

## 日本大学 125MeV 電子線形加速器および光源開発の現状報告

### STATUS REPORT OF 125 MeV ELECTRON LINAC AND LIGHT SOURCE DEVELOPMENT AT NIHON UNIVERSITY

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

Kyoko Nogami<sup>#,A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Takeshi Sakai<sup>A)</sup>,  
Yoske Sumitomo<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Hiroshi Ogawa<sup>B)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>C)</sup>,  
Shinichiro Michizono<sup>C)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>C)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>C)</sup>, Tsuyoshi, Suwada<sup>C)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>C)</sup>,  
Atsushi Enomoto<sup>C)</sup>, Satoshi Ohsawa<sup>C)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>C)</sup>, Takakazu Shintomi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University

<sup>B)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

<sup>C)</sup> 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 1576 h in 2019. The electron beam acceleration time was approximately 237 h. Though the machine operation time in term of the klystron heater power supplies increased, the electron beam acceleration time was about 34 % shorter than that in 2018. Dielectric breakdown occurred frequently at the RF output windows of the klystrons and about 60 % of the operation time was spent on the conditioning of the klystrons. Replacement of the FEL undulator permanent magnets, installation of additional chamber for THz light source, and some other improvements with respect to the light sources required shutdown of the machine for a long period compared to the previous years. Furthermore, vacuum troubles that happened associated with these processes caused delay in recovery of the electron beam acceleration.

#### 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 0.1~4 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 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  $\mu$ s での運転が困難な場合は RF パルス幅を狭めている(10~17  $\mu$ s)。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いる。

#### 2. 加速器稼働時間とビーム・光源利用

2019 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。2019 年度における加速器稼働時間は 175 日、クライストロン通電時間は約 1576 時間、電子ビーム加速時間は約 237 時間であった。稼働日数および通電時間は前年度に比べ約 25 %増加したのに対して、電子ビーム加速時間は約 34 %も減少した。これはクライストロン 1 号機の RF 出力窓での放電・出力低下への対応およびアンジュレータ永久磁石、THz 光源等に関する更新工事などが原因である。特にクライストロン 1 号機は、2018 年 9 月中旬から RF 出力窓の放電が頻発し安定になるまでエージングに長時間を要した。現在では、所定の RF パルス幅・出力電力までほぼ回復している。また年度の後半は、例年よりビームラインなどの工事の回数が多く、これに伴う大気ばく露からの真空度の回復に時間がかかり、電子ビーム加速運転ができない時間が長くなったことも一因である。

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。2019 年度のクライストロン通電時間の約 6 割が加速器調整運転となった。このほとんどがクライストロンのエージングに費やされている。LEBRA では、FEL 発振のため最大 20  $\mu$ s の RF パルス幅での定常運転を目指しているが、このような長パルスでは RF 出力窓での放電が深刻な問題となる。2013 年頃から数回のクライストロンの交換や、慎重なエージングを行ったが RF 出力窓での放電を根本的に解決することはできなかった。そこで、放電が発生しても RF 出力窓への負担を低減し加速器運転に支障がないように保護システムを導入した[8]。放電が発生すると即座に

<sup>#</sup> nogami@lebra.nihon-u.ac.jp

RF 出力を停止し、後続のパルスは放電が発生したタイミングまでのパルス幅で RF を再出力し、RF パルスのトリガーに合わせて徐々に元の RF パルス幅まで広げることができる。また PXR のように狭い RF パルス幅 (5~6 μs) で運転しているときは、放電が発生しても後続パルスを設定のパルス幅のまま RF を出力するように切り替えることもできる。このシステムを導入後、放電時の真空度の変化の様子から RF 出力窓への負担が低減できていると考えられる。

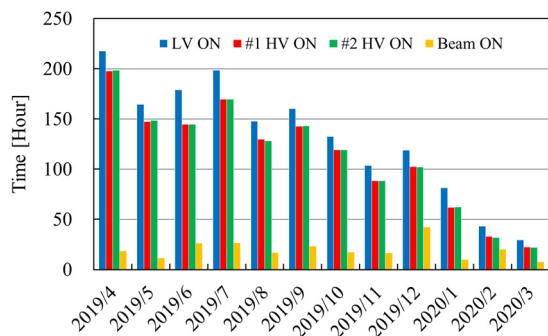


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied to the klystrons and the beam acceleration, respectively.

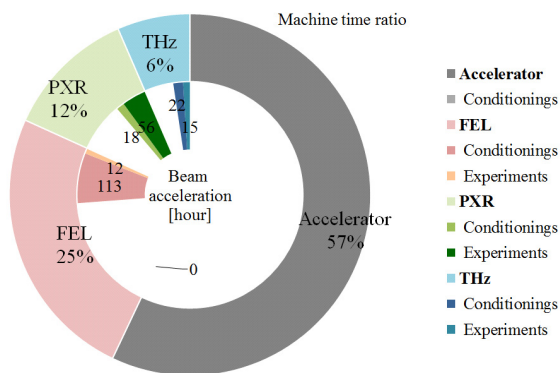


Figure 2: Share of the machine time (outer circle) and the beam acceleration time (inner circle) assigned to each application.

### 3. 光源に関する更新工事

#### 3.1 アンジュレータ永久磁石の交換

FEL 強度の低下の主な原因は、共振器鏡表面の損傷による反射率の低下である。そこで、共振器鏡の交換を行えば FEL 強度は回復するはずである。しかし、2012 年 10 月に曲率半径 3.5 m、2016 年 8 月に曲率半径 4.0 m の共振器鏡にそれぞれ交換したが、それ以前の FEL 強度の半分程度しか得られなかった。クライストロン RF 出力窓の放電の影響で RF パルス幅の違いや、電子ビーム加速の違いはあるものの、FEL 強度が高くなる条件は見つからなかった。電子ビーム条件以外に原因があると考え、2017 年 12 月アンジュレータ間隙中心のピーク磁

場の測定を行った。その結果、アンジュレータ入口から約 3 分の 1 の永久磁石が大きく減磁しており、設置当初と比較し最大で約 40 % 磁場が低下していた[9]。そこで、2020 年 2 月に文科省 Q-LEAP 予算によりアンジュレータ永久磁石部を更新した。新しい永久磁石は、NEOMAX 社製のネオジウム・鉄・ボロン系焼結磁石 (NMX-S41EH) で、最小磁極間隙 24mm で中心磁場は 1.24 T (設計) である。

2011 年に高速グリッドパルサを導入した当初は、電子ビームの加速条件が異なるフルバンチモードとバーストモードを重畳したことで、45° 偏向系での電子ビーム損失が増加したと思われる。特に 45° 偏向系に設置していたコリメータでの電子ビーム損失が大きいため、これを撤去した。さらに発生したγ線や中性子線が、アンジュレータ入口直前にこれらの遮蔽のために設置してあった鉛ブロックでビルドアップし、より高線量の 2 次放射線が発生し照射されたことにより永久磁石の劣化が進んだ可能性がある。そこで鉛ブロックをより上流側へ移動し、その下流にポリエチレン、ステンレスまたはボロン入りプラスチックブロックを設置した。また、アンジュレータ上流の PXR ビームライン側にコンクリートブロックを設置し遮蔽を強化した。また、アンジュレータ架台の上流側にシンチレーション検出器による放射線モニタを設置した[10]。

#### 3.2 FEL 輸送ラインの改善

FEL 共振器鏡の結合孔から取り出された FEL は、上流側共振器鏡の後方の真空槽内にある振分け鏡で反射されコリメータ用大型真空槽へと導光される。また、共振器鏡の交換などレーザーアライメントが必要な場合は、振分け鏡は退避させることができる。この振分け鏡用真空槽は電子線形加速管から続く直線配管の合流点にある六方キューブと溶接ベローで接続されている。しかし、この振分け鏡用真空槽と六方キューブの位置がずれており、接続する溶接ベローが大きく歪んでいた。FEL 利用実験へ提供するのに影響はないが、2020 年 2 月に六方キューブに接続する真空配管・真空ベローを適切な長さのものと交換しこの歪みを解消した。

#### 3.3 PXR-THz 光輸送および測定系の更新

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きた。PXR ビームライン上で発生する THz 光は、45° 偏向電磁石で発生するコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR)、コヒーレントエッジ放射 (CER) および PXR ライン上の標的で発生するコヒーレント遷移放射 (CTR) である。2016 年にこれら複数の THz 光を隣接実験室に輸送するために、PXR 発生装置の下流にある真空槽を改良した[6, 11]。2020 年 3 月この真空槽に設置している反射鏡のうち、CSR、CER および CTR の後方放射を輸送する反射鏡を THz 光の輸送効率を考慮して凹面からトロイダル面のものに交換した。さらに PXR 出力窓から取出された THz 光が大気中の水蒸気で減衰するため、乾燥空気を注入できる気密性の高い輸送路および測定装置が設置できる専用箱を導入し、精度の高い測定が行えるよう整備している[7]。

## 4. 真空トラブル

### 4.1 PXR 出力窓周辺の真空リーク

2019年10月、PXR 利用実験中、PXR 発生装置および輸送ラインの真空度が徐々に悪化し、さらに上流の加速管や電子銃周辺の真空度も悪化したため、利用実験を中止しなければならなかった。PXR 発生装置上流のゲートバルブを閉じ、発生装置真下および PXR 出力窓周辺から PXR 輸送ライン全体の真空排気を開始した。しかし、真空度の改善が見られず、リーク箇所を特定するため PXR-THz 光輸送用反射鏡を備えた角型真空槽の下流のゲートバルブを閉め、真空領域を区分して真空度の変化を確認した。その結果、角型真空槽を含む PXR 輸送ライン上流域は通常の真空度まで回復した。輸送ライン最下流域で真空リークが疑われる箇所としては PXR 出力窓があり、これは O リングを使用したフランジで窓材を挟み込むように取り付けられている。構造上のスローリーク以上に真空度が悪化しているため、まず窓材そのものの耐久性を疑った。長期使用に実績のあるカプトンシートから 2017 年に東レ製のルミラー-T-60 に変更して約 2 年が経過していたため、デシケータに保管してあった未使用のルミラー-T-60 窓に交換したが、真空度は改善されなかった。リーク検出器を使用して再調査を行った結果、X 線遮蔽用鉛シャッター駆動機構に使用している溶接ペローでリークしていることが判明した。応急措置として遮蔽用鉛を外して蓋をし真空排気を行ったが、X 線照射停止中に X 線や $\gamma$ 線などを遮蔽するものがなくなり、安全性の観点から PXR ラインへの電子ビーム輸送を一時中止した。同年 12 月上旬に溶接ペローの修理が完了し鉛シャッターを戻し PXR 利用実験を再開した。

### 4.2 CaF<sub>2</sub> 窓

2019年10月下旬、コヒーレントアンジュレータ放射による準単色 THz 光を取り出す反射鏡を備えた真空槽の新設工事を行った[12]。工事完了後、取り外していた配管を再設置し真空排気を開始した。しかし、真空度が工事前の状態に回復せず、リーク検出器でもリーク場所を特定することができなかった。そこで、Fig. 3 のように工事の際に大気ばく露した領域をいくつかの区域にわけて真空度の変化を確認した。まずアンジュレータ用真空配管を取り外し、その上流側 (Fig. 3 の①のみ) と下流側 (Fig. 3 ③と④) で真空排気する区域を分けたところ、上流側の真空度は順調に回復した (Fig. 4 青線)。一方で、下流側の真空度は 1 桁悪いのに加え、Fig. 4 の赤矢印で示すように急激に回復してしばらくすると元に戻るという現象が見られた。このようにして真空排気領域を徐々に狭めながら排気試験を行った結果、リーク箇所は新設した真空槽にあることがわかった。この真空槽に付属する窓、真空配管、反射鏡の駆動機構、新品のビームポジションモニタなどを蓋や石英窓に順次交換し真空度の変化を調べた結果、CaF<sub>2</sub> 窓が原因であることがわかった。これは FEL 利用実験室の一つであるクリーンルームの FEL ポートから移設したものだ。移設前、クリーンルーム内の FEL 輸送ライン周辺では原因不明のリークがあり、それもこの CaF<sub>2</sub> 窓が原因だった可能性がある。

工事開始からリーク箇所を特定し真空配管などをすべて元に戻した後、真空度が回復するまでに大学行事も挟んだため約半月かかった。そのためこの期間は電子ビーム加速を行うことができなかった。

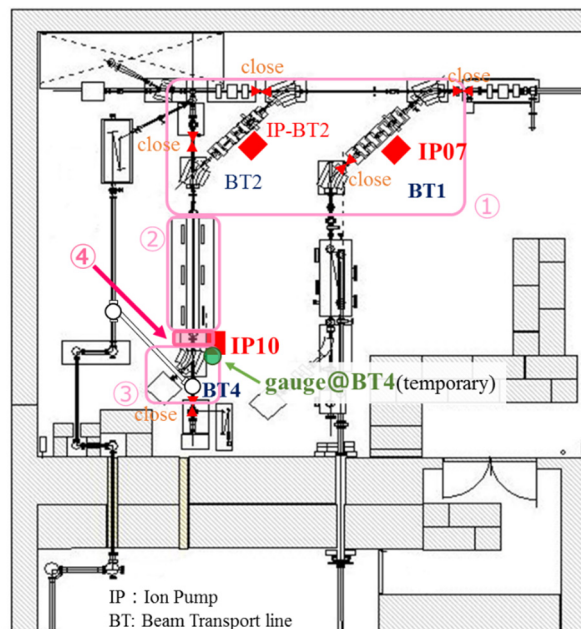


Figure 3: Top view of the FEL beam line. The rectangular areas show the isolated blocks of the vacuum pumping for the leak test.

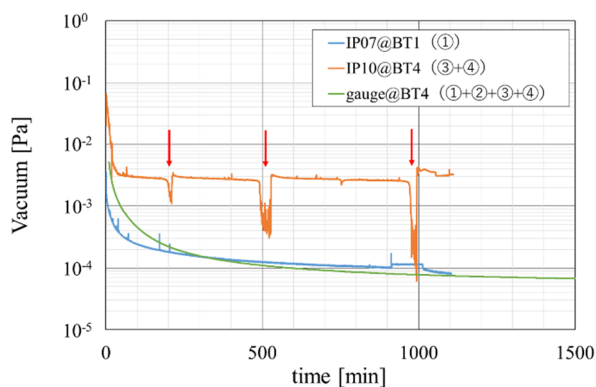


Figure 4: The time variation of the vacuum around the FEL transport line measured in the vacuum recovery test.

### 4.3 FEL コリメータ用真空槽

3.2 節で記した工事の際、振分け鏡のレーザアライメントが必要となったので、FEL コリメータ用大型真空槽も大気ばく露した。FEL 輸送ラインのアライメントも完了したので、大型真空槽の上下流に設置してあるゲートバルブを閉め真空排気を行った。しかしこの大型真空槽に設置してあるイオンポンプを定常動作させられるまで真空度が回復しなかったためゲートバルブを開けることができなかった。原因としてイオンポンプの劣化が考えられたが、すぐに交換できる予備のイオンポンプがなかった。そこで、イオンポンプ電源を高圧可変型に交換し、まずは高圧 3.5 kV を印加してイオンポンプを稼働させた。真空度

の回復状況を見ながら徐々に高圧をあげて所定の7.5 kV に印加が可能となり、真空度は工事以前まで回復をして、FEL を隣接実験室まで輸送可能となった。現在、180 l/s のイオンポンプが2台設置してあるが、排気能力は多少劣るが真空槽設置から十分時間経過していることも考慮して300 l/sを1台へと交換する予定である。

## 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.*, “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, this meeting.
- [8] 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, this meeting.
- [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] 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, this meeting.
- [11] T. Sakai *et al.*, “Research and development of the high power THz light sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp.821-824.
- [12] Y. Sumitomo *et al.*, “Development of coherent THz quasi-monochromatic undulator radiations at Nihon University”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, this meeting.