

PF リングにおけるビーム入射時の放射線抑制について

SUPPRESSION OF RADIATION LEVEL CAUSED BY INJECTION LOSS AT THE KEK PHOTON FACTORY

下崎義人[#]

Yoshito Shimosaki[#]

KEK

Abstract

At the Photon Factory storage ring (PF ring), the optimization of the beam injection has been performed to improve the reproducibility of the beam injection since November 2021, where the orbit feedback at the beam transport line from the injector to the PF ring, the tune feedback at the PF ring, and the waveform feedback for the injection kicker magnets at the PF ring, and the automatic tuning of the timing and energy of the injection beam from the injector were introduced for the stable beam injection, step-by-step. As a result, we observe that the radiation level at the experimental floor due to the injection loss is suppressed to the lower level than that before optimizing the beam injection.

1. はじめに

Photon Factory (PF) は大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に設置された放射光実験施設で、2.5 GeV の PF リングと 5 GeV / 6.5 GeV の PF Advanced Ring (PF-AR) の二つの蓄積リングを有している[1]。このうち PF リングでは、蓄積電流 450 mA でトップアップ運転を行いながら放射光をユーザー実験のために供給している。入射器から 2.5 GeV まで加速・減速された電子ビームはパルス偏向電磁石 (BP581) で PF 側に出射され、PF-BT と呼ばれる輸送ラインを通じて PF リングへ入射される (Fig. 1)。

しかしビーム入射に再現性が無いことからトップアップ運転中に蓄積電流を維持できず、ビームロスによって実験フロアの一部で放射線レベルが急上昇する場合があります。これが PF リングで問題となっていた (Fig. 2)。そこで (1) 入射効率改善の調査のためには再現性のあるビーム入射が必要であること、および (2) ユーザー運転時に実験フロアの放射線レベルの突発的な上昇を抑制する必要があることから、ビーム入射の安定化に向けた系統的な調査と加速器調整を 2021 年 11 月から開始した[2]。

まず6次元位相空間における入射ビームの位置と角

度を一定とするために、PF-BT における自動軌道補正の導入[2]に加えて、入射ビームのエネルギーフィードバックの強化と入射タイミング自動調整を行なった。次に PF ring において自動チューン補正と入射キッカー波

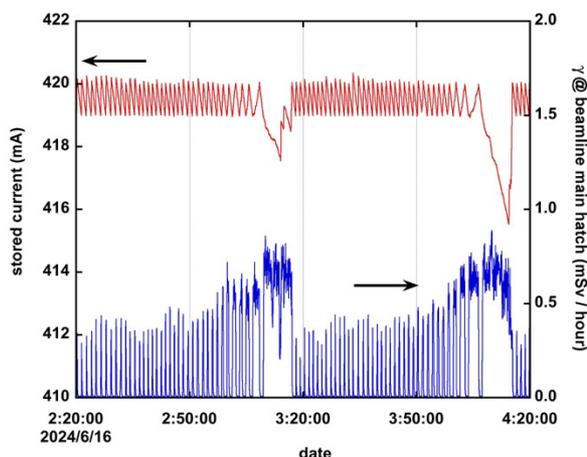


Figure 2: An example that the top-up operation was not available and the radiation level at the beamline main hatch was rising during the unstable beam injection.

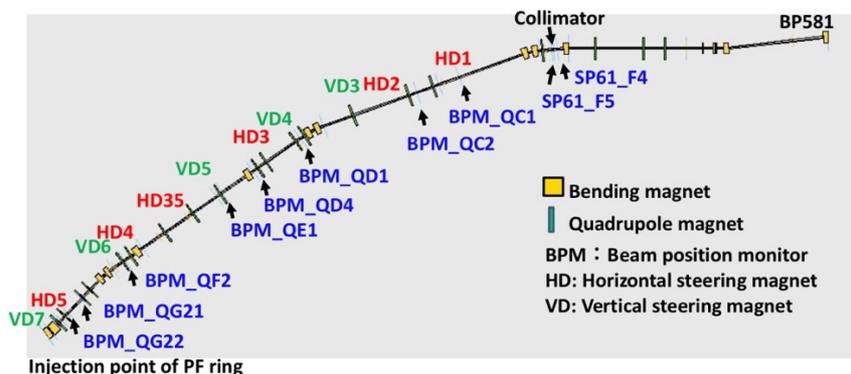


Figure 1: Schematic view of PF-BT.

[#] yoshito.shimosaki@kek.jp

形のフィードバックを導入し、蓄積リング側についてもビーム入射の安定化を行なった。

更に現在は PF-BT のコリメーター部における自動軌道補正について試験中である。入射安定化に向けた取り組みと結果について報告する。

2. 6次元位相空間における入射ビーム軌道の安定化について

2021年の調査開始時、入射ビーム用のエネルギーフィードバックは x 方向に分散関数が大きい(約 6 m)、BPM_QC1 が使用されていた(Fig. 1 参照)。そこで、入射ビーム用のエネルギーフィードバックに使用されている区間(BPM_QC1 ~ BPM_QC3)には自動軌道補正を適用せず、BPM_QD1 より下流の BPM を使って入射ビームに関する自動軌道補正を 2023 年 5 月に導入した [2]。X 方向については BPM_QD1 から BPM_QG22 までの全ての BPM を用いて自動軌道補正を行なっている。一方で y 方向については BPM_QE1 と BPM_QF2 を除く BPM_QD1, BPM_QD4, BPM_QG21, BPM_QG22 を用いて自動軌道補正を行なっている。自動軌道結果の補正例を Fig. 3 に与える。

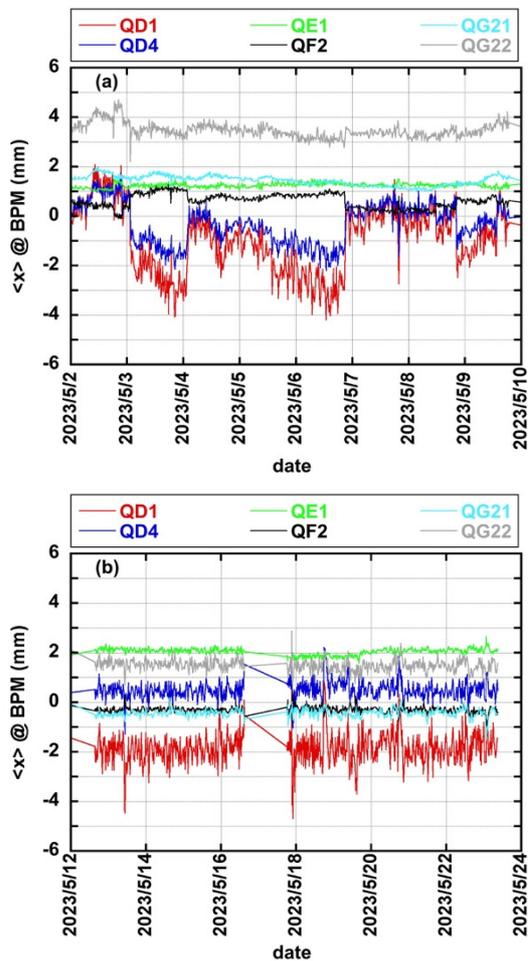


Figure 3: Injection-beam orbit averaged per 100 injections in the horizontal, (a) before and (b) after adopting the automatic orbit correction at the PF-BT.

上述のように、x 方向に分散関数の大きい、BPM_QC1 で入射ビームの位置情報からエネルギー情報に換算し、入射ビームのエネルギーフィードバックを行なっていたが、x 方向の位置誤差とエネルギー誤差が分離できず、入射ビームのエネルギーがふらつく事象が確認されていた(Fig. 4(a))。Figure 4(a)では概ね 24 時間周期で入射ビームのエネルギーが変動している様子が見える。日較差によるものと思われる。

そこで 2024 年 10 月に、エネルギーフィードバックに使用する BPM を、y 方向に分散関数の大きい(約 0.8 m)位置にある BPM_QE1 に切り替えた。Y 方向に分散関数がゼロの区間にある BPM_QD1 と BPM_QD4 (Fig. 1 参照)で自動軌道補正を行うことにより、(y, y')をリファレンス軌道に合わせ、y 方向に分散関数が有限となる BPM_QE1 の位置で自動軌道補正をオフにすることにより、入射ビームの位置誤差とエネルギー誤差を分離し、エネルギー誤差成分だけを入射器側へ送ることができる。この方式でエネルギーフィードバックの強化を行なった時の結果例を Fig. 4(b)に示す。

次に、入射タイミングの変動に伴う入射率の悪化と実験フロアでの放射線レベルの上昇が確認されていたの

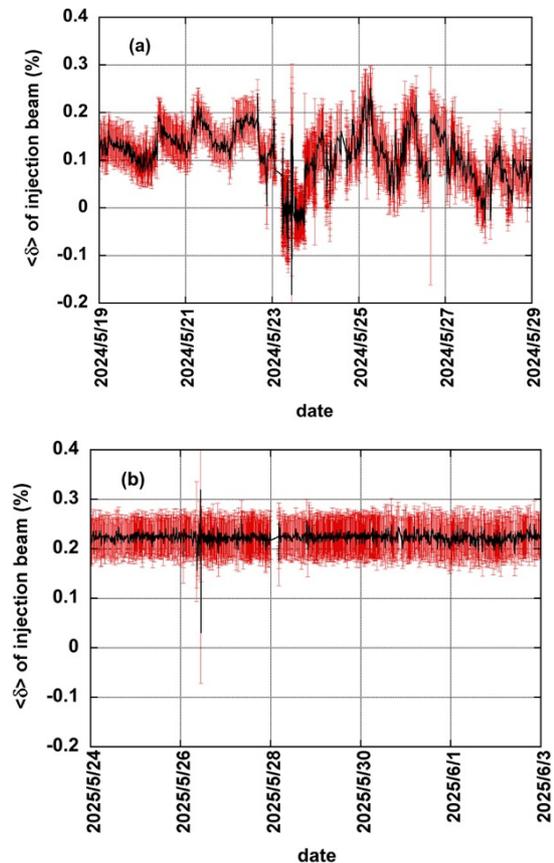


Figure 4: (black) Center of injection-beam energy averaged per 100 injections and (red) its standard deviation in the case that (a) the horizontal signal of the BPM_QC1, at which the horizontal dispersion is 6 m, was utilized for the energy feedback, and that (b) the vertical signal of the BPM_QE1, where the vertical dispersion is 0.8 m, was utilized for this purpose.

で、2024年5月に入射タイミングの自動調整を導入した。その時の蓄積電流値、入射率、入射タイミングの要求値、入射タイミングの測定値、そして実験フロアでの放射線レベルの例を Fig. 5 に示す。

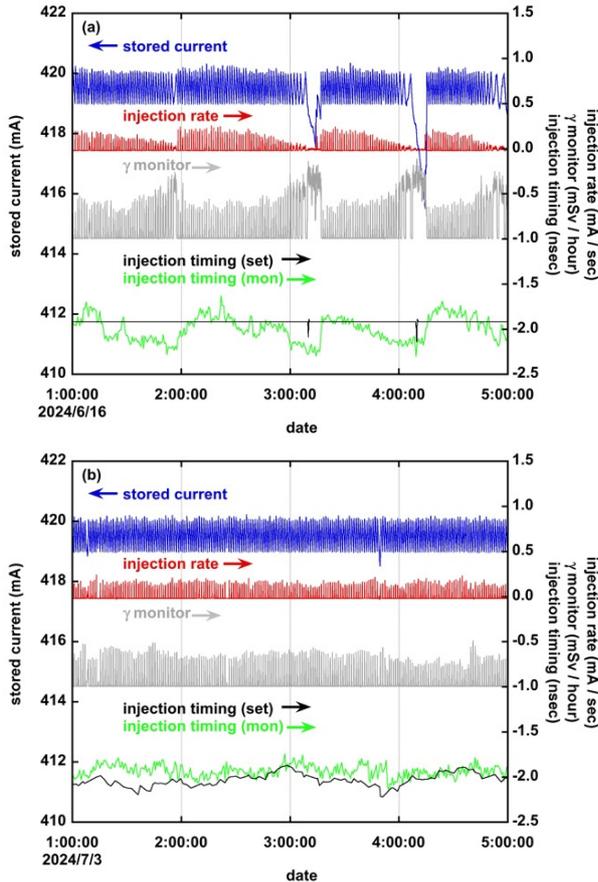


Figure 5: The stored current, the injection rate, the radiation level at the beamline main hatch, the set value of the injection timing and its evaluated value (a) before and (b) after adopting the automatic correction of the injection timing.

まず Fig. 5(a)は入射タイミングの自動調整導入前の結果で、黒線が入射器に送っている入射タイミングの設定値、緑線が入射タイミングの測定値である(実際は入射器から送られてくるビームトリガーと RF 基準信号との差分である[3])。入射タイミングの設定値が一定であるにも関わらず、入射タイミングの測定値が概ね 30 分周期で鋸波形状になっていることがわかる。そして入射タイミングの測定値が極小値を取るときに、入射率が悪化し、場合によっては入射が滞って蓄積電流(青線)が減少し、実験フロアの放射線レベル(灰色)が上昇する様子が見える。

Figure 5(a)では入射タイミングの設定値を一定にしていた。そこで入射タイミングの測定値の平均値があるリファレンスの値に近づくように、入射タイミングの設定値を自動調整するスクリプトを導入した(Fig. 5(b))。結果、入射率の悪化や実験フロアでの放射線レベルの急上昇を抑制できることを確認した。

PF-BT における自動軌道補正、入射ビームのエネルギー

ギーフィードバックの強化と入射タイミング自動調整により 6 次元位相空間で入射ビームの軌道を安定化させたことになる。

3. PF ring における入射安定化に向けた取り組み

次に蓄積リング側でビーム入射の安定化に向けた以下の取り組みを行なった。

放射光施設では放射光源として挿入光源が使用されており、挿入光源のギャップ駆動でチューンが変動することが知られている[4]。PF ring では、入射時の蓄積ビームの入射振動(=バンプ軌道の漏れ)から turn-by-turn BPM で常時チューン測定を行なっている。PF ring のユーザー運転中にチューンシフトが誘起され、入射効率が悪化することが観測されていた。またチューンが大きくずれた時にビーム不安定性が誘起されることも確認されていた。そこでチューン変動に伴う入射効率の悪化やビーム不安定性の励起を抑制するために、2023年12月に global tune feedback を導入した。結果例を Fig. 6 に示す。

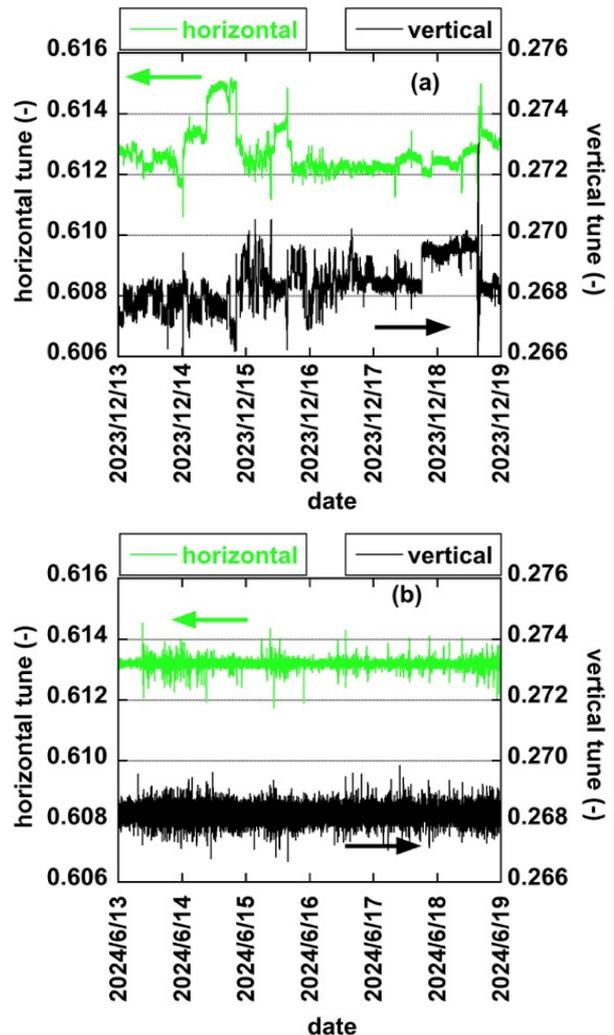


Figure 6: Fractional tune (a) before and (b) after adopting the automatic tune feedback.

PF ring では入射のために3台のキッカー電磁石(K1, K3, K4)が使用されている。ユーザー運転中、ユーザーから入射時の光源位置の変動が指摘されたため調査を行なったところ、キッカー波形のピーク電圧とピークタイミングがユーザー運転中に長期的にドリフトしており、それに伴い入射振動の振幅も長期ドリフトしていること、および入射率も入射振動のドリフトに伴い変化していることを確認した。そこでキッカー波形のピーク電圧とピークタイミングの時間平均が一定となるように、キッカー電源の電圧設定値とトリガー設定値をフィードバックするスクリプトを導入した。K1に関するキッカー波形のピーク電圧とピークタイミングのフィードバック結果例を Fig. 7 に、入射振動の振幅(=入射振動をFFTにかけた時のチューン成分の振幅)を Fig. 8 に示す。Figure 7 では紙面の都合上、K1 のみの結果を与えているが、K3 と K4 についても同様にピーク電圧とピークタイミングについてフィードバックを行なっている。蓄積ビームに関する入射振動振幅の長期ドリフトが抑制されていることがわかる。

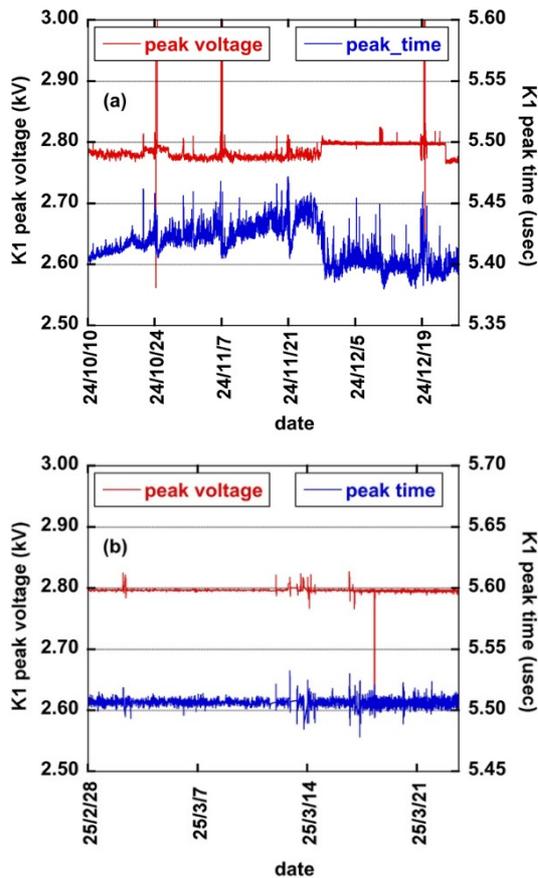


Figure 7: The peak voltage and the peak timing of K1 (a) before and (b) after adopting the automatic correction.

4. PF-BT コリメーター部の自動軌道補正試験

上では既に導入済みの「ビーム安定化に向けた取り組み」について報告した。ここでは現在試験中の PF-BT コリメーター部の自動軌道補正について進捗を報告する。

PF-BT 上流に設置されているコリメーター(Fig. 1)は、x 方向の口径が 12 mm と PF-BT において最も狭く、またこの位置での x 方向分散関数が約 2 m あることから、入射ビームに位置誤差やエネルギー誤差が発生するとコリメーターで入射ビームが削れ、PF ring でのビーム入射が不安定になることが問題となっていた。コリメーターを開くと入射効率は改善されるが、入射ビームのハロー粒子がビームロスを引き起こし、実験フロアの放射線レベルが急上昇することが実験的に確認されていた。

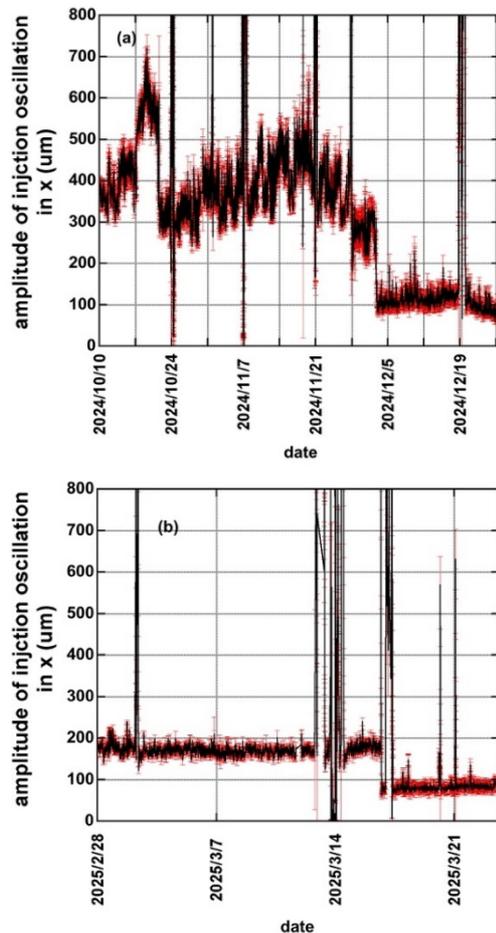


Figure 8: (black) Horizontal amplitude of injection oscillation averaged per 100 injections and (red) its standard deviation (a) before and (b) after adopting the automatic correction of the peak voltage and peak timing for K1, K3 and K4.

そこでコリメーター部に自動軌道補正を適用し、コリメーター位置でのビーム軌道を一定にすることにより、コリメーター部でのビーム透過率を一定にする試験を 2025 年 5 月に開始した。コリメーター上・下流にある 2 つの BPM(SP61_F4 と SP61_F5) の和信号で求めたコリメーター部での入射ビームの透過率の例を Fig. 9 に与える。

コリメーター部での自動軌道補正導入によりビーム透過率が全体的に向上し、また透過率の変動が抑制されているように見える。

コリメーター部での自動軌道補正導入に効果が見られることから、ビーム入射の更なる安定化に向けて、引き続き試験を行う予定である。

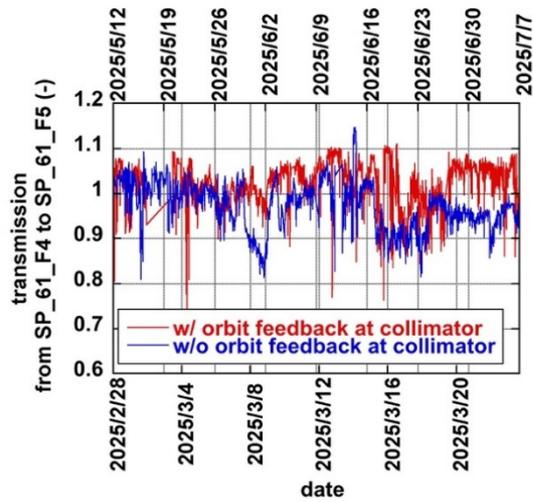


Figure 9: The transmission of the injection beam through the collimator before and after adopting the automatic orbit correction at the collimator.

5. 入射率と実験フロアの放射線レベルについて

最後に、これまでのビーム入射安定化に向けた取り組みの結果として、5 Hz 入射時の入射率に関する長期監視結果を Fig. 10 に、同じく 5 Hz 入射時の実験フロアでの放射線レベルの長期監視結果を Fig. 11 に与える。

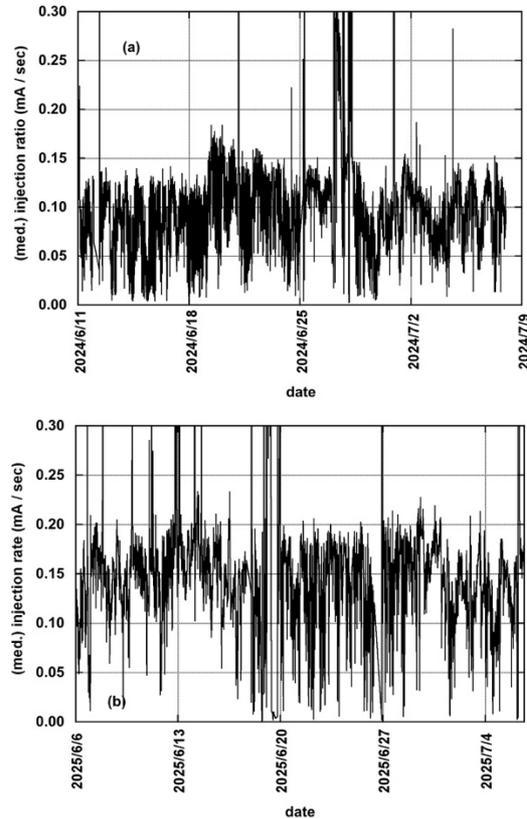


Figure 10: The median of the injection rate (a) before and (b) after optimizing the beam injection.

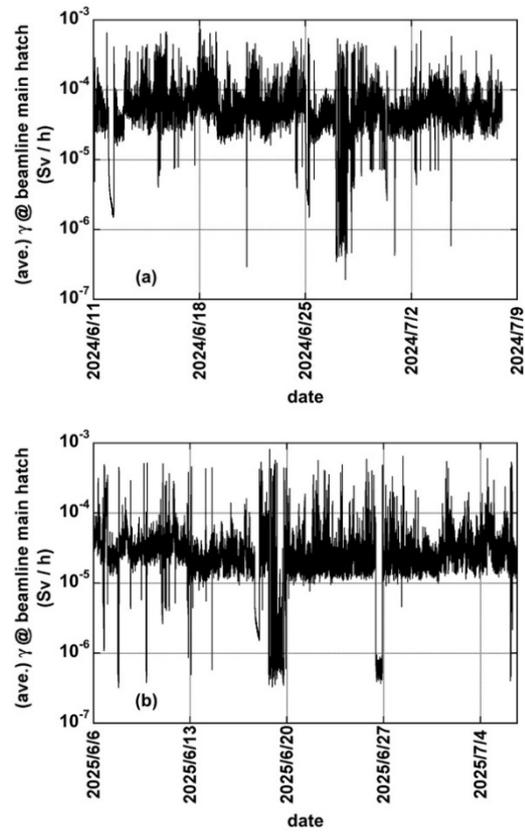


Figure 11: Time averaging of the radiation level at the beamline main hatch (a) before and (b) after optimizing the beam injection.

Figure 4 で気温変化の依存性も確認されたことから、ここでは 2024 年と 2025 年の夏期のユーザー運転期間における入射率と放射線レベルを比較している。入射率の突発的な急落が依然見られるものの全体としては入射率が改善し、実験フロアの放射線レベルも全体的に概ね半減しているとの結果を得た。

今後も引き続きビーム入射の安定化に取り組むと共に、入射率の改善に向けた調査も行う予定である。

謝辞

PF リングのビーム入射の安定化をはかるにあたり、高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設の帯名 崇氏、佐藤政則氏、宮原房史氏、第 6 研究系のメンバー、および加速器運転員の御協力を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] <https://www2.kek.jp/imss/pf/>
- [2] Y. Shimosaki, T. Obina, S. Nagahashi, N. Higashi, “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”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 - September 1, Funahashi, Japan, 2023, pp. 424-428.
- [3] T. Obina, private communication.
- [4] L. Smith, “Effect of wigglers and undulators on beam dynamics”, ESG TECH NOTE-24.