

高デューティ LaB6 フィラメントイオン源の暴走と対策

HIGH-DUTY FACTOR OPERATION OF THE LAB6 FILAMENT ION SOURCE

柴田崇統^{#, A)}, 杉村高志^{A)}, 高木昭^{A)}, 池上清^{A)}, 栗原俊一^{A)}, 發知英明^{A)}, 内藤富士雄^{A)}
Takanori Shibata^{#, A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Akira Takagi^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)},
Hideaki Hotchi^{A)}, Fujio Naito^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

An arc-driven ion (proton) source equipped with the lanthanum hexaboride (LaB6) filament was developed and operated with a beam current of 53 mA in the previous study [1, 2]. The duty factor at the moment was 0.4%, namely a pulse width of 200 us and a repetition rate of 20 Hz. The duty factor was limited by two reasons. One is the power supply temperature rise by the increased average current. The other is a runaway mode of the LaB6 filament operation due to the higher heat flux from the arc plasma. In the present study, we updated the arc pulse power supply to operate the source with a duty factor of 5% (pulse width of 500 us and a repetition rate of 100 Hz). Several plasma parameters and filament temperature in the high-duty factor operation are monitored in different power supply settings to avoid the runaway mode. The proceeding also provides countermeasures to operate the LaB6 filament ion source stably with the high-duty factor.

1. はじめに

加速器の粒子源として、フィラメントを使用するアーク放電型イオン源は放電の安定性が高く、ビーム出力の揺らぎやイオン源内プラズマの消灯事象が起こり難い利点がある。そのため、加速器運転の急停止リスクがある医療分野等での活用が期待できる。その反面、フィラメントは加熱して使用することで断線するため、イオン源運用においては、定期的なメンテナンス(フィラメント交換)が課題である。フィラメントイオン源のメンテナンス期間を延ばす対策も進められてきた。従来、KEK-PS や J-PARC などの加速器施設では、数週間に亘る 24 時間イオン源連続運転を実施するため、六ホウ化ランタン (LaB6) フィラメントを用いたイオン源開発が行われてきた。いずれの施設も、負水素イオン (H⁻) ビームを生成するイオン源であり、J-PARC では約 20 kW のアーク投入電力に対して 1,200 時間の連続運転実績があり[1,2]、KEK-PS では数 kW のアークプラズマ点弧で 2,500 時間以上のフィラメント寿命を確認した[3]。LaB6 イオン源に数 kW のアーク投入電力を印加して十分な電流出力が得られる陽子源などでは、1 日 8 時間程度の運転を行う場合でも、半年以上の運用期間を見込むことができる。

上記のような有用性から、本研究では医療分野にも応用可能な水準を目指した安定長寿命の LaB6 イオン源システムを開発してきた。同イオン源では、アーク投入電力 6 kW に対して陽子ビームのピーク電流出力 53 mA (ビームエネルギー 50 keV) を得られている[4,5]。一方、平均ビーム電流を増加させるためには、イオン源内のプラズマ点弧に対するデューティファクターを増加させる必要がある。前述した H⁻源では、加速器施設全体の要求値から、KEK-PS で 0.4%、J-PARC で 2% のデューティで連続運転が行われた。また、本研究で以前開発したものは、0.4% デューティ(パルス幅 200 us、繰返し周波数 20 Hz)である。

本研究に置いてデューティファクターを増加させるためには、2 つの課題を解決する必要があった。1 つ目は電源の温度上昇である。もう 1 点は、LaB6 フィラメントによるアークプラズマ「暴走モード」の懸念である。本研究で対象とするイオン源では、フィラメントに DC 電流を印加することで LaB6 焼結体を昇温することで、一定量の熱電子電流を得る。一方で過度な昇温によりフィラメント温度が融点付近に達することで、フィラメント寿命が減少する、あるいはフィラメント断線を生じる。「暴走モード」とは、デューティファクターの増加により、プラズマ点弧時間が増えることで、LaB6 フィラメントへのプラズマからの熱流束が増加する。これにより、フィラメント温度が上昇することで、熱電子放出量が増加する。するとプラズマ点弧効率が上昇し、さらにフィラメントが熱負荷を受ける。これを繰返すことで、フィラメント過熱と同様の事象が起こり得る。

今回、既存の LaB6 イオン源システムにおいて、アークパルス電源の改良を行い、上記課題の 1 つである電源温度上昇の問題を解決したので、その状況を報告する。また、デューティファクターをこれまででない 5% まで増加させた際の LaB6 フィラメントによる「暴走モード」の有無と、各種電源運転モードによるアークプラズマパラメータの制御手法を説明する。

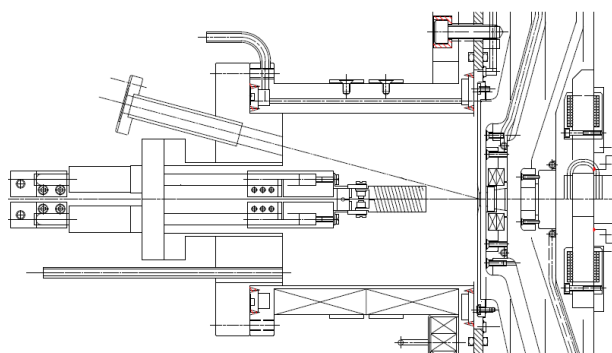


Figure 1: Schematic drawing of the LaB6 filament ion source in the present study.

[#] takanori.shibata@kek.jp

2. LaB6 フィラメントイオン源システム

2.1 イオン源および試験体系

Figure 1 に LaB6 フィラメントイオン源本体を示す。イオン源プラズマ容器は、18 極のマルチカスプ磁場配位とし、その内 2 極のカスプ磁石の外側には、フィルター磁場を形成するため追加で磁石を取り付ける仕様となっている。フィラメントはイオン源天板側から中心に向けて挿入される。また、フィラメント位置は軸方向に可変であり、今回はプラズマ電極からフィラメント端部間を 10 mm として運転した。フィラメントは株式会社デンカ製の LaB6 焼結体を高温炉でベーキングして活性化させた二重螺旋構造のもの (c-9a 型) を使用した[6]。

本試験では、LaB6 フィラメントにはフィラメント電源より 72 A の DC 電流を印加した状態で、 H_2 ガスを 10 SCCM 導入する。さらに、フィラメント部をカソード、プラズマ容器をアノードとし、その間にアークパルス電圧を印加することで、プラズマを点弧する。イオン源出力側には、3 枚の単孔付き電極板 (プラズマ電極; PE、引出電極; EE、接地電極; GE) が取り付けられ、電極間に高電圧を印加することで陽子ビームを出力する。試験ではフィラメント温度計測系の都合上、高圧印加を実施していないが、ビーム出力時は PE-EE 間に 10 kV、EE-GE 間に 40 kV のパルス高電圧を印加し、50 keV/50 – 60 mA の陽子ビームエネルギー/ピーク電流を出力し、GE 電極の先に取り付けたファラデーカップで受ける。

フィラメント温度計測のため、イオン源天板にはビューポートを取り付け、イオン源内部のフィラメント部を見込むように放射温度計 (ジャパセンセンサー製 FTK9-P300) を設置した (Figure 2)。LaB6 フィラメントは予め定常温度まで昇温した後、アークプラズマを点弧した際の温度時間変化を記録した。

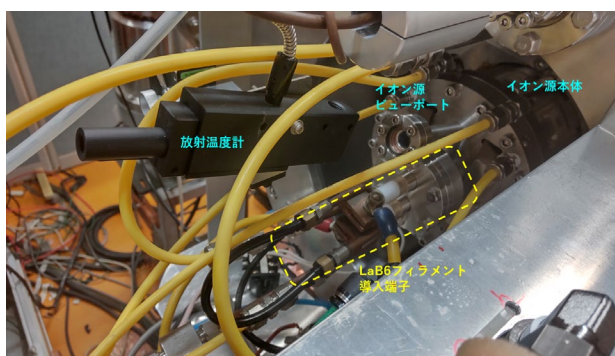


Figure 2: Photograph of the source chamber and the setup of the radiation thermometer.

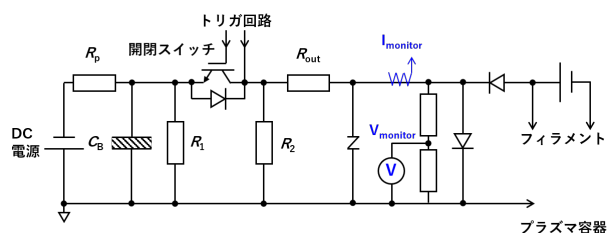


Figure 3: Schematic diagram of the arc pulse and the filament power supplies.

2.2 イオン源電源回路

プラズマ生成用の電源部は、フィラメント電源とアークパルス電源から構成される。フィラメント電源は、LaB6 フィラメントに直列接続し、DC 電流印加に使用する。イオン源側では LaB6 フィラメントとプラズマ容器は絶縁されており、その間にパルス電圧を印加するためアークパルス電源を接続する。Figure 3 に電源回路全体の概念図を示した。イオン源電源システムを小型に抑えるため、本イオン源におけるアークパルス電源では、並列コンデンサバンクと開閉スイッチのみによるパルス成形を行う仕様である。アークパルス電源正極側は、イオン源電位ステージ上に電位固定し、負極側はフィラメント電源回路と接続することで、パルス生成時にのみ LaB6 由来の熱電子がプラズマを介してプラズマ容器に向けて加速される。プラズマ電流とフィラメント電流の重畳を避けるため、アークパルス電源負極側とフィラメント電源正極側とを接続し、フィラメント負荷が比較的小さい回路構成とした[7]。

アークパルス電源自体は、最大 300 V/18 A 出力可能な DC 電源で駆動し、パルス OFF (スイッチ開放) 時にコンデンサバンクを充電し、パルス ON 時に放電する。パルスが高繰返し周波数であるほど、パルス OFF 時のコンデンサバンク充電時間は短くなるが、現在の目標デューティファクター 5% (繰返し周波数 100 Hz) に対しては充電時間は十分にある。また、コンデンサバンク容量 C_B もビームパルス生成に対して droop の影響が無い (1% 以下) となるものを選定した。コンデンサバンク過充電を防ぐため、開閉スイッチ 1 次側・2 次側回路にそれぞれブリーダー抵抗 R_1 , R_2 を施した。パルス ON 時のアーク電流出力は開閉スイッチ 2 次側の出力抵抗を介して、イオン源プラズマに流れ込む。アーク電流および電圧はアークパルス電源終端部に取り付けた DCCT および分圧抵抗器を用いて測定した。

高デューティ運転の課題の 1 つは、主として出力抵抗 R_{out} の過熱による電源全体の温度上昇である。従来の 0.4% デューティに対しては、出力抵抗として $1 \Omega / 150W$ のエレマ抵抗を 2 直列で使用していたが、5% デューティでは温度上昇が著しかったため、高デューティ用に 1.2Ω の円板抵抗器 9 直列 3 並列に交換した。また、抵抗器の各直列部の間には銅板を挟み、そこに空冷ファンによる送風を行うことで冷却性能を上昇させた。空冷ファンは 2 台から 4 台に増設し、調整治具による風向き調整を行うことで出力抵抗を集中的に冷却する。上記の冷却能力増強は、電源筐体のサイズ $W430 \text{ mm} \times H250 \text{ mm} \times D480 \text{ mm}$ を維持して改良を施した[5]。

3. アークプラズマ点弧試験

3.1 プラズマ点弧前の定常フィラメント温度

本試験では LaB6 フィラメントを昇温するため、電源出力 72 A/8.4 V の条件で運転した。放射温度計で測定した定常状態のフィラメント温度表示は、 1160°C 前後であった。放射温度計における被測定物の放射率は $\varepsilon = 1$ としたが、実際の測定に置いて LaB6 焼結体の放射率は温度とともに変化する。例えば $\varepsilon' = 0.9$ まで変化していると、プランクの法則に基づいて、温度表示と実際の温度との誤差は $(\varepsilon/\varepsilon' - 1.0) \times 100 = 11\%$ 程度であり、 200°C 程度低い値となっている可能性がある。一般的に、

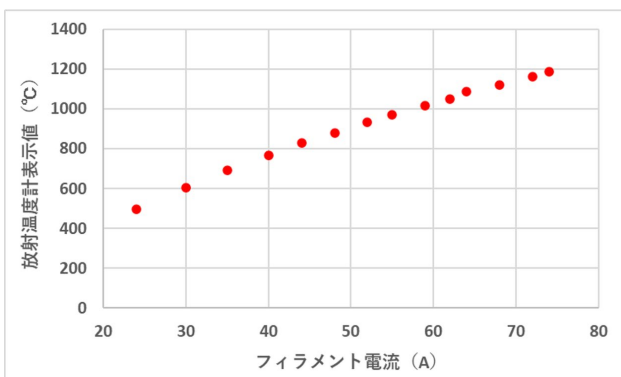


Figure 4: Dependence of the LaB6 temperature on the filament current in the present system.

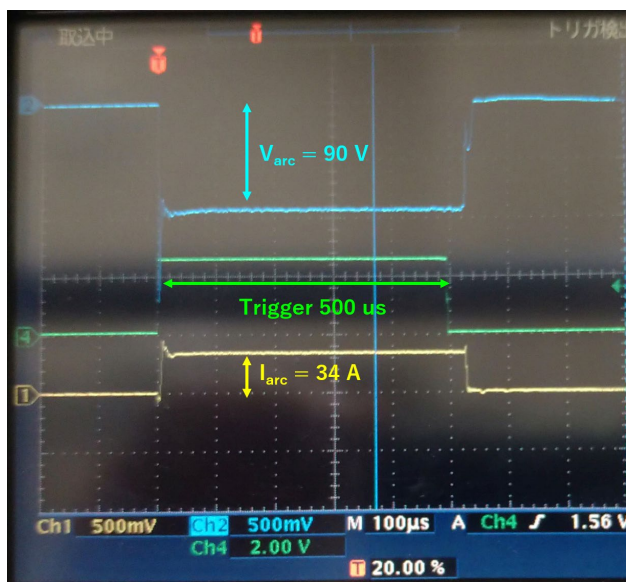


Figure 5: Waveforms of the arc current (CH1), the arc voltage (CH2), and the trigger pulse (CH4).

LaB6 は融点が 2210°C であるのに対し、多くのフィラメントイオン源試験では 1400 – 1500°C で使用されている。御本試験におけるフィラメント電流と温度表示値の関係を Fig. 4 に示す。

3.2 定電流 (CC) 制御によるアークプラズマ点弧

フィラメント温度が定常状態に達した後、水素ガスを導入し、アークパルス電源出力を ON とすることで、アークプラズマを点弧した。本試験では、アークパルス電源出力におけるデューティファクターを従来の 0.4% から 5% (500 us/100 Hz) に増加した際の、アークプラズマ安定性を確認した。代表的なパルス波形を Fig. 5 に示す。このとき、アークパルス電源内の DC 電源から出力される平均電流 I_{DC} には上限 (CC limit) 2.2 A を設定し、LaB6 フィラメントの暴走等が起きた場合でもアーク電力が増加し過ぎないようにした。また、DC 電圧 V_{DC} は、初期値を 240 V としてプラズマ点弧し、CC limit 時はフィードバックによって変化 (減少) するようにした。Figure 6(a) には I_{DC} および I_{arc} 、Fig. 6(b) には V_{DC} および V_{arc} 、LaB6 フィラメント温度の時間変化をそれぞれ示す。

プラズマ点弧後 1 時間程度で、アーク電流は 17 A から 34 A まで増加し、運転終了まで一定値を維持した。こ

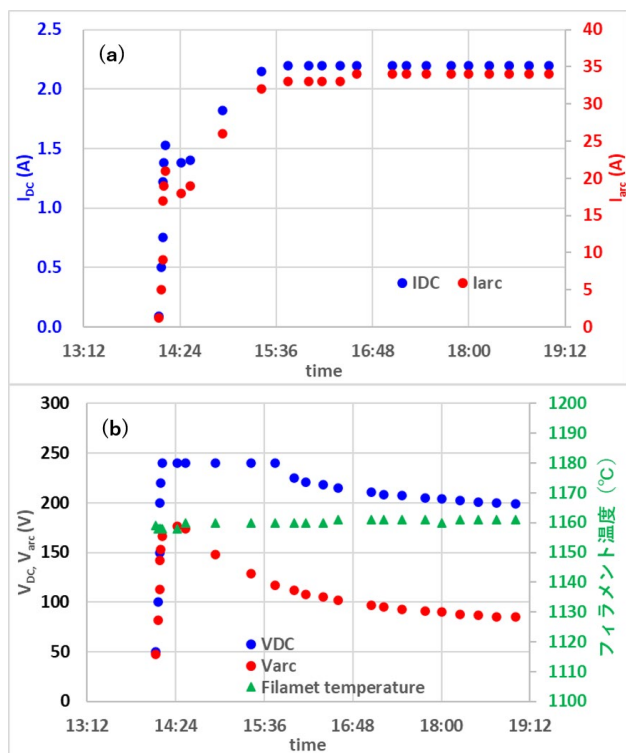


Figure 6: Time variations of (a) I_{DC} and I_{arc} , and (b) V_{DC} , V_{arc} and the filament temperature in the CC limit controlled experiment.

のアーク電流 (ピーク電流) I_{arc} の増加は、アークプラズマ密度の成長によるものである。CC limit により DC 電流が一定になると、アーク電流も一定になる。その後もプラズマ点弧効率が向上を続け、フィードバックによりアーク電圧は徐々に減少して 85 V 前後で定常状態となった。この電圧は水素原子・分子のイオン化反応速度係数によって決まる。また、入力電圧 $V_{DC} = 205$ V は、アークパルス電源内部の電圧降下 (主として出力抵抗による) とアーク電圧との和になっていることも確認した。

この間、フィラメント温度は 1158 – 1161°C の範囲にあり、温度変化は殆ど見られなかったことから、上記のアークプラズマ成長は、LaB6 フィラメントの暴走によるものではなく、プラズマ点弧が定常状態に至ったことによる。暴走が生じていない一因として、アーク投入電力がピーク 3 kW 程度であったことも挙げられる。アーク投入電力を徐々に高めていった際のフィラメント暴走モードの有無を調査することは今後の課題である。

本試験の有用な情報として、DC 電源の CC limit によってアーク投入電力を制御可能であることを示した。プラズマ点弧が定常状態に至った後は、アーク電圧 V_{arc} は水素プラズマ点弧効率で決まり、アークパルス電源内の電圧効果は、主として出力抵抗およびアーク電流 I_{arc} で決まる。高デューティの場合でもフィラメントの暴走 (熱電子放出量の変化) が無いことから、 I_{arc} は CC limit で決まるため、この CC 設定を用いてアーク投入電力を概ね線形に制御することが可能である。

4. まとめ

LaB6 フィラメントを使用したアーク放電型イオン源は、プラズマ点弧およびビーム出力の安定性において利点

があり、ビーム急停止のリスクがある加速器への活用が期待できる。また、陽子ビーム源での使用における LaB6 フィラメント寿命は 2,500 時間程度と十分に長く見込める。一方、プラズマ生成を高デューティファクターで行うと、フィラメントの「暴走モード」発生が懸念されてきた。

本試験では、温度上昇に対応するため回路構成と排熱増強の改良を施したアークパルス電源を使用し、デューティファクターを従来の 0.4% から 5% に増加させて LaB6 イオン源を運転した。プラズマ点弧後、数時間経過後もフィラメント温度表示は 1160°C 前後を維持していたことから、5% デューティ (500 us/100 Hz) 運転においてもフィラメントの「暴走モード」は抑えられていることを確認した。また、CC limit を設定することで、プラズマ定常状態におけるアーク電流、アーク投入電力を制御可能であることを示した。

今回試験より、安定性が高くフィラメント寿命の長い LaB6 イオン源を高デューティファクターで暴走なく運転可能であることが確認できた。また、電源改造も従来サイズを変更することなく、19 インチラック 1 台にイオン源電源システムが収まる状態を維持した。

今後、投入電力を徐々に増加させて、医療応用にも活用可能な水準の、大電力 (大強度) 高デューティの場合においてもアークプラズマ点弧の安定性を調査する。

参考文献

- [1] H. Oguri *et al.*, Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams **12**, 010401 (2009).
- [2] 大越清紀, 他, 「J-PARC イオン源の運転状況」, 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋市, 2013 年 8 月 2 日–6 日, .SUP038.
- [3] Y. Mori *et al.*, AIP Conf. Proc. **158**, 378 (1987).
- [4] 柴田崇統, 他, 「iBNCT 用 LaB6 フィラメント・マルチカスプイオン源の開発状況」, 第 15 回日本加速器学会年会, 長岡市, 2018 年 8 月 7 日–10 日, WEP036.
- [5] T. Shibata, “Long Pulse Arc-Driven Proton Source for High Intensity iBNCT”, *the 7th ACFA-HPPA mini-workshop*, 17–19 April 2019, Rokkasho, Japan.
- [6] 高木昭, OHO 96 高エネルギー加速器セミナー「イオン源」, (高エネルギー加速器科学研究奨励会, 1996).
- [7] 小栗英知, 「大強度負水素イオン源の研究」, 総合研究大学院大学, 数物科学研究科, 加速器科学専攻学位論文, 平成 15 年度.