

IFMIF 原型加速器の現状 STATUS OF IFMIF PROTOTYPE ACCELERATOR

春日井 敦^{A)}、赤木 智哉^{*A)}、蛭沢 貴^{A)}、平田 洋介^{A)}、一宮 亮^{A)}、近藤 恵太郎^{A)}、前原 直^{A)}、
坂本 慶司^{A)}、新屋 貴浩^{A)}、杉本 昌義^{A)}、ナスター ホアン^{B)}、カラ フィリップ^{C)}、
ジッコ エルベ^{C)}、ハイディンガー ローランド^{C)}、フィリップス ガイ^{C)}
Atsushi Kasugai^{A)}, Tomoya Akagi^{*A)}, Takashi Ebisawa^{A)}, Yosuke Hirata^{A)}, Ryo Ichimiya^{A)}, Keitaro Kondo^{A)},
Sunao Maebara^{A)}, Keishi Sakamoto^{A)}, Takahiro Shinya^{A)}, Masayoshi Sugimoto^{A)}, Juan Knaster^{B)},
Philippe Cara^{C)}, Herve Dzitko^{C)}, Roland Heidinger^{C)}, Guy Phillips^{C)}

^{A)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) /Rokkasho

^{B)}IFMIF/EVEDA Project Team

^{C)}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 of RFQ, MEBT, D-Plate and RF system have just completed, and we started RF conditioning of RFQ.

1. はじめに

核融合エネルギーの実用化のためには、1 億 °C 以上の超高温プラズマにおいて重水素と三重水素の核融合反応で生じる 14 MeV の高エネルギー中性子に耐えられる材料の開発が不可欠である。そのため、14 MeV の中性子を連続的に発生できる核融合中性子源の開発が重要となる。核融合中性子源の候補として、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である国際核融合材料照射施設 (International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF) が、国際協力の下、検討が進められてきた。

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 (BA) 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、青森県六ヶ所村に設置した六ヶ所核融合研究所において欧州との共同事業として IFMIF 原型加速器の建設・調整・コミッショニングを実施している [1]。

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) から構成される大電流重陽子線形加速器である。LIPAc は加速器を構成する

各機器の設計製作を欧州及び日本の各研究機関において行い、六ヶ所核融合研究所に持ち込んで、組立・試験を行うことが特徴である。Figure 1 に LIPAc の全体構成図を示す。

LIPAc の組立及び試験は以下の 4 つの段階に分かれている。

- フェーズ A : 100 keV, 140 mA, CW
- フェーズ B : 5 MeV, 125 mA, duty 0.1%
- フェーズ C : 9 MeV, 125 mA, duty 0.1%
- フェーズ D : 9 MeV, 125 mA, CW

本プロジェクトは 2017 年 5 月末までの 10 年間から、2020 年 3 月末までの延長が決定しており、現在、フェーズ A まで完了している。また、フェーズ B までの機器の調達については完了し、RF コンディショニングが開始されたところである。フェーズ C に必要な機器は 2018 年に六ヶ所へ搬入され、順次据付及び組立が開始される予定である。

2. フェーズ A の現状

フェーズ A は入射器単体の試験である。試験は A1-A3 の 3 段階に分かれており、エミッタンスの計測点が異なる。フェーズ A1 は LEPT の 2 つのソレノイド電磁石間、A2 は RFQ 入射点付近で計測を行い、それぞれの試験については、既に完了し目標を達成している [2]。現在はイオン源直後でエミッタンス計測を行い、ビームシミュレーションと実験のより詳細な比較を行うためにフェーズ A3 試験を実施中である。

2.1 イオン源+LEPT (入射器)

LIPAc の入射器は電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型イオン源と低エネルギービーム輸送系 (LEPT) から構

* akagi.tomoya@qst.go.jp

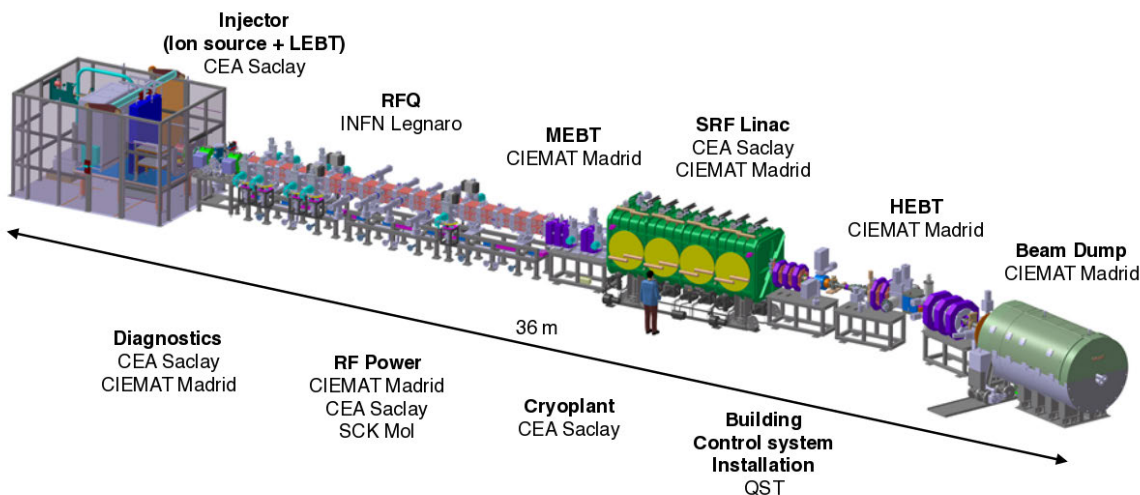


Figure 1: Configuration of LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator).

成される。CEA Saclay で設計、製作及び性能確認試験を行い、六ヶ所核融合研究所に搬入された [3]。この ECR イオン源は 2 つのコイルを設置したプラズマ容器と 5 つの取り出し電極（プラズマ電極、中間電極、第一接地電極、リペラー電極、第二接地電極）からなる。プラズマは 2.45 GHz のマイクロ波で生成される。Figure 2 に ECR イオン源の模式図を示す。

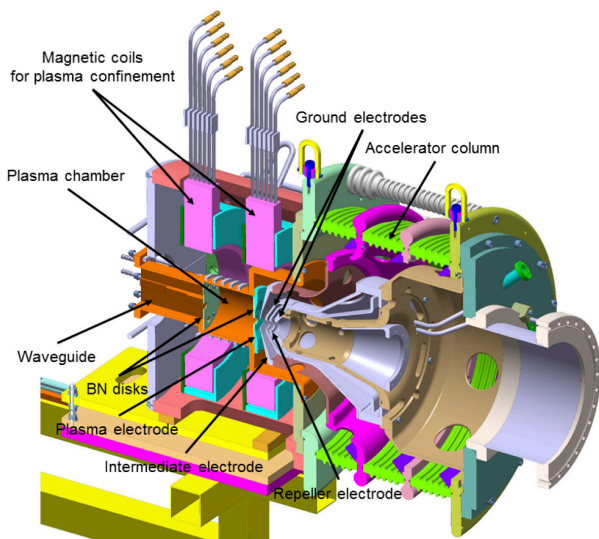


Figure 2: Schematic drawings of the LIPAC ECR ion source.

LEBT は 140 mA、100 keV の重陽子ビームを 2 つのソレノイド電磁石で収束させつつ、RFQ の入射条件に合うように輸送する。RFQ 入口で要求されるビーム性能は Table 1 のとおりである。また、エミッタンスメータと分光器を用いて、ソレノイド電磁石間でのビーム診断を行うことが可能である。

入射器については既に、マイルストーンである加速エネルギー 100 keV、ビーム電流 140 mA、CW 運転、エミッタンス $< 0.3\pi$ mm·mrad を個別にではあるが達成し

Table 1: Summary of Requested Beam Parameters at the RFQ Entrance

Requirements	Target value
Particles	D+
Output energy	100 keV
Output D+ current	140 mA
D+ fraction	99%
Normalized rms emittance	0.25π mm mrad
Duty factor	CW

ている [4]。

フェーズ B に向けた準備としては、現状の取り出し電極は中心軸及び間隔を再調整する必要があることが分かっているため、これを実施する予定である。また、duty 0.1% を実現するためにはチョッパーを使用し数 10 ~ 100 μ s 幅の矩形パルスビームを生成する必要があり、その機能試験を行う必要がある。

3. フェーズ B の現状

フェーズ B は、入射器の下流側に RFQ、MEBT、D-Plate、低電力用ビームダンプ (LPBD) を接続し、125 mA の重陽子ビームを 5 MeV まで Duty 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指している。現在、これらの装置は全て加速器室内の所定の位置に据え付けられている。全体配置図を Fig. 3 に示す。

3.1 RFQ

RFQ は INFN Legnaro が製作を担当した。全長 9.8 m の 4 ベーン型 RFQ で 5 MeV までビームを加速する。RFQ は 18 個の高周波空洞モジュールからなり、6 個ずつ 3 分割されたスーパーモジュールを、六ヶ所で精密なアライメントを行い結合した。共振周波数は 175 MHz である。Figure 4 に RFQ の写真を示す。

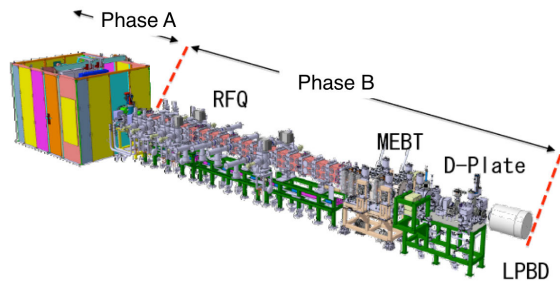


Figure 3: Configuration of Phase B.

大電流ビームかつ低エネルギーの加速器であるため、空間電荷効果の影響が大きく、ビーム収束が難しいが、収束性の高いビームでなければ加速器構造物の放射化により保守が困難になる。そのため、ビーム損失を抑えることが非常に重要となり、 $10\ \mu\text{m}$ 程度の加工精度と $0.1\ \text{mm}$ のアライメント精度での設置が要求される [5]。



Figure 4: RFQ of LIPAC.

六ヶ所での組立後、真空試験やビーズを用いた電場分布測定及び固定式チューナー 112 式を用いて共振周波数および長さ方向の電場分布調整を実施した。イオンポンプ、クライオポンプ、RF カプラの接続後、2016 年 12 月に RFQ 全体のベーキングを実施、真空系、冷却水系、高周波系、電気系、計測系を整備して、2017 年 7 月より RF コンディショニングを開始したところである。

3.2 高周波源システム

高周波源システムは CIEMAT Madrid が機器の調達を担当している。主な機器としては、RFQ 用高周波源 (200kW×8 系統)、SRF 用高周波源 (105kW×8 系統)、MEBT バンチャー用高周波源 (16kW×2 系統)、同軸導波管システム、冷却水系 (配管、ポンプ、熱交換器等) がある。2017 年 7 月に RFQ 用高周波源の試験は全て完了し、RFQ への入力が可能になった。

3.3 MEBT、D-Plate 及び LPBD

MEBT と D-Plate は CIEMAT Madrid が製作を担当している。MEBT は RFQ と SRF ライナックの間に設置され、RFQ により 5 MeV まで加速されたビームを最適なビーム品質で SRF ライナックに入力する役割を持つ。ビーム診断系は D-Plate と呼ばれ、加速されたビームの

電流モニター、エミッタンス計測も兼ねたビームプロファイルモニター、バンチ長計測系、ビーム損失モニター等からなる。RFQ のコミッショニング段階では一時的に MEBT の後段に設置される。

LPBD はフェーズ B 用の重陽子ビームを受け止める小型のビームダンプであり、INFN Legnaro が製作を担当した。

4. フェーズ C、D

フェーズ C、D はフェーズ B の RFQ のビームコミッショニング後に、SRF ライナック、HEBT、大型ビームダンプ (BD) を接続し、125 mA の重陽子ビームを 9 MeV まで加速させる実証を行う。フェーズ C は duty 0.1%、フェーズ D は CW 運転を実証する。

4.1 SRF ライナック及びクライオプラント

SRF ライナック及び冷却のための液体ヘリウム製造装置 (クライオプラント) の調達は CEA が担当している。クライオプラントはすでに据え付け、コミッショニングが完了している。

SRF ライナックは 8 個の半波長 (HWR) 型超伝導空洞と 8 個の超伝導ソレノイドで構成され、重陽子ビームを 5 MeV から 9 MeV まで加速する。現在、CEA 研究所で製作中であり、2018 年度中に六ヶ所へ部品のまま搬入され、六ヶ所において組み立てられる。

4.2 HEBT 及び BD

HEBT 及び BD は CIEMAT で製作中であり、2018 年 5 月ごろに六ヶ所へ搬入予定である。

5. 今後の計画

2017 年 10 月より RFQ の本格的な RF コンディショニングが実施される。それと並行してフェーズ B の試験のための準備を進め、2018 年 1 月からはビームコミッショニングを実施する予定である。さらに、ビームコミッショニングと並行して、六ヶ所において超伝導加速器を組み上げ後は、いよいよ HEBT と BD を含む全ての装置をビームラインに接続し、9 MeV、125 mA の重陽子ビームを用いた試験を実施する予定である。

参考文献

- [1] Y. Okumura *et al.*, "Operation and commissioning of IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) LIPAC injector", *Review of Scientific Instruments* 87, 02A739 (2016).
- [2] R. Ichimiya *et al.*, "IFMIF/EVEDA 原型加速器 (LIPAc) の入射器のビーム特性改善", *The 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug. 2016, WEOM05.
- [3] R. Gobin *et al.*, "Final Design of the IFMIF Injector at CEA/Saclay", *Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China*, May 2013, pp. 3758–3760.
- [4] A. Kasugai *et al.*, "IFMIF/EVEDA 原型加速器の現状", *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug. 2016, pp. 1405–1408.
- [5] E. Fagotti *et al.*, "Status of IFMIF-EVEDA RFQ", *Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia*, Nov. 2016, pp. 51–55.