

IFMIF 原型加速器の現状

STATUS OF IFMIF PROTOTYPE ACCELERATOR (LIPAc)

長谷川 和男^{#, A)}, 春日井 敦^{A)}, 近藤 恵太郎^{A)}, 杉本 昌義^{A)}, カラ フィリップ^{B)},
ジッコ エルベ^{C)}, ジェックス ドミニク^{C)}, LIPAc ユニットを代表して

Kazuo Hasegawa, Atsushi Kasugai, Keitaro Kondo, Masayoshi Sugimoto (QST/Rokkasho), Philippe Cara
(IFMIF/EVEDA PT), Herve Dzitko, Dominique Gex(F4E) on behalf of LIPAc Unit
^{A)} QST Rokkasho, ^{B)} IFMIF/EVEDA Project Team, ^{C)} Fusion for Energy

Abstract

The LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) project, which is under the collaboration framework between Europe and Japan, has entered in the new stage from low duty to validation of high duty (ultimately continuous-wave) cycle operations of a 5 MeV RFQ. In the configuration change and commissioning, some highlights are preparation of a high power beam dump, a new beam transport line, and improvement of RF systems. The COVID-19 restricts the entry of EU experts to Japan. To mitigate these effects, the beam dump and the beam transport line are commissioned with a help of remote connection from EU. Some data sharing tools have been developed to allow experts to participate in the beam operation from Europe. This paper will present a progress and status of the LIPAc.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)六ヶ所核融合研究所では、国際核融合材料照射施設(IFMIF、International Fusion Materials Irradiation Facility)の原型加速器(LIPAc, Linear IFMIF Prototype Accelerator)と呼ばれる9 MeV, 125 mA, 重陽子ビームの連続加速の工学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[1]。これは、2007年より開始された日欧の共同事業である”幅広いアプローチ活動(BA活動)”の一環として実施してきた。BA活動は2020年3月にPhase Iを終了したが、4月からPhase IIとして活動を継続している。LIPAcはFig. 1に示すように、イオン源(入射器)、RFQ(高周波四重極加速器)、MEBT(中間エネルギービーム輸送系)、SRF(超伝導加速器)、D-plate(ビーム診断系)、HEBT(高エネルギービーム輸送系)、BD(ビームダンプ)から構成される。加速器機器

(入射器、RFQ、MEBT、HEBT、SRF、BD、175 MHz高周波システム、ローカル制御、ビーム診断系)は欧州の研究所(CEA, CIEMAT, INFN, SCK-CEN)で設計、製作、試験が行われた。また、建屋、ユーティリティ、中央制御システム、RFQのカプラはQSTが担当した。これら

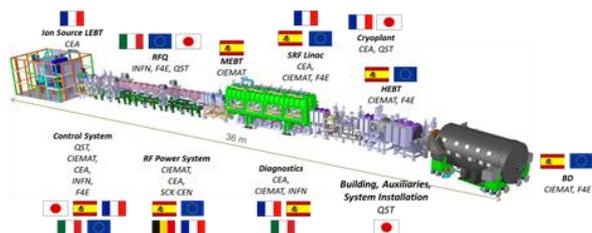


Figure 1: LIPAc accelerator with the contribution from the European and Japanese Contributors.

[#] hasegawa.kazuo@qst.go.jp

の機器を統合し、六ヶ所核融合研究所で組立と試験を行っている。コミッショニングを段階的に行っており、2019年7月にRFQの5 MeV、125 mA、0.1%デューティの重陽子ビーム加速試験に成功した[2,3]。今回はその後の進展を中心に報告する。

2. ビームラインの整備

SRFをビームラインに組み込む前に、RFQまでの重陽子ビームの高デューティでの実証試験を行うこととし、大電力ビームダンプと、それに接続するためのビーム輸送系の整備を進めた。RFQの下流に設置していた低電力

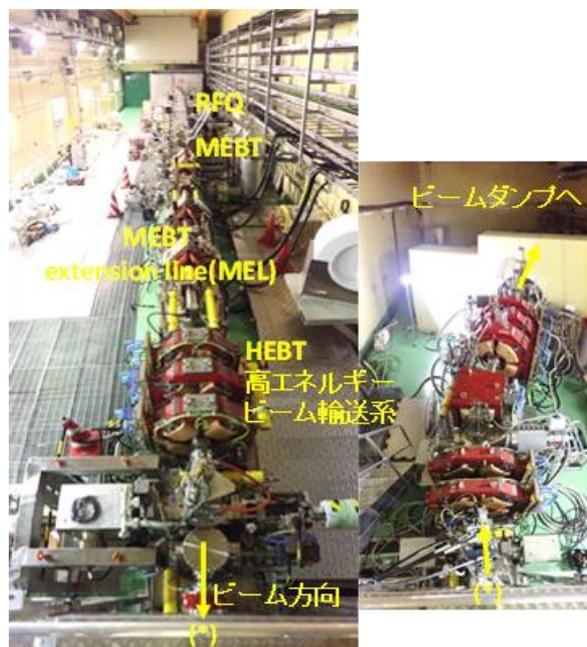


Figure 2: Beam Transport Line (MEBT, MEL and HEBT).

用ビームダンプを撤去し、将来 SRF を据え付ける部分には MEL (MEBT Extension Line) の輸送系を据え付け、

更に HEBT、BD を整備した (Fig. 2)。この高デューティ試験終了後、MEL を撤去して SRF を組み込めば良い体系である。MEL 部分の詳細な構成や真空ダクト内での微粒子の測定結果については[4]で報告がある。

3. 新型コロナウイルスの感染拡大の影響

2020 年 2 月中旬以降、新型コロナウイルスの感染拡大を受け、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 10 名がキャンセルとなった。また、六ヶ所に長期滞在していて、新システムとなる HEBT と BD の統合試験を担当していたスペイン CIEMAT 研究所の専門家が早期帰国することになり、計画していた作業や試験に大幅な遅延が発生することになった。

4 月には欧州の人員、QST の職員も原則在宅勤務となり、大規模な流行による研究所の閉鎖も想定し、高周波源の立ち下げ、RFQ の真空バージ、入射器を除く真空機器や冷却水機器を停止した。この間、ソフトウェアの更新、文書作成、現場スタッフの運転教育などを行い、在宅勤務での時間も有効に活用できるようにした。特に、200 にもわたる運転や現場作業手順の文書整備を行ったことは、その後の運転や保守を行う上で、また、担当者が万一出勤できない事態になったときのリスク軽減の意味でも有用であった。

2020 年 5 月 14 日に青森県の緊急事態宣言解除を受け、通常勤務に移行し、徐々に現場作業を再開し、7 月には RFQ の RF コンディショニングを再開することができた。

中断した HEBT と BD のコミッショニングは、スペインの CIEMAT 研究所とインターネットを経由したリモート接続により技術支援を受けながら調整試験を行った。

4. ビーム運転の準備

4.1 実時間データ転送システムの整備

前述のように LIPAc はサブシステム毎に各研究所が担当して整備したため、試験を行うには、欧州の専門家の参加が不可欠となる。これら担当した機器の調整にとどまらず、LIPAc の試験は、日欧の研究者・技術者が参加し、お互いに様々な役割を担いながら、アイデアや意見を出し合い、調整・試験を進めて成果をあげてきた。しかしコロナウイルスで来日できない状況となり、日欧の共同チームが一体的に調整・試験活動を共有するための仕組みの整備が急務となった。以前から、六ヶ所研ではインターネットを介して欧州に LIPAc の測定・実験データを転送し、実験に参加したりデータ解析を実施したりするためのシステムの構築を行っていたが、その開発の優先度は必ずしも高くはなかった。しかしコロナウイルスの流行を契機に、5 月にタスクフォースを立ち上げ、このシステムの整備に精力的に取り組み、欧州の専門家が遠隔で参加できるようにデータを転送し、共有するシステムを構築することになった。

Figure 3 にそのデータ転送と遠隔実験参加の概念を示す。加速器の制御系ネットワークをそのまま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大きい。そこでインターネットからアクセス可能な DMZ にデータ転送サーバを置き、このデータ転送サーバを経由し、かつ、一方向のアクセス(加速器ネットワークから DMZ へ、DMZ から欧州へ)のみを許可することで、安全にデータを転送する仕組みを構築した。データを一方向に送ることから、データダイオードと呼ばれる。2020 年 10 月 21 日、ガルピン(ドイツ)にある Fusion for Energy (F4E) のオフィスに設置したデータ受信用サーバとの間で転送試験を実施し、初めてデータ転送に成功した。その後、転送するデータの種別を拡充し、LIPAc で得られるほとんどのデータを実時間で転送することが可能となった。欧州の



Figure 3: Real time data transfer system from Rokkasho to F4E and schematic view of remote participation from Europe.

専門家は、OPI で必要なデータを選択して確認でき、六ヶ所研に新たに整備した原型加速器遠隔実験室(中央制御室)とテレビ会議で接続することで、データの共有とコミュニケーションを確保し、ビーム試験を共同で行えるようになった。

4.2 RF システムの性能向上と RFQ コンディショニング

LIPAc の RFQ には 8 系統の RF 源を使っており、その 1 系統の概念を Fig. 4 に示す[5]。前述のように 2020 年 7 月に RFQ の RF コンディショニングを開始したが、インターロックの発報なしで数時間の運転持続は難しい状況にあった。その原因の一つは、RF 源から発生するノイズにより、センサー類のインターロックレベルを超えることにあった。8 系統の内、1 系統でも発報すると運転が停止してしまう。そこで、アースやシールドといったノイズ対策、反射インターロックの校正、サーキュレータの整合を十分にとるなど、一つ一つ改良を重ねた。また、欧州から納入された前置増幅器を日本で新規に製作した改良型(六ヶ所で活動している日欧の RF チームが設計)に交換し、安定性が向上した。こうした多くの改良の結果、システムとしての RF の安定性が大きく向上した。

Figure 5 に RFQ の RF コンディショニングの履歴を示す。ペーン間電圧が重陽子加速の条件 132kV でデューティ 5% の様子を示したものである。黒線が RFQ の電圧で、トリップはあるが、RF システムでのインターロック発報による停止は無く、17 時間連続運転できた結果である。デューティの条件などが異なるため単純な比較は難しいが、ノイズによって数分程度の持続時間であったり、調子が良い場合でも数時間程度だったこと考えると、大幅な向上である。当然、ビームの安定供給としては、これで十分というレベルではなく、また、今後デューティを向上さ

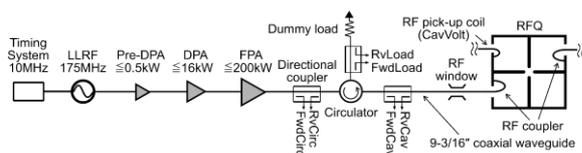


Figure 4: RF components and RFQ.

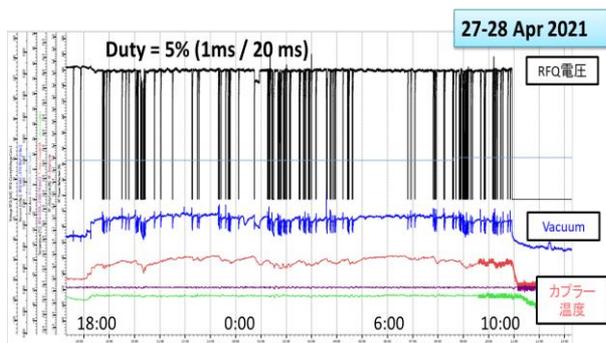


Figure 5: RFQ conditioning history.

せることによってより条件が厳しくなることから、継続的に性能向上を図っているところである。

4.3 ビームダンプ冷却系

大電力ビームダンプ (Fig. 6) の据付けは 2020 年 3 月までに完了したが、冷却水系のコミッショニングがビームを注入するための必要不可欠な条件であった。ビームを受け止める部分は銅製のコーン (Fig. 6 下図、全長 2.5m) となり、これを含むカートリッジを冷却水システムに接続し、通水試験を行った。これは、コロナウィルスの影響で帰った CIEMAT 研究所の技術者とリモート接続をしながら調整を行った。日欧の時差の都合で 1 日の内で作業時間が限られ、当初予定していたよりも長期間を要したが、無事に通水できるようになった。

この銅製コーンの冷却水として、イオン交換水のままで銅の溶け出しが懸念され、腐食の抑制を行う必要がある。その対応の一つは脱気システムで、冷却水中の溶存酸素濃度を抑制するもので、約 50 ppb 以下に抑えて運転できるようになった。もう一つは pH 制御で、若干アルカリ性である 8~8.5 にするために薬剤を注入するシステムを動作させた。これらも CIEMAT 研究所から納品されたものを動作させる必要があり、リモート接続でコミッショニングを完了した。

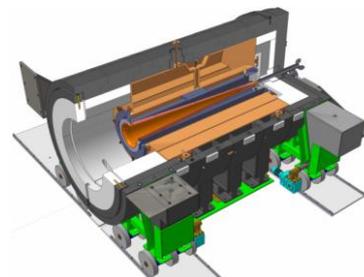


Figure 6: High power beam dump: (top) exterior view (beam direction is right to left), (bottom) cut-out view (beam direction is left to right).

5. ビーム試験

夏季にメンテナンスを行うために、その前の試験とその

後の試験に分け、夏前はシステム確認や運転員のトレーニングを主目的に、低デューティでの試験を行うことにした。また、コミッショニングでのリスクを低減するために、イオン源のプラズマ電極の口径を 6 mm (定格は 12 mm) として電流を抑えるとともに、放射化の可能性が低い陽子をまず加速することにした。

2021 年 6 月末には、全ての加速器機器と中央制御システムのインターロック系 (MPS: 機器保護システム、PPS: 人的保護システム) との連携動作を確認する統合試験を開始した。並行して、運転手順書、実験プログラム、運転監視画面など、ビームダンプへのビーム入射に必要な準備を進めた。

これらの準備が完了し、7 月 15 日、陽子でのビーム加速を開始した。まずは、HEBT 直線部まで輸送してシステム確認を行った。その後の調整を経て、21 日にビームダンプまで輸送することに成功した。Figure 7 に上流から下流までのビーム電流モニターで観測された波形を示す。Lebt は RFQ 入口で 12.2mA、Mebt は RFQ 出口で

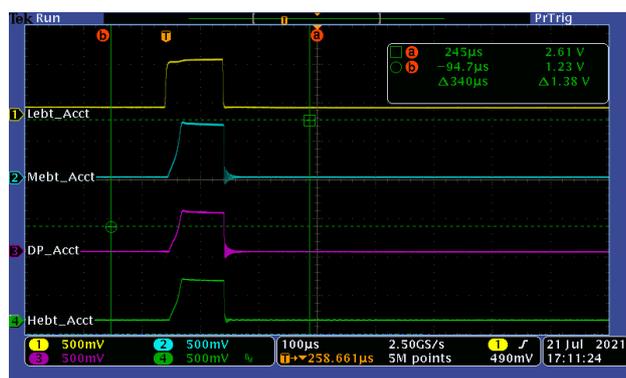


Figure 7: Waveforms of the current monitors for proton beam.

9.8mA であり、RFQ の透過率は 80 %となる(ただし、イオン源のプトロン比の補正がない単純な電流比)。その下流 DP (D-plate)、Hebt (ビームダンプ直前) では 9.8 mA で、RFQ からのビームがほぼ 100 %透過している結果が得られた。

7 月 26 日にイオン源のガスを水素から重水素へ切り替え、27 日に重陽子の加速を確認し、翌 28 日にビームダンプまで輸送した。このときの電流は、RFQ 入口で 20 mA、出口とビームダンプ 16 mA で、陽子と同様に、RFQ の出口からの電流はほぼ 100 %ダンプまで輸送することができた。

運転は 7 月 30 日まで行い、メンテナンス前の運転を終了した。8, 9 月の 2 か月間はメンテナンスを予定しており、7 月の試験結果を受けて 10 月以降の運転を計画し、ピーク電流向上とデューティ向上を目指す予定である。

謝辞

LIPAc の整備、調整、運転、保守は、LIPAc ユニットメンバーにとどまらず、QST や欧州各機関の多くの関係者

に支えられており、そうした方々に感謝を申し上げる次第である。

この作業は、欧州原子力共同体と日本政府の間の BA 協定に基づいて行われている。ここに記載している見解および意見は、必ずしも本協定の当事者の見解および意見、またはそれを反映したものではないことを申し添えておく。

参考文献

- [1] K. Sakamoto *et al.*, “Present Status of IFMIF Prototype Accelerator”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 16, No.2 2019 (100-108).
- [2] K. Kondo *et al.*, “Validation of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) in Rokkasho”, Fusion Eng. Des 153,11503 (2020).
- [3] H. Ditzko *et al.*, “Status and future developments of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)”, Fusion Engineering and Design 168 (2021) 112621.
- [4] T. Ebisawa *et al.*, “Particle Measurement in SRF Position on the IFMIF Prototype Accelerator”, in these proceedings, THP010.
- [5] T. Shinya *et al.*, “Integration of 175-MHz LIPAc RF System and RFQ Linac for Beam Commissioning” IEEE Trans. Plasma Sci. 48 (2020) 1489-1495.