

5%デューティ LaB₆ イオン源のビーム運転

BEAM OPERATION OF 5%-DUTY FACTOR LaB₆ 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)}, 佐藤将春^{A)}, 南茂今朝雄^{A)}, 内藤富士雄^{A)},
方志高^{A)}

Takanori Shibata^{#, A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Akira Takagi^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)},
Masaharu Sato^{A)}, Kesao Nanmo^{A)}, Fujio Naito^{A)}, Zhigao Fang^{A)}

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

Abstract

Arc-driven type proton source with lanthanum hexaboride (LaB₆) is under development for proton accelerators which require high-duty factor and stable beam operation. The basic design and 0.4% duty factor beam experiment of the LaB₆ filament ion source was performed in 2018. In the prior year, we modified our pulsed power supply system to tolerate the temperature increase in the higher duty-factor operation and succeeded in the arc plasma production of 5 % duty factor (100 Hz repetition and 500 μ s pulse width). This manuscript reports on the beam extraction experiment with 5 % and 7.5 % (100 Hz repetition and 750 μ s pulse width) duty factors and several troubles of the ion source equipment at the high-duty operations.

1. はじめに

六ホウ化ランタン (LaB₆) フィラメントを使用したアーク放電型イオン源は、従来 KEK や J-PARC における大強度陽子加速器用の粒子源として用いられてきた。フィラメントによる放電を利用したイオン源は、真空容器内に熱電子源があることから、他の放電形式(高周波入力など)を用いたイオン源と比較して安定なプラズマを生成することが可能である。そのため、医療用加速器などビーム生成の中断によるリスクがある場合において、信頼性が高い利点がある。その一方で、フィラメントには寿命があり、交換頻度が高くなることによる施設利用率の低下が懸念される。

上記に着目すると LaB₆ フィラメントは、低仕事関数の金属(タングステンやタンタル等)によるフィラメントと比較して長寿命であることが知られている。KEK-PS や J-PARC では数 kW 以上の投入電力に対して、1200 - 2500 時間の連続運転実績がある。上記のような大型施設でない場合、日中運転のみであれば数か月から半年の使用期間が見込める。

LaB₆ イオン源の未解決要素の 1 つは、高デューティ運転の可否であった。一般的に、アーク放電型イオン源のフィラメントは高温にすることで熱電子放出量を増加させプラズマ生成効率を高めるが、一方でフィラメント温度が上昇しすぎること著しく寿命が短くなる。高いデューティ比でプラズマを点弧させた場合、プラズマから LaB₆ フィラメントへの熱負荷が増加するため、フィラメント温度は上昇し、熱電子放出量の増加を介してプラズマ点灯効率が上昇する。イオン源へのプラズマ投入量にフィードバックなど制限をかけなければ、プラズマ温度・密度は上昇し続けるため、いずれフィラメント断線に至る(暴走モード)。この暴走モードのため、LaB₆ フィラメントでの高デューティ運転には懸念があった。

従来 LaB₆ フィラメントの運転では、デューティ比が 0.4

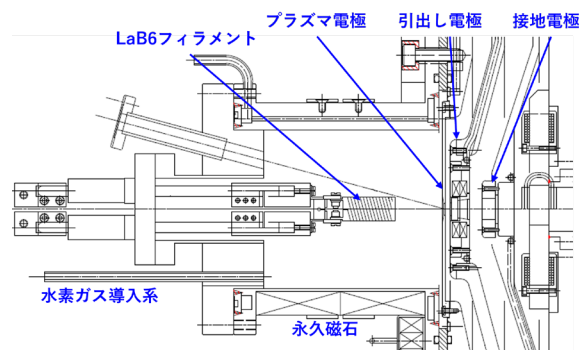


Figure 1: Schematic drawing of the LaB₆ filament arc-driven ion source.

–2.0%までは問題なく使用可能な実績がある。本研究では、LaB₆ イオン源のデューティ比をさらに増加させた場合に起こる事象と実用の可否を調査する。2023 年度の報告では、近年の KEK における高デューティ陽子リニアック[1]を参考に、5%のデューティ比(繰り返し周波数 100 Hz×パルス幅 500 μ s)の水素プラズマをアーク放電により点灯するイオン源および電源システムを構築し、試験を実施した[2]。

今年度は上記に加え、イオン源静電加速部に高電圧を印加し、50 keV のビーム引出し運転を実施した。また、デューティ比を 7.5%に増加させた試験も行った。本報告ではビーム試験状況と機器改良について説明する。

2. LaB₆ フィラメントイオン源

2.1 イオン源本体

本研究では、高デューティ仕様の陽子リニアック加速器を想定し 2017 年より、LaB₆ イオン源の開発を開始した。プラズマ生成部の詳細は文献[2]に記載しているため、ここでは概要のみ記述する。イオン源(Fig. 1)では、プラズマチャンバ内に格納した LaB₆ 焼結体フィラメント電流を印加することで熱電子を生成する。プラズマチャンバ

[#] takanori.shiabta@kek.jp

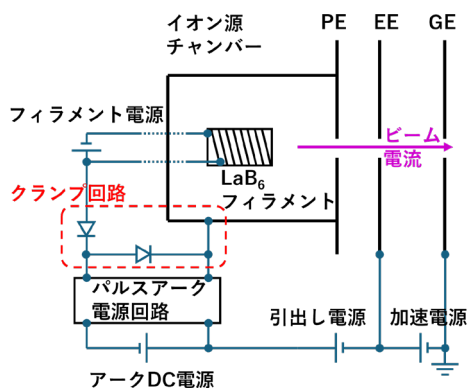


Figure 2: Pulsed arc and high voltage power supply systems of the LaB6 ion source.

一内には水素ガスを導入し、イオン源チャンバーとフィラメント間に電圧を印加することで、アーク放電を行う。チャンバーは 18 極の永久磁石で囲み、生成したプラズマを効率よく閉じ込める。また、イオン源チャンバー周囲にはソレノイドコイルを取り付け、軸磁場の印加によりビーム引出孔直上のプラズマ分布を制御することで、イオンビームの引出効率を最適化する。プラズマ生成後は、イオン源内のプラズマ電極 (PE)、引出し電極 (EE)、および接地電極 (GE) の間に 2 段階の高電圧を印加することで 50 keV のイオンビームを引き出す。イオン源接地電極の先には、ファラデーカップを取り付け、ビーム電流値を測定する。従来の 0.4% デューティ比での試験では、イオン源から 53 mA 程度のビーム電流出力を測定した [3]。

今回試験中はファラデーカップの代わりに質量分析計を取り付けていたが、イオン源 GE から計測系までの距離が長く、輸送ダクトが細い。そのために、引き出されたビームが空間電荷で発散し、壁にロスしてしまうことでビーム電流値の測定が正確にできなかった。本報告では、ビームの時間構造のみを説明し、ビーム電流値については次回以降の課題とする。

2.2 イオン源電源回路

Figure 2 には、イオン源電源回路全体の概念図を示した。イオン源内部のプラズマ点弧は、アーク DC 電源、パルスアーク電源回路、およびフィラメント電源から実施する。フィラメント電源は常時 ON とし、LaB₆ フィラメントを昇温することで、熱電子が常に放出されている状態を作る。一般的に LaB₆ フィラメントに流れる電流が高いほど、フィラメント温度は上昇するため、熱電子放出量は多い。フィラメントの損耗を抑えるため、フィラメント電源とパルスアーク電源回路は PN 接続としている [4]。

アーク DC 電源に定電圧を印加することでパルスアーク電源回路を介して、パルス化された電圧 (アーク電圧) が Figure 2 の LaB₆ フィラメントとイオン源チャンバーの間に発生する。アーク電圧が生じることで、チャンバー内の電子が加速されるとともに水素ガスのイオン化反応が促進されるためプラズマが成長する。これに伴い、フィラメントとチャンバー間にはアーク電流が流れる。プラズマが効率よく点弧し、荷電粒子の量が多くなるとアーク電流が増加し、アーク DC 電源に要求される電流値も引き上げられる。

プラズマからイオンビームを取り出すためには、PE-EE

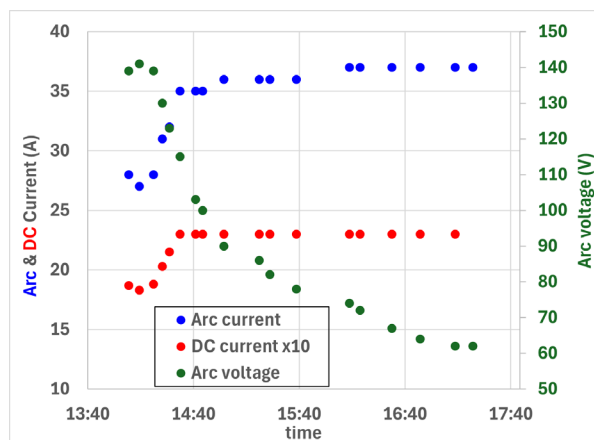


Figure 3: Time variations of the arc current (blue), the arc voltage (green), and the arc DC power supply current (red).

および EE-GE の電極間にそれぞれ高電圧を印加する回路; 引出電圧回路および加速電圧回路を取り付けた。ビーム電流に従って、各高圧電源に要求される電流量が決まるが、運転中の不純物混入等による電極間の放電が起こると、10 μ s 前後の短パルスでサージ電流が発生する。ビーム試験にあたり、サージ電流がパルスアーク電源回路に流入すると IGBT やアーク DC 電源等が故障する可能性がある。これを防ぐため、パルスアーク電源回路とイオン源チャンバーの間にはクランプ回路を接続した。

3. 高デューティ比でのプラズマ試験およびビーム試験

3.1 5% デューティ比でのプラズマ試験

プラズマ試験は、2023 年度および今年度 (2024 年度) に実施した。2023 年度は、上記イオン源とともにパルスアーク電源を改良し、デューティ比を 5% (繰り返し周波数 100 Hz \times パルス幅 500 μ s) でプラズマ点弧試験を実施した。DC 電源からの電流出力はパルスアーク電源回路によりプラズマ点弧に必要な電荷量がイオン源に流れる。高デューティ条件下では、回路内の抵抗を介して電源温度が上昇する。2023 年度の電源改良では、抵抗器の耐電力および空冷ファンによる冷却能力を増強することで 5% デューティでの運転時に電源内部の最大局所温度が 75 $^{\circ}$ C 以下に抑えられることを確認した [2]。同試験ではアーク DC 電源の出力電圧を固定しプラズマ点弧を開始したところ、時間経過とともにアーク電流の増加とアーク電圧の低下が見られた。この要因として、デューティ比 5% ではプラズマからの熱負荷による LaB₆ フィラメントの温度上昇が挙げられる。その結果、熱電子放出量の増加を介してプラズマ生成の効率が高まったため、イオン源内のプラズマ密度および、アーク電流を増加した。一方、パルスアーク電源の電圧降下とプラズマ点弧の高効率化により、アーク電圧は低下する。この条件では、フィードバック等の外部制御が無ければ、1 章で述べた「暴走モード」が誘発される状態にあることが判った。

2024 年度試験結果におけるアーク DC 電源電流、アークパルス電流、およびアーク電圧の時間変化を Figure 3 に示した。試験では、パルスアーク電源内の DC

電源における出力電圧を 240V としてプラズマ点弧を開始した。前年度の結果を踏まえ、電流上限 (CC limit) を 2.5 A に設定したところ、一定時間経過した後にアーク電流値の増加は 37 A で止まった。その後、CC limit 制御によりアーク DC 電源の出力電圧が低下し始めた。この段階では、プラズマ点弧の効率はなお上昇しているが、徐々に一定値に落ち着いた。2023 年度の報告では、同様の CC limit 条件に対してアーク電圧の定常値が 80 V 程度であった[2]のに対し、今年度の試験ではアーク電圧は 60 V 前後に漸近した。この違いは、イオン源冷却水の設定温度を 10°C (2023 年度) から 20°C (2024 年度) に変更したためである。今年は冷却水温度が高いことで、LaB₆ フィラメントの定常温度も高い値となるため、熱電子放出量は高い。その結果、低アーク電圧で (高効率で) プラズマ点弧する。ただし、フィラメント自身は高温で損耗が進行しやすい状況にある。

3.2 5%デューティ比でのビーム試験

前年度のプラズマ点弧した条件で電極間に高電圧を印加し、ビーム引出しを試みたところ、パルスアーク電源のクランプ回路が故障する事象があった。クランプ回路は過去に KEK-PS 試験用に 0.4%デューティ比で使用していたものを流用していたため、5%デューティでピーク電流 30 - 40 A (平均電流 1.5 - 2 A) をイオン源に流したことで、電流経路上のダイオードが故障した。上記に代

替する新たなクランプ回路を製作し、再度 5%デューティでプラズマ点弧ビーム試験を実施した (前節における 2024 年度試験)。ビーム試験時はプラズマ点弧開始から 3 時間程度が経過し、アーク電圧は 62 V に落ち着いた状態である。Figure 4 (a), (b)には、ビーム引出し時のアークプラズマ波形およびビーム電流波形を示した。Figure 4 (a)は横軸 100 μ s/div とし、CH1 (青) にアーク電流 (I_{arc}) 波形、CH2 (薄青) にアーク電圧 (V_{arc}) 波形、CH4 (緑) はタイミングトリガーを示した。プラズマ点弧の繰り返しは 100 Hz、パルス幅は 500 μ s であり、高電圧電源 2 台は直流モードで動作させているため、ビーム生成のデューティ比はプラズマ生成のものと同値である。Figure 4 (b)は横軸 4 ms/div で、CH1 (青) にビーム電流値を表示した。ビーム電流波形のパルス幅は、アーク波形と同様 500 μ s であり、繰り返しは 100 Hz でビーム波形を示した。CH3 (マゼンタ) は、高圧プローブ (1:2000) で測定した引出し電圧と加速電圧の合計値である。5%デューティ比でのビーム運転は 1 時間程度実施し、各電流波形や電源動作等に異常が無いことを確認した。

3.3 7.5%デューティでのプラズマ・ビーム試験

5%デューティ比でのプラズマ点弧およびビーム引出しが 1 時間確認できたところで、プラズマ点弧のデューティ比を 7.5%; 繰り返し周波数 100 Hz \times パルス幅 750 μ s に増加させて試験を継続した。Figure 5 には、アーク波

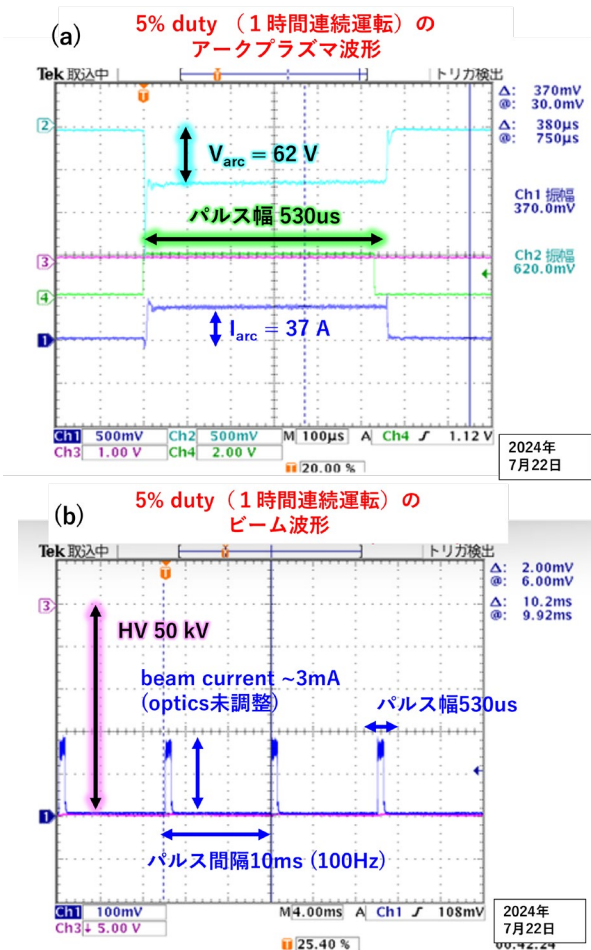


Figure 4: Waveforms in the 5% duty factor experiments; (a) the arc discharge and (b) the beam current.

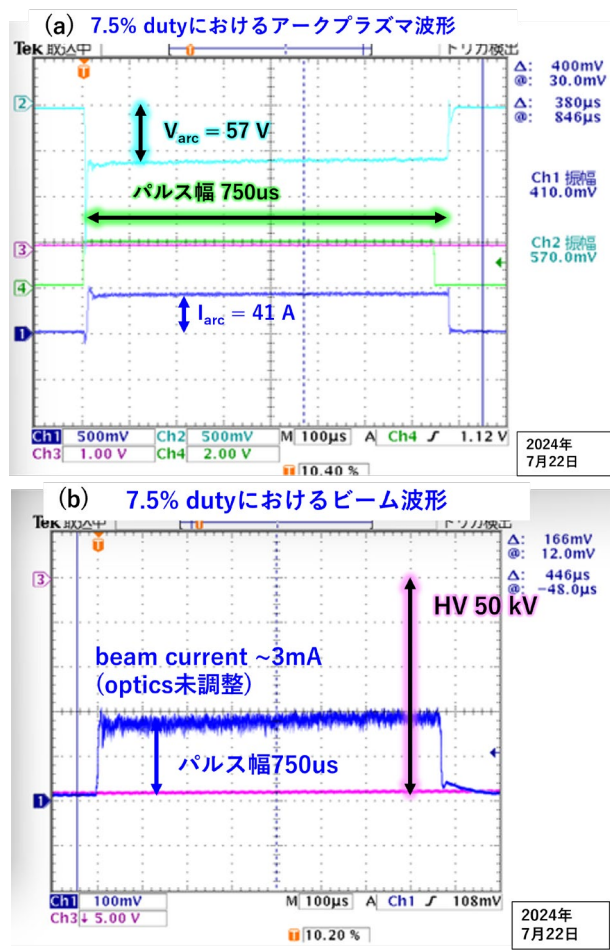


Figure 5: Waveforms in the 7.5% duty factor experiments; (a) the arc discharge and (b) the beam current.

形およびビーム波形を示した。パルスアーク電源回路の温度上昇を懸念して、7.5%デューティ比での試験は数分間に留めたが、タイミング変更直後に異常は見られなかった。デューティ比が増加することで、アーク DC 電源に要求される電流値が増加するため、CC limit は $2.5 \text{ A} \times 1.25 \text{ 倍} = 3.75 \text{ A}$ としたところ、アーク電流、電圧の値はそれぞれ 41 A と 57 V であり、5%デューティ試験時と概ね近い値が得られた。

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。

2023 年度は、高デューティ仕様に改良した LaB₆ イオン源のプラズマ試験を行った。5%デューティではフィラメントからの電子放出増加が見られたが、DC 電源制御により暴走モードを抑えられた。

上記結果を受け、2024 年度は LaB₆ イオン源に高電圧印加回路を整備し、ビーム試験を実施した。ビームオプティクスが未調整であったため、ビーム電流は確認で

きなかったが、5%デューティでの LaB₆ イオン源から 50 keV のビームを 1 時間連続で出力することに成功した。

また数分間ではあるが、7.5%デューティでプラズマ・ビーム試験にも成功した。今後は、未調整であったビームオプティクスを見直し、>5%デューティ・50 mA・50 keV でのビーム連続運転を目指す。

参考文献

- [1] Z. Fang *et al.*, “Progress report of the iBNCT accelerator”, The 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, July-Aug. 2024, TFSP15, this meeting.
- [2] T. Shibata *et al.*, “High-duty factor operation of the LaB₆ filament ion source”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2024, pp.388 – 391.
- [3] T. Shibata *et al.*, “Status of development on LaB₆ filament arc-driven multi-cusp ion source for iBNCT”, Proc. 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018), Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 385 – 387.
- [4] 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.