

IFMIF 原型加速器 (LIPAc) の高デューティビーム試験結果 RESULTS OF HIGH DUTY CYCLE BEAM OPERATION OF LIPAc

赤木智哉^{#, A, B)}, Benedetti Florian^{C, D)}, Carin Yann^{B, C)}, Chambrillon Janic^{C)}, Cismondi Fabio^{C)}, Dzitko Herve^{C)}, Gex Dominique^{B, C)}, 長谷川和男^{A)}, Jimenez Rey David^{C, E)}, 近藤恵太郎^{A)}, 熊谷公紀^{A, B)}, 増田開^{A, B)}, Moya Ivan^{B, C)}, Scantamburlo Francesco^{B, C)}, 杉本昌義^{A, B)}, IFMIF/EVEDA Integrated Project Team^{A-F)}
Tomoya Akagi^{#, A, B)}, Florian Benedetti^{C, D)}, Yann Carin^{B, C)}, Janic Chambrillon^{C)}, Fabio Cismondi^{C)}, Herve Dzitko^{C)}, Dominique Gex^{B, C)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, David Jimenez Rey^{C, E)}, Keitaro Kondo^{A)}, Kohki Kumagai^{A, B)}, Kai Masuda^{A, B)}, Ivan Moya^{B, C)}, Francesco Scantamburlo^{B, C)}, Masayoshi Sugimoto^{A, B)},
IFMIF/EVEDA Integrated Project Team^{A-F)}

^{A)} QST-Rokkasho Institute for Fusion Energy

^{B)} IFMIF/EVEDA Project Team

^{C)} Fusion for Energy

^{D)} CEA

^{E)} CIEMAT

^{F)} INFN

Abstract

The Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) is being commissioned under the international collaboration between the EU and Japan. LIPAc aims to accelerate a deuteron beam of 125 mA to 9 MeV and operate in CW mode, and consists of an injector, an RFQ, a Superconducting RF linac (SRF), a beam transport line, and a beam dump. Until recently, the LIPAc beamline was in its final configuration except for the SRF, which was for a high-duty beam operation called Phase B+ commissioning. The main objective of this commissioning was to validate high duty cycle deuteron beam operation and characterization of the beam. Phase B+ was completed at the end of June 2024, with a beam current of about 119 mA and duty cycle of up to 8.75% have been achieved. After the completion of the Phase B+, the SRF will be delivered to the accelerator room and installed in the beamline. The results of Phase B+ are presented in this paper.

1. はじめに

核融合エネルギー分野における日本と欧州による国際協力プロジェクトである幅広いアプローチ (BA) 活動の一つとして、国際核融合材料照射施設 (International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF) の工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA) が進められている[1]。これは D-T 核融合反応で発生する 14 MeV の高エネルギー中性子による核融合炉材料への影響を検証するため、D-Li 核反応を用いた加速器駆動型の強力中性子源の研究開発を行うものである。

IFMIF の原型加速器は Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) と呼ばれ、欧州との共同事業で青森県六ヶ所村においてコミッショニングが行われている。IFMIF 加速器は 40 MeV の重陽子 250 mA (2×125 mA) を連続 (CW) 運転する設計であるが、LIPAc はその低エネルギー部分の実証を行うことが目的であり、125 mA の重陽子ビームを 9 MeV まで加速し、CW 運転することを目標としている。LIPAc は入射器、高周波四重極加速器 (RFQ)、超伝導線形加速器 (SRF linac)、ビーム輸送系およびビームダンプから構成され、各機器の設計製作を欧州の研究機関で行い、QST 六ヶ所研に持ち込んで、据付・調整試験を行なっている。LIPAc のコミッショニングは入射器単体試験 (フェーズ A 試験)、RFQ 実証試験

(フェーズ B 試験)、SRF 実証試験 (フェーズ C/D 試験) と段階的に進められる (Fig. 1)。2019 年 7 月に RFQ による 125 mA 重陽子短パルスビームの加速 (1 ms, 1 Hz) に成功しフェーズ B 試験を完了[2]、その後、高エネルギービーム輸送系 (HEBT) とビームダンプ及び SRF の代わりに MEL (MEBT Extension Line) の据付を完了し、2021 年にフェーズ B+ 試験と呼ばれる高 Duty ビーム試験を開始、2024 年 6 月末に完了した。現在はフェーズ C に向

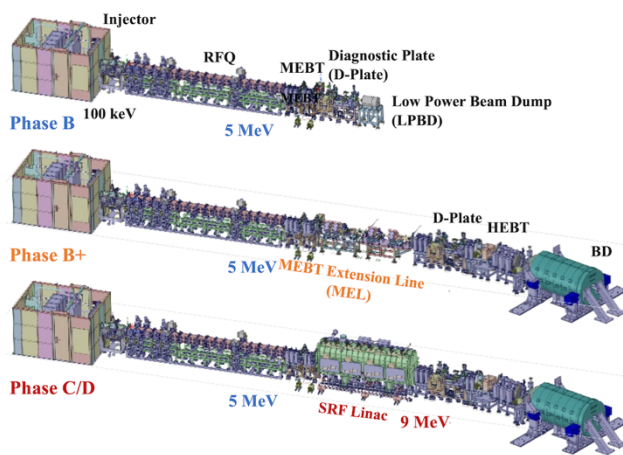


Figure 1: The three configurations of the LIPAc stepwise commissioning phase.

[#] akagi.tomoya@qst.go.jp

けて SRF 据付準備を進めているところである。本稿では、フェーズ B+試験で得られた試験結果について報告する。

2. フェーズ B+試験

フェーズ B+試験の主な目的は長パルスでの 5 MeV 重陽子ビーム運転の実証及び(フェーズ B+試験完了後に設置される)SRF に入射されるビームの特性評価である。フェーズ B+試験においては CW (Duty Cycle 100%) に到達することを最終的な目標として、以下のように段階的にビーム試験を進める計画が立てられた。ステージ 1: 低電流・低 Duty Cycle 試験、ステージ 2: 125 mA・低 Duty Cycle 試験、ステージ 3: 125 mA・高 Duty Cycle 試験である。

フェーズ B+試験のステージ 1 は、フェーズ B 試験から追加された機器の動作検証とアライメントの確認及びフェーズ C の初期にも使用される予定の「プローブビーム」の特性評価を目的として、低 duty (100 μ s / 1 Hz) の 10 mA / 2.5 MeV 陽子ビームと 20 mA / 5 MeV 重陽子ビームを用いるビーム試験である。ステージ 1 は 2021 年 7 月に陽子ビーム加速試験から開始し、12 月末までに約 20 mA の重陽子ビームをほぼ損失無くビームダンプに入射することに成功した。約 100 μ s の短いビームパルスは入射器の低エネルギービーム輸送系 (LEBT) に設置されているチョッパーを用いて生成する。ステージ 1 試験開始直後、陽子ビーム加速試験において、チョッパーの下流でビームパルス立ち上がりの顕著な遅れが観測されたため、LEBT の空間電荷補償を強化するために Kr ガスを注入したところ立ち上がりの過渡時間が減少することを確認した。また、ビームベースドアライメント (BBA) を用いた四極電磁石のミスアライメント評価[3]や破壊型ビーム診断機器を用いたビーム特性評価を実施した。ステージ 1 の試験結果についての詳細は[4]で報告されている。2021 年 12 月のステージ 1 完了後、ビーム加速試験を一時中断して、高 Duty ビーム試験に向けたコンディショニングを入射器と RFQ で並行して実施した。

3. 入射器 CW 試験

LIPAc 入射器はビーム電流約 140 mA、規格化 rms エミッタンス $\leq 0.25 \pi$ mm mrad の重陽子ビームを CW で安定に供給することが求められる。一方で、これらの条件を同時に満たしつつ、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的に困難であるため、引き出し口径の異なる複数のプラズマ電極 (PE) をあらかじめ製作しておき、口径の小さな電極から順次大きなものに替えながら、安定的に達成可能な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た。そして引き出し口径 $\phi 11$ mm の PE を用いた入射器 CW 試験で、LIPAc の要求性能をほぼ満足する試験結果を得た[5]。また、このビーム条件で約 11 時間以上の CW 運転を達成した。その後、より安定して目標の重陽子ビーム電流を RFQ 下流で得るため、少し口径の大きい $\phi 11.5$ mm の PE を用いた CW 試験を実施した。短期間の試験ではあるが、より高ビーム電流、低エミッタンスのビームが達成できる見通しが得られたので、フェーズ B+試験のステージ 2/3 で使用することを決定した。

4. RFQ の CW コンディショニング

4.1 RFQ コンディショニング手順

RFQ は重陽子加速に必要な空洞電圧 132 kV で CW までのコンディショニングを行うことを目標とした。当初、目標の電圧を維持して Duty を上げていく方針でコンディショニングを行い、定格の 132 kV で Duty Cycle 25% を達成した。しかし RF 反射によるインターロックが頻繁に発生しそれ以上 Duty を上げることが難しかったため、低い電圧でまず Duty を CW まで上げてから、電圧を定格まで上げる方針にした。そして、2021 年 12 月に定格電圧の約 80% (105 kV) において CW での RF 入射を達成し、IFMIF 用高熱負荷下における定常動作を初めて実証した[6]。ところが 2022 年 3 月、RFQ コンディショニング中に RF カプラにおいて真空リーク事象が発生したため、8 台全ての RF カプラを RFQ から取り外し、カプラ内部の状態確認を実施した。その結果、真空リークが確認されたカプラの真空側 O リングの溶融を確認。マルチパクターによる発熱の影響と考えられた。

4.2 RF カプラの改良

今後、高 Duty 運転では同様の問題が発生する可能性が高いと考えられるため 2 つの対策を並行して実施した。(1) 現行の O リング RF カプラの改良[7]と(2)内導体が真空窓にろう付けされている RF カプラの準備[8]である。ここでは(1)の対策とその結果について簡単に述べる。現行カプラの対策として、冷却能力を強化した内導体の設計製作を行った。具体的には、RF 窓に接触しているアンカーと内導体の冷却されている部分との接触面積が非常に限られており、熱的な弱点であることが判明したため、これら 2 つの部品間の接触面を拡大することにより熱伝導を改善するための新しいアンカーが設計された。2023 年 3 月 (真空リークから約 1 年後) にカプラの組立て、RFQ への取付け及び真空リーク試験を完了し、6 月から RFQ コンディショニングを再開した。コンディショニング再開から比較的短期間で重陽子加速の定格電圧でビーム加速試験に必要な条件に到達したため、8

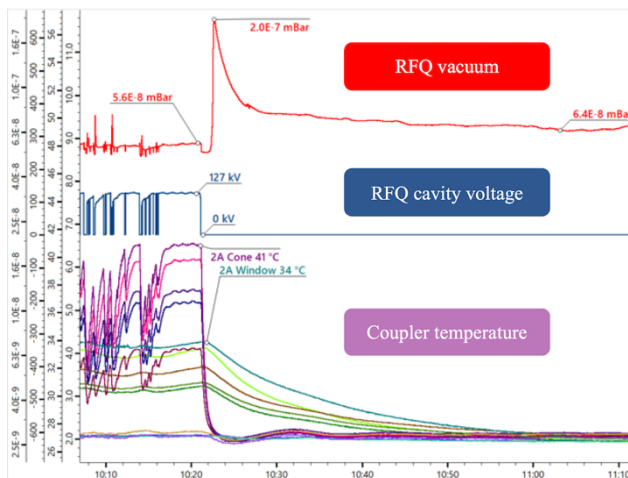


Figure 2: Abnormal vacuum pressure increase during RFQ conditioning using RF couplers with improved cooling capacity.

月にステージ2を開始、高 Duty に向けた RFQ コンディショニングは並行して行われた。2023 年 12 月末までに、定格電圧で Duty Cycle 約 27%に到達。しかし、RF カプラの発熱は解消せず、再び真空リークの兆候が見られた (Fig. 2)。そのため、これ以上の高 Duty 運転を断念し、フェーズ B+では Duty を最大 10%に制限することを決定した。

5. フェーズ B+試験ステージ 2

ステージ 2 は引き続き低 Duty で、入射器の調整により RFQ 出口において約 70 mA と低めに調整した重陽子ビーム電流で開始した。その後、ビーム電流は約 115 mA まで増加させた。定格に近い重陽子ビーム電流におけるバンチャーのチューニングを完了し、破壊型ビーム診断機器を用いたビームプロファイル、エミッタンスの測定、また FPM のような非破壊型ビームプロファイラやビームロスモニタの動作検証を実施することができた (Fig. 3)[9]。一方、ビーム輸送系の最適化調整をする中で、予期していなかった粒子損失が、特に MEL 上流部及び下流部で確認されたため、四極電磁石のFRINGE磁場の影響について、Hard-Edge (HE) モデルと Fringe Field (FF) モデルのシミュレーション結果を比較することで検討した。また、ビームを用いて四極電磁石の磁場勾と励磁電流の換算式の較正試験を実施。これらの結果は [10]で報告された。較正された換算式を用いた FF モデルでの計算結果と測定結果を比較したところ良く一致

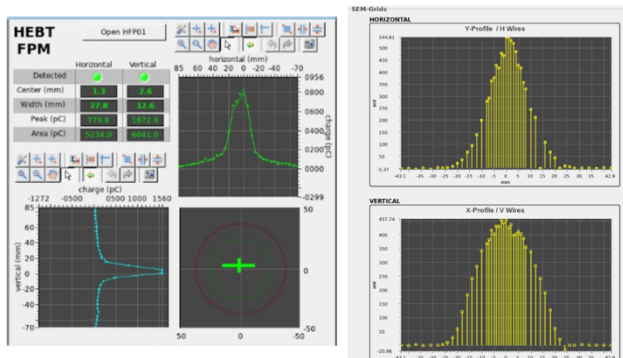


Figure 3: Beam profile measurements of HEBT-FPM (left) and HEBT-SEM Grid (right).

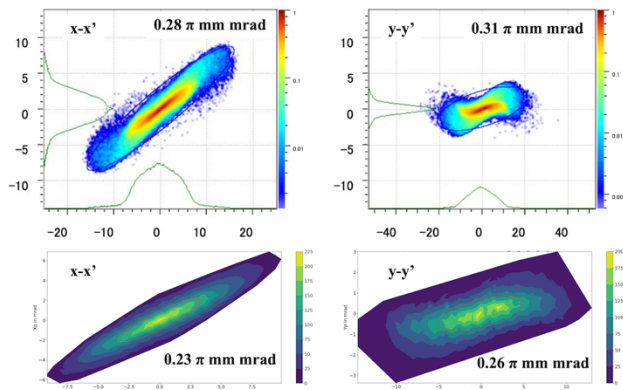


Figure 4: Transverse phase space profiles at D-Plate Slit, comparing simulations (top) and measurements (bottom).

たので、粒子損失を抑えるようにビーム光学系を再設計し、実際に粒子損失が減少したことを確認した。Figure 4 に D-Plate Slit の位置で測定したエミッタンス測定結果とシミュレーションの比較を示す。低 Duty ビームで実施すべき破壊型診断機器によるビーム特性評価を完了し、2023 年 11 月末にステージ2を完了した。

6. フェーズ B+試験ステージ 3

2024 年の年明けからは冬期メンテナンスを実施するためにビーム加速試験を一時中断、その後、2023 年 3 月末に目標 10%に向けて Duty を上げていくステージ3を本格的に開始した。この試験では LEBT のチョッパーをビームラインから引き抜き、イオン源からのビームパルスそのまま RFQ へと入射し、パルス幅と繰り返し周期を調整することで Duty を上げていく。ステージ3では最初、パルス幅 1 ms、繰り返し周波数 1 Hz から開始して、徐々に Duty を上げていった。チョッパー無運転ではビームパルスの立ち上がり速度がチョッパーを使う場合に比べて非常にゆっくりで、パルス幅 > 2 ms 程度でプラトーに到達するので、LLRF の最適化を再度実施した。

ステージ3はその後に控える SRF の据付作業の予定を考慮し、2024 年 6 月末に完了することが予め決まっており、その完了までに最大 Duty Cycle 8.75% (パルス幅 3.5 ms / 繰り返し周期 40 ms) を達成した。この時は、パ

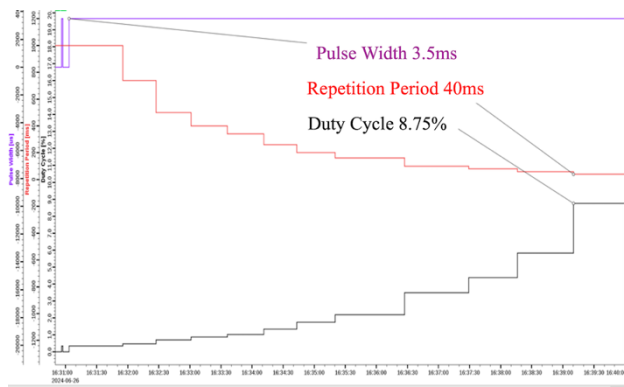


Figure 5: Beam pulse width, repetition period, and duty cycle history from the start of beam injection to the maximum duty cycle of 8.75%.

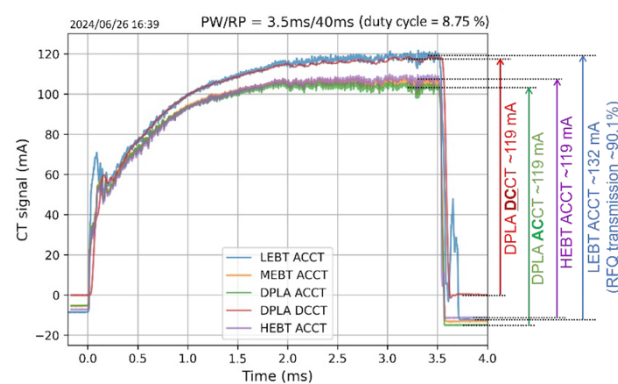


Figure 6: Beam current waveform when 8.75% duty cycle is achieved.

ルス幅を 3.5 ms に固定して、繰り返し周期を 1 s から徐々に下げていき、Duty 8.75% に到達した (Fig. 5)。この時、ビーム電流は HEBT で約 119 mA (Fig. 6)、RFQ 透過率は約 90% であった。

7. 高 Duty 化の課題

これ以上の長パルス化あるいは高 Duty 化は、現行の O リング式 RF カプラーでは困難であることが確認された。具体的には長パルス、高 Duty において、マルチパクタリングによると考えられる負荷変動で RF 反射の時間変化が顕著になり、またそれが各 RF カプラー間で異なる速度で変化することにより、各 RF システムでアンバランスが生じていた。その結果として、RFQ 空洞温度や真空度が定常に至る前にインターロックでビームが停止してしまい安定な状態に至ることができなかった。現在準備を進めているろう付けカプラーに交換したとしても、高 Duty 化のためにはマルチパクタリングの対策が必須である。

また、冷却水による RFQ チューニングは、インターロックでビームが 1 秒間以上停止すると、その都度、低 Duty からの上げ直しが必要となるが、現行の LIPAc におけるインターロックシステムでは、インターロックによるビーム停止からの再立ち上げまで少なくとも 1 分間以上かかってしまう。関連して、現行のタイミングシステムはビームを ON のままスムーズにパルス幅及び繰り返し周期を変えられるような改良が必要である。上記に加えて、フェーズ B+ 試験では、今後取り組むべきいくつかの問題点を明らかにすることができたので、それらを整理し今後の改良のためにフィードバックしていく予定である。

8. フェーズ C に向けた準備

フェーズ B+ 試験と並行して、フェーズ C 試験のために SRF の準備が QST 六ヶ所研で進められており、すでにクリーンルーム内で 8 台の超伝導空洞とソレノイド電磁石の接続が完了している (Fig. 7)。一方、加速器室ではフェーズ B+ 試験の完了を受けて、2024 年 7 月から早速 MEL の解体作業が始まっている。今後の予定としては、2024 年の秋にクライオモジュールを加速器室に移動し、2026 年に冷却開始及びビーム試験開始を目指している。



Figure 7: Superconducting cavities and solenoids with connections in clean room.

9. まとめ

2024 年 6 月末に LIPAc の高 Duty ビーム試験 (フェーズ B+) が完了した。高 Duty ビーム試験に向けたコンディショニング期間において、入射器と RFQ はそれぞれ独立して CW での動作を実証した。ビーム加速試験ではフェーズ B の後に設置した新しいコンポーネントやビーム診断機器の動作実証、及びビームの特性評価を完了した。最終的に Duty 8.75%、ビーム電流約 119 mA を達成し、さらなる高 Duty 化に向けた様々な課題を認識した。一方、すでにフェーズ C 試験に向けた準備は始まっており、並行して組み立て作業を行っていた SRF を今年度中に加速器室に運び込むために、MEL の解体作業が進められている。いよいよ LIPAc が完成形となるフェーズ C ビーム試験は 2026 年開始を目指している。

謝辞

This work was undertaken under the Broader Approach Agreement between the European Atomic Energy Community and the Government of Japan. The views and opinions expressed herein do not necessarily state or reflect those of the Parties to this Agreement.

参考文献

- [1] H. Dzitko *et al.*, “Status and future developments of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)”, *Fusion Eng. Des.*, 168, 2021, 112621.
- [2] K. Kondo *et al.*, “Validation of the linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc) in Rokkasho”, *Fusion Eng. Des.*, 153, 2020, 111503.
- [3] H. Jibong *et al.*, “Evaluation of quadrupole magnets misalignment in the IFMIF prototype accelerator using the beam based-alignment method”, *Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022*, pp. 706-710.
- [4] K. Masuda *et al.*, “Commissioning of IFMIF Prototype Accelerator Towards CW Operation”, in *Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022*, pp. 319-323.
- [5] T. Akagi *et al.*, “Achievement of high-current continuous-wave deuteron injector for linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc)”, *Nucl. Fusion*, 64, 2024, 066005.
- [6] A. De Franco *et al.*, “RF conditioning towards continuous wave of the RFQ of the linear IFMIF prototype accelerator”, in *Proc. IPAC'23, Venice, Italy, May 2023*, pp. 2345-2348.
- [7] F. Scantamburlo *et al.*, “Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) Radio Frequency Quadrupoles (RFQ) RF couplers enhancement towards CW operation at nominal voltage”, *Fusion Eng. Des.*, 204, 2024, 114508.
- [8] A. De Franco *et al.*, “High power continuous wave test of RF couplers for the RFQ of the Linear IFMIF Prototype Accelerator”, *Proc. PASJ 2023, Funabashi, Aug.-Sep. 2023*, pp. 34-39.
- [9] S. Kwon *et al.*, “High beam current operation with beam diagnostics at LIPAc”, *JINST*, 19, 2024, T05013.
- [10] J. Hyun *et al.*, “Importance of quadrupole magnet fringing fields in low energy beam transport: example in the LIPAc 5 MeV D+ beamline”, in *Proc. IPAC'24, Nashville, TN, May 2024*, pp. 3512-3515.