

パルスマグネット架台のモーター駆動制御

MOTOR-DRIVEN CONTROL OF SUPPORT STRUCTURE FOR PULSE MAGNETS

牛本信二^{#,A)}, 榎本嘉範^{B)}, 肥後 寿泰^{B)}

Shinji Ushimoto^{#,A)}, Yoshinori Enomoto^{B)}, Toshiyasu Higo^{B)}

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

At KEK e-/e+ linac, we will install next year the new pulse magnets set on the new supports, between 3rd to 5th sector for the upgrade to Super KEKB. These magnets have been scheduled to replace the present DC quadrupole magnets sitting on the old-type support. The new magnet support uses the screw jack mechanism equipped with the electric motor. We have developed a motor driven system for this new magnet support with using stepping motors and micro controllers. In this paper, we report this system and its performance.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器(以下 Linac)では Super KEKB に向けた高度化作業を進めている。Super KEKB の運転は 2016 年 6 月を以て Phase1 の運転を終了した。次回の運転(Phase2)では 20ms 毎に Super KEKB の両メインリング LER(4.0GeV e+), HER(7.0GeV e-)に加え、LER への陽電子ビームのエミッタンス低減のための DR (1.1GeV e+), PF(3.0GeV e-)および PF-AR(6.5GeV e-)の 5 つの異なるエネルギーのリングにオプティクス上最適化した状態で供給する必要がある。Figure 1 に Linac のレイアウトと想定されるビーム経路を記す。

各ビームは電子銃から 1 セクター途中の陽電子ターゲットまでの間は、電荷量のみ異なる状態で、オプティクスとしては同じ条件下で輸送される。LER に入射する陽電子ビームはここで大強度の電子をターゲットに当てて生成する。ここではその他の電子ビームはビーム軸中心上に設けられたターゲットの孔を通過する。以後、2 セクター直後の第 2 スイッチヤードまでは、異なる電荷の粒子を共通の条件下で輸送される。陽電子はここからダンピングリングを経て 3 セクターに再度入射する。3 セクター以降では、入射先のエネルギーに合わせて、各ビームの加減速をおこないながらビームを輸送する。

3 セクター以降の最適な輸送条件を実現するため、新たに製作したパルスマグネット(偏向電磁石と四極電磁石)を、既存の四極電磁石と置き換える形で設置する予定である。

一方、Super KEKB で求められる電磁石のアライメント精度は $\sigma \sim 0.1\text{mm}$ [1]という高い水準であるのに対し、既存の電磁石架台は構造的に精密なアライメントの実現が困難になっている。また、近年の調査により、複数のブロック構造で構成される入射器棟のトンネルで建屋の連結部に於いて長時間に渡る床面の大きな変動[2][3]が確認されており、アクティブなアライメント機構の必要性も検討されている。

本稿では新たに試作した電磁石架台の詳細と、遠隔アライメントシステム実現に向けた架台アライメント機構のモーター制御動作試験の状況について紹介する。

2. 電磁石架台

2.1 旧型電磁石架台

現在使用している代表的な電磁石架台を Figure 2 に示す。3 セクター以降に設置されている既存の電磁石架台は幾つかの種類があるが、何れも以下のような共通設計に基づいて製作されている。

- 架台から伸ばした金具で両側の加速ユニット架台に橋掛けした構造(非独立構造)
- 両端の加速ユニット架台に取り付けた位置決め用プレートに基づいて横方向位置を決定
- 加速ユニット架台との連結・接触部は固定せず、外力を受けた際、柔軟に可動する
- 加速ユニット架台への重量負担を軽減するため、板バネを組み込んだ支持架台を有する(例外あり)

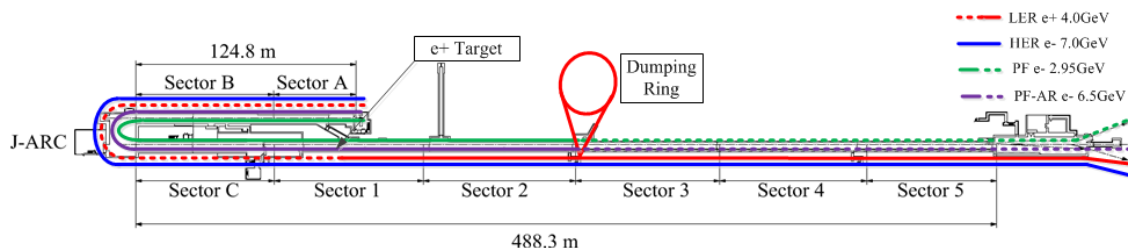


Figure 1: Layout of e-/e+ injector Linac and multiple energy beams transport.

[#] ushimoto@post.kek.jp

旧型架台の特徴は、上下流のユニット架台に依存する構造により単独でのアライメント機構を有していない点が挙げられる。横方向のアライメントは架台の上下流に設置された加速ユニット架台に取り付けた位置決め用の金具を基に決まる。一方、高さ方向は、電磁石架台から延ばした橋掛け用の金具を加速ユニットに預けることで実現する。いずれも連結部は可動機構(カムフォロアおよびローラーベアリング)が組み込まれており、両端の架台調整に合わせて自由に動く仕組みである。このような機構は電磁石架台単体でのアライメント作業を省略できる反面、単体のアライメントができず、精密アライメントは非常に困難である

また、ある程度の外力では構造が破綻しないように可動する構造であったものの、2011年の大震災では想定以上の揺れ振幅により、一部の電磁石は架台から落下・損傷して大きな被害[4]が発生した。外観上の損壊が見られない架台でも、位置決めプレートが緩むなど、ミスアライメントに大きな影響が見られた。この地震以後、四極電磁石は全数レーザートラッカーを用いて再アライメント[5]をおこなったが、一部では目標のアライメントを実現できていない状況である。

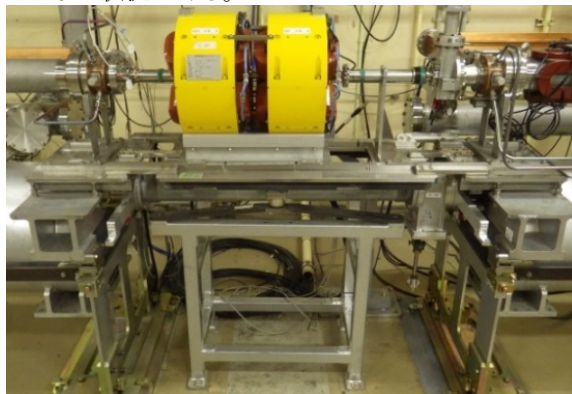


Figure 2: The current magnet support.

2.2 新規設計架台

旧型架台の構造の問題点を踏まえ、SuperKEKBの仕様を満たすために新規設計・試作をおこなった架台をFigure 3に示す。

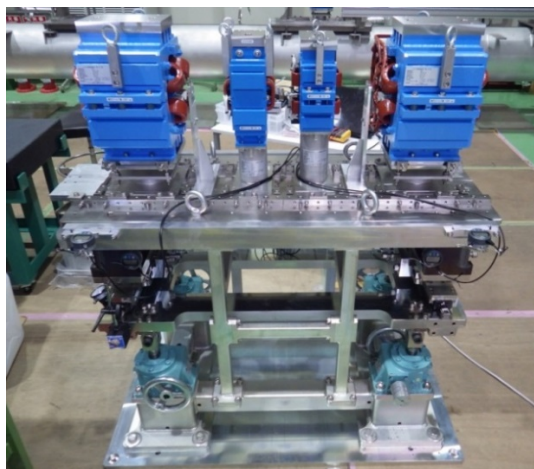


Figure 3: The new magnet support structure.

図のように、この架台には4台のパルスマグネット(四極電磁石、偏向電磁石各2台)が搭載される。架台は以下の3つのユニットで構成される。

- (1) ベースユニット
 - ・トンネル床面に固定する基準プレート
 - ・中間ユニットの支持兼、高さ方向のアライメントをおこなうスクリーージャッキ
- (2) 中間ユニット
 - ・ベースユニットとの連結部を含むプレート
 - ・平面上のひずみを吸収する可動機構
 - ・水平方向アライメント用スクリーージャッキ
- (3) 上段ユニット
 - ・電磁石を搭載する天板および基準レール
 - ・レーザートラッカー測定用の基準孔
 - ・レーザーアライメントシステム[2]用のセンサー取り付け部

新しい架台への大きな変更点は、これまでの橋掛け構造から独立アライメント機構を有した構造とした点、及び調整機構にモーターを取り付ければ容易にアクティブ制御可能なスクリーージャッキ[6]を採用したことである。Table 1に使用したスクリーージャッキの仕様を記す。水平方向は、使用トルクを満たし架台をコンパクトにできるよう考慮して小型のもの(日本ギア工業 JSGLUK)を選定した。また、高さ方向は電磁石を含めて最大で1t近い重量の支持・昇降をおこない、且つ、地震等による外力に屈しない支持脚としての役割も踏まえて40mmの軸径を持つもの(日本ギア工業 J2GLUK)を使用している。

Table 1: Basic Specifications of Screw Jack

Type Name	JSGLUK	J2GLUK
Capacity [kN]	5	50
Lifting screw diameter [mm]	20	40
Lifting screw lead [mm]	4	8
Stroke [mm]	50	50
Worm gear ratio	24	24
Required input at allowable load [N·m]	1.2	23.7

中間ユニット内には架台アライメント時に発生するねじれを吸収する機構として水平方向にはLMガイド、ビーム進行方向にはクロスローラウェイを用い、回転はクロスローラベアリングを用いている。これによりベースユニットに影響することなく、非常に滑らかに横方向の調整がおこなえる。一方、高さ方向のねじれは、ベースユニットのスクリーージャッキ先端に取り付けたスフェリカルベアリングにより吸収され、滑らか且つ強固に中段ユニットと連結されている。

最後に、想定される架台の設置手順を記す

- (1) オフサイトでレーザートラッカーを用いて上段ユニット上の電磁石を精密アライメント
- (2) ベースユニットの設置
- (3) 中段ユニットをベースユニットと連結
- (4) レーザーアライメントシステムを用いてビームラインに対するアライメントを実施

3. モーター制御システム概要

新架台で導入したスクリーージャッキはアライメント作業の効率化を図るとともに、外付けのモーターによる遠隔操作を目的とした選択である。スクリーージャッキにはメーカーで提供されるモーター化ユニットを用いても十分な能力を見込める一方、高価でサイズが大きい欠点がある。架台の設置場所は空間的に制限があることなどから今回は使用を見送り、代替として、市販のモーターを使用して独自に小型モーターユニットの開発をおこなった。

今回使用したモーター制御のシステム概要を Figure 4、使用した機器を Table 2 に記す。モーターは細かい位置決めが可能なステッピングモーターを使用した。モーターの制御は低コストで汎用性の高い制御が可能なマイクロコントローラー(マイコン)を使用することとし、Arduino® leonardo ETH[7]を採用した。このマイコンは独自の arduino 言語による IDE(総合開発環境)を使用することでプログラミングが可能である。また、豊富なアナログ・デジタル入出力を備え、従来製品では拡張ボードで対応していた Ethernet®[8] ポートが標準で組み込まれているのが特徴である。このマイコンだけでも小型のステッピングモーターを動かすことは可能であったが、今回使用したステッピングモーターでは、最大で数 A 程度の出力が必要となるため、最大でも数 10mA 出力のマイコンだけでは制御ができない。そのため、市販のステッピングモータードライバーキット[9]を使用した。このキットはステッピングモータードライバー L6470 を搭載し、定格 3A(最大出力 7A)と高出力である。またマイコンから SPI(Serial Peripheral Interface)通信で制御が可能であり、ノイズが多い環境下でも安定した動作が見込まれる。

今回の試験では、一旦、制御用 PC から USB 接続したマイコンにシリアル通信で指令を送り、マイコンはこの指令を基に SPI 通信でドライバーを制御して、ステッピングモーターを動かした。



Figure 4: The key parts of motor control.

Table 2: Equipment of Motor Control System

	Manufacturer	Type Name
Micro-controller	Arduino	Lenardo ETH
Stepping Moror	Oriental Motor	PKP246D15A-L / PKP264D14A-SG10-L
Motor driver kit	Akizuki Denshi Tsusho	AE-L6470DRV

4. 動作試験

実際の架台を用いた動作試験の前に、まずマイコンによるステッピングモーター制御の試験を実施した。前述

の通り、マイコンは SPI 通信でドライバーを制御するため、マイコンボードのデジタル出力ピンから、ドライバーの制御ピンに配線をおこなう。Arduino Leonardo ETH では Arduino の従来機種に比べてデジタル出力ピンが充実しており、SPI 通信で使用する各入出力のうち SCK(Serial Clock)、MISO(Master In Slave Out)、MOSI(Master Out Slave In)に関しては標準の出力ピンがアサインされている。しかし、SS(Slave Select)は標準出力ピンが用意されていないため、汎用のデジタル出力をプログラム上で SS 出力にアサインして使用した。これによりマイコンでモーターを動かすことが可能となった。実際の接続対応を Table 3 に記す。

Table 3: Digital Output Correspondence Table

Signal	Arduino Leonardo ETH	Motor Driver
SCK	ICSP-3	6(CK)
MISO	ICSP-1	5(SDO)
MOSI	ICSP-4	7(SDI)
SS	DO-10	8(#CS)

次に架台にステッピングモーターを取り付けるための金具を設計・試作した。金具はスクリーージャッキに加工されていたネジ穴を利用して取り付けした。モーターとジャッキ間のカップリングには耐放射線性とバックラッシュを考慮して、金属製ディスクタイプを使用した。Figure 5 にモーターの接続例を記す。

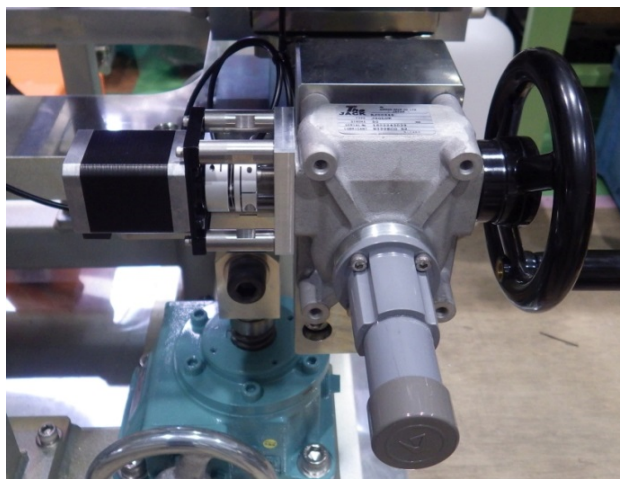


Figure 5: Stepping motor and support with screw jack.

実際にビームラインに設置した架台では、加速ユニット架台のアライメントに用いているレーザーアライメントシステム[10]を用いることを想定しており、上段ユニットに取り付けた Quadrant Photo Detector でアライメントレーザーの位置から架台のずれを計測し、その値に基づいてアライメントをおこなうこととなる。

試験環境ではレーザーアライメントシステムが使用できないため、架台の可動方向にデジマチックインジケータ[11](ミツヨ 分解能 1 μm)取り付け、その値を基に制御をおこなうこととした。Figure 6 にデジマチックインジケータの設置状況を示す。

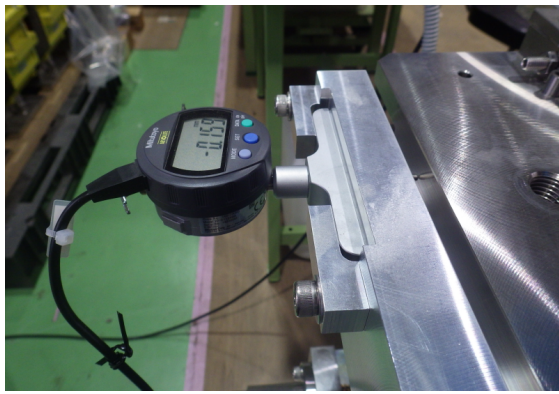


Figure 6: Digimatic indicator.

試験では制御用 PC 上の LabView で作成したプログラムでデジマチックインジケータの値を取得し、その値がある閾値内に入るように各モーターに対応したマイコンに指令を送ることとした。今回おこなった横方向のモーター制御の結果を Figure 7 に記す。マイコン上のプログラムを適正な可動量となるように調整したことで、 $1\mu\text{m}$ の精度で想定した位置に架台を動かせることを確認した。

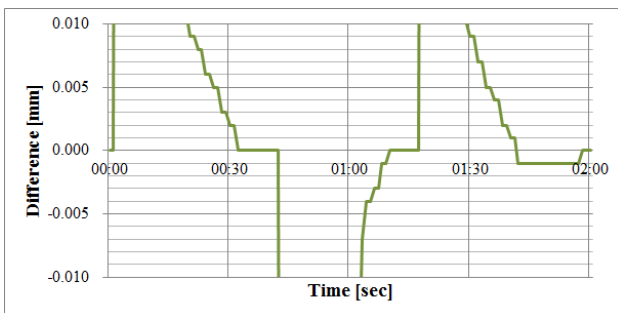
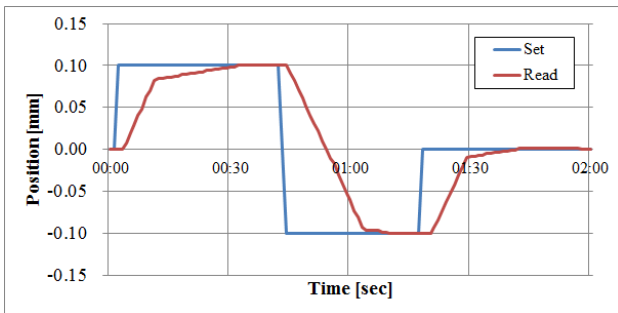


Figure 7: Result of movable test.

5. まとめ

今回、新しく設置するパルス電磁石架台の試作とそのアライメント機構としてモーター駆動のシステムの開発・動作試験をおこなった。現段階では横方向駆動用の 2 台のモーターを用いて、水平方向の並進及び垂直軸周りの回転(ヨー)の 2 軸の同時制御をおこなったが、今後は高さ方向駆動用の 4 台のモーターも合わせて制御し、高さ方向の並進、水平軸周りの回転(ピッチ)、ビーム軸周りの回転(ロール)の 5 軸(ビーム進行方向は除く)制御試験をおこなう予定である。また、1 台のマイコンから複数台のモーター制御を実現することで、システム全体のコスト低減を図る予定である。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] 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(2)”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 4-7, 2015.
- [6] <http://www.nippon-gear.jp/index.html>
- [7] <http://www.arduino.org/products/boards/arduino-leonardo-eth>
Arduino は Arduino SRL の登録商標です。
- [8] Ethernet およびイーサネットは富士ゼロックス株式会社の登録商標です。
- [9] <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-07024/>
- [10] Y. Enomoto *et al.*, “床変動の常時モニターを目指すレーザーPD を用いた自動計測機器の開発”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 4-7, 2015
- [11] <http://www.mitutoyo.co.jp/products/dejim/dejim.html>

その他本稿で使用した会社名、製品名は各社の商標、または登録商標です。