

IFMIF/EVEDA 原型加速器の開發現状

PRESENT STATUS OF IFMIF/EVEDA PROTOTYPE ACCELERATOR

春日井敦^{#, A)}, IFMIF/EVEDA 原型加速器統合チーム^{B)}

A) Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Rokkasho Fusion institute

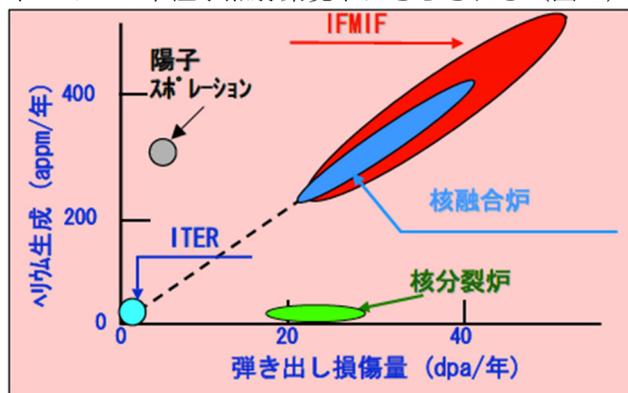
B) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-Saclay), IFMIF/EVEDA Project Team,
Fusion for Energy (F4E), Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

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 started at Rokkasho, Japan. After the commissioning of the injector, RFQ, MEBT, D-Plate, HEBT, beam dump and SRF linac will be installed and tested in step-by-step approach until the BA period.

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と三重水素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 (図 1)。



dpa: 原子当たりの弾き出し回数(displacement per atom)

appm: 核変換濃度 (atom part per million)

Figure 1: Comparison of neutron source.

14MeV 中性子の照射による影響は、材料の原子に中性子が証と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と似た高エネルギー中性子による照射試験が開発中の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 Material Irradiation Facility, IFMIF) しかなく、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様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できる (図 2)。

その後、2007 年より日本と欧州による国際共同事業であ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。日本原子力研究開発機構 (JAEA) 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。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、青森県六ヶ所村に新たに設置した

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

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）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。

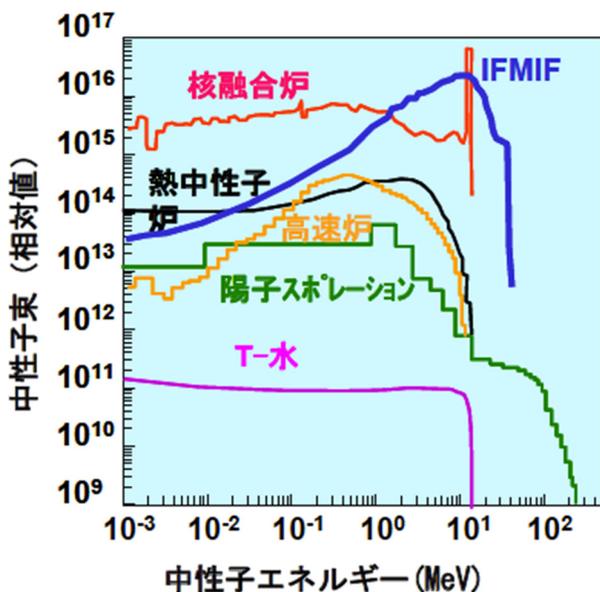


Figure 2: Comparison of neutron energy spectrum.

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 リニアック) - 診断系 (D-Plate) - 高エネルギービーム輸送系 (HEBT) - ビームダンプから構成された大電流重陽子線形加速器である。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 3) であるのに対し、原型加速器は 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。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。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。

入射器はフランス原子力・代替エネルギー庁サクレ研究所 (CEA Saclay) が担当で、既に 2012 年に試運転で 100 keV / 140 mA の陽子及び重陽子イオンの連続ビームを実証済みである。この入射器は青森県六ヶ所村のサイトに 2014 年に移設され、現在原型加速器の初段として性能実証試験中である。また、RFQ は 2015 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、超伝導リニアックは 2017 年にフランス CEA-Saclay から、高周波システム、MEBT、HEBT、ビームダンプ等は 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) からそれぞれ搬入される予定である。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。(図 4)

実際の IFMIF では超伝導加速器を 4 段直列に並べ 40MeV まで加速するが、原型加速器では超伝導加速器 1 段まで (9MeV) の加速の工学実証を目標としている。しかしながら、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高い低エネルギー部の実証が不可欠なため、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。

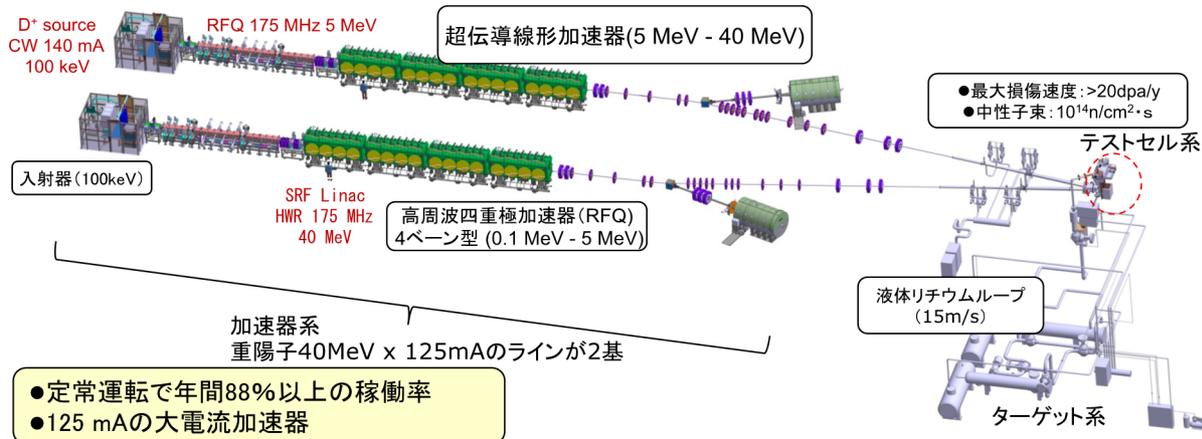


Figure 3: Configuration of IFMIF.

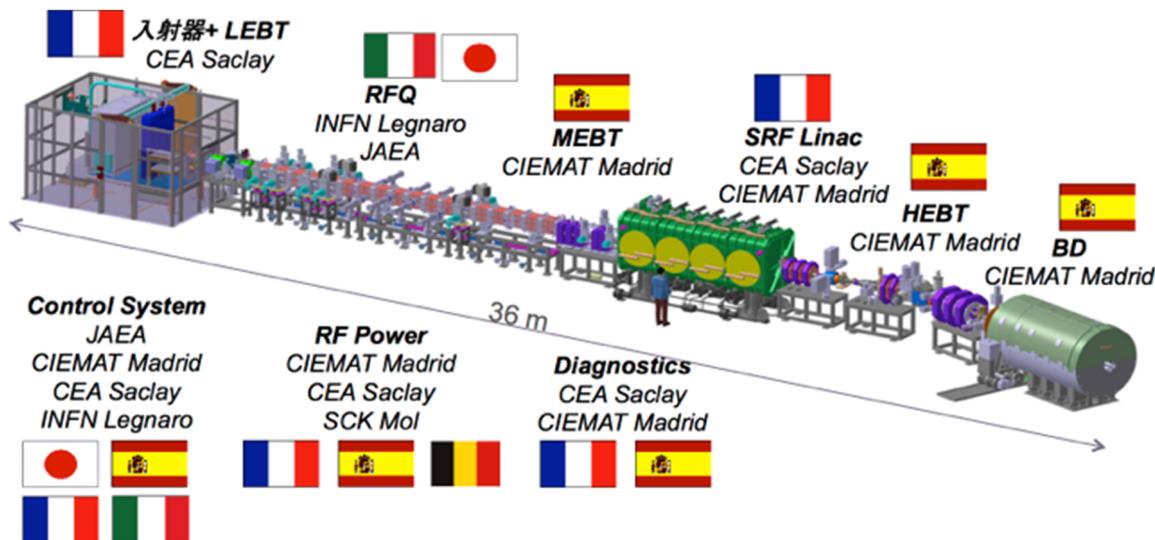


Figure 4: Configuration of LIPAc at Rokkasho.

3. 主要機器の製作状況

3.1 高周波四重極加速器 (RFQ)

RFQ はイタリア国立核物理学研究所 (INFN) レニャーロ研究所の担当である。約 10m の長尺の RFQ は 3 分割されたスーパーモジュールからなり、スーパーモジュールは 6 個の RFQ から構成されている。現在レニャーロ研究所で RFQ の製作が進められ、11 月に受入のための性能試験を実施し、12 月から 1 月にかけて日本に空輸される予定である。周波数は 175MHz である。レニャーロ研究所では出来上がった

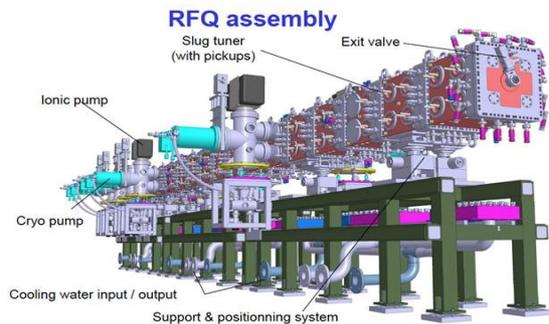
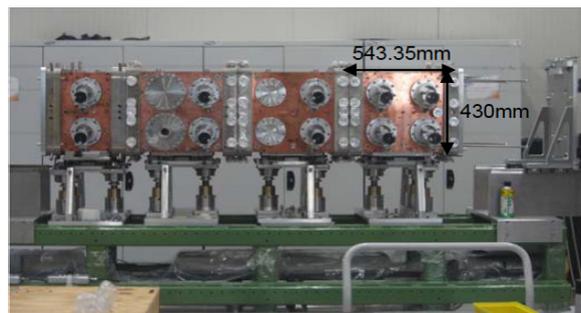


Figure 5: RFQ of LIPAc.

RFQ の部分モジュールについて順次大電力試験を実施中である。

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行い、等価的な RF パワー200kW-14 秒の CW 運転を実証した。この 200kW-CW 運転のためにはパルス幅 1msec Duty 1/2 において 5 日間の RF エージングによる脱ガスを行いカプラーの高周波窓や RF コンタクト部からのガス放出に問題無いことを実証した^[1]。

3.2 高周波源システム (RF system)

高周波源システムは、スペインエネルギー環境技術センター (CIEMAT) の担当である。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 6)。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、220kW 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。モジュールスペインの機器メーカーで製作され、性能確認試験を既に終えた。RFQ 用高周波モジュールは高周波源システムは幾つかに分けて日本に船便で輸送される予定であり、高周波源要電源 7 式、高周波モジュール 2 式等が第 1 陣として 8 月末に六ヶ所サイトに搬入され、順次据付けが開始される予定である。

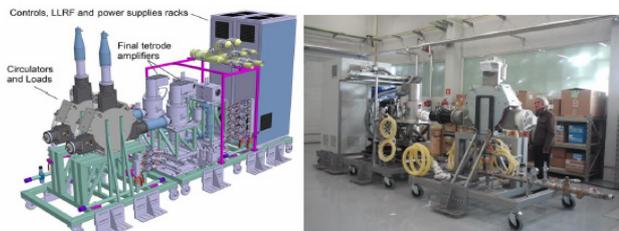


Figure 6: RF module.

3.3 超伝導加速器 (SRF Linac)

超伝導加速器はフランス原子力・代替エネルギー庁サクレ研究所 (CEA Saclay) が担当であり、ニオブでできた 8 個の超伝導空洞から構成され液体ヘリウムで冷却される。約 2m x 2m x 6m のクライオスタットの中に格納されている (図 7)。8 基の超伝導空洞により 5MeV から 9MeV まで加速される。超伝導加速器空洞は高圧ガス保安法の適用を受けるためニオブの圧力容器として高圧ガス保安協会に特認申請を行い受理された。今後は冷凍保安規則に基づいた製作、試験、検査を実施し、日本でモジュールを組み立てる予定である。

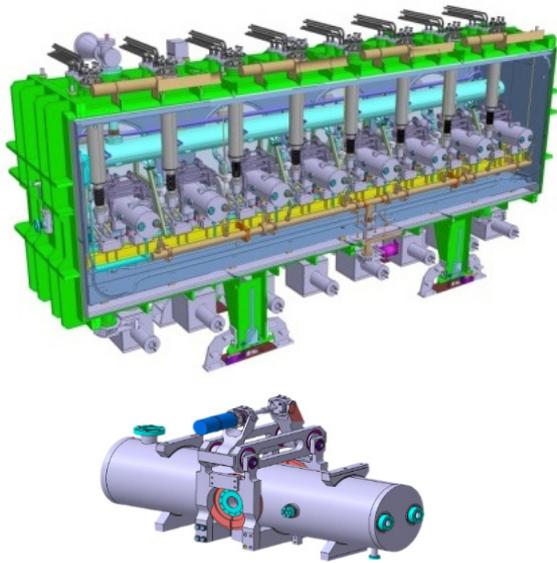


Figure 7: SRF Linac.

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^[2, 3]

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 4 日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リティ管理システム^[4]やデータ収集系を整備し^[5]、入射器制御電源系の冷却水配管改修を実施した後、4 月 28 日に陽子ビームでの 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ッショニングを進めた後、6 月 29 日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 7 日に重陽子ビーム生成に成功し、7 月 15 日に施設検査の受検、7 月 17 日付けで施設検査合格証を受けた。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た (図 8)。

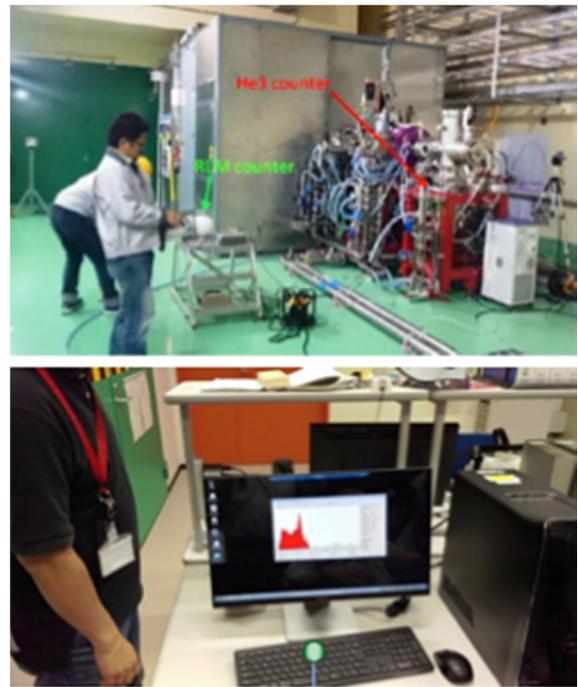


Figure 8: RFQ of LIPAc.

4.2 今後の計画

2015 年 9 月以降は引き続き、RFQ 入射を模擬した位置でのビーム測定を実施し、RFQ 入射位置で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っていく。並行して高周波源や高圧電源等高周波システムの据付けを行い、2016 年 1 月から RFQ, MEBT, D-Plate, 低電力ビームダンプの組立・据付け・調整を実施し^[6]、RFQ までの 5MeV-130mA を目指した重陽子の加速実験を行う予定である。その後超伝導加速器が完成した後に全ての加速器機器を接続し、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 を達成させる予定である。

参考文献

- [1] S. Maebara, et al., "IFMIF/EVEDARFQ ライナック用 RF カプラーの耐電力試験", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [2] Y. Okumura, "IFMIF/EVEDA 用大電流加速器の進捗", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] K. Sinto, et al., "IFMIF 原型加速器 (LIPAc) 入射器の現状", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [4] H. Takahashi, et al., "IFMIF/EVEDA 加速器の入射器試験における Pulse Duty 管理システムの開発", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [5] H. Usami, et al., "IFMIF/EVEDA 加速器制御系データ収集系の開発状況", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [6] R. Ichimiya, et al., "IFMIF/EVEDA 原型加速器のシステムコミッショニングの現状", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.