

## PF-AR における 5 GeV トップアップ運転実現のための輸送路の改造

### IMPROVEMENT OF THE BEAM TRANSPORT LINE FOR REALIZING THE TOP-UP INJECTION WITH 5 GeV BEAM ENERGY IN KEK PF-AR

満田史織<sup>#</sup>, 東直, 野上隆史, 長橋進也, 内山隆司, 原田健太郎, 中村典雄, 本田融, 佐藤政則, 岡安雄一, 榎本嘉範  
Chikaori Mitsuda<sup>#</sup>, Nao Higashi, Takashi Nogami, Shinya Nagahashi, Takashi Uchiyama, Kentaro Harada,  
Norio Nakamura, Tohru Honda, Masanori Satoh, Yuichi Okayasu, Yoshinori Enomoto  
High Energy Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

#### Abstract

In the KEK PF-AR, an energy-saving operation was introduced in 2019 by reducing the operation energy from the normal 6.5 GeV to 5 GeV. However, on-demand injection from Linac was not realized due to the beam-transport line designed to pass a mono-energy beam. Therefore, a plan to improve the beam-transport line to pass an energy-variable beam was started in 2019, and the improvement of the PF beam-transport line was completed in the summer of 2022. The PF-AR is now in the operation with full top-up injection for the beam energy of 5 GeV and 6.5 GeV in 2023. The change of operation energy in the PF-AR no longer interferes with the operation of top-up injection in the PF, realizing the coexistence with the top-up operation of PF ring. This paper presents an overview of the constructed system and the construction work, focusing on the bending magnet introduced in the beam transport line for the beam-orbit correction.

#### 1. はじめに

PF-AR での 6.5 GeV フルエネルギートップアップ運転の運用は、Linac からリングへの電子ビーム輸送路である直接入射路[1]の完成をもって 2017 年に開始された。2018 年からは年々削減されてきた PF-AR 運転経費の捻出のため、5 GeV エネルギーでの運転モードの確立が要請された。5 GeV エネルギーでの運転調整方法の確立が試行され、2019 年には 5 GeV エネルギー運転による 60%の電力削減を実現した。通常の 6.5 GeV エネルギーによる運転モードと 5 GeV エネルギーによる運転モードはユーザー運転期間の半分ずつの期間で実施されている。この運転に導入に際し、この直接入射路はビームエネルギー 6.5 GeV の単一エネルギーのビーム輸送にのみ最適化されているため、2019 年度開始の 5 GeV エネルギーモードでの運転では、「疑似」的なトップアップ運転が継続されてきた[2]。

ここでいう疑似トップアップ運転は、PF リング、PF-AR に対して 2 分 30 秒と 1 分 30 秒のそれぞれのオンデマンド入射の時間猶予を与えて、その時間内は固定のリングへトップアップ入射を継続するものである。これにより各リングでの蓄積電流値は 0.4 mA 以下の変動幅で維持することが可能である。この時間猶予は、PF リングと AR へのビーム振り分け用共通パルスバンド (PB) 及び PF 輸送路 (PF-BT) と AR 輸送路 (AR-BT) が交叉する共通 DC ベンド (BPFS) の偏向角切り替えと、Linac でのビームエネルギーの補正に要する時間となっている。Figure 1 に複雑に輸送路が交叉する Linac 第 3 スイッチヤード (SY) の PF 及び PF-AR 輸送路の配置図を示す。PF-AR 建設時に狭小な空間条件で地盤条件の適地に輸送路を通す必要から、AR-BT は PF-BT と共通化した電磁石を交叉しながら配置された。これら電磁石の励磁条件が単一エネルギー輸送の条件となっている。

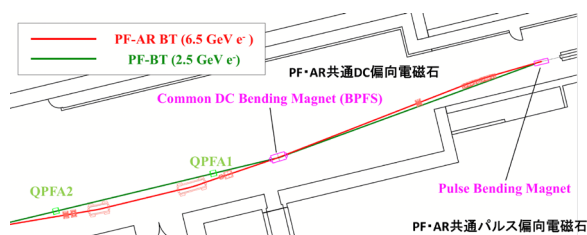


Figure 1: PF-BT and AR-BT in 3rd SY yard of Linac.

この疑似トップアップ運転でも蓄積電流値が放射光供給に問題とならない程度に維持できるが、実際にはいくつかの問題が露呈している。疑似トップアップ運転はあくまでも定期的な入射時間内においてトップアップ入射が実現されるものであるため、PF または PF-AR のいずれかの加速器がビームを占有する期間 (マシンスタディー時や立ち上げ調整時) においては、片方のリングでは蓄積モードでの運用となる。また、PF のビーム寿命の短いハイブリッド運転期間の PF-AR の運転は本来のトップアップ運転が可能な 6.5 GeV エネルギーモードの運転が固定されスケジュール上の柔軟性が不足していた。更に、PF-AR のビーム寿命が低下する AR-TBL プロジェクト[3] と放射光との共立運用では、いずれの運転エネルギーでもトップアップ入射が必要条件となっており、本来のトップアップ入射、「本」トップアップ運転が希求された。

#### 2. エネルギー可変トップアップ運転の改造

2019 年より本トップアップ運転へ向けた改造計画を立案する作業部会が発足し、2022 年度夏に改造工事が実施された。改造場所は、Fig. 1 に示す Linac 第 3 SY の PF-BT 輸送路である。

<sup>#</sup> chikaori.mitsuda@kek.jp

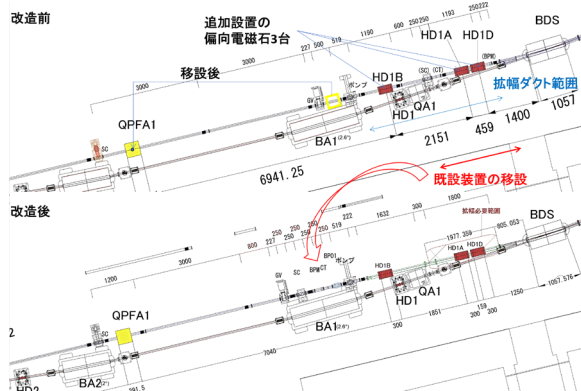


Figure 2: Improvement of PF-BT line by adding three bending magnets in Linac-3rd SY.

改造案では、ビームエネルギーが低く余剰角を補正しやすい PF ビーム輸送路に 3 台の補正偏向電磁石を導入する[4]。いずれの輸送路にも共通に利用されている 6.5 GeV エネルギーで規格化されている BPFs は PF-AR の 5 GeV ビームエネルギーを輸送する結果、PF ビーム輸送路では十分な偏向角を得ることが出来なくなり余剰角が生じる。そのため PF リングへ輸送するビームの軌道は、BPFs を境にした輸送路下流で大きく膨らむ。PF-AR のエネルギー可変輸送の対応に向けた改造であるのに、PF リング用輸送路の改造となるためやや複雑であるが、そのため、改造後の運転調整でも PF と PF-AR の輸送路いずれにおいても、余剰角補正量を最小限に抑える輸送光学系の調整が行われる。

改造案は費用を抑制し、比較的技術的に容易で低コストの機器の組み合わせで可能なものとした。BPFs を起点に、余剰角で生まれる軌道のふくらみを真空ダクトの拡幅改造で吸収し、軌道が大きくふくらむ前に BPFs 直下流位置で軌道修正をかける。6.5 GeV エネルギーの時には運用せずに、5.0 GeV エネルギーの時にのみ補正することから、DC 的に余剰角を補正すればよく、偏向電

磁石製作も技術的に容易である。

共通 PB に対しては、PF-AR 用 5 GeV エネルギーのビームと 2.5 GeV エネルギーのビームを打ち分けるための運用方法が考案された。通常ならば PB は共通化されたうえで軌道が最適化されているため、6.5 GeV AR ビームと 2.5 GeV ビームは出力の正弦半波波形の同じ波高の頂点で打ち分けることが可能である。しかし、BPFs の課題と同様、AR ビームの 5 GeV エネルギーに出力波高を合わせると PF ビームに余剰角が生じる。パンチ毎にショットバイショットで 3000 A 近くの出力電流波高をビームエネルギーに合わせて制御することは不可能である。そこで、ミリ秒オーダーの速さで切り替え制御が可能なデジタルタイミングシステムを利用することで、ビームと出力電流ピークとのタイミングをわずかにずらす。正規の頂点のタイミングからエネルギー減少分の波高となる波形の立ち上がり部分のタイミングに合わせ仮想的に波高を変えたように見せる方法をとる。これにより無理なく 6.5 GeV と異なるビームエネルギーでも対応が可能で、その方法による誤差は、電流ピーク点での出力電流安定度  $10^{-3}$  のレベルと同等である。改造に向けて追加される余剰角補正の偏向電磁石はこの安定度に準じて設計、製作された。

2021 年に改造計画の具体化へ向けた予算化が進み、2022 年度夏の長期加速器停止期間での改造工事に向けた改造工事の工程の検討、機器配置設計、機器の設計、製作、調達が進められた。改造による機器配置を Fig. 2 に示す。既設機器は、追加される 3 台の偏向電磁石 (Fig. 2 中 HD1D, HD1A, HD1B) の設置のためにそれら下流側に移設される。また既設 4 極電磁石の QPFA1 もおよそ 6 m 程度下流に移設される。BPFs 下流よりビーム軌道のふくらみを吸収するために円筒型の真空ダクトは扁平拡幅ダクトにして HD1B 下流まで通して新設する。Figure 3 にこの改造のために製作した、扁平拡幅ダクト及び偏向電磁石の断面図を示す。

### 3. 余剰角補正偏向電磁石システム

#### 3.1 電磁石の設計と製作

余剰角補正偏向電磁石には、以下の要求項目があり設計の指針が立てられた。1. 余剰角補正用偏向電磁石の設置場所は、Fig. 2 からわかる通り PF-BT と AR-BT が近接化しているため、AR-BT 既設ダクトと物理的にも磁場的にも干渉・影響のない電磁石とする。2. BPFs の直下流に設置できるように短磁極長で出来る限り強い補正角を得る。3. 余剰角による軌道の振れ幅が 13.5 mm となるため、振れ幅とビームサイズを包含する良好磁場領域(磁場平坦度)を得る。これら 3 つの条件を満たす電磁石の形状として、最終的に、リターンヨークを磁場が飽和しない程度に薄くした窓枠型とした。近接する AR-BT 真空ダクトにぶつからないように小型で、ただし、強い蹴り角を得るための高い励磁電流を流せる直接水冷式とした。ホロコンダクターコイルを巻ける空間を確保し磁場平坦度を得るための太い磁極をシム付きで設計した。

振れるビーム軌道中心からビームサイズ片側  $5.5\sigma$  位置を扁平拡幅ダクトの最低拡幅幅とし、磁場平坦度の領域としては  $\pm 3\sigma$  を確保するよう扁平拡幅ダクトも偏向電

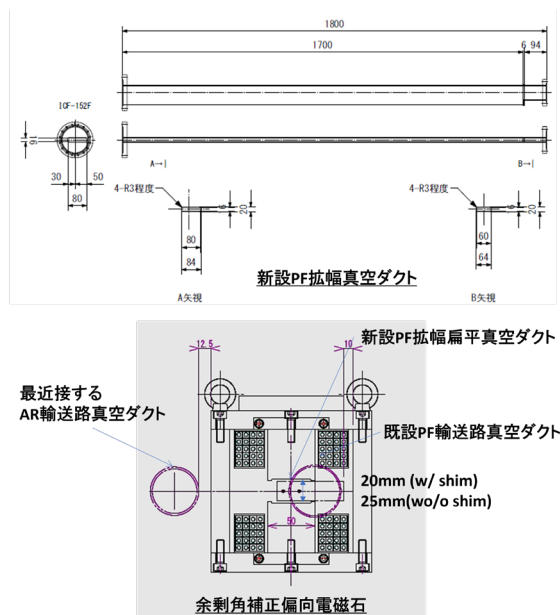


Figure 3: New vacuum duct and bending magnet.

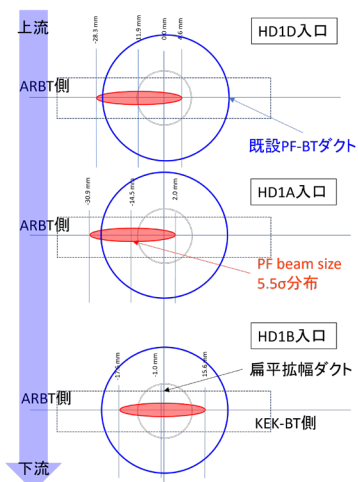


Figure 4: The relative distance from original beam orbit and the beam size in each position of additional bending magnets.

磁石の磁極幅も決定している。磁場の平坦度は、共通パルスバンドの電流出力安定度に準じ  $10^{-3}$  である。ここで、偏向電磁石を設置する場所でのビームサイズは  $1\sigma = 3\text{ mm}$  である。Figure 4 にビーム軌道の振幅と扁平拡張ダクトで最低限必要とされるビーム領域の幅を示した。PF リングの運転エネルギーが 2.5 GeV で AR 運転エネルギーが 6.5 GeV 時のビーム軌道を含しながら、エネルギー変更運転時でのビーム領域を包含するには、片側最低 31 mm のダクト幅が必要になる。既設ダクトの内径サイズは  $\phi 52\text{ mm}$  で、ビーム軌道の振幅を包含できない。扁平拡張ダクトの幅は、5 GeV エネルギー以外でも対応可能な裕度のある PF-BT 軌道中心から片側 40 mm を確保した対称な形状のダクトとなっている。Table 1 に余剰角補正用偏向電磁石の要求性能と解析計算で得られた仕様を示す。ホローコンダクターは 10 気圧の冷却設備において 2 気圧程度の圧損と 25 °C 雰囲気下で  $\Delta T < 5\text{ °C}$  以下の温度上昇を認めるものとし、指標値を出し、要求サイズに近い入手性の良いものを採用している。実運用では 3 L/min の流量としている。

Table 1: Requirement and Specification of Bending Magnet

Kick angle	10 mrad
Magnet length/gap	300 mm/25 mm
Turn #/pole and NI(AT)	20/5454
Excitation current	136.36 A
Center field	0.2778 T
Current density	5 A/mm <sup>2</sup>
Required conductor size/conductive area	5.9×5.9 mm/ $\phi 3.0\text{mm}$ / 27.3 mm <sup>2</sup>
Hollow conductor	O-1255/6.4×6.4/ $\phi 3.2/32.0\text{ mm}^2$
Water flow ( $\Delta T < 5\text{ °C}$ )	0.45 atm, 0.28 L/min

扁平拡張ダクトの高さは偏向電磁石の磁場強度の補償から決定された。磁極先端のシムを回避するように外寸法 20 mm、肉厚 3 mm の SUS ダクトである。磁極幅は、上述の平坦度を満たす領域を磁極中心から  $\pm 10\text{ mm}$  の範囲で得ることを条件に、磁場の飽和を考慮しながら MAFIA シミュレーションでシム形状を最適化し決定した。最適化された磁極端形状図を Fig. 5 に示す。製作時のシムの形成の際に、ミル機械加工上の制約で図中 0.722 のシムスロープは、設計上の 0.625 から変更されている。

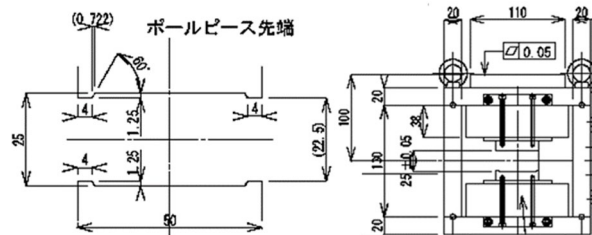


Figure 5: Left figure shows the detail of cross-sectional shape of the shim structure in the pole and right figure shows the return-yoke size of magnet.

この磁石設計で得られる磁石断面での磁場性能を Fig. 6 に示す。左図は、磁石中心磁場で規格化した水平磁場分布であり、この時の  $\pm 10\text{ mm}$  点での磁場の平坦度は  $1.0 \times 10^{-3}$  である。右図は、磁場のリターンヨーク、シム端での飽和の度合いを見たヨーク内磁場強度分布である。磁場中心強度は、磁場飽和条件下で 136.36 A の励磁電流で 0.2724 T を得た。150 A の想定した励磁電流に対して、10% の裕度を持つ。飽和あり、なしでのシミュレーション比較ではこの励磁電流において、飽和ありでの磁場は無飽和での磁場の 99.37% である。AT ファクターが定格の 1.5 倍の励磁電流の領域まで磁場の飽和の影響を無視できる。

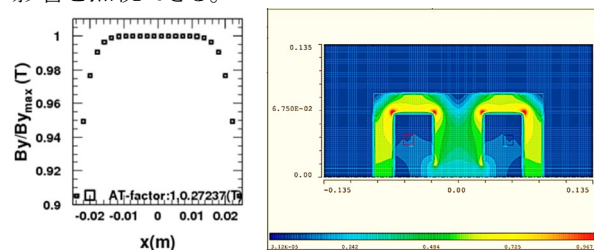


Figure 6: Normalized magnetic field distribution for horizontal axis (left figure). Contour plot of magnetic field strength in the cross-section of upper-half magnet (right figure).

本改造計画 (Phase1.0) の次の改造計画 Phase1.5 においてビーム軌道の調整裕度を増加させるための偏向電磁石をさらに増設する計画がある。そのため、電磁石の製作台数は 3+1=4 台とした。製作する総台数が少ないため、ブロックのレーザー加工で製作を行った。ブロック材は JFE の BMR2 SUY1 である。各ブロックは、切り出し後、組み上げ各面の面精度が 0.05 mm で製作された。磁極間平行度は 0.02 mm が要求された。最終的な組み上げ公差は 0.1 mm としたが、寸法検査の結果、製作寸法誤差は磁極長で 0.01 mm、磁極端間で 0.01 mm、組み上げ後の外形寸法の最大誤差は 0.03 mm となった。

組み上げ面の面精度が精度よくできているため、電磁石アライメント用基準座は、組み上げ後の切削・研磨をせずとも上述の最大誤差内に収まっている。寸法の最大誤差による相対誤差の総和は $4 \times 10^{-4}$ となった。本偏向電磁石に求められる磁場要求精度の $10^{-3}$ の水準を十分に満たしている。電磁石総重量はコイル重量 6 kg を含んで 68 kg である。電氣的性能では、コイル抵抗は 10 mΩ、コイルインダクタンスは 262 μH である。製作費用抑制のため電磁石の冷却水配管はスウェージロックとシンフレックスチューブの絶縁を組み合わせたものとした。

### 3.2 電磁石の磁場性能評価

完成した電磁石の全数にホール素子 3 次元磁場測定器による磁場測定を実施した。磁場性能の確認、励磁曲線の取得、初期化シーケンスの確立のためである。磁場性能の確認では、2 次元マッピング計測により、電磁石長手方向の磁石中心 ( $z=0$ )、磁石端部 ( $z=\pm 100$ 、150 mm) でのそれぞれの磁場強度水平分布を 2 mm ステップで磁極幅 50 mm の領域で計測し、磁場の平坦度を確認した。また、磁極幅 50 mm の範囲を 2 mm ずつずらしながら、電磁石長手方向に、磁石中心より -250 mm から +230 mm まで長手方向磁場分布を 10 mm ステップで計測し、積分磁場を確認した。電磁石中心における磁場平坦度、積分磁場による積分磁場平坦度を求めている。

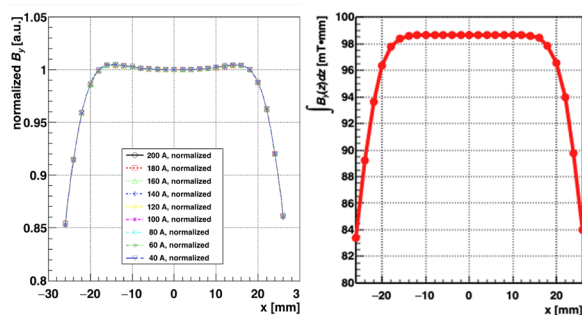


Figure 7: The distribution of magnetic field (left side) and integrated magnetic field (right side) on the horizontal axis of center of magnet.

Figure 7 に 4 台中 1 台の磁場測定の結果の 1 例を示す。左図は、磁場強度の水平分布を電流値ごとにみたものを形状比較のため規格化し重ねている。右図は、積分磁場分布を水平方向にプロットしたものである。電磁石中心で見た水平分布は  $2.2 \times 10^{-3}$  の平坦度となっており、設計時の  $1.0 \times 10^{-3}$  から 2 倍ほど大きい。これを積分磁場の水平分布で見た場合、 $1.3 \times 10^{-4}$  となり要求を十分に満たすものとなっている。4 台の積分磁場平坦度の平均は  $8.3 \times 10^{-5}$  に達している。電磁石中心での水平分布が若干のいかり肩となってしまった原因は、多角的な分析を試みたが分かっていない。鉄材小片を入手しなかったため B-H カーブ不明の鉄材となっており、この点原因の要素として残る。150 A の励磁電流の BL 積は 4 台の平均値で期待値の 0.09167 Tm に対して 0.09860 Tm であった。2.5 GeV ビームエネルギーに対する蹴り角は 4 台平均で 11.83 mrad と運転の励磁電流 150 A で要求性能を 18% 程上回っている。有効磁極長は磁極長 0.3 m に対し 4 台平均で 0.329 m を得た。BL 積の 4 台の電磁石間の最大

の差は  $4.3 \times 10^{-3}$  である。個体差間が要求精度よりやや大きい。

電磁石の長手方向かつ水平方向の中心で励磁曲線を取得した。シミュレーション結果と磁場測定結果の相違は 4 台の平均で  $-7.7 \times 10^{-4}$  であった。各電磁石間の最大の差は  $4.7 \times 10^{-3}$  となった。電磁石個体間の差は、電磁石中心の磁場強度と、積分磁場のいずれも同等となっており、電磁石中心での磁場強度の個体差がそのまま積分磁場にも反映されていることから、電磁石全体の外形寸法、特に磁極長について製作誤差が極めて低いと言える。電磁石中心磁場の個体間の強度差は、切り出したブロック材料の磁性の個体差とも判断できる。

初期化シーケンスは、本電磁石では積層鋼板でなくブロック材を採用していることから磁場の再現性を確保するうえで重要な要素である。200 A の定格励磁電流までのランプアップレートを固定し、定格電流での保持時間を 5、10、20、30 秒のそれぞれで、定格電流とゼロ電流との間のループを 5 回繰り返した際の磁場の再現性の収束を比較し見極めて決定している。5 秒の保持時間では  $10^{-4}$  の磁場の再現性を得るには 5 回のループが必要であるが、10 秒では 2 回ループで収束する。最終的な初期化シーケンスとして定格電流時 200 A での保持時間を 10 秒とした 5 回のループを採用している。運転電流 150 A への設定はその 5 回目のループ完了後、あらためて定格電流値へ上げたのち、運転設定電流値まで下げるシーケンスとしている。

### 3.3 電磁石電源と制御システム

電磁石に接続する励磁用電源とその付帯設備は、SY の 2 階クライストロンギャラリーに 19 インチラックに格納し設置した。電源は、求められる磁場性能より電流出力性能としての安定度が 200 ppm 以下、定格電流・電圧 200 A・20 V 以上であるものが候補に挙げられた。高砂製作所 HX-S-030-200G2FI、菊水電子工業 PAT20-200T、TDK ラムダ G20-250-D である。この中で、もっとも電流出力安定度が低いものが TDK で 100 ppm/°C、リップル率が低いものが高砂製作所で 0.2 A/rms であった。筐体が小型で、出力安定度が高いものを優先し、リップル率が 0.6 A/rms と高砂製作所製にわずかに劣るが TDK ラムダを採用した。この電源は外部制御がイーサネット直接デジタル制御が可能なのも必要な採用要素である。外部アナログ入力も充実しており、電磁石に備わる温度過熱のサーモスイッチ、冷却水流量計に備

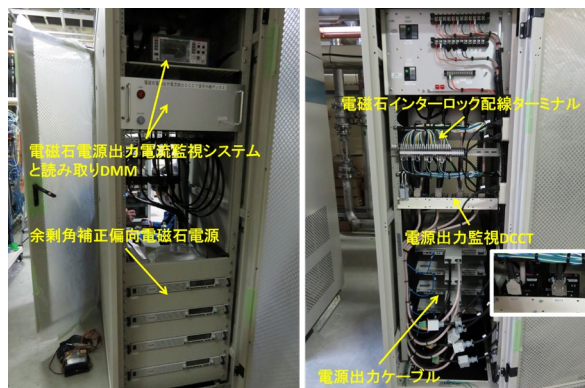


Figure 8: Magnet-power source system in 19-inch rack.

わる流量低接点信号も、これらが OR をとって直接電源に電磁石インターロック信号として入力されている。

電源は 19 インチラックの近傍の制御中核拠点のハブより 3 m 程度のイーサネットケーブルが接続されるがこの拠点ハブまでは上位制御システムと光接続されており上位との制御通信速度は速く、制御の安定度は高い。

各電源出力ケーブルの負極側ケーブル(電磁石からの戻りケーブル)には、CAEN ELS 製外部 DCCT の CT-300 がクランプされており、DMM にて精密に電流値が計測監視され、余剰角補正蹴り角の精密な制御を可能としている (Fig. 8 参照)。

## 4. エネルギー可変改造工事の完工

### 4.1 改造工事準備から完工まで

2021 年度内に、水冷偏向電磁石、電磁石電源、電源格納ラック、電磁石付帯設備 (冷却配管、ケーブル、電力盤)、真空ダクト類、電磁石架台、機器移設用架台類の調達を行った。2022 年 7 月、PF 運転終了の翌週 7 月 11 日、Linac 加速器停止直後より現場の既設機器及び機器架台、真空ダクトの撤去の工事が開始された。現場は Linac 導波管や機器冷却設備、そして先の機器群が複雑に入り組んで設置されている。PF-BT 及び AR-BT が最近接していることから作業スペースは限られ、撤去作業は機器の破損がないように慎重に進められた。並行して、作業干渉のない、Linac のクライストロンギャラリー (加速器トンネル上階部) には余剰角補正電磁石の電源及び電源制御システムが新設、整備された。加速器トンネル内は機器群の撤去が済んだところへ、新設電磁石架台、移設機器架台のケガキ測量が行われ、余剰角補正電磁石が設置された。電磁石は粗アライメントが実施され、電磁石を半割して、扁平毛く復真空ダクトの受け入

れ態勢が整った。移設機器の設置も済んだ後で、ダクトの設置作業が開始され、真空締結されたのは、工事開始からおよそ 1 か月後の 8 月中旬である。真空締結が済めば、粗排気を開始することが可能で、10 月の PF の秋の運転開始に向けて十分に早くに真空の立ち上げが開始された。真空ダクトが電磁石内にインストールされ、電磁石の半割の復旧が行われた。移設機器類の制御、給電ケーブル類の延伸、接続作業もその後に行われた。加速器トンネル内の作業がひと段落したところで、電磁石の付帯設備の整備が開始された。クライストロンギャラリーに設置の電源と電磁石を結ぶ出力ケーブル、水冷電磁石の冷却水流量、温度を監視するインターロックケーブル、電磁石への冷却水配管の敷設である。これらは、8 月の下旬から 9 月の月上旬にかけて作業が進み完了した。9 月上旬に仕上げとなる測量と、余剰角補正電磁石の精密アライメントが完了し、改造工事が完了した (Fig. 9 に新設された電磁石を示す)。2022 年の秋からの運転で運転調整を確立するビームコミッショニングが順調にすすめられたことは、本学会の口頭発表の東氏「PF-AR 5 GeV 運転時における PF との同時トップアップ入射のコミッショニング及びユーザー運転への適用」[5]を参照されたい。この成功を受けて、2023 年度夏の加速器運転より、PF-AR おける 5 GeV 本トップアップ運転の運用が無事に開始されている。

### 4.2 Phase 1.5 へ向けた今後の展望

2023 年の今夏に Phase 1.5 改造工事が現在進行形で進捗している。これにより余剰角の補正に裕度が増えるだけでなく、今後 BPFS 上流側合流ダクトを拡幅改造することで AR のビームエネルギー可変輸送に対して PF-BT のみの調整で対応することが可能になる。この最終工事を Phase 2.0 としており、ビーム輸送調整の相互調整の無駄をなくす調整の効率化へ向けた計画が今後進む予定である。

## 謝辞

本プロジェクトは KEK 物質構造科学研究所の予算支援と、KEK 加速器研究施設第 5 研究室の多大なるご協力を頂きましたことを感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] N. Higashi *et al.*, “Construction and Commissioning of a New Direct Beam Transport Line of PF-AR”, Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Accelerator, vol. 14, No. 3, 2017, pp. 134-141.
- [2] S. Nagahashi *et al.*, “THE 5 GeV OPERATION STATUS AT THE PF-AR” Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, 2020, Online, pp. 651-655.
- [3] C. Mitsuda *et al.*, “CONSTRUCTION OF THE GeV-RANGE TEST BEAMLINE AT KEK PF-AR”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 320-324.
- [4] N. Higashi *et al.*, “REALIZATION OF TOP-UP OPERATION OF PF-AR WITH 5 GeV (2)”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 579-582.

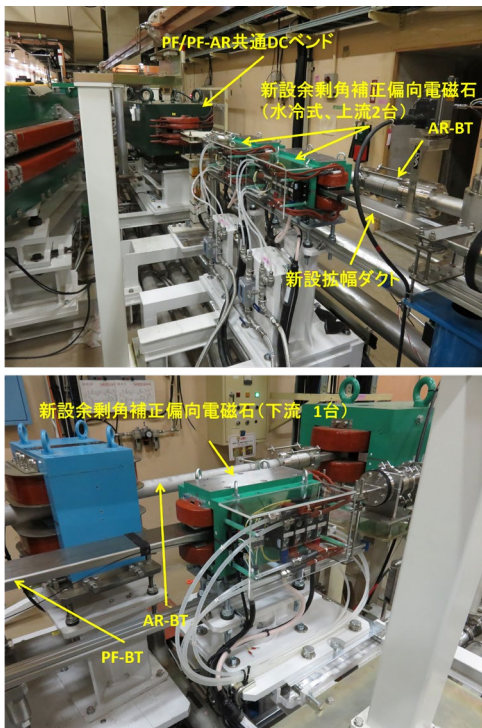


Figure 9: Three bending magnets installed in PF-BT.

- [5] N. Higashi *et al.*, “COMMISSIONING AND APPLICATION TO USER-RUN OF SIMULTANEOUS TOP-UP OPERATION OF PF AND PF-AR IN 5 GeV”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, 2023, Funabashi, WEAO6, this meeting.