

J-PARC 線形加速器における MEBT1 に関するビーム実験

BEAM STUDY ON MEBT1 AT THE J-PARC LINEAC

岡部晃大^{#,A)}, 劉勇^{B)}, 大谷将士^{B)}, 守屋克洋^{A)}, 宮尾智章^{B)} 北村遼^{A)}, 平野耕一郎^{A)},
小栗英知^{A)}, 金正倫計^{A)}

Kota Okabe^{#,A)}, Yong Liu^{B)}, Masashi Otani^{B)}, Katsuhiko Moriya^{A)}, Tomoaki Miyao^{A)}, Ryo Kitamura^{A)},
Kouichirou Hirano^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The J-PARC linac has a medium energy beamline (MEBT1) between RFQ and DTL. The MEBT1 is equipped with an RF beam chopper system to control the macro-bunch beam shape in the longitudinal direction so as to match the Circular Accelerator (RCS) in the latter stage. Two buncher cavities are installed in the existing MEBT1 for the matching the longitudinal shape of the beam with the chopper system and the downstream DTL. However, in principle, a total of three bunchers are required: one for the chopper system and two for beam shape matching with the DTL. Therefore, there have been long discussions about the design of the new MEBT1, which is an MEBT1 with a buncher added. On the other hand, in MEBT1, the space charge effect is very strong, and it is difficult to install beam monitors in the DTL section, so it is difficult to clarify the current experimental results using numerical simulations. We first conducted systematic beam experiments to investigate how the beam quality could be improved by adding a buncher to the MEBT1. As a result of examining the risks and benefits that would improve from remaking MEBT1 from the results of beam experiments, it was found that there was little merit in installing the new MEBT1 in terms of achieving a beam power of a little over 1 MW at the J-PARC accelerators. It was determined that the MEBT1 of 1 can be adequately handled. In this paper, we report the results of beam experiments on the MEBT1 and the review process of the new MEBT1.

1. Introduction

1.1 MEBT1 について

J-PARC 線形加速器では、RFQ と DTL の間にビームライン(MEBT1)を設けている(Fig. 1)。MEBT1 には後段の円形加速器(RCS)に整合するように縦方向のミドルバンチ形状を作るための RF ビームチョッパーシステム、及び、マイクロバンチの縦方向ビーム幅をコントロールするためのバンチャーが 2 台設置されている(Fig. 2)[1]。

MEBT1 の特徴および機能を以下に列挙する。

- ビームエネルギーが 3 MeV と低いため、空間電荷効果が非常に強く表れる
- ミドルバンチ構造を作るための RF チョッパーシステムを備えている
- 下流 DTL に対する横方向と縦方向のエンベロープマッチングを行う
- RFQ から出射されるごく少量の陽子ビームの除去

上記のように MEBT1 に対して要求される機能は多く、それに応じて MEBT1 には加速器機器が数多く据え付けられている。MEBT1 の全長は 3 m ほどであるため、現行のラティスを保ったまま、機能向上のため新たな装置を追加で据え付けることが難しい。そのため、追加機器を新たにインストールするには、イオン源および RFQ の設置場所を変える必要がある。また、MEBT1 は空間電荷効果が非常に強く表れる場所でもあるため、安易に MEBT1 の全長を長くした場合、空間電荷効果由来のエミッタンス増大が発生する可能性もある。

1.2 MEBT1 のアップグレード計画

J-PARC linac では以前より、Linac のビーム品質向上のため、MEBT1 のアップグレードに関する議論がなされてきていた[2]。具体的には、まず目的の一つとして、チョッパーシステムで成形し損ねたビームを減少させることである。MEBT1 におけるチョッパーシステムは、linac の基準周波数である 324 MHz の高周波電場で横方向



Figure 1: This figure shows schematic layout of the J-PARC LINAC.

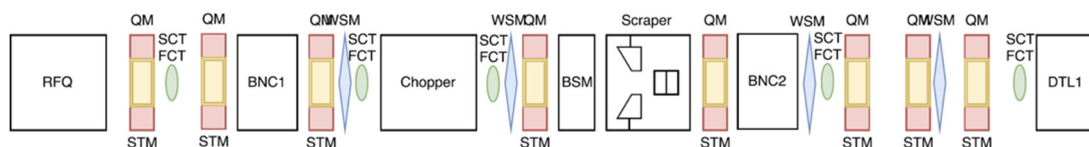


Figure 2: This figure shows schematic layout of the MEBT1.

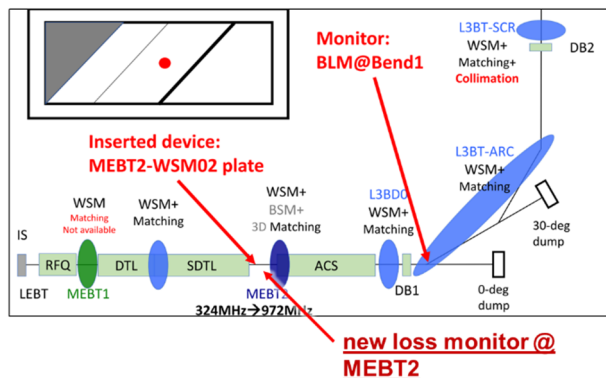


Figure 3: Schematic of the method of a beam chopping leakage measurement.

にキックすることでミドルバンチ構造を作っている。成形し損ねてチョッパーから漏れたビームは、後段の 3 GeV-シンクロトロン(RCS)におけるRFに同期しないため、必然的に RCS 内でロスする。従って、効果的にビームを成型するためには、チョッパー空洞の位置での 324 MHz のビームマイクロバンチ長を短くする必要がある。加えて、下流側 DTL に縦方向のマッチングを施し、ミスマッチに起因するエミッタンス増大を抑制しなければならない。すなわち、チョッパーからのビーム漏れ抑制するため(チョッパー空洞におけるバンチ長を制御するため)に 1 台のバンチャー、縦方向マッチングのために 2 台のバンチャーが必要となる。

一方、現状の MEBT1 にはバンチャー空洞が 2 台しか設置されていないため、チョッパーにおける中間バンチビーム成型と縦方向マッチングを最適なするためにはパラメータが一つ足りないこととなる。そこで、バンチャー空洞を 3 台備えた新 MEBT1 の設計検討が進められてきた。

現行の MEBT1 は前述したとおりバンチャー空洞を追加設置するためのスペースがない。そのため、新 MEBT1 は現行の RFQ より 50 cm ほど短い新 RFQ に置き換えて、新たにできたスペースにバンチャーを追加設置することを想定したものである。

MEBT1 アップグレードの検討は主に数値シミュレーションを用いて行ってきた。しかし、現状、DTL 通過後のビームの挙動とシミュレーション結果では大きな差異がある。その理由としては、MEBT1 や DTL ではビームエネルギーが低いため、空間電荷効果の影響が顕著であり、それに伴うエミッタンス増大、ビーム分布の変化を数値シミュレーションで再現しきれないことが考えられる。加えて、DTL セクションにはビームポジションモニタ(BPM)やビームプロファイルモニタ(WSM)等のビームモニタが

設置できないため、数値シミュレーション結果と実験結果とのすり合わせが非常に困難である。

MEBT1 の機能を拡張した新 MEBT1 を導入するためには、RFQ の置き換え等の大掛かりな加速器機器の変更が必要となる。そこで、本格的に新型 MEBT1 の設置検討を行う前に、現行の MEBT1 で系統的なビーム試験をおこない、その実験結果に基づいて、新 MEBT1 を設置することによるメリットの定量的な評価を行った。本実験では 1MW 利用運転を想定した 50mA ピーク電流のビームに関するものである。

2. MEBT1 アップグレードのためのビーム試験

2.1 チョッパー漏れビーム試験

本実験の目的は、MEBT1 以外の加速器のパラメータを 1MW 利用運転時のものにした際に、チョッパー漏れビームの量を抑制するチョッパー空洞とバンチャー1 のパラメータを確認することである。

Figure 3 に本実験手法の概要図を示す。本実験では、まず、チョッパーについて全ビームをチョップする設定にする。この設定ではチョッパーが正しく機能しているならば、MEBT1 より下流にはビームは到達しない。次にごく少量のビームを計測するため、下流の MEBT2(Fig. 1)にビームを阻むためのプレートを挿入して、その近辺のビームロスモニタ(シンチ)にて計測を行い、その結果とチョッパー空洞とのパラメータ依存性を調べた。実験結果を Fig. 4 に示す。

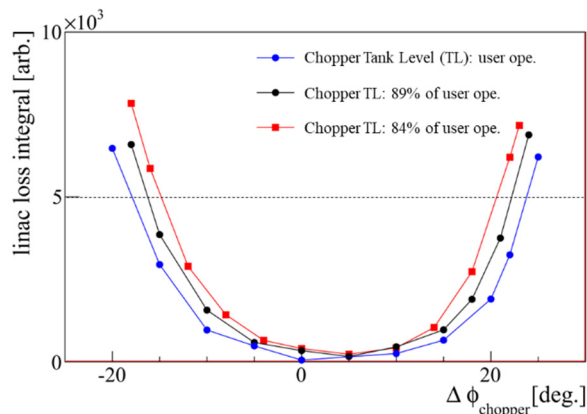


Figure 4: This figure shows the study results of a beam chopping leakage measurement.

実験時のバンチャーrf振幅(E0TL)は 0.16 MV と利用運転時に用いているパラメータとしている。横軸はチョッパー空洞の rf 位相を示し、縦軸はビームロスモニタ信号

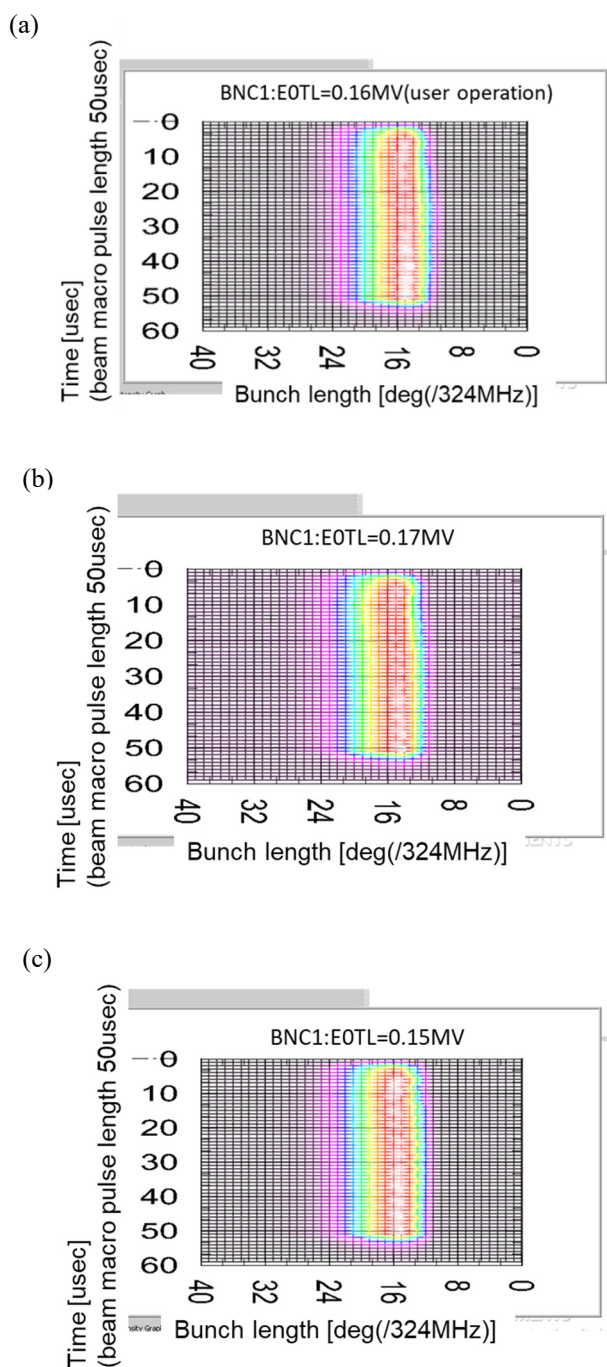


Figure 5: These figures show the bunch shape response in the MEBT2 to the rf amplitude of buncher 1.

の積分値である。Figure 4 ではそれぞれチョッパー空洞のタンクレベルについてチョッパー空洞の rf 初期位相に対するビーム漏れ量を示している。この結果から、利用運転時に使用するバンチャー1 の設定値において、チョッパーパラメータを適切に選択することによってチョッパー空洞からのビーム漏れを何ら問題のないレベルまで抑制可能なことが分かった。

Figure 5 は MEBT2 においてバンチシェイプモニタを使用して測定したバンチ形状とバンチャー1の rf 振幅と

の関係を示している。

本図の横軸はマイクロバンチ幅であり、縦軸はマクロパルス長を示している。本実験時にはビームのマクロパルス長は 50 マイクロ秒である。(a)はバンチャー1の rf 振幅について利用運転パラメータの際のバンチ形状を示している。(b)及び(c)は、それぞれ利用運転パラメータの振幅から約 6%増減した際のバンチ形状を示している。ビーム調整時では 6%以内でバンチャー1の rf 振幅を調整することでチョッパー漏れビーム量を制御できていることから、このパラメータ範囲を設定した。

測定結果を比較すると、三者の間にはほとんど差がないため、バンチャー1について 6 パーセント程度の振幅の増減では縦方向のビーム形状について影響を及ぼさないことが分かった。

2.2 横方向ビームエミッタンスとバンチャー1空洞の rf 振幅との関連性

次に、バンチャー1と2の rf 振幅を変えることで DTL への縦方向ミスマッチを故意にひき起こして、空間電荷

Table 1: Parameter Set of Emittance Measurement

Parameter set	rf amp. of buncher1	rf amp. of buncher2
pattern1(user operation)	EOTL=0.16 MV	EOTL=0.12 MV
pattern2	EOTL=0.18 MV	EOTL=0.12 MV
pattern3	EOTL=0.18 MV	EOTL=0.11 MV
pattern4	EOTL=0.18 MV	EOTL=0.14 MV

力を介した横方向 rms エミッタンスの増大がどの程度発生するのかと調査した。rms エミッタンスは SDTL 上流部において4本のビームプラファイルモニタを用いた測定結果をもとに空間電荷効果を考慮したエンベロップ方程式を用いたフィッティングを行って算出した。それぞれのパラメータセットを Table 1 にまとめた。

Table 2: Emittance Ratio of Each Parameter

	Horizontal	Vertical
pattern2/pattern1	1.001	0.991
Pattern3/pattern1	1.025	1.007
Pattern4/pattern1	1.034	1.023

本実験の結果を Table 2 にまとめている。この結果はパターン2から4について、それぞれパターン1のエミッタンスとの比を取ったものである。

この結果から、いずれのパラメータにせよ、rms エミッタンスの変化はせいぜい数パーセントにすぎないことが分かった。また、バンチャー1の rf 振幅をチョッパー漏れ

ビーム抑制する方向に変えたとしても、バンチャー2 の rf 振幅を調整することで横方向のエミッタンス増大を回避する解があることが判明した。

2.3 ビーム実験結果のまとめ

ビーム実験結果を以下にまとめる。1 MW のビーム運転を想定した場合、現行の MEBT1 において、チョッパーの漏れを抑制するチョッパーやバンチャーのパラメータを選んだとしても、縦方向および横方向のビーム品質に対する影響は限定的であり、利用運転に影響を及ぼすレベルではないといえる。

3. まとめと今後

MEBT1 の機能を拡張した新 MEBT1 を導入するためには、RFQ の置き換え等の大掛かりな加速器機器の変更が必要となる。そこで、現行の MEBT1 で系統的なビーム試験をおこない、新 MEBT1 の有用性を検証した。その結果、1 MW 利用運転を想定した条件では、チョッパーからのビーム漏れを十分に抑制しつつ、且つ、これまでの加速器運転で実現してきたビームの質を担保できるパラメータがあることが判明した。従って、RFQ を置き換えることによるリスクを考えると、少なくとも 1 MW 利用運転を達成するうえで、現行の MEBT1 を新型に変更するメリットは少ないものと結論付けた。

ただし、今後 1 MW を超えるビーム出力を目指すこと、もしくはより安定的な 1 MW 利用運転を達成するうえで、新 MEBT1 を導入する必要性が高まる可能性もある。引き続き、MEBT1 および DTL に関する数値シミュレーションとビーム実験を行っていく予定である。

参考文献

- [1] T. Maruta *et al.*, Proceedings of LINAC2012, Tel-Aviv, Israel, pp.395 - 397 (2012).
- [2] K. Okabe *et al.*, Proc. 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conf. Proc., 011011 (2021).