

## J-PARC イオン源の現状

### STATUS OF THE J-PARC RF ION SOURCE

大越清紀<sup>#,A)</sup>, 上野彰<sup>A)</sup>, 池上清<sup>A)</sup>, 高木昭<sup>A)</sup>, 浅野博之<sup>A)</sup>, 小栗英知<sup>A)</sup>

Kiyonori Ohkoshi<sup>A)</sup>, Akira Ueno<sup>A)</sup>, Kiyoshi Ikegami<sup>A)</sup>, Akira Takagi<sup>A)</sup>, Hiroyuki Asano<sup>A)</sup>, Hidetomo Oguri<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center

#### Abstract

In order to satisfy the requirements of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) second stage, which will produce a 1MW beam, the Cs-free LaB<sub>6</sub>-filament-driven H<sup>-</sup> ion source was replaced to a cesiated RF-driven H<sup>-</sup> ion source (RF ion source) during the summer shutdown period on 2014. By developing and testing the RF ion source on an off-line test-stand for about five years, it successfully and stably produced a peak current of more than 60mA within the acceptance of the following RFQ linac with the required beam duty-factor of more than 1.25% (500  $\mu$  s $\times$ 25Hz). For about one year, the RF ion source has been operated with a peak current of 33mA routinely, which causes the smallest beam loss in the J-PARC operated with a 500kW beam. It has been also operated with a peak current of 55mA for a few weeks in each two months for the J-PARC beam study striving toward the 1MW beam operation. The beam current is controlled within the error of  $\pm 0.1$ mA by feed-backing the RF power and the Cs density during the operation. Except for the only one failure of the internal RF-antenna in the beginning of the operation, there was no serious trouble. The RF ion source with the 33mA peak current operation is successfully operated for approximately 1100 hours.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) では、運転開始当初からセシウム不使用の六ホウ化ランタンフィラメント駆動型 (LaB<sub>6</sub>) イオン源[1]を使用して、物質生命科学、ニュートリノ及びハドロン実験施設にビームを提供してきた。しかし、LaB<sub>6</sub> イオン源で生成できるビーム電流は最大 30mA 程度であり、リニアックのビーム増強計画 (リニアック出口で 50mA) [2]には対応できないため、新方式の Cs 使用の高周波駆動型 (RF) イオン源を導入することとした[3]。RF イオン源は、ビームラインに設置する前にテストスタンドにて開発実験を進め、各構造部の最適化や運転方法の確立を行い、RFQ のアクセプタンスに収まるビーム電流で 60mA 以上引き出すことに成功した。さらに、新規に開発した RFQ と合わせたテストスタンドにて、バグ修正や長時間の性能試験も実施した。RF イオン源は、2014 年夏期メンテナンス期間にビームラインに設置し、10 月からリニアックの加速試験、12 月から利用運転を開始した。本学会では、主に RF イオン源の構造や運転状況及びトラブル等について報告する。

#### 2. 高周波イオン源の設置

##### 2.1 高周波イオン源の構造

新規にインストールした RF イオン源は、LaB<sub>6</sub> イオン源と同様に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。プラズマチェンバ内に米国 SNS (Spallation Neutron Source) で使用して

いる RF アンテナ[4]を設置し、30MHz-RF を連続的に印加し、2MHz-RF をパルス的に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。さらに、負水素イオンビームを増大させるために、本イオン源はセシウム(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。Cs 異常導入 (過多) を防ぐために、天板フランジのビューイングポートに設置した分光器で Cs 発光強度 (852nm) を測定してセシウム量を常時監視している。プラズマ電極(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。Cs 導入器用マントルヒータ 3 台と PE 用温度調整用ヒータの電力は PID (Proportional Integral Derivative) で温度制御している。Figure 1 に J-PARC の高周波駆動型イオン源の断面図を示す。

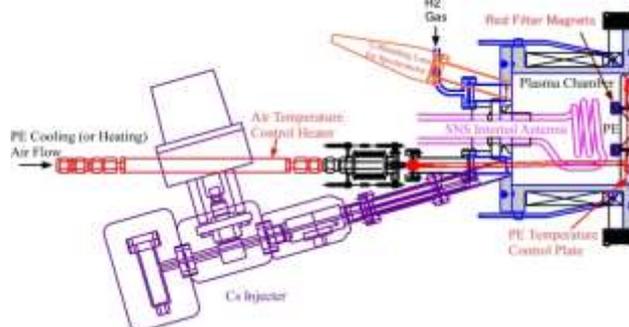


Figure 1: Cross-sectional view of the J-PARC RF-driven H<sup>-</sup> Ion Source.

<sup>#</sup> ohkoshi.kiyonori@jaea.go.jp

## 2.2 高周波イオン源の設置作業

2014年夏期メンテナンス期間にRFイオン源のインストール作業を実施した。作業は、最初に既存の感電防止用フェンスを含むLaB<sub>6</sub>イオン源機器を撤去することから始まり、全てを撤去した後にRFイオン源機器のインストールを行った。これらの作業と並行して、RFイオン源のプラズマ電極温度調整用に2台の圧空供給器の新設とRFイオン源用の電源整備(2MHz高周波電源設置や既存電源の改修)を行い、インストール作業は、当初予定したスケジュール通りに完了できた。ビームラインに設置したRFイオン源の全体写真をFigure 2に示す。

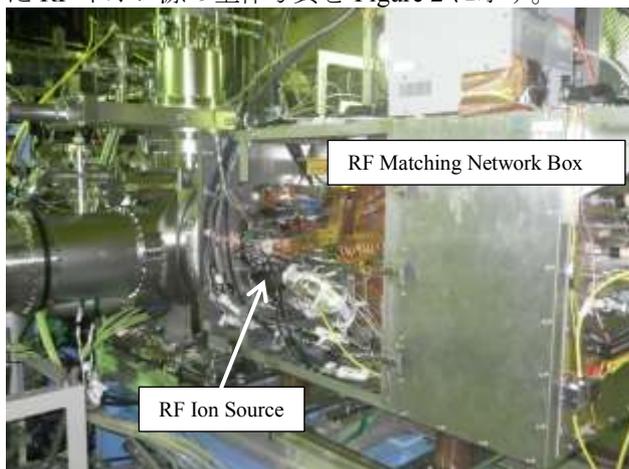


Figure 2: Photograph of the J-PARC RF ion source.

## 3. 高周波イオン源の開発実験

### 3.1 RF アンテナの選定

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いる。新品のRFアンテナの写真をFigure 3に示す。



Figure 3: RF-Antenna developed in SNS.

RFアンテナは、φ4.76mm(3/16")の銅製パイプの

2.5 ターン構造で、表面は絶縁のために珪瑯コーティングが行われている。開発実験開始当初、運転中にコーティングが破損する事象が頻発したため、アンテナ径を測定したところ、破損したアンテナは他に比べてコーティングが薄いことが分かった。コーティングの薄さが故障に関係していると判断し、アンテナを入手した際に良質のアンテナを選別することが重要であると考え、すべてのアンテナの外径(1本につき11ヶ所)を測定してコーティングが厚く、かつ表面状態の良好(亀裂等が無い)のものを選定して使用することにした。アンテナ20本入手した時のそれぞれのパイプの平均直径値をFigure 4に示す。20本の外径を平均すると約φ5.75mmとなるので、平均的なコーティング厚は0.5mm程度である。従ってコーティング厚には±10%程度のばらつきがあることになるが、中には平均より20%以上も薄いアンテナもある(No. 20)。当面の合格基準としてコーティング厚い外径φ5.80mm以上のアンテナのみを、実装することにした。

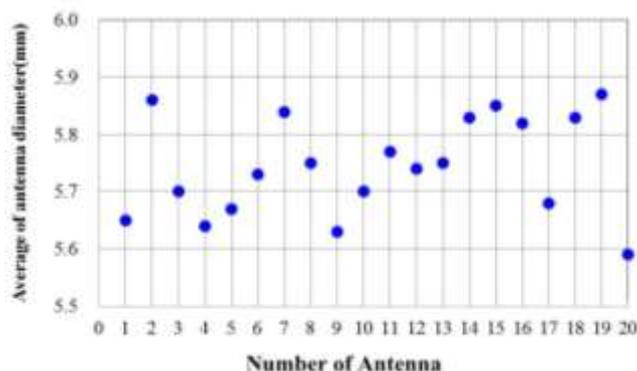


Figure 4: Average diameter of antenna pipe.

### 3.2 プラズマチェンバの改良

RFイオン源の最初の設計では、プラズマチェンバの材質は、LaB<sub>6</sub>イオン源と同様に冷却効率を重視して無酸素銅(OFC)を使用していた。しかし、導入したCs蒸気の大部分が冷えた内表面に付着してしまい、結果としてCsを頻繁に導入する必要が生じた。Cs導入量を低減するために、プラズマチェンバの材質を熱伝導の低いステンレス鋼に変更した結果、導入量を大幅(1/10以下)に減らすことができた[5]。

### 3.3 運転条件の最適化

これまでの開発実験により、フィルタ磁場の強度及び分布がビーム電流値に大きく影響を及ぼすことが分かったため、ビーム電流が最大になるようにロッドフィルタ磁石の形状及び磁石間のギャップ長を微調整して最適化を行った[6]。

一方、エミッタンスは、プラズマ電極温度(PE)が高いと大きくなる傾向があることが分かったため[7]、ヒータ付圧縮空気で電極温度を最大70°Cで一定に保つように制御することにした。

### 3.4 ビーム電流安定化フィードバック制御

プラズマチェンバ内に導入した Cs は時間とともに消耗していくため、ビーム電流もそれに伴い減少する。また、Cs 導入直後はビーム電流が急激に増加するため、利用運転に影響が出てしまう。このため、ビーム電流を常に目標値に維持するためのフィードバックシステムを導入した[8]。Figure 5 にビーム電流フィードバック制御の設定画面とステータス画面を示す。

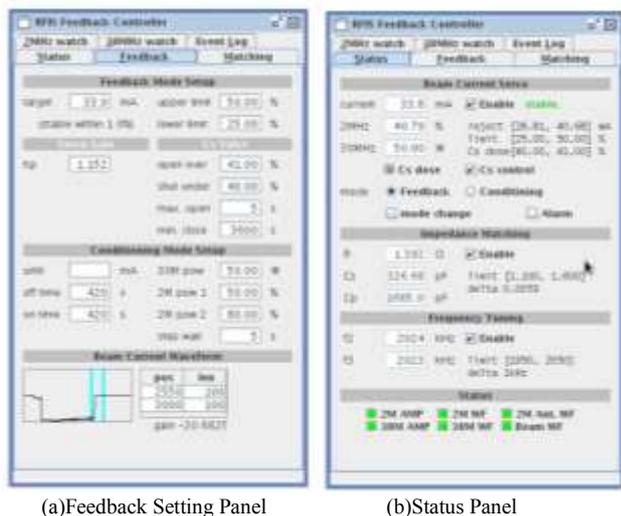


Figure 5: Beam current feedback control panel.

フィードバック制御の設定画面(a)では、以下のパラメータを設定することができる。

- 目標ビーム電流値 (target)
- Cs バルブの 1 回あたりの最大開放時間 (max. open)
- Cs バルブの 1 回あたりの最小開放待機時間 (min. close)
- RF パワー設定値の上下リミット (upper limit, lower limit)
- Cs 添加タイミングの RF パワー (open over)

また、本フィードバック制御には、2MHz 高周波の反射が最小になるように整合回路の可変コンデンサ (並列、平行) と 2MHz 高周波電源の周波数を常時自動で調整する機能も備えている。

Figure 5 に示す設定値でフィードバック制御を行った時のイオン源運転状況を Figure 6 に示す。

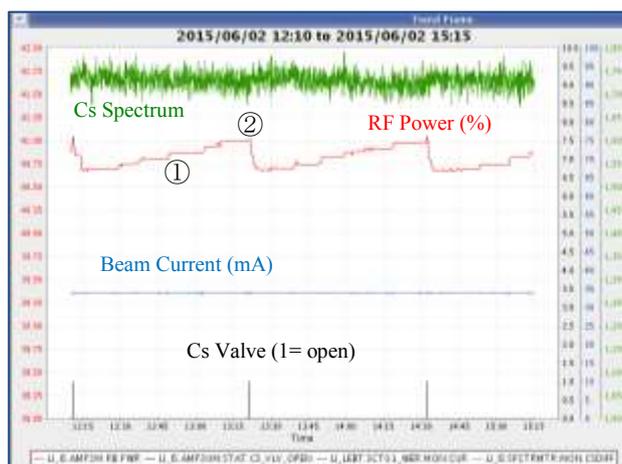


Figure 6: Example of operational status using feedback control system.

現在の運転では、ビーム電流低下をまず 2MHz-RF パワーの増加で抑え (Fig.6 中の領域①)、RF パワーが Cs 添加タイミングに達したときに Cs バルブを開けて Cs を補てん (Fig.6 中の領域②) する方式を採用している。この動作を繰り返して、ビーム電流を常に一定に保っている。

Cs バルブの故障や Cs オープン異常温度上昇により Cs が必要以上にチェンバ内に導入されるのを防止するために、本フィードバック制御には Cs 発光強度が設定値を超えると自動的に Cs オープンヒータを OFF するインターロック機能も有している。

## 4. RF イオン源の運転・保守

### 4.1 ビーム供給運転

2014 年 10 月から RF イオン源によるビーム運転を開始し、2015 年 6 月末まで継続した。この間、RF イオン源はアンテナ故障が 1 回発生したのみで、ほぼ安定にビームを供給することができた。

RF イオン源を使用した最初のビーム運転である RUN#57 では、5mA、30mA 及び 50mA でのビーム加速調整を行い、その後利用運転を開始した。RUN#62 の利用運転では、ビーム電流 33mA で約 1,100 時間の連続運転に成功した。平成 27 年 1 月の加速器大電流ビームスタディでは、イオン源から約 60mA のビーム引出しも行った。

Figure 7 に、2014 年 10 月から 2015 年 6 月末までのイオン源から引き出したビーム電流値、Table 1 に RUN#63 の 33mA 運転時 (利用運転) 及び 47mA 運転時 (スタディ運転) 運転時のイオン源パラメータを示す。RF パワーは Cs 添加量で変化するため平均的な値で示している。

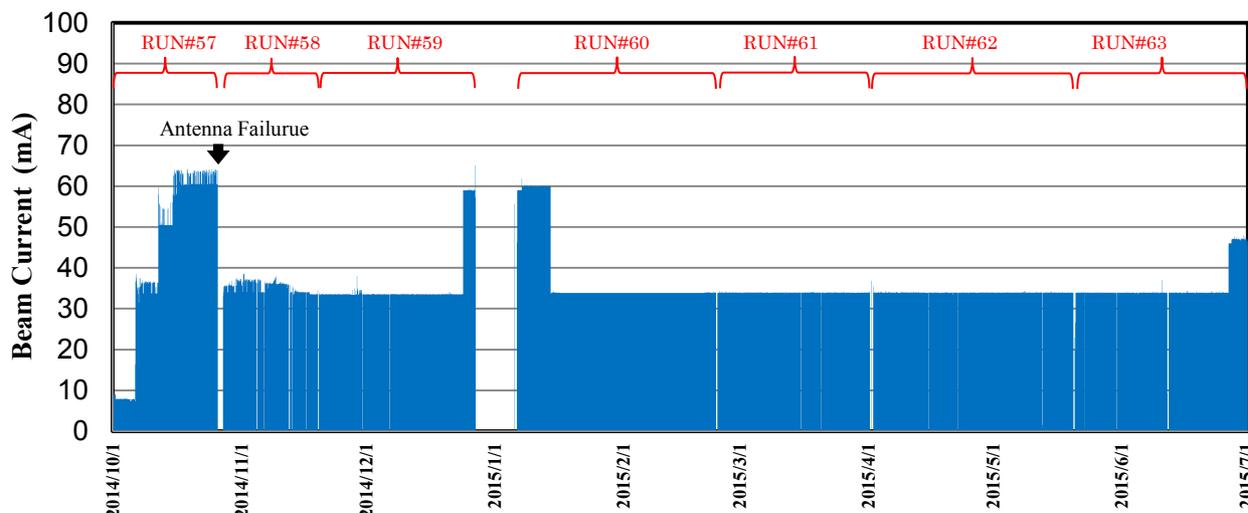


Figure 7: Beam current extracted from ion source at each day.

Table 1: Operation Parameter of the RF Ion Source

|                               | 33mA operation                     | 47mA operation                     |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 2MHz RF Power                 | 32 kW                              | 38kW                               |
| Beam Length/<br>Repetition    | 100-500us/<br>1-25Hz<br>(Variable) | 100-500us/<br>1-25Hz<br>(Variable) |
| 2MHz-RF Length/<br>Repetition | 700us/<br>25Hz(Constant)           | 700us/<br>25Hz(Constant)           |
| Extraction Voltage            | 9.9kV                              | 10.3kV                             |
| Acceleration<br>Voltage       | 42.0kV                             | 41.5kV                             |
| PE Temp.                      | 57°C                               | 61°C                               |
| Cs Reservoir<br>Temp.         | 190°C                              | 190°C                              |
| Cs-Valve Open<br>Time         | 12s/h                              | 30s/h                              |
| H2 Gas Flow                   | 24sccm                             | 24sccm                             |
| Solenoid Mag.1                | 495A                               | 525A                               |
| Solenoid Mag.2                | 605A                               | 665A                               |

RF イオン源におけるビーム電流 47mA 運転は、33mA 運転時に比べて、2MHz RF パワーが約 1.19 倍、Cs 導入量は 2.5 倍必要である。ビーム幅と繰り返しは実験によって変更しているが、イオン源の 2MHz-RF のパルス幅と繰り返しは、イオン源状態を安定させるために固定としている。

#### 4.2 運転中のイオン源トラブル

2014 年 10 月から RF イオン源の運転を開始したが、RF イオン源本体の重大トラブルは、アンテナ故障によるものが 1 回のみであった。アンテナの故障の原因は、イオン源の 60mA 調整時に Cs を多く導入し過ぎたためアンテナにダメージを与えたためと考えられる。復旧にはイオン源交換を伴ったが、

コンディショニング済みのバックアップ用イオン源を準備していたため、故障から約 8 時間でビーム運転を再開することができた。故障したアンテナの損傷状況を Figure 8 に示す。コーティングが 2mm 程度損傷して、ベースの銅管が見えている状態であることが分かる。



Figure 8: Photograph of damaged the RF-antenna.

#### 4.3 イオン源のメンテナンス

現在、イオン源は約 1.5 か月周期でメンテナンスを行っている。メンテナンスは、交換作業及びビーム調整を合わせて 24 時間以内に終了させることが求められている。通常、イオン源交換後は、安定にビームを引き出せるまで数日間は要する。このため、メンテナンス時間を短縮するために、事前にオフラインで次のような事前準備を行っている。

- ① 運転後のイオン源を分解し、プラズマチェンバ及びプラズマ電極の研磨・清掃を行い、内部アンテナを新品のアンテナに交換し、イオン源を組み上げる。
- ② 組み上げたイオン源を、リークテスト実施後にテストスタンドにセットし、高真空(イオン源真空  $10^{-6}$ Pa 台)になるまで真空引きを行う。

- ③低 RF パワー(25kW)で短時間運転し、その後プラズマと H<sub>2</sub> ガスを停止して高真空 (10<sup>-6</sup>Pa 台) になるまで待機する。最初に低 RF パワーでプラズマを生成するのは、プラズマ生成直後に新品アンテナや構成部品から発生する不純物ガスによって、アンテナがダメージを受けるのを防ぐためである。
- ④この動作を繰り返し、十分にガス出しが完了したら、Cs を少量ずつ添加して最適な条件にする。
- ⑤エミッタンス測定後、保管用台車に設置して真空引き後に Ar パージし、バックアップ機とする。

バックアップ機のトラブルも考慮して、ビーム運転中は常時2台のバックアップ機を待機できるように準備している。

## 5. まとめ

2014 年 10 月より使用を開始した高周波駆動型イオン源は、これまで一度だけ運転中にアンテナが破損したほかは特に大きなトラブルはなく、安定に稼働している。現在、イオン源から 33mA 程度のビームを使用してビーム利用運転を行っており、本条件にて 1,100 時間の連続運転にも成功している。

今後の利用運転ではビーム電流を上げていく予定であるため、各ビーム電流におけるイオン源の最適な運転パラメータを見出し、大電流かつ安定なビーム供給の実現を目指す。

## 参考文献

- [1] K.Ohkoshi, et al., Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2013).
- [2] K.Hasegawa, "Upgrade and Operation of J-PARC Linac", Proceedings of the J-PARC Symposium 2014 to be published as a volume of JPS Conference Proceedings.
- [3] S.Yamazaki, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012.
- [4] M.P.Stockli, et al., Rev.Sci. Instrum. 81, 02A729(2010).
- [5] I.Koizumi, et al., Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2013).
- [6] A.Ueno, et al., AIP Conf. Proc. 1655, 030010 (2015).
- [7] A.Ueno, et al., AIP Conf. Proc. 1655, 030009 (2015).
- [8] A.Ueno, et al., AIP Conf. Proc. 1655, 030008 (2015).