

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[#]、神藤勝啓、南茂今朝雄、柴田崇統、
池上清、高木昭、上野彰、小栗英知

Kiyonori Ohkoshi, Katsuhiro Shinto, Kesao Nanmo, Takanori Shibata,
Kiyoshi Ikegami, Akira Takagi, Akira Ueno, Hidetomo Oguri
J-PARC Center

Abstract

In September 2014, a cesiated RF-driven negative hydrogen ion (H⁻) source was initiated to operate at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The extracted H⁻ beam current and the continuous operation time of the ion source have been improved upon their own records. In the RUN#79 (from April to July 2018), the ion source delivered the H⁻ beam current of 47 mA to the post-accelerators for 2,201 hours continuously. In October 2018, the beam current from the ion source was increased to 60 mA so that the linac could inject the beam current of 50 mA into the 3 GeV synchrotron. In the RUN#80 (from October to December 2018), the continuous operation time of 1,791 hours was achieved. For the past year, we had the antenna failures twice during the operation, and needed to replace to a spare ion source. We have been developing the J-PARC-made antenna by using a test-stand. Recent experimental results showed that the continuous operation time of 2,083 hours was achieved with the J-PARC-made antenna.

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 5 年が経過し、その間、RF H⁻イオン源は、ビーム電流と連続時間を徐々に更新してきた。

本会では、RF H⁻イオン源の最近 1 年間の運転実績や故障等の報告の他、J-PARC 製 RF アンテナの長時間運転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[4]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 リザーバオーブン電源が停止し、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。

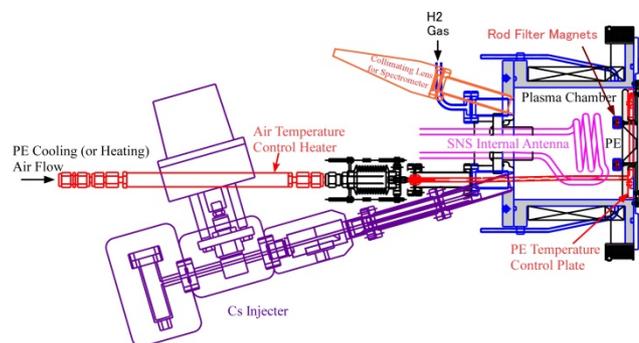


Figure 1: Cross-sectional view of the J-PARC RF-driven H⁻ ion source.

2.2 イオン源内残留ガスの低減化

イオン源テストスタンドにおいて、メンテナンス等のためにアルゴン (Ar) ガスパージした後真空引きを行うと、10⁻⁶Pa 台で真空値が定期的に跳ねる上回る現象が確認された。この真空値跳ね上がりと同期してマススペクトルの Ar 及び N₂ 量も増加してい

たため、O リングと溝の間にある空間に閉じ込められていた残留ガスが、少量ずつ真空側に抜けてきていると考えた。残留 Ar が存在すると、プラズマ電極表面がスパッタされ、Cs を剥ぎ取るなど、ビーム性能に影響を与えるため、イオン源のすべての O リング溝に Figure 2 に示すようにエア抜き溝加工 (2ヶ所) を行った。加工後のイオン源は、残留ガスが減少するため、プラズマ電極に付着した Cs が乖離しにくい状態となり、Cs 量の調整が難しくなる。このため、ロードフィルター磁場を弱める方向で磁石配置の調整を行った。Figure 3 にエア抜き加工前と加工後のイオン源特性の変化を示す[5]。

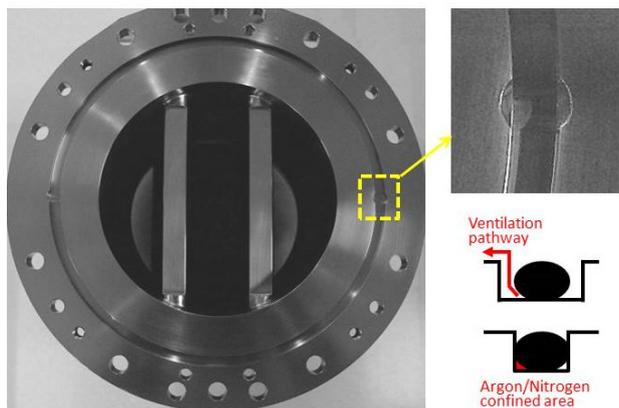


Figure 2: O-ring groove of plasma chamber flange with ventilation pathways for confined argon/nitrogen.

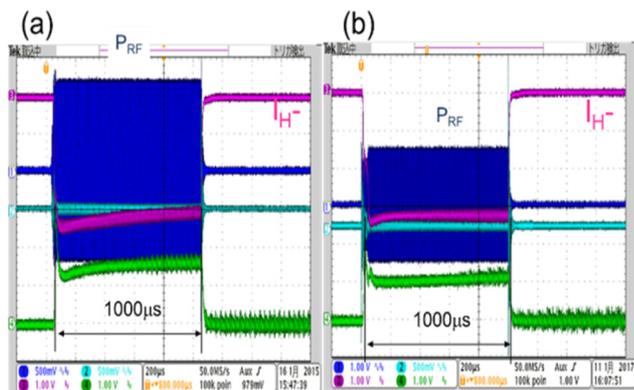


Figure 3: Waveforms of H beam (Magenta: 20 mA/div), 2 MHz RF forward (blue), reflect (cyan) and extract current (green).

Figure 3 の左側 (a) がエア抜き加工無し、右側 (b) がエア抜き加工後の 66mA 運転時のビーム電流及び高周波電力のパルス波形を示す。ビーム電流は、溝加工により、ビームパルス内の約 10% の droop も改善された。さらに、必要な高周波電力も 41kW から 25kW に抑えられ、低い高周波電力での運転が可能になった。低電力での運転は、アンテナのダメージ軽減やセシウム導入量低減に効果があり、イオン源の安定運転に大きく貢献している。

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

H30 年夏期メンテナンス後から R1 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 Figure 4 に示す。

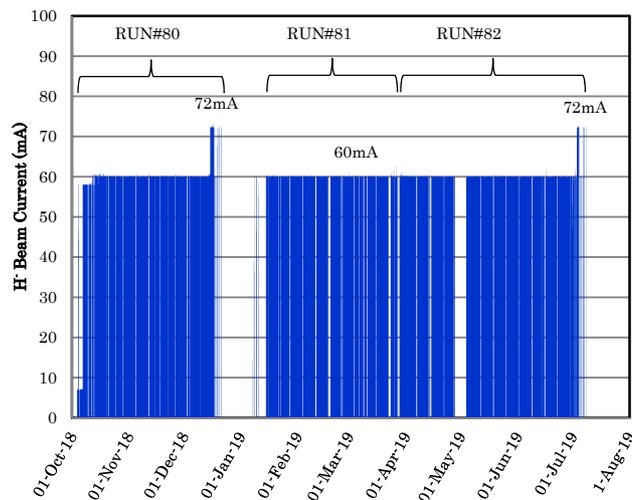


Figure 4: Operation history of the ion source for the latest year.

縦軸のビーム電流は、低エネルギー輸送系 (LEBT) で測定した値である。

昨年の本会で、イオン源ビーム電流 47 mA で 3ヶ月の連続運転で寿命や安定性に問題ないことを確認したと報告したが、2018 年 10 月 (RUN#80) からは、更にイオン源ビーム電流を増強して、60 mA (リニアック出口 50 mA) の条件下で 1,797 時間の連続運転を達成した。

RUN#80 及び#82 (2019 年 3 月~7 月) の終盤には、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試験的にビーム電流 72 mA でイオン源の運転を行った。ビーム電流を 60 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 33 時間) もビーム引出系の放電頻度の増加はなく、安定にビームを供給することができた。

高周波負水素イオン源は、2014 年 9 月からの RUN#57 から運転を開始し、ビーム電流及び連続運転時間を順調に延ばしてきた。RF イオン源の RUN 毎の運転実績を Figure 5 に示す。RUN#80 及び#82 で、それぞれ一度アンテナが破損し、臨時にバックアップイオン源と交換するトラブルが発生した。アンテナ故障の詳細については、次項で報告する。

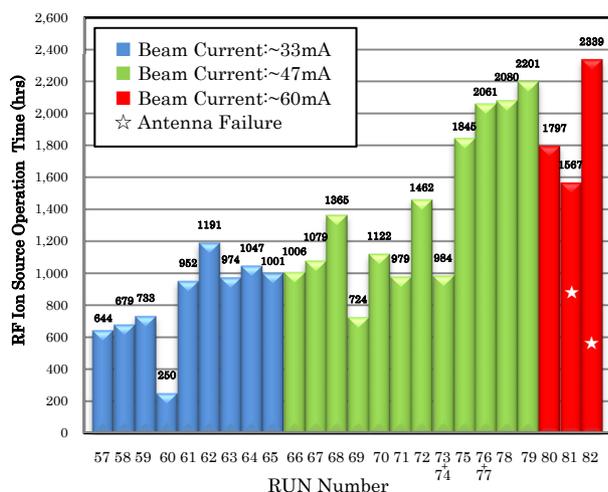


Figure 5: Operation time for the ion source of each RUN.

3.2 イオン源の故障

高周波イオン源の使用開始直後（2014年10月）に高周波アンテナが故障した後は4年以上にわたりほぼトラブル無く稼働していたが、今年に入り、2回のアンテナ故障が発生した。

1回目のアンテナ故障は、RUN#81 運転開始から約851時間後に発生した。この時は故障の約2週間前からプラズマのCs発光スペクトル強度が瞬時低下する現象が頻発（1回/30min程度）し、その後、アンテナが破損した。Figure 6にアンテナ破損前のCs発光強度の変動を示す。この瞬時低下現象はアンテナ故障の前兆の一つと考えられる。故障の原因として、初期不良も考えられるが、アンテナ故障箇所がCs導入口近くであったことから、Csが局所的に過多になったことも考えられた。このため、セシウムオープン温度を200℃から180℃に下げて、Csを少量ずつ導入する方法に変更した。

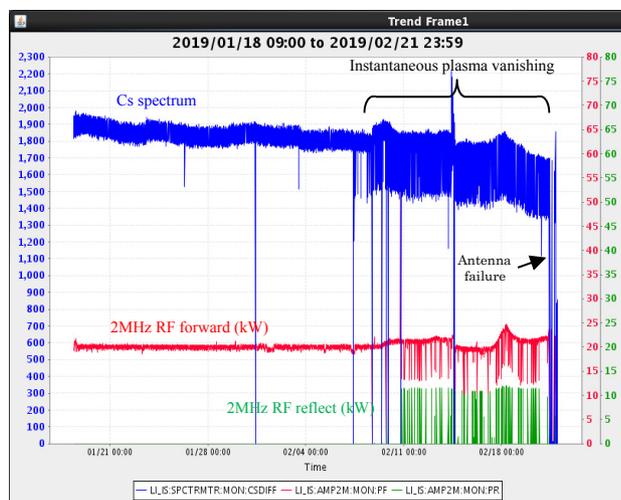


Figure 6: Time variation of the Cs spectrum and 2MHz-RF forward before antenna failure.

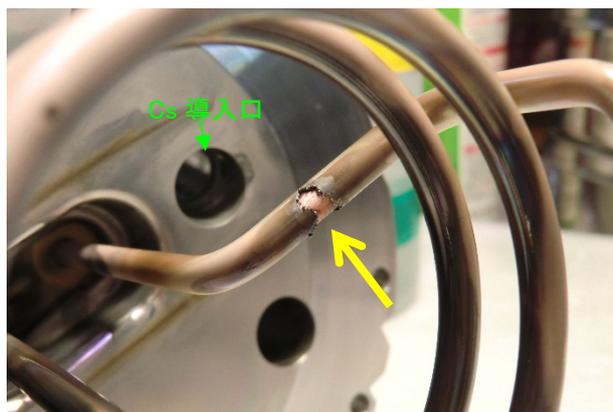


Figure 7: Damage of RF-antenna coating in RUN#81.

2回目の故障は、RUN#82 開始から543時間後に発生した。運転開始から非常に安定にイオン源は稼働していたが、突然ビーム電流が無くなり、RF反射も増大した。Figure 8にアンテナ故障時のRF進行波及び反射波及びビーム電流波形を示す。

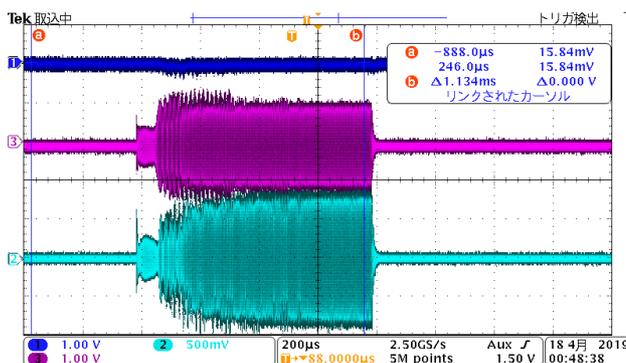


Figure 8: Waveforms of 2 MHz RF forward (magenta), reflect (cyan) and H⁺ beam (blue: 20 mA/div).

アンテナ故障したイオン源の真空リーク試験を行ったところ、プラズマ電極冷却管の接続部で $5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($3.5 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ベース)のリークが確認された。プラズマ電極冷却管のリーク箇所をFigure 10に示す。この継手部は、プラズマ電極をベーキングするため、最高温度400℃の高温空気が流れるため、長年の使用によりメタル面シール部が劣化し、真空リークを起こしていることが分かった。このため、RUN終了時には、ベローズ一式を新品に交換する方針とした。



Figure 9: Damage of RF-antenna coating in RUN#82.

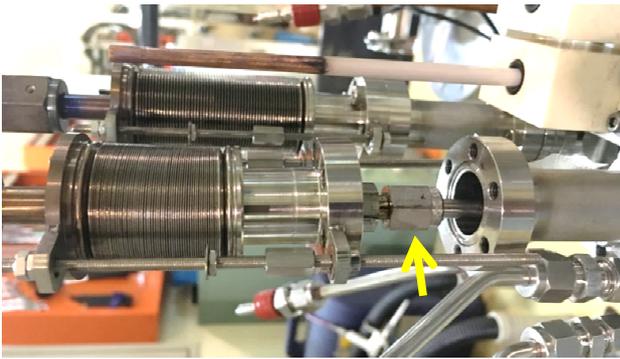


Figure 10: Air leak of the pipe connector (VCR1/8) for the plasma electrode cooling or heating.

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。Figure 11 に J-PARC 製アンテナの写真を示す。本 RF アンテナは SNS 型と同形状に加工した脱酸素銅丸管 ($\phi 4.8\text{mm}$) 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 0.5 mm 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[6]。



Figure 11: Photograph of a J-PARC antenna.

4.2 J-PARC 製アンテナの長時間運転

昨年の年会では、アンテナの耐久性を確認するために 1,410 時間の長時間運転を行い、安定に稼働していることを報告した。その後、テストスタンドの RFQ の入れ替え作業等で約 4 ヶ月の運転中断期間があったが、運転時間を積み重ねて現在 2,083 時間に到達した。最近 1 年間の J-PARC アンテナ運転実績を Figure 12 に示す。

また、別のテストスタンドにおいて、J-PARC アンテナの大強度ビーム (繰り返し: 50Hz 、パルス幅: $1000\mu\text{s}$) での耐久試験を開始し、SNS アンテナ使用時の同等の 2MHzRF 電力で、ビーム電流 100 mA を確認している。今後、大強度ビームで長時間運転を行い、耐久性や改善点を確認する予定である。

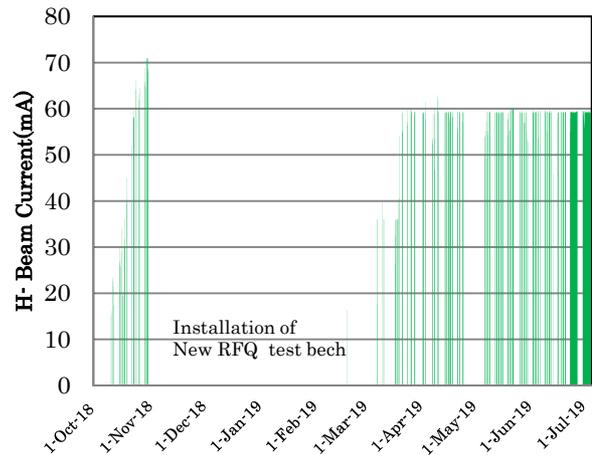


Figure 12: Operation history of the ion source using J-PARC-made antenna.

5. まとめ

2014 年 9 月より運用を開始した RF H-イオン源は、これまで順調に運転時間とビーム電流を徐々に増強し、RUN#80 (2019 年 10 月 5 日~12 月 21) では、イオン源ビーム電流を 72mA に増加し、1797 時間安定に供給している。また RUN#80 及び#82 の終盤では、加速器スタディのために 72 mA のビームを安定に供給している。イオン源のトラブルとしては、RF アンテナの故障が 2 回 (2019 年 2 月と 4 月) 発生し、4 月のアンテナ故障時に真空リークが確認されたため、それが故障の原因であったと考えている。

J-PARC 製高周波アンテナの耐久性試験も継続しており、現在の運転時間は、2,083 時間に達成している。今後は、J-PARC 製アンテナの個体差によるビーム特性の影響の有無確認や、 100 mA の大強度ビームによる耐久性試験を進める予定である。

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, p.946-949 (2013).
- [3] S.Yamazaki *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.260-264 (2012).
- [4] M.P.Stockli *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**,02A729 (2010).
- [5] A.Ueno *et al.*, New J. Phys. **19**(2017)015004.
- [6] K.Ohkoshi *et al.*, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.889-892 (2018).