

信号で決められた時間積分し、後段でデジタイズされる。ゲート・トリガは、“beam trigger” タイミング (TYPE B or C) [2] によって制御され、制御ターミナルで設定された時間間隔でサンプルされる。本測定では、16 ms 間隔であった。

残留線量測定では、まず、全周の検出器のバイアス電圧を変更する。調整の結果、-1.6 kV (ロスのホットスポット), -1.8 kV (通常部分) で運用している。さらに、ゲート・トリガを “no beam trigger / waiting” タイミング (TYPE A) [2] により駆動するように、設定を変える。

3. オフセット補正

積分信号を取り扱っているので回路系の僅かな漏れ電流が積算され、処理結果にオフセットとして混入する。1測定当りの積分時間は、速い取出し (FX) モードで 1.6 秒、遅い取出し (SX) モードで 5.0 秒である。FX モードで取得した信号を Figure 4.a に示す。オフセットを検出するために、全検出器のバイアス電圧を 0 V として取得したデータを Figure 4.b に、オフセット差引の結果を Figure 4.c に示す。

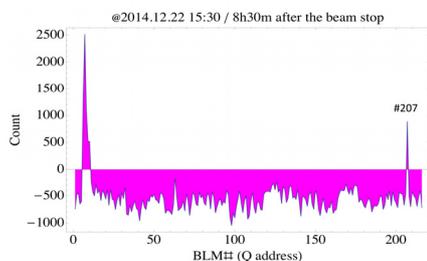


Figure 4.a: Raw signal of the residual radiation measured with the BLM system.

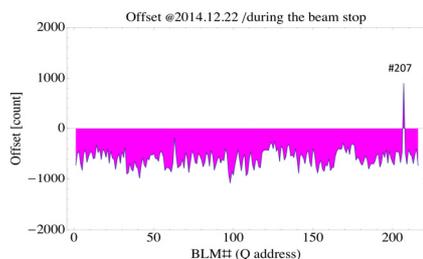


Figure 4.b: Measured offset of the BLM system.

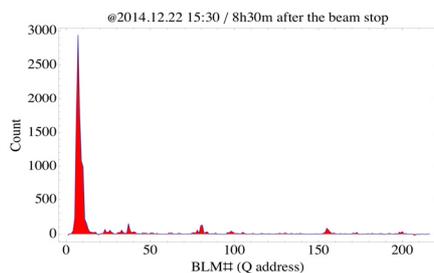


Figure 4.c: Corrected signal of the residual radiation measured with the BLM system.

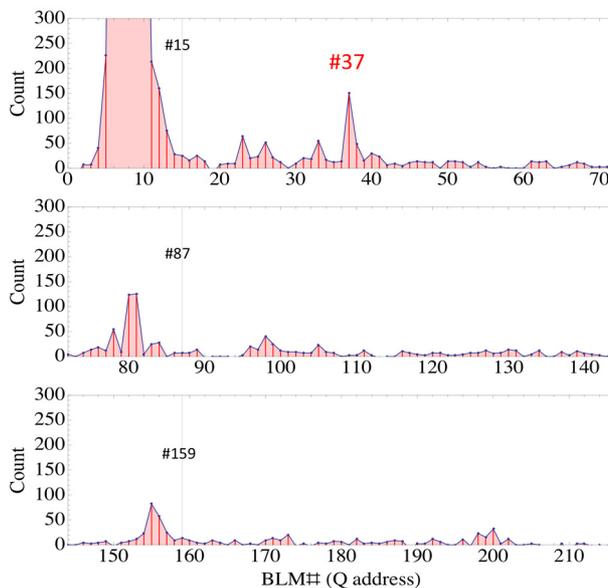


Figure 5: Residual radiation measured with the BLM. The MR is divided into three parts. The abscissa is the BLM number, which is almost proportional to the beam path length along the ring.

同じデータを、横軸を3分割し (MR は3回対称)、さらに縦軸を拡大してプロットした結果を Figure 5 に示す。バイアス電圧は#213~216, #1~20 が -1.3 kV で、その他は -1.6 kV であった。これによるゲインの違いは約 8 である。2014 年 12 月 22 日のビーム停止から 8 時間 30 分後のデータである。各プロットで縦線 (上図から#15, #87, #159) は直線部とアーク部の境界を示している。各直線部で残留線量が大きい場所は、上からそれぞれ、MR コリメータ部、SX 用セプタム、FX 用セプタム付近であり、ビーム供給中のビームロスが大きいエリアである。#37 にもピークがあるが、MR コリメータのハロー削除の残りカスが到達している可能性がある。今回の測定は [3][4] の発展形である。トンネル内に人員が入って被曝しながら残留線量を測定する事無しに、全体的な残留線量が把握できることが非常に有用である。ただし、BLM による残留線量測定は、トンネル内機器の残留線量の詳細を厳密には反映していないので注意が必要である。すなわち、ビームダクトの表面線量と上記の値にきれいな相関が見られない箇所も見つかっている [5]。

4. 生成核種によるフィッティング

MR コリメータ部の BLM#6, #7, #8, #9, #10 による 2014 年 12 月 22 日からの冬季シャットダウン中残留線量測定結果を Figure 6 に示す。横軸はビーム停止後の経過時間、縦軸は、BLM#6, 7 の位置で測定した線量計 [6] の値 (平均値) により規格化した残留線量値である。個々の BLM のゲインのパラッキはこの

プロットには反映してない。残留線量の減衰を 3 成分で下記のように書き表して、

$$N(t) = c_1 e^{-t/\tau_1} + c_2 e^{-t/\tau_2} + c_3 e^{-t/\tau_3} \quad (1)$$

各 BLM による線量測定値の減衰曲線にフィッティングして Table 1 の結果を得た。放射性核種は、鉄からの寄与だとすると、寿命の短いほうから ^{56}Mn , ^{24}Na , ^{55}Co , ^{52}Mn , ^{48}V , ^{54}Mn が考えられる^{[7][8][9][10]}。各核種の半減期は Table 2 のとおりである。γ線のエネルギーはインテンシティ 14%以上を掲載した。フィットの結果との対応は今後調査する。#6 (green) の減衰が他に比べて速いのは、短寿命核種が多い一方長寿命核種が少ないことが原因で、MR コリメータ・セクションが#6 の後方から始まるため、過去からの長寿命核種の蓄積は少ないが、直前の運転・スタディでのビームロスが多かったことが考えられる。

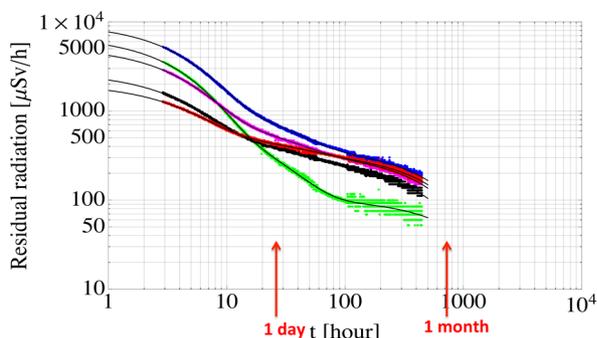


Figure 6: Residual radiation measured with the BLMs. The origin of the time axis is the beam-off timing. Data points are BLM#6: green, #7: blue, #8: magenta, #9, black, #10: red. Black curves are fitted to each data set.

Table 1: Result of the Decay Fit

BLM	C ₁	C ₂	C ₃	τ ₁	τ ₂	τ ₃
#6	6200	600	100	3.9	22	1000
#7	8300	870	380	4.0	27	610
#8	4400	490	330	3.9	28	560
#9	2200	270	270	4.0	35	530
#10	1500	220	330	4.1	33	620

* Units C_i [mSv/h], τ_i [hour]

Table 2: Lifetime and Gamma of the Candidate Nuclides

Nuclide	Half life	Mean lifetime τ	Gammas [MeV]
^{56}Mn	2.58 h	3.72 h	0.85, 1.81, 2.11
^{54}Mn	312 d	10800 h	0.83
^{52}Mn	5.59 d	194 h	0.511, 1.43
^{55}Co	17.5 h	25.3 h	0.511, 0.931, 1.40
^{24}Na	15.0 h	21.6 h	1.37, 2.75
^{48}V	16.0 d	552 h	0.511, 0.98, 1.31

本測定システムでは、検出器および磁気シールドも放射化してしまい、残留線量の測定値はこれらを含んだ値である。検出器・磁気シールドは、心線・コネクタを除いて SUS と鉄できている。近傍の 4 極電磁石鉄心のみならず、検出器・磁気シールド自身からの γ線を検出することになるが、放射化の度合いを測るといった観点からは、途中で検出器・磁気シールドを交換するといったことが無い限り、大きな問題は無いと考えられる。

5. まとめと展望

J-PARC MR の各 4 極電磁石に取り付けた“比例計数管”型 BLM の設定パラメータ（バイアス電圧、ゲート・タイミング）を変更することにより、MR のほぼ全周の固定位置（各 4 極電磁石）での残留線量をビーム停止後（原理的に）から連続して測定する運用に成功した。減衰曲線をフィッティングし、短寿命の ^{56}Mn についてはシミュレーション結果での予想と矛盾しない結果が得られた。その他の核種については、更なる分析（スペクトル分析）が必要である。これらの結果を使えば放射性核種の積算の程度を推定することが出来るので、ビームロスによる機器の長期被曝計画（例えば、ビーム停止の 1ヶ月後に 1mSv/h の作業を担保するには、ビームロスほどの程度まで許されるか）の立案に役立つと考えられる^{[7][8]}。

今後、パラメータ変更の自動化が望まれる。また、より高性能な処理回路への更新が予定されているので、線量の分解能も向上することが期待される。

参考文献

- [1] T.Toyama, S.Lee, K.Sato, A.Akiyama, Y.Hashimoto, H.Nakagawa, J.Odagiri, T.Suzuki, M.Teijima, N.Yamamoto, N. Hayashi, and K. Yamamoto, proc. of HB2008, p.450.
- [2] <http://www-cont.j-parc.jp/mediawiki/index.php/Timing>
- [3] K.Satou and T.Toyama, Proc. of 8th Ann. Meeting of PASJ (2011) 424.
- [4] H.Nakagawa, S. Shibata, S.Hiramatsu, K.Uchino and T.Takashima, NIM174(1980)401-409.
- [5] T.Toyama, H.Kuboki, Y.Sato, M.Uota, M.Shirakata and B. Y-Rendon, in these proceedings.
- [6] CAMBERRA RADIAGEM2000.
- [7] K.Satou, Y.Sato, M.Uota, M.Shirakata and M.Yoshii, Proc. of 10th Ann. Meeting of PASJ (2013) 688.
- [8] K.Satou, Y.Sato, M.Uota, M.Shirakata and M.Yoshii, Proc. of 2nd Intern. Symp. on Sci. at J-PARC 2014.
- [9] M.Shirakata, private communication, Dec. 2014.
- [10] National Nuclear Data Center, information extracted from the Chart of Nuclides database, <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>