

フィードバックによる SACLA 加速器運転の安定化

STABILIZATION OF SACLA ACCELERATOR OPERATION BY FEEDBACK

家納 寛^{#, A)}, 藤本 賢治^{A)}, 田中 均^{B)}, 原 徹^{B)}

Yutaka kano^{#, A)}, Kenji Fujimoto^{A)}, Hitoshi Tanaka^{B)}, Toru Hara^{B)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In SACLA, the electron beam energy is changed bunch by bunch to perform multiple XFEL beamline operation and top-up beam injection to SPring-8. SACLA is a user facility and it is important to provide stable x-ray laser to two XFEL beamlines and 8 GeV electron beam to the SPring-8 storage ring. Recently experimental requirements on XFEL characteristics have become diverse and complex, such as not only laser intensity and stability, but also short pulses, small or large spectral widths, spatial profiles, dual-wavelength amplification, and more. Consequently, XFEL has become more sensitive to the changes in environment and accelerator parameters, making it difficult to maintain stable laser operation using conventional methods, where the operators manually adjust the accelerator while watching various monitors. To maintain the same lasing state for a longer time, it is essential to determine which monitor should be used and which parameter should be feedbacked. A careful analysis of the daily operation state showed that the changes in the bunch charge passing through a round collimator hole downstream of the electron gun affected the lasing state. By using a magnetic lens to keep the charge constant, the CSR monitors of a three-stage bunch compressor became correctly evaluating the bunch length, which enables to provide individual feedback from upstream and contributing to the stabilization of the XFEL. This paper reports the stabilization of the SACLA accelerator operation through feedback systems.

1. はじめに

ユーザー実験施設である SACLA では、2 本の XFEL ビームライン (BL2, BL3) での XFEL 運転と SPring-8 へのトップアップ入射を、電子ビームエネルギーをバンチ毎に制御しながら同時に行っている [1-3]。ビーム入射を行いながら 2 本の XFEL ビームラインへ安定なレーザーを供給することが重要であるが、近年 XFEL 利用の高度化に伴いレーザー強度や安定性だけでなく、短パルス性、スペクトルの幅や形状、空間プロファイルの安定性、二波長発振、セルフシードなどユーザーからの要求は多種多様になっている [4, 5]。このためレーザー発振状態が環境や加速器パラメータの変化に敏感になり、様々なモニタを見ながら運転員が加速器を手動で調整する従来の方法では、長時間のレーザー発振状態の安定維持が難しくなった。XFEL 施設にとって電子ビームやレーザー光の安定性は最も重要な点であり、本稿では、長時間のレーザー発振状態の安定維持の為に取り組んできたフィードバックによる SACLA 加速器運転の安定化について報告する。

2. SACLA の従来の加速器調整手法

運転開始以来 SACLA は安定化の為、精密温度調整装置による各加速空洞の温度安定化 (0.1°C から 0.01°C p-p)、低電力 RF 信号用 19 インチラックへの精密温度調整装置の導入、タイミング信号伝送用位相安定化光ファイバ、高精度インバータ充電電源安定性 (0.01% p-p) の改善など、XFEL パルス強度の増強と安

定化に向けてさまざまな加速器機器の改良を行ってきた。またユーザータイム中は、加速器の一部のビームフィードバックと、運転員が 1 時間に数回各加速管の位相などを微調整することで、数カ月に渡る 24 時間ユーザー運転を実現してきた。従来の加速器パラメータ調整の概要を Fig. 1 に示す。

SACLA は、熱電子銃カソードの 1 A のエミッション電流からディフレクターによって 1 ns の電子ビームを切り出し、入射部における速度変調バンチングと 3 台の磁気シケイン型バンチ圧縮器 (BC) により電子バンチ長を 20 fs 程度 (FWHM)、ピーク電流 10 kA まで電子バンチを圧縮している。ユーザータイム中は、カソードヒータをフィードバック制御することによりカソードの温度を調整し、電子銃のエミッション電流を 1 A に保っている。ディフレクター出口には丸穴コリメータが設けられ、空間コリメーションにより電子ビーム周辺部を除去し芯の部分のみを通す。下流の 238 MHz サブハーモニックバンチャー (SHB) でエネルギーチャープを与えられた電子バンチは、L バンド加速管までの区間において速度変調バンチングによってバンチ圧縮される。その際、RF のドリフトなどにより生じるビーム到達タイミングの変化 (BC1 入口の RF 空洞型 BPM 信号の位相) を、SHB の位相調整によって一定にしている。3 箇所磁気シケイン型バンチ圧縮器 (BC1, BC2, BC3) のエネルギーとバンチ長についても、エネルギー分散部のビーム位置と CSR モニタが同じ状態になる様に、L バンド、S バンド、C バンドの各加速管位相を運転員が調整してきた。また BC1 にはエネルギースリットがあり、最終的にレーザー発振に必要な部分のみを切り出す。BC1 出口の電子バンチ電荷量が一定になるように、運転員が 476 MHz ブースター (BS) の位相を微調整

[#] kano@spring8.or.jp

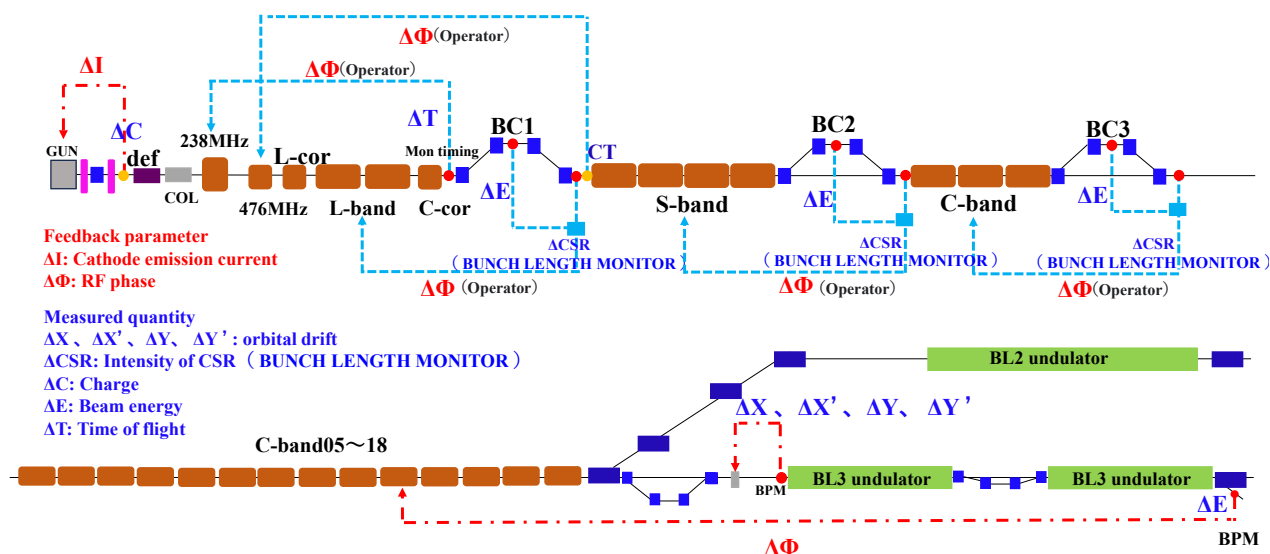


Figure 1: Conventional beam adjustment scheme.

する。しかし前節で述べた様に、ユーザーからの要求が高度になるにつれ、様々なモニターを見ながら運転員が手で加速器を調整する従来の手法では、レーザー発振状態の安定維持が難しくなった。

3. 従来の加速器調整手法の改善

まずこれまで運転員が加速器を手動調整してきた3カ所の磁気シケイン型バンチ圧縮器のビームエネルギーとバンチ長をフィードバックで固定したが、レーザー発振を長時間安定に維持することが出来なかった。日々の運転状態と各モニターデータを解析し検討した結果、電子銃カソード表面の形状が時間とともに変化して初期集束力が変わり、ディフレクター下流の丸穴コリメータを通過する電子バンチ電荷量に変化していることがわかった。238 MHz 下流のビームモニターでの電子バンチ電荷の変化を Fig. 2 に示す。

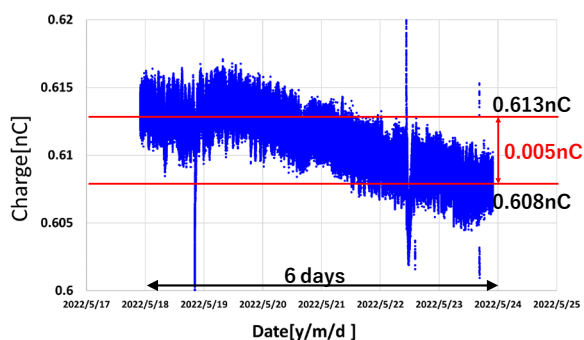


Figure 2: Electron bunch charge variation in beam monitors.

丸穴コリメータを通過する電子バンチ電荷量を一定にする為、Fig. 3 に示す磁気レンズを用いた新たなフィードバックを追加し、磁気レンズの収束力を変えて丸穴コリメータを通る電子バンチの電荷量を一定にした。フィードバック導入後約3ヶ月間の磁気レンズの制御量を見ると、電子銃カソード交換直後の1ヶ月間は磁気レンズの収束力が弱くなり、その後収束力を強くする方向へ数%程度

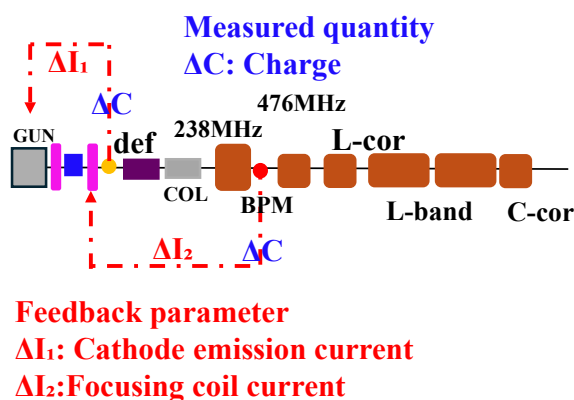


Figure 3: Electron bunch charge feedback using magnetic lens.

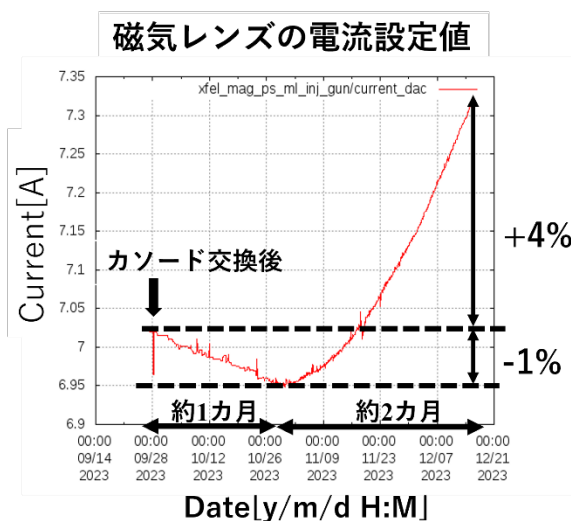


Figure 4: Magnetic lens current used for a bunch charge feedback.

変化していることがわかった。磁気レンズの電流の変化を Fig. 4 に示す。

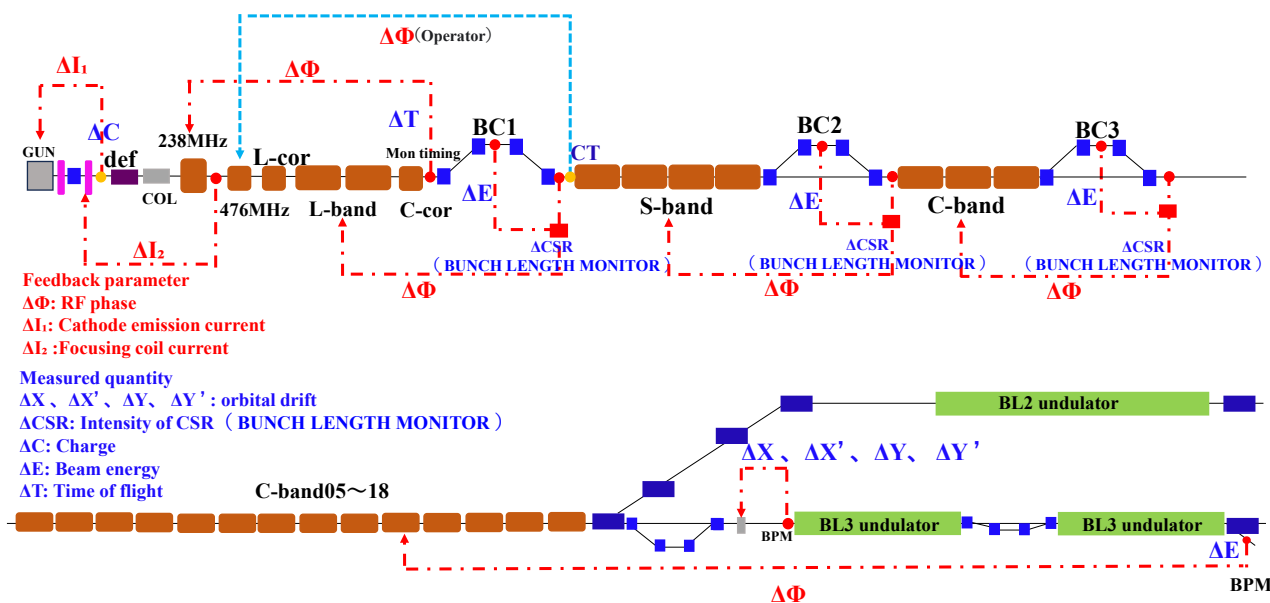


Figure 5: Improved beam feedback scheme.

フィードバックで使用しているバンチ長モニタ [6]は、電子ビームが偏向電磁石を通過するとき発生するコヒーレント放射光が、バンチ電荷量一定のもとで電子ビームバンチ長と相関することを利用して、電子銃からBC1までの電子ビームの電荷量を一定にしたことで、3段のバンチ圧縮器のバンチ長モニタが正しくバンチ長を評価できる様になり、Fig. 5 に示すシケインフィードバックの精度が向上した。その結果3段のバンチ圧縮器を上流から個別にフィードバックできるようになり、これまで運転員が

1 時間に数回行ってきた各加速管の位相調整頻度が1日数回程度に減少した。従来の方法で調整時の BL3 レーザー強度を Fig. 6 に、改良したフィードバック適用時のレーザー強度を Fig. 7 に示す。長期ドリフトや短期のふらつきが改善し、長時間レーザー発振を維持することが可能となった。またアンジュレータ上流部で生成した SASE 光を結晶で単色化し、アンジュレータ下流部で再び電子バンチと重ねることで増幅するセルフシード型 XFEL などの複雑な運転においても、改良したフィードバックによ

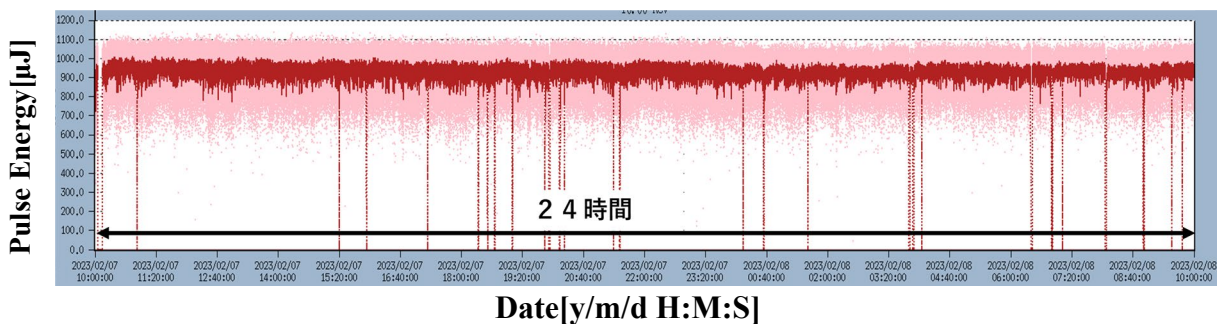


Figure 6: BL3 laser intensity when conventional beam adjustment method is applied.

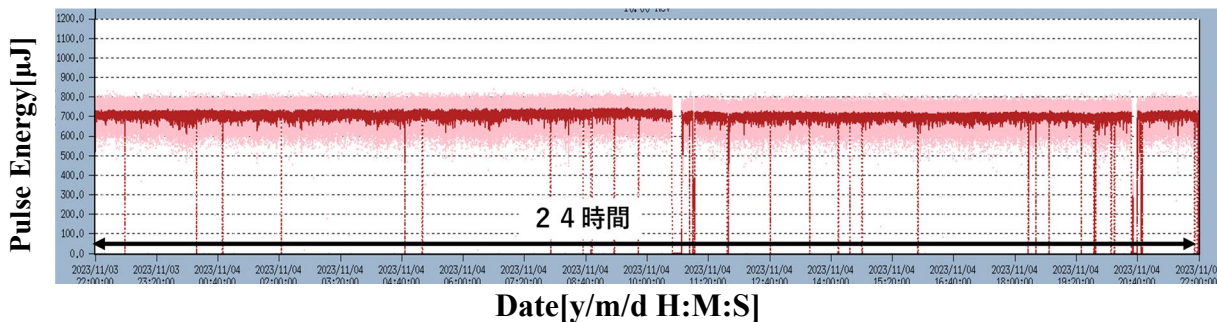


Figure 7: BL3 laser intensity with beam feedback.

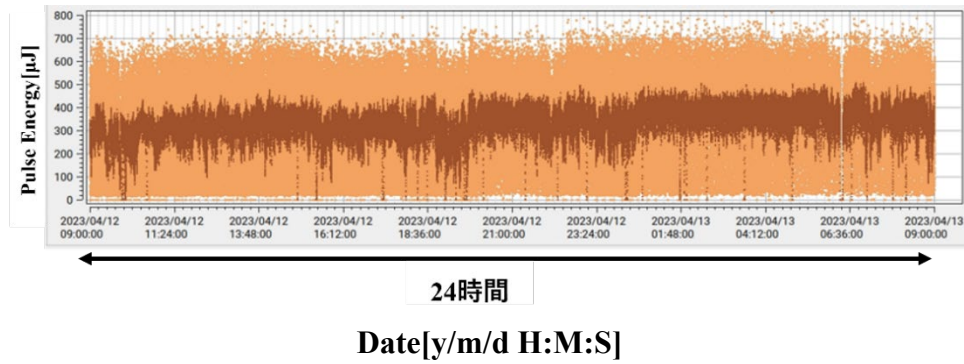


Figure 8: Laser intensity stability during self-seeding operation with conventional beam adjustment scheme.

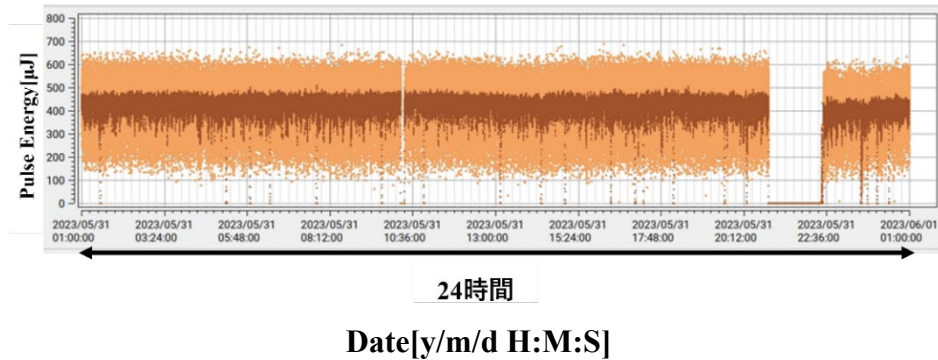


Figure 9: Laser intensity stability during self-seeding operation with beam feedback.

るレーザー強度安定性の改善が確認できた。Figure 8 と Fig. 9 は、セルフシード型 XFEL のパルス強度安定性を、フィードバック改良前後で比較したものである。

SACLA は、各加速空洞や加速管を同期するために、基準となるタイミング RF 信号を光ファイバで伝送している。温度などの環境変化による影響は、干渉計を使った光ファイバ長制御装置[7]でフィードバック補正しているが、末端で光を電気信号に変換する OE などの電子機器はフィードバックループの外にある。これらの電子機器は特に湿度の変化に敏感で、レーザー強度に影響を与えている事が判明している。電子ビームを使ったフィードバック補正により、こういった環境変化による変動がレーザーに与える影響についても小さく抑えられている事が確認できた。また、作業等のため RF 機器を停止して加速器トンネル内に入室した際も、これまでは加速器トンネル内作業後ビーム運転開始まで時間がかかっていた。これは RF を止めたことで、各加速管や空洞の温度が変化して共振周波数が変わり振幅が変化する為、安定するまで待ってからビーム運転を再開しレーザー強度を再現していたためである。一方電子ビームフィードバックを用いて、3段のバンチ圧縮器におけるビームパラメータを再現させることにより、加速管や空洞の温度が安定するのを待たずに、作業前のレーザー強度を数分で再現できるようになった。

4. まとめ

長時間のレーザー発振状態維持の為、電子バンチ電荷量を一定にするなどビームフィードバックを改良するこ

とで、3 段のバンチ圧縮器におけるビームフィードバックを精度よく動作させることができるようになり、SACLA 線形加速器の安定性が向上した。また加速器トンネル内作業後の RF 機器のドリフトを、ビームフィードバックを用いることで補正し、加速器スタートアップ時間を大幅に短縮することもできた。今後も更なる SACLA 安定化に向け、ビームフィードバックの改良に取り組んでいく予定である。

参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, “Low-emittance beam injection for a synchrotron radiation source using an X-ray free-electron laser linear accelerator”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 24, 110702 (2021).
- [2] T. Hara *et al.*, “Pulse-by-pulse multi-beamline operation for x-ray free-electron laser”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 020703 (2016).
- [3] T. Hara *et al.*, “Time-interleaved multienergy acceleration for an x-ray free-electron laser facility”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 16, 080701 (2013).
- [4] I. Inoue *et al.*, “Generation of narrow-band X-ray free-electron laser via reflection self-seeding”, *Nat. Photon.* 13, 319 (2019).
- [5] T. Hara *et al.*, “Two-colour hard X-ray free-electron laser with wide tunability”, *Nat. Commun.* 4, 2919 (2013).
- [6] C. Kondo *et al.*, “SACLA における CSR ビームバンチ長モニタの開発”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan* (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan).
- [7] H. Maesaka *et al.*, “Fiber Length Stabilization for the Optical Timing and RF Distribution System of XFEL/SPring-8”, *Proceedings of the 4th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan*, (2007).