

日本大学 125MeV 電子線形加速器の現状

STATUS REPORT OF 125 MeV ELECTRON LINAC AT 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)}, 住友洋介^{A)}, 高橋由美子^{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)}, 榎本収志^{C)}, 大澤哲^{C)}, 山本樹^{C)}, 新富孝和^{C)}, 佐藤勇^{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)}, Isamu Sato^{A)}

^{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 1263 h in 2018. The electron beam acceleration time was approximately 358 h, which is about 30 % shorter than that in 2017. Frequent dielectric breakdowns occurred at the RF output window of the klystron #1 in September 2018. After the conditioning carried out for 2 months, the normal operation at the RF output power of 18 MW with the RF pulse duration of 20 μ s was resumed. Immediately after the recovery of klystron #1, leakage of the cooling water of the klystron #2 focusing solenoid was found out at around the welding area of the cooling water pipe that was covered under the lead radiation shield. The solenoid required to be replaced with a new one. The klystron #2 was also replaced because of the damage in the RF output window. It took about 4 months before the conditioning of the klystron #2 started since the leakage of the cooling water. The klystron #1 had not operated until the recovery of the klystron #2. Presently, both klystrons are under the conditioning in parallel. The electron beam acceleration time was greatly reduced because of the conditioning of the klystrons for a long time.

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 1300~6000 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 0.1~2 THz で利用可能である[2-6]。2010 年に電子銃の改造を行い、通常のフルバッ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 1 号機の RF 出力窓で放電が発生し、クライストロンを交換しても RF 出力窓での放電がしばしば問題となっている。そこで、RF パルス幅 20 μ s で運転が困難なときは、RF パルス幅を狭め (< 17 μ s) で FEL 発振を行っている。さらに、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いる。

2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

2018 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。2018 年度における加速器稼働時間は 143 日、クライストロン通電時間は約 1263 時間、電子ビーム加速時間は約 358 時間であった。前年度より稼働日数および通電時間は増加したものの電子ビーム加速時間は約 30% も減少した。例年 8 月は、夏期休業を利用したメンテナンスを行うため稼働時間が短くなる。2018 年 9 月中旬からクライストロン 1 号機 RF 出力窓で放電が頻発し、RF パルス幅 20 μ s を得ることが困難となったので 1 ヶ月以上エージングに費やした。そのため 9 月から 10 月に電子ビーム加速時間は減少したが、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。1 号機が所定の RF パルス幅・出力電力を回復した直後、2 号機で集束コイルの冷却水漏れが発生した。この冷却水がオイルタンク内に漏れ出た可能性があるため絶縁オイルを交換することになったが、消防署への少量危険物取扱い届出の事前手続きに約 1 ヶ月要した。冷却水漏れにより集束コイルの交換が必要となったが、同時に RF 窓が破損していた 2 号機の交換も余儀なくされた。結局、2 号機集束コイルの冷却水漏れが発生してからエージングを再開するまでの約 3 ヶ月間は加速器を停止しなければならなかった。そのため、2018 年 11 月から 2019 年 1 月まで運転実績がほとんどない。2019 年 1 月末にクライストロン 2 号機の交換が完了し、導波管のベーキング・ダイオード試験を経て同年 2 月中旬からエージングを開始した。

Figure 2 に利用目的別クライストロン通電時間の割合

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

(外円)と電子ビーム加速時間(内円)を示す。2018 年度のクライストロン通電時間の約半分が加速器調整運転となった。これは、2018 年度の後期にクライストロン 1 号機 RF 出力窓での放電・出力低下と 2 号機の集束コイル冷却水漏れへの対応でクライストロン交換などを行ったため、エージングに多くの時間を費やした結果である。現在も、最大出力電力 20 MW、最大 RF パルス幅 20 μs を目指しエージングを行っている。

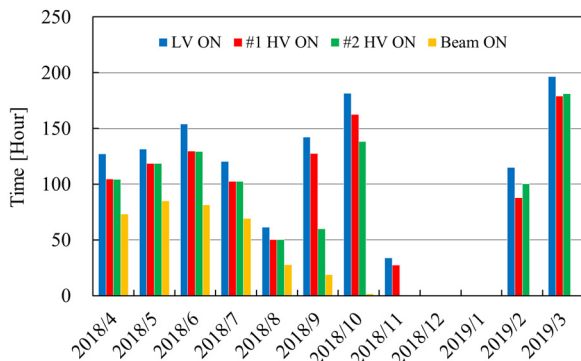


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystrons and the beam acceleration, respectively.

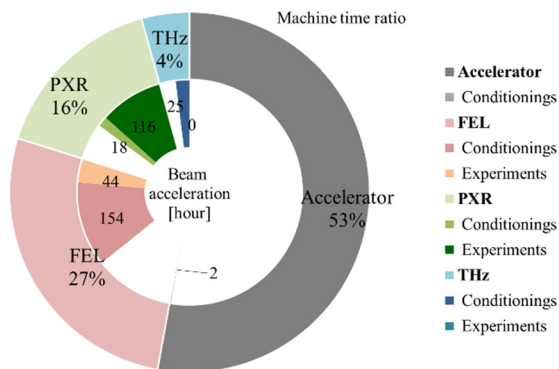


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

3. クライストロン

3.1 1号機 RF 出力窓の放電

2013 年中頃から RF 出力窓の放電が頻発し、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 (< 17 μs) 対応してきた。そのため 2015 年中頃からは RF パルス幅 20 μs での電子ビーム加速はほとんど行っていない。2017 年 12 月にクライストロン 1 号機の交換と同時に RF 出力窓の真空排気能力の強化も行い、その後約半年間は RF パルス幅 20 μs での電子ビーム加速が可能となった。しかし 2018 年 9 月中旬に再び RF 出力窓での放電が発生し、RF パルス幅が広いままでは放電が収まらず、一旦、RF

パルス幅を狭くし段階的に負荷を増やし 1 ヶ月以上エージングを行った結果、所定の RF パルス幅・出力電力まで回復した。その直後、クライストロン 2 号機で後述する故障が発生し、2 号機の運転再開までの約 3 か月間は 1 号機も停止していたところ、運転再開後に RF 出力窓での放電が頻発した。2019 年 2 月中旬から約 6 ヶ月間のエージングの結果、RF パルス幅 15 μs 以下では所定の出力電力まで回復した。

3.2 2号機集束コイルの冷却水漏れ

2018 年 10 月末日、クライストロン 2 号機で集束コイルの冷却水漏れが発生した。集束コイルの冷却水用配管溶接部の腐食が原因であった。集束コイルの交換が必要となったが、漏れた冷却水がその下のパルストランスのオイルタンク内に落ちる可能性とオイルの経年劣化を考慮し、この際オイルタンク内の絶縁オイルの交換も行うことにした。この作業のために、消防署への少量危険物取扱い届出の事前手続きに約 1 ヶ月要した。集束コイルの交換にはクライストロンを取り外す必要があったが、取り外し作業のためクライストロン接続導波管を大気に晒した際、以前から疑っていた RF 窓の破損が確認されたため、クライストロン交換を余儀なくされた。交換後のクライストロンは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で約 2.7 万時間使用した PV-3030A3 型である。約 6 か月間のエージングの結果、RF パルス幅 5~6 μs では RF 出力窓での放電頻度は比較的少なく、出力電力は以前より低いが約 18 MW まで到達した。これによりエネルギー 100 MeV での電子ビーム加速ができ PXR 利用実験に対応している。しかしながら長パルスの電子ビームが要求される FEL 発振では、出力 RF 電力が高くなると頻繁に RF 出力窓で放電を繰り返す、実験遂行に十分な時間連続して安定な運転は困難となっている。ただし、バーストモードによる電子ビーム加速では、ピーク電流が高く FEL 増幅の立ち上がりが速く、RF パルス幅が 10 μs 程度でも利用可能な FEL の発振が可能である。そこで利用実験に対応するため、FEL 発振を確保しながら放電頻度が減少する RF パルス幅まで狭め (10~13 μs)、さらに以前のクライストロンよりも低い約 16 MW の出力電力で加速器運転を行っている。このような条件でも電子ビームエネルギー 70 MeV 以下では FEL 発振とその利用実験が可能である。より短波長の FEL を利用実験に提供するためには RF 出力を上げて電子ビームエネルギーを高くする必要があり、さらにマクロパルスあたりの FEL 強度を上げるためには RF パルス幅を広げなくてはならない。従って引き続き、利用実験のない日は最大 20 μs の長パルスで 20 MW の出力電力を目指してエージングを行う予定である。

3.3 クライストロン出力下流導波管の排気強化

RF 窓の損傷は、窓材のセラミックで発生するマルチバクタによる放電が原因であると考えられる。クライストロン出力 RF 窓から約 2 m 下流にある加速管側導波管との仕切り用 RF 窓に比べて、クライストロン出力 RF 窓が損傷し易いのは、クライストロン出力 RF 窓付近の真空排気能力不足が原因で放電の頻度が高いためと思われる。クライストロン出力 RF 窓の損傷により頻繁にクライストロンを交換していたところは、加速管側との仕切り用 RF 窓付

近に設置された排気速度 60 l/s イオンポンプで導波管の真空排気を行っていた。1999 年から 2000 年にかけてクライストロン出力 RF 窓のセラミック表面から約 300 mm 下流に排気速度 8 l/s のイオンポンプ (ANELVA 社製) を 2 台追加し排気能力の強化を行い [7]、クライストロン出力 RF 窓での放電およびこれによる窓の破損も減少し、クライストロンの交換頻度も格段に減った。しかし、2013 年からクライストロン 1 号機出力 RF 窓での放電頻度が増加しはじめ、2 度クライストロンの交換を余儀なくされた。そこで、クライストロン出力 RF 窓付近の真空排気をさらに強化するため、1 号機は 2017 年 12 月に、2 号機は 2019 年 2 月にそれぞれイオンポンプを排気速度 8 l/s から 20 l/s のもの (Agilent 社製) に更新した。2 号機では加えて加速管側導波管との仕切り用窓付近を排気していた 60 l/s イオンポンプを 200 l/s のものへと強化した。今後、1 号機についても 60 l/s イオンポンプを 200 l/s に強化する予定である。

3.4 モジュールータ充電直流電源の故障

2019 年 3 月、クライストロン 1 号機の高圧が突如、印加できなくなった。このときモジュールータ室で異臭があり、上階にあるモジュールータ用直流電源の高速制御部の高圧整流回路オイルコンデンサが燃焼し回路に過電流が流れブレーカーが遮断されていたことが原因だった (Fig. 3)。焼けていないコンデンサの容量を測定した結果、定格 (0.047 μF) より低下しているものが見つかり、予備の電源から整流ユニットごと外して交換修理した。2 号機の直流電源も確認したところ、同様に焼けたコンデンサが 1 つ見つかりこれを交換した。メンテナンス時期には燃焼の危険があるオイルコンデンサから同じ容量のメタライズドポリプロピレンフィルムコンデンサにすべて交換する予定である。



Figure 3: The high voltage regulator units for the high speed voltage stabilizers in the modulator dc power supplies.

4. FEL および THz 光輸送ラインの更新

4.1 THz 光輸送ラインの更新

2010 年から産業技術総合研究所と共同で進めてきた THz 光源の開発では、FEL または PXR ビームラインで発生したコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR)、コヒーレント遷移放射 (CTR) およびコヒーレントエッジ放射 (CER)

を隣接する実験室で利用できるようにそれぞれ輸送ラインを整備してきた [2, 3, 6]。さらに 2017 年 12 月から FEL ラインのビームダンプへ電子を導く 45° 偏向電磁石の磁場端で発生した CER を隣接実験室へ導光するため、この 45° 偏向電磁石と下流側 FEL 共振器鏡との間に新たに設置した真空槽内に上下移動で切替えて使用できるように 2 種類の鏡を配置した。1 方は THz 光の全反射鏡、もう 1 方は中心に直径 25 mm の貫通穴があり THz 光の一部のみを反射する中空鏡である。中空鏡は、共振器内で発生している FEL の光ビームサイズより大きな穴径に設計されているので、FEL を発生させながら THz 光も輸送できる [8]。2017 年 12 月にこの輸送経路を整備したときは、FEL 輸送ラインへ導光する一部の真空配管が未接続で、途中に取出し窓を設けて加速器本体室内で CER の強度やスペクトルなどの基礎データを取得していた。この結果、THz 光の帯域は 0.1~3 THz、マクロパルス当りの強度は全反射鏡使用時で 0.25 mJ が得られた [9]。2019 年 3 月に全反射鏡および中空鏡の更新、前回の工事で未接続部の真空配管を FEL 輸送ライン上の真空槽と接続した。この真空槽内には直径 76.2 mm のサファイア基板 (厚さ: 0.43 mm) に厚さ 0.4 μm の酸化インジウムスズ (ITO) を蒸着した THz 反射平面鏡が設置され、これにより透過 FEL に反射 CER を重畳して隣接実験室へ同時輸送することが可能となった [10]。

4.2 FEL 輸送ラインの分離

FEL 輸送ラインは加速器ビームラインにゲートバルブのみで直結されていたため、以前から FEL 利用実験の際には FEL 輸送ラインの真空度悪化が問題となっていた。真空リーク箇所の特定を試みたが明白なリーク箇所が見つからず、突発的な真空度悪化が起きるとイオンポンプの排気能力では対応できず停止してしまい、真空度が維持できない場合に備えてターボ分子ポンプで常に排気を行っている状態であった。また、利用実験中に FEL 輸送ラインで、このような真空度の悪化が発生すると加速器側の真空度も悪化し、電子ビーム加速が困難となり利用実験に支障をきたす場合がしばしばあった。そこで、超高真空の加速器側から FEL 輸送ラインの真空系を分離することにした。分離には加速器本体室から隣接実験室に出た直後の真空槽の下流ベローズを外し真空槽とダクトそれぞれのフランジに CaF₂ 窓を設置した。分離した下流側に設置してあったイオンポンプは停止し、現在はターボ分子ポンプで真空排気を行っている。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16H03912 および JP19H04406 の助成を受けて行いました。

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.*, “Improvement of the Long Pulse Operation of the S-Band Klystron”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, Japan, July, 12-14, 2000, 12P-34.
- [8] T. Sakai *et al.*, “Developments of high power coherent terahertz wave sources at LEBRA linac in Nihon University”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 8-10, 2018, pp.346-348.
- [9] N. Sei *et al.*, “Research of Coherent Edge Radiation Generated by Electron Beams Oscillating Free-Electron Lasers”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, May, 19-24, 2019, pp.1772-1774.
- [10] T. Sakai *et al.*, “Development of coherent edge radiation source at FEL beam line in LEBRA”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, July 31-Aug. 3, 2019, this meeting.