

# PRESENT STATUS OF THE FAST LOCAL BUMP SYSTEM FOR HELICITY SWITCHING AT THE PHOTON FACTORY

Kentaro Harada<sup>#A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK-PF, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

The fast local bump system for the helicity switching of the circular/linear polarized undulators (CPU) has been developed at the long straight section of 8.9 m length between B15 and B16 (BL16) of the Photon Factory storage ring (PF-ring). It consists of five identical bump magnets, power supplies and two APPLE II type variably polarizing undulators with two DC steering magnets and four AC steering magnets. With feed-forward correction, the unwanted beam oscillations round the ring are suppressed to about 2~3  $\mu\text{m}$  for both horizontal and vertical directions during the fast local bump. These beam disturbances are at most the same as those from the top-up injection at some beam lines and the facility let the BL16 users use the fast bump during the time of the user experiment. During the user time, the users can freely start and stop the fast local bump twice the day; 8:30am and 20:30pm. In this presentation, the present status of the fast bump system is shown.

## PF リング 16 番直線部の偏光高速スイッチングシステムの現状

### 1. はじめに

PF リング 16 番直線部には、2 台の APPLEII 型可変偏光アンジュレータ及び高速偏光スイッチングシステムが設置されている (図 1) [1-4]。システムは、別々の偏光に設定された 2 台の挿入光源内の電子軌道に交互にバンプを立てることで、2 台の挿入光源からの光を交互に遮り、ビームラインに届く光の偏光を高速でスイッチングする [5]。物質の微弱な偏光依存性をロックイン技術を用いて測定することがその目的である。ここでは、現在、設計目標である 10Hz でのユーザーラン中のスイッチング運転を始めた高速バンプシステムの概要と、運用の現状について述べる。

### 2. 高速バンプシステムの概要

高速バンプシステムの電磁石配置を図 2 に示す。挿入光源内の電子軌道に水平高速バンプを作る為の 5 台のバンプ電磁石 (K1~K5) 及びそれぞれに対する電源は、5 組とも全く同一のものである。直線部中央のバンプ電磁石 K3 の両脇には、2 台の挿入光源からの光の光軸の、相対的な角度と位置を調整できる様に 2 台の DC ステアリング電磁石 (HV) が設置されている。また、誤差や挿入光源の影響によるバンプ内外の垂直方向の振動抑制、バンプ外側へ漏れた水平方向の振動の精密な補正の為、直線部両側のダブレット 4 極電磁石の両脇に、合計 4 台の速いステアリング電磁石 (FHV) が設置されている。

バンプ電磁石の電流波形及び水平軌道バンプ形状を図 3 に示す。高速バンプの設計周波数は 10Hz、片方の挿入光源からの光を遮る為に必要な角度バンプは 0.3mrad、電磁石配置より、必要な蹴角は最大 2.4mrad、バンプの高さは最大約 1mm となる。電磁石のギャップはリングの実効的な最小アパーチャから 21mm、コア長は 15cm、珪素鋼板の積層構造で



図 1 : 16 番直線部の 2 台の APPLE II 型挿入光源及び偏光高速スイッチングシステム

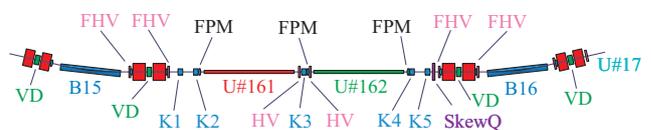


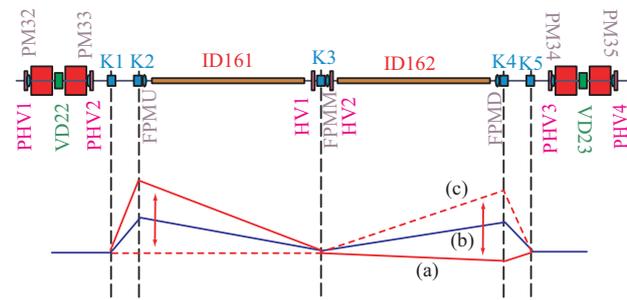
図 2 : 16 番直線部の電磁石構成。K1~K5 が水平高速バンプ電磁石、HV は光軸調整用の遅い水平垂直ステアリング電磁石、VD は遅い垂直ステアリング電磁石、FHV はフィードフォワード補正用の速い水平垂直ステアリング電磁石、FPM は速い軌道測定用の BPM。SkewQ は挿入光源の歪 4 極成分を補正する為の DC 歪 4 極電磁石。

ある。電源は  $\pm 100\text{A}$ 、 $\pm 50\text{V}$  のドロップ式 AC 電源で、バンプを作る為に必要な最大電流はおおよそ 60A、電圧約 10V である。

制御系の概略を図 4 に示す。任意波形発生器は位相及び振幅を調整しても波形がリセットされない為、バンプを立てながらのパラメータの微調整が可能で

<sup>#</sup> kentaro.harada@kek.jp

## 軌道



## 電流波形

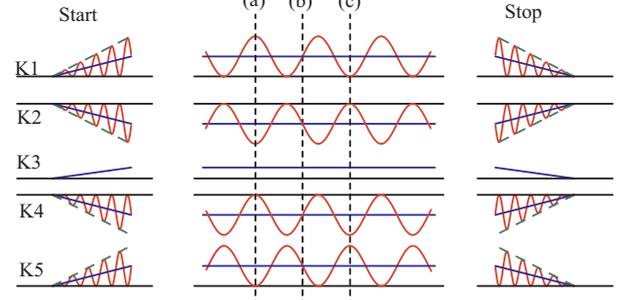


図 3：バンプ形状及び電流波形。図は説明の為、あえて光軸がずれた状態のバンプを表している。2台の挿入光源内に、DC 的に半分の高さのバンプを立て（図の青線）、そこに位相が逆の AC 分を重ねることで、交互にバンプを立てることができる。バンプが降りた状態の光軸調整は DC 的に行うことができる。

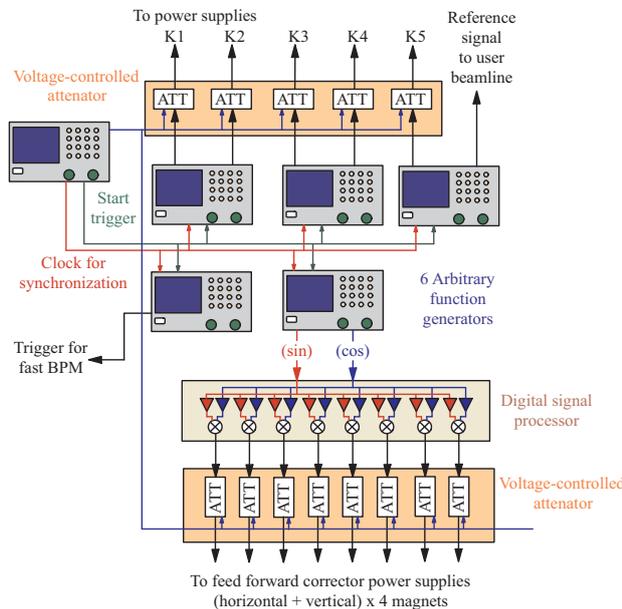


図 4：制御系の概念図。6 台の任意波形発生器（Tektronix 社製 AFG3102 及び 3020B）、2 台の減衰器、1 台のデジタル信号処理器（mtt 社製 DSP7100）からなる。6 台の任意波形発生器はトリガー信号及びクロック信号で全て同期、同調されている。

ある。高速スイッチングの開始、停止時には、2台の減衰器を用い、バンプ電磁石及びフィードフォワード電磁石の両方の振幅を同時に徐々に大きくまたは小さくしてゆく。これは電磁石の初期化に相当する操作であり、これにより、停止開始での履歴の影響を抑えることができる。

### 3. 光軸調整と誤差の補正

スイッチング中のビーム位置測定は、速い BPM（Instrumentation Technologies 社製 Libera Brilliance、図 2、図 5 の FPM）を用いて行う。PF リングには通常の遅い COD 測定に組み入れられていない BPM がいくつか存在し、それを速い信号処理回路に接続することで、常時高速軌道測定が可能になる。また、

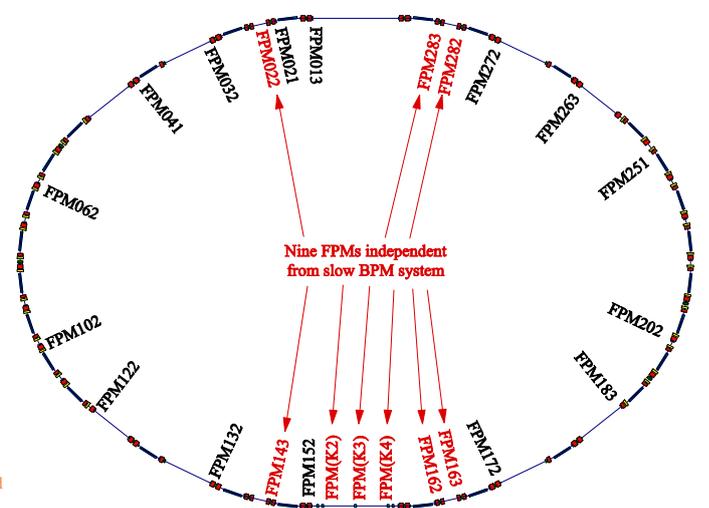


図 5：速い BPM の配置図。赤字は常時速い測定が可能、黒字は切替器でケーブルを切り替えた上で、手で速い検波回路に接続すれば測定可能となる。

いくつかの BPM からのケーブルには、途中で切替器が挿入されており、遅い測定から外して速い検波回路に接続することが可能になっている。図 5 に速い BPM の一覧を示す。スイッチング運転時の確認、バンプ外側の振動補正や光軸調整に使用する速い BPM は、バンプ内側の 3カ所（FPM(K2)、FPM(K3)、FPM(K4)）と外側の 6カ所（FPM032（切替器経由）、022、283、282、143、162）の合計 9カ所である。他の BPM は通常、遅い軌道補正に組み込まれており、マシンスタディ時のみ、調整結果の確認の為に高速測定に切り替えて利用されている。

スイッチング ON の時、挿入光源内の電子軌道に 10Hz で水平バンプを作るが、誤差や挿入光源の磁場の影響により、リング全体に水平垂直とも余計なビーム振動を引き起こしてしまうことが避けられない。リング全体のビーム変動はビームサイズの 1/10 以下に抑える必要があり、それはおよそ水平 30 $\mu\text{m}$ 、垂直 3 $\mu\text{m}$  以下である。バンプ電磁石の蹴り角  $\theta$  は、DC 成分を  $K_{DC}$ 、AC 振幅を  $K_{AC}$ 、角振動数を  $\omega$ 、初

期位相を $\varphi_0$ とし、さらに AC 振幅の誤差を $\Delta K$ 、位相の誤差を $\Delta\varphi$ とすると

$$\theta = K_{DC} + (K_{AC} + \Delta K)\sin(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi)$$

と書け、展開して誤差の 1 次まで取れば、

$$\Delta\theta_{AC} = \Delta K \sin(\omega t + \varphi_0) + K_{AC}\Delta\varphi \cos(\omega t + \varphi_0)$$

となる。振幅の誤差はバンブと同位相のビーム振動を引き起こし、位相の誤差はバンブと  $90^\circ$  ずれた位相のビーム振動を引き起こす。従って、ビーム振動の測定と補正には位相情報が必須であり、図 4 に示した様に、任意波形発生器から速い BPM へバンブと同期したトリガー信号を送っている。BPM では 1 秒間に数回の更新頻度で、64 周毎に 1 回の測定を 6400 回分 (10Hz の約 2.5 周期分) 連続で行う (例えば図 7)。BPM で測定したビーム位置変動の波形は、バンブに同期した成分と  $90^\circ$  ずれた成分とに分解して振幅が求められる。補正は通常の COD 補正と同様に逆行列を用いた計算で、バンブ

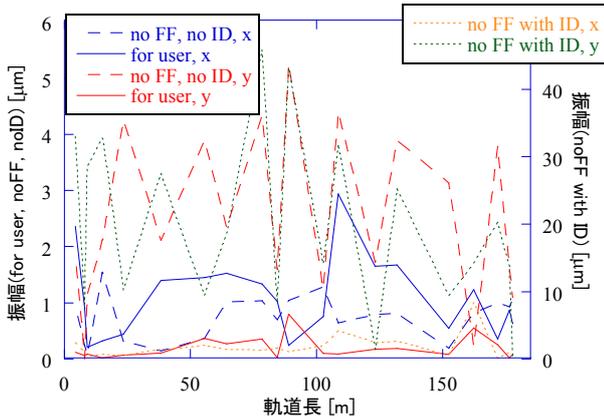


図 6 : スwitching中のリング全体の 10Hz 振動の振幅。水平を x、垂直を y とし、ユーザーラン中 (for user 縦軸左)、そこからフィードフォワード補正を切った場合 (no FF with ID 縦軸右)、さらに挿入光源のギャップを開けた場合 (no FF, no ID 縦軸左) を示す。

電磁石 K1 は固定とし、K2、K4、K5 の振幅と位相について必要補正量を求める。リング外側の水平振動補正では、バンブ外側の速い BPM を 6 個用い、垂直振動では、バンブ内外の 9 個全てを用いる。制御系の分解能は電流振幅 0.001A、位相  $0.01^\circ$  であり、水平方向約  $2\mu\text{m}$  のビーム振動に対応する。それ以下の水平振動抑制、垂直方向の振動補正には、フィードフォワード補正が必要である。

フィードフォワードの為の電磁石制御は、任意波形発生器からバンブと同期した正弦波と、 $90^\circ$  位相をずらした余弦波を DSP に入力し、それに任意係数をかけて重ね合わせ、電源に出力するという方法で行われる。例えば、垂直振動は大部分が挿入光源の影響であるので、バンブ同期した成分に対する係数が大きくなる。バンブ内側を含めてリング全周に対して垂直方向の振動抑制を行う場合は、補正電磁石 4 台全てに対してバンブ同期成分の係数を設定する必要があるが、バンブ外側だけでよい場合は、2 台使うのみで十分である。

リング外側でのビーム振動の補正結果を図 6 に示す。挿入光源のギャップを開いた状態では、バンブ電磁石の調整のみで、水平約  $2\mu\text{m}$  まで振動が抑制できている。その時の誤差による垂直振動は約  $4\mu\text{m}$  である。挿入光源のギャップを閉じると、水平  $4\mu\text{m}$ 、垂直約  $40\mu\text{m}$  まで振動が増加する。垂直振動は挿入光源の歪 4 極磁場によるもので、振動はほとんどバンブと同位相成分のみである。フィードフォワード補正により、水平方向の振動は約  $3\mu\text{m}$  以下に、垂直方向は  $1\mu\text{m}$  以下に抑制され、その状態でテスト運転、ユーザー運転を行っている。なお、振動の様子は挿入光源の偏光パラメータ  $\phi/2$  及びエネルギーパラメータ  $p/2$  にほとんど依存しない。また、長期シャットダウン後の運転開始時に調整を行えば、数ヶ月にわたる連続運転期間はパラメータの調整は不要である。挿入光源の影響、長期変動とも、振動振幅の変化は  $1\sim 2\mu\text{m}$  程度 (測定誤差と同等内) に

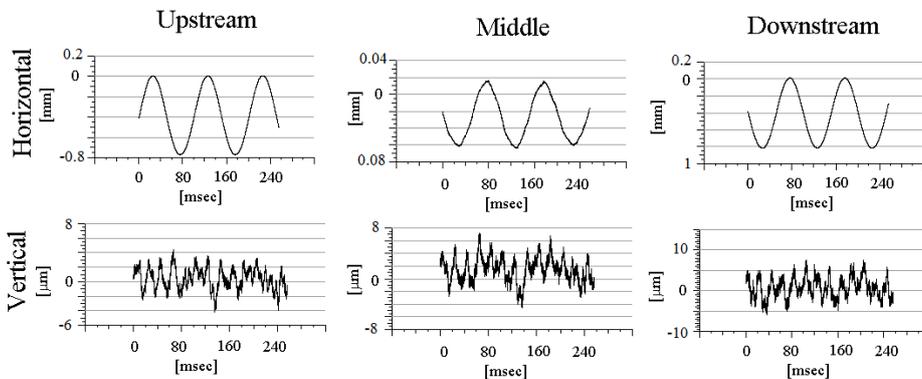


図 7 : バンブ内側の速い BPM でのビーム位置測定の様子。Vertical 軌道に見えている振動は 50Hz 成分である。(常時測定、調整に用いているバンブ外側の 6 個の BPM でも、測定データの形式は同じである。)

収まる。

BL16 に対する光軸調整の手順は、まず、スイッチングなしの状態、直線部中央の 2 台の DC ステアリング (図 2 の HV) を使って 2 台の挿入光源の光軸を相対的に一致させた後、バンパ電磁石及び遅い垂直ステアリング (K1、K2、K4、K5、VD) を使って、直線部全体に対して DC バンプを作って光軸調整を行う。最後に、スイッチングを開始し、バンパ内の 3 個の速い BPM を用いて、バンパが降りた瞬間のビーム位置が DC 的に決めた光軸に合う様に、DC バンプをさらに調整する。スイッチング中の速い BPM の測定例を図 7 に示す。HV、VD はスイッチングの有無に依らず同じ値であるが、バンパ電磁石の DC 成分については、バンパ有無で異なった値になる。

現在、ユーザーランの途中ではバンパ内部の常時軌道補正を行っていない。バンパ内部の日較差や長期ドリフトによる軌道変動の常時補正は今後の課題である。

#### 4. スwitchingの停止、開始操作

BL16 以外の軌道補正、光軸確認は、BL16 において AC 的に運用する電磁石 (水平バンパキッカー電磁石 5 台及びフィードフォワード補正用ステアリング電磁石 4 台) を切った状態を基準に行っている。その状態を基準とし、スイッチングなし (DC モード) の場合、バンパ電磁石は 16 番の光軸をあわせる為に必要な局所 DC バンプを作る様に DC 的に励磁され、フィードフォワード電磁石は電流ゼロである。一方、スイッチングあり (AC モード) の場合、バンパ電磁石は DC オフセットありの 10Hz 正弦波励磁、フィードフォワード補正電磁石も ON となる。例えば、スイッチングを開始する場合は、減衰器を徐々に入れることで、16 番内の局所 DC バンプを立ち下げ、パラメータを AC 用に設定後、再び減衰器

表 1 : スwitchingありでのユーザー運転履歴

2011.	12/08	振動測定スタディ
2012.	01/19	9:00 - 01/23 9:00 テスト運転
	02.22	21:00 - 02/23 9:00
	03/09	09:00 - 03/12 8:30
	04/12	09:00 - 04/18 21:00
	05/10	09:00 - 05/14 08:30
	05/16	08:30 - 05/17 09:00
	05/28	08:30 - 05/28 20:30
	05/30	21:00 - 05/31 09:00
	06/26	08:30 - 06/27 20:30
	06/28	08:30 - 06/28 20:30

を抜いてゆく。逆の場合、すなわち、AC モードから DC モードへのスイッチング停止時も同じである。すなわち、スイッチングの停止開始時には、減衰器入り、パラメータ再設定、減衰器切り、という操作を行うが、その所要時間は数分間である。

現在のところ、スイッチングの停止と開始時、一時的に水平方向に 20 $\mu$ m 程度の軌道変動が生じている (図 8)。この変動の大きさは、かつて、挿入光源のモード変化などの際に許容されていた値とほぼ同様のレベルであり、現状、毎朝晩の 2 回、挿入光源のモード変更と PF-AR への入射の時刻にあわせて、スイッチングの停止開始操作が許容されている。この一時的な軌道変動の抑制は、今後の課題である。

#### 5. ユーザーランへ

2011 年 12 月 8 日のマシンスタディにおいて、全ビームラインに協力して頂き、10Hz スwitching 時の他ビームラインへの影響の測定が行われた。その結果、いくつかのビームラインで top-up 入射時のビーム変動と同程度 (最大 2 倍程度) の光の変動が観測されたが、実験に大きな支障が出るビームラインは幸いにも存在せず、ユーザーラン中のスitch

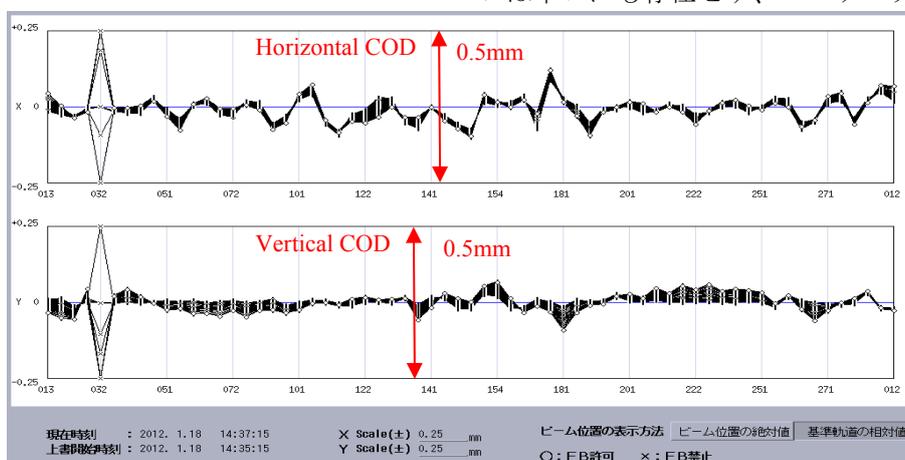


図 8 : スwitching開始、停止操作時の一時的な軌道変動。マシンスタディ時に、垂直方向の速い軌道フィードバック補正を切って測定したもの。ユーザーラン中は、垂直方向の変動は、速い軌道補正で十分に補正可能であり、ほとんど生じない。(ここでは、BPM032 は速い測定用に切替済。)

ング運転が許可された。その後、スイッチングシステムの長期連続運転試験を兼ねて 2012 年 1 月 19 日から 23 日まで試運転が行われ、現在まで、断続的にスイッチングありでのユーザー運転が行われている。スイッチングありでのユーザー運転の履歴を表 1 に示す。

ユーザーランの間、挿入光源の偏光パラメータ  $\phi/2$  及びエネルギーパラメータ  $\rho/2$  は自由にビームラインから変更することができる。また、スイッチングの停止開始も、朝晩の 8 時半に限られているものの、ユーザーが自由に依頼することができる。(操作は光源運転員が制御室で行っている。)

## 5. 今後の課題

2007 年に製造開始、2008 年にリングに設置、その後、調整を重ねてきた高速偏光スイッチングシステムは、2012 年よりユーザーラン時の運用を開始した。16 番のバンプ内側に対する常時軌道補正、及びスイッチングの停止開始時の一時的な軌道変動の抑制が今後の課題である。2012 年秋からの運転においても、マシンスタディを続けていく予定である。

## 参考文献

- [1] S.Matsuba et al., “Fast Local Bump System for Helicity Switching at the Photon Factory”, Proc. of PAC09, (2009), pp.2429-2431
- [2] K.Harada et al., “Tuning of the Fast Local Bump System for Helicity Switching at the Photon Factory”, Proc. of IPAC2010, (2010), pp.3150-3152
- [3] K.Tsuchiya et al., “Operation of a fast polarization-switching source at the Photon Factory”, Proc. Of SRI2012, to be published
- [4] K.Amemiya et al., ” Fast polarization switching in the soft X-ray region at PF BL-16A”, Proc. Of SRI2012, to be published
- [5] G. Schutz et al., “Absorption of circularly polarized x rays in iron”, Phys. Rev. Lett. 58, (1987) 737