

日大 LEBRA 電子リニアックの現状と光源利用

STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AND APPLICATION OF 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)}, 佐藤勇^{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^{D)}
 Kyoko Nogami^{#,A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Isamu Sato^{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^{D)}

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

^{B)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

^{C)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{D)} Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Variety of users' experiments using near-infrared free electron laser (FEL) and parametric X-ray (PXR) have been conducted at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA). The 125-MeV electron linac operated approximately 1740 hours in 2012, which is almost the same as that in 2011. Nearly a month was spent to recover unstable electron gun emission, which was found caused by a mistake in fabrication of the capacitive area in the matching load circuit for the grid-pulse coupler. In terms of the light source, the FEL resonator mirrors with the smallest curvature radius ($R = 3.5$ m) at LEBRA were installed in place of the mirrors with $R = 3.7$ m which developed damages on their surfaces during the use over than 3 years. The new mirror configuration is expected to reduce the damage around the FEL coupling hole because of lower electric power density on the mirror surface. The optical beam line for terahertz-wave coherent synchrotron radiation was developed in collaboration with AIST. Generation of the PXR beam with the X-ray energy of 60 keV was tested by using a diamond single crystal.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) の 125 MeV 電子線形加速器およびそれ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 (PXR) は、2004 年の利用開始以来、これまでに近赤外 FEL と非線形光学結晶を用いたその可視光領域高調波、5 - 34 keV の PXR を光源としておもに学内の共同利用が進められてきた^[1]。2012 年度における 125 MeV 電子リニアックの稼働日数は 171 日であった。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つてからは、通常のマクロパルスモード (フルバッチモード) 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が多く行われている。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

Figure 1 に 2012 年度の月別加速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時間を要するメンテナンスや工事を行っているため、他の月より運転時間が短くなつて

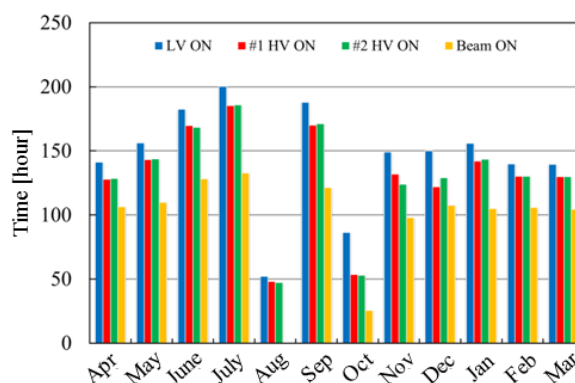


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of energization of the klystron heaters, the high voltage applied on the klystrons, and the beam acceleration, respectively.

いる。特に 2012 年度は、THz 光取り出し専用ビームラインの整備を行ったためビーム加速は行わなかった。さらに、10 月に FEL 共振器ミラー、電子銃カソード交換を行った。この際 9 月末に突然発生した電子銃引出電流変動の原因解明および電子銃の活性化に時間を費やしたことから、他の月に比べて加速器稼働が短くなっている。この期間を除くと概

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

ね順調に 140~200 時間の運転が実施されていることがわかる。加速器の運転日数は 171 日、加速器運転時間数も 1740 時間と前年度とほぼ同程度に稼働した。しかし、利用実験有料化前に比べて短くなっている。

Figure 2 に、利用目的別に実際に利用された時間の割合を示す。2010 年度末に、電子銃回路改造によるバーストビーム引出しとビーム加速が可能となり、このモードによる FEL 発振を利用した実験も増えている。しかし、FEL の安定した供給には、加速器本体の状態が大きく影響するので、PXR に比べて調整のための時間が多く、利用実験とほぼ同程度に必要なとなっていることがわかる。また、PXR は比較的安定に供給ができるようになったことから、その調整にほとんど時間をかけていないこともわかる。

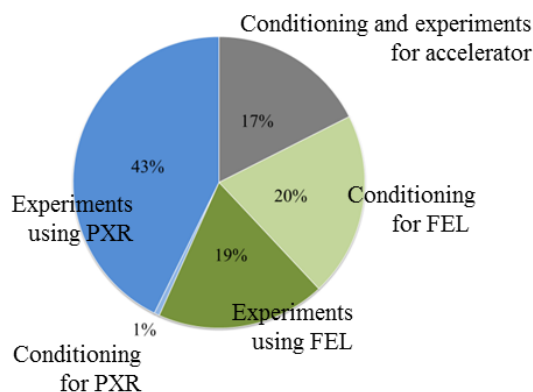


Figure 2: The machine time ratio for each operation purpose.

3. リニアック電子銃

3.1 電子銃エミッション電流の安定度

2012 年 9 月末に、電子銃エミッション電流の大きな変動が起きるようになった。これにより特に FEL の安定供給が難しくなったことから、この変動の原因として電子銃カソードの劣化を疑い、10 月はじめに電子銃のカソードの交換を行った。しかし交換後、試験運転においてエミッション電流の変動に改善が見られなかった。そこで、さらに詳しい調査を行った結果、エミッション電流の変動は、グリッドパルスカプラーの絶縁同軸ダミーロードでの絶縁不良が原因であることが判明した。フランジのプラスチックネジの下でカプラー絶縁部にバリがあり、終端用の抵抗とグラウンドが不安定に接触していた (Fig. 3a, 3b)。このためリーク電流が発生することによってグリッドバイアス電圧が不安定な低下を示し、エミッション電流の変動を発生させていた。Figure 3c に示すようにこのバリを除去して電気的な絶縁状態が保たれていることを確認し、その後はエミッション電流の安定度が元の状態に戻った。

3.2 パルス内での電子銃エミッション電流変化

電子銃カソード交換の際、カソードフランジ取り

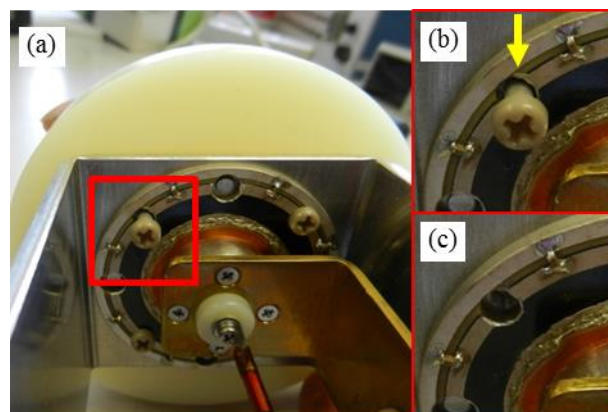


Figure 3: Photograph of the gun grid pulse coupler. (a) The dummy load of the grid pulse coupler. (b) A burr (yellow arrow) found under the plastic bolt head. (c) After the removal of the burr.

付けの不具合からスローリークが発生し、真空度の回復に長時間を要した。また、3.1 節の調査のために大気暴露をやり直したことから、カソードの再活性化も必要となった。

交換後のカソードは、それまでと同じ EIMAC の Y646B であるが、エミッション特性が大きく異なることがわかった。パルス幅 50 μ s のマクロパルスによる従来のフルバンチモードでは、エミッション波形には特に以前のカソードとの違いが見られなかった。しかし、バーストモード加速のため高速グリッドパルスの重畳を行うと、マクロパルス内におけるエミッション電流の減衰が顕著にみられるようになった。以前のカソードでは、パルス先頭の数 μ s で小さな減衰が見られたものの、その後は平坦であった。この違いは、カソードの大電流取出し特性の違いによるものと考えられる。

バーストモードでの電流減衰は、高速グリッドパルス電圧を下げ、バーストビーム電流を抑制することで軽減できることから、FEL 発振に利用可能なバーストビーム引出しの条件を探り、以下のようにほぼ許容できる電子銃動作パラメータを決定することができた。高速グリッドパルスの出力電圧は 100 - 160 V の範囲で変えられるが、それでは高過ぎたため、グリッドパルスカプラーの高速グリッドパルス入力コネクタに 10 dB 同軸減衰器を取り付けた。この効果として、Figure 4a に示すようにフルバンチモード (マクログリッドパルス電圧 53 V) のビームパルスの立ち上がりが遅くなる問題が発生した。これは直列に挿入されていた DC カットの特性が原因で、日本高周波製 DC カット DB-N-01 (2 - 8 GHz) に交換したところ、フルバンチモードのビームパルス立ち上がりと平坦度は元に戻った (Fig. 4b)。しかし、これにバーストモード (高速グリッドパルス電圧 100 V) を重畳させると、やはり高速グリッドパルスによるエミッション電流は減衰が大きく、加速ビームのエネルギー平坦度を悪化させていた (Fig. 4c)。そこで、DC カットを元の PASTERNAK 製 PE8213 (10 MHz - 18 GHz) に戻し、Fig. 4a のフル

バンチモード波形と Fig. 4c のバーストモード波形の重畳を行わせ、そのタイミングを調整することで、結果的にビーム電流を平坦化し、平坦な加速エネルギーを実現することにした。その結果が Fig. 4d に示されている。長期的な観察から、電子銃カソード周辺の真空度の改善とそれに伴う電子銃カソードの状態の変化に応じて、エミッション電流の状態も顕著に変化することがわかった。このため、エミッション電流の変化に応じて電子ビーム引出しを行うタイミングを調整、高速グリッドパルスの減衰率および高速グリッドパルスの電圧を変更することで、パルス内でのエネルギー変化の少ない電子ビーム加速を行っている。

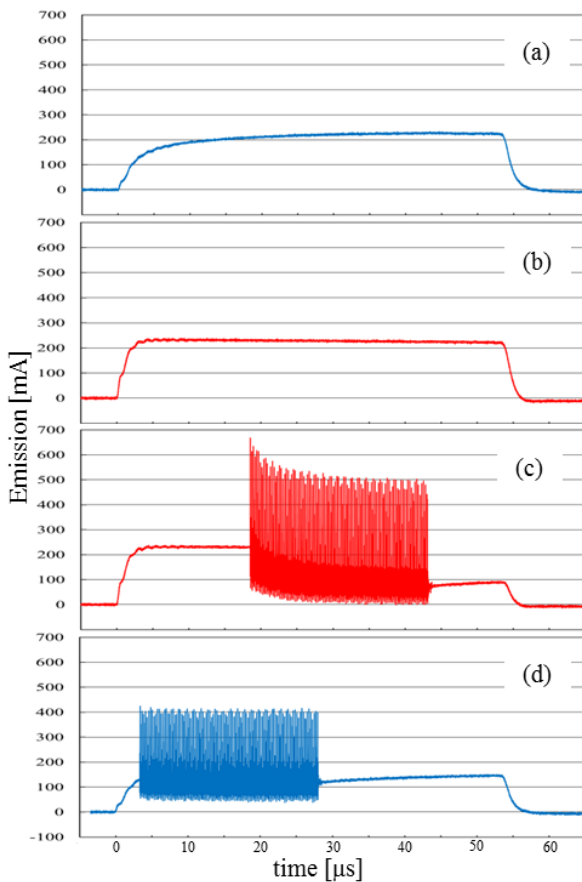


Figure 4: Change in the gun emission current waveform. (a) and (b) show the macropulse emission waveforms with different DC cuts at the input connector for the high-speed grid pulse. (c) and (d) show the emission waveforms when the high-speed grid pulse train was superimposed on the macropulse. The waveforms in different colors mean that they were resulted from the emission measurement using different DC cuts. An attenuator of 10 dB was inserted in series at the input connector for the high-speed grid pulse.

4. 光源の整備

4.1 THz 光源用ビームラインの整備

2010 年から LEBRA における THz 光源の利用を目的として、産業技術総合研究所が主体となって基礎研究を行ってきた^{[2][3]}。2012 年 8 月の夏期メンテナンスに合わせて、THz 光源のための専用の取り出し光ビームラインを整備した。取り出された THz 光は、FEL 輸送ラインに入力し実験室に輸送することができる (Fig. 5)。これにより、THz 光と FEL の同時利用が可能となった。

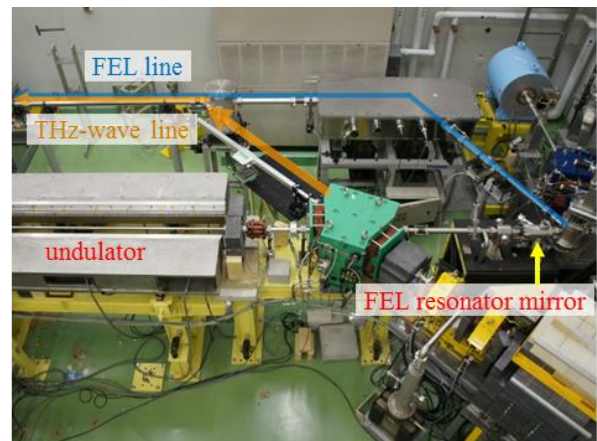


Figure 5: The beam line for the extraction and transportation of the terahertz-wave coherent synchrotron radiation.

4.2 ダイヤモンド単結晶を用いた PXR 発生

LEBRA では、X 線利用実験のためにシリコン単結晶を用いて 5 - 34 keV の PXR を発生させ提供しているが、より高エネルギーの X 線を発生させるためにダイヤモンド単結晶 (C(400)) を発生用標的結晶として用いて PXR の発生を試みた。その結果、約 60 keV の X 線発生が確認された^[4]。照射実験終了後のダイヤモンド単結晶は、電子ビームが照射された場所が黒く変色し、結晶が割れていた。わずか約 2 週間の実験で標的結晶に激しい損傷が生じていた事実から、ダイヤモンド結晶を用いて高エネルギー X 線を実際に利用するには、結晶の強度に関して今後研究の必要性が示唆される。

5. 故障およびメンテナンス

2012 年は、長期間の加速器停止を余儀なくされるほどの深刻な故障は起こらなかった。しかし、対応に 1 日程度かかる故障およびメンテナンスがいくつかあった。たとえば、クライストロン 2 号機の集束電磁石電源の故障は、代替品を用いて応急処置をすることで利用実験に対応した。その後、正規の部品で修理を行った。

また、いずれ深刻な問題になることが予想されるものについては、夏期メンテナンスで対応した。イオンポンプの自己ガス放出と考えられる真空度の悪

化により、イオンポンプが停止するという事象がたびたび起こっていた。そこで、特に頻度の高いクライストロンと加速管を繋ぐ導波管および PXR チェンバの排気を行っている計 3 台のイオンポンプの元素交換を行った。イオンポンプからの自己ガス放出と思われる深刻な真空度の悪化頻度は格段に減り、高い真空度を保ち、頻繁に停止することがなくなった。そのほかのイオンポンプについても、今後、必要に応じて順次元素交換を行う予定である。

5.1 クライストロン電子銃碍子の汚れ

2011 年に発生した地震の影響によりクライストロンアセンブリタンク内での放電が増え、クライストロン電子銃碍子の表面への汚れ付着が目立つようになった。そのため、2011 年の夏期メンテナンスの際に碍子表面の清掃およびタンク内の絶縁油の交換を行った。しかし、クライストロンアセンブリタンク内の放電数は減ったにも関わらず、わずか 1 年でクライストロン 2 号機の電子銃碍子表面への顕著な汚れ付着が確認できたため、2012 年夏期メンテナンスにおいて清掃を行った。絶縁油は耐圧試験を行い問題がなかったので、清掃前のものを再びタンク内に戻し使用している。今後引き続き、クライストロン 2 号機の碍子表面の経過観察が必要である。さらに、クライストロン 1 号機にはこのように短期間で碍子表面に汚れが付着する現象は見られなかったので、2 号機に関して根本的な原因解明が重要であると考えられる。

5.2 FEL 共振器ミラーの交換

2011 年に点検用ビューポートを通してミラーが劣化していることが確認されていた^[1]。そこで、2012 年 10 月に FEL 共振器ミラーの交換を行った。近年、バーストモードビームを用いた FEL 発振が可能となり、バンチ当たりの光強度が増大したことがミラーの劣化を早めている可能性が考えられた。そこで、ミラー交換の際には LEBRA において曲率半径が 3.5 m と最も小さい共振器ミラーを導入した。これにより、ミラー表面上でのエネルギー密度が下がり、上流側の光取り出し用結合孔（直径 0.8 mm）周辺の損傷が軽減できると期待している。

6. まとめ

2012 年度は、加速器を長期間停止しなければならぬ大きな故障は発生しなかったものの、不安定なエミッション電流の原因究明および電子銃カソード交換に伴う試験運転に長時間を費やした。一方、新たに THz 光の利用が可能となったことから、利用実験分野の広がりや実験件数・利用時間の増加を期待している。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., "STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AND APPLICATION AT NIHON UNIVERSITY", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11,

- 2012
 [2] N.Sei et al., "Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA", Journal of Physics D: Applied Physics, 46, 045104, 2013
 [3] N.Sei et al., "Development of Intense Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiations at LEBRA", Proceedings of FEL2012 (The 34th International Free Electron Laser Conference), Nara, Aug. 26-31, 2012
 [4] Y.Hayakawa et al., "TEST OF DIAMOND SINGLE CRYSTALS IN THE PARAMETRIC X-RAY SOURCE BASED ON A DOUBLE-CRYSTAL SYSTEM", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 2-6, 2013