

J-PARC 3 GeV シンクロトロンでの大強度運転の状況

STATUS OF J-PARC 3 GEV RAPID CYCLING SYNCHROTRON UNDER THE HIGH POWER OPERATION

山本風海^{#, A)}, 金正倫計^{A)}

Kazami Yamamoto ^{#, A)}, Michikazu Kinsho^{A)}

^{A)} J-PARC center, JAEA

Abstract

The J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) aims to deliver 1 MW proton beam to the materials and life science experimental facility (MLF) and the main ring synchrotron. While the energy and the peak current of J-PARC linac had been increased in 2013 and 2014, preparations of RCS for 1 MW operation were also arranged. As a result of the injection energy upgrade in 2013, we confirmed that the space charge effect during acceleration process was well eased and the beam loss was drastically reduced. After increment of the peak current from the linac, we tried 1 MW-equivalent operation. This first trial revealed that the power supply of the RF cavity was insufficient to accelerate 1 MW-equivalent beam. The RF system was improved at the end of 2014, and 1 MW-equivalent beam operation was achieved in January, 2015. The beam power for MLF users was also increased to 500 kW in April. In this paper, we report the improvement and status of RCS for high power operation.

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1MW相当のビームを供給する目的で建設された^[1]。J-PARCでは2014年夏季にイオン源の増強を行い、リニアックは設計性能のピーク電流50 mAでの運転が可能となった^[2]。RCSでも夏の保守作業期間に大強度ビームを受け入れるための準備作業を進め、作業後に設計最大出力である1 MW相当の出力を達成すべく調整を開始した。調整の初期段階において、800kW相当を超えた加速粒子数での運転時に高周波加速空洞の電源出力が不足し、バケツが維持できずほとんどのビームが失われる事が判明した。そのため、空洞共振点を変更し必要な電流値を下げる、電源出力の余裕分を使用しインターロックの値を見直す、等の対処を行い、年明けの調整運転時に1 MW相当の試験運転に成功した。また、供用運転としても段階的にビーム出力を増加していき、物質生命科学実験施設(MLF)に向けて500 kWの出力での連続運転を達成した。本稿では、このような大強度運転を達成するためにRCSで実施した作業内容と、大強度運転条件の下での加速器の状況について報告する。

2. 大強度出力運転のための増強

J-PARC 加速器は、当初設計ではリニアックで50 mAのピーク電流を400 MeVまで加速しRCSへ入射する設計となっていた。しかし予算及び技術開発の問題から、ビーム調整が始められた2007年からは上記設計値でなく加速エネルギーは181 MeV、

ピーク電流は30 mAで運転を開始した^[3]。リニアックの当初設計への回復は、2013年および2014年度の夏季保守期間中に行われた。具体的には、2013年度の夏季保守期間に新たな加速空洞を導入することで加速エネルギーを400 MeVまで増強し、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ピーク対応の設計の物に換装する工程が組まれた^[4]。実際には、2013年5月にハドロン実験施設において放射性物質漏えい事故を引き起こしてしまい^[5](国際原子力事象評価尺度の評価はレベル1で、「事故」ではなく「事象」に分類されるが、ここでは自戒の意味から「事故」と表記する)、エネルギー増強作業は一時中断となった。そして、これまで想定していなかった放射線漏洩事故に発展しうるリスクの見直しを図り^{[6][7]}、その検討の結果を受けた対策が一段落した所で、当初予定していた作業を再開した。

RCSでは400 MeV入射に向けた大きな改造として、入射時に入射ペインティング軌道を作るシフトバンプおよび水平ペイントバンプの電磁石用電源の増強工事が行われた^[8]。181 MeV入射時におけるバンプ電源は、半導体のIGBTモジュールを用いたアセンブリの多重化回路構成によるチョップ方式を採用していた。しかし400 MeVへの増強に伴って、シフトバンプ電源に関しては回路方式をコンデンサの充放電を利用した転流方式へ変更した。この方式では、入射バンプ波形の立上げ開始時、フラットトップ開始時、そして、フラットトップが終了した立下げ開始時にのみ、コンデンサの充放電のスイッチ操作を行うため、原則的に3回のスイッチ操作でバンプ波形を形成できる。そのため、スイッチングに起因する電流リップルノイズを大幅に低減することができた。一方、ペイントバンプ電源は台形波形や 50π mm.mrad、 150π mm.mradなどのペインティングエリアに対応したペインティング軌道を形成する必

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

要があるため、任意の波形形成が可能な IGBT によるチョップ方式を引き続き採用した。これら新しいバンプ電源のうち、シフトバンプ電源に関しては調整運転中に以下二点の不具合が判明したが、解消されないまま 2014 年 2 月から運用が開始された。

- 1) 出力電流を一定に保つためのフラットトップ用ユニット部分が長時間の運転に耐えられずに故障し使用できず、本来一定に保たれねばならない磁場が時間とともに減少してしまったこと。
- 2) 電源の冷却が不十分なため温度異常が多発し、トリップが頻発したこと

これらのうち 1) に関しては、入射中の入射位置が動かないように入射用のパルス電磁石で軌道補正をすることで対応した^[9]。2) に関しては、仮設の空冷ファンを電源周辺に多数設置することで温度上昇を防ぎ、次の長期メンテナンスである 2014 年の夏まで運転を継続することができた。最終的には、2014 年夏の保守作業によってフラットトップ用ユニットの修理が完了し、磁場のフラットトップが維

持できるようになるとともに、本設のファンを電源筐体に取り付けることで仮設ファンでの冷却よりも効率的に電源内の温度を下げられるようになった^[10]。

運転停止後の残留線量に関しては、入射フォイルと入射および周回ビームとの相互作用で発生した二次粒子による放射化がフォイル真空容器で進んでいた^{[11][12]}。図 1 に、300 kW で供用運転し、停止 4 時間経過後の線量を示す。RCS ではコリメータで加速中に広がったハローを回収している^[13]ため、これらコリメータ (図 1 中拡大部分) とダンプを除くと、入射部に高放射化機器が集中している。この入射部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、入射バンプ電磁石のエッジ収束によるベータ関数変調の影響で、ペインティングエリアを広げると急激にロスが増加していた^[14]。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も行なわれた。

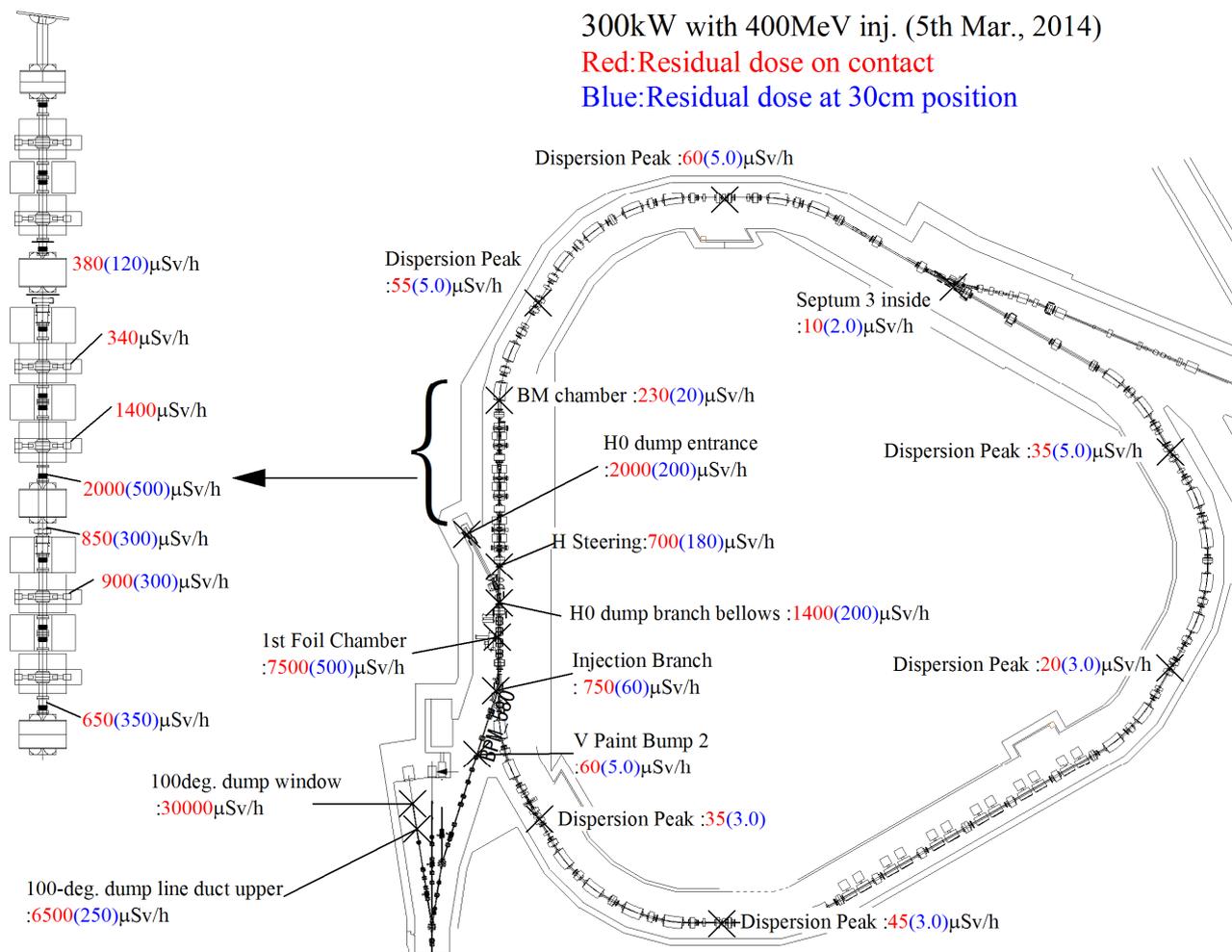


Figure 1: Residual dose distribution of J-PARC 3 GeV synchrotron. This figure shows the dose rates at the surfaces of the magnets and vacuum chambers (red) or at the 30 cm distance from the surfaces (Blue) after accelerator operation. These data were acquired after continuous operation at 300 kW for one week and 4 hours cooling.

3. RCS 運転状況

3.1 大出力運転調整

入射エネルギー400 MeV での RCS のコミッションは、400 MeV リニアックの調整が終わった2014年1月末より開始された。ビーム調整によって、当初の想定通り入射エネルギー増加によるビームロスの低減が確認でき^[15]、1 MW 運転に向けての課題の一つがクリアされた。さらに、2014年夏季保守期間でのリニアックフロントエンドの増強およびその後の調整で、2014年の10月半ばには RCS での1 MW 試験に必要なピーク電流50 mA のビームが入射できる状態になり、それから1 MW へ向けたビーム調整を開始した。この調整期間では、770 kW 相当の粒子数まではほとんどロス無く加速する事が出来たが、820 kW 相当まで粒子数を増やすと、加速中盤の10 ms 付近で空洞電源(真空管増幅器に直流電力を供給している陽極電源)がトリップしてビームが全てロスしてしまった。この原因について調査を進めたところ、高周波空洞を駆動するのに必要なアノード電流が出力とともに増加し、その増加量が想定より大きかったため、電流超過インターロックになったことが判明した^[16]。そのため、電流超過のインターロック設定値を上げ、さらに RF 空洞のコンデンサを外してアノード電流を低減できる空洞共振点に変更して再度1 MW の運転に挑戦し、1 MW 相当の粒子の加速に成功した^[17]。

3.2 連続供用運転状況

単発では1 MW 相当の粒子の加速に成功したが、連続運転を行うためにはさらなるロスの低減が必要であり、実際の供用運転は300 kW から徐々に出力を上昇していった。図2に一日当たりの加速粒子数と主なロス発生点での線量の推移を示す。リニアックの加速エネルギーの増強およびピーク電流の増強後しばらくは、増強前と変わらず300 kW 相当での運転が継続された。これは、MLF の中性子ターゲットの大強度化対応の確認が済んでおらず、ターゲットの保護の観点から強度を抑えた運転をする必要があったためである。MLF 側で大強度ビームの受け入れ準備が2015年1月に完了し、出力を増強しようとしたところ、今度は MLF のミュオン二次ビームラインで使用する電磁石の電源で火災が発生し、その対応で1か月超運転が停止となった^[18]。その後、2月末から300 kW で運転を再開し、3月半ばに400 kW、さらに4月半ばには500 kW まで出力を増強する事に成功した。この際、500 kW での運転を行う前に、新たに設置した補正四極電磁石によって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補正とペイントエリアの拡幅を行った。その結果、400 kW 運転を一か月継続した後では10 mSv/h を超えていたフォイル真空容器の線量率(図中四角点)を、パワーを上げたにも拘らず減少させることに成功した^[19]。この結果を受けて、5月半ばに600 kW まで出力を増加して夏まで運転する予定であったが、4月末に MLF の中性子ターゲットで冷却水漏れが発

生し、以降 MLF への供給は中断され、5月中は MR のニュートリノへ向けた早い取り出しの運転のみが、6月は MR のハドロン実験施設へ向けた遅い取り出しの運転のみが7月1日まで行われた。MR 向けの運転のデューティは10%以下であり、特にハドロン実験用の運転では繰り返しが6秒と遅くビーム強度も小さいため、MLF に向けて運転していた時と比べると2桁以上加速粒子数が少なくなっている。そのため、運転停止時には図に示した主だったロス発生点での線量はすべて1/10程度まで減少した。

図3に2014年度および2015年度前半の MLF 向けの運転時間およびトリップの状況を示す。2014年度は、立ち上げ時間等を除くと加速器は合計4145時間運転され、そのうち3258時間が MLF の運転に利用された。立ち上げ後の調整運転および利用運転中のトラブルによる運転停止は681時間であり、稼働率は83.6%であった。トラブルのうち、RCS に起因する停止時間は261時間で、停止回数はビームロスモニタによる機器保護システムのインターロック、大強度調整中の RF 空洞の電流超過インターロック、取り出しキッカー電磁石のミスファイヤーがほとんどを占めるが、停止時間は偏向電磁石が114時間、バンパ電磁石が70時間、RF 空洞が36時間で上位となった。2015年度前半は MLF 向けの加速器の運転時間は781時間で、運転停止時間の総計は46時間であった。運転時間が短いのは、前述の通り中性子ターゲットで水漏れが発生し運転できなくなったためである。加速器としての稼働率は94%であり、このうち RCS に起因する停止時間は15時間程度であった。停止回数はビームロスモニタと取り出しキッカー電磁石がほとんどであったが、停止時間としては補正電磁石、キッカー電磁石、ロスモニタの順であった。

3.3 作業時の被ばく量

表1に、2014年夏の保守期間中に RCS 内で作業した作業者の被ばく線量の分布を示す。

Table 1: 2014年度夏季保守作業時の被ばく線量

被ばく線量 (mSv)	人数 (人)
0.01-0.05	31
0.06-0.1	10
0.11-0.2	8
0.21-	4

RCS に設置されたアラーム線量計の最小検知線量である0.01 mSv 以上の被ばくを受けた作業者は合計53名おり、集団線量は3.7 mSv であった。0.1 mSv 以上の被ばくを受けた人は12名で、すべて入射部周辺での作業によるものであった。最大被ばく線量は0.31 mSv であり、これはフォイル真空容器とつながっているセラミックダクトの着脱作業時、それも大半はリーク試験時に被ばくした物であった。2015

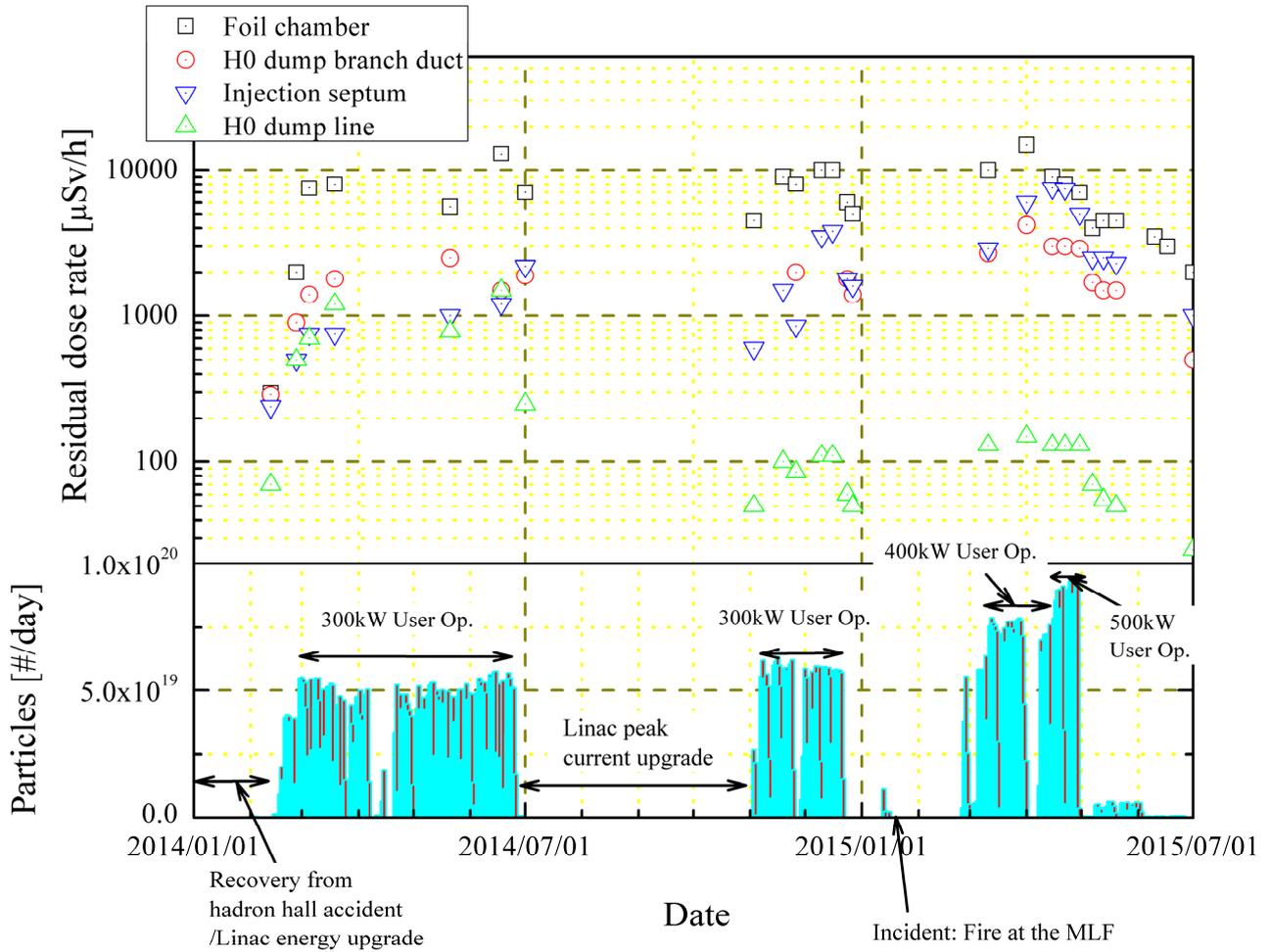


Figure 2: Histories of the residual dose values at major loss points and the numbers of accelerated particles.

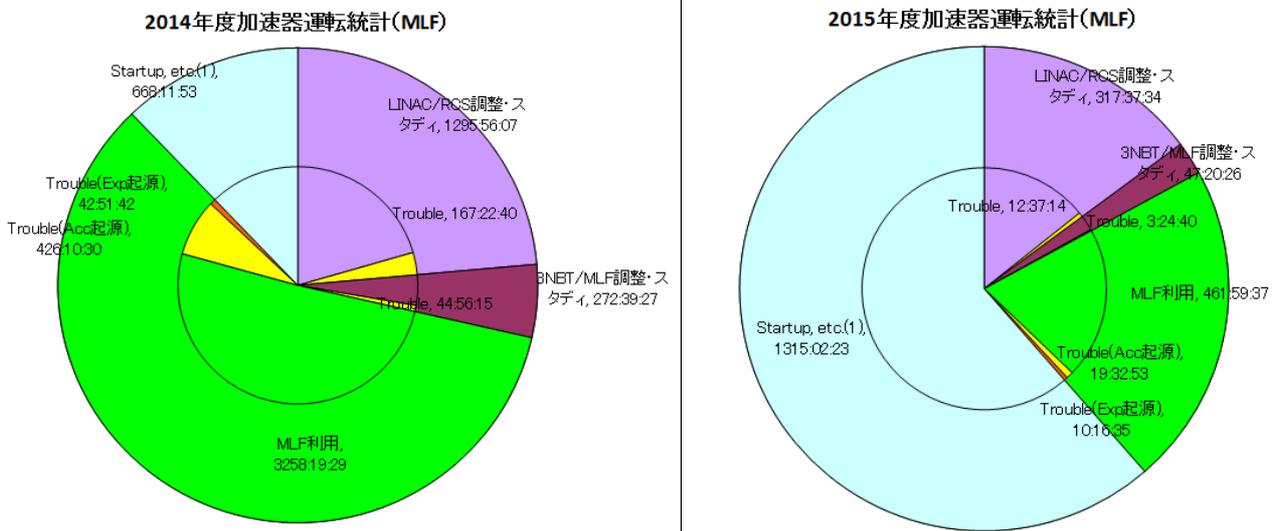


Figure 3: The circular charts of accelerator availabilities.

年度に関しては、7月24日の時点で作業者の最大被ばく線量は0.07 mSvとなっている。作業としては使用済みフォイル回収等のフォイル保守作業である。500 kWでの運転後の線量分布も、300 kW運転時(図1)と同様に入射部以外は残留線量がそれほど高くなく、有意な被ばくが発生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、今後作業時の被ばくをさらに低減するための検討を行う予定である。

4. まとめと今後

J-PARCは2013年と2014年の夏季停止期間にリニアックおよびRCSの増強を行い、1 MWの運転を行う準備を整えた。2014年秋以降のビーム調整により、1 MW達成のためにはRF空洞システムの改良が必要である事が判明した。年末に一時的な処置を行うことで、2015年初頭に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達成した。しかしながら、1 MW出力運転では、なお加速途中で通常運転の数十倍のロスがアーク部分散関数のピーク付近で発生しており、このパワーで連続運転を行うためには空洞運転パラメータのさらなる調整が必要である。現状は空洞アノード電流出力に裕度がないので、電源の容量を増強する改造を2015年度の夏季保守作業期間に進めている。また、フォイル容器の放射化抑制も重要な課題である。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、リニアックビームのピーク電流が上がっても入射ビームのエミッタンスを現状に保つ必要がある。そのため入射ビームラインへのプロファイルモニタの追加、ハローを削るためのスクレーパシステムの改良を2015年度の夏季保守作業期間に進めている。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今後進めていく必要があり、現在入射バンパ電磁石の改造を含めて検討を進めている。

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] 森下卓俊他, "J-PARC リニアックのアップグレード", 加速器, 12, 1, 22-30 (2015), 高エネルギーニュース, 33 (4), 270-278 (2015).
- [3] K. Hasegawa, "Commissioning of the J-PARC Linac", Proc. of PAC'07, THYAB02 (2007).
- [4] H. Oguri, "Power Upgrade of J-PARC Linac", Proc. of IPAC'13, WEYB101 (2013).
- [5] T. Koseki et al., "Present Status of J-PARC - After the Shutdown Due to the Radioactive Material Leak Accident-", Proc. of IPAC'14, THPME061 (2014).
- [6] N. Kamikubota et al., "New Surveillance System to Enhance Safety of J-PARC Accelerators", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-MOOL11 (2014).
- [7] K. Yamamoto et al., "Increment of the Machine Protection

- System in J-PARC Rapid Cycling Synchrotron", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SAP096 (2014).
- [8] N. Hayashi et al., "Progress of Injection Energy Upgrade Project for J-PARC RCS", Proc. of IPAC'13, THPWO032 (2013).
- [9] T. Ueno et al., "Status of the horizontal paint bump power supply of the J-PARC RCS", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SUP058 (2014).
- [10] K. Horino et al., "Report of the temperature problem of the new horizontal shift bump power supply at the J-PARC RCS", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SUP060 (2014).
- [11] K. Yamamoto et al., "Residual Dose with 400 MeV Injection Energy at J-PARC Rapid Cycling Synchrotron", Proc. of IPAC'14, TUXA01 (2014).
- [12] 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", Proc. of the 2nd international symposium on science at J-PARC, in printing.
- [13] K. Yamamoto et al., "Performance of the beam collimation system in the Japan Proton Accelerator Research Complex Rapid Cycling Synchrotron", Progress in Nuclear Science and Technology, 4, (2014) pp243-246.
- [14] H. Hotchi et al., "Numerical study for beam loss occurring for wide-ranging transverse injection painting and its mitigation scenario in the J-PARC 3-GeV RCS", NIM, Sect. A778, 102-114 (2015).
- [15] H. Hotchi et al., "Commissioning the 400 MeV Linac at J-PARC and High Intensity Operation of the J-PARC RCS", Proc. of IPAC'14, TUXA01 (2014).
- [16] H. Hotchi, "Lessons from 1-MW Proton RCS Beam Tuning", Proc. of the 54th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, HB2014, MOXLR02 (2014).
- [17] H. Hotchi, "Recent progress of J-PARC RCS beam commissioning", in these proceedings.
- [18] "J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) 第2実験ホールにおける火災に関する報告書 (最終報) の提出等について (お知らせ)", プレス発表, <http://j-parc.jp/ja/topics/20150219press.html>
- [19] M. Yoshimoto et al., "Residual dose measurement and activation of the injection area in the J-PARC RCS", in these proceedings.