

J-PARC 3-50BT 上流部再アラインメントの効果 EFFECT OF THE RE-ALIGNMENT OF J-PARC 3-50BT LINE

白形政司^{#, A)}
Masashi J. Shirakata^{#, A)}
^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

In J-PARC, the alignment of beam line elements has been measured almost every year since the construction. After the mega-quake in 3.11 of 2011, the re-alignment for the beam recovery was done before early 2012, however, the alignment of the Rapid Cycling Synchrotron (RCS) was postponed until the long shutdown period in 2013, because the RCS did not get fatal error such as a local large displacement and we planned the very long shutdown period for the LINAC upgrade. In this paper, the alignment status of the beam transport line from 2008 to 2013 and the effect of re-alignment in 2013 are reported.

1. はじめに

茨城県東海村の J-PARC 施設には、2 つのサイクロトロンリングがある。速い繰り返しのシンクロトロン（以下、RCS）のビームは 3NBT ラインと呼ばれるビームラインに取り出され、途中の振り分け電磁石により一部が遅い繰り返しのシンクロトロン（以下、MR）へと送られる。この振り分け電磁石から MR 入射部までを結ぶビームラインを、3-50 Beam Transport (3-50BT) ラインと呼ぶ。

Figure 1 に 3-50BT ラインの概要を示す。実際のビームラインは細長い上に場所によって四極電磁石の並びにかなりの疎密があるが、この図ではビーム方向の縮尺を適当にしてラインの構成だけを示すよ

うにしている。RCS と MR はリングが設置されている標高が 4.1 m 異なるため、3-50BT ラインのほぼ中央に約 80 m の傾斜部を設けてある。傾斜部は単純な FODO 構造で、RCS, MR 間に出てくると予想される変位を吸収する役割を持たせている。傾斜部の下流は MR 光学系へのマッチングのみを行うが、上流には MR 行きビームのハロー成分を取り除くためのコリメータを設置^[1]している。光学系は、Figure 2 に示す。ライン入口と MR への接続部はそれぞれ上下流の光学系に合う様に調節するため運転状況によって大きく変わる可能性があるが、コリメータから傾斜の下までは設計値を保つようにするのが基本である。

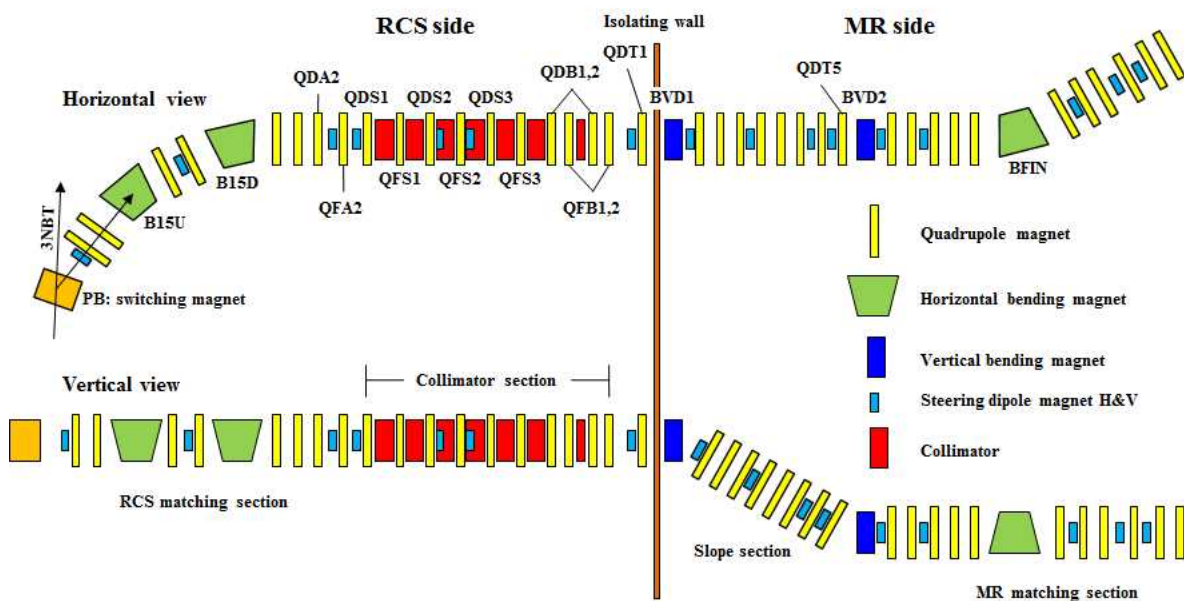


Figure 1: Schematic drawing of the 3-50BT Line. It consists of four sections: RCS matching, collimator, slope, and MR matching. The figure shows the layout of elements. The lengths along the beam are arbitrary.

[#] masashi.shirakata@kek.jp

MR のアーチャーは RCS の 1/4 であり、輸送路においてあらかじめハローを取り除くことで、MR 入射時のビームロスを低減する。コリメータ部では多くの二次粒子が発生し機器にダメージを与えることから、当初はビームモニターやステアリング等は一切設置しなかった。しかしベータトロン位相の進みが早く軌道歪みも出やすいことから、2013 年の夏季シャットダウン期間に 3 台のビーム位置モニターと 2 台の軌道補正電磁石 (ステアリング) を増設^[2]した。これにより、2013 年後期の運転ではコリメータ部の軌道確認とその補正が簡単に出来るようになった。ここではこれまでの 3-50BT ラインにおける電磁石アラインメントの変遷と 2013 年の再アラインメントによるビーム軌道の改善について報告する。

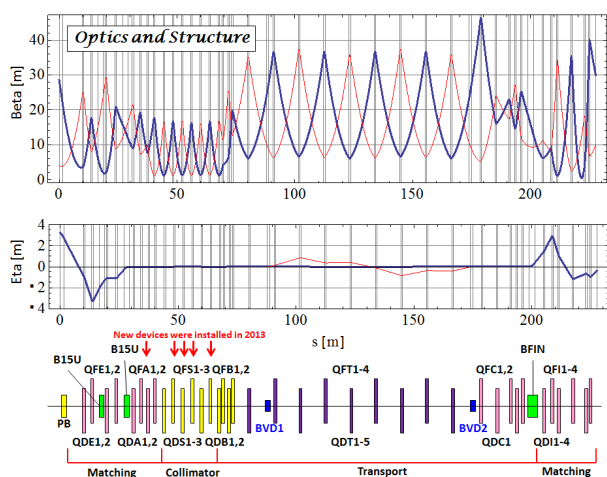


Figure 2: Typical optics of the 3-50BT line.

2. アラインメントの経年変化

2.1 電磁石高さ

Figure 3 に、2008 年以降の電磁石高さの変化を示す。鉛直上方向が、縦軸のプラスである。各電磁石には基準座が上下流の 2 つあるので、1 台につきデータが 2 点ずつある。RCS 側のビームライン高さは TP+3200.00 mm が設計値であったが、測量結果を

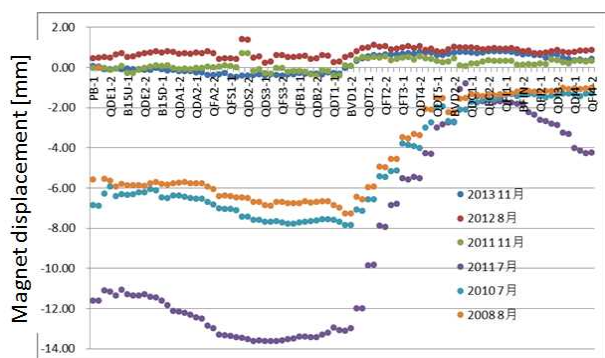


Figure 3a: Vertical displacement of magnets since 2008.

反映して 2007 年に TP+3197.59 mm と修正された。MR 側のビームライン高さは TP-1100.00 mm である。標高の基準は、原科研内で強固な地盤の上に建設されている JRR-3 の周辺に基準座を設けている。3-50BT ラインの最初のアラインメントは 2006 年 11/15~12/1 の期間に実施したが、MR エリアでは大規模な土木工事が続いており、測量からアラインメント終了までの期間中に RCS も MR もフロアレベルが変動した。これに対応し、2007 年 3 月に傾斜部のみ修正をかけている。

J-PARC においても建設後の沈下が観測されており、また新建屋の建設に伴う土木工事は MR エリアでビーム運転開始後も続いた。そのため 2010 年までは比較的ビームラインの変動も大きく出ている。RCS 側のトンネルはビームコリメータを置くため壁圧が厚く作られているため、垂直偏向電磁石 BVD1 まではほぼ一体で動いている。2011 年には東日本大震災のためひととき大きな変位がでている^[3]が、局所的な動きはそれに比して大きくない。

2011 年秋に復旧のための再アラインメントを行った^[4]。震災により施設そのものが大きく変位したため設計値への回復は困難であったことから、現状追認として RCS, MR 側のビームライン標高をそれぞれ TP+3186.00, TP-1107.65 mm と再定義した。2011 年 11 月のアラインメント後の確認測量で QDS002 が 0.7 mm 高くなっており、アラインメント時の手違いと思われるが、翌 2012 年 8 月の測量では 1.4 mm に変位が拡大していた。2013 年には RCS リングの再アラインメントが実施され、それに伴い RCS 側のビームライン標高は TP+3187.60 mm と再度変更された。それに伴い 3-50BT ラインの上流部も再アラインメントを行い、QDS002 の変位もそのとき修正した。

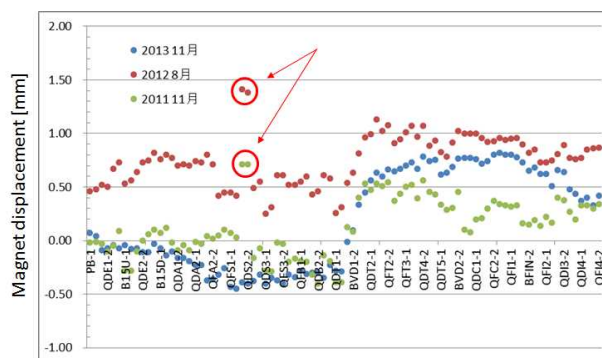


Figure 3b: Vertical displacement of magnets after the realignment in 2011 and 2013. In 2013, the entrance of the 3-50BT line is changed again according to the realignment of RCS.

2.2 水平方向位置

Figure 4 に、2008 年以降の電磁石位置 (ビーム垂直方向) の変化を示す。ビームから見て右方向を、

縦軸のプラスに採ってある。これは MR と同じ座標系である。一方へずれていく様子が見られるが、これは J-PARC サイト全体で見た時、MR の方向が変わって見えることに起因する。したがって、BT の健全性は直線に乗っているかどうかで判断する。2011 年のデータで、QFB1-QDB2 間に位置跳びが確認できる。ここにはエキスパンションジョイントがあり、トンネルの躯体が切れている。鉛直方向ではこの様な跳びは見られなかった（じつは折れ曲がりが見えている）が、トンネルが横ずれを起こしていることが判断できる。

2011 年以降鉛直方向のずれが見られた QDS2 は、2012 年の水平方向でも 1 mm 弱の変位が見られる。QDT1 は、2008 年に見られたずれが 2010 年に消失している。この間アラインメントは行っていないので、この電磁石も要注意である。2011 年冬にアラインメントを実施したが、2012 年の測量時にやはり変位が見られる。2013 年のアラインメントで再度修正しており、本年 9 月に確認測量を予定している。

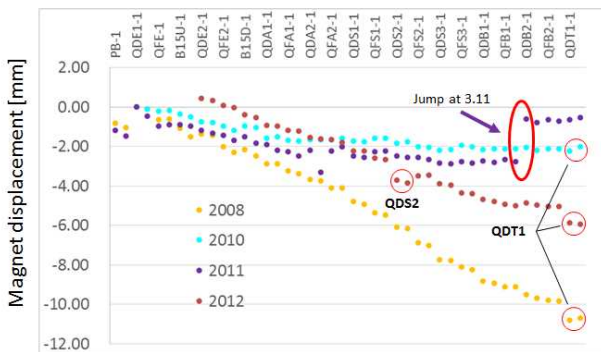


Figure 4: Horizontal displacement of magnets since 2008.

3. ビーム軌道の変化

3.1 2011 年～2013 年まで

コリメータ部の軌道調整のためには、QFA2 と QDT1 の下流に設置してあるビーム位置モニター（以下、BPM）を利用してきた。すなわち、コリメータ部の前後で軌道変位をゼロにするという方法であるが、コリメータ部の四極電磁石にアラインメントの狂いが生じるとうまくいかなくなる。Figure 5 は、2012 年 12 月に測定した定常運転時の軌道である。コリメータ部にはビームモニターが無いので、四極電磁石における軌道は電磁石の励磁電流を変えて、下流のモニターで観測される軌道の変位から算出している。またコリメータによりビームの両端が検出できるので、そこから軌道中心を推定している。ただしコリメータのアラインメント精度は 1 mm 程度であり、更にベータatron 振幅の異なる場所でビームの両端を見ているため精度は悪い。加えて QDS, QFS 電磁石群はそれぞれ 3 台が直列接続になっており、3 台分の変位をフィットで求めている

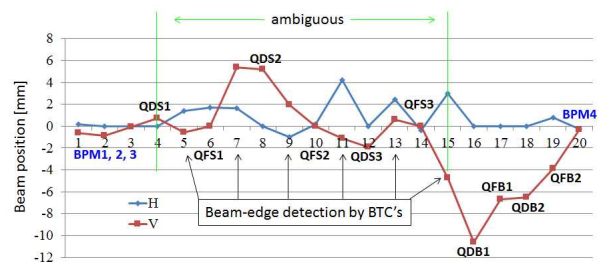


Figure 5: Measured beam orbit in collimator section.

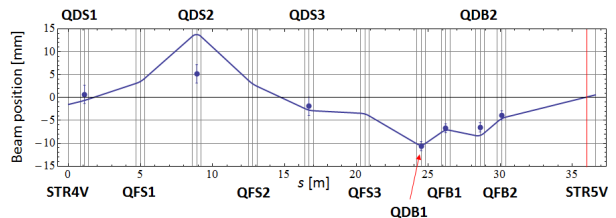


Figure 6: Reconstructed orbit in collimator section.

ため不定性を含んでいる。そのため信頼度が低いと思われる部分には”ambiguous”と示した。Horizontal 方向の変位は、実際にはほとんど無いかもしれない。だが、vertical 方向には明らかに軌道が大きく振れている。

Figure 6 は STR4V での位置と傾きをそれぞれ ± 2 mm、 0.8 ± 0.2 mrad とし、QDS1 および QDB1～QFB2 のデータに合うように再構成した軌道である。電磁石のアラインメントについては、QDS2 の高さはフリーパラメータとしたが、その他の電磁石のアラインメント誤差は ± 0.1 mm 以内に制限した。また、励磁電流は 2014 年 12/14 の記録値を使用した。

QDS2 が外れているのは、やはり単独励磁できないために軌道解析がうまくいっていないのだと思われる。コリメータによるビームエッジ検出を行った際、Unit-04 においてビームが異常に上方にあるという結果が出ていたが、それもこの結果と合わない。むしろ、Unit-04 の設置の方に問題があると思われる。QDS1～QFS3 のアラインメント誤差が ± 0.1 mm である場合、QDB1 で推定される軌道変位は 1σ で 0.6 mm である。QDB1 でこの様に下方に大きく振り下がるには、QDS2 が 1.6 mm 高くなければならない。これは Figure 3b の結果とコンシステントである。また STR5V のところでちょうど軌道がゼロに戻っており、ここでまっすぐな軌道にうまく戻せていたと考える。

3.2 2013 年再アラインメント後

3-50BT ラインには、もともと軌道補正用ステアリングが 14 台用意してある。再アラインメント前はコリメータ部の前後で Table 1 に示す様な運転をしてきた。補正量としては大きな値であり、不自然な

運転であったと言える。再アラインメント後には、vertical ステアリングを STR7 までゼロにした状態で、Figure 7 の軌道を実現した。ここにはコリメータ部に新設した BPM のデータが入っていないが、それについては本年 4 月からビームが見え始め、QFS 電磁石の下流で軌道変位は水平/垂直方向ともに大きくても 1 mm 程度であることが確認出来ている。

Table 1: Vertical Steering Kick Angle in 2012

Steering	Current [A]	Kick angle [mrad]
STR4V	+40.21	+0.774
STR5V	-14.41	-0.277
STR7V	+10.54	+0.203
STR9V	+11.15	+0.215

2011 年に傾斜部の再アラインメントを行った際、MR フロアの沈下を見込んで QDT5 の目標値を意図的に 1 mm 低く設定していた。震災以降の変動は予想と違ってきているので、今後修正をかける必要があるかもしれない。そうすれば、STR9V の電流値もゼロに出来ると考えられる。

今回軌道を修正出来た結果、Unit-04 の高さの方が不正であることが確定した。軌道歪みが 1 mm 以下と仮定すると、約 5 mm 低いという結果になる。Unit-04 は、本年中にかさ上げを行い、高さを修正する予定である。

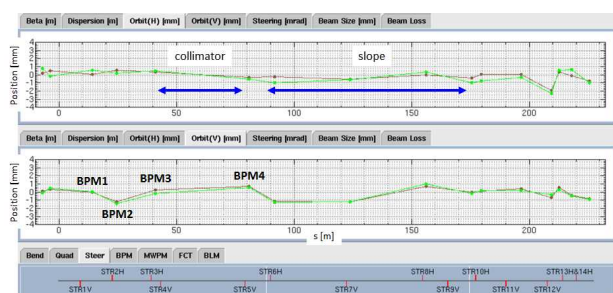


Figure 7: Measured beam orbit at shot#133 of RUN#52 and steering positions.

4. まとめ

3-50BT ラインは建設当初は建屋の沈下に伴うミリオーダーの変位が見られたが、2011 年の震災以降その傾向は落ち着いている。毎年の測量結果を見る限り、上流部 (RCS 側) 電磁石の中で QDS2 と QDT1 は要観察である。

Vertical 方向に出ていたと思われる軌道の歪みは、2013 年の再アラインメントにより解消した。それはコリメータ部内に新設したビーム位置モニターによっても、本年 4 月より直接確認出来ている。傾斜部下流まで vertical ステアリング無しでほぼ設計軌

道を通ることから、再アラインメントは非常にうまくいったと考える。

参考文献

- [1] M.Shirakata, et al., Proceedings of EPAC2006 (1148-1150), Edinburgh, Scotland, June 26-30, 2006
- [2] M.Shirakata, et al., “J-PARC 3-50BT 増強計画”, SAOS03, Proceedings of the PASJ10, Univ. of Nagoya, Aichi, Aug. 3-5, 2013
- [3] M.J.Shirakata, et al., Proceedings of IPAC2011 (1662-1664), San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011
- [4] M.J.Shirakata, et al., “震災後の J-PARC 主リングアラインメント”, MOPS018, Proceedings of the PASJ8, Univ. of Nagoya, Aichi, Aug. 1-3, 2011