

大強度高周波負水素イオン源用 J-PARC 製内部アンテナのガス放出特性

OUTGASSING CHARACTERISTICS FROM THE J-PARC-MADE INTERNAL ANTENNA FOR A HIGH-INTENSITY RADIO-FREQUENCY H⁻ ION SOURCE

神藤勝啓^{#, A)}, 柴田崇統^{B)}, 大越清紀^{A)}, 南茂今朝雄^{B)}, 池上清^{B)}, 小栗英知^{A)}

Katsuhiro Shinto^{#, A)}, Takanori Shibata^{B)}, Kiyonori Ohkoshi^{A)}, Kesao Nanmo^{B)}, Kiyoshi Ikegami^{B)}, Hidetomo Oguri^{A)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In J-PARC, we have been conducting the test of a J-PARC-made internal antenna in order to establish the manufacturing method and understand the characteristics of H⁻ beam extracted from the J-PARC RF H⁻ ion source with the antenna for ignition of the cesiated hydrogen plasma. We investigated the outgas characteristics during the production of a high-density plasma by using the J-PARC-made antenna in this year. It is confirmed that no remarkable impurities were emitted from the antenna by a residual gas analysis using a quadrupole mass analyzer installed downstream the ion source and a spectroscopic analysis of the plasma in the ion source. It is found that the emittances of the H⁻ beam extracted from the J-PARC radio-frequency H⁻ ion source by using the antenna were similar as those in case by using SNS antenna.

1. はじめに

J-PARC では、2014 年秋の運転より、それまで用いていた六硼化ランタン (LaB₆) フィラメントによる熱陰極放電型負水素 (H⁻) イオン源から、内部アンテナを用いた高周波 (RF) 放電型 H⁻ イオン源に置き換えて、加速器施設にビームを供給している。イオン源から引き出された H⁻ ビーム電流及び 1 回あたりの運転時間も運転計画に合わせて徐々に増加しており、2022 年夏までの運転 (Run 89) では、イオン源から 60 mA の H⁻ ビーム電流を 4,000 時間以上連続して引き出すことに成功した。Figure 1 に、これまでの J-PARC での RF H⁻ イオン源の運転実績を示す。

J-PARC の RF H⁻ イオン源を構成する機器はほぼ全て J-PARC で設計・製作したものであるが、RF 放電用の内部アンテナのみ米国オークリッジ研究所の SNS で用いているものを、J-PARC 用にカスタマイズして使用している。そこで、J-PARC ではアンテナの製法や製作したアンテナの性能を理解することを目的として、J-PARC 製内部アンテナを試作し、動作試験を進めてきた。

高密度プラズマ放電中に内部アンテナより不純物がプラズマ中に放出されることで、アンテナ自身やイオン源真空容器、ビーム引き出し部の電極などがスパッタリングにより損傷する恐れがある。今回、四重極質量分析器によるイオン源残留ガス分析とイオン源チャンバー内プラズマの分光計測をオフラインで実施し、アンテナやイオン源真空容器からのガス放出特性を調べた。

2. J-PARC 製内部アンテナ

Figure 2 に J-PARC で用いている大強度 RF H⁻ イオン源の図を示す。イオン源の詳細については、過去の発表原稿[1]を参考にして頂きたい。水素プラズマを生成するためにイオン源チャンバー内に内部アンテナが設置されるが、J-PARC 実機 H⁻ イオン源には、SNS 製内部アンテナが設置されている。今回のオフライン試験では、J-

PARC で試作したアンテナ (J-PARC 製アンテナ) をイオン源チャンバー内に設置して、プラズマを点け、ガス放出特性やビーム引き出し実験を行った。

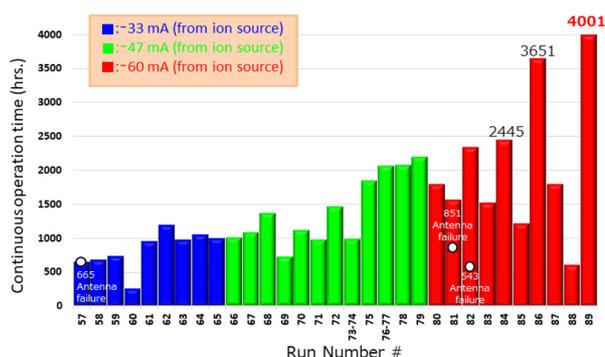


Figure 1: Operation history of J-PARC RF H⁻ ion source.

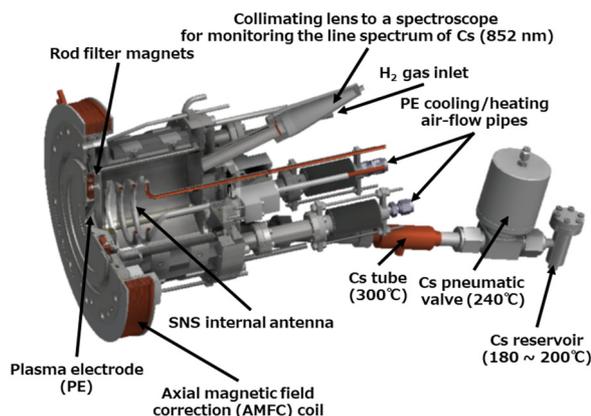


Figure 2: A schematic drawing of the J-PARC RF H⁻ ion source.

[#] kshinto@post.j-parc.jp

Figure 3 に内部アンテナの形状を示す。内部アンテナは、無酸素銅パイプ(管外径 4.8 mm、肉厚 0.8 mm)を用いた 2.5 周のらせん構造をしている。銅パイプには絶縁処理のため珪瑯を塗布しており、コーティングされた部分の管外径は 5.8 mm ~ 6.3 mm である。

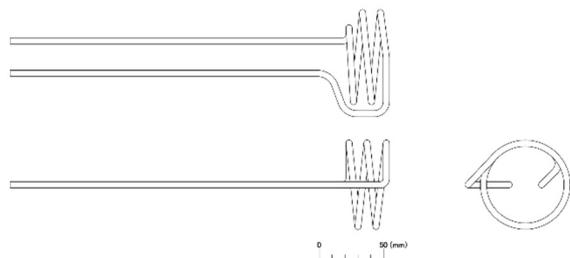


Figure 3: A schematic drawing of the internal antenna for the J-PARC H⁻ ion source.

J-PARC 製アンテナに用いた銅パイプをコーティングした珪瑯の成分組成比はメーカーから公開されていないため、成分に含まれている分子のみを Table 1 に示す。この成分を参考に残留ガス分析、イオン源プラズマの分光分析での原子の発光強度を確認する。Table 2 に、J-PARC 製アンテナに用いられた化合物の元素の原子量と天然存在比及び主な発光波長を示す。

Table 1: Components of Porcelain Enamel for the J-PARC-made Antenna

SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
CaO	BaO	ZnO	P ₂ O ₅	ZrO ₂

3. J-PARC 製アンテナのガス放出特性

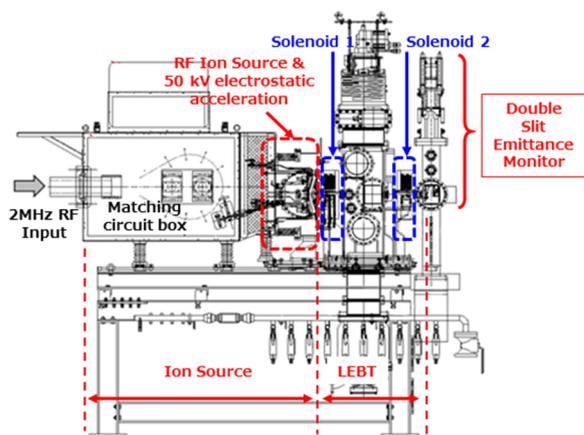
3.1 H⁻イオン源テストスタンド

Figure 4 にイオン源から引き出された H⁻ビームの性能を確認するためのオフラインのテストスタンド[1]を示す。イオン源の残留ガスの質量分析には、キャノンアネルバ製の四重極型質量分析器(QMA)(型番:M-201QA-TDM)[2]を用いて測定した。QMA は、Fig. 4 (b)の写真に示したように、ビーム引き出し部のチャンバーの両側に設置した 1,500 L/s ターボ分子ポンプを擁した真空排気系への片側のダクトの分岐に設置されている。この QMA は、質量数 200 まで測定可能である。イオン源内のプラズマ光は、Fig. 2 に示したイオン源チャンバーの天板に取り付けた集光レンズで集められ、光ファイバーケーブルを介してオーシャンオプティックス社製の分光器(JAZ-EL200-XR)[3]で 200 nm から 1000 nm までの波長の光を分光測定している。

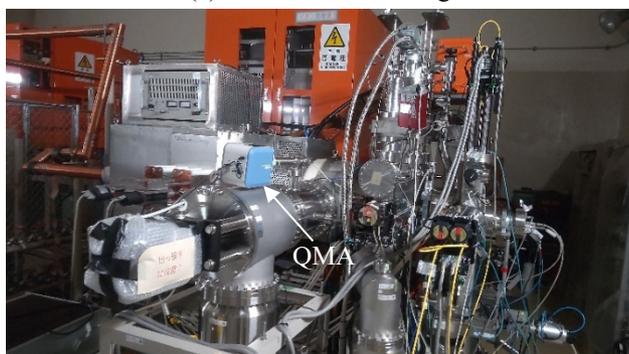
イオン源より引き出された H⁻ビームは、J-PARC 実機の低エネルギー輸送系(LEBT)と同じ配置で並べたビーム輸送系を通り、実機の RFQ 入り口の位置に相当する場所に設置されたダブルスリット型のエミッタンスモニターを用いて、垂直方向及び水平方向のエミッタンスが測定できる。

Table 2: Mass Number with Natural Abundance [4,5] and Major Emission Wavelengths [4,6,7] of the Elements Composed by the Enamel for the J-PARC-made Antenna

	Mass number (Abundance)	Wavelengths (nm)
B	10 (18.9 - 20.4%), 11 (79.6 - 81.1%)	249.7, 249.8, 345.1
O	16 (99.74 - 99.78%), 17 (0.038 - 0.040%), 18 (0.187 - 0.222%)	777.2, 777.4, 777.5
Na	23 (100%)	330.2, 330.3, 568.3, 568.8, 589.0, 589.6
Mg	24 (78.88 - 79.05%), 25 (9.988 - 10.034%), 26 (10.96 - 11.09%)	279.6, 280.3, 285.2, 382.9, 383.2, 303.8, 516.7, 517.2, 518.4
Al	27 (100%)	263.2, 266.9, 281.6, 308.2, 309.3, 394.4, 396.2, 623.2, 624.3
Si	28 (92.19 - 92.32%), 29 (4.645 - 4.699%), 30 (3.037 - 3.110%)	250.7, 251.6, 252.9, 288.2, 390.6
P	31 (100%)	253.4, 253.6, 255.3, 255.5
K	39 (93.2581%), 40 (0.0117%), 41 (6.7302%)	404.4, 404.7, 766.5, 769.9
Ca	40 (96.941%) 42 (0.647%) 43 (0.135%) 44 (2.086%) 46 (0.004%) 48(0.187%)	315.9, 317.9, 393.4, 396.8, 422.7, 422.5, 443.5, 445.5
Zn	64 (49.17%), 66 (27.73%), 67 (4.04%), 68 (18.45%) 70 (0.61%)	202.6, 206.2, 213.9, 250.2, 255.8, 328.2, 330.3, 334.5, 468.0, 472.2, 481.1, 636.2
Zr	90 (51.45%), 91 (11.22%), 92 (17.15%) 94 (17.38%) 96 (2.80%)	339.2, 343.8, 349.6, 352.0, 354.8, 357.2, 360.1, 468.8, 471.0, 473.9, 477.2
Sb	121 (57.21%), 123 (42.79%)	206.8, 217.6, 231.1, 252.8, 259.8, 287.8, 323.2, 326.8
Ba	130 (0.11%), 132 (0.10%), 134 (2.42%), 135 (6.59%), 136 (7.85%), 137 (11.23%), 138 (71.70%),	230.4, 233.5, 307.2, 389.2, 413.1, 455.4, 493.4, 542.5, 551.9, 553.6, 577.8



(a) Schematic drawing



(b) Photograph

Figure 4: Off-line test bench for the J-PARC RF H⁻ ion source.

3.2 残留ガス分析

Figure 5 に、イオン源で RF 放電により水素プラズマを点けた時の QMA で測定した信号の測定結果の一例を示す。Figure 5 (a)に示すように、質量数 1 及び 2(それぞれ H 及び H₂)の信号が他の質量数に比べて、2~3 桁大きい。質量数 16~18(水及びその組成成分: O, OH, H₂O)及び質量数 28 の信号がバックグラウンド(BG)レベルに比べて、やや大きく見えている。質量数 32(酸素: O₂)の信号が BG レベルで殆ど検知されていないこと、He を用いた真空リーク試験で 1×10^{-12} Pa m³/s 以下の He の流量であったことから、質量数 28 は一酸化炭素(CO)による信号であると考えている。Figure 5 (b)に、Fig. 5 (a)の質量数が1~140 までについて、縦軸も線形プロットにし、レンジを 2×10^{-13} A から 4×10^{-13} A までで示した。質量数 40 及び 44 付近に信号のピークが見られる。質量数 40 は、アルゴン(Ar)(原子量 39.95)またはカルシウム(Ca)(原子量 40.08)が考えられる。セシウム(Cs)を導入する H⁻イオン源では、真空から大気圧に戻す際に、セシウムが大気中の H₂O や O₂ などと反応しないよう通常は Ar をパージガスとして、容器内の圧力を大気圧に戻している。そのため、質量数 40 は Ar による信号である可能性が高いと考える。質量数 44 は CO₂ による信号であると考えられる。不純物である Ba(原子量 137.3)までの質量数において、上記以外の質量数では QMA 信号は BG レベル

程度であり、アンテナの珪瑯コーティングから放出されている不純物は検出されていないと思われる。

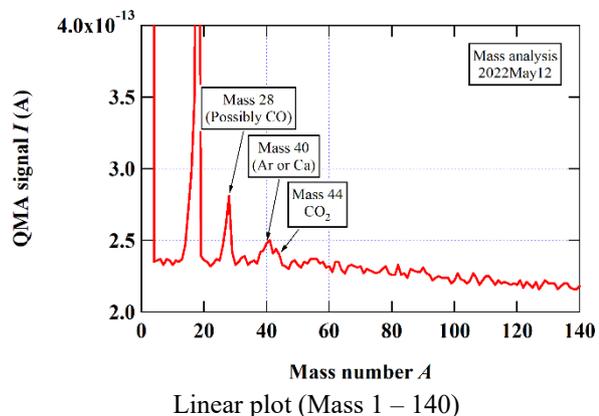
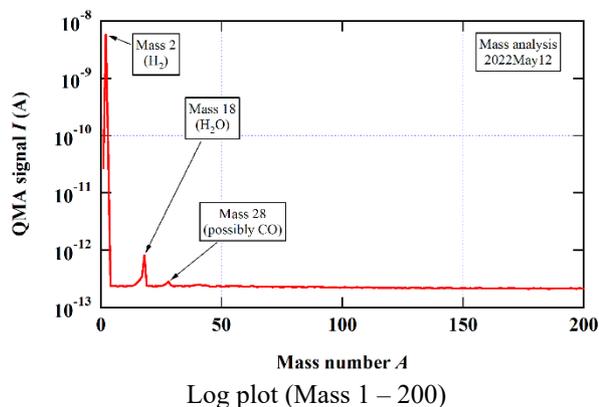


Figure 5: A typical result of the residual gas analysis measured by a QMA installed downstream the ion source.

3.3 プラズマの分光測定

残留ガス分析では質量数が明らかになるが、イオン源が-50 kV の高電圧になるため、容易に QMA を設置することができない。そのため、イオン源プラズマを分光測定することでアンテナの珪瑯コーティングから放出された元素による発光も調べた。

Figure 6 にイオン源で RF 放電により水素プラズマを点けた時のイオン源内プラズマの発光を分光測定した結果の一例を示す。Figure 6 中の赤実線は J-PARC 製アンテナの分光測定結果である。比較のために、黒点線で同じテストスタンドで SNS 製アンテナを用いたときの分光測定の結果を示す。J-PARC 製アンテナによるイオン源プラズマの分光特性は、SNS 製アンテナの特性と大きな違いがないことが分かった。SNS 製アンテナの絶縁コーティングの組成は公表されていないが、J-PARC 製アンテナの珪瑯コーティングは、SNS 製アンテナのものと比較してあまり大きな違いはないと考えられる。

Figure 6 の分光特性を見ると、水素原子の線スペクトルと水素分子のバンドスペクトル[8,9]が顕著に見えることが分かる。Table 2 の不純物の主な線スペクトルの波長に該当するものは、酸素(O)以外はないと思われる。Figure 6 では、質量数 40 の Ca の発光波長の線スペクトルは検出されていないため、質量数 40 の残留ガスは Ar によるものであると考える。

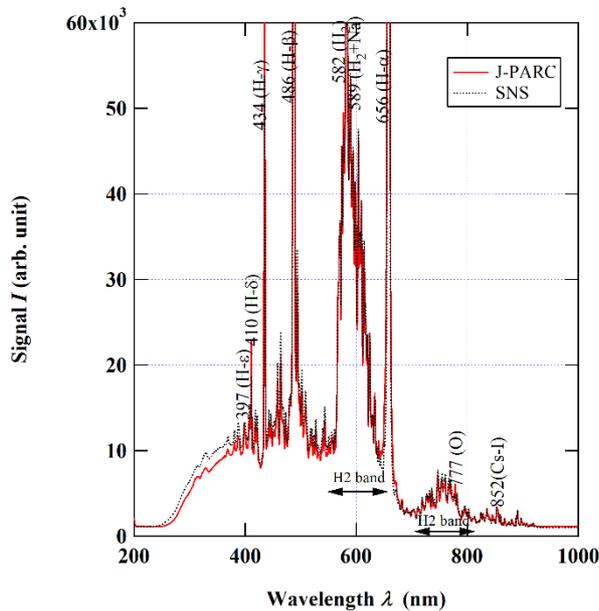


Figure 6: A typical spectroscopic measurement in the H⁻ ion source with the plasma ignited by the J-PARC-made antenna with as a reference with that ignited by an SNS-made antenna for comparison.

4. J-PARC 製アンテナを用いた RF H⁻イオン源から引き出された H⁻ビームの特性

J-PARC 製アンテナを用いた RF 放電により水素プラズマを生成し、H⁻ビーム電流を増大化するためにイオン源内に Cs を導入することで RF H⁻イオン源より 60 mA の H⁻ビームを引き出し、エミッタンス測定を行った。

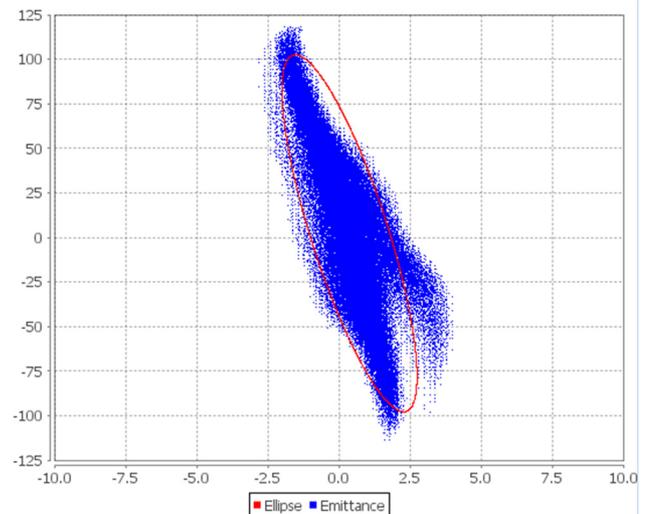
Figure 7 は、Fig. 4 に示すテストスタンドで測定した H⁻ビームの位相空間分布図である。水平方向及び垂直方向の 95%規格化エミッタンスは、それぞれ $\epsilon_{95\%rms} = 0.279 \pi \text{ mm mrad}$ 及び $\epsilon_{95\%rms} = 0.254 \pi \text{ mm mrad}$ であり、SNS 製アンテナを用いた時のエミッタンス[10]と大きな違いがないことが分かった。

5. まとめと今後の予定

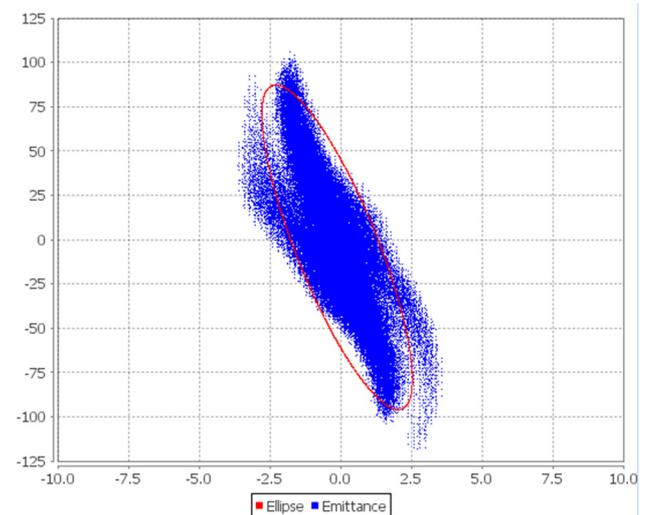
J-PARC 製アンテナを用いた RF H⁻イオン源での水素放電を行ったときのガス放出特性について調べた結果、残留ガスの質量分析及びイオン源プラズマの分光測定からは RF 内部アンテナの絶縁を取るために用いている珪藻コーティングからは不純物が放出されている様子は見えなかった。SNS 製アンテナを用いた場合の分光測定の結果と比較しても、特段大きな違いはなく、J-PARC 製アンテナのガス放出特性は、SNS 製アンテナと同等のガス放出特性であると考えられる。

J-PARC 製アンテナを用いた H⁻ビーム引き出し実験を行った結果、RFQ 入口に相当する場所でのビームエミッタンスは、水平方向及び垂直方向とも SNS 製アンテナを用いた時のエミッタンスとほぼ同程度であることも確認できた。

現在、オフラインのテストスタンドを 24 時間運転(無人での連続運転)できるように改修を行っている。改修後、



(a) Horizontal



(b) Vertical

Figure 7: Emittance measurement of the H⁻ beam extracted from the RF H⁻ ion source with the J-PARC-made antenna.

J-PARC 製アンテナによる RF H⁻イオン源の連続運転試験を実施する予定である。この連続運転の成果によって、J-PARC 製アンテナを用いた RF H⁻イオン源の J-PARC 実機への投入を判断する。

参考文献

- [1] K. Shinto *et al.*, “2 MHz 高周波源による高周波大強度負水素イオン源から引き出されたビームへの影響”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, pp.230-233.
- [2] https://anelva.canon/products/component/mass/ma_detail01.html
- [3] <https://www.oceaninsight.jp/Products/jaz.html>
- [4] J. R. Rumble editor-in-chief, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 102nd edition, 2021, 1-15 – 1-16.
- [5] Isotopic Compositions of the Elements 2019; <https://www.ciaaw.org/index.html>
- [6] F. M. Phelps, M. I. T. wavelength tables, Volume 2, Wavelengths by element, Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1982, pp.800-802.
- [7] NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference

Database 78, Version 5.9;

<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

- [8] M. P. Stockli, Journal of Physics: Conference Series, 399 (2012), 012001-1 – 012001-10.
doi:10.1088/1742-6596/399/1/012001
- [9] B. X. Han *et al.*, “Application of optical emission spectroscopy for the SNS H⁻ ion source plasma studies”, AIP Conference Proceedings, **1655** (2015), 030003-1– 030003-9.
doi:10.1063/1.4916430
- [10] T. Shibata *et al.*, “Soundness evaluation of J-PARC RF ion source after 5-month continuous operation”, Journal of Physics: Conference Series, **2244** (2022), 012041-1 – 021041-5.
doi:10.1088/1742-6596/2244/1/012041