

負イオン源の 基礎と 今後の課題

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

柴田 崇統

1

イオン源の概要.

多様な構造
多様な用途

2

負イオンの利点.

何のために負イオンビームを作るのか？
負イオンの用途

3

負イオンの原理.

負イオンという状態
負イオンの生成
特有のイオン源構造

4

実践例と課題.

- 大強度陽子加速器 (J-PARC) の紹介
- 目標と課題

5

まとめ.

CONTENTS

イオン源の概要

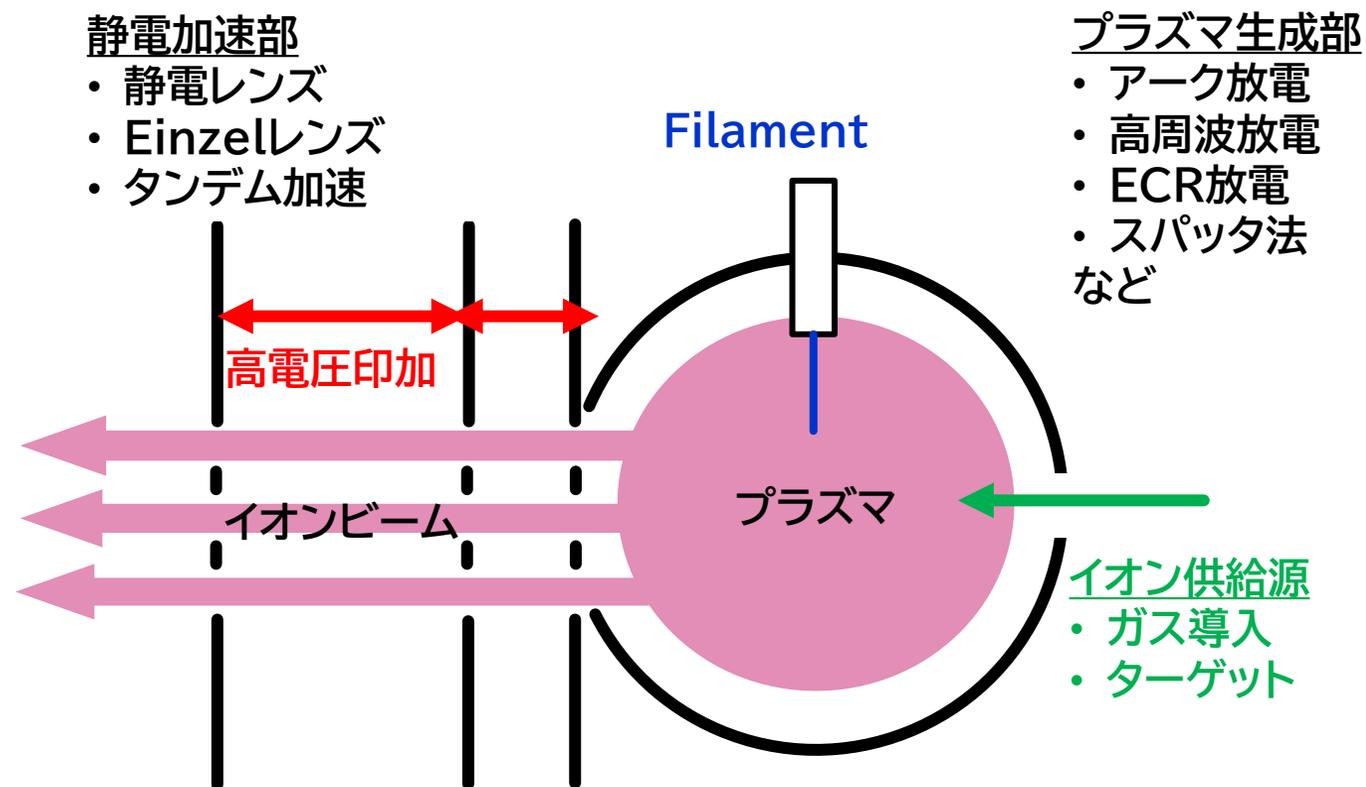
どういう装置か？

- 「特定のイオン（正または負に帯電した粒子）を内部で生成し、その粒子の集まりを特定の方向に出力する（ビームとして引き出す）装置」[1]

一口にイオン源と言っても、...

- イオンの種類
- イオンの生成方法
- ビームの引出方法

などの多くの種類・用途がある



[1] 石川順三, 「イオン源工学」, (アイオニクス株式会社, 1986) .

イオン源の概要

どういう装置か？

- 「特定のイオン（正または負に帯電した粒子）を内部で生成し、その粒子の集まりを特定の方向に出力する（ビームとして引き出す）装置」[1]

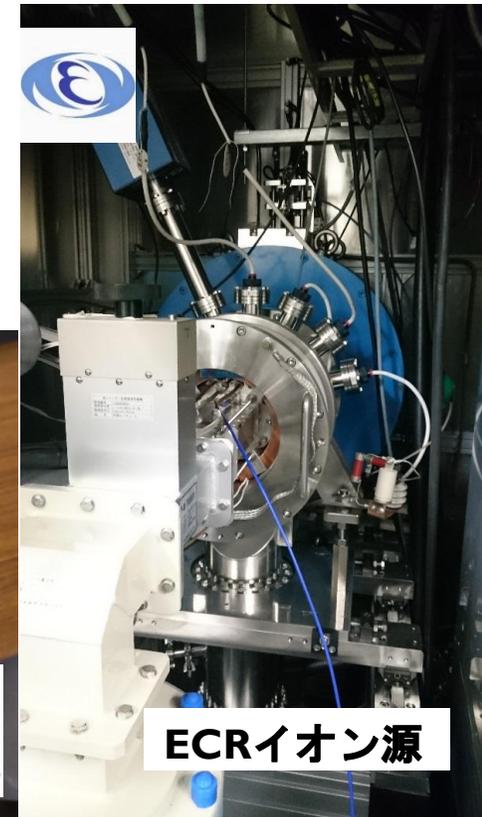
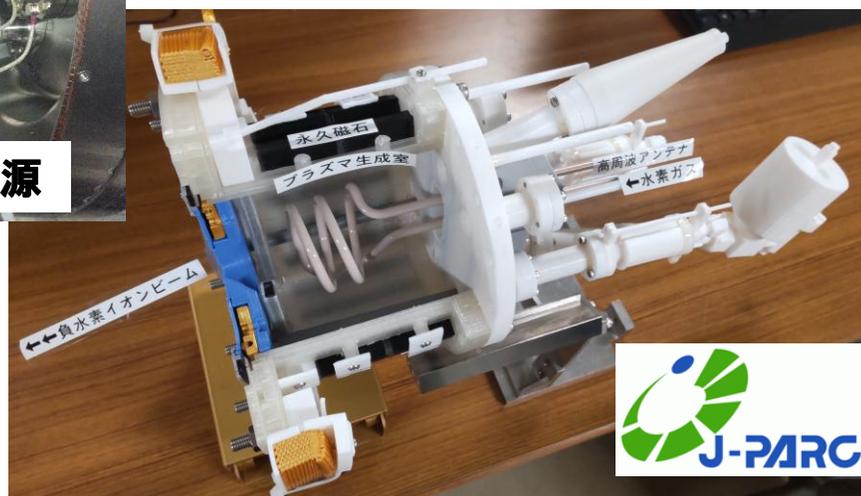
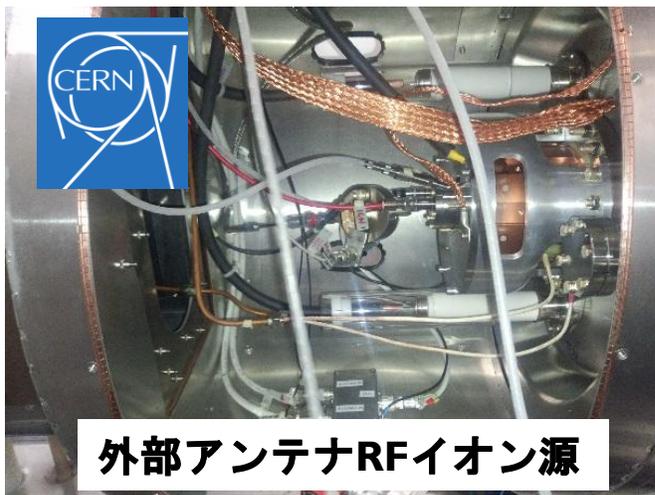
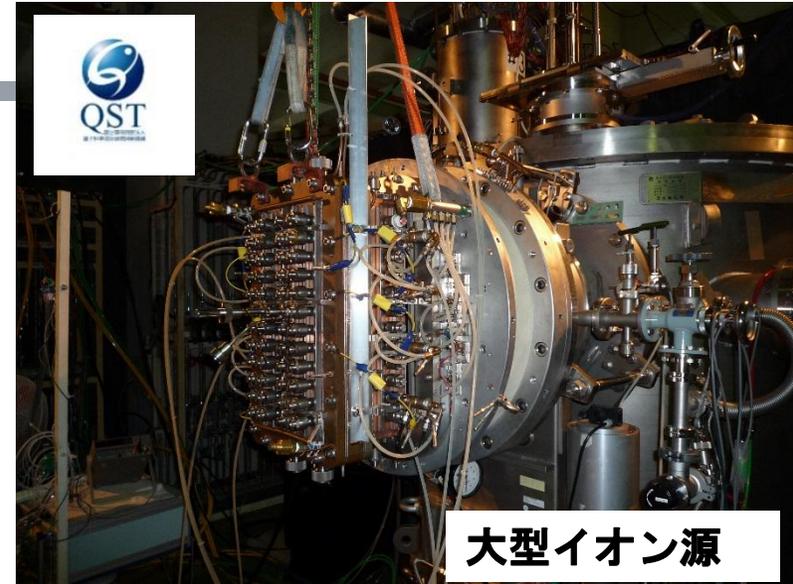
一口にイオン源と言っても、

- イオンの種類
- イオンの生成方法
- ビームの引出方法

などの多くの種類・用途がある

※写真は発表者撮影のもの（主に加速器用途）。他にも核融合や産業応用に特化したイオン源がたくさんある。

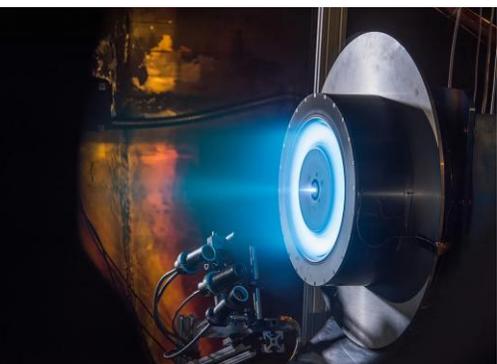
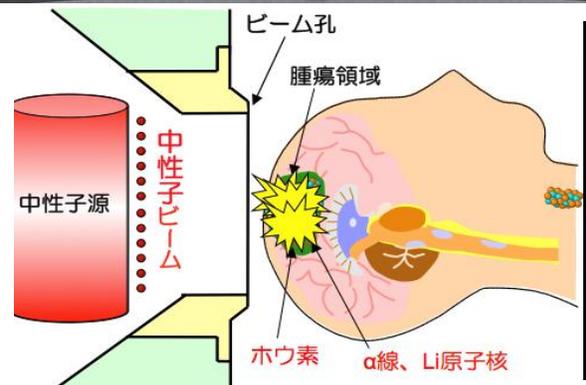
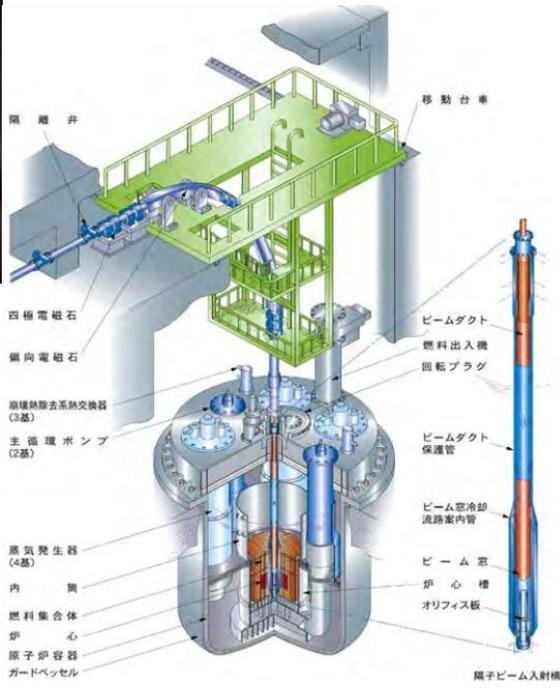
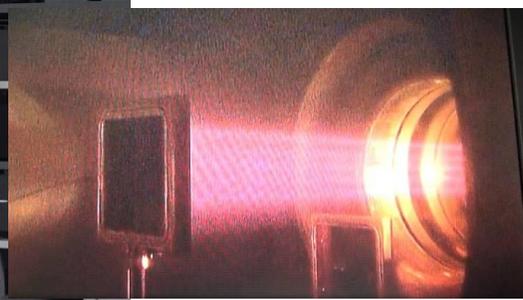
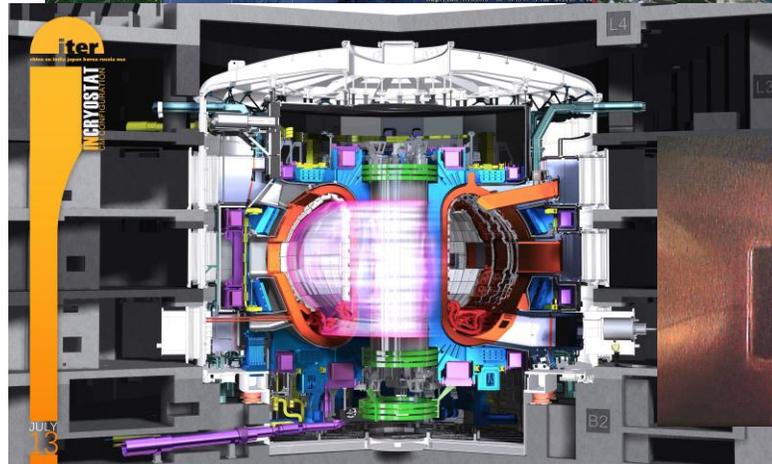
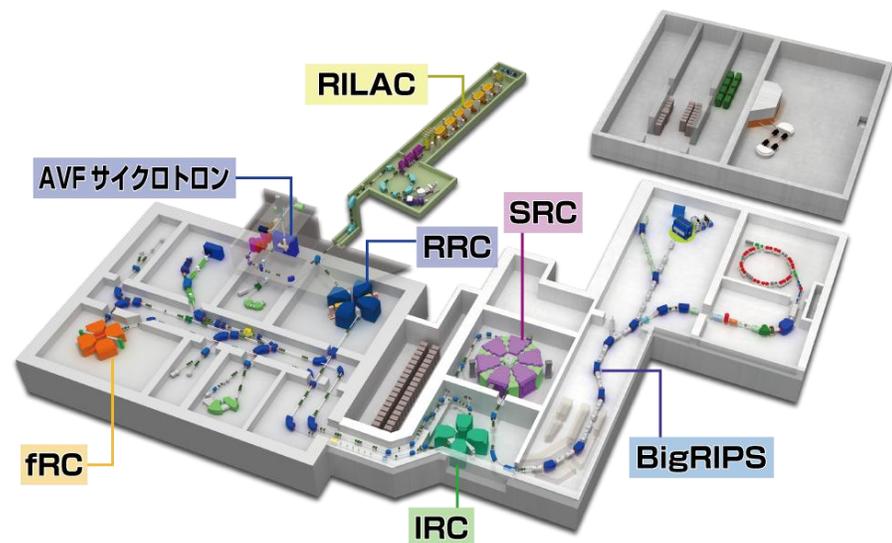
[1] 石川順三, 「イオン源工学」, (アイオニクス株式会社, 1986) .



イオン源の概要

イオン源の用途

- 医療応用
- 半導体製造
- イオン注入
- イオンスラスタ（人工衛星）
- 核融合プラズマ加熱
- 重イオン加速器（RI、原子核物理）
- 陽子加速器（素粒子物理、物質生命科学分野、核変換）



[1] 原子力機構, 「ADSを用いた核変換技術の研究開発状況」, 文科省 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会, 令和3年7月30日.
 [2] 熊田博明, 「ホウ素中性子捕捉治療法 (BNCT) による次世代がん放射線治療」, 第9回高エネルギー加速器科学研究奨励会特別講演会.
 [3] ITER ORGANIZATION (<https://www.iter.org/>)
 [4] NASA, "TECH TODAY: NASA'S ION THRUSTER KNOWHOW KEEPS SATELLITES FLYING" (<https://www.nasa.gov/technology/>).
 [5] RIKEN NISHINA (<https://www.nishina.riken.jp/facility/>).
 [6] J-PARC T2K EXPERIMENT (<https://t2k-experiment.org/ja/>).

負イオンの利点

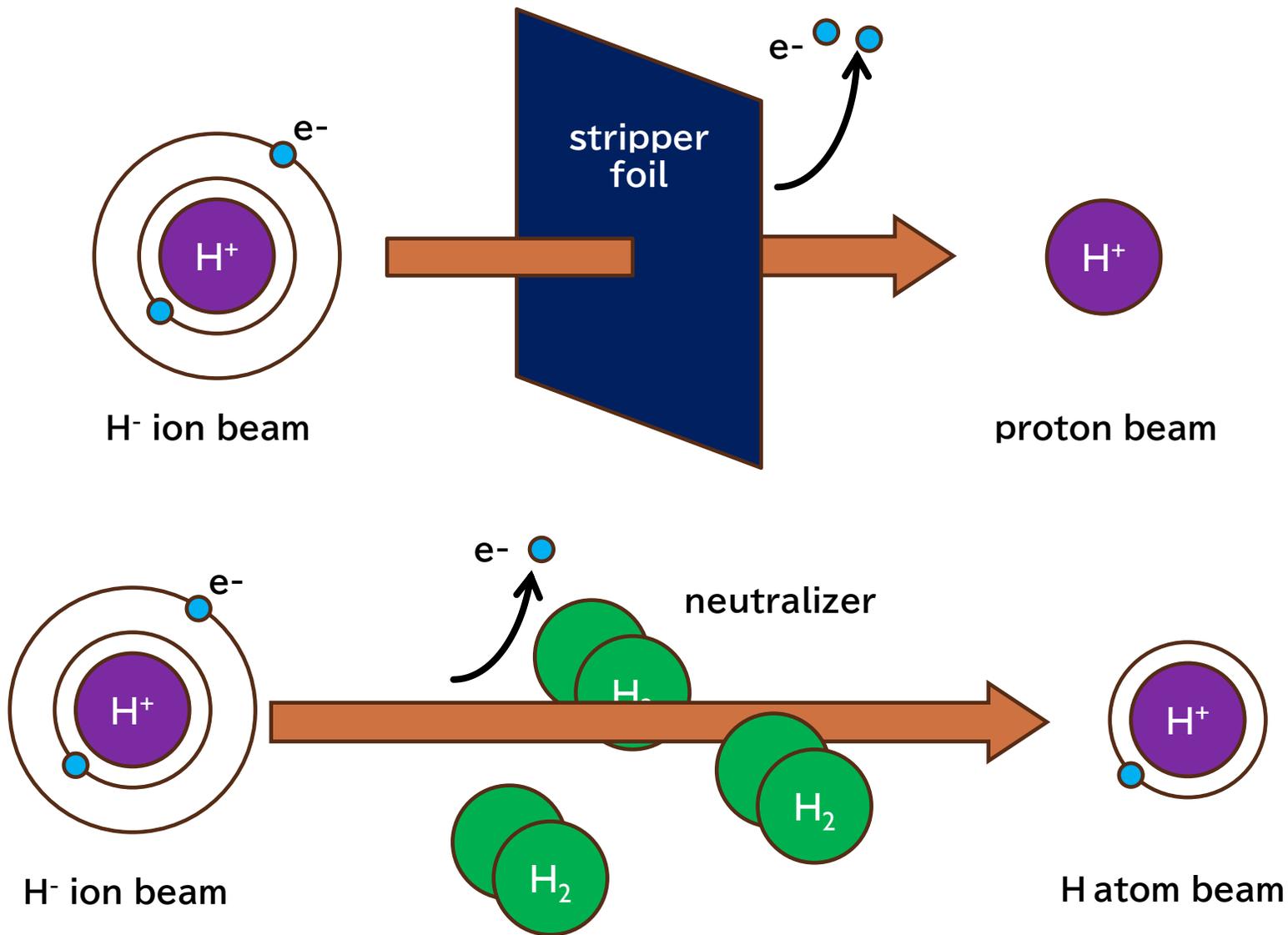
- 何のために負イオンビームを作るのか？
- 負イオンの用途(4つほど紹介)

負イオンの利点

負イオン源は、負に帯電したイオン (Negative Ion) を出力する装置。

※何のために負イオンビームを作るのか？

- 負イオン(原子などに電子が追加された状態)の「壊れやすい」性質を利用する。
- 負イオンを加速した後、薄膜(カーボンなど)やガス中を通過させて、電子をはぎ取り正イオンや原子に変換する。
- この方法で、**高エネルギー・大強度ビーム**を効率よく生成する。

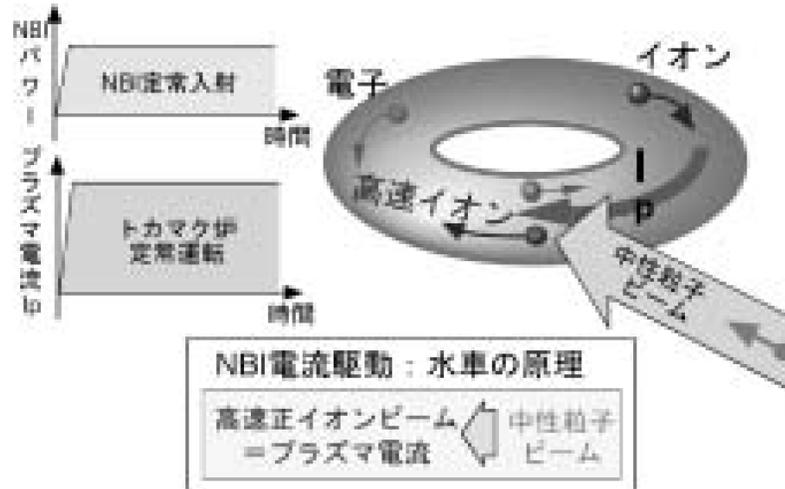


負イオンの荷電変換のイメージ

負イオンの用途

核融合プラズマ加熱における 高エネルギー中性粒子ビームの生成

- 核融合プラズマを加熱する方法の1つに、外部から中性粒子(原子)ビーム入射を行う方法がある。
- 中性粒子ビーム入射加熱装置(NBI)
- 負水素イオン(H⁻/D⁻)ビームを高エネルギー(500keV・1MeV)に加速し、それを中性化セルに入射することで原子(H/D)ビームに変換する。



第5図 NBIによるプラズマ電流駆動

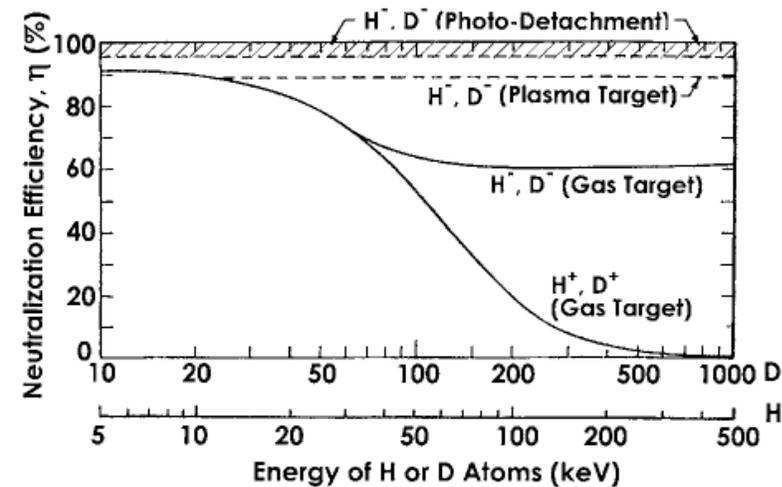
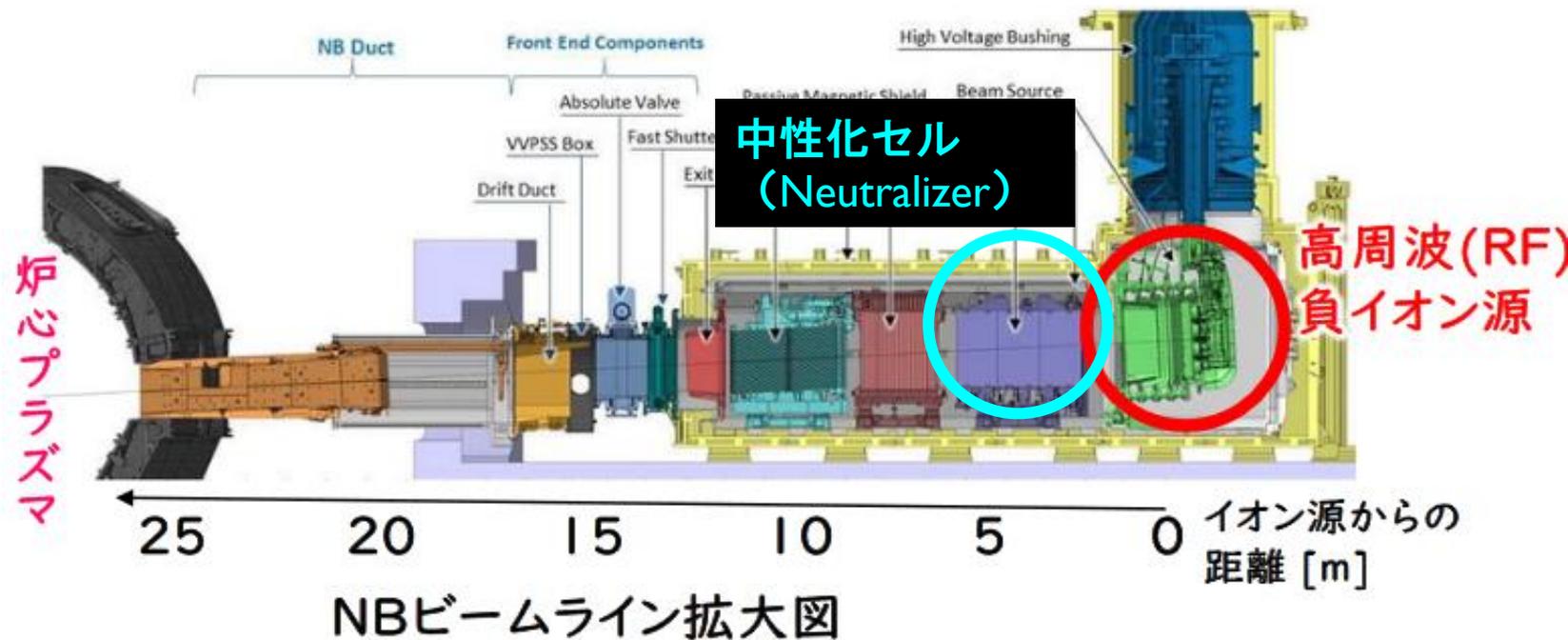


Fig. 1 Neutralization efficiency of positive and negative ion beams as a function of the beam energy of H or D atoms.



中性粒子ビーム入射加熱装置 (NBI)

[1] 日本原子力学会誌, VOL. 47, NO. 2 (2005).

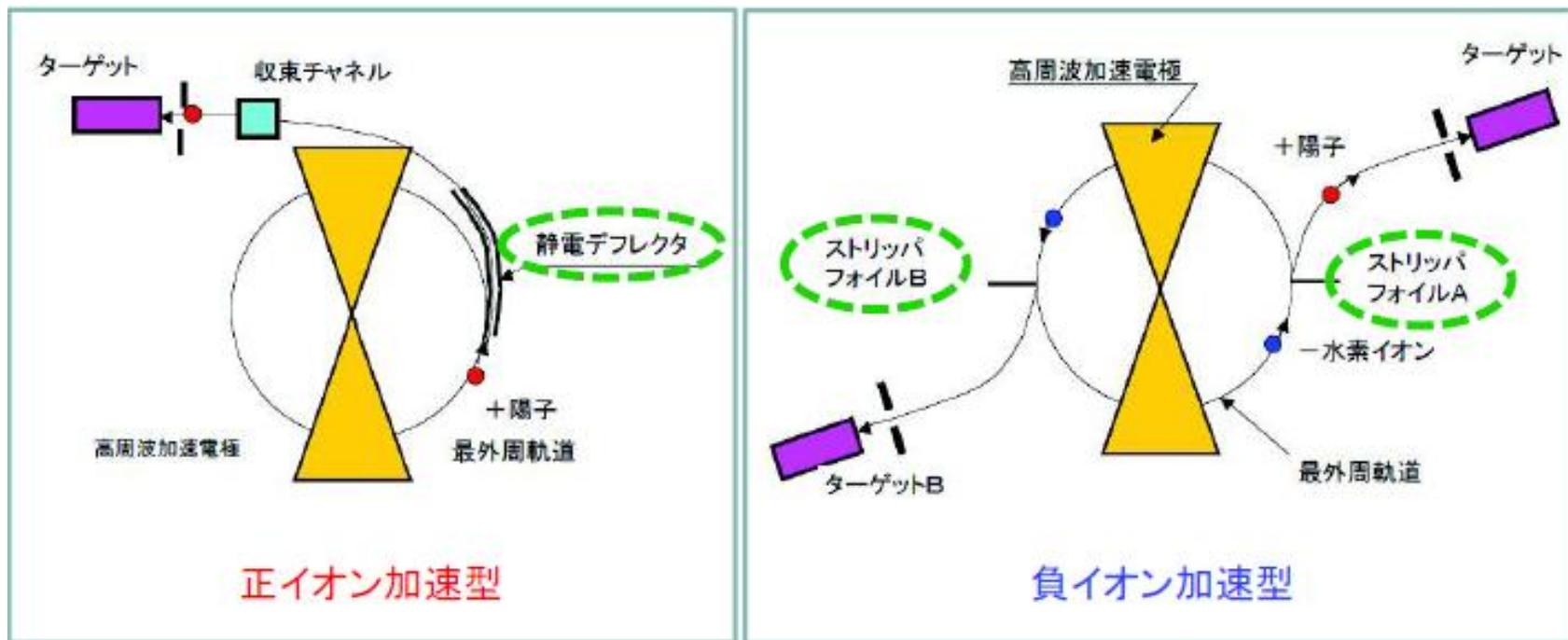
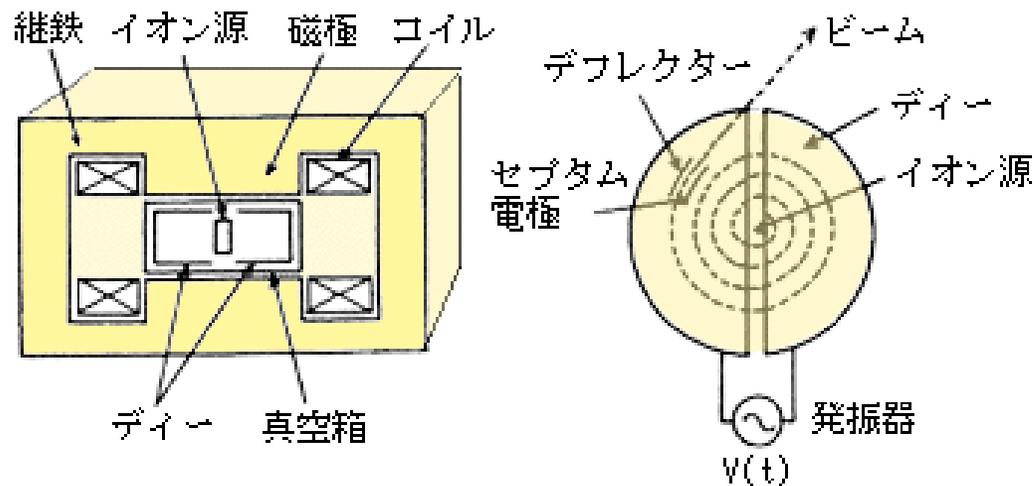
[2] C.F.BARNETT, ATOMIC DATA FOR CONTROLLED FUSION RESEARCH, ORNL-6086 V1 (1990).

負イオンの用途

サイクロトロンにおける

ビーム取り出しの効率化

- **サイクロトロン**ではイオンビームを周回させながら加速を行う。
※紙面垂直方向に磁場を印加することでビームを周回させる。
- 陽子ビームを加速する場合、静電デフレクタによる取り出しの際にビームロスが増加
- 負イオンビームを加速した後、**取り出し部で荷電変換**することで、**ビームロスを低減**することが可能



正イオン・負イオン加速型サイクロトロン

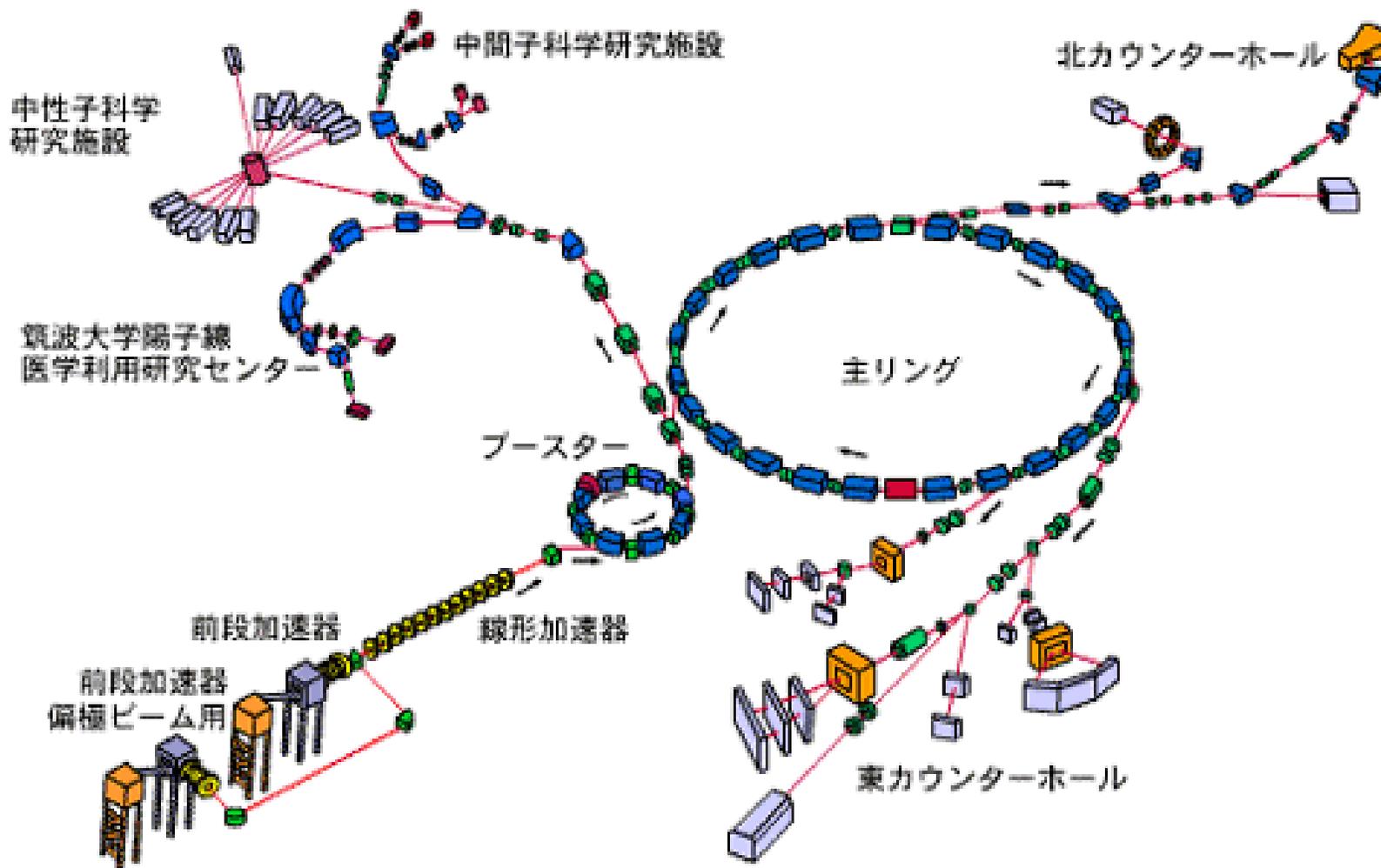
[1] 熊田幸生, 「小型サイクロトロンへの挑戦」 (住友重機械 量子機器事業センター) より引用。

[2] KEKキッズサイエンティスト 「サイクロトロン」 (<https://www2.kek.jp/kids/accelerator/accelerator02.html>) .

負イオンの用途

シンクロトロンにおける
大強度陽子ビームの生成

- **シンクロトロン**などの円形加速器では、周回するイオンビームに新たなビームを合流させることで、ビーム増強を行う(多重入射法)



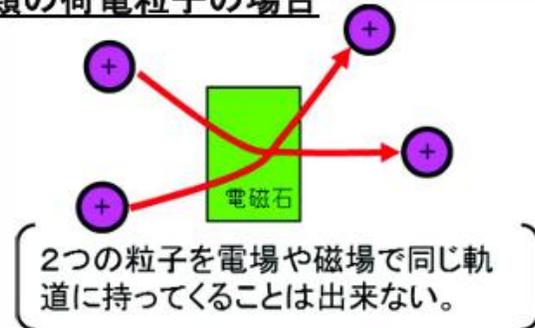
KEK 12GEV陽子シンクロトロン

負イオンの用途

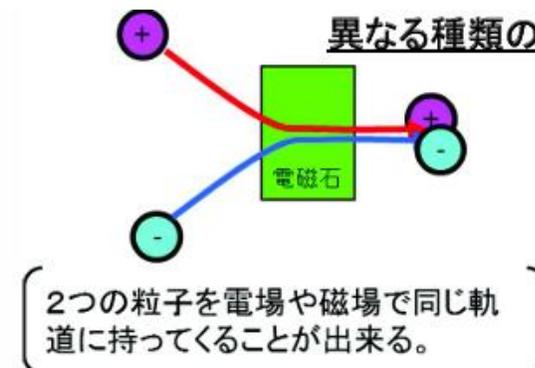
シンクロトロンにおける 大強度陽子ビームの生成

- 周回する陽子ビームに、新たな陽子ビームを合流させることは難しい。
- そこで、**負水素イオンビームを合流**させた後に**荷電変換を行う**ことで、効率よく大強度ビームを生成できる

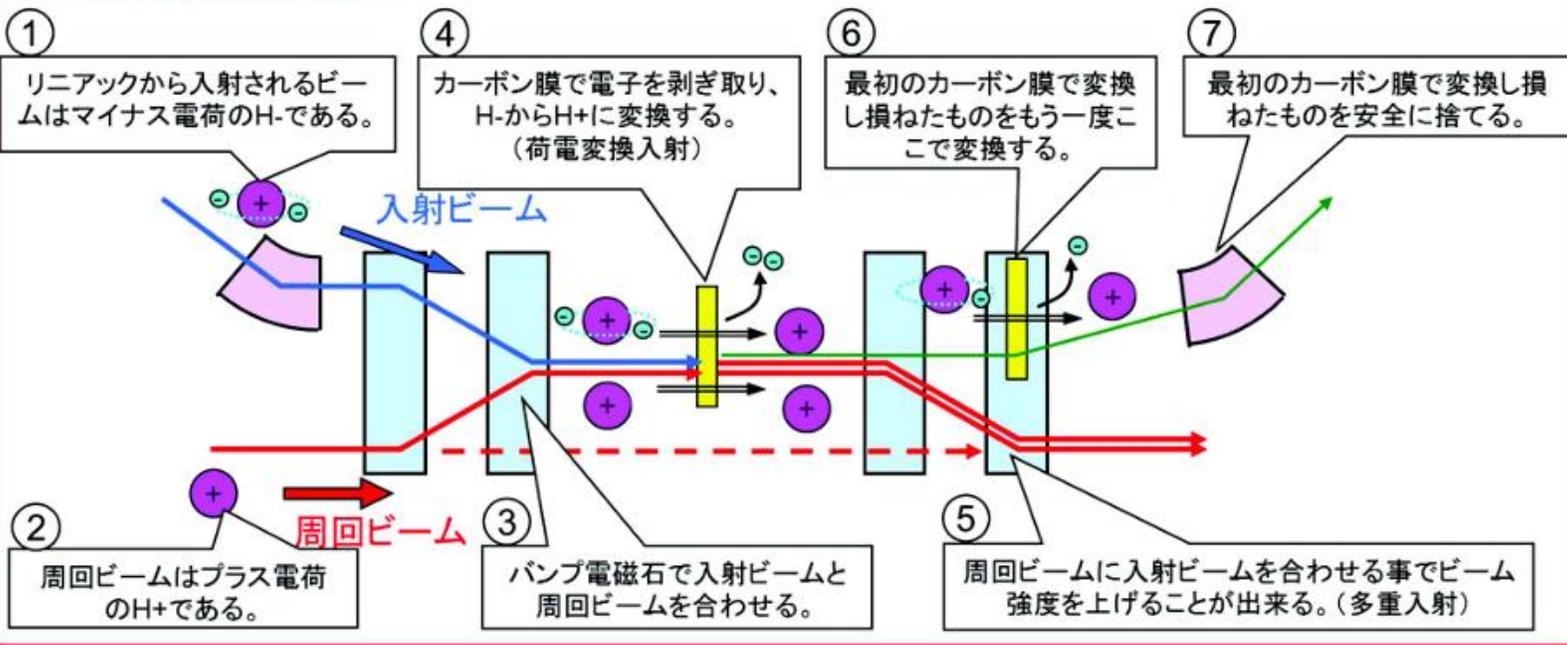
同じ種類の荷電粒子の場合



異なる種類の荷電粒子の場合



ビーム入射の仕組み

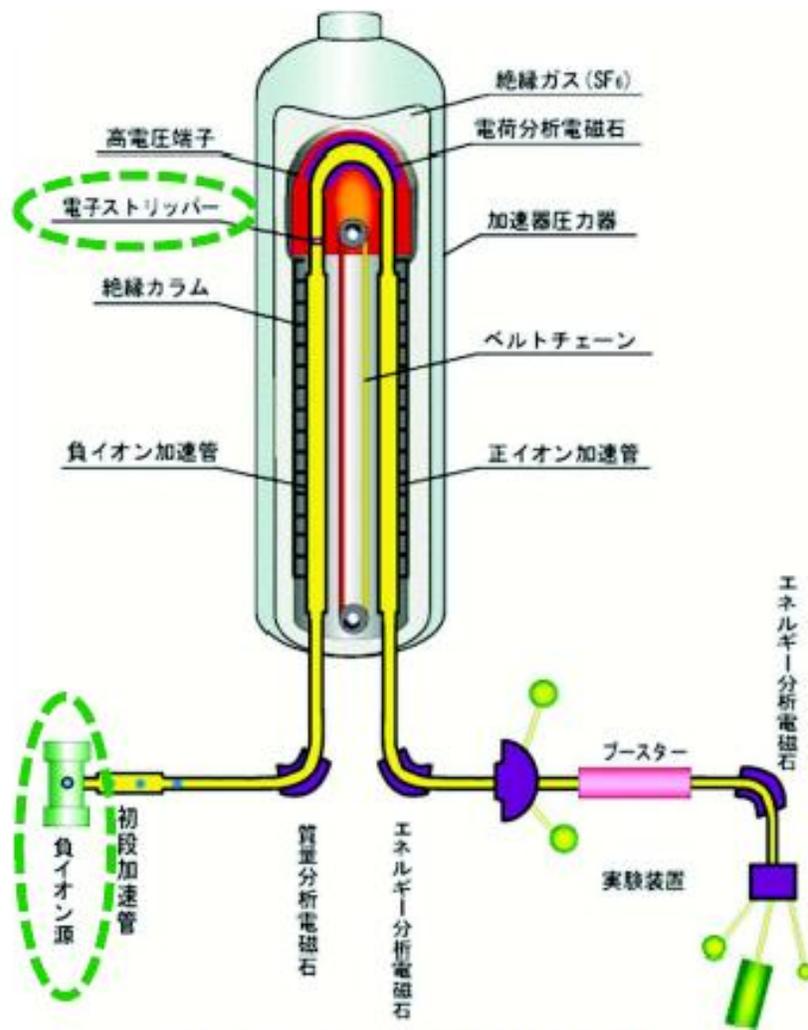


陽子加速器 (シンクロトロン) における多重入射法

負イオンの用途

タンデム加速器

- 負イオンビームを静電加速した後に荷電変換によって正イオンビームを作る。
- 同じ高電圧ステージを利用して再度ビーム加速する。
- イオン源本体を地上に置くことができる、また印加電圧をビームエネルギーより小さく設定できる利点がある。



JAERIタンデム加速器の概念図

(図: 日本原子力研究開発機構 タンデム加速器HPより引用)



$$E = (1+n)V$$

E: イオンエネルギー
n: 電荷
V: ターミナル電圧

タンデム加速器

[1] 原子力機構タンデム加速器 (<https://ttandem.jaea.go.jp/>)

[2] 若狭湾エネルギー研究センター (<https://www.werc.or.jp/outline/shisetsu/gaiyo/tandem.html>)

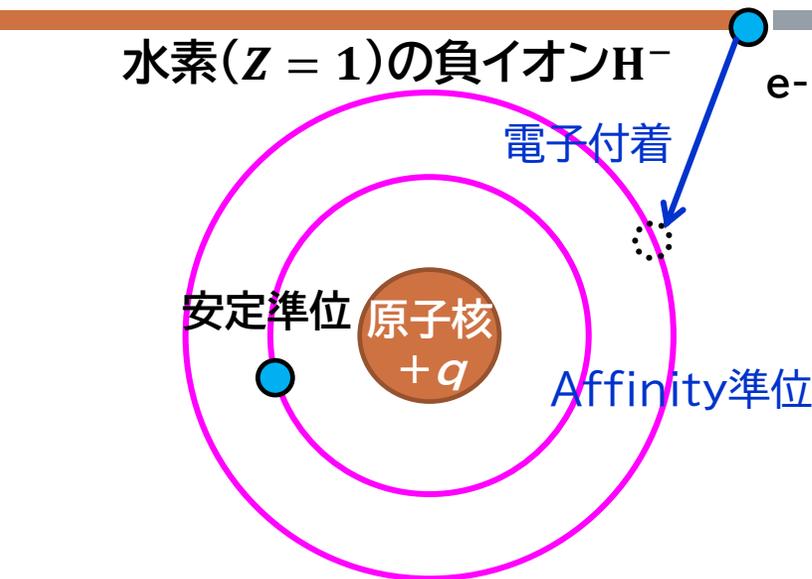
負イオンの原理

少しだけ講義っぽいお話、、、

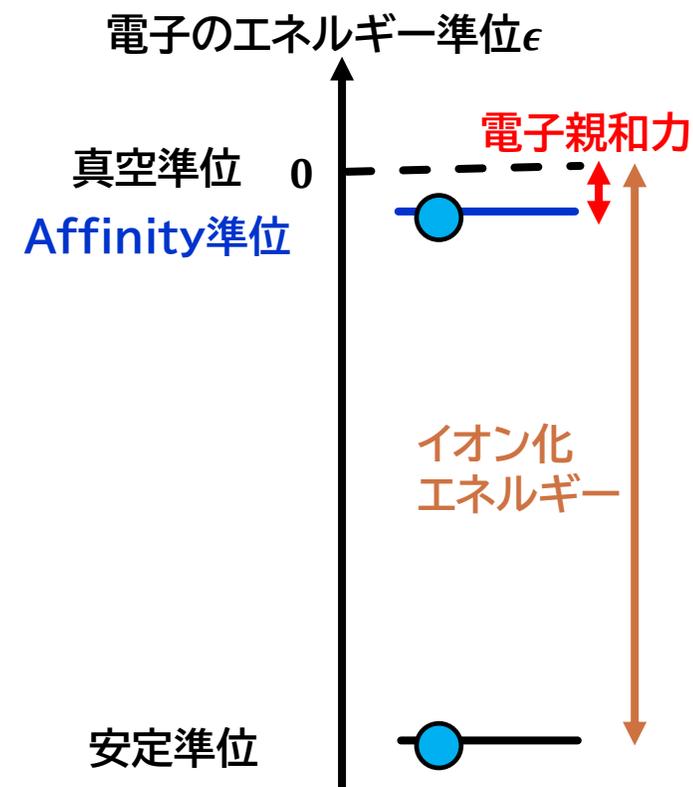
- 負イオンとはどういう状態か？
- 負イオンの生成方法(水素の場合を例にとって説明)
 - 体積生成過程
 - 表面生成過程
- イオンビーム生成のための特有なイオン源構造

負イオンとは どういう状態か？

- **負イオン** ... 原子・分子に電子を1つ以上付着した状態。負の電荷を持つ。
- **電子親和力** ... 原子の最外殻の準位に、外から電子を1つ付着させた際のエネルギー利得。
- **電子付着** ... 原子・分子の最外殻軌道に外部電子が入り、負イオンが生成される。



元素	電子親和力(eV)
H	0.754
He	< 0
Li	0.652
B	0.28
C	1.268
O	1.462
F	3.399
Ne	< 0
Na	0.546
Cl	3.615
Ar	< 0
K	0.5012



$$\epsilon = -\frac{Z^2 m q^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \times \frac{1}{p^2} \quad (p = 1, 2, 3, \dots)$$

負イオンの体積生成

体積生成過程 (2ステップの反応)

① 振動励起水素分子の生成



- 水素分子の振動準位 v は、**高速電子** e_{fast}^- との衝突によって励起される。
- 電子温度が5 eV程度**のとき、 $v \geq 9$ 以上の高い準位を持つ振動励起分子が多く生成される。

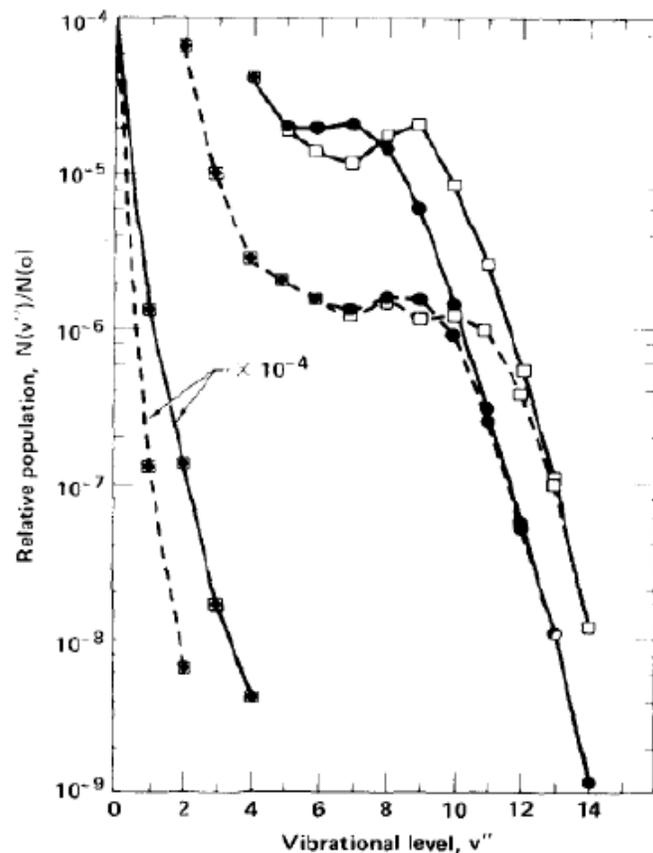
② 負イオンの体積生成



- 高準位の振動励起分子と**低速電子** e_{slow}^- が衝突する際、負イオンが生成される。
- 電子温度が1 eV以下**であるとき、負イオンの生成効率が高い。

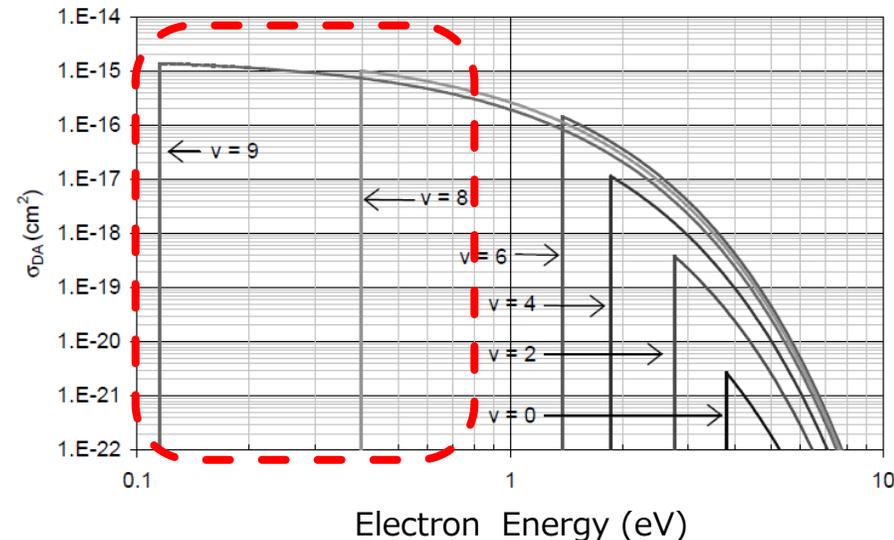
①②の反応を起こすためには、...

⇒ イオン源内で2つの電子温度領域を作る必要がある。

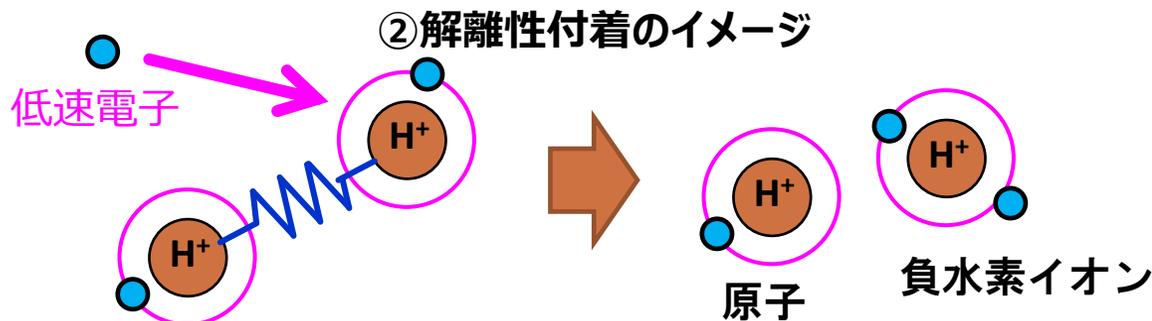
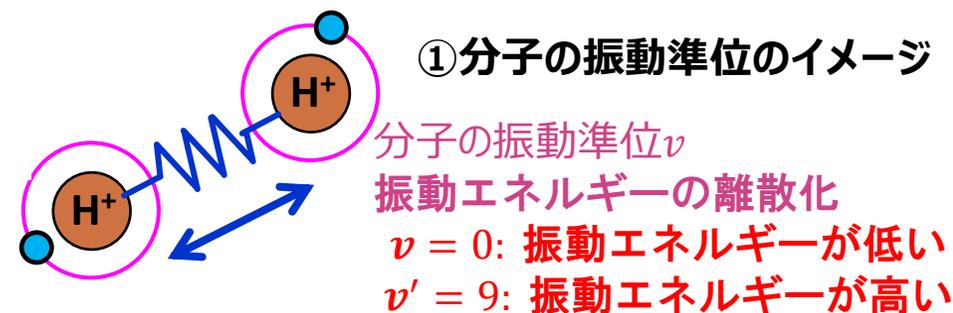


[1] J. R. HISKES, ET AL., J. APPL. PHYS. 53, 3469 (1982).

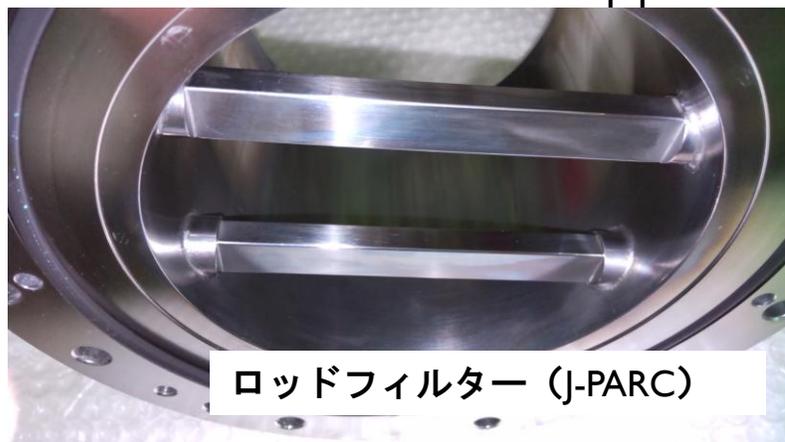
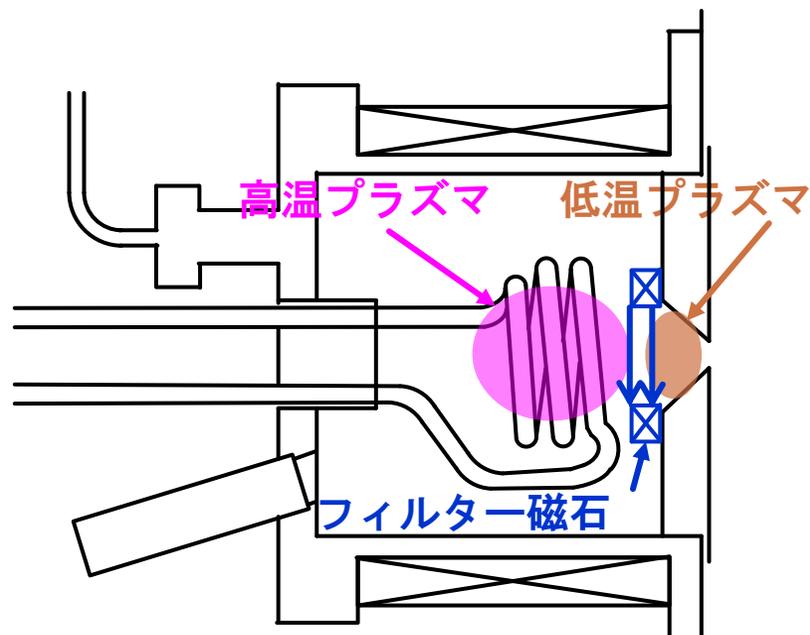
Dissociative electron attachment $e + \text{H}_2(v) \rightarrow \text{H}(1s) + \text{H}^-$



[2] R. K. JANEV, ET AL., JULICH REPORT NO. JUEL-4105 (2003).

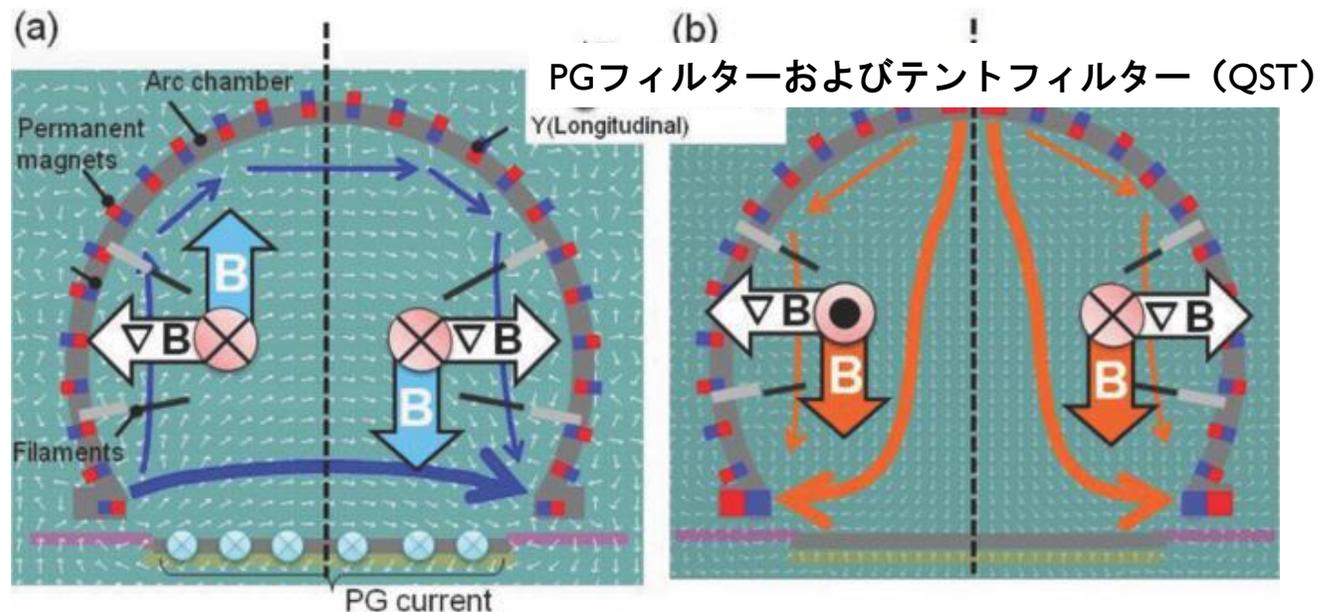
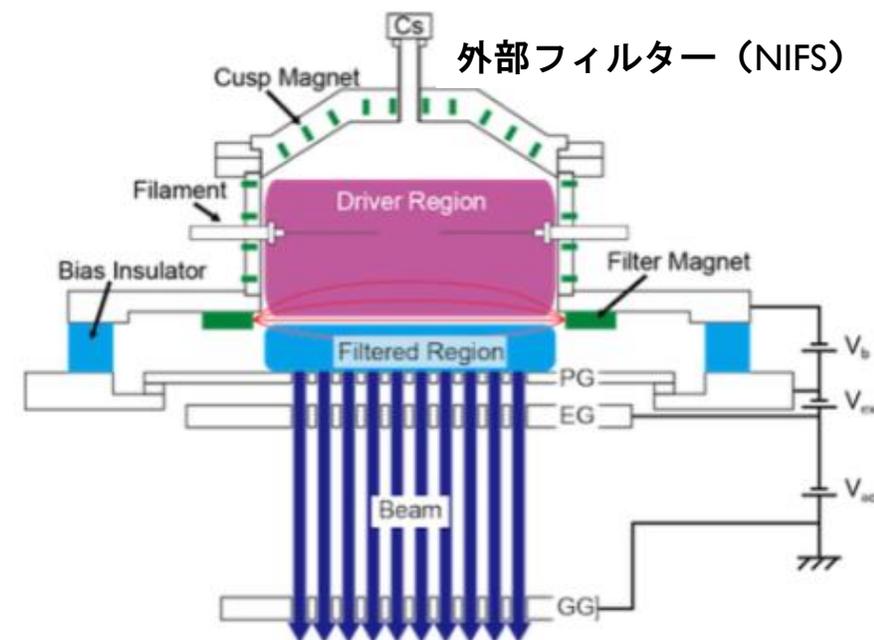


特有のイオン源構造 1 : フィルター磁石の導入



フィルター磁場

- イオン源のプラズマ生成領域とビーム引き出し孔付近の間に、垂直磁場を印加する(永久磁石、DC電流などを利用)。
- **フィルター磁場(数100 Gauss程度)**をプラズマが横切ると、電子温度は低下する。



[1] H. NAKANO, ET AL., J. INST. **11**, C03018 (2016).
[2] M. YOSHIDA, ET AL., REV. SCI. INSTRUM. **85**, 02B314 (2014).

特有のイオン源構造 1 : フィルター磁石の導入

磁力線垂直拡散

- **なぜフィルター磁場で電子温度が下がるのか？**
- 電子や正イオンは、サイクロトロン運動によって磁力線に巻きつく。衝突が頻繁に起こると、粒子は磁力線を跨いで拡散する；

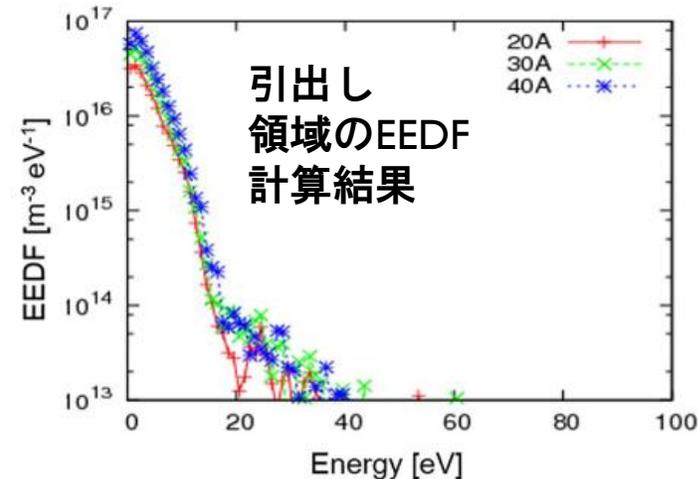
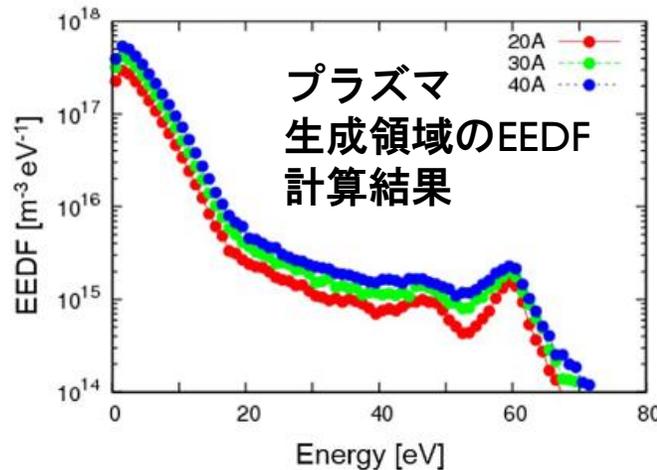
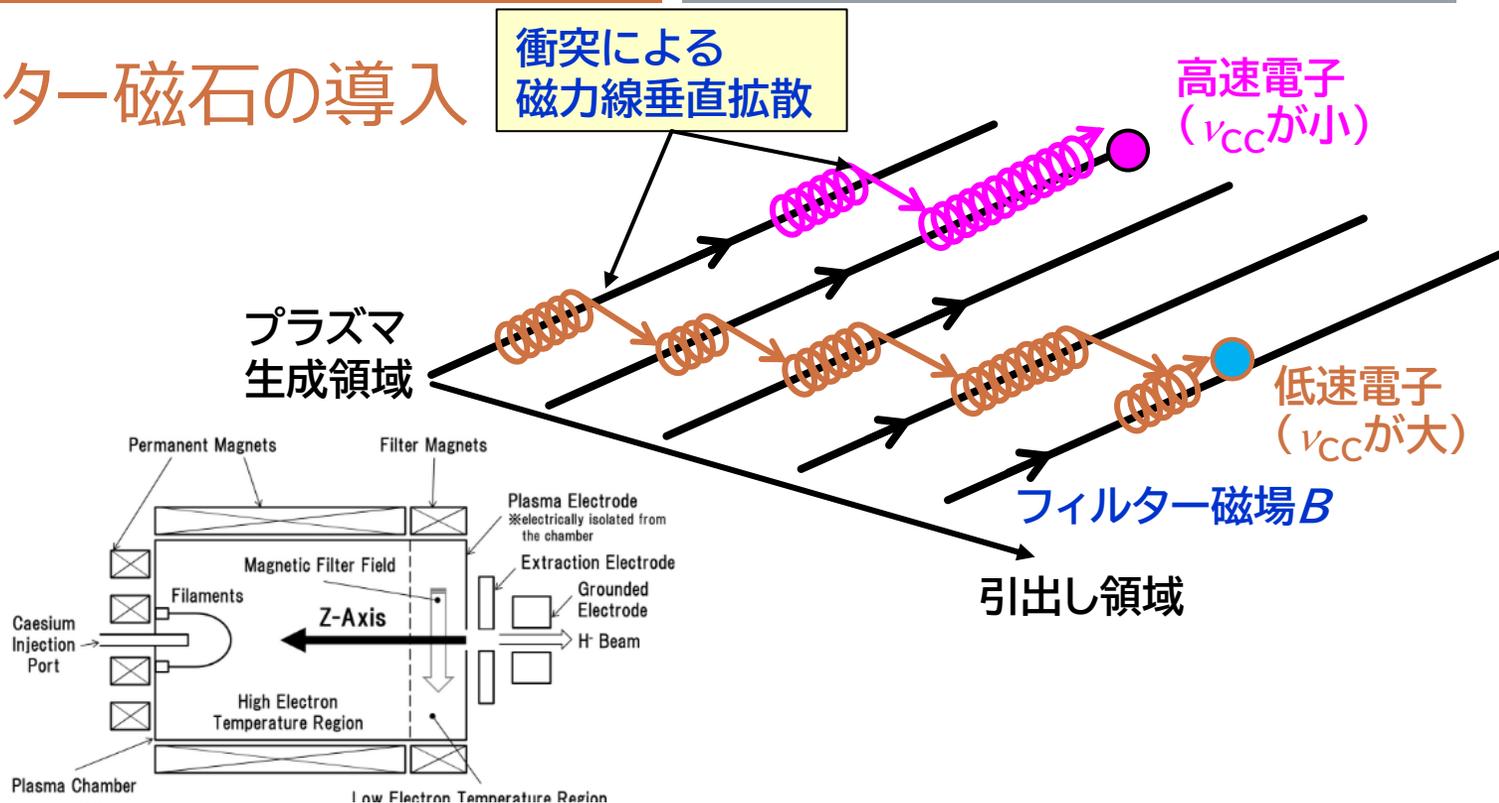
$$D = \frac{k_B T}{mv}, \quad D_{\perp} = \frac{D}{(1 + \omega_C^2 / v^2)}$$

クーロン衝突

- 電子や正イオン間のクーロン衝突は、エネルギーが低いほど頻繁に起こる；

$$\nu_{CC} = \frac{q_A^2 q_B^2 n_p \ln \Lambda}{8\pi \epsilon_0^2 \mu^2 u^3}$$

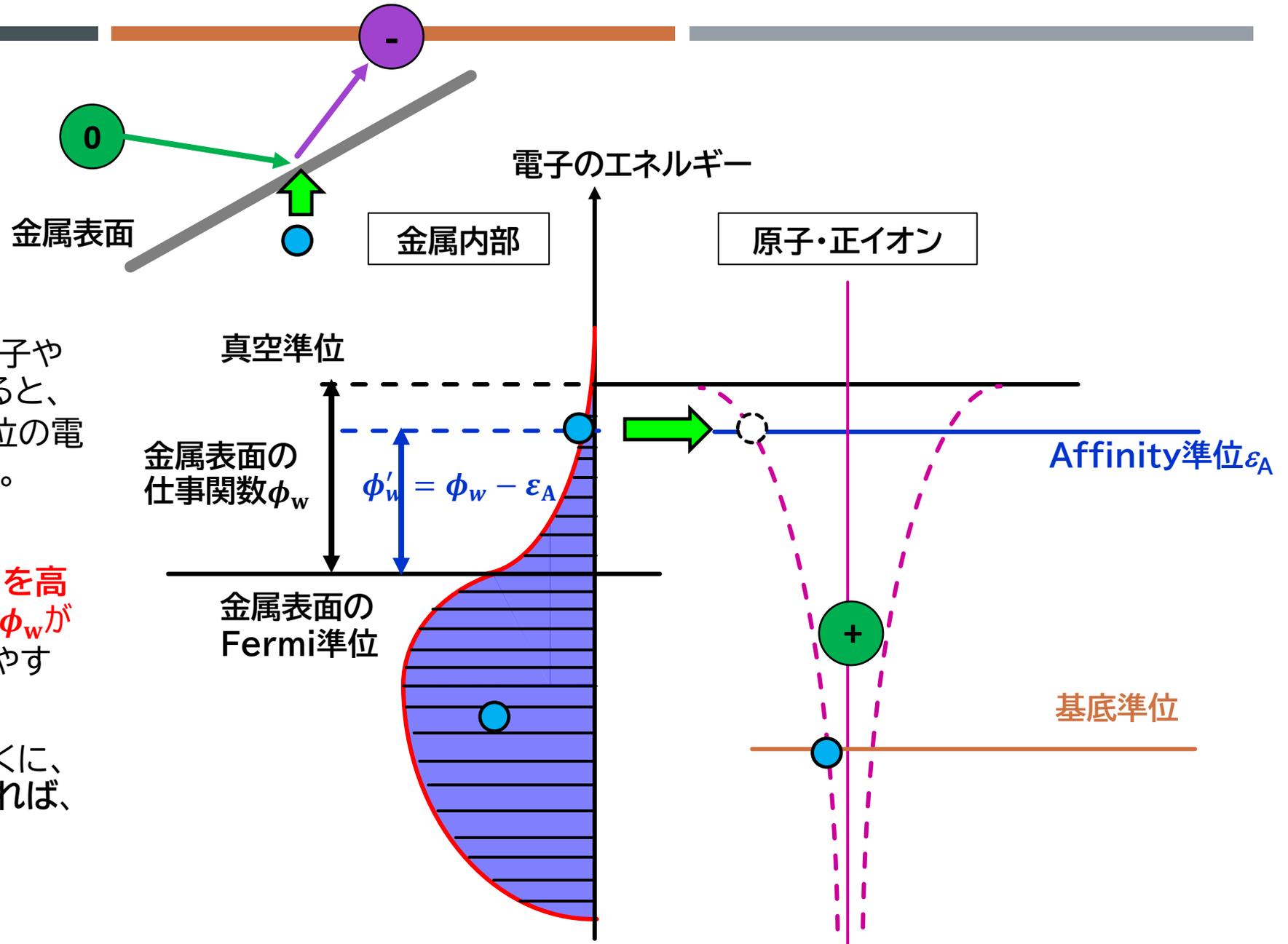
- **低エネルギー電子のみがクーロン衝突による拡散の影響を強く受けてフィルター磁場を横切る。**
- その結果、低い電子温度領域が形成される。



[1] M. ONAI, ET AL., AIP CONF. PROC. **1869**, 030043 (2017).

[2] H. ETOH, ET AL., PLASMA FUSION RES. **11**, 2406063 (2016).

負イオンの表面生成



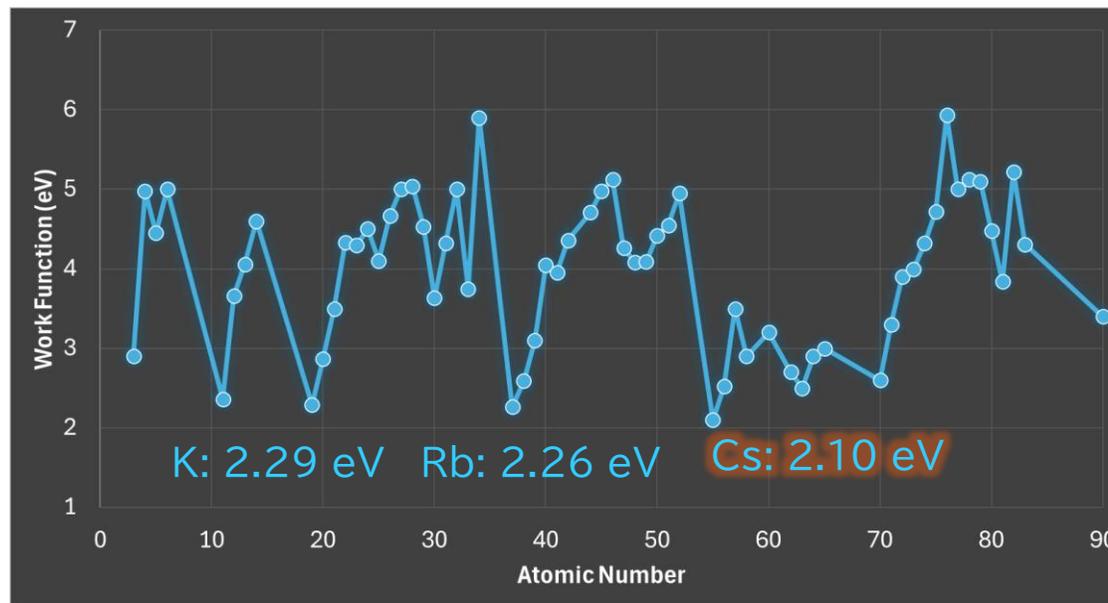
表面生成過程

- 仕事関数の低い金属表面に、原子や正イオン(H^0, H^+ など)が入射すると、金属内部の電子が Affinity 準位の電子軌道へと遷移することがある。
 $H^0, H^+ + \text{wall}(\text{low } \phi_w) \rightarrow H^-$
- 遷移確率(≡負イオン生成確率)を高めるためには、金属の仕事関数 ϕ_w が低い(金属から電子が飛び出しやすい)ことが望ましい。
- イオン源のビーム引出し孔の近くに、 ϕ_w の低い金属表面を用意できれば、負イオンビームを増強できる。
- どうやって？

特有のイオン源構造 2 : イオン源へのセシウム (CS) 金属の導入

低仕事関数の金属表面

- 単体の元素で見ると、セシウム (Cs) などのアルカリ金属 (イオン化エネルギーが高い元素) が低い仕事関数を持つ。
- **モリブデンやタングステン**など電極材料となる金属表面に**Cs**などの元素を**0.5 – 0.6原子層程度**の厚みで**堆積させる**ことで、仕事関数をさらに下げることが可能。



イオン源の電極材料	セシウム付着なし	セシウム付着時
モリブデン(Mo)	4.2 eV	1.54 – 1.82 eV
タングステン(W)	4.52 eV	1.52 – 1.80 eV
SS304	4.21 eV	1.52 – 1.60 eV

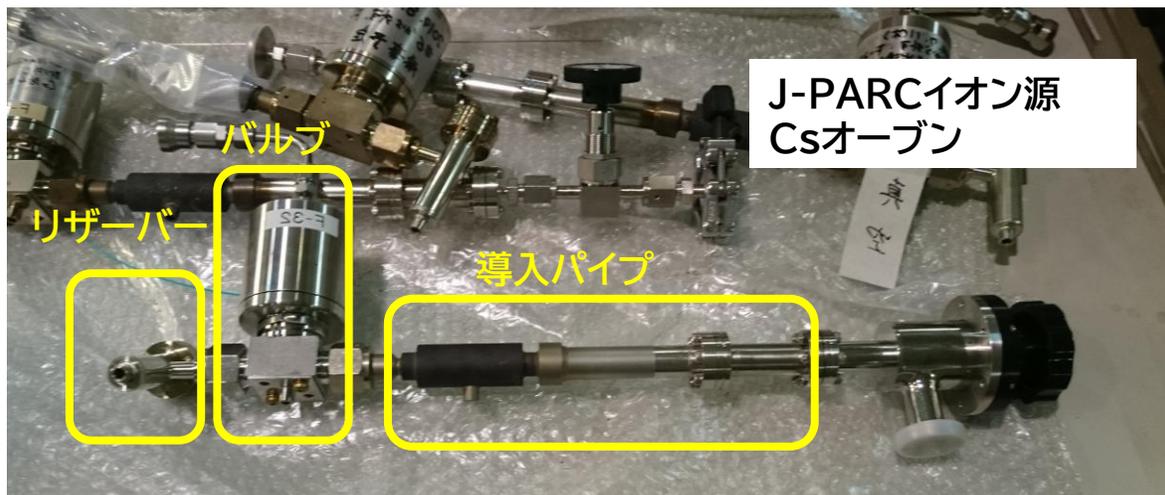
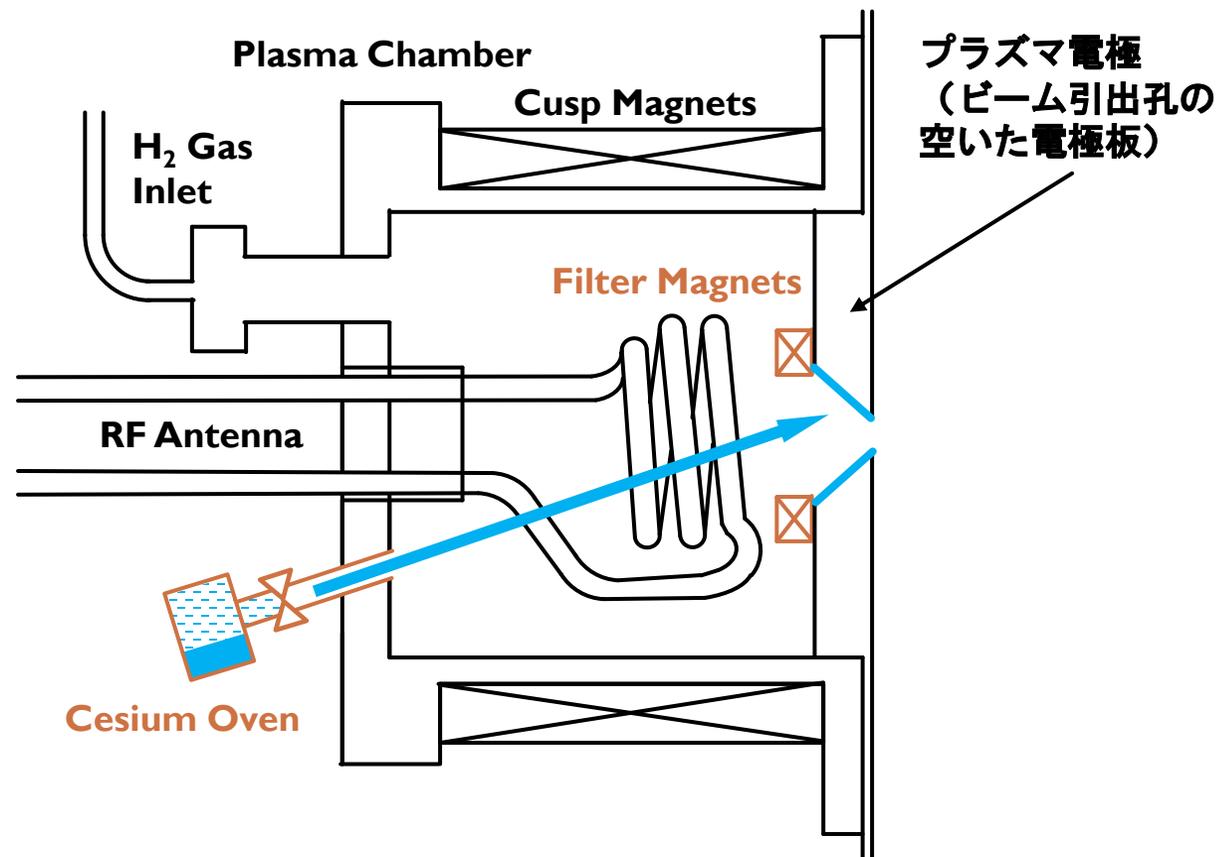
[1] G.S.TOMPA, ET AL., SUR.SCI.185, L453-L458 (1987).

[2] LIBRETEXTS CHEMISTRY (https://chem.libretexts.org/ancillary_materials/reference).

特有のイオン源構造 2 : イオン源へのセシウム (CS) 金属の導入

Csオーブンによる導入

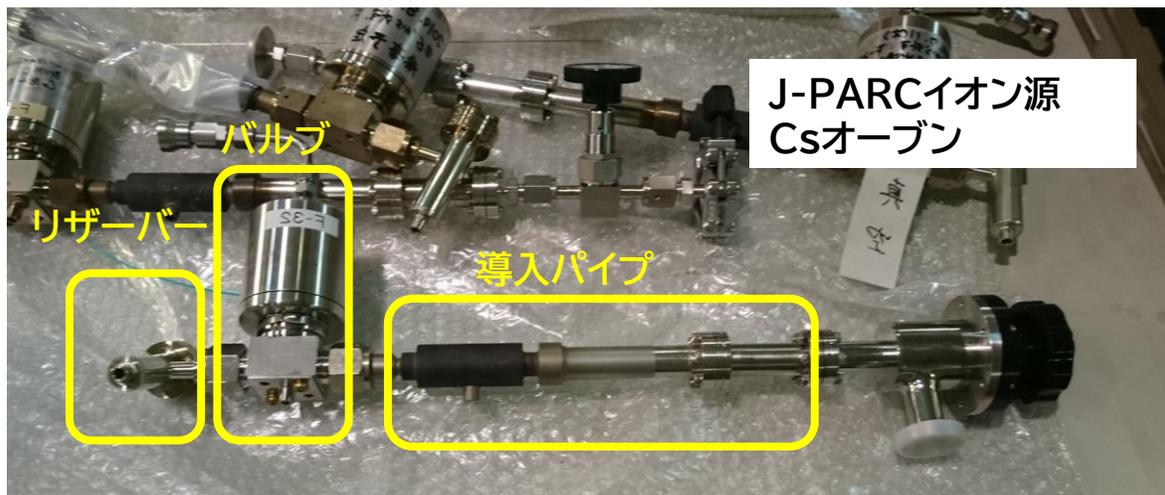
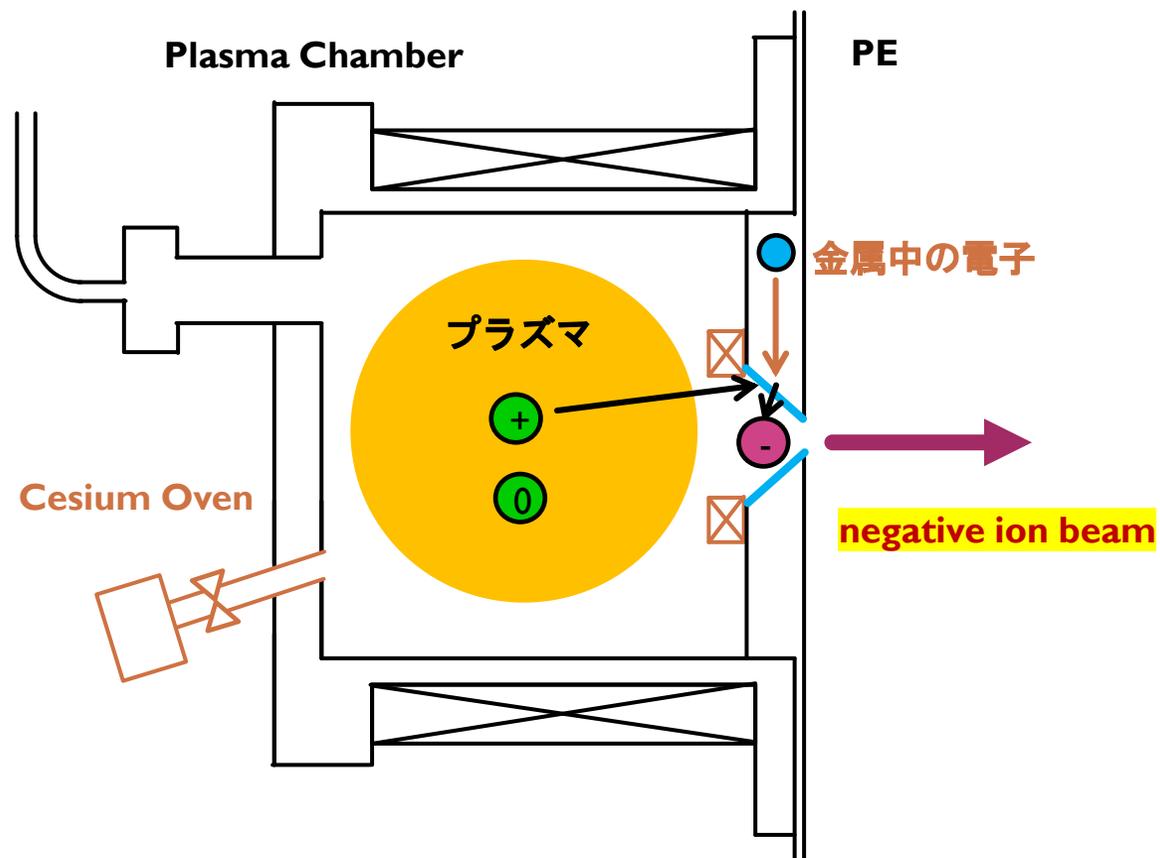
- Csを充填したオーブンを加熱することで、蒸気となったCsをイオン源チャンバー内部に導入する。
- Csはイオン源の電極板 (ビーム引出孔の近く) に蒸着する。
- プラズマ中の原子や正イオンが電極板に入射することで、負イオンが生成される (そのままビームとして引き出される)。



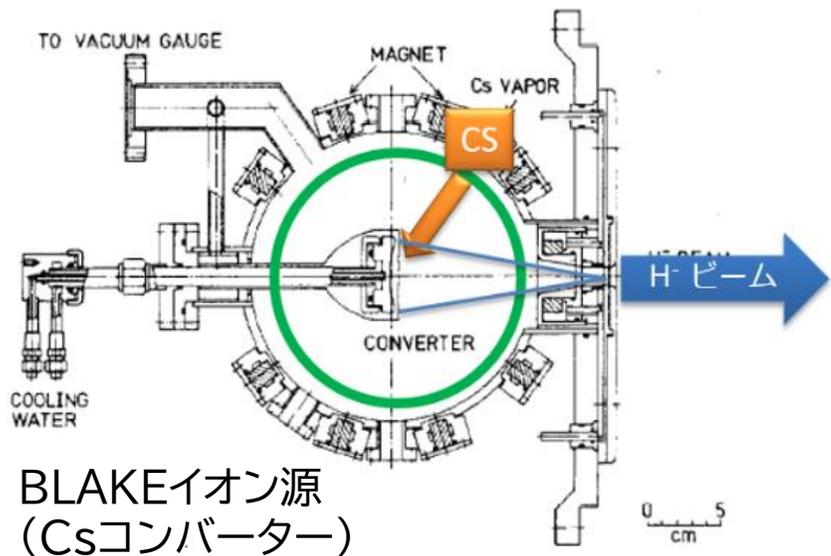
特有のイオン源構造 2 : イオン源へのセシウム (CS) 金属の導入

Csオーブンによる導入

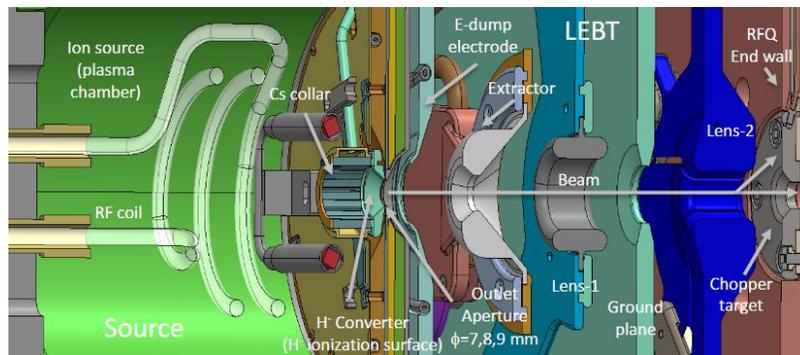
- Csを充填したオーブンを加熱することで、蒸気となったCsをイオン源チャンバー内部に導入する。
- Csはイオン源の電極板 (ビーム引出孔の近く) に蒸着する。
- プラズマ中の原子や正イオンが電極板に入射することで、負イオンが生成される (そのままビームとして引き出される)。



特有のイオン源構造 2 : イオン源へのセシウム (CS) 金属の導入

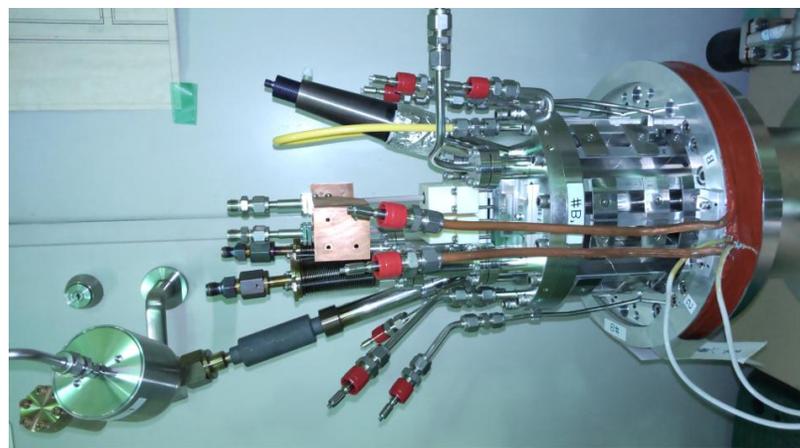


BLAKEイオン源
(Csコンバーター)



ORNL-SNSイオン源
(Csカラー)

CERN-LINAC4イオン源
(Csオーブン洗浄機)



J-PARCイオン源(Csオーブン)



J-PARCイオン源
(Csオーブン充填作業)

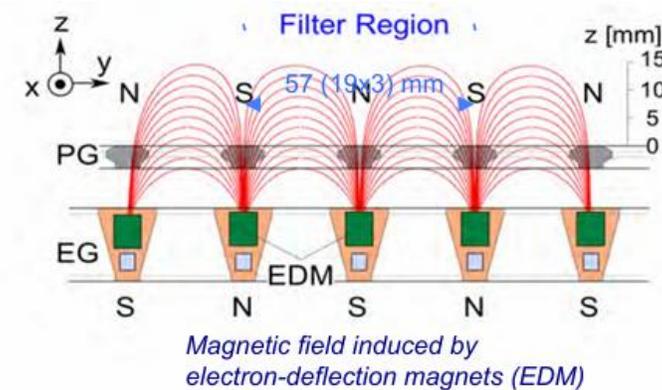
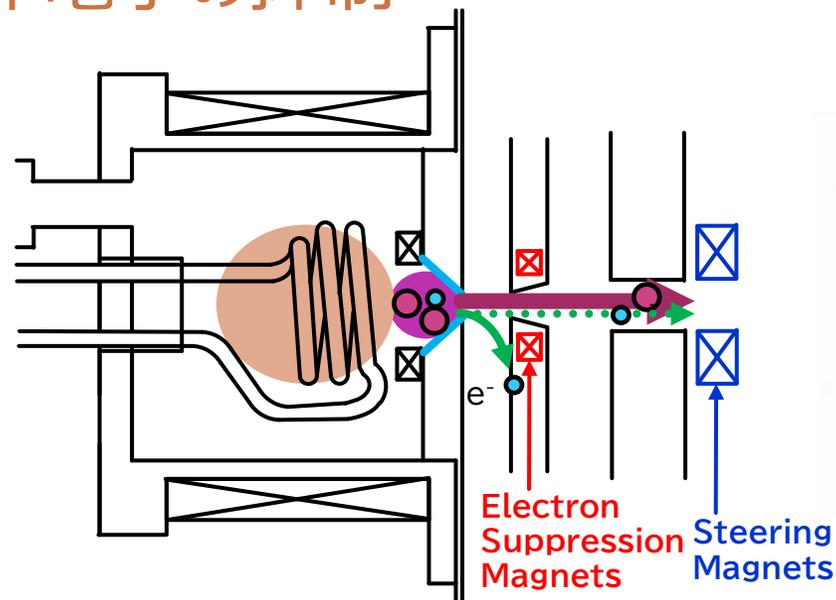


[1] A. TAKAGI, ET AL., IEEE TRANS. NUCL. SCI. **32**, 1782-1784 (1985).
[2] R. WELTON, ET AL., J. PHYS: CONF. SER. **2743**, 012029 (2024).

特有のイオン源構造 3 : 随伴電子の抑制

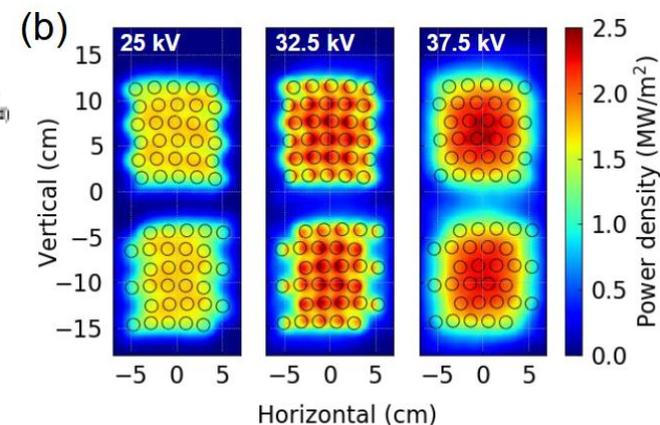
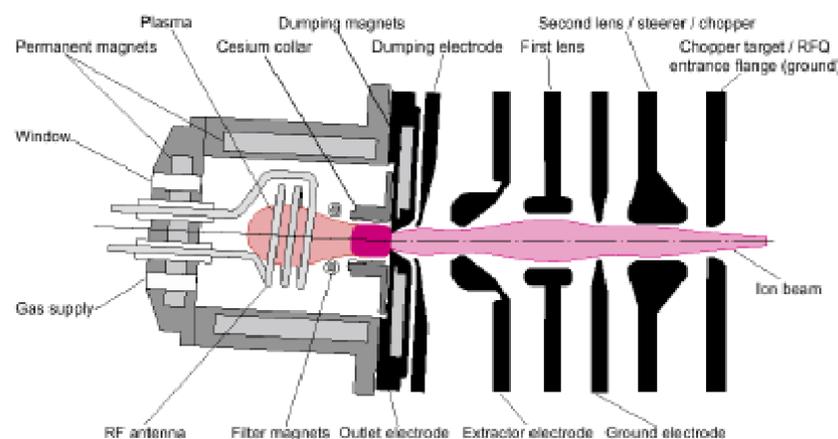
負イオンの静電加速

- 負イオンの静電加速を行うと、電子も引き出されてしまう。
- 加速された随伴電子は、電極の広い領域に衝突することで不純物の発生や放電を誘起する。場合によっては、電極自体を損耗させる要因にもなる。



電子抑制磁石の導入

- ビームが十分に加速される前の初段加速において、垂直磁場を用いて電子だけを捕捉する。
- 一方、負イオンの種類によってはビーム軌道も曲がってしまうので後段部で補正する。

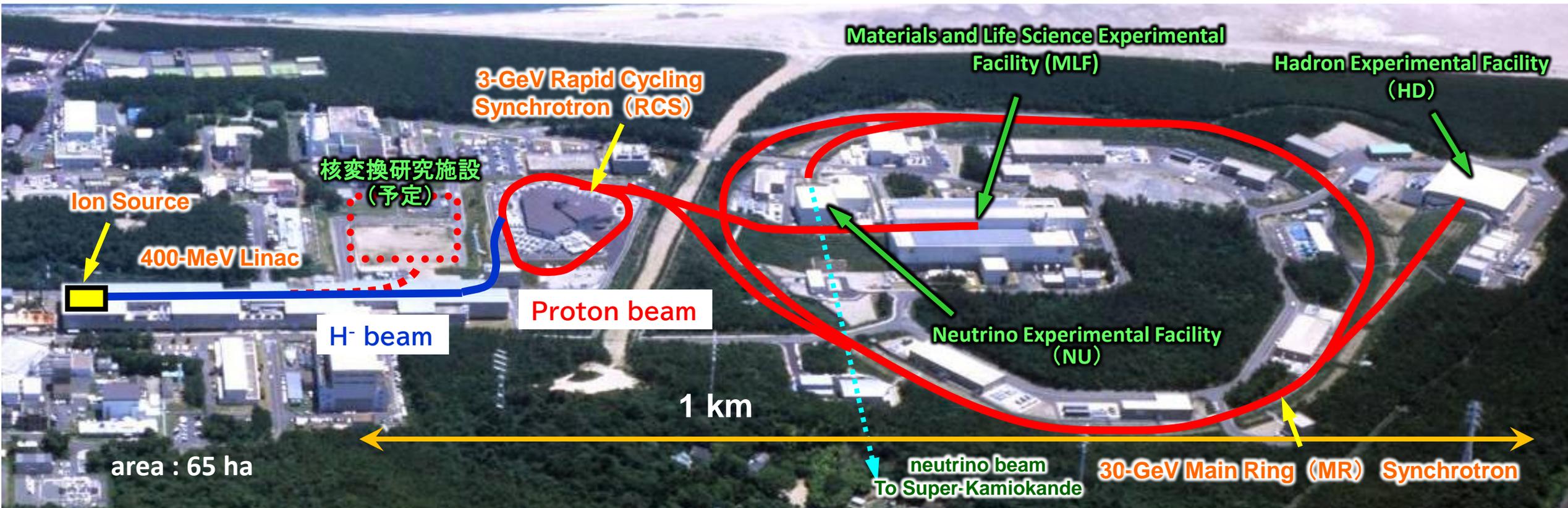


[1] R.KELLER, ET AL., NASA STI/RECON TECHNICAL REPORT N. 639. (2002).
[2] K.TSUMORI, AND M.WADA, APPL. PHYS. REV. **8**, 021314 (2021).
[3] U.FANTZ, ET AL., J. PHYS.: CONF. SER. **2244**, 012049 (2022).

負イオン源の実践

- 大強度陽子加速器施設 J-PARC の紹介
- 負イオン源の目標と課題①: 長寿命化・メンテナンスレス
- 負イオン源の目標と課題②: ビームの安定供給
- 負イオン源の目標と課題③: ビームの大電流化

大強度陽子加速器施設 J-PARC の紹介



● Linac

- ビーム粒子 : H⁻
- ビームエネルギー : 400 MeV
- ビーム電流 (peak current) :
50 mA (J-PARCユーザー利用)
60 mA (加速器スタディ用)
- ビームパルス幅・繰返し : 500 us/25 Hz

● Rapid Cycling Synchrotron (RCS)

- ビーム粒子 : H⁻ → H⁺
- ビームエネルギー : 3 GeV
- MR加速器へのビーム入射
- MLFターゲットへのビーム供給
- MLF施設へのビームパワー実績 :
1 MW (in April. 2024)

● Main Ring (MR)

- ビームエネルギー : 30 GeV
- ビームパワー :
➢ **800 kW** (in June 2024) to NU
➢ **80 kW** (in June 2024)

2024年に建設当初の
目標パワーを達成!

大強度陽子加速器施設 J-PARC の紹介



物質生命科学実験施設(MLF) 実験ホール



Super-Kamiokande (ICRR, Univ. Tokyo)

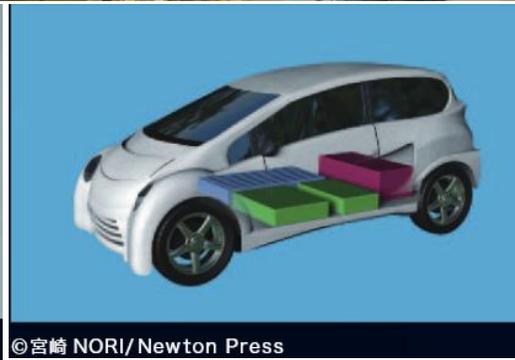
ニュートリノ実験施設



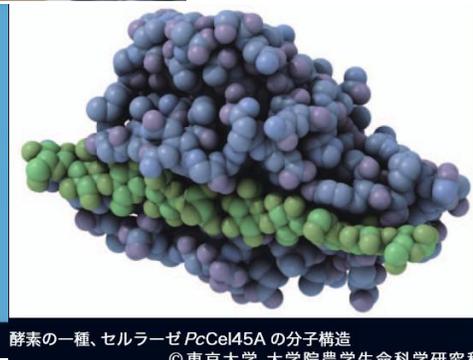
Neutrino Facility at J-PARC (KEK-JAEA, Tokai)



円筒型リチウムイオン電池

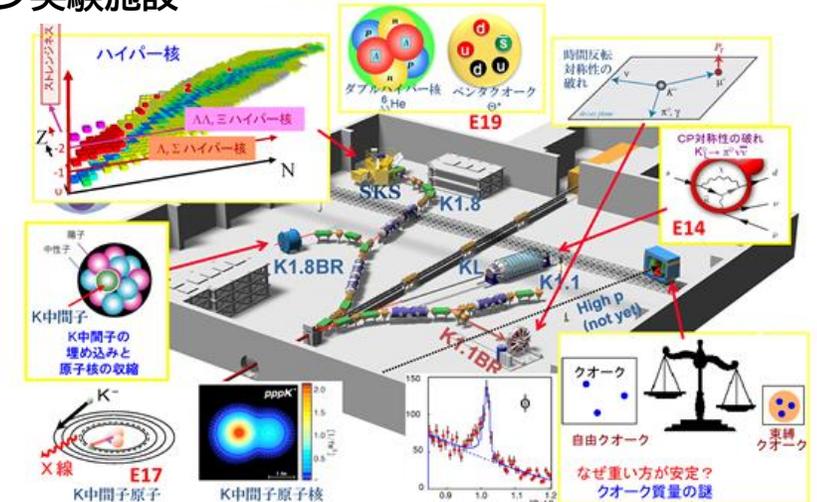


©宮崎 NORI/Newton Press

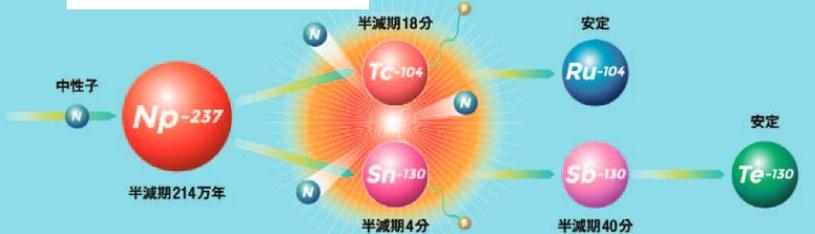


酵素の一種、セルラーゼ *PcCel45A* の分子構造
©東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物材料科学専攻 森林化学研究室

ハドロン実験施設 原子核・素粒子物理学

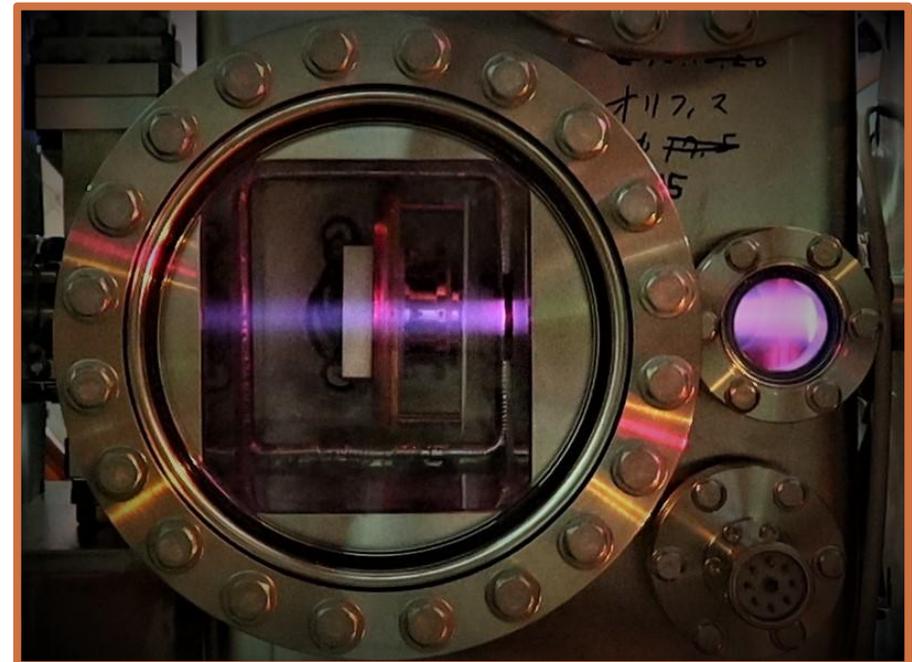
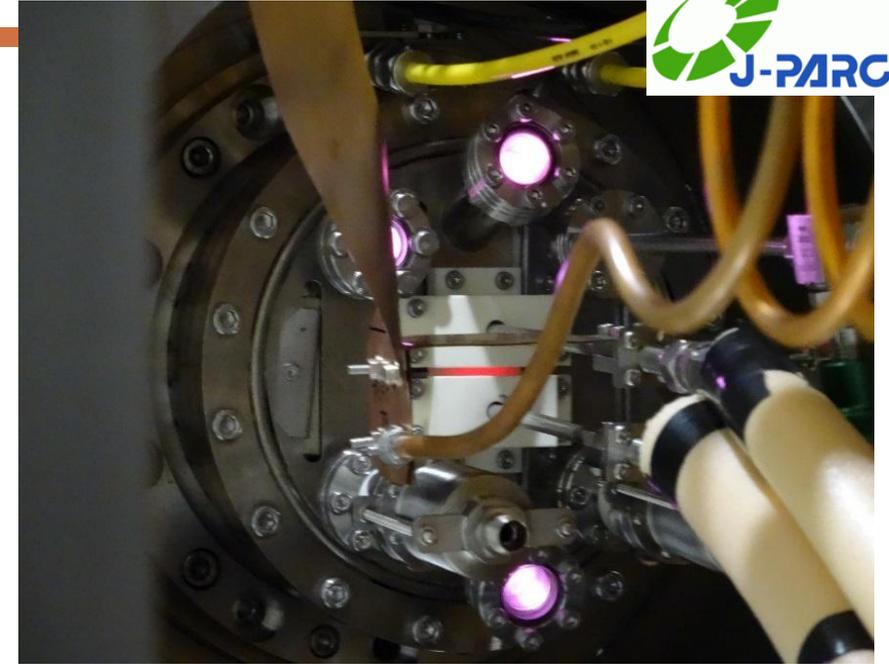
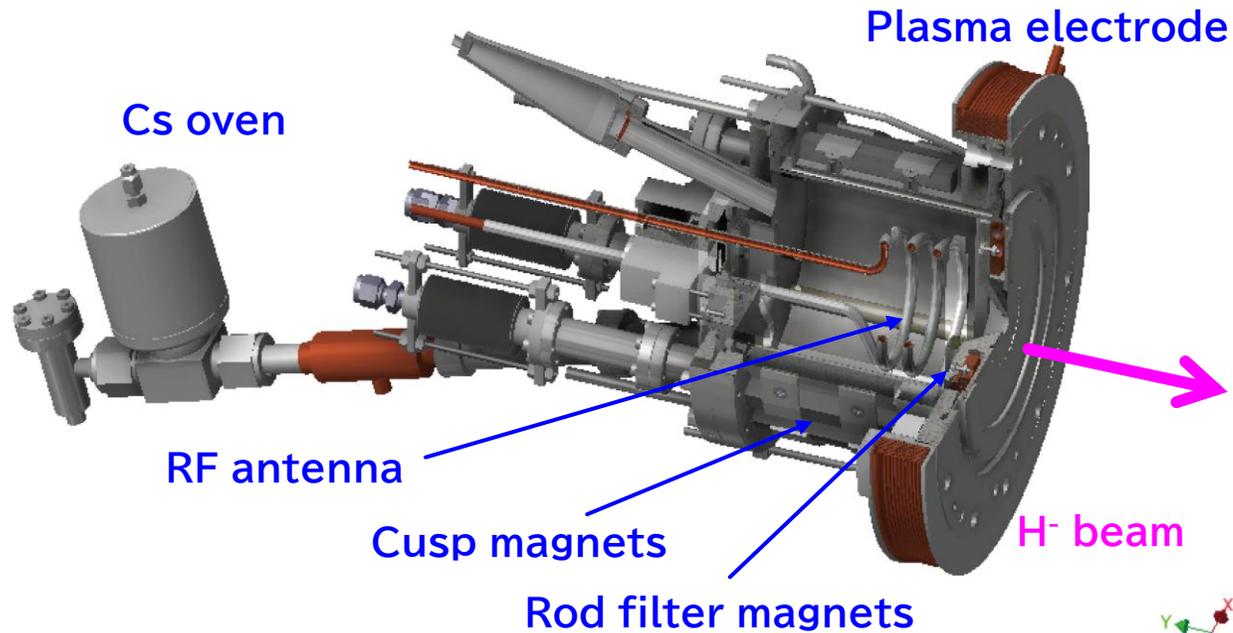


核変換の研究



各分野の実験は、毎年夏のメンテナンス期間を除いて(約7カ月)24時間実施されるため、J-PARCの加速器も連続した陽子ビーム供給運転を要する。

J-PARCの負水素イオン源



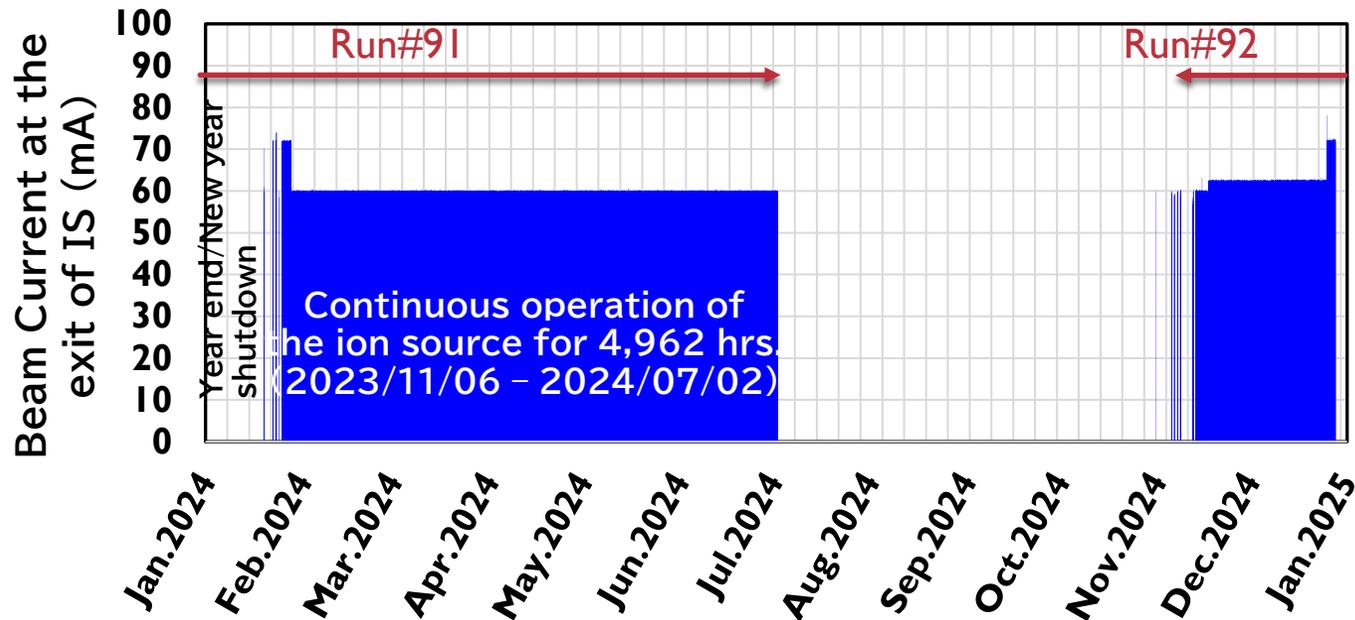
J-PARC高周波(RF)放電型 負水素イオン源: 2014年 - 現在

- RFアンテナによる誘導結合型プラズマ点灯、マルチカusp磁場配位
- Csオーブンとロッドフィルター磁石により、負イオン生成を促進する
- J-PARC利用運転: **60mA±0.3mA**のH⁻イオンビーム出力
- 年間の連続運転時間: **約5000時間**(duty factor 2.0%)
- ビームエミッタンス: 0.2 - 0.3 π mm mrad

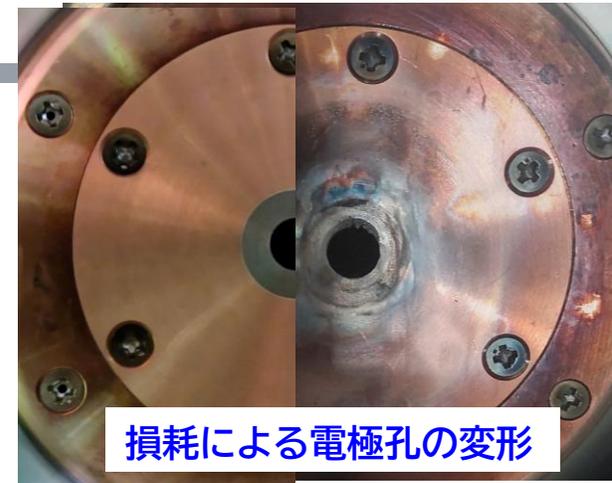
負イオン源の目標と課題①: 長寿命化・メンテナンスレス

- J-PARCなど陽子加速器では”availability”の維持が重要
- 核融合分野、大型加速器分野では、メンテナンス頻度を極力減らしたい
- 課題: Csオーブンに充填したCsの枯渇
- 課題: ビーム偏極によるイオン源機器の損耗
- 課題: フィラメントなど短寿命部品を使用しないイオン源の開発

Ion Source Operation Trend (2024 Jan. - 2024 Dec.)

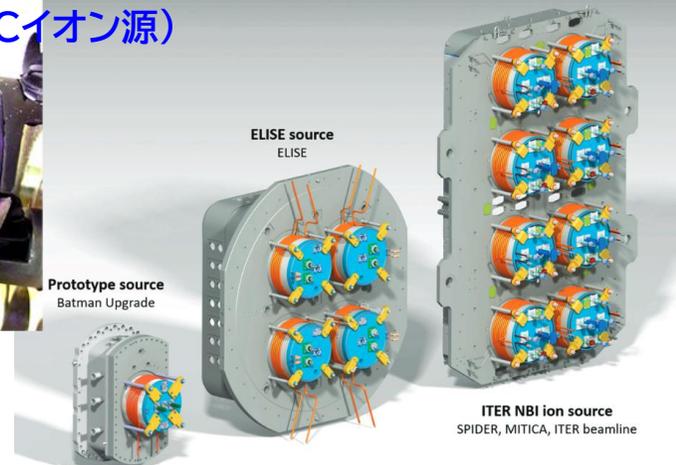
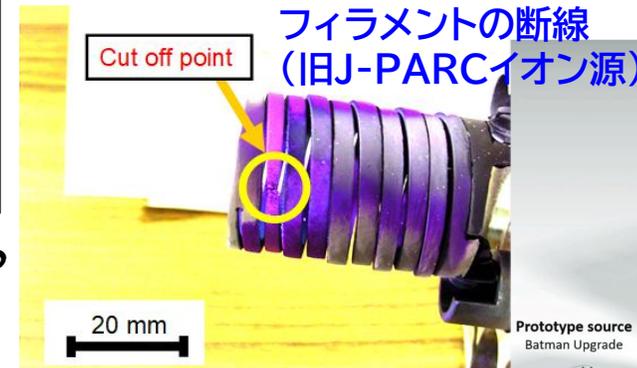


Csオーブン内の残量確認(目視)



Cs consumption in 5 months

- filled Cs amount : 2.49g
- Cs remain: 2.40 g
- estimation of Cs consumption in RUN#86
 - Cs consumption rate : 4mg/h @180°C
 - Cs VLV open duration : 79,074 sec = 22 hrs.
 - Total Cs consumption : **88 mg**



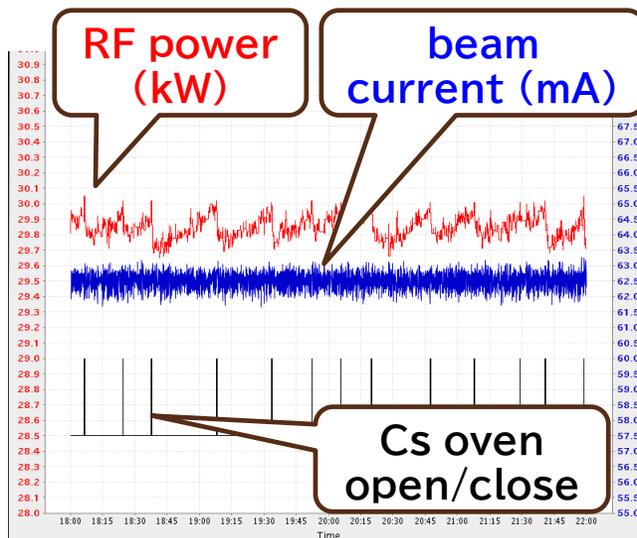
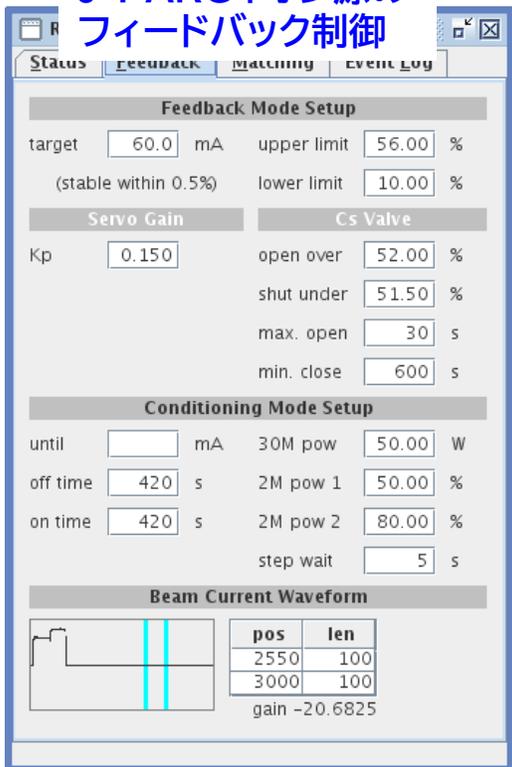
NIFSでは2022年からRFイオン源運転開始!

[1] J-PARC LINAC GR., J-PARC ACCELERATOR TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE (A-TAC) 2025.
 [2] T. SHIBATA, ET AL., J. PHYS.: CONF. SER. 2244, 012041 (2022).
 [3] D. WUENDERLICH, ET AL., NUCL. FUSION 61 096023 (2021).

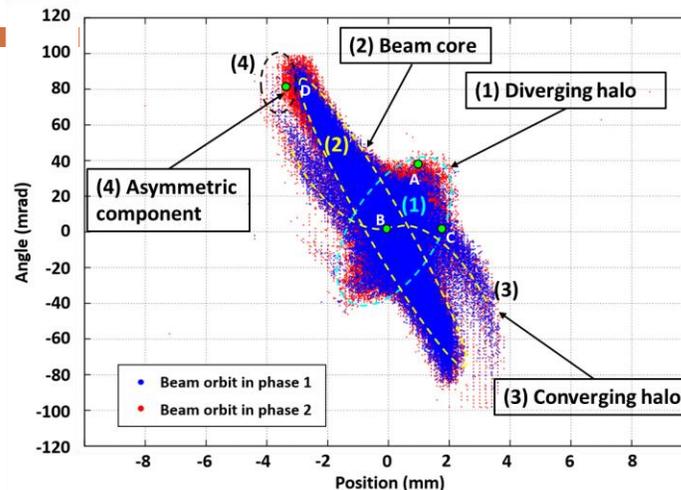
負イオン源の目標と課題②: ビームの安定供給

- 加速器、医療分野など、ビーム電流のfluctuation低減が必要
- 高周波放電型イオン源ではビームパラメータが振動する機構
- **課題: Cs導入のフィードバック(FB)制御**
- **課題: 高周波放電型イオン源の振動抑制手法の開発**

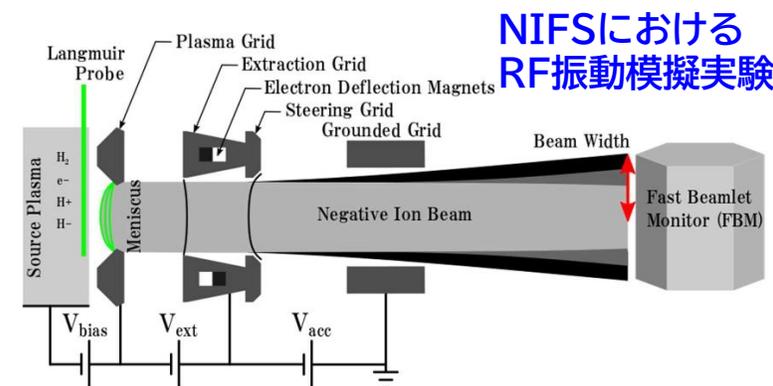
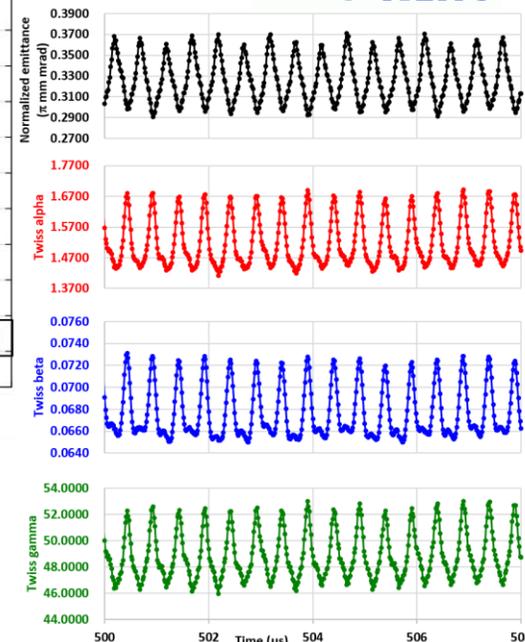
J-PARCイオン源のフィードバック制御



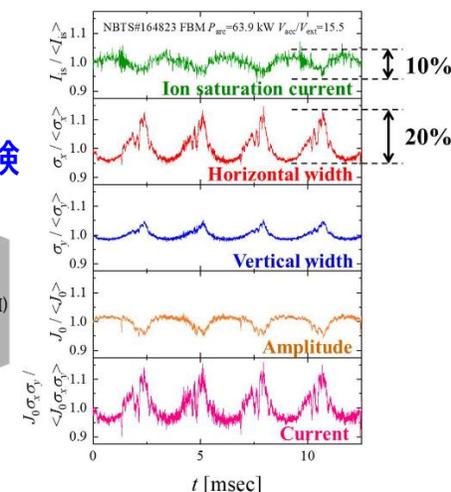
- ※FBシーケンス
- (1) ビーム電流減少感知
⇒ 高周波電力増加
 - (2) 高周波電力上限値到達
⇒ Csオープンバルブ開放



J-PARC High-speed Double-slit emittance monitor



NIFSにおけるRF振動模擬実験



[1] 小栗英知, 「J-PARC用イオン源の運転経験」, 第6回IFMIF研究会, 令和2年12月21-22日, QST六ヶ所.
[2] T. SHIBATA, *ET AL.*, AIP CONF. PROC. **2373**, 050002 (2021).

[3] K. NAGAOKA, *ET AL.*, "DIFFERENT CHARACTERISTICS OF PLASMA MENISCUS FORMATION", 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEGATIVE IONS BEAMS AND SOURCES (NIBS2020), 1 - 11 SEP. 2020, ONLINE.

負イオン源の目標と課題③: ビームの大強度化

- 加速器、核融合NBI、医療分野など負イオン源全体の目標
- **ビームエミッタンスあるいは発散角の低減に向けたプラズマ・イオンビーム輸送過程の制御**
- **課題: Plasma/beam diagnosticsの開発**
- **課題: 負イオンのNumerical model開発**

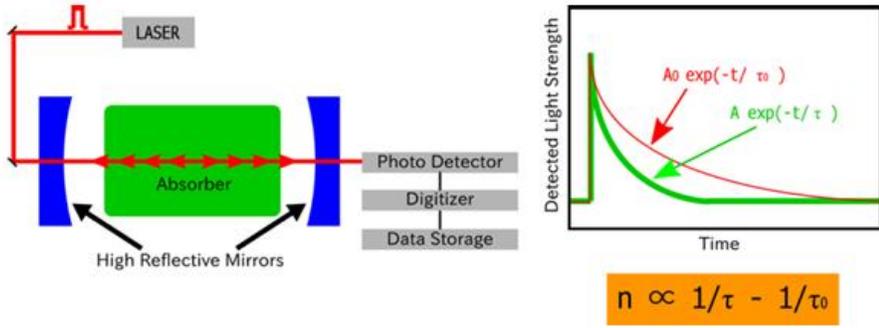


Figure 3. Principle of cavity ring-down technique (CRD).

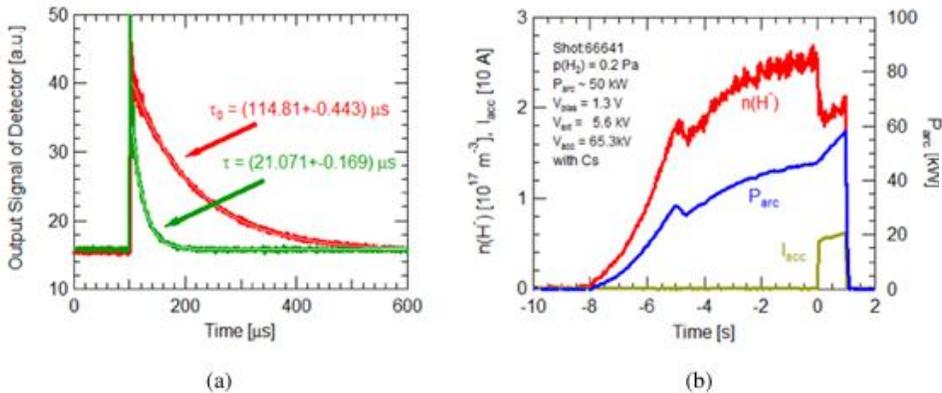
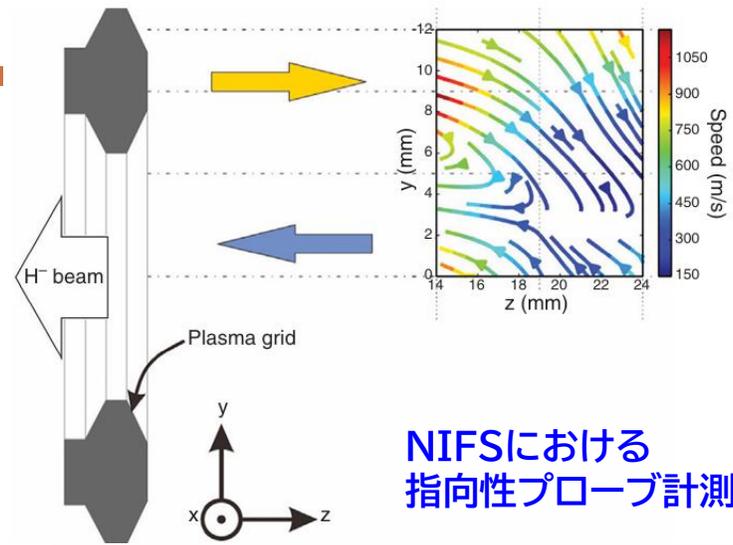
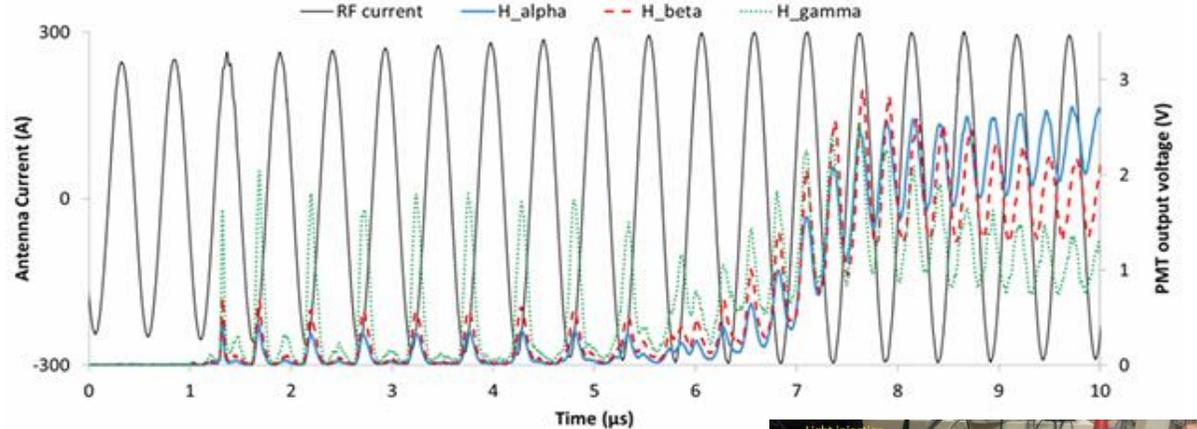
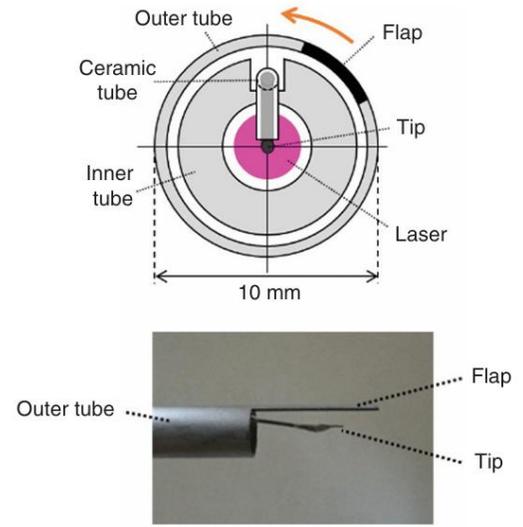


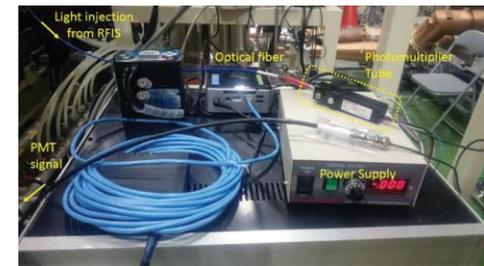
Figure 5. (a) Ringdown signals with and without plasma. (b) Time evolution of H^- density with input arc power [7].



NIFSにおける
指向性プローブ計測



H-イオン密度のCavity Ring Down (CRD)計測 (NIFS)



高速PMT発光分光計測
(CERN/J-PARC)

[1] H. NAKANO, *ET AL.*, JINST **11**, C03018 (2016).
 [2] GENG, *ET AL.*, FUSION ENG. DESIGN **123**, 481 (2017).
 [3] K.TSUMORI AND M.WADA, APPL. PHYS. REV. **8**, 012314 (2021).
 [4] J.LETTRY, *ET AL.*, AIP CONF. PROC. **1655**, 030005 (2015).
 [5] T. SHIBATA, *ET AL.*, AIP CONF. PROC. **2011**, 020008 (2018).

負イオン源の目標と課題③: ビームの大強度化

- 加速器、核融合NBI、医療分野など負イオン源全体の目標
- **ビームエミッタンスあるいは発散角の低減に向けたプラズマ・イオンビーム輸送過程の制御**
- **課題: Plasma/beam diagnosticsの開発**
- **課題: 負イオンのNumerical model開発**

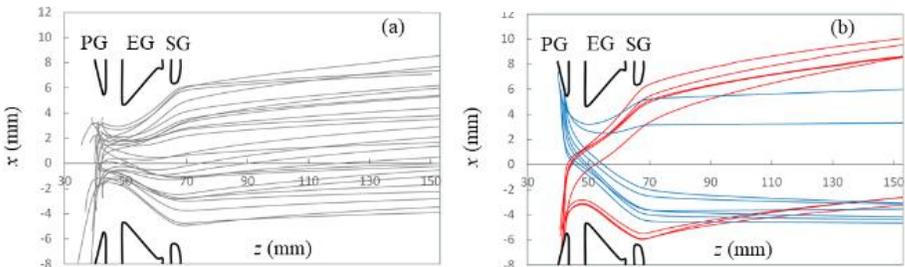
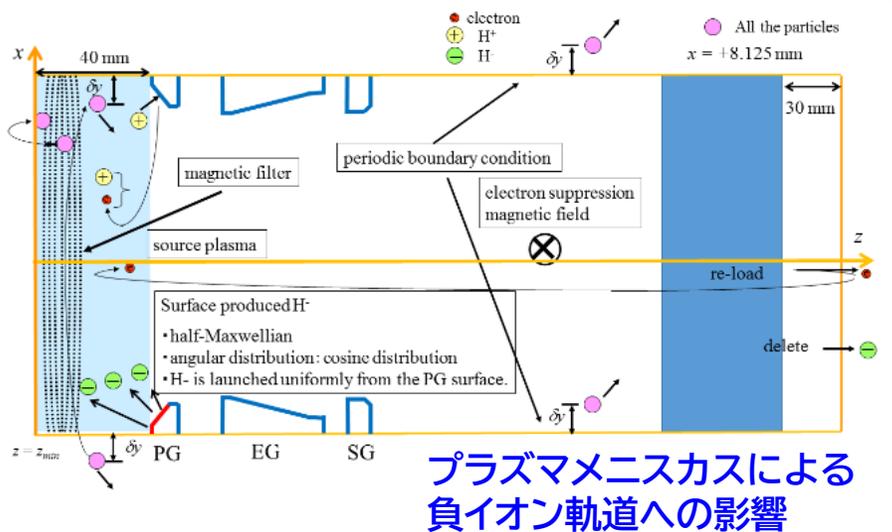
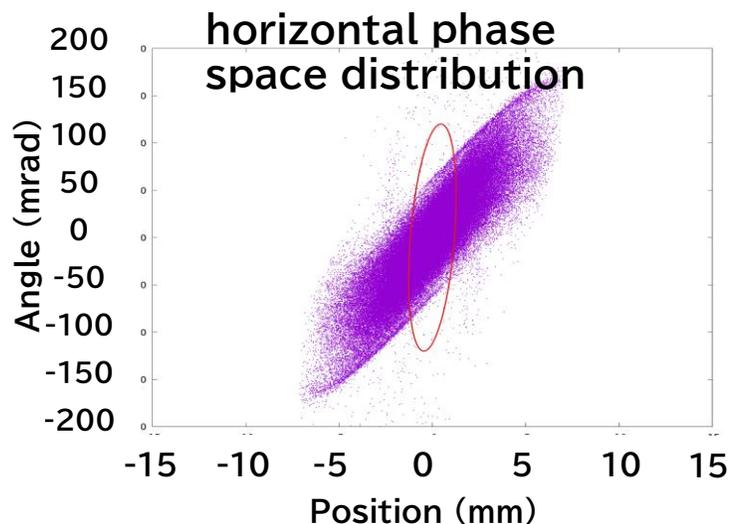
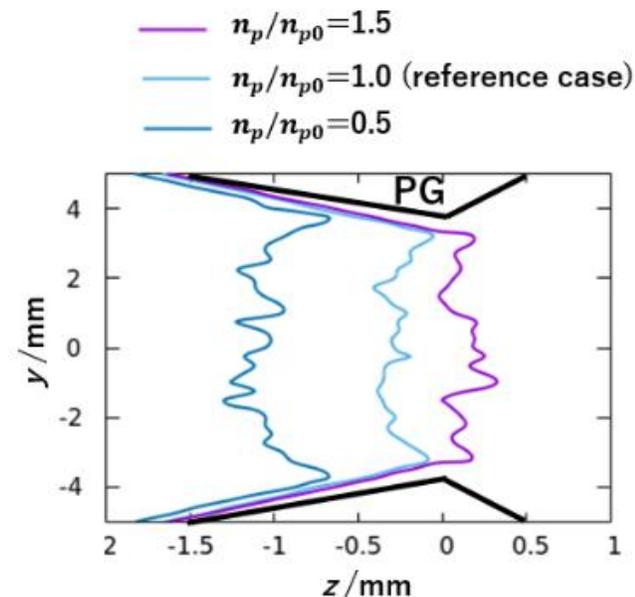
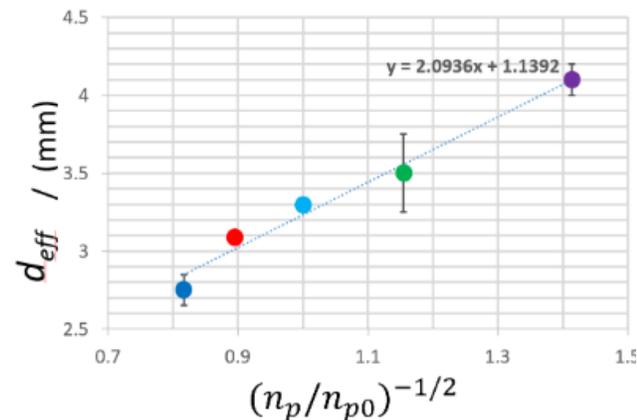
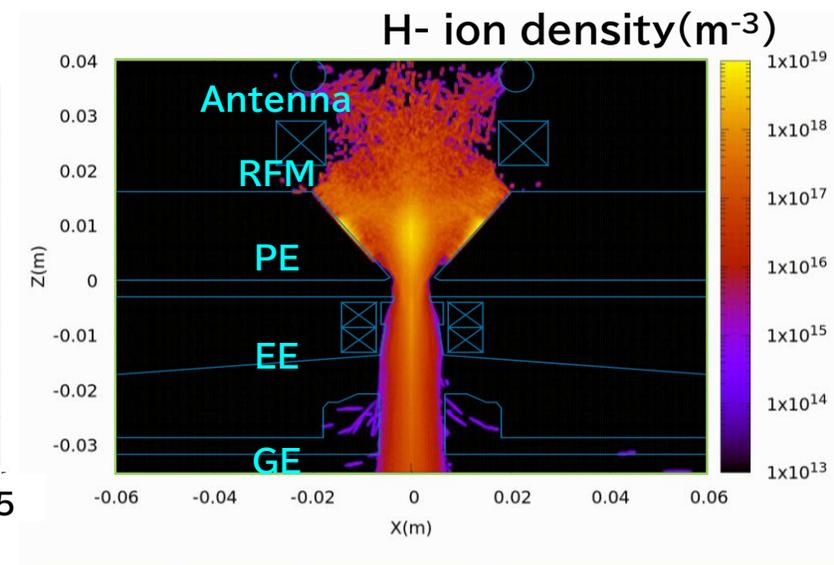


Figure 7. Examples of the negative ion trajectories extracted from (a) the central region and (b) near the upper (blue) and lower edges (red) are shown for Case 3.

プラズマ密度と負イオン引出しにおけるイオンシース長の関係



ビームエミッタンス計算



[1] K. MIYAMOTO, *ET AL.*, JINST **18**, C06014 (2023).
 [2] K. HAYASHI, *ET AL.*, JINST **19**, C04031 (2024).
 [3] T. SHIBATA, *ET AL.*, PROC. 4TH J-PARC SYMPOSIUM (J-PARC2024), ACCEPTED.

まとめ

- イオン源には多様な構造や用途がある。その1つに「負イオン」を作って加速する負イオン源がある。
- 負イオンビームをなぜ作るのか？ 負イオン自体の性質を利用するものもあるが、..
- 高エネルギーや大強度のビームを効率よく生成するために、負イオンの壊れやすい性質を利用できる。
- 電子親和力が正の元素は負イオンの状態を取り得る。
- 水素の場合、体積生成過程と表面生成過程によって、負イオンの状態を作ることができる。
- フィルター磁場、Csオープン、また電子抑制磁場の導入など、特有の機能を持ったイオン源が開発されている。
- 負イオンビームは、陽子加速器、核融合NBIや産業・医療応用など多くの場面で使用されている。
- 負イオン源への要求・目標としては、以下のようなものがある；
 - 長寿命・メンテナンスレス化
 - ビームの安定供給
 - ビームの大強度化
- 上記を達成するため、多くの大学や研究機関で新たな計測手法や装置設計、またシミュレーションなどの技術が日々開発されている。
- **負イオンビームは作るのは大変だが、その恩恵は大きい。**
- **今後の大強度ビーム or 高エネルギービームの実現において、開発の重要性が高まっている。**

ご清聴ありがとうございました



2025年夏に負イオンビームの研究会を開催します

- 負イオンビームのコミュニティでは、毎年NIFS主催の研究会を実施しています
- 2025年度の研究会は、J-PARCで開催することになりました。
- 世界最大強度の加速器施設・実験施設の見学ツアーも実施します。
- 参加費は無料(旅費支給)ですので、ご興味があればお気軽にご参加ください。

連絡先: 研究代表(柴田: takanori.shibata@kek.jp) NIFS世話人(中野: nakano.haruhisa@nifs.ac.jp)

