日本大学電子線利用研究施設の 125MeV 電子線形加速器と光源の現状

STATUS OF 125 MeV ELECTRON LINAC AND LIGHT SOURCE AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

野上杏子#, A), 早川恭史 A), 境武志 A), 住友洋介 A), 高橋由美子 A), 早川建 A), 田中俊成 A), 清紀弘 B), 小川博嗣 B), 古川和朗 C), 道園真一郎 C), 土屋公央 C), 吉田光宏 C), 諏訪田剛 C), 福田茂樹 C), 榎本收志 C), 大澤哲 C), 山本樹 C), 新冨孝和 C)

Kyoko Nogami #, A), Ken Hayakawa A), Toshinari Tanaka A), Yasushi Hayakawa A), Takeshi Sakai A), Yoske Sumitomo A), Yumiko Takahashi A), Norihiro Sei B), Hiroshi Ogawa B), Kazuro Furukawa C), Shinichiro Michizono C), Kimichika Tsuchiya C), Mitsuhiro Yoshida C), Tsuyoshi, Suwada C), Shigeki Fukuda C), Atsushi Enomoto C), Satoshi Ohsawa 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 715 h in 2020. The electron beam acceleration time was approximately 342 h. Though the machine operation time in term of the klystron heater power supplies decreased, the electron beam acceleration time was about 37 % longer than that in 2019. Since damages in the diodes in the back-diode circuit at the pulse modulator #2 were found causing shortening and voltage reduction of the output pulse, all the diodes and the capacitors in the back-diode circuits of both the pulse modulators were replaced with new ones to recover stable pulse outputs. Stable FEL lasing with the full-bunch mode beam was recovered after the replacement of the whole undulator magnets in 2020, and then the FEL power has increased gradually to nearly the same level as previously achieved.

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、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提供している。FEL は基本波 1300～6300 nm 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[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 0.1～4 THz で利用可能である[2-7]。2010 年に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 年の中頃からクライストロン RF 出力窓で放電が頻発し、クライストロン交換後も RF 出力窓での放電が運転上問題となっている。そこで特に長パルスが必要な FEL の場合、RF パルス幅 20 μs での運転が困難なときは RF パルス幅を狭めている（10～17 μs）。さらに、アンジュレータ永久磁石が入口から約 3 分の 1 の領域で減磁していることもあり、RF パルス幅を狭めて FEL 発振を行うときは、より安定な発振を得るためにバーストモードによる電子ビーム加速を行ってきた。2020 年 2 月にアンジュレータ永久磁石列を新規製作したものに交換した[8]。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

2020 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。2020 年度における加速器稼働日数は 102 日、クライストロン通電時間は約 715 時間、電子ビーム加速時間は約 324 時間であった。稼働日数および通電時間は前年度に比べ半減したものの、電子ビーム加速時間は約 37 % 増加した。稼働日数および通電時間の減少は、2020 年 4 月から約 2 ヶ月間、新型コロナウィルス感染拡大防止のため入校制限が実施されたことに加え、入校制限の解除直後にモジュレータ室の空調機室外機が故障し修理完了までにさらに約 1 ヶ月かかってしまったことが挙げられる。

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。2020 年 2 月にアンジュレータ磁石列を更新し FEL 試験運転を重点的に行い、このため 2020 年度のクライストロン通電時間の約 6 割が利用実験を含む FEL 発振のための運転となった。2013 年から RF 出力窓での放電が問題となっていたが、放電が発生すると即座に RF を停止し、後続パルスは放電が発生したタイミングのパルス幅で RF を再投入、RF パルスのトリガ合わせて徐々に元の RF パルス幅に広げる保護システムを導入した[9]。これにより、クライストロンエージングとして費やした時間が減少したが、長パルスを必要とする FEL 運転の時は、エージングも兼ねてクライストロンを所定の電圧まで徐々に昇圧しているため、電子ビーム加速時間の約 2 倍の通電時間を要した。2020 年 12 月、利用実験中クライストロン 2 号機の RF 出力電力が突然低下した。パルスモジュレータ放電部の

nogami@lebra.nihon-u.ac.jp

バックダイオード回路のダイオードの一部が故障したことが原因であったが、回路素子の定格電力を超える可能性があるため繰返しの高い運転が困難になった。そのため X 線照射の積分時間を確保しなければならない繰返しの高い PXR 調整・利用実験（PXR ラインを使用した THz 調整・利用実験も含む）は 2 号機の修理が完了するまで控えたため時間が減少した。

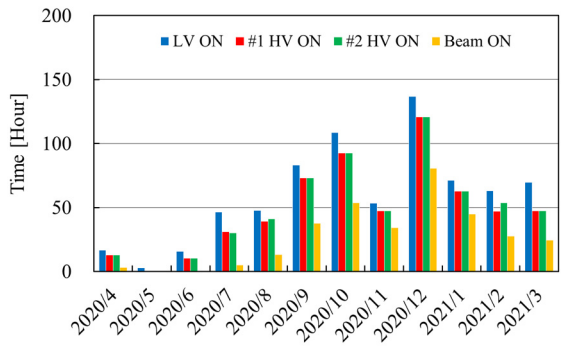

Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystrons and the beam acceleration, respectively.

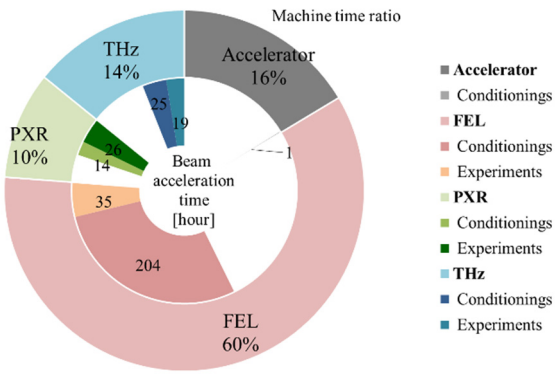

Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

3. 故障機器・更新工事

3.1 パルスモジュレータ放電部バックダイオード回路の故障

2021 年 2 月 THz 利用実験中に突然クライストロン 2 号機の RF 出力電力が低下した。所定の高圧を印加しても RF 出力電力が戻ることはなかった。利用実験を続行するため、RF 出力電力が低いままで実験を再開したが、出力電力低下前より低いエネルギーで電子ビーム加速を行わなければならなくなった。その後の調査で、パルスモジュレータ放電部のバックダイオード回路のダイオードの一部が完全に導通状態となっていることがわかった。

パルスモジュレータはクライストロン放電時の反射電力やサイクロトロンがオフした後に生じる大きな逆電圧パルスを抑えるため、回路全体を保護するバックダイオード回路が取り付けられている[10]。この回路は 20 個の直列接続されたダイオードに、並列接続された 3 本のセラミック抵抗器を直列に接続して 1 組となっている。これを 3 組並列に接続することで逆電圧とジュール損失容量を確保するように設計されている。2000 年 4 月にこの回路で放電が発生しダイオードとセラミック抵抗器の一部が破損したので交換されている[11]。今回の調査で 1 台のパルスモジュレータのバックダイオード回路に使用しているダイオード 60 個のうち 1 号機は 13 個、2 号機は 31 個が導通状態にあった。さらに 2 号機にいたってはダイオード列 1 列 20 個すべてが完全に導通状態となったため、RF 出力電力が低下したと思われる。このとき赤外線カメラによる測定で、20 個すべてが通電状態となったダイオード列と直列接続されたセラミック抵抗器 3 本のそれぞれの温度が約 100 ℃に達していた。そこで 2021 年 5 月からすべてのダイオードを SEMIKRON 製 SKNa 22/50 に、ダイオードと並列接続のコンデンサーも KEMET 製（容量 47 nF）のものにすべて交換した。修理完了後、2 号機は所定の RF 出力電力まで回復し、さらにセラミック抵抗器の温度は室温より大きく上昇しないことが確認でき、現在は通常運転が可能となっている。

3.2 クライストロン RF 出力電力

2013 年頃にクライストロン 1 号機 RF 出力窓での放電が頻発し、所定の RF パルス幅 20 μs での運転が困難となり、利用実験を優先するため RF パルス幅を狭めて対応してきた。クライストロンの交換で一旦は RF パルス幅 20 μs での運転が可能となったが、2018 年 9 月に再び RF 出力窓での放電が発生した。エージングに多くの時間を費やし 1 号機に関しては放電頻度は減少し、所定の RF パルス幅・出力電力まで回復した。しかしその後、2 号機でも同様に RF 出力窓での放電が発生した。RF 出力窓の放電は、窓材のセラミックで起きたマルチパクタによる放電と考えられる。放電対策として、クライストロン出力窓周辺の真空排気の強化や放電発生時の保護回路システムを導入してきたが、2 号機に関しては現在も所定の RF 出力電力では放電頻度が増加するので、高エネルギーの電子ビーム加速や FEL 発振に支障をきたさない程度で可能な限り RF 出力電力を下げて運転を行っている。

放電の引き金となるセラミック窓の損傷の原因として、過剰な RF 電力の出力が疑われた。そこで、使用しているマイクロ波検波器と新たにパワーメータで RF 出力電力が同時測定できるようにパワースプリッタで分岐し、得られた結果を Fig.3 に示す。ただし、マイクロ波検波器で得られた出力電力は、2002 年 5 月に較正されたもので換算しており、その後数回行われた較正結果はほどんど変化していない。クライストロン 1 号機・2 号機ともにマイクロ波検波器とパワーメータでの RF 出力電力が異なっていた。クライストロンは高エネルギー加速器研究機構（KEK）から移管されたもので、最大 40 MW（RF パルス幅 4 μs）まで出力可能だが、LEBRA では KEK より長パルスで運転しているため、最大 RF 出力電力 20 MW 程度で使用している。クライストロン交換後のエージングでは、マイクロ波検波器で得られた出力が 20 MW になるよう高圧を印加していた。しかし、実際に出力している RF 電力がパワーメータの結果に近い場合、明らかに 20 MW を超え

ていることになる。これがセラミック窓の損傷の原因になっている可能性もあるので、今後より詳細な調査が必要である。現在は、RF 出力窓の放電対策も兼ねて、パワーメータで得られる RF 出力電力を基に 20 MW を超えないよう加速器運転を行っている。

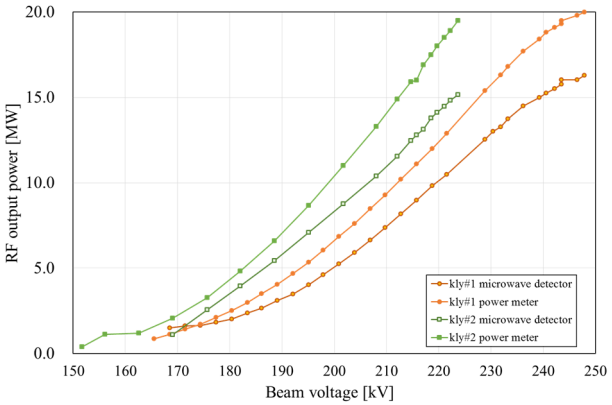

Figure 3: RF output power of the klystrons measured by the microwave detector and power meter.

3.3 その他の故障

2020 年 6 月加速器運転を再開したが、モジュレータ室の空調が効いておらず室温が通常より高かった。夏季を迎えるということもあり、モジュレータ室の室温上昇は機器故障につながる可能性を考え、空調機の修理完了までは加速器運転を停止した。空調機の故障は、室外機からの冷媒漏れが原因であったが、その故障箇所の特定および修理部品の調達に時間がかかり運転停止期間は約 1 ヶ月に及んだ。

FEL45° 偏向系に設置してあるスリット幅測定用の可変抵抗器を交換した。取り付け後の動作確認中にスリットのモータ配線から火花が出た。通常スリットは最大幅に広げているが、モータに通電しないとスリットがゆっくりと狭まってしまうため速やかに修理した。

4. FEL 発振強度の改善

2020 年 2 月、文部科学省 Q-LEAP 予算によりアンジュレータ永久磁石列を耐放射線（熱耐性）の高いネオジウム・鉄・ボロン系焼結磁石に交換した。今後の運転で放射線による減磁を避けるため、アンジュレータ上流部の放射線遮蔽壁を強化し、さらに運転中に放射線強度を常時モニタできるように小型シンチレーション検出器を設置した[12]。Figure 4 に 2004 年 4 月以降、得られたマクロパルス当りの FEL 発振強度を示す。一部調整中のデータや高調波の強度を含み、途中の光学素子による吸収やクライストロン RF パルス幅の違いによる補正はしていない。2012 年に曲率半径 3.5 m の共振器鏡に交換した頃から、フルバンチモードによる FEL 発振強度は RF パルス幅が狭い時期が多いことを考慮しても、それ以前までに得られた程度まで回復しなかった。また、パルス毎の FEL 発振強度が安定せず、利用実験の実施を優先するためより安定なバーストモードによる FEL 発振を多用した。これら発振強度の低下や不安定性はアンジュレータ永久磁石の減磁が原因であったと考えられる。磁石列を交換後の試験運転では、フルバンチモードによる FEL 発振が安定したことで、電子ビームの加速条件の調査が進んだ。Figure 5 に波長別の FEL 発振強度を示す。発振可能波長域においてフルバンチモードによる発振は、現在でもクライストロンの RF 出力窓での放電対策のため RF パルス幅を 20 μs より狭めていることを考慮すれば、過去の最大値と同程度まで FEL 発振強度は改善されているといえる。さらにバーストモードによる発振は、これまでで最高の FEL 発振強度が得られている。

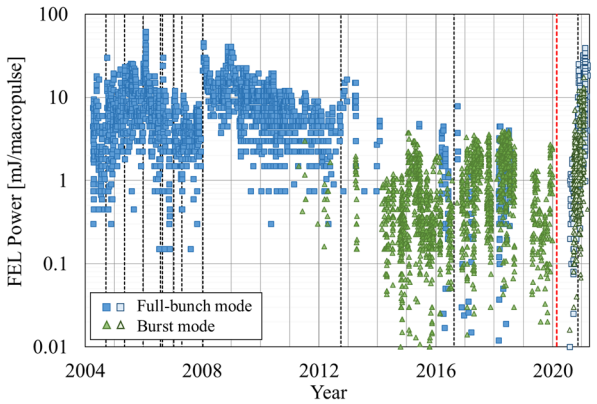

Figure 4: Long-term behavior of the FEL power since April 2004. The dashed lines show the timing the resonator mirrors (black) or the FEL undulator magnets (red) were renewed.

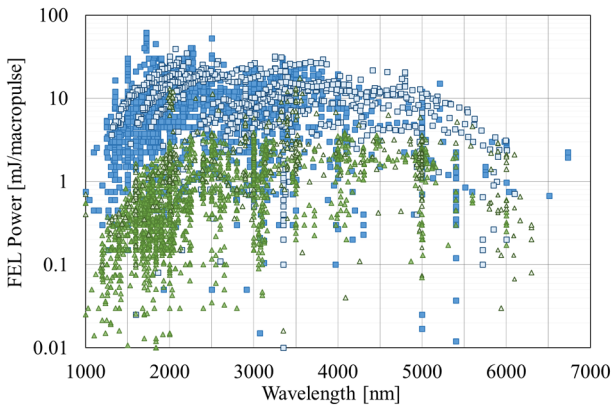

Figure 5: FEL power as a function of the wavelength.

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.*, "Development of coherent edge radiation source at LEBRA in Nihon University", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 629-632.
[8] K. Nogami *et al*., "Status report 125 MeV electron linac and light source development at Nihon University", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 905-908.
[9] T. Tanaka *et al*., "Effect of shut-off of RF window breakdown during the long-pulse operation of S-band klystron", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 51-55.
[9] K. Nogami *et al.*, "Status Report of 125 MeV Electron Linac at Nihon University", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, July 31-Aug. 3, 2019, pp. 1206-1209.
[10] K. Hayakawa *et al*., "Test operation of the pulse modulator of the 125MeV linac at Nihon University", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 1997, pp.41-43.
[11] K. Ishiwata *et al*., "Breakdown of the back-diode of the pulse modulator for FEL linac at Nihon University", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Jul. 12-14, 2000, pp.222-224.
[12] H. Okazaki *et al*., "Development of a radiation monitor for undulator demagnetization at Nihon University", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 837-839.