

KEK-PF におけるビームベース測定を用いた入射効率改善のための研究 STUDY FOR IMPROVING THE INJECTION EFFICIENCY USING BEAM BASED MEASUREMENT AT KEK-PF

平野広太^{#, A)}, 原田健太郎^{B)}, 長橋進也^{B)}, 上田明^{B)}, 帯名崇^{B)},
高井良太^{B)}, 高木宏之^{B)}, 東直^{B)}, 小林幸則^{B)}

Kota Hirano^{#, A)}, Kentaro Harada^{B)}, Shinya Nagahashi^{B)}, Akira Ueda^{B)}, Takashi Obina^{B)},
Ryota Takai^{B)}, Hiroyuki Takaki^{B)}, Nao Higashi^{B)}, Yukinori Kobayashi^{B)}

^{A)} Hiroshima University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The injection scheme for PF ring was designed using the kicker and septum magnets. After the earthquake hit in 2011, the injection efficiency has decreased. This primary cause of the problem seems to be the alignment errors of the septum magnets and correction magnet of beam transport path. To recover and improve the injection efficiency, investigation of the present injection parameters are essential. We carried out the beam based studies in order to fix the injection parameters. In this paper, we report an overview of the beam based measurements.

1. はじめに

蓄積リングを周回するビーム電流値は、ガス散乱や量子寿命、ビーム内散乱によって時間と共に減ってゆく。これを回復するため、入射器から供給されるビームを、輸送路を通じてリングまで運び、入射を行う。高エネルギー加速器研究機構の PF リングではキッカー・セプタム電磁石を用いた入射方式を採用している。模式図を Fig. 1 に示し、入射の原理を説明する。

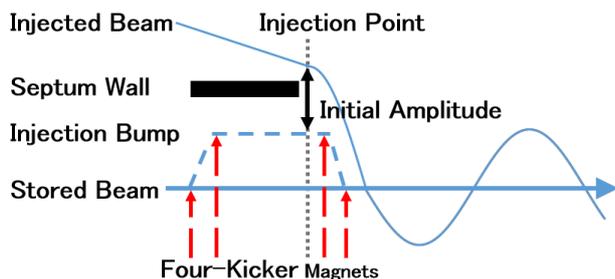


Figure 1: Schematic drawing of an injection scheme using pulsed kicker and septum magnets.

Figure 1 は、入射の瞬間にキッカー電磁石とセプタム電磁石を励磁した様子を表す。セプタム電磁石はビーム輸送路の終端部に設置され、入射ビームの軌道の向きを蓄積ビームの設計軌道とそろえるために用いられる。セプタムでは入射ビームのみ向きを曲げ、蓄積ビームに影響を与えないようにするためセプタム壁で区切り、渦電流の効果を利用して磁場を遮蔽している。キッカー電磁石は入射点にバンプを形成するために 2 台が入射点上流、2 台が下流に合計 4 台を設置される。下流 2 台のキッカー電磁石は入射ビームに対して、ベータatron 振動の振幅を小さくする働きをしながら、2 台の上流のキッカー電磁石と組み合わせて基準軌道を入射路側へ寄せ

るバンプを形成する。入射ビームは入射点でのセプタム壁を挟んだ入射ビームと蓄積ビームの間の距離が初期振幅となり、振動しながらリングを周回する。振動は放射減衰によって決まる時間のスケールで減衰していき、最終的には蓄積ビームと交わり合っ捕獲される。しかし、現実のキッカー電磁石は、振幅やタイミングの不揃い、パルス波形の違い、バンプ内の 6 極電磁石のような非線形要素などによって完全に閉じたバンプにならない。また、キッカー電磁石のパルス時間長が周回周期を超える場合、2 ターン目以降も蹴ってしまう、マルチキックの問題がある。

PF リングでは、キッカー電磁石の誤差やマルチキックの影響から、入射時の蓄積ビームの振動や入射効率低下の問題が存在した[1]。そこに 2011 年の地震によるビーム輸送路の電磁石やセプタム電磁石の位置のずれが原因となって、入射効率の低下やビームロスによる放射線の発生など問題が悪化した。特にセプタムは真空槽に入っていることやターゲット座がないため、再据付されておらず正確な入射ビームの位置が特定されていない。そこで本研究はビームベース測定による入射パラメータの特定とシミュレーションによる最適な入射パラメータの探索を行った。

2. 測定の概要

ビームベース測定は、直線部 (ID02)両端のダクトの BPM 電極にビーム位置検出回路 (Libera Brilliance+ [2])を接続してドリフトスペースを挟んだ 2 点の位置情報から、直線部中心の位相空間情報を計算し、上流に転送する方法で行った。この測定で入射ビームの位相空間情報及びキッカー電磁石のパルス波形、セプタム電磁石・ビーム輸送路の補正電磁石の応答など入射パラメータを調べる。直線部からキッカー電磁石及び入射点を含めたリングの構造を Fig. 2 に示す。また、転送の計算で用いた twiss パラメータと直線部からの位相進みの設計値を Table 1 にまとめる。但し、K1 は位相進みの関

[#]hirano-m170458@hiroshima-u.ac.jp

係から、ID01 の位相空間情報を転送した。

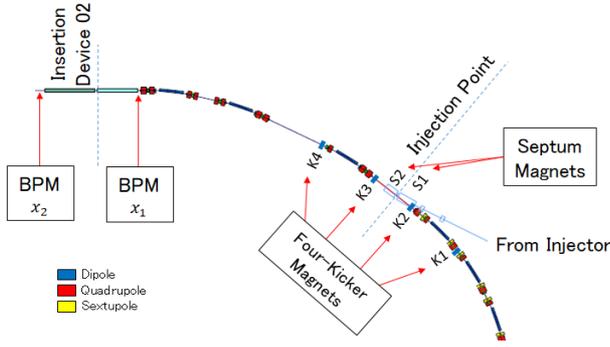


Figure 2: Lattice configuration for the measurement.

Table 1: Twiss Parameters and the Phase Advance $\Delta\phi_x$ from the Insertion Device 02 (ID02)

	K1	K2	K3	K4	ID02	Inj
α_x	-1.79	-0.62	-1.47	-0.66	0.01	-1.08
β_x	3.25	6.02	13.8	3.15	12.0	9.45
$\Delta\phi_x$	8.01	8.29	1.24	0.86	0.00	1.26

2.1 入射ビームの測定

Figure 3 に PF リングの蓄積ビームの中心軌道とバンブ、入射ビーム、そしてセプタム壁の位置関係を示す。位置関係はセプタムを真空槽の外側の位置を測量して図面との比較から推定した。入射ビームをリングに周回するためには、アクセプタンス内に打ち込むことが要求され調整には正確な情報が必要となる(Fig. 4)。

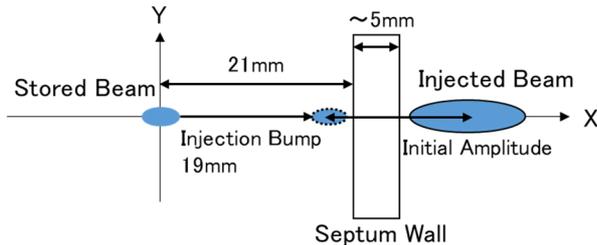


Figure 3: Injected beam and stored beam relative position at the injection point.

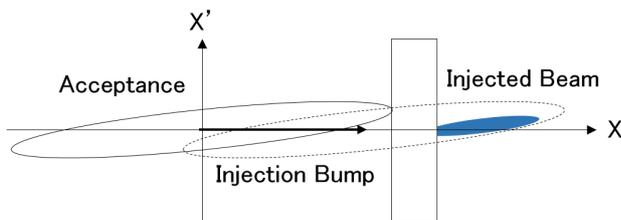


Figure 4: Horizontal phase space plots of injected beam and stored beam of Fig. 3.

そのため、入射ビームの測定では、蓄積ビームの位置を測定し中心軌道を求めた後、入射ビームの相対座標を調べた。

蓄積ビームの中心軌道の座標は、直線部両端のダクトの電極にビーム位置検出回路を接続して求める。入射ビームの応答測定では、初期振幅が電極間距離(=±11 mm) 近くの信号も含むため、補正が必要となる。ダクトには 4 極の電極があり、その信号の比 U、V から位置を導出できる。ビーム位置は、

$$x = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 k_x(i,j) U^i V^j \quad (1)$$

で表される。Equation (1)は、信号の比 U、V に非線形応答係数 k_x で多項式補正した水平位置を示す。非線形応答係数はダクトの中心から離れた位置に対する出力電圧の非線形成分を補正する。しかし、ビーム位置が電極間距離を超える場合、ビーム位置は縮退されるため調整が必要となる。直線部中心の位相空間情報は、Eq. (1)の結果を用いて

$$x = \frac{x_2 + x_1}{2}, \quad x' = \frac{x_2 - x_1}{l} \quad (2)$$

で表される。ここで、 l (=8.83 m)は直線部の長さである。Equation (2)から求めた水平の位相空間情報は、入射点の入射ビームやキッカー電磁石の位相空間情報などを求めるため、転送行列で転送する。これは、以下の式で示される。

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{Inj} = M \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{ID02} \quad (3)$$

転送は Table 1 の twiss パラメータと位相進みから計算する。蓄積ビームの中心軌道および入射ビームの位相空間情報は、以上の過程から計算される。垂直方向に対しても同様である。

2.2 キッカー電磁石のビーム応答測定

蓄積ビームのバンブ軌道は通常 4 台のキッカー電磁石を励磁してつくる。バンブをうまく閉じるためには、設計振幅に揃え、タイミングを同期することが要求される。キッカー電磁石のビーム応答測定では、蓄積ビームの振動を調べて、パルス波形を再構築しタイミングや蹴り角の調整を行った。

キッカー電磁石のパルス波形は、Eq. (4)によって直線部の位相空間情報を各キッカー電磁石の位置に転送して蹴り角を導出し、パルスのタイミングを遅延時間方向に掃引した結果を繋げて求める。PF のキッカー電磁石のパルス時間長は周回時間より長いので、パルス波形を得るためにターンごとのキックの振動を追いかけて求めた。1 ターン目のキックは bpm で直接に観測され、パルス電磁石の蹴り角を $\theta(t)$ 、Kicker から検出回路を接続した BPM までの転送行列を M_{BK} とおくと、

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix}_B = M_{BK} \begin{pmatrix} 0 \\ \theta(t) \end{pmatrix}_K \quad (4)$$

で表される。前ターンの蹴り角を含む振動は、

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ x'_{n+1} \end{pmatrix}_B = M_{BK} \left\{ M_{KB} \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix}_B + \begin{pmatrix} 0 \\ \theta(t) \end{pmatrix}_K \right\} \quad (5)$$

が観測される。一方で、蹴り角が収束した応答は一周の転送行列を重ねて、

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ x'_{n+1} \end{pmatrix}_B = M_c \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix}_B \quad (6)$$

となる。この計算を適用して、一周の転送との差を解き、ビームの応答からパルス波形を再構築した。

2.3 セプタム電磁石のビーム応答測定

PF では入射ビームの調整をビーム輸送路の上流から補正電磁石とセプタム電磁石 S1, S2 で行う。セプタム電磁石の蹴り角は、電流値と磁場の線形性を適当な係数であわせ制御している。この係数をセプタム電磁石のビーム応答に基づいた値に更新するためセプタム電磁石の電流値と蹴り角の関係を測定する。電流値はセプタム電磁石のパルス波形をオシロスコープで観測して求める。蹴り角は、セプタム電磁石の蹴り角を変化させて入射ビームの傾きの変化量を測定する。これらの結果から電流値と磁場の係数を校正する。セプタム電磁石のパラメータを Table 2 にまとめる。

Table 2: The Parameters of the Septum Magnets

position	Max value		Setting value	
	[mrad]	[A]	[mrad]	[A]
S1	166	6000	118.61	5344
S2	98	6500	93.69	6281

2.4 入射シミュレーション

入射ビームの位相空間情報やキッカー電磁石のパルス波形など測定した入射パラメータを現在のオプティクスに適合して入射シミュレーションを行う。オプティクスの測定は LOCO を実施した[3]。LOCO とは、蓄積リングの補正電磁石を微小な角度で蹴り、BPM で観測される振動の応答行列から加速器パラメータを推定する手法である。推定は軌道レスポンスと実測のレスポンスの残差が最小となるように加速器パラメータをフィッティングして行った

LOCO モデルの結果と入射パラメータの測定結果を用いて、入射効率の計算とパラメータの探索を行う。シミュレーションは SAD を使用した[4]。入射効率の計算は、入射ビームの測定結果を使った位相空間情報と分布の粒子を生成して放射減衰のスケールまで追跡した[5]。トラッキングの最中にフィジカルアパーチャーを超えた場合には、ビームが失われるとした。Table 3 に PF リングのフィジカルアパーチャーとベータトロン関数をまとめる。

フィジカルアパーチャーは水平方向に超電導ウィグラー (ID14)とセプタム壁を、垂直方向にアンジュレータ (ID16)を設定した。また、ID14とセプタムに付随するアプゾバーを設定した。LOCO モデル予測した水平 β 関数を使って、規格化振幅はセプタム出口で 6.50 から 5.84、ID14 で 5.67 から 6.45 となり、アパーチャーはセプタム出口で最も狭くなっていることがわかる。

Table 3: Physical Aperture and Betatron Function

Position	Aperture [mm]		Betatron function [m]	
	X	Y	Design	LOCO
ID16	-	7.5	5.00	5.07
ID14	16	-	7.96	6.15
SEPTUM	20	-	9.44	11.71

3. 測定結果

3.1 入射ビームの測定

蓄積ビームの中心軌道の測定は 3 mA のシングルバンチのビームを使った。結果を Table 4 にまとめる。

Table 4: Phase Space of Stored Beam at ID

	Position [mm]	Angle [mrad]
Horizontal	-1.83 ± 0.28	0.52 ± 0.09
Vertical	2.10 ± 0.17	-0.07 ± 0.07

次に入射ビームの測定は、1 nC の入射バンチを 1 Hz 入射して、turn-by-turn のデータから入射した瞬間を抽出して行った。Figure 5 に入射バンチを 100 点プロットした結果を示す。横軸はビーム位置、縦軸は角度の位相空間情報を表す。Table 5 は蓄積ビームの座標からとった相対座標をまとめた。

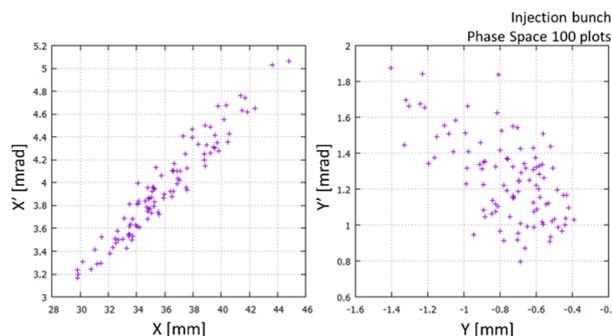


Figure 5: Phase space plots of injected bunch at the injection point, units in millimeter.

Table 5: Phase Space of Injected Beam of Fig. 5

	Position [mm]	Angle [mrad]
Horizontal	30.5 ± 3.2	3.11 ± 0.42
Vertical	0.06 ± 0.23	1.02 ± 0.23

Figure 5 の分布から蓄積ビームのバンチの振幅は約 17.5 mm となる。これは測量で推定したキッカーバンチの振幅 19 mm と整合性をもつ。Table 5 の水平の位相空間座標は、設計モデルの (27 mm, 2 mrad)から離れて初期振幅の増大が確認できる。

3.2 キッカー電磁石のビーム応答測定

キッカー電磁石のパルス波形の測定は、4 台のパルス電磁石を独立に 0.4 mrad の蹴り角を与え蓄積ビームの応答を測定した。ビームの応答はパルス波形に再構築するため、励磁のタイミングを遅延時間方向に 25 nsec ずつ掃引して 0~2500 nsec までのパルス波形をプロットした (Fig. 6)。

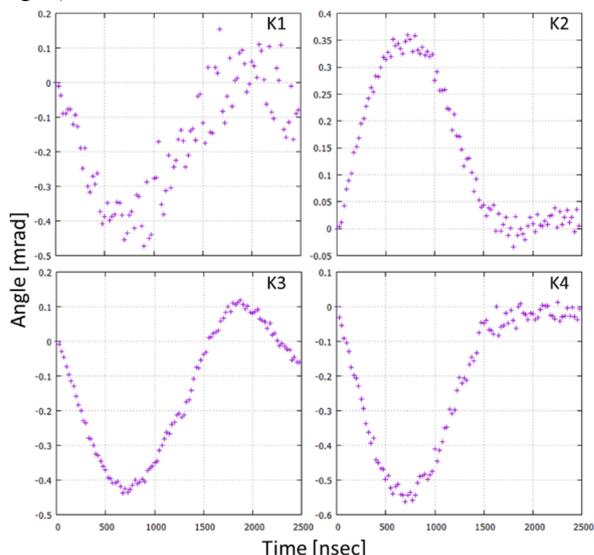


Figure 6: Reconstructed pulse shapes of kicker magnets (0.4 mrad).

Table 6: Kick Angle and Pulse Length (Zero-to-Zero)

	K1	K2	K3	K4
Kick angle [mrad]	-0.414	0.351	-0.452	-0.539
Pulse length [nsec]	1550	1625	1550	1625

パルス波形より蹴り角を揃え、タイミングを実際のビームの挙動から整列することができた。K1 のパルス波形は ID02 からの位相進みが振幅の節となるため、ID01 の位相空間情報を転送して求めたが位相進みは 0.405 であるためばらつきが観測された。次に、実際にリングからキッカー電磁石 K3 を取り出して磁場測定したパルス波形と比較を行った (Fig. 7)。

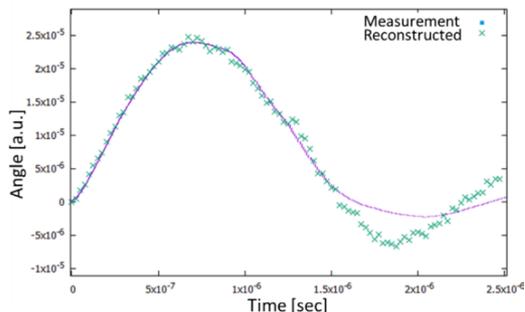


Figure 7: Pulse shapes of K3, the measurement of magnetic field (solid line) and the reconstructed of beam response (dotted).

Figure 7 では立ち上がりから 1500 nsec までパルス波形は一致しており、蹴り角とタイミングの調整が保証されるが、設定振幅の蹴り角から反対方向にはみ出すアンダーシュートで違いが出た。ビームベース測定でタイミングや蹴り角を揃えることは制御室から電磁石までの環境に依存せず調整を行うことができるため、電流値-磁場の係数を正しく反映することができ、計算通りのバンプを設計できる。しかし、タイミングを完璧に同期したとしても、アンダーシュートの影響やパルス幅の違いによって完全に閉じたバンプ波形を設計できないことがわかる。

3.3 セプタム電磁石の測定

セプタム電磁石の制御で使われる電流値-磁場の関係を測定した。はじめにオシロスコープで観測する電流波形のピーク値とモニターの蹴り角の関係を測定した。電流値は 0 A から最大値まで変化させてモニターの蹴り角を調べた。電流値はオシロスコープのピークサーチの分解能でばらつきを持つが、0 から最大値まで線形性をもって変化していることを確認した。次にモニターの蹴り角をビームベース測定から予測される蹴り角を比較した。測定はセプタム電磁石上流にある補正電磁石で入射ビームが直線部のダクト中心を通るように調整し、モニターで ± 0.3 mrad 変化させたときの傾きをビームベース測定で調べた。これらの操作から得た電流値-磁場の係数を Table 7 にまとめる。

Table 7: The Parameters of Septum Magnets

Name	Prev.	Update	
	[mrad/A]	[mrad/A]	%
S1	22.2	22.4	-1.6
S2	16.6	17.1	12.94

Table 7 より、実際のビームは S2 で大きく蹴っていることが予測される。

3.4 入射シミュレーション

LOCO の軌道レスポンスは補正電磁石を水平で 0.04 A、垂直で 0.02 A で励磁して測定した。Figure 8 に LOCO モデルの β 関数と計算値の β 関数を示す。

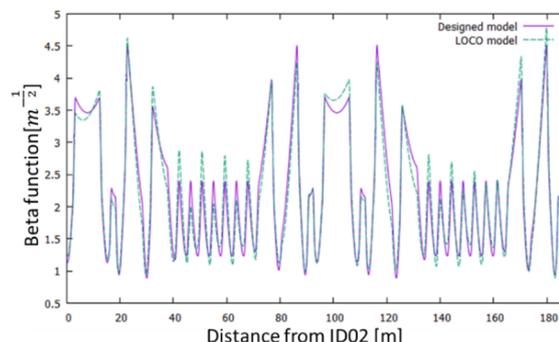


Figure 8: Horizontal beta functions, the loco model (dotted line) and the designed model (solid line).

Figure 8 には挿入光源やアライメントエラーによるオプティックスの影響が表れている。入射シミュレーションは LOCO モデルと設計モデルを使って比較する。LOCO パラメータを使った実測レスポンスと軌道レスポンスの残差はフィッティングによって標準残差は水平方向で $5.10 \mu\text{m}$ 、垂直方向で $2.87 \mu\text{m}$ まで収束した。

はじめに設計モデルのオプティックスとビームベース測定で得た入射ビームの位相空間情報で入射シミュレーションを行う。キッカー電磁石のパルス波形はピーク位置を起点としたシングルキックとする。Figure 9 に入射した粒子がリングを周回する度の粒子数の変化を示す。縦軸は粒子数を示し、横軸はリングの周回数を表す。

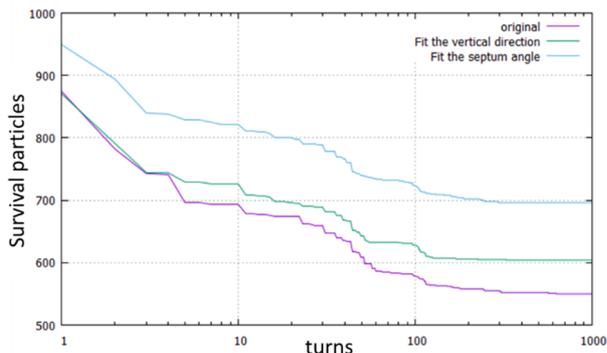


Figure 9: Number of survival particles per turns.

1 つ目は、Table 5 の入射ビームをそのまま入射した場合で効率は 55.0% になる。2 つ目は、ビーム輸送路の補正電磁石 (CM) で垂直方向の位相空間を原点に調整した場合で効率は 60.4% に改善される。最後は、ベータatron 振動の初期振幅を最小とするためセプタム電磁石の蹴り角で自由度を与えて調整した場合で 69.6% まで改善した。このとき粒子は垂直方向のアパーチャーではなく、水平方向で落としていることを確認した。

次に Fig. 6 のキッカーパルス波形を使ったマルチキックと LOCO モデルのオプティックスを使用した入射効率を計算する。キッカー電磁石は運転に使用している蹴り角を使用して、タイミングはピーク位置を起点とするマルチキックとする。この結果を Table 8 にまとめる。

Table 8: The Results of the Injection Simulation

	Single Kick	Multi Kick
Original	25.8	31.8
Fix the vertical	49.2	55.6
Fix the septum	63.4	57.3

現在の入射条件を考慮した入射効率は、補正電磁石とセプタム電磁石の補正で 31.8% から 57.3% の範囲内にある。これは実際の入射効率 40.2% を含む。設計モデルのオプティックスと比べてシングルキックの入射効率は 30% ほど落ち込むが、マルチキックだと改善されている。効率が改善される理由として、マルチキックでは K3、K4 は振幅を大きくする方向に蹴り、K1 は振幅を小さくする方向に蹴るためと考えられる。実際に K3、K4 の蹴り角を

制限なくして組み合わせを探索すると、全ての粒子が入射される解が見つかった。しかし、キッカー電磁石には蹴り角の制限があるため、今後の展望として、セプタム壁の高さをどこまで近づける必要があるか計算を行い、キッカー電磁石のタイミングと蹴り角の組み合わせの調整から蓄積ビームの振動が最小かつ入射効率を最大とする解を探索し、ビームスタディで検証する。

4. まとめ

今回の測定によって、PF リングにおいて問題であった入射効率の低下の問題を、ビームの応答測定から原因を調べ、入射ビームの位相空間情報の特定やキッカー電磁石の校正を行った。現在は、キッカー電磁石の蹴り角を校正してバンパの問題は軽減されている。キッカーバンパを用いた入射方式では、厳密なバンパをつくることはキッカー電磁石の特性を揃える必要があるため不可能であるが、タイミングと蹴り角を含めて蓄積ビームの振動が最小かつ入射効率を最大とするパラメータを模索する。セプタム電磁石の蹴り角は上流から S1、S2 の 2 台で調整しているが S2 は計算より大きく蹴っていることが予測される。セプタム電磁石の応答は、入射ビームを用いた測定になるため、振幅の大きさから測定条件が限られたが曲げ角を予測した。

入射をパラメータの測定結果と現在のオプティックスを反映したシミュレーションでは現在の入射効率は約 $30\sim 60\%$ の範囲にあり、水平方向のアパーチャーで粒子を落としていることが予測される。また実際の入射効率は計算値の範囲内である。水平方向で粒子を落とす原因として、セプタム電磁石の設置誤差とカップリングによる初期振幅増大とマルチキックによる K3、K4 の挙動が考えられる。今後の入射パラメータの調整として、垂直方向の位相空間を調整してカップリングを抑える補正電磁石とセプタム電磁石の組み合わせを調べ、蓄積ビームの振動を抑えるキッカーのタイミングと蹴り角の組み合わせを探索して、ビームを使った測定から評価を行う。

参考文献

- [1] Y. Kobayashi, A. Ueda, and T. Mitsuhashi, "Injection performance with a traveling wave kicker magnet system at the photon factory storage ring", in Proc PAC'03, paper RPPG013, pp. 3204-3206.
- [2] http://www.i-tech.si/accelerators-instrumentation/liberabriliance-plus/benefits_1
- [3] J. Safranek, "Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements", Nuclear Inst. and Methods in Phys. Res. A, 388, pp. 27-36 (1997).
- [4] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [5] K. Hirano, S. Matsuba, and K. Harada, "Simulation study for improving the injection efficiency at KEK-PF", in Proc. PASJ'17, Sapporo, Japan, Aug. 2017, paper TUP011, pp. 319-321.