

# PF-AR 5 GeV 運転時における PF との同時トップアップ入射の コミッショニング及びユーザー運転への適用

## COMMISSIONING AND APPLICATION TO USER-RUN OF SIMULTANEOUS TOP-UP OPERATION OF PF AND PF-AR IN 5 GeV

東直 <sup>\*,A)</sup>, 満田史織 <sup>A)</sup>, 長橋進也 <sup>A)</sup>, 原田健太郎 <sup>A)</sup>, 下崎義人 <sup>A)</sup>, 野上隆史 <sup>A)</sup>,  
内山隆司 <sup>A)</sup>, 中村典雄 <sup>A)</sup>, 本田融 <sup>A)</sup>, 佐藤政則 <sup>A)</sup>, 岡安雄一 <sup>A)</sup>, 榎本嘉範 <sup>A)</sup>, 飯田直子 <sup>A)</sup>  
Nao Higashi <sup>\*,A)</sup>, Chikaori Mitsuda <sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi <sup>A)</sup>, Kentaro Harada <sup>A)</sup>, Yoshito Shimosaki <sup>A)</sup>,  
Takashi Nogami <sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama <sup>A)</sup>, Norio Nakamura <sup>A)</sup>, Tohru Honda <sup>A)</sup>, Masanori Satoh <sup>A)</sup>, Yuichi Okayasu <sup>A)</sup>,  
Yoshinori Enomoto <sup>A)</sup>, Naoko Iida <sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>KEK

### Abstract

Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) located at High Energy Accelerator Research Organization (KEK) is a 6.5 GeV light source accelerator. The use of a new beam transport line (BT) was started in 2017, and since then the simultaneous top-up operation with another light source in KEK, Photon Factory (PF: 2.5 GeV), has become possible. In 2019, in order to secure the user-time, the operation was started with the ring-energy of PF-AR lowered from the original 6.5 GeV to 5 GeV. However, there is a common DC bending magnet that affects both BTs' orbits of PF and PF-AR at the intersection of BTs, so that the simultaneous top-up operation became unavailable with the lower energy of 5 GeV of PF-AR. At the PASJ annual meeting in FY 2020, several solutions to overcome this problem were presented, and in FY 2021, we got the budget for one of the proposals and in the summer of FY 2022 (last summer), the phase 1 modification was carried out. In this meeting, we will report on the commissioning conducted in last year, and its application to the user-run.

## 1. これまでの経緯

### 1.1 PF-AR の新たな入射路

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) には Photon Factory (PF: 2.5 GeV) と Photon Factory Advanced Ring (PF-AR: 6.5 GeV) の 2 つの光源加速器がある。2017 年に同じ KEK つくばキャンパス内にある KEKB が SuperKEKB にアップグレードするのに伴い、PF-AR の輸送路 (beam transport line: BT)、ARBT が KEKB の BT から独立した。2017 年まで ARBT では 3 GeV の電子ビームを輸送し、PF-AR 入射後は 6.5 GeV まで加速したが、新しい ARBT は 6.5 GeV で設計され、これにより PF-AR においてトップアップ入射が実現されることとなった。これにより、PF と PF-AR の同時トップアップ入射が実現されることとなった (Fig. 1) [1]。

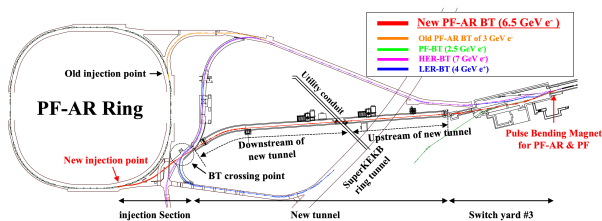


Figure 1: New beam transport line for PF-AR.

### 1.2 疑似トップアップ運転

昨今、加速器の運転コスト削減の要求が高まっており、PF-AR は 2.5 GeV の PF に比べてその傾向が相対的に強い。これに対応するため、通常の 6.5 GeV から 5 GeV にエネルギーを下げた運転実施の提案がなされた。しかし、新 ARBT は 6.5 GeV の電子ビームを輸送するように設計されており、5 GeV の電子ビームが輸送される場合、ARBT と PF の BT (PFBT) の交差点に設置されている共通 DC 偏向磁石 (BPFS) の下流から設計軌道からのずれが生じてしまう (Fig. 2)。これを解決するため、“疑似トップアップ運転”が導入された [2]。この方式では各リングに対してそれぞれ専有入射時間 (PF: 150 秒, PF-AR: 90 秒) を与え、その時間内で BPFS の励磁電流を各入射エネルギーに合わせて変更する。蓄積電流値の減少はあるがそれはわずかであり、ユーザーへの影響は

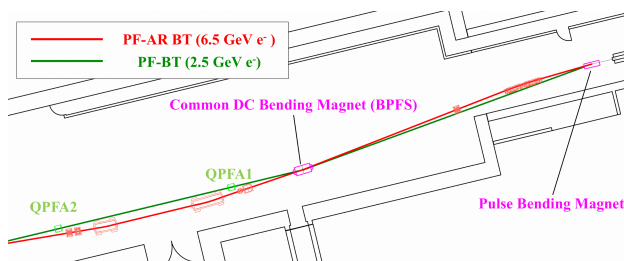


Figure 2: Layout around the intersection of PFBT and ARBT. Beams comes from the right side to the left. Orbits of PF-AR and PF are isolated at the pulse bending magnet, and after that, intersects twice. The common DC bending magnet is placed at the first intersection.

\* nao.higashi@kek.jp

ほぼ皆無である。2019年に5 GeVでのユーザーランが開始され、その後も安定した運転が続けられた。

## 2. 真トップアップ運転の需要

疑似トップアップ運転によりPFおよびPF-ARの蓄積電流値をほぼ規定値に保つことが実現できたが、様々な観点からBTの専有時間を設ける必要のない“真のトップアップ運転”の需要は依然として存在する。

1つ目は運転スケジュールの制限である。PFでは大電流のシングルバンチと通常のマルチバンチが共存する“ハイブリッド運転”を一部のユーザー運転で採用しているが、通常のマルチバンチ運転時よりもビーム寿命が短く、疑似トップアップ運転下ではPFにおいてハイブリッド運転を設定することができない。

2つ目はビームの短寿命化及び予想しないビーム損失に対する即時対応の必要性である。昨今、 $e^+$ 、 $e^-$ 照射試験ビームラインがPF-ARに建設され、試運転が開始された[3]。それと並行し、PF-ARでは低エミッタンスopticsの適用が検討されている[4]。これらにより、ビーム寿命が短くなったり、予想せぬビーム損失が発生したりする可能性があるが、真のトップアップ入射が可能であれば、例えばPF-ARで問題があっても、その影響はPFには及ぶことはない。

## 3. 真のトップアップ入射を実現するための改造

真のトップアップ運転の実現に向けた改造のための予算が2021年度に成立し、昨年(2022年度)の夏に実際の改造が行われた。この改造では、共通DC偏向電磁石“BPFS”の磁場をARBTの5 GeVと6.5 GeVの間に設計し、ARBT(5 GeV)とPFBT(2.5 GeV)のそれぞれで発生する軌道差を吸収する。今回の目的は2.5 GeVのPFBTに対して新たに5 GeV ARBTを実現することであるが、ARBTには追加の機器を設置するスペースがほと

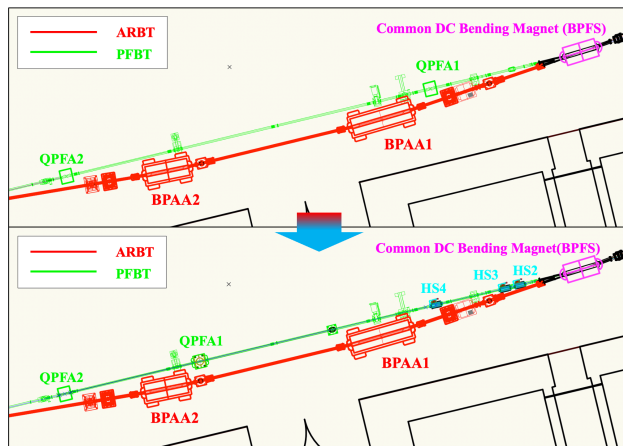


Figure 3: Modification of PFBT. Up is before the modification, and down is the after. HS2, 3, 4 are the new horizontal steering magnets to be installed onto PFBT in this modification. BPAA1, 2 are the existing bending magnets on ARBT.

んどないため、PFBTを改造することとした。PFBTで発生する軌道差は新たに設置する3台の水平ステアリングで吸収する(Fig. 3)。この際、新たに設置する水平ステアリングの場所にあった四極電磁石「QPFA1」を下流側に移設した。

この改造ではDC電磁石のみを採用することができ、コストと設置・運用の手間を抑えることが可能となっている。また、改造範囲は狭く、比較的高価なビーム位置モニター(BPM)やスクリーン・モニターの範囲を避けられているため、真空ダクトの新造も限定的となっている。

PFBTとARBTの新しいopticsをそれぞれFig. 4, 5に示す。PFBTの新たなoptics(Fig. 4)では、BPFSによる余剰な蹴り角は12.6 mradとなっている。これにより発生しうる、BPFSからの距離に比例した軌道差を抑

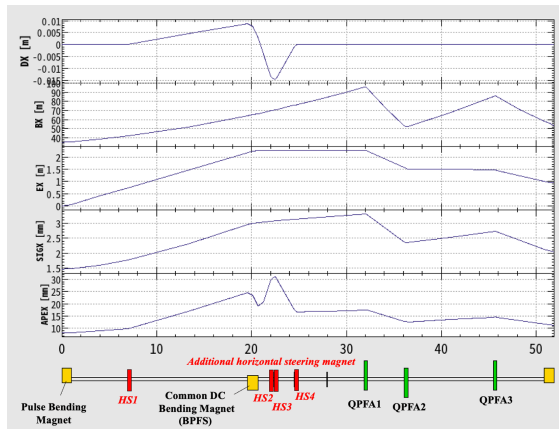


Figure 4: New optics of PFBT. QPFA1, 2, 3 are the quadrupole magnets. HS1 is the horizontal steering too, however this was already installed before this modification. From top to bottom, the deviation from the designed orbit (DX [m]), beta function (BX [m]), dispersion function (EX [m]), beam size (SIGX [mm]) and the space that the beam occupies (equals to  $|DX| + 5\sigma_x$  (APEX [mm])) are shown. All are in the horizontal direction.

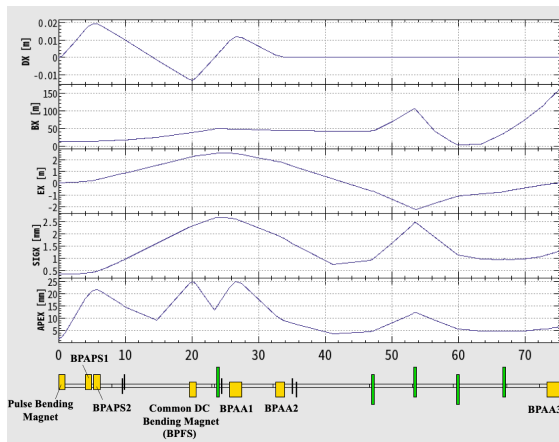


Figure 5: New optics of ARBT. BPAPS1, 2 are the bending magnets and the green thin rectangles express quadrupole magnets.

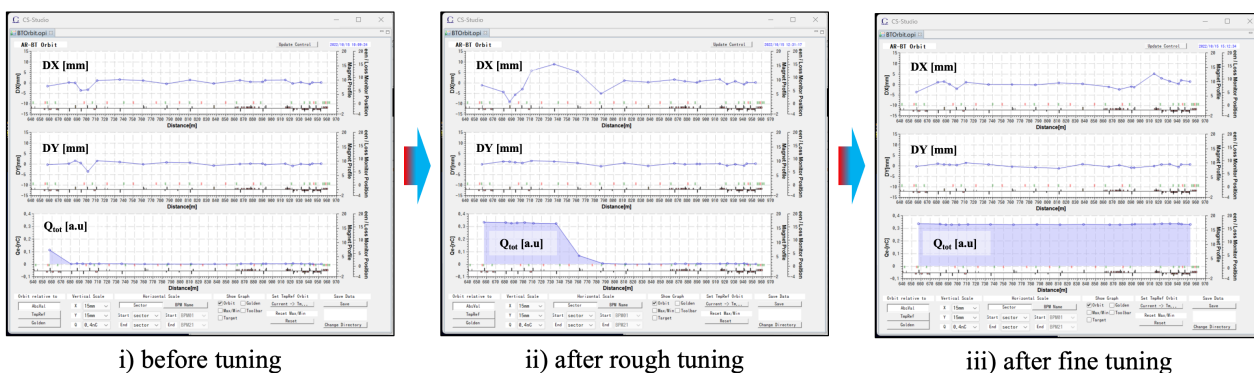


Figure 6: One example of ARBT tuning. The left is the first state before the tuning, and the center is after the rough tuning of BPAA1 and BPAA2. The right is after the fine tuning. From top to bottom, the deviation from the designed orbit in horizontal (DX [m]), the one in vertical (DY [mm]) and the total charge transported to the point [a.u.] are shown. DX and DY looks good in the left, however these were the false signals with too weak electric input due to the off-center beam.

え込むため、新規に挿入する水平ステアリング「HS2」「HS3」はBPFSの直下流に配置した。

ARBTの新たなoptics (Fig. 5)では、パルス偏向電磁石と「BPAPS1, 2」によりBPFSにより発生する余剰蹴り角を実効的に実質的に低減させる。パルス偏向電磁石は50 Hzで動作しているが、振幅はそのpulse間で変更できずARBTとPFBTの間で最適化できないため、pulseの位相(delay)を変更を変更することで実効的にARBTでのパルス偏向電磁石蹴り角を抑制する。BPFSによる元の余剰蹴り角は6.66 mradで、パルス偏向電磁石とBPAPS1, 2による抑制によって元の64.6%となる4.30 mradまで低減される。

今回製作した電磁石や真空ダクト、設置・アライメント等については今年会で報告の[5,6]を別途確認していただければ幸いである。

## 4. コミッショニングとユーザー運転への適用

### 4.1 コミッショニング

第一段階として、PFBT改造前の昨年(2022年)5月に、ARBT単独での5 GeVビームの輸送試験を実施した。これは前述したように、新たなARBT opticsはハードウェアを変更せずにテストできたためであり、5月14日、15日の2日間でおおよその電磁石設定を確立できた。

続いて昨年の10月、11月に、改造したPFBTを用いた入射試験を実施した。最も尊重されるルールは、調整ノブとして共通DC偏向磁石「BPFS」の電流値を変更しないことである。このルールに従う限り、ARBTとPFBTの調整は理想的には互いに独立なはずである。各BTには水平ステアリングもしくは偏向電磁石がいくつか存在する。しかし実際の軌道と設計上の差異を小さくするためにそれらを全てを調整ノブとして使用すると、軌道調整の収束は困難になる。理想的に、位置と角度の設定に必要なノブは2つであり、ARBTでは「BPAA1, 2」、PFBTでは「HS3, HS4」を調整ノブとして使用し

た (Fig. 3)。ARBTにおける調整過程の一例を Fig. 6 に示す。

コミッショニングの結果、ARBT・PFBTともに従来のopticsと同等の入射率が得られることを確認した。

### 4.2 ユーザー運転への適用

今年度(2023年度)の4月から開始されたユーザー運転で初めて新opticsの適用を行った。スケジュールの概要を Fig. 7 に示す。通常スケジュールと同様に当該期もPFから先に立ち上がった。PF-ARは6.5 GeVではなく5 GeVから立ち上がる予定で、裏でPF-ARが運転しないのであれば、PFBTの設定は従来opticsでも新opticsでもどちらでも問題ない。しかし後からPF-ARが5 GeVで入射を必要とする場合、PFBTの設定を新opticsに切り替える必要があり一時入射が中断してしまうため、運転当初から新opticsを適用することとした。実際には、4月25日のPF立ち上げ時は従来opticsを用い、4月26日に新opticsへの切り替えをおこなった。これには1時間40分ほどを要した。5月10日にPF-ARが立ち上がったが、前もってPFBTは新BTで通していたため、PF-ARの立ち上げに際してPFへの入射が滞ることはなかった。次に5月29日にPF-ARは6.5 GeVに切り替わった。これに対応して、PF、PF-ARとも従来BT opticsに戻した。PFではこれに30分を要した。PF-ARに関してはリングそのものの切り替えもあるためBT自体の調整時間については言及できないが、どちらも切り替えについてはトラブルもなくスムーズに実施できている。現在のところ、コミッショニング時に確立したパラメータ

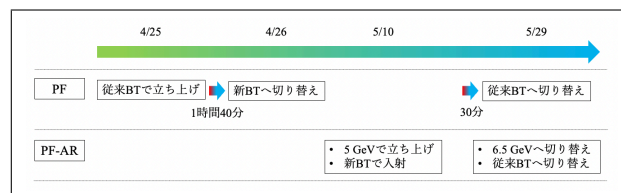


Figure 7: User-time schedule in FY2023 Spring.

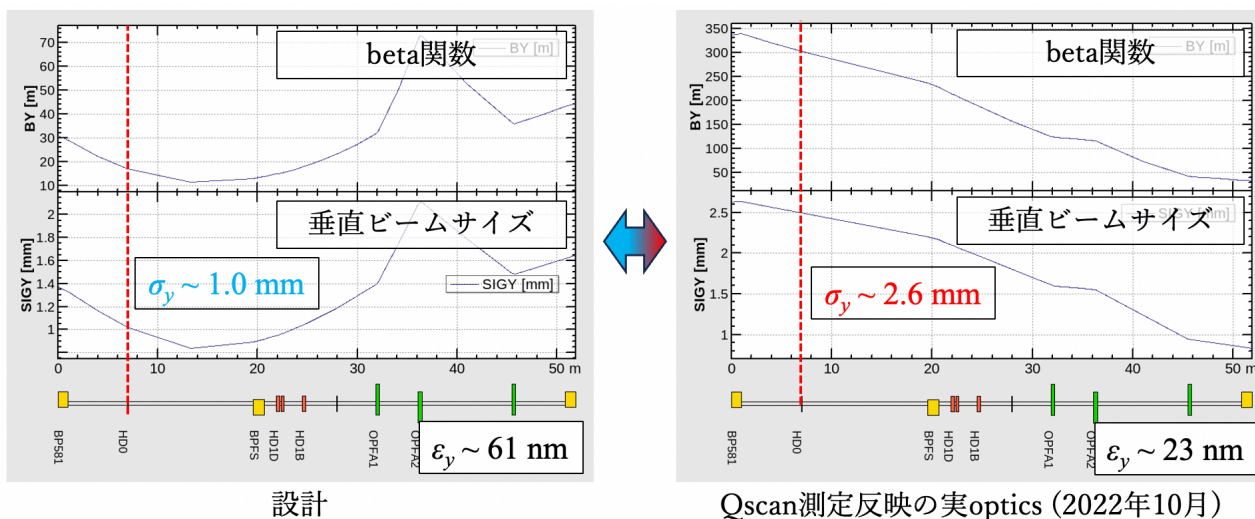


Figure 8: Design optics and measured one of PFBT in vertical direction.

を呼べば、大きな調整は必要ない状況となっている。

## 5. Phase 1.5の改造

前述したように我々は既に PF-AR 5 GeV と PF 2.5 GeV の同時トップアップ入射を実現しているが、今年 (2023 年) の夏、phase 1.5 と呼ばれる改造を追加実施した。Phase 1 では新たに3つの水平ステアリング「HS2, 3, 4」を設置した。一方、「HS1」は既設の電磁石で蹴り角が相対的に小さく、フル定格 3 A、0.7 mrad で新 PFBT の軌道を成立させており、余裕がなかった。今回、同じ仕様のステアリング電磁石を新たに4つ製作しており、HS1 を4つ目(最後)の水平ステアリング電磁石に置き換えることで、ビーム軌道の成立がより安定することが期待される (Fig. 9)。この作業では phase 1 と同様、新たなステアリング電磁石のギャップに合わせて垂直方向に狭い真空ダクトを新規に製作、設置した。

これにより、次期の運転において optics matching を行う必要がある。Figure 8 に PFBT 垂直方向の設計 optics と、Qscan 結果を反映させた optics を示す。設計では phase 1.5 の改造部にて縦方向 beamsize  $\sigma_y$  は 1.0 mm であるのに対し、2022 年 10 月に測定した optics では 2.6 mm となっている。新規設置した扁平ダクトの垂直方向口径は片側 8 mm であり、測定結果を反映すると  $3\sigma$  程度までしか確保することができない。本改造はこれまで  $5\sigma$  の確保を前提としており、これを実現するためには、入射器側の4極電磁石から調整し、PFBT 入り口の

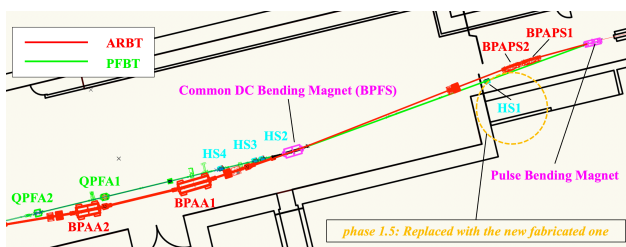


Figure 9: Phase 1.5 modification.

optics matching を実施する必要がある。そのため、今年 (2023 年) 11 月開始の次期運転では、PF 運転前から入射器 (linac) と協調して調整する予定である。

PFBT の調整については本年会にて報告の [7] を別途確認していただければ幸いである。

## 謝辞

KEK 物質構造科学研究所 (IMSS) および KEK 加速器研究施設第 6 研究系の皆様には、改造予算やコミッション時間調整等に多大なご協力を賜りましたこと、改めて感謝申し上げます。また、入射器第 3 スイッチヤードの改造と関連する情報の共有にご協力いただきました加速器研究施設第 5 研究系の皆様にも感謝の意を表したく存じます。

## 参考文献

- [1] 東直 他, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッションング”, PASJ2017, THOL10.
- [2] 長橋進也 他, “PF-AR における 5 GeV 運転の状況”, PASJ2020, THPP63.
- [3] 本田融 他, “PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画”, PASJ2021, MOP049.
- [4] 東直 他, “PF-AR の低エミッタンス化”, PASJ2017, TUP013.
- [5] 満田史織 他, “PF-AR における 5GeV トップアップ運転実現のための輸送路の改造”, PASJ2023, TUP15.
- [6] 長橋進也 他, “PF-AR における 5GeV トップアップ運転実現のための電磁石設置”, PASJ2023, TUP43.
- [7] 下崎義人 他, “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”, PASJ2023, TUP47.