

Super KEKB に向けた電子陽電子入射器のアライメント状況

STATUS OF ALIGNMENT OF KEK LINAC FOR SUPERKEKB

牛本信二^{#, A)}, 肥後壽泰^{B)}, 諏訪田剛^{B)}, 佐藤政則^{B)}, 榎本收志^{B)}, 紙谷琢哉^{B)}, 柿原和久^{B)}, 田中窓香^{B)},
鈴木和彦^{A)}, 豊富直之^{A)}, 木村康一^{A)}, 水川義和^{A)}

Shinji Ushimoto^{#, A)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Tsuyoshi Suwada^{B)}, Masanori Satoh^{B)}, Atsushi Enomoto^{B)},
Takuya Kamitani^{B)}, Kazuhisa Kakihara^{B)}, Madoka Tanaka^{B)},

Kazuhiko Suzuki^{A)}, Naoyuki Toyotomi^{A)}, Kouichi Kimura^{A)}, Yoshikazu Mizukawa^{A)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd. ^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The alignment system of the KEKB injector LINAC referred to the laser beam passing through each two straight beam line. This system was used to align the girders of the accelerator sections. The accelerator components were installed mechanically on the girders. On 11th, March, 2011, a lot of the components and the support girders at the LINAC were largely displaced due to the big earthquake. In order to recover the alignment and refine it, we have established 500m laser light passage with improved pointing stability and made the more precise alignment possible. In parallel, we have introduced the laser tracker for precision alignment measurement to re-align the components with respect to the mechanical references attached to the girders. In this paper, we report the status of the recent alignment processes.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器 (以下、LINAC) では、SuperKEKB のための高度化に向けたアライメント作業を進めている。LINAC は Figure 1 に示すように 2 つの直線部 (A-B セクターおよび C-5 セクター) を J-ARC と呼ばれる 180 度の偏向部でつないだ J 型の線形加速器である。LINAC は 8 つのセクターから構成され、各セクターには 4~8 台の加速ユニットが設置されている。ユニット架台上には加速管や電磁石などのコンポーネントが機械的精度で設置されている。架台のアライメントは 2 か所の直線部に構築されたレーザーアライメントシステムを用いておこない、加速器のアライメントが実現する。

2011 年に発生した東日本大震災により架台を含むコンポーネントも全域に渡り被害^[1]が見られた。アライメントへの影響も大きく、架台やコンポーネントの大きなミスアライメントが発生した。

震災以後、SuperKEKB へ向けた高度化に伴い、加速器コンポーネントの再アライメントが重要課題として認識され、アライメント精度向上のためにレーザーアライメントシステムの高安定化^[2]と精密測量用レーザートラッカーの導入をおこなった。現在、これらの導入により SuperKEKB で要求されるアライメント精度 (ローカルにおよそ 2~3 加速ユニットの内 $1\sigma=100\mu\text{m}$ 以下) を実現するための作業を進めている。

本報告では LINAC におけるアライメント状況と今後の展開について紹介する。

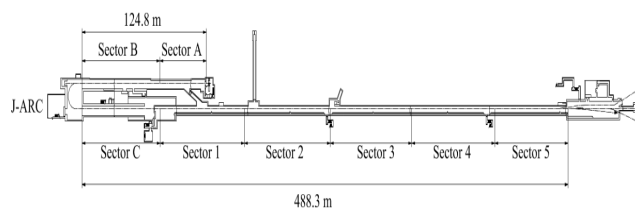


Figure 1: Outline of KEK e-/e+ injector LINAC.

2. アライメントシステム概要

LINAC における従来のアライメントは加速器コンポーネントを機械的精度で架台に搭載し、レーザーアライメントシステムで架台を直線上に並べるというものであった。

しかし、前述のように震災により架台および搭載されたコンポーネントのミスアライメントが大きくなった。これを改修するために、新たにレーザートラッカーを導入し、直接コンポーネントのミスアライメントを測定し、アライメントをおこなうこととした。

一方、既存のレーザーアライメントシステムも大幅な改良をおこない、精度と安定性を向上させて架台アライメントの精度向上に大きく寄与している。

以下にレーザーアライメントシステムとレーザートラッカーについて紹介する。

2.1 レーザーアライメントシステム

レーザーアライメントシステムはアライメント用レーザー、レーザー位置を測定するための QPD (Quadrant-silicon Photo-Diode: 4 分割シリコンフォトダイオード)、レーザーを安定に伝搬させるための光軸管、QPD からの信号をモニターするディテクターとオシロスコープから構成される。

[#] ushimoto@post.kek.jp

レーザー光学系および出射部は各直線部の上流端に設置され、レーザーはビームライン上流から下流に向けて発射される。

各直線部のレーザーは始点と終点に位置する 2 つの基準 QPD 中心に固定されレーザー基線となる。A-B セクターでは A1 ユニット上流部 (AIU) と J-ARC 入射点 (REF2 AB)、C-5 セクターでは J-ARC 出射部 (REF2) と最下流部第 3 スイッチャードの床基準点 (E2 点) 上部に設置された QPD (58D) が基準となる。

各架台には光軸管が組み込まれ、その両端に QPD を内蔵した PD ホルダーが取り付けられている。PD ホルダー間はダクトで接続され、レーザー伝搬時には真空 (<10Pa) 状態にする。QPD 中心は光軸管中心軸上に位置するようにホルダー内の可倒式金具に高精度に取り付けられ、レーザー基準と一致する。架台上のコンポーネントは光軸管の中心位置 (QPD 中心位置に一致) を基準としてサブ架台と基準レール、押さえ金具により拘束し位置決めされる。

レーザーは終点 QPD の中心位置に固定されるようフィードバックが動作しており、500m 長レーザー基線は、 $40 \mu\text{m}$ (1σ) の安定度を達成している。各架台をアライメントする際は、PD ホルダー内のセンサーを起こした状態でレーザー基線に対する架台の位置を測定しながら、架台の調整機構を利用してアライメントをおこなう。

2.2 レーザートラッカー

2011 年から加速ユニット架台および搭載された加速器コンポーネントの直接精密測量をおこなうため、レーザートラッカー (Leica AT-401) を導入した。

レーザートラッカーはリフレクタと呼ばれるターゲットとトラッカー本体、トラッカーを操作するための制御 PC で構成される。実際の測定では、まず初めに台座等を利用して対象物にリフレクタを設置する。次にトラッカー本体からリフレクタに向けてレーザー光を出射し、反射光を計測する。このとき求められた距離情報と、トラッカー本体に組み込まれているチルト・スイベル 2 種類のエンコーダからの角度情報を利用し 3 次元座標を決定する。Table 1 に AT-401 の仕様を記す。

LINAC では $100 \mu\text{m}$ 以下の精度を実現するために、半径 5m 程度の範囲 (およそ加速ユニット架台の長さに相当) で使用している。

Table 1: Specification of AT-401

Accuracy	+/- $15 \mu\text{m}$ + $6 \mu\text{m}/\text{m}$
Repeatability	+/- $7.5 \mu\text{m}$ + $3 \mu\text{m}/\text{m}$
Typical working Volume	320 m
Horizontal rotation	+/- 360°
Vertical rotation	+/- 145°
Resolution	0.07 arc seconds

3. レーザートラッカー測定環境の整備

LINAC では近年レーザートラッカーによる測定が始められたため、既存のコンポーネントの多くがレーザートラッカー測定を前提とした基準座などの構造を有していないという問題があった。コンポーネントの中でも高精度なアライメントを要する加速管・電磁石のレーザートラッカー測定を可能にするため、各コンポーネント専用の治具を作成し評価をおこなった。以下に実際に使用している治具について紹介する。

3.1 架台位置基準測定

レーザートラッカーによる架台上のコンポーネントの高精度測定をおこなうための基準となる QPD 位置を参照する治具を作成した。この治具は Figure 2 に示すように PD ホルダーの嵌め合いを利用し隣接して取り付けられる。この金具は QPD 中心から水平方向に 400mm オフセットして張出した構造を有し、治具の先端にリフレクタとその台座が設置される。これにより、リフレクタ座標はレーザー基線に対し水平方向に 400mm オフセットした座標となる。

座標精度は金具の設置精度に影響を受けるため、高精度水準器 (精度: $0.02\text{mm}/\text{m}$) を用いて加速ユニット架台の水準に合わせて取り付けをおこなう。

この金具は随時設置を進めており、今夏の長期メンテナンス期間中には、すべての加速ユニット架台に設置予定である。

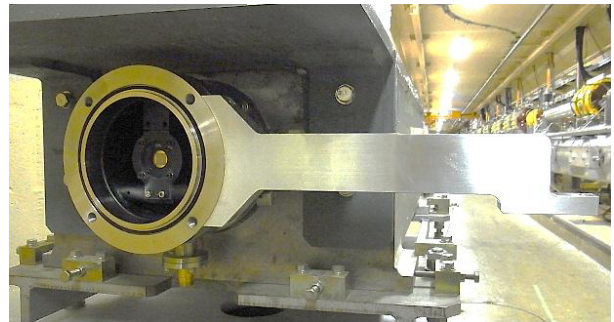


Figure 2: Measurement jig of QPD for laser tracker.

3.2 加速管位置測定

現在、LINAC では主に 4 種類の異なる形状の加速管 [LAS (Large Aperture S-band)、KEKB 型 S-band (KEKB)、PF 型 S-band (PF)、C-band] が設置されている。その内、2013 年に設置された LAS 管を除いた加速管にはリフレクタを設置するための基準座が備わっていない。そのため、加速管中心の正確な位置を測定するのが困難であった。

今回、加速管の大部分を占める、KEKB と PF 用にそれぞれの測定治具を製作した。Figure 3 は実際に PF 加速管に治具を設置した様子である。

治具は中央上部にリフレクタ台座を設置する孔と治具の水平を確認するための水準器 ($0.02\text{mm}/\text{m}$) を設置する台座が一体となった構造をしている。これを径および加速管との同心度が保証された支持脚取り付け部に載せ、水準器を見ながらマイクロメー

ターを使用して精密設置調整をする。

本治具は高精度に設置されることで加速管中心の鉛直上にリフレクタが位置するように設計されている。レーザートラッカーにより求められた座標から、高さ方向の設計寸法を差し引くことで、加速管中心位置が同定できる仕組みである。

実際の測定では、製作誤差によるエラーを最少にするため、製作した複数の治具の中から事前の測定で最も誤差が小さかった個体を用いている。

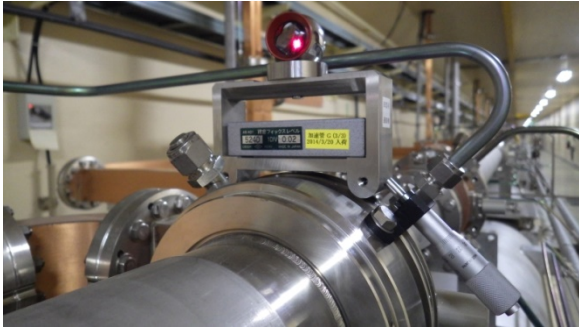


Figure 3: Measurement tool of accelerator tube for laser tracker.

3.3 収束電磁石用アライメント台座

既存の収束電磁石にはリフレクタ用台座を設置するための構造がなく、レーザートラッカーでの測定が困難であった。

この問題を解決するため、収束電磁石の外径寸法に合わせたリフレクタ専用台座を製作し、半割にした磁石に対して精密定盤上で取り付けをおこなった。取付け後にはレーザートラッカーを用いて確認計測を実施した。Figure 4 に台座を取り付けた磁石を示す。台座の取り付け手順は以下の通りである。

1. 磁石上部台座設置個所の塗装剥離
2. 磁石の分解（半割り）
3. 精密定盤上で台座の仮固定
4. レーザートラッカーを用いた台座の位置確認
5. 接着剤による台座の固定
6. レーザートラッカーを用いた固定後の再測定
7. 磁石の復元

この作業では、台座の加工精度を含めて $\pm 50\mu\text{m}$ 以下の精度で電磁石中心の鉛直上に台座を設置している。この台座により加速ユニットに対する収束電磁石のミスアライメント測定が可能となった。

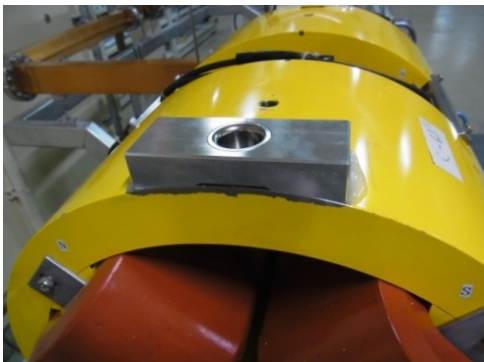


Figure 4: Reflector base on the quadrupole magnet.

4. 加速ユニット架台アライメント状況

ユニット架台のアライメントはレーザーアライメントシステムにより、A-B セクター、C-2 セクターおよび 3-5 セクターの 3 段階に分けて実施した。これは LINAC の高度化に於いて、A-2 セクターを上流側、3-5 セクターを下流側とする 2 分割運転により、作業個所が分断されたためである。以下に各区分間でのアライメント結果を紹介する。

4.1 A-B セクター

Figure 5 に A-B セクターユニット架台アライメント結果を記す。A-B セクターはレーザー基線長が C-5 セクターに比べて短いため、レーザー安定度が高く測定誤差の少ない計測が可能であった。合わせておこなったレーザートラッカーによる測定においても 0.3mm 以下の精度で架台がアライメントされていることを確認した。

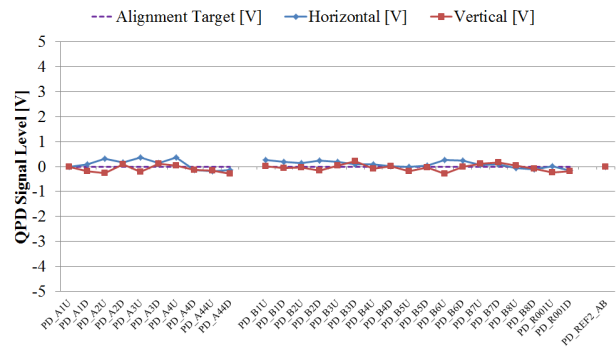


Figure 5: Result of A-B sector ACC-UNIT alignment.

4.2 C-2 セクター

C-2 セクターは標準ユニット架台に加え、#15～#17、#21～#23 ユニットにかけて陽電子生成捕獲部対応の高剛性アルミ鋳物架台^[4]が設置されている。

これらの架台にも QPD が設置されており、既存の架台と同様にレーザーアライメントが可能である。しかし、搭載するコンポーネントの重量が大きいいため、複数の脚部で構成されており標準ユニット架台に比べてアライメント作業が複雑である。Figure 6 に現在の C-2 セクターユニット架台アライメント状況を記す。ミスアライメントは 1mm 以下ではあるが A-B セクターに比べて大きいいため、今後再調整をおこなう必要がある。

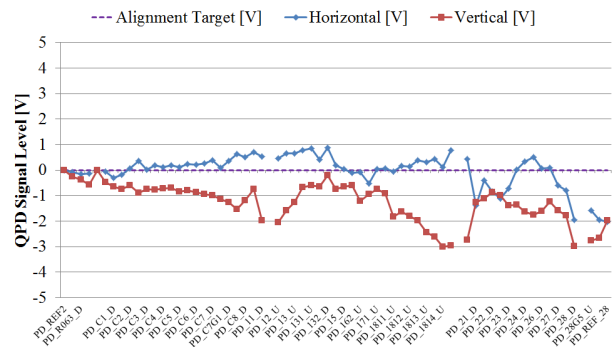


Figure 6: Result of C-2 sector ACC-UNIT alignment.

4.3 3-5 セクター

3-5 セクターはレーザー基線に対して最大で高さ方向に 7mm、横方向に 6mm 程度のずれが生じていることが事前の測定結果から想定されていた。

加速ユニット内の導波管立体回路はその構造上、横方向の変位に関しては比較的順応性が高いのに対し、高さ方向に関しては可動範囲が少ない。高さ方向の調整による真空リーク発生の可能性検討のため、比較の変位量の大きな 3 セクターの #34~#36 ユニットを使用して、5mm 程度の調整試験を実施し、導波管変形等を調べた。この試験の結果、真空リーク等の問題が見られないことを確認し、真空状態のまま 3-5 セクター全体の調整をおこなうことにした。但し、縦方向の調整量が最大となる 3-4 セクターは 3~4mm 程度の調整にとどめて様子を見るよう大きなバンブ軌道に調整をおこなった。Figure 7 にアライメント結果を記す。

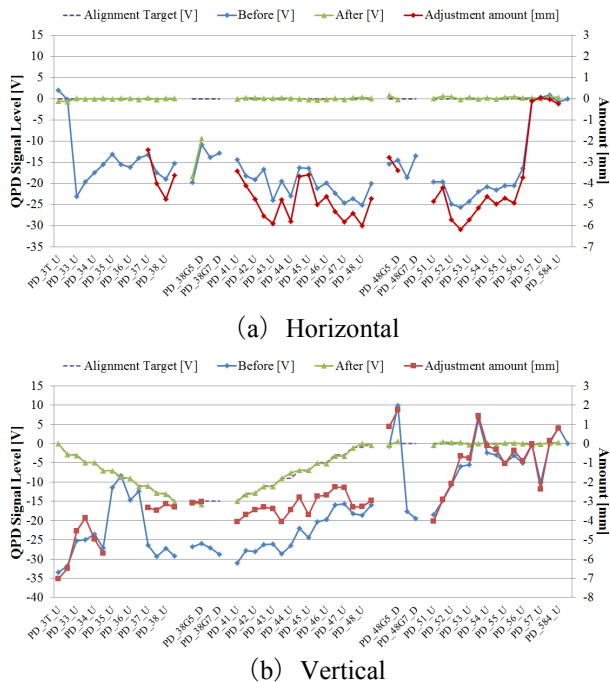


Figure 7: Result of 3-5 sector ACC-UNIT alignment.

5. ARC 部アライメント

A-B セクターおよび C-2 セクターの加速ユニット架台アライメント後、ARC 部の電磁石アライメントをおこなった。ARC 部建設時、電磁石は水平に配置されたが、レーザートラッカーで再度測定したところ、偏向電磁石および収束電磁石の高さに最大で 1.6mm ほどのずれが計測された。

また、直線部のアライメント結果から、2 本の直線部は ARC 部で仮定した水平面に対して、わずかに傾きがあることが判明した。これらの結果から、今回改めて 2 か所の直線部を含む平面に電磁石が配置されるよう、レーザートラッカーを使用して 3 次的にアライメント^[3]をおこなった。Figure 8 に調整前後の偏向電磁石高さ方向測定結果を示す。

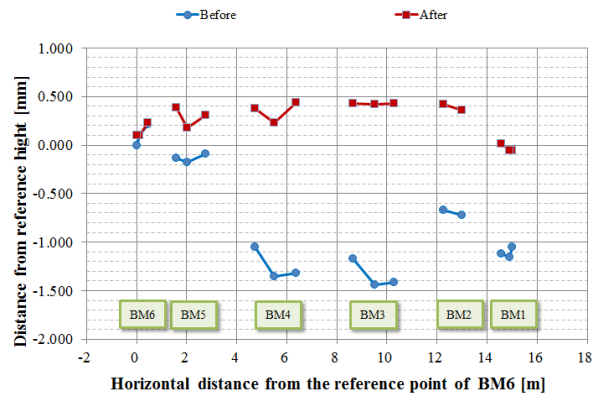


Figure 8: Result of bending magnet alignment at J-ARC.

6. 加速管アライメント

加速ユニット内の加速管アライメントはレーザートラッカーと加速管位置測定治具を使用した。

アライメント手順は以下の通りである。

1. ユニット架台のロール調整
2. ユニット架台両端の QPD 位置測定
3. 現状の加速管位置の測定
4. サブ架台高さおよび基準レール調整
5. 加速管横方向位置調整

レーザートラッカーを使用することで加速ユニット架台両端の QPD 座標を基に、より精密な加速管のアライメントが可能となった。アライメント精度は SuperKEKB での仕様を満たす 100 μm 以下である。現時点で全 55 ユニット中 39 ユニットの調整が終了している。調整の例として Figure 9 に #34 ユニットでのアライメント結果を記す。

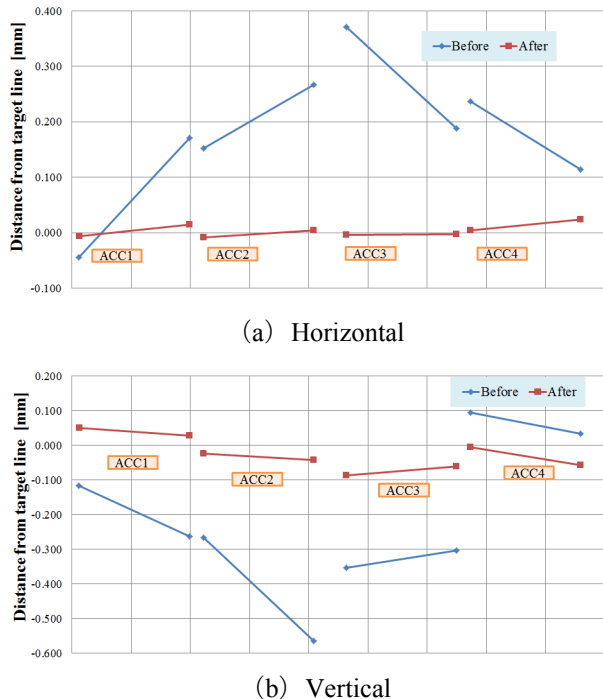


Figure 9: Result of accelerator tube alignment at #34 unit.

7. 収束電磁石アライメント

収束電磁石の多くは加速ユニット間に設置された連結構造の架台に搭載されている。この架台は加速ユニット架台と位置決めピンにより連結されており、架台の動きに追随する仕組みとなっている。先の大地震により、この連結部も大きな損傷を受け、多くの個所で仮復旧の状態となっていた。

今回、電磁石に取り付けた台座を用いて、試験的に B セクター現状測定とアライメントをおこなった。作業はレーザートラッカーを用いて連結架台両端の加速ユニットに設置された QPD 位置座標を取得し、そこから設計上の位置に磁石が配置されるように架台のレール部と磁石台座の間に 50~200 μm のシムを挟み込み微調整をおこなった。

B セクターのアライメント結果を Figure 10 に記す。今回の手法で大幅にミスアライメントが減少しており、今後、他のセクターも同様の作業を進めていく予定である。

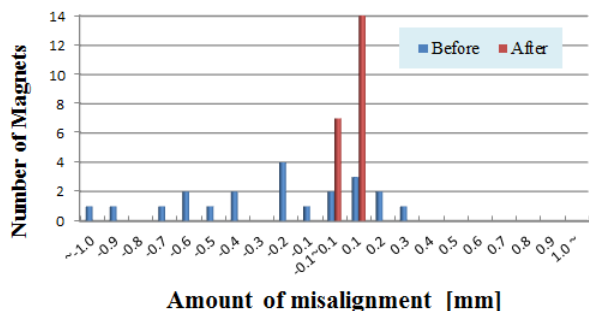


Figure 10: Horizontal misalignment of quadrupole magnet at B sector.

8. まとめ

LINAC におけるアライメント方式と現時点でのアライメント状況について紹介した。アライメント作業とともに測定環境の整備も継続中である。

今後は長期メンテナンス期間を利用して定期的に設置状況のデータを収集し、今後のアライメントのための基礎データとして蓄積していく予定である。

参考文献

- [1] K.Suzuki et al., “東日本大震災からの KEK 電子陽電子入射器真空系の復旧作業”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [2] T.Suwada, “高精度レーザーアライメントのための 500m 長レーザー長基線の高安定化”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 10, No.4, 2013.
- [3] M.Tanaka et al., “REFINEMENT OF ARC ALIGNMENT BETWEEN TWO STRAIGHT SECTIONS FOR INJECTOR LINAC OF SUPERKEKB”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, June 15 - 20, 2014.
- [4] K.Kakihara et al., “KEK 電子陽電子入射器の加速ユニット架台”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 8-10, 2014.