

KEK電子・陽電子入射器で実現する仮想加速器

VIRTUAL ACCELERATOR REALIZATION AT KEK ELECTRON/POSITRON LINAC

古川和朗 *^{A)}、秋山篤美 ^{A)}、一宮亮 ^{A)}、岩崎昌子 ^{A)}、岡崎知博 ^{C)}、小田切淳一 ^{A)}、梶裕志 ^{A)}、門倉英一 ^{A)}、草野史郎 ^{B)}、工藤拓弥 ^{B)}、倉品美帆 ^{A)}、佐藤政則 ^{A)}、中村卓也 ^{B)}、中村達郎 ^{A)}、諏訪田剛 ^{A)}、三川勝彦 ^{A)}、水川義和 ^{B)}、宮原房史 ^{A)}、吉井兼治 ^{B)}

Kazuro Furukawa * ^{A)}, Atsuyoshi Akiyama ^{A)}, Ryo Ichimiya ^{A)}, Masako Iwasaki ^{A)}, Tomohiro Okazaki ^{C)}, Jun-ichi Odagiri ^{A)}, Hiroshi Kaji ^{A)}, Eiichi Kadokura ^{A)}, Shiro Kusano ^{B)}, Takuya Kudou ^{B)}, Miho Kurashina ^{A)}, Masanori Satoh ^{A)}, Takuya Nakamura ^{B)}, Tatsuro Nakamura ^{A)}, Tsuyoshi Suwada ^{A)}, Katsuhiko Mikawa ^{A)}, Yoshikazu Mizukawa ^{B)}, Fusashi Miyahara ^{A)}, Kenji Yoshii ^{B)}

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

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

^{C)} East Japan Institute of Technology, 1-4-22 Minatomachi, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0034

Abstract

SuperKEKB electron/positron asymmetric collider is under construction in order to elucidate new physics beyond the standard model of elementary particle physics. However, this will be only possible by a precise measurement with 40-times higher luminosity compared with that of the previous project KEKB. The storage ring and injector linac should be upgraded to enable a 20-times smaller beam size of 50 nm at the collision point and twice-larger stored beam current of 3.6-ampere positron and 2.6-ampere electron with a short expected lifetime of 10 minutes. At the same time two light source rings, PF and PF-AR, should be filled in top-up injection mode. To this end the injector linac should be operated with precise beam controls. Dual-layer controls with EPICS and MRF event systems are being enhanced to support beam operation with precise pulse-to-pulse beam modulation (PPM) at 50Hz. A virtual accelerator (VA) concept is being introduced to enable a single linac behaving as four VAs switched by PPM, where each VA corresponds to one of four top-up injections into SuperKEKB HER, LER, PF and PF-AR. Each VA should be accompanied with independent beam orbit and energy feedback loops to maintain the required beam qualities. An independent parameter set for each of PPM VAs is maintained for operation. The requirements from SuperKEKB HER and LER for beam emittance, energy-spread, and charge are especially challenging. Beside above PPM VAs, another kind of virtual accelerators that simulate each PPM VA on a accelerator design code is under development. The design concepts of two kinds of VAs are described.

1. はじめに

KEKB B ファクトリの 11 年間の実験の成功を受け^[1]、新しい電子・陽電子非対称コライダ SuperKEKB に改造する建設作業が進んでいる^[2]。衝突点でのビームサイズを絞り、また電流を倍増させることにより、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という KEKB の 40 倍のルミノシティを達成し、素粒子のフレーバ物理の解明に繋がると期待されている。SuperKEKB は電子・陽電子入射器、7 GeV 電子リング (HER)、4 GeV 陽電子リング (LER) から構成され、また、低エミッタンスの陽電子を得るために新しくダンピング・リングも建設される。

電子・陽電子入射器は、実験目的が異なりエネルギーやビーム特性も異なる複数の蓄積リング加速器にもビームを供給してきたが、そのうち、Photon Factory (PF) と PF Advanced Ring (PF-AR) という 2 つの放射光蓄積リングには入射器の後半を用いて現在も入射を継続している。SuperKEKB に向けては、低エミッタンス大電流のビームの生成・入射が求められており、新規に大電流 RF 電子銃や陽電子捕獲のためのフラックスコンソレータ等を導入する^[3,4]。2015 年からは、SuperKEKB を含め、これら 4 つの蓄積リング及びダンピング・リングへそれぞれ特性の大きく異なるビームを切り替えながらやり取りする必要がある (Fig. 1)。

入射器は大電力電源を 50Hz でパルス動作させる能力を持つので、150 以上の加速機器パラメータを 20 ミリ秒以内に切り替えて、パルス毎に異なる入射ビームに対応させる。このような運転形態をパルス・トゥー・パルス・モジュレーション (PPM) と呼ぶことがあり、CERN の複合加速器などでも行われているが、CERN の場合は 1.2 秒程度と比較的ゆっくり切り替えている^[5]。PPM ではビームの特性をパルス毎に頻繁に変更し、仮想的に、あたかも同時に複数の蓄積リングに入射しているように振る舞わせる。これは、複数の仮想加速器を同時に運転操作していることに相当する^[6]。

各仮想加速器内では、それぞれ独立のビーム測定を参考にしながら、ビーム光学条件を維持しなくてはならない。一部のマイクロ波やタイミング、パルス電磁石装置など高速で切り替えが可能となっているため、各仮想加速器で独立に管理できる高速同期パラメータが 150 以上存在する一方、DC 電磁石など各仮想加速器間で共

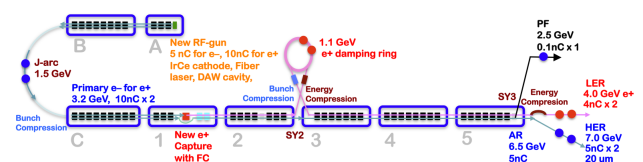


Figure 1: Injector linac layout and beam delivery to several experimental facilities.

* <kazuro.furukawa@kek.jp>

通のパラメータも 1000 近く存在する。ビーム運転開始当初はビームの不安定要因も多数懸念されており、各仮想加速器内でビーム安定化フィードバック機構を複数動作させる必要があると思われる。その構築には後で述べるように、別の種類の仮想加速器が必要とされる。

2. 高速イベント同期制御機構

KEKB 計画における制御システムは、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [7] の導入によって下位層の抽象化を達成し、また SADscript [8] を含めたスクリプト言語を運転環境に導入することによって新しい発想を容易に運転に反映させることに成功した。さらに、EPICS や制御測定装置の進化に合わせ、“Channel Access Everywhere” という概念により、新しい装置の導入を容易にした [9]。

その後、PF では実験精度の向上のためにトップアップ入射運転の要望が高まり、また、KEKB においても特にクラブ空洞の導入に伴い、電子・陽電子衝突条件の調整の安定化のために、トップアップ入射運転が期待されるようになった。そこで、パルス偏向電磁石などの 50 Hz でビーム切り替えを可能にするハードウェアを整備した上で、信頼性の高い高速同期制御機構を導入した。

同期制御機構は FPGA (Field Programmable Gate Array) と SFP (Small Form-factor Pluggable) を用いた回路を、制御用計算機ネットワークとは独立の光ファイバで、スター構成に接続したもので、通常イベント制御システムと呼んでいる [10, 11]。イベント・ジェネレータ (EVG) は一本のファイバの上に基準タイミング、114.24 MHz のクロック、そして 2.28 Gbps の同期データを多重化して載せることができ、ファンアウトを通して接続された遠隔のイベント・レシーバ (EVR) はクロックを再生し、イベント同期を確立すると共に、データも受信する。KEKB の運転時は Fig. 2 のように 1 km の範囲の 19 のステーションを結び、約 150 の高速同期パラメータを 20 ms 以内に切り替えた。高速に切り替えが可能となったパラメータは、電子銃からの電子ビーム電荷、マイクロ波発生装置の On/Off と位相とタイミング、パルス電磁石の On/Off とタイミングと磁場強度、そして、ビーム測定用のタイミングや帯域などである。そのうちタイミングについては遅延等のパラメータに従って、10 ps 程度の精度の信号の出力を行い、アナログ信号については、VME バス経由で DAC モジュールを制御した [12]。

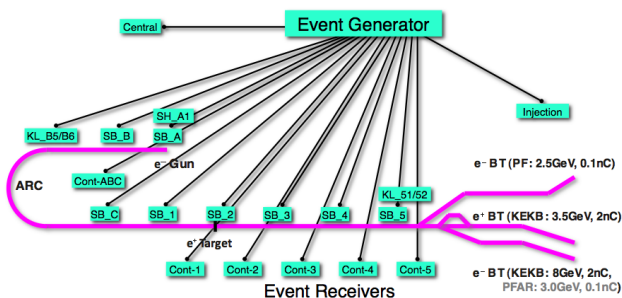


Figure 2: Overall configuration of the event-based control system, that included 19 event stations to cover the 1-km facility in KEKB, and will be extended.

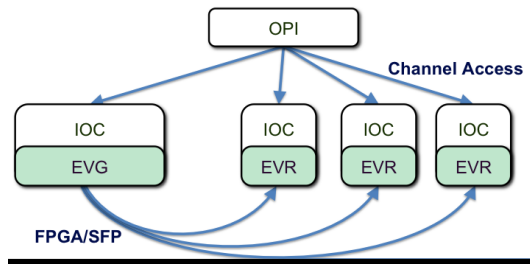


Figure 3: Dual-tier controls with EPICS channel access at the top, and fast and robust control with synchronized event-based system at the bottom.

イベント制御機構は、20 ms 毎のビームパルスを、1~10 秒程度の長さまで切り替え手続きとして繋げて、確実に実行して行くが、その手続き自体の制御は EPICS によって行なっており、ハードウェアに近い高速同期制御をイベント制御機構が受け持ち、0.1 秒程度の遅い制御を EPICS が受け持つ、Fig. 3 のような 2 階層の “Dual-tier” 制御システムとなっている。

KEKB 運転時には、KEKB と PF-AR がビーム輸送ラインを共有していたため、エネルギーの異なるビームを高速で切り替えることができなかったが、独立のビーム輸送ラインの建設が予定されており、SuperKEKB の本格運転時には、高速で切り替えられることになる [13]。また、SuperKEKB の入射においては以下に述べるように精度の高いビーム制御が必要となるため、さらに多数のパルス電磁石やマイクロ波装置の高速同期パラメータが追加され、約 200 になるとと思われる。

3. EPICS・PPM と仮想加速器

仮想加速器という言葉は、ハードウェアを持つ実加速器に対して、計算機上に構築した仮想の加速器モデルのことを指すことも多い。シミュレーションコードで構成した仮想加速器モデル上のビーム光学パラメータと、実加速器上の実ビームの挙動をオンラインで比較することで、加速器の性能向上を図ったり、実加速器の建設前に加速器の特性を調べたりするために使われる概念である [14]。さらに EPICS には制御パラメータをシミュレーションに切り替える機構が最初から組み込まれており、この機構を利用すると、運転に用いる上位ソフトウェアを実加速器に接続したり、仮想加速器に接続したり、比較的容易に切り替えることも可能となっている。ここではこのような仮想加速器を仮にシミュレーション仮想加速器と呼ぶことにする。

この考え方に対して、先の節で述べたように、PPM 運転制御における仮想的な複数の加速器も仮想加速器と呼ばれることがある。入射器の PPM 運転においては、少なくとも、Fig. 4 にも示すように、次のような PPM 仮想加速器群を用意することになる。

- SuperKEKB HER 入射用 7-GeV 電子加速器
- SuperKEKB LER 入射用 4-GeV 陽電子加速器
- PF 入射用 2.5-GeV 電子加速器
- PF-AR 入射用 6.5-GeV 電子加速器

このうち LER 入射用陽電子加速器は、さらに、粒子種類とダンピングリング (DR) 前後で次のように分割さ

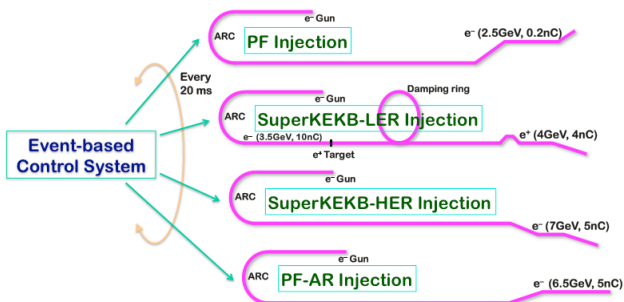


Figure 4: Single injector linac behaves as four PPM virtual accelerators, being managed by an event-based control system.

れる。

- 陽電子標の前 3.5-GeV 一次電子加速器
- DR 前 1.1-GeV 陽電子加速器
- DR 後 4-GeV 陽電子加速器

DR では 40 ms 以上の時間を掛けて陽電子のエミッタンスを減少させるので、同じビームについては 2 パルス以上時間的に離れたビームとなる。DR 入射前のビームのエネルギー、位置、エミッタンスなどは DR 内で失われるが、メインリング (MR/LER) の旋回周波数に対する相対タイミングや電荷量は関連を持つので、これらのビームは全く独立と考えていいわけではない。

また、SuperKEKB 入射用のビームは、一つのパルス内で、96 ns 離れた 2 つのビームバンチを持つことができ、2 バンチ目は 1 バンチ目のウェイク場の影響を受けるので、おそらく別の扱いが必要となる。イベント同期制御としては独立に制御できるパラメータは多くはないが、ビーム測定はそれらを区別して行う必要がある。

個々の PPM 仮想加速器は 1000 近い共通のパラメータと約 200 個の独立の高速同期パラメータを持ち、それぞれのビーム特性に合わせてビーム光学系を最適化しなくてはならない。従って、それぞれの PPM 仮想加速器に対応して、シミュレーション仮想加速器を必要とすることになる。

現在使われている加速器シミュレーションコードは、残念ながら、このような共有パラメータを持つ複数の仮想加速器を同時に最適化するような仕組みを用意していないので、繰り返しによって最適な運転パラメータを探す必要がある。上に挙げた仮想加速器を、さらに区域によって、

- RF 電子銃から 180 度アーク前まで (1.5 GeV)
- 陽電子標の前まで (3.5 GeV)
- DR 入射部まで (陽電子 1.1 GeV、電子 4.6 GeV)
- 入射器終端まで (SuperKEKB、PF、PF-AR で異なるエネルギー)
- ビーム輸送ラインの入り口

というように分け、その区域によって仮想加速器に優先順位を付けて最適化を行い、共通のパラメータを通して他の仮想加速器も徐々に最適化を行うことになると考えている。

運転時には、それぞれの実加速器の装置が安定に指定したパラメータを再現しているかどうか、特に低電力

マイクロ波や、タイミングについてのモニターを監視する必要がある [15, 16]。また、ビーム位置モニターなど複数のビーム測定装置が、それらの仮想加速器と同期して測定を行うので、その結果を参照しながら、シミュレーション仮想加速器と比較して、ビームを改良させていくことになる [17]。特に KEKB に比べ、大電流の要請が高次モードのビームウェイク場を通して低ビームエミッタンスの要請を満足できるのかどうか自明ではなく、まずは繊細なビーム軌道の管理が求められると考えられている。

4. 各仮想加速器におけるビーム安定化

シミュレーションによると、10 mm mrad 弱のエミッタンスで RF 電子銃から生成されたビームを、入射器終端まで SuperKEKB の入射条件である 20 mm mrad で導くには、少なくとも局所的には 0.1 mm、広域には 0.3 mm の精度のアライメントが必要とされている。この値については、現在、東日本大震災によって影響を受けた入射器のアライメントの全面的な改修を行なっているが、基本部分が 30 年以上前の設計であり、かなり厳しい値であると思われる。もしも、アライメントが悪化すると、入射器内をビーム輸送する際に、加速管内で発生する横方向高次ウェイク場によって、ビームバンチが歪み、エミッタンスが悪化してしまう。

エミッタンスが悪化しないようなちょうど良い軌道を探し、必要なアライメント精度が達成されていれば、その軌道を維持することによって、ビームエミッタンスも維持できるはずである。少なくとも要求エミッタンスが厳しい SuperKEKB 向け電子と陽電子の仮想加速器において、そのような軌道安定化フィードバック機構を実装する必要がある [18]。

さらに、複数の連続アライメント測定の中に、加速器トンネルの床が大きく動いているとの結果もあり、解析を進めているが、その緩やかな変動の影響を何らかの方法で抑える必要がある。このような緩やかな変動は、温度などの変化により、マイクロ波やタイミングなどにも起こる可能性が予想され、最終的にはビームのエミッ

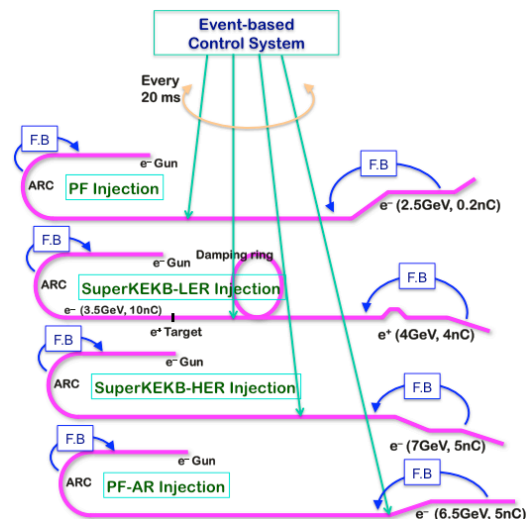


Figure 5: Each of multiple virtual accelerators may be managed by several stabilization feedback loops.

タンスやエネルギーに影響を与えるので、安定化フィードバック機構は一つの仮想加速器の中でも多種類、多重に必要となる (Fig. 5)。

アライメントの達成精度や装置の安定度によって、安定化フィードバックの速度はパルス毎なのか、遅くても良いのか変わってくると思われる。KEKB 運転の初期にはイベント制御機構はなかったが、速い変動も見られ、装置の安定度についてひとつずつ対策することによって、安定化フィードバックの時定数は数秒から数十秒程度で充分となっていた。しかし、SuperKEKB のビームパラメータが 10 倍近く厳しくなっており、各仮想加速器内の安定化機構の役割は大きいと考えられる。また、ビーム安定化機構の設計にはシミュレーション仮想加速器が必要となる。これらの機構を正しく動作させるには、見通しのよい全体の描像を持つことが重要かと思われる。単純化した Fig. 6 のような描像を元にして、詳細を詰めて行きたい。

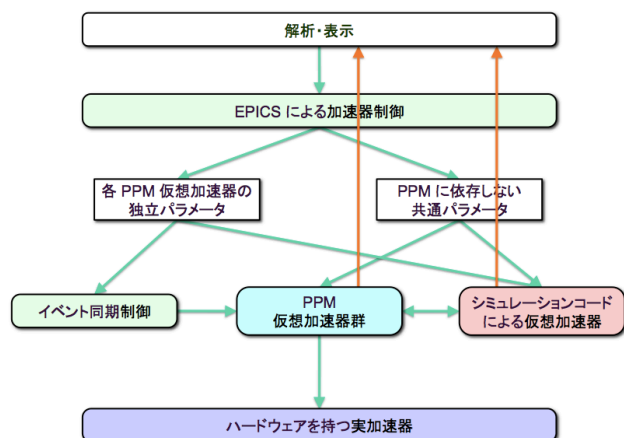


Figure 6: Overall configuration of PPM and simulation virtual accelerators.

5. まとめ

2 種類の仮想加速器の考え方をを用いた SuperKEKB 入射器の運転制御について考えてみた。複雑なビーム運転モードや高度なビーム品質を達成するためには、このように多重の抽象化が必要と思われる。このような機構の構成要素は既に準備されつつあり、仮想加速器自体の実現は可能だと思われるが、具体的な安定化機構も含めたビーム光学モデルとソフトウェアの実装については、検討すべき課題も多い。KEKB で用いられたソフトウェアをイベント制御情報を利用して動作させる試験は行なっているので、シミュレーション仮想加速器によるパラメータ管理を整備し、PPM 仮想加速器の高度化を図りたい。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, “Commissioning of KEKB”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A010.
- [2] T. Abe *et al.*, “Achievements of KEKB”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A001.
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A011.
- [4] F. Miyahara, “Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac”, T. Natsui, “Linac upgrade for SuperKEKB”, these proceedings.
- [5] K. Furukawa *et al.*, “High-intensity and Low-emittance Upgrade of 7-GeV Injector Linac towards SuperKEKB”, *Proc. IPAC’13*, Shanghai, China, 2013, pp.1583-1585.
- [6] J.P. Potier *et al.*, “Pulse to Pulse Modulation of the CERN PS Complex”, *Proc. PAC1977*, Chicago, USA, 1977, pp.1518-1520.
- [7] A. Akiyama *et al.*, “Accelerator Control System at KEKB and the Linac”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A008.
- [8] EPICS: <<http://www.aps.anl.gov/epics/>>.
- [9] N. Akasaka *et al.*, “Operation Software for Commissioning of KEKB Linac Programmed with SAD”, *Proc. APAC’98*, Tsukuba, Japan, 1998, pp.495-497.
- [10] K. Hayashi *et al.*, “MicroTCA Inter-Board Data Communications Applied to BPM and LLRF Systems”, these proceedings.
- [11] Micro-Research Finland Oy: <<http://www.mrf.fi/>>.
- [12] M. Liu *et al.*, “Development Status of SINAP Timing System”, *Proc. IPAC’13*, Shanghai, China, 2013, pp.2992-2994.
- [13] K. Furukawa *et al.*, “New Event-based Control System for Simultaneous Top-up Operation at KEKB and PF”, *Proc. ICALEPCS’09*, Kobe, Japan, 2009, pp.765-767.
- [14] H. Kaji *et al.*, “Injection control at SuperKEKB with Event Timing System”, these proceedings.
- [15] H. Harada *et al.*, “Beam-commissioning study of high-intensity accelerators using virtual accelerator model”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **602**, 2009, pp.320-325.
- [16] H. Katagiri *et al.*, “RF Monitor Unit for Simultaneous Injection”, *Proc. PASJ’12*, Toyonaka, Japan, 2012, pp.753-756.
- [17] M. Satoh *et al.*, “Development and Application of the Trigger Timing Watchdog System in KEK Electron/Positron Linac”, *Proc. IPAC’13*, Shanghai, China, 2013, pp.2962-2964.
- [18] M. Satoh, “BPM DAQ System Upgrade for SuperKEKB Injector Linac (II)”, R. Ichimiya, “Development of Beam Position Monitor Readout System for Electron-Positron Injector Linac towards the SuperKEKB”, these proceedings.
- [19] M. Yoshida, “Temporal manipulation of low emittance and high charge electron beam for SuperKEKB injection”, these proceedings.