

REMARKABLE PRESSURE RISE AT PUMPING PORT IN J-PARC MAIN RING

Masahiko Uota[#], Masayuki Shimamoto, Yoshihiro Sato, Yasuhiro Takeda, Yoichiro Hori, Yoshio Saito

KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

In J-PARC MR synchrotron with high power beam operation, the remarkable and endless pressure-rise over 10^{-4} Pa or more is found when a ion-pump of the ring turns off by accident or on purpose. This high pressure exceeds the normal pressure distribution of pump series and causes the beam loss by nuclear interaction. The outgassing rate depends on the existence of external magnet field at the pumping port, the initial pressure and the operating beam power. A minus potential synchronized with the operating cycle are found at the electrode in pumping port. The formation of electron cloud is considered to the pressure rise.

J-PARC MR イオンポンプ OFF 時の顕著な圧力上昇

1. はじめに

J-PARC 50GeV シンクロトロン (MR) は東日本大震災で中断する直前の時点で、種々の調整の成果により速い取り出し運転モードでは繰り返し周期 3.04秒で30GeVの 92×10^{12} 個(145kW相当)の陽子ビームを供給するまでに至っていた。MRは、真空系としてはポンプが点在する1600m弱の長大なドーナツリング形状である。MRの真空ポンプは $0.5-0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ のスパッタイオンポンプ(IP)のみで、in-vacuum機器を内包し高い値を維持し続けている入出射機器チェンバーを除く大部分については、真空の圧力はポンプを節とする単純な放物線分布を形成している。また、大強度運転時には、ビームに同期した圧力上昇が全周にわたり観測されている^[1,2]。

2010年1月、初めて出力35kWでアポートダンプへ数分間の連続試験運転を行った時、殆どのアーク部では数割の圧力上昇に留まっていたが、未通电のIP #111の付近からのみ莫大なアウトガスが初めて観測された(図1左)。また、同年5月、60kW連続運転の停止期間中に、アーク部のIP 2台の電源が故障しポンプ配置の変更により付近の圧力が $6 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ から高々倍の $1.2 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ へ移行した。そのまま気づかずに運転を開始すると、運転に同期した爆発的な圧力上昇を開始し、遂には 10^{-3} Pa を超え残留ガスとの相互作用による二次粒子の上昇をビームロスモニタが検知しMPSが発報し、運転出力を下げざるを得なくなるという事象が発生した(図1右)。

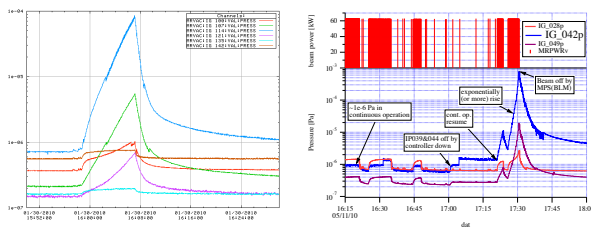


図1: OFF-IPの存在による運転時圧力上昇(2010初頭).

[#] masahiko.uota@kek.jp

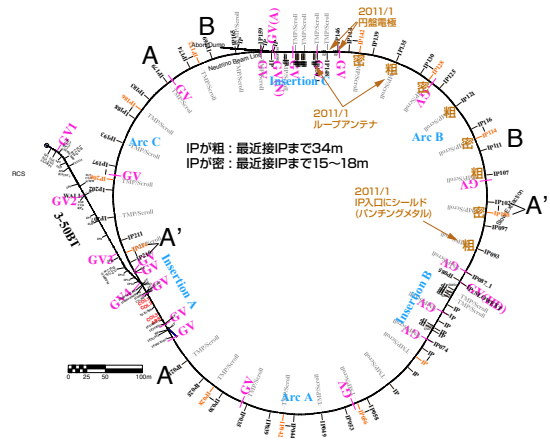


図2: MRのポンプ配置図(2011年3月現在).

通电していない休止状態のIPが繋がったポンプポートにおける原因不明、予期せぬ発散的な圧力上昇は、将来さらなる大強度化の際に問題となる可能性がある。そこで、圧力上昇の特徴を把握し発散的アウトガスの原因を探るため、大強度連続運転中にリング全周のIPを1ないし2台ずつ運転に支障のない範囲で短時間故意に停止させ圧力上昇の様子を観測した。また、T字型ポンプポート枝管内のポンプまでの途中にピックアップ電極を置き、ポンプポート内の電位を運転中に測定した。

2. 真空ポンプの配置と圧力分布動向

2011年春時点のMRのIPの配置を図2に示す。MRのアーク部は1 module 15度 50.8mで24 moduleから成る。2010年夏までは、IPの配置数は1.5台/moduleで、ほぼ34mの等間隔配置ではあったがmoduleの周期、ひいてはビーム軌道周期とは一致していなかった。ポンプが点在する長いパイプの圧力は、ポンプを節、中間点を最大とする放物線分布を描く。IPの数がモジュールの数と合わない為、モジュールの中央の、軌道のdispersion関数が最大とな

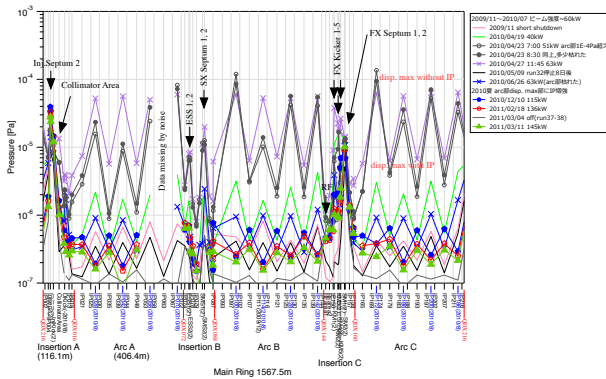


図 3: 圧力分布の推移.

るミッシングベンドの短い直線部は、IPが有り圧力最小の場所と、ポンプポートは用意されていたがIPが無く圧力が最大となる場所が交互に存在していた。

一方、大強度運転時には、リング内のあらゆる場所でビームとの相互作用により圧力上昇が発生し、その後の真空表面の改善により上昇が収まるというビームによるデガス現象が観測される。2010年4月の63kWの運転についてはアーク部のIP群中間点の圧力が短時間ながら 10^4 Paを超えビームロスモニタにロス信号が観測されるまでに至るといふ際どい事象があった。そこで、夏に残る12カ所全てのミッシングベンドにIPをインストールした。ただしポンプの電源は下流側のIPとの並列繋ぎとなっている。この排気速度強化により、2010年秋からの100kW級の運転、さらに今年春の140kWを超える運転でも、アーク部でビームロスを生じさせる過大な圧力上昇も起こることなく 10^6 Paを超えない余裕のある状態を維持できた。図3に2009年秋から2011年3月までの大強度運転時のリング1周の圧力分布を示す。

ビームダクトからの排気はT字型のポンプポートから行っているが、形状はアーク部型、直線部型、単純T字型の3種類ある。アーク部型は枝側も含め3つのベローズと一体化したTi製、直線部型はベローズの無いステンレス製であるが、両者共にキャビティ構造であり内側には前者は円筒状フィンガーコンタクト、後者は円筒状パンチングメタルがあってその中をビームが通過する。IPが実際に排気しているのはキャビティ室で、ビームダクトはフィンガーの間隙又はパンチングメタルの多孔を介して排気されているが、排気のコンダクタンスはビームダクト内径130mmの円筒と同等で十分に確保されている。なお、キャビティ室から排気口及び繋ぎの枝管を通してポンプシャーシの底部まで空間が80cm程空いているが、枝の途中にセラミックリングが設けてありビームダクトとポンプや真空計はDC的に絶縁されている。またポンプシャーシ内は漏れ磁場が存在している。

3. ポンプ停止試験結果と考察

3.1 試験結果

大強度連続運転中に、運転に影響を与えない圧力変動の範囲内で1-2台のIPをある時間停止させる

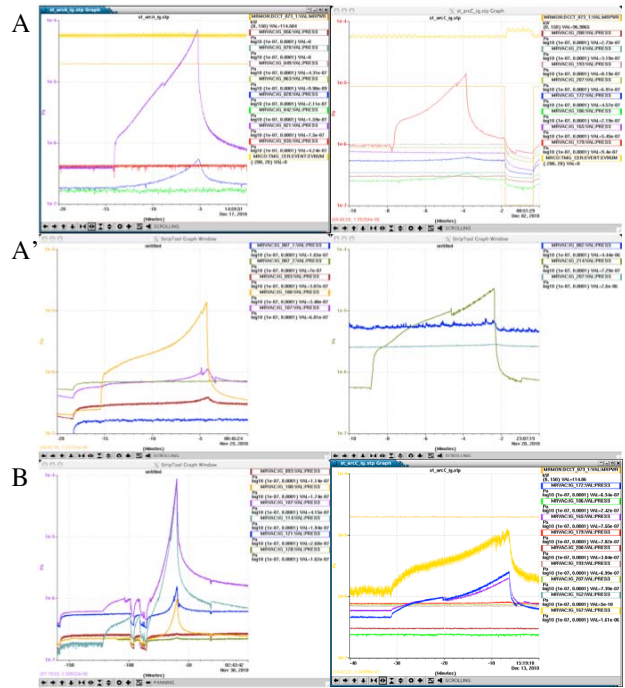


図 4: アーク部 IP OFF 時の圧力の挙動.

試験は、2010年2月から震災直前まで細々と行われた。方法は、IPをOFFし、圧力が発散的に上昇し 10^4 Paを超えそうな場合は電源を再びONさせる。すぐに上昇しない場合も、1時間以上経過後に発散上昇フェーズに移行し 10^4 Paを超える場合もあり、2-3時間経過観察した。また発散するIPでも、ビーム強度を下げれば発散しない場合、同じ強度でも時期が異なりOFF前の圧力が下がっていると発散しない場合があった。

例として2010/11-2011/1にかけて95-110kW連続運転中のアーク部の3通りの配置のポンプ電源をOFFした時の近傍の真空計(B-Aゲージ)の変化を図4に示す。分類のそれぞれは図2のアーク部の記号に対応しており、IPの停止前の上下流隣接ポンプとの距離、停止中のポンプ距離、及び圧力測定ゲージの位置関係を表1に示す(数値は概算)。

表 1: ON/OFF 時のアーク部ポンプ配置分類

分類	停止前上流最近接	停止前下流最近接	停止後ポンプ距離とゲージ位置	注釈
A	34m	34m	68m, 中央	
A'	17m	17m	68m, 中央	2台停止
B	34m	17m	51m, 両端	

分類A, A'は共にポンプ停止によりポンプ間距離が68mとなり、中央部は圧力分布の極大点に移行しすぐに発散的上昇を開始、3-10分足らずで 10^4 Paを超えそうになる。一方分類Bは圧力の上昇速度が緩慢で、上昇に転じるまで数時間かかっている。真空

計の位置について、分類 A, A'は圧力極大点を観測、分類 B はポンプ直上極小点を観測し肝心の極大点はゲージが存在せず観測できていないという違いがあるが、発散的な上昇があれば周辺の複数の真空計でも観測できている事から傾向の把握に問題は無い。まとめると、以下のような特徴がある。

- 分類 A, A'は高速、分類 B は低速。
- 初期圧力が高い程、早く発散傾向に移行し高速に上昇する。
- 圧力が発散的上昇へ移行する閾値が存在する。その値は $1-2 \times 10^{-6}$ Pa 程度。
- 閾値及び上昇速度はビーム強度及び経験値(運転時間またはビーム周回時間)に依存している。経験を積めば速度が鈍り発散しなくなる。

3.2 考察

上昇傾向が異なる分類 A, A' と B との相違点にはポンプ間距離(68m と 51m)があるが、圧力極大点の値はコンダクタンスが小さく排気速度が十分大きくまた様なガス放出速度であれば距離にほぼ比例するので、両者の差は高々1.5倍でしか無いはずである。よって距離の差は大した問題では無い。

ここまでポンプの距離だけに注目していたが、停止させたポンプ及びポンプポートが置かれている物理的な場所及びビーム軌道関数に着目すると大きな違いがある。すなわち、分類 A, 及び A'の停止2台中1台(図2のオレンジ色のIP)は、ミッシングベンドのドリフトスペースに置かれており(図5a), 上流側に Q 電磁石または共鳴補正用六極電磁石があるのみであるのに対し、一方分類 A'のもう1台の停止ポンプ及び分類 B は、Q と Bend に挟まれた隙間に置かれており(図5b), 図5aの上流のQと同様の漏れ磁場に加えて下流側 Bend の派手な漏れ磁場(数百ガウス程度)を被っている。よって、ポンプの置かれた場所で分類すると、ポンプ停止によって圧力が高速に上昇する条件は

- dispersion 関数極大近傍でビームロスが発生しやすい
- Q電磁石の隣だが、更に下流側はドリフトスペース(上流Qの更に3m上流もD.S.)

一方低速上昇条件は

- Qに加え Bend の隣で漏れ磁場を被っている
- とまとめられる。即ち、圧力上昇のメカニズムにビームロスと電子の介在を疑わなければならない。

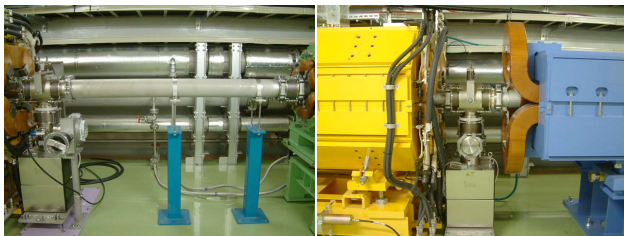


図5: イオンポンプ及びポンプポート周辺環境
a) missing bend の Q の下流, b) Q と Bend の隙間。

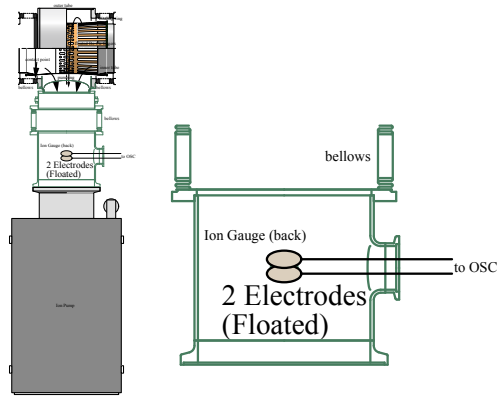


図6: ポンプポート内に電極を設置

4. ポンプポート内の電極による電位観測

ポンプポート内の状況を知る為に、#146のRFセクションに置かれた(アーク部と同型の)ポンプポートの枝管に設けてある空きポートから2枚のφ30mm円盤電極を枝管に対し垂直に挿入、枝管内の中心に水平に置き、電極に生じる電位を大強度連続運転中に測定した(図6)。この時、IPを停止させ圧力を上げることにより、電極信号の圧力依存性を調べた。ただし、外部環境としては、RFキャビティに挟まれた位置にあるので大きな外部磁場は存在しないが dispersion はゼロ、図2に示すように IP144 と IP148 が上下流の14m離れた位置にあり IP146 を停止してもポンプ間隔は29mあるため圧力が上がりにくい場所である。

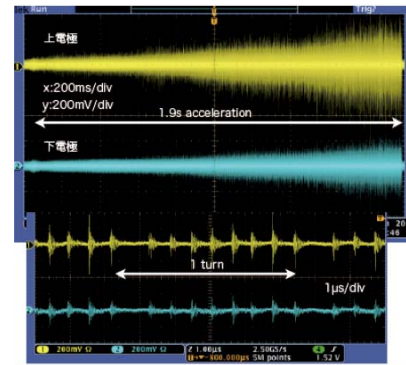


図7: 生波形(上:加速期間, 下:拡大).

加速 phase 全時間及び1 turnが見えるまで拡大したものを図7に示す。加速と共に大きくなる信号が得られ、それらは各 bunch 1つ1つが通過する時に発生していることがわかった。この信号はビーム強度及び真空の圧力に依存していた。BPM電極と似ているが、スリットまたはパンチングメタルの向こう側を通過しているビームからの信号を捉えていることが異なっている。

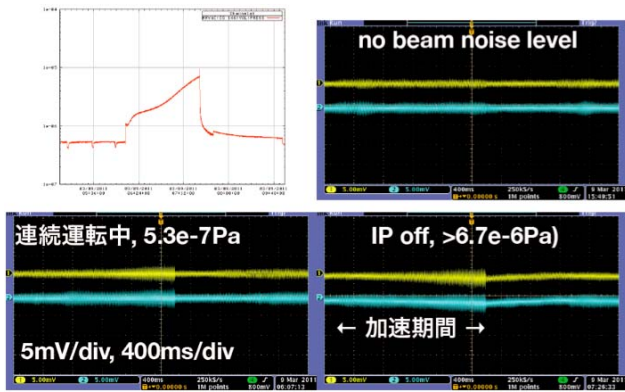


図 8: LPF & 8 shots 平均

次に、信号を RC(初段 $1k\Omega \times 1\mu F$)による 150Hz LPF で受け速いバンチ信号をカットし、さらに 8 サイクルの平均を取ってベースラインの変化を調べたところ、圧力を上げた時に 1 サイクルの運転周期に同期した遅い変動を捉えることに成功した(図 8)。加速と共に電位は負に動き、出射後に戻っている。さらにデータ処理でスムージングをかけ、圧力をパラメータとして枝管内電極電位の時間変動を得た結果を図 9 に示す。ビーム加速期間に負に大きくなり、出射後 LPF の C とオシロの入力インピーダンスとで作る時定数(1s)程度で decay しているがゼロには戻らず、常時電位は負である(測定器オフセット含む)。負のピーク電位はその時の圧力に依存していることがわかった。電位の時間変化を直線近似し、さらにピーク電圧が圧力に比例していると乱暴に仮定すると、30φの電極に集まった電荷は約 $0.5nC/\mu Pa$ である。枝管の直径は約 120mm なので、枝管内はオーダで $10nC/\mu Pa$ の電子が降ってきている。なお、B-A ゲージの熱電子の影響の有無を確認するため、ゲージの ON/OFF を切り替えて測定したが差は見られなかった。

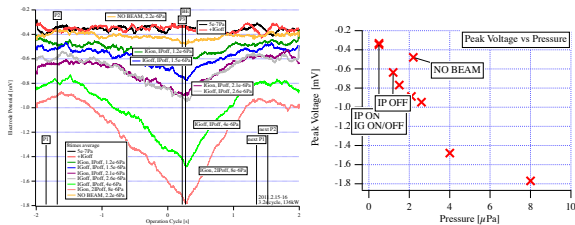


図 9: 枝管内電位の時間変化と圧力依存性

5. 再び考察

ポンプの枝管内に設置した電極なので、単純にビームが通過するときの電場では無い。ビームのイメージ電流はスリットまたはパンチングメタルを通過しているはずである。また、漏れ電場が圧力に依存する訳はないので、バンチ信号は漏れ電場によるものではない。そして、ベースラインが運転サイクルに同期し負へ変動していることは、電極に電子が飛び込んでいることを示している。この電子の由来は、いわゆる電子雲の「切れ端」であろうと推測している。排気口の逆サイドの壁から飛んだ二次電子がバ

ンチ電場で加速され通過し、そのままスリット/パンチングメタルの孔を通過して排気口に飛び込む、というメカニズムである。

電子雲の形成には、最初の種として残留ガスの、つまりその場所の圧力がパラメータとして入ってくる。圧力が高いほど、生じる電子密度は高くなるので、測定と consistent である。

また、3章のポンプ停止時の圧力の発散的上昇現象も、電子雲形成時に同時に生じる真空表面からの気体分子の脱離と考えれば説明が可能である。残留ガスは電子雲の種であり、電子雲生成時に種も生じているのであるから、種を生じる速度がその場のポンプ、または(OFFによって)遠くのポンプが排気する速度を超えた場合に種すなわち圧力は指数関数的に増える。そして、3章最後に考察した磁場による圧力発散速度の抑制も、電子雲生成が磁場で抑制されているためということの説明できる。

6. 結論

大強度運転時にポンプを停止させた時の顕著な圧力上昇は外部磁場とビームロス、停止時点での周囲の圧力に密接な関係があることがわかった。ポンプ枝管内電位から、圧力上昇の原因は、残留ガス由来の電子雲の過剰な形成である可能性がある。さらにポンプが正常な通常の連続運転時でさえ、ある程度の電子雲は圧力分布に従って常時形成されている可能性から、ビーム強度を上げていく時、強度のステップ的な上昇により圧力が発散上昇フェーズに移行することが無いよう、徐々に強度を上げ真空表面をビームによりコンディショニングするのが必須であろう。今後モニタグループらにより詳細な電子雲の測定が行われる予定であり、性質を把握し、さらにソレノイド設置等の積極的な電子雲抑制手段を講じる必要性の検討も視野に入れておくとなお良いと思われる。

7. 謝辞

モニタグループには助言及び LPF などを、また RF グループには電源棟までのケーブルとオシロを貸与いただきましたので感謝します。また、ただちに運転に影響を与えるものでは無かったとは言え、ポンプの電源を故意に切り真空圧力を操作するというある意味危険な実験を黙認していただき感謝します。

参考文献

- [1] M. Uota, et al., "J-PARC MR の大強度ビームによる圧力上昇とビームロス", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 4-6, 2010, Himeji, Japan), p721.
- [2] M. Uota, et al., "VACUUM SURFACE SCRUBBING BY PROTON BEAM IN J-PARC MAIN RING", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, p3858.