

# VACUUM MEASUREMENT OF LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB INJECTOR LINAC

Yoshikazu Mizukawa<sup>1, A)</sup>, Shinji Ushimoto<sup>A)</sup>, Naoyuki Toyotomi<sup>A)</sup>, Kazuhiko Suzuki<sup>A)</sup>,  
Tsuyoshi Suwada<sup>B)</sup>, Masanori Satoh<sup>B)</sup>, Eiichi Kadokura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd  
2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

<sup>B)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Towards the Super KEKB project, a new laser-based alignment system is under development at the 600-m-long KEKB injector linac. The alignment system consists of the laser source, position sensing detector and data acquisition system. The reference laser beam propagates inside a cylindrical duct of 115 mm internal diameter to eliminate the laser beam fluctuation due to air flow. For the further of the laser beam, it is necessary that the inside of laser duct is kept at low-pressure condition. For this reason, we are investigating the vacuum leakage of all laser ducts installed in the KEKB injector linac. In this report, we report the system of laser duct vacuum measurement and its result in detail.

## KEKB 入射器におけるアライメント用レーザー光軸管の真空測定

### 1. 概要

KEKB 入射器 (以下、入射器) では、KEKB アップグレードに向けた入射器の高度化に伴い、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。レーザーを用いたアライメントシステムは、レーザー出射部及び検出部から構成され、各加速管架台の上流及び下流側に四分割シリコンフォトダイオード(Photodiode; 以下、PD)を設置している。

本システムでは、10 m 長加速管架台の内部にアライメント用レーザー光軸管(Φ115 mm)を設置し、その内部にアライメント用基準レーザーを伝搬させ、PD による計測をおこなう。本方式では、レーザー光軸管内を真空状態にすることにより、空気の揺らぎがレーザーに与える影響を抑制することが可能である。昨年度中に、1 セクター分(加速管架台 8 ユニットの)レーザー光軸管真空測定をおこなった。入射器における 500 m 長ライン (C~5 セクター)には、42 本の 10 m 長レーザー光軸管及び 19 本の 10 m 長より短いレーザー光軸管 (2 m 長など) から構成されており、これらの真空測定を継続しておこなっている。本稿では、入射器におけるレーザーアライメントシステムの概要およびレーザー光軸管真空測定の結果について報告する。

### 2. はじめに

入射器では、Super-KEKB へ向けたレーザーアライメントシステムの再構築が進行中であり、今年の夏期メンテナンス中に、C セクターのアライメント測定をおこなった<sup>[1, 2, 3]</sup>。その測定結果より、水平方向に大きなずれがあることが確認された。また、現状での測定分解能は、水平方向 0.352 mm、垂直方向 0.15 mm であり、目標とする 0.1 mm は達成され

なかった。これは理想的なレーザー光強度分布が実現されていなかったことが主な原因である。また、空気の揺らぎによるレーザー光の不安定性に起因する測定の困難が認められた。そこで、レーザー出射部のレンズユニットの改良とともに、レーザー光軸管内を真空状態にし、入射器 500 m ラインでのアライメント測定精度 0.1 mm を目標としたシステム開発をおこなっている。

### 3. レーザーアライメントシステム

#### 3.1 システム構成

入射器は、180 度偏向部を挟み 100 m 長 (A, B セクター)及び 500 m 長 (C~5 セクター)の 2 つの直線部から構成される全長約 600 m の線形加速器である(図 1)。2 つの直線部には、それぞれレーザー光源が設置されており、独立したアライメント計測が可能である。レーザー光を用いたアライメントシステムは、入射器建設当初に導入されたものであり、レーザー出射部及び検出部から構成される。入射器の加速管架台の上流及び下流側には、PD が設置されている。

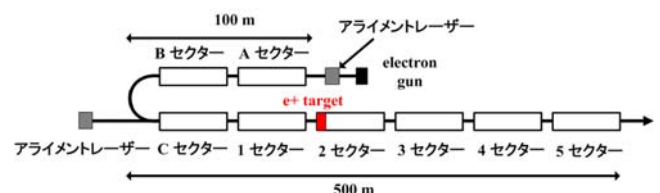


図 1 : KEK 入射器の構成

図 2 に入射器基本ユニットの構成図を示す。基本

<sup>1</sup> mizukawa@post.kek.jp

ユニットは、10 m 長の円筒型加速管架台(Φ508 mm)を基本とし、架台上部には加速管を設置するための基準プレートが設けられている。1 台の架台上には、2 m 長加速管が 4 本設置されており、基本ユニット 8 台で 1 つのセクターを構成している。加速管架台の内部には、アライメント用レーザー光軸管(Φ115 mm)が設置されており、レーザー光軸管の内装には、レーザー光の反射を抑制するための黒色塗装が施されている。レーザー光軸管を二重管構造としたのは、温度変化に起因した空気の揺らぎにより、レーザー光が変動することを避けるためである。

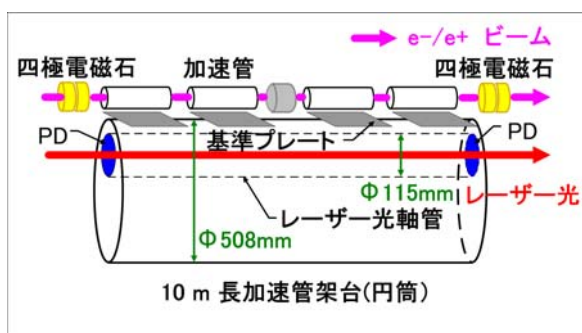


図 2 : 入射器基本ユニットの構成図

本システムを用いたアライメント測定では、はじめに、最上流および最下流に位置する 2 個所の基準 PD において、中心を通るような基準レーザー光軸を準備する。その後、各 PD でのレーザー位置を計測することにより、基準レーザー光軸からの相対位置が測定される。基本ユニット内のアライメントについては、加速管架台の PD 中心、加速管中心、および基準プレート間の相対位置が事前にアライメントされている。このため、ユニット間のアライメントを実行すると、必然的に加速管中心および電磁石中心のアライメントが達成されることとなる。入射器では、加速管設置誤差による横方向ウェーク場の影響や四極電磁石設置誤差によるビーム変位の影響から、0.1 mm 以下のアライメント精度が要求されている。

### 3.2 PD 及び検出装置

図 3 に、PD チェンバーおよび検出装置の写真を示す。PD として、Φ10 mm の四分分割シリコンフォトダイオードを使用している。PD は、図 3 にあるように専用チェンバー上のホルダーに装着され、その側部には、PD ホルダー用稼動レバーが装備されている。測定をおこなわない個所においては、PD ホルダーを機械的に倒し、レーザー光を下流へ伝搬させることが可能である。PD 面上にレーザー光を照射すると、各シリコンフォトダイオードには入射光強度に応じた電流が流れる。この電流値は、図 3 (右)の検出装置を用いて読み出される。本検出装置は、前面のメーターパネルにより、水平および垂直方向に対応した重心位置を目視にて読みとることが

可能である。また、パネル背面の BNC 端子より、各ダイオードに流れた電流および水平・垂直位置に対応した電圧を出力することができるため、オシロスコープなどを用いた精密測定が可能である。

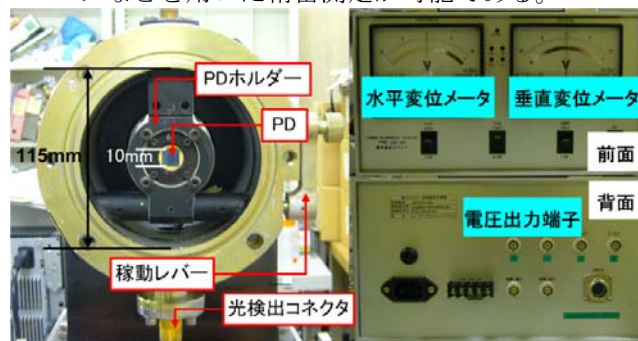


図 3 : PD チェンバー(左)および検出装置(右)

## 4. PD チェンバーリーク試験

レーザー光軸管の真空測定に先立ち、PD チェンバー単体でのリーク試験をおこなった。これは、リークが認められた場合に、リーク個所がレーザー光軸管であるか、または PD チェンバーであるかの判断を明確におこなうためである。本試験では、図 4 に示すように、PD チェンバーおよび He リークディテクター(ライボルト社製 型名: UL100PLUS)を接続して、リーク試験をおこなった。試験手順は、下記の通りである。

1. PD チェンバーの両面に排気治具を取り付け、内側を密閉した PD チェンバーに He リークディテクターを接続し、PD チェンバーの排気をおこなう。
2. 圧力が  $1 \times 10^{-7}$  (Pa $\cdot$ m<sup>3</sup>/s) 以下に達した後、PD チェンバーへ He ガスを吹きかける。
3. 圧力上昇が見られない場合は合格品、それ以外の物は不合格品と判断する。

本試験の結果を、表 1 に示す。これまでに、112 台についてリーク試験をおこなったが、不合格品は 1 台のみであった。本不合格品では、PD チェンバーの光検出コネクタ部の接合面(Φ30 mm)にリークが認められた(図 5)。接合面内部にある O リング(ニトリルゴム G-30)を新品と交換した後、再度測定をおこなったが、再度リークが認められたため不合格品と判断した。保留の 2 台に関しては、他の物と形状がことなるため、専用治具の製作後にリーク試験をおこなう予定である。

表 1 : PD チェンバーリーク試験結果表

総数	112 台
合格	109 台
不合格	1 台
保留	2 台

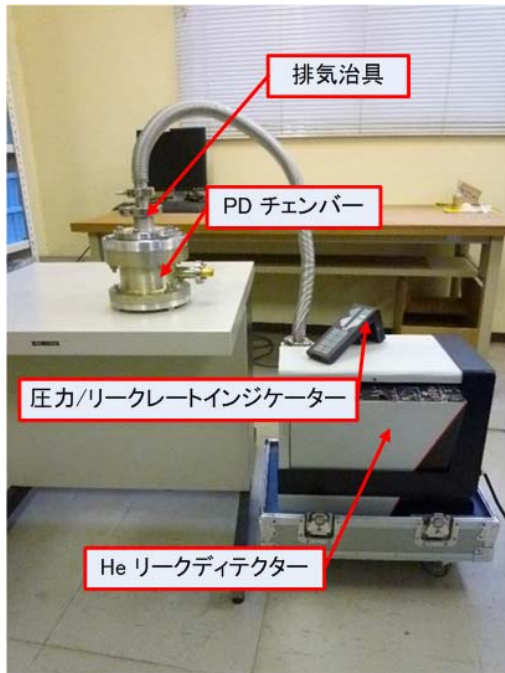


図4： PD チェンバーリーク試験の写真



図5：PD チェンバーリーク箇所

## 5. レーザー光軸管の真空測定

### 5.1 システム構成

図6にレーザー光軸管真空測定の概略図を示す。また、測定に使用した機器の一覧を表2に示す。

表2：真空測定システム使用機器一覧

機器名	メーカー名	型名
データロガー	横河電機(株)	MW100
ゲージコントローラー	PFEIFFER	TPG300
ピラニゲージ	PFEIFFER	TPR018
真空ポンプ	アネスト岩田(株)	ISP-250B

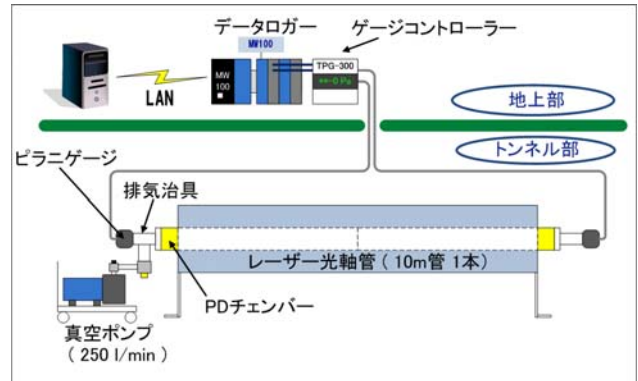


図6：真空測定の概略図および機器構成

本システムでは、入射器ビーム運転中においてもアライメント測定をおこなうことを目標としている。そのため、耐放射線仕様のピラニゲージ<sup>[4]</sup>を採用した。本測定においては、中真空状態( $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$  Pa)の到達圧力が求められているため、オイルフリースクロール真空ポンプ<sup>[5]</sup>を使用した。表3に、本機の仕様を示す。

表3：スクロール真空ポンプの仕様

設計排気速度	250 (l/min)
到達圧力	1.6 (Pa)
電動機出力	0.4 (kW)
電圧	三相 200 (V)
吸気口径	NW25
排気口径	NW16
冷却方式	空冷

### 5.2 データ収集システム

データ収集システムは、Experimental Physics and Industrial Control System<sup>[6]</sup> (EPICS)を用いて構築されており、ゲージコントローラーのデバイス部、Linux-PC およびデータロガー<sup>[7]</sup>のサーバー部、さらにデータの表示・保存をおこなうクライアント部の3階層から構成されている。本測定では、ゲージコントローラーから出力されるアナログ電圧をデータロガーでモニターし、ネットワーク経由でLinux-PCに取り込み、圧力値への換算をおこなった。データの保存およびモニター用の上位アプリケーションは、オブジェクト指向スクリプト言語であるPythonを用いて開発した(図7)。

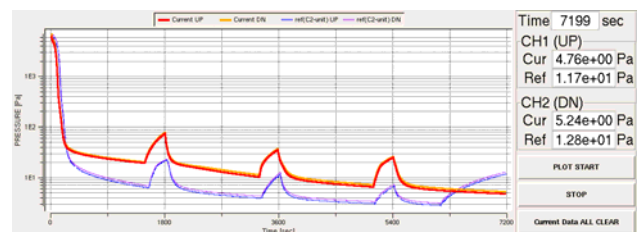


図7：真空データモニター用プログラム

### 5.3 測定方法

レーザー光軸管は、トンネル内に設置されているため、入射器運転中には真空測定をおこなうことができない。本測定では、トンネル内へ入域可能な短期メンテナンス（隔週木曜日の午前中）を利用して、真空測定をおこなった。短期メンテナンスではトンネル入域可能時間が3時間に制限されているため、効率よく真空測定をする必要がある。レーザー光軸管の真空測定に必要な準備作業および手順の詳細は、下記の通りである。

1. レーザー光軸管に取り付けられたPDチェンバーを取り外し、PDチェンバー装着面をスクレイパーでフラットに削る。これは、レーザー光軸管およびPDチェンバーの装着面でのリークを避けるためである。
2. PDチェンバーに装着されているOリングを新品と交換する。
3. レーザー光軸管の上・下流側に、PDチェンバーを取り付ける。
4. ピラニゲージを装着した排気治具を、レーザー光軸管の上・下流側に取り付ける。
5. 上流側に、250 l/minのスクロール真空ポンプを設置し、排気を開始する。

図8に、レーザー光軸管真空測定時の機器設置写真を示す。入域可能時間が3時間であるため、1ユニット当たりの測定時間を2時間とし、残りの1時間を準備および機器撤去のための作業時間とした。測定時間内では、25分間排気した後、真空状態でのガス放出を確認するため5分間バルブを閉める。この作業を3回繰り返すため、1ユニット当たりには要する測定時間は1時間30分である。本測定では、最終到達真空圧力が、上・下流側とも10 Pa以下に達した場合に合格と判断した。この値はC1ユニットの測定結果と使用した真空ポンプの排気能力を考慮して設定した。なお、真空中におけるレーザー伝搬特性<sup>18)</sup>においても、この値が十分要求を満たすものであることが示されている。

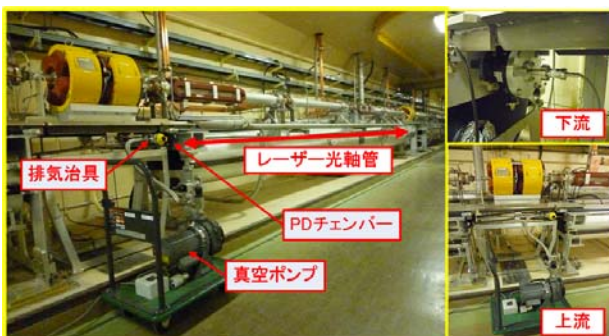


図8：真空測定時の機器設置写真

### 5.4 Cセクター真空測定結果

本測定では、レーザー出射部に近いCセクターの真空測定をおこなった。図9は、真空排気開始から55分経過後および1時間25分経過後の到達真空圧力を示している。この図から、C1~C6ユニットは、測定開始から55分経過後に真空圧力が10 Pa以下に到達していることが見て取れるため、合格品と判断した。一方、C7ユニットは、55分経過時点での真空圧力が10 Paを超えていたが、1時間25分経過時点で真空圧力が10 Pa以下に到達したため、合格品と判断した。C7ユニットが、他のユニットと比較して55分後に真空圧力が下がらなかった原因は、PDチェンバーおよびレーザー光軸管の間の装着が不十分であったと考えられる。その根拠は、測定開始から55分経過以降、PDチェンバー取り付けボルトの増締めをおこなった後、圧力低下が見られたためである。図9の結果は、測定途中にボルトの増締めした結果である。

一方、C8ユニットは、測定開始から5分経過後、45 Paまで真空圧力の低下が見られた。しかしながら、55分経過後においても、圧力低下は20 Paにとどまっている。図10に、本測定に於ける合格品(C6ユニット)および不合格品(C8ユニット)の真空圧力履歴の比較を示す。この図から、C8ユニットはC6ユニットの真空圧力履歴と比較して、5分経過以降も真空圧力の低下が見られない。PDチェンバーを再装着後、再測定を2回おこなったが改善は見られなかったため、不合格品と判断した。図9および、図10に示すようにC8ユニットの測定は1時間程度おこなったが、圧力低下がみられなかったため、その後の測定を中断した。C8ユニットのリークは、レーザー光軸管中央部溶接個所の可能性が高いと推測している。また、合格したユニットにおいても、PDチェンバー取り付け時のOリング装着不具合によるリークが2回発生したが、いずれも再測定では目標到達圧力を実現した。

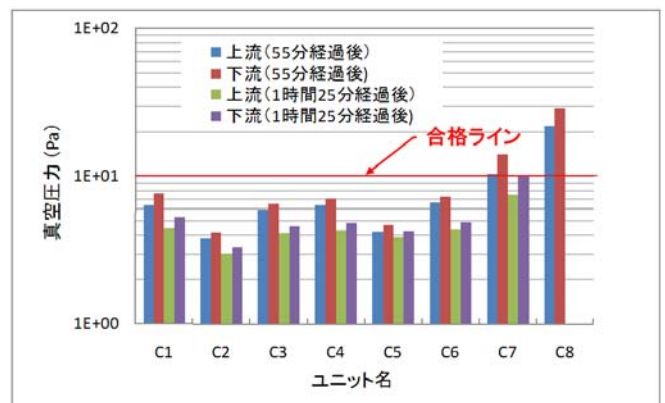


図9：Cセクター真空測定結果

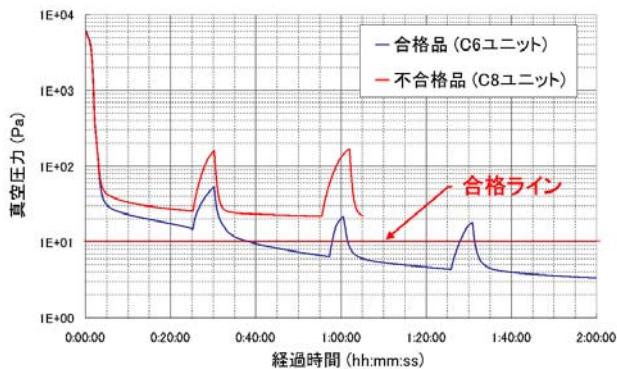


図 10 : 合格品及び不合格品の真空圧力履歴

## 6. まとめと今後の課題

入射器では、Super-KEKB へ向けたレーザーアライメントシステムの再構築が進行中である。高精度なアライメント測定のためには、アライメント用レーザー光を安定化することが重要である。このため、レーザー光軸管内を真空化するためのシステム開発を進めている。昨年 3 月末より、PD チェンバー単体およびレーザー光軸管の真空測定をおこなってきた。C セクターにおける測定では、1 個所の光軸管にリークが認められた。そのため、光軸管より小口径( $\Phi 75$  mm)の円筒ダクトを挿入し、真空化する方式を検討中である。既設加速管架台の光軸管へ挿入する必要があるため、蛇腹構造のものを試作中であるが、内壁へ施す黒色塗装の方法などの検討課題が残されている。

また、本夏期メンテナンス中も引き続き真空測定を継続しており、現在、全 73 ユニット中 42 ユニットの測定が完了している。今月中には、全ユニットの測定を終える予定である。現在用いている測定工程の見直しや、個々の作業への習熟を通して、さらなる測定効率の向上を目指している。

これと平行して、レーザー光学系の改良<sup>[9]</sup>や、PD をホルダー中心へ取り付けの方法<sup>[10]</sup>の検討が進められている。また、レーザーアライメント測定結果を検証するため、水準器を用いたアライメント測定との比較もおこなわれている<sup>[11]</sup>。これらの詳細については、他稿を参照されたい。

## 参考文献

- [1] T. Suwada and M. Satoh, "LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: DESIGN OF THE OPTICAL SYSTEM", in Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, Japan, Aug. 5-7, 2009, pp. 79-81.
- [2] T. Suwada and M. Satoh, "LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC: DESIGN OF THE MEASUREMENT SYSTEM", *ibid.*, pp. 82-84.

- [3] M. Satoh et al., "LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM FOR THE 500-M-LONG KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC", *ibid.*, pp. 1159-1161.
- [4] <http://www.pfeiffer-vacuum.de>
- [5] <http://www.anest-iwata.co.jp>
- [6] <http://www.aps.anl.gov/epics>
- [7] <http://www.yokogawa.co.jp/ns/daq/acquisition/mw100/ns-mw100-01-ja.htm>
- [8] T. Suwada, E. Kadokura, M. Satoh, "LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC", in these proceedings.
- [9] M. Satoh, T. Suwada, E. Kadokura, "LASER PROPAGATION CHARACTERISTICS IN LASER-BASED ALIGNMENT EXPERIMENT AT THE KEKB INJECTOR LINAC", in these proceedings.
- [10] E. Kadokura, T. Suwada, M. Satoh, "LASER-BASED ALIGNMENT SYSTEM AT THE KEKB LINAC: CALIBRATION OF SILICON PHOTODETECTORS (II)", in these proceedings.
- [11] T. Kume, E. Okuyama, M. Satoh, T. Suwada, K. Furukawa, "Straightness Measurement of the KEK Injector Linac Using a Level", in these proceedings.