

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)}, 紀井俊輝^{A)}, 大垣英明^{A)}

Heishun Zen^{#, A)}, Toshiteru Kii^{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 2023 年 8 月現在の FEL 装置概略図を示す。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]。

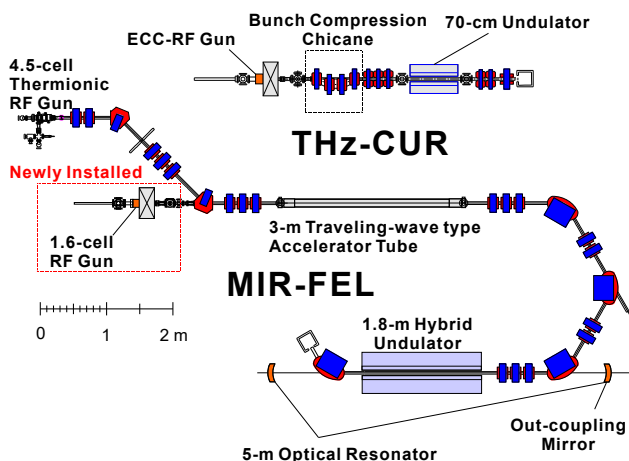


Figure 1: Layout of MIR-FEL and THz-CUR source in August 2023.

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

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

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[25]などを外部利用者との共同研究で進めている。

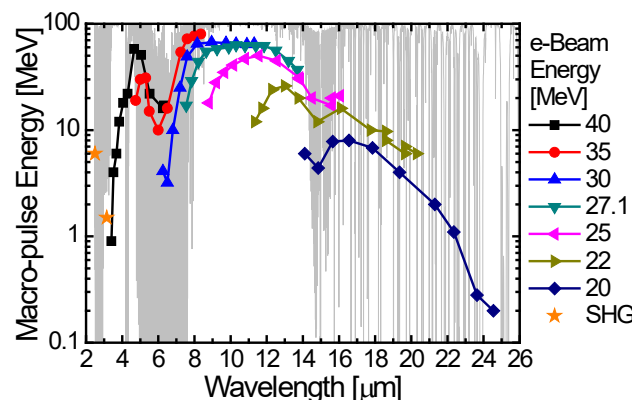


Figure 2: Macro-pulse energy of KU-FEL under the thermionic operation available at the user station 1.

2. 京都大学中赤外自由電子レーザーの性能

KU-FEL の 2023 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 LaB₆ 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再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(ZnGeP₂, $\theta=48.8$ deg. $\phi=0$ deg., 3 Photon 社製)を用いた二次高調波発生も行っている[26]。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。

Table 1: Performance of KU-FEL

RF Gun Operation Mode	Thermionic	Photocathode
Wavelength Range	3.4 – 26 μm	To be determined
Max. Macro-pulse Energy*	80 mJ @8.4 μm	4.5 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	~40 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]

*Observed at user station 1 (after 12 m transport). †Measured before the undulator duct replacement.

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[27]。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[28]。

昨年度の加速器学会以降、FEL 取出し用 KRS-5 真空窓を直入射から 45 度 P 偏光入射に変更し、この真空窓での反射ロスを低減すると共に、この真空窓をパワーモニタ&ガイドレーザ入射用のビームスプリッタとして利用する事で、その後挿入していた KRS-5 ビームスプリッタを除去することが可能となった。真空窓での反射損失低減およびビームスプリッタ除去により、下流で利用可能なFEL強度が1.74倍増強された。

2023年6月にはMIR-FEL用アンジュレータ真空ダクトを新規に製作したチタン/チタン合金製の物と交換し、アンジュレータの最小ギャップが 16.5 mm から 15.15 mm(機械的には 15.0 mm まで可。リミットスイッチの設置精度で 15.15 mm に制限)まで短縮された。これにより、アンジュレータ磁場強度変化による波長可変範囲が従来の約 1.6 倍に広がった。

2023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イクロパルスエネル

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 と低いため、マイ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得られる。これは熱的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[29]、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[28]。

3. KU-FEL 稼働状況

Figure 3 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2022 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 448.4 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 47%であり、まだマシン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ンタイム意向調査を行い、11 月のキャンパス全館停電までに通外部ユーザー利用実験を実施することとした。2022 年度も同様の方針でマシンタイム配分を実施し、ユー

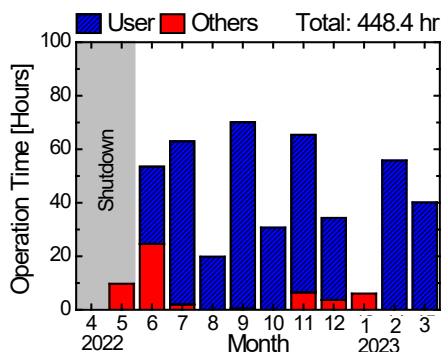


Figure 3: Operation time of KU-FEL facility in FY2022. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study of the driver linac and FEL parameter measurements are included in “Others”.

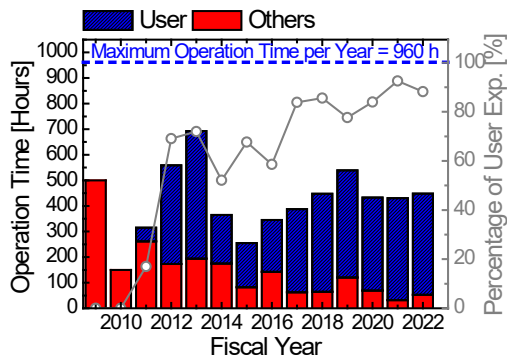


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

ザー利用を行った。また、2022年3月から5月末の間は1.6 空洞高周波電子銃の加速管直上流への追加に伴う放射線遮蔽の変更に関する変更申請および遮蔽変更・追加作業のため、シャットダウン期間となった。5月の加速器運転は施設検査前の調整運転に依るものである。

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実験が増加した。2022年度には、総運転時間の約88%がユーザー利用実験に供された。2022年度は2021年度と比べ運転時間は微増した。2022年度のユーザー数は18と2021年度に比べて2増加した。

2023年度は外部ユーザーグループ数が17と2022年度の18から1減少した。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実験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。

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。

電子銃用モジュレータは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年度に完了していた[30]。2019年度は加速管用モジュレータの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。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。現在、様子を見ながら継続して使用している。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[31]。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、高周波電子銃励振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砲頻度が増加しており、そろそろクライストロンの交換も考える必要が生じてきた。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。

KU-FELの光共振器ミラーは上流下流各5軸制御可能となっており、従来、10台のステッピングモータを10台のドライバ、1台のPLCで駆動・制御してきた。2022年度にはPLCが故障したため、ツジ電子製16chステッピングモータコントローラ(PM16C-04XDL)を導入すると共に、

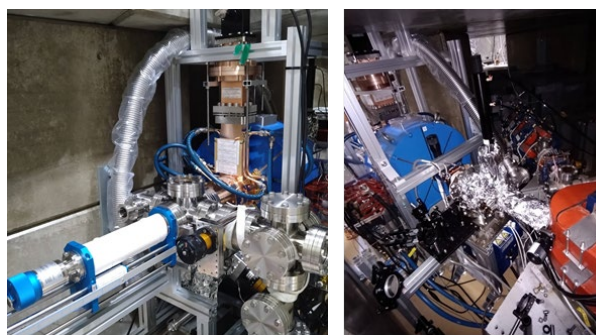


Figure 5: Photo of new 1.6 cell RF gun installation.

ドライバをマイクロステップ制御可能な物と交換した。これにより、光共振器の制御精度が向上した。

5. 施設整備状況

更により多くのユーザーに利用して頂ける様、加速器及び利用環境の整備を引き続き行っている。以下に案件毎に整理して述べる。

5.1 光陰極運転によるKU-FELの高ピークパワー化

2018年度から光・量子飛躍フラグシッププログラム(Q-LEAP)、基礎基盤研究課題として、中赤外自由電子レーザー(FEL)で駆動する高繰返し高次高調波発生(HHG)アト秒光源(FEL-HHG)の実現を目指し、量研、日大、KEK、京大エネ研のチームで研究開発を開始した。本プロジェクトでは、共振器型中赤外自由電子レーザーで発生させた高強度数サイクル中赤外光を希ガスに集光し、HHGを行い、アト秒X線発生を行う予定である。研究プロジェクトの構想や概要については、プロジェクトリーダーである量研の羽島氏が過去の加速器学会で報告しているため、そちらを参照されたい[32]。KU-FELでは、既設のKU-FEL施設をアップグレードする事でHHG駆動に必要な高強度数サイクル中赤外光の発生を目指して研究を進めている。2018年度には光陰極運転用陰極励起用レーザーシステムのアップグレードを行った[33]。2019年度は中赤外FELのパルス長測定系の構築を進めると共に、アップグレードした光陰極励起用レーザーシステムを用いた実験を行い、バンチ電荷量190 pC、マクロパルス長7 μsの電子ビームを発生させ、FEL発振を行うことで、引き出し効率9.4%という共振器型FELの引き出し効率として、世界最高記録を達成した[29]。また、更なるバンチ電荷量の増大による引き出し効率向上とピークパワー増大に向けて、新光陰極高周波電子銃の導入を進めており、2020年度にはKEK工作室の支援を受けて専用1.6空洞光陰極高周波電子銃を製作した[34]。2022年3月から6月の間に放射線遮蔽の改造・増強を実施すると共に、加速管直上流に新1.6 空洞高周波電子銃を設置した(Fig. 5)。2023年2月に銅陰極を用いたPhase Iコミッションングを実施し、電子ビーム発生とこの電子銃から発生させた電子ビームを用いたFEL発振を達成した[14]。

5.2 取出し窓変更によるMIR-FEL強度増強

これまでのFEL利用実験において、ユーザーの希望する実験を実施するに足る強度を持つFELの供給が出

来ており、強度増強の需要は高くなかった。しかし、前述の Q-LEAP 事業における希ガスからの高次高調波発生においては、これまでよりも高い FEL 強度が要求されている。従来の FEL 光取出し真空窓・輸送系では 2 枚の KRS-5 窓がほぼ直入射で挿入されており、ここで強度が約半分に減衰していた。2022 年度後半にこの部分での減衰を低減することでユーザー実験ステーションにて利用可能な FEL 強度の増強を図った。結果として、期待された通り 1.74 倍の強度増強が達成された。

5.3 アンジュレータ真空ダクト交換による狭ギャップ化

MIR-FEL 用アンジュレータの機械的な最小ギャップは 15.0 mm であるが、実際の最小ギャップは真空ダクト (SUS304 製、外幅 15.0 mm、内幅 11.0 mm) により 16.5 mm に制限されていた[35]。これは SUS304 加工時に生じた磁性を除くべく磁気焼鈍を実施した際に生じた変形が主な原因であった。MIR-FEL の更なる引き出し効率向上、性能向上に向けて、新たに外幅 14.0 mm、内幅 11.0 mm のチタン/チタン合金製真空ダクトを製作し、交換することで最小ギャップの短縮を図った。非磁性のチタン/チタン合金の利用により磁気焼鈍が不要になると共に、チタンの特性を活かして真空ダクト肉厚を 2 mm から 1.5 mm に変えることで、内幅を保ちつつ外幅を 1 mm 薄くする事ができた。結果として、アンジュレータギャップを機械的な最小ギャップと同じ 15.0 mm まで短縮することが可能となった。現在はリミットセンサの設置精度の加減で最小ギャップが 15.15 mm にて運用している。最小ギャップが 16.5 mm から 15.15 mm に短縮されたことにより、同一電子ビームエネルギー条件下での波長可変幅が 1.6 倍程度広がると共に、最大 K 値増大により FEL 強度も向上した。今後、K 値増大による引き出し効率増大効果を調査する予定である。

5.4 THz-CUR 用アンジュレータ交換

THz-CUR ではこれまで、産総研から移管された端部補正されていないアンジュレータを使用してきた。シングルパス型の光源のため、大きな問題は無かったが、本年度より開始した東京大学 坂上グループの科研費(課題番号 23H01198)プロジェクトで光共振器を組んでプリバンチ FEL 発生を実施することとなった。端部補正されていないアンジュレータでは端部磁場でのキックにより電子ビームの軌道中心が大きく偏向方向にずれると共に、変位量がアンジュレータの磁場強度に依存する。発振器型 FEL では光共振器光軸と電子ビーム軸を一致させる必要があり、この端部磁場でのキックが大きな悪影響を及ぼす。そこで 2023 年 7 月に端部補正されているアンジュレータへと交換を実施した。既に THz-CUR の発生を確認しており、今後、光共振器を構築し、発生波長よりも短い電子バンチを用いたプリバンチ FEL 発振とそれによる大強度 THz 発生を目指す。

6. まとめ

京都大学中赤外自由電子レーザーは 2023 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。

2022 年度の総稼働時間は 448.4 時間でその内の約 88 %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クロトロンと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。

一方、光陰極励起用レーザーの整備が進み、光陰極高周波電子銃を用いた THz 光源開発や中赤外 FEL の性能向上などの開発が進められている。今後、これらの開発が進むことで、より幅広い応用実験に利用可能な施設となる事が期待される。

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, <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 Gd₃Al₂Ga₃O₁₂: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 Phonon-mode 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ッ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] S. Kashiwagi *et al.*, “外部光共振器を用いたコヒーレントアンジュレータ放射の電場重畳,” in these proceedings.
- [26] 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
- [27] 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>
- [28] 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>
- [29] H. Zen *et al.*, “Record High Extraction Efficiency of Electron Laser Oscillator,” *Applied Physics Express* 13, 102007 (2020), <https://doi.org/10.35848/1882-0786/abb690>
- [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/FSPO/FSPO11.pdf
- [31] 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/THPO/THPO56.pdf
- [32] R. Hajima *et al.*, “自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒 X 線光源”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 742-746, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI011.pdf
- [33] H. Zen *et al.*, “京都大学中赤外自由電子レーザーの長マクロパルス光陰極運転に向けた光陰極励起用レーザーシステムのアップグレード”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2019, pp. 786-788, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI024.pdf
- [34] T. Miyajima *et al.*, “高効率極短 FEL パルス生成のための 1.6 セル高周波電子銃の開発”, *Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2021, pp.610-613, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/WEPO/WEPO04.pdf
- [35] H. Zen *et al.*, “Present Status of Kyoto University Free Electron Laser”, *Proc. of FEL2013*, 2013, pp.711-714, <https://epaper.kek.jp/FEL2013/papers/wepso84.pdf>