

## J-PARC イオン源の運転状況

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

大越清紀<sup>#</sup>、池上清、小泉勲、上野彰、高木昭、山崎宰春、小栗英知  
 Kiyonori Ohkoshi<sup>#</sup>, Kiyoshi Ikegami, Isao Koizumi, Akira Ueno, Akira Takagi and Hidetomo Oguri  
 J-PARC Center

#### Abstract

A cesium-free H<sup>-</sup> ion source driven with a LaB<sub>6</sub>-filament is being operated at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) without any serious trouble since the restoration from the halt due to the March 2011 earthquake. The H<sup>-</sup> ion current extracted from the ion source has been restrained to approximately 19 mA for the 50-days continuous operation without any lifetime problem on the filament. During the operation period from Jan. 5 to Feb. 22 2013 (scheduled operation time was 1200h), the extracted beam current from the ion source was increased to 22 mA in order to increase the beam power delivered to the J-PARC experimental halls. The filament current necessary for the constant arc-power, after it reached the maximum value at around 200h from the start of the operation, usually almost linearly decreases as time. The decreasing speed of the filament current changed from about 0.02A/h to about 0.6A/h at 1108h from the start of the operation. After 10h from the observation of the high decreasing speed, the filament was broken. By the unusual quick maintenance, in which only the end-plate with a LaB<sub>6</sub>-filament instead of the whole ion source chamber from the end plate to the plasma electrode was changed, the beam operation was restarted with beam stop time of about 8h. The parameters measured during the LaB<sub>6</sub>-filament braking process and the prediction method of the LaB<sub>6</sub>-filament life-time are presented in this paper. Also, the ion source operation more than 30 mA for 8 days and the status of the front-end test stand consisting of the ion source and the 50mA-RFQ for the J-PARC upgrade to 1MW are presented.

#### 1. はじめに

東日本大震災復旧後の J-PARC イオン源は、ほぼトラブルなく順調に稼働している。J-PARC の運転サイクル(RUN)は、50 日間(1200h)に延伸された<sup>[1]</sup>が、ビーム電流はイオン源の LaB<sub>6</sub>(六ホウ化ランタン)製フィラメントの寿命を考慮して 19mA に制限していた。ビームユーザ側からのビーム電流増加の要望に応えるため、先ず、RUN#44 途中 (2012 年 10 月 16 日)から 30 日間ビーム電流を 22mA に上げた運転を行いフィラメント寿命以外に問題が発生しないことを確認した。これまで、J-PARC イオン源では、LaB<sub>6</sub>フィラメント断線に関するデータがほぼ無かったため、データ取得の目的も兼ねて RUN#46 (2013 年 1 月 5 日～)では 22mA の 1200h 連続運転を試みた。フィラメント消耗の目安となるフィラメント電流値は、1100h 過ぎまでほぼ一定に減少していたが、その後、急激に減少率が増大して 1118h で断線に至った。今回断線まで運転したことで、断線の予兆やフィラメントの消耗状況等のイオン源運転に有意義なデータを取得できた。

本学会では主にフィラメントの断線時の状況及び消耗具合について報告を行い、昨年 9 月からのイオン源運転状況及び来年 J-PARC にインストール予定の大電流用イオン源&RFQ のテストスタンドの整備状況についても報告する。

#### 2. J-PARC 負水素イオン源

J-PARC で使用している負水素イオン源の構造を Figure 1 に示す。

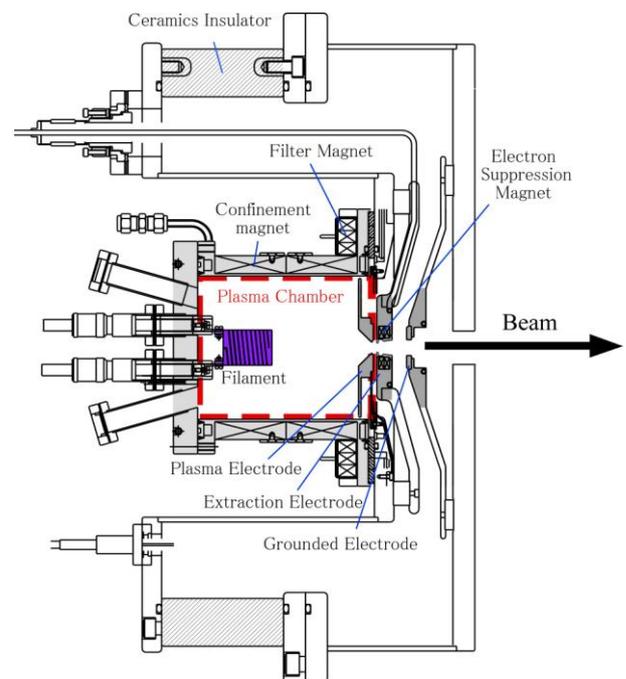


Figure 1: Structure of the J-PARC negative ion source.

プラズマ生成室内に設置した LaB<sub>6</sub> フィラメント1本を熱陰極として使用し、アーク放電を行うことでソースプラ

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

ズマを生成する。フィラメントは、内径 23.0mm、外径 29.5 mm、全長 43.6mm の円筒型の LaB<sub>6</sub> 素材にワイヤーカットを施すことで、約 3.3mm 幅の 2 重螺旋構造に加工されている。2 重螺旋構造により隣り合うフィラメントに逆向き電流が流れ、磁場が打ち消されることで、高い熱電子引き出し効率となる。プラズマ生成室で生成した負水素イオンは約 50keV のエネルギーでイオン源から出射され、2 台のソレノイド電磁石で収束され RFQ 加速器に入射される。

### 3. イオン源の運転状況

昨年の夏季メンテナンス後の RUN#44(2012 年 9 月)から RUN#49 (2013 年 5 月)までのイオン源運転実績を Figure 2 に示す。

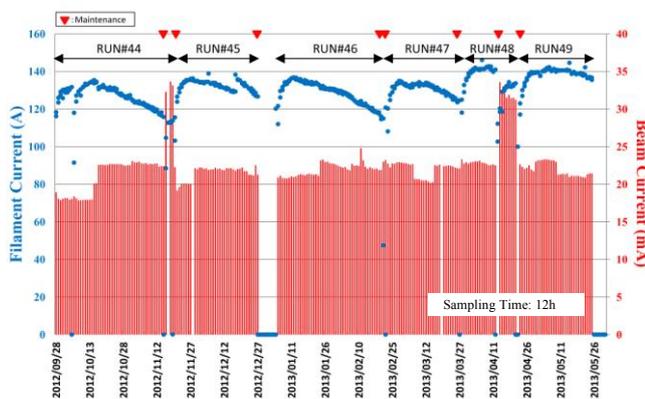


Figure 2: Operation result of the ion source.

RUN#44 は、ビーム電流 18mA で開始したが、途中から 22mA に増加させて運転を行い、ビーム安定性に問題ないことを確認した。その後、メンテナンスを実施し、3GeV シンクロトロン(RCS)スタディのため 3 日間の大電流ビーム試験 (30mA)を行った。初めての 32mA 連続運転であったため、24 時間体制で監視を行ったが、アークの異常放電は定期的起こっていたものの、イオン源のパラメータ調整等はほとんど不要で、安定にビーム供給することができた。

RUN#45 以降は 20-22mA 運転が定常になり、RUN#46 では、22mA で 1200h 連続運転を始めて試みたが、RUN 終了 3 日前の 1118h で断線した。その時の状況については次項で詳しく報告する。

RUN#48 後半(2013 年 4 月)に 2 回目の RCS 大電流ビームスタディを行い、30mA 運転を 8 日間実施した。今回は夜間を無人運転としたが、スタディ終了まで安定に供給することができた。この時のビーム電流値とフィラメント電流の経時変化を Figure 3 に示す。

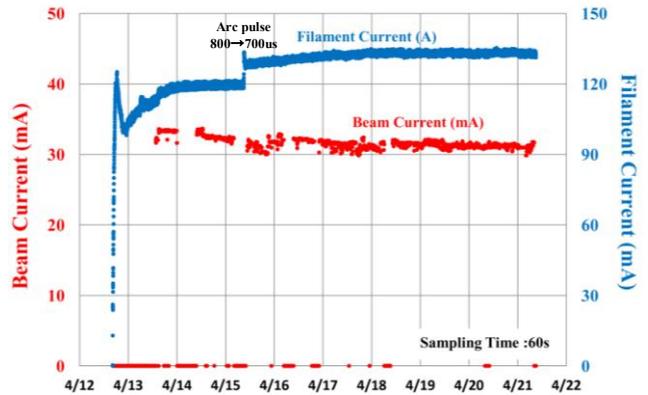


Figure 3: Trend of 30mA high power operation.

大強度ビーム試験中のイオン源アーク電力は、68kW (170V, 400A)で、アークパルス幅は通常の 800us から 700us に短縮している。Fig.3 の 4/15 にフィラメント電流が上がっているのは、この時にアークパルス幅を変更したためである。

RUN#49(2013 年 4 月～)もイオン源は順調に稼働していたが、ハドロン実験施設の放射線事故が発生したため、現在(2013 年 7 月)はビーム運転を停止して J-PARC 全体の安全点検等の作業に専念している。

### 4. LaB<sub>6</sub> フィラメントの断線状況

J-PARC 加速器の故障トラブルによる計画外停止は、ビーム利用実験に多大な影響を与えてしまうため、RUN 中にフィラメント断線する恐れのない運転条件でこれまでイオン源を運転してきたが、RUN#46 では初めてビーム電流 22mA(アーク電力約 27kW)で 1200 時間連続運転を試みた。運転条件により消耗範囲が異なる為、フィラメントの消耗状況の定量化には重量と寸法測定を行うしかない。しかし、一定アーク電力運転の場合、フィラメント電流が最大値の 10~15%程度減少すると断線に至るとの経験則がある。RUN#46 でのフィラメント電流の経時変化を Figure 4 に示す。フィラメント減少率比較のため、ビーム電流 17mA(アーク電力 20kW)で 1200h 以上運転した時のフィラメント電流も合わせてプロットした。

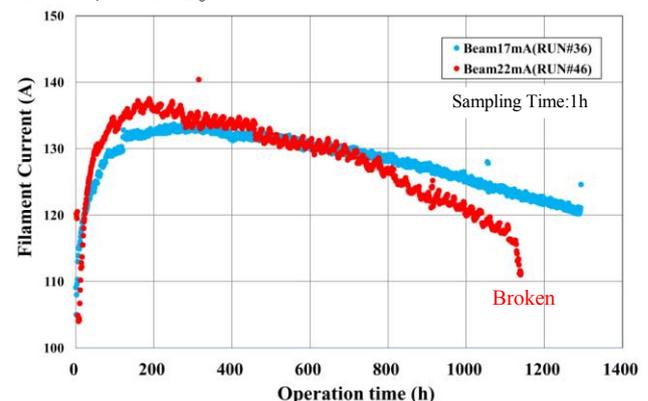


Figure 4: Trend of the filament current.

(red:1118h (broken), blue:1200h over(not broken) )

運転開始から約 200h までは共にフィラメント電流値が上昇している。これはフィラメント低温部表面にアーク放電時の高温時に放出されたホウ素が附着し徐々に覆われて<sup>[2]</sup>電子エミッション領域が減少するため、それを補い一定電流値を確保するための加熱電流の上昇である。その後、エミッション領域は固定され、その部分が損耗し細くなるためフィラメント電流は徐々に減少していく。17mA 運転時の減少率は、運転終了までほぼ一定(0.017A/h)であった。22mA 運転時は、傾き(減少率)は大きくなったものの約 1108h まで減少率はほぼ一定(0.02A/h)であったが、その後減少率は 0.6A/h に増大した。この変化をフィラメント断線の予兆と判断し、ビームユーザ等へ断線する可能性が大きいことを周知するとともに、フィラメント交換のための準備を開始した。予兆が現れて約 11 時間後の 2013 年 2 月 20 日 23:01 にフィラメントは断線しビーム利用運転は停止したが、事前にビームユーザに断線の可能性を伝えていたため、ビーム実験への影響は最小限にすることができた。断線直前のフィラメント電流、アーク電流・電圧及びビーム電流の変動を Figure 5 に示す。

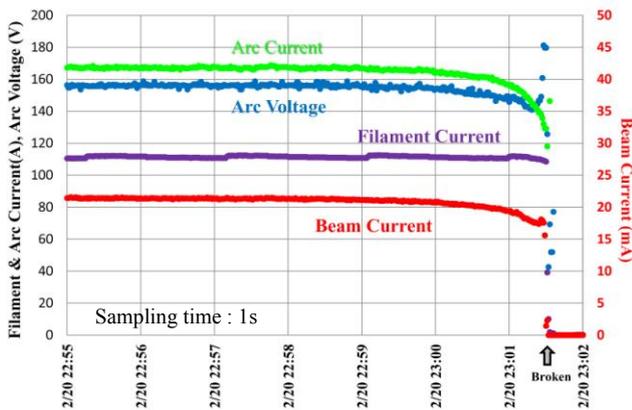


Figure 5: Detail of ion source parameters Just before broken.

フィラメント断線の 2 分前までは、ビーム電流を始め各パラメータは非常に安定していたことが分かる。その後、アーク電流とビーム電流はゆっくりと減少し始めてビーム電流が 17mA 付近で断線した。

### 5. フィラメント消耗と寿命予測

フィラメントの消耗状況を確認するため、RUN#39 以降、運転前と運転後のフィラメント重量測定を行っている。Figure3 からも分かるように、ビーム電流増加でフィラメント消耗率は増加する。ビーム電流はアーク電力に依存するため、アーク電力と運転時間に対するフィラメント消耗率(運転後重量/運転前重量)をプロットしたところ線形性が得られた。アーク電力×時間に対するフィラメント消耗率を Figure 6 に示す。

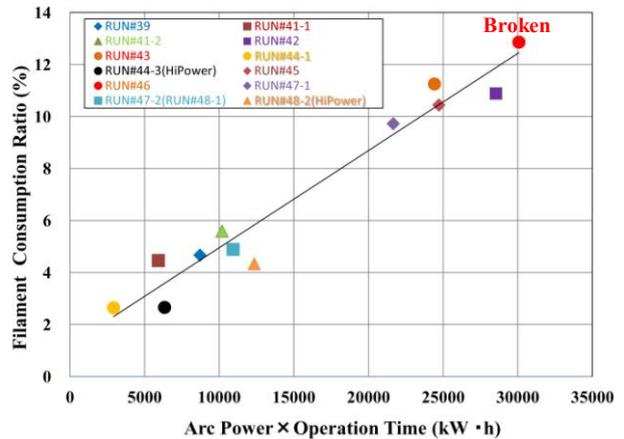


Figure 6: Relationship of filament consumption ratio and arc power(kW) × operation time (h).

RUN#46 で断線したフィラメントの消耗率は、運転前のフィラメント重量に対して 13%(運転前 36.5g、運転後 31.8g)であった。この時のアーク電力と時間の積 (Fig.6 横軸) は 30,000 であり、この数値を用いることでフィラメント寿命を予測することができる。例えば、RUN#36 の 17mA (アーク電力 20kW) 運転時のフィラメント寿命は、 $30000/20=1500h$  と推測できる。しかし、アーク電力以外のイオン源条件(残留ガスや磁場等)の違いで寿命が大きく変化する可能性もあるため、今後、様々なイオン源条件で消耗量のデータを取得して信頼性を高める必要がある。

### 6. 断線後のイオン源復旧作業

イオン源構成部品のユニット化や真空部品の事前ベーキングにより、イオン源メンテナンス時間を約 3 日間から 24h に短縮することに成功しているが、今回の断線は RUN 中であつたため、メンテナンス時間を更に短縮させてビーム提供を再開させなければならなかった。通常のメンテナンスは、フィラメント、プラズマ生成室及びプラズマ電極まで交換(フルメンテナンス)するが、今回は時間短縮のためフィラメントのみを交換することにした。

断線した時刻は 23:01 で、リニアック加速トンネルへの入域には、放射性物質を減衰させるのにビーム停止後 2 時間待たなければならない。このため、作業開始が深夜 1 時過ぎになってしまったが、事前に断線予測できていたため、深夜でも作業者の手配や交換準備も事前に整えられた。交換作業及びビーム調整も順調に進み、フィラメント断線から約 7.5 時間後にはビーム運転を再開することができた。フルメンテナンス時とフィラメントのみ交換時に要する時間の内訳を Figure 7 に示す。

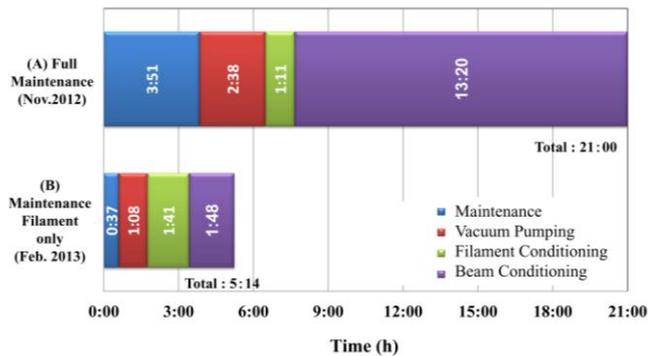


Figure 7: Maintenance time of the ion source.

(A): Ion source replacement,  
(B): Filament replacement only

メンテナンスで取り外したフィラメントの表面は、大部分がホウ素で覆われて黒く変色しており、その部分での消耗はほとんど見られなかった。LaB<sub>6</sub>本来の紫色の部分先端から2-3段目の一部分のみで、フィラメントの消耗も激しいことから、この部分で主にエミッションされていたと思われる。断線箇所は、先端から3段目の2重螺旋の戻り側（マイナス端）であった。マイナス端はフィラメント加熱電流に加えアーク電流も重畳されるため、プラス端より多くの電流が流れて高温になる。これによりマイナス端が集中的に消耗して、断線したと考えられる。RUN#46で断線したフィラメント写真をFigure 8に示す。

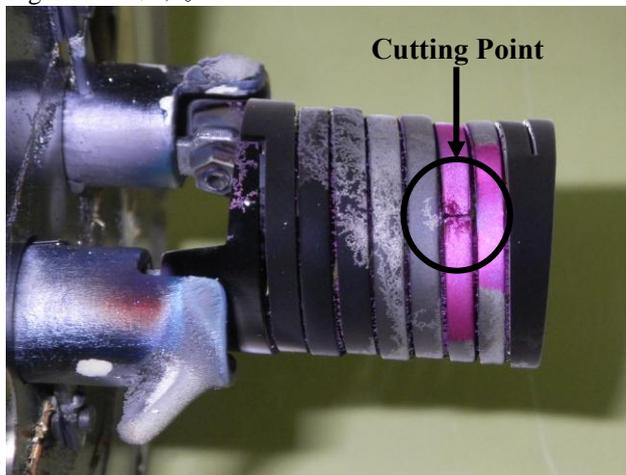


Figure 8: Photograph of the filament after operation.

## 7. 大強度用 RFQ テストスタンドの整備

J-PARCの大強度化のために2014年夏に大電流用RFQ加速器及び高周波(RF)イオン源<sup>[3]</sup>をJ-PARCにインストールする予定である。実機へのインストール前の性能試験を実施するため、リニアック棟クライストロン準備室にイオン源&RFQテストスタンドを整備し、4月よりイオン源調整運転を開始した。第一段階として、RFQの性能試験を優先的に行うため、イオン源はRFイオン源ではなく、実績のある

LaB<sub>6</sub>イオン源でスタートした。イオン源は実機同様の性能(ビーム電流 34mA)が得られた。今後、LaB<sub>6</sub>イオン源からRFイオン源に換装を行い、RFイオン源の性能試験及び耐久試験を実施する予定である。イオン源&RFQテストスタンドの設置状況の写真をFigure 9に示す。写真の右側にイオン源、左側にRFQ及びビーム診断系が設置されている。

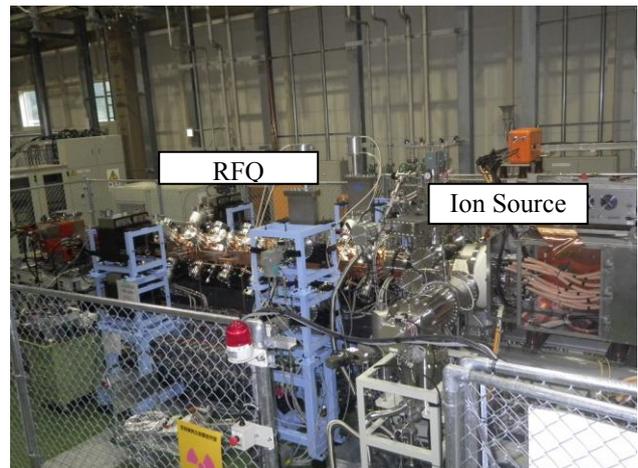


Figure 9: Photograph of the ion source and the RFQ test stand for J-PARC upgrade.

## 8. まとめ

これまでJ-PARCイオン源ではLaB<sub>6</sub>フィラメント断線に関するデータはほとんど無かったため、寿命を予測するのが困難であった。しかし、今回断線まで運転できたことで、断線前の予兆を確認できたことと断線時のフィラメント消耗量のデータを取得できたことは、今後のフィラメント寿命を予測するのに大変貴重なデータになった。また、フィラメント交換のみの臨時メンテナンスを実施し、ビーム停止から8時間以内にビーム利用運転を再開することも確認できた。今後、ビームユーザへの安定なビーム供給を行うために、これらのデータを有効に利用していく予定である。

## 参考文献

- [1] H.Oguri, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012
- [2] H.Oguri, et al., Rev. Sci. Instrum. 81 02A715(2010)
- [3] S.Yamazaki, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012