

# 大強度負水素イオン源の高周波放電による引き出されたビームへの影響 EFFECT DUE TO RF DISCHARGE FROM A HIGH INTENSITY H<sup>-</sup> ION SOURCE UPON THE EXTRACTED BEAM

神藤勝啓<sup>#, A)</sup>, 柴田崇統<sup>B)</sup>, 和田元<sup>C)</sup>

Katsuhiko Shinto<sup>#, A)</sup>, Takanori Shibata<sup>B)</sup>, Motoi Wada<sup>C)</sup>

A) J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (J-PARC/JAEA)

B) J-PARC Center, High Energy Research Accelerator Organization (J-PARC/KEK)

C) Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

## Abstract

In J-PARC, peak H<sup>-</sup> current of several tens mA is extracted from an ion source driven by a solid-state rf amplifier with the frequency of 2 MHz for production of a cesiated hydrogen plasma. In case of the rf-driven ion source for producing the high-intensity H<sup>-</sup> current, the plasma density in the source chamber is so high that the ion sheath around the beam extraction area can follow the rf oscillation. The H<sup>-</sup> beam current fluctuation as large as approximately 1 mA was observed at the average beam current of 44 mA measured by a Faraday cup installed downstream of the ion source. The beam exhibited some fluctuation to the transverse motion as well. To further clarify this high frequency oscillation of the beam extraction sheath, we propose a measurement system using a time-resolved highly sensitive emittance monitor in order to observe the real-time beam fluctuation in the phase space.

## 1. はじめに

K. N. Leung らによって SSC (Superconducting Super Collider) 用に 1.8 MHz の高周波 (RF) 駆動の大強度水素負イオン源 (H<sup>-</sup>イオン源) が開発 [1] されて以来、J-PARC [2] や SNS (ORNL) [3]、LINAC4 (CERN) [4] などの加速器施設では数 10 mA 級の H<sup>-</sup>ビーム電流を引き出すために 2 MHz の RF 源を用いた大強度 H<sup>-</sup>イオン源の開発、運転が行われてきた。

J-PARC では、プラズマ点火に用いられている H<sup>-</sup>イオン源の RF 周波数が、イオン源より引き出された H<sup>-</sup>ビームに与える影響について調査を始めた。本発表では、RF 周波数に同期した H<sup>-</sup>ビーム電流量の揺動を観測したので、この結果を報告する。ビーム電流だけでなく、ビームのエミッタンスに対しても揺動が生じている可能性がある。そこで、この揺動を調べる計画も併せて報告する。

## 2. J-PARC 大強度 RF H<sup>-</sup>イオン源

J-PARC で用いている大強度 RF H<sup>-</sup>イオン源の構造を Figure 1 に示す。イオン源の運転状況等の詳細は、大越らの本年会での発表 [5] に示されている。J-PARC では、イオン源内で水素プラズマを生成するために SNS と同型の RF アンテナをプラズマ真空容器内に設置している。アンテナに 30 MHz の連続波 50 W を印加して放電を維持し、2 MHz のパルス波 (~800 μs) 最大 50 kW を重畳して高密度プラズマを生成し、H<sup>-</sup>ビームを引き出している。このイオン源は、セシウム (Cs) 導入器を備えている。Cs リザーバ温度及び Cs バルブ開閉時間で Cs 導入量を調整し、プラズマ電極表面の Cs 層厚を最適化して H<sup>-</sup>ビーム電流量の増大化を図っている。

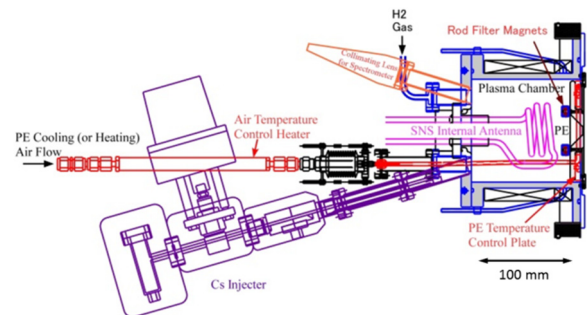


Figure 1: A cross-sectional view of the J-PARC RF-driven H<sup>-</sup> ion source.

## 3. H<sup>-</sup>ビーム強度の揺らぎ

### 3.1 イオンプラズマ周波数

ビーム引き出し孔近傍に生成されるイオンシースの時間応答性はイオンプラズマ周波数  $f_{pi}$  [Hz] によって決まると考えられ、以下の式で表される。

$$f_{pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_i e^2}{m_i \epsilon_0}} \quad (1)$$

ここで、 $n_i$  [m<sup>-3</sup>] はイオン密度、 $m_i$  [kg] はイオンの質量、 $\epsilon_0$  [F/m] は真空中の誘電率である。水素イオンのイオン密度  $n_i$  に対するイオンプラズマ周波数  $f_{pi}$  の関係を Figure 2 に示す。このイオンプラズマ周波数  $f_{pi}$  より低いと、シースは高周波に追従する。

<sup>#</sup> shinto.katsuhiko@jaea.go.jp

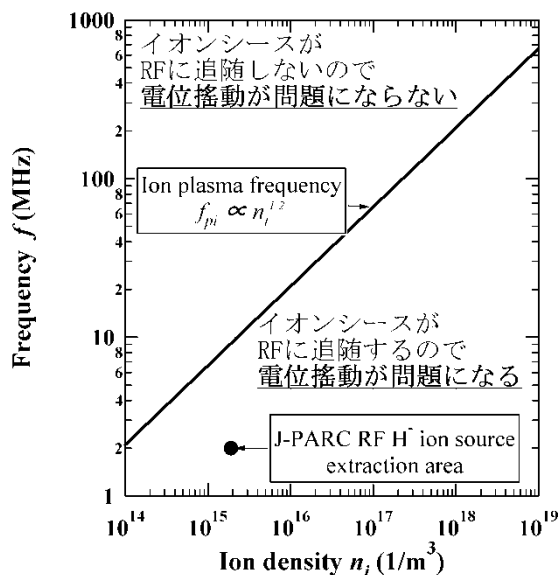


Figure 2: Ion plasma frequency plotted as a function of ion density.

J-PARC のイオン源で生成される H<sup>+</sup>ビーム電流密度は、最大 107 mA/cm<sup>2</sup> (H<sup>+</sup>ビーム電流 68 mA/引出孔直径 9 mm) である。これがイオン飽和電流密度に等しいとして H<sup>+</sup>の密度を算出すると、イオン源引出部近傍 (イオンシース領域) で約  $2.2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  程度となる。RF イオン源内プラズマの密度はシース領域の密度よりも高いと考えられる。Figure 2 に J-PARC のイオン源でプラズマを生成するために駆動する RF 周波数とイオン密度についてプロットした。J-PARC のイオン源で用いられている RF 周波数は、イオンプラズマ周波数  $f_{pi}$  に比べて十分に低い。

### 3.2 ビーム強度揺らぎの観測

J-PARC イオン源に印加している 2 MHz のパルス波の RF 波形とイオン源より引き出された H<sup>+</sup>ビーム波形を Figure 3 に示す。2 MHz の高周波電力は約 25 kW である。イオン源より 50 keV で引き出された H<sup>+</sup>ビームは、ファラデーカップでビーム電流を測定すると平均 H<sup>+</sup>ビーム電流 44 mA に対しビーム電流は約 1 mA の変動があり、2 MHz で振動していることが観測された。

プラズマ中でイオンプラズマ周波数  $f_{pi}$  よりも低い周波数で高周波を印加した場合については、KEK-PS の表面生成型イオン源 [6] で高速にチョップされた H<sup>+</sup>ビーム引き出しの研究が行われた [7]。表面生成型 H<sup>+</sup>イオン源では、コンバータと呼ばれる金属の電極をプラズマに対して負にバイアスすることで、コンバータ表面に入射する正イオンや中性粒子によって、表面から脱離した H<sup>+</sup>がビームとして引き出される。このコンバータ電圧に約 2 MHz の周波数 (500 MeV ブースターシンクロトロンの入射時の RF 周波数) の交流電圧を重畳することで、イオン源で高速チョップされた H<sup>+</sup>ビームを生成した。重畳した高周波はイオンプラズマ周波数に比べて十分に低く、コンバー

タ電極とプラズマの間のシースが重畳した高周波に追従したため、コンバータ表面での H<sup>+</sup>生成量がコンバータ電圧の変化に呼応して増減した。

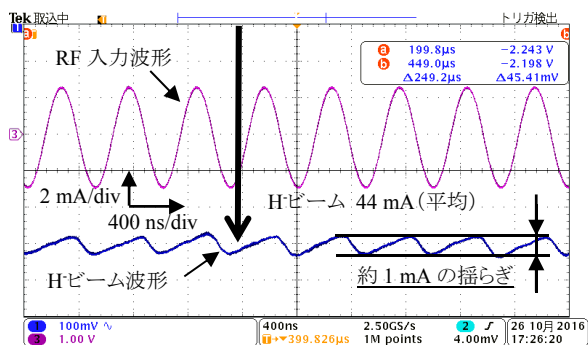


Figure 3: Waveforms of RF power input to the antenna and the expanded H<sup>+</sup> beam current.

J-PARC のイオン源では、放電駆動高周波電場とビーム引き出し孔近傍の電場が結合することにより引き出し電場に変調が掛かり、プラズマ中の荷電粒子 (H<sup>+</sup>) はこの引き出し電場の変調に追従して運動するためにイオン源より引き出された H<sup>+</sup>ビーム電流量は揺らぎを持ったと考えられる。Figure 3 で 2 MHz RF 入力サイン波に対して H<sup>+</sup>ビーム波形の揺らぎ方がサイン波から歪んでいる理由は明確には分かっていない。今後この原因についても調査する予定である。

### 4. ビームエミッタンスの揺らぎ観測の計画

ビーム引出孔近傍の電場が、放電駆動高周波と結合することによってプラズマ中 H<sup>+</sup>の運動に揺らぎが生じたのであれば、ビーム進行方向 (Longitudinal) 成分だけでなく、それに垂直方向 (Transverse) の成分にも揺らぎが生じる可能性がある。そこで、J-PARC ではプラズマ生成に用いている 2 MHz RF のエミッタンスに対する影響を調べることを計画している。

J-PARC では、ビーム粒子検出にファラデーカップを備えたダブルスリット式エミッタンスモニタを用いている。このファラデーカップでは、微弱な信号を検出することが困難である。また、本研究では 2 MHz RF に対して十分に早い応答性を有する検出器が必要となる。そこでこのビーム検出部をマイクロチャネルプレート (MCP) に付け替えて計測する準備を進めている。Figure 4 に RF イオン源から引き出されたビームの位相空間上での揺らぎを観測するための概念図を示す。2 つのスリットの位置を固定し、位相空間上の定点でのマクロパルス内の時間変化に対するビーム電流の変動を調べることで、RF に起因したエミッタンスの揺らぎを観測することを目指す。

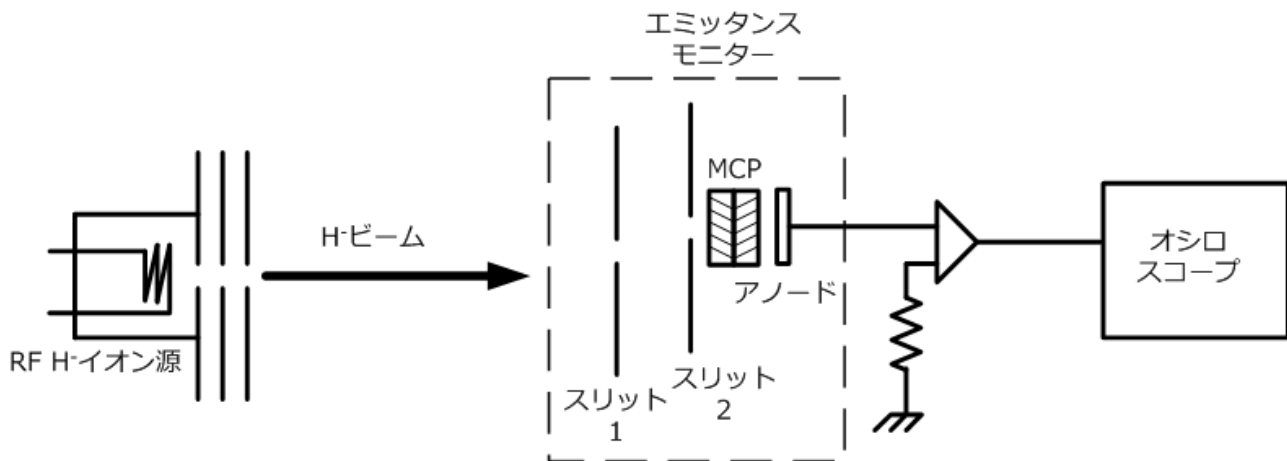


Figure 4: A schematic drawing of a measurement system for the beam fluctuation in the phase-space coordinates.

## 5. まとめ

J-PARC で用いられている 2MHz での RF 駆動型 H-イオン源より引き出された H-ビーム電流は、RF に同期して揺動していることが分かった。これは、駆動周波数がイオン密度の 1/2 乗に比例するイオンプラズマ周波数に比べて低く、放電駆動高周波電場とビーム引き出し孔近傍の電場が結合したため、イオンソースが RF に追従し引き出された H-ビームに揺らぎが生じたことが原因と考えられる。

ビーム粒子が RF に追従して揺らぐことで、エミッタンスにも影響を与える可能性がある。今後、放電駆動周波数がエミッタンスに与える影響を調べる実験を行う予定である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K05108 の助成を受けたものです。本研究を始めるにあたり、J-PARC センター加速器ディビジョンの長谷川和男氏、金正倫計氏、内藤富士雄氏、小栗英知氏の勸奨に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] K. N. Leung *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Vol. **62**, 100 (1991).
- [2] H. Oguri *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Vol. **87**, 02B138 (2016).
- [3] M. P. Stockli *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Vol. **87**, 02B140 (2016).
- [4] J. Lettry *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Vol. **87**, 02B139 (2016).
- [5] K. Ohkoshi *et al.*, "Operation status of the J-PARC H<sup>-</sup> ion source", in these proceedings.
- [6] A. Takagi *et al.*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. **NS-32**, 1782 (1985).
- [7] K. Shinto *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Vol. **67**, 1048 (1996).