

J-PARC MR 加速器の放射化コントロールのための残留線量率測定 RESIDUAL DOSE RATE MONITORING FOR FUTURE MACHINE ACTIVATION CONTROL AT J-PARC MR

佐藤健一郎、佐藤洋一、魚田雅彦、白形政司、吉井正人

Kenichirou Satou #, Yoichi Sato, Masahiko Uota, Masashi Shirakata, Masahito Yoshii
J-PARC/KEK

Abstract

Since July 11, 2012, to investigate the beam loss mechanism, we have been monitoring the residual dose rate on the accelerator components like Q and B magnets, RF components, and collimators after beam stop. As for the collimator area, residual dose rate change was measured up to 300hrs cooling time after beam stop, and these data were estimated by using the Sullivan-Overton equation. The equation well reproduces the measured data within $\pm 50\%$ and the fitting parameters were obtained. By using the parameters we have estimated the future residual dose rate level at the collimator area within the factor of 2. These calculations show that the 1000W injection beam loss during an 11 months/year continuous beam operation will make residual dose rate of over 2.4mSv/h during the next 1 month maintenance stage after 15years repetition.

1. はじめに

J-PARC MR 加速器では最大 240kW ビームを T2K 実験に供給している。今夏 Linac に ACS 加速空洞が設置され、加速エネルギーは 181MeV から 400MeV へとアップグレードされる。これにより MR が受けるビームは質、量ともに向上し、さらに MR 運転周期を短縮することにより、設計出力 750kW を達成する予定である。

ビーム強度を上げる際には、ビームロス量の低減化を図り、加速器装置そのものを過大に放射化させないことが重要である。リングの全周に配置した計 216 本の比例係数管式ビームロスモニタ (BLM) は、ビームが電磁石などの機器に衝突する際に発生する放射線を観測するが、その信号強度からビームライン上のビームロス分布を精度よく推定することは、反応過程の複雑さ、衝突する機器の構造の複雑さから困難である。加えて加速器運用上はビームロス量よりむしろビーム停止後の機器の残留線量率のほうが重要である。BLM の信号強度と機器の残留線量率との相関を調査することのほうがより本質的であるため、ビーム運転を停止するメンテナンス時には、サーベイメータで機器の残留線量率を詳細に測定している。サーベイ結果と運転パラメータとの相関を調べ、次の運転にフィードバックしている。

破損した機器の入れ替えなどをするトンネル内作業で、作業エリアの空間線量率や対象となる機器の表面線量率が高い場合には、線量率がハンズオンメンテナンス可能なレベルに低下するまで放置しなければならない。余分な冷却時間はメンテナンス時間を増加させ、結局加速器の稼働率低下を招くことになる。

現在、最も空間線量率が高いコリメータエリアで

は、時間的な推移も調査している。将来の放射化レベルを推定するためには、その減衰特性を調べるのが重要だからである。メンテナンス時に想定する最大線量率と冷却時間から、許容されるビームロス量を推定し、運転に適切な制限を与えることは J-PARC のような大強度ハドロン加速器の運用上、本質的に重要であると思われる。

本報告では残留線量率測定結果を紹介し、特にコリメータエリアで測定した線量率の時間推移の解析結果を紹介する。評価式で得られた結果をもとに将来の線量率予測を評価した結果も示す。

2. 残留線量率測定：全周サーベイ

ビームロスによる機器の放射化を監視するため、2012 年の夏期長期メンテナンス期間中の 7 月 11 日から機器表面の残留線量率測定を行っている。測定器は CANBERRA 社製 RADIAGEM2000 を使用している。比較的長期のメンテナンス時期では、放射化レベルが高い機器についてリング全周にわたりくまなくサーベイを行なっている。

Figure 1 は 2012 年 11 月 13 日、ビーム停止後 1 日の残留線量率測定結果である。ビームロスポイントを特定するため電磁石入口および出口の真空チャンバーを各々上下左右、計 8 箇所測定している。図中には特に顕著な放射化が観測された機器を示している。最も線量の高いエリアは入射直線部であり、第 1 アーク部のアドレス 20 番地付近から 50 番地付近にかけて線量は急激に低下している。QFX40 は第 1 アークのディスパージョンピークポイントであり、つねに入口のビーム進行方向左側 (加速器内側) が高線量になっている。これらの放射化は入射直線部のコリメータで散乱された低エネルギー粒子が原因と思われる。また、QFX98, 105, 170, 198 はともにディスパージョンピークポイントであり、出口の加速器内側が常に高線量である。これらの電磁石で

kenichirou.satou@j-parc.jp

はダクト形状を角ダクトに変えているため出口がアパーチャー不足になっており、低エネルギー成分がビームロスを引き起こしていると考えられる。

半日程度の短期停止の場合は測定時間が限られて

いることと、なるべく測定者の被曝を抑えるため、重点監視ポイントである RF 空洞、ディスパージョンピークポイント、ビームロスが特に顕著であったポイントのみを測定している。

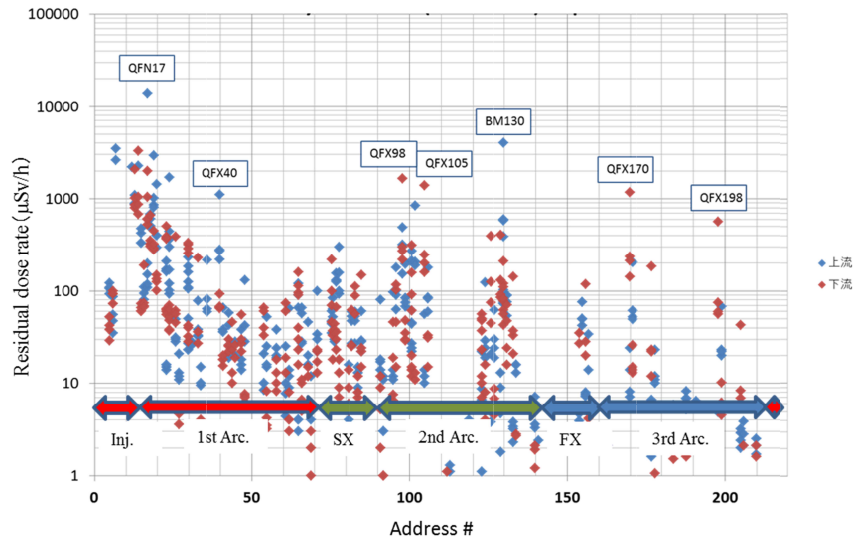


Figure 1: On contact measurements of residual dose rate of the accelerator components on Nov. 13, 2012, 1 day after the beam stop of FX operation of 196kW output to neutrino experimental facility. The horizontal axis shows MR address number, 1~216. Measurements were made at in total 8 points on surface of an each magnet vacuum chamber, up, down, left, right side of the entrance and the exit. The blue and red points show data from the entrance and the exit side, respectively.

3. 残留線量率測定：コリメータエリア

3.1 残留線量分布

入射直線部のコリメータエリアではビーム停止後の経過時間（冷却時間）と残留線量率の変化を調査している。ビームロス量と運転期間、冷却期間の相関を調べることで、将来の放射化レベルを精度よく推測することを目指している。2013年5月8日14:00、ビーム停止後5時間後の測定結果をFigure 2に示す。図中に測定機器の写真も示している。測定番号1~8については機器表面と連絡通路を挟んで反対側リング外周側の壁表面を測定し、入射キッカーおよびQM6、7は機器表面から60cm離れた場所を測定した。測定の高さはビームラインに統一した。

コリメータエリアではコリメータ容量増強のため、2012年夏期メンテナンスでコリメータの増設が行われた^[1]。2013年の夏期メンテナンスでもコリメータ増設が予定されている。測定番号1、2、7のコリメータおよび測定番号5、6の門型遮蔽は新たに設置された機器である。門型遮蔽内部にはコリメータが設置されている。

3.2 Sullivan-Overton 式

残留線量率の推移を評価するため、以下のSullivan-Overton式^[2]を使用した。

$$\dot{D}(t) = B\phi \ln \left[\frac{T+t}{t} \right] \quad (1)$$

この式はある加速器運転期間 T に一定のフラックス ϕ で発生するビームロスが照射ターゲットである加速器構成装置（電磁石、コリメータなど）に誘起する残留線量率の時間推移を表す。 t は運転停止後からの時間である。機器毎のフラックスを求めることは現在不可能であるため、ここでは電流モニタ（DCCT）出力の差分から決定した入射時ビームロス電力（入射ビームロス）を参照することとした。入射ビームロスは主に入射直線部に設置されたコリメータで発生している。 B は比例係数であり、

- 1) ターゲット幾何学形状
 - 2) ターゲット構成物質
 - 3) ビームロス時の状況（エネルギー、ターゲット内の衝突場所）
 - 4) コリメータバランス
- に依存する量である。2) はコリメータの大部分が鉄であり、電磁石は銅製のコイルには冷却用の水や絶縁材料が含まれるが、質量の大部分は鉄である。3) は入射直線部のビームロスは大部分が入射直後に発生するのでエネルギーは 3GeV である。コリメータ内のビームロス発生位置は、ビーム外縁部を削るために内部に設置されたコリメータ Jaw に限定される。また、4) 極電磁石や入射キッカー電磁石などの機器についても、定常的なビームロスは最もアパーチャーが狭いところで発生することになるため、その位置は機器毎決まっていると考えられる。一方4) については、各コリメータのビームロス量は各コリメータの Jaw の抜き差しでコントロール

する（コリメータバランス）ため機器調整毎に変化する。機器で発生したビームロスが多量の高速中性子を発生させ、その高速中性子が下流の装置を放射化させるため、コリメータバランスの変化は付近の機器の放射化に複雑に寄与することになる。ただし、以上の要因は運転パラメータが安定なら機器毎の定数として規定できるため、一旦その数値が得られたら入射ビームロスを参照して残留線量率の推移が評価できる。

CERN-PS 電磁石からの残留線量率の解析に Sullivan-Overton 式が使用され報告されている^[3]。ビーム停止後 2000 時間までのデータと比較しており、評価式は最大 2 倍程度の過小評価である。Sullivan-Overton 式は $t > 12$ 分、 $T + t < 500$ 日の範囲で有効である^[4]。

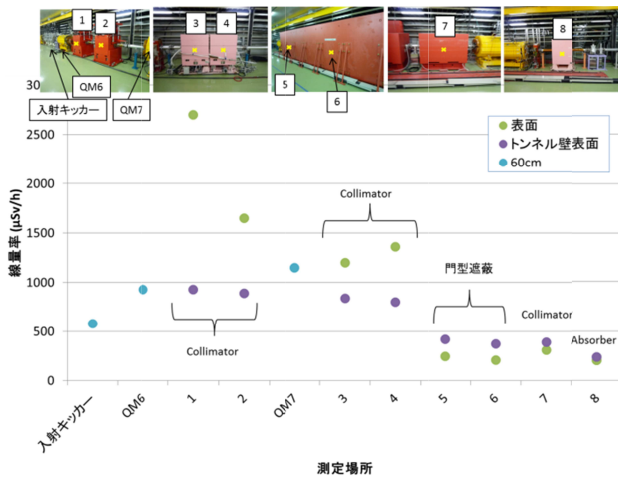


Figure 2: Residual dose rate measurements at the collimator area of the injection straight line, 5hrs after the beam stop, on May 8, 2013. Measurements were made at 60cm apart from an injection kicker magnet and QM6 and QM7 (blue points), and on contact for collimators, 1, 2, 3, 4, 7, an absorber 8, and an outer iron shield 4, 5 (green points), and on contact on the tunnel wall in from of the points 1~8 (purple points). The height of the measured points were all that of the beam line.

3.3 測定結果と Sullivan-Overton 式による評価

Figure 3 に測定値と、Sullivan-Overton 式の変換係数 B をフリーパラメータとして評価した式を示す。図中の数字は Figure 2 で示した測定番号を表している。以降測定番号 X の図を Figure3- X とする。横軸は 2013 年 3 月 6 日 9:00 を時間原点にとった経過時間である。Table 1 には評価に用いた加速器運転期間をまとめている。

MR 加速器には速い取り出し運転(FX)と遅い取り出し運転(SX)があるが、SX の出力は現在 24kW 程

度であり、コリメータエリアの入射ロスは BLM 出力の比較から FX の場合の 1/5 程度である。さらに運転周期 (FX:2.64s, SX:6s) を考慮すると影響は 1/11 程度である。このため影響は少ないとして無視した。また、A 期間以前の運転の影響については 3.4 にまとめた。

Table 1: Summary of the beam operations used for estimates of the Sullivan-Overton equation, where “Date_Start”, “Date_Stop”, P(W), Time(hr) means beam operations start and stop date, averaged injection beam loss power in unit of W, and time passage from 9:00 of Mar. 6, 2013. *means Preliminary value.

	Date_Start	Date_Stop	P(W)	Time(hr)
A	09:00/19/10/2012	09:00/12/11/2012	357	-3345~-2769
	09:00/28/11/2012	09:00/12/12/2012	279	-2343~-2064
	00:00/18/01/2013	00:00/22/02/2013	303	-1152~-336
	00:00/27/02/2013	09:00/06/03/2013	473	-177~0
	02:00/19/03/2013	09:00/19/03/2013	351	305~312
B	22:00/19/03/2013	05:00/27/03/2013	256	325~500
C	21:00/27/03/2013	09:00/03/04/2013	300*	516~648
D	21:00/03/04/2013	07:00/12/04/2013	300*	658~860
E	21:00/02/05/2013	09:00/08/05/2013	300*	1354~1486
F				

Figure3-1 の $t=174.5$ 時間の測定値 (赤丸で示す) $345 \mu \text{ Sv/h}$ は、1 時間後に測定した値が $526, 520 \mu \text{ Sv/h}$ (2 回測定) であることから数値の読み取りミスが疑われるため、Sullivan-Overton 式の評価には使用しないこととした。評価式で使用した変換係数 B を Figure 4 に示す。

もっとも残留線量率が高かった Figure 3-1 では、評価式と測定結果との比較から運転停止後 5 時間では評価式は 1.5 倍程度の過小評価であり、運転停止 319.5 時間後 ($t=977.5$ 時間) では 1.15 倍程度過大評価となった。運転停止後 320 時間以内のデータは Sullivan-Overton 式が 50% 程度の誤差で再現している。一方 Figure 3-5~7 の $t=658$ 時間以降のデータは評価式との誤差が大きい。E、F の期間では門型遮蔽内部のコリメータにビームが当たらず、変換係数が小さくなっている。このため E 期間以前の運転による残留線量率推移の評価誤差の影響が相対的に強くなり、この期間の評価に大きな誤差が生じたものと思われる。

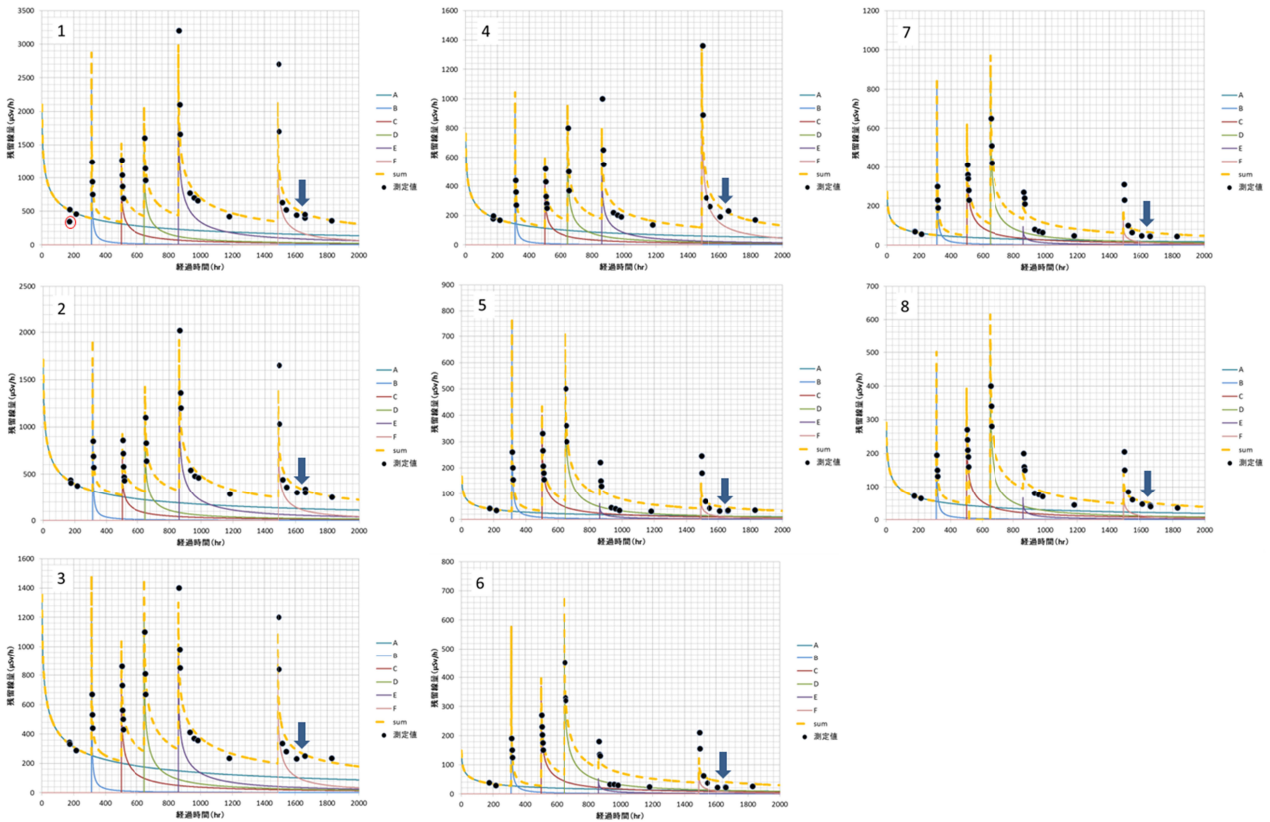


Figure 3: On contact measurements of residual dose rate transition after beam stop at the points 1~8 of the collimator area and the fitting results of Sullivan-Overton formula (eq. 1), where the red circled data was excluded for this estimation. Each solid line corresponds to the contribution of the FX beam operations after 2012 summer long shut down, period A~F (see text), and dashed lines are sum of these. Horizontal axis shows time passage from 9:00 of Mar. 6, 2013. Note that the equation is only valid for dose rate transition after beam stop, so the behavior during beam operation is incorrect. The arrows in the figures shows the SX beam operation during 21:00 of May 13, 2013 to 9:00 May 15, 2013, that is $t=1618\sim 1654$. After beam stop, some buildup can be seen.

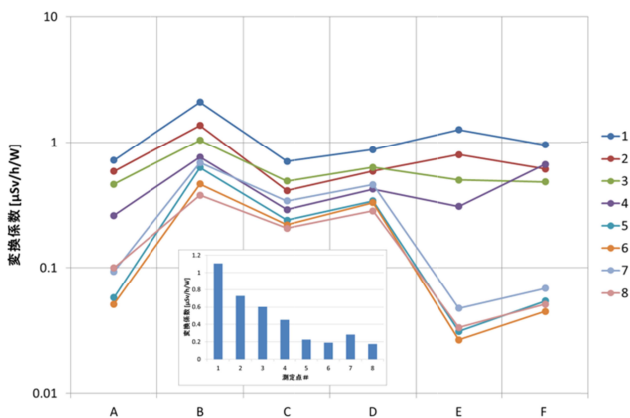


Figure 4: Fitting results of the conversion factor, B value of eq. 1, derived from the measured residual dose rate from each FX operation period, A~F. The bar graph shows the averaged values through A~F.

3.4 過去 (A 期間以前) の履歴

MR 加速器が稼働して以来使用している機器については A 期間以前の履歴が残っている。この影響

を Sullivan-Overton 式を使用して評価する。最初に MR 加速が行われた 2008 年 12 月 23 日から東日本大震災が発生した 2011 年 3 月 11 日、約 20000 時間の内、実運転時間は約 27%であった(Duty=27%)。2013 年 3 月 6 日 9:00 時点 (2011 年 3 月 11 日を基準として約 18000 時間後) の線量率を推定する。変換係数 B は Figure 4 から $0.5 \mu\text{Sv/h/W}$ を採用する。また、入射ロスパワーは現在の運転が 300W 程度であり、ビーム強度が上がるとともに徐々に増加してきたため、全期間を通じて平均 150W 程度であった。よって残留線量は以下のように評価できる。

$$\dot{D}(t) = \text{Duty}(= 0.27) \cdot B(= 0.5) \cdot \phi(= 150W) \cdot \ln\left[\frac{20000\text{hr}+18000\text{hr}}{18000\text{hr}}\right]=15 \mu\text{Sv/h}$$

Sullivan-Overton 式は照射時間と冷却時間が 500 日(12000 時間)を超えると誤差が徐々に大きくなり、10000 日(240000 時間)では変換係数 B を実際より 30%程度引き下げることになる。厳密な評価は難しいが、おおよそ $15 \mu\text{Sv/h}$ 程度が A 期間以前の履歴であると言える。これを測定番号 3、4 の測定値から差し引き再度変換係数 B を評価すると 10%程度低い値になるため、影響は 10%程度であると

評価できる。

3.5 SX 運転の影響

Figure 3 の矢印は SX 運転期間 (2013 年 5 月 13 日 21:00~2013 年 5 月 15 日 9:00 $t=1618\sim 1654$) を示しており、運転停止 5 時間後の残留線量率の増加が観測されている。E 期間の 5 時間後のデータと比較すると測定場所により違いがあるが 1/30~1/300 程度である。

3.3 で記載したように、SX の影響は FX の場合の 1/11 程度である。さらに E 期間の運転時間は 202 時間に対して、この期間の SX 運転は 36 時間であり、運転時間による効果を計算すると $\ln[(36+5)/5]/\ln[(202+5)/5]=1/1.9$ となる。さらに、9:00~21:00 までは加速器調整運転を行っており、連続運転は行っていないため、Duty は 50% 程度である。これらから影響はトータル 1/42 程度であり、測定結果は妥当であると言える。

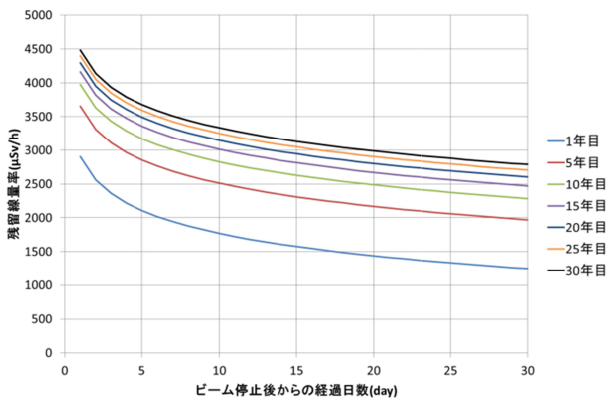


Figure 5: Future residual dose rate calculations at the collimator area assuming that a year operation is such that 335 days for a continuous beam operation with an injection beam loss of 1000W and the rest 30 days for long beam shut down for maintenance. The conversion factor is assumed to be $B=0.5\mu\text{Sv/h/W}$. The lines show the dose rate estimates after 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 years repetitions. The horizontal axis means time after beam stop at maintenance stage.

4. コリメータ部の残留線量率予測

得られた結果からコリメータ部の残留線量率を以下の計算条件で評価する。

- ・変換係数 B : $0.5\mu\text{Sv/h/W}$ とする。Figure 4 から場所によって 2 倍程度の変動がある。
- ・入射ビームロス : コリメータエリア全体で常に 1000W であるとする。
- ・運転周期 : 11 ヶ月間 duty100%の連続運転を行い、長期メンテナンスとしてビーム停止期間 1 ヶ月を仮定し、この運転周期を毎年繰り返すとする。これ以前の照射履歴によるオフセットは無視する。

3.4 で議論したように運転期間と冷却期間が 500 日を超えると Sullivan-Overton 式は実際と誤差が大きくなるが、10000 日(27.4 年)で 30%程度の誤差で

ある。

繰り返し運転開始後 1、5、10、15、20、25、30 年目の計算結果を Figure 5 に示す。15 年繰り返すとほぼ一定値に近づき、全メンテナンス期間の 30 日間冷却しても 2.47mSv/h であり、25 年後にはビーム停止後 15 日で 3mSv/h を超える。また、冷却期間に比べて運転期間が長いいため、30 日メンテナンス期間内での線量率の減少は限定的である。ビーム停止後 1 日後と 30 日後の線量率を比較すると 1 年後のデータは 43%に減少し、30 年後のデータでは 62%に減少する。

5. まとめ

2012 年 7 月 11 日以降、残留線量率を測定してきた。機器表面線量率分布を詳細に調査し、運転パラメータと比較することによりビームロスメカニズムの把握に勤めている。残留線量率を定量的に議論するためには崩壊様式の理解が必要不可欠である。Sullivan-Overton 式はその助けになる。

入射直線部のコリメータについて機器の表面線量率の時間推移を詳細に調査し、Sullivan-Overton 式で評価した結果、変換係数は場所と運転期間によってファクター 2 程度のばらつきがあるが、 $0.5\mu\text{Sv/h/W}$ 程度で見積もれることがわかった。この変換係数をもとにコリメータエリアの残留線量率を推測することが可能になり、一例として 1000W 入射ロスを 11 ヶ月運転 1 ヶ月メンテナンスで繰り返した場合の評価を行った。計算結果は 15 年後には 30 日の冷却後でも 2.47mSv/h である。

コリメータ部以外の機器における変換係数の導出は今後の課題である。また、加速器運転では残留線量率ではなく BLM 出力を参照するので、BLM 出力との相関を調べることは本質的である。BLM 出力と運転停止後の残留線量率推移の相関がとれれば、その出力に最適なアラームレベルを設定し、マシン・プロテクション・システム(MPS) に物理的に意味のあるアラームを渡すことが可能になる。

参考文献

- [1] M. Shirakata *et al.*, Proceedings of IPAC'11, San Sebastian, Spain, 2011 (3496-3498).
- [2] Sullivan, A.H., Overton, T.R., Health Phys. 11 (1965) 1101.
- [3] Gobel, K., Ranft, J., Stevenson, G.R., radiation Problems Encountered in the Design of Multi-GeV Research Facilities, Rep. 71-21, CERN, Geneva (1971), Chap. VIII.
- [4] M. Barbier, Induced Radioactivity, North Holland (1969).