

## PRESENT STATUS OF KYOTO UNIVERSITY MIR-FEL FACILITY

Toshiteru Kii <sup>#A)</sup>, M.A.Bakr <sup>A)</sup>, Ryota Kinjo <sup>A)</sup>, Yong-Woon Choi <sup>A)</sup>, M. Omer <sup>A)</sup>, Kyohei Yoshida <sup>A)</sup>, Naoki Kimura <sup>A)</sup>,  
 Keiichi Ishida <sup>A)</sup>, Takuya Komai <sup>A)</sup>, Marie Shibata <sup>A)</sup>, Kyohei Shimahashi <sup>A)</sup>, Hidekazu Imon <sup>A)</sup>, Heisyun Zen <sup>A)</sup>,  
 Kai Masuda <sup>A)</sup>, Taro Sonobe <sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki <sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
 Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

### Abstract

We have developed a linac based Mid Infrared Free electron Laser (MIR-FEL) facility in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. The Kyoto University Free electron laser (KU-FEL) consists of 4.5-cell thermionic RF gun, S-band accelerator tube and Halbach undulator. The lasing wavelength is 12-14  $\mu\text{m}$  at present. The limitation of the lasing wavelength mainly comes from instability of the thermionic RF gun and performance of the undulator. In order to extend tuning range of wavelength and improve stability we have been working on the study of electron source, beam diagnostic and control, and replacement of the undulator.

As a pilot application to evaluate selective phonon excitation processes in solid materials by irradiating with MIR-FEL, a PL measurement system was installed and we have started test measurement. In 2011, the Joint Usage/Research Center program "The core research center program on Zero-Emission Energy" was authorized by the MEXT and the KU-FEL facility is open for users through the program.

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

## 京大赤外自由電子レーザー研究施設

### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、特に中赤外域 (波長 5 ~ 20  $\mu\text{m}$ 、波数 2000 ~ 500  $\text{cm}^{-1}$ ) をターゲットとし、波長可変で高パルス出力、短パルス幅という従来の光源にない特性を有する自由電子レーザー (FEL) を用い、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研究を推進している。

KU-FEL 装置は 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) 放射線管理上、KU-FEL で加速可能な最高ビームエネルギーは 40 MeV、最大ビーム電力は 11.8 W、最大年間運転時間 960 時間である。FEL 発振は電子ビームエネルギー 24 MeV、ビーム電流約 100 mA、マクロパルス幅 5  $\mu\text{s}$  の条件下で行った。この際の電子ビーム規格化エミッタンスは  $10 \pi \text{ mm-mrad}$ 、エネルギー広がり 0.5% であった。2008 年には波長 13.2  $\mu\text{m}$  において、出力の飽和を達成している<sup>[2]</sup>。FEL 特性はピークパワー 5 MW、推定マイクロパルス幅 700 fs であった。現時点で発振波長領域は FEL ゲインと最大ビーム電力の制約により波長 12~14  $\mu\text{m}$  に制限されており、波長 5 ~ 20  $\mu\text{m}$  での安定したレーザー発振を実現するため、装置開発等を行っている。

KU-FEL の利用研究に関しては、MIR-FEL ビーム伝送ラインおよびユーザー利用実験室の整備を完了し、現在分析機器群の導入を進めている。(図 2) 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。

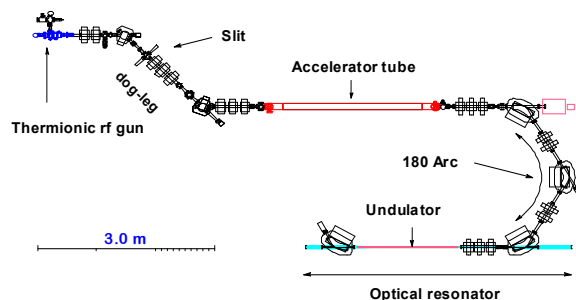


図 1 : KU-FEL の構成

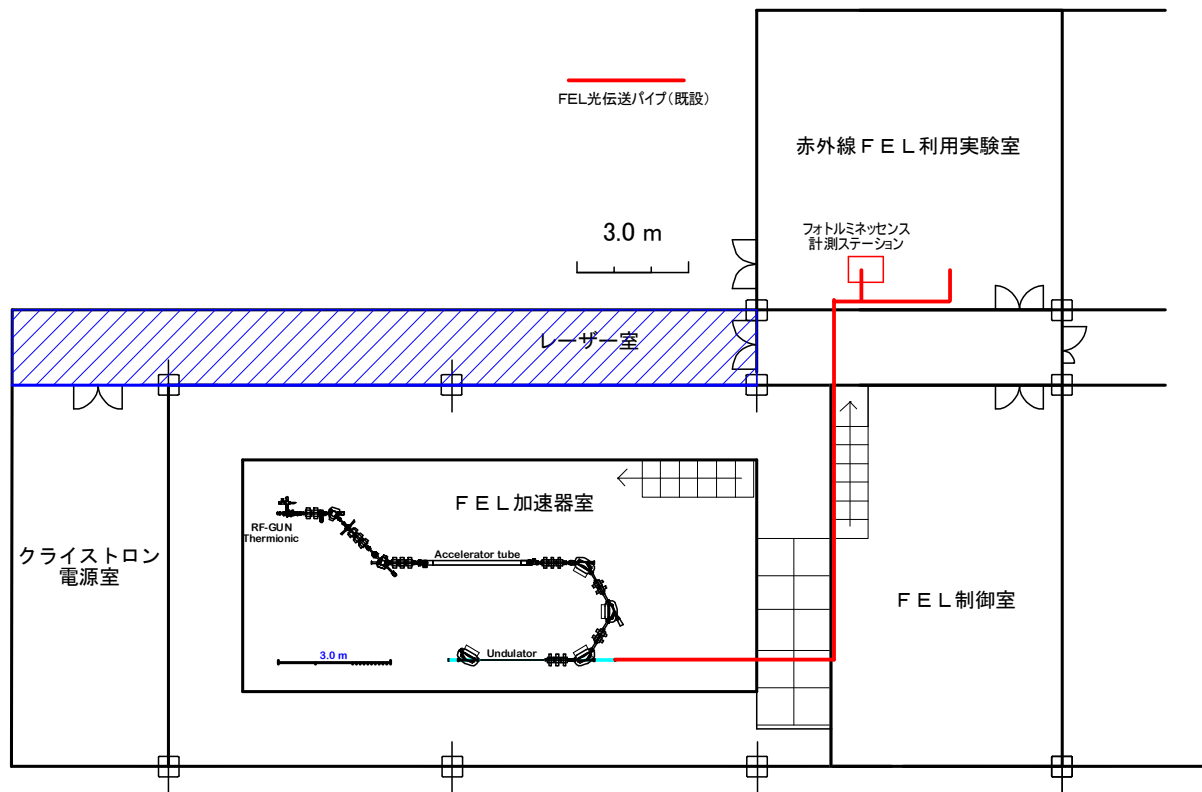


図 2 : KU-FEL 施設概略

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。

## 2. 加速器稼働状況

KU-FEL 駆動用の電子直線加速器の平成 22 年度稼働状況を図 3 に示す。総運転時間は約 150 時間と平成 21 年度の約 500 時間と比較しても 1/3 以下の運転時間であった。運転時間のうち大半は、熱陰極電子銃の陰極交換とその後のエージング、電子ビーム調整に費やした。

平成 22 年度には、加速器の主要コンポーネントにおける重大な故障はなかったものの、電子銃の熱陰極の度重なる故障、ビーム計測用セラミックダクトの破損、計測機器の故障、クライストロンのイオンポンプ用高圧電源の故障と小さなトラブルが頻発し、その対策のために運転時間が大幅に制限された。共同利用・共同研究への安定したビーム提供を行うためには、安定した装置稼働が不可欠であり、計測機器等のリプレースが喫緊の課題である。

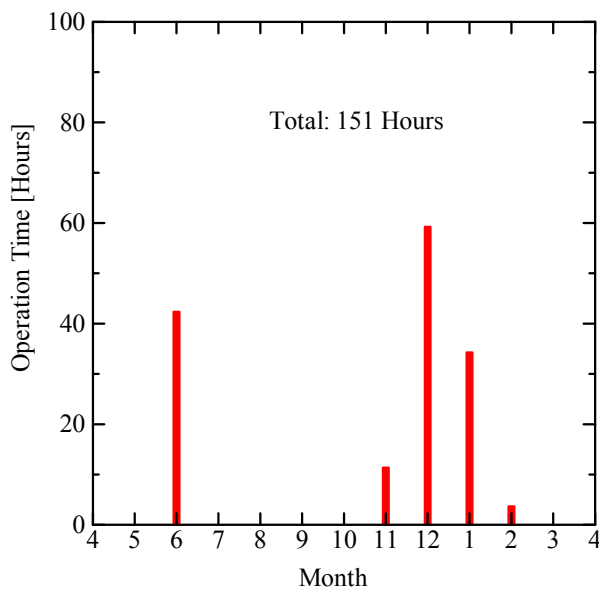


図 3 : 平成 22 年度電子直線加速器稼働状況

### 3. 施設整備状況

平成 22 年度には光エネルギー材料連携研究設備を導入し、分光分析装置群と光陰極高周波電子銃の陰極励起用レーザーを整備した。

陰極励起用レーザーシステムは波長 1064 nm の 89.25 MHz の Nd:YVO<sub>4</sub> モードロックピコ秒レーザーから、加速器と同期して 10 ~ 300 パルスのマイクロパルスを切り出し、マルチパス増幅後に 4 倍高調波を発生し、光陰極の照射を行うシステムとなっている。S バンドの 32 分周であるため、平均電子ビームパワーは減少するが、1 ミクロパルスあたりの電荷量を 10 倍以上に増強することが可能であり、大幅な遮蔽強化を行うことなく、FEL ゲインの上昇に伴う発振波長域の拡大を目指している。また、励起用レーザーと FEL を組み合わせたポンププローブ実験についても検討を進めている。光陰極型高周波電子銃を共振器型 FEL に適用させるには、マクロパルス全域にわたり、エネルギーのそろった電子ビームをアンジュレータに導入する必要があり、特に陰極励起光のマイクロパスごとのエネルギー制御がきわめて重要であり、これまで熱陰極電子銃で行ってきた高周波電力変調法<sup>[3]</sup>、空洞周波数デチューニング法<sup>[4]</sup>のほか、レーザーマイクロパルスの高精度なパワー変調を行うことを計画している。

加速器建屋に関しては、共同利用・共同研究で利用可能な運転時間を増やすことを検討しており、追加遮蔽により、X 線および中性子に対する放射線遮蔽増強について準備を進めている。

共同利用・共同研究では FEL 制御室に隣接する「赤外線 FEL 利用実験室」を主に使用することを想定しており、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を導入し予備計測を実施した<sup>[5]</sup>。そのほかの分析機器群：ICP 発光分光分析装置、質量分析システム、超遠心分析システム、高速原子力間力顕微鏡、大気中光電子分光装置については、「赤外線 FEL 利用実験室」および隣接する「エネルギーナノサイエンス研究棟」へ導入し整備を進めている。共同利用・共同研究の枠組みを利用することで、これらの機器の単独利用はもちろんのこと、FEL 照射実験後の試料観察等への利用が可能である。

### 4. 将来計画

共同利用・共同研究への対応に向けては、KU-FEL の発振波長域の拡大と安定な FEL ビームの発

生が重要な課題となっている。このため、2 で述べた保守作業のほか、ビーム位置・エネルギー・バンチ長の非破壊計測及び自動制御、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 高調波信号を用いた非破壊バンチ長計測を行い、ピーク電流のモニター及び向上を行い、FEL ゲイン向上につなげる予定である。

アンジュレータの更新に関しては、旧 JAEA 自由電子レーザーで使用されていた全長 1.8 m のハイブリッドアンジュレータへ交換することにより FEL ゲインの向上を計画している。詳細については、当プロシーディングス「KU-FEL 1.8 m アンジュレータでのレーザー発振波長領域の評価」(石田ほか)<sup>[6]</sup>を参照されたい。

### 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 12μm 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] 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).
- [6] K. Ishida, M.A. Bakr, Y.W. Choi, R. Kinjo, M. Omer, K. Yoshida, N. Kimura, T. Komai, M. Shibata, K. Shimahashi, H. Imon, T. Sonobe, H. Zen, K. Masuda, T. Kii and H. Ohgaki, "Evaluation of Lasing Range with a 1.8 m Undulator in KU-FEL", In these Proc.