

日本大学電子線利用研究施設 LEBRA の現状報告

STATUS REPORT OF 125 MeV ELECTRON LINAC AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

境武志^{#, A)}, 早川恭史^{A)}, 住友洋介^{B)}, 早川建^{A)}, 田中俊成^{A)}, 高橋由美子^{A)}, 長瀬敦^{C)}, 久保田月野^{C)}, 大和紗也香^{C)}, 伊東幸輝^{C)}, 清紀弘^{D)}, 恵郷博文^{E)}, 道園真一郎^{E)}, 土屋公央^{E)}, 諏訪田剛^{E)}, 吉田光宏^{E)}, 大澤哲^{E)}, 福田茂樹^{E)}, 古川和朗^{E)}, 山本樹^{E)}, 新富孝和^{E)}, 榎本收志^{E)}

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

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

^{B)} College of Science and Technology, Nihon University

^{C)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University

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

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

Abstract

At LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application), in collaboration with KEK (High Energy Accelerator Research Organization), a light source based on a 100 MeV electron linac for FEL (Free Electron Laser) and PXR (Parametric X-ray Radiation) has been developed. Additionally, research and development of a THz light source are being conducted in joint research with AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology). The operation time of the electron linear accelerator in fiscal 2022 was 1126 hours, spanning 143 days, with a beam acceleration time of approximately 570 hours. Each light source is primarily used for user experimental applications. As the operating time of the high-frequency source has reached 40,000 hours and the aging of the main equipment is progressing, a new RF amplifier has been manufactured. In the oscillation test using the new RF amplifier for FEL, we have achieved a stable oscillation level and are using it for continuous operation. In this presentation, we will report on the maintenance of the accelerator and the status of user utilization.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) における 2022 年度の稼働日数は 143 日、クライストロン通電時間は 1126 時間、電子ビーム加速時間は 570 時間であった。ビーム加速時間はほぼユーザー実験に用いており、自由電子レーザー (FEL) 実験に半分以上利用されている。残りはパラメトリック X 線放射 (PXR) 実験に 150 時間、テラヘルツ波 (THz) 利用実験に約 90 時間利用された。現状、高周波源の真空悪化による問題が発生しているためパルス幅を制限しているが、FEL 発振はできており、ユーザー実験対応をしている。ユーザー実験の一部では、NEDO プロジェクト (JPNP20003) が PXR 実験で進行しており、Si(400)結晶を用いてエネルギー 9.1~47.4 keV の高エネルギー側で対応している。また FEL 実験では、文部科学省 量子飛躍フラグシッププログラム (Q-LEAP)・次世代レーザー・基礎基盤研究も継続しており、ガスターゲットへの FEL 照射測定系の準備も進めている。THz ラインではコヒーレントチェレンコフ放射発生による THz 光発生装置開発、コヒーレント遷移放射光渦光源等の開発を進め、基礎実験を行っている。加速器側機器に関しては、古くなっていたクライストロン用の S バンド長

パルス RF アンプを交換しテストを実施中である。FEL 発振試験では現状発振可能な安定度は確認できており、RF アンプの 2 号機を製作予定である。本発表では加速器装置側の機器整備およびユーザー利用状況等について報告する。

2. LEBRA125MeV 電子線形加速器と各光源

LEBRA では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と産業技術総合研究所 (AIST) との共同研究において、100 MeV 電子線型加速器の高度化、各光源開発を行っている。各光源開発では、FEL と PXR の光源開発、THz 光源開発を行っており、各光源開発と学内外共同利用を進めている [1-10]。THz 光源開発は FEL ライン、PXR ラインそれぞれで進めており、2019 年度から THz 帯のコヒーレントエッジ放射 (CER) 光源開発、コヒーレント遷移放射 (CTR) 光源開発に加え、平面波コヒーレントチェレンコフ放射 (CCR) 光源開発を精力的に進めている。FEL 波長は 1.3~6.5 μm 、非線形光学結晶 BBO を用いて 0.4~1.2 μm 、準単色 X 線源である PXR は 9.1~47.4 keV、THz 光源は 0.5~3 THz 弱まで利用可能である。各光源は利用実験での使いやすさを考慮し、常時立入り可能な実験室への輸送系を構築している。THz 波に関しては各ビームラインへ重畳可能なシステムを構築しており、

[#] sakai.takeshi@nihon-u.ac.jp

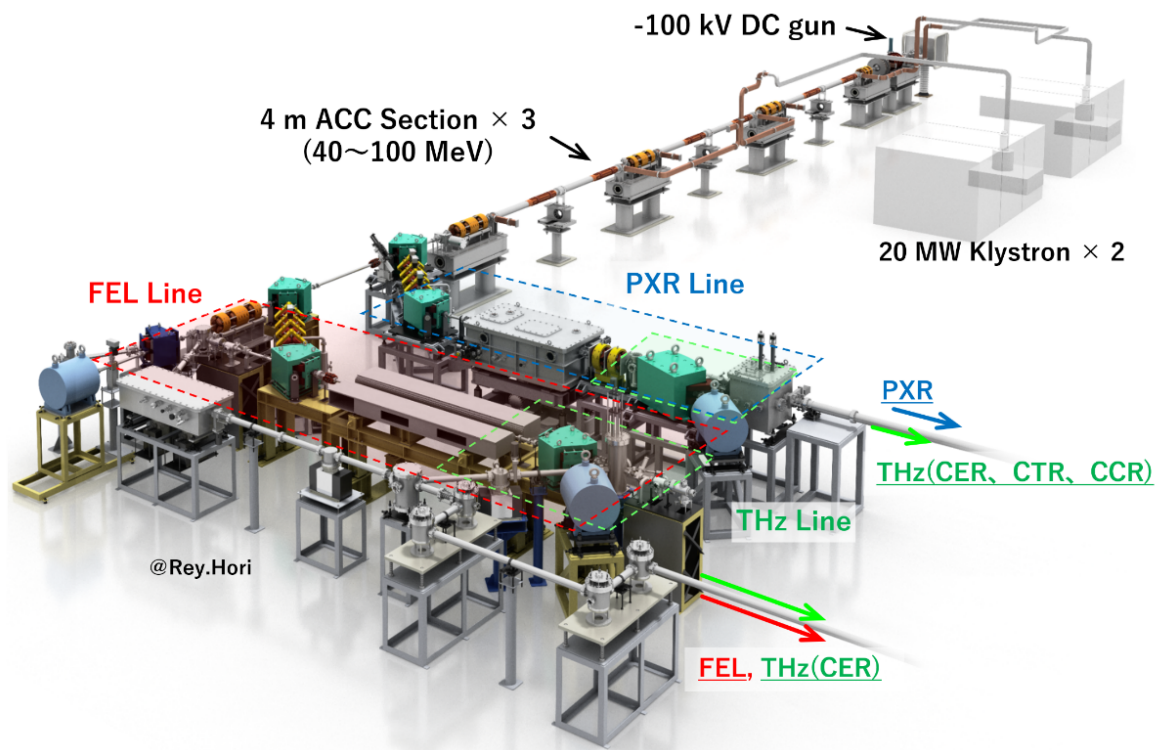


Figure 1: Layout of the 100 MeV electron linac, PXR line, FEL line, and THz line at LEBRA in Nihon University.

FEL 及び、PXR と同じ光学系へ輸送が可能となっている。LEBRA の電子線形加速器と各ビームラインの概要図を Fig. 1 に示す。

3. 2022 年度の加速器運転状況と共同利用状況

2022 年度の加速器運転及び共同利用状況としては、稼働日数は 143 日間おこない、クライストロン通電時間は 1126 時間であった。電子ビーム加速時間は 570 時間行い、そのうちビーム加速時間はほぼユーザー実験に利用された。その他の運転時間はマシンスタディ及び、クライストロンなどのエイジングなど調整運転に用いた。内訳としては、FEL 実験に 326 時間とビーム運転時間の半分以上、残りは、PXR 実験に 148 時間、THz 利用実験に 87 時間利用され、残りはマシンスタディとなっている。ただし現状では、高周波源の真空悪化による波形欠けの問題が発生しており、RF パルス幅を制限して運転をおこなっている。しかし、フルバンチモード及びバーストモードどちらでも FEL 発振できており、ユーザー実験の対応を進めている[11-15]。

ユーザー実験では、大規模ユーザー実験として、PXR 実験では NEDO プロジェクト (JPNP20003) が Si(400) 結晶を用いてエネルギー 9.1~47.4 keV の高エネルギー対応モードでおこなっている[10]。FEL 実験では文部科学省 量子飛躍フラグシッププログラム (Q-LEAP)・次世代レーザー・基礎基盤研究が継続されており、ガスターゲットを用いた FEL 照射測定系の準備を進めている[16]。THz 光源では、コヒーレントチェレンコフ放射、コヒーレント遷移放射光渦発生装置、遷移放射の光渦光源等の開発を進めており、基礎実験を進行中である。その他に、

JST 未来社会創造事業 (JPMJMI17A1) の支援を受け、これまで開発を進めていた 2.6 セル高周波電子銃空洞を応用し、レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線形加速器の開発にも参画している[17, 18]。

4. PXR 線源の高エネルギー化と利用研究

LEBRA-PXR 線源の応用は発生源である Si 結晶の簡単な調整によるエネルギー選択性と空間コヒーレンスを利用した X 線イメージングが主流となっている。フラットパネル検出器 (FPD) を用いたコンピュータ断層像 (CT) の撮像が可能であり、放射光源施設で行われている測定手法と同様な回折強調イメージング (Diffraction enhanced imaging: DEI) と同時 K 吸収端差分 (K-edge subtraction)-CT を実現している。また、PXR 放射源に Si(400) 結晶を採用することで X 線を高エネルギー化し、47.4 keV までのエネルギー領域での燃料電池セルの測定を実施している。なお PXR ビームは水平方向において約 48 eV/mm のエネルギー分散があり、移動範囲 75 mm では X 線エネルギー範囲 3.6 keV に相当している。DEI の実験セットアップを応用して特定元素の K 殻吸収端を跨いだ 2 色交差 X 線ビームによる吸収端前後の像の同時測定を実現している。このような 2 つの CT 像の差分から特定元素の 3 次元分布の取得にも成功している。

5. 赤外線自由電子レーザーの現状とコヒーレント THz 放射の利用

光共振器タイプの FEL を運用し、ユーザー利用実験への供給を実現している。これまでに 827 nm~6.5 μm の範囲において FEL 発振を達成し、BBO など非線形光学

結晶を用いて 400 nm~1.2 μm の高調波の生成と供給も可能である。FEL は真空ビームラインを介して輸送され、非放射線管理区域であるユーザー用各実験室で照射可能である。LEBRA リニアックの加速周波数は 2856 MHz であるが、電子銃に高速グリッドパルサーを導入し、64 分周または 128 分周(マイクロパルス間隔~44 ns)のバーストモードの間引き運転が可能である。光共振器内の FEL ミクロパルスのピークパワーは最大で数 GW になる。FEL の応用利用では、超短パルスレーザーの固体表面への集光照射によるナノ周期構造 (Laser-induced periodic surface structure: LIPSS) の研究が学内の岩田研究室により行われている。その他、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 次世代レーザー領域 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」(代表者:羽島良一;JPMXS0118070271.)に参画しており、赤外 FEL を希ガスターゲットに照射し、高次高調波 (HHG: high harmonic generation) によりアト秒領域の紫外・X 線パルスの発生を目標に照射系を構築中である。

THz 光源の応用利用では、薬剤粉末の錠剤化技術と THz 分光法を用いた主成分吸収スペクトル観測技術の研究が学内の大谷研究室と AIST の共同研究で行われている。この研究では、医薬品の主成分吸収スペクトルの観察と薬剤粉末の錠剤化におけるサンプル内濃度の評価を行っている。サンプルには、ファモチジン、イブプロフェン、ロキソプロフェンなどを用いており、複数の賦形剤との混合比率を調整しながらテストを実施し、薬剤の結晶多形の判別などへ応用を進めている。

6. マシントラブルと改良等

これまでのクライストロン通電時間の合計時間は、2 号機ともに 4 万時間を越えており、全体的に老朽化が進んでいる。クライストロン集束コイルには 1 号機あたり電源を 7 から 8 台用いており、設置から数十年経過した電源が使われている。このように非常に古い電源のため、代替の検討が必須な状況であり、システムの入替が必要となっている。KEK ではクライストロン集束電源の代替システムを検討しているため、その動向を参考しつつ、検討を進めていく予定である。

LEBRA が設置されている理工学部船橋校舎では、夏季中の計画停電が 8 月に 3 回実施される。ほぼ 1 日、またはお盆休みを挟むと、2 日間程度電源が落ちるため、その後の加速器真空系立上げ作業や関連機器の復旧に時間がかかり、最悪な場合、機械装置の故障も発生しやすく、停電復旧作業は非常に大きな負担となっていた。そこで近年低価格化が進んでいる大容量ポータブル電源を導入している。この電源は拡張が容易なため、1 箇所あたり 2~4 kWh 程度を導入した。主にイオンポンプ電源系へ EPS 機能で導入することで、計画停電や近年増えてきているゲリラ豪雨による瞬停対策にも対応している。導入した外部電源とイオンポンプ電源を設置しているラックの様子を Fig. 2 に示す。停電時も 1 日以上 19 インチラック内装置の状態維持が可能である。しかし外部電源は、内部回路切替え時間が 30 ms 以内の仕様となっており、PLC 内部電源では 25 ms を超えると保持が続かない事が判明した。そのため、ゲリラ豪雨に伴い瞬停が

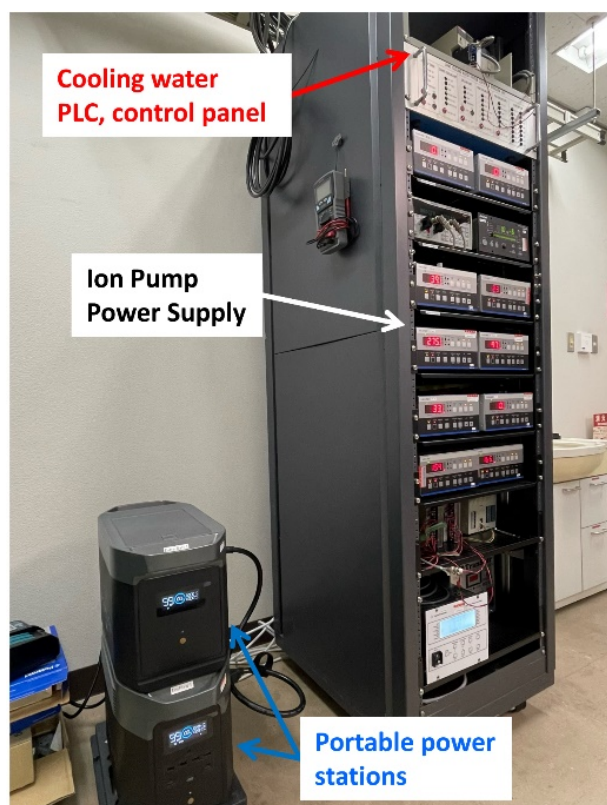


Figure 2: Portable power systems, ion-pump power supply and coolingwater control system rack.

発生した際に、加速器の急停止や、クライストロン系統の LV ダウンが 2 回発生するというトラブルが発生した。そこで、PLC 系統には小型 UPS (10 ms 以内切替え) を経由し、対応することとして問題を回避している。関連して、停電復旧時に復旧作業の手間が問題となっていた PXR 発生装置において、新たに 500 L の大型イオンポンプを追加し、500 L イオンポンプ 2 台体制へ強化した。

PXR 結晶用ステージの制御系も老朽化が進んでおり、ドライバ故障が発生した。特に PXR システムを構築した 2000 年頃に導入した非常に古いサーバーであるため、ISA バス用の制御ボードを使用していた。サーバーはシステム導入時に用意していた予備機が 1 台あったため、今回は入れ替えることで対応できた。しかし、今後同様の故障が発生した際は、予備機が無い場合、ISA バス用の制御ボードが近年では入手が難しい状況であることから、入れ替えを検討する必要がある。

クライストロンはロングパルス運転をしているため、使用している RF アンプは、パルス幅: 20 μs、繰り返し: 5 Hz、出力: 300 W に対応した長パルス用の特注品である。しかし導入から 15 年以上経過しており、2 号機に用いている RF アンプには細かなところで不具合が出てきたため、RF アンプの新規製作を行った。新しいアンプは R&K にて製作し、トリガー系の改修を経て、クライストロン出力を無事確認し、ビーム試験、FEL 発振を確認した。2023 年度後半に 2 号機を製作予定であり、実機では RF 波形の立上がり部分の補正を容易にするために、タイミング系の改良を検討し、完成次第、1 号機への交換を行う予定である。

7. まとめ

LEBRA における稼働日数はコロナ禍で減少していたが、徐々に回復しつつあり、2022 年度は 143 日だった。ビーム加速時間はほぼユーザー実験に利用され、ユーザー実験時間も回復してきている。大規模ユーザー実験では、PXRを用いた NEDO プロジェクト(JPNP20003)、FEL を用いた Q-LEAP プロジェクトを実施し、その他に学内外のユーザーに利用されている。スタッフの人数が減っていることから、作業の効率化を進めている。特に問題となっていた停電時復旧作業の負担軽減のため、大容量ポータブル電源を導入し、夏季休暇中の計画停電復旧作業の負担を下げている。加速器に関しては、クライストロン通電時間が 4 万時間を越えており、各機械装置の老朽化が目立ち、入れ替え等を一部始めており、特に制御系で用いている古い規格の機器入れ替え、保守検討を進めている状況である。

謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 JP19H04406、21K12539 の助成、Q-LEAP 次世代レーザー領域 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」(代表者:羽島良一;JPMXS0118070271)、NEDO 委託業務(JPNP20003)、JST 未来社会創造事業(JPMJMI17A1)を受けて行いました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] T. Sakai, “Development and application of electron linac at LEBRA in Nihon University”, 放射光, May 2021 Vol.34 No.3, pp.153-162.
- [2] Y. Hayakawa, Y. Takahashi, “ Diffraction-enhanced imaging and elemental imaging based on K-edge subtraction as applications of a parametric X-ray source driven by an electron linac”, 放射光, March 2020 Vol.33 No.2, pp.87-94.
- [3] T. Sakai *et al.*, “Evaluation of Bunch Length by Measuring Coherent Synchrotron Radiation with a Narrow-Band Detector at LEBRA”, *Condens. Matter* 2020, 5(2), 34. doi.org/10.3390/condmat5020034
- [4] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, *J. Phys. D*, vol. 46, pp.045104, 2013.
- [5] N. Sei *et al.*, “Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, *Proceedings of FEL2014*, Basel, Switzerland, pp.541-544.
- [6] T. Sakai *et al.*, “Development of coherent edge radiation source at FEL beam line in LEBRA”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, pp.465-467.
- [7] Y. Hayakawa *et al.*, “Project on the superposition of beamlines for parametric X-ray radiation and coherent transition radiation in the THz region at LEBRA”, *Journal of Physics: Conference Series* 732 (2016) 012013.
- [8] N. Sei *et al.*, “Millijoule terahertz coherent transition radiation at LEBRA”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 032401 (2017).
- [9] 境武志 他, “日本大学電子線利用研究施設におけるコヒーレントエッジ放射の光源開発”, *日本赤外線学会誌*, 2022, 31, 2, pp.76-83.
- [10] Y. Hayakawa *et al.*, “日大 LEBRA における加速器光源の開発とその現状”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, TUOP01, this meeting.
- [11] T. Kubota *et al.*, “高繰り返し中赤外光周波数コム開発に向

- けた試験位相相関実験”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEP52, this meeting.
- [12] A. Nagase *et al.*, “日大 LEBRA-FEL のマクロパルス波形の共振器長デチューニング依存性”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, THP26, this meeting.
- [13] S. Yamato *et al.*, “加速器運転中の定点線量評価に向けた電離箱と自作シンチレータの比較”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, THP44, this meeting.
- [14] K. Ito *et al.*, “プラズマとの相互作用実験のための真空保護インターロック装置開発”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, THP45, this meeting.
- [15] Y. Sumitomo *et al.*, “疑似宇宙高速電波バースト現象生成に向けたプラズマとの衝突実験の準備状況”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, FRP43, this meeting.
- [16] R. Hajima *et al.*, “自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源の研究: 2023”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, FRP25, this meeting.
- [17] S. Masuda *et al.*, “レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線形加速器の大電力高周波試験”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEP49, this meeting.
- [18] T. Sakai *et al.*, “レーザープラズマ航跡場入射用 C バンド高周波電子銃の開発”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, THP39, this meeting.