

日本大学電子線利用研究施設の電子線形加速器と光源の現状

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

野上杏子^{#, A)}, 早川恭史^{A)}, 境武志^{A)}, 高橋由美子^{A)}, 早川建^{A)}, 田中俊成^{A)}, 住友洋介^{B)}, 清紀弘^{C)}, 惠郷博文^{D)}, 道園信一郎^{D)}, 土屋公央^{D)}, 諏訪田剛^{D)}, 吉田光宏^{D)}, 大澤哲^{D)}, 福田茂樹^{D)}, 古川和朗^{D)}, 山本樹^{D)}, 新富孝和^{D)}, 榎本収志^{D)}

Kyoko Nogami^{#, A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Yumiko Takahashi^{A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Yoske Sumitomo^{B)}, Norihiro Sei^{C)}, Hiroyasu Ego^{D)}, Shinichiro Michizono^{D)}, Kimichika Tsuchiya^{D)}, Tsuyoshi Suwada^{D)}, Mitsuhiro Yoshida^{D)}, Satoshi Ohsawa^{D)}, Shigeki Fukuda^{D)}, Kazuro Furukawa^{D)}, Shigeru Yamamoto^{D)}, Takakazu Shintomi^{D)}, Atsushi Enomoto^{D)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University

^{B)} Science and Technology, Nihon University

^{C)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The 100 MeV electron linac at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University operated for approximately 1168 h in 2023. The electron beam acceleration time was approximately 606 h, which was almost the same as that in 2022. The parametric X-ray beam of up to 47 keV has been provided for user's experiments by using a Si(400) single-crystal target. The coherent edge radiation generated at the bending magnet of the PXR generating beam line has been provided for user's experiments as the main terahertz radiation source. In addition, new terahertz light sources based on the coherent Cherenkov radiation and coherent transition radiation using an optical vortex target are under development in collaboration with AIST.

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、自由電子レーザー (FEL)、パラメトリック X 線放射 (PXR)、THz 光を発生させて共同利用に提供している。FEL は基本波 1.3~6.5 μm および非線形光学結晶を用いた可視・近赤外線領域の高調波 0.4~1.2 μm [1]、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 で利用可能である[2]。現在、PXR の標的結晶には Si (400) を使用しており、9.1 keV~47 keV の X 線を利用実験に提供している[3]。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も可能となった。2013 年中頃から続くクライストロン RF 出力窓での放電は、クライストロンを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の RF 出力窓の致命的な損傷を回避するために RF 保護回路を導入した[4]。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 μs での電子ビーム加速は困難であり、FEL 発振は RF パルス幅を狭めて (< 12 μs) 行っている。また 2020 年 2 月にアンジュレータ永久磁石列を更新し、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[5]。

2. 加速器稼働時間と光源利用の現状

2023 年度の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。2023 年度における加速器稼働日数は 143 日、クライストロン通電時間は約 1168 時間、電子ビーム加速時間は 606 時間であった。例年 8 月は夏季休業、大学の計画停電や行事もあり、加速器の長期停止が必要となるため、これに合わせて加速器のメンテナンスも行っているため稼働時間が他の月に比べて極端に短くなっている。また、2024 年 1 月下旬から、コヒーレント THz 光源開発を目的として新たな標的を PXR ビームライン上に設置する作業、FEL 輸送ラインのアライメント作業などで加速器運転時間がやや減少している。

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。2023 年度のクライストロン通電時間の約半分が FEL 調整および利用実験に費やしている。これは、利用件数が他の光源に比べて多く、そのための調整運転を行う日数も多かったためである。このことに加えて、FEL 発振が比較的長パルスが必要とし 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を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時間の割合が他の光源に比べて低い。一方、繰り返しは 5 pps と高いもののパルス幅を PXR は 4 μs 、THz は < 8 μs に狭めて運転を行っ

[#] nogami.kyoko@nihon-u.ac.jp

ているため RF 出力窓での放電頻度は減少するので、比較的安定な利用が可能である。THz 光源の利用には、主に PXR ビームラインで発生するコヒーレントエッジ放射を提供している。隣接実験室の出力窓から取り出された THz 光は、大気中の水蒸気による減光を避けるため乾燥空気を注入できる気密性の高い輸送路および測定装置が設置できる専用箱内に導光され、精度の高い測定が可能である[6,7]。

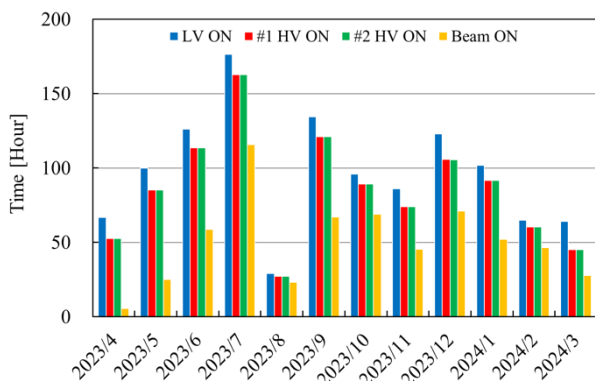


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystron and the beam acceleration, respectively.

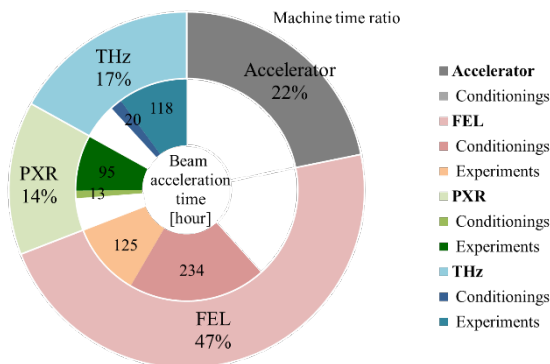


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

3. 光源の更新工事およびトラブル

3.1 THz 光源

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[8]。2016 年には PXR ライン上で発生するコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR)、コヒーレントエッジ放射 (CER)、コヒーレント遷移放射をそれぞれ隣接実験室へ輸送できるように整備し[9]、現在は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 CER を主に利用実験に提供している。2021 年 12 月に新たに平面波コヒーレントチェレンコフ放射 (CCR) の発生を目的として PXR ビームライン上に高抵抗 Si 誘電体中空円錐管を設置し、基礎実験を開始した[10]。2023 年 1 月に、CCR 用標的を人工石英の中空円錐管

に交換し、さらにその上部に光渦遷移放射用標的 (アルミニウム) を設置し、これら 2 つの標的は上下移動で切り替え使用することができる。基礎測定の結果、CCR 発生では中空部を通過する電子ビーム軌道の角度が強度に影響することがわかった[11]。そこで、PXR 発生装置上流に軌道制御のためのステアリングコイル設置を検討している。

2017 年に、FEL ラインのビームダンプへ電子を導く 45°偏向電磁石で発生する CER を隣接実験室へ輸送できるように整備した[12]。45°偏向電磁石と下流側共振器鏡の間に、THz 光反射用の 2 つのトロイダル鏡を備えた円筒形真空層を設置した。2 つのトロイダル鏡は全反射鏡と FEL 発振を妨げない穴付き鏡であり、これらはステップモータ駆動により遠隔で切り替えられる。最近、鏡裏面と固定治具それぞれにある罫書線のずれが見つかり、これは切り替え時のステップモータの振動によるものと考えられる (Fig. 3 黄色の矢印)。反射鏡がトロイダル鏡であることから、回転方向へのずれは THz 光の輸送効率にかかわる問題であるため、早急に対策が必要である。

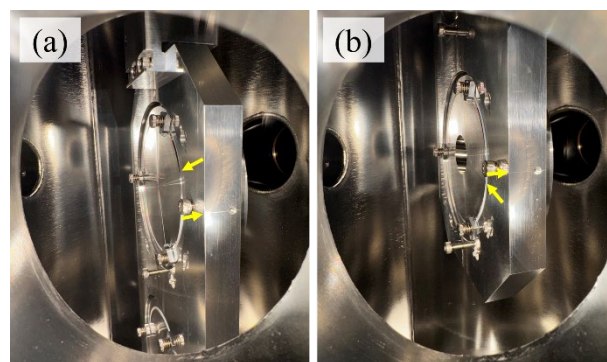


Figure 3: Rear views of terahertz transport toroidal mirrors installed in the FEL line. (a): total reflection mirror. (b): total reflection mirror with a center hole.

3.2 サイクロトロンの不調

クライストロン 2 号機パルス電圧にノイズが生じると、安定な電子ビーム加速が困難となる。これはサイクロトロンに起因していると考えられるが、原因は不明である。ノイズの発生頻度が増加したときは、サイクロトロンのヒータ電圧やリザーバ電圧を調整して対応している。2 号機に使用しているサイクロトロンは e2v 社製 CX2411 で 2016 年 10 月に使用を開始し、現在までの通電時間は 8,600 時間超である。サイクロトロンの寿命の個体差は大きいものの、高価ゆえ多少の不調では交換できない。そこで、自爆の頻発など致命的な故障につながる前に推奨されている冷却方法の導入を検討している。推奨されている冷却方法は、上下から送風またはサイクロトロンを覆う円筒を設置し下部から送風する方法であり、どちらを選択するか検討している。

3.3 加速器運転の省力化

加速器運転従事者の負担を軽減するために、2 つの制御を自動化した。まず、クライストロン印加電圧の自動昇圧である。これは昇圧電圧や時間の間隔を設定でき、所定の印加電圧まで昇圧パターン設定を行うこともできる。次に、RF 保護回路の後段に新たに電子ビーム加速

のトリガをオンオフする回路を導入した。RF 出力窓で放電が発生するとパルスの途中で即座に RF を停止し、これに伴い電子ビーム加速のトリガも停止する。後続パルスは放電が発生したタイミングの RF パルス幅で RF を再投入し、その後トリガに合わせて RF パルスを徐々に元のパルス幅まで広げる。RF パルス幅が元のパルス幅に広がった次のタイミングで電子ビーム加速のトリガを再開する。これまでは RF 出力窓での放電が発生したときは手動で電子ビーム加速を停止し、RF パルス幅が戻ったことを確認して加速を再開していたが、自動で電子ビーム加速の停止・再開ができ、運転者の負担軽減とビーム利用の効率化が図れるようになった。

謝辞

本研究開発の一部は、JSPS 科研費 JP19H04406、21K12539、23K28360、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] T. Sakai *et al.*, “Status report of 125 MeV electron linac at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 1037-1040.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, Sep. 2-4, 2020, pp.629-632.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] T. Sakai *et al.*, “Research and development of the high power THz light sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp.821-824.
- [10] T. Sakai *et al.*, “Research and development of terahertz sources at LEBRA-PXR beam line in Nihon University”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 9-12, 2021, pp.568-571.
- [11] T. Sakai *et al.*, “Development of terahertz sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 2, 2024, FRP028, this meeting.
- [12] T. Sakai *et al.*, “Developments of high power coherent terahertz wave sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp.346-348.