

A SURVEY OF OPTIMAL FILAMENT SHAPE IN THE J-PARC H⁻ ION SOURCE

Kiyoshi Ikegami¹, Akira Ueno, Hidetomo Oguri, Yuya Namekawa, Kiyonori Ohkoshi

J-PARC Center, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan

Abstract

A cesium-free H⁻ ion source driven with a LaB₆ filament is under operation at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The ion source succeeded in producing the maximum beam current of 38mA, which satisfies the requirement of 36 mA for the J-PARC initial stage. The operating beam current, however, is within 30-33 mA during accelerator beam commissioning runs since the maximum arc current is restricted to 300 A for a highly stable beam operation. In order to improve the arc power efficiency and examine the possibility to satisfy the requirement of 60 mA for the J-PARC final stage, we started a survey of the optimal size and shape of the LaB₆ filament by using an H⁻ ion source test stand. All the tests were carried out with the same condition such as an arc current of 300 A, a beam energy of 50 keV and the same magnet configuration of the plasma chamber. A beam current of 35.2 mA was extracted using a double spiral LaB₆-filament with a diameter of 29.5 mm and length of 35.5 mm, which is used in the J-PARC ion source. By using a smaller one with a diameter of 15mm and length of 34 mm, the beam current was increased to 41.8 mA. Furthermore, it was increased to 43.4 mA by using a flat triple hairpin shape LaB₆ filament.

J-PARC負水素イオン源LaB₆フィラメント形状の最適化試験

1. はじめに

六ホウ化ランタンフィラメント(LaB₆-fil.)を使用するJ-PARC負水素イオン源では、400 Aの高アーク電流投入による高密度水素プラズマの生成により、セシウム不使用で38 mAの高輝度ビームの引き出しに成功している。このイオン源の開発当初は、現在より小さいLaB₆-fil.を使用していたが、アーク電流による加熱での放電の不安定性が観測された為、LaB₆-fil.のサイズを拡大して400 Aの高アーク電流運転を可能とした。さらに、アーク電流300 A以下なら、J-PARCの運転周期である3週間の安定ビーム供給を達成できる見込みを得た[1]。しかし、この変更によりアーク電流効率(アーク電流当たりのビーム電流)の減少も同時に観測され、ビーム電流は30~33 mA程度で、J-PARC第一期の要求電流(36 mA)を若干下回ってしまった。

そこで、アーク電流効率の改善と安定運転を両立させ、またJ-PARCの最終要求電流(60 mA)達成の可能性を検証する為、LaB₆-fil.の大きさや形状によるビーム強度の違いを精細に調べることにした。この論文では、J-PARCイオン源と同じ基本構造であるJ-PARC試験用イオン源で行ったその試験結果について報告する。

2. J-PARC試験用イオン源の構成

J-PARC試験用イオン源は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)にてJ-PARCの前身であるJapan Hadron Facility(JHF)計画用に開発されたもので、基本構造はJ-PARCイオン源とほぼ同じである[2]。但し、アーク電源の方式は異なり、電流最大値は300

Aである。このイオン源の断面図を図1に示す。イオン源から引き出されたビームは、ソレノイド電磁石により集束され、その100 mm下流のファラデー・カップに入射され電流値が測定される。ビームダクト内径、ビーム加速電圧とも、J-PARCイオン源と同じで、各々28 mmと50 kVである。

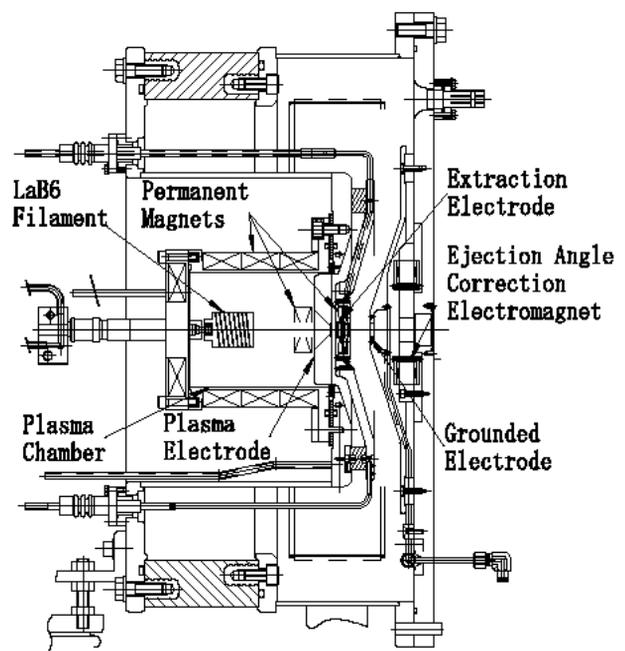


図1 J-PARC試験用イオン源断面図

試験用イオン源の主な仕様を以下に列記する。括

¹ kiyoshi.ikegami@kek.jp

弧内はJ-PARCイオン源の値である。

- ・プラズマ真空容器内径/全長
100 mm/122.5 mm(100 mm/130 mm)
- ・プラズマ真空容器冷却方式
間接冷却→運転中内面温度約50°C(水冷)
- ・プラズマ真空容器/フィラメントフランジ磁場
18極/放射状6極(18極/並列4極)
- ・外部フィルタ磁石片側サイズ*左右1対
40W×15L×38 mmH(40W×15L×30 mmH)
- ・電子抑制磁石 (対向磁極 2段 4個使用)
40W×4L×7 mmH(40W×4.5L×10 mmH)
- ・プラズマ電極口径/厚さ
φ9 mm /16 mm(同左)
- ・アーク電源/最大アーク電流
定電流電源/300 A(改良型定電流電源/400 A)

3. LaB₆-fil.形状とビーム強度

3.1 二重螺旋型LaB₆-fil.サイズとビーム強度

KEK-12GeV陽子シンクロトロンで20年以上安定にビームを供給したコンバータ方式の表面生成型負水素イオン源[3]で使用された、二重螺旋型LaB₆-fil.(直径15 mm、長さ34 mm)を踏襲し、J-PARCイオン源でも二重螺旋型LaB₆-fil.(直径29.5 mm、長さ35.5 mm)を採用した。但し、表1に示される通り、アーク電流が一桁以上異なる為、そのサイズが拡大されている。

	アーク電流	アーク電圧	アーク幅	繰り返し
KEK	40A(2本)	160V	200 μs	20Hz
J-PARC	300A	150V	700 μs	25Hz

表1 KEKイオン源とJ-PARCイオン源のパラメータ

図2に示す異なるサイズの二重螺旋型LaB₆-fil.をJ-PARC試験用イオン源取り付け、ビーム引き出し実験を行った。

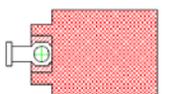
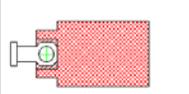
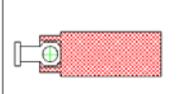
a) J-PARCイオン源使用 φ29.5×35.5(内径23) 二重螺旋(8ターン) 陰極電流125A(8.0V)	b) JHFイオン源相当サイズ φ22×31(内径13.5肉厚) 二重螺旋(10ターン) 陰極電流122A(6.4V)	c) KEK-PSイオン源使用 φ15×34(内径10.5) 二重螺旋(12ターン) 陰極電流67A(7.25V)
		
ビーム電流: 35.2mA (Iarc 300A設定)	ビーム電流: 38.0mA (Iarc 300A設定)	ビーム電流: 41.8mA (Iarc 300A設定)

図2 二重螺旋型LaB₆-fil.サイズとビーム強度の関係

アーク電流300 Aで行った実験で、J-PARCイオン源用LaB₆-fil.とKEKイオン源用LaB₆-fil.によるビーム電流は、各々、35.2 mA(図2a)と 41.8 mA(図2c)であった。これらの中間サイズのLaB₆-fil.によるビーム電流は、これらの中間値の38 mA(図2b)であった。φ22 mmのLaB₆-fil.ならアーク電流300 Aで、J-PARC第一期の要求電流を達成可能だが、サイズを小型化

すると、3週間の安定ビーム供給は厳しいものと予想される。しかしながら、この試験結果でのサイズ拡大によるビーム強度減少は、プラズマ領域に置いたLaB₆-fil.がプラズマの障壁となる為と思われる為、それを極力避けてエミッション電流を得ることで、アーク電流効率の改善が可能なことを示唆している。

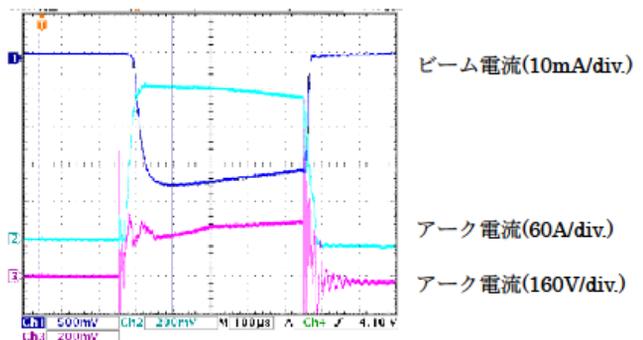
左写真は10時間程度運転したφ29.5 mm LaB₆-fil.



である。電子を放出している表面はLaB₆本来の紫色である。黒化部分は、LaB₆-fil.から蒸発したボロンが付着したか、もしくはLaB₆-fil.

から析出したボロンである (SEMでの表面分析でボロン成分が多く検出された)。この写真から明らかな様に、二重螺旋構造のLaB₆-fil.は、一番重要な先端部の温度が低く有効に働いていない事が分かる。

下図オシロ波形はφ29.5mm LaB₆-fil.を使用した時の波形である (時間軸100 μs/div.)。アーク電流のドループは、アーク電源の特性上避けられない。



3.2 二重螺旋型LaB₆-fil.設置位置とビーム強度

二重螺旋型LaB₆-fil.を2個取り付ける方法で、ビーム軸からLaB₆-fil.遠ざける事を試みビーム引き出し実験を行った時の結果を図3に示した。この実験でLaB₆-fil.を2本使用するのは、LaB₆-fil.をビーム軸から遠ざけて設置する事で起こる電子放出領域の減少を避ける為である。通電は2個のフィラメントを直列接続にしている。

図-3a)では、ビーム軸からLaB₆-fil.が遠い為電子効率が悪くビーム強度は31.2 mAであった (通常より8 mm長いLaB₆-fil.取り付けブラケットを使用)。図-3b)では、ビーム軸から45度傾けてLaB₆-fil.を設置した事でビーム強度は40.2mAまで上昇した。図3c)は、ビーム軸上に2個LaB₆-fil.を設置した場合で、ビーム強度は37.2mAであった。この実験結果からも、LaB₆-fil.がプラズマの障壁となっている事が窺える。

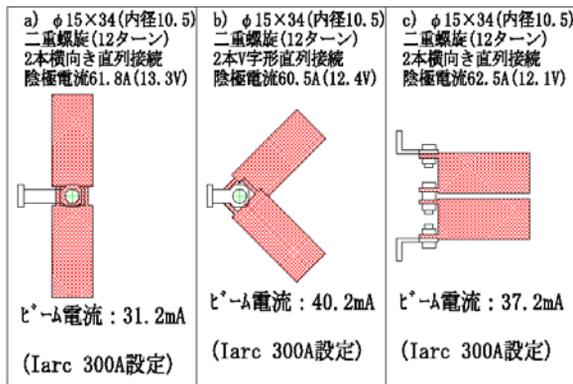


図3 二個の二重螺旋型LaB₆-fil.とビーム強度の関係

3.3 平形LaB₆-fil.とビーム強度

これまで実験結果の経緯から、体積容量が小さな平面形のLaB₆-fil.を使用した場合はビーム軸上のプラズマ障壁を最小限にできる可能性が出てきたため、図4で示す平形LaB₆-fil.でビーム引き出し試験を行った。

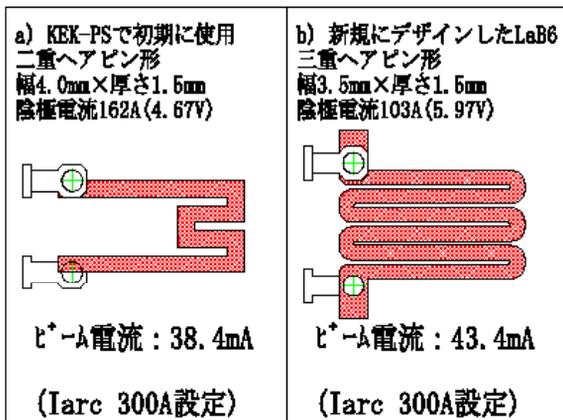
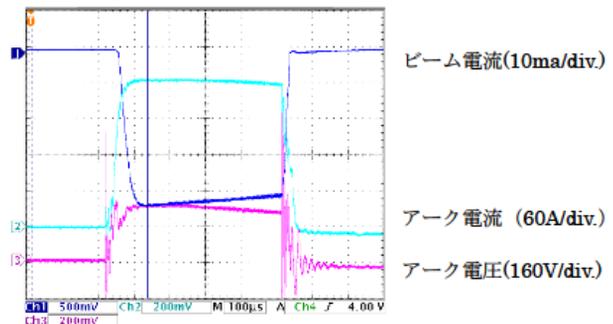


図4 平形LaB₆-fil.サイズとビーム強度の関係

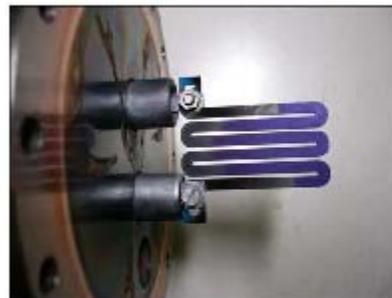
図4a)は、KEK-PSの運転初期表面生成型負水素イオン源に使用していた平面形二重ヘアピンLaB₆-fil.を、J-PARC試験用イオン源に取り付けて試験した結果で、ビーム強度38.4 mAを得た。但しこのLaB₆-fil.は、取り付け部でアーキングを起こしたため、電流導入端子外周を大きくセラミックで覆ってビーム試験をしており、通常の電流導入端子個々を別々に覆うセラミック管で覆っただけであれば、もう少しビーム強度は増えると思える。

図4b)は、新規にデザイン制作した平面形三重ヘアピンLaB₆-fil.での試験結果である。KEKの二重ヘアピン型はフィラメント電流を多く取る為、三重ヘアピンにして全長を長く表面積を広くするデザインとした。この結果ビーム強度は43.4 mAと今回の一連の試験では一番良いビーム強度が得られた。また、フィラメントフランジを90度回転し、LaB₆-fil.の向きを変えた場合も同じビーム強度が得られた。

下図はこの時のオシロ波形である (時間軸100 μ



s/div.)。 $\phi 29.5$ mm二重螺旋LaB₆-fil.の時と比べ、アーク電圧が徐々に下がっている。この事はパルス時間内でLaB₆-fil.が徐々に加熱されるためと思われるが、まだフィラメント温度で制限されたアーク電流を保っていると思われる、厳しい運転状況ではない。



また、三重ヘアピンLaB₆-fil.のビーム運転後の左写真の様子を見ると、電子放出面が、中央部で綺麗な紫色に彩られており、電子がフィラメント表面の広範囲から放出されていることが分かる。

4. まとめ

今回の試験結果から、LaB₆-fil.をビーム軸上に設置した時にはLaB₆-fil.の外径が小さい方が高いビーム強度を引き出せる事を確認した。これは、LaB₆-fil.がプラズマの障壁となる為と考えているが、その他にも、ビーム軸中心部軸上からの電子放出の方がよりプラズマ生成効率が良い為とも考えられる。従って、それらの理由を突き詰め、LaB₆-fil.ではそのデザインをする必要がある。

また平面形LaB₆-fil.は、アーク電流効率が良くなった事でビーム強度の増加に繋がった。

今回の一連の試験で、LaB₆-fil.は形状や設置位置の最適化により、稼働中の実機イオン源にもビーム増強の余地があることがわかった。今後も実験を継続し、J-PARCイオン源の更なる性能向上と目指すつもりである。

参考文献

- [1] H. Oguri, A. Ueno, K. Ikegami, Y. Namekawa, and K. Ohkoshi, PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 12, 010401 (2009)
- [2] 池上清、上野彰、近藤恭弘 第28回リニアック研究会
- [3] 高木昭、OHO96 高エネルギー加速器セミナー (1996) p I-1