

## PF-AR 新ビーム輸送路建設計画

### CONSTRUCTION PROJECT OF A NEW BEAM TRANSPORT LINE FOR PF-AR

高木 宏之<sup>#A)</sup>, 浅岡聖二<sup>A)</sup>, 古川和朗<sup>A)</sup>, 芳賀開一<sup>A)</sup>, 原田健太郎<sup>A)</sup>, 本田融<sup>A)</sup>, 本間博幸<sup>A)</sup>, 飯田直子<sup>A)</sup>, 柿原和久<sup>A)</sup>, 菊池光男<sup>A)</sup>, 小林幸則<sup>A)</sup>, 工藤喜久雄<sup>A)</sup>, 久米達哉<sup>A)</sup>, 三増俊広<sup>A)</sup>, 宮内洋司<sup>A)</sup>, 長橋進也<sup>A)</sup>, 中村典雄<sup>A)</sup>, 中村 一<sup>A)</sup>, 濁川和幸<sup>A)</sup>, 野上隆史<sup>A)</sup>, 帯名崇<sup>A)</sup>, 小川雄二郎<sup>A)</sup>, 小野正明<sup>A)</sup>, 尾崎俊幸<sup>A)</sup>, 佐波俊哉<sup>A)</sup>, 佐藤政行<sup>A)</sup>, 多田野幹人<sup>A)</sup>, 田原俊央<sup>A)</sup>, 高井良太<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 多和田正文<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 上田明<sup>A)</sup>, 吉田光宏<sup>A)</sup>

Hiroyuki Takaki<sup>#A)</sup>, Seiji Asaoka<sup>A)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>A)</sup>, Kaiichi Haga<sup>A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Tohru Honda<sup>A)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>A)</sup>, Naoko Iida<sup>A)</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>A)</sup>, Mitsuo Kikuchi<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>, Kikuo Kudo<sup>A)</sup>, Tatsuya Kume<sup>A)</sup>, Toshihiro Mimashi<sup>A)</sup>, Hiroshi Miyauchi<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Hajime Nakamura<sup>A)</sup>, Kazuyuki Nigorikawa<sup>A)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Yujiro Ogawa<sup>A)</sup>, Masaaki Ono<sup>A)</sup>, Toshiyuki Ozaki<sup>A)</sup>, Toshiya Sanami<sup>A)</sup>, Masayuki Sato<sup>A)</sup>, Mikito Tadano<sup>A)</sup>, Toshihiro Tahara<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Yasunori Tanimoto<sup>A)</sup>, Masafumi Tawada<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Yoshida

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

High Energy Accelerator Research Organization (KEK) has a construction project of a new beam transport (BT) line for the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR). Currently, the injection energy of the PF-AR is 3.0 GeV and the accumulated beam is accelerated to 6.5 GeV. The new BT line will connect from the LINAC end to the PF-AR ring in an approximately straight line and will become independent of the KEKB 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, HER, LER of KEKB and PF ring. The new BT tunnel was almost completed in FY2013, and the installation of utilities is in progress now. The whole project is planned to be finished in FY2016 synchronized with the commissioning and the development of the SuperKEKB.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の線形加速器 (LINAC) は、つくばキャンパス内にある 4 台の蓄積リング、すなわち KEKB の High Energy Ring (HER)、Low Energy Ring (LER)、Photon Factory (PF)、及び Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) に対して電子もしくは陽電子ビームを供給している (現在 KEKB は SuperKEKB<sup>[1]</sup>へとアップグレード中である)。LINAC は高速スイッチングを行うことでエネルギーの異なる電子及び陽電子を 50Hz で任意に供給する能力を有しており、PF-AR 以外の 3 台の蓄積リングはこの高速スイッチングされたビームを使って入射が可能である<sup>[2]</sup>。PF-AR だけはこの高速スイッチングに参加していないため、他の 3 台の蓄積リングへの入射を中断したうえで LINAC を 20 分程度専有して入射を行っている。また、Fig. 1 に示すように、PF-AR の現在のビーム輸送路は KEKB のビーム輸送路 (KEKB-BT) と共有区間を持っている。したがって、PF-AR への入射時には KEKB-BT の一部区間を PF-AR 入射用に最適化する必要がある。しかしながら、現在アップグレード中の SuperKEKB では蓄積ビームの寿命が 10 分程度と短くなるため、今までのように PF-AR 入射時に

LINAC を専有して入射を行うことが困難となり、PF-AR も高速スイッチングされたビームを使って入

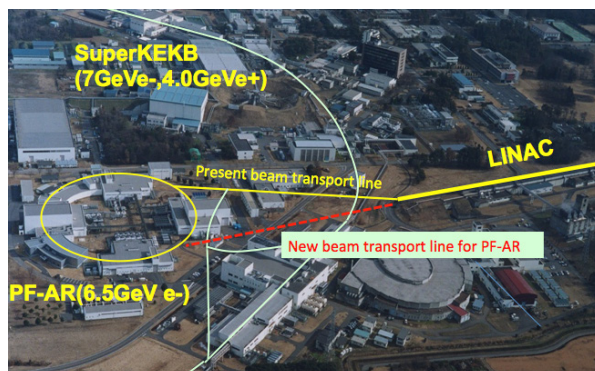
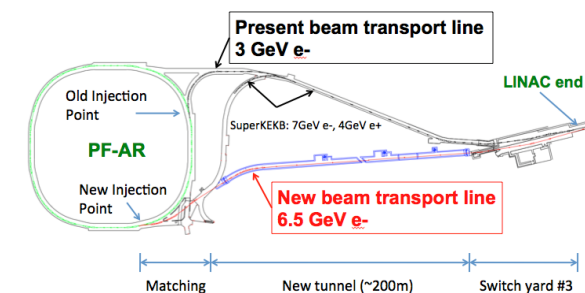


Figure 1: New beam transport line (red) for the PF-AR.

<sup>#</sup> hiroyuki.takaki@kek.jp

射する必要が出てきた。

そこで、3.0GeVの電子を入射するよう設計されていた現在のビーム輸送路の使用をやめ、最初から6.5GeVの電子ビームをPF-ARに直接入射するための新しいビーム輸送路(Fig. 1の赤線)を建設しようという計画が現在進行中である。これにより、今後は3.0GeVで入射した後に6.5GeVまで加速する必要がなくなり、6.5GeVでのフルエネルギー入射が可能になると共に将来的にはトップアップ運転も可能となる。

## 2. 新ビーム輸送路の構成

新ビーム輸送路の構成はFig. 1に示すようにLINACの最下流部からPF-ARの新入射点まで約320mある。新ビーム輸送路の光学関数はFig. 2に示す通りである。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ている。LINACの光学系がダブレット等に変更された場合は、第3スイッチヤード部で光学関数の吸収ができるようにしている。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 $100 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{rad}$ 、エネルギー広がりとして $1.0 \times 10^{-3}$ のガウス分布を仮定した。

新ビーム輸送路は、都合上3つの部分に分けており(第3スイッチヤード部、新トンネル部、およびマッチング部)、以降の節でそれぞれの部分を詳しく述べる。

### 2.1 第3スイッチヤード部

第3スイッチヤード部(SY3)はFig. 3に示すように、入射器からの電子および陽電子ビームをKEKB(HER-BT:紫線、LER-BT:青線)、PF(緑線)、およびPF-AR(赤線)に振り分ける部分である。現在、SY3のKEKB-BTを通して3 GeVの電子をPF-ARの入射点に輸送しているが、新ビーム輸送路ではPFが使っているパルスベンドを共通に使い、SY3においてKEKB-BTと分離される。PFへは2.5GeVの電子を輸送し、PF-ARへは6.5GeVの電子を輸送

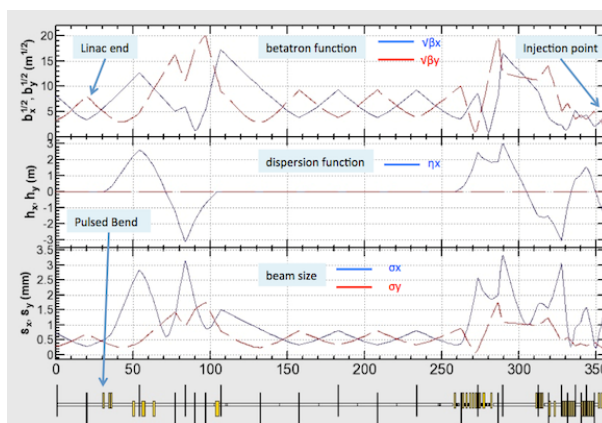


Figure 2: Optical functions from the end of the injector linac to the injection point of the PF-AR. Blue and red lines represent the horizontal and vertical parameters, respectively.

するため、共有のパルスベンドは2.5GeVのPFに合わせた蹴り角に固定したうえで、6.5GeVの電子用には現在のパルスベンドの直下流に2台のパルスベンドを増設し対応する。

PFとPF-ARへのエネルギーの違う2つのビーム輸送路は、ほぼ似たような角度でパルスベンド直後に設置された偏向電磁石(Fig. 3のA点)に到達する。ここでエネルギーの低い2.5GeVの電子は大きく曲げられ、6.5GeVの電子はほとんど曲げられないので2つの輸送路が分離できる。その後、両ビーム輸送路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へ向かうビーム輸送路は、SY3のゼロ度のビームダンプの手前で更に曲げられて新トンネル部へと接続される。ビームダンプがある部分では厚さ3mのコンクリート壁にコア抜きを行う。コア抜き部は、SY3側の既存の2mの壁の部分は直径200mmで抜き、新トンネル部分側の1mについてコンクリート注入時にボイドを使って直径250mmの穴となっている。

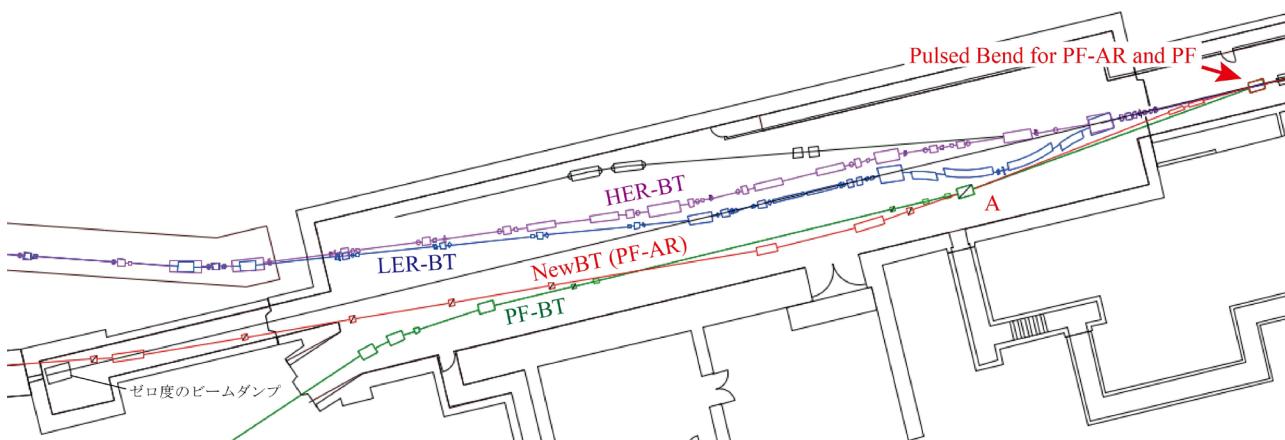


Figure 3: New beam transport line layout of switchyard number 3.

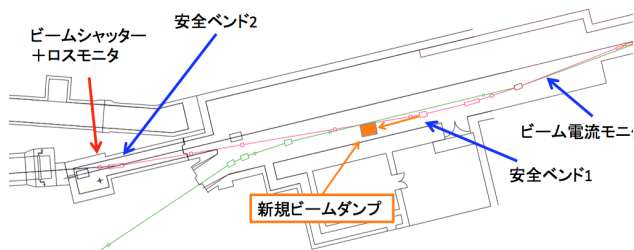


Figure 4: Safety bending magnets and new beam dump at SY3.

SY3 の床面にはピットが縦横に走っているため、電磁石設置時には H 鋼等を使ってピットを跨ぐような脚部を電磁石架台下部に用意し避ける予定である。

新ビーム輸送路を通して LINAC からの電子ビームが PF-AR に絶対に入射されないという安全を担保するための偏向電磁石 (安全バンド) は、SY3 に設置した偏向電磁石 2 台を使用する (Fig. 4 参照)。安全バンド 1 は、ビームダンプを使って PF-AR 用のビームを調整するためのものである。安全バンド 2 は、LINAC のゼロ度ラインを通過して来たビームが PF-AR の新ビーム輸送路に入って来ないようにするためのものである。この 2 台の安全バンドにより LINAC の調整が安全に行える。ビームシャッター及びロスモニタは安全バンド 2 の下流に設置する予定である。

SY3 に設置した電磁石の内、ビーム進行方向の長さが 1.3m と 1.85m の 2 台の偏向電磁石およびの 0.4m の四極電磁石 5 台は新規に製作した。安全バンド 2 に使用するのは既存の電磁石である。SY3 に設置する電磁石用の電源は PF リング地下に設置し、そこから電源ケーブルを PF のビーム輸送路を通して SY3 まで敷設する。SY3 と新トンネルとの間は新ビーム輸送路用にしかコアが抜かれておらず、新トンネル部の電気、冷却水等は下流側から引く事になる。

現在 PF のビーム輸送路に設置してある電磁石と PF-AR の新ビーム輸送路は 2 箇所干渉するところがある (Fig. 3 の分離用電磁石の直下流の四極電磁石 2 台と、再度 2 つのビーム輸送路が交差する直下流の四極電磁石 1 台)。この干渉する電磁石については 1m 程度下流側へ移動することを考えている (Fig. 3 には移動予定箇所が描いてある)。この四極電磁石の移動に伴い PF ビーム輸送路には新しいオプティクスが必要になるが、PF ビーム輸送路全体を変更することなくスロープの手前で現在のオプティクスと

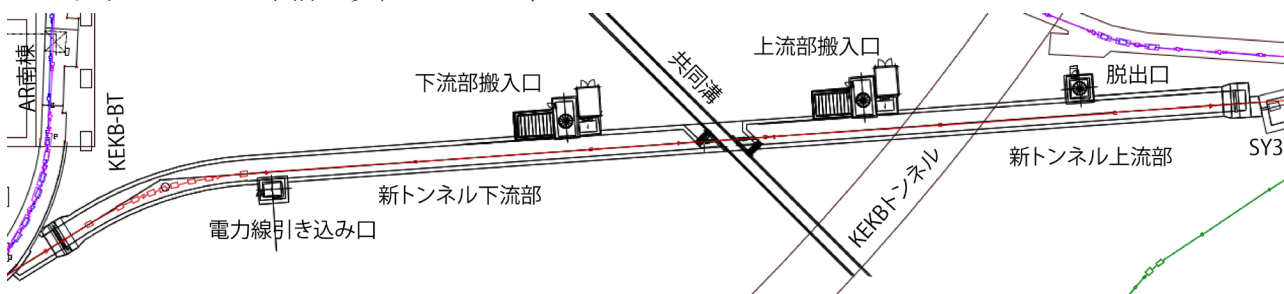


Figure 5: New beam transport line layout of new tunnel section.

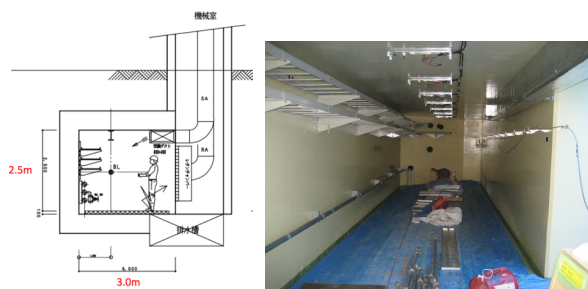


Figure 6: New tunnel.

マッチングさせる予定である。

## 2.2 新トンネル部

新トンネル部は 2013 年度に新たに建設した約 200m のトンネル部分を指す (Fig. 5 参照)。直線部の光学関数は FODO で繋がっており、約 26m 毎に四極電磁石が設置されている。アーク部は 9 台の既存の 1m の偏向電磁石を使って約 30 度曲げている。新トンネルは、KEKB コントロール棟から富士実験室へ走る共同溝によって上流部と下流部に 2 分割される。共同溝には KEBK の安全系等のケーブルが多数走っており、このケーブルラダーを動かすとケーブルに不要なテンションをかけることになる。それを回避するために、共同溝部を通過する際に本来のビーム輸送路の高さに比べて約 10cm 程度上方を通すことでケーブルラダーの間を通す。このために 1.7mrad 程度の蹴り角を持つ空冷の垂直偏向電磁石を 4 台用意し 60m かけてこのバンプ軌道を作る。正確なバンプの高さは、2014 年度夏に行うビーム輸送路の野書き時の測量結果を元に決める予定である。またこのバンプ区間に設置した 5 台の四極電磁石は、スロープに沿って角度を持たせることなく水平に設置する予定である。

新トンネルの断面図は、Fig. 6 に示すように幅 3m 高さ 2.5m となっている。ビーム輸送路は西側の壁 (Fig. 6 の図中左側) から 1m の所に設置し、通路として 2m を確保する。トンネル天井にクレーンはなく、物品の運搬は通路を使って運ぶ必要がある。ビーム輸送路側には幅 500mm のケーブルラダーを 2 段用意した。

新トンネルへの物品の搬入口は上下流部にそれぞれ1箇所ずつある。搬入部の開口は5m×3mである。開口部は室外にあり、天井部は厚さ500mmのコンクリートシールドで覆われる。コンクリートシールドは1本あたり3280mm×500mm×500mmで重さ約1.9tとなっており、隣り合うシールドが重なり合うような形に作られている。コンクリートシールド上部には通常テントが張られ、雨が直接コンクリートシールドには当たらないようにしてある。安全のためコンクリートシールドの合わせ目にはゴムのパッキンを取り付け、雨水がトンネル内に入らないよう対策を施す。

新トンネル上流部はKEKBのトンネルの上を通過する。そのため、この部分ではARBTのトンネル工事中が少しでもKEKBのトンネルに影響を及ぼさないように500mmほど通常部分に比べてビーム輸送路の床を高くして通過している。これによりKEKBトンネルの上部との間隔は約3mとなる。

新トンネル下流部の偏向電磁石は水冷であり、必要な冷却水はPF-ARのリングからKEKB-BTを横切って新トンネル下流側へ引く。これにともない、PF-ARとKEKB-BTおよび、KEKB-BTと新トンネル下流部の間の壁に冷却水配管を通すためのコア抜きを行う。上流部に設置する四極電磁石、垂直偏向電磁石、および補正電磁石は全て空冷のため上流部には冷却水の配管はなく、上下トンネル間には排水用の配管が通っているだけである。新トンネルの排水は最終的にはKEKB-BTの排水用の釜に集められる。

新トンネル部に設置した電磁石用の電源は、AR東棟の現在のビーム輸送路用電源が設置されている部屋に収納する。電力ケーブルはそこから地上部を通過して新トンネル下流部まで引かれ、Fig. 5にある電力線引き込み口位置からトンネルに落とし込む。

### 2.3 マッチング部

マッチング部はFig. 7に示すように、新トンネル部から来た新ビーム輸送路がKEKB-BTと交差した後PF-ARの入射点へ向かう。新ビーム輸送路を通すために合計4箇所の壁に直径200mmのコアを抜く必要がある。コア抜き箇所は、新トンネル下流部とKEKB-BT間の壁、KEKB-BTとPF-AR間の壁、および旧TRISTANリングへの出射路を形作っている三角形の部屋の壁2箇所である。

SY3、新トンネル、およびARリングにおけるビーム輸送路の高さは床から1200mm（床のうねりは別として）となっているが、マッチング部のKEKB-BTと新ビーム輸送路が交差する点においてKEKB-BTの床は1200mm低くなっている。したがって床から900mmの高さにKEKBの陽電子ビーム輸送路が走り、その900mm上をKEKBの電子ビーム輸送路が走り、さらにその600mm上（床から2400mmの高さ）を新ビーム輸送路が走り交差する事になる。そして、Fig. 7の”イ”と書かれた部分より下流側（図中左側）で再び床面が高くなり、ビーム輸送路の高さは1200mmとなりPF-ARの入射点へと向かう。KEKB-BT付近に設置する電磁石の殆どはこの2400mmの部分避ける形で設置する。ただし、

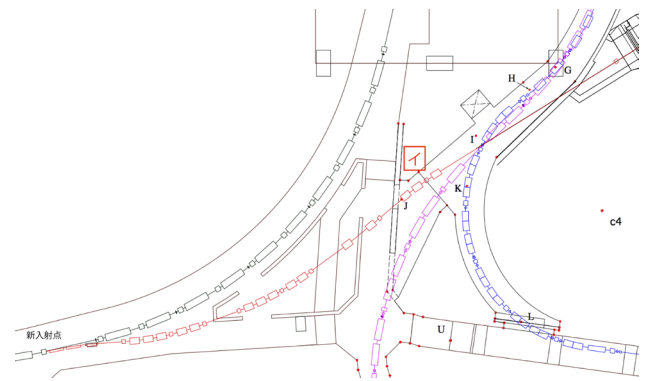


Figure 7: New beam transport line layout of matching section.

偏向電磁石1台と四極電磁石1台はその境目に設置する必要があり、この部分には高さ1200mmのテラスを作りその上に電磁石を設置する予定である。

新ビーム輸送路の最下流にある6台の四極電磁石については新ビーム輸送路の他の部分に設置したものに比べて強い収束力を必要とすることから、ボア直径を38mmで新規に製作した（他の四極電磁石のボア直径は52mm）。また、入射点に設置する2台のセプタム電磁石およびDCセプタムも新規に製作した。

マッチング部の電磁石用電源は新トンネル部と同様にAR東棟に設置する。電力ケーブルについてはARリングの中を通過して供給する。また、冷却水はARリングから供給するため、ARリングとKEKB-BT間にはコア抜きをおこなう。

### 3. インストールスケジュール

新ビーム輸送路の建設スケジュールをFig. 8に示す。トンネル建設は2013年度で終了し、2014年度は設備工事を行う予定である。新ビーム輸送路に使用する電磁石は、現在のPF-ARの3GeV入射路で使用している電磁石（偏向電磁石24台、四極電磁石18台）を基本的には再利用する予定であるが、6.5GeVにエネルギーを上げたため、入射点付近には強い四極電磁石が必要であるので6台は新規製作し、またSY3に設置する偏向電磁石の内2台及び新入射点に

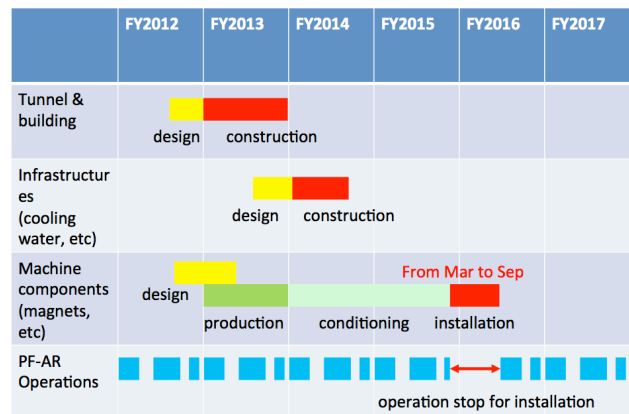


Figure 8: Construction schedule of the PF-AR new transport line.

設置する DC セプトラムは新たに製作した。新規に製作が必要となった電磁石、電源、真空ダクト等の加速器コンポーネントの建設は2013年度中にほぼ終了した。新ビーム輸送路へのコンポーネントのインストールについては、現在のところ、2016年の3月頭から9月末を考えている。インストールに際して、現在使用している3GeVのビーム輸送路に使われている電磁石を新ビーム輸送路に移設するため、PF-ARは2016年3月頭から運転を停止する予定である。PFについてはSY3のみの改造となるため、SY3および入射器運転時に立ち入り禁止となるトンネル上流部については7月頭からのインストール作業とする。これによってPFは2016年3月から予定している新ビーム輸送路のインストール期間中、夏季停止期間までは通常どおり運転が可能となる予定である。また、新ビーム輸送路を作るに当たって、SY3におけるPFのビーム輸送路にも多少変更が必要となる(詳細は2.1節参照)。2016年10月にPFとPF-ARを同時に立ち上げとなるのを避けるために、PFのビーム輸送路については2015年の夏に作業ができないか現在検討中である。

現在考えている新ビーム輸送路のインストール時期については、KEKB-BTを横断して作る予定であることから、SuperKEKB建設の進行状況に依存する所が大きい。現在、新ビーム輸送路のインストール開始が2016年の3月からとなっているのはBelle-II検出器のロールインの時期に合わせているためであり、この時期が変更されるとそれに伴って新ビーム輸送路のスケジュールも変更されることになる。

#### 4. その他の設備

トンネル内の空調及び電気は、新トンネルの搬入口の横に新規に建設する機械棟に置かれる。機械棟は現在建設中で、設備工事が完成する9月中旬に同時に完成する。また新トンネル内のモニタ及び真空機器の制御用に上下流トンネル搬入口傍に制御機器収納庫(5.4m×3.6m)をそれぞれ1室用意した

#### 5. 現状および今後の予定

新ビーム輸送路の工事については、現在、設備工事が順調に行われている。また新トンネルより下流のビーム輸送路の野書きを行っている。今後は新ビーム輸送路の具体的な設置に向けての準備を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] M. Masuzawa, "Next Generation B-factories", in Proceedings of the First International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, 2010, pp. 4764-4768.
- [2] Eiji Kikutani, Kazuro Furukawa, Makoto Tobiyama, "KEKB Bucket Selection System, Present and Future", in Proceedings of the 7th Annual Meeting of PASJ, 2010.