

J-PARC 大強度高周波駆動負水素イオン源の運転状況 OPERATION STATUS OF THE J-PARC HIGH-INTENSITY RF-DRIVEN NEGATIVE HYDROGEN ION SOURCE

神藤勝啓^{#, A)}, 大越清紀^{A)}, 柴田崇統^{B)}, 南茂今朝雄^{B)}, 川井勲^{C)}, 池上清^{B)}, 上野彰^{A)}
Katsuhiko Shinto^{#, A)}, Kiyonori Ohkoshi^{A)}, Takanori Shibata^{B)}, Kesao Nanmo^{B)},
Isao Kawai^{C)}, Kiyoshi Ikegami^{B)}, Akira Ueno^{A)}
^{A)} J-PARC Center / Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
^{B)} J-PARC Center / High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{C)} Nihon Axis Co., Ltd.

Abstract

J-PARC initiated the operation of the high-intensity rf-driven negative hydrogen (H^-) ion source in 2014 autumn. The ion source produces H^- beams with a beam current of 60 mA and a beam energy of 50 keV so that the J-PARC linac can inject the H^- beams into the 3 GeV RCS with the beam current of 50 mA and the beam energy of 400 MeV. The 2022/2023 campaign was the first time that the continuous operation of the H^- ion source without any exchanges of the ion source until the end of the campaign was examined. The continuous operation time of 4,412 hours was achieved at that time. We present the operation status of the J-PARC H^- ion source in this campaign as well as the status of the J-PARC-made internal antenna test.

1. はじめに

J-PARC では、2014 年より大強度高周波 (RF) 駆動負水素 (H^-) イオン源の運用を開始した。後述のとおり、RF 駆動 H^- イオン源運用開始からの連続運転時間を徐々に延伸してきた。J-PARC では、徐々にイオン源より引き出された H^- ビーム電流及び連続運転時間を延ばしてきた。現在はリニアックで 50 mA の H^- ビームを引き出すために、イオン源よりビームエネルギー 50 keV でビーム電流 60 mA の H^- ビームを生成してユーザー利用運転に供給し、72 mA の H^- ビームを生成して加速器スタディに供給している。Run#89 (2022 年 1 月～6 月) で、イオン源の連続運転磁化は 4,001 時間を達成した。本稿では、2022 年夏メンテナンス以降の J-PARC 大強度 RF 駆動 H^- イオン源の運転について報告する。

2. J-PARC 大強度 RF 駆動 H^- イオン源

Figure 1 に J-PARC 大強度 RF 駆動 H^- イオン源の図を示す。また、Table 1 にイオン源の仕様を示す。イオン源のプラズマチャンバーは、内径 100 mm、長さ 120 mm の円筒であり、18 極のカスプ磁場により水素プラズマが閉じ込められている。実機の運転では、SNS で用いているものを J-PARC 用にカスタマイズした内部アンテナ (SNS 製アンテナ) を用いて水素プラズマを生成している。プラズマに接するビームを引き出すための電極 (プラズマ電極) はモリブデン製で、その孔径は 9 mm である。

J-PARC では、プラズマ電極表面にはセシウム (Cs) 蒸気を導入して表面の仕事関数を下げることで、表面生成による H^- イオンの増大化を図っている。生成された H^- イオンがプラズマ中の高速電子により壊されることを防ぐために、J-PARC ではロッドフィルターマグネットを用いて

フィルター磁場を形成している。

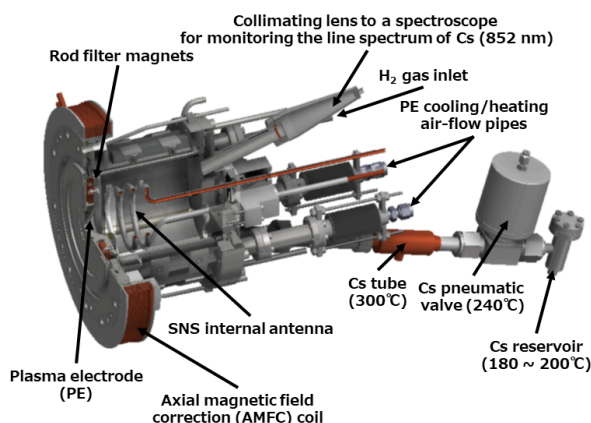


Figure 1: A 3D drawing of the J-PARC high-intensity RF-driven H^- ion source.

Table 1: Specifications of the J-PARC High-Intensity RF-Driven H^- Ion Source

Specifications	
Discharge type	RF discharge by an internal antenna
Repetition rate	25 Hz
RF frequency	30 MHz (CW, ~50 W) 2 MHz (0.8 ms pulsed, ~35 kW)
H_2 gas flow rate	21 sccm (typical)
Cs consumption	88 mg in 3,651 hours (in FY2021)
Beam energy	50 keV
Extracted	60 mA (for user operation)
H^- beam current	72 mA (for accelerator beam study)

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

イオン源から繰り返し 25 Hz、マクロパルス幅最大 0.5 ms の H-ビームを引き出しているが、プラズマ及び引き出された H-ビームが安定になるまでの時間を考慮して、2 MHz RF 源のパルス幅は最大 0.8 ms である。通常 Cs は運転前に 2.5 g 程度をリザーバーに導入しており、3,651 時間の連続運転で、消費量は 88 mg 程度であることが分かった。

ビームを安定に引き出すために、30 MHz の CW で低密度プラズマを生成し、ビームを引き出すタイミングに合わせて 2 MHz の高電力パルスを投入している。

3. J-PARC ビーム運転 Run#90 での H-イオン源の運転状況

Figure 2 に J-PARC Run#90 でのイオン源より引き出されたビーム電流の変化を示す。Run#90 では、2022 年 11 月 11 日よりリニアックのビーム運転が開始され、年末年

始の運転停止期間、春季の運転停止期間、4 月下旬の MR 電源棟での電源故障による停止期間(5 月 11 日より加速器の運転復旧、13 日より MLF での利用運転再開)、6 月下旬の HD 電源棟での電源故障による運転停止、Run#90 の終了まで、これまでと異なり、2022/2023 の 1 キャンペーンを通して途中でイオン源を交換せずに 1 台のイオン源で運転を行った。

運転停止中は、イオン源および低エネルギービーム輸送系 (LEBT) は、真空の状態を維持しながら、ビーム運転再開まで待機した。運転開始、再開前には、イオン源の動作確認を行い、健全にビーム引き出しが再現していることを確認して、運転に臨んだ。

運転途中、大きなトラブルもなく安定にビームを供給し続けることができた。途中、低電流または高電流の加速器スタディを行う際には 4 時間程度のイオン源の調整を行うことで、対応した。

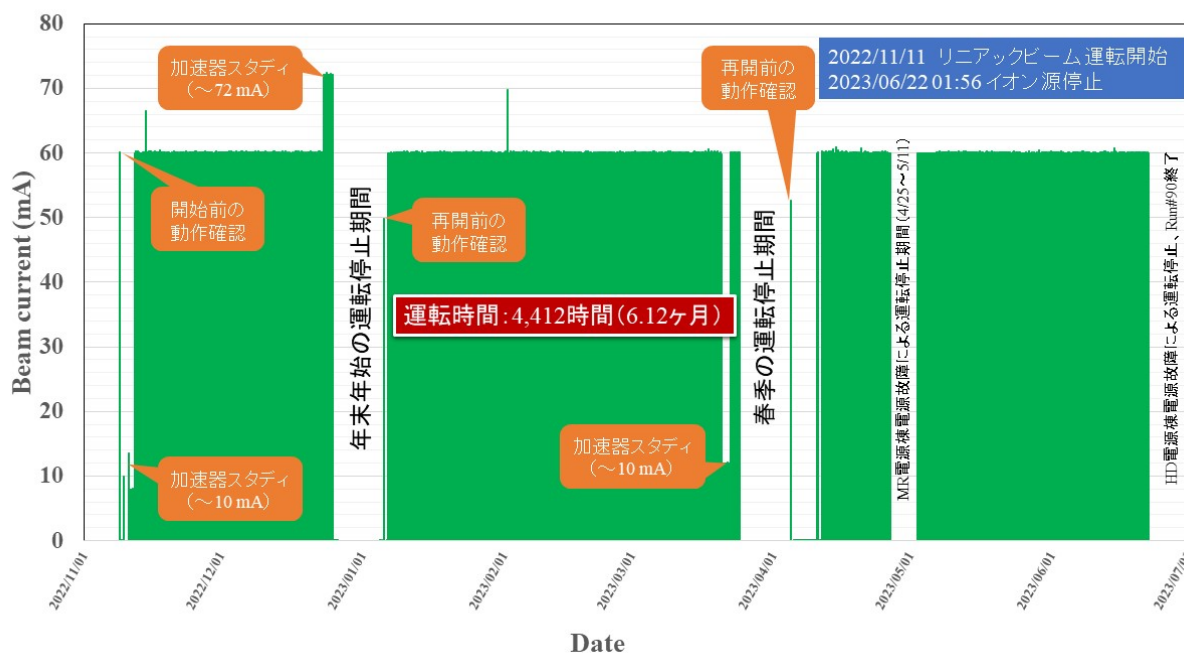


Figure 2: Beam current extracted from the J-PARC high-intensity RF-driven H⁻ ion source during Run#90.

Figure 3 に 2014 年に J-PARC で RF 駆動 H-イオン源の運用が始まってからのイオン源の連続運転時間の履歴を示す。RF 駆動 H-イオン源の運用開始当初は、イオン源からの引き出し電流が 33 mA であったが、運転実績を積み重ねて、引き出し電流量を 33 mA → 47 mA → 60 mA へと増やし、設計当初のリニアック出口でのビーム電流 50 mA を達成することができた。この間、イオン源の大きなトラブルは、アンテナの破損が 3 回 (Run#57、#81 及び#82) のみで、それ以外はスケジュールされた運転時間を全うしてイオン源の運転を終えている。イオン源の連続運転時間は、実績に合わせて徐々に増加し、Run#90 では 1 キャンペーンを通しての 4,412 時間の連

続運転を実施することができた。

4. J-PARC 製内部アンテナの開発状況

J-PARC の RF 駆動 H-イオン源は、ほぼ全て J-PARC で設計・製作したものであるが、先にも述べた通り内部アンテナだけは SNS 製のものを採用している。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。これまでに、J-PARC 製アンテナを用いて高密度水素放電を行った時のガス放出特性を調べ、アンテナに採用している珪酸コーティングから不純物が放出されておらず、SNS 製アンテナと特

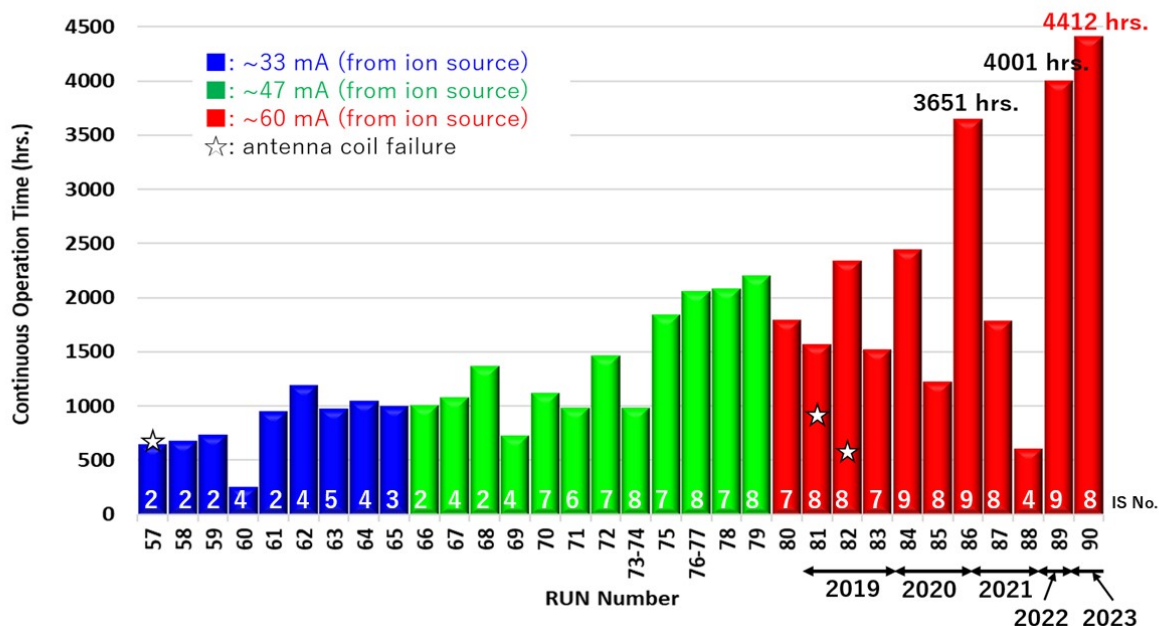


Figure 3: Operation history of the J-PARC high-intensity RF-driven H⁻ ion source.

段大きな違いがないことを確認した[1]。

昨年度末より、J-PARC 製アンテナに RF 投入電力を長時間通電した時の耐久試験を開始した。また、並行して J-PARC 製アンテナの試験をしているイオン源テストスタンドを 24 時間運転(無人での連続運転)ができるように改修を進めた。

本耐久試験では、J-PARC 実機での運転に比べて最大 5 倍にデューティを上げることにより、実際の運転日数を短縮させて耐久性を調べることにした。Table 2 に、通常の J-PARC 実機でのイオン源の運転パラメータとテストスタンドでの 2 MHz RF 源の運転パラメータとの比較を示す。

Table 2: Comparison of the Input RF Power of the J-PARC Nominal Operation With That for the Endurance Test

	J-PARC nominal operation	Endurance test for the J-PARC-made antenna
Repetition	25 Hz	50 Hz
Pulse width	0.8 ms	1.0 ms
Duty	2.0 %	5.0 %
Input RF power	30 kW (approx.)	60 kW (approx.)

J-PARC 実機で通常の利用運転時に投入される RF パワーに対して、本耐久試験では、最大約 5 倍のパワーを毎秒投入している。2 MHz RF 源からの投入パワーを 30 kW とすると 1 日当たりの J-PARC 実機での RF 投入電力量は、14.4 kWh となる。Table 3 に今年 3 月よりテストスタンドで 1 本の J-PARC 製アンテナに投入した電力量

を示す。3 月 10 日に試験を開始した時には、平日日勤時(約 8 時間)で、繰り返し 50 Hz(実機運転の 2 倍)、RF 投入パワー 60 kW(実機運転の約 2 倍)で運転を行った。4 月に入りパルス幅を 0.8 ms→1.0 ms(実機運転の 1.25 倍)に伸ばすことにより、実機の約 5 倍まで投入パワーを上げたが、平日の日勤時のみの試験で更に 4 月下旬からの 5 月初旬までの運転停止期間があったため、トータルの投入電力量はあまり稼げなかった。冷却水系や高周波源などの 24 時間監視、異常時に自動停止ができるようにテストスタンドの 24 時間運転化を並行して行ってきた改修作業が 6 月初旬に完了した。6 月 15 日より 24 時間運転を開始することができ、約 4 ヶ月で実機の約 100 日分に相当する RF 電力量を投入することができたが、これまでに大きな問題は生じていない。

Table 3: Total RF Power Input to a J-PARC-Made Internal Antenna

Month	Total RF energy input to the J-PARC-made antenna
March	233.38 kWh (16.21 days)
April	213.17 kWh (14.80 days)
May	296.46 kWh (20.59 days)
June	674.13 kWh (46.81 days)
Total	1417.14 kWh (98.41 days)

5. まとめ

J-PARC では、2014 年秋より運用を開始した大強度 RF 駆動 H⁺イオン源の運転が、次の 2023/2024 キャンペーンで 10 年を迎える。2022 年 11 月より開始した Run#90 の運転において、2022/2023 キャンペーン期間中に途中で 1 度もイオン源の交換をすることなく 1 台のイオン源で運転を終了することができた。これまでの 4,001 時間の連続運転時間を大きく超える 4,412 時間の連続運転時間を達成した。

J-PARC は概ね夏メンテナンス後の 10~11 月から翌年の 6 月末~7 月上旬までが 1 キャンペーンであるので、最大約 9 ヶ月の連続運転に耐えられるように、引き続き運転管理を進めていく。J-PARC では、将来的に更なる大強度化を目指しているため、加速器スタディーでも引き出している H⁺ビーム電流 72 mA 以上での長時間運転をテストスタンドで実証していく必要があり、その準備に取り組んでいる。

RF によるプラズマ生成のために、運用当初より SNS 製の内部アンテナを用いて運転が行われてきたが、J-PARC 製内部アンテナの実用化に向けて、引き続き耐久試験、その後大電流でのビーム引き出し連続運転試験を進める。

謝辞

イオン源テストスタンドの 24 時間運転化に当たり、J-PARC センター加速器第 3 セクションの高橋博樹氏、鈴木康夫氏、田崎竜太氏をはじめ、制御グループの方のご協力、ご尽力に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Shinto *et al.*, “Outgassing characteristics from the J-PARC-made internal antenna for a high-intensity radio-frequency H⁺ ion source”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyushu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 675-679.