

# 東京理科大学・赤外自由電子レーザー研究センターの現状

## PRESENT STATUS OF FEL-TUS (IR-FEL RESEARCH CENTER OF TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE)

今井貴之<sup>#, A)</sup>

Takayuki Imai<sup>#, A)</sup>

<sup>A)</sup> Tokyo University of Science

### Abstract

IR-FEL research center of Tokyo University of Science (FEL-TUS) is a facility for aiming at development of the high performance FEL device and promotion of photo-sciences using it. The main part of FEL-TUS involves a mid-infrared FEL (MIR-FEL) which provides continuously tunable radiation in the range of 5 -14 micrometer and a variety of experiments are by the use of this photon energy corresponding to the various vibrational modes of molecules are now underway. We also are making effort to develop a far-infrared FEL (FIR-FEL) in order to realize FEL lasing in the THz region. The status of research activities at FEL-TUS will be presented.

### 1. はじめに

東京理科大学には、研究推進機構・総合研究院の研究センターの一つとして、千葉県野田キャンパスに赤外自由電子レーザー研究センター<sup>[1-3]</sup>（略称 FEL-TUS; Free Electron Laser at Tokyo University of Science）が設置されている。

Table 1 に示した通り、FEL-TUS は中赤外自由電子レーザー(MIR-FEL; Mid-Infrared FEL)、遠赤外自由電子レーザー(FIR-FEL; Far-Infrared FEL)の 2 台の赤外自由電子レーザー装置を所有している。現在の研究の中心は MIR-FEL を用いた光利用研究であるため、本稿では主に MIR-FEL の装置、光利用研究の現状をまとめる。FIR-FEL については、今後 THz 領域での発振を目指した装置開発体制を整備し、両者を並行して進めていく方針であり、最後に触れることにする。

設置されているが、駆動する RF 電源は一台のみで、両者を同時に運転することはできない。現在は光利用研究を行っている MIR-FEL の運転を優先しており、稼働時間のほぼ全てが MIR-FEL である。

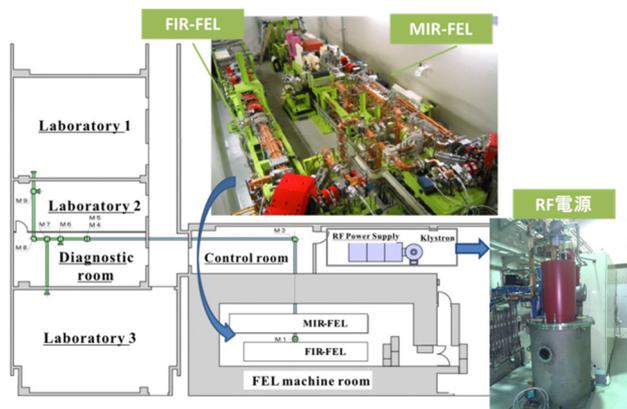


Figure 1: Layout of FEL-TUS.

Table 1: Comparison MIR-FEL and FIR-FEL

|                            | MIR-FEL        | FIR-FEL           |     |
|----------------------------|----------------|-------------------|-----|
| Wavelength                 | 5-14           | 300-1000          | μm  |
| e <sup>-</sup> beam energy | 40             | 10                | MeV |
| Optical Resonator          | Fabry-Perot    | Hybrid*           |     |
| Status                     | User Operation | Under development |     |

\* a rectangular waveguide and cylindrical mirrors

### 2. FEL-TUS について

Figure 1 に示すように、FEL-TUS には FEL 装置室と 4 つの実験室（第 1-3 実験室と光分配室）がある。MIR-FEL、FIR-FEL はともに FEL 装置室内に並列に

MIR-FEL の光利用研究については改めて 4 章で述べるが、FEL-TUS の特徴としては、東京理科大学のみならず、他機関のユーザーにも共用されている点が挙げられる。2007 年度から本格的に共用が開始されたが、現在は、光ビームプラットフォーム（我が国独自の技術に基づき開発・運用されている先進的な研究施設が文部科学省先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業に基づいてネットワークを形成し、産学官による施設の利用をより一層推進しようとする新しい枠組み<sup>[4]</sup>）に参画している。同プラットフォームは、放射光施設 6 機関(KEK・物質構造科学研究所（代表機関）、あいちシンクロトロン光センター、立命館大学・SR センター、兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・九州シンクロトロン光研究センター、SPring-8（連携機関））、レーザー施設 2 機関（大阪大学・レーザーエネルギー学研究

<sup>#</sup> timai@rs.noda.tus.ac.jp

センター、FEL-TUS) で形成されている。(詳細についてはホームページ<sup>4)</sup>参照)

### 3. MIR-FEL; Mid-Infrared FEL

#### 3.1 装置構成

Figure 2 に MIR-FEL の装置構成を示す。S-band 熱カソード RF 電子銃 (On-axis Coupled Structure 型) で生成された電子ビームはアルファ電磁石とスリットでビーム形成されて加速管に入射する。3 m の S-band 加速管で最大 40 MeV まで加速され 2 台の 25 度偏向電磁石を通過しアンジュレーター(Halbacht-type、周期数 40、周期長 32 mm)に入射し、その後 90 度下向きに偏向、ダンプされる。光共振器は hole-coupling mode で、上流側ミラーから FEL 光は出力し、補償光学系 (楕円ミラーと放物線ミラーの組み合わせ) において平行光とし、各実験室の出力窓まで真空中を導光させている。

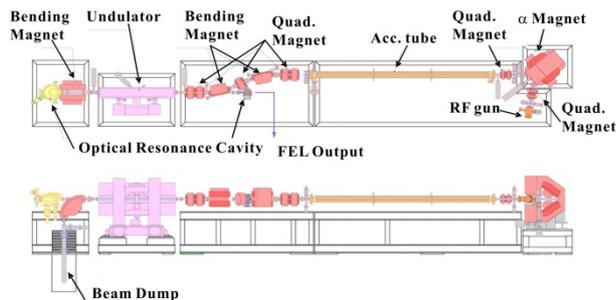


Figure 2: Schematic layout of MIR-FEL.

#### 3.2 装置稼働状況とトラブル

Figure 3 に過去 5 年間の装置稼働時間を示す。近年順調に稼働していたが、2012 年度、2013 年度に稼働時間の減少が見られる。

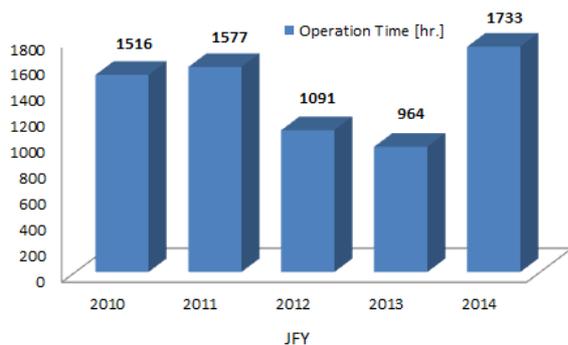


Figure 3: Machine operation time from 2010 to 2014.

その要因の一つとなったのは 2012 年 12 月に発生したクライストロン (TOSHIBA E3729) からの水漏れである。装置運転中に突然発生したもので、原因を調査したところ Figure 4 に示すように、収束電磁

石から漏れたことが判明した。

修理不能で予備を持ち合わせていなかったため、KEK より中古クライストロン (TOSHIBA E3754) を借用した。FEL のため RF パルス幅が長い (6.8 microsec) 等、仕様・運転条件が異なるため、調整に時間を要したが、運転、光利用研究を再開することができた。(現在は、2014 年度に購入、インストールした E3729 を使用)

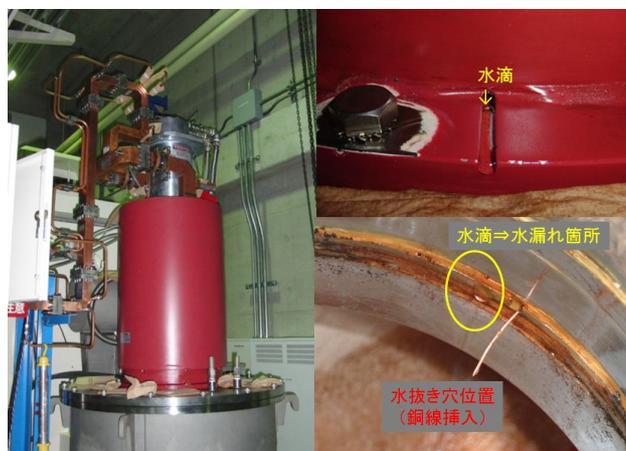


Figure 4: Photograph of water leaking from klystron magnet.

#### 3.3 Ir<sub>5</sub>Ce カソードの導入

FEL-TUS では、これまで RF 電子銃の熱カソードとして LaB<sub>6</sub> 単結晶を用いてきた。MIR-FEL の運転条件下の実績としては寿命が平均 1 年程度で、通常夏のシャットダウン時にカソードの交換、Aging・再立上を行ってきた。しかし、製作されるカソードに個体差があり (すぐに出力の低下する寿命が極端に短いものがある)、またビームタイムの確保の観点からもカソードの長寿命化は課題の一つであった。

そこで、KEK・入射器グループの協力の下、新たにカソードを導入した。導入したのは Ir<sub>5</sub>Ce で、既に報告されている通り<sup>5, 6)</sup>、SuperKEKB のフォトカソード RF 電子銃の新材料として開発され、安定で高量子効率を実現しているものである。

FEL-TUS では熱カソードとして導入しているが、1 年 6 か月程度経過した現時点でも、引き続き安定で出力の低下も見られず、現カソードは、LaB<sub>6</sub> カソードよりも有意に寿命が長いと言える。継続して使用し、今後 2 つのカソードの詳細な性能比較をまとめる予定である。

### 4. 光利用研究

Figure 5 に示した通り、光利用研究における MIR-FEL の光源としての特色は、「中赤外領域での波長可変性」、「直線偏光性」、「特異な時間構造を持つパルス光源」(Figure 6 参照)、「高い光子密度」が挙げられる。また発振波長が、分子構造の際によって吸収スペクトルに顕著な違いが現れる「指紋

領域」と呼ばれる領域であり、ほとんど全ての物質が照射対象になることも特筆すべき点である (Figure 7 参照)。



Figure 5: Characteristic features and the corresponding research fields explored by MIR-FEL.

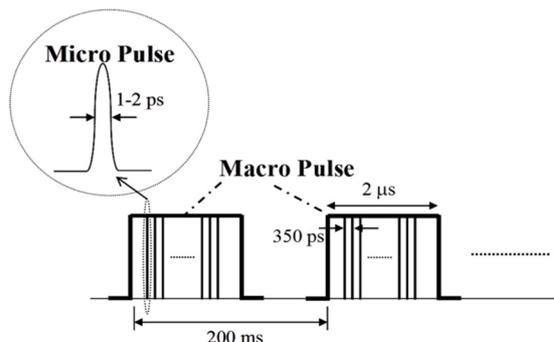


Figure 6: Pulse time structure of MIR-FEL output.

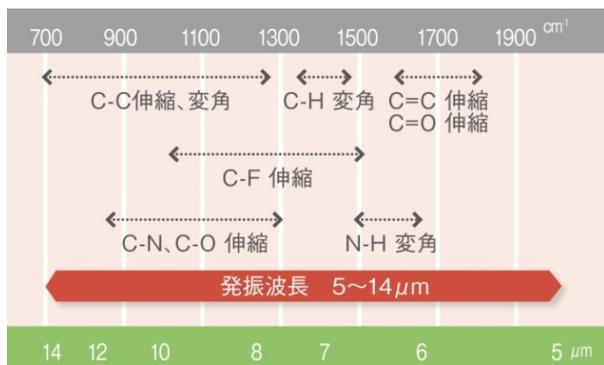


Figure 7: The correspondence of tunable wavelength range of MIR-FEL to vibrational mode of molecule.

これまで FEL-TUS で実施された主な研究分野、採択利用課題は以下の通りである。

- 先端計測関連  
FEL&質量分析による構造解析  
FEL&新規分光法による表面・界面解析
- 材料科学関連  
赤外多光子吸収による同位体分離  
赤外多光子吸収による新規化合物の合成  
FEL 照射による金属有機化合物の反応制御  
FEL 照射による分子構造の変化
- 生命科学・医療応用関連  
FEL 照射による細胞の形態変化  
病菌の FEL による失活実験  
FEL 照射による分子凝集構造の変化

近年、FEL-TUS では生命科学・医療応用関連に重点をおき、分析機器やバイオ実験環境の整備を行い、利用課題でも同分野が増加傾向にある。研究成果についても、例えばアルツハイマー病の原因と考えられているアミロイド線維が MIR-FEL 照射により分解することに成功するなど興味深い結果が得られている。[7-9]

また、外部ユーザー利用研究課題については、年間 4~7 件程度の実績があり、これまでの研究成果報告は一部 (一定期間公開延期の利用課題) を除きホームページ<sup>[10]</sup>にて公開している。

## 5. 今後について

FEL-TUS では、今後のセンターの研究推進の在り方について 2014 年末に外部有識者による将来計画検討委員会から答申を受けた。その趣旨は「現在光研究を行っている MIR-FEL に加え、現在発振していない FIR-FEL を立ち上げ、2 台の FEL の同時運転により新しいサイエンスの展開が大きく期待される」ということである。現状では同時に 2 台の FEL を稼働できないため、RF 電源・分配系、冷却水系改造等を検討し、MIR-FEL の光実験の傍ら、定常的に FIR-FEL のマシンスタディをできる状態の実現を目指している。

## 謝辞

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 (入射器グループ) には、中古クライストロンの借用、電子銃カソードについて、ご協力、ご支援いただきました。

また将来計画検討委員会では、加速器・FEL 分野より設楽哲夫・高エネルギー加速器研究機構教授、羽島良一・日本原子力研究開発機構研究主席、加藤龍好・大阪大学産業科学研究所准教授 (所属等は委員会開催時) に外部委員を務めていただきました。

皆様に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] T. Imai, K. Tsukiyama, T. Shidara, M. Yoshida, T. Morotomi, and K. Hisazumi, "Infra-red free electron laser at Tokyo University of Science", Proceeding of IPAC'10, 2188 (2010).
- [2] T. Imai, T. Kawasaki, J. Fujioka, M. Matsubara, K. Komiya, T. Morotomi, K. Hisazumi, T. Shidara, M. Yoshida and K. Tsukiyama, "Status of IR-FEL at Tokyo University of Science", Proceeding of FEL2012, 453 (2012).
- [3] 加速器学会年会における発表. 第 1 回(4B06), 第 2 回(21P068), 第 4 回(WP08), 第 6 回(TPOPA24), 第 7 回(FSRP18), 第 8 回(TUPS008), 第 9 回(THPS059).
- [4] <http://photonbeam.jp/>
- [5] D. Sato, et al., "高輝度電子銃用フォトカソード新材料の開発と高量子効率化", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 3-5, 2013.
- [6] D. Sato, et al., "Development of Better Quantum Efficiency and Long Lifetime IrCe Photocathode for High Charge electron RF Gun", Proceedings of IPAC2013,327 (2013).
- [7] T. Kawasaki, T. Imai, and K. Tsukiyama, "Use of a mid-infrared free-electron laser (MIR-FEL) for dissecting the amyloid fibril structure of a peptide", J. Anal. Sci. Meth. Inst., 4, 9-18 (2014) DOI:10.4236/jasmi.2014.41002.
- [8] T. Kawasaki, J. Fujioka, T. Imai, K. Torigoe, and K. Tsukiyama, "Mid-infrared free-electron laser tuned to the amide I band for converting insoluble amyloid-like protein fibrils into the soluble monomeric form", Lasers Med. Sci., 29, 1701-1707(2014) DOI:10.1007/s10103-014-1577-5.
- [9] T. Kawasaki, T. Imai, J. Fujioka, and K. Tsukiyama, "Effect of mid-infrared free-electron laser irradiation on refolding of amyloid-like fibrils of lysozyme into native form", The Protein Journal, DOI 10.1007/s10930-012-9452-3-1-7 (2012).
- [10] <http://www.rs.noda.tus.ac.jp/liaison/seika.html>