

SCSS : SPring-8 Compact SASE Source project の現状

新竹 積^{1,A)}、渡川和晃^{A)}、稲垣隆宏^{A)}、Y.J. Kim^{A)}、田中隆次^{A)}、原 徹^{A)}、北村 英男^{A)}、石川 哲也^{A)}、
松本 浩^{B)}、馬場 斉^{A)}、吉田 光宏^{C)}、高須 ゆう子^{D)}

^{A)}理化学研究所、SPring-8 播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{C)} 東京大学素粒子物理国際研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

^{D)} 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

概要

SPring-8 理研では、将来の本格的 X 線 FEL 利用施設 (波長 1 Å) の実現を目指して、その技術開発の足がかりとなる軟 X 線 FEL プロジェクト (SCSS 計画、目標最短波長 3.6 nm) の建設を行っている。SCSS の特徴である“コンパクトな FEL”を実現するために、C バンド高電界加速器、短周期の真空封止アンジュレータ、そして電子銃には単結晶 CeB₆ カソードを採用し、その技術開発を行っている。この 3 つの技術は日本独自のものであり、諸外国の SASE-FEL 計画とは一線を画しており、その成否が大きく注目されている。また我々の最近の研究によって、ひとつの大きなチャレンジであった長尺なアンジュレータのアラインメント精度が、実はそれほど厳しいものではないことがわかり、SASE-FEL 設計手法の流れを変えるものとして注目されている。

1. はじめに

現在まで世界各地の放射光施設が、材料科学、地球科学、生命科学、環境科学及び医学利用など幅広い研究分野で高度の解析技術を提供してきた。そのなかで、分析能力のさらなる向上をめざして SPring-8 をはじめとする第 3 世代放射光施設 (アンジュレータ光源を主に使用) がつぎつぎに建設され、広くユ

ーザーに高輝度の X 線を供給している。

この高輝度化の流れの究極が X 線レーザーである。点光源に近い線源から平行な X 線が放射され、その波長が単色であり、かつ位相がそろっており、その強度が十分に高いこと。これが X 線レーザーであるが、これを実現できるのが SASE 型の自由電子レーザーと考えられている。

従来の自由電子レーザーでは、2 枚の反射ミラーの中にアンジュレータを置き、これにリニアックまたはストレージリングの電子ビームを通過させた。発生した放射光がミラーで反射されて、次にくるバンチした電子ビームと重なると、放射光電場 E のなかを電子がサイン波運動 (アンジュレータ運動) をすることによって、電子が加速または減速され、これがアンジュレータ磁場の分散により電子密度の粗密の縞を形成させた。この縞の周期が放射光の波長と一致するために発生する放射光が互いに干渉し強めあう。その結果、強度は次式のように非常に高くなる。

$$P_{FEL} = n \cdot P_{spont}$$

ここで、 P_{spont} は密度波がない場合の自発放射のアンジュレータパワー、 n は粗密波を形成する電子の数である。通常、電子バンチ 1 個当たり 1 nC 程度の電

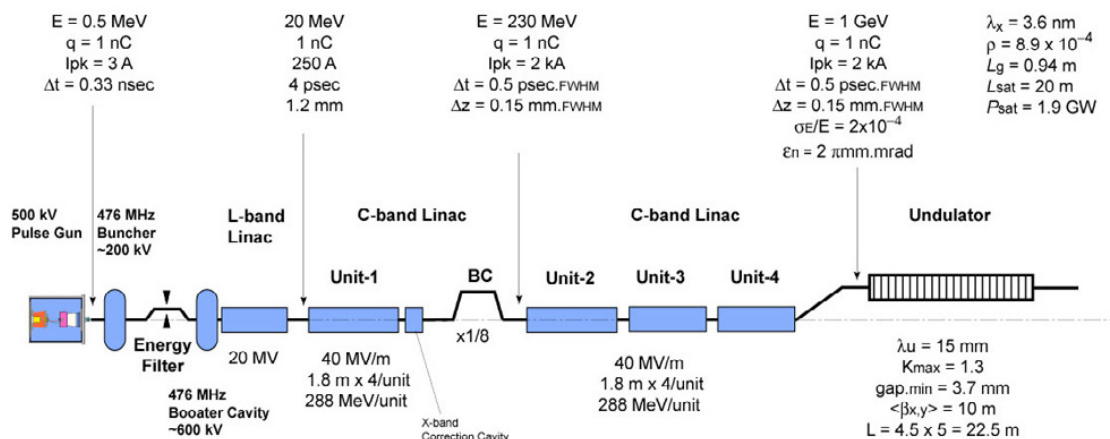


図 1 SCSS: SPring-8 Compact SASE Source :システム図

¹ E-mail: shin

荷を有し、これに含まれる電子は 10^9 個程度であるから、わずかな粗密波が形成されてもその増幅度は非常に大きくなる。例えば 0.1% の粗密波では、 n は 10^6 となり、そのパワーは単純に 10^6 倍となり、強力なレーザー光となる。これが自由電子レーザー(FEL)であり赤外、可視そして紫外線までが実現されている。

この FEL を短波長の真空紫外、軟 X 線、さらには X 線へと応用しようとする大きな問題が発生する。それは FEL に必用な十分な反射率をもつミラーが存在しないのである。この問題を解決するには、「ミラーのいらぬ FEL」を作ればよい。そこで考えられたのが、SASE (Self Amplification of Spontaneous Emissions 自然放射の自己増幅) である。非常に長いアンジュレータを用い、1 回通過によって自発放射光を増幅するという方法である。

自発放射のパワーから飽和までには 10^6 倍以上のゲインが必要であり、これを現実的な長さ (約 100m 以内) のアンジュレータにて実現するには、大きな増幅ゲインが求められ、電子ビームに次のような条件が課せられる。

- (1) 高密度の電子。ピーク電流にして数キロアンペア。
- (2) 横方向エミッタンス (規格化) $1 \pi \text{ mm.mrad}$ 程度。
- (3) エネルギー分散 10^4 以下。

したがって SASE-FEL では、低エミッタンス電子入射器を開発し、そのエミッタンスを壊さないように加速、その途中でバンチ圧縮を行い必要なピーク電流を確保し、アンジュレータに入射させる必要がある。

このバンチ圧縮過程の副産物として、フェムト秒の FEL 光が得られる。これを用いた高時間分解能の実験、とくに可視光のフェムト秒レーザーとのポン

表-1 SCSS 設計ビームパラメータ(1 GeV).

注：バンチ長は標準偏差ではなく FWHM.

bunch charge	Q	1	nC
normalized emittance	$\epsilon_{n,x,y}$	2	$\pi \text{ mm.mrad}$
final electron energy	E	1	GeV
final rms energy spread	σ_δ	0.02	%
final FWHM bunch length	Δz	0.15	mm
	Δt	0.5	psec
peak current	I_{pk}	2	kA
undulator period	λ_u	15	mm
radiation wavelength	λ_x	3.6	nm
minimum gap	g	3.7	mm
maximum K-parameter	K	1.3	
undulator unit length	L_1	4.5	m
total undulator length		22.5	m
beta function	β	10	m
FEL parameter	ρ	8.9	$\times 10^{-4}$
gain length	L_g	0.94	m
saturation length	L_{sat}	20	m
saturation power	P_{sat}	2.0	GW

プ・プローブ実験が注目されている。

2. SCSS 加速器

SCSS のビームパラメータを表 1 に、そのシステムを図 1 に示す。電子ビームの最高エネルギーを 1 GeV と設定し、アンジュレータを真空封止型として、その周期長を無理なく実現可能な最短の 15 mm に選ぶと、最短波長 3.6 nm が得られることになる ($K=1$ のとき)。これはちょうど水が X 線に対して透明、有機物が不透明といういわゆる Water Window 領域であり、生体物質を生きたまま観測するという X 線顕微鏡の実現が期待される。発生する放射光はきわめてピークパワーが大きく数 GW レベルである。このため広範囲な分野への貢献が期待されているが、その有用性は未知の部分が多いのも事実である。

2.1 500 kV パルス電子銃

SCSS では RF-Gun は使用せず、パルス高電圧を用いた熱電子銃を採用した。まず RF-Gun についての問題は、

- (1) ユーザー利用を目的とする X 線 FEL では、ビームパラメータの安定性、再現性、機器の寿命が重要視されるが、Photo-cathode を用いた RF-Gun では、カソード表面の特性とパルスレーザーの安定性に疑問がまだまだ多い。
- (2) RF-Gun 空洞の背後には、klystron とその電源、RF-low power system、冷却水、インターロック、レーザーとその電源、タイミングシステム、光パイプ、レーザー室が必要であり、RF-Gun が従来のバンチャー型入射器に比べてシステムが格段に単純化されたわけではない。また、光電カソードを使用する場合には、その準備のための設備を要する。

一方、従来型の DC 高電圧を印加した熱電子銃とバンチャーによる電子入射システムについては、

- (1) そのエミッタンスが大きいことを除けば、長年の実績があり、安定性やメンテナンス性は十分にユーザー利用にかなうものと思われる。
- (2) そのビーム性能については、改善の可能性がある。具体的には電子銃の印加電圧を高くし、かつ小面積のカソードから細いビームを引き出せば、エミッタンス $1 \pi \text{ mm.mrad}$ 程度 (電荷 1 nC, バンチ長数 psec) が得られる可能性が残されている。
- (3) 電荷量、バンチ長、エネルギー幅などの各パラメータを独立に調整でき、SASE-FEL の研究に最適である。

2.2 カソード

電子銃のカソードには CeB6 の単結晶を用いる予定である。CeB6 は高輝度電子源としてよく知られた LaB6 とは兄弟分であり、両者ともに電子顕微鏡用の電子銃として広く使用されている。Ce (セリウム) は原子周期律表上で La (ランタン) の右隣に位置し、CeB6 の方が高温運転時 (1400°C) の蒸発量が LaB6 より少なく、カソード寿命を長くすることができる。

CeB6 を供給する FEI 社の報告では、実際の電子顕微鏡に組み込んだ現場の運転実績では 5000 時間が報告されている。この寿命はニードルカソードの円錐部分が蒸発して、先端の平坦部が消滅する時点で定義されており、FEL 用の電子銃のようにロッド形の場合、その寿命はこれよりはるかに長くなるものと予想される。むしろヒーターの寿命が問題となろう。現在、グラフィイトヒーターを用いた加熱システムの開発を行っている。

2.3 C バンドによる主加速システム

電子・陽電子リニアコライダー計画に向けて、KEK にて開発してきた C バンド周波数(5712 MHz)による高電界加速システムを採用した。加速勾配は単バンチに対して 40 MV/m、マルチバンチにて 35 MV/m である。C バンド・システムに必要となる各コンポーネント(クライストロンなど)の開発は終了しているが、1 ユニット(クライストロン 2 本、加速管 4 本)の高電界試験が残されている。

2.4 バンチコンプレッサー

シュケイン型バンチコンプレッサーにて、バンチ長を 1/4~1/8 に圧縮し、ピーク電流を 4~8 倍に増大して、短波長での FEL ゲインをかせぐ。バンチ圧縮率を大きくすると、偏向電磁石の中で発生するコヒーレントなシンクロトロン放射(CSR)が、バンチの水平方向エミッタンスを増大させる現象が問題となっており、DESY、SLAC をはじめとする各研究所で勢力的に研究が行われている。さらに上流からくる電子ビームに乗っている密度のばらつきが信号源となり、これが CSR によって自己増幅されるらしいことが明らかになってきている(CSR Instability)。われわれは、これらの対策として電子入射器で出来るだけバンチ長を短くしておき、シュケイン・バンチコンプレッサーの圧縮率を下げる方法をとることにした。現在、入射器の最適化を行っている。

2.5 アンジュレータ

SCSS では真空封止型アンジュレータを使用する。この方式では、永久磁石をビームの直ぐ近くに近づけることができるので、短周期が可能である。SCSS 用のアンジュレータは、周期長 15 mm、最小ギャップ 3.7 mm、最高 K 値 1.3 である。運転の当初は、ギャップを大きく開けて、ビームのチューニングを行い、軌道が安定したのちに、次第にギャップを閉じて FEL 発振へと持ち込む。最短波長 3.6nm にて十分に飽和させるには、約 20 m のアンジュレータが必要となる。

アンジュレータについての最大の懸案は、電子軌道をまっすぐにアラインメントできるかどうかであった。典型的な精度は 10 micron-m である。DESY TESLA では BPM を多数配置する方法、LCLS ではア

ンジュレータのユニット長を短くし、各ユニット間に Q-magnet と BPM を配置し、Beam Based Alignment によって軌道修正する方法を検討している。

われわれは、そのようなアラインメント精度が「本当に必要か?」という問題設定そのものに疑問を抱き、FEL の増幅原理に立ち戻って再検討した。その結果、「ゲインの高い SASE-FEL の場合、1 セグメント長がゲイン長の数倍あれば、セグメント間のアラインメントおよび位相関係のマッチングは不必要」という結論に達した。SASE-FEL に必要な長さ数十メートルのアンジュレータは、長さ数メートルのセグメントに分けて製造する。各セグメント内の磁場は、磁場測定器によって高精度に測定可能であり、シムなどの調整機構によって、予想電子軌道を直線に高精度でアラインメントできる。問題はセグメントをトンネルに配置するときの精度と、セグメント間の光の位相関係であった。我々の解析によると、セグメント間でのアラインメントが悪く、さらに位相関係がマッチングしていなくても、FEL 信号の情報が電子の密度情報として下流へ伝達され、これが seeding laser のように増幅されるので、常に増幅が行われる。また飽和現象があるため、最終的な出力パワーの低下は、ほとんど見られないということなのである。くわしくは参考文献[2]を参照していただきたい。

これによって、アラインメントの問題が解決されたばかりではなく、例えば下流に従ってギャップを開放して電子の運動量をリカバリーしてゆく「テーパーアンジュレータ」を形成でき、resistive wakefield によるエネルギーロスの補償や、電子から光のエネルギー変換効率の向上を図ることが可能となる。また、最下流のセグメントの内部で、意図的に電子軌道を折り曲げ、ユーザーへ供給するパワーをゼロから連続的に最大出力まで調整することが可能となり、物性研究に大きな自由度を供給できるだろう。

3. まとめ

ここに述べたように、SCSS は各部でユニークな設計となっており、その成否が各国の研究所から注目されている。ここで得られる研究成果は SASE-FEL のみならず、最近注目されている ERL (Energy Recovery Linac)へも貢献できるものと考えている。これから数年、勢力的に技術開発を行いたいと考えておりますので、技術に関するコメント、研究協力、研究への参加など、大いに歓迎しております。

参考文献

- [1] SCSS 関連の情報(参考文献)はすべて次のホームページより入手可能です。<http://www-xfel.spring8.or.jp>
- [2] T. Tanaka, H. Kitamura and T. Shintake, "Misalignment Effects of Segmented Undulator in Self-Amplified Spontaneous Emission", Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, Vol. 5, 040701 (2002)