

IFMIF 原型加速器 (LIPAc) 入射器の現状

PRESENT STATUS OF THE INJECTOR FOR IFMIF LINEAR PROTOTYPE ACCELERATOR (LIPAC)

神藤勝啓^{#, A)}, 市川雅浩^{A)}, 高橋博樹^{A)}, 近藤恵太郎^{A)}, 春日井敦^{A)}, Raphaël Gobin^{B)}, Frank Senée^{B)},
Nicolas Chauvin^{B)}, Juan-Marcos Ayala^{C)}, Alvaro Marqueta^{C)}, Benoît Bolzon^{B), C)}, 奥村義和^{C)}
Katsuhiro Shinto^{#, A)}, Masahiro Ichikawa^{A)}, Hiroki Takahashi^{A)}, Keitaro Kondo^{A)}, Atsushi Kasugai^{A)},
Raphaël Gobin^{B)}, Frank Senée^{B)}, Nicolas Chauvin^{B)}, Juan-Marcos Ayala^{C)}, Alvaro Marqueta^{C)}, Benoît Bolzon^{B), C)}
and Yoshikazu Okumura^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

^{C)} IFMIF/EVEDA Project Team

Abstract

Commissioning of the injector for the IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) Linear Prototype Accelerator (LIPAc) was started at International Fusion Energy Research Centre (IFERC) located in Rokkasho, Aomori in November 2014. This report describes some results obtained during this commissioning period since November 2014. The normalized rms emittance for H⁺ beam with the energy of 100 keV and the extraction current of 137 mA was 0.28 π mm mrad. The proton ratio of 80 % with H⁺ beam energy of 100 keV and the extraction current of 160 mA was obtained at the middle of the LEPT consisting of two solenoids. The deuteron operation was also started in July 2015. The preliminary results of the deuteron operation are also shown in this report.

1. はじめに

核融合炉材料開発において、D-T 核融合反応で生成される 14 MeV の中性子による厳しい放射線環境下にさらされる炉材料に対して、その照射試験による性能実証が必要不可欠とされてきた。この認識の下、国際核融合材料照射施設 (IFMIF) は、重陽子-リチウム (d-Li) 核反応による加速器駆動型中性子源として、最大 10¹⁸ n/m²s というこれまでにない強力な中性子場を生成する施設であり、その技術開発が進められている。IFMIF では、大電流 (125 mA × 2 基) の重陽子 (D⁺) ビームを線形加速器で 40 MeV まで加速し、液体リチウムターゲットに入射することで、D-T 核融合反応を模擬した連続スペクトルの中性子場を発生する。

2007 年より日欧の国際事業協定の一つとして始まった IFMIF の工学実証・工学設計活動 (EVEDA) では、IFMIF の原型加速器 (Linear IFMIF Prototype Accelerator; LIPAc) の設計・製作・試験を行うことが含まれている。この原型加速器は青森県六ヶ所村の国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) にて、段階的にビーム試験を行う予定で進められている。LIPAc 入射器は 2013 年より輸送、据付が進められ^[1]、2014 年 11 月 4 日に陽子 (H⁺) によるビーム試験を開始した。H⁺ ビームでの加速器のコミッショニングを進めた後、2015 年 7 月 7 日に D⁺ ビーム生成に成功し、7 月 15 日に施設検査の受検、7 月 17 日に施設検査の合格証を受けた^[2]。

本稿では、IFERC に設置された LIPAc 入射器の概

要及びビーム試験の結果について報告する。

2. LIPAc 入射器の概要

IFMIF 加速器及びその原型加速器である LIPAc の構成や現状については、参考文献[3]及び[4]に記載されている。LIPAc の入射器には Table 1 に示した性能が要求される。

Table 1: Requirement of the IFMIF/LIPAc Injector

| | |
|---------------------------------------|--|
| Particle type | D ⁺ (H ⁺ for beam tests) |
| Beam energy/current | 100 keV/ 140 mA |
| D ⁺ fraction | 99 % (at LEPT exit) |
| Transverse emittance (normalized rms) | 0.25 π mm mrad (at LEPT exit) |
| Duty factor | CW (pulse for beam tests) |

入射器は 2.45 GHz のマグネトロンを用いた電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源と、2 台のソレノイド電磁石を用いた低エネルギービーム輸送系 (LEPT) で構成されている。この入射器は、フランス原子力・代替エネルギー庁サクレイ研究所 (CEA/Saclay) で設計・製作・予備試験^[5]が行われ、2014 年 11 月より原子力機構六ヶ所サイトにおいて水素 (H₂) による入射器のビーム試験が開始された。

Figure 1 にイオン源の概念図を示す。プラズマ源は、2 つのコイル電磁石によりプラズマを閉じ込める構造になっており、ECR 条件を満たす磁場 (875 Gauss) の位置を調整できる。ビーム引き出し系は、

[#] shinto.katsuhiro@jaea.go.jp

Figure 1 に示す通り 5 枚電極構造になっており、プラズマ電極と接地電極の間に設けた中間電極に印加する電圧を調整することで、ビーム引き出しの最適化を行う。LEBT からの逆流電子を抑制するために、2 枚の接地電極の間にリペラー電極を設けている。プラズマ電極のビーム穴径は、 $\phi 8$ mm、 $\phi 10$ mm、 $\phi 12$ mm の 3 種類があり、これまでに $\phi 8$ mm 及び $\phi 10$ mm の穴径の電極を使ってビーム試験を行った。

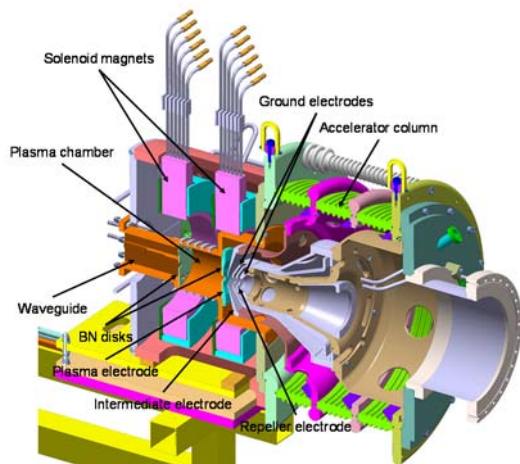


Figure 1: ECR ion source for LIPAc.

LEBT は、空間電荷効果によるビーム発散、輸送中のエミッタンス増大を防ぐために約 2 m の長さであり、長さ 310 mm の 2 つのソレノイド電磁石を用いた集束系で構成されている。各ソレノイド電磁石の中には、垂直・水平方向にビームを偏向できるようにステアリング電磁石が挿入されている^[6]。

イオン源より引き出された水素/重水素正イオンビームの品質を評価するためのビームモニタとして、銅製のビームストッパー（2 台のソレノイドの間に 1 枚、LEBT 下流のビーム診断チャンパー終端に 1 枚）、アリソンスキャナー型のエミッタンスモニター^[6]、CID カメラを用いたビームプロファイルモニター^[7]、残留ガスとの衝突により中性化した水素イオン粒子から発光した Balmer- α 光の Doppler シフトを利用した分光によるビームのイオン組成比測定^[7]、空間電荷緩和効果を調べるための 4 grid 分析器などが設けられている。

3. H⁺ビームによるコミッショニング

2014 年 11 月より、H⁺ビームによる LIPAc 入射器のコミッショニングを始めた。本コミッショニングでは、先ずイオン源のコンディショニングと並行して、据え付けた機器の動作について不具合の有無を確認した。その後、ビーム診断機器は 2 台のソレノイドコイルの間に設置して、イオン源より引き出されたビームの品質を調べた。ここでは、アリソンスキャナー型エミッタンスモニターを用いたエミッタンス測定とイオン源より引き出された水素正イオンビームについて分光によるビーム中イオン組成比の測定の結果を示す。

3.1 エミッタンス測定

H⁺ビームのエネルギー 100 keV におけるエミッタンス測定を行った。Figure 2 にイオン源からの引き出し電流 137 mA でのエミッタンス図を示す。

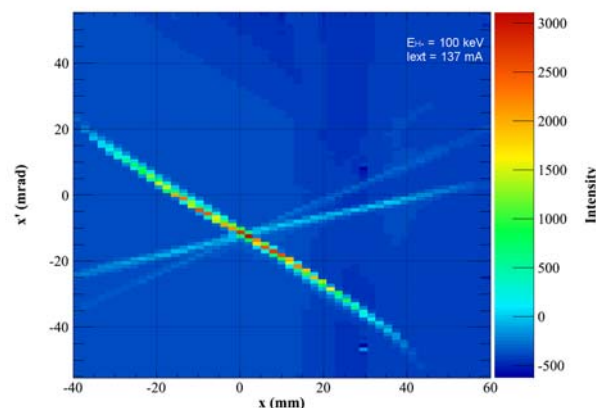


Figure 2: Emittance diagram of H⁺ beam with the beam energy of 100 keV and the extraction current of 137 mA.

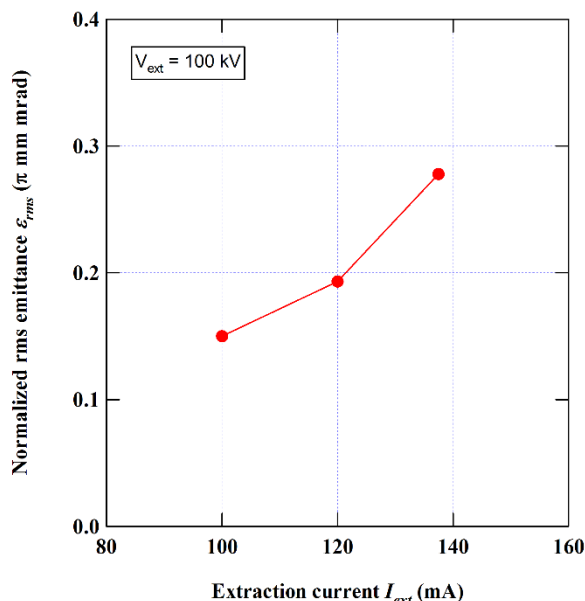


Figure 3: Normalized rms emittance of H⁺ beam plotted as a function of extraction current.

マグネトロンからの RF 入力を変えることにより、引き出し電流を変化させたときのエミッタンスの変化を Figure 3 に示す。

3.2 水素正イオンビーム中イオン組成比の測定

イオン源より引き出された正イオンビームは H⁺だけでなく、分子イオン H₂⁺及び H₃⁺も含まれている。後段の加速器 (RFQ など) に不純物イオンを含まずに大電流を加速するためには、プロトン比が高い必要がある。非破壊でイオン組成比を測定するために、ビームが真空中を飛行する時に真空中の残留水素分子と衝突して、励起電子が脱励起する時に発する Doppler シフトした Balmer- α 光の強度よりイオン組

成比を求めた^[8]。Figure 4 に D⁺ビームエネルギー100 keV で引き出し電流に対するイオン種比の割合を示す。RF 入力を大きくすることでイオン源の引き出し電流を増加しているため、引き出し電流増加に伴って、プロトン比が増加していることが確認された。H⁺ビームエネルギー100 keV の時に引き出し電流160 mA で約80%のプロトン比を得た。

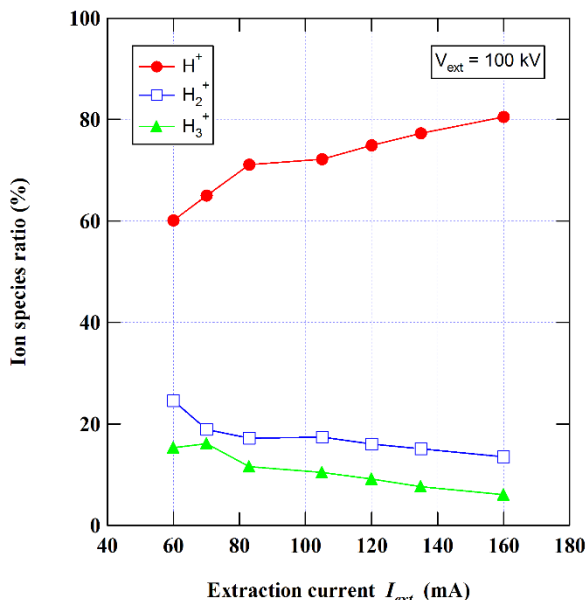


Figure 4: Ion species ratio as a function of extraction current. The extraction voltage is applied to 100 kV.

4. D⁺ビームによるコミッションング

2015年7月より、D⁺ビームによるコミッションングを開始した。D⁺ビームエネルギー100 keV における重水素正イオンビームによる規格化 rms エミッタンスを Figure 5 に示す。これまでのところ、ビームパルス幅 19 ms で、プラズマ閉じ込め用コイル電流、D₂ ガス流量や引き出し系の中間電極印加電圧などのイオン源のパラメータの違いにより多少変化するが、D⁺ビームの規格化 rms エミッタンスは約 0.3 π mm mrad を得た。しかしながら、長パルス幅で引き出し電流を 100 mA 以上まで増加してビームを安定に引き出すためには、イオン源のパラメータを大きく変える必要があることが分かった。その場合には、イオン源内プラズマの状態が変わってしまうため、エミッタンスは 0.4 π mm mrad に増加した。

5. まとめと今後の予定

2014年11月より、LIPAc 入射器のコミッションングを開始し、2015年7月には重陽子ビーム生成を行うに至った。陽子ビーム及び重陽子ビームについて、ビームエミッタンス、イオン組成比測定を進めていき、本入射器のビームパラメータを概ね測定できたところである。

8月下旬よりプラズマ電極の穴径φ12 mm を用いてビーム試験を実施する予定である。また、ビーム測定機器を LEBT 下流に設置した入射器用ビーム診断

チャンバーに移して、RFQ 入射を模擬した際のビーム品質の測定をし、入射器として要求されている性能の評価を行う予定である。

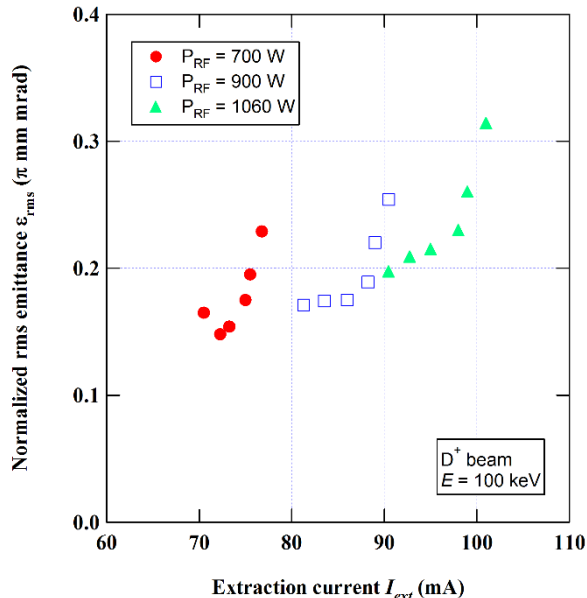


Figure 5: Normalized rms emittance as a function of extraction current with the pulse length of 19 ms. As the intermediate electrode voltage was also changed, the emittance was slightly changed even at the same RF power input.

参考文献

- [1] 神藤勝啓 他、Proc. 11th Ann. Meet. PASJ, p.1109-p.1112 (2014).
- [2] 春日井敦 他、本プロシーディングス.
- [3] 杉本昌義 他、「加速器」 Vol. 7, No. 2, p.110-p.118 (2010).
- [4] 奥村義和 他、Proc. 11th Ann. Meet. PASJ, p.194-p.198 (2014) 及び本プロシーディングス.
- [5] R. Gobin et al., Rev. Sci. Instrum., 85, 02A918 (2014).
- [6] R. Gobin et al., Proc. IPAC2013, p.3758-p.3760 (2013).
- [7] F. Sénée et al., Proc. DIPAC2011, p. 407-p. 409 (2011).
- [8] C. F. Burrell et al., Rev. Sci. Instrum., 51, p. 1451-p.1462 (1980).