

## J-PARC MR に新品の機器を加える場合の焼き出し運転の評価

### EVALUATION OF BAKE-OUT OPERATION WHEN NEW EQUIPMENT IS ADDED TO J-PARC MR

魚田雅彦<sup>#</sup>

Masahiko Uota<sup>#</sup>

KEK/J-PARC Center

#### Abstract

In the MR synchrotron of the J-PARC high-intensity proton accelerator, gas emission from the inner wall surface of the beam duct is constantly observed as the proton beam bunches passes through. The amount of gas released is larger with higher beam intensity and higher vacuum pressure, and conversely smaller in relation to the integrated charge or total beam current that has passed through. Since the area that was exposed to the atmosphere and worked on during maintenance has little time to exhaust from the atmosphere, the pressure is high when the beam operation is resumed, and since the beam passes through the area for the first time, a large amount of gas is released, causing the pressure to rise further, leading to beam instability and beam losses. To avoid this, a certain amount of time is necessary to promote gas release by intentionally reducing the intensity of the circumferential beam when operation is resumed, which we refer to as “burnout operation”. Among various past installation operations, we extracted duct replacement at periodical arc sections and collimator replacement operations as comparable cases with complete conditions, and verified the effect of beam burnout from the exhaust curve of the vacuum pressure caused by the atmospheric exposure operation. The results show that the heat-baking process should be performed before the installation to reduce the burnout time, and that sufficient exhaust time should be ensured before the operation.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC の MR シンクロトロン の 運 転 は、2008 年 5 月 の 入 射 試 験 開 始 から 現 在 ま で 15 年 が 経 過 し、パ ラメータ調整・変更と機器の改造・増設により所期計画でのビーム強度 750 kW での速い取り出し運転がようやく実現しようとしている段階である。機器の改造・増設では、主に夏期のメンテナンス期間に加速器の一部で内部の真空を窒素で大気圧まで充填パージしてから真新しい、ビームが通過していない真空ダクトをインストールする。その後主に秋期に、ビーム調整運転を始めた時に起こるのは、新たにインストールしたビームダクトでの短期的な圧力上昇である。

この現象は、3–30 GeV の陽子バンチが通過する度、

- ダクト内に残留する気体分子の一部がイオン化され電場で加速して内壁を叩く
- 残留気体分子内の原子が励起して放出する X 線等が内壁に照射される
- バンチ電場で一時的に形成された電子雲がバンチ通過後やデバンチ時に解放され内壁を叩く

等により、内壁表面の気体分子が脱離することで起こっていると考えられている。よってバンチの密度分布と時間構造に依存する。つまり最も単純にはビーム強度に依存する。また、脱離分子数は元々吸着していた分子の数が減ってくれば減るので、連続運転で多数回バンチが通過すれば放出量、ひいては圧力上昇量が減る。これは現象としては、連続運転を開始すると、ダクトの見かけの気体放出速度が増えるので平衡する圧力が上昇し、同じビーム強度で運転し続けると正味の通過ビーム電流ま

たは積算の通過電荷に反比例するように気体放出速度が減少し圧力が下がってくることで観測される[1]。よって、これはビームバンチによるダクト内壁のベーキングと言える。

残留気体分子が増加し圧力が上昇するとそれをソースとしてさらに内壁を叩く正のフィードバックがあり、最終的にはビームロスモニタまたは真空の MPS(Machine Protection System)が働きビーム運転が停止してしまう。そうならないために、秋期の運転開始時は低強度で数時間ビームによるベーキングで気体放出を促し、圧力上昇が収まってきたら強度を一段階上げる、を繰り返す「焼き出し運転」を行っている。

ビーム強度を意図的に低くする焼き出し運転の時間は短く済ませるべきである。何で決まっていたかを過去の具体例から明確にする。

#### 2. 焼き出し 1: コリメータ部 2017 年と 2023 年の比較

直線部 A のビーム整形用コリメータの構成は 2015 年秋までは既報の通り[2]で、その後 Fig. 1 のように変遷している(「新」は新規インストールダクトの位置を表す)。新ダクトの観点で列挙するとそれぞれの時期で、

- 2015 年秋: Col-C, Col-D 及び前中後の Bellows の計 5 本、延べ 4.8 m
- 2017 年秋: D 上流 Bellows と D 用隙間, G 上流 Bellows と G 用隙間の計 4 本<sup>1</sup>、延べ 5.4 m
- 2022 年 1 月: Col-D と下流 Bellows, Col-G と上流 Bellows の計 4 本、延べ 3.6 m

<sup>1</sup> Col-H と H の下流 Bellows は Col-D と D の下流からの移設なので新ダクトではない。

<sup>#</sup> masmahiko.uota@kek.jp

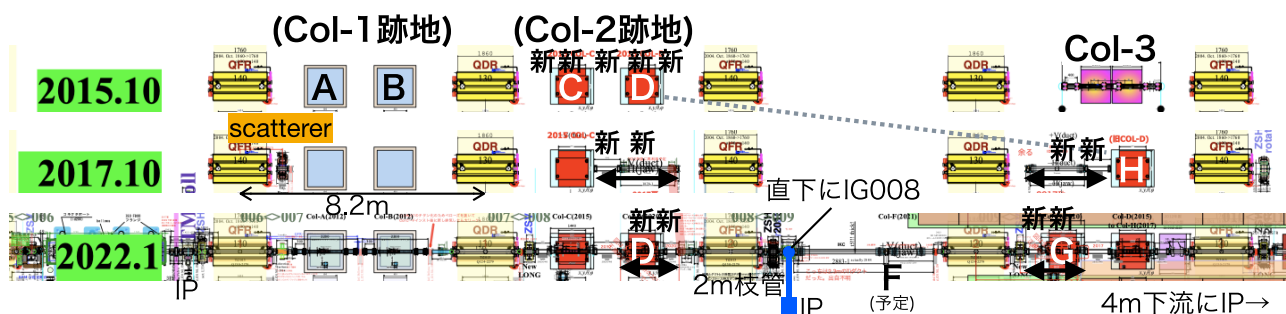


Figure 1: Layout changes in collimator area.

Table 1: Pumping Time, Length of New Ducts and the Final Beam Power before Next Summer Maintenance

時期	運転前排気時間[H]	新ダクト長[m]	翌年夏メンテ前FX利用運転強度[kW]
2015 年秋	300	4.8	390
2016 年秋	600	なし	460
2017 年秋	300	5.4	490
2022 年以降	10700	3.6	(540)

が新規インストールされたダクトである。材質はベローズ、コリメータダクト共に Ti で、ベローズの内部には壁構造をビームから隠すためのスリット状の BeCu フィンガーコンタクトが存在する。コリメータジョーは W で Ti に対し HIP 接合してある。表面処理としては製造工場にて最終工程で 200°C (ベローズは 150°C) 24 時間のベーキングを施し、大気曝露後にインストールしてからは特に何の処置もしていない。

2015 年秋以降のコリメータ部の改造後の排気開始からビーム調整運転開始までの時間、新ダクト長、及び翌年 7 月まで到達したビーム強度をまとめたものを Table 1 に示す。

2016 年はコリメータ部の上流に新モニタをインストー

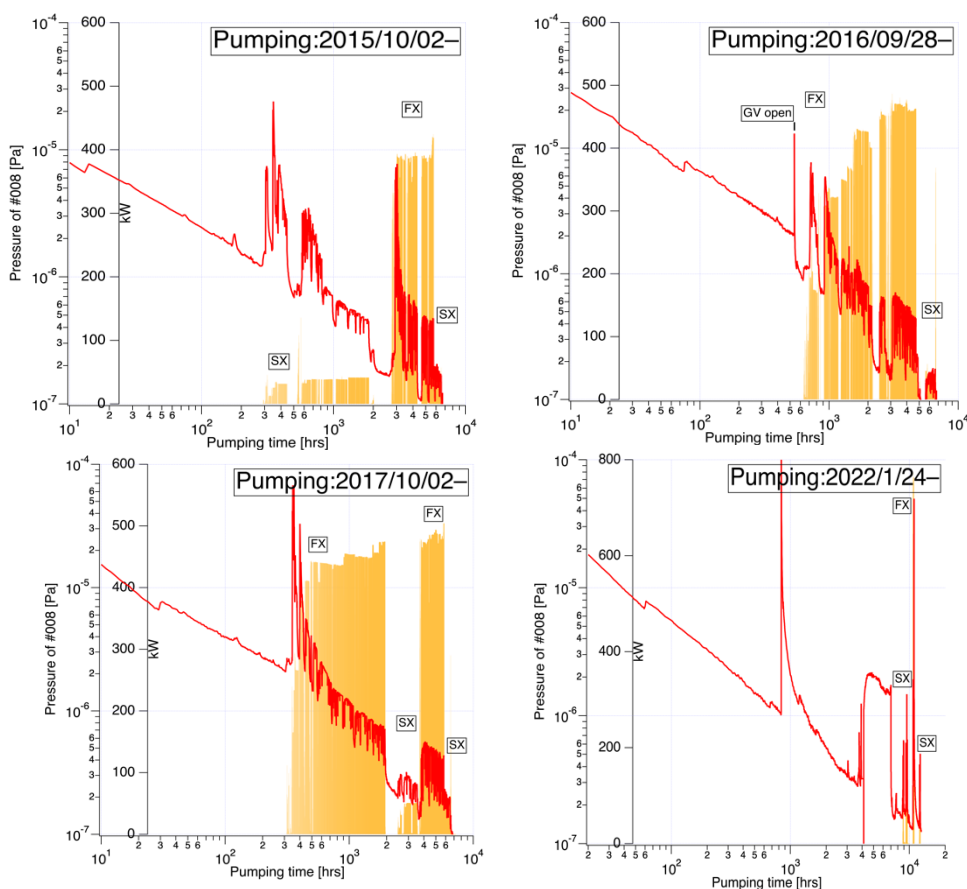


Figure 2: Vacuum pressure at collimator area and the beam power of each years, based on the time from pumping start in air.

ルするために大気曝露されている。また 2022 年以降は、低強度のビーム運転が短期間あった後、大強度 FX 運転の調整が 2023 年 4 月に始まり、約 2.5 日の焼き出し運転ののち主電磁石電源故障により中断している。

それぞれの秋から翌年夏までの排気曲線とその時の運転ビーム強度を重ねたプロットを Fig. 2 に示す。

ここで 2017 年秋と 2022 年以後の運転での気体放出について比較する。2017 年秋は運転前排気時間が 2015 年秋と同程度の 300 時間で圧力は  $2e-6$  Pa 程度まで下がっていたが、2015 年が相対的に強度の低い SX 運転から始まったのに対し 2017 年は FX 運転から始まったため、最初の気体放出によって圧力は  $1e-4$  Pa 程度まで上昇してしまっている。運転開始からの百数十時間、ビーム強度の立ち上がり緩いのは、ビームによる焼き出しに時間がかかっているためである。一方、2022 年 1 月以後では、大強度 FX 運転を行えたのは 2023 年 4 月であり、 $10^4$  時間を超える極めて長い初期排気時間が確保されたため、運転開始時の圧力は  $1e-7$  Pa 台まで下がっており、最早ビームを打つ前に枯れていることがわかる。ここから、焼き出し時間を減らすには、運転前排気時間を長く取れば良いという(当然の)結論が導かれる。

また 2017 年の排気曲線からは、8 ヶ月のビーム運転にダクトが晒された結果、ベースラインが顕著に下がっていることも観察できる。これはビーム運転によって、気体放出速度の減少が早まったことを表しており、ビーム運転は(加熱の)ベーキングと等価であるとわかる。

### 3. 焼き出し 2: アーク部のドリフトスペースの単管の置き換えによる気体放出現象

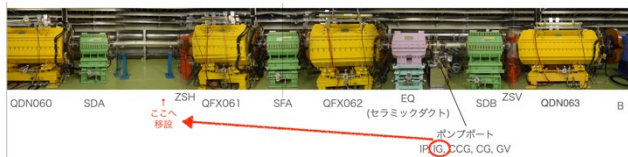


Figure 3: The missing bend area and EQ magnet for SX spill adjustment.

2009 年夏、アーク部ミッシングベンド小直線部 24 箇所のうち 15 度(50.8 m)ずつ離れた 3 箇所#056, #063, #070

に置かれた IP 等真空排気ポート(B-A ゲージ(以下 IG と称す)含む)の直上流に、それぞれ遅い取り出しのスピル制御用四極電磁石 EQ, EQ, RQ が設置された(Fig. 3)。速い励磁のためビームダクトにはセラミックが用いられ、二次電子抑制のため 10 nm の TiN コーティングが施されている。ビーム通過時のイメージ電流はセラミックダクト外側全周に軸方向に貼られた幅 5 mm の銅箔を流れるが、Ti フランジ-Ti スリーブから銅箔までは 1 片の 5 mm 幅の電極しか設けていないため、同軸構造のシールド側が電極を残して切れてしまっている。ビームバンチが通過するときこの切れ目から電磁波が放射されてしまうためと思われるが、電磁石設置後の加速器運転後から、バンチが通過したタイミングで直線距離にして 50 cm 未満の近距離に位置する IG にイオン電流にして負の方向のパルス状のノイズが乗るようになり、ビーム強度 100 kW を超えた 2011 年頃以降は連続運転中に圧力が測定不能となった(Fig. 4)。

運転が短時間止まれば測定が回復するとはいえ、アーク部の連続する 3 箇所 150 m もの区間でビーム運転中の圧力がモニタできないのは極めて問題である。電磁ノイズは距離を離せば効果的に減らせることから、2016 年夏に#070 の、2017 年夏に#056 と#063 の IG だけを 5 m ほど上流のドリフトスペースに移設した。具体的には IG 用 NW25 枝管の付いた長さ 25 cm 程度のダクト 3 台を新たに製造し、2016 年の 1 台はそのままインストールし、2017 年の 2 台は直前に 180°C で 8 時間 3 セットのベーキングを施し、短期間大気に晒した後にインストールした(製造工場での表面処理はバフ研磨及び電解研磨のみ)。いずれも既存の 1.5-1.7 m の単管を、新作の枝管付きダクトと中古(ある程度の期間加速器運転に使用したのちに置き換えのため外され、加速器トンネル内にて大気(または窒素)雰囲気数年度程度保管)の 1.3-1.5 m の単管で置き換えている(Fig. 5)。

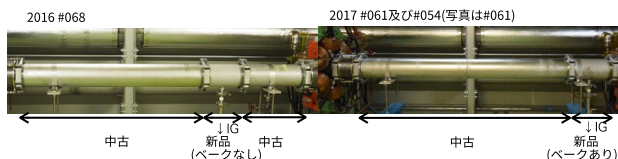


Figure 5: The new ducts for IG.

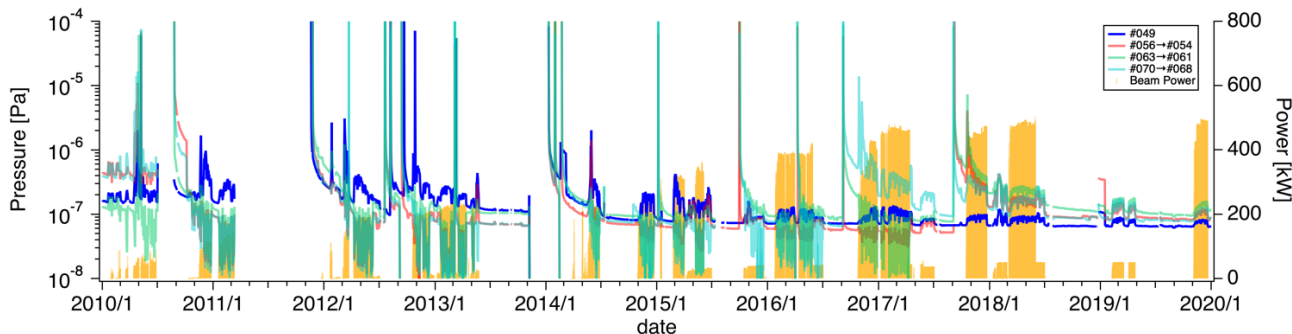


Figure 4: Pressure trend at missing bend area near EQs and RQ. For comparison, also plot in #049 of no SX-magnet.



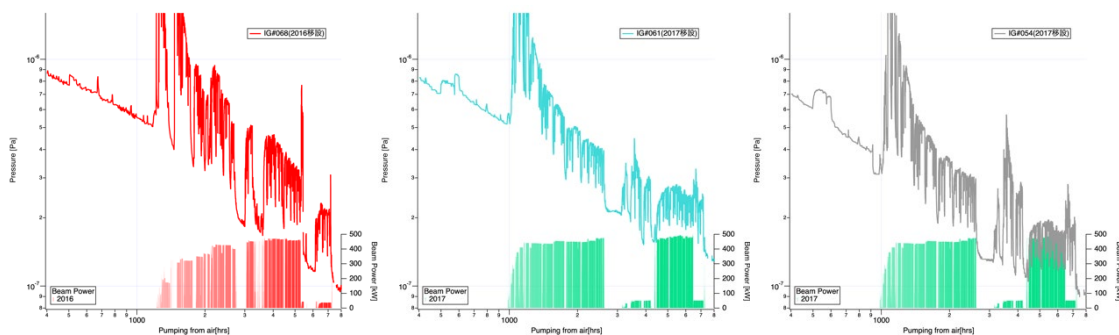


Figure 6: Pumping curve at the new IG ducts of #068, #061 and #054 respectively.

元タスピル制御電磁石が近くに無い#049と比較すると、当該IGは移設によりノイズ混入が消失していることがFig.4に示されている。なお、移設はIGのみでIPは動かしていないため、移設前や他のアーク部の圧力測定点と異なり、ポンプで形成される二次の圧力分布の極小点(ポンプ)から離れた、分布のいわゆる坂の途中を測定することになったため、相対的に3倍程度の圧力が測定されるようになった事に留意する必要がある。

移設後の3つのIGの排気曲線とビーム強度のプロットをFig.6に示す。ここから以下ことが読み取れる:

- ビーム運転前の大気からの排気曲線は殆ど違いが無く、インストール前の加熱ベーキング処置の有無は本例の表面積程度では初期排気には効果が見えない。
- ビーム運転開始直後の圧力上昇量及び上昇の継続時間、すなわち気体放出の総量を目視で比較すると、2017年のベーキング有りの2者の方が、ビーム強度が高いにもかかわらず明らかに少ない。

2017年の方がビーム強度が素早く立ち上がっており焼き出し運転が短く済んでいる要因の一つは、圧力上昇の程度が少なくビームの調整が容易だった可能性がある。その傍証として、圧力上昇時にビームロスモニタ(BLM)によってロスが検出されていることをFig.7に示す。グラフはQDN, QFX, QFX, QDNの4つの電磁石の肩に設置されたBLMの積分カウント値のトレンドを圧力及びビーム強度に重ねたもので、3箇所とも、新ダクトでの気体放出箇所から一番近い、下流側のBLMのカウントが高々 $1e-5$  Pa程度の圧力上昇に呼応して反応しているこ

とがわかる。この程度の圧力上昇は特に立ち上げ直後の期間は全周の至る所で起こっており、すなわち至る所のBLMに信号が乗っていたとすると、ビーム調整時のパラメータ選択時にミスリードしてしまっていた可能性がある。本件についてはBLMのより詳細なデータ解析を行うべきである。

#### 4. 考察

コリメータ部での数回のインストールにおける圧力とビーム運転強度のトレンドからは、焼き出しに必要な時間は運転開始時の初期排気圧力に依存しており、圧力が高い場合には焼き出し運転時間を長く取る必要があることがわかる。運転開始時の圧力を下げるには、1) ポンプの排気速度を上げる、2) 気体放出速度の高い物質の使用を避け、かつ気体放出速度を下げる処置を施す、3) 運転前の初期排気時間を長く取る、の3つが考えられる。最初の案は、物理的にも経済的にも現実的ではない。2つ目の案は、アーク部でのIG移設例で明らかになったように、インストール前の $200^{\circ}\text{C}$ 程度のpre-bakeを実施することで、beam-bake時間を減らせるということである。3番目は実験スケジュールと予算にも関係するが、例えばインストールは10月までに終わらせて3ヶ月(2000時間)排気し1-6月を運転期間とする、などが合理的な計画である可能性がある。ただし実質7-9月の3ヶ月のみをインストール期間とすること、コリメータ部は作業被曝を減らすことが推奨されるため残留放射能を下げる冷却期間をなるべくおく必要があることは対立しており、慎重なスケジューリングが要請される。

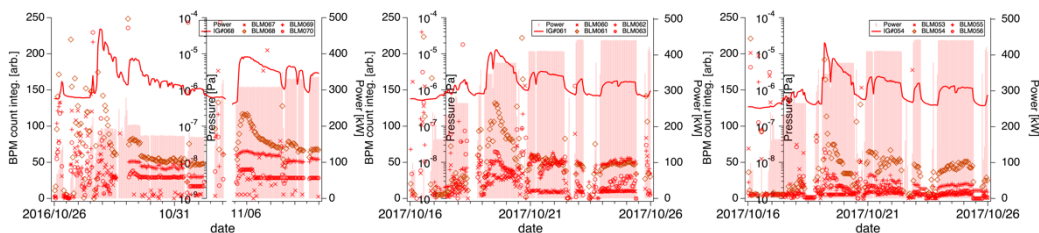


Figure 7: Trend of BLM and vacuum pressure near the new IG ducts of #068, #061 and #054 respectively.

## 5. 結論

新規にダクトをインストールするときは pre-bake を行い、インストール後に十分な排気時間を取り運転前圧力を下げること、beam-bake すなわちビームによる焼き出し運転時間を減らすことができる。

## 参考文献

- [1] M. Uota *et al.*, “大強度陽子加速器施設 J-PARC の主リングシンクロトロンにおける真空圧力のビーム依存性”, *J. Vac. Soc. Jpn.*, vol.57, No.3, pp.111-114, 2014.  
doi:10.3131/jvsj2.57.111
- [2] M. Uota *et al.*, “J-PARC MR のコリメータ・ジョーの開発”, *Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016)*, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp.1189-1192.