

KEK PF-BT に関するシミュレーションモデルの改修と加速器調整への適用 MODIFICATION OF SIMULATION MODEL FOR MACHINE TUNING AT KEK PF-BT

下崎義人^{#, A)}, 帯名崇^{A)}, 長橋進也^{A)}, 東直^{A)}

Yoshito Shimosaki^{#, A)}, Takashi Obina^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Nao Higashi^{A)}

^{A)} KEK

Abstract

In order to manifest and to optimize the beam performance at the PF-BT which is the beam transport line from the injector to the photon factory, the reconstruction of the simulation model was performed by changing magnetic fields and the beam parameters. After modifying the simulation model, the emittance of the injection beam has periodically been measured and the automatic orbit correction has been demonstrated for the stable beam injection.

1. はじめに

加速器調整を行う際に、シミュレーションはビームの挙動を解明・予測する上で有力なツールである。計算機の中で現実の加速器を再現できるようになれば、シミュレーションで得られたパラメータを実機に導入することでビーム性能の改善が見込める。

PF (Photon Factory) リングは KEK に設置された放射光実験施設であり、2.5 GeV-450 mA の電子ビームを蓄積して、電子ビームから放射される光をユーザー実験のために供給している[1]。電子ビームは入射器で 2.5 GeV まで加速・減速された後、パルス偏向電磁石 BP581 で PF に向けて出射され、PF-BT と呼ばれる輸送ラインを通して PF リングへ入射される (Fig. 1)。

PF-BT に関しては、シミュレーションコード SAD[2]用に BH11 から PF-BT 最下流までを記述したシミュレーションモデルが 2017 年に構築されており、これが 2021 年 11 月の時点での最新版であった[3]。しかし SAD によるシミュレーション結果が実測値を全く再現しない状況であり (Fig. 2(a))、PF-BT から PF リングへの入射調整を SAD に基づいて行うことが困難な状況だった。

そこで PF-BT を通過する入射ビームの素性を明らかにして、系統的な加速器調整を行うために、2021 年 11

月から PF-BT に関する調査を開始した。シミュレーションモデルの改修後、SAD の結果が実験結果を概ね再現するようになり、これにより定期的なビームパラメータ取得などが可能となった。

シミュレーションモデルを改修するまでに行った「ビームを使って原因を1個ずつ潰していく作業」の内容と現在の PF-BT の調整例について報告する。

2. シミュレーションモデルの再構築

まず PF リングの運転停止期間 (2022 年 1 月) に PF-BT の機器配置を調査した。結果、実機として存在している電磁石の一部が SAD の入力ファイルに記載されておらず、またビームプロファイルモニターの一部に関して、実機と SAD 入力ファイルとで 6 m ほど位置が乖離していることが判明し、SAD 入力ファイルを修正した。

次に PF リングへの入射ビームのビームパラメータが、設計値通りになっているかの調査を行なった。Figure 1 の四極電磁石 QD1 ~ 4 が設置されている領域は x と y の両方向においてアクロマット条件が課されており、四極電磁石 QD1、2 とプロファイルモニター PM4 の組み合わせで Q-scan を行うことにより、x と y の両方向の入射ビームパラメータを観測することができる。

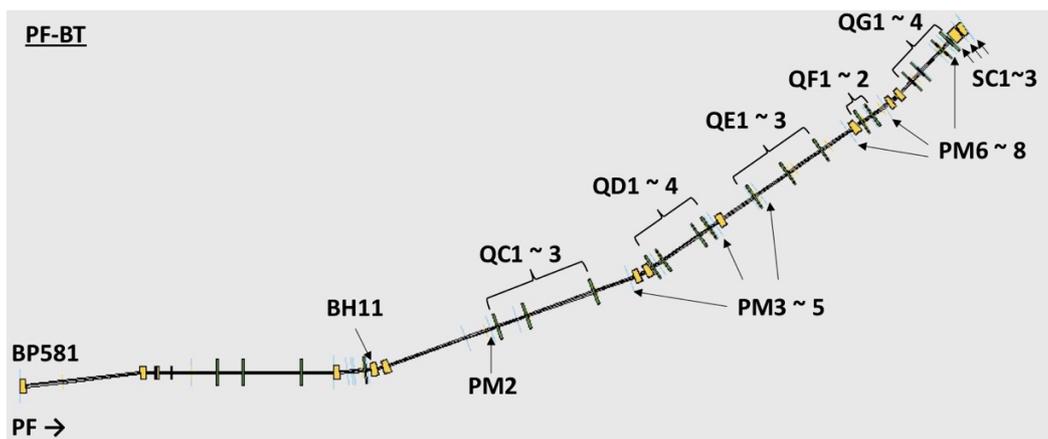


Figure 1: Schematic view of the PF-BT.

[#] yoshito.shimosaki@kek.jp

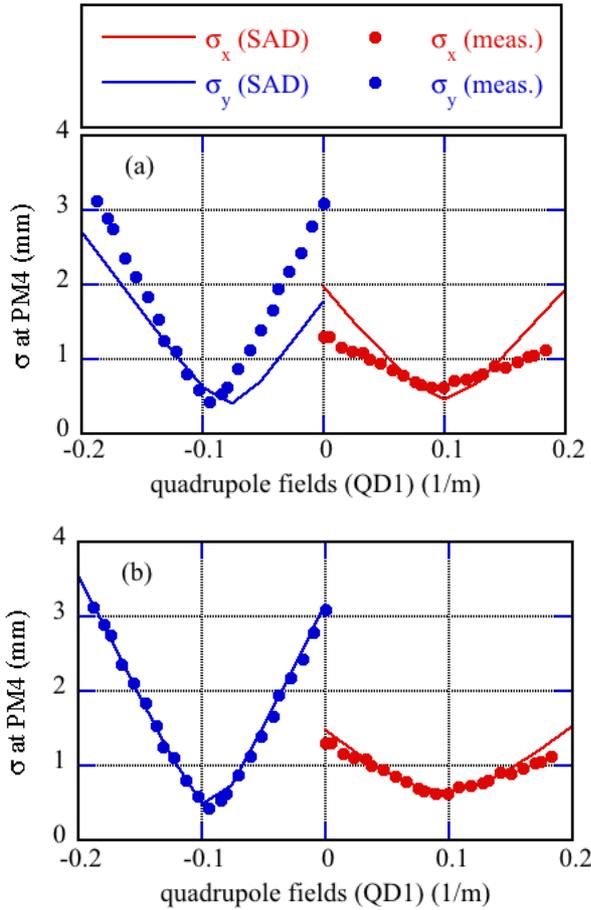


Figure 2: RMS beam size by changing the quadrupole field of QD1 (a) before and (b) after correcting the simulation model.

通常、Q-scan を実施する際は四極電流値を変えながらビームサイズを測定するが、ビームパラメータを求める際には四極電流値ではなく四極磁場係数の方が必要となる。すなわち四極磁場係数から四極電流値への換算係数 (KtoI) が間違っていると正しいビームパラメータを求めることができない。そこで Q-scan を行う前に QD1、2 の KtoI 測定を行なった。QD1、2 を PF-BT から切り離して磁場測定を行うことは困難であるため、QD1 の上流にあるステアリングと QD1、2 の電流を共に変えながら PM4 の位置で入射ビームの重心が動かない条件を探すことにより、QD1、2 の KtoI を求めた[4]。結果を Table 1 に与える。KtoI の測定値は概ね設計値通りであった。一方で「ユーザー運転で使用されている KtoI」が、設計値からも測定値からも大きく乖離している結果となった。

「ユーザー運転で使用されている KtoI」が非現実的な

Table 1: KtoI of QD1 and QD2

Quadrupole magnet	KtoI (design)	KtoI (meas.)	KtoI used in user operation
QD1	9.8 A.m	10.6 A.m	14.0 A.m
QD2	9.8 A.m	10.0 A.m	5.3 A.m

Table 2: RMS Emittance valuated by Q-scan

	QD1 - PM4	QD2 - PM4
(ϵ_x, ϵ_y) evaluated by KtoI (design)	(66 nm.rad, 94 nm.rad)	(71 nm.rad, 116 nm.rad)
(ϵ_x, ϵ_y) evaluated by KtoI (meas.)	(73 nm.rad, 103 nm.rad)	(80 nm.rad, 113 nm.rad)
(ϵ_x, ϵ_y) evaluated by KtoI used in user operation	(97 nm.rad, 138 nm.rad)	(44 nm.rad, 59 nm.rad)
Designed (ϵ_x, ϵ_y)	(61 nm.rad, 61 nm.rad)	(61 nm.rad, 61 nm.rad)

値である可能性が示唆されたため、検証のために QD1-PM4 と QD2-PM4 の 2 つの組み合わせで Q-scan を行なった。QD1 と QD2 の距離が近いので、KtoI の測定値が妥当なものであれば QD1-PM4 で求めたエミッタンスと QD2-PM4 で求めたエミッタンスは近い値をとる筈である。結果を Table 2 に示す。(1) 「ユーザー運転で運用されている KtoI」を使用すると QD1 位置でのエミッタンスと QD2 位置でのエミッタンスが倍以上異なる結果になること、(2) KtoI (設計値) 及び KtoI (測定値) を用いた場合は QD1 位置のエミッタンスと QD2 位置でのエミッタンスが概ね一致すること、(3) KtoI (設計値) 及び KtoI (測定値) を用いた場合、x 方向エミッタンスの測定値はほぼ設計値と一致すること、及び(4) KtoI (設計値) 及び KtoI (測定値) を用いた場合、y 方向のエミッタンスの測定値が設計より 2 倍近く増大することがわかった。

Table 3: KtoI estimated by Genetic Algorithm (GA)

Quadrupole magnet	KtoI (design)	KtoI (GA)	KtoI used in user operation
QD1	9.83 A.m	9.83 A.m	14.05 A.m
QD2	9.84	9.93	5.25
QD3	9.90	9.90	10.46
QD4	9.89	9.98	10.48
QE1	5.96	5.96	5.92
QE2	5.93	5.99	7.07
QE3	5.96	6.04	6.28
QF1	5.96	6.01	4.66
QF2	5.96	6.04	6.38
QG1	5.95	5.96	4.35
QG2	5.95	6.06	4.95
QG3	5.96	6.06	5.43
QG4	5.93	6.06	2.96

これらの結果を使って SAD の入力ファイルを修正し、QD1 の四極電流値を変えた時のビームサイズの変化を計算した。結果を Fig. 2(b)に与える。SAD の入力ファイルを修正することで、SAD の結果が測定結果と概ね

致するようになった。

QD1, 2 以外の四極電磁石についても KtoI が間違っている可能性があったため KtoI の推定を行なった。まず実機においてビーム条件及び四極電流を変えながら 8 台のビームプロファイルモニター (PM4~8, SC1~3) でビーム形状を測定し、次に SAD でこれら全てを再現するように、それぞれの四極電磁石の KtoI について遺伝的アルゴリズムによる推定を行なった。結果を Table 3 に、KtoI を修正して SAD でビームサイズを計算したときの測定結果との比較例を Fig. 3 に与える。Table 1 と同様、「ユーザー運転で使用されていた KtoI」は KtoI (設計値) と KtoI (推定値) と大きく乖離しており、ユーザー運転で使用されていた KtoI を使用するとシミュレーション結果は測定結果を全く再現しない。また KtoI (設計値) を使った場合でも SAD の結果と測定結果にわずかに差異が見られた。KtoI (推定値) を用いると SAD でのシミュレーション結果が測定結果を概ね再現するようになった。KtoI (推定値) は設計値からの磁場誤差が反映されたため、測定結果を再現できるようになったものと考えている。

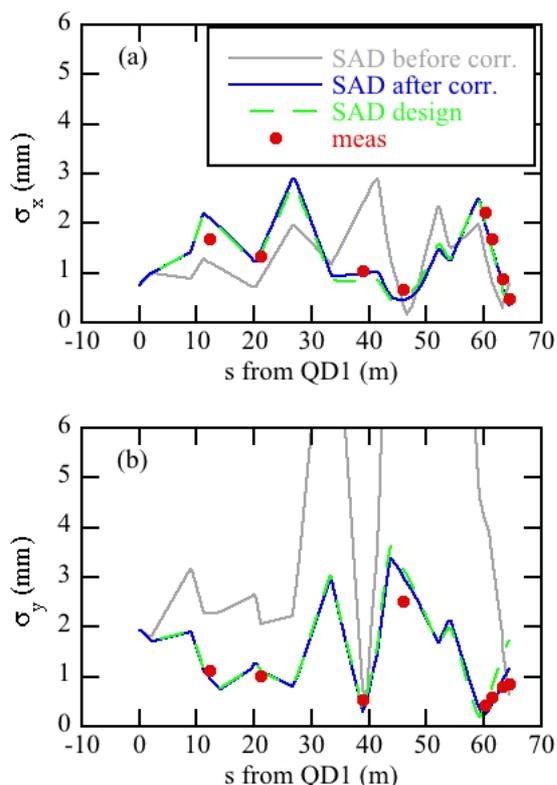


Figure 3: Comparison of RMS beam size between simulation results before and after modifying simulation model and experimental results in (a) the horizontal and (b) the vertical, respectively.

以上のことから 2021 年 11 月時点で 2017 年の PF-BT のシミュレーションモデルで計算した SAD の結果が測定結果を再現しなかったのは

- ・機器とモニターの位置が SAD 入力ファイルに正しく配置されていなかったこと
- ・SAD の入力ファイルには四極磁場係数が使われているが、実際に運転を行う際には四極電流値が必要

であり、その換算係数 (KtoI) が間違っていたこと

- ・ビームのエミッタンスについて、x 方向は概ね設計値通りであったが、y 方向のエミッタンスが設計値の約 2 倍近く大きかったことが原因であった。

3. 入射ビームエミッタンスの推移

シミュレーション結果が測定結果を再現できるようになったということは、PF-BT の輸送行列を抽出できるようになったということであり、複数のビームプロファイルモニター測定結果と輸送行列があればビームのエミッタンスを測定することができる[5]。そこで

- ・ユーザー運転中、定期的に取り得しているビームプロファイルモニターの全信号 (all screen capture) と輸送行列の組み合わせで求めた入射ビームのエミッタンス
- ・マシンスタディ期間中に定期パラメータ取得として行なっている、Q-scan (QD1-PM4 の組み合わせ) で求めた入射ビームのエミッタンス

の比較を行なった。結果を Fig. 4 に与える。(1) 異なる手法で求めたエミッタンスは両者でよく一致しており、(2) 測定開始時点の 2022 年 5 月初旬から 2022 年 6 月末までの期間は Table 2 と同様に y 方向のエミッタンスが x 方向の 2 倍以上大きかったものが、(3) 6 月末以降は y 方向のエミッタンスが x 方向に比べて小さくなっていることがわかった。

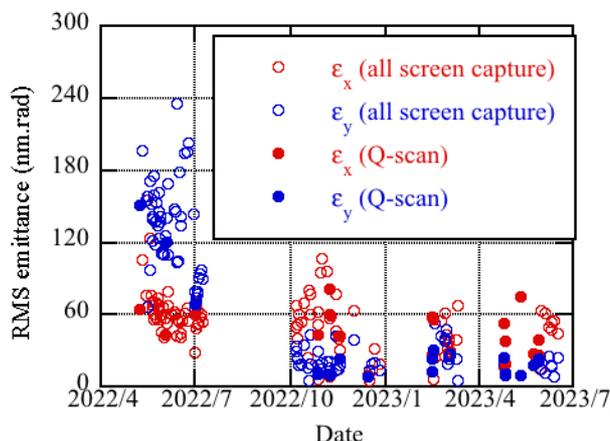


Figure 4: RMS emittance of the injected beam measured at the PF-BT.

入射器は現在、ダンピングリング、PF、PF-AR、SuperKEKB の HER と LER の 5 リングに電子ビームの入射を行なっている[6]。上述の PF 入射ビームの y 方向エミッタンスが減少したタイミングは SuperKEKB の運転が停止したタイミング (2022 年 6 月末) と一致することから、SuperKEKB の運転と PF 入射ビームの y 方向エミッタンスに相関があるのではないかと考えている。2023 年 12 月に SuperKEKB の運転が再開される予定なので、入射器側と PF 側と合同で調査を行う予定になっている。

4. ラティス関数の最適化による入射効率の改善について

PF-AR の 5 GeV 運転時にトップアップ運転を行うために、2022 年の夏季停止期間に PF-BT 上流部分で電磁石の移動を伴う工事が行われた[7]。2022 年 10 月 4 日に運転再開となったが、工事の影響により PF への入射効率が悪化していたので(Fig. 5)、10 月 6 日に PF-BT の調整を行なった。

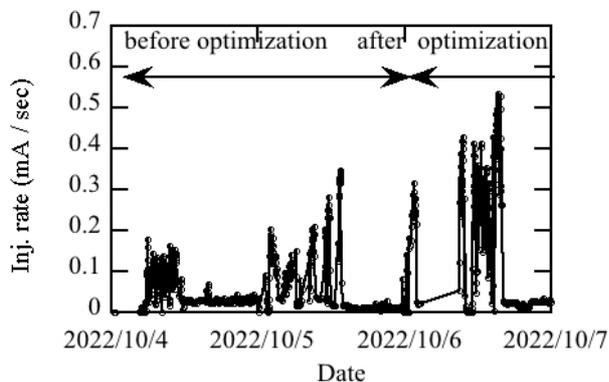


Figure 5: Injection efficiency before and after optimizing quadrupole fields (meas.).

まずビームスクリーンモニターでビームプロファイルを確認したところ、本来、x 方向分散関数がゼロであるべき QD1 の位置で、工事後に分散関数が漏れていることが

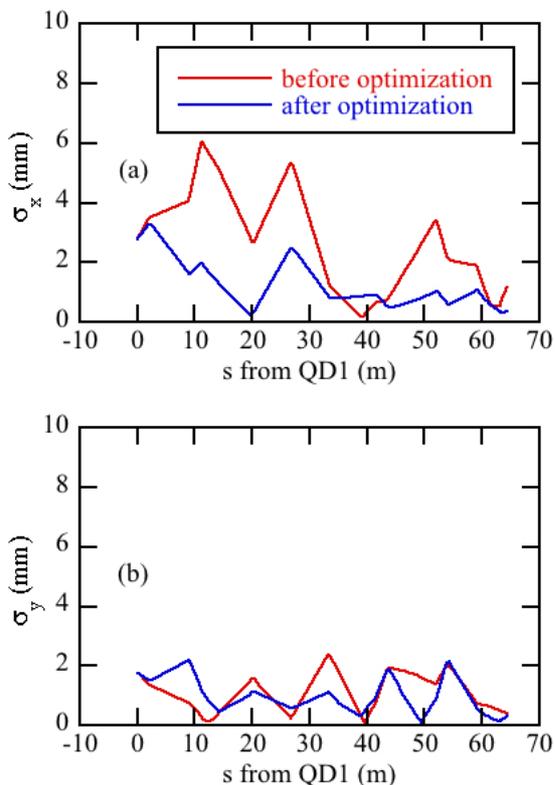


Figure 6: RMS beam size before and after optimizing quadrupole fields (SAD).

わかった。これにより PF-BT 下流に設置されているセプタム電磁石にまで x 方向分散関数の漏れが伝搬し、「入射ビームのエネギージッター」と「x 方向分散関数の漏れ」により「セプタム電磁石位置での入射ビームの位置と角度」が shot-by-shot で変わることにより、入射効率が悪化していたものと思われる。そこでまず、分散関数の漏れを無くすために四極電磁石 QC1~3 の調整を行なった。

QC1~3 の調整により x 方向分散関数の漏れが抑えられたので、次に QD1 による Q-scan を実施したところ、工事に伴い PF-BT 全体を通して x 方向にビームサイズが増大していることが確認されたため、PF-BT 全体でビームサイズが小さくなるような四極磁場係数を SAD で求め (Fig. 6)、実機に適用した。その後、ステアリングの調整を行ったところ、5 Hz 入射での入射効率が PF-BT 調整前の 0.3 mA/sec から 0.5 mA/sec まで改善した (Fig. 5)。上述のように、KtoI の修正により SAD が測定結果を再現するようになったため、効率良く PF-BT の調整ができるようになったと思う。

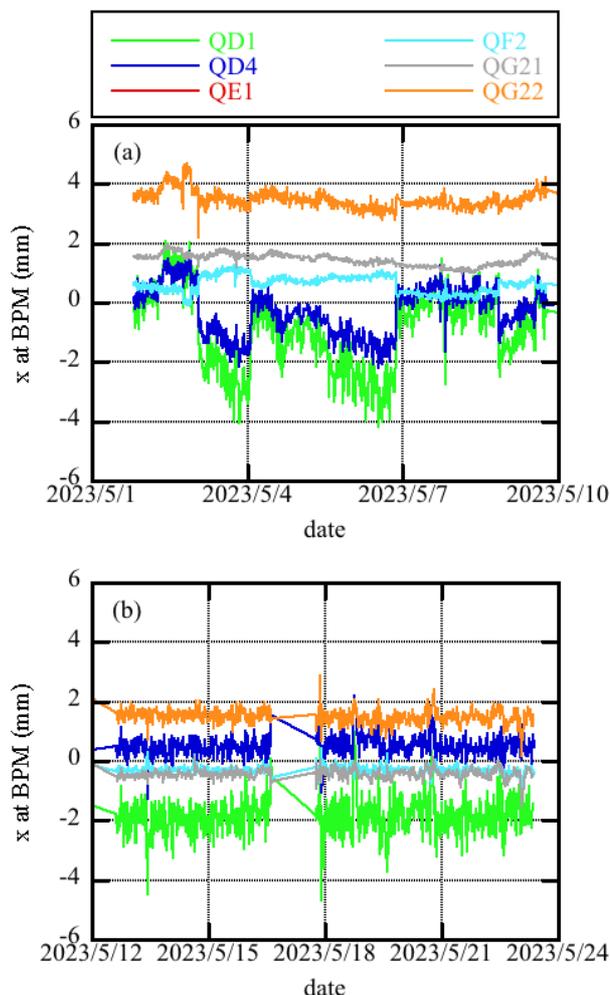


Figure 7: BPM signal in horizontal direction (a) before and (b) after introducing the orbit correction.

5. 自動軌道補正の導入による入射効率の安定化について

入射器から PF-BT への出射軌道が設計値からずれると (Fig. 7(a))、電子ビームは PF-BT 内の設計軌道からずれた位置を通過することになるので、PF への入射効率が悪化する (Fig. 8(a))。

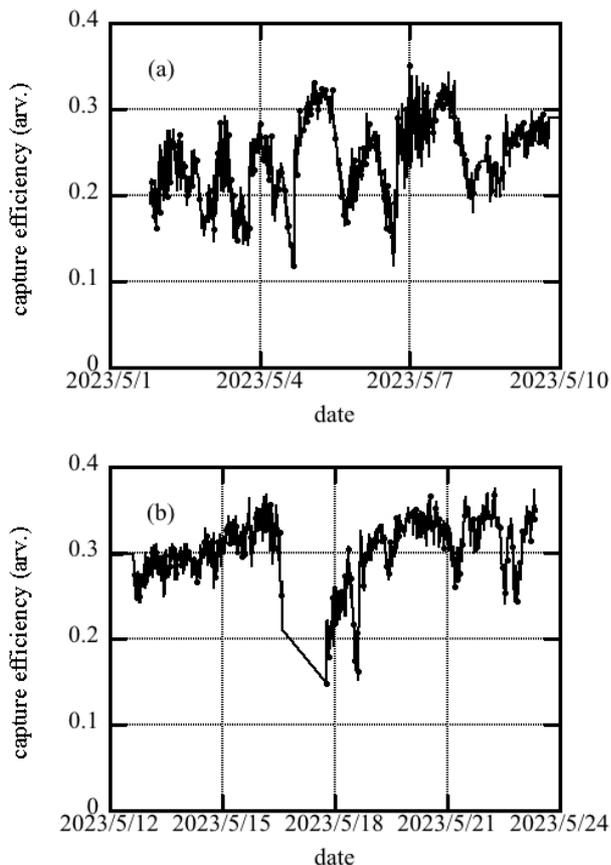


Figure 8: Capture efficiency from PF-BT to PF ring (a) before and (b) after introducing the orbit correction.

PF への安定なビーム入射を期待して、マシンスタディ期間に PF-BT における自動軌道補正の試験を行なった。Y 方向の軌道変動に比べ x 方向の軌道変動が大きいということが観測されていたため、今回は x 方向への軌道補正を行なった。まず四極磁場の中心にビームが通るようにステアリングの調整を行なった後、その軌道をリファレンス軌道として設定した。次に入射器から出射される電子ビーム 100 発分について、PF-BT の各点に設置されたビーム位置検出器 (BPM) で軌道誤差の最頻値を算出し、それがリファレンス軌道と重なるようなステアリング磁場を、SAD で算出した応答行列を用いて求めた。自動軌道補正の効果を調べるためにステアリングでわざとビーム軌道を蹴って入射効率を悪化させたところ、自動補正により軌道が徐々にリファレンス軌道に戻り入射効率が回復することを確認した (Fig. 9)。

PF-BT 自動軌道補正の効果が確認されたので、翌 5 月 12 日から、ユーザー運転で PF-BT 自動軌道補正の試験運用を行った。長期期間にわたって入射効率の変動が抑制されることが確認された (Fig. 7(b) 及び Fig.

8(b))。

今後も定期的に KtoI の更新を行いながら、入射ビームパラメータの監視と入射効率の安定化に向けた加速器調整を行う予定である。

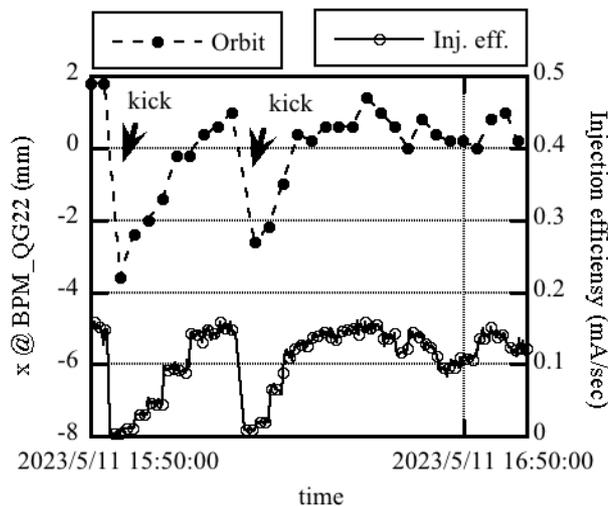


Figure 9: Checkout of the beam orbit correction at PF-BT: even when the orbit was perturbed by steering kicks, the injection efficiency was recovered by the orbit correction.

参考文献

- [1] 放射光実験施設 フォトンファクトリー - KEK IMSS PF, <https://www2.kek.jp/imss/pf/>
- [2] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [3] Y. Ohnishi, "PF-BT Version 10", September 2017, KEK internal report.
- [4] 本田洋介, 「ベータatron振動測定による診断部 Q マグネットの収束力の測定」, KEK internal report.
- [5] 安達利一, 「Twiss parameter 測定方法」, 私信.
- [6] K. Furukawa *et al.*, "Injection operation into multiple storage rings at KEK Electron/Positron 7-GeV Injector Linac", Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016), Chiba, Japan, Aug. 2016, pp. 501-504.
- [7] N. Higashi *et al.*, "Commissioning and application to user-run of simultaneous top-up operation of PF and PF-AR in 5 GeV", To be presented at 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Chiba, Japan, Aug.-Sep. 2023, WEOA.6.