

正負水素イオン源と 核融合プラズマへの応用 (その2)

竹入康彦

核融合科学研究所

- NBIにおける負イオン源の必要性
- 種々の負イオン源
- 体積生成方式負イオン源
- Cs添加プラズマ方式負イオン源
- 大型負イオン源の例と特徴
- おわりに

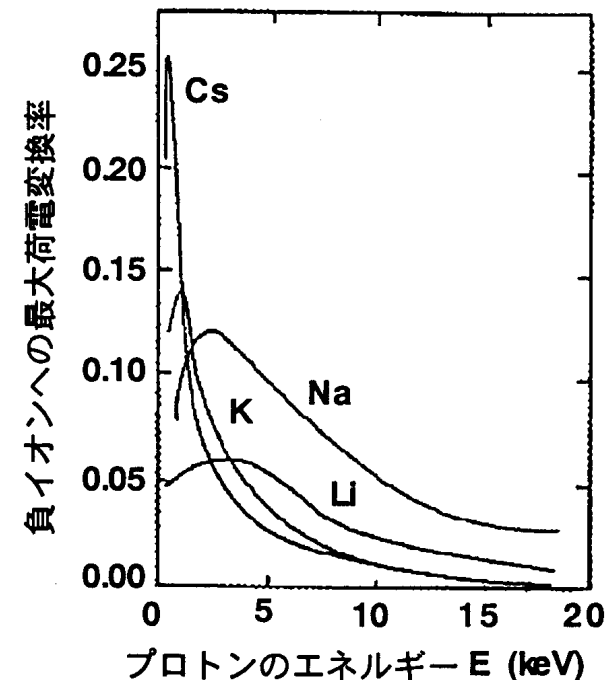
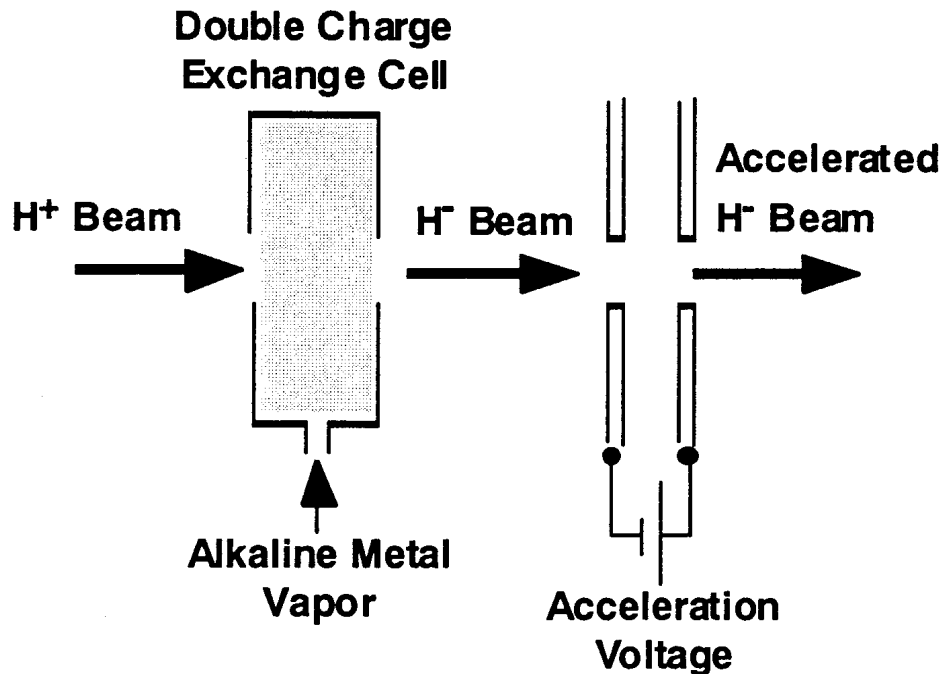
NBIにおける負イオン源の必要性と 負イオンNBIシステム

- 核融合実験装置の大型化に伴い、必要とするNBIの入射エネルギーも核子当たり100keV以上となってきた。
- 高エネルギー領域では、正イオンビームの中性化効率は20%以下に激減するのに対して、負イオンビームは1MeV以上でも60%を維持するので、負イオン源は高エネルギーNBIに対して必須となる。
- イオン源は中性化効率に依存するが、入射電力の2倍程度のイオンビーム出力が必要である。現状の得られている電流密度は、正イオンビームの場合250mA/cm²程度なのに対して、負イオンビームの場合30mA/cm²程度であることから、要求されるビームエネルギーと中性化効率の関係を考慮して、正イオン源か負イオン源かの選択がなされる。
- その境界は核子あたりのエネルギーが100keVあたりであるが、システム効率を考えると、境界付近のエネルギーでの設計は現実的ではなく、正イオン源NBIシステムでは80keV/nucleon以下で、負イオン源NBIシステムでは120keV/nucleon以上で設計する必要がある。

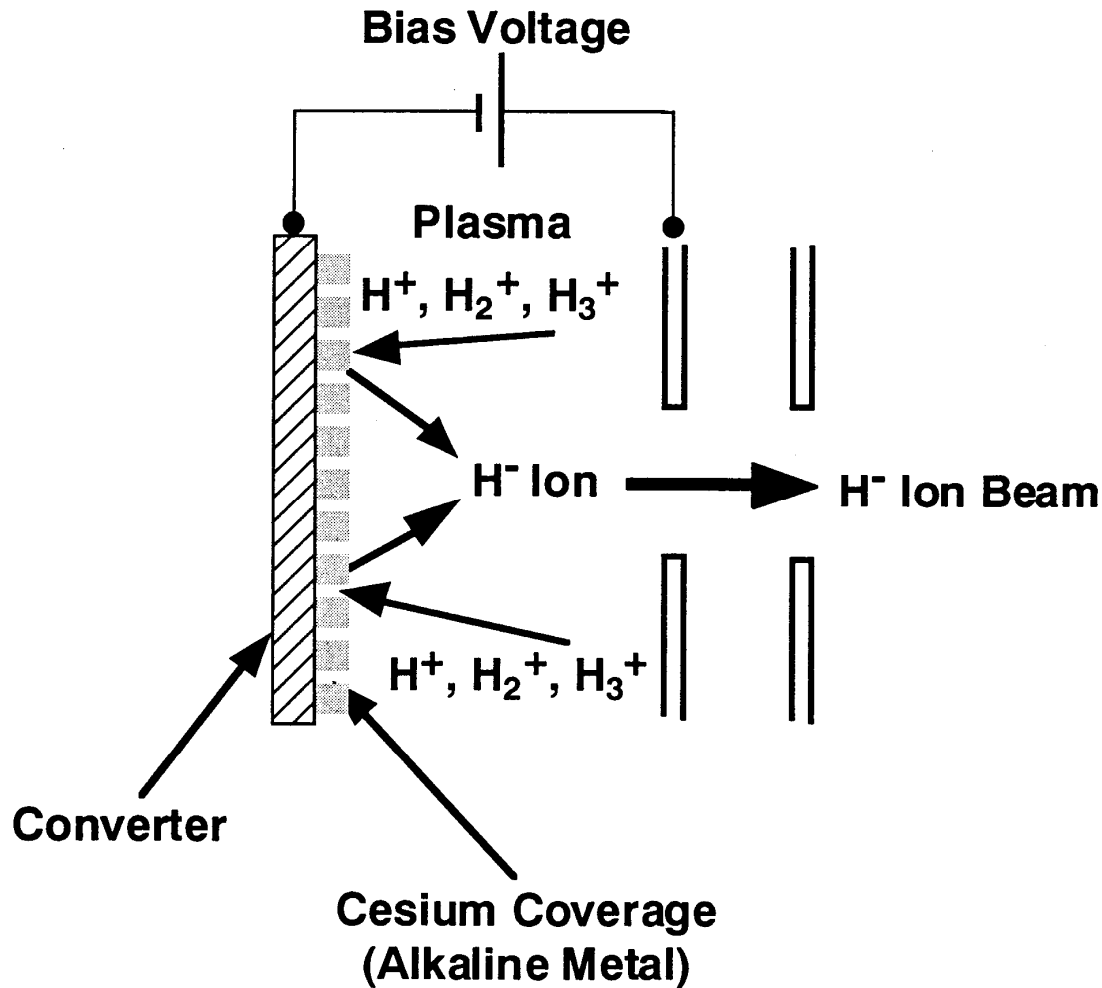
種々の負イオン源方式

二重荷電交換方式

- ・ アルカリ金属蒸気等の電子を与えるドナ物質中に正イオンビームを通過させて、二重荷電交換反応により負イオンビームを得る。
- ・ 高い荷電交換効率を与える正イオンビームのエネルギーが5keV以下と低いため、発散角の小さい大電流ビームを得るのが難しい。
- ・ 最近、負ヘリウムイオン源としての開発が行われている。



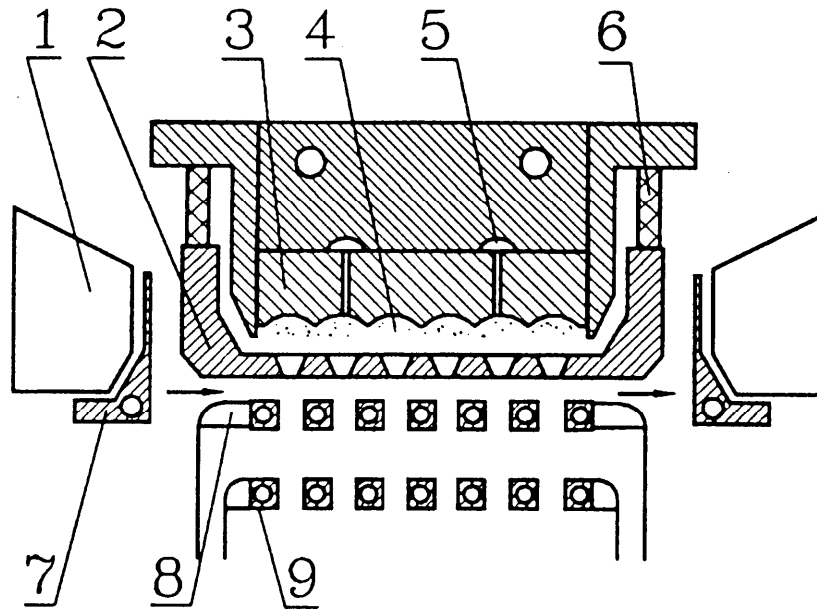
種々の負イオン源方式 表面生成方式



- ・ プラズマ中に設置した、セシウム等を吹き付けて仕事関数を低くした固体表面(コンバータ)に正イオンを入射させ、表面で負イオンに変換されて反射してきた粒子を負イオンビームとして引き出す。
- ・ コンバータに負のバイアス電圧(100~200V)を印加。
- ・ コンバータ表面のCs層の制御が難しいと共に、表面が損傷するため、長パルス化及び寿命に問題。
- ・ 負イオンのエネルギー分布が広く、良質な負イオンビームが得にくい。

表面生成方式—表面プラズマ型(マグネトロン型)の例

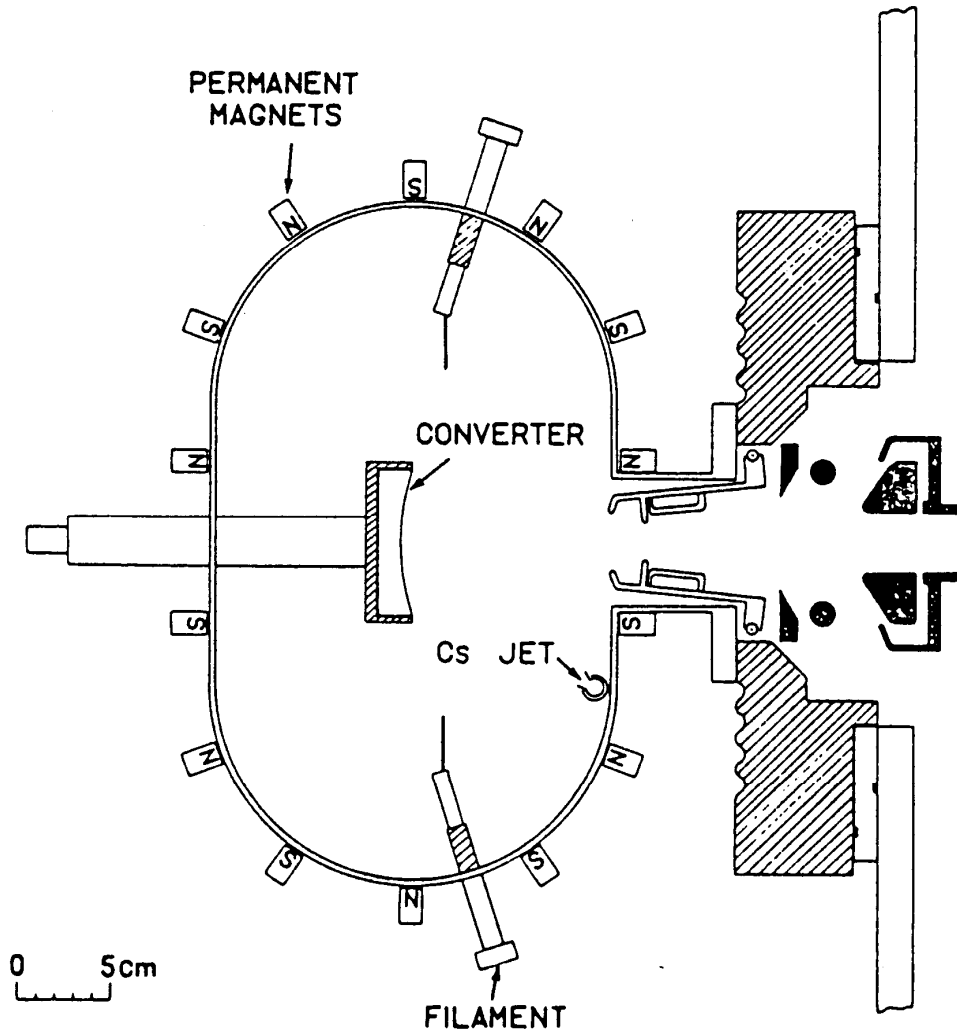
- ・ E×Bグロー放電カソード表面をコンバータとして利用。
- ・ コンバータとプラズマ電極の間にシート状の水素とCsの混合プラズマを生成し、コンバータから反射して放出された負イオンを直接引き出す。
- ・ 動作ガス圧力が高いのが問題。20～30mTorrで100mA/cm²の負イオンが得られている。



表面プラズマ型表面生成方式負イオン源。1. 磁極、2. アノード、3. カソード、4. プラズマ、5. H₂ガスおよびCs供給用空洞、6. 絶縁物、7. 電子捕集板、8. 引出用電極、9. 加速用電極。

種々の負イオン源方式

表面生成方式—マルチカスプ型の例

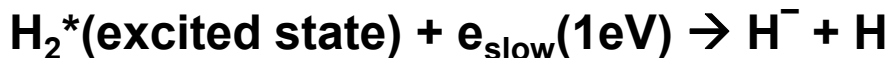
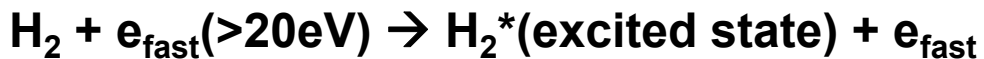


- ・ 高効率なプラズマ生成が可能なマルチカスプ型アーク放電室内にコンバータを挿入し、Cs蒸気をコンバータ表面に吹き付ける方法。
- ・ 動作ガス圧力の低減が可能で、1mTorrの時、1Aの負イオン電流が3x25cm²のスリットから得られている。

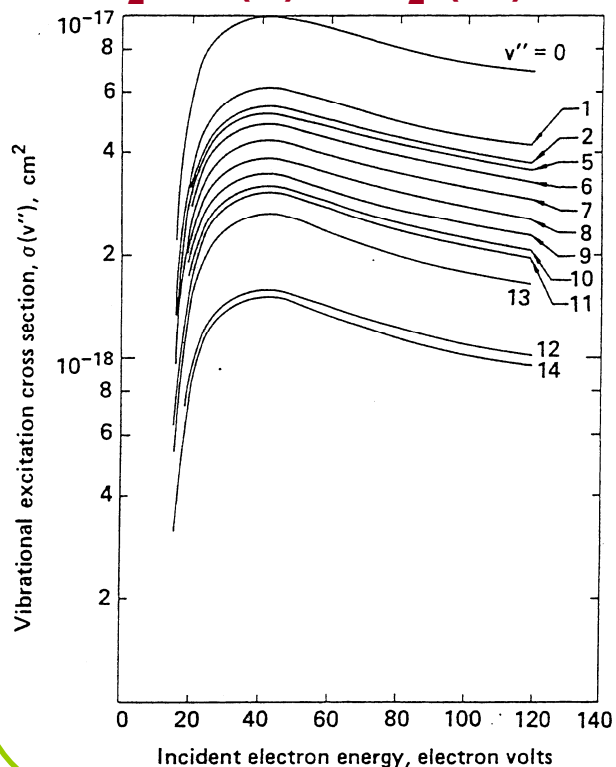
プラズマ体積中の負イオン生成過程

体積生成 Volume Production

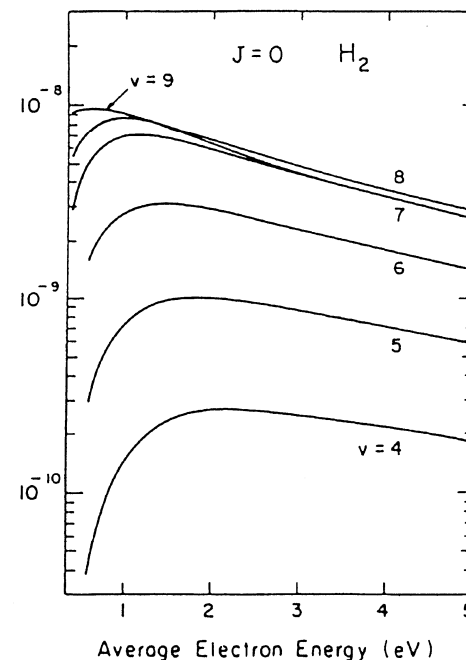
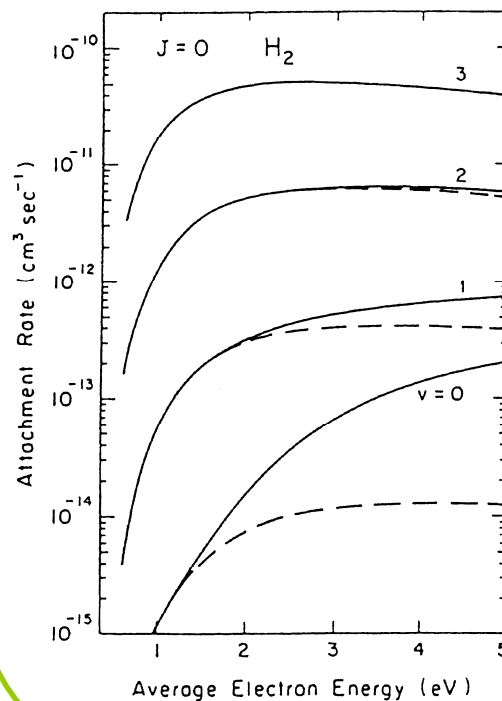
振動励起分子の解離性電子付着による負イオン生成



振動励起分子生成断面積



解離性電子付着反応率

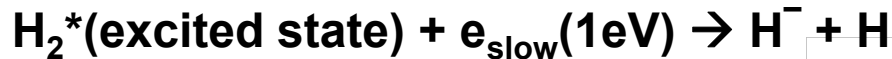
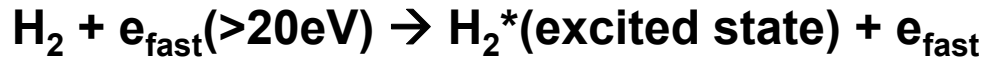


水素負イオンの生成・消滅過程と放電室構成

磁気フィルターを用いた2放電室(タンデム)方式

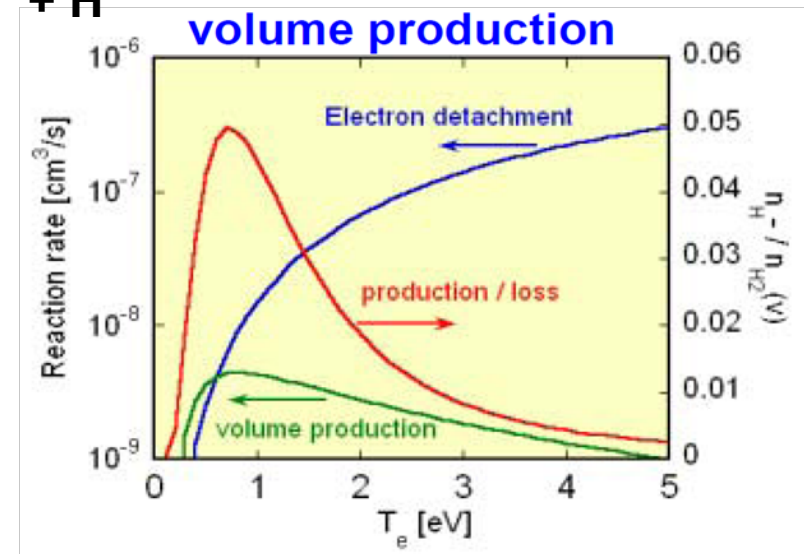
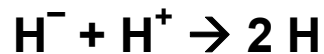
体積生成による負イオン生成過程

→ 高速電子(>20eV)と低速電子(~1eV)が必要



負イオンの消滅過程

→ 1eV以上の電子衝突による消滅



磁気フィルターによる電子温度の空間的制御: 2つの放電領域に分離

ドライバー領域 → プラズマを生成する主放電領域

高速電子(数10eV)による高密度プラズマ及び振動励起分子の生成

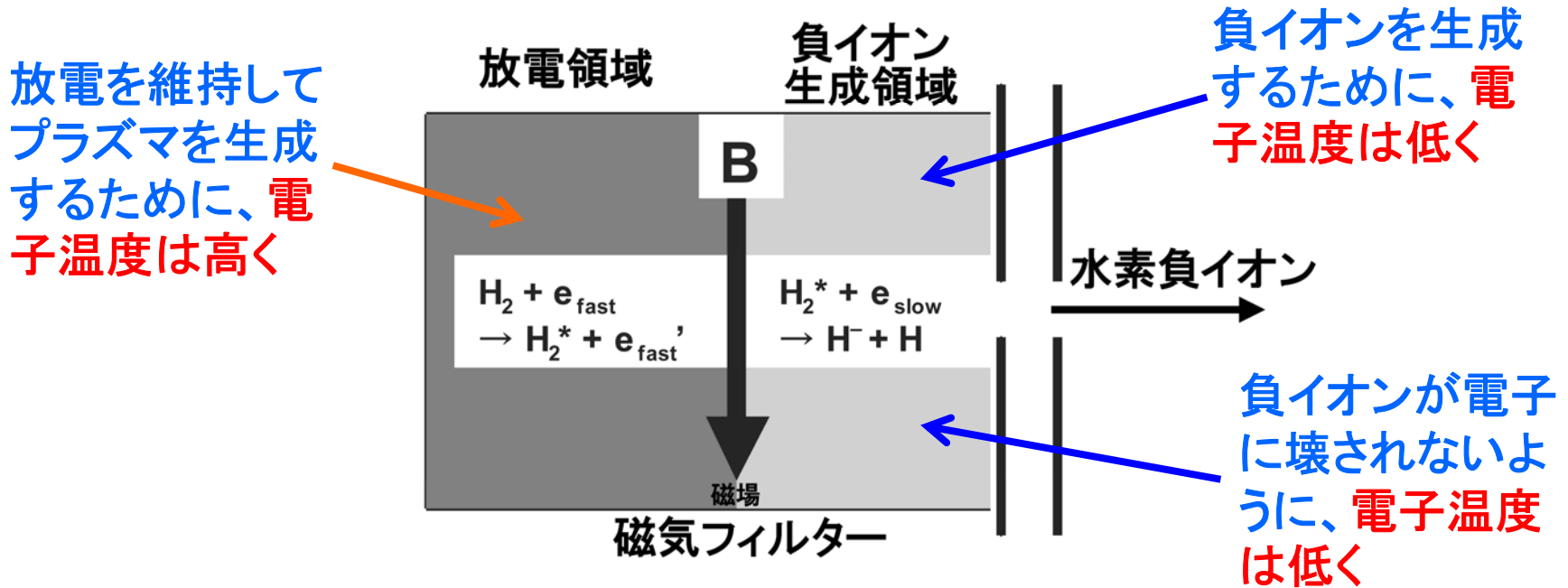
負イオン生成領域 → 負イオンを引出す拡散プラズマの領域

低電子温度(~1eV)プラズマにおける負イオン生成と負イオン消滅の低減

種々の負イオン源方式

体積生成方式—プラズマ中で負イオンを生成

振動励起分子は磁場の影響を受けずに拡散するため、高エネルギー電子との衝突による振動励起水素分子の生成領域(ドライバー領域)と低エネルギー電子の振動励起分子への解離性付着による負イオン生成領域(引出領域)を分離・独立させる。

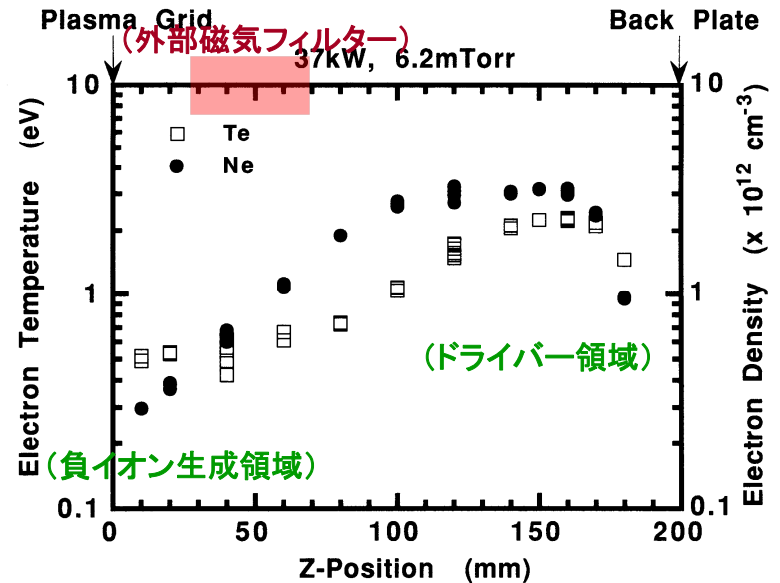
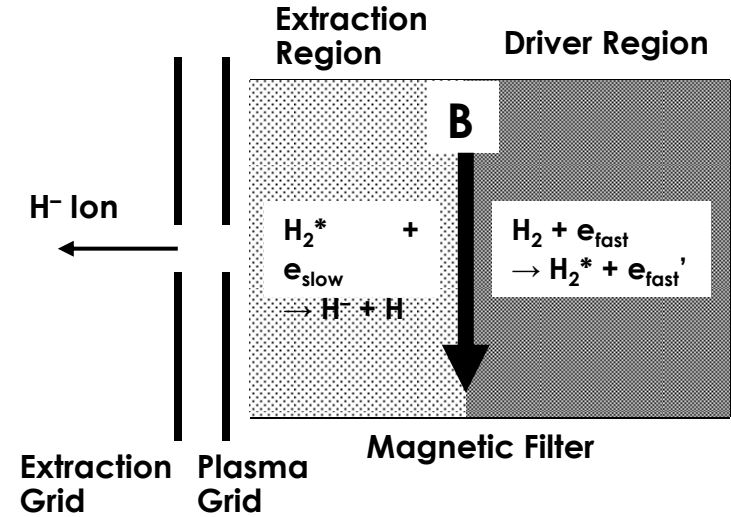
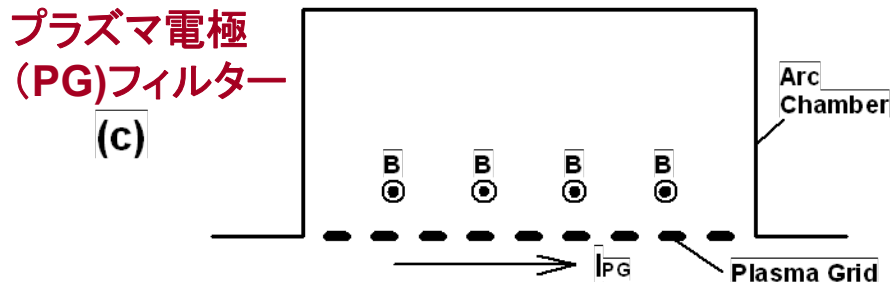
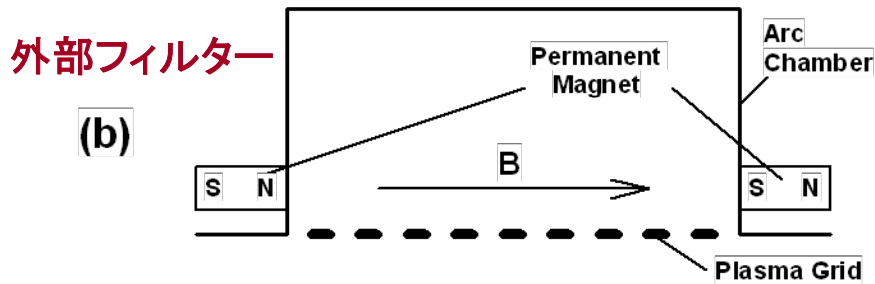
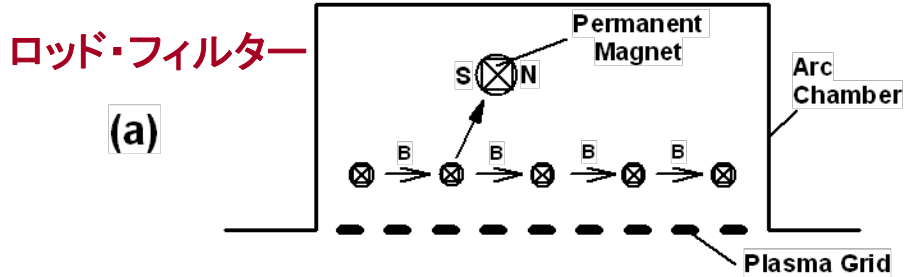


プラズマ中に磁場をかけて(磁気フィルター)、電子温度を空間的に制御することにより、負イオンを生成

磁気フィルターによる電子温度制御

磁気フィルターの方法

- 磁気フィルターにより、電子温度と共に電子密度も空間的に低減する。



Cs添加表面効果による負イオン生成

Cs導入による大幅な負イオン電流の増加

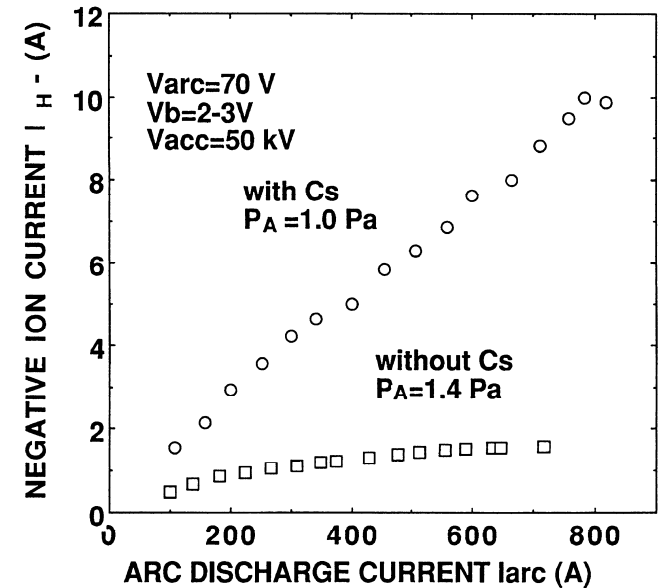
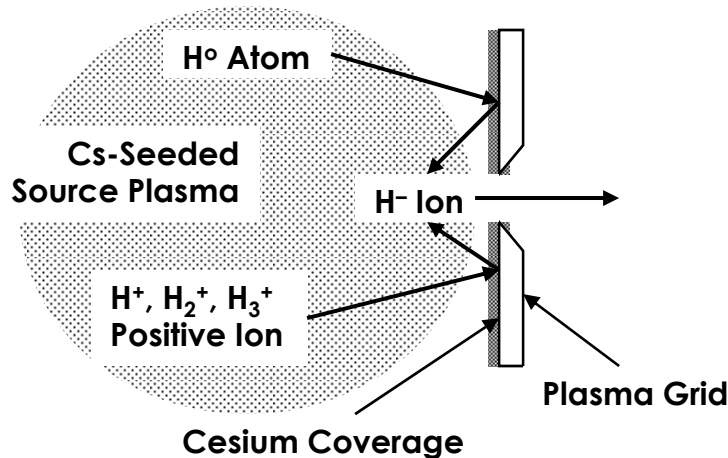
体積生成方式による負イオン生成の問題点

- ・動作ガス圧力が高い(>1Pa) — 加速途中の負イオンの中性化損失
- ・負イオン電流密度が低い(<10mA/cm²) — アーク効率も低い

少量のCsをプラズマ中に導入することによる飛躍的な性能向上

- ・負イオン電流の大幅な増加(3~10倍以上)
- ・引出電子電流の大幅な減少
- ・動作ガス圧力の低下

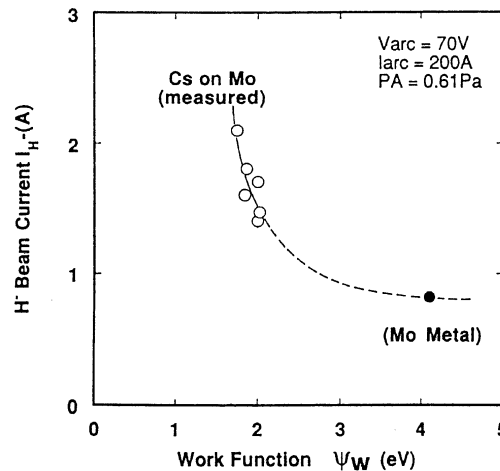
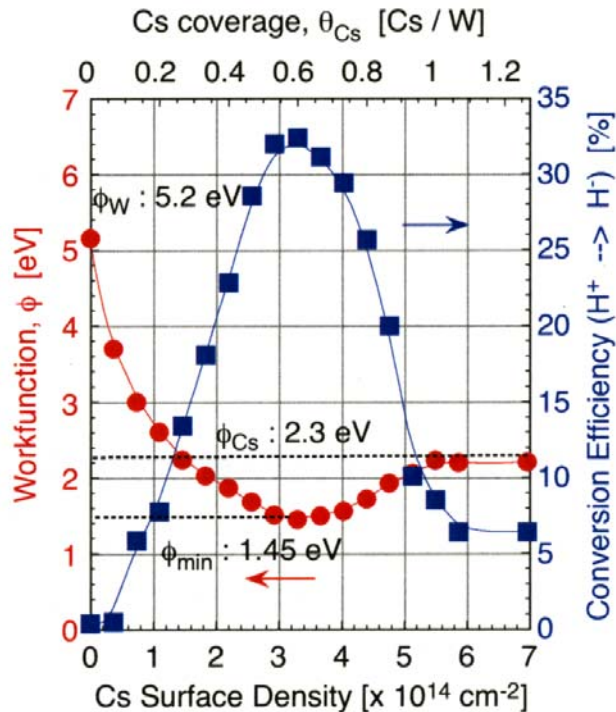
→ Cs被覆電極の表面効果による負イオン生成



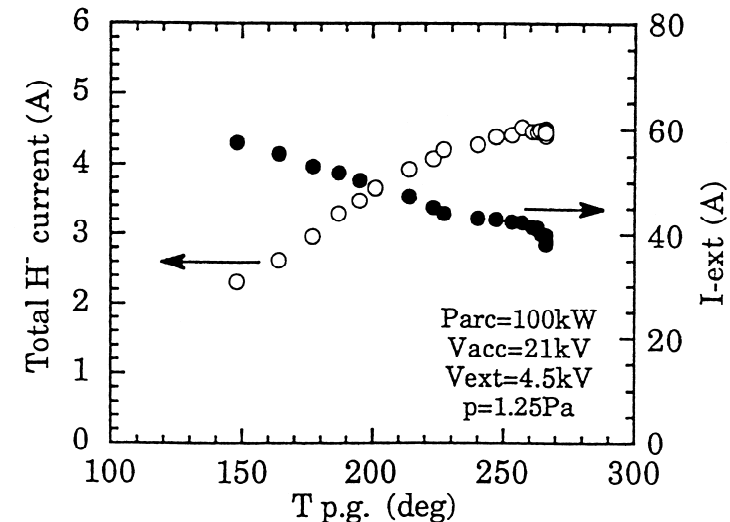
低仕事関数表面上における負イオンの生成

Csに覆われた表面の仕事関数の低下

- 水素原子および水素イオン(プロトン)が、Csに覆われた低仕事関数の電極表面上で水素負イオンに変換する。
- Csの被覆率により表面の仕事関数は変化し、0.6層程度の被覆率の時、仕事関数はバルクのCsより低下して最低となり、負イオン変換効率も最大となる。
- 電極温度が低いとCs被覆は多層となり、仕事関数はバルクのCsの値まで上昇する。



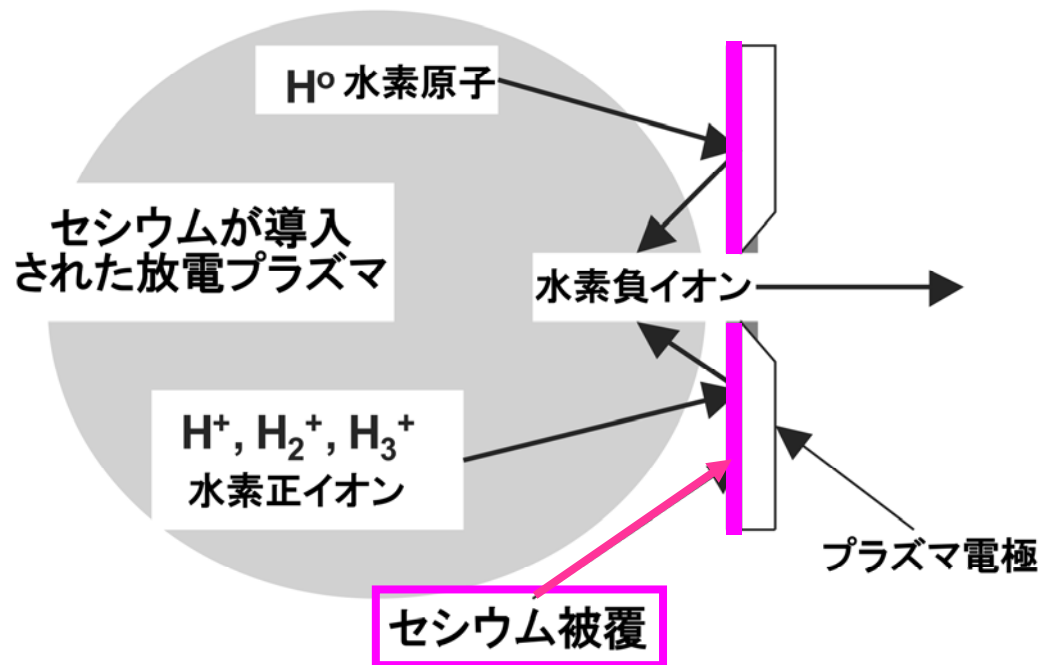
- 負イオン生成効率は電極温度に依存し、200~300°C程度に維持する必要がある。



種々の負イオン源方式

Cs添加プラズマ方式負イオン源 負イオンNBIシステムでの使用を可能とした

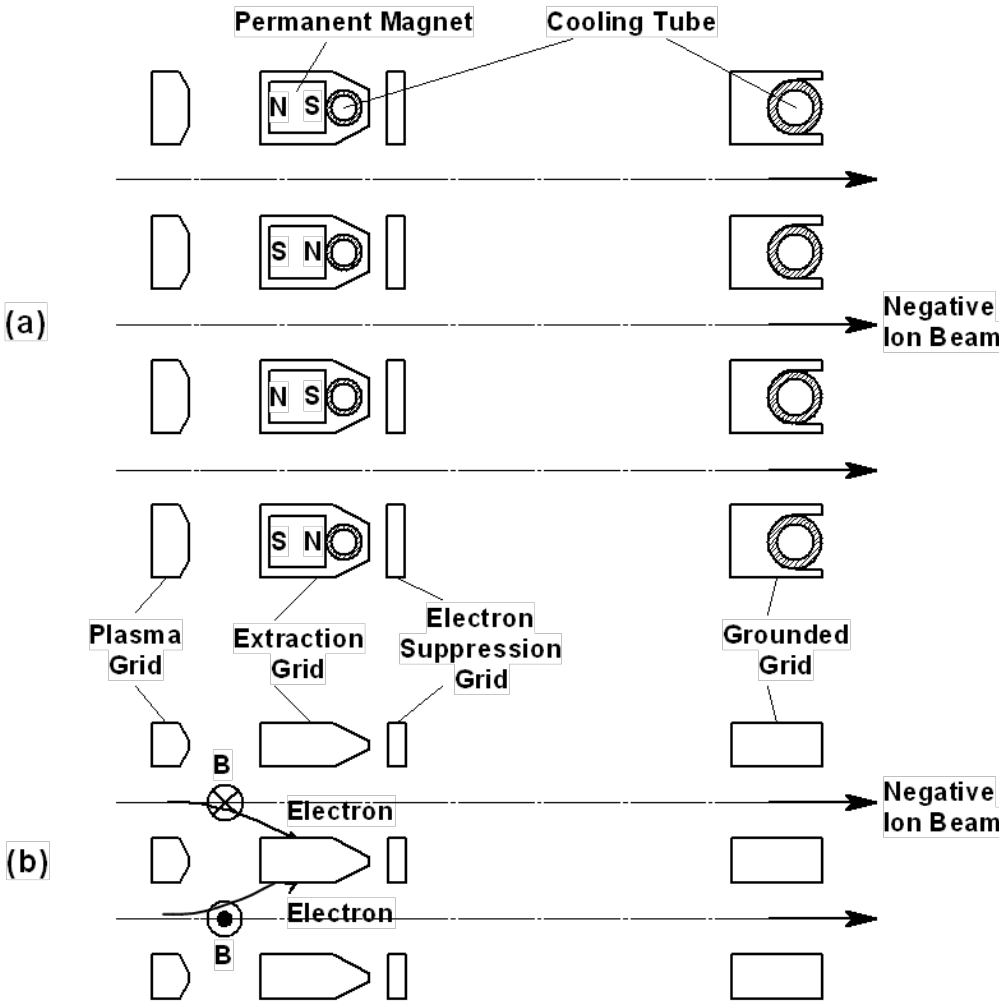
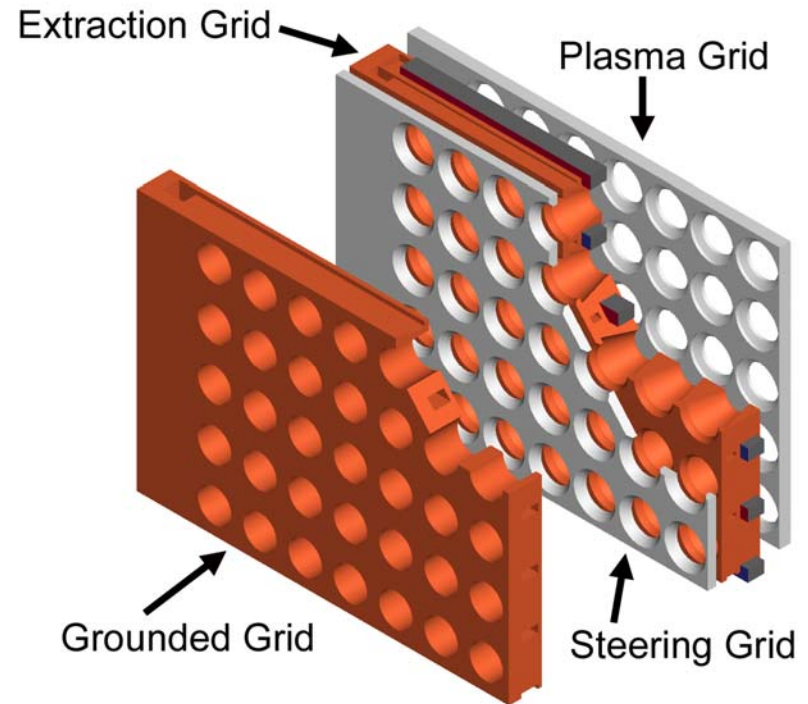
- ・体積生成方式に比べて、負イオン生成効率が数～10倍以上増加。
- ・引出電流が大幅に低下し、動作ガス圧力も低下。
- ・Csで被覆された電極上の表面効果により負イオンが生成。
- ・大型のCs添加プラズマ方式負イオン源で、10A以上の負イオンを生成。



負イオンビーム加速器の構造

多孔・多段電極構成(1段引出・1段加速)

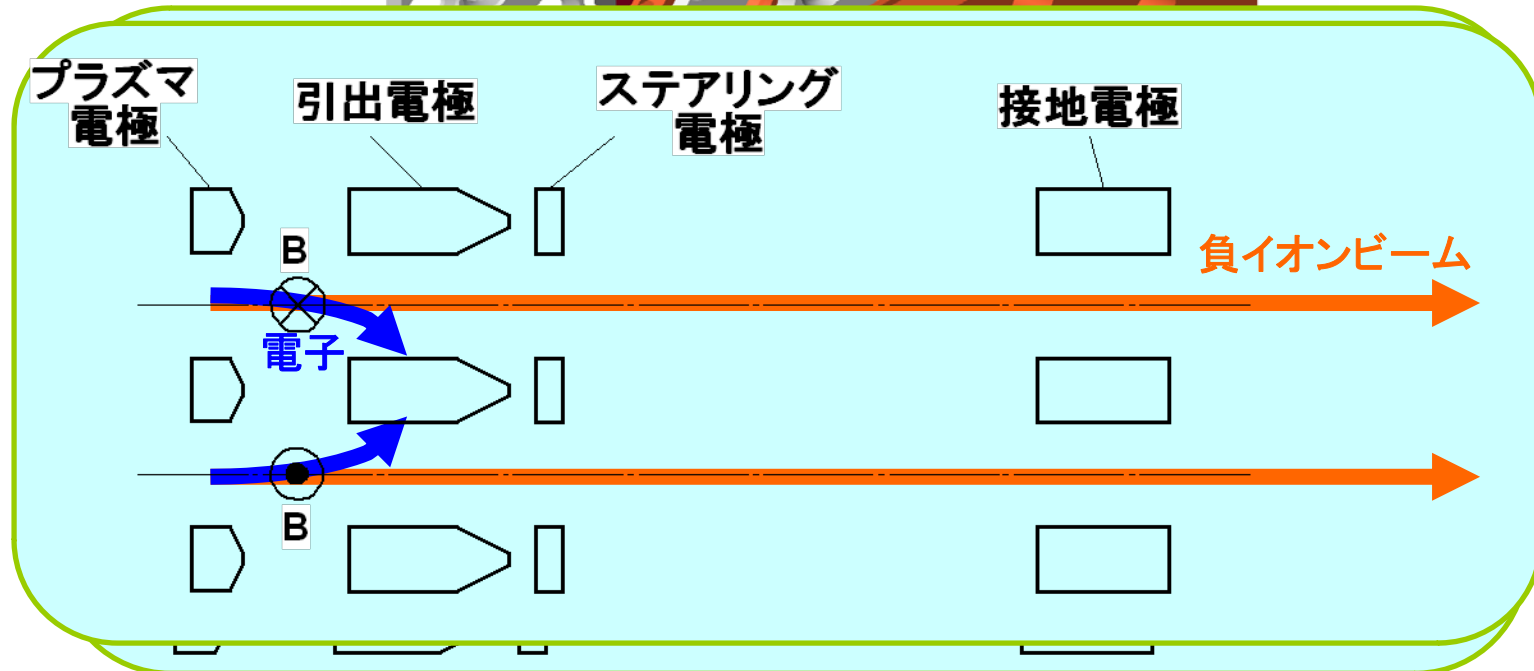
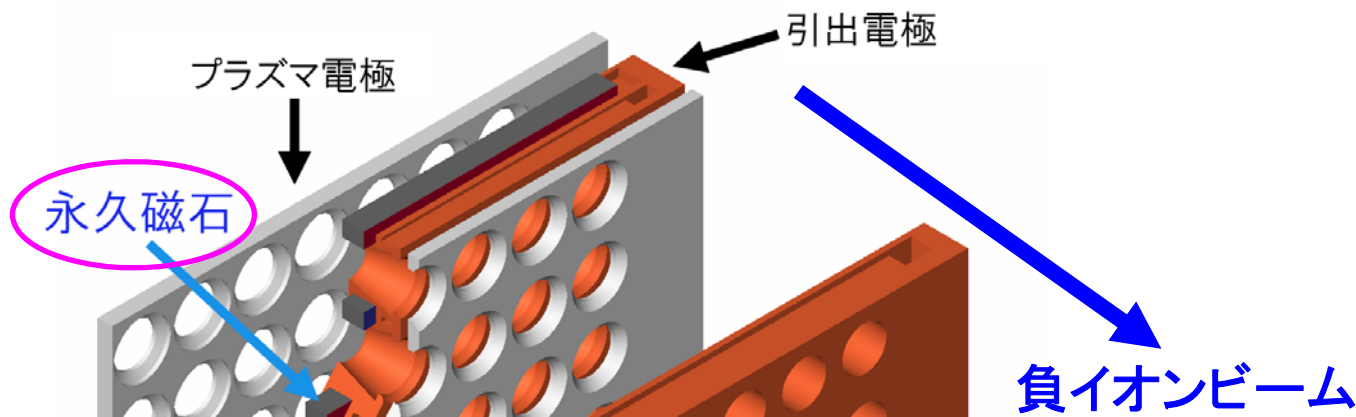
- プラズマ電極、引出電極、ステアリング電極、接地電極により構成される1段加速電極系。
- 引出電極には、引出電子抑制用の永久磁石が埋め込まれている。
- ステアリング電極により、各ビームレットの軌道制御を行っている。



電極に永久磁石を埋め込んで、電子の引出しを抑制

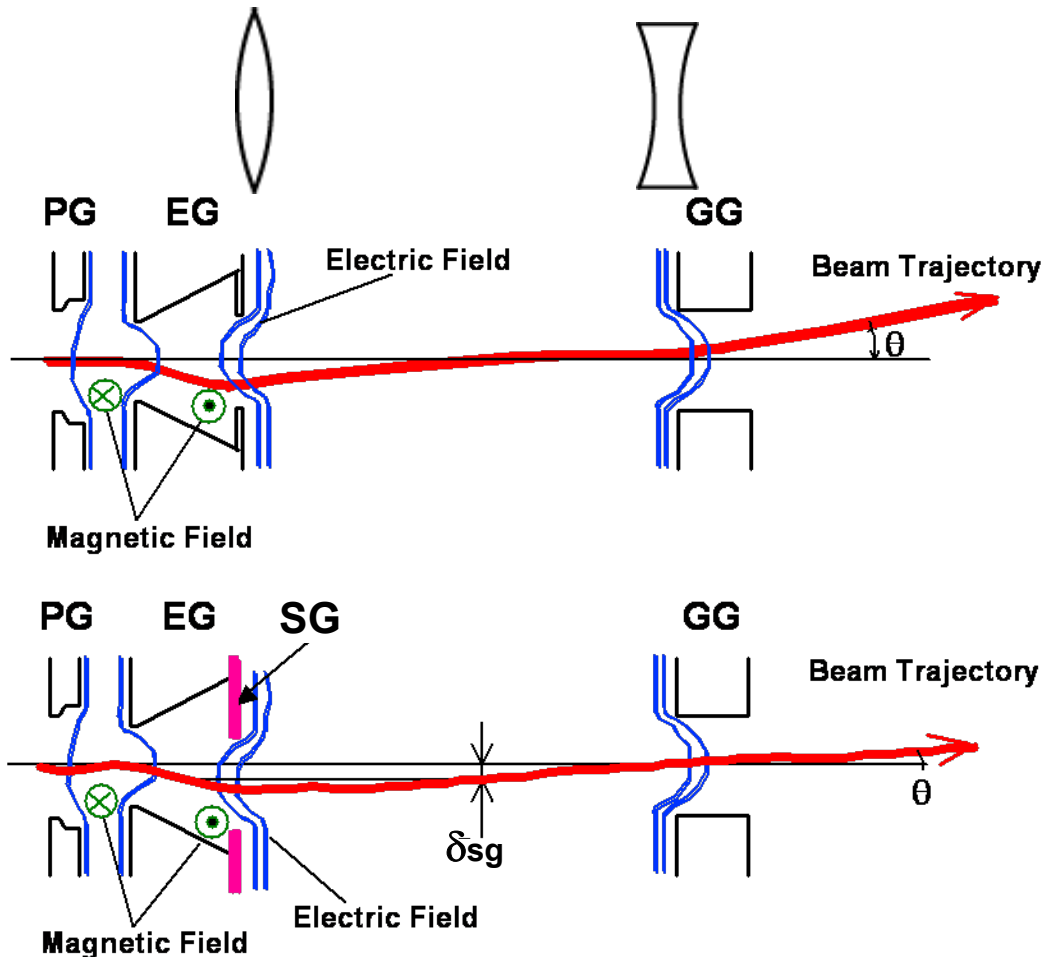
電子は出さずに負イオンを加速する

電子の引出しを抑制するように、電極に永久磁石を埋め込んでいる。



電極に小さな穴(直径1cm程度)をたくさん開けて、各々から出てくる負イオンビームを束にして加速する

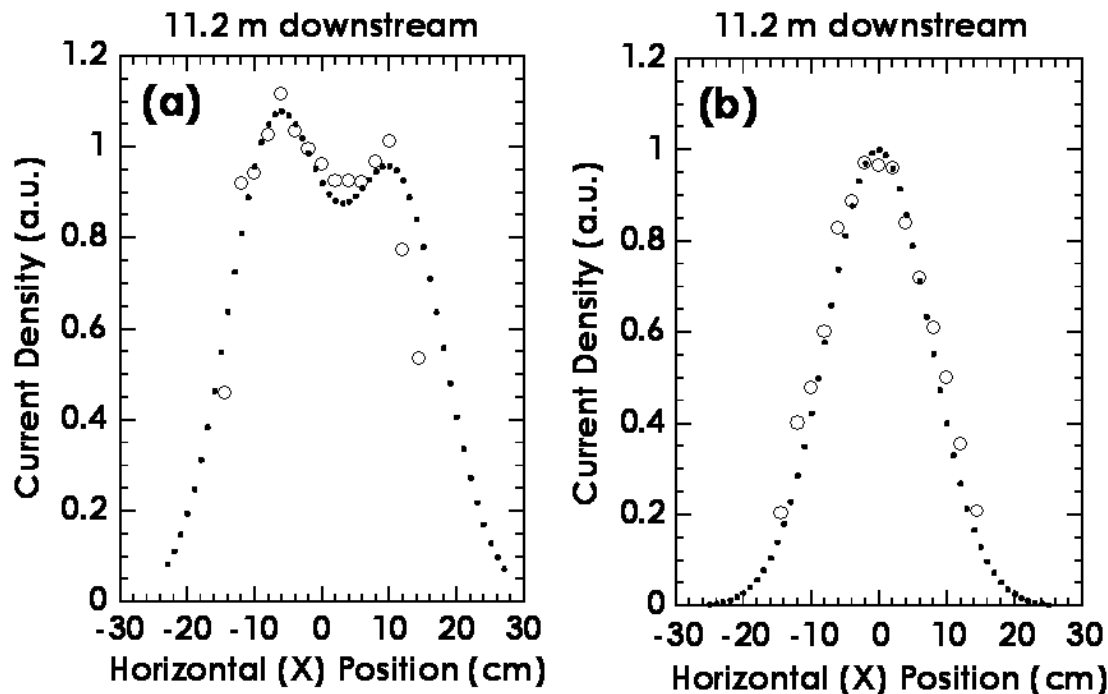
引出電極の電子抑制磁場により偏向された負イオンビームレットの電極孔軸変位による静電レンズ効果を用いた補正



- 引出電極磁場により偏向された負イオンビームレットは、ビーム軸から変位するため、電極孔における静電レンズ効果により偏向する。
- 電極(SG)の孔軸を変位させることにより、負イオンビームレット偏向を静電レンズ効果により補正する。

引出電極磁場による負イオンビームレット偏向の補正

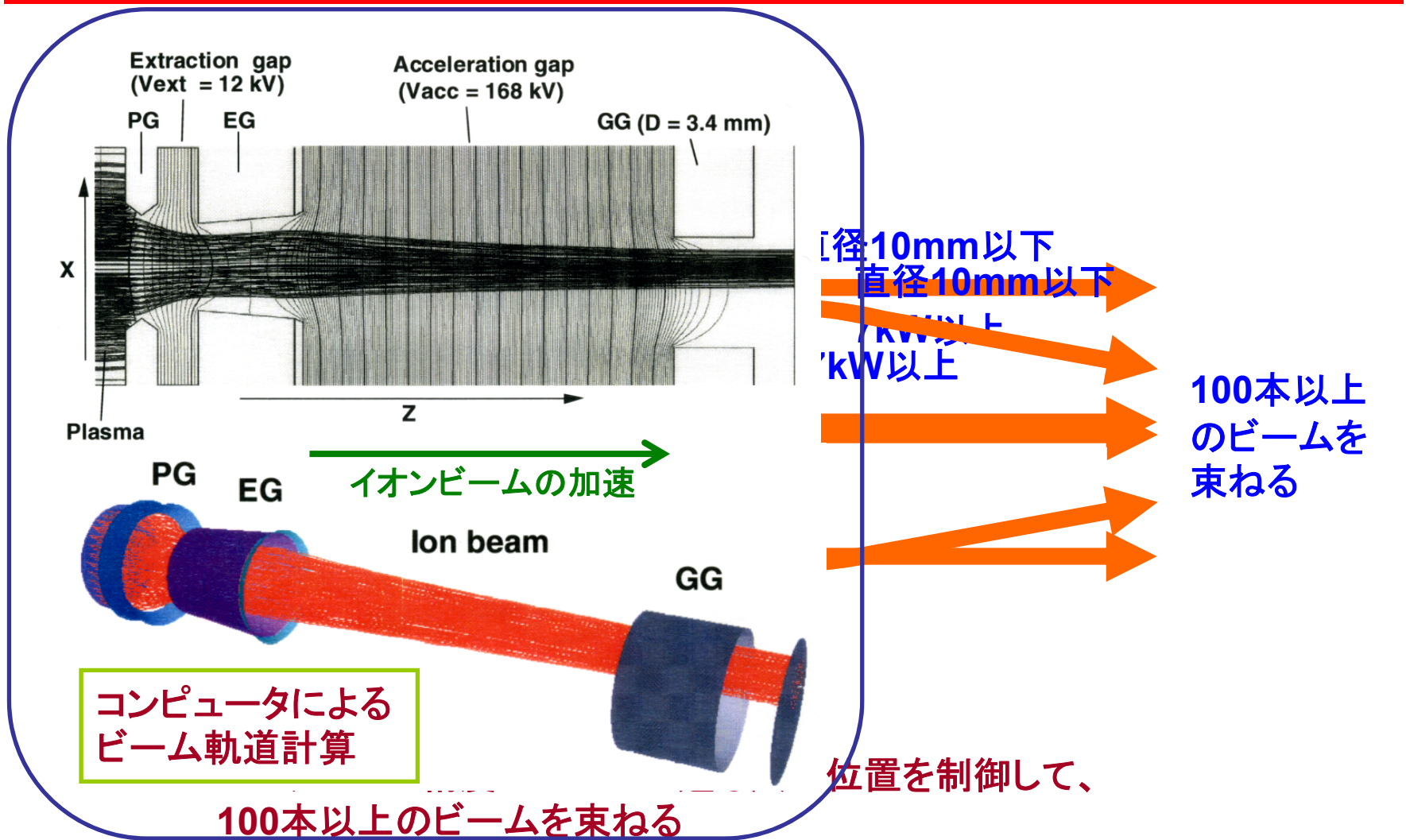
孔軸変位によるビームレット・ステアリングは、線形的に重ねることができるため、多ビームレット収束のための孔軸変位とビームレット偏向補正のための孔軸変位の足し合わせが可能。



大面積多孔電極から引出し・加速された負イオンビームのプロファイル。
(a) 多ビームレットを収束させるために接地電極の孔軸を変位させたとき、および(b) 引出電極磁場によるビームレット偏向を補正するための孔軸変位を(a)の接地電極の孔軸変位に足し合わせたとき。

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



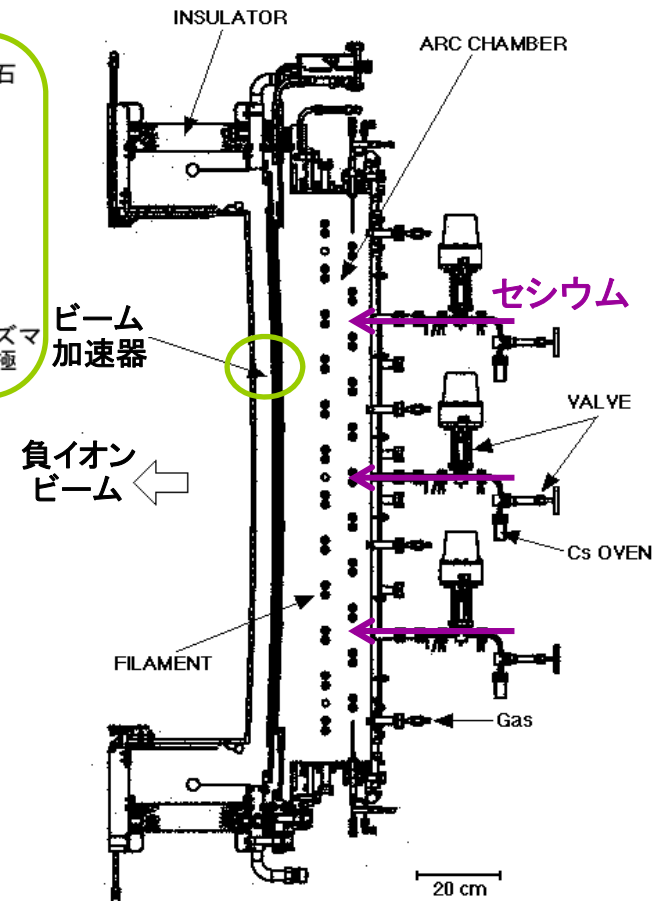
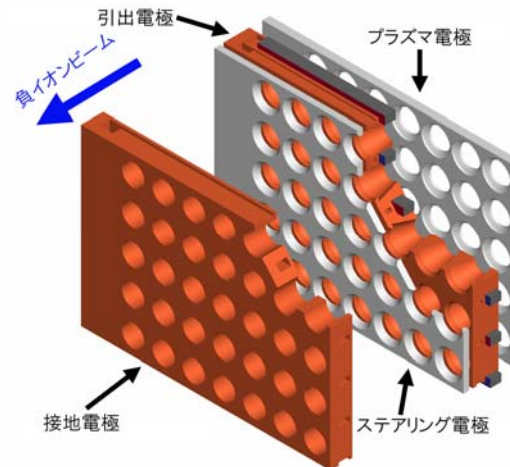
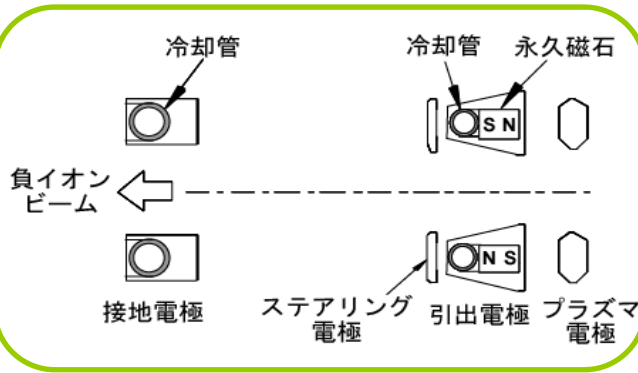
10ミクロンの精度でビームの通る穴の位置を制御する

大型大電流負イオン源 (180kV-30A: 世界最高)

- セシウムの利用による負イオン生成
- 大型プラズマ生成室 35cm(幅)x145cm(長さ)x21cm(深さ)
- 大面積電極による負イオンビームの加速 (電極面積: 25x125 cm²)

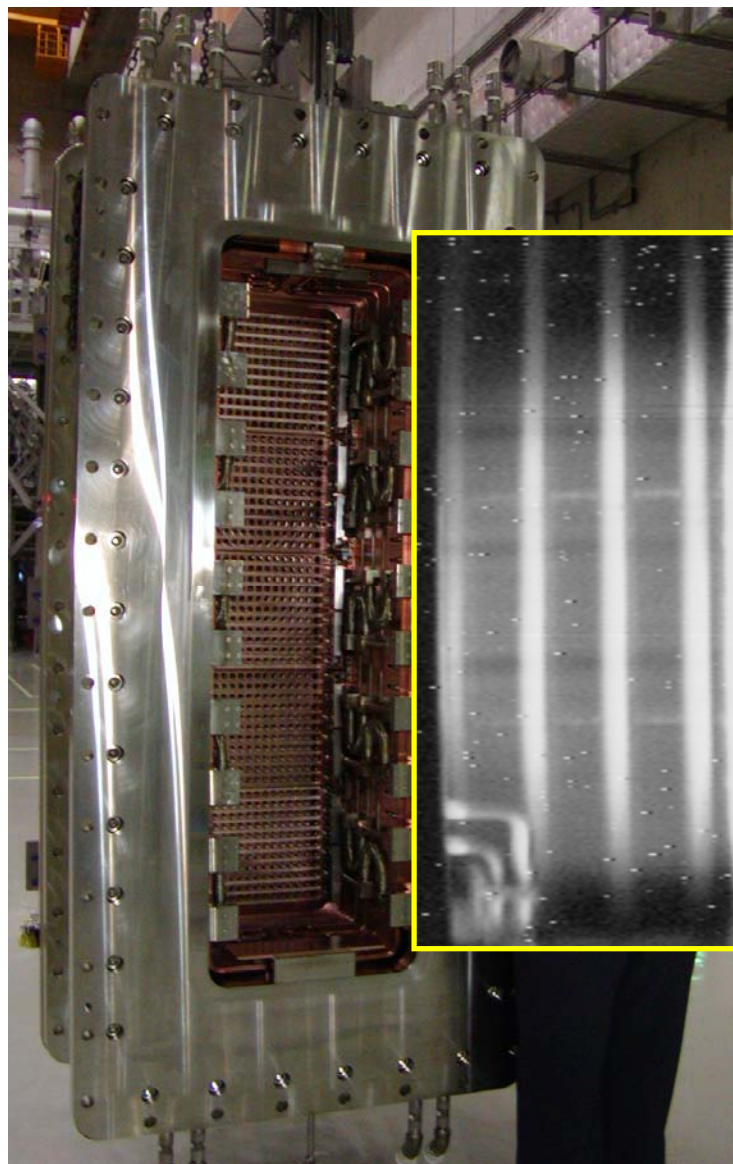


ビーム加速器

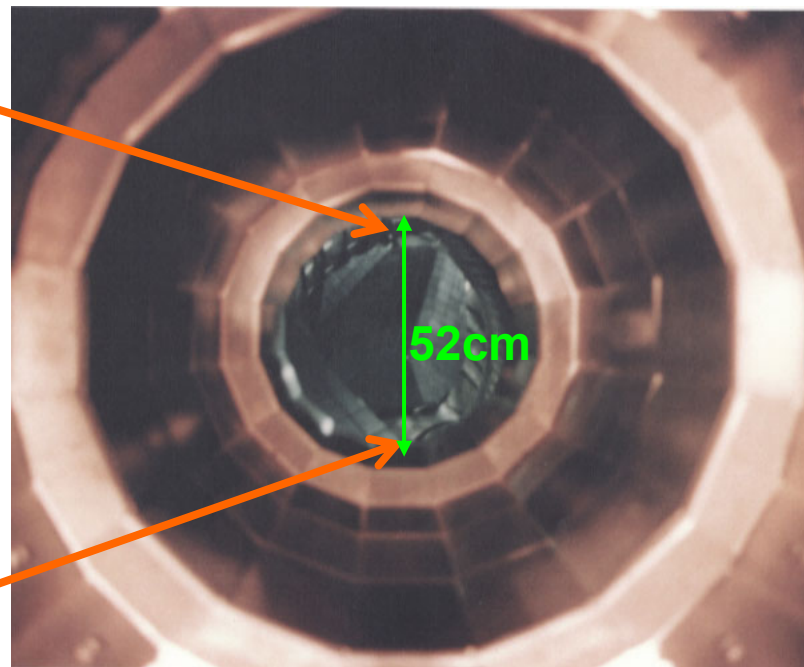


負イオン源からの大面積ビームを絞り込んでLHDへ入射

電極孔軸変位により5MWのビームを収束させて入射

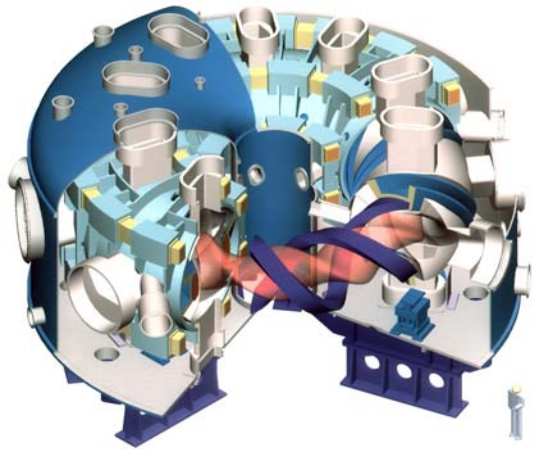


125cm



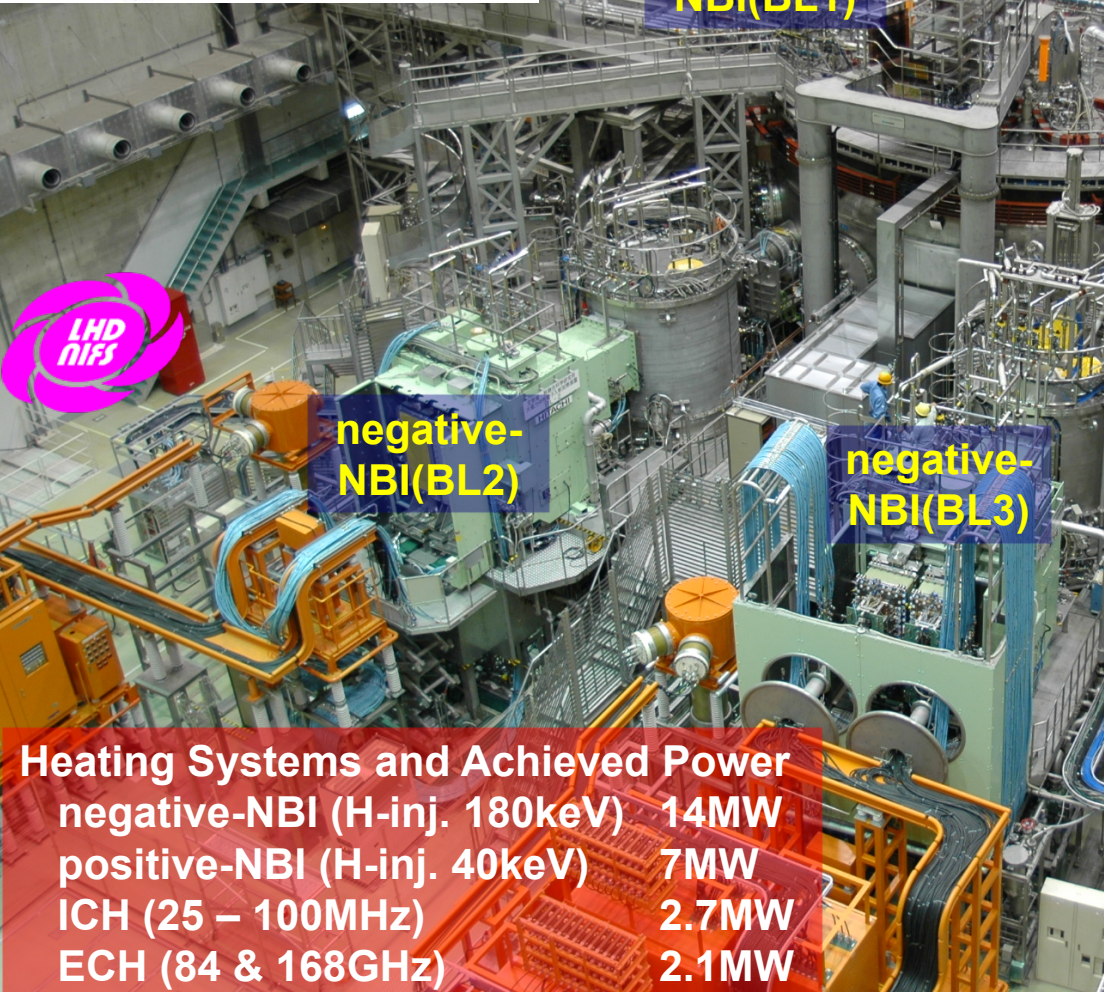
52cm

770本のビームを直径
52cmに絞り込んで入射



Large Helical Device (LHD)

Heliotron configuration of $l=2/m=10$ field period
 All superconducting coil system
 Plasma major radius 3.42-4.1 m
 Plasma minor radius 0.6 m
 Plasma volume 30 m³
 Toroidal field strength 3 T



negative-NBI(BL1)

positive-NBI(BL4)

negative-NBI(BL2)

negative-NBI(BL3)



Heating Systems and Achieved Power	
negative-NBI (H-inj. 180keV)	14MW
positive-NBI (H-inj. 40keV)	7MW
ICH (25 – 100MHz)	2.7MW
ECH (84 & 168GHz)	2.1MW



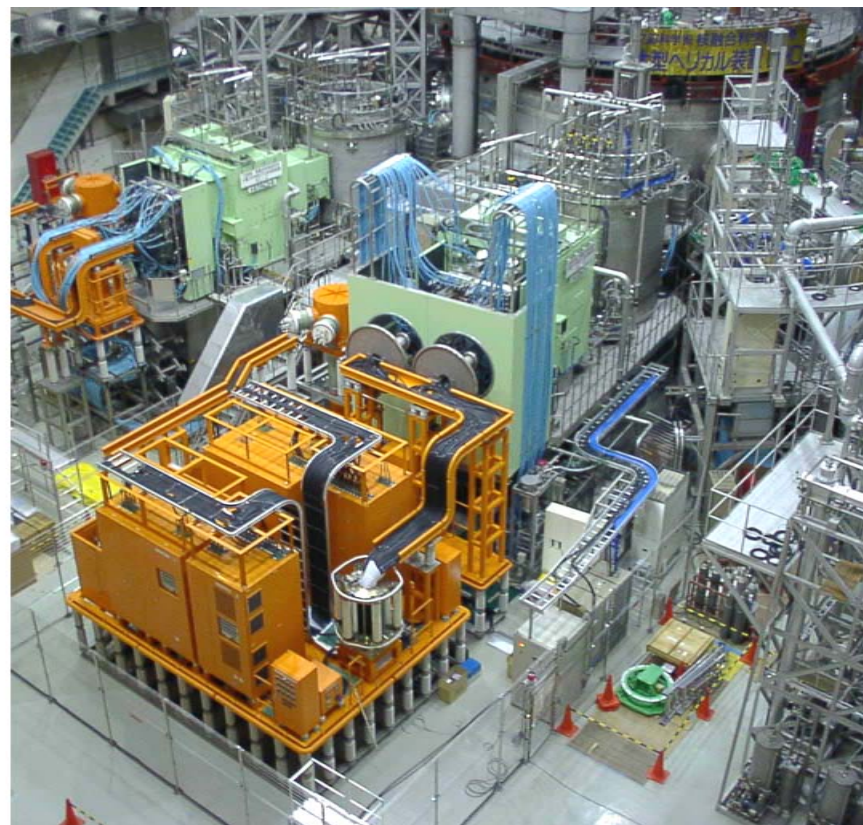
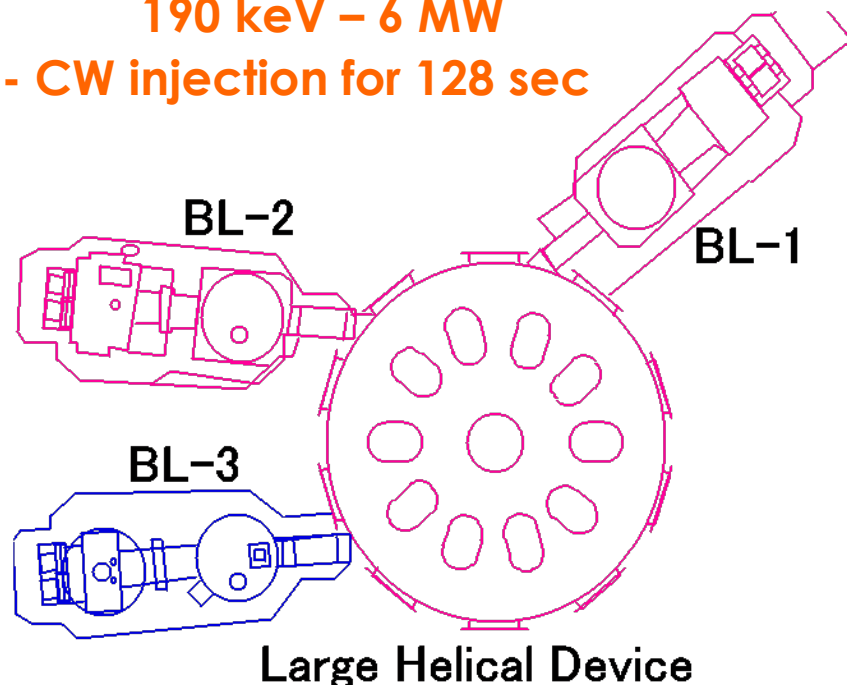
Plasma vacuum vessel

Negative-Ion-Based LHD-NBI

- Three injectors with six negative ion sources.
- Negative-NBI is a main heating device in LHD.

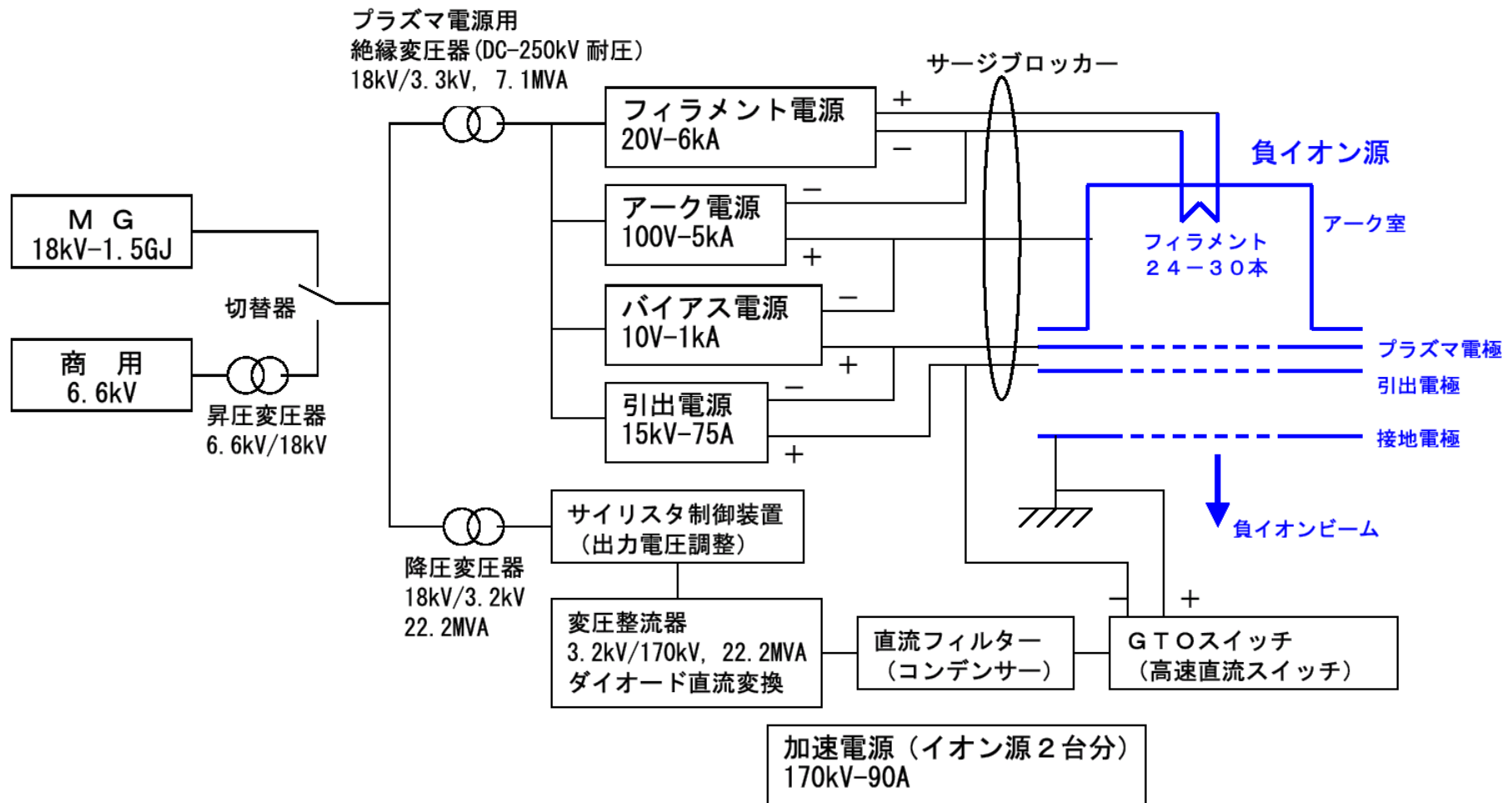


- 180 keV – 5 MW (specification of 1 injector)
- Operational in 1998 with 2 injectors (BL1 & BL2), and 1 injector in 2001 (BL3)
- Total achieved power of 14 MW
- Achievement in 1 injector
190 keV – 6 MW
- CW injection for 128 sec



LHD負イオンNBI装置への電力供給

- ・LHD負イオンNBIシステムは、最大で50MW程度の電力を用いるので、電動発電機(MG)を用いたパルス運転をしている。





Ion-Source V.V.

Beam-Dump V.V.

Negative Ion Source

Neutralizer

Injection Port

NBI - BL2

Power Supplies for Source Plasma

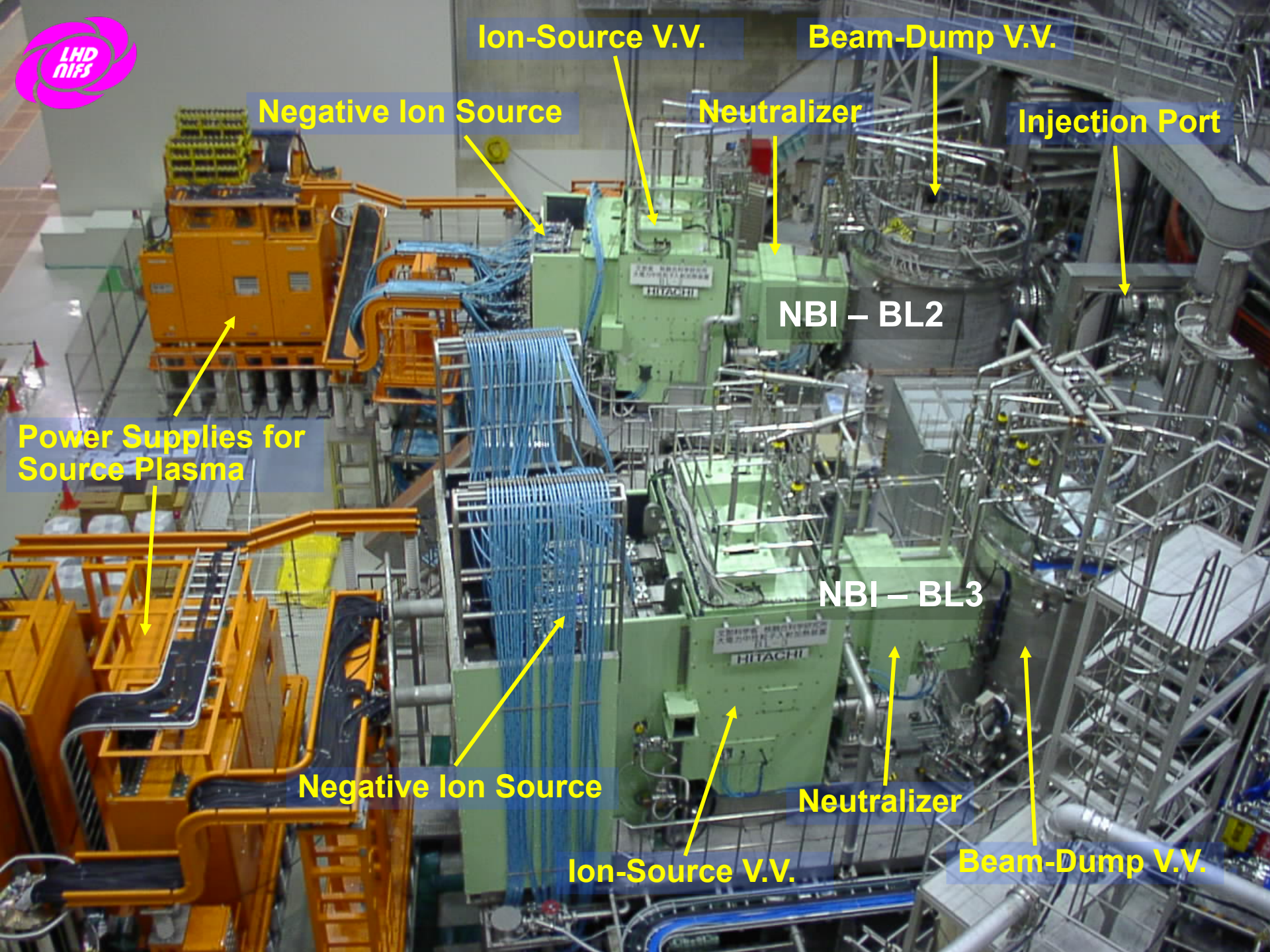
NBI - BL3

Negative Ion Source

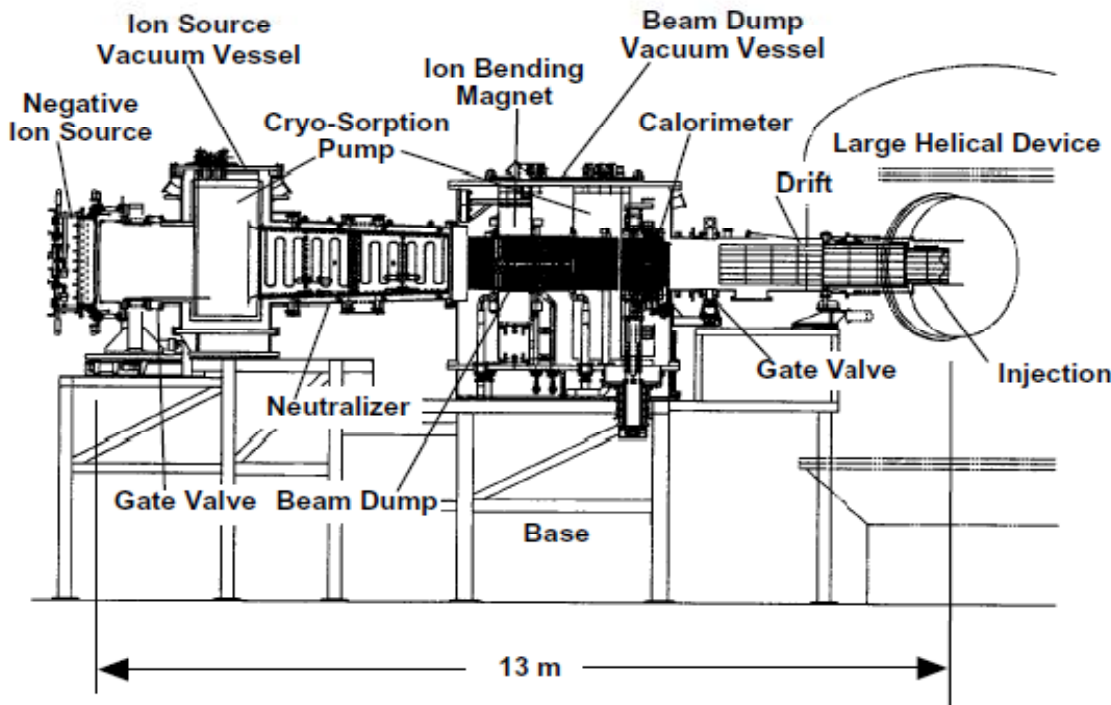
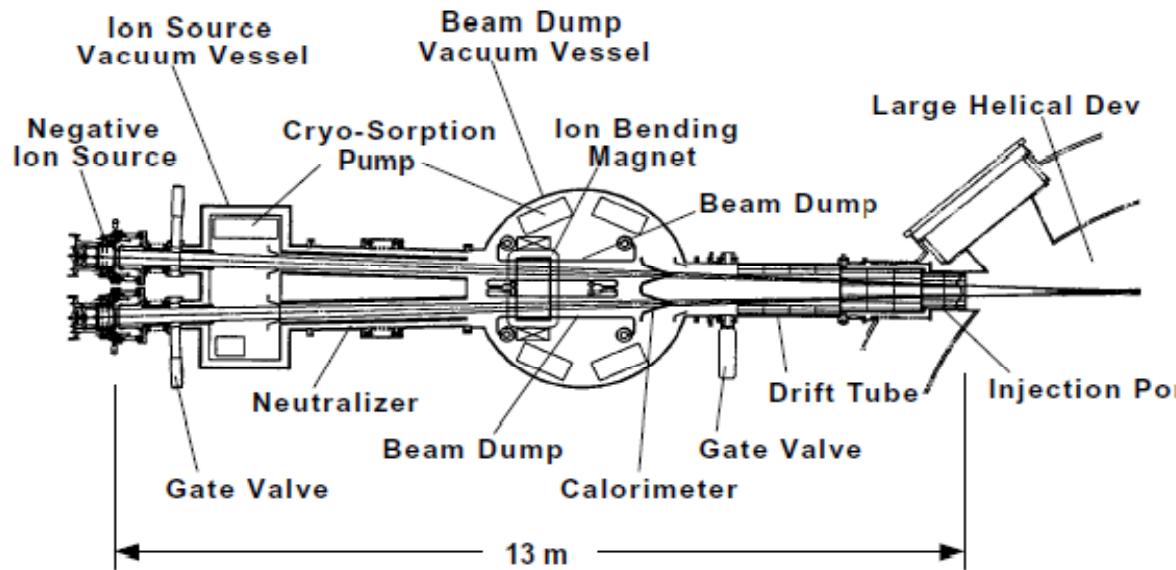
Neutralizer

Ion-Source V.V.

Beam-Dump V.V.



Structure of the negative-ion-based injector



- Hydrogen injection of 180keV – 5MW for 1 injector.
- Two negative ion sources are attached side-by-side.
- Effective neutralization length is 5m.
- Focal length of the ion source is 13m, and the pivot point of two sources is located 15.4m downstream.
- Injection port is about 3m long with the narrowest part of 52cm in diameter and 68cm in length.

Large Helical Device

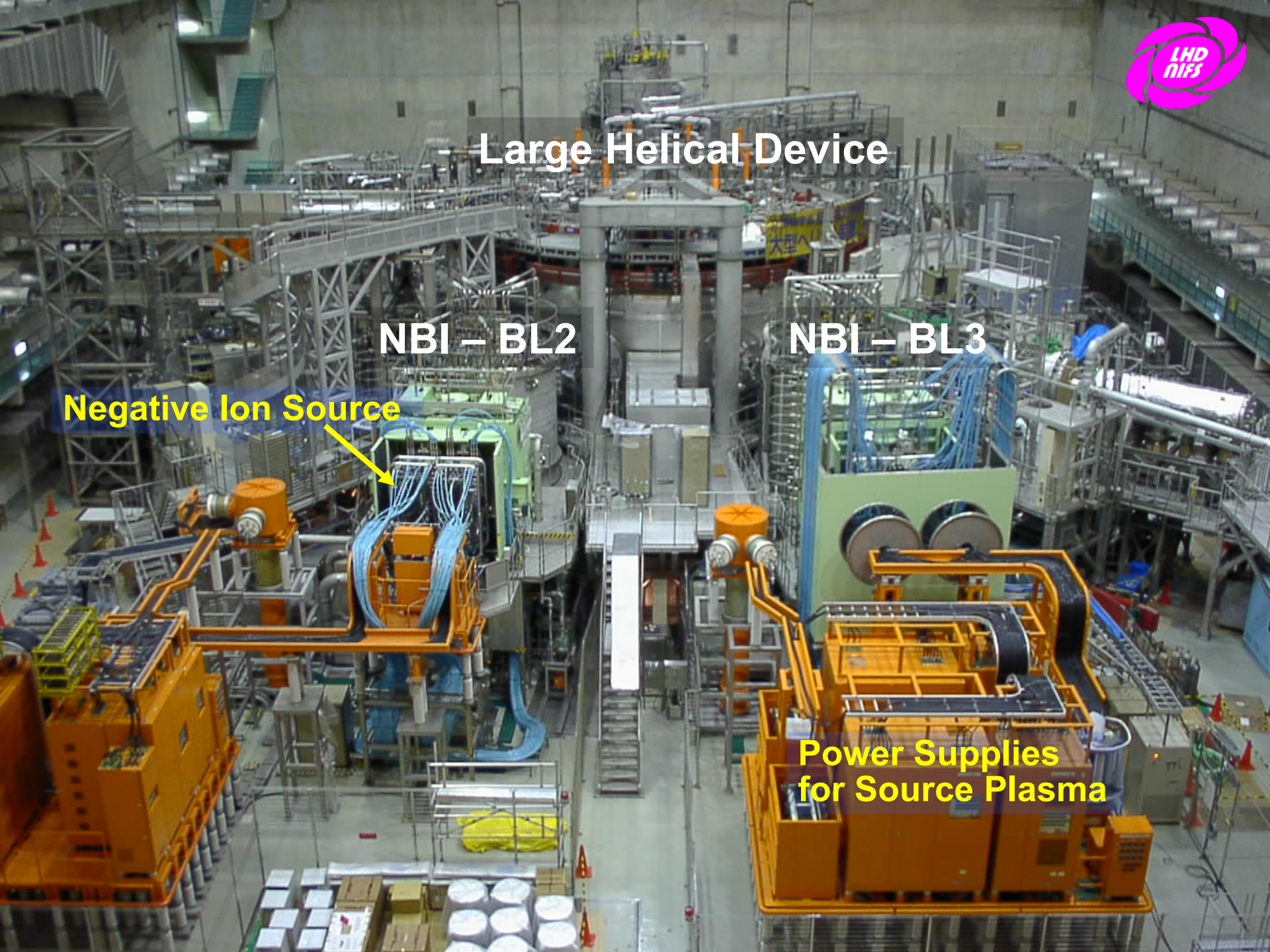
NBI – BL2

NBI – BL3

Negative Ion Source



Power Supplies for Source Plasma



Cs添加プラズマ方式負イオン源における プラズマ源の最適化

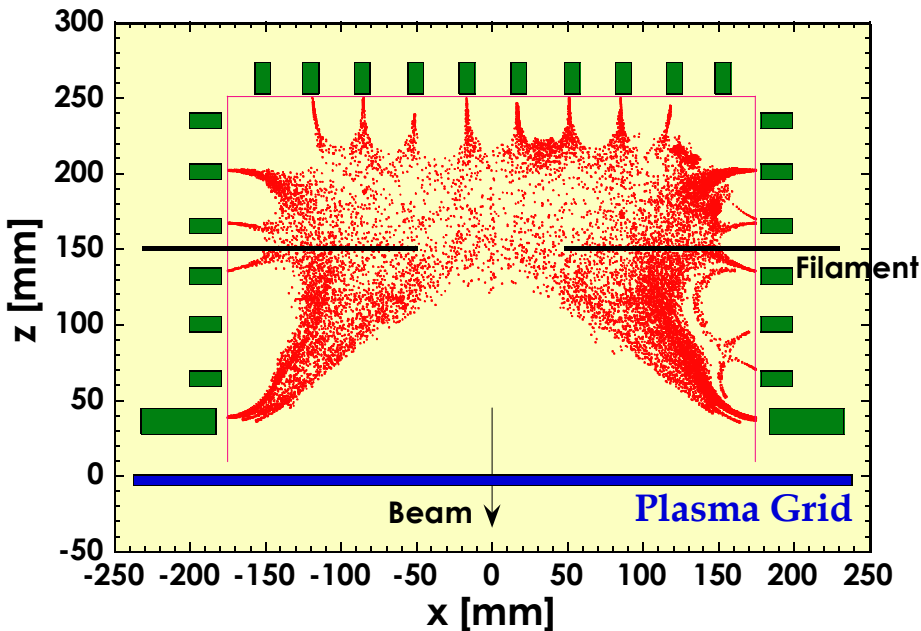
アーク放電室の磁場構造の最適化

- プラズマ源は高い閉じ込め性能が必要。
 - ・高いアーク電力効率で高密度プラズマの生成が可能
 - ・プロトン比および原子比の高いプラズマの生成が可能
 - ・低い動作ガス圧力でのプラズマ生成が可能
- アーク室を強いカस्प閉じ込め磁場で構成し、高い体積／表面積比の得られる形状とする。
- 強いカस्प磁場は磁気フィルター磁場と局所的にリンク・結合しやすいことから、局所放電を避けるため、アーク放電室の磁場構造の最適化が必要。
- フィラメントからの1次電子軌道の追跡を行い、その軌道が均一化するように磁場構造を最適化する手法が有効。

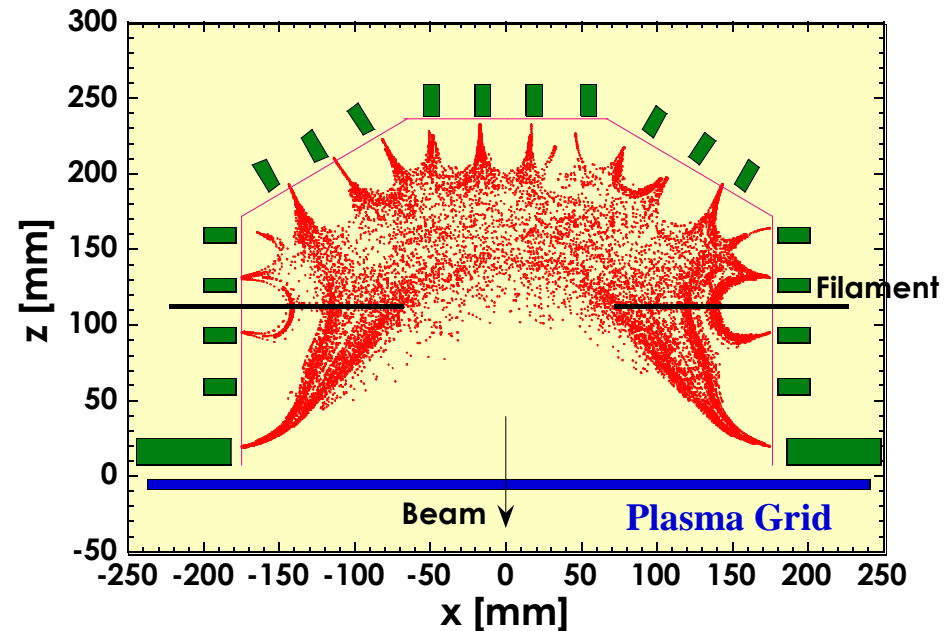
1次電子軌道の追跡による アーク放電室の形状および磁場構造の最適化



- 最適化前(左図): フィルター磁場とカスプ磁場が局所的に結合して、フィラメントからの1次電子が壁近傍の局所ミラー磁場に捕捉されるため、プラズマが局在化し、プラズマ損失を増大させる。
- 最適化後(右図): アーク放電室断面形状を六角形にし、磁場配位を工夫した結果、フィルター磁場とカスプ磁場の局所的結合が低減し、1次電子軌道はドライバー領域で均一化された。



Non-optimized configuration
(original arc chamber)

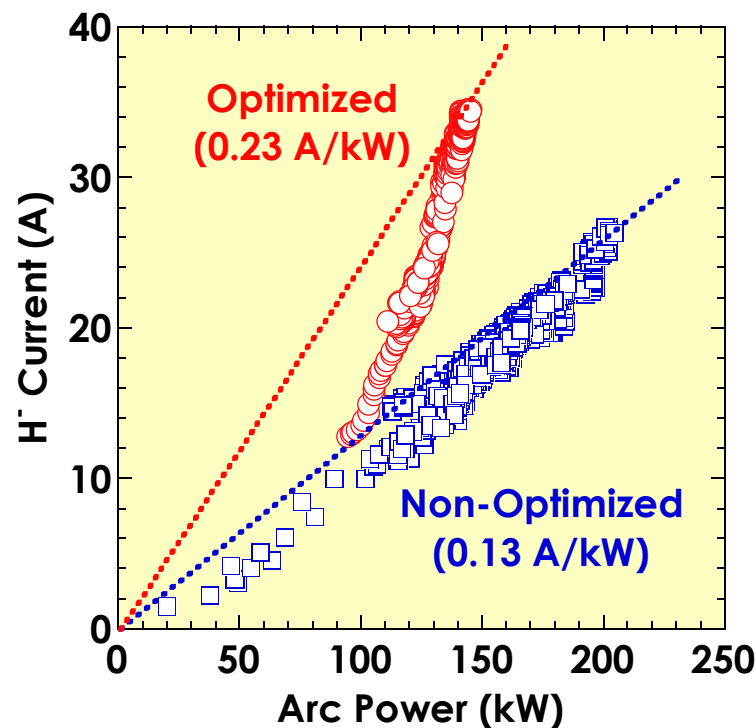
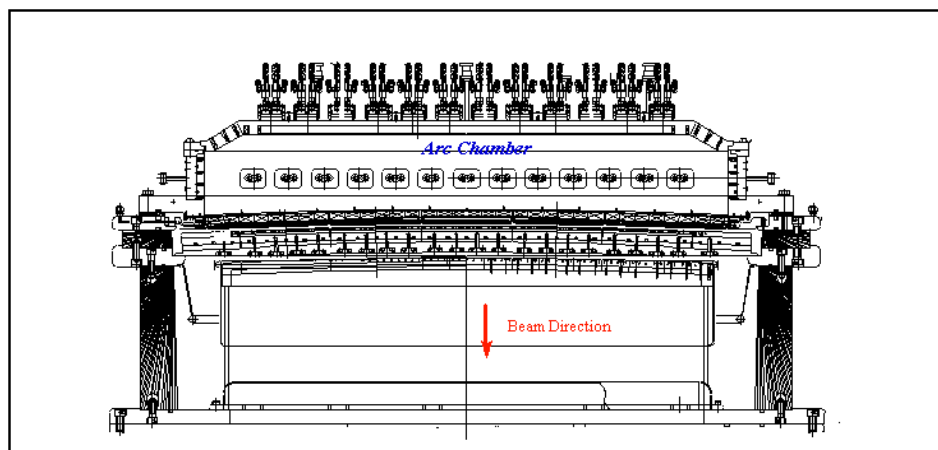
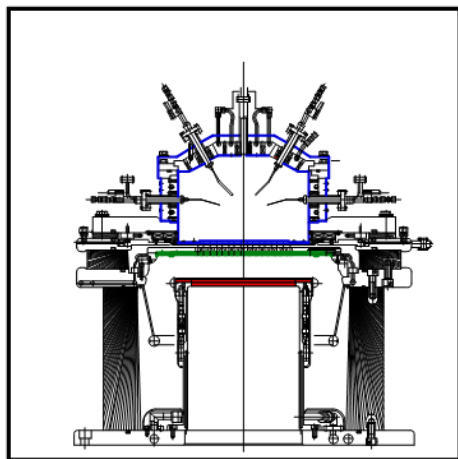


Optimized configuration
(modified arc chamber)

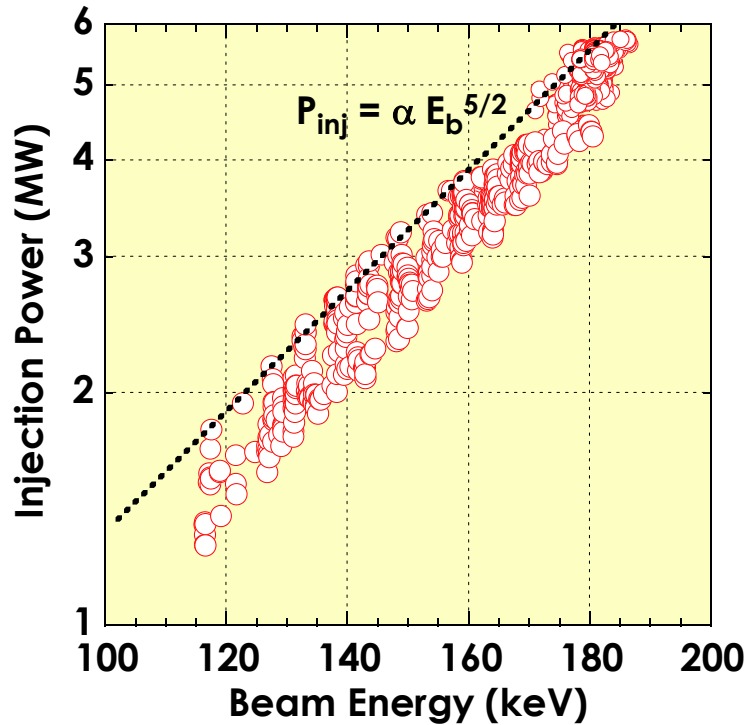
アーク放電室と磁場構造の最適化により、 負イオン生成効率は大幅に増大した。



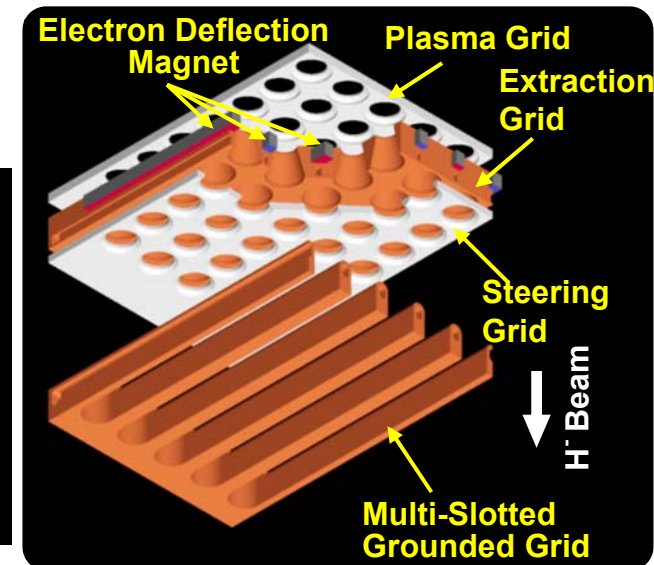
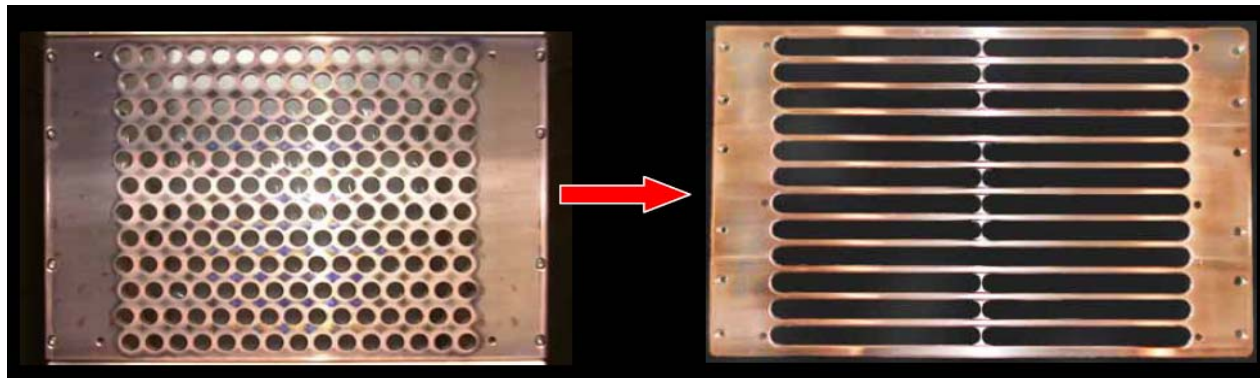
- アーク放電室の断面形状を六角形にして磁場構造を最適化することにより、体積／(損失)表面積比を大きくすると同時に、フィルター磁場とカस्प磁場の局所結合を低減させることができた。
- その結果、負イオン生成に対するアーク電力効率は大幅に増大し、35Aの負イオン電流(35mA/cm²の負イオン電流密度に相当)が得られた。



多スロット型の接地電極を使用することにより、高電圧保持性能が向上し、入射電力が増大した。

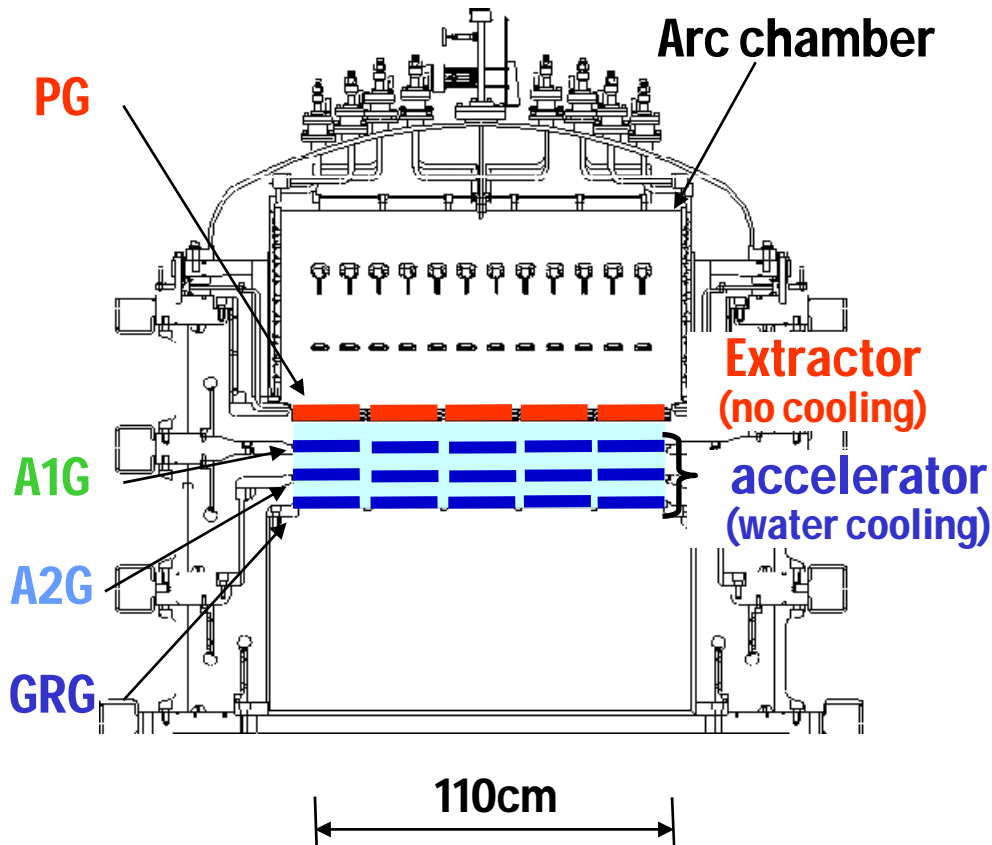


- 電極の透明率が大きくなり、加速された負イオンや電子の電極への直接衝突が減少した。
- 加速ギャップのガス圧力が減少し、負イオンの残留ガスによる中性化損失が減少した。
- その結果、接地電極の熱負荷は半減し、加速ギャップにおける高電圧保持性能が向上した。
- 負イオン電流は、加速電圧の5/2乗に比例して増加し、190keV-6MWの中性ビーム入射を達成した。



大型負イオン源の例 JT-60U N-NBI

JT-60U装置で使用されている負イオン源



負イオン源仕様: 500keV-22A
プラズマ源

「かまぼこ」のような半円筒形状
直径: 2m、長さ: 1.7m

0.3Pa以下の低ガス圧力動作
プラズマ電極フィルター: 3~5kA
電極面積: 45cm × 110cm、5分割
6枚電極3段加速
達成値: 400keV、17.4A



大型負イオン源の例 ITER-NBIシステム

1MeV-40Aの大型負イオン源の設計



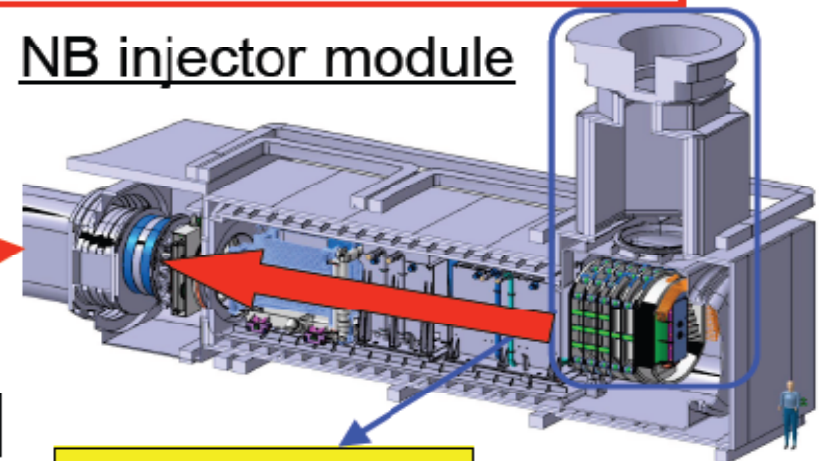
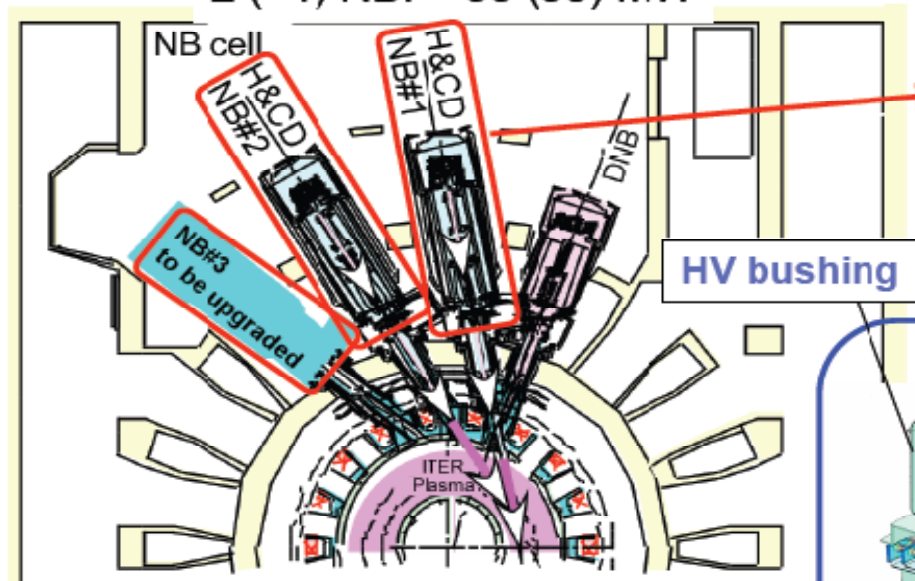
ITER NBIシステム

ITER requirement

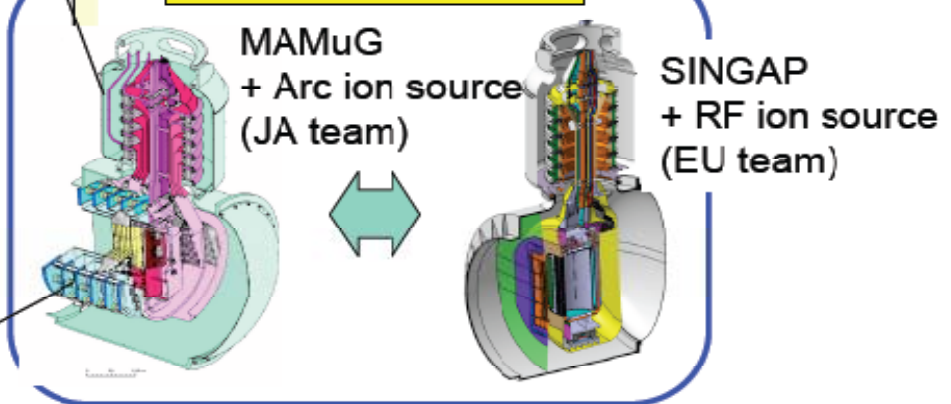
16.5 MW, 1 MeV D⁰ NBI ← 40 A, 1 MeV D⁻ ion beam

ITER plan view

2 (+1) NBI = 33 (50) MW

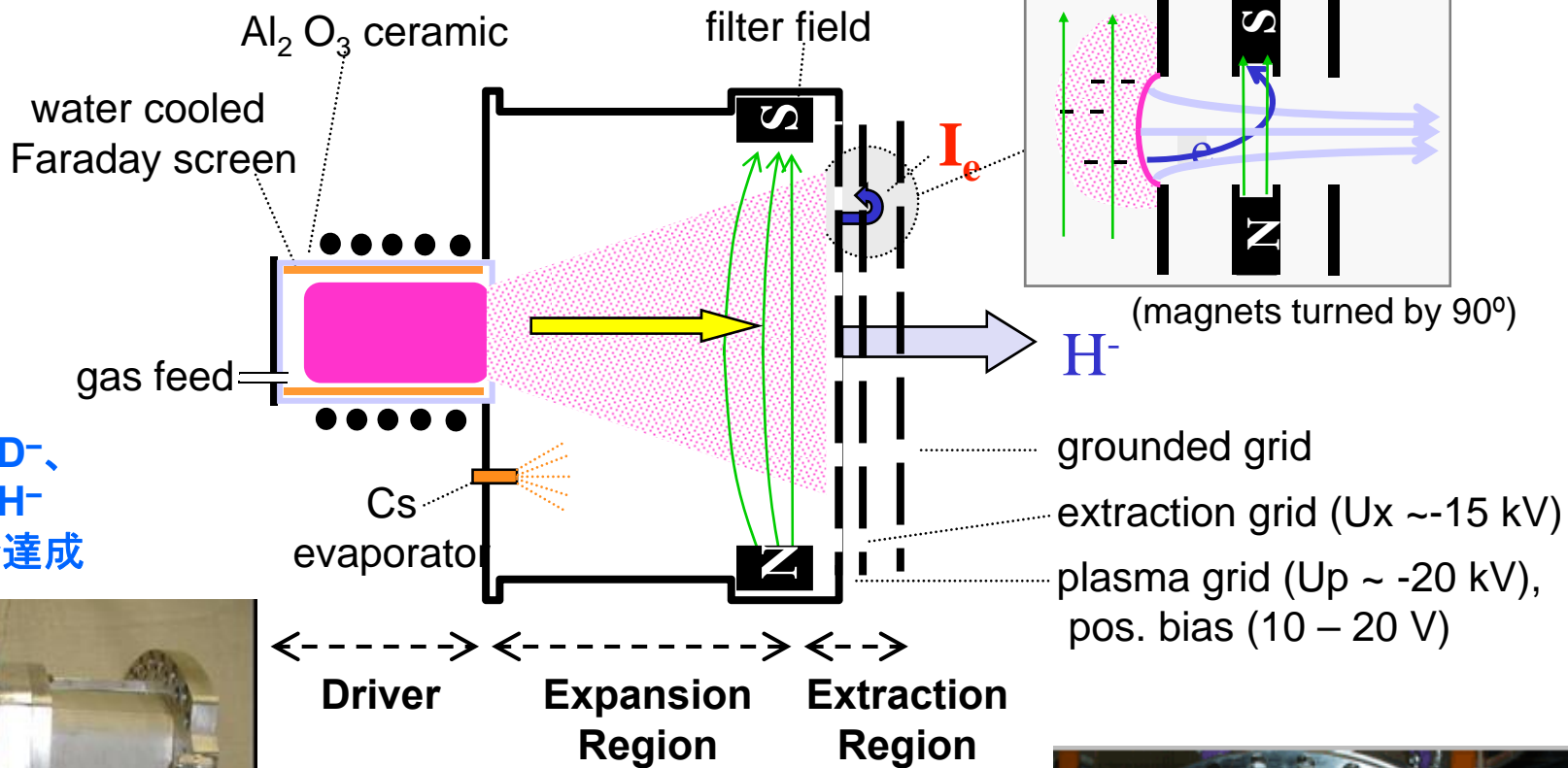


Two design options

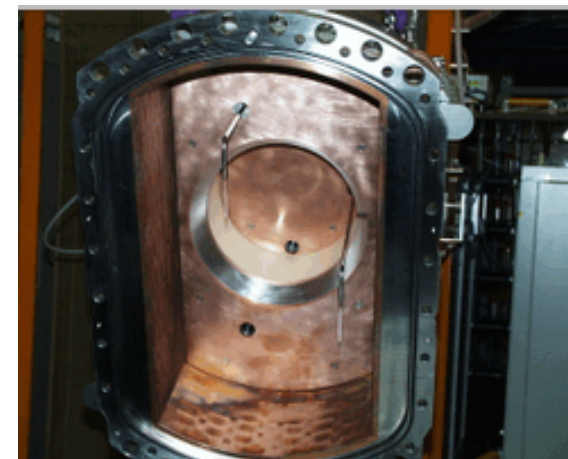
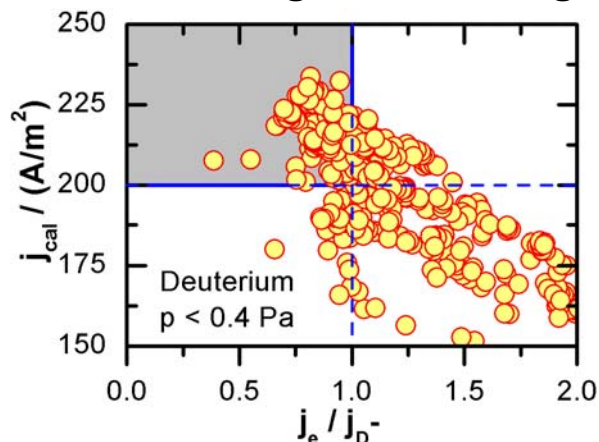


ion source & accelerator

IPP-GarchingにおけるRF負イオン源の開発



23mA/m² D⁻、
33mA/m² H⁻
を0.3 Paで達成

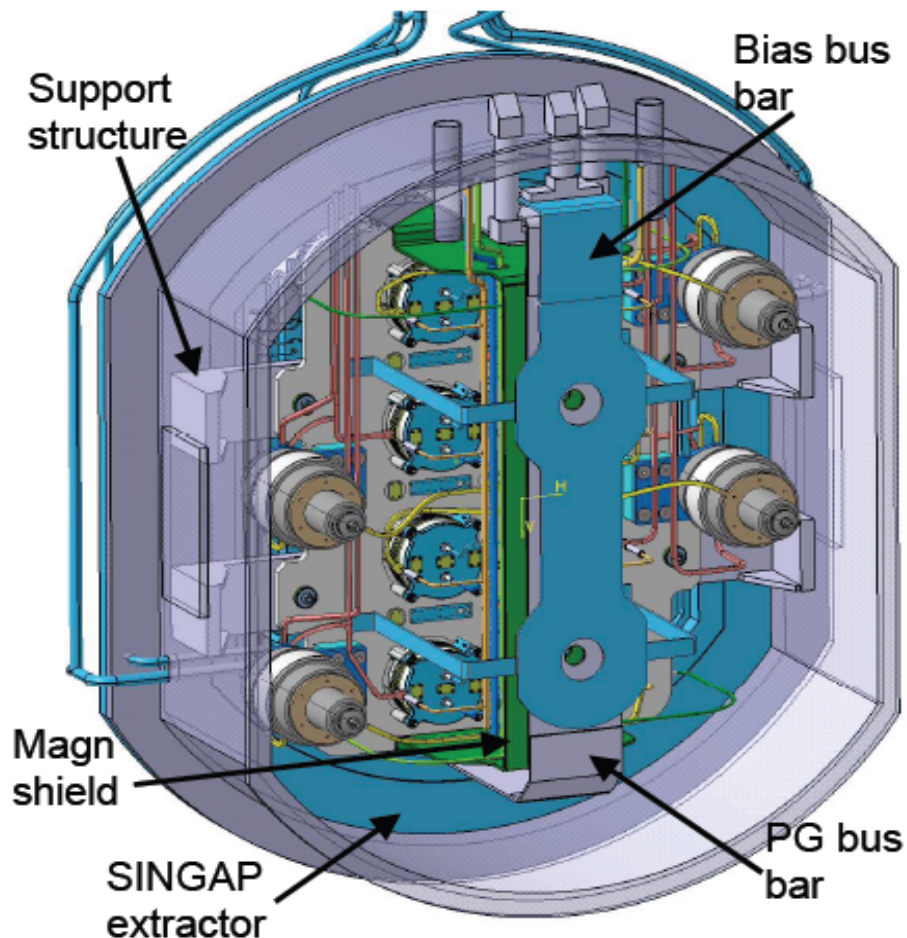


大型RF負イオン源の設計提案

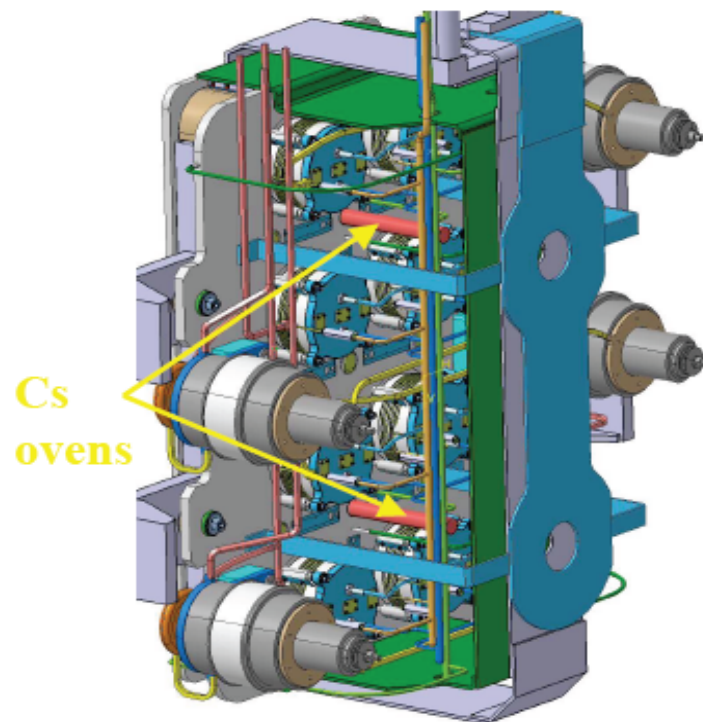
1MeV-40AのITER-NBIシステム用負イオン源提案設計



RF負イオン源



Now the level of detail is comparable with the arc driven ion source.



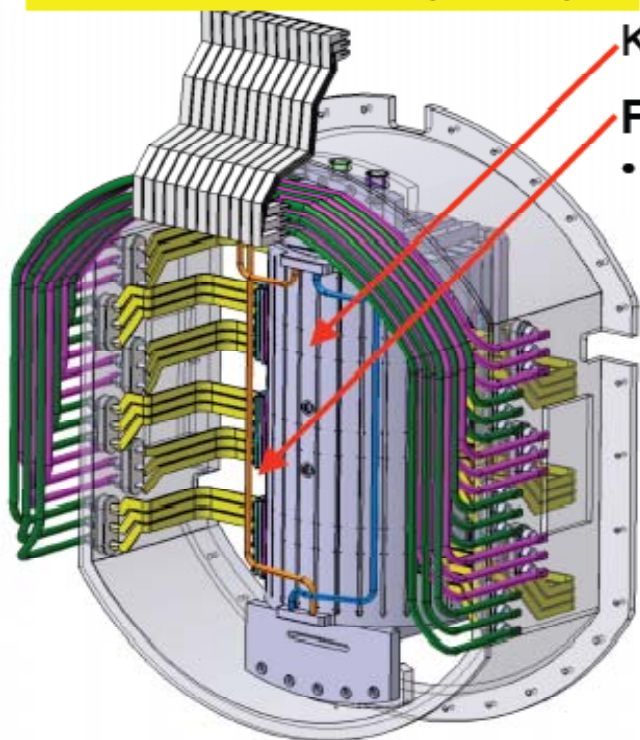
フィラメント・アーク方式かRF方式か ITER-NBI用負イオン源に対する選択



ITER負イオン源

ITER target: 40 A (200 A/m²) D⁻ ion beam from an extraction area of 0.6 x 1.5 m².
Two design options: Arc or RF ion sources.

Reference design
Arc ion source (JAEA)



KAMABOKO source

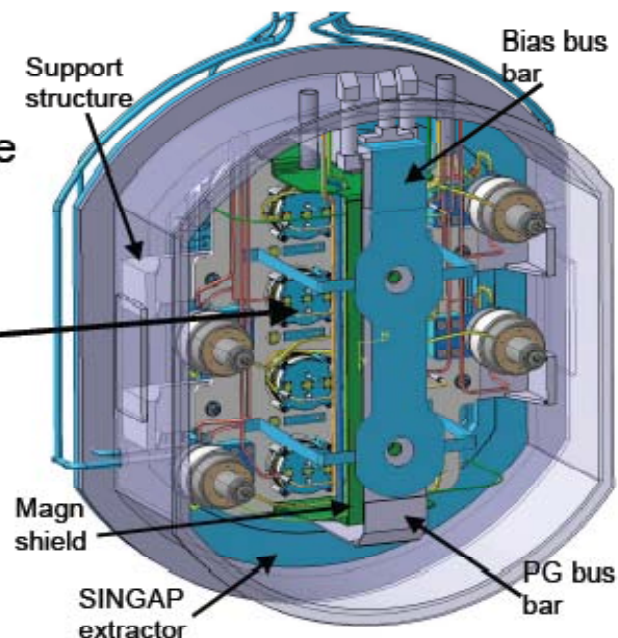
Filaments: 72 pcs.

- Replacement: regular maintenance

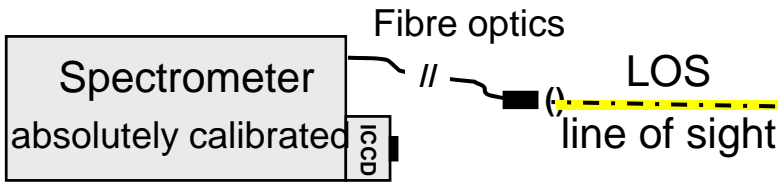
8 RF drivers

- Possibly less frequent Maintenance

Alternative design
RF ion source (IPP)



Simple experimental set-up



Survey spectrometer

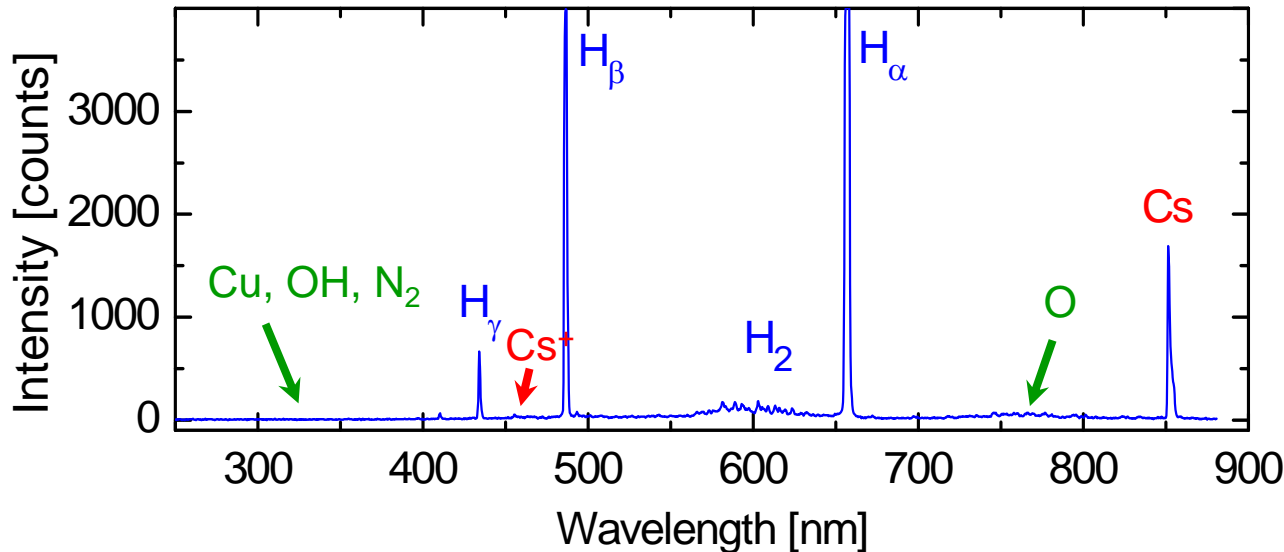
- ▶ 200 - 900 nm, low resolution $\Delta\lambda \approx 1$ nm, time traces
- ▶ 200 - 780 nm, high resolution $\Delta\lambda \approx 0.3$ nm

Analysis (quite complex)

$$\varepsilon_{p,k} = n(p) A_{pk}$$

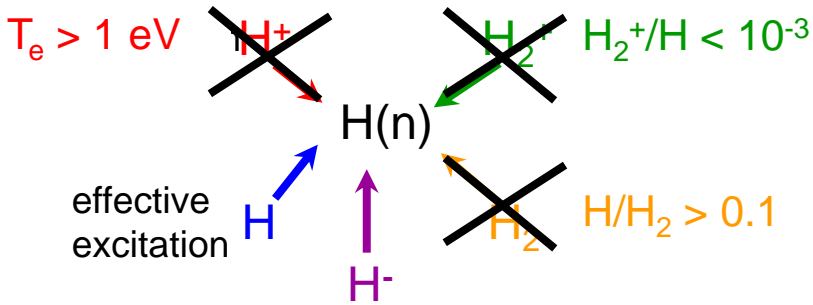
Collisional radiative models

$$\varepsilon_{pk} = n_0 n_e X_{pk}^{eff}(T_e, n_e)$$

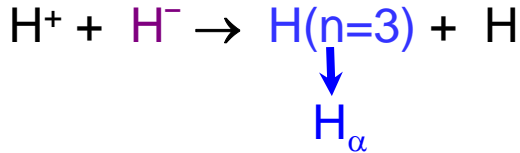


- ▶ Impurities
- ▶ T_{gas} , T_{vib} from H_2
- ▶ H/H_2 from H_γ/H_2
- ▶ n_e from H_β/H_γ
- ▶ Cs , Cs^+
- ▶ H^- from H_α/H_β

Population mechanisms for H



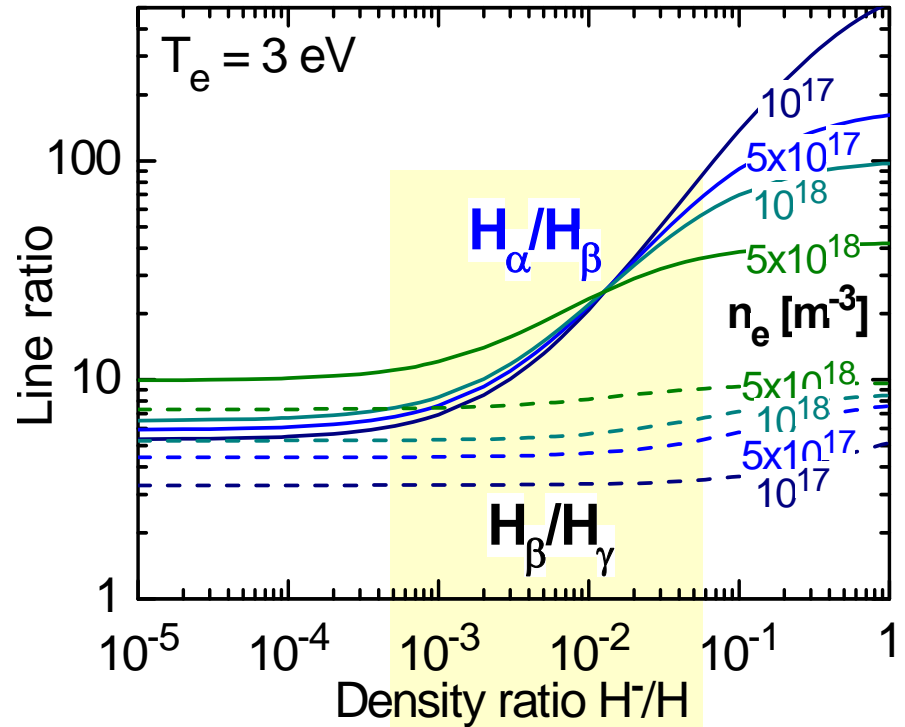
mutual neutralisation



Collisional radiative model

Measurement of Balmer line ratios

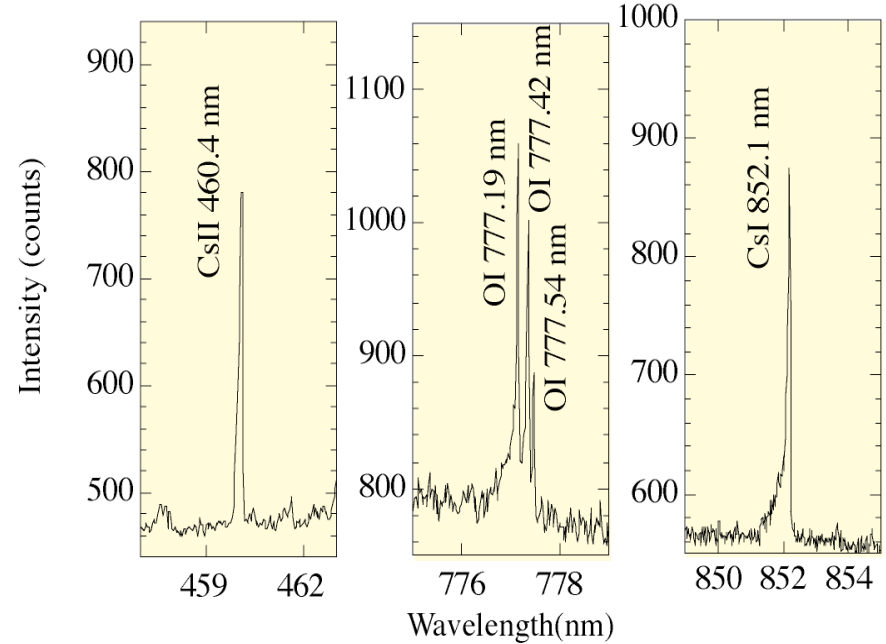
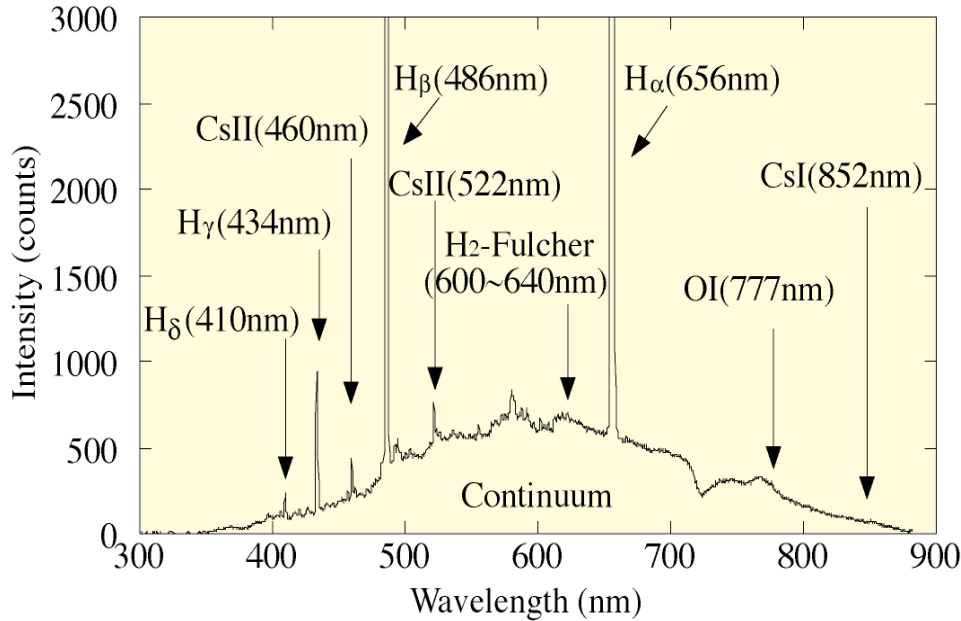
Line ratios depend on n_e , T_e and H^-/H



H_α/H_β depends on H^-/H

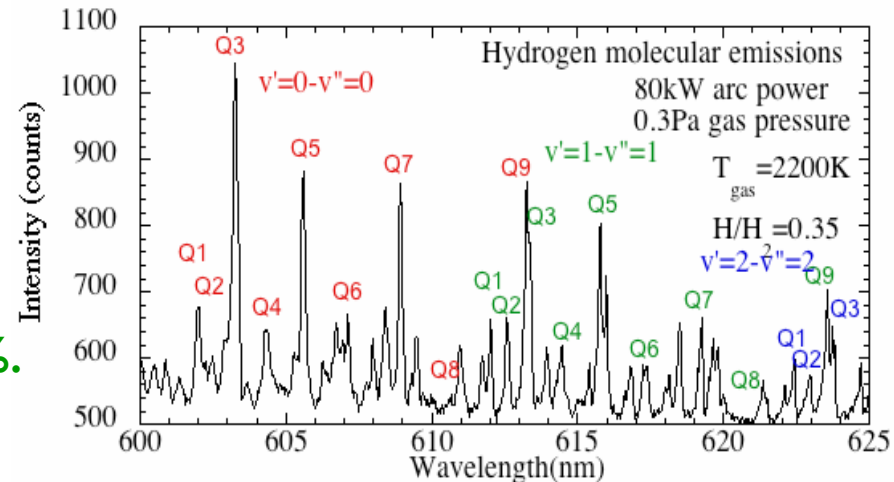
H_β/H_γ reflects n_e and T_e

Low-resolution and wide range spectrometer High-resolution and short range spectrometer



Strong continuum emitted from tungsten filaments
 Hydrogen Balmer emissions ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$)
 Cs-neutral emission (852.1nm)
 Cs-ion emissions (522nm, 460nm)
 Molecular hydrogen emissions (600-640nm)
 Neutral oxygen emissions (777nm, triplet)
 No tungsten emission (400.9nm)

- Cs ionization degree is as high as 99.9%.
- Gas temperature is estimated at 2200K, and H/H₂ ratio is as high as 0.35.



まとめにかえて

- ・核融合プラズマの主要な加熱機器であるNBIシステムに用いられる大型の正負水素イオン源について、大体積におけるイオン源プラズマ生成および大面積のビーム引出し・加速に焦点を当てながら、その特徴について講述した。
- ・数MW～数10MWの大電力ビームを生成するNBI用イオン源にとって、イオン源プラズマの生成効率、ビームの加速効率等の動作効率は、電力効率を上げると共に機器の損傷を防ぐ意味でも極めて重要である。
- ・現状のNBIシステムで使用されている大型の正イオン源については、ほぼ完成された技術であり、今後は、RFイオン源の最適化に向けた研究が行われるであろう。
- ・大型の負イオン源は、実際の負イオンNBIシステムで使用されるようになったものの、ITER-NBI用の1MeV-40Aの負イオン源の開発に向けて数多くの課題が残されている。
 - ビームの一様性(イオン源プラズマの一様性)
 - 加速電子の抑制
 - 高エネルギー加速に伴う耐電圧の問題
 - RF負イオン源の開発
- ・NBI用イオン源は、加速器で使用される正負水素イオン源と原理的には同じ部分が多いが、イオン源規模、ビーム電流、ビーム加速方式等、構造も含めて大きな違いがある。一方で、原理的に同一な点に着目して、加速器およびNBI用イオン源の研究者は同じテーブル上で議論することも多い。今後もこのように、互いにフィードバックさせながら、水素イオン源の開発を進めていくことになるであろう