

IFMIF/EVEDA 原型加速器の開発の現状

PROGRESS OF DEVELOPMENT OF IFMIF/EVEDA PROTOTYPE ACCELERATOR

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

Atsushi Kasugai^{#A)}, Keishi Sakamoto^{A)}, Masayoshi Sugimoto^{A)}, Sunao Maebara^{A)}, Keitaro Kondo^{A)}, Ryo Ichimiya^{A)},
Takahiro Shinya^{A)}, Juan Knaster^{B)}, Yoshikazu Okumura^{B)}, Roland Heidinger^{C)}, Philippe Cara^{C)}, Herve Dzitko^{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 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

現在核融合エネルギーの研究開発は国際プロジェクトである国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画を中心に進められ、ITER の建設がフランスのサン・ポール・レ・デュランス (カダラッシュ) で着々と進められている。核融合エネルギーの科学的・技術的実現性は ITER で立証され、その後、今世紀中葉には発電実証をするための核融合原型炉を建設することが計画されている。核融合エネルギーの実用化には、1 億°C以上の超高温プラズマにおいて重水素 (D) と三重水素 (T) の核融合反応で生じる高エネルギー中性子のエネルギーを効率よく電力に変換することが必要である。超高温プラズマを閉じ込めるための容器表面や受熱部の材料は、プラズマから発生する熱や 14 MeV というこれまでに人類が経験したことが無い高いエネルギーの中性子照射環境下にさらされる。

14MeV 中性子の照射による影響は、材料の原子に中性子が衝突することによって生じる弾き出しや核変換が生じ、材料の組織変化により特性変化を引き起こす。そのため、核融合原型炉の開発にあたっては、核融合反応で発生するエネルギースペクトルに近い高エネルギー中性子による照射試験が核融合炉内構造物の構造材料の健全性実証に不可欠とされてきた。

そこで DT 核融合炉が実現していない現状では、核融合反応で発生する中性子環境を模擬できる装置は重陽子-リチウム (d-Li) 核反応による加速器駆動型中性子源である国際核融合材料照射施設 (International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF) し

がなく、国際協力の下、概念の検討がこれまで進められてきた。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、重陽子ビームが突き抜けられない十分な厚さの液体リチウムに入射することで核融合原型炉環境を模擬できる連続スペクトルの中性子照射場を実現し、0.5 リットルの体積内で 20dpa/年以上の高い中性子束が得られる (図 1)。

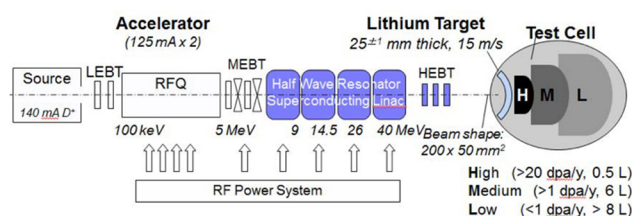


Figure 1: A schematic of the IFMIF facility.

その後 ITER 計画の一環として、2007 年より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が開始された。その事業の一つである 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側実施機関として文部科学省から指定を受けている。この活動のうち工学設計活動は 2013 年 6 月に中間設計報告書の完成をもって終了したが、IFMIF/EVEDA 原型加速器の工学実証活動は引き続き行われ、青森県六ヶ所村に設置した六ヶ所核

[#] kasugai.atsushi@qst.go.jp

融合研究所（国際核融合エネルギー研究センター）において欧州との共同事業として原型加速器の建設・調整・コミッショニングが実施されている。

2. IFMIF/EVEDA 原型加速器の概要

この 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）から構成された全長約 36m の大電流重陽子線形加速器である（図 2）。実際の IFMIF 加速器の設計が、ビームライン 2 本及び各ラインで 4 段の超伝導加速器を用いて 40MeV-250mA の重陽子ビームを連続運転する仕様（図 1）であるのに対し、LIPAc は 1 本のビームライン、超伝導加速器 1 台で 9MeV-125mA の重陽子ビームを連続運転する仕様である（Table 1）。大電流の連続ビームを加速するためには、空間電荷によるビーム発散力が大きい低エネルギー部の実証が不可欠である。そのため、RFQ までの低エネルギー部については、IFMIF 実機用加速器と同じ構成となっている。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（六ヶ所サイト）において加速器として 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。これまでに欧州の各研究機関において、加速器機器の設計・製作が行われてきており、現在六ヶ所核融合研究所において組立・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]。

Table 1: Main Parameters of LIPAc Compared to IFMIF

Primary parameters	LIPAc	IFMIF	Units
Number of Linacs	1	2	—
Duty factor	CW	CW	—
Ion type	D ⁺	D ⁺	—
Beam intensity on target	125	2 × 125	mA
Beam kinetic energy on target	9	40	MeV
Beam power on target	1.125	2 × 5	MW
RF	175	175	MHz
Target material	Cu	Li	—
Total length	34.0	84.7	m
Injector length	5.0	5.0	m
RFQ length	9.8	9.8	m
MEBT length	2.3	2.3	m
SRF Linac length	4.6	22.4	m
Number of cryomodules	1	2 × 4	—
HEBT total length	9.6	45.0	m

入射器はフランス原子力・代替エネルギー庁サクレール研究所（CEA Saclay）が担当で、既に 2012 年に試運転で 100 keV / 140 mA の重陽子イオンの連

続ビームを実証済みである。この入射器は六ヶ所村サイトに 2014 年に移設され、現在原型加速器の初段としてその性能実証を完了した。また、RFQ は 2016 年にイタリア国立核物理学研究所（INFN）レニャーロ研究所から搬入され、チューナーの調整を終えた。超伝導ライナックは 2017 年にフランス CEA-Saclay から超伝導空洞やクライオスタットの部品を日本に運び込み、六ヶ所サイトにて組み立てを行う予定である。高周波システム、MEBT、D-Plate は 2015 年から 2016 年にかけてスペインエネルギー環境技術センター（CIEMAT）から搬入され、現在は据付調整の最中である。HEBT、ビームダンプは 2017 年以降に搬入され、RFQ までのビームコミッショニングが完了した後、ビームラインに組み込まれる。

日本は主に建屋、周辺設備、高周波結合系、制御、全体組立・試験を担当している。

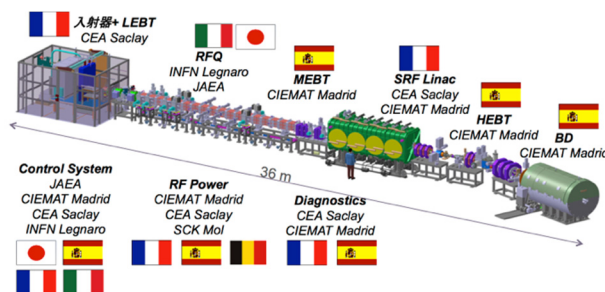


Figure 2: IFMIF Prototype Accelerator.

3. 主要機器の状況

3.1 高周波四重極加速器 (RFQ)

9.8 m と長尺の RFQ は 3 分割されたスーパーモジュールからなり、それぞれが独立した調整用架台に乗せられている。各スーパーモジュールは 6 個のセクションから構成されている。周波数は 175MHz である。2016 年 2 月に日本に空輸されたスーパーモジュールは、4 月にレーザートラッカを用いて慎重にアラインメントを行い一体化された。5 月から開始した両側エンドプレート部を含む RFQ 単体におけるビーズを用いた電界分布測定とダミーチューナーを用いた周波数調整を経て、チューナーの削り出し加工を行い周波数及び電界強度分布マッチングをほぼ完了した。11 月からは入射器、高周波伝送系及び冷却水系を接続し、いよいよ本格的な RF コンディショニングに入る予定である（図 3）。



Figure 3: Assembled RFQ.

一方、日本が担当している RF カプラーについては、High-Q load circuit を用いて定在波による耐電力試験を 8 式+スペア 1 式の全 9 式について行い、等価的な RF パワー 200kW-10 秒以上の CW 相当運転を実証した。この RF カプラーは六ヶ所核融合研究所に設置される高周波源システムとカップリングキャビティを用いた RF 伝送試験 (200kW-CW) を検証する予定である [2]。

3.2 高周波源システム (RF system)

高周波源システムは、2014 年から屋外変圧器、配電盤等が順次六ヶ所サイトに搬入され、据付けが進められている (図 4)。高周波のモジュールの内訳は、それぞれ 175MHz の CW モジュールであり、RFQ 用として、200kW の 4 極管ユニットが 8 ライン、超伝導加速器用として 105kW の 4 極管ユニットが 8 ライン、MEBT のバンチャー用として 16kW の固体増幅器 2 基からなる。RFQ 用高周波モジュールは高周波源システムは RFQ 用の 6 ライン・3 ユニットの既に設置され、電源ケーブル、信号ケーブル配線、冷却水配管が急ピッチで進められている。また 9 インチの同軸導波管ライン (50mx8 系統) も地下ピットを介し、高周波源から RFQ まで接続する施工を行っているところである。

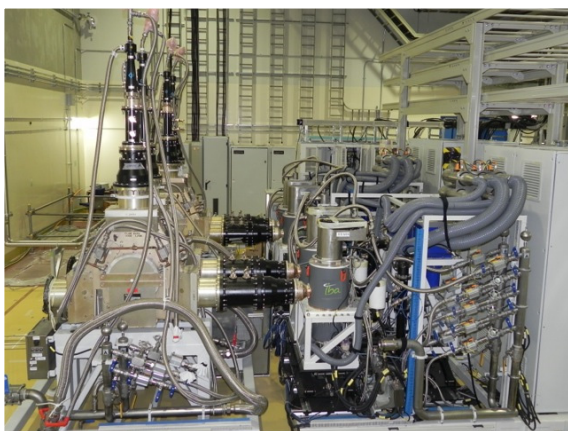


Figure 4: RF system.

3.3 超伝導加速器 (SRF Linac)

超伝導加速器は、ニオブでできた 8 個の超伝導空洞、8 個の超伝導ソレノイドコイル等から構成され、液体ヘリウムで 4K まで冷却される。これらの機器は約 2m x 2m x

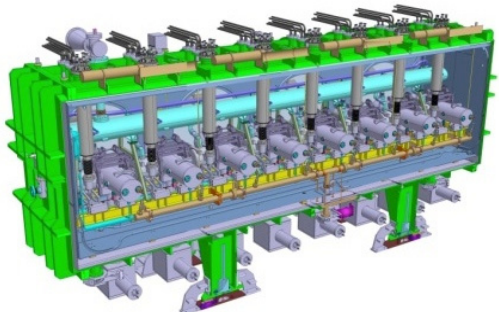


Figure 5: SRF Linac.

6m のクライオスタットの中に格納されている (図 5)。8 基の超伝導空洞により 5MeV から 9MeV まで加速される。ニオブで製作された超伝導加速空洞は、高圧ガス保安法に基づく圧力容器として認可が必要であり、高圧ガス保安協会に特認申請を行い認可された。今後は冷凍保安規則に基づいた空洞の製作が CEA の責任の下行われ、日本への搬入前に耐圧気密試験、溶接検査等を実施することになる。これらの超伝導加速器のコンポーネントを欧州から搬入した後、六ヶ所サイト内に設置するクリーンルームにてクライオモジュールとして一体化し、組み上げる予定である。

3.4 MEBT 及び D-Plate

中エネルギービーム輸送系 (MEBT) は、RFQ と超伝導ライナックの間に設置され、RFQ により 5MeV まで加速されたビームを最適な形状で SRF ライナックに輸送する役割を持つ。5 つの 4 極コイル、2 つのバンチャー、1 つのスクレーパーからなる (図 6)。また D-Plate はビーム診断装置のことであり、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 (図 7)。RFQ のコミッショニング段階では、一時的に RFQ 直後のビーム輸送系 (MEBT) の後段に設置されるが、最終コミッショニング段階では高エネルギービーム輸送系 (HEBT) の中に組み込まれる。MEBT 及び D-Plate 本体は 2016 年 4 月に六ヶ所サイトに搬入され、その後順次冷却系や真空排気系、制御盤が搬入される。



Figure 6: MEBT.



Figure 7: D-Plate.

3.5 クライオプラント

超伝導加速器は液体ヘリウムにて 4K まで冷却されるため、設備として液体ヘリウム製造装置(クライオプラント)が必要である。クライオプラントは、フランス原子力・代替エネルギー庁サクレイ研究所(CEA Saclay)が担当であり、2016 年 4 月にコールドボックス、圧縮機、油分離器がフランスのエアリキード社から搬入されたのに引き続き、デューワー、ガスヘリウムバッファタンク、MCTL(液体ヘリウム供給ライン)、液体窒素タンク等が 2016 年度に設置され、試運転が開始される予定である。クライオプラント及び超伝導加速器は共に閉ループとして高圧ガス保安法の冷凍保安規則に基づいて許認可申請する。一日当たりの冷凍能力は 110 冷凍トン、圧縮機の定格出力は 132kW であり、運転に際しては県知事の許認可が必要となる。

4. 六ヶ所サイトにおける試験状況

4.1 入射器の実証試験 [3]-[6]

入射器(図 8)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 月に陽子ビームでの 100keV-120mA の安定な連続運転に成功した。また陽子ビームでの加速器のコミショニングを進めた後、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。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) 4.7×10^9 n/s の中性子発生を確認している。その後、LEBT(低エネルギービーム輸送系)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 0.3π mm mrad 以下を個別に達成した(図 9)。また、RFQ への入射を模擬した位置でのビームエミッタンス等の測定を実施し、入射器として要求されているパラメータの最適化を実施した。

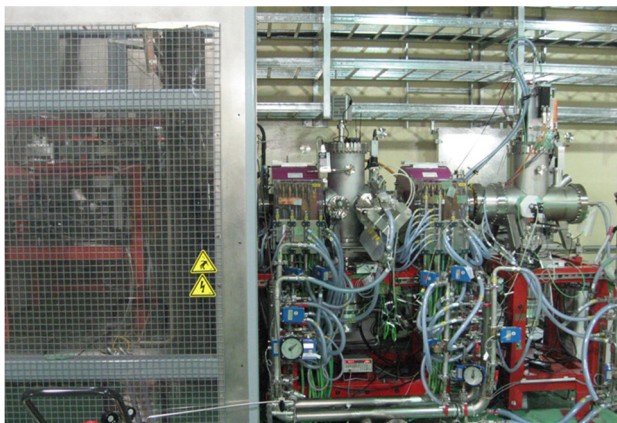


Figure 8: Injector.

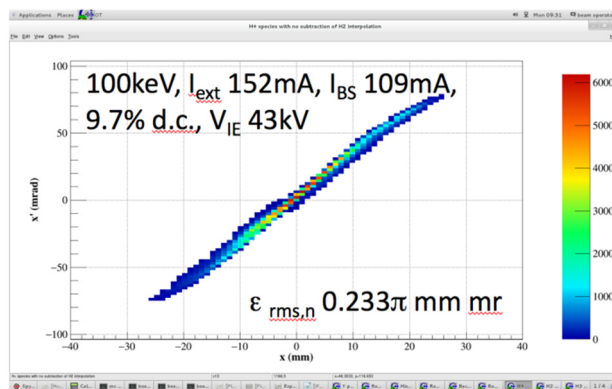


Figure 9: Emittance diagram at 100keV/100mA/D+.

4.2 今後の計画

2016 年 9 月以降は引き続き、高周波源や高圧電源等高周波システムの据付け、ケーブル配線、冷却水配管の整備を行い、RFQ, MEBT, D-Plate, 低電力ビームダンプ(LPBD)の組立・据付け・調整を実施し、RFQ の RF コンディショニングを約 4 ヶ月間実施した後、RFQ までの 5MeV-125mA を目指した重陽子の加速実験をデューティ 0.1%で行う予定である。RFQ のビームコミショニングと並行して、六ヶ所サイトに設置するクリーンルームで超伝導加速器を組み上げた後、HEBT、大型ビームダンプの全ての加速器機器をビームラインに接続し、プロジェクトのミッションである重陽子を用いた統合ビーム試験 9MeV-125mA-CW を実施する予定である。日欧の国際協力に基づくこのプロジェクトの終了は 2019 年 12 月末であるが、その後引き続き核融合材料照射施設として発展させるべく、超伝導加速器を増設し加速エネルギーを 40MeV まで増強し、液体リチウムターゲット、照射設備、ホットセル等を追加することで、14MeV の中性子を発生させる先進核融合中性子源(A-FNS)として整備する計画を持っている。

参考文献

- [1] 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.
- [2] S. Maebara *et al.*, "RF 入力カプラー伝送試験のための 175MHz カップリングキャビティの工学設計", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] R. Ichimiya *et al.*, "IFMIF/EVEDA 原型加速器(LIPAc)の入射器のビーム特性改善", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [4] Y. Okumura *et al.*, "Operation and commissioning of IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) LIPAc injector", Rev. Sci. Instrum. 87, 02A739 (2016).
- [5] K. Shinto *et al.*, "Measurement of ion species in high current ECR H+/D+ ion source for IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)", Rev. Sci. Instrum. 87, 02A727 (2016).
- [6] 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).