

シンチレータによるコリメータでのビームハローカットの評価 EVALUATION OF BEAM HALO CUTTING WITH COLLIMATORS BY SCINTILLATOR DETECTORS

門脇琴美 ^{*,A)}, 佐々木知依 ^{A)}, 安居孝晃 ^{A)}, 佐藤洋一 ^{A)}, 橋本義徳 ^{A)}, 酒井浩志 ^{B)}

Kotomi Kadowaki ^{*,A)}, Tomoi sasaki ^{A)}, Takaaki Yasui ^{A)}, Yoichi Sato ^{A)}, Yoshinori Hashimoto ^{A)}, Hiroshi Sakai ^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

In J-PARC, Main Ring (MR) upgrade is in progress to increase beam intensity. In high intensity beam operation, reducing beam loss is an important issue. In MR, beam loss is localized by cutting the beam halo with MR collimators. In order to measure turn-by-turn beam loss in collimator area, we installed detectors constructed with plastic scintillator and PMT there. In this study, we evaluated the performance of the detector. We confirmed consistency between measured collimator positions and detector signals by scanning the collimator positions. In addition, we measured the beam loss for every turn and compared with other beam loss monitors. The scintillator detector could measure beam loss of first few turns unlike other detectors. Further data analysis and improvement of detector construction are needed for quantitative use.

1. はじめに

J-PARC では Main Ring (MR) のビームの大強度化を進めており、ビームロスの低減が重要な課題の一つとなっている [1,2]。MR ではコリメータでビームハローを削ってビームロスを局所化することで、コリメータ部以外の場所のビームロスを低いレベルに抑えている。MR コリメータの位置を Fig. 1 に赤で示す。ビームロス低減のためにはコリメータ部におけるビームハローの分布を把握することが重要である。さらに、周回各ターン (約 5.4 μ s)、各バンチ (約 0.6 μ s) のロスを測定することで、ビームロス局所化シナリオをより深く追いつむことができる。

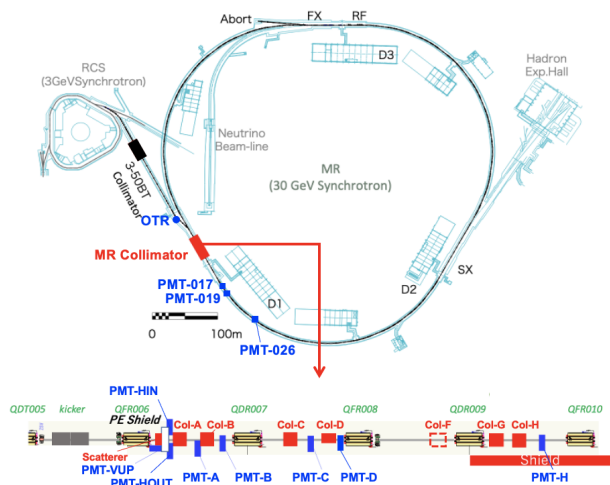


Figure 1: Location of MR collimators (red) and detectors (blue).

MR コリメータは吸収体でビームハロー成分を直接削り取るシングルパス型であり、コリメータ内部に設置

されている L 字型の吸収体はコリメータジョウと呼ばれる [3]。コリメータ上流にはビームハローを散乱するための薄板散乱体が水平方向に 2 つ (HOUT, HIN)、鉛直方向に 1 つ (VUP) 設置されており、ビーム試験が行われている [4]。ビームの大強度化に伴いコリメータの増強も順次進めており、2022 年には新たに 2 台 (Col-D, G) が導入されて 6 台体制 (Col-A, B, C, D, G, H) となった。2024 年にはさらに 1 台が導入され、最終形である 7 台体制となる予定である。

現在ビームハローは、MR への入射ビームラインにおいて、Optical Transition Radiation (OTR) と蛍光を用いた高ダイナミックレンジのプロファイルモニター OTR/FL で測定している [5]。今回 MR を周回するビームのハロー分布の情報を得るために、MR コリメータ部に設置されているロスモニター [4] を利用した。ロスモニタの設置場所を Fig. 1 に青で示す。コリメータによりカットされたハロー成分がロスモニターで検出されるため、コリメータジョウの位置スキャンにより、カットされたハロー分布を測定できる。今回は新規導入されたコリメータの動作試験を合わせて行うことができるように、検出器の再配置や機器の入れ替えを行った。本報告では、検出器の性能評価、ビームハローの分布の評価、他の検出器との比較を行う。

2. 測定方法

2.1 機器の構成

検出器および測定に使用した機器の構成を Fig. 2 に示す。今回使用したロスモニターは、速い応答を得るためにプラスチックシンチレータと光電子増倍管 (PMT) を検出器として用いている。プラスチックシンチレータは EJ-200 (Eljen Tech.) を使用した。PMT は H6410, H1161 を使用した (どちらも浜松ホトニクス株式会社製)。PMT 用の電源は N1470 (CAEN), NDT1470 (CAEN), HV-02W (サトウ電子), HJPM-1R3-SP (松定), RPH-031 (ハヤシレビック) を使用した。各電源モジュールにはそれぞれ 1-4ch の出力があり、1 つの出力につき 1 つの PMT に接続されている。各電源は NIM ビン電源に接

* kadowaki@post.kek.jp

続されており、共通の GND を使用している。データ取得にはオシロスコープ (HDO6054 1 台、Wave Runner 44Xi-A 2 台、どちらも TELEDYNE LECROY 製) を用いた。サンプリングレートは 2500 MS/sec (レコード長 125 kpoints) および 250 MS/sec (レコード長 125 kpoints または 50 Mpoints) とした。測定に使用した PMT と印加電圧および電流を Table 1 に示す。ビーム強度等の条件により信号強度が変化したため、Table 1 に示す範囲内でゲインを調整した。

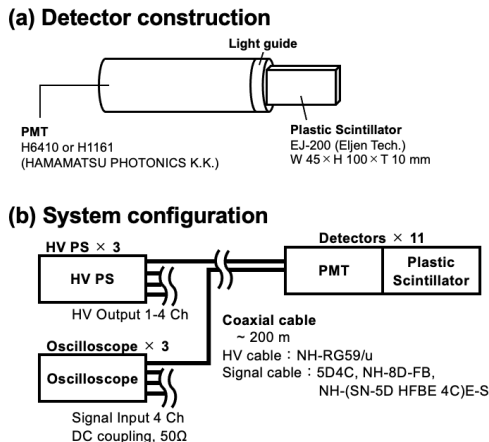


Figure 2: Configuration of measurement system.

Table 1: Configuration of Detectors (Scintillator was not Attached to #5)

Detector	PMT	HV [V]	I_{mon} [μ A]
#1	H6410	500 - 600	124 - 150
#2	H6410	550 - 800	138 - 175
#3	H6410	550 - 650	137 - 150
#4	H6410	550 - 800	135 - 175
#5	H6410	800 - 1100	365 - 503
#6	H1161	600 - 800	420 - 425
#7	H6410	600	148
#8	H6410	800 - 1000	325 - 440
#9	H6410	550 - 800	136 - 265
#10	H6410	1000	430
#11	H6410	550	134

2.2 設置場所

使用した検出器は、途中で入れ替えたものも含めて全部で 11 本 (#1~#11) である。散乱体及びコリメータからの応答を評価するため、Col-A 上流の散乱体付近に 3 本 (HOUT, VUP, HIN)、各コリメータ下流 (Col-A, Col-B, Col-C, Col-D, Col-H) に 4 本設置した。また、コリメータ部で散乱された粒子のうち、運動量を失ったものは MR Arc 部に存在する Dispersion エリアでロスする。このロスを測定するため、Arc 部 (MR アドレス 017, 019, 026) にも検出器を 3 本設置した。

コリメータ部はビームロス量が多く、シンチレータおよび PMT も放射化することが課題である。事前の測定で、これまで測定に使用していた PMT はかなり放射化が進んでおり、HV ゲインに変化はないものの、計数率が下がっていることが分かった。シンチレータは PMT よりも放射化量は少なかったが、放射線劣化により多少の変色やクラックが見られた。この放射化の影響を検討するため、#4 にはシンチレータと PMT 両方が高放射化 (>10 kBq) しているものを使用した。その他の検出器は放射化の影響がほぼないものを使用した。

一方、コリメータ部では大きなビームロスが起こることから、シンチレータを取り付けなくても PMT で直接ビームロスを測定できることが期待された。PMT の光電面やダイノードに入射した γ 線が直接電子を放出し、信号を出すからである。以上の理由から、Col-B 下流に設置した#5 にはシンチレータは取り付けず、シンチレータの有無による比較を行うこととした。ビーム試験は 2022 年 7 月から 2023 年 4 月にかけて 3 回に分けて行われた。

3. 結果と考察

3.1 HV ゲイン測定

各検出器について印加電圧に対するゲイン測定を行った。線源は放射化した機器等からの放射線 (^{60}Co , ^{22}Na , ^{54}Mn 等) である。測定結果を Fig. 3 に示す。高放射化している#4 を含め、全ての検出器で測定範囲内における線形性は良好であった。指数関数 $f(x) = a \cdot \exp(bx)$ でフィッティングした結果を Table 2 に示す。R は測定値とフィッティング結果の相関係数である。シンチレータが取り付けられていない#5 は他の検出器と比較して元の信号が小さいので、比較的高い電圧で使用する必要がある。

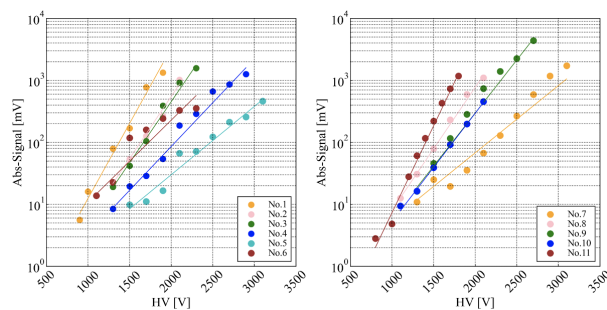


Figure 3: HV gain curve.

3.2 ビーム強度応答評価

大強度ビームに対して、ビーム強度に対する信号の応答を評価した。ビーム条件は 2 バンチ入射、ビーム強度は $4.35 - 7.06 \times 10^{13}$ proton per bunch (ppb) である。散乱体は Full open、コリメータは利用運転用の設定 (水平方向 64π mm mrad、鉛直方向 61π mm mrad) とした。

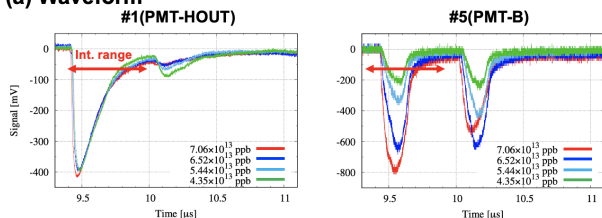
測定結果を Fig. 4(a) に示す。Figure 4 左図は#1、右図は#5 の結果である。#1 では 2 バンチ分の信号は測定できているものの、後ろバンチの信号が前バンチよりも大幅に小さくなっていることが分かる。ビーム強度

Table 2: Gain Curve Fitting Parameters

Detector	a	b	R
#1	0.47	0.0056	0.78
#2	0.55	0.0046	0.96
#3	0.52	0.0045	0.96
#4	0.13	0.0033	0.89
#5	0.19	0.0025	0.98
#6	0.51	0.0030	0.46
#7	0.46	0.0025	0.75
#8	0.084	0.0046	0.97
#9	0.11	0.0039	0.98
#10	0.094	0.0040	1.00
#11	0.012	0.0065	0.98

が大きいほどこの影響は大きくみえる。一方で、#5ではこの効果は最大強度の測定以外ではみられなかった。原因としては#1のPMTのHVゲインが大きすぎたことが推測される。シンチレータに入射した放射線は光へと変換され、PMTで光電子に変換、増幅される。しかし、光入力が大きすぎる場合はPMTの内部回路で電流の飽和が生じ、出力が低下することが知られている。3.1節で測定したHVゲインは放射線1本に対する信号であるのに対し、ビームロスでは大量の放射線が発生する。そのため、シンチレータで発生する光量が過大になり、PMTの飽和を起こしてしまった可能性がある。一方、PMTのみの場合は光電面に直接入射したものだけを測定するため発生する光電子数が比較的少なく、飽和を起こしにくいと考えられる。実際にPMTの飽和が起こったかは3.3節で改めて検討することとする。

(a) Waveform



(b) Relationship with beam intensity

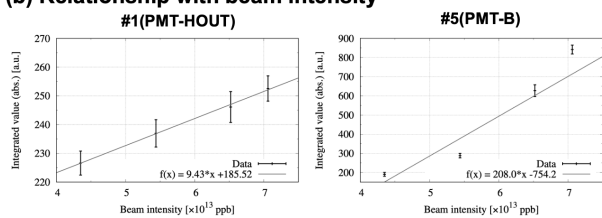


Figure 4: Results for each beam intensity.

次に、ビームロス量とビーム強度との関係を評価した。まず、BGデータとしてビーム入射がない時のデータを複数回(5-10回)測定した。全BGデータの平均値をBG値とし、波形データから差し引きすることとした。次に、1バンチ目の信号だけを積分することでビームロス量を求めた。積分範囲は1バンチ目の信号

の立ち上がりから2バンチ目の直前までの約0.6 μs間である。

計算結果をFig. 4(b)に示す。ビーム強度と共にビームロス量が大きくなる傾向がみられた。これはビーム強度が増加するとコリメータ部のビームロス量が増加することを示している。ビーム入射路に設置されている他のモニタの測定結果からビーム強度を上げるとビームハローが増えることが知られているが、今回の結果はこのことと同様の傾向がある。OTR/FLで得たハロー分布との定量的な比較については今後の課題として解析を進める予定である。

3.3 前後バンチ比較

前節の測定で、2バンチ目の信号でPMTの飽和が起こっていることが示唆された。実際に飽和が起こっているか確認するため、前後バンチの信号強度の比較を行った。まず2バンチ入射で測定を行い、その後1バンチ入射で前後バンチそれぞれの測定を行った。シンチレータによる影響も検討するため、シンチレータを取り付けている#1、PMTのみの#5で比較を行った。設置場所はそれぞれHOUT, PMT-Bである。それぞれ印加電圧と電流は600 V (150 μA), 1050 V (480 μA)である。ビーム強度は全て 3.3×10^{13} ppb、コリメータはCol-Aのみ 65π mm mrad、その他のコリメータおよび散乱体はFull openに設定した。

測定結果をFig. 5に示す。#1では後ろバンチのみ入射(青)に対して2バンチ入射時(黒)に後ろバンチの信号が小さくなっていることから、後ろバンチでPMTの飽和が起こっていることが分かる。一方、#5では後ろバンチの信号強度は後ろバンチのみ入射(青)と2バンチ入射時(黒)で変化がなかった。このことから、少なくともこの設定では飽和が起こっていないことが分かる。信号の飽和対策としてシンチレータを取り外す、HV設定値を低くするといった案が考えられたが、すぐに対応することは難しかった。そのため、以降は1バンチ入射で測定を行うこととした。

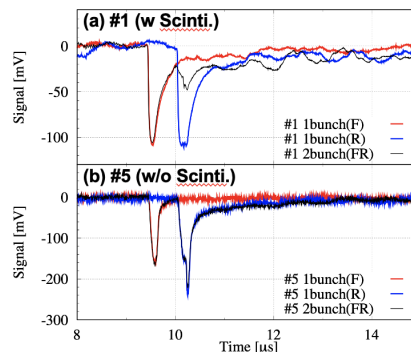


Figure 5: Waveform with 2 bunch (black) or 1 bunch (red for front-bunch only, blue for rear-bunch only) beam.

3.4 コリメータ応答評価

MRコリメータ6台(Col-A, B, C, D, G, H)について、コリメータジョウの位置スキャンによる応答評価を行った。位置スキャンはコリメータ1台あたり水平方向、鉛直方向の2方向について測定を行った。ただし

Col-C 鉛直方向については、時間の制約から測定を行うことができなかった。測定はコリメータジョウをビームから最も離れた状態から開始し、徐々にビーム中心にコリメータジョウを近づけていった。散乱体は Full open、ビーム強度は 3.3×10^{13} ppb とした。

ビームの分布をガウス分布と仮定すると、コリメータジョウにより削られたビーム量は次式の相補誤差関数で表すことができる。

$$f(x) = \frac{a}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x-c}{\sqrt{2}b} \right] + d$$

a, d は定数、 b [μm] はビームサイズ、 c [μm] はビームの中心値に対するコリメータジョウの位置である。 c には測量から求めた値を定数として代入した。この相補誤差関数を用いて、コリメータ応答のフィッティングを行った。

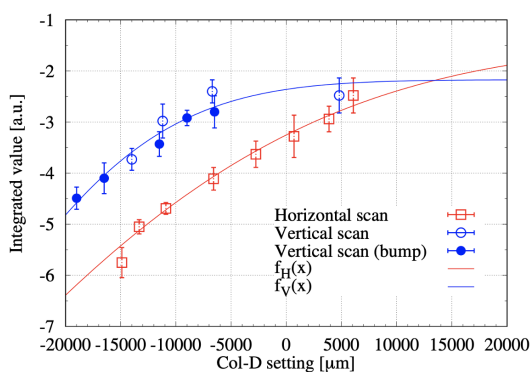


Figure 6: Beam loss response with position of Col-D jaw. At Col-D, β_x is 26.16 m, β_y is 10.01 m. The blue fill squares indicate results of bumped orbit.

測定結果を Fig. 6 に示す。Col-D の下流に設置した検出器#5 では、水平方向および鉛直方向両方に応答が見られた。また、各コリメータの測定結果について相補誤差関数による fit も行うことができた。これはビームベースで得たビームロス応答の結果が、測量で得られたコリメータジョウの位置で説明できることを示している。

Figure 6 に示す Col-D について、各パラメータの fit 結果は水平方向で $a = 18.8 \pm 1.76$, $b = 30000 \pm 9600$, $c = -38930$, $d = -1.42 \pm 1.20$ 、鉛直方向で $a = 12.1 \pm 1.99$, $b = 14500 \pm 2900$, $c = -31210$, $d = -2.17 \pm 0.35$ であった。一方、シミュレーションから得られたビームサイズ b_{ideal} は水平方向、鉛直方向で 10390 [μm], 6650 [μm] であった。これらの値と fit 結果は大きく異なっている。まず原因として考えられるのは、ビームサイズ b の違いである。しかし、実際のビームサイズとの違いは 1-2 割と考えられ、この大きな違いは説明できない。次にビーム中心とコリメータジョウの距離 c について考える。COD がある場合、ビーム中心からずれが生じるが、これは 1 mm 程度と考えられる。また、コリメータジョウの測量誤差は 0.1 mm 程度であるため、 c の違いでも説明できない。最後に挙げられるのは、ビーム分布の形の違いである。シミュレーションではビーム分布はガウス分布であると仮定している

が、実際のビーム分布がガウス分布ではない場合はコリメータ応答は相補誤差関数から変化する。今後の解析では、OTR/FL で測定した正確なビーム分布を用いた解析も検討している。なお、OTR/FL は、現在入射ビームラインに設置されているものに加えて、MR 周回リング内にもう一台設置する予定である。これら 2 台の同時測定と、新規設置される OTR/FL で MR の入射直後の 20 turn 程度の測定を行うことにより、ビームハローの位相空間分布の測定が期待されている [6]。

3.5 各ターンのビームロス量の評価

各ターンのビームロス量の評価を MR へのビーム入射後 200 ms 間の測定により行った。今回の測定条件では入射したビームは加速されずに入射後約 130 ms 周回し、その後ビームダンプへと取り出される。ビーム強度は 3.28×10^{13} ppb である。散乱体 HOUT, VUP を 60π mm mrad に設定し、HIN は Full open とした。コリメータは Col-A のみ水平方向を 60π mm mrad、鉛直方向を 70π mm mrad に設定した。Col-B 以降の下流のコリメータは Full open とした。

測定結果を Fig. 7 に示す。各ターン (約 $5.4 \mu\text{s}$ 毎) にビームロスが起こっていることが分かる。1 ターン目のロスは 2 ターン目のロスと比較して大きな値であった。これは、本測定においては入射ビームラインにあるコリメータを閉めずに測定を行ったため、本来入射ビームラインでカットされるはずのビームハローが MR に入射されたからである。実空間上で 60π mm mrad より外側にあった粒子は全て 1 ターン目でロスしたと考えられる。

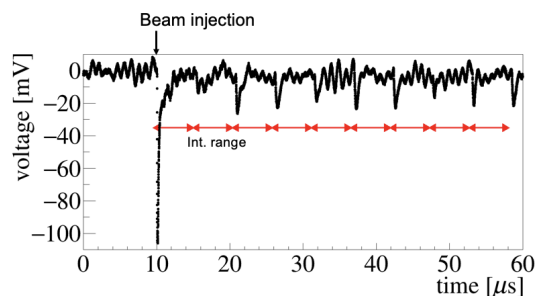


Figure 7: Beam loss from beam injection to first few turn.

次に、各ターンのビームロスを求め、MR に設置されている他のモニターとの比較を行った。まず、ビーム出射後のビームが周回していない期間 (入射から 130 - 200 ms) の平均値を BG 値とし、波形データから差し引いた。次に、周回周期 (約 $5.4 \mu\text{s}$) ごとに信号を積分して各ターンのビームロス量を求めた。最後に各ターンのロス量を積算することでビームロスの積算値を求めた。

比較対象のモニターとしては DCCT, AIC (Air-gassed Ion Chamber), PBLM (Proportional chamber beam loss monitor) を選定した [1]。それぞれのモニターと比較をするため、DCCT のデータをもとにビームロス量の規格化を行った。まず、DCCT で測定したビーム強度について、ビーム入射時の値との差分を取ることでビームロスの割合を評価した。次に、ビーム入射時から 10 ms, 115 ms

のデータ 2 点からビームロス増加量を求めた。ビーム入射から 10 ms のデータを使用したのは、DCCT は応答速度が遅く、ビーム入射のような急激な変化に対しては応答が良くないからである。最後にシンチレータ、AIC, PBLM についても 10 ms, 115 ms の 2 点からビームロス増加量を求め、DCCT の増加量と一致するように補正係数をかけた。ロス量はビーム入射時に 0 となるようにした。

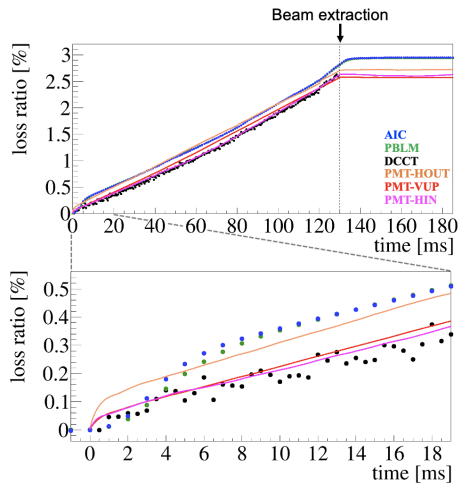


Figure 8: Beam loss of MR monitors.

計算結果を Fig. 8 に示す。ビーム入射時から全てのモニターでロスが増加し、ビーム出射 (130 ms) 以降はロス量が増加しなくなった。ただし、AIC, PBLM はビームロス総量を正確に計算するための信号処理を行っているため応答が遅く、出射後から 5 ms 程度は変化が見られた。同様の理由で、AIC, PBLM は入射直後の応答も遅くなっている。Figure 8 下図から、シンチレータの信号は、入射から 10 ms 以内では他の検出機と比較してと比較して立ち上がり速度が速いことが分かる。これはシンチレータ検出器の応答の速さを反映していると考えられる。入射から約 1 ms (入射後約 200 ターンに相当) はロスの増加量が大きかった。このことから、入射後の大きなビームロスは数ターン間の短い間だけではなく、比較的長い時間をかけて生じていると推測される。ビームロス量に関しては、シミュレーションでは最初の数ターンで 0.3 % 程度のロスがあると予測されていたが、シンチレータではロス量を過小評価している傾向があった。原因の一つとして、シミュレーションではビーム分布をガウス分布と仮定していることが挙げられる。今後は OTR/FL で測定した実際のビーム分布を用いてさらに解析を進める予定である。

4. まとめ

J-PARC MR コリメータにおけるビームハロー分布を明らかにするため、MR コリメータ部に設置されているプラスチックシンチレータと PMT を組み合わせたロスモニタを再配置し、性能評価を行った。ビーム試験の結果から、シングルバンチ測定においてはビーム強度が大きくなるとビームロス量が増加する傾向がみられた。一方、2 バンチ測定に関しては PMT の飽和が起

こっている可能性が高いので、例えばシンチレータを取り付けず PMT 単体で測定を行う等、検出器の構成や設定を再検討する予定である。

次に、各コリメータに対して動作試験および応答評価を行った。コリメータ下流に設置した検出器ほぼ全てで水平方向および鉛直方向に反応があり、コリメータが正しく動作していることを確認できた。ビーム分布をガウシアンと仮定してビームロス応答を評価したが、測定結果から求めたビームサイズとシミュレーションから求めたビームサイズが大きく異なっていた。このことから、ビーム分布がガウシアンからずれている可能性が示唆された。

最後に長時間のロス測定し、ビームロス量の校正と他のモニタとの比較を行った。入射後から一定時間後の結果では他のモニタと同様の特性を示した。ビーム入射直後は他のモニタと比較して速い応答を持ち、各ターンごとのビームロス量を測定できることが確かめられた。一方で、ビームロス量の評価は予測と一致していない部分があった。今後はビームハロー分布の測定結果との比較などデータ解析を進め、より詳細な性能評価を行う予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、J-PARC MR モニターグループには議論に参加いただき、非常に有意義なコメントをいただいた。また、沼井一憲氏には機器の設置および測定に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* Vol. 2021, 033G01, 2021. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [2] Y. Kurimoto and Y. Sato, “Upgrade plan of J-PARC Main Ring”, *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol. 18, No.1, 2021, pp. 10-20.
- [3] M. Shirakata *et al.*, “Beam collimator system which consists of seven units in J-PARC Main Ring”, *Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 756-760. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/THP0/THP017.pdf
- [4] Y. Sato *et al.*, “Beam loss localization with scatterer catcher system in J-PARC Main Ring”, *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 90-94. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEOL/WEOL03.pdf
- [5] Y. Hashimoto *et al.*, “Two-dimensional and wide dynamic range profile monitor using OTR/fluorescence screens for diagnosing beam halo of intense proton beams”, *Proceedings of HB2014*, East-Lansing, USA, Nov. 10-14, 2014, pp. 187-191.
- [6] T. Sasaki *et al.*, “Development of a wide dynamic-range beam profile monitor using OTR and fluorescence for injected beams in J-PARC Main Ring (4)”, *Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Funabashi, Japan, Aug. 29- Sep.1, 2023, Submitted.