

# J-PARC MR 周回リングのビーム運転中の残留気体分子測定 I MEASUREMENT OF RESIDUAL GAS MOLECULE DURING BEAM OPERATION IN J-PARC MR RING I

魚田雅彦 \*)  
Masahiko Uota\*  
KEK/J-PARC

## Abstract

Residual gas analysis in the J-PARC MR synchrotron ring during high-intensity beam operations has been hindered by radiation-induced failure concerns. This study presents a novel approach to overcome these challenges. In October 2023, a commercial quadrupole mass spectrometer (QMS) with an integrated controller was directly connected to the ring. Initial measurements using a standard notebook PC were successful but short-lived due to radiation damage. Subsequently, a radiation-hardened PC was employed for intermittent measurements, enabling data collection over six months without failure. The spectra obtained were consistent with those from initial baking procedures. Despite lacking specific radiation countermeasures, the QMS controller functioned with minimal malfunctions, providing insights for instrument operation in high-intensity accelerators. This method demonstrates a viable approach for long-term residual gas analysis in high-intensity particle accelerators, potentially applicable except for the collimator area.

## 1. はじめに

J-PARC の MR シンクロトロンでは、秋季ビーム運転再開時に新規ビームダクトから顕著なアウトガスが観測される。対策として「ビームによる焼き出し運転」が年次恒例となっている。

B-A ゲージ (BAG) による全圧の挙動は、(i) ビーム強度の増加に伴うアウトガス量の上昇と真空ポンプの排気速度との均衡による圧力上昇、および (ii) 運転継続に伴う増加圧力の漸減、という特徴を示す。これは真空加熱ベーキング処理時の圧力挙動と類似している [1]。

しかし、実際の気体分子分圧測定は、ビーム強度が 100 kW 以下だった 2010 年 [2] 以降、近年実施されていない。これは多くの四重極質量分析計 (QMS) のコントローラーが真空フィードスルー直結構造のため、MR の大強度ビーム運転時に発生すると想定されてきた放射線が電子回路に悪影響を及ぼし、正常な動作を阻害するという「通念」に起因している。

MR の真空機器 (BAG、冷陰極ゲージ (CCG)、コンベクトロンゲージ (CG)、イオンポンプ (IP)) は、全てコントローラーを地上の電源棟に設置し、100–450 m のケーブルを介して機器本体を制御している。一方で、ビームモニタやネットワークカメラ、照射試験装置等の一部で、ビームラインから数 m 程度の近接位置に電子機器を配置し、ビーム運転中も正常に機能させている事例が近年増加しており、ビームラインからの距離と適切な運用方法次第では、トンネル内での電子回路の安定動作が可能であることが徐々に明らかになってきた。

この知見に基づき、2023 年 10 月、我々は 2009 年に購入したコントローラー一体型 QMS をリング内に設置し、大強度運転中の測定を試みることを決定した。この挑戦的な取り組みは、機器の故障リスクを考慮しつつも、長年未測定であった大強度ビーム環境下での気

体分子分圧データの獲得を目指すものである。

## 2. トンネルインストールと出来事

### 2.1 タイムライン

- 2023 年夏 RF 加速空洞 3 台の交換に合わせて QMS を接続
- 10/20 大気から排気開始 (Scroll → TMP → IP 起動後 TMP 除去)
- 11/20 ~ 加速器ビーム調整およびスタディ
- 11/23 夜 ~ ニュートリノビーム調整および連続運転 (計画)
- 11/24 2:47 460 kW で 6 発、および 7 発で停止
- 同 3:08 390 kW で 19 発、および 23 発で停止
- 同 4:30 260 kW で連続運転開始
- 同 5:33 PC 故障により QMS 測定が停止
- 12/13 放射線対策を施した PC を用意し測定再開
- その後 QMS は半年以上生存中

インストール後の上下流の BAG による全圧および MR のビーム強度の 2024 年 7 月までのトレンドを Fig. 1 に示す。

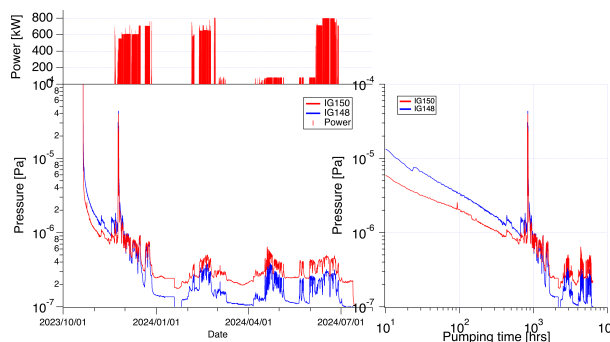


Figure 1: (left) Trend of beam power and total pressure, (right) vacuum pumping curve.

\* masahiko.uota@kek.jp

## 2.2 設置場所

QMS のリング内の設置位置を Fig. 2 に、接続後の写真を Fig. 3 に示す。電源棟へ続くサブトンネルの前のアドレス#150 にある T 字型の二重排気管の未使用ポートに接続した。Q 電磁石を挟んだ上流側には、RF の増強計画の一環で 4-gap 空洞 (電解研磨された SUS316L 製、ダクト長 2088 mm)3 台、および隙間を埋める繋ぎダクト (空洞と同材質、同処理、長さ 1645 mm) が新造・インストールされた。加速管は製造工場で、繋ぎダクトは我々で 200 °C 24 時間のベーキングを行い、ベーキング後は窒素を 1 気圧充填して保管のちトンネル内に設置し、短時間の大気曝露後に速やかに連結して排気している。Figure 2 下図における略記号はそれぞれ以下の通りである:

- QMS+controller : キヤノンアネルバ M-101QA-TDM
- PC1(初期) : Note PC
- PC2(対策) : Mini PC + スマートコンセント
- hub : スイッチングハブ + スマートコンセント
- IP : Gamma Vacuum 600LX
- BAG : ULVAC M-15(GI-M2)
- PE : ポリエチレンブロック
- Pb : 鉛ブロック

QMS の設置方向に関しては、ビームロスの多い水平面を避け、また下方向への設置が機器の干渉により困難であったため、45° 上向き方向を選択した。この配置

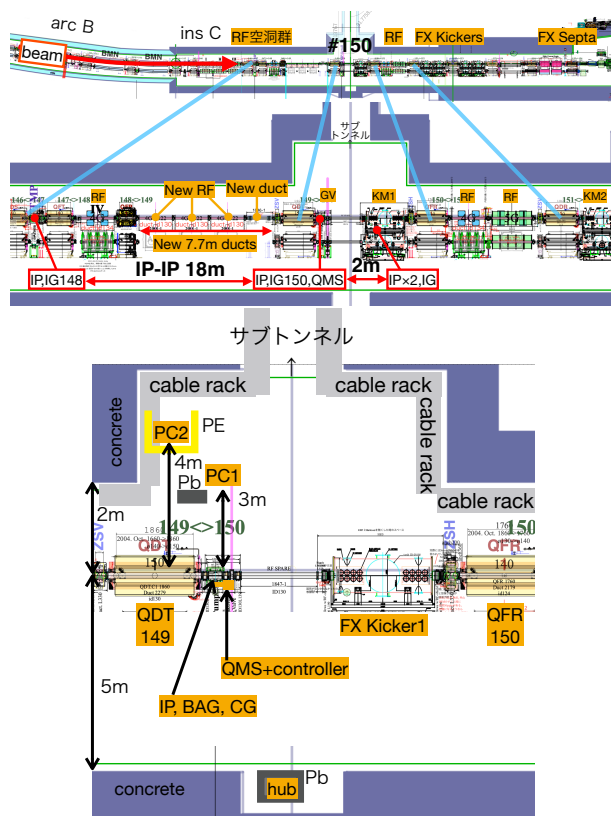


Figure 2: (upper)QMS location in MR ring and (lower) more detailed layout.

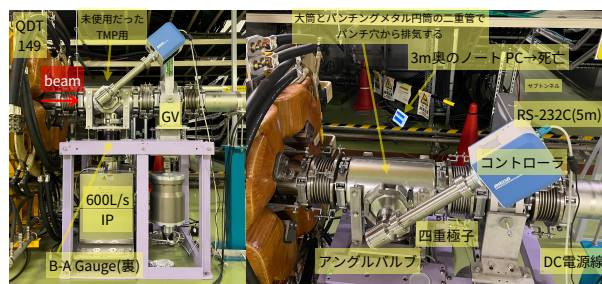


Figure 3: (left)The QMS head is attached to the pumping port by an angle valve and 45 degree upward orientation. (right)The photo shows the positioning of the QMS head and controller in relation to the ring-side equipment and the control PC in the initial setup.

により、測定子に直結するコントローラーは下流ゲートバルブ (GV) のシャーシに隣接し、周回ビームから約 30 cm の近接位置に設置された。制御用ノート PC は 5m の RS-232C ケーブルと USB 変換アダプタを介して接続され、サブトンネルへの入口付近の地面に直接配置されたため、ビームラインからの距離は約 3.5m となった。設置場所近傍の既存の有線ネットワークを活用し、ディスプレイを常時開状態とし VNC を用いた遠隔操作により測定を実施することとした。

## 2.3 放射線による異常動作

ノート PC での測定は、11/20 からの加速器スタディおよび調整の間は順調に遠隔測定でき、11/22 夕方に連続測定を仕掛けて放置したところ 11/24 早朝の 260 kW の連続運転開始後 43 分で測定が停止し 9 時に確認した時にはネットワークから見えなくなった。11/29 に現場確認すると PC は電源が入らなくなっていた。分解して放射化していなかった内蔵 M.2 SATA SSD を取り出し、外付けエンクロージャに接続したところマウント、読み出しが可能だったため、故障停止した時点までのデータ回収に成功した。

一方、早々に故障すると予想していた QMS コントローラー本体は、11/29 に現場で別 PC を用いて動作確認すると、案の定、測定データに Fig. 4 のような全くスペクトルが取得できない異常が生じていた。故障と判断しコネクタから抜き搬入棟下の地下室に退避させていたが、1 週間後 12/6 に再試行すると、なぜか再び通常のスペクトルが取れるまで復活していた。ただし若干の不具合として、測定スペクトルはランダムに 1 マス分まるまる抜ける症状が数スキャンに 1 回の頻度で発生するようになっていた (Fig. 5)。これは mass=2,18,28,44 などを指標として後からずれを補正することが可能で、

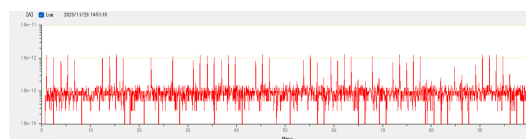


Figure 4: Example of anomalous signal obtained from instrument on 11/29.

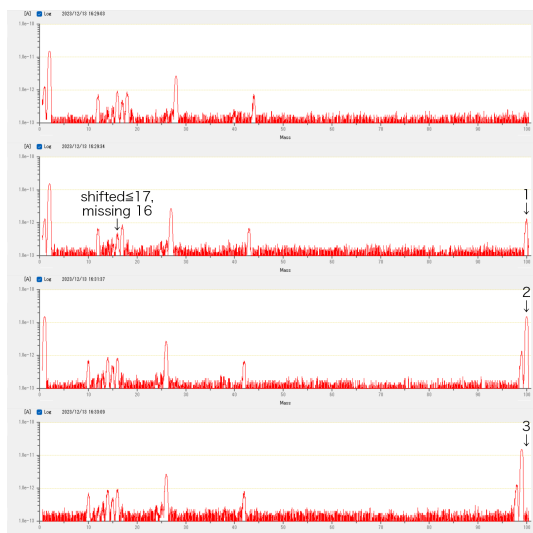


Figure 5: An anomaly occurred in which the spectrum gradually shifted to the left due to missing one mass data at random timing during the measurement.

欠測 mass 以外は取得できるのでこのまま放射線対策 PC を用意して再挑戦することにした。

#### 2.4 放射線対策 PC

ノート PC はディスプレイ開状態ではシルエットが大きい。そこで新しい PC は NUC 系ファンレス PC でスマートフォンサイズの MeLE Quieter3C (Celeron N5105、Windows 11 Pro) を選択した。HDMI コネクタにダミープラグを挿入しヘッドレスに起動させ、VNC による遠隔操作で仮想画面へアクセスする。

過去のデータ救出の困難な経験から、データ保存は本体 (eMMC)、microSD カード、USB 外付け HDD、地上の別 PC (sftp によるコピー) の 4 箇所に分散させ、本体以外は 2 分ごとにソフトウェア同期を行った。

既設のセプタム電磁石冷却水配管観察用ネットワークカメラの遠隔電源制御を参考に、QMS 本体と PC の電源をネットワーク経由で遠隔 ON/OFF 可能にするため、スマートコンセント (電源自在 IP Power) に接続した (ネットワークカメラ用とは別系統)。放射線量が高くなる可能性のあるビームスタディ時は電源を OFF にし、ロスが少ない利用運転時のみ ON にして測定を行う運用が可能となった。ただし、スマートコンセント自体は常時 ON である点が懸念事項として残った。

中性子対策として、ポリエチレンブロック (PE) 10 個でカマクラ状の遮蔽体を作成し、その中にスマートコンセントと Mini PC を配置した。排熱不足の懸念から、12cm の USB ファンを追加し強制空冷を行った。

ノート PC 故障時の経験を踏まえ、リングからの距離と縦方向位置 (ドリフトスペースの薄いパイプの横) が線量増加の原因と考え、延長ケーブルを 10m に変え、カマクラの設置位置をサブトンネル窪みの角の奥、リングから見えにくい陰の位置に移動させた。縦方向には磁極の鉄による遮蔽効果を見越して Q 電磁石の真横とした。さらに下流方向からの直達放射線 ( $\gamma$ , X 等) 防護のため、リングのドリフトスペースダクトとカマク

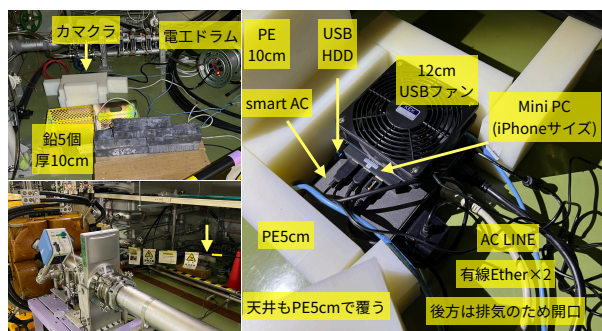


Figure 6: Radiation resistant PC setup. A small PC and smart outlet were placed inside a kamakura dome made of polyethylene blocks, a lead block wall was built in front, and the whole thing was moved to the far side of the depression.

ラを結ぶ直線上に 10 cm 厚の鉛ブロックによる壁を構築した。設置の様子を Fig. 6 に示す。

### 3. QMS 測定結果

まず 11/24 未明のノート PC 故障までの QMS 測定結果を述べる。Figure 7 はその 6 時間分の全圧とビーム強度のトレンドである。次に対策後の PC による測定について述べる。

#### 3.1 NU 行き最初の連続運転試行

11/23 からの加速器側のアポートダンプ行きでの調整と大強度ビームスタディ (全て 1 発ずつ時間をおいて打つ) の後、24 日未明に行き先をニュートリノ行きに切り替え、最初に 490 kW 10 発設定で運転したところ 6 発しか打てなかった (ロスモニタの MPS で停止) 時の QMS スペクトルを 1 スキャン後と重ねて Fig. 8 に示す (約 30 s/スキャン)。QMS のエミッション電流は 2 mA、SEM は 800 V に設定している。図の下側は 2 スキャンに相当する時刻の全圧とビーム強度のトレンドである。約 10 s 間のアウトガスによって  $3 \times 10^{-5}$  Pa 程度に上昇し、運転停止後はポンプへ排気されていく過渡的な変動の中での測定のため、スペクトルの絶対値の比較はあまり意味が無いが、44 までの低質量側は全圧の 1 桁近い圧

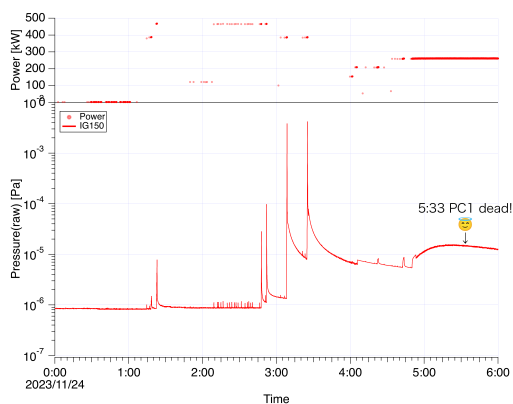


Figure 7: Pressure and beam power during the MR beam study and the first neutrino continuous operation in November 2023.

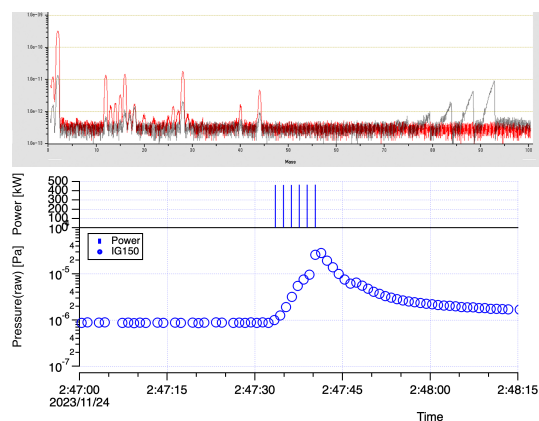


Figure 8: (upper) QMS during 460 kW 6 shots(shot/1.36 s) and next period scans and (lower) the total pressure and beam power at about 2 QMS scan periods.

力上昇に対応した分圧 (特に  $H_2$ , C,  $CH_4$ , CO, Ar,  $CO_2$ ) の上昇が確認できる。また、ビーム運転中の特徴として、全圧が上昇するにつれ、ノコギリ波状の、スペクトルに分離していないノイズ信号が観測されている。このノイズ信号は、次の大放射イベントでさらに奇妙な振る舞いを見せ、極めて興味深いので後に考察する。

### 3.2 370 kW 19 発および 23 発で RF Trip により停止

次に 370 kW が試され、19 発および 2 回目 23 発で RF Trip が発生して停止した。この時の RF 近傍の全圧は高速に立ち上がり  $1 \times 10^{-2}$  Pa に迫る圧力上昇が記録されていたので、放出源である新品 RF 空洞ダクトでは 1 桁以上高い圧力になり加速ギャップ間で放電および急激な温度上昇が発生したと思われる。前後の QMS の波形および全圧波形を Fig. 9 に示す。全圧の上昇に対応する極めて大きな分圧と、100 番まで殆ど全ての質量の信号 (殆どは炭化水素系高分子のクラッキングパターン) が記録されている。H, C, O, その組み合わせが極めて多い。また、490 kW 時にも見られた、全圧上昇に呼応して上昇するノコギリ波ノイズ信号はさらに明瞭になり、しかも奇妙なことには、最後の 2 山は幅が広く運転周期に全く同期していない。

### 3.3 260 kW 連続運転

ビーム運転の方はその後試行錯誤ののち、260 kW で連続運転に移行し、全圧での観察から 6 時間後にはこの強度ではアウトガスが収まったため強度を 410 kW へ上げ、さらに 6 時間後に 550 kW へ上げて順調に焼き出しを促進させている。一方、QMS の測定は (後にデータを救出してわかったことだが)、最初の 260 kW の連続運転開始後 43 分で PC の故障により測定が停止してしまった。全圧で  $1.5 \times 10^{-5}$  Pa 台まで上昇したのち緩やかに減少に転じた頃の事である。260 kW 連続運転開始直前から死ぬ直前までを Fig. 10 に示す。運転周期同期のノコギリ波ノイズはやはり圧力上昇と共に若干の上昇が見えている。スペクトル自体は 44 までの多少の上昇が見えている。

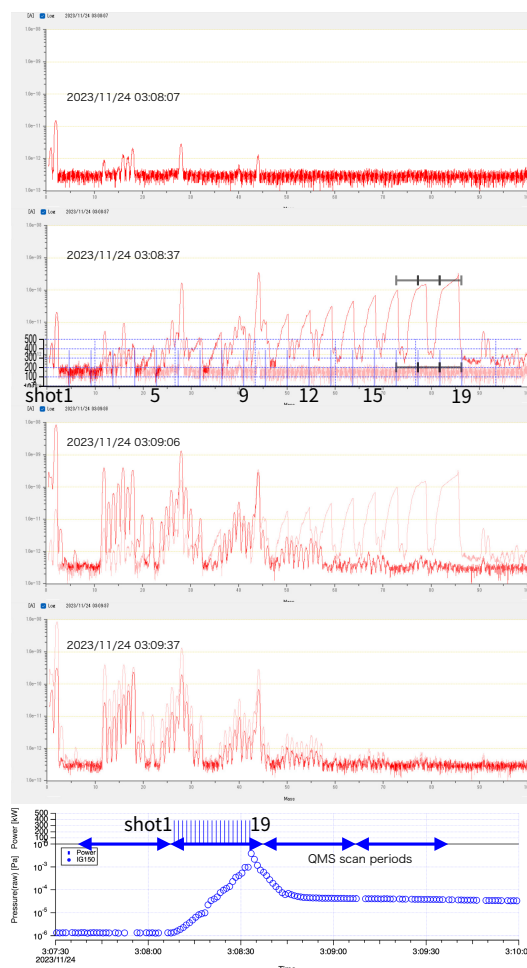


Figure 9: (upper) QMS during 370 kW 19 shots and (lower) the total pressure and beam power at about 5 QMS scan periods.

### 3.4 PC 耐放射線強化後

12/13 に放射線対策を施した PC による測定を開始した頃には、600–700 kW の大強度運転中でも全圧は高々  $1 \times 10^{-6}$  Pa ほどにしか上昇しなくなっており、焼き出し運転は終わった後であった。710 kW 連続運転と遅い取り出し (SX) 運転 81 kW 連続運転中の QMS を Fig. 11 に示す (信号が弱くなっていたので SEM を 900 V に設定)。両者ともほぼ同じ全圧での測定だが、運転周期同期ノイズ (但し初期 FX 運転時のノイズとは形状が異なる) が SX 運転のみ観測されている。

## 4. 考察

### 4.1 一体型 QMS による測定の成功

KEK 12GeV-PS での経験から、陽子加速器トンネル内での電子回路の故障は不可避と考えられていた。しかし今回、中性子に対するポリエチレン、X 線や  $\gamma$  線に対する鉛遮蔽を築き、さらに測定時のみ電源 ON/終了後速やかに OFF する運用により、故障を回避することができた。特筆すべきは、ビームラインからわずか



Figure 10: QMS during 260 kW continuous beam operation. (upper) At the beginning of operation, (lower) just before the PC died.

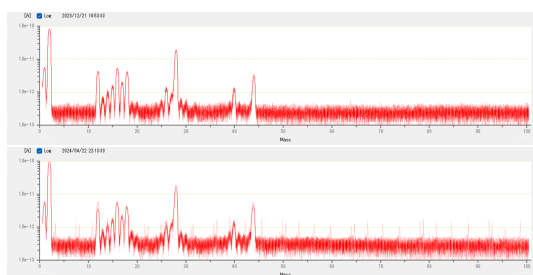


Figure 11: 5-scans-averaged QMS during (upper) FX 710 kW operation(2023/12/21) and (lower) SX 81 kW operation(2024/4/22). The total pressure (rise, too) is almost identical, and therefore the partial pressure spectra are very similar, except for the pulse noise in SX.

30 cm の位置に置かれた QMS コントローラーが、離して設置した制御 PC の方が先に機能停止するまで、連続通電状態で問題なく測定を継続でき(初期セットアップ)、その後半年以上生存した(対策セットアップ)ことである。この予想外の健闘の原因は、装置の分解調査なしには特定できないが、MR のビーム運転(特に利用運転)時におけるロスがコリメータ部に局所化され、他の領域では極めて低いことを反映していると推測される。市販の測定子とコントローラーを 3-15 m 程度のケーブルで接続する分離型は非常に高価であるため、一体型での測定成功は大きな意義を持つ。

#### 4.2 MR の残留気体分子

ビーム運転前および運転時の安定状態におけるスペクトルの特徴として、主に質量数 2, 28(26 を伴う), 16(15,14,13 を伴う), 12, 18(17 を伴う), 44, 40 の C, H, O 系が観測された。質量数 40 は Ar または  $C_3H_4$  の可能性があるが、炭化水素であれば隣接する質量数にも信号が現れるはずであること、および MR の主排気ポンプである IP が conventional 型で Ar の排気速度が極めて低いことから、Ar と推測される。圧力が大幅に上昇した際には Ar 不安定性と類似のメカニズムで IP の Ti 素子が大量にスパッタされ、Ar が再脱離したと考えられる。その他の分子に関しては、製造時のベーキング温度を

上げ、ステンレス表面の酸化クロム層を適切に制御すれば、除去または減少させ、ビームによる焼き出し時間を短縮できる可能性がある。ただし、今回使用した RF 加速空洞ではセラミックギャップ部の強度の観点から高温処理が困難であり、また長尺ダクトの高温ベーキングが可能な施設は限られているため、コスト面での課題が残る。

#### 4.3 QMS のノイズ信号

スペクトルには圧力上昇に伴い、ノコギリ波状 (FX 運転時) またはパルス状 (SX 運転時) のノイズが重畳していた。本 QMS の測定原理は、熱電子でイオン化した残留気体分子を電場で加速し、RF の AC 四極電場内を特定の質量/電荷比のイオンのみが飛行出来てファラデーカップ (FC) に到達し、生じた電子を二次電子増倍管 (SEM) で増幅して電流検出するものである。観測されたノイズは質量によらず連続的に検出されており、通常の測定過程で得られた信号ではない。現時点では考えられる原因として以下を挙げておく：

- FC や SEM に直接、真空側か大気側から粒子または放射線が飛来した可能性。候補として四重極電場の影響を受けない中性子、X 線、 $\gamma$  線、影響を受けにくい高エネルギー荷電粒子が考えられる。
- 電流測定回路に乗った電磁ノイズ。但し圧力依存性の説明が付かない。

FX 運転では全圧に依存し、圧力低下とともにノイズが消失したことから、ビームダクト内の残留気体分子との相互作用で生じた X 線が大気側から照射されたのが原因ではないだろうか。測定子の根元側 (FC と SEM の位置) 付近の大気側にシンチレータを設置して同時測定を行えば、さらなる情報が得られた可能性がある。370 kW での RF Trip 発生直前には、通常の運転周期から外れた長時間幅の信号が記録されていたが、空洞ギャップでは放電が発生し多量のプラズマが飛んでいたから、RF の最終段の電圧波形等との比較分析が有用かもしれない。

また、SX 81 kW 運転時に観測された、FX 運転では生じなかった鋭いパルス状ノイズは、SX における debunch 過程での電子雲発生等が関与している可能性がある。

## 5. おわりに

J-PARC MR シンクロトロンに市販のコントローラー一体型 QMS を接続し夏のメンテ期間にインストールした新品ダクトから秋のビーム運転の初期に放出される気体分子について測定を試みた。ビームラインに最も近いコントローラーは大強度運転下でもほぼ正常に動作し、また制御用 PC について中性子及び  $\gamma$  線、X 線対策を施し、短時間測定以外は測定系全部の電源を切っておく運用により、無対策では数日で故障した PC を延命させることに成功し、ビームによる焼き出し運転時の放出気体スペクトルを得ることに成功した。測定データには通常のスペクトル以外のノイズ信号が乗っており、今後の検討課題としたい。

参考文献

- [1] M. Uota, "Evaluation of Bake-Out Operation When New Equipment is Added to J-PARC MR", Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 907-911. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2023/proceedings/PDF/FRP2/FRP29.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/FRP2/FRP29.pdf)
- [2] M. Uota *et al.*, "Pressure Rise and Beam Loss with High Intensity Beam in J-PARC MR", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 2010, pp. 721-723. [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj7/proceedings/P\\_4PM/P\\_EH\\_4PM/WEPS126.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/P_4PM/P_EH_4PM/WEPS126.pdf)