

日大 LEBRA 電子線形加速器と光源の現状

STATUS OF ELECTRON LINAC AND LIGHT SOURCE 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)}, 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)}
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 1200 hr in 2016. The electron beam acceleration time was approximately 400 hr, which is about 40 % shorter than that in 2015. In October 2016, the thyatron in the #2 klystron modulator was replaced after working for 14 years. The conditioning of the new thyatron took more than a month because the thyatron heater power had mistakenly been supplied at half the rating current. Furthermore, adjustments of the reservoir voltage and the keep alive voltage have been required to stabilize the keep-alive current when the repetition rate of the beam pulse was changed. In parallel with user experiments, emission tests of different electron gun cathodes were carried out from May through October 2016. During the experiments, slow vacuum leak was found at the metal O-ring of the cathode assembly for vacuum sealing. Although normally metal O-rings made of stainless steel should be plated with silver for the use as an ultra-high vacuum seal, the O-rings reserved in LEBRA had not been plated. We had to keep using the O-rings before 40- μ m thick silver was plated on the other reserves.

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発生させた自由電子レーザー (FEL)、パラメトリック X 線放射 (PXR)、THz 光の共同利用を行っている[1]。各光源の利用可能帯域は、FEL は 1300~6000 nm の基本波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[2]、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 である[3-6]。2010 年にリニアック電子銃の改造を行い、通常のマクロパルスモード (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ている。2013 年の中頃から頻発しているクライストロン 1 号機の RF 出力窓での放電は、クライストロンの交換を行って一旦は改善したが、その後再発した。現在では、RF パルス幅を狭めること (<17 μ s) で FEL 利用実験に対応している。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

2016 年度の月別加速器運転時間の推移を Figure 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。2016 年度における稼働日数は 154 日で、前年度に

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

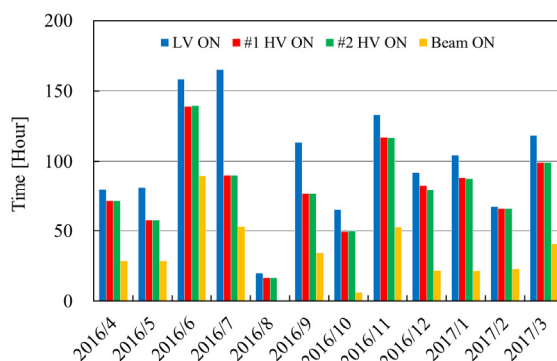


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystrons, and the beam acceleration, respectively.

比べて約 10 % 減少した。また加速器運転時間は約 1200 時間、電子ビーム加速時間は約 400 時間であり、前年度に比べてそれぞれ約 360 時間および約 240 時間減少した。この理由として、主に劣化・故障した部品の交換作業やそれに伴う調整等の対処、電子銃カソードの特性試験の実施などがある。例年 8 月は、夏期休業を利用してメンテナンスを行うため、他の月より運転時間は短くなっている。Figure 2 に利用目的別の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 1 号機 RF 出力窓での放電のため、クライストロンのエージングに費やす割合が増えている。特に FEL 発振時は他の光源に比べて RF パルス幅が広いので、クライストロン高圧の印加を開始してから、エージングも兼ねて徐々に既定電圧まで昇圧している。このため、電子ビーム加速時間に比べてクライストロン通電時間が長く

なっている。LEBRA では、運転の効率を考慮し原則として 1 週間毎に FEL または PXR ビームラインに電子ビーム輸送を切り替えている。現在、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ているため、PXR 利用のための時間が前年度より減少している。また、加速器調整のためのクライストロン通電時間が全体の 29% を占めているが、この中にはクライストロンエージングの時間以外に、電子銃カソードの活性化・エミッション特性試験時の通電時間も約 120 時間を含んでいる。2016 年 5 月から 10 月にかけて電子銃の特性試験を行っており、特に 6、7 月に加速器稼働時間が長くなっているのはこのためである。

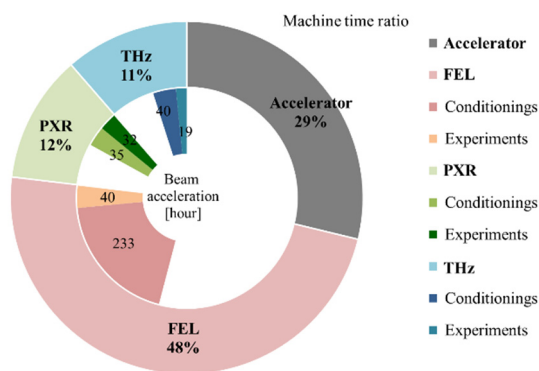


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

3. 劣化・故障部品の交換

3.1 サイラトロンキープアライブ電流

2016 年 10 月にクライストロン 2 号機モジュレータの Litton (現 L3 Technologies) 社製サイラトロン L4888B がトリガパルスに同期して放電しなくなった。このサイラトロンは約 14 年間使用していたことから寿命と判断し、新品の E2V 社製 CX2411 に交換した。トリガパルスで速やかに放電させるために、サイラトロンカソードとキープアライブ電極間で予備的な放電をさせているが、Figure 3a に示すようにサイラトロン交換直後は、このキープアライブ電流の変動が激しく、安定に動作することが困難であった。これは、ヒータ電圧を定格より低い値に設定していたことが原因であった。そこでヒータ電圧を定格まで上げることで一旦は改善した (Fig. 3b)。しかしその後、繰り返して 5 Hz に変更するなど加速器の運転条件によって、突然キープアライブ電流が変化することがあった (Fig. 3c 矢印)。このときキープアライブ電流の変化に伴い電子ビームのエネルギーに変動が生じ、特に FEL 発振および THz 発生に大きく影響した。そこで、キープアライブ電流

が運転条件の影響を受けないようにリザーバ電圧およびキープアライブ電圧の調整が必要であった。これによりサイラトロン起動開始直後はキープアライブ電流の変化はあるものの、電子ビーム加速を行っている間は、ほぼ一定に保たれるようになった (Fig. 3d)。

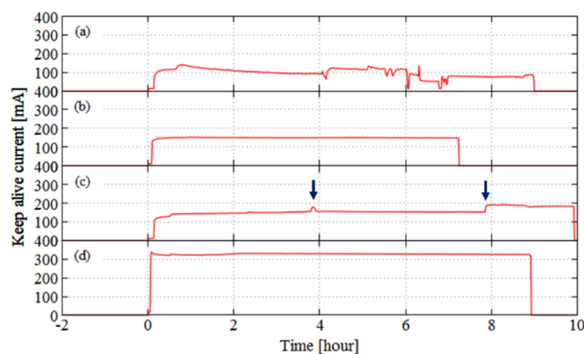


Figure 3: Fluctuation of the keep alive current of the thyratron in the #2 klystron modulator. (a) Before adjustment of the #2 thyratron heater power. Operation with normal heater power (b) at a repetition rate of 2 Hz and (c) at a repetition rate of 5 Hz. (d) After further adjustment of the #2 thyratron reservoir and keep alive voltage at a repetition rate of 5 Hz.

3.2 共振器ミラー表面の損傷

2012 年 10 月から使用していた共振器ミラーは、点検用ビューポートから観測した限りではその表面に僅かな変色は見られたものの結合孔周辺に深刻な損傷は見られなかった。しかし、FEL 強度が低下してきたため、2016 年 8 月に共振器ミラーを交換した。これまで LEBRA では、2008 年に曲率半径 3.7 m、2012 年に曲率半径 3.5 m の共振器ミラーへと交換してきた。これは、曲率半径を小さくすることで、共振器ミラー表面での光ビーム径を大きくしここの光エネルギー密度を抑え、共振器ミラー表面、特に結合孔周辺の深刻な損傷を低減できると期待したからである。実際にこれら 2 つの共振器ミラーは、使用期間がどちらも 4 年以上とこれら以前の共振器ミラー (使用期間は半年～1 年半程度) より長期に渡り使用することができた。使用後の曲率半径 3.7 m の共振器ミラーを観察すると結合孔周辺から広い範囲で損傷していた。一方で曲率半径 3.5 m の共振器ミラー表面は、結合孔周辺の損傷は見られず、そこから少し離れた場所に肉眼で僅かな変色が数カ所認められた。顕微鏡による観察でこれらの変色は損傷であることがわかった。現在使用している曲率半径 4.0 m の共振器ミラーは点検用ビューポートから観察すると、その表面に微かではあるがすでに結合孔を中心としたリング状の変色が確認されている。

4. 真空トラブル

2016 年 5 月から 10 月にかけて、利用実験と並行して計 3 個の電子銃カソードの特性試験を行った。Figure 4 に、電子銃カソードまたは金属 O リングを交換し真空排気開始後の電子銃付近における真空度の変化を示す。

1 個目のカソード取付けの際、しばらくはカソード付近は通常より約 1 桁悪い真空度までしか到達しなかった (Fig. 4a)。しかし、その後急激に真空度が通常時まで回復したため、エミッション特性試験や利用実験を行うことができた。2 個目のカソードに交換したときには、Figure 4b に示すように通常より 1 桁悪い状態までしか真空度が上がらなかった。リーク調査を行った結果、カソードアセンブリの真空フランジ部でリークが見つかった。このフランジの真空シールに使用する金属 O リングがリークの原因と考え、金属 O リングのみを予備のものに交換したが、真空度の改善が見られなかった。この間カソードアセンブリに使用した金属 O リングは、実は仕様上超高真空用ではなく、表面に銀メッキが施されておらず厚みが足りないことがリークの原因と判断した。暫定的にこの O リングはそのまま使い、後に残りの予備 O リングに約 40 μm の銀メッキを施して交換した。これによりスローリークはなくなり、電子銃周辺の真空度は正常になった (Fig. 4c)。現在使用している電子銃カソードに交換した際も、銀メッキを施した金属 O リングを使用しているのでスローリークは起こっておらず、加速器を運転していないとき電子銃周辺の真空度は、 10^{-7} Pa 台まで到達している。

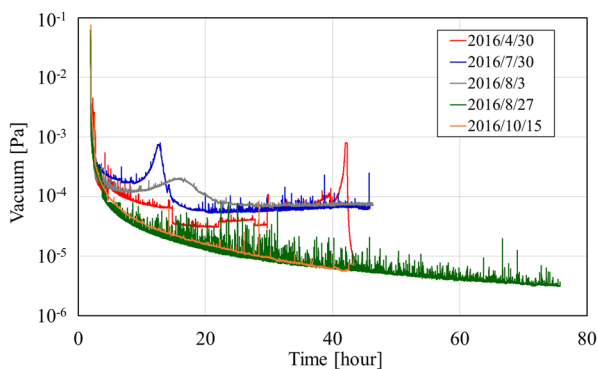


Figure 4: Vacuum of the electron gun that was estimated from the ion pump current measured after the cathodes were replaced. (a) at the test of the first cathode, the vacuum was initially worse than that at usual operation, but suddenly recovered afterward. (b) The vacuum stayed low after the next cathode was installed. (c) For the third cathode, a metal O-ring with 40 μm thick silver plating was used.

5. PXR-THz 光源

2010 年から産業技術総合研究所と共同で THz 光源の開発と利用の開拓を進めている。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) を取り出すための専用ビームラインを整備し、0.1~0.3 THz の光を隣接実験室で利用可能にした [3]。これに加え 2016 年 4 月には、PXR ビームライン上で発生させた THz 光を隣接実験室で利用するため、PXR 発生装置の下流にある真空槽を改良し、X 線輸送ラインへの導光を可能にした [6]。PXR ビームライン上で発生する THz 光は、 45° 偏向電磁石で発生する CSR およびコヒーレントエッジ放射

(CER)、さらに PXR ビームライン上に設置した標的で発生するコヒーレント遷移放射 (CTR) である。予備実験では、FEL アンジュレータ入射ビームラインで発生する THz 光より高強度で、0.1~2 THz の光が観測されている [7,8]。

5.1 THz 発生用標的の交換

当初は CTR を発生させる標的として Ti 箔 (厚さ: 50 μm 、直径: 40 mm) を設置し、THz 光の特性を調べてきたが、2017 年 4 月にスパッタリングにより厚さ約 10 μm の Al を表面に成膜した Si 結晶 (厚さ: 200 μm 、直径: 76 mm) と Be 箔 (厚さ: 100 μm 、直径: 65 mm) を Figure 5 に示すようにそれぞれ設置し、これを上下に移動することで標的の切り替えを可能にしている。

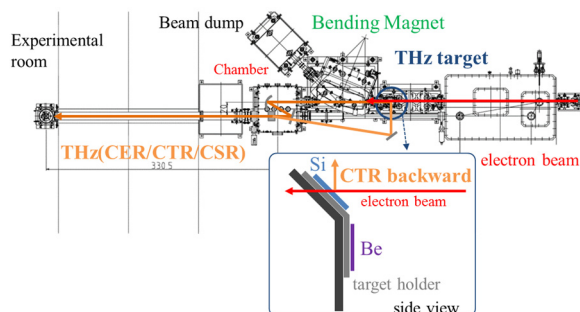


Figure 5: Top view of the PXR beam line showing the positions of the sources and the transportation lines of the terahertz-waves, and side view of the targets (a silicon crystal plate with aluminum coating and a beryllium foil) for CTR.

5.2 コヒーレント遷移放射の輸送経路

CSR、CER および CTR 前方放射は、真空槽内の凹面鏡および X 線輸送ライン上の平面鏡で反射させ X 線輸送ラインへ導光している。一方、標的に Al 蒸着した Si を使用した場合は、標的が電子ビームに対して 45° の角度で設置してあるため、発生する CTR 後方放射を結晶石英の光学窓から鉛直上方に取り出し、大気中に設置した放物面鏡と平面鏡を用いて下流の真空槽に上部の光学窓から再び入射、内部の平面鏡で X 線輸送ラインへ導光している。これらの 2 経路は、真空槽内のそれぞれの鏡を上下に移動させることで切り替えが可能である [6]。当初 CTR 後方放射は、加速器本体室における測定で得られた強度の約 10% 程度しか隣接実験室に輸送できていなかった。この原因についていくつか検証した。CTR 発生箇所から隣接実験室の出力窓までと同じ距離だけ加速器本体室内で大気中を輸送しても、測定された THz 強度はほとんど低下しなかった。このことから大気中を輸送する際の水蒸気による減衰は大きく影響しないことがわかった。次に、真空槽上部の石英光学窓での吸収を疑い、窓径が小さいが結晶石英の光学窓に交換し、さらにレーザーによる輸送経路のアライメントも丹念に行い輸送効率を調べた。これにより隣接実験室までの輸送効率は上がったが、予想した強度には達しなかった。取り外した石英光学窓の透過率も測定したが、これだけでは THz 光の輸送効率の低下を説明できなかった。CTR 後方放射は経路上に多くの鏡を組み合わせ集光もしたが

ら輸送しているため、輸送経路の光学設計とアライメントに問題がないか検討を行なっている[9]。また、THz 発生用標的までの電子ビーム軌道の調整により、発生した THz 光を輸送経路に導光する効率が改善できる可能性が考えられる。LEBRA には、PXR 発生用または THz 発生用の標的で発生する可視光領域の遷移放射を観測するシステムがあるので、これを利用して電子ビームの軌道調整と隣接実験室への輸送効率との関係を調べることを予定している。

6. まとめ

2016 年度の加速器稼働日数、クライストロン通電時間および電子ビーム加速時間は、例年よりも減少した。これはいくつかの部品の劣化・故障による交換およびそれに伴い必要となった調整や、電子銃の活性化およびエミッション特性試験などの結果である。特に、クライストロン 2 号機モジュレータのサイクロンが故障し交換したが、交換後のキープアライブ電流の調整に数ヶ月を費やした。

産業技術総合研究所と共同で進めてきた THz 光源の開発は、PXR ビームラインでの発生を重点的に行った。隣接実験室まで輸送された CTR 後方放射は加速器本体室で測定した強度の約 10 %程度しか輸送できなかった。考えられるいくつかの原因を検証した結果、電子ビーム調整と輸送経路のアライメントが重要であると考えている。今後は輸送経路の改良および調整を行っていく予定である。

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. Nogami *et al.*, “Status of Electron Linac and THz Source Development at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 1368-1370.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, Journal of Physics D: Applied Physics, 46 (4), 2013, 045104.
- [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] N. Sei *et al.*, “Development of coherent terahertz wave sources using LEBRA and KU-FEL S-band linacs”, Proceedings of FEL2015, Daejeon, Aug. 23-28, 2015, pp. 143-146.
- [8] K. Nakao *et al.*, “Measurement of Intensity Distribution of CSR in LEBRA PXR beamline”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp. 1006-1008.
- [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, Aug. 1-3, 2017.