

日大 LEBRA 電子線形加速器と光源の現状

STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION 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)}, 中尾圭佐^{A)}, 稲垣学^{A)}, 高塚健人^{A)}, 長島涼子^{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)}, 山本樹^{C)}

Kyoko Nogami^{#,A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Kento Takatsuka^{A)}, Ryoko Nagasima^{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)}, 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 1740 hr in 2014. The electron beam acceleration time was approximately 910 hr, which is about 10 % longer than that in 2013. The klystrons have been operated for some time at an RF pulse width of 12 – 16 μ s for user's experiments using free electron laser (FEL) in order to avoid frequent electric breakdown at the output RF window. Leakage was found in the ceramic vacuum tube which was located upstream of the the first regular accelerating tube in July 2014 and was recovered in October 2014. Based on the development of the terahertz-wave source that was begun in 2010 in collaboration with AIST, the coherent synchrotron radiation generated at the FEL electron beam line has been served for user's experiments since 2012. The properties of the terahertz-waves generated at the PXR line have been studied as shorter-wavelength terahertz sources.

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、2004 年より行っている。これまで近赤外 FEL (1300~6000 nm) と非線形光学結晶を用いた可視光領域高調波 (400~1200 nm) および 5 - 34 keV の PXR の利用が進められてきた[1]。また、2012 年度に THz 光の取り出しビームラインを整備し、基礎研究に加え THz 光を利用した応用実験も行われている[2-4]。リニアック電子銃のバーストモードビーム引出しが可能となったからは、通常のマクロパルスモード (フルバンチモード) とバーストモードの重畳加速による高い FEL 発振強度を利用した実験も行われている。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

Figure 1 に 2014 年度の月別加速器運転時間の推移を示す。図で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)、ビーム加速時間 (黄) が示されている。例年 8 月は夏期休業があり、この時期を利用してメンテナンスなどを行うため、他の月より運転時間が短くなっている。また、2014 年 10

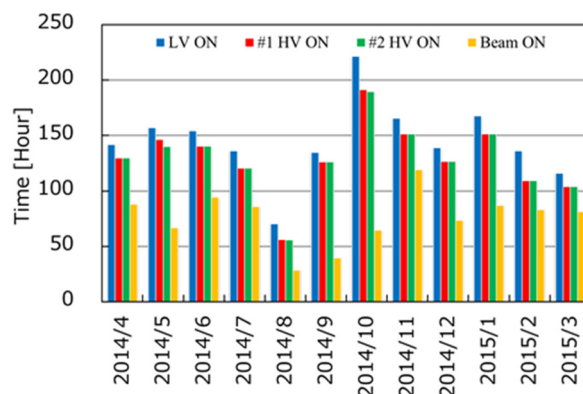


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystrons, and the beam acceleration, respectively.

月にクライストロン通電時間および高圧印加時間が増加しているが、これは2013年に起きたクライストロン1号機RF出力窓での頻繁な放電が再発し、クライストロンエージングに時間を費やしたためである。もともとRFパルス幅の短いPXR発生では利用実験に支障がなかったが、FEL発生ではRF出力窓の放電頻度を減少させ、かつFEL発振が可能な条件を満たすようRFパルス幅を狭めることで利用実験

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

に対応し、実験の合間にエージングを継続した。

2014年度における加速器の稼働日数は180日、加速器運転時間は1740時間で、例年とほぼ同程度の稼働時間であった。さらに、電子ビーム加速時間は約914時間であった。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。2014年度はクライストロンのRF出力窓の放電が発生したもののユーザー実験を優先させたため、調整および利用時間は前年に比べて10%ほど増加している。また、PXRラインで発生するTHz光に関する基礎研究は試験・調整運転として行っているので、その時間が増えている。

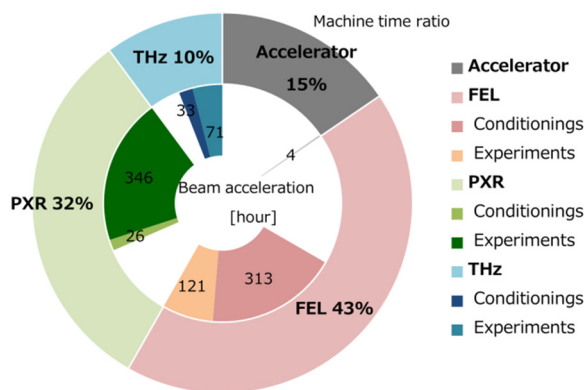


Figure 2: Share of the machine time for each application (outer circle), and the performance of the beam acceleration time spent for a variety of experiments (inner circle).

3. 電子線形加速器の真空トラブル

3.1 加速管の真空度

この約10年間、1本目のレギュラー加速管を真空に引いているイオンポンプ(ACC#1)の電流は他の箇所、特にその下流部3本目の加速管付近のイオンポンプ(ACC#2)の電流に比べて明らかに多かった。2014年7月のリーク探査の結果、バンチャー加速管下流のコアモニタ用セラミックダクト接合部でのリークが原因であることが判明した[1]。Figure 3に2014年6月以降のACC#1およびACC#2で得られた真空度の経過を示す。リーク部を特定した直後は、応急処置として真空用シリコングリースの塗布を試し効果はあったが、同年9月末に再び真空度が悪化したため、結局セラミックダクトを交換した。これにより以前と比べて1桁以上真空度が改善した。その後、緩やかな変化はあるものの、加速管の真空度は概ね良好に維持されている。

3.2 クライストロンRF出力窓の放電

2013年10月にクライストロン1号機を交換したが、2013年11月末にはRF出力窓の放電が頻発するようになった。RFパルス幅の狭いPXR利用実験は実施できたが、パルス幅20μsでのFEL発振は困難であったため、利用実験よりクライストロンのエージングを優先させた。約2ヶ月クライストロンの

エージングを行い、2014年1月末に漸く安定に動作するに至った。しかし、2014年9月末に再びクライストロン1号機RF出力窓での放電が頻発するようになった。RFパルス幅を短くすると放電の頻度が減少したので、このときにはRFパルス幅をFEL発振が可能な範囲で狭くし(12~16μs)、ユーザーの利用実験が継続できるよう対応した。また、ユーザー実験がないときはクライストロンのエージングに時間を費やした。その後、RF出力窓の放電はほぼ起こらなくなったのでRFパルス幅20μsで電子ビーム加速を行っている。2015年にもこのような現象が再発しており、同じような対応をしながら加速器を稼働させているが、この放電を繰り返す原因の究明が必要である。

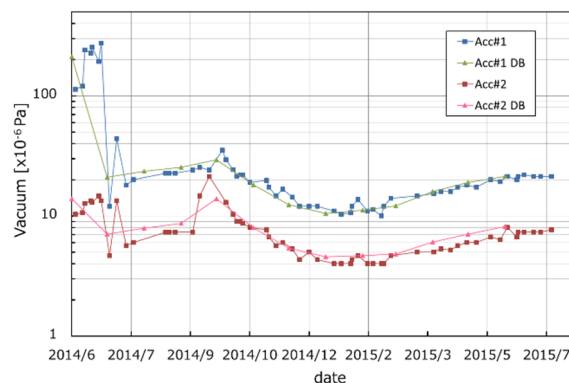


Figure 3: The behavior of the vacuum in the ion pumps obtained from the records of the ion pump currents. The data stored in the database (DB) system was averaged every 1 month.

4. PXRラインにおけるTHz光源の開発

4.1 放射過程と基礎研究

2010年から産業技術総合研究所と共同で進めてきたTHz光源開発においては、FELアンジュレータに電子ビームを導く45°偏向電磁石(Figure 4の赤丸で示す)で発生するTHz領域(0.1~0.3 THz)のコヒーレントシンクロトロン放射(CSR)の利用に向けて、専用の取り出しビームラインが2012年に整備され、THz光をFEL輸送ラインに導光することで実験室での利用を可能にした[4,5]。さらに、PXR発生装置の前後にある45°偏向電磁石(Figure 4の緑丸で示す)でもCSRは発生しており、現在これを新たな光源として整備することを目指している。PXR発生ライン上の電子ビームは、入射ラインのバンチ磁気圧縮効果を用いて、FELライン入射前に比べて短バンチに出来るため、より短波長のTHz光が期待できる。また、予備的な実験結果としてTHz光の強度は予測の数倍あり、FEL入射ラインより高強度であった。これはCSRに加えコヒーレントエッジ放射(CER)も混合して観測されたことが原因であると考えられた。そこで、様々な条件の下で偏光の違い

による空間分布の振る舞いを測定することによって、THz 光発生箇所に対応した放射過程（CSR または CER）の同定を試みたが、まだ明確な結果は得られていない[6]。

PXR ラインでは偏光電磁石で発生する CSR（または CER）以外に、電子ビームライン上にターゲットとなる結晶を挿入することで遷移放射（CTR）による THz 光を発生させることができる（Figure 4 の青丸の位置）。そこで、PXR 用 Si ターゲットで発生する CTR に加えて、その下流にあるスクリーンモニタを流用して新たなターゲットを設置し、ここで CTR による THz 光の発生を可能にした[7]。ターゲットには Ti 箔（厚さ 50 μm 、直径 40 mm）を採用している。

4.2 実用化に向けた整備

初期の基礎実験の結果から、PXR ラインで発生する THz 光は光源としての利用が十分期待できる。しかし、現状では THz 光の強度や空間分布などの基礎特性の測定は加速器本体室に検出器を設置して行っているため、このままでは様々な利用実験への実用化が難しい。そこで、偏向電磁石および Ti 箔で発生する THz 光を、PXR 発生装置の下流にある真空槽を改良し PXR 輸送ラインに導光することを検討している[8,9]。また、PXR 用 Si ターゲット結晶で発生した THz 光は、X 線反射用結晶（第 2 結晶）で反射させると PXR 出力ポートから取り出せる。そこで、2015 年 2 月、Ti 箔を設置するとともに PXR 発生装置出口に集光用ホーンを取り付け基礎実験を進めている。今後、基礎実験とともに利用に向けた整備を進めていく予定である。

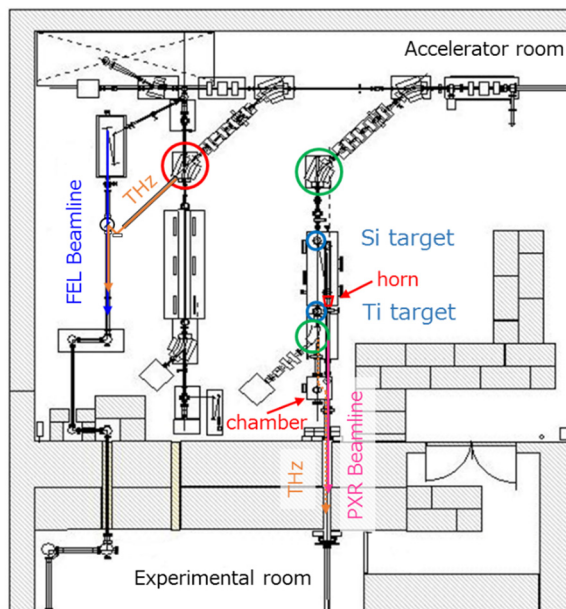


Figure 4: Top view of the accelerator facility illustrating the position of the sources and the transportation lines of the terahertz-waves.

5. まとめ

2014 年 7 月に 1 本目加速管の上流にあるセラミックダクトにリークが発見され、同年 10 月初めに交換を行った。これにより加速管の真空度は、以前の真空度より 1 桁以上改善され、現在では緩やかな変化はあるものの良好な真空度が維持されている。また、2013 年に交換したクライストロン 1 号機の RF 出力窓での放電が、2014 および 2015 年の一時期にも頻発し、解消するまで数ヶ月エージングに費やすことになった。この期間は RF パルス幅 20 μs で電子ビーム加速が困難になったが、RF パルス幅を狭くすることによって FEL 利用実験に対応した。

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 年から FEL ラインで発生した THz 光（CSR）の利用実験に活用されている。短バンチの電子ビームからの THz 光発生が可能な PXR ラインでは、より短波長の THz 光（CSR、CER および CTR）が発生しており、今後、光源としての利用を目指し整備を進める予定である。

参考文献

- [1] K.Nogami et al., "STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.380, 2014
- [2] N.Sei et al., "Development of Intense Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiations at LEBRA", Proceedings of FEL2012, p.480, 2012
- [3] N.Sei et al., "Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA", Journal of Physics D: Applied Physics, 46, 045104, 2013
- [4] N.Sei et al., "Characteristics of the transported terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA", Proceedings of FEL2014, p.541, 2014
- [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, p.2150, 2014
- [6] 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, p.1006, 2014
- [7] N.Sei et al., "Development of coherent terahertz wave sources using LEBRA and KU-FEL S-band linacs", submitted to FEL2015, 2015
- [8] 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
- [9] Y.Hayakawa et al., "Project of the superposing beamline for parametric X-ray radiation and coherent transition in THz region at LEBRA", RREPS-15 (2015)