

企画セッション | 部会・連絡会セッション：核融合工学部会

■ 2022年9月7日(水) 13:00 ~ 14:30 | 会場 E1棟3F 33番教室

[1H_PL] 核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状

座長：林崎 規託 (東工大)

[1H_PL01] LIPAcの概要

*長谷川 和男¹ (1. QST)

[1H_PL02] ビーム試験計画

*増田 開¹ (1. QST)

[1H_PL03] 入射器

*赤木 智哉¹ (1. QST)

[1H_PL04] RFQおよびRF源

*近藤 恵太郎¹ (1. QST)

[1H_PL05] 超伝導リニアックおよび冷凍機システム

*蛭沢 貴¹ (1. QST)

核融合工学部会セッション

核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状

Current Status of Accelerator Development for Fusion Neutron Source (LIPAc)

(1) LIPAc の概要

(1) Outline of LIPAc

*長谷川 和男¹, LIPAc ユニット¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

1. はじめに

「核融合炉による発電実証」を目的とした核融合炉原型炉 (DEMO) の検討が進められている。DEMO の炉心では 14MeV という非常に高いエネルギーの中性子が連続的に発生し、炉を構成する材料に照射損傷等の影響をおよぼす。したがって DEMO の実現には、14MeV の高エネルギー中性子に耐えうる材料の開発が課題の 1 つとなる。この課題克服のため、加速器を用いた核融合用中性子源が検討された。その技術実証を目標とし、2007 年より日欧の共同事業である“幅広いアプローチ活動 (BA 活動)”の一環として、IFMIF/EVEDA (IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility 国際核融合材料照射施設、EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activities 工学実証・工学設計活動) 事業が開始された[1-3]。

2. IFMIF

図 1 に IFMIF の概念図を示す。図では加速器は 1 本であるが、定常 (デューティ 100%, CW) 加速を行う重陽子加速器 (電流は 125mA) 2 本を有し、それぞれの加速器は、100 keV で重陽子を引き出す入射器、5 MeV まで加速する高周波四重極加速器 (RFQ)、さらに 40 MeV まで加速する超伝導線形加速器 (SRF) から構成される。加速された 40 MeV の重陽子ビームは液体リチウムターゲットに照射されて中性子が発生し、この下流に試験材料を置き照射試験を行うものである。

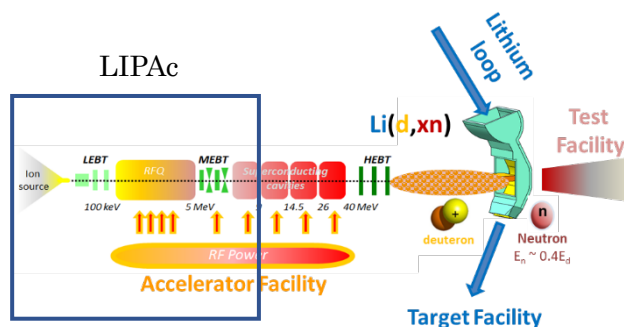


図 1: IFMIF の概念図 (図では加速器が 1 本であるが、IFMIF としては 2 本で設計・検討が進められた)

3. LIPAc の概要と体制

125mA の定常加速は、これまでの加速器技術の達成パラメータからの技術ギャップが大きい。そのため段階的に建設・実証するとして、IFMIF 原型加速器 (Linear IFMIF Prototype Accelerator, 以下 LIPAc) と呼ばれる 9 MeV, 125 mA の技術的実証を目的とした大電流加速器の研究開発を日欧協力で行っている。

図 2 に LIPAc の機器配置と貢献国・機関を示す。LIPAc は、図 1 の IFMIF

用加速器の上流部に相当し、入射器、RFQ、超伝導加速器の初段の 1 台までを実証するものである。2007 年にプロジェクトが始まって以来、具体的な体制、作業分担、R&D 項目などの協議を行ってきた。QST 六ヶ所

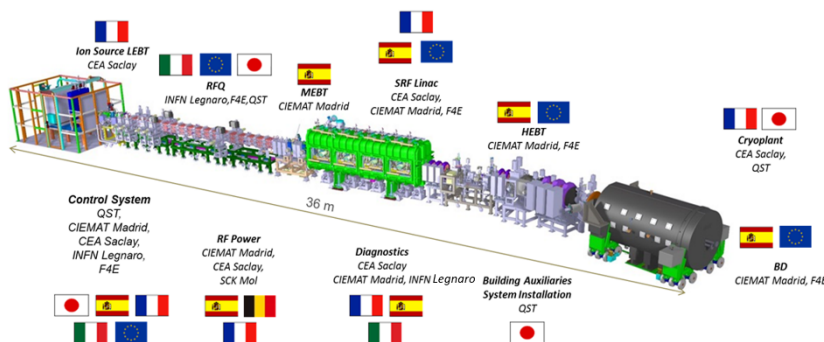


図 2: LIPAc の機器配置と貢献国・機関

研究所でサイト整備を行い、実際の機器製作、製作拠点からの輸送、据付・調整試験(コミッショニング)を日欧共同で行ってきた。加速器の主な機器は欧州が担当し、日本は、中央制御系、RFQ の高周波入力カプラ、建屋などのインフラ設備の整備を行った。事業の実施にあたっては、IFMIF/EVEDA 事業チーム、および日欧のホームチームからなる統合的な実施体制が取られている。

4. LIPAc の状況

コミッショニングは段階的に行っており[4]、RFQ の下流に低電力ビームダンプを設置した体系で、2019 年 7 月に RFQ の 5MeV、125mA、0.1%デューティの短パルス重陽子ビーム加速試験に成功した。その後、低電力ビームダンプを撤去し、RFQ の下流にビーム輸送系、大電力ビームダンプの設置と接続などを行った。

2020 年 2 月中旬以降、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、欧州研究機関から試験調整のために来所予定だった専門家等が来日できなくなるとともに、六ヶ所に滞在して統合試験を担当していた専門家が早期帰国することになった。この条件でもコミッショニングを進めるため、統合試験はリモート接続により実施した。LIPAc のコンディショニング(高電圧や大電力による調整)やビーム試験には欧州専門家の参加が不可欠であり、このために欧州への実時間データ転送システムを構築し、遠隔実験参加を可能とした(図3)。LIPAc の制御用ネットワークをインターネットに接続することはセキュリティ上の懸念があるため、複数のデータ中継用サーバを経由し、一方向のみのアクセスを許可することで、セキュアでかつ大容量・高速なデータ転送を実現した。これによって、欧州からも六ヶ所研内と同等にデータアクセスが可能となった。

ビーム試験再開に際し、各機器の設置、調整、動作試験などの機器レベルの調整・試験、単体や全体制御の試験、インターロック系の統合試験に加え、手順書の作成や教育といったソフト的なところも含めて準備を行った。

こうした準備、コミッショニング、コンディショニングを進め、長パルスビーム試験を 2021 年 7 月から開始した。ビームデューティが低い条件で全体システム確認やビーム診断機器の調整が終了した段階にあり、次にデューティを上げた試験に入る予定である。

本企画セッションでは、これまでのビーム試験の経過や今後の計画、および LIPAc 各機器の仕様や状況について報告する。

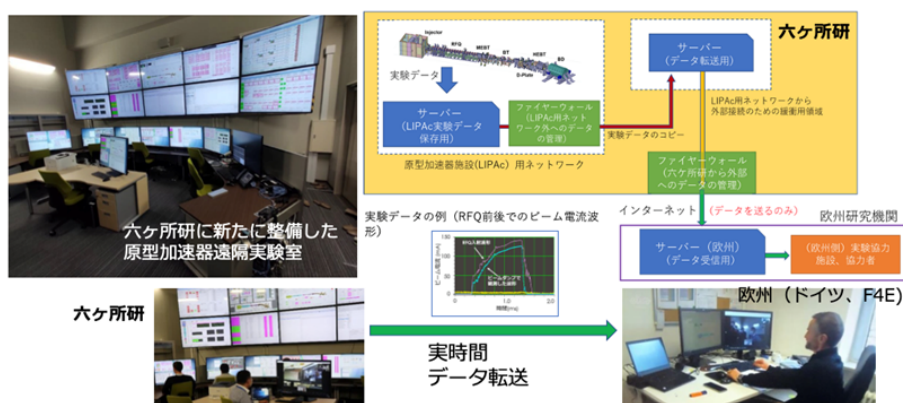


図3:欧州への LIPAc データの転送によるデータ共有の概念

- [1] H. Dzitko et al., Fusion Eng. Des. 168 (2021) 112621.
- [2] P. Cara et al, "IFMIF/EVEDA Project: Achievements and Outlooks beyond 2020", presented at FEC 2021.
- [3] 坂本慶司他, 「IFMIF 原型加速器の現状」, 100-108 「加速器」 Vol 16, No.2 (2019)
- [4] 増田開他, 「核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状 (2) ビーム試験計画」、本大会予稿集。

*Kazuo Hasegawa¹, on behalf of LIPAc Unit¹⁻⁶

¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

核融合工学部会セッション

核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状

Current Status of Accelerator Development for Fusion Neutron Source (LIPAc)

(2) ビーム試験計画

(2) Beam Commissioning Plan

*増田 開^{1,2}, LIPAc ユニット¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

LIPAc [1,2] のコミッショニングは図 1 に示すように段階的に進めている。Phase C において最終的に LIPAc は、100 keV の入射器 (図中の Injector)、5 MeV まで重陽子ビームを加速する世界最長の高周波四重極加速器 (RFQ、動作周波数 175 MHz)、2 台のバンチャ空胴を備えた中エネルギービーム輸送系 (MEBT)、9 MeV まで追加速する超伝導高周波線形加速器 (SRF linac)、ビーム診断系 (D-Plate)、高エネルギービーム輸送系 (HEBT) と、世界最大電流となる 125 mA CW、9 MeV の重陽子ビームを受け取るビームダンプ (BD) とからなる。MEBT の直後に D-Plate と低電力ビームダンプ (LPBD) を配置した Phase B において、RFQ によるものとしては世界最大電流となる 125 mA の重陽子パルスビーム (パルス長 1 msec、1 Hz) の加速実証 [3-5] を 2019 年 7 月に終えて、現在は Phase B+ が進行中である。9 MeV、1.125 MW までの重陽子ビームを受け入れ可能な BD を配置した Phase B+ において RFQ からの 5 MeV 重陽子ビームの CW までの高デューティ試験を行った後に、この Phase B+ ビーム試験のために一時的に設置されたビーム輸送系 (MEBT Extension Line: MEL) の位置に SRF linac を設置して Phase C ビーム試験に移行する計画である。

Phase B+ ビーム試験の主な目的は、(1) SRF より上流の Injector、RFQ 及び MEBT の CW までの実証、(2) Phase B+ に続く Phase C において SRF linac に入射されるビームの特性評価、(3) D-Plate を含むビーム診断系の低デューティから CW までの試験などである。Phase B+ で初めて設置された機器の、低電流ビーム (~10 mA の陽子、及び、~20 mA の重陽子) による基本的な試験等を目的とした Phase B+/Stage 1 ビーム試験を昨年 12 月に終えて、現在は、Injector 単体での CW ビーム試験 [6] と RFQ の RF コンディショニング [7] を進めている。これらの各サブシステムの CW ビーム試験に向けたコミッショニングが完了した後に、125 mA 重陽子ビームによる Phase B+/Stage 2 及び Stage 3 ビーム試験に移行する。まず Stage 2 において、多くのビーム診断機器が使用可能な 5 % 以下のデューティにおいてビーム特性の評価を行った後に、最終 Stage 3 において、主に非破壊型のビーム診断機器を用いて CW までの高デューティを目指す計画である。

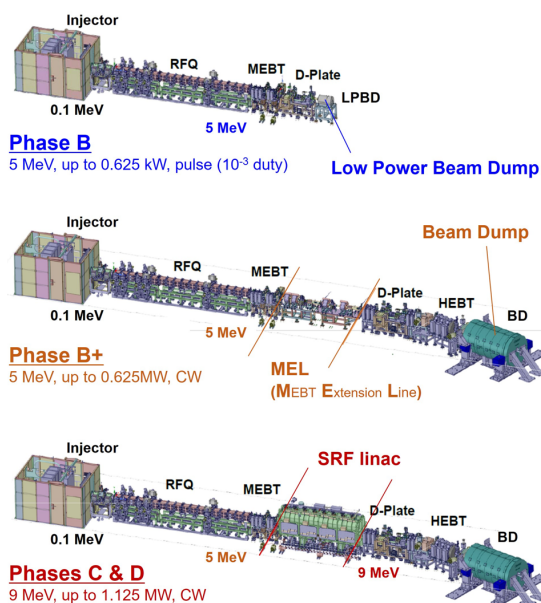


図 1 LIPAc の段階的コミッショニングの各 Phase における器機配置

[1] H. Dzitzko et al., Fusion Eng. Des. 168 (2021) 112621.

[2] 長谷川和男他、「核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状 (1) LIPAc の概要」、本大会予稿集。

[3] K. Kondo et al., Fusion Eng. Des. 153 (2020) 111503.

[4] K. Kondo et al., Nucl. Fusion 61 (2021) 116002.

[5] L. Bellan et al., Proc. ICFA HB 2021 (2021); doi:10.18429/JACoW-HB2021-WEDC2.

[6] 赤木智哉他、「核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状 (3) 入射器」、本大会予稿集

[7] 近藤恵太郎他、「核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状 (4) RFQ と RF 源」、本大会予稿集

*Kai Masuda^{1,2} on behalf of LIPAc Unit¹⁻⁶

¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

核融合工学部会セッション

核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状

Current Status of Accelerator Development for Fusion Neutron Source (LIPAc)

(3) 入射器

(3) Injector

*赤木 智哉¹, LIPAc ユニット¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

原型加速器 (LIPAc, Linear IFMIF Prototype Accelerator) [1]の入射器は ECR イオン源と低エネルギービーム輸送系 (LEBT) で構成される。CEA-Saclay が設計、製作及び性能確認試験を行った後、QST 六ヶ所研究所に搬入され、2017 年 8 月までに入射器単体での試験 (Phase-A 試験) を完了した。入射器に求められる仕様は、RFQ で 125 mA、CW の重陽子ビーム加速を達成するため、100 keV、140 mA の重陽子ビームを安定に供給することである。それに加えて低エミッタンスビームであることも必要で、これらの要件を同時に満たす運転条件を確立する必要がある。また、ビーム加速試験の初期段階におけるビーム損失による装置の放射化を防ぐため、重陽子ビーム試験を開始する前に予め LIPAc の各機器を調整することができるよう、50 keV、70 mA の陽子ビームを供給することも求められる。2019 年 7 月に完了した Phase-B 試験 (RFQ 実証試験) において、RFQ による 125 mA の重陽子パルスビームの加速 (1 ms、1 Hz) に成功し、低デューティでは、入射器が目標のビーム電流加速を達成できるビーム条件で、重陽子ビームを RFQ に供給できることを実証した[2]。

イオン源のビーム引き出しシステムは 5 枚の電極 (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) で構成される。プラズマ電極は、陽子ビーム加速やビーム電流の小さな試験を行う場合に、引き出し口径の小さなものに交換して運転することが可能である。中間電極は印加する高電圧を調整することでビームの発散角を最適化するために使用する。プラズマ電極-中間電極間ギャップはスペーサーを用いて数 mm 程度調整できる。LEBT では 2 つのソレノイド電磁石でビームを収束させつつ、RFQ の入射条件に合うようにビーム輸送する。各ソレノイドには X-Y ステアリング電磁石が組み込まれている。イオン源から引き出されたビームの特性評価については、主に 2 つのソレノイド電磁石の間に設置されたアリソンスキャナー型エミッタンスメータを使用する。また、イオン種の成分比測定のためのドップラーシフト分光計やビームプロファイル観察用のカメラ、空間電荷中和率測定用 4 グリッド分析計も使用できる。

現在は Phase-B+試験 (125 mA 長パルス重陽子ビーム加速試験) の準備のため、入射器の大電流、CW 運転の実証試験を進めている。大電流と低エミッタンス (目標 $0.25 \pi \text{ mm-mrad}$) という要件を満たし、放電頻度が低い安定動作可能な領域を理論的に予測することは一般に困難であるため、引き出し口径の異なる複数のプラズマ電極を予め製作しておき、口径の小さな電極から順次大きな電極に変えながら、総ビーム電流とエミッタンスの関係について実験的に最適な条件を探索してきた。これまでに引き出し口径 $\phi 9$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 11 \text{ mm}$ の電極を用いた入射器長パルス試験を完了しており、 $\phi 11 \text{ mm}$ の電極を使用した試験で総電流 150 mA、重陽子割合 91% (137 mA)、低エミッタンスビームの生成に成功した。また、このビーム条件で約 11 時間の CW 運転を達成した。これにより LIPAc の入射器として CW 運転においても要求性能をほぼ満足することを実証した。さらに、これまで実験的に得られた結果の系統的な分析と経験から、口径 $\phi 12 \text{ mm}$ の電極を用いれば更に低エミッタンスの大電流重陽子ビームを安定的に供給できる見通しを得ることができたため、この電極を用いた試験についても現在進めているところである。既に総電流 160 mA で CW 運転を達成したが、ビーム安定性の改善が必要で、今後も RFQ 長パルス加速試験に向けて最適化を継続する予定である。

[1] H. Dzitko et al., Fusion Eng. Des. 168 (2021) 112621.

[2] T. Akagi et al., Rev. Sci. Instrum. 91 (2020) 023321.

*Tomoya Akagi¹, on behalf of LIPAc Unit¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

核融合工学部会セッション

核融合中性子源用加速器開発（LIPAc）の現状

Current Status of Accelerator Development for Fusion Neutron Source (LIPAc)

(4) RFQ および RF 源

(4) RFQ and RF Source

*近藤 恵太郎¹, LIPAc ユニット¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

LIPAc では入射器で生成し 100 keV まで加速した重陽子ビームを、高周波四重極加速器 (RFQ) により 5 MeV まで加速する。本 RFQ は、動作周波数 175MHz の 4 ベーン型で、イタリア INFN レニャーロ研が設計・製作したもので、全長 9.8 m と世界最長である。大電流 125 mA の重陽子定常 (CW) ビームを放射化を抑えながら加速するために、低エネルギー部での加速とパンチングを丁寧に行い、高エネルギー部でのビーム損失を極力抑えるように設計され、極めて高い工作精度で製作されている[1, 2]。この RFQ は 12 個のモジュールからなる高周波空洞であるが、壁損失は重陽子加速時の定格ベーン間最大電圧 132 kV で 560 kW、ビーム負荷は定格電流 125 mA で 625 kW にも達する。合計 1.2 MW 以上の大電力の高周波は、計 8 台の高周波カプラーと同軸導波管によって入射する、世界唯一の設計であり、位相と振幅の厳密な同期制御が必要となる。このため、フルデジタル制御の LLRF (Low Level RF) を用い、マスタースレーブ方式の同期とフィードバック/フィードフォワード制御を行っている。高周波電力を供給する RF 源システムは、スペイン CIEMAT 研により調達された。四極管で 2 段増幅を行い、各カプラー1 系統あたり最大 200 kW、CW を出力する[3]。RFQ は 2016 年から六ヶ所研において据付調整が開始され、RFQ 空洞の RF コンディショニングを 2017 年 10 月から開始した。これまで RF 源の不安定性や 8 系統同期入射に起因する様々な問題に直面し、四極管やダミーロードの破損、RF カプラーの過熱による真空リーク・同真空窓の破損などのトラブルを経験した。これらの問題を解決し、また RF 源の様々な改良を実施した結果、安定性が大きく向上し、現在では効率的に RF コンディショニングを進めることが可能となった。2019 年夏までには重陽子ビーム加速に必要な定格電圧 132 kV でパルス長 5 ms での RF 入射が可能となった。また、2021 年末には、105 kV で CW での RF 入射を達成した。現在も定格電圧における CW 入射に向けた試験を継続中である。RFQ によるビーム加速試験は、RF コンディショニングの進展と共に、段階的に実施してきた。2018 年 6 月に陽子ビーム、2019 年 3 月に重陽子ビームの加速に初めて成功し、2019 年 7 月にはピーク電流 125 mA、パルス幅 1 ms の重陽子ビームの加速に世界で初めて成功し、プロジェクトの初期目標の 1 つを達成した [4]。その後、さらにパルス幅を伸長するため、CW ビームを受けることができる大電力ビームダンプと RFQ を接続するビーム輸送系が整備された。2021 年 7 月に初めて加速した重陽子ビームを大電力ビームダンプに入射することに成功し、同年末までにパルスビームを用いた特性評価試験を完了した。今後、RF コンディショニングの進捗を見ながら、RFQ による長パルスビームの加速試験を実施する計画となっている。

[1] A. Pisent et al., “IFMIF-EVEDA RFQ Design”, Proc. of EPAC08, Genoa, Italy (2008).

[2] E. Fagotti et al., “Installation and Low Power Test of IFMIF-EVEDA RFQ at Rokkasho Site”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, THPIK032 (2017).

[3] M. Weber et al., “Functional Overview of the RF Power System for the LIPAc RFQ”, IEEE Transactions on Plasma Science, 49, 9, 2987 – 2996 (2021).

[4] K. Kondo et al., “Validation of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) in Rokkasho”, Fusion Engineering and Design, 153, 111503 (2020).

*Keitaro Kondo¹, on behalf of LIPAc Unit¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

核融合工学部会セッション

核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状

Current Status of Accelerator Development for Fusion Neutron Source (LIPAc)

(5) 超伝導リニアックおよび冷凍機システム

(5) Superconducting Linac and Cryogenic System

*蛭沢貴¹, LIPAc ユニット¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

LIPAc は、100 keV の入射器(Injector)、重陽子ビームを 5 MeV まで加速する高周波四重極加速器(RFQ)、中エネルギービーム輸送系(MEBT)、9 MeV まで加速する超伝導高周波線形加速器(SRF Linac)、ビーム診断器系(D-Plate)、高エネルギービーム輸送系(HEBT)と、125 mA(CW)/9 MeV の重陽子ビームを受けるビームダンプ(Beam Dump)で構成される[1]。図 1 に示すように、LIPAc の SRF クライオモジュールは、ビームを加速するために 8 式のニオブ製の半波長共振器 (HWR: Half-Wave Resonator, 共振周波数: 175 Hz, 定格加速電場: 4.5 MV/m) 型空洞(図 2)、8 式の高周波(RF)カプラー、ビームを収束するため 8 式の超伝導ソレノイドコイルパッケージ(中心磁場: 6 T)が HWR と交互に周期的に配置され、ビーム加速・収束を繰り返す構造としている[2]。クライオスタットは、輻射熱を抑制する断熱シールド、地磁気を遮蔽する磁気シールドで構成される。HWR とソレノイドコイルパッケージは、多段クロードサイクル方式を用いたヘリウム(He)冷凍機システムによって生成される液体 He で、4.5 K まで冷却される。LIPAc の冷凍機システムとクライオモジュールはクロードループを構成し、高圧ガス保安法冷凍則の規制を受け、特にニオブから構成される空洞は例示基準が適用できないため事前認可が必要である。超伝導加速空洞は、微粒子の混入により電界放出現象を誘発し、加速電場の劣化・クエンチを引き起こすので、組立作業は半導体工場レベルのクリーンルーム内で実施される。

SRF クライオモジュールを構成する各機器は、欧州の研究機関で製作・性能試験が完了した後、QST 六ヶ所研究所に搬入された。冷凍機システムは、2017 年に施工が完了し、2018 年に QST 主体の液化運転のトレーニングを実施した。クライオモジュールは 2019 年より、六ヶ所研究所内に整備された ISO-class5 のクリーンルーム内で欧州実施機関(F4E)により組立作業が開始され、一部の HWR と RF カプラーの接続作業などが実施された。ところがその後、新型コロナウイルス拡大による入国規制等で欧州の技術者が来日できず、組立作業が中断し、作業は延期されてきたが、2022 年夏より組立作業が再開される。クライオモジュールの組立作業は 2023 年春頃に完了する見通しであり、その後、加速器室への搬入、据付作業、冷凍機システムとの接続・液化運転、コミッショニングを開始する計画である。



図 1. LIPAc の SRF クライオモジュール(左)と冷凍機システム(右). 図 2. LIPAc の HWR 空洞.

[1] H. Ditzko *et al.*, “Status and future developments of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)”, Fusion Engineering and Design, 168-112621 (2021).

[2] N. Bazin, *et al.*, “Status of the IFMIF-EVEDA superconducting linac”, Proc. SRF2019, Dresden, Germany, 735-741 (2019).

*Ebisawa Takashi¹ on behalf of LIPAc Unit¹⁻⁶

¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN