

## IFMIF/EVEDA 原型加速器の現状

### STATUS OF IFMIF/EVEDA PROTOTYPE ACCELERATOR

春日井 敦<sup>#A)</sup>, 坂本 慶司<sup>A)</sup>, 近藤 恵太郎<sup>A)</sup>, 前原 直<sup>A)</sup>, 一宮 亮<sup>A)</sup>, 新屋 貴浩<sup>A)</sup>, 杉本 昌義<sup>A)</sup>,  
ナスター ホアン<sup>B)</sup>, 奥村 義和<sup>B)</sup>, ハイディングガー ローランド<sup>C)</sup>, カラ フィリップ<sup>C)</sup>, ジッコ エルベ<sup>C)</sup>,  
フィリップス ガイ<sup>C)</sup>

Atsushi Kasugai<sup>#A)</sup>, Keishi Sakamoto<sup>A)</sup>, Sunao Maebara<sup>A)</sup>, Keitaro Kondo<sup>A)</sup>, Ryo Ichimiya<sup>A)</sup>, Takahiro Shinya<sup>A)</sup>,  
Masayoshi Sugimoto<sup>A)</sup>, Juan Knaster<sup>B)</sup>, Yoshikazu Okumura<sup>B)</sup>, Roland Heidinger<sup>C)</sup>, Philippe Cara<sup>C)</sup>, Herve Dzitko<sup>C)</sup>,  
Guy Phillips<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) /Rokkasho

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

<sup>C)</sup> Fusion for Energy (F4E)

#### Abstract

The IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) project aiming at material tests for a future fusion DEMO reactor is under the Engineering Validation and Engineering Design Activities (EVEDA) phase in the Broader Approach (BA) Agreement of fusion program between Japan and EU. As a part of the activities, the installation and commissioning of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) is at the stage of demonstration of the feasibility of the low energy section of an IFMIF deuteron accelerator up to 9 MeV with a beam current of 125 mA in CW. The installation and the beam commissioning of LIPAc injector have just completed at Rokkasho, Japan. After the commissioning of the injector, the installation of RFQ, MEBT, D-Plate and RF system have just been started.

#### 1. はじめに

2007年より開始された日本と欧州による国際共同事業である核融合分野における幅広いアプローチ活動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) は、IFMIF の工学設計・主要機器の設計・製作・試験を行い、IFMIF の建設判断に必要な技術実証を行うことが最大のミッションである。量子科学技術研究開発機構 (QST) はこのプロジェクトの日本の実施機関として文部科学省から指定を受けている。六ヶ所核融合研究所 (国際核融合エネルギー研究センター) では欧州との共同事業として IFMIF 原型加速器の建設・調整・コミッショニングが実施されている。

IFMIF/EVEDA 原型加速器は、LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) と呼ばれ、重水素イオン源 (入射

器) - 高周波四重極加速器 (RFQ) - 中エネルギービーム輸送系 (MEBT) - 超伝導加速器 (SRF ライナック) - ビーム診断系 (D-Plate) - 高エネルギービーム輸送系 (HEBT) - ビームダンプ (BD) から構成された大電流重陽子線形加速器である (図 1)。

LIPAc の大きな特徴は、加速器を構成する各機器の製作を欧州及び日本の研究機関がそれぞれ担当し、六ヶ所核融合研究所において原型加速器として 1 つに組み上げるという調達取決めに基づいた国際協力である点にある。これまでに欧州及び日本の各研究機関において、担当する加速器機器の設計・製作が行われてきており、現在六ヶ所核融合研究所において日本が中心となって組立・調整・ビーム試験を段階的に実施しているところである。[1]

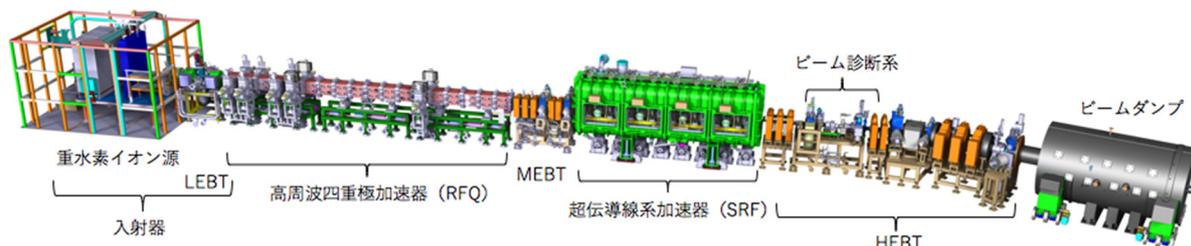


Figure 1: IFMIF Prototype Accelerator.

<sup>#</sup> kasugai.atsushi@qst.go.jp

組立・調整・ビーム試験は以下の4つのフェーズに分かれている。

- (1) フェーズ A (入射器直後にビーム診断箱を置き、100keV-140mA, duty100%のビーム実証)
- (2) フェーズ B (RFQ, MEBT, D-Plate を追加し、その後に低電力用ビームダンプを置き、5MeV-125mA, duty0.1%のビーム実証)
- (3) フェーズ C (SRF ライナック, HEBT, BD を追加、D-Plate は HEBT に組み込み、9MeV-125mA、duty0.1%までビーム実証)
- (4) フェーズ D (9MeV-125mA, duty100%, CW のビーム統合試験)

各フェーズに応じた RI 許認可申請を行い、放射線管理が必要である。プロジェクトは、当初 2017 年 5 月までの 10 年間であったが、2015 年 12 月の日欧の運営委員会において 2019 年 12 月末まで延長された(図 2)。



Figure 2: Schedule.

## 2. フェーズ A (入射器試験) の現状

入射器は2013年より欧州から六ヶ所サイトに輸送、据付が進められ、2014年11月に陽子によるビーム試験を開始した。並行してパルスデューティ管理システムやデータ収集系を整備し、入射器制御電源系の冷却水配管改修を実施した後、2015年4月から陽子ビームでの調整を実施後、6月に放射線障害防止法に基づく放射線管理区域を設定し7月に重陽子ビーム生成に成功した [3]-[5]。重陽子ビーム生成による中性子発生を確認し、これまでにエミッタンス測定中に (エミッタンスメータの表面はタングステン)  $4.7 \times 10^9$  n/s の中性子発生を確認している。その後、LEBTの2つのソレノイドコイルの電流値を最適化することにより、エミッタンスの最適条件を見出し、2015年12月までに、原型加速器のマイルストーンである重陽子ビームで、100keV, 140mA, CW, エミッタンス  $0.3\pi$  mm mrad 以下を個別に達成した。イオン源の断面図及びフェーズAの実験構成図をそれぞれ図3、図4に示す。図4でフェーズA-1とA-2でエミッタンスモニターの位置が異なる理由は、RFQを接続後はRFQ結合位置近傍でのビームエミッタンスを測定することができなくなるため、予めLEBTの2つのソレノイドコイルの間において測定したエミッタンスと(A-1)、RFQ結合位置近傍でのエミッタンス(A-2)を校正し、ビームシミュレーションとの比較から、A-1で測定したエミッタンスを用いてRFQ結合位置でのエミッタンスを評価するためである。

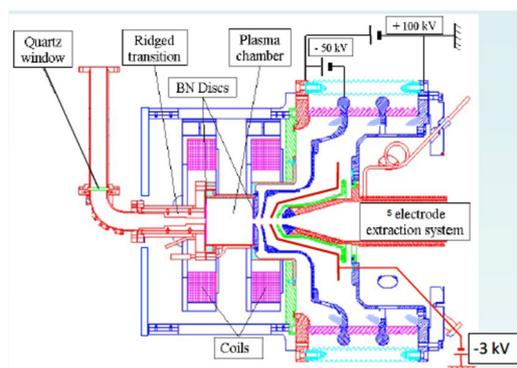


Figure 3: ECR ion source for LIPAc.

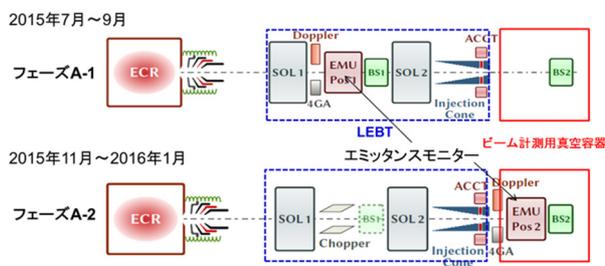


Figure 4: Configuration of Phase A.

## 3. フェーズ B (RFQ 試験) の現状

フェーズ B は、フェーズ A で性能を確認した入射器の下流側に、RFQ、MEBT、D-Plate、LPBD を接続し、175MHz の高周波を RFQ (RF 入力ポート 8 か所)、及び MEBT のバンチャー (2 ユニット) に投入し、125mA の重陽子ビームを 5MeV までデューティ 0.1% で加速し SRF ライナックの入射条件を実証することを目標としている (図 5)。そのために必要な高周波源システムの整備、RFQ 及び MEBT、D-Plate の整備を現在進めているところである。高周波源システム、真空システム、冷却システム等の準備が全て整った後、RFQ の大電力コンディショニングを約 4 ヶ月実施し、その後ビーム試験に移る計画である。フェーズ B では放射線発生装置としての使用許可は原子力規制庁から 2016 年 3 月 31 日付ですすで取得しており、2017 年度初旬に施設検査を受けた後、本格的なビームコミショニングに入る。なお現在の加速器室の様子を図 6 に示す

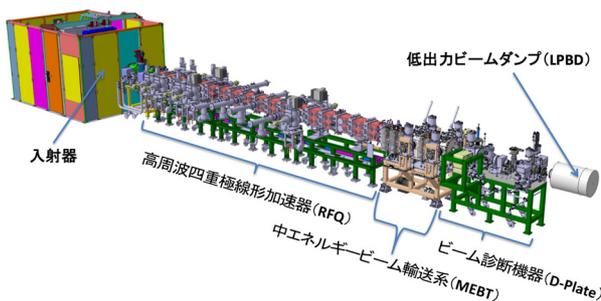


Figure 5: Configuration of Phase B test.



Figure 6: Present status of accelerator.

### 3.1 高周波源システム

スペインエネルギー環境技術センター (CIEMAT) が調達を担当し、2014 年 7 月から 9 回に分けて六ヶ所核融合研究所に機器を搬入している。主な機器は、RFQ 用高周波源(四極管式) 8 ユニット(スペイン INDRA 社製、175MHz-200kWx8 系統(RFQ 用) (図 7)、175MHz-105kW-8 系統(SRF 用))、MEBT バンチャー用高周波源(半導体式) (スペイン BTESA 社製、175MHz-16kWx2 系統)、高周波源用 13kV 陽極高圧電源(スペイン JEMA 社製、400kWx8 式(RFQ 用)、200kW-2 出力 x4 式(SRF 用))、同軸導波管システム(ドイツ SPINNER 社製、9 インチ 50mx8 系統(RFQ 用)、6 インチ 50mx 8 系統)、冷却水系(配管、ポンプ、熱交換器等)がある。



Figure 7: RF modules.

### 3.2 高周波四重極加速器(RFQ)

イタリア国立核物理学研究所 (INFN) レニャーロ研究所が製作を担当。2016 年 2 月に 3 分割されたスーパーモジュールが日本に空輸された後六ヶ所核融合研究所

に陸送された。開梱後専用ジグを用いて加速器室に移動し、レーザートラッカーによる精密アライメントを経て、3 つのモジュールを精密に結合させた。図 8 は結合した 9.8m の RFQ、図 9 は RFQ の内部である。ビーズ摂動を用いた低電力による電界強度分布測定を実施し、100 個以上ある模擬チューナーでマッチング調整を実施中である。具体的には模擬チューナーの挿入距離データに基づき、実機用チューナー及びエンドプレートを精密に製作し、アルミ製ビーズを通しながらネットワークアナライザーで RF 特性を確認する。今の所、約 2/3 のチューナーを実機用チューナーに置き換えて RF 特性を計測したが、不要モードの存在比が許容値である 2%以内、共鳴周波数が 174.995MHz が得られ、軸方向の電界分布も計算値と一致することが確認できている。

また RFQ の空洞調整に必要な精密な温調機能を持つ冷却水システムが 2016 年 2 月に搬入され、接続調整中である。2016 年度は、クライオポンプ系統、ターボポンプ系統、ベーキング装置、制御盤等のその他の付属機器が搬入され、2016 年度中に RFQ の RF コンディショニングができるところまで整備する予定である。また低出力ビームダンプの製作も INFN の担当であり、アルミ合金製のコーン型ビームダンプであり、重陽子ビーム 5MeV-125mA-0.1%デューティのビームを受け止める。中性子発生量は最大  $9 \times 10^{11}$  n/s と評価している。



Figure 8: RFQ.

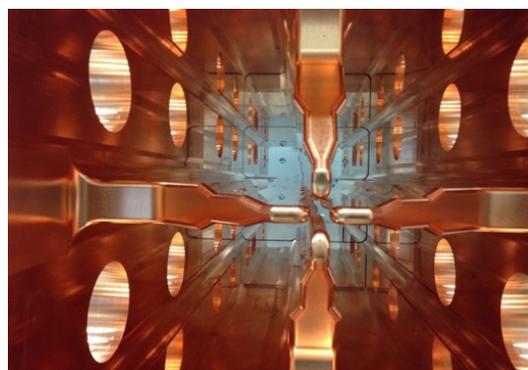


Figure 9: Inside of RFQ.

### 3.3 MEBT 及び D-Plate

MEBT(中エネルギービーム輸送系) (図 10) 及び D-Plate (ビーム診断系) は、スペインエネルギー環境技術センター (CIEMAT) が製作を担当している。2016 年 3 月と 4 月に本体が六ヶ所核融合研究所に搬入され、現在ケーブルやアライメント、真空系統のチェックが行われて

いる。

冷却系水系統、制御系統、コイル電源等の付属機器が2016年度中に全て搬入され据付を完了する予定である。



Figure 10: Checkout of MEBT.

#### 4. フェーズ C, D (SRF ライナック) の現状

フェーズ C・D はフェーズ B の RFQ、MEBT のビームコミッション後、SRF ライナック、HEBT、大型ビームダンプを接続し、SRF ライナックの RF コンディショニング・冷却後に、125mA の重陽子ビームを 9MeV まで加速させる実証を行う。フェーズ C はデューティ 0.1% まで、フェーズ D は 100% デューティの CW 動作を実証し、ビーム統合試験を完了させる。このプロジェクトの完了予定は 2019 年 12 月末である。

##### 4.1 SRF ライナック

SRF ライナックはフランス原子力・代替エネルギー庁サクレー研究所 (CEA-Saclay) が担当である。8 式の半波長超伝導共振器 (HWR) (図 11)、ソレノイドコイル等がクライオスタットの中に組み込まれる。ニオブ製の超伝導キャビティは高圧容器として日本の高圧ガス保安法の適用を受けるため、製作開始前に高圧ガスの許認可申請及び安全性の事前評価を高圧ガス保安協会 (KHK) の委員会で審査を受ける必要がある。2013 年から事前評価審査に必要なデータや解析、書類を揃え、KHK と協議を重ね、2016 年 3 月に最終的に認可を受けた。現在は超伝導キャビティの製作が CEA 主導で進められ (製造はイタリアの Zanon 社)、プロトタイプ及び実機が CEA サ

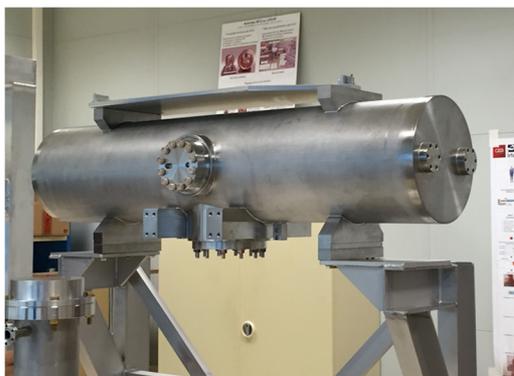


Figure 11: HWR SRF cavity.

クレー研究所で電界測定、冷却試験、RF カブラ組み合わせ試験等が 2016 年から開始されている。2017 年 9 月には完成したコンポーネントが六ヶ所核融合研究所に搬入され、六ヶ所核融合研究所でクライオモジュールに組み立てられ、原型加速器に据え付けられる。

##### 4.2 クライオプラント

SRF ライナックの 4K 冷却のため、液体ヘリウムの製造装置 (クライオプラント) が必要である。このクライオプラントの調達にはフランス原子力・代替エネルギー庁サクレー研究所 (CEA-Saclay) が担当している。クライオプラント機器の製造及び据付は、フランスエアリキード社が受け持ち、2016 年 4 月にコールドボックス (図 12)、圧縮機、油分離器が六ヶ所サイトに搬入され、据付が開始された。2016 年度中に液体窒素タンク、ガスヘリウムバッファタンク、デューワー、MCTL 等の機器も据付けられ、試運転が開始される予定である。それに伴い液体ヘリウムの製造については高圧ガス保安法の冷凍則での申請を行っているところである。



Figure 12: Cold box for cryoplant.

##### 4.3 HEBT 及び BD

HEBT (高エネルギービーム輸送系) 及び BD (ビームダンプ) は、スペインエネルギー環境技術センター (CIEMAT) が製作を担当している。現在スペインにて製作中であり、2017 年に六ヶ所核融合研究所に搬入が計画されている。

#### 参考文献

- [1] A. Kasugai *et al.*, "IFMIF/EVEDA 原型加速器の開発の現場", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [2] Y. Okumura *et al.*, "Operation and commissioning of IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) LIPac injector", Rev. Sci. Instrum. 87, 02A739 (2016).
- [3] K. Shinto *et al.*, "Measurement of ion species in high current ECR H<sup>+</sup>/D<sup>+</sup> ion source for IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)", Rev. Sci. Instrum. 87, 02A727 (2016).
- [4] R. Gobin *et al.*, "Installation and first operation of the International Fusion Materials Irradiation Facility injector at the Rokkasho site", Rev. Sci. Instrum. 87, 02A726 (2016).