



2. 加速器のハードウェア

大竹雄次^{1,2}, 安積則義^{1,2}, 青柳秀樹², 安積隆夫^{1,2}, 浅野芳裕¹,
備前輝彦^{1,2}, 恵郷博文^{1,2}, 深見健司^{1,2}, 花木博文², 原 徹^{1,2},
長谷川照晃^{1,2}, 細田直康², 稲垣隆宏^{1,2}, 井上 忍³, 糸賀俊朗²,
木村洋昭^{1,2}, 小林利明², 近藤 力^{1,2}, 前坂比呂和^{1,2}, Xavier Marechal²,
松原伸一², 松井佐久夫^{1,2}, 成山展照², 大島 隆^{1,2}, 櫻井辰幸^{1,2},
清家隆光^{1,2}, 白澤克年⁴, 鈴木伸介², 高橋 直^{1,2}, 武部英樹^{1,2},
田中隆次^{1,2}, 渡川和晃^{1,2}, 富澤宏光^{1,2}, 張 超², 呉 樹奎²,
柳田謙一², 新竹 積⁴, 北村英男¹, 熊谷教孝²

¹独立行政法人理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1-1

²財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1-1

³スプリングエイトサービス㈱ 〒679-5165 兵庫県たつの市新宮町光都1丁目20番5号

⁴沖縄科学技術大学院大学 〒904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶1919-1

要 旨 本稿では、世界最短波長である0.06 nmの増幅に成功したX線自由電子レーザー“SACLA”の加速器の器機について述べる。特に、建設コストを抑えるための小型化手法である、高輝度熱電子銃やCバンド加速器による高電界加速、真空封止アンジュレータの詳細を紹介する。加えて、安定なX線レーザーの増幅に必要な器機の高度な安定性についても述べる。

2.1 はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)“SACLA”の加速器は、高輝度の電子ビームを発生および加速するための電子線型加速器と、レーザー光を自発放射から発生・増幅するための光源であるアンジュレータからなる^{1,2)}。諸外国に建設されたり計画されたりしている^{3,4)}XFELと比べて小型化して建設コストを抑え、非常に高い安定性を得ることが装置開発の達成命題になっていた⁵⁾。特に装置の小型化のためには、高輝度電子ビームを発生する熱電子銃⁶⁾およびCバンド加速器システムによる35 MV/m以上の高電界加速⁷⁾、短周期および狭間隙の真空封止アンジュレータ⁸⁾の三種の神器が必要である。この高輝度や高電界加速、短周期・狭間隙が、加速器全長を短くし、アンジュレータによる自己増幅型放射(SASE)における非線形増幅過程のゲイン長を短縮することに大きく寄与する。このことが装置の大きな特徴となっている。加えて、この加速器の構成器機には、ビーム調整を容易にしてX線レーザーを安定に発生させるために、究極とも言ってよい器機の安定度が要求される⁹⁾。それらは、電子銃の輝度や低エミッタンスおよびエネルギー安定性、電子加速用高周波空洞内の電力

・位相安定性や電子ビームの軌道を制御する収束系の電磁石の磁場の安定性、アンジュレータでの電子と発生した光の相互作用を維持するためのアライメントの正確さなどである。本稿では、これらの性能を実現するために開発してきたSACLAの加速器を構成する器機について、その性能も合わせて紹介する。

2.2 装置の概要および目標性能

2.2.1 装置の構成

アンジュレータ光を非線形増幅させX線レーザーにするためには、kAクラスの尖頭電流が必要である¹⁰⁾。現状で可能性のある技術からこのような大尖頭電流を得るためには、限られた平均ビーム電流(電荷)しか出せない電子源からの電子バンチをパルス圧縮して、尖頭電流を増やすしかない。このような考え方から、SACLAでは以下の方法で電子を発生および加速する。電子バンチは、Fig. 1のSACLAの器機構成に示すように熱電子銃に500 kV, 3 μs(FWHM)の高電圧を印加することで真空パイプ中に引き出される。その後バンチ圧縮するために電子バンチは、3 kV, 2 ns幅(FWHM)の高電圧パルスが印加された平

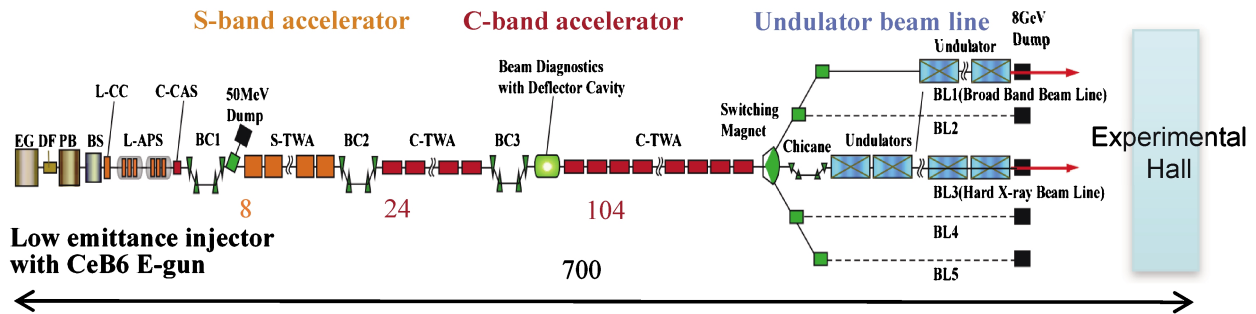


Fig. 1 Layout of SACLA. SACLA comprises a low-emittance injector including a CeB6 500 kV thermionic electron gun (EG), a beam chopper (DF), a sub-harmonic buncher (SHB or PB), an L-band correction cavity (L-CC), L-band alternating periodic structures (L-APS) and a C-band correction accelerating structure (C-CAS), a bunch compressor 1 (BC1), 8 S-band accelerating structures, a bunch compressor 2 (BC2), 24 C-band accelerating structures, a bunch compressor 3 (BC3), 104 C-band accelerating structures and undulator beam lines (BL1 and BL3 with 18 undulators).

行平板電極とコリメータで構成されたビームチョッパーを通して、1 ns (FWHM) 幅のパルスに切り出される。次に電子バンチには、次段の238 MHz サブハーモニックバンチャー (SHB) 高周波空洞内での時間変位電場により速度変調が与えられる。この1 nsの電子バンチ幅は、4.2 ns 周期の高周波の180度の位相空間内に十分に収まるように選ばれたものである。このSHB通過後の電子バンチ(ビーム)は、後段の476 MHz プラスター空洞や1428 MHz (Lバンド) のエネルギーチャープ補正用3次高調波空洞、Lバンド Alternating Periodic Structure (APS) 高周波空洞、5712 MHz (Cバンド) のエネルギーチャープ補正用3次高調波空洞を通過する。その電子ビームのエネルギーとパルス幅は、徐々に加速され1 MeV 位から30 MeV になり、速度変調バンチ圧縮過程により1 ns から10 ps 程度に短縮する。ちなみに、前述のLバンドの補正空洞は、476 MHz 高周波加速電場の2次の非直線性を打ち消して直線に補正するために使用される。またCバンドの補正空洞もLバンド高周波加速電場に対して同様の働きをする。この速度変調過程の最終段階のAPS空洞では、10 ps のバンチに沿って加速エネルギーに対してエネルギーチャープ(変調)が加えられる。これは、電子バンチをLバンド高周波のクレスト位相に対して-22度に乘せて加速することである。このチャープにより、APS空洞後段の4つの偏向電磁石で構成されたシケイン(第1バンチ圧縮器、BC1)の磁気型バンチ圧縮過程で、エネルギーチャープに比例した軌道偏差によりパルス圧縮が行われる。その過程で電子のバンチ幅が10 ps から3 ps になる。その後8本ある2856 MHz (Sバンド) の3 m 加速管により、電子のエネルギーを450 MeV にする。同時に、電子をSバンド高周波位相の-23度に乘せてバンチに沿ったエネルギーチャープを加える。続くBC2によるパルス圧縮でバンチ幅が3 ps から300 fs になる。最終的にSASE増幅に必要な30 fs, 3 kA 尖頭値のバンチ構造を持った電子を生成するためには、後続の24本のCバンド

加速管によりエネルギーを1.45 GeV にする。加えて、5712 MHz (Cバンド) 高周波位相の-48度に乘せてエネルギーチャープを電子バンチに加え、BC3にこの電子を通過させる。以上のバンチ圧縮の終了後に8 GeV の電子のエネルギーを得るためには、約35 MV/m の加速電界が出せる1.8 m のCバンド加速管の104本で加速する。この電子を後続の5 m のアンジュレータの18台で構成されたビームライン(BL3)に通し、X線レーザーを発生する。以上がSACLAの電子加速とX線レーザーの発生過程の概略で、ビームに直接関係した機器の構成である。以上に加えてSACLAには、電磁石で5本のビームラインに加速電子ビームを振り分け5つの実験が可能な余地を持たしている。このことにより将来的には、パルス電磁石による高速のビーム振り分けが可能になれば、幾つかの実験がほぼ同時進行で実施できる可能性もある。

今まで述べた電子の加速や光の発生に直接寄与する装置の他に、SACLAでは電子ビームのエネルギーおよびその安定性を決める重要な装置がある。それらは、後述する加速器のエンジンであるL, S, Cバンドの大電力高周波源や238, 476 MHz の中電力高周波源、それに高周波基準信号を供給する低電力高周波系である。加えて、ビームを直接操作するビーム収束用電磁石の電源も安定性という面では非常に重要である。またアンジュレータ区間において、電子ビームの軌道を電子により発生した光の光軸に合わせるには、1 μm 以下などの十分に安定で高検出精度を持った電子ビームの位置モニターが必要である。このような安定で厳しい検出精度を維持できなければX線レーザーの調整もままならず、レーザーの変動要因すら認識できない。このような装置を陰で支える冷却水や空調などは、機器の温度安定性を決めるので、同様の意味で非常に重要である。見方によっては、これがXFEL装置の安定性を決めると言っても過言ではない。

Table 1 Present parameters of the X-ray and an electron beam of SACLA

X-ray	
Wavelength (Å)	~0.6
Peak Power (GW)	10
Pulse Length (fs)	200~30
Photons per pulse	2×10^{11}
Pulse Energy (mJ)	0.1~0.5
Bandwidth	10^{-3}
Peak brilliance (ph/s/mm ² /mrad ² /0.1% BW)	1×10^{33}
Coherence (transverse)	2D coherent
(longitudinal)	Multimode
Electron Beam	
Energy (GeV)	~8
Charge (nC)	0.2~0.3
Peak current (kA)	~3
Pulse width (fs)	30~70
Normalized Emittance (π mm mrad)	1.4 in X, 1.7 in Y
Repetition rate (Hz)	~60 (Maximum)

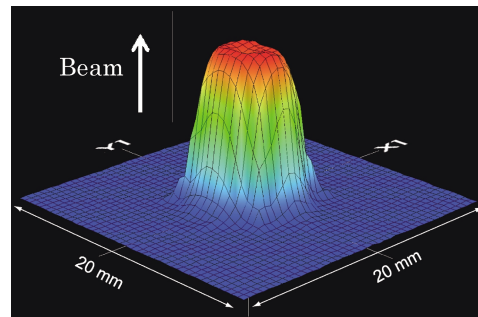
2.2.2 課せられた安定性の目標性能

Table 1に、現状のSACLAの電子およびX線レーザービームの設計値である諸パラメーターを載せる。ここで言うパラメーターを実現するには、約100 mのアンジュレータ区間の有効長70 mで、通過電子により発生する光とそれと相互作用する電子の軌道の重なりを10 μ m以内にすることが必要¹¹⁾。加えて高周波位相・電力安定性は、たとえば入射部のCバンド補正空洞における許容値が最も厳しく、位相の短期ジッタが50 fs (rms) や電力の安定性が 10^{-4} (rms) 以内である¹²⁾。この値を達成する事により、電子銃とチョッパーで作られる1 A, 1 nsの電子バンチを30 fs, 3 kAに圧縮する過程において、この3 kAの尖頭電流を10% (rms) 以内の変動に維持することができる。それは、アンジュレータにおいて発生するSASEのふらつきを10% (rms) 以内に収めることに相当する¹³⁾。この実現のためには、たとえば238 MHzのSHBでは10 mKオーダーの温度安定性が必要で、この事実は試験加速器の経験から判っている¹⁴⁾。このような温度安定性も目標性能の一部として設定された。

2.3 SACLA 構成装置

2.3.1 電子銃

電子銃⁶⁾は、3 mm径で長さ5 mmの6ホウ化セリウム(CeB₆)の単結晶を約1500度に加熱して、それに500 kV, 3 μ s (FWHM)の高電圧パルスを印加することで、高輝度(低エミッタンス)の電子ビームを発生する装置である。**Fig. 2**にはその写真を掲載する。この装置では、**Fig. 3**に示す0.6 π mm \cdot mradのエミッタンスの電子ビームを発生している。このシステムは、後述するCバンド加速ユニット

**Fig. 2** Outlook of the 500 kV, CeB₆ thermionic electron gun.**Fig. 3** Spatial beam profile emitted from the electron gun with an emittance of 0.6 π mm \cdot mrad.

と同様のインバータ電源とパルス変調器(パルスモジュレータ)で50 kV弱の高電圧パルスを生成する。その出力パルスを昇圧トランスに通すことで500 kVのパルスにして、前記の電子銃本体へ印加する。このような高電圧パルス生成機器のCバンド大電力高周波のシステムとの互換やインピーダンス整合のために、電子銃本体と並列にクライストロン類似のダイオード管が疑似負荷として接続されている。

2.3.2 Cバンド高周波加速システム

SACLAのCバンド加速システムは**Fig. 4**に示す物で、全部で64ユニットある。各ユニットは、35 MW, 2.5 μ s (FWHM)幅の大電力高周波を出力するクライストロン(50 MW最大)の1台、真空導波管立体回路、高周波パルス圧縮機SLEDと2本の1.8 m加速管より構成されている。クライストロンの出力は、この立体回路を通してSLEDと加速管に印加される。この35 MW尖頭電力のパルス高周波は、パルスの途中で180度の位相反転がされているもので、これが高周波パルス電力増倍器であるSLEDを通ることで尖頭電力が200 MW(パルス内平均で140 MW)に増倍される。この尖頭高周波電力を2本の加速

管に投入することで、 ~ 35 MV/m の電子の加速勾配を実現することができる。Fig. 5 には、現状で SACLA において達成している各 C バンド加速ユニットの加速電界を加速器の配列に沿って示す。各ユニットのクライストロンは、以下に述べる機器および 350 kV の尖頭電圧を持つ高電圧パルスで駆動されている。まず、50 kV インバータ電源でパルス変調器のパルスフォーミングネットワーク (PFN, L と C の回路ネットワーク) を充電する。続いて、高電圧スイッチであるサイラトロンで充電された PFN 回路を開閉し、約 4 μ s, 25 kV の高電圧パルスを発生させる。その後、出力パルスを昇圧トランスへ通すことで 350 kV パルスが生成される。このシステムの特徴は、C バンド加速空洞を使用した高い加速勾配と高周波位相・電力安定性で、要求される安定度は既に述べたものである。この大電力システムでこのことを実現するための肝となるのは、50 kV インバータ電源の電圧安定度である。それ

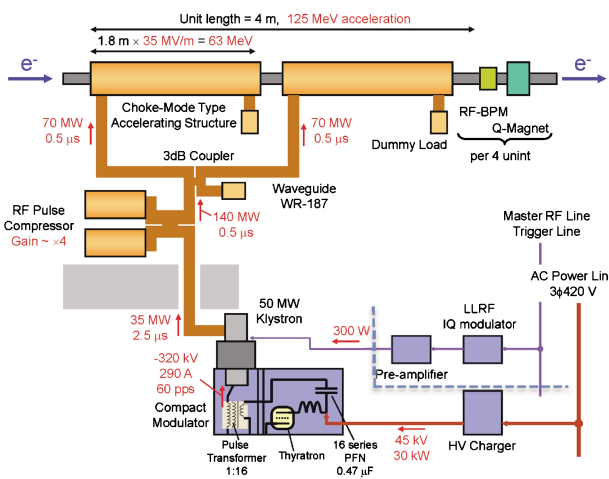


Fig. 4 Schematic diagram of the C-band accelerator system (one unit). The system comprises 2 C-band accelerating guides, high-power waveguide components, a 50 MW klystron with a 2.5 μ s rf output pulse width, a pulse modulator and a high-voltage inverter power supply.

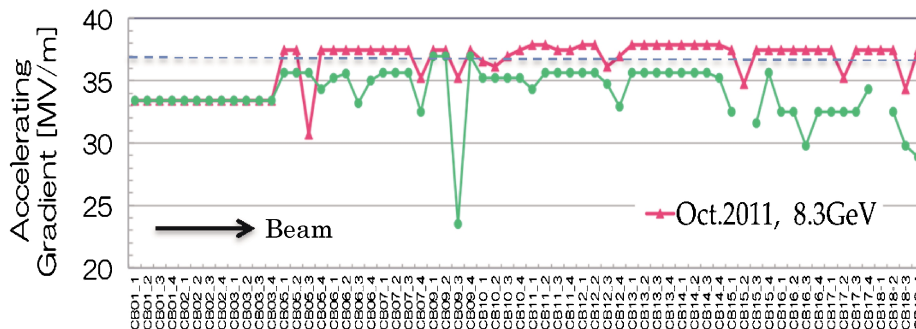


Fig. 5 Acceleration electric-field gradient of all the C-band units along the SACLA accelerator. Electric-field gradients of almost all the C-band units after BC3 reach values of more than 37 MV/m. The red line with the solid triangle dots shows the case at a beam energy of 8.3 GeV and the green line with the solid round dots shows the case of 7 GeV. The blue dots line is a value of 37 MV/m.

は、この電圧値がクライストロン管内の電子の加速電圧 (速度) を決定し、その変動が発生する高周波電力値および位相の変動に直結するからである。要求される高周波電力・位相安定度を実現するためには、この充電電圧の安定度は 100 ppm (p-p) を十分に下回るものでなければならない。これを実現するために開発されたインバータ電源の電圧安定度を Fig. 6 に示す。それは 1 分間で 6.7 ppm (rms) の短期電圧変動に達している⁷⁾。

2.3.3 タイミング・低電力高周波システム

タイミング・低電力高周波システムは、加速空洞を駆動するために時間基準高周波であるサイン波の信号を分配することや時間基準に同期したトリガーパルスの分配、ポン

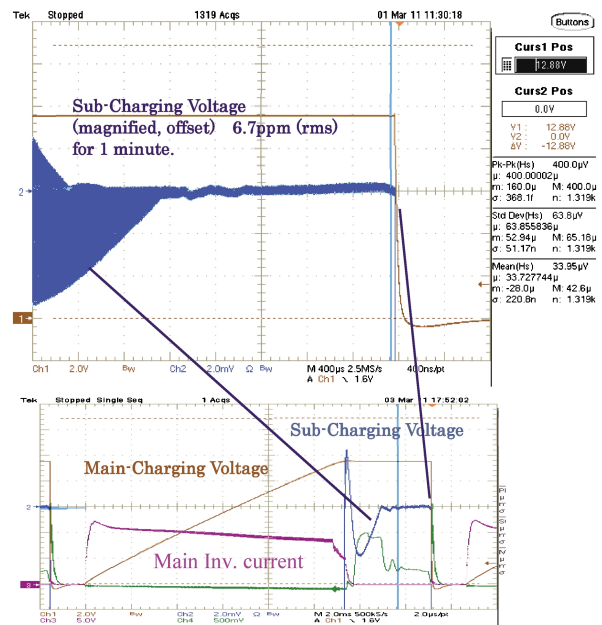


Fig. 6 Voltage stability of the inverter power supply. The stability is 6.7 ppm in rms for 1 minute. The upper “a” drawing shows the magnified amplitude and time scales case. The lower “b” shows the reduced amplitude and time scales case.

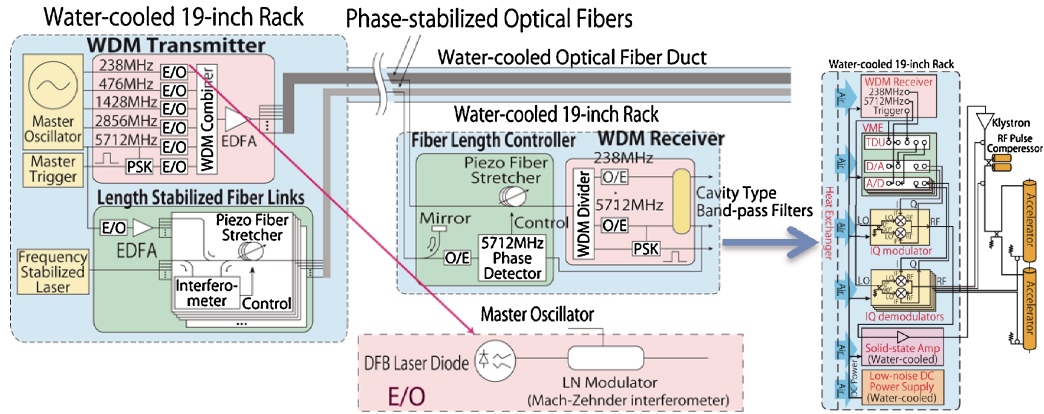


Fig. 7 Configuration of the SACLA LLRF and timing system. The system comprises a master rf and trigger part, an optical rf and timing signal transmission part and a LLRF and timing part for driving the klystron and a DAQ system for an rf and an experiment.

プ・プローブ実験用チタンサファイヤレーザーのモードロック同期信号を供給する。このシステムが、SACLAのX線レーザーの安定性やポンプ・プローブ実験の時間精度を決めている。2.2.2で述べた高周波の位相・電力安定性を満足するために、本システムを構成する非常に低ノイズな特性を持つ個別装置を開発した。このシステムの不安定性につながるの、主に短期のものは集積回路などの高周波半導体素子の熱雑音、ショットノイズ、DC電源のACリップルおよびノイズ、クライストロン高電圧パルスモジュレータなどからの外来ノイズなどが考えられる。このうち熱雑音およびショットノイズは、要求性能を満足する素子を選択することで、2.2.2の要求性能を満たすことが出来る。このため本システムでは、要求性能実現のために、電源の低ノイズ・低リップ化および外来ノイズに対するシールド（アイソレーション）の強化、信号伝送への差動や同期検波方式の採用による耐ノイズ性の向上を行った。

SACLAのタイミング・低電力高周波システムの概要をFig. 7に示す¹⁵⁾。このシステムは、最初にマスターのオシレータおよびトリガー部で低ノイズの高周波時間基準信号やパルスが発生する。その信号を光変換し、続くシングルモード・位相安定化光ファイバーにより伝送する。伝送された信号やトリガーパルスは、前記した238, 476, 1428, 2856, 5712 MHzの空洞群、ビームモニターシステムのデータ収集装置、実験用検出器およびデータ収集装置、ポンプレーザーなどの端末機器の同期駆動や機器の起動を行う。端末機器へ光ファイバーによって送られた基準高周波およびパルス信号には、おのおの、光・電気変換された後にIQ (In-phase and quadrature) 変調・検出手法やデジタル遅延装置により、高周波位相・電力の制御およびパルスの遅延が加えられる。以上の信号伝送の品質劣化は、マスターオシレータからのノイズが前記の伝送過程においてどの程度増加するかで決まる。Fig. 8には、マスターオシレータ (MOSC) の5712 MHz キャリア信号の側波帯ノイズが、光ファイバー伝送および続くIQ変調後にどの程

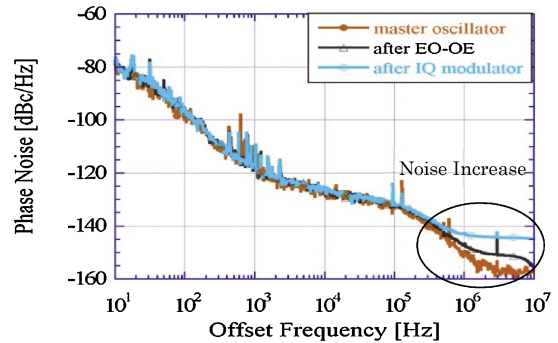


Fig. 8 Comparison among the noise values of the MOSC, after 400 m optical signal transmission, and of the IQ-modulator output. The integration value of noise increase depicted by the black circle on the graph corresponds to a time jitter of ~10 fs.

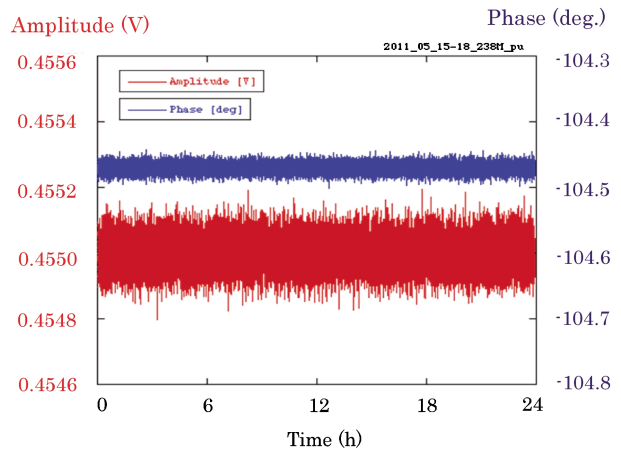


Fig. 9 Phase and amplitude stabilities of the 238 MHz SHB. The phase stability is 0.0067 deg. in rms and the amplitude stability is 1×10^{-4} in rms for 24 hours.

度増加するかを示す。このデータから、我々の開発した本システムにおいては、僅か10 fs程度の時間ジッタ

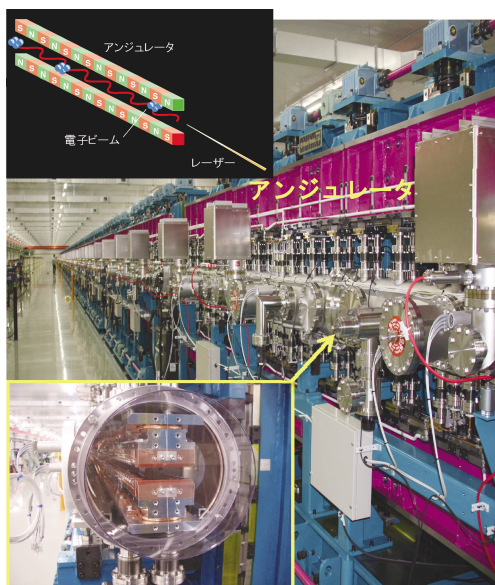


Fig. 10 18 undulators along the BL3 of SACLA.

に相当するノイズが MHz 領域のみで増加するにとどまっていることがわかる。加えて、Fig. 9 には、SACLA の低電力高周波システムで駆動された 238 MHz SHB 空洞の高周波位相・電力安定度を示す。そのデータは、短期・長期の位相変動が 0.0067 度 (rms)，電力変動が 1×10^{-4} (rms) に達しており、2.2.2 で示した要求値を満足している。

2.3.4 アンジュレータ

アンジュレータは、Fig. 10 に示すような一定間隔で N, S の順で交互に極性を変え並べた永久磁石列を上下に配列した装置である。この上下の磁石列の間隙に電子ビームが通過することで、磁極の周期間隔で相対論的な電子が蛇行を繰り返して光（自発放射）を発生する。この過程で発生する光の波長 λ_n は、ドップラー効果とローレンツ収縮により、電子の前方で蛇行の周期に比べて著しく短縮している。具体的には次式で与えられる¹⁶⁾。

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

ここで λ_u はアンジュレータ磁場の周期長であり、 γ は電子ビームのローレンツ因子である。また、 K は偏向定数と呼ばれるパラメーターであり、次式で与えられる。

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi mc} \quad (2)$$

ここで B はアンジュレータの磁場強度、 e は電子の電荷、 m は電子の静止質量、 c は光速である。X 線レーザーを生成するためにアンジュレータ中で SASE を増幅するため

Table 2 Parameters of the SACLA undulator

Magnet Structure	Hybrid Type
Permanent Magnet Material	NdFeB
Length (m)	5
Period Length (mm)	18
Number of Periods	277
Number of Undulators for BL3	18
Minimum Gap of Magnet (mm)	3.5
Maximum K value	2.2
K at 0.12 nm, E = 7 GeV	1.8

には、自発光を発生する電子の前方の電子群を発生する光の波長単位で集群させる必要がある。この集群は、アンジュレータの周期磁場により蛇行する前方電子が、自発光（遅延ポテンシャル）の横方向電場により加減速されることで達成される。この加減速の過程を通して電子が集群し、SASE の自乗の非線形増幅（発振）が起こる。SACLA では、より低い電子エネルギーで X 線レーザーの発振を実現するために、短周期でも十分な磁場強度が得られる真空封止アンジュレータを採用している。これは高加速勾配を実現する C バンド加速管とともに、XFEL 装置の小型化のために必須の技術である。Table 2 には、SACLA のアンジュレータの定数を掲載する。現在、SACLA の光源棟のビームライン 3 (BL3) には、Fig. 10 に示すような全長 5 m の真空封止アンジュレータが 18 台設置され、 $\sim 0.6 \text{ \AA}$ の X 線レーザーの発生を担っている。このアンジュレータの磁石列の最低間隙は 3.5 mm で、周期長は 18 mm、最大の K 値は 2.2 である。間隙は可変 (3.5 mm 以上) で、間隙長に応じて B の強度が変わり K 値が変わるので発生する光の波長も可変となる。磁石の物質はネオジウム Nd, 鉄 Fe, ボロン B で、磁石を超高真空中に挿入するために窒化チタンのコーティングが表面に施されている。

真空封止アンジュレータではその構造上、従来の方式に基づく磁場測定が不可能であるため、真空槽設置後に磁場性能を確認できない。このため、真空封止アンジュレータの一般的な製造過程では、真空槽を設置する前に磁石列のみを架台に設置した状態で磁場測定を行った後、一旦磁石列を撤去してから真空槽を設置する。アンジュレータの磁場は上下磁石間隙に極めて敏感であるため、磁石列を脱着する過程において磁場性能が劣化する可能性は否定できない。しかしながら、真空槽設置後は精度の高い磁場測定は不可能であり、この性能劣化を確認することは困難であった。我々はこの問題を解決するため、新たな原理に基づく磁場測定手法を考案し¹⁷⁾、これを SACLA 用真空封止アンジュレータに適用した。この結果、Fig. 11 に示すように、真空槽設置（磁石列脱着作業）前後で位相誤差と呼ばれる磁場性能を表すパラメーターが劣化していることを確認した。一方でこの劣化の要因が、磁石列の位置再現性にあることが、磁場データを解析することにより明らかとな

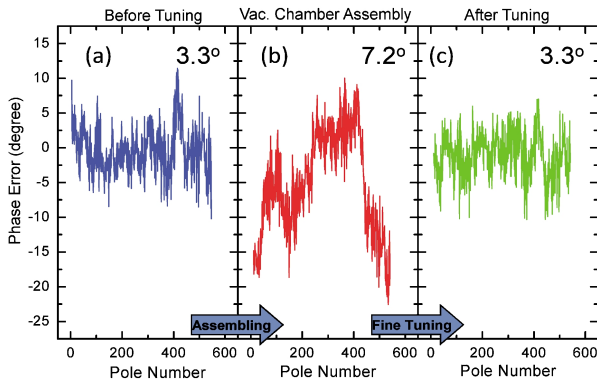


Fig. 11 Undulator phase-error profile (a) before and (b) vacuum chamber assembly, and (c) after fine tuning.

った。このため、磁石列を保持する駆動系を微調整し、元の磁場性能を回復することを確認した。ここで述べた手法はSACLAの全アンジュレータに適用されている。

2.4 まとめ

いままで述べてきた我々が開発した装置群を使用したSACLAは、XFELで世界最短波長となる $\sim 0.6 \text{ \AA}$ のレーザー光の発振を2011年に達成した。全長は、700 m程度で米国のLinac Coherent Light Source (LCLS)や建設中のErvo-XFELの1500 m位の長さと比較して短く、それらの施設のレーザーの波長より短いものとなっている。加えてSACLAのX線レーザーの安定度は、単純な加速空洞の高周波位相・電力帰還制御や、アンジュレータビームライン入り口の電子ビーム軌道を固定する帰還制御のみで、2日以上レーザー発振の維持が 1.2 \AA の光で可能となっている。これらの値は、SACLAにおいて先に述べた装置の設計思想を実現した賜で、我々の要求性をほぼ満足するものとなっている。

今後のSACLAの高度化であるが、セルフシーディングなどの技術によるX線レーザーの縦干渉性の向上がある。SASE光は、時間方向の縦干渉性が波長幅で 10^{-3} 程度(FWHM)で通常レーザーより1桁程度悪い。この値を通常レーザーと同程度の 10^{-4} 程度(FWHM)にするためには、セルフシーディングの手法を使う。それは、アンジュレータからの光を一旦モノクロメーターを通して単色化し、それを種光として後続のアンジュレータでレーザーの増幅を行う。この手法の詳細は、紙面の関係もあり述べられないので他の文献を参照して頂きたい¹⁸⁾。

参考文献

- 1) T. Tanaka and T. Shintake, (Eds.): SCSS X-FEL Conceptual Design Report, (2005).
- 2) H. Tanaka: Proc. of the 8th annual meeting of PASJ, (2011).
- 3) J. Arthur et al.: Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report, SLAC-R593 Stanford (2002).
- 4) M. Altarelli et al. (Eds): XFEL: The European X-Ray Free-Electron Laser, Technical Design Report. Preprint DESY 2006-097, (DESY Hamburg, 2006).
- 5) T. Shintake et al.: *Nature Photonics* **Vol. 2**, 555-559 (2008).
- 6) K. Togawa et al.: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10**, 020703 (2007).
- 7) T. Inagaki et al.: Proc. of IPAC11, 104-106 (2011).
- 8) H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* **7**, 121-130 (2000).
- 9) Y. Otake: Proc. of the 8th annual meeting of PASJ, (2011).
- 10) E. L. Saldin et al.: *The Physics of Free Electron Lasers*, Springer Berlin, (1999).
- 11) T. Tanaka et al.: *Nucl. Instrum. Meth., A* **528**, 172 (2004).
- 12) H. Tanaka et al.: Proc. of the 4th annual meeting of PASJ, 613-615 (2007).
- 13) H. Tanaka et al.: Proc. of the 4th annual meeting of PASJ, 610-612 (2007).
- 14) H. Maesaka et al.: Proc. of EPAC08, 1404-1406 (2008).
- 15) Y. Otake et al.: proc. of ICALEPCS07, 706-710 (2007).
- 16) 田中隆次ほか: 加速器, Vol. 5, No. 1, 3-12 (2008).
- 17) T. Tanaka, T. Seike, A. Kagamihata, T. Schmidt, A. Anghel, M. Bruegger, W. Bulgheroni, B. Jakob and H. Kitamura: *Phys. Rev. ST-AB* **12**, 120702 (2009).
- 18) G. Geloni, V. Kocharyan and E. Saldin: DESY 10-053 (2010).

● 著者紹介 ●



大竹雄次

チームリーダー

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
・加速器研究開発グループ・基盤光源
チーム

E-mail: otake@spring8.or.jp

専門: 加速器研究, マイクロ波工学

【略歴】

1976年, 高田工業高校卒業, 1976年,
高エネルギー物理学研究所・技官,
1988年, スタンフォード線型加速器セ
ンター(米国)・技師, 1991年, 技術部
係長, 1996年, 東京大学・助手, 1997
年, 論文博士(工学), 総合研究大学院
大学, 2002年, 文部科学省在外研究員
(ロシア・ドイツ), 2004年, 理化学研
究所・前任研究員, 2007年, XFEL建
設グループ・タイミング高周波チーム
リーダー, 2011年, 現職。

2. Hardware of Accelerator

Yuji OTAKE^{1,2}, Noriyoshi AZUMI^{1,2}, Hideki AOYAGI², Takao ASAKA^{1,2},
Yoshihiro ASANO¹, Teruhiko BIZEN^{1,2}, Hiroyasu EGO^{1,2}, Kenji FUKAMI^{1,2},
Hirofumi HANAKI², Toru HARA^{1,2}, Teruaki HASEGAWA^{1,2},
Naoyasu HOSODA², Takahiro INAGAKI^{1,2}, Shinobu INOUE³, Toshiro ITOGA²,
Hiroaki KIMURA^{1,2}, Toshiaki KOBAYASHI², Chikara KONDO^{1,2},
Hirokazu MAESAKA^{1,2}, Xavier MARECHAI², Shinichi MATSUBARA²,
Sakuo MATSUI^{1,2}, Nobuteru NARIYAMA², Takashi OHSHIMA^{1,2},
Tatsuyuki SAKURAI^{1,2}, Takamitsu SEIKE^{1,2}, Katsutoshi SHIRASAWA⁴,
Shinsuke SUZUKI², Sunao TAKAHASHI^{1,2}, Hideaki TAKEBE^{1,2},
Takashi TANAKA^{1,2}, Kazuaki TOGAWA^{1,2}, Hiromitsu TOMIZAWA^{1,2},
Chao ZHANG², Shukui WU², Kenichi YANAGIDA², Tsumoru SHINTAKE⁴,
Hideo KITAMURA^{1,2}, Noritaka KUMAGAI²

¹RIKEN, Harima Institute, RIKEN SPring-8 Center,

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-Gun, Hyogo 679-5148, Japan

²Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI),

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-Gun, Hyogo 679-5198, Japan

³SPring-8 Service Co., Ltd, 1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo 679-5165, Japan

⁴Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST),

1919-1 Tancha, Onna-son, Kunigami-gun, Okinawa, 904-0495, Japan

Abstract This paper describes instruments of the X-ray free-electron laser "SACLA" generating light with the world-shortest wavelength of 0.06 nm. The cost-effective method to reduce a machine length by using a high-brightness thermionic electron-gun, a C-band accelerator using a high-acceleration gradient and an in-vacuum undulator is especially explained. Furthermore, the extreme stability of the accelerator instruments to realize stable lasing is mentioned.
