

PRESSURE RISE and BEAM LOSS with HIGH INTENSITY BEAM in J-PARC MR

Masahiko Uota[#], Yoichiro Hori, Yoshio Saito

KEK

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Abstract

In J-PARC Main Ring, as the beam intensity rise over ten T_{ppp}, the vacuum pressure rise of order of 10⁻⁴Pa is observed in many chambers and beam ducts. The pressure rise is well controlled and decreased by the surface scrubbing effect with continuous and steady-intensity beam operation. With the high pressure-rise, also the beam losses are detected by the beam loss monitor at the chambers of a few meter long in 10⁻³Pa and the momentum dispersion maximum point in arc section in 10⁻⁴ Pa range.

J-PARC MR の大強度ビームによる圧力上昇とビームロス

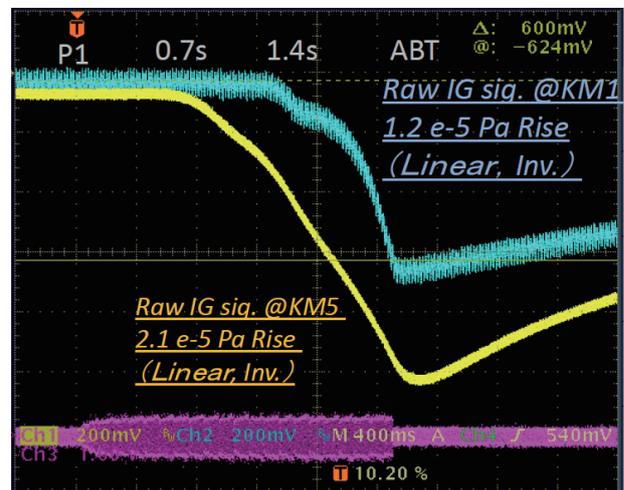
1. はじめに

J-PARC Synchrotron Main Ring (以下MR) では、ビームロスを抑制しつつビーム強度を上げる継続的なビームコミッションングを行い、ニュートリノビームラインへ 3.52s 周期で速い取り出し (FX) を、ハドロンビームラインへ 6s 周期で遅い取り出し (SX) を行っている。ビーム強度は 2009 年秋に KEK-PS の記録 8T (テラ) particles per pulse (ppp) を超え、2010 年初夏の時点で 35T_{ppp} (50kW 相当) の連続運転、48T_{ppp} の数十分の運転及び 70T_{ppp} (100kW) の数分間の運転が可能である。

初めて単発で数 T_{ppp} で加速・射出した 2009 年 11 月に、射出用の in-vacuum 磁石を内蔵した FX 用キッカーチェンバー、未通電の SX 用 ESS チェンバー、SX 用 DC セブタムチェンバーにて 100-1000 倍相当の 10⁻⁵-10⁻⁴Pa 台の瞬間的な圧力上昇を観測した^[1]。上昇圧力の高い後者では加速期間 1.9s の後半に従い増加するビームロスをも観測した。さらに、30T_{ppp} を超える連続運転が可能になった 2010 年春には、単純なパイプから成るアーク部のビームダクトでも最大 10⁻⁴Pa の圧力上昇とそれに伴う想定外のビームロスを観測した。本稿では、圧力上昇の特性と、上昇に伴うビームロスについて述べる。

2. 圧力上昇と scrubbing 具体例

圧力上昇の時間変化は、入射・加速・射出の 1 周期のみ (単発) のビーム運転では、図 1 の FX キッカーチェンバーの B-A ゲージの収集したイオン電流に示すように 1.9 秒の加速周期途中からガス放出が始まり、ビーム射出直後に放出が止まりポンプ (排気速度 1.2m³/s) ・その他による排気・再吸着による時定数数秒~数十秒のゆっくりした下降が観測される。一方、3.52s または 6s 周期の連続運転を一定のビーム強度で行う場合は、単発運転時の履歴の重ね合わせにより、図 2 に示すように運転開始後 FX キッカーチェンバーで数分程度、ガス放出点からポンプまでの距離が遠く排気のコンダクタンスが小さいアーク部ビームダクトで数時間程度かけて、平均の圧力が上昇した後、さらに数時間~数日のビーム運転の期間内で、ビームによる表面の scrubbing によりガス放出速度が小さくなる事で、指数関数的に減少していく。



Pressure Rise @KM1,KM5 :Shot 31643

図 1. 1.9s 加速周期中及びその後のキッカー #1、#5 の B-A ゲージの収集イオン電流の時間変化。

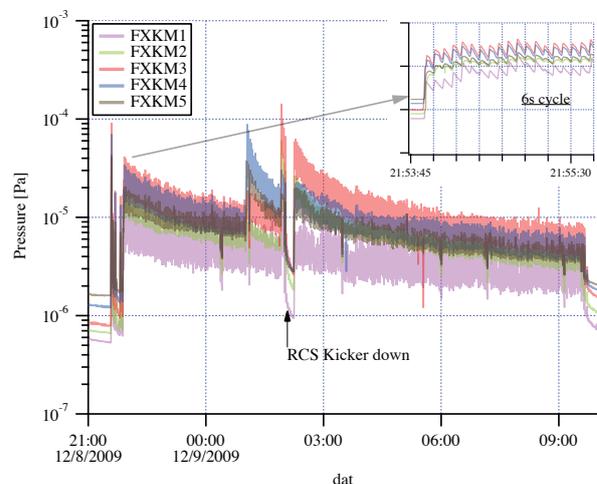


図 2. 6.5T_{ppp} 6s 周期定常運転時の、FX キッカー 5 台の圧力上昇と scrubbing による改善。

[#]masahiko.uota@kek.jp

次に同じビーム強度で連続運転を行うと圧力上昇は抑制されており、より高いビーム強度での連続運転が可能となる。なおFXキッカーでは、図2にも現れているように定常ビーム状態で運転しているにもかかわらず、途中でガス放出の様相が突然変化することが幾度となく観測されており、これは、例えば、表面の1つのガス源はscrubbingで枯れるが、大強度ビーム運転によりフェライトは高温に発熱している^[2]のでバルクからガス源が拡散により出現するという説明も不可能ではない。

3. ガス分析

現象を理解するための一つの手段として、キッカー1号機の粗排気ポートに四重極質量分析計を取り付けて70Tppp(100kW相当)単発運転を5~6発打った時の残留ガス分析(RGA)スペクトルを図3に、また比較のため製造時のベーキング前後のRGAを図4に示す。図から、ガス源はフェライトに吸蔵された炭化水素(要はアブラ)などであると推測している。同様に、大きな圧力上昇が発現しているSX DCセプタムのうちの2号機(SMS2)の70Tppp単発運転時のRGAの結果を図5に、さらに30Tpppを超えたあたりで発生し始めたアーク部の単管付近のRGAを図6に示す。周回ビーム側はアルミニウム

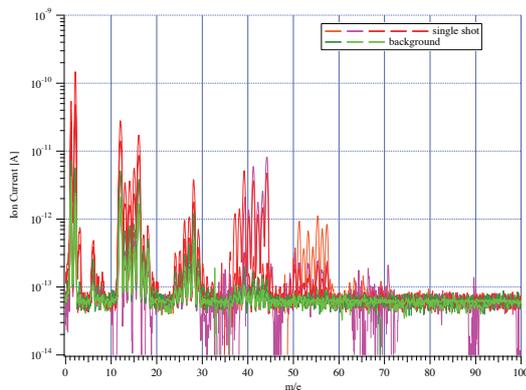


図3. 100kWで約10分おきにsingle shotをタイミングをずらしながら5発打った時のキッカー1号機のRGA(scan rate 1s/mass)。ポンプが作動中のため、shot後10秒程度で発生ガスは吸収されスペクトルの形状は不正確である。

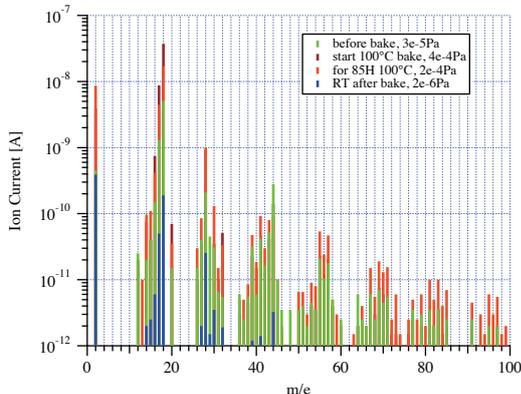


図4. 2006年キッカー製造時フェライトを仕込んだチェンバーを85時間100°Cでベーキングした時のRGA。

のパンチングメタルで囲われたSMS2で図のように高分子炭化水素系と思われるパターンが観測される理由は不明で、製造工程の検証が必要である。ステンレスパイプやチタンベローズから構成され構造が単純なアーク部のRGAでは、重い質量の分子はあまり見られず、放出量自体も多くはない。しかしビーム路長が1000mオーダで圧倒的に長いためにビームへの影響は無視できないものとなっている。

4. アーク部ビームロスとの相関

MR全周の過去2年間の圧力分布の変化を図7示す。非運転時またはビーム強度が低い場合は、殆どの場所で 3×10^{-7} Paを超えない程度で、素材のガス放出速度から殆ど到達限界まで達していると思われる^[4]。積層電磁鋼板をin-vacuumにおいた入射及びFXセプタムだけは数百倍高いままで、これは100m²を超える総表面積から十分予測された事である。

一方、数十Tpppのビーム強度の連続運転中に急激に強度を上げた場合などに、アーク部で 10^{-5} Paを超え、条件によっては 10^{-4} Paを超える圧力上昇が発生する経験をした(図7の2010/4/23,27)。ガス放出が2次電子

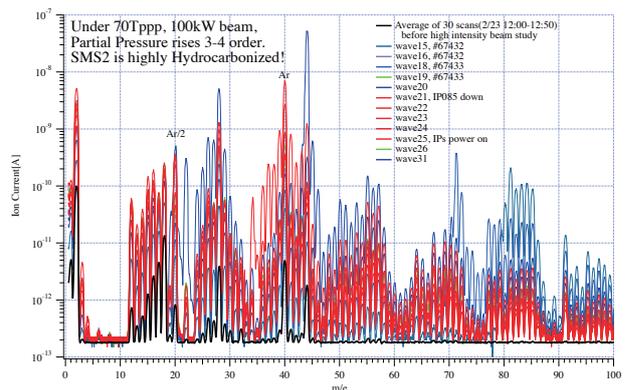


図5. 100kW単発で10shot程度を打った時のSX DCセプタム#2のRGA。この時全圧は 5×10^{-3} Paに達していた。ポンプ作動中であるがガス放出量が大きくshot数が多いためスペクトルが測定できた。Arの存在はハドロンビームラインのリークによる。

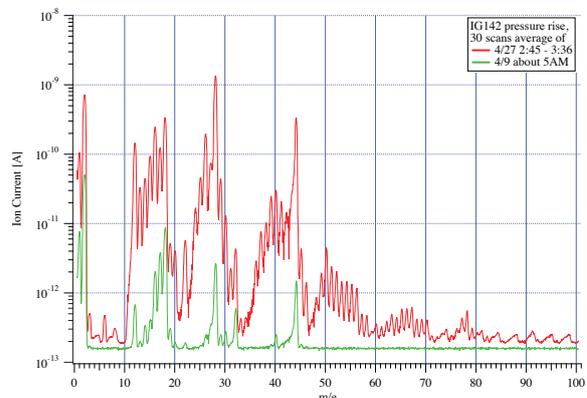


図6. 初めて45Tppp(60kW)連続運転を行った時にアーク部のmissing bendの単管でIP無しの場合(#142)で最大 6×10^{-5} Paまで上昇した時間前後50分間の平均のRGA。

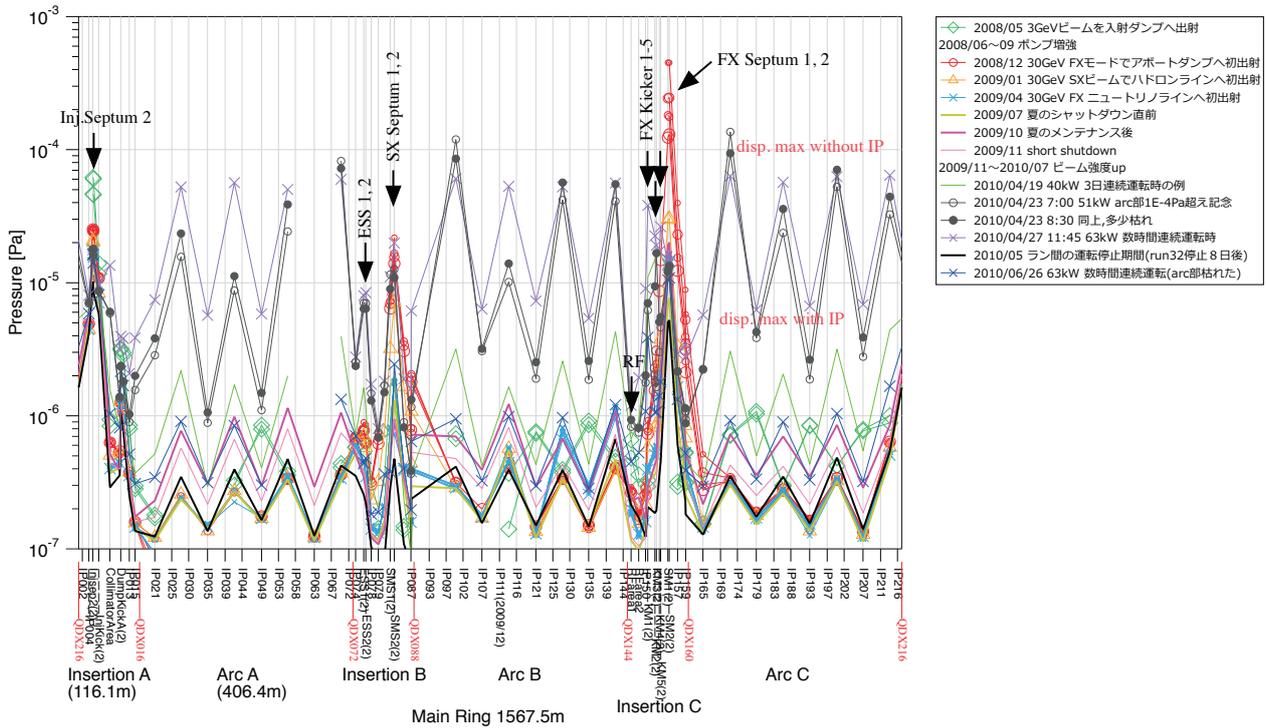


図 7. MR 全周の圧力分布の 2008 年からの変遷。

放出を契機とするものであるなら、最も疑わしいガス発生場所はアーク部の中でも磁場・洩れ磁場の無い 24 カ所の missing bend の単管であり、さらにその半分の 12 カ所は、イオンポンプが省略されている^[5]ため放物線分布を描く圧力分布の極大位置でありポンプ群から最も遠い。圧力上昇時に p_{min} と p_{max} の比が上昇前の 2 程度から 10 程度に大きくなるのは、排気速度の回復もさるとながら、一様でない動的ガス放出分布において、局所的なガス放出点ポンプ直上 (p_{min}) かポンプ群中間 (p_{max}) かという差が現れたのである。

図 8 は 10^{-4} Pa 上昇時のビームロスモニタの積分信号と近傍の圧力の一致を示したものであるが、残留ガスとの多重散乱によるビームロスが生じるには周回時間が秒のオーダーの場合数 Pa 程度まで濃くしなければならず、また、1 運転周期内での圧力変動は低圧力は一定と看做せるにもかかわらず図 8 下段の加速時間微分マップが表すように、グラフ y 軸に沿ってエネルギーとともにロスカウントが増えており、ビームロスのエネルギー依存性とは逆であるから、このロスモニタのシグナルは陽子ビームのロスそのものを見ていたのではない^[6]。それはともかく、圧力及びビーム path とロスモニタカウント数との間には 5×10^5 counts/Pa·m という関係が見いだされた。

5. 結論

J-PARC MR ではビーム強度が上がるに従い全周で圧力上昇が生じているが、連続運転を一定の強度で行うことでビームによる“コンディショニング”が行われ、再び圧力は収まる。ビーム強度の上昇が過大であるとロスモニタに反応するほどの圧力上昇が生じてしまうが、徐々にであれば破綻無く強度を上げていくことが可能である。

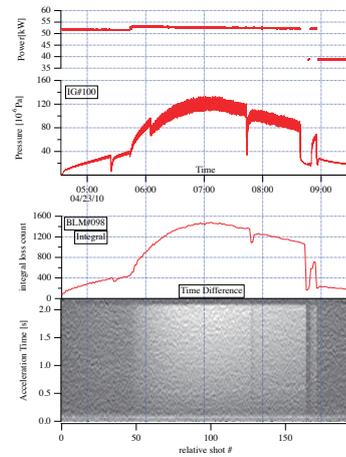


図 8. 初めて 53kW 連続運転を行いアーク部で 10^{-4} Pa を超えた 4/23 朝の (上から) ビーム強度、#100 の圧力、#98 のロスモニタ積分カウント、同モニタ時間微分 surface plot.

参考文献

- [1] Uota et al., Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, p.3858 (2010).
- [2] Now on discussing in FX Group.
- [3] Suggestion from SX Group.
- [4] Uota et al., Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan, p.974.
- [5] Uota et al., Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan), p.206.
- [6] Kenichirou Satou, Private Communication.