

J-PARC リニアック MEBT2 に設置するバンチ・シェープ・モニタの開発 DEVELOPMENT OF BUNCH SHAPE MONITOR AT MEBT2 OF J-PARC LINAC

二ツ川 健太^{*A)}, 大津 聡^{D)}, 川根 祐輔^{B)}, 高橋 大輔^{E)}, 田村 潤^{B)}, 根本 康雄^{B)},
林 直樹^{B)}, 福岡 翔太^{C)}, 真山 実^{D)}, 三浦 昭彦^{B)}, 宮尾 智章^{A)}, 吉川 宗良^{D)},

Kenta Futatsukawa^{*A)}, Satoru Otsu^{D)}, Yusuke Kawane^{A)}, Daisuke Takahashi^{E)}, Jun Tamura^{B)}, Yasuo Nemoto^{B)},
Naoki Hayashi^{B)}, Shota Fukuoka^{C)}, Minoru Mayama^{D)}, Akihiko Miura^{B)}, Tomoaki Miyao^{A)}, Hirokazu Yoshikawa^{D)},

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

^{B)}Japan Atomic Energy Agency

^{C)}University of Tsukuba

^{D)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

^{E)}Kanto Information Service

Abstract

In the J-PARC linac, the negative hydrogen beam is accelerated up to 400 MeV using the twenty-four 324-MHz cavities (RFQ, DTL, SDTL) and the twenty-five 972-MHz ACS cavities. In the MEBT2 section between SDTL and ACS, the accelerating frequency jumps from 324MHz to 972MHz. In this section, two ACS buncher cavities and twelve quadrupole magnets were installed for the longitudinal and transverse matching. Therefore, we are developing the bunch shape monitor (BSM) for the measurement of longitudinal beam profile as the wire scanner monitor for the measurement of transverse one. In the summer shutdown of 2016, one BSM was installed in the ACS01 bridge cavity and the main component of the BSM resolution was estimated to be less than 1 deg. In this presentation, we will like to introduce the tuning and the offline test, the results of the beam study.

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水素イオン (H^-) を 3-MeV RFQ, 50-MeV DTL, 191-MeV SDTL, 400-MeV ACS により 400 MeV まで加速して、3-GeV シンクロトロン加速器 (RCS) にビームを供給している。RFQ 空洞下流から DTL セクション入口までの中間エネルギービーム輸送系 (Medium Energy Beam Transport Line 1, MEBT1), 及び SDTL セクション下流から ACS セクション入口までのビーム輸送系 (以下 MEBT2) が縦・横マッチングのセクションとして設置されている。また、ACS セクション下流から 3-GeV RCS 入射点までは、Linac to 3-GeV RCS ビーム輸送系 (L3BT) がある。各加速空洞の共振周波数は、RFQ 空洞から SDTL 空洞までが 324MHz, ACS 空洞は 3 倍の 972MHz となっている。共振周波数に変化する前後の MEBT2 には、ACS 型のバンチャ空洞が 2 台設置されている [1]。この 2 台のバンチャ空洞を用いて、ACS 加速空洞の縦方向アクセプタンスにマッチングさせている [2, 3, 4, 5]。しかし、現状ではビームの縦方向の形状を測定するモニタが不足しているため、matching/mismatching を定量的に評価することができていない。そこで、J-PARC リニアックでバンチ・シェープ・モニタ (Bunch Shape Monitor, 以下 BSM) を開発している [6]。

本稿では、J-PARC リニアック製の BSM のオフラインの調整及びビーム試験の結果を紹介する。

2. BSM 測定原理

Figure 1 に BSM の測定原理の模式図を示す。バンチ化された負水素ビームが図の上から下へ通過すると

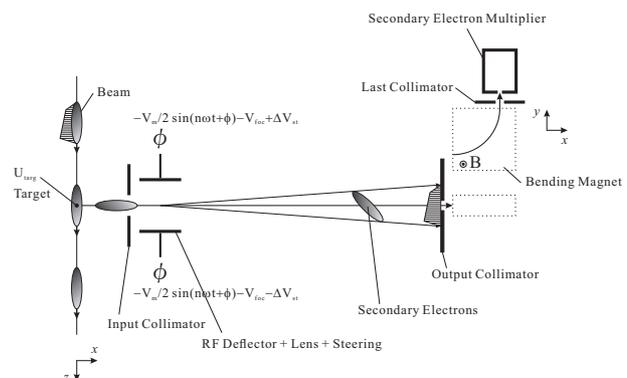


Figure 1: Principle of BSM.

き、アクチュエータによりビームライン中心に挿入されたタングステンワイヤ (Target) に衝突して二次電子を発生させる。ワイヤには負の高圧が印加されており、二次電子はこのポテンシャル (U_{targ}) により加速される。加速された二次電子の一部はビームラインに対してアクチュエータの反対側に設置してあるコリメータ (Input Collimator) を通過して、電極 (RF Deflector+Lens+Steering) に到達する。この電極は、以下の 3 つの役割を果たしている。

1. $\lambda/2$ モードの共振器になっており、電極間の RF 電場 ($V_m/2 \sin(nwt + \phi)$) によりバンチの時間情報を位置変調させる。この RF 周波数は J-PARC リニアックの加速周波数の 324MHz と同期している。
2. 2 つの電極間に定電圧を印加することにより、静電レンズ (V_{foc}) の効果で二次電子の軌道を 2 つ目のコリメータ (Output Collimator) 位置に収束をさ

*kenta.futatsukawa@kek.jp

せる。

- 2つの電極間に電位差 (ΔV_{st}) を設けて、二次電子の軌道を水平方向 (y) への収束点の微調整を行う。

2つ目のコリメータ (Output Collimator) を通過した二次電子は偏向電磁石 (Bending Magnet) により 90 deg. 偏向されて最終段のコリメータ (Last Collimator) を通過できる運動量だけが弁別される。最終的に二次電子は、電子増倍管 (Secondary Electron Multiplier, 以下 SEM) を用いて、増幅されて信号として取り出される [7]。

3. オフライン試験

3.1 RF 調整

Figure 2 に RF 調整の結果を示す。BSM の RF 調整では、電極長と入力アンテナの挿入量をパラメータにして、結合度と共振周波数を調整する必要がある。有限要素法 HFSS のシミュレーションから、アンテナ挿入量は結合度と共振周波数に大きく依存するが、電極長は共振周波数には大きく依存するが結合度への寄与は小さいことを事前の情報として得ていた。

そこで、最初にアンテナの挿入量を結合度が大きくなるように調整した (Fig. 2(a))。シミュレーションの通り、結合度だけでなく、共振周波数も大きく依存していることが分かる。その後、結合度が大きなアンテナ挿入量にパラメータを合せて、電極長を変更することで共振周波数の調整を実施した (Fig. 2(b))。電極長の長さの変位と共振周波数の関係は -0.7 MHz/mm という調整結果が得られたが、これはシミュレーションの結果と一致している。真空時の共振周波数は、窒素パーズと比較して $\Delta f = +100$ kHz となったが、これもシミュレーションが示唆していた値と一致している。RF 調整の結果、反射 (S_{11}) を -20 dB 以下に抑えながら、真空状態で共振周波数を $\Delta f < 50$ kHz に合わせ込むことができた。

3.2 電子収束系のオフライン試験

BSM のタングステンワイヤーには高圧印加だけでなく、フローティング電源を使用してオフライン試験用に電流を流す機能を持たせている。電流により加熱されたワイヤーから熱電子を発生させて、この熱電子を SEM からの信号として測定することで静電レンズ電圧及びステアリング電圧の調整とオフライン試験を実施した。

INR 製の BSM では、Output Collimator の面に蛍光塗料を塗り、目視で電子収束系の調整を実施していた。しかし、高真空で蛍光塗料を使用する方法は好ましくなく、また目視での測定は定量性に欠ける問題がある。そこで、今回は静電レンズの電圧 (V_{foc}) を固定してステアリング電圧 (V_{st}) でスキャンをすることで収束された電子の rms サイズを測定することで調整を行った。Figure 3 に静電レンズ電圧と rms サイズの相関を示す。Output Collimator のスリットサイズを 4.56 mm と 0.5 mm に変えたときの結果 (Fig. 3(a)) から、 V_{foc} が 4.0~5.5 kV において、2つのスリットサイズで優位に違いがある。その結果から、この静電レンズ電圧領域ではスリットサイズの 4.76 mm に対して優位に収束電子サイズが小さいことが分かる。Figure 3(b) には V_{foc} が 4.5~5.3 kV の詳細測定の結果を示す (blue squares, green circles の

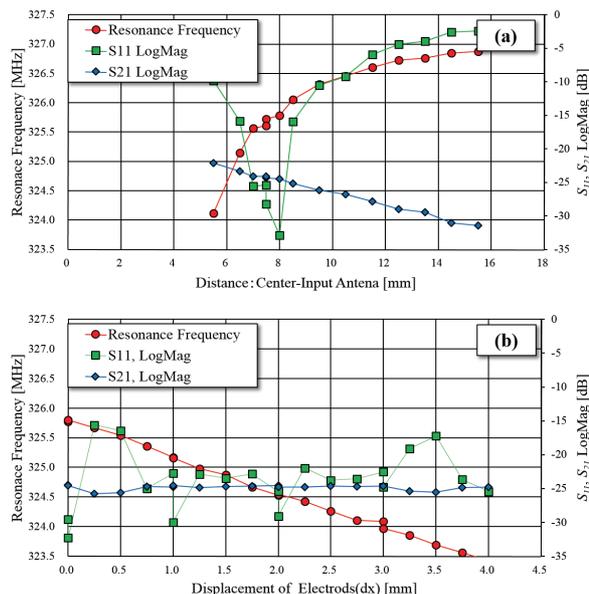


Figure 2: Results of RF tuning. (a) when the length of RF antenna was tuning, both the resonance frequency and the coupling were changed. (b) the displacement of the length of electrodes was changed, we can tune the only resonance frequency.

違いは再現性)。図中の値のばらつきは、熱電子の放出量が時間と共に多少の変動をしていることが原因と考えている。 $V_{foc} = 4.8$ kV でこのステアリング電圧スキャンの rms サイズが最小になり、その値は $\sigma_{V_{st}}^{rms} = 7$ V となった。

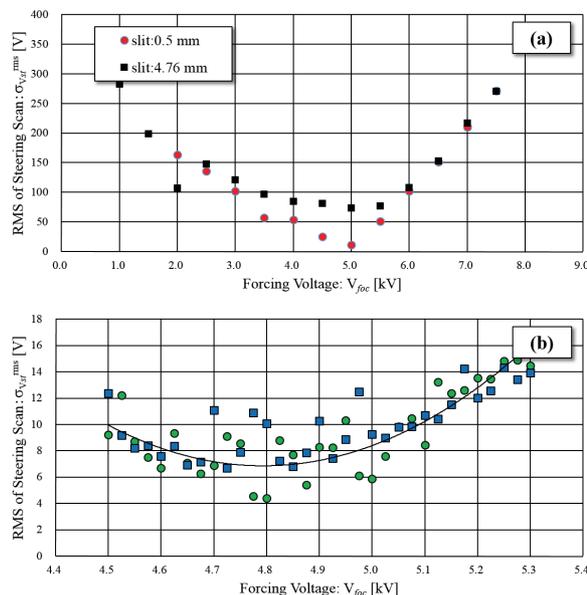


Figure 3: rms size for convergent electrons (a) in the large range and (b) in detail. These were measured using the steering scan at each lens voltage.

Output Collimator のスリット位置を変更して (Fig. 1 の y 方向に変位 $\Delta y=3.81$ mm), そのときの最適なステアリング電圧の差 (ΔV_{st}) からステアリング電圧の蹴り角 ($\Delta V_{st}/\Delta y$) を評価した¹。Figure 4 に静電レンズ電圧 V_{foc} が 4.5~5.3 kV の範囲におけるステアリング電圧の蹴り角の測定の結果を示す。ステアリング電圧による蹴り角はこの範囲ではほとんど静電レンズ電圧に依らず, $\Delta V_{st}/\Delta y=14.1$ V/mm という結果が得られた²。従って, 収束された電子のサイズは

$$\sigma^{rms} [\text{mm}] = \frac{\sigma_{st}^{rms} [\text{V}]}{\Delta V_{st}/\Delta y [\text{V/mm}]} \sim 0.5 [\text{mm}]$$

という結果が得られる。

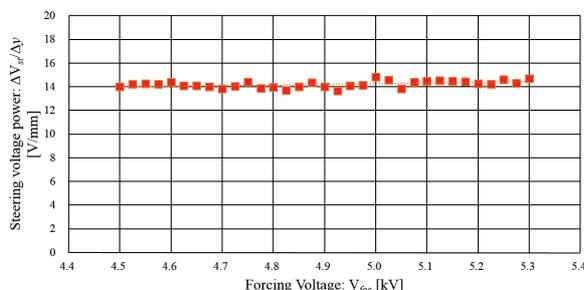


Figure 4: Steering voltage power dependence. Changing the steering voltage to 14.1 V, the position of convergent electrons shifts to 1 mm at the output collimator. The result was obtained in the conditions of slits with the different position.

3.3 偏向電磁石のアクセプタンス試験

実測のデータを, 偏向電磁石の磁場を有限要素法の OPERA 磁場計算と Output Collimator 及び Last Collimator の構造によるアクセプタンスは Runge-Kutta 法の軌道計算と比較した。

ワイヤーからの熱電子を用いて偏向電磁石部のアクセプタンスを測定しようとしたが, 電磁石の電流と信号強度の相関データを取得したときに矩形の波形が得られなかった (Fig. 5, SEM 0-deg. 及び SEM 180-deg.). これを現象論的に解釈すると, SEM としてラインフォーカス型の電子増倍管 (浜松フォトニクス R596) を使用しているが, 電磁石の電流によって収束電子の軌道が異なり, 第1ダイノード面への電子の入射角度が一定にならない。そのためダイノード面での二次電子の放出係数が異なっていたことに起因していると思われる。そこで, 熱電子の第1ダイノード面への入射角度が電子の軌道に極力依存しないように配置したところ, シミュレーションと同様な矩形の電磁石電流と信号強度の相関データを得ることができた (Fig. 5, SEM 90-deg.). 偏向電磁石部のアクセプタンスに関しては, ほぼシミュレーション通りの結果にした。

より詳細の比較を行い偏向電磁石部のアクセプタンスを評価するために, Fig. 1 の Output Collimator の代

¹Output Collimator の位置で 1 mm 水平方向に蹴るためのステアリング電圧として評価した。

²一般的な角度で蹴り角で評価すると, 0.19 mrad/V になる。

わりに 1 mmφ のホールの空いたコリメータを用いて偏向電磁石の電流依存性を測定した (Fig. 6)。図中の黒丸が実験結果を, 各色の線がシミュレーション結果を表している。(a)~(e) は位置の異なる 5 種類のホールを用いた実験結果を示しているが, シミュレーション結果とほぼ一致していることが分かる。ほぼシミュレーション通りの結果が得られたこと推察するに, Last Collimator により運動量アクセプタンスを調整でき, 典型的な 10 mm×10 mm の Last Collimator を使用した場合には $\Delta p/p=10\%$ である。

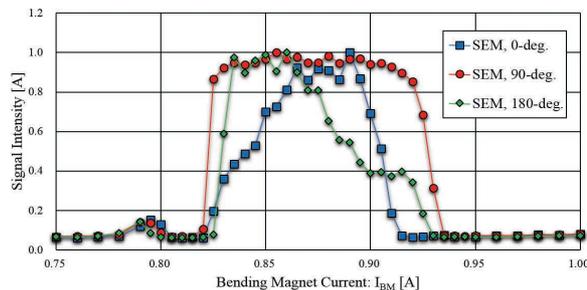


Figure 5: Acceptance of the bending magnet measured by the current scan of the bending magnet. The shape depended on the angle of the 1st dynode face of SEM.

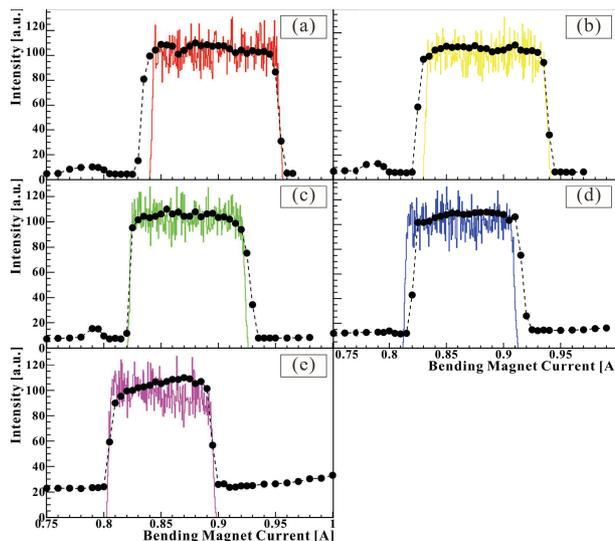


Figure 6: Estimation of the bending magnet acceptance using some holes without the slit at the output collimator. The black circles show the experimental results and the color lines are the simulation. The differences from (a) to (e) are the positions of holes.

4. ビーム試験

4.1 ワイヤーの位置調整

ビーム試験を行う際には, BSM のワイヤーをビームの中心に挿入する必要がある。ビームの中心にワイヤーが挿入されていることは, ビームロスモニタ (以

下, BLMP) の信号とワイヤー位置との相関を測定して, BLMP が最大となる位置からビームの中心を求めた。

Figure 7(a) の緑線が BSM のワイヤー挿入していない時, 赤線がワイヤー挿入した時の BLMP の信号強度分布となっている。ACS BSM01 をインストールした $s=140$ m 辺りからワイヤー挿入時の BLMP の信号強度が増加していることが分かる。Figure 7(b) は BSM のワイヤー位置を変更したときの BLMP の強度を示している。図中には BSM の下流の BLMP の信号強度を表示しているが, ほぼ全てのピークが同じワイヤー位置にあり, ワイヤーがビームの中心を通ったときと推測できる。今回, 設置された BSM に最も近い ACS01B の BLMP を使用して, 最適なワイヤーの位置を求めた。

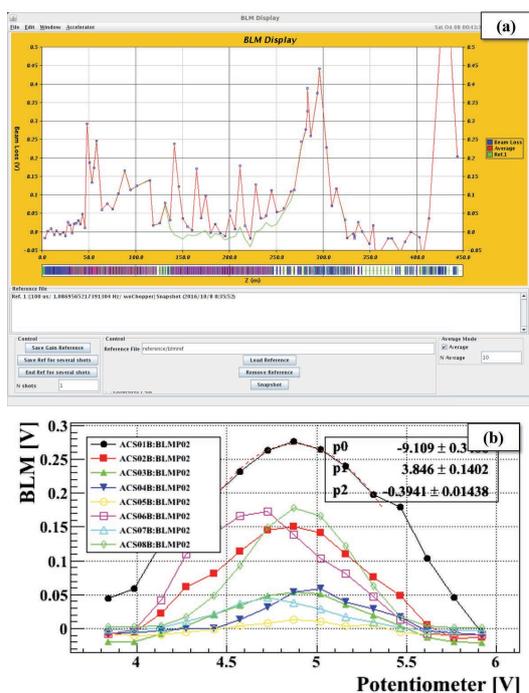


Figure 7: Results of the wire position tune showing (a) the beam-loss distribution when the tungsten wire of BSM is the center of beam and (b) is the wire position dependence on the beam loss.

4.2 RF 蹴り角測定

ビーム試験の際に, ステアリング電圧を変えて, ステアリング電圧とビームバンチ位相の中心値との相関を測定した。Figure 8(a) に 10 W 相当の RF パワーを入力した時のステアリング電圧のみを変えて測定したバンチ波形, (b) にステアリング電圧とバンチの位相の中心値をプロットしている。実際に使用する RF の領域では, $\Delta\phi/\Delta V_{st} = 0.10$ deg./V という結果が得られた。この結果とオフライン試験の収束電子の rms サイズ ($\sigma_{V_{st}}^{rms} = 7$ V) から,

$$\sigma^{rms} [\text{deg.}] = \sigma_{V_{st}}^{rms} [\text{V}] \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta V_{st}} [\text{deg./V}] \sim 0.7 [\text{deg.}]$$

という結果が得られた。この Output Collimator 位置での収束電子サイズは, BSM の分解能に最も寄与の大きい

要素と考えている。これを改善するためには, RF アンプの出力を上げることが最も効果的と考えている。次回のビーム試験で, RF アンプの出力を上げて試験をする予定である。

オフライン試験で求めたステアリング電圧の性能評価 ($\Delta V_{st}/\Delta y = 14.1$ V/mm) を用いると, Output Collimator 位置で $\Delta\phi/\Delta y = \Delta\phi/\Delta V_{st} \cdot \Delta V_{st}/\Delta y = 1.41$ deg./mm という結果が得られる。

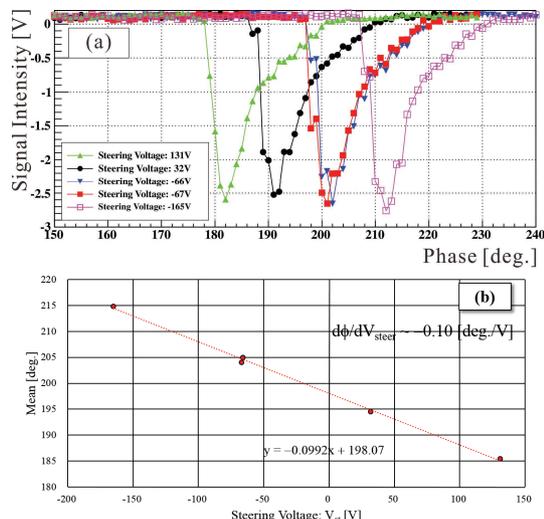


Figure 8: Results of RF kicking angle expressing (a) the bunch shape in the condition of the different steering voltage. and (b) the correlation between the phase center of the beam bunch and the steering voltage.

4.3 ビームバンチの測定

Figure 9(a) はバンチ測定の等高線分布, (b) は時間方向に投影したプロット, (c) は位相方向に投影したプロットを示している。(b) の立上りが悪いのは, BSM の信号強度が想定していたよりも小さく, 急遽 WSM 用のプリアンプを使用したためである。また, プリアンプを加速器トンネルではなく地上のクライストロンギャラリに設置したこともあり, ノイズの影響の大きくなっている。これに関しては, 時定数の短いプリアンプを製作して, 加速器トンネルに設置する予定である。現在, より分解能を向上させるための方向を模索している。

4.4 二次電子の単色性の評価

Figure 10 に偏向電磁石の電流を変更して, ビームのバンチ長を測定した結果を示す。偏向電磁石の電流が 0.848 A (green triangles) と, その他の電流 (0.910 A と 0.898 A : black circles, red squares) では明らかに測定されたバンチの形状が異なっている。これは, ワイヤーから放出された二次電子のエネルギーが単色でないことを示している可能性が高いと考えている。

この現象に関しては, 平成 29 年度の夏季シャットダウン後のビーム試験で詳細を調査する必要があると考えている。その結果次第では, SEM の上流の Last Collimator のサイズを変更して偏向電磁石部のアクセプタンスを制限する必要があると考えている。

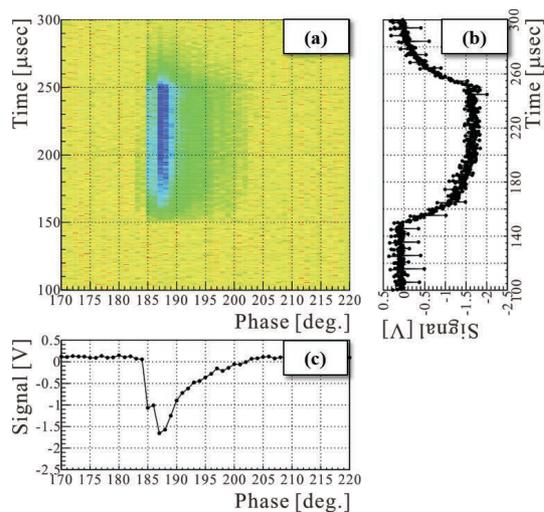


Figure 9: Results of the beam bunch expressing (a) counter plot, (b) projection plot on time, and (c) projection plot on phase.

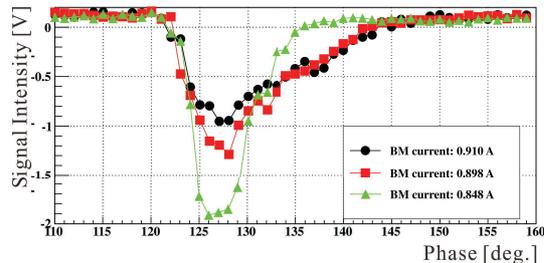


Figure 10: Results of the bunch shape depending on the bending magnet current.

5. まとめ

J-PARC リニアックでは、MEBT2 セクションで縦マッチングを実施するため、BSM の開発を行っている。実機のインストール前にオフラインで、RF 調整、静電レンズ及びステアリング電圧の調整を実施した。また、各種パラメータを測定して概ねシミュレーション通りの結果を得た。平成 28 年度の夏季シャットダウン後に実機にインストールをして、ビームを用いてモニタ評価を行った。最も分解能に寄与が大きいと思っている収束電子サイズは、 $\sigma^{rms}=0.7$ deg. となった。

今後、MEBT2 部には 2 台の BSM をインストールして、縦マッチングに使用する予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Technical design report of J-PARC", KEK Report 2003-13 and JAERI-Tech 2003-44; <http://www.j-parc.jp>
- [2] A. Miura *et al.*, "Bunch Length Measurement of 181 MeV Beam in J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, May 12-17, 2013.
- [3] A. Miura *et al.*, "Bunch Shape Monitor for J-PARC Linac", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.

- [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] A. Miura *et al.*, "Beam Monitor Layout for Future ACS Section in J-PARC Linac", Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, May 12-17, 2013.
- [6] 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.
- [7] A. V. Feschenko, "Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements", Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sep. 24-28, 2012.