

解説

# コヒーレント X 線源への挑戦

木原 元央

高エネルギー物理学研究所放射光実験施設\*

## Challenge to Coherent X-Ray Sources

Motohiro KIHARA

*Photon Factory, KEK*

Coherent x-rays is thought as providing with unprecedented scientific opportunities. For more than ten years coherent x-ray sources based on the idea of spontaneous amplification, spontaneous emission (SASE) have been developed extensively, particularly from theoretical aspects. Time has come when proof-of-principle experiments, or demonstration experiments, should be pursued more seriously to make the coherent x-ray source a reality.

This paper deals with the background of development of SASE FELs, the brief description of the SASE principle, and technical challenges required.

### 1. はじめに

放射光が現在のように広く使われるようになったのは、輝度、偏光特性、時間特性などの点で他のいずれの光源に比べても数段優れており、100 ナノメートル以下の波長領域では唯一のチューナブルな光源であるということによる。また、安定な電子蓄積リングに基づいているため、スペクトルや時間特性など、光源の特性が正確に予測することも重要な要素である。さらに、光源の安定度が実験の質を左右する重要なパラメータであることが認識されつつあり、ビーム寿命の数十時間、ミクロンオーダーの発光点安定度は今では常識的な要求になっている。

このような高度な放射光光源の技術はもちろん

一日にしてなったわけではなく、高エネルギー物理用に開発された電子加速器技術をもとに、当初の小型装置から順次大型装置へと開発が進められた結果、放射光源用の電子貯蔵リングは今日見るような極めて成熟度の高い装置に発展した。

放射光研究の著しい進展のもう一つの要因は、光源としての放射光の多様性にある。高エネルギー加速器をベースとする放射光源は従来型の光源と比べて決して廉価な装置ではないが、そのまわりには多数の実験装置を置くことができ、異なった波長や手法で多様な研究ができる。そのために、VUV から X 線にわたる広範囲の学問領域で放射光利用の要求が拡大した。これは放射光の進展にとって無視することのできない大きな要因で

\* 高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設 〒305 つくば市大穂 1-1  
TEL 0298-64-5631 FAX 0298-64-2801  
e-mail kiharam@kekvox.kek.jp

あった。

このような流れで見ると、放射光源の性能はこの30年の間、低エミッタンスリングの登場や挿入光源の発達によって飛躍的に進歩したが、放射光の揺籃期から今日の第三代放射光の時代に至るまでいずれも基本的には一貫した流れに沿ったものと位置づけられる(表1参照)。

一方、放射光に近い光発生技術に自由電子レーザー(FEL)がある。レーザーは極めて高いコヒーレンスを持つ理想的な光源であるが、多くの場合、波長はレーザー媒質に特有な値に限られ、出力も媒質を用いていることから一定の限界がある。しかし、FELでは、ガスや固体媒質の代わりに電子ビームが使われ、波長がチューナブルであるとともに、媒質を用いないことから大出力の可能性があるので、光源としてさらに魅力ある特性を持つものと考えられた。FELは1975年、Madeyらによってはじめて実証実験が行われ、それ以来、さまざまな波長領域で開発が行われている。マイクロ波の領域では、エネルギー1~10 MeV、ピーク電流1 kAのパルス状の電子ビームが使われ、加速器としては大きなピーク電流がとれる誘導型リニアックなどが用いられる。短波長FELの目指す波長領域は遠赤外から紫外にわたる広い領域に及び、遠赤外から赤外の領域ではエネルギー100 MeV以下の電子リニアックが、また、紫外領域では高エネルギーの電子リニアックや電子貯蔵リングが用いられる。これまでのと

ころ、最も短波長のFELは240 nmである。FELにはレーザーと同じように反射鏡が必要であるが、波長200 nm程度以下ではいまのところ、発振に至るに十分大きな反射率を持つ適当な鏡はない。

FELの応用面での進展は必ずしも放射光のような勢いを見せているとはいえないが、しかし一方では、X線領域でのレーザー実現の夢は以前から研究者の研究意欲を駆り立ててきた。これまでX線のもたらした科学研究上の重要な成果に照らしたときに、X線レーザーに大きな期待がかかっていることがその最大の理由であるが、未だそこがレーザーとして未開の分野であるということだけでも動機の十分な説明にはなる。X線レーザーについてはさまざまな着想に基づく開発が行われてきたが、本稿では、ここ10年、急速に進展しつつある電子リニアックを用いたX線領域FELについて述べてみたい。

## 2. アンジュレータと自由電子レーザー

本題にはいる準備として、放射光とFELの原理について簡単に説明しておく。

電子は磁界の中を運動するとき、求心加速度を受けて進行方向に電磁波を放射する。高エネルギー電子円形加速器の中では、電子が偏向電磁石を通過するとき、電子が光速に近い速度で運動しているために、その進行方向に鋭い指向性をもった光が放射される。これが放射光である。このとき放射される光は連続スペクトルをもつ。そして、利用可能な光の最大エネルギーの目安は、電子のエネルギーと磁束密度によって決まる臨界エネルギーによって与えられることはよく知られているとおりである。

このような偏向部光源に対して、最近の放射光施設では、放射光の輝度または強度を上げるために、周期的磁界を利用した挿入光源が用いられる。この場合、単純に考えてもその周期数に比例して強度が高くなることが予想されるが(マルチ

表1 日本を中心とした放射光の歴史

1895	X線の発見
1947	放射光の初観測
1956	Tombouliau and Hartmanによる放射光特性の精密測定
1965	核研ESにおける放射光実験
1975	物性研SOR-RING完成
1981	電総研TERAS完成
1982	高工研PF完成
1984	分子研UVSOR完成
1997	SPring-8完成予定

ポールウィグラー), 周期数が多くなるとそれぞれの極から放射される光の干渉効果が顕著になり, 電子エネルギー ( $\gamma = E_e/mc^2$ ) とウィグラーの周期長 ( $\lambda_u$ ) によって決まる波長の光がとくに強く放射されるようになる (アンジュレータ)。このような干渉性アンジュレータから得られる光は, 平面型アンジュレータの場合, 波長が

$$\lambda = (\lambda_u/2\gamma^2) (1 + K^2/2) \quad (1)$$

で与えられる基本波とその高調波である。ここで,  $K$  はアンジュレータの磁束密度 ( $B_u$ ) や周期長などによって決まるパラメーターで,  $K = eB_u\lambda_u/2\pi mc = 0.933 B_u[\text{T}]\lambda_u[\text{cm}]$  で与えられる。アンジュレータ光のスペクトルは図1のように線スペクトルとなる。バンド幅は, エミッタンスやエネルギー幅などの電子ビームの特性やアンジュレータの周期数によって決まるが, 周期性磁場の一様性にも関係する。図1に示すように, アンジュレータ光の輝度は偏向部からの光に比べて数桁高くなる。

FEL はアンジュレータと2個の反射鏡ならびに電子ビームとからなる (図2)。電子ビームはアンジュレータを通過するとき光を出す, 光が鏡で反射されてアンジュレータに戻ったとき再び電子ビームがくると, 光と電子ビームとの相互作用により電子のエネルギーの一部がより大きく光のエネルギーに変換される。この過程が繰り返されて光の増幅が行われ発振に至る。ここでいう相互作用の過程は, レーザー分野で使われる術語によれば誘導放射であるが, FEL の場合にはむしろ加速器の分野でなじみ深いシンクロトロン振動の概念に照らして理解の方が物理的イメージがつかみやすい。

放射光リングのように高周波加速空洞を利用しているシンクロトロン型の加速器では, 電子は高周波電界によって加速されている。空洞内の電界の方向はもちろん電子の進行方向に一致してい

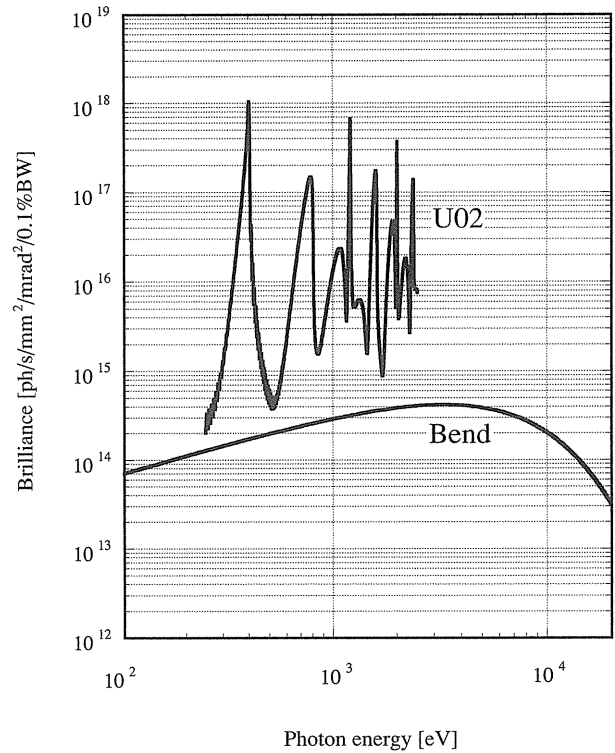


Figure 1. Comparison between undulator radiation (U02) and bending magnet radiation (Bend), taken from the case of the Photon Factory.

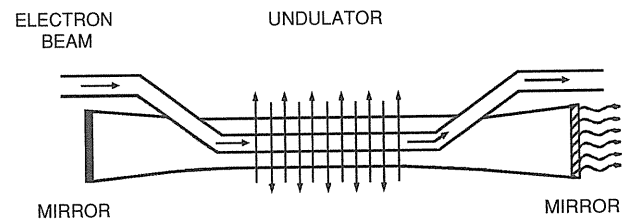


Figure 2. Principle of free-electron lasers.

る。このような高周波の作る正弦波型のポテンシャルの下での電子の振る舞いを加速器の分野ではシンクロトロン振動 (または位相振動) と呼んでいるが, シンクロトロン振動は, 図3に示すように, 電子のエネルギーと正弦波に対する位相とで作られる位相空間内の電子の周期運動である。電子は図に矢印で示した経路に沿って動き, 位相空間内のどの位置にいるかによって加速されたり減速されたりする。

FEL の場合, 光は横波であるから, 電子を加速・減速するためには, 電場の方向と電子の進行方向とを一致させる必要がある。これを可能にし

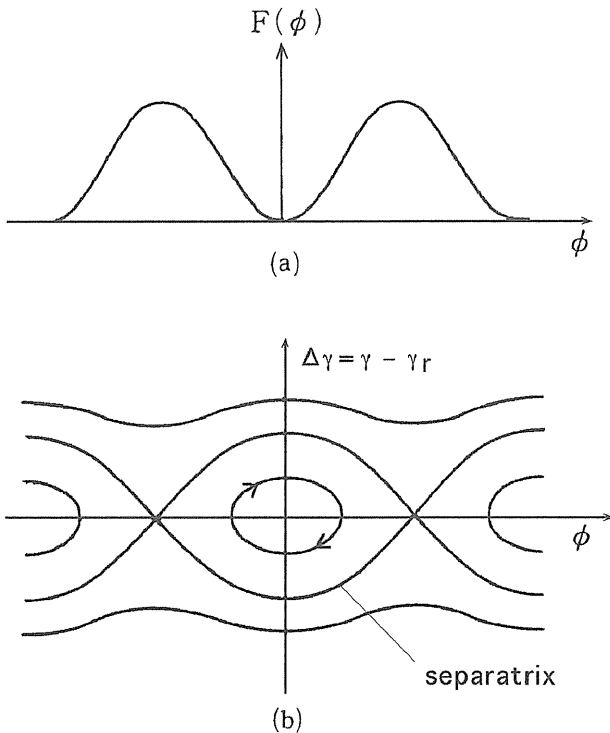


Figure 3. Phase-space description of the synchrotron oscillation.

ているものがアンジュレータ内で電子の蛇行運動によって生じる横方向の速度成分である。この場合には、いわゆる ponderomotive potential の下での電子の運動になるが、描像はシンクロトロン振動と似ている<sup>1)</sup>。この場合には図3の  $\gamma_r$  は、光の波長とアンジュレータの周期長から決まる電子の共鳴エネルギーであり、(1)式で与えられる。

FELにおける誘導放射を理解するために、時間的に一様な分布をもち、エネルギーが一定の電子ビームが入ってきたと仮定する。このような電子ビームがアンジュレータの中を通過するとき、電子のエネルギーが共鳴エネルギーに一致するときには位相振動の対称性から半分の電子は加速され、半分の電子は減速されるので、実質のゲインはゼロである(図4)。もし、エネルギーが少しずれていると対称性がくずれるのでゲインが生ずる可能性がある。総合的に電子ビームのエネルギーが減ずる場合がFELにおける誘導放射ということになる(これと逆の場合もあるわけで、その

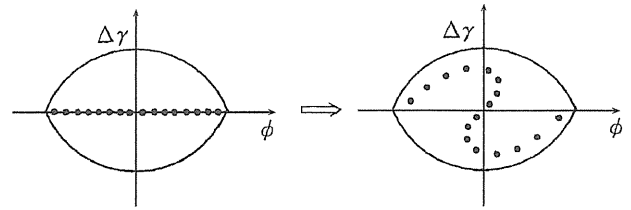


Figure 4. Illustration of the trajectories of electrons in the phase space. This case represents no net gain in an FEL.

時には電子はレーザーによって加速されることになる)。

### 3. 単一通過型高ゲイン FEL (Single pass, High gain FEL)

冒頭に述べたように、X線領域では有効な反射鏡をみつけることが困難であるとする、反射を利用せずに大出力のコヒーレントX線を取り出す方法が必要となる。そこで生まれたのが、高いピーク電流をもつ電子ビームによって生ずる集団現象を利用して高ゲインを実現し、アンジュレータを一回通過するだけで大きな出力を得るという単一通過型の大出力FEL (Single pass, High gain FEL) である。この方法では、基本的には種光 (seed laser) を用いる必要はないが、現在研究されているものの中には種光を用いるものもある。したがって、ここでは次の二種類に分類しておく。

#### (1) Spontaneous Amplification, Spontaneous Emission (SASE)

SASEの方式は外部から種光を与えない点の特徴である。電子はバンチ(バンチ長は数ピコ秒)の中ではマクロにはほぼ一様に分布している。しかし、実際には必ず細かいむらが存在する(白色ノイズ)。アンジュレータの先頭部では普通の意味でのアンジュレータ光がでるが、電子ビームの密度分布は光との相互作用の結果、徐々に光の波長を周期として細かいバンチを形成するようになり、電子密度が高いときには、これらの電子がコ

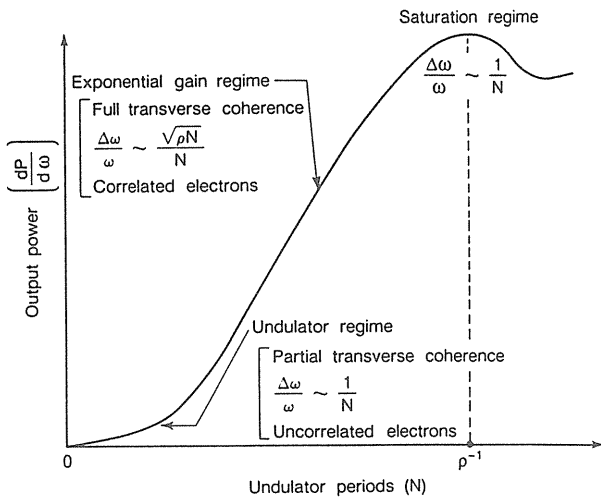


Figure 5. Schematic representation of SASE characteristics<sup>2)</sup>.

ヒーレントに放射を出すにともない次第に光の強度が増大して、最後には指数関数的に成長する。これが SASE の原理である (図 5)。光の強度はあるところで飽和するが、その理由はこれより先に進むと電子の密度分布がかえって乱れて増幅度が低下するからである。種光を用いないのでこの方法には原理的には波長の制限はない。

(2) High Gain, Harmonic Generation (HGHG)

HGHG の方式は、外部から種光を与えるとともに、種光の高調波を取り出すというものである。基本構成は図 6 に示すように optical klystron (OK) と同一であるが、普通の OK と異なる点は後半のウィグラーの共鳴波長が種光の高調波 (例えば 3 倍) になっている点である。電子ビームは一番目のウィグラーの中でエネルギー変

調を受け、分散部を通過した後では密度変調が生ずる (プリバンチャー)。バンチしたビームは 3 倍高調波に対応する密度成分をもっており、第二のウィグラーの中でこれらがコヒーレントに放射を出し、ついに指数関数的増大に到るというのが HGHG のポイントである。ノイズから出発する SASE に比べて、種光を用いることによって、ウィグラーの長さを短くできるという狙いがある。出力のバンド幅は入力の種類によって決まるので狭いバンド幅が実現できる。また、出力の波長の安定度も種光の波長の安定度によって決まるので、種光を用いない SASE に比べて安定であるなどの利点もある。しかし、種光を必要とすることからどのような波長でもよいというわけにいかない。

4. SASE の要点

普通の FEL では、アンジュレータを 1 回通過するときに必要なゲインは鏡による反射損失を上回ればよく、それほど高い必要はない。このような小ゲインの場合には、ゲインは波動場の振幅と位相を時間的に一定と仮定して電子ビームのエネルギーの変化量を計算することによって求められる。

しかし、SASE のような高ゲイン FEL では、電子ビームと光の相互作用を厳密に取り入れる必要がある。すなわち、波動場の中での電子のエネルギーと位相の変化だけでなく、電子ビームが電流源となって作る波動場の変化をも正確に取り入

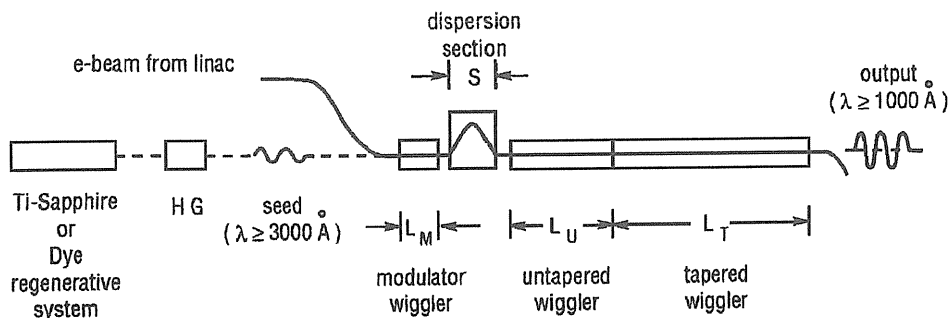


Figure 6. Schematic of the HGHG FEL concept<sup>3)</sup>.

れる必要があり、さらに、高密度の電子ビームがパンチして蛇行運動するという複雑な状況の下では、電子間のクーロン相互作用をも取り入れる必要がある。このように、高ゲインFELの特徴は、ビームを構成する個々の電子が波動場と空間電荷を介して相互作用するということである。その結果、外から光の場が与えられるか、または電子の密度分布が一様でないという条件の下では、一種の集団的不安定性 (collective instability) が起こり、光の強度が指数関数的に増大する可能性がある。

高ゲインFELにおける集団的不安定性を詳しく研究してSASEの可能性を示したのは、Bonifacio, Pellegrini and Narducciである<sup>4)</sup>。

高ゲインFELを記述する自己無撞着のFEL方程式は、光の振幅と電子のエネルギーおよび波動場に対する電子の位相に関する連立非線形微分方程式となる。Collective instabilityの起こる条件や増幅率はこれらを解くことによって求めることができるが、FEL全体の振る舞いはどうしても数値計算によって求める必要がある。それによると、光の強度は、図5に示したように、はじめ緩やかに進行したあと指数関数的な増大に転じ、最後に飽和点に達する。

SASEの動作の概要は解析的な計算によって知ることができる<sup>5)</sup>。zをアンジュレータの軸方向の座標としてSASEで起こる光の強度の変化を

$$I \sim \exp(z/L_G) \quad (2)$$

の形で表すと、ゲイン長さ  $L_G$  は次式で与えられる。

$$L_G = \lambda_u / 4\pi\rho \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  はFELの動作を決定する重要なパラメーターで、FELパラメーターと呼ばれ、

$$\rho = \left[ \frac{1}{64\pi^2} \left( \frac{K\lambda_u}{\sqrt{2}\gamma} \right)^2 \frac{I_p}{I_A \beta \epsilon_n} \right]^{1/3} \quad (4)$$

で求められる。このように、 $\rho$  はアンジュレータのパラメーターである  $K$  や  $\lambda_u$ 、電子エネルギーにも依存するが、最も重要な点は電子密度である。上の式では、これはピーク電流 ( $I_p$ ) と規格化ビーム断面積ともいべき量 ( $\beta\epsilon_n$ ) の比によって与えられている。なお、 $I_A=17$  kA はアルファベーン電流と呼ばれる定数、 $\epsilon_n$  は電子ビームの規格化エミッタンス、 $\beta$  はアンジュレータの中での電子ビームのベータトロン関数である。

光の強度が増大するにつれて電子は位相空間の中の安定領域 (バケット) に捕まってその中を動き回るようになるが、SASEの飽和点は、位相振動が180度進んだところで起こると考えるのが合理的である。そのような考えにたって飽和点に達するまでの距離や飽和時の出力などを求めると、飽和点に達するまでの距離は

$$L_s = (10 \sim 20)L_G \quad (5)$$

また、飽和時の光のピーク強度  $P_s$  と電子ビームのピーク電力  $P_b$  (電子のエネルギーとピーク電流の積) の比は  $\rho$  で与えられることがわかる。

$$P_s/P_b = \rho \quad (6)$$

これは定義からまさにFELの効率を与えている。また、飽和時の光のバンド幅は

$$\Delta\lambda/\lambda = \rho \quad (7)$$

で与えられることもわかる。(3)と(5)を使って、飽和に達するに必要なアンジュレータの周期数は

$$N_u = 1/\rho \quad (8)$$

となることわかる。

上に述べた結果は、電子ビームを一次元モデルによって単純化して求めたもので、ビームの横方向のひろがりやエネルギー幅など実際のビームの性質を無視している。しかし、これらについては、次の条件が満たされるときには性能の劣化はわずかであることが示されている。

- (1)  $\epsilon \leq \lambda/4\pi$  (電子ビームのエミッタンスは光ビームのエミッタンスより小さいこと。右辺は光の回折限界でのエミッタンス。)
- (2)  $L_G \leq L_R$  ( $L_R = 2k\epsilon\beta$  は、光ビームが回折によって広がって、電子ビームの領域から離れるのに要する距離。もし  $L_G$  が  $L_R$  より短ければ、optical guiding<sup>注)</sup>の働きによって光の拡散が抑えられる。)

- (3)  $\Delta\gamma/\gamma < \rho$  (電子ビームのエネルギー幅が飽和時の光のバンド幅より小さいこと。)

### 5. SASE の計画と必要な電子ビームの特性

X線領域での SASE 計画に関する提案は現在2つ出ている。一つは SLAC の Linac Coherent Light Source (LCLS) 計画, もう一つは DESY

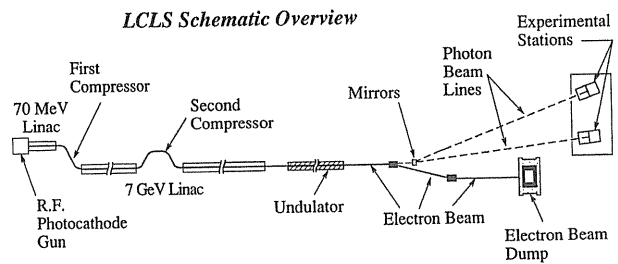


Figure 7. Schematic of the LCLS plan<sup>6)</sup>.

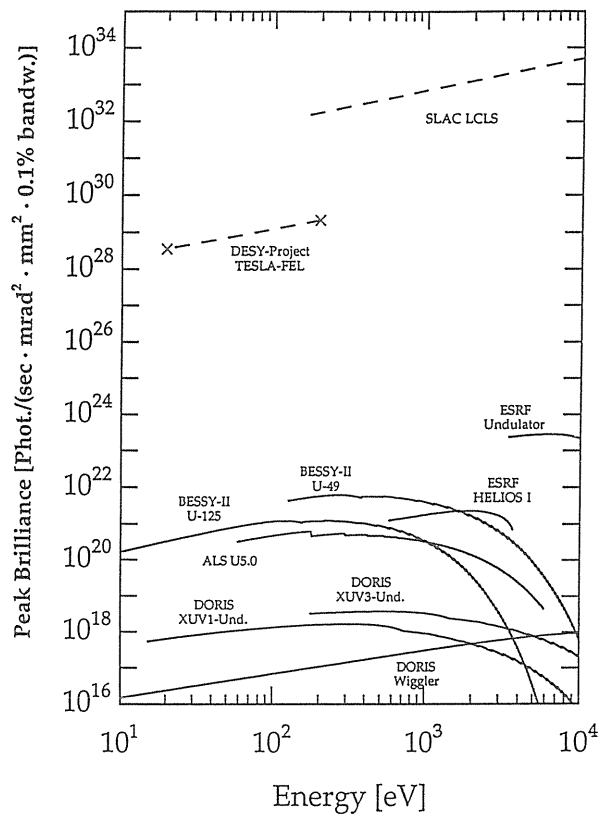
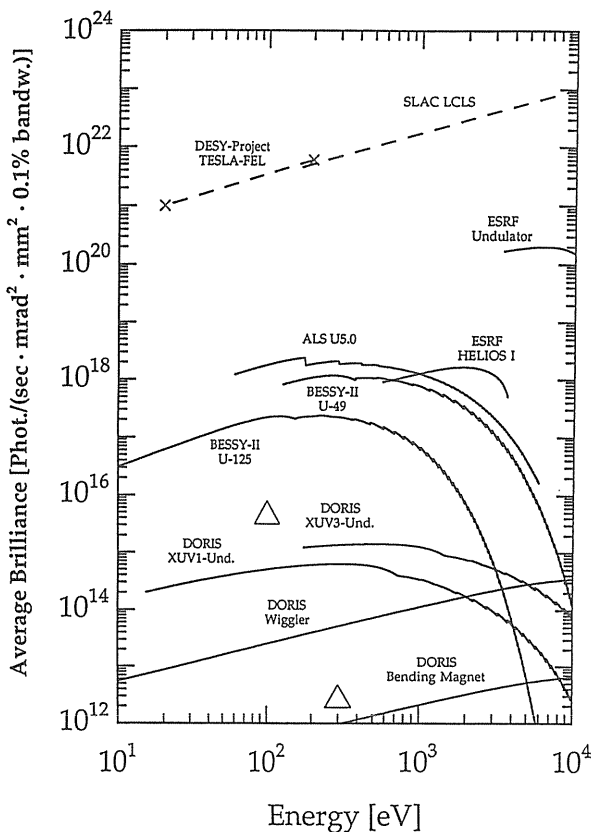


Figure 8. Average and peak brilliances expected at LCLS and TTF-FEL<sup>7)</sup>.

注) optical guiding : 高ゲインFELでは、電子ビームが光ファイバーのような働きをする。すなわち、位相速度が光速に比べて小さくなり、光を中心に集める方向に作用する。

の TESLA Test Facility FEL (TTF-FEL) 計画である。

LCLS 計画では、図7に示すように、現存の SLAC の電子リニアックの3分の1を利用し、ピーク電流 2 kA 以上の電子ビームをエネルギー 7 GeV に加速し、全長60 m のアンジュレータを通すことによって波長 4 nm の SASE を実現する<sup>6)</sup>。

TESLA Test Facility は DESY におけるリニアコライダー開発計画において建設されている超伝導リニアックで、エネルギーは500 MeV である。将来、1 GeV に拡張してピーク電流 2 kA 以上のビームを加速し、全長19 m のアンジュレータを通して波長6.4 nm での SASE を実現する<sup>7)</sup>。

LCLS や TTF-FEL が実現すると、第3世代放射光と比べて時間平均の輝度で2桁以上、ピーク輝度では5桁から10桁近く高い値の放射光が得られると見積もられている(図8)。

現在までの知識を基礎にして推定された SASE 計画の主要なパラメーターを示したものが表2である。SLAC と DESY の設計の大きく違うところは、リニアックのエネルギーの違いもあるが、繰り返し周波数と1パルスあたりのバンチ数である。SLAC では常伝導リニアック (rf 周波数 3 GHz) を用いており、繰り返しが高い代わりに rf のパルス幅が短く、パルス当たり1バンチを加速する。これに対して、DESY では超伝導リニアック (rf 周波数 1 GHz) であり、繰り返しが低い代わりに rf のパルス幅が長く (ms オーダー)、パルス当たり多バンチ (7200個) を加速する設計になっている。

いずれにしても共通の特色は、電子ビームに課せられた性能が、ピーク電流が 2.5 kA と高いこと、規格化エミッタンスが 2~3 mm.mrad と低いことであり、FEL パラメーターも  $(1\sim 2) \times 10^{-3}$  とほぼ共通している。

X 線領域の SASE に必要な電子ビームに対する要求をまとめると表3のようになるが、これは

表2 SASE 計画の主なパラメータ

		LCLS	TTF-FEL
電子エネルギー	GeV	7	1
ピーク電流	kA	2.5	2.5
規格化エミッタンス (rms)	mm.mrad	3	2
バンチ当たり電荷量	nC	1	1
バンチ長 (rms)	ps	0.1	0.16
パルス当たりバンチ数		1	7200
繰り返し周波数	Hz	120	10
アンジュレータ周期長	cm	8.3	2.73
FEL パラメーター $\rho$		$1.14 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
波長	nm	4	6.4
ゲイン長	m	5.8	1.0
飽和長さ	m	60	19
飽和ピーク出力	GW	9	3
ライン幅	%	0.15	1
バンチ当たりの光子数		$10^{14}$	$4 \times 10^{13}$
ピーク輝度		$4 \times 10^{31}$	$2 \times 10^{29}$
平均輝度		$2.7 \times 10^{21}$	$6 \times 10^{21}$

表3 電子ビームへの要求

ピーク電流 : 1 kA 以上 (目安として、電荷量 1 nC, パルス幅 0.1 ps (rms))
規格化エミッタンス : 1 mm.mrad (rms)
エネルギーひろがり : $10^{-3}$ (rms)

電子リニアックの現状に照らすと極めて高度である。比較のために、通常の熱電子銃を用いた高工研の 2.5 GeV 電子リニアックの諸特性を比べてみる。

高工研の場合には多くの稼働中のリニアックと同じように熱電子銃を用いているが、大電流短バンチテストにおいて得られた結果は、プレインジェクターのところ (エネルギー 45 MeV) で測定してバンチ幅 10 ps (FWHM)、電荷量 6 nC、規格化エミッタンス 70 mm.mrad、エネルギー幅 0.6% (FWHM) である<sup>8)</sup>。また、高工研のリニアコライダー計画である JLC のテストファシリティである ATF においても熱電子銃を用いておおむね同様のエミッタンスの値を実現している<sup>9)</sup>。

現在でも電荷量そのものは十分に大きな値が実



現されているけれども、X線FELでは高いピーク電流で1桁以上小さなエミッタンスを実現しなければならない。これが第一の課題である。また、バンチ幅を短くして必要なピーク電流を実現するために、リニアックで加速するあいだにいかにしてバンチ幅を短くするか、いわゆるバンチ圧縮 (bunch compression) を実現することも大きな課題である。

エミッタンスについてはもう一つの問題がある。電子銃から低エミッタンスビームを発生したとしても、ピーク電流が大きいときには空間電荷効果によって低エネルギー部においてエミッタンスの増大が起こる。また、リニアックの加速管の中の電磁界や外部集束磁場などの不整によって電子ビームのエミッタンスは劣化する。したがって、リニアックの最終端において2~3 mm.mradという極めて小さな規格化エミッタンスを実現するためには、電子銃周辺の問題とともに、ビーム加速および輸送中のエミッタンス保存 (emittance preservation) の問題を研究する必要がある。

エネルギー幅については、先に述べたように輝度の劣化をもたらさないためには、SASEに固有のバンド幅 ( $\sim\rho$ ) に劣らない程度には小さくしなければならない。X線領域FELの場合、目安として $10^{-3}$ 程度には小さくしなければならない。

## 6. 必要な技術開発

### 6.1 高周波フォトカソード電子銃

1980年代におけるFELの開発の過程において低エミッタンス、大出力の高品質電子ビームを作るために、ロスアラモス研究所を中心に、レーザー照射によるフォトカソードを用いた高周波電子銃が開発された<sup>10)</sup>。

熱電子銃を装着したリニアックでは、ヒーターによって熱せられたカソードから生まれる熱電子 (パルス幅1 ns程度) を100 kV程度の高電圧で引き出し、その後ろに構えているサブハーモニッ

クバンチャやバンチャによって集群したのちに加速管で加速する。このような過程でエミッタンスの劣化が起こり、さらに電子密度が高いときには空間電荷効果のためにエミッタンスを小さく抑えることが困難である。

高周波電子銃は図9に示すような1.5空洞から成り、端面のフォトカソードから発する電子を高勾配の電界によって一気に加速し、これによって空間電荷効果を抑えるというものである。高周波の電界が最大となる瞬間に合わせてレーザーを照射することができるので、短い時間内にバンチしたビームを得ることができる。また、レーザーのビームサイズは小さいので、エミッタンスの小さな電子ビームが得られる。現在世界で開発されている電子銃では1.5空洞で7 MeV程度にまで加速する。また、規格化エミッタンスとして2~3 mm.mradを達成している。高周波電子銃に関する今後の開発目標は表4に示したようまとめられるが、さらに、レーザー照射フォトカソード電子銃には、実用化に至るまでにいろいろな技術上の開発要素が残っている。

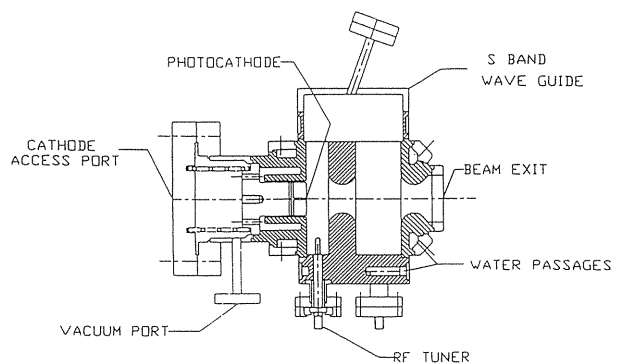


Figure 9. BNL photo-cathode rf gun<sup>11)</sup>.

表4 レーザー照射フォトカソード高周波電子銃の開発目標

エネルギー	5~10 MeV
電荷量	1 nC
バンチ幅	2 ps (rms)
規格化エミッタンス	1 mm.mrad (rms)
エネルギー幅	0.2%

- (1) フォトカソードの量子効率の一様性と再現性 現在のところ、フォトカソードは量子効率の高いものは寿命が短く、一様性や再現性に劣るなどの問題がある。
- (2) 空間電荷効果によるエミッタンスの劣化の補償法 (ソレノイドによるなど)
- (3) ドライブレーザーの安定度の改良。レーザービームの中心位置の安定度、高周波に対する位相の安定度は、いずれも電子ビームの性質の安定性に重要な影響をもつ。

## 6.2 バンチ圧縮とエミッタンス保存

高周波電子銃から得られるビームのバンチ幅は数 ps であるから、ピーク電流を上げるためには10倍程度のバンチ圧縮を行って0.1 ps オーダーのバンチ幅を実現する必要がある。バンチ圧縮の原理は、高周波電界を使ってバンチの前と後にエネルギー差を与え、OK と同じように偏向電磁石からなる分散系を通すことによってバンチを圧縮するというものである。しかし、一気に10分の1に縮めるのは困難であり、図7にあるように2段階に行うなどの方策が考えられている。当然、バンチ圧縮の結果エネルギー幅が大きく増えては困る。

一般に、リニアックのビームのエミッタンスは、加速管の内部の電磁界の不整によって悪くなるので、ここで問題にしているような小さなエミッタンスを実現するには、注意深い調整が必要である。さらに、SASE では数十メートル級のアンジュレータを使用するので、アンジュレータを通す間のビームトランスポートも大きな課題である。

## 6.3 長尺アンジュレータ技術

これまで実用になったものの中では、高工研のMR放射光計画の中で開発された5.4 m のアンジュレータは世界最大級のアンジュレータである。ここではもともと全長数十メートルの長尺アンジュ

レータの建設を想定してモジュラー型の設計が採用されており、モジュールを接続することによって、任意の長さのアンジュレータを実現できるようになっている<sup>12)</sup>。

しかし、SASE で要求されるアンジュレータでは、強い磁束密度が要求され、周期数も桁違いに多い。さらに、電子ビームをできるだけ絞るために強い集束電磁石と共存する必要がある、これまでとは異なった設計が要求される。SLAC では、図10に示すような概念設計が行われているが、SASE に必要な精度を実現するために検討課題は沢山残っている。なかでも、アンジュレータの電磁石と集束電磁石を含めて、磁界の特性、アライメントに関して厳しい要求がある。磁界やアライメントの不整によってビームが曲げられたり、位相空間の希釈化が起こると、レーザー効率に大きな影響を及ぼすので、不整磁場の効果の見積もりや補正法を含むアンジュレータの製作技術の確立などの課題を解決しなければならない。

## 6.4 シミュレーション・コードの開発

SASE に関する理論的研究はすでに10年余りの間相当に進んできたが、SASE の動作が原理的に複雑な非線形現象に依っているだけに、基本動作の理解に限っても解析的研究だけでは十分に問題を把握することはできない。この点、普通の加速器の基本原理が線形力をもとに成り立っているのと根本的に違う。このために、SASE の研究にはできるだけ現実に近い条件を取り入れた粒子トラッキングコードの開発が不可欠である。これまでもいろいろなトラッキングコードが開発されているが、コードのクロスチェックを行うなどして、より現実を反映したものを開発する必要がある。また、シミュレーションには一定の限界があることを考慮すると、実験との比較を可能とするためにもデモンストレーション実験を早急に実現化し、シミュレーションとの比較研究を行ってコードの質を上げる努力をする必要がある。

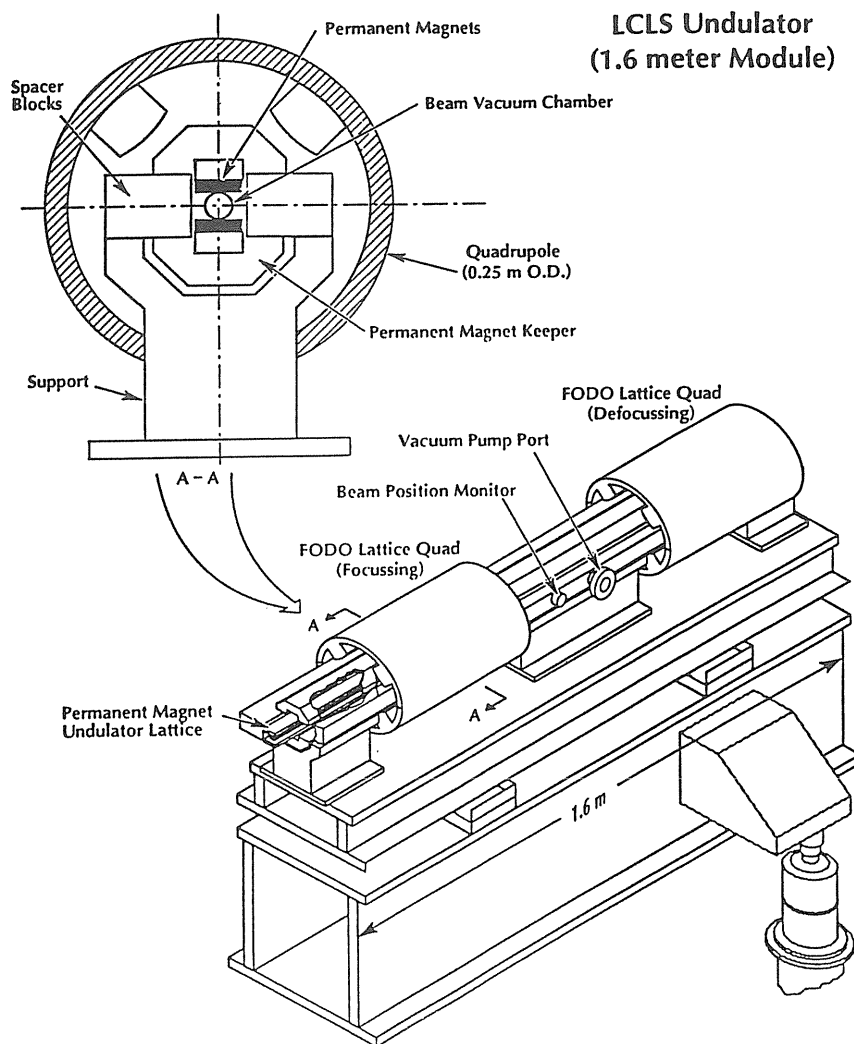


Figure 10. An undulator design for LCLS<sup>6)</sup>.

## 7. SASE の実証実験計画とその現状

バンチ長が光の波長と同程度の短バンチ電子ビームを用いて行ったコヒーレントな放射の観測に関しては、わが国には中里らの先駆的研究がある<sup>13)</sup>。中里らは、180 MeV の電子ビーム（バンチ長2.5 mm）を用いて、波長2 mm のところで偏向電磁石からの放射光強度が電子数の二乗に比例することを初めて観測した。また、最近の実験としては Wiedemann によって報告されたものがある<sup>14)</sup>。Wiedemann らは16 MeV の電子ビームをアルファ電磁石を通すことによって短バンチ化して（～0.1 ps）ピーク電流280 A を実現し、波長47  $\mu\text{m}$  のところで SASE を観測したとしている。彼らはアンジュレータの長さを変数にして放

射光強度をプロットすると、 $\rho=0.0078$  と仮定して計算した SASE のゲイン曲線に一致すると結論している。このときの出力は、単なる自発アンジュレータ放射と比べて有為に異なっていたという。しかし、これだけでは残念ながら SASE の原理を定量的に実証できたとはいえない。

最近、アメリカでは、X線領域 FEL のワークショップが頻繁に開かれており、開発研究に向けて協力体制の模索も行われている。このような中で、表5に示すように、いくつかの開発計画が生まれている。このほかに、すでに述べた SLAC と DESY の計画がある。

本格的な X線レーザーの計画に先立ち、これらの中規模計画での SASE の実証実験が不可欠

表5 SASE 実証実験計画一覧<sup>15)</sup>

施設名称 計画名称	UCLA IR FEL	BNL-ATF HGHG	BNL UV project
エネルギー MeV	17	30.6	210
規格化エミッタンス mm.rad	5	7	6.5
エネルギー幅 %	0.1	0.04	0.043
ピーク電流 A	200	110	300
ゲイン長 cm	7.6	21.5	123
ウィグラー全長 m	0.6	2	10
波長 $\mu\text{m}$	10	3.53	0.2
ピーク出力 MW	0.001	30	

である。今のところ、何といても理論先行で進んでいる。今後早急に、

- (1) ノイズからのスタート
- (2) 数ゲイン長にわたる増幅
- (3) 飽和長さとお出力

などが予想通りかどうか、誤差の影響はどうか、など実験で検証する必要がある。

## 8. わが国の状況とまとめ

日本における FEL の研究は、数カ所の施設でマイクロ波から紫外線までの広い範囲の波長領域で行われているが、SASE についてはまだ構想の段階にある。わが国には100 MeV 以上のリニアックをもつ施設を考えると、高工研 ATF (1.5 GeV), SPring-8 (1 GeV), 東北大核理研 (300 MeV), FEL 研 (160 MeV), 日大 (125 MeV, 建設中) とある。とくに、高工研ではリニアコライダー計画のテストファシリティとして ATF の開発計画が進められており、X 線領域 FEL と技術要求が共通である。

放射光を用いた研究も構造変化や反応のダイナミックスの研究へと向かいつつあり、今後、大強度のパルス性放射光の重要性が増すことは間違いない。図 8 に予想されるように、SASE-FEL は、従来の放射光とは比較にならないピーク輝度をもつ X 線を生む可能性がある。SASE は理学、

工学の両面において多くの解決すべき問題を含んでいるが、加速器屋を引きつけるに十分な魅力をもっている。いまのところ世界はわが国より少しばかり先を進んでいるが、日本の加速器技術の現状からみればさしたる遅れではない。何とかして日本で実現できないものかと思う。

SASE にとっては、何といても、“proof-of-principle” が緊急の目標である。世界がその一番乗りを目指して競っている状態にある。とはいえ、今や一研究施設だけで解決できるような状況にないこともまた確かである。国内はもとより、国際協力も必要であろうし、分業も必要かもしれない。放射光が夢の光源といわれてから長い年月が過ぎた。第三世代放射光の建設もそろそろ峠にさしかかった現在、このあたりでもう一度夢を見て頑張ってもいいのではないだろうか、これをまとめとしておく。

## 9. 謝辞

本稿を書くに至った経緯は、1996年1月に岡崎で開かれた第9回放射光学会年会で、予定の S. Krinsky 氏の代役として講演したところ、それをまとめて会誌に書くように依頼されたことによる。本稿をまとめるに当たっては多くの方々にご教示を頂いた。お名前は省略させて頂くが、厚くお礼申し上げたい。

## 文献

- 1) J. B. Murphy and C. Pellegrini: Introduction to the physics of the free electron laser, in *Laser Handbook*, 6 (1990) North-Holland Pub. Co.
- 2) K.-J. Kim: *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 1871 (1986).
- 3) L. H. Yu: *Phys. Rev.*, **44**, 5178 (1991).
- 4) R. Bonifacio, C. Pellegrini and L. M. Narducci: *Opt. Comm.*, **50**, 373 (1984).
- 5) C. Pellegrini: *Nucl. Instrum. Meth.*, **A272**, 364 (1988); K.-J. Kim and M. Xie: *Nucl. Instrum. Meth.*, **A331**, 359 (1993).
- 6) C. Pellegrini and H. Winick: *Workshop on Scientific Applications of Coherent X-Rays*, Stanford, February 12, 1994, SLAC-437.
- 7) A VUV Free Electron Laser at the TESLA Test Facility at DESY Conceptual Design Report, June

- 1995, TESLA-FEL 95-03.
- 8) S. Ohsawa *et al.*: Proc. 1994 International Linac Conference, Tsukuba, August 1994, p. 193.
  - 9) J. Urakawa: private communications (1996).
  - 10) J. S. Fraser, R. L. Scheffield and E. R. Cray: Nucl. Instr. and Meth., **A250**, 71 (1986).
  - 11) K. Batchelor *et al.*: Nucl. Instr. Meth., **A318**, 372 (1992).
  - 12) S. Yamamoto, T. Shioya, H. Kitamura and K. Tuchiya: Rev. Sci. Instr., **66**, 1996 (1995).
  - 13) T. Nakazato *et al.*: Phys. Rev. Lett., **63**, 1245 (1989).
  - 14) H. Wiedemann: private communications (1996).
  - 15) I. Ben-Zvi: Nucl. Instr. and Meth., **A358**, 52 (1995).

## きいわーど

### Single-pass, High-gain FEL

自由電子レーザー (FEL) としては、アンジュレータと2枚の反射鏡を用いるのが普通であるが、これは電子ビームを一回だけアンジュレータを通過させるだけで、十分に高い増幅率を実現するという考えのものである。マイクロ波の領域では、ピーク電流の高い電子ビームを用いて高ゲインの増幅器を実現する試みがなされてきたが、最近、これを X 線の領域に応用する提案がある。

### Spontaneous amplification, spontaneous emission (SASE)

高ゲイン FEL の方式の一つ。電子ビームがアンジュレータにはいると、はじめは普通のアンジュレータ光が放射されるが、電子ビームのピーク電流の高い

ときには、光との相互作用によって電子ビームのバンチングが起こり、アンジュレータを通過する間に光強度が指数関数的に増大するようになると期待されている。種光を用いないので波長の制限がない。

### High gain, harmonic generation (HGHG)

ピーク電流の高い電子ビームを用い、種光を用いて高ゲインの増幅器を実現するという試みの一つである。Optical klystron (OK) のように電子ビームをバンチングさせる部分と増幅させる部分とからなるが、普通の OK と違うところは、種光の高調波を増幅するようになっているということである。種光より波長の短い光の増幅ができる、種光を用いるのでレーザーの特性 (波長の安定性など) が SASE より優れているなどの利点が期待できる。