

OPERATION STATUS AND PERFORMANCE UPGRADE PLAN OF SACLA

Hitoshi Tanaka #

XFEL Research and Development Division, RIKEN SPring-8 Center, RIKEN Harima Institute
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 678-5148, Japan

Abstract

After the first lasing achieved at a wavelength of 1.2 Angstrom in June 2011 beam tuning efforts were continued to obtain the target XFEL performance at SACLA. Since the middle of October 2011, owing to these efforts, generation of an intense laser pulse beyond sub-mJ has been constantly achieved in a wide wavelengths ranging from 0.8 to 3 Angstrom. Aiming at a user experimental run starting from March we replaced the gun cathode assembly by new one and optimized the accelerator parameter together with automating and rationalizing the beam tuning procedures. User experiments at SACLA were thus started on schedule in March and stable and intense XFEL has been served for user experiments by 24-h continuous operation. Even though user experimental runs started smoothly the following four improvements are critically important to push up the performance of SACLA further; (1) stabilization of the accelerator, especially drift suppression of the RF system in the injector, (2) widening the lasing wavelength range, (3) control of the laser pulse duration, and (4) increasing the laser intensity. In parallel with the above short-term activities, we have been advancing the long-term ones, such as seeding of XFEL, fast switching of plural undulator beamlines, relocating the SCSS test accelerator to the SACLA undulator hall with energy upgrade, etc. This presentation reports the current laser performance, accelerator research activities, and future upgrade plan.

X線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況と今後の高度化

1. はじめに

平成 23 年 6 月に波長 1.2 Å でレーザー増幅が確認された SACLA は、その後の調整により、23 年末には 0.8~3Å のレーザー波長域にて、サブミリジュールのパルスエネルギーの安定生成が可能になった。平成 24 年年明けからは、3 月のユーザー運転を目指した準備を進め、予定通りユーザー実験を開始するに至った。ここでは現状の SACLA の運転状況、問題点とその対策、今後の高度化の概要に関し報告する。

2. SACLA の運転状況とレーザー性能の現状

平成 24 年度(前年度の 3 月を含む 13 ヶ月)の SACLA の運転計画は、総運転時間 7000 時間(利用実験に 3000 時間、実験準備・研究開発に 3000 時間、システム調整に 1000 時間)である。実験準備・研究開発は、新しい光源である XFEL を用いた実験手法の開発、レーザー特性の改善等に当てられ、今後順次状況に応じて、利用実験へと振り替えられていく予定である。運転は 2 週間を基本単位として実施され、利用実験は概ねこのうちの 1 週間で占める。3 月 1 日から始まった平成 24 年度上半期の SACLA の運転実績を表 1 に示す。

2011 年 6 月にレーザー増幅の初観測を達成したが、夏までの間レーザー強度は 30~40 $\mu\text{J}/\text{pulse}@10\text{ keV}$ と低い値に止まっていた。これを改善するため、夏期停止期間明けのビーム調整において多段バンチ圧

縮器各段での射影規格化エミッタンスを軌道と収束パラメータにより $1\pi\text{ mm mrad}$ に制御しつつピーク電流値を 3 kA 以上に高める調整を実施した。これによりレーザーパルスエネルギーは基準ビームエネルギーにおいて大幅に増加した。さらに、挿入光源ビームラインの電子ビーム軌道を正しく設定する方法を確立することで図-1 に示すように広い波長範囲に渡りレーザー強度を sub-mJ / pulse まで引き上げる事ができた^[1,2]。表 2 に現状のレーザー性能をまとめる。

表 1 : 平成 24 年度上半期の SACLA 運転実績

運転期間	H24/3/1 – H24/7/19
総運転時間	3135.7 hr
ユーザー利用実験	1415.7 hr
実験準備・研究開発	1600.0 hr
システム調整	120.0 hr

2011 年秋以降に計測した SASE のゲインカーブの詳細な解析により^[3,4]、レーザー増幅部の電子ビーム規格化スライスエミッタンスは $0.7\pi\text{ mm mrad}$ もしくはそれ以下と今のところ評価されている。

ユーザー実験は 24 時間連続で行われる。必要なパラメータは事前に全て準備しておくので、レーザー波長等のパラメータ変更と確認を除き、利用実験中には加速器調整を基本的に行わない。レーザーの再現性は良く、ピーク強度の 7 割以上のレーザー強度が定常的に利用実験に供給されている。ギャップ可変型アンジュレータの特徴を生かし、±20%程度のレーザー波長変更は、ユーザーが実験の要請に

tanaka@spring8.or.jp

応じてアンジュレータギャップを動かし変更できる。重要な定期的調整としては、アンジュレータビームラインのアンジュレータ自発放射によるアライメントがあり、この調整は 2~3 週間に 1 度の頻度で定期的に行っている。電子銃のカソードアッセンブリーは年に 1 度の交換で十分なエミッション電流を維持できている

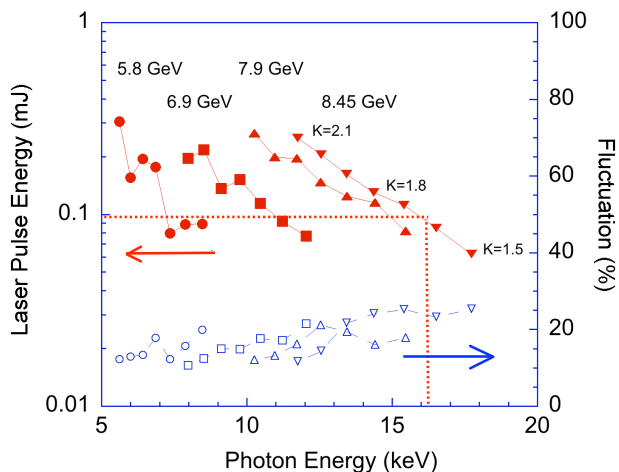


図 1 : レーザー強度の波長依存性

表 2 : ユーザー運転時のレーザー性能

パルスエネルギー	Sub mJ (e.g. 0.36mJ@5.5 keV)
ピーク出力	>10 GW
強度変動	10~20%(σ :標準偏差)
レーザー波長	4.5 ~ 15 keV
繰り返し	10 Hz
空間干渉性	Nearly full
平均レーザー利用率 @ 10 Hz	~90%
平均トリップ間隔 @ 10 Hz	~30 min.

3. 短期的な改善課題

3.1 加速器の安定化^[5,6]

SACLA のレーザーの強度変動は波長により 10~20%(σ)となっているが、特に短波長域では加速器の不安定性による変動が大きな割合を占めている。現状でショット毎の変動の主要因は、(1)多段バンチ圧縮器の RF パラメータのショット毎の変動によるビーム電流のふらつき、(2)入射部の不安定性に起因するビーム軌道変動^[7]である。(1)に関しては、もともと 10%(σ)の変動を設計目標としていたが(2)は想定外であった。ビーム軌道変動は入射器部に設置された空洞の温度制御用ヒーターの Pulse Width Modulation との相関が見られ、温度センサーの高分解能化並びにヒーターの DC 化^[8]に向けた準備を進

めている。現状の運転における最大の課題は RF 系のドリフトである。SCSS 試験加速器^[9]に比べドリフト量は大幅に改善されてはいるものの、RF パラメータデータセットの有効期間は数日であり、一週間前の加速器パラメータセットの再ロードによりレーシングはほとんど再現しない。さらに入射部のドリフトが単純でないため、またそのメカニズムを完全に理解できていない現状では、明確なフィードバックの構築が難しい。入射部起源の変動要因の抑制を進め、定型のフィードバックによりある程度長期間レーザー増幅の維持を可能とする状態に改善する方向で、様々な検討、調査、スタディを実施している^[6,7,10,11]。それと平行し、多段バンチ圧縮器の各段で圧縮条件を一定に制御する CSR を用いたフィードバックシステム^[12]の準備も進めている。3 日間のユーザー運転におけるレーザー強度の変動を図 2 に示す。

現状ユーザー運転は 10 Hz の繰り返しに制限されているが、これはサイクロトロン自爆がビーム繰り返しに比例するためである。電子ビームのエネルギーにも依存するが、典型的な加速器パラメータを用いた場合の平均トリップ間隔は約 30 分で、トリップ原因の 80%がサイクロトロン自爆である。自爆後の次のパルスから正常に復帰する確率が極めて高いことから、シングルイベントは無視するように機器インターロックの変更を夏の停止期間中に実施する予定^[13]である。この改修後、運転状況を見ながら繰り返しを 60 Hz に向け段階的に引き上げていく。

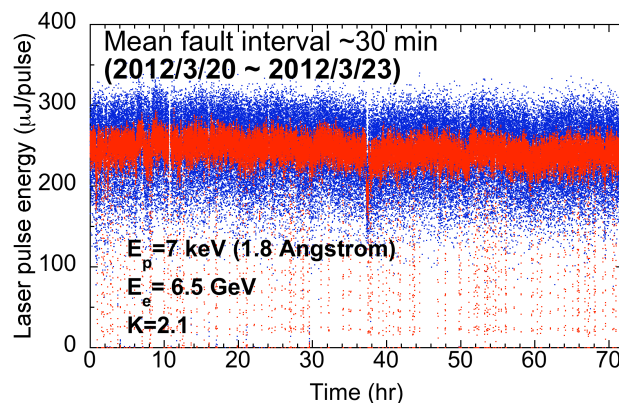


図 2 : 利用実験時のレーザー強度変動

3.2 レーザー波長範囲の拡大

平成 24 年度上半期のユーザー運転で提供したレーザー波長範囲は 4.5~15 keV である。図 1 で示すように、この範囲内では sub-mJ/pulse のレーザー強度を提供できる。4.5 keV より長波長側では、現状レーザー強度の急激な低下が生じる。その原因を究明し、対策を講じることで、利用波長を長波長側にある程度拡大することは可能であろう。大幅な拡大には、後述する SCSS 試験加速器のアンジュレータホールへの移設とそのアップグレードを行い、2 つの加速器により長波長域と短波長域をそれぞれカバーする構成がレーザー利用率と利用波長域拡大の面で有利である。

短波長化は、強度との両立を考えると、現状では電子ビームエネルギーの増強が近道である。C-band 加速システムの途中、ビームエネルギーで約 3 GeV の地点に小さなシケインが設置されている。これは加速途中で混入する暗電流の内、収束系のクロマティックアベレーションで損失しない暗電流を除去する目的^[14]で導入されたが、予想以上に暗電流が少なく^[15]、現在は撤去されている。このスペースは C-band 加速器ユニット 4 台分に相当し、それらを増設する事で約 0.5 GeV のエネルギーゲインが見込める。これにより 17 keV までレーザー利用波長を拡大できると考えている。

3.3 レーザーパルス幅制御（短パルス化）

レーザーのパルス幅は、電子ビームの電流分布の計測値から、エンベロープで 10~20 fs (FWHM) と推定されているが、利用者からは、より短いパルスの高出力レーザーを利用したいという要求が出ている。短パルス化には幾つかの方法が考えられるが SACLA では、(1) バンチ圧縮を強めて電流分布にスパイクを形成する方法と、(2) アンジュレータの K 値を小さくし、電子ビームの芯の部分、狭い時間スライスのみをレーザー増幅させる方法を検討している。現状ではいずれも顕著なパルスエネルギーの減少を伴うが、(1)の方法を最適化し、ピーク電流を上げることでパルスエネルギーの減少をどの程度抑えられるか検討を行っている。

3.4 レーザーパルス強度の増大

レーザーのパルスエネルギーは 10 keV で 0.26 mJ が得られているが、電流分布の実測から、電子ビームのバンチ長（ピーク部）は、FEL シミュレーションで高いパルスエネルギーが得られる条件に比べ半分以下になっている。パルスエネルギーを増大させるには、電子ビームのレーザー増幅部の時間幅を広げレーザー増幅に寄与する電子数を増加させる必要がある。SACLA では C-band 補正空洞によりバンチ圧縮過程での 2 次の非線形性の補正^[16]を行っているが、さらに圧縮パルスの幅を広げるには、3 次の非線形性の補正が必要になる。ビーム調整で 3 次までの非線形性補正を実現するには、2 次と 3 次の補正の独立性が鍵となる。そのような観点から、3 次以上の高次の非線形性を独立に制御できる 8 極補正電磁石を用いるスキーム^[17]の検討を進めている。

別のアプローチとして、アンジュレータのピーク磁場を高めて、レーザーの増幅効率を引き上げレーザーのパルスエネルギーを増大することを検討している。SACLA のアンジュレータの最小ギャップは、現状 3.5 mm で運用しているが、機械設計上は 2 mm まで狭くできる^[1]。これにより 3 以上の K 値が実現でき、レーザー強度を稼ぐには有利になる。

4. 高度化の長期戦略

SACLA の長期的な高度化には、(1)フルコヒーレントかつシングルモードの理想的な XFEL の生成と (2) XFEL の利用効率の向上という 2 つの柱がある。

4.1 XFEL のシード化

SASE のショット毎のスペクトルと強度等の変動を抑えるには、ショットノイズからスタートする FEL のレーザー増幅プロセスを制御する必要がある。

現在 SACLA では、SASE を分光器に通し、一定の狭帯域スペクトル部を切り出してシード光として利用する自己シードスキームの開発を短波長域で進めている^[4]。来年秋の導入を目指し、この夏期停止期間に BL3 の 9 番目のアンジュレータを最後尾に移設し（図 3 参照）、空いたスペースに小型のシケイン（電子ビームの遅延ライン）とそのバイパス（直線）ラインを設置し、まずは SASE 光を用いた相関計測によりフェムト秒の時間分解能で電子ビームの電流分布を精密計測することから開始する。シード XFEL の強度を確保するため、来年夏までに BL3 のアンジュレータセグメント数は 21 台まで増設する予定である。

一方で、比較的長波長側のシード化は、外部レーザー光源の利用も可能であるため、希ガスをを用いた高調波生成 (HHG) によるシードレーザーを直接 FEL で増幅するスキームを主に SCSS 試験加速器を使って開発を進めている^[18]。この方法では、電子ビームと外部レーザー高精度同期や高出力レーザーの安定化等、難しい開発要素が多い。一方で同期精度を必要としない自己シードスキームは、分光システムの小型化が問題となっている。長波長域では、まだ、シード化スキーム最適化の余地は多く、多様なスキームの検討を進めて行く。

4.2 XFEL 利用効率の向上

XFEL の利用を効率的に行うには、広いレーザー波長域をどのようにカバーするかの方針が重要である。SACLA では加速器のエネルギーをパルス毎に切り替えることはせず、幾つかの電子ビームエネルギーを時間で区切って供給する方式を考えている。波長は各アンジュレータラインのパラメータにより適宜調整する方針である。SACLA の加速器を高エネルギー電子ビーム生成に使用する場合、長波長の FEL を生成する低エネルギー電子ビームをどのように供給していくかが問題となる。建設可能な 5 本のビームラインのうち、長波長をカバーする BL1 と BL5（図 3 参照）の 2 本は専用の小型加速器をアンジュレータホールに設置することとし、最終的には最大 3 つの加速器が並列で運転して異なるエネルギーの電子ビームを供給するシナリオである。

BL1 の高度化：現在 SACLA のプロトタイプ機である SCSS 試験加速器は、250 MeV の高輝度電子ビームにより 50~60 nm の真空紫外波長域の FEL を利用実験に提供している。この試験加速器を改造し、BL1 の専用加速器として SACLA のアンジュレータホールに移設する計画を進めている。試験加速器の利用運転は平成 24 年度で終了し、平成 26 年度中のビーム運転再開を目指し、移設の準備を進める。BL1 の上流には約 100 m のスペース（図 3 参照）があり、加速管を増設すれば最大 1.4 GeV まで電子ビームエネルギーを引き上げられ、これによる数

nm の軟 X 線 FEL の生成が可能になる。これと平行し、HHG を用いるシード化の整備、HGFG による波長圧縮の検討も進める。

パルス毎のビームラインの切り替え：BL2~BL4 の3本のビームラインには、最大 60 Hz のパルス振り分け（各ライン 20 Hz）を可能とできるような AC 振り分け電磁石の研究開発を本年度から開始した。このパルス振り分けは平成 26 年度中に導入を行えるよう計画している。同時に、BL2 並びに BL4 のアンジュレータの仕様の検討にも着手した。図 3 に SACLA の長期的な高度化に関連する改造を模式的

に示す。

5. まとめ

SACLA のユーザー実験はスケジュール通り開始され、設計性能をほぼ満足するレーザーを安定に供給できている。レーザー性能をさらに改善するため、4 つの短期的課題にも精力的に取り組んでいる。長期的な視点から、シングルモードで時間・空間干渉性の高いシード XFEL の開発とレーザー利用の高効率化を目指したシステム改善も平行して進めている。

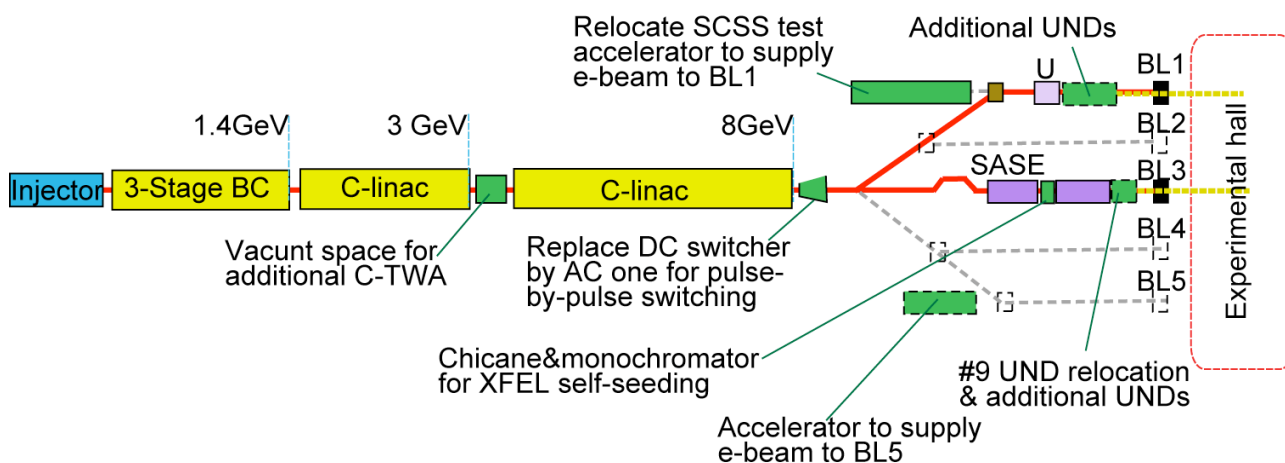


図 3： SACLA の長期的な高度化に関連する改造

参考文献

- [1] H. Tanaka, “The SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA)”, Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, May 20-25, 2012, pp. 2106-2110.
- [2] T. Hara, et al., “SACLA 電子ビーム性能向上に向けての取り組み”, in these proceedings.
- [3] T. Ishikawa, et al., “A Compact X-ray Free-electron Laser Emitting in the Sub-angstrom Region”, Nature Photonics, DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.141.
- [4] T. Tanaka, et al., “SACLA における光源性能評価と光源高度化”, in these proceedings.
- [5] Y. Otake, et al., “SACLA 加速器構成機器の問題点と改善”, in these proceedings.
- [6] H. Maesaka, et al., “SACLA の XFEL 強度安定化”, in these proceedings.
- [7] T. Asaka et al., “SACLA 加速器のビーム変動解析”, in these proceedings.
- [8] T. Hasegawa et al., “SACLA 入射部の精密温度調節装置高度化”, in these proceedings.
- [9] T. Shintake et al., “A Compact Free-electron Laser for Generating Coherent Radiation in the Extreme Ultraviolet Region”, Nature Photonics **Vol 2**, No. 9 (2008) 555-559.
- [10] T. Sakurai et al., “SACLA 加速器における入射部環境磁場の変動による FEL 強度への影響”, in these proceedings.
- [11] T. Ohshima, et al., “SACLA における電子ビーム到達時間測定”, in these proceedings.
- [12] C. Kondo, et al., “SACLA における CSR ビームバンチ長モニタの開発 2”, in these proceedings.
- [13] T. Inagaki, et al., “SACLA Cバンド加速器の加速電場の向上とトリップ頻度の低減”, in these proceedings.
- [14] H. Tanaka, et al., “Dark Current Suppression at XFEL/SPring-8 by Using the Chromatic Aberration”, Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference, Vancouver, British Columbia, May 4-8, WE5RFP051 (2009).
- [15] T. Inagaki, “Operation Status of C-band High-gradient Accelerator for XFEL/SPring-8”, Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011, pp. 104-106.
- [16] K. Togawa et al., “Electron bunch compression using an over-correction method for a compact x-ray free-electron laser”, Physical Review Special Topics Accelerators and Beams **12**, 080706 (2009).
- [17] K. Togawa et al., “SACLA における電子バンチ圧縮の高次非線形補正によるレーザー高出力化”, in these proceedings.
- [18] T. Togashi et al., “Extreme ultraviolet free electron laser seeded with high-order harmonic of Ti:sapphire laser”, Optics Express **19** (2011) 317-324.