

J-PARCリニアック用レーザーアライメントシステムの開発

池上 雅紀^{1,A)}、東 保夫^{A)}、加藤 隆夫^{A)}、内藤 富士雄^{A)}、吉野 一男^{A)}、田中 宏和^{A)}

久保田 親^{A)}、伊藤 崇^{B)}、高崎 榮一^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

〒305-0032 茨城県つくば市大穂1-1

^{B)} 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

概要

原研およびKEKでは、J-PARCリニアックのアライメントに用いるレーザーを用いたアライメントシステムの開発を行っている。J-PARCリニアックの全長はおよそ280mであり、横方向のアライメントの目標は $\pm 50\mu\text{m}$ である。本論文では、このアライメントシステムの概要と、長さ50mの試験用ビームラインを用いた基礎実験の結果について発表する。

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の加速器施設は、400MeVリニアック、3GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、50GeVシンクロトロンからなる[1]。そのうちリニアックは、50keV負水素イオン源、3MeV高周波四重極リニアック (RFQ)、50MeVドリフトチューブリニアック (DTL)、190MeV分離型ドリフトチューブリニアック (SDTL) および400MeV環結合型結合空洞リニアック (ACS) からなる。J-PARCリニアックの全長は、下流のビームトランスポートラインの直線部も含め、約280mである。ビームロスおよびエミッタンス増大を抑えるためには、各加速器コンポーネントの精密なアライメントが不可欠である。このような観点から、このリニアックの横方向のアライメントの目標を $\pm 50\mu\text{m}$ と定めた。さらに、J-PARCの加速器施設が海岸沿いの脆弱な地盤の上に建設されることを考えると、長年にわたって床面の変動を監視する必要がある。このような要求を満たすために、原研およびKEKでは、J-PARCリニアックのアライメントに用いるレーザーを用いたアライメントシステムの開発を行っている。これまでに、主要なコンポーネントの試作と、長さ50mの試験用ビームラインを用いた基礎試験を行った。本論文では、このアライメントシステムの概要と、この基礎実験の結果について発表する。

2. レーザーアライメントシステム

本レーザーアライメントシステムは、KEKのPFリニアックのアライメントシステムを元に設計されている[2]。本アライメントシステムの概念図を図1に示す。レーザー光源は、リニアックの最上流に設置さ

れる。レーザー光源としては、波長が532nmのダイオード励起固体レーザーを採用した。レーザー光源の直後に置かれた光学系を用いてレーザー光をほぼ平行ビームにし、その後は光学系を入れない構成とした。レーザー光軸は、負水素イオンビーム軸から水平方向に700mm離れた位置に位置し、空気の流れによるレーザー光の揺らぎを軽減するために、気密ダクトで覆われている。この気密ダクトの内径は80mmである。KEKのPFリニアックでは真空ダクトが採用されているが、ハンドリングと製作の容易さから、本システムでは気密ダクトを採用することを計画している。

J-PARCリニアックは、高周波空洞や四重極電磁石、ビームモニターなどの加速器コンポーネントから構成されており、複数の加速器コンポーネントが1つの架台上に設置されるような構成となっている。J-PARCリニアックのアライメントにおいては、1つの架台上に設置されたコンポーネント間の相対的なアライメントについては、アライメントテレスコープなどを用いた従来の光学アライメントを行い、その後、架台間のアライメントをする際に、レーザー軸を基準とすることを想定している。各架台は、上流側と下流側に1個ずつ、計2個のレーザーターゲットを備えている。レーザーターゲットとしては、直径30mmの4分割フォトダイオードを採用した。この直径は、レーザー光源から280m下流におけるレーザー光のスポット径より大きい。

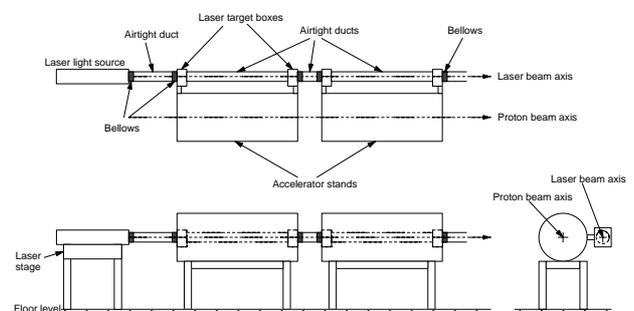


図1：レーザーアライメントシステムの概念図

¹ E-mail: masanori.ikegami@kek.jp

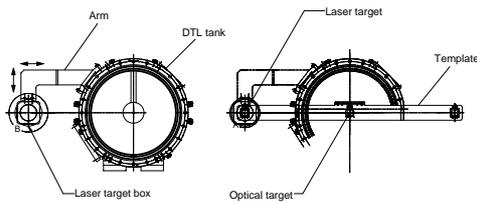


図2：ターゲットボックスのDTLへの取り付け

個々のレーザーターゲットは、「レーザーターゲットボックス」と呼ばれるボックス内に格納されている。このレーザーターゲットボックスは、レーザーターゲットを必要に応じてレーザー光軸からそらすための駆動機構を備える。この機構はそのレーザーターゲットより下流に取り付けられたターゲットにおける測定を容易に行うために必要なものである。この駆動機構には、精密な位置の再現性が要求される。試作機による試験の結果、この駆動機構には、 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内の位置再現性があることが確認された。

このターゲットボックスは、アームを介して架台に（あるいは直接加速器コンポーネントに）取り付けられる。例として、図2に、DTLにターゲットボックスを取り付ける方法を示した図を示す。DTLタンクを加速器トンネル内に設置するのに先立って、レーザーターゲットの位置を、テンプレートを基準として調節する。レーザーターゲットの位置の調節を行った後、レーザーターゲットボックスのタンクに対する位置を固定（ロック）する。テンプレートは、鉄製のバーで、負水素イオンビーム軸位置にアライメントテレスコープ用の光学ターゲットを、レーザー光軸位置にレーザーターゲットをのせることができるものである。DTLタンクの上流端と下流端に1つずつのテンプレートを取り付け、それぞれにレーザーターゲットをのせることによって、レーザーターゲットボックスの位置調節の基準となるレーザー軸を設定することができる。負水素イオンビーム軸位置にのせる光学ターゲットは、タンクとドリフトチューブの相対アライメントに用いられる。SDTLやACSなどの他の機器へのレーザーターゲットボックスの取り付けも、基本的には上記と同様の方法で行われる。レーザー光軸を回転軸とした回転は、水準器（傾斜計）を用いて抑える。

原則として、長期にわたる加速器トンネル床面の変動を監視するため、ビーム運転中もレーザーターゲットは機器に取り付けたままにしておくことを想定しているが、放射線によるフォトダイオードの損傷が無視できない場合に対応するため、レーザーターゲットは精密な位置再現性をもって取り付け取り外しが可能な設計となっている。

長期運転の後、地盤の変動のため、ある時期に再アライメントが必要となることが予想される。この場合、レーザー架台を設置した床面も動くため、レーザー光自体も当初アライメントを行った位置を保存してはいない。再アライメントを行うためには、それに先だって、所定の位置にレーザー光軸をあわ

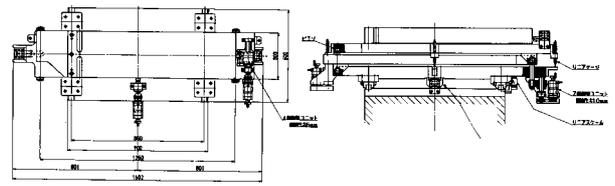


図3：レーザー架台



図4：ビームラインに設置されたレーザー架台

せる必要があり、そのためのレーザー光射出方向の微調整機構が必須となる。この微調整機構には、およそ $0.1\mu\text{rad}$ という極めて高いレーザー光射出角度の分解能が要求される。この高分解能の角度調節を実現するため、本システムでは、レーザー光源および光学系をのせたプレートを弾性変形させることによって、射出方向を調節する方式を採用した。このレーザー架台は、レーザー光源および光学系を、4枚のアルミプレートを重ねた上にのせた構成となっている。4枚のアルミプレートにはそれぞれくびれた部分があり、その部分を支点として変形しやすいつくりになっている。各アルミプレートの支点から離れた点をステップモーターで押すことにより、弾性的にプレートを変形させ、レーザーの射出方向を調節する。図3は、レーザー架台の構造を示したものであり、図4は、試験用ビームラインに設置されたレーザー架台の写真である。この架台についてのR&Dは、現在KEKで進行中である。

3. テストビームラインによる実験結果

このレーザーアライメントシステムの実現可能性を検証するため、KEKの陽子リニアック棟の加速器トンネル内に長さ50mのテストビームラインをつくり、それを用いて長距離のビーム実験を行った。この実験の主な目的は、試作した主要なコンポーネントの性能確認と、空気の揺らぎの影響の調査である。

長距離実験に先立って、システムの基本的な特性

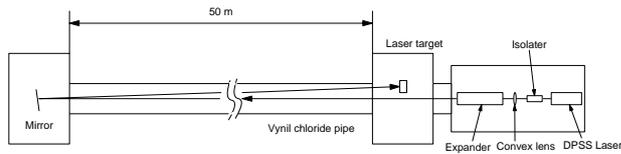


図5：長距離実験のセットアップ

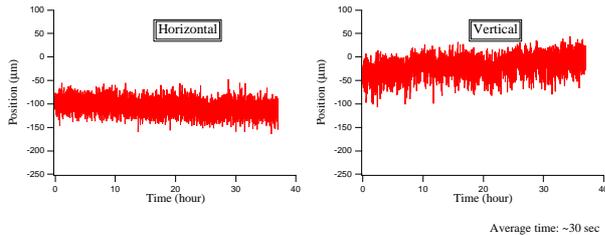


図5：光路長50mの実験結果

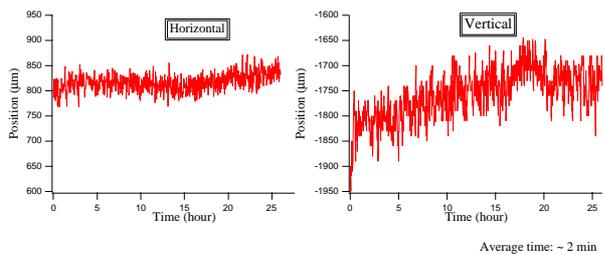


図6：光路長100mの実験結果

をおさえるため、約0.3mの光路長での実験を行った。この実験において、本システムで用いるレーザーターゲットが5 μm 以内の位置分解能をもつこと、および信号処理回路の長時間ドリフトがおよそ $\pm 5\mu\text{m}$ 以内であることが確認された。

図5は、長距離実験のセットアップを模式的に示したものである。上流端には、レーザー光源と光学系をのせたレーザー架台を設置した。本実験で用いた光学系は、光ファイバーやコリメータを含まない単純なものである。レーザー光路は、空気の流れによる揺らぎを抑えるため、塩化ビニール製の仮の気密ダクトで覆った。ビームラインの下流端には光学定盤を設置し、光路長50mの実験を行う際にはここにレーザーターゲットを、光路長100mの実験を行う際にはここに平面鏡を設置した。実験中、トンネルは空調されており、リアックのための冷却水系が稼働していた。レーザー光源について、温度調節は特に行わなかった。

図6は、光路長50mの実験において測定したスポット位置を時間の関数として表したものである。図7

は、光路長100mの実験において測定した同様のデータを示したものである。これらの図から、出力される位置信号には、周期が2~3分かそれ以下の比較的速い成分のゆらぎと、周期が2~3時間かそれ以上の遅い成分のゆらぎが含まれていることがわかる。周期が比較的速い成分については、アベレージをとることにより統計的に落とすことが可能で、図6では約30秒、図7では約2分にわたってアベレージをとっている。

4. ディスカッション

本実験において、比較的速い成分のゆらぎの振幅はほぼ光路長に比例し、ゆらぎの振幅を統計的に半分にするためには3~4倍のアベレージ時間が必要であることがわかった。図6、図7からわかるように、航路長100mの実験の鉛直方向を除いて、50 μm 以内の測定分解能が達成されている。航路長100mの実験は、光学定盤上に置いた平面鏡のなんらかの不安定性に影響されている可能性がある。わずかな光学定盤（あるいは平面鏡）の傾きが生じて、この航路長100mの実験のセットアップでは、大きな測定誤差が生じる可能性がある。航路長100mの実験について、より確度の高い結果を得るためには、50m地点の光学系を改善する必要がある。

先に述べたように、比較的速いゆらぎの成分はアベレージによって軽減できるが、遅い成分についてはその軽減が難しい。本実験において観測された遅い成分は許容できる範囲のものであるが、実際のアライメント時には光路長がさらに長いことやトンネル内の環境が異なると予想されることから、ゆらぎの振幅がより大きい可能性がある。そのため、この遅い成分のゆらぎの原因を特定し、それを軽減する方を確立することが急務である。

5. 謝辞

三菱重工業株式会社の壁谷氏、柿崎氏、リコーエレメックス株式会社の菊池氏、平松氏には、レーザーターゲットおよびレーザーターゲットボックスの機械設計をしていただいた。KEKの荒川氏には、レーザーターゲットの出力信号を処理するフィルター回路を設計していただいた。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, "The JAERI-KEK Joint Project (the J-PARC Project) for the High Intensity Proton Accelerator", Procs. of PAC 2003, in print.
- [2] Y. Ogawa et. al., "Improvement of the Alignment System for the KEK 2.5-GeV Electron Linac", Procs. of PAC 1995, p. 2087 (1995).