

PF-AR における 5 GeV トップアップ運転実現の検討 (2) REALIZATION OF TOP-UP OPERATION OF PF-AR WITH 5 GeV (2)

東直*^{A)}, 満田 史織^{A)}, 長橋 進也^{A)}, 原田 健太郎^{A)}, 野上 隆史^{A)}

内山 隆司^{A)}, 中村 典雄^{A)}, 本田 融^{A)}, 佐藤 政則^{A)}, 岡安 雄一^{A)}, 榎本 嘉範^{A)}

Nao Higashi*^{A)}, Chikaori Mitsuda^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Takashi Nogami^{A)}

Takashi Uchiyama^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Tohru Honda^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Yuichi Okayasu^{A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

High Energy Accelerator Research Organization (KEK) has two light sources, Photon Factory (PF) with 2.5 GeV and Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) with 6.5 GeV. The beam transport line (BT) that directly supplies electrons from Linac to PF-AR was constructed in 2017, and since then the simultaneous top-up operation of PF and PF-AR has been carried out. In 2019, PF-AR has started the 5 GeV operation in order to secure the operation time under the reduction of the operation budget. However, there is a common DC bending magnet that kicks both electron beam of PF and PF-AR at the intersection of BTs. Due to this, it becomes impossible to realize both design orbits simultaneously when the energy of PF-AR is reduced to 5 GeV. In the annual meeting in 2020, we presented some proposals to solve this problem [1]. Based on these, one was budgeted last year (FY2021), and the phase 1 modification of PFBT was conducted in this summer (FY2022). In this presentation, we will explain the details of the phase 1 modification and the phase 1.5 and phase 2 proposal that may be realized in the near future.

1. これまでの経緯

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) と Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) の 2 つの光源加速器があり, 周回エネルギーはそれぞれ 2.5 GeV と 6.5 GeV となっている. 2017 年, 同じ KEK つくばキャンパス内にある KEKB が SuperKEKB へと upgrade されるのに伴い, それまで KEKB のビーム輸送路 (BT) に寄生していた PF-AR の BT が独立し, 周回エネルギーと同じ 6.5 GeV で直接入射することが可能となった (Fig. 1) [2]. これによって, PF と PF-AR の同時 top-up 運転が可能となった.

一方, 運営費交付金削減の影響は年々大きくなり, 周回エネルギーが相対的に高い PF-AR ではその運転時間の確保がより大きな課題となっていた. これを解決するため, 周回エネルギーを従来の 6.5 GeV から一部運転を 5 GeV に下げて運転することが提案され, 2019 年度よりこれが実施されることとなった.

周回エネルギーを下げることによってビームラインに供給される X 線の波長域と強度について多少の変更が生じた. これについては 6.5 GeV と 5 GeV の運転時間をおおよそ半分ずつにするということの影響を最小限にし, 利用者側との合意が取られた.

しかしもう一つ, 2017 年より実現されてきた PF と PF-AR の同時 top-up 運転について, PF-AR が 5 GeV 運転を採用する際には成立しないと言う課題が浮上した. 2017 年から運用が開始された ARBT は 6.5 GeV のエネルギーを元に設計されており, PFBT と ARBT の交差点には共通 DC 偏向電磁石が存在する (Fig. 2). 同じ磁場強度を 2.5 GeV と 6.5 GeV, それぞれのエネルギーを持った電子ビームが通過することで, それぞれの設計角度で蹴られる, という運用のため, PF-AR のエネルギー

を 6.5 GeV から 5 GeV に変更した場合, この共通 DC 偏向電磁石下流より設計軌道 (ダクト中心) からの水平方向の軌道差 dx が発生することとなる. これを回避し, かつなるべく各放射光リングの蓄積電流値の減少を抑制するため, 疑似 top-up 運転というものが採用された [3]. これは PF と PF-AR それぞれに 150 秒と 90 秒の入射時間を与え, PF-AR 入射時には共通 DC 偏向電磁石と最上流の Pulsed 偏向電磁石の励磁電流値を 5 GeV に合わせて運用することで, 擬似的に同時 top-up 運転を実現するというものである. 2019 年にこの疑似 top-up 運転が開始され, 現在もなお有効な手段として機能している.

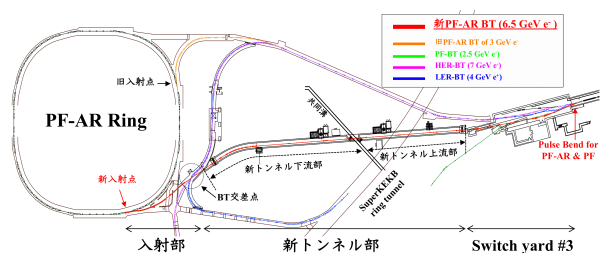


Figure 1: A new direct beam transport line for PF-AR. The operation was started in 2017.

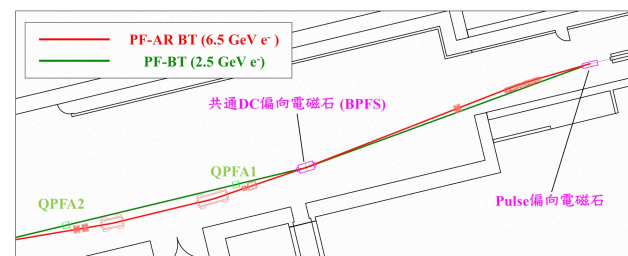


Figure 2: There is a common DC bending magnet “BPF5” at the intersection of PFBT and ARBT.

* nao.higashi@kek.jp

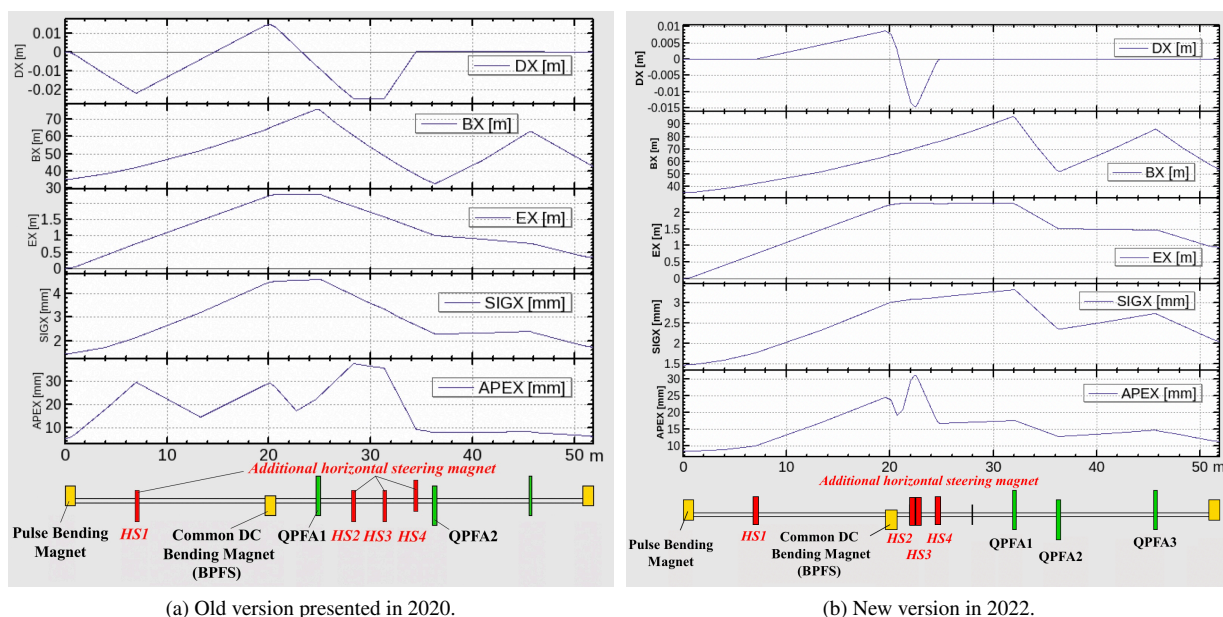


Figure 3: 4HS proposal's optics.

2. 同時 TOP-UP 運転実現のための検討

疑似 top-up 運転の実現により, PF, PF-AR の蓄積電流値は規定の値をほぼ維持することが可能となった. しかし以下のような観点から, 引き続き真の top-up 運転が望まれている.

- 運転スケジュールの縛り

PF の一部運転期間中に実施される, 高いバンチ電荷を持った single bunch と通常の multi bunch を共存させた Hybrid 運転においてはビーム寿命の短さから真の top-up 運転が望ましく, 現在 PF が Hybrid 運転する際には同時 top-up 運転が可能である 6.5 GeV での運転が PF-AR で実施されていないとではない.

- PF-AR テストビームライン [4] による影響

現在試験運用中の素粒子・原子核実験用検出器開発のための照射テストビームラインは, PF-AR の電子バンチ周回軌道近傍にワイヤ標的を設置することで目的の照射用ビームを生成する. PF-AR そのもののユーザー運転を阻害しないような設計にはなるが, 万が一の beam instability の発生や beam loss, ビーム寿命急落が発生するような場合には真の Top-up 運転が可能であると, 柔軟な対応ができる.

- low emittance optics による低寿命化対策

PF-AR では optics の再設計による低エミッタンス化を目指す study が進んでいる. Low emittance optics が実現した場合, ビーム寿命が短くなる可能性あり, その場合には 5 GeV においても真の top-up 運転が望まれる.

真の top-up 運転を実現するために, まずは ARBT の optics 変更のみで共通 DC 偏向電磁石下流から始まる軌

道差を吸収できるか検討したが不可能と判明した. 次に, 共通 DC 偏向電磁石の磁場強度を通常の PFBT 2.5 GeV, ARBT 6.5 GeV の設定からやや弱めて, ARBT 5 GeV を優先的に成立させ, PFBT 側で発生する軌道差を optics で吸収できるか検討した. しかしこれも不可能であると判明したため, optics の変更だけでなく, ハードウェアの改造, 具体的には DC ステアリング電磁石や pulse 電磁石を PFBT に追加するような検討を行った. 2020 年の報告 [1] では PFBT に 3 つないしは 4 つのステアリング電磁石を追加することで余剰軌道を吸収する 4HS 案と, 余剰軌道を発生させる共通 DC 偏向電磁石, BPFS を pulse 偏向電磁石で挟むサンドイッチ案の 2 つを提案した.

3. 4HS 案の採択と再検討

2021 年度, 先の 2 つの提案のうち, コスト等を検討した結果 4HS 案が実行に移されることとなった. Fig. 3 に 4HS 案の optics を示す. 2020 年報告の提案では共通 DC 偏向電磁石 “BPFS” の下流に既設の 4 極電磁石, QPFA1, 2 の間に 3 台のステアリング電磁石を設置することを検討していた (Fig. 3a). 最上流の “HS1” は既に PFBT に設置されており, 2019 年に実施したビームを使った測定では最大で 0.7 mrad ほどビームを蹴ることができていることを確認している. “HS2, 3, 4” は新たに設置する必要がある水平ステアリング電磁石で, 実際のハードウェアの制約は無視して, 2 つの四極電磁石の間をおおよそ等間隔にシミュレーション上で配置し, 計算した.

今回改めて 4HS 案を検討した結果, 当該部の真空機器等の移設や搬入経路の確保, これまで片側 3σ として計算していたビームが占める空間を 5σ に広げたことなどを反映させ, BPFS 下流の QPFA1 を下流に移設し, それによってできた空間に 3 台のステアリング電磁石を設置する案とした (Fig. 3b).

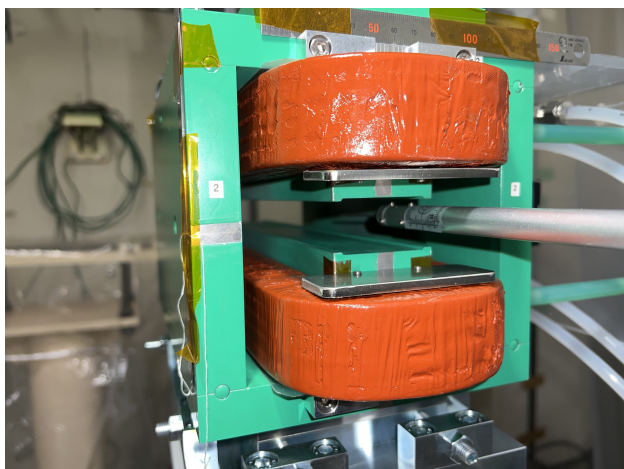


Figure 4: Magnetic field measurement of a horizontal steering magnet, newly manufactured this time.

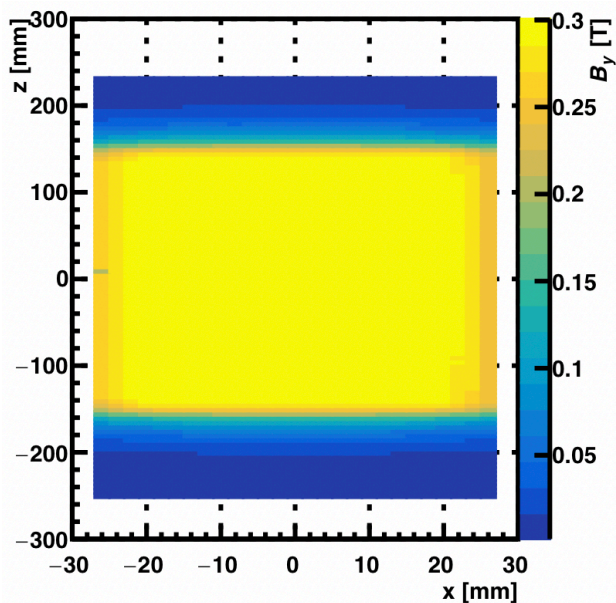


Figure 5: One example of the mapping result of the magnetic field measurement with a Hall probe.

4. 2022年夏の実施内容 (phase1)

PF-AR 5 GeV 真 top-up 化改造は現在, phase 1, 1.5, 2 の3段階で実施する予定となっており, 今夏(2022年夏)は phase 1 の改造を実施した.

水平ステアリング電磁石は phase 1 では新たに3台を新規に設置する必要があった(HD2, 3, 4). HD1については既設ではあるが, 蹴り角に余裕がないため, phase 1.5では“HD2, 3, 4”と同等の蹴り角を持つものと置き換えを予定している. 従って今回は同じ蹴り角を持つ水平ステアリング電磁石を4台製作した. PFBTの限られたスペースで十分な蹴り角を実現するために, 比較的短い gap 長を採用した(Fig. 4). 製作した電磁石磁場測定結果の1例を Fig. 5 に示す. また, この短い gap 長に合わせ, かつ,

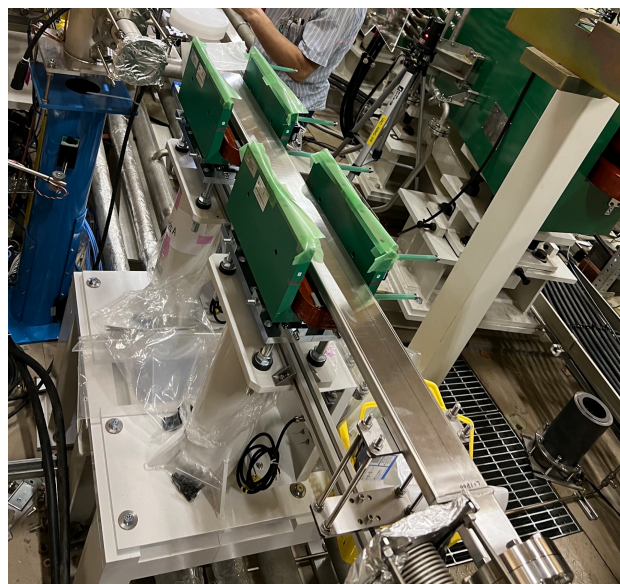


Figure 6: Installation of a newly manufactured plane duct into the new horizontal steering magnet.

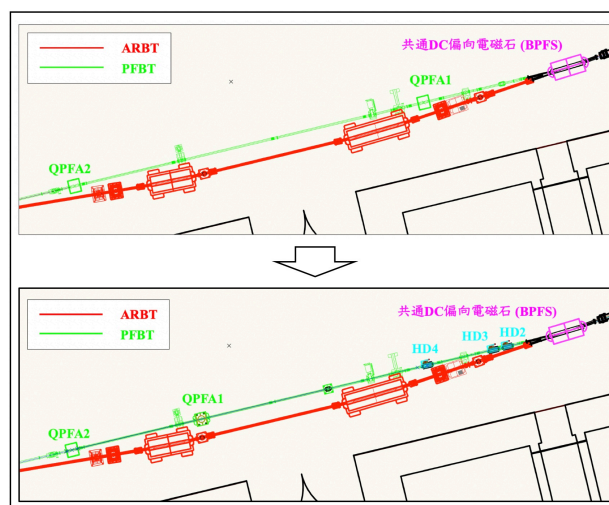


Figure 7: A change in PFBT. QPFA1 was moved downstream, and three horizontal steering magnet were installed.

発生する水平方向の軌道差を十分に受けきれられるような扁平ダクトを製作, インストールした(Fig. 6).

元の案では QPFA1, 2, 2つの4極電磁石の間に等間隔に3つの水平ステアリング電磁石を配置していたが, 当該部の前には搬入口があり, ここに電磁石などの重量物を設置するのは撤去, 再設置, アライメントの手間が増えることから望ましくない. そのため, QPFA1 を下流に移設し, HD2, 3, 4も ARBT に隠れるよう配置, 搬入口前は真空ダクトのみになるように配置した(Fig. 7).

Phase 1 の改造については次年度の年会で改めて詳しく報告する予定である.

5. COMMISSIONING PROCEDURE

2022 年秋から、当該改造部を使用したコミッショニングを実施予定である。ARBT, PFBT 共通の電磁石は共通 DC 偏向電磁石 “BPFS” のみであるため、まずは ARBT の輸送を確立し、BPFS の磁場強度を決定 (Fig. 8), その後 PFBT の軌道を決定する。PFBT と ARBT は BT 最上流のパルス偏向電磁石で分離するが、振幅はそのままに、パルス毎の位相 (delay) を制御することによって、各 BT への蹴り角を実効的に調整する (Fig. 9)。

6. 今後の計画

今夏から今秋にかけて、phase 1 を実施しているところであるが、今後 phase 1.5, 2 と、さらなるビーム運転の安定化を目指した改造を実施する予定である (Fig. 9)。

phase 1.5

Phase 1 では新規にインストールする水平ステアリングが 3 台であったが、既設の水平ステアリング電磁石 “HD1” は蹴り角が相対的に弱い。今回新たに製作した水平ステアリング電磁石の 4 台目を既設のものに入れ替えることで、ビーム運転の安定化が期待できる。新規水平ステアリング電磁石をインストールする際には、phase 1 の時と同様にステアリング電磁石のギャップに合わせた扁平ダクトを新規に製作、インストールする必要がある。Phase 1.5 は今年度中の実施を予定としている。

phase 2

Phase 1, 1.5 の optics は ARBT, PFBT 共にダクト中心からずれた軌道を成立させる必要があり、beam tuning には複雑さが残されている。これをより簡便にするためには、痛み分けをするのではなく、PFBT か ARBT どちらかの軌道を従来通りのダクト中心とし、調整する BT を残りのどちらかとする、という方式が考えられる。Phase 2 では ARBT を 5 GeV として設定することでダクト中心を輸送させ、PFBT 側で余剰軌道を吸収する。この場合、共通 DC 偏向電磁石 “BPFS” の設定を ARBT 5 GeV に合わせるため、PFBT から見ると、BPFS で蹴られる量が phase 1, 1.5 に比べてさらに減り、下流で発生する軌道差がより大きくなる。これを吸収するために、phase 1.5 で置き換え予定の HD1 で事前に大きく蹴る必要がある (Fig. 10)。これに合わせ、現在 BPFS 前後に置かれた合流ダクトを、上流側に拡張する必要がある。現在、BPFS の磁場平坦性を考慮した詳細設計を実施しているところである。

参考文献

- [1] 東直 他, “PF-AR 5 GeV におけるトップアップ運転実現の検討”, PASJ2020, WEPP62.
- [2] 東直 他, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッショニング”, PASJ17, THOL10.
- [3] 長橋進也 他, “PF-AR における 5 GeV 運転の状況”, PASJ2020, THPP63.
- [4] 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.

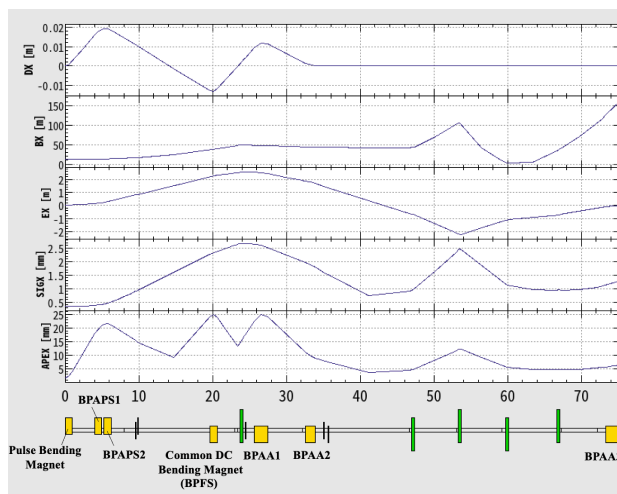


Figure 8: A new optics of ARBT in 5 GeV.

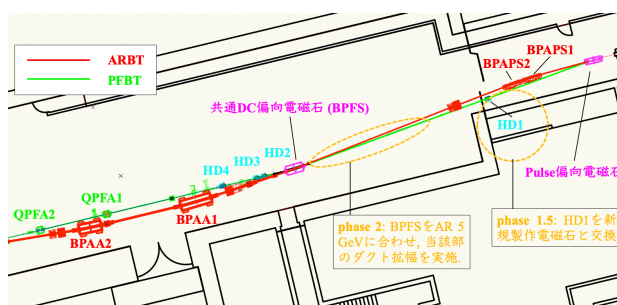


Figure 9: Magnets that will be used in the beam commissioning and the modification range in phase 1.5 and 2. In phase 2, the extension range of the merging duct may be changed according to the detailed design in the future.

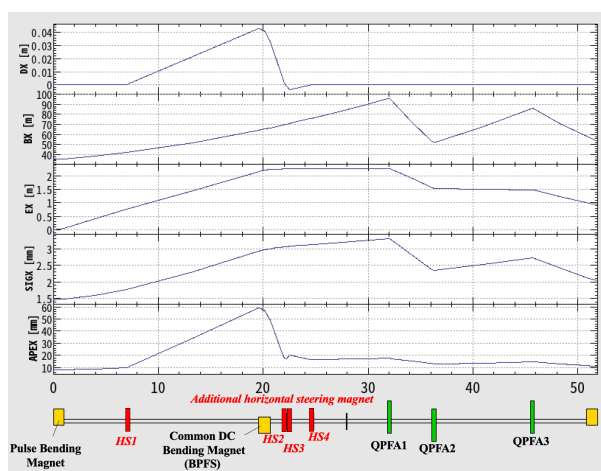


Figure 10: Phase 2 optics of PFBT. It has a large kick at HD1 in advance in order to suppress the larger dx that occurs downstream of BPFS. This makes dx larger upstream of BPFS, then the merging duct needs to be extended upstream of BPFS.