

## 日大 LEBRA 電子線形加速器の現状

### STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AT LEBRA IN 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>, 中尾圭佐<sup>A)</sup>, 稲垣学<sup>A)</sup>, 高塚健人<sup>A)</sup>, 長島涼子<sup>A)</sup>,  
佐藤勇<sup>B)</sup>, 榎本収志<sup>C)</sup>, 大澤哲<sup>C)</sup>, 福田茂樹<sup>C)</sup>, 設楽哲夫<sup>C)</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>, 山本樹<sup>D)</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>, Keisuke Nakao<sup>A)</sup>,  
Manabu Inagaki<sup>A)</sup>, Kento Takatsuka<sup>A)</sup>, Ryoko Nagasima<sup>A)</sup>, Isamu Sato<sup>B)</sup>, Atsushi Enomoto<sup>C)</sup>, Satoshi Ohsawa<sup>C)</sup>,  
Shigeki Fukuda<sup>C)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>C)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>C)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>C)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>C)</sup>,  
Mitsuhiro Yoshida<sup>C)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>D)</sup>

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

<sup>B)</sup> Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

<sup>C)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>D)</sup> Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

The near-infrared free electron laser (FEL) and parametric X-ray (PXR) at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) have been served for a variety of users' experiments. Since the beginning of the collaboration with AIST in 2012, development of the terahertz-wave coherent synchrotron radiation source was greatly advanced; the terahertz beam was constructed to share part of the FEL optical beam line and has been served for user's experiments. The 125-MeV electron linac operated approximately 1890 hr in 2013. The electron beam acceleration time was approximately 800 hr, which is about 30 % shorter than that in 2012 due to nearly four months of aging required of a klystron before stable operation. A vacuum leak was found at the ceramics vacuum tube located upstream of the accelerating tube. The FEL resonator mirrors installed in 2012 are still in use. Though no serious damages have been seen around the coupling hole of the output mirror, the FEL output power in the region of the wavelengths shorter than 2000 nm has been decreasing since the beginning of fiscal 2013.

#### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2004 年の共同利用開始以来、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 (PXR) を光源として、近赤外 FEL (1300~6000 nm) と非線形光学結晶を用いたその可視光領域高調波 (400~800 nm) 及び 5 - 34 keV の PXR の学内共同利用が進められてきた<sup>[1]</sup>。また、2012 年度に THz 光の取り出しビームラインを整備し、以来基礎実験に加え THz 光源を利用した応用実験も増えている<sup>[2][3]</sup>。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

2013 年度の月別加速運転時間の推移を Figure 1 に示す。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

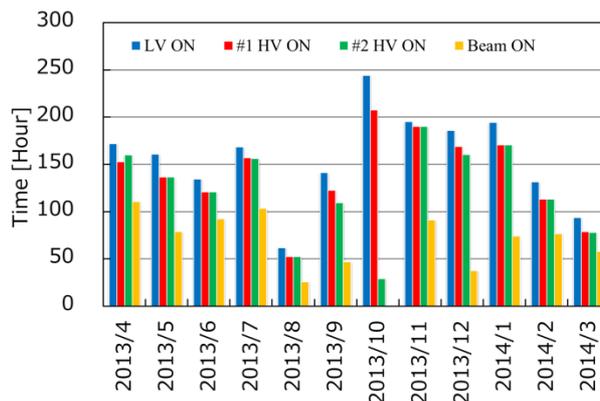


Figure 1: Statistics of the monthly machine operation time in terms of the klystron heater power supplies, the high voltage applied on the klystrons, and the beam acceleration, respectively.

行っているため、他の月より運転時間が短くなっている。さらに 2013 年 9 月から 12 月にかけて電子ビーム加速時間が短くなっているのは、クライストロン 1 号機の交換を要する故障の影響である。2013 年度における加速器の稼働日数は 193 日、加速器運転時間は 1890 時間と例年とほぼ同程度の稼働時間があったにもかかわらず、電子ビーム加速時間は約

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

800 時間と非常に短くなった。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。2013 年度はクライストロンの故障もありエージングにかける時間が多かった。また、これに伴い FEL を安定に発生させるためのエージングおよび調整の時間も多いため、調整にほとんど時間をかけていないことがわかる。

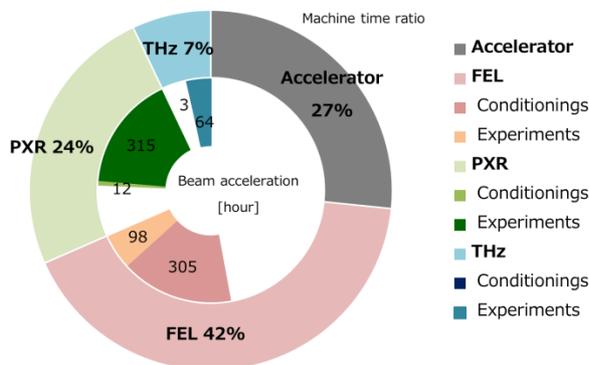


Figure 2: Share of the machine time for each application (outer circle), and performance of the beam acceleration time used for a variety of experiments (inner circle).

### 3. クライストロンの故障

#### 3.1 クライストロン出力 RF パルス波形

2013 年 9 月に、クライストロン 1 号機の出力 RF 窓での放電が頻発した。クライストロン集束用コイルの電流値の変更やエージングを丹念に行ったが、パルス幅 20  $\mu$ s で正常に RF 出力を得ることが困難となった。一方で、PXR 発生においては RF パルス幅を 6  $\mu$ s に設定しているため、RF 出力窓の放電頻度は少なく、電子ビームを加速し実験をすることができた。しかし、クライストロン内部の真空度も悪化するようになったので、同年 10 月にクライストロンを交換した。このとき、RF 窓は既に破損していることが判明した。

#### 3.2 エージングと RF 出力電圧

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 3.4 万時間使用した PV-3030A3 である。ダイオード動作運転を含め約 1 週間程度の連続運転で、ほぼ所定の RF 出力が得られるまでになった。しばらくは正常動作していたが、2013 年 11 月末には再び 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 利用実験は行えたが、パルス幅 20 $\mu$ s での FEL 利用が出来ず、クライストロンのエージングにさらに約 2 ヶ月を費やし、2014 年 1 月末に漸く安定に動作するに至った。2014 年 1 月末にはクライストロン集束コイルの冷却水ホース継ぎ手から水漏れが発生した。ホースの留め具に不具合があったために早急に対処した。

交換後のクライストロンでは、交換前と同じ設定

電圧で高圧を印加しても、RF 出力パワーは交換前より低くなっていた。集束コイルの電流値の組み合わせを様々試したが良いパラメータが見つからず、結局、設定印加電圧は変更せず RF 出力パワーが若干低い状態で使用しているが、必要な電子ビーム加速エネルギーは得られており、深刻な問題は起きていない。

### 4. 加速管の真空度

#### 4.1 真空度の周期的変化

Figure 3 に導波管および加速管に設置されているイオンポンプの位置を示す。10 年以上前から 4 m 加速管 1 本目に設置されているイオンポンプ (Figure 3 中の ACC#1) の電流が他の箇所、特にその下流部 3 本目加速管に設置されているイオンポンプ (Figure 3 中の ACC#2) の電流に比べて明らかに多く、しかも近年電流の増加が著しくなっていた。加速器運転記録簿及び真空度モニターシステム<sup>[4]</sup>により保存されている各イオンポンプ電流値を解析し求めたそれぞれの真空度の長期変化を Figure 4 に示す。この図から、ACC#1 の真空度は、約 1 年周期で変化しているように見える。さらに 2011 年頃から真空度悪化時のイオンポンプ電流値が顕著に増大しているこ

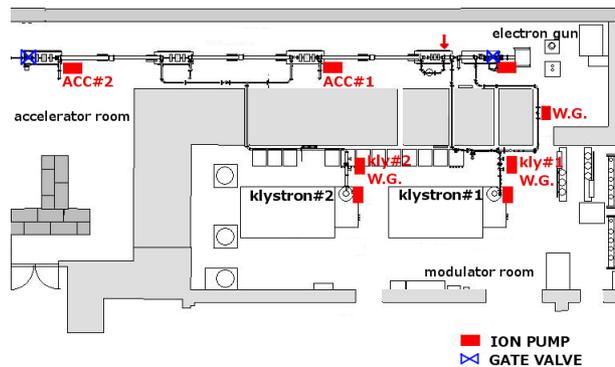


Figure 3: Top view of the accelerator facility indicating the location of ion pumps.

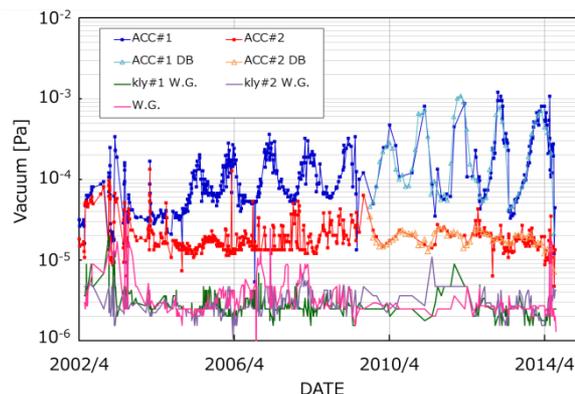


Figure 4: The long term behavior of the ion pump vacuum obtained from the records of ion pump currents. The vacuum of the ion pump ACC#1 near the first accelerating tube has shown a periodic change.

とがわかる。真空度悪化の原因として古いイオンポンプの劣化が考えられたため、2013年4月末にACC#1のイオンポンプエレメントを交換した。しかしエレメント交換の効果はあったが、再び真空度が悪化し2014年4月の時点では交換前と同程度になった。

#### 4.2 リーク箇所の特定と対処

ACC#1の真空度の周期的変化と本体室床の温度変化<sup>[4]</sup>の関係を調べたところ、ACC#2には見られない顕著な相関があることがわかった。ACC#1の真空度が悪化する時期にはACC#2より2桁近く悪化することもあったが、ACC#2とはマニホールで繋がっているにもかかわらず互いの真空度には強い相関が見られなかった。真空コンダクタンスを考慮すると、ACC#1近傍の加速管または真空ダクトにリークがあり、周辺環境の温度変化の影響を受けてリーク量が増える結果、真空度の季節的変化が生じていると推測された。そこで、2014年7月にリーク探査を行った結果、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 (Figure 3の矢印) でリークしていることが確認された。Figure 5にリーク箇所であるセラミックダクトの写真を示す。セラミックダクト下流のベローズに歪みがあることから、セラミックと金属の接合部に負荷がかかっている可能性がある。応急処置としてこの部分にリークシーラントや真空用シリコングリースを塗布し、真空度は改善した。しかし、根本的な解決ではないため、再び深刻な真空度の悪化につながる可能性があるため、次のメンテナンス時期に別のセラミックダクトに更新する予定である。

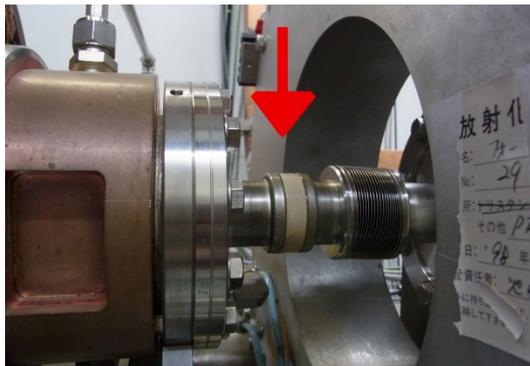


Figure 5: The photograph of the ceramic duct where an apparent vacuum leak was found.

### 5. FEL 発振強度

2012年10月に更新し使用中のFEL共振器ミラーは、LEBRAに導入した共振器ミラーの中では曲率半径が3.5mと最も小さい。バーストモードによる電子ビーム加速が可能となったからFEL発振の際にバンチ当たりの光強度が増大する可能性があったため、曲率半径を小さくすることでFEL取り出し用結合孔(直径0.8mm)周辺でのエネルギー密度を低下

させ、共振器ミラーの劣化を抑える効果が期待された。この共振器ミラーに交換してから得られたFEL発振強度の波長分布をFigure 6に示す。Figure 6上図は、LEBRAで発振可能な1200~6000nmの全範囲に渡る結果を、また下図は2000nm以下の範囲の結果を示しており、それぞれ年度別に区分して表示してある。ここでFEL発振強度のデータは、2012年10月から2014年7月までの運転記録簿に基づいており、調整中に記録された値も含まれている。また、Figure 6上図の3000nm付近でFEL発振強度が弱くなっているように見えるが、これは測定用パワーメータの前に設置されたFELの高調波を反射し分光器に導くコールドミラーの赤外線透過率の波長依存性が原因である。Figure 6では、従来の加速モードであるフルバンチモード (Full)、高速グリッドパルスを重畳したモード (重畳モード: Full + Burst)、さらに重畳モードでもマクログリッドパルス電圧を40V以下またはオフにしバーストビームのみ加速するバーストモード (Burst)、の各モードによる強度も比較している。ただし、現状では高速グリッドパルサーのみ (マクログリッドパルス電圧をオフ) の場合は、エミッション電流の平坦度が悪化するので、マクログリッドパルス電圧をオフにしてFEL発振を行うことはない。3000nm以上の長

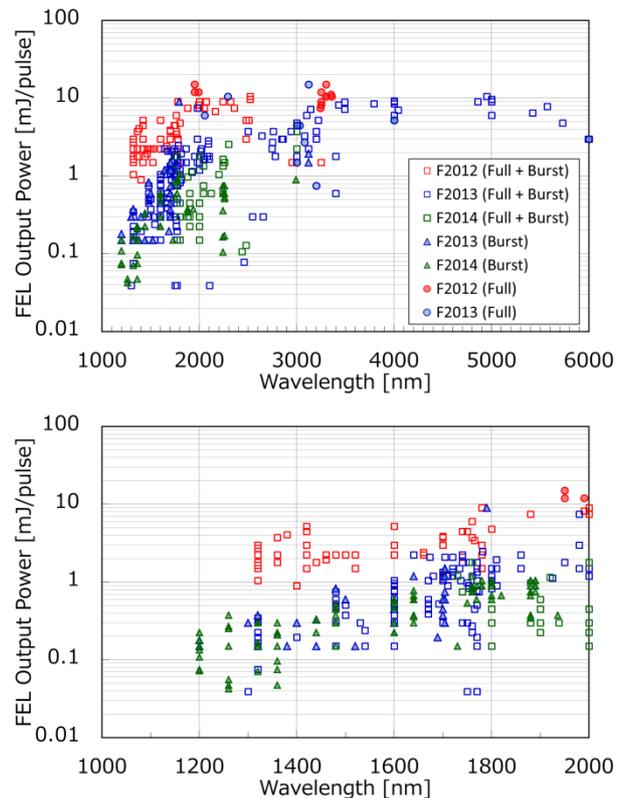


Figure 6: Performance of the FEL output power as a function of the wavelength. The upper graph shows the result for the region from 1200 to 6000 nm and the lower graph for the region shorter than 2000 nm.

波長側では、フルバンチモードでの FEL 発振はゲインが大きく十分安定であるため、他のモードによる運転実績はほとんどない。それに対して短波長側では、FEL をより安定に高強度で発振させるために、重畳モードが多用されてきたが、最近の実績では重畳モードとバーストモードによる FEL 発振強度に有意な差がないことがわかっている (Figure 6 下図)。このため現在、短波長側ではバーストモードによる FEL 発振が多く行われている。さらに 2000 nm 以下の FEL 発振強度は、2012 年度に比べて 2013・2014 年度は明らかに低下していることがわかる。この原因としてはいくつか推測されている。まず、2012 年 10 月に交換した電子銃カソードのエミッション特性の長期変化<sup>[1][6]</sup>や、クライストロン 1 号機 RF 出力パワーの低下などにより電子ビームの状態が変化している可能性が考えられる。この場合、電子ビームの状態を FEL 発振のために十分な最適化ができていない可能性がある。次に共振器ミラーの劣化の可能性が考えられるが、ビューポートから共振器ミラーの状態を観察した限り、2 年近く使用しても結合孔周辺には目立った損傷は見られなかった。これにより共振器ミラーの曲率半径を小さくした効果は得られていると考えられるが、共振器ミラー反射率への影響までは確認できないため、バーストモード (または重畳モード) の多用がパワー低下の原因になっている可能性は残っている。

## 6. まとめ

2013 年度は、RF 出力窓の破損によりクライストロン 1 号機の交換を行った。交換後のクライストロンにおいても RF 出力窓での放電が収まるまで、クライストロンのエージングに全体で 3 ヶ月以上費やしたため、電子ビーム加速時間および利用時間が例年に比べて短くなった。また、従来 1 本目の加速管周辺の真空度は、その下流側の加速管の真空度に比べて非常に悪かったが、長期的な真空度の変化を元に、イオンポンプの近傍でのリーク探査の結果、1 本目加速管の上流にあるセラミックダクトにリークを発見した。早急にこのセラミックダクトを交換する予定である。

現在使用中の共振器ミラーで発生させた FEL 強度が、特に短波長側で 2013 年度ごろから明らかに弱くなっている。2012 年 10 月交換した電子銃カソードのエミッション電流特性の長期変化、クライストロン交換に伴う RF 出力の低下、バーストモードによる FEL 利用の頻度増加など、ビーム条件や FEL 発振強度が共振器ミラー交換時から変化している。これらさまざまな要因により FEL 強度が低下していると考えられるが、その因果関係は未解明である。原因究明のためにさらに詳しい調査を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] K.Nogami et al., "STATUS OF ELECTRON LINAC OPERATION AND APPLICATION OF LIGHT SOURCE AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p373, 2013
- [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] K.Nogami et al., "LINAC VACCUME MONITORING SYSTEM AT LEBRA", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.394, 2005
- [5] K.Nogami et al., "MEASUREMENT OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE LEBRA-FEL RESONATOR LENGTH", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.788, 2010
- [6] M.Inagaki et al., "Long-term Behavior of the Electron Gun Emission Property at LEBRA Linac", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014