

KEK 電子陽電子入射器におけるトリガー信号配信システム

諏訪田 剛^{1A)}、古川和朗^{A)}、上窪田紀彦^{A)}、佐藤政則^{A)}、草野史郎^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 三菱電機システムサービス（株） 〒305-0045 茨城県つくば市梅園 2-8-8

概要

現在、KEK 電子陽電子入射器は、2 台の放射光リング (PF/2.5 GeV, PF-AR/3 GeV) と 2 台の KEKB リング (HER/8 GeV, LER/3.5 GeV) への安定した入射を行っている。前者には、短パルス電子ビームを、後者には、単バンチ電子・陽電子ビームを供給している。入射器のトリガー信号配信システムは、KEKB 運転のために旧トリガーシステムを拡張することにより新たに開発がなされ、トリガーシステム全体の再構築が行われた。本報告は、入射器のトリガー信号配信システムの全体構成とその性能評価をまとめたものである。

1 はじめに

入射器の日々の入射は、PF 及び PF-AR に対し、それぞれ 1 及び 3 回の電子ビームを、KEKB に対しては、20 回以上の電子陽電子ビームの入射が行われる。このように、入射器単独のビーム調整を含めると 1 日当たり 50 回以上のビームモードの切替えが行われることになり、モード切替えに伴う各デバイスに配信されるトリガータイミングの再現性及び安定性が重要となる。特に、KEKB 運転[1]に向けてトリガーシステムは、旧システムを拡張することで新たに再構築することにし、システム全体として再現性の良い安定したトリガー信号の配信を行えるように変更を行った。KEKB リング[2]から要求される入射タイミング精度は、旧システム (トリスタン AR 用) のそれに比べ 10 倍の精度が要求される。この要求に対し KEKB リング周波数と高精度に同期するトリガーシステムを構築することによりこれを実現した。

このように、入射器トリガーシステムは、KEKB HER/LER 用と PF/PF-AR 用の 4 種類のトリガーモードを持つことになる。現在では、リモート制御システムの安定化に伴い、入射モードに対応した迅速かつ再現性のよいトリガーモードの切替えが可能となり安定な入射に貢献している。

2 トリガー信号配信システムの概要

入射器のトリガーシステムは、2 組の電子銃/前段入射部 (KEKB 用と放射光リング用)、59 台の rf ユニット、rf モニター、ビームモニター、KEKB リングキッカー、PF (又は PF-AR) リングキッカー及び陽電子生成用パルス電源等への総計 147 点にも及ぶタイミング信号を配信している。全長約 600m の入射器は、8 つの区域 (セクター) に分割され (KEKB 運転で A, B, C の 3 セクタ分が増設された)、セクター毎にトリガー信号配信ステーション (セクターステ

ーション、SS) が設置されている。メインステーション (MS) から伝送されるトリガー信号の受信及び各機器 (主にクライストロン等) への信号の再分配は、この SS にて行われる。MS は、ほぼ入射器中央に位置する主制御室近くに設置し、2 方向 (ABC と 1-5 セクター) に分けて SS へのトリガー信号 (マスタートリガー) の送信、リングキッカー/セプタム電磁石へのトリガー、電子銃グリッドパルサーのトリガー信号を生成する (図 1 参照)。一方、各 SS では、マスタートリガーを受信し、トリガー信号を再生成し適当な時間遅延の後各パルスデバイスへの再分配を行う。

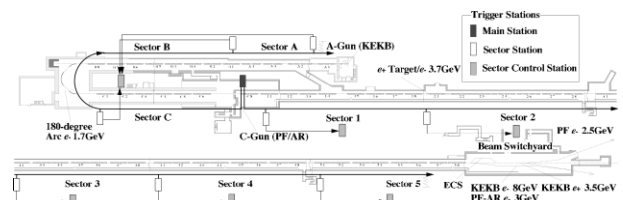


図 1: 入射器におけるトリガーステーションの配置。

3 トリガー信号配信システム

3.1 基準クロックの生成とサブハーモニック周波数

トリガー信号は、各リングの rf 周波数 PF (500 MHz), PF-AR (509 MHz), KEKB (509 MHz) に同期して配信される必要がある。入射ビームの KEKB リングへの同期精度は、入射ビームのシンクロトロン運動の振幅を極力抑制するために、リングのバケツ中心から 30 ps (r.m.s.) 以下の精度が要求される。これは、旧トリスタン AR に対する同期精度の 10 倍厳しいものになっている (旧トリガーシステムについては文献[3,4]を参照)。この要求を満足させるために KEKB リング入射器間で共通の基本 rf 周波数 (10.38546 MHz) を持つことにし、これを定倍することにより必要となる加速周波数を生成している[5]。電子銃から出射した電子ビームは、2 台のサブハーモニックバンチャー (SHB1/114.24 MHz, SHB2/571.20 MHz)、プレバンチャー、バンチャー及び S バンド加速管 (2856 MHz) により加速される。表 1 に必要となる KEKB リング入射器間の rf 周波数の関係をまとめる。基本 rf 周波数は、リングトンネル内の温度変化に起因するリング周長の変化を補正可能 (0.1 Hz ステップで可変) とし、リング側の基本 rf 周波数との間でフェーズロックを行うことにより入射を可能にしている。入射器のトリガーシステムは、571.2 MHz の rf クロックを用いることにより、クロックに精度よく同期したト

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

リガー信号の遅延 (1.75 ns/clock) が可能となっている。これらの rf 周波数の内、KEKB リングとの間では 508.8875 MHz 及び 10.38546 MHz に対しフェーズロックをかけて位相の安定化を行っている。

表 1 : KECB リング入射器間の rf 周波数の関係

rf デバイス	定倍率	rf 周波数[MHz]
基本 rf	—	10.38546
SHB1	× 11	114.24
SHB2	× 55	571.20
入射器加速 rf	× 275	2856
リング加速 rf	× 49	508.8875

3.2 メインステーションにおけるトリガー信号の生成

図 2 に MS におけるトリガー信号生成の基本的なブロック図を示す。

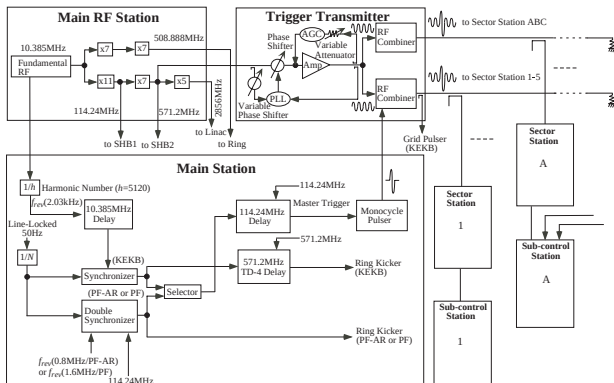


図 2 : メインステーションにおけるトリガー信号の生成。

入射ビームの繰り返し (最大 50Hz) は、電源にライン同期した繰り返し周波数を 1/N 分周器を通すことによりビームトリガーを生成する。これは、クライストロンモジュレータの充電をいつも一定の電源位相で行うようにするため、モジュレータ出力電圧を安定化させるためには必要となる。ライン同期信号は、同期回路により 10.385 MHz のバケット選択のための遅延されたリング周回パルス (2.03 kHz) との間で同期が取られた後 (最大 500μs)、入射器マスタートリガー及びリング入射キッカーへのトリガー信号が、適当なデジタル遅延回路を通して生成される。マスタートリガーは、571.2MHz rf とモノサイクル信号とをトリガー送信機内で重畳させることにより生成し、MS から上下流に設置している SS へと送信される。マスタートリガー信号の伝送には、20D 同軸ケーブル (三菱電線, WF-50-7S) を使用している。このようにマスタートリガーを rf クロックとモノサイクルトリガーの重畳信号として送信することにより、rf-トリガー間の位相ジッターを軽減でき、また、rf をクロックとして用いて再同期化することにより高精度にトリガー信号を再生することが可能となる。トリガー送信機では、マスタートリガーの出力パワーレベル (定常運転値 ~ 4 W) 及び出力位相をつまみで可変としており、かつ rf クロックに対し AGC (自動ゲイン制御) と PLL (フェーズロック) により出力パワーと位相に対しフィードバックをかけてマスタートリガー信号

の安定化を行っている。出力パワー及び位相安定度 (ジッター) は、それぞれ 1 % 以下、3 ps (r.m.s.) である (図 4 参照)。図 5 に MS における各 rf とトリガー信号との相対的な時間関係を表すタイミングチャートを示しておく。

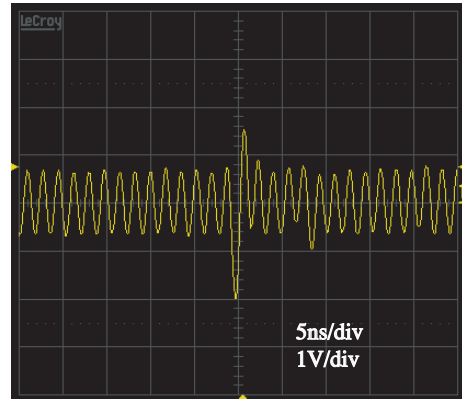


図 3 : メインステーションにおけるマスタートリガー信号波形。

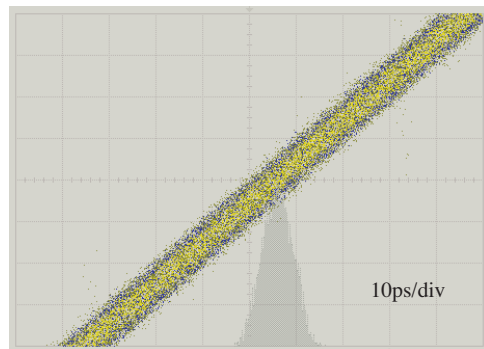


図 4 : メインステーションにおけるマスタートリガーのジッター測定。

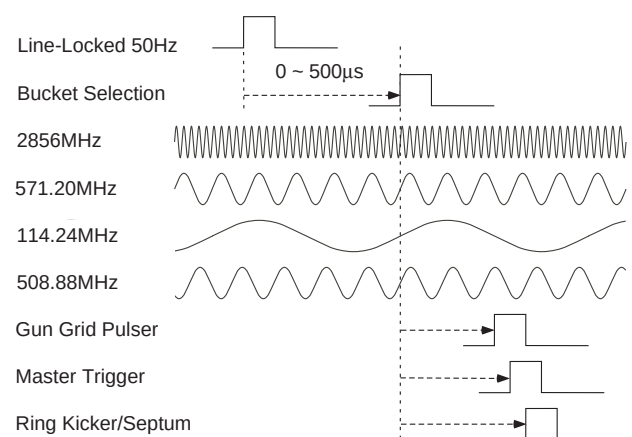


図 5 : メインステーションにおける各 rf とトリガー信号配信のタイミングチャート。

3.3 セクターステーションにおけるトリガー信号の分配

MS から送信されるマスタートリガーは、20D 同軸ケーブルに取り付けた方向性結合器 (結合度 16~20dB、伝送距離に応じて結合度を変え、受信パワーを一定にしている)

により信号を取り出し各 SS に設置したトリガー受信機に 12 dBm 程度のパワーレベルで入力する。SS におけるトリガー信号分配のブロック図を図 6 に示す。

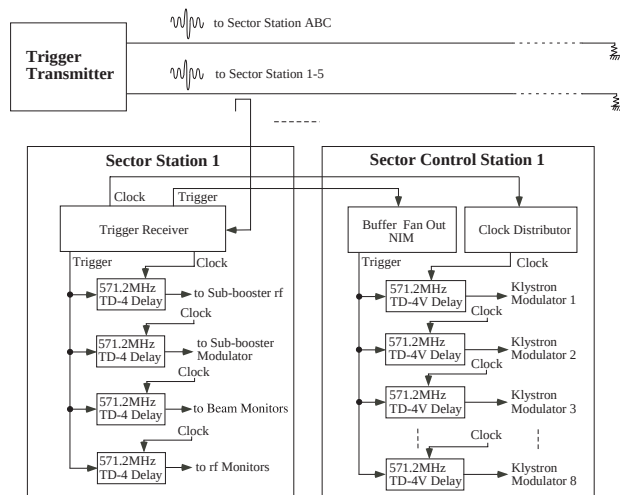


図 6 : セクタステーション及び副制御室におけるトリガー信号分配のブロック図。

マスタートリガー受信機内では、バンドパスフィルターにより rf クロックとモノサイクルパルスを分離する。モノサイクルパルスは、ディスクリミネータにより立上がり電圧を捕らえ NIM レベルのパルスとしてトリガーを再生する。このトリガーパルスが、TD-4 遅延モジュールのスタート信号となり、571MHz rf クロックでカウントする遅延の後、各機器への遅延トリガー信号として送信される。TD-4 遅延モジュールを使用することにより rf クロックとの再同期が行われるのでタイミングジッターを押さえている。SS では、サブプースターの高電圧発生、rf のパルス化のためのスイッチ、パルス圧縮器用位相反転タイミング、rf モニター、ビームモニター等のトリガー信号が、このように生成される。一方、クライストロンモジュレータの高電圧に対するタイミングは、歴史的経緯から、SS ではなく、副制御室からトリガー信号を配信する必要がある、これを行うために SS から副制御室まで rf クロックとトリガー信号を伝送し、遅延モジュールを通して再同期化した後、モジュレータ高電圧トリガーとして配信される。副制御室における遅延モジュールには、VME で制御可能な TD-4V が使われる。これは、歴史的経緯から CAMAC 版の TD-4 が最初に開発された後、入射器制御システムへの適合性を考え VME 版のモジュールへと移行したもので、規格仕様は、まったく同じものである。

マスタートリガー信号の各 SS でのトリガージッターを測定するために、各 SS の受信機から再生された rf クロック及び TD-4 遅延モジュールにより再同期化されたトリガー信号の両信号を同軸ケーブルにより MS まで帰還させた。専用のケーブルがないので、帰還用同軸ケーブルには、旧電流モニター用の 20D 同軸ケーブルを使った。トリガージッターの測定は、MS で生成された rf クロックのゼロクロスジッターを各 SS から帰還させたトリガー信号をトリガーとして（或いは、逆に MS で生成したトリガー信号をトリガーとして帰還 rf クロックのゼロクロスジッターとして）サンプリングオシロスコープを用いて測定した。全 SS

からの帰還信号を測定した結果、MS から最も遠い距離に位置する第 5 セクタ SS のジッターが図 7 に示すように 4 ps (5 ps) であった。この測定結果は、帰還させたトリガーパルス及び rf クロックの減衰、波形歪み及び、SS での再同期化によるジッターを考慮すると MS で測定したジッター (3 ps) がほとんど増大することなく伝搬していることを示している。このように全 SS でのジッター測定が今回の測定により初めて行われ、トリガー信号配信システムが信頼性よく動作していることを確認した。

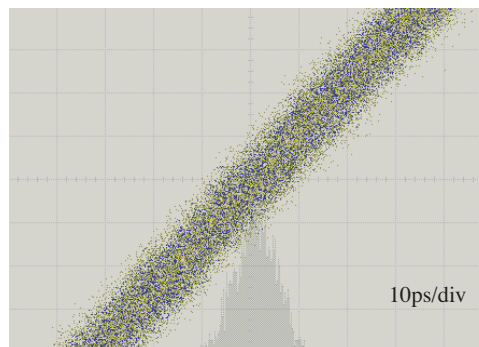


図 7 : 第 5 セクタにおけるマスタートリガーのジッター測定。

4 まとめ

入射器のトリガー信号配信システムは、前任者である浦野氏による構築後、システム全体の安定化を計るべく幾つかの改善を行ってきた。特に副制御室における旧トリガーシステムの VME への置き換え、マスタートリガー送信機の安定化、TD-4 遅延モジュールの不具合対策、CAMAC イサネットコントローラのドライバー改修等々が、ここ 3 年の内に行われ、ようやく安定したシステムが完成した。現在は、VME-TDC を用いたトリガータイミングの監視システムを構築中で計算機による常時監視を行いたいと考えている。

5 謝辞

入射器トリガーシステムの基本設計及びその構築の大半は、前任者である浦野氏によりなされたものである。同氏の指導に感謝します。

参考文献

- [1] I. Abe *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 499 (2003) 167.
- [2] S. Kurokawa and E. Kikutani, Nucl. Instr. and Meth. A 499 (2003) 1.
- [3] T. Urano and K. Nakahara, Nucl. Instr. and Meth. A 247 (1986) 226.
- [4] T. Urano, Y. Hosono and K. Hasegawa, Nucl. Instr. and Meth. A 327 (1993) 529.
- [5] H. Hanaki, S. Anami, S. Fukuda, H. Katagiri, T. Matsumoto and S. Michizono, Proc. First Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'98), KEK, Tsukuba, Japan, 1998, p. 139.