

SACLA 運転インターロックシステムの更新 — 高速振分運転への対応 —

UPGRADE OF BEAM-OPERATION INTERLOCK-SYSTEM FOR SACLA

松原 伸一^{#,A)}, 前坂 比呂和^{B)}, 北村全伸^{C)}, 尾藤 竹志^{D)}, 大竹 雄次^{B)}

Shinichi Matsubara^{#,A)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Masanobu Kitamura^{C)}, Takeshi Bito^{D)}, Yuji Otake^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute, ^{B)} RIKEN SPring-8 Center,

^{C)} Hitachi Zosen Corporation, ^{D)} IMT Co., LTD

Abstract

In SACLA, which is an X-ray free electron laser in the SPring-8, a new-beam line of BL2 has been constructed. Furthermore, the plan, which relocates the SCSS test accelerator to the upstream part of the BL1 of SACLA, has been also executed. For this reinforcement, modification of the logic and configuration of an interlock were needed. This interlock system is called a beam operation interlock system to manage the SACLA's machine operation. The interlock system governs permissions, such as for routing electron-beam trajectories along the beam lines of SACLA, for managing an operation mode to extract beams from electron guns, and for controlling amounts of integrating accelerated electron-charges. For the reinforcement, the operation interlock system equips new two essential-logics. One is monitoring ability of a proper electron beam routing along the individual beam lines. This complicated routing is decided by the output currents from power supplies to a kicker magnet and DC bending magnets settled on the beam lines of the BL1 ~ 3. The kicker magnet is operated at a maximum of 60 Hz. The operation interlock system should check the current of the kicker magnet in shot by shot of the beam. Therefore, we installed the MS-PLC, which is able to rapidly monitor the kicker magnet current at a certain timing, in to the operation interlock system. The other is managing the exclusive operation between the two electron sources of SACLA and the relocated SCSS, so as not to simultaneously inject the beam to the BL1 from the both machines. SACLA properly operates after the above-mentioned improvements by changing the configuration and interlock-logic of the operation interlock system.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 SACLA ではユーザの利用機会を増やすために、3つの大きな高度化・改造を 2014 年に行った。1つは、新しいビームライン・BL2 を増設した。そして、2つ目として、既存ビームラインである BL3 と増設した BL2 へショット毎に電子ビームをパルス・キッカー電磁石により高速振り分けをする^[1]高度化である。3つ目は、2013 年に運転を終了した SCSS 試験加速器を SACLA の BL1 ビームライン上流に極紫外 FEL 駆加速器として移設したことである^[2]。これにより、SACLA 施設内に2つの電子ビーム源を設け BL1 を独立に運転することができる。今までユーザは、1本のビームラインしか利用できなかったが、これらの高度化・改造により、BL1 と BL2 および BL3 の複数のビームラインを同時に利用できるようになる。これらの大きな装置改造に伴い、SACLA のインターロックシステム^[3,4,5]も変更が必要であった。

SACLA のインターロックは、放射線防護に関わる安全インターロック^[3,4]と各構成装置に関わる機器保護インターロック、そして SACLA の複雑な運転・動作を管理する運転インターロック^[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・電子ビームルート設定、加速電荷量の監視・積算・制限、ビームダンプへの電子ビームの入射保障、ビームの繰り返し周期の設定を行っている。前記の高度化に対応するため運転インターロックシステムは以下の改造を行った。

1つは、時分割で複数ビームラインへビームを伝送するビームルートの設定が適正であることを、最大 60 Hz で行う高速振り分け運転に対応してショット毎に監視できるようにした。そのためには、電子ビームのショット毎に変わるビームルートに沿った複数の偏向電磁石が、適正な磁場を発生していることをその励磁電流で監視する必要がある。たとえばそれは、ショット毎にビームライン、ビームエネルギーを変える高速振り分け運転では、キッカー電磁石の励磁値・タイミングが共に時々刻々で適正でなければならぬ^[6]。2つ目は、SACLA 施設内に増設した 2 台目の加速器である極紫外 FEL を、SACLA の運転と干渉なく運転できるようにした。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て、高速・安定なインターロック動作を目指した。しかし、PLC などのプロセス制御用の装置では、キッカー電磁石におけるミリ秒領域のパターンの高速電流の監視は容易ではない。本稿で我々は、運転インターロックシステ

[#]matsubara@spring8.or.jp

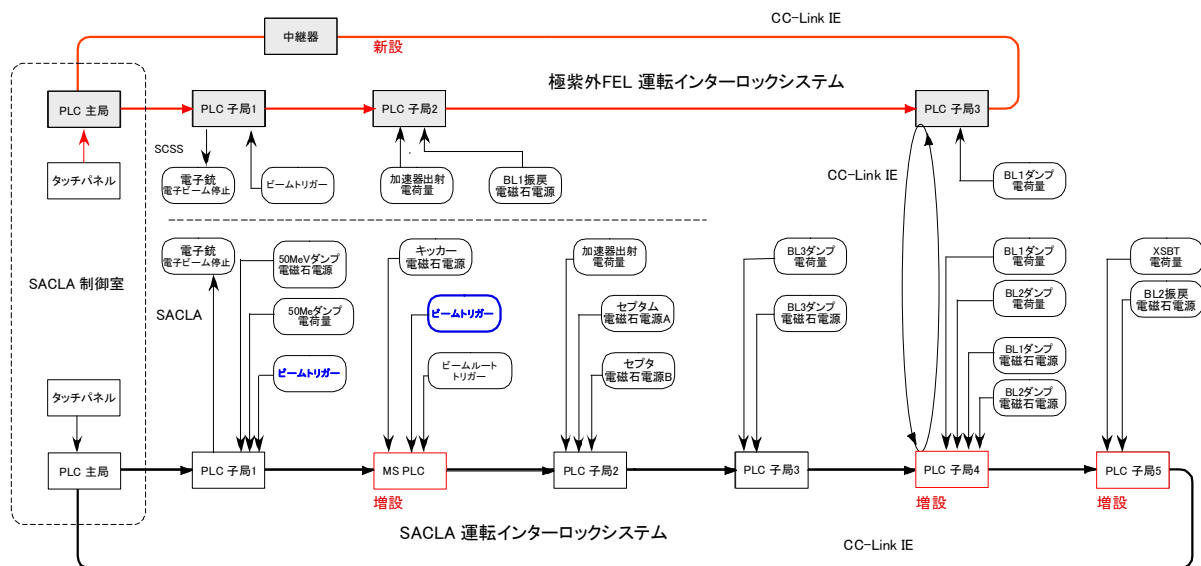


Figure 1: Configuration of the beam operation inter-lock systems for the SACLA and the EUV-FEL accelerators.

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記述する。特にキッカー電磁石の電流監視には、高速性を維持するために特別な工夫をしたので、それについて述べる。

2. 運転インターロックの改修

2.1 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。SACLA の立ち上げ当初はビームラインが BL1 と BL3 の 2 つであり、SACLA の運転インターロックシステムだけで、4 台の PLC 群で構成されていた (PLC 主局、PLC 子局 1, 2, 3)。我々は、この構成を BL2 の増設・高速振り分け運転対応のために MS-PLC、PLC 子局 4, 5 を増設して、7 台の PLC 群にした。また、極紫外線 FEL 用の運転インターロックシステムを新設した。加速器に沿って配置されている PLC 群それぞれの役割を以下に記す。各運転インターロックシステムの主局 PLC は制御室に設置し、タッチパネルから独立に状態の表示・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 が加速器上流に設置されている。加速器終端部に設置した PLC 子局 2 は、加速器において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、ダンプ近傍に設置した PLC 子局 (SACLA 運転インターロックの PLC 子局 3, 4、および、極紫外 FEL の運転インターロックシステムの PLC 子局 3) においては、電子ビームがビームダンプへ入射することを監視する。また、SACLA 入射部に設けられ

た 50 MeV ダンプへの入射や Spring-8 蓄積リングへ伝送する XSBT ルートの監視を担う PLC がそれぞれ設けられている。SACLA の高速振り分け運転のビームルート制御のため、MS PLC を設置し、キッカー電磁石電源の適正励磁を監視できるようにした。

2.2 適正ビームルートの監視改修

SACLA は Fig. 2 に示すように複数の光源ビームラインを有するため、装置の安全な運用のためには適正なビームルートの設定が必要である。改修前の運転インターロックシステムでは、指定したビームルートの偏向電磁石が適正に、励磁か非励磁の状態監視のみで電子ビームの出射許可または不許可を行っていた。それは、ビームエネルギーに対する偏向電磁石の適正励磁値の監視を、放射線安全を担保する安全インターロックシステムにおいて別に行っていたからである^[3,4]。

それに対して、SACLA の高速振り分け運転と極紫外 FEL 増設の高度化に伴いビームルートが複雑化したので、我々は安全インターロックシステムの変更を行った。具体的には、安全インターロックは当該放射線領域のエリアの閉鎖管理のみを行う。放射線の SACLA の加速器収納室からの放射線漏洩への防護は、ビーム光学上で電子ビームが万が一にビームダクトに当たって損失が予想される場所に、放射線遮蔽を増強して放射線安全を担保することで行う。また我々は、収納室外の当該箇所に放射線のエリアモニターを設置して、冗長的に放射線漏洩を監視するようにしている。これにより、安全インターロックシステムから、各ビームルートの偏向電磁石の適

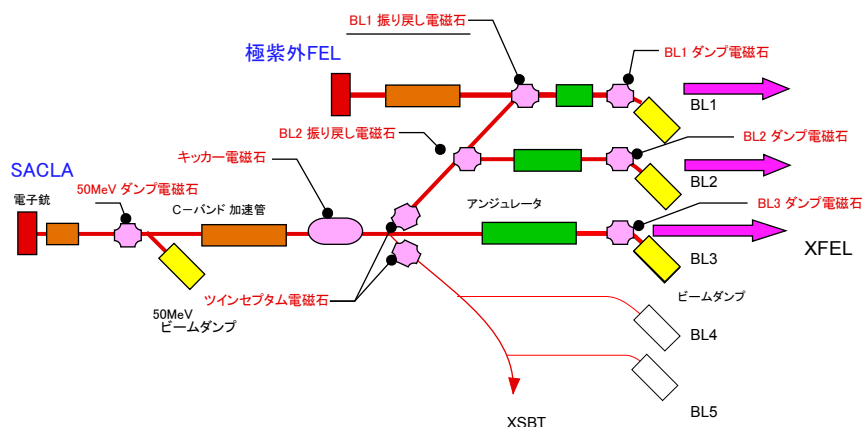


Figure 2: Configuration of the SACLA and the EUV-FEL accelerators.

正励磁値を監視するビームルート安全インターロック機能⁴⁾を省き、ロジックを簡素化した。

以上の理由から、我々は、ビームルートの監視を主に運転インターロックシステムが担う事にして、SACLA の全ての偏向電磁石の適正励磁値監視機能を当該システムに組み込んだ。加えて、電子ビームが XFEL 実験ハッチへ伝送されないことを冗長的に担保するために、ダンプ電磁石の適正励磁値を引き続き安全インターロックが監視している。監視する偏向電磁石の配置を Fig.2 に示す。適正判定基準は安全インターロックが行っていたものと同じ、設定値から $\pm 10\%$ の以内範囲である⁴⁾。

DC 偏向電磁石の励磁値の監視機能は、電子ビームの電荷量を読み読み取る PLC 子局に追加された。加えて、改修後の本システムは、キッカー電磁石下流の DC ツインセプトム電磁石の励磁値も同様に監視している。そして、SACLA 加速器終端部 (Matching section : MS) に新設した MS-PLC が、最大 60 Hz でパルス動作するキッカー電磁石の励磁値を電子ビームのショット毎に監視する。MS-PLC の詳細な説明は 3 節に記述する。

これにより、パルス・キッカー電磁石、セプトム電磁石、振り戻し電磁石、ダンプ電磁石の励磁値を監視でき、設定ビームルートに対する各電磁石の適正励磁値の組み合わせにより、適正ビームルートの運転を保障する。

2.3 極紫外 FEL 用の運転インターロックシステム

SACLA と極紫外線 FEL は独立した加速器なので、個々に運転を行う。そのために、極紫外線 FEL 用の運転インターロックシステムは別システムとして構築した (Fig. 1)。制御室には、SACLA と紫外極紫外線 FEL それぞれのシステムを操作するためのタッチパネルが設置され、独立に運転状態の表示・操作が行われる。システム概要は、SACLA の運転インターロックと同様である⁴⁾。加えて、電荷積算計は極紫外 FEL 専用が独立にシステム内に設置され、出

射電荷は独立に管理される。

極紫外線 FEL の光源ビームラインは、SACLA の光源ビームラインの 1 つである BL1 を用いる。すなわち我々は、Fig. 2 に示すように一つのビームラインを 2 つの加速器で供用するわけである。そのため、BL1 へ SACLA と極紫外 FEL から同時に電子ビームを入射しない排他的な運転の監視が必要である。この理由から我々は、BL1 上流の DC 偏向電磁石 (BL1 振り戻し偏向電磁石) の励磁状態を監視する。極紫外 FEL の運転インターロックの PLC で BL1 振り戻し偏向電磁石の励磁値を監視し、励磁されていない状態でのみ、BL1 上流の極紫外 FEL からの電子ビームの出射を許可する。SACLA から BL1 への電子ビームの出射は、BL1 振り戻し偏向電磁石が適正励磁されていることで許可される。BL1 の振り戻し偏向電磁石の励磁値は、極紫外 FEL の運転インターロックシステムから読み取り、CC-link-IE を介して SACLA の運転インターロックシステムへ渡される。BL1 への電子入射は、BL1 振り戻し電磁石の動作により SACLA と極紫外線 FEL の間で排他的に管理されている。この BL1 ダンプ電磁石の励磁値は、SACLA の運転インターロックシステムから読み取りとられ、極紫外 FEL の運転インターロックシステムと情報が共有されている。

これにより我々は、1 つの建屋内に設置された SACLA と極紫外線 FEL の 2 つの加速器を干渉なく独立に運転することができる。また、極紫外 FEL の運転インターロックシステムを独立で構築したことで、極紫外 FEL の機器や運転インターロックシステムに故障などが生じてても、SACLA の運転を支障なく行うことができる。ただし故障時には、BL1 への極紫外 FEL からの入射状況が SACLA の運転インターロックシステムから確認できないため、SACLA からは BL1 への入射はできない。このように、極紫外 FEL のシステムに不具合が生じてても、BL2, BL3 への入射だけであれば、SACLA の運転は継続できる。

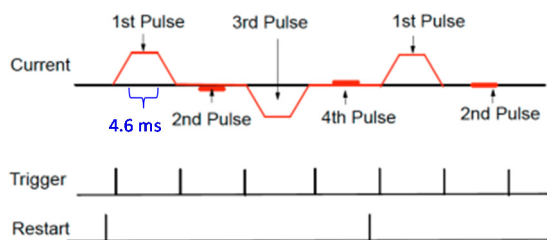


Figure 3: A current-output pattern of the kicker magnet power supply and the trigger signal and the restart signal into the power supply [6].

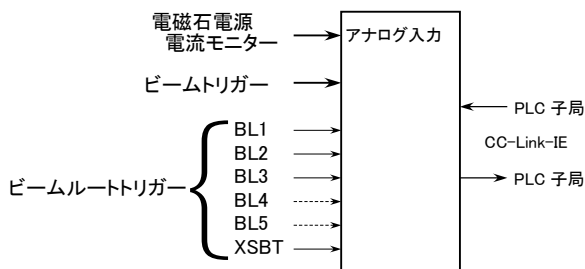


Figure 4: Structure of the input and output signals of the MS PLC.

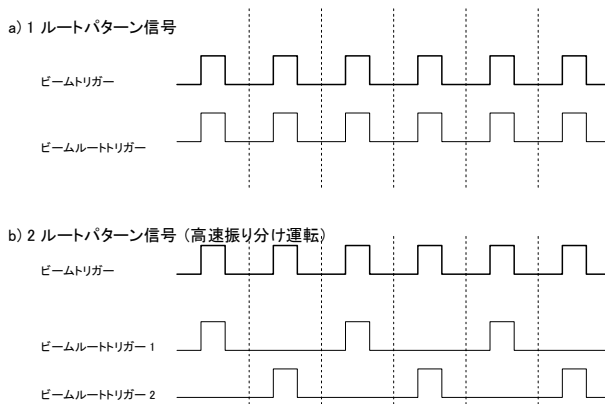


Figure 5: Sequence patterns of the beam trigger and the beam-root triggers to the MS-PLC.

3. 電子ビーム時分割高速振り分け手順およびその監視

SACLA の高速振り分けは、最大 60 Hz のショット毎に各ビームラインへエネルギーの違う電子ビームを振り分ける。高速振り分けを行うキッカー電磁石には、ショット毎に違う値で磁場を励磁する必要がある。このキッカー磁石を励磁する電源は、事前に制御回路に記憶させた最大 4 つの電流値パターンで動作する。外部からのビームトリガー信号に同期して、1～4 の設定パターンに対応した電流パルスが順次出力される。そして、リスタート信号により 1 番目の設定パルス出力に戻る。キッカー電磁石電源の制御回路は、ビームトリガーのタイミングに合わせて前記のパターン運転を自身で閉じて自動的に

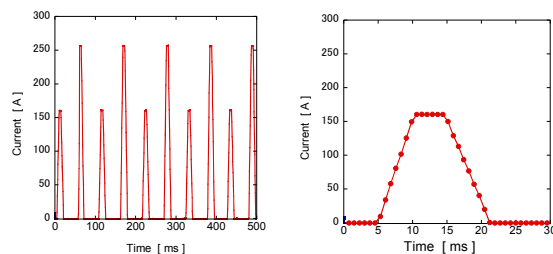


Figure 6: Measurement results of the kicker magnet current by using the MS-PLC. The current profiles on the graph are two patterns.

行う。キッカー電磁石の動作例を Fig.3 に示す。SACLA の運転インターロックシステムでは、以上のような複雑なパターン電流値設定が適正かとトリガーシステムが各実験ユーザへビームライン毎供給するタイミング信号（ルートトリガー）が適正かを監視する必要がある。この難しい実時間での複雑な監視判定を、既存のシステムに新規に増設した MS-PLC が行う。

高速にパターン電流値をモニターするためには、MS-PLC にはユニバーサルモデル高速タイプ (Q04UDVCPU)^[7]を用いた。MS-PLC の入出力信号の種類を Fig. 4 に示す。この PLC には、ビームトリガー、各ルートトリガーが入力される。ビームトリガーは SACLA 線形加速器からの加速電子ビームの出射タイミングであり、ルートトリガーは各ビームラインへの入射周期タイミングである。ルートトリガーは、ビームトリガーを間引いた周期になり、それぞれのビームライン毎のルートトリガーのタイミングが交互に重ならないようにする (Fig. 5)。この MS-PLC には、ビームトリガーが 1 つ、ルートトリガーが 6 つ (BL1, BL2, BL3, BL4, BL5, XSBT 用) の入力端子が設けられている。BL4, BL5 の 2 つのビームラインは将来の増設予定のものである。

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管理しており、電子銃直下流のビームチョッパーの動作周期・ビームトリガーを Fig. 1 に示す加速器上流部に設置した PLC 子局 1 に入力して、そこからトリガー信号を CC-link-IE を通じて各 PLC ユニットへ配信している。これによりシステムは、各 PLC の動作をビームショット毎に同期することができる。しかしながら、CC-link-IE でのトリガー配信ジッター精度は 2 ms 程度であり、ネットワークでのデータの遅延やその他の PLC 処理時間を考慮すると、キッカー電磁石の 4.5 ms のパルスの平坦部内 (Fig. 3) で、適正なタイミングの電流値を安定に読み取るのは困難であった。そのため、MS-PLC には独自のビームトリガー入力を設けて割り込み処理を行うことで、システムは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判定する。

これらのトリガー信号は SACLA の LLRF システム⁸⁾より出力される。キッカー電磁石へも、同じ LLRF システムからトリガーが配信されている。これにより運転インターロックシステムは、入力されるビームトリガー周期と、MS-PLC に入力されるビームトリガー周期、キッカー電磁石に入力されるビームトリガー周期の間にタイミングズレなどの齟齬がある場合、電子ビームの出射を止めることができる。また、ビームトリガーとルートトリガーの齟齬、ルートトリガーが入力されない事象、複数のルートトリガーのタイミングが重なった場合も電子ビームの出射を止める。

MS-PLC は、キッカー電磁石電源から出力されるパルス電流値に比例したモニター電圧を監視する。モニター出力は 1~10 V であり、それは 320 A から 320 A の電流値に相当する。0 A が 5.5 V に相当する出力である。断線などの機器トラブル時にモニター値が 0 V になることを考慮して上記の出力とした。MS-PLC で読み取った 2 パターン運転時のキッカー電磁石の出力電流を Fig. 6 に示す。本システムは、出力電流値を 50 mA (rms)の精度でモニターできている。これは、我々が決めた設定値から±10%の範囲を適正と判定するのに十分な読み取り精度である。また MS-PLC に入力されたビームトリガーに対して、~ 0.1 ms のジッタータイミンで励磁値が判定できている。

MS-PLC は、ルートトリガーの入力を受け、対応するビームラインへのキッカー電磁石の適正励磁値をショット毎に呼び出す。そして、ビームトリガーのタイミングのキッカー電磁石出力電流を読み取り、適正励磁値であることを判定する。この判定結果を上位の PLC 主局に送る。運転インターロックシステムは、励磁値に齟齬がある場合に電子銃直下流のビームチョッパーの停止により電子ビームの出射を止める。以上に述べた MS-PLC の機能により、システムは最大 60 Hz で動作するキッカー電磁石の適正励磁値が監視でき、高速振り分け運転の適正ビームルートの監視を行うことができる。

MS-PLC は、ルートトリガーとキッカー電磁石の電流値により想定されるビームルート（軌道）が適正であることを監視できるが、ルートトリガーと実際の電子ビームエネルギーに対応したビーム軌道と通過ビームラインが各ショットで適合しているかを確認できない。しかし、運転インターロックシステムは、SACAL に沿った電流モニターの出力値を使い電子ビームのビームダンプへの入射をショット毎に確認しているため、ルートトリガーほかとビームエネルギーの間に齟齬がある場合は直ちに射を停止することができる。以上に述べたように運転インターロックは、キッカー電磁石の適正励磁監視と、ビームダンプへビームの入射監視の 2 重の監視を行うことで、高速振り分けの適正運転の信頼性を担保

している。実際、改修した運転インターロックシステムの監視のもと、BL2 と BL3 の高速振り分け運転が安全に行われている。

4. まとめ

X 線自由電子レーザー SACLA では FEL のユーザ利用の機会を増やすために、我々はビームラインの増設、高速振り分け運転対応、極紫外 FEL 増設を行った。これらの大きな装置改造に伴い、SACLA のインターロックシステムの変更が行われた。SACLA の複雑な運転・動作を管理する運転インターロックシステムでは、今回、① 適正ビームルートの監視の改修、② 極紫外 FEL の運転インターロックシステムの増設を行った。適正ビームルート監視の改修により、電子ビームルートに関わる偏向電磁石と最大 60Hz で振り分け動作をするキッカー電磁石の適正励磁値の監視が、本システムによりショット毎に行えるようになった。また、極紫外 FEL の運転インターロックシステムの増設により、SACLA と極紫外 FEL の運転管理が、独立してできるようになった。また、SACLA と極紫外 FEL からの BL1 への電子ビームの入射が、同時に行われられないように排他的に管理できるようになった。この運転インターロックの改修は 2015 年 1 月までに行われた。現在までに、この運転インターロックシステムの管理に基づき BL2 の運転、高速振り分け運転が行われている。極紫外 FEL の運転は 2015 年秋からを予定している。

参考文献

- [1] T. Hara et al., “Development of the electron bunch distribution system at SACLA”, Proceedings of the 11 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2014).
- [2] T. Sakurai et al., “Construction and RF condition of EUV-FEL accelerator for SACLA”, Proceedings of the 12 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2015).
- [3] M. Kago et al., “Design report of accelerator safety interlock system for SACLA”, Proceedings of the 11 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2008).
- [4] M. Kago et al., “Radiation safety interlock system for SACLA”, Proceedings of the 11 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2011).
- [5] S. Matsubara et al., “System design of beam operation interlock for the XFEL/SPring-8”, Proceedings of the 11 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2010).
- [6] H. Takebe et al., “High precision pulse magnet power supply development for SACLA beam-line switch and pulse NMR measurement”, Proceedings of the 11 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2014).
- [7]<http://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/faspec/detail.do?kisyu=plcq&formNm=Q04UDVCPU>
- [8] H. Maesaka et al., “Beam diagnostic system for the SACLA beamline upgrade system”, Proceedings of the 12 the Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2015).