

# 日本大学電子線利用研究施設の電子線形加速器の稼働と光源利用の現状

## STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AND APPLICATION OF LIGHT SOURCES AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

野上杏子<sup>#, A)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>, 境武志<sup>A)</sup>, 高橋由美子<sup>A)</sup>, 早川建<sup>A)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>, 住友洋介<sup>B)</sup>, 清紀弘<sup>C)</sup>,  
惠郷博文<sup>D)</sup>, 吉田光宏<sup>D)</sup>, 土屋公央<sup>D)</sup>, 松本修二<sup>D)</sup>, 松本利広<sup>D)</sup>, 古川和朗<sup>D)</sup>, 山本樹<sup>D)</sup>  
Kyoko Nogami<sup>#, A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Takeshi Sakai<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>,  
Yoske Sumitomo<sup>B)</sup>, Norihiro Sei<sup>C)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>D)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>D)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>D)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>D)</sup>,  
Toshihiro Matsumoto<sup>D)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>D)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University

<sup>B)</sup> Science and Technology, Nihon University

<sup>C)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

<sup>D)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The 100 MeV electron linac at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) has operated for approximately 1066 h in 2024. The electron beam acceleration time was approximately 408 h, which was approximately 20 % shorter than that in 2023. In December 2024, a resistor in the automatic voltage regulator (AVR) was broken during the operation of the accelerator, causing instant shutdown of many devices including the pulse modulators that required the stabilized power source. The long-term record of the AVR output voltage fluctuation suggested that the voltage stability had already been decreased since March 2024. This also suggested that the fluctuations of the klystron pulse voltages and the thyratron keep alive currents during this period were due to unnoticed troubles in the AVR.

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、100 MeV 電子線形加速器を基に、3 種類の光源を共同利用に提供している。自由電子レーザー (FEL) は基本波 1.3~6.5  $\mu\text{m}$  および非線形光学結晶を用いた可視・近赤外領域の高調波 0.4~1.2  $\mu\text{m}$ [1]、パラメトリック X 線放射 (PXR) は標的結晶を交換することで 5~47 keV、THz 光は発生させるビームラインとその放射過程に依存するが 0.5~3 THz が利用可能である[2-4]。2022 年 3 月から PXR の標的結晶には Si(400)を採用し、X 線エネルギー 9.1~47 keV の高エネルギー X 線の活用を推進している[5]。2010 年から通常のフルバンチモードに加えてバーストモードによる電子ビーム加速が可能となった。2013 年から続くクライストロン RF 出力窓での放電は、交換してもなおしばしば発生し運転上の問題となっている。そこで、2019 年に放電が発生した際に RF 出力窓の致命的な損傷を回避するための RF 窓保護回路を導入した[6]。現在でも、主にクライストロン 2 号機の RF 出力窓で放電が頻発しているため、RF パルス幅 20  $\mu\text{s}$  での電子ビーム加速は困難であり、比較的長パルスを必要とする FEL 発振でも RF パルス幅を狭めて (<11  $\mu\text{s}$ ) 行っている。また減磁したアンジュレータ永久磁石列を 2020 年に更新した。これによりフルバンチモードによる FEL 発振は安定し、バーストモードによる FEL 発振強度は過去最高の強度が得られた[7]。

### 2. 加速器稼働時間と光源利用

2024 年度月別加速器運転時間の推移を Fig. 1 に示す。図には月別のクライストロン通電時間 (青)、クライストロン 1 号機 (赤) および 2 号機 (緑) の高圧印加時間、電子ビーム加速時間 (黄) を示している。2024 年度における加速器稼働日数は 151 日、クライストロン通電時間は約 1066 時間、電子ビーム加速時間は約 408 時間であった。前年度に比べ稼働日数はやや増加した一方で、通電時間は約 10%、電子ビーム加速時間は約 20%も減少した。例年 8 月は夏季休業のほか、大学の計画停電や行事により加速器を長期停止しなければならず、これに合わせて加速器のメンテナンスも行っている。これに加えて 2024 年度は見学や点検作業などで放射線業務従事者以外の者が加速器本体室に入室する機会が増加、年度末には利用側の FEL 輸送経路のうち真空悪化で使用を停止していた経路の復旧作業を実施、などにより電子ビーム加速停止の日が増えたことが稼働時間、特に電子ビーム加速時間の減少に繋がった。

Figure 2 に、利用目的別クライストロン通電時間の割合 (外円) と電子ビーム加速時間 (内円) を示す。2024 年度は、前述した電子ビーム加速停止日にクライストロンのエージングを行っていたため、前年度より加速器調整運転に費やした割合が増加した。また、クライストロン通電時間の約半分を FEL 発振のために費やしているが、これは、FEL は利用件数が他の光源に比べて多く、そのための調整運転する日数も多いためである。これに加えて、FEL 発振が比較的長パルスを必要とし RF 出力窓での放電の頻度が上がるため、クライストロン昇圧にエージングも兼ねているため通電時間に対して電子ビーム加速

<sup>#</sup> nogami.kyoko@nihon-u.ac.jp

時間の割合が他の光源に比べて低い。一方で、繰り返しは 5 pps と高いものの PXR では RF パルス幅を 4  $\mu$ s、PXR ライン上で発生する THz 光では <7  $\mu$ s 程度に狭めて加速器運転を行っているため、RF 出力窓での放電頻度は FEL に比べて減少し安定な利用が可能である。

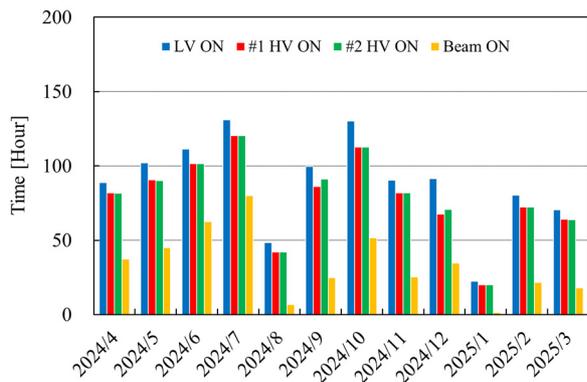


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystron and the beam acceleration, respectively.

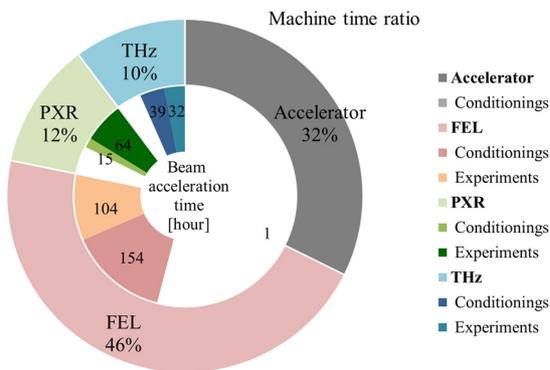


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

### 3. 光源の現状

#### 3.1 FEL-THz 光重畳利用に向けての整備

2010 年から産業技術総合研究所と共同で THz 光源の開発を行ってきた[2-4]。2016 年に PXR ライン上で発生する THz 光を隣接実験室へ輸送できるように整備し、現在では主にビームダンプへ電子ビームを導く 45° 偏向電磁石の磁場端で発生したコヒーレントエッジ放射 (CER) を利用実験に提供している。出力窓から取り出された THz 光は大気中の水による吸収を避けるため、内部に輸送路および測定装置を設置し乾燥空気を注入できる気密性の高い専用箱に導光し、精度の高い測定が可能である[4, 8]。これに対して、FEL ライン上で発生した CER を隣接実験室へ導光するための整備は 2017 年に既に実施している[9]。FEL ライン上のビームダンプへ電子を導く 45° 偏向電磁石と下流側共振器鏡との間に

真空槽を設置し、THz 光の全反射鏡と中心に内径 25 mm の穴があいた中空鏡を上下に切り替えられるようになっている。中空鏡の穴径は FEL 光ビームサイズより大きいので、FEL を発生させながら THz 光も輸送できる。この中空鏡で反射された CER は、FEL 輸送ライン上の真空槽内のペリクル型ビームスプリッターで反射され隣接実験室へと輸送される。この FEL と THz 光を重畳させる利点を活かした測定を進められるように、隣接実験室の整備が重要となってくる。既に PXR ラインで発生する THz 光の利用実験で導入されているような乾燥空気注入型の専用箱を FEL ライン用にも追加で導入した[10]。また検波器や FEL または THz 光に対して応答速度の高い検出器をそれぞれ購入しており、加速 RF 周波数の 64 分周されたバースト電子ビームから生成される FEL および THz 光のマイクロパルスの状態を測定できるように整備していく予定である。

#### 3.2 クライストロン出力電力と FEL 発振強度

現在使用中のクライストロン 2 号機は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) から移管された PV-3030A3 型を 2019 年 1 月に設置したもので、約 6 ヶ月のエイジングの結果、主に PXR 発生のための運転条件である RF パルス幅 6  $\mu$ s、約 18 MW の出力電力でエネルギー 100 MeV まで電子ビーム加速が可能となった。これに対し FEL 発振を確保しながら放電頻度が減少する RF パルス幅まで狭め (<13  $\mu$ s)、出力電力は 16 MW で加速器運転を行えるようになった。しかし、加速器運転を続けるに従い放電頻度が増加したため、放電頻度を抑えるために結果として徐々に RF パルス幅を狭めることになった。一方、特にフルバッチモードによる安定した FEL 発振と利用実験可能な発振強度を得るためには、10  $\mu$ s 以上の RF パルス幅が必要となることから、RF パルス幅を狭めて放電リスクを回避するには限界があった。そこで、クライストロン 2 号機の出力電力を低くして放電頻度を利用実験に支障がでないところまで減少させることを試みた。現在では、RF パルス幅は 12  $\mu$ s 以下、出力電力は 11~12 MW 程度で FEL 発振を行っている。バーストモードであればエネルギー 95 MeV 程度まで電子ビーム加速が可能である。Figure 3 にクライストロン 2 号機、その後のアンジュレータ磁石列および共振器鏡の交換後に得られた FEL 発振強度の変化を示した。ただし、図中のデータ

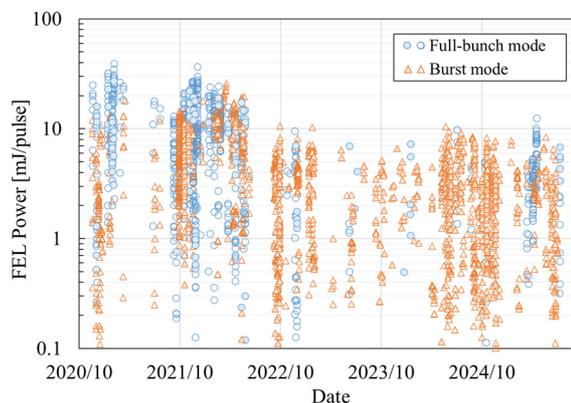


Figure 3: Long-term behavior of the FEL power since October 2020.

は調整中のデータも含み、RF パルス幅の違いなどの補正は行っていない。現在のクライストロン稼働条件下でも利用要望に応えられる程度の FEL 発振強度(数 mJ)は得ている。

## 4. 装置の故障と施設の整備

### 4.1 自動電圧調整器の故障

2024 年 12 月には加速器稼働中にクライストロンモジュレータ用自動電圧調整器 (AVR) 内部の抵抗器が破損し、これから電力を供給していた多くの機器が突然遮断した。この際に AVR の電圧変動記録を遡って調査したところ、既に同年 3 月から電圧安定度の劣化が起きていたことが判明した (Fig. 4)。このことから、2024 年に顕著になったクライストロン 2 号機のパルス電圧およびサイクロトロンキーブアライブ電流の変動[11]の一因に AVR の安定度低下があったと思われる。2025 年 2 月から 6 月はメーカーから AVR または安定化電源のデモ機を借りて加速器を稼働させた。その間に故障した AVR を修理したが、その際判明した故障の過程は、2024 年 3 月の時点でまず 40 A ヒューズが切れ、背面の大電流用不燃性巻線抵抗器 (225 W, 1 Ω) に負荷がかかり過熱、それに気が付かず使用を続けた結果、この抵抗器が破損したと考えられる。切れたヒューズ、破損した抵抗器、点検で見つかった故障ダイオードを交換修理し、電圧安定度は故障前と同程度まで回復したので、デモ機返却後の現在もこれを使用して加速器運転を行っている。今後は安定化電源を新規購入し、修理した AVR は予備機とする予定である。

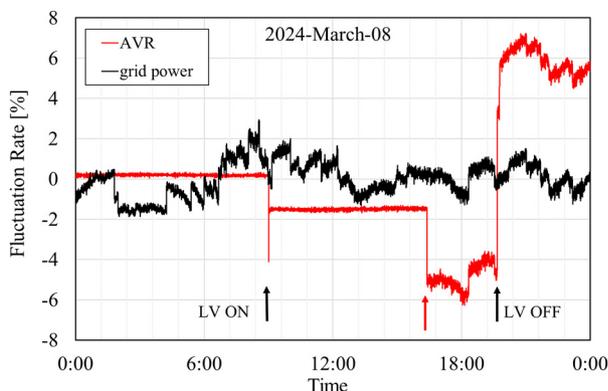


Fig. 4: Fluctuation of the output voltage of the automatic voltage regulator and the source grid power voltage, respectively.

### 4.2 FEL 輸送経路の復旧

LEBRA では、利用側の FEL 輸送ラインが 2 経路あり、以前は真空度悪化が問題となっていた。このうちクリーンルームへ FEL を輸送する経路側で突発的に真空度の悪化が起きていたので、ゲートバルブで真空区域を分け問題の経路の使用を停止した。その後繰返し真空リーク箇所の特定制を試みたが成功しなかった。しかし 2019 年に別の作業中に、クリーンルームに設置してあった FEL 取り出し用 CaF<sub>2</sub> 窓がリークの原因だったことが判明したが [12]、クリーンルーム使用を希望する利用者の減少や光

路切り替え機構の問題などから修理をせず、長らくこの経路への FEL 輸送を停止したままだった。そもそも 2 部屋あったクリーンルームのうち 1 部屋はクリーンルームとして使用していなかったことから、通常の FEL 利用実験室として有効活用できよう、2024 年 1 月末からこのクリーンルームを廃止し、その後停止していた FEL 輸送ラインの復旧および光路切り替え機構の更新工事を行った。また現在は使用していない実験室の取り出しポートを、今後簡便な調整機能を備えたものに整備していく予定である。

## 謝辞

本研究開発の一部は、文部科学省平成 30 年度光・量子飛躍フラッグシッププログラム次世代レーザー基礎基盤研究「自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」(課題番号: JPMXS0118070271)、JSPS 科研費 16H03912、JP19H04406、21K12539、23K03671、24K21543 の助成、および公益財団法人 JKA 競輪の補助を受けて行いました。

## 参考文献

- [1] K. Hayakawa *et al.*, “Harmonic generation of the FEL using NLO”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Japan, Aug. 1-3, 2007, pp. 583-585.
- [2] N. Sei *et al.*, “Development of Intense Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, Proceedings of FEL2012, Nara, Japan Aug. 26-31, 2012, pp. 480-483.
- [3] T. Sakai *et al.*, “Research and development of the high power THz light sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 821-824.
- [4] T. Sakai *et al.*, “Development of coherent edge radiation source at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Matsuyama (Online meeting), Sep. 2-4, 2020, pp. 629-632.
- [5] Y. Hayakawa *et al.*, “Characteristic of monochromatic 40-keV X-ray produced by the LEBRA-PXR source at Nihon University”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 18-21, 2022, pp.583-587.
- [6] T. Tanaka *et al.*, “Effect of shut-off of RF window breakdown during the long-pulse operation of S-band klystron”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, pp.51-55.
- [7] K. Nogami *et al.*, “Status of 125 MeV electron linac and light sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 384-387.
- [8] 山添亮 *et al.*, “テラヘルツ波分光計測における水蒸気の吸収軽減および吸収補正に関する検討”, 電気学会 計測/知覚情報合同研究会, Kochi, Japan, Dec. 16-17, 2021, IM21-033.

- [9] T. Sakai *et al.*, “Development of high power coherent terahertz wave sources at LEBRA linac in Nihon University”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 7-10, 2018, pp.346-348.
- [10] T. Sakai *et al.*, “Development of terahertz sources at LEBRA FEL beam line”, Proceedings of the 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan., Tokyo, Japan (PASJ2025), Aug. 6-8, 2025, this meeting.
- [11] K. Nogami *et al.*, “Status of electron linac and light sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan., Yamagata, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2024, pp. 1188-1190.
- [12] K. Nogami *et al.*, “Status report of 125 MeV electron linac and light source development at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan., Matsuyama (Online meeting), Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 905-908.