

# J-PARC用セシウム添加型負水素イオン源の開発

小栗 英知<sup>1</sup>、滑川 裕矢

日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

## 概要

原研では大強度陽子加速器計画（J-PARC）に使用するセシウム添加型負水素イオン源の設計・製作を行い、これまでビーム試験を進めてきた。その結果、セシウム添加状態において負イオンビーム電流72mA、規格化RMSエミッタンス $0.15\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下の負イオンビーム引き出しに成功し、本計画のイオン源ビーム要求仕様を達成した。また、フィラメントの長寿命化試験を行い、現在、アークパワー30kW、デューティー3%の条件で258時間のアーク放電連続運転に成功している。

## 1. はじめに

原研とKEKが共同で進めている大強度陽子加速器計画（J-PARC）では、陽子ビームをターゲットに照射し、核破砕反応によって発生する二次粒子を用いて多様な分野の研究を展開するため、既存の加速器を大幅に上回るビームパワー1MWという性能を目指している。これに必要なビームを生成するイオン源には、ビーム電流60mA、デューティーファクター2.5%、規格化RMSエミッタンス $0.20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下の負水素イオン引き出しが要求されている。世界で稼働中の加速器用負イオン源で、これらの性能を全て満足するイオン源は現存しない[1]。そのため原研では、核融合炉で使用する大型負イオン源開発で培われた技術をベースにして大強度加速器用負イオン源の開発を行った。

## 2. 負イオン源

今回開発を行った体積生成型負イオン源の構造図を図1に示す。プラズマ生成室の形状は、直径150mm、長さ200mmの円柱型で、側壁および上蓋には永久磁石を設置して、ソースプラズマ閉じ込め用のマルチカスプ磁場と体積生成方式に必要なフィルター磁場を生成している[2]。ソースプラズマは、直径1.5mmのヘアピン型タングステンフィラメントを使用してアーク放電にて生成している。セシウムは、プラズマ生成室側面に専用のオープンを設置して生成室内に導入している。

ビーム引き出し系は、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ている[3]。プラズマ電極のビーム引き出し孔口径は8mmφである。ギャップ長は、プラズマ電極 - 引出電極間が2.2mm、引出電極 - 接地電極間が8.4mmである。引出電極には永久磁石が組み込まれ、負イオンと同時に引き出

される電子は、この永久磁石がつくる磁場によって軌道が曲げられ（Y方向）、引出電極に衝突して除去される。水素ガスがイオン源出口に大量に存在すると、ビームは残留ガスと衝突し中性化損失を引き起こす。そのため、ビーム引き出し系に差動真空排気系を設置し、ビームが通過するラインとは別のラインから残留ガスを排気することで中性化損失の低減を図り、その結果、負イオンビーム電流が1.5倍増加することを確認した。

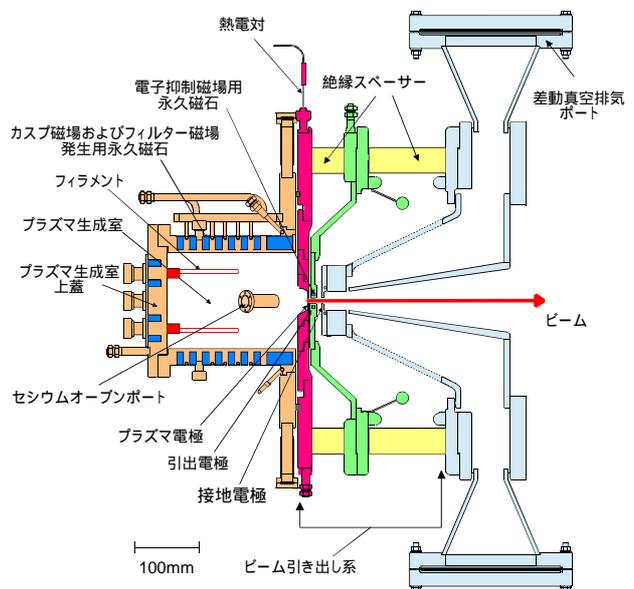


図1: 負水素イオン源の構造図

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 負イオンビーム引き出し試験

体積生成型負イオン源では、通常、プラズマ生成室に磁気フィルターと呼ばれるシート状の横磁場を設けて、生成室を高温電子領域と低温電子領域（＝負イオン生成領域）に2分化する。負イオン生成効率を上げるには、それぞれの領域で電子エネルギー分布を最適化する必要がある。今回製作したイオン源は、プラズマ生成室をビーム加速部の外部に設置し、磁気フィルターの強度および形状の調整自由度を大きくした。これにより、磁気フィルターの詳細なパラメータサーベイ実験が容易に実施でき、より

<sup>1</sup> E-mail: oguri@linac.tokai.jaeri.go.jp

高い負イオン生成効率の実現が可能となる。負イオンビーム電流の磁気フィルター強度依存性の測定結果を図2に示す。図2の横軸は磁気フィルター強度を示し、プラズマ電極表面からフィラメントの先端までの距離とその間で発生している磁束密度の積で与えられる。負イオンビーム電流は磁気フィルター強度とともに増加し、400Gauss・cm付近で最大となり、それ以上では減少する。これは、フィルター強度が弱いときは電子温度の2分化が不十分で、高温電子が負イオン生成領域に侵入して負イオンが破壊するためにビーム電流が低くなると考えられる。また、フィルター強度が強いときは、高温電子の運動が制限され生成室内に広く分布することが出来なくなるのでプラズマ生成効率が下がり、負水素イオンの素となる励起水素分子や水素原子の生成量が減少するためビーム電流が低くなると考えられる。

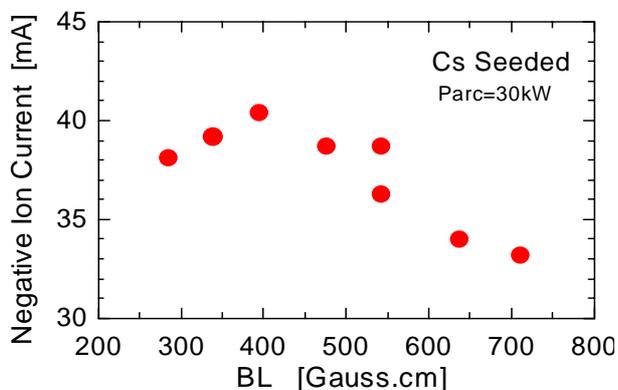


図2：ビーム電流の磁気フィルター強度依存性

負イオン電流のアークパワー依存性を図3に示す。図中の2種類のデータは、セシウム添加状態（Cs Seeded）およびセシウム未添加状態（Pure Volume）の測定結果である。ビーム電流はセシウム未添加状態ではアークパワーに対して飽和傾向にあるが、セシウム添加により飛躍的に増加し、アークパワー56kWにて本計画の目標値60mAを超える72mAのビーム電流に達した。プラズマ電極のビーム引き出し孔の口径は8mmφであるから、72mAを電流密度に換算すると144mA/cm<sup>2</sup>となる。

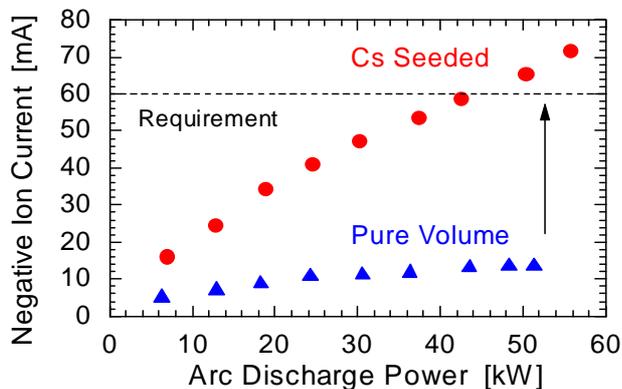


図3：セシウム添加時および未添加時のビーム電流のアークパワー依存性

X方向およびY方向のエミッタンス測定結果を図4に示す。測定条件は、ビームエネルギー70keV、ビーム電流60mAである。得られたデータを楕円近似して実効的な規格化RMSエミッタンスの大きさを計算すると、X方向、Y方向はそれぞれ0.13、0.15πmm・mradとなり、目標値である0.20πmm・mradを十分満足する結果が得られた。Y方向のエミッタンスがX方向よりも大きいのは、Y方向は負イオンビームが引出電極の電子抑制磁場の影響を受け、除去される電子と同じ方向にビームがわずかに偏向を受けるためだと考えられる。

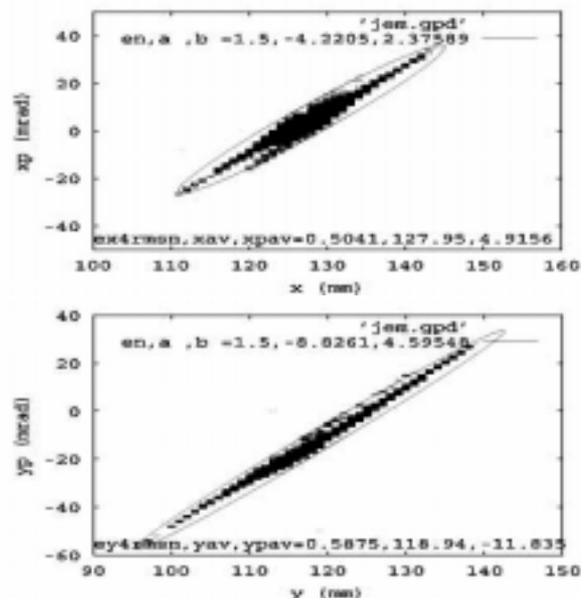


図4：エミッタンス測定結果（70keV & 60mA）  
（上図がX方向、下図がY方向）

### 3.2 フィラメント寿命試験

J-PARC用イオン源のメンテナンス頻度500時間を達成するために、イオン源の連続運転時間を制限する主要因になると考えられるフィラメントの長寿命化試験を実施した。フィラメント2本または3本使用し、それぞれアークパワー30kW、デューティー3%で連続運転を行った。その結果、2本使用時の寿命は63時間だったのに対し、3本使用時は258時間に達した。ここで述べる寿命とは、フィラメント通電開始から使用フィラメントのうちどれか1本が断線したときまでの時間である。258時間運転後のフィラメントについて、各ポイントの太さをマイクロメータで測定し、消耗状態を調べた。その結果を図5に示す。グラフの横軸はフィラメント径の測定点を示し、ヘアピンの中央（頂点）を原点とし、フィラメント電源の負端子側と接続した方をマイナス、正端子側の方をプラスとしている。断線したのは#3フィラメントで、断線場所は-50mm付近である。図5が示すとおり、フィラメントは負端子側の消耗が著し

いことが分かる。アーク放電中のフィラメント電流を測定すると、正端子側はアーク電流がフィラメント加熱電流を打ち消す方向に流れるのに対し、負端子側はフィラメント加熱電流に重畳する方向に流れることが分かり、このため負端子側のフィラメント温度が正端子側より上昇し、断線に至ると考えられる。よって負端子側のアーク電流の流れ込みを低減できれば、フィラメントの長寿命化が期待できる。

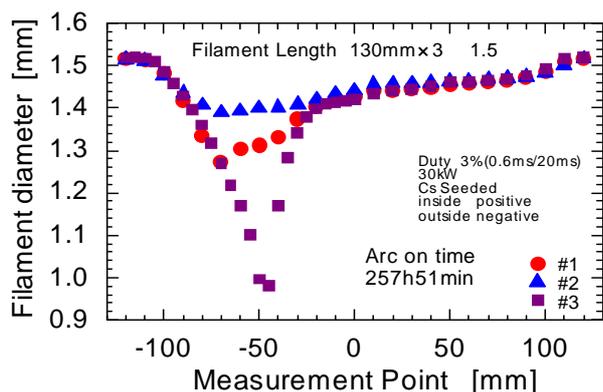


図5：典型的なフィラメントの消耗状態

フィラメントの正端子側と負端子側に流れ込むアーク電流の大きさ割合は、フィラメント電源とアーク電源の接続点から、フィラメントのそれぞれの端子までの電気抵抗の大きさで決まる。これまではフィラメント電源の電流容量を下げるためにフィラメント電源の負端子側をアーク電源に接続していたが（N接続と呼ぶ）、この場合フィラメントの正端子側のアーク電流経路が、フィラメント電源およびこれの正負ケーブルの大部分に及ぶため、負端子側より抵抗値が大きくなり、その結果、負端子側のアーク電流量が大きくなる。そこで今回、フィラメント電源の正端子側をアーク電源に接続して（P接続）フィラメント寿命への影響を調べた。フィラメント3本、アークパワー50kWのときの負端子側のフィラメント1本当たりの電流を測定すると、N接続では181Aであったのに対し、P接続では151Aとなり30A低い値を示した。フィラメント3本を使用し、アークパワー45kW、デューティーを定格の2倍以上に相当する6%の条件で連続運転したところ、N接続では寿命が46時間であったのに対し、P接続では83時間となり寿命が約1.8倍向上した。先ほどの258時間達成したときはN接続なので、P接続を行えば寿命は464時間に達すると期待できる。

正端子側について小電流でも負端子側と同等の熱電子放出を得られれば、負端子側の負担が減りフィラメントの寿命が向上すると考えられる。フィラメントの抵抗値が大きくなれば発熱量が増加するので、フィラメントの正端子側の断面積を負端子側より小さくした異断面形状フィラメントを製作して寿命評価を行った。アークパワー30kW、デューティー3%、フィラメント2本、N接続の条件で連続運転を行ったところ、正端子側1.4mm、負端子側1.5mmのフィラメントで寿命が119時間に達した。両側とも1.5mmのフィラメントを同条件で運転したときは63時間であったので、寿命は約1.9倍向上したことになる。よってこの異断面形状フィラメントを使用すれば、予想寿命464時間がさらに882時間程度まで伸びることが期待される。負端子側をテーパ状に太くしたフィラメントは、原研のJT-60用正イオン源で実際に使用されている[4]。

ラメントで寿命が119時間に達した。両側とも1.5mmのフィラメントを同条件で運転したときは63時間であったので、寿命は約1.9倍向上したことになる。よってこの異断面形状フィラメントを使用すれば、予想寿命464時間がさらに882時間程度まで伸びることが期待される。負端子側をテーパ状に太くしたフィラメントは、原研のJT-60用正イオン源で実際に使用されている[4]。

## 4. まとめ

今回開発したセシウム添加型負水素イオン源の現状性能と、計画の要求性能を表1にまとめる。ビーム電流、デューティーファクターおよびエミッタンスなどビームの基本性能については、今回の開発で計画の要求性能を達成したことになる。フィラメント寿命については、現状の達成時間は258時間であるが、電源の接続方法やフィラメントの断面形状の工夫により、800時間程度まで寿命が伸ばせる見込みを得た。現在、1台のフィラメント加熱電源に複数本のフィラメントを接続して加熱しているが、この場合、図5に示すとおり、フィラメントによって消耗速度が異なるため、全てのフィラメントを有効に使用することができない。そこでフィラメントごとに加熱電源を用意し、全てのフィラメント電流が常に等しくなるように加熱電流を制御すれば、使用フィラメント全て均等に消耗させることができ、フィラメント寿命がさらに向上すると考えられる。

表1：イオン源の現状性能と要求性能の比較

	Present status	Requirement
Beam Current	72mA	60mA
Beam Energy	50 - 70keV	50keV
Duty Factor	5.0 % (max)	2.5 % (max)
RMS Emittance	0.13 (X), 0.15 (Y) πmm.mrad	~ 0.20 πmm.mrad
Maintenance Frequency	258hours @Parc=30kW, Duty=3% (Fil. Lifetime)	> 500hours

## 参考文献

- [1] R. F. Welton, "Overview of High-Brightness H<sup>-</sup> Ion Sources", Proc. 2002 Linear Accelerator Conference, Gyeongju (2002)
- [2] H. Oguri, et al., "Development of a H<sup>-</sup> ion source for the high intensity proton linac at JAERI, Rev. Sci. Instrum., Vol. 71, No. 2, p975 (2000)
- [3] H. Oguri, et al., "Development of an H<sup>-</sup> Ion Source for the High Intensity Proton Linac, Rev. Sci. Instrum., Vol. 73, No. 2, p1021 (2002)
- [4] S. Tanaka, et al., "Tapered tungsten filament for a long life cathode", Rev. Sci. Instrum. 55 (1984) 1625