

Status of FEL-SUT: IR-FEL Research Center of Tokyo University of Science

T.Imai^{1,A)}, K.Nakai^{A)}, A.Iwata^{A)}, T.Kadowaki^{A)} and T.Morotomi^{B)}

^{A)} FEL-SUT: IR-FEL Research Center of Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service; CO., LTD, Accelerator Engineering Center
2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

Abstract

In order to develop high performance IR-FEL and new photo science by use of it, the IR-FEL Research Center of Tokyo University of Science (FEL-SUT) was established in 1999 and has been operating as a user facility for application experiments. The center has two FEL devices. One is mid-infrared FEL (MIR-FEL) for the wavelength range of 5-16 μm and the other is far-infrared FEL (FIR-FEL) at 300-1000 μm wavelengths. MIR-FEL consists of an RF gun with a thermionic cathode, an alpha magnet, an S-band linac and a permanent magnet undulator combined with an optical resonance cavity of hole-coupling mode. It has been operated providing FEL light for various researches. FIR-FEL is also using S-band linac, but optical resonator is composed of waveguide and two cylindrical mirrors to improve slippage problem and reduce diffraction losses. The commissioning of FIR-FEL is under way. We present the status of FEL-SUT in this paper.

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

1. はじめに

東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センター（略称：FEL-SUT）は、科学研究費補助学術創成研究費による研究プロジェクト「赤外自由電子レーザーの高性能化とそれを用いた光科学」（研究代表者：黒田晴雄教授，1999 - 2003年度）の拠点として、1999年千葉県野田キャンパスに設立された^[1,2]。波長が連続可変で強力な単パルス光を発生できる自由電子レーザーの特徴を活かし、分子構造の差異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」と呼ばれる赤外領域において、新たな光科学の展開を目指し、FEL装置の開発と光利用研究を進めている。

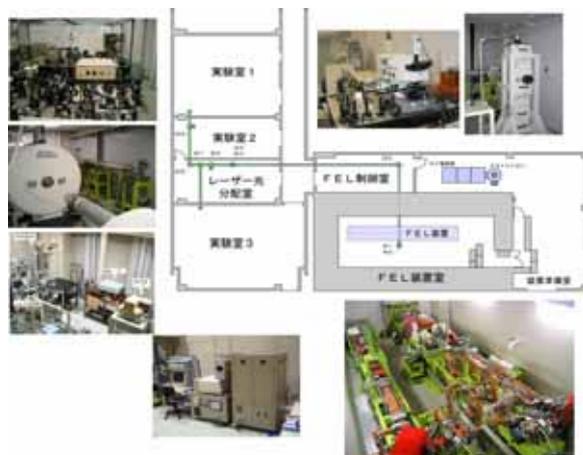


図1: FEL-SUT全体図

図1に示すように、FEL-SUTには2台のFEL装置と4つの実験室（第1-3実験室、光分配室）がある。MIR-FEL（中赤外、発振波長領域：5~16 μm ）は既に発振し^[3]各実験室まで導光され実験が行われている。また、FIR-FEL（遠赤外、300~1000 μm ）は利用実験と並行しながら装置を立ち上げている。以下にそれぞれのFEL装置と利用実験について述べる。

2. 中赤外自由電子レーザー（MIR-FEL）

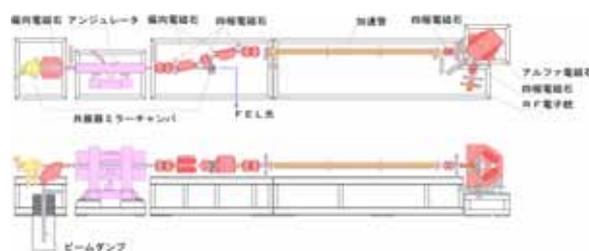


図2: MIR-FELの概略図

中赤外自由電子レーザー（MIR-FEL）はFEL-SUTにおける光研究の基幹となる装置である。図2にその全体を示す。S-band 熱カソードRF電子銃（On-axis Coupled Structure型、LaB₆カソード）^[4]で生成された電子ビームは α 電磁石でエネルギー分布幅とバンチ長を整えられ、加速管（全長3m、S-band Constant Gradient型）に入射する。最大40MeVまで加速された電子ビームはビーム輸送系を経てアンジュレータ（Halbach-type 水平型、全長1.28m 周期数43、

¹ E-mail: timai@rs.noda.tus.ac.jp

磁極：SmCo)に入射し、蛇行して放射光を放出する。アンジュレータを通過したビームは90°下向きに偏向しダンプされる。

光共振器はhole-coupling modeで、上流側の金コートミラー中心部の直径1mmの孔からFEL光を取り出す。各実験室まで(最長約30m)は、回折による拡がりを抑えるために平行光に変換して真空中を自由空間モードで伝播させる、FEL光の発散角とビーム径を補償する光学系^[5]が組み込まれている。具体的には、楕円面ミラーと放物面ミラーを組み合わせ、FEL出力ミラーの孔を楕円面ミラーの第一焦点とし、放物面ミラーの焦点を第二焦点に一致させているので、平行光への変換は波長に依存しない。

MIR-FELの光特性を表1に、装置室内で測定した波長のパワー分布の例を図3に示す。通常、電子ビームのエネルギーは40MeVで運転しているが、9-10 μm より長い波長の光供給の場合には高出力となるようビームエネルギーを下げている。また発振波長は、アンジュレータの駆動によるギャップ長調整で容易に変更できる。各実験室からアンジュレータの遠隔操作と波長測定を行えるので、実験者が実験中自由に波長変更やスキャンすることができる。

表1: MIR-FELの光特性

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| Wavelength range | 5-16 μm |
| Micro-pulse time width | 2 ps |
| Micro-pulse energy | 8-25 μJ |
| Micro-pulse spacing | 350 ps |
| Macro-pulse time width | 1-2 μs |
| Macro-pulse repetition rate | 5 Hz |

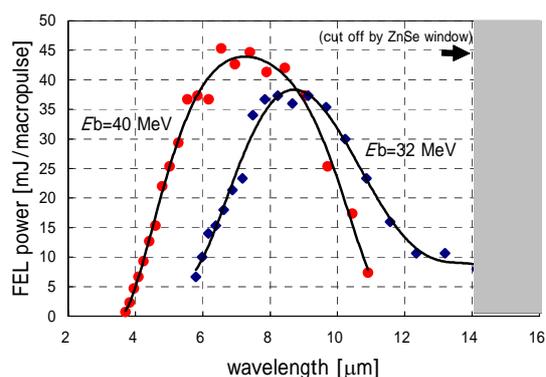


図3: MIR-FELパワーの波長分布(装置室内)

3. 遠赤外自由電子レーザー (FIR-FEL)

FEL-SUTには、MIR-FELの他に遠赤外自由電子レーザー (FIR-FEL)^[6-8]が設置されている。300~1000 μm での発振を目指しているが、テラヘルツ電磁波領域に属するこの波長域は、磁気物性や超伝導現象の研究のみならず、多分野への興味深い応用が考えられ、短パルス・高出力の強力な光源と期待される。FEL-SUTでは高周波源をMIR-FELと共有し切り替えて使用するため、利用実験以外のビームタイ

ムで、現在、加速器調整を行っている。

FIR-FELの特徴は、光共振器部に導波管と円筒ミラーを組み合わせたハイブリッド型共振器を適用したことである。発振波長が長波長であるため、共振器内での電子の進行速度と光の群速度との相違から生じるスリッページや回折損失を低減する構造に設計されている。

FIR-FELの概略図を図4に示す。入射部は熱カソードRF電子銃と α 電磁石というMIR-FELと同一構造になっている。加速管は、電子ビームのエネルギーを10MeVとしているので、MIR-FELの半分の1.5mである。また、加速管下流にはVertical chicaneがあり、 α 電磁石と併せてスリッページに関わってくるパンチ長を調整できるようになっている。

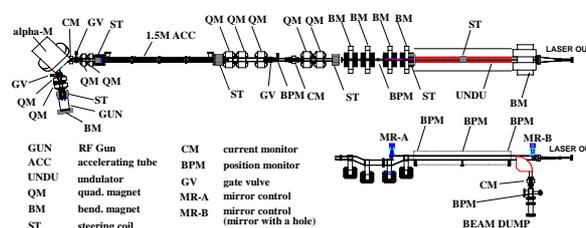


図4: FIR-FELの概略図

4. 光利用研究

ここでは2003年度MIR-FEL利用実験を中心に、光利用研究について述べる。FEL-SUTでは、学術創成研究プロジェクトを中心に研究を進めてきたので、東京理科大学のみならず、他大学・研究機関の研究グループも利用実験を行っている。括弧内は研究グループの所属を示す。

4.1 赤外FELを用いた同位体分離・異性体分離 (東京理科大学総合研究所)

レーザーを用いた同位体分離は、中赤外領域ではCO₂レーザーによる例はあるが、波長可変であるFELで手法が確立できれば、利用できる作業物質の可能性がひろがる。PhSiF₃を作業物質としたSi同位体分離実験を行い、Ph²⁸SiF₃、Ph²⁹SiF₃、Ph³⁰SiF₃が960 cm⁻¹、925cm⁻¹のFEL光で選択的に解離し同位体を濃縮できることを示した^[9]。

異性体分離は多くの分野で不可欠な技術となっているが、異性体同士は物性が非常に近いため分離が難しいものも多い。赤外吸収スペクトルに特徴的な違いがある異性体も見られ、その場合は、特定波長の光照射により特定の異性体のみを選択的に解離することで分離可能となる。Bis (trifluoromethyl) benzene のメタ異性体及びパラ異性体の混合物の照射実験を行い、1275-1250cm⁻¹でメタ異性体を、1310-1290cm⁻¹でパラ異性体を高選択的に解離させることに成功し、FELを用いた分離方法が有用であることを示した。

4.2 気体分子の振動励起過程の研究 (東京理科大学理学部)

赤外領域での多光子解離・多光子イオン化過程の研究は、適当な光源がなかったためあまり例がないが、FELの光特性から基礎的な利用研究の一つにあげられる。この波長領域では主として振動励起が関与する。CO分子^[10]に引き続き、NH₃の基底状態の対称変角モード₂ (約950 cm⁻¹)、ND₃の非対称変角モード₄ (約1190 cm⁻¹) に関して、FELと色素レーザーの同時照射による共鳴イオン化実験を行い、振動励起することに成功し、励起過程の解析が進んでいる。

4.3 分子固相膜における赤外FEL誘起プロセスの研究 (東京大学大学院理学系研究科)

固相へのレーザー照射で誘起されるプロセス、特にFELを用いて赤外多光子プロセスについて、そのメカニズムに関する基礎的研究に取り組んだ。

C₆₀^[11]および多環芳香族分子 (C₁₄H₁₀、C₁₆H₁₀、C₁₈H₁₂、C₂₀H₁₂) の固相膜にFELを照射し実験を行った。FELは単に振動モードを励起するだけでなく、解離と重合による化学反応を起こさせ新たな物質を作り出し、生成物はイオンや電子、白色光を放出し、一部は一種のプラズマを形成し減衰していくという誘起プロセスをつかめた。メカニズムの詳細は今後の課題と言える。

4.4 赤外FELを用いた紫外可視時間分解分光法 (東京大学大学院理学系研究科)

赤外FELによって多光子遷移された物質からの発光及び吸収を時間分解し、赤外多光子励起のダイナミクスに関する研究を行うため、紫外・可視時間分解装置を製作、FEL照射実験を行った。FEL光 (1519 cm⁻¹) の照射により多光子励起されたクロロホルム溶液中のメロシアニン色素分子の発光観測に成功した。発光は赤外多光子吸収によってプラズマ化した色素分子からの発光と推測しているが、今後さらに詳細な実験、分析を行っていく。

4.5 赤外近接場光学顕微鏡による分子センシング・イメージング (大阪大学大学院工学系研究科)

微小領域における物質の同定・定性分析として重要性の高い赤外顕微分光法は、赤外光の波長による回折限界に制限され、現状ではその空間分解能は数10 μm程度である。より高い分解能を目指し、原子間力顕微鏡用カンチレバーをベースとした微小開口型近接場プローブと赤外FELを組み合わせた赤外近接場光学顕微鏡システムを構築し、オレイン酸コレステリル分子構造変化を評価した^[12]。

FEL光照射によってオレイン酸コレステリルのエステル結合 (C=O結合 (吸収波長5.75 μm)、C-O-C結合 (8.55 μm)) が解離した領域を近接場分光分析した結果、分子構造変化は照射領域のみで起こり、周辺部には拡散しないことを回折限界以下で確認で

きた。サブミクロンの空間分解能で分子センシング・イメージングが行えることを示したと同時に様々な薄膜試料の分子構造解析への応用が期待される。

4.6 生体高分子イオンの多光子解離に関する研究 (産業技術研究所生命情報科学研究センター、東京理科大学理工学部)

本研究では、超高真空下でトラップされた分子イオンに中赤外FELを照射することによって多光子吸収解離を引き起こし、分子イオンとFEL光との相互作用のメカニズムを解明することを目的とし、FT-ICRMS (フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴型質量分析計) とFELを組み合わせた多光子解離実験装置を開発した。同装置のFT-ICRMSは4.7Tの超伝導マグネットが用いられ、数万ダルトンの高分子イオンのトラップも行うことができるため、振動緩和の時定数が長い高分子イオンの多光子解離現象を観測できることが特徴の一つである。水素付加した2価のSubstance P イオンを光解離により断片化できることが確認され、今後ペプチドイオンの断片化の波長依存性を中心に実験を行っていく。

その他の利用実験として、「赤外FELを用いた吸着種の選択励起反応の研究」^[13] (北海道大学触媒化学研究センター)、「レーザー照射と歯質の構造的変化」^[14] (日本大学松戸歯学部) 等がある。

5. まとめ

東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センター (FEL-SUT) では、現在、MIR-FEL (発振波長領域: 5 ~ 16 μm) の光利用実験とFIR-FEL (遠赤外、300 ~ 1000 μm) の立ち上げを行っており、赤外FELの研究開発、赤外領域での基礎研究、そして新たな応用の開拓を目指し、研究活動を推進している。

参考文献

- [1] Haruo Kuroda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, Suppl-1, 1 (2002).
- [2] 科学研究費補助金 (学術創成研究) 最終報告書 (平成16年5月)、FEL-SUTレポートNo1-4
- [3] M. Yokoyama et. al., *Nucl. Inst. and Meth.*, **A475**, 38 (2001).
- [4] F. Oda et. al., *Nucl. Inst. and Meth.*, **A475**, 583 (2001).
- [5] K. Nomaru et. al., *Nucl. Inst. and Meth.*, **A445**, 379 (2001).
- [6] 小池英仁他, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, TP-31.
- [7] H. Koike et. al., *Nucl. Inst. and Meth.*, **A507**, 242 (2003).
- [8] M. Sobajima et. al., *Nucl. Inst. and Meth.*, **A483**, 240 (2002).
- [9] K. Nomaru et. al., *Nucl. Inst. and Meth.*, **A507**, 552 (2003).
- [10] Y. Ogi et. al., *J. Electron Spectroscopy and. Related Phenomena*, **128**, 67 (2003).
- [11] Y. Hamada et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, Suppl, 113 (2002).
- [12] T. Masaki et. al., *J. Appl. Phys.*, **95**, 334 (2004).
- [13] K. Asakura et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, Suppl-1, 118 (2002).
- [14] H. Iida et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, Suppl-1, 148 (2002).