

## SACLA 複数ビームラインの独立運転制御のための 運転インターロックシステム改良

### IMPROVEMENT OF OPERATION-INTERLOCK SYSTEM FOR INDEPENDENT OPERATION OF MULTIPLE BEAMLINES IN SACLA

松原 伸一<sup>#, A)</sup>、黒木 教平<sup>B)</sup>、尾藤 竹志<sup>C)</sup>、北村全伸<sup>B)</sup>、前坂 比呂和<sup>D)</sup>、大竹 雄次<sup>D)</sup>

Shinichi Matsubara<sup>#, A)</sup>, Kazutoshi Kurogi<sup>B)</sup>, Takeshi Bito<sup>C)</sup>, Masanobu Kitamura<sup>B)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>D)</sup>, Yuji Otake<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute, <sup>B)</sup> Hitachi Zosen Corporation,

<sup>C)</sup> IMT Co., LTD, <sup>D)</sup> RIKEN SPring-8 Center

#### Abstract

In the X-ray free electron laser facility SACLA, parallel operation of multiple beamlines has been realized to increase an availability of the beam time. Electron bunches are alternately distributed to two beamlines in pulse-by-pulse of 60 Hz repetition rate. However, with the previous operation-interlock system, the delivery of the electron bunches to both beamlines stopped, even when either beamline was alerted. We modified the logic and configuration of the interlock system to stop only the bunches distributing to the alerted beamline. We installed a special control module called CTC-PLC, which rapidly stops the electron bunches which is delivered to the specific beamline in shot by shot basis. In addition, the new system allows change the electron beam condition such as a beam energy independently for each beamline not to interrupt the beam delivery to another beamline.

#### 1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)施設 SACLA では、8 GeV の加速器で加速された 60 Hz の電子ビームを複数のビームラインへショット毎に振り分け、XFEL の利用機会を増やす高速振り分け運転が行われている[1]。現在は、60 Hz のビームを交互に 2 本のビームライン BL2、BL3 に振り分ける運転を行っているが、近い将来には、SPring-8 の蓄積リングへの入射も加えて、3 方向以上のルートへ、任意の繰り返し頻度で、任意のショットを任意のルートへ電子ビームを振り分ける計画である。高速振り分け運転においては、SACLA の加速器を仮想的にビームライン毎の独立した加速器であるように制御することを目指している。電子ビームの運転を監視する運転インターロックシステムにおいても、この高速振り分け運転に対応するための改良が必要である。

SACLA のインターロックシステムには、放射線防護に関わりエリア管理・監視を行う安全インターロック[2, 3]と、加速器構成機器の運転状態や真空状態を監視し保護する機器保護インターロック、そして電子ビームの運転状態を管理する運転インターロック[4, 5]により構成されている。運転インターロックシステムでは、電子ビームの出射許可、運転モードや電子ビームルートの設定と監視、加速電荷量の監視、ビームダンプへの電子ビームの入射保障を行っている。当初の運転インターロックシステムでは、あるビームラインにおいて電子ビームの過大な損失や偏向電磁石の励磁異常などのインターロックが発報した際に、全ての振り分け先への電子ビームの出射を停止することになっていた。しかし、高速振り分けによる複数ビームラインの同時利用が定常的になり、ビームライン

毎に別のユーザ実験が行われるようになった現在では、インターロック動作の対象でないビームラインの運転を妨げずユーザ実験を継続できるシステムが求められた。また、利用運転中には個別のユーザより任意のタイミングで、電子ビームのエネルギーなどのパラメータ変更が求められる。パラメータの変更時には、ビームルートの保証のために、電子ビームの出射を停めて偏向電磁石など機器の設定を変更する必要がある。

これらの問題を解決するため、ショット毎に電子ビームの出射を制御する機能を、運転インターロックシステムに追加した。そして、複数のビームラインを独立に管理し、異常の発生したビームラインへ入射される電子ビームだけを停止させることとした。また、2019 年に予定される、任意のショットを任意のビームルートへ振り分けるオンデマンド運転を想定し、それに対応するシステムとした。我々は、現状の Programmable logic controller (PLC) 群で構成された運転インターロックシステムの拡張で、これらの複雑なロジックを実現した。本稿では、運転インターロックシステムにおけるこの複雑なロジックや高速システムの実現方法について報告する。

#### 2. 運転インターロックシステムの構成

運転インターロックシステムの構成図を Fig. 1 に示す。また、運転インターロックシステムに関わる SACLA の構成機器配置を Fig. 2 に示す。

運転インターロックシステムは、SACLA 施設内に配置された 7 台の PLC 群で構成されている。制御室に設置した PLC 主局は、タッチパネルにて状態の表示・操作を行う。電子銃の動作、電子ビームの出射を制限するための PLC 子局 1 が加速器上流部の第 1 シケイン (BC1) 付近に設置されている。SACLA の電子ビームは、熱電子

<sup>#</sup>matsubara@spring8.or.jp

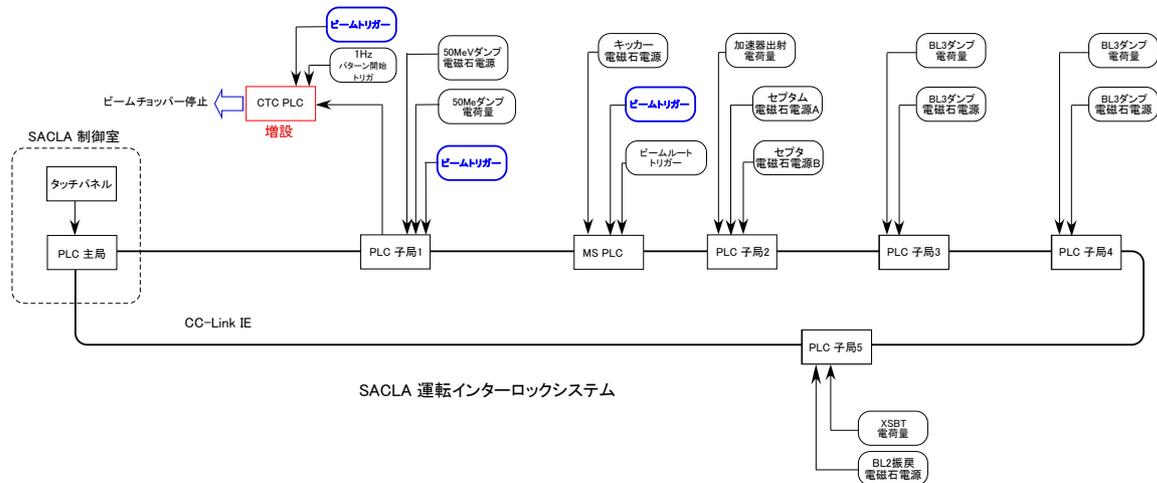


Figure 1: Configuration of the beam operation inter-lock system in SACLA.

銃から最大 60 Hz の繰り返しで生成され、直後に設置された高速パルス・ビームチョッパーにより 1 ns に切り出される。インターロックシステムにより、ビームチョッパーを停止することで、電子ビーム出射を抑制することができる。また、この PLC 子局 1 において SACLA 入射部終端の 50 MeV ダンプへの電子ビームの入射、入射電荷積算量の監視も行っている。

加速器終端部 (Matching section : MS) に設置した PLC 子局 2 は、加速された電子ビームの出射電荷量の監視を行う。そして、ビームライン終端のビームダンプ近傍に設置した PLC 子局 3, 4 は、ビームダンプへ入射した電子ビームの電荷量を計測し、正しくビームダンプへ導かれていることを監視している。また、SPring-8 蓄積リングへ接続する XSBT ビーム輸送ライン付近に設置された PLC 子局 5 は、XSBT へ出射した電荷量を計測し、ビームルートの監視をしている。これらの PLC 群は、冗長性を持つ CC-Link IE の光 2 重ループで確実に接続されている。電子ビームの出射管理をするため、PLC 子局 1 にビームトリガー信号を入力し、このタイミングを CC-Link IE を通じて各 PLC ユニットへ配信することにより、ビームショットに同期して監視動作をすることができる。

2015 年に開始した高速振り分け運転のため、ショット毎にビームルートの設定・状態が適正であることを監視する改良を行った[5]。具体的には、電子ビームを振り分けるキッカー電磁石の励磁値とタイミングが、電子ビームの設定エネルギーと振り分け先ルートと一致していることをショット毎に監視する仕組みである。この目的のために、加速器終端部に MS-PLC を増設した。この MS-PLC には専用の基準ビームトリガー信号を入力し、そのタイミングで割り込み処理を行うことで、ビームのタイミングに対応するキッカー電磁石の励磁値を監視・判定することができる。この仕組みの詳細については、参考文献 5 に記している。

### 3. 高速振り分け運転のインターロック概要

今年 1 月には、ショット毎に電子ビームの出射ルートを任意に切り替える複雑な高速振り分け運転のための改良を行った。高速振り分け運転において、ビームライン毎に独立した加速器として仮想的に扱うためには、インターロックが発報したビームライン、ルートに入射する電子ビームの出射だけを選択して停止することが必要である。そこで、該当するショットのビームチョッパーへのトリガー信号を停止して、電子ビームを出射しないようにすることとした。ビームチョッパーの動作タイミングは XFEL の安定な発振に大きく影響するため、5 ps 以下の時間精度が必要とされる。その時間精度を実現するために開発された VME トリガーディレイユニット (TDU, Trigger Delay Unit) によって、トリガー信号は 1 ps 以下の精度で生成される[6]。この VME-TDU には、外部からの出力インヒビット信号を受けて、トリガー出力を停止する機能があり、今回の改造ではこのインヒビット信号をパルス出力する PLC 装置 (CTC, Chopper trigger controller) を製作し設置した。CTC-PLC と他のインターロックシステムとの信号の授受について Fig. 3 に示す。MS-PLC と同様に、専用の基準ビームトリガー信号による割り込み処理を行うことで、PLC を用いても約 0.1 ms の精度のインターロック制御が行える。このインヒビット信号の付加により、ビームチョッパーへ送る動作トリガー信号の精度を損なうことはない。

また、インターロックにより対象のビームラインへの電子ビーム出射を停止するためには、CTC-PLC は、各出射ショットに対応した電子ビームの振り分けルート情報を事前知っておく必要がある。現在の振り分け運転は、

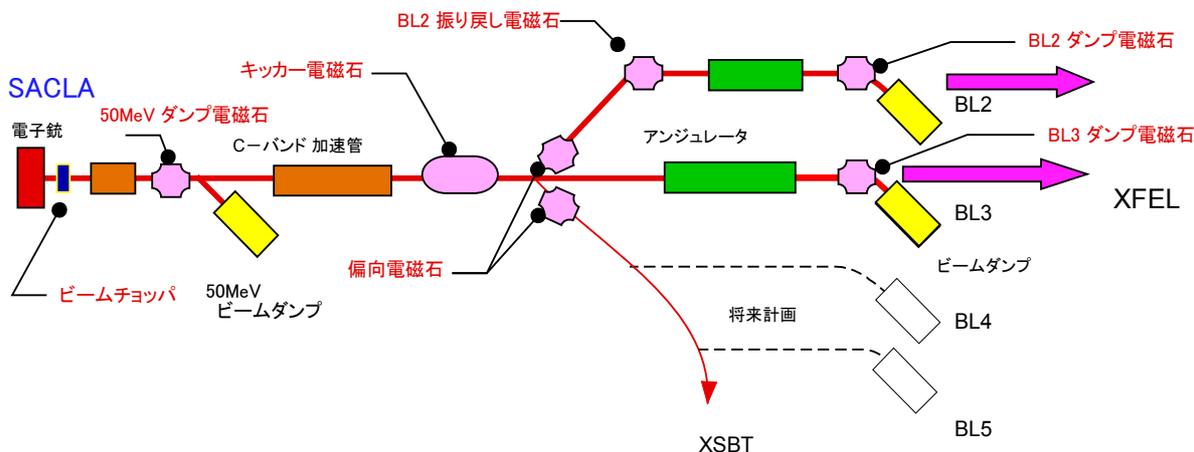


Figure 2: Configuration of SACLA and components concerned with the operation interlock system.

BL3、BL2 への均等・交互振り分け条件のみと決まっているため、予め PLC 内に交互動作のパターンを組み込んでいる。CTC-PLC では、ビームトリガーとパターン開始の 1 Hz のトリガー信号を入力し、BL3、BL2、BL3、BL2、、、と交互のビームルートへの出射を制御している。一方、2019 年から予定されているオンデマンド運転では、あらかじめ設定された 60 ショット分の出射ビームルートパターンが 1 秒毎に選択される。ビームルートパターンが複雑になり、ビームルートパターンの更新が必要になる。その際には、CTC-PLC に入力している 1Hz のパターン開始トリガー信号を、ショット毎にビームルート情報を入力する方式に変更する。ルート情報の入力については MS-PLC と同じ方法で、ショット毎にルートトリガーが入力されルート情報を管理する[5]。

SACLA においては、安全インターロックや、機器保護インターロックからも即座に電子ビームの出射を停止する必要がある。これらのインターロックもまた、CTC-PLC を経由して各ビームルートの電子ビームの出射を停止することになる。ビームルート毎に出射を制御するため、CTC-PLC へ入力されるインターロック信号は、各ビームルートに対応した数だけの信号が用意されている。安全

インターロックからは、ビームルート信号だけではなく、全てのショットの電子ビームを止めるための信号も接続され、インターロックの 2 重化がされている。

この改良を行った後、60 Hz のビーム出射周期での BL2、BL3 への高速振り分け運転時のショット毎の測定電荷量を Fig. 4 に示す。Figure 4 (a) の定常状態では、ショット毎に BL2 と BL3 へ交互に電子ビームが出射されているのがわかる。Figure 4 (b) は、CTC-PLC の動作により BL2 へ入射する電子ビームのショットを停止した時のものである。PLC を用いたインターロックシステムにより所定のビームルートへの電子ビームの出射を制御できていることがわかる。

運転インターロックシステムでは、電子ビームの出射許可を出すと共に、加速器末端でのショット毎の電子ビーム電荷量をモニターし監視している。このシステムにより、電子ビーム入射が許可されないショットのタイミングで、有意な電荷量を検出した際には、異常事態として直ちに全ショットの電子ビームの出射を停止する。加えて、ビームチョッパーの動作信号も CTC-PLC に入力して監視しており、許可されていないタイミングでビームチョッパーが動作することがないように 2 重に監視している。

今回のインターロックシステムの改良により、高速振り分け運転時に特定のビームルートの電子ビームだけの出射停止を保証することができ、特定のビームラインのビームエネルギーの変更やビーム調整を独立して行うことができるようになった。そして、ビームライン毎に独立した加速器として仮想的に扱えるようになった。

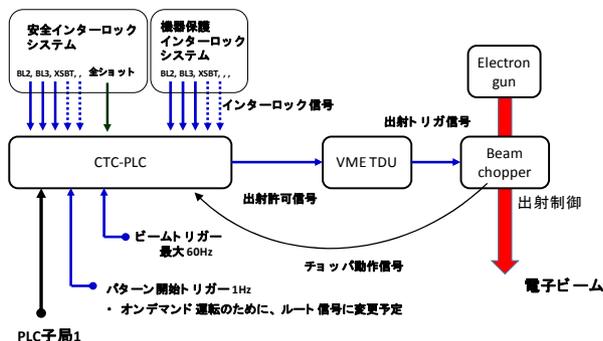


Figure 3: Structure of the input and output signals of the CTC-PLC.

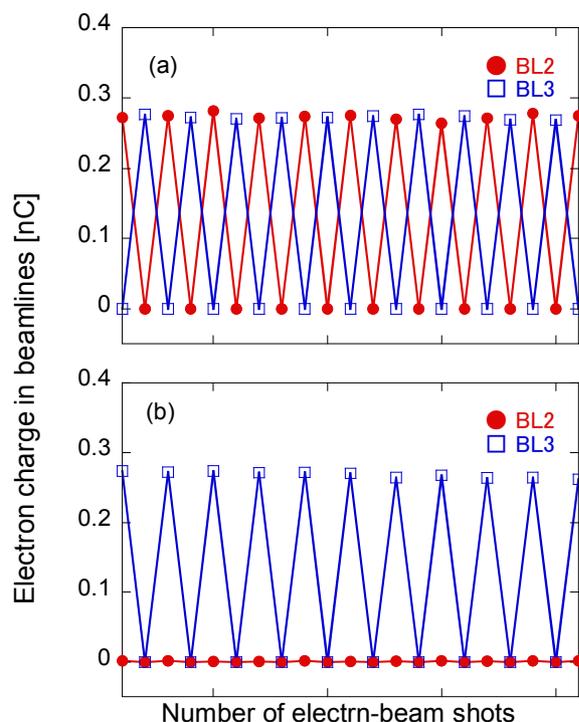


Figure 4: Measured electron beam charge for BL2 and BL3 during the multiple beamline operation with 60 Hz repetition. (a) is the operation with permission of both beamlines. (b) shows the status of stopping shots to BL2 by using the operation-interlock system.

- [4] S. Matsubara *et al.*, “System design of beam operation interlock for the XFEL/SPring-8”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2010).
- [5] S. Matsubara *et al.*, “Upgrade of beam-operation interlock-system for SACLA”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2015).
- [6] Y. Otake *et al.*, “Timing and low-level rf system for an x-ray laser”, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 022001 (2016).

#### 4. まとめ

SACLAにおいて、高速振分け運転による複数ビームラインの同時利用運転をより使いやすくするために、運転インターロックシステムの改良を行った。改良前は、特定のビームラインにおいてインターロックが働く際に全ての電子ビームの出射が停止されていた。今回、ビームライン毎のインターロック情報を独立に管理し、異常の発生したビームルートへ入射されるビームだけを停止させるインターロックシステムを構築した。この改良により、ビームルートで使用する電子ビームのエネルギーを変更する時や加速器の調整を行う際にも、他のビームルートの運転を中断する必要は無くなり、XFELの利用が継続でき、運転の中断時間を減らすことができた。

#### 参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, “High peak current operation of x-ray free-electron laser multiple beam lines by suppressing coherent synchrotron radiation effects”, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 040701 (2018).
- [2] M. Kago *et al.*, “Design report of accelerator safety interlock system for SACLA”, Proceedings of the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2008).
- [3] M. Kago *et al.*, “Radiation safety interlock system for SACLA”, Proceedings of ICALEPCS2011 (2011).