

PULSE-TO-PULSE BEAM SWITCH AT KEK ELECTRON LINAC

Kazuro Furukawa*^{A)}, Eiichi Kadokura^{A)}, Artem Kazakov^{B,A)}, Takuya Kudou^{C)},
Shiro Kusano^{C)}, Ge Lei^{D)}, Katsuhiko Mikawa^{A)}, Tatsuro Nakamura^{A)},
Masanori Satoh^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Guanglei Xu^{D)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)}Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Mitsubishi Electric System and Service, 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

^{D)}Institute of High Energy Physics (IHEP), Shijingshan District, Beijing, 100049, China

Abstract

The 8GeV Linac at KEK provides electrons and positrons to Photon Factory (PF) and B-Factor (KEKB). Simultaneous top-up injections have been considered for both PF and KEKB rings in order to improve the injection efficiency and the stability. Fast beam-switching mechanisms are being implemented by upgrading the timing and control systems with an event system. While the present timing system provides precise timing signals for 150 devices, many of the signals will be dynamically switched pulse-by-pulse using the event system. Fast controls of low-level rf, beam instrumentation, pulse magnets, kickers, a gun, and beam operation parameters will also be upgraded to be switched synchronously in the event control system. A new scheme has also been developed and tested to enable double-fold synchronization between rf signals.

KEK 電子入射器の高速ビーム切り替え機構

1. はじめに

KEK の電子入射器は KEKB-LER, KEKB-HER, PF, PF-AR の 4 つのリングに対してそれぞれ特性の異なるビームを供給している。それらのビームモードを切り替える場合には、どの電磁石を初期化するかに応じて 30 秒から 2 分の時間を必要としている。特にひとつのリングにおいてビーム開発研究 (スタディ) を行う場合には、他のリングの実験への影響は大きく、安定な実験が阻害されることも少なくない。また、現在は KEKB においては連続入射 (Continuous InjectionTM) が行われているが、PF リングにおいても連続入射 (Top-up) の要望が高まってきている。そこでまずは KEKB と PF への入射について高速に切り替えができるようビームラインを構築し、切り替えのため更新を進めている [1, 2]。

ビームモードの切り替えにおいては、制御機構やタイミング機構の更新も必要となり、パルス機器の遅延、低レベルマイクロ波、ビーム安定化フィードバック、などを高速で切り替える機構が必要となる。まずはそのような切り替え事象を広範囲に確実に通知するために、イベント分配システムが導入することにした。また、それぞれの機器が高速な (50Hz, つまり 20ms) 切り替え要求に応答する必要があり、主要な機器に改造を行っている。その上で、採用したイベントシステムが直接扱うことのできるタイミングの変更、そしてその他のパラメータの変更を高速に行なうことにしている。

このような仕組みを 2006 年から試験を始め、さらに 2008 年の秋から本格運用できるよう準備を進めている。これらの切り替えの機構について以下に述べることにする。

2. ビームモード切り替え制御の高速化

これまでの運転では、15 あまりの設定項目について 30 秒以上の時間を要してビームモードの切り替えを行っている [3]。これに対して、50Hz のパルス毎に切り換えが可能なパルス電磁石などの機器を導入し、それらの機器の特性を利用して、双方の加速器での実験効率を高められるように、現在ビーム制御の手順の確立が進められている。具体的には以下のような機器パラメータについて高速切り替えが必要となる。

- 電磁石：パルス偏向電磁石、パルス軌道補正電磁石、パルス陽電子捕獲コイル
- マイクロ波：低レベル位相及びタイミング (当面 10ヶ所)、大電力パルスタイミング (当面 24ヶ所)、測定系選択信号
- 電子銃：グリッドパルサ選択信号、バイアス電圧及びピコ秒遅延
- ビームモニタ：BPM 高速同期読み出し、ワイヤスキャナ・ストリークカメラ選択信号
- 入射：セプトラム・キッカー選択・遅延、バケット選択連携
- 運転操作：ビーム安定化フィードバック機構、パラメータ操作・表示・管理、記録蓄積、安全インタロック

これらについて、KEKB や PF を含めて、約 1km の範囲に亘って、タイミングや情報が同期している必要がある。また、運転中であっても、例えばバックグラウンドなど実験条件の変化に対応して、頻繁にパラメータを変更する可能性があるため、動的な設定変更が求められる。さらに、出力が数百倍異なるビームを高速で切り替えることを考えると、安全管理上誤りが許されないこと

*E-mail: <kazuro.furukawa@kek.jp>

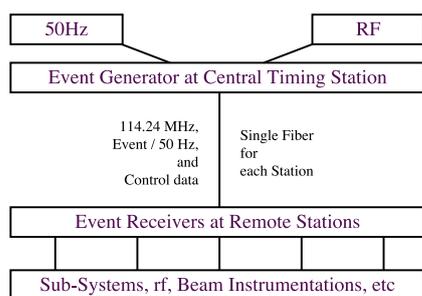


図 1: イベントシステムによりイベントとタイミングの分配が容易になる。

が分かる。

特に、ビーム特性やパラメータが高速に切り替わるため、操作上はそれぞれのビームモード毎に仮想加速器が見えるような仕組みを構築する必要があると思われる。

3. イベント分配システム

3.1 これまでのイベント分配

加速器システム全体が同期して、あるビームモードに切り替わり、正しく動作するように通知する機能をイベント通知と呼ぶことがある。これまではこのようなイベントは主に制御ネットワークを経由して各装置に通知され、必要があればパラメータの変更が行われてきた。切り替える必要があるパラメータの数は 500 個から 1000 個である。タイミング信号については、パルス繰り返しの 50Hz 毎に情報を伝えなくてはならないものもあり、15ヶ所のタイミングステーションのうち 8ヶ所に 4本のハードワイヤが張られ、どのパルスにビームが伴っているか、どのパルスでビーム測定を行うか、などを指定するイベントの通知に使用されてきた^[4]。これまでは電磁石の初期化に時間がかかったためこれら 2つの機構で充分機能してきた。

3.2 新しいイベント分配システム

今回、パルス毎のビームモード切り替えを行なうため、多数の機器パラメータをイベントに同期して切り替える必要が生じ、これまでのイベント・タイミングシステムを参考にしながら^[5]、柔軟な設定が行えるよう、FPGA と Rocket I/O を組み合わせたシステムを構築することを検討した。しかし、Swiss Light Source (SLS) で開発されたイベントシステムが、さらに Diamond 放射光施設のために機能増強されており、我々の要求を満たすことが分かり、これを導入することにした^[6, 7]¹。

このシステムでは、イベント発生器が、イベント、クロック、タイムスタンプ、2k バイトまでのデータ、などを重畳して一本の光ファイバ経由で送り出し、スター・トポロジに接続された多数のイベント受信機がそれらを正確に再現する。クロックは 50MHz から 125MHz の間で選択できるので、S バンドの 25 分の 1 でサブ・ハーモニック・パンチャの周波数である 114.24MHz を選択

¹現在では 10 以上の加速器で採用されている。

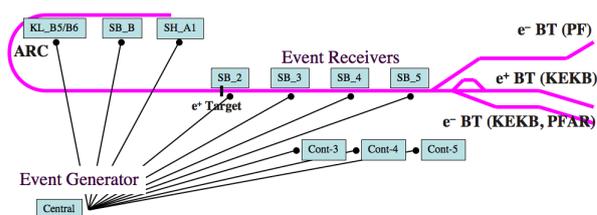


図 2: 入射器内のイベントシステムの配置。

した。イベント受信機には自由な周波数を発生できるシンセサイザが組み込まれており、イベント発生器のクロックと PLL 同期するので、10ps 以下の同期精度を確保することができる。

このクロックはイベント繰り返し周期でもあり、この間隔 (約 8.5ns) でさまざまなイベント列を発生させることができ、個々のイベント受信機はそれぞれのイベントにどのように反応するか設定することができる。多数の信号やソフトウェア割り込みを発生することができる。これによってイベントに同期した複雑な制御を行うことができるだけでなく、図 1 のように一系統の光ファイバ接続だけで全体の構成を簡略化することができ、保守も容易となる。

イベントシステムで使用する制御モジュールは、イベントの高速処理のために複雑な機能を持ち、モジュール上の FPGA や CPU により拡張性も高い。制御ソフトウェアも複雑ではあるが、これまでに複数の研究機関が協力して開発してきたソフトウェアを使用することが可能で、独自の開発は最小限にすることができる。ソフトウェアは EPICS^[8] を使用するので、最近の入射器の方向性とも合致している^[9]。VME 計算機と VxWorks という実時間処理オペレーティングシステム (RTOS) に EPICS IOC を組み合わせて進めている²。50Hz での切り替えを行うためには RTOS の採用は必須と考えている。

2008 年秋は図 2 のように、入射器の前半 3ヶ所と後半部分の 7ヶ所に新しいイベント・タイミングシステムを導入する。

4. モード切り替え制御

4.1 低レベルマイクロ波とタイミング

PF 入射時の 2.5 GeV と KEKB 入射時の 8 GeV という大きく異なる電子エネルギーを切り替えるために、マイクロ波源の運転・待機、タイミング信号、そして低レベルマイクロ波位相の設定を切り替える必要がある。運転・待機の切り替えと、タイミング信号の変更は、新しいイベント分配システムの機構のファームウェアの中で実現が可能であり、特別なハードウェアを用意する必要はない。VME 一幅のイベント受信機が 14 個までの信号を出力することができる。

低レベルマイクロ波の設定値の切り替えについては、イベント分配システムからの信号で、確実に低レベルマイクロ波のアナログ量を変更できるような仕組みを試

²当初は RTEMS というオペレーティングシステムを使用していたが、他のシステムとの互換性を考え VxWorks IOC に移行した。

験している。切り替えイベントによって VME バスへの割り込みを発生し、それによって直前に送られた制御点のアナログ情報を設定する。ソフトウェアは先に述べたように EPICS 上に構築している。

4.2 ビーム位置モニタ (BPM) 読み出し

ビームモニタとしては、約 100 台設置されているビーム位置モニタがもっとも運転に重要であり、さまざまなビーム安定化フィードバック・ループや表示ソフトウェアで常時監視されるとともに、後に入射ビーム特性の向上のための履歴解析に使用されることも多い。

ビーム・モード切り替えが高速になれば、それらの情報を区別する必要がある、まずは全てのパルスを読み出すことが重要になる。以前は情報を間引いて、1 秒に 1 回までしかビーム位置を読み出せなかったが^[10]、複数の可能性を検討した結果、要求される測定精度を満たしながら、できるだけ能動的な装置の数を増やさずに保守性を高める解決策として、オシロスコープ (Tektronix DPO7104) を用いた読み出し系を新しく採用して運用を始めている^[11]。

基本的な読み出しの考え方はこれまでの仕組みと同じであるが、このオシロスコープは 3GHz の CPU を持った Windows オペレーティング・システムを搭載しているので、数十におよぶ較正係数を適用する位置モニタの情報処理をオシロスコープの上で行うことができ、50Hz の高速処理や、96ns しか離れていない複数バッチの処理にも対応できる。1 台の測定系で平均して 5 台の BPM を読み出すので、全体で 25 台の測定系を設置している。

Windows が実時間処理に対応していないことが懸念されるが、これまでの 50Hz 連続読み出し試験では、平均して 100 万回の測定で 1 回程度の取りこぼししか起こさないことが分かってきている。制御点について設定の抜けが起こることは致命的だが、読み出しではソフトウェアによる補正が可能なので、十分実用になると考えている。

4.3 その他の機構

BPM 以外のビーム測定やマイクロ波測定についても BPM と同様な対応が必要となるが、BPM に比べると常時全てのビーム・モードを測定する必要性は低いので、当初はイベント受信器からビームモードの選択情報を確実に送り、これまでと同じ測定を行うことで、運転は可能であると考えている。

加速周波数に関しては、KEKB と入射器の間のビームタイミングのジッタが全幅 30ps しか許されていないため、それらの周波数の間には整数関係を持たせている。しかし、KEKB と PF のリング周長補正のためにそれぞれの加速周波数は独立にかつ連続的に変更調整されている。そこで、入射ジッタ全幅 700ps を許して、PF と入射器の間の入射タイミングを探す回路を運用している^[12]³。

³原理的には周波数関係に禁止帯があるが、実用上問題になることは無い。

5. ビームモード選択

これまで述べたようにモード切り替えの制御はできるようになったが、実際にどのような順序でビームモードを選択するのか、決定しなくてはならない。その規約が事前に決まっていれば、イベント送信機上にプログラムすれば良いが、当初は規約がさまざまに変化することが予想される。そこで、各リングからの要求を受けるプログラムを一つ用意し、そのプログラムが調停した 20ms 毎のビームモード情報を一秒程度の可変長リストにしてイベント送信機に送ることにした^[13]。特性により、空打ちなどを行わなくてはならない機器も多数あり、20ms 毎に多数のイベントを発生するため、リストは複雑になっている。

6. 考察とまとめ

50Hz のビームモード切り替えに関して、個々の項目の実証は進みつつある。例えば、タイミング同期精度については 8ps (rms) 程度が得られており、離れた場所の同期制御についても確認された。今後、ビーム運転の中で、確実な制御の維持について経験を積んでいきたい。将来は、双方向のタイミング安定化や精度向上を図りたいと考えている。2009 年には PF の Top-up 入射が予定されており、PF リングでの放射光実験と KEKB での B 中間子の物理実験に対し大きな貢献になると期待している。

参考文献

- [1] M. Satoh *et al.*, "The KEK Injector Upgrade for the Fast Beam-Mode Switch", *Proc. EPAC2006*, Edinburgh, UK, 2006, p. 855.
- [2] M. Satoh *et al.*, "Present Status of the KEK Injector Upgrade for Fast Beam-Mode Switch", *these proceedings*.
- [3] K. Furukawa *et al.*, "Beam Switching and Beam Feedback Systems at KEKB Linac", *Proc. LINAC2000*, Monterey, USA., 2000, p. 633.
- [4] K. Furukawa *et al.*, "The Timing System of KEKB 8-GeV Linac", *Proc. ICALEPCS2003*, Gyeongju, Korea, 2003, p. 130.
- [5] F. Tamura *et al.*, "Timing System for J-PARC", *Proc. PAC2005*, Knoxville, U.S., 2005, p. 3853.
- [6] Y. Chernousko *et al.*, "Diamond Timing System Developments", *Proc. ICALEPCS2003*, Gyeongju, Korea, 2003, p. 244.
- [7] <<http://www.mrf.fi/>>.
- [8] <<http://www.aps.anl.gov/epics/>>.
- [9] K. Furukawa *et al.*, "Lifespan of an Accelerator Control System and Transition to EPICS", *Proc. 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society*, Tosu, 2005, p. 424.
- [10] K. Furukawa *et al.*, "Beam Feedback Systems and BPM Read-Out System for the Two-Bunch Acceleration at the KEKB Linac", *Proc. ICALEPCS2001*, San Jose, USA., 2001, p. 266.
- [11] M. Satoh *et al.*, "Fast BPM DAQ System Using Windows Oscilloscope-based EPICS IOC", *Proc. ICALEPCS2007*, Knoxville, USA, 2007, p. 469.
- [12] K. Furukawa *et al.*, "Timing System Upgrade for Top-up Injection at KEKB Linac", *Proc. EPAC2006*, Edinburgh, U.K., 2006, p. 3071.
- [13] S. Kusano *et al.*, "Development of software for event system in KEKB Linac", *these proceedings*.