

陽子リニアックの整列について

2003. 7. 3 T. Kato

山崎加速器リーダーより、リニアック加速管整列の方法を、これまでのレーザー法から、その他の方法（レーザートラッカー、あるいはワイヤーと水レベル）に変更する提案がされました。その提案時の設問（本メモページ9以降）に対して準備したのが本メモである。

1] J-PARC リニアックの整列法について

1-1. 整列に関連する基本的な特性

電子加速器との比較をすれば、陽子リニアックの特徴を把握しやすい。

1. 電子加速ではローレンツ短縮が際立っているが、陽子リニアックでは、ほとんど効かない。高エネルギー電子では、100 mの直線加速部分では、数センチである。
2. 高エネルギー電子加速では、高周波発散力がない。陽子リニアックでは、大きな影響を与える。
3. 円形加速器の場合、局所エラーは特定可能であり、効果的に打ち消す事も出来るが、リニアックでは、そうした便利な機能はない。

1-2. 何を整列するか

1. 収束磁石を直線状に並べる。これは、四極磁石による横方向キックをできる限り小さく押さえる為である。
2. 高周波中心（ドリフトチューブ中心）と四極磁石中心を整列させる。これは、高周波発散力によるキックを押さえる為である。
3. 磁石と空洞とをその上に整列させた複数の架台を整列させる。

結局のところ、整列の主目的は、横振動を押さえる事である。従って、必要なだけのステアリング磁石を用意して、そのかわりに整列精度を落としてもよい。そうした選択をする場合には、磁石と空洞が夫々別のキックを与える事、リニアック出口では、横位置が一定である方がリング入射のためには適していると思われる事、チューニングで磁場の設定を変えるとか、あるいは電場の強さを変えると、それに応じてその後方の横変位が変わり、ステアリングの必要な強さも変わる事、加速途中のどこかでキックが変化すると、後ろまで一時的には大変な事になり、エネルギーが高いので大事であろうと予測される事など、少し面倒が増す事などに注意すれば良いと思われる。苦労が増えそうな方法なので、直線にコンポーネントを並べ、できる限りステアリングを使わずに済むような整列を目標とする。

1-3. DTL-SDTL の整列の実際

前項に述べた整列の目的を実現するために、DTL と SDTL は次のように既に製作されている。

1. DTL では、各タンク内のドリフトチューブは仕様精度 ± 50 ミクロンで設置されている。製作後の測定では、その大部分の精度は、仕様より改善されている。
2. DTL のユニットタンクは中心軸を光学的に整列させる方法を使って連結される。これは ± 50 ミクロンの精度内で達成可能と思われる。仕様書上では、連結精度は ± 0.1 mm となっている。DTL の場合には、以上の方法により、収束磁場と高周波発散力の中心をあわせる事が達成されていると考える。
3. SDTL では、タンクユニット内には収束磁石がないので、外置きの収束磁石とタンクの高周波発散力中心をそろえる事を目標とする。これを行う為に、SDTL の偶数番号の架台上の前部と後部に一体として組立られている 2 台のダブレットを整列させ、次に、タンク中心と 2 台のダブレットで決まる光軸とを整列させる。この方法により、一つの架台上では、磁石中心と収束力中心が整列され、以後、架台の剛性範囲では、一体として動くものと期待する。
4. SDTL の奇数番の架台上には、空洞だけが設置される。高周波キックを考えると、空洞に対する必要整列精度は、磁石に対する精度に比べて低下するが、SDTL タンク相互の整列にあたり、奇数架台と偶数架台を区別する事はしない。隣あう SDTL タンクの整列は、中心軸を使って光学的に行う。
5. ここまでの作業でローカルな範囲の整列は出来るが、二つの問題が残る。第一は、全系整列後には、中心軸を光学的に利用する事は極めて難しい事である。そこで、空洞の外側になんらかの基準点が必要となる。第二は、250m の長さにわたり直線性を保証していない事である。この二つを解決する為に空洞横にレーザー基準を設定する事にした。
6. レーザー軸について
ビーム軸から水平に 70cm 離れた所にレーザーを通し、これをリニアック整列後の基準とする。これを基準として検定しておく為に、二つのタンク毎の整列作業の時に、そのタンクのレーザー位置信号を確認する。この方法により、整列後のタンク架台の変位が容易に測定できると思われる。

2] レーザー測定システムの開発状況について

レーザーシステムの基本的な問題は、必要な精度で測定ができるのかどうかであろう。重要な項目について簡単に述べる。

2-1」 レーザーの指向性

レーザー本体仕様によれば、レーザービームの指向性は $7.5 \mu\text{rad/deg}$ 以下となっている。この数字そのものであれば、250m で 1.9mm 程度となり、良い値ではない。それではこれまでの測定ではレーザーの指向性はどうかであったか。

図 1 に距離 50 m の測定結果を示す。図 2 に距離 100m の測定結果を示す。

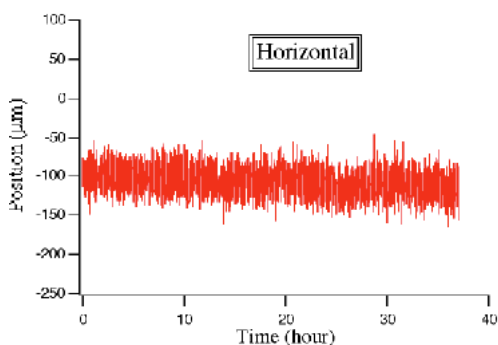


図 1 距離 50 m の位置測定。

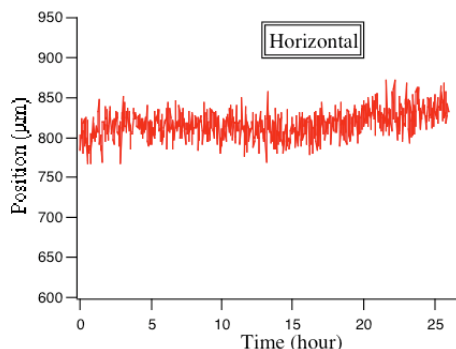


図 2 距離 100m の位置測定。

図 1 では、30 秒の平均後の測定の幅は、 ± 30 ミクロン程度である。図 2 では 2 分の平均をしている。レーザービームのふれが距離に比例しているとすれば、距離 250m では、レーザーのふれは 0.15 mm 程度であり、必要な精度に近づくと言ってもよいが、その前に、この測定位置信号の幅（ノイズ）を決めているものは何かについて考察する。

図 3 は、レーザーターゲットから得られる生信号をオシロで観測した結果である。信号には、38 kHz と 40 kHz 付近の大きな 2 種類のスパイクが見られる。図 4 におよそ 1 時間の間の距離 10m 程度のレーザー測定結果を示す。この測定信号は、ある程度安定した基線と、そこにあまり因果性もなく上乘されるパルス性の測定点から成り立つ事がわかる。こ

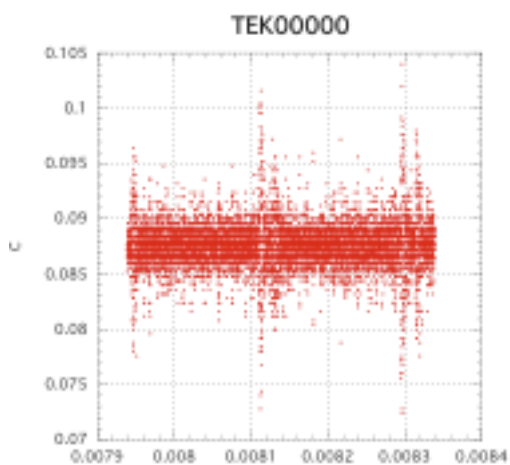


図 3 レーザー生信号

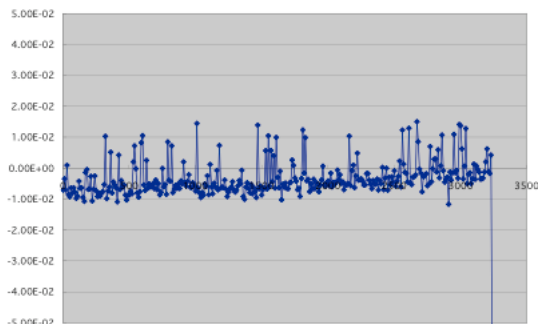


図 4 約 1 時間の横変位測定結果

のパルス性ノイズがなければ、ノイズ幅は半分以下になるのではないか。現在使用している低域フィルターは、カットオフ周波数が kHz 以上と高く設定されており、フィルター通過後の信号には、パルス性のノイズ、低域のノイズ、レーザー架台の振動測定にも見られたハム成分とその高調波などが見られるので、この部分を改良すれば、測定信号の S/N 比が改善されて、測定に必要な時間も減少する事が期待される。

2-2」レーザーシステムのコスト

前回の入札不調の原因は、それぞれの単価があまりに高くなりすぎた事とおもわれる。一例として、レーザーを空気から遮断するレーザーダクトについて考える。某社の見積もりでは、およそ1億円である。これは、次のようにして製作すると 1000 万かからないであろう。

アルミパイプの直管でフランジなし。パイプ同士の接続は、径の大きな塩ビパイプとゴムシール。内側の塗装は行う。断熱が必要となれば、スーパーインシュレーションをまく。

レーザーボックスは、これまで設定していた全てのボックスに対する互換性という機械的精度が厳しい仕様をはずす事により、大幅なコスト減が見積もられる。こうした仕様見直しを行えば、予定価格での製作は可能と判断する。

3] レーザーと地球の丸みについて

地球の丸みの効果は 250 m の直線部であれば、約 5 mm 程度であろう。これを、対応する加速管の整列ユニット毎 (37 セット) の傾きに換算すれば、 $0.5\mu\text{rad}$ 程度となるので、整列に要求する精度以下 (SDTL では例えば 5m で $0.1\text{mm}\sim 20\mu\text{rad}$ 程度) となる。従って、計算するまでもなく、シミュレーションへの影響はほとんどない。従って、地球の丸みの為にレーザーが必要であるという議論はない。問題はリニアックの整列をどのようにするかという考え方の違いと、将来、どのようなシステムが我々にとって有用であるかという点にある。

y 方向については、次の二つの整列法が考えられる。

並べ方(A):

リニアックの両端には、基準点がある。基準点をもとに、リニアック全長にわたり、直線基準ラインを設定して当初からそれに整列させる。基準ラインは精度から考えるとレーザーが適当である。

並べ方(B):

リニアックの両端には、基準点がある。並べ初めでは、片方の基準点と水準器により局所整列用のビーム軸を定め、これに空洞を整列させる事になる。複数の空洞を並べ終わると、次第に、並べた空洞から決まるビーム軸と、終端の基準点との誤差の測定精度があがるので、その段階で、必要ならばつぎのビーム軸に修正を加える事になる。あらかじめ、リニアックの両端の基準点を地球の丸みを考慮して決めておけば、原理的には、整列作業途中の大きなビーム軸の修正は行わずに済むと思われる。仮に、この修正が、ある整列ステップに要求されている整列精度を大きく越える事になれば、ビームに影響が出る事になる。

どちらの整列法を選らんでも、局所的な整列精度が同じであれば、ビームに与える影響は同じである。局所的な整列精度が同じであれば、それにより全体のビームの性質が決まる。

3] 運転開始後の整列

今の所、運転開始後にも、整列作業が必要になるだろうとの予測が有力である。その場合には、限られた時間内に、少ない労力で、全系の整列状態を測定出来るシステムが優れていると言える。レーザーシステムの場合に、この作業に困難が伴うという予測はないと思われる。逆に、運転途中でも、極めて短期間の間にデータが取得出来るようなシステムは可能と予測する。そのようなデータは、初期変動が大きいと予想されるコミッショニングの時には、重要な情報となり、通常運転開始後も、チューニングの為の大切な情報となると考える。一旦運転が始まると、加速器利用時間に対するユーザーの要求は厳しくなるのが通例であり、既に ACS 設置問題でそれが貫徹されている。

4] 加速管整列の仕様について

整列仕様は、その加速器に求められる仕様に依存する。本リニアックは、高エネルギー大強度陽子リニアックであり、シンクロトロン入射器としての役割を果たすので、ビームに求められる要求仕様は厳しいものがある。整列仕様を考察する時に用いるシミュレーションは、その能力に限りがある。例えば、本リニアック性能の重要な因子とされるビームハローについては、明確な指針は決定出来ない。その中でわかっている事は、ほとんどの場合、各種の mismatches がビームの劣化につながるという事である。全てにわたって、最善の努力をしなければ、目的の性能には到達しないと考える。そうした一つ一つの改善が、ビーム損失の低減化につながり、今後数十年の作業中の被曝量の低下につながると考える。このような状況の中で、以下に示す整列仕様を決めた考え方は次の通りである。

1. 縦、横のエミッタンス増加が顕著でないような設定とする。

これは、エミッタンス増加が顕著でないリニアックでは、ミスマッチによるハローの生成は少なからうという予測による。そこで、ある効果が顕著に表れるようなエラー設定に比べて、相当の安全ファクターを設定する。

2. 仕様は数字で与えざるを得ないが、製作にあたり、単にその数字の中に入れて良いという製作姿勢ではなく、より優れた性能を求める。
3. 従って、このようにして決めた仕様上の数字は、これ以下でなければ絶対にだめだという数字ではない。これらの仕様が問われるのは、ビーム強度が増して、リニアックの性能限界に近い運転の時であろうと予測する。

以下に、これまでの製作に使われた仕様をまとめた。

DTL 仕様書

4.1.2.3 四極磁石の整列精度

収束用四極磁石の整列精度は、加速ビームの性質に大きな影響を与える。整列の基準軸はユニットタンク中心軸（項番 4.2.1.7-A）とする。

- ・磁石中心の据付精度： 横方向が ± 0.05 mm 以内
- ・軸方向の据付精度： ± 0.1 mm 以内
- ・中心軸廻りの回転： ± 2 mrad 以内
- ・ビーム軸との傾き： ± 1 mrad 以内

本DTLでは、できる限り高い四極磁石の整列精度が望ましい。最終的なドリフトチューブの整列をドリフトチューブのビーム孔を使って行うことを考慮して、四極磁石の製作、ドリフトチューブへの組み込み等の製作工程を行うことが必要である。

4.1.2.4 ドリフトチューブの整列精度

ドリフトチューブの整列精度により加速電場分布が決まる。整列の基準軸はユニットタンク中心軸（4.2.1.7-A）とする。ドリフトチューブの中心はビーム孔の中心とする。

- ・横方向の据付精度： ± 0.05 mm 以内を目指す
- ・軸方向の据付精度： ± 0.05 mm 以内

4.1.2.5 複数個のタンク相互の間の整列精度

- ・横方向の据付精度： ± 0.05 mm 以内を目指す
- ・軸方向の据付精度： ± 0.5 mm 以内

4.1.4 ドリフトチューブの整列精度

ドリフトチューブの整列精度により加速電場分布が決まる。整列の基準軸はタンク中心軸（4.2.5-A 項）とする。ドリフトチューブの中心はビーム孔の中心とする。

- ・横方向の据付精度： ± 0.1mm 以内
- ・軸方向の据付精度： ± 0.2mm 以内

4.1.5 複数個のタンク相互の間の整列精度

- ・横方向の据付精度： ± 0.1mm 以内
- ・軸方向の据付精度： ± 0.5mm 以内
- ・隣り合うタンク中心軸間の傾き： ±0.1mrad

タンクのビームラインへの整列は本仕様範囲外であるが、最長 300m のリニアックにおいて、そのビーム軸を、本リニアックのビーム軸を基準として、上記の精度で達成することが可能である構造としなければならない。

4.2.5 整列法

タンクの整列は、タンクとその間に設置される四極磁石（本仕様範囲外）を一体と考えて行う。

A) ドリフトチューブの整列

タンク内のドリフトチューブの整列は、タンク両端面のピン位置に装着される 2 枚の整列用テンプレートにより決まる中心軸に、ドリフトチューブのボアの中心に設置した光学ターゲットを利用して整列させる。テンプレートの中心軸には、光学ターゲットを設置する。又、このテンプレートの光学ターゲット用の中心軸から水平方向に 700 mm ± 0.02 mm 離れた位置にはターゲットボックス（本仕様範囲外）と指定するレーザーターゲット（本仕様範囲外）を設置出来る構造とする。タンク内面切削時に、タンク端面のピン位置を決める。このピン位置によって決まるタンクの中心軸と、タンク内径の平均値から決まる中心軸とのずれは ±0.1mm 以内とする。テンプレートの着脱による位置の再現性は ±0.02mm 以内とする。タンクの水平位置は、タンクフランジ上面につくる水平位置決め用の基準面に水準器をおいて決める。

B) タンク整列の方法

レーザー軸に ±0.02mm 以内の精度でターゲットボックスを設置する。

いったん調整後は、ターゲットボックスの着脱による位置の変位は ±0.02mm 以内とする。

ターゲットボックス内の所定の位置に、レーザーターゲットを容易に着脱でき、且つ、必要のない時は、遠隔操作によりレーザーターゲットをレーザー軸から回転等によりずらす構造とする。

この操作の再現性は ±0.005mm 以内とする。

レーザーターゲットの着脱による位置の変位は ±0.02mm 以内とする。

4.10 架台

架台はリニアック全体を支えると同時に、将来は全長300mに及ぶ精密なアラインメントの基本的な要素であるという意味で非常に重要である。架台には、タンク一台と、その後ろに配置される四極磁石2台（本仕様に含まない）を設置する。磁石の横方向設置精度は±0.1mm以内とする。磁石用の基準面とタンク端面に使うテンプレート上のレーザーターゲット位置とは、±0.02mm以内の精度で位置が決められる事。

注) 仕様書の数字と表現について

DTL仕様書では次のように書かれています。

4.1.2.3にて、DTQはユニットタンク中心軸に対して50ミクロン以内。

4.1.2.4にて、DTはユニットタンク中心軸に対して50ミクロン以内を目指す。

4.1.2.5にてタンク相互は50ミクロン以内を目指す。

これより、DTQの中心を整列させる事を最重要課題としている事がわかります。一体となっている1個のDTとDTQの中心軸は必ずしも一致しない可能性があります。従って、DTの整列とDTQの整列が矛盾する事を予期して、このような表現になっています。実際には、ボアを再加工する事により、一致させるように製作段階では手直しをしました。

次に、タンク相互整列の精度記述は、実際には、タンクの一様な変位に対する許容度が大きい事を反映しています。

2003年6月25日の DTL-SDTL 整列打ち合わせにおいて、山崎加速器リーダーは次のように述べられた。

- 1) リニアック全長のスケールの摂動に対して、ビームがどう振る舞うのかにより、整列の仕方が違うと考える。
- 2) DTL の整列の考え方が合理的かどうかをまず検討する。

第(1)項は、具体的には次の主旨の発言と考えられる。

地球の丸みを考慮すれば、直線 250m で約 5mm、300 m で約 7mm の落差を生じる。そこでリニアックを整列させる場合に、この落差を考慮すべきであるかどうかをまず考えなければならぬ。

理想的に、この落差を生じるように角度を分配して設置すれば、ビームには影響が出ないであろうと既に述べた。

物理学にはかのアインシュタイン先生により有名になっている思考実験という有力な武器がある。この場合、簡単な思考実験により、落差がないように整列する方式が原理的には優れている事がわかる。次の二つの理想リニアックを考える。

- A) 理想的に直線上にならんでいるリニアックの理想的な収束磁石を仮定する。そのビーム軸に1個の粒子を走らせれば、それは、リニアック中を直進する。
- B) 次に、今度は、地球の丸みを考慮した理想的な円弧に沿って、理想的な収束磁石を並べたリニアックを想定する。ここに同じように1個の粒子を入射させるとどうなるであろうか。最初の磁石を通過する時、粒子は、ほんのわずか中心からはずれているので、収束磁石により、横方向のキックを受ける。いったんキックを受ければ、よほどの好条件に恵まれない限り、横方向の振動の振幅は次第に増大する。横収束力が強いので、粒子は横振動を伴いながら、円弧に沿って進む事になる。振動の詳細は、収束磁石の配置と強さに依存する。

ここまでの比較から、システム(A) が優れている事は歴然としている。しかしながら、それは原理的な話であり、現実には避ける事の出来ない整列に伴う誤差がある。この場合、理想リニアック(B)の固有誤差は、整列誤差よりは小さいので、実際問題としては、どちらを選らんでも差を生じないと考える。

そこで、問題の選択理由は、第一には、原理的な事をどの程度重視するか、第二には、整列後の使い勝手等を含めた性能、第三にコストという事になると考える。

システム(B)を選ぶ条件を考えてみよう。

- 1) なんらかの理由でシステム(A) が構築出来ない。
- 2) システム(B) はシステム(A) にまさると考える。
- 3) システム(B) はコストが安い。

条件（1）について：

システム(A)が構築出来ない理由としては、コスト、性能の二つが考えられる。コスト面では、昨年度末の入札不調だけをみれば、確かにそう考えられない事もないが、先に述べたアルミ直管ダクト案の 1000 万が実現可能であれば、コストを理由にする事はないと思われる。又、レーザーボックスは仕様の見直しを行い、全体のコストは予定内に入ると思われる。

次に性能であるが、これは、実際に 250m の試験をしていないという点に不安が残る。しかしながら、これまで得られた 50m 及び 100m の測定結果を見て、250m の時には測定精度が数 mm になるという議論は科学的な推論とは言えないだろう。確かに、レーザーのゆらぎは増えるが、平均値の測定は、必要精度で行えるのではないか。また DTL の連結テストでは、レーザー整列法の基本的な方式が実証されており、性能面が足りないという理由はない。レーザーの幅はあっても、数ミクロンの分解能が得られている。又、レーザー測定の基本的な重要コンポーネントである、レーザー方向を微調するレーザー架台と測定ターゲットシステムが完成しており、基本測定において実績がある。これまでに製作した全ての DTL、SDTL はレーザー整列法を前提として製作が行われた。

条件（2）について：

システム(B) がシステム(A)に、使い勝手を含めて、性能面において勝るとい根拠はないと思われる。高エネルギー側リニアック基準点を使って、あらかじめビーム軸を 0.1-0.2(?)mm 程度の精度で設定するという点では、その他の方法はレーザーに負ける。レーザートラッカーの実際上の精度は 10m で 0.1 と報告された。KEK の AR 測定において、始点から測定を開始してリング 1 周後には、システムティックエラーの累積により大きな測定差が得られる方法を、直線リニアックで敢えて選択する積極的な理由は見当たらない。そのような累積誤差は、どこかでなんらかの方法で吸収しなければならない。又、専門業者二人を測定時に必要とすると言われている点、全系の測定に必要な時間等、レーザー方式に勝るとは言えないだろう。

条件（3）について：

コストの比較は、単品の機器のみならず、システム及び作業について行わなければならないので、システム(B)については今の所不明。仮に、レーザートラッカーであれば、常に作業費が必要という想定をしていると聞いている。

次に DTL の整列の考え方が合理的かどうかをまず検討するという提案であるが、これは、皆さまの検討結果により、これ以上の方法はないという結論に落ち着いたと考える。