

話 題

KEKB-HER, KEBB-LER, PF の
三リングへの同時入射に成功菊池 光男*・飯田 直子・大西 幸善・小川 雄二郎
紙谷 琢哉・古川 和朗・三増 俊広

Simultaneous injection from KEK Linac to PF and KEBB rings

Mitsuo KIKUCHI*, Naoko IIDA, Yukiyoishi OHNISHI, Yujiro OGAWA,
Takuya KAMITANI, Kazuro FURUKAWA and Toshihiro MIMASHI

Abstract

A successful simultaneous-injection with pulse-to-pulse mode-switch to the PF, KEBB-HER, and KEBB-LER rings from KEK Linac has greatly contributed to their upgraded performance. Detailed description of the system is presented.

1. はじめに

KEKB のルミノシティは 2009 年 6 月, 設計ルミノシティの 2 倍を超える $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ を記録した. この成功の陰には入射器の飛躍的な性能の向上があった. その一つとして, 5 年にわたり開発してきた, KEBB の二つのリングと PF リングへの同時入射が同年 4 月に成功したことが挙げられる.

図 1 は KEBB 衝突リングを構成する二つのリング LER 及び HER と PF リングの, ある典型的な 1 日の蓄積電流値の変化を示したものである. 上段の図は「同時入射」を始める前, 下段は「同時入射」に成功した後である. KEBB の電子陽電子入射器 (以下入射器と呼ぶ) は従来, 上記の三つのリングに対して, 運転モード (電磁石, 各種 RF の設定) を切り替えながら入射していた. 2009 年春, 入射器の繰り返し 50 Hz のパルス毎に各リングの要求に応じて入射する (同時入射) ことに成功した. 図 1 (下) において PF の蓄積電流値の幅は 0.1 mA である. HER と LER で蓄積電流が時々落ちているのは, PF-AR に入射しているときや KEBB の状態が悪化したことによる.

2. ことのはじまり

「問題」が表面化したのは 2004 年のことであった. この年 KEBB はいわゆる連続入射を開始し, それま

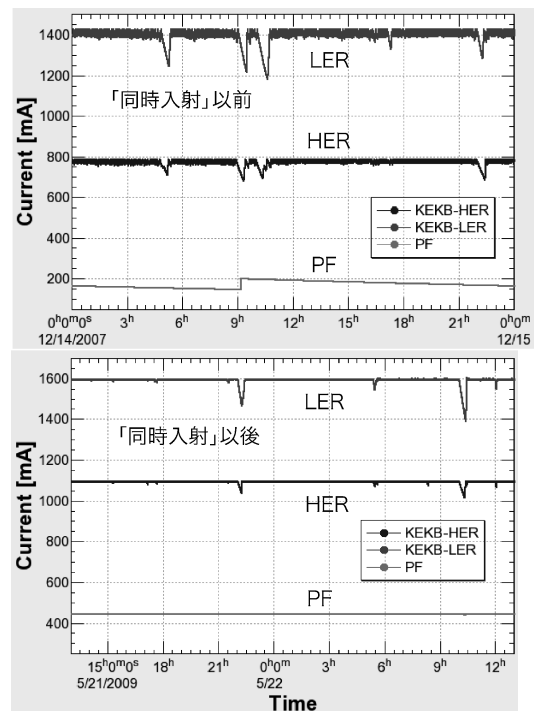


図 1 同時入射以前 (上), 以後 (下) における蓄積電流値の変化

での 90 分ごとのビーム入射にくらべて劇的に積分ルミノシティが伸び始めた. 連続入射モードでは入射器を常時占有するため, PF および PF-AR と入射器

* KEK 高エネルギー加速器研究機構
kikuchim@post.kek.jp

(Linac) の取り合いになるという事態が起きた。このことは入射器を占有するような PF リングのビーム開発マシンタイムにおいて特に顕著であり、まさに一触即発という状態にまで至ったのである。実のところ、Linac の繰り返しは 50 Hz であり KEKB と PF の入射繰り返し周波数を足してもなお余裕がある。このことを考えた時、筆者の一人の脳裏に浮かんだのは CERN-PS のことであった。CERN-PS は下流側加速器のあらゆる要求に応じて電子陽電子から果ては重イオンまで加速し、入射器としての役割を「同時」に (Super-cycle という形で) こなしている。Linac を KEK における電子陽電子源の中心として、同時に下流側の加速器に供給するように改造するしか解決方法はないのではないか、と思われた。放射光業界ではトップアップ運転が当たり前になってきており、PF の価値を高めるためにも PF のトップアップ運転は必要であるし、他方 KEKB のルミノシティを 50 倍に上げる SuperKEKB 計画においては占有度がさらに増し、PF, PF-AR へ同時入射する以外共存の道はない。ここに至って気運が盛り上がり 2004 年春入射改善グループ (IUC) が結成され、入射器改造に着手したのである。

3. Multi-Energy Linac

電子入射器が生成するビームは 4 つのリングに入射されているが、そのうち当面 PF-AR を除く、3 つのリングへのトップアップ入射を行うことが計画された。目標はエネルギー、電荷およびビーム電流の異なる、PF (2.5 GeV, e^- , 1 バンチ, 0.1 nC), HER (8 GeV, e^- , 2 バンチ, 1.2 nC), LER (3.5 GeV, e^+ , 1.2 nC) の三つのビームに対して、要求に応じ、Linac の設定を 50 Hz で切り替え加速することである。このほか、入射器内部では陽電子生成用の一次電子ビーム (4 GeV, 10 nC, 2 バンチ) も高速に切り替え加速されねばならない。ここで、KEKB 入射用のビームを 2 バンチとしているのは、50 Hz パルスのそれぞれの中に 96 ナノ秒間隔の 2 バンチのビームを加速することを意味しており、入射効率をほぼ 2 倍にすることができる。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。このためにはまず第一に、Linac の電磁石の設定電流を変えずに、エネルギー・電荷の異なる複数のビームを加速・輸送する Multi-energy オプティクスを実現し、ビームを自由自在に操作する技術が必要となる。これについては 4 章で詳述する。Linac のアラインメントが完

全であれば軌道は三者で同じになるはずであるが、現実には異なるため、50 Hz で動作するステアリング磁石を要所要所に設置することが必要であった (5 章)。また電子入射と陽電子入射のモード切り替えの際の、陽電子生成標的のビームラインへの出し入れが問題であるが、標的は固定したまま、ビームの軌道をパルスステアリング磁石によりパルス毎に変化させ、標的のすぐ横に開けられた小さな孔を通過させるという方式を取るようになった^{1,2)}。第二に、こうして加速された各ビームを下流側加速器に分配するためのパルス分岐バンドが必要である (6 章)。第三に、各ビームに応じた加速電圧にするため、Low-level RF の Timing をパルス毎に変えられるタイミングシステム (イベントシステム) が必要である (7 章)。イベントシステムの制御対象は電子銃, SHB (Sub Harmonics Buncher) 位相, Buncher 位相, Sub-Booster 位相, Klystron Pulse マクロタイミングなど、およそタイミング制御の全てに及び、それまでのデジタルディレイを置き換えるものでもある。その他 PF 輸送ラインの改造 (一部新しい入射路の建設), 穴あきターゲットの改良, BPM 読み出しシステムの改良等多々あるが、本稿では割愛する (文献 1, 2 を参照されたい)。

PF, HER, LER 用ビームの Linac に沿ったエネルギープロファイルおよび電荷量を図 2 に示す。A セクター先頭の電子銃によって作り出された電子ビームはバンチングされた後 A, B セクターで 1.7 GeV のエネルギーまで加速され 180°アーク (J-arc : R セクター) を通過する。1 セクター終端には陽電子生成用ターゲットがある。PF 用及び HER 用電子ビームは、ターゲット中心からずらして開けられた孔を通すことでターゲットを迂回する。HER 用電子ビームは、C から 5 セクターの間で 8 GeV まで加速される。一方 PF 用ビームは、3 セクター前半のクライストロンをスタンバイモード (パルス・タイミングをビームから外すこと) にし、さらに 3 セクター後半から 5 セ

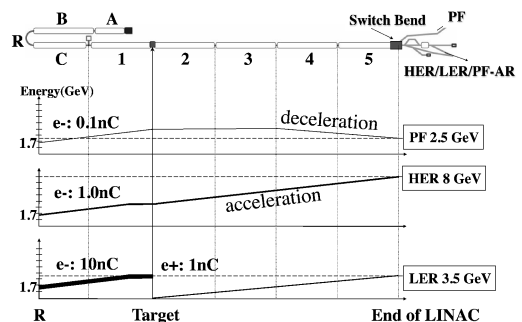


図 2 各ビームのエネルギープロファイル

クターまでのクライストロン位相を減速位相にすることで 2.5 GeV 減速する。実際には、個々のクライストロンの位相は 50 Hz では動かさないので Sub-Booster に使用されている半導体移相器によって位相を変更する。最終エネルギーの微調整は 5 セクターにあるエネルギー・フィードバックシステムによって行う。これらのタイミング及び位相の 50 Hz 切り替えはすべてイベントシステムの仕事である。

4. Multi-Energy Optics—Linac 運転モデルの確立—

4.1 PF・HER 同時入射

HER, LER, PF への三リング同時入射に挑戦する第一ステップとして行ったのが、ビーム電荷の同じ HER, PF への二リング同時入射である。その時行ったオプティクス測定、四極電磁石のファッジ係数測定が三リング同時入射への基礎固めとなった。

収束及び軌道補正用電磁石はブロック型電磁石であるので速い磁場変更は不可能である。従って同一の磁場の下でエネルギーの異なるビームを輸送しなければならない。3 セクター以降のビーム光学系では PF 用 2.5 GeV ビームに対してノーマル・セルのベータロン位相の進みを 90° となるように設定した。HER 用 8 GeV ビームに対してはノーマル・セルの位相の進みは約 30° となる。図 3 に C セクター以降のビーム光学系を示す。上段、中段はそれぞれ PF ビーム、HER ビームに対するベータ関数、下段はビーム・エネルギーを示す。

設定されたオプティクスを実際のビームを使って検証するために Single kick によるビームの応答の測定を行った。軌道補正電磁石でキックされたビームの位置を下流の BPM で測定する。この際、下流でビームロスしない程度の 2 種類の大きさで蹴り、軌道の差を single kick 応答とした。こうすることでビームの

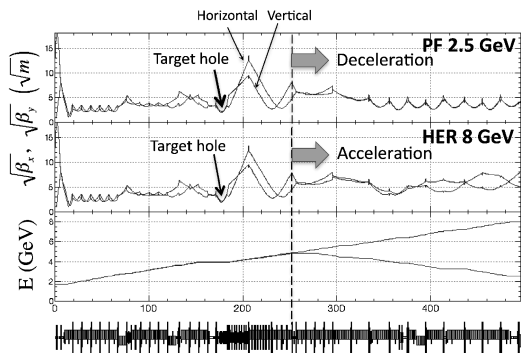


図 3 ビームオプティクスとエネルギープロファイル

絶対位置をキャンセルできる。このような Single kick 測定を、ベータロン位相が重複しない水平・垂直合計 22 カ所の軌道補正電磁石で行った。実際に測定された軌道差と設計オプティクスの計算で求めた軌道差は、必ずしも一致しない。モデルと実測のずれから、各四極磁石のファッジ係数(電流値の補正係数)を求めることができる。モデルと実測のずれは、加速ゲインのずれにも押しつけることができるので、測定されるファッジ係数は四極磁石の場所でのビームエネルギーのずれを含んだものである。PF ビームで測定したファッジ係数と HER ビームで得られたファッジ係数は、加速ゲインのずれの効果が両者で異なるため一致しない。我々は PF ビームによるファッジ係数を採用することとして、HER ビームに対するオプティクスのずれは、下流の HER-BT ラインに設置されているワイヤスキャナーを用いて matching を取ることにした。

Single kick 測定から全四極電磁石のファッジ係数を求めた。この過程で、ある四極電磁石でファッジ係数だけでは説明できないズレが観測された。調査の結果、その四極電磁石を含むトリプレットの誤結線によるものであることが判明した。これによるオプティクスのずれは下流の matching により補正されてしまうので 10 年間見過ごされてきたのである。図 4 に、配線正常化およびファッジ係数の導入による四極電磁石の補正前後の Single kick 軌道を示す。ファッジ係数は最大 3% で、ほとんどが 1% 程度の大きさである。補正後は水平・垂直共に実測とモデルの軌道が一致していることがわかる。

次に軌道補正について述べる。特に 4~5 セクター

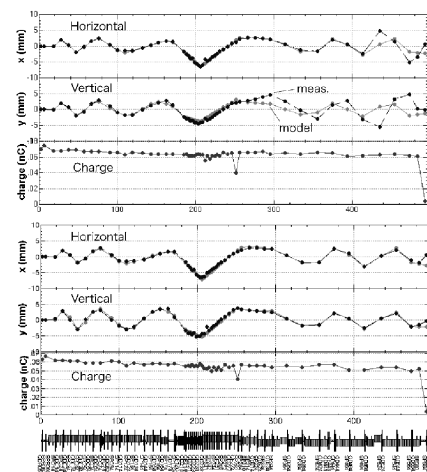


図 4 ファッジ係数の導入による四極電磁石の補正前(上) 補正後(下)の Single kick 軌道

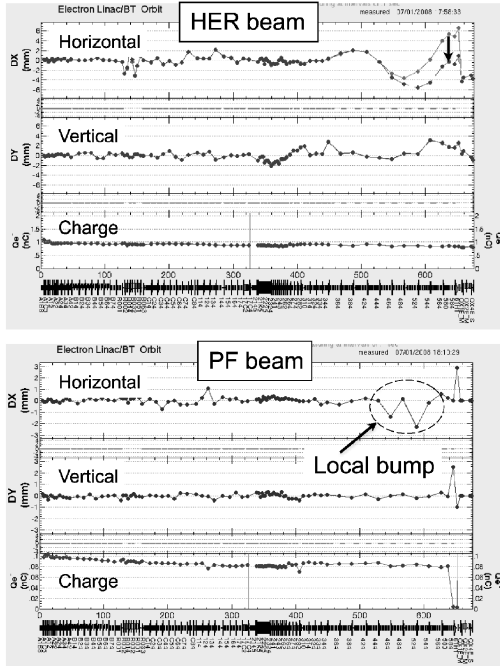


図5 バンプ軌道による軌道補正

では PF ビームと HER ビームのエネルギーが大きく違ってくるので、磁石のアラインメントがよほど良くないと、軌道が大きく異なってしまいます。そこで、両ビームでエネルギーが異なることを利用して、Linac 終端部でどちらのビームも軌道が収まるように以下のような軌道補正をした。まず PF ビームの軌道補正後、Linac 終端で軌道が出ないように 5 セクターで局所バンプ軌道を作る。このバンプは PF ビームに対しては閉じているが、エネルギーの違いから HER ビームでは閉じない。バンプ軌道を 2 か所で作ることにより原理的にはバンプ下流の HER ビームの軌道を補正することができる。図 5 にバンプ軌道による HER ビームの軌道補正の例を示す。

このようにして、PF, HER 両ビームに対しては DC 電磁石の設定を変えることなしに、およそ 2 秒の切り替え時間で運転を行うことができた。

4.2 三リング共通オプティクス

PF・HER 同時入射スタディで、Linac のオプティクスは確立された。LER 用ビームを参加させる場合、PF・HER と電荷の異なるビームを扱わねばならない。また図 2 に示すように、LER 用ビームは 1 セクター終端のターゲットまでは 10 nC の大電流の電子ビームで、ターゲット後は約 1 nC の陽電子となる。従って、ターゲット上流では 0.1 nC の PF ビームと電荷量が 100 倍違うビームを通すことになる。試行錯誤の結果、Linac をいくつかのパートに分け、各々

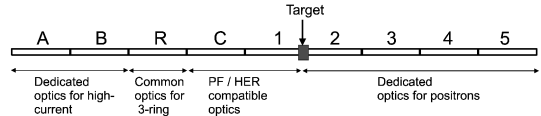


図6 三ビームに対するオプティクスの最適化

でオプティクスを最適化した (図 6)。

A, B セクターでは、大電流 10 nC のビームに対して最適化された LER 用運転パラメーター (DC 電磁石電流値) を設定した。J アークの設定は元々三リングに対して共通であった。C, 1 セクターでは 4.1 で述べた PF・HER 共通オプティクスを設定した。LER 用オプティクスでは陽電子収量を増やすためにターゲットで β 関数を強く絞っているが、このままでは PF・HER ビームは穴を通った後ビームサイズが大きくなりすぎて輸送することができないことがその理由である。代償として、陽電子収量は LER 用オプティクスに比べて約 2 割程度減少した。ターゲット下流は、生成した陽電子ビームを効率よく通すため、LER 用運転パラメーターを設定した。

設定されたオプティクスは、ウェーク場の効果等で必ずしもモデル通りのオプティクスにはならない。オプティクス測定のため、B, C 及び 5 セクターの 3 カ所に 4 台一組のワイヤースキャナーが設置されており、これらを用いてビームサイズを測定し、オプティクス matching を行った。ただし、5 セクターではビームエネルギーが三ビームで全て異なること、また LER ビームは他の二ビームに比べてビームサイズが非常に大きいことから、LER ビームでのみ matching を実施した。HER ビームは下流の HER-BT で matching をとることができるが、PF-BT ラインにはワイヤースキャナーが設置されておらず、オプティクスが測定できない。実際には LER ビームに対して matching したオプティクスでは四極電磁石が強すぎて、PF ビームは分岐後の BT で β 関数が発散してしまい、ビームが通らなかった。これは PF への分岐点から最初の四極電磁石までの距離が約 20 m と長いためである。Linac 終端分岐直前の四極電磁石の設定値を下げることによりビームを通すことが可能となった。LER ビームは LER-BT ラインのワイヤースキャナーで matching し、PF は 5 セクターでのワイヤースキャナーによるオプティクス測定結果を用いて PF-BT ラインのオプティクスを matching した。こうして三リング共通オプティクスが完成した。

軌道補正は、三ビームの場合にはバンプ軌道が使えないので要所要所にパルスステアリングを設置して対

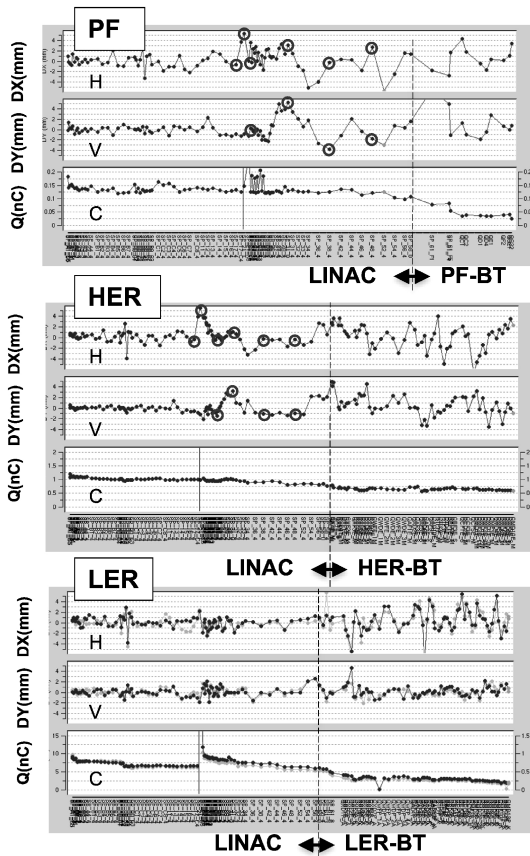


図7 3ビームの軌道

処した。パルスステアリング、イベントシステム、Linac/BPM の高速読み出しの導入により、3ビームに対して 50 Hz の Pulse-to-pulse での軌道補正が可能となった。補正後の軌道を図7に示す。丸印はパルスステアリングの位置を示す。

Pulse-to-pulse 入射のためには、さらに KEBB/BT の入射位置フィードバックに用いる BPM の高速読み出し、入射位相の高速切り替え、KEKB リングの Bucket selection system の Pulse-to-pulse 化が必要であった。全ての条件が整って、2009 年 4 月、三リング同時入射が実現した。

5. パルスステアリング磁石

3章で述べたように、パルスステアリング磁石はターゲット迂回軌道をつくるのに必要である。またモード毎に異なった値でビーム軌道を調整できるようなステアリングがある程度の台数必要である。

電子ビームを標的中心から横に 4.5 mm 離れた孔への迂回軌道を通すのに必要なステアリング磁石の偏向角は 1.0 mrad (4.0 GeV 電子に対して 13.3 mT · meter) である。これを満たすものとして、まず既存の旧 TRISTAN AR 取り出し用 Fast Bump 磁石の磁

表1 パルスステアリング電磁石の特性値

	改造品	新作品
磁極長さ	150 mm	150 mm
磁場有効長	約180 mm	約180 mm
磁極間隙	35 mm	35 mm
磁極幅	150 mm	80 mm
インダクタンス	57 mH	38 mH
励磁特性	7.1 mT/A	8.9 mT/A

極に付加的な磁極を足して磁極間隙を 70 mm から 35 mm に改造したものをを用いた。この改造によりインダクタンス値が大きくなったが、パルス電流を流した場合、最大電流値はインダクタンスと電流値の時間変化の勾配値から決まる誘起電圧が電源の電圧リミット値になるところで制約されてしまう。一方、DC 電流を通電する際には、電源の最大定格電流値まで流すことができる。当初の想定では、ビーム繰り返しに応じて DC モードとパルスモードを切り替えることで対処する予定であったが、実際にはこのような柔軟な運転には対応できないことが判明したため、後に磁極幅をコンパクトにしてインダクタンスを下げた磁石を新規製作することとした。磁石の特性値を表1に示す。

この磁石を励磁する電源として、NF 社製の BP4620 と BP4610 を使用した。これらは内部の任意波形発生器で作った波形で 4 象限出力を出すことができる (BP4620 は最大 ± 20 A, BP4610 は最大 ± 10 A)。後に、スタートトリガーに対する出力波形の時間ジッターが 3 ms 程度と大きいことがわかったため、外部から基準波形信号を与えて、この電源はアンプとして働くモードで使用するように変更した。この基準波形信号を作るものとしては、Agilent 製の任意波形発生器 HP33220A を前段に使い、次段に 4 種類のモード毎に異なった係数で増幅させることのできるツジ電子製のアンプモジュールを通してから、電源に入力信号として与える。なお、このアンプモジュールは、イベントシステムからのモード別トリガー信号を与えることで、増幅係数はパルス毎に切り替えることができるようになっている。また、電源のオン、オフの制御や、インターロック信号に基づく強制的オフなどについては、PLC (Programmable Logic Controller) システムを介して制御している。また、電源からの出力電流値の監視に関しては、電源のモニター端子からの出力を PLC の ADC に入力して読み出すことでモニタリングを行っている。また、これについても

イベントシステムからのモード別トリガー信号を与えることで、各モード毎の出力電流値を独立にモニターすることができる。

パルスステアリング電磁石用のセラミックダクトを製作した。セラミック部分の長さは 210 mm, 内直径は 26 mm, 外直径は 32 mm である。また迂回軌道の頂点付近にある収束用四極電磁石のダクトでは、横方向でビームの一部がダクトに当たって失われることがわかったため、内直径 20 mm の円形ダクトから横長の楕円形（長直径 24.85 mm, 短直径 13.2 mm）のものに変更して、横方向にビームが当たらないように対処した。

なお設置台数は、標的部の迂回軌道用に 4 台（水平方向 3 台, 垂直方向 1 台）とその下流に 8 台（水平方向 4 台, 垂直方向 4 台）の合計 12 台である。

6. パルス偏向電磁石

同時入射用のパルス偏向電磁石は入射器終端部第 3 スイッチヤードの直上流に設置された。PF へのビームは、パルス偏向電磁石で 114 mrad 曲げられて PF ビーム輸送路へ導かれる。表 2 に電磁石の仕様を示す。磁極間隙にはセラミックチェンバーが挿入されている。電磁石のコアは一体型で製作され、チェンバー挿入時に半割出来ないため、チェンバー片端には、取り外し可能な特殊フランジが装着されている。チェンバー内径 86×16 mm, 長さ 1200 mm, 厚さ 5 mm である。チェンバー内部にはビームのイメージ電流を流すための Ti コーティングが施されている。

電源出力電流波形は、200 μ sec 幅の正弦半波で、ピーク電流が 27 kA (2.5 GeV ビームに対応) までは最大繰り返し周波数 25 Hz, 32 kA (3 GeV) のビー

表 2 パルス偏向電磁石仕様

Parameters	Value
偏向角	114 mrad
磁場	1.22 T
磁極間隙 (W×H)	157×30
ターン数	1
コア長	1.0 m
繰り返し周波数	25(12.5) Hz
最大電流	27(32) kA
出力電流波形	正弦半波
パルス幅	200 μ s

ムに対しては、18.5 Hz まで運転可能である。任意のパルス繰り返しについて出力電流ピーク安定性は、peak-to-peak で 0.1% 以下である。電源本体はクライストロンギャラリーに置かれ、約 7 m の同軸ケーブル 40 本を通して電磁石につながっている。電源の出す電磁ノイズの他機器への影響を抑えるため、電源アースは独立に用意され、トリガー信号は光ファイバーで送られている。放電スイッチとしてはサイリスタ（三菱 FT1000A-50A）24 個（4 並列 6 直列）が用いられている。電源制御は、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) をベースに構築され、PLC を通して行われている。

7. 高速イベント制御システム

高速ビームモード切り替えによる疑似同時入射を実現するためには、広域で高速・確実な制御システムが必要となる。この節ではこのような目的で構築された高速イベント制御システムについて説明する。

入射器の繰り返し周波数は 50 Hz であり、さまざまなパルス電源がこの繰り返しで動作するように設計されている。同時入射を導入したことによって、KEKB への入射効率が下がってしまえば意味がないので、ひとつのパルスも無駄にはできない。そこで、今回の同時入射のために追加して導入された電源等も、同様に 50 Hz に同期するように設計された。従って、切り替えを行う際には、20 ミリ秒以内に確実に操作を行わなければならないことになる。

7.1 イベント制御システムの概要

計算機制御システムやそれぞれの装置の制御機構は、以前は 1 秒程度の制御を主眼に設計されていたので、確実に 20 ミリ秒の制御を達成するためには新しい機構を導入する必要があった。また、パルス毎に自由に入射リングを選択し、入射効率やビームの安定性を最大限に高める必要もあった。

ここ数年間、パルス電磁石以外にもマイクロ波発生装置など 20 ミリ秒以内の制御機構が準備され、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、と次第に増え、それぞれ試験が繰り返されてきた。

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、達成が困難と思われた。10 年以上前には、Ethernet 規格にはデータパケット衝突回避機能があるために、実時間性が無いと言われていた。現在では接続機構として最下位層のリピータではなく、その上位層のスイッチ(ブリッジ)

が使用されるために、実時間動作の可能性の状況は10年前とは違ってきている。実際、入射器の運転中の制御ネットワーク上で50 Hzの情報交換が失敗する頻度は100万回に1回以下である。しかしこの確率をもってしても、入射器の制御ネットワークには1000近い機器が接続され、数百の光接続が使われていることもあり、今後とも最善の状態が維持できるかどうかは保証できない。

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を検討した。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ている。しかし、過去に独自の同期ネットワークを導入した加速器は、その維持に多大な人的資源を投入しており、独自のハードウェア開発を行うことは躊躇された。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、アプリケーションソフトウェアの工夫次第でさまざまな機能を利用できることがわかり、また、信頼性も問題ないことがわかった。また、試験中にも次々と新しい加速器が評価を始め、現在では10近い加速器施設が採用を決めている。

この装置内では、外部クロックに同期した1 GHzから2.5 GHz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、50 MHzから125 MHz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早い情報、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。

内部・伝送クロックは外部クロックと分周比から決まり、入射器では当初571.2 MHzと分周比5としていたが、停電後の同期の曖昧さを避けるために、114.24 MHzと分周比1で運用することとした。結果として内部・伝送クロックはその20倍の2.3 GHz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。イベント制御は、送信側(イベント送信器, EVG230)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、当初オープンソースのRTEMSを使用していたが、KEKBで10年以上前から使用しているVxWorksを新しい版に入れ替えることができることがわかり、将来的にはKEKBと環境を共通にできることを考慮し、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分程度の時間内では10ピコ秒以下の同期精度を持っている。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に対する要求仕様は十分に満足させることができる。一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、また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。

7.2 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)、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。入射器のマスターオシレータで作られた5つの低レベルマイクロ波源のうち114.24 MHzと50 Hz信号がイベント送信器に入力される。このうち50 Hz信号は図8に示すように、PFリングまたはHER, LERの二つのリングについて、周回周波数に対してリング内バケット選択のための遅延を追加し、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。三つのリングの間の選択は後で述べるように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ミリ秒毎にデジタル信号入出力ボードを通して選択を切り換えることで実現される。

入射器からKEKBリングへの入射位相許容度が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を持たせている。一方、

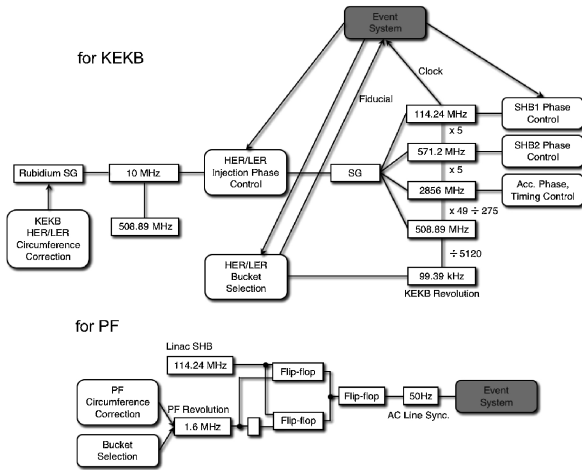


図 8 マイクロ波周波数, 周回周波数, イベントレート及びそれらの制御の関係. 上段が KEKB 向け, 下段が PF 向け

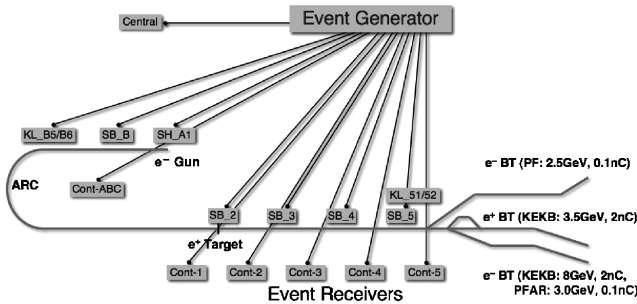


図 9 イベント生成ステーションと 600 m の入射器に亘って設置されたイベント受信ステーションの配置

KEKB と PF のリングの周長は独立に補正されるために周波数は連続的に変化しており, PF リングとは同時に整数関係を持つことができない. しかし PF リングの入射位相許容度が大きいので, 300 ピコ秒の時間内で偶然同期するタイミングを探し同期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に渡され, さらに 15 分割されて図 9 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. 400 m よりも遠いステーションにはシングルモードの SFP と光ファイバを使用し, 近いステーションへはマルチモードを使用している.

7.3 イベント受信ステーション

通常の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 ボードを持っている. イベント受信器は VME64x 一輻のモジュールで,

114.24 MHz 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 個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. これらは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. 低レベルマイクロ波の位相などの制御においては, イベントが CPU に割り込みを発生させ, 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.

装置を直接制御する場合には, 確実に制御するためにこのようなイベント受信器を使用している. モニタステーション等においては直接イベント受信器と接続することが困難なものもあり, そのようなものに対しては, イベント生成ステーションから Ethernet 及び TCP/IP 経由でイベントを伝達している. 7.1 に述べたように, ppm 以下のイベント情報漏れが起こる可能性があるが, 簡易な解決策が見つかるまでの改善の策と考えている.

7.4 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. ところが, 運用中はパルス電源など各装置が連続動作をするため, 高速で動作する部分のソフトウェアを入れ替えることができない.

その代わりに, ビームモードパターンと呼ばれるものを作り, 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は次のように使われる.

- 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 100 ミリ秒, 最大 10 秒に相当する.
 - 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。イベントは現在約 50 個用意されており、あるイベントは多数の装置の制御に関わり、またあるイベントは他の装置と性格の異なる特定の装置の制御に対応する。

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 (114.24 MHz) の速度で送出する。VxWorks 上のアプリケーションプログラムと FPGA 上のソフトウェアが協調し、実時間性を失わないように動作する。

イベント受信ステーションは、送られてきたイベントそれぞれ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 EPICS 制御ソフトウェア環境で開発されており、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 5,000 個ほどになっている。

約 200 台設置されているビーム位置モニタ (BPM) の読み出しには約 30 台のオシロスコープ (DPO7104) を用いている。BPM 電極からの信号はオシロスコープ上で 20 ミリ秒以内に処理が行われる。その際には、さまざまな測定パラメータについてビームモードを認識した上で処理を行う必要がある。オシロスコープにはイベント受信装置を内蔵できないので、先に述べたように Ethernet と TCP/IP を経由したイベント受け取り機構を採用し、パルス毎の処理を行うことにした。そのソフトウェアもイベントステーションと同じく EPICS 制御ソフトウェア環境で構築された。

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) は、柔軟性を確保するためスクリプト言語で記述され、図 10 のようなグラフィカルユーザインターフェースおよび他のプログラムとの通信機能を持つ。ビーム開発用に細かい指定ができるプログラムと、通常運転中に限られた操作だけができるプログラムなど、複数が用意されている。ビームモードパターンジェネレータは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

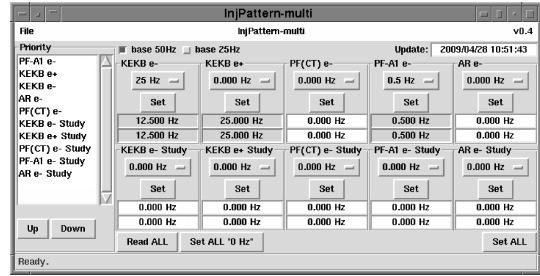


図10 通常運転中に使用されるビームモードパターンジェネレータの画面。リング加速器からの入射指示を調停して、自動的にパターンをイベント生成ステーションに送る

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。

7.5 運用の現状

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と置き換えた。当初は 50 Hz の早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、2009 年の春から計画通りの本格的な高速切り替え機構の運用を始めた。

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、その原因として 50 kV 高電圧パルス電源からのノイズを疑っている。それ以外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。

謝辞

同時入射実現のために奮闘してこられた次の方々に感謝します (敬称略): 池田光男, 上田明, 大沢哲, 柿原和久, 菊谷英司, 小林幸則, 佐藤政則, 末武聖明, 諏訪田剛, 多和田正文, 三浦孝子, 三橋利行, 矢野喜治, 横山和枝, 吉田光宏

参考文献

- 1) Masanori Satoh *et al.*: 加速器学会誌, 3 巻 2 号 171-177 (2006)
- 2) Masanori Satoh *et al.*: 加速器学会誌, 5 巻 2 号 144-149 (2008)