

J-PARC RCS への入射ビームの監視と H0 ダンプライン BPM の設計 MONITORING OF THE INJECTED BEAM TO THE J-PARC RCS AND BPM DESIGN FOR H0 DUMP LINE

林直樹、Saha Pranab、吉本政弘、畠山衆一郎

Naoki Hayashi*, Saha Pranab, Masahiro Yoshimoto, Syuichiro Hatakeyama
Accelerator Division, J-PARC Center, JAEA

Abstract

The J-PARC Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) is designed as a 1-MW high power accelerator. It has been operated since 2007, and its injection energy and beam current are upgraded in 2014. Its operation is very smooth and provides the high intensity beam to the Material and Life science experimental facility (MLF) and the Main Ring (MR). The beam is injected with multi-turn mode. It is possible because the negative hydrogen ion beam from the Linac, H^- , and the circulating proton beam H^+ are different state. The H^- is converted to H^+ at the injection point, where a charge stripper foil is set. A small fraction of the injected beam, which is not fully stripped, are transferred to the injection beam dump through H0 dump line to prevent un-necessary activation. Since the limit of beam dump is only 4 kW, which is about 3% of designed injection beam power 133 kW, the beam has to be stopped immediately in case of stripper foil break up incident. A current monitor is used to detect sudden intensity increase. Relatively small fluctuation is also monitored by adopting averaging and detecting specific frequency component. For further improvement and precise monitoring, new Beam Position Monitor (BPM) at H0 dump line is considered. In this report, the current monitoring system for the injection beam is presented, and we discuss about design and issues for the BPM at H0 dump line.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Research Complex) は、3つの加速器、3つの実験施設からなる研究施設である。その二番目の加速器である RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) は、設計ビームパワー 1 MW の速い繰返しのシンクロトロンである [1]。2007 年のファーストビームより運転を開始し [2]、途中 2014 年にリニアックのアップグレード、ACS (Annular-ring Coupled Structure) 空洞の導入による入射エネルギー増強 (181 から 400 MeV)、イオン源方式の変更 (ピーク電流 50 mA 化) を経て、翌 2015 年には、1 shot ながら設計性能の 1 MW 相当を達成した [3]。直近では、約一時間の連続試験運転まで実施している。ユーザーへの利用運転も、MLF (Materials and Life Science Experimental Facility) 向けには、500 kW、MR (Main Ring) を経由して NU (Neutrino Experimental Facility) 向けには、490 kW、HD (Hadron Experimental Facility) 向けには、約 50 kW と安定的にビーム供給を行っている [4]。

RCS では、大強度ビーム実現ため、入射点に炭素薄膜フォイルを置いて、 H^- を H^+ ビームに荷電変換する多重周回入射方式を採用している。更に、入射後の空間電荷効果を緩和する為、位相空間上に計画的に埋めていくペインティング入射も行っている。入射点に設置している荷電変換フォイルであるが、リニアックからの入射ビームのみならず、入射後の周回ビームも衝突し、uncontrolled なビームロスの主要原因となっている。そのため、出来るだけ薄くする必要があり、現状では、330 g/cm² の厚みのものを使用している。この時、荷電変換効率は、約 99.7% である。

さらに、周回ビーム衝突回避の観点からは、フォイルはできるだけ小さいほうがよいが、入射ビームのプロファイルが、大きくなると、フォイルに当たらない H^- ビームも増える。このわずかに変換されなかったビームは、不用意な機器の放射化防止のため、入射ビームダンプへ導かれる。ダンプ容量は、4 kW と定格入射ビームパワー 133 kW の約 3% しかなく、万一の荷電変換フォイル破損時には、即時にビームを停止する必要がある。突発的なビーム強度上昇に備え、電流モニタ (Current Transformer) CT を使った電流監視、小さな変動についても、波形データを平均処理して求めている [5,6]。今回、さらなる監視強化のため、H0 ダンプラインに BPM (Beam Position Monitor) の設置を検討した。ビーム強度は、通常メインビームの約 0.3% 程だが、この BPM は、従来の RCS の周波数ではなく、リニアック周波数 324 MHz で検波することで、パルス電磁石のノイズの影響を避ける。また、入射の全時間帯での位置変化も観測できれば、ペイント入射状況の監視、交流四極電磁石の影響の確認にもつながる。入射ビームの連続的な測定は、安定的な運転継続に資する重要な監視項目である。本報告では、現状の入射ビーム監視について触れた後、H0 ダンプラインに設置する BPM の設計、課題について述べる。

2. 入射スキーム及び H0 ダンプビームライン

ペインティングの詳細については、別の論文 [7,8] に譲り、ここでは、必要最低限の簡単な説明に留める。Figure 1 [7] は、水平方向のペインティング時の各軌道、及び機器配置を示したものである。入射点、水平方向の入射軌道は、25 Hz で動く四極電磁石

* naoki.hayashi@j-parc.jp

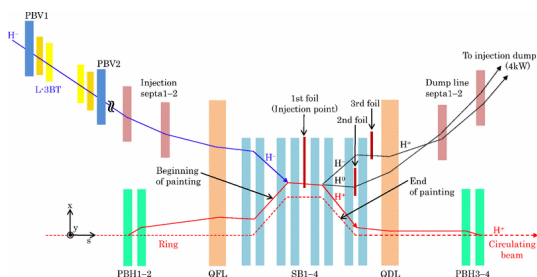


Figure 1: Schematic view of the RCS injection area for horizontal painting. Three charge stripping foils are shown in red.

QFL, QDL の影響を除いて、原則固定である。横方向ペインティングの内、垂直方向のペインティングは、入射ビームライン L3BT (Linac-to-3GeV RCS beam transport line) の最終段にある 2 台のパターン電磁石 (PBV1, PBV2) を使って、時間的に入射点での軌道傾きのみが変化するように、操作する。水平方向のペインティングは、リング内にある 4 台のパターン電磁石 (PBH1-2, PBH3-4) により、周回軌道を時間的に変化させ、相対的に入射ビームを所定の位相空間に来るように調整する。

荷電変換フォイルは、合計で三か所あり、最初のフォイルがメインである。入射点は、内側にある 4 台のシフトバンプ電磁石 (SB1-4) のちょうど真ん中にある。このシフトバンプ電磁石は、入射時間中は、一定で固定したバンプ軌道を決める。4 番目のシフトバンプ電磁石 SB4 の中央にある第二、及び、SB4 と次の QDL の間にある第三荷電変換フォイルは、それぞれ、第一フォイルで完全に交換しきれなかった H^0 または H^- ビームを H^+ に変換する。確実な変換を期するため、第一フォイル (330 g/cm^2 、高さ 20, 横 110 mm) に比べ、厚くかつ大きくなっている (500 g/cm^2 、高さ 220, 横 60 mm)。これらの下流では、実体として、ビームは、全て H^+ に荷電変換されているが、便宜的に、第一フォイルを通過した直後の状態で H^0 、 H^- -ビーム、と呼ぶこととする。第一フォイルを更に薄くすれば、周回ビームとの衝突によるビームロス、小さくなるが、フォイル自体の扱いが困難になるだけでなく、ビームダンプへ導かれる H^0 、 H^- ビームが増え、周回ビームも減ってしまう。

結果的に荷電変換されない入射ビームを適切に処理するのが、Injection beam dump (H0 ビームダンプ) であり、 H^0 、 H^- ビーム等を導く 15 m 程の短いラインが、H0 ビームダンプラインである。若干異なる H^0 、 H^- 両方のビーム軌道を含めるため、その真空容器内径は、400 mm で設計されている。

実際に、H0 ダンプラインへ導かれるのは、確率的に第一フォイルで変換されないもの (約 0.3%) のほか、第一フォイルに当たらない入射ビームで、入射ビーム軌道がずれたり、ビームサイズが大きくなると増加することがある。フォイルが劣化し荷電変換効率が下がった場合、更に進んで荷電変換フォイルが破損した時も想定されている。Figure 2 に、H0 ダ

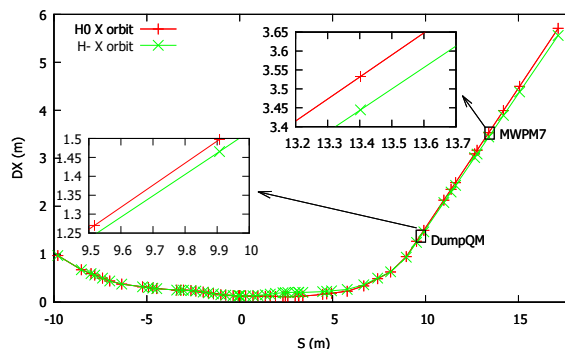


Figure 2: H^0 , H^- orbit along circulating beam reference.

ンプラインを含む入射部のビーム軌道を示す。

3. 入射用ビームモニタ

3.1 L3BT ラインにあるビームモニタ

RCS への入射ビームについて、BPM を使った軌道は、勿論、光学モデルとの比較により求まるエネルギーについても、L3BT で監視している。

従来の BPM 信号処理系では、25 Hz、マクロパルス最後の $5 \mu\text{s}$ から任意の中間パルス一つのみを代表として選択しそのパルスのビーム位置を決めている。ただ、ペインティングの監視のためには、マクロパルス全体、最長 $500 \mu\text{s}$ 間の位置変化を知る必要がある。Figure 3 は、L3BT ライン上最終段にある BPM で、垂直ペイントのためマクロパルス内で軌道を振っている様子を示したものである [9]。マクロパルス全幅の時間変化を記録できる機器は限定されているが、必要に応じこのように監視が可能である。この時、MLF 行き、NU 行き (MR 行き) で、時間変化の様子が異なるのは、水平方向のペインティングに対し、垂直ペイントの向きを変えていたためである。NU 行きに対しては、水平・垂直方向、共に位相空間の中心から周辺に入射する correlated painting に対し、MLF 行きに対しては、垂直ペイントが位相空間の外側から中心に移動する anti-correlated painting を実施していたためである。また、ビーム強度の違いから入射時間も異なっていた (測定時、NU 行き $500 \mu\text{s}$ に対し、MLF 行きは、 $220 \mu\text{s}$ であった)。

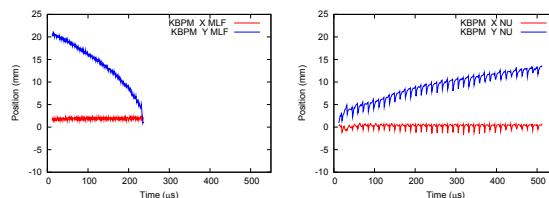


Figure 3: The beam position at the last quadrupole magnet in L3BT.

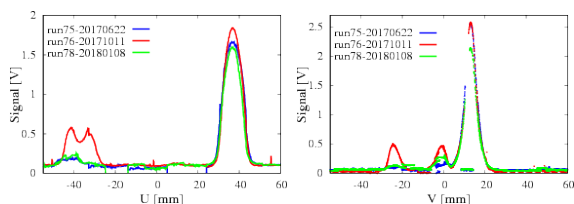


Figure 4: The beam profile at MWPM7 different run. Upper is U-plane and lower is V-plane.

3.2 入射部及び H0 ダンプラインにあるビームモニタ

ビーム調整時、入射ビーム位置、プロファイル測定のため、また、荷電変換フォイルの変換効率測定の場合に、入射・ダンプラインに設置した Multi-wire Profile Monitor (MWPM) [10] を使う。MWPM は、破壊型モニタであり、信号強度は十分である。むしろ、ワイヤ破損を避けるため、パルス幅を短く、ビーム強度を抑制して使用している。使用方法は、1 Hz で、100 ショット分 (定間隔で張られた) ワイヤ位置を動かしながら測定している。MWPM4,5,6 は、入射点前後にあり、最も近い MWPM4 を使って、入射点を正確に把握する。

MWPM6, MWPM7 は、H0 ダンプライン上に設置されている。この際、第1、第2、第3 荷電変換フォイルの挿入状態に対応して、主成分が H^0 、又は H^- になる。例えば、第3 フォイルのみを挿入すれば、 H^- のみを選択することになる。 H^- の contribution は、単に、全く荷電変換されない成分だけでなく、入射ビームに対しギリギリの大きさの第一フォイルに当たらない成分、も含んでいる。入射ビームが想定より大きかったり、調整時より入射点が変動すると、フォイルに当たらない成分が増え、H0 ダンプへ輸送されるビーム量が増えて見えることがある。この例を Fig. 4 に示す。右側の大きなピークが H^0 の成分をしめしているが、Run76 (赤色) は、それ以外にも左側に、フォイルの上下を通過した H^- 成分が観察された。

現在、H0 ダンプラインにある電流モニタ、H0CT は、メインビームの 0.3% 程度の弱いビーム強度を 1 パルスで検知するのは難しい。フォイル破損やバンブ電磁石のトリガーミスなどにより、急に強いビーム (元ビームの 20% 以上) が、来れば、それを検知し、Interlock として働くように設定している。ただ、それだけでは、定常的な様子が分からないので、25 Hz パルスデータを約 40 秒間ためて平均化、FFT 処理し、RCS の RF 周波数成分の相対的強度から、ビーム強度を求めている。平均処理、特定の周波数成分に特化することで、入射パルス電磁石による厳しいノイズ環境下でかつ、小さなビームでも検知できている [5,6]。

実際に、入射ビーム輸送ライン L3BT のある電磁石の冷却水量が低下し (この際流量計の問題でインターロック発報せず)、高温になったとき、わずかながら、垂直方向のビーム位置変動と H0 ダンプライン

へのビーム強度、周回ビーム強度の変動が同時に起きていたことが、後になって分かった。これも、軌道が僅かに変わり、第1 フォイルに当たらないビーム成分が増えた一例と思われる。この際、ビーム強度に比べ、かなり緩やかに応答するビームダンプの温度もこの傾向を支持していた。

3.3 RCS リング周回上にあるビームモニタ

L3BT 上の BPM はもちろん、RCS リングへ入射後も、リニアックの周波数成分 324 MHz が残っている間は、入射直後のビーム位置を周回ビームと区別して測定し、横方向ペイントの状況を監視することができる [9, 11]。第一アーク部、セル 6, 7 にある、BPM324 は、通常の RCS の周波数ではなく、リニアック周波数で検波することが可能な設計となっている。(入射後ビームのリニアック周波数成分は、急速に減衰する。) BPM324 による測定例を Fig. 5 に示す。

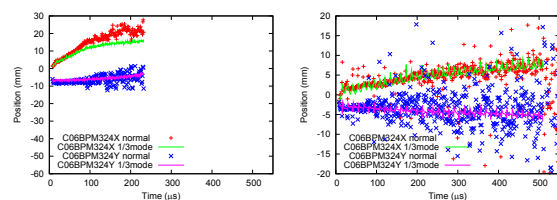


Figure 5: Data of Cell 06 BPM324 for MLF and NU mode. Both normal operation and 1/3 mode data are shown.

4. H0 ダンプライン BPM の設計

これまで述べてきた通り、ある程度の監視体制は整っている。しかし、急にフォイルが無くなると、高々 100 秒程で定められたビームダンプ容量に達する。これを考慮すると、時間分解能に優れ、パルス毎に、ビーム強度・ビーム軌道変動も分かるビームモニタで僅かな兆候も捉えたい。繰返しになるが、H0 ダンプラインのビーム強度は、通常ビームの 0.3% である。しかも、近くには、大きなノイズ源であるパルス電磁石があり、その測定は容易ではない。この BPM は、通常 RCS の COD を測定するもの (周回周波数、又は、その高調波のである数 MHz を検出) [12] ではなく、リニアックのマイクロバンチ構造 324 MHz を検出することで、耐ノイズ性向上を目指す。

H0 ダンプラインの BPM は、324 MHz をピックアップするストリップライン型として検討する。これは、リニアック本体、L3BT でも採用されている。真空容器内に、容器壁と伝送線路を構成するストリップを作り、読み出しの信号ケーブルと同じ特性インピーダンス、50 Ω を持たせる。

上流側ポート U で時間 t に発生した電流は、下流側に向かって伝送線路を通り伝わってゆく。また、ビームが下流側ポート D に到達したとき (時間 $t+l/(c\beta_b)$) にまた電流が生じる。ビーム、長さ l の伝送路を伝える信号速度をそれぞれ、 β_b, β_s 、ストリップラインの開口角度 ϕ とすると、上流下流ポートで

の信号 V_U, V_D は、

$$V_U(t) = \frac{\phi Z_0}{4\pi} \left[I_b(t) - I_b\left(t - \frac{l}{\beta_b c} - \frac{l}{\beta_s c}\right) \right] \quad (1)$$

$$V_D(t) = \frac{\phi Z_0}{4\pi} \left[I_b\left(t - \frac{l}{\beta_b c}\right) - I_b\left(t - \frac{l}{\beta_s c}\right) \right] \quad (2)$$

となる。上流ポートでの周波数成分の電圧は、ビーム電流

$$I_b(t) = \langle I_b \rangle + 2\langle I_b \rangle \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m\omega_0 t) \quad (3)$$

に対し、

$$V_U(\omega) = \frac{\phi Z_0}{\sqrt{2\pi}} \langle I_b \rangle A(\omega) \sin \left[\frac{\omega l}{2c} \left(\frac{1}{\beta_s} + \frac{1}{\beta_b} \right) \right] \quad (4)$$

となる [13]。

400 MeV の H^- は、 $\beta_b = 0.713$ であり、 $\beta_s = 1$ として、 $l = 0.192$ m となる。後は、特性インピーダンス Z_0 が、 50Ω となるように、電極幅を決める。

別解として、上流側を 50Ω 終端し、下流側で信号読み出しすることも考えられる。つまり、

$$\frac{\omega l}{2c} \left(\frac{1}{\beta_b} - \frac{1}{\beta_s} \right) = \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

となる場合である。この場合、電極長 $l = 1.13$ m と 1 m を超えるので、現実的ではない。

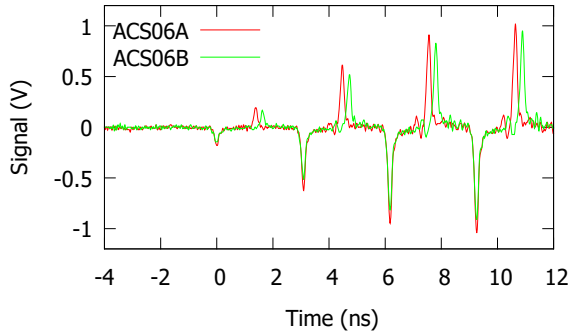


Figure 6: Time domain data of stripline BPMs for various locations and electrode length.

以下、アナログ帯域が 12.5 GHz までである、オシロスコープ Tektronix DPO71254B または、DPO71254C を用いて測定した BPM の生波形データを示しながら説明する。Figure 6 は、ACS セクションで、中間パルスの立上り部分を見たものである。最初に上流ポートに到達したビームにより、負側に信号が出て、反射して帰ってきたものが上側に出ている。324 MHz の周期なので、次のマイクロパルスは、約 3.09 ns 後にやってくる。上記で説明した最適条件というのは、反射波が丁度、324 MHz の半周期になるように選ぶのがよい、ということである。ビームは、徐々に加

速されるため、場所により最適な電極長は、段々長くなる。ただ、全 BPM を最適化するのは、製作上効率的でないため、電極長は規格化し、ACS セクションの途中で 1 回長さを変更している。丁度、Fig. 6 にある ACS06A を含め上流では、155 mm、ACS06B 以下の下流では、185 mm としている。電極が延びた分だけ反射波は、遅れる様子が分かる。L3BT の BPM も、運転開始当初は、181 MeV のエネルギーであったが、400 MeV アップグレードを見込んで、185 mm に統一している。ただ、厳密にな 400 MeV 用には、もう少し長い電極が最適である。

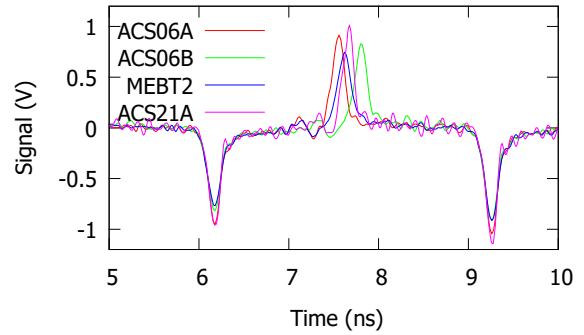


Figure 7: Time domain data of stripline BPMs for various locations and electrode length.

Figure 7 には、ACS06A, B だけではなく、ACS セクションより上流の MEBT2 と最後の空洞 ACS21 の BPM 波形データも合わせてプロットした。MEBT2 から ACS06A へ、ACS06B から ACS21 へ、夫々加速され反射波が速くなっているのが分かる。

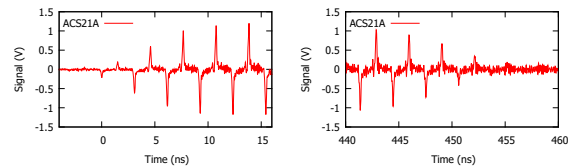


Figure 8: ACS21 BPM time domain waveform data at the beginning and the end of intermediate pulse.

真空容器内に内径の変化など段差があると、HOM (Higher Order Mode) が、発生する。真空容器自体は、導波管の働きをし、内径が大きくなると、cut off 周波数が下がり、遠くまで伝搬し、BPM 測定のノイズとなる。まず、ACS21 で、中間パルスの立上りとパルスの後で比べてみる。Figure 8 は、その波形である。ACS 空洞の内径 40 mm、半径 $a = 0.02$ m の円形導波管と考えると、最低次のモードは、TE₁₁ モードであり、遮断波長は、 $\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c} = \frac{2\pi a}{\rho_{11}} = 3.41a$ であるので、cut off 周波数は、 $f = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{3.41 \times 0.02} \sim 4.40 \times 10^9$, 4.4 GHz となる。これは、ビームの後で、324 MHz の 14 倍高調波、4.5 GHz より高い成分が残っていることと一致する。

通常は、ビームが行かない、L3BT 途中にある 0 度ダンプでは、7 倍高調波、2.27 GHz 以上のスペクトル

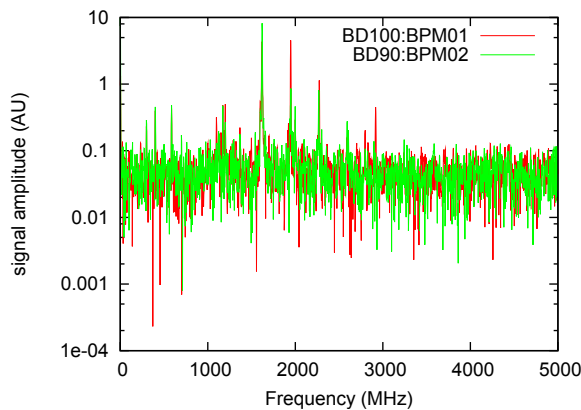


Figure 9: 100-, 90-degree beam dump BPM FFT.

は残り、100度、90度ダンプでも、Fig. 9のように、5倍高調波、1.62 GHz以上のスペクトルは残る。これは、内径85 mmの0度ダンプ、内径120 mmの100度、90度ダンプ、のcut off周波数、それぞれ2.07, 1.47 GHzとつじつまが合う。H0 ダンプラインについては、内径がACS21の10倍、400 mmになるので、cut off周波数は、1/10の440 MHzとなる。狙いは、324 MHzであるので、最低次数のモードだけに限定すればHOMと混信することはない。

予想される信号強度について、現状の測定データから評価する。これまでに、ピーク電流50 mAのデータを示してきた。最下流の加速空洞ACS21のBPMでは、内径40 mmであり、 $V_{pp} \sim 2.4$ Vであった。RCS入射部直前の、内径180 mmのL3BT:BPM79では、 $V_{pp} \sim 0.4$ Vであった。内径が4.5倍になったのに対し、信号強度は、1/6であった。これから、内径400 mm、荷電変換後のビーム強度0.3%とすると、H0 ダンプラインBPMの予想信号は約 $V_{pp} \sim 0.5$ mVとなる。ノイズレベルは、実際に使用するデータ読み出し回路、デジタイザ、平均処理の時間幅等にも依存するので、一概に言えない。仮に、入力レンジ $V_{pp} = 2$ Vで考えると、ノイズレベルは、 $\frac{0.5 \times 10^{-3}}{2} \sim -72$ dB。さらに、14-bit ADCで4kのサンプリング数で考えると、noise floorまで、119 dBあるとして、S/Nは、40 dBは確保できる。この条件であれば、半径200 mmのダクトに対して、1%の2 mm程度の精度になる。

H0 ダンプラインのダクトは、 H^0 と H^- 、二つの軌道を含むため、内径400 mmの大きさである。電極が小さくなれば、信号強度も小さくなるので、電極幅については、今後も検討する。H0 ダンプラインは、非常に短いラインであるが、ゲートバルブ、真空排気ポートや既存のビームモニタが密集し、中々新規の機器を入れることは難しい。そこで、ほぼ中央の9.5 m付近にある四極電磁石の中であれば、他機器との干渉は避けられる。RCSリング内の主電磁石は、25 Hzの周期で動作しているの、中に組込む真空容器は、渦電流の影響を避けるため全てセラミックス製である。通常BPMは、補正電磁石の中に収められているが、それでも渦電流の影響を低減するた

め、本体部分は、リブ付の形状を採用している[12]。しかし、今回のH0 ダンプラインの四極電磁石は、直流電磁石であるので、金属製のダクトでも問題はなく、そこに、BPMの電極を仕組む設計とする。

MWPM7付近では、 H^0 と H^- のビーム位置は、水平方向で80 mm位の差があるが、BPMの設置を想定している四極電磁石(QM)付近では、25 mm位の差になる(Fig. 2)。垂直方向には、入射時間0.5 msの間に、有限角度から傾き無しまで変わるので、最大約15 mm、位置が変化する。ビーム強度の関係等から、 H^0 と H^- の分離までは、難しいかもしれないが、垂直ペイントの様子は、観察できると予想される。

5. まとめ

J-PARC RCSの入射ビーム監視についてシステムの現状について述べた。H0 ダンプラインのモニタについて、現状では、時間分解能が不足するため、新しいモニタについて検討した。リニアックの周波数及びその高調波での検波を検討し、既存BPMの大きさ、信号の実測から、基本次数であれば、HOMノイズの混入は避けられる。 H^- ビームを直接導く、H0モードの時は、十分な感度があるが、通常運転時は、位置計算には、ようやく足りる程度と思われる。今後、他のビームダンプBPMを使った低強度での信号精度の検討・実測を実施したい。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki eds., Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Hotchi *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 12, 040402 (2009)
- [3] H. Hotchi, “Recent Progress of J-PARC RCS Beam Commissioning - Toward Realizing the 1-MW Output Beam Power” *Proc. of IPAC 2015*, Richmond, VA, USA, May 2015, paper TUBB3, pp. 1346–1348.
- [4] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan FSP014
- [5] P.K. Saha *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 14, 072801 (2011)
- [6] P.K. Saha *et al.*, *Proc. of HB2012*, Beijing, China, Sept. 2012, paper TU01C02, pp. 297–301.
- [7] H. Hotchi *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 15, 040402 (2012)
- [8] P.K. Saha *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 16, 120102 (2013)
- [9] N. Hayashi, A. Miura, P.K. Saha, M. Yoshimoto, *Proc. of IPAC 2017*, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper MOPAB070, pp. 277–280.
- [10] S. Hiroki *et al.*, *Proc. of EPAC 2008*, Genoa, Italy, May 2008, paper TUPC036, pp. 1131–1133.
- [11] N. Hayashi, P.K. Saha, T. Toyama, *Proc. of IBIC 2013*, Oxford, UK, Sept. 2013, paper WEPC19, pp. 716–719.
- [12] N. Hayashi *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.* A677, p.94-106. (2012)
- [13] R.E. Shafer, “Beam Position Monitoring, 10. Directional coupler pickup electrodes”, AIP conf. proc. 249, (1990) p.617.