

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)}、池上清^{A)}、柴田崇統^{A)}、
高木昭^{A)}、南茂今朝雄^{A)}、上野彰^{A)}、小栗英知^{A)}

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

^{A)}J-PARC Center

Abstract

Operation of a cesiated rf-driven negative hydrogen ion source was initiated in September 2014 in response to the requirements of beam current upgrade in J-PARC linac. Delivery of the required beam current from the ion source to the J-PARC accelerators has been successfully performed. In 2016-2017 campaign, continuous operation of the ion source for approximately 1,845 hours (from April to July 2017) was achieved with beam current of 47 mA.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のイオン源は、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) 不添加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 負水素イオン源の運転が開始され、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提供を開始して約 3 年が経過した。RF イオン源の運転開始当初は、イオン源の主要部品である内部アンテナが故障する事象が 1 回発生したが、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からは、ビーム運転中のアンテナ故障やその他のトラブルもなく安定に動作しており、イオン源連続運転時間を年々延ばしている。

本会では、RF 負水素イオン源の最近 1 年間の運転実績等の報告の他、J-PARC 製 RF アンテナの性能評価結果について報告する。

2. J-PARC RF 負水素イオン源

2.1 RF 負水素イオン源の構造

J-PARC の RF 負水素イオン源は、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、電磁波が外部へ漏洩するのを防ぐためにシールドボックス内に収められており、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 負水素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、2 MHz-RF をパルス

的に最大 50 kW 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 リザーバ温度又は Cs バルブ開放時間にて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 過多状態になるのを防ぐインターロックを備えている。PE は高温空気が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。

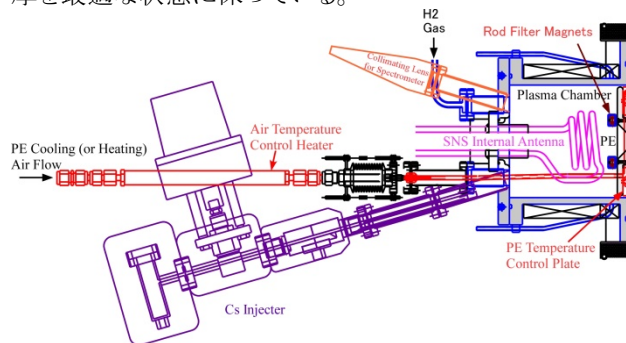


Figure 1: Cross-sectional view of the J-PARC RF-driven H⁻ ion source.

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 TMP 1 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 24 sccm における真空度は、イオン源出口で 3.5×10^{-3} Pa 程度であるが、LEBT オリフィス下流では 1.0×10^{-5} Pa 程度を維持している。

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

2.2 プラズマ電極温度調整システム

プラズマ電極での表面生成を利用したイオン源の H 生成量は、プラズマ生成室出口に設置されたモリブデン製 PE 表面の Cs 付着量に大きく影響される。H を安定に生成するために PE 表面の Cs 量を一定に保つことが重要であるため、J-PARC イオン源では、Figure 2 に示す PE 温度調整システムを導入している。イオン源運転中は、PE 温度を約 54 °C になるように、PE に取り付けた銅製冷却板に流す圧縮空気温度をヒータにより調整している。圧縮機システムは加速器トンネル内に設置されて容易に保守作業ができないため、圧縮機が1台故障した場合でも動作を継続するように圧縮機を 2 台体制で交互(24h切替)運転している。また、圧縮機のドレンもトンネル内排水ピットに自動排水するようになっている。圧縮機設置後、約3年間が経過し、それぞれの積算運転時間は No.1 が 246h, No.2 が 213h であるが、これまでトラブル等はなく、安定に稼働している。今年の夏期メンテナンス期間に初めてのメンテナンスを実施し、V ベルトやフィルタ交換等行う予定である。

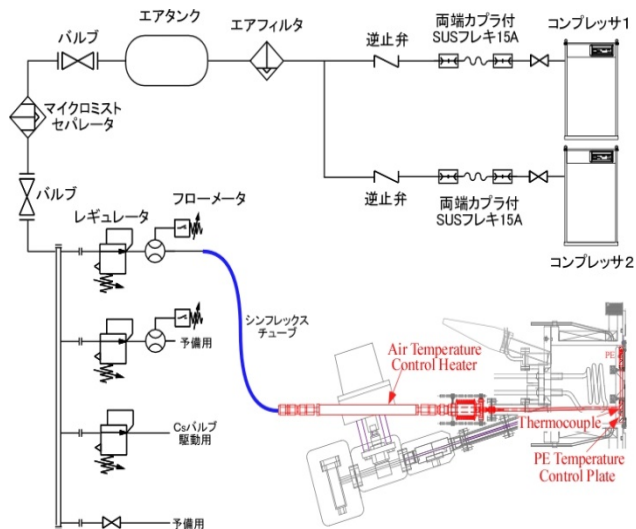


Figure 2: Compressed air system of the temperature control system for the plasma electrode.

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

H28 年夏期メンテナンス後から H29 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 3 に示す。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]。

ユーザ利用運転でのイオン源でのビーム電流値は 2015 年 12 月までは約 33 mA であったが、2016 年 1 月から約 45 mA に増強した。ビーム増強に伴う新たな不具合はなく、RUN#75 ではビーム電流 47 mA の条件下で連続運転 1,845 h を達成し、更に RUN 最終日 (77 日目)

には J-PARC の更なる高度化を目指したデータ取得のため、ビーム電流を 68 mA に増加して加速器のスタディ運転を行った。

ビーム電流 47 mA 及び 68 mA 運転時のイオン源運転パラメータを Tabel 1 に示す。

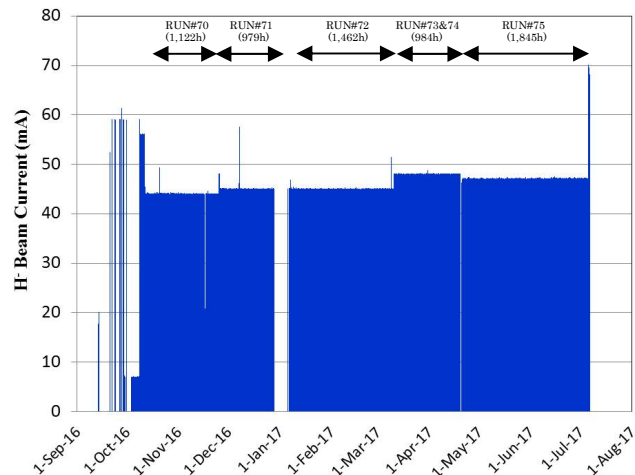


Figure 3: Operation history of the ion source for latest a year.

Table 1: Ion Source Parameters at 47 mA and 68 mA Operations

Parameters	47 mA Operation	68 mA Operation
2 MHz RF Power	22.4 kW	25.2 kW
RF pulse length/ repetition	800µs/ 25Hz	800µs/ 25Hz
Acceleration Voltage	43.0 kV	43.0 kV
Extraction Voltage	9.8 kV	9.8 kV
H ₂ gas flow rate	24 sccm	23 sccm
Solenoid Magnet_1	460 A	500 A
Solenoid Magnet_2	600 A	660 A
Steering Magnet_V	-3.5 A	-5.0 A
Steering Magnet_H	-2.0 A	-4.0 A
Cs Reservoir Temp.	200 °C	200 °C

Cs を使用するイオン源の場合、時間経過とともにビーム引出系に Cs が堆積して連続放電を誘発することを懸念していたが、RUN#75 に長時間運転でも放電頻度が顕著に増加していくことはなく、適切な Cs 量を維持できていたと思われる。RUN#75 の 47 mA 長時間及び 68 mA 大強度ビーム運転時の引出電圧 (9.8 kV) と加速電圧 (43 kV) の放電頻度を Figure 4 に示す。47 mA 運転時の平均の放電頻度は、引出電圧が約 0.2 回/週、加速電圧が約 1.7 回/週に対し、68 mA 運転中は、1 日の運転で加速電圧が 5 回に増加しているが、ビーム運転には影響しない頻度である。

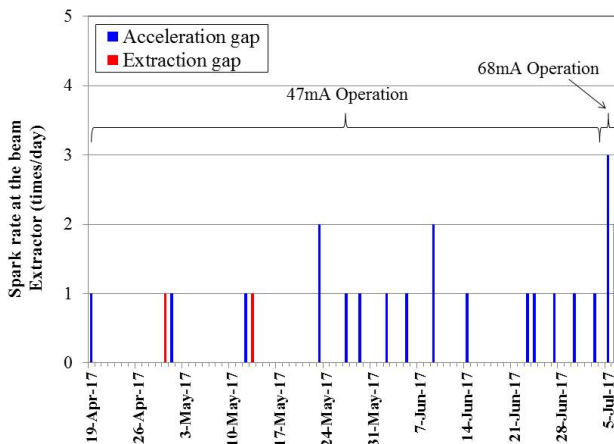


Figure 4: Spark rate at the beam extractor of the source during RUN#75.

3.2 イオン源の保守

RUN と RUN の間に実施するイオン源メンテナンスでは、通常約 20 時間でイオン源交換及び調整運転によるビーム安定化を実施している。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) を行う。RUN#72 (ビーム電流 47 mA、運転時間 1,462 h) で使用した RF アンテナの表面状況の写真を Figure 5 に示す。アンテナ表面は高密度プラズマにより黒く変色しているが、絶縁コーティング自体は消耗や損傷は見られず健全であった。

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、短時間停止が 2 件程度あった。1 件目は、ビーム電流値を一定に維持するためのフィードバック (FB) 制御に関する不具合であり、ビーム電流モニタ用デジタルのハンダグリップにより FB 制御が停止し、その結果ビーム電流がゆっくりと低下した事象があった。ビーム電流値は常時監視しているため、設定値から 2 % 以上変動した時点でアラーム発報により気づき、デジタルの再起動で正常復帰した。もう 1 件は、J-PARC イオン源電源の近傍に設置されているイオン源テストスタンドの高電圧放電ノイズにより実機 2 MHz-RF 電源やタイミングシステムが誤動作してしまう事象であった。2MHz-RF 電源はノイズ対策を実施したが、タイミングシステムのノイズ対策は夏期メンテナンスに調査、対処予定である。



Figure 5: RF antenna after RUN#72 (1,462h) operation.

4. J-PARC 製 RF アンテナ

4.1 J-PARC 製アンテナの製作

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開始している[7]。本 RF アンテナの形状は、現状アンテナの性能と比較するため SNS と同型とした。Figure 6 に J-PARC 製アンテナの写真を示す。

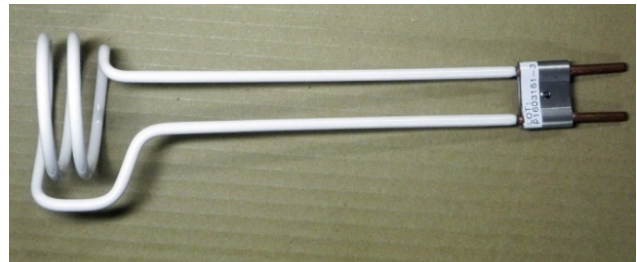


Figure 6: Photograph of a J-PARC antenna.

4.2 J-PARC 製アンテナによるビーム性能確認

J-PARC 製アンテナを取り付けた RF イオン源#1号機を使用して H29 年 6 月にビーム性能確認を行った。プラズマは 30MHz-RF を 50W (CW) 及び 2 MHz-RF を最大 50 kW までスムーズに投入でき、安定にプラズマを点火することができた。

Figure 7 に 2 MHz-RF パワーに対する H-ビーム電流依存性を示す。RF 50 kW でビーム電流約 60 mA を引き出され、ほぼ SNS アンテナ使用時と同性能が得られた。Figure 8 に 60 mA 生成時のビーム、2 MHz 進行波 (P_f)、反射波 (P_r) 及び引出電流のオシロスコープ波形を示す。

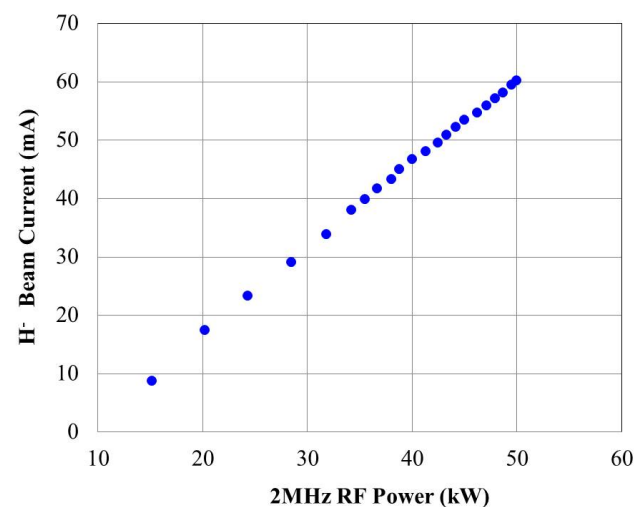


Figure 7: Relation between 2MHz RF power and H- beam current from an RF ion source with a J-PARC antenna.

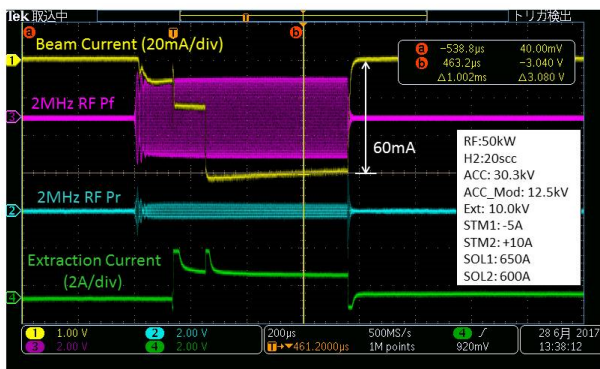


Figure 8: Waveforms of H⁻ beam from the ion source using a J-PARC antenna, RF powers (forward and reflect) and extraction current.

RFQ 入射位置相当に設置したエミッタンスモニタによる、国産アンテナ使用時のエミッタンス測定結果を Figure 9 に示す。H⁻ビーム電流 55 mA での 95%規格化 RMS エミッタンスは、Horizontal: $0.261\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 及び Vertical: $0.302\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であり、SNS アンテナ使用時と同程度であった。

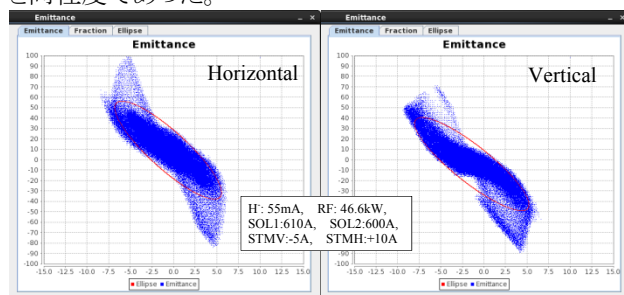


Figure 9: Normalized RMS emittances of H⁻ beam of 55 mA extracted from the ion source with a J-PARC antenna.

次に、短時間ではあるが高デューティー、ハイパワープラズマにてアンテナ耐久試験を実施した。2 MHz-RF のデューティを通常の 2 % (25 Hz, 800 µs) から 5 % (50 Hz, 1000µs) に増加し、RF Power を 48 kW 一定で 16 h (8 h×2 回) プラズマを点火したが、プラズマは非常に安定に維持していた。運転後のアンテナ写真を Figure 10 に示すが、懸念していた絶縁コーティングの消耗や損傷は見られなかった。

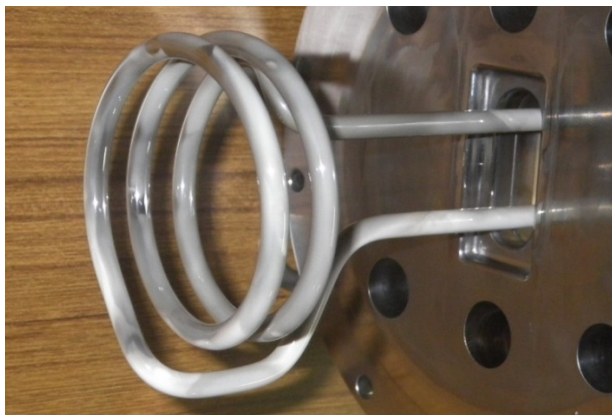


Figure 10: J-PARC antenna after operation.

5. まとめ

2014 年 9 月より運用を開始した高周波駆動型イオン源は、最近1年間にはほぼトラブルなく、安定に稼働している。RF イオン源稼働開始当初は、RUN 運転時間は 700 h 程度であったが、最近の RUN#75 (2017 年 4 月 20 日 ~7 月 6 日) では約 2.6 倍の 1,845 h まで延長し、最後の 1 日間は加速器スタディとしてこれまでの最大ビーム電流である 68 mA のビームを供給することができた。

また、J-PARC 製高周波アンテナの性能確認を開始し、真空試験、プラズマ点火試験、ビーム引出し試験及び高出力プラズマ耐久試験等を実施して、SNS アンテナと同程度の性能が得られた。運転後のアンテナコーティングも顕著な消耗や損傷は見られず、初期の試験としては良好の結果であった。今後、運転パラメータの変更や長時間運転等のデータを蓄積する予定である。

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, 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] K.Ohkoshi *et al.*, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.940-943 (2016).