

THE TASK OF BEAM ABORT MODULE OPTICAL LINK NETWORK FOR XFEL SAFETY INTERLOCK SYSTEM

Yoshiji Ohbayashi^{1,A)}, Masashi Toko^{A)}, Satoshi Tamaki^{A)}, Koji Nakatani^{A)}, Hiroyuki Mukai^{A)}, Takeshi Nakaura^{A)}, Masahiro Kago^{B)}, Tomohiro Matsushita^{B)}

^{A)} Hitachi Zosen Corporation

7-89 Nanko-kita 1-Chome, Suminoe-ku, Osaka, 559-8559

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

X-ray Free Electron Laser (XFEL) facility will provide an environment to experiment using high coherent X-ray laser beam, which is generated by electron beam accelerated by a linear accelerator, passing the undulator. The XFEL facility (SACLA) which is constructed at SPring-8 site, is necessary to build the two interlock systems for human radiation protection. One is accelerator safety interlock system to ensure the safety of the accelerator housing portion. Another is the beamline interlock system to ensure the safety of beamlines and experimental hutch. Two interlock systems, alone or together, stop the accelerator, to ensure the safety of facility. This system can stop the accelerator at high speed, using high-speed stop signal optical transmission equipments connected in series, without PLC. The high-speed stop signal optical transmission equipment was designed and has achieved, to be within 5ms delay time, when connected in series 70 equipments. This paper reports about the role and characteristics of the high-speed stop signal optical transmission equipment.

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

1. はじめに

我が国初の X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設として SPring-8 内に建設された SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は、電子銃から出射された電子ビームを直線加速器により加速し、アンジュレータを通過させることで高コヒーレンス X 線レーザー光を発生させることができ、科学分野での基礎研究から応用開発まで幅広い分野での活用が見込まれている。

SACLA では放射線安全の観点から、安全インターロックシステムが設置されている。加速器部に対しては加速器安全インターロックが設置され、レーザー光を利用実験するビームラインに対してビームラインインターロックが設置されている。

SACLA の施設全長は約 700m にわたる直線型の施設であり、そのうちの前半約 400 m が加速器収納部、中間約 240m が光源機器収納部、そして後半約 60m が実験研究棟である。加速器部は主に電子銃と加速空洞が設置されており、電子銃や加速空洞へのパワーが供給されると加速器が運転状態となる。安全インターロックは、安全に関わる諸条件が成立した場合に電子銃や RF 電源へ運転許可信号を伝達する。この設備では多数の RF 電源が広範囲に設置されており、これらに対して許可信号を速やかに且つ正確

に伝達する必要がある。加えて非常停止ボタンの信号も同様の高速性と安定性で伝達する必要がある。

これらの要件を満たすために、高速停止信号光伝送装置の開発が必要であった。

2. 高速停止信号光伝送装置

高速停止信号光伝送装置 (以下、「停止モジュール」と記述する。) は複数の加速器制御装置に対して、加速器安全インターロックからの運転許可信号を伝達する機能が要求される。

また、外部機器や他のインターロックシステムからの運転許可/停止信号を直接やり取りができるような入出力を持つ必要がある。

そこで、許可信号を伝達するためのモジュール (停止モジュール) を制作した。この停止モジュールを複数台光ファイバーで直列接続することで、許可信号を複数の制御装置に伝達する仕組みを構築した。以下 8 項目を開発重点項目に掲げ、設計・製作を行った。

- (1) 電気信号を光信号に変換し、光ファイバーを介して長距離通信を行う。施設の長さを考慮して、設計上の装置間距離は 1km とした。
- (2) 停止モジュールを 70 台直列接続した場合の応

¹e-mail : ohbayashi@hitachizosen.co.jp

答速度が 5ms 以内とする

- (3) モジュール間の運転許可信号の伝達を二重化する。1 つは静的信号、もう 1 つは方形波信号を用いる。
- (4) 静的信号によって高速応答性を実現する。
- (5) 方形波信号によって確実性を実現する。静的信号系では、機器故障で ON の状態のままになる問題が生じる。それに対して、方形波を利用すればこの問題が回避できる。
- (6) 許可停止が「OFF」になれば、その状態をラッチする。
- (7) 機能毎に 3 つのタイプ A~タイプ C の 3 機種を製作する。
- (8) 電気ノイズに強い構成とする。

設計上、特に外部から受けるノイズの影響などに問題があり、外部入力との絶縁などの検討を行った。システム構成としては、フォトカプラによる入力絶縁部、CPLD によるシーケンス処理部、光入出力部、フォトカプラにより絶縁された信号出力部などで構成した。専用の回路基盤を制作した。この回路基板は基板上のディップスイッチを切り替えることで、モジュール A,B,C で共有できる構成とした。

次に停止モジュールの各タイプについて機能と用途を詳しく述べる。

2.1.タイプ A

このタイプは加速器安全インターロックからの電気信号を取込み、光変換を行う機能を持つ。信号のブロック図を図 1 に示す。

電気入力 Ea が PLC から入力される静的信号である。電気入力 Eb は PLC から入力される方形波であり、PLC から入力される方形波は 20Hz である。電気入力 Er はインターロックリセット信号である。この信号を受け取ると、許可信号 OFF をラッチした状態から復帰できる。このモジュールからは Oa, Ob, Or が光出力される。Oa は静的信号、Ob は方形波、Or はリセットである。このモジュールから出力される方形波 Ob は 1kHz とした。これにより方形波でも応答時間を 1ms 以内にする事かできる。

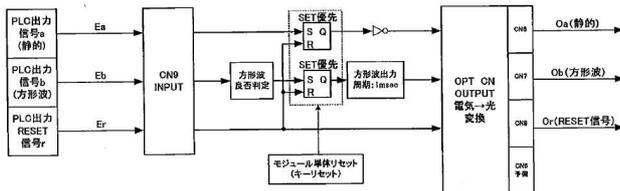


図 1: 高速停止モジュールタイプ A ブロック図

2.2.タイプ B

このタイプは、外部機器から許可信号を取り込む機能を持つ。外部機器から出力された電気信号を静的信号 Ea, Eb として取込み、光入力信号 Fa, Fb とそれぞれ論理和を取った結果を光信号 Oa, Ob として出力される。同様に論理和の結果は電気信号 A1~4, B1~4 として出力される。光入力信号 Fr はそのまま Or として出力される。信号のブロック図を図 2 に示す。

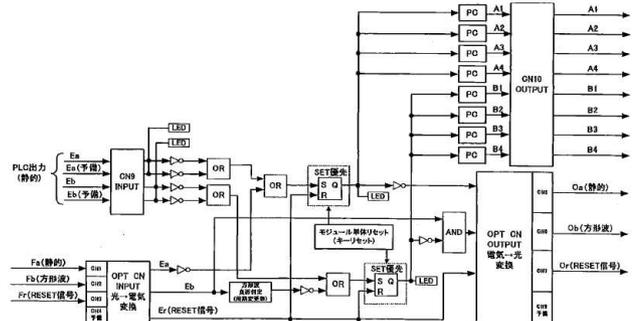


図 2: 高速停止モジュールタイプ B ブロック図

2.3.タイプ C

このタイプは許可信号を外部機器に出力する機能を持つ。光信号 Fa, Fb, Fr を取込み、信号の ON/OFF 判定を行った後、光信号 Oa, Ob, Or として出力するとともに外部機器への静的電気信号 A1~4 および B1~4 を出力する。信号のブロック図を図 3 に示す。

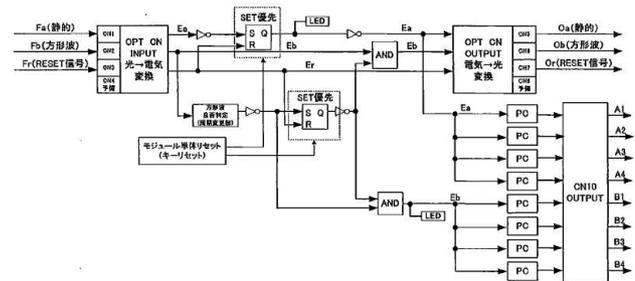


図 3: 高速停止モジュールタイプ C ブロック図

2.4.停止モジュールの接続方法

これら 3 タイプの停止モジュールを図 4 のようにタイプ A→B→C→C の順に光ケーブルで直列接続して使用する。

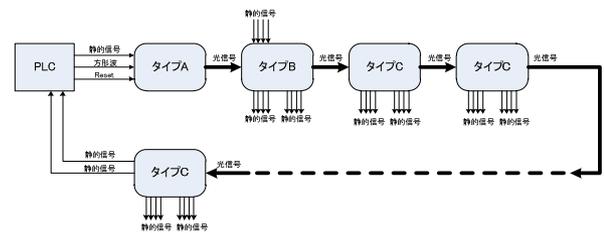


図 4: 停止モジュールによる光ネットワーク

3. 遅延時間の測定

停止モジュールの入力から出力までの遅延時間は、十分に仕様を満足するよう設計した。そこで、実際に測定を行い、実測値を求めた。

デバイスごとの遅延時間の設計値と実測値を表 1 にまとめた。

表 1: デバイスごとの遅延時間及び設計時間

デバイス	条件	設計値	実測値
電気信号 入力回路	「ON」入力時 (立上り)	200 μ s	45 μ s
	「OFF」入力時 (立下り)	200 μ s	126 μ s
電気信号 出力回路	「ON」入力時 (立上り)	30 μ s	44 μ s
	「OFF」入力時 (立下り)	30 μ s	14 μ s
デバイス	条件	カタログ値	実測値
光信号 入力回路	「ON」入力時 (立上り)	0.1 μ s	—
	「OFF」入力時 (立下り)	0.1 μ s	—
光信号 出力回路	「ON」入力時 (立上り)	0.1 μ s	—
	「OFF」入力時 (立下り)	0.1 μ s	—
CPLD	処理時間	0.3 μ s	—

入力回路は図 5、出力回路は図 6 に示す。実測値はおおむね設計値よりも高速である。ただし、出力回路の ON 入力時が設計値よりも遅くなっている。これは、この遅延時間はモジュールの要求仕様に比べて十分短いため、このまま採用した。

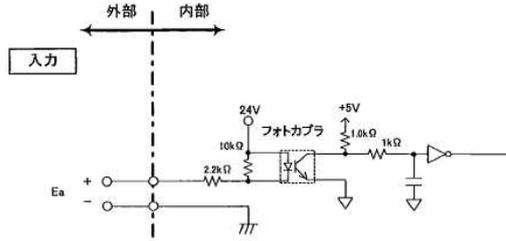


図 5: 停止モジュールの電気信号入力

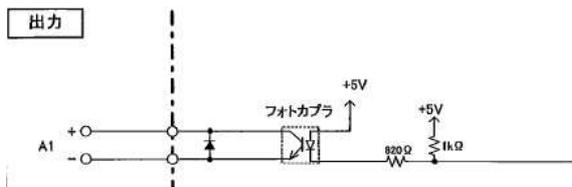


図 6: 停止モジュールの電気信号出力

これらから求めた、実測値と設計値から求めた停止モジュール全体での遅延時間の設計値と実測値を表 2 に示す。

表 2: 停止モジュール各タイプの遅延時間

種類	条件	設計値	実測値	
タイプ A	電気信号入力 → 光出力	200.1 μ s	「ON」入力時 (立上り)	76 μ s
	「OFF」入力時 (立下り)		106 μ s	
タイプ B	光入力 → 光出力	0.5 μ s	「ON」入力時 (立上り)	0.1 μ s
	「OFF」入力時 (立下り)		0.13 μ s	
タイプ C	光出力 → 電気信号入力	30.4 μ s	「ON」入力時 (立上り)	10 μ s
	「OFF」入力時 (立下り)		50 μ s	

3.1.直列接続評価試験

検査治具ユニット 1 台と停止モジュールタイプ C を 19 台直列接続した評価試験を行い、その結果を表 3 にまとめる。実験時の機器構成は図 7 に示す。遅延時間の測定は、検査治具の光出力がタイプ C を 19 台経過して検査治具の光入力に戻るまでの時間を測定した。

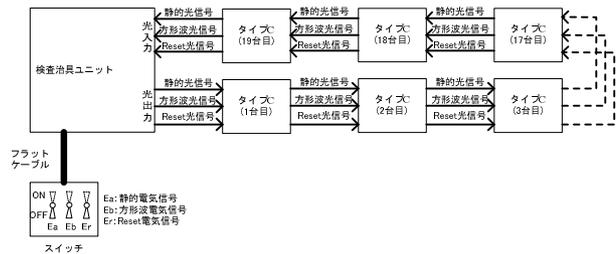


図 7: 19 台接続評価試験機器構成

表 3: 停止モジュール 19 台接続時の遅延時間

	測定項目	実測値
①	検査治具が静的信号を光信号として出力してから 19 台を経由し、再び静的光信号を受信するまでの遅延	OFF→ON: 8.0 μ s ON→OFF: 8.68 μ s
	②	検査治具が静的信号を光信号として出力してから 19 台目の静的電気信号が出力されるまでの遅延
③	検査治具が方形波を停止してから 19 台目の方形波電気信号が出力されるまでの遅延	1.02ms

この結果から 70 台接続時の遅延時間を求める。

①の測定結果は、測定治具と停止モジュール 19 台を合わせた 20 台分の E/O 変換を行っているため、以下の計算で 70 台接続時のおおよその遅延時間を求める。

$$\text{立上り} : 8.00 \mu\text{s} \div 20 \text{台} \times 70 \text{台} = 28 \mu\text{s}$$

$$\text{立下り} : 8.68 \mu\text{s} \div 20 \text{台} \times 70 \text{台} = 30.38 \mu\text{s}$$

②の測定結果は 19 台目の停止モジュールの静的電気信号出力であるので、以下の計算で 70 台接続時のおおよその遅延時間を求める。

$$71.2 \mu s \div 19 \times 70 \text{ 台} \approx 262.32 \mu s$$

③の測定結果は 19 台目の停止モジュールの方形波電気信号出力であるので、以下の計算で 70 台接続時のおおよその遅延時間を求める。

$$1.02ms \div 19 \text{ 台} \times 70 \text{ 台} \approx 3.76ms$$

計算で求めた 70 台接続時の遅延時間はいずれも 5ms 以内となっており、最初に設定した開発要件を満たしている。

4. ノイズ対策

「IEC 61000 4-4」に準拠したノイズ試験を試作機に対して実施した。この試作機による試験の中で FTB 試験ノイズを印加したときに限り、本体が誤ってリセットされてしまう現象が現れた。このリセット誤動作に対して調査を行ったところ、リセットスイッチのハーネスに対して 15ms 以下のノイズが印加され、リセットされてしまうことが分かった。

4.1. 対策

ハーネスにノイズが印加する現象に対して、以下 4 項の対策を行い、再度実験を行った

(1) シールドケーブルの接地

シールドケーブルのシールド部を FG および基板の GND に落とす。

(2) キーリセット OFF 状態の電流値増大

停止モジュール単体リセット回路の抵抗値を変更し、ケーブルおよび回路に流れる電流値を増大させる。(図 8 参照)

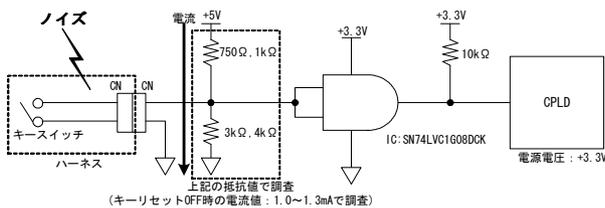


図 8: キーリセット回路の電流値変更

(3) バイパスコンデンサ追加

モジュール単体リセット回路にバイパスコンデンサを追加する。(図 9 参照)

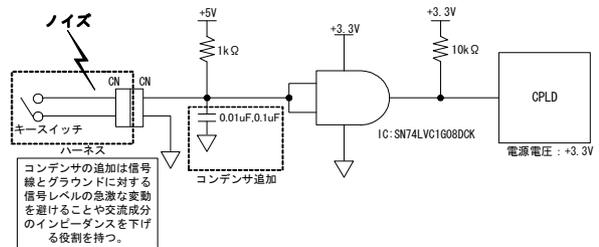
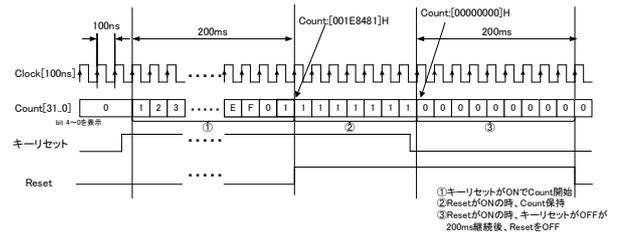


図 9: バイパスコンデンサを付加回路

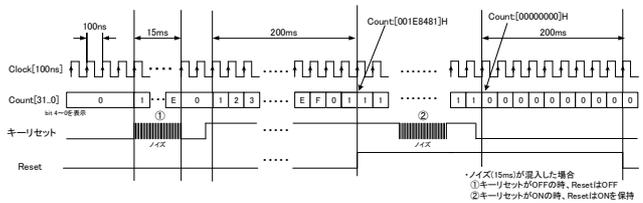
(4) デジタルフィルタの組み込み

CPLD をデジタルフィルタに追加する。

図 10 にデジタルフィルタを組み込んだ際のタイ



(a) ノイズ印荷がない場合



(b) ノイズ印加あった場合

図 10: デジタルフィルタのタイミングチャート

ミングチャートを示す。

リセットスイッチのハーネスから印加されたノイズは 15ms 以下の短い波長であったため、リセットスイッチの動作に 200ms 以下の入力を削除するデジタルフィルタを組み込み、15ms 以内のノイズ印加があってもリセット入力と見なさないようにした。

上記 4 項目の対策を実施し、実験を行ったところ、(1)、(2)の対策はあまり効果が見られず、(3)のバイパスコンデンサと(4)のデジタルフィルタによって、印加ノイズによる誤動作の発生数を減少させることができた。

さらに、リセット「ON」入力時間をカウントするカウンタレジスタ値にメタステーブルが発生し、誤動作が発生した可能性が考えられるため、CPLD の入力部を 3 段 FF 回路へ変更した。

最終的な対策として、リセット回路へバイパスコンデンサとデジタルフィルタを追加し、CPLD の入力部に FF を追加することで、FTB 試験ノイズ印加時の誤リセットは発生しなくなった。

5. まとめ

SACLA では、現在 90 台の停止モジュールが採用され、稼働している。その内訳はタイプ A : 4 台、タイプ B : 8 台、タイプ C : 78 台である。

特に RF 部には 75 台の停止モジュールが直列に接続され稼働している。

参考文献

- [1] 籠正裕. “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・第33回リニアック技術研究会 (2008年8月6日~8日 東広島)
- [2] 籠正裕. “SACLA における放射線安全インターロックシステム” 本学会 MOPS086