

# IFMIF/EVEDA 原型加速器用入射器の現状

## STATUS QUO OF THE INJECTOR FOR THE IFMIF/EVEDA PROTOTYPE ACCELERATOR

神藤勝啓<sup>#,A)</sup>, 市川雅浩<sup>A)</sup>, 高橋康之<sup>A)</sup>, 久保隆司<sup>A)</sup>, 堤和昌<sup>A)</sup>, 菊地孝行<sup>A)</sup>,  
春日井敦<sup>A)</sup>, 杉本昌義<sup>A)</sup>, ラファエル ゴバン<sup>B)</sup>, パトリック ジラルド<sup>B)</sup>, ニコラス ミシャーラ<sup>B)</sup>,  
フランシス アロール<sup>B)</sup>, デニス ロワゾー<sup>B)</sup>, パトリス ジオ<sup>B)</sup>, ホアン-マルコス アヤラ<sup>C)</sup>, 奥村義和<sup>C)</sup>  
Katsuhiko Shinto<sup>#,A)</sup>, Masahiro Ichikawa<sup>A)</sup>, Yasuyuki Takahashi<sup>A)</sup>, Takashi Kubo<sup>A)</sup>, Kazuyoshi Tsutsumi<sup>A)</sup>,  
Takayuki Kikuchi<sup>A)</sup>, Atsushi Kasugai<sup>A)</sup>, Masayoshi Sugimoto<sup>A)</sup>, Raphael Gobin<sup>B)</sup>, Patrick Girardot<sup>B)</sup>,  
Nicolas Misara<sup>B)</sup>, Francis Harrault<sup>B)</sup>, Denis Loiseau<sup>B)</sup>, Patrice Guiho<sup>B)</sup>, Juan-Marcos Ayala<sup>C)</sup> and  
Yoshikazu Okumura<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>B)</sup> Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

<sup>C)</sup> IFMIF/EVEDA Project Team

### Abstract

The prototype accelerator is being developed for an engineering validation of the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) which is equipped with an accelerator-driven-type neutron source for developing fusion reactor materials. This prototype accelerator is a deuteron linear accelerator consisting of an injector, an RFQ, a superconducting linac, RF power systems, a beam dump and beam transport lines. It aims to produce a CW D<sup>+</sup> beam with the beam energy and current of 9 MeV and 125 mA, respectively. The injector test was examined at CEA/Saclay in 2012 for producing a CW H<sup>+</sup> beam and a CW D<sup>+</sup> beam with the beam energy and current of 100 keV and 140 mA, respectively. After the beam test at CEA/Saclay, the injector was transported to the International Fusion Energy Research Centre (IFERC) located in Rokkasho, Aomori, Japan. In the end of 2013, installation of the injector was started at IFERC for the injector beam test beginning from autumn 2014 in order to obtain better beam qualities for successful injection and acceleration of the following accelerators. In this paper, some results of the injector beam test performed at CEA/Saclay and the status quo of the installation of the injector at IFERC are presented.

### 1. はじめに

核融合エネルギーの開発段階は、国際核融合実験炉 (ITER) の建設が始まり、今後発電システムとしての成立性を実証するための原型炉を経て、実用化されることを目指している。核融合エネルギーの実用化には、D-T 核融合反応の生じている燃焼プラズマから効率よく電力に変換すること、燃料となるとトリチウムの再生産を行うことなどが必要となる。このような燃焼プラズマの性能向上とともに、核融合炉工学分野の開発も必須である。特にプラズマを閉じ込めるための材料は、プラズマから発生する熱や中性子による、これまでに経験したことのない厳しい環境下にさらされる。そのため、核融合研究開発の当初より材料照射試験による性能実証が不可欠とされてきた。

炉材料開発には、D-T 核融合反応で生成される 14 MeV の強力中性子源が不可欠であるという国際認識の下、重陽子-リチウム (d-Li) ストリッピング反応による加速器駆動型中性子源を選択した国際核融合材料照射施設 (IFMIF) <sup>[1]</sup> の技術開発が進められてきた。IFMIF に必要な材料照射用の中性子場は最大  $10^{18}$  n/m<sup>2</sup>s というこれまでにない強力なものであ

り、D-T 核融合反応で発生する 14 MeV 中性子による影響をより正確に評価するためには、高速炉を含む核分裂炉やスポレーション源とは異なる中性子エネルギー分布を持つことが不可欠である。また、照射材の材料試験におけるデータの精度を高めるために、限られた大きさを持った複数個の試験片に対して照射条件を厳しく制御しながら照射する必要がある。このため、IFMIF では大電流の重陽子ビームを一樣な密度分布に拡大した上で、ビームが突き抜けない十分な厚さの液体リチウムに入射することで発生する連続スペクトルの中性子場を生成する加速器駆動型中性子源が選択された。

2007 年より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 (Engineering Validation and Engineering Design Activities, EVEDA) では、IFMIF の原型加速器の設計・製作・試験を行うことが含まれている。この原型加速器は、IFMIF 実機用加速器の低エネルギー部そのままの構成であり、入射器-RFQ-MEBT-超伝導リナックの初段 (実機では 4 段で D<sup>+</sup>ビームを 40 MeV まで加速) から成る。これまでに、ヨーロッパの研究機関において、加速器機器の設計・製作が行われてきており、それらを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、以下「六ヶ所サイト」と記す)

<sup>#</sup> shinto.katsuhiko@jaea.go.jp

にて原型加速器として組み立て、段階的にビーム試験を行う予定である。2012年までフランス原子力庁サクレ研究所において、入射器の開発が進められ、2013年に六ヶ所サイトに輸送されてきた。現在、入射器の据付を行っており、2014年秋よりビームコミッショニング開始の予定である。

本論文では、入射器の CEA/Saclay での入射器の試験状況及び IFMIF での入射器の据付状況について報告する。

## 2. CEA/Saclay での IFMIF/EVEDA 原型加速器用入射器のビーム試験

### 2.1 IFMIF/EVEDA 原型加速器用入射器

IFMIF/EVEDA 原型加速器用入射器は、重水素イオン源と低エネルギービーム輸送系 (LEBT) で構成されている。この入射器は CEA/Saclay で、設計、製作及びビーム試験が行われた。イオン源から引き出され、LEBT を通過してきたビームパラメータを測定するために、LEBT の後方にはビームストッパーを内蔵したビーム診断用の真空容器が設けられている。この真空容器も六ヶ所サイトに輸送されてきており、入射器のビームコミッショニングで用いられる。RFQ を設置する時には、このビーム診断用真空容器は取り外されるため、ビームコミッショニング期間で、RFQ に入射するビームの特性を十分に理解して、再現性のある信頼度の高い入射器にする必要がある。

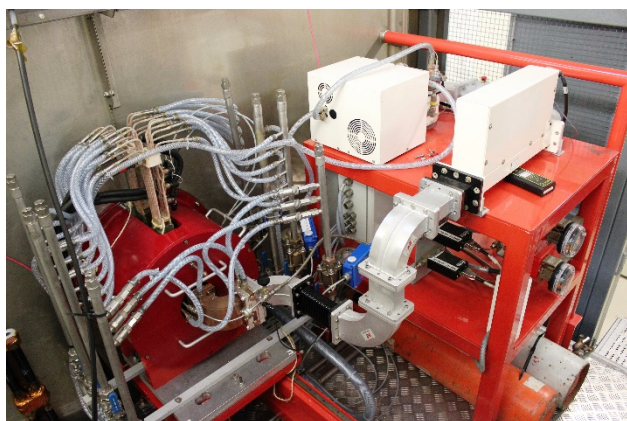


Figure 1: Photograph of the ion source for the IFMIF prototype accelerator installed at CEA/Saclay.

Figure 1 に入射器のイオン源部の写真を示す。100 kV の高圧ステージ上に 2.45 GHz の ECR イオン源が設置される。イオン源より引き出されたビームの性能を評価するため、ビーム診断機器が LEBT 及びその下流のビーム診断用の真空容器に設置されている<sup>[2]</sup>。Figure 2 に LEBT 部の写真を示す。この入射器の詳細については、参考文献[3]、[4]などに示されている。IFMIF の入射器に要求される仕様は Table 1 の通りである。イオン源の引き出し系は、当初 4 枚電

極での引き出し構造で設計、製作されて試験を行っていたが、高電圧を印加時には、電極間での放電が多発したため、中間電極と電子抑制電極の間に接地電極を設けて、2012年9月に5枚電極の引き出し構造に変更した<sup>[5]</sup>。

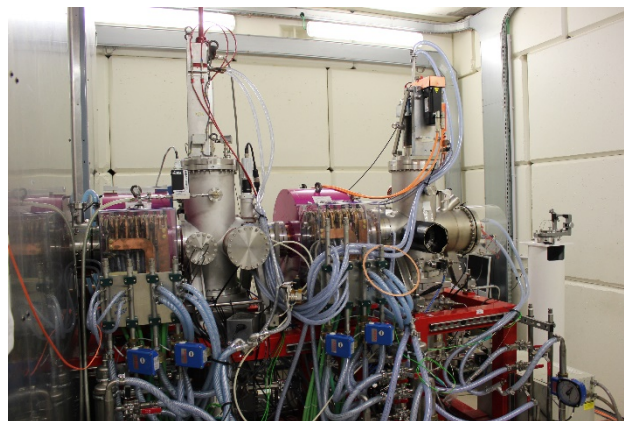


Figure 2: Photograph of the LEBT for the IFMIF prototype accelerator installed at CEA/Saclay.

LEBT は、空間電荷効果によるビーム発散、エミッタンスの増大化を少なくするために、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おり、長さは 2.05 m である。各ソレノイド電磁石は 0.2 Tm の BL 積を持つ。これらのソレノイド電磁石の中には、垂直、水平方向に偏向できるようにステアリング電磁石が入れられている。このステアリング電磁石で、100 keV の重陽子ビームに対して、30 mrad の補正が出来る。

Table 1: Requirement of the IFMIF Injector

Particle type	D <sup>+</sup> (H <sup>+</sup> for beam tests)
Beam energy	100 keV
Beam current	140 mA
D <sup>+</sup> fraction	99 % @ LEBT exit
Transverse emittance (normalized rms)	0.25 $\pi$ mm mrad @ LEBT exit
Duty factor	CW (pulse for beam tests)
Beam rise/fall time	10 $\mu$ s

### 2.2 CEA/Saclay での入射器ビーム試験

入射器を六ヶ所サイトへ輸送する前に、入射器の性能評価 (事業協定による調達物の受入試験) が 2012年11月に CEA/Saclay で JAEA 及び IFMIF/EVEDA 事業チームの専門家の立ち合いの下で行われた。受入試験での結果の一例として、イオ

ン源からの引き出し電圧 100 keV で、パルス幅及び繰り返しをそれぞれ 10 ms 及び 10 Hz でのビーム試験結果を表 2 に示す<sup>[6]</sup>。I<sub>bs</sub> はビームストッパーでのビーム電流、εは横方向の規格化 RMS エミッタンスである。重陽子比には、ビームと LEPT 内の残留ガスとの衝突による発光を Doppler シフト法による分光から導出した。

原型加速器では、RFQ 以降の機器の放射化を避けるためにパルス運転も行う必要があり、入射器から引き出されたパルスビームの幅を小さくし、立ち上がり・立ち下がり性を良くするために LEPT 内にビームチョッパーを設置する予定である。CEA/Saclay ではビームチョッパーの開発を十分に行えなかったため、六ヶ所サイトにて行う必要がある。また、CW 運転時のビームエミッタンスの測定も十分に行えなかったため、これについても六ヶ所サイトでのビームコミッショニング期間に行う必要がある。

Table 2: Experimental Results of the Injector Acceptance Test (E = 100keV, 10 ms/10 Hz)

I <sub>bs</sub> (mA)	D <sup>+</sup> fraction (%)	ε (π mm mrad)
100	80	0.14
110	83	0.15
120	85	0.16
130	88	0.17
140	90	0.20
150	91	0.26

### 3. IFMIF/EVEDA 原型加速器用入射器の六ヶ所サイト据付状況

2012 年 11 月の受入試験が終了した後に、CEA/Saclay の入射器一式は解体、梱包されて、2013 年 3 月より機器が六ヶ所サイトに順次搬入された。この入射器の搬送期間に、入射器を含む原型加速器を駆動するためのヨーロッパ調達分の電気設備や電源類の水冷に用いる熱交換器なども搬入されてきた。

2013 年 11 月より入射器及び電気設備、熱交換器などの六ヶ所サイト内の IFMIF/EVEDA 開発試験棟への据付が開始された。入射器については、これまでに CEA/Saclay より 6 名の研究者、技術者が六ヶ所サイトに来て、JAEA の研究者、技術者らと一緒に据付作業を行ってきた。Figure 3 に六ヶ所サイトでの入射器の据付作業の状況を示す。

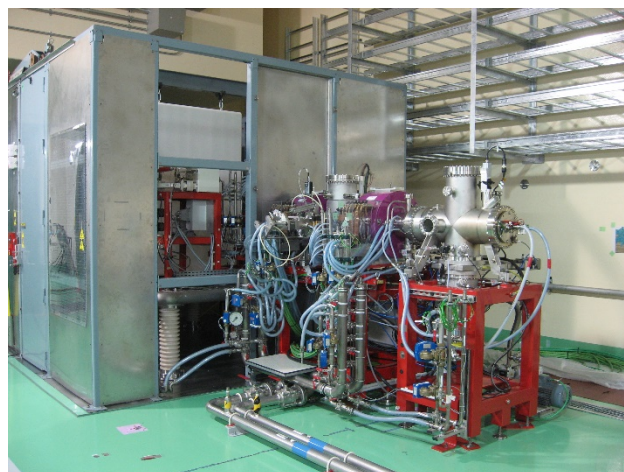


Figure 3: Injector installed at IFMIF/EVEDA accelerator building in Rokkasho.

国際協力の下で実験装置を開発する際には、電気設備、冷却水配管などの付帯設備においても、国際規格などを基に設計や製作を行うことが多い。今回の国際事業において生じた問題点を示すことは、将来の ILC など国際協力事業への注意喚起になると思われる。

電気設備については、日本では「電気設備術基準・解釈」を基に電気工作物などを設計・製作されているが、ヨーロッパでは IEC (国際電気標準会議) が策定した標準を基に、電気機器の設計・製作されている。そのため、接地系統や接地ケーブルの配色について日欧で異なるため、調整を行う必要があった。例えば、接地系統については、日本は TT 系統、ヨーロッパは TN-S 系統を採用している。ヨーロッパの機器を設置するために六ヶ所サイトでも加速器機器に対する接地系統は接地系統を混在させないようにある段階のところで TN-S 系統に統一している。ケーブルの外皮の色についても、日本では緑色が接地ケーブルとして通常用いられているが、ヨーロッパでは緑色のケーブルも電力ケーブルとして用いられている。そのため、六ヶ所サイトでは緑/黄のストライプの外皮を接地ケーブルとしている。

冷却水などの配管の規格については、日本では JIS により配管やフランジが規格化されているが、今回ヨーロッパより搬送された配管類は DIN (ドイツ規格協会規格) のものが用いられている。そのため、ヨーロッパより搬送される配管部材は十分に用意する必要がある。また、DIN 規格の配管は肉厚が薄く、日本の JIS 規格の溶接法では配管、フランジなどを溶接できないため、日本で DIN 規格の配管部材の溶接を行う場合には特殊な技術を持つ技術者を必要とする。

### 4. 今後の予定

IFMIF/EVEDA 開発試験棟の加速器室への入射器本体の据付は概ね完了した。しかし、電気設備や冷却水設備など一部の機器について据付、単体試験を行い、入射器への電力投入や冷却水の通水試験など

を行う必要がある。これらの作業を進めた後に、2014 年秋より入射器のビームコミッショニングを開始する予定である。

また、後段の加速器機器がヨーロッパより順次搬入されてくるため、その据付準備や放射線管理区域の変更申請なども並行して行うべく、準備を進めている。

## 参考文献

- [1] 杉本昌義 他, “IFMIF 加速器のプロトタイプ建設の意義と目標課題”, 「加速器」Vol. 7, No. 2, 110-118 (2010).
- [2] J. Marroncle, et al., Proceedings of IBIC2012, pp557-565.
- [3] R. Gobin, et al., Rev. Sci Instrum., **79**, 02B303(2008).
- [4] O. Delferrière, et al., Rev. Sci. Instrum., **79**, 02B723(2008).
- [5] R. Gobin, et al., Proceedings of IPAC2013, pp.3758-3760.
- [6] R. Gobin, et al., Rev. of Sci. Instrum., **85**, 02A918 (2014).