

J-PARC リニアック MEBT2 における縦方向ビームマッチングのための バンチシェイプモニタのトラブル事例と進捗報告

TROUBLE CASES AND PROGRESS REPORT OF BUNCH SHAPE MONITOR FOR LONGITUDINAL BEAM MATCHING IN J-PARC LINAC MEBT2

宮尾智章^{#,A)}, 守屋克洋^{B)}, 石川将樹^{C)}, 諸橋裕子^{B)}, 神谷潤一郎^{B)},

Tomoaki Miyao^{#,A)}, Katsuhiro Moriya^{B)}, Masaki Ishikawa^{C)}, Yuko Morohashi^{B)}, Junichiro Kamiya^{B)},

^{A)} KEK, J-PARC, ^{B)} JAEA, J-PARC, ^{C)} NECO

Abstract

The J-PARC linac accelerates the beam using 324 MHz and 972 MHz RF system. In order to match the longitudinal beam to the lattice at the frequency change location, Medium Energy Beam Transport 2 (MEBT2), a Bunch Shape Monitor (BSM) is installed to measure the beam longitudinal profile. In November 2024, the BSM failed because of turbo molecular pump trouble. This BSM, which had many problems, was removed in January 2025, and preparations for beam measurement are now underway using a new BSM developed at the Annular Coupled Structure (ACS) section of J-PARC. In this report, we describe the trouble cases of the BSM and the progress and issues of the newly developed BSM.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、RF 駆動イオン源で生成された負電荷水素イオン (H⁻) を高周波四重極型リニアック (RFQ)、ドリフトチューブリニアック (DTL)、機能分離型 DTL (SDTL)、環状結合型リニアック (ACS) により 400 MeV まで加速して、次段シンクロtron加速器である 3 GeV シンクロtron(RCS) に供給している。また、RFQ 出口から DTL セクション入口の間、SDTL セクション出口から ACS セクション入口の間にはビームの縦・横方向を調整するために、中間エネルギービーム輸送系 (MEBT1, MEBT2) が設置されている。加速周波数は RFQ 空洞、DTL 空洞、SDTL 空洞は 324MHz、ACS は 3 倍の 972MHz で運転している。特に、SDTL 空洞から ACS 空洞までのビーム輸送は周波数が変化する区間により、ビームの横方向と縦方向のマッチングが必要不可欠である。しかし、ビームの縦方向を診断できるビームモニタがなかったため、2012 年度、ロシア科学アカデミー原子核研究所(INR)のメンバーと J-PARC 用バンチシェイプモニタ(BSM)を開発した。Figure 1 は BSM の設置位置の推移を示す。電磁石や RF の設定を同じにしたままツイスパラメータやエミッタンスを測定するために、3 台の BSM をビームラインにインストールした (Fig. 1(a))[1, 2]。Figure 2 に BSM の測定原理を示す[3]。BSM は ϕ 100 μ m のタングステンワイヤーに -10 kV の電圧をかけてビームに衝突させ、10 keV の 2 次電子を発生させる。加速された 2 次電子は 2 枚の銅板で構成された静電レンズによって 2 次電子を収束させ、偏向電磁石で 90 度曲げてから電子増倍管で増幅した信号を取得している。ビームの縦方向の分布を測定するには、2 枚の銅板間に生じた 324 MHz の RF 双極子場中を 2 次電子が通過することにより、2 次電子の時間構造を変調させて、ビーム位相分布の測定をしている。ビームの本測定前に、BSM のパラメータを決める必要があり、タングステンワイヤーに電流を流して加熱させることで発生した熱電子を使ってパラメータ調整を実施している。本稿ではこれまで

起こった BSM と周辺機器のトラブル、BSM のオフライン測定とビーム試験結果について報告する。

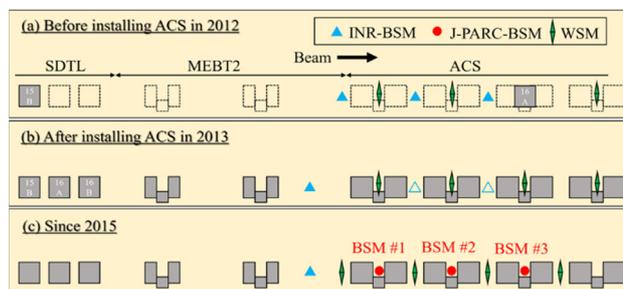


Figure 1: History of BSM Installation Sites in MEBT2 and ACS Sections.

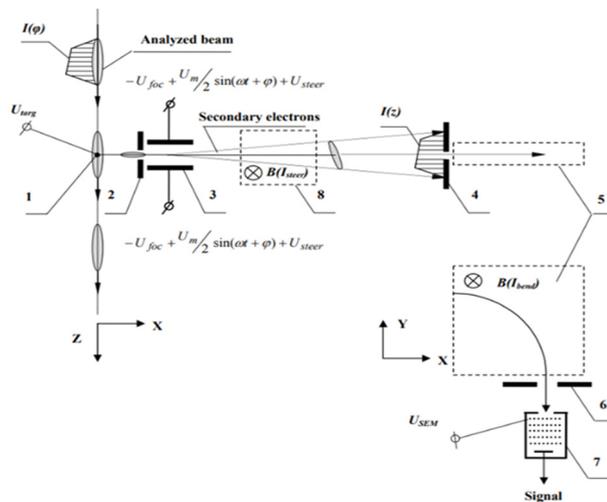


Figure 2: Principal of BSM (1: target, 2: input collimator, 3: RF deflector combined with electrostatic lens, 4: output collimator, 5: bending magnet, 6: collimator, 7: Secondary Electron Multiplier, 8: steering magnet).

[#] tomoaki.miyao@j-parc.jp

2. BSM のトラブル

BSM のトラブルは主に真空関連であった。2012 年時にインストールした 3 台の BSM はビームエネルギー 181 MeV のビームで測定を実施した。ところが、ワイヤーと静電レンズへの高圧印加、RF を印加した状態でビームを照射したときにアウトガスが多量に発生して、周囲のイオンポンプを破損させる事象が起こった。この事象が原因で残り 2 台の BSM の測定は断念せざるを得なくなった。当初、ACS 空洞間に設置予定だった 3 台の BSM はアウトガスが空洞に悪影響を及ぼす点で 2013 年の ACS 空洞インストール時に BSM を取り外して真空対策を実施した。ACS 空洞間にインストールする条件は、大気から 6 時間排気で 1.0×10^{-5} Pa、24 時間排気で 1.0×10^{-6} Pa の排気速度を満たし、かつ、ビーム測定時の真空圧力を 5.0×10^{-7} Pa を保つことであった。取り外された BSM はひたすらベーキングを実施したものの、3 台の BSM のうち、いちばん真空特性が良くても、真空圧力が 5.0×10^{-7} Pa に到達するまで 300 時間程度かかる見込みであった。そこで、Fig. 2 のように BSM の上下流と BSM の頭頂部の計 3 台に排気速度 300 L/sec. のターボ分子ポンプ(TMP)を取り付け、ビームライン上で 60 時間ベーキングを実施して 1 台のみインストールした(Fig. 1(b)) [4]。残りの BSM は内部調査を実施した。BSM の真空容器の表面加工が粗く、静電レンズと RF の極版に付属するセラミックには油性ペンで書かれた跡、銅板の汚れがあった。ベンコットとエタノールで表面を吹いたところ、黒い切削油の汚れも付着した。真空悪化の原因が特定できたことで、J-PARC 製の BSM 開発をする運びとなった[5]。

ビームラインにある BSM はその後 ACS 空洞へのアウトガス放出を防ぎつつ、真空悪化することなく MEBT2 にあるバンチャ空洞の振幅を変えながらビーム位相分布の診断を 10 年間実施してきた。ビームのマッチング以外にも活躍していて、メンテナンス後のビーム調整時にビームロスが多発する事象があったが、BSM の測定により、ビームの先頭部分の異常を特定することができた[6]。

ところが、2024 年の 11 月に BSM 頭頂部に付いていた TMP が急停止してしまい、ビームラインの真空悪化を起こしてしまった。他の TMP も 10 年以上動作し続ける機器のため、2025 年 1 月に BSM と付属の真空機器を撤去することとなり、INR 製 BSM はここで終焉を迎えた[7]。

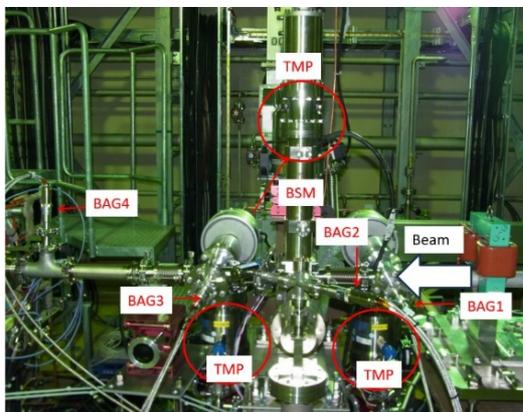


Figure 3: Layout of vacuum equipment at MEBT2.

3. J-PARC 製 BSM のオフライン試験

3.1 BSM の構造と真空機器

J-PARC 製の BSM は 2014 年から開発が始まり、真空圧力が 10^{-7} Pa 台の超高真空容器であることが求められる。前回の反省を生かし、アウトガスが出ないように、加工、洗浄、組み立てを実施した。BSM の真空特性は省略させていただくが、J-PARC 製 BSM の頭頂部には磁気浮上型 TMP を採用している。Figure 1 (c)に示すビームの縦方向マッチングに必要な 3 箇所の ACS 空洞間の 4 極電磁石の間に BSM を設置した。空洞へのアウトガス進入対策として BSM 上下流にビームラインゲートバルブを追加して、モニタ単体でメンテナンスを実施できるようにしている。

3.2 BSM オフライン試験

ACS 区間に設置した J-PARC 製 BSM は 3 台とも信号が見られなくなるという問題が発生した。そのため、上流から 3 番目の ACS 空洞間に設置していた 1 台をモニタの調整部屋に運んで BSM のパラメータを決めるためのオフライン試験を再度実施した。Figure 4 に BSM オフライン試験の様子を示す。タングステンワイヤーは -10 kV の高圧印加のほかにフローティング電源を使用してワイヤーに電流を流すことにより加熱されたワイヤーから熱電子を発生させて電子収束に必要な静電レンズの電圧、偏向磁石の電流、電子増倍管の電圧を決めた。



Figure 4: Layout of BSM offline test at a monitor room.

Table 1: Parameters of BSM

ワイヤー電圧	-10.0 kV
レンズ 1 電圧	-4.0 kV
レンズ 2 電圧	-4.4 kV
偏向電磁石電流	0.87 A
電子増倍管電圧	-1.50 kV
フローティング電圧	430 mV
リーク電流	-0.67mA

Table 1 にオフライン試験時に使用したパラメータを示す。パラメータを決めるにあたり、ワイヤーに-10 kV までゆっくりと高圧をかける。大気解放時から実施する際は、ワイヤーからアウトガスが放出されて真空度が 1 桁上昇することがあるので注意が必要である。次に、フローティング電源をゆっくり上昇させて、ワイヤー電源からのリーク電流を見ることでワイヤーから熱電子が出てくることを確認している。リーク電流値は-0.8 mA を超えるとワイヤーが溶断しやすくなるので、リーク電流値は-0.7 mA 以下を目安に調整することが望ましい。熱電子が出始めたところで、静電レンズと偏向電磁石の各パラメータを決定させる。静電レンズの電圧は大雑把に-4.0 kV と-4.4 kV に設定して偏向電磁石の最適化を実施し、0.87 A に設定した(Fig. 5)。静電レンズはレンズ 1 の電圧を固定してレンズ 2 の電圧を調整して出力信号が大きくなる場所を探す。レンズ 2 を固定した時も同様の測定を実施する。Figure 6 にレンズ 1 を固定してレンズ 2 の電圧を調整した時の出力電圧の変化を示す。横軸はレンズ 2 の電源の目盛り(ノブ)を表し、縦軸の出力電圧はレンズ 1 の電圧を-4.1 kV にした時に得られた最大出力電圧を 1 としている。レンズ 1 を-5.0 kV、レンズ 2 を-5.3 kV が S/N がいい結果となった。ただ、レンズのノブを少しでも動いてしまうと、出力信号が大幅に減ってしまうので、測定の際はレンズ 1 を-4.1 kV にしてノブの変動があっても一定に信号が取れる組み合わせを採用している。

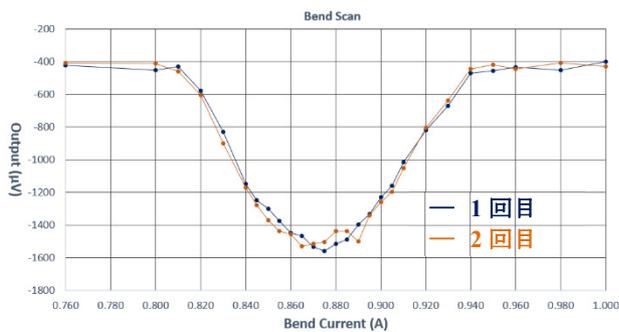


Figure 5: Result of bending magnet current scan.

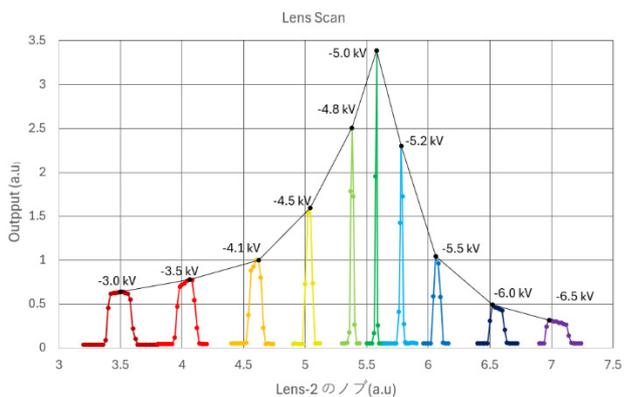


Figure 6: Parameter adjustment of lens voltage.

3.3 ビームラインでの信号確認

モニタ調整部屋で調整した BSM のパラメータを確認

するため、ビームラインに設置済みの J-PARC 製 BSM のうち、最上流のモニタで実施した。初めに Fig. 7 のようにビームラインの BSM に直接接続してパラメータ調整を実施した。Table 2 に調整したパラメータを示す。Figure 7 の左側にあるオシロスコープを見ると、ベースラインに対して全体的に下がっていることがわかり、熱電子の電子増倍管出力が確認できる。真空度は 10^{-5} Pa 台でインターロックまで達してないのはワイヤーのコンディショニングにより、アウトガス放出が減ったものと考えられる。パラメータについては、モニタ調整部屋での調整と似た傾向が見られた。パラメータの誤差は、ワイヤー位置や静電レンズの取り付け精度等の BSM 本体の個性があるものの、ワイヤーの位置が変わらない限り設定したパラメータでビーム測定が可能である。ただし、フローティング電源とリーク電流値は熱電子放出量を手動で制御しているため、値の誤差からは省略する。

Table 2: Parameters of BSM at J-PARC Linac

ワイヤー電圧	-10.0 kV
レンズ 1 電圧	-4.0 kV
レンズ 2 電圧	-4.0 kV
偏向電磁石電流	0.87 A
電子増倍管電圧	-1.40 kV
フローティング電圧	380 mV
リーク電流	-0.26 mA

オフライン試験を受けて、BSM 本体に異常がないことがわかったため、改めてビームラインの BSM の配線を接続して同様の試験を実施したが信号が見えなかった。配線系統を確認したところ、SHV コネクタ部に異常があり、コネクタ交換により信号が見られることが確認できた。ビームラインと地上部のケーブル長は 25-35 m と長いので、電圧降下は電流減少が起こる可能性もあるが、特に問題なかった。



Figure 7: Layout of BSM test at the J-PARC Linac.

4. ビーム試験と今後の課題

モニタ調整部屋で調整した BSM のパラメータを使用して、ビーム測定試験を実施した。測定用 BSM は ACS

区間に設置している上流から 2 番目のモニタである。ビーム条件はピーク電流値 50 mA、エネルギー191 MeV、マクロパルス幅 50 μ s、繰り返し 1.0 Hz である。初めにワイヤーをビームの中心は下流のビームロスモニタ 2 台を使って信号が高いところを探すことで位置調整した。その後、ワイヤーへの高圧印加、静電レンズの印加、電子増倍管の電圧を設定し偏向電磁石の電流値を調整した。偏向電磁石のスキャン結果を Fig. 8 に示す。青色がモニタ調整部屋の試験結果、橙色がビーム試験結果である。モニタ調整部屋の試験と同じ傾向が見られ、10 keV の 2 次電子と熱電子の測定の違いからビーム試験でのピークが鋭く出ているものと考えられる。

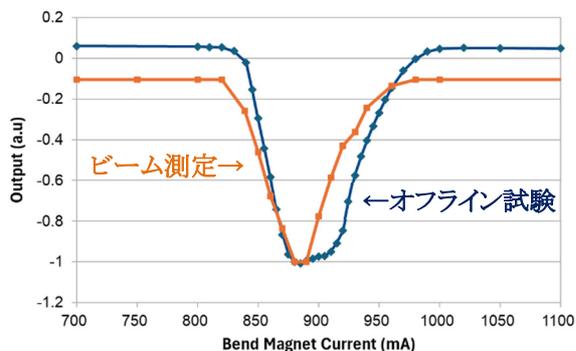


Figure 8: Result of bending magnet current scan on beam.

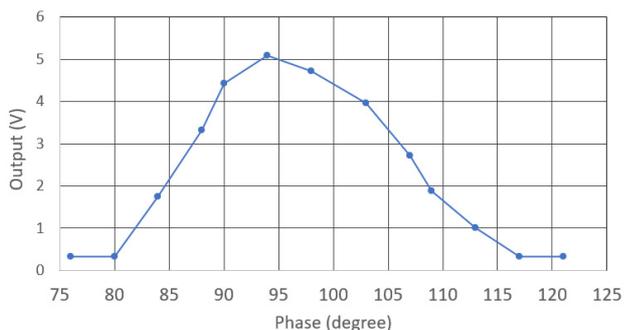


Figure 9: Sample of bunch shape measurement.

ビーム位相分布の測定は IQ モジュレータを使用し、銅板間 RF 双極子場の位相を変調することで測定している。Figure 9 はビーム位相分布の測定例を示す。ビーム

縦方向の分布は $\sigma^{\text{rms}} = 7.8 \text{ deg.}$ であった。今後の課題として、現在の測定は手作業のため測定に時間がかかるのと、分解能をよくするためには細かい調整が必要なため、EPICS レコードを使用した遠隔制御化を進めている。

5. まとめ

リニアックの加速周波数が変わるところでビームの縦方向マッチングに重要な BSM をインストールしたが、超高真空には程遠い真空容器であったため、TMP3 台を追加してビームライン上で 60 時間ベーキングをしようやく、測定ができるようになった。TMP が破損するまで 10 年間測定して ACS 空洞へのビーム入射に貢献してきた。現在、J-PARC 製 BSM のオフライン試験でパラメータを設定し、ビームラインでの測定までできるようになったので、次回は EPICS レコードでの遠隔制御化を急ぎたいところである。

参考文献

- [1] M. Ikegami *et al.*, “Recent Progress in Beam Commissioning of J-PARC Linac”, in Proc. of IPAC2013, THPWO030, Shanghai, China (2013).
- [2] A. Miura *et al.*, “Design and delivery of beam monitors for the energy-upgraded linac in J-PARC”, J. Korean Phys. Soc. **66**, 364 (2015).
- [3] A.V. Feschenko, “Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements”, Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, FRXOR01, September 2012.
- [4] T. Miyao *et al.*, “Improvement of the Vacuum Pressure of the Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.
- [5] K. Futatsukawa *et al.*, “Development of Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac”, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015.
- [6] K. Moriya *et al.*, “Beam Monitors in the J-PARC Linac and its current activities”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug.29-Sep.3, Funabashi, Japan, 2023.
- [7] Y. Morohashi *et al.*, “Vacuum system troubles and countermeasures at J-PARC Linac MEBT2”, Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 6-8, 2025.