

J-PARC リニアックにおけるビームラインアライメントの状況

STATUS OF BEAMLINE ALIGNMENT IN J-PARC LINAC

森下卓俊[#], 伊藤崇, 小栗英知

Takatoshi Morishita[#], Takashi Ito, Hidetomo Oguri

Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

J-PARC linac has finalized its precise alignment in 2006 and started a beam operation. Since the alignment error should be a cause of beam loss, a precise survey has been performed periodically to ensure the alignment accuracy. In the SDTL section, slight displacements occurred in the position restoration of the seismic isolation structure of the tank support. Along with continuing the smoothing alignment annually, we are taking measures to reduce the external force on the cavity through a waveguide connection. A local floor elevation continues at the upstream part of the straight section. The realignment of this section has been performed to restore the beam-line linearity every several years. In the downstream part of the linac, step-like floor displacements at the expansion joints and local settlements were observed for a few years from 2011, however, there have been stabilized in recent years. We will continue to perform precise survey of the accelerator periodically to maintain the alignment accuracy. In this paper, the results of the precise survey as well as the realignment activities are reported.

1. はじめに

J-PARC リニアックは、負水素イオン源、高周波四重極リニアック (Radio-Frequency Quadrupole linac, RFQ)、ドリフトチューブリニアック (Drift-Tube Linac, DTL)、機能分離型ドリフトチューブリニアック (Separate-type DTL, SDTL)、および環結合型結合空洞リニアック (Annular-ring Coupled Structure linac, ACS) で構成されたおよそ 300m の直線部で、ピーク電流 50 mA の負水素イオンビームを 400MeV に加速する。続いて、6 台の偏向電磁石からなる第一アークセクション、およそ 65m のコリメータセクション、2 台の偏向電磁石からなる第二アークセクション、および入射マッチングセクションを経て、入射平均電流 $333 \mu\text{A}$ (=ピーク電流 50 mA × パルス幅 500 μs × 間引き率 54% × 繰り返し 25 Hz) のビームを 3 GeV シンクロトロン (3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, RCS) に入射し、RCS から 1 MW のビーム出力を得る。

リニアックは 2006 年に SDTL までのインストールと精密アライメントを終え、181MeV 加速でのビーム調整運転を開始した。続いて 2013 年の夏期メンテナンス時に ACS をビームラインにインストールし、翌年からエネルギー 400 MeV で RCS にビームを供給している。Figure 1 にリニアック加速器機器配置概要とトンネル形状を示す。第二アーク以降は 3 GeV シンクロトロン建家に属し、リニアック建家とは L3BT トンネルを挟んで連結している。

横方向アライメントの目標精度は、DTL 空洞および収束電磁石を $\pm 0.1 \text{ mm}$ 、SDTL 空洞 (ドリフトチューブには収束電磁石を内蔵せず、四重極ダブレットは空洞間に配置している) と ACS 空洞を $\pm 0.3 \text{ mm}$ としている[1]。機器アライメント状態の悪化はビーム損失増加の要因になることから、継続的に精密測量、建家変動のモニタリングを実施している。リニアック全域の精密アライメントはコスト、期間の制約もあるため頻繁には実施できない。そこで、

夏期メンテナンス時に実施する精密測量や、水管傾斜計[2]による床変動のモニタリングに基づいて直線からの逸脱の大きな箇所を特定し、作業エリアを絞って修正アライメントを実施している。本稿第二章では精密測量の方法と結果、第三章では修正アライメントの状況について報告し、今後の方針について検討する。

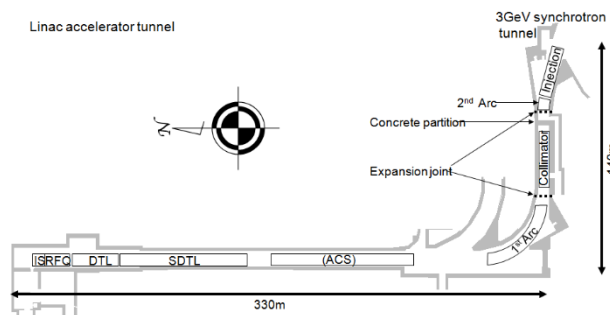


Figure 1: Layout of the J-PARC linac tunnel.

2. 精密測量

Table 1 に精密測量で主に使用する機材を示す。加速空洞と電磁石の基準座には、機器を水平に設置したときの機器中心に対する位置がわかっているピン穴と水平面をもたせており、水平方向には、ピン穴に差し込んだリフレクターターゲットの 3 次元位置をレーザートラッカーで測定する。加速器トンネルは細長い形状であるので、ビームラインに対して通路を挟んだ向かい側の壁におよそ 5 m 間隔 (ビームラインとの距離はおおむね 2.5 m) で配置した補助基準点も合わせて測定し、測量網を形成することで基準座の水平方向の座標を決定している[3]。機器の高さは、基準座に取り付けられるアダプターに短尺のバーコード尺を取り付け、デジタルレベルを使用し

[#] takatoshi.morishita@j-parc.jp

て測定する。トンネル全域に配置している床レベル鋺も含めた水準測量経路を形成して、閉合差を調整している。基準座(一つの機器に少なくとも2か所設置)の座標と水平面の傾き(水準器で測定)によって、装置中心の位置を確定させる。

Table 1: Survey Instruments

Survey	Instruments	Objects
Levels	Leica DNA03 and invar stuff with barcode	Levels for floor monuments, fiducials of magnets and cavities
	SOKKIA PL1	Levels of markings
	WYLER MINILEVEL NT	Pitch and roll of magnets and cavities
Three-dimensional coordinate measurements	Leica LT600	Position of the reflector on fiducials and auxiliary
	Leica AT401	reference points

2.1 水準測量結果

夏期メンテナンス時には、毎年、床に配置しているレベル鋺の水準測量を実施している。Figure 2 に、レベル鋺高さの 2011 年 7 月からの変化量を示す。床の高さ方向の変形を比較するため、DTL の入り口にあるレベル鋺を高さの原点にとった。横軸はビームラインに沿った距離を示す。DTL から下流に 320 m の位置は第一アークの出口にある建屋連結部(エクспанションジョイント、EXJ)、380 m 付近の第二アークにも EXJ がある。

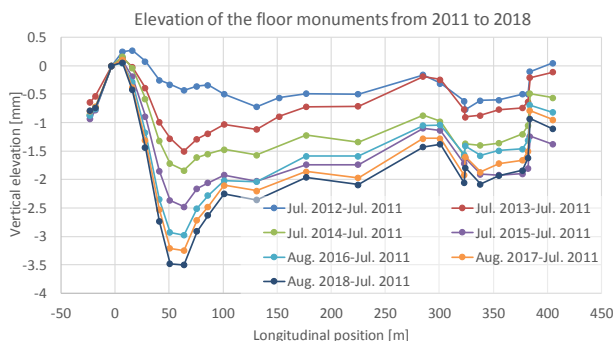


Figure 2: Floor elevation since Jul. 2011.

床の変動傾向として、以下の特徴があげられる。

- EXJ では、2011 年から 2 年ほど断層状の高さ変動が発生しているが、以後、段差が拡大することなく、現在は安定している。
- Figure 2 の 290m 付近(第一アーク)は、周辺から見て隆起傾向が見られたが、近年は安定している。
- DTL セクション(Fig. 2 では 0~27 m までの区間)と、それに続く SDTL セクション(27 m~120 m までの

区間)では局所的な沈み込みが現在も継続している。

Figure 2 の 120 m 以降、RCS への入射部近傍(380 m の EXJ より下流側は RCS と同一の建家)までは、微小な変動はあるものの、継続的な高さの変形は見られないが、トンネル上流部は現在も変形が蓄積する方向に継続していることがわかる。

次に、ビームライン上の機器(DTL 空洞と収束電磁石、偏向電磁石)の水準測量結果を Fig. 3 に示す。Figure 2 と同様に、高さ方向の変形の度合いを比較するため、DTL 最上流の基準座を高さの原点にとり、2011 年からの変動量をプロットしている。当然ではあるが、Fig. 2 の床変動と同傾向の局所的な高さ変動が DTL~SDTL セクションで確認された。その修正のため、当該区間の再アライメントを 2013 年と 2016 年に実施している。したがって、Fig. 3 の 2014 年、2017 年の直線部上流のデータはその前年に実施した高さ調整を含んだ値であることにご注意いただきたい。

リニアックの直線部は 2011 年以降、DTL 出口から数メートルのところまで折れ曲げたビームラインとしている。これは地震の影響で床の変形が数十ミリに及んだこと、DTL の位置調整可能幅が小さく、作業工程も複雑であることから、DTL の移動量を最小にするようにビームラインを定義したことによる。前述の再アライメントの際も同様に、折れ曲がり点をもとの位置に戻すことはせず、DTL の移動量が最小限となるように、DTL~SDTL セクションのビームラインをその都度定義しなおしている。したがって、2014 年のデータでは、前年に再定義したビームラインの差分だけ折れ曲がったように見えている。2017 年のデータも同様である。

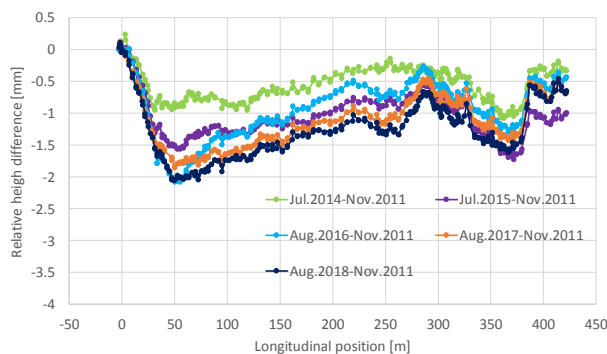


Figure 3: Difference in relative height of the magnets since Nov. 2011.

Figure 3 では、2015 年以降、250 m 近傍に局所的なくぼみが見られるようになった。全幅 0.5 mm 程度であり、蓄積する傾向は今のところは見えないが、今後増大することがあれば、直線部全域を考慮し、広範囲な再アライメントを実施することも検討している。この区間は ACS 下流部から第一アーク入口にわたるエリアであり、Fig. 1 に示すように、加速器トンネルは分岐路が交差する複雑な躯体構造となっていること、さらに、泥岩への杭基礎が第一アーク部にしかないことなどによる構造上の影響が考え

られる[4]。このくぼみは比較的短い区間で発生していることから、その配置間隔が長いレベル値のみの計測ではこの細かい構造を確認することはできない。このことから、少なくとも年 1 回の電磁石の精密測量を今後も継続する予定である。

2.2 水平方向精密測量結果

平面方向の機器座標は、レーザートラッカーを用いて機器基準座と壁面補助基準点をリンクさせた測量網で測定している。リニアックの直線部は水平横方向 (Fig. 1 における東西方向) にも、高さ方向と同じ場所 (DTL 出口から数メートルの位置) で折り曲げたビームラインとしている。

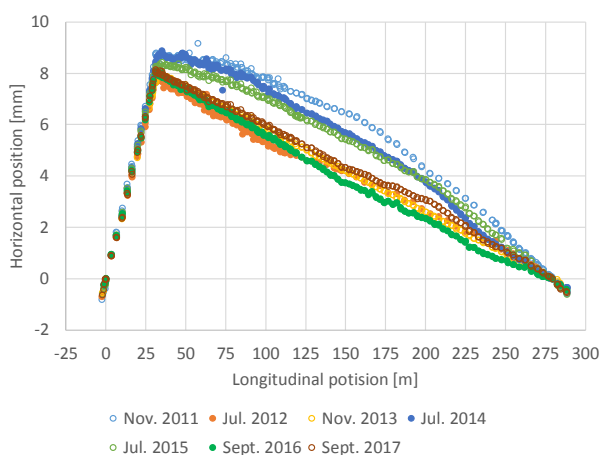


Figure 4: Horizontal position of the accelerator components (cavities and magnets) in the linac the straight section.

Figure 4 は 2011 年 11 月以降の直線部ビームライン機器 (加速空洞と収束電磁石) の水平横方向の位置測定結果である。本測定ではレーザートラッカーを、おおむね 15 m 間隔で移動しながら、InnovMetric Software 社製ソフトウェア PolyWorks のバンドル調整を用いて測定座標を連結している。本図では、各年の測定データについて、DTL 入口と第一アークの最初の偏向電磁石を結ぶ直線を横軸に設定してプロットしている。局所的な折れ曲がりなどの変形は現時点では現れていないが、直線中央部では測定年ごとに比較的大きな差 (3 mm 程度) が見られる。細長いトンネルの水平方向の網測量では、座標系の連結時に発生する誤差で、直線部の広い範囲に及ぶ湾曲状の形状誤差が生じやすいと考えられることから、現時点では測定上の誤差であると推測している。

3. 修正アライメント

前章で示した精密測量結果を基に、リニアックでは、毎年のメンテ時に修正アライメントを実施してきた。2011 年以降の主な作業内容は

- 局所的な沈下を修正するための直線上流部のアライメント
 - SDTL セクションのスーミング
- である。

3.1 直線上流部のアライメント

2011 年のリニアック全体アライメント以降、2.1 に示したように局所沈下が継続していたため、2013 年には SDTL セクションの再アライメント、2016 年には、DTL セクションも含めた直線上流部の再アライメントを実施している。

DTL セクションはおよそ 10 m の加速タンク 3 台から成る。すべてのドリフトチューブに収束電磁石が内蔵されており、トータルで 146 の加速セルで構成されている。タンク間やドリフトチューブにはビーム位置モニターや補正電磁石は配置されておらず、設計通りのビーム加速のために、リニアック直線部においても特に高精度のアライメントが要求されるセクションである。

DTL は 3 つのユニットタンク (筒) を直結して一つの空洞となる構造で、ユニットタンクの両端フランジには、中心から通路側に 460 mm、上方向に 215 mm の位置にトラッカー用のリフレクターターゲットを固定できる基準座を設けている。したがって、DTL 空洞 1 台は計 6 個の基準座を持つ。Figure 5 は 2011 年以降の DTL 基準座の直線性の変化を示したものである。基準座の直線性は、水平横方向には安定しているものの、DTL セクション全体で 2016 年までに 0.3 mm の高さ方向の湾曲が見られた。そのため、2016 年に DTL セクションを含むリニアック直線部上流の再アライメントを実施した。Figure 2 および Fig. 3 に示すように、その後も床の高さ方向の変形は継続しており、2018 年には再び、DTL セクションで高さ方向におよそ 0.1 mm の湾曲が生じている。今後も測量を継続して次年度以降のアライメント計画に反映させる必要がある。

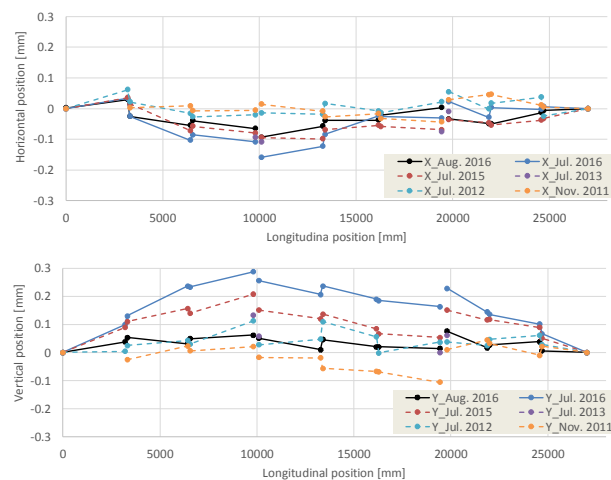


Figure 5: Straightness of the DTL section.

3.2 SDTL セクションのスーミング

SDTL 空洞は架台に免震構造を有している。空洞上部架台と下部架台の間にレール (水平横方向と長手方向) を介することで水平方向に分離し、ダンパーによって振動を吸収し、スプリングによって位置を復元させるものである[5]。しかしながら、何らかの要因で位置ずれ (水平方向の滑り) が発生しやすいため、SDTL セクションは毎

年、水平方向のスムーズングを実施している。SDTL 空洞は上流から S01A, S01B, S02A, …, S16B の 32 空洞から成り、空洞間に配置される収束ダブレットは B 空洞の上部架台両端部に固定されており、B 空洞と一体となって免震部に固定される。

Figure 6 は 2017 年に行った SDTL セクションにおける収束ダブレット電磁石の修正アライメント結果である。Figure 6(a)は水平横方向、Fig. 6(b)は高さ方向である。高さ方向はその前年に修正アライメントを実施しているものの、1 年間の床の変動で 0.2 mm 程度のくぼみが見られるが、この年には調整していない。水平方向には、その前年の SDTL 再アライメント時には±0.1 mm 以下に調整済みであるが、1 年後には±0.2 mm 程度のばらつきが発生していることがわかる。

アライメント時には免震ばねの弾性力を調節することで位置を合わせるが、地震等で揺れが発生した後に元の位置に復元する際、空洞への配管からの外力がばらつきの要因となる可能性がある。空洞に接続している大電力 RF 用導波管にはフレキシビリティを持たせているものの、2011 年のビームライン復旧時には建物に対してビームラインを西方向に最大で 16 mm ずらす調整をしたことから、建家に固定されている管からの外力を完全に除去しきれていなかった 2018 年には同軸管からの外力低減のため、実測に合わせた長さの同軸管に交換するなどの対策を講じている。

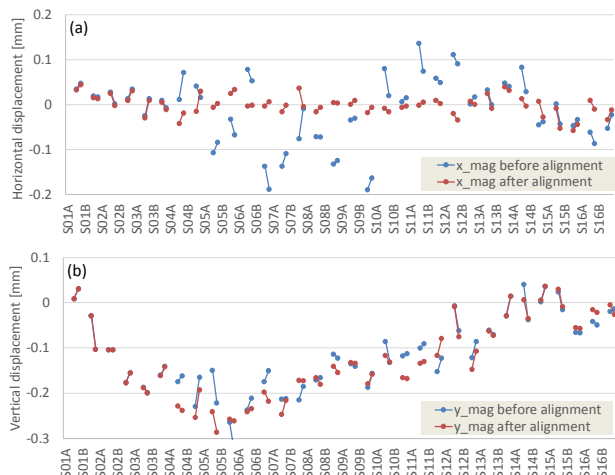


Figure 6: SDTL doublet alignment.

4. まとめ

機器アライメント状態の悪化はビーム損失の要因になることから、J-PARC リニアック全域の定期的な精密測量を実施し、必要に応じて再アライメントを行いビームラインの整列精度を確保している。

SDTL 空洞架台は、その免震構造部の位置復元に若干のばらつきが見られている。毎年のスムーズングを継続するとともに、改善に向けて、空洞への外力を低減する対策を行っている。

近年の精密測量結果によれば、直線部上流で床の変動が継続しており、現状、直線性の維持のため数年ごと

のローカルな再アライメントが必要な状況である。リニアック下流部では 2011 年以降、数年間は EXJ での段差状の床変動や不等沈下が見られたものの、その後悪化する傾向はみられていない。しかしながら、不等沈下は比較的短い区間で発生していることから、今後も加速器本体の定期的な精密測量と、必要に応じた計画的なアライメントを継続して、アライメント状態の維持に努める。

謝辞

リニアックでは床の高さ変動に対する補正が最も重要な課題であり、ビームラインのアライメント精度は株式会社パスコの三島研二氏、阿部直宏氏、飯塚恒太氏らのご尽力による測量データの蓄積によって支えられております。

参考文献

- [1] M. Ikegami, C. Kubota, F. Naito, E. Takasaki, H. Tanaka, K. Yoshino, H. Ao, T. Itou, K. Hasegawa, T. Morishita, N. Nakamura, A. Ueno, Proc. of LINAC2004. , August 2004, p474.
- [2] T. Morishita and M. Ikegami: Nucl. Instrum. Meth. A602 (2009) 364.
- [3] T. Morishita, H. Asano, A. Ueno, K. Hasegawa, and M. Ikegami, Procs. of 2007 Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, p.1520, (2007).
- [4] T. Morishita, H. Asano, and M. Ikegami: Procs of IPAC 2011, WEPS049, San Sebastián, Spain (2011).
- [5] H. Asano, T. Ito, T. Morishita, Y. Yamazaki, Z. Kabeya, S. Kakizaki, S. Fujie, K. Suzuki, T. Kato, F. Naito, E. Takasaki, and H. Tanaka, Procs. of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA, pp. 743-745, 2006.