世界のX線自由電子レーザー ー日本のXFEL施設SACLAは何を目指して、どのように開発されてきたのかー

田中 均

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター
XFEL研究開発部門 (〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1)

X-Ray Free-Electron Laser (XFEL) in the World - Japanese XFEL Facility, SACLA was Developed in What Way and for What Aim -

Hitoshi TANAKA

XFEL Research and Development Division, RIKEN SPring-8 Center, RIKEN Harima Institute, 1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo 679-5148

(Received May 11, 2012)

The SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAsER (SACLA) has been open for user experiments since March 2012. SACLA is the world first compact XFEL facility aiming at a general-purpose machine spread widely, which was designed to make the facility size compact as much as possible with the state-of-the-art technology. Success of SACLA actually stimulates lots of researchers who are eager to utilize XFEL for their experiments to build their own XFEL facilities. Construction of compact XFEL, which SACLA first showed how to realize, is now a hot topic all over the world and some of them are being investigated for budgeting. This article aims at providing basic knowledge on a SACLA system and toward which SACLA is going. For this purpose the article compares approaches to XFEL among three leading XFEL projects, LCLS, European XFEL and SACLA and then, describes features of SACLA in detail.

Key Words: X-ray free-electron laser (XFEL), Compact XFEL, In-vacuum undulator, C-band accelerator

1. はじめに

波長1.5 Åにて、世界初のX線自由電子レーザー(XFEL)がカリフォルニアのSLAC国立加速器研究所^{†1}で産声を挙げたのは2009年の事である¹⁾。その直後にバンクーバーで開催された粒子線加速器国際会議(Particle Accelerator Conference 2009)^{†2}での異様な盛り上がりは、新たな時代の幕開けを予見させるには十分であり、今でも強烈に筆者の記憶に残っている。XFELの報告が行われるセッションの議長は東北大学の浜広幸先生であったが、成果を発表するために登壇したSLACのPaul Emma博士に対し、「遂に人類は長年の夢であったX線レーザーを手に入れました」と言ってその偉業を称えた。講演後の聴衆からの割れんばかりの拍手喝采は、私がこれまで経験したことのない凄まじいものであった。

それから遅れること2年、日本において、全く異なる方式のユニークなXFEL施設、SACLA(SPring-8 Angstrom

Compact free-electron LAsER)が誕生した^{2,3)}。一言で言っても、日本のシステムは、XFELを広く普及させる事を念頭に置き、その汎用光源化を現時点で可能な限り追求したものである⁴⁾。高エネルギー物理実験の資産や経験を最大限に活用し、その重厚長大なスタイルを踏襲したアメリカやヨーロッパとは目標とするレーザー性能に大きな差はないものの、そのアプローチは全く異質と言ってよい。このようなSACLAの成功は、世界中でXFELを自分たちの実験に利用したいと願っている研究者を勇気づけ、自分たちのXFEL施設建設を彼らに真剣に検討させる契機となった。

「X線自由電子レーザー(SACLA)の最前線」と銘打つ特集号における本記事の役割は、SACLAの設計概念とはいかなるものか、それを実現するためにどのような技術を開発してきたのか等を分かりやすく解説し、それによりアメリカやヨーロッパの代表的なXFEL建設プロジェクトとの本質的な違いを明らかにすることである。これ

^{†1} URL: <http://www.slac.stanford.edu/>

^{†2} URL: <http://www.triumf.info/hosted/PAC09/>

を効果的に行うため、SACLAシステムの詳細な説明に入る前に、LCLS⁵⁾(Linac Coherent Light Source)、European XFEL⁶⁾のシステム概要を述べ、SACLA⁷⁾との違いを簡単に説明する構成とした。

2. 代表的な2つのXFEL施設の概要とSACLAとの比較

現状、XFELはSASE(Self-Amplified Spontaneous Emission: 自己増幅自発放射)という原理⁸⁾に基づきシングルパスで生成される。現実的な長さで目標のレーザー特性を得るには、光共振器を使う従来法に比べ高い増幅利得が必要となり、高輝度の(高密度、かつ平行性が高い)電子ビームが必須となる。この結果、放射による反跳⁹⁾で電子ビームの質が劣化するリング型加速器は採用できない。故に、現状の全ての計画において電子を供給するシステムは、高品質電子ビーム源と電子ビームを時間方向に圧縮するバンチ圧縮システム、線型加速器の組み合わせで構成されている。このようにシステム設計の境界条件が制限されているが、できあがるXFELシステムは、その設計思想(目指すべきゴール)により大きく異なってくる。まずはLCLSとEuropean XFELに関してそのシステムの概要を見ていくことにする。

2.1 LCLSのシステム概要

LCLSでは、既存の2マイル線型加速器を最大限利用することで、低コストで、かつ早期にXFELを実現することを目標に掲げた。ブルックヘブン国立研究所で開発研究が進んでいた銅光カソードRF電子銃の技術¹⁰⁾をベースに要素技術開発と設計を進め、2006年から入射器の建設に着手した。その後、線型加速器の改造、第2バンチ圧縮器(BC2)の設置、アンジュレータの設置などを進め、2009年4月中旬に1.5 Åの波長において、SASE型のXFELを世界で最初に実現、その後XFELの利用実験でも世界をリードし今日に至っている。アメリカの戦略は、ここまではある程度成功していると言える。2マイル線

型加速器の残りの1/3を同様に利用して、軟X線と硬X線の2本の新たなレーザービームラインを設置するLCLS II計画¹¹⁾も予算化され建設が進められている。

LCLSは、全長約3 kmの2マイル線型加速器の上流から約2 km地点に、XFELで必要となる高輝度電子ビームを提供する光カソードRF電子銃、Sバンド加速システム(加速周波数2.856 GHz)、電子ビーム診断装置等から構成される入射器を新たに設置し、エネルギー135 MeV、電流値33 A、電荷250 pC、スライスエミッタンス 0.4π mm mradの高輝度電子ビームをFig. 1に示すように35度曲げて既存の線型加速器(ほぼ1 kmの長さ)へ入射する¹⁾。入射器にはレーザーシステムの変動により引き起こされるマイクロバンチングを抑制するためのレーザーヒーター¹²⁾が設置されている。

この電子ビームを1 kmのSバンド加速システムにより最大14.35 GeVまで加速する。加速器に沿って磁気バンチ圧縮器がエネルギー250 MeV(第1バンチ圧縮器BC1)、4.54 GeV(第2バンチ圧縮器BC2)の2ヶ所に設置され、3 kAの最終ピーク電流までエミッタンスを悪化させないように電子ビームを圧縮する。このためBC1の上流に圧縮プロセスにおける非線形性を効率良く補正できるX-band補正加速システムが導入されている。

3 kA、14.35 GeVの電子ビームはドッグレッグとビームコリメータにより電子ビームのハローを取り除き、電子ビーム性能確認のためのビーム診断エリアを経て、真空外固定ギャップアンジュレータビームラインへ移送される。ここで発生した軟X線FELは、実験ホールA(アンジュレータ出口から約50 m下流)へ、X線FELは主に離れた実験ホールB(アンジュレータ出口から約400 m下流)へ移送され実験に利用される。基本波の最短波長は、1.2 Åと報告¹³⁾されており設計の1.5 Åを超えている。レーザーパルスエネルギーは数mJに達しているとの報告もあるが、レーザー強度が直接、校正評価されていないため、実際のどの程度の強度が実験に利用されているのかは、今のところクリアではない。

Fig. 1 Schematic drawing of the LCLS facility. PCRFG, photo-cathode RF gun; LH, laser heater; S-Linac, S-band acceleration system; X, X-band energy chirp linearizer; BC1(2), 1st(2nd) bunch compressor; BD, beam dump.

2.2 European XFEL (EXFEL) の概要

EXFELは極めて政治的な判断の下でシステム設計がなされてきた経緯がある。もともとTeV領域の e^+e^- リニアコライダーにおける要素技術と考えられた超伝導Lバンド加速システム(加速周波数1.3 GHz)の開発、製造、性能試験のための試験施設(TESLA Test Facility: TTF)としてスタートした。TESLAとはTeV Energy Superconducting Linear Acceleratorからできた言葉^{†3}である。その後、高エネルギー物理の閉塞状況を受け、開発した技術を短波長のSASE FELの実証実験に適用する方向性が見いだされ、FLASH^{†4}(Free electron LASer in Hamburg)へと続き、現在のEXFELの基礎が形作られた。液体Heレベルの超伝導技術を基盤とするため、熱シールドの導入や加速システムの周波数を高くできない等、施設規模を大きくする要素が多い。その一方で、超伝導の特徴を生かしロングパルストレインによる10 Hzのバーストモード(200ナノ秒間隔で集団となった3000ショットのレーザーが10 Hzで繰り返し発生)運転が可能となる。バーストモード運転は、光子数を各段に引き上げる事が可能になる反面、バースト内の繰り返しが5 MHzと高くなるなど、有効に利用するためのハードルは高い。このような成り立ちの結果として、EXFEL計画は、コストパフォーマンスを追求するのではなく、他では決してできない「究極の光源」を目指す道を選択することとなった。

EXFELの模式図をFig. 2に示す。全長は3.4 kmとLCLSに比べてもかなり長い。また、ハンブルグの市街地に位置しその殆どを地下トンネル内に設置するため、建設コストも割高となり、トンネルが狭いためにメンテナンス性も悪い。

EXFELでは、必要となる高輝度電子ビームをLCLSと同様に、光カソードRF電子銃を用いた入射器で供給する。大きな違いは、光カソードとして量子効率の高いCs₂Te^{†4}を用いている点である。このため励起レーザーのパワーを銅カソードに比べ大幅に低減でき、安定な高

輝度電子ビーム生成を実現できる。入射器は、エネルギー~130 MeV、電流値50 A、電荷1 nC、スライスエミッタンス 1.4π mm mradの高輝度電子ビームをシングルバンチから3000パルスのマルチバンチまで生成が可能である。

この電子ビームは、Lバンド超伝導加速システムにて最大20 GeVまで加速される。途中、エネルギー500 MeV(第1バンチ圧縮器BC1)と2 GeV(第2バンチ圧縮器BC2)の2ヶ所に配置された2段の磁気バンチ圧縮器で5 kAの最終ピーク電流まで、エミッタンスを維持しつつ圧縮される。これを実現するためBC1の上流に圧縮プロセスにおける非線形性を効率良く補正する3倍高調波補正空洞が導入されている。

EXFELシステムには、電子源として光カソードRF電子銃を用いているため、暗電流(利用出来ないゴミ電子)の発生量が多く、それがビーム口径の大きいLバンドシステムにより、加速器終端に相当量が移送される欠点がある。そのため、それを取り除く大がかりなコリメータが加速器の最終段に設置される。さらに超伝導システムをCWとは異なるバーストモードで利用するため、バースト間、バースト内での電子ビーム特性を一定に維持するため、複数のフィードバックシステムの導入が計画されている。このための一部システムも図中のCDF部に設置されている。CDF部には、電子ビームの最終性能を確認する診断システムも設置される。

EXFELでは、アンジュレータ自発放射ラインを含め最大10本までビームラインを設置可能である。ビームラインは直径4.5 mと5.2 mの円形トンネル内に設置される(ホールではない)、2つの実験ホールに5本ずつ分配される。直線ラインからの最大偏向角は2.5度である。目標最短波長はSACLAより短い0.5 Åが計画されている。

2.3 LCLS, EXFELと日本のXFEL施設SACLAとの比較

3つのXFEL施設の主要なシステムパラメータをTable 1

Fig. 2 Schematic drawing of the European XFEL facility. PCRFG, photo-cathode RF gun; L-Linac, L-band super-conducting acceleration system; 3rd, 3rd harmonic correction cavity; BC1 (2), 1st (2nd) bunch compressor; CDF, section for beam collimation, diagnostic and feedback; BD, beam distributor; BM, bending magnet; SASE, undulator beamline for SASE XFEL; U, undulator beamline for spontaneous undulator radiation; BDP, beam dump.

^{†3} URL: http://tesla.desy.de/TTF_description/TESLA/TTF_description.html

^{†4} URL: <http://flash.desy.de/>

に示した。この比較表から以下の事が分かる。

- (1) SACLAは、他の2施設に比較して電子ビームエネルギーが低く、施設規模が小さい。
- (2) このことによりSACLAの建設コストは他に比べて大幅に圧縮されている。
- (3) 一方で得られるレーザー波長、パワーは3つの施設で大きく違わない。
- (4) SACLAのビームラインの本数はEXFELに比べ半分ではあるが、LCLSを大幅に上回っている。
- (5) 超伝導技術を用いたEXFELは、時間あたりのレーザーパルス数が圧倒的に大きく、高い平均輝度、高フラックスを実現している。

フラックスの点では、超伝導技術を用いて高フラックスを実現するEXFELには遠く及ばない。しかし、その1点を除けば、施設規模が小さいSACLAではあるが、ほぼ同等のレーザー性能を実現していることは明らかであろう。次章ではどのように性能を維持した上で施設規模を低減できたのかについて詳しく述べる。

3. 日本のXFEL施設SACLA

SACLAの設計コンセプトは、基礎科学分野で広範に利用が期待されるX線・軟X線レーザーの近未来のニーズに合わせて、多数の施設を世界中に建設可能とするコンパクトで高性能のXFEL施設の実現であり、その先にはXFELのテーブルトップ化も見据えたものである。もう一つの特徴は、高性能を実現するため、SACLAでは

安定性に徹底的に拘ったシステム開発を行ってきたことである。ピーク性能が素晴らしくとも不安定では利用が難しくなる。光源の最高性能を利用に結びつけるには、ピーク性能に近いレーザー特性を定常的に実現する必要がある。そのために、レーザーの安定性を損なう外乱要因の抑制を装置開発のレベルから系統的に実践してきた¹⁵⁾。これらの技術開発の結果、SACLAのプロトタイプ機(試験加速器)では、50~60 nmの極端紫外光波長域で1日の時間スケールでレーザー出力飽和が常に維持される超安定レーザー運転を実現した¹⁶⁾。試験加速器のレーザー性能の詳細はRef. 16を参照されたい。FLASHでのSASE FEL運転が著しく不安定であったため、「SASEによるレーザーは本質的に不安定」という考え方が常識化していた時代に、その常識を打ち破ったのである。この設計思想は、さらに進化した形でSACLAに生かされている。

一方LCLSでは、レーザーの不安定性が今後のレーザー利用において問題となる可能性が指摘されている。その理由は、LCLSが既存の線型加速器をXFELに転用したからである。元々XFELの要求性能を満たすことが難しい既存のシステムを無理矢理改造し、フィードバック等を駆使して何とか抑え込んだ、そのように見受けられるのである。聞くとところによれば、ピーク電流フィードバックなしでは、レーザー運転を数分も継続できないそうである。このやり方は確かに一番にXFELを実現し、サイエンスでも先鞭を付けるのには効果的であろう。しかし、SPRING-8とAPSのアプローチの違いが放射光の性

Table 1 Comparison of system parameter among three leading XFEL facilities.

	LCLS	European XFEL	SACLA	
Construction site	SLAC	DESY	SPring-8	
Total budget	615 M \$ * 74 Billion ¥ **	1082 M€ 162 Billion ¥ ***	39 Billion ¥	
Completion year	2009	2015	2011	
Location	Underground	Underground	On the ground	
Total length (m)	~1800	3400	~700	
Max. beam energy (GeV)	14.35	20	8.5	
Max. repetition (Hz)	120	10 x (3000 pulse train)	60	
Capable (Constructed)	1 (1)	10 (3+2****)	5 (1+1****)	
Number of undulator beamlines				
Acceleration charge (nC)	~0.25	1 (planned)	~0.3	
Acceleration system	Normal conducting S-band	Super-conducting L-band	Normal conducting C-band	
Undulator	Type	Out-of-vacuum, fixed gap	In-vacuum, variable gap	
	Period length (mm)	30	35.6 (SASE1)	18 (BL3)
	Period number	3729	4620 (SASE1)	4986 (BL3)
	Deflection parameter K	3.71	3.3 (SASE1)	2.2 (BL3)
Shortest wavelength (nm)	0.12	0.05~6 (planned)	0.06 (BL3)	
Laser pulse duration (fs)	10 ~ 100	<100 (planned)	10 ~ 30 (BL3)	
Peak power (GW)	A few tens	20 (planned, SASE1)	A few tens (BL3)	
Peak brilliance ($\text{phs}/0.1\% \text{bw}/\text{s}/\text{mm}^2/\text{mrad}^2$)	~ 10^{33} (calc.)	~ 10^{33} (calc., SASE1)	~ 10^{33} (calc., BL3)	

* This amount does not include the existing machine cost

** Converted using a currency rate of 120 ¥/\$

*** Converted using a currency rate of 150 ¥/€

**** Beamline for spontaneous undulator radiation

能に反映した様に、LCLSのアプローチでは究極のレーザー性能には届かないだろうと筆者は予測する。

3.1 SACLAのシステム概要

Fig. 3にSACLAの模式図を示す。SACLAの全長は約700 mで施設は次の5つの部分から構成される。即ち、低エミッタンス電子ビームを生成する単結晶カソードパルス熱電子銃と速度変調バンチングにより電子ビームを進行方向に圧縮する入射器(Fig. 3のA), 3段の磁気シケインを直列につないだ多段バンチ圧縮システム(Fig. 3のB), ビーム電流が3 kAを超える高密度電子ビームを8 GeVのエネルギーまで引き上げる高加速勾配のCバンド加速システム(Fig. 3のC, 全長~250 m), 8 GeVの高輝度電子ビームの自発放射からX線レーザーを生成する長尺の真空封止アンジュレータ(Fig. 3のE, 全長90 m), アンジュレータ終端から110 m下流に位置し、レーザーの診断・加工を行う光学ハッチとその直下流の実験ハッチ(Fig. 3のF)である。圧縮後の電子ビーム特性を評価する診断システムは、最終磁気圧縮器BC3の下流に設けられている。ビームラインは最大5本まで設置可能で、現在は、硬X線(BL3)と広帯域軟X線(BL1)の2本が稼働している。電子ビームの繰り返しは最大60 ppsである。現状のDC振り分け電磁石(Fig. 3のD)は、パルス毎に電子ビームを各ビームラインやSPRing-8の蓄積リングへ振り分け可能な高速AC電磁石に将来置き換えられる予定である。

3.2 短周期真空封止アンジュレータ

小型XFELの実現には、先ず、レーザー媒体である電子ビームのエネルギーを低く抑える必要がある。この理由は、施設全長に占める線型加速器の割合が大きく、加速器の長さ、即ちビームのエネルギーがレーザー施設の大きさを決定付けるからである。レーザーの素となるア

ンジュレータ放射の波長 λ_n (n 次光)は、アンジュレータの周期長 λ_u 、ローレンツ因子 γ と電子ビームの最大偏向角と γ の積である K パラメータを用いて

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

と表される。この式が示すように、短波長のXFELを低エネルギー電子ビームから得るには λ_u を小さくすれば良い。短周期の実現では、さらに重要な制約条件が課せられる。それは、短周期を満たすと同時に、レーザーの種である自発光を充分発生させるだけの磁場強度を確保するという事である。磁場強度を確保するには蛇行する電子ビームに磁極を近づける必要があり、永久磁石列が真空槽内部に入る真空封止アンジュレータが最適である。真空封止アンジュレータ技術¹⁷⁾を導入したことで、SACLAでは、8 GeVという低エネルギーでXFELが可能になった。Fig. 4 (a)にSACLAのアンジュレータホールに設置された真空封止アンジュレータを示す。

これに対し、電子ビームに磁石列を近づけると磁石表面を流れる壁電流密度が増加し、表面の電気抵抗による影響(Resistive Wall Wakefield: RWW)が大きくなり、長尺のアンジュレータに渡るFEL相互作用に悪影響をもたらすという議論が起こった。真空封止アンジュレータの磁石列表面状態の改善には、電子ビームの誘起する壁電流が直接磁極面に流れないように、ニッケルメッキを施した50 μ mの銅フィルムで磁極面を覆う工夫が成され¹⁸⁾、これにより真空チェンバー内壁と等価な電気抵抗と表面状態を実現することができた。銅フィルムで覆われた磁石列の写真をFig. 4 (b)に示す。

一方で、SACLAの真空封止アンジュレータの最小ギャップ幅は3.5 mmで、例えばLCLSのチェンバー内径5 mmに比べ確かに小さい。RWWは、おおよそギャップ幅の3乗に逆比例して増大するので、SACLAはLCLSに

Fig. 3 Schematic drawing of SACLA facility. TG, 500-kV pulsed thermionic gun with a single crystal cathode; LC, L-band energy chirp corrector; CC, C-band energy chirp linearizer; L-APS, L-band standing-wave acceleration system; S-Linac, S-band acceleration system; C-Linac, C-band acceleration system; BC1 (2, 3), 1st (2nd, 3rd) bunch compressor; BD, beam diagnostic system; SM, switching magnet; BM, bending magnet; SASE, undulator beamline for SASE XFEL; U, undulator beamline for spontaneous undulator radiation; BDP, beam dump.

Fig. 4 XFEL undulators installed in the SACLA undulator hall (a) and upper and lower magnet arrays covered by Ni plating Cu foil of which thickness is 50 μm (b).

比べ約3倍これによる効果が強調されることになる。詳細な検討の結果、RWWにより電子ビームにエネルギーチャープ(進行方向位置に相関したエネルギー偏差)は生じるものの、この長さのスケールは電子ビームのレーザー波長に対応した密度変調に比べて桁違いに長く、増幅への直接的な影響は無視できること、並びにこのエネルギーチャープによるスペクトル幅の広がりは僅かであることが確認された。

3.3 常伝導C-band高勾配加速システム

ビームエネルギーを下げた上で、その低いエネルギーまで、電子ビームを高効率で加速できればさらに施設規模を小さくできる。この発想から、現状で大量生産が可能、かつ高い加速勾配を実現できるシステムとして常伝導Cバンド加速システム(加速周波数5.7 GHz)¹⁹⁾が採用されるに至った。目標とする35 MV/mを安定に実現するために、システムの改良が進められた結果、試験加速器において定常的に37 MV/mの加速電界を達成²⁰⁾することができた。

一方で、安定なレーザー生成の決め手は加速システムの安定性にある。線形加速器は、基本的にフィードバックの効かないオープンループのシステムである。そのため、究極のレーザー安定性に迫るには、電子の加速に使用されるパルス駆動のハイパワー機器の変動を、それぞれその重要度に応じて要求範囲内に抑え込む地道なアプローチが必要になる。

安定化に関わる主要な開発項目は、(1)パワースource変動を抑制するためのクライストロン駆動パルス源の精密印加電圧設定²⁰⁾(目標設定精度はpeak-to-peak値で100 ppm以下)、(2)高精度基準周波数を加速器400 mに渡り分配し、その位相と振幅を精密に設定、制御するシステム²¹⁾(位相設定精度は100 fs以下)、(3)加速器に渡って分布した多数のRF機器に正確な動作タイミングを与えるシステム²²⁾(設定誤差は100 fs以下)、(4)加速管やパルス圧縮器の変形による位相、振幅ドリフト抑制のための精密温度制御システム(精度は0.1度以下)、(5)信頼性の高い運転とRFノイズ抑制を考慮した単一オイルタンク式クライストロンモジュレータシステム²³⁾等である。Fig. 5にSACLAの加速器トンネルに設置されたC-band加速管、導波管とパルス圧縮器を示す。

3.4 単結晶カソード熱電子銃を用いた低エミッタンス入射器

ワンパスで出力飽和を達成する高い増幅利得を実現するため、高輝度の電子ビームが必要になることは既に述べた。輝度は6次元位相空間における電子ビームの密度であるから、通常は3つの2次元位相空間の積で表すことができる。これから高輝度を得るには、水平、垂直位相空間の面積に当たるエミッタンスを低減し、同時にビーム電流を高めれば良いことが分かる。エミッタンス ε は γ 、光速で規格化された速度 β と規格化エミッタンス ε_n (静止状態へ外挿した電子ビームの初期エミッタンス)を用いて

$$\varepsilon = \frac{1}{\beta\gamma} \varepsilon_n \quad (2)$$

と表される。輝度を高めるには、このエミッタンスを低減する必要があるのだが、(2)式から分かるように、低エネルギーで小さなエミッタンスを得るには、規格化エミッタンス自体を下げるしかない。逆に規格化エミッタンスを下げられない前提では、XFEL施設のビームエネルギーは高く設定せざるを得ない。これらの理由から、XFELに用いられる電子ビームエネルギーは15~20 GeV

Fig. 5 Normal conducting C-band Acceleration system installed in the SACLA accelerator tunnel.

という極めて高い値に設定されてきた。LCLSでは、今でこそ加速電荷量を下げて 0.4π mm mradという実験結果を得ているが、当初はエミッタンスとして 1.2π mm mradという値³⁾を想定していた。

SACLAを成功させるには 1π mm mrad以下の極めて小さい規格化エミッタンスを実現し、かつ、それを維持したままビーム電流を3 kAまで高める必要があった。これはSACLA設計時には、とても難しい条件と考えられていた。いくつかの方法を考えた結果、電子ビームの均質性、ビーム特性の再現性、運転の信頼性と柔軟性、メンテナンスの容易さ等を考慮し、熱電子銃に基づく入射器システムを採用した。直径3 mm ϕ のCeB₆単結晶をカソード(Fig. 6)として用いる熱電子銃が、500 kVの高圧パルスと制御グリッドを取り除いた工夫で、1 Aと低いビーム電流ながら 0.6π mm mrad(重心から90%の電子換算)の低エミッタンスビームの生成²⁴⁾に成功したのである。

相対論的エネルギー領域で、しばしば問題となる空間電荷効果によるエミッタンスの劣化は、空間電荷力が軸対称均質円柱ビームでは線形となる特性を利用して抑制する。この結果、入射器システムは、電子ビームの規格化エミッタンスをほぼ維持したまま、長い電子ビームパルスを1 nsecに切り出し、2つの高周波空洞でエネルギーチャージとビームエネルギーを制御し、速度のエネルギー依存性を用いて電子ビームを時間方向に圧縮する「速度変調バンチング」により、ビーム電流を20~100 A

まで増加することが可能になった。さらに、この電子ビームをビームの縦方向位相空間内での回転運動を効果的に取り入れた3段の磁気バンチ圧縮システム²⁵⁾によりエミッタンスを維持したまま圧縮する。このような多段のシステムを駆使し、電流値を3 kA以上に引き上げることでSACLAではXFELに必要な高輝度電子ビームを生成する。

3.5 SACLAで達成されたレーザー性能^{2,26)}

Table 2に達成されたSACLAのレーザー性能をまとめて示す。レーザー生成は波長約0.6~3 Åの範囲で可能であるが、レーザー出力飽和が達成できるのは現状では1 Åより波長の長い領域である。ユーザー利用では、やや狭い0.83~2.5 Åの波長範囲で現在レーザーを提供している。レーザー出力は直接測定ではなく、測定された電子ビーム時間プロファイルのエンベロップとレーザーパルスエネルギー測定値から見積もっている。SASEはスパイク構造を有しており、実際のピーク出力は10 GWを大きく上回っていると考えられる。レーザーの強度変動は波長に依存し、飽和領域では標準偏差で10~20%である。波長が長くなるにつれ徐々に10%に近づいていく。空間干渉性の評価は、ダブルスリット(60 μ mの間隔)による干渉パターンから得られたVisibilityで暫定的に行った。Visibilityは98%と高く、このことから空間干渉性はほぼ100%と推定される。

レーザーの繰り返しは今のところ10 Hzで行っている。これはフォルト頻度を抑え平均フォルト間隔を30分以上とするための暫定措置である。フォルトの主要原因はサイラトロン(高圧プラズマスイッチ)のミスファイアであり、現在、不必要なフォルト回数を減らすようサイラトロン機器インターロックの見直しを行っている。夏以降に繰り返しを徐々に上げて、早急に60 Hzの目標値を実現する計画である。フォルトからの復帰は約1分で、復帰後のレーザー出力、位置、波長等の再現性は十分高く、実験でフォルト前後の特性の違いが気になる事はない。ユーザー運転期間は24時間の連続運転を行っており、実験中でのレーザー調整は基本的に不要である。レーザー波長変更は2通りで実施している。大きく波長を変える場合は、電子ビームのエネルギーをオペレータが変更する事で対応する。K値変更で対応可能な波長の微調整は、実験ホール端末から、実験の要請に応じて自

Fig. 6 CeB₆ single crystal cathode.

Table 2 Summary of achieved XFEL performance.

Item	Achieved performance
Pulse energy (mJ/pulse)*	0.5@2.3 Å, 0.26@1.2 Å
Peak power (GW) *	>10
Intensity fluctuation (% in STD) *	10 ~ 20
Lasing wavelength (Angstrom)	0.63 ~ 2.8
Spatial coherence	Nearly full
Available focused beam (μ m ²)	1 × 1 ~ 2 × 2
Repetition (Hz)	10
Mean time between faults (min.)	30 ~ 40
Recovery time from single fault (min.)	1
Operation mode	24 hr continuous
Reproducibility	70 ~ 80% of the peak

* Performance depends on a laser wavelength

Fig. 7 Laser intensity fluctuation over three days. The blue and red points show the single shot and moving-average of 10 shots, respectively.

由に実験ユーザーが実施できる。

Fig. 7にユーザー実験期間3日間に渡るレーザー強度の安定性を示す。この例では、レーザー波長は1.8 Åである。レーザーパルスエネルギーは、3日間に渡り約0.25 mJに維持されていることが分かる。レーザー位置の変動は、ピンクビーム(分光前)では、ビームサイズ(約300 μm FWHM)に比べて十分小さく、分光後ではビームサイズ(約100 μm FWHM)と同程度の変動が見られる。現在、どちらも $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ のマイクロビームとして利用可能であり、ショット毎のマイクロビーム位置はほぼ固定されている。レーザー波長の変動は、レーザースペクトル幅(～0.4% FWHM)に比べて十分小さく、標準偏差で0.1～0.15%である。

得られたレーザー性能は、低コストでコンパクトなXFEL施設でも、高性能で十分安定なX線レーザーが実現可能であることを示すものである。

4. 今後の進展

さらなるコンパクト化の可能性については、これまでの常伝導RF技術をさらに推し進め、施設規模を低減する方向がある。C-band加速システムの加速勾配も35 MV/mからコンスタントに40 MV/m以上で運転ができており、多少の伸び代はまだありそうだ。また、SACLAでは導入を見送ったX-band(加速周波数11.4 GHz)まで周波数を高めれば100 MV/m(SACLAの2倍以上)程度まで加速勾配を上げられる可能性もある。これまでの加速方式に変えて、例えばレーザープラズマ加速等を取り入れていく事も検討に値する。新方式は、加速勾配1 GV/mの台も夢ではなく、線型加速器の施設規模を劇的に縮小できる可能性があるからだ。

一方でアンジュレータの周期長をさらに下げる可能性も残されている。SPRING-8では、これまで15 mmという周期長の真空封止アンジュレータによりEUV SASE FELを運転してきた実績がある。より短周期に迫るには、ピーク磁場を高めていく必要があるが、これにはピーク磁場をより高くできるクライオアンジュレータや超伝導アンジュレータの技術開発が必要になろう。仮に周期長

10 mmが実現出来れば、SACLAのビームエネルギーは6 GeVまで低減できることになる。これらの開発、さらにシステム設計の最適化により、現在のSACLAの施設規模をさらに大幅に縮小できる可能性は十分にあるだろう。

レーザー特性の観点では、理想的なX線レーザーの実現が挙げられる。SASE型のXFELでは2次元の空間干渉性を有する短パルスで高強度のX線が得られるが、レーザーはショットノイズから立ち上がるため、ショット毎にレーザーパルスの強度、スペクトル、時間構造が変化するマルチモードのレーザーである。また、ノイズからレーザーを成長させるために非常に高いビーム電流が必要となり、結果的に出力飽和レベルは数10 GWと極端に大きくなり制御ができない。この欠点を解消し、シングルモードで時間・空間干渉性を有し、強度可変の理想的なX線レーザーをどう作れば良いのか。1つの方法は、外部からレーザーを導入し、アンジュレータ内で電子ビームと重ね合わせ、外部レーザーにより電子ビームにレーザー増幅の種となる密度変調を毎ショット再現するシード化²⁷⁾である。この場合の最大の問題は、X線領域には適当なレーザー源がないことであるが、近年SASE XFELを種光として利用する自己シード化²⁸⁾のアイデアが提案され、具体的な検討が進められている。SACLAでも今年度から、自己シード化に向けたR&Dを開始する予定である。

レーザー強度の増強については、レーザー増幅に寄与する電子数を増やすため、圧縮過程の非線形性を3次まで補正し、ピーク電流の時間幅を広げる新たなスキームを検討中である。また、電子ビーム軌道上のアンジュレータピーク磁場を上げて((1)式の K を大きくする)レーザー強度を高めることも検討している。このためには、アンジュレータの最小ギャップを3.5 mmからさらに縮める必要がある。 K 値を大きくするとレーザー波長は長波長側にシフトするため、ビームエネルギーの最大値を引き上げるための加速器の増強も並行して取り組む必要がある。これらの改善策を組み合わせ、1 mJ/pulseを超える高強度レーザーの安定生成にも挑戦していく。

参考文献

- 1) P. Emma: *Proc. Particle Accelerator Conference, Vancouver* (2009) p.3115.
- 2) T. Ishikawa, H. Aoyagi, T. Asaka, Y. Asano, N. Azumi, T. Bizen, H. Ego, K. Fukami, T. Fukui, Y. Furukawa, *et al.*: *Nature Photonics*, DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.141.
- 3) H. Tanaka: *Proc. International Particle Accelerator Conference, San Sebastian* (2011) p.21.
- 4) T. Shintake, H. Matsumoto, T. Ishikawa, and H. Kitamura: in *Optics for Fourth-Generation X-Ray Sources (Proceedings Volume)*, edited by R. O. Tatchyn, A. K. Freund, and T. Matsushita **4500** (SPIE, Bellingham, WA, 2001) p.12.
- 5) Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report, SLAC-R-593 (Stanford, 2002).
- 6) M. Altarelli, R. Brinkmann, M. Chergui, W. Decking, B. Dobson, S. Düsterer, G. Grübel, W. Graeff, H. Graafsma, J. Hajdu, *et al.*: *XFEL: The European X-ray Free-Electron Laser*, Technical design report, DESY 2006-097 (DESY, Hamburg, 2006).
- 7) T. Tanaka and T. Shintake (eds): *SCSS X-FEL Conceptual Design*

- Report (RIKEN Harima Institute, Hyogo, Japan, 2005).
- 8) R. Bonifacio, C. Pellegrini, and L. M. Narducci: *Opt. Commun.* **50** (1984) 373.
 - 9) M. Sands: SLAC-121 (SLAC, Menlo Park, 1970).
 - 10) D. T. Palmer, X. J. Wang, R. H. Miller, M. Babzien, I. Ben-Zvi, C. Pellegrini, J. Sheehan, J. Skaritka, H. Winick, M. Woodle, *et al.*: *Proc. Particle Accelerator Conference, Vancouver* (1997) p.2687.
 - 11) Linac Coherent Light Source II Conceptual Design Report, SLAC-I-060-003-000-00-R000 (SLAC, Menlo Park, 2011).
 - 12) Z. Huang, M. Borland, P. Emma, J. Wu, C. Limborg, G. Stupakov, and J. Welch: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **7** (2004) 074401.
 - 13) P. Emma, R. Akre, J. Arthur, R. Bionta, C. Bostedt, J. Bozek, A. Brachmann, P. Bucksbaum, R. Coffee, F.-J. Decker, *et al.*: *Nature Photonics* **4** (2010) 641.
 - 14) J. H. Han, K. Abrahamyan, J. Bähr, H.-J. Grabosch, M. Krasilnikov, D. Lipka, V. Miltchev, A. Oppelt, B. Petrosyan, D. Pose, *et al.*: *Proc. European Particle Accelerator Conference, Lucerne* (2004) p.357.
 - 15) H. Tanaka, T. Fukui, T. Hara, N. Hosoda, T. Inagaki, S. I. Inoue, T. Ishikawa, H. Kitamura, C. Kondo, N. Kumagai, *et al.*: *Proc. Free Electron Laser Conference, Liverpool* (2009) p.758.
 - 16) T. Shintake, H. Tanaka, T. Hara, T. Tanaka, K. Togawa, M. Yabashi, Y. Otake, Y. Asano, T. Bizen, T. Fukui, *et al.*: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** (2009) 070701.
 - 17) H. Kitamura: *Rev. Sci. Instrum.* **66** (1995) 2007.
 - 18) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Marechal, S. Okada, and H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* **5** (1998) 403.
 - 19) T. Shintake, N. Akasaka, K. L. F. Bane, H. Hayano, K. Kubo, H. Matsumoto, S. Matsumoto, K. Oide, and K. Yokoya: *Proc. Particle Accelerator Conference, Dallas* (1995) p.1099.
 - 20) T. Inagaki: *Proc. Linear Accelerator Conference, Vancouver* (2008) p.1090.
 - 21) Y. Otake, H. Maesaka, M. Kitamura, T. Shintake, T. Ohshima, N. Hosoda, T. Fukui, and T. Ohata: *Proc. Asian Particle Accelerator Conference, Indore, India* (2007) p.634.
 - 22) Y. Otake, T. Ohshima, N. Hosoda, H. Maesaka, T. Fukui, T. Ohata, M. Musha, K. Tamasaku, M. Kitamura, K. Imai, *et al.*: *Proc. International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Knoxville* (2007) p.706.
 - 23) T. Shintake, T. Inagaki, K. Shirasawa, C. Kondo, and T. Sakurai: *Proc. International Particle Accelerator Conference, Kyoto* (2010) p.3287.
 - 24) K. Togawa, T. Shintake, T. Inagaki, K. Onoe, T. Tanaka, H. Baba, and H. Matsumoto: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** (2007) 020703.
 - 25) K. Togawa, T. Hara, and H. Tanaka: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** (2009) 080706.
 - 26) H. Tanaka: *Proc. International Particle Accelerator Conference, New Orleans* (2012) WEYB01.
 - 27) T. Togashi, E. J. Takahashi, K. Midorikawa, M. Aoyama, K. Yamakawa, T. Sato, A. Iwasaki, S. Owada, T. Okino, K. Yamanouchi, *et al.*: *Opt. Express* **19** (2011) 317.
 - 28) G. Geloni, V. Kocharyan, and E. Saldin: DESY 10-53 (DESY, Hamburg, 2010).