

日大 LEBRA 電子線形加速器と THz 光源の開発

STATUS OF ELECTRON LINAC 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)}, 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)}, 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)}

^{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) operated approximately 1560 hr in 2015. The total electron beam acceleration time devoted to generation of FEL, PXR and terahertz-wave was approximately 645 hr, which is about 30 % shorter than that in 2014. The operation of the accelerator was stopped for a month due to breakdown of the water recirculating pump for the cooling tower system early in 2016. The development of the terahertz-wave transport line for users' experiments is underway in collaboration with AIST, the properties of the terahertz-waves generated at the downstream of the PXR generating system having been studied in detail for this purpose.

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) とパラメトリック X 線放射 (PXR) の共同利用を行っている。2004 年より近赤外 FEL (1300 ~ 6000 nm) および 5 ~ 34 keV の PXR の利用が進められてきた[1]。また、2006 年より非線形光学結晶を用いた可視光領域の高調波 (400 ~ 1200 nm) を[2]、2012 年より FEL ラインで発生する THz 光[3,4]の利用実験も行われている。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 年中頃から、使用している 2 台のクライストロンのうちクライストロン 1 号機の RF 出力窓での放電が頻発し、RF パルス幅 20 μ s で電子ビームを加速することが困難となった。クライストロンを交換したが、約 1 年後に RF 出力窓で再び放電が頻発した。そこで、RF パルス幅を狭めること (12 ~ 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

2015 年度の月別加速器運転時間の推移を Figure 1 に示す。図には各月のクライストロン 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) が示されている。2015 年度における稼働日数は 172 日、加速器運転時間は約 1560 時間、電子ビーム加速時間は約 645 時間であった。稼働日数は前年とほぼ同じであるのに対し、加速器運転時間は約 200 時間、電子ビーム加速時間では約 300 時間減少している。8 月は、例年夏期休業

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が短くなっている。さらに 2016 年 1 月、冷却塔冷却水循環ポンプの羽根車が、モーターシャフト固定部で破損し、これの交換修理と運転再開までに約 1 ヶ月を要した。そのため 1 月および 2 月の運転時間が他の月より短くなっている。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。2013 年 9 月に頻発したクライストロン 1 号機 RF 出力窓での放電以来、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。RF 出力窓での放電の頻度が減少するように、利用実験以外の稼働時間の多くはクライストロンのエージングに時間を費やしている。特に FEL 利用においては、本来 RF パルス幅 20 μ s で電子ビーム加速を行いたい、パルス幅を狭めると放電頻度を抑えられることから、RF 出力窓での放電頻度を減少させ、かつ FEL 発

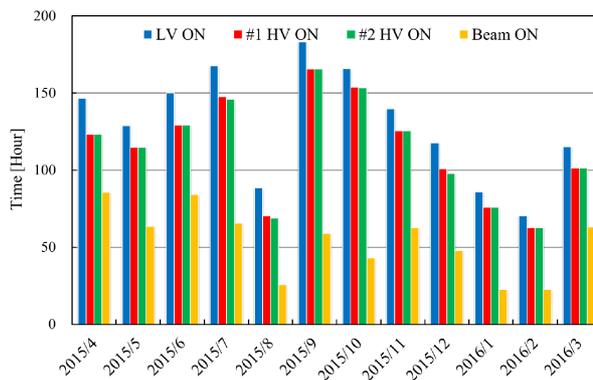


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystron, and the beam acceleration, respectively.

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

振が可能な範囲で RF パルス幅を狭めている。しかし、PXR や THz の利用に比べて RF パルス幅が広いため、クライストロンの高圧は印加開始からエージングを兼ねて徐々に既定電圧まで昇圧させ、その後電子ビーム加速を開始している。このため、電子ビーム加速時間の割にはクライストロンの通電時間が非常に長い。また、THz 光利用のための稼働時間の割合は前年とほぼ同じであるが、PXR 発生用ビームラインで発生する THz 光の基礎研究の調整・試験運転時間が増加している。

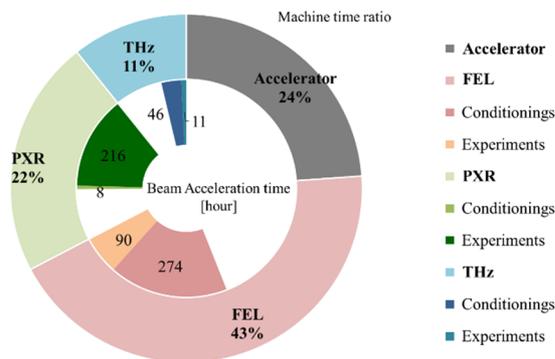


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) spent for each application.

3. PXR-THz 光の輸送ライン

2010 年から産業技術総合研究所と共同で THz 光源の開発を進めている[3, 4]。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 0.1~0.3 THz のコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) を取り出す THz 光専用ビームラインを整備し、隣接実験室での利用を可能にした[5, 6]。さらに 90° 電子ビーム偏向系ではバンチ磁気圧縮効果を用いバンチ圧縮が可能であり、PXR 発生ビームラインの電子ビームは FEL アンジュレータへの入射前電磁石の位置に比べて短バンチにできるため、より短波長の THz 光が期待できる。基礎研究の結果、FEL アンジュレータ入射ビームラインより高強度で 0.1~2 THz の光が観測され、PXR 発生ビームラインの電子ビームは THz 光源として十分期待できることがわかった[7, 8]。ここで、Figure 3a に PXR 発生ビームライン上の複数の THz 光源から発生した THz 光の輸送ラインを示した。光源として期待される THz 光は、ビームダンプ上流に設置されている 45° 偏向電磁石で発生する CSR に加えコヒーレントエッジ放射 (CER)、さらに PXR 発生用標的結晶 (Si) またはその下流に新たに設置した標的 (Ti 箔: 厚さ 50 μm、直径 40 mm) で発生するコヒーレント遷移放射 (CTR) である。2016 年 4 月、これらの THz 光を X 線輸送ラインに導光するため、PXR 発生装置の下流にある真空槽を改良した (Fig. 3b, 3c)。CSR、CER および Ti 箔からの CTR 前方放射は、凹面鏡 (Fig. 3b①) および X 線輸送ライン上の平面鏡 (Fig. 3b②) で反射させ X 線輸送ラインへ導光している。また Ti 箔で発生する CTR 後方放射は、その上部の光学窓から取り出し、大気中を放物面鏡と平面鏡を用いて、真空槽上部の光学窓に入射し、真空槽内部の平面鏡 (Fig. 3b③) で X

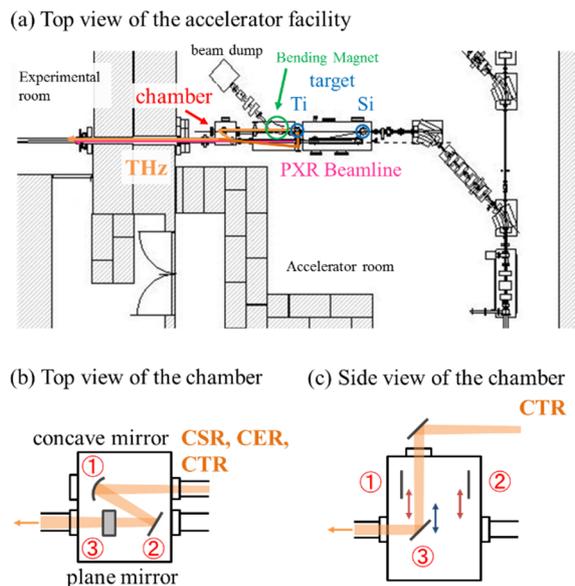


Figure 3: (a) Top view of the accelerator facility illustrating the positions of the sources and transportation lines of the terahertz-waves. (b) Top view and (c) side view of the chamber for terahertz-wave guiding optics.

線輸送ラインへ導光している。上記の 2 経路は、それぞれの鏡を上下に移動させることで切り替えることが可能である (Fig. 3c)。現在、真空槽内の 2 つの平面鏡はアルミ蒸着ガラス鏡を使用しているため X 線は透過しない。しかし、THz 光輸送システムの基礎測定を行ったあとは、これらを PXR が透過するアルミナイズドマイラに変更し X 線との同時輸送を可能にする予定である[9, 10]。さらに、Ti 箔を標的として発生させる CTR 後方放射は、大気中を輸送しているため、1 THz 付近の光が大気中に含まれる水蒸気による吸収を受ける。この影響を低減するため輸送経路の改良も検討している。

4. 装置の故障

4.1 クライストロン用集束コイルの電源

2015 年 12 月、冷凍機とクライストロン補助電源系の電力が運転中に遮断した。原因は即座には判明しなかったが、調査している際にクライストロン用集束コイルの電源が 4 台故障していることがわかった。このうち電源が入らないものが 1 台、電源は入るが冷却ファンが動作しないものが 3 台あった。これらの予備は保有していなかったため、代替電源を KEK から一時借用し、対応した。

4.2 冷却塔循環ポンプ

2016 年 1 月半ば、冷却塔循環水サブライヘッダーへの冷却水流量が急激に減少した (Fig. 4 上図)。これは冷却塔循環ポンプのモーターシャフトと羽根車の連結部が破損し (Fig. 4 下図の赤い矢印)、羽根車が空回りしたことが原因であった。このシャフトおよび羽根車の交換修理に約 1 ヶ月を要し、この間加速器の運転を停止しなければならなかった。そのため 2016 年 1 月および 2 月の

運転時間が他の月よりも少なくなっている。

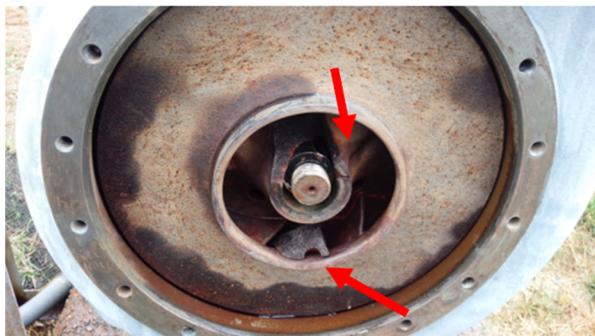
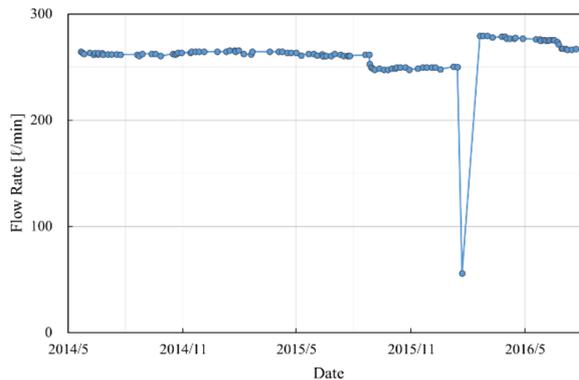


Figure 4: The graph shows the record of the water flow rate from the cooling tower to the supply header. The arrows in the photograph indicate the vane wheel and the broken part in the cooling water recirculating pump.

5. まとめ

2010年から産業技術総合研究所と共同で進めてきたTHz光源の開発研究では、2012年にFELアンジュレータ入射ビームラインで発生するTHz光(CSR)を、さらに2016年にはPXR発生ビームラインで発生するTHz光(CSR, CER および CTR)を隣接実験室に導光するための光輸送ラインを整備した。PXR発生ビームラインにおいては、より短バンチの電子ビームから発生する短波長のTHz光が実験に利用可能となった。今後、THz光を大気中を輸送する際の水蒸気による吸収を低減するための対策や、X線との同時輸送を可能にする改良を行う予定である。

LEBRAに加速器設置以来使用している装置の故障が相次いだ。クライストロン用集束コイルの電源は、共同研究機関であるKEKから同じ電源を借用し対処することができた。しかし、冷却塔循環ポンプのシャフトおよび羽根車の修理には約1ヶ月要し、共同利用運転の時間を削減する結果となった。

参考文献

- [1] K. Nogami *et al.*, “Status of Electron Linac Operation and Light Source at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, pp. 365-367.
- [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.*, “Characteristics of the transported terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, Proceedings of FEL2014, Basel, Aug. 25-29, 2014, pp. 541-544.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Y. Hayakawa *et al.*, “Concept Design of a THz Beamline Superimposed on an X-ray Beamline at LEBRA”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, pp. 1370-1374.
- [10] Y. Hayakawa *et al.*, “Development of the System Superposing THz-waves onto an X-ray Beam at the LEBRA-PXR Beamline”, The 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Makuhari, Aug. 8-10, 2016, this meeting.