PASJ2018 FSP012

# 京都大学自由電子レーザ施設の現状

# PRESENT STATUS OF FREE ELECTRON LASER FACILITY AT KYOTO UNIVERSITY

全炳俊<sup>#, A)</sup>, 茶谷 脩也<sup>A)</sup>, Krainara Siriwan<sup>A)</sup>, Torgasin Konstantin<sup>A)</sup>, 紀井俊輝<sup>A)</sup>, 増田開<sup>A)</sup>, 大垣英明<sup>A)</sup> Heishun Zen<sup>#, A)</sup>, Shuya Chatani<sup>A)</sup>, Siriwan Krainara<sup>A)</sup>, Konstantin Torgasin<sup>A)</sup>, Toshiteru Kii<sup>A)</sup>, Kai Masuda<sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 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  $\mu$ m 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 空胴高周波電子銃と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

<sup>#</sup> 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                | $3.5 - 23 \mu m$ |
|---------------------------------|------------------|
| 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、まだまだマシンタイムに余裕が有 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レータのコンデンサ不 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

#### PASJ2018 FSP012

を通っ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 空胴高周波電子銃(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 µJ、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  $\mu$ m であり、また、波長 13  $\mu$ m 以長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  $\mu$ m 以長で予期せぬ光 共振器損失の増大が確認され、波長 23  $\mu$ 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確認され、波長 23  $\mu$ 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  $\mu$ m 以長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  $\mu$ m 以長で 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 交換や再アライン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は現在、当初の目標 波長領域(5~20 µm)を超える 3.5~23 µm 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 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

- 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/S135 0449507001077
   H. Zen *et al.*, "Development of Level Development of Level Devevlopment of Level Development of Level Development of Level D
- [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/S187 5389216303042
   [3] H. Zen *et al.* "Present Status of Infrared FEL Facility at
- [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

 M. Kitaura *et al.*, "Visualizing Hidden Electron Trap Levels in Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>: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.56.02270
1/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/0168 900201689002
- [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/paper s/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/S187 6610216300571

- [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/proceeding s/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.