

J-PARC 負水素イオン源の運転状況

OPERATION STATUS OF THE J-PARC H⁻ ION SOURCE

大越清紀^{#,A)}、神藤勝啓^{A)}、南茂今朝雄^{A)}、柴田崇統^{A)}、池上清^{A)}、
高木昭^{A)}、上野彰^{A)}、滑川裕矢^{B)}、小栗英知^{A)}

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

^{A)}J-PARC Center

^{B)}Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.

Abstract

In 2017-2018 campaign, the J-PARC rf-driven negative hydrogen (H⁻) ion source producing H⁻ beam with the beam current of 47 mA accomplished three times of long-time operation more than 2,000 hours without any serious problems. On the final day of this campaign, the ion source produced an H⁻ beam with the current of 72 mA in order to demonstrate the beam current of 60 mA at the linac exit. We are also conducting an endurance test of a J-PARC-made antenna at a test bench. The antenna achieved the operation time approximately 1,400 hours.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の負水素 (H⁻) イオン源は、2014 夏期メンテナンス期間にリニアックビームを 30 mA から 50 mA へ増強[1]するためにセシウム (Cs) 不使用の六ホウ化ランタンフィラメント駆動型[2]からセシウム添加型高周波駆動型 (RF) [3]に換装を行った。同年 9 月から RF H⁻イオン源の運転を開始し、物質・生命科学、ニュートリノ及びハドロン実験施設へビーム供給を開始して約 4 年が経過した。RF H⁻イオン源は、H27 年本学会で報告[4]した良質のアンテナの選別方法やプレコンディショニング運転を実施しているため、J-PARC 加速器実機でのビーム運転中にアンテナ故障やその他の大きなトラブルもなく安定に動作し、イオン源連続運転時間を年々延ばしている。

本会では、RF H⁻イオン源の最近 1 年間の運転実績や保守作業等の報告の他、J-PARC 製 RF アンテナの長時間運転を実施しているため、その途中結果について報告する。

2. J-PARC RF H⁻イオン源

2.1 RF H⁻イオン源の構造

J-PARC の RF H⁻イオン源は、SUS 製プラズマ生成部、ビーム引出し系及び真空排気系から主に構成されている。イオン源及び整合回路は、電磁波の外部へ漏洩を防ぐために金属製シールドボックス内に収められている。イオン源本体はメンテナンス性を考慮して、天板フランジ、プラズマチェンバ及びプラズマ電極 (PE) を一体化した構造となっている。Figure 1 に J-PARC RF H⁻イオン源本体の構造図を示す。SUS 製プラズマチェンバ内に米国 SNS (Spallation Neutron Source) で使用しているものと同型の RF アンテナ[5]を設置し、30 MHz-RF を連続的に 50 W 印加して低密度プラズマを維持し、ビーム引き出し時に 2 MHz-RF をパルス的に最大 50 kW を

[#] ohkoshi.kiyonori@jaea.go.jp

重畳することで高密度パルス水素プラズマを生成している。本イオン源は Cs 導入器を備えており、Cs リザーバ温度と Cs バルブ開放時間でプラズマチェンバ内への Cs 導入量を調整している。天板フランジのビューポートに設置した分光器で Cs 発光強度 (852 nm) を常時監視し、あらかじめ設定した強度を超えると Cs リザーバオープン電源が停止し、Cs 過多状態になることを防ぐインターロックを備えている。PE は高温空气管により温度調整が可能な構造になっており、Cs 導入量の調整と合わせてプラズマ電極表面のセシウム層厚を最適な状態に保っている。

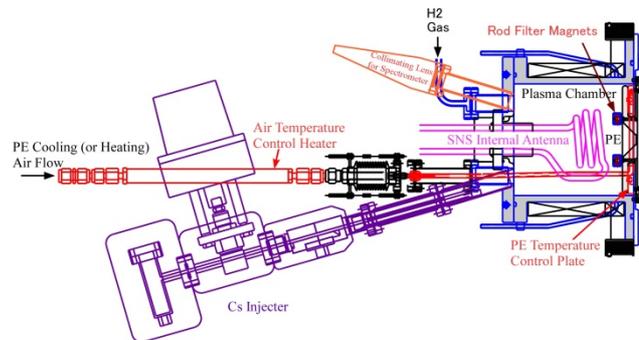


Figure 1: Cross-sectional view of the J-PARC RF-driven H⁻ ion source.

2.2 イオン源真空排気系

真空排気系の構成は、イオン源部に 1500 l/s のターボ分子ポンプ (TMP) 2 台設置され、低エネルギービーム輸送系 (LEBT) は、RFQ への水素 (H₂) ガス流入を極力減らすためにチェンバ内に直径 15 mm のオリフィスを設置して差動排気している。オリフィス上流に 1500 l/s の TMP1 台と 500 l/s の TMP 2 台、下流側は 3600 l/s のクライオポンプ 1 台による真空排気しており、通常イオン源

運転時の H₂ ガス 21 sccm における真空度は、イオン源出口で 5.6×10^{-3} Pa 程度であるが、LEBT オリフィス下流では 2.3×10^{-5} Pa 程度を維持している。イオン源及び LEBT の真空排気系の配置図を Fig. 2 に示す。

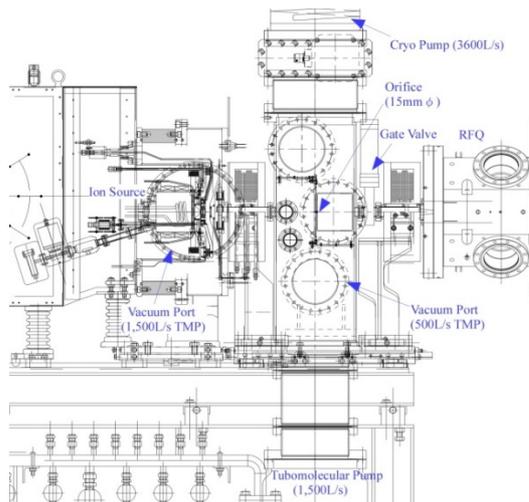


Figure 2: Vacuum system of the ion source and LEBT.

3. 高周波イオン源の運転・保守

3.1 高周波イオン源の運転実績

H29 年夏期メンテナンス後から H30 年夏期メンテナンスまでの一年間の高周波イオン源運転実績を Fig. 3 に示す。

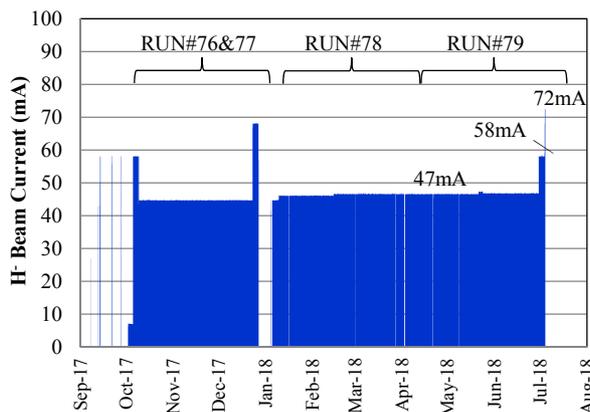


Figure 3: Operation history of the ion source for the latest year.

縦軸のビーム電流は、低エネルギー輸送系 (LEBT) で測定した値であり、その値が一定になるように 2 MHz-RF 電力及び Cs 添加量をフィードバック制御している[6]。最近一年間のユーザ利用運転では、イオン源はビーム電流値約 47 mA で運転を行っている。RUN#75 で初めて約 3 ヶ月間の連続運転を試行し、寿命や安定性に問題が無いことが証明されたため、J-PARC では RUN#76 からはイオン源のメンテナンスを 3 ヶ月毎に行う方針とした。

Figure 4 に示すように現在まで 3 回の 3 ヶ月連続運転を行い、RUN#79 (H30 年 4 月～7 月) ではこれまでの最長時間となる 2,201 時間を達成した。

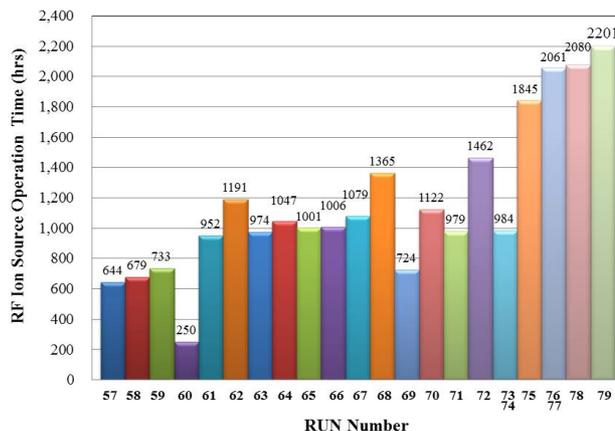


Figure 4: Operation time for the ion source of each RUN.

RUN#79 終盤 (89 日目) には加速器スタディのために、ビーム電流を 58 mA に増加した。また RUN 最終日 (93 日目) には、J-PARC の更なる高度化を目指したリニアックの加速器スタディのためにこれまでのイオン源の最大ビーム電流となる 72 mA に増加し、ビーム強度が RFQ 出口で 66 mA、リニアック出口で 60 mA を確認した[7]。ビーム電流を 58 mA から 72 mA に増加させるためのイオン源調整は、Cs 添加条件の安定化まで含めて約 2 時間で完了し、大強度ビームスタディ中 (約 8 時間) もビーム引出系の放電はなく安定にビームを供給できた。

RUN#79 のビーム電流 47 mA、58 mA 及び 72 mA 運転時のそれぞれのイオン源運転パラメータを Table 1 に、72mA 運転時のビーム、2 MHz 進行波 (Pf) 及び反射波 (Pr) のオシロスコープ波形を Fig. 5 に示す。

Table 1: Ion Source Parameters at 47 mA, 58 mA and 72mA Operations

Parameters	47 mA operation	58 mA operation	72 mA operation
2 MHz RF Power	16.7 kW	20.3 kW	26.3kW
RF pulse length/ repetition	800µs/ 25Hz	800µs/ 25Hz	800µs/ 25Hz
Acceleration Voltage	42.5kV	43.0 kV	42.5kV
Extraction Voltage	9.8 kV	9.8 kV	10.3kV
H ₂ gas flow rate	21 sccm	21 sccm	22 sccm
Solenoid Magnet 1	520 A	510 A	540A
Solenoid Magnet 2	650 A	660 A	680A
Steering Magnet V	-4.0 A	-5.0 A	-5.0A
Steering Magnet H	-1.0 A	0.0 A	-2.0A

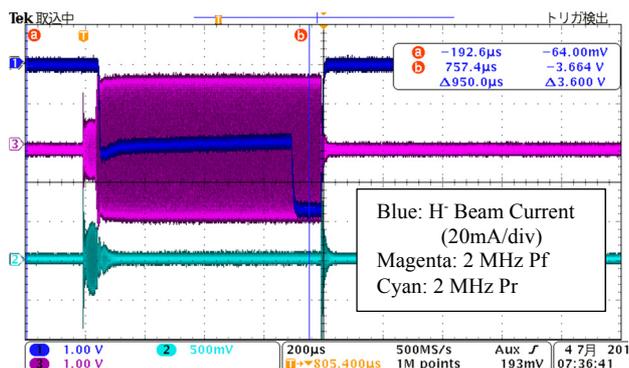


Figure 5: Waveforms of H⁺ beam of 72 mA from the ion source, 2 MHz RF forward (Pf) and reflect (Pr).

3.2 イオン源の保守

毎 RUN 終了後にイオン源のメンテナンスを短時間で実施している。イオン源メンテナンスでは、主にイオン源本体の交換、H₂ ボンベの交換、真空リーク試験、イオン源ガス出し運転及びビーム調整運転を行う。新たに取り付けるイオン源は、オフラインで事前にコンディショニング運転及びビーム性能確認を実施しているため、イオン源取付け後のアウトガスも少なく、短時間でビーム供給を可能としている。

RUN で使用したイオン源は、プラズマ生成室内の清掃後、アンテナの交換及び Cs の充填(~3 g)を行っている。RUN の運転時間が延長されてからは、Cs 導入器の高温用バルブの稼働回数が増加したため、Cs 異常導入を未然に防止するために高温用バルブは RUN 毎に新品に交換している。

最近 1 年間の運転では、イオン源が原因で長時間ビームが停止するような不具合事象は発生していないが、H30 年 1 月に Cs 導入器で使用している 3 台のヒータの内 1 台(チューブ部)が温度低下する事象があった。ビーム運転への影響を与えないように、一時的にチューブ隣の Cs 導入バルブ用ヒータ温度を 240℃から 260℃に上げて、その熱伝導でチューブ部の温度を高温に維持し対応した。翌メンテナンス日の調査で、ヒータ電源の故障であることが判明したため、予備電源に交換して復旧し、ビーム運転を継続した。

4. J-PARC 製 RF アンテナ

4.1 J-PARC 製 RF アンテナ

RF イオン源の主要部品である RF アンテナは、米国 SNS で使用しているものを採用しており、イオン源の性能上問題はないが、J-PARC においてもアンテナの特性やその生産方法などの知見を得るために、独自にアンテナ製作を進めてきた [8]。本 RF アンテナは SNS 型と同形状に加工した脱酸素銅丸管(φ4.8mm)であるが、コーティング釉薬として表面クラックを防ぐために、J-PARC ではアンチモン系の乳濁ガラスを採用している。

釉薬をスプレーガンで銅管に吹き付け、その後、電気炉で 825 °C で 2 分以上焼成させる。これを 3~4 回繰り返して絶縁コーティングの厚さを 0.5mm 以上にして、高密度プラズマに対する耐久性を向上させている。Figure 6 に J-PARC アンテナ製作時の写真を示しており、手前 2 本が絶縁コーティングを 1 回行った直後のアンテナで、2 列以降は、絶縁コーティング前のアンテナである。

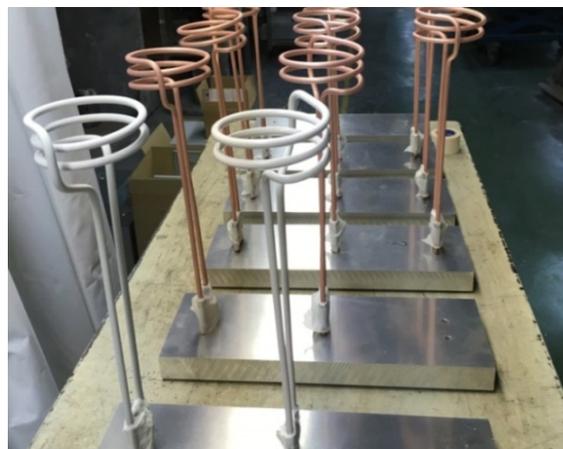


Figure 6: Photograph of J-PARC-made antenna production.

4.2 J-PARC 製アンテナの長時間運転

昨年の年会では、オフラインビーム試験にて J-PARC 製アンテナで SNS 製と同程度のビーム性能が得られたことを報告した[9]。本年は、アンテナの耐久性を確認するために長時間運転試験を実施した。運転時の平均 2MHz_{RF} パワー(RF 出力×デューティ)を利用運転時の約 1.5 倍の約 4.98 kW に設定して連続運転開始し、約 1 ヶ月間終日連続運転を行ったところで電源の故障等が発生し一時中断、その後は日中のみの運転に切り替えた H30 年 3 月から試験を開始し、6 月末時点で 1,410 時間の運転を行ったが、アンテナに不具合等は無く安定に稼働することができた。

J-PARC アンテナの運転状況を Fig. 7 に、運転時のビーム、2 MHz 進行波 (Pf) 及び反射波 (Pr) のオシロスコープの波形を Fig. 8 に示す。

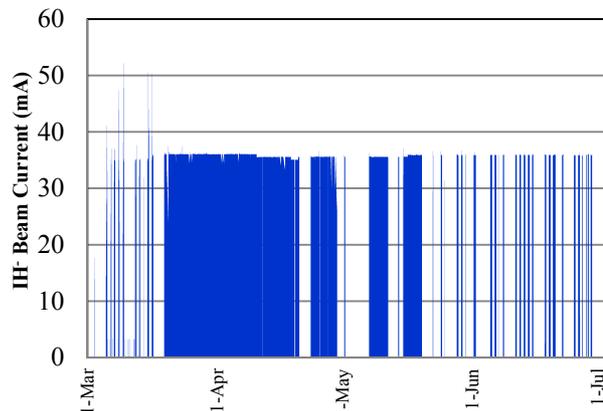


Figure 7: Operation history of the ion source using J-PARC-made antenna.



Figure 8: Waveforms of H beam from the ion source (yellow) using a J-PARC-made antenna, RF powers (Pf (magenta) and Pr (green)).

5. まとめ

2014年9月より運用を開始したRF H-イオン源は、この1年間も大きなトラブルなく、安定に稼働した。H29年10月のRUN#76からイオン源のメンテナンスは3ヵ月毎に実施する方針とし、RUN#79(2018年4月3日~7月4日)では2,201時間の連続運転を達成した。また同RUNの最終日は加速器スタディのためにこれまでの最大ビーム電流である72 mAのビームを安定に供給することができた。J-PARC製高周波アンテナの耐久性確認にも着手し、現在1,410時間の運転時間を達成している。

参考文献

- [1] K.Hasegawa *et al.*, "Upgrade and Operation of J-PARC Linac", JPS Conference Proceedings, 8, 011012 (2015).
- [2] K.Ohkoshi *et al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.946-949 (2013).
- [3] S.Yamazaki *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.260-264 (2012).
- [4] K.Ohkoshi *et al.*, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.1040-1044 (2015).
- [5] M.P.Stockli *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81,02A729 (2010).
- [6] A.Ueno *et al.*, AIP Conf. Proc. 1655, 030008 (2015).
- [7] M. Otani *et al.*, in these proceedings (FROL09).
- [8] K.Ohkoshi *et al.*, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.940-943 (2016).
- [9] K.Ohkoshi *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.651-654 (2017).