

X線自由電子レーザー概論

1. はじめに

最初に行われるこの講義は、X線自由電子レーザー（以下、XFEL）の加速器物理と要素技術を主眼とした今回の加速器セミナーの導入に当たる。本講義は参加者にXFELの全体像を与え、引き続き講義の中で取り扱われるサブシステムが、全体の中でどのような役割を担うのかの理解を助ける最低限の情報を与える事を目標とする。故に、ここでは、個別の事項に深く踏み込まず、精度の高い定量的な議論は行わない。

2. XFEL 登場の背景

2.1. 科学的必要性の高まり

XFEL 利用への期待は、放射光光源の進化と共に大きくなっていった。図1に放射光光源の輝度に直結する自然エミッタンスの性能向上の歩みを示す。1990年代に入って第三世代高輝度光源が出現し、高輝度、かつビームの軌道面に垂直な方向のコヒーレンスが高いX線が利用可能になり、精密な構造解析や電子状態と機能との相関が議論できるようになってきた。そして飛躍的に向上したX線のコヒーレンスを用いた様々な可能性も検討されるようになっていった。一例として

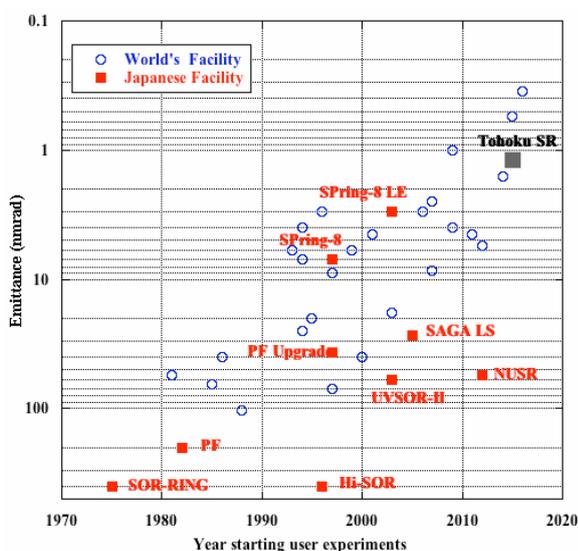


Fig.1 放射光源の進化

SPring-8 で行われた X 線の Coherent Diffraction Imaging (CDI) 実験 [1]を挙げることにする。この研究成果は、コヒーレント X 線による生体試料等の非結晶サンプルのナノレベルでの 3 次元構造解析の可能性を示した。電子顕微鏡では見ることのできない内部の構造まで X 線の透過性により観察でき、幅広い応用が期待される手法の一つである。

Low Momentum Compaction 運転[2]やレーザーライミング技術[3]等により、短パルス X 線の利用も可能になり、これまで観測できなかった高速の現象が、再現可能という制限付きではあるが観測できる道が開かれ始めた。

これらの測定は、既存の放射光源を利用する限り様々な理由で利用できる光量や観測対象が厳しく制限され、観測手法として一般に広く普及するには至っていない。しかし、既存の放射光光源を用いたこれらの先駆的な R&D は、コヒーレント短パルス光源への期待を徐々に高めていった。

2.2. 加速器技術の進歩

1980 年代に SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission; 自己増幅自発放射) という原理[4]が提案され、シングルショットの FEL により X 線領域でのレーザー生成の可能性が示された。しかし、現実的な長さのアンジュレータラインと電子ビームエネルギーを用いて SASE による十分なレーザー増幅利得を得るには、高い電子ビーム輝度(低エミッタンスかつ kA を超えるピークビーム電流)が必要である。当時の最大の課題は、これを可能とする超低エミッタンス電子銃の開発であった。1985 年に LANL で始まった光カソード RF 電子銃の R&D[5]は、(i) 光カソードで高密度・短パルス電子ビームを生成、(ii) 高い加速勾配でこのビームを一気に数 MeV 以上まで加速し、空間電荷効果によるエミッタンス劣化を抑制するという明快なコンセプトが人々に理解され、世界中で急速に開発が進められていった。その結果、光カソード RF 電子銃の性能は着実に向上し、BNL/SLAC/UCLA の共同研究[6]で開発された銅光カソード RF 電子銃 (1.6 セル S バンド) を改

良することで LCLS (Linac Coherent Light Source) の目標性能 ($1\pi \mu\text{mrad}@1\text{nC}$) に到達できる見通しが得られるに至った[7]。DESY でも量子効率の高い Cs_2Te をカソード材とし、UV 駆動レーザーを組み合わせた光カソード RF 電子銃 (1.5 セル L バンド) により目標性能 ($1.4\pi \text{mrad}@0.5\sim 1\text{nC}$) を達成できる見込が 2005 年頃には得られるようになった[8]。

2.3. XFEL の特徴と期待されるサイエンス

SASE 型の XFEL は、図 2 に示す様に従来の放射光に比べ (i) 空間干渉性がほぼ 100%、(ii) ピーク輝度が桁違いに高い (設計性能比較では SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LASer) が SPring-8 の 10 億倍)、(iii) パルス幅が桁違いに短い (設計性能比較では SACLA が SPring-8 の 1/1000 以下) という特徴を有する革新的な光である。今後、以下の例のようなサイエンスの開拓が期待されている。

精密構造解析から精密ダイナミクス解析へ：XFEL では、その高いピーク輝度と短パルス性の利点を活かし、動的な現象を数フェムト秒の時間スライス、且つ高い空間分解能で見ることが出来る。これにより今まで始状態と終状態から予測していたダイナミクスの直接観測が期待される。

対象特性の直接観測へ：従来の放射光利用においては、結晶 (3 次元の周期構造) を用いて、その構造を調べ、計算機シミュレーションを援用する

ことにより、機能、物性、反応等の特性の予測を行ってきた。XFEL の高い空間干渉性を活用し、結晶という特別な状態をとらない試料においても、機能発現環境下での構造変化の直接観測が期待できる。

極端環境下でのサイエンス：XFEL は非常に高いピークパワーがその特徴である。これを微小空間に集光すると $10^{20} \text{W}/\text{cm}^2$ を超える高いパワー密度の利用が可能である。これを用いて極限環境下での新たなサイエンスが可能になると期待される。

3. 電子ビームに要求される性能

3.1. SASE 型 FEL のレーザー増幅

SASE によるレーザー増幅を図 3 に模式的に示す。アンジュレータ軸上放射での基本波 (共鳴波長) は、電子の相対エネルギー γ とアンジュレータ周期長 λ_u 、アンジュレータの偏向パラメータ K で (3.1)式のように表される。

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad (3.1)$$

$$K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi m_e c}. \quad (3.2)$$

ここで、 e , B_0 , m_e , c はそれぞれ、電子の電荷、アンジュレータのピーク磁場、電子の質量、光速を表す。この波長を有するレーザー場に対し、各電

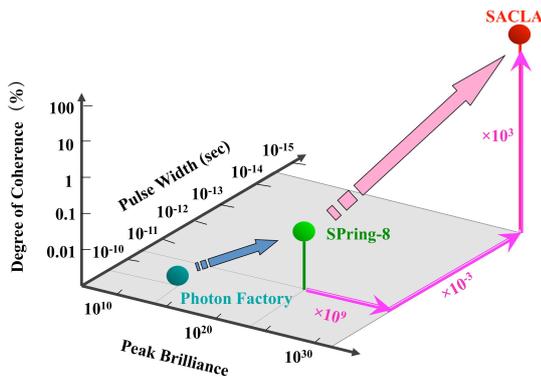


Fig. 2 XFEL の特徴

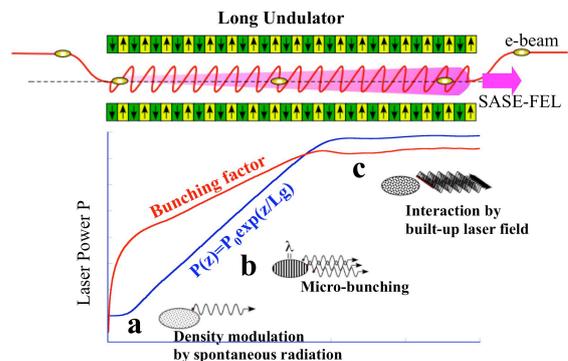


Fig. 3 SASE による FEL の増幅過程

子の蛇行の位相は固定される。これをレーザー場の作るポテンシャルに捕捉されると表現する。高輝度 (低エミッタンス且つ高ピーク電流) 電子ビームの自発放射が種となり電子ビームに微小なエネルギー変調が発生すると、レーザー場との位相が固定されているので、エネルギー変調は次第に強調されていく (図3の a)。

アンジュレータ内の軌道長のエネルギー依存性を介して、エネルギー変調を生じない安定点に向かって電子が集まっていくので、エネルギー変調は密度変調 (マイクロバンチング) へと転換される。密度変調が生じると、自発放射光にコヒーレント放射が加わり強度が増し、密度変調はさらに強調されるよう正の帰還が掛かる。電子とレーザー場のエネルギー交換はレーザー場の振幅を変調し、ポテンシャルの位相ズレを引き起こす。この振幅変調は、安定点に向かって集まってきた電子ビームを僅かに減速位相側へシフトさせるので、レーザー場は電子ビームのエネルギーの一部を受け取ることができる。このエネルギー交換にも正の帰還が掛かるので、レーザー出力は指数関数的に増大 (図3の b) する。まさに誘導放射と等価な増幅過程が展開されるのである。

電子ビームは、発達したレーザー場との相互作用を繰り返し、電子ビームのエネルギー広がりが増大、輝度が低下していく。また、強大となったレーザー場による過大な変調により、一部の電子は減速位相からこぼれ落ちるようになる。結果的にネットの増幅利得が低減し、レーザー出力が頭打ちとなる出力飽和 (図3の c) の状態に達する。

上で述べた“誘導放射過程”を効率的に行うには、形成された密度変調を保持できる電子ビームの角度広がりが必要である。また、電子ビームの密度が高いほど増幅効率が高いことも定性的には理解できるであろう。これらは、次に定量的に示される。

3.2. 増幅利得と電子ビーム特性

SASE の増幅利得の大きさは、レーザー出力が e (~2.72) 倍となるのに必要なアンジュレータの長さ (周期数) で一般的に定義され、これをゲイン

長と呼ぶ。高い増幅利得が得られれば、ゲイン長は短くなり、レーザー出力の飽和に到るアンジュレータの全長は短くなる。一次元近似によるゲイン長 L_{IG} は、電子ビーム特性とアンジュレータパラメータで

$$L_{IG} = \frac{\lambda_u}{4\sqrt{3\pi\rho}} \quad (3.3)$$

と書ける[9]。ここで ρ は FEL パラメータ[4]と呼ばれ

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{K\lambda_u\omega_p}{8\sqrt{2\pi c}} F \right)^2 \quad (3.4)$$

$$\omega_p = (4\pi c^2 r_e n_e)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$F = [J_0(\Lambda) - J_1(\Lambda)], \quad \Lambda = \frac{K^2/4}{1+K^2/2} \quad (3.6)$$

と表される。 ω_p はプラズマ角周波数、 n_e は電子の個数密度、 r_e は電子の古典半径 (2.818×10^{-15} m)、 J_n は次数 n のベッセル関数である。これから SASE の増幅利得はピーク電流の 1/3 乗に、エミッタンスの -1/3 乗に比例することが分かる。

図4に(3.3), (3.4)式を使い 0.1 nm のレーザー波長に対して計算した FEL パラメータと1次元ゲ

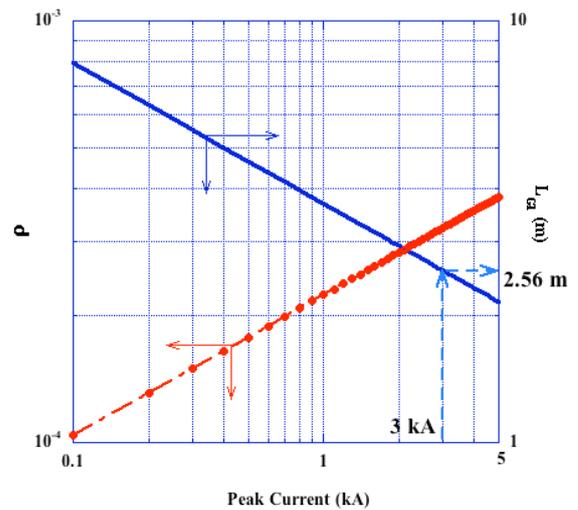


Fig. 4 FEL パラメータとゲイン長のピーク電流依存性

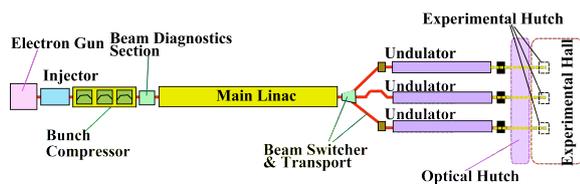


Fig. 5 XFEL の基本システム

イン長を示す。計算では電子ビームとして、エネルギー 8 GeV、規格化エミッタンス 1π mmmrad、アンジュレータとしてヘリカル ($F=1$)、 $K=1.85$ 、 $\lambda_u=18$ mm、平均ベータトロン関数 30 m を用いた。出力飽和が得られるアンジュレータの長さは、ゲイン長の 20~25 倍となるので、エネルギー広がり の効果が入らない次元近似かつヘリカルアンジュレータを仮定した条件でも 50~65 m 程度のアンジュレータ長が必要になることが分かる。SASE XFEL の 3 次元シミュレーションによれば、XFEL に必要な電子ビーム特性はおおよそ、(i) 規格化エミッタンス 1π mmmrad 以下、(ii) スライスエネルギー広がり $\sim 10^{-5}$ 、(iii) ピーク電流 3 kA 以上、(iv) 最終加速電荷 ~ 1 nC である。

4. XFEL システム

4.1. 基本システム構成

図 5 に XFEL の基本システムを模式的に示す。加速器は、加速効率の高い円形加速器ではなく、直線加速器が用いられる。円形加速器では、エネルギー広がり とエミッタンスは偏向電磁石のシンクロトロン放射による放射励起と放射減衰の動的平衡[10]で決まり、それらはエネルギーの 2 乗で大きくなる。一方、線形加速器では、基本的に加速は進行方向の運動量のみを全ての電子ビームに均等に与えるので、エネルギー広がり とエミッタンスはエネルギーに反比例し、加速とともに減少する。このようなビーム性能の違いから、XFEL で必要となる、(i) 十分高エネルギーで (ii) エネルギー広がり が小さく、(iii) 低エミッタンスの高輝度電子ビーム (6 次元位相空間における電子ビーム密度が高い) を得るため、線形加速器システムが採用されている。

このシステムには、最上流部に高輝度電子源があり、目標のレーザー増幅利得を可能にする高品質電子ビームを供給する。必要なビーム性能は、最終ビームエネルギーやアンジュレータのパラメータ等で決定される。

その下流に位置する入射器は、電子銃からの電子ビーム特性により省略可能である。SACLA では電子源出口での電子ビームは 1 ns と長く、ビーム電流も 1 A と低い。このため、第 1 バンチ圧縮器の L バンド加速システムで効率的に電子ビームを捕捉できるようにバンチャー、収束レンズやコリメータ等から構成された入射器を必要とする。

電子ビームの輝度を目標値まで引き上げるためのバンチ圧縮システムでエミッタンスを悪化させないようにビーム電流を引き上げる。一般的にはオフレスト加速と電磁石シケインで構成される磁気バンチ圧縮が用いられる。圧縮完了後の電子ビーム品質を確認するために専用の診断ステーションが設けられる。

圧縮された電子ビームは主加速システムにより最終ビームエネルギーまで加速される。最終ビームエネルギーまで加速された電子ビームは振り分け電磁石でビームラインに振り分けられ輸送系によって各アンジュレータラインに導かれレーザーを生成する。

レーザーは光学ハッチにてショット毎に診断・加工され、下流の実験ハッチにてサンプルに照射される。

4.2. LCLS のシステムとアプローチ[7]

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 を実現する戦略をとった。2006 年に入射器の建設に着手して以降、線型加速器の改造、バンチ圧縮器の設置、アンジュレータの設置などを段階的に進め、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。

LCLS は、全長約 3 km (2 マイル) の線型加速器の上流から約 2 km 地点に、XFEL で必要となる高

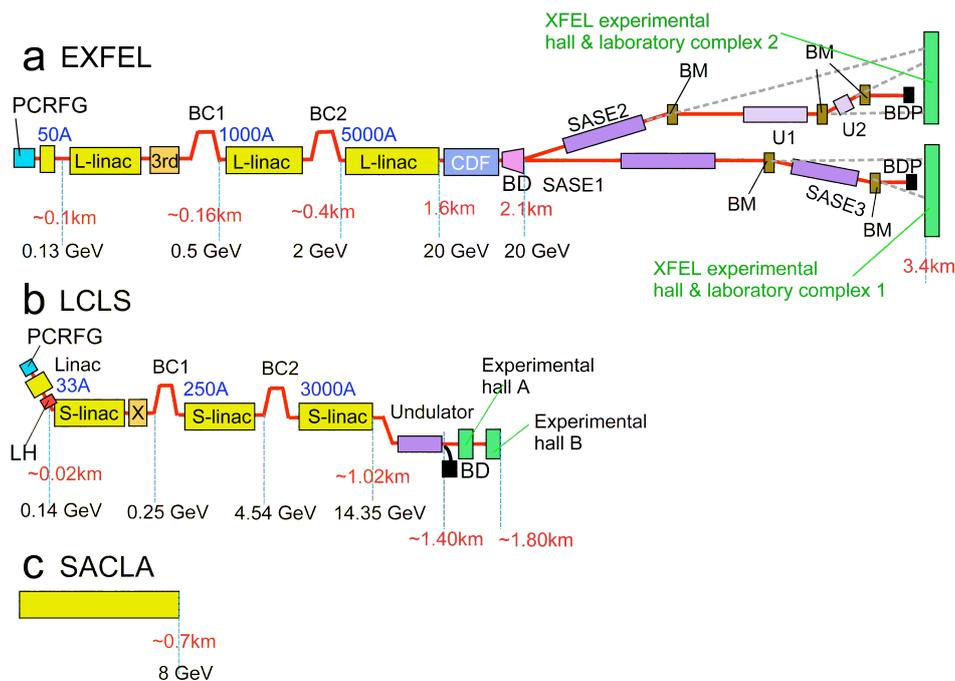


Fig. 6 EXFEL と LCLS のシステム構成

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低エネルギー部を新たに設置し、エネルギー135 MeV、ビーム電流 33 A、電荷 250 pC、スライスエミッタンス 0.4π mmmrad の高輝度電子ビームを図 6-b 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[11]。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する X バンド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、固定ギャップアンジュレータ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) へ輸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。

4.3. Euron XFEL(EXFEL)のシステムとアプローチ[14]

EXFEL は、リニアコライダーの要素技術である超伝導 L バンド加速システム(加速周波数 1.3 GHz)開発のための試験施設 (TESLA Test Facility; TTF) としてスタートした。その後、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[15] (Free electron LASer in Hamburg) へと続き、現在の EXFEL 至っている。

液体 He レベルの超伝導技術を基盤とするため、施設規模を大きくする要素が多いが、超伝導の特徴を生かしロングパルスレインによる 10 Hz のバーストモード (200 ns 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) 運転が可能である。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。EXFEL 計画は、コストパフォーマンスを度外視し、他では決してできない「究極の光源」を目指しているように感じられる。

EXFEL の模式図を図 6-a 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、その殆どの部分が地下トンネル内に設置される。建設コストを抑えるためにトンネルが狭くメンテナンス性も良好とは言えない。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 電子銃を用いて生成するが、違いは光カソードとして量子効率の高い Cs₂Te[16]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した。この電子ビームは LCLS 同様、バンチ長が十分短いので直接 L バンド超伝導加速システムで加速できる。電流値 50 A、電荷 1 nC、規格化エミッタンス 1.4π mmmrad 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ている。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予定である。

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、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 (ホールではない)、二つの実験ホールに 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。

4.4. SACLA のシステムとアプローチ

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、多数の施設が建設可能なコンパクトかつ高性能の XFEL 施設を実現するというものだ[17]。このため、(i) 短周期真空封止アンジュレータを採用し、電子ビームエネルギーを下げ、アンジュレータ長を短縮、(ii) 常伝導 C-バンド高勾配加速システムにより加速器を短く、そして (iii) このシナリオを成立させるための低エミッタンス電子ビームを生成する CeB₆ 単結晶カソードパルス熱電子銃を開発した[18]。もう一つの特徴は、安定性への徹底的な拘りである。ピーク性能が素晴らしくとも不安定ではその性能を利用しきれない。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施した[19]。

図 7 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。最上流部 A は入射器である。500-kV 単結晶カソードパルス熱電子銃は、低エミッタンス電子

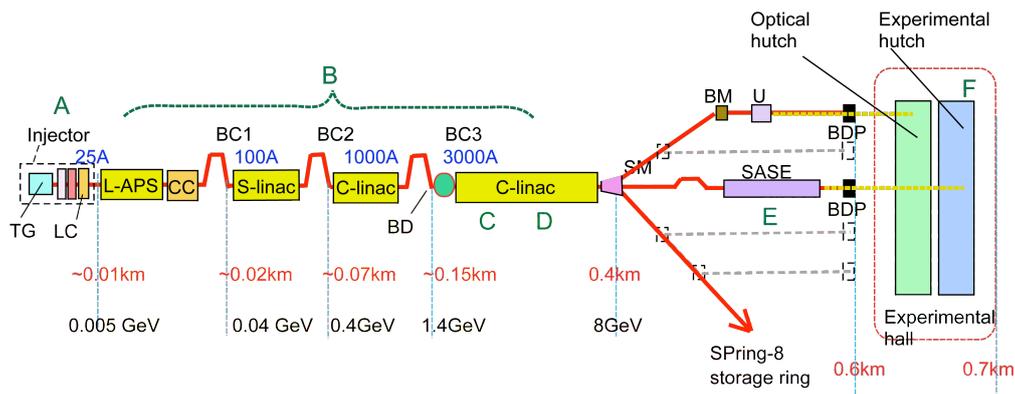


Fig. 7 SACLA のシステム

ビームを、最大 60 pps で生成する。約 $2 \mu\text{s}$ の一様円柱ロングビームは、エミッタンスを保存したまま、静磁場とパルス電場によるチョッパーで 1 ns で切り出される。その後、磁気レンズとデュアル RF ポテンシャルを用いた速度変調バンチング部で電子ビームを進行方向に約 20 倍圧縮する。速度変調バンチングの非線形性を制御する L バンド補正空洞も入射器最終段に設置されている[20]。

バンチ長に合わせ L、S、C バンドと順次周波数が高くなる 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 (B) がその後続く。1 段目の磁気シケイン上流部には、初期のロングバンチに補正逆チャープをインプリントし、圧縮とともに逆チャープを強調させ、主加速器と同じ周波数で効率的にバンチ圧縮過程の非線形チャープを補正する C バンド補正加速管 (この方式はオーバー補正法と呼ばれる) が設置されている[21]。BC3 の直下流には、フル圧縮された電子ビームのエミッタンス、並びにピーク電流が評価できる診断部が設けられ、C バンド RF ディフレクター[22]が配置されている。

BC3 出口での電子ビームエネルギーは約 1.4 GeV である。ビーム電流が 3 kA を超える高密度電子ビームは C バンド主加速システム (C: 全長 $\sim 250 \text{ m}$ 、104 本の 1.8 m 加速管、運転時の最大平均加速勾配 $\sim 38 \text{ MV/m}$) [23]により 8 GeV (最大 8.5 GeV) の目標エネルギーまで加速される。途中の 3 GeV 地点に、暗電流除去用の小型シケイン[24]が当初設置されていたが、運転時に暗電流が殆ど問

題にならないことが確認され、現在は取り除かれている。この部分に 8 本の C バンド加速管を追加すれば、ビームエネルギーを 9 GeV 近くまで増強することが可能になる。

最終ビームエネルギーまで加速された電子ビームは、振り分け電磁石(D) により所定のアンジュレタラインへ輸送される。現状この電磁石は DC であるが、2015 年度中のパルス毎の振り分け運転を目指し、振り分け電磁石の AC 化を含む、高速パルス振り分けシステムの開発が進行中である。

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タ (E: 全長 95 m 、運転開始時の総セグメント数 18)[25] が BL3 に設置されている。このアンジュレタの周期長は 18 mm で、1 セグメント約 5 m 、277 周期分の永久磁石ユニットにより構成される。現状の最小ギャップは 3.5 mm で最大 K 値は 2.2 である。アンジュレタビームラインの入口部には、軌道の基準を与える二つのビーム位置モニターが十分な地磁気シールドを施された 7 m のチャンバを挟んで配置されている。さらに電子ビームハローがアンジュレタの永久磁石列を叩かないように、パルス当たり 10^3 個電子まで検出可能な超高感度ハローモニター[26]も設置されている。アンジュレタ間には 4 極電磁石とビーム位置モニター、スクリーンモニタ、ダイポールステアリング、電子ビームとレーザーの相対位相調整用の移相器等が配置されている。ステアリングを除く

これらの機器は水平、垂直位置の遠隔制御可能な可動式架台上に搭載され、レーザー光軸の微調整に威力を発揮している。アンジュレータ部のビームのエンベロープは FODO 型であるが、LCLS とは異なり、4 極電磁石の電流値は電子ビームのエネルギーに応じてスケールされる。両者の違いはアンジュレータアライメント手法の違いから生じている。

アンジュレータ終端から 110 m 下流にレーザーの診断・加工を行う光学ハッチが、その直下流に実験ハッチ(F) がある。ユーザー実験中に、インラインでレーザー波長、重心位置、強度、プロファイルの計測が可能[27]である。ビームラインは最大 5 本まで設置可能で、現在は、X 線 FEL (BL3) と広帯域軟 X 線 (BL1) の 2 本が稼働している。

4.5. 今後の動向

4.5.1. 施設の小型化

SACLA の作った小型化の流れは世界的な潮流の一つになっている。2016 年運転開始予定の SwissFEL 建設プロジェクト[28]では、真空封止アンジュレータの短周期化と電子ビームの低エミッタンス化をさらに進め、C バンド加速技術を使い、5.8 GeV の低エネルギーで 0.1 nm のレーザー波長を目指している。

さらに劇的に施設規模を小型化する方向がフランスで模索されている。LUNEX5 プロジェクト[29]では、レーザー航跡場加速を利用して電子ビームを加速し、先端シード化技術と組み合わせで次世代小型 FEL の開発が検討されている。

4.5.2. レーザーの高繰り返し化

常伝導では LCLS の 120 Hz を超える繰り返しは未だに計画されていない。一方で、超伝導空洞技術を採用している EXFEL (2015 年運転開始予定) では 5 MHz 間隔の約 3000 パルスのバーストを 10 Hz で供給する計画である。LBNL で進められている NGLS プロジェクト[30] (2023 年運転開始予定) では 1 MHz の CW 運転が検討されている。L バンドの超伝導加速空洞システムは同様であるが、光カソード RF 電子銃の周波数を VHF 帯の 186 MHz

まで落とし、空洞壁面でのパワー密度を下げ CW 運転時の冷却問題の解決を図っている。カソード材は確定していないが、マルチアルカリカソード CsK₂Sb が有望と考えられているようだ。

XFEL の高繰り返しを目指す際には、単位運転時間当たりのトリップ回数という概念を忘れてはならない。XFEL はユーザーマシンであり、実験が効率的に行えるかという問題意識を常に持つことが重要だ。幾ら繰り返しを早くしても 5 分に 1 度レーザーが止まる状況では困るからである。高圧スイッチ (サイラトロン) の固体化なども含め、トータルシステムとして高繰り返し化が実験ユーザーに意味があるよう開発を進めることが肝要である。

4.5.3. フルコヒーレント化

現状の XFEL は SASE というメカニズムにより、ショットノイズからレーザー増幅が始まる。このため、時間スペクトルは多モードでスパイクとなり、ショット毎にスペクトルやパルスエネルギー等が変動する。空間干渉性は高いが時間コヒーレンスに乏しい、ある意味制御できない光である。現状の SASE 型 XFEL でも実施可能な実験系もあるが、多くの場合、XFEL のスペクトルとその強度を精密に制御することが望ましい。

シングルモードで空間・時間コヒーレンスが高い XFEL を生成するには二つのアプローチがある。一つは XFEL0[31]と呼ばれ、高い繰り返しの高輝度電子ビームと長尺アンジュレータ、複数の結晶による狭帯域帰還ループを組み合わせシングルモードの XFEL を目指すアプローチである。長波長の低増幅利得と光共振器を組み合わせる FEL システムを低波長域に拡張したものと考えて良い。帰還ループの損失が長波長の共振器を構成するミラーに比べて大きく、これに打ち勝ち増幅を得るには、高輝度電子ビームと超伝導加速システムによる高繰り返し化が必須の要素となる。

もう一つのアプローチは、現状の SASE 型 XFEL のスタートアップを自発光からフルコヒーレンスを持つレーザー種光に置き換えるという考え方である。波長の長い軟 X 線から極端紫外波長域

では、HHG (Higher Harmonic Generation)[32]により生成されたフルコヒーレントな光を種として直接利用が可能である。X線波長域には、このような光源がないので、長波長からスタートし、波長圧縮[33]によりX線領域を狙う方式と、自らのSASEを分光しコヒーレンスを高めたシード光として利用する自己シード化[34]の二つの方式がある。後者はLCLSで2012年に実現[35]された。自己シード化方式は、自動的に時間同期が取れ、複雑で高精度のタイミング系やレーザーシステムを必要としないメリットがある。

5. XFEL システムで特に重要となる性能と機能

5.1. 電子ビームの再現性と安定性

再現性と安定性がコミッショニングの時期、さらにユーザー運転とその後の高度化にとって重要であることは案外知られていない。

コミッショニングにおいては、加速器の上流から段階的に調整を進める過程で、前日までの加速器調整状態が翌日再現できなければ調整が進まない。調整を積み上げられるパラメータの再現性が最低限必要になる。

また、SACLAでは電子銃から生成された1Aのビーム電流を3kA以上に引き上げるので、これを可能にするには、多段のバンチ圧縮器の各段の圧縮状況を観測し、設定パラメータを追い込めるだけのRF機器の安定性が必要となる。この安定性は、加速位相でおおよそ100fs、加速電圧の安定度で100ppm以下[36]であり、モジュレータ充電器の充電電圧、LLRF系、タイミングシステム、加速管やパルス圧縮器の温度制御に至まで高い安定性と再現性が要求される。

現在のSACLAでは、加速器パラメータの賞味期限は数日である。ビーム信号を基準としたピックアップの値によりパラメータを定義しているのに、何故数日で加速器の運転状態が変わってしまうのであろうか。リング型光源ではあり得ないことである。リング型光源では、基本的に定常解が存在し、摂動が加わっても定常解の周りの安定振動となる。シンクロトロン振動の原点も、ある

意味、電磁石の構成する基準軌道により定義されている。これに対し、線形加速器ベースのXFELは完全なオープンループのシステムで定常解が存在せず、ドリフトを自立的に戻す仕組みがない。フィードバック補正も有効に働かないため、全ての機器の安定性を極限まで高めるしかリング型光源の安定性に近づけられない。

再現性は、ユーザー運転の効率だけでなく、レーザー性能にも大きく影響することがSACLAで最近明らかになった。レーザーの強度を高めるパラメータの微調整の最中に、調整中のノブ以外のパラメータが微妙にシフトすると永遠に最適なパラメータへは到達しないからである。

SACLAのコミッショニングからユーザー運転、その後の高度化を実施して特に感じるのは、電子源の安定性と再現性、信頼性の重要さである。線形加速器は、カソードから引き出された電子を1パルス毎に加速しレーザーを生成する。電子源のトラブルは、レーザーの特性に直結し、対処の範囲も限定されるので、運転において一番深刻な事態だ。電子源からの電子ビーム特性が再現しない、安定しない状況で精密調整を行い、レーザー性能を引き上げていくのは、未経験ではあるが、大変困難なことだと想像する。コミッショニングからその後のレーザー性能の高度化がSACLAでこれほど順調に進んだ理由の一つとして、年間を通じてほぼメンテナンスフリーで安定に再現性良く電子ビームを出し続ける熱電子銃と入射部の存在があると著者は考える。

5.2. アンジュレータの磁場精度とその精密調整

アンジュレータは、FELの増幅を担うという意味では最重要機器の一つである。十分な高輝度電子ビームが供給されたとしても、アンジュレータの性能が要求を満たしていなければレーザー増幅は得られない。アンジュレータは通常の放射光光源でもよく使用されているが、XFELで用いる時には特にどの点が難しいのだろうか。

5.2.1. 狭ギャップでの磁場分布精度の確保

低エネルギー電子ビームを用いて短波長 XFEL 生成を目指すコンパクト XFEL では、アンジュレータの短周期化が施設規模を左右する。SASE の増幅利得を得るには、短周期でも十分な積分磁場が必要であり、磁石列をビームにより近づけることができる真空封止型が有利である。

この結果、XFEL 用の短周期アンジュレータはリングで使用するものに比べ狭ギャップ (SACLA では最小ギャップは 3.5 mm) となる。磁石列間に働く最大磁場吸引力はギャップ幅が短くなるにつれ指数関数的に増大するので、狭ギャップでは挿入光源の高い剛性が求められる。また、ギャップの設定精度はギャップが狭くなるほど厳しくなるので、同時に高いギャップ制御精度も必要である。

磁石列間に働く力が強大であることによる様々な変形の心配もあり、使用状態 (In-situ) で磁場分布を高精度で計測、補正できる仕組みも重要だ。SACLA では真空チェンバーに磁石列が組み込まれた状態で、アンジュレータの磁場分布を精密に計測できる SAFALI システム[37]が開発され活躍している。

5.2.2. X線を用いたアンジュレータの精密調整

リングのアンジュレータとの最大の違いは、全長 100 m 近い、数十のセグメント (SACLA ではコミッショニング当時は 18 セグメント) で構成される長尺アンジュレータラインを、レーザー増幅の立場から見て、一本の高精度アンジュレータとして機能させるという点である。

これを達成するには、(i) 各セグメント磁場分布の健全性確認、(ii) 各セグメントとフェイズシフターのギャップ依存誤差磁場の補正テーブル作成 (精度 < 数 μm)、(iii) 各セグメントの K 値精密調整 ($\Delta K/K < 5 \times 10^{-4}$ 、ギャップ幅誤差では約 3 μm)、(iv) アンジュレータセグメント、4 極電磁石とビーム位置モニター等の付帯機器の精密アライメント (精度 < 4~5 μm)、(v) Resistive Wall インピーダンスによるエネルギーロスの保障を段階的に実施する必要がある。

LCLS では (i)と(iii)を通常のラボベースの磁場分布計測に基づき実施し、(iv)と(v) はトンネル設置後に、実際の電子ビームを用いた BBA (Beam Based Alignment)で行った[38]。LCLS では固定ギャップなので、(ii)は(iv) に繰り返し込まれる。一方で、SACLA ではラボベースの磁場計測による調整で初期状態を整え、アンジュレータホール設置後に (i)から(v)をアンジュレータからの自発光を主に用いて実施した[39]。どちらのアプローチでもレーザー増幅は可能であるが、今後どちらが世界の主流になるかは現時点では分からない。

5.3. 光ビーム診断系

5.3.1. ビーム調整時での利用

光ビーム診断系は、ユーザー運転時だけでなくビームコミッショニング時でも極めて有効である。これらのシステムをビームコミッショニングに間に合うよう整備することが、順調なコミッショニング要件のうちの一つであろう。

二結晶分光器と 0 次元強度検出器を組み合わせたスペクトル計測システムは、積分することでアンジュレータの自発放射から SASE のスペクトルまで観測が行えるため、コミッショニングの後半から利用できることが望ましい。また分光した光と各セグメントのギャップスキャンを組み合わせる事で精密 K 値調整[39]が、さらに 0 次元検出器を 2 次元検出器に置き換え、分光した光の光軸を観測できれば、自発光を用いたアンジュレータビームラインのアライメント[39]にも利用できる。

アンジュレータ放射の低エネルギー側のテール部分を分光して切り出した時の X 線の空間プロファイルを図 8 に示す。プロファイルがドーナツ状をしている理由はエミッタンスとエネルギー広



Fig. 8 自発放射の低エネルギーテールを分光して切り出した光の空間分布

がりが十分小さいからである。リングで同様の観測をすると、水平エミッタンスとエネルギー広がりによりリングの内部が埋まったプロファイルが観測される。このように特定の波長域を切り出した光の空間分布から電子ビームの特性評価も可能になる。アンジュレータ放射のスペクトル形状から、アンジュレータ磁場分布に大きな位相誤差があるか等、磁場分布の健全性の評価も行える。

基本波のピークに分光器を設定し、最上流のセグメントからギャップを対応する K 値まで一台ずつ閉め、測定終了後にセグメントのギャップを分光器のスペクトル窓の外まで detuning すれば、インピーダンスによるエネルギーロスを波長シフトとしてアンジュレータラインの下流に向かって順次計測することもできる。

SACLA のコミッショニング後半のレーザー調整では、強度モニターが加速器調整の指標になった。リング型加速器ほど細密な加速器模型が構築しにくい線形加速器ベースの光源では、レーザーのパルスエネルギーを最大化させるように加速器のパラメータを最適化するのが最も確実な方法である。レーザーの強度モニターは、ビーム調整に欠かせないモニターの一つである。

5.3.2. ユーザー運転時での利用

利用実験時は、実験を中断しない非破壊インラインモニターの整備が重要である。特に SASE XFEL では強度、波長、スペクトルがショット毎に変化するので、レーザー特性のショット毎のデータが実験データの解析に必須である。

SACLA ではレーザーのポジション、中心波長、強度、空間プロファイルが実験ハッチ直前の光学ハッチにて実験中に観測可能になっている。一例として、XFEL を用いた CDI 実験でのインラインモニターの使用例を紹介する。CDI 実験ではレーザーのプロファイルを常時モニターしている。SACLA では現状 RF システムのドリフトが完全に止まっていないため、長時間運転中に入射部の電子ビーム軌道のズレにより、レーザービームのプロファイルが 2 玉に分離することがある。この場

合、回折データが正しく取れず、位相回復により実像を戻すことが困難となる。プロファイルに異常が見られると、実験ハッチから加速器調整の要請が入り、レーザープロファイルを再現させている。実験に応じて重要なレーザーパラメータは異なるので、きめ細かい対応が実験の効率化には欠かせない。

Table 1 SACLA の主要レーザー性能

Pulse energy		0.4 mJ@10 keV
Available photon energy range		4.5~15 keV
Pulse duration (FWHM)		< 10 fs
Spatial coherence		Nearly full
Repetition Rate*		20 Hz
Stability	Intensity $\sigma_{\delta I}/I$	$\leq \sim 10\%$
	Pointing $\sigma_{\delta z}/z$	3~7%
	Wavelength $\sigma_{\delta \lambda}/\lambda$	$\sim 0.1\%$

*2013 年度から 20Hz に。それまでは 10Hz。

6. 現時点で達成された SACLA の性能

SACLA のユーザー運転は 2012 年の 3 月から開始された。初年度は大きなトラブルもなく順調に運転が行われ、年間の計画運転時間 7060 時間のうち 7016 時間の運転が行われた。施設の稼働率としては $\sim 99.4\%$ が達成された。利用運転時間は 3152 時間で、このうちの 241 時間はダウンタイムである。年間の平均レーザー利用率は 92.3%に達した。全利用運転中の Fault 回数は 5450 回で平均 Fault 間隔は約 37 分であった。

表 1 にレーザーの主要性能を示す[40]。レーザーの最大光子エネルギーは約 20 keV であるが、ユーザー実験で利用されている光子エネルギー範囲は、4.5~15 keV である。パルスエネルギーは光子エネルギーに依存し、長波長程高い強度が得られる傾向にある。光子エネルギーが 12 keV より低い領域において、基本的に出力飽和に達した安定発振状態のレーザーが供給可能になっている。10 keV でのパルスエネルギーのチャンピオンデータは 30 ショット平均で約 400 μJ (2013 年 6 月時点) である。空間コヒーレンスは、ヤングのダブルス

リット (50 μm のスリット間隔) による干渉縞のシングルショット計測により評価され、計測した全レーザーショットでビジビリティがほぼ 100% であった。このことから、SACLA のレーザーは基本的に全ショットで十分な空間干渉性を有していると評価できる[41]。

レーザー発振状態での強度変動は、標準偏差で約 10% であり、図 9 に示す様にレーザー出力は長期間安定している。レーザープロファイルの重心変動は、サンプル直近の光学ハッチ内でビームサイズの 3~7% 程度に抑えられている。中心波長の安定性は 0.1% を下回り、中心波長変動は、スペクトル幅の内側に収まっている。

RF 系トリップ後の位置、波長、プロファイル、強度の再現性は高く、トリップ後の強度レベルがトリップ前に滑らかに繋がる様子が図 9 でも見て取れる。SACLA で達成された安定性は、LCLS で得られた、強度変動が大きく、レーザー光軸がドリフトする XFEL とは大きく異なり、ある意味、加速器システムの作り方により安定な SASE XFEL が得られる事を世界中に示す結果となった。この SACLA での運転実績は LCLS II[42]の設計にも影響を及ぼし、加速器の安定化が重視される見通しである。

安定性の他にも、SACLA の大きな特徴がある。それはレーザーの短パルス性である。SACLA は通常運転時でも 10 keV の光子エネルギーにおいてパルス幅は常時 10 fs を大きく下回っていると推定されている。図 10 は SACLA の電子ビームの高輝度特性を裏付ける SASE の増幅利得カーブの

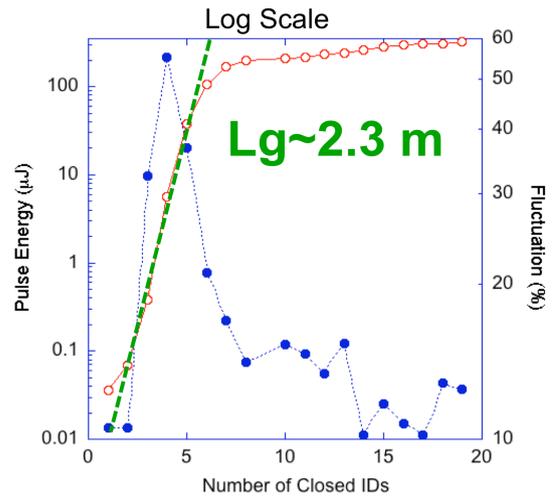


Fig. 10 XFEL の基本システム

測定データである。指数関数的な出力増幅領域のゲイン長は 2.3 m が再現性良く実験的に得られており、LCLS で得られた 3.4 m に比べて大幅に短い。このデータは SACLA の電子ビームが高いピーク電流までエミッタンスを維持したまま圧縮されることを裏付けると共に、レーザーのパルス幅が 10 fs を下回っていることの証拠にもなっている。この評価と矛盾しない結果が、シングルショットスペクトル計測[43]や自己相関を用いた電子ビームパルスの電流分布計測からも得られている。レーザーのパルスエネルギーは高エネルギーの LCLS には及ばないが、ピークパワー (ピーク輝度) ではレーザーパルス幅の長い LCLS を凌駕している。SACLA では 30 GW 以上の高いピークパワーが常時利用可能である。このような特徴

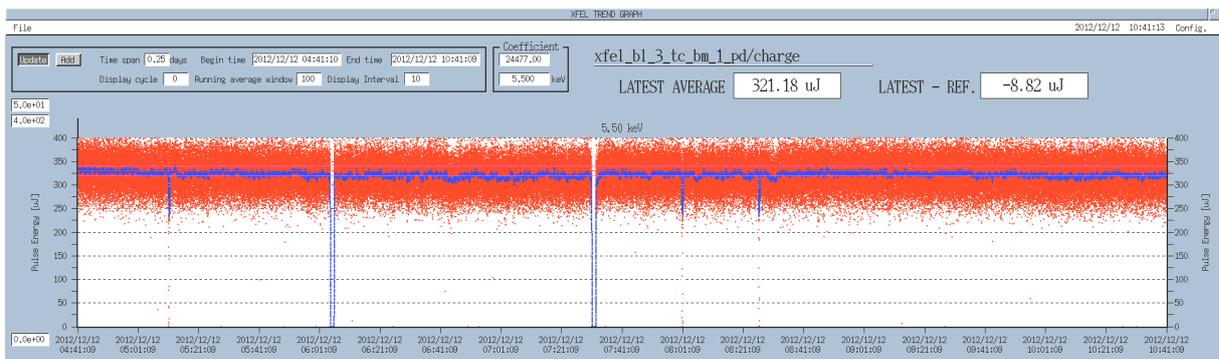


Fig. 9 レーザー光子エネルギー5.5 keV での 6 時間に亘る強度変動

とビームラインの強力な集光システム (1 μm [44] および 50 nm 集光 [45]) が相まって、X線の非線形光学現象の研究に関して、SACLA が世界をリードする環境が整いつつある。

7. 今後の SACLA のレーザー性能改善

7.1. パルスエネルギーの増強

SACLA の設計検討では、パルスエネルギーはロングパルスモード (レーザーパルス幅 ~ 30 fs) において ~ 700 μJ 、ショートパルスモード (レーザーパルス幅 ~ 6 fs) で ~ 300 μJ と予想されていた。これに比べ、現状はさらにショートでの運転になっている。パルスエネルギーの増強に関しては、大きく分けて二つのアプローチがある。

一つは実際のレーザー強度を上げるという方法である。極端なショートパルスにも関わらず、400 μJ のパルスエネルギーが得られているのは、電子ビームの輝度が設計時の想定を大幅に上回っているからだ。現状ではこれ以上の輝度向上は難しく、パルス幅を伸ばしてレーザー増幅に寄与する電子数を増やすことが一つの可能性である。補正空洞を用いるエネルギーチャープの非線形性補正スキームは、有効に働いているが 2 次と 3 次の補正が分離しておらず、3 次の非線形性の補正までは実際の電子ビームの位相空間情報が得られない現状では難しい。そこで 2 次と 3 次の補正を分離して独立のノブで取り扱える補正スキームを新たに導入し、パルスエネルギーの大きいロングパルスモードを実現、実験に応じて二つのモードの使い分けができるように検討している。

もう一つのアプローチは、レーザー強度を実験のサンプル上でより効率的に利用しようというものである。現在、10 keV の光子エネルギー近辺で X 線光学系の透過率は $\sim 60\%$ であり、5.5 keV 近傍では $\sim 30\%$ まで低下している。これを 90% 近くまで引き上げるだけでも大幅な強度の実効的な増加になる。さらに検出器の感度の問題も考える必要がある。SACLA では、2 次元の検出器として MPCCD (Multi-Port Charge Coupled Device) を開発し利用に供しているが、現在用いられているシリコン受光素子は、空乏層の厚みが 50 μm であ

り、10 keV 以上の高エネルギー領域で量子効率が顕著に低下する。この問題を解決するため、空乏層厚が 300 μm の高い量子効率を有する素子の開発を進めている。これらの改善により実効的な強度を現状から数倍上げることができると考えており、ロングパルスモードでの強度増強とあわせて 1 桁程度の実効的レーザー強度の増加を実現すべく、開発に取り組んでいる。

7.2. XFEL のシングルモード化

X 線波長領域のシード化には自己シード方式を採用する事を SACLA では決定した。3 次元シミュレーションを用いた設計検討の結果、種光として十分な強度を得るには、7~8 台のアンジュレータセグメントが必要である事が分かった。この結果を受けて、2012 年の夏に、BL3 の上流から数えて 9 台目のアンジュレータセグメントを取り除き、最後尾の 18 台目のアンジュレータの下流に移設し、空いたスペースに小型のシケインを追加した。このシケインはレーザーと電子ビームの位相差を 0~40 fs の範囲で調整できる。2013 年の夏期停止期間に、この場所に透過型の結晶分光器を設置し、自己シード化によるシングルモードの XFEL 生成を目指す。SACLA ではバンド幅 0.01% で切り出した XFEL の強度も滑らかなシングルピークの分布をとり、強度がゼロまで落ちる事はない。この結果は、レーザーのスペクトルはショット毎に異なるものの、そのエンベロープは概ね同じ波長範囲に留まっていることを示している。この実験事実から、自己シード化を行っても安定したシングルモードの XFEL が生成できると期待している。シード化による輝度の増加は 1 桁程度を見込んでいる。

軟 X 線 (SX) を含む長波長域のシード化については、様々な R&D が行われている。SACLA のプロトタイプである SCSS 試験加速器では、高出力 Ti:Sa レーザーと Xe ガスを用いた HHG により、その 13 次高調波を生成し、直接シード方式により波長 60 nm でのシード化に成功している。その後、レーザーと電子ビームのタイミングドリフトの非破壊計測とドリフト補正法の開発が行われ、

極めて安定なシード化 FEL 運転を達成しており、HHG を用いたシード化の技術蓄積を行ってきている。一方で SX における自己シード化は、LCLS でも設計が進んでおり、今後これらの結果を総合的に判断した上で、SACLA の境界条件にマッチした最善の方式を決定する予定である。

7.3. マルチビームライン化

XFEL は通常のレーザーと同様で、基本的にシングルユーザーマシンである。複数のビームラインを整備した場合、レーザーパルスをビームライン毎に分け合うことになるが、複数の実験を同時に進められるので実験の効率は格段に向上する。

SACLA の XFEL ビームラインは、線形加速器の延長線上に位置する BL3 が稼働している。最大 5 本までビームラインの増設が可能で、2014 年度中の供用開始に向け BL2 の建設を進めている。現在短パルス自発放射のみを提供している BL1 は、比較的長波長 (EUV~SX) の FEL を生成するビームラインへと改修を進めつつある。

複数の XFEL ビームラインを運用する際に鍵となるのが、電子ビームのエネルギー選択とパルス毎のビームライン切り替えである。電子ビームのエネルギーを固定で振り分ける場合、別々の実験を行う各ビームラインのレーザー波長をどう提供するのかといった問題があった。それに関連して、アンジュレータパラメータをビームライン毎にどのように決めるかは、シンプルな問題ではない。K 値で変えられる波長は、精々数 10%に過ぎないからである。そこで SACLA ではパルス毎に電子ビームのエネルギーを大きく (例えば 5~8

GeV) 変える TIME (Time Interleaved Multi-Energy acceleration) 運転というスキーム[46]を新たに開発した。これによりビームライン毎に実験に応じた必要なエネルギーの電子ビームを供給できる。さらに、電子ビームのエネルギーをビームライン毎に大幅に変えられるので、アンジュレータの設計を標準化できるという大きなメリットもある。

パルス毎のビーム振り分けは、現状の DC 振り分け電磁石を 2015 年中にはパルス化することを目標に掲げ、開発を加速している。また、使用できるビームライン毎のレーザーパルス数を増やすために、加速器の繰り返し周波数を高めるべく、現在 RF 機器のコンディショニングと改善を進めている。レーザーの高繰り返し化と TIME スキームとを併せて、パルス毎のビーム切り替えを伴うマルチレーザービームラインの効率的な運用を目指している。

7.4. 高品質 XFEL の開発

2012 年から、遅延時間 (0~40 fs) がアト秒の時間精度で制御された 2 色の XFEL を、同じサンプルに利用できないかの検討を進めている。2 色の XFEL は、波長を最大 30%程度変えることができ、入射角度や位置も 2 色で独立に制御できる[47]目処が立ちつつある。

一方でさらなる短パルス化、高出力化の検討も進めている。レーザーと小型のシケイン (遅延機構) を組み合わせたパルス圧縮プロセスにより、数十アト秒の超短パルス、シングルモードテラワット XFEL[48]の開発も進める予定である。

参考文献

[1] J. Miao, et al, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 088303 (2002).
[2] M. Abo-Bakr, et al, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 254801 (2002).
[3] A. A. Zholents and M. S. Zolotarev, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 912 (1996).
[4] R. Bonifacio, et al, *Opt. Commun.* **50**, 373 (1984).
[5] J. S. Fraser, et al, Proc. of PAC'87, Washington DC, USA March 16-19 (1987) p.1705.
[6] D. T. Palmer, et al, Proc. of PAC'97, Vancouver, B.C., Canada May 12-16 (1997) p.2687.

[7] LCLS Conceptual Design Report, SLAC-R593 (Sranford, 2002).
[8] K. Honkavaara, Proc. of FEL'05, Palo Alto, California, USA Aug. 21-26 (2005) p.411.
[9] R. Bonifacio, et al, *Nuovo Cimento* **13**, No. 9, 1 (1990).
[10] M. Sands, Report SLAC-121, UC-28 (ACC) (1970).
[11] P. Emma, Proc. of PAC'09, Vancouver, B.C., Canada May 4-8 (2009) p.3115.
[12] Z. Huang, et al, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **7** 074401 (2004).

- [13] P. Emma, et al, *Nature Photon.* **4** 641 (2010).
- [14] XFEL: The European X-ray Free-Electron Laser, Technical design report, DESY 2006-097 (DESY, Hamburg, 2006).
- [15] <http://flash.desy.de/>
- [16] J. H. Han, et al, Proc. of EPAC'04, Lucerne, July 5-9, (2004) p.357.
- [17] SCSS X-FEL Conceptual Design Report (RIKEN Harima Institute, Hyogo, Japan, 2005); T. Shintake, et al, *Nature Photon.* **2** 555 (2010).
- [18] K. Togawa, et al, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** 020703 (2007).
- [19] H. Tanaka et al, Proc. of FEL'09, Liverpool, August 23-28 (2009) p.758.
- [20] H. Hanaki, et al, Proc. of EPAC'08, Genoa, Italy, August 23-28 (2009) p.85.
- [21] K. Togawa, et al, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** 080706 (2009).
- [22] H. Ego, et al, Proc. of IPAC'11, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9 (2011) p.1221.
- [23] T. Inagaki, et al, Proc. of LINAC'12, Tel-Aviv, Israel, Sep. 9-14 (2012) p.186.
- [24] H. Tanaka, et al, Proc. of PAC'09, Vancouver, B.C., Canada May 4-8 (2009) p.2383.
- [25] T. Tanaka, private communication.
- [26] H. Aoyagi, et al, Proc. of DIPAC'11, Hamburg, Germany, May 4-9 (2011) p.12.
- [27] K. Tono, et al, *Rev. Sci. Instrum.* **82** 023108 (2011).
- [28] SwissFEL Conceptual Design Report, PSI Report 10-04 (PSI, 2011); <http://www.psi.ch/swissfel>
- [29] M. E. Couprie, et al, Proc. of FEL'11, Shanghai, China August 22-26 (2011) p.208.
- [30] J. Corlett, et al, *Synchrotron Radiation News* **22**, No. 5, 25 (2009).
- [31] K. J. Kim, et al, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 244802 (2008).
- [32] F. Krausz, and M. Ivanov, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 163 (2009).
- [33] L.-H. Yu, et al, *Science*, **289**, 932 (2000).
- [34] G. Geloni, et al, *J. Mod. Opt.* **58**, 1391 (2011).
- [35] J. Amann et al, *Nature Photon.* **6**, 693 (2012).
- [36] Y. Otake, et al, Proc. of the ICALEPCS'07, Knoxville, USA, Oct. 15-19 (2007) p.706.
- [37] T. Tanaka, et al, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12**, 120702 (2009).
- [38] H. D. Nuhn, Proc. of FEL'09, Liverpool, August 23-28 (2009) p.714.
- [39] T. Tanaka, et al, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **15**, 110701 (2012); T. Tanaka, Proc. of FEL'12, Nara, August 26-31 (2012) p.543.
- [40] T. Ishikawa, et al, *Nature Photon.* **6**, 540 (2012); H. Tanaka, Proc. of IPAC'12, New Orleans, USA, May 20-25 (2012) p.2106.
- [41] C. H. Song et al., to be published elsewhere.
- [42] https://slacportal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public/LCLS_II/Pages/default.aspx
- [43] Y. Inubushi, et al, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 144801 (2012).
- [44] H. Yumoto, et al, *Nature Photon.* **7**, 43 (2013).
- [45] H. Mimura, et al, to be published elsewhere.
- [46] T. Hara, et al, submitted to *Phys. Rev. ST Accel. Beams*.
- [47] T. Hara, et al, submitted to some journal.
- [48] T. Tanaka, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 084801 (2013).