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*

魚田 雅彦*¹・堀 洋一郎*¹・齊藤 芳男*¹

Beam Dependence of the Vacuum Pressure in J-PARC Main Ring Synchrotron

Masahiko UOTA*¹, Yoichiro HORI*¹ and Yoshio SAITO*¹

*¹High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan

(Received November 13, 2012, Accepted December 25, 2013)

At the J-PARC Main Ring synchrotron (MR), as the beam power is so high beyond a hundred kilowatts, a large increase of the vacuum pressure is observed during the beam acceleration periods. The change of the vacuum pressure has been recorded at the fixed point of the MR synchrotron ring for three years. The pressure growth normalized by the beam current was in inverse proportion to the total charge or the integrated beam current. The analysis shows the vacuum system is compatible with a future power-upgrade of the MR.

1. はじめに

J-PARCは大強度高エネルギー陽子ビームを利用して、物質生命科学及び素粒子原子核物理研究を推進する研究施設である。加速器群はリニアック、Rapid Cycle Synchrotron (RCS) 及び50 GeV シンクロトロン (Main Ring, MR) から構成されている。MRはRCSから運動エネルギー3 GeVの陽子 10^{13} 個の集団 (バンチ) を最大8個入射し、1.4–1.9 sで30 GeVに加速し実験研究施設へと出射する周期パルス運転を行っている。1周期は、加速後約2 sをかけた徐々に取り出す遅い取り出しモード (SX) で6 s、加速後一気に取り出す速い取り出しモード (FX) では初期の3.52 sから徐々に短くし2012年7月時点では2.56 sである。2009年春の利用運転開始以来、運転機器パラメータ調整や改良を重ね、バンチの粒子数密度及びバンチ数増加、FX運転での短周期化によりビーム強度を上げ、FX運転では1周期あたり粒子数 10^{14} 個、出力200 kW、実験施設での利用運転開始以来の積算粒子数は 3.0×10^{20} 個に到達しさらに増加中である。

2. MR 真空装置の概要及びビーム依存性

MRは約100 mの直線部3つと約400 mの120度の円弧 (arc) 部3つからなる全周長1567.5 mのビーム周回路からなる極めて細長い金属製真空槽である (Fig. 1)^{1,2)}。周回路は、内径が主に130 mmの円または円に近い断面形状を持つ1–6 m程度のSS316L製パイプと100 mm程度のTi製ベローズをフランジ接続したもので全長の95%以上を占めている。主排気装置はイオンポンプ (IP) のみである。各直線部にある、磁性体の積層構造により実効表面積が数 10 – 1000 m²に及ぶin-vacuum電磁石を内蔵する、少数のステンレス製箱形チェンバ (図のA, B, C付近) を除けば、15–35 m程度の間隔で点在するIPによる、ビーム運転を行っていない時の静的な圧力は 1×10^{-7} Pa以下に到達し、分布は材

Fig. 1 Layout of MR vacuum ring. Inset shows pressure distribution in ring.

質、ポンプの配置及び表面積から予測される通りとなっている。

一方、ビーム運転時には、バンチの粒子数密度、運転時間及び走行路の形状に依存した気体放出による動的な圧力上昇が観測されている³⁾。これはビーム強度の上昇と共にまず静的圧力の高い直線部箱形チェンバで最初に観測され、後に定期的に連続運転がなされるようになると arc 部を含む全周で観測されるようになったもので、周回粒子数を段階的に増やすとその都度気体放出量が増加し、運転時間の経過すなわち通過ビーム粒子数の積算と共に低下する焼き出し効果があることがわかっている。Arc 部での数日間の運転における観測例を Fig. 2 に示す。

気体放出による圧力の上昇は、周回ビームの運動に対し残留気体との衝突などによる不安定性をもたらし、最終的に加速器機器を放射化させ残留放射能を上昇させるビーム損失を起こす原因となるため、ビーム運転時には気体放出が過大であってはならない。将来計画としてビーム強度は2年後に2倍、5年後には750 kW すなわち約3倍への増強を目指しており、気体放出量のビーム強度依存性を定量化し把握してお

* 平成24年11月15日 第53回真空に関する連合講演会で発表

*¹ 高エネルギー加速器研究機構 (〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1)

く必要がある．そこで，約3年間の長期圧力観測から，電流換算したビーム強度と気体放出量との間の関係をまとめたものが本論文である．

3. 圧力上昇のビーム電流依存性評価

観測点として，外部から陽子ビームの運動を制御する変動

Fig. 2 Pressure rise by the continuous 33–66 kW beam operation at the point P in Fig. 1. The beam current is the average value of every 10 minutes.

磁場が印加されるものの余分な内蔵物が無く，1–6 m 程度の単純なステンレス鋼管及び Ti 製ベローズがフランジで接続された arc 部のある一点（Fig. 1 の点 P）を選び，Bayard-Alpert 型熱陰極電離真空計で測定された圧力を用いた．近傍の IP は真空計の直下，及び周回路の上下流それぞれ34 m 離れた場所に，T 字型分岐管により分岐した位置に配されているので，周辺の圧力分布は二次曲線を描き，真空計はその極小値を測定している状況である．

解析手順は以下の通りである．

約1秒間隔で測定している圧力データ3年分から，まず解析の容易化のため8時間毎の平均値を算出しデータ点数を減らした．ここで加速器の周期運転による変動，数分の運転停止などによる変動，非周期の単発運転時の変動等が繰り返される．得られた3年間の圧力の履歴を **Fig. 3** の最上段に示す．左端を含む毎夏期の空白は，機器改造及び震災による加速器停止期間で，いずれも数週間から数ヶ月の大気曝露を伴っている．次に，加速器が連続運転に入る前の圧力と，数時間から数日間にわたる機器不調や短期メンテナンス等による連続運転期間中の非運転時の圧力から，ビーム運転が無かった場合の圧力の background 値を内挿して見積もり，ビーム運転時のみ，8時間平均値との差を圧力上昇値 Δp として求めた（Fig. 3 の2段目）．以下のデータ点は全て8時間毎の平均値を算出している．

Fig. 3 (From top) a trend of a pressure in the arc of MR, pressure-rise during beam operation, averaged beam current and integrated total charge, and current-normalized pressure-rise, respectively.

次に、圧力に影響を及ぼしているであろうビームの強度から、定量化のため圧力同様8時間毎の平均電流を算出する。入射から加速終了までバンチ構造を保って運動するMRのビームは時間幅にして入射時200 ns、加速後50 nsのパルス電流であるので、ビーム強度は連続的な電流としてではなく、各周期の出射直前の粒子数として記録されている。そこで、電流とは単位時間に通過した電荷量であるから、各周期の粒子数に、入射から出射までの周回数を掛け単位時間（8時間）にわたって積算し時間で除すことで8時間毎の平均電流とした。なお1運転周期内の周回数は、FXモード運転ではTable 1の値を用いた。周回数は加速時間の短縮化に対応して徐々に減少している。SXモード運転では全測定期間で 5.5×10^5 周とした。これは1.9 sの加速期間の周回数に、2 sの出射期間中に粒子数が線形に減少する特性を考慮し出射期間中の周回数の半分を見かけの周回数として加算したものである。以上の量により算出した平均電流、及びその積分すなわち総電荷をFig. 3の3段目に示す。総電荷は毎夏の大気曝露毎に初期化している。最後に、 Δp を平均電流で除した規格化圧力上昇をFig. 3最下段に示す。さらに、規格化圧力上昇の総電荷依存性をFig. 4に示した。

4. 考 察

Fig. 4の各期のグラフから、以下のような共通する傾向が読み取れる。運転初期で通過電荷が 10^5 C程度より小さい領域は、ビームの損失を極力少なくしながら強度を徐々に上げて行く調整運転を行っている時期であるため、単パルスの不連続な運転であったり、継続しても運転時間が半日程度と短く、調整が済む度に強度を階段状に上昇させるコンディショニング運転を行っている領域である。そのため大きな圧力変

動に対し測定間隔が1 sと粗いことによる誤差等が大きいことからばらつきが大きくなっていると思われるが、グラフの傾斜は-1よりは小さく-0.5よりは大きい程度のようなのである。一方電荷が蓄積するにつれ、機器が安定し大出力運転が継続した結果として、運転時間1500時間相当である電荷 10^6 C程度を超える領域では、傾斜はどの年もほぼ-1であると言えるだろう。

通過電荷量に対し電流規格化気体放出量が再現性のある減少傾向を示すのはビーム運転に伴う「焼き出し」効果を表し、表面の「枯れ」が進んでいることを示している。よって、将来計画としてビーム強度を3倍に増強した時、圧力上昇値は運転初期に乱れたとしても電荷の蓄積後は最終的には高々3倍程度にしかならず、ビーム運動へ不安定性をもたらすことにはならないだろうと予測できる。

放出される気体の源は、毎夏の大気曝露による表面への気体吸着と思われる。運転再開初期には、曝露の程度によって量の異なる、吸着エネルギーの低いものから脱離し気体放出量にずれやバラツキが生じていたものが、運転継続によりそれらが殆ど脱離し、最後に残った脱離しにくいものや金属内部に溶けていたバルク内の炭素原子や水素原子が表面へ移動して脱離する機構が推測される。

気体の放出機構については、軌道を逸れた陽子が真空壁を貫通する時に熱エネルギーを与える、電離した残留気体イオンがバンチ電場で加速され内壁を叩くイオン衝撃脱離、ビームロス等により生成した二次電子が陽子バンチに捕獲されバンチの通過後に飛行して壁を叩く電子衝撃脱離などが考えられている。

ここでFig. 4の2011-2012年の右端に観測された顕著な縦線に注目したい。この部分は2012年6月にFX運転の直後に運転モードを変更し行われたSX運転によるものである。Fig. 3の3段目によれば、2012年6月のSX運転のビーム電流強度は直前のFX運転の数十分の1程度に過ぎないが、4段目の規格化圧力上昇は逆に数十倍高く跳ね上がった後に再び「枯れ」が進行していることがわかる。両運転モードが異なるのは出射方法で、FXでは加速後に直ぐ1周で取り出すのに対し、SXでは加速後に進行方向の電場の拘束が解かれビームがバンチ形状を保てなくなり coasting beam となって周回しながら、陽子の一部が三次共鳴によって横方向に膨らんでセプトラム電磁石で薄く削られ取り出されていくことが

Table 1 Machine cycle, acceleration time in a cycle and turn number per cycle for the fast-extraction mode.

Cycle [s]	Time for acceleration [s]	Turn number
6.00	1.90	3.6×10^5
3.52	1.90	3.6×10^5
3.20	1.90	3.6×10^5
3.04	1.87	3.6×10^5
2.92	1.75	3.3×10^5
2.56	1.40	2.7×10^5

Fig. 4 Normalized pressure-rise vs. total charge. Slope of solid line and dotted line are -1 and -0.5 respectively.

2 s にわたって行われる。気体放出を惹き起こす機構として推測されているもののうち加速期間中のビームパンチの電場によるものは両運転モードに共通で、電流で規格化すれば量は同じであるから、SX 運転時の顕著な気体放出の殆どは加速期間後のパンチの消失した 2 s の出射期間に、別の機構、例えば出射のために横方向に膨らんだビームの一部の軌道を逸れた粒子がロスする時の熱や運動エネルギーによって惹き起こされていることが考えられる。ただし、SX 運転中は電磁石からのジュール熱による発熱量が多いため、真空槽温度が FX 運転時より高い傾向にあることが圧力上昇の見積もりに影響を与えた可能性は捨てきれない。SX モードの運転期間が短くデータの蓄積が少ないため、気体放出の運転モードによる差異は今後の課題としたい。

過去には、例えば蓄積電流数十 A の 28 GeV 陽子衝突実験用蓄積型シンクロトロン CERN-ISR では、電流の増加と共に圧力が突然発散的に増加しビームが失われる pressure bump が見出されていた^{4,5)}。真空壁からの放出量はビームのイオン化断面積、脱離の yield、ビーム電流、圧力に比例し、その場の実効排気速度に等しくなると圧力が発散すると説明され、現象の抑制には適切な表面処理により到達圧力を下げることが効果的であったという。一方 J-PARC の MR は粒子の滞在時間が最長で 4 s 程度と短く、平均電流は将来増強しても高々数 A 程度であり、pressure bump が発生する条件は満たさない。また、陽電子加速器や、陽子加速器のうちでもパンチ長やパンチ間隔が極めて短い CERN の SPS, LHC 等では、複数のパンチの走行に伴う内壁からの二次電子放出がパンチの正のポテンシャルによって捕獲と解放を繰り返す multipacting により成長することで形成される電子雲がもたらすビーム運動不安定性に関して精力的に研究が行われている⁶⁾ところであるが、二次電子放出であれ、運動不安定化によるビーム損失であれ真空槽表面からの気体放出が発生しうる。しかしながら、J-PARC MR のパンチ条件で

は電子雲は成長しないといわれており⁷⁾、実際、我々が設置した電子雲観測装置ではごく最近のビーム強度になって初めて、電子生成現象の観測例⁸⁾が報告されるようになったが、現在の強度では、焼き出し効果によって表面状態が変わるとすぐに消失してしまう程度に過ぎないものである。これも引き続き観測実験を継続中で、今後のビーム強度増強に伴う変化が期待されている。

5. おわりに

J-PARC MR での 3 年間のビーム運転に伴う真空系の圧力履歴から、強度増強と共に観測されて来た圧力上昇をもたらす気体放出がビームの平均電流に依存し、総電荷に反比例する特徴を見出した。今後のビーム強度の増強に対しては、運転再開初期の過大な気体放出時期経過後は同様の依存性を再現すると期待され、排気系が健全であれば現在の真空系で十分対応可能であると思われる。

〔文 献〕

- 1) Y. Saito, F. Naito, C. Kubota, S. Meigo, H. Fujimori, N. Ogiwara, J. Kamiya, M. Kinsho, Z. Kabeya, T. Kubo, M. Shimamoto, Y. Sato, Y. Takeda, M. Uota and Y. Hori: *Vacuum*, **86** (2012) 817.
- 2) M. Uota, Y. Hori, M. Shimamoto, Y. Sato, Y. Takeda, T. Kubo and Y. Saito: *Proc. of Particle Accelerator Society Meeting 2009*, Tokai (2009) 974.
- 3) M. Uota, Y. Hori and Y. Saito: *Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Himeji (2010) 721.
- 4) K. Johnsen: *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **70** (1973) 619.
- 5) R. S. Calder: *Vacuum*, **24** (1974) 437.
- 6) F. Zimmermann: *Proc. of the 19th IEEE Particle Accelerator Conference*, Chicago, USA (2001) 666.
- 7) K. Ohmi, T. Toyama and C. Ohmori: *PRST-AB*, **5** (2002) 114402.
- 8) M. Uota and T. Toyama: *Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Osaka (2012) 462.