

KEK 電子陽電子入射器の加速ユニット架台

SUPPORT OF ACCELERATOR SECTION OF KEK INJECTOR LINAC

柿原和久^{#,A)}, 肥後寿泰^{A)}, 榎本收志^{A)}, 山岡広^{A)}, 牛本信二^{B)}, 飯野陽弼^{C)}, 諸田明洋^{C)}

Kazuhisa Kakihara^{#,A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Hiroshi Yamaoka^{A)},

Shinji Ushimoto^{B)}, Yosuke Iino^{C)}, Akihiro Morota^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

^{C)} TOYAMA Co., Ltd.

Abstract

The reexamination of the support of accelerator section is required for the recovery from the damage caused by the Great East Japan Earthquake on 11th, March, 2011. The general idea of KEK injector linac support has the feature of flexible structure, and these were not able to sustain under the shake of lower-6th on the Japanese intensity scale. We investigated the vibration characteristic aiming at the more rigid structure. Furthermore, some new supports were installed on the beamline for positron capture section of SuperKEKB. This report describes the two types of supports of accelerator section.

1. はじめに

KEK電子陽電子入射器（以下、入射器）では2011年の東日本大震災により大きな被害^[1]を受けたことから、その主な原因である加速ユニット架台の剛性不足を改善するための耐震化を進めてきた。また SuperKEKB用陽電子ターゲット下流は陽電子捕獲効率向上のため全長2m、内径30mmの大口径S-band加速管（LAS）10本の採用を決定したことにより、従来の加速管と比べて寸法、重量が増加した。また、将来この加速管群をLバンド加速管に取り換えて陽電子収集を上げる必要が生じたときを想定して、その外側に配置するソレノイド電磁石、四極電磁石も大型化した。その結果、加速ユニット架台には約1ton/m以上の機器が搭載されることになった。

更に、加速ユニット架台は設置する各機器を高精度にアライメントする役割を兼ねているため、単体での寸法精度に加えて最終的な機器積載時の位置精度も重要となる。

ここでは、従来の標準的な加速ユニット架台（標準架台）の耐震化の内容と、新規製作したアルミ製架台の設計、製作、計測、設置について報告する。

2. 標準加速ユニット架台の耐震化

2.1 標準加速ユニット架台

現在、入射器の57ユニット中49ユニットで使用されている標準架台は、放射光2.5GeV入射器の建設時（1981-1982年）に40台が設置され、その後の陽電子ライン建設、KEKB改造を経て、震災時には同架台は53台配置されていた。

標準架台の基本的な設計は1978年に行われており、その中で地震時を想定した構造についての検討がされている。その資料によると KEK の地盤の固有振動数を5Hz、地震の周波数領域を2~20Hz（強度最大を10~20Hzの範囲）と見積もり、加速ユニット全体を2Hz程度の柔構造とすることで、地震時の応力集中を避ける設計が行われたことが分かる。

標準架台の基本的な構成を Figure 1、主要な構成部品とその役割を Table 1 に示す。ビーム軸に直交（X軸）方向に対しては主に本体の板バネと8.5mの円管部が、ビーム軸（Y軸）方向には支持脚の支持板が、ビーム軸垂直（Z軸）方向には円管部と支持脚の支持板が柔構造に寄与している。

本架台が入射器に設置された1981年以降、茨城県南部では震度5弱の地震が2回発生している^[2]が、東日本大震災までの30年間被害はほとんど受けていなかった。しかし東日本大震災の揺れに対しては、約2tonの荷重を受ける2台の支持脚の支持板がY

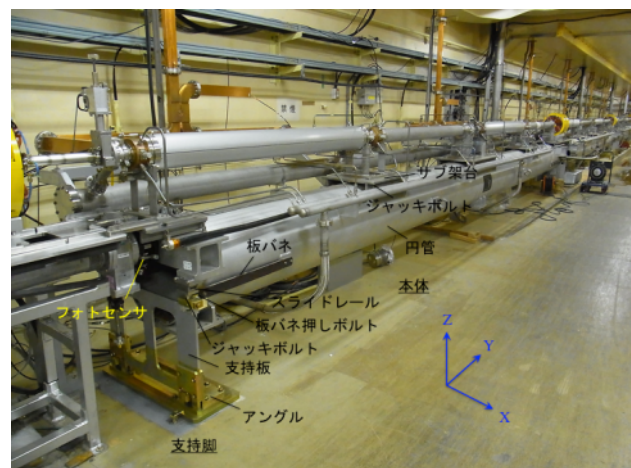


Figure 1: Configuration of the Regular Support.

[#] kazuhisa.kakihara@kek.jp

方向に大きく変形して、真空ベローズの破損等の大規模な被害の要因となった。

Table 1: Components of the Regular Support

| 部品名 | 構成部品 (数量/unit) | 主な役割 |
|--------------|--|--------------------------------|
| サブ架台 | 機器支持板 : 20t (5) ジャッキボルト : M12 (20) | 加速管及び各機器 の位置決め, 固定 |
| | 円管 : φ 508, 9t, 8.5m (1) | ユニット全体支持 |
| 本体 | 脚連結部 : スライドレール (4) | X 方向調整 |
| | 板バネ : 745×50, 12.5t (4) | 振動吸収(X 方向), 応力分散 |
| 支持脚 | ジャッキボルト: M20 (4), 先端半球 | 本体支持, Z 方向 調整 |
| | 支持板: 10t (2) | 全体支持, 振動吸 収(Y 方向), 応力 分散 |
| | アングル: 150×200, 14t (4) | 全体支持, 床と支 持板の接続 |
| | 板バネ押しボルト: M8 (4) | X 方向位置調整, 同拘束力調整 |
| アライメ ント装置 | フォトセンサ: 4 分割シリコンフォト ダイオード (2) | 基準レーザーとの 水平・垂直距離計 測 |
| | レーザー光軸管: φ 114.3, 3t, 8.5m (1) | アライメントレ ザー光輸送 |

2.2 標準加速ユニット架台の振動特性

標準架台の耐震化を進めるにあたり、まず震災時の揺れと標準架台の振動モードについて調べた。

震災時の防災科学技術研究所での南北方向の応答スペクトル (加速度、速度: 減衰比 0.02) を Figure 2 に示す。南北方向は Y 方向とほぼ一致している。ピークを含む高い数値の振動数領域は、加速度応答スペクトルが 1000gal 以上の場合 2~12Hz、速度応答スペクトルが 50cm/s 以上の場合 0.3~3Hz となっ

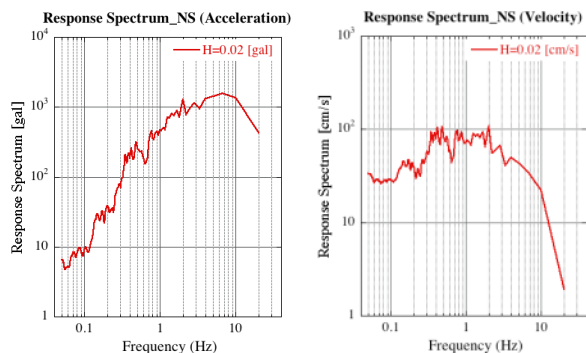


Figure 2: Response Spectrum of the Great East Japan Earthquake at Tsukuba (K-NET, IBR001)

ている。

次に標準架台のモーダル解析を構造解析ソフト ANSYS により行ったところ、最低周波数の固有振動が 2.8Hz、Y 方向の振動という結果が得られた。

更に架台と建物床の振動特性を知るための計測を 1-3 (1 セクター3 ユニット)、1-5、1-6、3-7 で実施した。加速ユニット中央のサブ架台上とその下の床にサーボ型加速度センサー [MG-102S: 特許機器 (株)] 各 3 台を、それぞれ Figure 1 の X、Y、Z 軸方向に合わせて設置し、定常状態での微振動データを収集し解析した。

Figure 3 (A)は 3-7 の計測結果から求めたパワースペクトル密度 (PSD: Power Spectral Density) である。3Hz 付近のサブ架台上の PSD 値は床の値に比べて 1000 倍以上であり、激しい共振が懸念される特性であることが分かる。

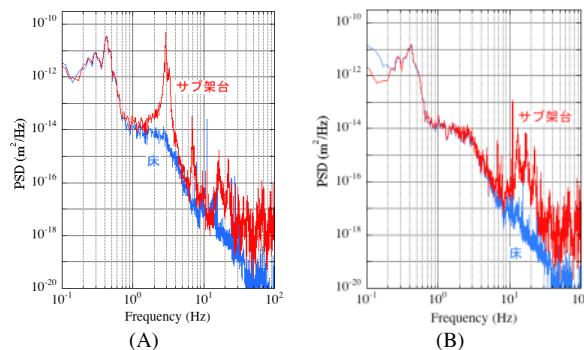


Figure 3: Power Spectral Density of Regular Support.

2.3 標準架台の評価と耐震化

これまでの調査及び計測、解析の結果から、標準架台は耐震性において次の特徴を持つといえる。

- 固有振動数の最小値は 3Hz 付近、そのときの振動モードはビーム軸 (Y) 方向である。
- 東日本大震災の応答スペクトルにおける 3Hz 付近は、加速度応答と速度応答が共に高い値を示す領域にある。約 3Hz の固有値を持つことが被害を大きくした要因であると考えられる。
- 柔構造は剛構造に比べて地震の際に振幅が大きくなる可能性を持つ。それは材料の耐力を超えた塑性変形や異なる位相での相対運動への発展によるベローズ等連結部の損傷につながる。

これらの結果を元に標準架台の耐震性を上げる方法として、固有振動数をひとまず 10Hz 以上、できれば 15Hz に上げることを検討した。当初は支持脚の高剛性化を考えたが、コスト高にならないよう最終的には基本的な構成はそのままにして、本体円管部の中央下部に凸を下に向けた形状の部材を取り付け、その水平 (X、Y) 方向の変位を拘束することで対応することにした (Figure 4)。

その試験結果を Figure 3 (B)に示す。3Hz 付近の固有値はなくなり、13Hz まで上昇した。同様の結果は ANSYS による解析によっても確認できた。

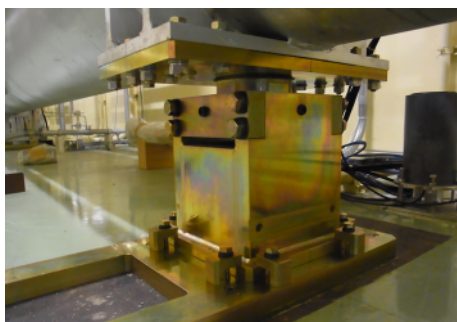


Figure 4: The Displacement Restricted Machine Installed under the Center of Support.

3. 新規加速ユニット架台

3.1 新規加速ユニット架台概要

入射器では SuperKEKB で要求される高輝度ビーム実現のための様々な改造が現在も進行中である。その中の大きな柱となっている陽電子ビーム増強に関連して新規加速ユニット架台（新規架台）の設計から設置までを行った。設置後ソレノイド電磁石を搭載した建設途中の新規架台（1-6-1）を Figure 5 に示す。

ダンピングリングに 1.1GeV、4nC の陽電子を供給するために、新たな陽電子ターゲットは従来の 2-1 から約 50m 上流の 1-4 の場所に変更され、その下流には 10 本の LAS が配置されている。更に 1-5、1-6 では LAS の外側にソレノイド電磁石が、1-7 には LAS 1 本当たり 3 台の大型四極電磁石（QM-L）が設置された。架台の基本的な性能として、これまで以上に大型化して荷重増となった積載機器を安定して保持することが求められた。

また、低エミッタンスビーム輸送のためのアライメント精度（ $1\sigma = 0.1\text{mm}$ 以下：加速ユニット内）を実現するためには、機器を高精度に設置できることが重要である。

3.2 新規架台設計・製作

新規架台に要求した主な内容を次に示す。

- A. 架台のアライメントは標準架台同様、架台の上下流端に取り付けた 4 分轄シリコンフォトダイオード（QPD: Quadrant-silicon Photo-Diode）を用いてレーザー基線に合わせる^[3]。

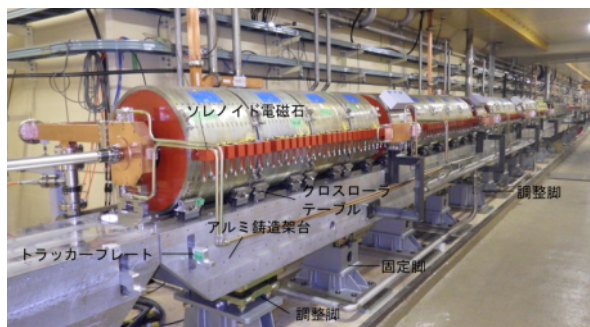


Figure 5: New Supports for Positron Capture Section.

- B. 機器搭載時に加速ユニット内 $1\sigma = 0.1\text{mm}$ 以下を十分達成できること。
- C. 機器を載せる台は非磁性、高剛性で、加工精度が良いこと。
- D. 機器積載時の固有振動数が 15Hz 以上。

A~D を考慮した結果、機器を載せる架台上部はこれまで入射部や旧陽電子ラインで実績のあるアルミ合金鋳物材料（AC4C-T5）を使用することにした。新規架台に関する基本的な情報を Table 2 に示す。支持脚の数量、アルミ合金部の形状や寸法は機器積載時の変位量が 0.05mm 以内に収まるような条件から決定した。

Table 2: Basic Information of New Supports

| 架台 | 全長(mm)/構造 | 積載機器/重量(kg) | 調整脚/支持脚 |
|-------|-------------|---------------------------------|---------|
| 1-5 | 5246 / 単独型 | LAS×2/400 Solenoid×9/ 5850 | 2 / 3 |
| 1-6-1 | 9974 / 連結型 | LAS×4/800 Solenoid×19/ 13300 | 3 / 6 |
| 1-6-2 | 6690 / 単独型 | QM×11/2970 BM×4/1480 | 2 / 3 |
| 1-7 | 10683 / 連結型 | QM×4/1080 | 3 / 6 |

全長が 10m 級の 1-6-1 と 1-7 架台については、工作機械、仕上がり精度、取り扱いの関係で 2 台の架台を連結して使用する構造とした。連結はキーによる位置決めとトルク管理したボルト締結により行っている。この部分の精度が十分でないで 2 台の架台に角度ができてしまい、ミスアライメントの原因となる。極力この要因を除くために仕上げ加工は連結した状態で行った。本アルミ合金鋳造架台の切削加工は 8m のテーブルを持つ東芝製 NC 五面加工機 MPC-3180 を使用した。

新規架台の脚部は調整脚と支持脚の 2 種類がある。調整脚はクロスローラーテーブルにより、X 方向の調整機構と 2 本のジャッキボルトによる Z 方向の調整機構を持つ。架台両端と連結型の中央が本タイプの脚である。

固定脚は Z 方向の支持のみを行う。支持は鋼球による 1 点で、調整はレベリングブロックで行う。

3.3 新規架台の計測

完成した全ての新規架台はビームラインに設置する前にレーザートラッカー（Leica AT-401）を用いて主に上面と接合部の寸法、形状測定を実施した（Figure 6）。

Figure 7 は 1-6-1 架台を連結した状態で 9 台の脚にセットした無負荷のときと、正規荷重の約 40% を分散して載せたときの架台上面の平坦度測定結果である。測定点はビーム軸方向約 10m を 250mm 間隔、横方向 580mm を 5 等分したときの 4 点とした。但しこのときの無負荷時のデータは 3 点である。また負荷を載せた際には、それによりレーザー光が遮られる測定点はデータが取れていない。



Figure 6: A Support Under Measurement by AT-401.

測定結果から次のことがいえる。

- A. 無負荷状態において両端部と中央部（連結部）では高さの差が約 0.15mm ある。上流側と下流側を単体として見ても、中央部が下がっている形状となっている。ただし全てのアルミ架台がこの傾向を持つものではなかった。
- B. 正規の 50% 負荷をかけたとき、架台の上面は約 0.08mm 下がった。その後無負荷に戻すと元の状態を再現することから、弾性変形による変位であると考えられる。したがって機器搭載後のアライメントは必須となる。
- C. 無負荷時と負荷があるときでビーム軸周りの回転（ロール）は発生していない。

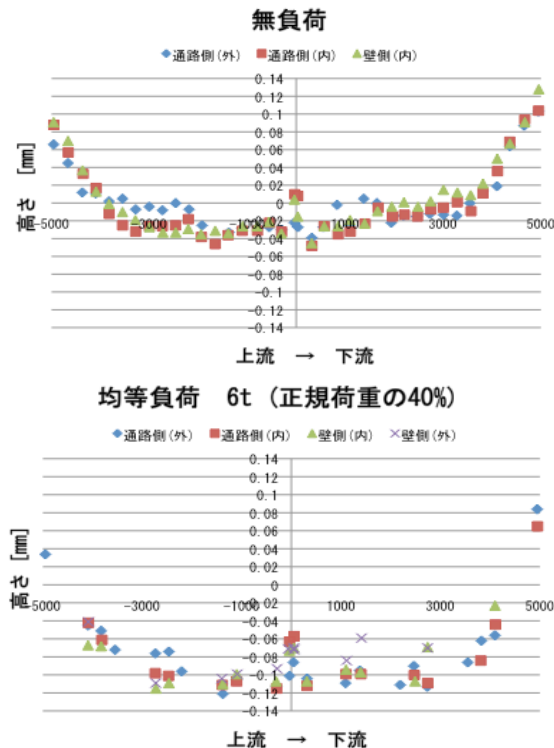


Figure 7: The Measurement Results of Flatness on the Top of Support.

4. まとめ

入射器建設当初から 30 年以上使われている標準加速ユニット架台と昨年ビームラインに設置した新

規のアルミ鋳造加速ユニット架台について紹介した。

震災をきっかけに標準の柔構造設計の架台を地震の影響が小さくなるように、固有振動数を 15Hz 程度に引き上げるべく改造を加えてきた。この耐震化は現在もまだ継続中であり、アライメント作業と連携しながら進めている。

SuperKEKB で要求されるビームの高輝度化のために製作した新規架台は設置後 1 年になる。今後はビームライン上における架台の振動及び寸法測定を行い、その結果から最終的な評価、更なる対応をすることになる。

謝辞

防災科学技術研究所が運用している K-NET の強震観測データを使用させていただきました。

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] 茨城県. “茨城県耐震改修促進計画. 平成 21 年 5 月改訂. <<http://www.pref.ibaraki.jp/bukyoku/doboku/01class/class13/kikaku/sokusinkeikaku.pdf>>
- [3] 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. 8-10, 2014