

# J-PARC リニアック用バンチ・シェイプ・モニタの開発

## BUNCH SHAPE MONITOR FOR J-PARC LINAC

三浦昭彦<sup>#, A)</sup>, Alexander V. Feschenko<sup>B)</sup>, Alexander N. Mirzozjan<sup>B)</sup>, 宮尾智章<sup>C)</sup>,  
大内伸夫<sup>A)</sup>, 小栗英知<sup>A)</sup>, 長谷川和男<sup>A)</sup>, 池上雅紀<sup>C)</sup>

Akihiko Miura<sup>#, A)</sup>, Alexander V. Feschenko<sup>B)</sup>, Alexander N. Mirzozjan<sup>B)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>C)</sup>,  
Nobuo Ouchi<sup>A)</sup>, Hidetomo Oguri<sup>A)</sup>, Kazuo Hasegawa<sup>A)</sup>, Masanori Ikegami<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency,

<sup>B)</sup> Institute for Nuclear Research, Russia Academy of Science,

<sup>C)</sup> J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization,

### Abstract

In J-PARC Linac, a project for energy and intensity upgrade has been progressed since 2009 using Annular-ring Coupled Structure (ACS) cavities. Because the longitudinal matching of the injection beam to the ACS cavities is required as well as the transverse matching, we decided to employ the bunch shape monitors (BSM's) to measure the longitudinal beam profile. We developed three BSM's in collaboration with INR (Institute for Nuclear Research: Russia) for the upstream part of the ACS section. We introduce the structure of BSM and mention the measured results taken during the commissioning of BSM.

### 1. はじめに

現在の J-PARC リニアックでは、イオン源で生成された負水素イオンを、50keV まで加速し、これを RFQ(Radio Frequency Quadrupole)加速空洞に入射して、3MeV まで加速する。その後、DTL(Drift Tube Linac)、SDTL(機能分離型 DTL)に順次入射して、181MeV まで加速し、2 台のデバンチャ空洞を用いてビームの運動量拡がりを低減させて、下流側に接続されている 3GeV シンクロトロンに入射している<sup>[1]</sup>(Figure 1 参照)。

J-PARC リニアックでは、現在の 181MeV から 400MeV までエネルギーをアップグレードする計画が進められており、この計画では、デバンチャに用いている空洞を現在の SDTL 下流に接続し、その後 21 台の ACS(Annular-ring Coupled Structure)加速空洞を用いて、400MeV まで加速することとしている。この ACS 加速空洞の加速に用いる RF 周波数は 972MHz であり、これは、現在使用している加速空洞の周波数 324MHz の 3 倍である。したがって、ACS 加速空洞にビームを入射する際には、ビームバンチの縦方向の力が変化することから、縦方向のマッチングが重要となる。このため、ビームバンチの縦方向の情報を得るために、バンチ・シェイプ・モニタ(BSM: Bunch Shape Monitor)をロシア原子力研究所(INR: Institute for Nuclear Research: Russia)と共同で開発を開始した。

BSM の設計は平成 21 年度より開始し、22 年度より

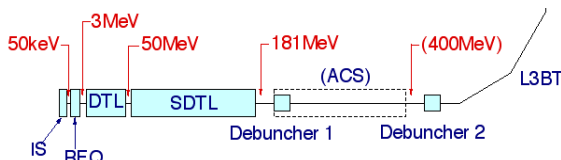


Figure 1: Layout of J-PARC linac.

り製作を開始した。23 年度にすべての製作を終了し、24 年度夏期のシャットダウン中に、ビームラインへの据え付けを終了し、運用を開始した。24 年度夏期シャットダウン後のビームコミッションングでは、通常の加速器のチューニングに加えて、BSM の性能評価や現在の 181MeV 運転における縦方向ビームプロファイルに関する基礎データの取得などを実施した<sup>[2]</sup>。

本稿では、開発した BSM の構造を紹介するとともに、モニタの性能評価のために実施した測定結果の一部を紹介する。

### 2. バンチ・シェイプ・モニタの測定原理と構造

#### 2.1 バンチ・シェイプ・モニタの測定原理

BSM の測定原理を Figure 2 に示す。負水素ビームのパルスは、図の上方よりビーム通過位置に挿入されたタングステンワイヤ(1: target)に衝突する。ワイヤには、負の高圧ポテンシャルが与えられており(-10 kV)、ビームがワイヤに衝突して発生した二次電子を等方位に加速する。加速された電子の一部はコリメータ(2: input collimator)を通過し、RF ディフレクタ電極(3: RF deflector)間に到着する。RF ディフレクタ電極には、静電レンズ電圧( $U_{foc}$ )がかけられており、二次電子は、2 つ目のコリメータ(4: output collimator)上に収束する。ここで、output コリメータ上のコリメータに鉛直な軸を  $z$  軸と仮定し、静電レンズで収束された二次電子の位置を  $z_0$  とする。RF ディフレクタ電極に、RF 加速周波数(324MHz)に同期した高周波電圧( $U_d/2 \times \sin(\omega t + \phi)$ )を加えると、二次電子はビーム位相( $\phi$ )に依存した電圧によってスキャンされ、output コリメータ上で、 $z = z_0 + z_{max} \sin \phi$  に変位する。したがって、ビームの位相方向の強度分布  $I(\phi)$  は、二次電子の空間分布  $I(z)$  に変換される。

<sup>#</sup> amiura@post.j-parc.jp

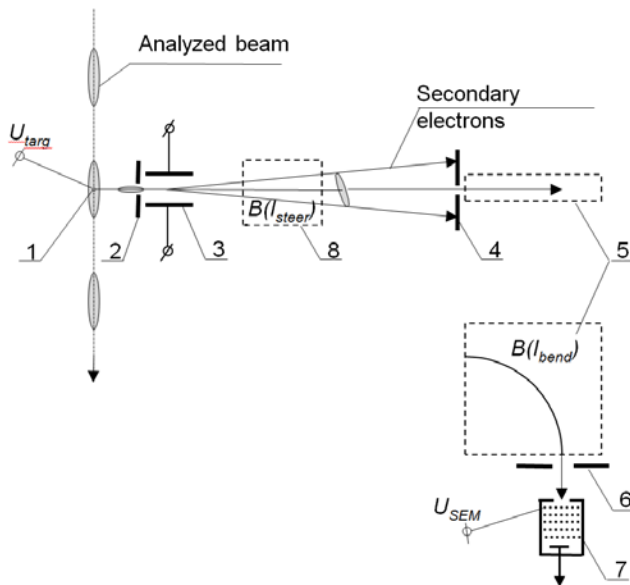


Figure 2: Principal of BSM (1: target, 2: input collimator, 3: RF deflector combined with electrostatic lens, 4: output collimator, 5: bending magnet, 6: collimator, 7: Secondary Electron Multiplier, 8: steering magnet)<sup>[3]</sup>.

つまり、位相をスキャンすることによって、output コリメータを通過する二次電子に強度分布が発生することになる。

また、負水素イオンの 1 つの電子は容易に電離し、この電子は、BSM での計測において雑音の要因になりうる。負水素イオンから電離して発生した電子と、output コリメータを通過した二次電子とは、コリメータまでの間で加速されるエネルギーが異なるため、偏向電磁石(5: bending magnet)と最後のコリメータ(6: collimator)の幅を調節することによって、二次電子のみを弁別し、二次電子を電子増倍管(7: Secondary Electron Multiplier)にて信号として取り出すしくみになっている<sup>[3]</sup>。

Figure 3 に RF ディフレクタ間の電界分布の解析結果を示す。電極には負の静電レンズ電圧がかけられている。ここでは、内部の電界分布の状態を理解するため、通常印加されている電圧(-8.3 kV)より大きい電圧(-10.0 kV)を与えた。図の左端の丸印(水色)に、ターゲットに衝突して発生し、ターゲットに印加した電圧によって加速された二次電子を示した。この電子が電極間に入った時、徐々に電圧の低い方に向かって減速される。Input コリメータに入る電子がス

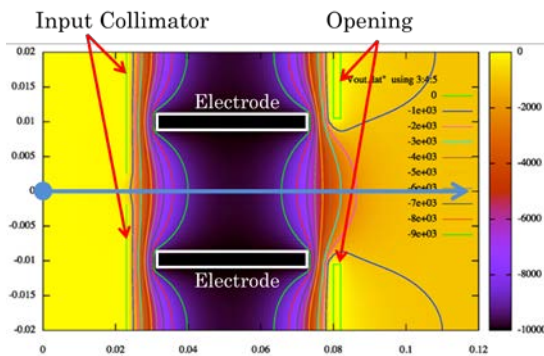


Figure 3: Static electrical potential around RF deflector.

リットの中心軸からずれる場合、等電位面に鉛直な方向に力を受けるため、中心軸に向かう方向に力を受ける。また、開口部を出ていく二次電子は開口近傍で加速される。スリットの中心軸からずれた軌道にある電子は、Input コリメータ部と同様に、中心軸に向かう方向に力を受けるため、Output コリメータに向かって収束する力を受ける構造になっている<sup>[4]</sup>。

### 3.2 バンチ・シェイプ・モニタの主な構造

BSM はボディ、RF ディフレクタ、ステアリング磁石、アクチュエータ、検出器などで構成されている(Figure 4 参照)。BSM のボディは二つの四極磁石間のビーム軸方向の約 90mm の空間に据え付けられる設計となっており、RF ディフレクタ、ターゲットが固定してあるアクチュエータ、Output コリメータ、検出器等はビーム軸と鉛直の方向に取り付けられている。

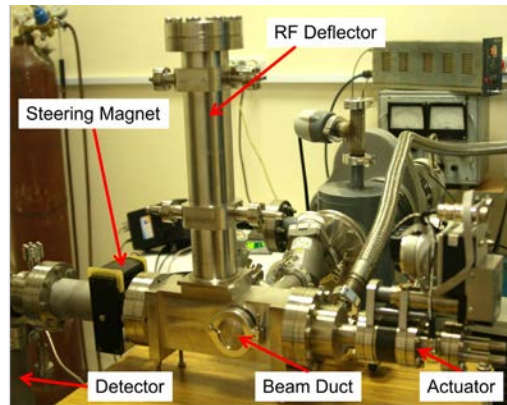


Figure 4: Overview of bunch shape monitor. Beam travels from front side to rear side.

### 3.3 RF ディフレクタの構造

RF ディフレクタの概要を Figure 5 に示す。ディフレクタは、(1)ディフレクタ空洞内に配置した電極、(2)共鳴周波数を得るために電極長さを調節するねじ、(3)RF 信号を検出するための可変容量カップラ、(4)静電レンズ電圧を与えるためのフィードスルーにより構成する。RF ディフレクタ電極は  $\lambda/2$ (=463 mm) の長さで平行に設置されている。

### 3.4 アクチュエータ、Output コリメータ、検出器

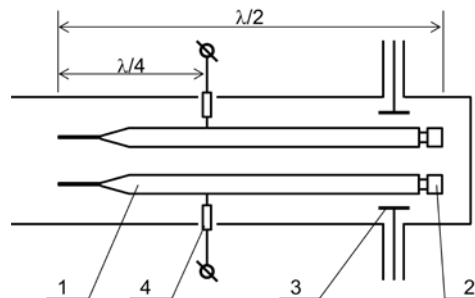


Figure 5: Schematic diagram of RF deflector (1: electrode, 2: adjuster screw, 3: coupler, 4: HV feed through).

アクチュエータには、汎用の VG Scienta 社製 ZLTM50ME を使用した。このアクチュエータは、ステップモーターで駆動され、1 ステップで 0.50 $\mu$ m の駆動精度を有している。横方向のビームサイズは 1.0~2.0mm (RMS)なので、ビーム中心へターゲットを挿入する際の移動精度は十分であるといえる。

ビームを使わない静電レンズ電圧の調整及びステアリングマグネットによる光軸の初期的な調整では、ターゲットワイヤに -10 kV で 0.9 A の電流を印加し、ターゲットから出た熱電子を用いる。Output コリメータの周囲には蛍光塗料が塗布してあり、コリメータから外れた熱電子は、このコリメータ周囲の蛍光塗料塗布部に衝突し、蛍光を発生する。この光は、反射鏡を介して直接観察することができる仕組みになっている。

ターゲットに負水素ビームを衝突させて生成した二次電子は、ディフレクタによって振り分けられ、コリメータを通過し、ベンドマグネットで雑音となる電子を取り除いて検出器に到達する。この電子の検出には、浜松フォトンクス社製電子増倍管 R596 を用いた。この電子増倍管はバイアス電圧 1.0kV 付近から 2.5kV 付近にかけて高いリニアリティを持っている。計測に使用する際、実際のビームから得られる信号の最大値が数 V 以下となるようにバイアス電圧を調整した。

### 3.5 BSM の設置

BSM は ACS セクションに入射するビームのチューニングに使用するため、ACS セクション入射直後の ACS01~03 空洞の前の四極マグネット間に設置した(Figure 6)。

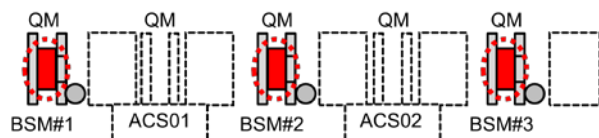


Figure 6: Bunch shape monitor (BSM) layout in the frontend of ACS section. Dotted circles are BSM's, QM's are quadrupole magnets.

## 4 BSM 性能評価のためのビームコミッショニング

### 4.1 BSM 測定用パラメータの取得

はじめに、BSM に設定する各構成機器のパラメータを決定した。ターゲットはビーム強度の最も強い位置にするのが理想である。このため、ターゲットをビーム内に挿入し、ターゲットで散乱されて発生したビームロス、その下流のロスモニタで観測し、ロスモニタの信号が最も大きくなる部位をビームの中心と考えた。また、ステアリングマグネットの電流値は、ソフトウェア上で連続的に変化させ、電子増倍管で検出できる信号のピークを走査して求めた。

この際、電子増倍管のバイアス電圧の調整も同時に実施した。

### 4.2 測定結果の初期検討

ビームダイナミクスシミュレーションにおける縦方向ビームサイズの計算結果と、実際の測定結果により測定結果の妥当性について評価を行った。ここでは、BSM の上流側で最も近い加速空洞(SDTL15, S15)に投入する RF の振幅を変化させ、ビームの収束力に対する各 BSM 位置における縦方向ビームサイズについて比較することとした。シミュレーションには 3D-PIC を用い、3 台の BSM の位置におけるビームサイズを S15 の振幅をパラメータとして算出した。測定結果と合わせて Figure 7 に示す。BSM#1 が ACS01 の上流側に設置されたモニタであり、#2、#3 は各々その下流に位置している(Figure 6)。これによると、各振幅における位相の拡がり、上流から下流に向かって拡がっており、シミュレーションで求めた傾向に一致している<sup>[5]</sup>。このことから、BSM の測定結果は妥当であると判断できる。しかし、振幅が大きくなるに従って、BSM#3 の測定結果が解析結果と離れていく結果については、さらなる調査が必要である。

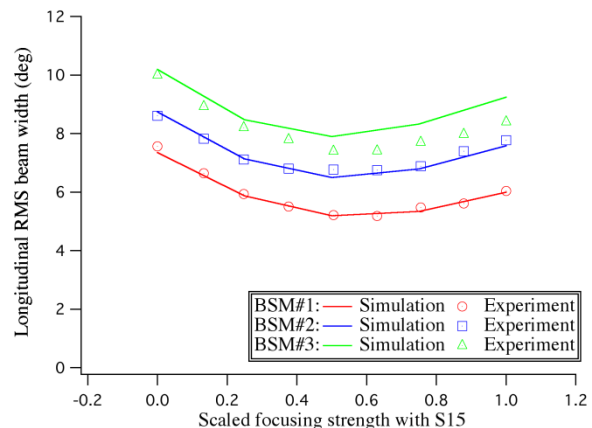


Figure 7: Measured longitudinal RMS beam width with changing focusing strength of last SDTL cavity (S15) and corresponding simulation results<sup>[2, 5]</sup>.

### 4.3 測定した縦方向のビーム形状について

BSM#1 におけるビームエネルギー 181MeV、マクロパルス幅 100 $\mu$ s、繰り返し 1Hz における測定結果の例を Figure 8 に示す。右上部がビームの先頭であり、はじめの 20 $\mu$ s までの部分にビームの歪みが見られる。これは、加速空洞の RF のフィードフォワードのタイミングが遅れたことにより、位相・振幅が歪んだためと考えられる。また、ビームが存在する 100 $\mu$ s の裾部に信号が現れている。これは、時間的には、バンチとバンチの間に相当し、ビームの照射によって加熱されたターゲットから放出された熱電子や上流から飛来する電子が直接電子増倍管に入射したためと考えられる。

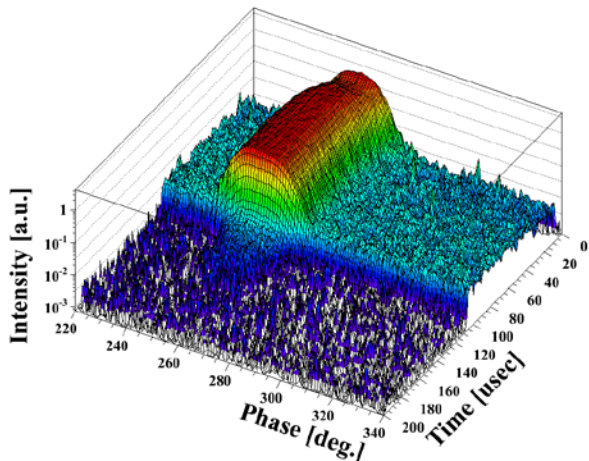


Figure 8: Data acquired by BSM#1. These will be used for the beam dynamics study and design for the energy upgraded Linac.

また、現在得られた縦方向のビーム形状からビームサイズを算出する方法の検討を進めている。ビームの先頭部の歪みの除去や、裾に現れるノイズの除去方法について、種々の解析を進めている。

## 5 まとめ

J-PARC リニアックでは、400MeV までのエネルギーアップグレードに関し、縦方向のビームマッチングを行うためのバンチ・シェイプ・モニタをロシア原子力研究所と共同で開発した。本稿では、その測定原理と構造について紹介するとともに、BSM 用に実施したコミッショニングの結果を示した。BSM の測定結果は、ビームダイナミクスシミュレーションと比較し、妥当な測定結果を得ることができたと考えられる。しかしながら、ビームダイナミクス解析とのずれに関する検討、測定結果から縦方向のビームサイズを解析する方法についての課題を残している。また、測定の間、設置位置近傍の真空の圧力値が上昇することが判明した。これは、RF ディフレクタ電圧に合わせて約-8.5 kV の静電レンズ電圧が印加されており、内部で放電が発生しているためと考えている。このようなガスの放出に対応する検討も進めている。

## 参考文献

- [1] Y. Yamazaki, ed., J-PARC Design Report (JAERI-Tech 2003-2004, KEK Report 2002-13).
- [2] A. Miura, et. al., "Bunch Length Measurement of 181 MeV Beam in J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, MOPME027, May 2013, Shanghai, China
- [3] A. V. Feschenko, "Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements", Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, FRXOR01, September, 2012
- [4] J. Tamuta, et al., "Numerical Study on the Effect of Magnetic Shield of a Bunch Shape Monitor in J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, THPWO035, May 2013, Shanghai, China
- [5] M. Ikegami, et al., "Recent Progress in Beam Commissioning of J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, THPWO030, May 2013, Shanghai, China