

## 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#, 奥村 純平, 田伐 俊介, Krainara Siriwan, Torgasin Konstantin, 紀井 俊輝, 増田 開, 大垣 英明  
Heishun Zen, Jumpei Okumura, Shunsuke Tagiri, Siriwan Krainara, Konstantin Torgasin, Toshiteru Kii,  
Kai Masuda, and Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

#### Abstract

A mid-infrared Free Electron Laser (MIR-FEL) facility named as KU-FEL has been developed for promoting energy related science and researches using an intense, tunable and short pulse mid-infrared laser pulses. The facility is now opened for internal and external user experiments. Moreover, a THz coherent undulator radiation source based on a photocathode RF gun has also been developed. In this paper, present status of those accelerator-based infrared light sources is reported.

#### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、中赤外自由電子レーザー(MIR-FEL)の発生とその利用を目指し、小型量子放射発生装置(KU-FEL)を開発している。特に中赤外域(波長 5-20  $\mu\text{m}$ 、波数 2000-500  $\text{cm}^{-1}$ )は、分子振動の殆どがこの領域に出現する為に、波長可変で高パルス出力、短パルスという従来の光源にない特性を有するMIR-FELを用いる事で、化学結合の選択的な切断や多光子吸収等を利用した新しいエネルギー材料開発等が可能である。

KU-FEL 装置は 4.5 空胴熱陰極高周波電子銃、3 m 加速管(どちらも S-band)、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]。Figure 1 に 2017 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[2]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 89.25 MHz 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  $\mu\text{m}$  において発振可能となっている。また、2013 年には、ビーム位置モニター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[3,4]。THz-CUR 光源の概略図も

Figure 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。

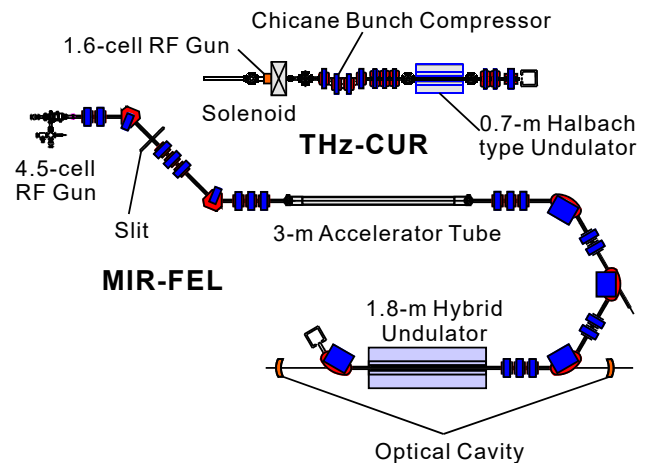


Figure 1: Layout of MIR-FEL and THz-CUR source in July 2017.

#### 2. 京都大学中赤外自由電子レーザーの性能

KU-FEL の 2017 年 7 月現在の性能を Table 1 に示す。2017 年 6 月に実施した状況調査において、波長 3.5  $\mu\text{m}$  での発振に成功した為、発振可能波長域は現在、3.5~23  $\mu\text{m}$  となっており、当初目標であった 5~20  $\mu\text{m}$  を超える波長域をカバーする事が可能となっている。また、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各 FEL 波長でのパルスエネルギーを Figure 2 に示す。大気による吸収(灰色実線)の為、所々、ユーザーステーション 1 に届く FEL パルスエネルギーが低下しているが、輸送路を室素置換する事で大

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

気による吸収の影響を抑える事が可能である。また、4~13  $\mu\text{m}$ の間では 10 mJ を超えるマクロパルスエネルギーを持つ FEL の利用が可能となっているが、13  $\mu\text{m}$  よりも長い波長では波長が長いほど FEL 強度が低下する傾向がある。原因としては、長波長になるほど、FEL の光共振器からの取出し効率が低下する事、アンジュレータ中でのスリッページ長が長くなり、FEL ゲインが低下する事、光共振器中での回折損失が大きくなる事などが考えられ、詳細な検討を進めている。

Table 1: Performance of KU-FEL

Wavelength Range	3.5 – 23 $\mu\text{m}$
Max. Macro-pulse Energy*	30 mJ @5 $\mu\text{m}$
Typ. Macro-pulse Duration	2 $\mu\text{s}$
Max. Micro-pulse Energy*	5 $\mu\text{J}$ @5 $\mu\text{m}$
Micro-pulse Duration†	0.6 ps @12 $\mu\text{m}$
Typ. Bandwidth	3%-FWHM

\*Observed after 12 m transport.

† Reported in reference [5].

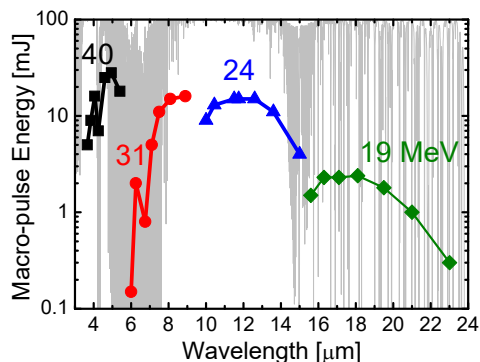


Figure 2: Available macro-pulse of KU-FEL in its wavelength range at the user station #1. Numbers written in the graph shows the electron beam energy. Gray line is the percentage transmission of air with 12 m path length.

### 3. KU-FEL 稼働状況

Figure 3 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2016 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 343 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 36%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 2015 年度に比べて少し総運転時間が増加したが、依然として 400 時間を割り込んでいる。2017 年度は所外共同利用・共同研究の件数が

2016 年度の 5 件から 8 件に増加しており、ユーザー利用時間の増加を見込んでいる。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。

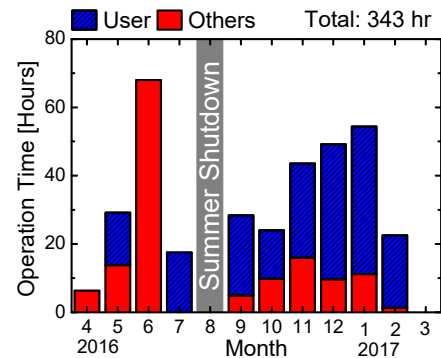


Figure 3: Operation time of KU-FEL facility in FY2016. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study on the driver linac and FEL parameter measurements are included in “Others”.

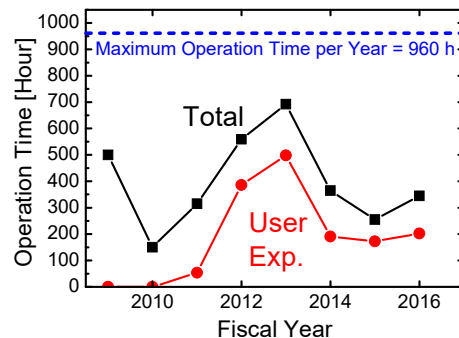


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

### 4. トラブルおよび問題点

#### 4.1 高周波窓の真空漏れ

2013~2016 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 SF<sub>6</sub> 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コンデンサ不良(解決済み)

2016 年度の年会でも報告したが、2014 年 7 月より高周波電子銃用クライストロンモジュレータの PFN 用コンデンサ(HAEFELY 社製 TYPE: CJF/CV114、耐電圧 30 kV、1997 年製造)の大量破損が発生していた。早稲田大学鷲尾研究室のご厚意で使用しなくなったほぼ同仕様の

コンデンサを 5 本移管して頂くと共に、産総研の黒田隆之助氏よりサイズが大きいがほぼ同仕様の使用済みコンデンサを 4 本移管して頂き、何とか延命してきた。その後、2015 年度の予算で代替コンデンサ (NWL CAPACITORS 社製、65 nF $\pm$ 10%、30 kV peak) を 10 本購入し、アタッチメントを製作する事で初代コンデンサと同じ設置方法での設置を可能とした。2016 年度には更に 10 本代替コンデンサを調達し、2017 年 4 月に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(全 20 本)を新しいコンデンサと交換した。交換後の写真を Figure 5 に示す。現在、交換後 3 ヶ月が経過したが、大きなトラブルは無く、問題なく運転できている。



Figure 5: Photograph of new capacitors installed in PFN with specially designed attachments.

#### 4.3 電子銃用クライストロンモジュレータのサイクロンノイズ増加

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、サイクロン(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。また、光陰極高周波電子銃駆動用ピコ秒モードロックレーザを音響光学変調器にてパルス切り出しを行っているが、その切り出しタイミングがショットごとに大きくふらつくという現象が観測されている。幸い、予備のサイクロンが一本あるので、PFN 製造メーカー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ク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 製造メーカーと相談しつつ、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

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)の製作を行い、2010 年度に光陰極励起用レーザの導入を開始、2011 年度よりゼロエミッションエネルギー研究拠点の共同研究として産総研の黒田隆之助氏の助力の下、マルチパス増幅器の構築を開始し、2012 年度に 4 次高調波

(266 nm)の発生を確認した。当初はこの電子銃を中赤外 FEL 発生用に使用する予定であったが、諸般の事情により小型 THz 光源の電子源とする事に方針を変えた。2014 年 10 月に高周波立体回路の組み換えを行い、2015 年 6 月からコミッションを開始した。2015 年度には電子ビームのエネルギー・エミッタンスといった諸特性の測定を行った[6]。その後、シケイン型磁気バンチ圧縮器でのバンチ圧縮試験を行い、バンチ圧縮が可能である事、250 GHz までのコヒーレント遷移放射の発生を確認した[4]。そして、2016 年 7 月に THz-CUR 発生用アンジュレータを設置し、同 8 月に 0.17 THz から 0.55 THz の THz-CUR の発生を確認した。

2017 年度も THz-CUR の性能評価試験を実施しており、絶対強度測定の結果として 1 ミクロパルス当たり約 0.6  $\mu$ J、ピークパワー約 10 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[7]。バンチ電荷に対する放射強度の依存性など、更に詳細な調査も行っている。

#### 5.2 高速焦電検出器の導入と光共振器損失の調査

前述の様に、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、長波長領域で FEL マクロパルス構造の測定が可能な高速焦電検出器(ELTEC 社製 Model 420)を導入し、FEL 光共振器損失の調査を行った。結果として、波長 15  $\mu$ 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  $\mu$ 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  $\mu$ 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。

### 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を超える 3.5~23  $\mu$ m での発振が可能となっている。昨年度の総稼働時間は 343 時間でその内の約 59%がユーザー利用実験に供された。2014 年 7 月から頻発していた高周波電子銃駆動用クライストロンの PFN コンデンサの故障に対する処置として、コンデンサ全数(20 本)の交換を終え、中赤外 FEL の安定供給体制が回復した。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

- [1] 山崎鉄夫: 加速器、2 (2005) 251.

- [2] R. Nagai *et al.*, “Performance of the undulator for JAERI FEL project,” NIM A 358, pp.403-406 (1995);  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900201689002>
- [3] S. Suphakul *et al.*, “Generation of Short Bunch Electron Beam from Compact Accelerator for Terahertz Radiation,” Proceedings of IPAC2016, pp.1757-1759 (2016);  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tupow008.pdf>
- [4] S. Suphakul *et al.*, “Beam Dynamics Investigation for the Compact Seeded THz-FEL Amplifier,” Energy Procedia 89, pp.373-381 (2016);  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216300571>
- [5] Y. Qin *et al.*, “Pulse Duration and Wavelength Stability Measurements of a Midinfrared Free Electron Laser,” Optics Letters, Vol. 38, Pages 1068-1070 (2013);  
<https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-38-7-1068>
- [6] K. Damminsek *et al.*, “Electron Beam Properties from a Compact Seeded Terahertz FEL Amplifier at Kyoto University,” Proceedings of FEL2015, pp.85-88 (2015).
- [7] S. Krainara *et al.*, in these proceedings (WEOM02).