

J-PARC リニアック DTL の入射マッチング改善に向けた 中エネルギービーム輸送系 (MEBT1) のビーム測定 BEAM MEASUREMENT OF MEDIUM ENERGY BEAM TRANSPORT LINE (MEBT1) TO IMPROVE INJECTION BEAM MATCHING IN J-PARC LINAC DTL

楊井京輔 ^{*A), B)}, 飯沼裕美 ^{B)}, 大谷将士 ^{C)}, 近藤恭弘 ^{A), B)}, 平野耕一郎 ^{A)}, 宮尾智章 ^{C)}, 守屋克洋 ^{A)}
Kyosuke Yanai ^{*A), B)}, Hiromi Inuma ^{B)}, Masashi Otani ^{C)},
Yasuhiro Kondo ^{A), B)}, Koichiro Hirano ^{A)}, Tomoaki Miyao ^{C)}, Katsushi Moriya ^{A)},
^{A)JAEA, ^{B)Ibaraki University, ^{C)KEK}}}

Abstract

The J-PARC linac is operated with design peak current of 50 mA from 2018. Further, a higher beam current is being investigated for future projects at J-PARC. For operation with such a high beam current, it is required to understand parameters of beam especially in a medium energy beam transport (MEBT1) line between the 3-MeV RFQ and the 50-MeV DTL. MEBT1 is a 3-m-long transport line to match the beam to the DTL and produce a macro pulse configuration for a 3-GeV RCS. In this paper, recent measurements in MEBT1 and in a testbench of RFQ will be presented.

1. はじめに

J-PARC リニアックは RF 駆動イオン源で生成した H^- [1] を 400 MeV まで加速し、3-GeV シンクロトロン加速器 (RCS) に供給している。J-PARC リニアックは 3-MeV RFQ [2]、50-MeV DTL、191-MeV SDTL、400-MeV ACS の 4 つの加速空洞から構成される。RFQ と DTL の間及び SDTL と ACS の間にはそれぞれ、中間エネルギービーム輸送ライン MEBT1 及び MEBT2 を設置している。

J-PARC リニアックは 2018 年 10 月から設計ピークビーム電流 50 mA でビームを安定供給している。さらに、現在検討が進んでいる J-PARC 将来計画の実現のために、更なる大強度運転の検討および試験も実施している [3]。

現在の J-PARC リニアックは、ピーク電流の増加に伴って 2 段目の DTL 出射ビームのエミッタンスが初段 RFQ 出射ビームと比較して 20~30% 増加しており、ビームの安定供給や今後の更なる大電流化に向けて、ビーム損失による残留放射線の増加等が懸念されている。エミッタンス増加の原因として、DTL 入射ビームの不整合が考えられており、解決には RFQ-DTL 間の MEBT1 におけるビームの諸パラメータを正確に把握する必要がある。

MEBT1 におけるビームの光学計算には Q スキャン法で測定した RFQ 出射ビームのエミッタンスと Twiss パラメータを用いているが、この測定の系統誤差が現状では定量的に評価されていない。このため、予備用 RFQ 試験設備である RFQ テストスタンドを用い、実機エミッタンス測定との比較及び系統誤差の評価を目的として、ワイヤスキャナモニタ及び 2 重スリット型エミッタンスモニタで実機と同様にプロファイル測定を行った。

また、MEBT1 の BPM で得られるビーム重心位置の測定精度にも疑念があり、現在の DTL 入射ビ

ーム軌道の制御にも最適化の余地がある。このため、MEBT1 の重心位置情報の正確性確認のため、ビームベストアライメント (BBA) による BPM の中心確認と、BPM 本体の健全性確認を行った。本稿ではこれらの測定結果について述べる。

本稿の構成は以下の通りである。まず、J-PARC リニアック MEBT1 と RFQ テストスタンドの構成をそれぞれ 2 章と 3 章で説明する。その後 4 章で RFQ テストスタンドにおけるビームプロファイル測定結果について述べる。加えて 5 章では、MEBT1 における BBA による BPM の中心確認の結果について述べ、最後に 6 章として全体を通したまとめを述べる。

2. MEBT1

MEBT1 は RFQ と DTL の間の中間エネルギービーム輸送ラインである。約 3 m のビームラインに Fig. 1 のように機器が配置されている。MEBT1 の役割は大きく分けて次の 2 つである。1 つ目は、RCS 入射のための中間バンチ構造をつくることである。このために、RF Deflector (RFD) とスクレーパーが用いられる。2 つ目の役割は、下流の加速空洞 DTL へのビームマッチングのためのビーム整形を行うことである。このため、8 つの 4 極電磁石 (Q1 から Q8) と 2 つのバンチャー空洞が用いられる。

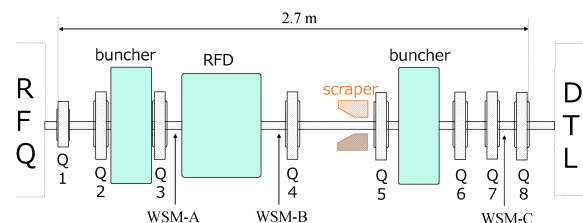


Figure 1: Schematic of MEBT1.

J-PARC リニアックの各セクションにはビームモニタが多数設置されており、MEBT1 にも数種のビームモニタが設置されている。その内、8 つの 4 極電

* yanaik@post.j-parc.jp

磁石の内側にそれぞれ設置されたビームポジションモニター (BPM01 から BPM08) [4] は、本論文 5 章で主要な役割を果たすものである。

3. RFQ テストスタンド

RFQ テストスタンド [5] は J-PARC リニアックの予備用 RFQ 試験設備であり、Fig. 2 のように機器が配置されている。J-PARC リニアックと同仕様の RFQ および MEBT1 と同仕様の 4 極電磁石 3 つ (Q1 から Q3) を備えている。ビームモニターとして Q1-Q2 間と Q2-Q3 間にそれぞれ WSM [6] (WSM1, WSM2) を設置したほか、Q3 より後方のチェンバーに 2 重スリット型エミッタンスモニター [5] を設置した。この WSM 2 台およびエミッタンスモニターを用いて、2 章で示すビームエンベロープ測定を実施した。

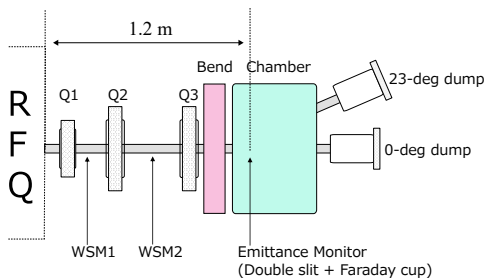


Figure 2: Schematic of RFQ teststand.

4. ビームエンベロープ測定

実機 MEBT1 の Q スキャン法によって算出されるビームパラメータとの比較を目的として、RFQ テストスタンドにおいて、WSM および 2 重スリット型エミッタンスモニターを用いてビームプロファイルの測定を行った。この測定も Q スキャン法の手法に則っている。目標とする Q1 または Q2 に対して、それぞれ他の 4 極電磁石を OFF にした状態で、電流値 0A を起点として通電する電流値を一定ずつ上昇させて複数の測定条件を設けた。現状として実機パラメータとの比較はまだ行うことができていないが、測定されたビームのエンベロープとシミュレーションの比較を行った結果を本章で報告する。

RFQ テストスタンドでのビームの諸パラメータの推定は、空間電荷効果を考慮してビーム輸送計算を行う必要がある。そのため、我々は PIC シミュレーション IMPACT [7] によるビーム輸送コードを用いて計算を行っている。

Figure 3 は 2020 年 4 月に測定した結果である。図中の曲線は IMPACT によるシミュレーション結果である。IMPACT によるシミュレーションは、ビームの初期条件として RFQ シミュレーションの結果を使用したものである。

図からわかる通り、4 極電磁石の電流値の変化によるビーム幅の収束と発散の傾向は一致している。x 方向の比較は測定と IMPACT の差は概ね 1mm 以内に収まっているが、y 方向では測定値と IMPACT に

2mm 以上の差があり、z が大きくなるにつれて x,y 方向ともに測定値との乖離も大きい。

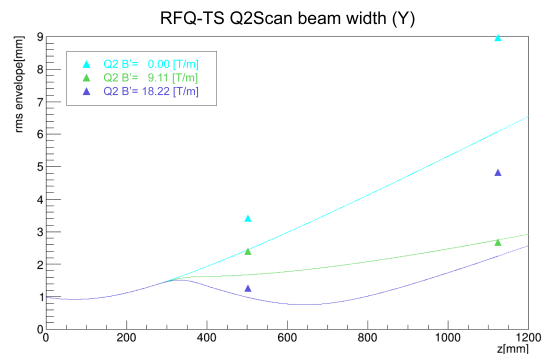
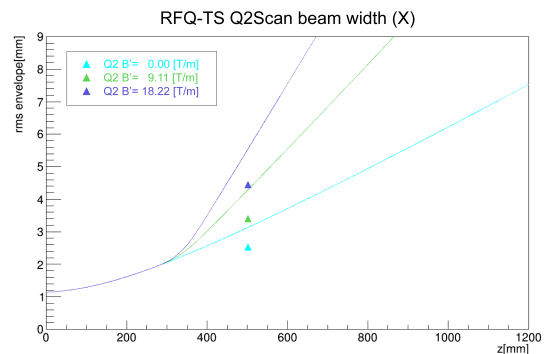
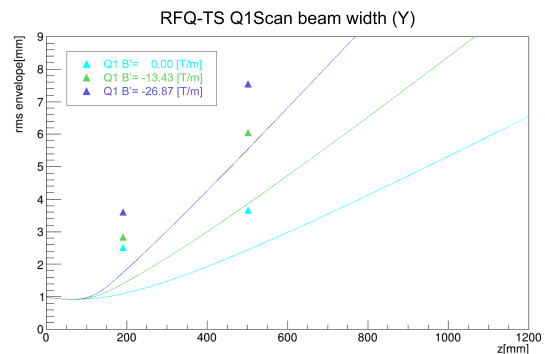
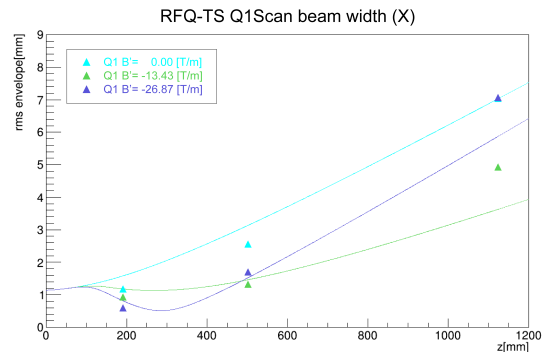


Figure 3: WSM measurements of the beam envelope at MEBT1. The results are compared with the simulation for Q1 and Q2 under three conditions: 0[A], in focus, and over-focus, independently of each other. The colors of the markers in the measurement results and the colors of the lines in the simulation are the corresponding measurement conditions.

この結果から、IMPACT の入力として使用している、RFQ シミュレーションから得られる初期ビームのパラメータが実際の RFQ 出射ビームと異なると考えられる。このため、今後測定データからビームの rms エミッタンスと Twiss パラメータを算出するほか、測定結果からシミュレーションを用いて初期ビームのパラメータの推測を行う方針である。

5. BEAM-BASED ALIGNMENT (BBA)

前章と独立して、実機 MEBT1 における BPM の offset の推定を Beam-based Alignment (BBA) [8] という手法を用いて行った。この取り組みは、BPM によって得られるビーム重心位置情報の中心が、4 極電磁石の中心とどの程度ずれているかを把握するものである。

BBA の原理は、BPM の示す中心の位置にビームを通過させ、その上で BPM と同じ位置にある 4 極電磁石を通电することで、ビーム軌道の変化の有無と程度を見るものである。BPM の示す中心が 4 極電磁石の中心と真に一致していれば、4 極電磁石の通电によってもビームの重心位置は変化しない。一方で、BPM の示す中心が 4 極電磁石の中心と一致せずずれていた場合、4 極電磁石の通电によってビームの重心位置が変化する。実際の測定時には 4 極電磁石の通电によるビーム重心位置の変化を測定するため、BBA を行う対象の BPM より後ろに別途もう一つ変化測定用の BPM が必要になる。

我々は 2019 年 9 月から 2020 年 4 月にかけて、BPM02, BPM03, BPM07 に対して BBA を行った。結果として、BPM02 の X 方向と BPM03 の Y 方向で 0.3mm 程度の中心の offset があり、BPM02 の Y 方向と BPM03 の X 方向では offset はないことが確認された。BPM の測定精度から、この offset はリニアックのビームの安定供給には影響が少ないと考えられる。

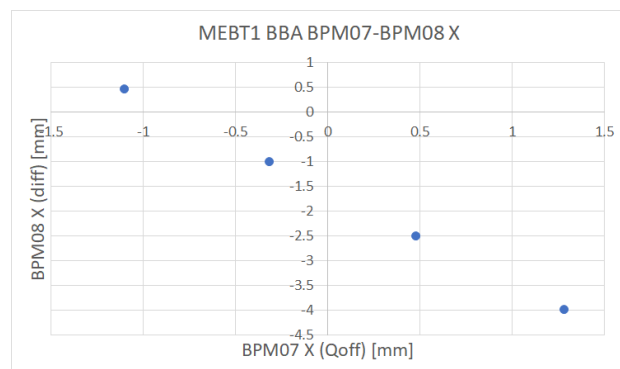


Figure 4: BBA results for MEBT1 in the BPM07x direction. The horizontal axis represents the center of gravity of the beam at BPM07. The vertical axis is the change in the gravitational center of gravity in BPM08 for the measurement of the change due to ON/OFF of Q7.

Figure 4 は、BPM07 に対して行った BBA の結果である。横軸が対象の BPM が示すビーム重心位置、縦

軸が 4 極電磁石の ON/OFF によって変化量測定用の BPM で生じるビーム重心位置の変化量 (差分) である。BPM07 の X 方向の結果を示した Fig. 4 では、測定点を結ぶ直線と横軸の値から、0.7mm の offset があることわかる。これらの結果は MEBT1 の BPM がビーム中心位置を正しく把握できていないことを示している。

一般的に BPM と 4 極電磁石の中心の不一致は、対象 BPM ・ 変化測定用 BPM の物理的なアライメントのずれのほか、電極やケーブルの異常に由来することがある。BBA によって判明した BPM の中心位置のずれの原因は様々な要因が考えられるため、現在調査中である。また、ビーム試験時間の都合により BBA を行えなかった残りの BPM についても、今後同様に行う予定である。

6. まとめ

J-PARC リニアックでは 2018 年 10 月から設計ピークビーム電流 50mA でビームを安定供給している。ピーク電流の増加に伴って MEBT1 のビームのパラメータを正確に把握する必要がある。

MEBT1 で行われている Q スキャン法によるビームパラメータの測定・算出との比較のため、RFQ テストスタンドで同じ手法による測定を行った。RFQ テストスタンドでの測定結果のうちビーム幅を、シミュレーションと比較したところ、y 方向で大きくシミュレーションと測定結果に乖離が見られたため、初期ビームとしてシミュレーションに使用している、RFQ 出射ビームのパラメータの見直しが必要であることがわかった。

また、MEBT1 において一部の BPM に対して BBA により 4 極電磁石との中心確認を行ったところ、0.7mm のずれが判明したため、原因を調査中である。

謝辞

本研究は日本原子力研究開発機構設ける特別研究生制度の枠組みで行われた。

参考文献

- [1] 大越清紀 他、第 15 回日本加速器学会年会論文集、pp. 889-892 (2018).
- [2] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, 17, 120101, 2014.
- [3] 大谷将士 他、第 15 回日本加速器学会年会論文集、pp. 216-219 (2018).
- [4] S. Sato *et al.*, Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.467-469, 2004.
- [5] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, 22, 120101, 2019.
- [6] A. Miura *et al.*, Proc. of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan, pp. 1008-1010, 2010.
- [7] J. Qiang *et al.*, J. Comput. Phys. 163, 434-451, 2000.
- [8] G. Shen *et al.*, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 595-597, 2007.