

PF-AR 直接入射路の建設

THE CONSTRUCTION OF THE DIRECT BEAM TRANSPORT LINE FOR THE PF-AR

長橋進也[#], 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, 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, 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, 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, 山本将博, 吉田光宏

Shinya Nagahashi [#], 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, Hidenori Sagehashi, Masanori Satoh, Masayuki Sato, Toshiya Sanami, Tsuyoshi Suwada, Ryota Takai, Hiroyuki Takaki, Seiji Takasaki, Mikito Tadano, Madoka Tanaka, Yasunori Tanimoto, Toshihiro Tahara, Masafumi Tawada, Nobukazu Toge, 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, Masahiro Yamamoto, Mitsuhiro Yoshida

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We have a construction project of a new beam transport line (BT) for the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR). The injection energy of the PF-AR was 2.5~3.0 GeV and the accumulated beam was accelerated to 6.5 GeV. The new BT will connect from the LINAC end to the PF-AR in an approximately straight line and will become independent of the SuperKEKB BT. It enables the full energy injection, and the top-up injection will be realized as a simultaneous continuous injection with the other storage rings, High Energy Ring (HER), Low Energy Ring (LER) of SuperKEKB and Photon Factory Storage Ring (PF ring). The new BT tunnel and the building were completed in 2014, and the installation of infrastructures was also completed in 2015. The whole project is planned to be finished in 2017 before the commissioning of the SuperKEKB Phase2.

1. はじめに

X線領域の放射光源用電子ストレージリングである Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) は、2.5~3.0GeV の電子ビームを入射し、6.5GeV まで加速を行ってから、利用実験を行っていた。一方、電子陽電子入射器 (LINAC) は、4 台の蓄積リング (SuperKEKB[1]) の High Energy Ring (HER) および Low Energy Ring (LER)、Photon Factory Storage Ring (PF リング)、PF-AR) に対して、エネルギーや電荷量の異なる電子または陽電子を 50Hz のパルス毎に高速で切り替え、任意の蓄積リングへ供給することが可能である。SuperKEKB および PF リングに対しては、この高速に切り替えたビームを使用して、同時に入射をすることが可能であるが、PF-AR は SuperKEKB と共通の入射路を使用していたために、他の 3 台の蓄積リングへの入射を中断し、入射路のモードを切り替えて入射しなければならなかった。これに要する時間は、最短でも 10 分程度であり、蓄積ビームの寿命が極端に短い SuperKEKB とは、同時に運転できないことになってしまう。そこで、SuperKEKB の Phase2 が始まる前に、6.5GeV の電子ビームを PF-AR に直接入

射するための専用の入射路 (PF-AR 直接入射路、Figure 1) を建設し、他の 3 台の蓄積リングと同時に入射できるようにするための計画が進行中である[2]。また、この入射路が完成することによって、将来、トップアップ運転が可能となる。

新トンネルの建設は 2014 年に、それに付随する設備工事は 2015 年に完成した。現在、2017 年のビームコミッションングを目指して、この夏よりビームラインの建設が本格的に始まっている。

2. PF-AR 直接入射路の構成

PF-AR 直接入射路は、Figure 1 に示したように LINAC 最下流部から PF-AR 新入射点までの約 320m の区間である。

PF-AR 直接入射路の光学関数を Figure 2 に示す。この光学関数は LINAC から FODO でビームが送られて来た場合を想定したものだが、LINAC の光学系が変更されても、第 3 スイッチヤード部 (SY3) で光学関数の吸収ができるように設計している。図は上からベータatron 関数、分散関数、ビームサイズとなっており、ビームサイズ計算には規格化エミッタンスとして $100 \times 10^{-6} \text{mrad}$ 、エネルギー広がりとして 1.0×10^{-3} のガウス分布を仮定した。

PF-AR 直接入射路の構成について、SY3、新トンネル

[#] shinya.nagahashi@kek.jp

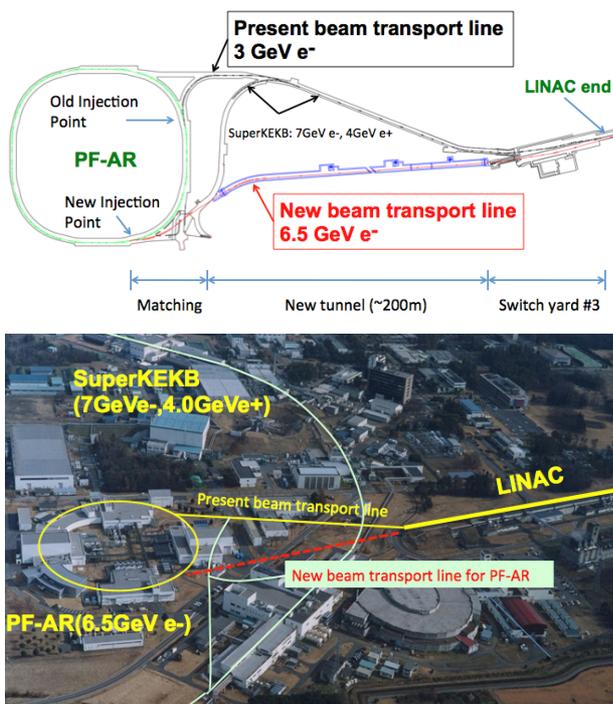


Figure 1: The direct beam transport line for the PF-AR.

部、およびマッチング部の 3 つの区間に分け、詳しく述べる。

2.1 第 3 スイッチヤード部

SY3 は Figure 3 に示したように、入射器から出た電子および陽電子ビームを SuperKEKB の HER (紫線) と LER (青線)、PF リング (緑線)、PF-AR (赤線) に振り分ける部分である。

PF-AR 直接入射路は、2.5GeV の電子ビームを PF リングへ振り分けている最大繰り返し 25pps のパルス偏向電磁石を用いて、SuperKEKB の BT と分離する。PF リングには 2.5GeV の電子を、PF-AR には 6.5GeV の電子をそれぞれ入射するため、共通のパルス偏向電磁石を同じ励磁電流で励磁しても、エネルギーの違う電子ビームの軌道を分離することが可能である。分離された

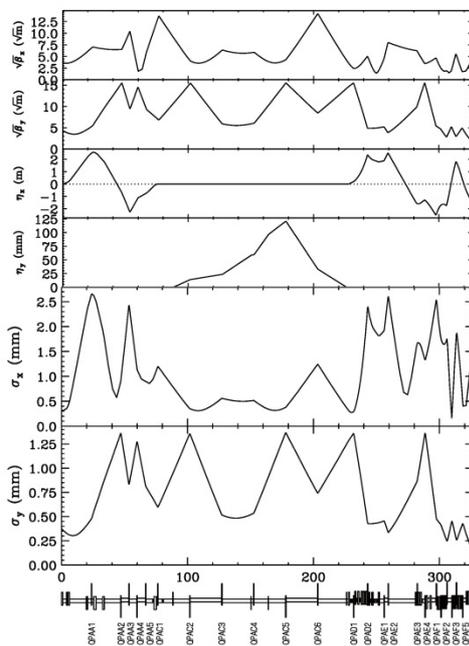


Figure 2: Optical functions from the end of the injector linac to the injection point of the PF-AR. Blue and red lines represent the horizontal and vertical parameters, respectively.

PF-AR の電子ビームは、パルス偏向電磁石直下流に設置する 2 台の DC セパタ電磁石を用いて Figure 3 の A 点で PF リングの BT と合流し、A 点下流にある共通の偏向電磁石によって、再び分離される。その後、PF-AR と PF リングの BT は、もう一度同一平面上で交差し、各蓄積リングへ向かう。

PF-AR 直接入射路の制御は、全て SuperKEKB コントロール棟で行うが、SY3 の制御系だけは、PF リングのローカルネットワークへ繋ぐことになっている。このため、制御機器も PF リング側に置かれることになるが、PF-AR 直接入射路の制御は、Experimental Physics and Industrial Control System

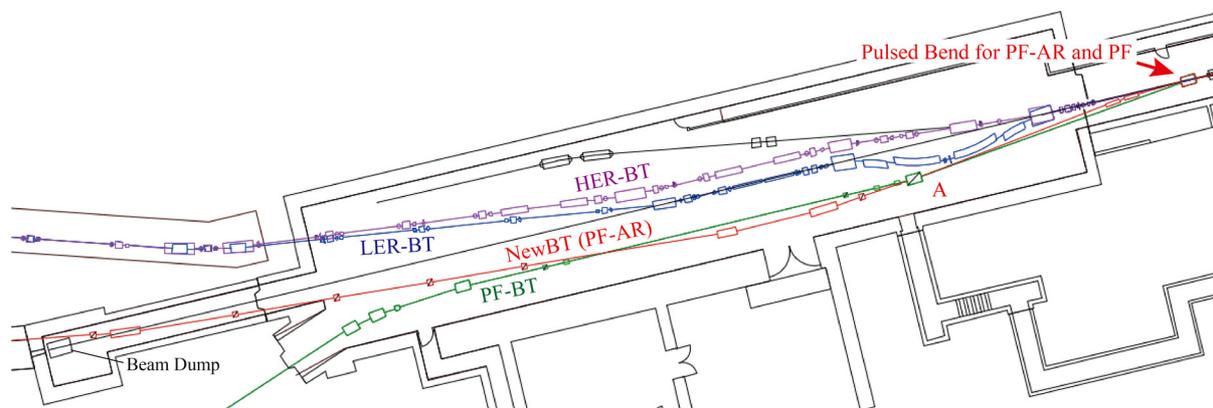


Figure 3: The direct beam transport line layout of the switchyard number 3 for the PF-AR.

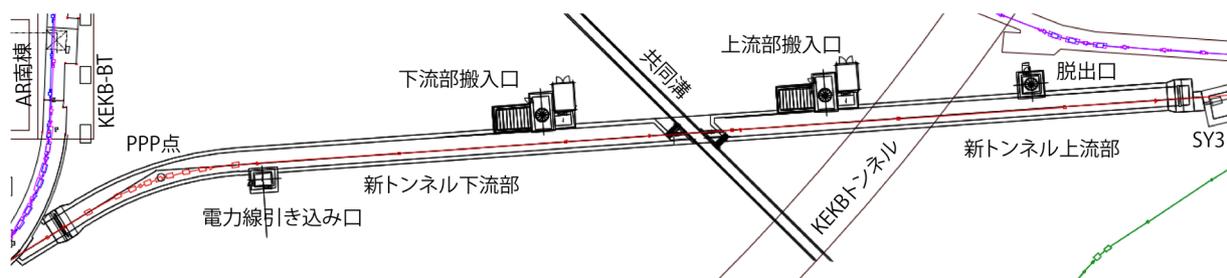


Figure 4: The direct beam transport line layout of the new tunnel section for the PF-AR.

(EPICS [3]) を用いて行うことが決まっております、EPICS record にアクセスすることが出来れば、制御機器や対象がどこにあっても関係ないと言う EPICS の利点を活用することが出来る。具体的には、EPICS Process Variable Gateway (EPICS PV Gateway) を PF ローカルネットワーク内に置き、必要な record だけ通信を許可する方式である。なお、新たに作る Graphical User Interface (GUI) には、Control System Studio (CSS, [4][5]) を採用して、統一化を図る予定である。

2.2 新トンネル部

新トンネル部は 2013 年に建設した約 200m のトンネル部分であり、ケーブル用共同溝によって、上流部と下流部に 2 分割された構造となっている(Figure 4)。新トンネルには、エキスパンションジョイントは存在するものの、上下流のトンネルの天井の躯体は、それぞれ、共同溝と縁の切れた状態で繋がっており、日格差や季節変動の影響で、各々のトンネルの位置関係が大きくズレないように工夫してある。

新トンネルの水平ビーム軌道は、弧部より上下流にある直線部の延長線上の交点(PPP 点)と、SY3 下流のダンプトンネルに設置する磁極長 2m の偏向電磁石(BA3)を結んだ線を基準に設計した。この測量には、半径 160m において公称精度 $\pm 15\mu\text{m} + 6\mu\text{m}/\text{m}$ で測量可能な三次元測定器(Leica 製 AT402)を用いて行った。しかしながら、その距離が約 166m であったこと、レーザー光路が空調されていない約 8.7m の共同溝を横切る形で通っていたことから、BA3 の位置で、ビーム進行方向に約 0.6mm、ビーム水平方向に約 1.4mm のズレが生じてしまった。この結果は、AT402 の公称精度から判断すればそれ程悪くない数値であり、また BA3 の偏向角で対応可能な量であることから、十分使用に耐えうるものである。

垂直ビーム軌道は、共同溝内にあるケーブルラックとの干渉を避けるため、また SY3、新トンネル部、マッチング部の床面の高さの違いを吸収するため、最大約 2.7mrad の偏向角を持つ空冷の垂直偏向電磁石 4 台を用いてバンプ軌道を作る。上流部は 60m かけて約 1mrad 上方に、下流部は同じく 60m かけて約 1.5mrad 下方に高さを変える設計となっている。このバンプ軌道

内には磁極長 360mm の四極電磁石 4 台と磁極長 20mm の補正電磁石 4 台が置かれるが、磁極と真空ダクトの隙間が 1mm あるので、傾ける必要はなく、水平に設置する。

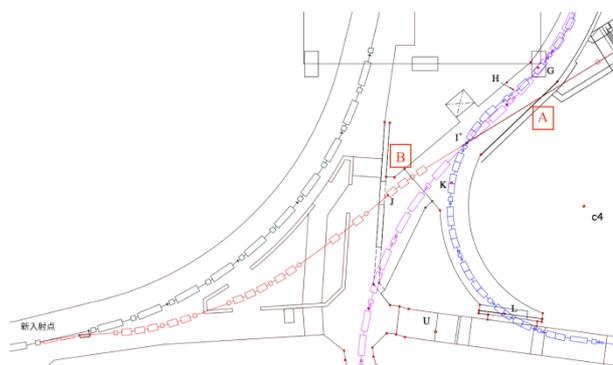


Figure 5: The direct beam transport line layout of the matching section for the PF-AR.

2.3 マッチング部

新トンネル部から出て来た PF-AR 直接入射路は、SuperKEKB HER の BT の 60cm 上方で交差した後、PF-AR の入射点へ向かう(Figure 5)。

マッチング部では、PF-AR 直接入射路が 5 箇所の壁を貫通しなければならないが、このうち下流側の 4 箇所については、三次元測量器(API 製 Tracker3(T3))と水準儀(NA2)を用いて、新入射点から位置を導出し、コア抜きを行った。

SuperKEKB の BT と交差する Figure 5 の A-B 間については、PF-AR 直接入射路の高さが床から 2.4m と高く、また SuperKEKB の BT と干渉して架台を立て難いことから、4m の真空ダクト 3 本を天井から吊り下げて設置する。このため、この間には、電磁石、ビームモニター、および真空機器を配置していない。ただし、Figure 5 の B 点については、下流側の床面を延長して、電磁石とビームモニターを設置する。

マッチング部下流の蓄積リングと同じ領域には、偏向電磁石 10 台、四極電磁石 6 台、補正電磁石 2 台を設置するが、隣同士の電磁石が近接しているため、その間に真空ダクトのフランジを配置するのが精一杯である(Figure 6)。そこで、高さ 45mm のペローズが、偏向電磁石の約 45mm~46mm の上下コイル間に挿入出来るよう



Figure 6: The Bending magnets and the vacuum chambers at matching section.

に設計されている。

新入射点のパルス電磁石は、今まで 2.5~3.0GeV だった入射エネルギーが 6.5GeV 上がるため、全て新規に製作した[6]。これに伴い、蓄積リングの銅製真空ダクトも、約 25m にわたって、更新する。

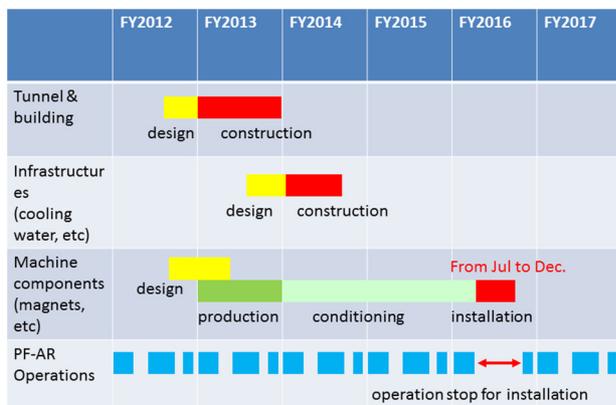


Figure 7: Construction Schedule of the direct beam transport line for the PF-AR.

3. ビームライン建設スケジュール

PF-AR 直接入射路全体のスケジュールを Figure 7 に示す。

PF-AR 直接入射路では、ビームラインの建設が始まる直前まで PF-AR の入射路に使用していた偏向電磁石 24 台と四極電磁石 11 台を再利用する。このため、旧入射路の解体作業と新入射路の設置作業を同時に行う必要がある。更に、PF-AR はビームライン建設作業のために 2017 年のビームコミッショニングまで停止しているが、LINAC と PF リングは 2016 年 10 月から 12 月まで運転を行うため、SY3 と新トンネル上流の一部は、9 月末までに完了しなかった作業を、12 月の運転停止後のわずかな期間で行わなければならない。また、機器が密集していたり、トンネルが狭かったりすることから、電磁石と真空の作業が干渉するトラブルも、あちこちで発生している。



Figure 8: A Bending magnet and a quadrupole magnet at the SY3 beam dump tunnel.

このような状況でも、電磁石作業としては一番懸念していた、SY3 下流のダンプトンネルの狭い空間に設置する BA3 の据え付けを無事に終えることが出来ている (Figure 8)。

4. 今後の予定

PF-AR 直接入射路は、複数の加速器の領域を通過することから、複数の放射線変更申請が同時に行われている。現在、遮蔽計算等申請内容が固まり、安全系の作り込みや遮蔽の設計等具体的な作業が始まったところである。

現在、2017 年のビームコミッショニングを目指して作業を行っているところだが、PF リングの BT と交差する SY3 の機器は、LINAC や PF リングの運転に関わる場所なので、9 月末までに立ち上げを完了している必要がある。また、PF リングの BT も、電磁石の干渉を避けるために配置を変えているため、光学系の設計を進めている。

今後も、様々な困難を乗り越え、2017 年のビームコミッショニングを無事に迎えたいと願っている。

参考文献

- [1] T. Kamitani, " SuperKEKB Phase1 (Injector+Ring) Status Report", in Proceedings of the 13th Annual Meeting of PASJ, 2016, MOOLP02.
- [2] H. Takaki *et al.*, "CONSTRUCTION PROJECT OF A NEW BEAM TRANSPORT LINE FOR PF-AR", in Proceedings of the 11th Annual Meeting of PASJ, 2014, SUP020.
- [3] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [4] <http://controlsystemstudio.org/>
- [5] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/css/>
- [6] A. Ueda, " Magnetic Field Measurements of the new kicker and septum magnets for PF-Advanced ring", in Proceedings of the 13th Annual Meeting of PASJ, 2016, TUP111.