

日大 LEBRA 電子線形加速器の運転の現状と THz 光源の開発

STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AND THz SOURCE DEVELOPMENT AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

野上杏子^{#, A)}, 早川建^{A)}, 田中俊成^{A)}, 早川恭史^{A)}, 境武志^{A)}, 住友洋介^{A)}, 高橋由美子^{A)}, 佐藤勇^{A)}, 清紀弘^{B)}, 小川博嗣^{B)}, 榎本收志^{C)}, 大澤哲^{C)}, 福田茂樹^{C)}, 設楽哲夫^{C)}, 古川和朗^{C)}, 道園真一郎^{C)}, 土屋公央^{C)}, 吉田光宏^{C)}, 山本樹^{C)}, 新富孝和^{C)}

Kyoko Nogami^{#, A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Yoske Sumitomo^{A)}, Isamu Sato^{A)}, Norihiro Sei^{B)}, Hiroshi Ogawa^{B)}, Atsushi Enomoto^{C)}, Satoshi Ohsawa^{C)}, Shigeki Fukuda^{C)}, Tetsuo Shidara^{C)}, Kazuro Furukawa^{C)}, Shinichiro Michizono^{C)}, Kimichika Tsuchiya^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{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) has operated for approximately 1100 h in 2017. The electron beam acceleration time was approximately 515 h which is about 30 % longer than that in 2016 though the machine operation time in term of the klystron heater power supplies decreased. The #1 klystron was renewed in December 2017 since the output RF window of the old one was damaged due to dielectric breakdowns, enabling the operation at an RF pulse width of 20 μ s. In December 2017, a new terahertz-wave transport line was constructed in collaboration with AIST to use the coherent edge radiation generated at the exit of the 45° bending magnet located downstream of the free electron laser (FEL) undulator for users' experiments and the electron beam diagnostics. Demagnetization of the undulator permanent magnets was found by the field measurements using a Gauss meter, which is considered a cause of the FEL power deterioration in recent operations.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、125MeV 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供給している。FEL は基本波 1300~6000 nm および非線形光学結晶を用いた可視・近赤外線領域の高調波 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 0.1~2 THz の範囲が利用可能である[2-6]。2010 年にリニアック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 年の中頃から頻発していたクライストロン 1 号機の RF 出力窓での放電に対して、RF パルス幅を狭め (<17 μ s) で FEL 発振を行なってきたが、2017 年 12 月にクライストロンを交換し 20 μ s での運転を回復した。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

2017 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。2017 年度における加速器稼働日数は、138 日、クライストロン通電時間は約 1100 時間、電子ビーム加速時間は約 515 時間であった。前年より稼働日数およびクライスト

ロン通電時間は減少したものの、電子ビーム加速時間は約 30 % 増加した。例年 8 月は、夏期休業を利用したメンテナンスを行うため、他の月より稼働時間は短くなっている。このとき、メンテナンスおよび停電復旧作業中に AVR および電子銃制御の通信用光コンバータの故障の対応に時間を費やした。2013 年中頃から頻発したクライストロン 1 号機の RF 出力窓での放電が収まらず、2017 年 12 月クライストロンの交換を行った。これと同時に RF 出力窓下流の導波管真空排気を強化するため、排気速

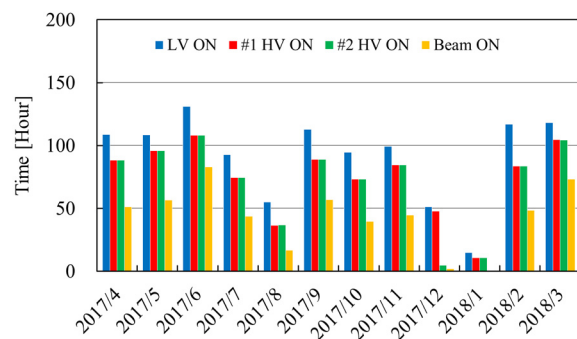


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystrons, and the beam acceleration, respectively.

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

度の大きいイオンポンプに交換した。真空粗排気開始からベーキング、ダイオード動作試験を含め所定の RF 出力が得られるまで延べ約 10 日費やし、RF パルス幅 20 μ s での電子ビーム加速が回復した。これにより 12 月はクライストロン 1 号機の高圧印加時間のみが長くなっている。2017 年 12 月末に、FEL アンジュレータ下流に設置してある 45° 偏向電磁石で発生するコヒーレントエッジ放射を隣接実験室まで輸送するための新規輸送ラインの整備を行った。しかし、予定期間内に工事が終了せず、年末年始を挟み工事の再開が約 1 ヶ月後となったため、その間の加速器運転を停止しなければならず 2018 年 1 月の稼働時間が減少した。

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。クライストロン交換に伴うエージングなどの運転時間は、加速器調整のための通電時間に含まれている。LEBRA では運転の効率を考慮し、原則として 1 週間毎に FEL また PXR ビームラインへの電子ビーム輸送を切り替えている。2017 年度は、主に PXR ビームライン上で発生させた THz 光の基礎研究および利用実験を行ったため、PXR と THz の運転時間の割合はそれぞれ FEL の半分程度となっている。

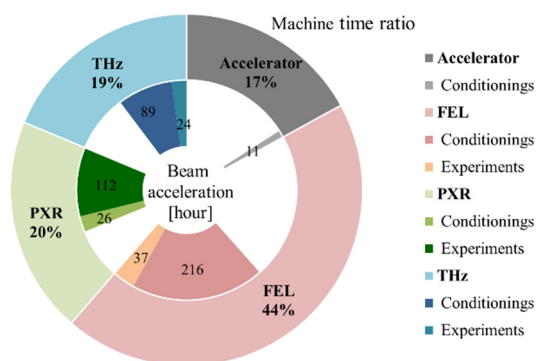


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

3. FEL-THz 光輸送ラインの整備

2010 年から産業技術総合研究所と共同で進めてきた THz 光源開発では、2012 年には FEL アンジュレータに電子を導く 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 [2,3]、2016 年には PXR ライン上で発生させたコヒーレント遷移放射 (CTR) およびコヒーレントエッジ放射 (CER) を隣接する実験室で利用できるように輸送ラインを整備してきた [6]。さらに 2017 年 12 月に、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 CER を隣接実験室へ導光するため、この 45° 偏向電磁石と下流側共振器鏡との間に新たに真空槽を設置した。この真空槽には 2 つの鏡が上下に切替えられるように配置しており、1 つは THz 光の全反射鏡、もう 1 つは中心に内径 25 mm の穴があり THz 光の一部を反射する中空鏡が設置されている (Fig. 3)。中空鏡は、共振器内で発生している FEL の光ビームサイズよ

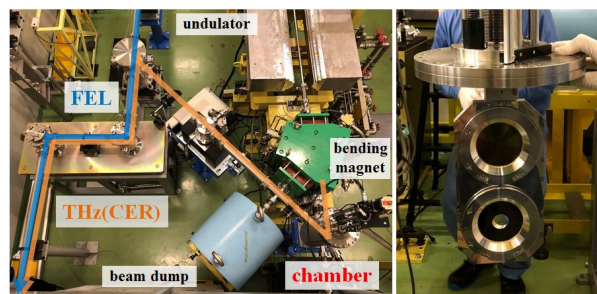


Figure 3: New terahertz-wave transport line of the coherent edge radiation generated at the exit of the 45° bending magnet located downstream of the FEL undulator (left). The mirror driving system to alternate the two reflecting mirrors (right).

り大きな穴径に設計されているので、これを使用すれば FEL を発生させながら THz 光も輸送できる [7]。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で反射され隣接実験室へと輸送される。この真空槽は 2012 年に整備した FEL 輸送ライン上の CSR 反射用を移設した。現在は、輸送ラインの一部のダクトが繋がっていないため、加速器本体室内に測定器を設置し、途中の取出し窓から放射される CER の強度やスペクトルなど基礎測定を行っている。

FEL 輸送ラインは元々真空排気能力が高くなかったため、FEL-THz 光輸送ラインの新設と同時に、この経路に新たに排気速度 300 l/s のイオンポンプを 2 台設置した。

4. アンジュレータ永久磁石の減磁

Figure 4 は、曲率半径 3.7 m の共振器鏡を設置した 2008 年 1 月以来得られた FEL 強度の推移を電子ビーム加速モード別に示してある。ただし、調整中のデータも含んでおり、波長は発振可能なすべての帯域に渡っている。また、2013 年中頃から 2017 年末までは、クライストロン RF 出力窓での放電を避けるため RF パルス幅を狭くしている期間を含んでいる。図中の実線は、各曲率半径を持つ共振器鏡の交換時期を示している。FEL 強度の低下の主な原因は共振器鏡表面の損傷による反射率の低下であるため、共振器鏡交換を行えば FEL 発振強度は回復していた。しかし、2012 年 10 月に曲率半径 3.5 m の共振器鏡に交換したが、それ以前に得られた FEL 強度の半分程度しか得られなかった。RF パルス幅や電子ビーム加速モードの違いはあるものの、電子ビームの加速条件の調整を丹念に行ったが、FEL 強度が高くなる条件は見つからなかった。点検用ビューポートから観察した限り結合孔周辺に僅かな変色は見られたものの FEL 強度低下の原因となりそうな深刻な損傷は見られなかったが、2016 年 8 月に曲率半径 4.0 m の共振器鏡へ交換した。約 1 年、電子ビーム条件をさまざま調整しながら FEL 発振を試みてきたが、特にフルバンチモードでの FEL 強度は上がらず、さらにより短波長ではマクロパルス毎に FEL 強度変動が大きく、安定な発振が困難となった。そこで、電子ビーム条件以外に原因があると考え、2017 年 12 月にアンジュレータ間隙中心のピーク磁

場の測定を行った。現在使用しているアンジュレータは2000年に導入したもので、ハルバック形式で周期長48 mm、周期数50、最小磁極間隔が24 mm、永久磁石はネオジウム、鉄、ボロンが主成分の信越ネオジウム(N42H)から成る。信越化学工業株式会社からの資料にある設置当時のアンジュレータ間隙中心のピーク磁場および2010年に測定したアンジュレータの片側の永久磁石の表面磁場(磁石幅の中央)と今回の測定結果を比較した。それぞれ測定条件が異なり磁場の強度が違うので、アンジュレータ出口側の永久磁石10個のピーク磁場の平均値でそれぞれ規格化した(Fig. 5)。すでに2010年の時点で、アンジュレータ入口側の永久磁石に減磁が認められる。さらに、2017年の測定では、アンジュレータ入口から約3分の1の永久磁石が大きく減磁しており、設置当初から最大で約40%磁場が低下していた。2011年から高速グリッドパルサを導入したが、フルバンチおよびバーストモードでは電子ビームの加速条件が異なっており、それを重畳していたことで45°偏向系での電子ビーム損失が多かったと思われる。これにより発生したγ線や中性子線が、アンジュレータ直前にこれらの遮蔽のために設置してあった鉛ブロックでビルドアップし、より高線量の2次放射線が発生し照射されたことが永久磁石の劣化を進めた原因ではないかと推測される。そこ

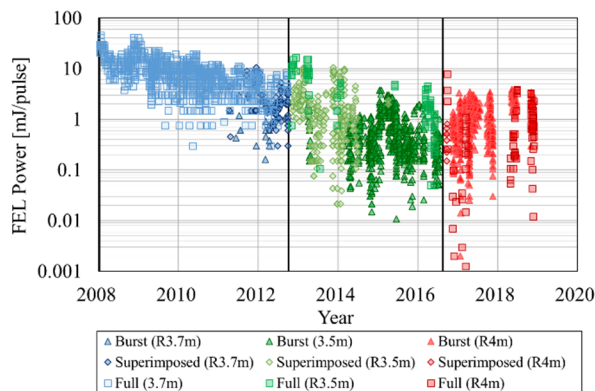


Figure 4: Long term behavior of the FEL output power. The vertical solid lines show the timing the resonator mirrors were renewed.

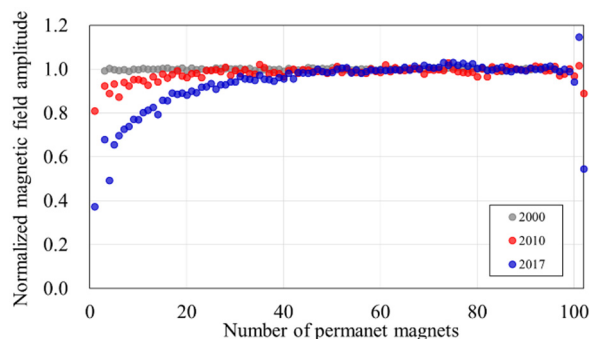


Figure 5: Distribution of the alternative magnetic field amplitude normalized to the average values over the 10 periods near the exit of the undulator. Nearly 1/3 of the total length at the beam entrance side (left side) has been found demagnetized by the measurement in 2017.

で、鉛ブロックを可能な限り上流側へ移動し、アンジュレータ直前にはボロン入りのプラスチックブロックを設置した。一方で電子線や放射線が直接永久磁石に照射されることよりも、それによって発生した熱による温度上昇が減磁の原因であるとの報告もある[8]。LEBRAではアンジュレータ永久磁石の冷却を行っていないので、必要ならば熱を除去するための対策も検討しなければならないだろう。アンジュレータの改修の目処は立っていないが、永久磁石の減磁の原因を調査し対処していく予定である。

現在、フルバンチモードに比べてマクロパルスあたりの強度は低いが、バーストモードによるFEL強度は以前と同程度であり、後述する電子銃高圧ターミナルの故障回復後、より安定なFEL発振が得られていることから主にバーストモードによるFELを利用実験に提供している。

5. 装置の故障とその対応

5.1 AVR

2017年にクライストロンモジュレータ用自動電圧調整器(AVR)出力に約3%の変動が生じるようになった。変動している時間は短い周期的に生じ、これに伴ってクライストロン2号機モジュレータのサイクロンキープアライブ電流も変動した。さらに、電子ビームのエネルギー変動も生じた。加えてAVRの冷却ファンが異音を発していたので、同型のファンに交換を試みた。しかし、使用したファンの筐体が絶縁仕様ではなかったため、数カ所のトランジスタに負荷がかかり破損し、過電流で抵抗が焼けた。破損したトランジスタと抵抗を更新し、筐体が絶縁仕様のファンに交換する修理を行ない、その後はAVR出力の異常な変動は起こらなくなった。

5.2 電子銃の制御

2017年8月下旬、電子銃制御に使用していた通信用光コンバータ(Graviton社製)が故障した。メーカーで調査したが原因が見つからずLEBRAで発生した問題が再現されなかったため一旦返却されたが、長時間動作させているとエラーランプが点灯し正常に動作しなくなった。光コンバータ内のレーザ素子の劣化とわかり修理となったが、部品入手に時間がかかりその間加速器の運転ができなくなるのを避けるため、電子銃高圧ターミナルへの制御コマンド送信を無線LAN経由で行うことにした。しかし、同じく光コンバータ経由で送信していた高速グリッドパルサのトリガパルサを送信できなくなったため、一時的にフルバンチモードのみの運転を余儀なくされた。その直後、高速グリッドパルサの制御インターフェイスも故障し、修理に約3週間費やした。修理完了後、高速グリッドパルサを高圧ターミナル内に再設置する際に、七星科学研究所のデジタル光リンク送受信モジュールを使用してトリガ信号を入力できるようにし、バーストモードによる電子ビーム加速も再開した。現在も制御コマンドの通信は無線LANとRS232シリアルデバイスサーバ(MOXA)を介して行っているが、これがその後複数回故障した。原因として高圧ターミナル内の温度上昇を疑い、高圧ターミナルの側面2箇所各4個、大型のファンを取り付けターミナル内の送風排風を大幅に改善した。しかし、2018年2月に再び高速グリッドパルサが故障した。

このときには、ターミナル上面に通信機器を載せたことにより静電気が溜まり、信号ケーブルを介して放電破壊を起こしたのが原因であると考え、電子銃制御用に追加した通信機器を、静電気と放電が発生しにくいよう全て高圧ターミナル内に収納した。さらに、シリアルポートに絶縁コネクタを取付け、万一静電気やそれによる放電が生じてもしリアルケーブルを通して電源が故障することがないよう対策を施した。

5.3 クライストロン 1 号機の交換

2013 年 9 月にクライストロン 1 号機の出力 RF 窓で放電が頻発し、RF パルス幅 $20\ \mu\text{s}$ で安定して RF 出力を得ることが困難となったので、同年 10 月にクライストロンを交換した。しかし、その約 1 年後 RF 出力窓での放電が再発した。その後、FEL 発振が可能な範囲で RF 出力窓での放電頻度が許容できる程度に減少するまで RF パルス幅を狭め ($< 17\ \mu\text{s}$)、利用実験に対応してきた。交換したクライストロンは交換前と同じ設定電圧で高圧を印加しても、RF 出力パワーは交換前より低くなっていたが、必要な電子ビーム加速エネルギーが得られたことからそのまま使用を続けた。しかし、クライストロン内部の真空度が悪化するようになり RF 窓の損傷が疑われたので、2017 年 12 月に再度クライストロン 1 号機を交換した。交換後のクライストロンは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で約 1.7 万時間使用した PV-3030A3 型である。ダイオード動作試験開始から約 4 日で、RF パルス幅 $20\ \mu\text{s}$ でほぼ所定の RF 出力を得られるまでになった。

2013 年中頃から頻発した RF 出力窓での放電は、窓材のセラミックで起きていたマルチパクタによる放電だと考えられ、特に LEBRA では最大パルス幅 $20\ \mu\text{s}$ で RF を出力していることから、放電による真空度の悪化が深刻な問題となる。実際、RF パルス幅 $6.5\ \mu\text{s}$ で電子ビーム加速を行う PXR では、RF 出力窓周辺での真空度を悪化させるような放電はほとんど起こらない。この放電により RF 窓が損傷すると、クライストロン内部の真空度の悪化も観測されるようになる。今回クライストロンを交換した際、放電対策として、クライストロン窓周辺の真空排気の強化を行った。従来 RF 窓付近に排気速度 $8\ \text{l/s}$ のイオンポンプ 2 台が設置されていたが、これを排気速度 $20\ \text{l/s}$ のイオンポンプ 2 台へと交換した。これによりクライストロン 1 号機に高圧を印加すると同時に発生していた RF 窓周辺の真空度悪化を伴う放電はほとんど観測されなくなり、RF パルス幅 $20\ \mu\text{s}$ での安定した電子ビーム加速が可能となった。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16H03912 および JP16K17539 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, 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, 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, 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] Y. Hayakawa *et al.*, “Development of the system superposing THz-wave onto an X-ray beam at the LEBRA-PXR beamline”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 1044-1048.
- [7] 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, Aug. 8-10, 2018, this meeting.
- [8] S. Okuda *et al.*, “Effects of electron-beam and γ -ray irradiation on the magnetic flux of Nd-Fe-B and Sm-Co permanent magnets”, NIM B, 94, 1994, pp. 227-230.