

エネルギー回収型リニアックを用いた 高平均出力赤外自由電子レーザーの開発

加藤龍好

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

加藤

高エネルギー加速器研究機構は、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」からの競争的資金を得て、エネルギー回収型リニアック試験加速器（コンパクト ERL）を用いた高平均出力な中赤外 FEL を開発中である。この FEL は高効率な産業用レーザーの開発に必要な加工データベースを構築するための光源として利用される予定である。

1. はじめに

近年、その軽量性や低コストにより、金属に代わる工業用素材として樹脂材料の需要が増えている。樹脂材料はその分子構造によって異なる機能を示すため、使用用途に応じて様々な樹脂材料が利用される。しかし、その加工は CO₂ レーザーのような波長固定のレーザーを用いた熱加工が一般的である。一方、中赤外波長領域は、物質固有の振動吸収が急峻な吸収ピークとして表れる波長領域であり、化学分析において分子構造特定などに利用されている。この波長領域の吸収波長は分子内の振動モードに由来し、特異な吸収が存在することが知られている。様々な種類の樹脂材料の加工効率の向上を考えたとき、使用される樹脂材料ごとに異なる、この吸収特性を利用した非熱加工が理想的な加工手法と考えられる。しかしながら、各々の樹脂材料において、切断や溶着などの加工に最も適した波長や必要なパワー密度、パルス幅などの情報はほとんど得られていない。これは中赤外波長領域で、波長制御が可能な高出力の光源が存在しないことに起因している。

樹脂材料の高効率加工を目的とした加工用レーザープロセスのデータベースを構築とするためには、中赤外波長域で動作する高平均出力の波長可変光源が必要となる。現状でこの要件を満たす高出力発振が可能なレーザー光源は自由電子レーザー (Free-Electron Laser; FEL)^{1,2)}のみである。FEL の波長は、電子のエネルギーとアンジュレータの磁場周期、磁場強度のみの関数となる。そのため、単一波長で、かつ原理的な発振波長の制約がなく、ミリ波領域から X 線領域までの広い波長範囲でレーザー発振が可能な単色光源となる。また FEL では、アンジュレータ中での電子と光の相互作用が増幅媒質の代わりとなるため、増幅媒質に由来する熱損失が存在せず、高出力な光の発生が可能となる。

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

(KEK) は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの競争的資金³⁾を得て、赤外 FEL プロジェクトを開始した。このプロジェクトの目的は、KEK にある Energy Recovery Linac (ERL)⁴⁾の試験加速器であるコンパクト ERL (cERL)^{5,6)}を用いて赤外 FEL (cERL-FEL) を建設し、その FEL を産業用レーザーに必要な加工データベースを構築するための光源として使用することである。また、この FEL は将来の EUV リソグラフィ光源用の ERL ベース FEL⁷⁾のための実証機になることが期待されている。本稿では KEK で開発中の cERL-FEL について報告する。

2. KEK における cERL の開発とその役割の変化

KEK のコンパクト ERL は、ERL ベースの次世代光源の実現に必要な要素技術の開発とその性能実証を目的とした超伝導加速器である。ERL の詳細は次節で述べるが、低エミッタンス・短パンチの電子ビームを高平均電流で利用することが可能な加速器である。KEK では PF と PF-AR に代わる将来光源として ERL をベースとした 5 GeV ERL 光源計画⁸⁾ (のちに 3 GeV に変更) を策定し、その技術面・運用面での問題の解決と ERL 技術の実証のために cERL を建設した。cERL は 2013 年から運転を開始し、年間 1 か月から 4 か月の運転期間を確保しつつ、これまで運用を続けてきた。この間に加速器の Continuous Wave (CW) 運転に伴ういくつかの問題が顕在化し、その都度解決方法を模索しつつ開発を進めてきた。結果として、CW 運転時の平均ビーム電流は毎年 1 桁ずつ増加し、2016 年 3 月には周回ビーム電流 0.9 mA でのエネルギー回収運転を達成した⁹⁾。

他方蓄積リング型光源では、ハイブリッド・マルチバンド・アクロマト (HMBA) 方式の考案により、広い安

定領域と現実的な六極磁場の強さの下で、100 pm rad クラスの低エミッタンスビームを実現できる新しいデザインの光源開発が飛躍的に進んできた。これにより、従来 ERL 光源に期待されてきた多くの放射光科学での成果が新しいデザインの蓄積リング型光源で早期に実現できる可能性が高まり、短パルス性を除いて ERL 光源が持っていた優位性の多くが失われることになった。KEK でも HMBA 方式の蓄積リング型光源の検討が進められた。その結果、改訂された KEK ロードマップでは 3 GeV ERL 光源計画の代わりに 3 GeV 蓄積リング型高輝度光源計画を推進することになった¹⁰⁾。結果として cERL は ERL による次期光源計画の R&D 機としての役割を一旦終え、新たに策定された KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) では、2017年以降の ERL の開発は超伝導加速器の産業利用や産業界への超伝導加速器技術の転用を目的としたプロジェクトとして位置付けられている¹¹⁾。

KEK ではこれまで超伝導加速器技術ならびに ERL 技術の利用展開として、レーザーコンプトン X 線源の開発¹²⁾や極短パルス電子ビームによる THz 波発生とその利用に向けた研究開発^{13,14)}、半導体リソグラフィ用光源としての ERL ベース FEL の設計研究¹⁵⁾などが行われてきた。さらにロードマップの改訂以降は、民間企業¹⁶⁾の出資による委託研究を受けて、照射部ビームラインを新設し、核医学用 RI である ^{99m}Tc の原料となる ⁹⁹Mo の製造試験、アスファルトの改質・再生のための理化学実験などの研究に取り組んでいる。2018年度12月には、産業技術総合研究所、東京理科大学、浜松ホトニクスと組んで応募した NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」に採択され、cERL の南直線部に 2 台のアンジュレータをインストールすることで、高平均出力な中赤外 FEL を開発することになった。

1.3 GHz 常伝導バンチャー空洞、3 台の 2 セル超伝導入射器空洞¹⁸⁾ (Injector module) からなり、電子銃で発生した高品質な 500 keV の電子ビームを最大 6 MeV まで加速する。周回部は一周約 90 m のレーストラック型で、東西には電子ビームの軌道偏向とバンチ圧縮・伸長のためのアーク部 (First arc, Second arc)、北直線部にはビーム合流部 (Merger, Injection chicane)、2 台の 9 セル超伝導主加速空洞¹⁹⁾ (Main-linac module)、ダンプ用ビーム取り出しシケイン (Dump chicane)、ビームダンプ (Beam dump) が配置される。南直線部は主にビーム利用のための直線区間となっており、当初は周長補正シケイン (Path-length control chicane) とレーザーコンプトン散乱 X 線の衝突点 (LCS interaction point) 用チャンバーが設置されていた。入射器空洞により加速された電子ビームは合流部から周回部に入射され、主加速空洞により最大エネルギーまで加速されたのち、周回部を 1 周する。再度、主加速空洞まで戻ってきた電子ビームは加速時とは 180 度逆の RF 位相で減速される。このとき電子ビームのエネルギーが回収され、次の電子ビームの加速に再利用される。入射部で加速された時のエネルギーまで減速された電子ビームは、取り出しシケインからダンプラインに導かれ、ビームダンプに捨てられる。cERL には 1.3 GHz の電子バンチ繰り返して連続的に電子ビームを発生する CW 運転モードと、1.3 GHz 繰り返しの電子バンチから形成される 100 ns 程度のマクロパルスを数 Hz の繰り返して発生する Burst 運転モードが存在する。CW 運転モードでは、電子ビームを減速してからビームダンプに捨てることで、放射線の発生が大幅に低減される。Burst 運転モードは CW 運転前のビーム調整やビーム実験等に用いられるが、ビームダンプまで輸送しないで利用する場合は平均ビーム電流 100 nA が上限となる。cERL の当初の加速器レイアウトを Fig. 1 に示す。

3. cERL の構成

cERL は入射部と周回部により構成される。入射部は 500 kV 光陰極 DC 電子銃¹⁷⁾ (Photocathode DC gun)、

cERL の設計加速電圧は、電子銃 500 kV、入射器空洞 3 台で 4.5 MV、主空洞 1 号機 (ML1) 15 MV、主空洞 2 号機 (ML2) 15 MV であり、設計時の入射エネルギーは 5 MeV、周回エネルギー 35 MeV であった。しかし、入射

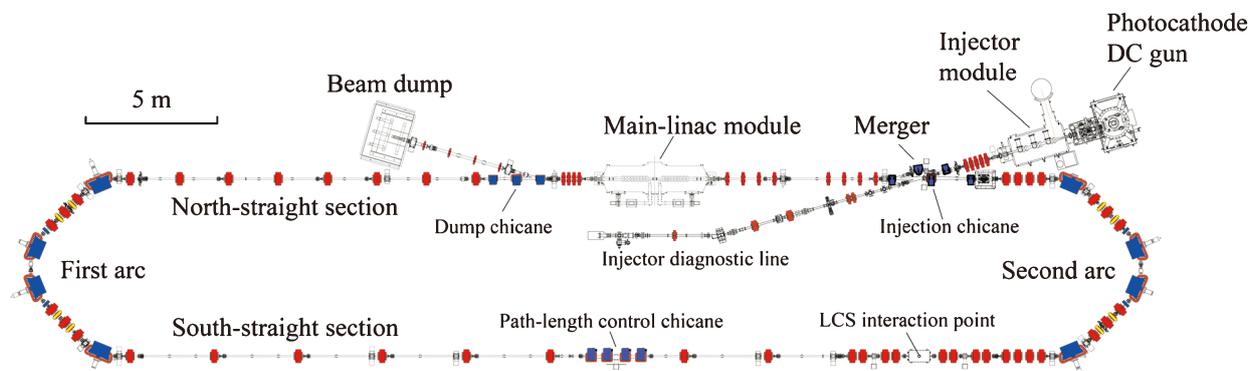


Fig. 1 (Color online) Original layout of the cERL.

器空洞の不要なマイクロ波を取り除くための高次モード (HOM) カプラーの発熱によるヘリウム蒸発量の増加、主加速空洞での Field Emission により放射される電子による放射線レベルの上昇、異なるエネルギーの電子ビームを合流・分離するための合流部における入射電子ビームと周回電子ビームの設計エネルギー比率 1 : 7 の制限により、入射エネルギーは 2.9 MeV に周回エネルギーは 20 MeV (申請上は 26 MeV) に抑えられてきた。これに加えて長期運転による主加速空洞の性能劣化がみられ、現在エネルギー回収運転が可能な主空洞の加速電圧は、ML1 が 6 MV、ML2 が 8.6 MV となっている。周回エネルギーは運転開始当初の 20 MeV から 17.6 MeV に低下した。しかし 2019 年 6 月の運転では、冷凍機の圧力動作点を変えることで、加速後のエネルギーを 19.5 MeV まで増加させることに成功した。また、合流部での入射電子ビームと周回電子ビームの設計軌道を見直し、エネルギー比率 1 : 4.75 まで安定にエネルギー回収運転ができることを確認している。エネルギー回収を前提としないビーム調整ではこの比率を超える入射ビームエネルギーでの運転も可能であり、運用上 5 MeV (申請上は 7 MeV) までの運転を行っている。cERL の設計パラメータと典型的な運転パラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Design and typical operational parameters of the cERL.

	設計値	現状
周回ビームエネルギー (MeV)	35.0	17.5-19.5
入射ビームエネルギー (MeV)	5.0	3.0-5.0
電子銃エネルギー (keV)	500	500
パンチ繰り返し (GHz)	1.3	←
最大平均電流 (mA)	10	1
運転モード	CW or Burst	←

4. cERL-FEL システムの概要

KEK で開発する cERL-FEL は樹脂材料の加工特性を調べるための中赤外光源として波長 10~20 μm をカバーする。我々はそのための FEL として、過去に ERL で稼働実績のある共振器型 FEL²⁰⁻²²⁾ではなく単一通過型 FEL (シングルパス FEL)^{23,24)}を選択した。この理由は、1) プロジェクトの期間が 2 年余りと短く、この間に共振器型 FEL を組み込むために別途ビームラインを建設する時間的な余裕がなかったこと、2) 既存のビームラインにアンジュレータを組み込んで共振器型 FEL に改造する場合、アンジュレータ前後に共振器ミラーを迂回するためのシケインを設けなければならないが、十分なビーム調整用の電磁石を新たに追加しないと、狭いアンジュレータ用真空ダクト内での電子ビーム損失による放射線量の増大により CW 運転が困難になると予想されること、3) 別途ビームラインを建設する場合でも既存のビームラインを改造する場合でも、プロジェクト予算のなかに収まらないこと、4) シングルパス FEL の形態をとることで cERL-FEL が EUV リソグラフィ光源用の ERL ベース FEL の技術実証となること、などが挙げられる。

シングルパス FEL でレーザー発振を実現するためには、一般に高いピーク電流と長尺のアンジュレータが必要となると言われている²⁴⁾。cERL ではあまり高いピーク電流が期待できないため、プラナー型アンジュレータを組み込んで FEL の出力飽和レベルに到達するためには少なくとも 7~8 m のアンジュレータが必要である。しかし、NEDO との契約に基づき我々が実現しなければならない光出力は CW 運転時で 1 W レベルであるため、必ずしも飽和に到達させる必要はない。その点を考慮して cERL の南直線部に設置するアンジュレータは 3 m \times 2 台とした (Fig. 2)。

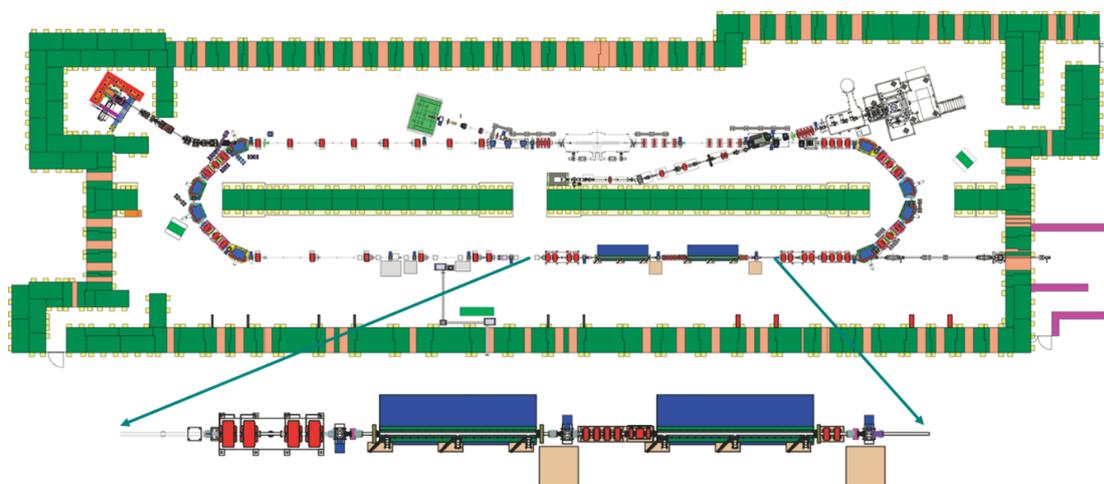


Fig. 2 (Color online) Layout of the cERL after modification for MIR-FEL (upper) and enlarged drawing of the undulators installed in the south-straight section (lower).

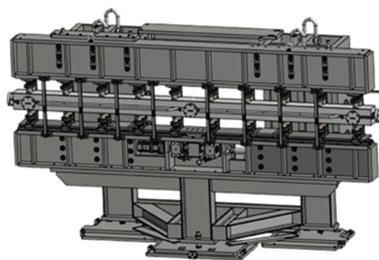


Fig. 3 (Color online) Design of the undulator for MIR-FEL (Left) and photograph of two undulators installed in the south-straight section of the cERL (Right).

また、cERLのビームエネルギーで波長10~20 μm の中赤外FEL発振を実現するためには真空封止アンジュレータに近い周期長が必要になる。我々が選択した周期長は24 mmであり、この周期長で高いK値を得るためには可能な限り上下磁極間隔(Gap)は狭い方が望ましい。しかしGapを狭くしすぎるとCW運転時のビーム損失が増大し、cERL周辺の放射線レベルが増大する。この点を考慮してGapは10 mmとした。このアンジュレータはGap固定のプラナー型アンジュレータであるが、下部磁石列をビーム軸方向にスライドさせることができ、上下磁石列の位相差で光子のエネルギーを変えるAdjustable Phase Undulator (APU)^{25,26}の機能を有している(Fig. 3)。アンジュレータの上下磁石列の位相が揃った時のK値は1.4となる。アンジュレータの周期数は124で、両端に12 mmずつの端部がつき、全長は3 mとなる。Gap可変機構を排した構造はアンジュレータ製作のコストダウンと軽量化に大きく貢献した。アンジュレータ1台あたりの重量が4トン台に抑えられたことで、これまで製作された3 m級アンジュレータと比較して搬入・設置に必要な機材がより簡易になっている。

アンジュレータの10 mmの磁極間には押出成形されたアルミ真空ダクトが収まる。真空ダクトの開口は、横50 mm、縦7.8 mmの楕円型であり、真空ダクト内の電子ビームの軌道調整のために3箇所にプロファイルモニターがつく。2台のアンジュレータ間隔は2.3 mであり、そこに前段アンジュレータからの光をモニターするための光取出しポート、4台のQ電磁石、シケイン電磁石が設置される。プラナー型アンジュレータは交互に極性の変化する偏向磁石列とみなすことができ、個々の磁石の入り口と出口では電子ビームの蛇行角に比例したエッジ集束力が働く。個々の磁石からの集束力は比較的小さいが、アンジュレータ全体に渡って作用するため、cERLのような低いエネルギーの電子ビームに対しては大きな集束効果をもたらす。電子ビームが水平方向に振動するアンジュレータの場合は、垂直方向にこの集束力が存在するため、垂直方向のビームサイズを一定に保つことができる理想的なビーム条件が存在する。Q電磁石は、前段アンジュレータを通過した電子ビームを後段アンジュレータの理想的なビーム条

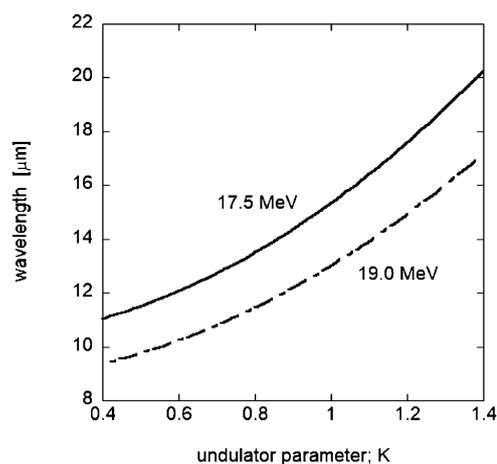


Fig. 4 FEL wavelength covered by the cERL-FEL.

件にマッチングさせるために用いられる。

5. cERL-FELで期待される光源性能

Fig. 4は電子ビームのエネルギーが17.5 MeVと19.0 MeVのときのFEL発振波長の範囲を示している。K値を1.4から0.6程度まで変化させることにより、波長10~20 μm をカバーできる。Fig. 5に示すのはシミュレーションにより得られたアンジュレータ軸に沿った光パルスエネルギーの成長である。横軸0~3 mが1台目のアンジュレータ、横軸5.3~8.3 mまでが2台目のアンジュレータ位置を示す。電子エネルギー17.5 MeV、バンチ当たり60 pCの電荷量で、電子バンチ形状としてガウス分布を仮定したとき、1台目のアンジュレータ入り口で理想的なビーム条件(バンチ長1 ps FWHM、規格化エミッタンス3 mm mrad、エネルギー分散0.1%)が実現できたと仮定すると、2台目のアンジュレータ出口では、波長20 μm で約0.1 μJ のパルスエネルギーが期待できる。FEL用にあらたに導入される81.25 MHz繰り返しの電子銃レーザーを用いてCW運転したときの平均ビーム電流は5 mAとなり、平均レーザー出力は最大10 W程度と予想される。当面は放射線申請の手続き上、最大電流が1 mAに制限されるため、電子ビームを間引いたバーストモードでの運転となる。こ

の cERL-FEL に必要とされる電子ビームとアンジュレータのパラメータを Table 2 に示す。

Fig. 5 の中で、1 台目と 2 台目のアンジュレータ内での

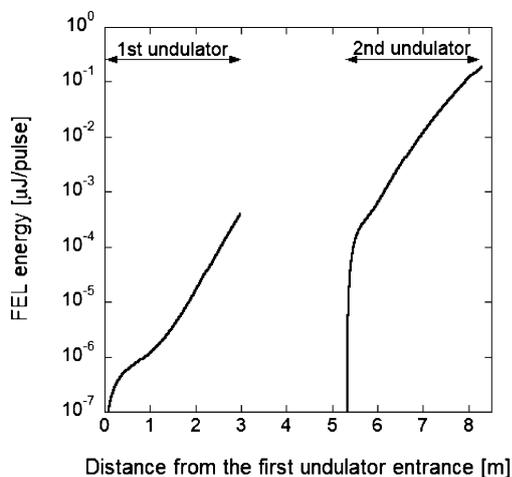


Fig. 5 Evolution of FEL pulse energy along the undulator axis for the wavelength of 20 μm .

Table 2 Required Parameters of cERL-FEL.

ビームエネルギー	17.5, 19.0 MeV
平均ビーム電流	5 mA (現時点では 1 mA)
バンチ電荷	60 pC
バンチ長 (FWHM)	0.5–1 ps
規格化エミッタンス	3 mm mrad
エネルギー分散	0.1%
ビーム繰り返し	81.25 MHz
アンジュレータ型	Planar (APU)
磁石素材	Nd-Fe-B
最大 K 値	1.4
アンジュレータ周期×周期数	24 mm × 124
ユニット数	2
FEL 波長	10–20 μm
平均 FEL 出力 (5 mA 時)	< 10 W

光の成長が繋がっていないのは、この FEL の大きな特徴である。FEL では電子ビームがアンジュレータ磁場内を 1 周期進むたびに光は 1 波長分だけ電子を追い越してゆく。これはスリッページと呼ばれる現象で、アンジュレータ全体では 1 波長×周期数分のスリッページ長が生じる。XFEL のように電子バンチ長に比べて光の波長が短い場合には、このスリッページ長が問題になることはない。しかし中赤外の光の波長は X 線に比べて桁違いに長いので、このスリッページ長の影響が無視できなくなる。このアンジュレータ 1 台あたりのスリッページ長は波長 20 μm のとき約 2.5 mm となる。しかし、圧縮後の電子バンチ長は 1 ps (= 0.3 mm) 程度となるため、増幅された光は常に電子バンチを追い越していく。この FEL では追い越してゆく光との相互作用により電子バンチ内に形成されるマイクロバンチが成長し、光パルスの後半が増幅される Short Pulse FEL となっている。特に 2 台のアンジュレータ間では、前段アンジュレータで発生した光は電子バンチを追い越して前方に移動し、後段アンジュレータではシード光としての役割を果たさない。後段アンジュレータでは前段アンジュレータでの FEL 相互作用により電子バンチ内に形成されたマイクロバンチから次の光パルスがあらたに成長してくる。この FEL で発生する光パルスは全体としてスリッページ長と同程度の長さとなるが、先頭部分と後方部分では光強度が桁違いとなるため、ほぼ電子バンチ長と同程度の長さの短パルス光とみなすことができる。

Fig. 6 に示すのはシミュレーションにより得られた 1 台目のアンジュレータ出口と出口から 400 mm 下流側での光の空間プロファイルである。FEL 増幅は電子ビームの電流密度に依存するため、電流密度の高いビーム軸上では増幅度合いが高く、ビーム軸から外れた位置では増幅度合いが低い。結果的にアンジュレータ磁場中で FEL 相互作用により増幅され続ける光は常に電子ビームと同じサイズに保たれる (Fig. 6 左)。これを光ガイディングと呼ぶ。アンジュレータ磁場がなくなり増幅が止まると光ガイディング

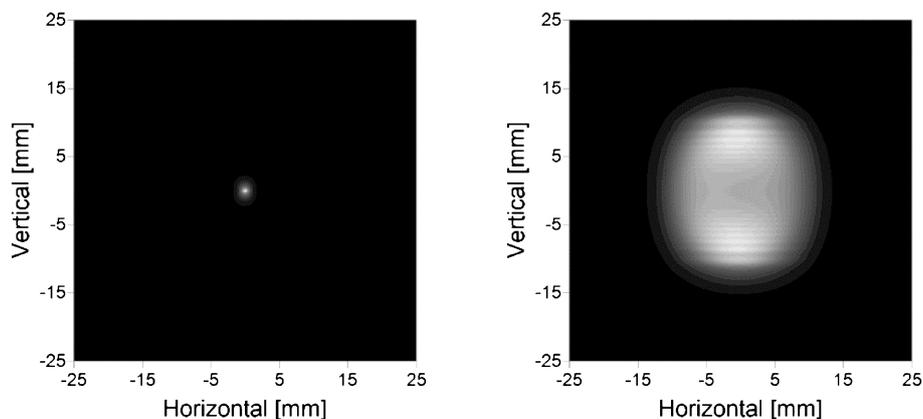


Fig. 6 Spatial profiles of FEL light at the first undulator exit (left) and at 400 mm downstream from the first undulator (right).

効果がなくなり、光は回折効果により空間的に広がり始める (Fig. 6 右)。水平方向に電子ビームが振動するブラン型アンジュレータの場合は垂直方向の電子ビームサイズが水平方向の電子ビームサイズよりも小さいため、垂直方向の光の発散角がより大きくなる。我々はこの空間広がりを利用して、ビーム軸上に挿入された穴あきの横撥ねミラーにより FEL 光を取り出す。他方、電子ビームはミラー上の直径 8 mm 穴を通過することで下流側に輸送される。この光取り出しミラーは 1 台目のアンジュレータの下流側約 0.6 m の位置と 2 台目のアンジュレータの下流側約 1.1 m の位置に設置されており、計算上では波長 20 μm の光に対して各々 FEL 放射の 72% と 95% を取り出すことができる。この光取り出し系の採用により、cERL のビームライン改造を最小限に留めたうえで、常に 2 台のアンジュレータからの光を同時にモニター・利用できるという利点がある。穴あきミラーによりビームラインに対して 90 度方向に撥ねられた FEL 光は KRS-5 窓を通して大気中に取り出され、光学定盤上に構築された光測定システムによりその特性を評価される。

6. まとめ

KEK は NEDO プロジェクトの予算を得て cERL を用いた高平均出力の中赤外 FEL を開発中である。本稿執筆時は cERL-FEL のビーム試験中であり、ここで具体的な結果をお見せすることはできないが、要求される光強度はほぼ達成されつつある。2021 年 5 月中旬の NEDO への最終報告以降、このプロジェクトの成果を公開していく予定である。この cERL-FEL は高繰り返しで動作する高ゲイン・シングルパス FEL の最初の試験機であり、EUV-FEL を実現するうえで解決すべき多くの技術課題を実証することができる。また、この FEL を光源として、加工用レーザープロセスのデータベースを構築することは、今後も増々その需要が拡大すると考えられる樹脂材料の加工において、高効率加工に必要な産業用のレーザー光源開発のための指針となり、直接的に加工時の電力消費を低減させて省エネルギー化に貢献するだけでなく、間接的には多様な樹脂材料の利用機会を増大させることで社会全体の省エネルギー化を押しすすめ、低炭素社会の実現に貢献すると考えられる。

謝辞

本発表は、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の成果に基づいたものである。cERL は KEK 加速器研究施設内の各研究系を跨いだ横断的な組織である超伝導加速器利用推進チームによって運転・維持・管理されている。特にこの NEDO プロジェクトで 2 年余りという短期間に FEL の建設から中赤外光の発生・評価まで実現できたのは、阪井寛志、土屋公央、谷

本育律、本田洋介、宮島司、島田美帆、中村典雄、帯名崇、高井良太、原田健太郎、高木宏之、満田史織、東直、山本将博、福田将史、田中オリガ、阿達正浩、野上隆史、内山隆司、江口柊、塩屋達郎、下ヶ橋秀典、多田野幹人、上田明、長橋進也、濁川和幸、三浦孝子、Qiu Feng、荒川大、梅森健成、許斐太郎、加古永治、中西功太、本間輝也、小島裕二、河田洋 (KEK)、羽島良一、川瀬啓悟 (QST)、坂本文人 (秋田高専)、Nora Peak Norvell (SLAC) 諸氏の協力によるところが大きい。

参考文献

- 1) J. M. J. Madey: *Journal of Applied Physics* **42**, 1906 (1971).
- 2) D. A. G. Deacon *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **38**, 892 (1977).
- 3) https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100064.html
- 4) M. Tigner: *Nuovo Cimento* **37**, 1328 (1965).
- 5) 春日俊夫: *日本加速器学会誌「加速器」* **5**, 13 (2008).
- 6) M. Akemoto *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **877**, 197 (2018).
- 7) 河田洋: *日本加速器学会誌「加速器」* **15**, 126 (2018).
- 8) 羽島良一, 中村典雄, 坂中章悟, 小林幸則: *日本加速器学会誌「加速器」* **6**, 149 (2009).
- 9) T. Obina *et al.*: “Recent Developments and Operational Status of the Compact ERL at KEK”, in *Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference, IPAC’16, Busan, Korea, May 8–13, 2016, TUPOW036*.
- 10) https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/Staff/roadmap2013Update-J_190419.pdf
- 11) <https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- 12) T. Akagi *et al.*: *Phys. Rev. Accel. Beams* **19**, 114701 (2016).
- 13) Y. Honda *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **875**, 156 (2017).
- 14) Y. Honda *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **121**, 184801 (2018).
- 15) N. Nakamura *et al.*: “S2E Simulation of an ERL-based High-power EUV-FEL Source for Lithography”, in *Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference, IPAC’17, Copenhagen, Denmark, May 14–19, 2017, MOP-VA020*.
- 16) <https://www.accelerator-inc.com/>
- 17) N. Nishimori *et al.*: *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 053402 (2019).
- 18) K. Watanabe *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **714**, 67 (2013).
- 19) H. Sakai *et al.*: *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 022002 (2019).
- 20) G.R. Neil *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **84**, 662 (2000).
- 21) R. Hajima *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **507**, 115 (2003).
- 22) N. A. Vinokurov *et al.*: “Commissioning results with multi-pass ERL”, in *Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference, PAC’09, Vancouver, Canada, May 4–8, 2009, MO4PBI02*.
- 23) R. Bonifacio *et al.*: *Opt. Comm.* **50**, 373 (1984).
- 24) 木原元央: *放射光* **9**, 220 (1996).
- 25) R. Carr: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **306**, 391 (1991).
- 26) R. Carr and H-D. Nuhn: *Review of Scientific Instruments* **63**, 347 (1992).

著者紹介



加藤龍好

高エネルギー加速器研究機構 教授

E-mail: ryukou.kato@kek.jp

専門：加速器物理，自由電子レーザー

【略歴】

1993年，東北大学大学院理学研究科博士課程修了，博士（理学）。

1993年-1995年，日本原子力研究所東海研究所，研究員。

1995年-2000年，大阪大学産業科学研究所，助手。

2000年，同助教授。2007年，同准教授。

2015年より現職。

Development of ERL-based high-average power infrared free-electron laser

Ryukou KATO High Energy Accelerator Research Organization (KEK) 1-1 Oho, Tsukuba City, 305-0801

Abstract The High Energy Accelerator Research Organization is developing a high-average power mid-infrared FEL using an energy recovery linac test accelerator (compact ERL) with competitive funding from the NEDO project "Development of high-brightness, high-efficiency next-generation laser technology". The FEL will be used as a light source to build the processing database necessary for the development of highly efficient industrial lasers.