

# 国際核融合材料照射施設の工学実証のための大電流原型加速器の現状

## PRESENT STATUS OF THE HIGH CURRENT PROTOTYPE ACCELERATOR FOR IFMIF/EVEDA

奥村義和<sup>#</sup>

Yoshikazu Okumura

IFMIF/EVEDA Project Team (JAEA)

2-166 Obuchi-Omotodate, Rokkasho, Aomori, Japan, 039-3212, Japan

### Abstract

International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) is one of the major facilities in fusion program to irradiate and characterize the fusion materials under intense neutron field. Under the framework of Broader Approach (BA) agreement between Japan and Euratom, Engineering Validation and Engineering Design Activities (EVEDA) launched in 2007 in Japan to validate the key technologies to realize IFMIF. The most critical technology to realize IFMIF is two set of linear accelerators each producing 125mA/CW deuterium ion beams up to 40MeV. The prototype accelerator being developed in EVEDA consists of an injector, a RFQ accelerator, and a superconducting linac, whose target is to produce 125mA/CW deuterium ion beams up to 9MeV. The injector has been developed in CEA Saclay and already demonstrated 140mA/CW deuterium beam. The injector has been delivered to International Fusion Energy Research Center (IFERC) in Rokkasho, Japan, where all the accelerator components will be assembled and operated to validate the accelerator technologies required for IFMIF.

### 1. はじめに

核融合エネルギーの実現に向けた幅広いアプローチ活動[1]のもとで、国際核融合中性子照射施設(IFMIF)の工学設計工学実証活動(EVEDA)が2007年から実施されている。IFMIFは、核融合炉に用いられる構造材料、機能材料の開発のために核融合炉に匹敵する大強度の中性子を発生し、候補材料への照射試験を行う施設であって、線形加速器で加速した40MeV/250mA/CWの重水素イオンビームを液体リチウムターゲットに照射し、最大20dpa/年以上の高い中性子照射場を作る施設である[2], [3]。

IFMIFの工学実証(EVEDA)における最大の課題が大電流線形加速器である。特に、空間電荷が問題となる低エネルギー側の、入射器(100keV/140mA/CW)、高周波四重極加速器(RFQ:5MeV/125mA/CW)、そして超伝導リニアックの初段(9MeV/125mA/CW)については、IFMIF実機の建設判断を下す前に工学実証を行う必要がある。

そこで、入射器と超伝導リニアックはフランス原子力庁サクレ研究所(CEA Saclay)が、RFQはイタリアのINFN研究所が、そして高周波電源やビームダンプ等はスペインのシーマツ研究所が、建屋や全体制御系は日本が中心となって分担し、青森県六ヶ所村に新設された国際核融合エネルギー研究センターにおいて実証試験を行うことになっている。

既に、入射器は予備試験を終えてフランスから六ヶ所村に到着して据付が完了し、入射器の実証試

験を待つばかりとなっている。更に、2015年にはRFQ、そして、2017年までに全ての機器が揃って、9MeV/125mA/CWの実証試験を行う予定である。

本稿では、入射器の予備試験の結果とともに、RFQ、超伝導リニアック、高周波電源、ビームダンプ等の現状について報告する。

### 2. IFMIFの構成と原型加速器

図1に工学設計活動で設計されたIFMIF施設の完成予想図を示す[4]。また、図2には、IFMIFの構成を示す。40MeV/125mAの重水素イオンビームの線形加速器2基を用いて250mAの重水素ビームを流速15m/sの液体リチウムターゲットに照射し、テストセル内の0.5リットルの体積内20dpa/年以上の中性子束を得る。

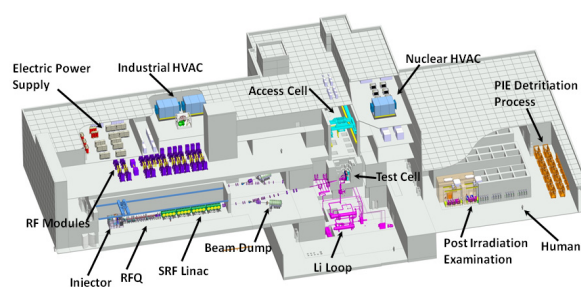


Figure 1: A design of International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF).

<sup>#</sup> okumura.yoshikazu@jaea.go.jp

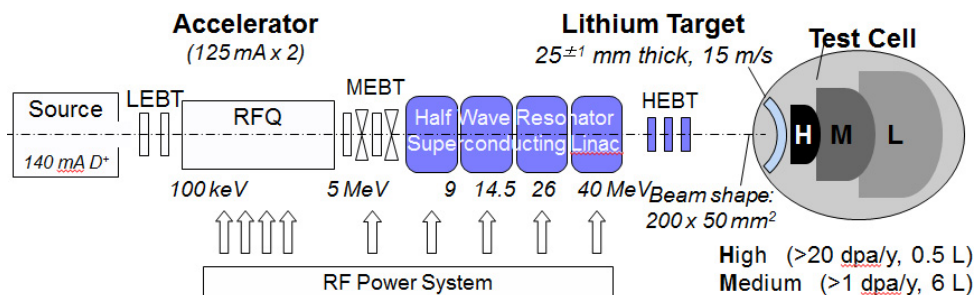


Figure 2: A schematic of the IFMIF facility.

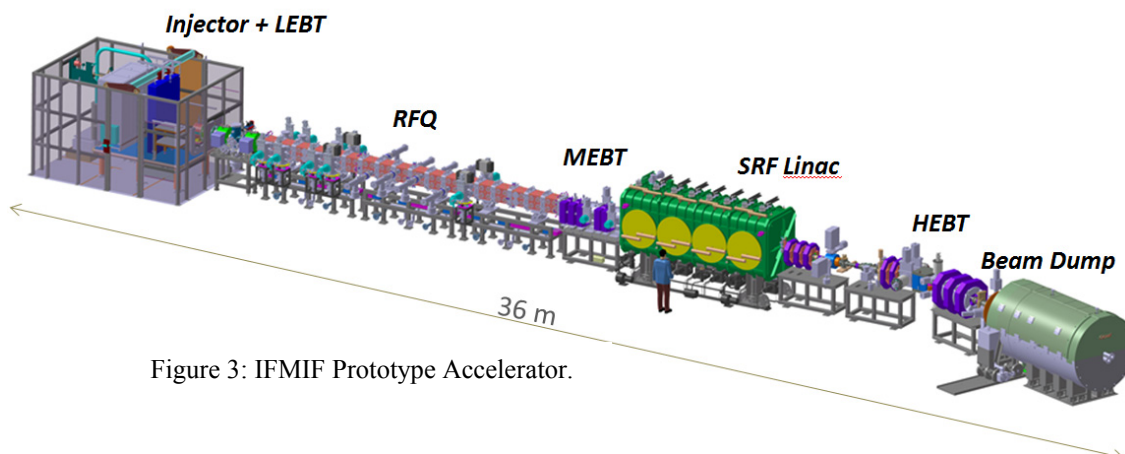


Figure 3: IFMIF Prototype Accelerator.

原型加速器(Prototype Accelerator)は、この IFMIF の加速器の入射器から超伝導加速器の初段までの実証試験を行うためのものであり、125mA の重水素ビームを 9MeV まで加速し、水冷されたビームダンプに入射する[5][6]。IFMIF 実機においては、更に 3 段の超伝導加速器を増設して 40MeV まで加速するとともに、2 基の加速器からのビームをマージして 250mA のビームを液体リチウムターゲットに入射することとなる。

試験において達成した値を示す。エミッタンスについては、10%, 30%, 50%, 100%Duty で測定され、高 Duty でのエミッタンス値については、やや大きめの値が観測されたが、これは実際にビームエミッタンスが増大しているのではなく、ビームパワーの増大により、エミッタンススキャナーが熱的に変形したためだと解釈されている。また、プロトン比については、パワーフローの確認や分光測定用の断面積を精査する必要がある。これらを含めて、六ヶ所での実証試験が実施される予定である。

### 3. 原型加速器の現状

#### 3.1 入射器

入射器は、マイクロ波(ECR)イオン源と低エネルギービーム輸送系(LEBT)から構成され(図 4 参照)、140mA の重水素イオンビームを 100keV のエネルギーで引き出し、RFQ に入射する。入射器は、既にフランスの CEA Saclay で設計製作が完了し、同研究所で実施された予備試験において、100keV/ 140mA の重水素ビームをパルス及び連続モードで安定に生成することに成功している[7]。

100keV, 10%Duty で、ビーム電流を 100mA から 150mA まで変化させてエミッタンスを測定した結果、規格化エミッタンスは 0.14 から 0.23πmm.mrad に増大し、同時にプロトン比(D+の比率)は、80%から 91%と高くなった(図 5, 図 6 参照)。

表 1 に、IFMIF の入射器で要求される値と、予備

Table 1: IFMIF Injector Requirements and the Achieved Value at CEA Saclay

Requirements	Target value	Achieved value
Energy	100 keV	100 keV
Current	140 mA	150 mA
D+ fraction	95%	91 %
Normalized rms emittance	0.25 π mm mrad	0.23 π mm mrad (at 10% duty)
Duty factor	CW	CW



Figure 4: ECR source and low energy beam transport.

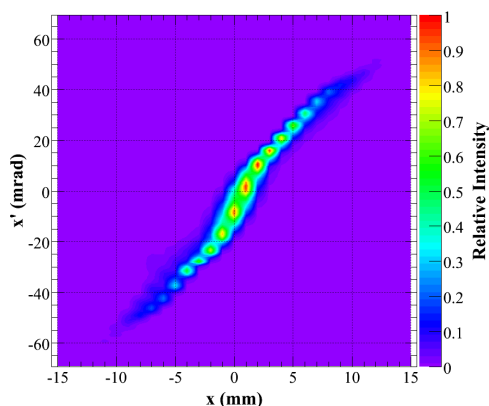


Figure 5: Emittance measurement at 140mA, 100keV.  $\epsilon = 0.20 \pi \text{ mm mrad}$  at 10% Duty.

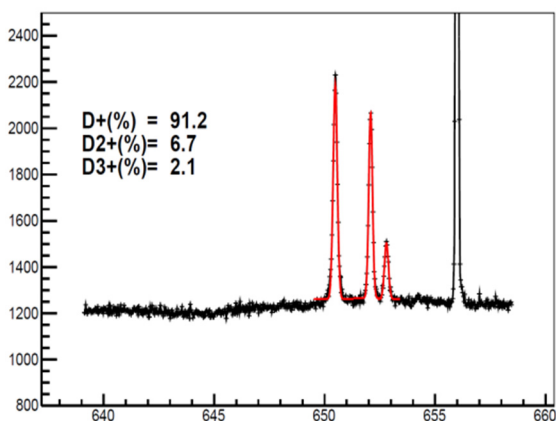


Figure 6: Doppler shifted spectrum at 100keV.

### 3.2 高周波四重極加速器(RFQ)

高周波四重極加速器(RFQ)は、4ベーン型で9.8mの全長があり、18個のモジュールから構成されている。それぞれ6個のモジュールから成る3つのスーパーモジュール(低、中、高エネルギー)を組み合わせる(図7参照)。入射エネルギーは100keVで、125mAの重水素ビームを5MeVまで加速する。

175MHzの高周波パワー約1300kWが、8個のループカプラにより入射され、最大表面電界は25.2 MV/mでキルパトリック限界の1.8倍である。

RFQは、イタリアのINFN研究所が担当しており、入射カプラについては日本の原子力機構が担当している。アルミニウム製の全長9.8mのフルスケールモデル製作の後、実機の製作技術を確認するために1モジュールの試作を行い、真空リークや製作精度試験を成功裏に終えた。

実機製作は3つのスーパーモジュール毎に行われており[8]、高エネルギースーパーモジュールは、2014年7月に完成した。更に、低エネルギー、中エネルギーのスーパーモジュールについても2014年11月完成予定であり、3つのスーパーモジュールの組合せ試験を経て、2015年3月には六カ所に向けて輸送する準備が整う予定である。

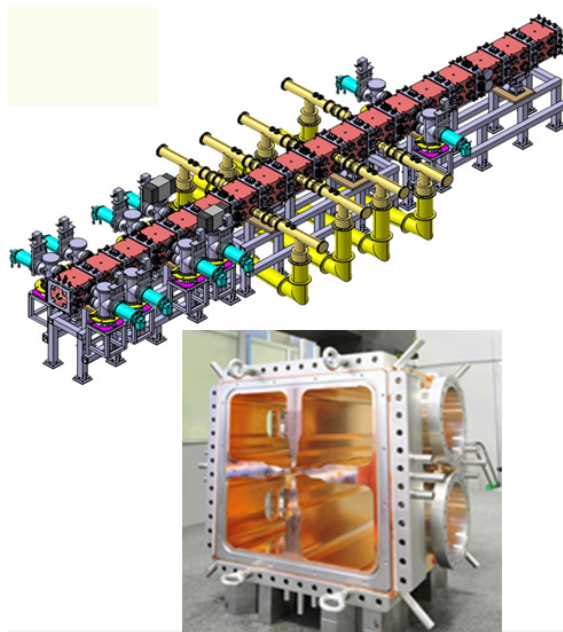


Figure 7: RFQ and a photo of the one module of the prototype cavity.

### 3.3 超伝導リニアック (SRF Linac)

5MeVで加速されたビームは、中エネルギービーム輸送系(MEBT)を通して、超伝導リニアックに入射され、初段のクライオモジュールで9MeVまで加速される。クライオモジュール内には、8個の超伝導空洞(Superconducting half-wave resonators: HWR)が並べられている。図8に原型加速器で実証試験を行う初段のクライオモジュールの外観と試作された超伝導空洞の写真を示す。また、表2に超伝導空洞とソレノイドの主要諸元を示す。

SRF LinacはフランスのCEA Saclayが設計製作を担当している。当初、2個の超伝導空洞を試作し、低温での試験を行ったが、プランジャーと呼ばれるチューニングを行う部分に問題があり、十分な性能が得られなかった。そのため、設計をやり直し[9]、現在、実機製作のための契約が開始されようとして

いる。

並行して、日本側と協力して、日本の高圧ガス保安法の手続きを進めている。超伝導空洞はニオブチタン製であり、それを圧力容器として用いるために材料の特認申請から行う必要がある。外国製の超伝導リニアックについて日本の高圧ガス保安法の手続きを行うのは初めてのケースとなるため、十分な準備期間が必要である。

Table 2: Main Parameters of Cavity and Solenoid

Frequency	175 MHz
Cavity $\beta$	0.094
Accelerating field Eacc	4.5 MV/m
Quality factor Qo	$1.4 \times 10^9$
Max. forward Power/ coupler	200 kW
Max. tuning range	$\pm 50$ kHz
Beam aperture cavity/solenoid	40/50 mm
Magnetic field Bz on axis	6 T
Field at cavity flange	$< 20$ mT

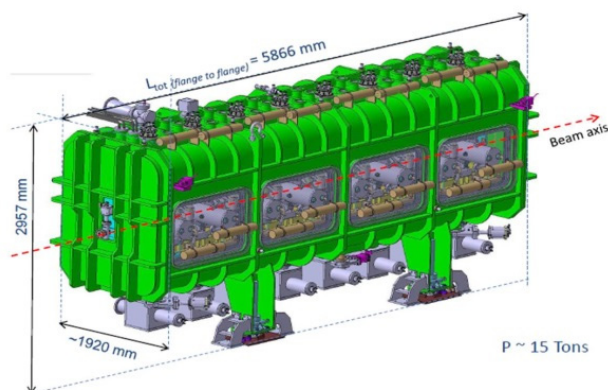


Figure 8: 3D mock-up of the prototype Cryo-module and a photo of the superconducting cavity.

### 3.5 ビーム輸送系、ビームダンプ

RFQ と SRF Linac を接続する中エネルギービーム輸送系 (MEBT) は、5 つの四重極と 2 つのバンチャーから構成されている。ビームハロとエネルギー逸脱粒子は、最大 500W を想定した 2 個の可動

スクレーパーで除去する。高エネルギービーム輸送系(HEBT)は、ビーム計測のための計測プレート、偏向磁石、ビームダンプの熱負荷を一定値以下 ( $< 200\text{kW/cm}^2$ )にするための Beam Expander、運転停止時にビームダンプからの放射線を遮蔽するための鉛シャッターなどから構成される。図 9 に MEBT の鳥瞰図と製作中の写真を示す。また図 10 には、高エネルギービーム輸送系(HEBT)の鳥瞰図を示す。

ビームダンプは、1.125MW (9MeVx 125mA)の連続ビームのパワーを受けるため、円錐形の強制水冷された受熱部とその周囲を取り巻く水とポリエチレン製の中性子遮蔽やガンマ線遮蔽のための鉄シールドから構成されている (図 11 参照)。

MEBT、HEBT、ビームダンプはスペインのシーマット研究所が担当している。ビームダンプのコーンの試作などを経て、現在、設計を完了し、製作中である。

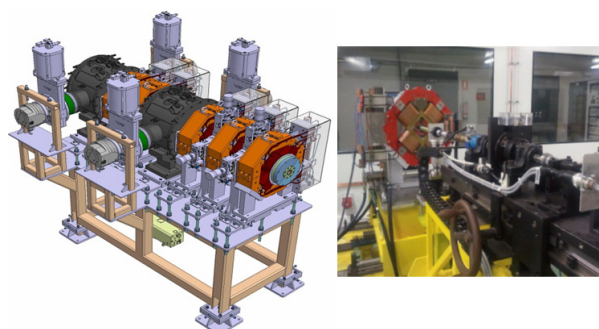


Figure 9: 3D mock-up of MEBT and a photo of the quadrupole testing.

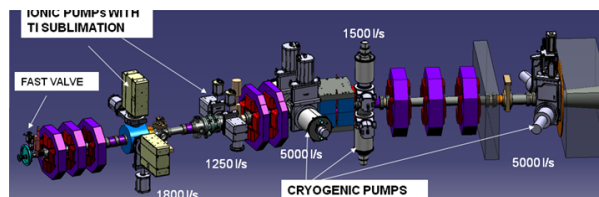
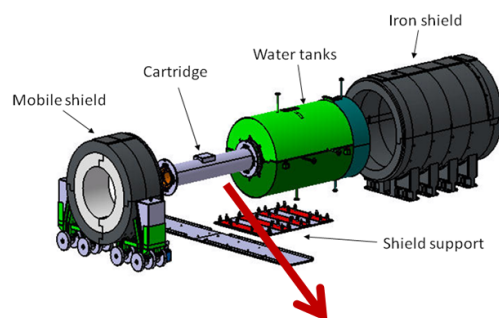


Figure 10: 3D mock-up of HEBT.



ITEM	NAME
1	Inner cone (Cu)
2	Outer cone (Cu)
3	Cylinder (SS)
4	Tip support (Cu)
5	Rear flange (SS)

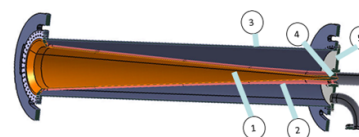


Figure 11: Beam dump.

### 3.6 高周波源

高周波源は、18基の高周波発生器から成り、そのうち8基は、200kWの高周波パワーをRFQの8つ高周波カプラーに、8基は105kWの高周波パワーをSRFの8つの超伝導空洞に、そして、2基は16kWの高周波パワーをMEBTのバンチャーに供給する。バンチャー用は半導体アンプを用いているが、その他は同じ設計の高周波発生器を用いている。すなわち、半導体のブリドライバーとプリアンプとメインアンプに4極管を用いたものである。

高周波源はスペインのシーマット研究所が担当しているが、プロトタイプモジュールで200kWの性能を確認した後、実機の1号機、2号機モジュールの試験を2014年6月に行い、200kWの出力や安定性を確認している(図12参照)。

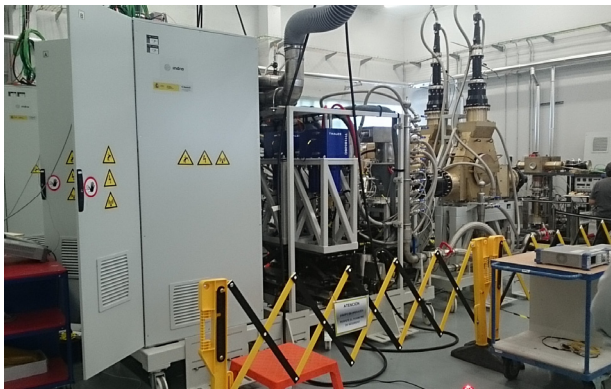


Figure 12: Acceptance test of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> RF module held in June 2014.

### 3.7 加速器建屋

加速器を受け入れるための建屋は、青森県六カ所村の国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)に2010年に完成している。図13に建屋鳥瞰図を示す。加速器本体を据え付ける1.5mのコンクリート遮蔽壁で覆われた加速器室のほか、入射器電源と18基の高周波源を据え付ける電源室、空調設備(HVAC)冷却系、全系制御系、SRF Linacのための冷凍設備エリアを備えている。

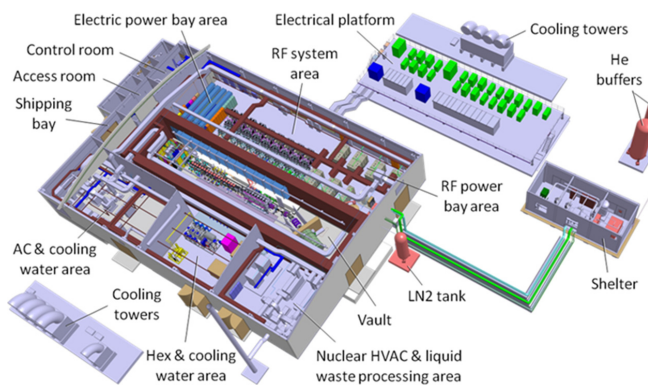


Figure 13: Accelerator building and the layout.

## 4. おわりに

核融合エネルギーの実現に向けて、核融合炉と同等の高エネルギー中性子による材料の重照射試験が必要であり、そのため国際核融合材料照射施設(IFMIF)の最重要コンポーネントである大電流加速器の実証試験を進めている。特に重要な、入射器、RFQ、SRF Linacの初段から構成される原型加速器を日欧の主要な研究所が分担して製作し、青森県六カ所村に新設された国際核融合エネルギー研究センターにおいて、実証試験を行う。

IFMIFの原型加速器は、125mAという大電流の重水素イオンビームを連続で定常的に発生する必要があり、これまでに無い加速器の先端領域に挑むことになる。

国際協力のもと、欧州の各研究機関からの専門家も参加して、2014年9月の入射器の実証試験を皮切りに一連の加速器実証試験を行うが、本プロジェクトの成功のためには、日本の核融合コミュニティのみならず、加速器コミュニティの協力が必要である。

## 参考文献

- [1] Y. Okumura, "Present status and achievements of Broader Approach Activities", *Fusion Sci. and Tech.* **64** (2013) 86.
- [2] P. Garin et al., "IFMIF's new design: Status after 2 years of the EVEDA Project", *J. Nucl. Materials* **417** (2011) 1262.
- [3] J. Knaster et al., "IFMIF: overview of the validation activities", *Nucl. Fusion* **53** (2013) 116001.
- [4] The IFMIF/EVEDA Integrated Project Team, "IFMIF – Intermediate Engineering Design Report", June 2013.
- [5] A. Mosnier et al., "Present status and developments of the linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc)", IPAC2012, New Orleans.
- [6] F. Scantamburlo et al., "LIPAc, The 125mA/ 9MeV/ CW Deuteron IFMIF's Prototype Accelerator: What Lessons have we learnt from LEDA?", *Proc of IPAC2014, Dresden, THPME019*.
- [7] R. Gobin et al., "International Fusion Materials Irradiation Facility injector acceptance test at CEA/Saclay: 140mA/100keV deuteron beam characterization", *Rev. Sci. Instrum.* **85** (2014) 02A918.
- [8] R. Dima et al., "Present status and progress of the RFQ of IFMIF/EVEDA, IPAC2013, Shanghai.
- [9] F. Orsini et al., "Progress on SRF Linac development for the IFMIF/EVEDA, IPAC 2013, Shanghai.