

J-PARC 3-50BT 増強計画

J-PARC 3-50BT UPGRADE PLAN

白形政司^{#, A)}, 魚田雅彦^{A)}, 大越隆夫^{A)}, 久保田親^{A)}, 佐藤健一郎^{A)}, 佐藤洋一^{A)}, 高野淳平^{A)},
外山毅^{A)}, 橋本義徳^{A)}, 堀洋一郎^{A)}, 原田寛之^{B)}

Masashi Shirakata^{#, A)}, Masahiko Uota^{A)}, Takao Oogoe^{A)}, Chikashi Kubota^{A)}, Kenichiro Sato^{A)}, Yoichi Sato^{A)},
Junpei Takano^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Yoichiro Hori^{A)}, Hiroyuki Harada^{B)}

^{A)} KEK/J-PARC

^{B)} JAEA/J-PARC

Abstract

The J-PARC 3-50BT line transfers the beam bunches from the rapid cycling synchrotron to the slow cycling one, called as the MR. The purposes of beam transport lines are: transferring the beam without any losses, and delivering to the following device with the optical matching. In addition, the J-PARC 3-50BT line has a collimator system in order to cut the halo component to the specified emittance. The J-PARC MR has achieved the beam power of 240kW, and aims that of 750kW after 2014. With such a very high beam power, the beam collimation in the 3-50BT line plays an important role for the stable beam operation. The upgrade of the 3-50BT line is planned for the high performance collimator operation, with additional beam monitors and steering system. This paper reports the upgrade plan of the 3-50BT line during the long shutdown period in late 2013.

1. はじめに

J-PARC は LINAC、速い繰り返しのシンクロトロン (以下、RCS)、主リング (周長約 1.6 km の遅い繰り返しのシンクロトロン。以下、MR) および各実験施設から成る複合施設である。このうち、RCS から物質・生命科学実験施設へ至るビーム輸送路を 3NBT ラインと呼び、3NBT ラインの途中から分岐して MR へ至るビーム輸送路を 3-50BT ラインと呼ぶ。一般的なビーム輸送路の目的は、途中ビームをロスすること無く目的地までビームを移送し、目的地の光学系に合わせて引き渡すことである。しかしながら 3-50BT ラインでは、RCS と MR のアパーチャの違いを調節するためのビームコリメータ (3-50BT コリメータ^{[1,2])} を有している。3NBT ラインが 324π mm mrad の物理アパーチャを持つものに対して MR の物理アパーチャは 81π mm mrad であるため、MR への入射ビームが大きなハロー成分を持つことが予想されたためである。J-PARC MR ではリングの入射直線部にもコリメータを有しているが、3-50BT コリメータとリングコリメータの二段構えで大強度運転に対応する。ビームパワー 500kW を超える大強度運転を行う際には、双方のコリメータでのビームロスバランスを考慮した運転が必要^[3,4,5]とされている。

3-50BT ラインの代表的な光学パラメータの一例と電磁石構成を Figure 1 に示す。一段目はベータ関数、二段目は運動量関数を示している。PB, B15U, B15D, BFIN は水平方向の偏向電磁石、BVD1, BVD2 は垂直方向の偏向電磁石である。3-50BT ラインは RCS-3NBT 系に対して光学マッチングを行うセクション、コリメータセクション、輸送セクション、MR への

光学マッチングセクションから構成される。3NBT ラインから MR 用のビームバンチのみを 3-50BT ラインへと振り分ける、振り分け電磁石(PB)の入口を 3-50BT ラインの起点と定義している。PB-QDS1 入口までがマッチングセクションである。PB-B15D 間にある 4 台の四極電磁石(QDE1, QFE1, QDE2, QFE2)で分散関数とその傾きをゼロとし、コリメータセクションでのビームサイズへの運動量分布からの寄与を無くす。これにより、純粋にビームエミッタンスでのハローカットが行える。B15D 以降の 4 台の四極電磁石(QDA1, QFA1, QDA2, QFA2)は、コリメータセクション入口への光学パラメータ合わせ用である。基本的にコリメータセクション、輸送セクションの光学系は不変とする。RCS においてビーム取り出しチューンが変更された場合などは、マッチングセクションで変更分を吸収する。ただし、分散関数のアクセプタンスが大きくない事に注意が必要である。PB 入口での分散関数値は、可能であれば 3 m 以下にしておくのが望ましい。

ビーム輸送ラインではロスの無い限り高精度なオペレーションは必須では無いが、3-50BT ラインではコリメータでハロー成分を精度良く制御する必要があるので、コリメータ上流で光学系パラメータを正しく押さえる必要がある。それについて、精度が高くプロファイル測定に頼らない「3 ステアリング・フィッティング手法^[6]」が確立され、その結果を基に測定系の増強が提案された。この手法を用いるとビーム位置モニター(BPM)によってもベータ関数を測定することが出来るため、BPM を増設することでコリメータセクションにおける光学系をより正確に把握することが出来る。また、これまでの運転経験からビームコリメータセクションでの軌道補正の必要性が高いことが認識されてきたため、ステアリン

[#]masashi.shirakata@kek.jp

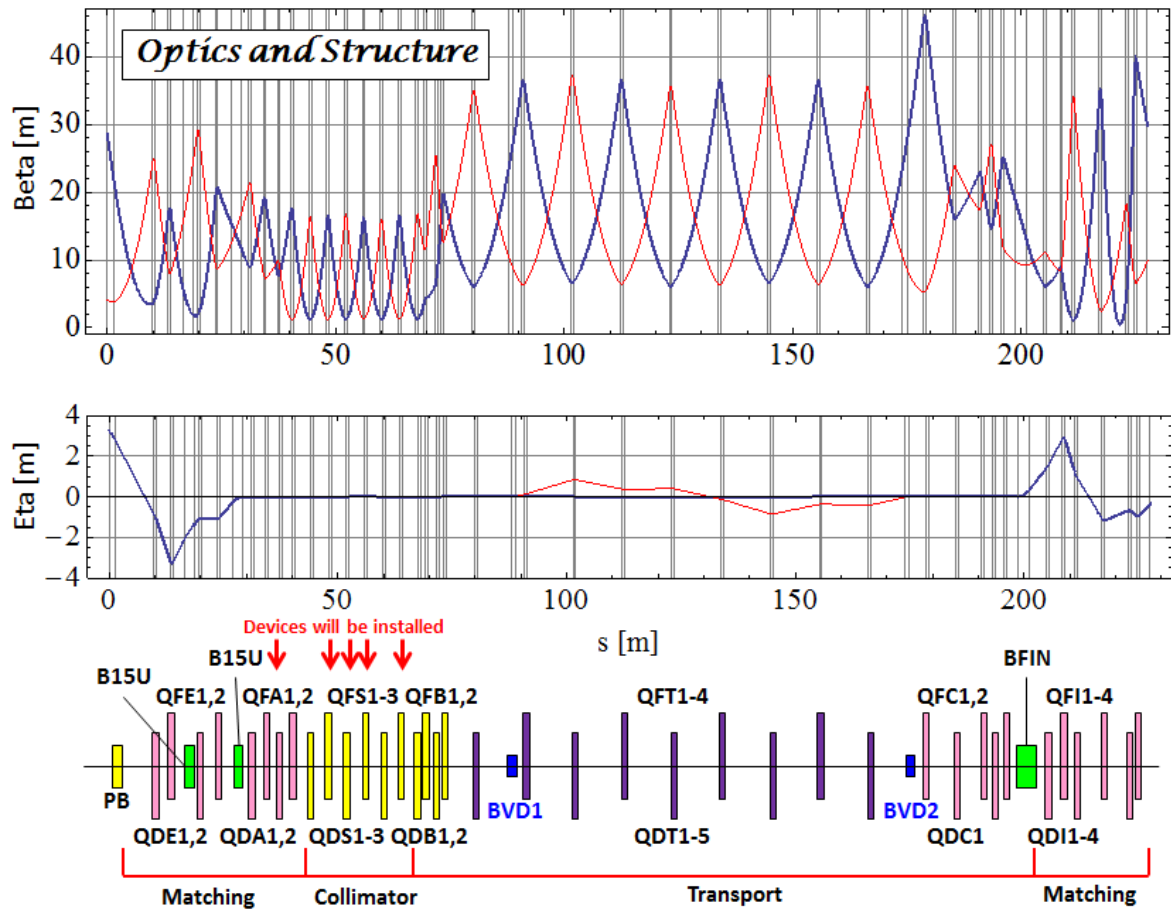


Figure 1: Schematic drawing and typical optics of the J-PARC 3-50BT line. Blue lines show the horizontal optics and red lines show the vertical one. Initial optical parameters are given on 13th January 2012, $(\beta_x, \alpha_x) = (28.618, 2.343)$ for the horizontal plane, $(4.086, 0.272)$ for the vertical plane, $(\eta_x, \eta'_x) = (3.255, -0.249)$ for the horizontal plane, and the vertical dispersion is zero.

グ電磁石の増設も併せて行うこととした。以下の章で、それらを述べる。

2. 機器の増強

2.1 MRPM の増設

Multi-ribbon profile monitor (以下 MRPM) はビームプロファイルを測定するモニターである。すでに 3-50BT には 9 台の MRPM (一部モニターはワイヤー仕様) がインストールされているが、コリメータ上流でのビーム光学系の測定精度を上げるため、QDA2 上流に 1 台を増設する。MRPM の実物を Figure 2 に示す。MRPM では外形 280×300 mm のセラミックスフレーム上にターゲットとして薄いリボン電極を 32 ch 配置したものを用意し、それらを直線導入機により横方向からビームライン上に出し入れする。陽子ビームがリボン電極を透過する際にその強度に応じた二次電子を放出させるため、電極に流れ込む電荷積分量の分布から一軸方向の陽子ビーム密度を測定することが出来る。これを J-PARC では SEEM と呼び、リボン電極を配置したセラミックスフレーム全体を SEEM ターゲットと呼んでいる。

SEEM ターゲットは水平方向用と垂直方向用のものをそれぞれ用意するが、モニター位置での光学系に合わせてリボンのピッチを最適化する。QDA2 上流の β_x, β_y はともに 10 m 程であること等を考慮し、今回製作するものは水平方向用を 2.5 mm ピッチ、



Figure 2: MRPM installed at the upstream of QDT1 magnet.

垂直方向用を 3 mm ピッチとした。ターゲットの材質には 5 μm 厚カーボン^[7]を第一候補としているが、変更する可能性もある。

MRPM は直線導入機の最大挿入時に SEEM ターゲット中心がビーム軌道中心と重なるように設置する。設置位置精度は $\pm 0.2 \text{ mm}$ である。

2.2 BPM の増設

Beam position monitor (以下、BPM) を設置するコリメータセクションでは、常時ビームロスによる二次粒子が飛び交っている。電極面積の大きい静電型 BPM などでは電極に飛び込む二次荷電粒子の影響が無視出来ず、測定誤差を大きくする原因となる。そのため、ここでは二次粒子によるノイズの影響を受けにくいループカップル型の BPM を採用した。当初は四極電磁石内に納めることも提案されたが、形状的な制約から四極電磁石下流部に設置する方式を採った。Figure 3 に概念図を示す。ダクトの右端(下流端)が BPM 本体である。BPM 本体の上下左右にループ型電極を取り付け、ループ内を通過する磁束に応じた電気信号を検出してビーム位置を算出する。コリメータセクションの四極電磁石用ビームパイプは内径 164 mm であり、電極位置もそれに揃えてある。電極の口出しは電磁石コイルの陰に隠れない様、十分外側に出す。

増設する BPM の位置測定精度は、相対精度 $\pm 0.1 \text{ mm}$ である。絶対位置測定に重要な BPM 取り付け精度は $\pm 0.5 \text{ mm}$ であるが、これには Beam-based alignment によるオフセット測定で改善を見込む。四極電磁石 QFS1, QFS2, QFS3 の 3 台について既存のビームパイプと交換し、コリメータセクションでのビーム軌道を常時モニターする。

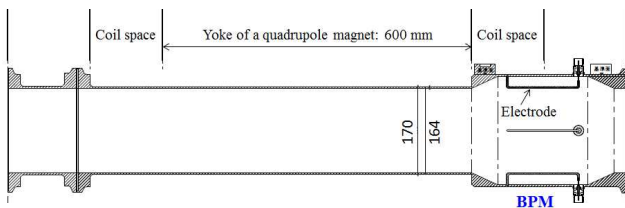


Figure 3: Loop-couple type beam position monitor.

2.3 ステアリング電磁石の増設

3-50BT ラインにおいてコリメータまでの区間にあるビームステアリングは STM-V, STM-H, STM-VH01, STM-VH02 の 4 台である。STM-VH シリーズはもとも水平垂直両対応型の偏向電磁石であるが、VH01 は水平用、VH02 は垂直用のみの使用としてきた。水平方向については B15D 等がステアリングを兼ねる事が出来るので、実は軌道変位への対応能力が高い。一方、垂直方向のステアリングは QDE1 上流の STM-V と QDS1 上流の STM-VH02 の 2 カ所しか無く、コリメータセクション直前での真っ直ぐな軌道作成がやりにくくなっている。電源を増設することで STM-VH01 を本来の水平垂直両用型として

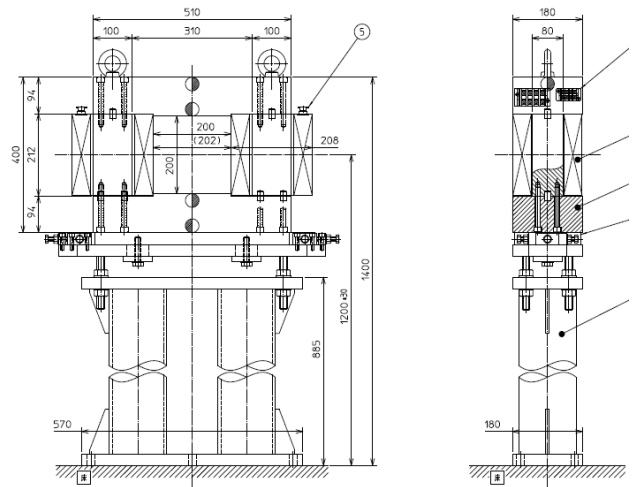


Figure 4: Steering magnet for the collimator area. (preliminary design)

運用し、コリメータへ入射する軌道を改善する。増設する電源は $\pm 150 \text{ A}$, $\pm 20 \text{ V}$ 程度であり、旧 KEK-PS から適当なものを流用する。

コリメータセクションではビームハローを効率的に削り落とすため、位相の進みが他のセクションに比べて速くなっている。コリメータセクションに入射してくる軌道の誤差、あるいは電磁石のアライメントエラーによりコリメータセクション内でもある程度の軌道変位が発生するが、セクション後半部では特にその変位が大きくなりやすい。これに対応するため、コリメータセクション中央部に Figure 4 の様な軌道補正用ステアリング電磁石を 2 台増設する。QDS2 下流には Figure 5 に示すようにコリメータ unit05 があり、コリメータダクト上流側の首部を覆う様に垂直方向用ステアリング電磁石を設置する。ビーム方向の利用可能な長さはコリメータダクトの長さで決まっており、180 mm である。現在コリメータシールドから首部を支えている機構はすべて取り外し、ステアリング電磁石からフランジを直接支えるように変更する。同様に QFS2 下流にはコリメータ Unit07 があり、水平方向用ステアリング電磁石を設置する。水平方向用ステアリング電磁石は、前節で述べた BPM のすぐ下流に置かれるわけである。

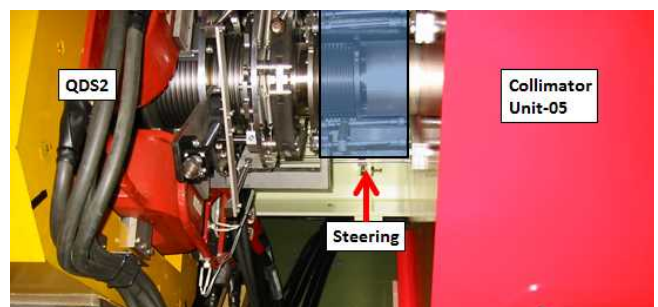


Figure 5: Free space for a steering magnet.

3-50BT ラインの既存のステアリング電磁石はビームスタディ時に軌道を大きく振れるよう 2 mrad 以上の曲げ角を出せるようになっていたが、今回は高放射線場に置かれる事や設置スペースに大きな制約があることから通常運転時の利用に対応できることに主眼を置いた。仕様を Table 1 に示す。空冷型で、設置や撤去時に真空の締結を外す必要のない構造とする。電源は $\pm 25A$, $\pm 20V$, ripple(p-p) $< 10^{-4}$, stability(8h) $< 10^{-4}$ のものを新規に調達し、D1 電源棟内に設置する。

Table 1: Specification of steering magnet

Items	values
Core size	180 x 400 x 500 mm
Gap height	200 mm
Conductor	IMW 2x8
Coil	480 turns per coil
Max. current	25 A
Resistance at 20°C	0.59 Ω
Max. voltage at 60°C	17.5 V
Bending angle	> 0.5 mrad
Weight	480 kg

2.4 QSC 電磁石電流分流器

QDS1 から QFB2 までの 10 台の四極電磁石を、その形状から QSC 電磁石と呼ぶ。3-50BT ラインでは四極電磁石の多くが個別励磁可能な構成となっており、励磁量を独立に変化させて下流の BPM における軌道変位の観測から、四極電磁石位置でのビーム軌道を推定することが出来る。コリメータセクションにおいて推定されたビーム軌道を Figure 6 に示す。これは BPM による直接測定、コリメータによるビームエッジ検出、および四極電磁石励磁量変更による測定の合成である。ただしコリメータ部の QDS, QFS 電磁石群はそれぞれ 3 台がシリーズになっており、信頼度が他の測定に比べて低い。

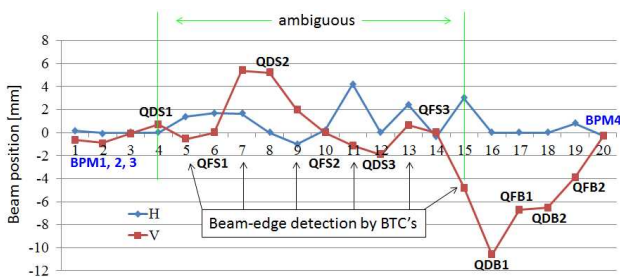


Figure 6: Reconstructed beam orbit in the collimator section by changing a focusing strength, with data obtained by other methods. These were measured during 3th to 16th November 2012.

QDS, QFS ファミリーの励磁量を個別に変化させることが出来れば、増設 BPM と相補的な測定をすることが可能となる。通常、このような目的のためには各電磁石に補助コイルを巻き、別電源による磁場を重畳するといった方式を採る。ところが、QSC 電磁石に必要な補助コイルを巻くことは、構造上困難であった。そこで、Figure 7 に示す様に個別の電磁石に抵抗値可変なバイパス抵抗を並列接続することにより、励磁量を個別に変更できるようにする。電子負荷も検討したが、取り合い点からのケーブルを長くとれないという制約があり、水冷抵抗器方式を採用することとした。水冷抵抗器 6 本を組み合わせ、約 8A ステップで 50A まで分流する。消費電力は最大で 2.2 kW であり、必要な冷却水量として 10 l/min 程度を既設ステアリング電磁石用の配管から分岐して賄う。

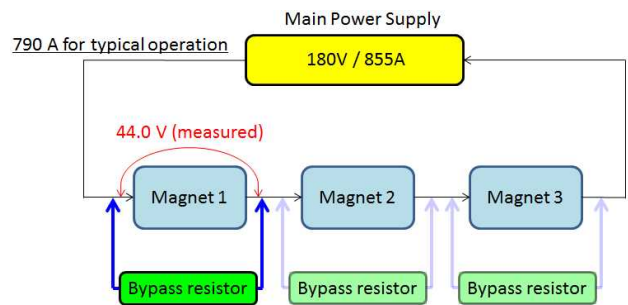


Figure 7: Current bypass for QDS/QFS quadrupole magnet family. Bypass resistor handles the magnet 1, 2, 3, individually.

2.5 QSC 電磁石冷却水ホースの金属化

3-50BT ラインの電磁石では冷却水系に EPDM 製のホースを使用しているが、Figure 8 に示すようにコリメータセクション内に設置してある QSC 電磁石群でも状況は同じである。これはコリメータセクション全体でのビームロスの設計が当初 450W とされていたためであるが、現在は門型放射線遮蔽設備

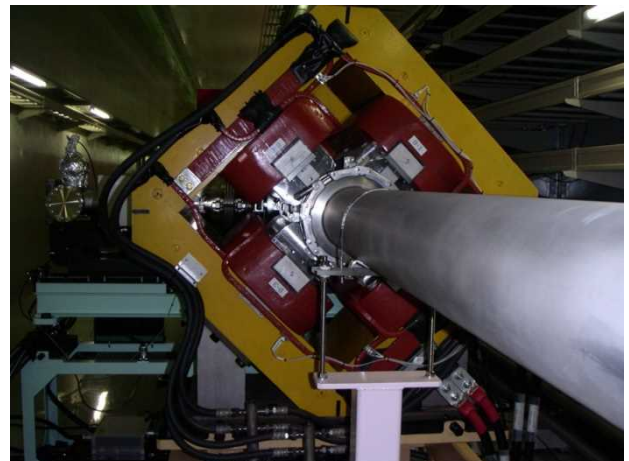


Figure 8: EPDM hoses on QSC quadrupole magnet.

^[8]などの増築により、2kW のビームロスまで受け入れ可能となっている。この様な大きなビームロスに対応するため、QDS1 から QFB1 までの 8 台の四極電磁石について、冷却水系を金属化する。既設の冷却水ヘッダーごとホースを撤去し、新しいヘッダーを通路側に寄せて取り付ける。チュービングには銅管を用い、電磁石コイルを形成するホローコンダクタ間の電気絶縁をとるために、各水回路の途中に Figure 9 に示す $\phi 12$ mm のセラミックス製チューブを挿入する。この改造により、耐放射線性が向上すると見込んでいる。

May 23-28, 2010 (4246-4248)

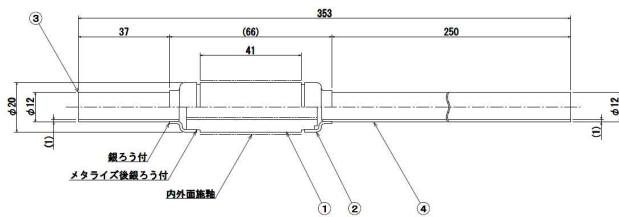


Figure 9: Ceramic tube for electrical isolation.

3. まとめ

J-PARC 3-50BT ラインではビームコリメータによるエミッタンス制御の精度を上げるため、いくつかの機器の増設を行う。光学系の測定のためにコリメータ直前に MRPM を 1 台、コリメータセクション内に BPM を 3 台増設する。また電流分流器によりコリメータセクションのシリーズになっている QDS/QFS 四極電磁石の励磁量を個別に変更できるようにする。これにより、当該セクションでのビーム軌道とベータ関数が正確に追えるようになる。また、ステアリング電磁石の増設により、コリメータセクション内での軌道補正も行える。これらの機器増強により、2014 年以降に実施を予定する大強度運転に対応した、種々のビームパラメータ測定と高度なオペレーションが可能となる見込みである。

参考文献

- [1] M. J. Shirakata et al., "Beam Collimator System in the J-PARC 3-50BT Line", Proceedings of EPAC2006, Edinburgh, Scotland, Jun. 26-30, 2006 (1148-1150)
- [2] M. Shirakata et al., "J-PARC 3-50BT ビームコリメーションの現状", Proceedings of PASJ9, WEPS092, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012 (645-648)
- [3] H. Hotchi et al., Proceedings of IPAC'12, New Orleans, USA, 2012 (3918-3920)
- [4] H. Harada et al., Proceedings of 2012 Hadron Beam workshop (HB2012), Beijing, China, 2012 (339-343)
- [5] Y. Sato et al., Proceedings of IPAC'11, San Sebastian, Spain, 2011 (598-600)
- [6] H. Harada et al., Proceedings of PASJ10, SAOS01, Nagoya, Japan, 2013
- [7] Y. Hashimoto et al., "Multi-ribbon Profile Monitor Using Carbon Graphite Foil for J-PARC", Proceedings of HB2010, Morschach, Switzerland, 2010 (429-433)
- [8] M. J. Shirakata et al., "Upgrade of Radiation Shield for BT Collimators", Proceedings of IPAC2010, Kyoto, Japan,