

HIGH PRECISION MOUNT METHOD OF PHOTODETECTOR IN LASER-BASED ALIGNMENT AT THE KEK INJECTOR LINAC

Keiichi Hisazumi^{#, A)}, Toshikazu Minami^{A)}, Yoshikazu Mizukawa^{A)}, Tuyoshi Suwada^{B)}, and Masanori Satoh^{B)},

A) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd., 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045, Japan,

B) Accelerator Laboratory, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

It is necessary to improve the alignment of the injector linac with high precision towards the SuperKEKB-factory project because this project requires high quality injection beams with lower emittances. We have rebuilt the laser-based alignment system of the injector linac. The laser-based alignment system comprises a laser and photodetectors. A method of high-precision positioning of photodiodes which need to incorporate in the photodetectors have been developed for this purpose. We report the technical and principal issues on the mounting and high-precision positioning method of the photodiodes in detail.

KEK 入射器におけるレーザーアライメント用光検出器の高精度取り付け

1. はじめに

これまで、KEK 電子陽電子入射器(入射器)は、KEKB リングに電子・陽電子ビームを供給してきたが、ナノビームを扱う SuperKEKB^[1]では、大電流、低エミッタンスの入射ビームが要求されている。

ビームの低エミッタンス化のためには、ビームラインを構成する電磁石や加速管の設置精度の向上が不可欠である。そのため、入射器ではアライメントの基準線にレーザーを用いるレーザーアライメントシステムの再構築をおこなっている。

受光素子 (Position Sensing Detector ; PSD) を組み込んだ光検出器 (Photo Detector ; PD) を加速管架台の両端に固定し、PSD でレーザー基準からの変位を測定することにより、加速管架台の変位を測定することができる。このとき、PD 自身の高精度アライメント(PD への PSD 取り付け)は、測定精度向上には欠かせない。本稿では、PD に対する PSD の高精度取り付け方法について報告する。

2. レーザーアライメントシステム概要

レーザーアライメントシステム^[2]は、レーザー、PD、光軸管、検出器、およびオシロスコープより構成される。PD、および光軸管は加速ユニットの一部に組み込まれている。

図1に加速ユニットの構成を示す。入射器における加速ユニットの典型的な構成は、加速管、円筒形ベース(ベース)、架台脚部、サブ架台、PD、および光軸管である。

直径φ508 mm ×長さ 8.44 m のベースは、精密調整機構を介して床に固定された脚部に支持されている。上部には、加速管が乗るためのサブ架台が取り付けられており、加速ユニットは、2 m 長加速管を4本設置が可能である。レーザーが伝搬するφ115 mm 光軸管は、ベースに内接して上部に溶接される。ベースの両端には、光軸管を挟み込む形で2つのPDが取り付けられている。ユニット内の加速管の

アライメントは、事前に高精度の位置調整がされており、レーザー基準線が両端のPD中心を通過するように、脚部に設けられた調整機構を機械的に動かすことで加速管のアライメントが可能である。

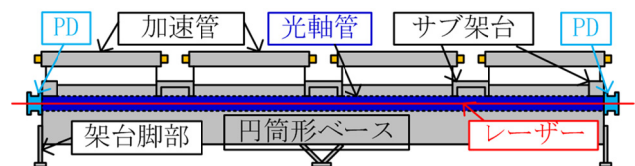


図1：入射器加速ユニットの構成

3. 光検出器

3.1 光検出器の構成

図2にPDの構成を示す。

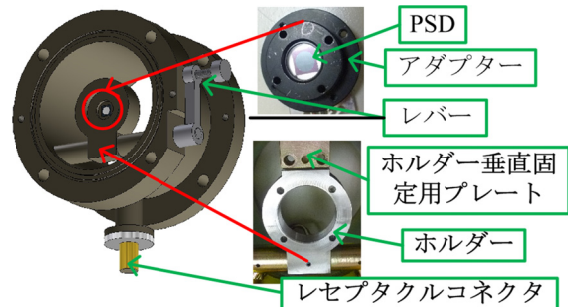


図2：PDの構成

PDは、円筒形の金属ケースの中に、PSD、アダプター、ホルダー、レバー、および外部へ信号を出力するためのレセプタクルコネクタで構成される。PDの両端のフランジには、光軸管と接合される面にOリング用の溝が掘ってあり、レーザーアライメント測定中は、PDと光軸管内部は真空状態^[3]に保たれる。これは、内部を伝搬するレーザーが空気によって揺らぐのを抑制^[4]するためである。

加速管架台上部のプレートとコネクタの干渉を避

[#]E-mail:hisazumi@post.kek.jp

けるため、PD はレセプタクルコネクタを下側にして加速ユニットに取り付ける。

PD の外側にあるレバーはホルダーと蝶番を通して連動しており、レバーを手動で立てるとホルダーが起立する。起立した後、上部の金属プレートに接触し、ホルダーが精度よく垂直位置で固定される。レバーを倒すとホルダーが水平に倒れ、レーザーを PD の後方へと通過させる。図 3 にホルダーの起立状態(左)と傾倒状態(右)を示す

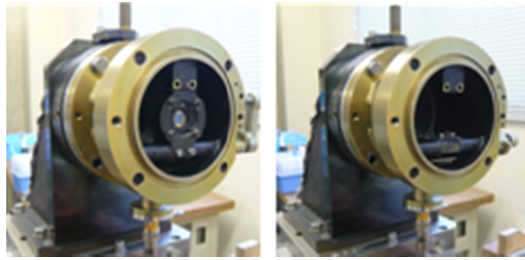


図 3 : ホルダーの起立状態(左)と傾倒状態(右)

3.2 PSD

PSD は、OSI Optoelectronics 社製の 4 分割のシリコンフォトダイオード(SPOT-9D^[5])である。図 4 (a)に PSD の寸法図を示す。表 1 に SPOT-9D の主な仕様を示す。

表 1 : SPOT-9D の仕様

シリコン電極直径	10 mm
受光部面積	19.6 mm ²
素子数	4
波長範囲	350~1100 nm
受光感度	0.05~0.65 A/W
素子間の GAP	0.102 mm
動作温度	-40~100 °C

ホルダー装着時に必要な部品構成を図 4 (b)に示す。

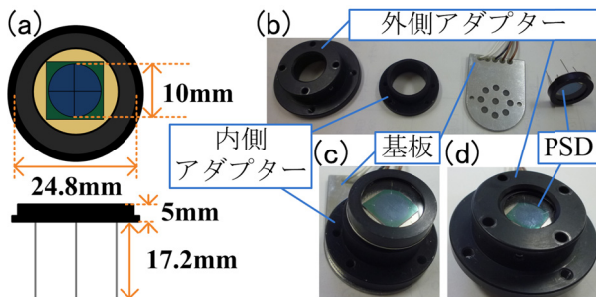


図 4 : PSD

(a)PSD 寸法図 (b)アダプター(外側、内側)、基板、PSD(左から順に並べる) (c)内側アダプターに PSD が乗った状態(d)PSD に外側アダプターを被せた状態

図 4 (b)は左から外側アダプター、内側アダプター、基板、PSD を示す。ホルダーに PSD を装着するには、基板上に内側アダプターと PSD を重ねて乗せ(図 4 (c))、上から外側アダプターを被せた状態(図 4 (d))にする。

4. テストベンチ

テストベンチは、PSD の良否を判定する性能評価試験(電気テスト)と PSD の精密取り付け位置調整をおこなう。図 5 にテストベンチの構成を示す。

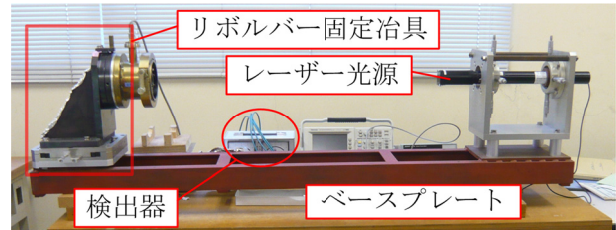


図 5 : テストベンチの構成

テストベンチは、レーザー光源、ベースプレート(150cm 長)、リボルバー固定治具、検出器、オシロスコープ、およびパワーメーターで構成される。表 2 にテストベンチで使用する測定機器のリストを示す。

表 2 : テストベンチの測定機器

レーザー光源	JDSU:Model1125
検出器	エマック社製:LAC-104
オシロスコープ	Tektronix:TDS3054B
レーザーエキスパンダー	Edmund: 10X-BEAM EXPANDER
パワーメーター	ADCMT: Optical Power Meter 8250A

専用台に設置したレーザー光源は、前後 2 か所でマイクロメータヘッド(2×4 本)を使って固定され、これら进行操作することにより照射位置と角度の調節が可能である。He-Ne レーザー($\lambda=632.8$ nm、最大出力 10 mW)を使用し、出射部先端に倍率 10 倍のビームエキスパンダーと 50%減光フィルターを取り付け、PSD 受光面でのレーザー強度約 1.8 mW、ビームサイズ直径 5 mm に調節している。精密位置調整には、レーザー出力の安定性が重要である。レーザーの電源投入直後は出力ドリフトが大きいいため、電源投入後、2 日以上待つて位置調整に使用している。

PD はリボルバー固定治具に取り付けて調整をおこなう。治具の上部には、ロックピンが付いており、レーザーに対して受光面を垂直に保ったまま PD を旋回させて、0°、90°、180°、270° の位置に固定が可能である。PSD にレーザーを照射することにより、4 分割セルから光電流が発生し、検出器^[6]に

入力される。検出器^[6]は、入力端子で光電流を受け、モニター用出力端子から4つの電圧信号として出力される。出力端子とオシロスコープを BNC 付ケーブルで接続し、直流電圧を測定することで、レーザー強度とレーザーに対する PSD 変位の計測が可能である。

5. PSD の交換作業

図6に PSD 交換作業のフローを示す。

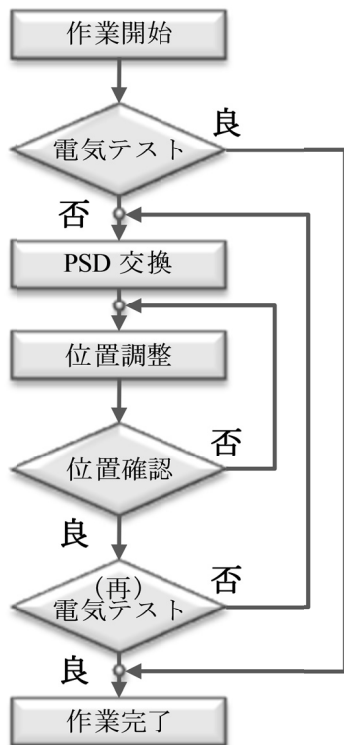


図6：PSD 交換作業フロー

入射器の建設以来、PSD の出力信号(ゲイン)の診断はおこなわれておらず、また長年の入射器運転により PSD が放射線損傷を受け、ゲイン劣化と4セルの出力不均衡が大きいことが予想された。PSD 出力低減や4セルの出力不均衡が大きい場合は、PSD の交換作業が必要となる。交換作業における、PD への取り付け位置の誤差は、そのままアライメントの測定精度を左右するので、PSD の交換と高精度取り付け方法の確立は重要な作業となる。

まず、テストベンチに PD を取り付け、電気テストを実施して交換の判断をおこなう。不適合と判定された場合は PSD を交換し、位置調整と位置確認が繰り返され、高精度な取り付けが確認されれば交換作業完了となる。

5.1 電気テスト

PSD の良否判定は、放射線損傷を受けていない同型器を基準として、対象となる PSD と出力を比較することでおこなう。

レーザー照射点を第一象限のセル中心に固定し、PD を 90° 毎に回転させ、各セルの出力をオシロス

コープで計測する。この時、以下の2つの条件が交換基準となる。

- 4セルからの出力が基準 PSD の出力(4出力平均)の75%未満のとき。
- 4セルの最大と最小ゲインの差が4出力平均の3%以上のとき。

この基準によると、電気的な4セルの出力不均衡による PSD の機械的中心位置のずれは 1 μm 以下に相当する。結果的には PD 全台数(152台)に対して22%(34台)の交換を実施した。

5.2 PSD 交換

アダプターと基板を分離し、新しい PSD を基板に半田付けした後、再度アダプターを PD ホルダーに戻すことでおこなわれる。

5.3 PSD 位置調整

PSD を交換すると、取り付け位置が PD 中心とずれるため、位置調整をおこなう必要がある。図7の左側に PSD を乗せた内側アダプター、右側に外側アダプターを示す。

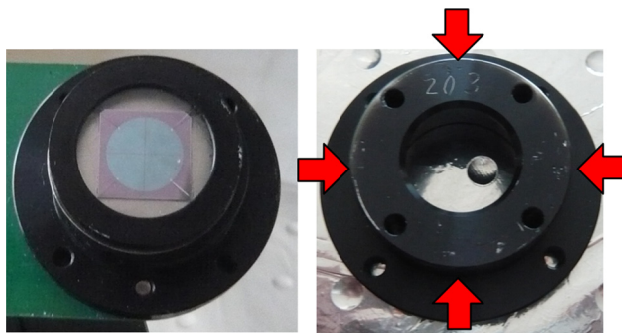


図7：PSD を乗せた内側アダプター(左)と外側アダプター(右)

図7(左)は、内側アダプターを挟み込んで PSD を基板に半田付けした状態である。基板下側よりネジを入れて内側アダプターと基板は固定されるが、PSD は基板と平行に可動する状態にある。

図7(右)に示す外側アダプターは、矢印のある側面部分4カ所に止めネジがあり、止めネジの調整により、水平、および垂直方向に PSD の位置移動が可能である。止めネジの移動量をダイヤルゲージにて測定したところ、止めネジ1回転あたりの移動量は 30 μm であった。

外側アダプターを PSD の上から被せ、止めネジを回し、4つの止めネジの先端が PSD の側面に当たることで PSD の取り付け位置が固定される。PD のホルダーに装着されている時は、止めネジ部分がホルダーに覆われてしまうため、ホルダーに取り付けた状態での位置調整は難しい。

5.4 PSD の取り付け位置解析

PSD の位置調整は、その中心を高精度に PD の回転中心(原点)に近づける作業である。図8に PSD 取り付け位置調整の解析方法を示す。

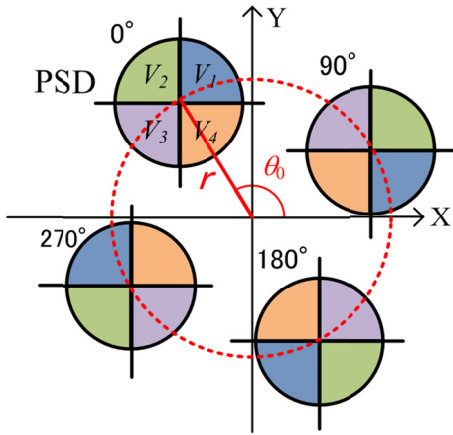


図8：PSD 位置解析

XY 座標は、テストベンチに固定された PD の機械的中心を原点とするものである。この原点に PSD 中心を一致させる調整が位置調整の方法である。

図8における分割された4つの円は、この座標系における PSD 交換後の初期位置を 0° の位置 (r, θ₀) として、90° 毎に回転させた時の PSD の回転位置を示している。このとき、各回転位置での PSD 中心は、半径 r の円周上を動く。

最初に 0° 位置にある PSD 中心にレーザー照射し、4 出力が等しくなるように照射位置を調整する。このとき、レーザーの照射位置は 0° の PSD 中心に高精度に一致している。次にレーザー照射位置を固定した状態で PD を時計回りに 0°、90°、180°、270° の位置に回転させ、4 出力をオシロスコープで計測する。ここで各回転位置において、4 つのセルの出力電圧 (V₁~V₄) と 0° の位置 (r, θ₀) との間には、以下に示す幾何学的関係が成り立つ

90° 回転位置の場合

$$r = S \frac{\sqrt{\{(V_1+V_2) - (V_3+V_4)\}^2 + \{(V_2+V_3) - (V_1+V_4)\}^2}}{\sqrt{2} \sum_{i=1}^4 V_i}$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{(V_4 - V_2)}{r \sum_{i=1}^4 V_i}$$

180° 回転位置の場合

$$r = S \frac{\sqrt{\{(V_3+V_2) - (V_4+V_1)\}^2 - \{(V_3+V_4) - (V_2+V_1)\}^2}}{2 \sum_{i=1}^4 V_i}$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{(V_3+V_2) - (V_4+V_1)}{2 \sum_{i=1}^4 V_i}$$

270° 回転位置の場合

$$r = S \frac{\sqrt{\{(V_3+V_4) - (V_1+V_2)\}^2 - \{(V_1+V_4) - (V_2+V_3)\}^2}}{\sqrt{2} \sum_{i=1}^4 V_i}$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{(V_1 - V_3)}{r \sum_{i=1}^4 V_i}$$

ここで、S は電圧値から位置を算出する補正係数で S = 31.5 μm である。この式を基本とすることにより、各回転位置における PSD 中心座標を出力電圧から変換して得られる。

本解析から PSD の位置座標が得られれば、次に止めネジを微小回転させ、PSD 位置を原点に近づくように移動させる(移動距離を直接計測することは難しい)。

再び、0° 位置でレーザーの照射位置を 4 出力が等しくなるよう調整し、新たな PSD 座標を求め、PSD 位置がさらに原点へ近づくように移動させる。このような調整過程を何度か繰り返し、徐々に PSD 中心が絶対原点に近づけるよう調整する。

5.5 再電気テスト

PSD の位置調整後の良否を判定する方法として、再度の電気テストをおこなう。

PD をテストベンチのリボルバー固定治具に取り付け、初期位置を 0° にする。PSD の第一象限上の光セルにレーザーを照射し、検出器を通してオシロスコープで出力をモニターする。

リボルバー固定治具を時計回りに 0°、90°、180°、270° と回転させ、各回転位置における第一象限セルからの出力電圧の最小値と最大値との差が出力電圧の平均に対して 3%未満であることを電気テストの良品判定条件にしている。

5.6 位置調整データ

ここでは、PSD の位置調整の要領と得られたデータを基に説明する。データサンプルを図9に示す。

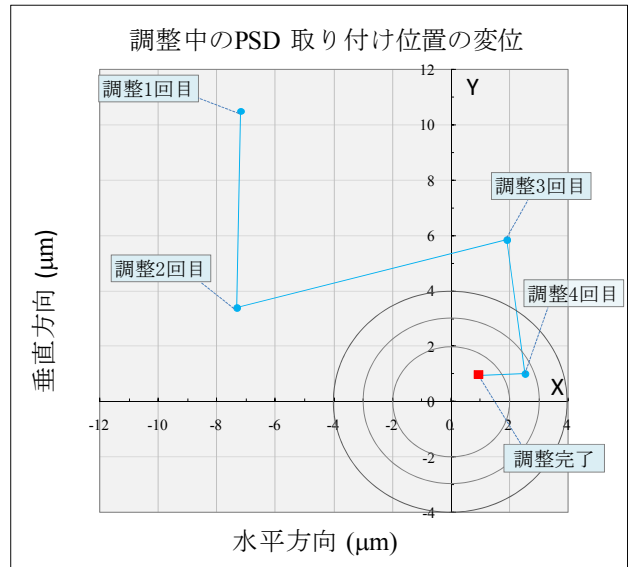


図9：典型的な PSD 位置調整データ

図9は、典型的な PSD の位置調整過程と結果である(参考として原点を中心とする3つの同心円を描く)。初期位置(調整1回目)の点(-7.2 μm 、10.5 μm)にあった PSD が、続く4回の調整で原点に徐々に近づき、半径2 μm の円内に PSD 中心が調整されたことを示す。

図10に、32台の PSD の位置調整をおこなった時の PSD 中心位置散布図を示す。

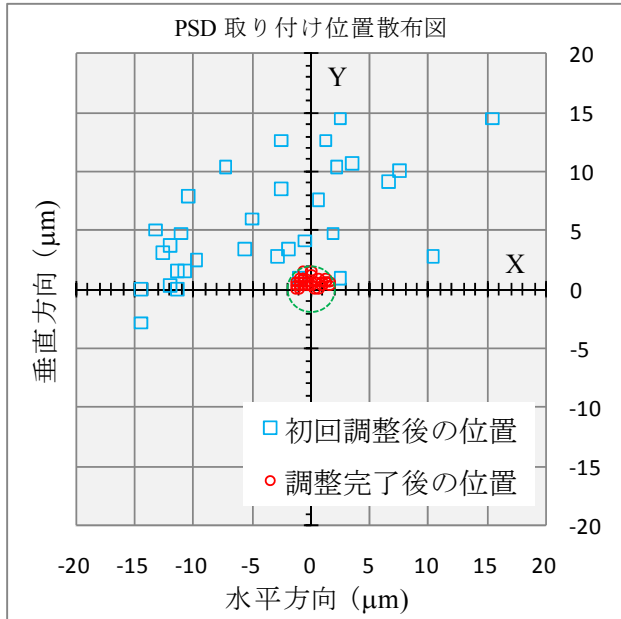


図10 : 位置調整後の PSD 中心位置(32台分)

グラフ中央の原点は PD 中心であり、縦軸、横軸は垂直、水平方向の原点からの距離をそれぞれ示す。青色のプロットは、粗調整としてのレーザーによる位置確認なしに初回の位置調整をおこなった PSD 中心位置である。

赤色のプロットは、位置確認と調整を繰り返しておこない(平均5回)、高精度に位置調整された後の PSD 中心位置を示す。中央の点線で書かれた円は直径4 μm である。

6. まとめ

本稿で述べた手法で PSD の位置を調整することにより、PD の中心から約 $\pm 2 \mu\text{m}$ の範囲内に PSD の中心を揃えることが可能である。

この手法は、水平と垂直の2軸方向に調整できるが、PSD の傾きを調整することができない。テストベンチの PD 固定治具に、水平と垂直に精度よく移動させる機構を付加して、傾き補正の手法の導入を今後の課題としたい。

7. 謝辞

PSD の精密位置取り付け方法に関して様々な助言と協力をいただきました飯野陽弼氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T.Kamitani et al., "LUPGRADE OF KEKB INJECTOR FOR SUPERKEKB", in Proceedings of the 7th Annual of particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [2] M. Satoh, T. Suwada, S. Telada, and K. Minoshima, "LASER BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE KEKB INJECTOR LINAC", in these proceedings.
- [3] Y. Mizukawa et al., "VACUUM MEASUREMENT OF LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB INJECTOR LINAC", in Proceedings of the 7th Annual of particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [4] T. Suwada et al., "LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC", in Proceedings of the 7th Annual of particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [5] <http://www.osioptoelectronics.com/standard-products/silicon-photodiodes/position-sensing-detectors/segmented-photodiodes.aspx>.
- [6] T. Suwada, M. Satoh, "LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON LINAC: DESIGN OF THE MEASUREMENT SYSTEM", in Proceedings of the 6th Annual of particle Accelerator Society of Japan, JAEA, Tokai, Naka-gun, Aug. 4-6, 2010.