

京都大学自由電子レーザー施設の現状

PRESENT STATUS OF FREE ELECTRON LASER FACILITY AT KYOTO UNIVERSITY

全炳俊^{#,A)}, 大垣英明^{A)}

Heishun Zen^{#,A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

An oscillator-type mid-infrared Free Electron Laser (FEL) named KU-FEL has been developed at the Institute of Advanced Energy, Kyoto University for energy related researches. A THz coherent undulator radiation source driven by a compact-accelerator using a photocathode RF gun has been developed as an accelerator based intense THz light source with quasi-monochromatic wavelength spectrum. In this paper, the present status of the facility is reported.

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、エネルギー関連研究への応用を目指し、中赤外自由電子レーザー装置(Kyoto University Free Electron Laser, KU-FEL)を開発してきた[1-3]。これまでに、波長 3.4~26 μm での発振に成功しており[3]、固体試料や薄膜のポンプ・プローブ分光[4-8]、生物試料への照射[9-13]等、幅広い応用実験に供されている。KU-FEL 装置の中赤外 FEL(MIR-FEL)は周波数 2856 MHz のマイクロ波で駆動する 4.5 空洞高周波電子銃と 3 m 加速管、ビーム輸送部、アンジュレータ、光共振器により構成されている[1, 2]。Figure 1 に 2024 年 8 月現在の施設概略図を示す。Q-LEAP 事業の下、MIR-FEL の更なる性能向上のため、加速管直上流に 1.6 空洞高周波電子銃の増設を行うと共に、Phase I コミッショニングとして銅陰極を用いた電子ビーム発生と FEL 発振実験を実施し、FEL 発振を確認した[14]。

MIR-FEL の開発に加えて、近年は光陰極高周波電子銃で発生させた電子バンチをバンチ圧縮器で圧縮し、1 ps 程度の短バンチにした後に、アンジュレータに入射する事で強い準単色 THz 光を発生させるコヒーレントア

ンジュレータ放射(Coherent Undulator Radiation: CUR)光源の開発も行っている[15-21]。THz-CUR 光源の概略図も Fig. 1 に示した。THz-CUR 光源は専用の光陰極高周波電子銃を持つが、高周波源と光陰極駆動用レーザーを MIR-FEL 用電子銃と共有している。ECC-RF Gun[22]を用いた高強度化[23]や低減衰偏光可変性付与光学系の開発[24]、外部共振器を用いた高強度化などを 外部利用者との共同研究で進めている。

2. 京都大学中赤外自由電子レーザーの性能

KU-FEL の 2024 年 8 月現在の性能を Table 1 に示す。4.5 空洞高周波電子銃内に設置された LaB_6 陰極を熱陰極として利用した際には、最短波長 3.4 μm 、最長波長 26 μm での発振が確認されている。ユーザー利用ステーション 1 における各波長でのマクロパルスエネルギーを Fig. 2 に示す。近年、基本波での発振可能最短波長よりも短い波長を利用したいという内部ユーザーの希望があり、中赤外用非線形結晶(ZnGeP_2 , $\theta=48.8$ deg. $\varphi=0$ deg., 3 Photon 社製)を用いた二次高調波発生も行っている[25]。これまでの実績としては、波長 6.3 μm の二次高調波発生で 3.15 μm を発生した際に、約 1.5 mJ の

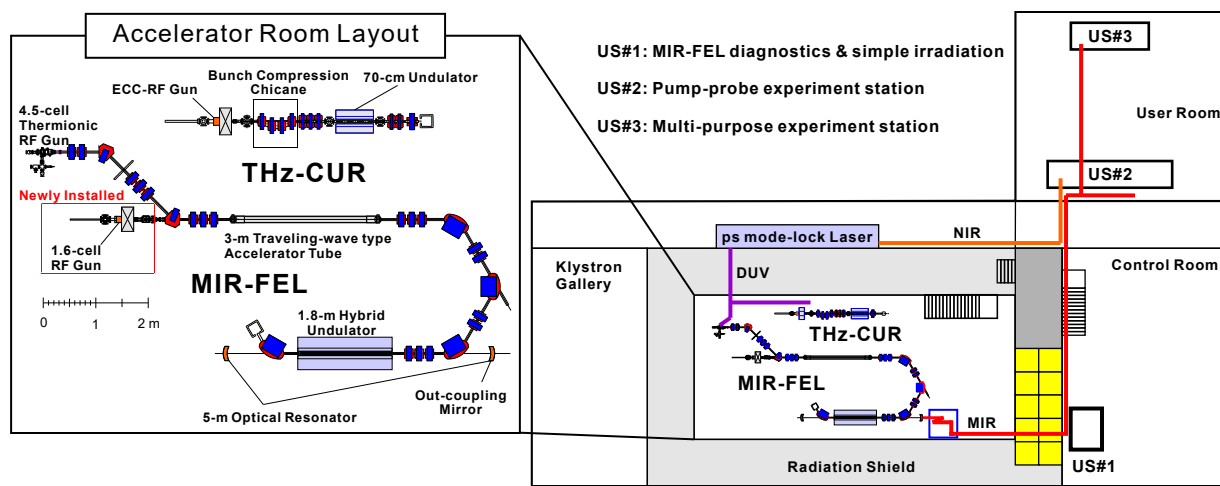


Figure 1: Layout of KU-FEL facility in August 2024.

[#] zen@iae.kyoto-u.ac.jp

Table 1: Performance of MIR-FEL

RF Gun Operation Mode	Thermionic	Photocathode
Wavelength Range	3.4 – 26 μm 2.5, 3.15 μm (SHG)	To be determined
Max. Macro-pulse Energy*	80 mJ @8.4 μm	5.7 mJ @11 μm
Typ. Macro-pulse Duration	2 μs	3.5 μs
Micro-pulse Repetition Rate	2856 MHz	29.75 MHz
Max. Micro-pulse Energy*	14 μJ @4.9 μm	~50 μJ @11 μm
Micro-pulse Duration*†	~0.3 ps @11 μm [28]	~0.2 ps @11 μm [28]
Typ. Bandwidth*	3 %-FWHM	~6 %-FWHM
Max. Extraction Efficiency†	5.5 % @11.6 μm [27]	9.4 % @11 μm [29]

マクロパルスエネルギーが、波長 5.0 μm の二次高調波発生で 2.5 μm を発生した際に、約 6 mJ のマクロパルスエネルギーが得られている。

2019 年度には FEL の引き出し効率測定を行い、熱陰極運転においては波長 11.6 μm にて最大 5.5 % の引き出し効率が得られている事を確認した。これは常伝導加速器を用いた共振器型 FEL では当時の最高の引き出し効率であり、動的バンチ位相変調を導入することで、高い引き出し効率が得られていることが明らかとなっている [26]。2020 年度に実施したマイクロパルス長計測により、波長 11 μm において熱陰極運転では半値幅約 0.3 ps のマイクロパルス長が得られていることが明らかとなった [27]。

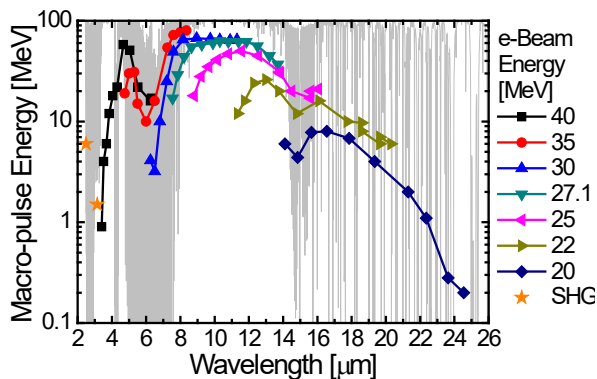


Figure 2: Macro-pulse energy of MIR-FEL under the thermionic operation available at the user station 1.

2024 年 8 月現在、本装置は波長可変範囲およびユーザーステーションで利用可能な最大マクロパルスエネルギーにおいて、中赤外自由電子レーザとして国内最高性能を有すると共に、引き出し効率において現在稼働中の共振器型 FEL として世界最高性能を有する。

高周波電子銃内に設置された LaB₆ 陰極に外部から波長 266 nm のマルチパルスピコ秒レーザを照射し、光陰極動作させた際の性能も Table 1 に示した。波長可変域はまだ調査できていないが、電子バンチ電荷量の増大により、FEL ゲインが増加しており、熱陰極運転時よりも幅広い波長可変域が得られると考えられる。マイクロパルス繰り返し周波数が熱陰極運転と比べて約 1/100 と低いいため、マクロパルスエネルギーは低下するが、より高いマイクロパルス当たりのエネルギーが得られる。これは熱的な影響を低減して非線形効果を得るのに適した条件と考えられる。FEL の引き出し効率は 9.4 % と熱陰極運転と比

べて増大し [28]、それに伴い、マイクロパルス長は波長 11 μm において半値幅約 0.2 ps と短くなっている [27]。

光陰極運転時に得られる FEL のマイクロパルス長を更に短くする手法として、長波長赤外透過媒質を用いた非線形パルス圧縮にも取り組んでいる。非線形パルス圧縮とは媒質中での非線形効果によるスペクトル広帯域化を利用したパルス圧縮手法である。これまでに 30 mm 厚の反射防止コート付きゲルマニウムを用いて、波長 8.7 μm にて FEL のマイクロパルス長を 146 fs から 106 fs まで短縮することに成功した [29]。現在は更なる短縮を目指して KRS-5 を用いた非線形圧縮に取り組んでいる。

3. KU-FEL 稼働状況

Figure 3 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2023 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 513.9 時間であった。放射線管理上の年間最大運転可能時間 (960 時間) の約 54 % であり、まだマシナタイムに余裕がある。2020 年度から予め全ユーザーに対してマシナタイム意向調査を行い、11 月のキャンパス全館停電まで一通り外部ユーザー利用実験を実施することとしており、2024 年度までこの方針を継続すると共に、今後も大きな問題が無ければこの形でのユーザー利用を継続していく方針である。

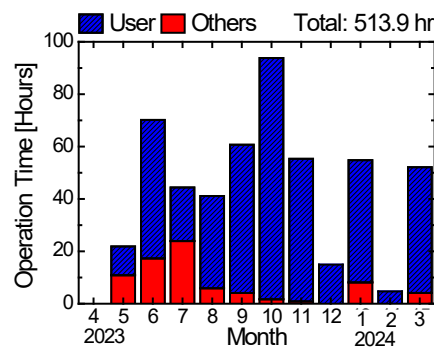


Figure 3: Operating time of KU-FEL facility in FY2023. The adjustment of accelerator, machine tuning of FEL lasing, study of the driver linac and FEL parameter measurements are included in “Others”.

Figure 4 に 2009 年度以降の総運転時間とユーザー利用時間及びユーザー利用時間が総運転時間に占める割合の履歴を示す。2010 年度までは加速器の R&D が

メインであったが、2011年度から2013年度にかけてユーザー利用が増加した。2023年度には総運転時間の約85%がユーザー利用に供された。2022年度と比べ2023年度の運転時間は増加した。2023年度のユーザーグループ数は17と2022年度の18から1減少した。

2024年度は外部ユーザーグループ数が15と2023年度の17から2減少した。新規利用者が2件あり、多少のユーザーの入れ替わりがある。本年度も昨年度同様、11月の停電までに外部ユーザー利用を一通り終える計画を立て、ユーザー利用実験を鋭意実施中である。

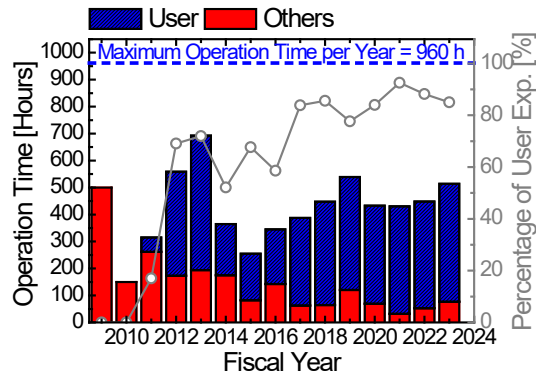


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

4. トラブルおよび問題点

KU-FELでは2台のクライストロンを用いて、電子銃と進行波加速管を個別に駆動している。電子銃用モジュールは1997年購入、加速管用モジュールは2003年購入であり、どちらも20年以上継続して使用しており、老朽化問題が顕在化している。電子銃用モジュールはPFN用高圧コンデンサの不良が2014年度より発生し、20本の全交換を2017年度に完了した[29]。2019年度は加速管用モジュールのPFN用高圧コンデンサの不良が発生した。そこで、2019年度はまず新しいコンデンサを10本調達し、交換した。残りの10本中5本を2022年度の予算で調達した。問題の生じたコンデンサから随時、交換を実施する予定である。モジュールの放電スイッチとして用いられているサイラトロンに関して、電子銃用モジュールは10年以上前に購入された予備品があったため、2020年4月に交換した。一方、加速管用モジュールは2021年3月末にKEK入射器系より譲り受けていた使用済みサイラトロンへの交換を実施した[30]。交換・調整後、本サイラトロンは問題なく動作しており、2021年4月21日の段階でFELの発振も問題なく行えることを確認した。一方、2022年度に入り、高周波電子銃用クライストロンの放電によるPulse Current Over インターロックの発報頻度が増加しており、2023年度以降は、上記エラー発報と同時の場合も同時でない場合もあるが、偶に高周波電子銃用クライストロンのパービアンスタが変化し、FELの発振状況が大きく変化してしまう事象が発生しており、徐々にその頻度が増加している。現象としては同じ充電電圧設定でもクライストロン電圧が低下し、電流が増加しており、陰極のエミッション減少ではないと思われる。

このクライストロンはThomson社製の物であり、事業を引き継いだThales社に問い合わせた所、同仕様の物の製作は困難と言われており、クライストロンソケットの変更も含めた対応が必要となっている。これらの状況を受けて、根本的な老朽化対策として、上記クライストロンおよびクライストロンモジュレータ2台の更新のため、大学本部への予算要求を行っている。

5. まとめ

京都大学中赤外自由電子レーザーは2024年8月現在、当初の目標波長領域(5~20 μm)を超える3.4~26 μmでの発振が可能となっている。中赤外用非線形結晶(ZnGeP₂)を用いた二次高調波発生も開始し、波長2.5 μmおよび3.15 μmでそれぞれマクロパルスエネルギー約6 mJおよび1.5 mJを達成可能である事が確認されている。従来の熱陰極運転のみならず、光陰極運転も実施可能となっており、より熱的影響が少なく非線形効果の表れやすい条件が得られる様になっている。2023年度の総稼働時間は513.9時間でその内の約85%がユーザー利用実験に供された。クライストロンモジュレータの老朽化が深刻化しているが、高圧コンデンサやサイラトロンの交換を適宜実施することにより、何とか延命できている。

謝辞

本研究の一部は文部科学省光・量子飛躍フラグシッププログラム課題番号JPMXS0118070271、科学研究費補助金(23H01198, 22H03871, 26706026)の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] H. Zen *et al.*, "Development of IR-FEL Facility for Energy Science in Kyoto University", *Infrared Physics & Technology*, 51, 2008, pp. 382-385.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449507001077>
- [2] H. Zen *et al.*, "Present Status and Perspectives of Long Wavelength Free Electron Lasers at Kyoto University", *Physics Procedia*, 84, 2016, pp. 47-53.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216303042>
- [3] H. Zen *et al.*, "Present Status of Infrared FEL Facility at Kyoto University", *Proceedings of FEL2017*, 2018, pp. 162-165.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fel2017/papers/mop050.pdf>
- [4] K. Yoshida *et al.*, "Experimental Demonstration of Mode-Selective Phonon Excitation of 6H-SiC by a Mid-Infrared Free Electron Laser with Anti-Stokes Raman Scattering Spectroscopy", *Applied Physics Letters*, 103, 2013, 182103.
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4827253>
- [5] E. Ageev *et al.*, "Time-resolved detection of structural change in polyethylene films using mid-infrared laser pulses", *Applied Physics Letters*, 107, 2015, 041904.
<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4927666>
- [6] M. Kagaya *et al.*, "Mode-Selective Phonon Excitation in Gallium Nitride Using Mid-Infrared Free Electron Laser", *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 2017, 022701.

- <http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.56.022701/meta>
- [7] M. Kitaura *et al.*, “Visualizing Hidden Electron Trap Levels in $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ Crystals Using a Mid-Infrared Free Electron Laser”, *Applied Physics Letters*, 112, 2018, 031112.
<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5008632>
- [8] O. Sato *et al.*, “Two-photon Selective Excitation of Phononmode in Diamond Using Mid-Infrared Free-Electron Laser,” *Physics Letters A* 384, 2020, 126223.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037596011931165X>
- [9] F. Shishikura *et al.*, “ザリガニの眼は中赤外線が見えるのか”, *日大医誌*, 75, 2016, pp. 140-141.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/numa/75/3/75_140/_article/-char/ja/
- [10] T. Kawasaki *et al.*, “Photo-Modification of Melanin by a Mid-Infrared Free-Electron Laser,” *Photochemistry and Photobiology*, 95, 2019, pp.946-950.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/php.13079>
- [11] T. Kawasaki *et al.*, “Cellulose Degradation by Infrared Free Electron Laser,” *Energy & Fuels* 34, 2020, pp.9064-9068.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.0c01069>
- [12] T. Kawasaki *et al.*, “Application of Mid-Infrared Free Electron Laser for Structural Analysis of Biological Materials,” *Journal of Synchrotron Radiation*, 28, 28-35 (2021).
<https://doi.org/10.1107/S160057752001406X>
- [13] T. Kawasaki *et al.*, “Degradation of Lignin by Infrared Free Electron Laser,” *Polymers*, 14, 2401 (2022).
<https://doi.org/10.3390/polym14122401>
- [14] H. Zen *et al.*, “KU-FEL における新 1.6 空胴光陰極高周波電子銃導入と Phase I コミッショニング”, *WEP25*, 第 20 回 日本加速器学会年会, 2023.
- [15] S. Suphakul *et al.*, “Generation of Short Bunch Electron Beam from Compact Accelerator for Terahertz Radiation,” *Proceedings of IPAC2016*, 2016, pp.1757-1759.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tupow008.pdf>
- [16] S. Suphakul *et al.*, “Beam Dynamics Investigation for the Compact Seeded THz-FEL Amplifier,” *Energy Procedia*, 89, 2016, pp.373-381.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216300571>
- [17] S. Suphakul *et al.*, “Measurement of Coherent Undulator Radiation of Compact Terahertz Radiation Source at Kyoto University,” *International Journal of Magnetism and Electromagnetism* 3, 2017, IJME-3-008.
<https://www.vibgyorpublishers.org/content/international-journal-of-magnetism-and-electromagnetism/ijme-3-008.pdf>
- [18] S. Krainara *et al.*, “Development of Compact THz Coherent Undulator Radiation Source at Kyoto University”, *Proceedings of FEL2017*, 2018, pp. 158-161.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fel2017/papers/mop049.pdf>
- [19] S. Krainara *et al.*, “Manipulation of Laser Distribution to Mitigate the Space-Charge Effect for Improving the Performance of a THz Coherent Undulator Radiation Source”, *Particles* 1, 2018, pp.238-252.
<https://www.mdpi.com/2571-712X/1/1/18>
- [20] S. Suphakul *et al.*, “Investigation of Bunch Compressor and Compressed Electron Beam Characteristics by Coherent Transition Radiation,” *Particles* 2, 2019, pp.32-43.
<https://www.mdpi.com/2571-712X/1/1/18>
- [21] S. Krainara *et al.*, “Properties of THz Coherent Undulator Radiation Generated from a Compact Accelerator Source at Kyoto University,” *Review of Scientific Instruments* 90, 2019, 103307.
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5110342>
- [22] K. Sakaue *et al.*, “Ultrashort Electron Bunch Generation by an Energy Chirping Cell Attached RF Gun,” *Physical Review ST Accelerators and Beams* 17, 2014, 023401.
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.17.023401>
- [23] K. Sakaue *et al.*, “エネルギー変調によって圧縮した電子バンチによるコヒーレントアンジュレータ放射,” *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2020, pp.638-640.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP60.pdf
- [24] S. Kashiwagi *et al.*, “Demonstration of Variable Polarized Coherent Terahertz Source,” *Infrared Physics & Technology* 106, 103274 (2020).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449519310254>
- [25] H. Zen *et al.*, “Present Status of Free Electron Laser Facility at Kyoto University,” *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2019, pp.1250-1253.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FSPI/FSPI004.pdf
- [26] H. Zen *et al.*, “High Extraction Efficiency Operation of a Midinfrared Free Electron Laser Enabled by Dynamic Cavity Desynchronization,” *Physical Review Accelerators and Beams*, 23, 2020, 070701.
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.070701>
- [27] H. Zen *et al.*, “Full Characterization of Superradiant Pulses from a Free-Electron Laser Oscillator,” *Scientific Reports*, 13, 2023, 6350.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-33550-z>
- [28] H. Zen *et al.*, “Record High Extraction Efficiency of Electron Laser Oscillator,” *Applied Physics Express* 13, 2020, 102007.
<https://doi.org/10.35848/1882-0786/abb690>
- [29] H. Zen *et al.*, “Nonlinear compression of naturally down-chirped superradiance pulses from a free-electron laser oscillator by thick germanium plates,” *Optics Express* 31, 2023, pp.40928-40936.
<https://doi.org/10.1364/OE.503090>
- [30] H. Zen *et al.*, “Present Status of Free Electron Laser Facility at Kyoto University”, *Proceedings of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2017, pp. 1347-1350.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/FSP0/FSP011.pdf
- [30] H. Zen *et al.*, “Present Status of Free Electron Laser Facility at Kyoto University,” *Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2021, pp.973-977.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/THP0/THP056.pdf