

大強度陽子ビーム用縦方向分布モニター応答特性評価

EVALUATION OF THE BUNCH-SHAPE MONITOR FOR THE HIGH-INTENSITY PROTON BEAM

北村遼^{*A)}、二ツ川健太^{B)}、林直樹^{A)}、平野耕一郎^{A)}、近藤恭弘^{A)}、
小坂知史^{C)}、宮尾智章^{B)}、根本康雄^{C)}、森下卓俊^{A)}、小栗英知^{A)}

Ryo Kitamura^{*A)}, Kenta Futatsukawa^{B)}, Naoki Hayashi^{A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Yasuhiro Kondo^{A)},
Satoshi Kosaka^{C)}, Tomoaki Miyao^{B)}, Yasuo Nemoto^{C)}, Takatoshi Morishita^{A)}, and Hidetomo Oguri^{A)}

^{A)}Japan Atomic Energy Agency

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization

^{B)}Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

Abstract

A bunch-shape monitor (BSM) in the low-energy region is being developed in the J-PARC linac to accelerate the high-intensity proton beam with the low emittance. A highly-oriented pyrolytic graphite (HOPG) was introduced as the target of the BSM to mitigate the thermal loading. The stable measurement of the BSM was realized thanks to the HOPG target, while the tungsten target was broken by the thermal loading from the high-intensity beam. However, since the longitudinal distribution measured with the BSM using the HOPG target was wider than the expected one, the improvement of tuning parameters is necessary for the BSM. The BSM consists of an electron multiplier, a bending magnet, and a radio-frequency deflector, which should be tuned appropriately. Behavior of these components were investigated and tuned. The longitudinal distribution measured with the BSM after the tuning was consistent with the expected one.

1. イントロダクション

大強度陽子加速器施設 J-PARC のリニアックでは、大強度の負水素イオン (H^-) ビームを 400 MeV まで加速している。エミッタンスが小さい高品質なビーム加速には、空間電荷効果が強く作用する低エネルギー領域でのビームマッチングが重要となる。リニアックの初段加速器である高周波四重極線形加速器 (RFQ) とそれに続くドリフトチューブ型リニアック (DTL) を繋ぐ中エネルギービーム輸送系 (medium-energy beam transport 1; MEBT1) では、マッチング調整のためにビーム縦方向位相分布を計測するバンチシェイプモニター (BSM) を導入・運用している [1,2]。MEBT1 で BSM を運用するためには、大強度 (ピーク電流で約 60 mA) かつ低エネルギー (3 MeV) のビームから受ける熱負荷に耐え得るプローブ (標的) の開発が必要であった。そのため高い熱負荷耐性を持ち、負極性の高電圧印加が可能である高配向性グラファイト (high-oriented pyrolytic graphite; HOPG) を BSM の二次電子生成標的として導入し、断線が多発した既存のタングステン標的に比べて安定したビーム測定ができることを確認した [3]。BSM は後述するように複数の調整ノブを持つため、ビーム縦方向位相分布を定量的に評価するためには、これらのパラメータを適切に調整する必要がある。本講演では大強度 H^- ビームを用いて HOPG 標的を搭載した BSM の各種応答特性を調査した結果を報告する。

2. 実験セットアップ

J-PARC リニアック棟のテストスタンドにて、HOPG 標的を搭載した BSM の応答特性評価試験を実施した。

図 1 に試験に使用した BSM の構成を示す。BSM では、ビームと標的の相互作用で生成された二次電子を、標的に印加した負極性電圧 (-10 kV) によって生じた電場により、検出器部へと引き出す。引き出された二次電子ビームは第一コリメータで切り出された後、2 枚の平板から構成されたデフレクタで高周波電場により位相-位置変調を受ける。このデフレクタ空洞へと印加する高周波の位相をビーム位相に対して走査することで、縦方向位相分布を測定できる。さらに、デフレクタの平板へと印加した静電圧 (レンズ電圧) を変えることで、二次電子ビーム径と軌道を調整できる。第二コリメータを通過した二次電子ビームは偏向電磁石を経由して、電子増倍管により増幅・検出される。本講演では、これら BSM の構成要素に対して電子増倍管の印加電圧・偏向電磁石の印加電流・デフレクタのレンズ電圧、の各種応答を調査・調整した。

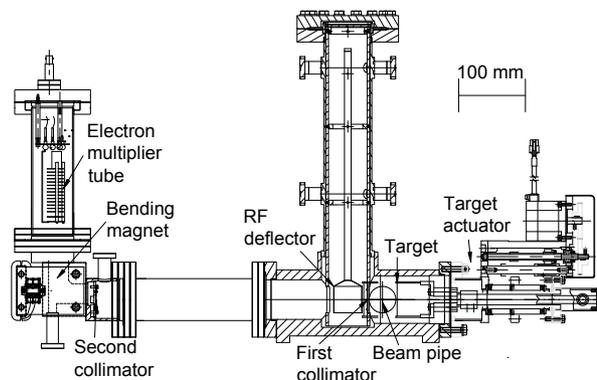


Figure 1: Bunch-shape monitor for the J-PARC linac [4].

*rkita@post.j-parc.jp

図2にBSMの試験セットアップを示す。テストスタンドでは、リニアックMEBT1と同様の、RFQにより加速されたエネルギー3 MeVの大強度 H^- ビームを使用した。ビーム条件はピーク電流約55~57 mA・マクロパルス長50 μs ・繰り返し1 Hzであり、RFQ及びBSMデフレクタ空洞の共振周波数はいずれも324 MHzである。3台の四重極電磁石はBSMへの漏れ磁場の影響を避けるため、すべての印加電流をゼロとした。縦方向測定の際は、BSM標的とビーム中心が一致するように、標的位置を調整した。

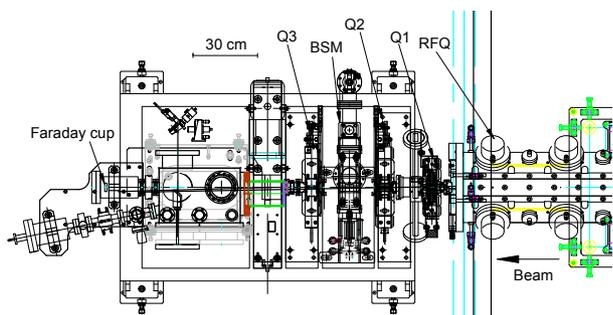


Figure 2: Experimental setup of the BSM [4]. "Q" shows a quadrupole magnet.

3. 応答特性評価

3.1 電子増倍管の印加電圧調整

デフレクタ空洞に対して高周波電圧を印加せず、二次電子ビームが電子増倍管まで透過するようデフレクタのレンズ電圧と偏向電磁石電流を粗く調整した状態で、電子増倍管の出力信号応答を調査した。図3に電子増倍管への印加電圧に対する出力波形の信号強度分布を示す。印加電圧が低い、または高い領域では、信号強度の低下が見られるため、信号強度変化が線形な領域内に印加電圧を設定した。

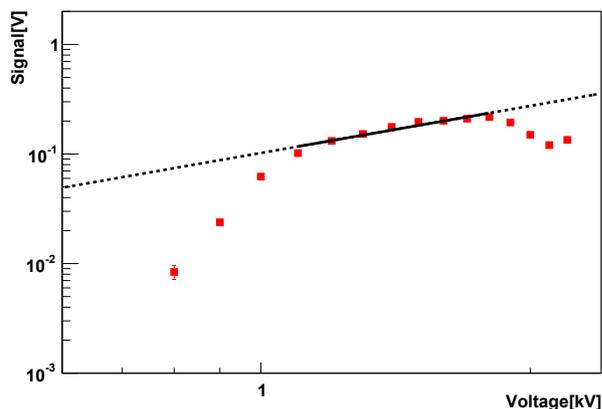


Figure 3: Signal distribution of the electron multiplier tube after an amplifier.

3.2 偏向電磁石の印加電流調整

デフレクタ空洞に対して高周波電圧を印加せず、二次電子ビームが電子増倍管まで透過するようデフレクタのレンズ電圧を粗く調整した状態で、偏向電磁石の印加電流に対する電子増倍管の出力信号応答を調査した(図4)。偏向電磁石の印加電流を連続的に上げる、または下げて出力信号の変化を見ると、電磁石のヒステリシスによる変動が見られる。このヒステリシス特性を考慮して、電流を同じ手順で印加することにより二次電子ビームの軌道が偏向電磁石のアクセプタンス内に収まるよう電流値を設定した。

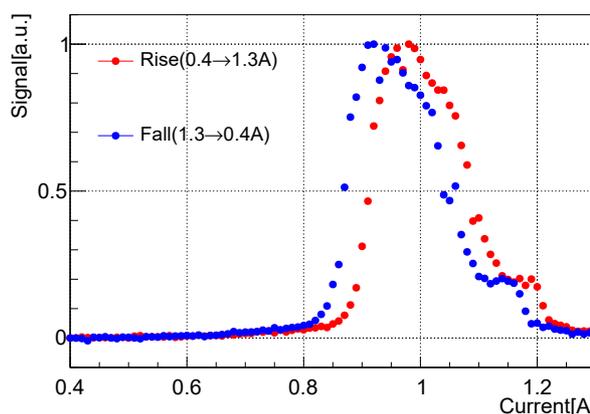


Figure 4: Signal distribution of the BSM when the current applied to the bending magnet was scanned.

3.3 レンズ電圧の調整

デフレクタ空洞に対して高周波電圧を印加せず、上記の電子増倍管電圧及び偏向電磁石電流を調整した上で、デフレクタによる二次電子ビーム径の収束応答を評価した。第一コリメータで切り出された二次電子ビームはデフレクタへ印加されたレンズ電圧により収束される。2枚の平板へ印加するレンズ電圧のうち、一方を走査した際の電子増倍管の出力信号応答を測定することで、第二コリメータ上での二次電子ビーム径を測定できる。この二次電子ビーム径が小さい場合、BSMの位相分解能は向上する[5]。図5にレンズ電圧に対する二次電子ビーム径の測定結果を示す。ビーム径はレンズ電圧が3~4 kVで極小となり、この条件で縦方向位相分布を測定した。

3.4 シミュレーションとの比較

電子増倍管の電圧・偏向電磁石の電流・デフレクタのレンズ電圧を調整した後、デフレクタ空洞に対して高周波電圧を印加して縦方向位相分布を測定した。BSMで測定した分布とシミュレーションによる予想分布との比較を図6に示す。測定結果はシミュレーション予想とよく一致しており、BSMに対して上記のようなパラメータ調整を実施することで、シミュレーションと定量的に比較可能なデータを得られることが確認できた。

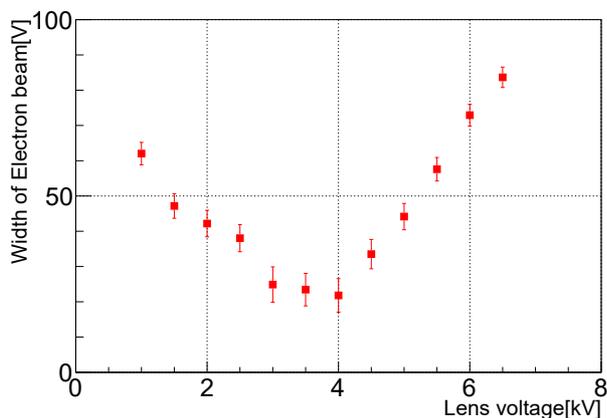


Figure 5: Width of the secondary electron beam at the second collimator in the BSM.

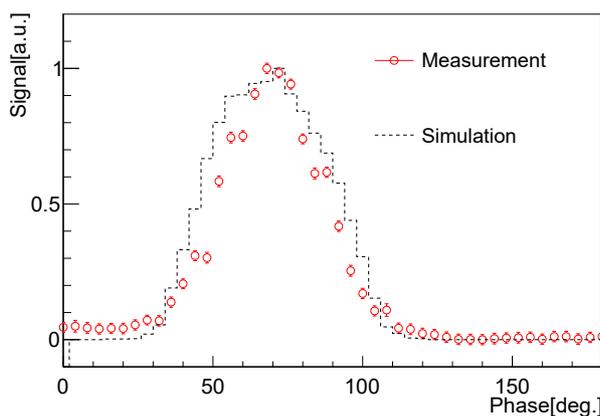


Figure 6: Bunch-shape distribution measured with the BSM.

4. まとめと展望

今回の試験では、HOPG 標的を搭載した BSM に対して電子増倍管の電圧・偏向電磁石の電流・デフレクタのレンズ電圧、の各種応答を調査・調整した。調整後に BSM で測定した縦方向位相分布はシミュレーション予想とよく一致しており、この調整手法でシミュレーションとの定量的な比較検証に向けた基礎データを得ることができた。今後は BSM の位相分解能評価、及びビームシミュレーションとの定量的な比較検証を進める。MEBT1 の大強度・低エネルギービームに対する BSM の運用手法が確立すれば、ビームマッチング最適化によりさらなる大強度・高品質ビーム加速が実現すると期待される。

参考文献

- [1] A. V. Feschenko, "Methods and instrumentation for bunch shape measurements", in Proc. of the PAC2001 (Chicago, USA) pp.517-21(2001).
- [2] S. Fukuoka *et al.*, "Development of bunch shape monitor and study of longitudinal beam matching at J-PARC linac",

TUP076, in the Proc. of the PASJ2017, Sapporo, pp.535-539 (2017) [in Japanese].

- [3] R. Kitamura *et al.*, "Bunch shape monitor for the high-intensity H- beam with 3 MeV using the carbon material", WEIO4, in Proc. of the PASJ2019, Kyoto, pp.51-54 (2019) [in Japanese].
- [4] R. Kitamura *et al.*, "Bunch-Size Measurement of the High-Intensity H- Beam with 3 MeV by the Bunch Shape Monitor", in Proc. of the 3rd J-PARC Symposium, Tsukuba, (To be published).
- [5] K. Futatsukawa *et al.*, "Development of bunch shape monitor at MEBT2 of J-PARC linac", WEP085, in Proc. of the PASJ2017, Sapporo, pp.1084-1088 (2017) [in Japanese].