

J-PARC 主リングシンクロトロン真空系は 10 年で老朽化しているか?

AFTER 10 YEARS, IS THERE ANY AGING DETERIORATION OF VACUUM SYSTEM AT J-PARC MR?

魚田雅彦[#], 堀洋一郎

Masahiko Uota[#], Yoichiro Hori

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Over ten years have passed since J-PARC MR vacuum system started operation. Since the suspected performance deterioration occurred in sputter ion pumps and B-A gauge of the chamber of Injection Septum II where the pressure was as high as $1e-5$ Pa, the pumps were exchanged in 2016. We examined whether abnormality has occurred in the pump and/or gauge from the exhaust curve accumulated for 10 years and revealed that there is some abnormality tendency in either or both.

1. はじめに

1.1 真空機器構成と圧力分布

大強度陽子加速器施設 J-PARC の主リングシンクロトロン(MR)真空系の主排気装置はスパッタイオンポンプ(IP)のみである。MR のビーム入射試験開始は 2008 年 5 月、加速出射試験は同年 12 月で、真空系はその少し前に立ち上げを完了している[1-3]。以来、真空系は真空が是、排気せずは非という旗印のもと、数日から数ヶ月のメンテナンスのための計画的な大気曝露(必ず 1 気圧まで窒素でパージを行ったのちに大気に曝される)や東日本大震災及び機器不具合による真空リークによる大気曝露(真空壁への強制的な大気導入)などの停止期間を挟みつつも、2018 年 7 月現在まで、初期に設置された IP 等は 10 年以上にわたり稼働し続けている。その甲斐あって、表面処理が電解研磨及び製造時の工場でのベーキングだけでも拘らず、リング一周に配した B-A ゲージ(以下 IG と表記)で測定した圧力分布はアーク部など単純な金属ダクトから構成される部分に関しては $1e-8$ Pa 台の超高真空領域に入っている(Fig. 1)。一方、図に示すように一部の狭い領域の特定のチェンバ(いずれも in-vacuum 電磁石を内蔵)周辺だけは 2 桁程度圧力が高い。これらのチェンバもまた、少しずつ圧力が下がって 10 年でようやくここまで下がってきたのである。

1.2 10 年の間での真空機器の劣化を疑う出来事

IP はリングに百数十台あるが、残留放射能が高い陽子加速器では現場作業は可能な限り避け、また作業する場合は可能な限り短時間で済ませるべきである。よって MR 加速器の生涯の間は IP のメンテナンス(例えばオンラインでのベーキングや IP 素子、IP そのものの交換等)を行わないで済ませることを計画していた。すなわち、ビーム運転時も十分に圧力が低い状態を保てるよう真空ダクトの表面処理方法を決め、止むを得ず設置される in-vacuum 機器につい

ては使用される材質をチェックし気体放出量を可能な限り下げよう準備された[4]。しかしながら、Fig. 1 の A にある入射セプタム 2 電磁石(InjSep2)だけは、磁石のコアが電磁鋼板(無機物絶縁体皮膜をコーティングした鉄-Si 合金、厚さ 0.35mm)を 1500mm 積層したもので総表面積が約 1km^2 あり、さらに溶射セラミックでコーティングしたセプタム電極や電磁鋼板を固定する貫通スタッドボルトの絶縁にカプトンフィルムが使用されてしまうなどの失敗があり、当初から圧力が $1e-4$ Pa 台と極めて高かった。チェンバに接続していたポンプ 2 台はそれを排気し続けた結果、2016 年夏についに交換する事態に陥ってしまった。まさに痛恨の極みである。

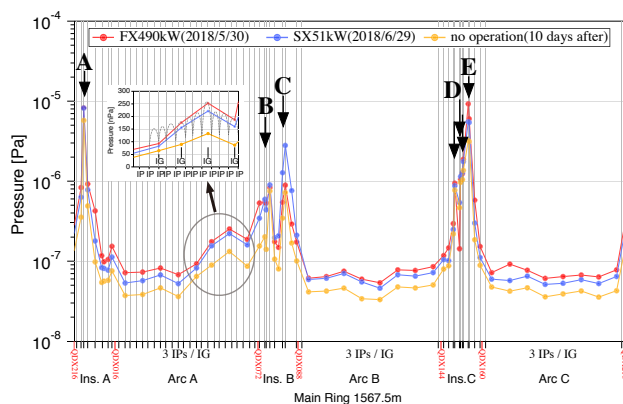


Figure 1: Pressure distribution in MR at various conditions such as FX 490 kW operation, SX 51 kW op., and static state after 10 days from the beam stop. The gray lines in Arcs indicate positions of IPs (omitted in Arc B and C for easy viewing). Almost all IGs except Arc A's three IGs are located directly above or near IP. The inset is a schematic representation of the true parabolic distribution. Three exceptional IGs of Arc A measure the maxima. A-E indicates the Injection Septum II, SX ESS1&2, SX magnetic septum1&2, FX Kicker 1-5, FX low-field septa, respectively.

[#]masahiko.uota@kek.jp

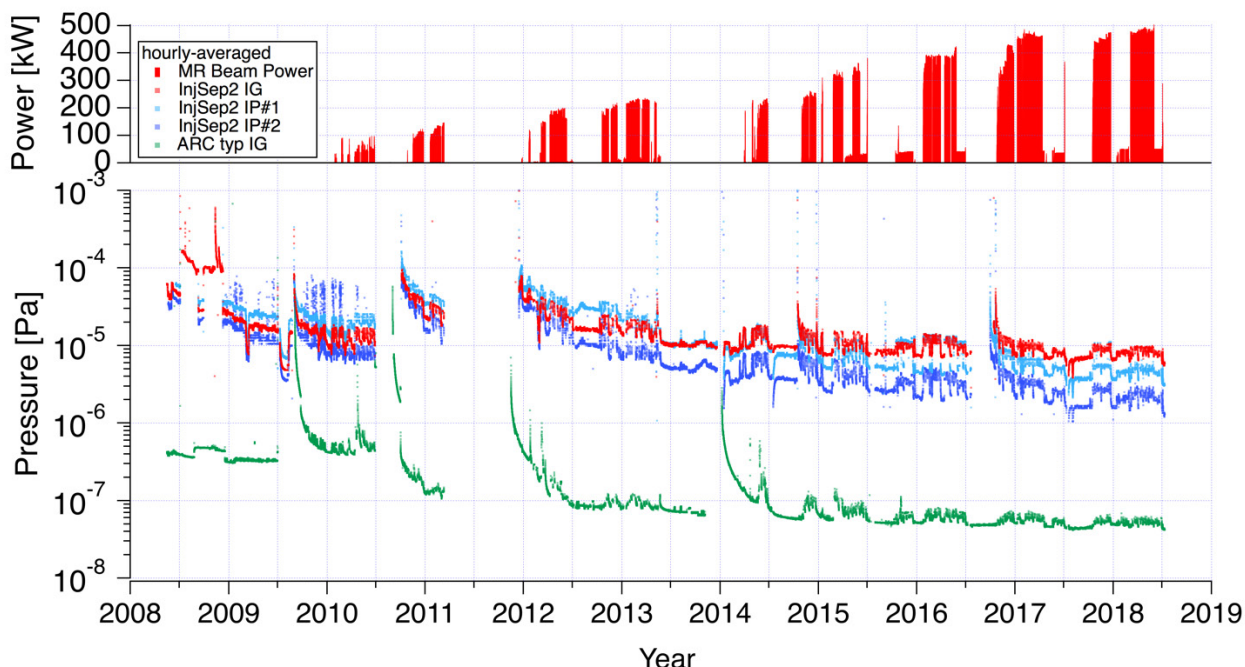


Figure 2: Vacuum pressure trend of the chamber of injection septum II and a typical position in ARC. The red line indicates the IG, sky-blue is for IP#1, blue is for IP#2, and green is for ARC, respectively. The upper graph shows the beam power of MR.

Figure 2 に、InjSep2 の IG、2 台の IP、さらに比較のためほぼ単純なダクトが連なっているアーク部のアドレス#200 に設置された IG の圧力値(サンプリング周期約 1 秒)の 1 時間ごとの平均値の 2008 年から 2018 年にわたる長期の圧力履歴を示す。ただし、時間的に連続したプロットではなく、グラフ最上部に示す MR の陽子ビーム強度が「1kW を超えない場合だけ」をプロットした不連続プロットである。これは、今注目しているのは非・ビーム運転時の静的な圧力なので、加速器運転に伴う圧力上昇の影響をできるだけ排除するためである。というも加速器運転中には、

- 電磁石への通電によりコイルがジュール熱によって発熱、電磁石内などで隣接するビームダクトが数～十度°C 上昇しベーキング効果によって脱離
- 陽子バンチの周回に伴って発生するパルス状の電場によって二次電子が集合し離散する機構によって、ビームに面した内壁に電子が照射されることで脱離する、電子衝撃脱離

といった現象により、加速器の連続運転中は気体放出量が増え平衡圧力が上昇、連続運転が止まると平衡圧力は減少する。連続運転停止の頻度は 1 週間に 1 回程度の半日～1 日間の機器メンテナンスであるので、圧力の上下動がその頻度で発生することになる。これを年のスケールでプロットすると 1 つのデータのグラフが縦に幅を持ち、重なり合ってしまう極めて見通しが悪い。よって非運転時のみをプロットするためのスレッシュホールドが 1kW なのである。ただし、ビーム運転停止直後に電磁石磁極の温度がなかなか

下がらないなどの影響により圧力が数～十数時間の時定数で下がるため、この処理をしてもなおグラフの線が縦に幅を持ってしまっている。

また残念ながら 2010 年の途中まではビーム強度データがデータベースに記録されておらず、粒子数及び運転周期から計算するのが容易ではないため、処理を省略しビーム運転中のデータもプロットしている。

さて、InjSep2 の 2 台の IP の交換の判断に至った直接の要因は、Fig. 2 のように圧力履歴を年のスケールで見た時に、他の機器と異なり圧力が下げ止まっているように見え、これはすなわちポンプの排気速度が徐々に下がっている異常が発生しているように見えたためである。また、大気曝露してのメンテナンス後に真空へ復帰する際、IP の初期起動時の自己アウトガスが 2014～15 年頃には極めて多くなり、なかなか安定に起動せず立ち上げに時間を要し全体の作業を遅らせる要因となっていた事も交換を後押しした。

ところが、2016 年に 2 台の IP を交換したものの、Fig. 2 のその後の 2 年間を見ればわかるように、圧力の下がり方は依然として緩慢であることが最近明らかとなってきた。つまり、圧力が下がらないように見える直接の原因は IP では無い可能性が浮上して来たのである。

IP は、素子の Ti がスパッタリングし切って潤滑する事で寿命を迎えるが、その時間はカタログ値によれば $1e-4$ Pa で運転した場合 5 万時間(5.7 年)と謳われている。実際の圧力履歴 Fig. 2 によると当該チェンバは当初こそ $1e-4$ Pa を越えているが、すぐに

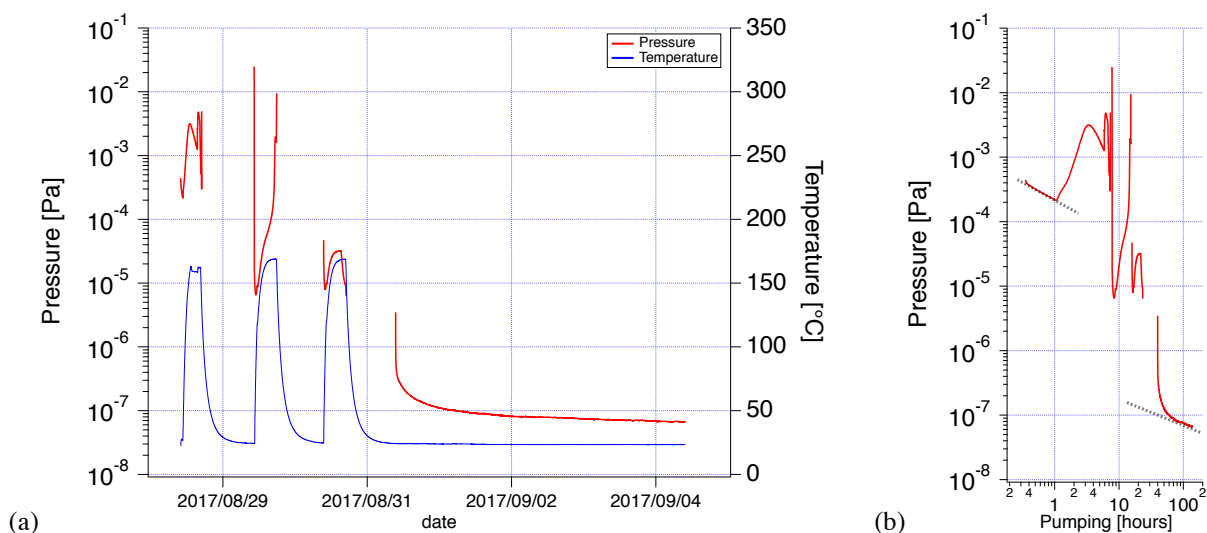


Figure 3: a) Pressure and temperature trend of IP baking. Due to the limitation of the work in the tunnel, baking was carried out three times during the daytime only. Vacuum equipment was kept sealed for first two nights. The IP succeeded in continuous operation from the morning of the third day, and pumping only by IP after the fourth day. b) The pumping curve. Two dashed lines have slopes of (upper)-0.55 and (lower)-0.40, respectively.

1e-5 Pa 台に入っており、積算運転時間からは余命自体はまだ十分にあると思われた。

そこで、外した2台のIPのうち1台について、大気中での保管1年後の2017年夏に、トンネル内オフラインにて新品ビームダクトのベーキングのためにTMPとIPからなる真空系を組み、IPも付属するヒーターによってベーキングしアウトガスさせる試験を行った。ベーキング条件は約180°Cで8時間×3回、昼間のみ実施した(トンネル内作業の制約による)

Figure 3のa)に温度と圧力の履歴を、b)に排気曲線を示す。試験開始当初は自己アウトガスによる圧力上昇のためIPは全く起動できなかったが、IP筐体ヒーターによるベーキングを行いながら電源を投入しガス出しを繰り返すことで、3日目、すなわちベーキングの積算時間で16時間程度以降は連続的に通電が可能となり、4日目以降はIPのみで排気するようになった。Fig. 3bの排気曲線によれば降温後のIPのみによる圧力カーブはベーキング前から桁違いに低い位置へシフトし、かつ時とともに下がっており順調に排気できていることがわかる。

こうして当該IPは交換せずともベーキングを行えば復活できたらしいことがわかった。

尤も、元々セプトラムチェンバの内容物及び外側の各部品はオンラインベーキングを想定していない。各部の部品の耐熱性は高くなく、また熱膨張の差を吸収する機構等も考慮されていないため、温度上昇によって電磁石の電気配線・冷却水配管系の故障やアラインメントのずれが生じる可能性がある。よって、IPを復活させるためのベーキングは一旦チェンバから外し、孤立した真空システムを組んで実施する必要がある。わざわざそのために長時間入射セプトラムを放置しておく位ならさっさと新品に交換すべきであることは自明で、2016年の交換作業の判断は妥当であった。

2. 排気曲線

Figure 4a, b, cに、InjSep2のIG、2台のIPそれぞれの圧力について、最初の排気開始(またはポンプを新たに設置し作動を始めた時)からの経過時間に対する排気曲線を示す。比較のためそれぞれにアーク部#200のIGのデータも載せている。1kW以上のビーム運転があった場合はプロットしていないのはFig. 3と同様である。

排気開始時刻の定義は、InjSep2に関しては2008年5月のビーム運転の1ヶ月前とした。アーク部#200は2008年のビーム運転開始時はIPが存在せず圧力分布の極大近傍を測定しており、IPが増設されたのは2010年9月である。よって増設したIPの起動時刻を排気開始時刻とした。

また簡単のため、メンテナンス等で大気曝露している時間等、ポンプで排気していない時間も排気時間に数えて経過時間を計算した。それによるずれ(飛び)が顕著なのは2011年3月の東日本大震災から12月の運転再開までの間で罹災後復旧までの期間の部分であり、一方累計の排気時間が5万時間を超えたあたりからは、最早排気していない時間が20日程度では排気時間に計上した影響は無視できるほど小さい。

グラフから読み取れることは大体以下の通りである:

- アーク部の構造の単純なダクトの場合、1e-8 Pa台でIPの実効排気速度が低下すると言われている領域にもかかわらずまだ直線に乗って下がっているように見える。傾きは大体-1/2に近いようであり、これは水素拡散が支配的になっていることを示唆するものと言われている。

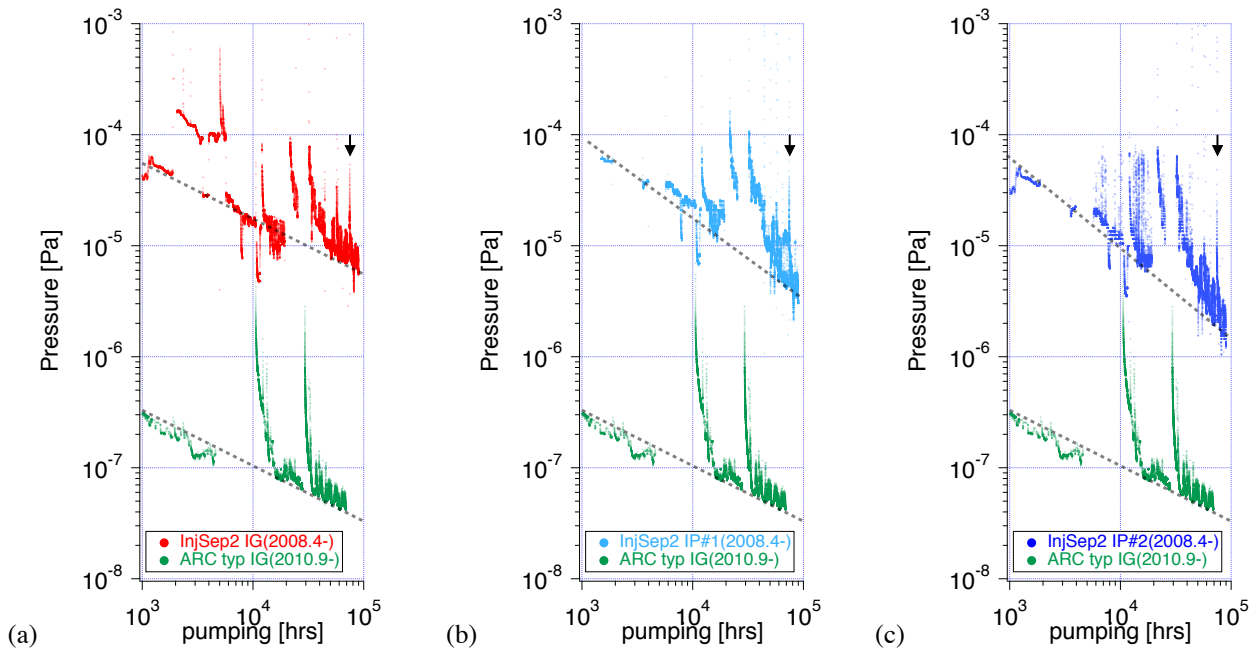


Figure 4: Pumping curve of a) IG, b) IP#1, and c) IP#2 of the chamber of injection septum II and a typical position in ARC. Arrows indicate the time when the pump was changed at 2016.9. The start time of ARC data was set as 2010.9 when the pump was installed in this place. The slopes of dashed lines are a) -0.5(both IG and ARC), b) -0.73, c) -0.81.

- 排気開始から現在までの間に大気曝露を含む排気停止時間が数回あるにも拘らず、7万時間の排気という時間スケールでは、最初からの直線に乗ってくる特徴が見える。つまり途中の大気曝露時の気体分子の吸着エネルギーは極めて小さいことが示唆される(いわゆる真空のメモリ効果)。
- InjSep2の場合、IGは2010年秋から排気曲線が上に飛び、傾きは緩やかである。即ち、圧力の下がり方が、 $1e-5$ Pa程度の高い圧力領域にしては遅いように見える。
- 一方で、同じチェンバの2台のIPに関しては、2010年秋からの数年の高い圧力への飛び出し及び最初の直線への復帰の傾向はIGと同様であるが、元々の直線の傾斜はIGよりも急であって、その傾向はIPを2016年に交換したにもかかわらずまだ続いているように見える。

つまり、同じチェンバに取り付けたIGとIPの圧力傾向に差が生じている事が明らかとなった。ここに何らかの異常があるように思える。

3. 考察

IGで測定する圧力があまり下がらないのは本当で、かつ、イオンポンプの換算圧力が排気曲線に乗って(あるいは急激に)低下している現象を同時に説明できるか検討した。

イオンポンプの換算圧力=冷陰極放電電流であるので、圧力の低下とは放電が減少したということに他ならない。放電が減る理由はアノードへの実際の印加電圧の低下、磁石の磁場の低下で、どちらも考えにくい。一方、吸着分子や収集イオンがTiを改質

(合金や化合物を生成)してスパッタを阻害したり吸着を阻害するような性質へ変わっていったとすると、徐々に放電電流は減少するため見かけの圧力は急速に下がり、かつ排気速度が徐々に低下することでIGが測定する実際の圧力低下は遅くなる。このいかにも都合の良い解釈で一応、現象の説明はできているように見える。なおポンプの改質は、ベーキングによって改善するようなものであったのは言うまでもない。

次に、IGの高止まり表示だけが誤りで、実際の圧力は下がっている可能性について検討する。この場合、例えばゲージのグリッド等からのコレクタへのリーク電流があると圧力を高めに表示させるだろう。

この事に関して、2009年に、同じ型番のB-AゲージでMRへ入射する3-50BTビームラインにてMRPM(Multi Ribbon Profile Monitor)の近傍に設置されていたものが悉くフィラメントを除くあらゆる場所に炭素の皮膜が成膜して汚染され、圧力支持値がおかしくなってしまった現象を参考として提示する。その汚染されたB-Aゲージは校正機と比較したところ、圧力の高い領域では正しい値に対して低い値を示し、圧力の低い領域では $1e-6$ Pa程度でsaturationしてしまう、という性質を持つようになっていた事が判明している。

実はInjSep2の直ぐ下流には、3-50BTのと同じ種類のMRPMが設置されている。やはり同様にそこから炭素系の蒸気が拡散して来たり、セプタム磁極の電磁鋼板のコーティング剤やカプトンフィルムから揮発した物質が付着する事により、ゲージは初期に汚染され炭素皮膜等が付着した可能性がある。ただしその場合は、真の圧力より低い値を表示するはずであるので、それを今回の場合に当てはめると、実

は最初から実際の圧力はさらに高く、それが表面汚染により低く表示され、長期排気後に圧力が下がって来た時の saturation の圧力が 3-50BT の場合より(どういうわけか)一桁高い $1e-5$ Pa だった、ということになる。この説明もまたかなり苦しいと言わざるを得ない。

ゲージに関しては交換自体は容易いので、できれば(再)校正された新品に交換し再び数年使用し様子を見る、また使用していた方はトンネル内で出来る範囲で外観検査やゲージとしての性能の確認を行う、といったことを進めることで有益な情報が得られるかもしれない。

4. まとめおよび今後の展望

J-PARC MR の真空機器は運転開始後 10 年が経過した。機器の老朽化に関して、リング一周の殆どの場所は真空の圧力が $1e-7$ Pa 程度で陽子加速器として十分に低く、全く問題なく機能し健全である。一方、内蔵物に超高真空非対応の有機材料や、表面積が莫大な部品が使われることで設置初期から圧力が高く、現在も $1e-5$ Pa 程度と高い数箇所のチェンバの IP および IG に関しては奇妙な傾向が現れていることが今回明らかとなった。具体的には、電磁鋼板を積層し莫大な表面積を持つコア構造と、カプトンフィルムを絶縁材料として使用している入射セプタム電磁石 II を内蔵したチェンバの IP と IG は、運転開始後数年を経て排気曲線の傾向が明らかに異なっている事、どちらかまたは両方とも何らかの不具合を持っている可能性がある事が判明した。IG が正しく、IP の排気速度が異常に低下する劣化が疑われたため 2016 年に IP を交換したが、外した IP をほぼ単独でベーキング処理を施すとそれなりの排気能力を示すまで回復し、少なくとも素子の寿命ではないことが確認できた。IG にも異常の疑いがあるため IG を交換すべきであるとわかった。もう一つの圧力の高い場所である FX セプタムチェンバの IP、IG についても引き続き解析を進め、異常がないか確認したい。ただし当該電磁石は近々アップデートされ引退予定であるので、緊急性は低い。

参考文献

- [1] M. Uota *et al.*, “J-PARC 主リング及び 3-50BT の真空系の現状”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan, 2009, pp. 974-977.
- [2] M. Uota *et al.*, “J-PARC MR イオンポンプ OFF 時の顕著な圧力上昇”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, pp. 1383-1386.
- [3] M. Uota *et al.*, “J-PARC 主リング真空ダクトの一部タン置換と運転への影響”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 1342-1346.
- [4] High-intensity Proton Accelerator Project Team, “Accelerator technical design report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC”, KEK Report 2002-13.