

iBNCT 用 LaB₆ フィラメント・マルチカスプイオン源の開発状況

STATUS OF DEVELOPMENT ON LAB₆ FILAMENT ARC-DRIVEN MULTI-CUSP ION SOURCE FOR IBNCT

柴田崇統^{#, A)}, 高木昭^{A)}, 池上清^{A)}, 杉村高志^{A)}, 南茂今朝雄^{A)}, 内藤富士雄^{A)}, 小林仁^{A)},
栗原俊一^{A)}, 本田洋介^{A)}, 佐藤将春^{A)}, 大越清紀^{B)}, 神藤勝啓^{B)}
Takanori Shibata^{#, A)}, Akira Takagi^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Kesao Nanmo^{A)}, Fujio Naito^{A)},
Hitoshi Kobayashi^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)}, Masaharu Sato^{A)}, Kiyonori Ohkoshi^{B)}, Katsuhiro Shinto^{B)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization
^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In order to satisfy the second term clinical trial condition of iBNCT, which requires 5 mA proton beam extraction from linac, beam operation of Lanthanum Hexaboride (LaB₆) filament has been started from Oct. 2017. In the test stand, plasma arc discharge properties and beam current measurement via Faraday-cup (FC) has been done under several ion source conditions. By Mar. 2018, 45 mA of beam current has been achieved at FC. Although the pulse width of arc discharge is limited to 200 μ s by the capacitor bank in power supply for pulsed arc, still the wave form of the arc discharge current/voltage and the resultant beam current at FC have shown very stable flat top (beam current fluctuation below 0.5 %) after 50 μ s. Further increase of beam current is required by optimization of AMFC (Axial Magnetic Field correction) field and filament emission which will be done in 2018.

1. iBNCT イオン源の状況

KEK、筑波大学、茨城県が共同で進めるホウ素中性子捕捉治療 (iBNCT) 開発の一環として、大電流の陽子ビームを生成可能な 8 MeV リニアックの調整が進められている。ビームの大電流化は、2014 年度より、(i) 施設検査条件; 平均電流 1.0 mA, (ii) 第 1 期治験条件; 平均電流 1.3 mA, (iii) 第 2 期治験条件; 平均電流 5 mA の三段階に分けて進められており、現在は第 1 期治験条件 (平均電流 1.3 mA) での安定運転を達成している[1]。

次なる課題である第 2 期治験条件において、平均 5 mA のビームを生成するためには、duty factor 10 % (パルス幅 1 ms, 繰返し 100 Hz) 条件下で、ピーク電流値 (flat top) 50 mA 以上をリニアックから出力する必要がある。また、LEBT ヤリニアック空洞内でのロスと考慮すると、イオン源からは概ね 60 mA 出力が要求される。

このようなピーク大電流化を図るため、2017 年度 10 月より、新たに六ホウ化ランタン (LaB₆) フィラメントを用いる熱陰極アーク放電型のイオン源開発を開始した。フィラメントによる放電を行う水素イオン (H⁺) 源は、プラズマ点弧の容易さ、放電状態の安定性、またビーム電流出力の高さの面で利点がある。特に、タングステンフィラメントを使用したイオン源では、過去に陽子ビーム電流で 100 mA 以上が達成された実績がある。

一方、現在 iBNCT で使用している電子サイクロロン共鳴 (ECR) 方式のイオン源に比べて、フィラメントを用いる方式では、フィラメント自体の寿命のために、定期的なメンテナンスを要することが課題である。フィラメントの寿命は、材質と放電時の使用温度に強く依存することから、この問題を解決するために、長寿命運転実績のある LaB₆ を使用したフィラメントを導入した。

[#] takanori.shibata@kek.jp

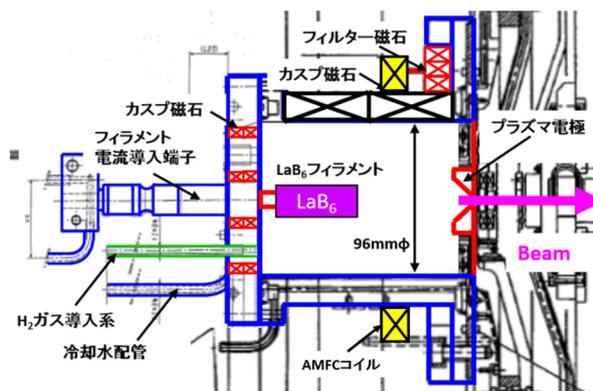


Figure 1: Geometry of LaB₆ filament ion source.

本論文では、イオン源とテストスタンドの仕様、および 2017 年度末までのビーム試験状況について報告する。

2. テストスタンドとイオン源の設計

本試験では、iBNCT での陽子ビーム大強度化に向け、LaB₆ フィラメントを使用した熱陰極アーク放電型・マルチカスプ水素イオン源の調整運転を 2017 年 12 月より開始した。また、2017 年秋期より、KEK つくばキャンパスにて iBNCT イオン源開発用テストスタンドを構築した。テストスタンドは、イオン源、静電加速用の真空容器、およびビーム計測系にて構成される。ビーム計測系は、ファラデーカップ、質量分析計、または 2 重スリット式のエミッタンスモニターのいずれかを、真空容器終端部に取り付けられる。

Figure 1 には、イオン源の外観を示した。イオン源は、円筒型の SUS チャンバー周囲に 18 極のカスプ磁石を取り付けたプラズマ生成室を持つ。天板プレートには、

Table 1: Operation Parameters of Ion Source

H ₂ ガス流量	5.5 – 13.0 sccm
フィラメント印加電流	72 A
フィラメント電源電圧	8.0 V
アーク電流	50 – 100 A
アーク電圧	80 – 130 V
AMFC 電流	0.0 – 5.0 A

Table 2: High Voltages for Ion Beam Extraction

引出し電圧	7.0 – 10.0 kV
引出し電源の電流	< 0.1 mA
合計電圧	50.0 kV
合計電圧印加用の電源電流	~ 2.0 mA
リペラー電圧	-1.0 kV

LaB₆ フィラメント用電流導入端子、H₂ ガス導入系のポート、および 4 極のカスプ磁石を挿入した。フィラメント形状は、KEK PS イオン源用に製作された LaB₆ の C9-a 形状を採用した[2]。LaB₆ フィラメントは、同様の型のものが J-PARC で試験され、1,200 h の H⁻(負水素イオン)ビーム連続出力の実績を持つ[3]。iBNCT の 1 日の照射時間を 8 時間と見積もっても、3 ヶ月以上のメンテナンスフリー期間が期待できる。天板の対面には、孔径 9.0 mmφ のモリブデン製プラズマ電極を取り付け、イオン源チャンバ電位と同電位とした。また、プラズマ電極の直上には、1 組のフィルター磁石を取り付け、短手方向の磁場を形成することで、プラズマの閉じ込め性能向上を図る。電子の閉じ込め性能が高いと、電子衝突による水素分子イオン (H₂⁺, H₃⁺) の解離反応、および解離性再結合反応が促進されるため、プロトン比を向上させる効果が期待できる。イオン源軸方向に磁場を形成する AMFC (軸磁場補正) コイルを取り付け、イオン閉じ込め性能と引き出し面近傍のビームオプティクス調整を可能とした。主なイオン源運転パラメータを、Table 1 に示した。

イオン源からの出力ビームエネルギーは、iBNCT 実機と同様 50 keV である。テストスタンドではプラズマ電極を含めた 3 枚の電極板に高電圧を印加し、二段加速によってビームを引き出す。ビームは、上流から順に、それぞれプラズマ電極、引出電極 (孔径 7.1 mmφ)、および接地電極 (孔径 12.4 mmφ) を通過する。ここでは、二段加速の内、プラズマ電極と引出電極間の電圧を引き出し電圧、引出電極と接地電極間の電圧を加速電圧と呼ぶ。テストスタンドでは、高圧電源回路の構成上、引き出し電圧、および二段の合計電圧を、設定可能である。また、高 duty factor での試験時には、下流部で発生した 2 次電子のバックストリームによるイオン源機器の放射化、損耗を防ぐため、真空容器接地電極近傍に、リペラー電極を挿入した。主な高電圧条件を、Table 2 に示す。

3. ビーム試験結果

テストスタンドの構築は 2017 年 10-12 月に完了した。以降、2018 年 3 月までのプラズマ試験、ビーム試験結果について報告する。

Figure 2 には、2018 年 2 月時点で取得したアーク電流 (CH1)・アーク電圧 (CH2) のパルス波形を示した。イオン源アークパルサーの容量制限から、現在はパルス幅

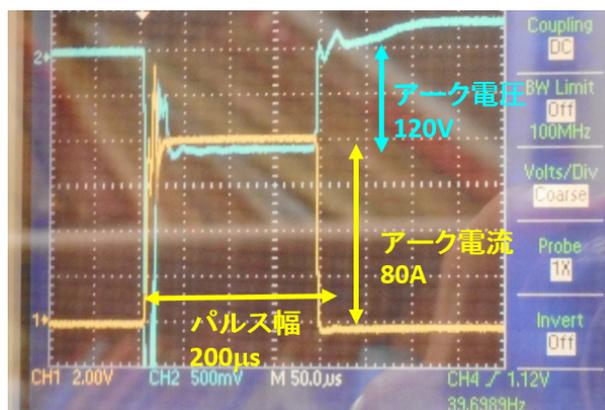


Figure 2: Wave forms of arc discharge current (CH1: 20A/div) and voltage (CH2: -50V/div) observed in Feb. 2018 at test stand.

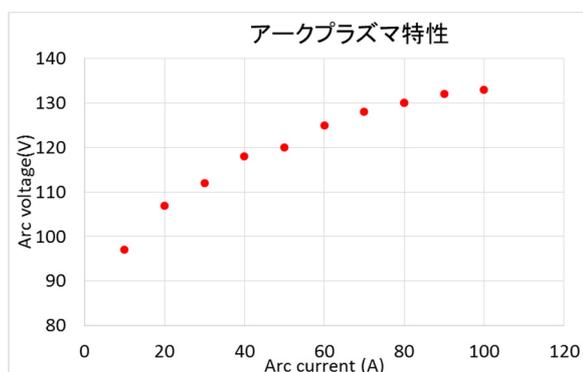


Figure 3: Arc current/voltage property of LaB₆ filament ion source discharge.

200 μs、繰返し 20 Hz にてプラズマ生成試験を実施している。プラズマ、およびビーム波形取得時の条件は、フィラメント電流は 72 A、ガス流量は 8.0 sccm、AMFC は 0.0 である。このときのアーク電流は 80 A、アーク電圧は 120 V で 200 μs の安定波形を得た。最初の 30 μs 前後では、プラズマ点弧のためのアーク電源で CC 制御をしていることから、無負荷イオン源チャンバ内に大電圧が生じている。このような異常波形領域が 100 μs 以上ある場合は、リニアックへの安定ビーム供給に影響を及ぼす。それ以下である場合は、低エネルギービーム輸送 (LEBT) 内部の空間電荷効果が定常に至るまでの時定数に比べて短い。プラズマ点弧後 100 μs 以降は、安定な Flat top 波形が形成されている。

Figure 3 には、同条件におけるアーク電流・電圧特性を示した。アーク電源からイオン源への投入パワーを増やしていくと、アーク電圧は 130 – 140 V の範囲に収束し、アーク電流のみが増加していく。本試験の場合、アーク電源のコンデンサバンク容量からアーク電流が 100 A に制限されるため、大容量電源の製作による、アーク電流、および duty factor の向上が次なる課題である。また、一般的には、アーク電圧は 70 – 100 V で電離効率が最適となることから、現在のセッティングではややアーク電圧過多の状態である。この理由として、今期のプラズマ試験では、フィラメント電流を 70 A に制限していることが挙

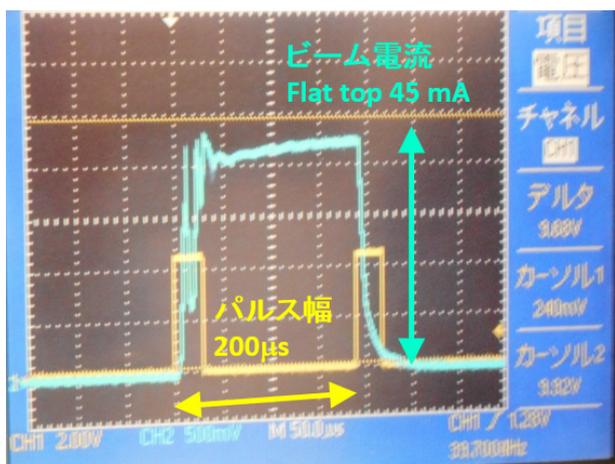


Figure 4: Wave form of ion beam current at FC (CH2; 10mA/div) observed in Feb. 2018. The Channel 1 shows trigger injection of arc pulser power supply.

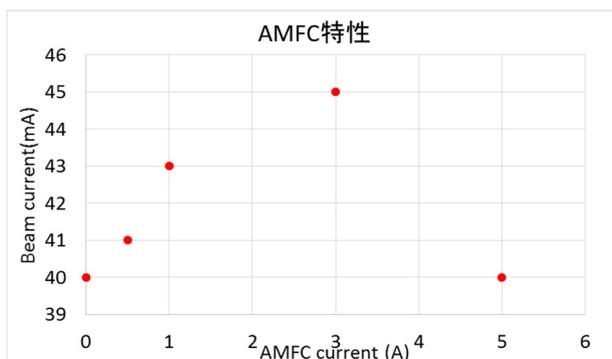


Figure 5: Dependence of FC beam current to AMFC injection current.

げられる。フィラメントの電子放出電流密度として、Richardson-Dashman の式

$$J = A_R T^2 \exp(-\phi/k_B T) \quad (1)$$

を用いると、LaB₆ フィラメント温度 T から十分なエミッションを得るには 1550°C 以上が必要とされ、電子放出電流値はフィラメント温度に強く依存することが判る。現在は、フィラメント温度 1500°C 前後であるため、エミッションの増加により、アーク効率向上を図ることが期待される。同じプラズマ条件でビーム引出し試験を実施した際、ファラデーカップにて測定された電流ビーム波形を Fig. 4 に示した。ピーク電流は 45mA までを確認した。同条件での引出し電圧は 8.7 kV で電界レンズの最適値を得た。ビームパルス幅 200 μs の最初の 50 μs は、前述したとおり、プラズマ点弧時の非定常状態の影響を受け、ビームのオプティクスは安定しないが、それ以降ビーム電流値の変動は、概ね 0.5 % の範囲に収まっている。

ビーム電流値のさらなる増加に向け、イオン源 AMFC コイルによる磁場強度とビーム電流の依存性測定を実施した。Figure 5 横軸には、AMFC コイル印加電流値、縦軸にはファラデーカップにて測定した電流値を示した。AMFC は図1に示したイオン源プラズマ電極近傍に、10 - 30 Gauss の軸方向磁場を形成する。アーク放電により

生成されたプラズマの閉じ込め性能が向上するとともに、メニスカスにおけるビーム初期発散角を決定する。これにより、電界レンズの条件に対するビームオプティクスの調整を行うとともに、プロトン比の向上を図ることが可能である。

4. まとめと今後の方針

iBNCT 第 2 期治験条件の目標であるリニアック平均電流 5 mA 出力に向け、2017 年度より大出力・長寿命 LaB₆ フィラメントイオン源の調整運転を開始した。2018 年 3 月までのビーム試験を実施し、ファラデーカップ出力で 45 mA のパルスビーム波形を確認した。パルス幅 200 μs の初期 50 μs は、プラズマアーク点弧の際の異常放電によるものだが、以降のアーク電流・電圧、およびビーム電流は 0.5 % 以内に収まるフラットな波形であることから、長パルス化の際の安定ビーム供給が期待できる。

一方、プラズマのアーク電流・電圧の flat top は、それぞれ 80 A, 130 V と現時点では最適ではない。そのため、今後はフィラメントからの電子放出電流を増加させた高パワー試験による出力増加、また AMFC 調整によるプラズマ閉じ込め性能・プロトン比向上の試験を行う必要があり、これらは 2018 年度に実施される。

また、アークパルサー電源の容量制限から、現状はパルス幅 200 μs, duty factor 0.4 % でビーム調整を行っている。iBNCT への導入に向け、コンデンサバンク容量を増強した長パルスアーク電源の開発が課題とされる。

参考文献

- [1] M. Sato, *et al.*, "Status report of the iBNCT accelerator", these proceedings.
- [2] K. Ikegami, *et al.*, Rev. Sci. Instruments **81**, 02A717 (2010).
- [3] K. Ohkoshi, *et al.*, "Operation status of the J-PARC ion source", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (August 3-5, 2013, Nagoya, Japan) pp. 946 - 949.