

日本大学電線利用研究施設の電子線形加速器の運転と光源の現状

STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION 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^{A)}, 清紀弘^{B)}, 小川博嗣^{B)}, 古川和朗^{C)}, 道園真一郎^{C)}, 土屋公央^{C)}, 吉田光宏^{C)}, 諏訪田剛^{C)}, 福田茂樹^{C)}, 榎本收志^{C)}, 大澤哲^{C)}, 山本樹^{C)}, 新富孝和^{C)}

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

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

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

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

Abstract

The 125 MeV electron linac at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University has operated for approximately 689 h in 2021. The electron beam acceleration time was approximately 363 h, which was almost the same as that in 2020. All the diodes and capacitors of the back-diode circuits in the klystron pulse modulators were replaced with new ones, since some of the devices had already been broken or degraded. During the shutdown of the linac for the work, some old elements of the linac such as the ion-pump power supplies were replaced as well. An additional beam position monitor was installed at immediate upstream of the electron beam dump in the free electron beam line. Development of a new terahertz light source based on the coherent Cherenkov radiation was started in collaboration with AIST. Additionally, generation of the parametric X-ray beam in the higher energy region has been tested by using a Si(400) single-crystal target.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、125 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 光を発生させ共同利用に提供している。FEL は基本波 1300~6000 nm 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 400~1300 nm[1]、PXR は 5~34 keV、THz 光は発生させるビームラインに依存するが 0.1~4 THz で利用可能である[2-8]。2010 年に電子銃の改造を行い、通常のフルバンチモードに加え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 年の中頃からクライストロン RF 出力窓で放電が発生し、クライストロン交換後も RF 出力窓での放電が運転上問題となっている。そこで、2019 年に RF 保護回路を導入し、放電が発生するとパルス途中で即座に RF を停止し、後続パルスは放電が発生したタイミングのパルス幅で再投入できるようにした。さらにその後 RF パルスのトリガに合わせて徐々に元の RF パルス幅まで広げて正常なビーム加速を回復できるようになった[9]。しかし長パルスが必要な FEL の場合は放電頻度が高く、RF パルス幅 20 μ s で運転が困難な時は RF パルス幅を狭めて運転を行っている。2020 年 2 月にアンジュレータ永久磁石列を新規作成したものに交換した。これによりフルバンチモードによる FEL 発振は安定し、その発振強度は過去の最大値と同程度まで回

復した。さらにバーストモードによる FEL 発振は、過去最高の発振強度が得られている[10]。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

2021 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 1 号機および 2 号機の通電時間(青)、1 号機高圧印加時間(赤)、2 号機高圧印加時間(緑)、電子ビーム加速時間(黄)を示している。2021 年度における加速器稼働日数は 100 日、クライストロン通電時間は 689 時間、電子ビーム加速時間は 363 時間であり、これは前年度とほぼ同程度であった。2021 年 2 月にクライストロン 2 号機のパルスモジュレータ放電部バックダイオード回路が故障したため、同年 4 月から加速器を計画停止し、1 号機を含めたすべてのバックダイオードとコンデンサを交換した[10]。修理完了までに約 2 ヶ月半要したが、この停止期間にモジュレータ室空調修理、FEL ビームラインに電子ビームポジションモニタ(BPM)の増設、既存のイオンポンプ電源をすべて印加電圧可変の小型電源への交換を実施した。運転再開後の 7 月には、モジュレータ充電直流電源のオイルコンデンサの焼損が原因で加速器運転不可となったが、直ちにコンデンサを交換し運転を再開した。これらの要因により 2021 年度上半期は加速器の運転時間が減少した。10 月以降は利用実験が増加したため、1 年を通した加速器運転時間は前年度とほぼ同程度となった。

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。2021 年度

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

のクライストロン通電時間の約 6 割が FEL 調整運転および利用実験に費やされている。これは、FEL 発振が比較的長パルスが必要なのでエージングも兼ねてクライストロン高圧を所定の電圧まで徐々に昇圧したり、他の光源に比べて利用実験の件数も多いので利用に向けた調整運転にも時間を費やしたためである。

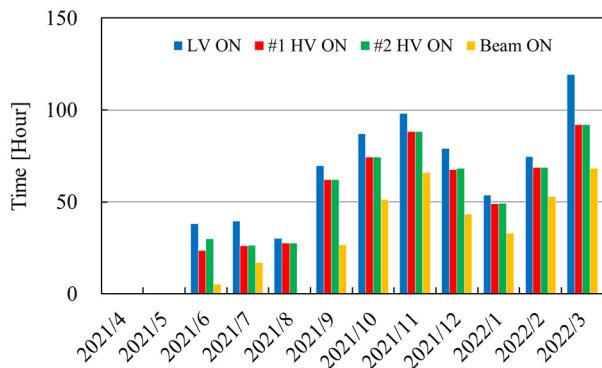


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystron and the beam acceleration, respectively.

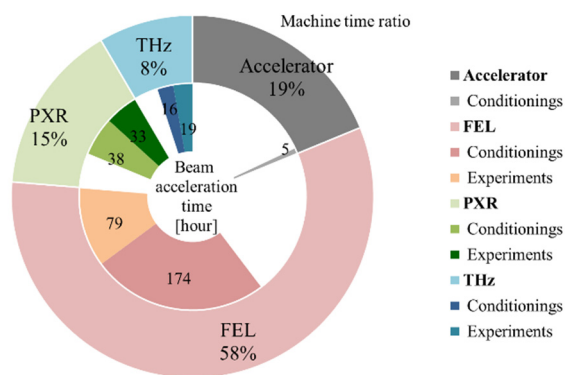


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

3. 光源の更新工事と現状

3.1 コヒーレントチェレンコフ放射

2010 年に産業技術総合研究所と共同で THz 光源の開発を開始し、2012 年には FEL アンジュレータに電子ビームを導く 45° 偏向電磁石で発生したコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) を [4, 5]、2017 年には FEL ラインのビームダンプへ電子を導く 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) を隣接実験室へ輸送し基礎測定および利用実験を行ってきた。また 2016 年には PXR ライン上で発生する CSR、CER、コヒーレント遷移放射 (CTR) をそれぞれ隣接実験室へ輸送できるように整備し利用実験へ提供している [6, 11]。さらに実験室の出力窓から取出された THz 光は大気中の水蒸

気による吸収で減光するため、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よう専用箱を導入し、精度の高い測定が行えるようになった [11]。これらの THz 光源に加えて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、2021 年 12 月に 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、現在は基礎測定を行っている [12]。

3.2 PXR 発生用標的結晶の欠損

2020 年 12 月に加速管上流のソレノイドコイルの極性を一部変更した。従来の設定電流と同じ条件で電子ビーム加速を行った結果、PXR 発生用標的結晶上で電子ビーム径が想定より小さくなり過ぎた可能性がある。標的結晶の端は楔型で薄くなっており、そこに径の小さい電子ビームが照射されたことによって発生した局所過熱が原因と考えられるが、Si 単結晶が欠損した (Fig. 3)。欠損箇所を避けて電子ビームが照射されるように結晶位置を垂直方向に動かしてホルダに固定、さらに PXR ビームラインでの電子ビームのパルス幅を狭く (3 μs 程度) し、しばらく使用を続けた。利用者からさらに高いエネルギーの X 線放射の要望もあり、2022 年 3 月に標的および反射用結晶を Si(220) から Si(400) へ交換した。基礎測定ではエネルギー 40 keV の X 線発生が確認されており、利用に向けて特性を調べている [13]。

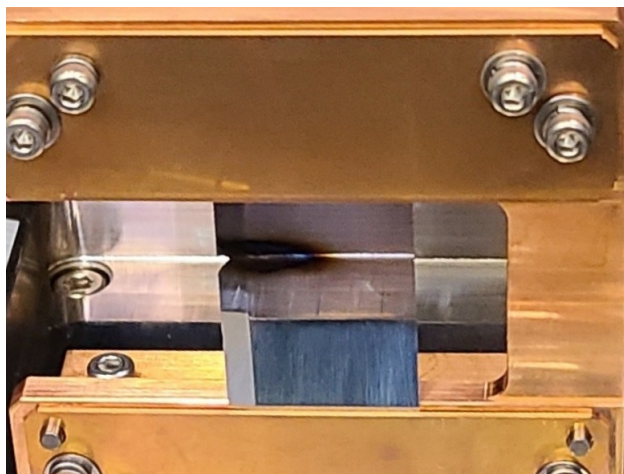


Figure 3: Damaged Si(220) single crystal for PXR generator target.

3.3 FEL 発振と電子ビームエネルギー

2021 年 4 月、4 個のボタン型電極から成る BPM を FEL ビームラインのビームダンプ上流に新たに設置した [14]。FEL は時間的および空間的に電子ビームのバンチ間隔に相当した離散的な光である。あるバンチと相関があるのは共振器長に対応して 128 波長離れたバンチ同士である。そこで、ある瞬間に観測される光の強度 Y_i はそのパスで発生した光の強度 P_i と蓄積光の強度の和で表すことができる。このとき蓄積光の強度はそのパスの 1 周期前つまり約 44.82 ns 前に観測された光の強度 Y_{i-1} と共振器を 1 往復する間の減衰率 η を用いると $(1 - \eta)Y_{i-1}$ となるので、そのパスで新たに発生した強度は $P_i = Y_i - (1 - \eta)Y_{i-1}$ と表すことができる。電子ビームエ

エネルギー77.8 MeV、波長約 3 μm のフルバンチモードにより発振した FEL を InSb 光誘電素子を用いた赤外線検出器で測定した。取得したオシロスコープのデータは時間間隔が 0.8 ns であるので、各データ点の 44.8 ns 前のデータを 1 周期前の光の強度 Y_{i-1} とし、各パスで新たに発生する光の強度 P_i を求めた。Figure 4 に求めた光の強度と新設した BPM における水平方向の電子ビーム位置の変化を示した。このとき減衰率を 0.04 と仮定した場合に蓄積光の影響がほぼなくなった。この結果から、光の強度 P_i は同時に測定された電子ビームエネルギーの定性的な低下の振舞と強い相関がみられる。ここで仮定した減衰率は、電子ビーム後端を起点とした FEL 発振波形の減衰から求められる共振器損失率の測定結果[15]と検出器の応答速度などを考慮すれば矛盾しない。電子ビーム位置の変化をそのエネルギーに変換できれば、電子ビームエネルギーから FEL への変換効率を定量的に知ることができる。

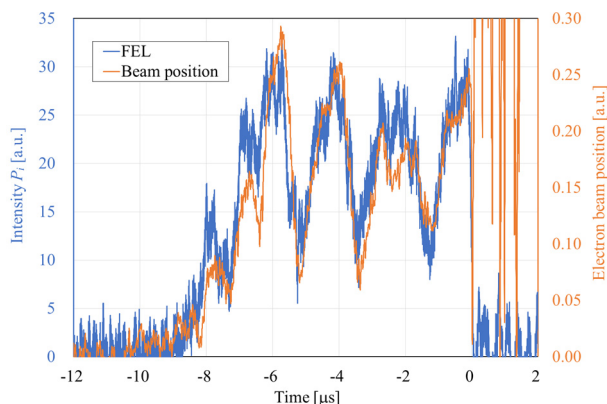


Figure 4: Comparison of the intensity P_i calculated from data measured with the infrared detector and the horizontal electron beam position at the BPM immediate upstream of the beam dump.

4. 機器の故障・更新作業

4.1 イオンポンプの新設と電源交換

PXR 発生装置およびその下流の角型真空槽の上蓋や PXR 出力窓には O リングが使用されているため構造上 PXR ラインの真空度は常に他の区域に比べて悪い。このため、PXR 出力窓周辺から常時ドライ真空ポンプとターボポンプによる排気を行っている。しかしながら、PXR 発生装置直下のイオンポンプの劣化に伴い真空度の維持が困難となり、2021 年 8 月に排気能力を向上させるため角型真空槽に排気速度 300 L/s のイオンポンプを新設した。2022 年 8 月には PXR 発生装置直下のイオンポンプを排気速度 500 L/s のものに交換した。それまで使用していたイオンポンプは取り外したが、今後エレメント交換したうえで、もともと分岐管である真空配管の反対側に再設置する予定である。

LEBRA に設置しているイオンポンプの多くは 20 年以上使用しているため、古いイオンポンプを使用している区域は工事などで大気ばく露後の真空度回復に要する時間が増加した。この要因は、従来のイオンポンプ電源

が定格 (7.5 kV) をいきなり印加するしかなく、大気ばく露から粗排気ユニットで回復した真空度でもイオンポンプ電流が過電流となり、過負荷により順調に定常動作に移行しないことがしばしばあったためである。このような古いイオンポンプの使用を続け、なおかつ大気ばく露から速やかに真空度を回復するために、電源を印加電圧固定の大型電源から印加電圧可変の小型なものにすべて交換した。これによりイオンポンプ電流を確認しながら印加電圧を徐々に昇圧できるようになり、さらに定格より低い印加電圧でもイオンポンプを動作させることが可能になった。しかし今後、古いイオンポンプは順次新しいものに交換していく予定である。

4.2 オイルコンデンサ焼損

2019 年 3 月にクライストロン 1 号機のモジュラータ用直流電源の高速制御部の高圧整流回路のオイルコンデンサが焼損した[16]。2 号機も同様に焼損したコンデンサがあり、このときは予備の電源から整流ユニットごと外して交換する対応を行った。しかし交換した整流ユニットにもオイルコンデンサが使用されていたため、2021 年 7 月に再びコンデンサの焼損が原因で、1 号機に高圧が印加できなくなった。2 号機の直流電源も確認したところ、同様に焼損したコンデンサが見つかった (Fig. 5)。今後、焼損による故障を回避するため、すべてのオイルコンデンサを同じ定格容量で燃焼の危険が少ないメタライズドポリプロピレンフィルムコンデンサに交換した。一方ダイオードについては、導通確認を行い問題のないものはそのまま利用した。

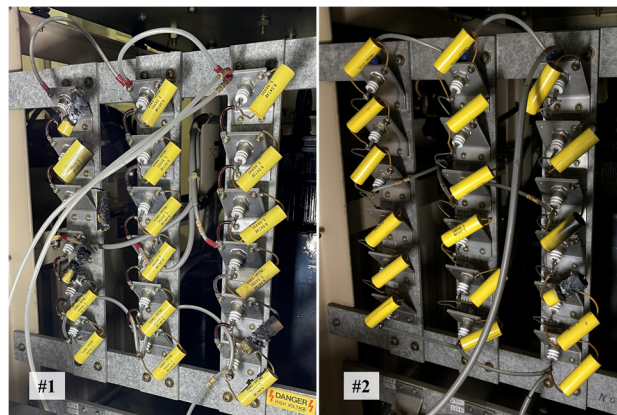


Figure 5: The high voltage regulator units for the high speed voltage stabilizers in the modulator dc power supplies.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19H04406 および 21K12539 の助成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] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, Journal of Physics D: Applied Physics, 46 (4), 2013, 045104.
- [4] N. Sei *et al.*, “Characteristic of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, Aug. 25-29, 2014, pp. 541-544.
- [5] N. Sei *et al.*, “Complex light source composed from subterahertz-wave coherent synchrotron radiation and an infrared free-electron laser at the Laboratory for Electron Beam Research and Application”, J. Opt. Soc. Am B, 31, 2014, pp. 2150-2156.
- [6] 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.
- [8] T. Sakai *et al.*, “Developments 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, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10., 2018, pp. 346-348.
- [9] 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.
- [10] 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, Aug. 9-12, 2021, pp. 384-387.
- [11] 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.
- [12] T. Sakai *et al.*, “Research and development of high-power terahertz sources at LEBRA-linac in Nihon University”, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct. 2022, TUP013.
- [13] Y. Hayakawa *et al.*, “Characteristics of monochromatic 40-keV X-rays produced by LEBRA-PXR source at Nihon University”, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct. 2022, WEP026.
- [14] 齊藤広斗, “共振器型自由電子レーザー発振時における光交換効率測定”, 日本大学, 2021 年度修士論文, 2022.
- [15] 廣原匠, “日本大学 LEBRA 赤外自由電子レーザーにおける光共振器損失の測定”, 日本大学, 2021 年度修士論文, 2022.
- [16] K. Nogami *et al.*, “Status Report of 125 MeV Electron Linac at Nihon University”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 1206-1209.