

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





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

- 「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。



外部アンテナRFイオン源



Science & Technology Facilities Council

QST

内部アンテナRFイオン源





3)



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
- イオンスラスター(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 (<u>HTTPS://WWW.ITER.ORG/</u>)
 [4] NASA, "TECH TODAY: NASA'S ION THRUSTER KNOWHOW KEEPS SATELLITES FLYING" (<u>HTTPS://WWW.NASA.GOV/TECHNOLOGY/</u>).
 [5] RIKEN NISHINA (<u>HTTPS://WWW.NISHINA.RIKEN.JP/FACILITY/</u>).
 [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 H⁻ ion be 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。



[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

ビーム取り出しの高効率化

- 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)



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



[1] 小栗英知,「負イオンの加速器応用の最先端」,日本物理学会(2012.9.19)@横浜国立大学.

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。





タンデム加速器

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 $H_2(\nu < \nu') + e_{fast}^- \rightarrow H_2^*(\nu') + e^-$

- 水素分子の振動準位vは、高速電子 efast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 > 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

 $H_2^*(v') + e_{slow}^- \rightarrow H^- + H + e^-$

- 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。

(1)2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。



10

特有のイオン源構造1:フィルター磁石の導入



ロッドフィルター (J-PARC)

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

<u>フィルター磁場</u>

- 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。





PG current

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;

$$D = \frac{k_{\rm B}T}{m\nu}, \quad D_{\perp} = \frac{D}{\left(1 + \omega_{\rm C}^2/\nu^2\right)}$$

<u>クーロン衝突</u>

 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;

 $\nu_{\rm CC} = \frac{q_{\rm A}^2 q_{\rm B}^2 n_{\rm p} \ln \Lambda}{8\pi\varepsilon_0^2 \mu^2 u^3}$

- 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).





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] LIBERTEXTS CHEMISTRY (<u>HTTPS://CHEM.LIBRETEXTS.ORG/ANCILLARY_MATERIALS/REFERENCE</u>).

<u>Csオーブンによる導入</u>

- 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)。





<u>Csオーブンによる導入</u>

- 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)。









ORNL-SNSイオン源 (Csカラー)



J-PARCイオン源(Csオーブン)

[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).





CERN-LINAC4イオン源 (Csオーブン洗浄機)







[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





[1] J-PARC PROJECT NEWSLETTER NO.95 (HTTPS://WWW.J-PARC.JP/C/EN/TOPICS/2024/08/05001381.HTML)





- RFアンテナによる誘導結合型プラズマ点灯、マルチカスプ磁場配位
- 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





<u> 負イオン源の目標と課題①: 長寿命化・メンテナンスレス</u>

- 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)

<u>Cs consumption in 5 months</u>

○ filled Cs amount : 2.49g

損耗による電極孔の変形

<u>負イオン源の目標と課題②:ビームの安定供給</u>

- 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



[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六ケ所. [2] T. SHIBATA, *ET AL*., AIP CONF. PROC. **2373**, 050002 (2021).



1 - 11 SEP. 2020, ONLINE.

<u>負イオン源の目標と課題③:ビームの大強度化</u>

- 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 ringdown technique (CRD)





高速PMT発光分光計測

(CERN/J-PARC)

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

[1] H. NAKANO, ET AL., JINST 11, COSO18 (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

200

150

0

-150

-200

-15

- 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







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.

[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オーブン、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。



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: <u>takanori.shibata@kek.jp</u>) NIFS世話人(中野: <u>nakano.haruhisa@nifs.ac.jp</u>)

東京から高速道路 または特急で約2時間

KEKつくば