

高周波負水素イオン源から引き出されたH⁻ビームの揺動

FLUCTUATION OF H⁻ BEAM EXTRACTED FROM A RADIO-FREQUENCY-DRIVEN H⁻ ION SOURCE

神藤勝啓^{#, A)}, 柴田崇統^{B)}, 和田元^{C)}

Katsuhiko Shinto^{#, A)}, Takanori Shibata^{B)}, Motoi Wada^{C)}

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

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

^{C)} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

Abstract

We have been conducting an investigation of the fluctuation of a negative hydrogen ion (H⁻) beam extracted from a radio-frequency-driven high-intensity H⁻ ion source. Spatial distributions of H⁻ beam extracted from the ion source and their time fluctuations were investigated. The observed fundamental frequency of the oscillation at the beam edge was twice the ion source driving radio frequency, while that at the beam center was the ion source driving radio frequency.

1. はじめに

粒子加速器や核融合プラズマ加熱に用いられている大強度負水素(H⁻)イオン源では、イオン源内プラズマの生成に高周波(RF)放電を用いることが主流となりつつある。粒子加速器ではJ-PARC[1], SNS[2], CERN[3]など、核融合プラズマ加熱では、ITER[4]などがその代表例として挙げられる。

RF駆動型H⁻イオン源は、K. N. LeungらによってSSC(Superconducting Super Collider)用に1.8 MHzでのRF駆動の大強度H⁻イオン源の開発[5]が発端となっており、その後1~2 MHzのRF源を用いたH⁻イオン源が世界中で研究、開発及び利用されている。

ところで、プラズマ境界に生成されるイオンシースの時間応答性は、プラズマ生成に用いているRF源の周波数 f_{rf} が、以下の式で表されるイオンプラズマ周波数 f_{pi} [Hz]に対する大小の関係によって決まると考えられる。

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

ここで、 n_i [m⁻³]はイオン密度、 m_i [kg]はイオンの質量、 ϵ_0 [F/m]は真空中の誘電率である。式(1)より、イオンプラズマ周波数 f_{pi} はイオン密度 n_i の平方根に比例することがわかる。Figure 1に n_i と f_{pi} の関係を示す。

プラズマ生成のためのRF駆動周波数 f_{rf} がイオンプラズマ周波数 f_{pi} より低い($f_{rf} < f_{pi}$)場合には、イオンシースはRFに追従するため電位の揺動が生じる。イオン源内のイオン密度 n_i が高くなるとイオンプラズマ周波数 f_{pi} が高くなるため、周波数の低い駆動周波数 f_{rf} で高密度プラズマ生成を行って大電流ビームを引き出す際には電位の揺動により、ビームが揺らぐ恐れがある。

大強度RF駆動型H⁻イオン源のような高密度プラズマ中でのRFに対するプラズマの振る舞いについて、T. Shibataらは数値シミュレーションによって、高密度プラズマのRF駆動型プラズマ源内では駆動周波数 f_{rf} の2倍

の周波数で密度揺動があることを示した[6]。また、T. Shibataらは大強度RF駆動型H⁻イオン源内プラズマのプラズマ点灯時から定常状態になるまでの間の時間変化を観測し、容量結合性プラズマから誘導結合性プラズマにモード遷移していく間にBalmer- α 線の時間変動が、 f_{rf} から $2f_{rf}$ へと遷移することを観測した[7]。一方で、K. Shintoらは大強度RF駆動型H⁻イオン源より引き出されたビーム電流が、 f_{rf} で揺らいでいることを観測した[8,9]。観測された発光強度の揺らぎが、ビーム電流の揺らぎとどのように相関するかは、ビームの横(Transverse)方向の揺らぎの度合いによっては、イオン源より引き出されたH⁻ビームのハロー成分になる恐れがある。そこで、我々はビームの横方向の揺動を調べることを始めた。これまでに、ビームの空間分布における各位置での時間変動について測定を行った。今回、その実験方法及び実験結果について報告する。

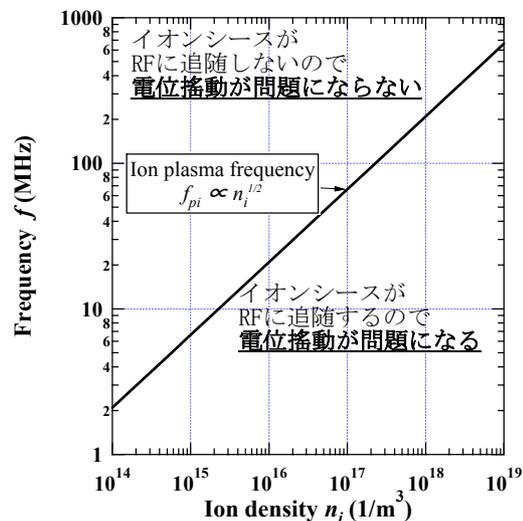


Figure 1: Ion plasma frequency plotted as a function of ion density.

[#] pasj-desk@bunken.co.jp

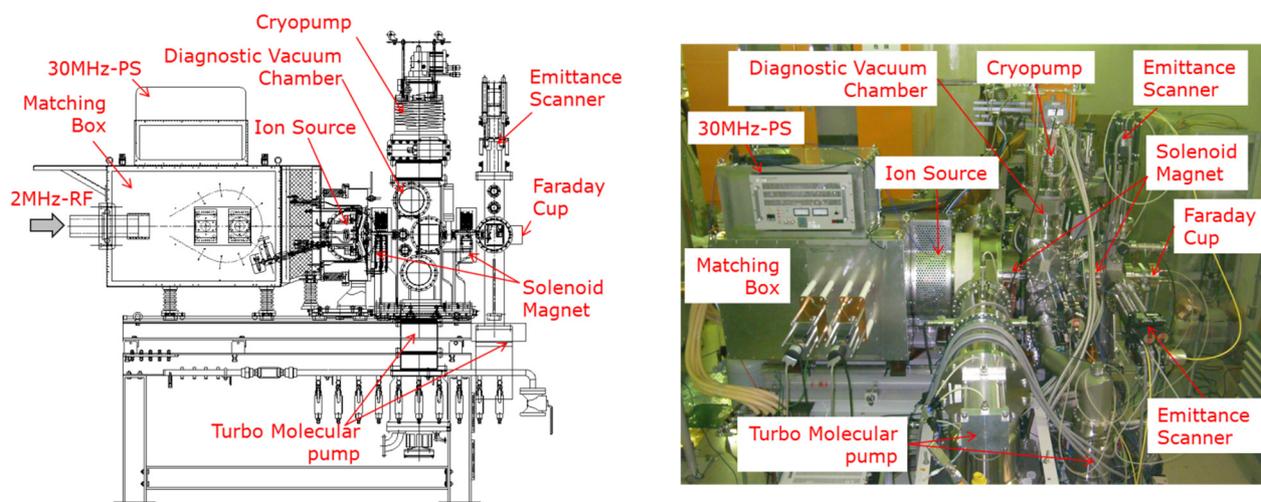


Figure 2: A schematic drawing and a photograph of the experimental apparatus.

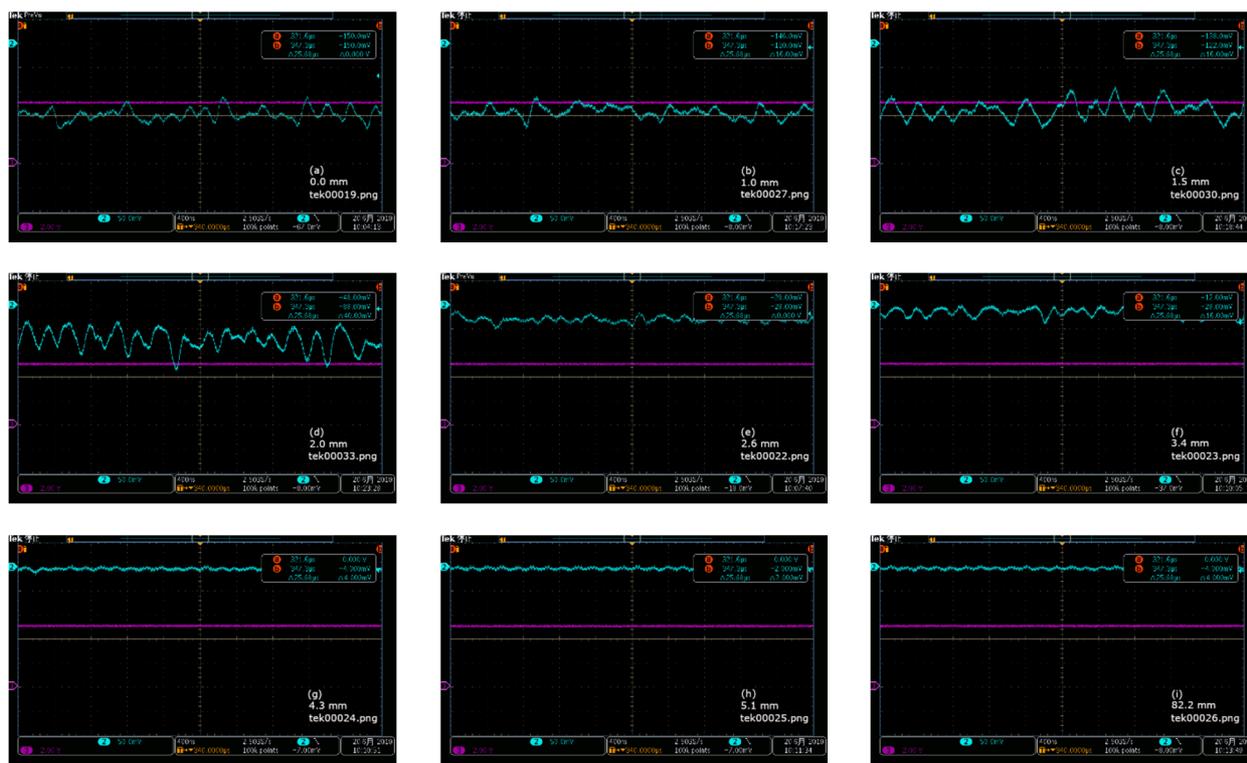


Figure 3: Photographs of the H⁻ beam (cyan) measured by a slit-Faraday cup.

2. 実験装置と方法

Figure 2 に実験装置図を示す. $f_{rf} = 2$ MHz の高周波 H⁻イオン源より約 50 kV で引き出された約 50 mA の H⁻ビームは, 2 つのソレノイド電磁石を備えたビーム輸送系を通過した後ビーム診断用真空容器(六方管)の最下流に備えたファラデーカップで全ビーム電流として測定される. 一方で, ビーム診断用真空容器にはダブルスリット型のエミッタンスモニターが水平方向及び鉛直方向に設置されている. スリット及びスリット付きファラデーカップそれぞれを独立に駆動することができる.

今回は, エミッタンスモニターのスリット付きファラデーカップ(スリット幅 0.1 mm×66.5 mm)を駆動することで, ビームの中心部からエッジ部について, それぞれの場所でのビーム電流を検出した. スリット付きファラデーカップで検出した信号はアンプを通して, オシロスコープでビーム電流の時間変化を観測した.

3. 実験結果と考察

Figure 3 にスリット付きファラデーカップをスキャンした時にファラデーカップで測定したビーム波形を示す. ファラデーカップで測定した H⁻ビーム電流が最大となる位置

をビーム中心位置 (Fig. 3 (a)) とし, ファラデーカップを中心位置からスキャンした位置 (スキャンした距離は各図中に表示) での H-ビーム波形を示した. Fig. 3 (i) は, H-ビームを下流に通すときのファラデーカップの位置であり, ファラデーカップが H-ビームから十分に離れた位置に移動したときの波形である.

中心位置 (Fig. 3 (a)) から離れるほど, ビームの直流成分は小さくなるが変調成分が大きくなっていることがわかる. また, 中心から 1.5 mm 付近 (Fig. 3 (c)) までは, $f_{rf}=2$ MHz でビーム波形が揺れているが, 2.0 mm 付近 (Fig. 3 (d)) では, $2f_{rf}$ (4 MHz) でビームが揺れている. ビーム変調成分は, 中心から 3.4 mm 離れたところ (Fig. 3 (f)) でも, はっきりと見える.

ビーム中心付近とビームエッジ付近で, ビーム揺動の基本周波数が f_{rf} から $2f_{rf}$ に移っている. ビーム中心部では K. Shinto らが示したイオンシースの揺動の影響 [8,9] を受けており, ビームエッジ部では T. Shibata らが示した密度揺動 [6,7] の影響を受けていることが考えられる. これについては今後さらに調べる必要がある.

4. まとめと今後の予定

RF 駆動型大強度 H-イオン源より引き出された H-ビームの揺動について, ビームの空間分布における各位置でのビーム揺動を調べた. その結果, ビーム中心部では, 駆動 RF の周波数がドミナントなビーム振動, ビームエッジ部では駆動 RF の 2 倍の周波数がドミナントなビーム振動が観測された. ただし, 今回の測定ではスリット形状で一方に積分されているため, 中心部においても周辺部からの寄与が大きいと考えられる. これに対応するには両方向に対してスリットでビームを切り, 二次元計測を行う必要があるが, 十分な信号強度の確保が必要となる.

ビーム揺動については, エミッタンスにも影響を与えると考えられるため, 高時間分解能でのエミッタンス測定を可能にするための計測系の構築を行っている. ダブルスリットを用いたエミッタンス測定では, ビーム二次元計測と同様に信号強度が小さくなるため, 二次電子増倍型検出器の使用も視野に入れた計測系を検討中である. 雑音が除去されていることの確認と, 信号検出系の大幅な増強を行った後, 最終的なエミッタンスの揺動について, 今後調べる予定である.

謝辞

本研究は科研費 JP17K05108 の助成を受けて行われたものです. 本研究を進めるにあたり, 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, 小栗英知氏から受けました勸奨に感謝いたします.

参考文献

- [1] K. Ohkoshi *et al.*, “J-PARC 負水素イオン源の運転状況 (WEPI038)”, in these proceedings.
- [2] Martin P. Stockli, Robert F. Welton and Baoxi Han, Review of Scientific Instruments Vol. 89, 052202-1–052202-11, (2018), doi: 10.1063/1.5025328.
- [3] J. Lettry *et al.*, AIP Conference Proceedings Vol. 2052, 050008-1–050008-6 (2018), doi: 10.1063/1.5083762.
- [4] G. Chitarin *et al.*, AIP Conference Proceedings Vol. 2052, 030001-1–030001-9 (2018), doi: 10.1063/1.5083729.
- [5] K. N. Leung *et al.*, Review of Scientific Instruments, Vol. 62, pp. 100-104 (1991); doi, 10.1063/1.1142315.
- [6] T. Shibata *et al.*, AIP Conference Proceedings Vol. 1869, 030017-1–030017-11 (2017), doi: 10.1063/1.4995737.
- [7] T. Shibata *et al.*, AIP Conference Proceedings Vol. 2011, 020008-1–020008-3 (2018), doi: 10.1063/1.5053250.
- [8] K. Shinto, T. Shibata, M. Wada, “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”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan Aug. 1-3, 2017, pp. 648-650.
- [9] K. Shinto *et al.*, AIP Conference Proceedings Vol. 2011, 080016-1 – 080016-3 (2018), doi: 10.1063/1.5053371.