

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[#], 桂山 翼, 村田 智哉, 野儀 武志, Sikharin Suphakul, Torgasin Konstantin, 紀井 俊輝,
増田 開, 大垣 英明

Heishun Zen[#], Tsubasa Katsurayama, Tomoya Murata, Takeshi Nogi, Suphakul Sikharin, 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 in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. In fiscal year 2014, the FEL operated for 355 hours. About 52% of operation time was dedicated to users. There was a shutdown periods from August to October for machine maintenance and rearrangement of RF waveguides. In addition to the scheduled shutdown, we need to spend one month for recovering from trouble of thermionic cathode in our RF gun. Now there is a serious problem that four high voltage capacitances of Pulse Forming Network (PFN) in a klystron modulator have already been reaching their lifetimes. We need at least 15 capacitances in the PFN for FEL operation and now no spare is remained. Some efforts to increase the user accessibility and FEL performance are also described in this report.

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) の建設を行っている。特に中赤外域 (波長 5-20 μm 、波数 2000-500 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]。図 1 に 2015 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 5-22 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。

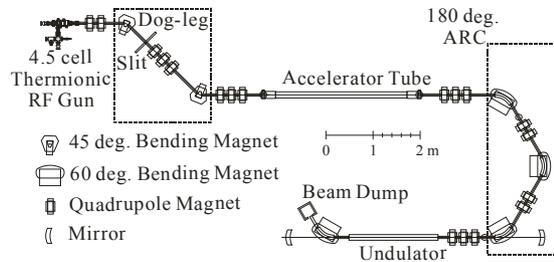


Figure 1: Schematic drawing of KU-FEL accelerator and FEL devices in July 2015.

2. 加速器稼働状況

図 2 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2014 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 355 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 37% である。図 3 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。しかし、2014 年度は前半は順調に運転時間が推移していたが、8 月、9 月の例年の夏季シャットダウンに加えて、10 月に THz-FEL 駆動用高周波電子銃増設作業の為に、シャットダウンを継続した事

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

と、11月の年一回の大学内全館停電の後、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が生じ、4ヶ月間シャットダウンしていた為、運転時間が大幅に短くなった。また、12月以降も例年と比べてユーザー利用実験の要請が少なく、利用時間が短かった為、結果として運転時間が400時間を割り込むこととなった。総運転時間に占めるユーザー利用時間の割合も52%と前年度の72%に比較して大幅に低下した。

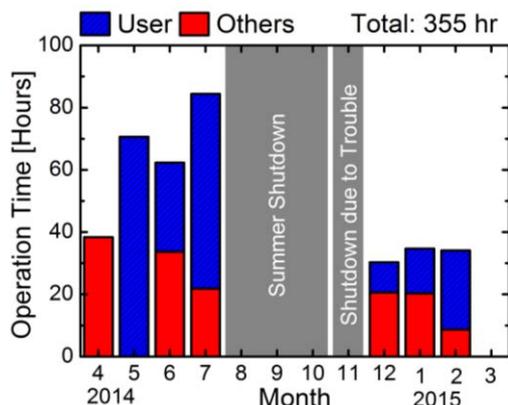


Figure 2: Operation time of KU-FEL facility in FY2014. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study on the driver linac, FEL transport line development and FEL parameter measurements are included in “Others.”

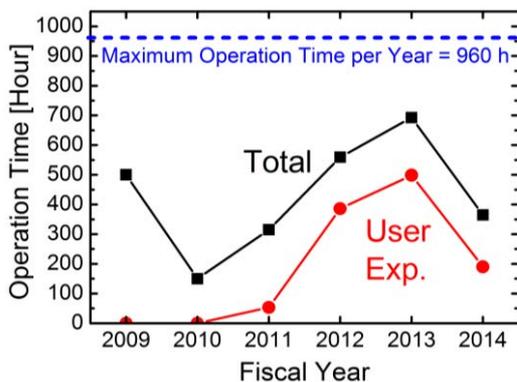


Figure 3: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

3. トラブルおよび問題点

3.1 高周波窓の真空漏れ

2013年、2014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窓の調達を済ませてあるので、症状の推移をみて交換タイミングを決める予定である。

3.2 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

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30kV、1997年製造)の破損が発生している。図4に問題が発生したコンデンサの写真を示す。



Figure 4: Photograph of damaged capacitances used in a PFN of a klystron modulator. The explosion proof valves of eight capacitances are already opened. Two blue colored capacitances were transported from Waseda University.

2014年度の年会前の段階で既に4台のコンデンサが破損しており、20段を18段に減らして運転中と報告したが、その後、更に5段破損し、いよいよKU-FEL運転に必要な15段を下回る危機が訪れた。早稲田大学の鷲尾研究室のご厚意により、使用しなくなったほぼ同じ仕様のコンデンサを5台移管して頂き、何とか延命している。移管して頂いたコンデンサも既に2台がパンクし、既設コンデンサの破損も相次ぎ、現状、ストックが無い状態となった。KU-FELの運営は極小予算で行われており、コンデンサを一気に交換する事は困難である為、代替コンデンサを一年に5台ずつ購入していき、4年で20台の交換を行う計画を立てている所である。

3.3 電子銃用クライストロンモジュレータ PFN 充電用高圧電源の動作不良

2015年春に電子銃用クライストロンモジュレータが運転中に突如として高圧充電異常を示し、止まってしまうという深刻な問題が生じた。十分以上継続して運転できる時もあれば、数ショットで停止する事もあり、症状が安定せず原因の特定に時間を要した。最終的に、PFNの充電に使用してきた高圧電源(TDK Lambda社製XR802-S)の低電圧システムに問題が

生じており、高圧充電異常を示しているという事が判明した。日新パルス電子の技術者と協議の結果、インターロックを無効化して 8 月までのユーザー運転に対応する事とした。今年度の 8 月・9 月のシャットダウン期間中に修理する予定である。

4. 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。

4.1 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で、2009 年度に 1.6 cell 電子銃空胴(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。これまでに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ている^[3]。

4.2 LaB₆ 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 空胴高周波電子銃中の LaB₆ 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の発生に成功している^[4]。

5. 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である 5~22 μm での発振が可能となっている。昨年度の総稼働時間は 355 時間でその内の約 52%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 18 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統発している。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。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).
- [3] S. Sikharin et al., in these proceedings (WEP002).
- [4] H. Zen et al., in these proceedings (FROM02).