

J-PARC リニアック大強度化にむけた MEBT1 におけるビーム測定結果 BEAM COMMISSIONING OF J-PARC MEBT1 FOR A HIGHER BEAM CURRENT

大谷将士^{*A)}、岡部晃大^{B)}、小栗英知^{B)}、平野耕一郎^{B)}、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)}, Hidemoto Oguri^{B)}, Koichiro Hirano^{B)}, Kenta Futatsukawa^{A)},
Akihiko Miura^{B)}, Tomoaki Miyao^{A)}, Katsuhiro Moriya^{B)}, Yong Liu^{A)}

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

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

Abstract

Presently, the J-PARC linac provides beam with a peak current of 40 mA, which will be upgraded to 50 mA for 1-MW operation of RCS after summer shutdown in 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 beam properties. Especially in MEBT1, located between the 3-MeV RFQ and the 50-MeV DTL, beam diagnostic and tuning are extremely important because of large effect of space charge. In this paper, we report about the diagnostic methods and result in MEBT1 and some results for a higher beam current study.

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^- 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、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 リニアックはこれまでピークビーム電流 40 mA、パルス幅 500 μ s でビームを安定供給しており、2018 年夏季シャットダウン明けからピークビーム電流 50 mA で運転する予定である。一方で、現在検討が進んでいる J-PARC 将来計画を実現するには、J-PARC リニアックの更なる大強度化が必要となる。

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ため、ビーム測定及び調整が困難である。特に MEBT1 においてはビーム縦方向に関して実際の測定結果がなく、ビーム診断方法の確立が急務である。

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、あらたに考案した縦方向測定手法および測定結果について述べる。最後にこれまでに実施したリニアック大強度試験結果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 のビームラインに図 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、チョッパー空洞 (RFD) とスクレーパーが用いられる。

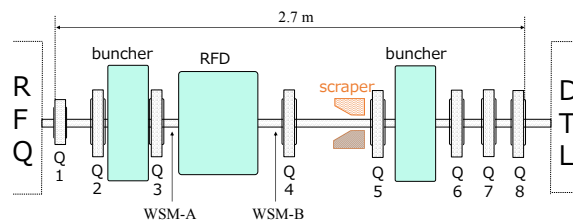


Figure 1: MEBT1 の概略図。

RFD [1] は TE_{11} モードで励起される高周波空洞で、ビーム蹴りだしたためのギャップ 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いるが、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 の下流及び Q4 の上流に設置されたワイヤースキャナーモニター (WSM) [2]、WSM-A 及び WSM-B 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。

* masashio@post.kek.jp

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 [3] 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。

図 2 は 60 mA 試験時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 [4] 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。

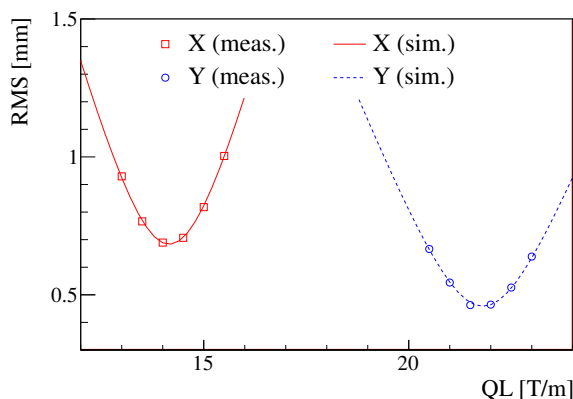


Figure 2: WSM モニターによるビームプロファイル測定結果。縦軸はプロファイルの rsm。横軸は 4 極電磁石の磁場勾配。

図 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。40 mA、50 mA、60 mA 測定時の結果を示している。rms エミッタンスに関しては、LINACSRfq [5] による RFQ シミュレーション結果と 10% 程度で一致している。Twiss パラメータに関しては測定とシミュレーションで相違があるが、RFQ のエンドセル部分のフリッジフィールドの取り扱いが不十分であることが主な原因であると考えている。WSM による測定に加えてスクレーパー位置をスキャンすることによりプロファイル測定を行ったが、本測定と誤差の範囲内で一致している。

以上から、WSM と IMPACT シミュレーションを用いた Q スキャン法による横方向測定は 10% 程度の精度でビームパラメータを推定できていると結論

づけた。また、60 mA での rms エミッタンスもこれまでに実績のある 40 mA、50 mA と 10% 以内で変化がなく、MEBT1 のラティス設計により同程度の透過率が期待できる。

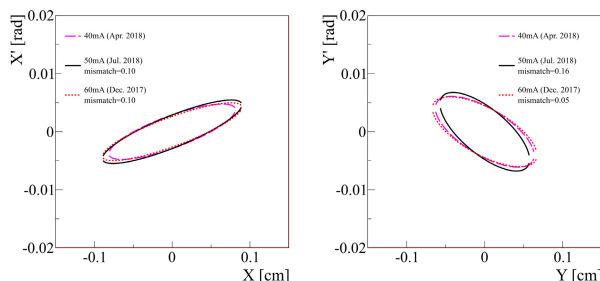


Figure 3: 40 mA、50 mA、60 mA での MEBT1 入口における位相空間分布 (rms 包絡線)。左、右図はそれぞれ X、Y 方向。

4. 縦方向測定

リニアックにおいて縦方向測定で良く用いられるのはいわゆるバンチシェイプモニター (BSM) [6, 7] である。J-PARC リニアックでもいくつかの BSM が設置されており、MEBT1 にも BSM が試験運用中である [8]。しかし、単位長さあたりのエネルギー損失が大きくワイヤー損傷の激しい MEBT1 では運用が難しく、安定な測定には至っていない。

RFD を採用する J-PARC リニアックでは独自の縦方向測定が実現可能である。図 4 に測定の概念図を示す。通常の運転では図上のようにビームバンチは RF ピークと同期しており、横方向に蹴られたビームはスクレーパーで吸収される。縦方向測定時は、ビームバンチを RFD 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が空間的な広がりに変換され、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、RFD の立ち上がり時間からの位相差を $\Delta\phi$ とすると、

$$\langle (x \pm k(\Delta\phi - \delta))^2 \rangle = \langle x^2 \rangle \pm 2k\langle x\Delta\phi \rangle + k^2\langle \Delta\phi^2 \rangle + k^2\delta^2, \quad (1)$$

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。符号は RFD の立ち上がり及び立下り時での測定となる。二つの測定の差をとることで、以下の通りビームの位相方向の幅を推定することができる。

$$\langle \Delta\phi^2 \rangle = [\langle (x + k(\Delta\phi - \delta))^2 \rangle / 2 + \langle (x - k(\Delta\phi - \delta))^2 \rangle / 2 - \langle x^2 \rangle] / k^2 + \delta^2. \quad (2)$$

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。

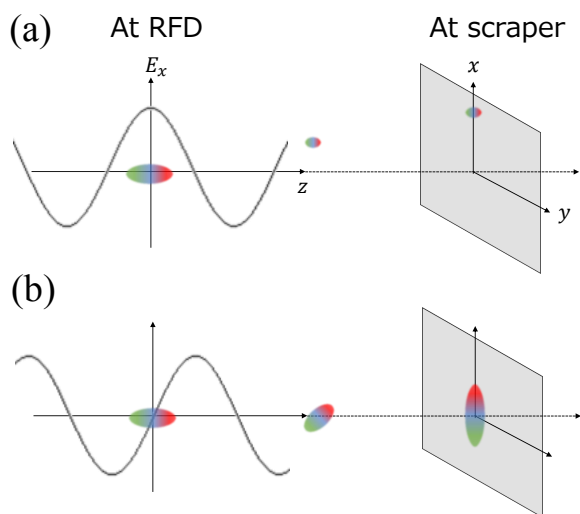


Figure 4: RFD を用いた位相方向幅測定概念図。

本測定は大強度試験に先駆けてビームピーク電流 40 mA で行った [9]。図 5 は典型的なビームプロファイル分布である。この例では式 2 によって求まる位相空間幅は 7 度である。

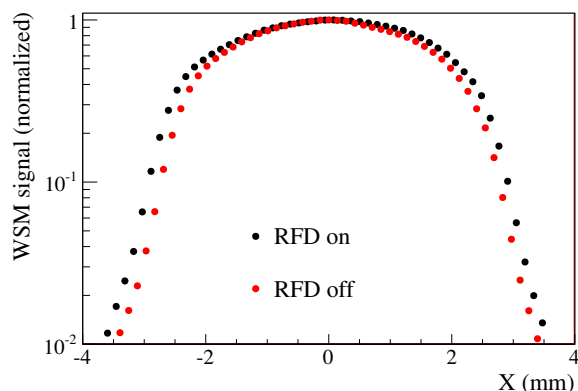


Figure 5: 典型的なビームプロファイル。

図 6 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。前述の通り RFD は二つのギャップを独立に操作できるので、それぞれで測定を行っている。縦方向測定においても横方向測定と同様に空間電荷の効果も考慮して計算を行う必要があったため、PIC シミュレーション IMPACT を用いてビームパラメータの推定を行った。つまり、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 [10] によってエミッタンスの誤差を評価した。測定によって得られた縦方向の rms エミッタンスは $0.13 \pm 0.01\pi \text{ deg} \cdot \text{MeV}$ であり、これは LINACSrfq による RFQ シミュレーション結果 $0.12 \pm 0.01\pi \text{ deg} \cdot \text{MeV}$ と誤差の範囲内で一致している。

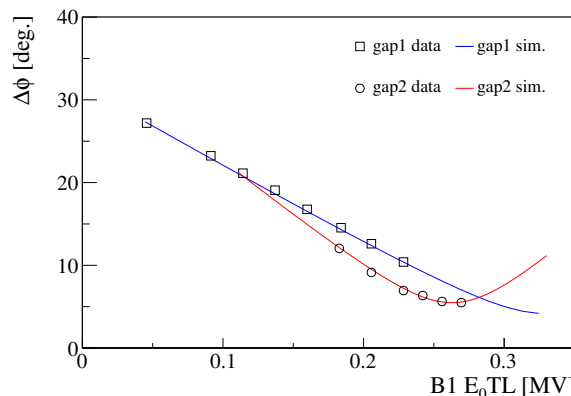


Figure 6: バンチャー振幅をスキャンして位相幅測定を行った結果。図中の曲線は IMPACT シミュレーションによるもの。

5. 大強度試験

1 章で述べた通り、J-PARC リニアックで大強度化を目指す場合、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。パルス幅の延長は RF 源の強化や RCS での RF システムの改良を必要とするため、実現にはある程度の時間が必要である。一方で、ピークビーム電流はその他のビームパラメータを制限することで即座に試験が可能である。そこで、先行してピークビーム電流 60 mA 試験を行い、ビームダイナミクスの理解などを進めるといったのが大強度化を目指す我々の戦略である。すでに 2017 年 7 月、2017 年 12 月、2018 年 7 月と 3 回にわたり 60 mA 試験を行った。

ピークビーム電流 60 mA の安定運用のためには、まずリニアック下流までビームを通すことでハードウェアの問題を洗い出す必要があった。図 7 に各セクションでのビーム電流値を示す。2017 年 7 月、2017 年 12 月の試験で段階的にビームを通すことに成功し、2018 年 7 月にはリニアック下流で 60 mA 以上のピークビーム電流を達成した。SCT の較正など細かい改善はあるものの、大きな機器の変更なしで 60 mA を達成できることが分かった。

さらにビーム品質の向上によるロス低減などを目指すには、ビーム診断によるビーム理解が必要である。その中でも MEBT1 におけるビームパラメータの理解が重要であるのは既に述べた通りである。既に横方向測定に関しては測定が完了しており、結果は 3 で述べた。縦方向測定に関しては時間の関係で測定できていないが、今後測定を進める予定である。

6. まとめ

J-PARC リニアックは将来計画実現に向けて大強度化を目指している。ピークビーム電流を 50 mA から 60 mA に増強するにはビーム診断が必要不可欠であり、空間電荷効果の大きい RFQ 下流の MEBT1 でのビームの理解が特に重要となる。横方向測定に

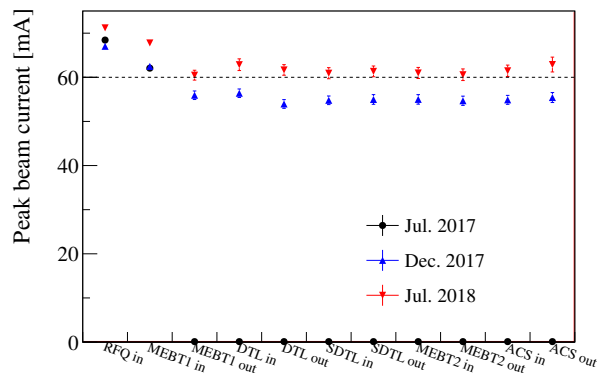


Figure 7: これまでに行った 60 mA 試験時の各セクションでのピークビーム電流値。

関しては Q スキャン法による測定を確立し、シミュレーションによる rms エミッタンスの評価と 10% 程度で一致する結果が得られた。RFD を用いた縦方向測定を考案し、40 mA で測定を行った結果、こちらも rms エミッタンスはシミュレーションによる評価と 10% 程度の範囲内で一致した。既にリニアック大強度試験を 3 回に渡り実施しており、リニアック下流で 60 mA 以上のピークビーム電流値を実現した。今後は横方向・縦方向測定を運用して、ビームの高品質化と更なる大強度化を目指す。

参考文献

- [1] 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).
- [2] A. Miura *et al.*, Proc. of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan, pp. 1008 – 1010, 2010.
- [3] J. Qiang *et al.*, J. Comput. Phys. 163, 434-451, 2000.
- [4] 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.
- [5] R.A. Jameson, ORNL/TM-2007/001.
- [6] A.V. Feschenko, AIP Conf. Proc. 281, 185, 1992.
- [7] I.D. Kittelmann, B. Cheymol, Proc. of the LINAC2014, Geneva, Switzerland, pp.143-145, 2014.
- [8] 福岡翔太 他、第 14 回日本加速器学会年会論文集、pp. 535-539 (2017).
- [9] M. Otani *et al.*, Proc. of the 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, BC, Canada, TUPAK009 (2018), submitted to Nucl. Instru. Meth. A.
- [10] W.T.Eadie *et al.*, “Statistical Methods in Experimental Physics”, North-Holland, 1971.