

Development of a Cs-seeded RF-driven H⁻ ion source for the J-PARC

Saishun Yamazaki^{1,A)}, Akira Ueno^{A)}, Yuya Namekawa^{B)}, Kiyonori Ohkoshi^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Akira Takagi^{A)},
Isao Koizumi^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}

^{A)} J-PARC Center

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195

^{B)} Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.,

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112

Abstract

A cesium (Cs) seeded RF-driven H⁻ ion source using an internal-antenna developed at the SNS (Spallation Neutron Source) is under development for the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). The requirements for the J-PARC second stage are an H⁻ ion beam of 60mA within normalized emittances of 1.5 π mm•mrad both horizontally and vertically, and a flat top beam duty factor of 1.25% (500 μ s×25Hz). The RF-driven H⁻ ion source was developed on the basis of a J-PARC ion source driven with a tungsten (W) filament. The axial magnetic field optimization by using an axial magnetic field compensation (AMFC) coil significantly enhances the H⁻ ion beam by typically 10%. An H⁻ ion beam with a flat top duty factor of 2.5% (1ms×25Hz) of 77mA, whose about 90% (corresponding to about 70mA) of emittance of each direction is within 1.5 π mm•mrad, is successfully extracted. During a demonstration operation over 100-hours, an H⁻ ion beam over 66mA was successfully produced with a relatively low RF power of about 40kW by seeding Cs for 4-minutes a day.

J-PARC 用セシウム添加高周波駆動負水素イオン源の開発状況

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)では、セシウム(Cs)不使用の六ホウ化ランタンフィラメント(LaB₆-fil.)を用いた負水素イオン源を稼働中である^[1]。LaB₆-fil.イオン源では、J-PARC 第1ステージの要求ビーム 30mA の生成は可能であるが、セシウム添加してもビームがほとんど増加せず、38mA が限界であった^[2]。J-PARC 第2ステージの目標であるビーム出力 1 MW を達成するためには、イオン源ビーム強度：60mA、ビームフラットトップパルス幅：500 μ s、繰り返し：25Hz が必要であり、かつ、LaB₆-fil.イオン源と同等のイオン源寿命(50日程度)が要求される。J-PARC でテストを行ったタングステンフィラメント(W-fil.)を用いた負水素イオン源では、セシウム添加により要求ビーム強度は十分満たす性能を得たが、フィラメント寿命が、3週間程度が限界で不十分であった^[3]。一方、米国のSNS(Spallation Neutron Source)では、内部アンテナを使用した高周波駆動負水素イオン源が稼働しており、ビーム強度：約 40mA、ビームフラットトップパルス幅：1ms、繰り返し：60Hz で 27日間連続運転を行っている^[4]。SNS イオン源は、ビーム強度は J-PARC 第2ステージ要求性能を満たしていないが、繰り返しの違いを換算したイオン源寿命が 65日と見込め要求性能を満たしている。そこで、J-PARC 用 W-fil.イオン源に内部アンテナを設置した高周波

駆動負水素イオン源の開発を行った。本論文では、J-PARC 高周波駆動負水素イオン源の構成と、これまでに得られた実験結果について報告する。

2.J-PARC 高周波駆動負水素イオン源の構成

J-PARC 高周波駆動負水素イオン源は、J-PARC 用 W-fil.イオン源試験機^[3]を基本に、プラズマ生成室にロードフィルターと、SNS イオン源で使用されている内部アンテナを設置したものである。本イオン源の断面図を図 1. に示す。プラズマ生成室は、内径 120mm、内長 127.5mm の内面ニッケルメッキを施した無酸素銅製である。プラズマ電極(PE)に温度制御用銅製冷却板を設け、ここに流す圧縮空気の流量調整により PE 温度 50~120°C の任意値に制御する。運転中の PE 温度は、PE 表面に設置した熱電対で測定している。セシウムは天板に設置したセシウムオープンによりプラズマ生成室内に添加する。セシウムオープンは、セシウムを蓄えるリザーバー、セシウム添加停止およびメンテナンス時のリザーバー真空保持のためのバルブ、およびセシウム導入口を備えたチューブから構成される。それぞれの部分にマントルヒーターと熱電対を取り付け、それぞれ個別に温度設定を行っている。試験時は、バルブとチューブ温度はセシウム固着防止のため 320°C、リザーバーの温度は 240°C とし、バルブ開放時間によりセシウム添加量を制御する。W-fil.イオン源では、

¹ yamazaki.saishun@jaea.go.jp

タングステンの PE への蒸着によるセシウム効果の減少に対抗するためにチューブに PE 近くまでの延長パイプが設置されているが、高周波駆動イオン源では、延長パイプは設置されていない。尚、W-fil.イオン源では、吹き付けセシウム量が多い為、PE 孔からのセシウムの漏れも多く、長時間の運転による引き出し、および加速ギャップでかなりの頻度(1 回以上/1 時間)の放電発生が観測された。

LaB₆-fil.イオン源で観測されたビーム軸磁場補正によるビーム強度増加効果の試験を行う為、軸磁場補正コイル(以降、AMFC-コイル:Axial Magnetic Field Compensation – coil と呼ぶ)を、アンテナの位置に設置している。

ビーム引出系は、プラズマ電極、引出電極および接地電極の 3 枚の電極で構成され、プラズマ電極と引出電極間には約 10kV (引出電圧)、引出電極と接地電極間には約 40kV (加速電圧) の電圧をそれぞれ印加して 50keV のビームを引き出している。引出電極内には、電子抑制永久磁石が設置されており、引き出された電子をここで除去している。電子抑制磁場およびロッドフィルター磁場により、負水素イオンビームは傾いて出射されるが、その出射角は、接地電極直後に設置されている出射角補正電磁石で補正される。図 2. に示されるとおり、イオン源から引き出された負水素イオンビームは、1 台の LEBT-ソレノイド電磁石で収束し、ビーム強度やエミッタンス等のビーム性能を測定している。

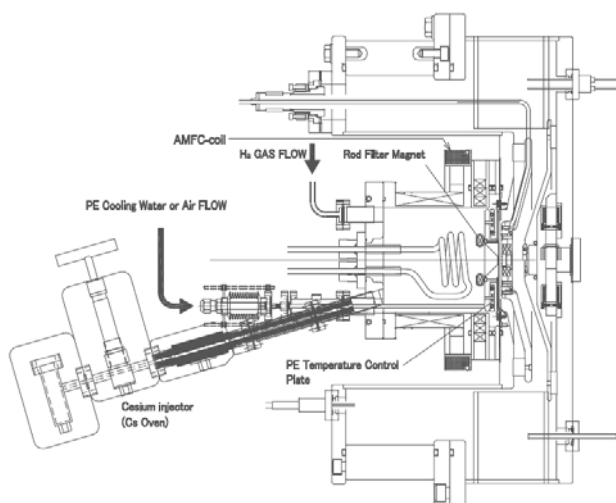


図 1. J-PARC 高周波駆動負水素イオン源断面図

3. 実験結果

3.1 セシウム添加方法

リザーバー設定温度(Tr)を W-fil.イオン源でセシウム効果が観測された 190°C 程度にして、セシウム効果測定を開始したが、セシウム効果は観測されなかった。リザーバー温度を変化させた結果、Tr=240°C では、比較的短いバルブ開放時間(運転開

始当初 30 分程度、総添加時間 200 分を超えると 4 分程度)でセシウム効果が再現性良く観測可能なことが判明した。なお、W-fil.イオン源と比較してリザーバー温度を高温にしなければならない直接原因は延長パイプの省略であるが、セシウム添加方法を変化させた以下の測定結果からロッドフィルター磁場による Cs⁺イオンの閉じ込めが副因となっていると理解される。

- ① プラズマ停止状態でのセシウムバルブ開放では、添加時間が数分でも引き出し加速ギャップでの放電が生じた。その後のビーム引き出し時のセシウム効果はあったが、放電は継続した(数回/1 時間)。
- ② プラズマ点灯状態でのセシウムバルブ開放では、総添加時間が 200 分を超えても放電頻度は低かった(1 回以下/1 日)。

上記二つの添加方法を比べると、①に比べて②の添加方法の方がビームを安定して引き出せる状態になるまでのセシウムの総消費量は増加する。しかしながら、J-PARC 高周波イオン源では、放電のリスクを軽減し、かつ、高ビーム強度を達成するセシウム添加方法として、②の添加方式を採用することにした。

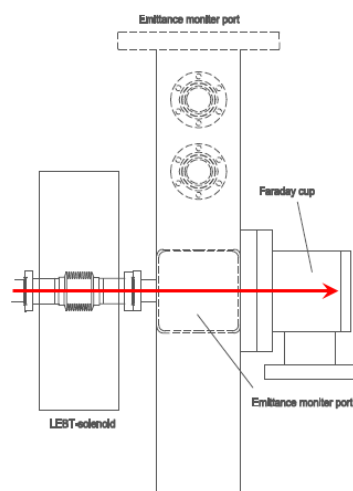


図 2. LEBT-ソレノイドおよびビーム測定系図

3.2 ビーム軸磁場補正効果

LaB₆-fil.イオン源ではビーム軸磁場補正により、ソレノイド磁場のキャンセルによるビーム強度増加効果が観測された。また、東北大学の安藤らが開発を行っているアンテナ式高周波駆動イオン源では、ビーム軸磁場強度を増加させることにより、プラズマ密度の増加とそれに伴うビーム強度の増加が報告されている^[5, 6]。本実験においても AMFC-コイルによる軸磁場補正のビーム強度に対する影響を調べた。

AMFC-コイル使用時のビーム強度変化を図 3. に示す。LEBT-ソレノイド電流は 400A(59040AT)とした。AMFC-コイル電流の正値は、LEBT-ソレノイド

磁場と重畳する方向に磁場が加えられていることを示している。図 3. が示すように、軸磁場の変化がビーム強度に影響を与えており、LEBT-ソレノイド磁場と重畳する側で 880AT 時にビーム強度が最大となり、77mA を達成した。

AMFC-コイルの効果を実量的に評価するために、計算コード Poisson^[7]を用いて軸方向の磁場を計算した。AMFC-コイル電流を変化させた場合の磁場強度計算結果を図 4. に示す。図中横軸において、アンテナは-5cm 付近、PE 表面は 0cm に位置している。AMFC-コイルを用いることで、軸磁場強度が増加していることが分かる。また、AMFC-コイル無しでもプラズマ生成室内に磁場強度があることから、LEBT-ソレノイドが作る磁場が生成室内にまで影響していることが分かった。

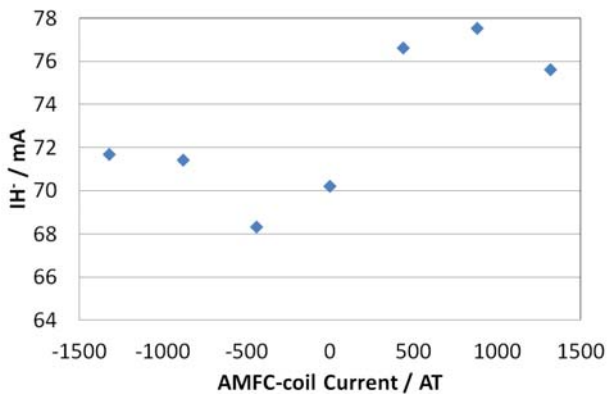


図 3. 軸磁場補正によるビーム強度変化

LaB₆-fil.イオン源で観測されたビーム軸磁場補正によるビーム強度増加効果は、ソレノイド磁場と逆方向に軸磁場補正を加えた時に生じた。これは、ビーム強度増加効果が現れる軸磁場の補正方向が、本イオン源とは逆となっていることになる。高周波イオン源はロッドフィルター磁石を設置しており、ロッドフィルター磁石の無い LaB₆-fil.イオン源とはビーム軸における磁場の違いから、引き出し条件が異なっているためと考えられる。

安藤らによるアンテナ式高周波駆動イオン源の実験では^[5, 6]、軸磁場強度が J-PARC テスト機より高い 160G までの試験が行われており、軸磁場強度が高いほどプラズマ密度が高くなっている。J-PARC では、図 3. に示したように、AMFC-コイル電流 880AT(AMFC-コイル中心で約 50G)の時に軸磁場補正効果が最大となり、その後補正効果は減少した。安藤らによるアンテナ式高周波駆動イオン源では、磁場補正コイルはアンテナより手前と奥の二か所(高温プラズマ領域)に設置してある。一方で J-PARC 高周波イオン源では、アンテナ上に設置してある。これはロッドフィルター磁石から PE までにある低温プラズマ領域の軸磁場増加を行うことで、低温プラズマ密度の増加を期待し、磁場補正を加えているためである。本実験において、軸磁場補正の効果に最適値があるのは、ロッドフィルター磁石付近の軸磁場が安藤らの実験とは異なり、その結果、

プラズマ密度の状態や引き出し条件が異なるためと考えている。

ビーム強度 77mA 時の、ビーム電流、引出電流、RF 進行波及び RF 反射波を図 5. に示す。本測定では 1.0msec パルス幅でビームを引き出している。ビーム電流波形を見るとパルス立ち上がりから、0.4μsec 程度までは、電流値が変動しているが、それ以降は安定していることが分かる。また、パルス内ビーム電流変動は 8%程度である。

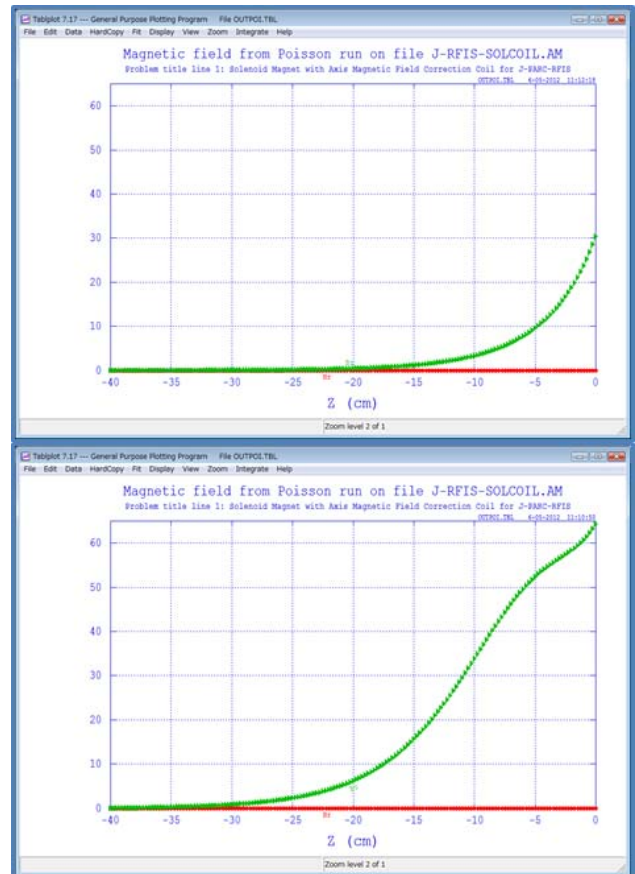


図 4. Poisson による磁場計算の結果 (上;AMFC-coil:0AT、下;AMFC-coil:880AT。 AMFC-コイルは-5cm、PE は 0cm に位置している。)

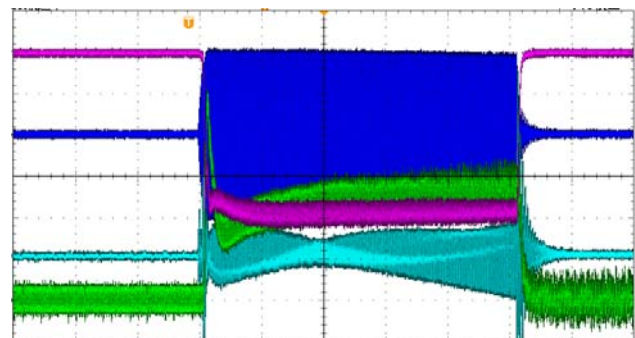


図 5. ビーム強度約 77 mA 時の、ビーム電流(赤線:20mA/Div.)、引出電流(緑線:50mA/Div.)、RF 進行波(青線:100mV/Div.)、RF 反射波(水色線:20mV/Div.) 横軸は 0.2ms/Div

3.3 エミッタンス

AMFC-コイル電流 880AT、LEBT-ソレノイド電流 400A 時(図 3. 中にてビーム強度が最大になる条件)のエミッタンス測定結果を図 6. に示す。規格化 RMS エミッタンスの値は、水平方向及び垂直方向でそれぞれ 0.45、 $0.44\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ であり、規格化 RMS エミッタンスの値としては W-fil.イオン源におけるビーム強度 76mA 引出時より大きな値となった^[3]。これは、RF 電磁場によるビームの位置変動が一因であると考えている。AMFC-コイルによる磁場補正の結果からは、コイル電流の変化はエミッタンス変化に大きな影響を与えていないことを確認している。

J-PARC で使用している RFQ のアクセプタンス設計値 $1.5\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 内のビームフラクションは、水平方向および垂直方向でそれぞれ 89.8% および 90.4% であり、その結果水平方向、および垂直方向の $1.5\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 内のビーム強度はそれぞれ、69.6mA および 70.1mA であった。したがって、RFQ でのビーム透過率 90% を満たすビームとして約 70mA のビームを供給できることになる。

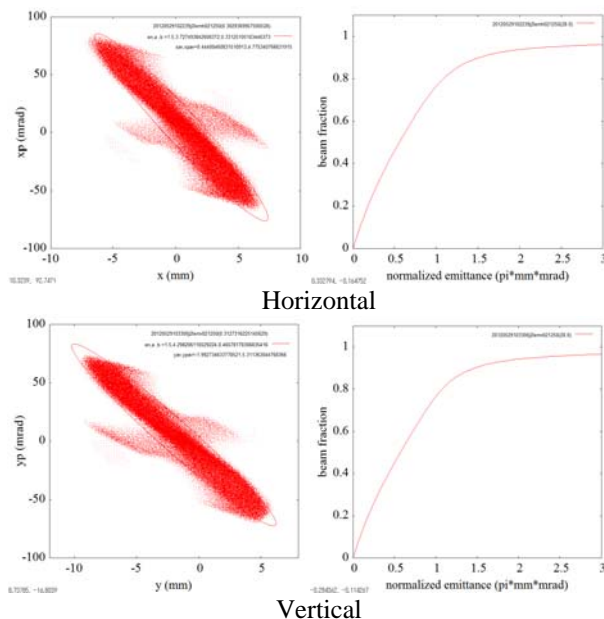


図 6. エミッタンス測定結果 (電子抑制磁場と水平および垂直方向)

3.4 100 時間連続運転

1 日数時間の断続的な運転試験を数日間行い、セシウム効果が再現性良く観測可能なことを確認した後に、長時間 (約 100 時間) 連続運転を行った。なお、試験開始前にビーム性能の確認等を行うために、10~35 分のセシウム添加を数回行い、合計で約 200 分間添加を行った。長時間連続運転時のビーム強度 (IH) および引出電流 (Iext) の時間変化を図 7. に示す。この時の AMFC-コイル電流は今までと同様に

880AT、LEBT-ソレノイド電流は 400A とした。5 日間の連続運転において毎朝、計 5 回セシウムを追添加した。1 回目のセシウム添加時間は 16 分間、2 回目の添加時間は 6 分、その後は各回 4 分間である。図 7. をみると、セシウム添加 1 回目後のビーム強度の時間変化が 2 回目以降の添加時と異なる結果となった。これは、実験開始日前の 2 日間は運転を行っていなかったため実験開始日初日の PE 表面のセシウムが酸化し、連続運転中に PE 表面の酸化セシウムが剥がれたため、ビーム強度が低下せずほぼ一定となったと考えられる。2 回目以降では、セシウム追添加によりビーム強度は約 70mA まで回復するとともに、ビーム強度の減少速度はほぼ同じであった。2 回目以降のデータにおいて、セシウム添加後の約 1 時間経過時からのビーム強度の減少速度は、約 0.1mA/h であった。引出電流については、2 回目追添加以降のデータにおいて、セシウム添加直度に約 90mA まで低下し、その後は運転時間の経過に従って電流が増加した。追添加 4 回目において、ビーム強度 66.4mA 時 (4 回目添加時より約 29 時間後) にエミッタンスを測定したところ、 $1.5\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 内のビームフラクションは水平方向、および垂直方向でそれぞれ 92.7% および 92.6% であり、その結果水平方向、および垂直方向の $1.5\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 内のビーム強度はそれぞれ、61.5mA および 61.4mA であった。

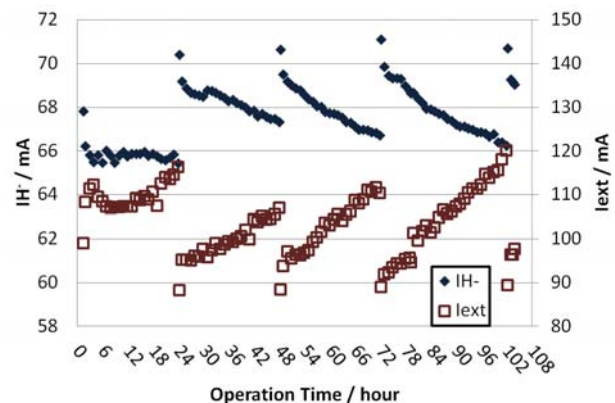


図 7. 長時間(約 100 時間)連続運転時のビーム強度および引出電流の時間変化

長時間連続運転試験の結果から、1 日 4 分間の添加でビーム強度の減少が許容範囲内に収まることを考えると、50 日連続運転する場合、長時間連続運転試験前に添加した時間約 200 分も加味して、積算で約 400 分間の添加が必要と考えられる。今回の実験条件であるリザーバー温度 240°C 時のセシウム消費量のデータは未だ無いが、同一のセシウムオープンを使用した J-PARC イオン源テストスタンド実験の結果から推測できる。テストスタンドでは、セシウム充填したリザーバーを 173°C の温度で使用した場合、271 時間で 2.2g 消費した。セシウムの 173°C と 240°C における蒸気圧は、それぞれ $2.2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ お

よび $3 \times 10^{-1} \text{Pa}$ であることから、リザーバー温度 240°C で 50 日の運転に必要なセシウム量は約 0.74g と見積もることができる。なお、長時間連続運転試験中の引出または加速ギャップでの放電発生頻度は、1 回以下/1 日であった。

ビーム強度と 2MHz-RF 出力の関係を図 8. に示す。図から分かるように、ビーム強度は 2MHz-RF 出力に大きく依存している。長時間連続運転中は RF 出力によるビーム強度調整は一度も行っておらず、RF 出力調整により現状のビーム強度減少率 (0.1mA/h) を低減できると考えている。

イオン源構成機器への RF ノイズの影響を考慮し、イオン源プラズマ生成室の外側を金属製のシールドで覆った。これにより長時間連続運転試験中、イオン源の側に付設された真空計や PE 温度計は RF ノイズの影響を受けることなく動作した。

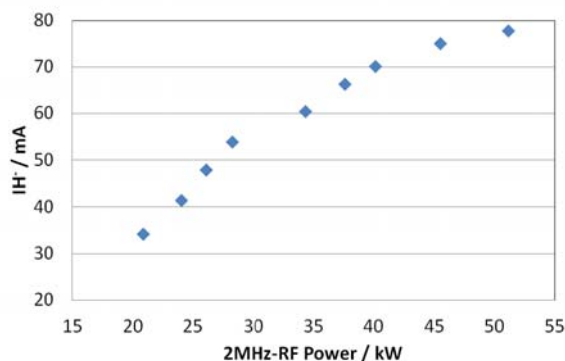


図 8. 2MHz-RF 出力を変化させた時のビーム強度変化

4. まとめ

J-PARC でテスト中の高周波駆動負水素イオン源に、AMFC-コイルによる軸磁場補正手法を用いた結果、ビーム電流 77mA 、さらに $1.5\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 内エミッタンスにおいて約 90% のビームフラクションを得た。基本ビーム性能としては J-PARC 第 2 ステージの要求値を十分満たす結果である。

プラズマ点灯状態でセシウム添加する方法を採用して長時間連続運転実験を行った結果、1 日一度セシウム追添加によりビーム強度の減少速度は約 0.1mA/h であり、また引出または加速ギャップでの放電発生頻度は、1 回以下/1 日であった。実用運転規模の連続運転試験は未実施であるが、長時間連続運転に関して大きな問題は無いと考えている。

今後は、セシウム添加量低減のための添加条件の最適化や、2MHz-RF 出力のフィードバック制御及びセシウム添加の自動化によるビーム強度の安定化を行い、ビーム強度の減少率低下を目指す。

参考文献

- [1] H. Oguri, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 010401 (2009).
- [2] H. Oguri, et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 02A715 (2010).
- [3] A. Ueno, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 02A720 (2010).
- [4] M. P. Stockli, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 02A729 (2010).
- [5] A. Ando, et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 02B107 (2010).
- [6] A. Ando, private communication.
- [7] Reference Manual for the Poisson/Superfish Group of Code