

J-PARC 3GeV シンクロトロン 加速器トンネル内の中性子測定 NEUTRON MEASUREMENT IN THE ACCELERATOR TUNNEL OF J-PARC RAPID CYCLING SYNCHROTRON

山本風海^{#, A)}, 畠山衆一郎^{A), B)}, 大津 聡^{B)}, 松本 哲郎^{C)}, 吉本政弘^{A)}

Kazami Yamamoto^{#, A)}, Shuichiro Hatakeyama^{A), B)}, Satoru Otsu^{B)}, Tetsuro Matsumoto^{C)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}

^{A)} Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

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

^{C)} Research Institute for Measurement and Analytical Instrumentation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

Abstract

J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) provides more than 700 kW proton beam to the neutron target. In order to investigate the influence of the radiation, we intend to evaluate the radiations such as the neutron and gamma-rays, which are generated due to the proton beam loss. If the amount of beam loss is excessive, it becomes difficult to identify the individual neutron and gamma ray. Therefore, we investigated the signal rate of the extraction point of RCS. Preliminary result indicated that we can enough distinguish the neutron and gamma-ray by the stilbene scintillator.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, RCS)は物質生命科学実験施設(materials and life science experimental facility, MLF)および主リング(Main Ring, MR)に最大 1 MW 相当のビームを供給する目的で建設された[1]。この様な大強度の陽子加速器においては、ビームロスによって発生する放射線によって加速器を構成する機器が劣化し、故障するリスクがある。RCS では、設計初期段階においてビームロスおよび線量分布の評価を実施し、各装置で必要な耐放射線性能を見積もった。またその結果に合わせて、各機器の耐放射線性能の評価試験、および高放射線照射に耐える機器の開発を行った[2]。これらの評価試験、開発は、現QST高崎研究所等で運用させているガンマ線源を用いて実施しており、ガンマ線の吸収線量が耐放射線性能の指標として用いられてきた。

しかし近年、ガンマ線と中性子線の混合する場での評価試験が行われており、例えばグリースに関してはガンマ線と中性子線と同じ吸収線量でも照射効果に違いがあることが判ってきている[3][4]。また一方では、RCSで実際に発生しているビームロスが設計想定よりだいぶ抑えられているため、各機器の吸収線量が当初目標よりかなり低い値となっている。こうした状況から、機器の放射線損傷を正確に評価し、寿命の検討を行うためには、加速器運転中のビームロスによって発生した、中性子やガンマ線などの二次粒子のスペクトルのデータが必要である。そこで、これまでのようなシミュレーションベースの評価だけではなく、運転中に発生する中性子やガンマ線を実測する手法について、検討を行った。

中性子とガンマ線を測定し区別するためには、検出器にそれら粒子が入った際に発生する波高信号を用いて識別する必要がある。この際、ビームロス量が過多で

あった場合は、そのビームロスによって発生する中性子やガンマ線一つ一つについて波高信号を分けることが出来なくなり、識別することは困難となる。しかし RCS では、入射直線部を除きほとんどロスが発生していないことが、ロスモニタの出力および残留線量の測定よりわかっている[5]。そこで、今回は運転後の線量が現在の運転状況において数十マイクロ Sv/h 程度である出射分岐ダクトの近傍において、スチルベンを用いて中性子-ガンマ線の弁別が可能か予備試験を行った。本稿では、その予備試験の結果について報告する。

2. 予備試験

2.1 測定場所と検出器の設置状況

図1に、600 kW 出力での利用運転後の RCS 加速器トンネル内の残留線量分布と、スチルベン検出器を設置した状況の写真を示す。RCS は運転開始当初よりビーム調整を実施し、ビームロスの原因究明及びその対策を継続的に進めてきた。その成果[6][7][8]として、現在は設計出力である 1 MW の連続運転においても、入射部[9]とコリメータ[10][11]以外ではほとんどロスしない状況となっている。今回の試験では、ビームロスが多すぎると検出器が飽和してしまい、パルスモードでの波高弁別が不可能になってしまう。RCS でロスが多い入射部とコリメータでは、ビーム調整で使用しているプラスチックシンチレータの出力がすでに飽和しており、これらの箇所ではロスが多すぎて今回の測定には不向きであると考えられる。一方、入射部以外で残留線量がある箇所は、アーク部と出射分岐部である。アーク部に関しては、分散関数の大きな箇所でも最大 100 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の線量となっている。出射分岐部に関しては、それより一桁低く 10 $\mu\text{Sv/h}$ である。今回は、周辺に他にロスポイントが無く、線量もより低い出射分岐部で測定を行うこととした。

検出器は、出射分岐部の股の真横の床上、股の直下から 1 m の位置に設置した(図1写真上参照)。周辺には

[#] kazami@post.j-parc.jp

600 kW user operation : until 9:00 15th Jul. 2021,
Beam study : 9:00 15th - 15:20 19th Jul. 2021,
Measurement : 9:30 20th Jul. 2021

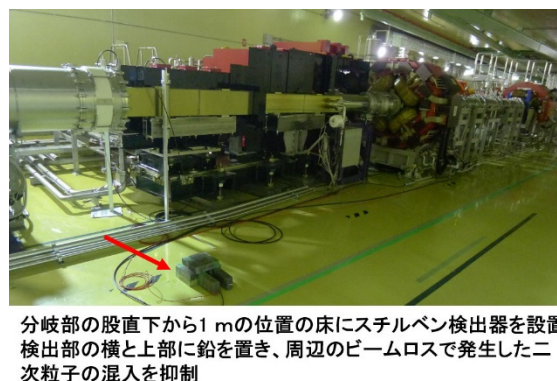
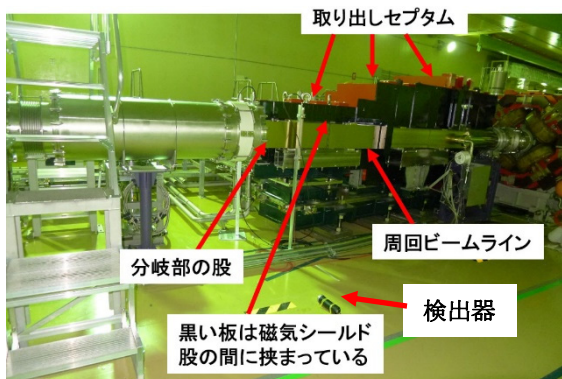
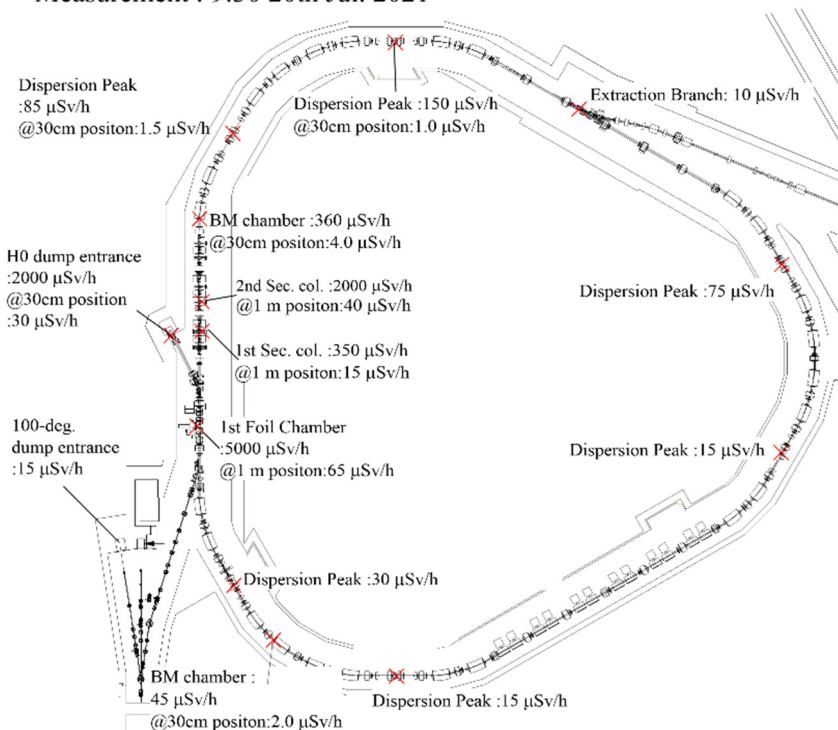


Figure 1: Residual dose distribution and location of the stilbene detector in RCS tunnel.

バックグラウンド以上の残留線量は存在しないが、トンネルは広く前後のアーチ部のロスポイントも見渡せる位置であるため、周辺からの放射線の漏れ込みを減らすために、検出器の左右と上に厚み 50 mm の鉛ブロックを配置した。

2.2 測定系

検出器は、スチルベンのヘッド+浜松ホトニクス製の光電子増倍管を使用した。検出器に電圧を印加する高圧電源、および波形データを処理、蓄積するデジタイザは地上にあるモニタ装置室に置かれ、信号及び印加電圧のケーブルは垂直連絡口およびサブトンネルを経由してトンネル内の検出器に接続される。デジタイザはSpectrum製のM2p.5942-x4[12]を使用した。測定条件を表1に示す。

Table 1: Measurement Condition

印加電圧	-2000 V
トリガー条件	立ち下がりセルフトリガー 閾値: -400mV
Total gate (図3参照)	500 ns
Delayed gate (図3参照)	500 ns
	ディレイ値: 100 ns
サンプリング周波数	80 MS/s
分解能	16 bit
レコード長	1000 (時間幅 125 μs)
レンジ	-10 V ~ +10 V

2.3 信号レートの確認

本測定を実施する前に、検出器のレートがどの程度になるか、出力波形をオシロスコープで測定した。測定は、入射開始から加速が終了してビームが取り出されるまでの20msすべての範囲を含むよう、オシロスコープのフルレンジを40msに設定して行った。その際の測定画面を図2に示す。図の赤矢印の範囲がビームが加速器内に存在する時間であり、検出器の出力は入射から取り出しまでの時間帯で、どこかに集中するという感じではなくランダムに出ている。これは、分岐部のダクトの物理口径が 486π mm-mrad.と、ビームロスを局所化するために設置しているコリメータ(324π mm-mrad.)を除くと最も狭い箇所

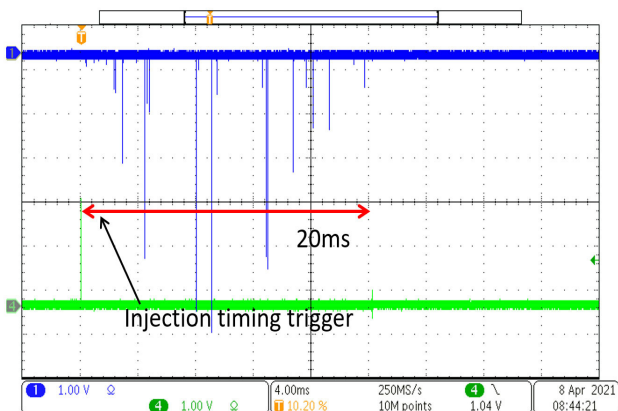


Figure 2: Signal during whole acceleration period.

所であり、加速中に広がったハローのうち、コリメータで回収しきれなかったものがまれに衝突するためと考えられる。上記の理由から、ビームが存在する時間内で断続的に信号が出ており、そのレートがパルス波形を識別できる程度であることが確認できた。

2.4 測定原理

図3に測定原理と短時間測定した結果を示す。図3の左の図は、参考文献から引用した図であり、スチルベンの波高信号の特徴を示している。スチルベンを含む一般的な有機シンチレータは芳香族化合物で構成され、分子構造中のベンゼン環が持つパイ結合電子の励起によって蛍光を発する。このパイ結合電子ペアには、スピンの向きが逆のシングレット状態と向きがそろったトリプレット状態が存在する。このうち、シングレット状態の励起準位から数nsという速さで基底状態に遷移する際に発生する光子が蛍光として検出される。トリプレット状態に関しては、励起状態の寿命が1ms程度とシングレット状態と比較して非常に長く、遅発蛍光が放出されることになる。放射線が検出器に入射すると、入射粒子がガンマ線の場合は電子、中性子の場合には陽子がそれぞれ相互作用によってはじき出される。このうち、エネルギー付与密度の大きい陽子のほうがパイ電子系をトリプレット状態に励起する確率がより高いため、出力波高のテールが大きくなる。中性子とガンマ線の弁別は、このテール部分の積分量の違いを使って行う。

実際の測定時には、図3右上図のようにデジタイザで取り込んだ波高信号に2種類のゲートをかけ、それぞれ

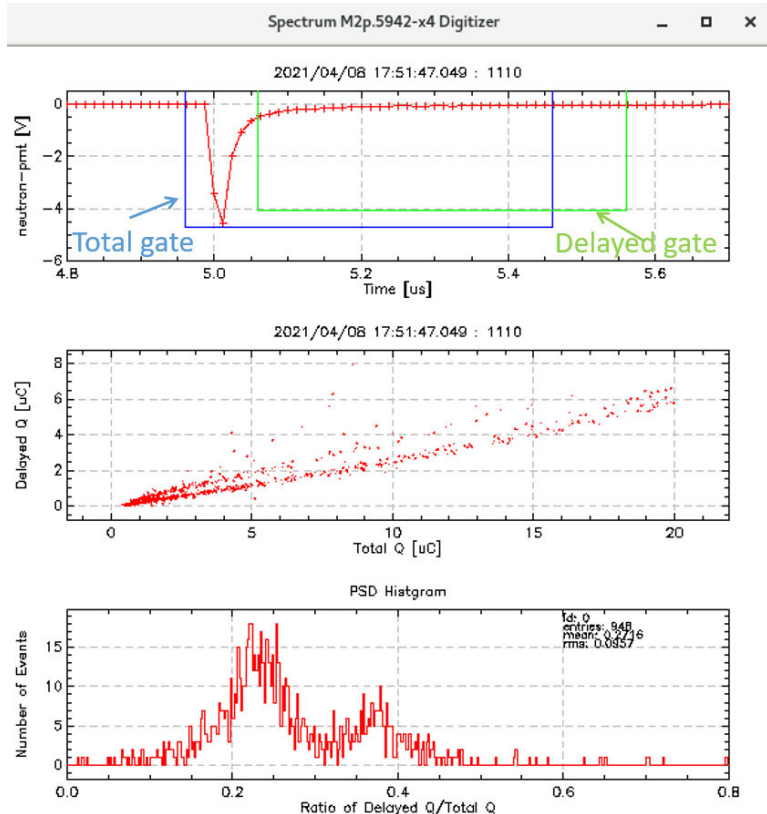
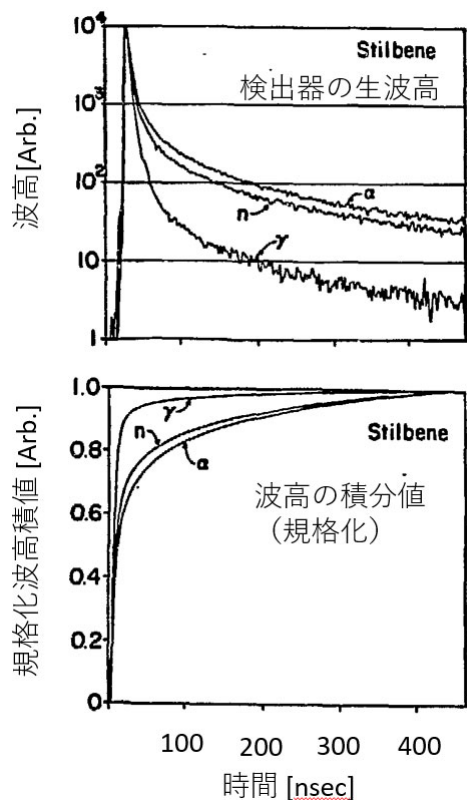


Figure 3: N- γ discrimination[13].

の積分値を求める。Total gate で積分した値を Total Q、Delayed gate で積分した値を Delayed Q とし、横軸 Total Q、縦軸を Delayed Q としてプロットしたものが図 3 右中図である。同じ Total Q 値であっても、中性子に由来する信号はガンマ線由来の信号より大きな値となり、図のように二つの傾きをもつグラフとなる。一番下の図は、Total Q で Delayed Q を規格化したデータの度数分布であり、波高値 \approx 入射粒子のエネルギーによらないガンマ線と中性子のカウント数を示している。

2.5 測定結果

ビーム運転時、およびビームが無いときの測定結果を図 4 に示す。ビーム運転時のデータは 2021 年 4 月 8 日に測定した。この時のビーム出力は、中性子・ミュオン実験を行っている物質生命科学実験施設 (MLF) に向けて 710 kW、主リングシンクロトロン (MR) からニュートリノ実験用に取り出された出力として 460 kW 相当であった。RCS から MLF、MR に向けては、入射時のペインティングパターン以下、それぞれの行先に応じたパラメータに切り替えて運転していた[14]。このため、行先 MLF のビームと MR のビームで条件が切り替わっており、ビームハローやビームロスの状況も違っているが、今回は行先ごとにデータを選別せず、すべてのショットを取り込んだ。測定時間は 2 時間程度とした。この際得られたデータを 2.3 節に述べた条件で中性子-ガンマ線弁別をした結果が図 4(a)である。Total Q v.s. Delayed Q をプロットした上の図は、ガンマ線による下のラインと中性子による上のラインがきれいに分かれており、弁別がうまくできていることが確認できた。下図で示された度数分布図でも、中性子と考えられるピークがきれいに見えている。

一方、ビームが無いバックグラウンドの状態を確認する

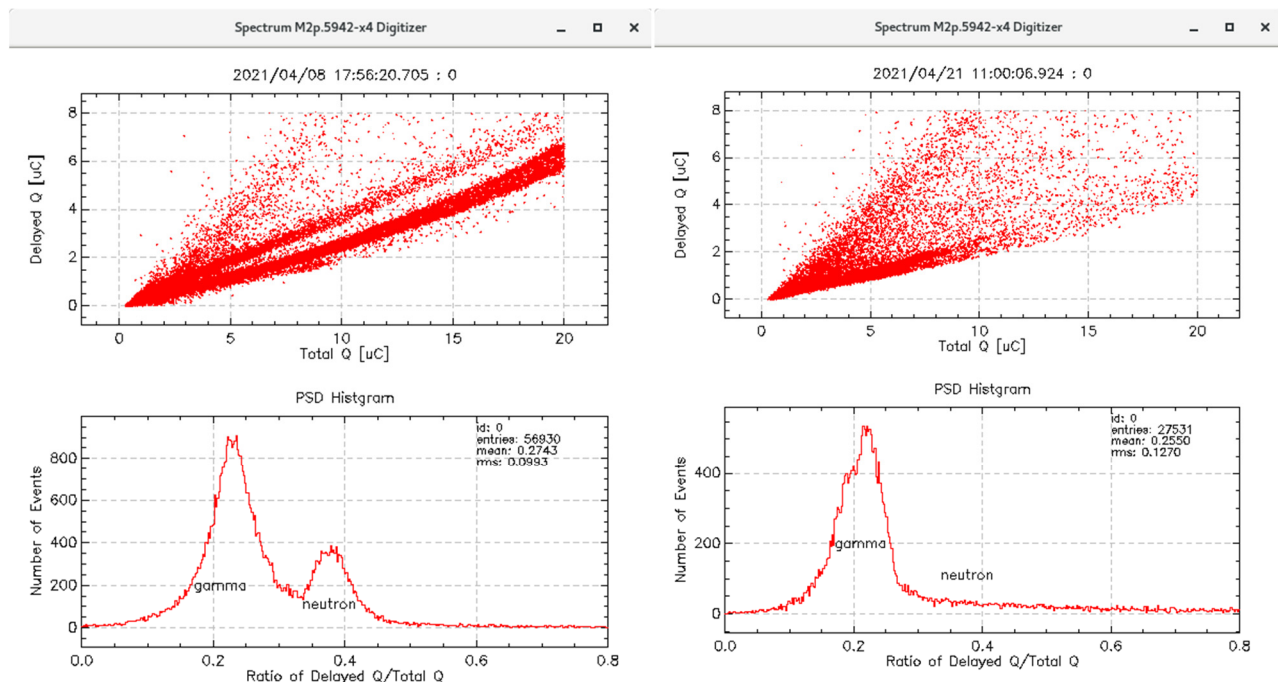
ために、加速器がメンテナンスで止まっている時間に同様の測定を行った。今回は保守日の 2021 年 4 月 21 日に測定を行った。その際の結果を図 4(b)に示す。図 4(a)の二本のラインのうち、中性子に由来する上のラインが無くなっているのが判る。また、ガンマ線由来の下のラインも、エネルギーの高い Total Q 値が 10 以上のデータが薄くなっており、これらの状況からビームが無い状態のデータとして妥当な結果であると考えられる。

3. まとめと今後

J-PARC RCS の加速器トンネル内の放射線スペクトルの評価手法について検討を開始し、今回はスチルベン検出器を用いて中性子-ガンマ線の弁別が可能か試験を実施した。弁別のためには検出器でパルス毎の波高出力を得る必要があるため、ビームロスが少なく二次粒子の生成レートが低いと考えられた、出射分岐部の横で試験測定を行った。試験の結果、中性子とガンマ線を目論見通り弁別できることが判明した。加速器トンネル内でこのような測定が可能であるのは、RCS では大強度出力での利用運転においてもビームロスが十分抑制されており、わずかに発生するビームロスに関しても場所が限定的であるためである。

今回の結果から、出射部周辺であれば検出器が飽和せず中性子の測定が可能であることが判ったので、今後は中性子のスペクトルを測定する手法の検討を進める。現状では、スチルベン検出器に加えてボナー球型中性子検出器や放射化サンプルなどを用いて測定が可能か検討を行っている。また、測定と併せてモンテカルロシミュレーションを行い、それらを併せてスペクトル評価を進める予定である。

また、図 2 の状態から、出射部であってもビームロスが



(a) Signal during beam operation

(b) Background Signal

Figure 4: Measurement results.

発生しているのは出射タイミングだけでなく、入射時から断続的に発生していることが判った。これは、入射から任意のディレイをかけたタイミングで測定することで、陽子入射によって生成される中性子-ガンマ線の入射陽子エネルギー依存性を、400 MeV から 3 GeV まで、任意のエネルギーで取得することが可能であることを示唆している。あるいは、検出器の出力を複数のデジタイザにパラレルに接続し、それらを違うトリガータイミングで測定することで、マルチエネルギーの測定を同時に実施することも可能である。

今後は、上記マルチエネルギー測定の可能性も含めて、検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team. "Accelerator technical design report for high-intensity proton accelerator facility project, J-PARC", JAERI-Tech 2003-044 and KEK Report No. 2002-13, 2003.
- [2] J. Kusano ed., "J-PARC 使用予定材料・機器の耐放射線特性試験報告集", JAEA- Review 2008-022, 2008.
- [3] M. Ferrai *et al.*, "Experimental study of consistency degradation of different greases in mixed neutron and gamma radiation", *Heliyon*, 5, 9, 2019, pp. 1-11.
- [4] M. Ferrai *et al.*, "Characterization of a polyphenyl ether oil irradiated at high doses in a TRIGA Mark II nuclear reactor", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 497, 2021, pp. 1-9.
- [5] K. Yamamoto *et al.*, "Recent Status of J-PARC Rapid Cycling Synchrotron", *Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC21)*, Campinas, Brazil, May 24-28, 2021, WEPAB179.
- [6] H. Hotchi *et al.*, "Beam commissioning of the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", *Phys. Rev. Accel. Beams* 12, 040402, 2009.
- [7] H. Hotchi *et al.*, "Beam loss caused by edge focusing of injection bump magnets and its mitigation in the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 010401 (2016).
- [8] H. Hotchi *et al.*, "Achievement of a low-loss 1-MW beam operation in the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 060402, 2017.
- [9] T. Nakanoya *et al.*, "3GeV シンクロトロンビーム入射部への遮蔽体設置作業", *Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online*, Aug. 9- 12, 2021, MOP008.
- [10] K. Yamamoto, "Efficiency simulations for the beam collimation system of the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid-cycling synchrotron", *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 11, p. 123501, Dec. 2008.
- [11] K. Yamamoto *et al.*, "Performance of the beam collimation system in the Japan Proton Accelerator Research Complex Rapid Cycling Synchrotron", *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, Volume 4, 2014, pp. 243-246.
- [12] <http://spectrum-instrumentation.com/en>
- [13] F. J. Lynch, "Basic limitation of scintillation counter in time measurements", *IEEE Trans. Nucl.*, 22, 1, p58-64, 1975.
- [14] H. Hotchi *et al.*, "Pulse-by-pulse switching of operational parameters in J-PARC 3-GeV RCS", *J. Phys. Conf. Ser.* 1067, 052015 (2018).