

J-PARC 大強度高周波駆動負水素イオン源の運転状況(2023-2024)

OPERATION STATUS OF THE J-PARC HIGH-INTENSITY RF-DRIVEN NEGATIVE HYDROGEN ION SOURCE IN 2023/2024

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

A decade has elapsed since the radiofrequency (RF)-driven negative hydrogen (H^-) ion source initiated operation at J-PARC. During this period, three instances of antenna failure and a number of minor issues have been identified. In the 2023/2024 campaign, a single RF-driven H^- ion source generated H^- beams with a beam current of 60 mA, which enabled the J-PARC linac to inject them into the 3-GeV rapid cycling synchrotron (RCS) with a beam current of 50 mA. The continuous operation time of the ion source reached 4,962 hours in this campaign, which signifies a notable enhancement in operational longevity in comparison to the preceding longest campaign in 2022/2023, which spanned 4,412 hours. This paper provides the operational status of the RF-driven H^- ion source during this campaign and the progress of the J-PARC-made antenna, which is currently under development.

1. はじめに

J-PARC では、2014 年秋に大強度ビームを生成するために、高周波 (RF) 駆動負水素 (H^-) イオン源の運転を開始し、この夏でちょうど 10 年が経過した。この 10 年間には、イオン源プラズマ容器内に設置された高周波を印加する内部アンテナが 3 回破損した以外には、大きなトラブルは発生していない。

段階的に伸ばした運転期間に対して、イオン源を交換するような大きなトラブルなく終えつつ、2022/2023 年の運転期間にはイオン源の交換をすることなく 1 台のイオン源による連続運転 (運転時間 4,412 時間) を行うことができるまでに至った[1]。

本稿では、2023 年夏メンテナンス以降の J-PARC 大強度 RF 駆動 H^- イオン源の運転を報告するとともに、現在開発中の J-PARC 製内部アンテナの進捗を報告する。

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、Table 1 にイオン源の仕様を示す。イオン源プラズマチャンバーは、ステンレス製で内径 120 mm、長さ 127.5 mm の円筒型であり、円筒側面部には永久磁石を用いて 18 極のカスプ (多極) 磁場を作り、水素プラズマをプラズマチャンバー内に閉じ込めている。J-PARC 実機の運転では SNS で用いられている内部アンテナを J-PARC 用にカスタマイズしたもの (SNS 製アンテナ) を用いて RF 放電により水素プラズマを生成している。水素プラズマに接するモリブデン製の電極 (プラズマ電極) には、イオン源から H^- ビームを引き出すために直径 9 mm の単孔が開けられている。このプラズマ電極表面を用いて H^-

イオンの生成を増大化するためには、表面の仕事関数を小さくする必要がある。J-PARC ではセシウム (Cs) 単体を Cs オープンから蒸気として導入している。そのため、Cs ディスペンサーなどを用いた場合と異なり、Cs 化合物からの熱分解による不純物がプラズマチャンバー内に混入しない。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、これは J-PARC で 1 年間運転するのに十分な量である。

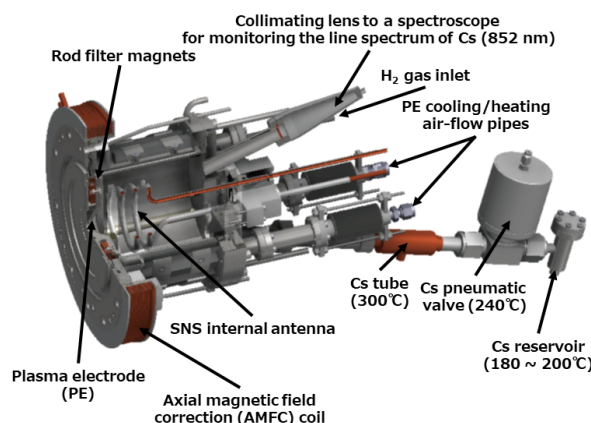


Figure 1: A 3D drawing of the J-PARC high-intensity RF-driven H^- ion source.

生成された H^- イオン (電子親和力 0.75 eV) が水素プラズマ中の高速電子 (< 1 eV) により壊されないように、J-PARC ではロッドフィルター磁石を用いてフィルター磁場を形成して、高速電子が引き出し孔周辺に入り込まないようにしている。

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

低エネルギービーム輸送系 (LEBT) に設置されているソレノイド電磁石からの漏れ磁場の影響を補正するために、Fig. 1 に示すようにイオン源のビーム引き出し部には軸磁場補正用コイル (AMFC) が設置されている。

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) |

イオン源から繰り返し 25 Hz、マクロパルス幅 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。

ビームを安定に引き出すために、30 MHz の RF 連続波 (出力 50 W 以下) 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 RF パルスを投入している。

3. J-PARC ビーム運転 Run#91 でのイオン源の運転状況

3.1 運転概要

Figure 2 に J-PARC ビーム運転 Run#91 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#91 では、2023 年 11 月 8 日よりリニアックのビーム運転を開始し、年末年始の運転停止期間 (2023 年 12 月 27 日 ~ 2024 年 1 月 24 日) を挟んで、2024 年 7 月 1 日まで運転を行った。イオン源は、Run#90 同様、期間の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うことができた。

イオン化してスパッタリングなどによるアンテナ破損を起こしたり、H⁻イオンを生成するプラズマ電極の表面状態を悪化させたりするような不純物がプラズマチャンバー内に混入しないように、停止期間中イオン源および LEBT は高真空状態 (~10⁻⁶ Pa) を維持してビーム運転再開まで待機した。運転開始前及び再開前には、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、ビーム供給に臨んだ。

概ね安定にビームを供給することができたが、次節で記述するようにイオン源に関連したトラブルがいくつか発生し、ビーム供給を一時的に停止する必要が生じた。

Figure 3 に 2014 年秋より 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、運転実績を積むに従い、2016 年 1 月より 47 mA、2018 年 10 月より 60 mA へと増やし、リニアックから RCS へのビーム入射電流について、所期目標値である 50 mA を実現した。この 10 年間で、イオン源で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) あり、Run の途中でイオン源を交換する必要が生じたが、それ以外は計画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。

アンテナの破損はイオン源の運転寿命を左右する大きな要因であるが、どれだけの連続運転が可能であるかということとはなかなか判断しづらく、実際に動かしてみないと分からない。そのため、J-PARC の利用運転時間を過去のイオン源の運転実績に合わせて徐々に増加してもらい、Run#90 では 2022/2023 の期間を通して 1 台のイオン源での連続運転に至った。Run#91 では更に連続運転時間を伸ばし、4,962 時間に達した。

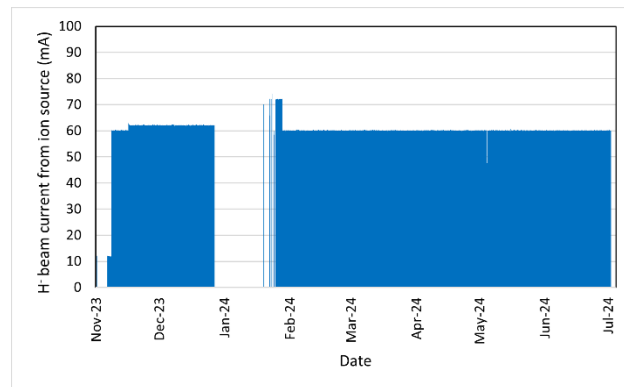


Figure 2: Beam current extracted from the J-PARC high-intensity RF-driven H⁻ ion source during Run#91.

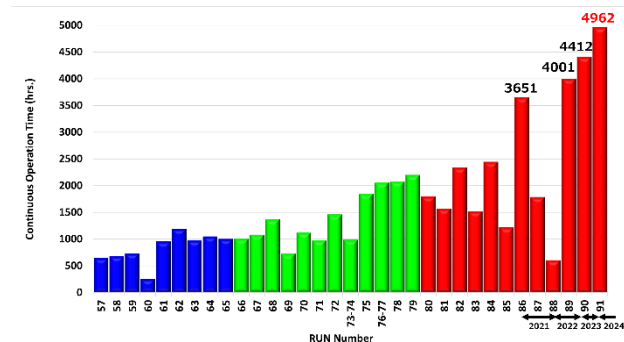


Figure 3: Operation history of the J-PARC high-intensity RF-driven H⁻ ion source.

夏季メンテナンス時には Cs と化学反応しないアルゴン (Ar) を用いたパージをする (ドライ窒素でも Cs は化学反応を起こすため、Ar でのパージが必須) が、真空ポンプの交換などの際に僅かながら大気中の酸素、窒素、水分などの不純物が真空容器内に入ってしまう 1 年以上の運転はリスクが伴うため、年 1 回のイオン源交換が必要であると考えている。

3.2 Run#91 期間中のイオン源に関連するトラブル

Run#91 期間中にイオン源に関連したトラブルがいくつか発生した。以下にその内容を記す。

● 加速変調電源異常 (2024 年 4 月 28 日)

イオン源から引き出されるビーム電流は通常 60 mA であるが、一時的にビーム電流が約 50 mA まで低下し、午前 0 時 58 分頃に担当者に異常対応の連絡が入った。

担当者が来所した際に、高電圧電源ボックスの方から異音を確認した。高電圧電源をオフした後に異音が出た電源ボックスのパネルを外すと、加速変調電圧 (12.5 kV) の出力ケーブルの固定が外れていた。

応急処置として、出力ケーブルが他のケーブルに触れないように施し、電圧が正常に印加されることを確認し、約 2 時間後の午前 3 時 1 分に運転を再開した。

昨年夏メンテナンス時にコンデンサの交換作業時に出力ケーブルが他のケーブルに接近したことが原因と考えている。

出力ケーブルは、本年夏季メンテナンス時に新品のケーブルに交換する予定である。また、他にケーブル間の接近・接触がないことを確認し、必要に応じて対応を行う。

● LEBT 内設置ファラデーカップ (FC) の二次電子抑制用バイアス電極の短絡 (2024 年 5 月 15 日)

半日メンテナンスのため、5 月 15 日午前 5 時に利用運転を一時停止したときに、イオン源から引き出されたビームの電流計測を変流器 (SCT) から FC に切り替えた時に、ビーム電流値が大きく減少する事象が発生した。

状況を確認したところ、FC にビームが入った際に FC 表面から放出される二次電子が外部へ漏れ出さないように抑制するために、通常は電極 (バイアス電極) に接地電位に対して -300 V の負電圧を印加しているのに、電源電圧が 0 V で電流が流れていた。

Figure 4 に LEBT 内に設置しているものと同じ構造の FC の写真を示す。LEBT 内に設置されている FC は、2014 年以前から使用されている。Figure 4 に示すように FC に入る電流を制限するためにカバー (接地電位) が前面に取り付けられている。また、FC にビームが入った際に FC 表面から放出された二次電子が外部へ漏れ出さないように負電圧が印加されるバイアス電極が設置されている。バイアス電極とカバーの間は空隙になっている。

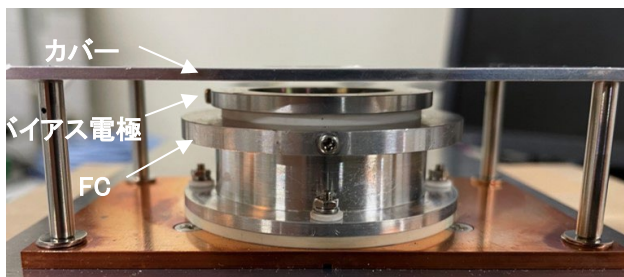


Figure 4: A photograph of the same structure of the Faraday cup installed in the J-PARC LEBT.

下流の加速器にビームを送る際には、FC はステップモーターを使った駆動機構でビームライン外に移動する。長期間使用している間に振動により、バイアス電極が動いてしまい、カバーに接触したことが原因で、電圧が掛からずに短絡したと思われる。テストスタンドでも同様の事象が生じたことがあり、バイアス電極とカバーの間に絶縁物を挿入することでバイアス電極が短絡しないように改修したことがあった。

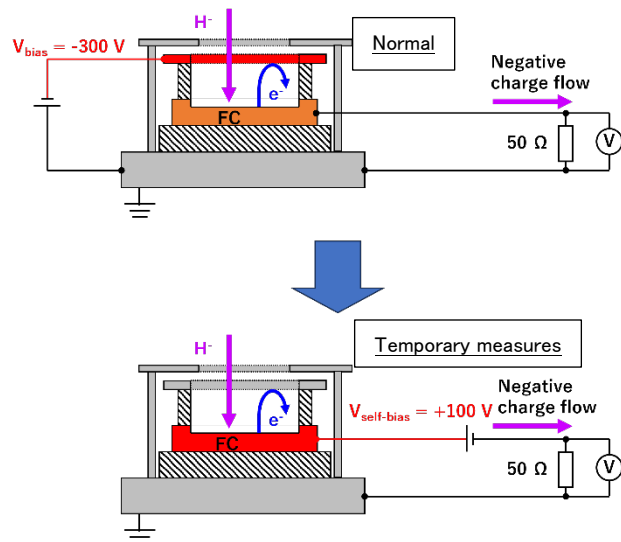


Figure 5: A schematic drawing of a temporary measures of applying the suppression voltage for secondary electrons emitted from the Faraday cup.

この FC を交換するためには、加速器トンネル内のクレーンを使用する必要があるためその使用前点検が必要であること、FC を取り付けられた真空フランジには SCT やビームストッパーが取り付けられており、それらは PPS (人的保護システム) の対象物であること、また運転中のイオン源を一時的に大気圧に開放するため大気中の不純物がプラズマチャンバー内に入るなどの理由で容易に交換できなかった。

そこで、Fig. 5 に示すように、接地電位に対して FC に $+100\text{ V}$ の正電圧を印加することで、FC 表面から放出された二次電子を FC 表面に戻すよう試みた。SCT から FC に切り替えた時にビーム電流が変化することなくほぼ同じ電流値を示すことを確認し、加速器の運転を継続した。幸いユーザー利用運転には、直接的な影響は生じなかった。

本年夏季メンテナンス時に、バイアス電極とカバーの間に絶縁物を挿入したものに交換する。

● AMFC 用電源故障 (2024 年 6 月 20 日)

午前 3 時 59 分頃にイオン源電源の MPS (機器保護システム) が発報した。担当者が来所して状況を確認したところ、AMFC 用電源が停止していることを確認した。AMFC 用電源は高電圧電源ボックス内に設置されているため、高電圧電源をオフにした後に、電源の交換を行った。

この電源は、RF 駆動 H⁻イオン源に替わる 2014 年夏以前は、フィラメント駆動型 H⁻イオン源でプラズマ電極に電圧を印加するための電源として用いられていた。J-PARC の運転が始まった 2006 年頃から使用されていた電源であり、制御回路の経年劣化が原因と思われる。

約 5 時間後の午前 8 時 49 分にイオン源の立ち上げが完了し、運転を再開した。

4. J-PARC 製内部アンテナの開発

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、第 2 章で記した通り、内部アンテナだけは SNS 製のものをを用いている。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。

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し、一昨年度より J-PARC 製内部アンテナに RF 投入電力を長時間通電した時の耐久試験を開始している[1]。

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 実機での運転に比べて単位時間に 5 倍の RF 電力を投入し、テストスタンドでの運転日数を短縮させて耐久性を調べた。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イオン源テストスタンドでの 2 MHz RF 源の運転パラメータを示す。製造過程でのアンテナの個性による耐久性の違いがないことを確認するために、3 本の J-PARC 製アンテナで試験を行った。耐久試験を行った結果、3 本とも J-PARC イオン源の実機換算で 5,570 時間(約 7.7 ヶ月)以上の運転時間に耐えることを実証できた。Table 3 に 3 本のアンテナに投入した電力と実機換算で投入した運転時間を示す。

一方で、J-PARC 製アンテナを用いてビーム引き出し実験も並行して行った。ビーム引き出し実験は、RFQ テストスタンドが 24 時間運転をできるので、そのテストスタ

ンドに J-PARC 製内部アンテナを取り付けたイオン源を設置し、2023 年 11 月 22 日から連続運転を開始した。テストスタンドの長期間メンテナンスなどで途中運転を停止しながらも 2024 年 7 月 3 日まで運転を実施し、3,888 時間(5.4 ヶ月)の連続運転を行うことができた。

Table 3: RF Energy Input to J-PARC-Made Internal Antennas and Equivalent Operation Time for Actual J-PARC RF-Driven H⁻ Ion Source

| Tested J-PARC-made antenna (period) | Input RF Energy (kWh) | Equivalent operation time (hours) |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| No. 1 (2023Mar10~Dec25) | 3515.6 | 5,859.3 |
| No. 2 (2024Mar05~Apr21) | 3395.8 | 5,659.6 |
| No. 3 (2024May15~Jul01) | 3344.2 | 5,573.6 |

5. まとめ

J-PARC の大強度 RF 駆動 H⁻イオン源の 2023/2024 キャンペーンの運転について記した。前キャンペーンに続き、キャンペーンを通してイオン源を途中交換することなく 1 台のイオン源で運転を行うことができ、これまでの連続運転時間である前キャンペーンの 4,412 時間を大幅に更新し、4,962 時間の連続運転時間に達した。

J-PARC では、RF 駆動 H⁻イオン源の前に 2006 年から熱陰極放電型 H⁻イオン源を運転しており、当時より使っていた電源やモニター類などイオン源本体以外の機器は、使用開始から 20 年近く経過しており故障が目立ってきた。稼働率を下げないように定期的な動作確認、点検を行うとともに、機器の更新を進める必要がある。

J-PARC の RF 駆動 H⁻イオン源で唯一海外より購入してきた RF 放電用内部アンテナに対して、これまで独自に試験を進めてきた J-PARC 製アンテナ実用化の目処が立つところまでできた。

参考文献

- [1] K. Shinto *et al.*, “Operation status of the J-PARC high-intensity RF-driven negative hydrogen ion source”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Aug. 29-Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 928-931.