

## J-PARC イオン源の現状

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

大越清紀<sup>#,A)</sup>、池上清<sup>A)</sup>、高木昭<sup>A)</sup>、浅野博之<sup>A)</sup>、上野彰<sup>A)</sup>、柴田崇統<sup>A)</sup>、  
南茂今朝雄<sup>A)</sup>、神藤勝啓<sup>A)</sup>、小栗英知<sup>A)</sup>

Kiyonori Ohkoshi<sup>#,A)</sup>, Kiyoshi Ikegami<sup>A)</sup>, Akira Takagi<sup>A)</sup>, Hiroyuki Asano<sup>A)</sup>, Akira Ueno<sup>A)</sup>, Takanori Shibata<sup>A)</sup>,  
Kesao Nanmo<sup>A)</sup>, Katsuhiko Shinto<sup>A)</sup>, Hidetomo Oguri<sup>A)</sup>

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

#### Abstract

In 2014 October, operation of cesium-seeded Radio Frequency (RF)-driven negative hydrogen ion (H<sup>-</sup>) source was started in J-PARC LINAC. As results of the skillful RF antenna screening and the proper pre-conditioning process, ion source operation more than 1 year was successfully performed without any unscheduled beam stops due to the antenna failure. The continuous operation of 1,350 hours with a peak beam current of 45 mA was achieved in the recent beam run (RUN#68). Moreover, the fluctuation of beam current in a low energy beam transport (LEBT) is kept within  $\pm 2\%$  of target value by application of three feedback systems. A new test stand equipped with a set of an H<sup>-</sup> ion source and an LEBT, which is similar configuration to that for the J-PARC LINAC, was assembled in order to investigate H<sup>-</sup> beam characteristics, for example, the emittance at the position of the RFQ entrance. In this presentation, we report the recent status of the ion source operation and some experimental results obtained at the ion source test stand.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のイオン源は、リニアックビーム増強計画[1]のため 2014年夏期メンテナンス期間にセシウム(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10月からRF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2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あったが、昨年本学会で報告[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はなく、安定にビームを供給している。

本会では、RF 負水素イオン源の最近 1 年間の運転実績及びトラブルの報告の他、新たにイオン源テストスタンドを整備したので、その状況について報告する。

#### 2. 高周波イオン源の構造

##### 2.1 高周波イオン源の構造

Figure 1 に示すように J-PARC の RF 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。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、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。アンテナは銅製パイプに絶縁のため珪瑯コー

ティングされているが、コーティングの厚さにばらつきがあるため、コーティング厚が 520 $\mu\text{m}$  (直径 5.8mm) 以上のアンテナだけを使用するようにしている。ビーム強度を増大させるために、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イングポートに設置した分光器で Cs 発光強度 (852nm) 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 過剰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 2 に J-PARC 高周波イオン源の構造図を示す。

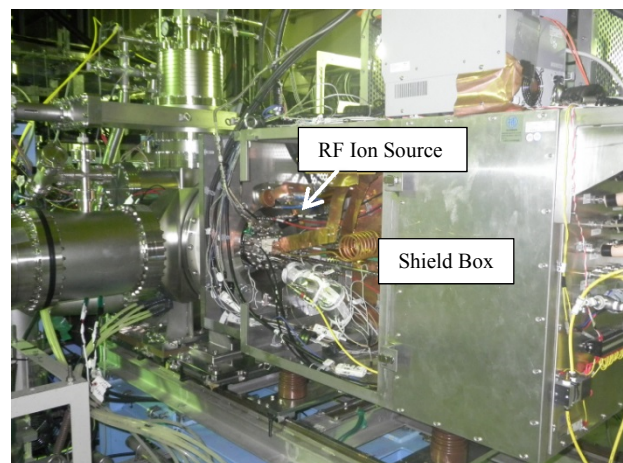


Figure 1: Photograph of the J-PARC RF-driven H<sup>-</sup> ion source.

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

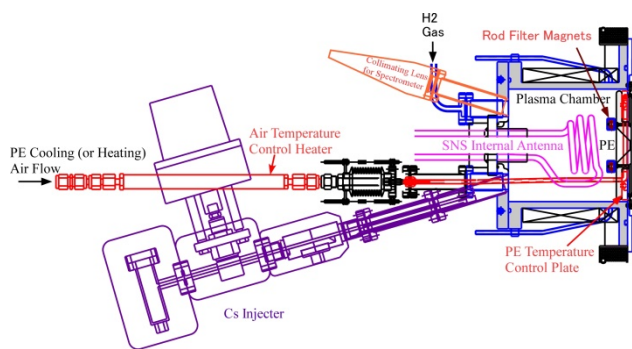


Figure 2: Cross-sectional view of the J-PARC RF-driven  $H^-$  ion source.

## 2.2 高周波イオン源用内部アンテナ

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いる。現在 SNS 製アンテナは、イオン源の性能上問題はないが、将来、イオン源のさらなる大強度化を目指すときにアンテナがその妨げにならないようにするためには、J-PARC でもアンテナ開発を開始し、ノウハウを蓄積することが重要である。J-PARC 独自のアンテナを製作するために国内珪瑯メーカーと打合せを重ね、昨年、20 本の試作品を製作した。Figure 3 に現状使用している SNS 製アンテナと今回試作した国産アンテナの比較写真を示す。アンテナ形状は、SNS 製と同寸法とし、コーティングの釉薬は、表面クラックを防ぐためにアンチモン系の乳濁ガラスを採用している。このため、SNS 製アンテナに比べ白色になっている。コーティング方法は、銅コイルにスプレーで釉薬をコーティングし、その後 840°C で焼成している。これを4度繰り返すことでコーティングの厚さを 520 $\mu\text{m}$  以上を確保できている。表面状態は亀裂やピンホールはなく、良好に仕上がっている。

今後、アンテナ単独での真空引き試験やプラズマ点灯試験を行い、不純物ガス等の発生がないことを確認した後にテストスタンドにおいてビーム引出し試験や耐久試験を進める予定である。

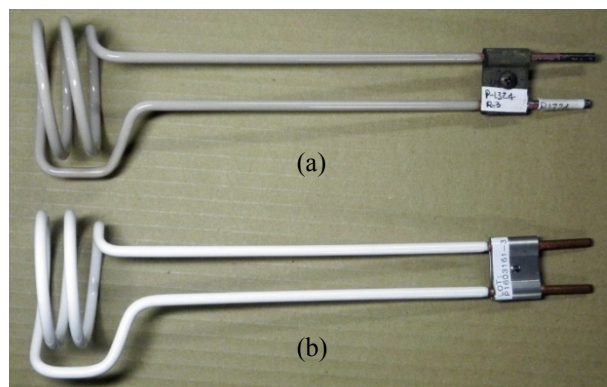


Figure 3: Photograph of the SNS-type RF-Antenna (a) and the J-PARC prototype one (b).

## 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

Figure 4 に最近1年間の RF イオン源の運転状況を示す。縦軸のビーム電流は、低エネルギー輸送系 (LEBT) での値であり、その値が一定になるように RF 電力及び Cs 添加量をフィードバック制御している[6]。

イオン源のビーム電流は、ユーザ利用運転では 2015 年 12 月までは 33mA で運転していたが、2016 年 1 月から 45mA に増強した。ビーム増強に伴う新たな問題は特に発生せず、RUN#68 ではビーム電流 45mA の条件下で連続運転 1,350h を達成することができた。RUN#64 や RUN#66 の運転実績で示されているように、時々、加速器のビームスタディのために 60mA 程度で運転を行っているが、この時も特に問題は起きていない。

Cs 添加型のイオン源では、ビーム引出系の電極に Cs が付着して連続放電を誘発する恐れがあったため、Cs が余分に導入しないように、少量ずつ添加するようにしている。最近一年間の引出電圧 (約 9kV) と加速電圧 (約 45kV) の放電頻度を Figure 5 に示す。RUN#64 開始前の調整運転時及び RUN#69 開始直後に引出電圧及び加速電圧が 1日に 7 回放電することがあったが、平均の放電頻度は、引出電圧が約 1週間に1回、加速電圧が 2.4 日に 1 回程度であり、プラズマチェンバ内の Cs 量が少ない状態で良好に保たれていると思われる。

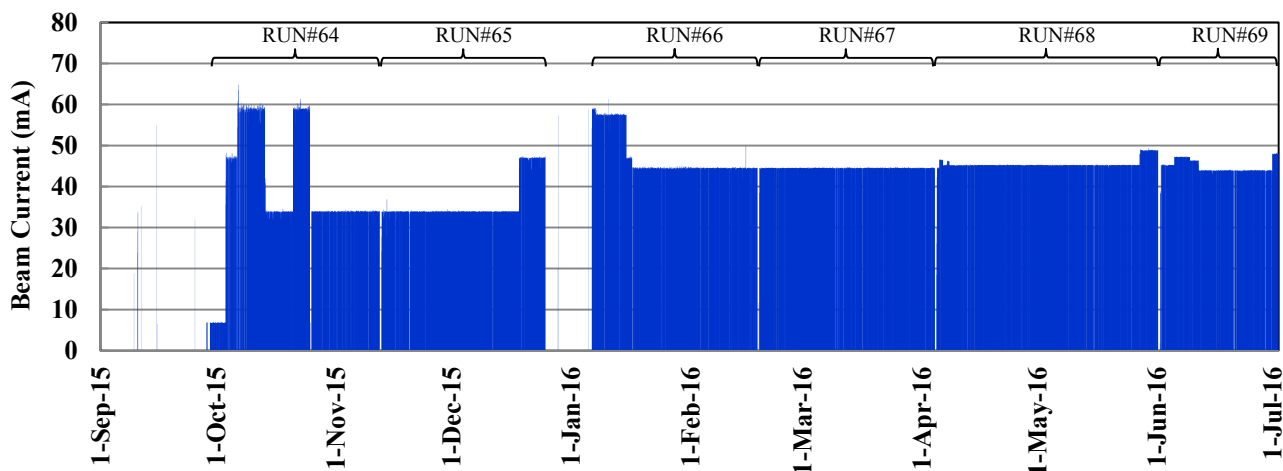


Figure 4: Operational history of the ion source.

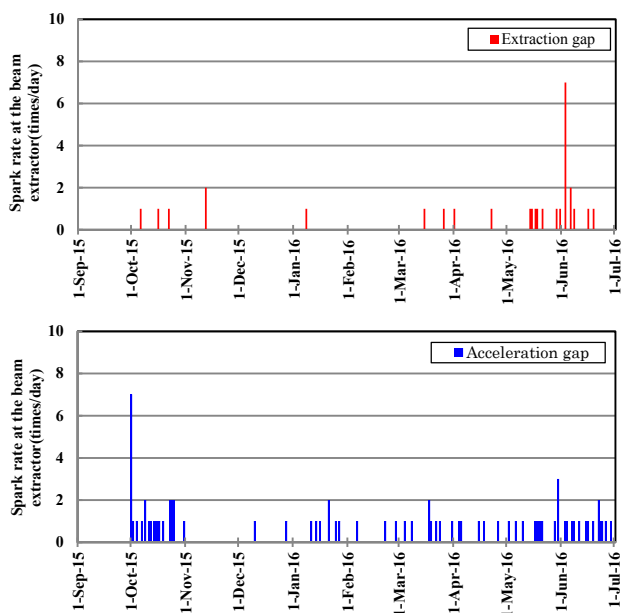


Figure 5: Spark rate at the acceleration gap (top) and extraction gap (bottom) of the source.

### 3.2 イオン源の保守

最近1年間は、イオン源が原因で長時間ビームが停止するような事象は発生していないが、軽度のトラブルは以下の2件発生している。

1件目は、ビーム安定化のためのフィードバック(FB)プログラムが停止してしまう事象で、2016年1月と5月の2回発生している。Figure 6に示すようにFBが停止すると2MHzのRF電力値が固定となり、Csの追加供給も停止するため、ビーム電流は2時間で約0.8mA減少する。イオン源のビーム電流は常時監視しており、2%以上変動するとアラームで警告するため、ビーム運転に影響する前にFB再立上げをして対応した。停止の原因はPCのハングアップだったため、PCの再起動を定期的に行うこととし、今後PCの更新も検討している。

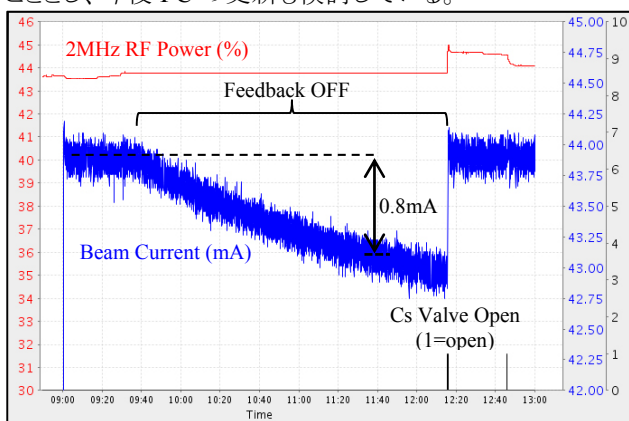


Figure 6: Beam current from the ion source during the stop of the feedback system.

2件目は、プラズマ電極温度測定用熱電対ケーブルの損傷である。プラズマ電極温度は表面のCs付着量と関係するため常時温度を計測しているが、一時的に正

常に測定できない(事象が発生したため、インターロックが発報し、ビームが停止した。温度はすぐに正常な値に復旧し、その後も特に異常は見られなかったため、短時間の停止後ビーム運転は再開されたが、メンテナンス時に熱電対ケーブルを取り外したところ、先端部とケーブル途中のシースが損傷していた。Figure 7に熱電対ケーブルの損傷部分の写真を示す。原因は、ケーブルと筐体の接触部分だけが損傷していたため、イオン源からの2MHzの高周波が熱電対ケーブルに乗り、電位差が生じたためと考えられる。今夏メンテナンス期間にケーブルにフェライトコア追加と、ケーブルと筐体を接触させない等の対応を行う。

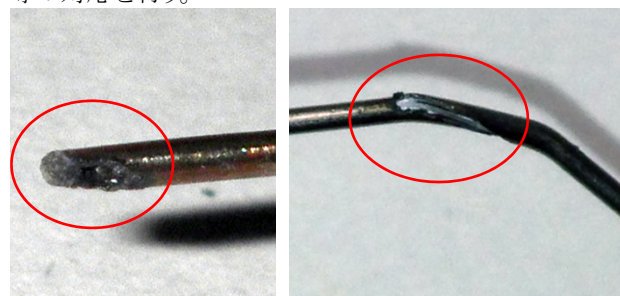
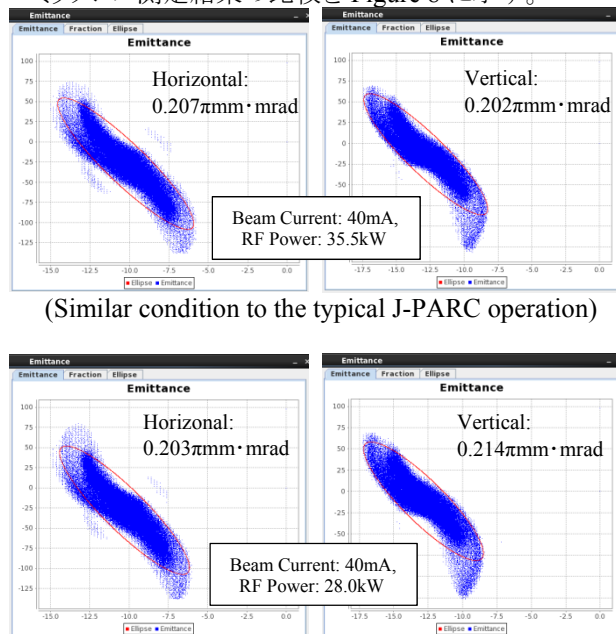


Figure 7: Damage of thermocouple cable for temperature measurement of the plasma electrode.

## 4. イオン源テストスタンドの構築

2016年5月にJ-PARCリニアック棟に、J-PARCと同じ機器構成のイオン源テストスタンドの構築し、イオン源のオフラインビームテストを開始した。本テストスタンドでは、J-PARCビームラインのRFQの入射にあたる位置にエミッタンスモニターを設置できる構造になっており、イオン源の種々のパラメータとRFQ入射位置でのエミッタンスとの相関を調べることができる。その一例として、ビーム電流一定でCs導入量を変化させたときの規格化RMSエミッタンス測定結果の比較をFigure 8に示す。



(Cs overdose condition (RF power decreased))  
Figure 8: Normalized RMS emittances of the H<sup>-</sup> beam extracted from the H<sup>-</sup> ion source #1 on a new test stand.

本測定では、Cs を多く導入したときは 2MHz-RF 電力を下げ、ビーム電流を一定に保った。実機イオン源に近い Cs 添加状態時のエミッタンス( $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ )は Horizontal (H):0.207 及び Vertical (V):0.202、Cs 過多状態は H:0.203 及び V:0.214 であり、大きな変化は見られなかった。

今後、ソレノイド電磁石 2 台、軌道補正電磁石 2 台及び引出系の電圧等を変化させてエミッタンスを測定し、RFQ 入口位置におけるエミッタンスが最小になるイオン源パラメータサーチを行う。また、プラズマ条件(不純物ガスの混入等)の変化によるエミッタンスの変化確認や、J-PARC 製アンテナの性能・耐久試験についても本テストスタンドを使用して行う予定である。

## 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、最近1年間は特に大きなトラブルはなく、安定に稼働している。2016 年 1 月からはユーザ利用運転時のイオン源ビーム電流 45mA に増強して運転を行っている。

今後、新たに構築したイオン源テストスタンドにて、パラメータの最適化や国産アンテナの耐久試験等を行い、実機イオン源の性能向上へ反映させる予定である。

## 参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “Upgrade and Operation of J-PARC Linac”, JPS Conference Proceedings, Vol. 8, 011012 (2015).
- [2] K. Ohkoshi *et al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013.
- [3] S. Yamazaki *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012.
- [4] K. Ohkoshi *et al.*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015
- [5] M. P. Stockli *et al.*, Rev.Sci.Instrum.81,02A729 (2010).
- [6] A. Ueno *et al.*, AIP Conf. Proc. 1655, 030008 (2015).