

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)}, 茶谷 脩也^{A)}, Krainara Siriwan^{A)}, Torgasin Konstantin^{A)}, 紀井俊輝^{A)}, 増田開^{A)}, 大垣英明^{A)}
Heishun Zen^{#, A)}, Shuya Chatani^{A)}, Siriwan Krainara^{A)}, Konstantin Torgasin^{A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Kai Masuda^{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. Recently, a THz coherent undulator radiation source driven by a compact-accelerator using a photocathode RF gun has been developed. In this paper, the present statuses of those light sources are 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, Figure 1)を開発してきた[1, 2]。これまでに、波長 3.5~23 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[4-7]や生物試料への照射[8]等、幅広い応用実験に供されている。

KU-FEL 装置は周波数 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 2018 年 7 月現在の FEL 装置概略図を示す。2011 年 12 月には、

JAEA の ERL-FEL にて使用されていた 1.8 m アンジュレータ[9]をそれまでに使用していたアンジュレータ[1]と交換すると共に、光陰極高周波電子銃の導入に向けて、FEL 光共振器長を従来の 4.514 m から 5.039 m へと変更した。この共振器長を光が往復するのに要する時間は既設モードロックレーザー発振器の繰り返し周波数 89.25MHz の 3 周期分に当たる。また、それと同時に光共振器を再設計し、短波長での光取り出し損失が小さくなる様に上流ミラーに設けた光取り出し穴の穴径をこれまでの 2 mm から 1 mm へと小さくした。上記の更新と 2013 年度に行ったアンジュレータダクトの更新により、現在、波長 3.5-23 μm において発振可能となっている。また、2013 年には、ビーム位置モニタとそれを用いた位置・エネルギー・加速管位相のフィードバック制御を本格的にユーザー運転に導入し、加速器の安定性が向上すると共に、日々の運転条件の再現性が向上している。

中赤外 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[10,11]。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 KU-FEL 用電子銃と共有している。2015 年 4 月に光陰極高周波電子銃からの電子ビーム発生に成功した。その後、2016 年 3 月にバンチ圧縮器の設置を完了、2016 年 4 月にコヒーレント遷移放射を用いたバンチ圧縮条件の確認を行った。そして、2016 年 7 月にアンジュレータの設置を完了し、2016 年 8 月にコヒーレントアンジュレータ放射の発生を確認した。

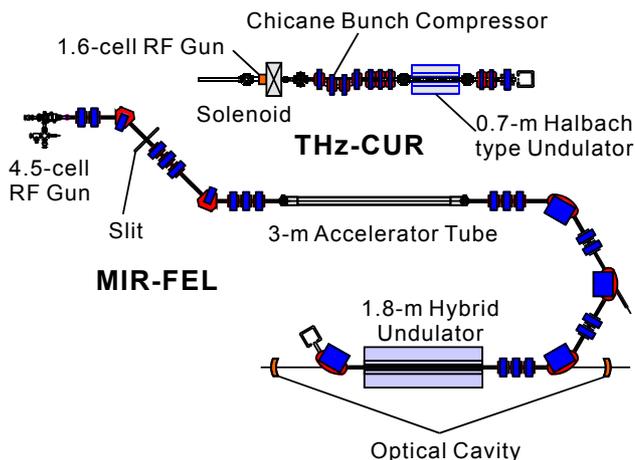


Figure 1: Layout of MIR-FEL and THz-CUR source in July 2018.

2. 京都大学中赤外自由電子レーザーの性能

KU-FEL の 2018 年 7 月現在の性能を Table 1 に示す。2018 年 7 月 28 日に行ったユーザー利用実験後の FEL 発振状況確認時に、波長 4.9 μm にて最大マクロパルスエネルギー 41.8 mJ を記録した。その際の写真を Fig. 2 に示す。これは FEL 光共振器の取出し穴から約 12 m 輸送した先にある光学台上で測定したものであり、昨年度までの最大マクロパルスエネルギー 30 mJ を大きく上回るものである。これは依然として、運転パラメータの調整により、より大きな光出力を得られる可能性が有る事を示唆している。実際のところ、この数日前に、アンジュレータ上流に設置された BPM の波形をリアルタイム解析し、マクロパルス内でのビーム位置変動をモニタ可能

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

とし、その情報に基づき、マクロパルス中でビーム位置変動が小さくなる様に運転パラメータを調整する事で、最大マクロパルスエネルギーの記録を更新する事が可能となった。同様の調整を行う事で、他の波長においても、これまで以上の出力が得られると考えられる。

また、FEL の性能を示す指標の一つに、電子ビームから FEL 光にどれだけのエネルギーが受け渡されたかを示す、引き出し効率がある。アンジュレータ通過後の電子ビームエネルギー分布の時間発展を測定する事でこの引き出し効率の測定を行い、発振波長 11.6 μm において、約 5%という高い引き出し効率が達成されている事が分かった。これは常伝導加速器を用いた FEL で報告された最高の引き出し効率であり、バンチ長がスリッページ長よりも長く、マクロパルス内での絶妙なバンチ周波数変調により達成されたと考えられる[12]。

Table 1: Performance of KU-FEL

Wavelength Range	3.5 – 23 μm
Max. Macro-pulse Energy*	41.8 mJ @4.9 μm
Typ. Macro-pulse Duration	2 μs
Max. Micro-pulse Energy*	7.3 μJ @4.9 μm
Micro-pulse Duration [13]	0.6 ps @12 μm
Typ. Bandwidth	3%-FWHM
Max. Extraction Efficiency [12]	5% @11.6 μm

*Observed after 12 m transport.



Figure 2: The maximum macro-pulse energy available at the user station #1. This was recorded after a user experiment on 28th July, 2018.

3. KU-FEL 稼働状況

Figure 3 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2017 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 388 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 40%であり、まだまだマシントimeに余裕がある状況である。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。2013 年度には、総運転時間の約 72%がユーザー利用実験に供された。2014 年度は THz-CUR 駆動用高周波電子銃増設作業や熱陰極高周波電子銃中熱陰極ヒータ通電用ラインの破断によるトラブルの為、運転時間が 400 時間を割り込んだが、2015 年度は更に総運転時間が短くなり、255 時間となった。これは、昨年度も報告した高周波電子銃用クライストロンモジュールのコンデンサ不

良と内部ユーザーの利用時間が短くなった事が主要因である。2016 年度はまだ不良コンデンサの交換が終わっておらず、運転時間が延びなかったが、2017 年度 4 月にコンデンサの全交換を終了した。あまり大きな増加ではないが、2017 年度は 2016 年度と比べて、運転時間が延びた。また、総運転時間の約 83%がユーザー利用実験に供された。

2018 年度は所外共同利用・共同研究の件数が 2017 年度の 8 件から 10 件に増加しており、ユーザー利用時間の更なる増加を見込んでいる。前述の通り、モニタ系の充実とともに、運転条件の最適化も進み、KU-FEL 自身の性能は年々向上しており、様々な応用実験に利用可能な性能が得られている。経年劣化に起因するトラブルに対処しながら、施設の安定運転を実現し、ユーザー利用の拡大を更に進めていく予定である。

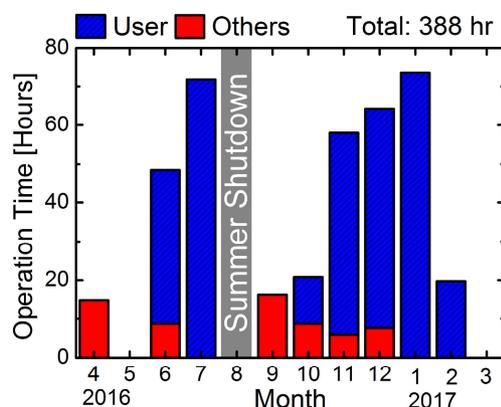


Figure 3: Operation time of KU-FEL facility in FY2017. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study of the driver linac and FEL parameter measurements are included in “Others”.

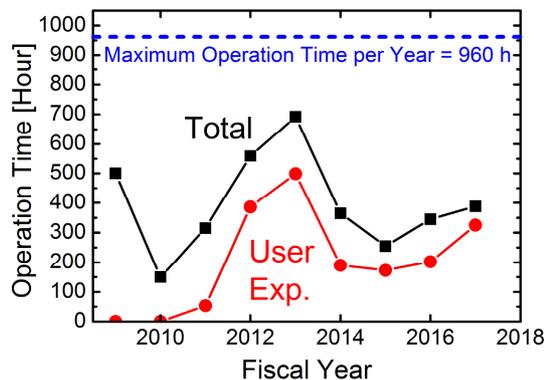


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

4. トラブルおよび問題点

4.1 高周波窓の真空漏れ

2013~2017 年度の年会でも報告したが、進行波型加速管の上流側の RF 窓から加圧時に SF₆ ガスが RF 窓

を通過して真空側に漏れるという問題が発生している。加速器室の室温と加速管部の真空度が強い相関を示しており、夏季に真空度が悪化する。交換用 RF 窓が調達済みであるので、症状の推移をみて交換タイミングを決める予定である。

4.2 電子銃用クライストロンモジュレータのサイラトロンノイズ増加

電子銃用クライストロンモジュレータの放電スイッチとして、サイラトロン(TRITON 社製 F-117)が用いられている。近年、放電時のノイズが増加すると共に、パルス毎のノイズの強度が不安定になるという現象が生じている。そして、このノイズ増加が原因と考えられる PFN 高圧充電電源の制御ボードの異常・故障が発生する様になった。幸い、予備のサイラトロンが一本あるので、PFN 製造メーカと相談しながら交換する事を考えている。また、現在使用しているサイラトロンは既に入手不能になっており、半導体スイッチとの置き換えを考えており、PFN 製造メーカと相談しつつ、大学本部への予算要求を行っている。

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 光陰極高周波電子銃を用いた THz 光源開発

2009 年度に KEK の大学等連携支援事業の下、2009 年度に 1.6 空洞高周波電子銃(改良型 BNL Type Gun-IV)を製作したのに端を発し、これまで、継続して光陰極高周波電子銃を電子源として用いた THz コヒーレントアンジュレータ放射(THz-CUR)の開発を継続して行ってきた[14]。2017 年度は構成された THz 検出器を用いて、絶対強度測定を行い、その結果として周波数 170 GHz において、1 ミクロパルス当たり約 1.3 μ J、ピークパワー約 20 kW の 10 サイクル放射の発生に成功している事が確認された[15]。また、バンチ電荷に対する放射強度の依存性から、大電荷時に空間電荷効果の影響でパルス圧縮が上手くできなくなり、出力が飽和するという結果が得られている[15]。これを受けて、どの様にして、空間電荷効果の影響を低減し、大電荷条件で短いバンチ長を得るかの検討を行っている[16]。

5.2 高速焦電検出器の導入と光共振器損失の調査

昨年度に報告した様に[14]、KU-FEL の長波長側発振限界は 23 μ m であり、また、波長 13 μ m 以上ではマクロパルスエネルギーが顕著に低下していく事が分かっている。この原因調査の一環として、高速焦電検出器(ELTEC 社製 Model 420)を導入し、FEL 光共振器損失の調査を行ったところ、波長 15 μ m 以上で予期せぬ光共振器損失の増大が確認され、波長 23 μ m では約 7% の光共振器損失が有る事が分かった。この光共振器損失の増大が 13 μ m 以上で顕著にマクロパルスエネルギーが低下する一因となっていると考えられる。しかし、10%程度の光共振器損失は 24 μ m 以上で FEL 発振できない理由の決定打とは考えられず、アンジュレータ用真空ダクトが持つ導波管モードの影響やスリッページ増大による FEL ゲインの低下等、他の影響も含めてより詳

細な調査を行う必要があると考えられる。

また、共振器損失低減に向けて、光共振器ミラー直前の真空ダクトを直径の大きいものと交換するなど、随時、対策を施しているが、今の所、大きな改善は見られておらず、最も有効径が小さいアンジュレータ用真空ダクトの交換や再アライメントも視野に入れて、検討を進めている。

6. まとめ

京都大学中赤外自由電子レーザーは現在、当初の目標波長領域(5~20 μ m)を超える 3.5~23 μ m での発振が可能となっている。モニタ系の整備が更に進み、運転条件が最適化されることで、より大きなマクロパルスエネルギーを持つ FEL を発生可能となっており、更なる最適化により、性能向上が可能である事が示唆された。

昨年度の総稼働時間は 388 時間でその内の約 83% がユーザー利用実験に供された。2014 年 7 月より問題となっていた不良コンデンサの全交換が終了し、その後、問題なく運転が可能となっている。しかし、今後、安定的にユーザー利用を推進していく為には、開発初期段階で導入し、耐用年数を過ぎた機器の交換や更新が必要となってくると考えられる。

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。また、更なる波長領域の拡大を目指した詳細な検討も行われており、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。

参考文献

- [1] H. Zen *et al.*, "Development of IR-FEL Facility for Energy Science in Kyoto University", *Infrared Physics and 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] 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>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] 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/
- [9] R. Nagai *et al.*, “Performance of the undulator for JAERI FEL project,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 358, 1995, pp.403-406; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900201689002>
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] H. Zen *et al.*, “Measurement of Extraction Efficiency of Kyoto University Free Electron Laser”, FROL03, in these proceedings.
- [13] Y. Qin *et al.*, “Pulse Duration and Wavelength Stability Measurements of a Midinfrared Free Electron Laser,” Optics Letters, Vol. 38, 2013, pp. 1068-1070; <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-38-7-1068>
- [14] 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
- [15] 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>
- [16] S. Krainara *et al.*, “Mitigation of the Space Charge Effect for Improving the Performance of THz-CUR Source”, WEP007, in these proceedings.