

# 正負水素イオン源と 核融合プラズマへの応用 (その1)

竹入康彦

核融合科学研究所

---

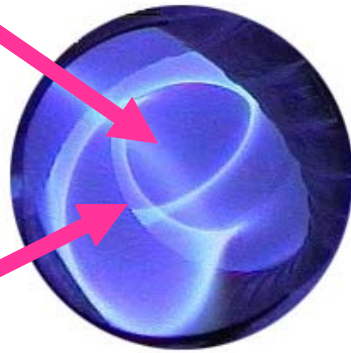
- 核融合とプラズマ加熱
- 中性粒子入射加熱(NBI)装置
- NBI用水素イオン源と必要な性能
- 大型容器におけるイオン源プラズマ生成
- 大面積ビーム引出し・加速とビームレット・ステアリング
- 大型正イオン源の例と特徴

# 核融合とプラズマ加熱

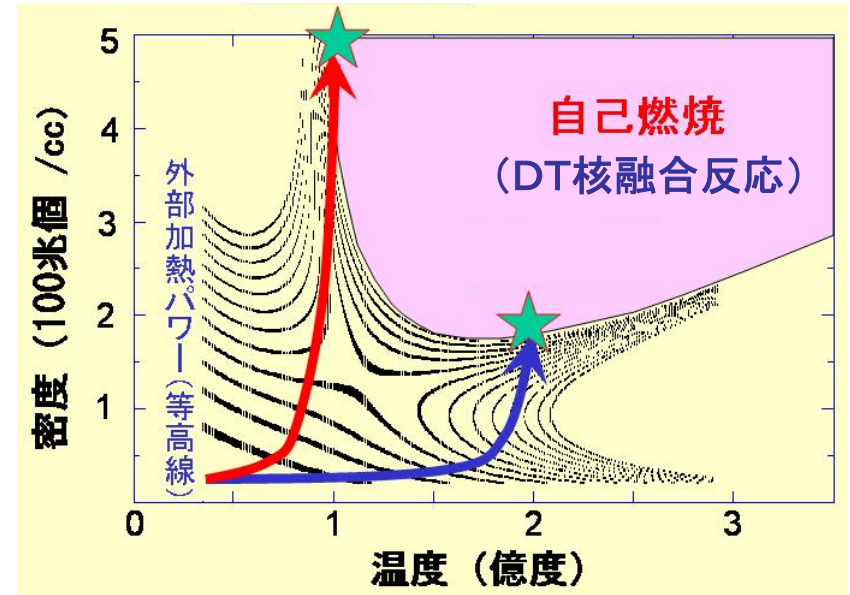
高温度に加熱することで核融合プラズマは点火し持続燃焼する

加熱

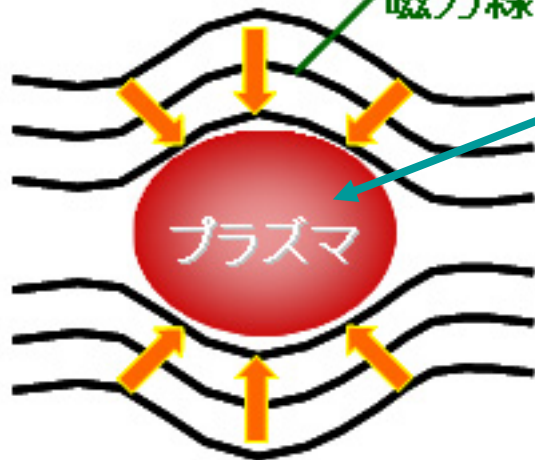
加熱



温度・密度  
の上昇



核融合炉



磁場による閉じ込め

燃焼プラズマ(DT核融合反応)

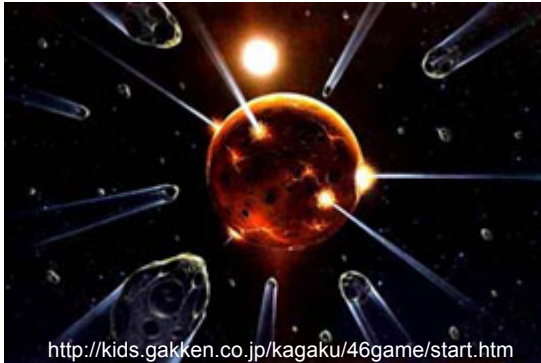


高エネルギー・ヘリウム原子核  
そのエネルギーによりプラズマ  
を加熱して燃焼条件を保持する  
→持続燃焼

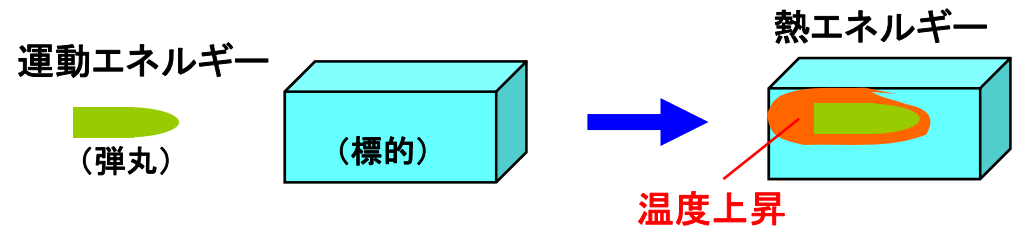
エネルギーとして取り出す  
→核融合エネルギー発電

# 粒子ビームによるプラズマ加熱

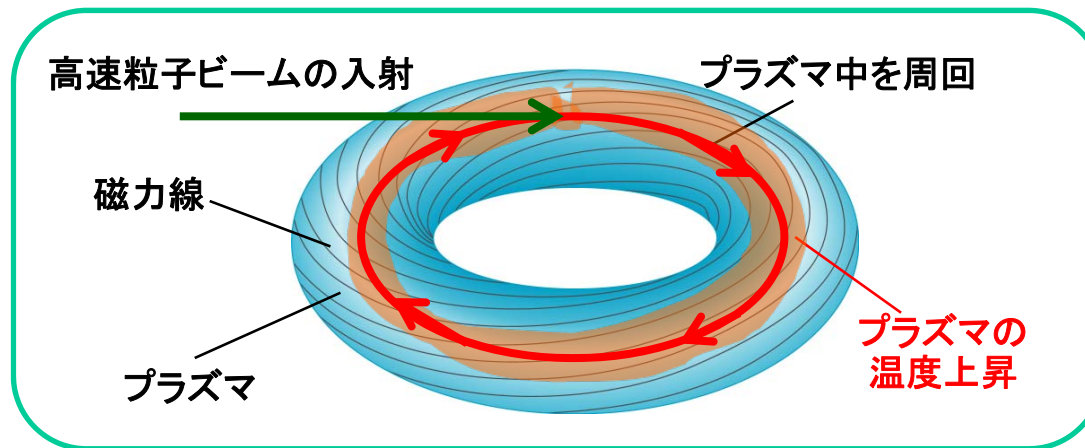
→ 高速粒子とプラズマとの摩擦熱  
運動エネルギーを熱エネルギーに変換



小惑星(弾丸)の衝突により、惑星(標的)の温度が上昇する



弾丸を標的に撃ち込み、標的の温度を上昇させる

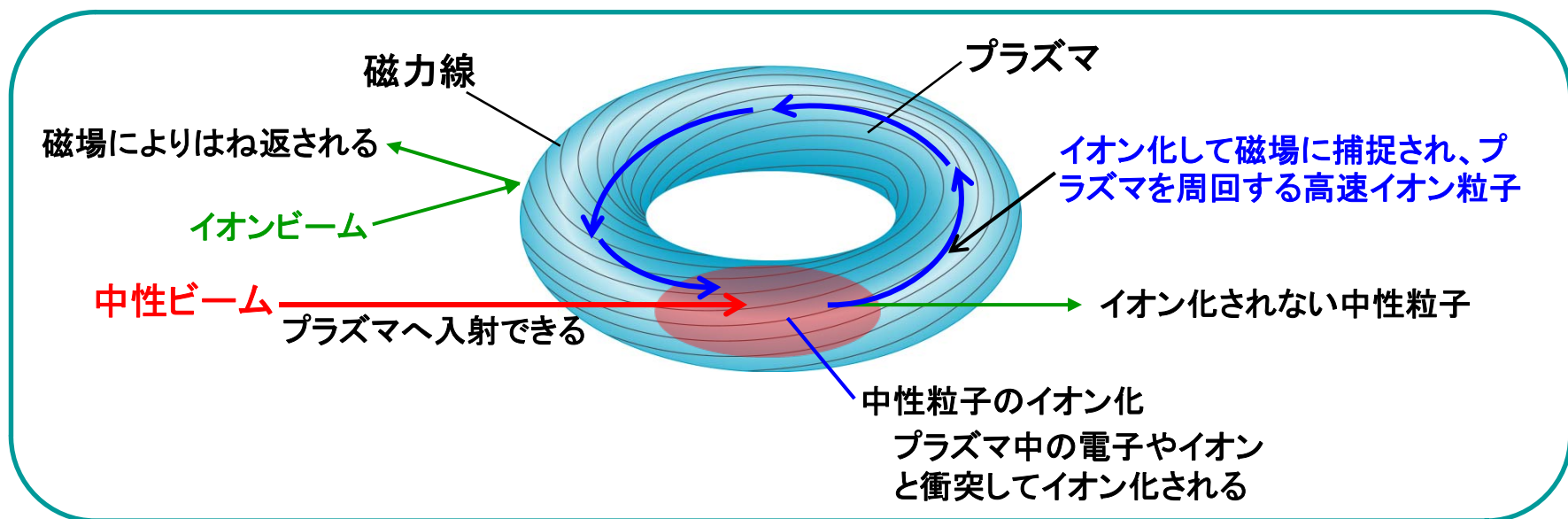


高速で入射された粒子とプラズマ粒子との摩擦熱でプラズマの温度を上昇させる

# 中性粒子ビーム入射(NBI)によるプラズマ加熱

→ 電気を帯びた荷電粒子はプラズマを閉じ込めている磁場にはね返されてしまうため入射できない

イオンビームを電氣的に中性な粒子にしてから  
プラズマに入射する

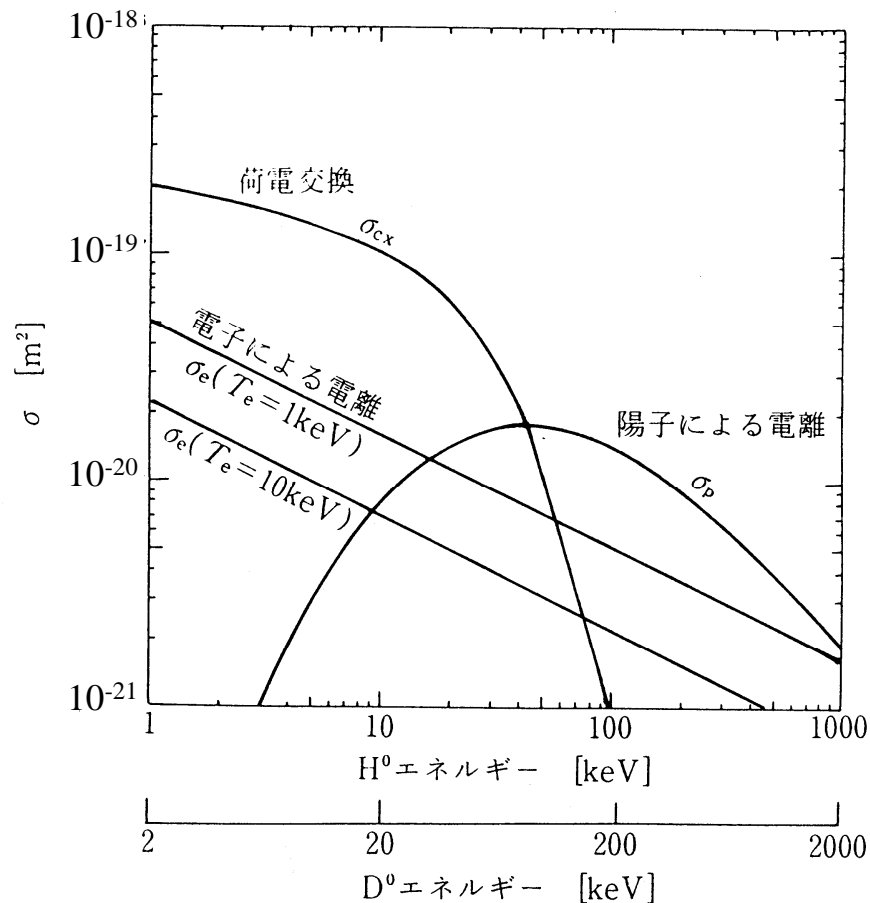


入射した高速中性粒子はプラズマ中で再びイオン化

→ 深くプラズマ中に侵入してイオン化することが重要

# プラズマへ入射する高速中性粒子のイオン化

- ・イオンビーム(荷電粒子)ではプラズマ閉じ込め磁場に跳ね返されてしまうため、電氣的に中性な粒子ビームをプラズマへ入射する。
- ・プラズマへ入射した中性粒子はプラズマによりイオン化され、磁場に捕捉される。
- ・プラズマを効率よく加熱するためには、中心部でイオン化させる必要がある。



- ・中性粒子ビームはプラズマ中でイオンビームに変換され、自身は侵入距離xと共に指数関数的に減衰する。

$$I_b = I_0 \exp(-x/\lambda)$$

$$\lambda = 1/(n\sigma): \text{特性侵入長}$$

- ・特性侵入長 $\lambda$ は、プラズマ密度 $n$ が高い程短くなり、イオン化断面積 $\sigma$ が小さい程長くなる。
- ・イオン化断面積 $\sigma$ はビームエネルギーが高い程小さくなる。
- ・大型装置・高密度プラズマほど、中心部でイオン化させるためには、高いビームエネルギー(スピード)が必要となる。

中小型装置プラズマ: 80keV(核子当り) 以下  
大型装置プラズマ: 100keV(核子当り) 以上

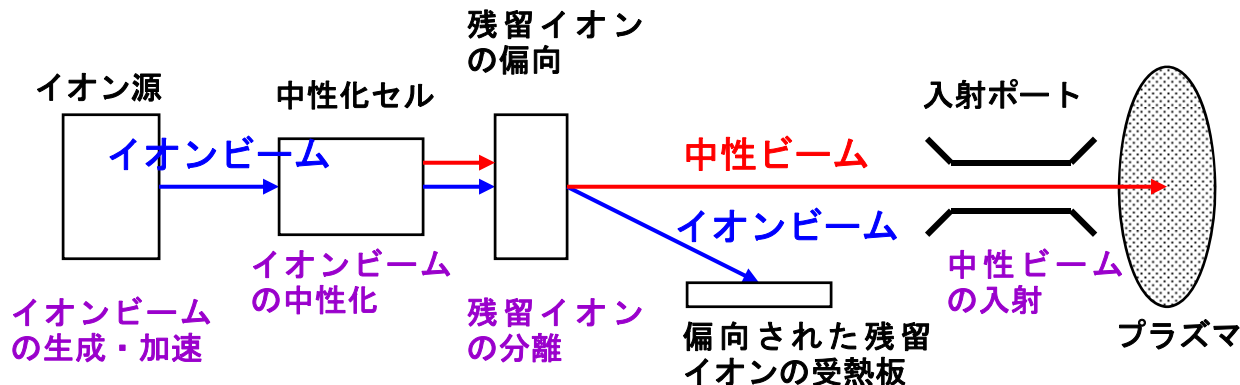
ITERプラズマ: 1MeV(重水素)

核融合炉プラズマ: 2MeV(重水素) 以上

# どのようにして高速中性粒子を作るのか？

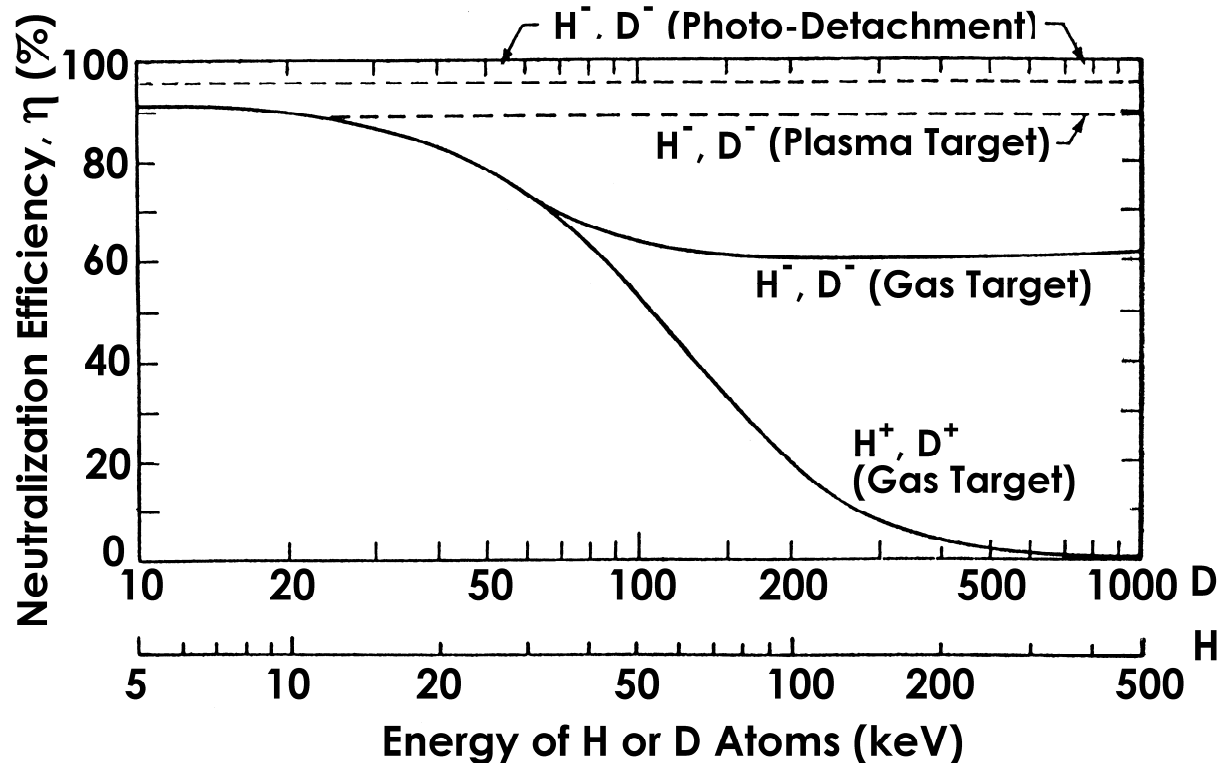
- ・中性粒子を数10keV以上に加速することはできないので、イオンを電界により加速して高エネルギーのイオンビームを作り、それを中性化することにより高速中性粒子にする。

- ・イオンビームの生成・加速  
→イオン源を用いて、必要なエネルギーのイオンビームを生成する
- ・イオンビームの中性化  
→イオンビームのエネルギーを保持したまま、中性粒子ビームへ変換する
- ・残留イオンの分離  
→中性化されなかったイオンビームを分離して、中性粒子ビームのみとする
- ・中性粒子ビームのプラズマへの入射



# 中性化効率とビームエネルギー

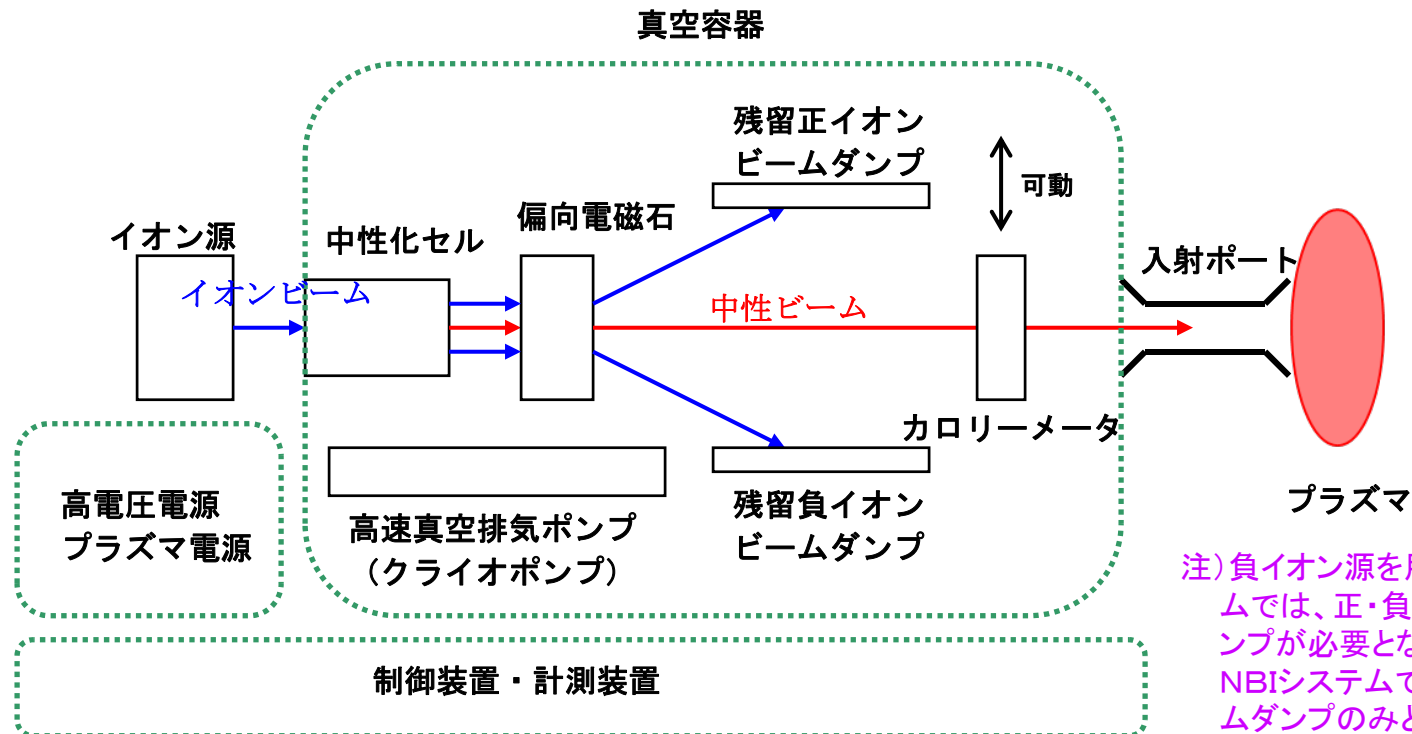
- ・水素イオンビームの中性化は、通常、同種の水素ガスを用いて行う。
- ・正イオンビームの場合、核子当たりのエネルギーが60keVを超えるあたりから、中性化効率が急激に減少する。
- ・負イオンビームの場合、1MeV以上の高エネルギー領域まで、60%の中性化効率を維持できる。
- ・負イオンビームでは、プラズマ中性化セルを用いた場合に90%、光電離セルを用いた場合95%以上の中性化効率が期待できる。





# 中性粒子入射加熱装置の構成

- ・中性粒子入射加熱装置(NBI)は、イオン源、中性化セル、偏向電磁石、残留イオンのビームダンプ、カロリメータ(中性粒子ビームの測定)、クライオポンプ、それらを内蔵する大型真空容器、入射ポート等より成る、複雑で精密な大電力機器である。
- ・高エネルギー大電力イオンビームを生成するイオン源に大電力(数MW以上)を供給する電源システム、それらを1ms以下の時定数で制御する制御システム、生成されたイオン・中性ビーム及び各種受熱機器の測定をする計測システムも備えている。



注) 負イオン源を用いたNBIシステムでは、正・負イオンのビームダンプが必要となるが、正イオン源NBIシステムでは、正イオンビームダンプのみとなる。



# NBI用水素イオン源に求められる性能

- ・ 大電力、大電流 → 数MW、数10A
- ・ 高エネルギー → 数10keV~1MeV(~数MeV)
- ・ 高効率生成
  - プラズマ生成効率・イオン生成効率 → 高電位部での電源容量
  - 加速効率 → 90%以上 電源容量 電極等の損傷
- ・ 高プロトン比 → 正イオン源
- ・ 低発散角、ビームの収束(マージ) → 数mrad 1点収束 入射ビーム効率
- ・ 一様性 → 入射ビーム効率
- ・ 低ガス圧力動作 → 電極等の損傷 入射ビーム効率



- ・ 大体積における高効率イオン源プラズマ生成
- ・ 大面積ビーム生成とビーム制御

# 1MW入射級NBIシステムの正イオン源と電源の例

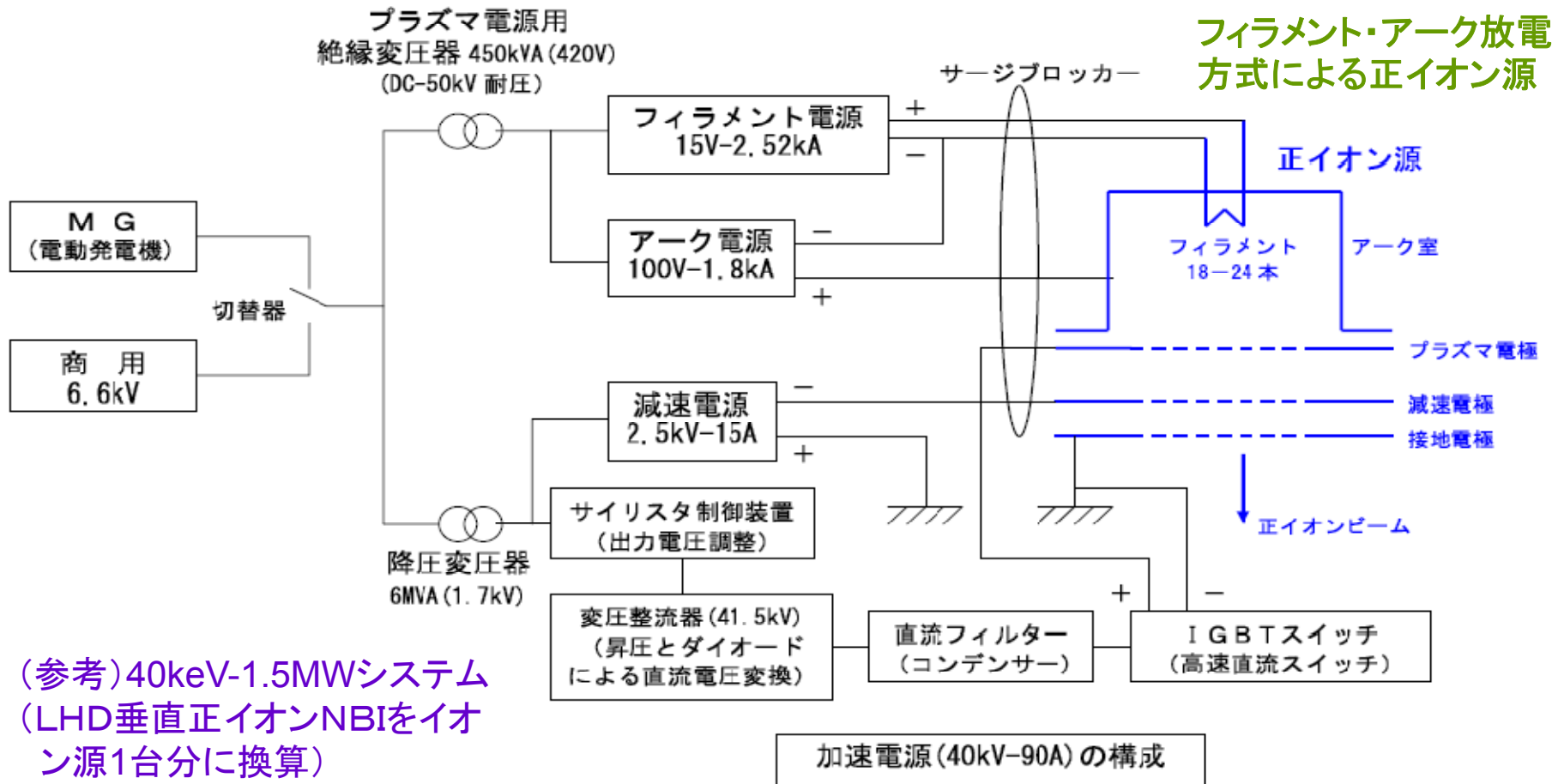
イオン源用電源→商用ラインから3MW程度の受電が必要

加速電源: 40 kV – 60 A

減速電源: 2.5 kV – 10 A

アーク電源: 100 V – 1200 A

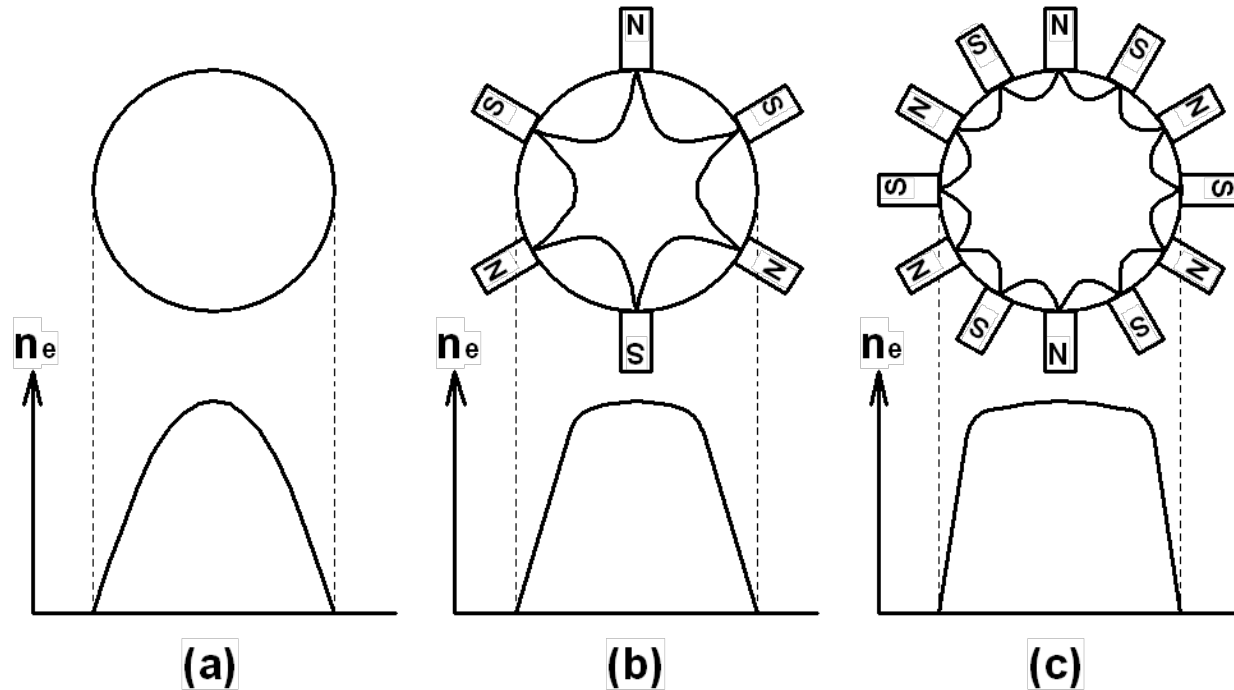
フィラメント電源: 15V – 1800 A



(参考)40keV-1.5MWシステム  
(LHD垂直正イオンNBIをイオン源1台分に換算)

# カスプ閉じ込め磁場配位

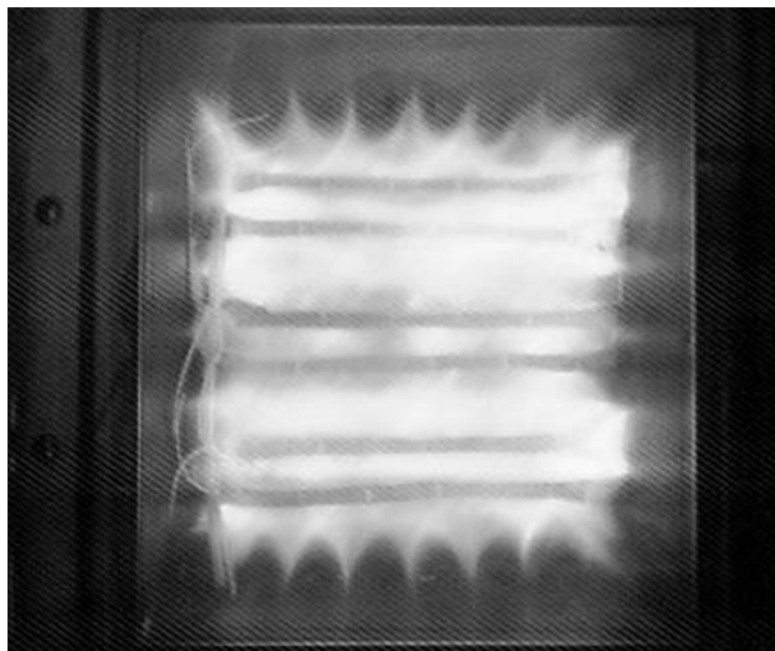
## — 大体積プラズマの高效率生成 —



- ・カスプ磁場の極数を増加させると、プラズマの一様な領域は壁面へ向かって拡大する。
- ・カスプ磁場強度はプラズマの閉じ込め性能に関係する。壁面上、1~2kGの強度。

# カस्प閉じ込め磁場配位

## — 多極線カस्प磁場において生成されたプラズマ —



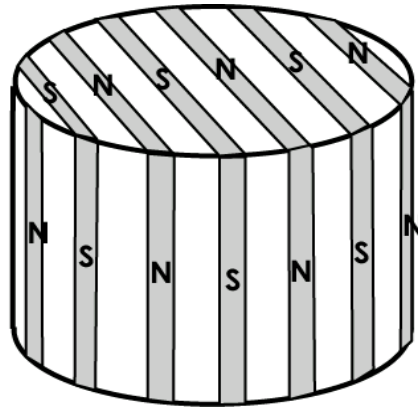
- ・ 角形容器外周に永久磁石列を軸方向に配置した多極線カस्प磁場配位において生成されたプラズマの断面写真。
- ・ プラズマは高周波(rf)放電により生成されており、6本のロッドがrfアンテナとして挿入されている。

# カスプ閉じ込め磁場配位の例

## — 軸方向配位と周方向配位 —

軸方向配位

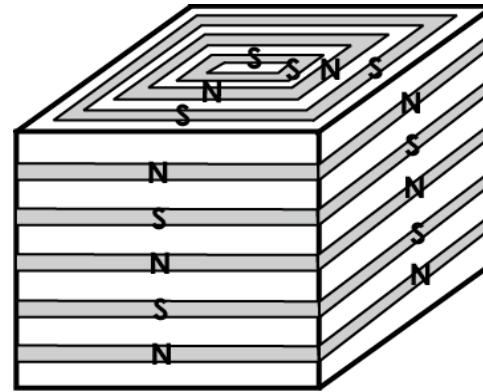
(a)



Ion Beam

周方向配位

(b)

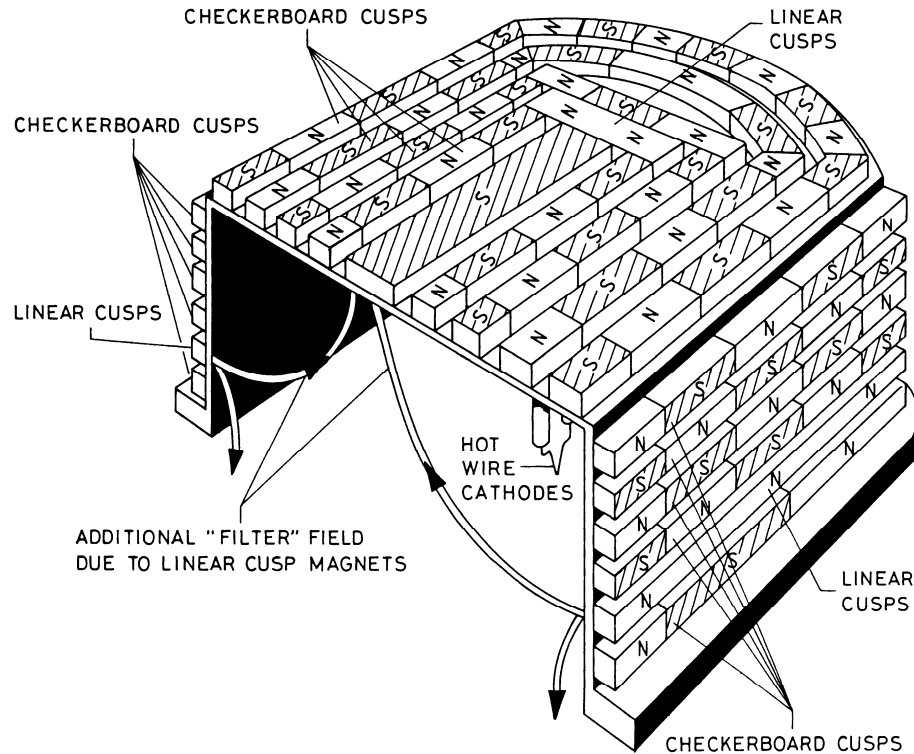


Ion Beam

- ・ 軸方向配位は主に円筒容器に、周方向配位は主に方形容器で用いられる。
- ・ 容器中央部(無磁場空間と見なされる領域)を横切るカスプ磁場の漏れ込み(stray field)には注意が必要。

# カスプ閉じ込め磁場配位の例

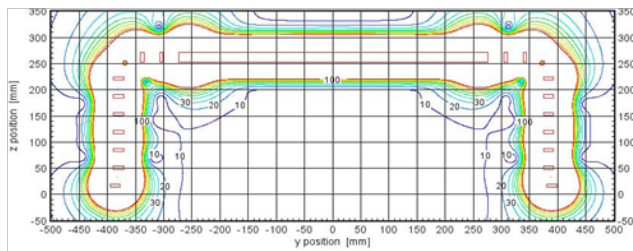
## — チェッカーボード配位 —



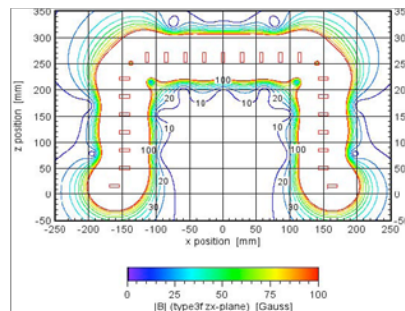
- ・隣り合わせの磁極が2次的に交互に換わるような点カスプ磁場配位(チェッカーボード配位)。
- ・カスプ磁場の接続長が短いのが特徴。  
(・中央部を横切るフィルター磁場はプロトン比を上げるため。)

# アーク放電室内における カusp磁場配位の最適化の例

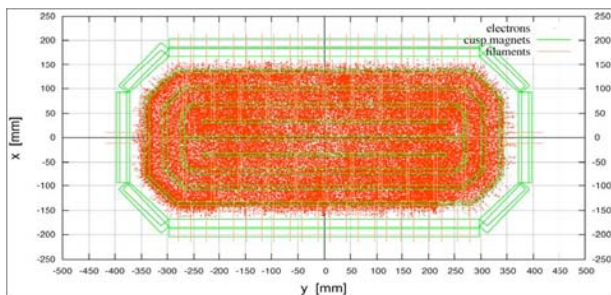
## 高速1次電子の一様分布



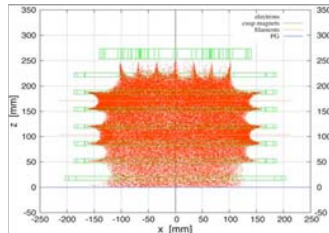
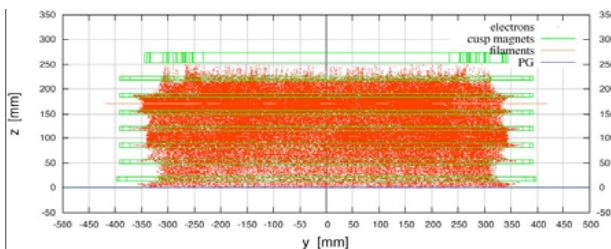
磁場強度の等高線分布



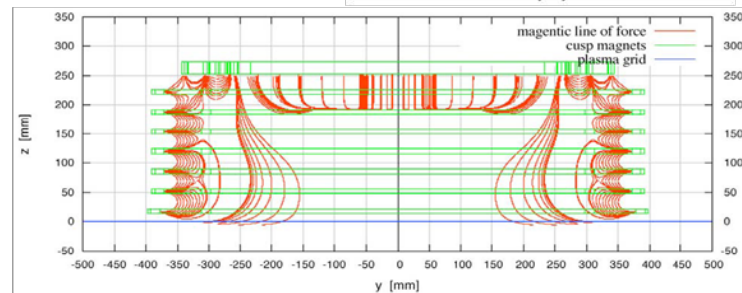
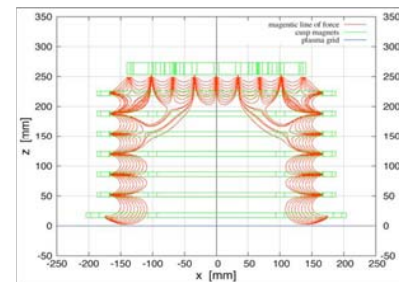
高速1次電子の分布が一様になるようカusp磁場配位を最適化することが、高効率で一様なアーク放電を実現する上で重要。



1次高速電子分布



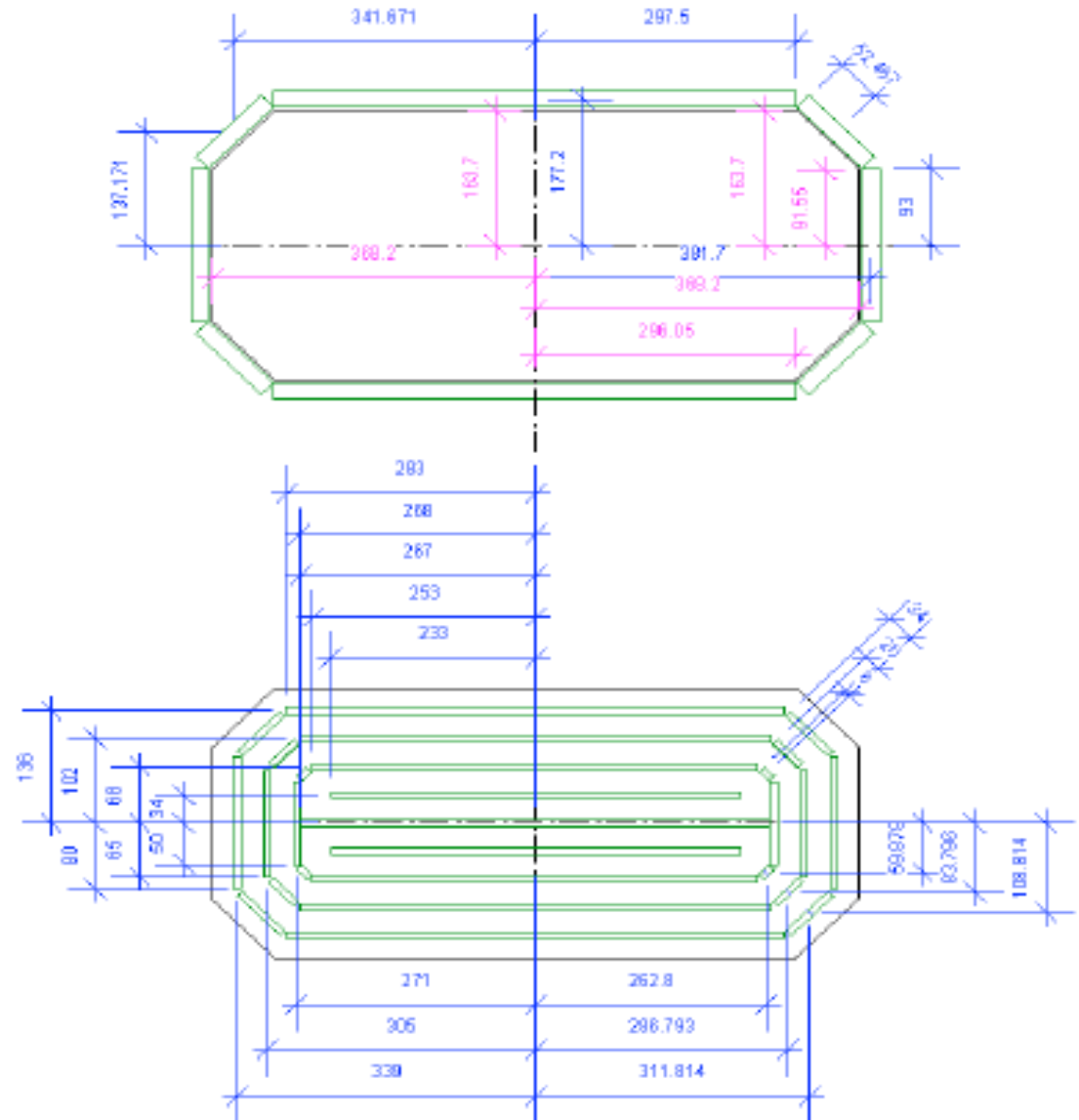
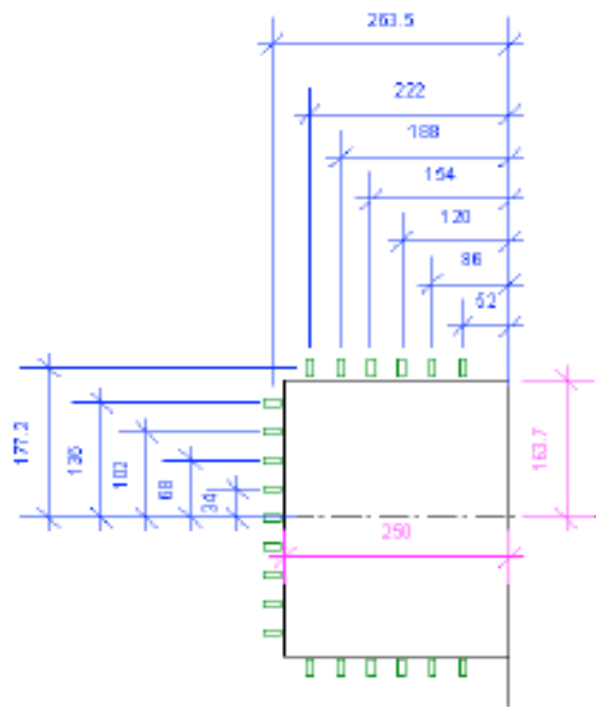
磁力線分布





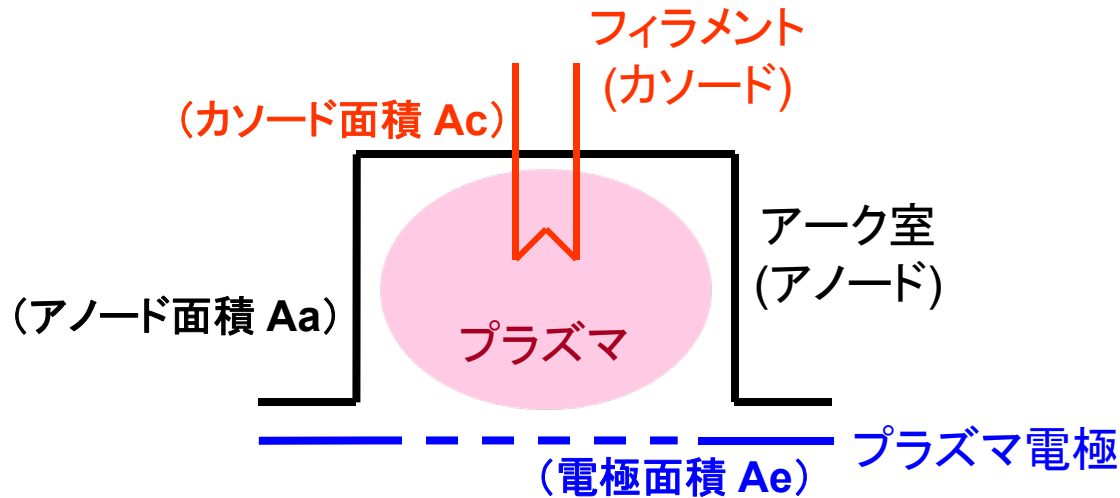
# アーク放電室の形状とカスプ磁場配位の設計例

type 2f



# 直流アーク放電による大体積プラズマのモデリング

Goede and Green と Goebel の解析に基づいて



フィラメント・アーク直流放電により生成されたプラズマの粒子バランスを解析

フィラメントからの高速1次電子  
プラズマ電子  
イオン

- ・A.P.H. Geode and T.S. Green, Phys. Fluids **25**, 1797 (1982).
- ・D. M. Goebel, Phys. Fluids **25**, 1093 (1982).

# 直流アーク放電による大体積プラズマのモデリング

## 1次電子・プラズマ電子・イオンの粒子バランス

フィラメントからの放出電子束と損失率:  $\frac{I_e}{e} = [n_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{col} + n_f \tau_f^{-1}] \cdot V$   
( $\tau_f$ 後にアノード壁面で損失または熱化で損失)

イオンの生成率:  $\frac{I_+}{e} = n_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{ion} \cdot V$   
(1次電子が中性ガスを電離)

イオン生成率と損失率のバランス:  $n_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{ion} \cdot V = \frac{n_i}{\tau_i} \approx n_i v_i (A_{ai} + A_e + A_c)$   
( $\tau_i$ 後にアノード壁、電極、フィラメントで損失)

$v_i$ にボームのシース条件を適用:  $n_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{ion} \cdot V = n_i \left( \frac{kT_e}{M} \right)^{1/2} (A_{ai} + A_e + A_c)$   
(シース端イオン速度 $v_i$ 、非熱化)

( $A_{ai}$ : アノード面積、 $A_e$ : 電極面積、 $A_c$ : フィラメント面積)

プラズマ電子の粒子バランス:  $[n_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{col} + n_0 n_f \langle \sigma v \rangle_{ion}] \cdot V = \frac{1}{4} n_e v_e A_{ae} \exp\left(-\frac{e\phi}{kT_e}\right)$   
(イオン化ないし1次電子の熱化で生成、アノード壁で損失)

$$= \left( \frac{kT_e}{2\pi m} \right)^{1/2} n_e A_{ae} \exp\left(-\frac{e\phi}{kT_e}\right)$$

イオンの生成効率:  $\frac{I_e}{I_+} = \frac{\langle \sigma v \rangle_{col}}{\langle \sigma v \rangle_{ion}} + \frac{1}{n_0 \langle \sigma v \rangle_{ion} \tau_f}$

- ・ 第1項: 高ガス圧力の極限での生成効率で、閉じ込め性能等とは無関係。
- ・ 第2項: 効率的なイオン生成には、1次電子の閉じ込め時間  $\tau_f$  の長いことが必要。

# 直流アーク放電による大体積プラズマのモデリング

閉じ込め性能、ガス圧力条件、アノード面積・カソード面積の条件

1次電子の閉じ込め時間：  
( $A_a$ : 実効的なアノード面積)

$$\tau_f \approx \frac{4V}{v_f A_a}$$

プラズマ体積が大きく、アノード面積が小さいとイオンの生成効率は高くなる。

ラングミュアのシース条件：  
(フィラメントへのイオン束の条件)

$$J_+ \geq \left(\frac{m}{M}\right)^{1/2} J_e \quad (J_+ = I_+/A, J_e = I_e/A_c)$$

安定なアーク放電のためのガス圧力条件：  
プラズマ体積が大きく、アノード面積が小さいと動作ガス圧力を低くできる。

$$n_0 \geq \frac{A}{4V} \cdot \frac{A_a}{A_c \left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} - A \frac{\langle \sigma v \rangle_{col}}{\langle \sigma v \rangle_{ion}}} \cdot \frac{v_f}{\langle \sigma v \rangle_{ion}}$$

プラズマ電位：  
負のプラズマ電位では放電モードスイッチに注意。

$$\exp\left(\frac{e\phi}{kT_e}\right) = \left(\frac{M}{2\pi m}\right)^{1/2} \frac{A_a}{A_a + A_e + A_c} \left(1 + \frac{\langle \sigma v \rangle_{col}}{\langle \sigma v \rangle_{ion}}\right)^{-1}$$

プラズマ電位が正であるための

アノード面積条件：

$$\frac{A_a}{A_a + A_e + A_c} \geq \left(\frac{2\pi m}{M}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{\langle \sigma v \rangle_{col}}{\langle \sigma v \rangle_{ion}}\right)$$

高効率放電にはアノード面積を小さくする必要があるが、アノード面積は全損失面積に対して左式を満足するよう大きくする必要がある。

カソード面積条件：

$$\frac{A_c}{A_a + A_e + A_c} \geq \frac{I_+}{I_e} \left(\frac{m}{M}\right)^{1/2}$$

フィラメントを太くして、本数を増やすことは、等価的にアノード面積が減少することに注意。

# プロトン比

NBI用イオン源では重要で、放電容器の性能と関係

- ・ NBIシステムでは、イオンはビームとして引き出し・加速された後に中性化されて原子( $H^0$ )ビームとなるため、分子状イオン $H_2^+$ 、 $H_3^+$ は、イオンビームエネルギーの1/2または1/3のエネルギーの中性原子ビームになってしまう。
- ・ そのため、プラズマ中の原子状イオンの比率(プロトン比)を上げる必要がある。
- ・ プロトン比は、プラズマ密度とイオンの閉じ込め時間に依存して増加する。
  - 放電電力を増加させるとプロトン比は大きくなる傾向にある。
- ・ イオン閉じ込め時間はプラズマ体積と実効的なイオン損失面積の比に依存する
  - カस्प磁場を強くした大型放電室がプロトン比の向上には有効。
- ・ 電極近傍の高エネルギー1次電子は、 $H_2$ 分子を電離して $H_2^+$ にする一方、熱電子は分子や分子イオンの解離の断面積が大きい。
  - フィルター磁場により電極近傍の高速電子を低減する。

# イオンの引出し

## 3/2乗則、単孔・多孔引出し

Child-Langmuir則: 
$$J_i = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left( \frac{2Ze}{M} \right)^{1/2} \frac{V_{ext}^{3/2}}{d_s^2}$$

引き出されうるイオン電流:

$$I_i = \pi a^2 J_i = \frac{\pi \varepsilon_0}{9} \left( \frac{2Ze}{M} \right)^{1/2} \left( \frac{2a}{d} \right)^2 \left( \frac{d}{d_s} \right)^2 V_{ext}^{3/2} \approx \frac{\pi \varepsilon_0}{9} \left( \frac{2Ze}{M} \right)^{1/2} \left( \frac{2a}{d} \right)^2 V_{ext}^{3/2}$$

- ・ 引出電圧に対して、引き出されうるイオン電流は、引出し孔径 $2a$ ではなく、引出し系の **アスペクト比:  $2a/d$**  によってのみ決められる。
- ・ **パービアンス  $P = I_i / V_{ext}^{3/2}$**   
パービアンスを一定にすると、ビームの特性は引出電圧に依存しない。

50kVで単孔から引き出せる水素正イオン電流は、**孔径に関係なく、0.5A程度**。

(イオン放出界面を安定に保つため、通常、アスペクト比:  $2a/d < 1$ )

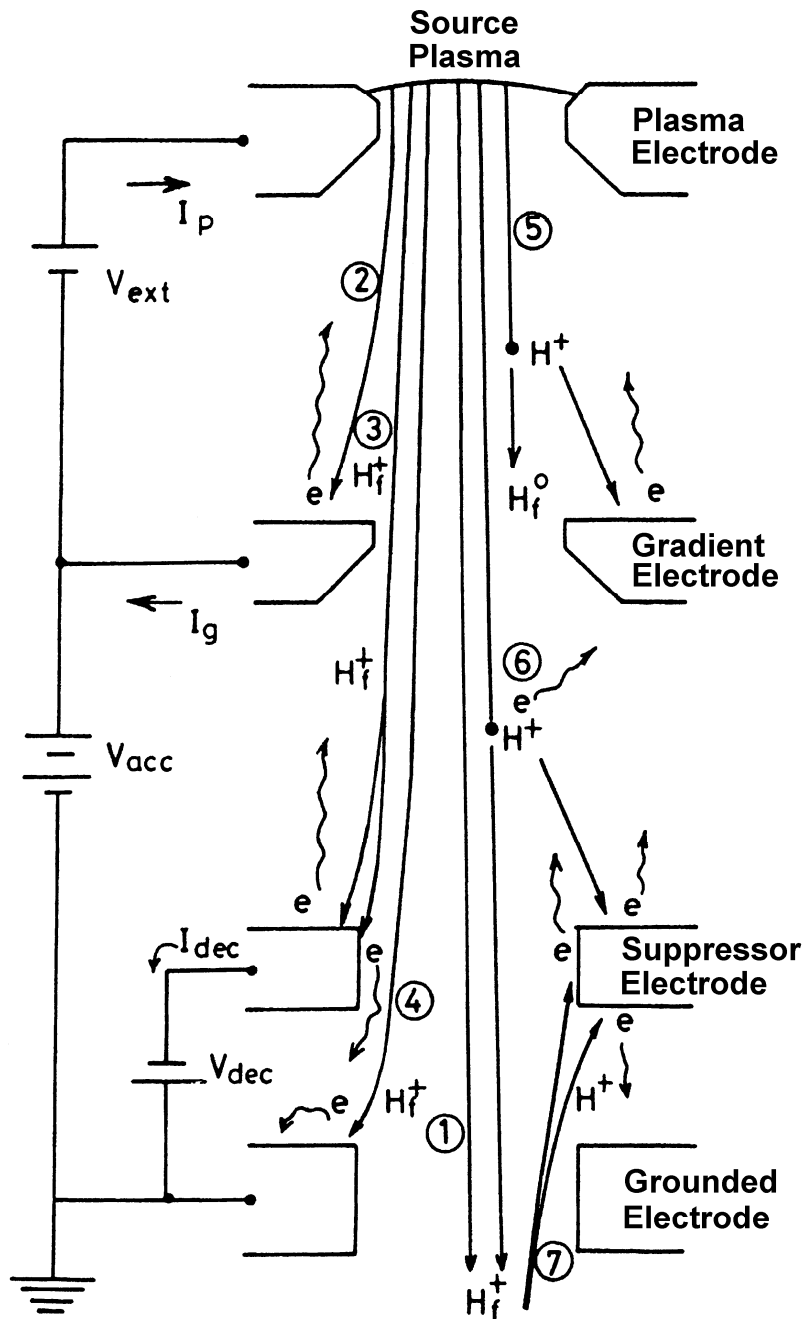
→ **多円孔または多スリット**の引出電極系にして、等価的にパービアンスを増加させる。

→ 引き出されるイオン電流は、単純に**開口部面積に比例して増加**する。

→ 電極透明率(開口率)50%、直径20cmの円形電極から、50kV—70A程度の水素正イオンが引き出せる。(最適パービアンス条件: 最大Pの0.6倍)

# 引出し・加速電極系の例

## 正イオン源



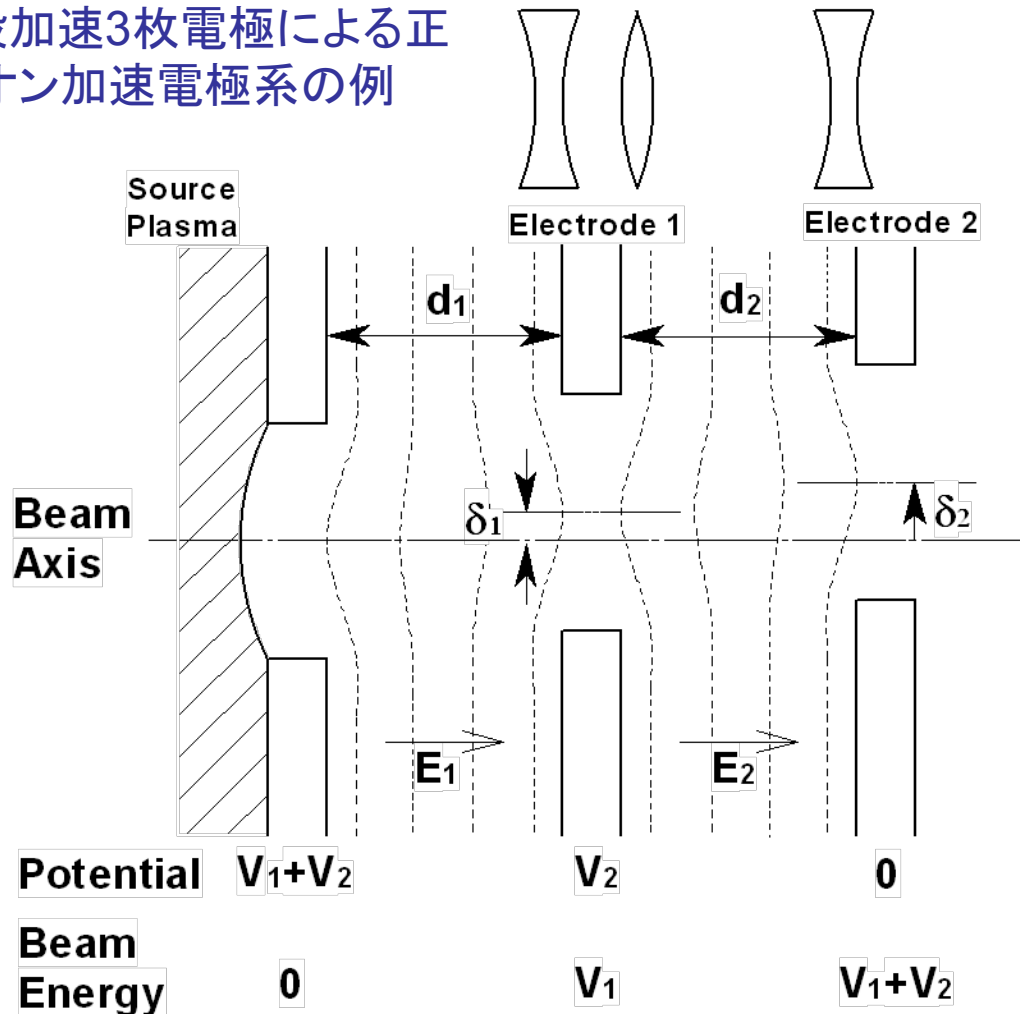
- ・ 2段加速-4枚電極の引出し・加速電極系
  - ・ 下流の接地電位の中性化プラズマからの逆流電子の抑制のための抑制電極
  - ・ ビームの軌道に沿って生ずる様々な過程
- (1) 加速されて電極系を通過するイオン( $H_f^+$ )。
  - (2)-(4) 電極へ衝突するイオン( $H_f^+$ )は、2次電子を生成し、その多くは上流の電極やプラズマへ逆流する。
  - (5)・(6) 背景ガスとの荷電交換や電離により生成された低速の2次イオン( $H^+$ )で、一部は電極に衝突して2次電子を放出する。電離に際して発生した電子とともに逆流する。
  - (7) 中性化プラズマから引き出されて抑制電極へ入射する低速イオン( $H^+$ )で、2次電子を生成する。



# ビーム加速と静電レンズ効果

## 電極孔の作る静電レンズ効果と孔軸変位

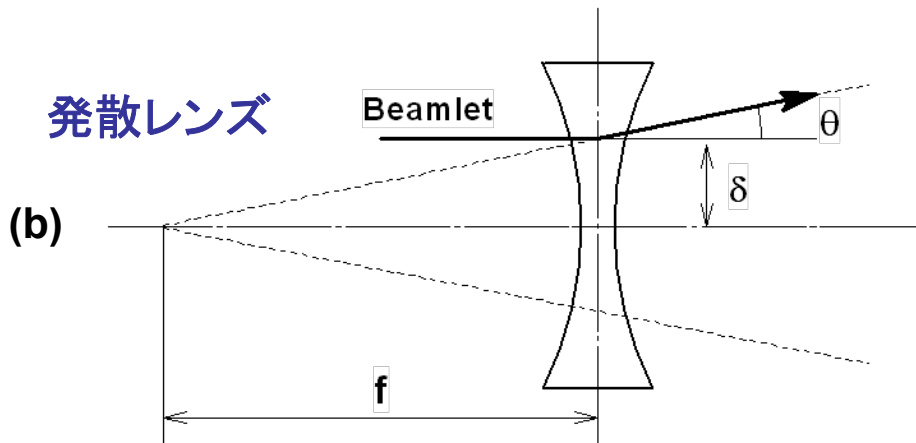
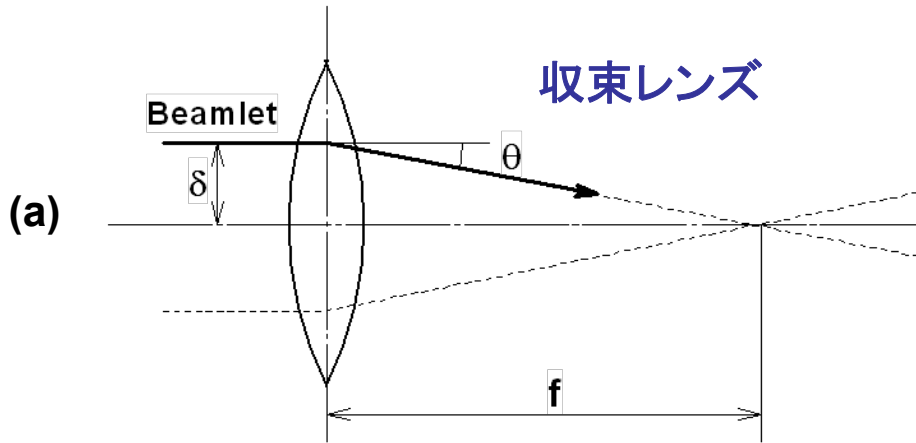
2段加速3枚電極による正  
イオン加速電極系の例



- ・ 加速電極1の入口側には発散レンズ効果が、出口側には収束レンズが形成されている。
- ・ このレンズ効果の組み合わせにより、電極1の静電レンズ効果が決められる。

# 収束・発散レンズ効果

静電レンズ効果を用いたビームレットの偏向



レンズの焦点距離  
(薄肉レンズ近似、近軸軌道)

$$f = \frac{4V}{E_d - E_u} \quad (\text{円孔})$$

$$f = \frac{2V}{E_d - E_u} \quad (\text{スリット})$$

$V$ : レンズ位置のイオンエネルギー

$E_u$ : 電極の上流の電界強度

$E_d$ : 電極の上流の電界強度

# ビームレット・ステアリング 孔軸変位によるビームレット偏向

NBI用イオン源では大面積・多ビームレットを制御する必要がある。

ビームレット偏向角:  $\theta = \delta / f$

電極1による偏向角:  $\theta_1 = \frac{\delta_1}{f_1} \left( \frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^{1/2}$

電極2による偏向角:  $\theta_2 = \frac{\delta_2 - \delta_b}{f_2}$        $\delta_b = \int_0^{d_2} \frac{\delta_1}{f_1} \left( \frac{V_1}{V_1 + E_2 x} \right)^{1/2} dx$

電極1と電極2の組み合わせによる偏向角:

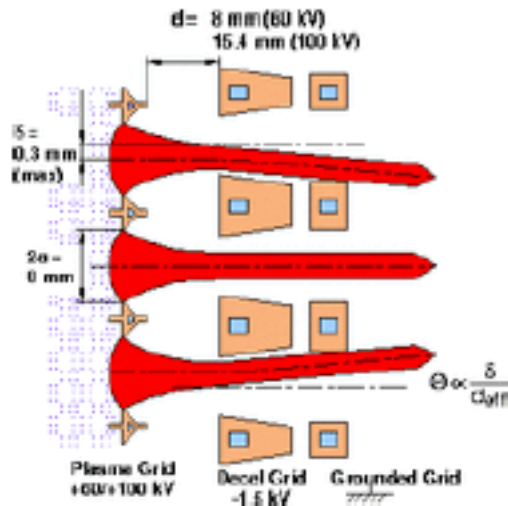
$$\theta_f = \theta_1 + \theta_2 = \frac{r_E}{4(d_1 + d_2 r_E)} \left[ \frac{\delta_1}{2} \frac{r_E - 1}{r_E} \left\{ 3 \left( \frac{d_1 + d_2 r_E}{d_1} \right)^{1/2} - 1 \right\} - \delta_2 \right]$$

- $r_E = E_2/E_1$  が1ならば、電極1はレンズとして働かない。
- 通常は、 $r_E > 1$  で、集束レンズとして働かせる。

第1近似として、最終のビーム偏向角は、各電極孔の変位によるビーム偏向の線形和として取り扱える。



|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Beam Area                          | 390 cm <sup>2</sup>         |
| Beam Size                          | 50.6 x 22.8 cm <sup>2</sup> |
| Hole Diameter                      | 8mm                         |
| Number of Holes                    | 774                         |
| Transparency                       | 0.37                        |
| Distance Plasma Grid - Decel Grid: |                             |
| 60kV Sources                       | 8.0 mm                      |
| 93kV Sources                       | 15.4mm                      |



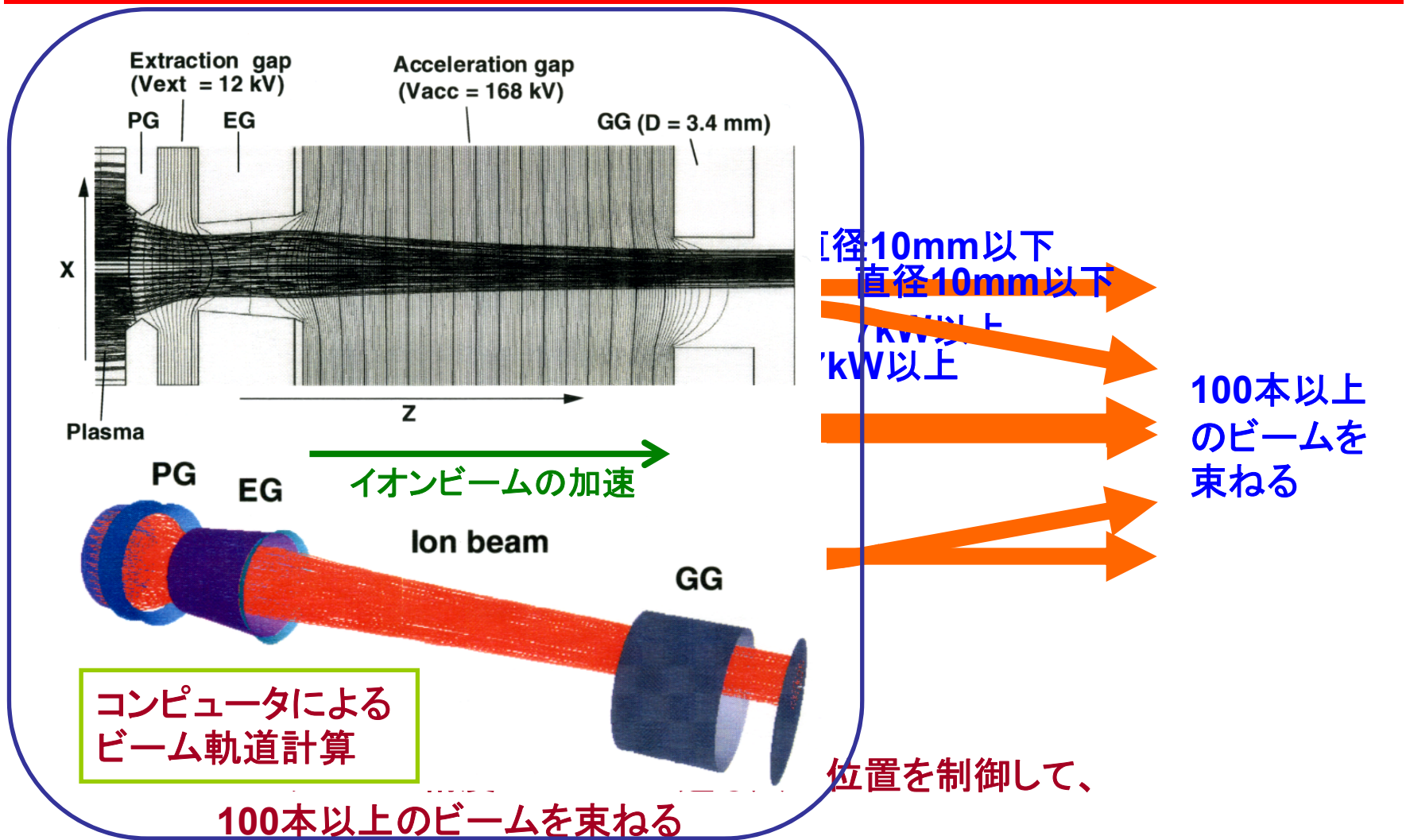
### Focussing

- The grid holes of the plasma grid and the decel and grounded grids are displaced by up to 0.3 mm for the outermost holes
- The two halves of the grids are tilted by 1.75°
- Focal points horizontal 6.5 m  
vertical 8.5 m

(参考)AUG-NBI イオン源の電極

# 極限のビーム技術

## 10ミクロンの精度でイオンビームを制御する

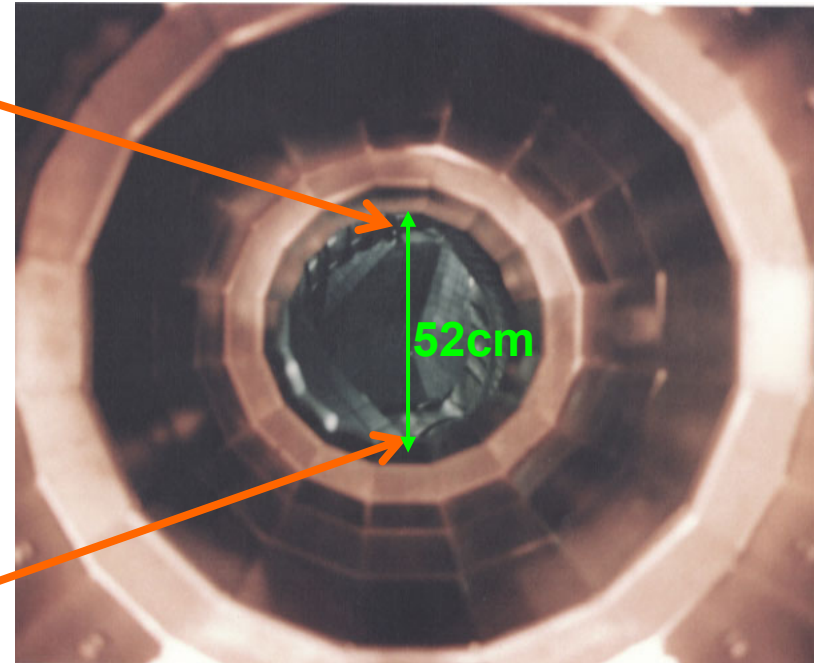
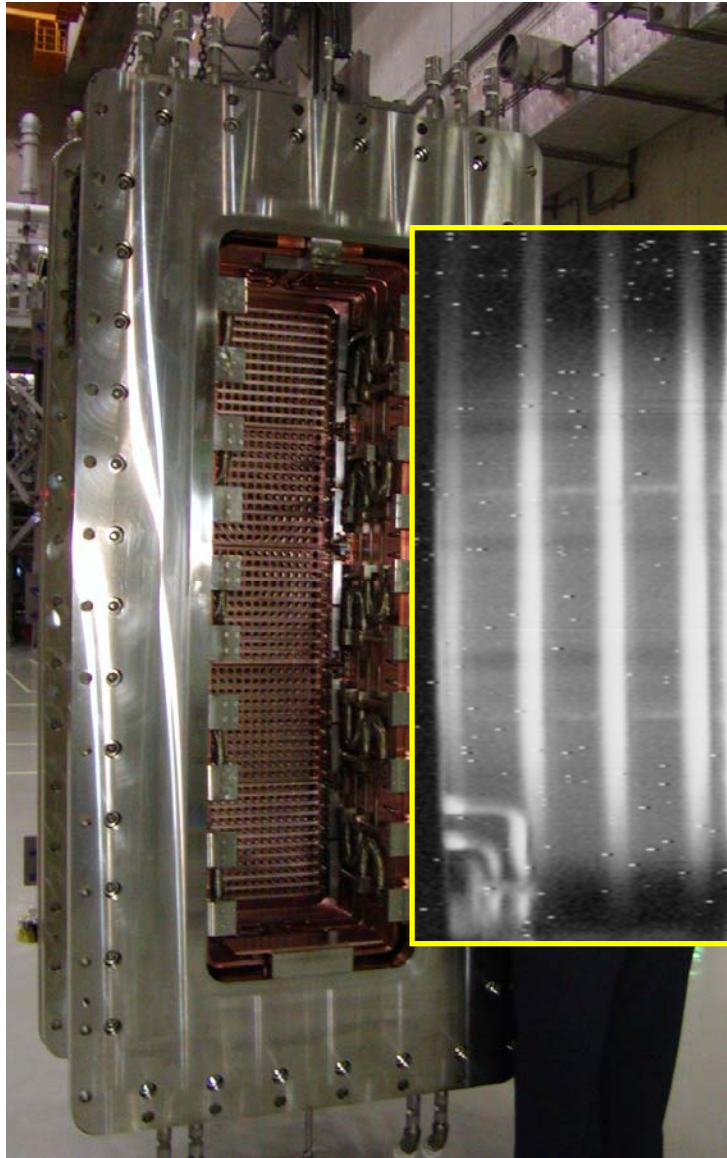


10ミクロンの精度でビームの通る穴の位置を制御する



# 負イオン源からのビームを絞り込んでLHDへ入射

## 5,000kWのビームが直径52cmを通過

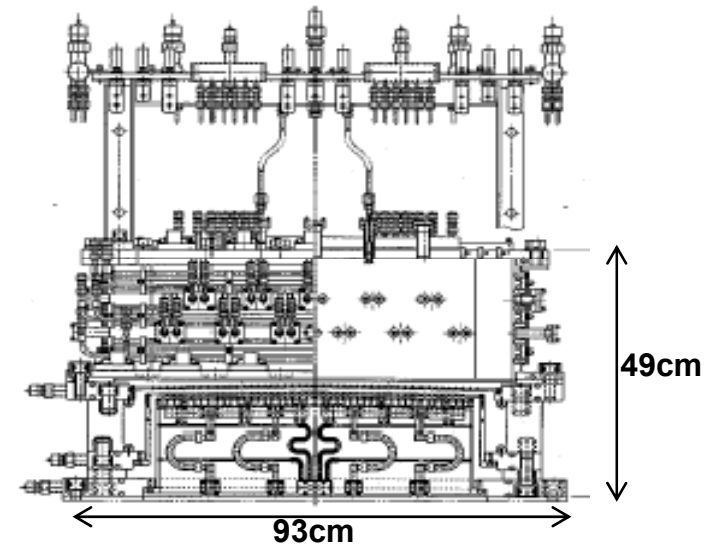
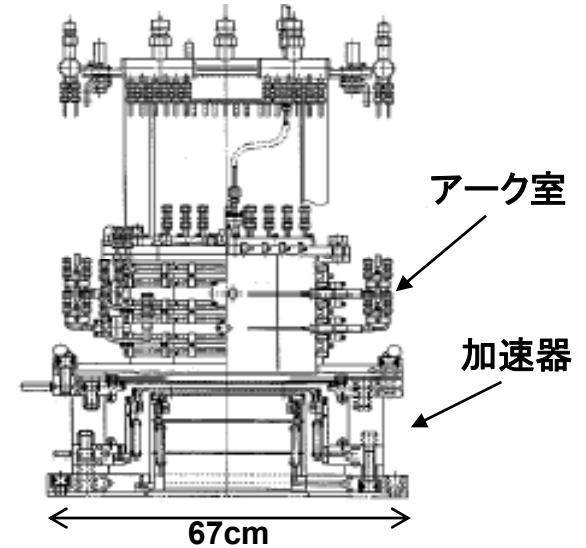


770本のビームを直径  
52cmに絞り込んで入射

# 核融合研(NIFS)のLHD-NBIで使用している 大型正イオン源の仕様



- 正イオン電流: 75A  
イオン源2台の並列運転  
加速電源: 40kV-180A  
減速電源: 2.5kV-30A
- 大型の角形アーク室  
33cm<sup>W</sup>x74cm<sup>H</sup>x25cm<sup>D</sup>  
正イオン源としては世界最大級  
フィラメント: 12-18本  
アーク電源: 100V-1800A(6分岐)  
フィラメント電源: 15V-2520A(6分岐)
- 加速器: 1段加速・2分割3枚電極  
ビーム引出面積: 21cmx55cm  
電極透明率: 35%  
各孔列間強制水冷
- ビーム焦点距離: 8.3m  
分割電極の傾斜と孔軸変位の併用





# 1MW入射級NBIシステムの正イオン源と電源の例

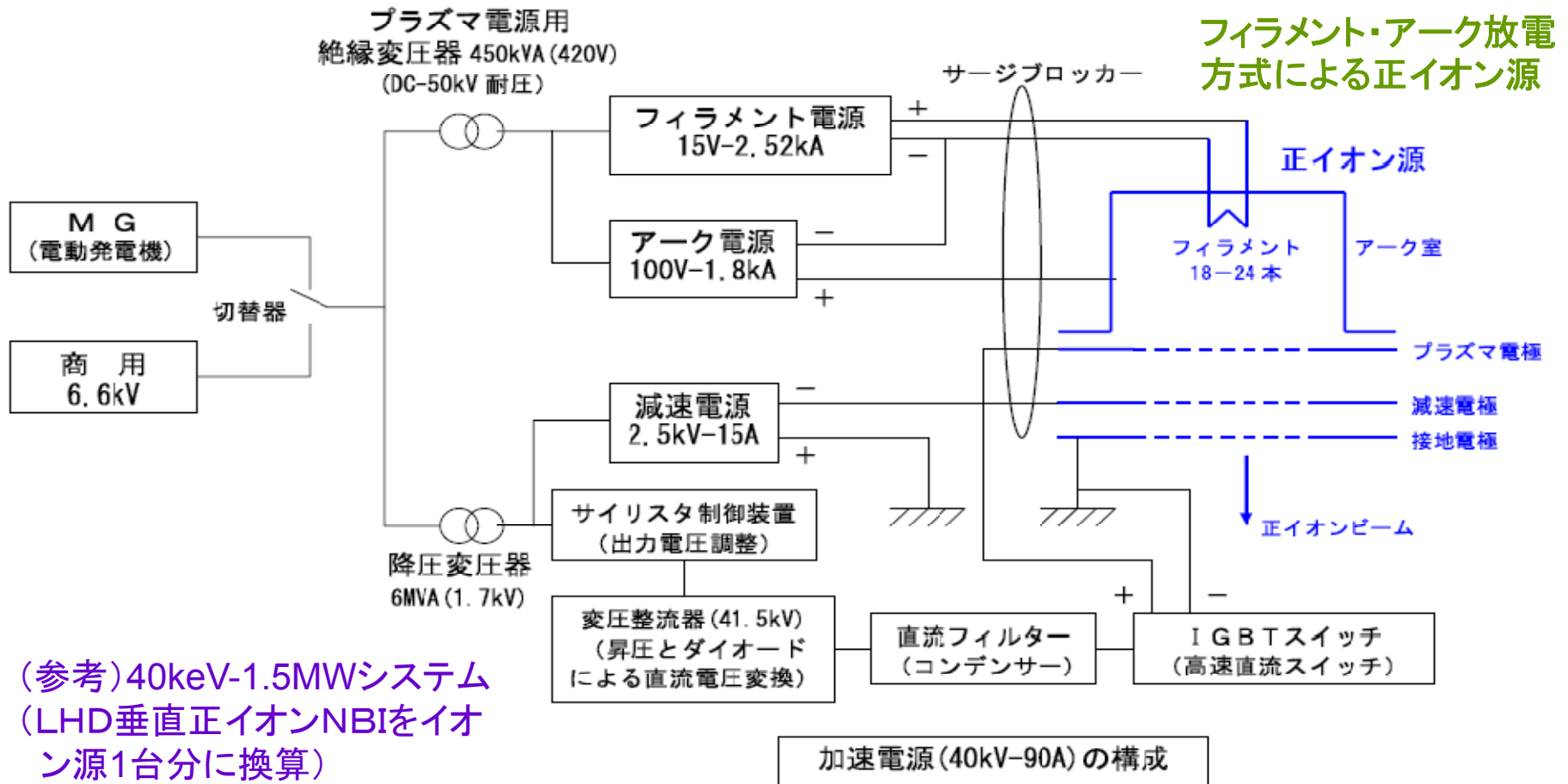
イオン源用電源→商用ラインから3MW程度の受電が必要

加速電源: 40 kV – 60 A

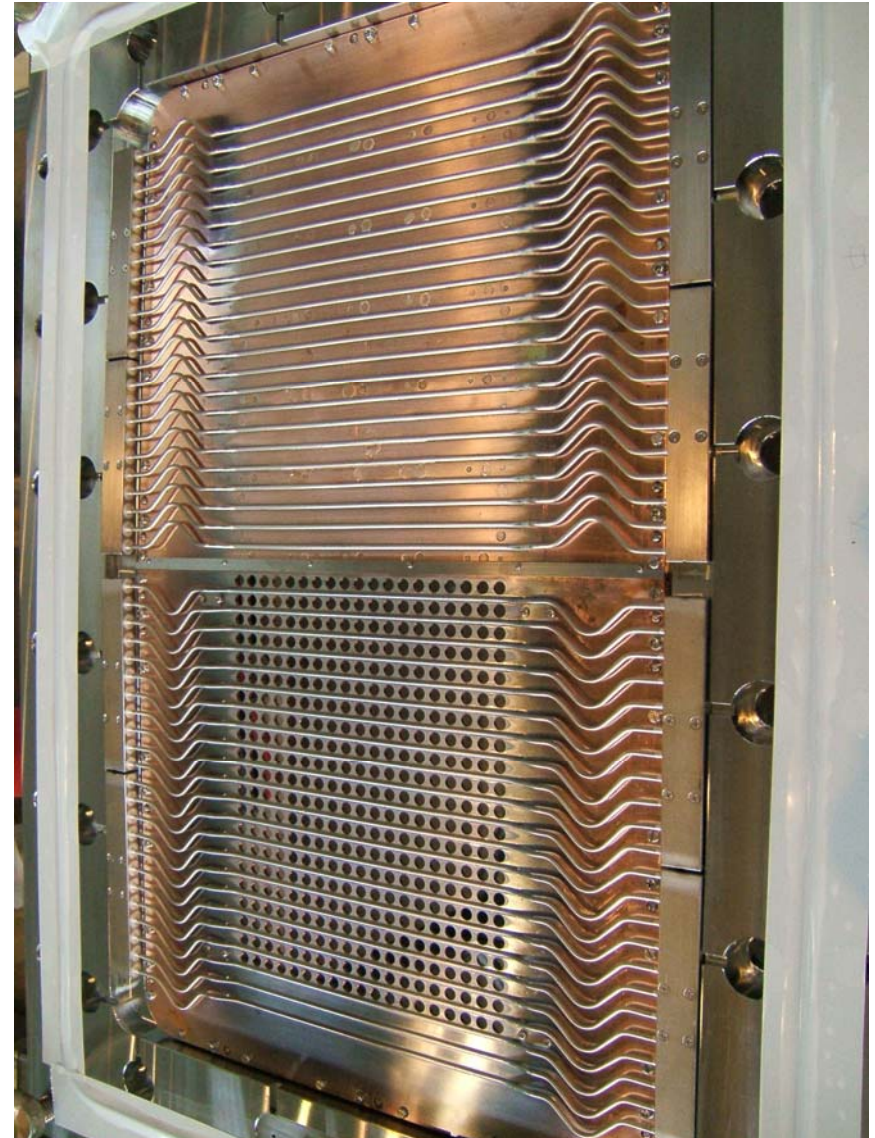
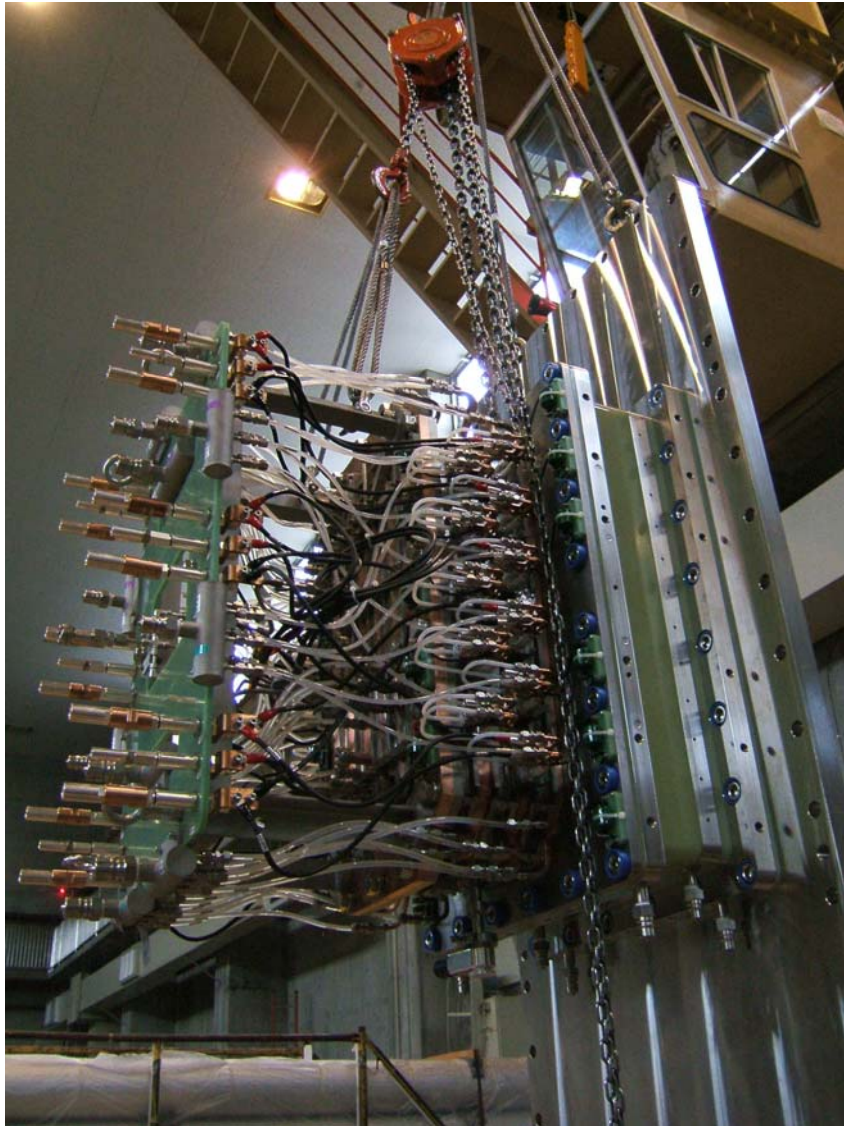
減速電源: 2.5 kV – 10 A

アーク電源: 100 V – 1200 A

フィラメント電源: 15V – 1800 A



# LHD-NBIで使用している大型正イオン源

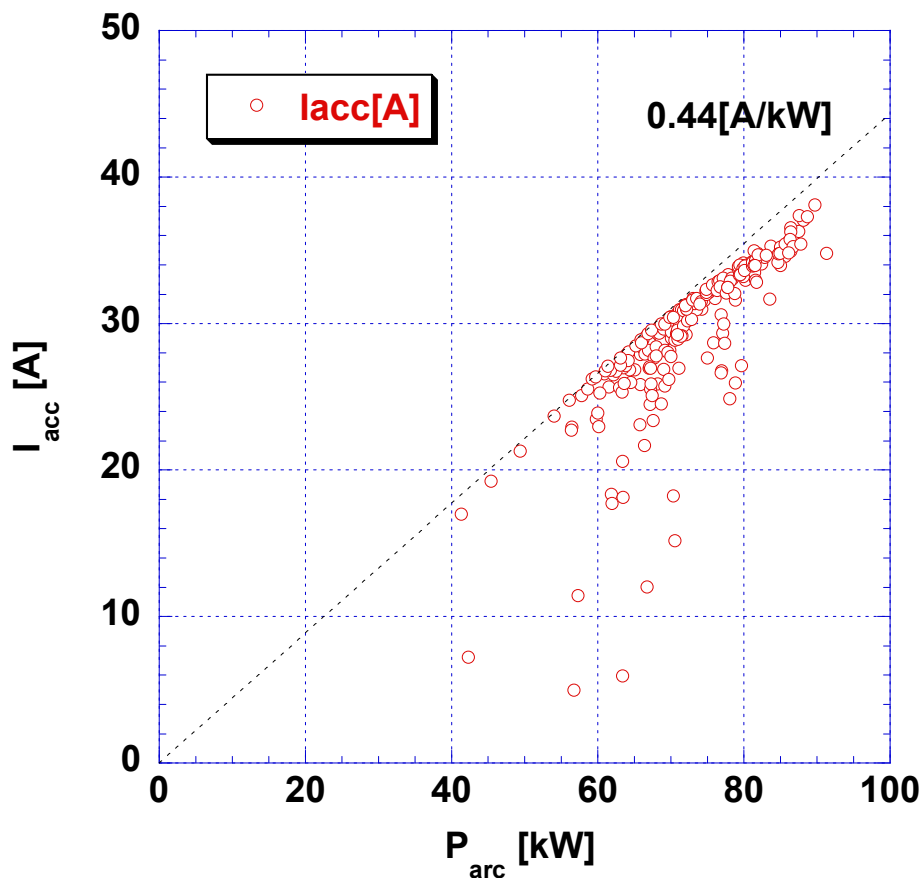


# LHD-NBI用大型正イオン源の特性の一例

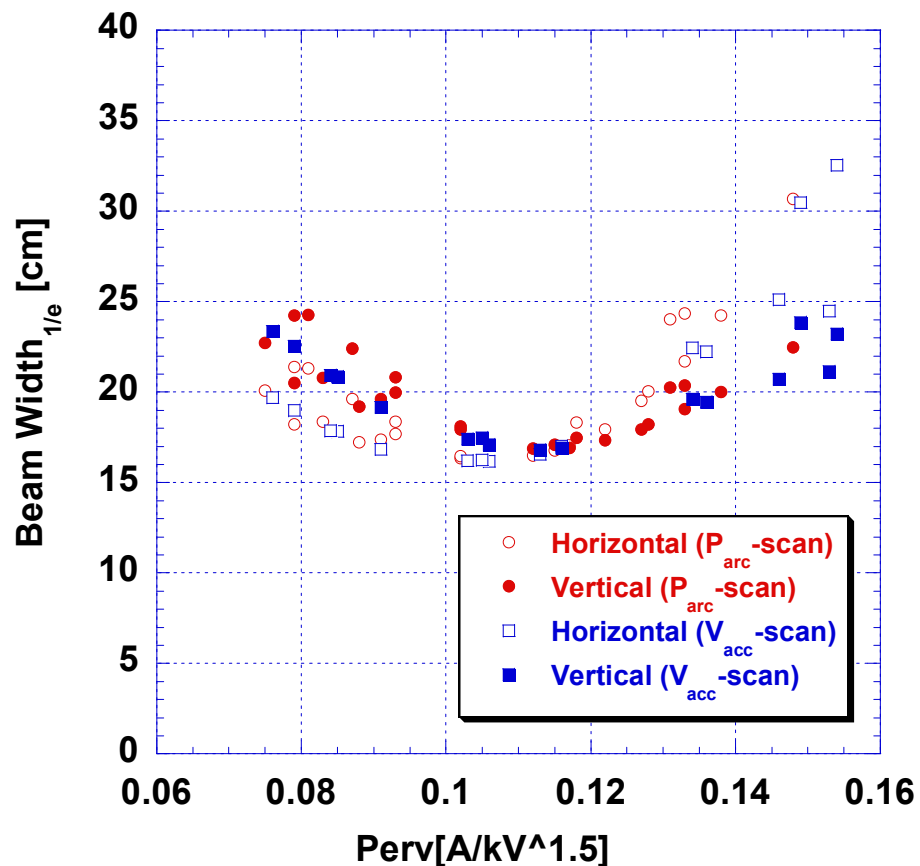


- 1/2面積を用いたアーク効率は 0.44A/kW と高い(全面積では、0.9A/kWとなる)。
- 電流密度は、200mA/cm<sup>2</sup>を超えている。
- 最小発散角(約1°)を与えるパービアンスは、電圧・電流に依らず一定。

a) Arc Efficiency (UA-source)



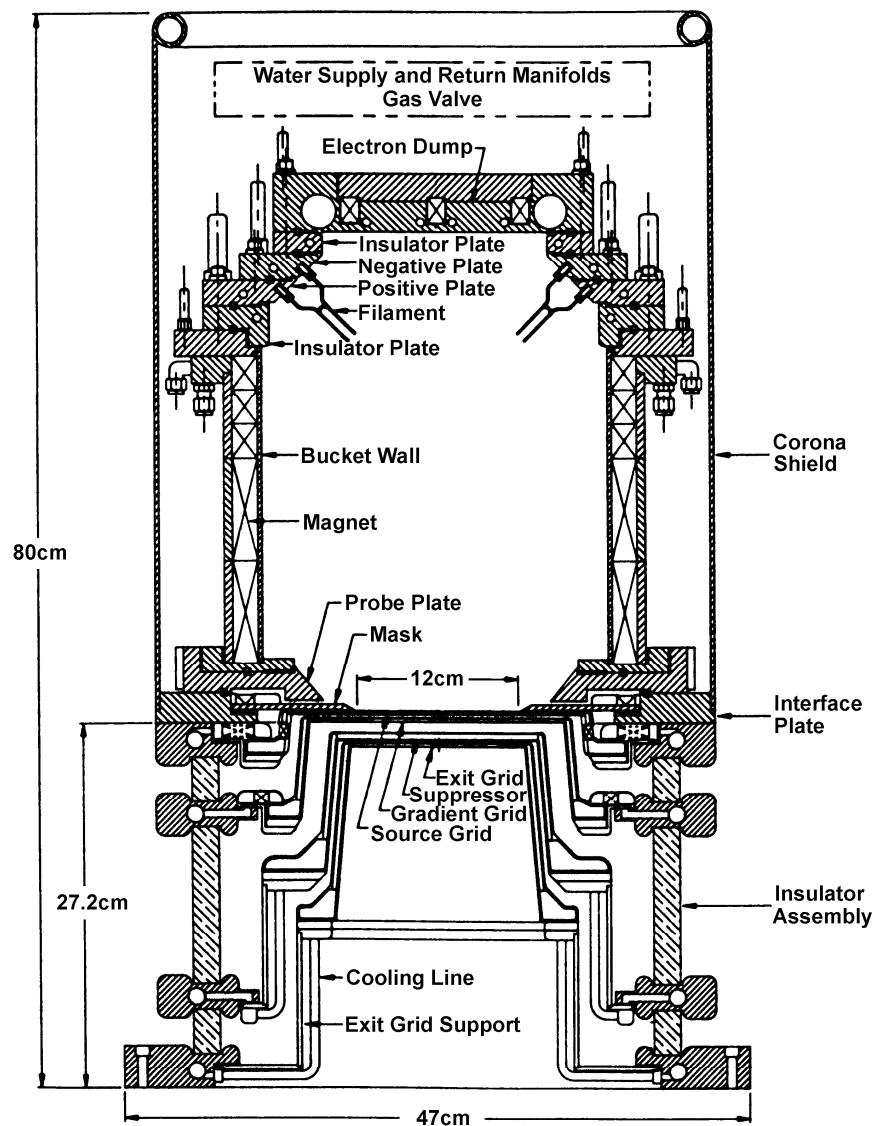
b) Beam Width (UA-source Gap=6.5[mm])





# 大型正イオン源の例 CLPS

TFTR装置やDIII-D装置で使用されている米国標準の正イオン源



プラズマ源

断面: 24cm × 57cm、深さ: 30cm

アーク効率: 0.6-0.7 A/kW

プロトン比: 80-85%

電極面積: 12cm × 43cm

多スリットによる引出し・加速

電極透明率: 60%

120keV-73A (230mA/cm<sup>2</sup>)

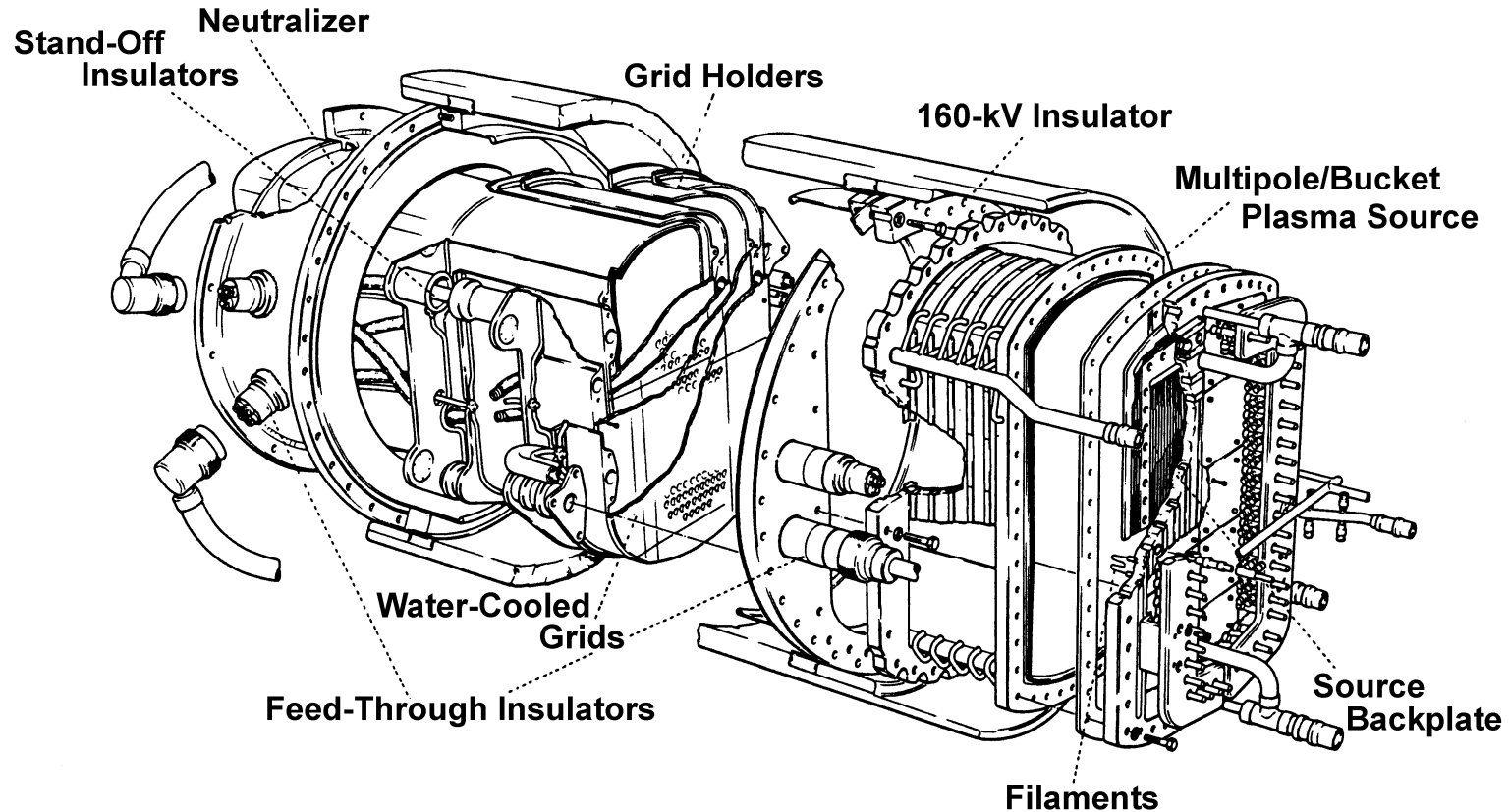
発散角: 7mrad (スリット方向)

12mrad (スリットと垂直方向)



# 大型正イオン源の例 PINI

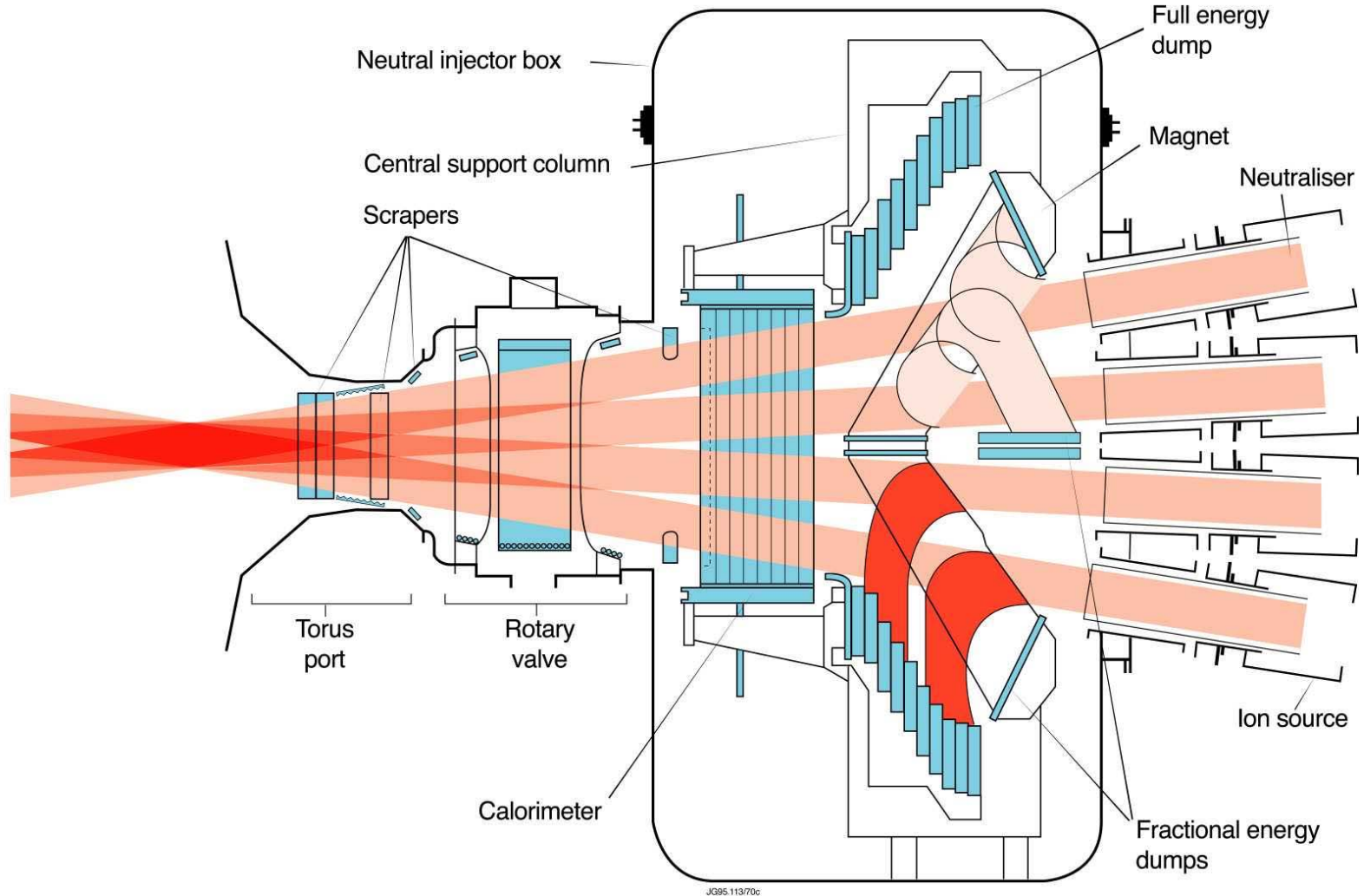
JET装置等で使用されているヨーロッパ標準の正イオン源



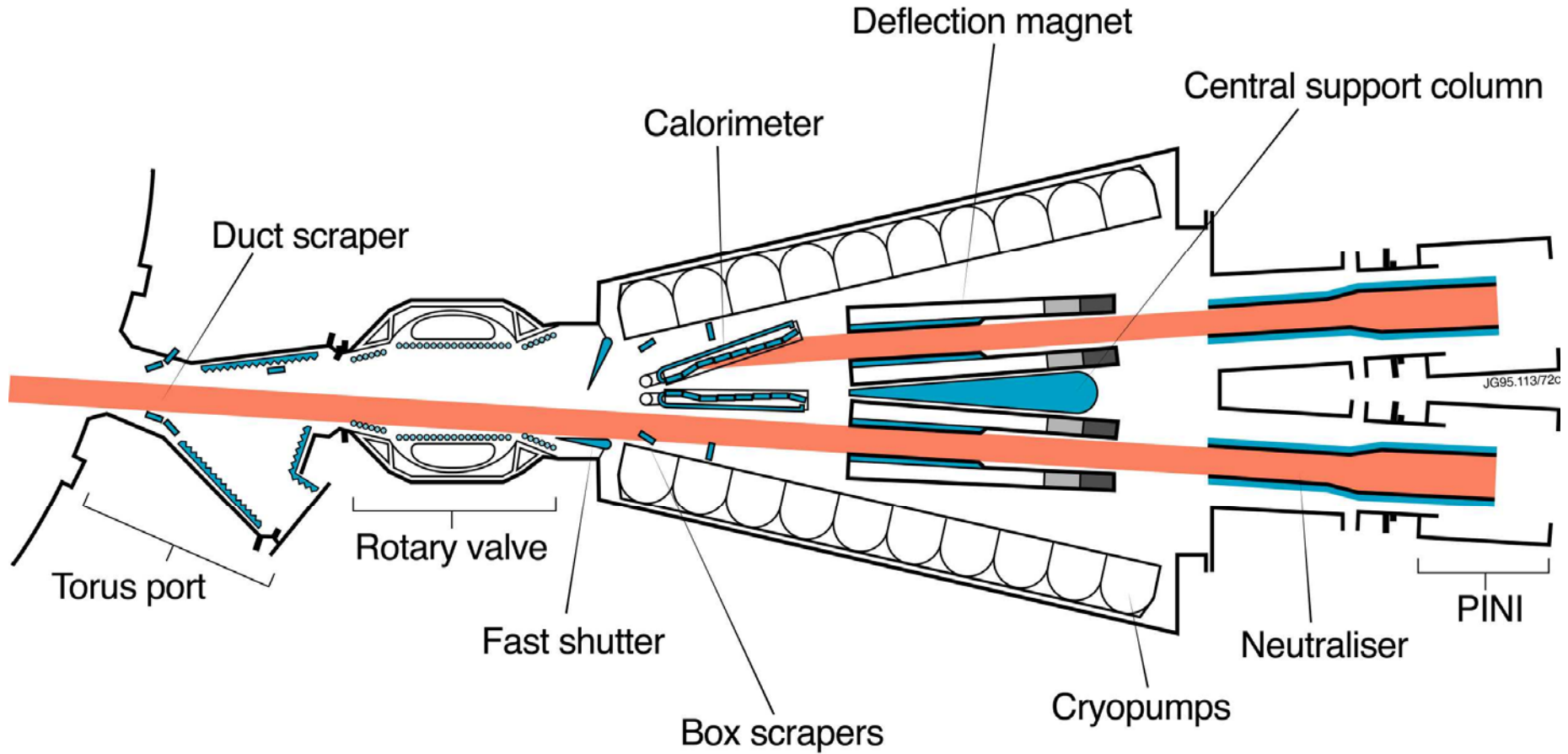
プラズマ源:レーストラック形  
断面:50cm×22cm  
チェッカーポート配位  
アーク効率:0.34 A/kW(3mTorr)

プロトン比:78-85%  
電極面積:45cm×18cm  
130keV-58A(<240mA/cm<sup>2</sup>)  
発散角:10mrad

# JET NBI System Layout (side view)

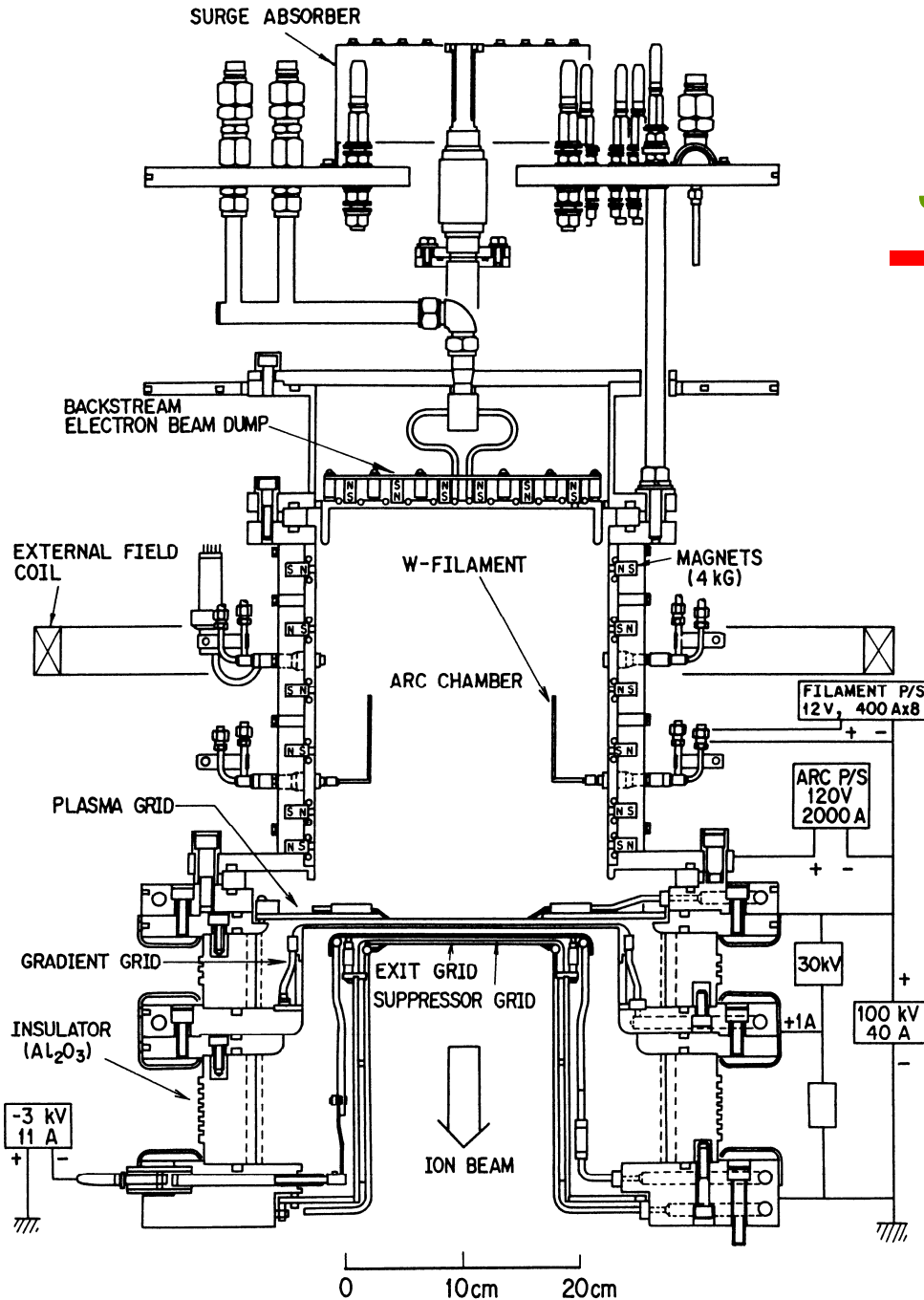


# JET NBI System Layout (top view)



# 大型正イオン源の例 JT-60 Source

JT-60装置で使用されている正イオン源



プラズマ源

断面: 25cm × 40cm、深さ: 34cm

壁面上カस्प磁場: 2.7kG

アーク効率: 0.7 A/kW

プロトン比: 90%

電極面積: 12cm × 27cm

電極透明率: 40%

75keV-35A (250mA/cm<sup>2</sup>)

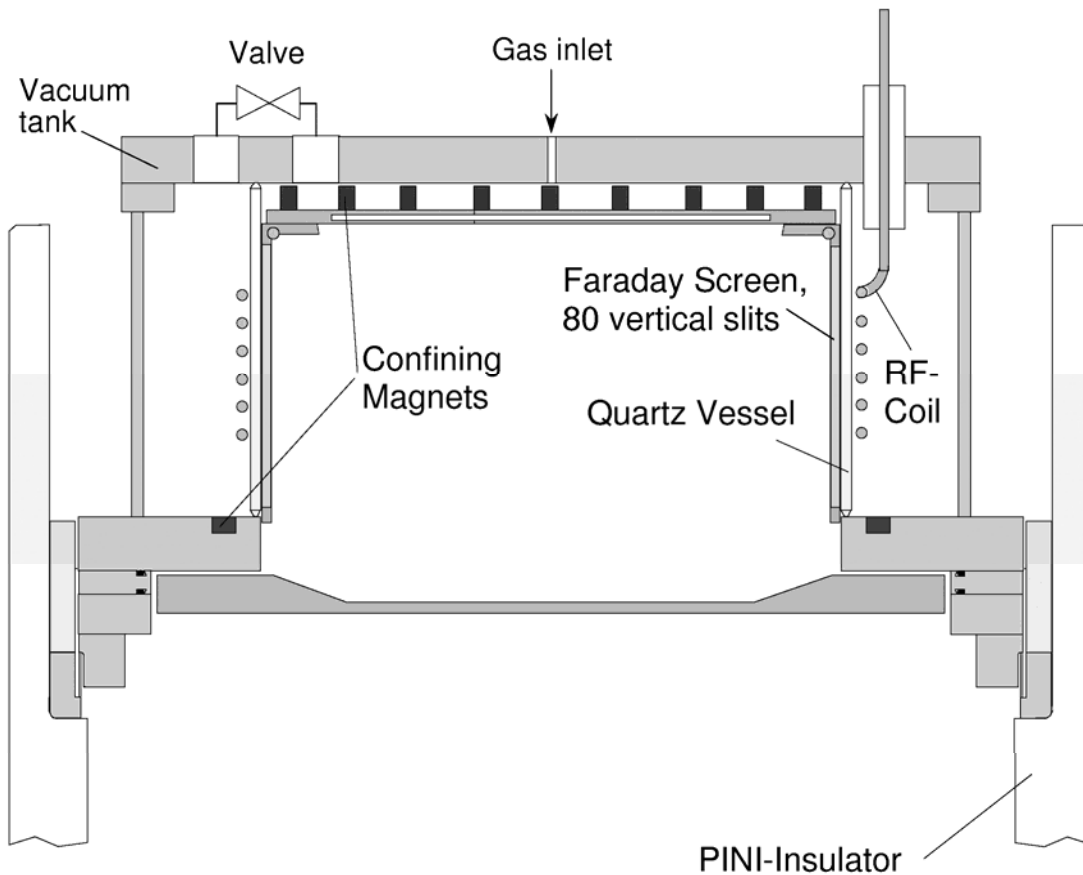
発散角: 17mrad



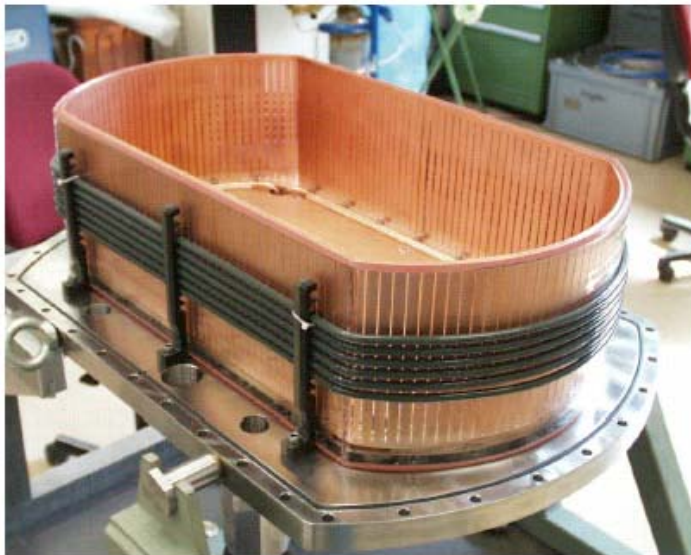
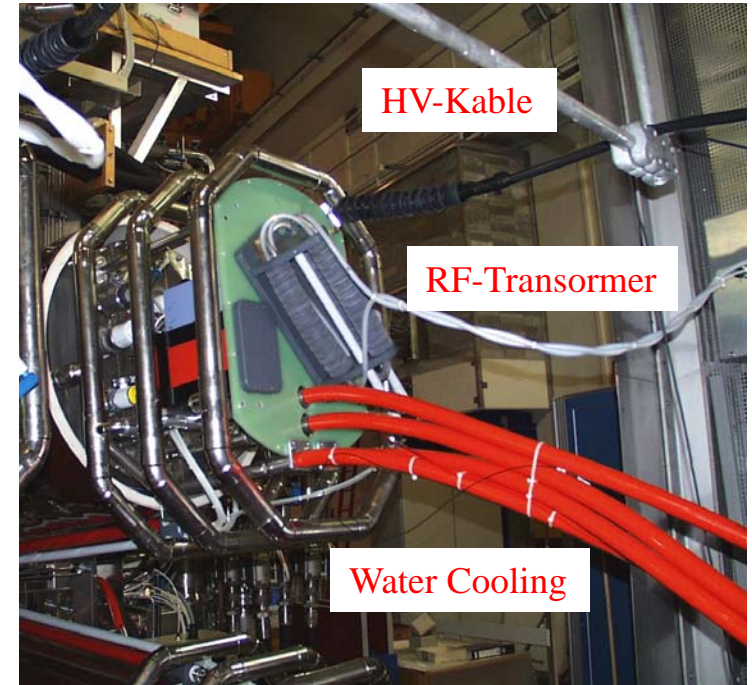
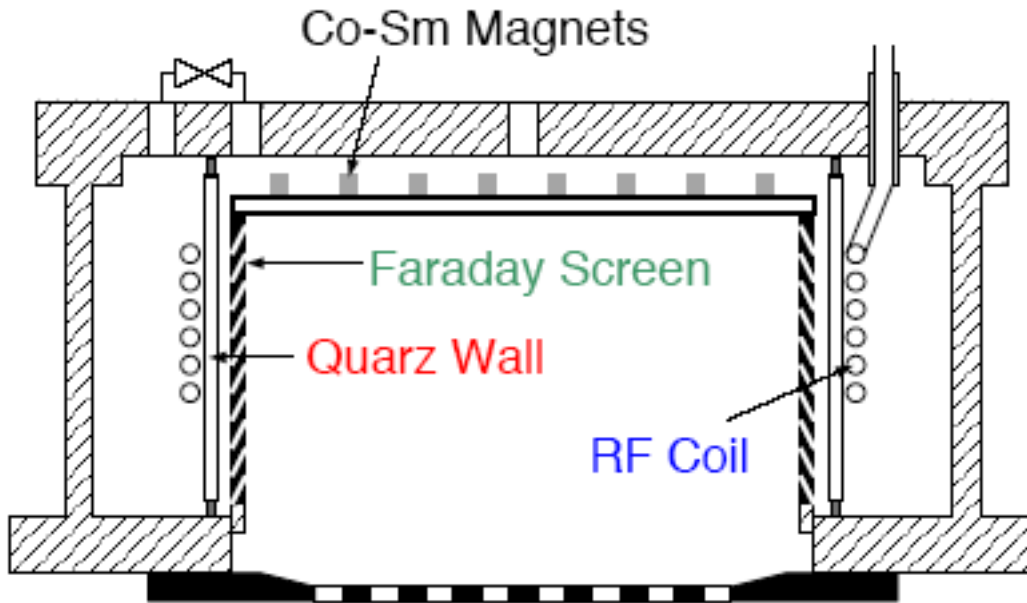
# 大型のRF正イオン源 RF-source

IPP-Garchingで開発され、AUG装置に使用されている正イオン源

RFを用いた高周波放電により、フィラメント等の消耗部が無くなり、メンテナンス周期の飛躍的な伸びが期待できる。



- ・ プラズマ源  
PINIイオン源がベース
- ・ RF周波数: 1MHz
- ・ RF電力: 100kW
- ・ 石英管に巻き付けたコイルアンテナによる誘導結合
- ・ ファラデー・シールドによる石英管の保護
- ・ プロトン比: 70-75%
- ・ 55keV-100A
- ・ 発散角: 17mrad

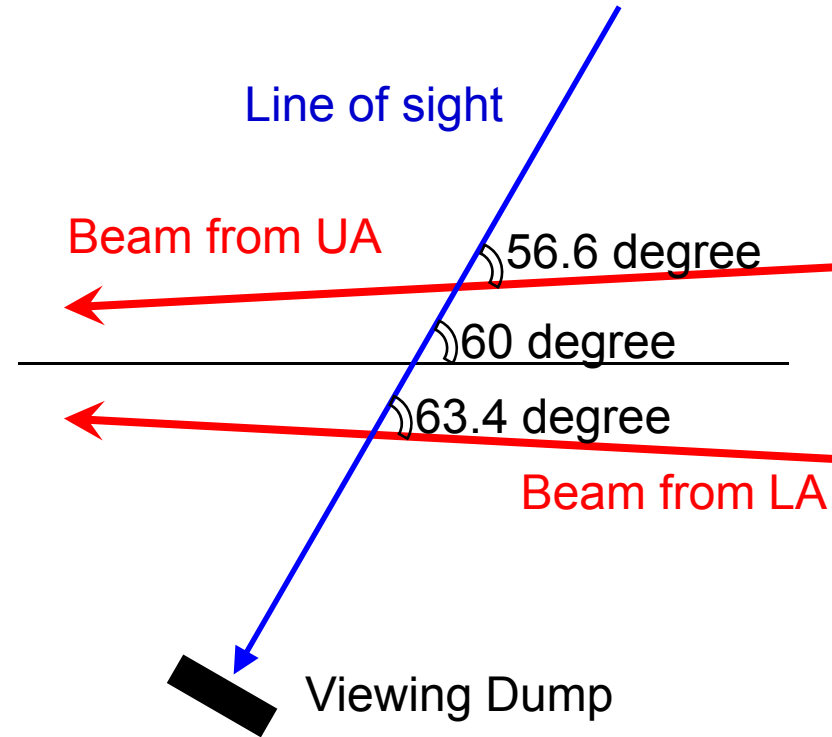
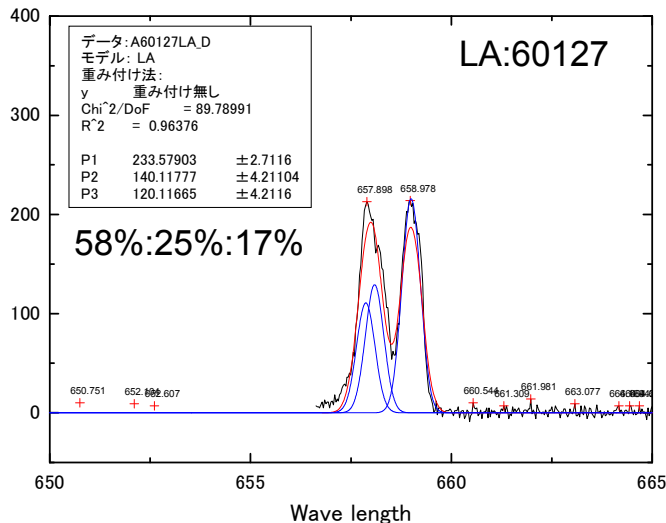
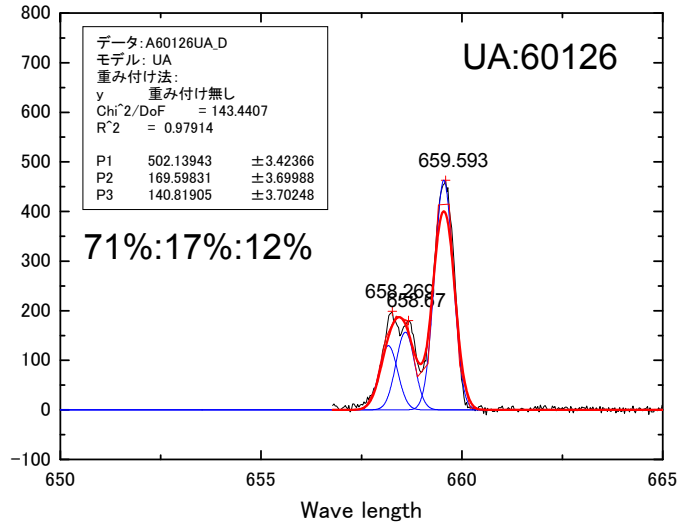


## Type 2 Source

- beam 55keV, 100A, H  
100keV, 60A D
- pulse length 10s
- RF source 100kW, 1MHz
- External RF-Coil: Copper coil 6 windings with teflon insulation
- Faraday shield: sputtering protection
- Backplate is covered by permanent magnets
- Matching Components: External air cooled ferrite transformer

# 光学的なプロトン比の測定

残留ガスとの衝突によるイオンビームの発光のドップラーシフトから測定



Data base of H $\alpha$ (656.28nm) measurement

| UA60126 |           |                 | UA60127 |           |                 |
|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|
|         | $\lambda$ | $\delta\lambda$ |         | $\lambda$ | $\delta\lambda$ |
| 1/3     | 658.17nm  | 1.88nm          | 1/3     | 657.87nm  | 1.59nm          |
| 1/2     | 658.59nm  | 2.31nm          | 1/2     | 658.09nm  | 1.81nm          |
| 1/1     | 659.55nm  | 3.27nm          | 1/1     | 658.94nm  | 2.66nm          |

# 核融合プラズマ加熱とNBIの発展

---

- 高速中性粒子を用いたプラズマ加熱法の提案(1970頃)。
  - L.A.Artsimovich, D.R.Sweetman, R.F.Post, etc.
- NBIに必要な原子・分子データの収集・整理。
  - A.C.Riviere, Nucl. Fusion 11, 363(1971).
  - 入射エネルギー: 約30keV
    - ⇔ITER等の核融合炉に必要なエネルギー: 1MeV
- NBI加熱原理とNBIシステム。
  - T.H.Stix, Plasma Phys., 14, 367(1972).
  - 高収束大電流正イオン源の必要性。
    - ⇒スケールリング則の確立。
  - 多孔／多スリットによる高パービアンス化、大型化。
  - 大電流正イオン源の開発(1970年頃～)

# 核融合プラズマ加熱とNBIの発展 -II-

---

- NBIによるプラズマ加熱法の確立。

- NBIプラズマ加熱の原理検証 @ CLEO-Tokamak(イギリス)。

- ✓ J.G.Cordey, et al., Nucl. Fusion 14, 441(1974)
- ✓ 50-80kW/22.5keV入射。
- ✓ プラズマイオンのエネルギー分布の変化を観測し、入射ビームからのエネルギー寄与を確認。

- NBI加熱によるイオン温度の上昇 @ TFR(フランス)。

- ✓ Equipe TFR, Plasma Phys. and Contrl. Nucl. Fusion Research, 1976, 69(1977).
- ✓ 10台のイオン源にて、2MW/39keVのビーム出力。
- ✓ イオン温度は入射前の2倍になり、1.9keVを達成。

- 大電力NBI加熱による高イオン温度の達成 @ PLT(アメリカ)。

- ✓ H.Eubank, et al., Phys. Rev. Lett. 43, 270(1979).
- ✓ 2.4MW/40keVを入射。  
=> 大型トカマクの建設を促進。
- ✓ 6.5keVのイオン温度を達成。

# 核融合プラズマ加熱とNBIの発展 -III-

---

- 大電流NBIシステムの建設(1980年代後半)。
  - TFTR(アメリカ): 120keV/20MW(D/T=> D,DT)
  - JET(EC): 80-140keV/20MW(D/T=>D,DT)
  - JT60(日本): 80keV/20MW(D)
- 中性化効率の検討。
  - K.H.Berkner, et al., Nucl. Fusion 15, 249(1975)
  - 負イオンの必要性
  - ガスセル、プラズマセル等の中性化方式の提案。
- 負イオン源の開発(1970年代後半～)。
  - 正イオン源の大型化、大電流化、高エネルギー化、高効率化と並行して、各種負イオン源の開発が行われる。
  - セシウム添加型体積方式負イオン源の開発により、負イオンNBIシステムの設計が可能になる(1990年代前半)。

# 核融合プラズマ加熱とNBIの発展 –IV–

---

- 負イオンNBIの建設。
  - 日本原子力研究所(JAERI): 1993年～  
500keV/10MWシステム(D) @ JT60U
  - 核融合科学研究所(NIFS): 1995年～  
180keV/15MWシステム(H) @ LHD
- 負イオンNBIによるプラズマ入射実験。
  - JT60U 1996年～
    - ✓ プラズマ加熱と電流駆動の確認。
    - ✓ 多段衝突電離過程によるビームの電離の確認。
  - LHD: 1998年～
    - ✓ 負イオンNBIシステムのみによるプラズマ実験の遂行。
    - ✓ NBIによる110秒定常実験。
- ITERにおける負イオンNBIシステムの計画。  
1MeV/50MW