

負イオンの加速器応用の最先端

日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター
加速器ディビジョン

小栗 英知

- 加速器施設における負イオンの利用例
- 加速器で負イオンが必要な理由
- 負イオン源の概要
- 加速器用負水素イオン源の現状
- まとめ

加速器施設における負イオンの利用例

負イオンの利用分野

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

軽イオン

- ◆物質生命科学実験 ←シンクロトロンなど
- ◆原子核・素粒子実験 ←シンクロトロン、タンデム加速器など
- ◆医療 (PET、BNCTなど) ←サイクロトロン、FFAGなど

重イオン

- ◆加速器質量分析 (AMS) ←タンデム加速器など

負イオンを用いた高エネルギー加速器

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

Synchrotrons:

Brookhaven National Lab – Alternating Gradient Synchrotron (AGS)
Deutsches Elektronensynchrotron (DESY)
Rutherford-Appleton Laboratory (RAL-ISIS)
Fermi National Laboratory (FNL)
Argonne National Laboratory (ANL) – Intense Pulsed Neutron Source (IPNS)
Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)

Storage Rings:

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) – Spallation Neutron Source (SNS)
Los Alamos National Laboratory (LANL) – LANCSE

Tandem Accelerators:

ORNL - 25 MV tandem
BNL - Tandem Van de Graff Accelerator
JAEA - 18 MV tandem
Etc. ...

Negative Ion Cyclotrons:

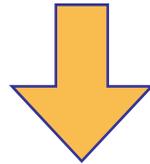
TRIUMF – 500MV cyclotron
Etc. ...



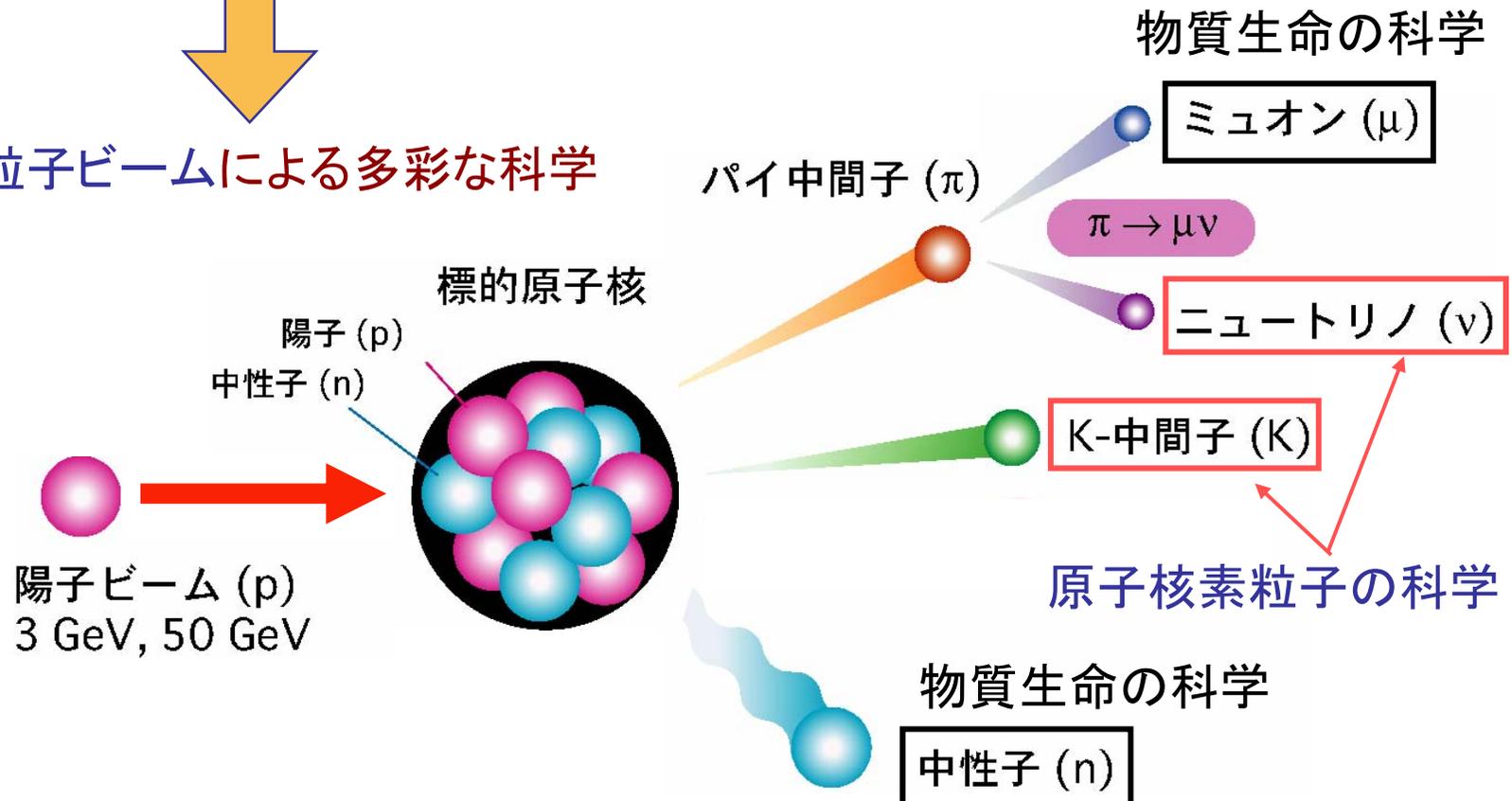
大強度陽子加速器 (J-PARC)

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

陽子を光速近くまで加速し、原子核と衝突させ
二次粒子ビームを作る。



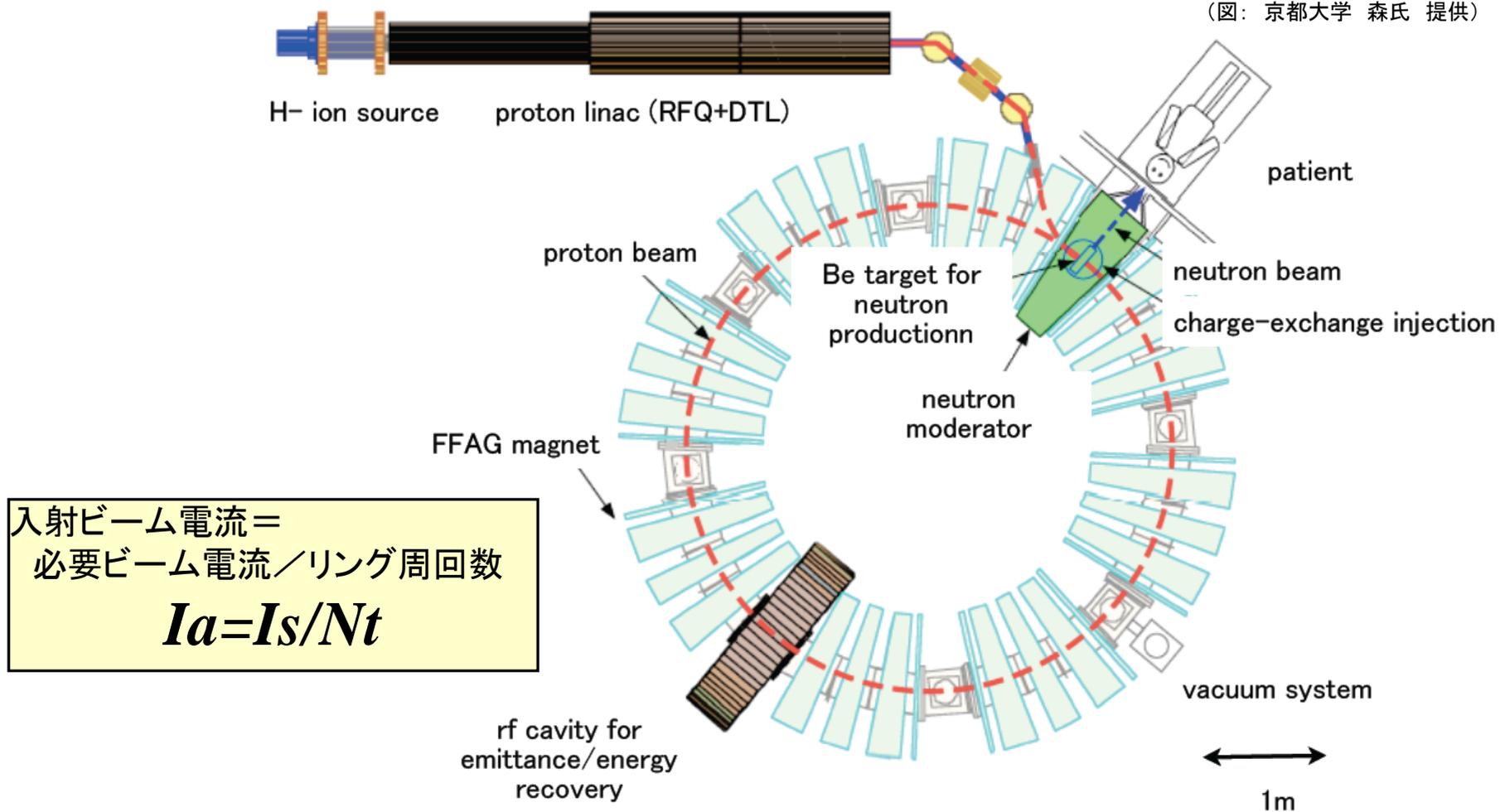
二次粒子ビームによる多彩な科学



FFAG-BNCT(京都大学)

日本物理学会(2012.9.19)
@横浜国立大学

(図: 京都大学 森氏 提供)



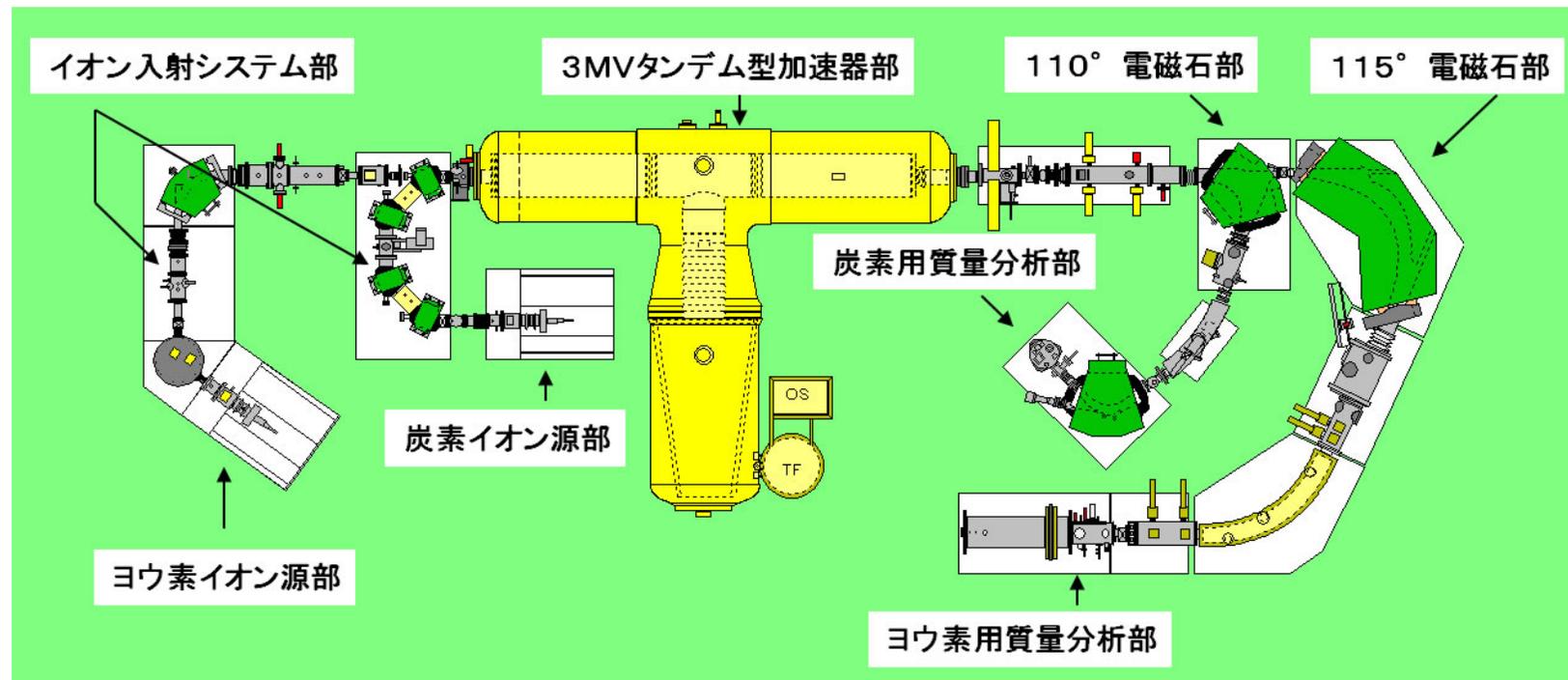
入射ビーム電流 =
必要ビーム電流 / リング周回数

$$I_a = I_s / Nt$$

入射器と蓄積リングの組み合わせによって、実際に加速する実電流値を抑えつつ、大強度の二次粒子を得る。

加速器質量分析

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学



JAEA青森研究開発センターの加速器質量分析(AMS)

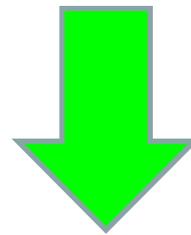
(図: 日本原子力研究開発機構 青森研究開発センターHPより引用)

イオン源: セシウムスパッター型

→セシウムイオンにより試料をスパッタし、試料が表面から離脱する際に負にイオン化させる。

炭素の放射性同位体である ^{14}C を測定する場合、妨害元素である窒素(^{14}N)は負イオンにならないため、イオン化の段階で除去することができる。

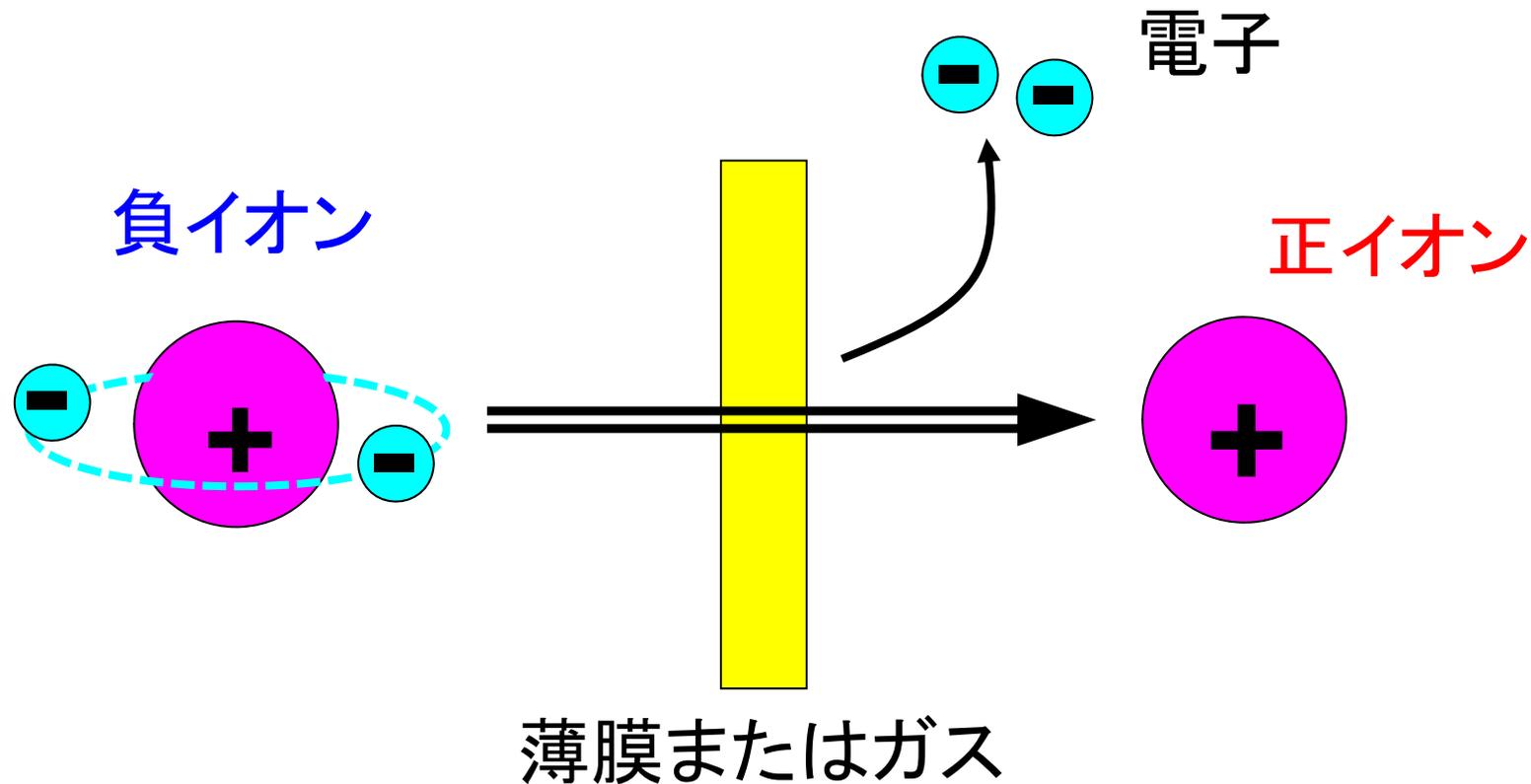
なぜ加速器に負イオンが必要なのか？



ビームを輸送途中で荷電変換できる

ビームの荷電変換

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

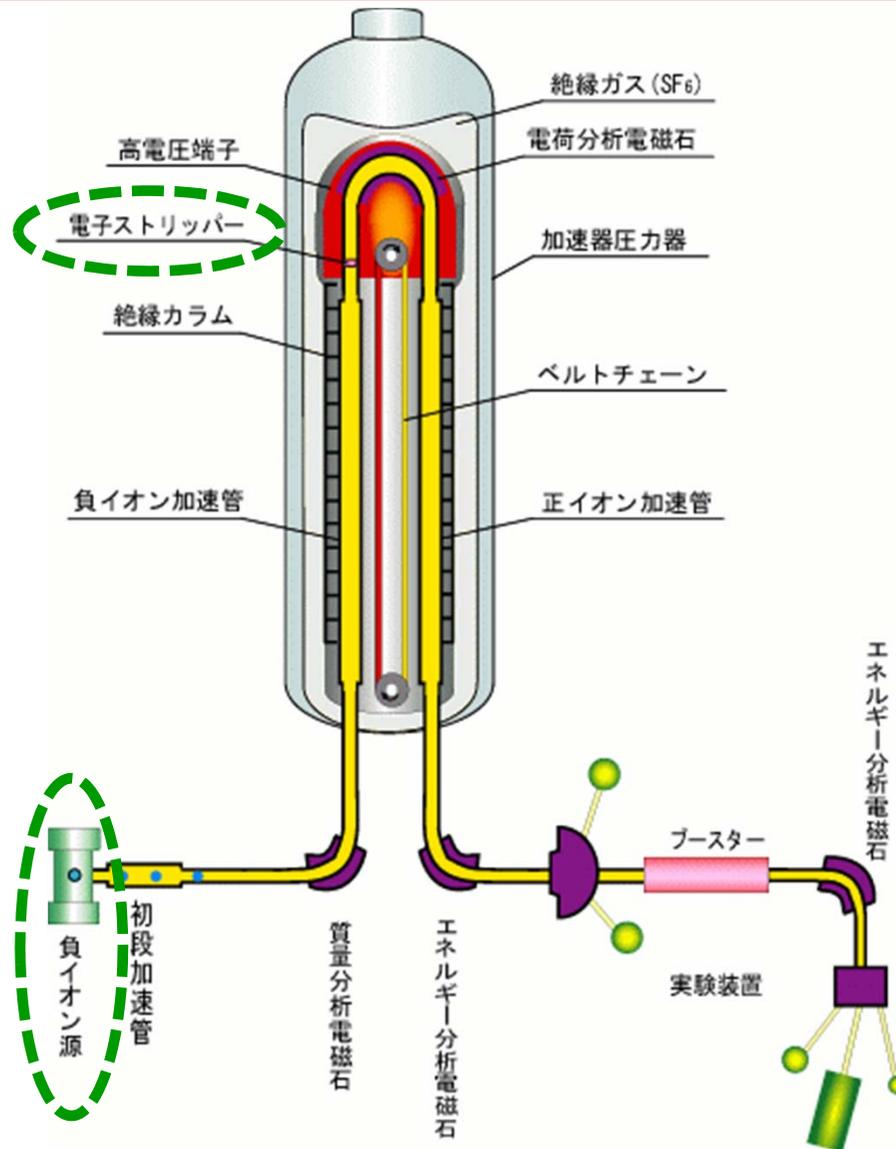


負イオンを、薄膜(カーボンなど)やガス中を通過させて電子を剥ぎ取り、正イオンに変換する。

(正イオンを負イオンに変換するのは難しいので、通常はやらない。)

タンデム加速器

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学



負イオンを接地側から電圧Vの高電圧ターミナルに向けて加速する。ここで負イオンから電子を剥ぎ取り、n価の正イオンを生成して接地側に加速する。n>1の重イオンでより有利となる。

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

E: イオンエネルギー

n: 電荷

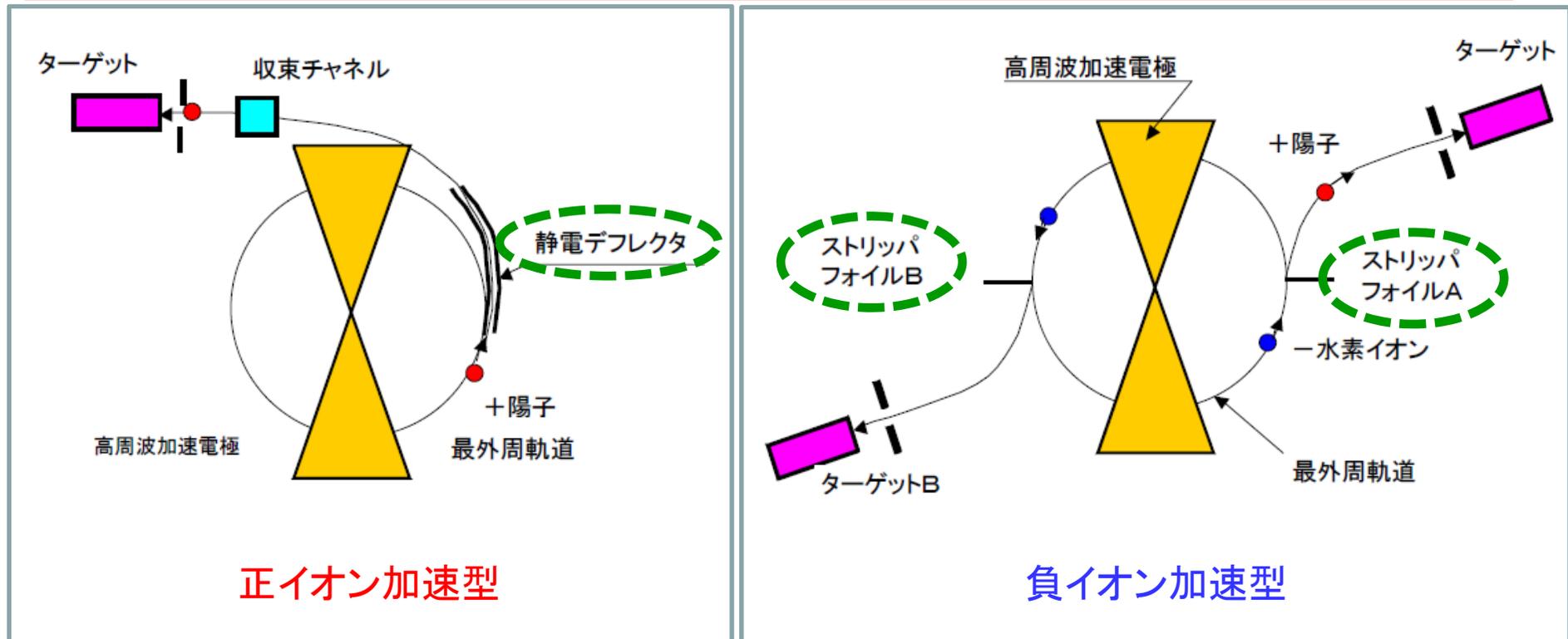
V: ターミナル電圧

JAEA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)

サイクロトロン

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

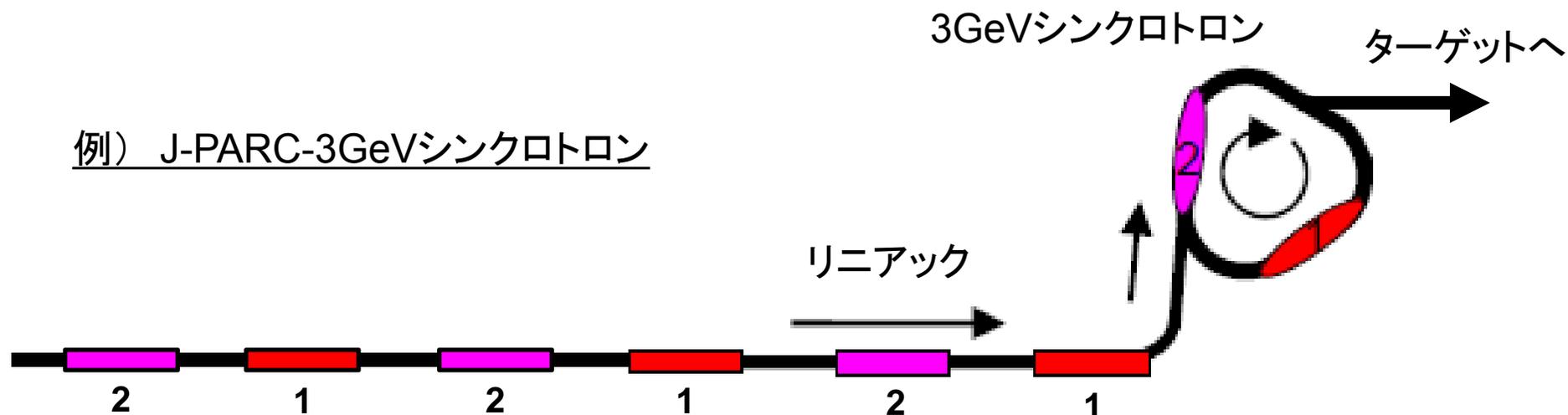


図：熊田幸生（住友重機械 量子機器事業センター）著 “小型サイクロトロンへの挑戦”より引用

- ◆ 正イオン加速型： 静電デフレクタによりビーム取り出す
⇒ビームがデフレクターに衝突し、取り出し効率が低い(60~70%)
⇒デフレクターが放射化する
- ◆ 負イオン加速型： 薄膜による荷電変換でビームを取り出す
⇒取り出し効率が高い(90%以上)
⇒エネルギーは10MeV程度まで(高エネルギーではHがH⁰になって失われる。)

シンクロトロン

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学



中性子実験施設では、パルス幅が短く、かつ高強度のビームが求められる。



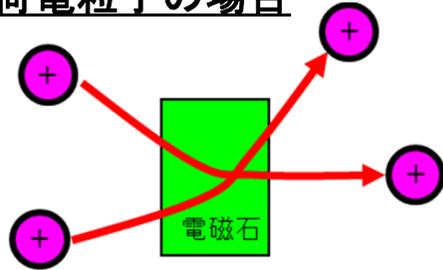
ビームを高強度化するために、既に周回しているビーム上にさらに多数回ビームを入射してビームを重畳する方法が採られる(多重入射)。

(J-PARCの3GeVシンクロトロンでは、数100回ビームを重畳する。)

シンクロトロン(つづき)

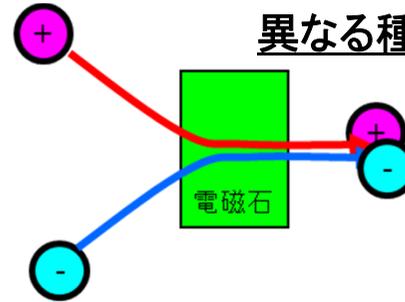
日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

同じ種類の荷電粒子の場合



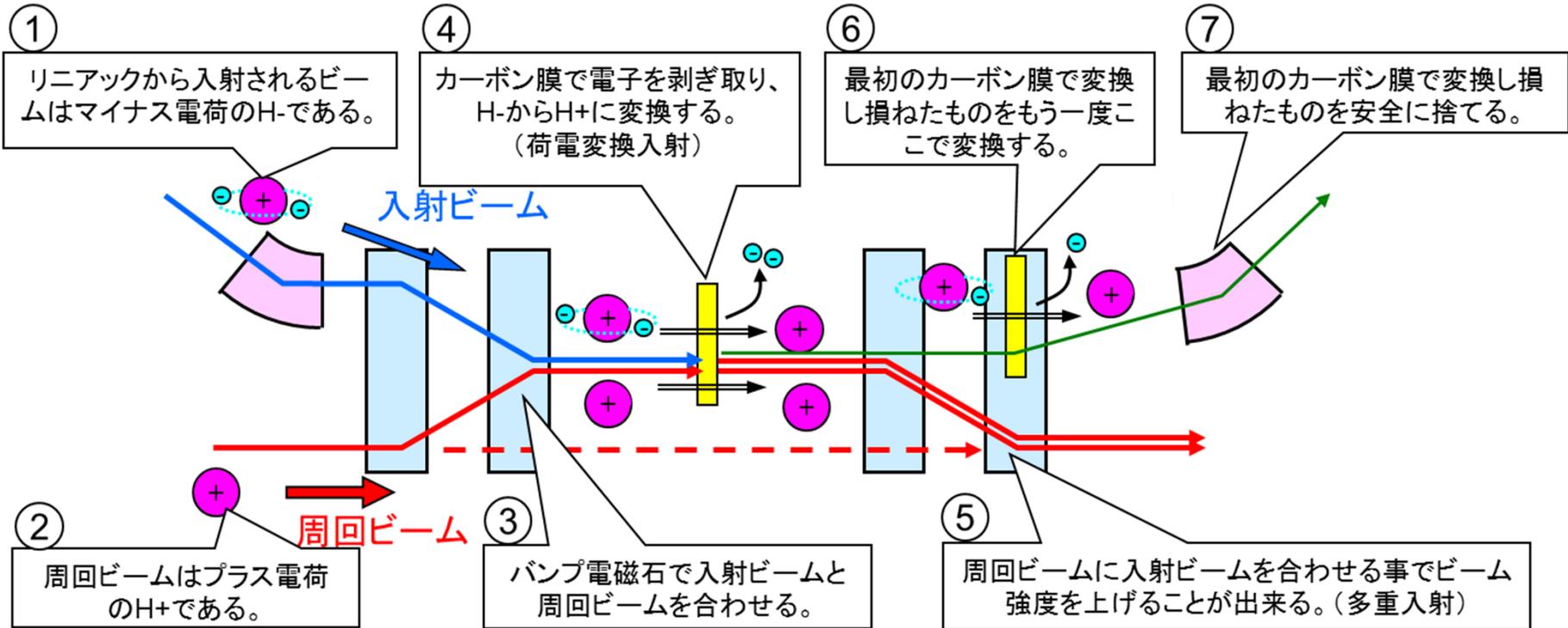
2つの粒子を電場や磁場で同じ軌道に持ってくることは出来ない。

異なる種類の荷電粒子の場合



2つの粒子を電場や磁場で同じ軌道に持ってくる事が出来る。

ビーム入射の仕組み

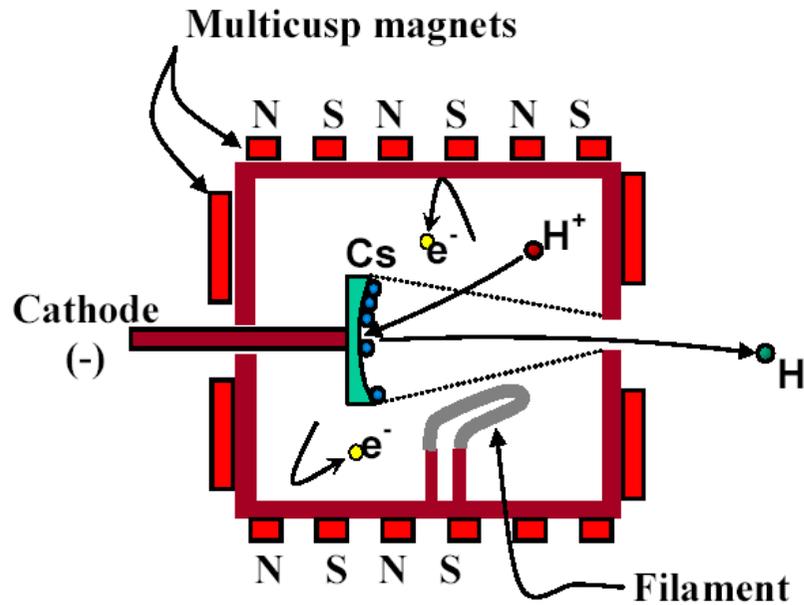


負水素イオン源の概要

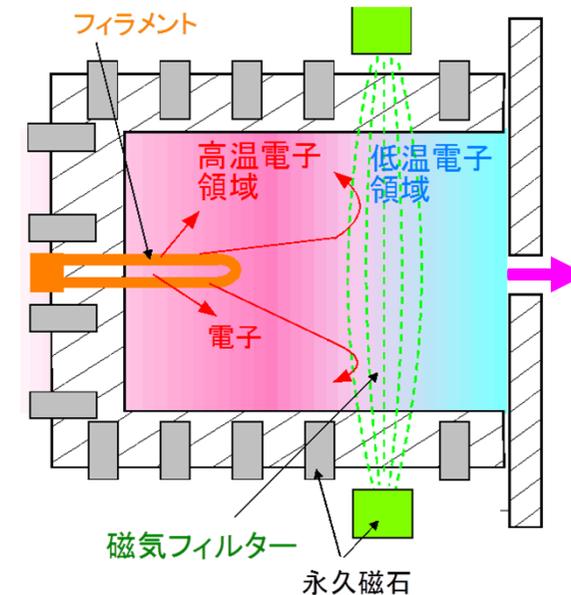
負イオン源のタイプと特徴

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

	表面生成型	体積生成型
入力パワー効率	高い	低い
ガス効率	高い	低い
ビーム輝度	低い	高い
セシウム添加	必要	原理的に不要
研究活動	最近は少ない	現在の主流



表面生成型(コンバータ付き)

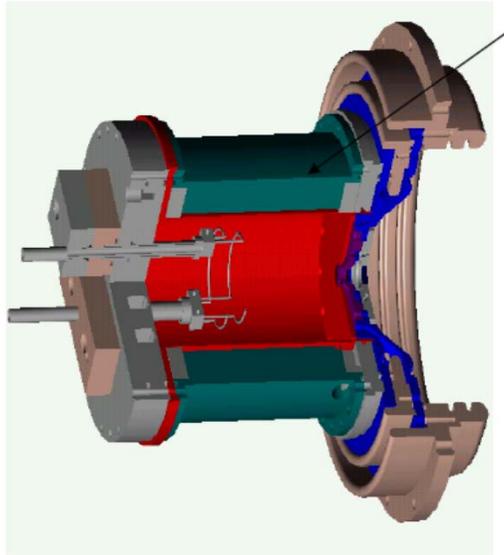


体積生成型

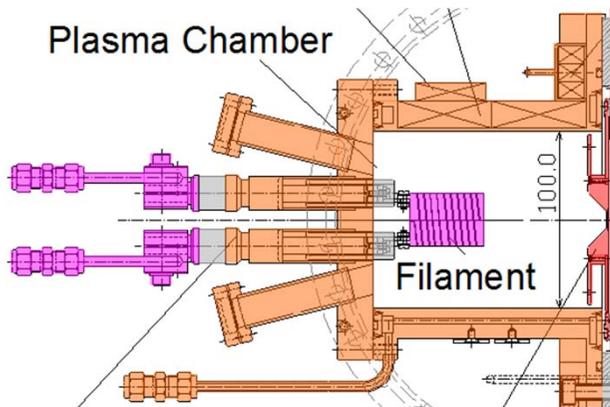
負イオン源のプラズマ生成方法

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

フィラメント駆動型

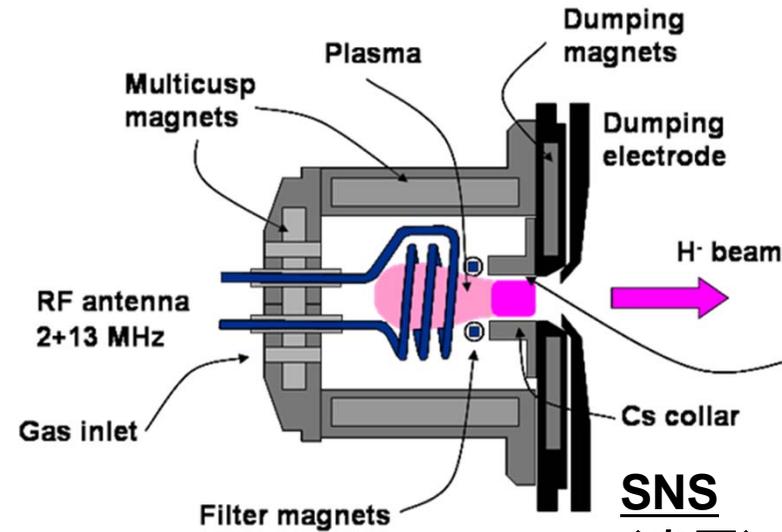


TRIUMF
(カナダ)
WまたはTa
フィラメント

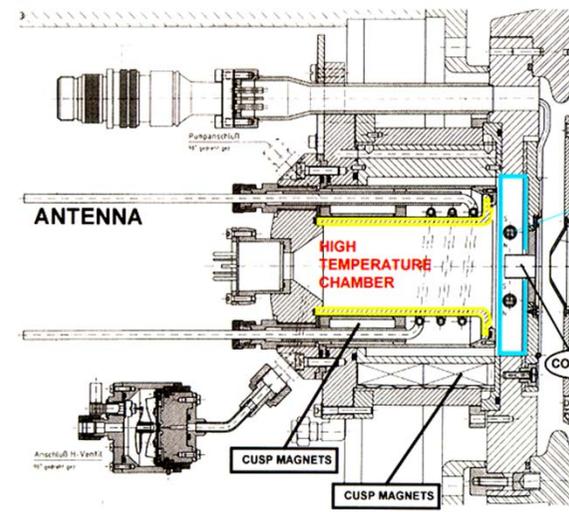


J-PARC
(日本)
LaB₆フィラ
メント

高周波駆動型



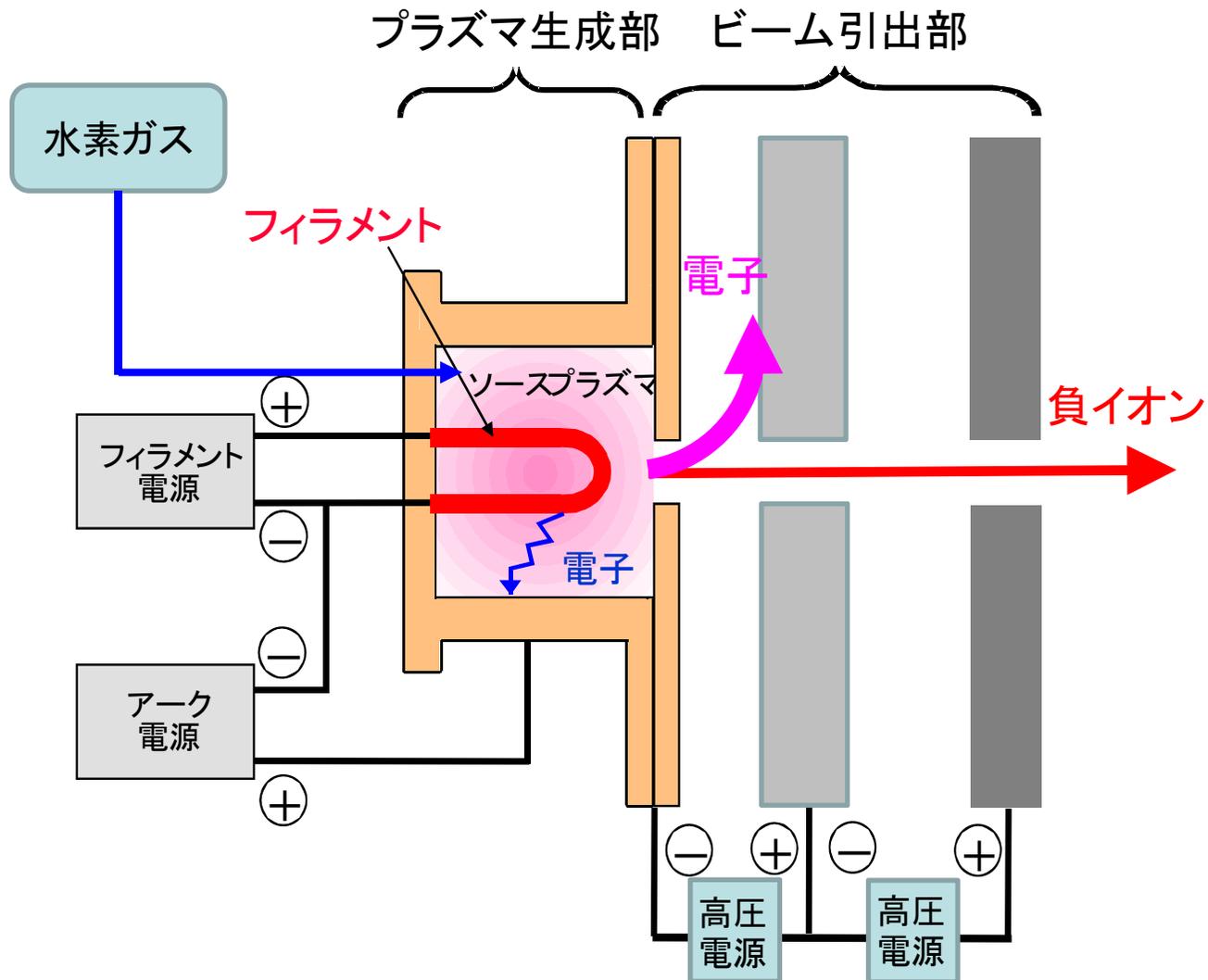
SNS
(米国)
内部アンテナ



DESY
(ドイツ)
外部アンテナ

負イオン源(フィラメント型)概念図

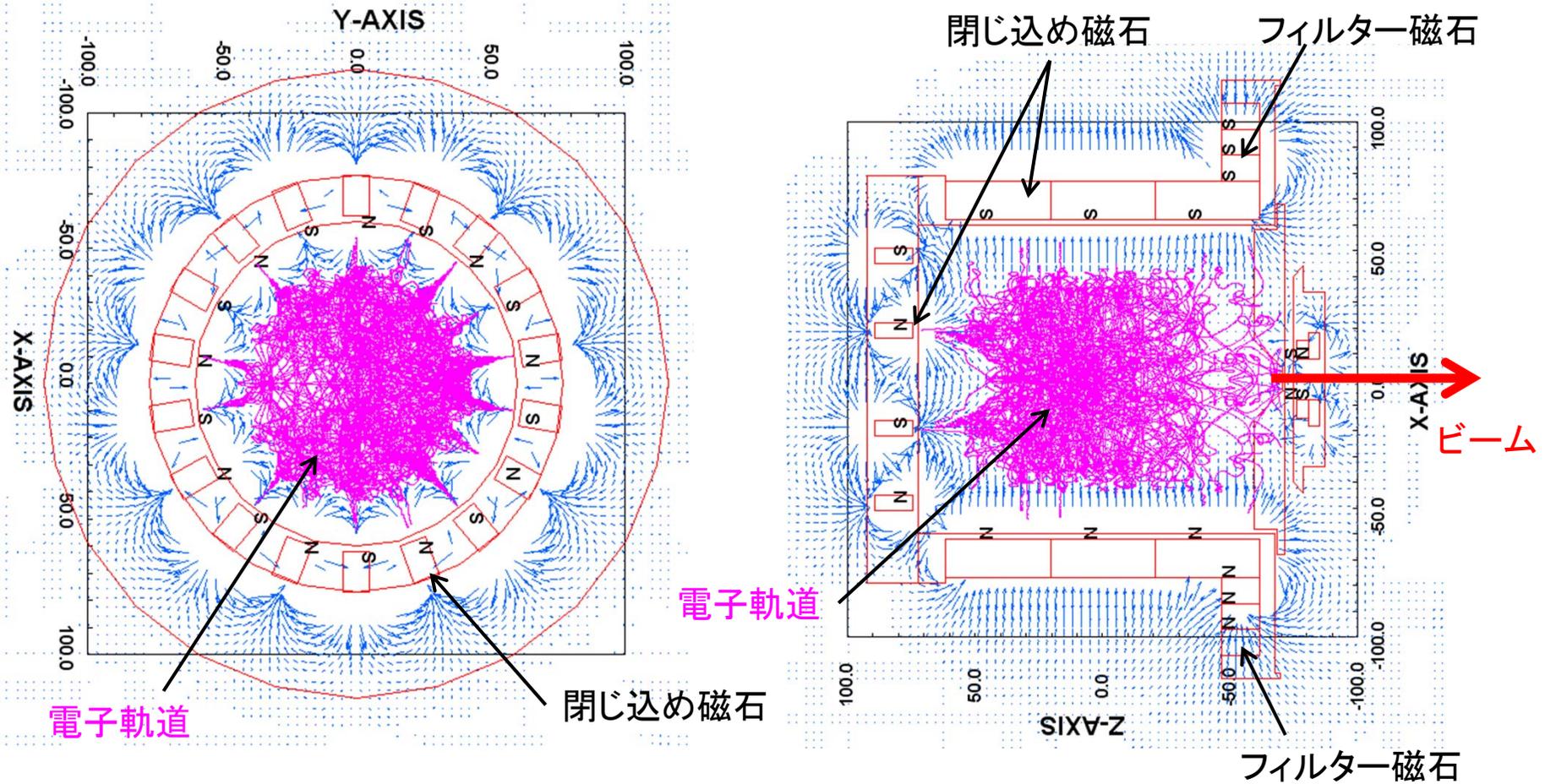
日本物理学会(2012.9.19)
@横浜国立大学



- ① プラズマ生成部に水素ガスを入れる。
- ② フィラメントを加熱してアーク放電を発生させ、ソースプラズマを生成する。
- ③ プラズマ生成部に高電圧を印加してプラズマからビームを引き出す。

プラズマ生成部

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

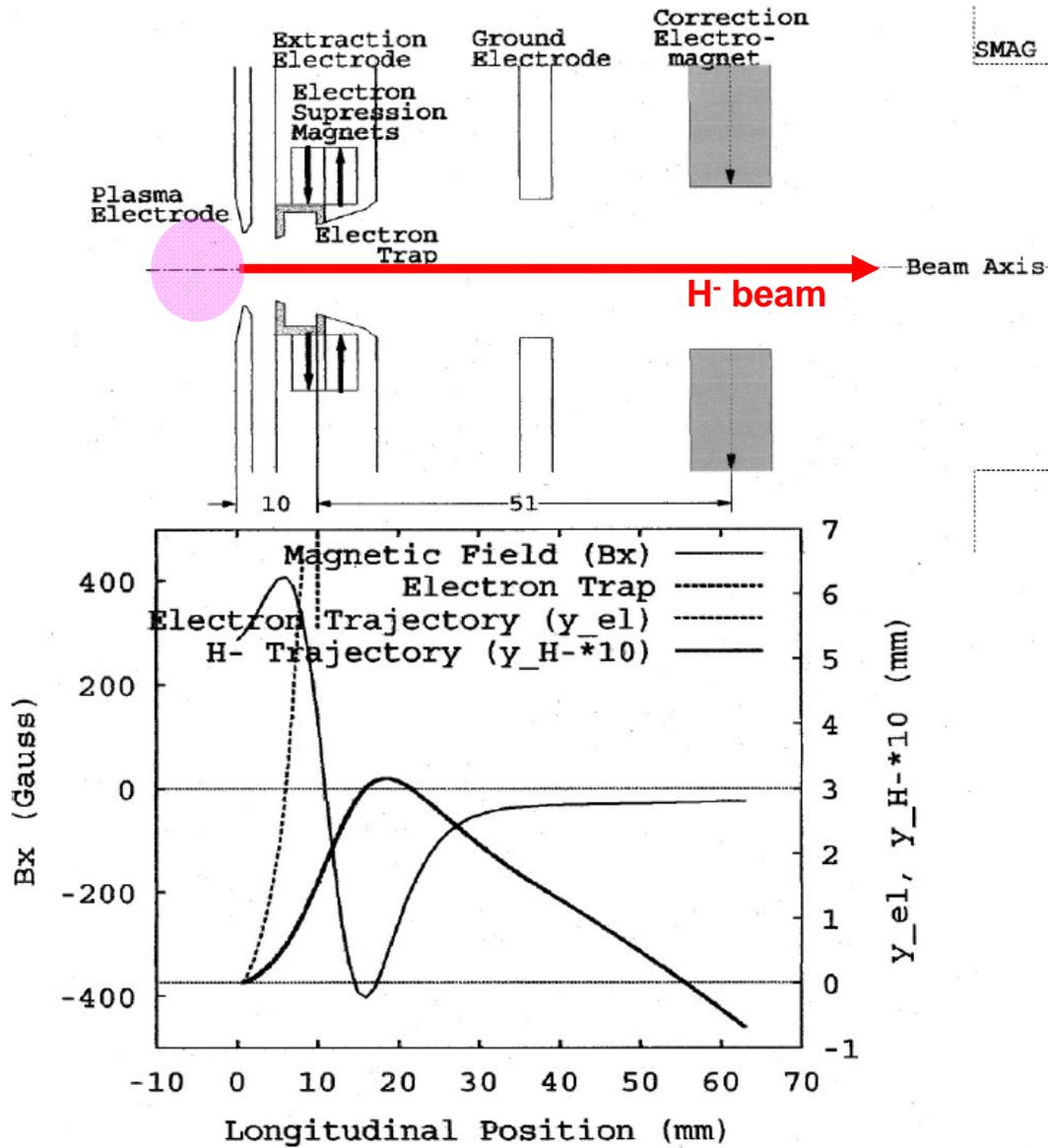


電子軌道計算結果の一例 (J-PARCイオン源)
計算コード: ELEORBIT

ソースプラズマを生成部内に閉じ込めるために、**マルチカusp磁場**が使われる。

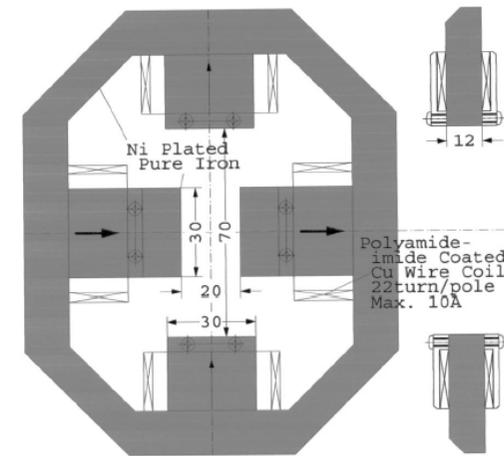
ビーム引出部

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学



ビーム引出部の一例 (KEK-JHFイオン源)

- ◆ 第2電極(引出電極)に永久磁石を組込み、磁場によって電子を除去(引出電極表面または電子トラップ内で吸収)。
- ◆ 負イオンは、ビーム引出部直後にステアリング電磁石によって軌道を補正。



ステアリング電磁石

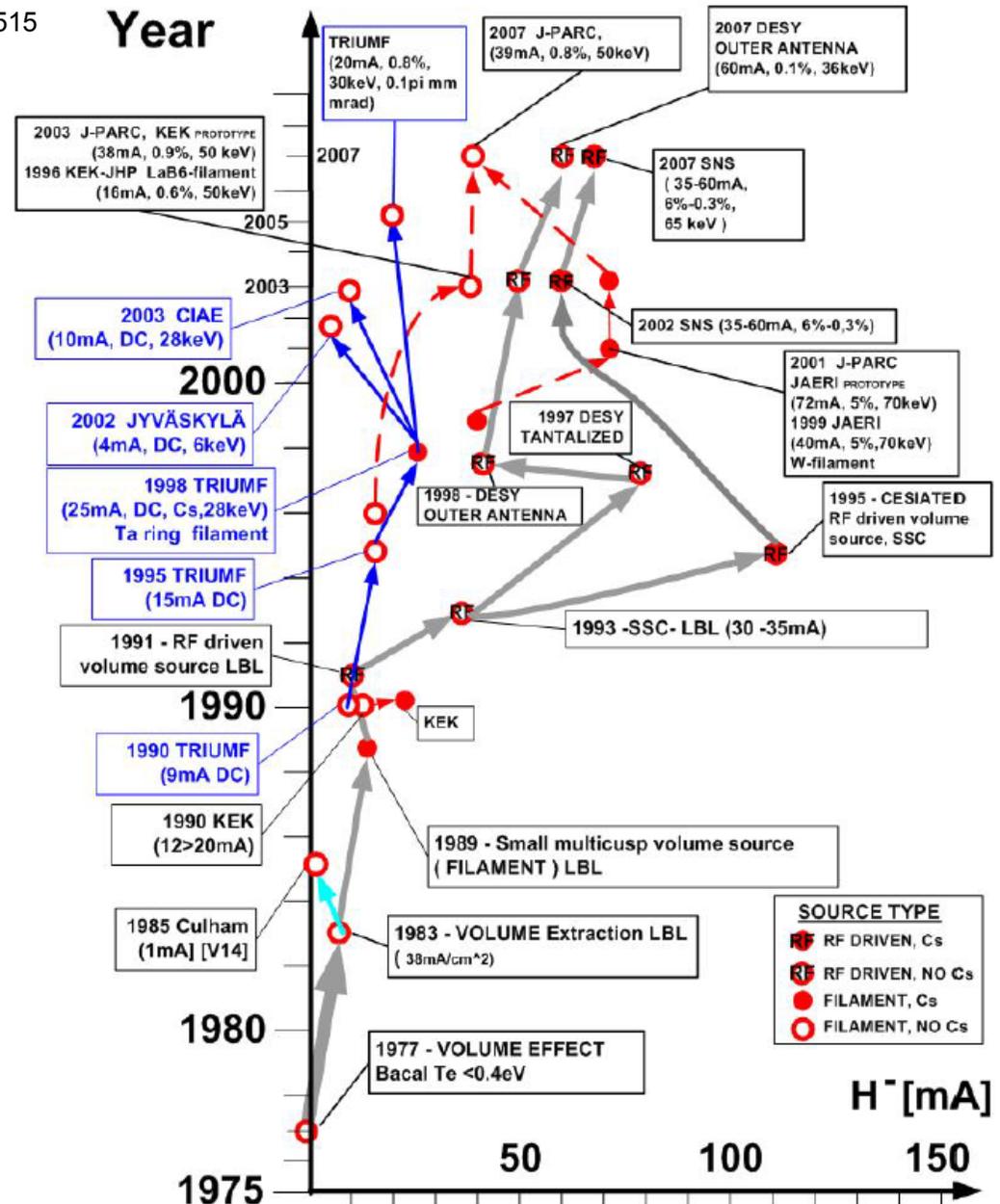
加速器用負水素イオン源の現状

体積生成型負イオン源の開発の歴史

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

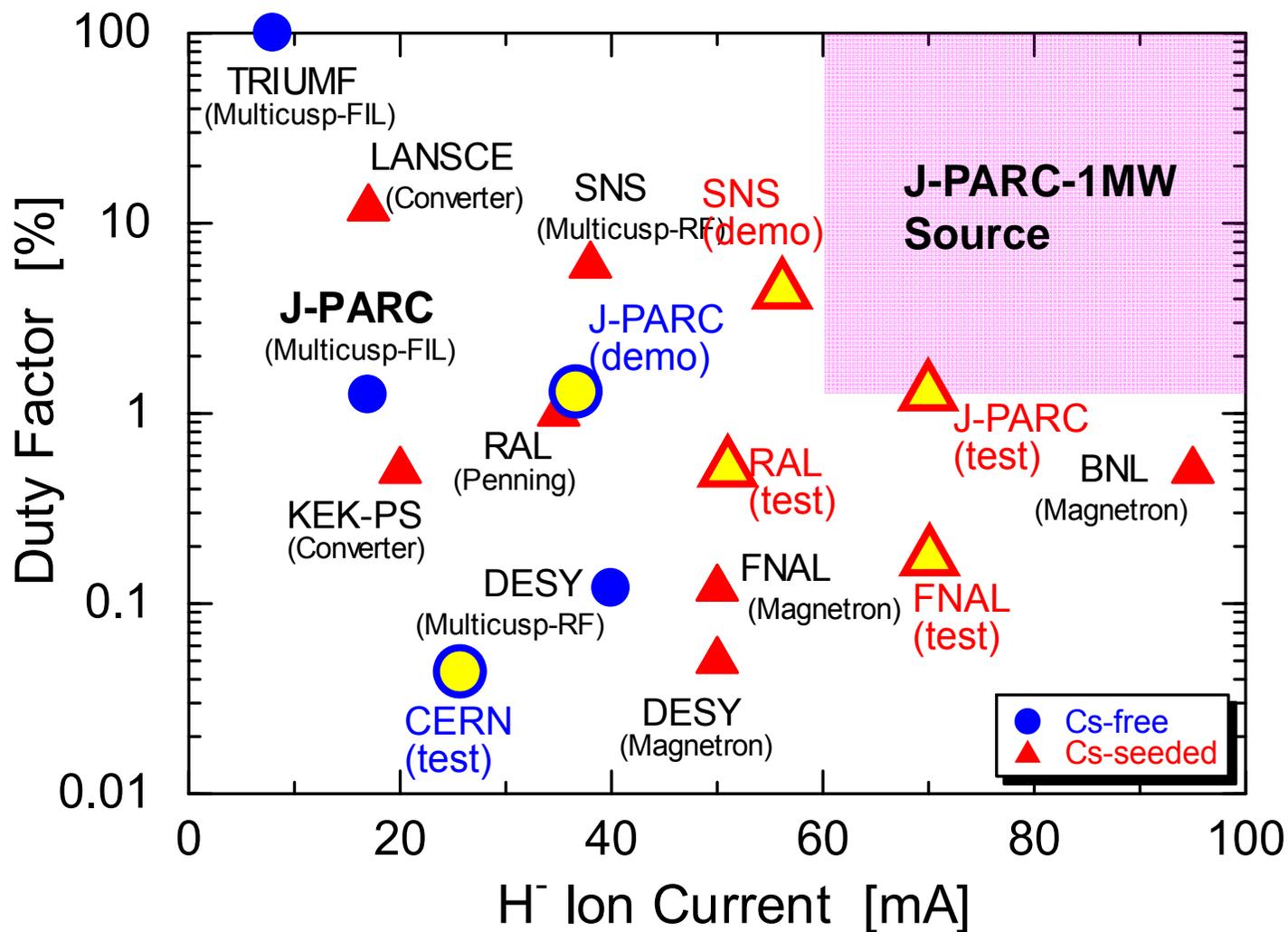
From J. Peters, RSI 79 (2008) 02A515

- 1977年にフランスの Bacal氏が負イオンの体積生成過程を発見。
- 1980年台に LBNLにてフィラメント、後に高周波型の体積生成型イオン源を開発。
- 1990年台に TRIUMFにて連続ビーム(DC)を引き出せるフィラメント型イオン源を開発。
- 1990年後半から KEK及び JAEAにて J-PARC用フィラメント型イオン源の開発に着手。
- 2000年から LBNLにて米国 SNS計画用の高デューティ高周波型イオン源を開発に着手。



世界の大型加速器用負水素イオン源

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学



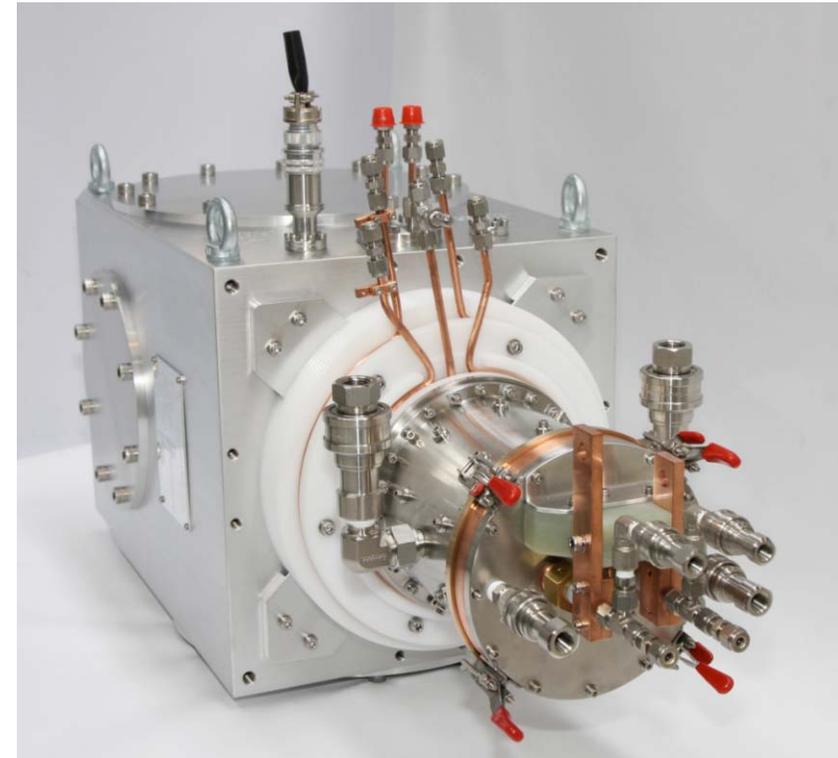
TRIUMF 負水素イオン源

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

- ◆ TRIUMFサイクロトロンのビーム入射器として開発。
- ◆ フィラメント (W、Ta) 型。
- ◆ D-PACE社が**製品**として販売。

TRIUMF source

- Beam Current: 15 mA (DC)
- Ion Energy: 20 - 30 kV
- Filament: 340 A, 3.5 V; 1.2 kW
- Arc supply: 29 A, 120 V
- Cs: free
- Normalized rms emittance:
~0.22 π ·mm·mrad
- Efficiency: ~ 3 mA / kW
- Filament lifetime:
≥14 days at peak current



Beam Current H ⁻ (mA)	Arc Current (A)	Beam Kinetic Energy (keV)	Beam ½ Size @ Waist (mm)	Beam ½ Divergence @ Waist (mrad)	Unnormalized 4rms Emittance* (mm·mrad)	Normalized 4rms Emittance* (mm·mrad)
1.15	2.4	25.000	1.94	24.7	48.04	0.35
2.0	4.8	25.000	2.28	21.5	48.96	0.36
3.0	7.5	25.000	2.84	20.8	58.94	0.43
4.1	12.2	25.000	3.18	23.0	73.16	0.53
5.1	18.7	25.000	3.74	23.1	86.40	0.63

LBNL 負水素イオン源の開発

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

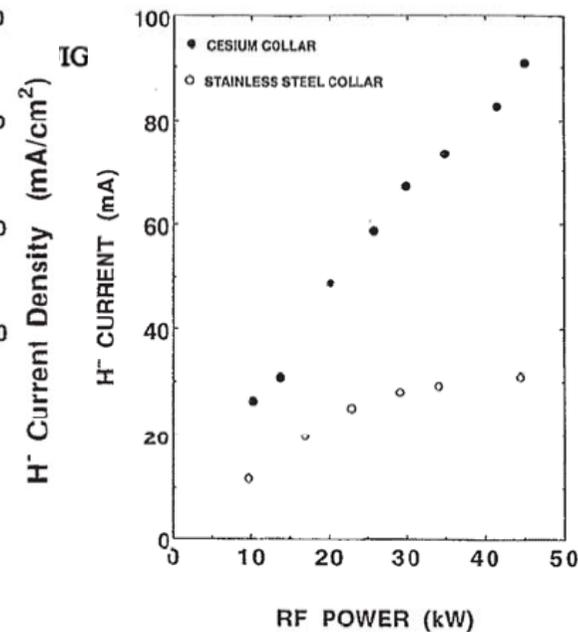
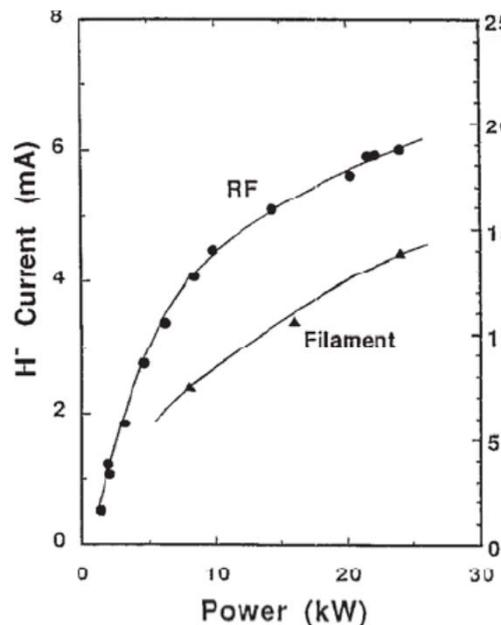
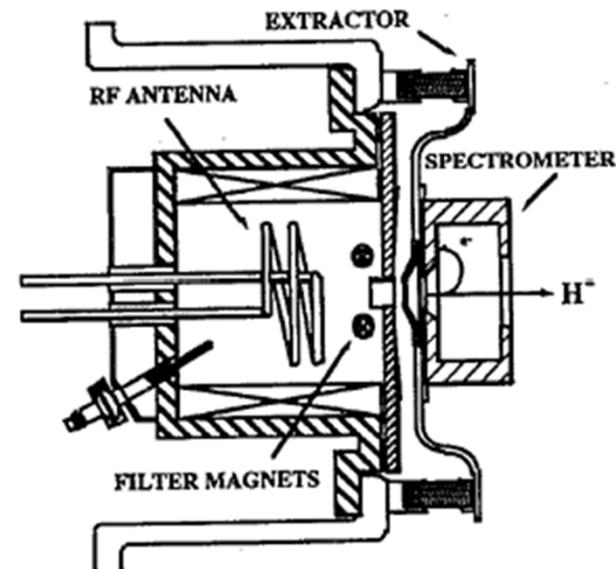
◆ 1990年に、LBNLのLeung氏が高周波型イオン源を開発。フィラメント型よりもパワー効率が高いことを示した。

◆ 1993年に、Leung氏がSAES社製のCs-dispenserを使用してビーム電流が3倍程度増加することを示した。

◆ 1996年に、SSCにおいてLBNLタイプを元にして高周波型イオン源を開発。

- ・ビーム電流: 70~100mA
- ・パルス条件: 0.1ms&10Hz

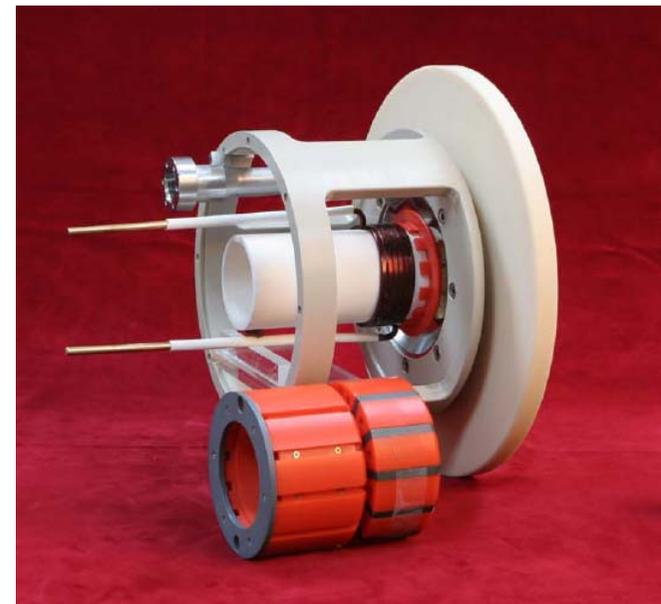
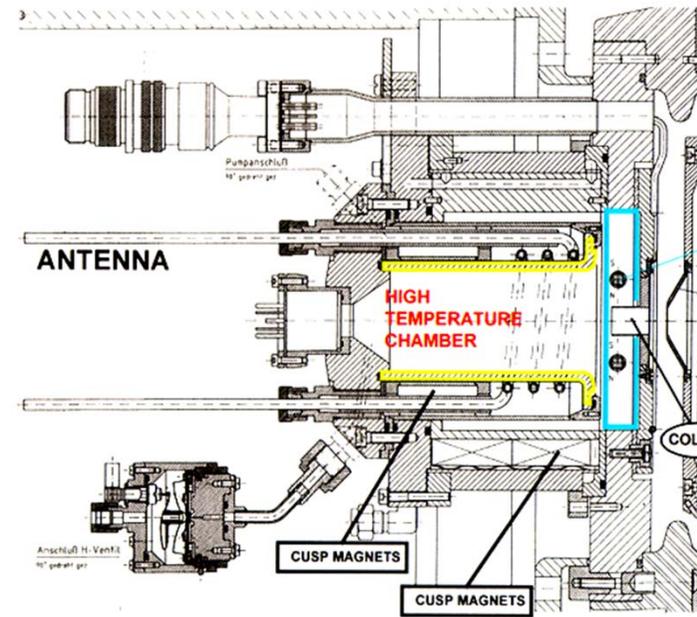
SSC 内部アンテナ型
負イオン源



DESY 負水素イオン源

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

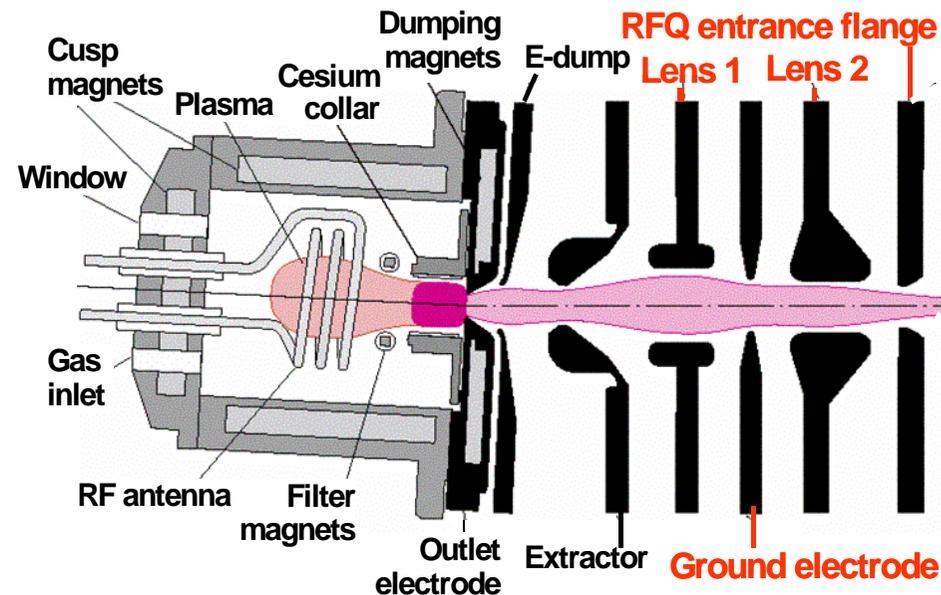
- ◆ アルミナ製プラズマチェンバの外側にアンテナを設置(外部アンテナ型)。
 - Beam current: ~40mA
 - Energy: 35keV
 - Pulse condition: 6Hz, 0.15ms
 - Duty factor: 0.05 %
 - RF power: ~ 40 kW
 - Cs: free
 - Scheduled maintenance interval: 41+ weeks
-
- ◆ 現在、CERNにてDESYタイプのイオン源を元にLINAC-4計画用のイオン源を開発中。
- <LINAC4- Design parameters>
- Beam current: 80 mA
 - Energy: 45keV
 - Pulse condition: 2Hz, 0.7ms



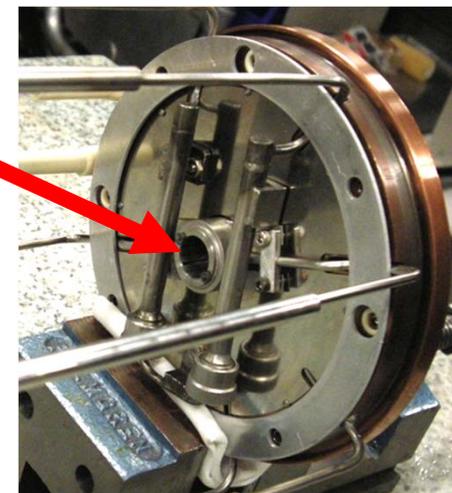
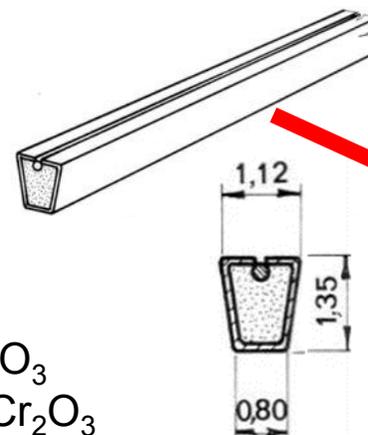
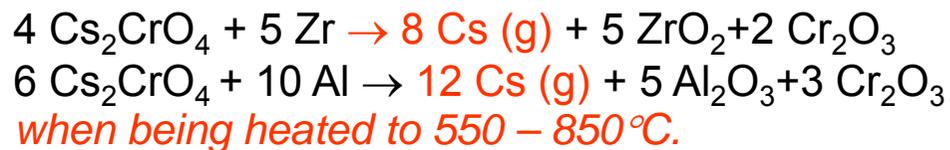
SNS 負水素イオン源

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

- ◆ LBNLで開発された高周波駆動型イオン源が原型。
- ◆ SASE社製Cs-Dispencerを使用。セシウム使用量は約30mg/1か月。
- ◆ 現在、ビーム電流38mA(RFQ出口)で定常運転を実施(Duty factor: 6%)。
- ◆ 高周波アンテナは1か月に一度交換。
- ◆ 外部アンテナ型イオン源の開発にも着手している。



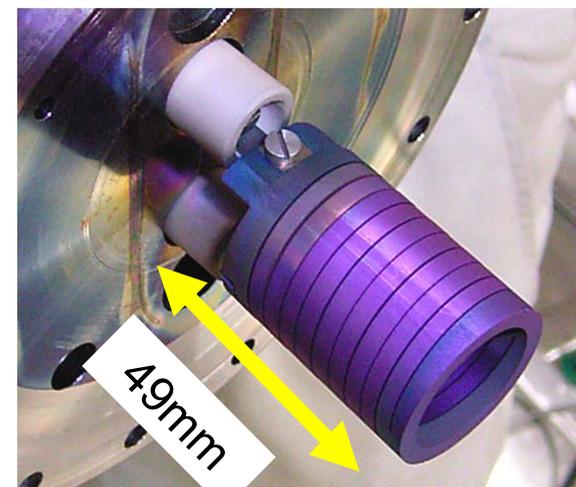
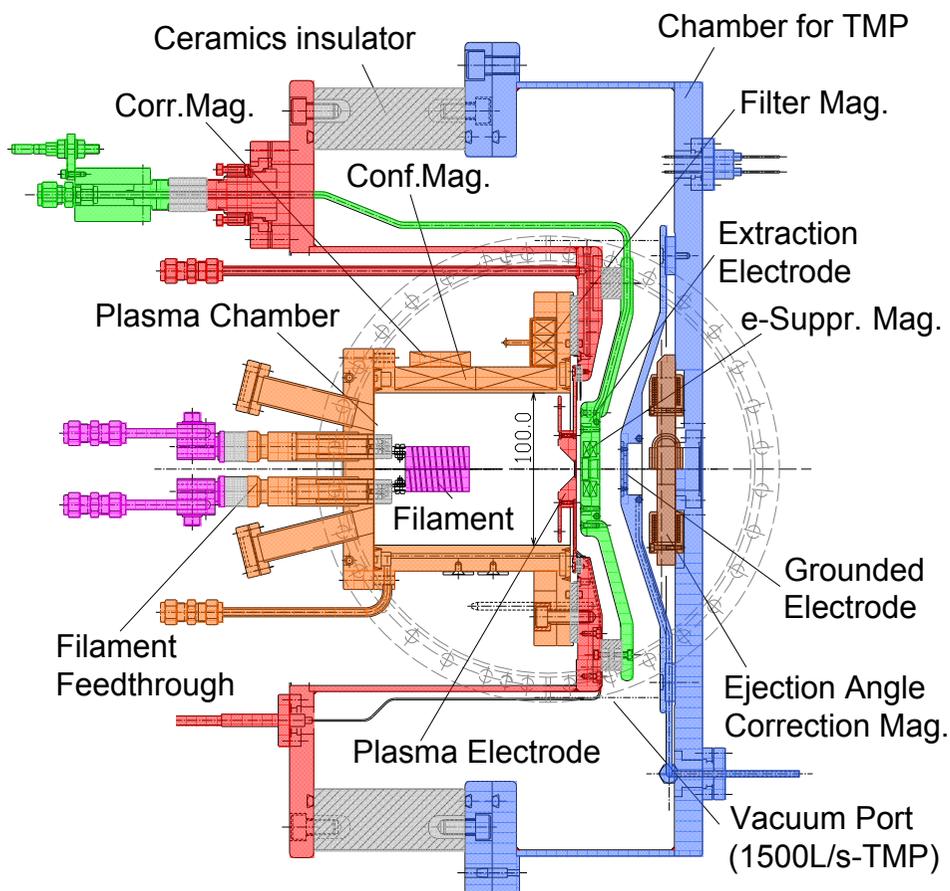
Cs cartridges from SAES Getters
Cesium chromate (Cs_2CrO_4)



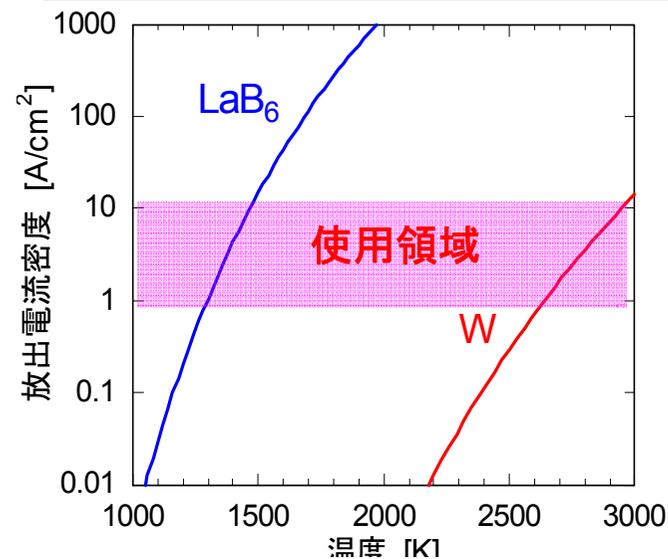
J-PARC 負水素イオン源

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

- ◆ フィラメント駆動型
(六ホウ化ランタン(LaB₆)製フィラメント)
- ◆ セシウム不使用



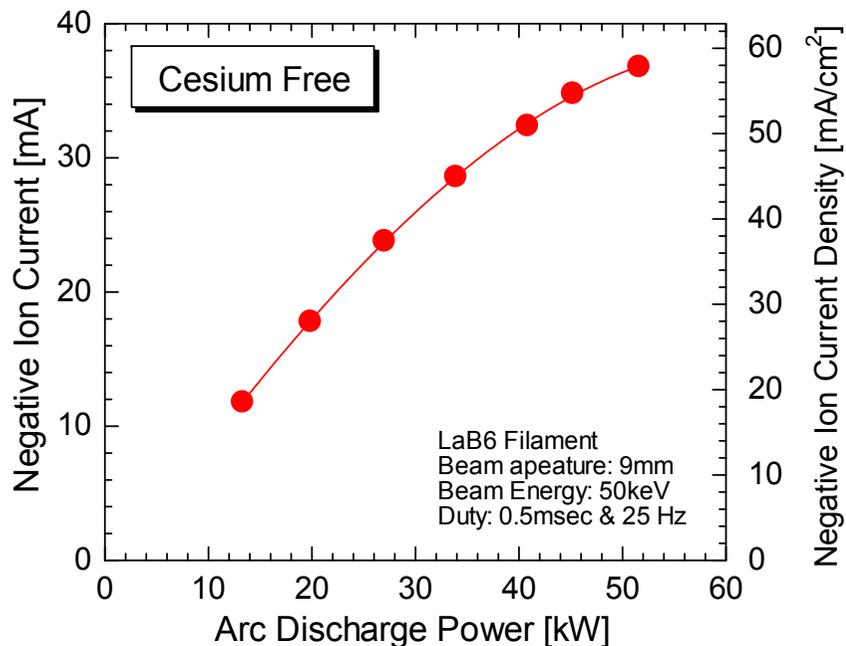
LaB₆フィラメント(二重らせん構造)
KEK-PSで開発



加熱温度と電子放出量の関係

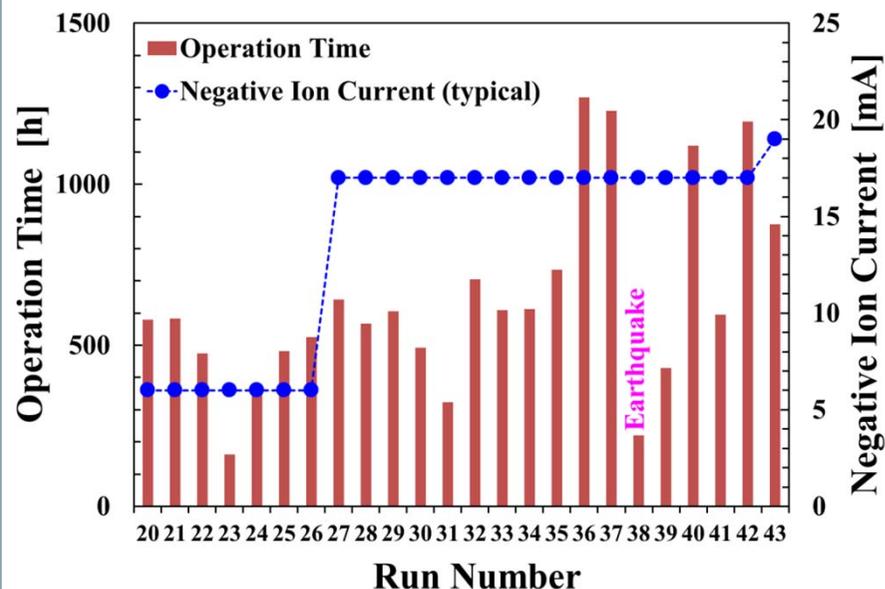
J-PARC 負水素イオン源(つづき)

日本物理学会(2012.9.19)
@横浜国立大学



ビーム電流のアーク放電パワー依存性

- 最大ビーム電流: 38mA
- パルス幅: 0.5msec
- パルス繰り返し: 25Hz



イオン源の運転履歴

- ビーム利用運転は17mAで実施
- イオン源寿命は1,200時間程度
- 長時間加速器が停止するような重大故障は無し。

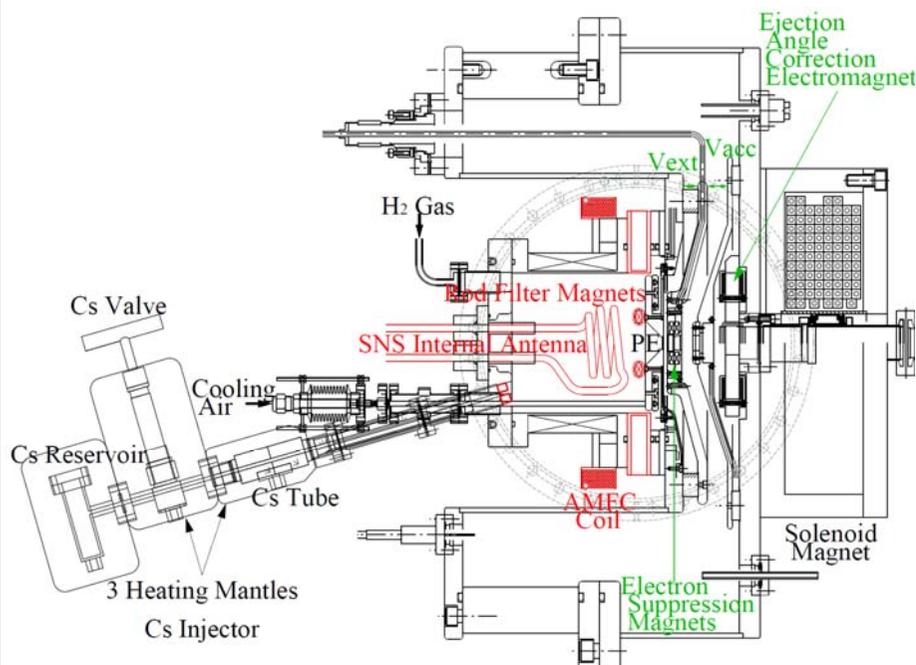
J-PARCイオン源の現状性能

J-PARC 負水素イオン源(つづき)

日本物理学会 (2012.9.19)
@横浜国立大学

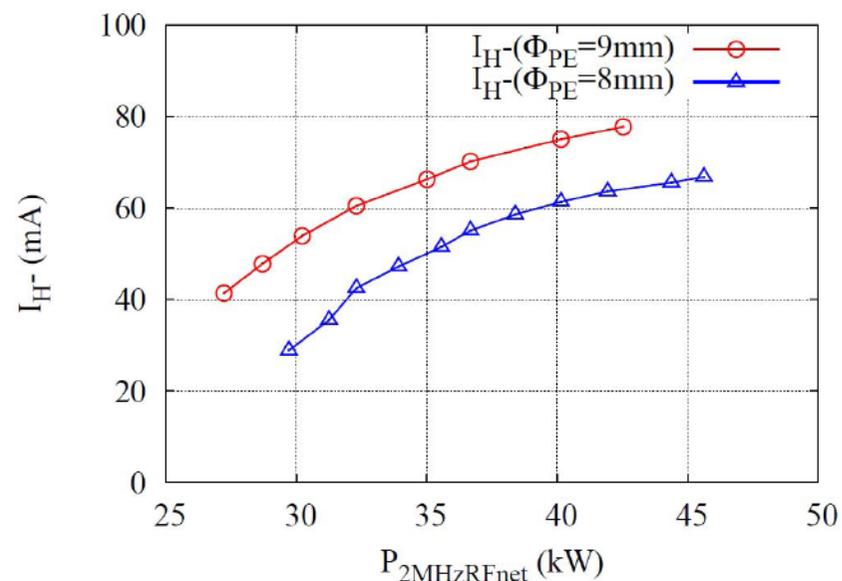
J-PARCにてビームパワー1MWを達成するために、高周波型イオン源(内部アンテナ型)の開発に着手。

(要求ビーム電流: 60mA)



- 現行機のプロトタイプを改造
- 高周波アンテナはSNS用イオン源と同一品を使用

現在得られているビーム性能



- 最大ビーム電流: 77mA
- パルス幅: 0.5msec
- パルス繰り返し: 25Hz

ビーム電流は要求性能を達成

ま と め

- 加速器分野における負イオンは、物質生命科学実験、原子核・素粒子実験、医療照射 (PET、BNCTなど)、および加速器質量分析 (AMS) など、基礎研究から医療/産業界まで幅広く利用されている。

⇒負イオン源のビーム性能が、正イオン源に匹敵する程度まで向上。
⇒長寿命や運転の容易性など、安定性及び信頼性が向上。

- 負イオン生成には様々な方法があるが、現在では高周波駆動型が主流になりつつある。
- 各加速器施設にて、ビーム強度向上のために負イオン源の大強度化が積極的に行われている (イオン源屋さんの大きなMotivationのひとつ)。
- 開発したイオン源をちゃんと使ってもらうには、単にビーム性能が優れているだけではなく、高い安定性や信頼性も兼ね備えなければならない。

ご清聴ありがとうございました。

