

OPERATION STATUS OF X-RAY FEL FACILITY SACLA AT SPring-8

On behalf of all the members contributing to construction and commissioning 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

The X-ray free electron laser (XFEL) facility, which has been constructed since 2006 in the SPring-8 campus next to the storage ring as a five-year project, was completed on schedule in March 2011. The facility is named SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAsEr) by its features. In the final construction stage high power aging of all the RF components was performed in parallel with the construction aiming at smooth beam commissioning. Owing to this preparation the beam tuning could be started in 21st February and three months later, in 7th June XFEL lasing was successfully observed at a wavelength of 0.12 nm. Beam tuning efforts have been continued towards achieving the target laser performance. This presentation reports the operation status of SACLA focusing especially on the achieved accelerator and laser performances.

動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況

1. はじめに

2006 年から国家機関技術の 1 つとして SPring-8 キャンパスに建設が進められてきた X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設は、その特徴から SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAsEr) と命名され、予定通り 2011 年の 3 月に完成した。SACLA はレーザーの安定性に拘り、できる限り施設規模を小型化するという発想の基に設計、建設された世界初の XFEL 施設である。クライストロンモジュラータ充電器の運転信頼性に関するトラブルから、RF 高出力機器の運転準備に遅れが生じたが、高出力エージェンダは 2010 年 10 月から準備が完了した機器から段階的に進めた。その結果 2011 年 2 月 21 日から予定を前倒して SACLA のビーム調整を開始した。

3 月中には 7.8 GeV の電子ビーム加速に成功、BL3 のアンジュレータギャップを 4mm まで締め、 0.8\AA の自発放射を観測した。4 月からは XFEL のレーザー増幅に向けた本格的ビーム調整を開始、ビーム診断系整備に遅れがあったものの、6 月 7 日に波長 1.2\AA において XFEL のレーザー増幅を達成した。その後施設検査を経て、レーザーの安定化、高出力化に向けた調整を進めている。現在はショートパルスモードでの調整を主に進め、パルスエネルギーは 10 ショットの平均で $50\ \mu\text{J}/\text{pulse}$ を超えるところまで強度が上がっている。レーザーの最短波長は $K=1.3$ 、ビームエネルギー $7.4\ \text{GeV}$ で 0.8\AA が得られている。

2. 現状の加速器性能

2.1 入射器[1]

tanaka@spring8.or.jp

入射器はプロトタイプ器と基本的には同じ設計であるが、磁気レンズの設計変更、速度変調バンチングを完結させる初段バンチ圧縮器加速システムの周波数変更 (S-から L-band へ)、高いバンチ圧縮を実現するための 2 つの補正空洞の導入、地磁気補正コイルによる電子ビームのねじれ補正を新たに実施した。入射器の RF システムには高い安定性が要求されていたが、設計目標値はほぼ達成でき[2]、ビームフィードバックなしでレーザー増幅の初観測に成功した。図 1 に電子銃から引き出された電子ビームを 1nsec に切り出した直後にスリットスキャン法で計測した水平位相空間分布を示す。エミッタンスは $1.1\pi\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ と設計通りの値が得られ、電子銃が健全に動作していることが確認できた。

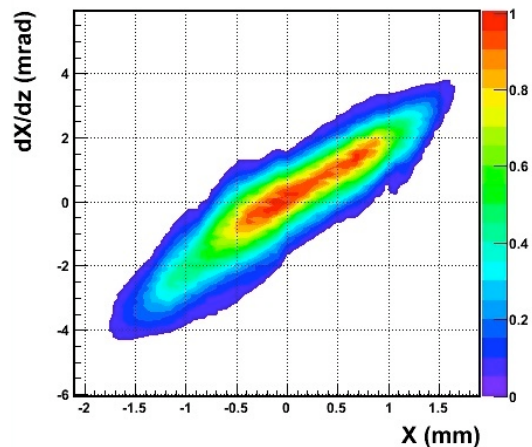


図 1 : スリットスキャンで計測された 1 nsec に切り出された電子ビームの水平位相空間分布。

2.2 電磁石システム[3]

電磁石システムの改善課題は、プロトタイプ器で

問題となった電磁石シケインからのディスパージョン漏れの抑制であった。これを改善すべく偏向電磁石の設計を大幅に見直し、補正用の4極電磁石をエネルギー分散部に設けた。結果的には偏向電磁石本体のマルチポールを抑制した結果、ディスパージョンの顕著なリークは見られず、4極電磁石はほとんど現状では励磁されていない。磁気シケインバイパス時やアンジュレータビームライン切り替え時に必要な磁場の再現化も、運転に不都合が生じない精度で機能している。磁気シケインバイパスラインは、設計変更を行い建設終盤で導入されたが、各段での圧縮特性をRFディフレクタで確認でき、多段バンチ圧縮システムのパラメータ調整に大いに役立った。

2.3 RFシステム[4]

RFシステムは、プロトタイプ器からクライストロンモジュレータとその充電器の大幅な設計変更を行ったため、機器の製作・設置が予定より遅れた。そこで電子ビームの運転エネルギーを段階的に上げる事にし、高出力エージング並びにビーム調整スケジュールは原則として維持する方針を取った。エージングが予定通り進んだユニットは現状の定常運転でも35 MV/mの加速勾配が達成されている。このような事情からレーザー運転時の標準ビームエネルギーは現状では7 GeVと低く設定されている。この運転条件での高出力機器関連の平均fault間隔は約30分である[5]。

安定なレーザー増幅には、特に入射部からバンチ圧縮部にかけてのRFの安定性が重要である。これにはクライストロンモジュレータのPFN充電電圧を高精度で一定に制御する必要があった。開発したインバータ充電器は ~ 10 ppm (1σ)の精度による充電を可能にした。併せて、高精度のタイミングシステムとLLRF系を構築した結果、12時間での位相安定性を1点10ショットの平均として、238MHzサブハーモニックバンチャー(SHB)で0.0067度 (1σ ; 設計目標値0.01度、図2参照)、C-bandの第一加速管部で0.032度 (1σ ; 設計目標値0.1度)が得られた[6]。フル加速後の電子ビームのエネルギー安定性は変動幅として 1σ が 1.4×10^{-4} 、ドリフトとして 4×10^{-5} (1分平均データを使用)が達成されている。

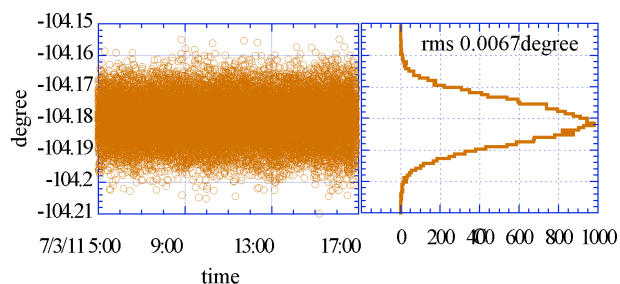


図2：SHBの位相安定性。

C-band加速システムからの暗電流はビーム調整当初から、調整障害要因にはならなかった。通常運転状態において加速器終端で暗電流は約2 pC/pulseである。アンジュレータライン入り口に設置された

ビームハローモニタにより、通常運転では電子ビーム鉛直 ± 2 mmの外側には電子ビームのハローが存在しないことも確認された[7]。RF増強に向け、暗電流除去用シケインが撤去可能かどうかの検討を現在行っている。

2.4 ビーム診断システム[8]

ビーム位置モニタ(BPM)はプロトタイプ器での測定実績に比べ、信号強度が大きく、測定のダイナミックレンジを広げるため外付けの減衰器を急遽導入した。一定のビーム条件では、BPMの分解能はサブミクロンに達している[9]。但し、ビーム条件を大幅に変える実際のチューニングでは、横方向のビーム分布に依存したシステムティックなビーム重心のシフトが予想以上に大きく、これによりRF-BPMの精度を期待した精密なビーム調整が困難になっている。

C-bandのRFディフレクタは設計どおりの掃引性能で最初から安定に動作した[10]。これによりバンチの圧縮状況の把握可能となり、多段のバンチ圧縮システムのパラメータ設定が効果的に実施できた。一方で垂直掃引画像を2次元で観測するOptical Transition Radiation (OTR)モニタは、3番目のバンチ圧縮器以降Coherent OTR (C-OTR)が顕著に発生し、実際のプロファイルの観測が困難である。このため、掃引画像観測用のOTRモニタ[11]のステンレス製スクリーンをCe:YAGスクリーンに変更し、レンズ前面のマスクで角度広がり少ないC-OTRを受け、マスクの脇を抜けてくる蛍光発光のみを結像することで実像を観測している。Ce:YAGスクリーンは加速器終端部にも導入され、アンジュレータ入り口でのビームエンベロープのマッチングに使用されている。図3にRFディフレクタで掃引したビームのプロファイルを示す。

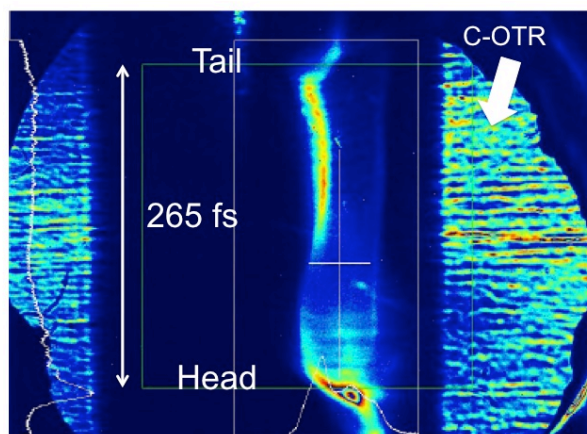


図3：圧縮後の電子ビームの掃引プロファイルの例

2.5 制御システム[12]

XFELでは、レーザー増幅を安定化する際、60 Hzのショット毎のデータを用いて、レーザーや電子ビーム特性と機器パラメータとの因果関係を調べ、機器パラメータや機器制御系を最適化していく。故にビーム診断機器の信号のみならず、変動しうる

RF 機器等の膨大なデータをショットに同期させて取得する必要がある。このように大規模なデータを高速で確実にハンドルして同期が取れるよう、多数の分散した CPU 上に同期したトリガーパルスを配信した。これにより、個々の CPU が自身のカウンターによるタグ番号をデータに付与することで XFEL システム全体に渡りショットに同期した（同じタグ番号の）一連のデータセットを取得できる。現在 10Hz の通常ビーム運転において、同期データ収集システムは安定に動作し、収集されたデータはビーム調整に大いに役立っている。

3. 現状のレーザー性能

SASE XFEL のレーズングは、電子ビームのバンチ圧縮調整 [13]、オプティクス調整とエミッタンス確認、アンジュレータラインへのエンベロープマッチング終了後、アンジュレータアライメント、アンジュレータの K 値精密調整、フェイズシフト調整、電子ビームのウエークによる K 値テーパーの調整を実施し予定通り観測できた [14]。レーズングの確認は、スリットで光の開口を狭めスペクトルを測定して行った。図 4 に SASE スペクトルの測定例を示す。

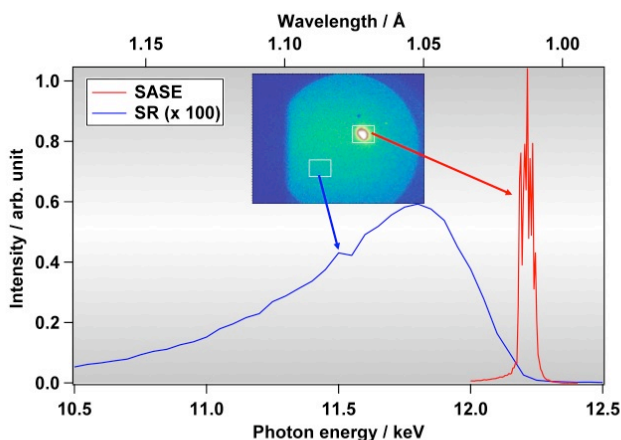


図 4: レーザー波長 0.1nm の SASE のスペクトル。自発光のスペクトルも併せて示す。

6 月 7 日のレーザー増幅初観測以来、(1)レーザー波長範囲の拡大、(2)レーザーパルスエネルギーの増大、(3)レーザー増幅の安定化、(4)レーザー増幅の再現化レベルの向上とその手法の確立を行ってきた。以下の概要を示す。

3.1 短波長化

SACLA のアンジュレータは K 値を 0~2.3 の間で変えることができる。有効なレーザー増幅利得を考えると同じ電子ビームエネルギーで波長を 100%変更可能 (K 値で 1.3~2.3) である。これにエネルギーを変えることで現在、0.2~0.08 nm の波長範囲でレーザー増幅が可能である。最短波長は電子ビームエネルギー 7.4 GeV で現状リミットされている。

3.2 パルスエネルギーの増大

現在電子ビームは短パルスモード、加速チャージを 100 pc 程度に限定し、バンチ長を FWHM で 30fs 以下に圧縮した条件で調整を続けている。これまで得られたピーク性能として、レーザーパルスエネルギー~60 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ が $K=1.8$, $E=7 \text{ GeV}$, $\lambda=0.12\text{nm}$ (以下標準パラメータと呼ぶ) で得られている。このパルスエネルギーは短パルスモードで見積もられる値に対し、ファクターで小さく、標準パラメータでは SASE は飽和に到っていないと推定される。この原因として、(1) 電子ビーム圧縮条件の最適化不足、(2)アンジュレータラインのミスアライメント、(3)アンジュレータパラメータの最適化不足等が考えられ、秋以降、ビーム実験により原因を明らかにし、改善策を施してサブミリジュールのパルスエネルギー達成を目指す。

3.3 レーザー増幅の安定化

アンジュレータパラメータの精密調整を効率的に進めるには、レーザー増幅状態を安定化することが重要である。そこでレーザー増幅初観測直後、2週間集中的に加速器の安定化に取り組んだ。レーザー出力との相関調査の結果、チョッパーのタイミング制御、L-APS 加速管の温度制御により電子ビームが変動していることが分かり、その部分を改善した。入射器の複数の空洞の精密温調用ヒーターのオンオフによる電子ビーム軌道の垂直変動(0.5 Hz)が、現状まだ残っており、レーザー出力変動の主要因となっている。これについてはオンオフサイクルの高速化と DC ヒーター導入の両面から改善を検討している。

電子ビームのドリフト制御として、現在 (1) 入射器の TOF 補正、(2) アンジュレータ入口軌道の補正、(3) 加速器出口の電子ビームエネルギー補正、(4) 第 2、第 3 バンチ圧縮器でのエネルギー補正が通常運転に導入されている。図 5 に 1 時間に渡るレーザー運転でのレーザーパルスエネルギーの変動の様子を示す。大きくレーザー出力が低下しているのは主に加速器の不安定性に依っている。

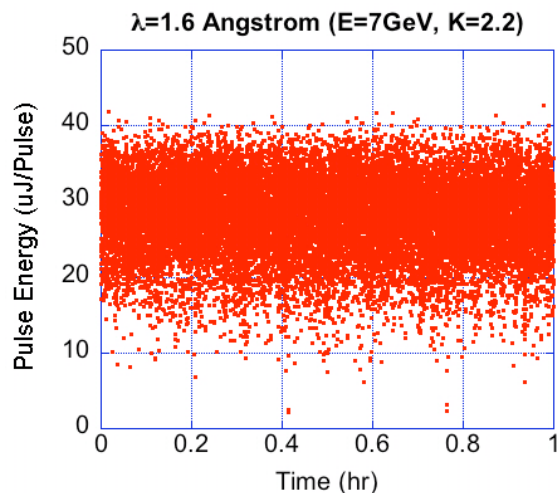


図 5: 1 時間にわたるレーザーのパルスエネルギーの変動。変動幅は 1σ で 18%。

3.4 レーザー増幅の再現化レベルの向上とその手法の確立

現状、SACLA は 24 時間運転を行っている。夜間は、ビーム調整がない場合、入射部のチョッパーをオフし、ビーム加速のみを停止している。ビーム運転は、毎朝 9:00 からの運転ミーティング終了後から行われ、パラメータのロード、ビーム状態、レーザー状態の確認、ノブによるレーザー強度調整で約 1 時間を要する。これによりピーク性能の 60~70% 程度のレーザーが再現できている。ノブとして現在使用しているのは、(1) 電子銃電圧、(2) L-band 補正空洞位相、(3) C-band 補正加速管位相、(4) アンジュレータビームラインへの軌道の入射条件である。アンジュレータラインのアライメントは今のところ 3 週間に 1 度程度の頻度で実施している。

4. 今後の予定

遅くとも本年 11 月には試験利用が開始され、来年の 3 月からは XFEL の供用開始が予定されている。それに向け、レーザーの安定性の向上、アンジュレータビームラインの再アライメントを含む長期間に渡るレーザーの再現化手順の確立、高速で安定なレーザー波長切り替え、レーザーパルスエネルギーの増大等を進めていく。

参考文献

- [1] H. Hanaki, et al., "Construction of Injector System for SPring-8 X-FEL", Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Sep. 12-17, pp. 425-427 (2010).
- [2] T. Asaka, et al., "X 線自由電子レーザー施設 SACLA 入射部の RF システム性能", in these proceedings.
- [3] Y. Kano, et al., "電磁石の概要とパターン励磁特性", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society in Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [4] T. Inagaki, et al., "Construction of 8-GeV C-band Accelerator for XFEL/SPring-8", proceedings of FEL'10, Malmö, Aug. 23-27, pp. 525-528 (2010).
- [5] K. Shirasawa, et al., "SACLA 主加速器の運転状況", in these proceedings.
- [6] T. Ohshima, et al., "XFEL/SPring-8 "SACLA" におけるタイミング・LLRF システムの性能", in these proceedings.
- [7] H. Aoyagi, et al., "Diamond-Based Beam Halo Monitor Equipped with RF Fingers for SACLA", Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, May 16-18, MOOB03 (2011).
- [8] H. Maesaka, et al., "Commissioning and Performance of the Beam Monitor System for XFEL/SPring-8 "SACLA" ", in these proceedings.
- [9] H. Maesaka, et al., "Performance of the RF-BPM of XFEL/SPring-8 SACLA", in these proceedings.
- [10] H. Ego, et al., "Development of a High Gradient Transverse C-band Deflecting Structure for the Diagnosis of Temporal Bunch Structure in the XFEL/SPring-8 SACLA", in these proceedings.
- [11] K. Yanagida et al., "Development of Screen Monitor with a Spatial Resolution of Ten Micro-meters for XFEL/SPring-8", Proceedings of LINAC'08, Victoria, Sep. 29 - Oct. 3, pp. 573-575 (2008).
- [12] M. Yamaga et al., "Event-Synchronized Data-Acquisition System for SPring-8 XFEL", Proceedings of ICALEPCS09,

Kobe, Oct. 12-16, pp. 69-71 (2009).

- [13] K. Togawa, et al., "X 線自由電子レーザー施設 SACLA における電子ビームの圧縮特性", in these proceedings.
- [14] T. Hara, et al., "SACLA 加速器のビームコミッションング", in these proceedings.