

# バンチシェイプモニタによるフロントエンドでの大強度ビームの縦方向測定 LONGITUDINAL MEASUREMENT OF HIGH-INTENSITY BEAM WITH BUNCH-SHAPE MONITOR IN FRONT-END

北村遼<sup>\*,A)</sup>、林直樹<sup>A)</sup>、平野耕一郎<sup>A)</sup>、宮尾智章<sup>B)</sup>、三浦昭彦<sup>A)</sup>、森下卓俊<sup>A)</sup>

Ryo Kitamura<sup>\*,A)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>, Koichiro Hirano<sup>A)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>B)</sup>, Akihiko Miura<sup>A)</sup>, and Takatoshi Morishita<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

In the J-PARC linac, the bunch-shape monitor (BSM) is developed to precisely and rapidly measure the longitudinal beam profile at the front-end, towards the improvement of the beam matching. The graphite target having the good strength to the high-power beam, has been introduced in order to mitigate the heat loading of the high-intensity beam. The effect due to the size of the graphite target was studied to evaluate the longitudinal bunch width. The longitudinal Twiss parameters and emittance were measured using the BSM and the IMPACT, which was the 3D particle-in-cell simulation code. In this presentation, we will report a series of the measurement result and the comparison between the measurement and the beam simulation.

## 1. イントロダクション

大強度陽子加速器施設 J-PARC リニアックではエミッタンス低減・ビームロス削減などの品質向上を目指して、フロントエンドでの縦方向分布を精度良くかつ迅速に測定できるバンチシェイプモニタ (BSM) の導入を進めている [1-4]。フロントエンドにある中エネルギービーム輸送系 (MEBT1) はリニアック最上流の加速空洞である高周波四重線形加速器 (RFQ) によりバンチングされたビームを最初に測定できる場所であり、MEBT1 のビーム品質はリニアック出射ビームに大きな影響を与える。図 1 に示した MEBT1 が持つ重要な機能として、

- RFQ で加速・バンチングされたビームを次の加速空洞であるドリフトチューブ型リニアック (DTL) へマッチングさせる。
- チョッパーによりシンクロトロン (RCS) 入射のための時間構造を形成する。

などが挙げられる。これらの要請に応じてビーム縦方向を調整するためのモニタとして BSM は重要な役割を果たすと期待される。フロントエンド用 BSM では熱耐久性の高いグラファイト製標的を導入により、これまで測定困難であったピーク電流約 50 mA・3 MeV の H<sup>-</sup> ビームを安定に測定できる。本講演ではこのフロントエンド用 BSM に関するテストスタンドでの試験と MEBT1 における縦方向測定結果について報告する。

## 2. BSM とテストスタンドでの試験結果

### 2.1 BSM の構成

図 2 に BSM の動作原理を示す。BSM では H<sup>-</sup> ビームと標的の相互作用で生じた二次電子をデフレクタ空洞へと導き、H<sup>-</sup> ビームと同期した高周波電場で縦方向分布を横方向へと変調することで元の縦方向の情報を得る。フロントエンド用 BSM ではこの標的にグラファイトを導入することで、従来のタングステンワイヤ標的

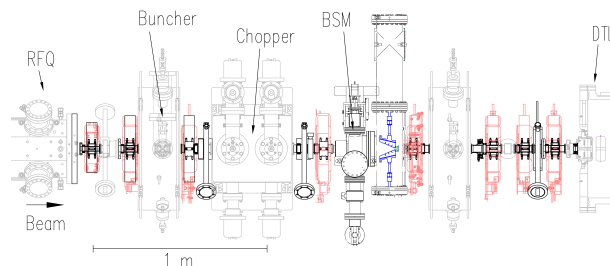


Figure 1: Configuration of MEBT1.

で頻繁に生じた断線による測定困難を克服している。グラファイト標的は熱耐久性が高いという利点の一方で、従来のタングステンワイヤ標的 (直径 0.1 mm) に比べて大きいため、標的の大きさに起因する測定への影響が懸念された。そのため J-PARC リニアック棟のテストスタンドにて大きさの異なるグラファイト標的を BSM に設置して、縦方向分布測定における標的の大きさの影響を評価した。

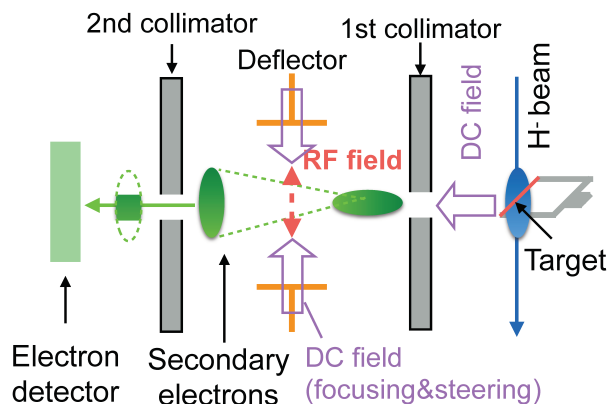


Figure 2: Principle of BSM.

\* rkita@post.j-parc.jp

## 2.2 テストスタンドでの試験結果

図3にテストスタンドの試験セットアップを示す。テストスタンドではイオン源とRFQにより $H^-$ ビームを3 MeVまで加速できる。ビーム条件はピーク電流約50 mA、マクロパルス長50  $\mu s$ 、繰り返し1 Hzである。グラフィット標的は0.2mm(幅) $\times$ 1.0mm(厚さ)と1.0mm $\times$ 1.0mmの2種類を用いた。グラフィット標的の大きさの違いは二次電子の時間広がりを生むため、大きな標的の場合縦方向分布は定性的に広がると予想される。グラフィット標的で発生する二次電子の時間広がりの影響をGeant4シミュレーション[5]で評価して、測定結果と比較した。図4に0.2mm $\times$ 1.0mm(small)と1.0mm $\times$ 1.0mm(large)のそれぞれの標的で測定した縦方向分布を示す。0.2mm $\times$ 1.0mmで測定した分布に対して、Geant4で計算した2種類の標的間での時間広がり差を考慮して、1.0mm $\times$ 1.0mmの場合と同等になるよう補正した分布(図4の“corrected”)は1.0mm $\times$ 1.0mmで実際に測定した分布を良く再現しており、標的大きさの影響が正しく評価できていることを確認した。

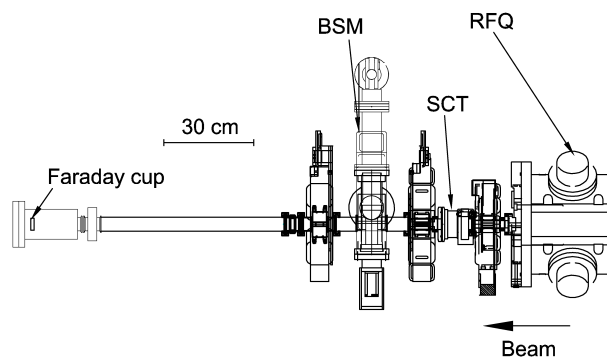


Figure 3: Experimental setup of the test stand in the J-PARC linac building [3].

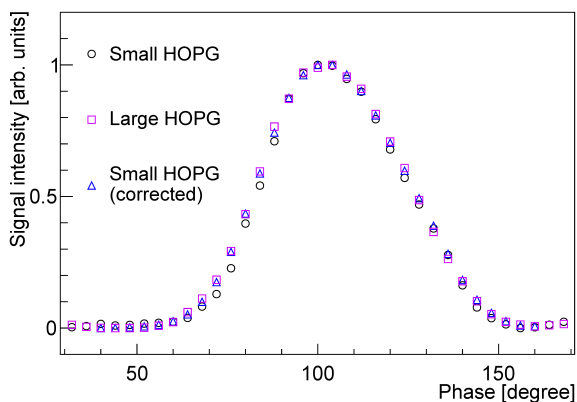


Figure 4: Measured and corrected longitudinal bunch shape using the BSM at the test stand.

## 3. MEBT1でのBSMによる縦方向測定

グラフィット標的による測定への影響が理解できたので、MEBT1にてBSMを用いた縦方向測定を実施した。MEBT1のビームエネルギーはテストスタンドと同じ3 MeVで、ビーム条件はピーク電流約50 mA、マクロパルス長100  $\mu s$ 、繰り返し1 Hzとした。BSMには1.0mm $\times$ 1.0mmのグラフィット標的を使用した。図5にBSMで測定した波形を示す。

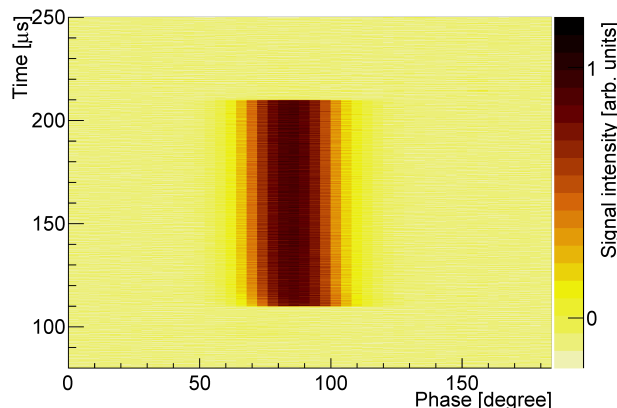


Figure 5: Measured waveform of the BSM.

縦方向 Twiss パラメータ・エミッタンス測定には、MEBT1のバンチャー空洞を用いた縦方向Qスキャン法[6]を利用した。図6にバンチャー電圧を変えながらBSMで縦パンチ幅を測定した結果を示す。BSMの測定結果から縦方向 Twiss パラメータ・エミッタンスを測定するため、空間電荷効果の影響を考慮できる3D PICコードであるIMPACT[7]を用いてフィットを行った。図6に示すIMPACTでのフィット結果は測定結果とよく一致している。図7では、IMPACTによるフィット結果から求めたRFQ出口での縦方向位相空間分布の楕円パラメータとRFQのデザインパラメータの比較を示す。両者はよく一致しておりMEBT1の縦方向ビームパラメータは予想通りであることが確認できた。

## 4. まとめと展望

本研究では熱耐久性の高いグラフィット標的を導入したフロントエンド用BSMにより縦方向分布測定及びTwiss・エミッタンス測定を行った。測定結果はデザインパラメータとよく一致しており、MEBT1のビームが予想通りであることを確認できた。現在までの実績として、ピーク電流を60 mAまで上げた条件での測定でも、安定した運用が可能であることを確認している。今後の展望としてBSMで縦方向分布をモニタしながらのビーム調整に取り組みビーム品質の向上を目指す。将来的に機器構成を改良した新しいMEBT1を導入する場合、本研究のBSMを用いれば任意の場所で縦方向分布を測定できるため、自由度の高い光学設計ができると期待される。

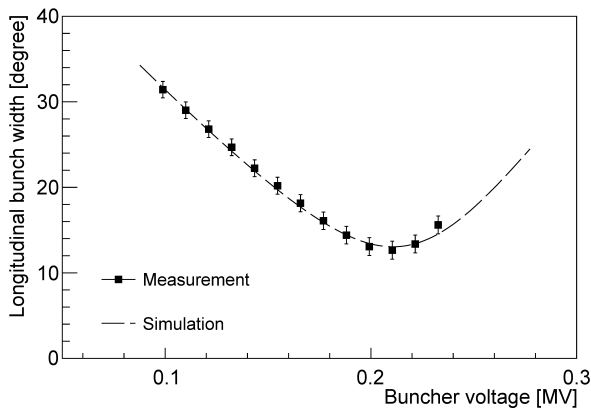


Figure 6: Longitudinal bunch width measured with the BSM in terms of the buncher voltage.

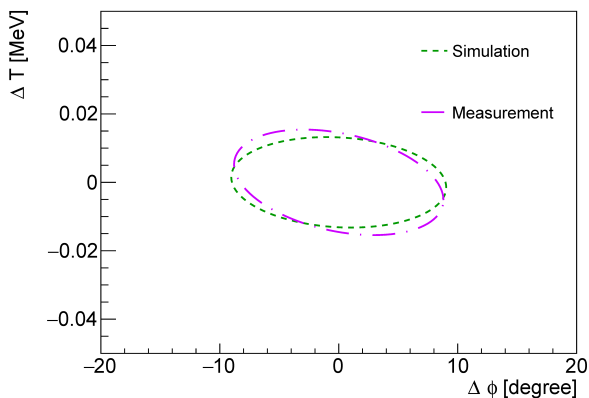


Figure 7: Longitudinal ellipses measured with the BSM and the design ellipse at the RFQ exit.

## 参考文献

- [1] R. Kitamura *et al.*, “Bunch shape monitor for the high-intensity  $H^-$  beam with 3 MeV using the carbon material”, WEOI04, Proc. of PASJ2019, Kyoto, Japan, pp.517–523 (2019).
- [2] R. Kitamura *et al.*, “Evaluation of the bunch-shape monitor for the high-intensity proton beam”, WEPP15, Proc. of PASJ2020, Online, pp.51–54 (2020).
- [3] R. Kitamura *et al.*, “Bunch-Size Measurement of the High-Intensity H- Beam with 3 MeV by the Bunch Shape Monitor”, JPS Conf. Proc. 33, 011012 (2021).
- [4] R. Kitamura, “First Measurement of Longitudinal Profile of High-Power and Low-Energy  $H^-$  Beam by Using Bunch Shape Monitor with Graphite target”, TH111, in Proc. of IBIC2022, Krakow, Poland (2022).
- [5] Geant4; <http://geant4.cern.ch/>
- [6] H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics 4th Edition, Springer, pp.222–227 (2015).
- [7] J. Qiang, R. D. Ryne, S. Habib, V. Decyk, J. Comput. Phys. 163, pp.434–451 (2000).