

解説

原研超伝導リニアック駆動自由電子レーザー 極短パルス, 高効率, 高出力, 波長可変レーザーの実現に向けて

峰原 英介

日本原子力研究所*

The JAERI Free-Electron Laser Driven by a Superconducting rf Linac Towards Ultra-Short Pulse, Highly-Efficient, High Power, and Tunable Coherent Light Sources

Eisuke J. MINEHARA

JAERI

We would like to explain recent developments and future plans of the JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) free-electron lasers driven by a superconducting rf linac with an energy recovery loop. In the beginning of February 2000, we could exceed our 1-kW design goal and finally reach 2.34 kW in quasi-continuous wave (CW) operation with a very high extraction efficiency of 5% or more. The high power and highly-efficient lasing has recently been found to be a novel one, a few cycle lasing of 250 fs, and about 1 GW peak at the perfect synchronism without lethargy.

原研エネルギー回収型超伝導リニアック自由電子レーザーに関する将来計画と最近の開発について説明する。2000年の初頭, 準CW動作で5%という高いビーム光引出効率で, 設計目標を超えることができ, 最終的に2.34 kWを達成することができた。この高出力高効率発振は, 今まで知られていない新規なもので, レサジー無し, 完全同期状態で, 数サイクル発振, 250 fs程度の幅を持ち, 約1 GWの尖頭値であることが最近わかった。

1. 自由電子レーザーの特徴

よく知られているように自由電子レーザー (FEL) は駆動源である電子加速器及び利得媒質であるアンジュレーター中の電子ビーム並びに光共振器鏡から構成される (Fig. 1)。FELは電子加速器からの高エネルギー電子ビームをアンジュレーターの交番磁界中に導き, 発生する放射光を干渉により強め, 光共振器により蓄積し, 繰り返し電子ビームと相互作用させることにより波長程度に電子ビームを集群させ, 輝度の高い, 強い誘導放射を発生させるレーザー装置である。通常型のレーザーが原子分子等の束縛された電子の状態間遷移による光放出を利用するのに

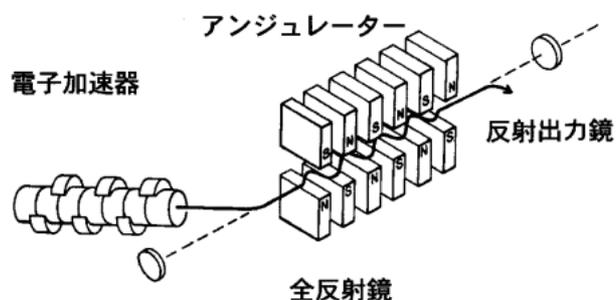


Figure 1. A free-electron laser consists of a driver (an electron accelerator), gain media (energetic electron beams in the undulator), and optical resonator (ref. 1).

比べて物質に束縛されない自由な電子ビームを用いるのでこの名前がある。FELは原理的に波長可変で, 極短パルスが生成でき, 波長限界が無く, x線領域での発振が可能である。FELは発生熱が動作原理上速やかにほぼ光の速度で系外に電子と共に排出され, 構成部品に熱損失や熱損傷が無い, このため出力限界が無く高出力が可能である。さらに同様の理由で変換効率が高いと考えられているた

* 日本原子力研究所 関西研究所 東海駐在 量子科学研究センター 自由電子レーザー研究グループ
〒319-1195 茨城県那須郡東海村白方白根2-4
TEL: 029-282-5464 FAX: 029-282-6057 E-mail: eisuke@jfel.tokai.jaeri.go.jp(offuce1)

め、軍用民生両方の次世代レーザーとして期待されて来た。現在は、加速器とレーザーの両方の優れた特質を受け継ぎ、その高エネルギー変換装置や長距離エネルギー伝送装置としての高い潜在能力等から、次世代のレーザーひいては光源全体に革新を起こす原動力として、実用化に大きな期待が寄せられている。

2. コヒーレント及び非コヒーレント高輝度光源の現状

コヒーレントでない第1世代の高輝度光源はX線管、水銀ランプ等を指すとも言われている。しかし、一般的には高エネルギー実験に寄生した非専用リングを第1世代と呼ぶようである。専用蓄積リング(SR)を用いる第2, 3世代の放射光源、マイクロ波発振器及び種々の通常型レーザー並びに自由電子レーザー(FEL)を含む非コヒーレント及びコヒーレント高輝度光源のピーク出力を縦軸、横軸を波長に取ってまとめたものである。第2世代SRは偏向電磁石を用いる専用SRで、第3世代SRは最近利用が始まった挿入光源(アンジュレーター)を用いたSpring-8のような専用高輝度SR²⁾である。Figure 2で特徴的なことは通常型レーザーは基本的には離散的な狭い線状の光のスペクトルであり、非常に多種類のレーザーによって発振され、その範囲は軟X線領域から遠赤外領域まで分布している。SRは基本的に連続スペクトルで、比較的狭い帯域のアンジュレーター放射光も複数のピーク構造を持った連続的なスペクトルである。

マイクロ波、ミリ波より短波長の赤外領域のFELは1977年米国スタンフォード大学のMadey等によって「再発明」された³⁾が、その遙か以前1940年代からマイクロ波領域のFELはユービトロン等の発振管^{4,5)}として広く知られていた。1999年まではFELは波長領域がSRと重なって居らず、今でも殆どのFELとSRは相補的な関係にあ

る。SRは主に硬X線領域から極端紫外領域の光を発生し、FELは遠赤外またはさらに長波長から真空紫外で発振できる。また発生全出力はSRの方がまだ大きいのがピーク出力は少なくとも7桁程度以上FELが高い。2000年初頭、DESYのTTF-FELで真空紫外領域の発振が確認された⁶⁾。今後、極紫外から軟X線領域にFEL最短波長は延伸すると期待される。

半導体製造設備分野で、第1世代の光源である高圧水銀ランプがいまだに使われており、エキシマーレーザーの大規模利用が始まっているが、SRは未だにこの設備には用いられてはいない。しかしながら学術的な用途には多くのSR及びFELが共同利用や商業的な利用形態で良く利用されている。Table 1にFELの応用について具体的な分野別にまとめる。

アインシュタインが発見した光の誘導放出の原理⁷⁾を用いるレーザーは非常に位相の揃った、集光性の良い、長距離伝送可能な強力な光をつくることができる。レーザーは発明されてから40年程度であるが鉄の溶接や切断からコンパクトディスク(CD)の演奏まで幅広く使われており、その利用は急速に広がっている。「もうすぐ光の時代がやってくる、工場、車、鉄道、船、飛行機までレーザー光で動く時代がくる。」と昔から言われたものであった。しかしながら現在は、効率の良い高い出力のものがないために、まだ利用は限定的で、そのような土木、建設、重工業等の分野の応用は実現されていない。

現在の大部分のレーザーの光は物質(利得媒質)中の束縛された電子により生成される。このためその光はその物質に非常に制約される。例えば、この光は、物質に固有の少数の波長(色)に限定される。レーザーを駆動する励起用フラッシュランプ光は、その一部がレーザー励起に用いられ、大部分はその物質を熱する。高品質の光が必要であれば熱歪みが無視できるほど弱い光しか出せない。そして

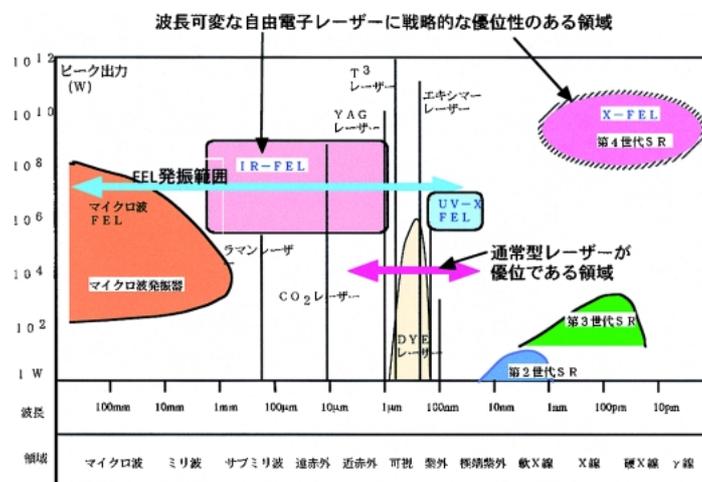


Figure 2. Two-dimensional distributions of the peak power (vertical axis) and wavelength (horizontal axis) for FELs and other bright light sources are illustrated.

Table 1. Summary of possible applications for future FELs.

分野	利用項目	利用例
原子力研究分野への応用	同位体分離	ウラン濃縮 原子力ウラン濃縮 分子法ウラン濃縮
		原子力新材料の精製 ⁹⁰ Zr, ⁵⁰ Ti, ⁵³ Cr などの精製
	再処理, 廃棄物処理	U, Pu その他の元素抽出群分離
	原子力技術	放射性材料の加工 (遠隔加工) 燃料の切断 (遠隔操作) 原子炉解体 (遠隔操作)
	核融合	プラズマ加熱, 電流駆動 プラズマ診断 (温度, 密度) レーザー核融合 ミュオン触媒核融合の反応加速
基礎科学	高エネルギー加速器への応用 電波天文学への応用 (局部発振器) 重力波天文台用レーザー	
基礎化学・物生研究分野への応用	光電子分光	金属バンド構造の決定, 素励起子, 不純物準位, 半導体, 半金属等の分光
	遠赤外分光	超伝導体のメカニズム 高温超伝導 材料の研究 超伝導ギャップエネルギー
	新材料の精製及び同位体分離によるモノ・アイソトピック材料	H, B, C, O, Si 等の同位体分離 物性値 (熱伝導率等) の大幅な改善
	バイオテクノロジー	DNA 構造の解体 DNA 神経繊維などの切断 高速蛋白質立体解析
	光励起化学反応の促進及び水素結合の切断	メゾスコピック素材 (サブミクロン以下) の開発・研究
テラヘルツ科学と工学	量子井戸, 量子細線, 量子点等の THz 高速 これらの電素を用いた検出素子/ レーザー環境有害物質の検出と分解	
医療研究分野への応用	光化学反応を用いる場合	癌治療 動脈硬化部除去, コレステロール分解, 骨の切断 胆石の碎石 近視・角膜のマイクロ切断手術 レーザー蛍光内視鏡 殺菌, 滅菌
	熱的作用を用いる場合	レーザーメス 光凝固法 あざ, メラニン沈着性疾患 レーザー内視鏡法
	その他	光刺激利用の機能回復 レーザー麻酔, レーザー鍼 光 CT, 生体内元素の濃度計測 ドップラー効果を使った血流測定, 代謝異常診断 レーザー歯科 (治療, 虫歯の予防, 加工) 細胞溶接, 遺伝子注入

Table 1. (つづき)

分野	利用項目	利用例
光加工 半導体・製造技術への応用 薄膜・表面プロセス	光加工	レーザー加工 穴明け, 切断, 溶接 表面加工, 変態焼き入れ, アニール 溶接プロセス (合金化, 肉盛, 表面 溶融) レーザーボーリング (石油井戸掘削) プラント建設
	薄膜・表面プロセス	光 CVD (レーザー化学蒸着) レーザー励起エッチング リソグラフィ (精密微小パターン の形成) レーザーアベレーション (均一な薄 膜の形成) ドーピング (不純物の制御, 高濃度 ドーピング) マーキング (永久変色を利用した核 印など) 殺菌 (ウエハー, 洗浄水) アニール (局所加熱など)
エネルギー	遠隔エネルギー伝送	スペースデブリ軌道偏向, 高々度無 人飛行船, 飛行機, 惑星探査機, 通 信衛星へのエネルギー伝送 (電力, 推進力, 熱源), 電力, 熱源光伝送
環境科学	高感度検出	フラン, ダイオキソンの広域高感度検 出 遠赤外ライダー, トリチウム遠隔検 知, 選択除去 分離/分解処理 振動励起準位経由 の熱分解 環境ホルモン等有害物質, オゾン層 有害物質, 地球温暖化物質等の広領 域広帯域モニター

逃げる熱も多いので効率が悪い。これは物質に固定された電子を使う限り避けられないことである。この事情を説明したのが Fig. 3 上である。発熱による大きな損失はレーザー駆動源 (フラッシュランプ) にもある。このため現在のレーザーは非常に非力なレーザーが大部分である。

そこで物質に束縛されていない自由な電子を用いるレーザー, つまり発振波長を光の波長まで短くした「真空管」である FEL のアイデアが生まれた。FEL で使う電子は「自由」であるのでそのレーザー光の色を自由に換えられる, また熱も発生しない, 或いは速やかに光速で排出されるので強い光を効率良く出せる。余った電子ビームはエネルギー回収して再利用し, 高いエネルギー効率と結果的に不要な放射線発生を10桁以上落とすことが出来る。このように FEL は光の時代にふさわしい理想のレーザーと考えられた。初期には米国のレーガン大統領の提唱した SDI (通称スターウォーズ計画) の候補⁸⁾にもなったのであるが, Fig. 3 中に説明されるように高エネルギー電子を作る常電導リニアックに莫大な熱が発生するので全体の効率が悪くボーイング社や TRW 社等で進められていた

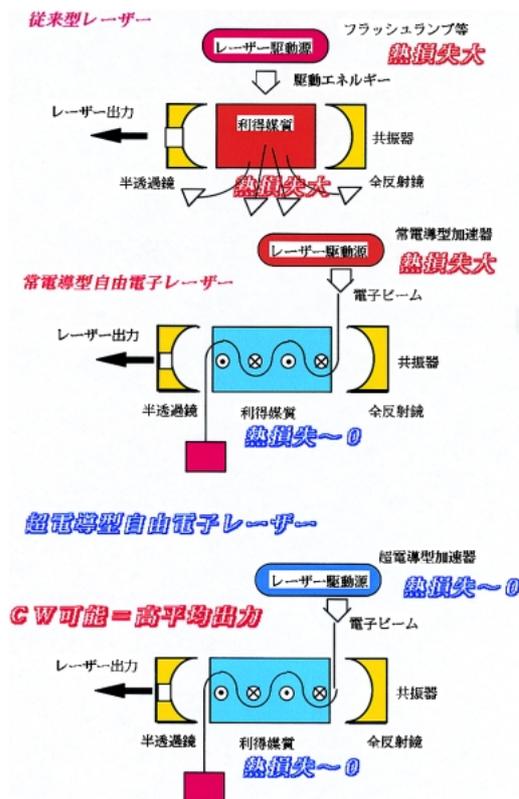


Figure 3. Comparison between heat losses in the conventional lasers, and normal conducting and superconducting rf linac-based free-electron lasers.

軍事利用研究は中止された。現在、軍事利用は小規模に米国ジェファーソン国立研究所と同国海軍が艦船の近接防衛兵器として開発が進められているのみである。

超伝導技術を用いてこの困難の解決を図ることができる。この説明が Fig. 3 下である。超伝導リニアックは常電導に比べて10万分の一以下の電気抵抗である。超伝導リニアックに投入された電力はほとんど100%電子エネルギーに変換される。そして常電導リニアックの導体損による莫大な熱は超伝導リニアックでは発生しない。しかしながら(常電導リニアックの全電力に比べて少ないが)極低温冷凍機の運転電力が必要となる。現施設は広い実験室サイズであるが、設計ではトレーラーサイズに小型化する目処が立っており、将来はさらに実験卓程度にまとめることが可能で、総効率(光出力を必要全電力で割った値=ウォールプラグ効率)をどの通常型レーザーよりも良くすることが出来る。たとえば、連続波(CW)炭酸ガスレーザーでは13%程度以下(パルス炭酸ガスレーザーでは数%以下)が限度とされるが、FELは15%以上が中規模の出力で、さらに大型機で50%程度が可能とされている。

3. 高効率高出力超伝導リニアック FEL の開発

FELは通常型レーザーと比べて極短パルス、波長可変、高効率、高出力が可能であると考えられる。また媒質

の特徴から原理的に発振波長の限界がないと期待される。波長可変性はFELのレーザー媒質が交番磁場中の高エネルギー電子であるので、次のFEL発振波長 λ_L の式で判るように磁場(B_U)又は電子エネルギー(γ)を変えることにより自由にかつ連続的に実現できる。

$$\lambda_L = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \left\{ \frac{eB_U \lambda_U^2}{2\pi mc} \right\} \right)$$

(ただし、 λ_U ; アンジュレーター周期長)

FELが高効率、高出力であることは前の Fig. 3 を見ていただくと理解できる。通常型のレーザーは、利得媒質を励起するためのフラッシュランプ等のドライバーにしても、固体、液体、気体等の利得媒質そのものにしても、発熱等の損失が大きい。もともとランプによる電気から光への変換効率が低い、そしてこの光は非常に広い波長領域に分散している。この広い領域の一部分しか利得媒質に吸収されない。このため膨大な熱損失がレーザードライバー(駆動源)及び利得媒質に発生し、平均出力を増加させることが出来ない。

FELは、既に述べたようにアンジュレーター磁場中の高エネルギー電子が利得媒質であるので発生熱が光の速度で速やかに系外に排出され、発熱による上限は無い。したがってFELは高効率、高出力であると考えられているわけであるが、今までのFEL装置は実際には平均出力が非常に低い。これは駆動源である常電導電子線リニアックにおいて非常に損失が大きいからである。この熱は通常金属銅の熱伝達では取り切れない、このため間欠的に短時間(十万~百万分の1秒程度だけ)パルス動作させて発熱損の総量を押えている。このため常電導リニアックを用いるFELにおいては高効率、高平均出力を実現するのは非常に困難となる。

超伝導リニアックは常電導リニアックの約10万分の1以下の表面抵抗であるので、前者は後者に比べて少なくとも10万倍程度以上の高い出力を容易に取り出せる事になる。この際、電子ビームの電流を増やしても損失は増えない。このため、前者は冷凍機運転のため余分の電力が必要で少し割り引かねばならないが、高出力の制限にはならない。Figure 3 では一番下の説明にあるように、超伝導リニアックを駆動源として用いることにより初めてFELの高効率、高出力という長所を現実のものとする可能性が出てくる。日本原子力研究所関西研究所東海駐在FEL研究グループにおいてこの超伝導リニアック駆動FELの開発に、最近成功した⁹⁾。原研では、準CW動作で5%という高いビーム光引出効率で、設計目標を超えることができ、最終的に2.34 kWを達成することができた。この高出力高効率発振は、今まで知られていない新規なもので、レサジー無し完全同期状態で、3サイクル発振、250 fs程度の幅を持ち、約1 GWの尖頭値であることが最近わかっ

た。この発振は、非常に高い縮重度を持ち、超放射状態であると考えられる⁹⁾。



Figure 4a. Injection system of the JAERI superconducting rf linac-based free-electron laser.



Figure 4b. Main accelerator system of the JAERI superconducting rf linac-based free-electron laser.

Figure 4a, b, c, d は、原研の施設の現状と建設の説明である。これは中赤外-遠赤外線領域の FEL で、本格的な学術利用や産業応用の準 CW 動作をするプロトタイプとして開発された。高エネルギー物理のリニアックと比較して小型で、扱い易く、高出力を可能とする CW 加速可能な超伝導リニアックの実現及びその高出力 FEL への応用が目標である。この開発過程で米国ジェファーソン研究所と日本原子力研究所の超伝導リニアック高出力 FEL の出力競争が展開され、日本原子力研究所の FEL が世界最高の効率と出力の記録を現在も保持している。超伝導リニアックによる最初の成果が出された後の開発競争の様子が、Fig. 5 から読みとれる。また、技術的には、出力制限は殆どないと考えられるので今後 2 年ごとに FEL は 1 桁以上出力が上昇すると期待される。

電子ビームのエネルギーの光に変わる割合を変換効率ま



Figure 4c. JAERI compact stand-alone, and zero-boil-off cryostat module for the superconducting rf linac.

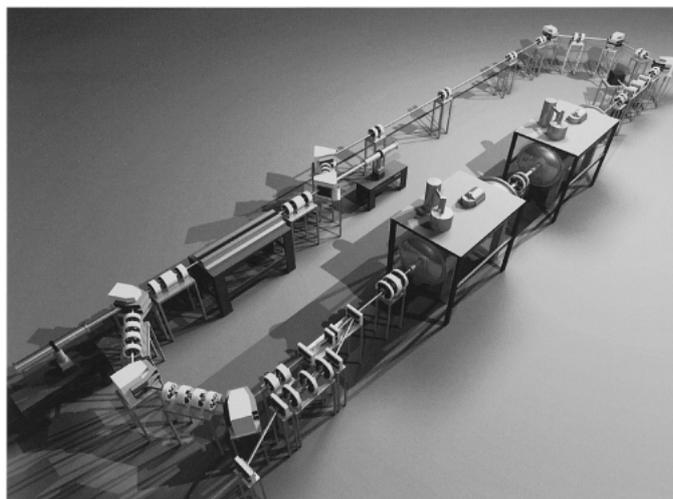


Figure 4d. Artist's view of the JAERI superconducting rf linac-based free-electron laser facility with energy recovery system. The facility is now under construction at JAERI, Tokai.

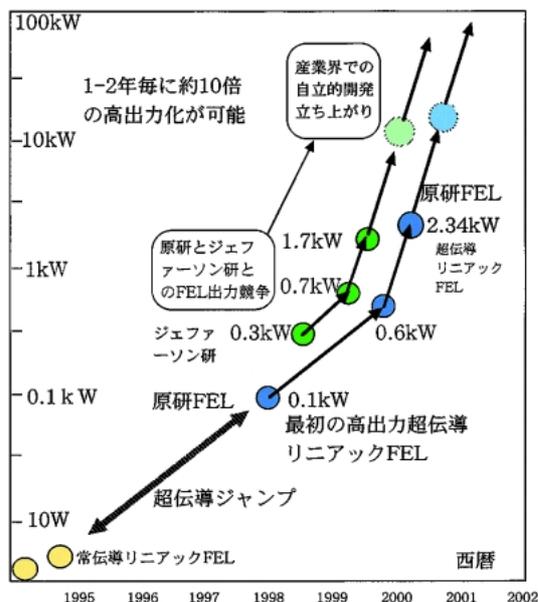


Figure 5. Superconducting rf linac-based free-electron lasers.

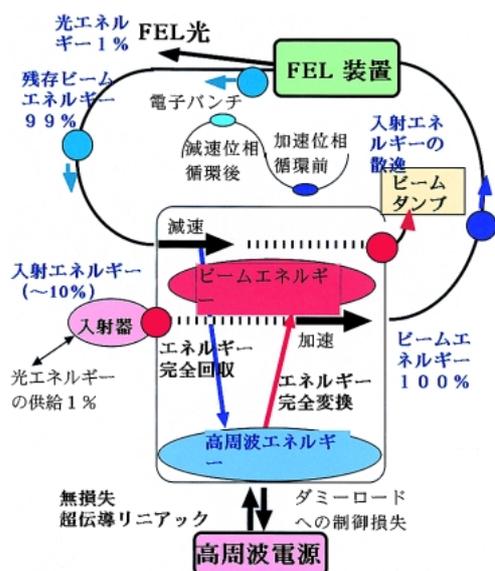


Figure 6. Explanation of energy recovery in FELs. An RF energy inside the superconducting cavity is converted into beam energy with negligible loss when the beam is in the acceleration phase. A small amount of the beam energy is then converted into light in the FEL device. Remained and most amount of the beam energy is fully transported to the cavity again, and the same amount of the converted energy is recovered into the RF energy in the deceleration phase. In the RF source, we have to consume small amount of energy in the dummy load to stabilize RF amplitude and phase. Therefore, we have to supply this amount of energy to the cavity. FEL light energy is fed by the injection system.

たは引出効率と呼んでいる。これは今まで1%程度以下で理論限界であったが、新しい発振モードが原研で確認され、最初に5%、現在7%程度が得られている⁷⁾。残り99%から93%は現在、捨てられているが、これを超伝導リ

ニアックの減速位相に入れて再度次の加速のエネルギーとして再度利用し、合わせて放射線発生を実質的に0とすることが超伝導リニアックでは可能である。このとき、加速時に同じ加速空洞内の高周波から電子ビームに与えられたエネルギーは、回収時には(減速時に)電子ビームから高周波に全量回収される。このように電子ビームエネルギーと超伝導リニアック内の高周波エネルギーとの間で完全なエネルギー変換が行われ、損失は非常に高い精度で0と考えることが出来る。結果的に、エネルギー回収が行われる電子ビームエネルギーの範囲で完全変換が行われる。回収最下限エネルギーである入射エネルギー以下では回収率は悪いので結果的には、光に変換されたエネルギーの数が必要となり、数十%程度の総効率が期待される。Figure 6に此の事情が説明してある。

4. 超伝導リニアック FEL の特長とその利用や応用

FELの原理的特長は波長可変、高出力、高効率であること、更に通常型のレーザーでは波長可変性やその発生と利用が困難な波長である中赤外/遠赤外及び紫外領域(近い将来x線領域)で動作することである。また電子リニアックによる電子ビームがレーザー駆動源となるためこの電子ビームの時間構造を持つ光ビームが得られる。このため他のレーザーでは不可能な尖頭値GW以上で連続動作するフェムト秒時間幅の遠赤外線レーザーが可能である。さらに将来は、アト秒時間幅にマイクロバンチされたフェムト秒長のパルス構造で、1Åから0.1Åで数百GW以上が可能となると期待されている⁶⁾。この発振光はSR用の蓄積リングからの光と比べると尖頭値輝度が10桁程度以上大きい。全光出力も近い将来SRを越えると考えられる。将来予測のロードマップをFig. 7とFig. 8に載せる。

この輝度が桁違いに大きいことを利用してFELにより発生、放出する光の対象物質への吸収を光の波長を精密に制御することにより有用な働きかけを非常に安価に実現できる。Table 1^{1),10),11)}にあるように精密な波長の設定により任意の元素、同位体、分子、化合物等の大規模な分離回収を行うことができる。また吸収の素過程、仕組みを同様にして制御し、分解、加工、改質、治療、診断、アニール等を行うことができる。このとき同一のレーザー装置を用いて広い範囲の波長をカバーできる。

Table 1にあるように、原子力分野への応用利用は、再処理、廃棄物処理、核燃料核材料創生である原子や分子の分離、と原子炉(金属やコンクリート等の切断)の解体、核融合プラズマの診断、加熱、慣性核融合のドライバー、ミュオン触媒核融合の反応促進に用いられている。基礎科学では、天文学、高エネルギー加速器、重力波、長基線干渉計等の診断、検出器、THz高周波源、干渉用レーザー、物性研究では、バンド構造、素励起子、量子井戸、量子細線、量子点、高温超伝導体理論の研究用光源、生物



Figure 7. Road map of the highly-efficient, and high-power FELs driven by a superconducting rf linac.

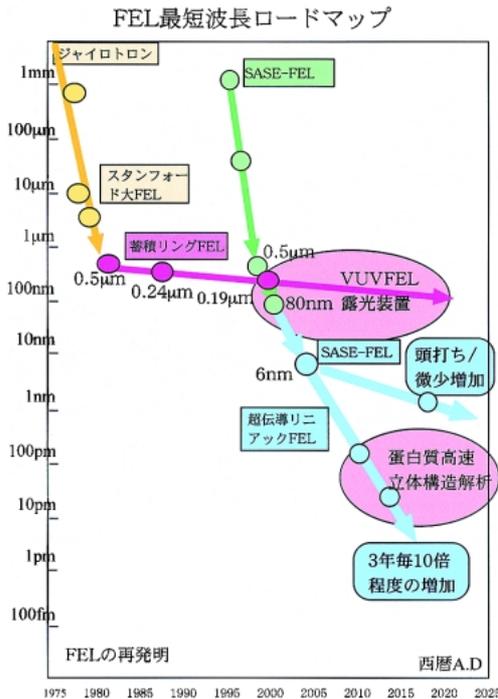


Figure 8. Road maps of short wavelength FELs driven by a superconducting rf linac.

科学ではゲノム解析, 蛋白質立体構造解析, 医療医学バイオ科学では, ガン, 血流, 代謝異常等の診断装置, レーザーメス, レーザーCT (光CT), 細胞溶接, 遺伝子注入, 殺菌, 滅菌, 表面処理, 光加工では, セラミック (コンクリートを含む), 金属, その他の物質の溶接, 切断, 改質, アニール, 穴あけ, ボーリング, エネルギー伝送で

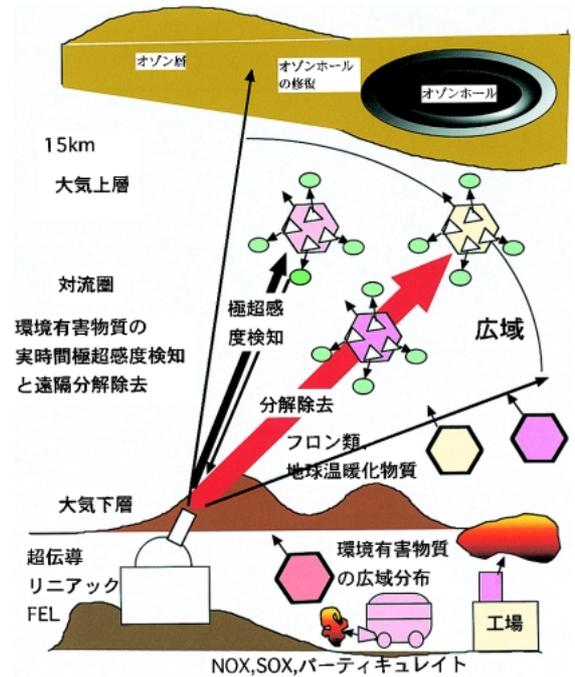


Figure 9. Utilizing ultrashort pulse, high efficiency, high power capability and tunability of FELs driven by a superconducting rf linac, the FELs can be applied to excite and to disintegrate selectively a specific states of a certain chemicals, and to realize a real time ultra-sensitive detection and removal of environmentally-harmful chemicals.

は, スペースデブリ軌道偏向, 高々度無人観測飛行機 (飛行船), 通信衛星や惑星探査機への電力や推進力や熱源の伝送, 光, 熱エネルギー伝送, 環境科学では, トリチウム等の遠隔極微量検知, 遠隔選択除去, 環境ホルモン等の有害物質の極高感度3次元検知, 高効率分解, フロンガスや温暖化物質の極微量検知, 遠隔高効率分解, フロンガス分解, オゾンホールの修復等が考えられる。

また現在, 加速器やアンジュレーター等の技術的な限界を克服する事により, 1 オングストロームに至る (x線共振器鏡を用いない) シングルパスx線レーザーの開発研究が進められている。発振波長の式からも容易に分かるようにその原理的な短波長限界は無いと考えられている。ただし発振波長の3/2乗で利得が小さくなる事, 及びx線共振器に必要な反射率の高いミラーが無く, シングルパスとなること等のために, より短い波長の発振は極めて困難となる。この原理的な困難を排して, 米国及びドイツにおいて次の5年でX線FELを実現させるため, 干渉性の高い電子ビームを実現できる常伝導及び超伝導リニアック自由電子レーザー技術開発が進んでいる。

高出力超伝導自由電子レーザーの応用の一つとして, Fig. 9にあるように大気中環境有害物質の3次元遠隔実時間超感度検知と遠隔分解除去の試みを説明する。殆ど全ての環境有害物質は, 中赤外-遠赤外領域に大きな共鳴吸収線が多数存在する。赤外領域は未だに良いコヒーレン

ト或いは非コヒーレント光源がなく、微弱ながら自由電子レーザーが広く利用されて来た。原研 FEL は、唯一この波長領域で、極短パルス、波長可変、高効率、高尖頭出力及び高平均出力のレーザー光を提供できる。これにより、広範囲の大気中に拡散している環境有害物質を遠隔で検知し、かつこの検知結果に基づいて集光した強力なレーザーで分解除去することが可能であることを日本原子力研究所で最近確認した¹²⁾。また、殆どの環境有害物質は（熱せられて吸収線が広がった状態では、選択性や効率が犠牲になるが）GW 級ピーク出力を持つ中赤外領域のレーザーで簡単に多光子解離、熱分解できる。これは焼却炉中の残留塵芥や煙道中において冷却中に再合成された環境有害物質を、通常の炭酸ガスレーザーで分解することが可能である事を示している。原研で FEL 及び炭酸ガスレーザーによるダイオキシンや PCB の分解成功後、民間で煙道中のダイオキシンの分解が実スケールで試みられ、成功している¹²⁾。これも実用上重要で、次世代の安価な超伝導 FEL の利用まではこのような方法も用いられると考えられる。

参考文献

- 1) C. A. Brau: Free-Electron Lasers, Academic Press (1990).
- 2) 高良和武監修日本物理学会編「シンクロトロン放射」.
- 3) D. A. G. Deacon, et al.: Phys. Rev. Lett., **38**, 892 (1977).
- 4) H. Motz: J. Appl. Phys., **22**, 529 (1951).
- 5) R. M. Phillips: 17th Conf. on Electron Tube Research, Mexico City (1959).
- 6) TTF-FEL 発振.
<http://sbfel3.ucsb.edu/www/desy1.html>
<http://www.desy.de/~wroblewt/scifel/scifel.html>
- 7) A. Einstein: Verh. d. Deutsch Phys. Ges. **18**, 318 (1916).
- 8) SDI (通称スターウォーズ計画) の APS 報告, Reviews of Modern Physics, **59**, S1-S200 (1987).
- 9) E. J. Minehara et al.: Nucl. Instr. and Meth. **A429**, 9 (1999).
 N. Nishimori et al.: Phys. Rev. Lett., **Vol86**, no. **25** pp. 5707 (2001).
- 10) 電気学会, 自由電子レーザー調査専門委員会編:「自由電子レーザーとその応用」(コロナ社, 1990).
- 11) 自由電子レーザー研究専門委員会編:「入門自由電子レーザー」(社団法人日本原子力学会, 1995).
- 12) 山内俊彦, 峰原英介他13名:「ダイオキシンへの赤外レーザー照射実験」環境科学会誌, **13巻3号**, 383 (2000).
 山内俊彦, 亀井康孝, 伊藤伸一, 古川行夫, 峰原英介:「CO₂ レーザー照射による PCB の分解試験」環境科学会誌, **14巻1号**, 73 (2001).