

PRESENT STATUS OF KYOTO UNIVERSITY MIR-FEL FACILITY

Heishun Zen[#], Kensuke Okumura, Hidekazu Imon, Kyohei Shimahashi, Marie Shibata, Torgasin Konstantin, Hani Negm, Mahamed Omer, Yong-Woon Choi, Ryota Kinjo, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki
 Institute of Advanced Energy, Kyoto University
 Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

A Mid-infrared Free Electron Laser (MIR-FEL) facility for energy sciences has been developed in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. The FEL consists of a 4.5-cell thermionic RF gun, an S-band accelerator tube, an undulator and an optical cavity. The tunable range of the FEL is extended from 10-13 μm to 5-14.5 μm after replacing its undulator and cavity mirrors. In the last fiscal year, the total operation time of FEL driver linac was 315 hours and 17% of the operation time was assigned to user experiments. In this paper, undergoing R&D work for the MIR-FEL is also reported.

京都大学中赤外自由電子レーザの現状

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(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 2012 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](表 1 参照)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、光共振器長を従来の 4.514 m から 5.039 m へと変更した。この共振器長が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 89.25 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。上記の更新により、現在、波長 5-14.5 μm において発振可能となっている。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]

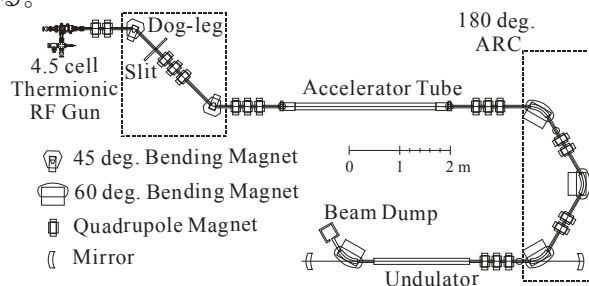


図 1 : 2012 年 7 月現在の FEL 装置概略図

表 1 : 新旧アンジュレータパラメータ

	Old	New
Structure	Halbach	Hybrid
Period Length	40 mm	33 mm
Number of Period	40	52
Minimum Gap	25.5 mm	19.5 mm*
Maximum K-value	0.99	~1.0

*真空ダクトによる制限。アンジュレータの機械的制限は 15.0 mm

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

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 23 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 315 時間であった。平成 22 年度の 150 時間と比べると倍程度の運転時間であるが、平成 21 年度の 500 時間には届かなかった。また、装置の修理・改造・調整に多くの時間が割かれた為、ユーザー利用実験時間は稼働時間全体の 17%に留まった。

4 月～6 月にかけては、前年度に発生した既設熱陰極のトラブルにより、修理に時間を要し、運転不能であった。7 月に修理品が手に入り、電子銃への導入、エージングの後、加速器の運転が再開された。7 月は電子銃のエージング、8 月は加速器パラメータの調整に概ね費やされ、9 月に加速器の調整と平行して FEL 光共振器長の調整が行われた。1 週間の探索の後、FEL 発振が得られる光共振器長が見つかった。その後、加速器、光共振器の調整が続けられ、10 月中旬に出力飽和が得られた。

10 月にはエネルギー理工学研究所の内部ユーザーが二次高調波発生実験を、11 月には日本大学よりユーザーが来訪し、赤外レーザによる生体物質転写実験を行った。

12 月は前述のアンジュレータ交換、共振器長の変更、共振器ミラーの取替えが行われた為、稼働時間はゼロであった。

1 月はシャットダウン後の加速器再立ち上げの後、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校正実験^[3]が行われた。

2 月上旬に FEL 発振に向けた加速器と光共振器調整を行った。シャットダウン前にこれまでのアンジュレータ・光共振器で FEL 発振に必要な加速器の調整が概ね済んでいた事、前述の更新により FEL ゲインが増大し、共振器損失が低下している事が幸いし、光共振器長を大幅に変更したにも関わらず 1 週間程で発振する共振器条件を見つけることができた。また、2 月下旬に日大より生体物質転写実験と歯のレーザ治療に関する実験が行われた。

3 月は主に加速器調整と発振波長域の調査を行った。年度末・修論提出時期と言う事もあり、稼働時間は 2 月に比べ短かった。

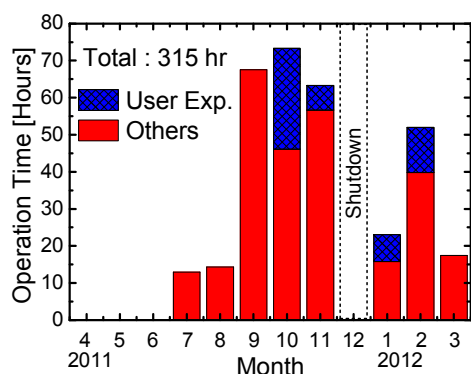


図 2：平成 23 年度電子線形加速器稼働状況。Others には加速器調整、FEL 発振調整、加速器研究、FEL 輸送路構築、FEL 特性計測を含む。

3. 現状の FEL 出力特性

駆動用加速器・光共振器の調整が概ね完了し、現在 5-14.5 μm で FEL 発振とレーザパワー飽和が確認されている。得られた典型的な FEL ビームパラメータを表 2 に示す。マクロパルス幅は約 2 μs であり、波長 10 μm 近辺で最大 15 mJ/macro-pulse の出力が得られている。また、波長 12 μm においてオートコリレーションによりマイクロパルス長の計測が行われ、0.7 ps を下回る結果が得られている^[4]。

表 2：典型的 FEL ビームパラメータ

Spectrum Width	~3%
Macro-pulse Duration	~2 μs
Macro-pulse Energy	1 - 15 mJ
Micro-pulse Energy	0.5 - 2.5 μJ
Micro-pulse Duration	< 0.7 ps @12 μm ^[4]

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、現在は電子ビームエネルギーを変化させ、波長を変化させている。波長変更の所要時間は波長の違いが 2 μm 程度であれば、10 分程度で変更が可能である。

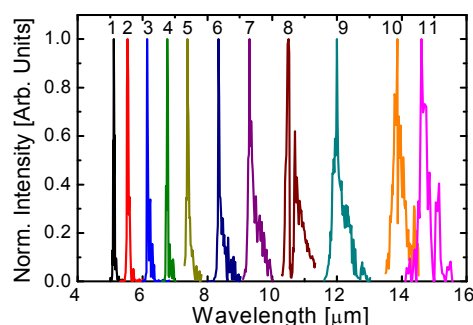


図 3：異なる電子ビームエネルギーでの FEL スペクトル。1：35.8 MeV、2：34.2 MeV、3：32.6 MeV、4：31.0 MeV、5：29.4 MeV、6：27.8 MeV、7：26.2 MeV、8：24.6 MeV、9：23.0 MeV、10：21.4 MeV、11：20.6 MeV。

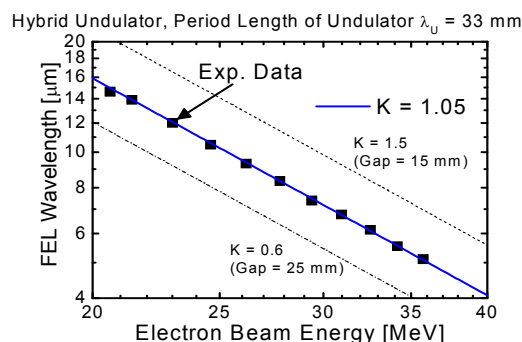


図 4：電子ビームエネルギーと FEL 中心波長の関係。実線は周期長 33 mm の異なる K 値での自発放射光中心波長の理論曲線を示す。

電子ビームエネルギーを変化させて計測した FEL スペクトルを図 3 に示す。電子ビームのエネルギーを 20.6 MeV から 35.8 MeV まで変化させる事により、波長を 14.5 μm から 5 μm まで変更可能である事が見てとれる。また、図 4 に電子ビームエネルギーと中心波長の関係性を示した。実験的に得られた中心波長は周期長 33 mm、K 値 1.05 のアンジュレータの自発放射光中心波長と一致した。この K 値は現在のアンジュレータでは Gap=19.5 mm に相当し、Gap の実測値とも一致している。今後は、アンジュレータ Gap を変えた際の FEL 出力パワー変化と波長変化を調査し、電子ビームエネルギーとアンジュレータ Gap の両方により、自由に波長を変えられる様、整備を進めていく予定である。

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。

4.1 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、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ている^[5]。2012 年度中に励起レーザ装置を完成させ、2013 年度中の電子ビーム生成を目指して真空・高周波系の整備を開始している。

4.2 放射線遮蔽の増強

一方で、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ている。本年度夏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。

4.3 FEL 光輸送系の更新

昨年度 12 月に共振器ミラーを交換し、取り出し穴を小さくしたことにより、取り出し穴での FEL 光の回折パターンが変化し、取り出される FEL ビームの初期ビームサイズと発散角が変化した。このため、FEL ビームを効率的に輸送する為、輸送光学系の再設計が必要となった。既に、設計・構築・コミッションングが終了し、取り出し窓から 12 m と 24 m 離れた 2 つのユーザーステーションにおいて波長 6 μm 、12 μm においてトランスポート後のビーム径を 1 インチ以下に抑えることに成功し、各ユーザーステーションにて 1 インチサイズのレンズが使用可能となっている。

4.4 ビーム位置モニタの導入

KEK の大学等連携支援事業の下、ボタン型 BPM^[6]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。現在、本年度中の完成を目指してヘテロダイン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 系の開発を行っている。将来的には得られたビーム位置情報を利用し、フィードフォワード制御による加速器の安定化を行う事を計画している。

4.5 アンジュレータの狭ギャップ化

2011 年 12 月に導入したハイブリッドアンジュレータ自身の機械的最小ギャップは 15 mm であるが、現有の真空チェンバーの幅が 19.5 mm であり、最小ギャップは 19.5 mm となっている。アンジュレータギャップを更に狭め、アンジュレータ K 値を現在の 1.0 から 1.5 まで大きくする事で、FEL ゲインの大幅な向上が見込まれる。本年度末の導入を目指し、7 月末より 15 mm 幅のアンジュレータダクトの製作を開始した。

5. まとめ

京都大学中赤外自由電子レーザは昨年度の改造により、5 ~ 14.5 μm での発振が可能となっている。昨年度の総稼働時間は 315 時間でその内の 17% が利用実験に供された。今後、更に多くのユーザーに利用して貰える様、加速器・利用環境の整備を継続して行っている。

平成 24 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既に 300 時間を越えており、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事を最後に報告しておく。

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., "Fringe-resolved autocorrelation measurement of KUFEL and its potential application to estimate the stability of lasing wavelength," THUH06 in these proceedings.
- [5] K. Shimahashi, et al., "Development of multi-bunch laser system for photocathode RF gun in KU-FEL," THPS119 in these proceedings.
- [6] N. Terunuma, et al., "High Resolution Upgrade of the ATF Damping Ring BPM System," Proceedings of BIW08, pp.200-204 (2008).