

核融合科学研究所における 中性粒子入射装置の研究開発

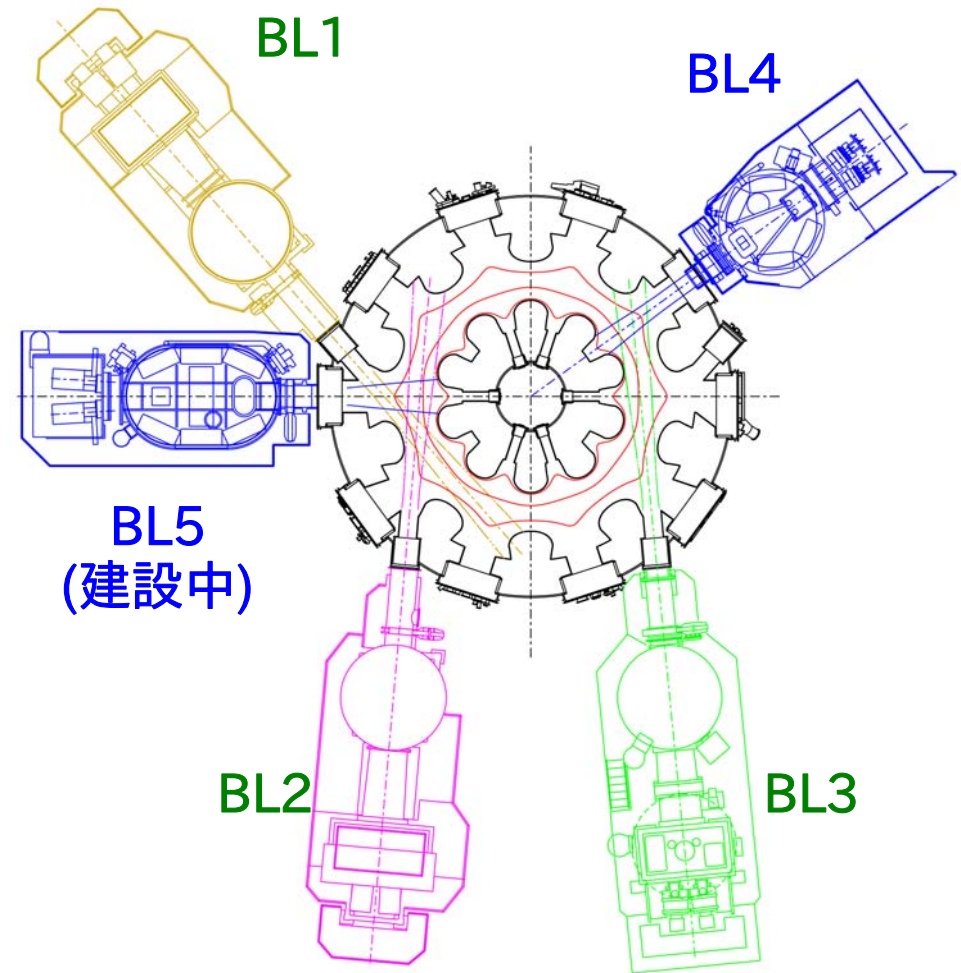
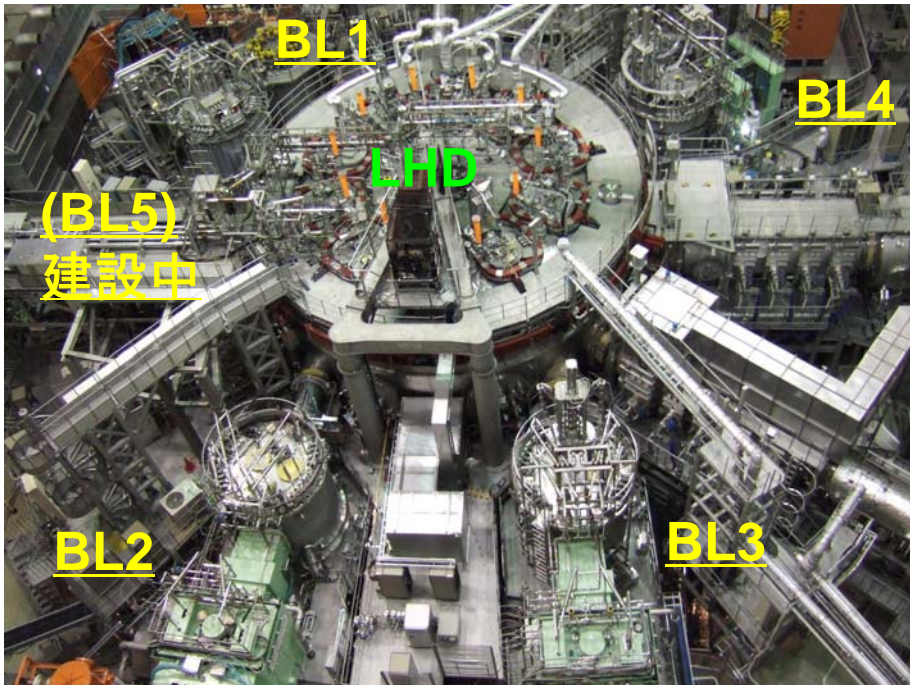
中野 治久、NIFS-NBIグループ
核融合科学研究所

内容

- LHD-NBIの紹介
- 核融合研における負イオン源の開発
 - イオン源プラズマ分布の空間均一化
 - 電極熱負荷の低減
 - 負イオンビーム光学系の改善
- H⁻生成・引出の高効率化に向けて
 - Cavity Ringdown Spectroscopy
- まとめ

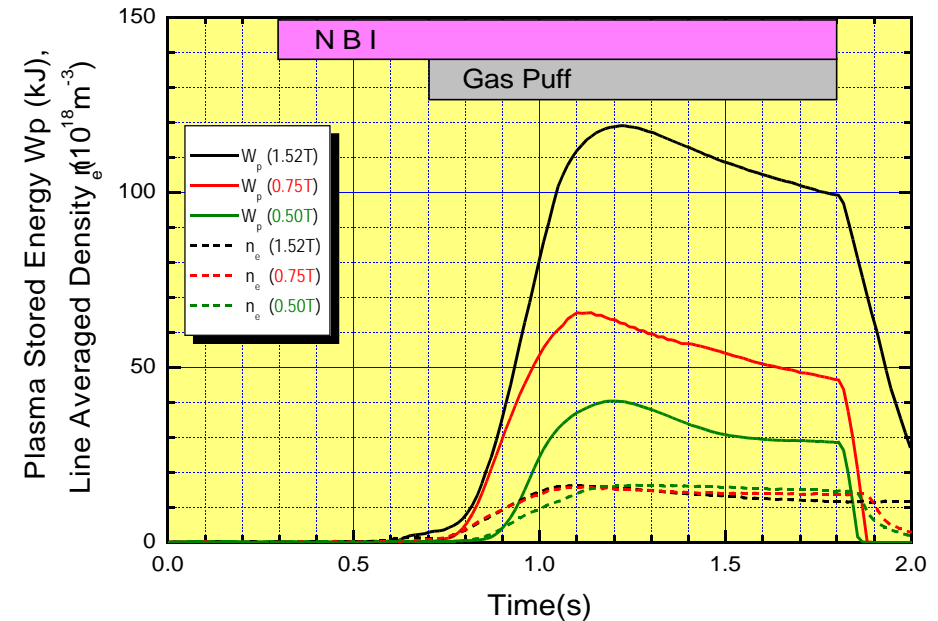
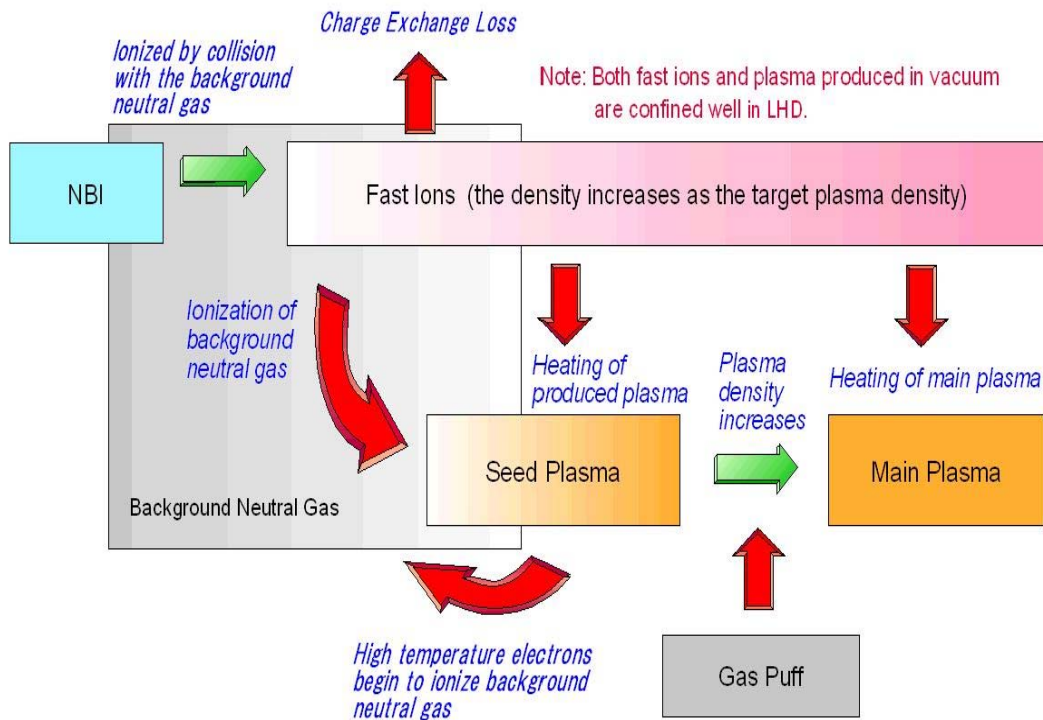
NBI on LHD

LHD-NBIの配置



- 4基のビームラインが稼働中
 - 負イオンNBI： 3基(BL1 ~ BL3)、接線入射
 - 正イオンNBI： 1基(BL4)、垂直入射
- 2010年度より新たに正イオンNBI(BL5、垂直入射)1基が運転を開始

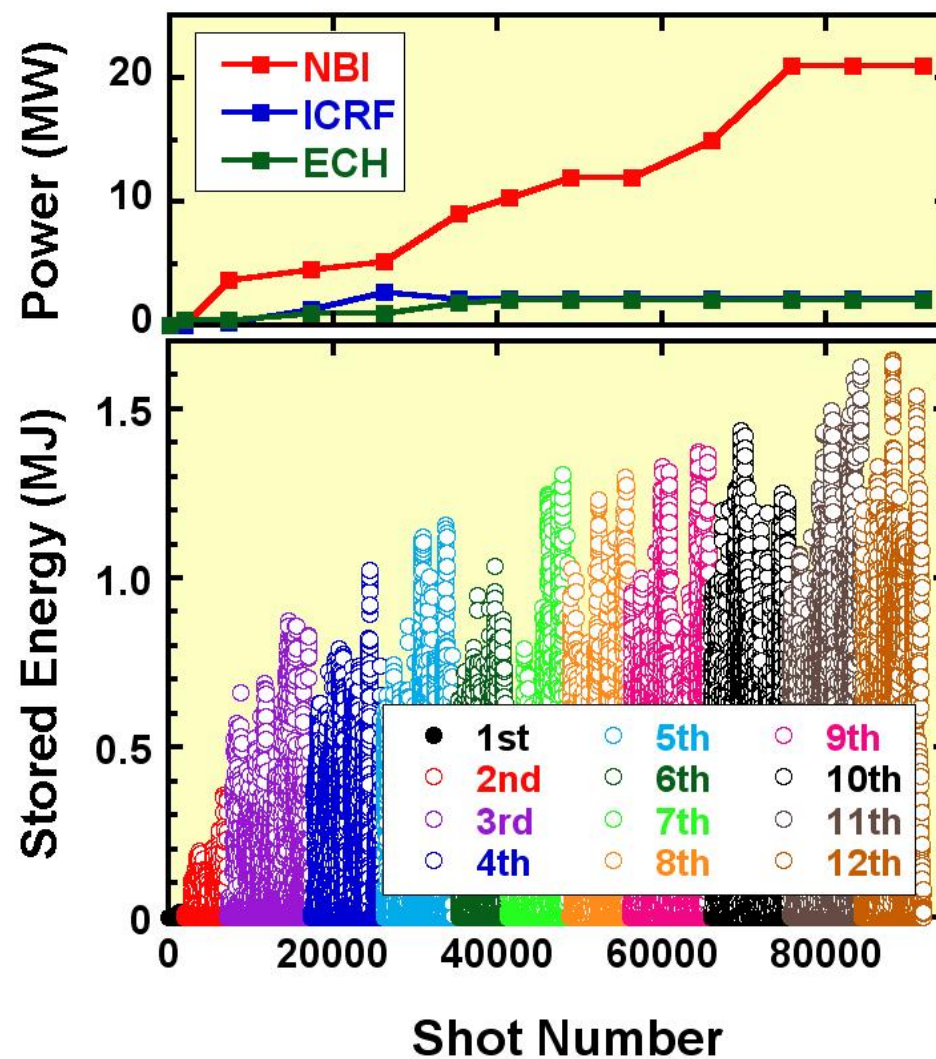
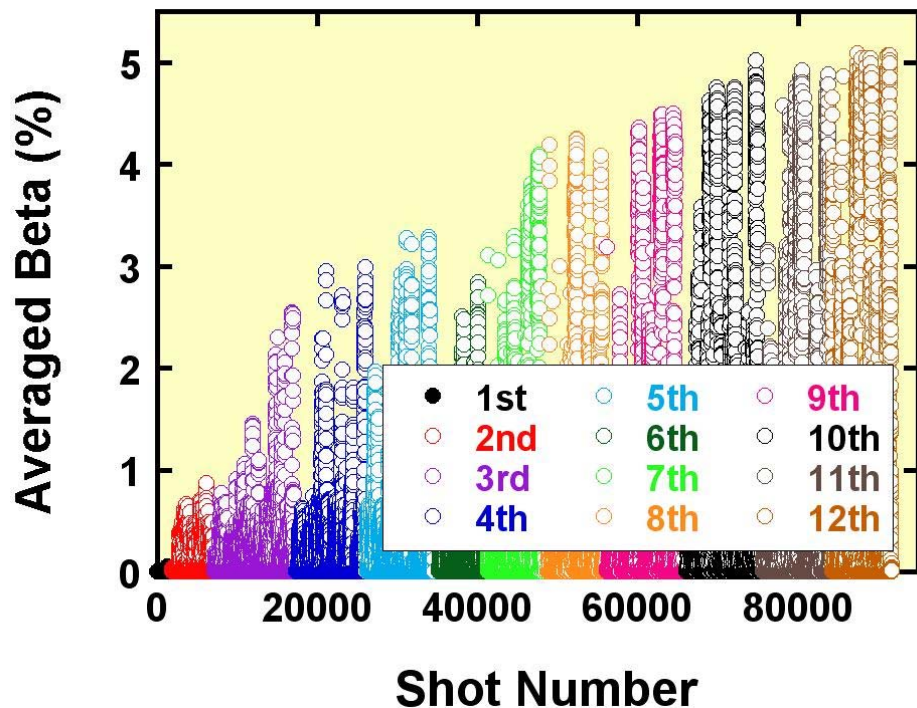
LHDにおける接線NBIによるプラズマ生成 (プラズマ・スタートアップ)



- LHDでは外部コイルのみによって閉じ込め磁場が形成されているため、NBIによるプラズマ生成（プラズマ・スタートアップ）ができる。
- NBIによるプラズマ生成は、閉じ込め磁場が必要であるが、磁場強度によらず可能である。

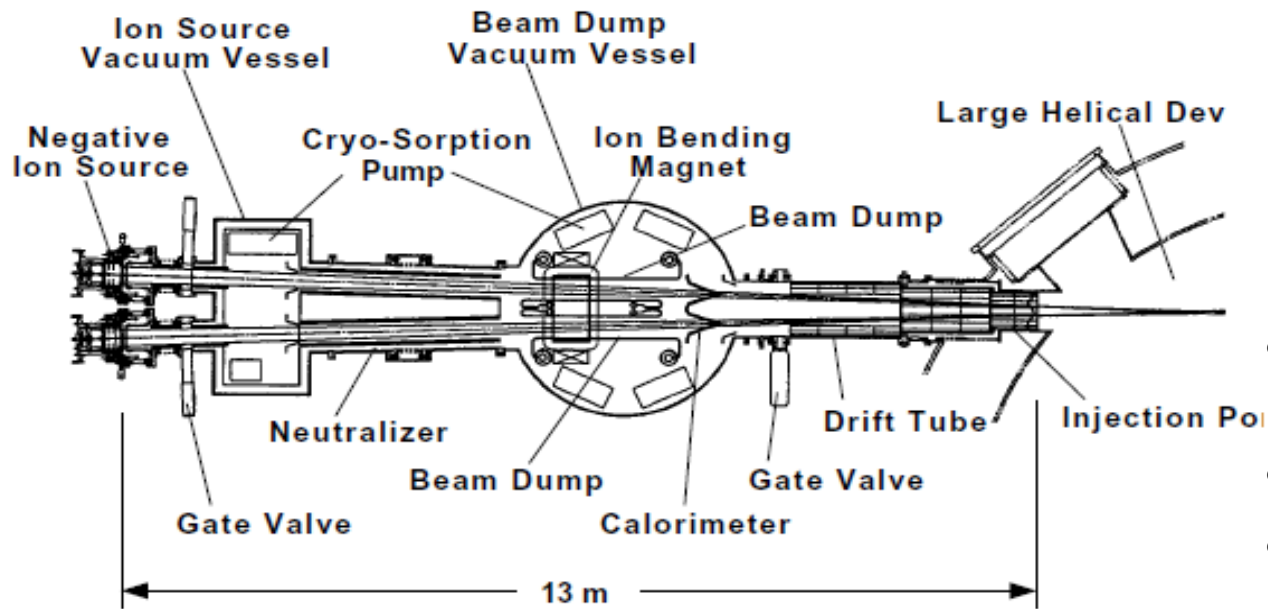
NBIの入射ビームパワーと LHDプラズマ性能の関係

LHDプラズマの平均ベータ値や蓄積エネルギーは、NBIの入射ビームパワー向上とともに増加してきた。

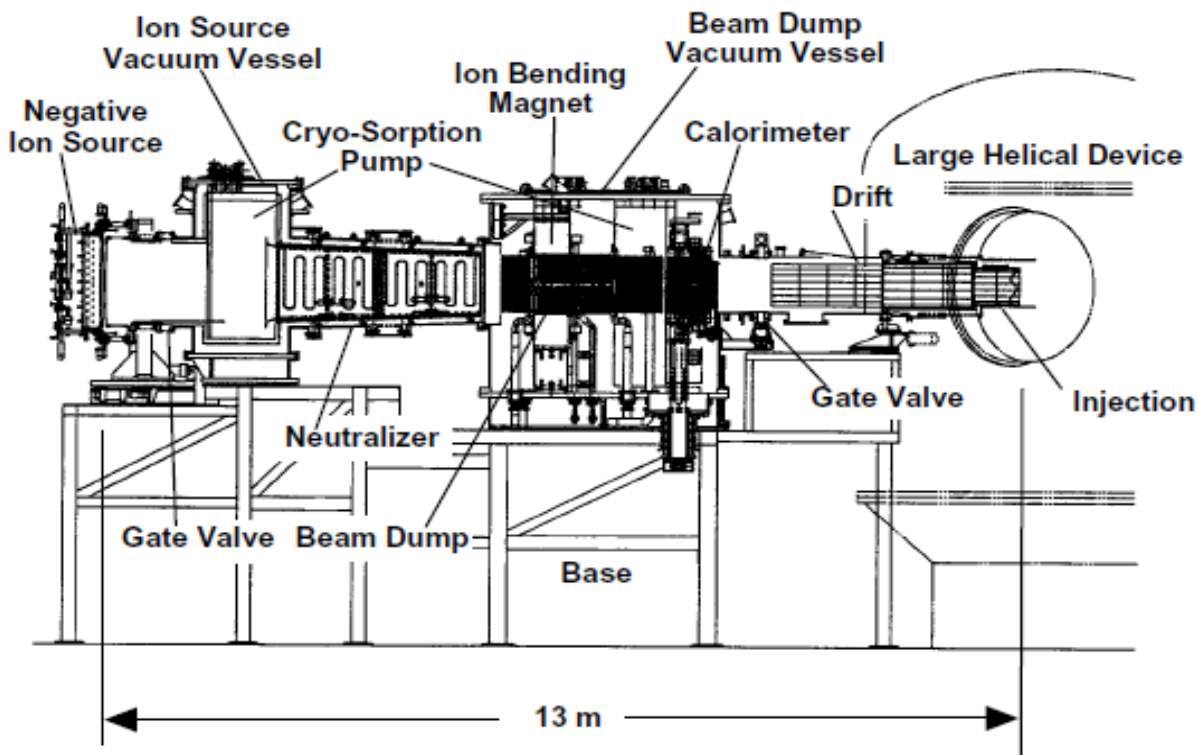


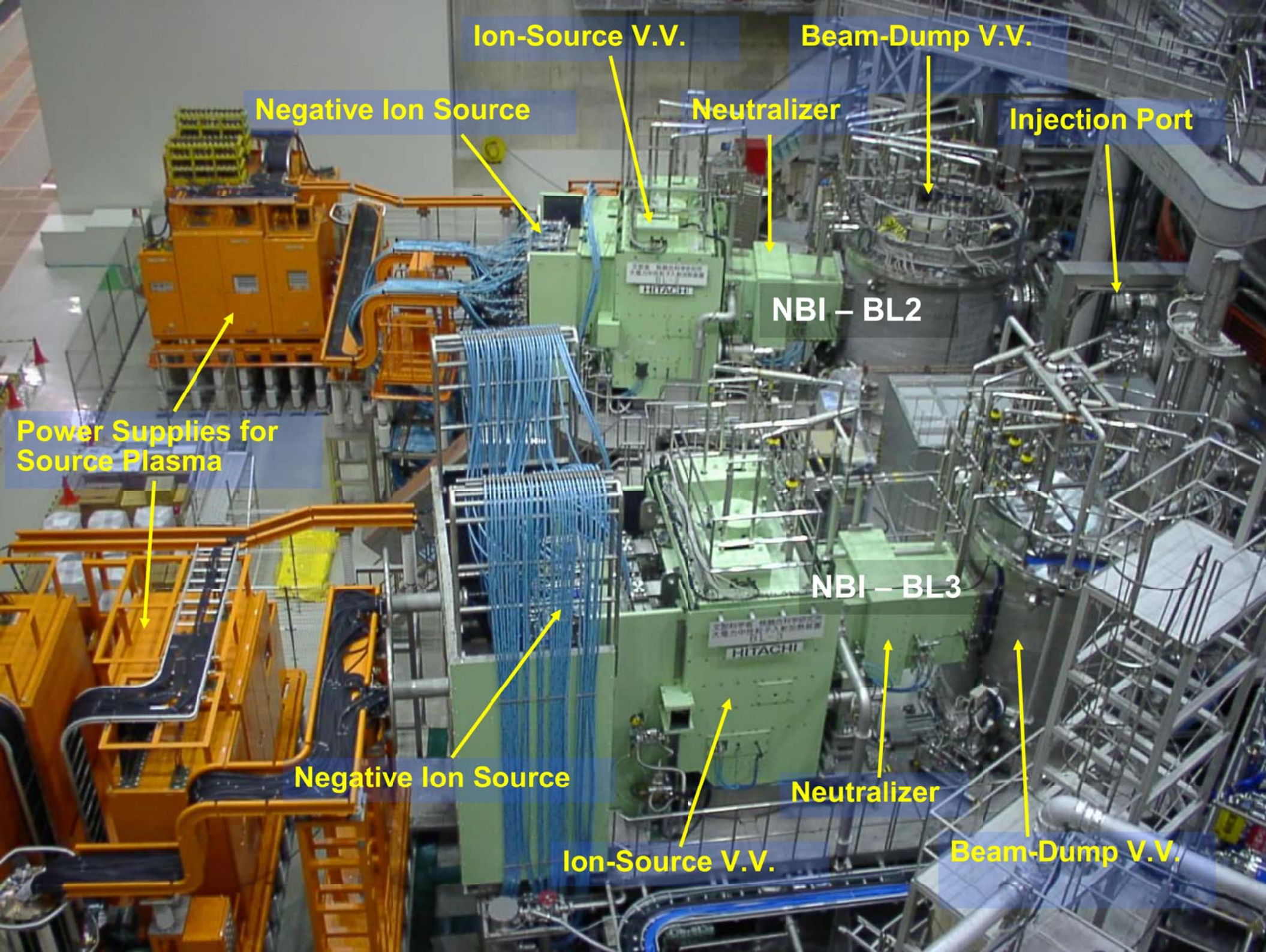
負イオンNBI

負イオンNBI の構造



- 設計仕様：(1基あたり)
180 keV – 5 MW
- 1基あたり2台の負イオン源
- 実効的な中性化セル長: 5 m
- 焦点距離: 13 m
- ピボット点: 15.4 m
- 入射ポート最小径: 0.5 m





Ion-Source V.V.

Beam-Dump V.V.

Negative Ion Source

Neutralizer

Injection Port

NBI - BL2

Power Supplies for Source Plasma

NBI - BL3

Negative Ion Source

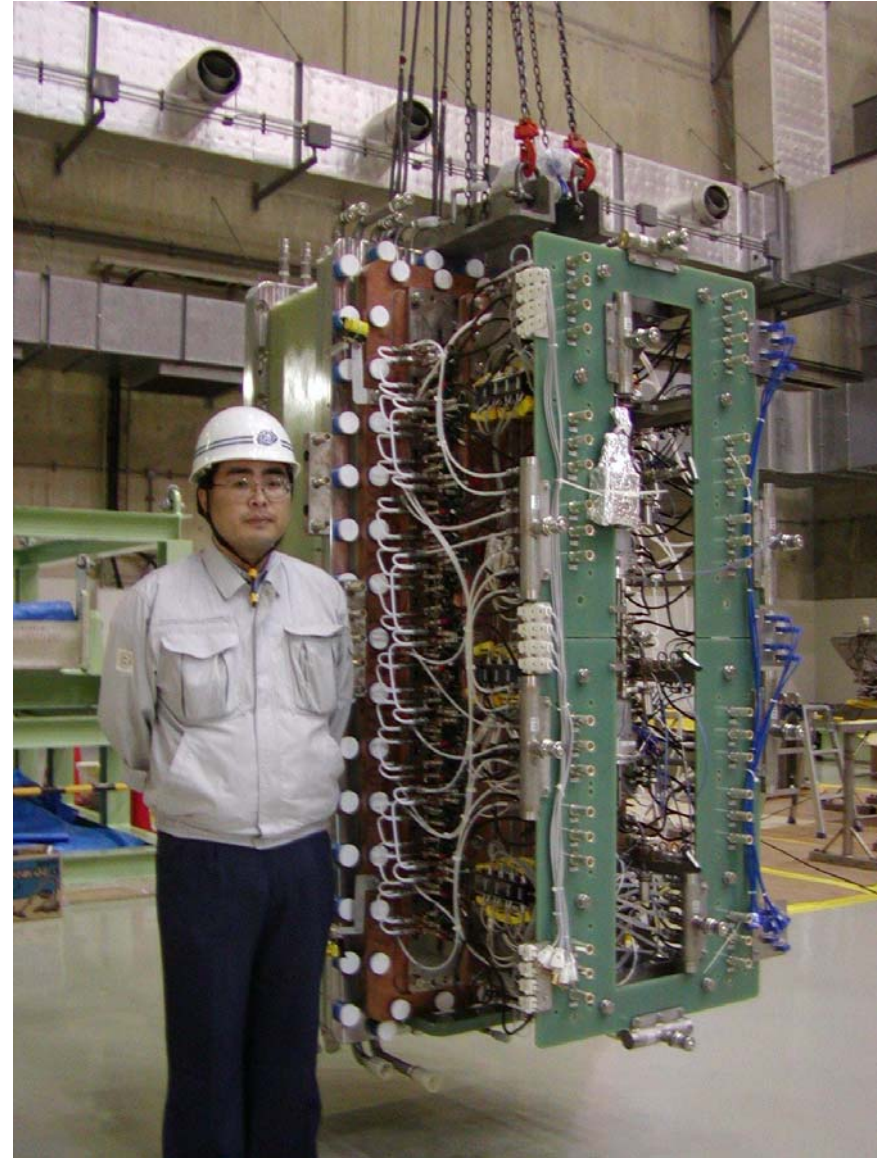
Neutralizer

Ion-Source V.V.

Beam-Dump V.V.

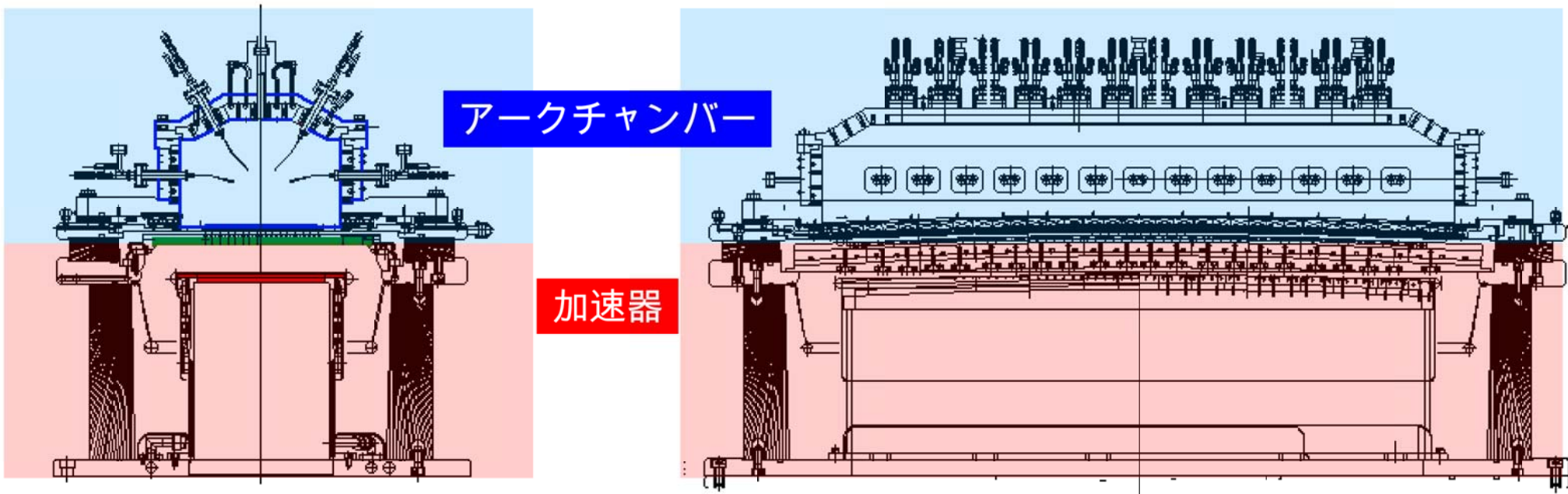
負イオン源の開発

LHD-NBI用負イオン源



LHD-NBI用負イオン源

Ion source for BL1



- セシウム添加型水素負イオン源
- 放電方式：フィラメント・アーク放電
- アーク放電容器寸法(内側)：1400 mm (H) x 350 mm (W) x 230 mm (D)
- 加速器：単段加速(プラズマ電極[PG]、引出電極[EG]、ステアリング電極[SG]、接地電極[GG])
- ビーム引出領域：1250 mm (H) x 250 (W) (各電極は5つに分割)

大電流H⁻ビームを得るための重要事項

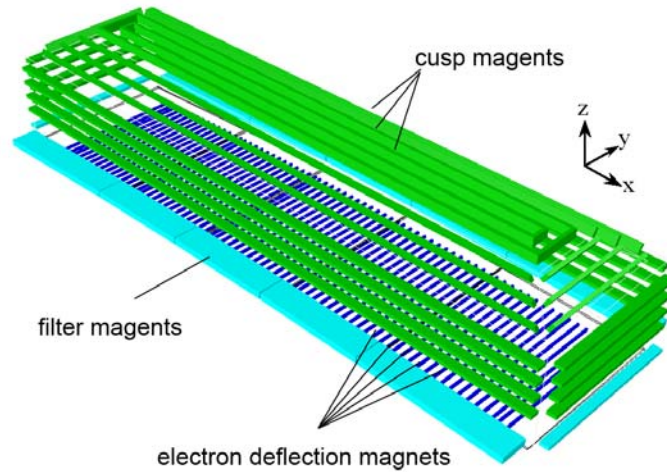
イオン源プラズマ分布の空間的一様性の実現

H⁻生成・引出の高効率化

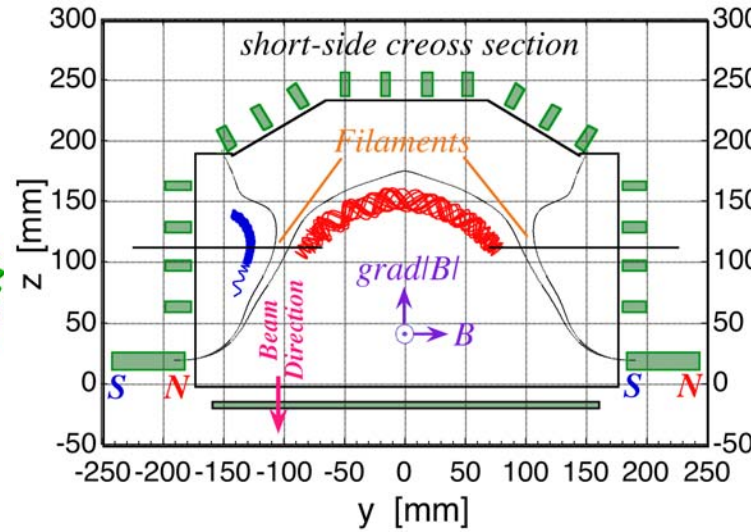
電極の熱負荷低減

加速器のビーム光学系の改善

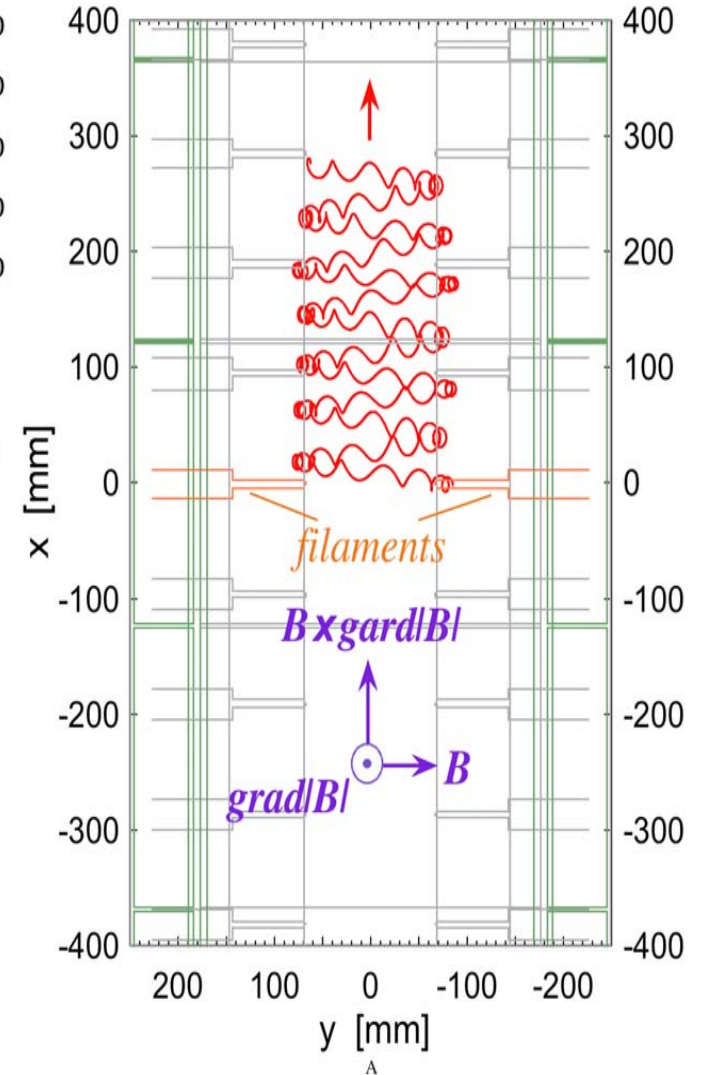
プラズマの空間均一性の実現 ～不均一性の発生～



負イオン源の磁石配置



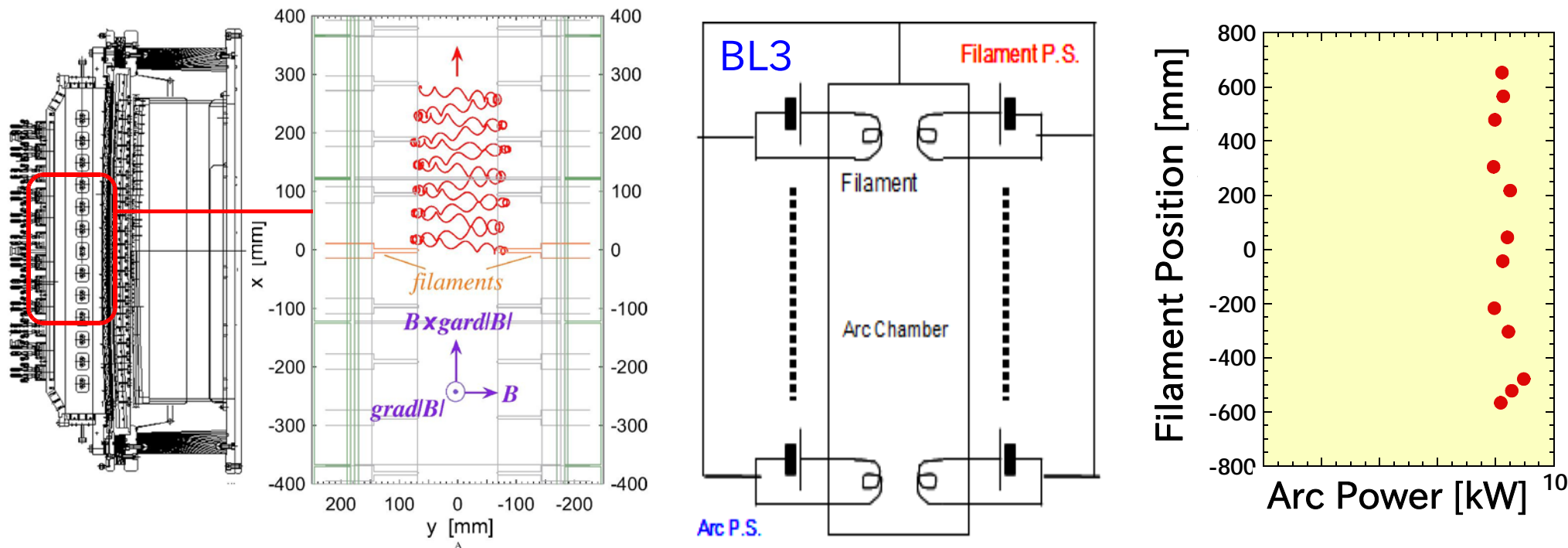
短辺断面の磁場と
一次電子軌道



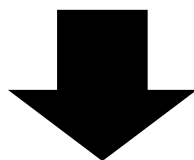
長辺断面内の一次電子軌道

アークチャンバー内には、短辺方向に一方向のフィルター磁場があるため、フィラメントからの一次電子は長辺方向にドリフトを起し、内部プラズマ分布の不均一性が発生する。

プラズマの空間均一性の実現 ～プラズマ分布制御～

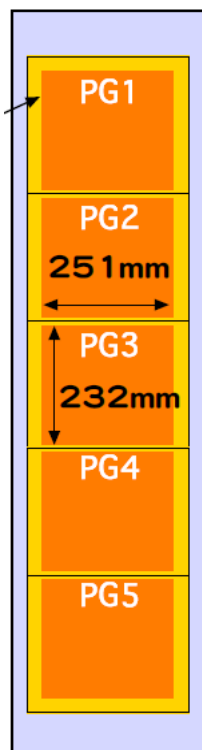


- フィラメント回路およびアーク回路をグループ毎に分割する。
- フィラメント電源およびアーク電源の出力(もしくは外部抵抗)を各グループ毎に調整することで、各領域のアークパワーを制御する。

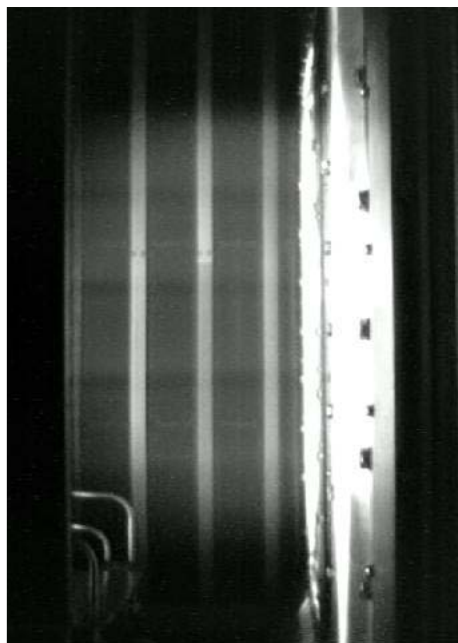


空間的に一様なイオン源プラズマを実現した。

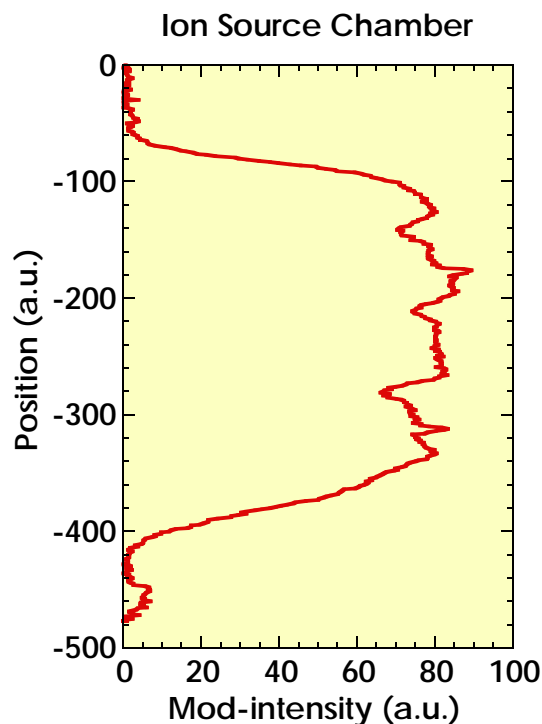
プラズマの空間均一性の実現 ～一様なビームの実現～



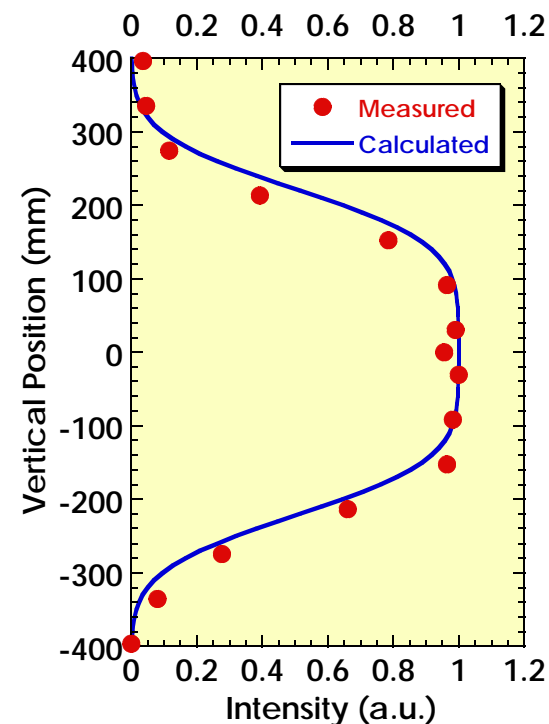
BL3 source



CCD view of H α intensity
2.2m downstream



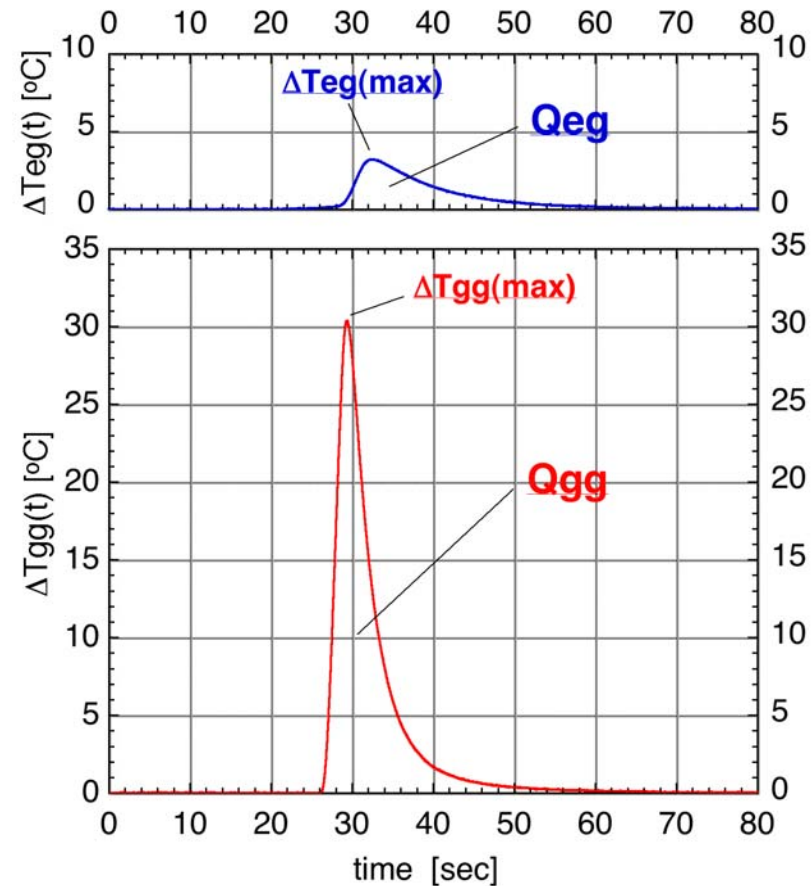
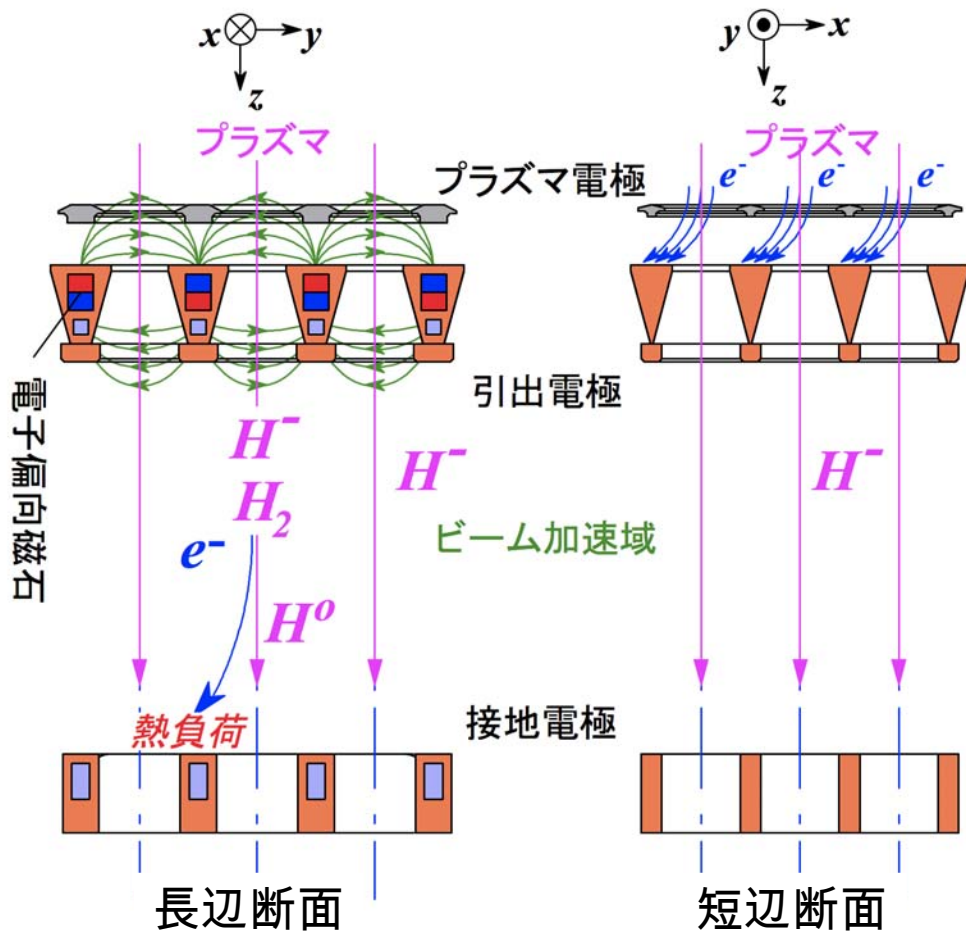
Distribution of H α intensity
2.2m downstream



Beam profile on calorimeter
8.5m downstream

イオン源プラズマ分布制御により、ビームの一様性を改善した。

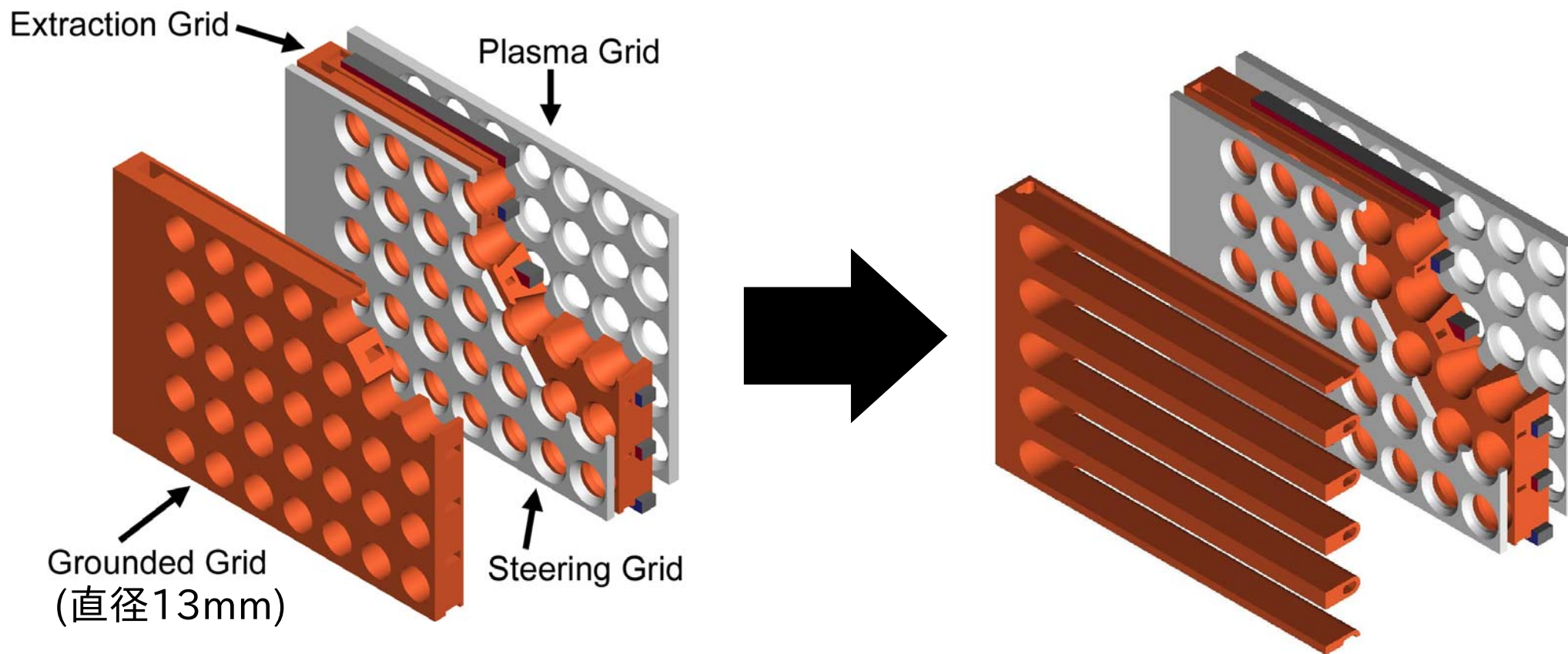
電極の熱負荷低減 ～電極の熱負荷～



- 負イオン加速では、加速域の中性粒子と負イオンが衝突し、負イオンが電子を放出する(ストリッピング過程)。このストリッピング電子や、電子を放出した中性粒子ビームが電極への熱負荷を与える。
- 引出電極に比べ接地電極への熱負荷が圧倒的に高い。

電極の熱負荷低減

～熱負荷低減のための接地電極形状～

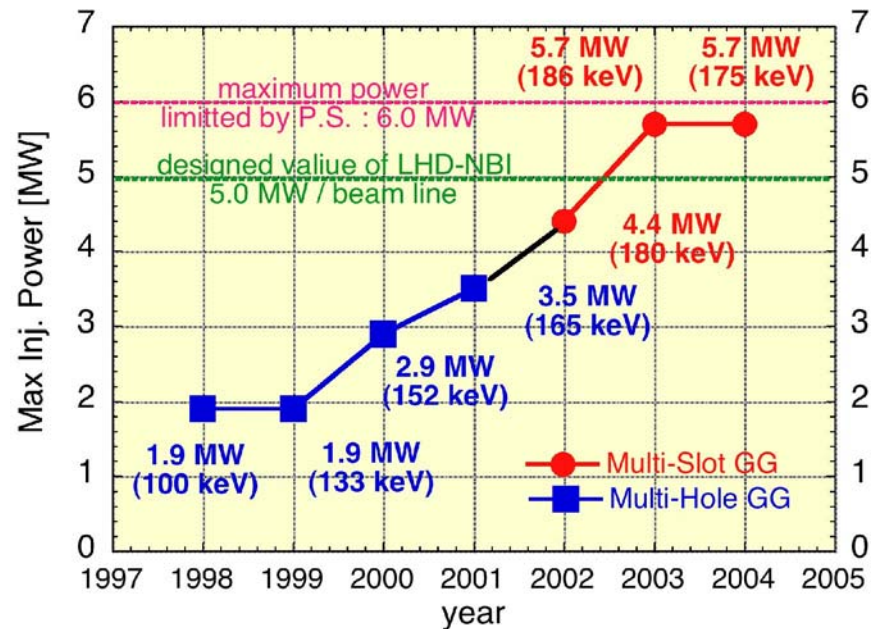
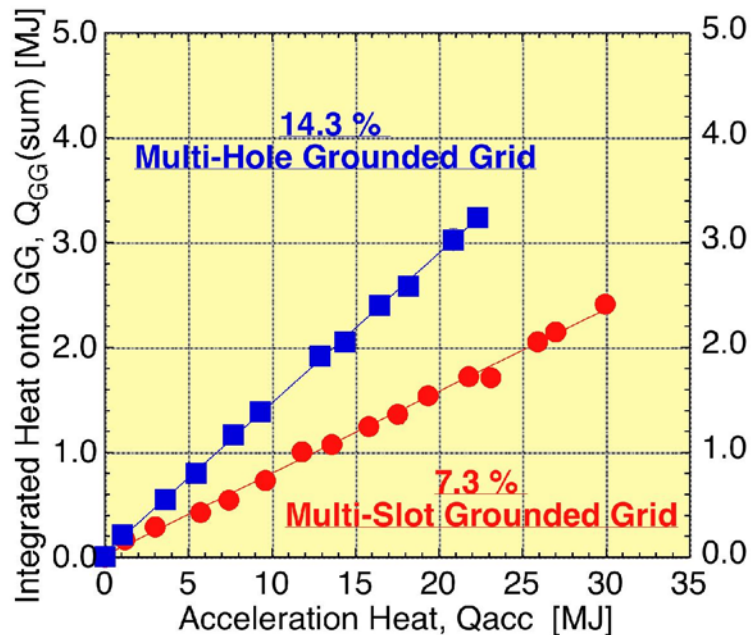


接地電極の表面積を小さくすれば良い。

↓
接地電極の孔径の拡大

↓
接地電極の孔をスロット化

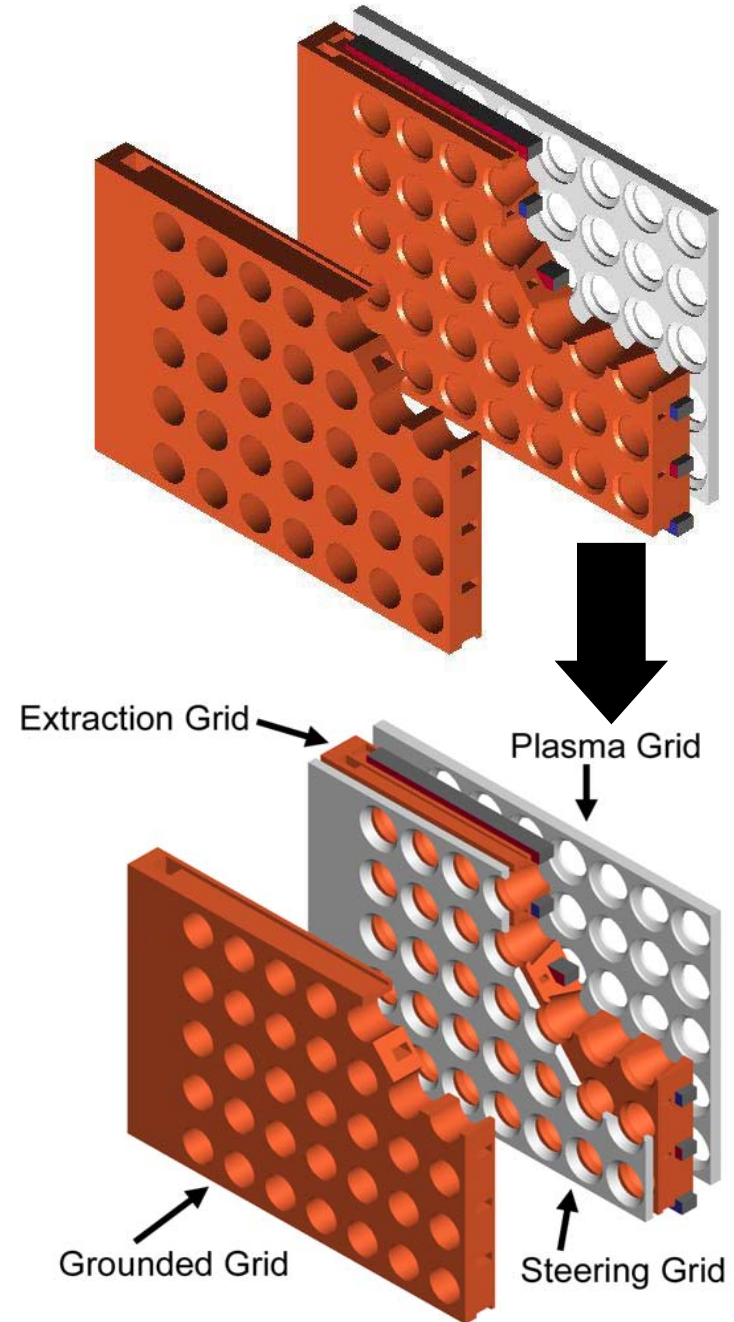
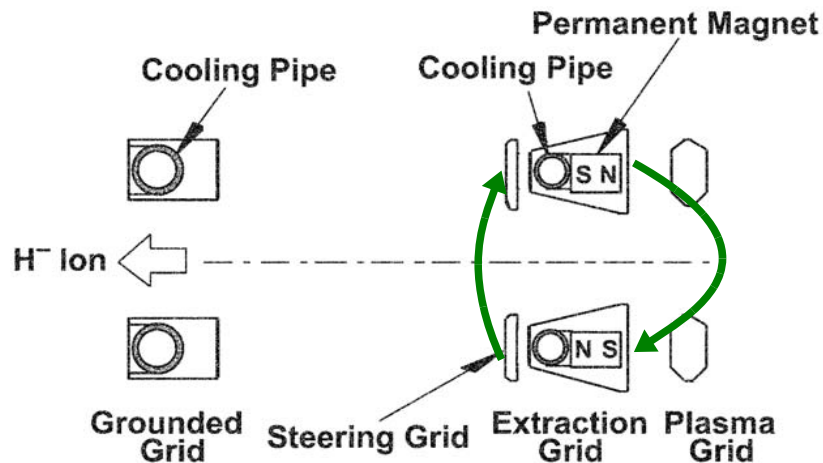
電極の熱負荷低減 ～多スロット接地電極の効果～



- 接地電極を多孔から多スロット化したことにより、接地電極のビーム透過率(接地電極の透明度)が42.6%から68.4%に増加した。
- 加速されたビームの熱量に対する接地電極への熱負荷がほぼ半減した。
 - 加速領域のガス圧の減少により、ストリッピング損失が減少したと考えられる。
- 結果、電極間ブレイクダウンが減少し、入射パワーがも増加した。

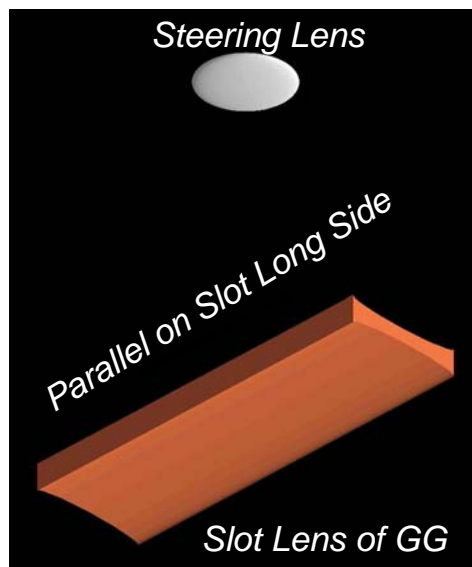
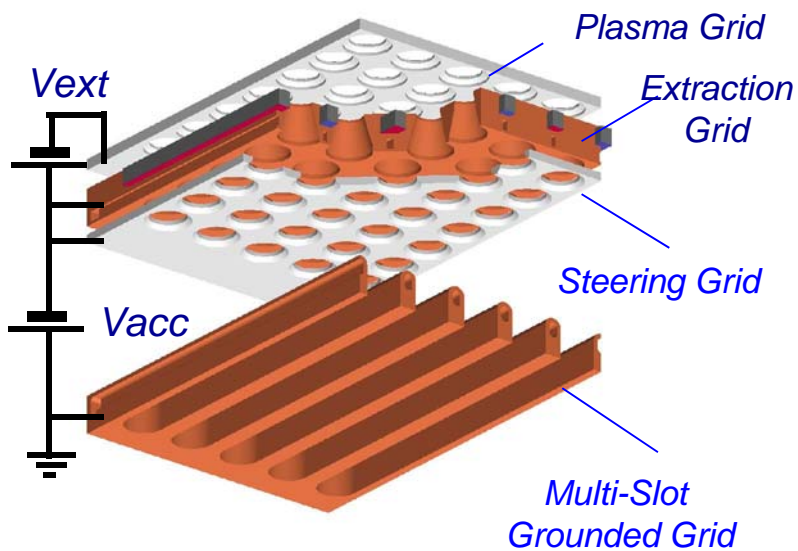
加速器のビーム光学系の改善 ～多孔型接地電極とステアリング電極～

- 引出電極内の電子偏向磁石による磁場によって、負イオンのビームレットも偏向される。
- 引出電極下流に引出電極の孔軸とズレた孔軸を持つステアリング電極を設置し、ビームレットの偏向を抑制する。
- ステアリング電極は、加速領域への二次電子が漏れを遮蔽する効果もある。

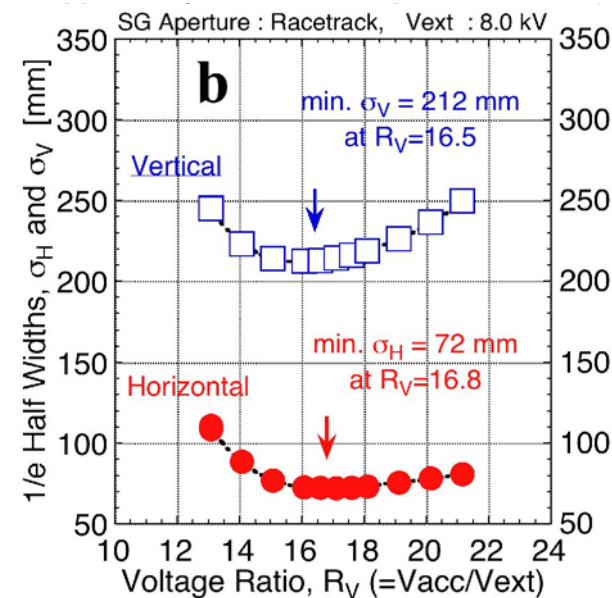
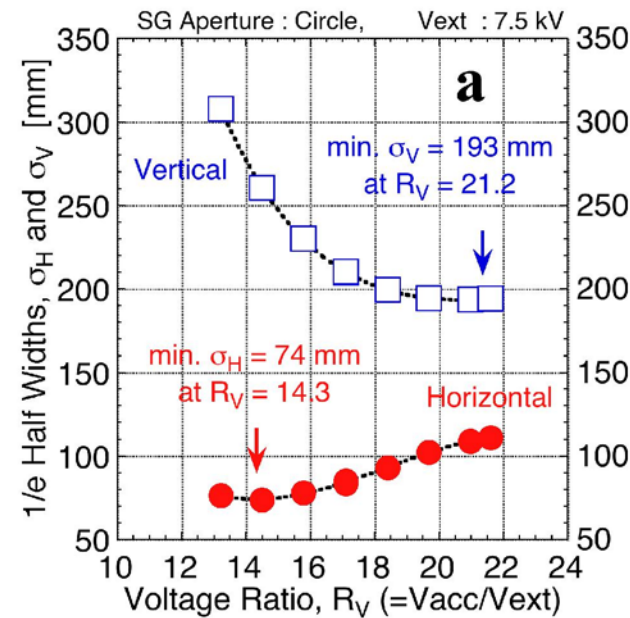
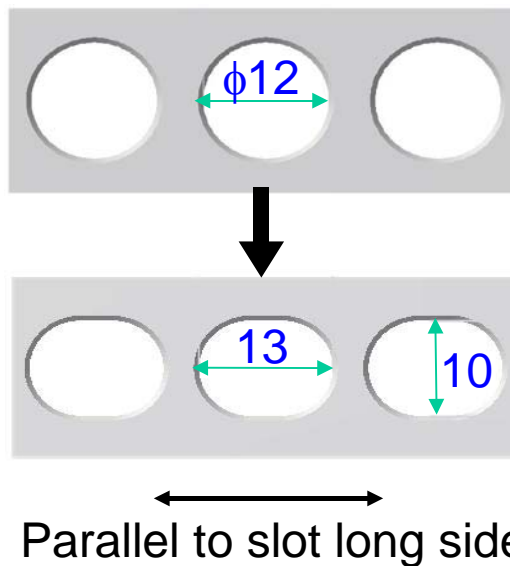


加速器のビーム光学系の改善

～多スロット型接地電極とステアリング電極～

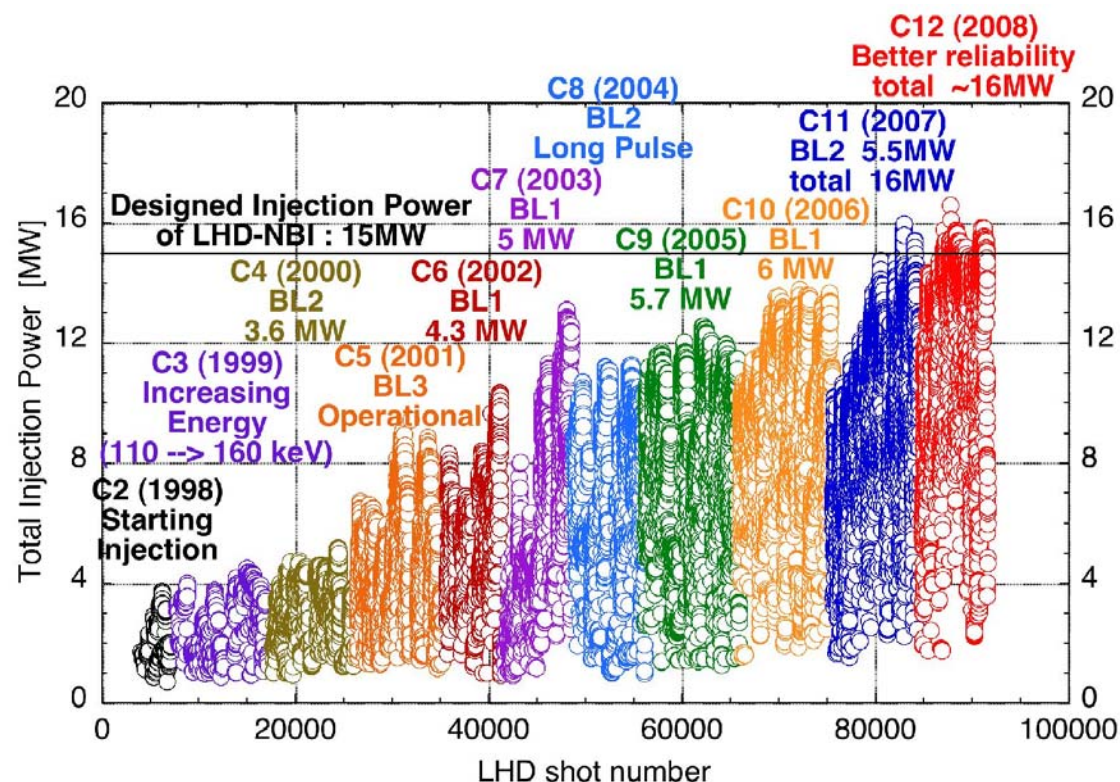
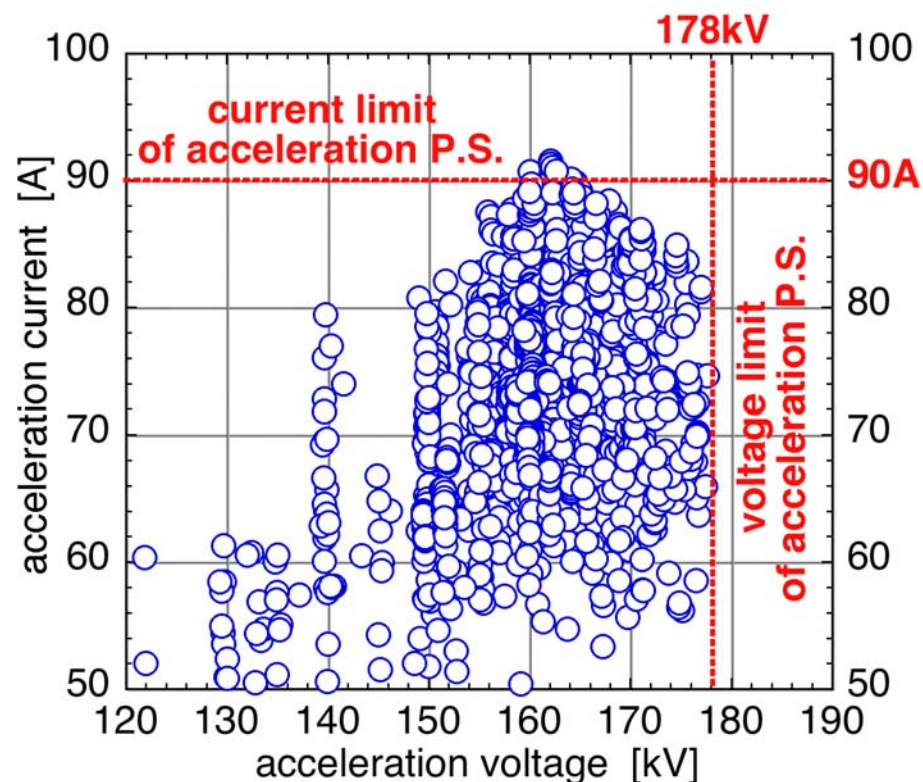


Similar optical lenses



- 短辺と長辺で収束条件が異なる。(ビーム収束条件の二重化)
- ステアリング電極孔を円型からレーストラック型に変更することにより、ビーム収束条件の二重化を緩和した。

負イオンNBIの到達性能



- 多スロット接地電極を採用した負イオンNBI(BL1)は、ほぼ電源容量の限界まで使用している。
- BL1は建設当初の設計仕様(180 keV – 5 MW)を超え、188 keV – 約7 MW (1.5秒)を達成した。
- 3基の負イオンNBIの合計入射ビームパワーとして、約16 MWを達成した。

大電流H⁻ビームを得るための重要事項

ビーム引出近傍における
プラズマの空間均一性の実現

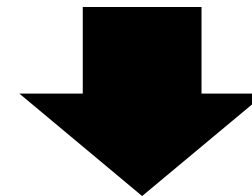
H⁻生成・引出の高効率化

電極の熱負荷低減

加速器のビーム光学系の改善

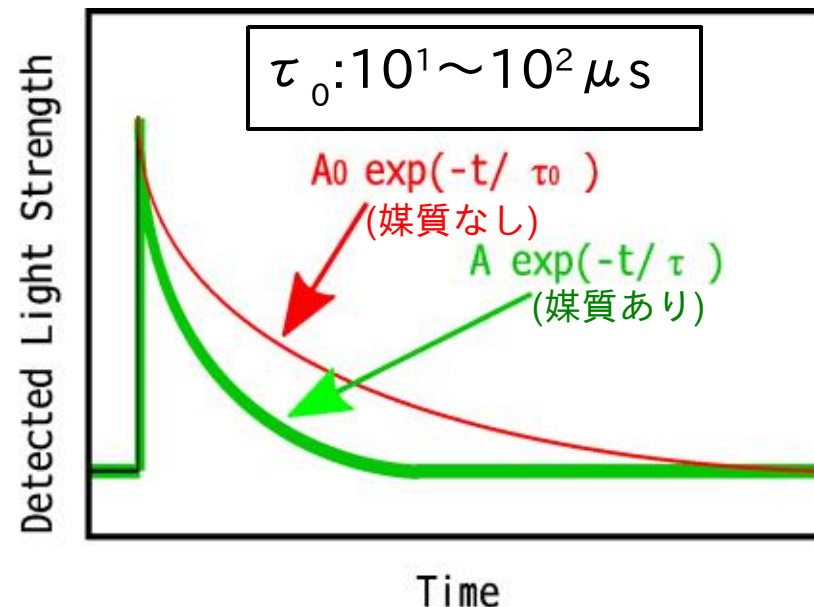
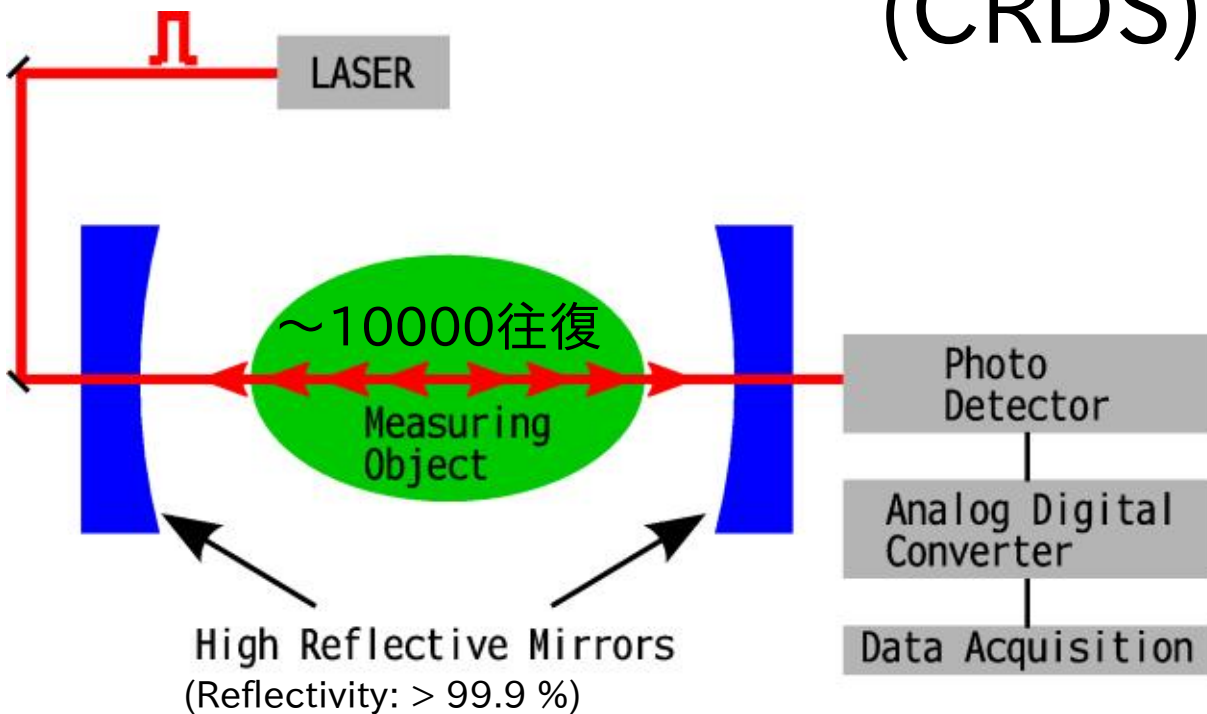
•イオン源プラズマ内のH⁻の計測が必要がある。

•ビーム引出時にも計測する必要がある。



Cavity RingDown Spectroscopy

Cavity RingDown Spectroscopy (CRDS)



$$n \propto 1/\tau - 1/\tau_0$$

<特徴>

- 光計測 ⇒ **ビーム引出時**も計測可能。
- 吸光度 $\log_{10}(I/I_0) \sim 10^{-8}/\text{Path}$ の高感度測定(従来の**吸収分光法**の $10^3 \sim 10^4$ 倍)。
- **密度の絶対値計測**。
- ショット間のレーザー発振強度変動の影響を受けない。
- 線平均密度測定。
- 時間分解能 $\sim 10 \text{ ms}$ (ただし、パルスレーザーの発振周波数にもよる)。
- 共振ミラーの高反射率の維持が必要。

Cavity RingDown Spectroscopy (CRDS)

● 媒質がない場合の検出光強度 (Ring-down信号)

$$I(t) = I_0 \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\tau_0} + X \right) t \right\}$$

$$\begin{cases} R^{2N} = \frac{1}{e} \\ \tau_0 = \frac{d}{c \ln R} \sim \frac{d}{c(1-R)} \end{cases}$$

● 媒質がある場合のRing-down信号

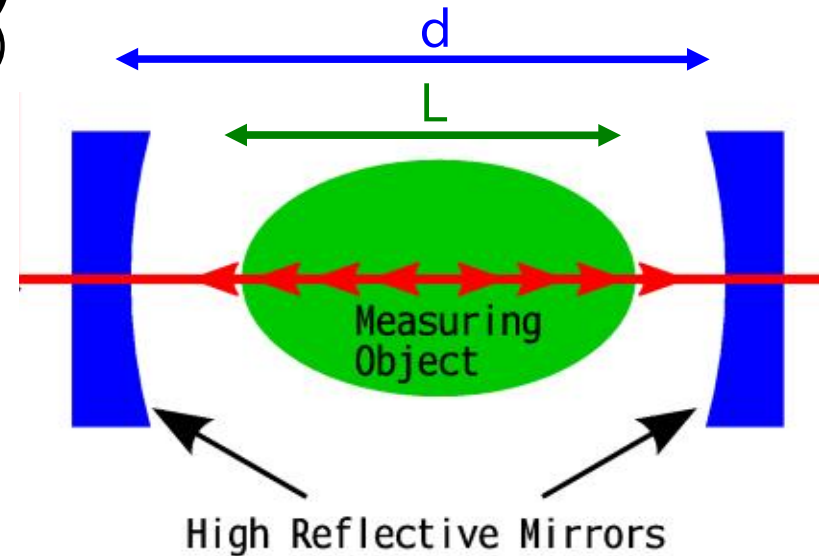
$$I(t) = I_0 \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\tau} \right) t \right\}$$

$$\frac{1}{\tau} \equiv \frac{1}{\tau_0} + X + \sigma n c \cdot \frac{L}{d}$$

● 媒質の密度

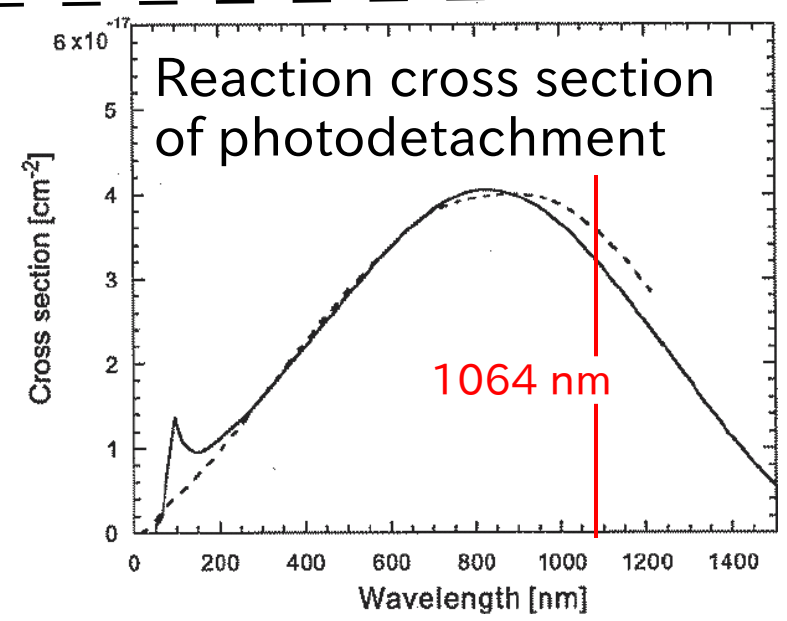
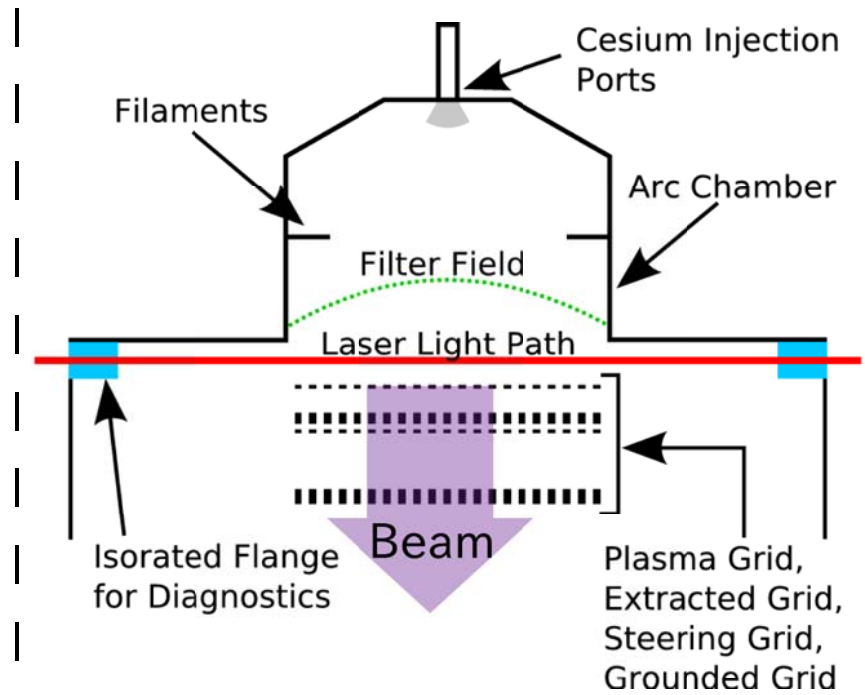
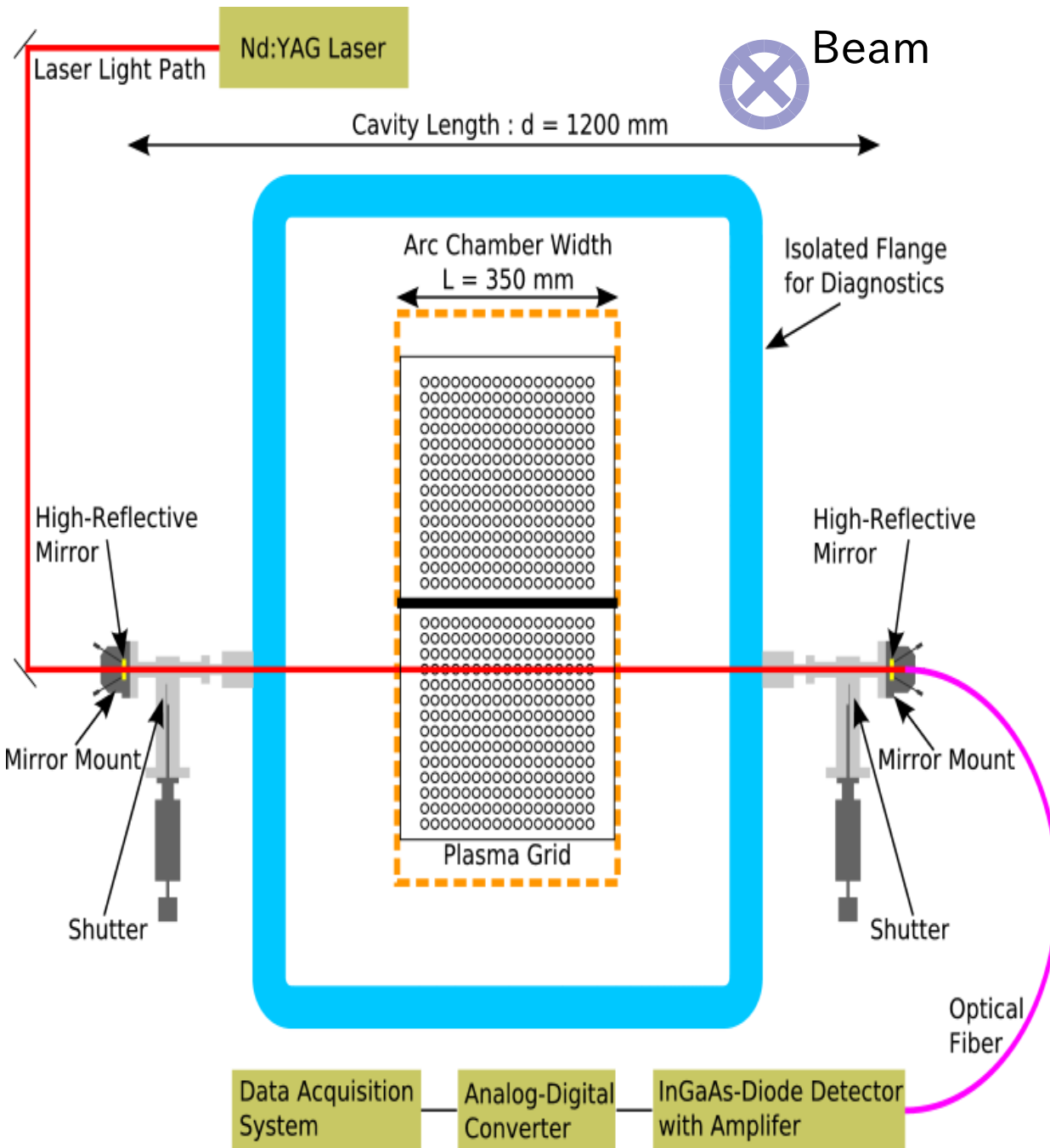
$$n = \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0'} \right) \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{1}{\sigma}$$

where $\frac{1}{\tau_0'} \equiv \frac{1}{\tau_0} + X$.

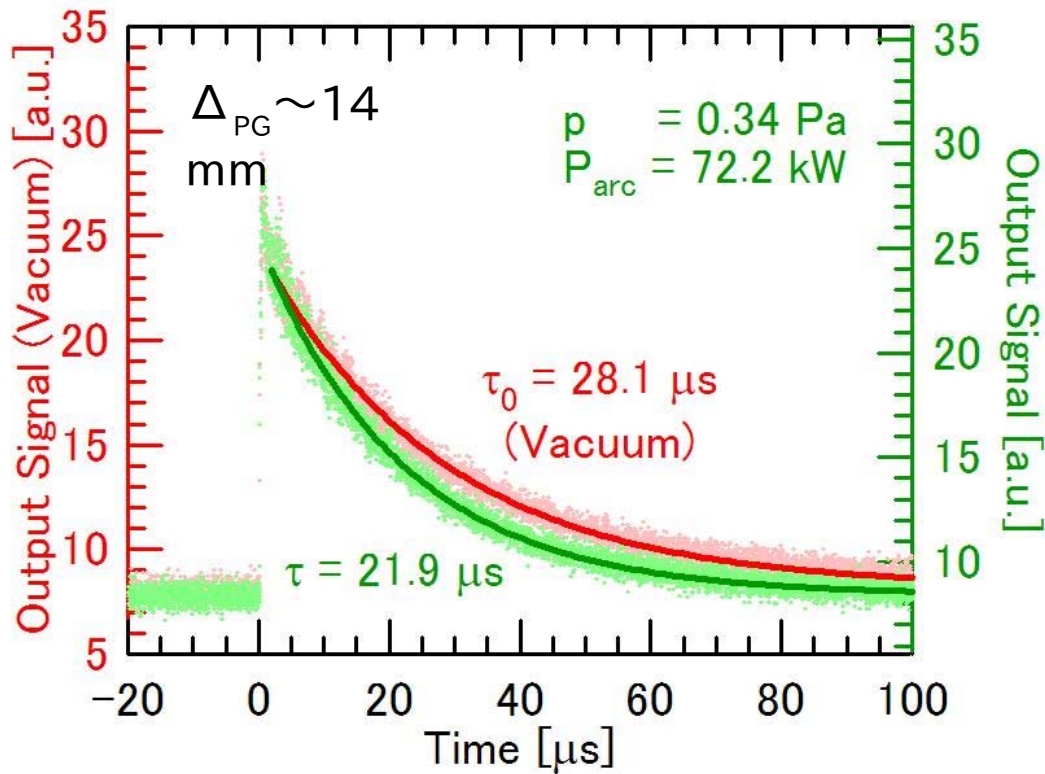


- $I(t)$ 光強度
- I_0 初期の光強度
- τ_0 媒質がない場合のRing-down時間
- τ 媒質がある場合のRing-down時間
- X 不確定要素
- R ミラーの反射率
- d 共振長
- L 媒質を通る光軸距離
- σ 反応断面積
- c 光速

CRDSシステム(概略図)



計測例



- 同程度の条件におけるプローブ計測およびビーム電流計測の結果。

$$T_e \sim 0.2 \text{ eV}$$

$$n_e \sim 3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$$

$$I(\text{H}^-) \sim 1 \text{ A@47.2kV}$$

- Child-Langumuir則とBohm条件より

$$I(\text{H}^-) = P_{\text{erv}} V^{1.5} = e n(\text{H}^-) c_s S$$

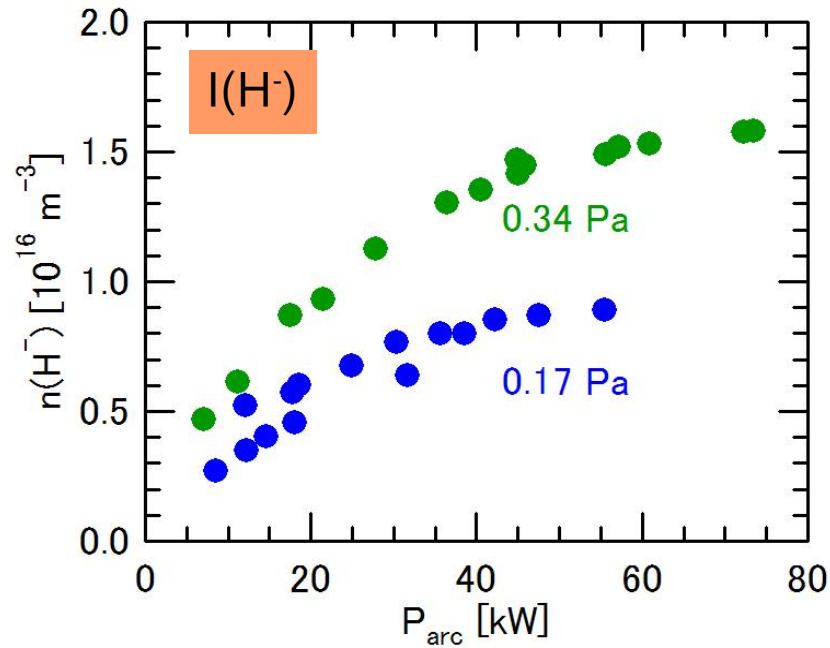
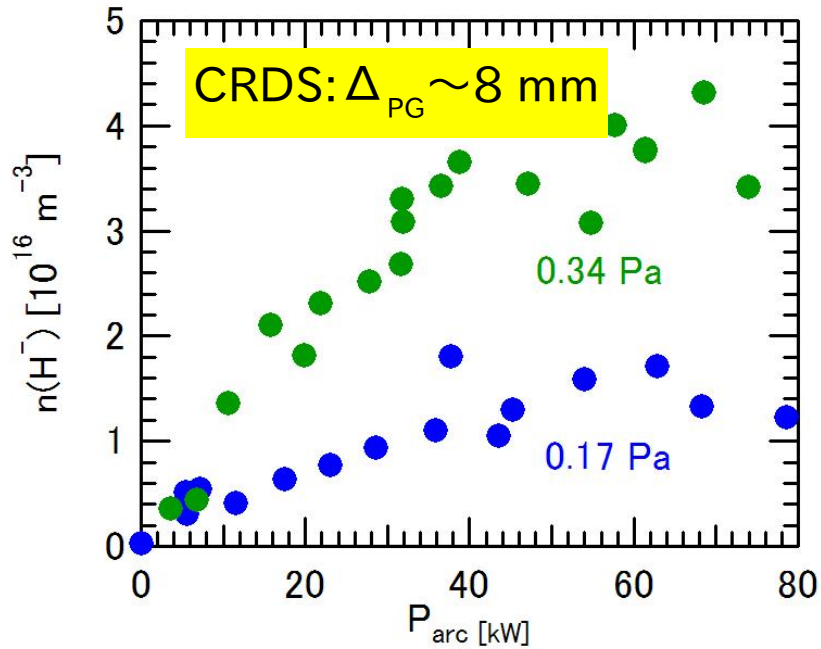
$$\begin{cases} V = V_{\text{Ext}} + V_{\text{Acc}} \\ P_{\text{erv}} = I(\text{H}^-) / V^{1.5} \\ c_s \equiv \sqrt{T_e / m_p} \\ S = \pi r^2 \times k \end{cases} \begin{array}{l} [r : \text{Aperture radius}] \\ [k : \text{Number of Aperture}] \end{array}$$

$$\begin{aligned} n(\text{H}^-) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{1}{\sigma} \\ &= \mathbf{3.3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}} \end{aligned}$$

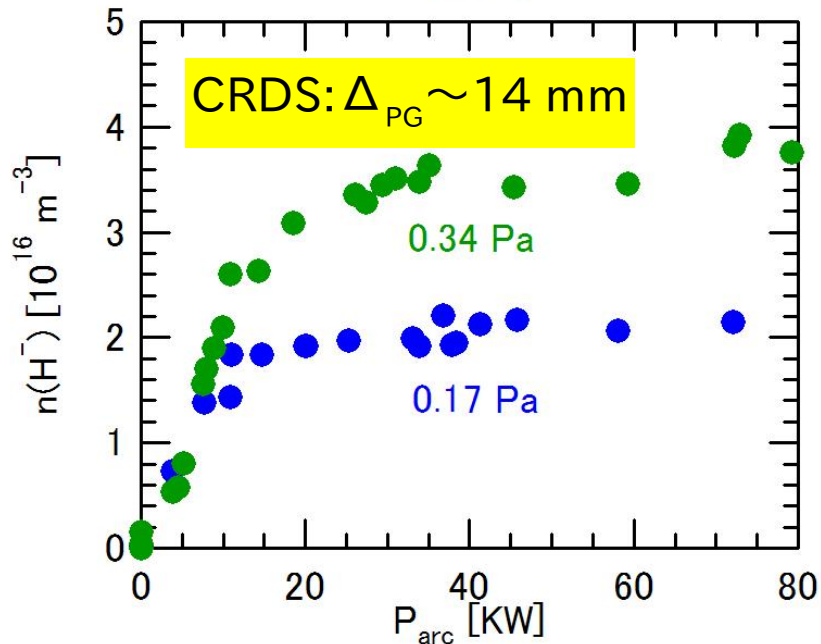
$$\begin{aligned} n(\text{H}^-) &= \frac{1}{e S} \frac{P_{\text{erv}}}{c_s} V^{1.5} \\ &= \mathbf{1.6 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}} \end{aligned}$$

- CRDSによる $n(\text{H}^-)$ と $I(\text{H}^-)$ による $n(\text{H}^-)$ のオーダーが一致した。
- PG近傍の $n(\text{H}^-)$ は n_e の10%程度であった。

$n(H^-)$ の P_{arc} 依存性と PG近傍の H^- のビームへの寄与



(注)
CRDS計測とビーム
電流計測は別に行っ
た。



- CRDSによるPGからの距離 $\Delta_{PG} \sim 8 \text{ mm}$ における $n(H^-)$ と $I(H^-)$ から評価した $n(H^-)$ の P_{arc} 依存性は、同様の傾向を示した。
- 一方で、 $\Delta_{PG} \sim 14 \text{ mm}$ における $n(H^-)$ と $I(H^-)$ から評価した $n(H^-)$ の P_{arc} 依存性は、低 P_{arc} で異なる傾向を示した。



加速ビームに対しての寄与は、よりPG近傍の H^- の方が大きい。

まとめ

- フィラメント回路とアーク回路をグループに分割し、個別にこれらを調整することにより、空間的に均一なイオン源プラズマを生成した。この結果、ビームの一様性が改善した。
- 接地電極孔の拡大およびスロット化することにより、接地電極への熱負荷を低減した。
- 引出電極下流にステアリング電極を設置し、電子偏向磁石による負イオンビームの偏向を抑制し、ビーム光学系を改善した。
- レーストラック型の孔を持ったステアリング電極を採用することにより、多スロット接地電極化によるビーム収束条件の二重化を緩和した。



負イオンNBI建設当初の仕様(180 keV – 5 MW @1基)を超える、188 keV – 約7 MW @BL1を実現した。また、3基の合計入射パワーも同仕様(15 MW)を超える約16 MWを実現した。

- H⁻生成・引出の効率化を目指して、CRDSによるH⁻密度の絶対値計測システムを整備した。