

CESIUM SEEDING EXPERIMENT FOR J-PARC H⁻ ION SOURCE

Yuya Namekawa¹, Akira Ueno, Kiyonori Ohkoshi, Hidetomo Oguri, Kiyoshi Ikegami
 J-PARC Center
 Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195

Abstract

The J-PARC H⁻ ion source succeeds in producing a beam current of 38mA without seeding Cesium (Cs). It satisfies the requirement of the J-PARC first stage in which a beam power of 0.6MW will be produced. However a beam current of more than 60mA is necessary for the J-PARC second stage in which a beam power of 1MW will be produced. Therefore, two R&D(research and development)'s are being carried out in order to increase the beam current. One is without seeding Cs and the other is with seeding Cs. In the latter R&D, preliminarily a beam current of 70mA is produced with a tungsten (W)-filament and an arc-power of 15kW. The low arc-power will be helpful for both of increasing the life-time of the filament and reducing the Cs consumption rate. The lower Cs consumption rate is necessary for the stabler operation against sparking in high voltage gaps. The practicability of the ion source with seeding Cs is examined by optimizing the filament material and shape, the Cs seeding system including the temperature control of each part of plasma chamber and the plasma confinement magnetic field.

J-PARC用負水素イオン源のセシウム添加実験

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) センタでは大強度陽子加速器^[1]の供用運転が行われている。現在、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)から取り出されるビーム出力の最大設計値は、0.6MWであるが、近い将来、当初の設計計画通り1 MWまで増強する必要がある。ビーム出力1 MWの供用運転時に求められるイオン源のビーム強度とパルス幅は、60mA以上と500 μsである。

現在のイオン源運転は、六ホウ化ランタンフィラメント(LaB₆-fil.)を使用し、セシウム(Cs)不使用で行い、3週間の運転サイクルでの連続かつ安定なビーム供給を実現している。しかし、最大ビーム強度は38mA^[2]で、将来の要求を満たしていない。

そこで我々は供用運転中の実機と同構造のイオン源にCsを添加し、特性を調べた。本論文では、フィラメントの種類や形状、プラズマ生成室内各部の温度制御を含めたCs添加方法及び得られたビーム性能等の結果について報告する。

2. 機器の構成と実験方法

LaB₆-fil.設置負水素イオン源試験機の断面図を図1に示す。このイオン源は実機とほぼ同じ構造であるが、試験の自由度を高める為、プラズマ生成室を直径100mmから120mmへ、深さ132mmから142mmへ各々拡大している。更に、Csを導入する為のCsオープンとモリブデン(Mo)製プラズマ電極(PE)にネジ止めする方式でPE温度制御用銅製冷却板が追加されている。Csオープンとは、Csを蓄えるリザーバ、Cs添加停止及びメンテ時のCs真空保持の為のバルブ、

チューブから構成される。各々個別のマントルヒータで加熱する事で各部の温度制御を可能にしている。通常、バルブとチューブはCs付着防止の為十分高温の300℃に制御され、リザーバの制御温度によりCsの添加量を制御する。PE温度制御用銅製冷却板にはニッケルメッキを施したステンレスパイプがロー付けされており、このパイプに流す圧縮空気の流量制御によりPE温度を80 ~ 300℃の任意値に制御可能である。電流導入端子に取り付けるMo製部品の変更により、図3のタングステンフィラメント(W-fil.)を用いた実験を行う。

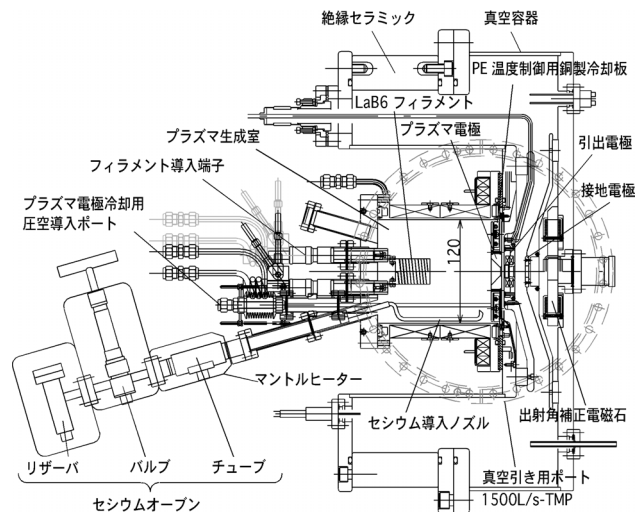


図1 負水素イオン源断面図 (LaB₆-fil.設置)

¹ yuya.namekawa@j-parc.jp

3. 実験結果

3.1 フィラメント材質によるビーム強度の違い

LaB₆-fil.使用時のCs非添加・添加でのアーク電力とビーム電流の関係、W-fil.使用時のCs非添加・添加でのアーク電力とビーム強度の関係を図2に示す。

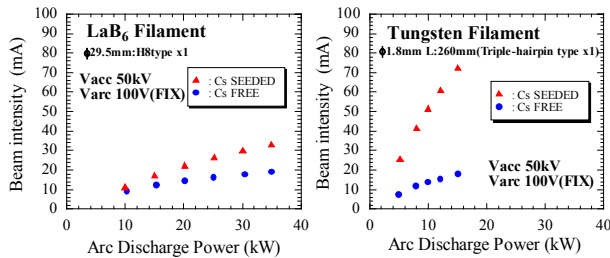


図2 LaB₆-fil.使用時とW-fil.使用時のCs非添加・添加でのアーク電力とビーム強度の関係

エミッタンス等の測定が十分可能な寿命を達成する為、W-fil.ではアーク電流の最大値を150Aに制限した。いずれの実験も、アーク電圧100Vで行った。Cs非添加条件では、LaB₆-fil.とW-fil.でビーム強度に大きな差は観測されなかった。W-fil.では、Cs添加により3倍以上のビーム強度増大が観測され、PE温度の最適値も250 程度と測定された。一方、LaB₆-fil.では、Cs添加によるビーム強度増大は2倍程度に留まり、PE温度の最適値も150 程度と低い値であった。但し、このデータは、PE冷却板設置前のもので、PE温度が十分低い状態からLaB₆-fil.通電とアーク電力増加を短時間で行って取得した予備的な実験結果であり、今後の実験でビーム強度増大の度合いが変わる可能性がある。

W-fil.では、数時間のフィラメント通電のみでも、明らかなWの蒸発とPE等への蒸着が確認された。PE表面は、Wで完全にコーティングされていると考えられる。LaB₆-fil.でもPEの表面等の着色が観測された為、Cs非添加で24時間程度ビーム引き出し運転を行ったPE表面に対し元素分析を行ったところ、表面蒸着物はホウ素が95%とほとんどで、次に多かったのがランタンの2.5%であり、モリブデンはほとんど観測されなかった。H⁻イオン生成が行われているPE電極のテーパ部表面^[3]へのフィラメントからの蒸着元素によりCsの仕事関数低減効果が異なった為、ビーム強度増大効果に差が生じたと考えられる。

3.2 W-fil.の形状による寿命の違い

直径1.8mmのW-fil.を成型したヘアピン型{図3-a}、全長140mm}と3連ヘアピン型{図3-b}、全長260mm}の2種で寿命試験を行った。一定のアーク電力条件(アーク電圧100V、アーク電流150A、繰り返し25Hz、ゲートパルス幅700 μ sec)で、断線する迄運転を行った。図4に、ビーム強度76mA時のビーム電流、アーク電流、アーク電圧の各波形を示す。

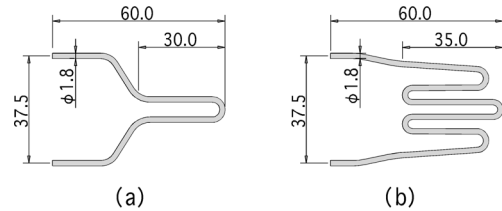


図3 W-fil.図：a)ヘアピン型、b)3連ヘアピン型

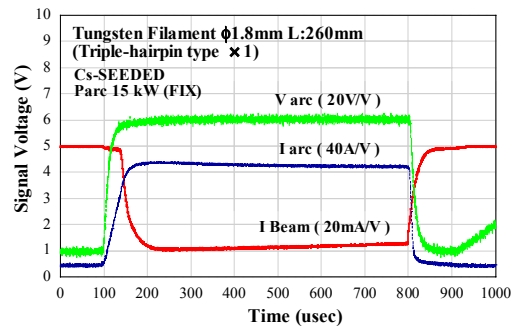


図4 ビーム強度76mA時の、ビーム電流、アーク電流、アーク電圧の各波形

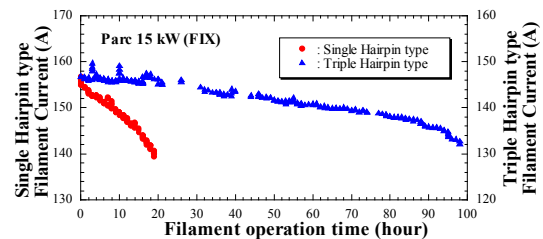


図5 W-fil.加熱電流の時間変化

ヘアピン型は、約20時間でヘアピン先端から約1 cmフィラメント電源マイナス端側が断線し、3連ヘアピン型は、約100時間でフィラメント電源マイナス端側のヘアピン先端から約1 cmプラス端側が断線した。プラズマ点火時にアーク電流がより多く重畳することが原因で、フィラメント電源マイナス端側が断線する事が知られている^[4]。しかし、使用後のヘアピン型は、ヘアピン先端からマイナス端側のみが顕著に細っていたのに対して、3連ヘアピン型は、マイナス端側が断線しているものの、電流導入端子に接続された付近の低温部以外の広範囲からの電子放出が表面状態の違いで観測された。ヘアピン形状は、磁場を相殺し、電子放出をし易くするのに効果的と考えられ採用されている。このヘアピンを3連化する事によって全長が長く出来たことに加え、隣接するヘアピン間の傍熱効果により、電子放出が可能な高温部分の長さが増加したことにより、約5倍の寿命延伸が可能となったと考えられる。更なる形状の工夫とW-fil.の複数化により、J-PARCに必要な500時間以上の寿命も可能であると考えられる。

これら寿命試験中のフィラメント電流の時間変化を図5に示す{ヘアピン型a}、3連ヘアピン型b}。所用アーク電流を達成するフィラメント電流値の減少

量が、フィラメント消耗量を表しており、運転開始時の値から約10%減少すると断線した。

3.3 Cs効果最適化方法とビーム強度のPE温度依存性

PE表面の仕事関数最小化、即ち、H⁻イオン生成効率最大化を達成するCs蒸着量を、PE温度とCs添加量の制御で行った。前者はPE温度調整用圧縮空気流量で、後者はCsリザーバ温度で制御した。これらの温度を変えながらビーム試験を行い、PE温度250程度、Csリザーバ温度230程度でビーム強度が最大になることが分かった。

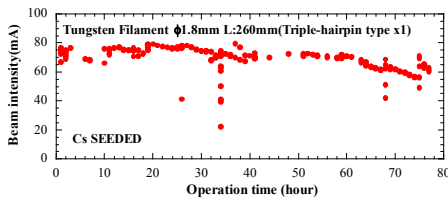


図6 Cs添加時のビーム安定度

但し、初めてCs添加を行う場合は、以上の条件を達成してから徐々にビーム強度が増大し、一定値となるのに約1時間を要した。この時間遅れは、Csが引き出し及び加速高電圧ギャップに過剰に供給され放電を引き起こすことを避ける為、直接PEテーパ部にCsが噴霧されていないよう、Cs導入ノズルを設置したことによると考えられる。即ち、添加されたCsは、プラズマ生成室の表面への付着とW-fil.からの輻射熱及びプラズマによる叩き出しによる浮遊を繰り返し、最適なCs濃度が達成されたと考えられる。Cs導入による高電圧ギャップでの放電頻度は、1時間当たり3回程度であった。PE温度250程度、Csリザーバ温度230程度の条件でイオン源を運転したときのビーム強度の経時変化を図6に示す。34時間付近でビーム強度が一時的に下がっているのは、実験のために故意にビーム強度を変化させたからである。60時間以降でビーム強度が徐々に減少しているのは、リザーバに充填したCsが枯渇した為と推測している。図7に、安定ビーム生成達成後、PE温度を変化させて測定したPE温度とビーム強度の関係を示す。

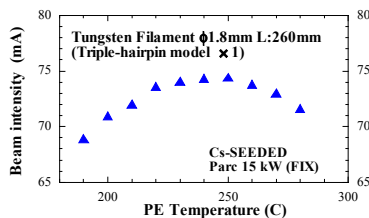


図7 3連ヘアピン型W-fil.使用Cs添加時のビーム強度のPE温度依存性

3.4 エミッタンス測定結果

ビーム強度30mA、61mA、76mA時の水平方向(X)と垂直方向(Y)のエミッタンス測定結果を図8に示す。測定は、イオン源から引き出し後、1台

のソレノイド電磁石で集束したビームを二重スリット式エミッタンスモニタを用いて行った。ビーム強度は、エミッタンスモニタの直後に設置したファラデーカップで確認した。30mA、61mA、76mA時の各々の水平方向/垂直方向の規格化rmsエミッタンスは、0.16/0.12、0.26/0.15、0.32/0.19 πmm.mradであり、ビーム強度の増大に伴いエミッタンスが悪化している。60mAのエミッタンスはJ-PARC用イオン源の要求性能を満たしているが、76mAでは超過している。これは現在の電極部が60mAを想定して設計されている為であり、高電圧ギャップ長の短縮とPE、引出電極、接地電極形状の最適化とにより改善可能と考えられる。

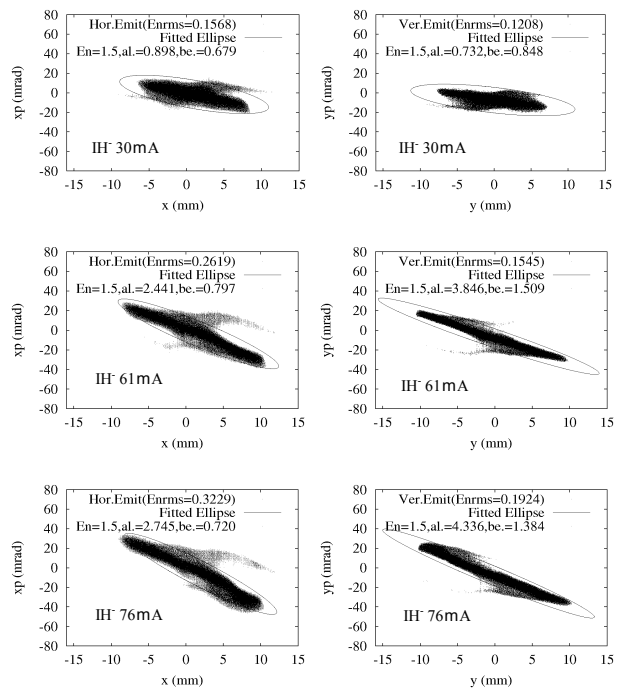


図8 エミッタンス測定結果

4. まとめ

W-fil.を使用したCs添加実験にて、基本ビーム性能であるビーム強度、エミッタンス及びデューティについてはJ-PARCの最終要求性能を達成した。今後は、上述のW-fil.形状の最適化及び複数化による寿命の要求性能達成を目指す。

参考文献

- [1] Hasegawa, in Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico, 2007 (IEEE, Albuquerque, New Mexico, 2007), p. 2619.
- [2] H.Oguri, et al. Rev.Sci.Instrum. 79, 02A506 (2008)
- [3] A. Ueno, et al., Rev.Sci.Instrum. 75 (5) 1714 (2004)
- [4] H.Oguri, Y.Namekawa, JAERI-Tech-2004-053