

## 京都大学中赤外自由電子レーザーの現状

### PRESENT STATUS OF MID-INFRARED FREE ELECTRON LASER AT KYOTO UNIVERSITY

全 炳俊<sup>#</sup>, 守田 健一, 桂山 翼, Suphakul Sikharin, Torgasin Konstantin, 紀井 俊輝, 増田 開, 大垣 英明  
Heishun Zen, Kenichi Morita, Tsubasa Katsurayama, Sikharin Suphakul, Konstantin Torgasin, Toshiteru Kii,  
Kai Masuda, Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

#### Abstract

A mid-infrared Free Electron Laser (FEL) facility, named Kyoto University FEL (KU-FEL), has been developed for promoting energy related researches at Institute of Advanced Energy, Kyoto University. In fiscal year 2015, the FEL operated for 255 hours. About 70% of operation time was dedicated to users. There was a shutdown periods in August and September for machine maintenance. The present status of KU-FEL facility is reported in this paper.

#### 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 空洞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 2016 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

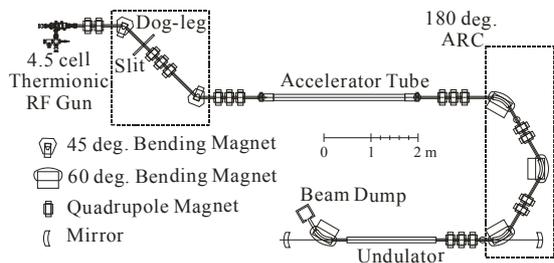


Figure 1: Schematic drawing of KU-FEL accelerator and FEL devices in July 2016.

<sup>#</sup>zen@iae.kyoto-u.ac.jp

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 3.6-23  $\mu\text{m}$  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。

#### 2. 京都大学中赤外自由電子レーザーの性能

KU-FEL の 2016 年 7 月現在の性能を Table 1 に示す。2016 年 6 月に実施した状況調査において、波長 3.6  $\mu\text{m}$  での発振に成功した為、発振可能波長域は現在、3.6 から 23  $\mu\text{m}$  となっている。また、FEL 光共振器の取り出し穴から約 12 m 輸送した先にあるユーザーステーション 1 にて測定した各 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、輸送路を窒素置換する事で大気による吸収の影響を抑える事が可能である。また、4  $\mu\text{m}$  から 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り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	3.6 – 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 <sup>†</sup>	0.6 ps @12 $\mu\text{m}$
Typ. Bandwidth	3%-FWHM

\*Observed after 12 m transport.

<sup>†</sup> Reported in reference [3].

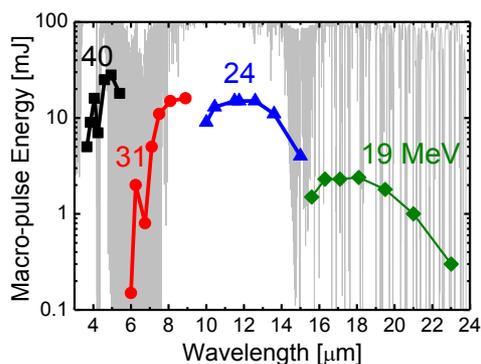


Figure 2: Available macro-pulse of KU-FEL in its wavelength range at the user station #1. Numbers written in the graph shows the electron beam energy. Gray line is the percentage transmission of air with 12 m path length.

### 3. 加速器稼働状況

Figure 3 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2015 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 255 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 27%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 年度からユーザー利用実験が増加し始め、2012 年度以降にユーザー利用実験が本格化し、全運転時間の半数以上を占めていることが見て取れる。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-FEL 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。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。施設の安定運転を実現し、ユーザー利用を拡大する事が当面の大きな課題である。

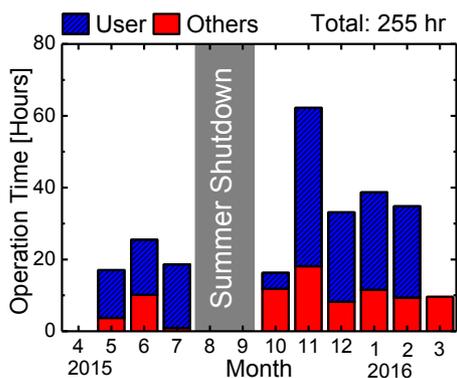


Figure 3: Operation time of KU-FEL facility in FY2015. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study on the driver linac, FEL transport line development and FEL parameter measurements are included in “Others.”

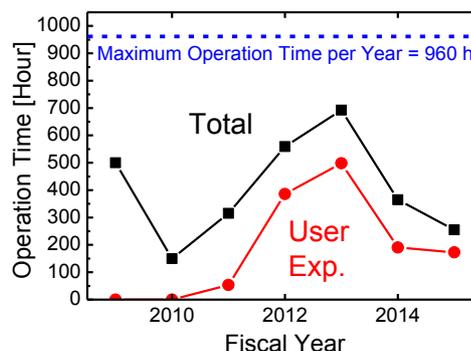


Figure 4: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

### 4. トラブルおよび問題点

#### 4.1 高周波窓の真空漏れ

2013~2015 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 窓を通して真空側に漏れるという問題が発生している。夏季に真空度が悪化し、冬季に真空度が回復するという傾向を示している。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

2015 年度の年会でも報告したが、2014 年 7 月より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)の破損が発生している。2015 年度の年会の段階で 22 本中 10 本が破損し、早稲田大学の鷲尾研究室のご好意で使用しなくなったほぼ同仕様のコンデンサを 5 本移管して頂き、何とか延命していると報告したが、既に 4 本のコンデンサが破損しており、20 段を 15 段に減らして運転中と報告した。その後、引き続きコンデンサの破損が続いたが、産総研の黒田隆之助氏よりサイズが大きいほぼ同仕様の使用済みコンデンサを 4 本移管して頂いた。同コンデンサは設置方法を工夫して Figure 5 の様にマウントする事が可能であり、これにより、運転を継続する事が可能であった。また、2015 年度の予算を使って代替コンデンサ(NWL CAPACITORS 社製、65 nF±10%、30 kV peak)を 10 本購入し、アタッチメントを製作すること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。設置時の写真を Figure 6 に示す。その後はコンデンサの破損が生じた時に新しいコンデンサとの入れ替えを行う形で置き換えが進んでいる。現在は産総研からのコンデンサ 4 本、早稲田大学からのコンデンサ 1 本、初代コンデンサ 8 本、新コンデンサ 3 本の 16 台体制で運転を行っている。

これまでの運転で、新しく調達したコンデンサが問題なく使える事がわかった為、今年度、更に 10 本のコンデンサと追加発注した。この冬に納品予定である。全 20 本分の新コンデンサが揃った段階で全てのコンデンサを新コンデンサと交換する予定である。



Figure 5: Mounted high voltage capacitors in a klystron modulator. Four capacitors in the front side are used capacitors transported from AIST. Two capacitors in the back side are the original capacitors used in this modulator.



Figure 6: Mounted high voltage capacitors in a klystron modulator. Rectangular ones are new capacitors made by NWL CAPACITORS. Others are original ones.

## 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ーの導入を開始、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<sup>[3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。

### 5.2 LaB<sub>6</sub> 陰極の光陰極動作による中赤外 FEL の性能向上

これまで熱陰極高周波電子銃として用いてきた 4.5 空洞高周波電子銃中の LaB<sub>6</sub> 陰極に外部からマルチバンチ UV レーザを照射し、マルチバンチ光電子ビームを発生させる事で、従来の熱陰極動作時よりもピーク輝度の高い電子ビームを発生させ、約 6 倍のピークパワーを持つ中赤外自由電子レーザーの発生に成功している<sup>[5]</sup>。その後、UV レーザのパルス長測定<sup>[6]</sup>や LaB<sub>6</sub> 陰極上での Schottky 効果の量子効率に与える影響の評価<sup>[7]</sup>、LaB<sub>6</sub> 陰極の量子効率のレーザー光子エネルギーおよび陰極温度への依存性測定<sup>[8]</sup>など、基礎的な研究を継続して行っている。

### 5.3 高周波電子銃駆動用クライストロン前置パルス増幅器交換による位相安定性の向上

KU-FEL では高周波電子銃と進行波加速管とで個別のクライストロン、LLRF 系を持つ高周波供給系を用いている。これは、熱陰極高周波電子銃特有の問題である Back-bombardment 現象を補償して電子ビームエネルギーをマクロパルス中で一定に保つ為には非常に有効なセットアップであった。一方、異なるクライストロンから電子銃と加速管にパワーを供給する為、各高周波供給系の位相安定度が悪いと、加速管に入射される電子ビームの入射位相がパルス毎に変動する為、エネルギー安定度が悪くなる。これまでの調査により、高周波電子銃への高周波供給系の位相安定度が悪く、電子ビームの安定度を低下させる原因となっている事が分っていた。これまで用いてきた高周波電子銃駆動用クライストロ

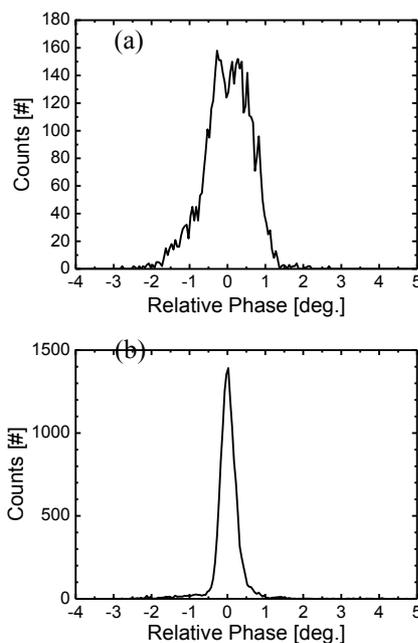


Figure 7: Measured result of shot-by-shot fluctuation of RF phase of the klystron output which is used for driving the thermionic RF gun. (a) Result with the old pulsed RF amplifier. (b) Result with the new pulsed RF amplifier.

ンの前置パルス増幅器位相安定度が悪く、これが原因と考えられた為、2015 年度にはこの前置パルス増幅器を新調した。Figure 7(a)に旧前置パルス増幅器を用いた場合、Figure 7(b)に新前置パルス増幅器を用いた場合のクライストロン出力の Shot-by-Shot 位相変動測定結果を示す。それぞれ位相検出器の信号出力をパルス毎に記録しておき、その結果から遅い変動成分を引いた後にヒストグラム化したものである。旧前置パルス増幅器を用いた場合の半値幅は 1.4 度であり、新前置パルス増幅器に置き換える事で半値幅は約 3 分の 1 の 0.44 度まで低減された。

既に新前置パルス増幅器を用いた運転を実施しており、旧前置パルス増幅器を用いた場合の FEL パワー安定度が 10%-FWHM だったのに対して、8%-FWHM まで安定度が向上した。また、電子ビームのエネルギー安定度が向上した為、FEL の波長安定度も向上したと考えられる。

## 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である 3.6~23  $\mu\text{m}$  での発振が可能となっている。昨年度の総稼働時間は 255 時間でその内の約 70% が利用実験に供された。高周波電子銃駆動用クライストロンが 1997 年の導入より 19 年が経過し、PFN コンデンサの不良や充電電源の不良など、経年劣化が原因と考えられる深刻な問題が継続している。PFN コンデンサについては早稲田大学・産総研の協力を得て、使用済みコンデンサを移管して頂く事で、急場を凌いだ。2015 年度に 10 本を調達し、2016 年度に更に 10 本を調達する事で、高周波電子銃駆動用クライストロンモジュレータ PFN の全てのコンデンサの交換が可能となる。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。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/0168900294012946>
- [3] Y. Qin *et al.*, Optics Letters, Vol. 38, Pages 1068-1070 (2013); <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-38-7-1068>
- [4] S. Sikharin *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Pages 1757-1759 (2016); <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tupow008.pdf>
- [5] H. Zen *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Pages 754-756 (2016); <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/mopow018.pdf>
- [6] H. Zen *et al.*, in these proceedings (TUP055).
- [7] H. Zen *et al.*, in these proceedings (MOP051).
- [8] K. Morita *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Pages 2088-2090 (2016); <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/wcoab03.pdf>