

J-PARC 3 GeV シンクロトロンビームコリメータの故障事象

A MALFUNCTION OF THE BEAM COLLIMATOR SYSTEM IN J-PARC 3 GEV RAPID CYCLING SYNCHROTRON

山本風海[#], 岡部晃大, 神谷潤一郎, 吉本政弘, 竹田修, 高柳智弘, 山本昌亘

Kazami Yamamoto [#], Kota Okabe, Junichiro Kamiya, Masahiro Yoshimoto, Osamu Takeda, Tomohiro Takayanagi,
Masanobu Yamamoto

Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

The 3 GeV Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) project generates 1MW proton beam for the neutron experiments and Main ring accelerator. In case of such high intensity hadron accelerator, the most important issue is to reduce the uncontrolled loss. The beam collimation system is designed for this purpose. In the present design, the physical aperture is 1.5 times wider than the primary collimator aperture and the beam loss can be enough localized on this condition. After startup of RCS in 2007, the collimator system of RCS worked well. But vacuum leakage occurred during the maintenance period in April, 2016. Since it was expected that the beam collimator was radio-activated very much, we took the influence of radiation into consideration and designed the collimator (ie. a remote clamp system to connect/take off it with a vacuum flange away from itself). Therefore, during the recovery work of the collimator, we were able to reduce the worker dose to less than 60 μ Sv though the collimator block had a residual dose of 40 mSv/h.

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) および主リングシンクロトロン(Main Ring synchrotron, MR)に向けて、最大 1 MW 相当のビームを供給する目的で建設された[1]。1 MW 出力運転時には、RCS はリニアックから入射される 400MeV、333 μ A もの大強度のビームを 25Hz の早い繰り返しで蓄積し 3 GeV まで加速する。この様な大強度の陽子加速器において最も重要となってくるのは、空間電荷効果や様々な不安定性等によって発生するビームロスや低減し、加速器機器の放射化をできる限り低く抑えることである。機器の放射化の程度が少なければ、保守作業時に作業者が受ける被ばく線量を抑える事ができ、故障時に放射能の減衰を待つ事無く迅速に交換ができる。また、ビーム照射や放射線による故障の確率も下げることができる。一般に、人が近づいて保守作業をする、所謂「Hands-on-maintenance」の条件として、ビームライン 1 m あたり 1 W のロス(1 W/m)量に抑える事が一つの指標となっている[2]。

そのため、RCS ではビームロスの最小化を目指しビーム調整を行ってきたが、リニアックからのビーム入射に使用している荷電変換フォイルによる入射、周回ビームの散乱の影響によるビームロスは原理的に無くす事はできない。そこで、RCS ではこのようなビームロスを局所化させるために、RCS 内の他の機器よりもアパーチャを狭くセットしたコリメータをビームラインに設置する事で、ビームロスをそのコリメータに集中させ、他の機器の放射化を減らす設計となっている[3]。このコリメータは、2007 年のビーム調整開始以来、ビームロスの局所化に使用され、

加速器機器の放射化を許容範囲に抑えることに成功していたが[4]、2016 年 4 月の保守期間中に、6 台あるコリメータの最下流の一台で真空リークが発生した。本発表では、コリメータの概要とリークが発生した際の状況、復旧作業状況について報告する。

2. RCS コリメータ概要

ビームが加速器真空容器内を走る間に、磁場の誤差や多極成分、あるいは陽子同士の電荷による反発、真空容器の鏡像電荷の影響等により、設計されたビーム幅を超えた粒子(ハロー)が発生する。ビームコリメータはこのビームハローを削り、ハローによるビームロスの影響が他機器に及ばないように保護する目的で設置される。

RCS 用コリメータシステムとしては、2 ステージコリメーションと呼ばれる方式が採用されている[5]。これは、ビームハローを散乱させるプライマリーコリメータと、その下流に置かれるセカンダリーコリメータから構成される。プライマリーコリメータによって散乱されたハロー粒子は、位相空間内で角度方向にシフトされ、その後位相が進むにつれて変位が増大し、下流に置かれたセカンダリーコリメータによって吸収される。このため、プライマリーコリメータから位相 π 進む間にビームロスを集中させる事ができる。現 RCS では、このロスを集中させる領域として、入射部後方の 1.5 セル分をあてている。水平および垂直方向のプライマリーコリメータは、この 1.5 セルの先頭に配置されている。コリメータの配置を図 1 に示す。また、このように、水平方向プライマリーコリメータをディスペーションフリーの直線部に配置する事で、水平方向のビームサイズを運動量に依存せず一定の値とする事ができる。吸収用のセカンダリーコリメータは全部で 5 台配置する設計となっており、その位置は位相空間上での粒子の位相の進み具合と、四極電磁石でのビームロスの低減化から決定している。

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

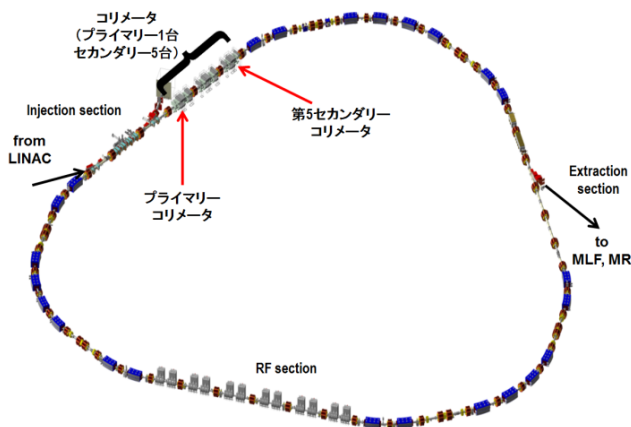


Figure 1: Layout of the collimators.

コリメータでは最大 4 kW のハローを吸収できるように、計算コードを用いて遮蔽体の設計を行った[6]。計算では、真空容器内部にビームが直接当たる 4 つのコリメータブロックを配置し、その外側を 300mm の鉄遮蔽、さらにその外を 800mm のコンクリート遮蔽体で覆うハイブリッド構造で評価を行っている。これは、遮蔽体の内側を密度が大きくγ線への遮蔽効果の高い鉄、外側を放射化し辛いコンクリートとする事で、特に残留放射線の影響を下げる事を目的としている。この遮蔽体により、コリメータブロックから出てくる放射線量を 1/10000 程度まで低減できる設計となっている。図 2 にコリメータ真空容器と遮蔽体の写真を示す。

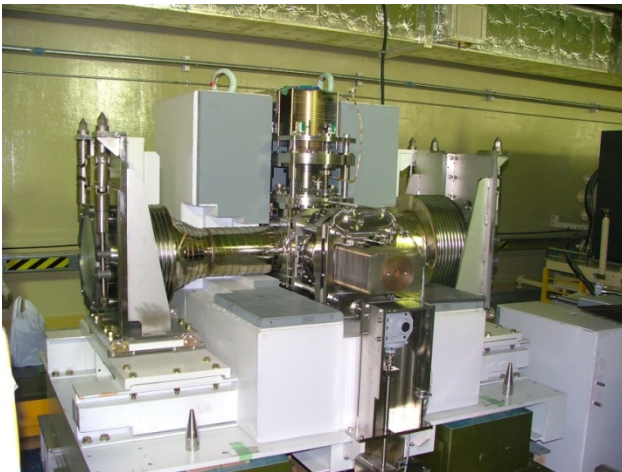


Figure 2: Photograph of the collimator.

コリメータの容量は最大 4 kW で設計されているが、2016 年 6 月時点の MLF 利用運転は 200 kW の出力で行われており、コリメータではトータルで数百 W のビームロスが発生しているの見積もられている。

3. コリメータ故障事象

3.1 真空リーク発生状況

2016 年 4 月 5 日午前中、コリメータ駆動機構制御用 VME (サブトンネル設置) の不具合対応を実施し、ネットワークハブ、VME 制御 CPU、VME モータコントローラボード 1 枚を交換した。午後 14 時頃から運転に向けて

動作確認を先頭から順次実施したところ、最下流の第 5 セカンダリーコリメータが、挿入及び引抜リミットまでの復帰動作はするが、任意の位置への移動ができない事が判明した。動作確認のため、数回挿入リミットと引抜リミットへの動作を繰り返したが、任意の位置への移動は相変わらずできなかった。この一連の動作確認の最中にリークが発生し、TMP が停止、GV が閉まった。

3.2 復旧作業

リーク量が大きいリークディテクタが使用できず、またリーク箇所と思われる駆動機構周辺が遮蔽体内のためアクセスもできないためリーク箇所の特定がすぐにはできない状況であった。そのため、リーク箇所特定のための手順の検討が必要となった。また、コリメータは重量物(遮蔽込みでおよそ 30 t)のため、偏向電磁石用のエアパレットで搬送する必要があり、エアパレットをコリメータ架台下に差し込む際に周辺のコンクリート遮蔽を撤去する必要があった。さらに、高放射線環境であることを考慮し、クランプに近づかず取り外せるように用意していた、リモートクランプを駆動する専用のナットランナーの準備も必要となった[7]。一方で、コリメータ周辺の線量を詳細に測定した結果、遮蔽体表面では 5-10 $\mu\text{Sv/h}$ 、コリメータ下流のダクト表面で 200 $\mu\text{Sv/h}$ であり、遮蔽体の陰で作業する分にはそれほど被ばくし無いことを確認した。このように、保守交換作業の内容が多岐に亘るため、それぞれに作業責任の取りまとめを置いて作業手順書の作成、リスクアセスメントを実施し、準備と実際の作業を進めた。

リーク発生翌日である 4 月 6 日に、音およびスニファ法によって故障箇所が第 5 セカンダリーコリメータである事を突き止めた。リーク箇所特定作業の間、重量物搬送、リモートクランプ駆動の作業手順作成とリスクアセスメント、用具の準備を行った。

4 月 7 日から、リークした第 5 セカンダリーコリメータ取り外しのため、周辺の遮蔽体撤去作業を開始した。遮蔽体の撤去後に遠隔着脱装置を用いてフランジ締結を外し、スミアを行った結果、汚染は無いことが確認できた。エアパレットにてコリメータを通路まで移動し、内部の線量を測定したところ、コリメータブロックが最大 40 mSv/h と非常に高い値であることが判明し、今後の方針を検討するために補修作業を一時ストップした。一方、取り外したコリメータ前後のビームラインに閉止フランジをうって真空排気を開始したところ、今回取り外したコリメータ以外で特に大きなリークはない事が確認できた。

当初は、リーク箇所を取り外し閉止フランジを取り付け復旧させる予定であったが、40 mSv/h のコリメータをむき出しにして閉止フランジと交換する場合、被ばくを十分抑えて作業を行うには相当に周到な準備と時間がかかることが想定された。そこで、コリメータは復旧させずに直管ダクトをつないだ状態で運転できないか検討を行った。SAD コード[8]を用いたトラッキングによると、故障した最下流のセカンダリーコリメータが無くともその前のコリメータを調整すれば現在のアーク部レベルのポイントロス(停止 4 時間後で < 100 $\mu\text{Sv/h}$ @コンタクト)が 1 箇所程度増えるだけで済みそうである、という結果が得られた。そこで、直管ダクトを取り付ける方針に変更した。

上記検討と並行して、コリメータの駆動試験を実施し

たが、現場で確認したところ動かすつもりで制御コマンドを送ったのは違うコリメータが動いたため、正常に制御できていない事が確認できた。このため、真空ダクト交換前に制御系を直し、交換する箇所以外の健全性を確立してから入れ替えを行う事とした。コリメータの制御系の調査の結果、新たに制御ボード一枚が正常に動作していない事を判り、交換し正常に動作する事を確認した。

ビームラインの復旧に関しては、取り外したコリメータの代わりに単管真空ダクトを前後のビームラインと真空締結し、ターボ分子ポンプで排気を開始した。また、通路に仮置きしていたコリメータを高放射化物品保管庫へ移動した後日詳細調査することとした。コリメータの撤去の手順を表1に示す。

単管ダクトを取り付けた後で、一晚真空排気を行ったところ、コリメータ部の圧力は朝の時点で 10^{-6} Pa 台になったため、リーク無しと判断、遮蔽体の復旧を行った。最終的に 4/12 の夜にビーム運転の準備が完了し、4/13 未明からRCS調整を開始、18:43 から 25 Hz 運転を開始した。

3.3 再開後のビームロス状況

図 3 に、運転再開前と後のビームロスモニタ[9]の出力の比較を示す。図の横軸はロスモニタの ID(およその設置場所に相当)、縦軸は積分出力を示している。SAD によるトラッキングの結果の通り、コリメータで局所化できず漏れ出した散乱粒子によるビームロスの増加はあったものの、 $100 \mu\text{Sv/h}$ を超える箇所は発生しなかった。しかし、第 5 セカンダリーコリメータでロスしていた粒子、あるいは上流コリメータにハローが当たる事で発生した二次粒子(主には中性子)を遮蔽する遮蔽体が存在しないため、新たに入れた直管ダクトでのビームロスモニタ出力が増

加し、実際に線量も局所的に最大 10 mSv/h 程度まで増加した。

Table 1: Removal Process of the Collimator System

作業	内容
①コリメータ周辺の真空切り離し。	制御室より操作し、コリメータ周辺のゲートバルブを閉じる
②コリメータ真空ダクト接続解除	遠隔真空着脱装置にてクランプを開放し、フランジを切り離す
③配線等撤去	コリメータ制御線コネクタ、ロスモニタの取り外し、ケーブル撤去
④搬送用エアパレット移動	偏向電磁石用エアパレット台車をコリメータ横まで移動
⑤エアパレット台車の架台下への挿入	BM 用エアパレット台車をガイドで位置合わせをしながらコリメータ下に潜り込ませる
⑥ジャッキアップ	台車付属の油圧ジャッキを用いて基礎架台からジャッキアップし、架台上のガイドピンから抜く
⑦通路まで横行移動	台車上にコリメータを載せた状態で通路まで横行車輪で移動し、通路脇の走行ガイドレールにガイドを接続する
⑧高放射化物品保管庫まで移動	エアパレットにて B2F 搬入通路横の高放射化物品保管庫まで移動し、保管する

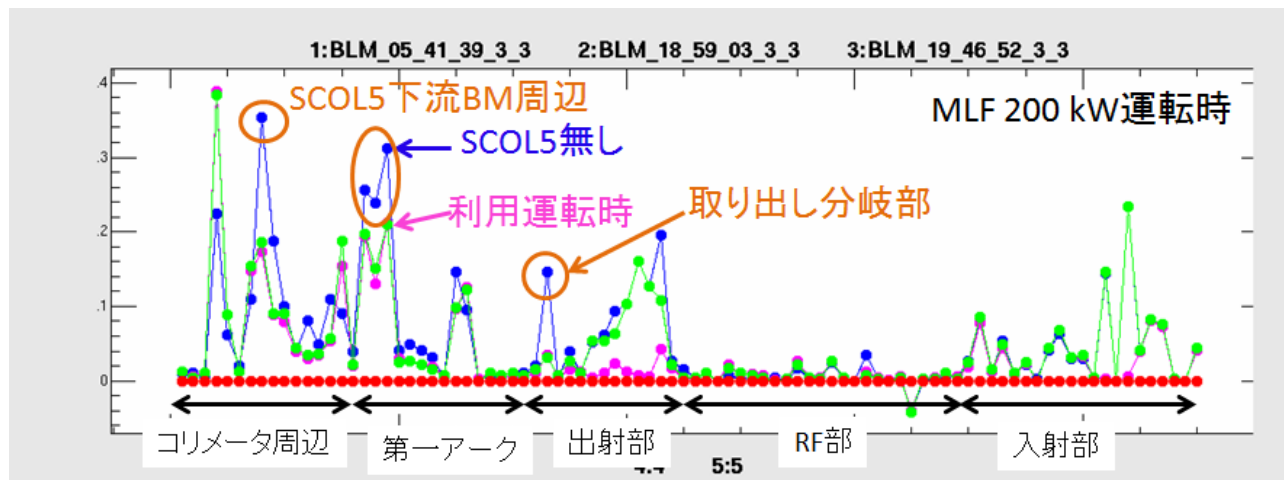


Figure 3: Beam loss monitor signals around the RCS.

4. まとめと今後

4.1 コリメータの遮蔽性能

図 4 に、コリメータ設計時の遮蔽体のモデル図と計算結果を示す。計算は MARS コード[10]を用いて行っており、計算モデルでは真空内に銅のコリメータブロックが配置され、その周りを 30 cm の鉄及び 50 cm のコンク

リートの遮蔽体が覆っている構造とした。この図ではビーム中心で切った断面の上半分を示しているが、計算では下半分と紙面奥行き方向にもコリメータがあり、合計 4 つの銅ブロックで 1.2 kW の 400 MeV 陽子を削った際の評価を行っている。ビーム照射時間は一か月連続で、一日冷却した後の各箇所表面での残留線量の値を色分けによって表現している。評価結果では、ビームを直接削る銅コリメータブロックは数 Sv/h(図の濃い緑)という非常

に高い線量となっているが、コンクリート遮蔽体の外側では数百 $\mu\text{Sv/h}$ (図の黄色～赤)と、1/1000 以下まで低減できる設計となっている。一方、今回実際に測定した結果では、銅コリメータブロックの最も線量の高い箇所では 40 mSv/h であったのに対し、コンクリート遮蔽体の表面では 10 $\mu\text{Sv/h}$ 以下で、計算同様 1/1000 以下の遮蔽性能を有している事が確認できた。

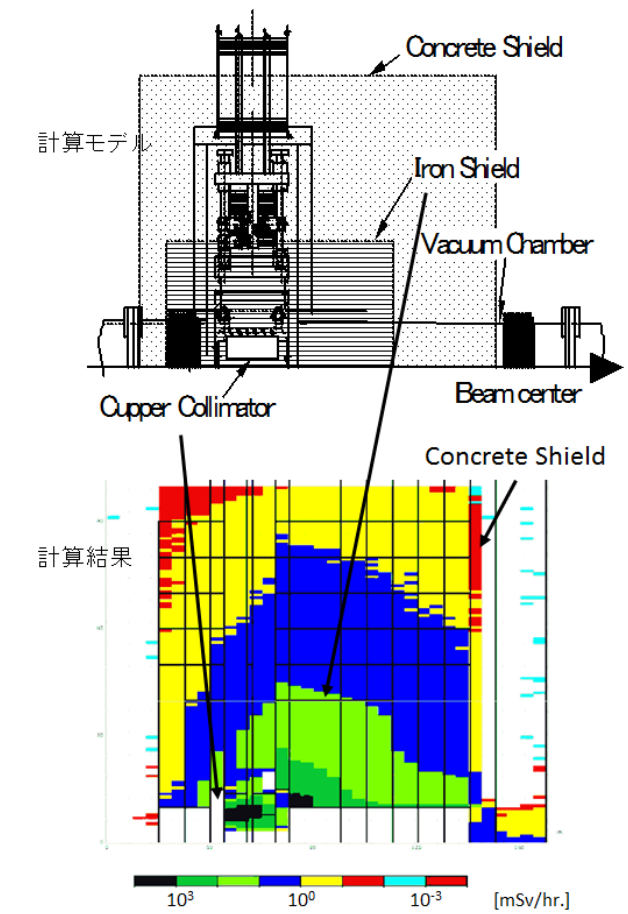


Figure 4: Residual dose estimation of the collimator.

4.2 被ばく量

今回のコリメータ故障からの一連の復旧作業で、合計 31 名が保守作業に当たった。そのうち、APD の検出限界以上の線量 (10 μSv 以上) を受けた作業者は 24 名であった。集団線量は 620 $\mu\text{Sv} \cdot \text{人}$ であり、作業者が受けた最大線量は 60 μSv であった。60 μSv の被ばくは二名の作業者が該当し、作業内容はそれぞれ遠隔着脱とサーベイ、真空ダクト取り付けであった。保守交換作業の内容が多岐に亘り、それぞれに作業責任の取りまとめを置いて作業者も分けたため、一人が突出して被ばくすることなくある程度平均化する事ができた。

ちなみに、前年 2015 年度通年での RCS の保守作業では、集団線量は 6.91 $\text{mSv} \cdot \text{人}$ 、最大線量 800 μSv であった[11]。今回の作業では、通年での保守作業の 1/10 程度の被ばく線量があったことになる。

4.3 保守作業手順の見直しが必要な点

1. 遮蔽体撤去

遮蔽体は、基本的に中心一点吊でバランスが取れるように作っていたはずだが、今回最初に外した最下流の天井部の遮蔽体だけバランスが悪く、安全に外すために四苦八苦し作業に時間がかかった。今回の記録を手順書に反映し、次回以降余計な作業時間が増えないようにする事で、被ばく量の低減を図る。

また、壁際に残っている遮蔽体とエアパレットが干渉して重心がずれ、コリメータを持ち上げた際にエアバランスを調整して何とか動かす設計であったが、もっと線量が高い状況となった場合には時間をかけて調整するのは被ばく量の観点から得策ではない。この問題を解決するために外側遮蔽体の改造が必要である。

2. リモートクランプシステム

ナットランナーの保守をしていなかったため、全体制御用の PLC の揮発メモリの記録が飛んでいた(ただし、ナットランナー本体のコントローラに設定が残っていたため、直接コントローラで制御できた)。製作から 10 年以上経過しているため、更新を行う必要がある。また、遠隔着脱装置の動作に不安を抱き、リモートクランプの直近で恐る恐る作業したので、せつかくの遠隔着脱装置の意味があまりなかった。ただし、遮蔽が設計通り線量を抑えてくれていたので、作業中の被ばくはそれほど多くならずに済んだ。

今回は直管ダクトをつなげたため取付時には遠隔着脱装置を使用しなかったが、実際新しいコリメータを取り付ける際には、コリメータ側のダクトと相手側フランジで嵌合するガイドを使用する。直接セラミックダクトとつながってはいないが、間に十分なベローが入っていないため、ぴったりと嵌らない限りはセラミックダクトに力がかかってしまう恐れがある。次に作る時は、この点を考慮して製作する必要がある。

今回の経験から、遮蔽体の影であれば、それほど被ばくせず済む事が確認できたので、新しいコリメータではフランジ着脱装置はフルリモートにこだわらず再設計をする。

4.4 まとめと今後

とりあえず、4 月から 6 月までの運転は直管ダクトで真空をつないだだけの状態で行ったが、遮蔽体無しで直管ダクトだけの場合、そのダクトが 10 mSv/h を超えて放射化し、今後ビームパワーが上がると保守作業ができなくなる。そこで、現在遮蔽体と予備のコリメータの製作を進めており、2016 年の秋の運転開始前にインストールする予定である。出力ビームパワーが 1 MW までであれば、コリメータでのロス設計の 1/10 程度(現在の 200 kW 運転の 4 倍程度)であるため、今回は 1 MW 運転までに対応したコリメータを入れ、駆動等はさせずにアパーチャに余裕を見た固定式とする。一方、既設コリメータに関しては、制御系の見直しを図り、今回異常が発生した VME のモータコントローラに変えて、故障後に検証試験を行い、VME よりも安定である事が確認できた横河の PLC に入れ替える。次年度以降、1 MW 以上の運転に対応する 4 kW コリメータの改良を進める予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC", KEK

Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-44.

- [2] N. Nakao *et al.*, “MARS14 Shielding Calculations for the J-PARC 3 GeV RCS”, KEK Report 2004-1 (2004).
- [3] K. Yamamoto, “Efficiency simulations for the beam collimation system of the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid-cycling synchrotron”, *Phys. Rev. ST-AB* 11, 123501 (2008).
- [4] K. Yamamoto, “Performance of the beam collimation system in the J-PARC RCS”, *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 4, pp. 243-246 (2014).
- [5] J. B. Jeanneret, “Optics of a two-stage collimation system”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 1, 081001 (1998).
- [6] K. Yamamoto *et al.*, “The beam collimator system of J-PARC rapid cycling synchrotron”, Proc. of 42nd ICFA Advanced beam dynamics workshop, HB2008. (2008).
- [7] K. Yamamoto *et al.*, “Present Status of Beam Collimation System of J-PARC RCS”, Proc. of 10th Biennial European Particle Accelerator Conference (EPAC06), (2006).
- [8] SAD code, URL; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [9] K. Yamamoto *et al.*, “Beam loss monitor system of J-PARC RCS”, Proc. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. pp. 1060-1064 (2013).
- [10] MARS code, URL; <http://www-ap.fnal.gov/MARS/>
- [11] K. Yamamoto *et al.*, “Worker dose under high-power operation of the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron”, to be published in Proceedings of ICRS-13 & RPSD-2016.