

話 題

PF-AR 直接入射路の建設と運転

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

Construction and Commissioning of a New Direct Beam Transport Line of PF-AR

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, Tohru HONDA, Hiroyuki HONMA, Katsuhiko MIKAWA
 Toshihiro MIMASHI, Hiroshi MIYAUCHI, Fusashi MIYAHARA, Yusuke YAMADA
 Naoto YAMAMOTO, Masahiro YAMAMOTO and Mitsuhiro YOSHIDA

Abstract

PF-AR is a synchrotron light source located in High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and supplies hard X-ray with single bunch operation. The injector “LINAC” of PF-AR is shared with other three rings: High Energy Ring (HER) and Low Energy Ring (LER) of SuperKEKB and PF. In KEKB era, the beam transport line (BT) of PF-AR and HER was shared, and the injection had to be interrupted for ten minutes at least for the standardization of the magnets when changing the objective ring for the injection. In the winter of FY2017, phase 2 operation of SuperKEKB will begin, and its Touschek lifetime is calculated as about ten minutes. This is shorter than in KEKB era, and the sharing of the BT cannot be adopted anymore for the simultaneous operation of both PF-AR and SuperKEKB. In order to realize this, we have constructed a new BT dedicated to PF-AR. The excavation of the new tunnel started in 2013, and the infrastructure construction was completed in 2014. The commissioning with the new direct BT started on 13 February, and the user-run was resumed in April 2017. 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.

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization 共著者所属も同じ
 (E-mail: nao.higashi@kek.jp)

1. はじめに

フォトン・ファクトリー・アドバンスド・リング (PF-AR) は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にある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。PF-AR は SuperKEKB の前身である TRISTAN のための蓄積リング (AR : accumulation ring) として 1984 年に建設された。その後 1987 年に放射光源としても利用されるようになった。1995 年に TRISTAN の運転が終了してからは、TRISTAN の蓄積リングという役目を終えて放射光施設として運用されている。

PF-AR の入射器 “LINAC” は PF-AR 以外に 3 つのリング、SuperKEKB High Energy Ring (HER), Low Energy Ring (LER), そしてもう一つの放射光施設である PF に、電子もしくは陽電子を入射している。SuperKEKB よりも前の KEKB 時代においては、PF-AR と HER の入射路 (BT) は一部共有されており、それぞれ 3.0 GeV と 8.0 GeV と、異なるエネルギーのビームを入射していた。このため、ビームの入射先を変更する際には標準化を伴う電磁石の設定変更により最低でも 10 分程度入射を中断する必要があった。これは目標磁場に正確に設定するため、各電磁石の磁場測定を行った際のヒステリシス・ループにのせて電流を設定する手順である。

2017 年度冬季から SuperKEKB Phase 2 が始まり、実際の物理ランにおいて高ルミノシティを

実現するビーム光学を HER 及び LER に適用した運転を行う予定である。ビームの寿命はバンチ内散乱によるタウシェック寿命で大きく決まるが、これが 10 分程度と大変短い¹⁾。つまり KEKB 時代の入射路共有と SuperKEKB が目指す高ルミノシティの共存は不可能となる。そこで今回、我々は PF-AR の入射路を HER から独立させ、専用の直接入射路 (新 BT) を建設した。

図 1 は今回建設した新 BT とその他の BT を合わせて示した図である。これまで PF-AR では 3.0 GeV の電子をリングに入射し、6.5 GeV まで加速してからユーザー運転を行っていた。この直接入射路の建設により、最初から 6.5 GeV で入射するフル・エネルギー入射が可能となる。これによりリングにおけるビーム電流の減少を常時入射によって補うトップアップ運転が、2018 年秋季から始まる SuperKEKB Phase 3 と同時に開始できることが期待されている。また、フル・エネルギー入射によるビーム不安定性の低減を活かし、PF-AR リングの低エミッタンス化も検討されている。

新 BT のためのトンネル建設は 2013 年度に開始され、インフラ整備を含め 2014 年度に終了した。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再開された。ここでは新 BT の建設とコミッションングについて報告する。また、今後の PF-AR の運転予定についても記述する。

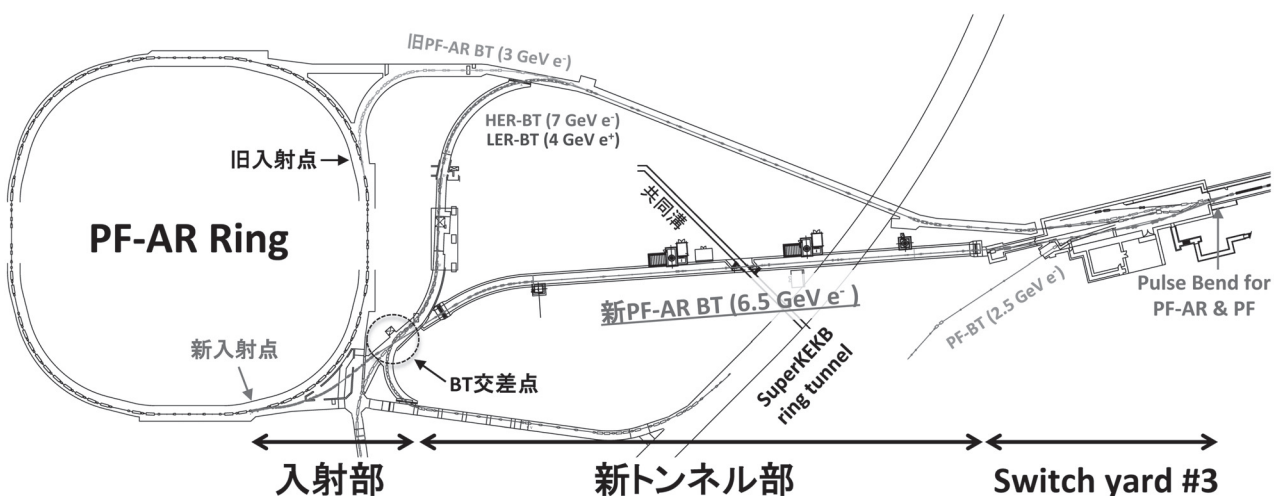


図 1 KEK LINAC から各リングへ向かう入射路と今回建設された PF-AR 直接入射路。

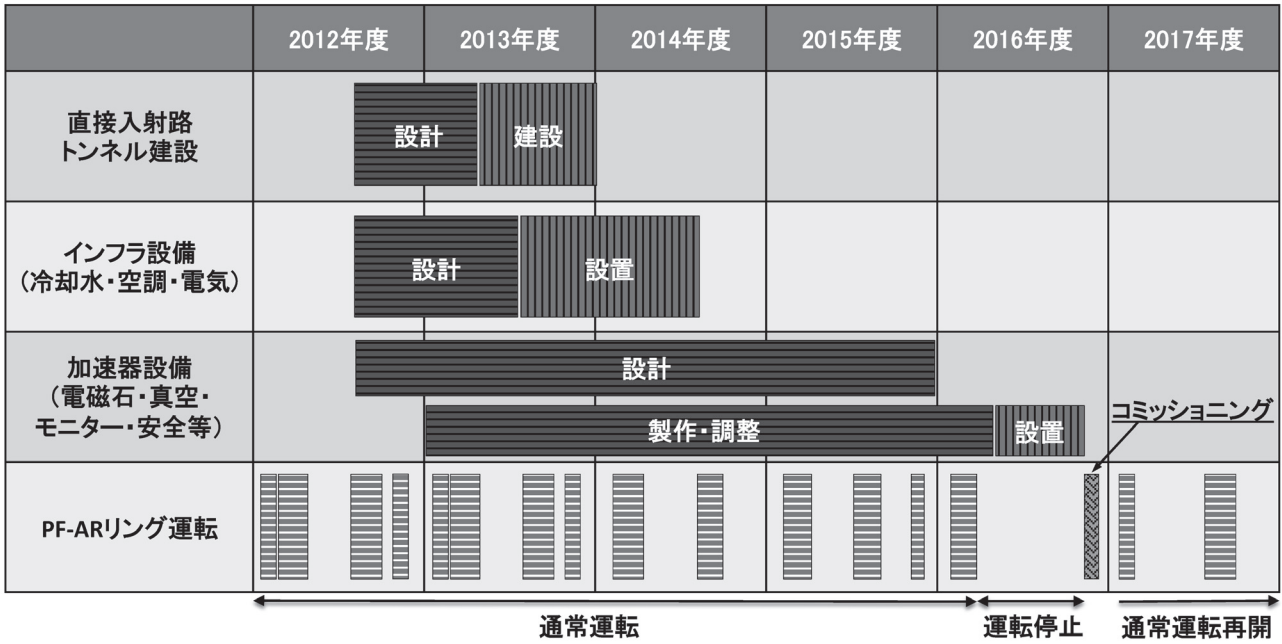


図2 PF-AR 直接入射路の建設及び PF-AR リングの運転スケジュール.

2. PF-AR 直接入射路の建設

2.1 スケジュール

今回の新 BT 建設のスケジュールを PF-AR リングの運転と合わせて図2にまとめた²⁻⁴⁾. LINAC から PF-AR リングの間に設けられた新トンネルの建設は 2013 年度に開始され, インフラ設備を含めて 2014 年度に完了した. 電磁石や真空ダクトなどの設置は 2016 年度 2 月のコミッショニング開始直前まで行われた. また, 電磁石は旧 BT から再利用されたものも多く, 撤去と再設置を同時並行で行う複雑なスケジュールとなった. PF-AR のユーザー運転は新 BT 建設と並行して通常実施され, 中断されたのは 2016 年度に旧 BT から加速器機器撤去を行った期間のみである.

2.2 直接入射路の構成

新 BT は LINAC の終端にあるパルス偏向電磁石から始まり, PF-AR リング南西に設けられた新入射点まで, 全長およそ 320 m に渡る (図1). ここでは LINAC 第 3 スイッチヤード (SY#3), 新トンネル部, 入射部の 3 つの区画に分けて各区画の説明を行う.

2.2.1 LINAC 第 3 スイッチヤード

PF-AR の新 BT と PF-BT は LINAC の終端にあるパルス偏向電磁石によって SuperKEKB の HER 及び LER から分離される (図3, 4). パル



図3 LINAC 第 3 スイッチヤードをビーム下流から上流を見た様子.

ス偏向電磁石の繰り返し周波数は最大 25 Hz で, AR の入射エネルギー 6.5 GeV と PF の入射エネルギー 2.5 GeV のビームを同じ磁場で蹴ることにより, PF-AR 新 BT と PF-BT はさらに 2 つに分離される. その後 2 つの BT は 2 回交差して各リングへ向かう. この区画は新 BT 建設において最も窮屈で複雑であり, 多くの課題を乗り越える必要があった.

2.2.2 新トンネル部

新トンネルは全長約 200 m で, 既存の SuperKEKB 共同溝によって上流部と下流部に分

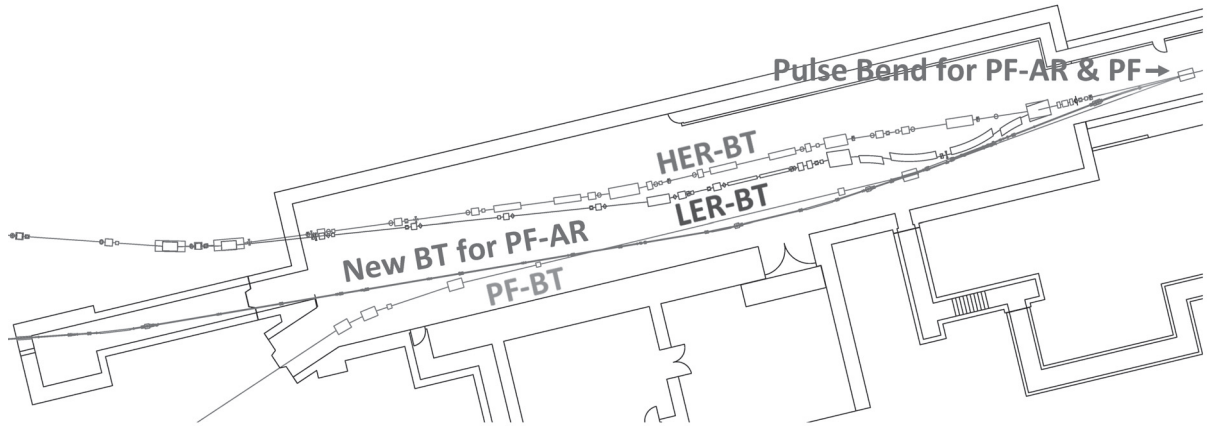


図4 LINAC 第3スイッチヤードにおける各BTの配置.

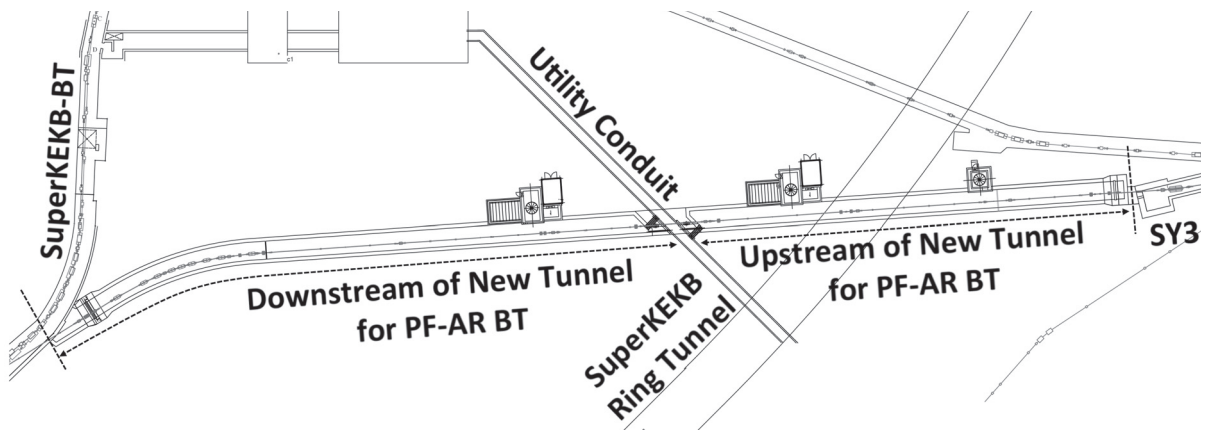


図5 SuperKEKB 共同溝により二分されたPF-AR新BTのトンネル部.

けられている (図5)。上流部と下流部の天井躯体は繋がっており、日格差や季節変動の影響による相対位置の変化を抑制している一方、共同溝とは切り離されている。新BTの真空ダクトは共同溝ケーブルラックとの干渉を避けるため、4つの垂直偏向電磁石を用いて上流部で64 mm 登り、下流部で90 mm 下るバンプ軌道を実現している。また、LINACとPF-ARの間には20 mm程度の高低差が存在するが、これもこのバンプにて解消される。新BTのトンネル設置がSuperKEKBのリングに影響を及ぼさないよう、上流部に500 mmほど床の高い部分を設け、トンネル躯体間に2 m程度の空間を確保した (図6)。

2.2.3 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 (図7)。PF-ARの新



図6 PF-AR新トンネル上流部をビーム下流から上流を眺めた様子。奥に見える段差の下にはSuperKEKBのリングトンネルがある。

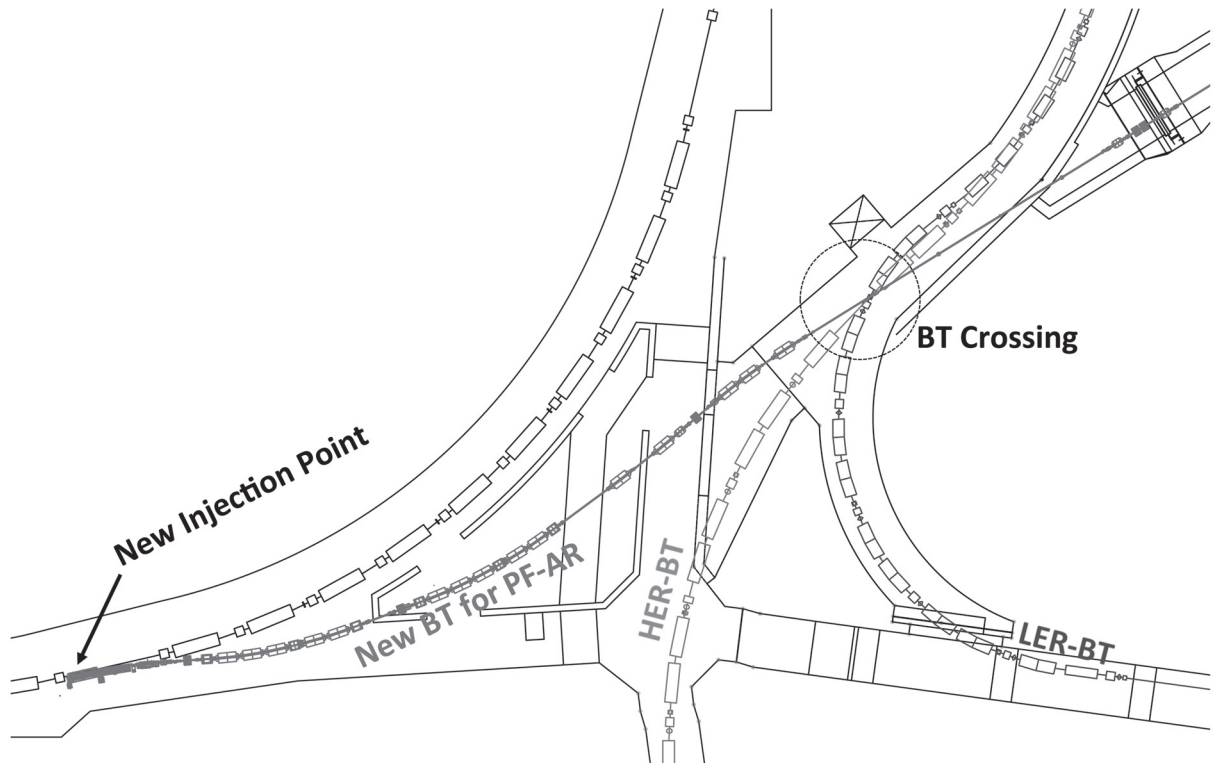


図7 PF-AR新BTの入射部.



図8 SuperKEKB-BTと交差する新BTダクト.

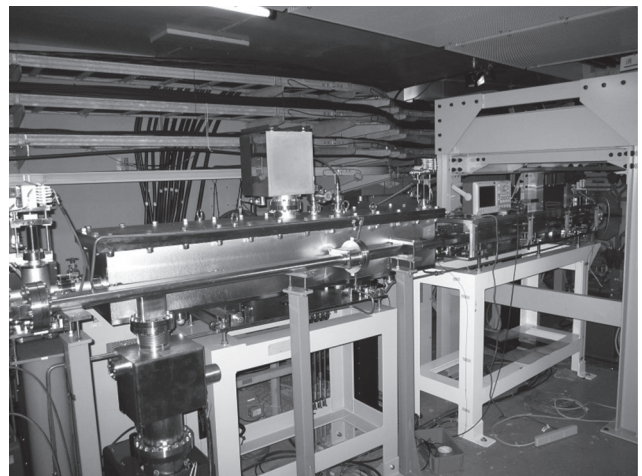


図9 新入射点に設置されたセプタム電磁石.

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した(図8).

入射点はリング南東から南西に移設された. また, 入射エネルギーが3.0 GeVから6.5 GeVに変更されたことに伴い, 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(図9)⁵⁾. 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.

2.3 PF-AR 新直接入射路の光学関数

図10に今回建設したPF-AR直接入射器の光学関数を示す. ビームサイズ σ の計算として, 新BTの始点において規格化エミッタンス 100×10^{-6} mrad, エネルギー広がり 1.0×10^{-3} のガウス分

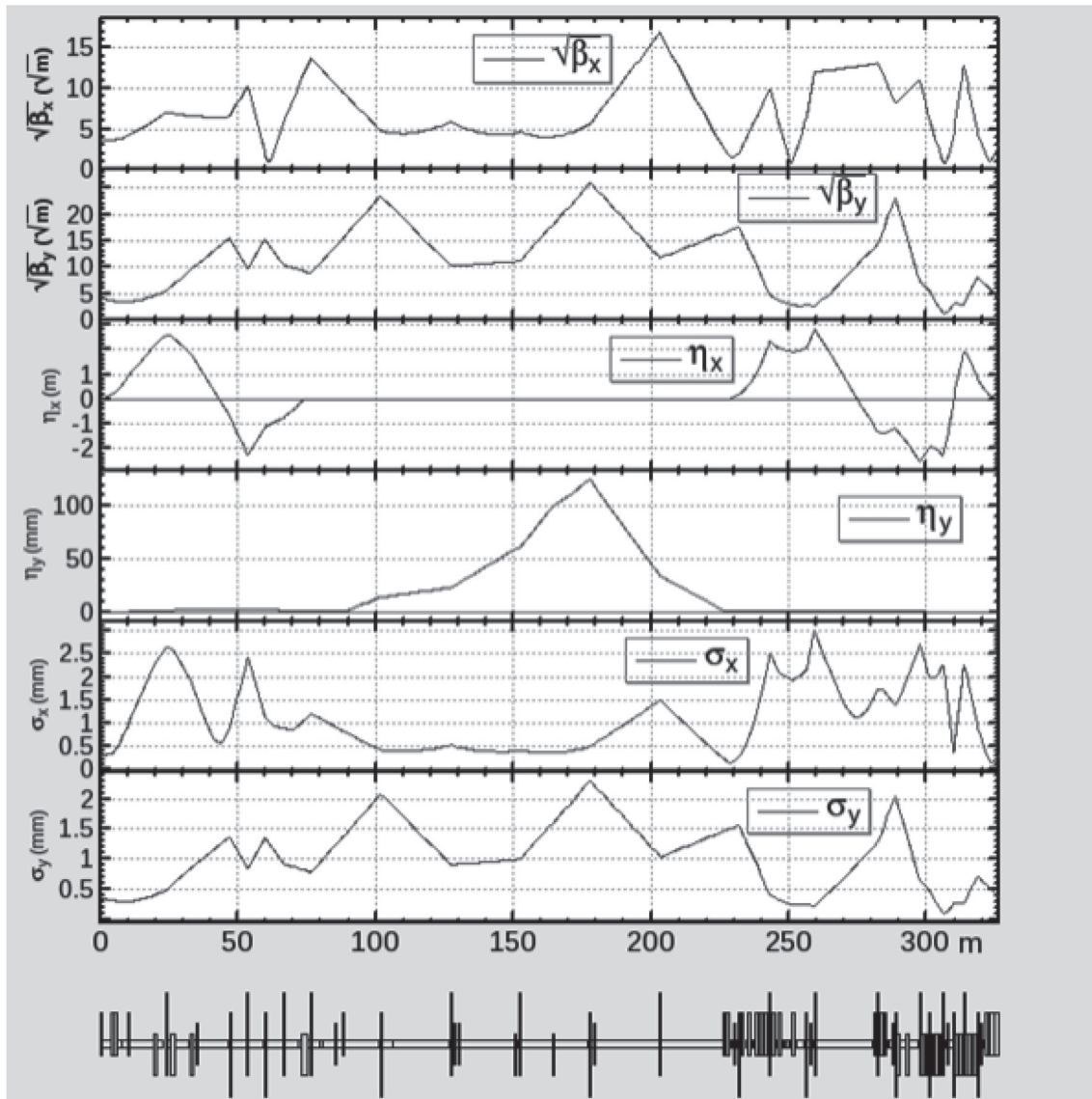


図 10 PF-AR 新 BT の光学関数.

布を仮定した. 分散関数 η は新入射点で水平・垂直方向ともに消えるよう最適化を行っている. 90-230 m の η_y が増大・減少しているところは新トンネル部において4つの垂直偏向電磁石によるバンパが形成されている部分に対応する.

垂直方向の物理アパーチャーとして一番制限が厳しいのは, 70-80 m にある LINAC 第3スイッチヤード終端偏向電磁石の真空ダクトで, 上下 19 mm のクリアランスがある. 先の条件と合わせ, これを十分にクリアできるように光学関数の最適化を行った.

2.4 アライメント

電磁石設置時に実施した精密アライメントの結

果を図 11 に示す⁶⁾. 真空チェンバーと干渉のあったパルス・セプタム電磁石2台を除き, 水平・垂直方向ともに全て目標値の ± 0.100 mm 以内に据え付けることができた. ds はビーム進行方向, dr は半径方向, dh は鉛直方向で, それぞれ設置設計値に対する誤差を表している. 横軸は新 BT のビーム進行方向距離 s で, SY#3 のパルス偏向電磁石が始点である. パルス・セプタム電磁石については設置誤差の範囲内における磁場平坦度が十分確認されており, 影響については無視できる.

3. コミッショニング

新 BT を使用した PF-AR コミッショニングは

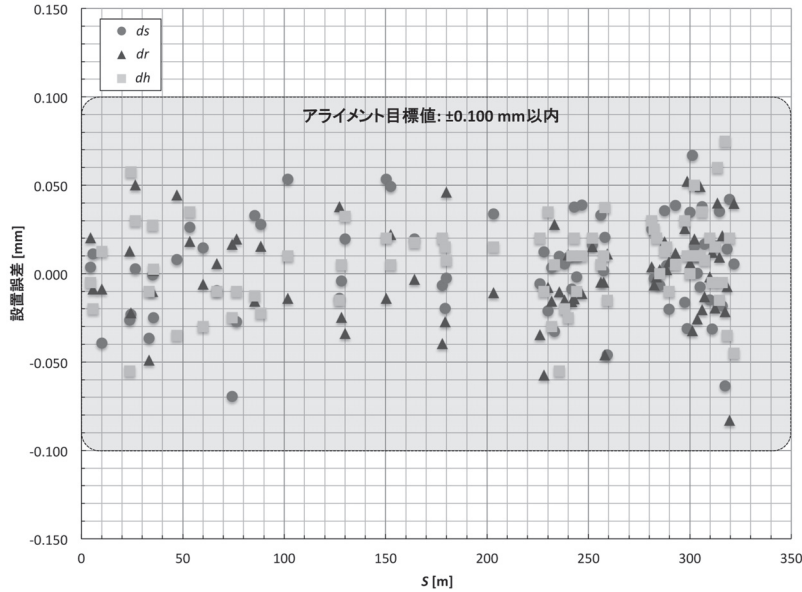


図 11 電磁石アライメントの結果.

2017年2月13日から開始された。初日、ビームが新BTを通過し新入射点まで到達したことを確認した。2日目にリングでのビーム蓄積が確認されたが、蓄積中のビーム損失が大きく入射効率は1%を下回っていた。後にこれは、キッカー電磁石の位相とビームの入射タイミングが一致していないことが原因だとわかった。それまでキッカー電磁石の電圧信号と新BT終端のBPM信号を同時モニターしタイミングを確認していたが、BPM信号がキッカー電磁石のノイズと干渉していた。そこで3台あるキッカー電磁石のうち中央の位相を掃引し、それに対する入射点下流BPMで水平方向のビーム位置を測定することにより、最適な位相を決めた(図12)。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。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BPMで測定された電荷量の比から求められている(図13)。この入射キッカーの調整後、入射効率は84-88%で安定した。

図14には簡易較正を行った後の新BTにおけるBPM測定の結果を示す。1, 2段目のDX, DYについては回路の較正により±1mmで信頼できる。3段目のビーム電荷 Q_e については、新BT直上流にあるLINAC 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較正をした結果を示している。

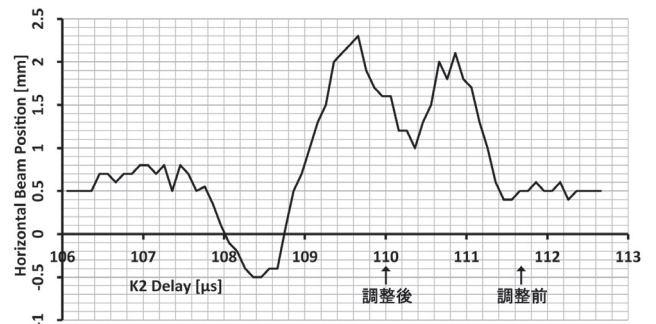


図 12 キッカー電磁石の位相とリング内BPMにおける水平方向の変位.

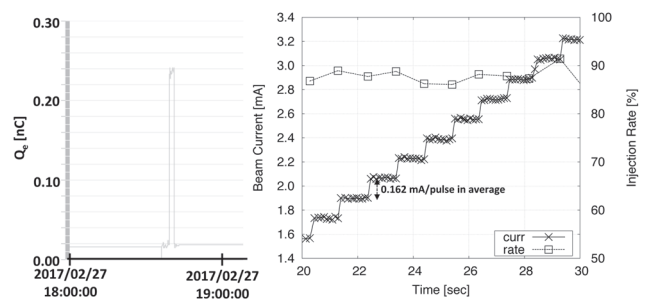


図 13 (左)LINAC終端CTで測定されたバンチ電荷量、(右)PF-ARリング内DCCTで測定された蓄積電流値.

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図15にまとめた。蓄積電流は設計目標値である60mAを達成している。60mAの蓄積を確認後、機器保全のため

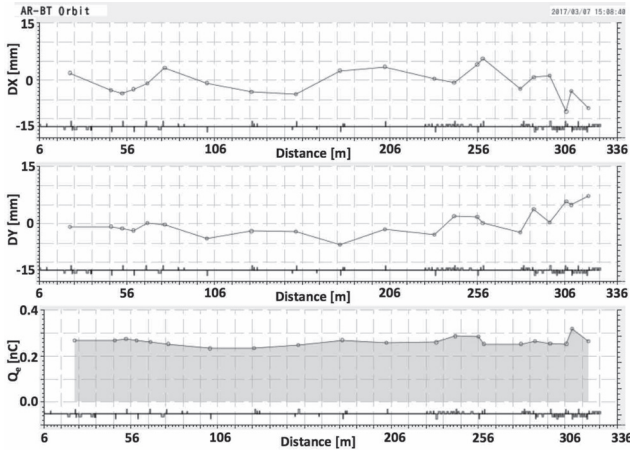


図 14 PF-AR 直接入射路における BPM 測定の結果一例.

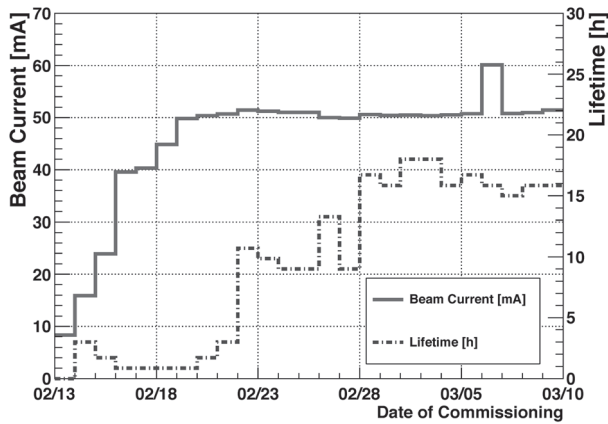


図 15 コミッショニングにおける日毎の最大蓄積電流値と寿命の代表値.

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. 真空とビーム寿命に関しては図 16 のように過去の達成値までの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.

4. 今後の予定

2017 年 5 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. 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 及び PF-AR におけるビーム・スタディの後, 2018 年

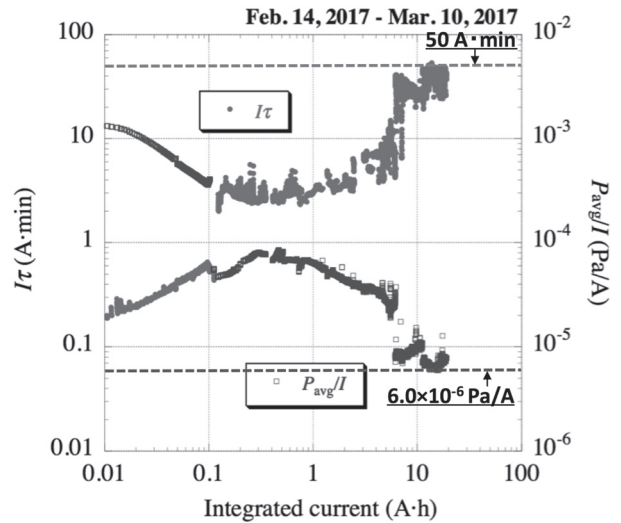


図 16 PF-AR リングの真空焼き出し. 点線は過去の達成値を示す.

秋頃, これまでの 4 つのリングにダンピング・リングを加えた 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.

謝 辞

新 BT の建設及びコミッショニングにあたり, KEK 内外の研究者・技術者, 多くの方々より多大なご協力を頂きました. この場をお借りし改めて御礼申し上げます.

参考文献

- 1) Y. Ohnishi, *et al.*, Proc. of HF 2014, pp 73-8 (2015).
- 2) H. Takaki, *et al.*, Proc. of the 11th Annual Meeting of PASJ, pp 990-4 (2014).
- 3) S. Nagahashi, *et al.*, Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ, pp 567-70 (2016).
- 4) N. Higashi, *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of PASJ, THOL10 (2017).
- 5) A. Ueda, *et al.*, Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ, pp 1222-6 (2016).
- 6) S. Nagahashi, *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of PASJ, TUP068 (2017).