

PF リングのトップアップ運転

本田 融 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
 帯名 崇 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

要 旨 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 2.5 GeV 放射光源リング (PF リング) では 2009 年 4 月よりトップアップ運転に完全移行した。PF リングのトップアップ入射は入射器 (LINAC) を共有する KEK B ファクトリの電子リング、陽電子リングを含めた 3 リング同時の連続入射として実現された。トップアップ運転に移行するにあたり PF リングでは、横方向、進行方向のバンチフィードバックやバンチフィル制御システムの整備を行い、また入射中の蓄積ビーム振動を抑制するためにパルス六極電磁石を用いた新しい入射方式を開発し実用化している。マルチバンチ運転では蓄積電流値の安定度 $\pm 0.01\%$ が実現されている。また任意のフィルパターンでバンチ電流を一定に保つことが可能になったのでハイブリッドフィルによるトップアップ運転のビーム試験も進めている。

1. はじめに

放射光源リングのトップアップ運転は米国の Advanced Photon Source やスイスの Swiss Light Source で世界に先駆けて開始され、Soleil, Diamond, SPring8 などの第 3 世代光源でつぎつぎと標準の運転形態として採用されてきた。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 2.5 GeV 放射光源リング (PF リング) でも 2009 年 4 月よりトップアップ入射によるユーザー運転に完全移行した。ユーザータイムの大部分は蓄積電流値 450 mA のマルチバンチモードで、また例年 1 週間 \times 3 回程度の期間を蓄積電流値 50 mA のシングルバンチモードで運転している。蓄積リングでの加減速を要するためトップアップ入射に対応できない 3 GeV 運転モードは 2009 年 12 月を最後に取り止めとなった。この結果 2010 年 1 月以降はユーザー運転時間の 100% がトップアップ運転となっている。

PF リングは入射器 (LINAC) を KEK B ファクトリ (KEKB) の 2 つの主リング、8 GeV 電子リング (HER) と 3.5 GeV 陽電子リング (LER) 及びもう一つの 6.5 GeV 放射光源リング (PF-AR) と共有している。専用の入射器を持たない PF リングのトップアップ運転は KEKB の性能向上を一方の目的とする 4 リング同時入射計画の一環として実現された。この 4 リング同時入射計画の経緯とトップアップに向けて PF リングで行われた改造を 2 章で紹介する。

PF リングは 2005 年度に直線部増強計画として蓄積リングの直線部にある四極電磁石を一新し直線部を拡張しかつ新しくアンジュレータを設置できる場所を増設する大規模改造を行った^{1,2)}。この改造を機にトップアップ入射に備えて横方向および進行方向のバンチフィードバックの整

備を進めた。バンチフィードバックシステムと PF リングで観測されるビーム不安定性について 3 章で、トップアップ運転用に開発した任意バンチフィル制御システムについて 4 章で紹介する。

PF ではトップアップ入射への応用を目指してパルス四極電磁石やパルス六極電磁石を用いた新しい入射方式の実証実験を行ってきた。PF リングではパルス六極電磁石による電子ビーム入射に成功し、実際にパルス六極電磁石入射によるユーザー運転を行っている。パルス電磁石開発の経緯を含めて 5 章に簡単に紹介する。また 6 章ではトップアップ運転の現状や蓄積電流値の安定性について記述する。

2. 4 リング同時入射計画とトップアップ運転の実現

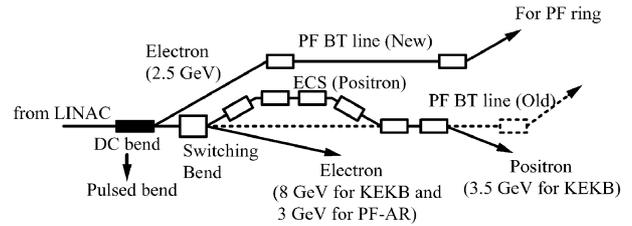
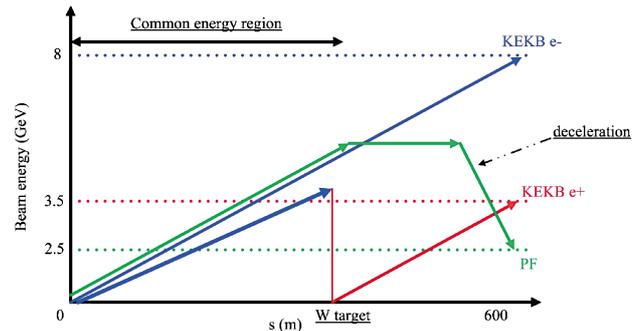
KEKB の主リングが建設中であった 1997 年に PF リングと LINAC は同時に大幅な改造を行った。LINAC は全長が 400 m から 600 m に延長され最高到達エネルギーが 2.5 GeV から 8 GeV へと増強された。PF リングでは四極電磁石と六極電磁石の数を倍増するラティス改造によって低エミッタンス化が行われた。この改造に遅れること 1 年余り 1999 年から完成したばかりの KEKB で衝突実験が開始された。当初すべての蓄積リングへの入射は排他的に実施されており、8 GeV 電子と 3.5 GeV 陽電子を数十分おきに切り替えて KEKB の主リングへ入射し、PF リングへは 1 日に 1 回か 2 回、PF-AR へは 1 日に約 10 回 2.5 GeV 電子を入射するような運転形態であった。KEKB の 2 つの主リングの蓄積電流値が高くなるに従って徐々に電子、陽電子の入射間隔が短縮され、ほどなく電子又は陽電

Table 1 History and future plan towards the simultaneous injection to four rings, PF-Ring, PF-AR, KEKB-HER and LER.

2004年	パルス四極電磁石入射の実証 (PF-AR)
2005年	直線部改造 (PF リング) 横方向バンチ毎フィードバック稼働 (PF リング) 新入射路設置: 分岐点を ECS 上流へ移設 (BT)
2006年	入射路終端部にビームダンプリーン設置 (BT)
2007年	8 GeV/2.5 GeV 同時加速成功 (LINAC) 穴あき陽電子ターゲットと 高速パンプシステム設置 (LINAC) 2.5 GeV 電子用パルスベンド設置 (BT) 入射路終端部にビームスリット設置 (BT) パルス六極電磁石設置 (PF リング)
2008年	シングルバンチ: トップアップ運転 (PF リング) —KEKB 運転休止時 進行方向バンチ毎フィードバック稼働 (PF リング)
2009年	イベントタイミングシステム: 50 Hz 切替 (LINAC) —3 リング同時入射完成 トップアップによるユーザー運転開始 (PF リング) 3 GeV 運転モードの実施を終える (PF リング)
2010年	KEKB 運転終了 パルス六極入射開始 (PF リング)
	今後の予定
2014年	PF-AR ビーム入射路 4 GeV 化, パルスベンド設置 —4 リング同時入射完成 Super KEKB のコミッションング

子を交互に休みなく入射し続けるようになった。PF-AR は2001年の蓄積リング全面改造を経てビーム寿命も大幅に伸びて入射回数は1日に3回程度と改善したが、KEKB のルミノシティをさらに向上し、また積分ルミノシティを効率よく積み上げるうえで、LINAC での電子・陽電子の切り換えや入射エネルギーの切り換えに要する時間、他のリングへの入射により入射ができない時間を可能な限り短くすることが検討された。その結果、放射光源リングのトップアップ運転をも同時に実現可能な4リング同時入射計画が立案された。この計画に従ってLINAC、ビーム輸送路 (BT) および PF リングで実施された改造を年ごとに **Table 1** にまとめた。

LINAC の最下流部でビームを KEKB と PF リングおよび PF-AR へ振り分けるスイッチャードは **Fig. 1** に示すような配置になっている。もともと PF リングへの分岐ベンドは KEKB 用の3.5 GeV 陽電子、8 GeV 電子を振り分ける偏向電磁石 (Switching Bend) と複数台の偏向電磁石からなる陽電子用の Energy Compression System (ECS) の下流部に位置していた。PF リングへの分岐ベンドを ECS よりも上流へ移動する改造が2005年のリング直線部改造と同時に進められた。この改造によって ECS を含む KEKB 用の多数の偏向電磁石や四極電磁石の磁場を保持したまま PF リングへの入射が可能になり、PF 入射と KEKB 入射の切り換えに要する時間が大幅に短縮された。新しい分岐点には当初 DC 偏向電磁石が設置されたが、約2年後には2.5 GeV 電子のみを選択的に蹴り出すパルス偏

**Fig. 1** Schematic drawing of beam switching section at the end of Linac.**Fig. 2** Beam acceleration pattern for PF, KEKB-HER and LER. The ordinate denotes beam energy and the abscissa denotes distance from electron gun. (Courtesy of Dr. Masanori Satoh)

向電磁石³⁾に置き換えられた。

LINAC 本体では2007年に全加速管の位相を高速制御して、50 Hz のパルスごとに加速エネルギーを8 GeV と2.5 GeV で切り換えることが可能になった。また同年に陽電子ターゲットをパルスパンプでバイパスして電子を加速できるように穴あきターゲットとパルス補正電磁石システムが導入された⁴⁾。50 Hz のパルスごとに電子銃やパルス偏向電磁石に必要なタイミングでトリガー信号を送り、全長600 m の LINAC 全体にわたって各加速管の加速位相を制御するイベントタイミングシステムが完備されて、2009年春に3リング同時入射への対応が完了した⁵⁾。四極電磁石や補正電磁石の電流値は高速で切り換えることはできないので、8 GeV、2.5 GeV の電子と3.5 GeV の陽電子のすべてに共通のオプティクスが設定されている。**Fig. 2** に示したように陽電子ターゲット付近までは電荷量の異なる2種の電子ビームに対して共通の加速を行い、後半部では8 GeV 電子はそのまま加速を続け、2.5 GeV 電子は一旦5 GeV 付近まで加速されたのち減速して生成されている。

PF リング側でも並行して BT ラインの終端部にビームダンプリーンや入射ビームを成形するスリットの設置を行った。また入射キッカーパンプの中にあつた六極電磁石をラティスから除外し非線形磁場を減らし、バンチ毎フィードバックシステムを整備して八極電磁石を廃止するなどの準備を進めた。安全系ではそれまで禁止されていた入射モードでの放射光ビームシャッターの開閉が、蓄積電流値が一定の

閾値を超えていることを条件にして許可された。また元々は各蓄積リングへの入射が排他的に制御されていたので、安全を確保しつつ LINAC から複数のリングへ同時にビームを入射できるようにするためのインターロック改造も必要であった。数回にわたるビームシャッター開放での入射試験を経て実験フロアでの放射線安全が確認された。

2009年春に3リング同時入射が完成し PF リングのトップアップ運転が開始されたわけであるが、実は第4の蓄積リング PF-AR はいまだ同時入射に対応できていない。PF-AR 入射の際は他の3リングへの入射をすべて中断しなければならない状況が残っている。完全な4リング同時入射は PF-AR の入射路を4 GeV 陽電子用に改造することによって達成する予定である。PF-AR は現在3 GeV で電子を入射し6.5 GeV に加速している。40倍のルミノシティー増加を目標とするスーパー KEKB 計画では今までの KEKB に比しても格段に細くビームを絞るため、蓄積寿命は長くても10分程度しかないと思込まれている。従ってスーパー KEKB では両リングへの連続同時入射は必要不可欠でかつ数分間の入射中断も実験の妨げになる。主リングのエネルギーが HER 7 GeV, LER 4 GeV に変更となることを受けて、現在3 GeV 対応である PF-AR の入射路を4 GeV 化し、LER への陽電子直接入射路との分岐点にパルス偏向電磁石を設置して、LER との同時入射を可能にする計画である。残念ながら6.5 GeV フルエネルギー入射とはならないので、PF-AR 自体のトップアップ運転の実現はできないが、PF リングを含む他の3リングへの入射を全く中断することなく随時 PF-AR への入射を可能とする計画である。

3. パンチ毎フィードバックシステムとビーム不安定性

3.1 横方向不安定性の抑制

電子蓄積リングに多数のパンチを蓄積する場合、電流値の増加にともなって個々のパンチの振動が互いに結合してビーム全体が不安定になる、いわゆるカップルドパンチ不安定現象が発生する。PF リングの場合、横方向（水平および鉛直方向）のビーム不安定を引き起こす原因はイオン捕獲である。この不安定現象を避けるために、全312バケットに対して約90%にあたる280バケットのみにビームを入射する部分フィルパターン運転を行っている。部分フィルによって不安定を弱くすることは可能であるが、完全に抑制することは困難である上に、パンチギャップを広げると個々のパンチ電流が大きくなって今度はビーム寿命の低下につながってしまう。そこでトップアップ入射以前にはユーザーラン中は八極電磁石を励磁してランダウ減衰をビームに与えることでイオン捕獲不安定を抑制していた。しかし八極磁場を強くするとダイナミックアパーチャが狭くなって入射が困難となるため、入射のたびに電磁石をオ

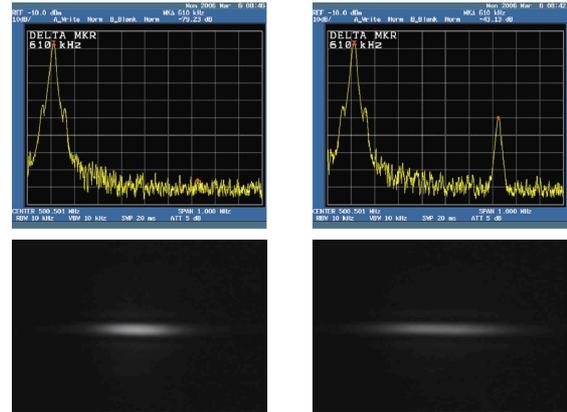


Fig. 3 Beam spectrum (upper) and visible light monitor (lower) with and without the feedback system. The left two figures are taken when the feedback is tuned on, and the right two figures represent the beam motion without the feedback. Note that the unstable beam spectrum corresponding to the horizontal betatron frequency (610 kHz) is apparently observed in the upper-right figure, and the beam profile become wide and sparse as shown in lower-right figure.

フにするという操作が必須であった。電磁石の切り替えには速くても数分程度かかってしまうため、このままではトップアップ運転には適さない。そこでトップアップ開始に備えるかたちで横方向のパンチフィードバックシステムを開発・運用してきた。

2005年秋には SPring8 の中村氏らの協力で開発されたデジタル信号処理装置による横方向フィードバックシステムを導入した⁶⁾。デジタルフィルタ (FIR フィルタ) は、1箇所の検出電極と1本のストリップラインキッカーのみで水平・鉛直両方向の振動を同時に抑制できるように設計され良好に動作することが示された。Fig. 3 にフィードバック ON/OFF でのビームスペクトルとビームプロファイルの比較を示す。その後2009年には KEK の飛山氏らの協力で Fig. 4 に示すような横方向フィードバックシステムを構築した⁷⁾。デジタル信号処理には KEK, SLAC, INFN の共同で開発された iGp (integrated gigabit processor) と呼ばれる装置を使用している。iGp は次節に述べる進行方向フィードバックとも共通なのでハードウェアの保守に都合が良く、また制御の基本フレームワーク EPICS との融合性が良かったので現在では新システムへ移行している。横方向フィードバックシステムはイオン捕獲不安定を完全に抑制する効果があるのはもちろんのこと、入射に伴うビーム振動の減衰時間を短くする効果もある。フィードバック無しの放射減衰時間が約8 ms であるのに対し、フィードバックをかけた場合は典型的には0.1 ms 程度で蓄積ビームの振動を減衰している。

3.2 進行方向不安定の抑制

PF リングではマルチパンチ運転時に比較的低電流の50 mA 程度から進行方向カップルドパンチ不安定が発生して



Fig. 6 Photo of longitudinal kicker cavity installed at the downstream of main accelerating cavity.

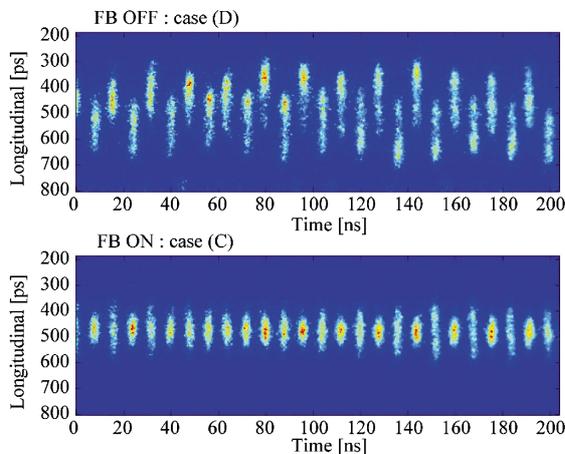


Fig. 7 Longitudinal beam profile by the streak camera. The upper figure shows the bunch shape without the feedback. As shown in the lower figure, the dipole motion is completely suppressed by the feedback system while longitudinal quadrupole motion still remains.

バックと共通の iGp が用いられている。ビーム振動検出には RF 信号の 3 倍である 1.5 GHz 成分を同期検波している。Fig. 6 の写真にある進行方向キッカーは DAFNE で設計された空洞タイプをもとにして PF リング用に設計、製作した。BL17 や BL5 では進行方向フィードバックによる不安定性の抑制によって最大 50% 程度ビーム強度が上昇し強度変動も改善することが確認され、進行方向フィードバックはユーザー運転には必要不可欠の装置として稼働している。

しかしながらフィードバックで抑制可能な単振動のほかには四極振動が発生し、この四極振動の振幅に変動が起こるとビームラインでの光強度変動を引き起こす場合があることが判明した。Fig. 7 は FB OFF 時 (a)、ON 時 (b) のストリークカメラによるビーム進行方向プロファイル測定である。この図では FB によってバンチ重心振動は抑えられているが、バンチが伸縮する四極振動が起きている様子がわかる。蓄積電流値を十分低くすると四極振動が発生しない

ことは分かっているが、現状では実用的な蓄積電流値でこの四極振動を完全に抑制することはできない。またトップアップ入射で一定電流を維持しても四極振動の強度にゆらぎが生じることがある。そこでユーザー運転では進行方向フィードバックと併用して RF 位相変調を弱くかけることによって安定的に四極振動を起こした状態を保って運転をしている。

4. バンチフィル制御システムとハイブリッドフィル

LINAC は 2 種類の電子銃 (A1 電子銃および 3T 電子銃) を有しており、いずれの電子銃からも PF リングの単一バケットを選択して入射可能である。PF リングの RF 信号を 312 分周したタイミング信号を LINAC に伝送し入射するバケットを選択している。従来は入射するバケットを LINAC のビーム線り返しに応じて順送りしてマルチバンチにするか、1 つのバケットのみに入射して単バンチ運転にするかのいずれかで、バンチ電流の制御は行っていなかった。マルチバンチ運転時にはバンチ電流にある程度のばらつきが生じていたが、ユーザーにとっては光の微視的な時間構造よりも平均強度の安定度の方が重要であることから、これまでこの現象が問題として表面化することはなかった。

しかし極端にバンチ電流が異なってしまうとビーム不安定性の面からも望ましくない。また適当な長さの小電流バンチトレインと高いバンチ電流を持つシングルバンチから構成される“ハイブリッドフィル”を考えると、従来の制御システムで生成はできても、トップアップ入射による維持はできない。ハイブリッドフィルではシングルバンチ部の寿命がマルチバンチ部の寿命に比べて極端に短いので、各バンチの寿命に応じて入射頻度が変わるような柔軟な制御システムでなければフィルパターンを一定に維持することはできない。

そこでバンチフィルを平均化するだけでなく、任意のフィルパターンを生成・維持できるようにするためにバンチフィル制御システムを開発した。Fig. 8 に示したブロック図のように、バンチ電流検出部である壁電流モニター (WCM) と高速サンプリングオシロスコープ、VME ベースのバケット選択システムからなる。このシステムの要は Windows ベースの汎用オシロスコープ (Tektronix, DPO7104) である。WCM からの信号は 20 GS/s のサンプリングレートでデジタル化され、オシロスコープ内部で稼働している C プログラムによって波形から各バンチに対応した 312 個のバンチ電流に比例した配列に変換される。同時に次にどのバケットに入射すべきかの判断を行って EPICS 経由で選択したバケットを VME システムへ通知する。Fig. 9 にこのシステムの制御例を示す。左が従来の順送り入射によるバンチ電流で、均一度は 10% 程度で

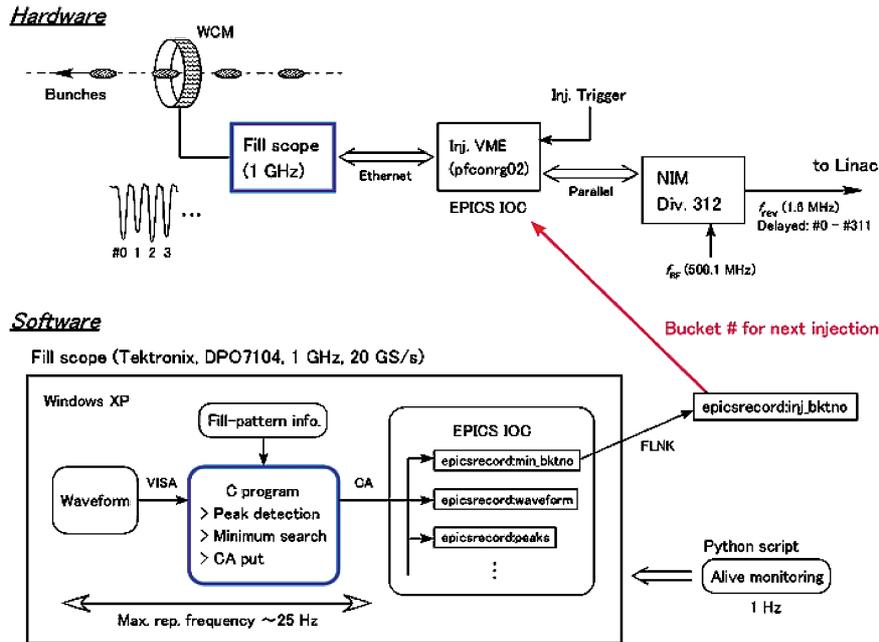


Fig. 8 Block diagram of arbitrary filling-pattern control system.

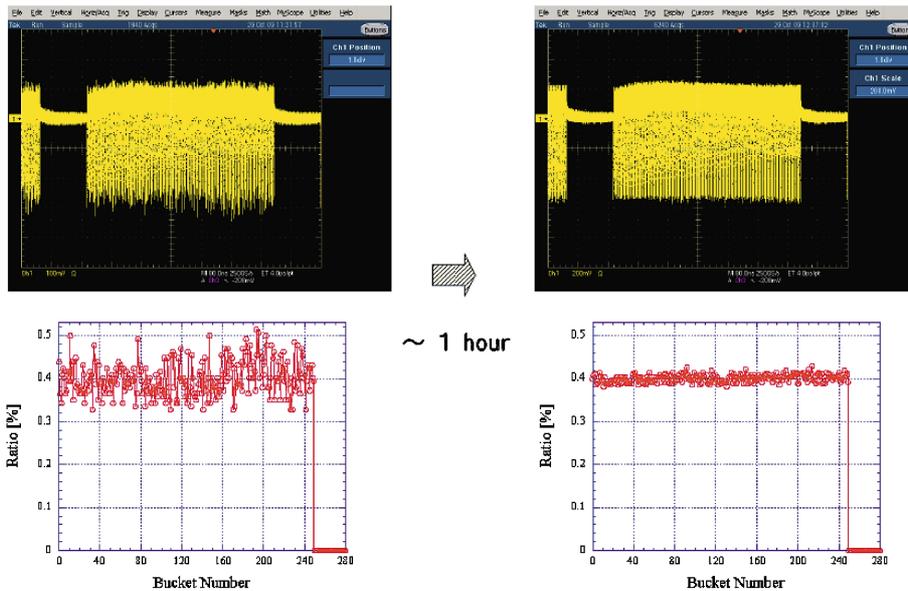


Fig. 9 Result of smoothing in bunch current as a result of filling-pattern control.

あったものが、時間の経過とともに1%以下にまで収まっていることがわかる。外部の制御サーバーでバケット選択システムの監視タスクを稼働させることによって、何らかの障害が発生したときにバケット選択を中止して従前の順送り入射に戻すようにしている。本システムがユーザーに供されてから既に1年間以上経過している。その間に人為的なミスやノイズ等によってバンチ電流に多少の不均在が生じることはあったが、単一のバンチのみが誤って成長するような問題は一度も起こっていない。

ハイブリッドフィルは比較的リング周長の長い放射光源

ではよく用いられる運転パターンであるが、PFリングは小型で周回時間が短いのでハイブリッドフィルへの要求は低かった。しかしトップアップ入射が始まり、フィルパターン制御システムも完成したことからマルチバンチユーザーとシングルバンチユーザーのビームタイム共有を図れるハイブリッドフィルへの期待が高まってきた。2010年にはFig. 10に示すようにリング半周にマルチバンチを蓄積し、その対向部分に50 mAの単バンチを蓄積するフィルパターンを形成し、ビームラインと合同でテストを行った。ハイブリッドフィルでのユーザー運転実現には横方向

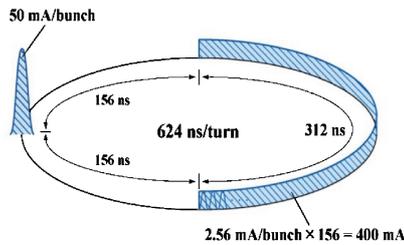


Fig. 10 Schematic drawing and the experimental result of hybrid-pattern filling with one large-current bunch and many small-current bunches in PF-Ring.

と進行方向のバンチフィードバックシステムが対応できることが重要である。シングルバンチ部で振動検出信号が飽和し逆にビームを不安定にしてしまうことを避けるため、シングルバンチ部にゲートをかけられるようにシステムの更新を行った。またシングルバンチ部近辺のバンチ純度（主バンチ内の電子数に対する直前・直後のバケット内に残留する電子数の比）を維持する純化システムについても純化信号生成回路の調整を行いハイブリッドフィルに対応できた。今後各ビームラインの準備を待って、正式のユーザー運転へ結びつけたいと考えている。

5. パルス六極電磁石を用いた トップアップ入射⁸⁾

Fig. 11の概念図にあるように、複数台のキッカー電磁石でつくるパルスバンチの代わりにパルス多極電磁石1台だけによるシングルキックで電子ビームを入射する試みはPF-ARで初めて成功した⁹⁾。PF-ARに最初に設置されたのはパルス四極電磁石で、この入射実験の目的はトップアップ運転を想定して蓄積ビームへの影響が原理的に小さい入射方式を確立することであった。PF-ARでのビーム試験を通じて、パルス四極による入射では蓄積ビームの単振動は確かに起こさないが、水平方向の四極振動すなわちビームプロファイルの変動が観測された。このようなビームプロファイルの変動が起こりにくい方法として考案されたのがパルス六極電磁石入射であった。パルス六極では中心付近の磁場勾配が零になるので、蓄積ビームへの影響が小さいという点ではパルス四極よりも有利となるからである。

PFリングに実際にパルス六極電磁石が設置されたのは

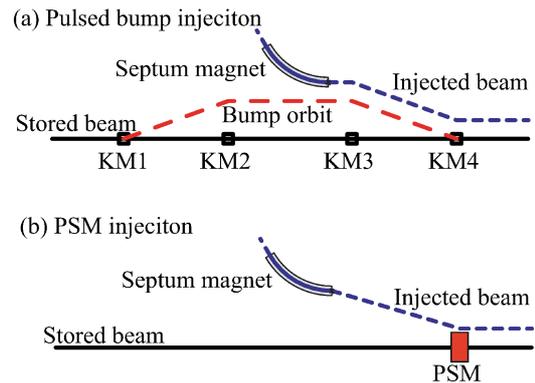


Fig. 11 (a) Conventional injection system with four kicker magnets (KM1-KM4), and (b) new injection system with a pulsed sextupole magnet (PSM).



Fig. 12 Pulsed sextupole magnet (yellow-colored magnet in the photo) installed at the straight section of the PF-Ring.

2007年であった。パルス六極電磁石でも効率の良い入射が可能であることを実証し、また蓄積ビームに発生する振動がキッカー電磁石入射に比べて格段に小さいこと、ビームプロファイルに大きな変動が起こらないので放射光ビームラインでみられる強度変動も十分に小さいことが確認された⁸⁾。

パルス六極電磁石はキッカー電磁石による入射とBTの入射軌道やセプタム電磁石のパラメータが同一のまま入射できる位置を選んで設置された。セプタム電磁石のある入射点から3つの偏向電磁石を通過した後の長直線部、長尺アンジュレータのすぐ下流に設置されている。Fig. 12はリングに設置されたパルス六極電磁石の写真である。磁極長は300 mm、ボア直径は66 mmで、入射ビームは軌道中心から水平に約15 mm内側を通過し、理想的には一回目に通過するときのみパルス六極磁場によるキックを受ける。

当初パルス六極の実証実験に用いた高圧電源のパルス幅がPFリングの周回時間624 nsより長いものであったので1回だけキックを受ける理想的な入射ではなかった。1ターン入射に対応した短いパルスが発生することができる電源の完成を待って2010年10月よりパルス六極入射によるトップアップ運転を開始した。しかし残念ながらユー

ザー運転開始間もなく直流の高電圧ケーブル端末部に絶縁不良が発生したので中断し、絶縁耐圧の改良を行った後、2011年1月よりパルス六極入射によるユーザー運転を再開した。再開後は約2か月間順調に稼働を続けた。

現状のパルス六極電磁石は、入射効率がキッカー電磁石による入射の2分の1程度に留まっている。また軌道中心での誤差磁場やビームが有限の大きさを持っていることなどを考慮すると蓄積ビームに与える影響も小さいながら残っている。蓄積ビームに残る微小な振動を評価する実験を継続して行っており、入射効率がキッカー電磁石に劣る原因の究明や、現状よりも大きな磁場勾配を得られる新しい磁極構造の検討などを続けている。

6. トップアップ運転の現状と今後の課題

3リング同時入射が可能となった2009年4月より2011年3月まで中断されることなく定期的にトップアップ運転が続けられてきた。PFリングでは週7日のうち1日が加速器マシンスタディーおよび保守にあてられ、残りの6日間で連続したユーザー運転時間となっている。Fig. 13に2011年2月のマルチバンチユーザー運転中、連続した6日間の蓄積電流値記録をプロットした。トップアップ入射中は常にビームロス率をモニターし、ビーム寿命のリアルタイム表示を行っている。Fig. 13にプロットした6日間ではビーム寿命は約45時間ではほぼ一定となっている。PFリングでは Touschek 寿命と残留ガス散乱による寿命が拮抗する条件になっており、ビーム寿命はビームダクトの真空の良否と進行方向不安定性、特に四極振動の強度変動の双方をモニターする重要な指標である。

この6日間の入射はすべてパルス六極電磁石を用いた入射であった。1日に2回、8:30と20:30の定刻に約2 mAの電流値の減少がみられる。これはPF-ARへの入射によるトップアップ入射の中断のためである。2月20日20:30の入射で電流値が一度440 mAまで大きく減少しているが、この時はPF-ARでの入射トラブルのため中断時間が通常の15分を大きく上回って1時間半に及んだためであった。

入射ビームゲートを蓄積電流値が下限値を下回ればオープン、上限値を上回ればクローズすることによって定電流を維持している。通常、上限値を450.00 mA、下限値を449.98 mAに設定している。蓄積電流値のサンプリング周期は0.1 s、またLINACの入射ビームの繰り返しは通常1 Hzに固定されている。現状では入射の頻度に特別に制限は課していない。

このような制御によって蓄積電流値はFig. 14のような三角波を描いて一定値に保たれている。1回の入射パルスにつき0.02 mAないし0.03 mA蓄積電流値が増加する。450 mAでのビーム寿命は約45 h、ビームロス率にすると約3 μ A/sである。1 Hzでの3回ないし4回の入射が約

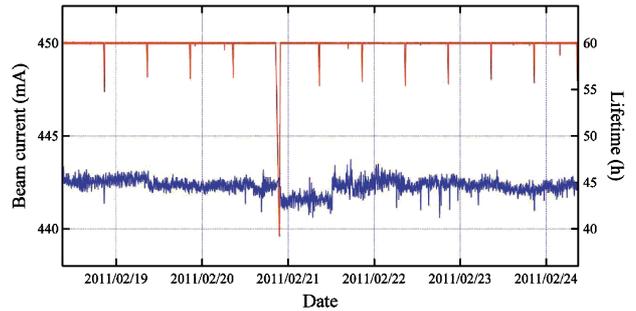


Fig. 13 History of beam current and lifetime in successive six days. The ring is operated in the top-up mode at 450 mA.

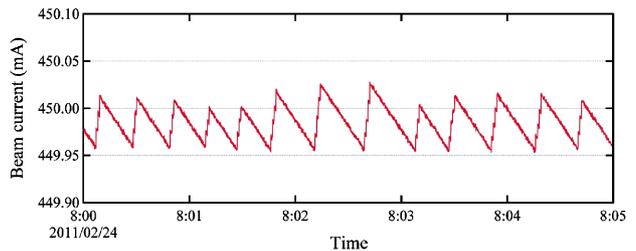


Fig. 14 Typical change in the beam current during the top-up injection. The graph shows the total beam current in 5 minutes.

20秒間隔で繰り返されている。電流値は概ね 449.98 ± 0.03 mAの範囲に納まっており、電流安定度は $\pm 0.01\%$ よりも良い。入射効率が安定していれば1分間に約10回(約0.2 mA相当)、1時間には約550回(約10 mA相当)の入射が行われる。状況によって入射効率が多少低下することもあるが、ビームロス率に対して入射率は十分に余裕があるので安定に定電流が保持されている。PF-AR入射による中断を除けばFig. 13に掲げた6日間で蓄積電流値が449.95 mAを下回ったのは合計8回、449.5 mAを下回ったのは1回のみで、いずれもごく短時間で定常状態に回復している。LINACの安定性と信頼性はもとより、パルス偏向電磁石やパルス六極電磁石も24時間のトップアップ入射を続けて行くうえで十分に安定な動作をしている。

シングルバンチモードは蓄積電流値50 mAで運転を行い、ビーム寿命は約2時間、ビームロス率にすると約7 μ A/sとなる。蓄積電流値はマルチバンチ運転と同等の変動幅に制御され、相対的な電流値の安定度は $\pm 0.05\%$ である。ビームロス率が約2倍となるのに応じて必要な入射回数も約2倍となり、Fig. 14と同様の入射が約10秒間隔で繰り返されることとなる。

マルチバンチ運転では約20秒間隔、シングルバンチ運転では約10秒間隔と比較的短い間隔で入射を繰り返しているが、現状ではビームラインで入射による蓄積ビームの変動はあまり問題となっていない。しかし将来的にはビームラインでも測定のスプリング周期の高速化などが見込まれるので、入射タイミングを通知するゲート信号配信の

準備を進めている。

蓄積電流値を維持するために必要な入射ビームの総電荷量は十分に小さくトップアップ運転中に発生する放射線レベルの問題は生じていない。ただし前章で述べたように現状でパルス六極の入射効率がキッカー入射に比較して劣っていることもあり、入射効率の改善は重要な課題である。3章で述べたとおり、蓄積電流値が一定に保たれていても進行方向不安定性の四極振動の振幅に変化が生じ、ビームラインで放射光強度の変動が観測されることがある。現状はRFの位相変調法の併用で対症的に安定化を図っているが、これについては根本的な解決が強く求められている。

7. まとめ

LINACグループとKEK Bファクトリグループとの共同で3リング同時入射を実現することにより、2009年春よりPFリングのトップアップ運転が可能となった。PF-ARを含めた4リング同時入射計画はPF-ARを4 GeV陽電子入射とすることで2014年度に予定されているSuperKEKBのコミッションングに同期して完成する予定である。

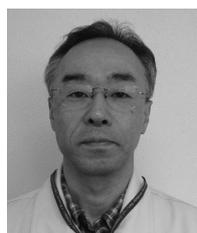
現状ではPF-ARへの定刻入射時を除けばトップアップ入射中断の頻度も非常に少なく、また蓄積電流値の変動幅も小さく一定電流を維持することができている。定電流を維持すると同時に、横方向、進行方向のバンチフィードバ

ック、バンチフィル制御システムを用いて放射光輝度の安定化を図っている。また定常的にパルス六極電磁石による入射を行って、入射に伴う蓄積ビームの変動を極力抑制して運転を継続している。

参考文献

- 1) T. Honda and Y. Kobayashi: J. Particle Accelerator Society of Japan **2**, 494 (2005).
- 2) Y. Tanimoto, *et al.*: J. Jpn. Soc. Synchrotron Radiation Research **19**, 233 (2006).
- 3) M. Tawada, *et al.*: “Development of pulsed bending magnet for simultaneous top-up injection to KEKB and PF ring”, Proc. PAC09, Vancouver, BC, Canada (2009) p175.
- 4) M. Satoh, *et al.*: “Simultaneous top-up injection for three different rings in KEK injector LINAC”, Proc. PAC '10, Kyoto, Japan (2010) p4287.
- 5) K. Furukawa, *et al.*: “New event-based control system for simultaneous top-up operation at KEKB and PF”, Proc. PAC09, Vancouver, BC, Canada (2009) p765.
- 6) T. Nakamura, *et al.*: “Single-loop two dimensional transverse feedback for Photon Factory”, Proc. EPAC2006, Edinburgh, Scotland (2006) p3006.
- 7) R. Takai, *et al.*: “Bunch by bunch feedback system using iGp at KEK-PF”, Proc. DIPAC09, Basel, Switzerland (2009) p59.
- 8) H. Takaki, *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 020705 (2010).
- 9) K. Harada, *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 123501 (2007).

● 著者紹介 ●

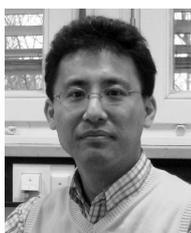


本田 融

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 准教授
E-mail: tohru.honda@kek.jp
専門: 加速器科学, 真空工学

【略歴】

1984年東京大学工学部物理工学科卒業。
1985年-1992年東京大学生産技術研究所
助手, 博士(工学), 1992年より高エ
ネルギー物理学研究所放射光研究施設助
手, 同物質構造科学研究所准教授を経て
表面物理学, 真空工学, 加速器科学の研
究に従事。2009年4月より現職。



帯名 崇

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 准教授
E-mail: takashi.obina@kek.jp

専門: 加速器科学, ビーム診断・制御

【略歴】

1996年総合研究大学院大学数物科学研究
科修了, 博士(理学)。日本学術振興
会特別研究員を経て高エネルギー物理学
研究所放射光研究施設助手, 2008年同
准教授, 2009年4月より現職。

Top-up Operation of Photon Factory storage ring

Tohru HONDA Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Takashi OBINA Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract At PF ring, a 2.5-GeV light source, the top-up operation began in 2009 April. The injector linac of PF ring is shared with the other light source (PF-AR) and the electron ring (HER) and the positron ring (LER) of KEK B factory. The top-up injection for PF ring has been realized as a simultaneous continuous injection with HER and LER. In preparation for the top-up operation, the bunch-by-bunch feedback system for transverse and longitudinal instabilities and the bunch current control system have been developed. A new injection method using a pulsed sextupole magnet has been developed and put into practical use. The stored current can be stabilized better than $\pm 0.01\%$ of 450 mA at the usual multi-bunch mode. A beam test of a hybrid filling pattern has been carrying out after an arbitrary fill pattern can be maintained at a constant bunch current.
