

# 自由電子レーザーの開発動向

## Present Status of Free Electron Laser Research

三 間 冨 興\*

Kunioki Mima

### 1. はじめに

自由電子レーザーは、高エネルギーの電子ビームがウィグラー磁場と相互作用してコヒーレントな電磁波を放射するものである。通常のレーザーと異なり、レーザー媒質のエネルギー準位に無関係であるため、シンクロトロン放射光と同様、電子ビームのエネルギーや磁場強度を変えることにより波長が可変である。例えば自由電子のエネルギーが1 MeVから1 GeVまで変ると、光の波長は1 cmから100 Åまで変る。この波長可変性と同時に、レーザーのエネルギー効率が高いこと及び排熱がほとんどないため、高い平均出力が得られることが特長である。これらの特徴のため、実用化に向けた開発が欧米で急速に進められており、日本でも近年研究が盛んである。

最初の増幅と発振の実験は、米国・スタンフォード大学のJ. M. J. Madeyのグループで、1976年～1977年におこなわれた<sup>1)</sup>。この実験では、図-1の様な装置が用いられ、3.4 μmの波長での発振に成功している。この装置では超伝導空洞の高周波線型加速器 (RF-Linac) が用いられており、高品質の電子ビームが得られたことが成功の第1の理由である。このグループからは、Schwettman, Smith, Elias, Deacon等、多数の米国FEL研究のリーダーが輩出している。

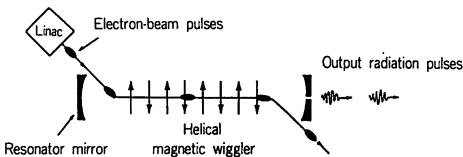


図-1 典型的な自由電子レーザーの発振器  
(電子ビームはRf Linacより)。

現在世界中で稼動している自由電子レーザーの波長域は図-2に示すように広がっており、現在計画中的のものも含めると2000 Åから1 cmにわたる全波長域で発振が実証されることになる。現在の最短波長の記録はノボシビルスク(ソ連)の原子核物理研究所の電子蓄積リング(VEPP-3)を用いた自由電子レーザー(FEL)での2400 Åである<sup>2)</sup>。日本でも大阪大学レーザー核融合研究センター、電子技術総合研究所、日本原子力研究所、分子科学研究所、理化学研究所で可視、赤外及びミリ波の発振実験が進められている。

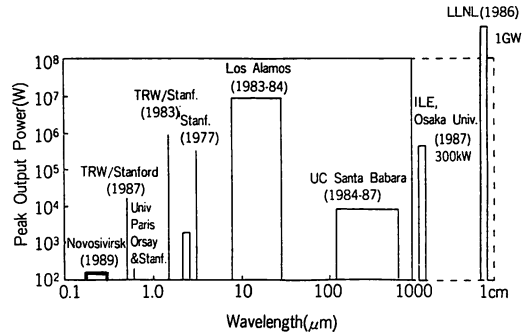


図-2 FEL実験の出力と波長範囲

### 2. 自由電子レーザーの構成要素と発振の条件

図-3に示すように、自由電子レーザーは電子加速器、ウィグラー(シンクロトロン放射装置ではアンジュレーターと呼ばれる。)及び光学系から構成されている。用いられる加速器の種類によってFELの全体構造が左右されるため、RF-Linac FEL、電子蓄積リングFEL(SR-FEL)、誘導線型加速器FEL(Induction Linac FEL)等と呼ばれる。RF-Linac FELの開発がもっともよく進んでおり、世界中で10台以上が建設されている。

図-1に示すように、RF-Linacのビームは数10PSのバンチになっており、ウィグラーに入射された電子

\*大阪大学レーザー核融合研究センター教授  
〒565 大阪府吹田市山田丘2-6

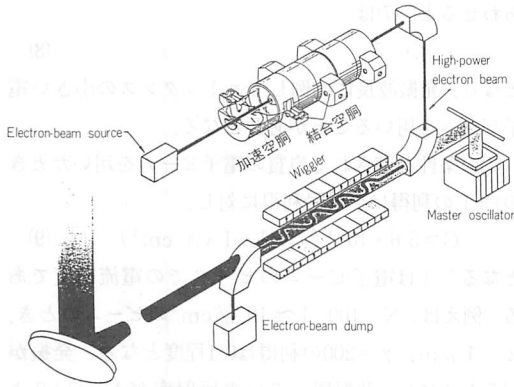


図-3 自由電子レーザーの構成

自由電子レーザーは高輝度加速器、高精度ウイグラー磁場、高耐力学システムにより成っている。

ビームから放射された光も電子ビームのバンチと同じパルス幅の波束となる。波束は共振器中で往復し、その往復周期と電子のバンチの繰り返し周期が一致していると光パルスは繰り返し電子ビームと相互作用し増幅される。1976年のスタンフォード大学の実験では、電子バンチの繰り返し周期は11.8MHzで、バンチ間隔は25.6mであった。従って共振器のミラー間隔は12.8mにして同期が取られた<sup>(1)</sup>。

ウイグラー磁場中では、電子ビームは図-4のように蛇行する。蛇行と同じ方向に偏光面を持つ光が放射・増幅される。図-4で波線は光の電場の振動の様子を示しており、 $A_0, A_1, A_2$ の位置にある電子は、 $\underline{E}$ の方向にウイグラー磁場によって曲られるため、電場の電子への仕事  $-e \underline{V} \cdot \underline{E}$  ( $\underline{V}$ は電子の速度) が負となり電子は減速される。逆に、 $B_0, B_1, B_2$ の位置の電子は加速される。従って、最初  $A_0$ にあった電子のZ方向の速度  $V_z$ が光速よりわずかに遅く、電子がウイグラーの一周期  $\lambda_w$ を伝播する間に光の波長  $\lambda$ だけ遅れる場合には  $A_0, A_1, A_2 \dots$ の位置を取り続ける。その結果、電子は減速され、そのエネルギーが光に変換され、光は増幅される。逆に  $B_0, B_1, B_2$ の電子は光のエネルギーを吸収する。入射点では電子はAの位置にも

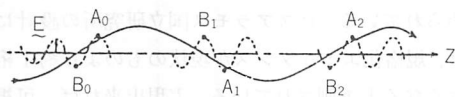


図-4 電子と電磁波とのウイグラー内における共振機構の概略。実線は電子の運動、破線は放射電磁波の場  $\underline{E}$ の方向と強度を示す。

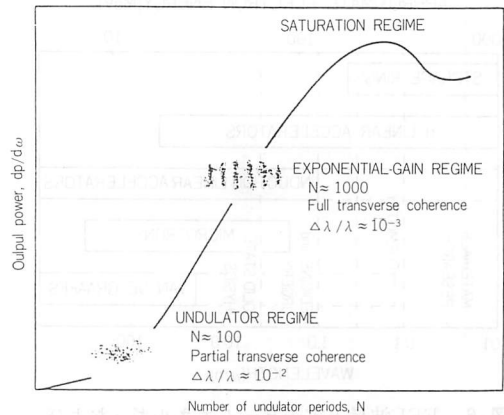


図-5 長いアンジュレーターでの自発放射から誘導放射への変化と放射光出力

Bの位置にも同程度存在し、吸収・増幅は相殺される。しかし、A及びBで電子が加速・減速されるため、十分長い相互作用の後には図-5のように、AとBとで濃淡が生じる。共鳴条件

$$(C - V_z) \lambda_w / C = \lambda \tag{1}$$

を満たす  $V_z$ よりもわずかに高速の電子ビームでは、減速を受けるAの位置に電子は長く滞在し、加速されるBの位置からは早く移動する。その結果、Aの位置での電子ビームの密度が高くなり、光の指数関数的な増幅が起る。FELで誘導放射出が強く起っている状態では、図-5のように、放射光の波長の周期で電子ビームに濃淡が生じている。後述するように、この濃淡は電子ビームのエミッタンスやエネルギー広がりにより乱されるため、光の波長が短いほどエミッタンス  $\epsilon_e$  やエネルギー広がり  $\Delta \gamma / \gamma$  を小さくする必要がある。

共鳴条件(1)は十分相対論的な電子ビームに対し近似的に

$$\lambda = \lambda_w / 2 \gamma_z^2 \tag{2}$$

と書ける。ここに  $\gamma_z^2 = 1 / (1 - V_z^2 / C^2)$ 。ウイグラー磁場による蛇行運動の横方向の最大速度を  $V_\perp$ とし、電子ビームのエネルギーを  $\gamma mc^2$ としたとき、

$$\gamma_z^2 = \gamma^2 / (1 + K^2 / 2) \tag{3}$$

$$K = \gamma V_\perp / C \tag{4}$$

となることより、共鳴条件は

$$\lambda = \lambda_w (1 + K^2 / 2) / 2 \gamma^2 \tag{5}$$

となる。ウイグラー磁場を  $B_w \sin(kwz)$  と与えたとき、 $K = eB_w / (kwmc^2)$  で与えられることが知られている。

(5)の共鳴条件から、発振波長が電子ビームエネルギー

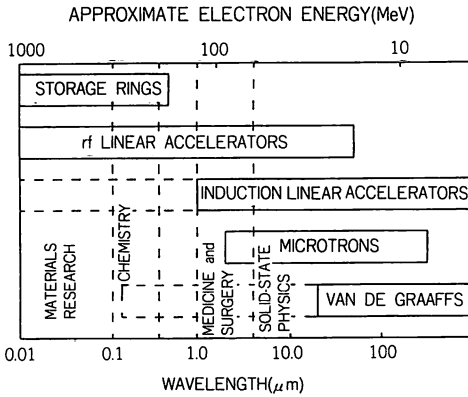


図-6 FEL波長と電子ビームエネルギーおよび加速器との関係

ーに反比例し、ウイグラー波長に比例して変えられることがわかる。また、ウイグラー磁場すなわちK値を変えることによってもλは可変である。

発振波長を大幅に変える場合には、電子ビームのエネルギーを変える必要があり、従って用いる加速器の種類によって発振波長範囲は限定される。図-6に発振波長の範囲と用いられる加速器及び応用分野が示されている。近赤外から紫外の範囲ではRF-LinacとかStorage ring（電子蓄積リング）のような高エネルギーの電子が得られやすい加速器が用いられ、遠赤外及びミリ波の領域では、誘導線型加速器、静電工速器、パルスパワーを用いる電子加速器が用いられる。また、加速器の種類は電子ビームの質に関係する。例えば、電子蓄積リングとか静電加速器は質の良い電子ビームを供給する。

電子ビームにエネルギー広がり ( $\Delta\gamma/\gamma$ ) や伝播方向の広がり (エミッタンス  $\varepsilon_b$ ) があると、電子ビームの  $V_z$  の分布が広がり、電子ビームの密度変調の形成が阻害される。ウイグラー長を  $L_w$  としたとき、速度広がり  $\Delta V_z$  による電子の位置の広がり、 $\Delta Z$  はウイグラーの出口で、

$$\Delta Z = \Delta V_z L_w / V_z \quad (6)$$

となる。従って、 $\Delta V_z$  の悪影響が出ないためには、 $\Delta Z$  を光の波長に比べ十分小さくしなければならない。すなわち、

$$\Delta V_z / V_z \approx \Delta\gamma / \gamma < 1/N \quad (7)$$

ここに  $N = L_w / \lambda w$  はウイグラー磁場の周期数である。速度広がり はエネルギー広がり に比例し、エミッタンスの2乗に比例する。電子ビームの半径及びウイグラー長を光ビームの半径  $R$  とレーリー長  $2R^2/\lambda$  に

あわせると、(7)は

$$\varepsilon_b \ll \lambda \quad (8)$$

となり、発振波長に比例してエミッタンスの小さい電子ビームを用いることが必要となる。

(7)の条件が満たされる良質の電子ビームを用いたときのFELの利得は小信号利得に対し、

$$G \approx 5.6 \times 10^{-4} \frac{\lambda}{\gamma} N^2 L_w I \text{ (A/cm}^2\text{)} \quad (9)$$

となる<sup>9)</sup>。Iは電子ビームのピークでの電流密度である。例えば、 $N=100$ 、 $I \approx 10 \text{ A/cm}^2$  のビームのとき、 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 、 $\gamma = 200$  の利得は0.1程度となる。発振が起るためには、共振器ミラーの反射率が  $1 - G/2$  より十分良くなければならない。可視より長い波長領域では一般に利得も大きく、反射率の大きいミラー材料があるため余り問題とならない。しかし、紫外領域では反射率が急激に小さくなるため、2000Åより短波長での発振にはミラーの開発も課題となる。特にXUV領域での発振には、4以上の利得を実現するか、より良い共振器を開発することが課題となっている。

電子蓄積リングでは電子ビームの品質は良いが、高出力レーザー光を得ることは困難である。レーザー出力を高くすると、蓄積されている電子ビームは擾乱を受けて、エネルギー分布が広がり、縦方向のビームのパンチも長くなるため利得が急激に低下し、レーザー発振が止まるか、出力が激しく低下する。一方RF-Linacでは、高出力レーザーとなりうるが、エネルギー広がり とエミッタンスを小さくすることが課題である。そのため、低エミッタンス、高電流密度の電子銃の開発が重要課題となっている。加速用マイクロ波と同じ周波数の高周波電場を用いて電子ビームを引き出すRF-gunとPhoto-Cathodeの組み合わせが有望視されている。このカソードではモードロックレーザーでマイクロ波の周期に合わせて光電子を発生し、高いピーク電流のエネルギーのそろった電子ビームが得られる。寿命の長いPhoto-Cathodeの開発と、安全なモードロックレーザーとクライストロンの同時制御が技術課題である。現在、 $\text{LaB}_6$ 、 $\text{K}_2\text{CsSn}$ 等のPhoto-Cathodeが用いられ50~100時間程度の寿命で、Nd-YAGレーザーの2倍もしくは3倍高調波光を照射する実験が進められている。ロスアラモス国立研究所の設計によれば、規格化エミッタンスが現状のものより約1桁が小さくなると予測されている。実現出来れば、可視からの紫外FEL発振が飛躍的に容易になるものと期待される。

FELのもう一つの開発課題は側帯波（サイドバン

表1 世界の自由電子レーザー装置

国名	研究機関	加速器			ウイグラー				光学系		その他プロジェクト
		種類	エネルギー	ビーム電流	種類	周期	長さ	強度	波長	その他	
1 米国	スタンフォード大学 HEPL	超伝導線型加速器 (L-band)	66~115MeV	1~26A	永久磁石 linear	3cm	3.5m		1.6 μm 0.53 μm		recircularによる高エネルギー化。安定なFEL発振
2	ローレンスリヴァモア国立研究所 (LLNL)	誘導線型加速器	EPA 5MeV ATA45MeV	10kA 10kA	電磁石 linear 電磁石+永久磁石 linear タイプード	10cm 10cm	2m 25m	2kG 2.5kG	9mm 10.6 μm	1GW 0.6GW	変換率 35% 1年後 shut down
3	カリフォルニア大学 サンタババラ校	静電加速器 (リサーチ用)	2~6 MeV	1~10A	永久磁石	6cm	6m		120 μm ~400 μm	数kW	User's Facilityとして機能している。コンパクトFEL建設中(~30 μmの発振)
4	ロシアラモス国立研究所	高周波線型加速器 (L-band)	42MeV	300A ~600A (15mA Macro pulse Average)	永久磁石 planer	2.7cm	1m (Oscillator用) 2m (Amplifier用)	K~1	10 ~40 μm	MOPA	Boeingと共同研究 エネルギー回収 photo-cathode RF-gunの試作
5	National Institute of Science and Technology / Naval Research Laboratory	Race-Track Microtron (S-band)	17MeV ~185MeV	550 μA (平均)	永久磁石 タイプード gap制御 (0.5mm/μm)	3cm	3.6m	0.54T	10 μm ~0.2 μm	Fabry-perrat 共振器長9m ミラーは Fuse Silica	1988年プロジェクト開始 加速器建設中
6 米国	Vanderbilt 大学	高周波線型加速器 (S-band)	40MeV	20A (200mA マクロパルス)	永久磁石 ハイブリッド	3cm	1.2m	-	2 μm 10 μm (高調波 1.5μm以下)		応用研究 (分子生物学 医療への応用)
7	Duke 大学	高周波線型加速器 (S-band)	38 ~45MeV	数A	永久磁石	3cm	1m	-	1 μm 10 μm		スタンフォード大学より移設 同位体分離等への応用
8	Columbia 大学	パルスパワー	1 MeV	kA	ヘリカル	-	-	-	2mm		optical guideの実証
9	MIT	パルスパワー	1.4MeV	260A	ヘリカル CARM サークュラー FEL	数cm	1m	2kG	9mm	10MW	1984年 ジャイラトロンとの比較検討
10	Boeing	高周波線型加速器 (L-band)	140MeV	100 ~300A	永久磁石 ハイブリッド	2.18	5m (10mも完成)	K>1	0.514 μm	共振器長50m (リング レーザー)	LANLと共同開発 Macro pulse (30kW設計値)
11	Univ. of Central Florida	静電加速器	12MeV	0.1A (DC operation)	永久磁石 linear				5~500 μm		1987年 プロジェクト開始
12 米国	ブルックブネル国立研究所 / ロックウエル・ロケットダイナミクス社	高周波線型加速器	50MeV	100A	超電導 マイクロウイグラー	0.88cm	60cm	4.5kG	0.47 μm		計画・建設中
13 フランス	ORSAY	ストレージリング (Super Aco)	800MeV ~450MeV		Optical Klystron	8cm		k=0.575	0.495 μm	利得 2%	
14 日本	ノボシビルスク原子核物理研究所 連	ストレージリング (VEPP-3)	350MeV	平均20mA Peak 3~4 A	Optical Klystron	10cm	3.4m + 1.2m + 3.4m	5.3kG	6900 Å 2400 Å	共振器長 18.7m 利得は 10%~2.5%	世界の最短波長記録
15 イタリア	Frascati 原子力研究所 (ENEA)	超伝導高周波線型加速器 マイクロトロン	25eV 20MeV	5 A -	ハイブリッド	4.4cm	2.2m	k=0.5 ~1.0	4~6 μm (3倍高調波の発振) 30 μm	出力 500W	'89年完成予定 利得20%
16 オランダ	FOM Inst. for plasma Physics	高周波線型加速器 (S-band)	15 ~25MeV (第2期は35~45MeV)	70A	永久磁石	6.5cm	2.5m	4.4kG	8 ~80 μm		プロジェクト名 FELIX 建設中 英国等と協力
17 フランス	Thomson CSF社 / CEAS	高周波線型加速器 (433MHz)	17MeV	~100A	永久磁石 ハイブリッド	3.2cm	2m	5~10kG	~20 μm	キャビティ長 10.38m	計画 long Macro-pulse (200 μs)
18 イタリア	INFL研究所 (Padova) / ミラノ大	静電加速器	0.7MeV	3 A (リサーチ用)	/	/	/	/	mm~cm波		プロジェクト名 (SEAPA) small Electrostatic Acc.
19 イギリス	オックスフォード大学	タンデム型静電加速器	10MeV	2 A	永久磁石	3.4cm	2m		100 μm ~400 μm (最終的には60~30 μm)		共同利用施設とする UCSBと協力 プロジェクト名 Obelix
20 西ドイツ	Weitzmann Institute テルアビブ大	静電加速器	5 MeV	1 A	コンパクトウイグラー				50 μm ~500 μm		

ド)の抑制である。飽和状態では電子がシンクロトロン振動するため、シンクロトロン振動程度周波数が異なる側帯波が成長してくる。その結果、共振器中の光が多モード化し、コヒーレンスが劣化すると同時に、ウイグラーのテイパーリングによるレーザーの高効率化が困難になる。側帯波を取り除き、単一モード発振を実現するため、共振器中へのグレーチングの導入とか、共振器長を同期状態からすこしずらすこと等の方法が実験及びシミュレーションによって調べられている。

3. 自由電子レーザー実験の現状

欧米では表1-a, b, c, dに示す研究機関でFELが稼動もしくは建計中である。最近ヨーロッパ各国でのFELの研究が急激に展開していることがわかる。イタリアとフランスの研究が特に精力的で、フランスカッチにある原子力研究所では超伝導RF-Linac及びマイクロトロンを用いて4~6μmから30μmにわたる

赤外領域の発振実験がおこなわれている。またフランスでは第2のStorage Ring FELとしてSuperACOがORSAYで稼動を開始し、5000Å近傍での利得2%を確認し、発振実験に成功している。今後より短波長での実験が進められるものと予想される。オランダ及び英国でも新しいプロジェクトが開始されており、オランダのエトレヒトのプラズマ物理研究所ではS-bandのRF-Linacを用いて10μm前後の赤外域の発振を目標としている。イギリスのオックスフォード大学のグループでは静電加速器を用いたFEL利用研究センター構想が実行に移されている。日本でのFEL研究装置は表2に示す。

3.1 RF-Linac FEL

RF-Linac FELの代表的な装置にはスタンフォード大学の超伝導ライナックとロスアラモス国立研究所(LANL)のLバンドのライナックがある。図-7にスタンフォード大の循環型ライナックのビームラインを示す<sup>(4)</sup>。1回目は66MeV、2回目は115MeVのエネ

表2 わが国における自由電子レーザー研究の現状

研究所	加速器または研究内容	電子ビーム	ウイグラー	発振波長	出力	註
電総研	SR (TERAS) 周長 31,4m	230MeV, 10mA	PM 7,6cm	570nm		オプティカル・クライストロン
分子研	SR (UVSOR) 周長 53,2m	280MeV, 3-10mA	PM 7,4cm	488nm		
日本大学 (習志野)	マイクロトロンライナック	30MeV				建設中
阪大産研	RF ライナック	24MeV, 3kA	PM 4 cm	10,6 μm (Vac.) 0,6 μm (H <sub>2</sub> ,ガス)		ガスFEL 最大38MeV, 67nc
阪大レーザー研	パルスパワー	0,5MeV, 1kA	ヘリカルW, 2cm	4 mm	300kW	
	パルスパワー	0,6MeV, 1kA	大出力 CO <sub>2</sub> レーザー	0,6 μm		ガス共鳴モードの検出
	パルスパワー/誘導電圧重量方式	4MeV, 1kA	ヘリカルW, 3cm	0,8mm	MWレベル	
理研	Cold REB CO <sub>2</sub> 光のトムソン散乱	0,6MeV, 10A 0,6MeV, 10A	ヘルカリW, 1,5cm CO <sub>2</sub> レーザー	13mm 590nm	100kW	効率1%, 自己モード同期現象の観測 Cold REBのエネルギーひろがり $\frac{\Delta E}{E} = 0,6\%$
金沢大学	パルスパワー	0,5MeV, 1kA	リップル磁場			
宇宙研	パルスパワー/誘導電圧重量	1MeV, 5kA	円周配置永久磁石	6,15mm		円形 FEL
原研	超伝導RF-Linac	24MeV	/	10 μm	/	原子力応用

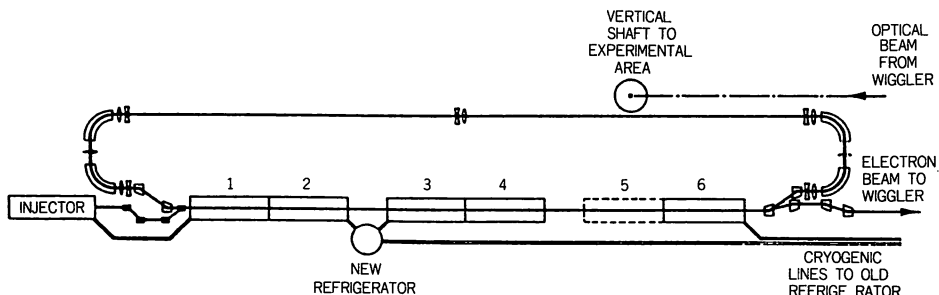


図-7 自由電子レーザー用スタンフォード大学超伝導一循環型 rf-linac

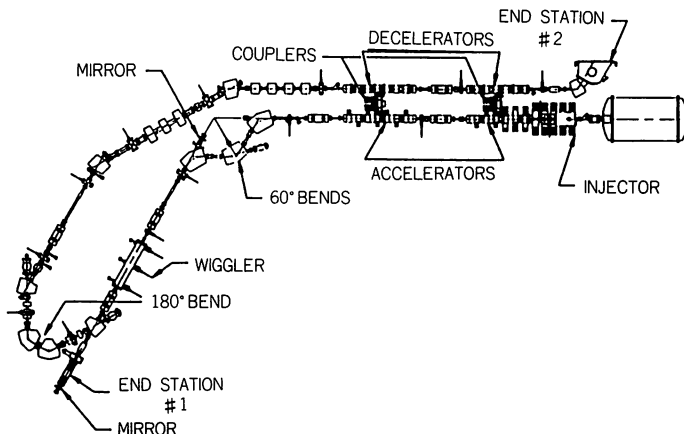


図-8 ロスアラモス国立研究所での自由電子レーザーシステム (rf-linac)

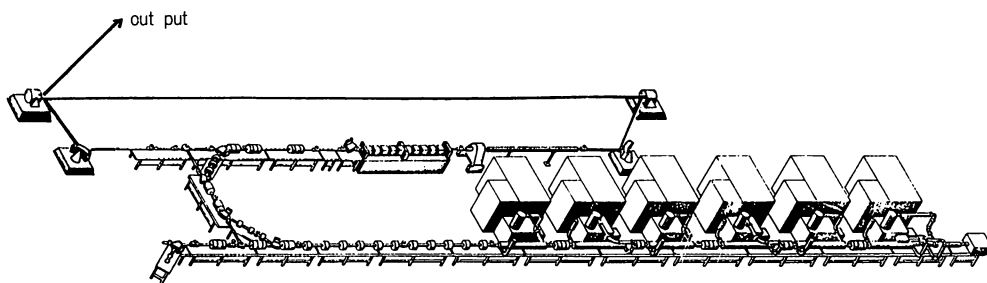


図-9 ボーイング社の世界最大級の可視光 FEL

ルギーのビームとなり、赤外と可視の実験が出来る。電子ビームエネルギー広がり及び電流のゆらぎが0.1%程度で極めて安定性とコヒーレンスのよいレーザー光が得られる。最近、物理実験等への応用実験が開始された。一方、LANLでは、10~40 $\mu\text{m}$ の波長域での高出力・高効率FELを目標に実験が進められている。図-8はエネルギー回収実験をおこなったときのビームの配置図である。60%以上のエネルギー回収に成功している。テイバードウイグラーを用いた発振実験では2.5%のエネルギー引出効率を得ることに成功している<sup>9)</sup>。また、ボーイング社との共同研究によりL-bandライナックを用いた0.514 $\mu\text{m}$ での発振を成功させている。この装置はボーイング社に設置されており、S DI用のFEL開発を主目的としたものである。現在長さ10mのウイグラーを用いて、波長1 $\mu\text{m}$ での高出力レーザー光の発生が試みられている。このFELは図-9に示すようにリング形状をしているのが特徴である。

### 3.2 電子蓄積リングFEL (SR-FEL)

SR-FELはもっとも短波長の発振に適した装置である。ソ連・ノボシビルスクの原子核物理研究所では、

バイパスを持つSR-FELで世界最短波長の発振に成功した。ウイグラーにはOptical klystron (OK) が用いられており、OKの全長は7.8mで、ビームエネルギー350MeVで2400 $\text{\AA}$ から6900 $\text{\AA}$ にわたり発振に成功している。2400 $\text{\AA}$ での利得が2.5%にも達していることが報告されている<sup>10)</sup>。

### 3.3 誘導線型加速器

ローレンスリヴァモア研究所 (LLNL) 及び阪大レーザー研で増幅実験が進められている。LLNLではExperimental Test Accelerator IIが稼動しており、波長9mmのミリ波を増幅し、ピーク出力1GW以上を実現している。約20ns (50J) のパルスを高磁場トカマクに入射し、相互作用実験をおこなっている。エネルギー引出効率は35%に達しており、もっとも高効率のFELとなっている。現在、繰り返し率5kHzにしてトカマクに入射するための準備研究が進行中である。一方、Advanced Test Accelerator は45MeVの電子ビームにより、炭酸ガスレーザー光を増幅し、0.6GWの出力を得ている。この実験では、電磁石と永久磁石を組み合わせたハイブリッドのウイグラーが用いられた。

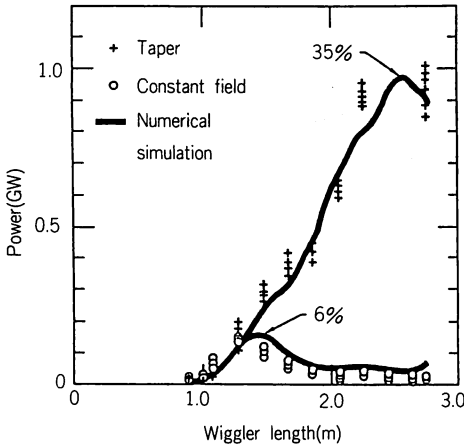


図-10 ETAにおける自由電子レーザー出力、1 GWの最高出力をテーパウイグラーで達成。波長は約1 cmである。

図-10には、ETAのFELでのテーパードウイグラーと一定ウイグラーの比較実験の結果とシミュレーションの結果を示す<sup>10)</sup>。

3.4 静電加速器FEL

カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB) では、遠赤外レーザーの利用研究センターでFELが稼動している。発振波長は120 μm~400 μmに渡っている。ビームエミッタンスは18mm-mrad, エネルギー広がりは0.1%程度であり、数100 μsのパルス幅のビームにより、単一モードでの発振に成功している。イスラエルのWeilzman研究所, イギリスのオックスフォード大及びCentral Florida Univ. の各研究所で静電加速器を用いたFEL装置の建設が進行中である。

4. おわりに

米国等においては、FEL装置自体の開発が一段落し、応用目的にそったFELの関係に研究の中心が移りつつある。図-2に示したように、各波長域に対応した種々の応用が考えられる。赤外から遠赤外の光は固体物性研究をはじめ医療、分子生物学、高勾配加速器、宇宙エネルギー伝送、プラズマ加熱への広い応用分野が考えられている。図-11は半導体、超伝導体等に関連する励起エネルギーを示したものである<sup>11)</sup>。この表は静電加速器FELを利用した遠赤外レーザー利用センター (UCSB) がまとめたもので、実際にこの表のいくつかのものについては実験結果がすでに得ら

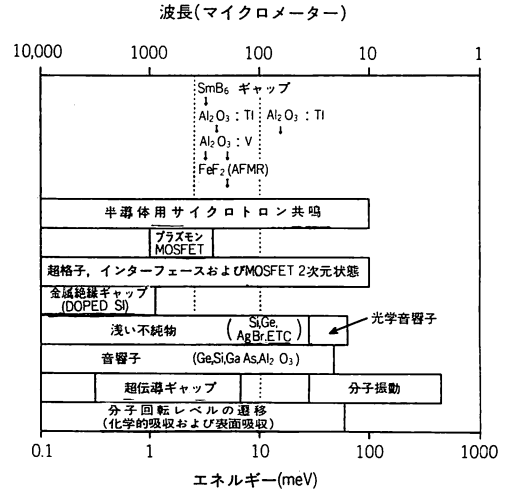


図-11 固体物性研究用励起

れている。最近DNAと波長可変遠赤外光との相互作用が注目されている。二重らせんがほどけるモードの励起のエネルギーに共鳴する遠赤外光を照射し、DNAの増殖等が制御可能となる。種々のDNAで共鳴波長が異なるためFELの波長可変性が最大限いかされることになる。可視及び紫外のFELは光化学、同位体分離等の原子力研究、電子機器の製作、不純物原子の微量分析等への応用が考えられている。光化学の分野ではレーザーを用いたCVD及び有機化学反応過程の光による制御等への応用が可能である。

現状ではFELは大型加速器を用いるため、他のレーザーに比べて高価である。しかし、高効率、大出力及び波長可変な三拍子そろったレーザーとなる可能性をもち、すでに述べたような広範な応用分野が考えられており、その開発が期待されている。

参考文献

- 1) D. A. G. Deacon, et al ; Phys. Rev. Lett, 38 (1977) 892.
- 2) I. B. Drobyazko, et al ; Proceedings of 11th International Conference of Free Electron Laser, Naples, Florida, 1989, to be published
- 3) 三間罔興, 今崎一夫 ; 自由電子レーザー, 応用物理, 57巻, 10号 (1988), 1468~1484
- 4) T. Smith et al ; Nucl. Instr. Meth. A259, (1987), 7.
- 5) R. Warren et al ; Nucl. Instr. Meth. A259 (1987), 8.
- 6) T. J. Orzechowski et al. ; Phys. Rev. Lett., 54, (1985) 889.
- 7) E. Shaw et al. ; Phys. Quan. Elect. 7, (1980), 665.