

RADIATION SAFETY INTERLOCK SYSTEM FOR SACLA

Masahiro Kago ^{#A)}, Tomohiro Matsusita ^{A)}, Nobuteru Nariyama ^{A)}, Yoshihiro Asano ^{B)}, Toshiro Itoga ^{B)}, Yuji Otake ^{B)}, Choji Saji ^{A)}, Hideki Takebe ^{B)}, Hitoshi Tanaka ^{B)}, Ryotaro Tanaka ^{A)}, Akihiro Yamashita ^{A)}

^{A)} JASRI/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{B)} RIKEN/SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

Abstract

A radiation safety interlock system for SACLA (XFEL/SPring-8) was constructed and commenced operation in March 2011. This system controls access to an accelerator tunnel, monitors the status of safety equipment, and gives permission for accelerator operation. When the safety condition is not satisfied, this system turns off the permission signal for accelerator operation, thereby stopping electron beam extraction from an electron gun. Especially, this system must stop the electron beam extraction within 16.6 ms when the electron beams deviates from the proper transport route. Therefore, the beam route interlock was installed to fast judge whether the beam route is proper or not, as a part of this system. Furthermore, we developed optical modules in order to transmit the permission signal with high speed. The system achieved a response time of less than 7 ms for the above mentioned interlock action. We report the design of the system and detailed performance, and, in addition, describe the outline of the beamline interlock system in the experimental area.

SACLA における放射線安全インターロックシステム

1. はじめに

SPring-8 サイト内に 8GeV の電子線形加速器と真空封止アンジュレータを用いて大強度の X 線レーザーを発生させる、SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) が建設され、2011 年 3 月よりビームコミッションが開始された。同時に、加速器安全インターロックシステムとビームライン・インターロックシステムの実運用も開始された。これらシステムは、施設の使用者等を放射線被ばくなどから防護する人的安全保護を担う。その設置目的から高い信頼性と安定性、さらには、施設の特徴に応じたシステムが必要である。

図 1 に SACLA の概略図を示す。SACLA では電子ビームを最大 60Hz で電子銃(GUN)から出射し、加速管によって 8GeV まで加速する。加速後の電子ビームは、振分電磁石により複数のビームラインに振り分けられる。現在、BL1(広帯域 X 線)と BL3(SASE-FEL)、2 本のビームラインが整備されているが、最大 5 本までのビームライン増設が計画され、それぞれに電子ビームを振り分け、X 線レーザーを発生させる。発生した X 線レーザーは光源

棟下流に建設された実験棟に導かれる。X 線レーザーを発生させた電子ビームは、ダンプ電磁石によってビームダンプへ破棄される。このとき、8GeV 電子が実験ホールへ侵入することを防ぐために、ダンプ電磁石等が適切に励磁されていることが重要となる。そのため、ダンプ電磁石、振分電磁石、振戻電磁石を放射線安全に関わる機器として取り扱い、これら電磁石の励磁状態に応じて加速器に運転許可を与える機能を加速器安全インターロックに導入した。また、電流異常時においては、異常検出後の 2 発目以降の電子ビーム停止を原則とした。したがって、最大 60Hz のビーム出射周期に対応するために 16.6ms 以内のインターロック動作を可能とするシステムを構築した。一方のビームライン・インターロックは、加速器安全インターロックと連携して実験エリアの放射線安全を担保するが、将来のビームライン増設を考慮して切り離し可能なシステムとして構築した。

ここでは、加速器安全インターロックの動作時間についてのシステム詳細構成と測定結果を中心に述べるとともに、ビームライン・インターロックシステムに関して、その概要を報告する。

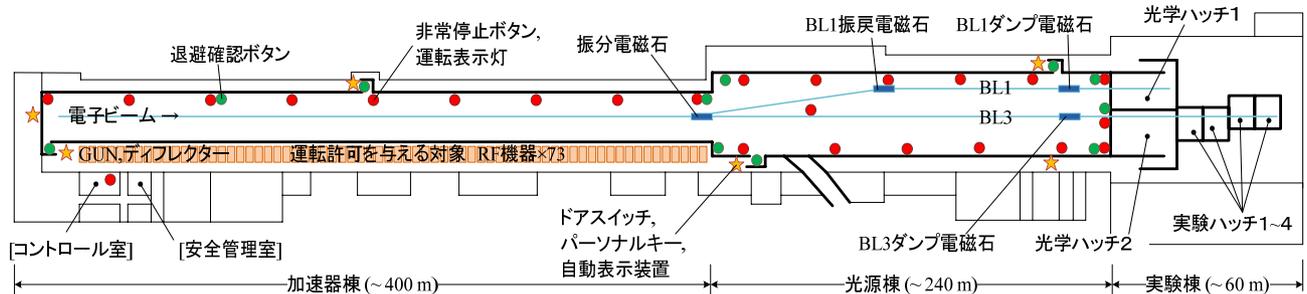


図 1 : 加速器安全インターロックシステムに係わる安全管理機器の配置図

[#] kago@spring8.or.jp

2. 加速器安全インターロックシステム

2.1 システムの概要

加速器安全インターロックシステムは加速器収納部内へのアクセス制御を行い、加速器棟および光源棟内に設置した機器の状態（図1）に応じて、加速器に運転許可を与える。本システムから運転許可がない場合、加速器は電子ビームを加速、出射することはできない。また、安全に係わる諸条件が成立しなくなった場合、本システムは、運転許可を取り消し、速やかに加速器運転を停止する。

加速器安全インターロックシステムは監視すべき対象を区別して、全系インターロック、非常停止インターロック、ビームルート安全インターロックの3つのインターロックで構成した^[1]。各々が判断した許可信号は全系インターロックに集約されると同時に、許可伝送系により対象機器へ配信される。図2にシステム全体構成を示す。

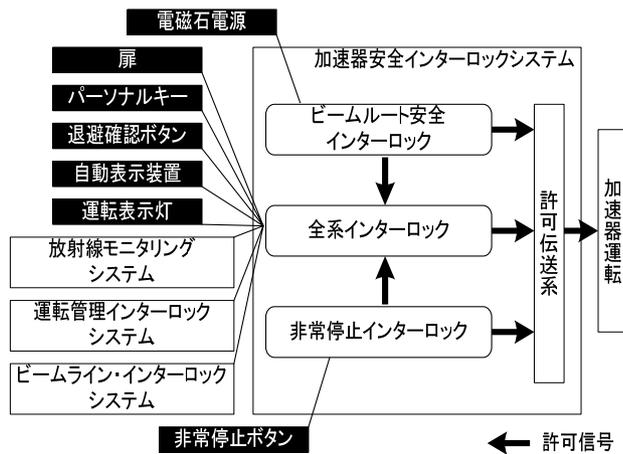


図2：加速器安全インターロックシステム全体の概略図

各インターロックの主な機能は次のとおりである。

- 全系インターロックは、収納部扉、退避確認ボタン等の機器を監視し、収納部内のアクセス制御を行うとともに、放射線モニタリングシステム^[3]、運転管理インターロックシステム^[4]などからの安全信号を制御する。
- 非常停止インターロックは、安全管理機器の中でも特に重要である非常停止ボタンのみを監視対象とする。
- ビームルート安全インターロックは、電磁石電源の電流値のみを監視対象とし、各電磁石の励磁状態の組み合わせでビーム経路を判断する。

放射線安全を管理するシステムは安定した動作が必要となるため、各インターロックの基幹部にはSPring-8 加速器安全インターロックシステム^[2]で長期稼働実績を持つ programmable logic controller (PLC) を採用した。この PLC をベースに構築したビームルート安全インターロックと、許可伝送系の構築に

より、本システムにおいて 16.6ms 以内の動作時間を実現した。以下に詳細と測定結果を記す。

2.2 ビームルート安全インターロック

ビームルート安全インターロックは、BL1 および BL3 のダンプ電磁石、振分電磁石、振戻電磁石の励磁監視を行う。ダンプ電磁石等の励磁不良の場合、電子ビームが適正に曲げられず、ビームダンプに入射されない状態となる。この場合に、16.6ms 以内で電子ビームの出射を停止する必要がある。PLC の処理時間を考慮して、図3のように、エネルギーPLC、ルート判断 PLC、励磁監視 PLC、と複数 PLC でシステムを構成した。各 PLC 間は PLC 光リンクで接続し、高速制御を必要としないデータの通信に用いる。エネルギーPLC は、各種設定値や運転エネルギー値の入力など高負荷処理を実行する。ここで、その値から各電磁石の理想的な電流値を算出し、励磁監視 PLC へ光リンクを介して配信する。励磁監視 PLC は、常に電磁石電源から電流値に比例した DC 電圧を AD に入力しており、配信された理想値と入力値を比較判定し、結果をルート判断 PLC へ出力する。この信号は高速伝送が必要であるため、励磁監視 PLC とルート判断 PLC 間を専用光ファイバで接続し、接点信号を E/O 変換して伝送している。ルート判断 PLC では、各励磁監視 PLC の判定結果を元に、組み合わせを判定して、運転許可信号を生成する。

許可信号の生成に必要な励磁監視 PLC とルート判断 PLC の処理を単機能化したことにより、両方とも 3.0ms 以下で動作し、PLC 間の信号遅延は 0.3ms 程度となった。また、機能分散型であるため、拡張性にも優れ、この動作時間を維持したまま将来のビームライン増設にも容易に対応可能である。

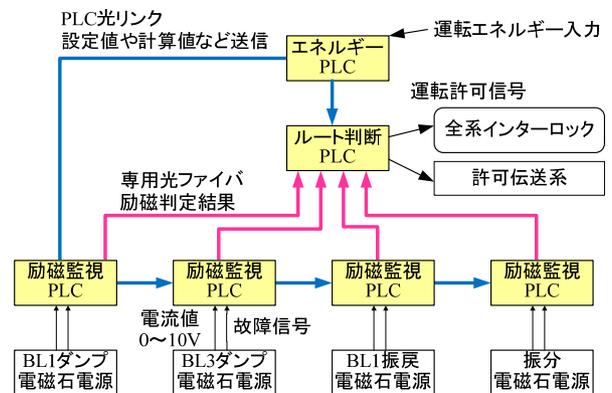


図3：ビームルート安全インターロックのシステム構成図

2.3 許可伝送系統

加速器安全インターロックは、GUN と RF の高電圧(HV)印可に対する許可信号を管理する。加えて、電子ビームの出射を高速停止する手段として、ビームディフレクターへのトリガー信号を停止する。これを制御する機器に対して許可信号の高速伝送が必

要となる。また、図 1 に示すように、RF 機器は約 400m にも渡り 73 台が設置されているため、長距離伝送が必要である。これら要件を満たすため、許可信号を伝送するための専用機器として、3 タイプ (A,B,C) のモジュールを新規開発した。A タイプは PLC とのインターフェイス用、B タイプは DI/DO を備えた中継用、そして C タイプは外部機器への出力用である。これらモジュールを光ファイバでダイジーチェーン接続して許可信号を伝送する。局間距離は 1km まで延長でき、1 台あたり 0.3ms 以下の光伝送が可能である^[5]。開発においては、ファストトランジェントバースト(FTB)試験、SCSS 試験加速器での長期動作試験などのノイズ耐性試験を行った。このモジュールを図 4 のように組み合わせ、許可を与える対象毎に 3 つの許可伝送系統を構築した。全系インターロックからの許可信号をモジュール(A)に入力することで、モジュール(B)を経由し、モジュール(C)から対象機器に対して許可信号が出力される。非常停止インターロックおよびビームルート安全インターロックからの許可信号は、GUN HV 系と RF HV 系のモジュール(B)に入力することで伝送される。GUN HV 系とビームディフレクター系のモジュール(B)間を接続しているため、GUN HV 不許可時はビームディフレクターも不許可となる。また、高速伝送が必要なビームルート安全インターロックからの許可信号は、ビームディフレクター系のモジュール(B)へ直接出力することで、より高速化を図った。

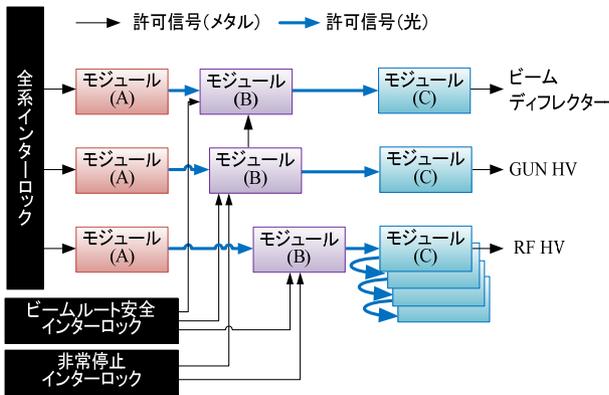


図 4：高速停止モジュールの接続図

2.4 インターロック動作時間の測定

ビームルート安全インターロックおよび許可伝送系を構築後、インターロックの動作時間をテストした。テストにはルート判断 PLC から最も配線距離の長い BL3 ダンプ用励磁監視 PLC を選定した。BL3 ダンプ用励磁監視 PLC に模擬信号を 1Hz で入力し、ビームディフレクターに対して許可を与える伝送系の出力信号が OFF になるまでの時間を 10,000 回計測した。この計測結果を図 5 に示す。インターロックの動作時間としては、最小値 3.8ms、最大値 6.7ms、平均値 5.2ms、標準偏差 0.8ms が得られた。結果、7.0 ms 以下の応答時間を達成しており、これは目標値(16.6ms)を十分満たす数値である。

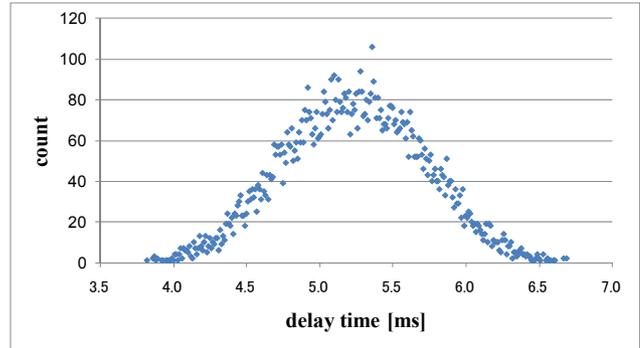


図 5：インターロック動作時間の測定結果。最小値 3.8ms、最大値 6.7ms、平均値 5.2ms、標準偏差 0.8ms が得られた。

3. ビームライン・インターロックシステム

3.1 システムの概要

ビームライン・インターロックが制御する機器を図 6 に示す。光源棟内には、X 線レーザー用のメインビームシャッター(MBS)が設置されている。これは、2 枚のビームシャッターとそれを保護するアプソーパーで構成される。これを開くと、光学ハッチに X 線レーザーが導入される。この MBS は光源側とビームライン側を切り分ける重要なシャッターである。BL3 では光学ハッチ内に下流シャッター(DSS)が設置されている。同様に MBS を開いたのち DSS を開くと実験ハッチに X 線レーザーが導入される。また、複数の実験のために、4 つの実験ハッチがある。これらの実験ハッチは切り替えて使用されるため、可動式エンドストッパーを適切に開閉して、X 線レーザーを使用する実験ハッチまで導き、それ以降のハッチへは X 線レーザーを遮断する必要がある。ビームライン・インターロックは、X 線レーザーを安全に使用するために、これらのハッチの扉、シャッター、可動式エンドストッパーの監視と制御を担う。

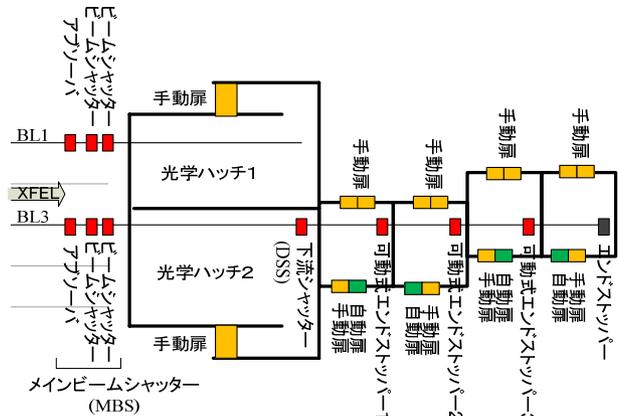


図 6：ビームライン・インターロックシステムに係わる安全管理機器の配置図

3.2 システム構成

SPRING-8 では 1 つのビームラインに 1 つのビームライン・インターロック設備が建設されている。これは、ビームラインが完全に独立した構成になっている点と、ビームライン単位で増・改築されるという要請による。SACLA の場合は、図 6 で示すように、BL1、2 で共同利用される光学ハッチ 1 と、BL3、4、5 で共同される光学ハッチ 2 があるため、ビームライン単位で完全に独立な構成ではない。そこで、図 7 のようなインターロック構成とした。ビームライン単位で動作する BL3 インターロックと、光学ハッチを専門に制御する光学ハッチ 1 安全インターロック、光学ハッチ 2 安全インターロックをそれぞれ設けた。光学ハッチインターロックは、下流に設置されるビームラインを容易に増設できる構造とした。また、BL3 インターロックは、BL3 安全インターロックと BL3 機器保護インターロックに分離した。安全系と機器保護系を独立設置することでメンテナンス性を向上させている。機器保護インターロックは、真空関係を主に制御する。それに対し、安全インターロックは人的保護関係の制御をする。すなわちシャッター、ハッチ扉の監視を行い、退出確認手続きの制御を行う。ここで、MBS は、加速器と光学ハッチを分離するための重要なシャッターであるため、シャッター閉信号を加速器安全インターロックと光学ハッチインターロックの両方で監視をするよう設計した。そして、MBS を閉じていれば、ビームライン・インターロックを加速器安全インターロックから切り離せる仕組みを導入した。これにより、工事などの関係でインターロックを停止しても、MBS の監視を加速器安全インターロックが引き続き行うため、安全を保つことができる。

加速器安全インターロックはビームライン・インターロックに使用許可を与える信号を送り、ビームライン・インターロックから安全信号を受け取る。この安全信号は、ビームライン・インターロックの安全条件が成立していると判断した場合に ON となる。この安全信号が OFF の場合は、加速器安全インターロックは速やかに加速器(GUN と RF)の運転を停止する。

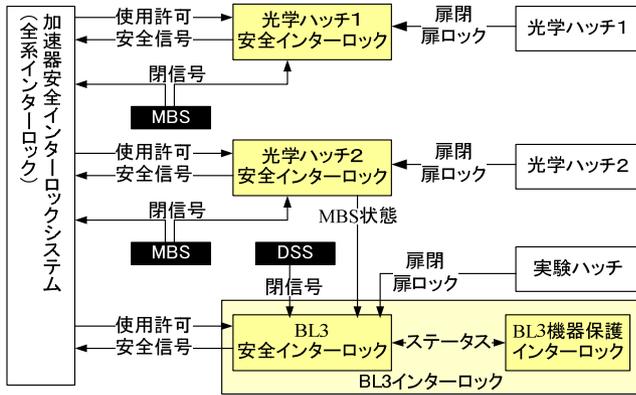


図 7 : ビームライン・インターロックのシステム構成図

4. まとめ

我々は、放射線安全設備として加速器安全インターロックシステムとビームライン・インターロックシステムを構築した。加速器安全インターロックシステムでは、新規開発した許可伝送用のモジュールおよびビームルート安全インターロックにより、PLC ベースのシステムで 7.0ms 以下の高速処理を実現した。ビームライン・インターロックシステムにおいては、光学ハッチ毎およびビームライン毎にインターロックを設け、システムの独立性、拡張性を考慮して構築した。これらシステムは、2011 年 2 月の安全検査に合格し、3 月からのビームコミッショニングと同時に実運用が開始された。

参考文献

- [1] M. Kago, et al., “XFEL 加速器安全インターロックシステムの設計”, 第 5 回加速器学会年会
- [2] C. Saji, et al., “SPRING-8 加速器放射線安全インターロックシステム更新”, 第 5 回加速器学会年会
- [3] N. Nariyama, et al., “Concept Of Radiation Monitoring And Safety Interlock System for XFEL/SPRING-8”, Proceedings of IPAC'10
- [4] S. Matsubara, et al., “XFEL/SPRING-8 の運転インターロックシステムについて”, 第 7 回加速器学会年会
- [5] Y. Ohbayashi, et al., “XFEL 加速器放射線安全インターロックシステムにおける高速停止信号光伝送装置の役割”, 本学会 MOPS086