

J-PARC L3BT におけるバンチシェイプモニタの検討

DEVELOPMENT OF THE BUNCH SHAPE MONITOR IN THE J-PARC L3BT

守屋克洋^{*A)}、岡部晃大^{A)}、劉勇^{B)}、三浦昭彦^{A)}、二ツ川健太^{B)}
Katsuhiko Moriya^{*A)}, Kota Okabe^{A)}, Yong Liu^{B)}, Akihiko Miura^{A)}, Kenta Futatsukawa^{B)}

^{A)}JAEA/J-PARC

^{B)}KEK/J-PARC

Abstract

In J-PARC, a development of Bunch Shape Monitor (BSM) has been progressed for measuring the longitudinal beam profile. If the profile is measured in L3BT which is the beam transport of Linac to the downstream 3GeV synchrotron, we can verify the beam loading compensation. In addition, combining the transverse beam profile monitor, we can measure the longitudinal-transverse coupling resonance induced by space charge effect(SCE). Therefore, to install a longitudinal beam profile monitor, it is made possible to adjust the beam more precisely in Linac and experimentally verify beam dynamics theory including SCE. This paper addresses that we numerically and experimentally confirm the optimum installation position of the BSM.

1. 序論

J-PARC Linac では、イオン源で生成した負水素イオンを Radio Frequency Quadrupole(RFQ) で 3MeV、Drift Tube Linac(DTL) で 50MeV、Separated-type Drift Tube Linac(SDTL) で 181MeV、Annular-ring Coupled Structure linac(ACS) で 400MeV まで加速する。400MeV まで加速した負水素イオンは L3BT を通過して、後段の 3GeV シンクロトロン(RCS) に入射される。

Table 1 に Linac の主なビームパラメータを示す。現在、ビーム電流 40mA、マクロパルス 500 μ s で利用運転している。更なる大強度化を目指して、ビーム電流 60mA、マクロパルス 600 μ s の利用運転が計画されている [1]。これらを実現するためには、大強度化に伴うビーム物理を理解するだけでなく、現状のビームロスを抑える必要がある。

Figure 1 は J-PARC Linac から L3BT で観測された顕著なビームロスエリアを示す。ビームの大強度化により、ビームロスはさらに増えることが予想される。現在、これらの問題点を解決するために、以下を行う必要があると考えられる。

- ビームローディング補正の高精度化
- 6次元にマッチしたビーム整形
- 縦横結合共鳴などの空間電荷効果の理解
- Intrabeam Stripping の理解

Linac や L3BT では、横方向ビームモニタにワイヤースキャナーモニタ (WSM) とビーム位置モニタ (BPM) が設置されている。また縦方向ビームモニタとして、J-PARC ではビーム時間幅を観測できる BSM [2] が設置されている場所がある [3,4]。

なお、Linac の設計思想として、Emittance Growth は少なからず生じるものとみなし、ビームマッチングセクションを複数設置している。ACS 上流部では、WSM と BSM を組み合わせたマッチングセクションを設置して

*moriya.katsuhiko@jaea.go.jp

Table 1: Main-Beam Parameters in Linac

	Present	Proposal
Particle species	H ⁻	H ⁻
Energy[MeV]	400	400
Repetition[Hz]	25	25
Peak current[mA]	40	60
Pulse width[μ s]	500	600

おり、既に Linac 上流部のビームロス起源やビーム物理についての研究が進められている [5]。本論では L3BT 1st Arc のビームロス (Figure 1 参照) に着目し、Linac 上流部と同様に縦横両方向をモニタするために、L3BT へ新たに BSM の設置を検討した。

2. BSM 設置位置の検討

L3BT 1st Arc のビームロスを調べるためには、L3BT 1st Arc で曲げられる前のビームを観測することが望ましい。よって、本研究では L3BT から 0 度ビームダンプ (BD0) の間に BSM を設置する (Figure 2 参照)。

Figure 2 は ACS21 から BD0 までの Lattice とモニター配置を示す。BSM を 1 台設置してビーム縦方向のパラメータを調べるために、縦方向収束力を変化させて Q-scan を行う。L3BT 上流部から BD0 の間で縦方向 Q-scan を行うことができるコンポーネントは ACS 最下流の ACS21 とデバンチャ 1(DBNC1) の 2 つある。縦方向のビームパラメータを求めるには、縦方向 Q-scan によりウエストを観測することが重要となる。そのためには縦方向収束力を十分に可変できることが必須であり、本研究では ACS21 を用いて縦方向収束力を変化させる。実験の都合上、ACS21 を加速無しで縦方向収束力を変化させるため、負水素イオンのエネルギーは 389MeV とした。

BSM の設置位置を検討する方法は、数値計算を用いた探索と、実機で縦方向 Q-scan を実施し既存のモニタを用いてビーム縦方向を調べる方法の 2 つある。ここ

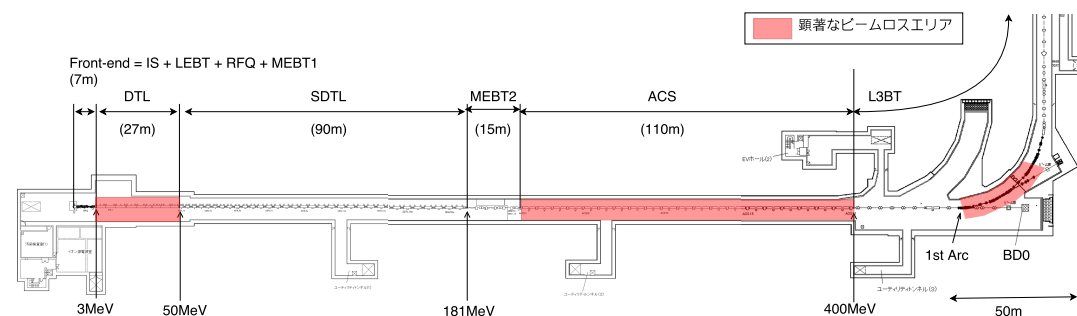


Figure 1: Severe beam loss sections between Linac and L3BT in J-PARC.

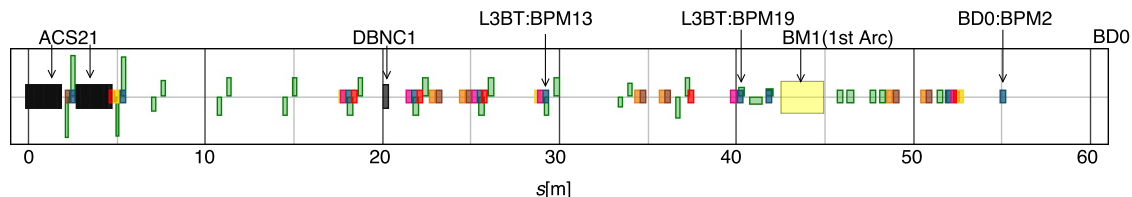


Figure 2: Layout of magnets and beam monitors from the last ACS cavity (ACS21) to the straight beam dump (BD0).

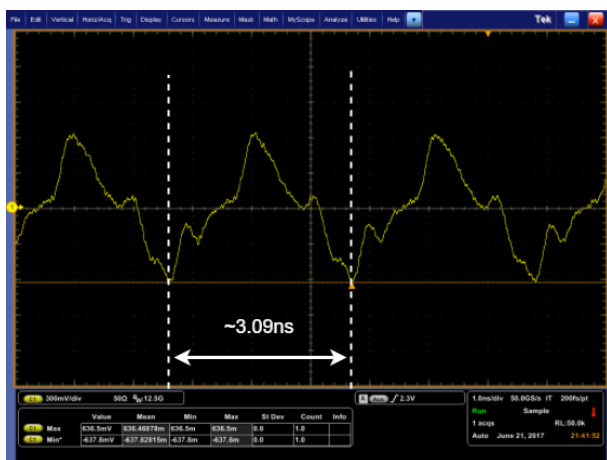


Figure 3: Bunch signal on BD0:BPM2, consisting of a stripline electrodes.

では既存のモニタとして、BPM を用いたビーム縦方向観測を行った。

2.1 BPM を用いた縦方向観測

J-PARC L3BT には、ストリップライン電極型 BPM が複数設置されている (Figure 2 参照)。DTL と SDTL では 324MHz、ACS では $972(=3 \times 324)$ MHz の高周波電場を用いて負水素イオンを加速しているため、バンチ信号は 324MHz (~ 3.09 ns) 毎に観測される。ストリップライン電極型 BPM で負水素ビームのバンチ信号を観測すると、下側にバンチ信号、上側に反射パルスが予想される。

バンチ信号の詳細な変化をオシロスコープで観測するためには、十分な周波数帯域が必要となる。バンチ信号が ~ 3.09 ns より十分短い時間構造を持つことが予想されるため、本研究では Tektronix DPO71254B (最大周波数帯域: 33GHz、サンプリング数: 100GS/s) を使用する。

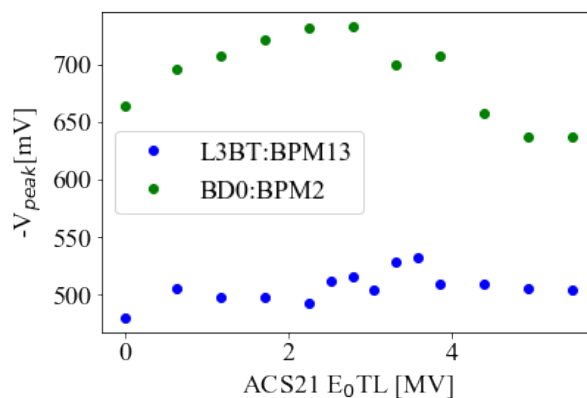


Figure 4: Longitudinal Q-scan with focusing force of ACS21.

Figure 3 はオシロスコープで測定したビーム通過時の BD0:BPM2 における電圧波形である。ストリップライン電極型 BPM をモニタしているため、上側にパルス信号、下側に反射パルスを確認できる。また、電圧波形の周期が ~ 3.09 ns であるため、この波形はバンチ信号である。

本研究では、ACS21 の縦方向収束力を変えることで Q-scan を行う。Figure 4 は縦方向収束力を変えた時の BD0:BPM2 と L3BT:BPM13 で観測したバンチ信号のピーク電圧値 ($-V_{peak}$) を示す。縦方向収束力を変えた際ビームロスがないと仮定すると、ビームの時間幅とピーク電流は反比例の関係にある。Figure 4 の BD0:BPM2 に着目すると、ACS21 の縦方向収束力を強くすることでビームは縦方向に収束され、ピーク電流が増加する。 $E_0 TL = 2.5$ MV 付近を境に overfocus となり、BD0:BPM2 の位置でビームは縦方向に発散し、ピーク電流は減少する。つまり、グラフのピークの位置でビーム時間幅がウエストを持つことを意味す

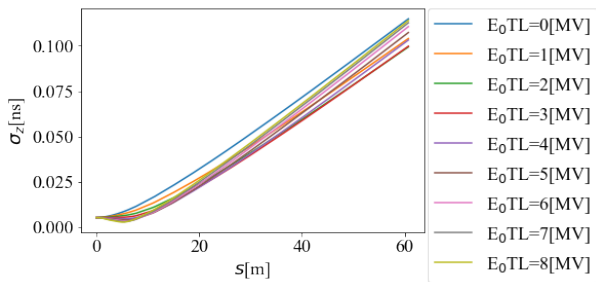


Figure 5: s dependence on the beam-time width.

る。実験の結果、L3BT:BPM13 の位置に $E_0TL=3.5\text{MV}$ 付近、BD0:BPM2 の位置に $E_0TL=2.5\text{MV}$ 付近でウエストを作ることが分かった。また、L3BT:BPM13 の位置におけるビーム時間幅は、BD0:BPM2 の位置におけるビーム時間幅よりも小さいことが分かった。つまり、L3BT:BPM13 付近に BSM を設置する場合、BD0:BPM2 付近に設置するよりも BSM を高精度化させる必要があることを意味する。

2.2 数値計算：3次元 Envelope 方程式

BPM を用いたビーム時間幅の観測では、Q-scan による傾向を理解できるが、ビーム時間幅の絶対値を求めることは難しい。ここでは Envelope 方程式を解くことでビーム時間幅を求め、BSM の設置位置を検討する。3次元 Envelope 方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{d^2X}{ds^2} + K_x X - \frac{\varepsilon_x^2}{X^3} - \frac{2Q_T}{X+Y} &= 0 \\ \frac{d^2Y}{ds^2} + K_y Y - \frac{\varepsilon_y^2}{Y^3} - \frac{2Q_T}{X+Y} &= 0 \\ \frac{d^2Z}{ds^2} + K_z Z - \frac{\varepsilon_z^2}{Z^3} - \frac{Q_L}{5\sqrt{5}Z^2} &= 0 \end{aligned}$$

と記述できる [6]。ここで、 s は独立変数、 x, y は横方向、 z は縦方向、 X, Y, Z はビームサイズ、 K_x, K_y, K_z は Lattice parameters、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ はエミッタンス、 Q_T, Q_L は Perviance、 β と γ は Lorentz factor を示す。なお、初期条件は 40mA のデザイン値を使用し、また、エミッタンスは一定であると仮定する。

Figure 5 は ACS21 から BD0 までの縦方向 Envelope の結果を示し、色の違いは ACS21 の縦方向収束力の大きさの違いを示す。収束力を強くすることで、縦方向ビームサイズが最小となる位置が、ACS21 に近づくことが確認できる。

BPM を用いた実験と同様に、各位置で観測されるビーム幅の結果を Figure 6 に示す。数値計算の結果、L3BT:BPM13 の位置に $E_0TL=3\text{MV}$ 付近、L3BT:BPM19 の位置に $E_0TL=2.5\text{MV}$ 付近、BD0:BPM2 の位置に $E_0TL=2.5\text{MV}$ 付近でウエストを作ることが分かった。これは BPM を用いた測定結果と一致する。

また、ウエスト作成時のビーム時間幅は BPM の位置毎に異なり、ACS21 に近いほど細く絞られることが分かる。これも BPM を用いた観測結果と一致し、ACS21 に近い位置に BSM を設置するほど、BSM の高精度化が必要であることを意味する。

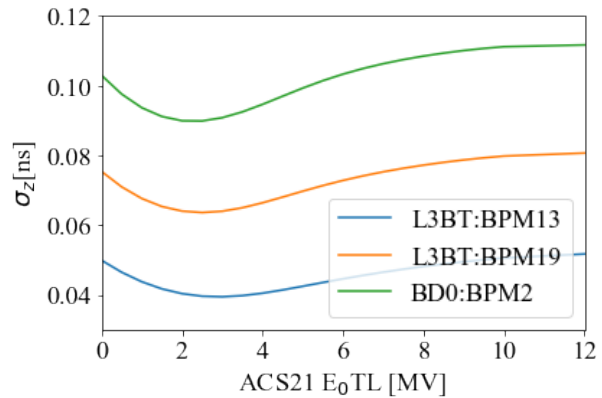


Figure 6: E_0TL dependence on the beam-time width on each BPM position.

縦方向 Q-scan 時のグラフの形に着目する。空間電荷効果が効かない場合、縦方向 Q-scan 時のグラフの形は放物線を描く。一方、本研究で使用したビームは大強度ビームのため、空間電荷効果が働く。今回計算した 3次元 Envelope 解析の場合、エミッタンスを一定としたが、ピーク電流が変化することで空間電荷斥力の大きさが変化したため、縦方向 Q-scan 時のグラフの形は放物線を描かないと考えられる。

3. まとめと今後

J-PARC ではビーム出力増強を目指し、大強度ビーム物理の理解・ビームロスの抑制に取り組んでいる。ここでは、J-PARC L3BT のビーム縦方向測定用 BSM の設置に向けた数値計算、BPM を用いたビーム縦方向観測実験について報告した。縦方向 Q-scan によるウエスト観測に必要な縦方向収束力の値は、3次元 Envelope 解析を行った数値計算結果と BPM を用いた観測結果はよく一致した。また、縦方向収束コンポーネントに近いほど、Q-scan によるビーム時間幅のウエストは小さくなり、高精度化な BSM が必要となる。さらに、縦方向 Q-scan 時のグラフの形は、空間電荷効果によって放物線よりずれたと考えられる。今後は数値計算を基に、縦方向ビームを観測するために必要な BSM の精度の見積もりや構造の最適化を行う。

参考文献

- [1] M. Kinsho, Linac and RCS Upgrade, J-PARC ATAC 2017.
- [2] A. V. Feschenko, Methods and instrumentation for bunch shape measurements, Proc. Part. Acc. Conf. PAC 2001, Chicago, p. 517 (2001).
- [3] A. Miura *et al.*, Bunch Shape Measurement of 181 MeV Beam in J-PARC Linac, JPS Conf. Proc., 011003 (2015).
- [4] K. Futatsukawa *et al.*, Development of Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac, JPS Conf. Proc., THP092 (2015).
- [5] A. Miura *et al.*, Beam Tuning for Longitudinal Profile at J-PARC Linac, Proc. of IBIC2016, Barcelona, Spain, Sept. 13-18, 2016.
- [6] M. Reiser, Theory and Design of Charged Particle Beams (John Wiley & Sons, New York, 2008).