

GLOBAL AND FAST BEAM CONTROL SYSTEM FOR SIMULTANEOUS TOP-UP INJECTIONS TO 3 RINGS AT KEKB AND PF

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

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

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

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

Abstract

The 8-GeV linac at KEK provides electrons and positrons to four storage rings. Simultaneous top-up injections to three rings, KEKB-HER, KEKB-LER and Photon Factory (PF), are now performed for the ultimate experimental results at the both KEKB and PF facilities. An event-based fast control system was newly constructed in addition to the existent EPICS control system. The event system enables fast controls from picosecond to millisecond range, and the conventional EPICS system covers slower controls. More than 100 parameters are driven every 20ms pulse globally by the new system in order to generate beams with three-times different energies and 100-times different charges. The system enables the future accelerator complex such as SuperKEKB as well.

KEKB と PF の 3 リング同時トップアップ運転のための 広域・高速制御機構とビーム運転

1. はじめに

KEK の 8-GeV 電子・陽電子入射器は 4 つの蓄積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。それらのうち KEKB-LER、KEKB-HER と PF の 3 つの蓄積リングに対して、同時にトップアップ運転が可能となるように、入射器の改造を進めてきた^[1, 2]。

2. 高速イベント制御システム

電子入射器ではさまざまなパルス電源が 50Hz の繰り返しで動作するように設計されている。同時入射を実現するためのビーム切り替えの際にも、ひとつのパルスも無駄にはできないので、20 ミリ秒以内に約 1km にわたる機器に対して確実に操作を行わなければならないことになる。

入射器で生成されるビームは次のような性質を持つ。

- KEKB 高エネルギーリング (HER) 入射用電子：8GeV, 1.2nC, 2 バンチ
- KEKB 低エネルギーリング (LER) 入射用陽電子：3.5GeV, 1.2nC, 2 バンチ (ただし、陽電子生成用の一次電子ビームは 4GeV, 10nC, 2 バンチ)
- PF リング入射用電子：2.5GeV, 0.1nC, 1 バンチ

これからわかるように、切り替えるビームの性質が、エネルギーで 3 倍以上、電流で部分的には 100 倍異なり、高速に切り替える際の挑戦課題となる。

2.1 イベント制御システムの概要

以前は、上に述べたようなビーム切り替えに 30 秒から 2 分を要していたが、その主な要因は大型偏向電磁石の磁場の再現性を確保するための標準化と、四重極電磁石の簡易標準化であった^[3]。四重極電磁石磁場を変

更しなくて良いようにビーム加速輸送機構を設計し、必要最低限のパルス電磁石を追加設置することになった。

また、他の機器にも制御機構が追加され、20 ミリ秒で切り替えることが可能な機器が、パルス電磁石、マイクロ波発生装置、電子銃、などと増え、それぞれ試験が繰り返された。

しかし、広域、高速、確実な制御機構については、これまで入射器の制御で用いてきた Ethernet と TCP/IP を基礎とした広域制御だけでは、達成が困難かと思われた。そこで、通常の制御ネットワークの他に高速制御用の同期通信ネットワークの導入が検討された。FPGA (Field Programmable Gate Array) と高速シリアル通信路を組み合わせた技術は民生品にも使用されるようになり、確立した技術になってきた。そこで、KEKB や入射器の制御で成功している EPICS のような国際協力を狙い、英国のダイヤモンド放射光施設向けにスイス放射光施設などが協力して開発が進んでいたイベントシステムハードウェアの評価を行うことにした。

2005 年から行った評価の結果、MRF 社のイベントシステムは元々放射光加速器向けに同じパターンタイミング信号を発生するように設計されているが、20ms 毎にプログラムを書き替えることにより我々の目的にも使用でき、また、信頼性も問題ないことがわかった。

この装置内では、外部クロックに同期した 1GHz から 2.5GHz のデジタル信号を、FPGA と簡易信号発生器で生成し、民生品となっている SFP (Small Form-factor Pluggable transceiver) で広域に光伝送することができる。この信号は、50MHz から 125MHz の速度 (イベントレート) で送られるイベント及び同期データと呼ばれる短く速い情報、毎秒 25 ~ 62.5 メガバイトの速度で最大 2 キロバイト送られる少し遅い情報、そしてタイミングクロックを伝達するために用いられる。

イベントレートは外部クロックと分周比から決まり、114.24MHz と分周比 1 で運用することとした。内部・

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

伝送クロックはその 20 倍の 2.3GHz となる。

装置は VME64x バス規格を使ったモジュールとして作られているが、イベント制御は、送信側（イベント送信器）が FPGA のアプリケーションソフトウェアで準備したイベント列を送り、受信側（イベント受信器）がイベント列を受け取った際に、CPU に割り込みを掛けることによって行う。この機構で、実時間オペレーティングシステムを用いれば、10 マイクロ秒程度の制御を広域に行うことができる。実時間オペレーティングシステムとしては、KEKB 全体の制御環境を共通にできるように VxWorks を採用することにした。

イベントシステムは、クロック同期の機構としても、送信側、受信側の位相同期回路によって、10 分程度の短時間では 10 ピコ秒以下の同期精度も持っている。長時間では接続のために使用している光ファイバの温度特性が影響し、安定性が悪化するが、入射器では電子銃やバンチ計測システム以外のタイミング信号からの要請は十分に満足する信号を発生させることができる。ひとつのイベント受信器で 16 個の信号を発生させることができ、FPGA のプログラムにより、多彩な遅延発生制御ができるため、多少ソフトウェアが複雑になることを除けばこれまで使用されてきたタイミング伝送機構の大部分は不要になると考えている [4]。

2.2 イベント生成ステーション

イベントシステムのハードウェア・ソフトウェアは選択可能な最大限の自由度を失わないように注意して構築されている。

イベント生成ステーションは MRF 社で製造されたイベント送信器 (EVG230) [5]、デジタル信号入出力ボードと Emerson 社の VME バス用 CPU (MVME5500) 及び光信号ファンアウトから構成されている。114.24MHz と 50Hz 信号がイベント送信器に入力されるが、50Hz 信号は図 1 に示すように、PF リングまたは KEBB の二つのリングについて、旋回周波数に対してリング内バケット選択の遅延を追加し、さらに周長補正を行ったマイクロ波に同期した上で、緩やかに電源周波数に同期している。イベント送信器内で生成されるビームモードパターンに従って、20 ミリ秒毎に 3 つのリングの選択を切り換えることができる。

KEKB と PF のリングの周長は独立に補正するために周波数は連続的に変化しているが、KEKB リングへの入射許容量が 5 度 (30 ピコ秒) と狭いため、KEKB と入射器のマイクロ波の間には整数関係がある。PF リングとは同時に整数関係は持てないが、許容量が大きいので、300 ピコ秒のジッターを許して偶然の同期タイミング信号を作り出している。

イベント送信器で生成された信号は SFP を通してファンアウトモジュールで 15 分割されて図 2 のようにスター型トポロジでイベント受信ステーションに送られる。

2.3 イベント受信ステーション

イベント受信ステーションはイベント受信器 (EVR230RF) と CPU (MVME5500)、さらに制御対象によって ADC と DAC ボード等を持っている。イベント受信器は VME64x 一輻のモジュールで、2.3Gbps の信

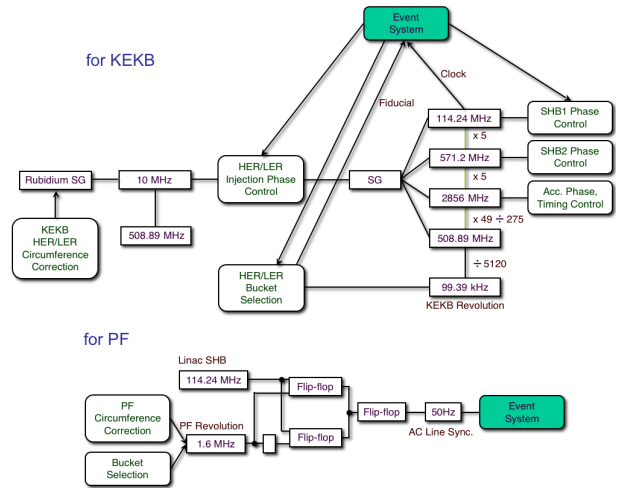


図 1: マイクロ波周波数、旋回周波数、イベントレート及びそれらの制御の関係。上段が KEBB 向け、下段が Photon Factory 向け。

号に載せて 114.24MHz のイベントレートで送られて来るイベントに応じて、背面から 16 のタイミングパルス（及びレベル信号）を発生させることができるので、マイクロ波発生装置やパルス電磁石のタイミング制御またはオンオフ制御に用いる。低電力マイクロ波の位相などの制御には、イベントが CPU に割り込みを発生し、それによって DAC と ADC ボードを制御するプログラムが起動される。

2.4 ソフトウェア構成

上のようなイベント制御システムを導入することによって、20 ミリ秒毎の各パルスに、ほぼ自由に入射対象リングを選ぶことが可能になった。ビームをどのような順序で入射するかについては、入射器・リングの運転状況や実験目的によって頻繁に変化する可能性がある。そこで、次のようなビームモードパターンと呼ぶものを作り、そのパターンを入れ替えることによって、入射要請の変化に答えることにした。

- ビームモードパターンの各要素は 20 ミリ秒間隔のパルスに対応し、入射リングやそのビーム特性を伴ったビームモードをひとつだけ指定する。
- ビームモードパターンはいつでもイベント生成ステーションへダウンロードすることができる。
- パターンの長さは 2 から 500 で、最小 40 ミリ秒、最大 10 秒に相当する。

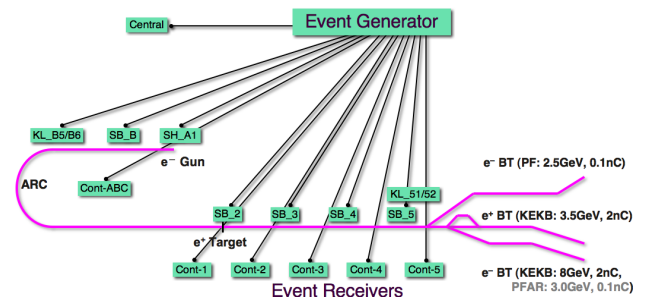


図 2: イベント生成ステーションと 600m の入射器に亘って設置されたイベント受信ステーションの配置。

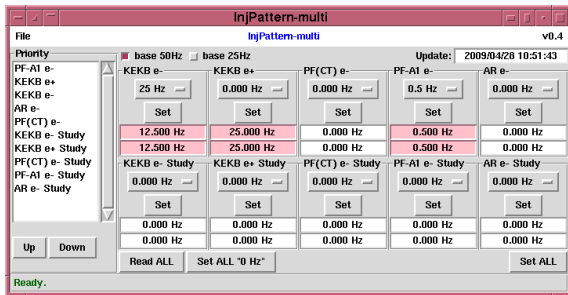


図 3: 通常運転中に使用されるビームモードパターンジェネレータの画面。リング加速器からの入射指示を調停して、自動的にパターンをイベント生成ステーションに送る。

- 新しいビームモードパターンがダウンロードされたら前のパターンの最後で入れ替えを行う。
- 新しいパターンが無ければ、その時のパターンを繰り返す。
- ビームモードは 10 個用意されており、通常運転に 4 つが使用され、残りはビーム開発に使用される。

あるパルスのビームモードが決まるとそのビームモードを実現するために、その前のパルスのビーム直後に各装置の動作準備を行うための複数のイベントが各イベント受信ステーションに送られる。そして、次のパルスの先頭から各装置の動作タイミングを発生させるための複数のイベントが送られる。

イベント生成ステーションはこのようにビームモードパターンを受け付け、その記述に従って、各要素に指定されたビームモードに対応したイベント列を生成し、イベントレート (114.24MHz) の速度で送出する。

イベント受信ステーションは、受信イベントのうち自ステーションに関連するものについて、あらかじめ決められた動作として、適切なアナログ値設定、遅延設定、信号発生などを行い、各装置の制御を行う。

イベント送信・受信ステーション上のアプリケーションプログラムは国際協力で開発されている EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 制御ソフトウェア環境で開発されており^[6]、主に EPICS ソフトウェアの最小単位である“レコード”間の制御接続の指定で動作させることとした。現在、準備されたレコードの数は 5000 個ほどになっている。

ビームモードパターンを生成するプログラム (ビームモードパターンジェネレータ) については、柔軟性を確保するためスクリプト言語で記述され、図 3 のようなグラフィカルユーザインターフェースと他のプログラムとの通信機能を持つ。リング加速器からの要請を通信機能で受け付けたり、画面上でのオペレータの指示を受け付け、それぞれのビームモードの間で調停を行う。その上で、各要素のビームモードを決定し、パターンを自動的に生成し、さらにイベント生成ステーションに送り出す。その調停の際には、その時間帯の各リングの優先度や、関連するパルス電源におけるパルス生成に関する制限などを考慮している。

2.5 イベント制御システムの運用

上のようなイベントシステムは 2008 年の夏から運用を始め、それまでの遅い制御機構の一部を置き換え

た。当初は 50Hz の速い切り替えは行わず、以前の運転形態を再現させて安定性を確認したが、計画よりも早く 2009 年の春から本格的な高速切り替え機構の運用を始めた。

これまでに設置され、実現した制御は次の通りである。

- 1ヶ所のイベント生成ステーションと 15ヶ所のイベント受信ステーション
- 電子銃の電圧とピコ秒タイミングの切り替え
- 12 のマイクロ波発生装置での低電力マイクロ波の制御切り替え
- 60 の大電力マイクロ波のタイミング制御の切り替え
- 10 のパルス電磁石オンオフ、タイミングの制御
- 100 の入射器のビーム位置モニタのための 24 のビーム位置測定ステーションの制御
- 100 のビーム輸送路のビーム位置モニタのための 4 つのビーム位置測定ステーションの制御
- KEKB の電子と陽電子の入射位相の制御
- KEKB の電子と陽電子のバケット選択の制御

これらの制御のために、20 ミリ秒のパルス毎に約 100 のアナログ・デジタルパラメータが変更され、各リングへの入射ビームを生成している。

約 1 年の運用で、1ヶ所のイベント受信ステーション (の CPU) が 2 度停止したが、50kV 高電圧パルス電源からのノイズを疑っている。イベントシステム自体には障害は見つかっていない。通常の運転時には、PF リングからの入射ビームパルス生成条件はあまり変わらないが、KEKB の HER と LER の入射については、頻繁に衝突条件の変更が行われることもあり、約 10 秒毎にビームモードパターンが変更される。(現在のビームモードパターンの長さは 100 程度になることが多い。) このような頻繁な条件の変更にも特に問題なく対応し、連続して 20 ミリ秒毎にビームモードを切り替えながら、同時入射を実現できている。

3. まとめ

2008 年 9 月から新しい高速制御システムの検証を進め、予定よりも早く 2009 年の 4 月から KEKB と PF の同時トップアップ運転を成功させて、各リングでの安定実験に貢献することができた。SuperKEKB などの将来の加速器における高速制御についても同じ機構が利用できると思われる。

参考文献

- [1] M. Satoh *et al.*, “高速ビームモード切り替えのための KEK 入射器アップグレード現状報告”, *Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society*, Hiroshima, 2008, p. 821.
- [2] K. Furukawa *et al.*, “KEK 電子入射器の高速ビーム切り替え機構”, *ibid.*, p. 424.
- [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] <<http://www.mrf.fi/>>.
- [6] <<http://www.aps.anl.gov/epics/>>.