

J-PARC 3-50BT ラインにおける光学系の調整

OPTICS TUNING AT THE J-PARC 3-50BT LINE

原田寛之^{#, A)}, 明午伸一郎^{A)}, 白形政司^{B)}, 佐藤洋一^{B)}, 田村文彦^{A)},
手島昌己^{B)}, 橋本義徳^{B)}, 五十嵐進^{B)}, 小関忠^{B)},
Hiroyuki Harada^{#, A)}, Shin-ichiro Meigo^{A)}, Masashi Shirakata^{B)}, Yoichi Sato^{B)}, Fumihiko Tamura^{A)},
Masaki Tejima^{B)}, Yoshinori Hashimoto^{B)}, Susumu Igarashi^{B)}, Tadashi Koseki^{B)}

^{A)} JAEA/J-PARC

^{B)} KEK/J-PARC

Abstract

The J-PARC 3-50BT line is the beam transport line from 3-GeV rapid-cycling synchrotron (RCS) to 50-GeV main ring (MR). The RCS is the high-intensity proton accelerator, where designed beam power is 1 MW, and has the complex source of space charge effect, etc. Therefore, the uncontrolled emittance growth and beam halo increase nonlinearly with the increasing the beam power. Additionally, the physical aperture of MR with 81π mm mrad is smaller than that of RCS with 486π mm mrad. Therefore, the 3-50BT line has the collimators in order to scrape the tail or the halo of the extracted beam from the RCS. The designed collimator aperture is 54π mm mrad. It is required to measure and optimize the optics parameter in the collimator area for taking full advantage of the beam collimation. This paper will introduce the method of optics measurement and report the result of the measurement and optimization based on the simulation.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC は、400MeV リニアック、速い繰り返し の 3GeV シンクロトロン (RCS; Rapid Cycling Synchrotron)、50GeV シンクロトロン (MR; Main Ring) の 3 基の加速器群から構成される^[1]。RCS は、25Hz という速い繰り返しでリニアックから入射された陽子ビームを 400 MeV から 3 GeV へと加速し、物質・生命科学実験施設 (MLF; Material and Life science Facility) へのビーム供給と、MR への入射の 2 つの役割を担っている。最終目標は 1MW の大出力運転を目指している。MR は RCS から入射されたビームを 30 GeV まで加速し、最先端の基礎科学実験であるニュートリノ実験施設および原子核実験施設へとビーム供給を行う。RCS や MR のような大強度陽子加速器では、空間電荷効果が最終的に到達可能なビーム出力に強い制限を与える。空間電荷効果それ自身や、空間電荷と周期的な外場とが複合的に絡み合っ て生じる様々な共鳴現象がエミッタンス増大やビーム損失の原因となりうる。RCS の物理アパーチャとコリメータアパーチャは、 486π mm mrad と 324π mm mrad であるが、後段の MR では 81π mm mrad と 54π mm mrad と小さく、RCS では大強度時のビームハローの削減に向けた研究を精力的に行っているが、MR コリメータのみでは許容できない可能性がある^[2,3]。そのため、一般的なビーム輸送ラインの役割とは異なり、ビームを所定のエミッタンスまで削る、もしくは所定の許容出力まで削るために、RCS と MR を繋ぐビーム輸送ライン (3-50BT) にコリメータを設置している。3-50BT

と MR のコリメータの許容出力は各々 2 kW であり、MR のさらなるビーム出力増強に向けて、無用なビーム損失をリング内のコリメータのみで回収させず、3-50BT と MR の 2 箇所のコリメータ部に許容出力範囲内で分配することが必須となる^[4]。この性能を十分に発揮するためには、MR のリング内と同精度に、3-50BT での光学系を把握ならびに調整する必要がある。加えて、3-50BT のコリメータや開発中の OTR^[5]などでビームプロファイルやハローを計測し、RCS のパラメータに対する定量的な議論のためにも 3-50BT で光学系を把握することは重要である。

2. 3-50 beam transport line (3-50BT line)

J-PARC 3-50BT ラインを Figure 1 に示す。RCS から取り出されたビームは、RCS から MLF のターゲットまでの 3-NBT ライン^[1]に設置されたパルス偏向電磁石 (PB) を励磁することで、MR への入射の際に 3-50BT ラインへと振り分けられる。3 台の水平方向の偏向電磁石 (B15U, B15D, BFIN) と 2 台の垂直方向の偏向電磁石 (BVD1, BVD2) と 36 台の四極電磁石を約 228m のラインに配置し、MR の入射部へとビームは導かれ、最終的に MR の入射部に設置された 2 台の水平方向の入射セプタム電磁石と 3 台の水平方向のキッカー電磁石によって、MR リングへとビーム入射が行われる。3-50BT では、コリメータ領域を要し、その領域の 7 台の四極電磁石間に 2 ユニットずつを配置している。奇数と偶数ユニットでは L 型の 2 軸可動式の散乱体の向きを逆にしており、2 ユニットで一つの組を構成している^[6]。位相空間上において約 22 度位相のずれた二つの六角形で整形する。各々のコリメータには上下左右に遮蔽体を配置し、許容出力は 2 kW である。

[#] hharada@post.j-parc.jp

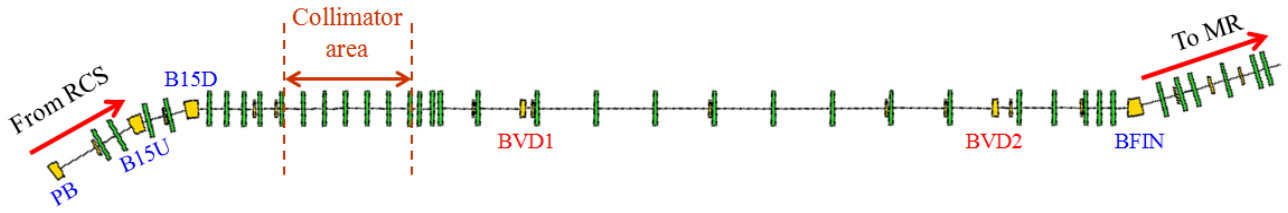


Figure 1: Schematic view of J-PARC 3-50 beam transport line from PB magnet to front of 1st injection septum magnet. Yellow and green components are bending and quadrupole magnets, respectively.

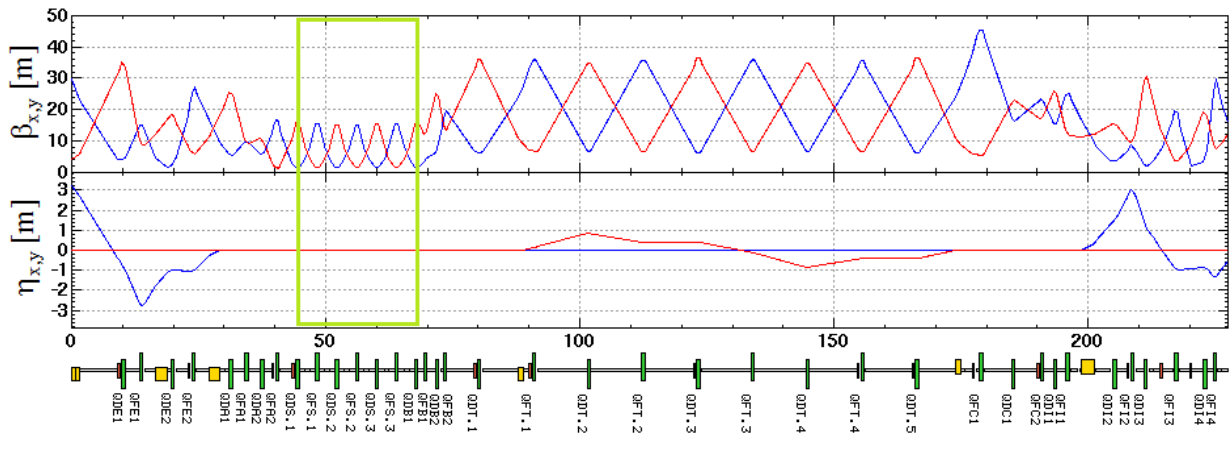


Figure 2: Designed optics parameters in 3-50 BT. Top and bottom plots are beta functions (β) and dispersion functions (η) for beam line or longitudinal direction s [m], respectively. Blue and red lines are horizontal and vertical plane, respectively. Light green region is the collimator area of 3-50BT.

3-50BT の光学パラメータ(ベータ関数と分散関数)を Figure 2 に示す。PB 入口が 3-NBT ラインからの光学系の取り付け点である。3-50BT の設計思想として、最上流の四極電磁石 4 台(QDE1,QFE1,QDE2,QFE)を用いて、B15D の出口での分散関数とその傾きをゼロにする。それにより下流のコリメータ部におけるビームの運動量広がりに対するビームの広がりを無くし、横方向の所定のエミッタンスを削る。次の 4 台の四極電磁石(QDA1,QFA1,QDA2,QFA2)で コリメータ部の入り口の光学パラメータをマッチさせ、2 ファミリーの四極電磁石 6 台で構成された コリメータ部の光学系を決める。コリメータ部より下流は、物理アパーチャでビーム損失しない光学系を設定し、最下流の四極電磁石数台を用いて、MR への入射マッチングを行う。

設計段階とは異なり、RCS や 3-NBT での光学系を変化させた場合には、3-50BT の光学系も大きく変化する。実際に RCS での光学系はビーム強度に応じて最適解を導出し、変化させてきた。その度に 3-50BT の光学系を精度よく調整しなければならない。特にコリメータ部での分散関数をゼロに調整、ならびにベータ関数の把握を統一的に行うことが、今後の MR 強度増強時のコリメータバランスのシナリオには重要となる。本稿では、ビーム輸送ラインにおける新たなベータ関数測定を紹介しつつ、光学パラメータの測定手法と結果、計算モデルに基づく調整手法と結果について述べる。

3. 光学パラメータの測定

3-50BT に設置してある 14 台のビーム位置検出器(BPM)^[7]と 9 台のプロファイルモニタ(PM)^[8]を用いて、光学パラメータ(分散関数、ベータ関数)の測定を行った。

3.1 分散関数測定

一般的な分散関数は、運動量の変化に対するビームの中心軌道や閉軌道の応答から測定する。水平方向を例とした関係式は、以下である。

$$\Delta x(s) = \eta_x(s) \frac{\Delta p}{p_0}$$

ここで Δx は中心軌道の変動量、 η_x は分散関数、 $\Delta p/p_0$ は運動量の変化量である。RCS の取り出し時の中心運動量を(-0.2%, -0.1%, 0%, 0.1%, 0.2%)と変化させ、その際に 14 台の BPM と 9 台の PM でビーム重心を測定した。運動量の変化に対するビーム重心の変化の応答より、各モニタにおける分散関数を導出した。その結果を Figure 3 に示す。4 章で述べる補正を行う前の測定結果であり、計算値と大きくずれ、コリメータ部で水平方向の分散関数がゼロになっていないことがわかる。分散関数をゼロに調整できない限り、運動量の広がりが横方向の広がりへと直接繋がりが、コリメータで所定の横方向エミッタンスを削ることができないため、補正は最重要課題となる。

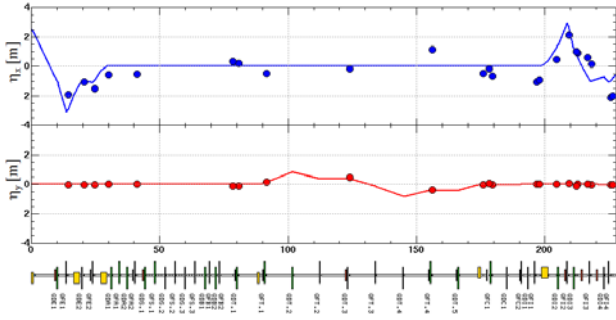


Figure 3: The result of dispersion function measurement. Top and bottom is horizontal and vertical plane, respectively. Lines and dots are setting optics by QMs and the measured dispersion function of the monitors, respectively.

3.2 新たなベータ関数測定手法

ビーム輸送ラインにおけるベータの測定手法には、様々な手法があり、ビームプロファイルのビーム幅からエミッタンスを仮定して見積もる手法、四極電磁石の励磁量に対する下流のビームプロファイルモニタ (PM) でのビーム幅の変動から見積もる手法 (Q スキャン法) などが挙げられる。これらの手法では、PM の位置でのみの測定、運動量広がりや分散関数による分布の広がり、四極電磁石の励磁量が既知であるという前提など、制限される要素が多い。四極電磁石の設定値と励磁量の違いや PM に数量に制限があるようなビーム輸送ラインでは、ライン全体の統一的な光学系を解釈することは困難となる。本稿で述べる新たなベータ関数測定の手法は、2 台以上の偏向電磁石やステアリング電磁石の蹴り角に対する下流に設置しているモニタでのビーム重心の変動からモニタでのベータ関数を求める手法である。

1 台目と 2 台目の電磁石の蹴り角を各々 $\Delta x'_1$, $\Delta x'_2$ とすると、電磁石より下流の m 番目のモニタでの位置の変位は、輸送行列 M の行列要素 M_{12} により、

$$\Delta x_{1m} = \sqrt{\beta_1 \beta_m} \sin(\phi_{1m}) \Delta x'_1$$

$$\Delta x_{2m} = \sqrt{\beta_2 \beta_m} \sin(\phi_{2m}) \Delta x'_2$$

となる。ここで β_1 , β_2 , β_m は各々電磁石とモニタでのベータ関数で、 ϕ_{1m} と ϕ_{2m} は各電磁石とモニタ間の位相差である。1 台目の電磁石が 2 台目より上流に設置されているとすると、位相差は $\phi_{1m} = \phi_{12} + \phi_{2m}$ であり、この関係を代入し整理すると、

$$\beta_m = \left\{ \frac{\Delta x_{1m} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} - \Delta x_{2m} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \cos(\phi_{12})}{\pm \sin(\phi_{12})} \right\}^2 + \left(\frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \right)^2$$

となる。この式を「ベータ関数導出式」とする。この関係式からわかるように、各偏向電磁石や各ステアリング電磁石のベータ関数や位相差が分かれば、

電磁石の下流のモニタでの蹴り角に対するビーム重心の応答から m 番目のモニタでのベータ関数を求めることができる。つまり、モニタ間の四極電磁石の励磁量に誤差があり、輸送行列が不正確であったとしても、ビーム重心を測定できる BPM や PM でのベータ関数を測定することが可能ということである。

この手法では、使用する電磁石でのベータ関数 (β_1 , β_2) や電磁石間の位相差 (ϕ_{12}) を既知であることを前提としている。それらの値に計算値や精度の悪い測定値を用いた場合には、モニタでの測定ベータ関数に不確定差が生じる。しかし、もし 3 台の電磁石で蹴り角を与えることが可能で、電磁石の下流に 5 台以上のモニタで測定が可能な場合には、最小二乗法を用いて、各電磁石のベータ関数と各電磁石間の位相差を見積もることができる。その手法を「3 ステアリング・フィッティング手法」とし、その手法に関して以下に述べる。

3 台の電磁石を用いると 2 台の組み合わせは 3 組でき、 m 番目のモニタにおいて、以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} \sin(\phi_{23}) + \frac{\Delta x_{3m}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3}} \sin(\phi_{12}) - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \sin(\phi_{13}) = 0$$

ここで、 $\phi_{13} = \phi_{12} + \phi_{23}$ であり、真値 β_1 , β_2 , β_3 , ϕ_{12} , ϕ_{23} に誤差が生じた場合には、右辺は 0 でなくなり、以下の式のように有限な値 $A_m (\neq 0)$ を持つ。

$$\frac{\Delta x_{1m}}{\Delta x'_1} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} \sin(\phi_{23}') + \frac{\Delta x_{3m}}{\Delta x'_3} \frac{1}{\sqrt{\beta_3}} \sin(\phi_{12}') - \frac{\Delta x_{2m}}{\Delta x'_2} \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \sin(\phi_{12}' + \phi_{23}') = A_m$$

モニタの台数が M の場合の

$$\chi^2 = \sum_{m=1}^M (A_m)^2$$

が最小 ~ 0 となるような 5 つの未知数を最小二乗法で求める。各電磁石でのベータ関数と位相差が求まり、それよりモニタでのベータ関数が求まる。

本稿で述べた新たなベータ関数の測定手法の利点としては、

- 電磁石の蹴り角の不定性は容易に求められること。
- ビームプロファイルのビーム幅のデータは用いず、ビーム重心のデータのみを用いるため、分散関数などの影響がないこと。
- PM のみならず BPM においても測定可能であること。
- 蹴り角に対するビーム重心の応答は線形であり解析が容易であること。
- 3 台以上の電磁石があれば、測定された蹴り角に対するビーム重心の応答のみがあればいいこと。

などが挙げられ、最終的に不確定性の少ないベータ関数測定ができる。なお、水平方向を意味する x で説明したが、垂直方向も同様の手法である。

3.3 ベータ関数測定

第 2 章でも上述したように 3-50BT ラインの光学系は、上流の RCS や 3-NBT ラインの光学パラメータによって、取り合い点(PB 入口)のパラメータが大きく変化する。そのため、上流の設定にマッチした光学系を 3-50BT ラインで構築すべく、四極電磁石を最適化する必要がある。加えて、3-50BT ラインに設置してある四極電磁石は、磁束が飽和する領域で使用しなければいけないものもあり、励磁特性は線形性を持たないため、上流の四極電磁石と比較して励磁磁場に誤差を生じる可能性が高い。

3.2 節で上述した測定手法をこの 3-50BT で適応するにあたり、3-50BT ラインに設置してある最上流の四極電磁石(QDE1)より上流の偏向電磁石やステアリング電磁石を選択した。水平方向では、上流から RCS の 3 台目の出射セプタム ESEP3、3-NBT の偏向電磁石 B01、3-50BT ライン最上流の PB の計 3 台である。垂直方向では、上流から 3-NBT ラインのステアリング電磁石 Y01、3-50BT ラインの最上流部のステアリング電磁石 ZSV01 の計 2 台である。まず、この選択した電磁石に関して、各々の電磁石と直下流の BPM の間をドリフトスペース(四極電磁石の励磁オフ)にして蹴り角の校正を行った。

水平方向における 3 台の電磁石での蹴り角に対する 1 台目の BPM でのビーム重心の応答を Figure 4 に示す。各々の電磁石での蹴り角は、3-50BT ラインでのビーム損失が生じないような設定を行い、3 から 7 点の異なる蹴り角で測定を行い、ビーム重心の測定では 5 ショットのデータを取得している。このデータを線形フィットにより応答成分 $\Delta x_i/\Delta x_j$ を求める。ここでの i はモニタ ID、 j は電磁石 ID である。この解析を全モニタと全電磁石に対して行った。

3 台の電磁石を用いているため、3 組のペアを選択できる。まず、モデル計算で導出した各電磁石でのパラメータ ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \phi_{12}, \phi_{23}$) を 3.2 節で述べた「ベータ関数導出式」に代入し、測定より得られた応答成分 $\Delta x_i/\Delta x_j$ から各モニタでのベータ関数を求めた。その結果、3 組で導出したベータ関数間で大きな違いが見られた。これはモデル計算で導出したパラメータが真値と異なるためである。そこで、3.2 節で上述した「3 ステアリング・フィッティング手法」を用いて、各電磁石でのパラメータを導出した。応答成分 $\Delta x_i/\Delta x_j$ を使用したモニタは、3-50BT ラインの 14 台の BPM である。各パラメータの χ^2 の結果を Figure 5 に示す。全パラメータで最小値(~ 0)となるパラメータの解を導出した。Table 1 で示す解を「ベータ関数導出式」に代入し、測定より得られた応答成分 $\Delta x_i/\Delta x_j$ から各モニタでのベータ関数を求めた。その結果、3 組で導出した全モニタでの水平方向のベータ関数は、各々測定誤差の範囲で一致した。その測定結果を Figure 6 に示す。設計値のモデル計算と大きくずれていることが分かる。垂直方向に関しては、上流に 2 台の電磁石しかないため、「ベータ関数導出式」にはモデル計算で導出したパラメータを代入した。そのため、測定値は不確実性が多く存在し、Figure 6 での測定値は参考値でしかない。

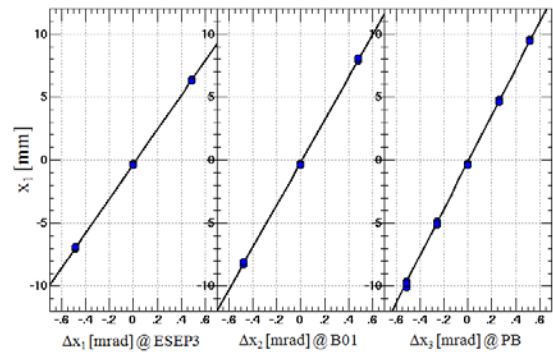


Figure 4: Response of beam position x [mm] at BPM1 for kick angle [mrad] of ESEP3 (left), B01 (center) and PB (right) magnets. Dots and Lines are the measured beam positions and linear fitted lines, respectively.

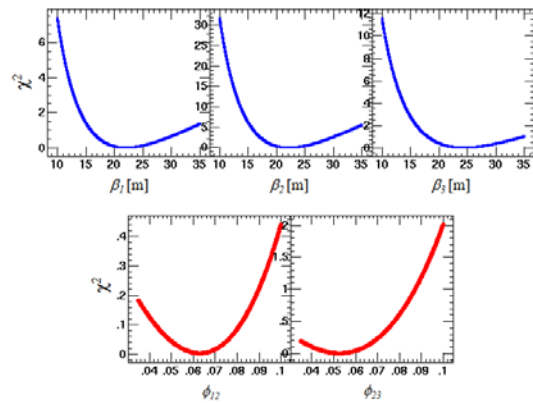


Figure 5: The results of “3 steering fitting method” for β (top) and ϕ s (bottom). Left, center and right plots in top one are β_1, β_2 and β_3 , respectively. Left and right plots in bottom one are ϕ_{12} and ϕ_{23} , respectively.

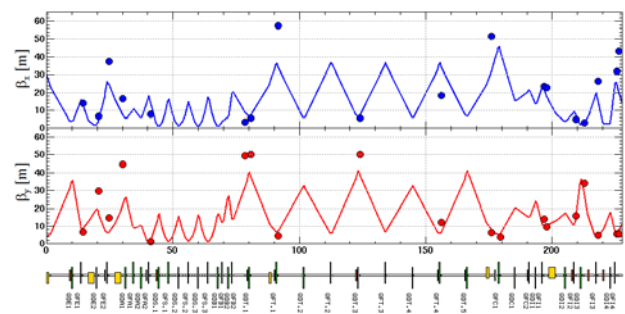


Figure 6: Designed (lines) and measured (dots) beta function at 3-50BT. Blue and red are horizontal and vertical plane, respectively.

Table 1: Calculated and estimated the parameters

パラメータ	モデル計算値	導出された解
β_1 [m]	22.51	22.01
β_2 [m]	21.52	22.14
β_3 [m]	25.35	24.37
ϕ_{12}	0.060	0.063
ϕ_{23}	0.046	0.053

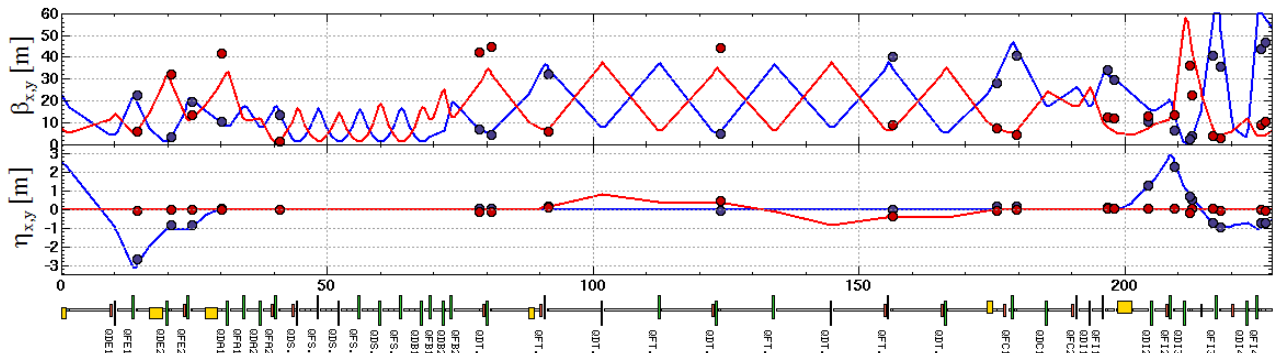


Figure 7: Calculated (lines) and measured (dots) optics parameters at 3-50BT after the dispersion function correction. Top and bottom plots are beta (β) and dispersion functions (η), respectively. Blue and red are horizontal (x) and vertical (y) planes, respectively. Measured beta functions (dots) for vertical plane (red) have uncertainty.

4. モデル計算に基づく分散関数補正

3-50BTでのコリメータ部で分散関数をゼロにすることが、コリメータの性能を確保する上で最重要である。そのためには、3 台目の水平方向の偏向電磁石 B15D の出口で分散関数とその傾きをゼロにする必要がある。そこで、B15D までの最上流部の 4 台の四極電磁石を設定値に近づける必要があり、4 箇所の分散関数の測定値をモデル計算に代入し、四極電磁石のずれ値を導出し、補正を行った。補正後の分散関数の測定値を Figure 7 に示す。また、分散関数の補正後、3.2 節で上述した手法を用いてベータ関数を測定した。その結果も Figure 7 に示す。本調整における最重要の課題であったコリメータ部における分散関数をゼロに調整でき、ライン全体においてもモデル計算と概ね一致した。ベータ関数に関しても、水平方向における測定値と計算値は概ね一致したが、垂直方向に関しては、現状 2 台のステアリング電磁石しかないため、「ベータ関数導出式」に計算値のベータ関数や位相差を代入した。そのため、測定精度に系統的な不確実性が生じており、現状では参考値として取り扱う。これらの結果より、ビーム輸送系における光学系の測定手法(ベータ関数と分散関数)を確立し、モデル計算に基づいて四極電磁石の補正用を導出し十分補正できるシステムを確立したと言える。

今後、ライン全体の四極電磁石において設定値とのずれ値を測定データから求めていく必要がある。そのためには、ベータ関数測定において不確実性を無くすこと、四極電磁石の台数に対するデータ点数が少ないためモニタ台数を増やすこと、垂直方向に関して、新たにステアリング電磁石を 3-50BT ラインの上流に追加することなどが求められる。そのため、今後段階的に 3-50BT ラインにおける機器増強が行われる予定である^[9]。特にコリメータ部にはモニタが 1 台も設置されておらず、光学系の調整に限らず、ビーム中心軌道の調整の観点からも早急な対策が求められる。2013 年の夏のメンテナンス期間において、3 台の BPM の追加や軌道補正用のステアリング電磁石の追加が計画されている。

5. まとめ

J-PARC RCS と MR 間のビーム輸送を行う 3-50BT ではビーム増強に伴って、非線形に増加する RCS の取り出しビームのビームハローを削り、ビーム整形の機能を持つコリメータを設置している。この性能を十分に発揮するためには、MR のリング内と同精度に、3-50BT での光学系を把握ならびに調整する必要がある。本研究では、新たなベータ関数測定手法「新ベータ関数測定手法」ならびに「3 ステアリング・フィッティング手法」を考案した。その手法に基づいてベータ関数の測定を行い、十分な精度で測定が可能な本手法を確立した。また、分散関数の測定を行い、最上流部の 4 台の四極電磁石を用いて、最重要課題であったコリメータ部での分散関数をモデル計算により四極電磁石のずれ値を導出し補正し、十分な調整ができた。今後、3-50BT におけるモニタの追加などのアップグレードとビーム調整試験を通じて、ビーム出力増強に向けた高精度の光学系の調整が可能な測定・調整システムの構築を目指す。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., Accelerator Technical Design Report for High Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI-Tech 2003-044 and KEK Report 2002-13, 2003.
- [2] H. Hotchi *et al.*, *Proc. 2012 International Particle Accelerator Conference (IPAC'12)*, New Orleans, USA, 2012, p. 3918.
- [3] H. Harada *et al.*, *Proc. 2012 Hadron Beam workshop (HB2012)*, Beijing, China, 2012, p. 339.
- [4] Y. Sato *et al.*, *Proc. 2011 International Particle Accelerator Conference (IPAC'11)*, San Sebastian, Spain, 2011, p. 598.
- [5] M. Tejima *et al.*, *this proceedings*, SAP078.
- [6] M. Shirakata *et al.*, *Proc. 9th Particle Accelerator Society of Japan*, Toyonaka, Japan, 2012, p. 645.
- [7] M. Tejima *et al.*, *Proc. 2010 International Particle Accelerator Conference (IPAC'10)*, Kyoto, Japan, 2010, p. 978.
- [8] Y. Hashimoto *et al.*, *Proc. 2010 Hadron Beam workshop (HB2010)*, Morschach, Switzerland, 2010, p. 429.
- [9] M. Shirakata *et al.*, *this proceedings*, SAOS03.