

PF-AR 直接入射路の建設とコミッショニング CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF DIRECT BEAM TRANSPORT LINE DEDICATED FOR PF-AR

東直*、浅岡聖二、飯田直子、岩瀬広、上田明、内山隆司、小川雄二郎、尾崎俊幸、小野正明、帯名崇、柿原和久、紙谷琢哉、菊池光男、岸本祐二、工藤喜久雄、久米達哉、小玉恒太、小林幸則、坂中章悟、下ヶ橋秀典、佐藤政則、佐藤政行、佐波俊哉、諏訪田剛、高井良太、高木宏之、鷹崎誠治、高橋毅、多田野幹人、田中窓香、谷本育律、田原俊央、多和田正文、峠暢一、長橋進也、中村典雄、中村一、夏井拓也、濁川和幸、丹羽尉博、野上隆史、芳賀開一、原田健太郎、肥後寿泰、古川和朗、本田融、本間博幸、三川勝彦、三増俊広、宮内洋司、宮原房史、山田悠介、山本尚人、山本将博、吉田光宏

Nao Higashi*, Seiji Asaoka, Naoko Iida, Hiroshi Iwase, Akira Ueda, Takashi Uchiyama, Yujiro Ogawa, Toshiyuki Ozaki, Masaaki Ono, Takashi Obina, Kazuhisa Kakihara, Takuya Kamitani, Mitsuo Kikuchi, Yuji Kishimoto, Kikuo Kudo, Tatsuya Kume, Kota Kodama, Yukinori Kobayashi, Shogo Sakanaka, Hidenori Sagehashi, Masanori Sato, Masayuki Sato, Toshiya Sanami, Tsuyoshi Suwada, Ryota Takai, Hiroyuki Takaki, Seiji Takasaki, Takeshi Takahashi, Mikito Tadano, Madoka Tanaka, Yasunori Tanimoto, Toshihiro Tahara, Masafumi Tawada, Nobukazu Toge, Shinya Nagahashi, Norio Nakamura, Hajime Nakamura, Takuya Natsui, Kazuyuki Nigorikawa, Yasuhiro Niwa, Takashi Nogami, Kaiichi Haga, Kentaro Harada, Toshiyasu Higo, Kazuro Furukawa, Tooru Honda, Hiroyuki Honma, Katsuhiko Mikawa, Toshihiro Mimashi, Hiroshi Miyachi, Fusashi Miyahara, Yusuke Yamada, Naoto Yamamoto, Masahiro Yamamoto, Mitsuhiro Yoshida
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The injector of KEK, LINAC supplies beams to 4 rings: High Energy Ring (HER) and Low Energy Ring (LER) of SuperKEKB, PF and PF-AR of light source. The beam transport line (BT) of PF-AR was shared with HER and it was inevitable to halt the injection for about 10 minutes in order to standardize the magnets of the BT during the simultaneous operation of SuperKEKB and PF-AR. This winter, Phase 2 operation of SuperKEKB will begin and the Touschek lifetime of HER is calculated as about 10 minutes that was shorter than that of KEKB. Therefore the 10-minute interruption will prevent the attainment of the target luminosity of SuperKEKB. In order to resolve this problem, the BT of PF-AR was separated from HER and then a new BT dedicated for PF-AR was constructed. The excavation of the new tunnel started in 2013, and the infrastructure construction was completed in 2014. The installation of accelerator components like magnets and vacuum ducts was finished in Feb. 2017, and the commissioning with the new direct BT started on 13 Feb.. The reaching of the beam to the PF-AR ring was observed on the first day of the commissioning. On 1 Mar., the facility inspection was conducted and accepted, then the user-run was resumed in this April. The machine study for the top-up operation of PF-AR and the simultaneous top-up operation of all 4 rings are planned in autumn 2017 and in autumn 2018 respectively.

1. はじめに

フォトン・ファクトリー・アドバンストリング (PF-AR) 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。これまでの入射路 (BT) では、3 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。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の入射器 LINAC は PF-AR の他に、SuperKEKB HER (High Energy Ring) に 7 GeV の電子、LER (Low Energy Ring) に 4 GeV の陽電子、PF に 2.5 GeV の電子をそれぞれ供給している。LINAC は PF、HER、LER の 3 つのリングへの同時入射を前提に建設されており、SuperKEKB へのアップグレード前の KEKB と PF-AR を同時に運転する際は PF-AR と HER が共有する入射路の電磁石を標準化するため、最低でも 10 分程度入射を中断する必要があった。アップグレード後の SuperKEKB はタウシェック寿命が 10 分程度と短く、HER と LER に

対して 50 Hz の連続入射が必要であり、PF-AR 入射のための 10 分間の中断は SuperKEKB の高ルミノシティ達成にとって致命的である [1]。この問題を回避するため、今回 PF-AR 専用の独立した BT を建設した [2,3]。この新しい BT は 6.5 GeV 入射用に設計され、2018 年秋の SuperKEKB Phase 3 開始と同時にトップアップ運転を行うことを目指している。新しいトンネルの建設は 2013 年に開始され、インフラ整備を含め 2014 年に終了した。電磁石や真空ダクトなど加速器機器の設置は 2017 年 2 月まで行われた。偏向電磁石のほとんどは旧 BT に設置されていたものの再利用であるため、その撤去と再設置は平行して行われた。新 BT を使用した PF-AR のコミッショニングは 2017 年 2 月から開始され、4 月からユーザー運転の提供が再開された。ここでは新 BT の建設とコミッショニングについて報告する。

* nao.higashi@kek.jp

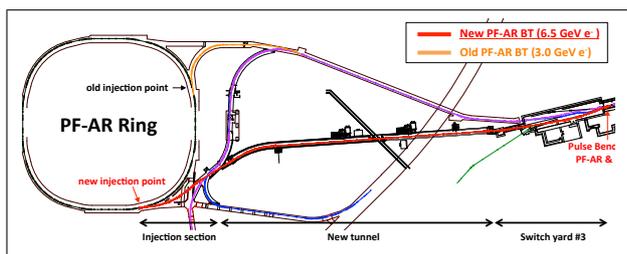


Figure 1: The schematic view of the old and the new direct beam transport line of PF-AR.

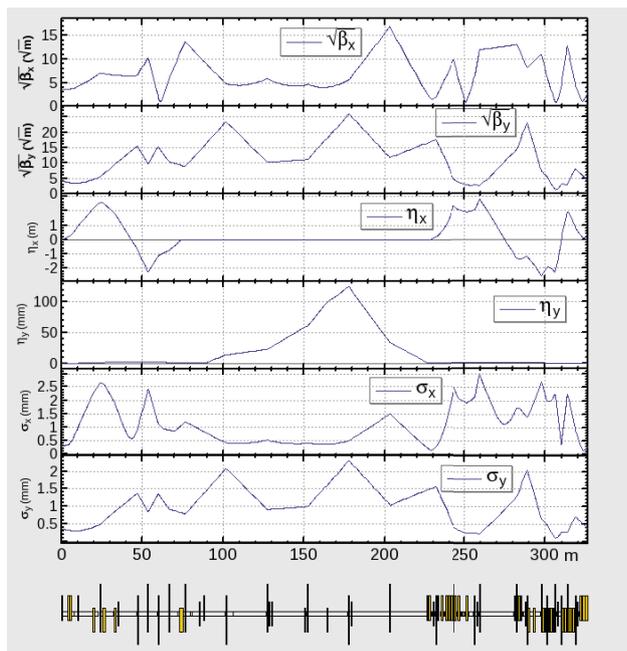


Figure 2: Optical functions from the end of the injector linac to the injection point of the PF-AR. In order to calculate the beam size, we supposed that the normalized emittance is 100×10^{-6} mrad, and the energy spread is 1.0×10^{-3} as the 1σ of Gaussian distribution at the initial point of the BT.

2. PF-AR 直接入射路の構成

新しい BT は LINAC の終端にあるパルス偏向電磁石から始まり、PF-AR の新入射点まで、全長およそ 320 m に渡る (Figure 1)。Figure 2 は新 BT の光学関数である。新 BT の構成について、LINAC Switch Yard #3 (SY3)、新トンネル、入射部の 3 つの区画に分けて説明する。

2.1 LINAC Switch Yard #3

Figure 3 に示すように、SY3 ホールは LINAC の終端に位置し、HER (紫)、LER (青)、PF (緑)、PF-AR (赤) にそれぞれ電子もしくは陽電子を振り分けている。PF と PF-AR の入射路に向かうビームは、最大 25 Hz の繰り返し周波数でパルス偏向電磁石によって電子ビームが振り分けられる。同じ磁場で異なるビーム・エネルギーの電子を蹴るため、PF と PF-AR の各 BT を分離す

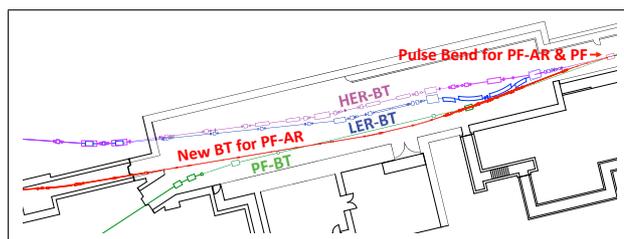


Figure 3: Four beam transport lines in LINAC Switch Yard #3.

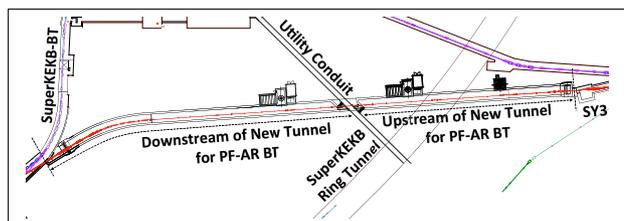


Figure 4: The new tunnel section of the direct beam transport line for PF-AR.

ることができる。この区画は今回の新 BT 建設において最も窮屈で複雑であり、BT の設計や各加速器機器の開発、アライメントに際しては多くの課題を乗り越える必要があった。

2.2 新トンネル部

新トンネルは全長約 200 m で、既存の共同溝によって上流部と下流部に分けられている (Figure 4)。上流部と下流部は互いに繋がっており、相対位置の擾乱は抑制されている一方、共同溝は切り離されている。共同溝ケーブルラックとの干渉を避けて新 BT の真空ダクトを貫通させるため、4 つの垂直偏向電磁石を用いて +60 mm のバンプ軌道を作っている。また、LINAC と PF-AR の高低差も、このバンプで解消される。光学関数はこの垂直バンプに対して分散がゼロになるように設計されている。

2.3 入射部

新トンネルを抜けると、新 BT は既存の SuperKEKB BT と交差する (Figure 5)。PF-AR の新 BT は既存の LER-BT から 0.6 m 上方を通過するため、新 BT の 4 m 長真空ダクトは 3 本に渡って SuperKEKB トンネルの天井から吊られるように設置された (Figure 6)。

PF-AR の 6.5 GeV 新入射システムとして、3 つのパルス・キッカー電磁石と 2 つのパルス・セプタム電磁石が新たに製作された [4-6]。このキッカー電磁石を設置するために、蓄積リングの真空ダクトを 25 m の長さ に渡って新調した。

3. コミッショニング

コミッショニングは 2017 年 2 月 13 日から開始された。初日、ビームが新 BT を通過し入射点まで到達したことを確認した。ビームの蓄積は 2 日目に確認されたが、蓄積中のビーム損失が大きくなり、入射効率は 1 % を

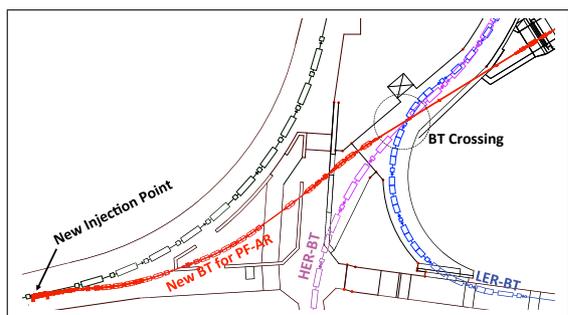


Figure 5: The injection section of the direct beam transport line for PF-AT.

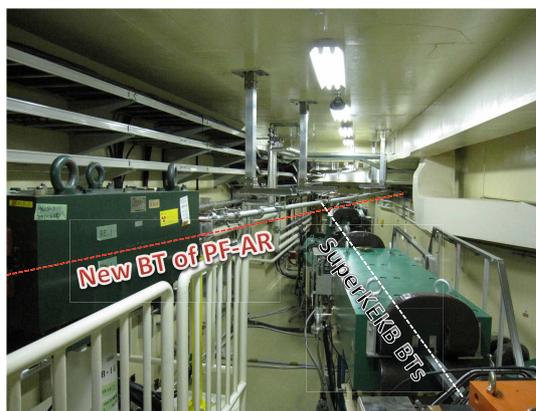


Figure 6: Three 4 m-long vacuum ducts for the new BT of PF-AR were hung on the ceiling of the existing SuperKEKB BTs tunnel.

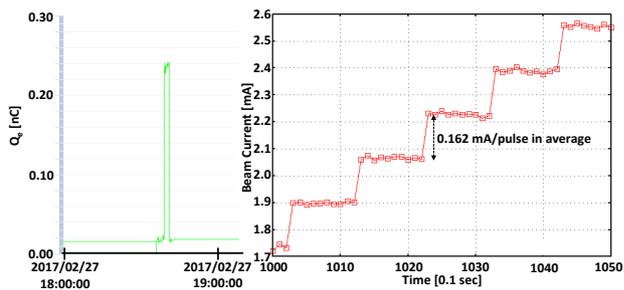


Figure 7: (Left) Charge amount detected at the end of Linac. (Right) Accumulated beam current of PF-AR ring.

下回った。この問題は入射キッカーのタイミングを正確に測定、調整することにより解決された。この結果、5日目には入射効率は80%を超えるところまで改善した。この入射効率はPF-ARリングのDCCTで測定した蓄積電流値の増加分とLINAC終端にあるCTで測定された電荷量の比から求められている (Figure 7)。この入射キッカーの調整後、入射効率は84-88%で安定した。

Figure 8には簡易校正を行った後の新BTにおけるBPM測定の結果を示す。1、2段階目のDX、DYについては回路の校正により ± 1 mmで信頼できる。3段階目のビーム電荷 Q_e については、新BT直上流にあるLINAC

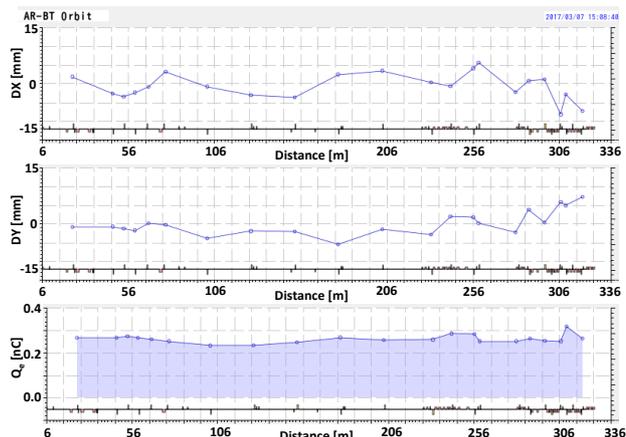


Figure 8: A example of the beam position and charge amount through the new direct beam transport line, measured by BPMs with the very rough first calibration. The starting point of “Distance” is the pulsed bending magnet in SY3, indicated in Figure 3.

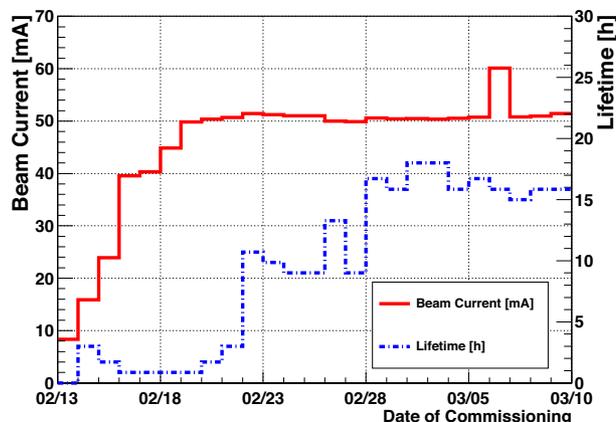


Figure 9: The history of the beam current and the lifetime. The displayed values of the beam current are the maximum ones, and those of the lifetime are the typical ones recorded for each day.

CTと新BT最下流にあるCTとの比から損失がほぼ無いという事実を前提に簡易校正をした結果を示している。

Figure 9にはコミッショニング期間におけるその日の最大蓄積電流と典型的なビーム寿命をまとめた。蓄積電流は設計目標値である60 mAを達成している¹。真空とビーム寿命に関してはFigure 10のように過去の達成値までおおよそ回復しつつある。3月1日に原子力安全技術センターによる施設検査が行われ、3月6日に合格が通知された。4月よりPF-ARは新たなBTと入射システムを用いて順調にユーザー運転を提供している。

¹60 mAの蓄積を確認後、機器保全のため蓄積電流値の上限を50 mAと設定しコミッショニングを続けた。

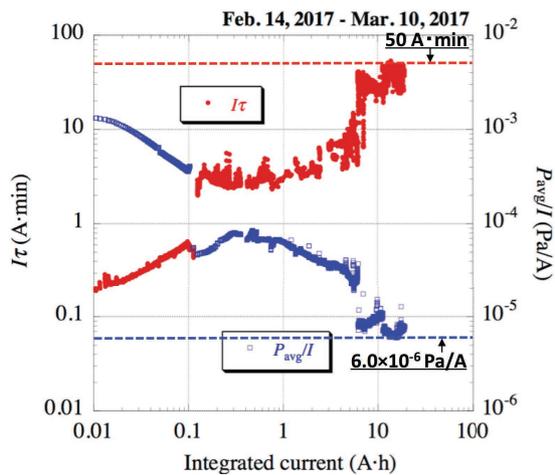


Figure 10: The state of the vacuum scrubbing of the PF-AR ring. Each dashed line indicates the goal estimated from the past results before the construction of the new BT.

4. 今後の予定

2017年6月から、5ヶ月間に渡るSuperKEKB Phase 2に向けたLINACの改造が行われている [7]。これを経て、LINACは2017年秋にこれまでの4つのリングに加えSuperKEKBのための陽電子ダンプ・リングへの連続入射が可能となる。SuperKEKBのコミッショニングとPFおよびPF-ARにおけるビーム・スタディの後、2018年秋頃、4+1リングへの同時トップアップ運転が開始される予定である。

また、今回建設された新BTにより、リング・エネルギーと同じ6.5 GeVでの入射、フル・エネルギー入射が可能となった。これにより、これまでの3 GeV入射における短バンチがもたらす強いHOM励起によるビーム不安定性が緩和される。これを利用し、これまでのおよそ半分のエミッタンスを実現する光学系を採用したスタディを行う予定である。

参考文献

- [1] Ohnishi Y, Koiso H, Morita A, Ohmi K, Oide K, Sugimoto H and Zhou D 2014 *Proc. of HF2014* (Beijing) pp 73-8.
- [2] Takaki H *et al.*, 2014 *Proc. of the 11th Annual Meeting of PASJ* (Aomori) pp 990-4.
- [3] Nagahashi S *et al.*, 2016 *Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ* (Chiba) pp 567-70.
- [4] Ueda A, Asaoka S, Honda T, Nagahashi S, Nakamura N, Nogami T, Takaki H and Uchiyama T 2016 *Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ* (Chiba) pp 1222-6.
- [5] Ueda A, Asaoka S, Honda T, Nagahashi S, Nakamura N, Nogami T, Takaki H and Uchiyama T 2017 *Proc. of IPAC2017* (Copenhagen) WEPVA060.
- [6] Ueda A, Asaoka S, Honda T, Nagahashi S, Nakamura N, Nogami T, Takaki H and Uchiyama T 2017 *Proc. of IPAC2017* (Copenhagen) WEPVA059.
- [7] Funakoshi Y *et al.*, 2016 *Proc. of IPAC2016* (Busan) pp 1019-21.