

FRIB 加速器のコミッショニングに向けたビームラインの整備と統括

SYSTEM INTEGRATION AND TECHNICAL READINESS FOR FRIB ACCELERATOR COMMISSIONING*

青寛幸# 他

Hiroyuki Ao#, Ben Arend, Nathan Bultman, Fabio Casagrande, Chris Compton, Marco Cortesi, John Curtin, Kelly Davidson, Kyle Elliott, Brandon Ewert, Andrei Ganshyn, Thomas Glasmacher, Yue Hao, Marc Hausmann, Kent Holland, Masanori Ikegami, Davin Jager, Shelly Jones, Nathan Joseph, Takuji Kanemura, Sang-hoon Kim, Mike Larmann, John Letourneau, Steven Lidia, Guillaume Machicoane, Martin Mugerian, Peter Manwiller, Samuel Miller, Dan Morris, Peter N. Ostroumov, John Popielarski, Laura Popielarski, John Priller, Haitao Ren, Kenji Saito, Andreas Stolz, Roben Walker, Xiaole Wang, Jie Wei, Genevieve West, Ting Xu, Yoshishige Yamazaki, Choi Yoonhyuck, Qiang Zhao

Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University, East Lansing, MI, USA

Abstract

After Michigan State University (MSU) was selected for the site of the Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) in 2008, technical construction started from 2014. The FRIB accelerator attained Key Performance Parameters (KPP) of project completion (CD-4) defined by US Department of Energy (DOE) in December 2021, and beam was finally delivered through the entire FRIB project scope in January 2022. The FRIB accelerator is the world's highest-energy Continuous Wave (CW) hadron linac and designed to accelerate all stable ions to energies above 200 MeV/u. During the construction, FRIB pursued a phased commissioning approach to proceed with installation and commissioning in parallel. Beamline installation and beam test started from the Front End segment, and then the beam line was extended to Transfer Hall in several steps. This paper seeks to describe system integration and technical readiness for FRIB accelerator commissioning and give an overview of the FRIB installation and commissioning.

1. はじめに

Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) はミシガン州立大学 (MSU: Michigan State University) がミシガン州イーストランシング (East Lansing, MI) にある同大学のキャンパス内に、米国エネルギー省 (US DOE: Department of Energy) の支援を得て予算\$730M で建設した重イオン加速器施設である。2008年にMSUがDOEからFRIBの建設地として選定され、2022年1月に計画したすべてのビームラインが完成、5月よりユーザー運転へ移行した [1]。

FRIB は大強度不安定核ビームの生成を目的とし、駆動加速器はCW (continuous wave) 運転、かつ標的での低エミッタンスビームの実現のため、超電導リニアックを採用した。RFQ以降の加速空洞は、一部のバンチャー空洞などを除いてすべて超電導空洞となっている。加速器の性能としては、すべての安定同位体イオンを200 MeV/u 以上まで加速し、400 kW のビームパワー (^{238}U の場合 5×10^{13} /s) で標的に入射することを目標としている。施設としては、新たにリニアック、RIビーム生成分離装置 (ARIS: Advanced Rare Isotope Separator) [2] を新たに整備し、実験装置群については既存の NSCL (National Superconducting Cyclotron Laboratory) のものを一部改良して引き続き使用する (Fig. 1)。

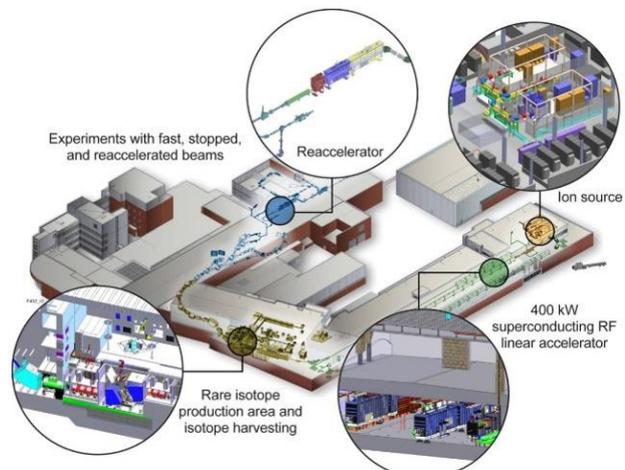


Figure 1: Overview of FRIB. The superconducting driver linac accelerates stable ions at >200 MeV/u at up to 400 kW. The rare isotope beams are produced in Rare isotope production area (Target hall) and filtered by Advanced Rare Isotope Separator (ARIS). Existing National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL) experimental facilities become elements of FRIB.

2. 機器の設置からビーム試験までの過程

FRIB ではビームライン機器の設置、ビーム試験までの一連の作業を、加速器の上流側からエリアごとに計 7 段階に分けて行った (Fig. 2)。

*Work supported by the U.S. Department of Energy (DOE) Office of Science under Cooperative Agreement DE-SC0000661 #ao@frib.msu.edu

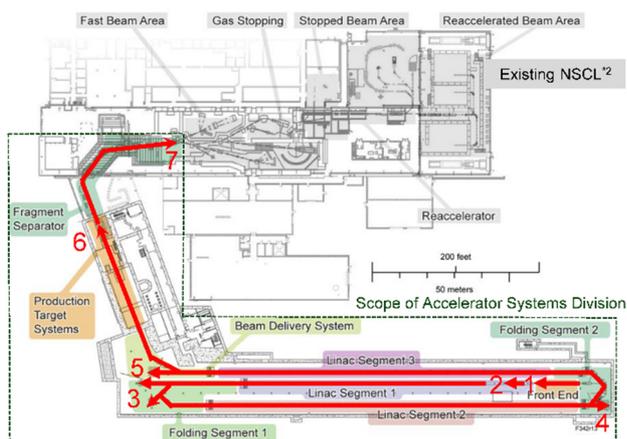


Figure 2: Phased installation and commissioning of FRIB accelerator. Installation started from the Front End (ion source and LEBT)

機器の設置からビーム試験の開始までには、大きく次の三段階がある。

- 各ビームライン機器の設置
- Device Readiness Review (DRR) による承認
- Accelerator Readiness Review (ARR) による承認

各段階について、FRIB で定められた役割分担は以下のようになる。

各ビームライン機器の設置については、機器担当者 (System owner) が責任を持つ。複数の機器担当者が関与するリニアックトンネル内の設置工程や全体試験については、ビームラインのセグメント毎に割り当てられたセグメントマネージャー (Segment Manager) が統括する。

DRR は FRIB 独自の内部委員によるレビューで、DHR (Device Hazard Review) と DOR (Device Operational Review) から成り立っている。まず DHR では、主に機器が安全に、所定の性能を満たしうることを確認する。DHR は、複数の機器担当者によって設置された機器を組み合わせた全体試験の前に行うよう定められている。例えば、ビームラインの場合では、クライオモジュールの冷却、電力試験などである。一方 DOR では、主に機器の運転、操作に関するトレーニングなど運転準備状況を確認する。DOR は、運転員に必要な操作を引き渡す前 (ビーム試験前) に行うよう定められている。ただし、現状では、運転員がすべての加速器機器の操作を行うわけではなく、複雑な機器の操作は、機器担当者のグループがシフトを組んで対応している。また DOR は ARR の前段階として、ビームライン機器の準備状況全体を再確認する目的も併せ持っている。DHR と DOR 両方が完了し、DRR の承認を得て、ARR に進むことになる。

ARR は外部委員によるレビューで、ビーム試験前に行うよう DOE によって規定されている。レビューでビーム試験の開始が適当であると承認されて、ビーム試験の開始が可能となる。

ビーム試験の目標は以下の二点である。

- ^{36}Ar を 200 MeV/u, 20 pA 以上まで加速
- ^{86}Kr で ^{34}Se の RI ビームを同定

これらの目標は、KPP (Key Performance Parameters) と呼ばれる当初目標の一部として、DOE によって定義されている。DOE は、計画全体の KPP の達成をもって、FRIB

が完成したと認める。各段階におけるビーム試験の目標 (Table 1) も、この KPP を達成するための途中段階として、別途定められたものである。

Table 1: Commissioning Phase and Beamline Area

Phase	Area with beam	Energy MeV/u	Date
ARR1	Front end	0.5	7/2017
ARR2	+ LS1 $\beta=0.041$ CM	2	5/2018
ARR3	+ LS1 $\beta=0.085$ CM	20	2/2019
ARR4	+ LS2 $\beta=0.29, 0.53$ CM	200	3/2020
ARR5	+ LS3 $\beta=0.53$ CM	>200	4/2021
ARR6	+ Target and beam dump	-	12/2021
ARR7	+ ARIS focal plane	-	1/2022

主要なスケジュールのマイルストーンは DOE レベルのマイルストーンとして、予定日および実際の完了日が DOE に報告される。加速器に関する項目としては、第一リニアック部 (LS1: Linac Segment 1)、第二リニアック部 (LS2: Linac Segment 2)、第三リニアック部 (LS3: Linac Segment 3) のビームライン準備完了、コミッショニング完了などが報告対象である。すべてのマイルストーンには責任者が割り当てられており、リニアックのビームライン準備完了 (DRR 完了) はセグメントマネージャーである。

これらの設置、試験前のレビューとは独立に、約半年ごとに FRIB 計画の進捗について外部委員および DOE によるレビューを受ける。レビューでの勧告、所見などに基づいて課題点を検討し、ビームラインの整備に反映する。

3. 各部ビームラインの整備

3.1 初段部 (FE: Front End)

初段部 (FE: Front End) のうち、地上部のイオン源およびビームラインの設置作業は 2015 年 11 月より開始した (Fig. 3)。段階的な機器設置を行うため、加速器建屋の建設も FE 部分が優先され、加速器 (ASD:

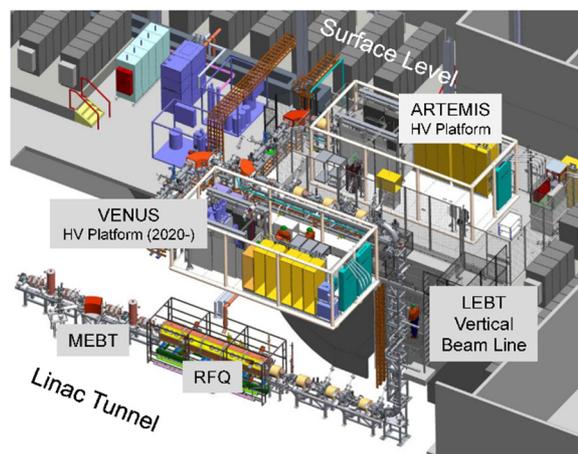


Figure 3: Front End segment. Ion sources are located in the ground level and the beam goes to the linac tunnel (underground level) through the vertical LEBT.

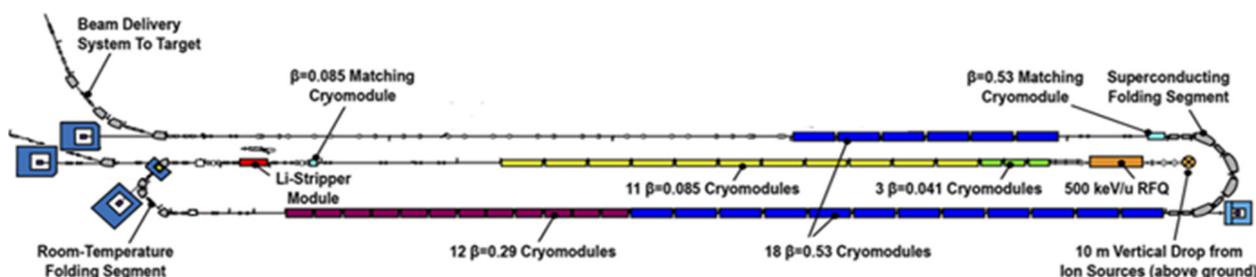


Figure 4: Configuration of FRIB injector linac consisting of 46 cryomodules (including 324 SRF cavities and 69 superconducting solenoids) in Linac Segments and 4 superconducting dipoles in Folding Segment 2.

Accelerator Systems Division) と施設 (CFID: Conventional Facilities and Infrastructure Division) が合意した機器設置開始 (RFE: Ready for equipment) が双方の工程に含まれている。

イオン源は 14 GHz 常伝導サイクロtron共鳴 (ECR) である ARTEMIS と、28 GHz 超電導 ECR の VENUS が設置されている。ALTEMIS は 2016 年 9 月に DRR を完了し、試験運転を開始した。VENUS は 2020 年から設置を開始し、現状単体での試験を進めている。加速器機器としての冗長性だけでなく、ユーザー運転の際のイオン核種の変更を速やかに行うためにも二台目のイオン源が求められており、2022 年内の VENUS の運転開始に向けて注力しているところである。

2016 年 11 月からはトンネル内で 80.5 MHz RFQ の最終組み立てと調整が行われた。RFQ は 5 分割構造で、単独の温調冷却水システムで周波数調整を行う。ビームは RFQ 出口で 0.5 MeV/u まで加速される。MEBT までのビームライン機器を含めた DRR を 2017 年 6 月、ARR を同年 7 月に完了し、ビーム試験を開始した[3]。RFQ はその後も空洞のコンディショニングを継続し、最終的に設計値 100 kW, CW での運転を確認している[4]。

3.2 リニアック部 (LS: Linac Segment)

リニアック部では 4 種類の超電導空洞、合計 46 台のクライオモジュール (CM: Cryomodule) が用いられている (Fig. 4, 5)。CM は全数、トンネル搬入前に冷却、電力、通電試験を行い、空洞、電磁石について性能上問題ないことを確認している。CM の生産については文献 [5]、CM を含めた FRIB における技術的挑戦、及び ARR4 までのビーム試験の結果については文献 [6] に詳しい。

CM をビームライン上に移動後、まず最初に CM 外部の基準座を用いてアライメントを行う。空洞と外部基準座の位置関係は、CM の組み立て時に測量されている [7]。アライメントに続いて、以下の周辺機器の取付作業が行われる。

- 制御、モニター、電磁石用電源ケーブルの配線、端末処理、接続
- クライオモジュール間の真空ダクトの設置 (要仮設クリーンルーム)
- 低温系 (cryogenics) との接続
- 高周波ケーブル、同軸管の接続 (冷却後) など

これら複数の機器担当者の取り合い点については、設計段階で文書 (ICD: Interface Control Document) で定義されている。また FRIB では、このような機器間での機械的な整合性を確認するため、建屋、加速器機器な



Quarter Wave Cryomodule				
β	Type	Component Counts (baseline + spares)		
		Cryomodules	Cavities	Solenoids
0.041	accelerating	3 + 1	12 + 4	6 + 2
	matching	1 + 1	4 + 4	-
0.085	accelerating	11 + 1	88 + 8	33 + 3
	matching	1 + 1	4 + 4	-
Half Wave Cryomodule				
0.29	accelerating	12	72	12
	matching	1	4	-
0.53	accelerating	18	144	18
	matching	1	4	-
TOTALS		46 + 3	324 + 16	69 + 5
2T Superconducting Dipole Magnets		4		

Figure 5: Scope of SRF cavities and superconducting magnets utilized in the FRIB linac.



Figure 6: Wooden mockup of the $\beta=0.085$ cryomodule to check mechanical interference and temporarily route cables for termination.

ほとんどの機器を含む 3D-CAD モデル (BIM: Building Information Modeling) を整備、活用している (Fig. 1, 3 もその一例である)。機器の干渉を事前にこの BIM モデルで確認することで、混みあったトンネル内の設置作業を大きく効率化している。

しかし BIM による電子的チェックにも限界があるため、木製の実物大モックアップを用いた旧来式的確認も行っている (Fig. 6)。このモックアップはケーブル端末処理の基準としても利用し、CM の有無に関わらず作業を進めることで効率化を図っている。

CM の搬入は初号機 ($\beta=0.085$) の 2016 年の 9 月から、最終機 ($\beta=0.53$) の 2020 年 6 月まで約 5 年に亘って続いた。途中、CM の β の違いによる多少の見直しが必要であったが、全体の流れはほぼ同様である。設置完了後のリニアック部を Fig. 7 に示す。

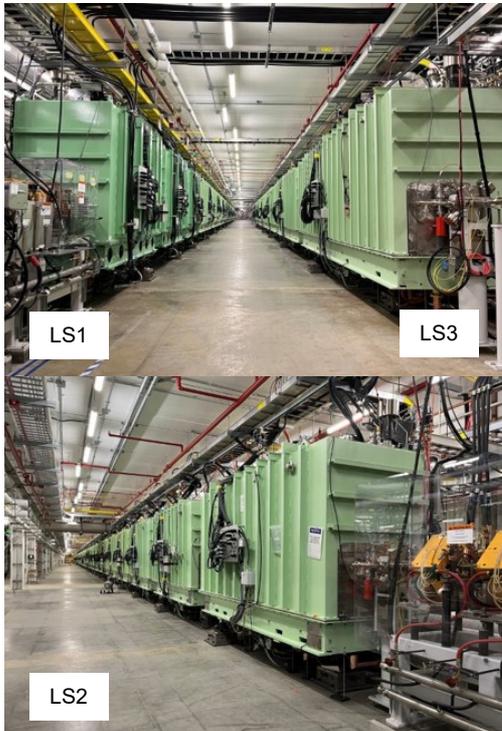


Figure 7: Installed cryomodules in the Linac Tunnel.

リニアック部の全体試験としては次の二つがある。

1. CM の 4K への冷却 (cool down)
2. 空洞の電力試験、電磁石の通電試験

CM の 4K への冷却には、ビームラインの接続、断熱真空、インターロック、アラームなどが必要となる。各 CM に貼り付けられたチェックリストに各機器の担当者がサインし、作業が漏れなく完了したことを確認する。ここでビームライン機器のインターロック、アラーム要求の総括はセグメントマネージャーの責任である。従って、ビームラインの機器全体の動作を理解し、機器担当者からの要求をまとめ、制御グループへ実装のための指示を出す必要がある。

試験中のトンネル内の作業員の安全に関しては、エリアマネージャー (Area Manager) が責任を持つ。例えば、酸欠防止モニタの動作状況、警報時の退避訓練、トンネル内への立入管理、退避確認などが該当する。

第 2 章で述べた通り、DHR により冷却開始が適当であるとの承認を受けて、CM 冷却の開始が可能となる。冷却中は低温グループが冷却を制御し、SRF グループは CM 本体を監視する。

空洞の電力試験、電磁石の通電試験には、冷却後のインターロック確認、空洞の高周波測定、同軸管の接続などが必要となる。安全面では、トンネル内への立入管理、退避確認の手順などの準備が必要となる。法令に基づく、ミシガン州への X 線発生装置の届出もこの時点までに行われる。準備完了後、DHR により電力試験開始の承認を受けて、試験を開始する。

空洞の電力試験時は、トンネル内の立ち入りが制限される。そのため 2 シフト制や、ビームライン設置に関わる人員を生成分離装置側 (Target Hall 側) に振り分けるなど、待機時間も効率的に作業が済められるように、加速器全体でスケジュールの調整をおこなった。これはビーム運転時も同様である。

3.3 折り畳み部 (FS: Folding Segment)

第一折り畳み部 (FS1) の直線部には、液体リチウム膜、固体炭素膜による二台の荷電変換装置が設置されている (Fig. 8)。いずれかの装置で荷電変換されたビームは、アーク部の可動式コリメーターなどにより不要なビームが取り除かれる。リチウム荷電変換装置は、長期間の単独試験で慎重に性能を確認したのち、2021 年 3 月にビームラインに設置された。以後のビーム試験により、Ar、Xe、U のビームを用いたリチウム膜による荷電変換が実証されている [8]。

第二折り畳み部 (FS2) の偏向部には、2 T の超電導 45° 偏向電磁石が 4 台が用いられる (Fig. 8)。最初の偏



Figure 8: (Top) Lithium and carbon strippers in FS1. (Bottom) Installation and magnetic field measurement of superconducting dipoles (1 - 4) in FS2.

向電磁石内を通過する直線のビームラインは、LS2 のビーム試験 (ARR4) で必要となる。従って、ビーム試験開始の約 1 年前、2019 年 2 月には 1 号機を搬入し、トンネル内での冷却、通電試験の準備を開始した。

搬入後の作業は、高周波系を除いて CM とほぼ同様である。アライメント、周辺機器の取り付け作業を行い、DHR の承認を受けて、冷却、通電、磁場測定を進めた。

4. ビームラインの整備と統括における経験から

FRIB のビームライン整備における教訓のひとつとして、「最初に小規模のシステムで実証を行い、その後より規模の大きいシステムに拡張する。」が挙げられる。

例えば CM の場合、最初の CM の組み立てと並行して、電力試験場所 (Test Bunker) の整備が行われた。最初に ReA6 bunker が整備され、計画初期の 80.5 MHz の CM の試験に用いられた。その後、別の建物に SRF Bunker が整備され、残りすべての CM の試験に用いられた (Fig. 9)。なお ReA6 bunker については、一部の設備を転用して Re-Accelerator 用の CM が設置され、ReA6 ビームラインの一部となっている。

これらの試験場所用に、超電導ソレノイド 1 台分の電磁石用電源、空洞 2 台分の高周波源、そしてそれらの制御系を整備した。これは FRIB CM の周辺機器を最小限の構成で試作、運転経験を得る良い機会となった。

トンネルにおいても ARR2 で 3 台の CM、ARR3 で 12 台と段階的に台数を増やす機会を得た (Table 2)。これらの設置作業に関する経験の蓄積から、ARR4 の 24 台についても工程遅延のリスクを最小限に抑え、ビームラインの整備を進めることができた。

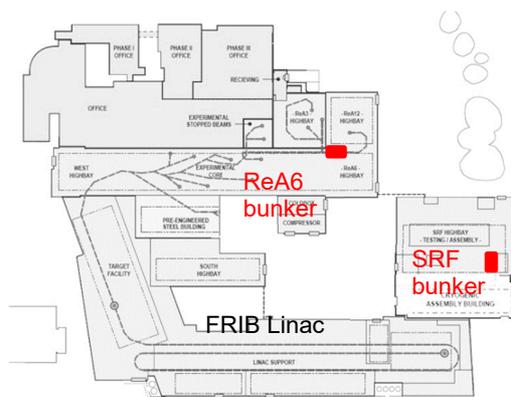


Figure 9: SRF test bunkers where the final CM tests were performed before transferring to the linac tunnel.

もうひとつは DRR についてである。DRR は所内レビューではあるが、委員は加速器 (ASD) 外の施設全体の安全担当者や技術担当者によって構成される。従ってレビュープログラムで規定されたチェックリストについて、ASD として満足したことを示す必要があり、機器担当者を促す、工程上の重要なマイルストーンとして機能した。

また繰り返し行われた DRR によって、ビームライン整備に関する確認事項が標準化され、機器担当者間の意識が共通化されたことも有益であった。

Table 2: Cryomodules Required at Commissioning Phases

Phase	Cryomodules	Cavity (in FRIB total)	Solenoid
ARR2	$\beta=0.041$ (1-3)	12	6
ARR3	$+\beta=0.085$ (4-15)	104	39
ARR4	$+\beta=0.29, 0.53$ (16-39)	272	63
ARR5	$+\beta=0.53$ (40-46)	324	69

今後も施設としてこれまでのレビュープログラム (DRR, ARR) を基本的に継続する方針である。レビューの項目を、どのようにビームラインの維持管理と、400 kW に向けた加速器機器の改良に向けて、更新、活用していくかという点が今後の課題といえる。

5. まとめ

FRIB は大型の加速器計画の中でも、極めて順調に推移、完成した例といえる。その中でも加速器建設、主にリニアックのビームラインの整備と統括の概要、および経験から得られた教訓などについて報告した。ユーザー運転開始後も、加速器の仕事として、引き続き実験エリア内の RI ビームラインの整備、ビーム出力増強のための機器の追加、改良など、多くの解決すべき課題が残されている。今後 6 年をかけて運転経験を積みながら、目標のビーム出力 400 kW にむけて調整を進める予定である。

謝辞

FRIB 計画は、米国内だけでなく、日本を含む国際的な研究所間の協力体制の下で完遂された。ここで改めて、すべての関係者の方々に深く御礼申し上げたい。

参考文献

- [1] J. Wei *et al.*, “FRIB commissioning and early operations”, in *Proc. IPAC’22*, Bangkok, Thailand, Jun., 2022, pp. 802-807.
- [2] M. Hausmann *et al.*, “Design of the Advanced Rare Isotope Separator ARIS at FRIB”, *Nucl. Instrum. Methods*, vol. 317, pp. 349-353, 2013.
- [3] E. Pozdeyev *et al.*, “FRIB front end construction and commissioning”, in *Proc. IPAC’18*, Vancouver, BC, Canada, Apr.-May, 2018, pp. 58-62.
- [4] H. Ren *et al.*, “Commissioning Status of FRIB front end”, in *Proc. NAPAC’19*, Lansing, MI, USA, Sep., 2019, pp. 813-816.
- [5] T. Xu *et al.*, “Progress of FRIB SRF Production”, in *Proc. SRF2017*, Lanzhou, China, Jul., 2017, pp.345-352.
- [6] T. Maruta *et al.*, “ビーム性能の当初目標を達成した FRIB 加速器”, *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol. 17, No. 4, pp. 269-278, 2020.
- [7] S. Miller *et al.*, “FRIB cavity and cryomodule performance, comparison with the design and lessons learned”, in *Proc. SRF2019*, Dresden, Germany, Jun.-Jul., 2019, pp.742-749.
- [8] T. Kanemura *et al.*, “Experimental demonstration of the thin-film liquid-metal jet as a charge stripper”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 128, no. 21, p. 212301, May, 2022.