

## 京都大学中赤外自由電子レーザー研究施設

### Present Status of Kyoto University MIR-FEL Facility

大垣英明<sup>#,A)</sup>、紀井俊輝<sup>A)</sup>、増田開<sup>A)</sup>、園部太郎<sup>A)</sup>、金城良太<sup>A)</sup>、M.A.Bakr<sup>A)</sup>、Yong-Woon Choi<sup>A)</sup>、  
上田智史<sup>A)</sup>、高崎正人<sup>A)</sup>、吉田恭平<sup>A)</sup>、石田啓一<sup>A)</sup>、木村尚樹<sup>A)</sup>

Hideaki Ohgaki<sup>#,A)</sup>、Toshiteru Kii<sup>A)</sup>、Kai Masuda<sup>A)</sup>、Taro Sonobe<sup>A)</sup>、Ryota Kinjo<sup>A)</sup>、M.A.Bakr<sup>A)</sup>、Yong-Woon Choi<sup>A)</sup>  
Satoshi Ueda<sup>A)</sup>、Masato Takasaki<sup>A)</sup>、Kyohei Yoshida<sup>A)</sup>、Keiichi Ishida<sup>A)</sup>、Naoki Kimura<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

611-0011 宇治市五ヶ庄

<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

#### Abstract

A linac based Mid Infrared Free electron Laser (MIR-FEL) facility has been developed in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. The linac consists of 4.5-cell thermionic RF gun and S-band accelerator tube generates up to 40 MeV electron beam whose macro-pulse duration is 5.5  $\mu$ s. Up to now 12-14  $\mu$ m FEL beam has been generated by use of this electron beam and continuous studies are carried out to extend the FEL wavelength as well as to generate stabilized lasing. For MIR-FEL application researches an MIR-FEL transport line has been installed and an application room is under preparation. The KU-FEL facility is open for users through “The Collaboration Program of the Laboratory for Complex Energy Processes, Institute of Advanced Energy, Kyoto University”.

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/>

#### 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域自由電子レーザー（MIR-FEL）の発生とその利用を目標に、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（5-20  $\mu$ 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ために、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 を用いることで、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 装置の構成は 4.5 空洞の熱陰極型高周波電子銃、3 m の加速管 1 本、ビーム輸送部、1.6 m Halbach 型アンジュレータと光共振器からなる<sup>[1]</sup>。

(図 1) 現在、定常的に最大ビームエネルギー 40 MeV までで、ビーム電流 120 mA、最大パルス幅 6  $\mu$ s でエミッタンス 10  $\pi$  mm-mrad、エネルギー広がり 0.5% の電子ビームを発生している。この電子ビームを用いて 2008 年 3 月には、波長 13.2  $\mu$ m において、出力の飽和を達成した<sup>[2]</sup>。この時の FEL のビーム特性は、ピークパワー 5 MW、マイクロパルス幅 700 fs であり、現在、5-14  $\mu$ m での安定したレーザー発振を実現するための研究を行っている。

一方、FEL を利用した研究を進めるために、ユーザー利用実験室の整備と MIR-FEL ビームラインの建設を行っている。本施設はエネルギー理工学研究所複合機能エネルギー研究センターの施設であり、毎年、センター共同研究の枠組みで、学内外の研究者に公開されており、2009 年度には 10 件のセンター共同研究を行った。

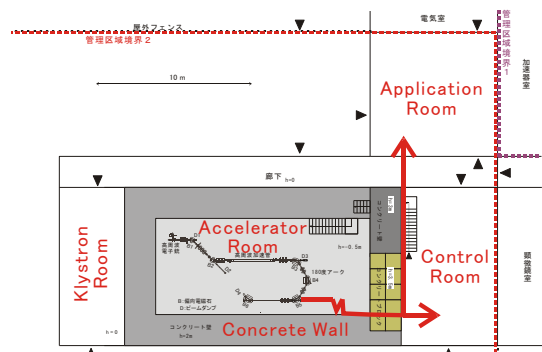


図 1 : Overview of the KU-FEL facility

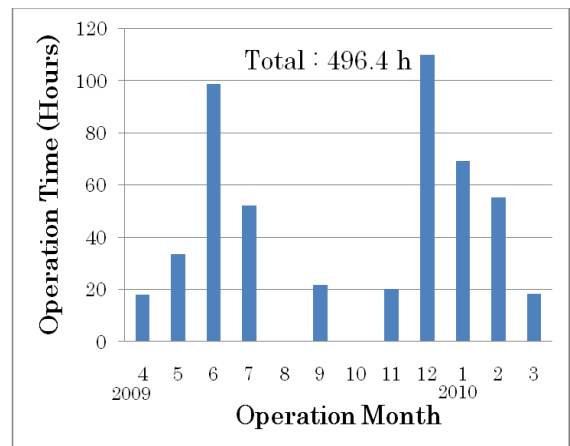


図 2 : 平成 21 年度電子直線加速器稼働状況

## 2. 加速器稼働状況

KU-FEL 駆動用の電子直線加速器の平成 21 年度稼働状況を図 2 に示す。総運転時間は約 500 時間で有るが、現状では、その多くが電子ビーム調整と FEL 発振実験に使用されている。

幸い、本電子加速器は平成 10 年に開発が開始された比較的新しい装置であるため、大きな故障は殆ど経験していない。RF 源は電子銃用に 10 MW、加速管用に 20 MW のクライストロンを用いており、順調に稼働しているが、RF 波形に変調をかける手法<sup>[3]</sup>により、熱陰極型高周波電子銃特有の back-bombardment 現象に対処している事から、PFN 回路のインダクタンスを頻繁に調整する必要性が有り、ステッピングモーターの空回りといった、特殊な問題が存在している。現在、根本的な解法を目指し、detuning 法<sup>[4]</sup>、カソード材料の検討<sup>[5]</sup>、三極管構造の導入<sup>[6]</sup>といった研究を行っている。

建屋施設に関しても、平成 16 年に既存建屋を改築して作られており、冷却水等も問題なく稼働している。問題点として、中性子の放射線遮蔽がある。これは局所遮蔽を用いているために、運転条件を変更する際のビーム調整の間等に線量が増加する事があり、後に述べる装置の改造に伴い、遮蔽用コンクリートの増強を行う予定である。

## 3. 施設利用状況

平成 21 年度において KU-FEL 施設では、以下に示す 10 件の課題でエネルギー理工学研究所複合機能エネルギー研究センターの共同研究を行った。

- 1) バルク超伝導体磁石を用いた新型アンジュレータにおける磁場制御
- 2) 三極管型熱陰極 RF 電子銃による高輝度電子ビーム生成
- 3) KUFEL を用いた波長上位変換
- 4) 相対論的電子ビームによる原子過程研究の新開拓
- 5) 赤外自由電子レーザーを用いた光干渉システムに関する研究
- 6) 電子ビームを用いたガラスチェレンコフ検出器の性能評価
- 7) 自由電子レーザー用線形加速器における電子

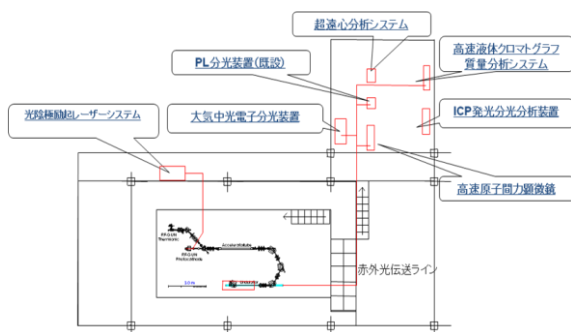


図 3 : 光エネルギー材料連携研究設備の概要

バンチ位相変動計測と安定化

8) 中赤外パルスレーザー光による脂肪族アルコール類の C-O 結合の活性化

9) シンチレータ結晶の発光効率のユニバーサルカーブの研究

10) 微視的トラック構造研究に向けた単一電子照射法の開発

このうち、7 件が電子加速器、電子ビームを用いる研究で有り、FEL 利用研究は 3 件である。これは、平成 21 年度では FEL 利用ビームラインも整備されておらず、簡易ベンチによる予備的な利用実験に留まっていたためである。

現在、FEL 利用実験室を「光エネルギー材料連携研究設備」という名称で整備中(図 3)であり、フォトルミネッセンス(PL)分光を用いた半導体材料評価システムが導入されている<sup>[7]</sup>。幸いなことに、図にあるような各種分析装置が平成 22 年度予算で導入される事になっており、平成 23 年度からのエネルギー理工学研究所の共同利用・共同研究拠点化に伴い、その利用の拡大が予想されている。

## 4. 将来計画

利用研究の拡大に伴い、まず KU-FEL の発振波長域の拡大と安定な FEL ビームの発生が求められている。このため、本施設ではビーム位置・エネルギーの安定化、バンチ長の非破壊計測、熱陰極電子銃の性能向上、アンジュレータの更新、光陰極電子銃の追加導入を現在推進中である。

ビーム安定化に関しては、KEK の大学支援事業により導入したビーム位置モニター(BPM)を用いて、ビーム位置・エネルギーの安定化を行う自動制御システムの構築を進めている。また、アンジュレータ前後のベンディングマグネットからの放射光および BPM からの RF 信号を用いた非破壊バンチ長計測を行い、FEL ゲイン向上につなげる予定である。熱陰極電子銃の性能向上については、2 節で示したが、これらの研究以外に、運転条件の安定化のための局所精密空調を電子銃部に導入する予定である。更に現行の 1.6 m アンジュレータを 1.8 m のアンジュレータに変更を行う予定である<sup>[8]</sup>。これについて以下にその概要を述べる。

KU-FEL では、2008 年 05 月に波長 12.3  $\mu\text{m}$  にて FEL 飽和を達成して以来、応用研究及びそれに要する高品質な光源の作成を進めている。FEL の波長域を短波長方向へ拡大することを目的としてアンジュレータの交換を行い、4~13  $\mu\text{m}$  帯で波長可変な飽和 FEL 発振を目指す。JAEA より移管された 1.8 m アンジュレータを用いることで既設のものを利用した場合の約 2 倍のゲインが見込まれている。更に、KU-FEL では Photocathode RF gun の導入を計画しており、これに合わせた共振器長の最適化も必要になっている。

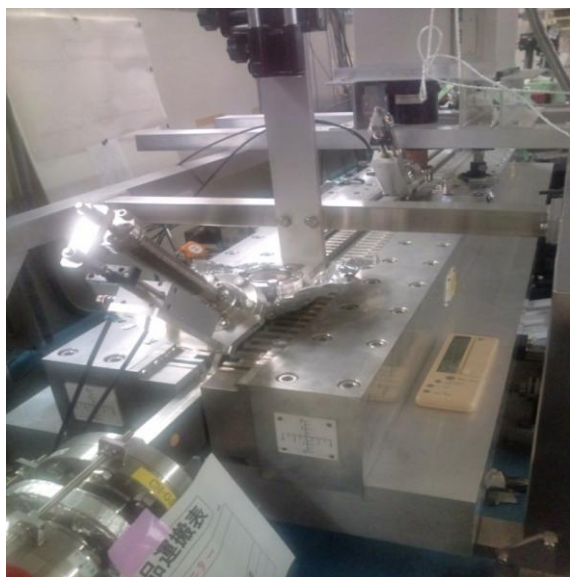


図 4 : JAEA 1.8 m アンジュレータ

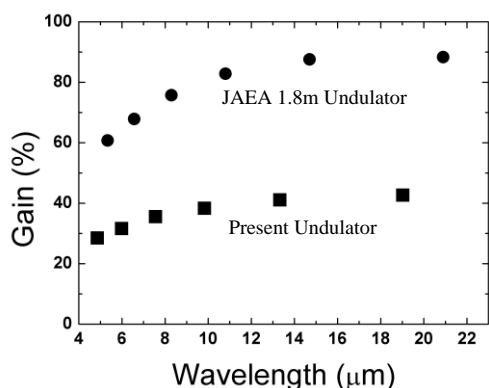


図 5 : FEL ゲインの波長依存性

表 1 : アンジュレータパラメータ

	現行	JAEA アンジュレータ
全長 (m)	1.6	1.8
周期数	40	52
周期長 (mm)	40	33
最小ギャップ長 (mm)	25.5	15
最大磁場 (T)	0.26	0.5
最大 K 値	0.99	1.54

図 4 及び表 1 に導入予定の JAEA アンジュレータの概観及びその主パラメータを示す。本改造により得られる FEL ゲイン並びに発振可能波長域の見積もりのためにシミュレーション計算を行った。この FEL シミュレーションでは、電子ビームパラメータに Parmela からの出力を用い、共振器長 4.52 m、上流ミラーの曲率半径 3.03 m、下流ミラーの曲率半径 1.87 m、FEL 出力ホール直径 2 mm の現行の光共振器を用いて試算した。計算によって得られた予想ゲインと、現行の 1.6 m アンジュレータによる FEL ゲインをそれぞれ図 5 に示す。このときの計算条件は、電子ビームはビーム半径が x 方向で 0.6 mm、y 方向で 0.4 mm、規格化エミッタンス  $3.5 \pi \text{ mm mrad}$ 、ピーク電流 17 A、エネルギー幅 0.5 %、マクロパルス長 6.7  $\mu\text{s}$  としている。FEL 出力計算は時間依存の計算を共振器型 FEL に対応させて我々のグループで拡張した GENESIS により行い、発振波長 14.7  $\mu\text{m}$  においてピーク出力 50 MW 程度の FEL が得られることが確認された。現在、Photocathode RF gun の導入について、マルチバンチレーザーの設計を行っており、その繰り返し周波数から、FEL 共振器長を 5 m に延長し、共振器パラメータの最適化を行っている。

### 参考文献

- [1] 山崎鉄夫: 加速器, 2 (2005) 251.
- [2] H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, H. Zen, S. Sasaki, T. Shiiyama, R. Kinjo, K. Yoshikawa, T. Yamazaki, "Lasing at 12 $\mu\text{m}$  Mid Infrared Free Electron Laser in Kyoto University", Jap. Jour. of Appli. Phys., Vol.47, No.10, pp.8091-8094(2008).
- [3] T. Kii, Y. Nakai, T. Fukui, H. Zen, K. Kusukame, N. Okawachi, M. Nakano, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshikawa, T. Yamazaki, "Reducing energy degradation due to back-bombardment effect with modulated rf input in S-band thermionic rf gun", AIP, Synchrotron Radiation Instrumentation, pp.248-251(2006).
- [4] H. Zen, T. Kii, K. Masuda, R. Kinjo, K. Higashimura, K. Nagasaki, H. Ohgaki, "Beam Energy Compensation in a Thermionic RF Gun by Cavity Detuning", IEEE transaction on nuclear science, Vol. 56, No. 3, pp.1487-1491(2009).
- [5] K. Masuda, T. Shiiyama, T. Kii, H. Ohgaki, K. Kanno, E. Tanabe, "Development of a Thermionic Triode RF Gun", Proc. of FEL2009, pp.281-284 (2009).
- [6] M.A. Bakr, K. Yoshida, K. Higashimura, S. Ueda, M. Takasaki, R. Kinjo, H. Zen, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, "Comparison between the hexaboride materials as thermionic cathode in the RF guns for a compact MIR-FEL driver", Zero-Carbon Energy Kyoto 2009, pp.202-210(2010).
- [7] T. Sonobe, M. Bakr, K. Yoshida, K. Higashimura, R. Kinjo, K. Hachiya, T. Kii, K. Masuda, and H. Ohgaki, "Investigation of the Effects of MIR-FEL Irradiation on the PL of Titanium Dioxides", AIP Conf. Proc. WIRMS 2009, p. 23 (2009).
- [8] H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, M. A. Bakr, K. Higashimura, R. Kinjo, K. Yoshida, S. Ueda, T. Sonobe, H. Zen, and Y. U. Jeong, "Status of the MIR-FEL Facility in Kyoto University", Proc. of FEL2009, pp.572-575 (2009)