

J-PARC リニアック RFQ 出射ビームの測定とビーム調整 BEAM DIAGNOSTIC AND TUNING AT THE J-PARC RFQ EXIT

大谷将士^{*A)}、岡部晃大^{B)}、小栗英知^{B)}、近藤恭弘^{B)}、地村幹^{C)}、
二ツ川健太^{A)}、三浦昭彦^{B)}、宮尾智章^{A)}、守屋克洋^{B)}、劉勇^{A)}

Masashi Otani^{*A)}, Kota Okabe^{B)}, Hidetomo Oguri^{B)}, Yasuhiro Kondo^{B)}, Motoki Chimura^{C)},
Kenta Futatsukawa^{A)}, Akihiko Miura^{B)}, Tomoaki Miyao^{A)}, Katsuhiko Moriya^{B)}, Yong Liu^{A)}

^{A)}KEK, Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

^{B)}JAEA, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

^{C)}Tohoku University, Sendai, Miyagi, 980-8578, Japan

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 important to understand transverse and longitudinal beam properties especially in low-velocity region. A medium energy beam transport (MEBT1) line between the 3-MeV RFQ and the 50-MeV DTL 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 and beam tuning results in MEBT1 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]。

大強度化の方針としてピークビーム電流の増加とビームパルス幅延長の 2 つが考えられるが、ピークビーム電流の増加にはビーム診断によるビームパラメータの理解が必須となる。特に MEBT1 では速度が小さく ($v/c = \beta = 0.08$) 空間電荷効果が大きいので、ビーム測定及び調整が困難である。また、MEBT1 における縦方向の蹴り残しビームは RCS における主要なロスの一因となっているため、MEBT1 における縦方向分布は RCS ロスを理解する上でも重要である。近年、我々は MEBT1 のチョッパー空洞 (RFD) を用いた縦方向のビーム測定方法を確立し、40 mA においてシミュレーションで見積もった値と無矛盾なエミッタンスを得た [4]。本稿では設計ピークビーム電流 50 mA における横・縦方向のビーム測定結果及びビーム調整手法の改良について報告する。

本稿の構成は以下の通りである。まず、J-PARC リニアック MEBT1 の構成を 2 章で説明する。続いて 3 章及び 4 章で MEBT1 における横方向測定結果と縦方向測定結果について述べる。最後に、さらなる

ビーム大強度化にむけた MEBT1 ビーム調整手法の改良の現状とまとめをそれぞれ 5 章と 6 章で述べる。

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以下の 2 つである。1 つ目は、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。このために、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。2 つ目の役割は 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、RFD とスクレーパーが用いられる。

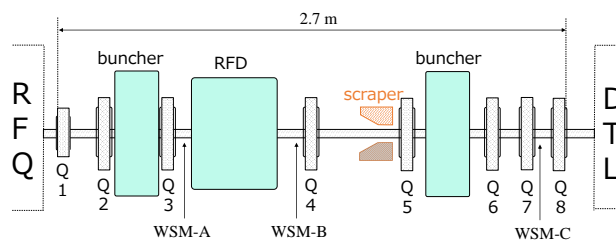


Figure 1: Schematic of MEBT1.

RFD [5] は TE_{11} モードで励起される高周波空洞でギャップ 2 つからなり、それぞれ独立な RF 電源で励磁している。共振周波数は RFQ 及び DTL と同じ 324 MHz で、ギャップ間の距離は $3\beta\lambda$ に相当する。RFD で水平方向に蹴りだした不要なビームバンチをスクレーパーで吸収することで、RCS 入射のための中間バンチ構造を形成する。

J-PARC リニアックの各セクションには CT をはじめとするビームモニターが多数設置されており、MEBT1 にもいくつかのビームモニターが設置されている。その中でも、Q3 下流、Q4 上流、及び Q7 下流に設置されたワイヤースキャナーモニター (WSM) [6]、

* masashio@post.kek.jp

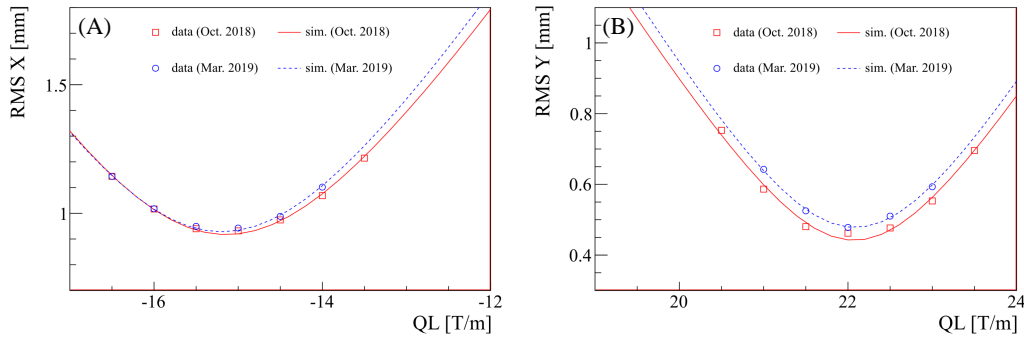


Figure 2: Transverse beam sizes in rms as a function of the quadrupole strength. (A) horizontal, (B) vertical. Two measurement results at different period (red square: Oct. 2018, blue circle: Mar. 2019) are shown along with the fitting by the PIC simulation (red line: Oct. 2018, blue dot line: Mar. 2019).

WSM-A、WSM-B、WSM-C は本論文で主要な役割を果たすビームプロファイルモニターである。

3. 横方向測定

MEBT1 ではいわゆる Q スキャン法によってビームの rms エミッタンスと Twiss パラメータを算出し、これをもとに下流の DTL にマッチングが取れるよう 4 極電磁石の強さを求める。測定は x 方向、y 方向それぞれ、Q3 及び WSM-B、Q4 及び WSM-A というペアで測定を行った。特に RFD では有効ビーム径が限られているため、ビームロスを避けるために 4 極電磁石のスキャン領域で電流値の減少が 1% 以下であることを保証して測定を行っている。

rms エミッタンス及び Twiss パラメータの推定に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開発しており、本コードを用いて計算を行っている。

Figure 2 は 2018 年 10 月および 2019 年 3 月に測定したスキャン結果である。ビームの rms エミッタンスと Twiss パラメータを変数として、測定結果と IMPACT シミュレーション結果の乖離が小さくなるように最適化関数を構成し、SIMPLEX アルゴリズム [8] によってフィットを行った結果が図中の曲線である。図で分かる通り、測定とシミュレーションは良く一致している。また、2 つの異なる時期での測定に大きな差は見られない。

Figure 3 は測定によって得られた MEBT1 入口でのビームの位相空間における包絡線である。図中のピンク破線は LINACSRfq [9] による RFQ シミュレーション結果である。シミュレーションにおける RFQ 入射ビームのエミッタンスはイオン源テストベンチにおける測定値 $0.27 \pi \text{ mm mrad}$ を用いており、RFQ 出射エミッタンスも $0.27 \pi \text{ mm mrad}$ である。シミュレーションと 2018 年 10 月、2019 年 3 月の測定結果はそれぞれ mismatch [10] 0.2 程度、エミッタンス値で 10% 程度で一致している。この mismatch に起因する DTL でのエミッタンス増加は、シミュレーションで 10%~20% 程度と見積もられており、ビームの安定供給には問題無いと考えられる。

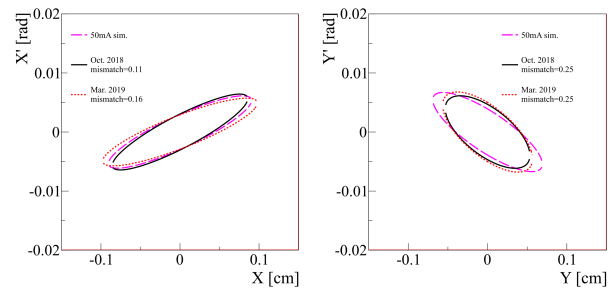


Figure 3: Designed (purple dashed) and measured rms phase space ellipses of the beam exiting the RFQ. Black line: Oct. 2018, red dot: Mar. 2019.

4. 縦方向測定

設計ピークビーム電流 50 mA においても、近年確立した RFD と WSM を使った測定手法 [4] によって縦方向の測定を行った。通常運転では RFD における RF 電場ピークはビームバンチと同期しており、ビームをスクレーパー方向に蹴り出すことで中間バンチ構造を形成する。縦方向測定時は、ビームバンチを RF 電場の立ち上がりあるいは立下りに同期する。これによって、ビームの位相広がり空間的な広がりに変換され、RFD 下流の WSM-B によるプロファイル測定によって位相方向幅を見積もることができる。つまり、ビームの位相幅の 2 乗 $\langle \Delta \phi^2 \rangle$ は、RF 電場の立ち上がり時でのプロファイル測定 $(x + k(\Delta \phi - \delta))^2$ と立下り時での測定 $(x - k(\Delta \phi - \delta))^2$ を用いて、

$$\langle \Delta \phi^2 \rangle = \left[\frac{\langle (x + k(\Delta \phi - \delta))^2 \rangle}{2} + \frac{\langle (x - k(\Delta \phi - \delta))^2 \rangle}{2} - \langle x^2 \rangle \right] / k^2 + \delta^2, \quad (1)$$

ここで、 x は粒子位置、 k は RFD の蹴り角、 δ は RFD の立ち上がり時間の不定性を表す。RFD の上流に設置されたバンチャーの振幅をスキャンしながら本手法によって位相方向幅を測定することで、Q スキャンと同様に縦方向の rms エミッタンス及び Twiss パラメータを推定することが可能となる。

Figure 4 は上流のバンチャー振幅をスキャンしながら位相幅測定を行った結果である。2018 年 10 月 (黒丸)、11 月 (青□)、2019 年 3 月 (赤△) および 7 月 (紫▽) に計 4 回の測定を行った。縦方向測定においても横方向測定と同様に、入射の縦方向 rsm エミッタンス及び Twiss パラメータを変数として、測定と IMPACT シミュレーションの乖離が小さくなるように SIMPLEX アルゴリズムで最適化を行った。WSM モニター測定の不定性など位相幅測定の誤差評価を行い、HESSE アルゴリズム [11] によってエミッタンスの誤差を評価した。黒点線、赤線および紫線はそれぞれ 10 月・11 月の結果、3 月および 7 月の結果をフィットした結果である。

10 月と 11 月の測定、3 月の測定、7 月の測定によるエミッタンスはそれぞれ $0.15 \pm 0.01\pi \text{ deg}\cdot\text{MeV}$ 、 $0.12 \pm 0.01\pi \text{ deg}\cdot\text{MeV}$ 、 $0.11 \pm 0.01\pi \text{ deg}\cdot\text{MeV}$ である。また、シミュレーションによる見積もりは $0.13 \pm 0.01\pi \text{ deg}\cdot\text{MeV}$ で、それぞれの測定と 20% 程度の範囲内で一致している。一方で、10 月 11 月の測定とその他の測定は測定誤差に対して有意な違いがある。11 月から 3 月にかけてイオン源を含めた上流のビーム輸送ラインの調整を行っているが、縦方向の違いの原因は分かっておらず原因を調査中である。

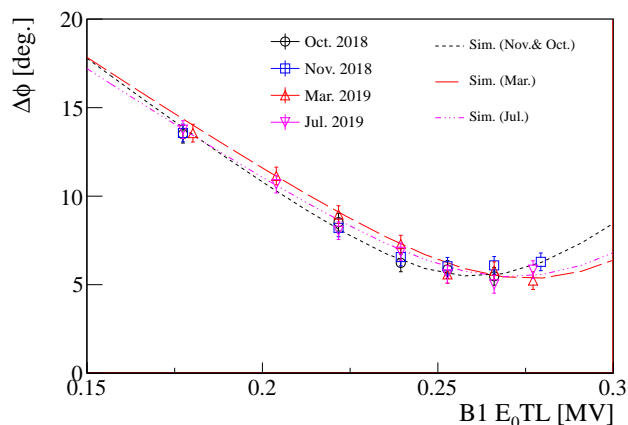


Figure 4: Result of the longitudinal bunch size measurements using the RFD. The black circle, blue □, red △ and purple ▽ show the measurement results on Oct. 2018 and Nov. 2018, Mar. 2019, and July 2019, respectively. The black line show the fitting result for Oct. and Nov. and the red line shows that for Mar. and July.

5. ビーム調整手法の改良

横方向および縦方向の測定結果に基づき、MEBT1 の調整手法の改良を目指している。最初のステップとして、MEBT1 下流に設置された WSM-C も含めた横方向のビームエンベロープを測定とシミュレーションで比較した。Figure 5 に結果を示す。測定結果 (赤点・青点) とシミュレーション (赤線・青線) は 0.2 mm 以内で一致している。横軸 = 2 m 付近の X 方向エンベロープのステップは、スクレーパーにおけるビームロスを反映したものであり、ビームロスの割合も再現している。現在は更なる調整の改良を

目指し、DTL 下流でのビーム測定結果とシミュレーションの比較を行っている。

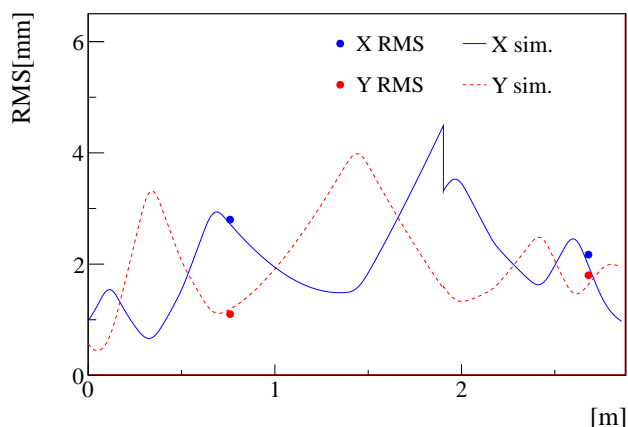


Figure 5: MEBT1 におけるビームエンベロープのシミュレーション (青線・赤線) と WSM による測定結果 (青点・赤点)。

6. まとめ

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。リニアックのほぼ最上流に位置するビーム輸送ライン MEBT1 における横方向および縦方向の測定を行った。横方向に関してはシミュレーションとミスマッチ 0.2 程度、エミッタンスで 10% 程度で一致している。また、縦方向に関してはシミュレーションと 20% 以内で一致しているが、異なる時期での測定に測定誤差以上の差があり、原因を調査中である。今後の更なる大強度化にむけて、これらの測定結果に基づく MEBT1 の調整手法の改良を行っている。

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] M. Otani *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. Sec. A, Volume 908, 11 November 2018, Pages 313-317.
- [5] 平野耕一郎 他、第 12 回日本加速器学会年会論文集、pp. 944-947 (2015)
- [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] F. James and M. Roos, "Minuit: A System for Function Minimization and Analysis of the Parameter Errors and Correlations", Comput. Phys. Commun., vol. 10, pp. 343 - 367, 1975.
- [9] R.A. Jameson, ORNL/TM-2007/001.
- [10] K.R. Crandall *et al.*, Report No. LA-UR-96-1836, 1996.
- [11] W.T. Eadie *et al.*, "Statistical Methods in Experimental Physics", North-Holland, 1971.