

## IFMIF/EVEDA 原型加速器超伝導加速器クライオモジュール組立てのための環境整備と現状

### PREPARATION AND CURRENT STATUS OF SRF CRYOMODULE ASSEMBLY ON THE IFMIF PROTOTYPE ACCELERATOR

蛭沢貴<sup>#,A)</sup>, 前原直<sup>A)</sup>, 近藤恵太郎<sup>A)</sup>, 春日井敦<sup>A)</sup>, 坂本慶司<sup>A)</sup>, 加古永治<sup>B)</sup>, 阪井寛志<sup>B)</sup>, 梅森健成<sup>B)</sup>,  
ベリー ステファン<sup>C)</sup>, バザン ニコラ<sup>C)</sup>, フィリップス ガイ<sup>D)</sup>, ジッコ エルベ<sup>D)</sup>, カラ フィリップ<sup>E)</sup>

Takashi Ebisawa<sup>#,A)</sup>, Sunao Maebara<sup>A)</sup>, Keitaro Kondo<sup>A)</sup>, Atsushi Kasugai<sup>A)</sup>, Keishi Sakamoto<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>B)</sup>,  
Hiroshi Sakai<sup>B)</sup>, Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Nicolas Bazin<sup>C)</sup>, Stephane Berry<sup>C)</sup>, Guy Phillips<sup>D)</sup>, Herve Dztiko<sup>D)</sup>, Philippe Cara<sup>E)</sup>

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

<sup>B)</sup> KEK

<sup>C)</sup> CEA

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

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

#### Abstract

Engineering validation and engineering design activities (EVEDA) of the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), an accelerator-based high intensity neutron source, is one of international collaborative projects in the field of nuclear fusion energy development by Japan and Europe, and the installation and the commissioning of the prototype accelerator (LIPAc, Linear IFMIF Prototype Accelerator) is ongoing at the Rokkasho Fusion Institute of QST. Several SRF Cryomodules will be required for IFMIF to accelerate deuterons from 5 MeV to 40 MeV. The assembly of the cryomodule will be completed under the responsibility of Fusion for Energy, with assembly work recently starting at the QST Rokkasho site in March 2019. Due to the cleanliness requirements for the assembly, QST took the responsibility to prepare the infrastructure of an ISO 14644-1 class 5 cleanroom. In addition, a dedicated slow pumping system and other ancillary equipment was prepared for the assembly. In this present paper, the details of the preparation work for the cryomodule assembly made by QST and current status will be presented.

#### 1. はじめに

IFMIF(International Fusion Materials Irradiation Facility, 国際核融合材料照射施設)は重陽子-リチウム(d-Li)核反応を用いた加速器駆動型の強力中性子源であり、20年以上前からIEAの国際協力の下で検討が進められてきた。現在は、2007年から開始された、ITERと並行して進めている日欧共同事業である幅広いアプローチ(BA)活動の枠組みの下で、IFMIF/EVEDAの工学実証・工学設計活動(Engineering Validation and Engineering Design Activities, EVEDA)が進められている。IFMIF/EVEDAでは、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ミッションである[1]。このための最も重要な課題の1つは大電流の重陽子加速器の原理実証であり、IFMIF加速器のプロトタイプである原型加速器の開発が日欧協力で行われ、六ヶ所核融合研究所において据付・調整・コミッショニングが実施されている。このIFMIF原型加速器は、LIPAc(Linear IFMIF Prototype Accelerator)と呼ばれ、Fig. 1に示すように、重水素イオン源(入射器)-RFQ(高周波四重極加速器)-MEBT-超伝導加速器(SRF)-ビーム診断系(D-Plate)-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。IFMIFでは2本のビームライ

ンを用い、各ラインで4段のSRFを用いて40MeV-合計250mAの重陽子ビームをCW運転する設計であるのに対し、LIPAcは1本のビームライン、初段のSRFのみで9MeV-125mAの重陽子ビームのCW運転を実証する計画となっている。IFMIF加速器の成否の鍵を握るのは、空間電荷効果によるビーム発散力が大きい低エネルギー部分の大電流加速実証である。

2018年6月にRFQによる2.5MeVの陽子ビーム加速試験に初めて成功し[2]、2019年7月現在は重陽子ビームの加速試験を開始している。SRFについては、2019年3月より、欧州実施機関の責任のもと、クライオモジュールの組立作業を開始した。

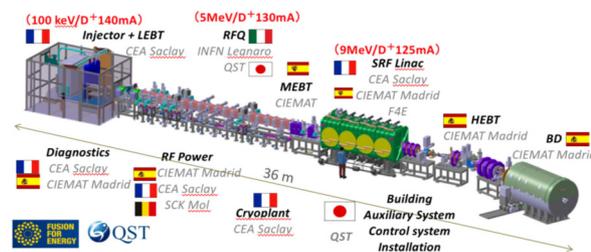


Figure 1: Configuration of the LIPAc.

LIPAcのクライオモジュールは、Fig. 2のように、8式のNb製の超伝導空洞であるHWR(Half Wave Resonator(半波長共振器)、運転周波数:175MHz、運転温

<sup>#</sup> ebisawa.takashi@qst.go.jp

度:4.5K)、RF カプラー、ビームを収束するための NbTi 製の超伝導ソレノイドコイル(中心磁場:6 T)で構成されている。超伝導空洞の定格加速電場は、4.5 MV/m である。極低温を維持するため内部の機器はクライオスタットの中に納められ、輻射熱を抑えるための断熱シールド、外部磁場を遮蔽するための磁気シールドで囲まれている [3]。

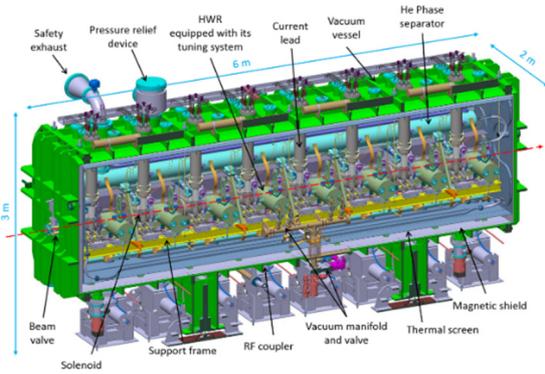


Figure 2: Configuration of the Cryomodule.

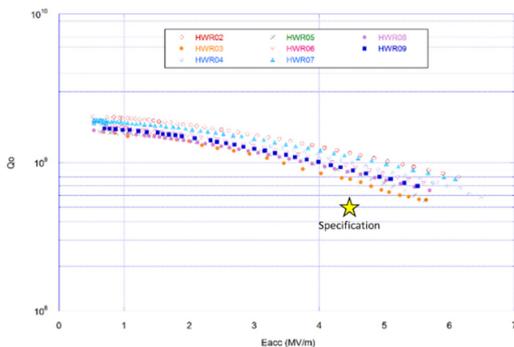


Figure 3:  $Q_0$  vs  $E_{acc}$  of the eight series cavities in vertical test [4].

空洞、RF カプラー、クライオスタットは CEA、超伝導ソレノイドコイルは CIEMAT が調達を担当する。当初、IFMIF 計画ではクライオモジュールは欧州で組み立てられてから日本に輸送される予定であったが、輸送による機器損傷を避けるため、各コンポーネントを日本に送り、QST 六ヶ所サイトで組み立てることに方針が変更された。空洞は縦測定(Fig. 3)、カプラーはコンディショニング及び耐電圧試験、ソレノイドコイルは冷却・通電試験及び磁場測定を行い、各々の機器の性能が確認された後、CEA のクリーンルームで洗浄され、六ヶ所に運ばれる [5]。六ヶ所サイトでクライオモジュールを組み立てるため、設備の準備・環境整備を行うことになった。

超伝導加速器空洞はわずかな塵やほこりの汚染によりフィールドエミッションを誘発し性能劣化を招くため、クライオモジュールは清浄度の高い環境下で組立作業が行わなければならない。そこで、クライオモジュールを組み立てるためのクリーンルームの建設やスロー排気システムなどの準備及び作業環境の整備を行った。本稿では、クライオモジュール組立のために QST が行った環境整備及び組立作業の現状について述べる。

## 2. クリーンルームの建設

LIPAc のクライオモジュールの組立には、ISO 14644-1 class 5 という、半導体工場と同等クラスの高い清浄度のクリーンルームが要求される。ここでは QST が建設したクリーンルームの仕様について説明する。

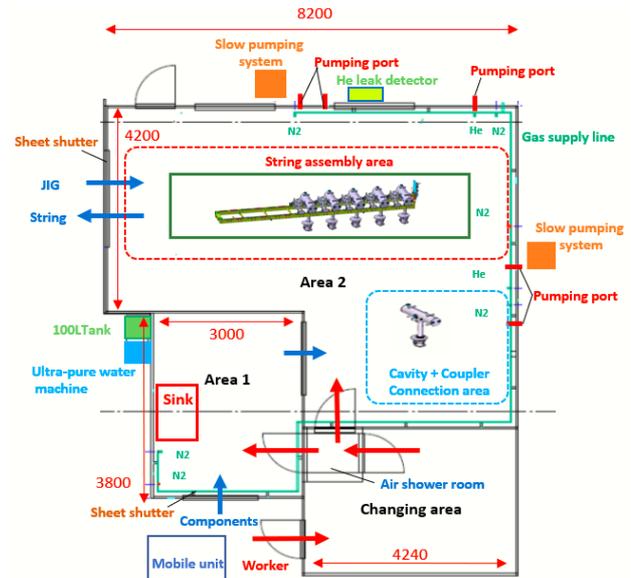


Figure 4: Layout of the clean room.

クリーンルームは Fig. 4, 5 で示すように 3 つの部屋と 1 つの移動型ユニットで構成される。このクリーンルームは、主に組立て作業を行うための必要最低限の設備と作業スペースのみを考慮してデザインした。

まず更衣室(changing area)に入室し、防塵服を着用する。その後、エアシャワールームで服の表面の塵やほこりを飛ばし、組立エリア (Area2) に入室する。

エリア1 (Area1) では主に各コンポーネントのゴミをエアガンで飛ばし、工具や小さい部品の洗浄を行う。そのため、高純度窒素ガスの取り出し口、イオンガン、超音波洗浄機、超純水製造装置などを設けている。ここできれいにした機器・部品はシートシャッターを開けエリア2 (Area2) に運ばれる。さらに、パスボックスを設け小さい工具や部品の受け渡しをできるようにしている。洗浄作業をするために、Milli-Q Integral MT 15XL という超純水製造装置を準備した。これはコンパクトで場所をとらず、またメンテナンスが簡単であるという特徴がある。純水の生成速度は 15 L /min、貯蔵タンクの容量は 100 L であり、小さい工具や部品を洗浄するのに十分である。空洞やカプラーなどのコンポーネントは CEA で高圧洗浄を施されてから日本に輸送されるので、このクリーンルームにはコンポーネントを洗浄するような大型の高圧洗浄設備は設けていない。

移動式ユニット (Mobil unit) 内ではコンポーネントをクリーンルームに持ち込む前に、塵やほこりをブローし、簡易なエタノール洗浄を施すなど予備洗浄を行い、クリーンルーム内に極力ゴミを持ち込まないようにしている。

エリア2では空洞とカプラーの接続及び空洞ストリングを行う。ここでは組立の際、空洞内部をフラッシングするた

めの高純度窒素ガスの出口を設けている。また、真空漏れ試験用のヘリウムガスのラインも設けている。クリーンルーム内部の機器とクリーンルーム外部の排気系を接続するため、ニップルを壁に貫通させた排気ポート(Pumping port)を5か所設けた。

超高純度ガスについては、ブロー、フラッシング、リークチェック用と各用途に合わせて取り出し口を配置した。ガス配管内部は電解研磨処理を施し、溶接で接合した。Figure 6 で示すように、フラッシング用の窒素は2本のボンベから供給され、片方が空になったらもう一方のボンベに半自動的に切り替え、窒素の供給を途絶えさせないように差圧式の切り替えバルブを設けた。ガスの取り出し口は、マイクロフィルタ、クリーンレギュレータ、バルブ、流量計で構成されており、フラッシングのための流量を調整をする。

全ての部屋は ULPA (Ultra Low Penetration Air:0.1  $\mu\text{m}$  の粒子を補足)フィルタを用いたダウンフローシステムで class5 の清浄度を維持している。層流が有効な位置は床から約 1 m の設計であり、その位置ではほぼ全域にわたってパーティクルは検出されなかった。組立て作業中、ビームラインの高さはおおよそ 1.3 m 程度の位置になるので、このクリーンルームは組立て作業に適していることが確認された。



Figure 5: Inside of the clean room.



Figure 6: Gas handling panel and gas outlet.

### 3. スロー排気システム

SRF の性能劣化の原因の一つとして、真空排気・ベントによるパーティクルの侵入・拡散が挙げられる。それを

防ぐために、ゆっくりとした真空排気及びベントを行うためのスロー排気システムを準備した。



Figure 7: Slow pumping system and operation panel.

Figure 7 にスロー排気システムの外観を示す。このスロー排気システムは KEK と共同で開発し、class3 のクリーンルーム内で組立てた[6]。スロー排気システムは粗排気用のドライポンプ(DP)、ターボ分子ポンプ(TMP)、排気速度を調整するためのマスフローコントローラ(MFC)及び禁油性のクリーンな真空機器で構成されており、配管類は電解研磨処理が施されたものを用いて構成されている。

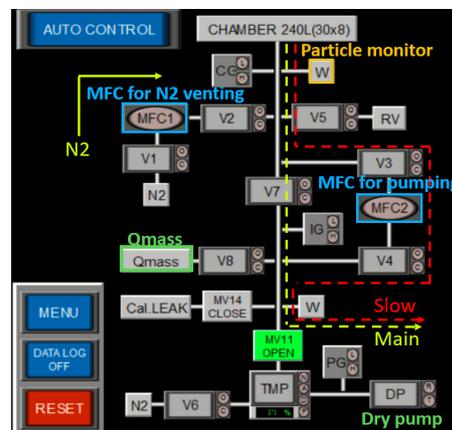


Figure 8: Block diagram of the slow pumping system.

内部の汚染防止のため、真空排気系はクリーンルーム外に配置し、壁に貫通させたニップルを介して、ベローズで内部の機器と接続されている。ベローズは、クリーンルーム内でイオンガンでパーティクルが0になるまでブローし、クリーン環境下で接続を行い、ゴミが入らないよう注意しながら接続した。操作パネルはクリーンルーム内に持ち込んだ。

Figure 8 にブロックダイアグラムを示す。スロー排気モードで運転する際は valve7 が閉じられ、MFC2 (0.6 L/min)を通し流量調整をすることでスロー排気を実現する。定格速度での排気モードに切り替える際は、MFC2 側のバイパスラインが閉じ valve7 が開く。ベントする際は MFC1 (0.2 L/min)で窒素の流量が調整され、ゆっくりと供給される。分圧は Qmass で読み取る。空洞の手前には Weex 社製の真空中パーティクルモニタシステムを設け、0.3  $\mu\text{m}$ ~3.6  $\mu\text{m}$  のサイズのパーティクルの量を測定することでパーティクルの動きを可視化することができる。我々のスロー排気システムの特徴は、クリーンルーム内

に持ち込んだパネル上で運転モードの切り替えが自動的に行えることであり、これは誤操作を防ぐことにもつながる。

このスロー排気システムは、操作中にパーティクルを発生させないかどうか、実際に運転し確かめた。その結果を Fig. 9 に示す。横軸は時刻、縦軸はパーティクルの発生量(積分値)を示す。

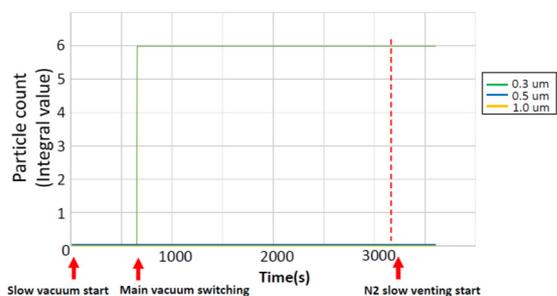


Figure 9: Result of the particle measurement.

まず、0 s でスロー排気を開始し、スロー排気中はパーティクルの発生がないことを確認した。しばらくスロー排気モードで運転し、600 s ほど経過したところで定格速度でのメイン排気モードに切り替えた。ここで、0.3 μm の粒子が 6 コ発生した。モード切替の際、valve 7 が開いたときに発生したと考えられる。その後、定格速度での排気をしばらく続けたがパーティクル数の上昇は確認されなかった。3200 s 経過したところで排気をやめ、スローベントモードで窒素を供給したが、窒素の供給中もパーティクル数の上昇は確認されなかった。我々のスロー排気システムは運転モードの切り替えの際に 0.3 μm の粒子が若干発生したが、排気・ベント中にはパーティクルの発生はないことがわかった。この実験では、KEK の研究を参考に、窒素ベント用の MFC1 は 0.2 L/min、スロー排気用の MFC2 は 0.6 L/min に調整して行った。

これとほぼ同じ設計のスロー排気システムが KEK の STF でのクリーン作業でも活用され、深刻なフィールドエミッションなく、ビーム運転が行われたと報告された[7]。

#### 4. エアキャスターによる機器の移動

LIPAc のクライオモジュールは総重量 12.5 t 程度の重量物である。クライオモジュールの組立を行う建物内には 10 t 級の重量物を持ち上げられる大型のクレーンなどはないので、クライオモジュールを移動調整するために、エアキャスターロードモジュールシステムを用いることにした。エアキャスターは圧縮空気を吐き出し、わずかに床から浮かして摩擦力を低減し重量物を運搬する輸送システムであり、大型の医療機器の運搬や半導体製造装置の運搬等、幅広い業界で重量物の運搬に用いられている。

エアキャスターを用いる利点としては

- ・大掛かりな工事は不要である。
- ・大型のクレーンより安価である。
- ・資格が不要である。
- ・安全性が高い。
- ・小回りが効くので、微調整に有効。

という点が挙げられる。デメリットとしては

- ・平坦な床でないと正常に動作しない。
- ・マンパワーを要する。

などが挙げられる。

圧縮空気には、コンプレッサからわずかながら発生する油分やパーティクルが含まれる。そこで、油分による組立環境の汚染、低温装置の性能劣化を抑えるために、圧縮空気を供給するホースにオイルミストフィルタを設け ISO8573-1:2010 class 1 の清浄度の圧縮空気を実現した。

2019 年 3 月、実際にエアキャスターを用いてクライオスタートを建物内に運搬した Fig. 10 のようにクライオスタートの脚底にエアキャスターモジュールを履かせ、コンプレッサから圧縮空気を供給し、プレッシャーコントローラで圧力を調整した。また、建物の入り口は段差があるので、鉄板を敷いて段差を埋めた。これでエアキャスターは正常に動作し、クライオスタートを安全に運び入れることができた。この作業では 10 人以上の人員を要した。

今後、クライオモジュールの完成後、加速室での運搬でも活用する予定である。



Figure 10: Setting of the air caster module.

#### 5. クライオモジュールの組立作業の現状及び今後の予定

2019 年 3 月より、クライオモジュールの組立作業が始まった。

まず、空洞をフラッシングするために、QST は Fig. 11 のような窒素パージュユニットを準備した。各部品は超音波洗浄を施し、イオンガンでパーティクルが 0 になるまでブローし、クリーンルーム内で組立てた。また、空洞内の圧力が上がりすぎないようにリリーフバルブ(差動範囲: 0.05~0.145 MPa)を設けた。また、ガス供給系の流量計に残留するパーティクルが空洞内に侵入しないように、窒素を導入するチューブの末端にはクリーンマイクロフィルタ(0.03 μm)を導入した。

現在は、組立作業に用いられる治具の準備・組立て、2 式の空洞とカプラーの接続および真空リーク試験を行い、リークがないことを確認した。9 月に組立て作業を再開し、残り 6 式の空洞とカプラーの接続、リーク試験が行われる予定である。

今後、空洞とカプラーの接続とリークチェックが完了した後、Fig. 12 のように治具の上に固定され、空洞内部をフラッシングしながらソレノイドコイルと接続される。クリーンルーム内での組立てが完了したら、クリーンルーム外に搬出し、レーザートラッカーを用いたアライメント作業及び、計測系やヘリウムラインの取り付けが行われる。ま

た、クライオスタットの組立でも並行して行われる。空洞部がクライオスタットに搬入された後、加速室に運搬されソレノイドコイルのカレントリードの接続が行われる。クライオモジュールの完成は2020年3月を目標としている。また、クライオモジュールがビームラインに据え付くまでに、クリーン環境下でクライオモジュール据付するためのローカルクリーンブースの準備も検討している。

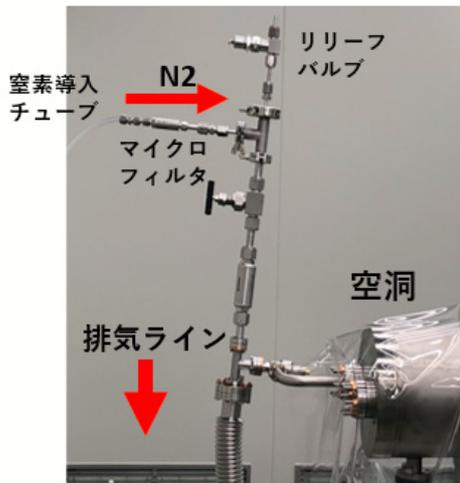


Figure 11: Preparation of the nitrogen purge unit.



Figure 12: String assembly in clean room.

## 6. まとめ

クライオモジュールの組立のために、六ヶ所核融合研究所において、ISO 14644-1 class 5 のクリーンルームの建設、スロー排気システムの構築、クライオモジュール運搬のためのエアキャスターシステムの準備と環境整備及び、各機器の性能・動作確認を行った。2019年3月にクライオモジュールの組立作業が始まり、2020年3月完成を目標としている。

## 参考文献

- [1] J. KNASTER *et al.*, Overview of the IFMIF/EVEDA project, Nucl. Fusion 57 102016, 2017.
- [2] K. Kondo *et al.*, “IFMIF/EVEDA 原型加速器(LIPAc)のRFQビームコミッショニング”, PASJ 2018, WEOLP02, Japan.
- [3] N. Bazin *et al.*, “Status of the IFMIF LIPAc SRF Linac”, in Proc. SRF2017, Lanzhou, China.

- [4] G. Devanz *et al.*, “IFMIF Resonators Development and Performance”, SRF2019, Dresden, Germany.
- [5] N. Bazin *et al.*, “Status of the IFMIF-EVEDA superconducting linac”, SRF2019, Dresden, Germany.
- [6] H. Sakai *et al.*, “DEVELOPMENT OF THE SLOW PUMPING & VENTING SYSTEM”, PASJ 2018, THP111, Japan.
- [7] H. Sakai *et al.*, “IMPROVEMENT OF A CLEAN ASSEMBLY WORK FOR SUPERCONDUCTING RF CRYOMODULE AND ITS APPLICATION TO THE KEK-STF CRYOMODULE”, SRF2019, TUP104, Dresden, Germany.