

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^{#A)}, 高見清^{A,B)}, 村田智哉^{A)}, 榎村勇輔^{A)}, 犬飼元晴^{A)}, Suphakul Sikharin^{A)}, 吉田恭平^{A)},
Torgasin Konstantin^{A)}, Negm Hani^{A)}, 紀井俊輝^{A)}, 増田開^{A)}, 大垣英明^{A)}
Heishun Zen^{#A)}, Kiyoshi Takami^{A,B)}, Tomoya Murata^{A)}, Yuusuke Tsugamura^{A)}, Motoharu Inukai^{A)},
Sikharin Suphakul^{A)}, Kyohei Yoshida^{A)}, Konstantin Torgasin^{A)}, Hani Negm^{A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Kai Masuda^{A)},
Hideaki Ohgaki^{A)}

A), Institute of Advanced Energy, Kyoto University

B), Nippon Advanced Technology Co.,Ltd

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 2013, the FEL operated for 693 hours. About 72% of operation time was dedicated to users. There was a shutdown periods on March 2014 for machine maintenance. In FY2013, we have made efforts to improve the machine stability. A precise water temperature control system for RF circulator has been manufactured by ourselves. The timing circuits in klystron modulators have been revised to reduce timing jitter and drift. The aluminum shield inserted to a current transformer has been replaced with longer one to avoid transverse beam kick due to charge-up of ceramic duct. Those improvements have drastically increased the laser power stability of KU-FEL. Now there is a serious problem that four high voltage capacitances of Pulse Forming Network (PFN) in a klystron modulator have already been reaching those lifetimes. We need at least 14 capacitances in the PFN for FEL operation and now 18 are 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 2014 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 2013 年度に行ったアンジュレータダクトの更新によ

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

り、現在、波長 5-20 μm において発振可能となっている。

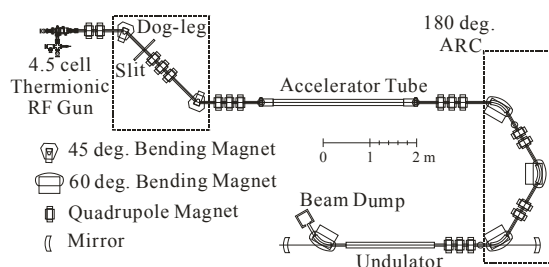


Figure 1: Schematic drawing of KU-FEL accelerator and FEL devices in July 2014.

FEL の利用研究に関しては、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で使用可能となっている。これまでに、ワイドバンドギャップ半導体(SiC)における中赤外レーザー照射による格子振動選択的励起の直接観測実験^[3]、中赤外レーザーによる生体分子のレーザー転写実験、歯の象牙質・エナメル質への中赤外レーザー照射時のピット形成と波長依存性調査、中赤外線照射によるレタス種子の光発芽効果の検証といった多種多様な実験が行われており、試行錯誤しながらも、漸く利用成果が出始める段階に入った。

一方、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^[4]。

2. 加速器稼働状況

図 2 に KU-FEL 駆動用電子線形加速器の 2013 年度における稼働状況を示す。総運転時間は 693 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 72%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。

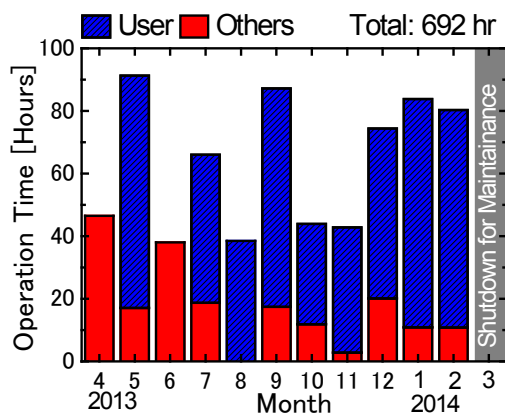


Figure 2: Operation time of KU-FEL facility in FY2013. The adjustment of accelerator, machine tuning for FEL lasing, study on the driver linac, FEL transport line development and FEL parameter measurements are included in “Others.”

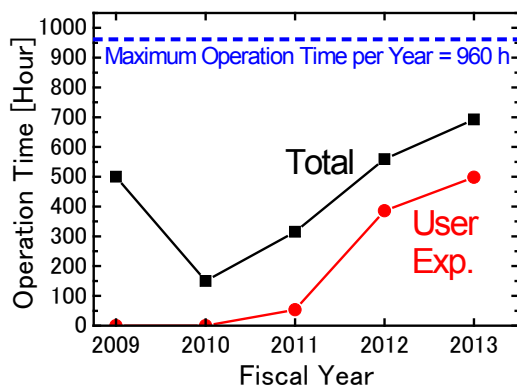


Figure 3: History of total operation time and user experiment time of KU-FEL since 2009. The maximum operation time per year is 960 hours, which is limited by radiation restriction.

3. 加速器安定性向上に向けた取り組み

2013 年度の年会にて報告した導波管型高周波サーキュレータの透過率変動^[5]およびクライストロンモジュレータ動作タイミングのドリフト^[6]およびジッターを低減する為に、自作温調機の導入とクライストロンモジュレータに使用されているタイミング制御回路の見直しを行った。また、高周波電子銃直後に設置された CT において、チャージアップによるビームキックが発生していた。これについても対策を施した。以下に案件毎に整理して述べる。

3.1 導波管型高周波サーキュレータ温調機の導入

KU-FEL では定在波型の高周波空洞に熱陰極を設置した熱陰極高周波電子銃を使っている。電子銃共振空洞からの反射波がクライストロンへ戻らない様に 4 ポート位相差型サーキュレータを使用している。昨年度の年会で報告した様に、このサーキュレータに使用されているフェライトの冷却に温度安定度の低い冷却水を使用していた為、冷却水の温度変化により、電子銃に供給される高周波電力が変動するという問題が生じていた^[5]。2013 年の 10 月からサーキュレータ専用精密温調の自作を開始し、12 月より導入した。これまで、運転中に冷却水温が 2 度程変化していたのが、0.2 度程度まで低減された。また、冷却水温度に対するサーキュレータ透過率の依存性を調査し、60 度までは温度が高いほど、温度依存性が弱まる事から、使用した装置の温度耐性を考慮し、冷却水温度を 50 度に設定する事で安定度を高める努力をした。これらの対策により、高周波電子銃へ供給される高周波電力の変動が大きく抑制された。

3.2 クライストロンモジュレータ内部のタイミング回路の見直し

2013 年度の施設現状報告にて報告した様に、3 m の進行波型加速管を駆動する為に使用しているクライストロンの動作タイミングが朝の立ち上げ以降、大きくドリフトする事が分かっていた^[6]。当初はサイクロトンの劣化を考えたが、サイクロトン前後にてタイミングドリフトを調べた所、サイクロトンが原因では無く、タイミング回路が原因で有る事が判明した。端的に問題の有った箇所を述べると、抵抗値の設計が間違っており、あるフォトカプラの駆動電流が不十分であった為、動作が不安定となっており、大きなドリフトが生じていた。適切な抵抗値の抵抗器と交換し、十分な駆動電流を流してやる事で、フォトカプラの動作が安定になり、大きなドリフトは生じなくなった。また、大きなジッター源となっていたタイミング回路に含まれているデジタル遅延回路を取り外し、上位に高性能デジタル遅延回路 (Stanford Research Systems, DG645) を導入する事で、クライストロンの動作ジッターを 40 ns-FWHM 以上から約 10 ns-FWHM と 4 分の 1 以下まで低減する事に成功した。

3.3 電子銃直後の CT におけるチャージアップ対策

熱陰極高周波電子銃では原理的に、非常に長い低エネルギーテイルを含む電子ビームが生成される。この低エネルギー成分は電子銃直後の四極電磁石を通過する際にばら撒かれ、真空ダクトに衝突して失われる。KU-FEL では電子銃から射出された電子ビームは 2 台の四極電磁石により収束され、電流測定用の CT を通って 1 台目の偏向電磁石に入射される。前述の低エネルギー成分が CT に用いられるセラミックダクトに当たって失われると、セラミックダクトに電荷が蓄積される (チャージアップ)。そして、蓄積された電荷による静電界により電子ビームが横方向にキックされ、下流でのビーム位置が変化する。電荷の蓄積されていく段階では徐々にビーム位置がシフトしていき、何かのはずみで放電が起き、電荷が解放されると、突如としてビーム位置がジャンプすると考えられる。KU-FEL では過去にこのような現象が観測されており、セラミックダクトの一部をアルミの筒で覆う事により、チャージアップが起こらない様な対策を施していたが、BPM による観測により、電子銃部では依然として同様の問題が生じている事が判明した。図 4 に典型的な測定結果を示す。図の縦軸はチャージアップによって発生したキックを補償する為に使用したステアリングマグネットの励磁電流である。図 4 より、一方向に徐々に角度が変化した後、突如として角度がほぼ変化前の値に戻っている事が分かる。

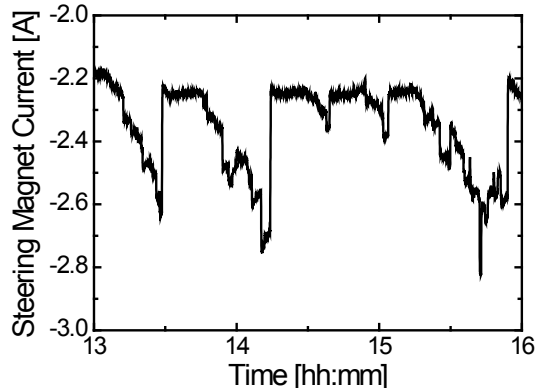


Figure 4: Influence of electric charge-up of the current transformer (CT) in the straight section of RF gun. The vertical axis is the excitation current of the steering magnet used for compensating the transverse kick induced by the charge-up of CT.

図 5 に対策としてこれまで使用していたアルミシールドと、今回導入したアルミシールドの概念図を示す。旧型(青色部分)ではセラミック部のビーム入射側 1/3 しかカバーされていないのに対し、新型(赤色部分)ではセラミック部全体がカバーされる様に設計した。そして、新型においても、下流側が真空ダクトと接触しない構造になっている為、電子ビームにより誘起された磁場が外部に取り出され、電流検出に使用可能となっている。アルミシールド

交換前後での電子ビーム電流計測結果を比較した所、ほぼ同一の計測結果が得られた。また、アルミシールド交換後には、図 4 の様な大きな角度の変動は見られなくなった。

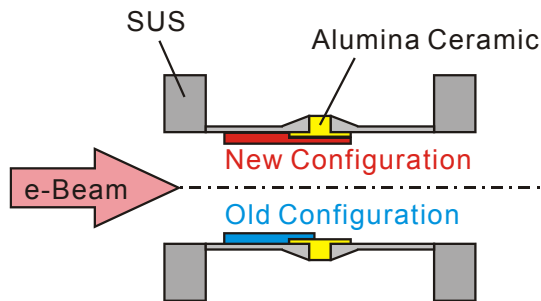


Figure 5: Adopted countermeasure for charge-up problem of ceramic duct used for current transformer. The blue part indicates the old configuration of aluminum shield which suffered from charge-up problem. The red part indicates the new configuration of aluminum shield adopted to solve the problem.

4. トラブルおよび問題点

4.1 高周波窓の真空漏れ

2013 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。交換用 RF 窓の調達を済ませてある為、本年度 8 月～9 月のシャットダウン期間の間に交換する予定である。

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

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。図 6 に問題が発生したコンデンサの写真を示す。



Figure 6: Photograph of damaged capacitances used in a PFN of a klystron modulator and an LCR meter used to check the capacitance. The explosion proof valves of three capacitances are already opened.

図 6 から分かる様に、3 台はパンクして防爆弁が開いている。簡易 LCR メーターで測定した所、これらは定格の 65 nF よりも高い容量値を示した。残りの 1 台はパンクしておらず、LCR メーターでの測定値も定格値と同じ 65 nF であったが、クライストロン電圧波形が通常時と異なり、問題があると判断された。KU-FEL の運転の為には、7.8 μ s の高周波パルスが必要であり、その為には通常時 20 段の内の 14 段の PFN が必要であると考えられる。予備を含めて 22 個あったコンデンサの内、4 個が不良となっているため、現在、2 段減らして 18 段で運転中である。HAEFLEY 社が既にコンデンサ製造事業から撤退しているため、現在、メーカーと代替品の購入・モジュレータの改造を含めた対策について協議中である。

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で、平成 21 年度に 1.6 cell 電子銃空洞(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。現在、設計研究を進めており^[7]、今年度 8~9 月のシャットダウン期間中に高周波立体回路の組み換えを行い、10 月以降にハイパワーテスト、ビーム発生試験を行う予定である。

中赤外 FEL の高度化に関しては、既存の 4.5 空洞高周波電子銃中に光陰極を設置し、光陰極高周波電子銃として使用する事を検討している。手始めとして、電子銃共振空洞内に設置した LaB₆ 陰極に紫外レーザーを入射する事で、光電子放出とその加速を確認した。

5.2 FEL 平均出力の増強

2011 年度に FEL 平均出力の向上を目指して、加速器建屋の中中性子・X 線遮蔽の増強を行い、変更申請を行った後、2013 年 12 月の施設検査を経て、電子ビーム平均パワーを 11.8 W から 41.2 W に増やすことが可能となった。これにより、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った。

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^[8]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。2012 年度、ヘテロダイナミック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、2013 年度に引き続き、BPM を用いた位置変動要因の調査を引き続き行っている。

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 5~20 μ m での発振が可能となっている。昨年度の総稼働時間は 693 時間でその内の約 72%が利用実験に供された。漸く利用実験の成果が出始めており、今後、更にユーザー利用が進み、成果が出る事が期待される。

現在、高周波窓からの真空漏れとクライストロンのモジュレータ PFN のコンデンサ不良という二つのトラブルを抱えている。前者は加速器の運転に大きな支障が出るほど深刻ではないが、後者は今後、不良コンデンサの数が更に増えると、FEL 発生が不可能になると考えられる。2014 年度は 7 月末現在の稼働時間は約 260 時間であり、その内の 60%以上がユーザー利用実験に供されている。2014 年度は 8~9 月にシャットダウン期間を設け、加速器装置群の保守と高周波立体回路の組み換え等を行い、1.6 空洞光陰極高周波電子銃の使用に必要な体制を整えると共に、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] K. Yoshida, et al., "Experimental demonstration of mode-selective phonon excitation of 6H-SiC by a mid-infrared laser with anti-Stokes Raman scattering spectroscopy," Applied Physics Letters 103, 182103 (2013).
- [4] 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).
- [5] K. Okumura, et al., "Study on Electron Beam Stabilization in KU-FEL," Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 742-745 (2013).
- [6] H. Zen, et al., "Present Status of Mid-Infrared Free Electron Laser in Kyoto University," Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 334-337 (2013).
- [7] S. Sikharin, et al., "Design of Compact THz-FEL system at Kyoto University," in these proceedings.
- [8] N. Terunuma, et al., "High Resolution Upgrade of the ATF Damping Ring BPM System," Proceedings of BIW08, pp.200-204 (2008).