

J-PARC リニアックにおけるバンチ形状モニターの開発及び 縦方向ビームマッチングの研究

DEVELOPMENT OF BUNCH SHAPE MONITOR AND STUDY OF LONGITUDINAL BEAM MATCHING AT J-PARC LINAC

福岡翔太^{#, A)}, ニツ川健太^{B)}, 林直樹^{C)}, 川根祐輔^{C)}, 劉勇^{B)}, 三浦昭彦^{C)}, 宮尾智章^{B)}
Shota Fukuoka^{#, A)}, Kenta Futatsukawa^{B)}, Naoki Hayashi^{C)}, Yusuke Kawane^{C)}, Yong Liu^{B)},
Akihiko Miura^{C)}, Tomoaki Miyao^{B)}

A) University of Tsukuba

B) J-PARC Center, KEK

C) J-PARC Center, JAEA

Abstract

In the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) Linac, the beam intensity upgrade plans were implemented for the beam energy (400MeV) in 2013 and the peak beam current (50 mA) in 2014. After the upgrade, notable beam losses were observed in the linac in the demonstration. Mitigation of the beam loss is required for routine user operation with such a high intensity beam. It is suspected that beam losses occur when the beam spills out from a longitudinal acceptance of the drift-tube linac (DTL) due to a mismatch in the longitudinal phase space. In order to improve the longitudinal mismatch, it is necessary to measure the longitudinal beam profile. Recently, we have developed a bunch shape monitor (BSM) to measure the longitudinal beam profile.

We measured the longitudinal bunch size. Measured longitudinal bunch size is 15.3 deg with default buncher tank level. By scanning an RF amplitude of buncher, we measured change of longitudinal bunch size to estimate the longitudinal emittance. We introduce the result of measurement by the new designed BSM and beam dynamics simulation.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、2013 年度末に既設の加速空洞の下流に ACS 空洞を設置してビームエネルギーを 400MeV まで増強し、2014 年度にイオン源、RFQ (Radio Frequency Quadrupole linac)、MEBT1 (Medium-Energy Beam Transport 1) から構成されるフロントエンド部をアップグレードし、電流を設計値の 50mA で加速することに成功している[1]。しかし、これらの増強に伴いビームロスが増加しているため、その原因を解明して、低減させることが求められている。ビームバンチの縦方向にビームを溢していることがビームロスの一因であることが疑われているが、既設のモニターでは縦方向の情報を得ることがほとんど出来ない。従って、リニアックではビームバンチの縦方向の形状を測定できるモニターを開発して、ビームバンチの縦方向の情報を得るためのバンチ・シェイプ・モニター(BSM)を開発し、ビームダイナミクスのシミュレーションと合わせて、縦方向のビームマッチングに関する研究を行った。

2. MEBT1

新規に製作される BSM は、リニアックビームラインの RFQ 加速空洞と DTL (Drift Tube Linac) の間の MEBT1 と呼ばれるビームラインに設置している。(Figure 1) このビームラインには、8 台の四重極電磁石、2 台のバンチャー空洞(それぞれバンチャー1とバンチャー2と呼称

される)、及びチョッパー空洞とスクレーパーから構成されており、負水素イオンの運動エネルギーは 3 MeV となっている。当該 BSM は RFQ 出口から 1.6 m 下流に設置されている。

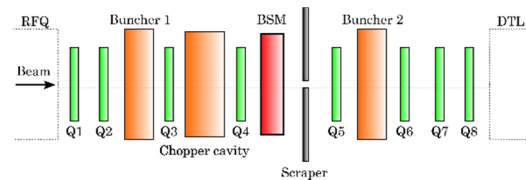


Figure 1: MEBT1 beamline layout.

3. バンチ・シェイプ・モニター(BSM)

3.1 測定原理

BSM の概要を Figure 2 に示す。鉛直方向に張られた (1)タングステンワイヤーをビームライン上に挿入させ、ワイヤーに負水素イオンが衝突することで 2 次電子が発生する。この 2 次電子の分布は、1 次ビームの縦方向の粒子分布を反映しており、その分布を測定するにより負水素イオンビームの縦方向の情報を得ることができる。

ワイヤーには負の高電圧が印加されており、2 次電子を等方位に加速する。加速された電子の一部は (2)入力コリメーターを通過し、(3)RF ディフレクター電極間に達する。RF ディフレクター電極には、静電圧も印加されており、静電レンズの役割も担っている。2 次電子は (4)出力コリメーター上に収束する。RF ディフレクター電極

[#] fukuoka@tac.tsukuba.ac.jp

に、RF 加速周波数(324MHz)に同期した高周波を印加させると、2 次電子はビーム位相に依存した蹴り角を高周波から受けて、出力コリメーター上で変位する。従って、出力コリメーター上で 2 次電子の位置分布を測定することによりビームの位相方向の強度分布を得ることができる。実際には、RF ディフレクター電極の高周波の位相を掃引して測定する。出力コリメーターを通過した 2 次電子は (5) 偏向電磁石により 90 度偏向されて最終段のコリメーターを通過できる運動量だけが弁別される。最終的に 2 次電子は、(7) 電子増倍管 (Secondary Electron Multiplier: SEM) を用いて、増幅された信号として取り出される[2]。

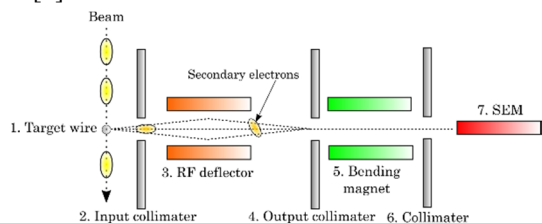


Figure 2: Principle of BSM.

3.2 ターゲットホルダーの改修

低いエネルギーにおけるワイヤーでのエネルギー損失を考慮し、ターゲットのワイヤー径を 20 μm とし、ワイヤーのホルダーも新規に製作を行った。

最初に製作を行ったホルダーは、先端部にセラミックスを使用して耐電圧を保持している。この性能を評価するために耐電圧試験を実施したが、印加予定の最大電圧は -10 kV に対し、-4.0 kV 印加からセラミックス表面に青白い蛍光発光が生じ、一定周期により放電を繰り返す事象が観測された。この現象は、絶縁セラミックス材のアルミナ表面がチャージアップし、充電と放電を繰り返すために生じていると考えられたため、さらに改良を加えたホルダーを製作した。改良型ホルダーでは、-10 kV が印加されるワイヤー部分に接している箇所金メッキを施し、チャージアップの抑制を試みた。しかし、メッキを施していない別の箇所と同様の放電が生じたため、更にセラミック材の量を極力削減したホルダー(Figure 3)に改修した。

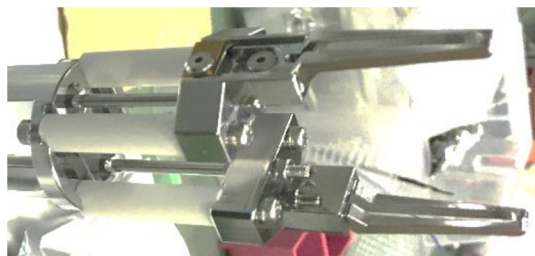


Figure 3: Photograph of the target holder.

3.3 ビームダクト径の変更

上流に設置されているチョッパー空洞によって蹴られる際のビームの広がり方を考慮し、上流側が NW40 であるのに対し下流側のビームダクトサイズを ICF203 に拡大し

ている。

実機でのワイヤー部及びディフレクター部の設計に関しては、ビームライン上流部に設置されているチョッパー空洞による負水素イオンビームの水平方向への広がりを考慮する必要がある。ビームダイナミクスのシミュレーションによると、チョッパー空洞により負水素イオンビームは進行方向に対し左右に約 25 mm ずつ広がると予想されるので、ビームライン中央からディフレクター部の入力コリメーターまでの距離を延長することが必要となった。この変更により 2 次電子の収束性能が変化するが、静電レンズ電圧を適切に調整することにより解消されるため問題とならないことを確認している。

4. オフライン調整

オフラインにおけるレンズ部、RF 部、及び偏向電磁石部の調整について報告する。BSM のディフレクター部分は、静電レンズ、ディフレクター、そして RF 共振器の 3 つの役割を兼ねている。測定に際してはワイヤーに電流を流すことで発生した熱電子を用いている。

4.1 静電レンズ電圧調整

RF ディフレクター電極には静電電圧が印加されており、放出された 2 次電子をコリメーター上に収束させる役割を果たしている。設計の段階では、イオン光学計算ソフト SIMION を用いて 2 次電子の粒子軌道を計算している。

2 枚のディフレクター電極への印加電圧の平均値は固定した状態で、ディフレクター電極間に僅かに電位差 (steering voltage) を設けることで下流のスリットに対して電子を左右に振ることができ、SEM の出力電圧を測定することで、静電レンズを通過後のスリット位置における電子の中心とサイズを知ることができる。測定の結果、ターゲット印加電圧 -10 kV に対して、静電レンズ電圧の最適値は -4.0 kV であると測定された(Figure 4)。これは、事前のシミュレーション結果と一致した。

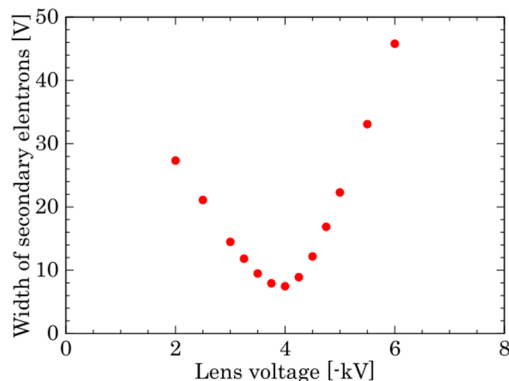


Figure 4: Lens voltage tune.

4.2 RF 調整

ディフレクターの周波数特性に関して述べる。周波数特性の計算には、高周波 3 次元電磁界解析ソフトウェア HFSS を使用した。こちらのシミュレーションは実機を想定し、ディフレクター電極は、全長 396 mm、外径 10 mm、

外導体は内径 54 mm、外径 62 mm で計算した。

BSM ではリニアックの加速周波数と同じ 324 MHz の RF をディフレクター電極上部のポート(入力ポート)から印加し、ディフレクター全体を共振させ、電極間に高周波電場を付加させる。電極上端部には、長さ 4 mm のネジが取り付けられており、これを回転させ電極長を変化させることにより、共振周波数の調整を行う。また、ディフレクター部は中部に静電レンズ電圧印加用のポートが 2 ヶ所、上部に RF 印加用の入力ポート、モニター用のピックアップポートがそれぞれ 1 ヶ所ずつ設けられている。入力ポートとピックアップポートはそれぞれ長さを変えられるように設計されており、それぞれのポート長を変化させることで RF の反射率(S_{11})と透過率(S_{21})を調整することが可能である。大気圧下においては、真空との共振周波数のシフト量を 100 kHz 前後と見積もっており、目標の 324 MHz より低い 323.9 MHz まで合わせ込む必要があった。最終的な真空下におけるネットワークアナライザによる測定結果を Figure 5 に示す。共振周波数は、323.994 MHz であり、324 MHz における S パラメーターの利得はそれぞれ $S_{11}=-25.1$ dB、 $S_{21}=-17.2$ dB、Q 値は 691 と測定された。

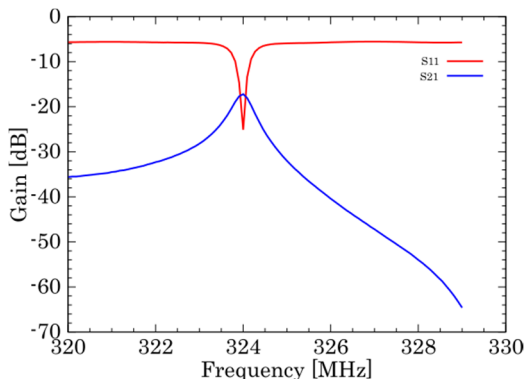


Figure 5: Frequency characteristics of BSM.

4.3 偏向電磁石

偏向電磁石部の調整に関しては、励磁電流をスキャンし、SEM の出力信号電圧が一定となる領域の中心を最適値とした。測定の結果、ターゲット印加電圧 -10 kV、-8 kV、-6 kV に対して、励磁電流値の最適値はそれぞれ 910 mA、820 mA、710 mA であった(Figure 6)。

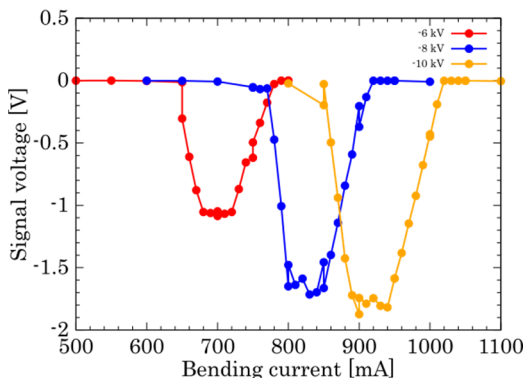


Figure 6: Bending magnet tune.

5. ビームダイナミクス計算

ビームダイナミクス計算コード IMPACT を使い、空間電化効果を含んだビームダイナミクス計算を行った。現状の設定での MEBT1 における横方向及び縦方向の RSM ビームサイズの計算結果を Figure 7 に示す。横軸は RFQ 出口からの距離、第 1 軸が横方向(X, Y)のビームサイズ、第 2 軸が縦方向(Z)のビームサイズを表す。

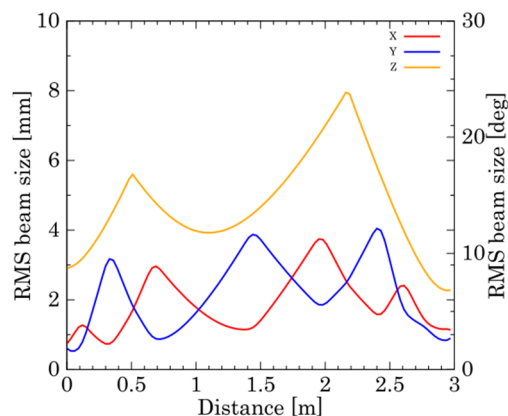


Figure 7: Transverse and longitudinal beam width.

次に、バンチャー1 の RF 電圧振幅(Tank level)を変えながら、BSM の位置での縦方向の RMS ビームサイズをプロットすると Figure 8 のようになる。Tank level を上げると RF からビームが縦方向に受ける力が大きくなり、焦点を結ぶようにビームサイズが小さくなる。Tank level が大きすぎると過焦点が生じ、ビームサイズが広がって見える。

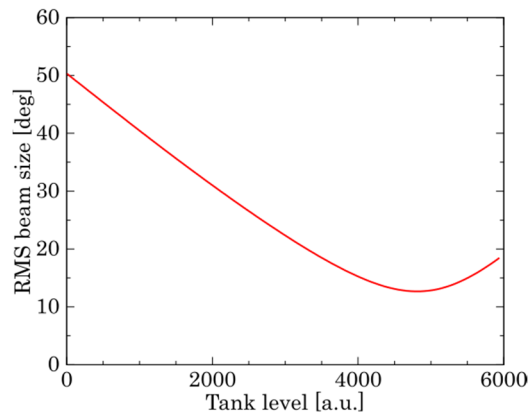


Figure 8: Buncher tank level scan.

6. ビーム試験

BSM を昨年 8 月初頭に MEBT1 へとインストールし、夏季メンテナンス明けの 10 月以降のビームコミッションングにおいてビーム試験を実施した。また、ビームライン上流に 3 mm 厚のパーマロイ製の磁気シールドを設置することで、電子の収束に影響を及ぼすと懸念される上流の四重極電磁石の漏れ磁場の影響を低減している。

ビームの電流値は 40 mA、マクロパルス幅は 50 μ sec、最大繰り返しは 1 Hz の条件にて測定を実施した。

MEBT1 のインストール後にワイヤーへの高電圧印加

によるワイヤー断線事象が生じたため、印加電圧を-6 kV に下げることにした。

6.1 静電レンズ電圧調整

ビームを用いて、静電レンズ電圧の確認を実施した。ワイヤーへの印加電圧を-6 kV に設定した際の静電レンズ電圧の最適値は-2.4 kV となった。この結果は、オフライン調整時に測定されたワイヤー電圧-10 kV に対する静電レンズ電圧の最適値-4.0 kV と比率が一致しており、妥当であると判断できる(Figure 9)。

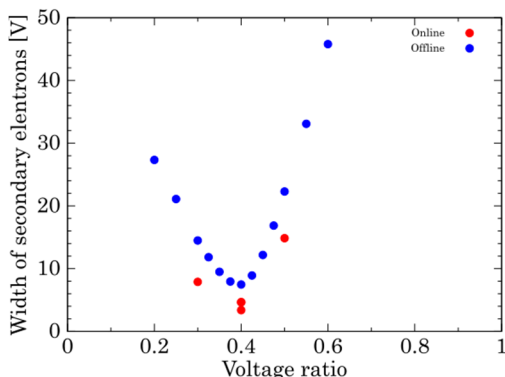


Figure 9: Lens voltage tune with beam.

6.2 バンチ形状測定

BMS 上流にはバンチャー空洞が 2 台設置されており、それぞれの空洞の RF 電圧振幅を変化させることで、縦方向のバンチ形状等を調整することができる。BSM の測定なしで決められたバンチャー1 の RF 電圧振幅値 (Tank level=4028[任意単位])での MEBT1 におけるバンチ形状の測定結果を Figure 10 に示す。この際の RF ディフレクターへの入力パワーは 15 W である。位相方向に、RMS 値で 15.3 度の広がりを持つ非対称なバンチ形状が測定された。

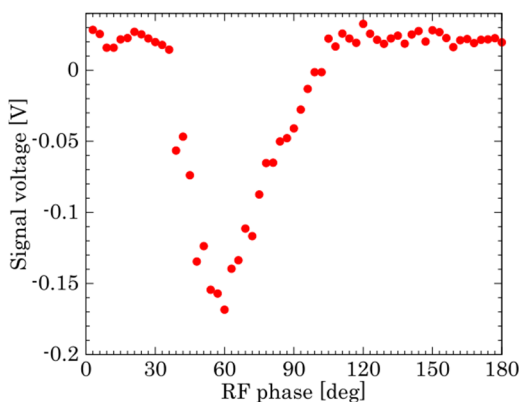


Figure 10: Measured bunch shape.

6.3 バンチャー1 の RF 電圧振幅スキャン

バンチャー1 の RF 電圧振幅値を変化させながら同様の測定を行った (Figure 11)。結果として、tank level=5500 前後で最小値を持つバンチ幅の変化が測定された。

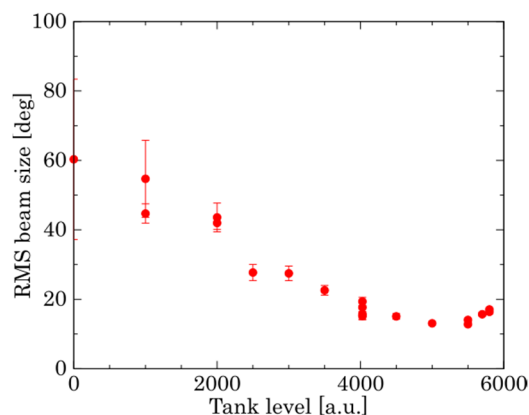


Figure 11: Buncher tank level scan.

横方向のエミッタンス測定で用いられる Q スキャン法 [3] を縦方向の測定に関して適用すると、縦方向の収束力 K のバンチャー空洞の後にドリフトスペース L がある場合を考える。BSM の測定位置における σ -matrix $\sigma(K, L)$ は、バンチャー空洞の位置での σ -matrix を用いて以下のように書き表される。

$$\alpha(K, L) = \begin{pmatrix} 1-KL & L \\ -K & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1-KL & -K \\ L & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

測定点における対象はビームサイズの 2 乗を表す σ -matrix の (1, 1) 成分のみであるから、そのみを計算し、K に注目して式を整理すると以下を得る。

$$\sigma_{11}(K, L) = L \sigma_{11} \left\{ K - \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} + \frac{1}{L} \right)^2 \right\} + \frac{L}{\sigma_{11}} (\sigma_{11} \sigma_{22} - \sigma_{12}^2) \quad (2)$$

したがって、ビームサイズの 2 乗を K の 2 次関数とした場合、3 つの係数を比較することにより、 σ -matrix の各パラメーターを算出することができる。実際の測定では K を変化させた時のビームサイズの 2 乗をプロットし 2 次曲線でフィットさせることでエミッタンス測定が行われる。

縦方向の収束力に相当するバンチャー1 の RF 振幅強度 $E_0 TL$ を横軸に、測定された縦方向バンチ幅の 2 乗 σ_z^2 を縦軸にとったグラフ (Figure 12) から、縦方向のビームパラメーターを算出することができる。実測値とシミュレーションは概ね一致する結果となったが、RFQ 出口でのビームの初期パラメーターの違いによる差が見られるため、実測に基づいて改めて算出をする必要があると考えられる。また、バンチャーの RF 振幅電圧が低い領域では、測定の誤差が非常に大きいため、更なる追加測定を行い、データ統計量を増やす必要があると考えられる。

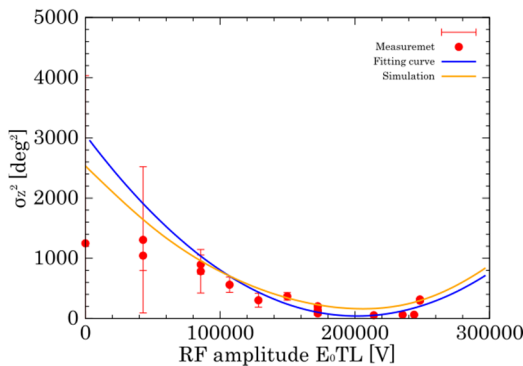


Figure 12: Buncher tank level scan.

7. まとめ

MEBT1 に新規に開発した BSM をインストールし、ビームコミッションングにおいてバンチ形状の測定を実施した。現状、位相方向に、RMS 値で 15.3 度の広がりを持つ非対称なバンチ形状が測定された。縦方向エミッタンス算出のために、上流のバンチャー空洞の RF 電圧振幅スキャンを実施したが、データの統計量が十分でないため、データの蓄積を含めて今後追測定を予定している。その後、測定に基づきながら、MEBT1 の 2 台のバンチャー空洞の RF 振幅電圧値の最適化を行い、ビームロスの低減に繋げる必要がある。

謝辞

研究を進めるにあたり、KEK の小関教授並びに筑波大学の小沢教授におかれましては、研究に関しご指導頂きまして、誠に感謝致します。また、ビーム試験に際し、MEBT1 担当者の平野氏を始めリニアック加速器の関係者の方々、関東情報サービス株式会社の吉田氏、高橋氏、三菱電機システムサービスの大津氏、吉川氏には多大なご協力をして下さいましたこととお礼申し上げます。BSM の製作に際し、VIC インターナショナル株式会社様には深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Maruta *et al.*, “RECENT PROGRESS OF BEAM STUDY IN THE J-PARC LINAC”, in proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, August 5 - 7, 2015. pp.432 - 436.
- [2] A. V. Feschenko, “Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements”, Proc. of RuPAC2012, SaintPetersburg, Russia, Sep. 24-28, 2012.
- [3] 阪井寛志, 8. ビーム計測 II, OHO '02 電子線形加速器の基礎, KEK, 2002 年.