

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)}, Bo Ju Yoon Hnin^{A)}, 大垣英明^{A)}
Heishun Zen^{#, A)}, Ju Yoon Hnin Bo^{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[4-9]、生物試料への照射[10-14]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 空洞高周波電子銃および 1.6 空洞高周波電子銃[15]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 2025 年 8 月現在の施設概略図を示す。

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[16-22]。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[23]を用いた高強度化[24]や低減衰偏光可変性付与光学系の開発[25]、プリバンチ FEL の実証実験[26]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 2025 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。基本波での発振可能最短波長 (3.4 μm) よりも短い波長を利用したいという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おり、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[27]。

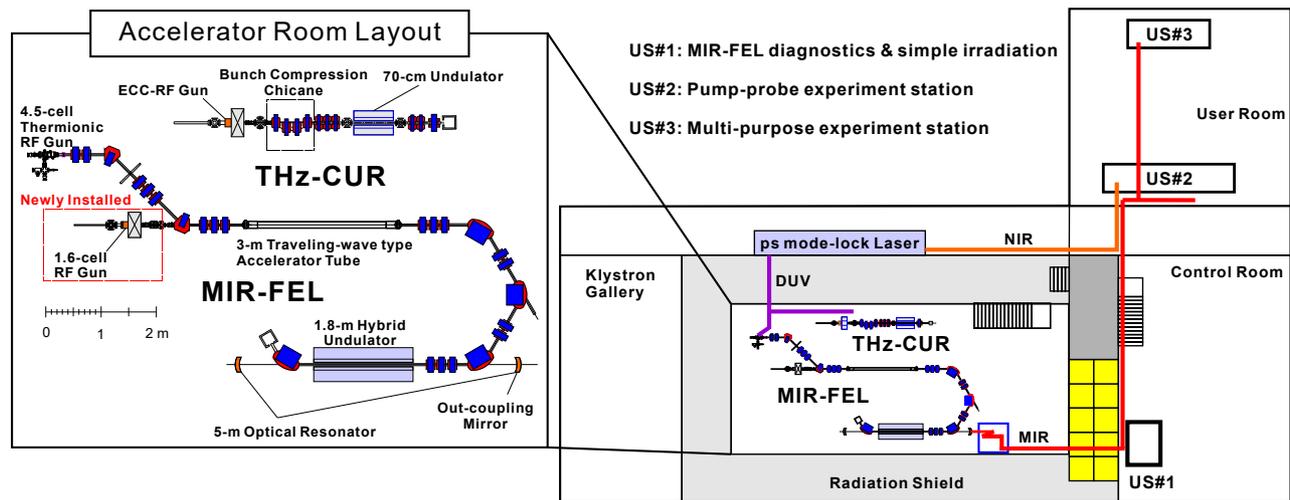


Figure 1: Layout of KU-FEL facility in August 2025.

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

Table 1: Performance of MIR-FEL

RF Gun Operation Mode	4.5-cell RF gun / Thermionic	4.5-cell RF gun / 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 [30]	~0.2 ps @11 μm [30]
Typ. Bandwidth*	3 %-FWHM	~6 %-FWHM
Max. Extraction Efficiency†	5.5 % @11.6 μm [28]	9.4 % @11 μm [29]

4.5 空洞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ーを照射し、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。

4.5 空洞高周波電子銃の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 [28]、光陰極運転においては波長 11 μm において最大 9.4 % の引き出し効率が得られている事が確認されている [29]。高い引き出し効率が得られている条件下では短いマイクロパルス長が得られる事が知られており、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、光陰極運転では半値幅約 0.2 ps のマイクロパルス長が得られている [30]。

4.5 空洞高周波電子銃では、低ハーフセル空洞電界、狭空洞間アイリスに加え、集束用ソレノイドも装備されていないため、バンチ当たり電荷量が 200 pC 以下に制限されている。Q-LEAP 事業の下で、更にバンチ当たり電荷量を増強すべく、高ハーフセル電界、広空洞間アイリス且つ収束用ソレノイドを具えた 1.6 空洞高周波電子銃を加速管直上流に導入している。これまでに銅陰極においてマクロパルス 7 μs 、空洞電界 100 MV/m の運転に成功している。また、昨年度は CsTe 陰極に換装した状態で、コンディショニング不足のため電子ビームマクロパルス長が 3 μs の条件ではあるが、バンチ当たり電荷量 550 pC、FEL ミクロパルスエネルギー 120 μJ @5 μm を達成した。

2025 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ーとして国内最高性能を有すると共に、引き出し効率およびピークパワー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。

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

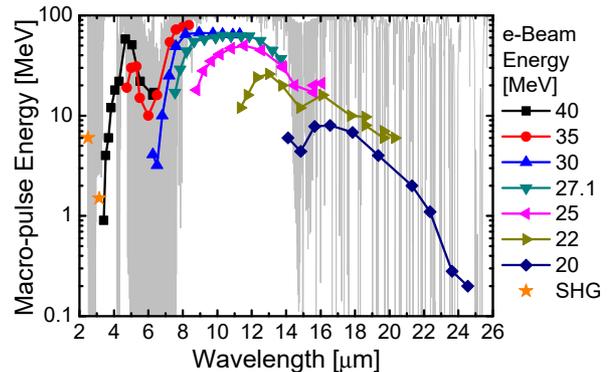


Figure 2: Macro-pulse energy of MIR-FEL under the thermionic operation available at the user station 1.

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 [31]。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 2024 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 527 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 55 % であり、まだメンテナンスに余裕がある。COVID-19 の流行をうけて、2020 年度から予め全外部ユーザーに対してメンテナンス意向調査を行い、11

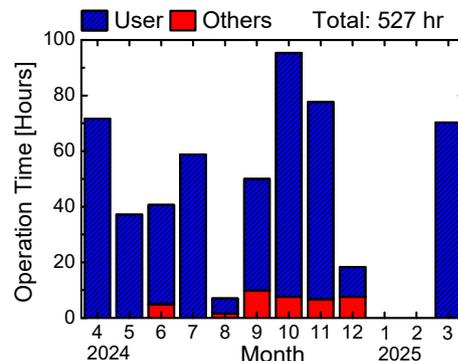


Figure 3: Operating time of KU-FEL facility in FY2023. The adjustment of accelerator, machine tuning of FEL lasing, study of the driver linac and FEL parameter measurements are included in “Others”.

月 2 週のキャンパス全館停電までに一通り外部ユーザー利用実験を実施することとしている。11 月 2 週以降は完了しなかった外部ユーザー利用も実施するが、主に施設内の研究開発実験に重点を置いて実験を実施する体制となっている。

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。2024 年度には総運転時間の約 93% がユーザー利用に供された。2023 年度と比べ 2024 年度の運転時間は増加した。2024 年度のユーザーグループ数は 15 と 2023 年度の 17 から 2 減少した。

2025 年度は外部ユーザーグループ数が 16 と 2024 年度の 15 から 1 増加すると共に、新規利用者が 3 件あり、少なからぬ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。

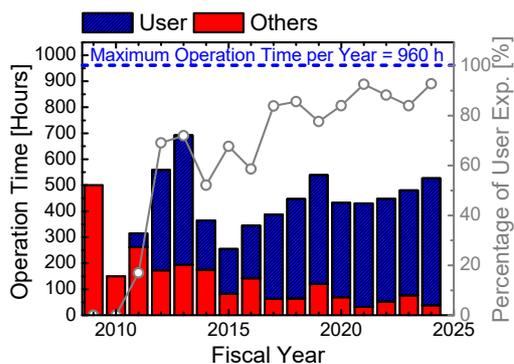


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

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。電子銃用モジュレータは 1997 年購入、加速管用モジュレータは 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。どちらのモジュレータにおいても高圧コンデンサの不良が発生しており、電子銃用モジュレータは 20 本の内 20 本、加速管用モジュレータは 20 本の内 10 本を新しいものに交換した。残りの 10 本中 5 本は 2022 年度の予算で調達完了しており、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。モジュレータ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、電子銃用モジュレータは 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、加速管用モジュレータは 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[32]。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いる。また、昨年・今年と徐々にその頻度が増加している。昨年度のプロシーディングス[33]では陰極のエミッション減少ではないと思われると報告していたが、その後、陰極ヒータ電圧変化に対するパービアンスの変化を調査したところ、パービアンスが陰極ヒータ電圧に強く依存した。このことから、定常的にエミッション減少が起こっており、放電によって一時、エミッションが増大し電圧低下が生じているのだと想像される。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 社からは同仕様の物の製作は困難と言われており、現在、陰極交換および電子銃のオーバーホールが可能か問い合わせ中である。クライストロンの交換が必要となった場合はクライストロンソケットやソレノイド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 (ZnGeP_2)を用いた二次高調波発生により波長 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 を得られることも確認されている。また、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。42024 年度の総稼働時間は 527 時間でその内の約 93% 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。クライストロンのエミッション減少及び放電由来と思われる Fault が増加しており、近い将来にクライストロンの交換が必要になると予測される。

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. 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. doi: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. doi:10.7567/JJAP.56.022701
- [7] M. Kitaura *et al.*, “Visualizing Hidden Electron Trap Levels in Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce Crystals Using a Mid-Infrared Free Electron Laser”, Applied Physics Letters, 112, 2018, 031112. doi: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] J.Y.H. Bo *et al.*, “Measurement of temporal evolution of antiferromagnetic domain change in nickel oxide driven by 2TO phonon mode excitation via pump-probe experiment,” Japanese Journal of Applied Physics, 63, 2024, 112001. doi:10.35848/1347-4065/ad879c
- [10] F. Shishikura *et al.*, “Electroretinograms from Crayfish Compound Eyes Evoked by Mid-infrared Irradiation: Spectral Sensitivity Measurements of Fast and Late Reaction,” Journal of Nihon University Medical Association, 82, 2023, pp.35-42,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/numa/82/1/82_35/_article-char/ja/
- [11] T. Kawasaki *et al.*, “Photo-Modification of Melanin by a Mid-Infrared Free-Electron Laser,” Photochemistry and Photobiology, 95, 2019, pp.946-950. doi:10.1111/php.13079
- [12] T. Kawasaki *et al.*, “Cellulose Degradation by Infrared Free Electron Laser,” Energy & Fuels 34, 2020, pp.9064-9068. doi:10.1021/acs.energyfuels.0c01069
- [13] 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). doi:10.1107/S160057752001406X
- [14] T. Kawasaki *et al.*, “Degradation of Lignin by Infrared Free Electron Laser,” Polymers, 14, 2401 (2022). doi:10.3390/polym14122401
- [15] 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.
- [16] 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>
- [17] 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>
- [18] 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/internationaljournal-of-magnetism-and-electromagnetism/ijme-3-008.pdf>
- [19] 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>
- [20] 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>
- [21] 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>
- [22] 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. doi:10.1063/1.5110342
- [23] 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. doi:10.1103/PhysRevSTAB.17.023401
- [24] K. Sakaue *et al.*, “Coherent Undulator Radiation from an Energy Chirped Electron Bunch,” 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
- [25] S. Kashiwagi *et al.*, “Demonstration of Variable Polarized Coherent Terahertz Source,” Infrared Physics & Technology 106, 103274 (2020),
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135049519310254>
- [26] T. Kobayashi *et al.*, “Study on Pre-bunched Free Electron Laser in the Terahertz Wavelength Range,” Proceedings of IPAC2025, 2025, pp.232-234. doi:10.18429/JACoW-IPAC25-MOPB093
- [27] 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
- [28] 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. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.070701
- [29] H. Zen *et al.*, “Record High Extraction Efficiency of Electron Laser Oscillator,” Applied Physics Express 13, 2020, 102007. doi:10.35848/1882-0786/abb690
- [30] H. Zen *et al.*, “Full Characterization of Superradiant Pulses from a Free-Electron Laser Oscillator,” Scientific Reports, 13, 2023, 6350. doi:10.1038/s41598-023-33550-z
- [31] 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. doi:10.1364/OE.503090
- [32] 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
- [33] H. Zen *et al.*, “Present Status of Free Electron Laser Facility at Kyoto University,” Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2024, pp.1150-1153, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/WTSP/WTSP13.pdf