

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

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)}、帯名崇 ^{A)}、中村典雄 ^{A)}

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

Takashi Nogami^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Norio Nakamura^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

KEK's 6.5 GeV light source, PF-AR uses a direct beam transport line (BT) newly constructed in 2017, and has achieved top-up operation with PF and Super-KEKB. However, due to the reduction of the budget for the operation, PF-AR started the 5.0 GeV operation from 2019. Then the simultaneous top-up operation of PF-AR and PF is no longer available because the direct BT of PF-AR (ARBT) is designed just for the energy of 6.5 GeV, and there is a common DC bending magnet on both ARBT and PFBT. Thus, in the current user-operation, the pseudo-top-up operation of PF-AR and PF is realized by finely switching the magnetic field strength of the common bending magnet. Now we are planning the modification of BTs to realize the true-top-up operation instead of the current pseudo-top-up operation. In this proceedings, we will compare some options, and explain the each characteristic.

1. PF-AR と入射路

PF-AR (フォトン・ファクトリー・アドバンストリング) はシングルバンチ運転に特化した硬X線領域の放射光施設である。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の入射器 (LINAC) は PF-ring (2.5 GeV), PF-AR (6.5 GeV), KEKB (2016 年からは SuperKEKB) の high energy ring (HER: 7.0 GeV), low energy ring (LER: 4.0 GeV), 合計 4 つのリングに電子もしくは陽電子を入射している。2016 年まで、PF-AR の入射路 (BT) は KEKB の HER-BT と一部を共有しており、3.0 GeV の電子を入射し 6.5 GeV まで加速してユーザー運転を行っていた。SuperKEKB ではタウシェック寿命が 10 分程度と短く、高ルミノシティを実現するためには 50 Hz の連続入射が必要となった [1]。そのため、PF-AR 専用の BT が建設され、2017 年から BT の利用を開始した。この新しい BT は 6.5 GeV 入射用に設計され、新 BT を使用した PF-AR のコミッションングは 2017 年 2 月から開始され、4 月からユーザー運転の提供が開始された (Fig. 1)。これにより、4 リング、同時入射が可能となった [2]。新しい ARBT は PFBT とパルス偏向電磁石で別れ、その後 2 度交差する。一度目の交差点には DC 偏向電磁石があり、同じ磁場強度で 6.5 GeV と 2.5 GeV の momentum を持ったそれぞれの電子バンチがそれぞれ決まった角度で蹴り出される (Fig. 2)。

2. PF-AR 5 GEV 運転

KEK における放射光施設の運転も、運営費交付金削減の影響を受け、様々な面で経費の見直しを余儀なくされている。2009 年度には年間 5000 時間だったものが 2016 年度には半分以下となり、ユーザー需要に満足に答えられなくなった。PF-AR は PF に比べて高い ring-energy であり、運転コストは相対的に大きい。そこで ring-energy を 6.5 GeV から 5.0 GeV に下げる案が浮上した。power で単純計算すれば、およそ 4 割の電気代削減となり、この分運転経費に充当することができる。これによる X

線-flux 低減の影響はなんとかクリアできるとの測定器側からの回答があり、2019 年度より本格利用開始となった。ただし、ARBT は 6.5 GeV で設計されているため、PF との同時 Top-up については実現できなくなる。実際の運転では PF と PF-AR それぞれに 150 秒と 90 秒の入射時間を与え、その配分時間内においてそれぞれの Top-Up 運転が継続される。PF-AR 入射時には共通 DC 偏向電磁石と最上流のパルス偏向電磁石の電流値を 5.0 GeV に合わせることで対応している (Fig. 2) [3]。配分時間は、蓄積電流値の減少許容量に到達するまでの時間と、共通 DC 偏向電磁石の切り替えに要する時間 (15 - 20 秒) が考慮されている。我々はこれを擬似 top-up 運転と呼んでいる。

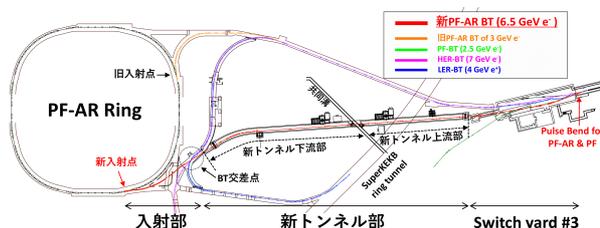


Figure 1: The Layout of Each Transport Beam Line.

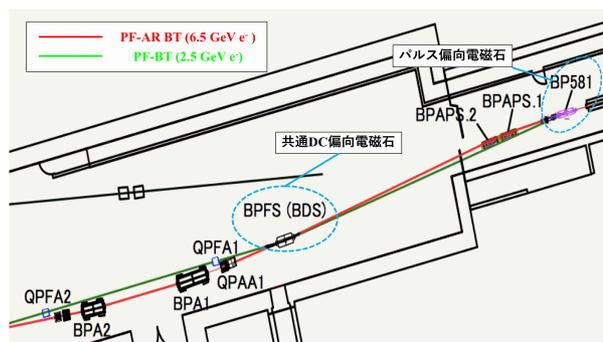


Figure 2: The Geometry of ARBT and PFBT.

* nao.higashi@kek.jp

3. PF-AR 5 GEV 運転におけるトップアップの需要

2019 年度からはおよそ半分ずつ、6.5 GeV と 5.0 GeV の運転が実施されている。6.5 GeV 運転は以前同様 PF との同時 top-up 運転が実施されているが、5.0 GeV 運転においては先程述べたように疑似 top-up 運転が採用されており、例えば PF が 420 mA に対して 419.5 mA、PF-AR が 55 mA に対して 54.4 mA と、蓄積電流値の減少は可能な限り抑えられている [3]。それでもなお、5.0 GeV 運転においても PF との同時 top-up 運転への要求は高い。

3.1 PF-AR, PF の運転スケジュールの制約

PF における大電荷のシングルバンチと低電荷のマルチバンチを共存させた Hybrid 運転においては、beam instability が比較的大きいため連続入射が望ましい。PF における Hybrid 運転でのビーム寿命は 5.4 hour となっており、通常の multi-bunch operation 時の 23 hour と比べて非常に短い [4]。現状では、PF が Hybrid 運転する際、PF-AR は同時 Top-Up 運転が可能な 6.5 GeV 運転のみが可能、というスケジュール的制約となっている。

3.2 PF-AR テストビームラインの新設 [5]

今年 2020 年、KEK において、PF-AR の電子ビームを利用した、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の建設が開始された。これは PF-AR の電子バンチ周回軌道近傍にワイヤ標的を設置し、制動放射による γ 線を converter に入射させて電子・陽電子対を生成する方式を採用する。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、beam instability の発生や beam loss, life 急落が発生するような場合には、それを補償することができる Top-up 入射は重要な改善策となる。

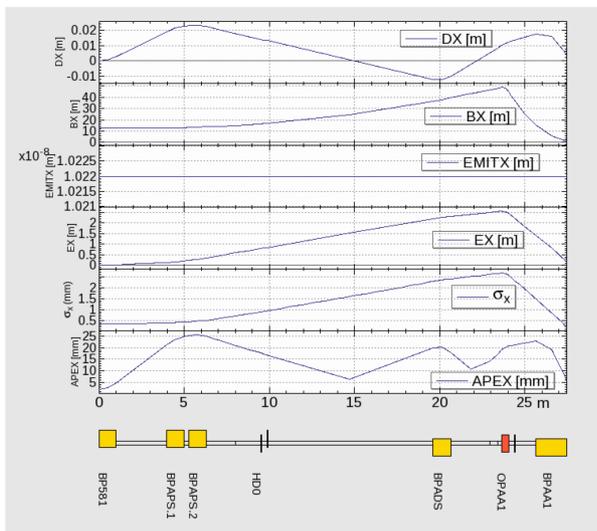


Figure 3: The Disturbance of The Beam Orbit in ARBT can be Suppressed in its Physical Aperture by Reducing the Magnetic Field by about 7 % of the Common Bending Magnet.

4. PF-AR 5 GEV におけるトップアップ運転のための改造

今回、PF-AR 5 GeV 運転における PF との同時トップアップ運転が可能になるような検討を実施した。現在の計画段階では、複数の予算規模に応じた素案を提案・検討し、それぞれの案の成立性・妥当性の議論を進め、最終的に素案の絞り込みを行っている。

4.1 Optics のみでの対応

まずはハードウェアには何も手を入れずに、BT の電磁石磁場強度のみを変更することで、6.5 GeV から 5.0 GeV に変更したことで発生する軌道差を physical aperture 内に抑えられるか検討した。使用できるノブには、最上流のパルス偏向電磁石も含まれる。現在の疑似 top-up 運転の際は、数 10 秒という比較的長い時間があるため、パルス偏向電磁石の磁場そのものの強度を調整しているが、PF 2.5 GeV、PF-AR 5.0 GeV の同時 top-up 入射の場合は、パルス偏向電磁石に入射する位相を調整することで、実効的な磁場強度を設定する。この手法については実際のビームを使った試験がなされ、pulse jitter が 40 ns 程度以下、それによる磁場強度の偏差は 0.08 % と想定されている中で、現実的な運用方法になる、という確認がなされている。

ARBT の物理アパーチャは片側おおよそ 25 mm であり、ここで共通偏向電磁石の強度を 7 % 低減させれば、ビームが存在する空間 APEX ($= 5 \times \sigma_x + \Delta x + 1$ mm) は 25 mm 以下に収まる (Fig. 3)。しかし PFBT に対するしわ寄せは optics の変更では吸収しきれないことがわかった (Fig. 4)。従って、PF-AR (5.0 GeV)、PF (2.5 GeV) の同時 Top-up 入射を実現するためには、電磁石追加等のハードウェアの変更が必要となる。

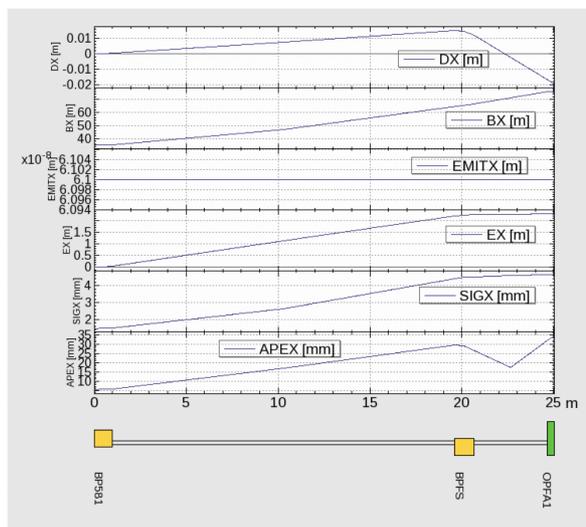


Figure 4: The Disturbance of The Beam Orbit in PFBT will Exceed its Physical Aperture due to the Reduction of the Magnetic Field by about 7 % of the Common Bending Magnet.

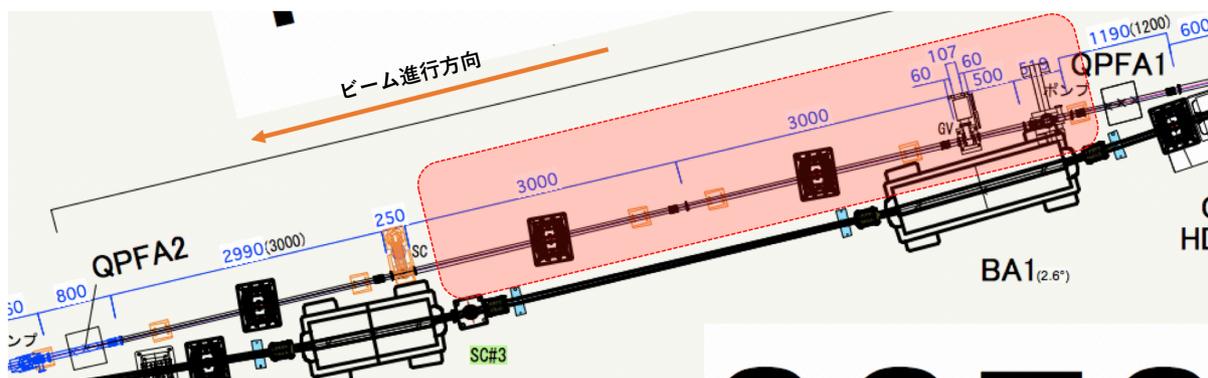


Figure 5: The Range to Expand the Vacuum Duct (Red Painted Part).

4.2 現在考える改造案候補

ハードウェアの変更にあたって、まずは現場の調査をおこなった。その結果、ARBTはPFBTに比べ既に component が詰まっており、電磁石の追加や作業性の観点からPFBTを改造する方が適切であるとの判断に至った。

まず、共通DC偏向電磁石の磁場強度は7%下げたことを前提とし、PFBTに電磁石を追加することを考えた。以下では2つのoptionについて説明する。

4.2.1 4HS案 PFBTで破綻が起きないように、パルス偏向電磁石と共通DC偏向電磁石の間にhorizontal steering(HS)を1つ、共通DC偏向電磁石の下流に3つのHS、合計4つのHSを設置し、かつダクトの内径を大きくして、破綻を防ぐ案である(Fig. 6)。

まず共通DC偏向電磁石BPFS(ARBT名ではBDS)の余剰な蹴りをなるべく小さくするため、余剰な蹴りの方向の逆向きにBPFSに入射するように上流のHSで電子バンチを蹴る。それでもなお、BPFSで余剰に蹴られた電子バンチは四極電磁石QPFA1を通過するが、かろうじて中心付近を通るため、余剰に大きく蹴られることはないが、そのまま次の四極電磁石QPFA2に大きな水平方向のoffset Δx を持って入射すれば、さらに大きく蹴られ、破綻する。そこでQPFA1とQPFA2の間に3台のHSを新設し、QPFA2に至るまでに Δx を消す。

HSの最大蹴り角は8 mrad程度で、ホロコンで $L=300$ mm, gapを51 mm程度とすると、40 A程度となる。

電磁石の追加とともに、QPFA1, QPFA2間の一部を、現在のICF114相当($\phi 60.5$ mm)の部分から、ICF152相当($\phi 97.6$ mm)等で拡張する必要がある(Fig. 5)。必要部分だけの拡張であれば、Gate Valve, ポンプ接続ダクトの交換だけで済み、BPMやScreen Monitorへの影響はなく、コストは比較的抑えられる。

4.2.2 サンドイッチ案 余剰な蹴りを発生させる共通DC偏向電磁石BPFSをパルス偏向電磁石2台で挟むこむ案である。BPFS周辺の局所的な補正で完結するため、改造範囲自体は4HS案よりも狭い(Fig. 8)。追加するパルス偏向電磁石の蹴り角は4 mrad程度で、 $L=300$ mm, gapを62 mm, turn数を2とすると、1500 A-peak程度の規模となる。

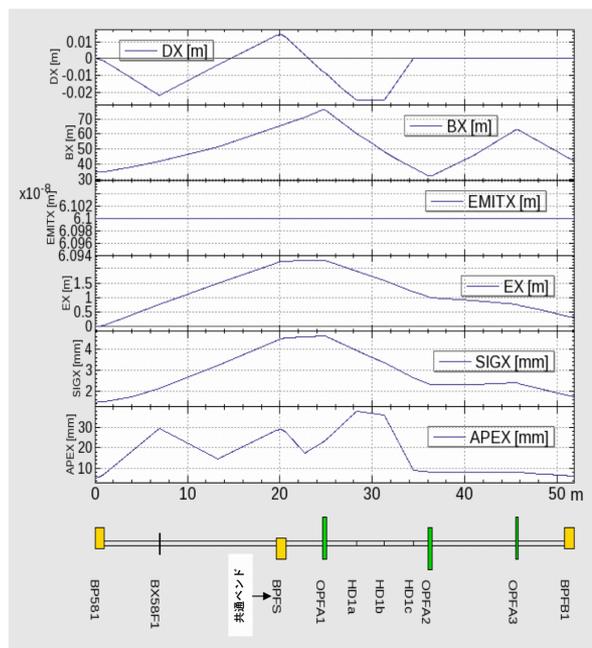


Figure 6: The Optics of PFBT in the 4HS Option.

共通DC偏向電磁石BPFSが設置されているところはPFBTとARBTが交差する点であり、X型のダクトが現在設置されている。上流は下流に比べ上流から一体の大きなダクトとなっており、現状のダクトをそのまま利用しようとする、新設するパルス偏向電磁石のgapが異常に大きくなり、非現実的である(Fig. 7, 9)。パルス偏向電磁石を新設するためには上流側のかなり広い範囲でダクトを設計し直す必要がある。またパルス偏向電磁石に対応してセラミックダクトを導入する場合には、一定のコスト増を想定する必要がある。

5. 今後の予定

現在有力な2案を、コスト面、運用面等様々な観点から精査していく予定である。そのため、現在具体的な電磁石の設計、電磁石電源の選定等を実施している。また、今後真空ダクトのより詳細な設計検討が必要になってくる。それらを進めながら、必要な予算の確保を目指していく。

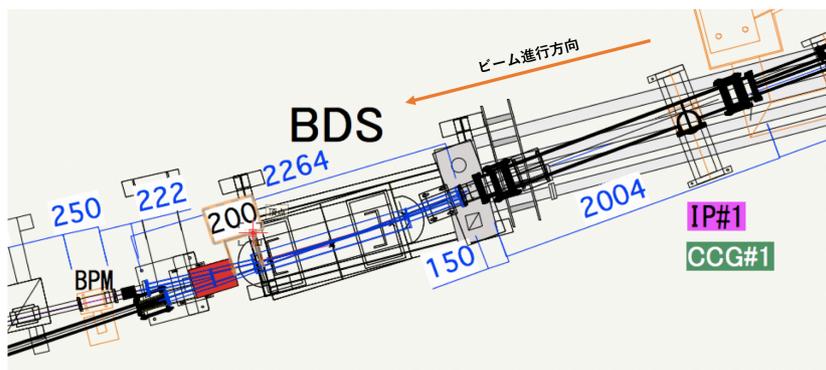


Figure 7: The Geometry around the Common Bending Magnet BDS in ARBT (BPFs in PFBT).

謝辞

今回、KEK 入射器の geometry やハードウェア, filling pattern 等に関して佐藤政則さんを始めとする KEK-LINAC の方々から情報提供いただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Proc. of HF 2014, pp 73-8, 2014; <http://accelconf.web.cern.ch/HF2014/papers/frt1b2.pdf?n=HF2014/papers/frt1b2.pdf>
- [2] N. Higashi *et al.*, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッションング”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 212-5; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TH0L/TH0L10.pdf
- [3] S. Nagahashi *et al.*, “PF-AR における 5GeV 運転の状況”, in these proceedings, THPP63.
- [4] R. Takai *et al.*, “PF リングにおけるハイブリッド運転モードの導入”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 1043-7; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS057.pdf
- [5] KEK 測定器開発室, 活動報告, 2020 年 5 月; <https://rd.kek.jp/activity.html>



(a) Upstream



(b) Downstream

Figure 9: The Current Circumstance around the Common Bending Magnet BPFS.

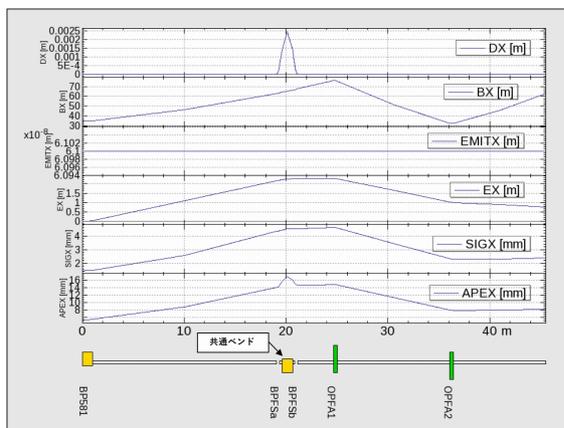


Figure 8: The Optics of PFBT in the Sandwich Option.