

J-PARC 3GeV シンクロトロン[†]の残留線量率と被ばく線量の推移

THE RESIDUAL DOSE DISTRIBUTION AND WORKER DOSES IN J-PARC 3GeV RAPID CYCLING SYNCHROTRON

山本風海[#]

Kazami Yamamoto [#]

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

Abstract

J-PARC 3GeV Synchrotron (RCS) started beam commissioning in 2007. The beam commissioning has been continued to increase the beam power for users. In a high-intensity hadron accelerator such as J-PARC, it is essentially important to reduce the activation due to the beam loss and to suppress the exposure of workers. For this purpose, RCS has continued to study and countermeasure for the causes of the beam loss from the initial stage of beam commissioning. At present, stable user operation is continuing at 500 kW. This value is half of the design beam power of 1 MW, and the residual doses are being maintained enough small so that the maintenance work does not be hindered. In this report, we introduce the history and measures of the residual doses in RCS so far, and the situation of the exposure dose of workers during maintenance work.

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最も問題となるのは、ビームロスによって加速器機器やトンネルが放射化し、保守作業に支障をきたすようになることである。一般に、陽子加速器において許容されるビームロス量の具体的な指標としては 1 W/m が目安とされている[2]。この値は、既存加速器の例に見られるリング一周数百 m に対して許容されるロスが数百 W であるという事実より提唱されており、加速器運転中のロスをこのレベル以下に抑えればいわゆる「hands-on-maintenance」、すなわち人間が近づいての保守作業が可能である。そのため、ビーム損失で生成される残留放射能による線量率の分布状況を把握し、それが上記 1 W/m 程度に収まるよう対策を講じながらビーム強度を上げていく必要がある。

本稿では、RCS でビーム調整を進める中で判明したビームロスの原因とその対策、および作業員の被ばく線量の推移について報告する。

2. ビーム調整初期段階における残留線量分布

2.1 概要

図 1 に、2012 年 6 月時点での RCS トンネル内の線量分布を示す。また、2007 年秋のビーム調整開始より 2012 年夏までの 1 日当たりの加速粒子数と主要なビームロスポイントの残留線量率の履歴を図 2 に示す[3]。

RCS では、周回、加速中にビームエミッタンスが広がって形成されるビームハローに関しては、入射直線部

の下流に設置したアパーチャを狭めたコリメータに局所化する方針で設計されており[4]、このコリメータは運転開始直後から想定通りに機能した[5]。シミュレーションの結果では、コリメータから漏れてきたビームハローはアーク部のディスパージョン関数のピーク周辺でロスする評価となっていたが、実際の線量分布も入射部を除くとディスパージョン関数のピークおよびその下流の偏向電磁石(BM)に集中しており、計算と一致している。また、加速中のエミッタンス増加はビーム調整によって低減され、コリメータに当たるビームハローの量自体を設計値である 4 kW に比べ相当低く抑えることができた。これらの結果により、東日本大震災の前の段階で MLF へのビーム出力として 200 kW を達成し、安定に供給することができた。

しかしながら一方で、ビーム強度の上昇とともに、リニアックから RCS への入射ライン(L3BT)や RCS の入射直線部においては、次のような高線量のポイントが見つかった。

- 1) リニアックで加速した負水素(H⁻)ビームを荷電変換入射する際に、変換しそこなった H⁻および H⁰ビームを廃棄するための入射ダンプラインと周回ビームラインとの分岐部(図 2 黒線)
- 2) 入射ダンプライン上の水平ステアリング電磁石(図 2 マゼンダ線)
- 3) L3BT 上の RCS との合流部に設置された、2 台のセプタム電磁石の間(図 2 青線)

これらの残留線量に関して、その原因の調査と対策を検討した。

2.2 入射ダンプラインと周回ビームラインとの分岐部の線量

MLF および MR への連続ビーム供用運転が開始されてから最初に高い線量が観測されたのは、入射用荷電変換フォイルより 5 m 程度下流の、ダンプビームラインと周回軌道を分岐するためのダクト、およびその下流であった[6]。このダンプビームラインは、入射時に陽子に変換し損ねた H⁻や H⁰を、廃棄用のダンプまで輸送する

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

ためのものである。周回軌道と、これらの廃棄ビームを分離するために、分岐ダクトにはセプタム電磁石を組み込む必要があり、この部分の真空容器の口径は周辺よりも小さくなっている。この口径が狭まった箇所、入射及び周回ビームのうちフォイルとの相互作用で散乱されたビームが集中して当たっていた。また、比較的散乱角が小さい粒子は、この分岐部を通過してその下流のビーム位置モニタ (BPM) にあたることで、散乱粒子の軌道計算から判った[7]。これらの損失を軽減するために以下の対

策を講じた。まず第一に、入射時のペイントエリアを広げ、次にフォイルの位置を調整した。これら2つの対策によって、フォイルヒット回数の低減を図った。さらに、東日本震災からの復旧作業と並行して、分岐部のダクトにコリメータを組み込むことで、散乱粒子がぶつかる場所を局所化し、さらに分岐ダクトとコリメータを遮蔽体で覆うことで、ビーム損失が大きい箇所からの残留放射能の影響を抑えることに成功した[8]。これら対策により、分岐ダクトの放射化を20%以下に減少した。

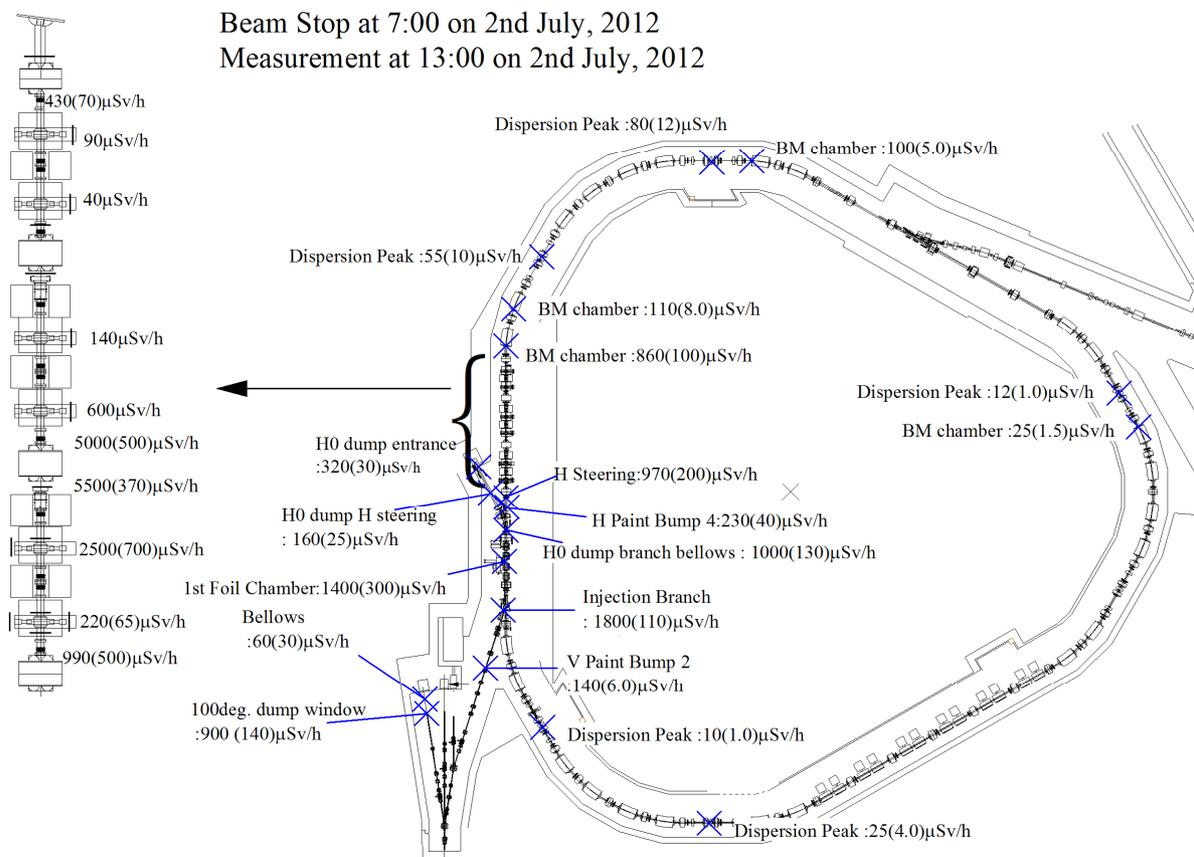


Figure 1: Residual dose distributions in the RCS after 200 kW operation for 1 month and 300 kW operation for 3 days. The values on the left are the residual doses on contact, and those on the right within parentheses are those at 30 cm away from the vacuum chamber surface.

2.3 入射ダンプライン上の水平ステアリング電磁石

入射ダンプラインに設置した、ダンプへの廃棄ビームの軌道を調整するステアリング電磁石のダクトが、周辺と比較して高い線量であった。このダクトはステアリング電磁石のギャップに合わせて前後のダクトより垂直方向の幅が狭くなっており、線量分布の詳細調査から、下流側のアパーチャが広いダクトと、幅の狭い電磁石のダクトをつなぐフランジにある段差に高線量が集中していることが判明した。この測定結果より、この放射化の原因は廃棄ビーム自体ではなく、ダンプにビームが廃棄された際に発生する中性子が反射してビームラインを逆走し、出っ張っている段差部にあたっていると推定した。そこで、ダンプ直前にポリエチレンブロックで遮蔽

した段差を作成し、逆流してきた中性子をポリエチレンで吸収する対策を行ったところ、線量を一桁下げることが成功した。

2.4 L3BT の 2 台のセプタム電磁石の間

運転を進めるうちに、入射ダンプラインに設置したセプタム電磁石1と2との間のダクトに、局所的に高い線量があることが判明した。この放射化は、真空ダクトの左右のうち、入射(H)ビーム軌道が曲がる向きに対して反対側(向かって右)にのみ観察された。このことから、ビーム損失の原因は入射ビームの一部が残留ガスによってH⁰に変換され、一つ目のセプタム電磁石の磁場で曲げられずそのまま直進してダクトに当たったものと考察した。この調査を行っていた際に、偶然に真空ポンプが故障し、L3BTラインの圧力が悪化する事象が発生した。この際

のBLM信号を確認したところ、圧力の上昇に比例してBLM出力も増加していることが確認できた。そのため、L3BTラインに追加のポンプを設置し、真空圧力を改善し

たところ、この点での線量を半分以下まで下げることができた。

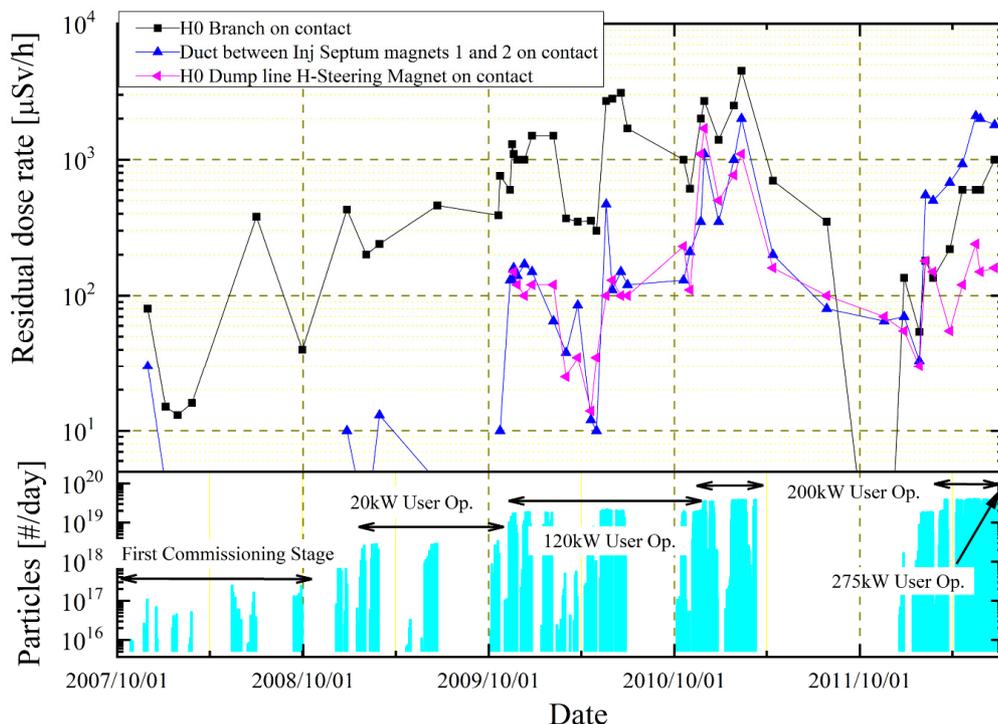


Figure 2: History of the RCS operation power and residual doses.

3. 1 MW に向けた調整時における残留線量

3.1 大強度出力調整時の高線量箇所

J-PARC 加速器では、2013 年度の夏季保守期間にリニアックに新たな加速空洞を導入することで、その加速エネルギーを 400 MeV まで増強し、さらに 2014 年度の夏季保守期間に、イオン源と前段加速部である RFQ を 50 mA ピーク対応の物に換装した[9]。入射エネルギーの増強および入射粒子数の増加を受けて、RCS でも 1 MW 出力に向けた調整を進めつつ、徐々に利用運転の出力を上げていった。ビーム出力の増強にも関わらず、運転パラメータの最適化によってビームハローの発生を最小限に止めることに成功し、運転停止後の残留線量率は入射部を除き 1 mSv/h 以下に抑えることができた。しかし入射部に関しては、フォイル真空容器の放射化が進んでいた。

この原因を調査したところ、入射及び周回ビームと荷電変換フォイルとの相互作用によることが分かった。図 3 に、フォイル容器近傍の BLM 信号出力の、入射粒子当たりの平均フォイルヒット数依存性を示す。BLM 信号は平均フォイルヒット数に比例して増えており、この結果はフォイル容器でのビーム損失がビームと荷電変換フォイルとの相互作用によることを示している。また、残留線量分布の測定結果と PHITS コードによるシミュレーション結果の比較も行い、シミュレーションによって得られた放射能の分布と残留線量値は、測定結果と一致した[10]。

この事実から、荷電変換フォイルでの核反応で放出された二次陽子と中性子が、フォイル容器における高い残留線量の主な原因であることが分かった。

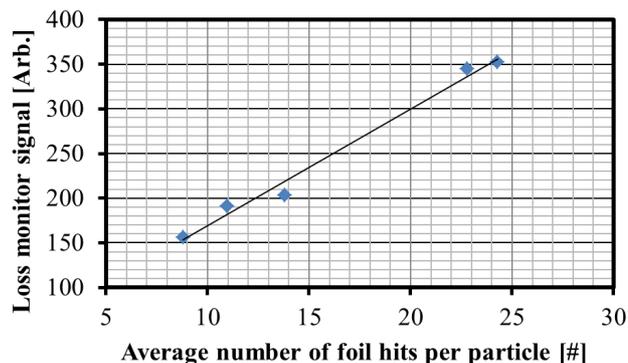


Figure 3: Beam loss signals near the injection point under different beam injection conditions in the RCS.

3.2 フォイル容器の放射化対策

このフォイル容器の残留線量を低減するためには、フォイルと周回ビームの衝突回数を減らす必要があり、そのためにはペインティングエリアを広げなければならない。しかし、入射バンパ電磁石のエッジ収束によるベータ関数変調の影響で、ペイントエリアを広げると急激にロスが増加していた[11]。そこで、ベータ関数変調を補正する補正四極電磁石の製

作と設置を行なった。この補正四極電磁石によって、ビームロスを増加することなくペイントエリアを広げることが可能となり、フォイル容器の残留線量を下げることができた。図4は2015年4月の運転時の残留線量の分布を示している。4月は400 kW 出力で運転を開始し、4/14に500 kWに出力を上昇し運転した。図4中の赤字は400 kWでの利用運転後、青字はそれに加えて500 kWで1日運転したのちの機器表面での線量の値である。

4月前半の運転は100 π mm-mrad、後半は150 π mm-mradのペイントエリアの設定で運転を行ったところ、500 kWに出力を上昇したにも関わらず、入射点近傍の線量率が下がることが確認できた[12]。現在はMLFに500 kWで運転を継続しているが、ペイントエリアを200 π mm-mradまで広げることで、フォイル容器の線量は10 mSv/h程度に抑えることができています[13]。

Red : 1st Apr., 2015 (400 kW 2week operation with H-painting area of 100 π mm-mrad.)

Blue: 15th Apr., 2015 (400 kW 6-day and 500kW 1-day operation with H-painting area of 150 π mm-mrad.)

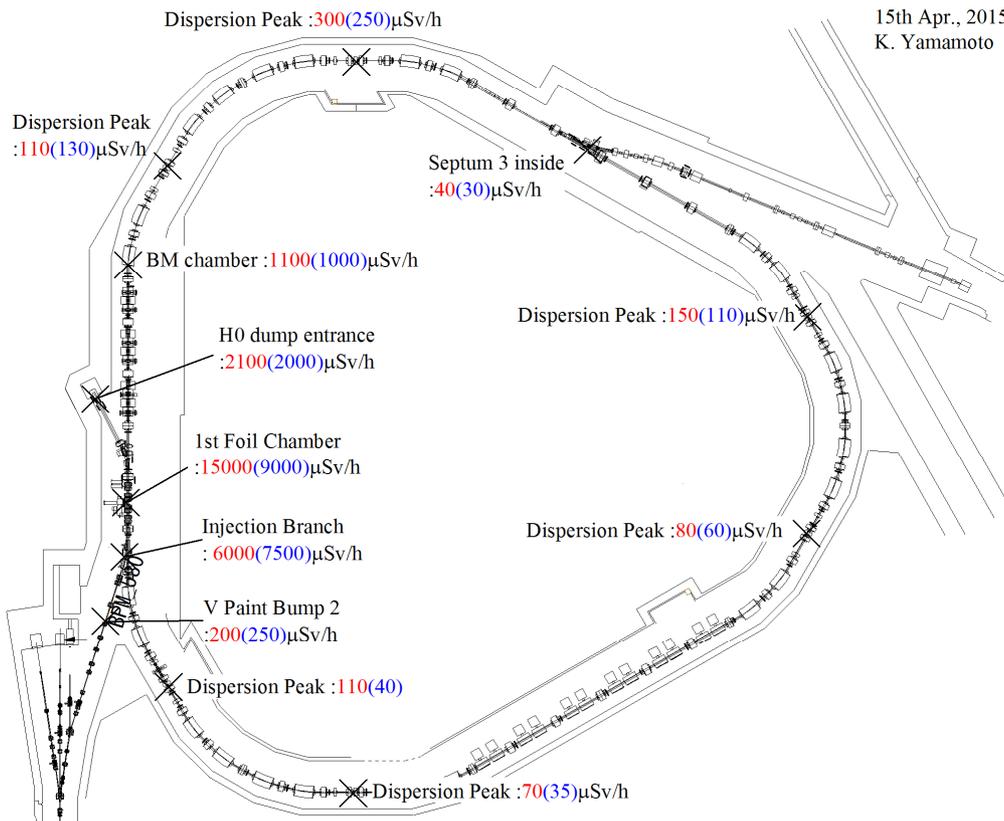


Figure 4: Residual dose distributions in the RCS after 400 kW operation and 500 kW operation.

4. 作業者の被ばく線量

図5に、2014年度から2018年度までの夏季保守作業期間の作業者の被ばく線量を示す。2014年度は300 kW、2015年度は4月末まで最大500 kWで運転を行ったが、中性子ターゲットで不具合が発生し、5月以降はMRのみにビームを供給した。中性子ターゲットは2015年夏に新しいものと入れ替えたが、500 kWで運転を開始して程なく11月にまた不具合が発生した。再度ターゲットの入れ替えを行い2月に運転を再開したが、ターゲットの予備が無く、故障を避けるために出力を200 kW以下に下げる運転が2017年夏まで続いた[14]。2017年夏に新しいターゲットに入れ替えて以降、300 kWから徐々に出力を

増し、2018年夏前には再び500 kWで利用運転を行うことができた。これらの事情により、2014年、2015年と比べると、2016年、2017年の夏季保守作業の集団線量、最大被ばく線量は低い値となっている。2018年度は出力の上昇に伴い、これらの値も上昇したが、作業手順の改善により被ばく量の低減に成功している。

一つの作業において、過去最も高い個人被ばく線量を記録したのは2015年夏の作業で、値は420 μ Svであった[12]。この作業は、入射フォイル周辺で入射バンパ軌道を作るバンパ電磁石のコイル補修作業で、高放射化した磁石の分解とコイル取り付け作業に伴う被ばくであった。また、この年に限らず、毎年高い線量を被ばくする作業は入射部に集中している。ペイントエリアの拡幅によって線量の減少に成

功したが、作業時の被ばくをさらに低減するための検討を継続している[15]。

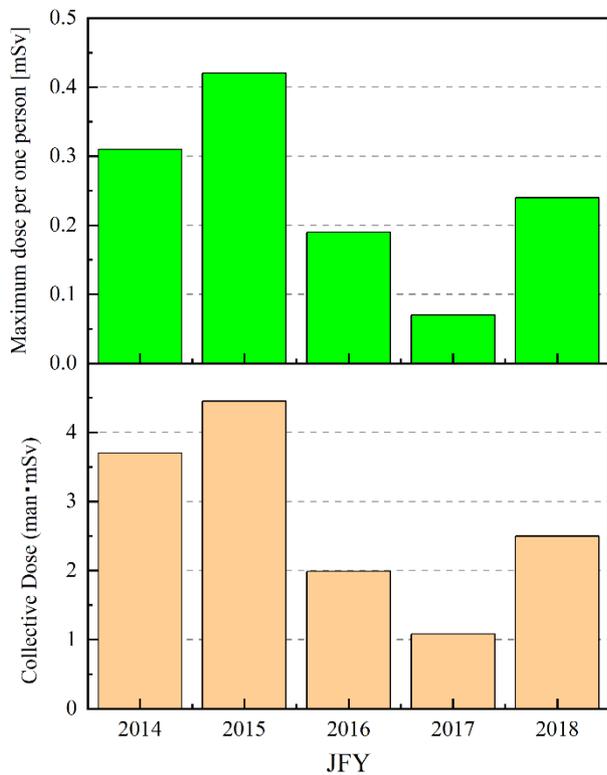


Figure 5: Summary of the worker dose.

5. まとめと今後

J-PARCは2007年にビーム調整を開始してから、加速器トンネル内の線量を継続的に監視し、保守作業に影響を与えないようにビームロスの低減に努めてきた。2015年初頭には設計出力である1 MW相当の粒子の加速取り出しに成功した。供用運転としては500 kWで安定な連続運転を継続しており、2018年7月には1 MWで1時間の連続運転も達成した。しかしながら、フォイル容器の放射化抑制が重要な課題として残っている。この問題については、ペインティングエリアを拡幅させることで周回ビームのフォイル衝突回数の低減に成功したが、さらにハードウェア側の対策として、入射部の作業手順の見直し、遮蔽体等の設計、保守性を高めた機器への改造を現在進めている。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC”, KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [2] JHP Project Office, “JHF ACCELERATOR DESIGN STUDY REPORT”, KEK Report 97-16, JHF-97-10, March (1998).
- [3] K. Yamamoto *et al.*, “Beam power and residual dose history of J-PARC RCS”, *Prog. Nucl. Sci. Technol.* **4**, pp. 238-242 (2014).
- [4] 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).
- [5] K. Yamamoto, “Performance of the beam collimation system in the J-PARC RCS”, *Prog. Nucl. Sci. Technol.* **4**, pp. 243-246 (2014).
- [6] K. Yamamoto *et al.*, “Beam loss and residual dose at 100 kW user operation in the J-PARC accelerator”, *Proc. of the 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop HB2010*, TUO2C06 (2010).
- [7] S. Kato *et al.*, “Localization of the large angle foil scattering beam loss caused by multi-turn charge-exchange injection” *Proc of IPAC12*, MOPPD074.
- [8] S. Kato *et al.*, “Localization of the large-angle foil-scattering beam loss caused by the multiturn charge-exchange injection”, *Phys. Rev. ST-AB* **16**, 071003 (2013).
- [9] 森下卓俊他, “J-PARC リニアックのアップグレード”, 加速器, 高エネルギーニュース, **33**(4), (2015).
- [10] E. Yamakawa *et al.*, “Measurements and PHITS Monte Carlo Estimations of Residual Activities Induced by the 181 MeV Proton Beam in the Injection Area at J-PARC RCS Ring”, *JPS Conf. Proc.*, vol 8, p. 012017, Sep. 2015.
- [11] 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. ST Accel. Beams*, vol. 19, p. 010401, Jan. 2016.
- [12] K. Yamamoto *et al.*, “Worker dose under high-power operation of the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron”, *Proc. ICRS-13 & RPSD-2016*, FP000101, 2016.
- [13] K. Yamamoto *et al.*, “Operation status of J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *Proc. IPAC2019*, TUPTS036, 2019.
- [14] K. Yamamoto *et al.*, “Recent status of J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *Proc. IPAC2018*, TUPAL020, 2018.
- [15] K. Yamamoto *et al.*, “New injection scheme of J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *Proc. IPAC2017*, MOPIK035, 2017.