

Research Activities on IR-FEL in Tokyo University of Science

IMAI Takayuki ^{#,A)}, Tetsuo Morotomi ^{B)}, Keiichi Hisazumi ^{B)}, Takayasu Kawasaki ^{A)}, Keisuke Komiya ^{A)}, Tetsuo Shidara ^{C)}, Mitsuhiro Yoshida ^{C)}, Nakajima Hiromitsu ^{C)} and Koichi Tsukiyama ^{A)}

^{A)} Tokyo University of Science

2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

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 μm 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. This paper will describe the status of research activities at FEL-TUS.

東京理科大学における赤外自由電子レーザーの光利用研究と装置開発

1. はじめに

東京理科大学・総合研究機構赤外自由電子レーザー研究センター (FEL-TUS; Free Electron Laser at Tokyo University of Science) ^[1-4] では、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 FEL 装置を所有し、さまざまな研究、開発に取り組んでいる。以下では、研究センター及び所有する FEL 装置の概要、さらに FEL-TUS での光利用研究と FEL 装置開発について述べる。

2. 研究センターと FEL 装置の概要

東京理科大学では、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を設立し、赤外自由電子レーザー (IR-FEL) のユーザー運転、光利用研究、さらに FEL 装置開発と幅広く研究活動を推進している。

図 1 に示した通り、2 台の FEL 装置、光出力が可能な 4 つの実験スペースを備えている。FEL 装置は、共に S-band 線形加速器をベースとした中赤外自由電子レーザー (MIR-FEL)、遠赤外自由電子レーザー (FIR-FEL) が同一の装置室内に設置され、装置準備室にある RF 電源を切り替えて装置運転している。前者は既に発振して光利用を行い、後者は発振に向け装置開発中である。両者の比較を表 1 に示す。

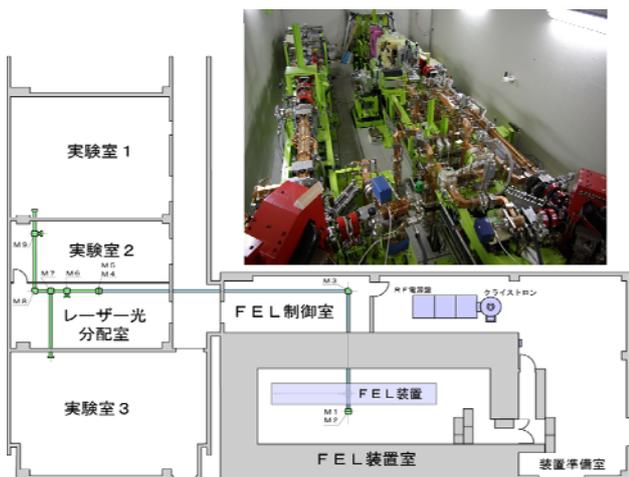


図 1 : FEL-TUS の全体図と装置室内にある 2 台の FEL 装置の写真。FEL 光の出力は、実験室 1-3 とレーザー光分配室の 4 か所で可能。装置室内写真の右側が MIR-FEL、左側が FIR-FEL。

表 1 : MIR-FEL と FIR-FEL の比較

	MIR-FEL	FIR-FEL	
Wavelength	5-14	300-1000	μm
e^- beam energy	40	10	MeV
Length of Acc. tube	3	1.5	m
Optical Resonator	Fabry-Perot	Hybrid*	
Status	User Operation	Under development	

* a rectangular waveguide and cylindrical mirrors

FEL-TUS は FEL の「光利用」に重点を置いて設立されたが、現在は文部科学省・先端研究施設共用促進事業の実施機関の一つとなっている（平成 24 年 4 月現在、NMR などの先端分析施設、放射光施設やスーパーコンピューターシステムなど 23 研究機関があるが、FEL 施設としては唯一）。同事業の趣旨は「大学・独立行政法人等の研究機関等の保有する先端研究施設の共用を促進し、基礎研究からイノベーション創出に至るまでの科学技術活動全般の高度化を図るとともに国の研究開発投資の効率化を図る。」^[5]であり、次章で述べる分子科学、生命科学、あるいは計測分析技術などの MIR-FEL の光利用研究に関して、本学以外の外部機関の利用（共用）を行っている^[6]。

3. MIR-FEL による光利用研究

FEL は一般的に「高出力・高輝度短パルスレーザー光であり、なおかつ広範囲で波長連続可変」であるが、FEL-TUS の MIR-FEL は、「発振波長領域」と「FEL パルスの時間構造」について特長を有する。

MIR-FEL の発振波長は 5-14 μm であるが、この波長領域は「指紋領域」と呼ばれ、分子により顕著に吸収スペクトルのパターンが異なる。また、FEL パルスは、図 2 に示す通り、RF 加速された電子ビームの時間構造を反映し、1-2 ps 程度のマイクロパルスが 350 ps 間隔で構成された、2 μs 程度のパルス（マクロパルス）である。この時間構造は赤外多光子吸収（IRMPA; Infrared Multi Photon Absorption）の誘起に適している。

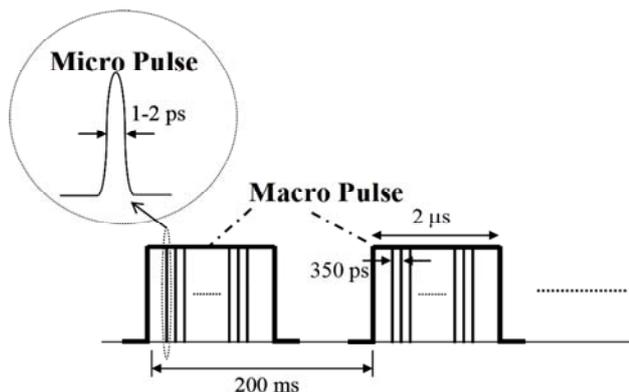


図 2: MIR-FEL のパルス時間構造

これらの特長を光利用の観点から、MIR-FEL のポテンシャル、考えられる利用例をまとめると以下のようなになる。

- (1) 中赤外における波長選択性
分光計測に基づく構造解析
(例：気相におけるクラスターの分子構造解析)

- (2) 高出力・高輝度
反応誘起に基づく分子創製
(例：赤外多光子励起による新規化学反応)
- (3) パルス性
時間分解計測に基づく動的現象の解析
(例：pump-and-probe によるダイナミクス追跡)
- (4) 直線偏光性
偏光計測に基づく物性解析
(例：表面における化学結合の配向性の解析)

また、FEL-TUS で実施されている光利用研究テーマとして、平成 24 年度初めに採択された課題名を以下に示す。

- FEL を用いた新規構造解析技術の開発
- 赤外自由電子レーザーを用いた光化学反応の研究
- 赤外自由電子レーザーを用いるタンパク質の凝集機構の解析
- 赤外自由電子レーザー励起による固体内局在中心可視発光
- 歯周病菌の菌体外多糖（LPS）のレーザーによる失活実験
- 歯質構成分子への FEL 応用
- 自由電子レーザー照射による分子構造の変化
- ジアルキルシラシクロブタンの中赤外パルスレーザー照射による物質変換

もちろん、上記以外の様々な光利用研究の可能性は十分に考えられ、FEL-TUS では、学内外を問わず光特性を活かした利用研究を推進していく方針である。特に、前章で述べように、先端研究施設共用促進事業により学外グループの施設共用の体制が整備されており、利用相談も随時受け付けている^[6]。

4. FIR-FEL 装置開発

図 3 に示すように FIR-FEL は MIR-FEL と同様に S-band 線形加速器と共振器を組み合わせた FEL であるが、電子ビームの加速エネルギーや共振器の構造が異なり（表 1）、現時点では、レーザー発振に至らず装置開発段階である。これまでに、加速空洞に DAW（Disk-and-Washer）型空洞を用いた熱陰極 RF 電子銃を開発、導入し、自発放射光検出まで成功している^[1]。次の段階として、共振器調整に取り組み発振を目指すことになるが、現時点で加速に成功している電子ビームのピーク電流量より高く、放射光強度を十分にすることが望ましい。

そこで、光・熱複合陰極による電子ビーム生成、加速に取り組むことにした。具体的には、これまで LaB₆ の単結晶を熱陰極として使用してきたが、外部から陰極面に Nd:YAG レーザーを照射することで、光・熱複合陰極として電子ビームを生成する。

光・熱複合陰極の発振調整におけるメリットは、レーザー照射時だけではあるが、生成される光電子ビームにより、ピーク電流量が増大する、すなわち自発放射光強度が増大し、その信号変化を検出しやすいことにある。さらに、FEL 発振という点からは、

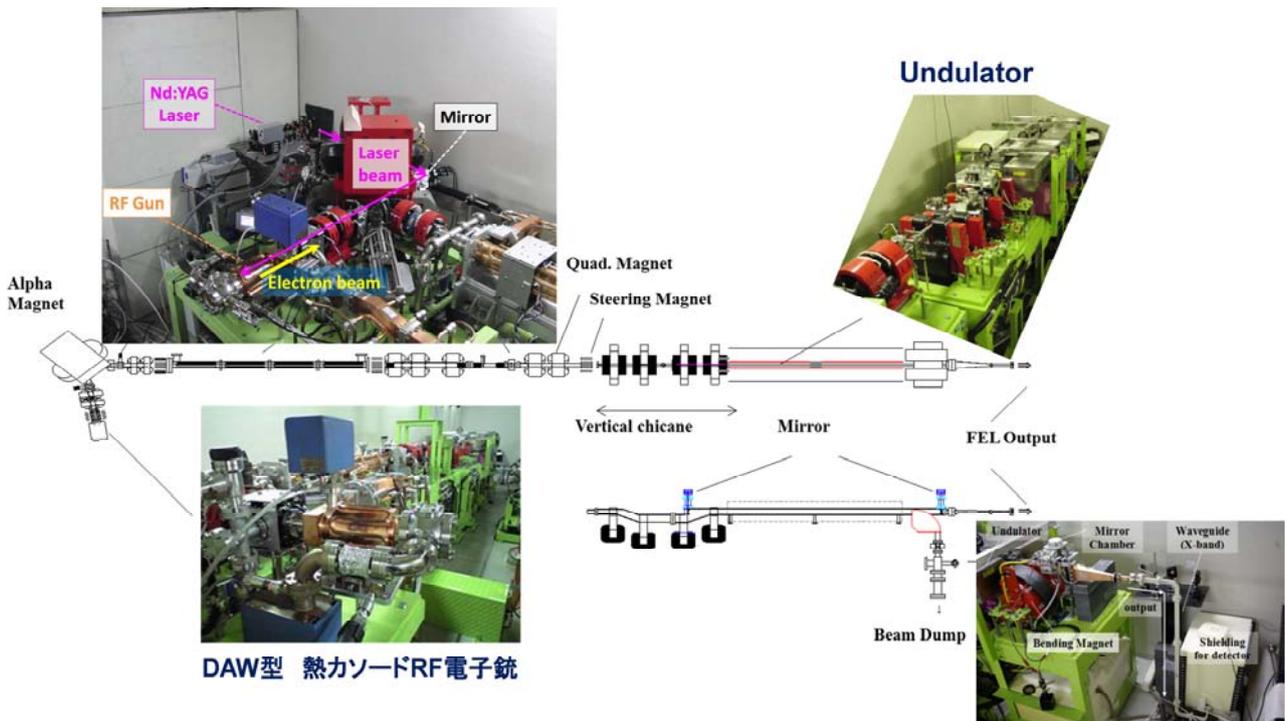


図 3 : FIR-FEL の Layout と写真。左上の写真は陰極面への Nd:YAG レーザー照射のセットアップ

熱陰極のみに比べ、飽和までの時間が短くなり、高効率、FEL パルス幅の増加が期待されることである。

図 3 左上の写真のように、装置室内の FIR-FEL 入射部横に Nd:YAG レーザー本体を設置して、 α 電磁石外側の View Port より、第 4 高調波 (波長 266 nm) を入射し、光・熱複合陰極により生成された電子ビームの CT 波形を図 4 に示す。パルス内の一部に、熱電子ビームより 4 倍程度高いピーク電流を持つ光電子ビームが生成されているのが確認できる。

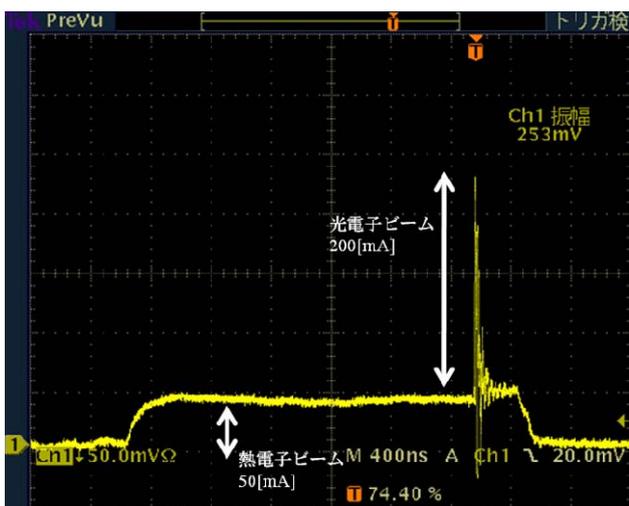


図 4 : 光・熱複合陰極により生成された電子ビームの CT 波形

今後は、より高いピーク電流が得られるよう、レーザー入射光路調整、照射レーザービーム形状の

調整をさらに最適化した上で、FEL 発振に向けて共振器調整を行う予定である。

謝辞

東京理科大学・赤外自由電子レーザー研究センター (FEL-TUS) における研究活動には、文部科学省・先端研究施設共用促進事業、KEK・大学等連携支援事業から補助、支援を頂いている。また、KEK 加速器入射器グループには、FEL 運転の安定化、本学大学院グループも含めた装置開発などご協力いただいている。FEL-TUS より関係者各位に御礼申し上げます。

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", will be presented in FEL2012; 34th International Free Electron Laser Conference, Nara, Aug. 26-31, 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).
- [4] FEL-TUS ホームページ <http://www.rs.noda.tus.ac.jp/fel-tus/>
- [5] 共用ナビ (研究施設共用総合ナビゲーションサイト) <http://kyoyonavi.mext.go.jp/> 先端研究施設共用促進事業について <http://kyoyonavi.mext.go.jp/info/about02/>
- [6] MIR-FEL の光利用は随時相談を受付。外部機関の利用に関する情報は FEL リエゾンホームページ <http://www.rs.noda.tus.ac.jp/liaison/>