

# PF-AR 測定器開発テストビームラインのための電磁石設置と加速器インターロックシステムの改修

## INSTALLATION OF MAGNETS AND UPGRADE OF ACCELERATOR SAFETY INTERLOCK SYSTEM FOR THE GeV-RANGE TEST BEAMLINE AT PF-AR

長橋進也<sup>#,A)</sup>, 池上陽一<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 高木宏之<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 外川学<sup>A)</sup>, 中村勇<sup>A)</sup>, 中村典雄<sup>A)</sup>, 野上隆史<sup>A)</sup>, 花垣和則<sup>A)</sup>, 本田融<sup>A)</sup>, 満田史織<sup>A)</sup>, 森隆志<sup>A)</sup>, 吉田 剛<sup>A)</sup>, 鷺見一路<sup>B)</sup>  
Shinya Nagahashi<sup>#,A)</sup>, Yoichi Ikegami<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Hiroyuki Takaki<sup>A)</sup>, Yasunori Tanimoto<sup>A)</sup>, Manabu Togawa<sup>A)</sup>, Isamu Nakamura<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Kazunori Hanagaki<sup>A)</sup>, Tohru Honda<sup>A)</sup>, Chikaori Mitsuda<sup>A)</sup>, Takashi Mori<sup>A)</sup>, Go Yoshida<sup>A)</sup>, Kazumichi Sumi<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup> Nagoya University

### Abstract

At the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR), which is an electron storage ring for a synchrotron radiation source in the X-ray region, we constructed a beamline to develop measuring instruments for elementary particle and nuclear experiments (test beamline) in the summer of 2021. There are a horizontal bending magnet, 7 quadrupole magnets and 2 vertical steering magnets in a test beamline. We used a leaser 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 2 steering magnets with no target, all magnets were aligned within 0.1 mm accuracy on the target position. We also updated the accelerator safety interlock system for a test beamline.

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の X 線領域の単パルス専用放射光源である Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) では、2021 年度夏の停止期間中に、素粒子・原子核実験の測定器開発を行うためのテストビームラインの建設を行った[1]。テストビームラインは、PF-AR に蓄積された電子ビームの一部を炭素性のターゲット[2]に当て、制動放射により生成されたガンマ線を銅製のコンバーターで再び電子・陽電子に変換して取り出し、電磁石群で電子ビームを加速器シールド壁外の測定器開発を行う場所まで輸送するものである。テストビームラインの電磁石群は、エネルギー選択用偏向電磁石 1 台、電子ビーム収束用四極電磁石 7 台、補正用ステアリング電磁石 2 台で構成されている。電磁石設置のための野書きやシールド壁の貫通口位置の測量、電磁石の精密アライメントには、レーザートラッカー (Leica AT-402) と水準儀 (Wild N3) を使用した。

本発表では、電磁石設置位置の野書き、設置、精密アライメントの詳細と、テストビームライン建設にともなう加速器インターロックシステムの改修状況を報告する。

### 2. 電磁石設置準備作業

#### 2.1 電磁石設置スペース確保

PF-AR は、2016 年度に直接入射路を建設したため[3]、元々入射点として使用していた南南西の短直線部(旧入射点)が空きスペースとして使用できるようになった。テストビームラインでは、この短直線部にターゲットを挿入し、

その下流の AR 南棟実験ホールに電子ビームを輸送して実験を行うレイアウトが採用された (Fig. 1)。PF-AR の蓄積リングは地下 1 階の高さにあるが、AR 南棟実験ホールは地下 2 階の高さにあるため、素粒子原子核研究所(素核研)の実験グループによって、2021 年度の春に、実験スペースが蓄積リングと同じ高さになるようなステージが建設されている。

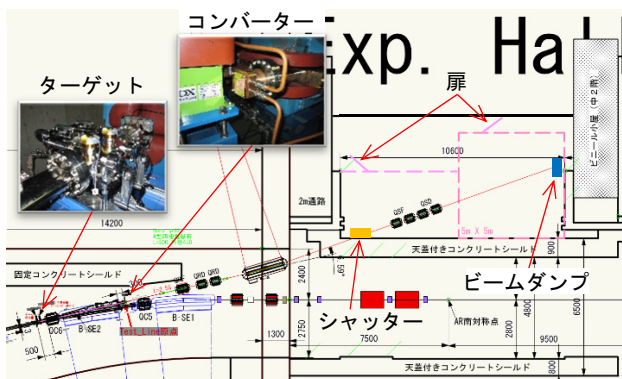


Figure 1: The GeV-range test beamline at PF-AR.

旧入射点には、入射時のビームロスによって発生する放射線を防ぐため、コンクリート製の防護壁があった。電磁石の設置スペースを確保するため、2020 年度夏の停止期間中にこれらの撤去を行った (Fig. 2)。

#### 2.2 蓄積リング内ケガキ作業と貫通口設置

電磁石の設置を容易にするため、ケガキ作業を、2021 年度冬の停止期間中に行った。AR 南棟実験ホールのステージ建設前だったため、蓄積リング内のみ作業を行った。電磁石設置位置にマークを打つための座標は、

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

加速器ビーム設計用計算機コード(SAD, [4])の出力をCADに描いて導出した。ケガキ精度は、基準とした蓄積リングの電磁石に対して  $\pm 1 \text{ mm}$  以内を目標とし、レーザートラッカーを用いてケガキを行うための治具を使用して行った。蓄積リングとのフィット誤差は、最大  $(x, y) = (1.568 \text{ mm}, 0.456 \text{ mm})$ 、RMS  $(x, y) = (0.902 \text{ mm}, 0.249 \text{ mm})$  であった。最大フィット誤差が  $1 \text{ mm}$  を超えてしまったのは、2001年度に行った高度化改造[5]以来アライメントを行っていないためであるが、それから20年以上経過していることを考えれば、十分目標を達成できると判断した。また、天底器(NL)でケガキ位置の代表点の再測量を行い、誤差  $(x, y) = (0.145 \text{ mm}, 0.106 \text{ mm})$  と、十分に目標を達成していることを確認した。

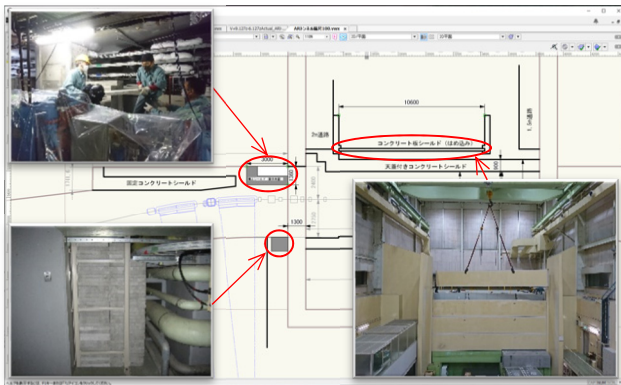


Figure 2: The dismantling of radiation shields for an old injection point.

同時に、蓄積リングと実験ホールを隔てている厚さ  $900 \text{ mm}$  のコンクリート製シールド壁へ、ビームライン用とケーブル用に  $\phi 200 \text{ mm}$  の貫通口を1つずつ設けた。ビームライン用は、ビームレベルと同じ  $1200 \text{ mm}$  の高さには、ビームラインに沿って開ける必要があるため、レーザー墨出器を用いてコア抜き機をビームラインのケガキ線に合わせることで位置出しを行った。ケーブル用は、放射光が直接貫通口を見通すことができないよう、蓄積リングのビームと直角方向で、かつ、ビームよりも  $700 \text{ mm}$  低い位置に設けた。この時に設けた貫通口は、抜いたコア材をそのまま戻すことによって、2021年度夏の停止期間まで閉止した。

### 2.3 ステージ上ケガキ作業

残りの全ての作業は、2021年度夏の停止期間中に行った。

まず、AR南棟実験ホールに建設されたステージ上にケガキを行った。基準や目標精度は蓄積リングと同様だが、蓄積リングとはシールド壁で隔てられており、間には  $\phi 200 \text{ mm}$  の貫通口しかないため、AR南棟シールド天井の一部を開放し、レーザートラッカーをシールド天井の上に設置して、蓄積リングの電磁石とAR南棟実験ホールを同時に見渡せるようにすることで、ステージ上に座標を移す方式を採用した(Fig. 3)。AR南棟実験ホールには、レーザートラッカーのCorner Cube Reflector (CCR)を固定できるよう、10個のHUBBS製の台座を空間的に広がりをもたせて配置して固定し、それらに蓄積リングの電磁石の座標を移すことで、以降の作業の基準

座標とした(Fig. 3, 4)。これにより、再び蓄積リングの電磁石を測量することなく、蓄積リングの電磁石との位置関係を把握することが可能となる。

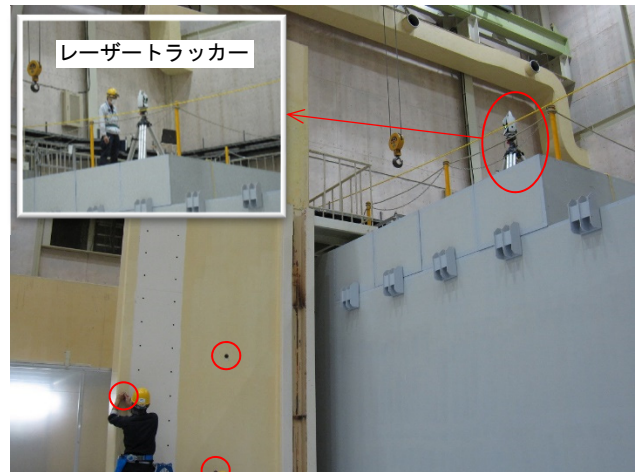


Figure 3: The installation of target holders with a laser tracker.



Figure 4: Target holders in the experimental hall.

## 3. 電磁石設置

### 3.1 架台アライメント

電磁石の設置とアライメントを容易にするため、架台のアライメントを行った。架台のアライメント精度は、近傍のケガキに対して  $\pm 1 \text{ mm}$  以内、 $\pm 1 \text{ mm/m}$  以内を目標とした。床面への固定は、全てメスのケミカルアンカーを使用した。定規での測定結果ではあるが、誤差は、最大  $0.75 \text{ mm}$ 、 $0.9 \text{ mm/m}$  であった。

ステージ上の架台については、ステージの歪みの影響を小さくするためベースプレートを設置し、ベースプレートに設けたタップに架台を固定した。また、蓄積リング内においても、既設のピット上に設置する四極電磁石1台についてもベースプレートを設置し、架台は同様にタップへの固定とした。

### 3.2 蓄積リング偏向電磁石移動

蓄積リングの真空ダクトは、ターゲットが収まるダクトを

交換するだけでなく、コンバーター用の取り出しポートを備え、ガンマ線が通過できるように新規製作された偏向電磁石ダクトも交換した。PF-ARの偏光電磁石はC型の鋼板を積層した電磁石で半割りできない。このため、偏向電磁石ダクトの交換時には、ダクトを一旦蓄積リング外側に引き出す必要がある。しかしながら、この場所は旧入射点であったため、コンクリート製シールドが蓄積リング外側に打設してあり、引き出すための十分なスペースが確保できない。そこで、架台も含めた総重量 7.5 t の偏向電磁石をリング内側へ専用治具でコロ引きして、ダクトの交換作業を行った (Fig. 5)。このコロ引き作業も、2021 年度の高度化改造以来であった。



Figure 5: The pulling work of a bending magnet to install a vacuum chamber.

### 3.3 電磁石設置

PF-ARの蓄積リングの天井は低く、リング内にはクレーン等の揚荷装置がない。このため、蓄積リング内の四極電磁石3台は、PF-ARのリング内専用改造された門型クレーンを用いて設置を行った。偏向電磁石は重量が3.7 tあり、門型クレーンの制限荷重を超えてしまうことから、3.1でアライメントした架台を、一部開放したシールド天井の真下まで移動し、AR南棟天井クレーンを使用して電磁石を架台の上に乗せることとした。電磁石の載った架台は、チルローラーを用いて設置場所まで移動し、油圧ジャッキを用いて3.1でアライメントした位置へ慎重に据え付けることで、精度を損なわないように留意した。ステージ上の四極電磁石4台は、AR南棟天井クレーンを使用して設置した。

### 3.4 精密アライメント

蓄積リング内の精密アライメントは、近傍の蓄積リングの電磁石に対して、水平方向はレーザートラッカーを使用し、高さは電磁石の基準座に立てた定規の目盛りをN3で合わせることで行った。目標精度は、 $\pm 0.1$  mm以内、 $\pm 0.1$  mm/m以内とした。蓄積リングの電磁石については、本作業で動かしたのもののみとし、近傍の電磁石との差異が小さくなるようにアライメントした。

ステージ上の精密アライメントは、近傍の2.3で設置した基準座に対して、蓄積リング内と同様に行った。

テストビームラインの精密アライメント結果をFig. 6に示す。dr, dsは水平方向の偏差を表しており、それぞれdrはビーム直角方向、dsはビーム進行方向である。dzは鉛直方向の偏差を表している。

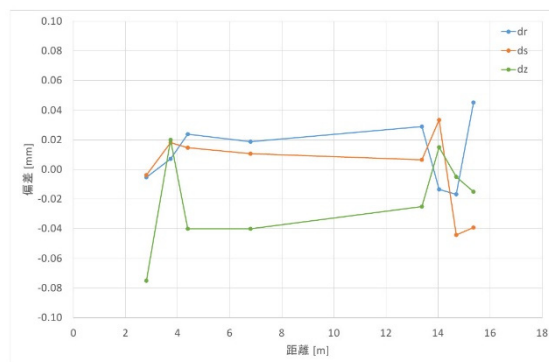


Figure 6: The results of the magnet precision alignment.

## 4. インターロックシステムの改修

### 4.1 貫通口の遮蔽

AR南棟のシールド壁に設けたビームライン用貫通口は、ビーム軸からずれて開いてしまうことを想定し、ビームサイズに対して十分に大きいものとした。しかしながら、四極電磁石のボア径が52 mmで、偏向電磁石のキャップ長も34 mmであることから、それよりも大きい穴径は不要であり、そのままでは放射線の漏洩が懸念される。そこで、貫通口に内径φ56.5 mmのSUS管を通し、その周囲を鉛で埋めることとした (Fig. 7)。レーザー墨出器を用いてビーム中心にSUS管を固定し、片側に50 mm厚のドーナツ状の鉛板を5枚ずつ詰めることにより、コンクリート換算で900 mm厚以上の遮蔽効果を見込んだ。隙間が小さくなるように、鉛板のSUS管が通る穴は、ビームラインに合わせて偏心させて製作し、残っ

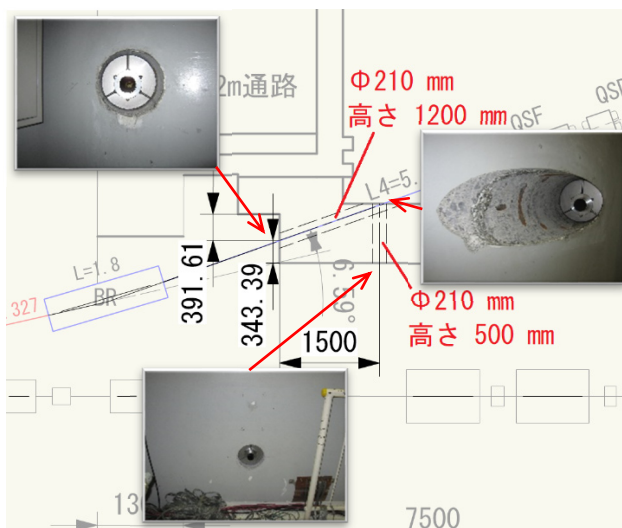


Figure 7: The radiation shields on through holes.

た隙間は鉛毛で埋めた。これによって、偏向電磁石で選択されなかった電子ビームは、シールド壁や鉛によって遮蔽され、実験ホールへは到達しないことになる。

ケーブル用貫通口についても、通すケーブルの量を見積もったところ、同じ内径の管で問題ないことがわかったため、同様に鉛を設置した。

#### 4.2 インターロックの改修

ビームラインへ導かれる電子ビームは、蓄積リングを周回している電子ビームが引き出されるのではなく、ガンマ線に変換されてから再び変換されたものである。このため、ビームラインの安全システムは、基本的に加速器安全システムとは独立したものとして設計された。

ビームライン安全システムは、300 mm 厚の鉄製メインビームシャッター、実験エリアへの入退域を管理するためのインターロック扉、電子ビームを安全に止めるための鉛製ビームダンプ、エネルギーを選択し実験エリアへ電子ビームを導く偏向電磁石、で構成されている。また、メインビームシャッターより下流からは、貫通口を通して蓄積リング内を覗くことができないような配置となっている。

メインビームシャッターが閉じている時には実験エリアへの入退域が自由にできるが、電子ビームを利用するためにメインビームシャッターが開いた状態でインターロック扉が開く、すなわち誰かが入域した時(異常時)には、直ちにメインビームシャッターが閉じ、偏向電磁石電源がオフし、ターゲットが退避するようなインターロックが組まれている。

念のためではあるが、最悪の状態を想定し、これら 3 要件が全て成立しなかった時には、蓄積ビームをダンプさせるように加速器のインターロックシステムを改修した。必要な信号は、加速器インターロックシステムに全てハードワイヤーで繋ぎ込んだ。

運用の安全対策にも留意した。まず、ターゲットは、蓄積ビームに直接作用し、蓄積ビーム寿命に大きく影響する。実験ユーザーが蓄積ビームへの影響を考えずにターゲットを操作してしまうことを防ぐため、ターゲットの操作は加速器制御室で、加速器職員または運転員のみが行うこととした。次に、加速器の調整やマシンスタディなど、通常とは異なる運転形態中にメインビームシャッターが開いてしまうことを防ぐため、放射光ビームラインへの Channel Permit 信号[6]に相当するもの (TBL Permit) を、加速器インターロックシステムから出すこととした。この信号が出ていない時には、実験ユーザーはテストビームラインのメインビームシャッターを開けることができない。将来的に、TBL Permit は Channel Permit と同期して出すことを想定しているが、細かい運用方法はこれから協議して詰めていく予定である。

#### 参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, “PF-AR における GeV 領域エネルギー電子を使った測定器開発用テストビームラインの建設”, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct. 2022, TUP015.
- [2] H. Sasaki *et al.*, “PF-AR テストビームラインにおけるターゲットと真空系の設計と整備”, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct. 2022, FRP021.
- [3] N. Higashi *et al.*, “PF-AR 直接入射路の建設とコミッショ

ニング”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 212-215.

[4] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>

[5] Y. Tanimoto *et al.*, “Vacuum systems renewal for the PF-AR upgrade”, Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, Oregon U.S.A., May. 12-16, 2003, pp. 809-811.

[6] S. Nagahashi, “放射光源加速器の安全システム”, Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 5, 2013, pp. 21-28.