

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 IN KYOTO UNIVERSITY

全 炳俊[#], 犬飼元晴, 梅村勇輔, 奥村健祐, 三島健太, Torgasin Konstantin, Hani Negm, Mohamed Omer,
吉田恭平, 高見 清, 紀井俊輝, 増田 開, 大垣英明

Heishun Zen, Motoharu Inukai, Yuusuke Tsugamura, Kensuke Okumura, Kenta Mishima, Torgasin Konstantin,
Hani Negm, Mohamed Omer, Kyohei Yoshida, Kiyoshi Takami, 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 energy related sciences in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. In fiscal year 2012, the FEL operated for 570 hours. About 70% of operation time is dedicated for users. There were two shutdown periods in FY2012; one was for the electric power saving in August and September 2012, and the other was for the building refinement in February and March 2013. During the winter shutdown, the vacuum chamber for the undulator was replaced with a narrower one. After the replacement, the tunable range of KU-FEL has been extended from 5-14 μm to 5-20 μm . Now there are two major problems in KU-FEL linac. One is SF_6 gas leakage through an RF window to the vacuum side. The other is a timing drift of a klystron pulse. Those are not critical for the linac operation, but they should be fixed in near future. In this paper, undergoing R&D work for the MIR-FEL is also reported.

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、比較的小規模の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)の建設を行ってきている。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 2013 年 7 月現在の FEL 装置概略図を示す。平成 23 年度 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]をこ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、将来の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。上記の更新と昨年度行ったアンジュレータダクトの更新により、現在、波長 5-20 μm において発振可能となっている。

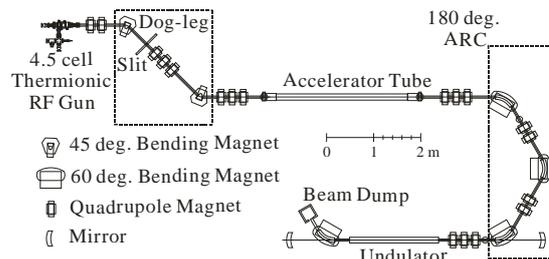


Figure 1: Schematic drawing of KU-FEL accelerator and FEL devices in July 2013.

利用研究に関しては、MIR-FEL ビーム伝送ラインが完成し、簡易計測用ステーションと蛍光分光ステーションの 2 箇所がユーザー実験に使用可能となっている。

また、当研究所は 2010 年に文部科学省により「共同利用・共同研究拠点」としての認定を受け、2011 年度から 5 年間にわたり、ゼロエミッションエネルギー研究拠点としての活動を従来の研究に合わせ実施することになった。この拠点活動は、二酸化炭素を大気中に排出せず環境調和性の高いゼロエミッションエネルギーの研究拠点として多様なエネルギー分野の融合的基礎研究を主導し、学術研究の発展とそれを担う研究者の教育・養成を通じて、国際的な課題であるエネルギー・環境・資源問題の解決に取り組むことを目的としている。KU-FEL 加速器システムは共同利用機器の一つとして、学内外の研究者に公開されている。

KU-FEL 加速器で発生する電子ビームを用いた利用研究も実施しており、シンチレータ結晶への単一電子照射による発光ユニバーサルカーブの研究、ガ

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

ス分子の電離過程の研究、高エネルギー物理学実験用の検出器校正への応用可能性の検討等を進めている。^[3]

2. 加速器稼働状況

図 2 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の平成 24 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 570 時間であった。平成 22 年度には 150 時間、23 年度には 315 時間で有り、着実に運転時間が伸びている。また、過去最長の運転時間であった平成 21 年度の 500 時間を超えた。また、総運転時間の約 70%がユーザー利用実験に供された。

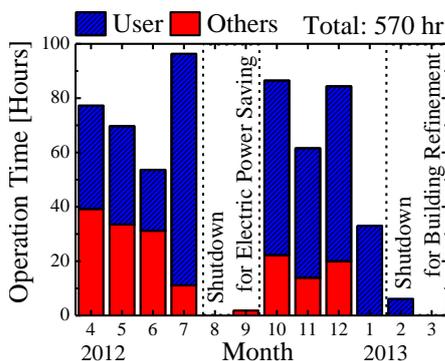


Figure 2: Operation time of KU-FEL facility in FY2012. The adjustment of accelerator, FEL lasing tuning, study on the driver linac, FEL transport line development and FEL parameter measurement are included in “Others.”

4 月～5 月にはエネルギー理工学研究所の内部ユーザーが FEL のパルス長計測と波長安定度計測手法の原理実証実験を行った^[4]。6 月には一件、外部ユーザーのテスト実験を行うと共に、FEL に含まれる高調波光の観測を行った。7 月には 4 月～5 月に行われたパルス長・波長安定度計測の追実験と非線形結晶中での YAG レーザと FEL との和周波発生を用いたシングルショット FEL スペクトル計測の実験^[5]が行われた。8 月～9 月は節電の為、運転を行わなかった。10 月に運転を再開し、シングルショット FEL スペクトル計測の実験を 7 月に引き続き行った。11 月には FEL に含まれる高調波光の観測が再度行われた。12 月には日本大学からユーザーが来訪し、生体試料への FEL 照射実験を行った。また、内部ユーザーによるプラズマシャッターを用いた FEL パルスの切り出し実験が行われた。年が明けて 1 月には九州大学よりユーザーが来訪し、単一電子照射によるシンチレータ較正実験^[3]が行われた。1 月下旬には日本大学よりユーザーが来訪し、歯のレーザ治療に関する実験が行われた。2 月～3 月にかけて施設建屋の外壁補修が行われた為、この期間もほぼ運転時間はゼロであった。この間に、電子銃の大気解放と陰極周辺部のチェック、故障していた電子銃出口のゲートバルブの交換、真空リークの有った CT 用セラミックダクトの交換、およびアンジュレータ真空ダクトをより幅の狭いものへの交換が行われた。

3. 現状の FEL 出力特性

3 月に行ったアンジュレータダクトの交換により、これまで 19.5 mm が最小ギャップだったアンジュレータを 16.5 mm までギャップを縮められる様になった。これにより、アンジュレータの最大 K 値が 1.05 から 1.49 へと大きくなり、発振可能波長範囲を昨年度報告した 5-14.5 μm ^[6]から 5-20 μm まで広げる事に成功した。また、アンジュレータギャップ変更による波長調整可能範囲も大きく広がった。得られた典型的な FEL ビームパラメータを表 2 に示す。

Table 2: Typical FEL beam parameters

| | |
|-----------------------------|---|
| Spectrum Width (FWHM) | ~ 3% |
| Macro-pulse Duration (FWHM) | ~ 2 μs |
| Macro-pulse Energy | 1 – 20 mJ |
| Micro-pulse Energy | 0.5 – 2.5 μJ |
| Micro-pulse Duration (FWHM) | < 0.7 ps @12 μm ^[4] |

アンジュレータ真空ダクト変更前はアンジュレータギャップを変化させて波長を変えるよりも高いゲインが見込まれる事から、主に電子ビームエネルギーを変化させ、波長を変化させていたが、現在、アンジュレータギャップ変更での波長変更もある程度可能となっている。図 3 に光共振器から取り出し直後の FEL パルスエネルギーを示す。図からわかる様に、電子ビームエネルギー 30 MeV、波長 9 μm で最大マクロパルスエネルギー 33 mJ が得られている。また、2 μm 程度の波長調整であれば、アンジュレータギャップの変更により、パルスエネルギーの大幅な減少無く波長を変えられる事が見て取れる。電子ビームエネルギー 20 MeV、波長が 14 μm より長い領域でのパルスエネルギーの減少は顕著であるが、まだその原因は明らかではない。電子ビームの更なる調整も含め、原因を調査する予定である。

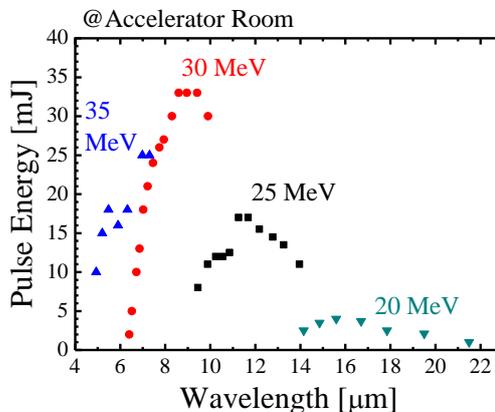


Figure 3: Macro-pulse energy of KU-FEL in the tunable range. The undulator gap was varied from 16.5 to 22 mm which corresponds to change of K-value from 1.49 to 0.94.

4. トラブルおよび問題点

4.1 高周波窓からの真空漏れ

平成 25 年 5 月頃に進行波加速管上流側のノーブルポンプの電流上昇に気づき、原因の調査を開始した。その結果、RF 供給用導波管に SF₆ ガスを加圧充填するとポンプ電流が上昇する事が判明した。SF₆ ガス充填領域と真空領域を隔てている高周波窓を通して SF₆ ガスが真空側に漏れ出していると考えられる。現在、真空度の悪化はそこまで顕著ではなく、自由電子レーザーの運転には支障をきたしていないが、高周波窓の早急な交換が必要となっている。真空漏れが生じた原因としては、導波管内での放電が考えられる。実際、加速管用の真空管型パルスアンプが自励発振を起こし、導波管中での放電が頻発している事が判明した。真空管型パルスアンプを自励発振が生じないように調整したところ、放電頻度が大きく下がった。

4.2 クライストロンの動作タイミングのドリフト

KU-FEL では、高周波電子銃と進行波加速管をそれぞれ独立な高周波供給系(クライストロン・パルスアンプ・LLRF 系)で駆動している。KU-FEL の安定性向上の為、クライストロン電流・電圧の波高値および立下りタイミングの計測を開始した。その結果、図 4 に示すように加速管を駆動するクライストロンの動作タイミング(図 4 上側)が一日に 500 ns 以上ドリフトしている事が判明した。一方、電子銃を駆動するためのクライストロンではその様な現象は見られていない(図 4 下側)。KU-FEL では熱陰極高周波電子銃中での Back-bombardment 現象によりマクロパルス中で電子ビーム電流が増加している。これにより引き起こされる加速管中でのビーム負荷変動に起因するマクロパルス中でのエネルギー変化を補償するため、クライストロン電圧に変調をかけている。クライストロンの動作タイミングが変わると、変調量が変わってしまい、平均エネルギーの変化やエネルギー幅の増大が引き起こされる。

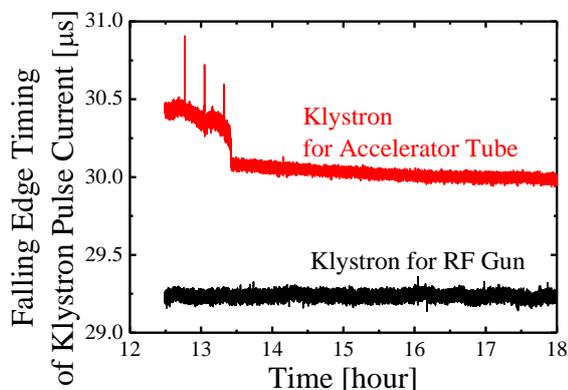


Figure 4: Measured falling edge timing of klystrons for the RF gun and the accelerator tube in KU-FEL.

原因として、まずクライストロン用パルスモジュレータ内部の高圧スイッチ(サイラトロン)の特性悪化を疑ったが、調査を行った結果、サイラトロン駆動用高圧パルス回路に入力されるトリガ信号が図 4 と同様のドリフトを持っていることが明らかとなった。この事から、更に上流側に問題があると考えられる。図 4 に見られる様に、クライストロンモジュレータ立上げ後、ある程度時間が経つとドリフトが止まるので、早朝に立上げ、昼過ぎから運転するもしくは、前日からタイミング回路に通電しておくという対応をとることで、運転上の問題を回避している。

5. 施設整備状況

更により多くのユーザーに利用して貰える様、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の導入

更なる FEL ピーク出力の向上を目指し、2009 年度より光陰極高周波電子銃の導入に取り組んでいる。KEK の大学等連携支援事業の元で、2009 年度に電子銃空洞(改良型 BNL Type Gun-IV)の製作は完了している。2010 年度に光陰極励起用レーザーの導入を開始し、発振器には波長 1064 nm の 89.25 MHz の Nd:YVO4 モードロックピコ秒レーザーを導入し、内蔵 AOM により 1 ~ 300 パルスの切り出しが現在可能となっている。加えて、一昨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、昨年度、4 次高調波(266 nm)の発生を確認した。2013 年度中の電子ビーム生成を目指して真空・高周波系の整備を行っている。

5.2 放射線遮蔽の増強

一昨年度、平均 FEL 出力の向上を目指して、加速器建屋の中性子・X 線遮蔽の増強を行った。本年度秋に放射線発生装置の変更申請を行い、加速器の運転繰り返し周波数を増加させる事で、容易に平均 FEL 出力の増大が可能となる予定である。

5.3 ビーム位置モニタの導入と安定化

KEK の大学等連携支援事業の下、ボタン型 BPM^[7]チェンバーを 6 台製作し、FEL 駆動用加速器の要所に配置済みである。昨年度、ヘテロダイナ方式の検波システムと電荷積算型 ADC を組み合わせた信号処理系、CAMAC と LabView を用いた GUI 系の開発を行った。現在、フィードフォワード制御を導入し、加速器の安定化を行い、ビーム位置の安定性が飛躍的に向上し、FEL 出力の長期安定性も向上している。また、BPM を用いた位置変動要因の調査も開始している。

5. まとめ

京都大学中赤外自由電子レーザーはアンジュレータダクトの交換により、当初の目標波長領域である 5 ~ 20 μm での発振が可能となっている。昨年度の総稼働時間は 570 時間でその内の約 70% が利用実験に供された。波長 14 μm よりも長波長側での出力低下が顕著であるが、原因は明らかになっていない。加速器の更なる調整を進めると共に、原因調査を行う予定である。

現在、高周波窓からの真空漏れとクライストロンの動作タイミングドリフトという二つのトラブルを抱えているものの、平成 25 年度は今のところ重故障は無く、7 月末現在の稼働時間は約 240 時間であり、その半分がユーザー利用実験に供されている。8 月に 1 ヶ月程度のシャットダウン期間を設け、加速器装置群の保守とマイナーアップグレードを行い、更に安定且つ定常的に FEL ビームを供給できる体制を整える予定である。

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] 魚住裕介, 京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッションエネルギー研究拠点共同利用・共同研究成果報告書, pp.127-128 (2012).
- [4] Y. Qin, et al., "Pulse duration and wavelength stability measurements of a midinfrared free-electron laser," Optics Letters, Vol. 38, Issue 7, pp. 1068-1070 (2013).
- [5] X. Wang, et al., "Single-shot spectra of temporally selected micropulses from a mid-infrared free-electron laser by upconversion," Optics Letters, Vol. 37 Issue 24, pp.5148-5150 (2012).
- [6] H. Zen, et al., "Present status of Kyoto University MIR-FEL facility," 第 9 会日本加速器学会年回プロシーディングス, pp.856-859 (2012).
- [7] N. Terunuma, et al., "High Resolution Upgrade of the ATF Damping Ring BPM System," Proceedings of BIW08, pp.200-204 (2008).