

## PF-AR 直接入射路の電磁石システムとそのアライメント

### THE MAGNET SYSTEM AND THE ALIGNMENT FOR THE PF-AR DIRECT BEAM TRANSPORT LINE

長橋 進也<sup>#</sup>, 高木 宏之, 上田 明, 原田 健太郎, 東 直, 中村 典雄

Shinya Nagahashi<sup>#</sup>, Hiroyuki Takaki, Akira Ueda, Kentaro Harada, Nao Higashi, Norio Nakamura

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

The PF-AR direct beam transport (BT) is 6.5 GeV new beam transport of about 320 m length from the pulsed bending magnet at the end of electron-positron linear accelerator (LINAC) to the injection point of the PF-AR storage ring. The construction was finished in February, 2017. The beam commissioning has been completed next March and the user run began in April. There are 30 horizontal bending magnets, 21 quadrupole magnets, 4 vertical bending magnets, 15 independent correction magnets and 2 pulsed septum magnets in the PF-AR direct BT. The BT was divided into 5 sections by shielding wall with about diameter 20 cm through-hole; the 3rd switch yard of the LINAC, the upstream section and the downstream section of the new BT tunnel, the crossing section over the Super KEKB BT and the storage ring tunnel. We used a laser tracer (Leica AT402, typical measurement volume:  $\phi 320$  m, absolute accuracy:  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ ) and a tilting level (Wild N3, 1 km double run levelling: 0.2 mm,  $\pm \sigma$ ) for precise magnet alignments. Except for the 2 septum magnets at the injection point that have interference with the vacuum chambers, all the magnets are aligned within 0.1 mm accuracy on the target position.

#### 1. はじめに

PF-AR 直接入射路は、電子陽電子入射器(LINAC)最下流部に設置されたビーム振り分け用パルス偏向電磁石から PF-AR 入射点までの約 320 m の区間 (Figure 1) であり、2017 年 2 月までに建設が完了し、翌 3 月にビームコミッショニングを行い、4 月よりユーザー運転を開始した[1]。PF-AR 直接入射路の電磁石は、水平偏向電磁石 30 台、四極電磁石 21 台、垂直偏向電磁石 (VB) 4 台、独立補正電磁石 15 台、パルスセプタム電磁石 (セプタム電磁石) 2 台であり、これらの電磁石は、直径 20 cm 程度の貫通口 (Figure 1 の A, B, C, D) のあるシールドで区切られた 5 つの領域 (LINAC 第 3 スイッチヤード (SY3)、PF-AR 直接入射路トンネル (新トンネル) 上流部と下流部、SuperKEKB BT 交差部、PF-AR 蓄積リングトンネル (PF-AR トンネル)) に渡って設置されている。測量およびアライメントには、半径 160 m において  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$  の公称精度で測定可能な三次元測定器 (Leica 製 AT402) と、1 km 往復測量の標準偏差 0.2 mm の公称精度を持つ水準儀 (Wild 製 N3) を使用した。真空チャンバーと干渉のあったセプタム電磁石 2 台を除き、水平垂直ともに、全て目標値の  $\pm 0.1$  mm 以内に設置することができた。

以下に、電磁石システムの概要、予備測量と電磁石の精密アライメントについて述べる。

#### 2. 電磁石システム

##### 2.1 電磁石

LINAC と新入射点はほぼ直線の位置関係でありながら、PF-AR 直接入射路は、既設構造物との干渉を避ける

ため、30 台の水平偏向電磁石により曲がりくねった構造

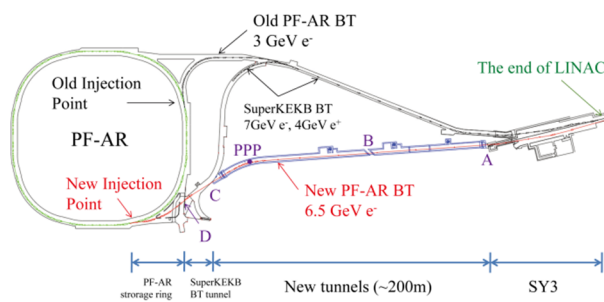


Figure 1: The direct beam transport line for the PF-AR.

となっている。また、約 320 m と距離もあることから、四極電磁石や補正電磁石も多数必要である。我々は、建設コストを下げるため、ビームラインの建設を始める直前の 2017 年 6 月末まで旧 PF-AR 入射路 (旧 BT) で使用していた偏向電磁石と四極電磁石をできる限り再利用することにした。旧 BT の電磁石は、旧トリスタンの入射路から使用され続けていたため、老朽化の問題を抱えている。しかし、旧 BT の運転が終了するまで電子ビームの輸送に大きな問題は起きなかったことから、再利用可能と判断した。再利用する電磁石の磁場測定は、旧 BT の解体から PF-AR 直接入射路の運転開始までの工期が約 7 ヶ月半と短かったことから、実施しなかった。

Table 1 に水平偏向電磁石と垂直偏向電磁石、独立補正電磁石及びステアリング用の補助コイルの主なパラメータを示す。BD, BE, BF1, BF2, BF3 は旧 BT からの再利用電磁石である。PF-AR 直接入射路では 6.5 GeV の電子を輸送するのに対して、旧 BT は 3.0 GeV であった。そこで、少しでも水平偏向電磁石の磁場強度を上げて、軌道設計の自由度を増すために、設計上の最大電流値 200 A をどこまで超えられるか、予備の電磁石を励磁して、

<sup>#</sup> shinya.nagahashi@kek.jp

Table 1: Parameters of the bending and the correction magnets. “HD\_” means the correction coil of the main magnet used for the corrector.

Magnet name	New or old	Number of magnets	Core length [mm]	Gap height [mm]	Maximum Current [A]	Coil turn numbers	Maximum magnetic field [T]
DCSA, DCSF	New	3	980	20	1000	10 x 2	1.339
BA1	New	1	1850	34	250	180 x 2	1.572
BA2	New	1	1300	34	250	180 x 2	1.584
BA3	Old	1	2000	25	300	40 x 2	1.201
BD	Old	9	1000	34	210	160 x 2	1.317
BE	Old	3	1000	34	200	160 x 2	1.265
BF1	Old	2	1000	34	150	160 x 2	0.9599
BF2, BF3	Old	10	1000	34	220	160 x 2	1.367
VB	New	4	200	52	10	731 x 2	0.4531
HD, VD	New	15	200	52	5	504 x 2	150.7x10 <sup>-3</sup>
HD_BA3	Old	1	2000	25	5	30 x 2	13.36 x10 <sup>-3</sup>
HD_BD, BE, BF1, BF2, BF3	Old	15	1000	34	5	50 x 2	17.12 x10 <sup>-3</sup>

Table 2: Parameters of the Quadrupole Magnets

Magnet name	New or old	Number of magnets	Core length [mm]	Bore diameter [mm]	Maximum Current [A]	Coil turn numbers	Maximum magnetic field gradient [T/m]
QA, QC1	New	5	400	52	30	126 / pole	15.75
QC2 to QC6, QD, QE	Old	11	360	52	30	118 / pole	14.49
QF	New	5	400	38	30	126 / pole	26.91

ホール素子を用いた中心磁場強度の測定を簡単に実施してみた。その結果、励磁電流値が 180A を超えたあたりから磁場の飽和が始まり、それにもなって電源電圧も徐々に高めの値となっていることがわかった。また、励磁電流 300 A 時のコイル表面温度は、励磁電流 200 A 時と比べて十数°C 高くなることがわかった。以上の結果と老朽化の程度から判断し、PF-AR 直接入射路での最大電流値は 10%増しの 220 A として設計することとした。

DCSA, BA1, BA2, BA3 は SY3 に設置した偏向電磁石である。SY3 には、既に SuperKEKB や PF リングの入射路、LINAC の診断ラインが配置されており、新たに電磁石を設置するスペースが限られている。このため、偏向電磁石 1 台あたりの偏向角も大きくする必要がある。しかしながら、旧 BT の再利用電磁石では十分な偏向角が得られないことから、BA3 を除く偏向電磁石は新たに製作した。また、DCSA は SuperKEKB と PF リングの入射路 (PF BT) に挟まれた領域に設置するため、10 mm 厚の鉄板 (SS400) を取り付け、磁気遮蔽を施した。

旧 BT の補正電磁石には 6.5 GeV の電子ビームを十分に曲げられるだけの能力がなかったため、補正電磁石と VB は全て新規に製作した。

Table 2 に四極電磁石の主なパラメータを示す。QC2 ~ QC6, QD, QE は旧 BT の再利用電磁石である。SY3 に設置した QA と QC1 は、前述した様に、設置するスペースの都合から新規に製作した。また、QF は、入射点までの光学系の設計において磁場勾配を大きくする必要があったため、ボア径 38 mm の電磁石を新規に製作

した。

水平偏向電磁石は全てホローコンダクターによる直接水冷式だが、専用の冷却水システムを増設することなく、必要な冷却水は全て既存の冷却水配管から分岐することで確保した。特に、新トンネル下流部弧部の冷却水は、PF-AR 蓄積リングの電磁石用冷却水配管を分岐、延長し、SuperKEKB BT 交差点を越えて配管した。新トンネル下流部の直線部分と上流部に設置した四極電磁石、垂直偏向電磁石、補正電磁石は全て空冷式で冷却水は必要ないため、この領域に冷却水配管は設置されていない。

## 2.2 電磁石電源

PF-AR は、直接入射路が完成したことにより、トップアップによるユーザー運転の実施が期待されている。一方、旧 BT で使用していた電磁石電源の大半はトリスタン (現 SuperKEKB) の入射路から使用し続けているもので、老朽化による故障を度々経験していた。そこで、PF-AR 直接入射路の信頼性を向上するため、一部の補正電磁石電源を除き、ほぼ全ての電磁石電源を新規に製作した。

前述した様に、電磁石が 5 つの領域に分かれて設置されていることにともない、電磁石電源も 3 つの建屋 (SY3 用電磁石電源は PF リング地下機械室、新トンネル用電磁石電源は AR 東棟、SuperKEKB BT 交差点部と PF-AR トンネル用電磁石電源は AR 西棟) に分けて配置した。

全ての電磁石電源の制御に Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) [2]を採用した。偏向電磁石電源(大型電源)については、電源本体の制御装置として横河製 PLC (FA-M3 シリーズ)を採用し、EPICS IOC が実装可能な F3RP61 とのデュアル CPU 構成(シーケンス CPU で電源本体の制御を行い、F3RP61 上で動作する EPICS IOC とは共有メモリー等を介して情報のやり取りを行う)となっている。上位との通信は、F3RP61 に Ethernet ケーブルを接続するだけで EPICS のチャンネルアクセスが可能となる制御方式[3]で、PF リングのパルス六極電磁石電源や cERL の第 2 電子銃電源で実績のあるものである。

四極電磁石や垂直偏向電磁石、補正電磁石電源(小型電源)は、cERL で実績があり EPICS と互換性のある CAENels 製の両極性電源(SY シリーズ)を採用した[4]。一部の補正電磁石電源については、在庫していた両極性電源を使用し、F3RP61 を使用して制御している。ただし、この PLC のアナログモジュールはチャンネル間が絶縁されていないため、電源のアナログ信号を入出力するためには間にアイソレータを挟まなければならないことに注意が必要である。これら小型電源の制御方式も、cERL で実績のあるものである。

全電磁石電源のグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)として、cERL で実績のある Control System Studio (CSS)を採用した。既存のソフトウェア資産を最大限活用することにより、開発時間の短縮を図った。

前述した様に、2016 年 6 月からのビームライン建設は作業量に対して十分な工期があるとは言えない状況であったため、電磁石電源と電磁石間のケーブル(DC ケーブル)配線は、電磁石を設置する領域の加速器が運転停止しているわずかな期間に前倒して行った。SY3 は 2014 年 3 月の LINAC 運転停止中に、新トンネルは加速器が運転中でも入域可能なようにトンネル内にフェンスを設けて 2016 年 6 月に行った。KEKB BT 交差部と PF-AR トンネルは、事前に AR 西棟内の経路を確保できず、2016 年 6 月 30 日の運転停止と同時に配線を開始した。DC ケーブルの経路は、同じ AR 西棟内に設置してある KEBB BT 用電磁石電源の電源ケーブル(AC ケーブル)を一旦全て撤去し、それらを PF-AR 直接入射路用 AC ケーブルのために新設したケーブルラックへ載せ替えることで確保した。これらケーブルの接続は、電磁石や電源が設置された後に行う必要があるため、全ての配線作業が完了したのは、PF-AR の運転開始まであと 1 ヶ月を切った頃であった。ということで、残りの 1 ヶ月弱の間に、後述する電磁石インターロックの動作確認、電磁石電源の立ち上げ調整、電磁石の極性確認と修正、遠隔からの制御系構築まで行う必要があったが、前述した様に、実績のあるものを採用した結果、全て運転開始前に完了することができた。

### 2.3 電磁石インターロック

様々な安全性を担保するために、電磁石や電源にはインターロックが用意されている。偏向電磁石には冷却水の流量低下と電磁石の温度上昇を監視するインターロックが、四極電磁石と垂直偏向電磁石には温度上昇を監視するインターロックが設けられている。これらのインターロックを処理するためにも大型電源と同じ横河製

PLC のデュアル CPU 方式を採用した。冷却水流量や電磁石温度信号はハードワイヤーで PLC に入力し、シーケンス CPU 上で判断し、ハードワイヤーで大型電源まで接続している。仮に何らかの理由で F3RP61 の EPICS IOC が停止しても、必要な時には必ずインターロックをかけることができるので安全である。小型電源は、容量が小さいことから PLC と小型電源間の配線は省略し、EPICS レコード経由でインターロック情報を渡している。制御と監視の為の GUI は、電磁石電源と同様 CSS で作成した。

同じ PLC で電磁石電源の運転時にトンネル内で赤色パトライトを回す制御も行っており、これもまたシーケンス CPU 上で判断している。大型電源の ON 信号はハードワイヤーで PLC に接続しているが、小型電源の ON 情報は、前述した理由と同じく配線は省略し EPICS レコード経由で PLC に渡している。

BA2, BA3 電磁石には、これらに加えて入域時の安全を担保するために安全システムからの運転許可信号が、外部インターロックとしてハードワイヤーで直接電磁石電源に接続されている。

各電磁石からのインターロックケーブルは、領域毎にトンネル内に設置した中継箱に一旦集約し、そこから PLC まで 60 芯の多芯ケーブル 1 本で接続した。60 芯よりも信号数が多い場合には、コモン信号を共通化して多芯ケーブル 1 本でも足りる様に設計した。これにより、電源設置場所とトンネル間にあるケーブル貫通口の配線量を減らし、スペースと作業時間を節約することができた。

## 3. 測量と精密アライメント

測量と据え付けの詳細を順に述べる。

### 3.1 着工前測量

PF-AR 直接入射路の電磁石と SuperKEKB BT の電磁石との設計上の位置関係はわかっている。そこで、新トンネルの着工前測量では建築基準点と同時に、新トンネルが接続する上流側の SY3 と下流側の SuperKEKB BT 交差部に設置されている SuperKEKB BT の電磁石の位置も測量した。これにより、建屋と PF-AR 直接入射路のビームラインとの位置関係を出すことができようになり、それらの間に 90 mm 程度のずれがあることがわかった。我々は建築関係者と協議を重ね、新トンネルの形状をビームラインに合わせて修正してもらうこととした。具体的には、新トンネル下流部弧部の多角形の頂点をビームラインのそれ(Figure 1 の点 PPP)と合うように修正し、点 PPP から SY3 までの直線部はビームラインと並行になる様に修正を加えた。また、貫通口 A, C についても同様に、ビームラインが貫通口の中心を通る様に開けられた。貫通口 B は、水平方向はビームラインの中心だが、垂直方向は、新トンネル上流部と下流部の間を横切っている既設共同溝内のケーブルラックを避けるため、ビームラインよりも 62 mm 高い位置に開けられた。

新トンネル床面の高さは、SY3 と SuperKEKB BT 交差部それぞれの床面の高さの平均とした。

### 3.2 壁基準座の設置

既設電磁石のある領域では、前述した様に、それらの

位置を基準としてPF-AR直接入射路のビームラインの位置を求めることができる。しかしながら、完成したばかりの新トンネルにはビームラインの位置を出すための基準がない。そこで、新トンネルの両側の壁約 1.5 m の高さに、10 m 間隔で Corner Cube Reflector (CCR)用の基準座を設けた。

### 3.3 予備測量とビームライン軌道の修正

新トンネル完成前に、SY3 の罫書きを行った。罫書きにはレーザートラッカー (API 製 T3) と、cERL 用に製作した罫書き用治具を使用した[5]。新トンネル建築の際には SuperKEKB BT の電磁石を基準にビームラインを求めたが、PF-AR 直接入射路は PF BT と共通の電磁石を通ることから、これ以降の SY3 における基準を PF BT へと変更した。

予備測量として、新トンネル完成後に新入射点周辺の電磁石を測量し、その座標を下流から上流に向けて SY3 最下流の水平偏向電磁石 (BA3) まで繋げていった。これ以降の測量には AT402 を使用した。AT402 は 1 度に測定できる範囲が広いと、隣り合う測定範囲を重ねて測量しながら座標を繋ぎ合わせるのではなく、PF-AR 直接入射路の様な直線部分の多いところでは、少ない移動回数で一気に測量することができる。このため、測量時間の短縮と、得られた座標の信頼性の向上が期待できる[6]。この作業では、貫通口 D の位置を求め、コア抜きも行った。また、貫通口 A, B, C の内側に CCR をあてて内側 1 周分の座標を測定し、New River Kinematics 製の三次元測定器用ソフトウェア (SpatialAnalyzer, SA) の形状フィット機能で円形にフィットさせ、貫通口の中心座標を求めた。これらの結果を基に、点 PPP を 151.455 mm 移動し、BA3 と移動した点 PPP 及び新入射点を固定点としてビームライン軌道を修正した。

この後、修正したビームライン軌道を、新入射点から上流に向けて罫書きしていった。

前述した様に、途中にある貫通口 B はビームラインよりも高い位置に開けられているため、新トンネル内で高さを変えるために垂直方向の大きなバンプを立てることから、このバンプの角度を調整して PF-AR 蓄積リングの高さと SY3 のビームラインの高さの差を吸収することにした。まず、PF-AR 蓄積リング入射点下流の四極電磁石の高さを、貫通口 B, C, D や人が通るための扉を通して新トンネル最上流部まで、壁に測量基準マーカーを貼りながら移していった。途中にある貫通口 B は約 9 m の長さがあり、共同溝とはφ200 mm で約 3.5 m 長の伸縮可撓管 2 本で接続されている。また、ビームラインは、約 2 m にわたって共同溝内の空調されていない空間を通る。ビームラインの高さ測量には、N3 を使用したが、この約 9 m の区間を N3 で覗いてみたところ、空気の動きと思われる揺らぎが±5 mm 程度発生していて測定できなかった。そこで、5 m 長の真空ダクトを 2 本つなげて両端に可視光の通る窓を付け、その管内を 1 日かけてロータリーポンプで真空に引き、その窓越しにターゲットを覗いてみたところ揺らぎが解消された。ただし、窓材での反射や屈折もみられたことから、実際には±0.5 mm 程度の誤差が発生しているものと思われる。

次に、PF-AR 直接入射路が交差する PF BT の四極電磁石の高さを、貫通口 A を通して、新トンネル最上流部

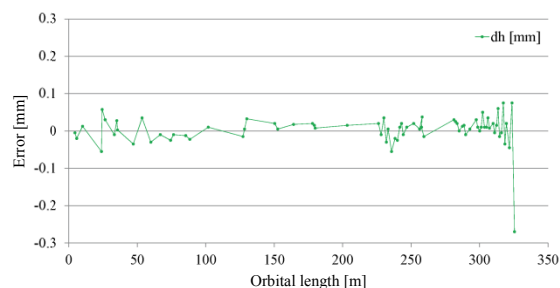
まで移した。この時の高さの差は、25.32 mm であった。これらの結果を基に、上流部では 62 m かけて垂直方向に 64.2 mm 上げた (+1.04 mrad) 軌道を、下流部では同じく 62 m かけて垂直方向に 90 mm 下げる (-1.45 mrad) 軌道とした。

### 3.4 電磁石の据え付け

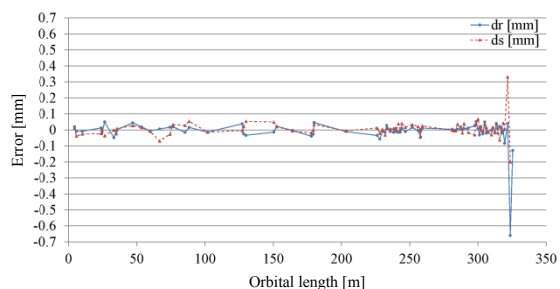
電磁石とその架台を据え付ける際には±1 mm 以内の精度で十分であることから、罫書き線を基準に水平位置を求めた。高さはオートレベル (Leica 製 NA2) を使用した。

SuperKEKB BT 交差部では、偏向電磁石 2 台と四極電磁石 1 台を床から 2.4 m の高さに据え付けなければならなかった。そこで、電磁石を載せるための 1.2 m 高のステージを製作した。

新トンネルでは、前述した様に、垂直方向に大きなバンプを立てている。このバンプ内の電磁石は、電磁石の中心の高さをビームラインの高さに合わせて水平に据え付けた。これに対して、真空ダクトは傾いたビームラインに沿って斜めに設置しなければならない。このバンプ内の電磁石の Gap は 52 mm で真空ダクトの外径がφ51 mm であることから、一番磁極長の長い四極電磁石の 400 mm の範囲内であれば、1.45 mrad の傾きがあっても干渉しないと判断した。これによって、据え付けに伴う時間の短縮を図ることができた。



(a) The error of the level position



(b) The error of the horizontal position

Figure 2: The result of the magnet precision alignment.

### 3.5 精密アライメント

罫書きの際に測定した基準となる電磁石や壁基準座の座標を使用し、電磁石の精密アライメントを行った。真空ダクトの挿入に電磁石の半割りが必要なものについて

は、精密アライメント後に真空ダクトを挿入し、半割り復元後の精密アライメントや測量は工期が短いことから省略した。Figure 2 に電磁石の精密アライメントの結果を示す。dh は垂直方向、dr はビーム進行方向に対して水平面内で直角方向、ds はビーム進行方向に対する目標値との差である。最下流で位置が大きくずれているのは、セプタム電磁石である。セプタム電磁石は PF-AR 蓄積リングの真空ダクトとの干渉があったためにこの様な結果となってしまったが、その他の電磁石は全て目標値の±0.1 mm 以内に据え付けることができた。

精密アライメントの成果は、ビーム調整においても効果が示されている。PF-AR 直接入射路の運転初日には、電子ビームが PF-AR 直接入射路を通して蓄積リングまで到達することが確認できた。その後の調整では、補正電磁石をほとんど使わずに電子ビームを通すことができた。Figure 3 に補正電磁石の電流値を示す。最上流で垂直補正電磁石の電流値が大きくなっているのは、実際にパルス偏向電磁石との高さが合わなかったためである。この高さの差は、精密アライメントの最終段階で判明したが、このパルス偏向電磁石は LINAC の終端に位置し、PF BT や SuperKEKB BT のビームも通過することから、PF-AR 直接入射路の都合でアライメントし直すことができなかった。原因は、予備測量で基準として使用した PF BT の四極電磁石の高さが適切でなかったことだが、その差は意外と大きく、2 mm 程度であった。シミュレーションにより、補正電磁石で許容できる量の差であったため、PF-AR 直接入射路の再アライメントは行わなかった。

#### 4. まとめ

限られた工期の中でも、電磁石や電源の製作、旧 BT の再利用電磁石の移設、それらの立ち上げまでを順調

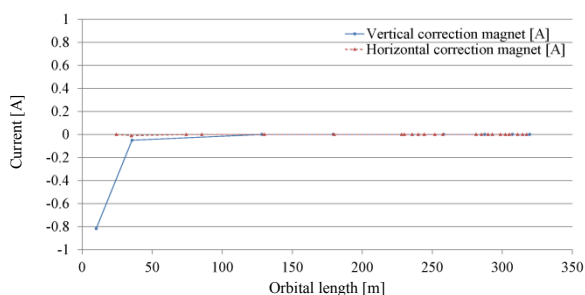


Figure 3: The current of the correction magnets.

行うことができた。

アライメントでは、新トンネルの建築前から軌道を意識した設計を行い、電磁石を無理なく据え付けることができた。

これらの結果から、今回採用した方法でも十分な成果が得られることがわかった。

#### 5. 今後の予定

PF BT と交差し共通の偏向電磁石を通る SY3 の領域では、ビーム調整において PF BT との干渉が起きており、調整に時間のかかってしまうことがあった。今後同時入

射をするにあたって、この干渉は SuperKEKB の運転にも影響が出かねないことから、軌道調整の自由度を高めるための補正電磁石の追加や、光学系の設計の自由度を高めるための四極電磁石の追加を予定している。この夏には、パルス偏向電磁石の下流に水平補正電磁石を各 1 台追加し、エネルギーの低い PF BT には四極電磁石も 1 台追加する予定である。

また、パルス偏向電磁石との高さの差を解消するためにも、PF BT も含めた再アライメントを実施し、補正電磁石の電流値を減らしたいと考えている。

我々は貫通口 B の高さを N3 で測量したが、今回の様に距離があり、かつ光路の媒質が違う環境では、水盛管水平器を使用するのが良いとの情報が得られた。今後は、水盛管水平器を使用した測量にも挑戦してみたい。

#### 参考文献

- [1] N. Higashi *et al.*, “Construction and commissioning of direct beam transport line dedicated for PF-AR”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017.
- [2] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [3] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [4] K. Harada *et al.*, “The power supply system for the compact-ERL”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, SUP066.
- [5] T. Kume *et al.*, “Magnets alignment for the cERL recirculation loop”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, SUP131.
- [6] T. Kume *et al.*, “Error estimation for accelerator alignment using surveying network”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013, SUP114.