

J-PARC MR コリメータ下流部の放射線モニタリング

RADIATION MONITORING IN THE DOWNSTREAM AREA OF J-PARC MR COLLIMATORS

白形政司^{#,A)}, 高野淳平^{A)}, 上川将章^{B)}, 米本和浩^{B)}

Masashi Shirakata^{#,A)}, Junpei Takano^{A)}, Masaaki Kamikawa^{B)}, Kazuhiro Yonemoto^{B)}

^{A)} KEK/J-PARC

^{B)} KANDENKO CO., LTD

Abstract

In a machine handling high energy hadron beams such as proton accelerators, high energy neutrons and γ rays are generated when beam loss occurs, which gives problems to peripheral devices. Therefore, equipment used for proton accelerators must be designed considering radiation resistance, from material to structure. Usually, radioisotopes obtained from nuclear reactors have been conducted for radiation resistance tests of such equipment. However, only the gamma rays can be used in the test using radioisotopes, and the energy is not as high as several MeV or less. Neutrons generated by the beam loss in the accelerator have a broad spectrum from thermal neutrons to fast neutrons with GeV order energy and gamma rays also have GeV order energy, which is very different from those obtained by nuclear decaying. Also, depending on the location, charged particles such as protons and π mesons may be directly blown. Since J-PARC MR conducts an irradiation test under an actual proton accelerator environment, we have developed a radiation proof test area from 2012 on the downstream side of a beam collimator which can obtain a large amount of radiation by causing beam loss to occur. Here we show the method and observation data accumulated so far about the monitoring of the radiation environment at the test area.

1. はじめに

J-PARC (Japan Particle Accelerator Research Complex) とは、茨城県那珂郡東海村にある多目的大強度陽子加速器施設である。陽子加速器ではビームの一部が軌道を外れビームパイプなどの構造物に衝突すると、そこで核反応により多量の中性子や高いエネルギーの γ 線を発生して周囲の物質を放射化する。電子機器などではシリコンチップの結晶構造に損傷を与え、装置を使いものにならなくしてしまう。そのため、陽子加速器などのハドロンを取り扱う施設では、放射線に耐性を持つ素材やデバイスを使用することが求められ、加速器トンネル内へ持ち込む前に耐放射線性の試験が実施される。通常、耐放射線性の試験は放射性同位元素を用いて行うが、放射性同位元素から得られる放射線は特定のスペクトルを持った γ 線がほとんどであり、陽子加速器内のビームロスからくるものとは大きく異なっている。そこで J-PARC MR (Main Ring) では、陽子加速器本体の一部に照射場を設け、実際の放射線環境下で耐放射線性試験を行える環境を整備[1]してきた。線源となるビームコリメータの直下流にある床方向を保護するための遮蔽体を試験テーブルとして流用し、高中性子線環境下でのデバイスの試験を行ってきたのである。

近年、原子炉用途などに向けて、耐放射線性のある LED 照明が開発されている。コバルト 60 を用いた試験では高い耐放射線性能が得られており、陽子加速器環境下での試験が大いに期待された。J-PARC MR の照射試験場は、高照射試験テーブル、中間エリア、穏健エリアの三つがある。耐放射線性 LED 照明は、穏健エリアで

試験を開始することとした。穏健といっても他の大部分の場所に比べればはるかに多量の中性子線や γ 線が飛び交う領域であり、ここで使用に耐えれば、陽子加速器のほとんどの場所で使用可能と判断できる。

2. 照明のセットアップと線量見積もり

Figure 1 に LED 照明の取り付け状況を、Fig. 2 に照射試験場の全体構成を示す。照射試験場は、線源となるビームコリメータの直下流に設置された高照射試験テーブル、その下流のアブソーバ群を含む中間エリア、一般の機器のみが並ぶ穏健エリアで構成される。LED 照明は、穏健エリアのリング内側、壁近くに試験場所を選定した。ビームラインから約 193 cm 内側で、122 cm 高い場所



Figure 1: Setup of the Radiation-resistant LED lighting.

[#] masashi.shirakata@kek.jp

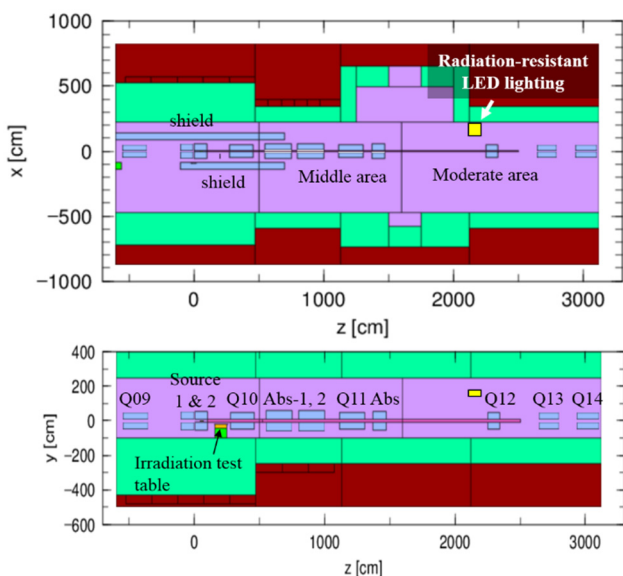


Figure 2: Schematic view of irradiation test area.

に取り付けてある。放射線源となるビームコリメータ(Col-3)からは、その中心を原点として 2145 cm 下流(すべて器具中心に対して)である。

照射試験エリアにおける中性子線や γ 線の分布は、PHITS version 3.20[2]を使用して予測する。線源は、2017年7月まで使用した Col-3 と、2017年10月から利用を開始した Col-H の二種類がある。Col-H は、2017年のメンテナンス期間に Col-3 を置き換えたものである。Col-3 は線源となる jaw を二つ持っており、そのバランスによって下流に放射される二次粒子の分布が変化する。Col-3 では上流の jaw をメインに使い、下流の jaw は補助的な使用としてきた。一方、Col-H はひとつの jaw を持つ単純な構成であるため、不確定な要素は少ない。

3. 線量測定

3.1 線量計のセットアップ

Figure 3 に、中性子線、 γ 線の吸収線量を測定するためのアルミ板、OSL 線量計の取り付け状況を示す。測定点は、①ビームラインに面した側板上、②照明の天花上で上流側、③同下流側、④下流に面した側板上、の四箇所を選定した。中性子線量を測るアルミ板は厚さ 1 mm、50 mm 角の大きさで、長期観測用とした。 γ 線を測る OSL 線量計には、その利便性から長瀬ランダウア(株)の nanoDot[3]線量計を採用した。これは厚さ 2 mm、10 mm 角と小型で、アルミ板の上に養生テープで簡単に取り付けることができる。OSL 線量計は繰り返しての使用が可能であるが、積算線量で 50 Gy まで使用する[1, 4, 5]こととし、その増加量の状況から二週間おきに交換することとした。

3.2 中性子線量

LED 照明に直接配置したアルミ板は、2016年10月11日から2018年7月4日まで連続して測定を行った。Table 1 に、アルミ板の Na-22 同位元素測定の結果を示す。下流に向けて取り付けられたものは、他に比べて若干量が少ない。中性子は上流から飛んでくるので、照明本体

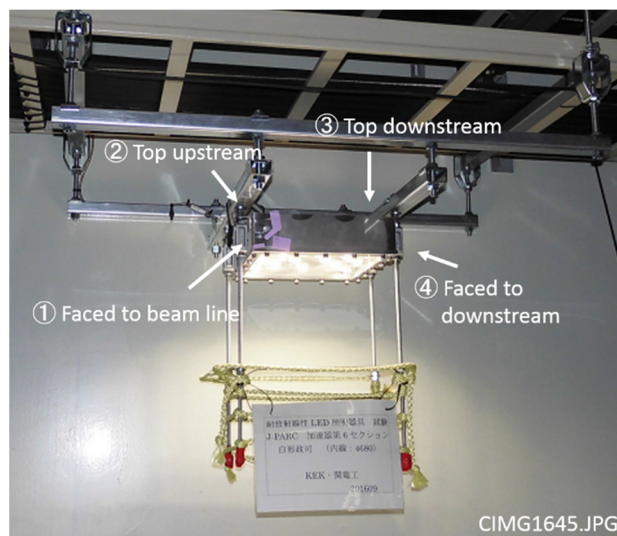


Figure 3: Arrangement of aluminum plates and OSL dosimeters. Four plates and dosimeters are set on the LED test light.

の遮蔽効果が見えていると思われる。生成量に対応する中性子束密度は、アルミ板 002, 003, 004 の平均から、ほぼ $1.9e+13 \text{ cm}^{-2}$ と見積もられる。アルミ板は線源直下流の照射試験テーブルにも設置しており、線源の強さを直接観測している。2016年10月11日から2017年10月10日までの期間は、PHITS による見積もりと測定でコンシステントであった。2017年10月から2018年7月4日までの運転については、取り出したアルミ板の残留線量がまだ高いことから、測定待ちとなっている。

Table 1: Measured Na-22

Measured position	Plate #	Volume [cm ³]	Dose	
			[Bq]	[Bq/cc]
Faced to beam line	002	2.75	16.6±0.85	6.04±0.31
Top upstream	003	2.97	17.3±0.86	5.83±0.29
Top downstream	004	2.80	15.9±0.83	5.68±0.30
Faced to downstream	001	2.28	9.8±0.65	4.30±0.29

この期間の加速器の運転状況を Fig. 4 に示す。これは線源となるビームコリメータのすぐ下流にある Q10 に取り付けられているビームロスモニター(BLM010)の信号を4時間毎に積算したものであり、線源からの二次粒子量にほぼ比例[6]する。途中に夏期メンテナンスを含むいくつかのビーム停止期間と遅いビーム取り出し運転(SX operation)期間があり、それらの期間中はコリメータでの二次粒子生成がまったく無いか、あるいは少ないため、LED 照明における吸収線量も少なくなる。対して、速い取り出し運転(FX operation)時はコリメータの負荷が大きく、試験機材へ順調に中性子線や γ 線を供給している。PHITS により見積もられる単位時間当たりの中性子線束密度にビームロス量と運転時間を乗じて得られる総中性

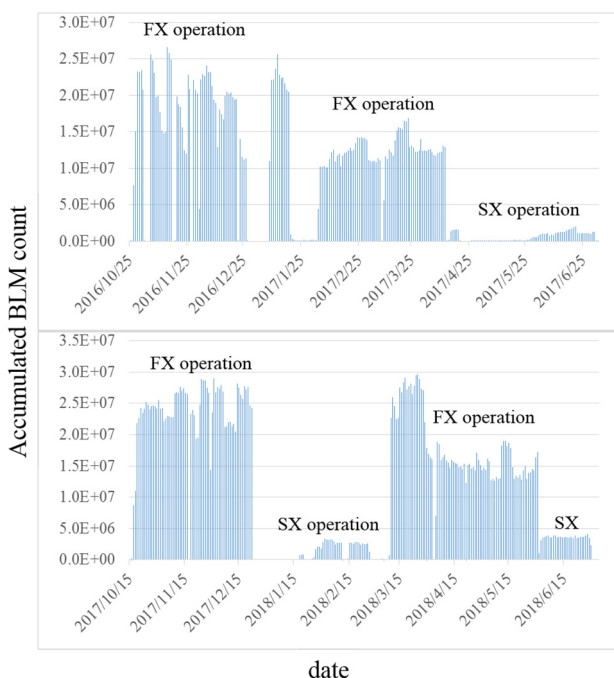


Figure 4: Accumulated counts of BLM010.

子線束密度の予測値は $6.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ であり、測定の方が3倍ほど多くなっている。これはコリメータの他に、LED照明の近くに中性子源となるビームロススポットがあることを示唆している。

3.3 γ 線量

2016年10月11日から2018年7月4日までの、2年間の γ 線積算線量の推移をFig.5に示す。図中の1~4が、Fig.3における①~④に対応している。N1, N2は中間エリア(Abs-1の上)における測定である。LED照明の設置場所に比べて、3倍強い。中央の平らな部分は、2017年度の夏期メンテナンス期間である。また、遅いビーム取り出し運転(SX operation)においても照射場への線量の供給は少ない。LED照明における年間の予想吸収線量は272 Gyであり、1のラインを除いてほぼコン

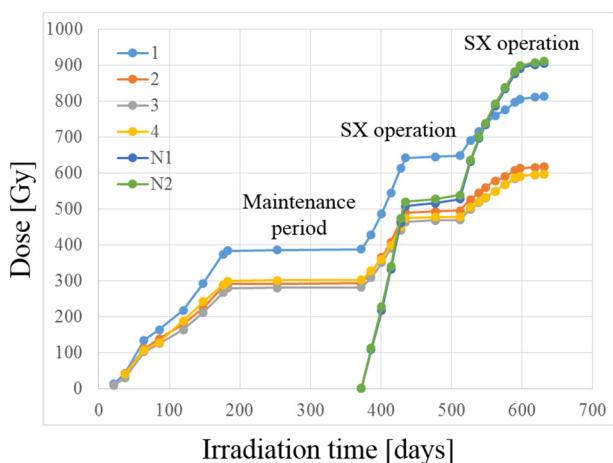


Figure 5: Exposed doses on the OSL dosimeters.

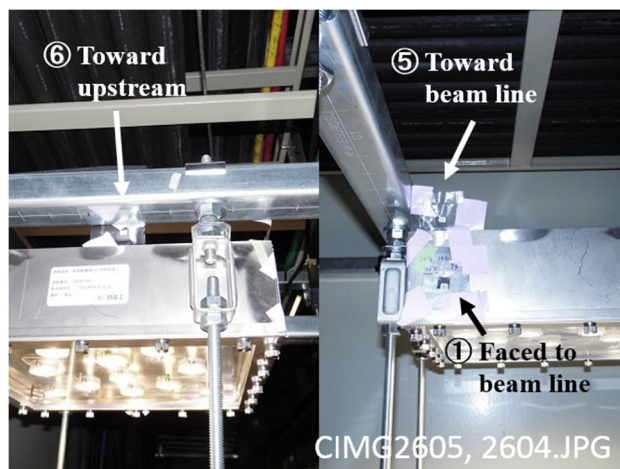


Figure 6: Arrangement of additional OSL dosimeters.

システマチックな結果になっている。

①での γ 線測定値が他に比べて有意に大きい理由を探るため、2018年5月10~24日の期間に、Fig.6に示す場所に追加の線量計を設置した。線源から線量計までの間に障害物が何も無いこと、背面からの照り返しが無いように中空に設置した。結果は⑤の場所で⑥に対して14%多くなっており、ビームラインに面して設置すると多くカウントされる状況が再現する。線量計に、指向性がある可能性が考えられる。

3.4 ビームロスモニターとの比較

OSL線量計は設置・測定まで含めて比較的手軽に扱えるが、何にせよトンネル内で線量計を交換するなどの現場作業が必須である。交換作業は比較的短時間であるが、 $100 \mu\text{Sv/h}$ 程度の残留線量がある場所での現場作業はなるべく減らしたい。そこで、LED照明近辺のBLM012がモニタリングに使えるかを検証した。3.2節でビーム運転状況を見積もったのと同じ手法を用いて線量計設置期間のカウント積算値をとり、線量計による吸収線量の値と比較した。結果をFig.7に示す。

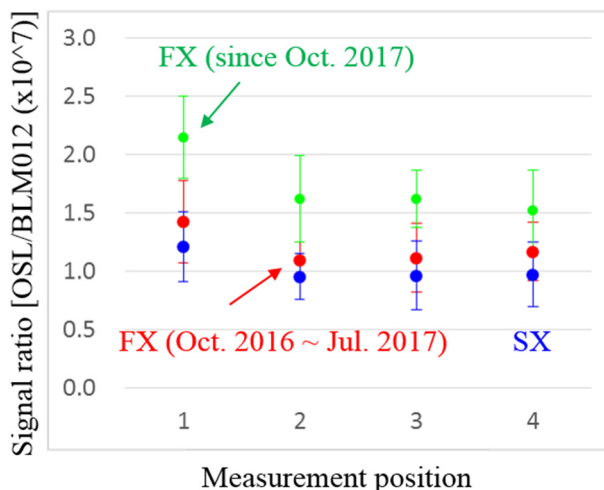


Figure 7: Exposed dose ratios with respect to accumulated counts of BLM012.

ビームコリメータの負荷が小さい遅い取り出し運転時は、係数も小さい。また、同じ速い取り出し運転でも 2017 年 10 月以降は係数に変化が見られ、ロスモニターの値に対して吸収線量が増えている。これは LED 照明の場所で γ 線のスペクトルが運転モードや線源となるビームコリメータの構造で変化するためと考えられる。Col-3 と Col-H では構造が異なり、Col-H では二次粒子が下流へ抜けやすくなっているため、 γ 線スペクトルの中でエネルギーの高い成分が増えていると思われる。いずれにせよ、現状では 1σ で 30%ほど誤差があるので、BLM のカウント積算値をもって吸収線量を評価するのは難しい。今後、ばらつきが小さくなるかを注視する。

3.5 ロススポット

最下流のアブソーバと LED 照明の間には、Fig.8 に示す様にポンプポートとゲートバルブを組み合わせたユニットが存在する。ゲートバルブの周辺には Fig.9 に示す様な強い残留放射線が確認されており、ここが高エネルギー中性子源になっていると考えられる。実際、ポンプポートとゲートバルブの上下流フランジの残留線量を測ると Table 2 のようになっており、ビームロスが水平方向であり、なおかつ通路側で起こっていることがわかる。ゲ-

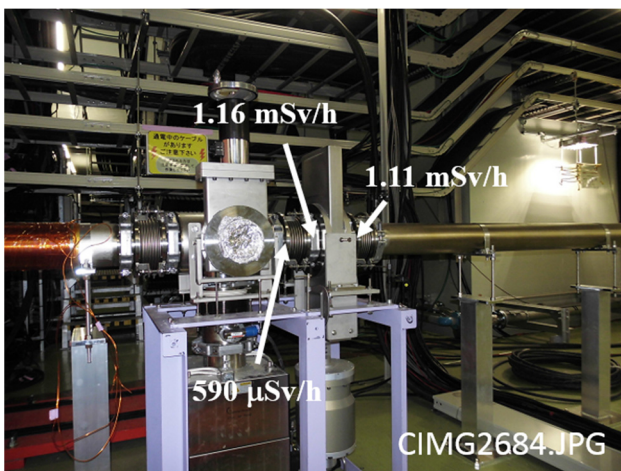


Figure 8: Pump port and GV close to the LED test light. The residual radiation level was measured at 23rd July 2018.

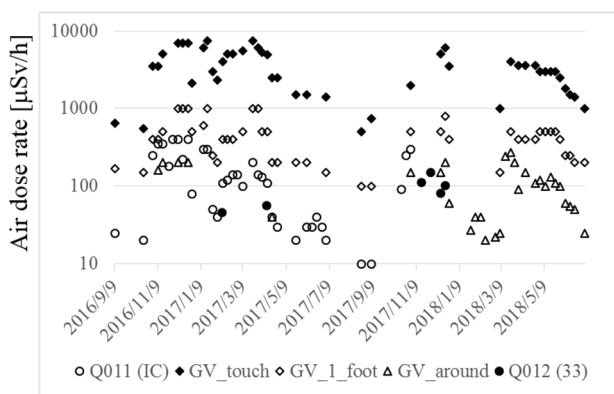


Figure 9: Dose rates around the GV between Q011 and test LED light.

Table 2: Residual Doses

Measured position	Path	Dose [$\mu\text{Sv/h}$]		
		Top	Rack	Bottom
Pump port (u)	451	266	343	276
Pump port (d)	590	321	418	330
Gate valve (u)	1.16×10^3	481	776	529
Gate valve (d)	1.11×10^3	490	717	558

トバルブ上流通路側で 1.16 mSv/h の高い残留放射線が確認されており、ここがロススポットであると認められる。

Fig.10 にポンプポート、ゲートバルブ周辺の、ダクトの詳細を示す。これによると特定の場所でアーチャーが狭くなっているということではなく、ベータatron位相から上流のコリメータ Col-C で散乱された陽子がここでロススポットをつくっている可能性が高い。このロススポットによる効果については、今後定量的な評価を行っていく。

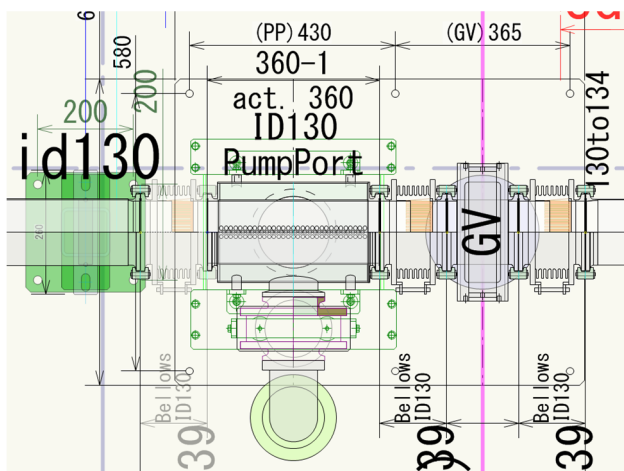


Figure 10: CAD drawing of the pump port and GV section.

4. まとめ

- J-PARC MR のビームコリメータ下流部を、照射試験場として利用している。
- 耐放射線性 LED 照明の試験を、穏健エリアにて 2016 年 10 月から継続中である。
- 吸収線量のモニタリングは、以下の手法をとる。
 - ・中性子線量にはアルミ板による Na-22 測定を利用。
 - ・ γ 線量には OSL 線量計を利用。
- BLM を使った常時モニタリングは、いまのところ誤差が大きい。
- LED 照明上流のゲートバルブが、意図しない二次粒子線源となっている。
- ゲートバルブ上流における、ロススポット発生の詳細については調査中。
- 2018 年 7 月 4 日に取り出したアルミ板の結果が出次第、Col-H によるシミュレーションとの比較を行って線源の強さを確認する。

謝辞

本稿の執筆に際し、アルミ板中の Na-22 測定を行っていただいた J-PARC 放射線安全セクションの中村一氏、光野冬樹氏に感謝します。また、1 Gy を超える領域での OSL 線量計の校正データを提供していただいた、橋本義徳氏に感謝します。

参考文献

- [1] M. J. Shirakata, Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May 2017, THPVA097, pp. 4689-4691;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/thpva097.pdf>
- [2] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018);
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2017.1419890>
- [3] H. Hayashi *et al.*, “High accuracy measurements by consecutive readings of OSL dosimeter”, Medical Imaging and Information Science, Maebashi, Gunma, Japan, Vol.31 No.2, 2014, pp. 28-34;
https://www.jstage.jst.go.jp/article/mii/31/2/31_28/_article/-char/en
- [4] T. Okazaki *et al.*, “Evaluation of Dose Response Characteristics of a Small Type Optically Stimulated Luminescence Dosimeter Irradiated with More than 10Gy,” in Proc. ISR2018, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 2018, (to be published).
- [5] T. Okazaki *et al.*, Proc. of PASJ15, Nagaoka, Niigata, Japan, August 2018, THP137 (this conference)
- [6] K. Satou *et al.*, “New data acquisition system for beam loss monitor used in J-PARC main ring”, NIM in Phys. Research, A 887 (2018) pp. 174-183;
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218300287>