

Super KEKB に向けた電子陽電子入射器のアライメント状況(2)

STATUS OF ALIGNMENT OF KEK LINAC FOR SUPERKEKB (2)

牛本信二^{#,A)}, 肥後壽泰^{B)}, 諏訪田剛^{B)}, 柿原和久^{B)}, 佐藤政則^{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)}, 久積啓一^{A)}

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

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

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

Abstract

The system of the initial alignment for the KEKB injector LINAC referred to the laser beam passing through each two of the straight beam lines. The pointing stability was improved and made the more precise alignment possible. This system is used to align the girders of the accelerator sections in the first stage of the alignment. The accelerator components were firstly set mechanically on the girders, and then were aligned more precisely by using the laser tracker with respect to the girder fiducial points. Recently we installed the new thermal-gun beam line above the RF-gun beam line at the upstream end of the LINAC. Because the laser alignment system was not available at the heavy construction period, we used the laser tracker fully to install the girders and the accelerator components. In this paper, we report the status of the recent alignment processes since the previous report.

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 4~8 台の加速ユニットからなる 8 つのセクターで構成される。各ユニットは単一架台上に加速管や電磁石などのコンポーネントが搭載されている。これらは最初架台上に機械的に設置された後にレーザートラッカーを用いて精密にアライメントされる。架台は 2 か所の直線部に各々独立に構築されたレーザーアライメントシステムを用いてアライメントをおこない、LINAC ビームライン全体のアライメントが実現する。

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 加速ユニットの内で $1\sigma = 100 \mu\text{m}$ 以下) である。これを実現するために、レーザーアライメントシステムの高安定化^[1]、レー

ザートラッカーによるコンポーネントのアライメント精密化を進めアライメント精度向上に努めている。本報告では前回の報告^[2]以降 LINAC で実施したアライメント作業について紹介する。

2. レーザーアライメントシステム測定

LINAC では加速ユニット架台のアライメントをおこなうためのレーザーアライメントシステムが 2 か所の直線部に設置されている。このシステムは 500m 長基線のアライメントレーザー、架台両端部の基準軸上に設置した QPD(Quadrant-silicon Photo-Diode : 4 分割シリコンフォトダイオード)と呼ばれる受光センサー、高精度のレーザー位置フィードバックシステム^[3] から構築される。レーザー光軸はレーザー出射点近傍と最下流の基準点を結ぶレーザー光路で規定される。レーザーシステムは、最下流のセンサー位置に光軸をフィードバックするように自動で位置補正をおこない、 $40 \mu\text{m}$ (1σ) の安定度を実現している。以下にこのシステムを用いておこなった作業について記す。

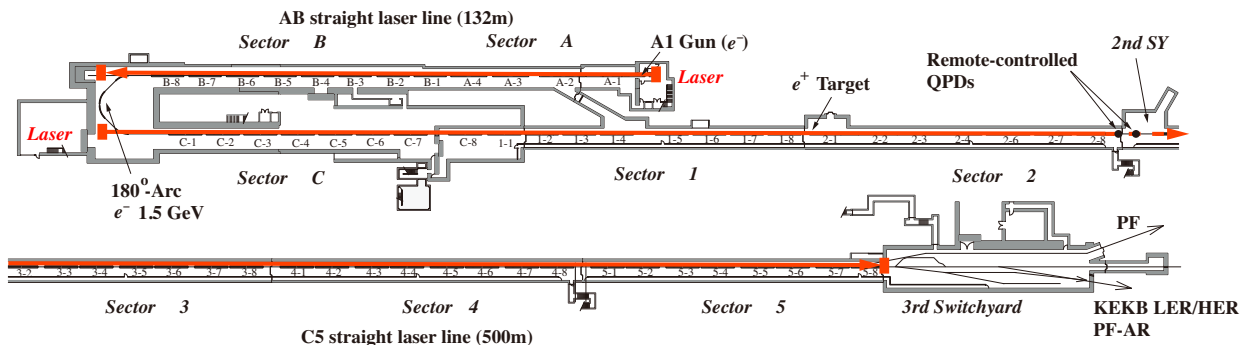


Figure 1: Outline of KEK e-/e+ injector LINAC.

[#] ushimoto@post.kek.jp

2.1 QPD 感度係数測定

レーザーアライメント計測はアライメントの基準となるレーザー光軸を形成するガウシアンビームを QPD で受光することによりおこなう。受光部の 4 象限に配置された各光センサーからの光電流を読み取ることで、ビーム中心に対する QPD の相対位置を把握することが可能となる。

アライメント精度を評価する際、この値を位置情報の単位に変換する必要がある。このとき用いる係数を感度係数と呼ぶ。この値はアライメントレーザーのビームサイズに応じて変化するため、一定ではない。幾つかの QPD で、アライメントレーザー出射部からの距離と感度係数を測定することで、C~5 セクター全域での感度係数が推定できる。

2014 年から実際の架台を動かして 1~5 セクターの感度係数分布を求めた。1 セクターおよび 28 ユニットでは下記の要領で作業をおこなった。

- (i) QPD 信号が 0 となる位置に架台を調整
- (ii) 架台にダイヤルゲージを設置し、原点とする
- (iii) 原点を中心に Horizontal および Vertical 方向に 0.5mm ずつ架台を動かし QPD 信号を測定

実際の架台を使用するため、過度な調整による導波管やビームラインの真空リークが発生しないように注意を払い、測定範囲は $\pm 1\text{mm}$ とした。

Figure 2 に 1-3 ユニット(PD_13_U)での測定結果を記す。Horizontal、Vertical 共に架台の調整量に対して比例した QPD 出力が得られた。この結果から、感度係数 [mm/Volt] を求めることができる。

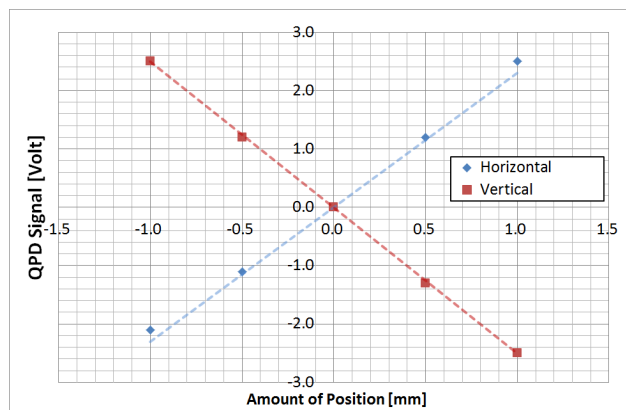


Figure 2: Position dependence of QPD signal at PD_13_U.

一方、3~5 セクターは架台調整時にダイヤルゲージを設置し、調整前後の QPD 信号の差異から感度係数を求めた。調整量が少ない幾つかの箇所では、上流に比べて感度係数が小さいため、計測データの誤差が大きくなり、正常な感度係数が求められなかった。1~5 セクターの感度係数測定結果を Figure 3 に示す。図中の点線は Vertical の感度係数を近似したプロットである。アライメントレーザーの出射部から 2 セクターまでは感度係数が $0.6\text{--}0.2\text{mm/V}$ に変化し、3~5 セクターではほぼ一定の値となっ

ていることがわかる。以降の QPD データは測定値をこの近似値を用いて距離データに換算し表記する。

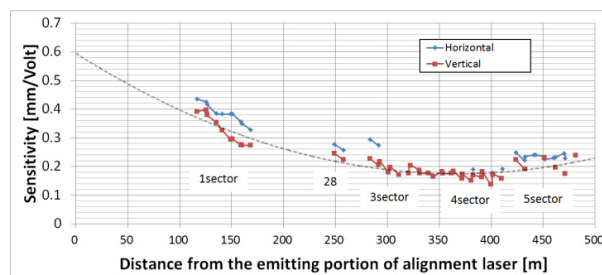


Figure 3: QPD Sensitivity (1~5 sectors).

2.2 3~5 セクターユニット架台アライメント

昨年の 12 月から今年の 2 月にかけて、3~5 セクター(3-T ~ 5-2 ユニット)の加速ユニット架台アライメントを実施した。前回の報告¹⁾時点では、3~4 セクターは Vertical 方向に 3mm のバンプとなるように調整をおこなった。その理由は、作業前の測定で架台の調整量が最大で 8mm 程度の箇所が判明し、調整によって導波管に真空リークが発生する危険性を想定していたためである。これまでの調整経験では Vertical 方向の調整量は最大で 5mm 程度であり、その範囲で滑らかにビームラインがつながるようにアライメントした結果である。

今回、真空を保持したまま 10 mm 近い架台の調整が可能か判断するため、問題が発生しやすいと判断している場所であるギャラリ一部水平導波管を作業前に予備調査した。ギャラリ一部で設計上の設置位置に対して上下方向に大きな差異が見られるユニットを候補とし、実際に水平導波管を外してその導波管の状態を確認するという方法でおこなった。

候補とした 4-1、5-6 ユニットの 3dB 分配部から水平導波管を経てトンネル内への垂直導波管頂上部までで、両端のフランジ位置は、上下方向に 8mm 以上、最大 15mm に及ぶずれが観測された。いずれのユニットも 3dB ハイブリッドでの変形は少なく、水平導波管に歪みが集中しており、反りが見られた。これを取り外し変形の具合を確認したところ、弾性変形による影響は見られず、大方塑性変形していたことが判明した。また、導波管に垂直に取り付けられているフランジに微小な角度がついていた。これはフランジ接合部のロウ付け箇所での変形が起きている可能性を示唆するが、真空リークやクラックなどは見られなかった。

これらの結果から、Vertical 方向における 10mm 以下の調整量では真空リークに至る導波管へのダメージの発生確率は少ないと判断し、真空を保持したまま架台調整を実施した。調整前後の QPD 出力信号変化を Figure 4 に記す。調整により、3~4 セクターのバンプが修正されていることがわかる。

この調整により、2011 年の震災以降進めてきた加速ユニット架台の初期アライメントが全ユニットに対して完了した。調整時のアライメント測定値は $\pm 0.3\text{mm}$ 以下であり、当初目標とした値を達成した。

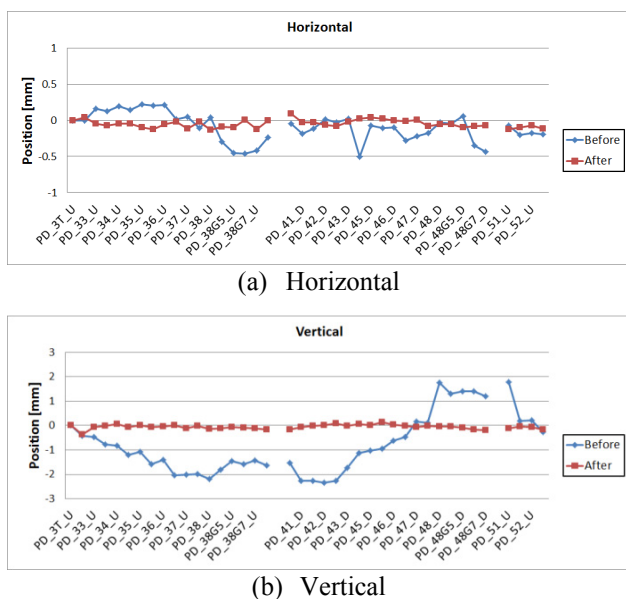


Figure 4: Result of the girder alignment in 3~5 sectors.

2.3 C~5 セクター長期測定

昨年から LINAC での長期メンテナンス期間を利用して C~5 セクター全 QPD データ測定を数回おこなっている。Figure 5 は 3~5 セクターの架台アライメント終了後の 2015 年 1 月 29 日の測定結果を基にこれまでの測定データの差分をプロットした結果である。図中の青い縦線は建屋の継ぎ目 (Expansion joint) を示す。この区間には計 6 か所の建屋継ぎ目が存在する。なお、加速ユニット架台はこの継ぎ目をまたがないように配置されている。

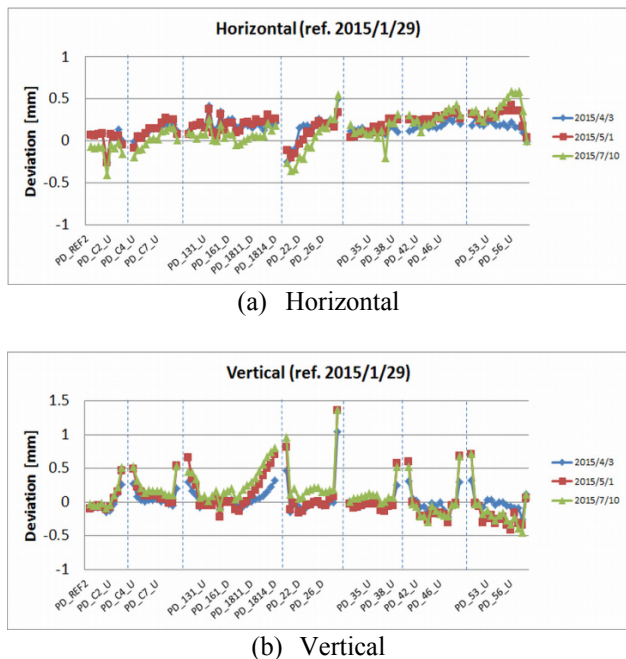


Figure 5: Result of the measurement of QPD signal in C~5 sectors.

測定結果から建屋の継ぎ目で Horizontal、Vertical

共に変動がみられる。(a) では継ぎ目前後での変化が場所によって異なるが、(b) では同じ方向に動いている。また Vertical では継ぎ目周辺で顕著な変化がみられる。このような建屋の変動自身は以前から議論されてきていたが、昨年から頻度を上げておこなってきた測定により、明瞭になってきた。

この変動を更に詳細に調べるため、昨年の 12 月から自動で出し入れ可能な新しい QPD システムを 2 セクター建屋継ぎ目の上下流 2 箇所に設置し、建屋の変動を常時観測し始めた^[4]。一方、同じ場所で昨年からの建屋継ぎ目の局所的な変化を観測するためにデジタルダイヤルゲージを用いた自動データ収集もおこない解析を進めている^[5]。

これらの測定結果から、徐々に建屋の変動について詳細が分かるようになってきた。今後、更に自動計測可能な QPD システムを追加設置し、床変動を含めたアライメント精度達成を如何におこなうかを検討していく。

3. レーザートラッカーによる測定

LINAC では 2011 年にレーザートラッカー (Leica AT-401) を導入した。これ以降、レーザートラッカーによるコンポーネントの測定をおこなうために、リフレクタ設置用の台座取付け等の環境整備に取り組み、精密アライメントが必要なコンポーネントの測定が可能となった。

レーザートラッカーは既設のビームラインコンポーネントのアライメント精度向上に努める一方、新規に設置した AT ライン架台のアライメントのような、構造上レーザーアライメントシステムが使用できない場合、架台の設置からその架台基準に対するコンポーネントの設置アライメントまで全てをその測定を基におこなうことになる。

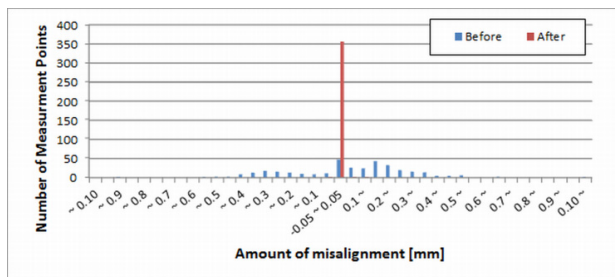
昨年からのレーザートラッカーを用いておこなった作業について以下に紹介する。

3.1 加速管の架台基準に対するアライメント改善

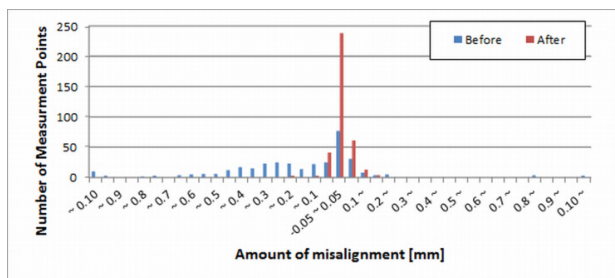
2012 年から進めていた加速ユニット架台上の加速管アライメント作業が 2014 年 10 月に概ね終了した。実際の測定では、リフレクタ設置用の治具を加速管の上下流 2 カ所に設置し、ユニット架台に設けた基準軸からのずれを測定・調整しており、データ数は加速管本数の倍となっている。作業をおこなった 182 本のアライメント結果を Figure 6 に記す。現在まで目標とするアライメント許容誤差は、最大 $\pm 100 \mu\text{m}$ としているが、その達成度は Horizontal:99%、Vertical:92% であった。

調整作業は Horizontal と Vertical で異なる。Horizontal 方向では、最小で $50 \mu\text{m}$ のシムをコンポーネント支持脚部と位置基準ルール間に挿入し調整をおこなった。一方、Vertical 方向ではコンポーネントが搭載されているサブ架台と呼ばれるプレートを支持する付属のジャッキボルトを使用して調整した。架台の構造上、1 枚のサブ架台には 2 本分の加速管支持脚が載っており、加速管支持脚ごとに個別の調整はおこなっていない。

このような調整方法の違いが Vertical 精度のばらつきに起因しているものと思われる。また一部では構造上調整限界に達しているものがあり、今後対応する必要がある。



(a) Horizontal



(b) Vertical

Figure 6: Misalignment of the accelerating tube.

3.2 四極電磁石アライメント

LINAC でこれまで使用していた四極電磁石にはレーザートラッカーによる測定を想定した基準座構造がなく、直接測定が困難であった。これを解消するため、磁石の上部にリフレクタ用基準座の取付けをすすめ、ビームライン上にあるほぼすべての磁石に設置を完了した。これによりレーザートラッカーを使用して四極電磁石の精密アライメントが可能となった。磁石は下記の手順でアライメントをおこなった。

- (1) 磁石のロール調整
- (2) 同一架台で連結した磁石(Doublet、Triplet、Quartet) 同士のアライメント
- (3) ビームラインに対する磁石のアライメント

これまで磁石のアライメントをおこなうにはビームラインから降りて、定盤等の上で作業をする必要があり、真空を破る大掛かりな作業であった。しかし、基準座の整備により、これらの作業をビームライン上に磁石を置いたままできるようになり大幅に作業効率が改善した。また、事前に加速ユニット架台のアライメントをすすめたことで、磁石が搭載されている架台自体のロールも改善されており、これまで現場ではできなかった(1)のような調整も可能となった。

(2) および (3) はレーザートラッカーによる作業である。いずれの調整も加速ユニット架台の基準軸を基に調整を実施した。場所によっては 2 台の加速ユニット架台をまたいで設置されている箇所がある。このような場合、連続した 2 つのユニット架台は

レーザーアライメントシステムで $\pm 0.3\text{mm}$ 以内にアライメントされているため、レーザートラッカーでの測定値から平均の基準軸を作成し、これを基にアライメントをすすめた。

調整によりほぼすべての磁石が連結した状態では $\pm 100\ \mu\text{m}$ 以内、前後のユニットとのずれは $\pm 300\ \mu\text{m}$ を達成している。今回の作業で目標値以内の調整ができなかった箇所については、今後ビームラインから一時撤去し、架台や組立精度も含めて調査をおこなう必要がある。

3.3 AT ラインアライメント

2015 年 2~6 月にかけて、LINAC の最上流 (A1 ユニットと呼ぶ) に位置する電子源の拡充をおこなった。これまで開発してきた RF 電子銃と並行して LINAC の各種開発・運転を進めるため、以前 KEKB 用に使用していた熱電子銃を二階建ての上部ラインに復活させる改造である。

改造ではまず既存の熱電子銃とそのビームラインを一部解体し、これを新たに AT ラインとしてこれまでの一階部 A1 ラインより 750mm 高い位置に二階建て構造として設置した。Figure 7 に完成したビームラインの様子を示す。図のように AT ラインは途中まで 1 階の A1 ラインと並行し、24 度の偏向部を経て A1 ラインと合流する。

二階部となる AT ラインには、A~B セクターの既設レーザーアライメントシステムによる架台アライメントが使用できない。既存の A1 ラインと共に AT ラインを高精度で設置するため、架台およびコンポーネントの設置・アライメント作業を全てレーザートラッカー測定を基におこなった。

このような偏向部を含むラインを構築する場合、従来のオートレベル等の測量機器だけで高精度な設置をおこなうには高いスキルと労力を要する。一方、レーザートラッカーでは、CAD 等であらかじめ想定した座標系に基づいてコンポーネントを測定しながら配置することができると、精度向上と共に大幅に時間短縮が可能になった。

一連の作業後、2 つのビームラインと合流部の角度を測定した結果、設計値 24 度に対して 23.99 度であった。レーザートラッカーを使用することで、今回のような偏向部を含むビームラインの構築が比較的短時間で高精度に実現できた例である。

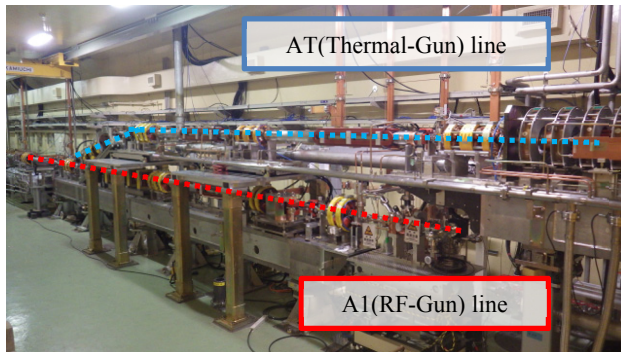


Figure 7: AT & A1 beam line.

4. まとめ

レーザーアライメントシステムを用いた加速ユニット全体の初期アライメントが完了した。一方、測定データから新たな問題として建屋の変動が浮き彫りになってきた。アライメントへの影響が大きく、この問題について詳しく理解するため今後もデータ収集を進めていく必要がある。

レーザートラッカーによるコンポーネントの精密化の第一段階は概ね完了した。今後はローカルにミスアライメント量を確実に抑えておくこと、更に床変動も含めて設置時の状態を維持するための保守の戦略を立てていくことが重要となっている。今後の課題として、実測データと CAD やビームシミュレーションの相互利用が図れる環境整備を進めたいと考えている。

参考文献

- [1] 諏訪田剛, “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”, 日本加速器学会誌「加速器」第10巻4号 2013, p.1.
- [2] S.Ushimoto, et al., “Super KEKB に向けた電子陽電子入射器のアライメント状況”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [3] T.Ichikawa, et al., “KEK 電子陽電子入射器におけるアライメントレーザーフィードバックシステムの改良”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 4-7, 2015.
- [4] T.Suwada, “KEKB 入射器における遅いトンネル床面変動の動的観測”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 4-7, 2015.
- [5] M.Tanaka, et al., “KEKB 入射線形加速器トンネル床変動の測定 (2)”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 4-7, 2015.