

アラニン線量計を用いた大強度陽子加速器周辺の線量測定の基礎的検討

FEASIBILITY STUDY ON DOSIMETRY USING ALANINE DOSIMETER AROUND HIGH-INTENSITY PROTON ACCELERATOR

山口英俊^{#, A)}, 橋本義徳^{B)}, 清水森人^{A)}, 山崎寛仁^{B)}, 中村一^{B)}, 白形政司^{B)}, 酒井浩志^{C)}, 黒澤忠弘^{A)}
Hidetoshi Yamaguchi^{#, A)}, Yoshinori Hashimoto^{B)}, Morihito Shimizu^{A)}, Hirohito Yamazaki^{B)}, Hajime Nakamura^{B)},
Masashi Shirakata^{B)}, Hiroshi Sakai^{C)}, Tadahiro Kurosawa^{A)}

^{A)} National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., LTD.

Abstract

Around the high-intensity proton accelerator in J-PARC, large amounts of neutron and gamma rays are generated by the high-intensity protons. Alanine dosimeters are capable of measuring very high doses at kGy level and have a potential to measure large amounts of radiation around the high-intensity accelerator. In this study, alanine dosimeters were installed around the accelerator in J-PARC to evaluate dose in a field with mixed neutron and gamma radiation. The dose around the main ring was measured over a period of two months. The RADMON and OSL dosimeters were used to measure the doses for comparison. As a result, doses of 0.8 - 2.7 kGy and 0.04 - 0.16 kGy were measured over two months at the high and low dose rate sites, respectively. The results of the alanine dosimeters were 1.3 to 1.6 times higher than the dose measured by the RADMON detector. Doses measured by the alanine dosimeter correlated better with the RADMON results than with the OSL dosimeters results.

1. はじめに

J-PARCの大強度陽子加速器では GeV レベルのエネルギーの陽子を加速させており、このような高エネルギー陽子がターゲットやコリメータ等の物体に衝突すると、中性子やγ線を発生させる。特に J-PARC の加速器は、1 サイクルあたり 10^{13} から 10^{14} 程度の非常に高いビーム強度（粒子数）を持つため、発生する中性子やγ線の量も非常に多い。加速器が設置されているトンネル内では、加速器制御や加速器稼働状況の監視のため、様々な機器や材料が設置されている。また、トンネル内には加速器の保守点検作業などのために人が立ち入る必要がある。このように、トンネル内の機器や材料の耐放射線性の調査や、放射線業務従事者の被爆管理といった必要があるため、トンネル内の線量をモニタリングすることが重要である。

加速器周辺では、線量の高いところでは 1 週間に数 kGy 程度の大線量が照射される過酷な場所がある。そのため、大線量を測定できる線量計が必要である。1 Gy 程度から 100 kGy 程度までのダイナミックレンジの広い線量計としてアラニン線量計がある。産業技術総合研究所 (AIST) では、滅菌などに使用される大線量測定のために、アラニン線量計を用いた線量測定法を研究している。アラニン線量計は化学線量計の 1 つであり、大線量の測定の不確かさが小さく、放射線照射後の信号が非常に安定であるため、大線量測定における参照標準線量計として使用されている。アラニン線量計のような化学線量計は、電氣的接続を用いた線量計（電離箱線量計や半導体線

量計）と異なりリアルタイムでの測定はできないが、大線量照射により電子部品が放射線による損傷を受けて使用不能になるといった問題を気にする必要がない。本研究では、アラニン線量計を用いて、ガンマ線と中性子線の混在場での実践的測定方法と、解析方法の信頼性を追求する。2019 年度には、J-PARC メインリング加速器の異なる二箇所にアラニン線量計を設置し、約二ヶ月間に渡って線量を測定した。比較のために、半導体検出器である RADMON や個体チップである OSL (Optical Stimulated Luminescence) 線量計での測定も行った。これらの測定結果を合わせて報告する。

2. 実験方法

2.1 アラニン線量計

本研究において、1 個のアラニン線量計は、1 個の容器に 4 つのアラニンペレットを入れたものを指す。容器は導電性のポリエーテルエーテルケトンで製作し、アラニンペレットを封入できるように蓋と本体に分けられている。アラニンペレットは市販のもの (Harwell Dosimeter Ltd., Batch No. BM616) を使用した。使用したバッチのアラニンペレットの公称寸法は、直径 4.8 mm ± 0.1 mm、高さ 2.8 mm ± 0.1 mm である。

2.2 ⁶⁰Co γ線場における照射

水吸収線量とアラニン線量計の信号値を紐付けるため、まずは AIST の ⁶⁰Co 標準場において 0.6 kGy までの線量範囲で照射を行った。AIST の ⁶⁰Co 標準場におけるアラニン線量計への照射の詳細については、すでに他の文献で述べられているため [1, 2]、そ

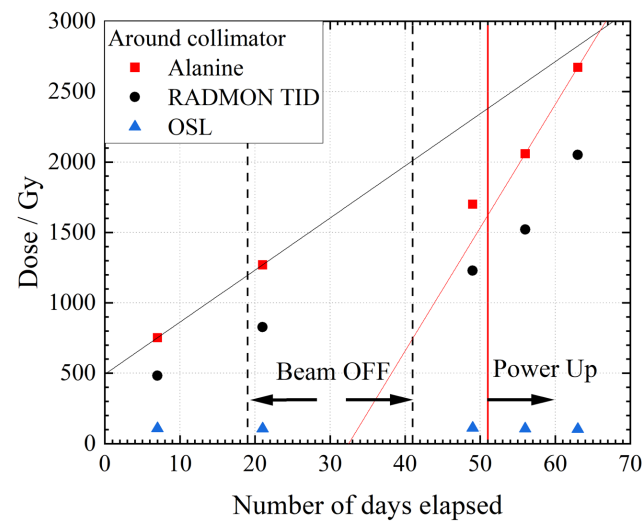
[#]hidetoshi.yamaguchi@aist.go.jp

Table 1: Date of Installation and Collection of Alanine Dosimeters

Dosimeter No.	Location	Date of installation	Date of collection
N01	Around collimator	2019/12/04	2019/12/11
N02			2019/12/25
N03			2020/01/22
N04			2020/01/29
N05			2020/02/05
N08	Around outer circumference	2019/12/04	2019/12/11
N09			2019/12/25
N10			2020/01/22
N11			2020/01/29
N12			2020/02/05

ちらを参照されたい。

校正曲線を 100 kGy まで拡張するために、量子科学技術研究開発機構 (QST) 高崎量子応用研究所の ^{60}Co 照射施設 (食品照射棟第 2 照射室) を利用して、照射を行った。最も線量計を線源に近づけることができる、線源からの距離 5 cm の位置において、照射した日時における公称線量率は 5.6 kGy/h であった。アラニン線量計の中心が線源中心の 22.5 cm の位置になるように、XYZ ステージと樹脂の棒を用いて高さを調節した。AIST で得た 0.6 kGy までの校正曲線と一部被るように、0.3, 1.0, 1.8, 3.2, 5.6, 10.0, 17.8, 31.6, 56.2, 100.0 kGy の線量点でアラニン線量計に照射を行った。各線量点でアラニン線量計 1 個に照射した。



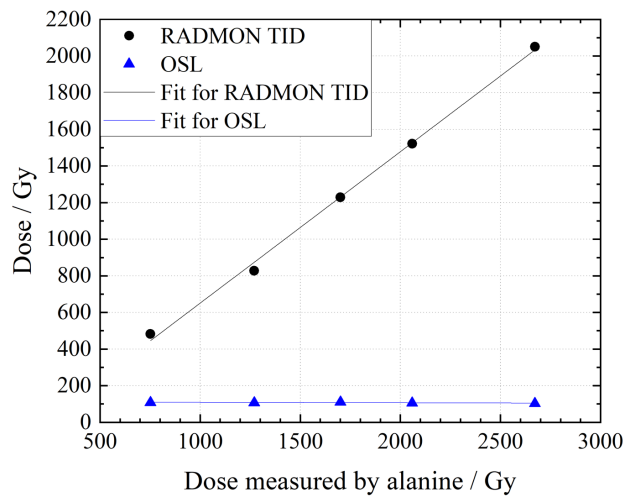
(a) Change in dose with respect to the number of days elapsed.

2.3 J-PARC における照射

J-PARC の加速器周辺の線量を測定するため、産総研から 14 個の未照射のアラニン線量計を J-PARC へ郵送した。アラニン線量計は、従来から RADMON が設置されていた Main Ring のリングコリメータ付近と、通路側外周付近の 2 箇所に設置された。コリメータ付近では線量率が比較的高く、通路側外周では線量率が比較的低いことが分かっていたので、広い線量範囲での測定可能性を検証するために、上記の 2 箇所で測定を行った。各場所でそれぞれアラニン線量計を 7 個ずつ設置した。アラニン線量計との比較のために、どちらの場所においても、アラニン線量計の側に同数の OSL (Optical Stimulated Dosimeter) 線量計 (長瀬ランダウア社製) を設置した。その後、加速器トンネル内に入ることができるタイミングで、年末年始等を除き 1 週間に 1 回を目安として、各地点でアラニン線量計と OSL 線量計を 1 個ずつ回収した。アラニン線量計を設置した日と回収した日を Table 1 に示す。設置日から回収日までの経過日数は、7 日から 63 日の間であった。アラニン線量計は回収の都度、産総研に返送された。OSL 線量計は、KEK 所有の microStar (長瀬ランダウア社製) を用いて測定された。測定期間中、RADMON を使用してデータをリアルタイムで取得した。RADMON では総電離線量 (TID: Total Ionization Dose) と中性子フルエンスの測定を行う予定であったが、故障のため、コリメータ付近では TID のみの測定となった。

2.4 ESR 測定

ESR 測定は、AIST 所有の電子スピン共鳴装置 (Bruker, EMX micro1/6) を使用して行われた。ESR 測定におけるマイクロ波強度と変調磁場は、それぞれ 2.0 mW、2.6 G とした。ESR 測定のリファレンス



(b) Correlation between dose measured by the alanine dosimeter and RADMON TID and between dose measured by the alanine dosimeter and dose measured by the OSL dosimeter.

Figure 1: Results of the alanine dosimeter, RADMON and the OSL dosimeter measurements around the collimator.

として、 Mn^{2+} を使用した。その他のパラメータや測定方法など、ESR 測定に係る詳細は、文献に記述されている[1, 2]。AIST 及び QST の ^{60}Co 場で照射したアラニン線量計を測定して得られた校正曲線から、J-PARC での照射で得られたアラニン線量計の線量を求めた。

3. 結果と考察

3.1 コリメータ付近での線量測定結果

コリメータ付近でのアラニン線量計の線量測定結果、RADMON で測定した TID、OSL 線量計による線量測定結果を Fig. 1(a)に示す。アラニン線量計と RADMON TID では、設置日からの経過日数が長くなるにつれ、測定された線量が大きくなっていることがわかる。アラニン線量計で測定された線量は、752 Gy から 2672 Gy、RADMON TID で測定された線量は 482 Gy から 2051 Gy であった。アラニン線量計で測定された線量は、RADMON TID で測定された線量に対して 1.3 倍から 1.6 倍程度大きい結果となった。これは、アラニン線量計に使用されている物質（アラニン、パラフィン）と RADMON の TID 測定部分で使用されている物質（シリコン）では、中性子との相互作用が異なっていることが原因であると考えられている[3]。文献では、アラニン線量計の測定結果は RADMON TID の結果の 7.3 倍であった。ただし、文献[3]の実験が行われた CERN と本研究で実験を行った J-PARC では測定場所の中性子のエネルギースペクトルが全く異なっていることが考えられるため、詳細な原因を突き止めるためには中性子スペクトルを明らかにする必要がある。

OSL 線量計の線量測定結果は、どの経過日数でもほとんど同じ値を示していた。これは、OSL 線量計

の測定可能線量の上限に達していたことが原因だと考えられる。

線量計設置から 51 日後の 2020/1/24 に、加速器の出力増加が行われた。出力増加前の最初の 2 点のアラニン線量計測定点と、出力増加後の 2 点の測定点に対してそれぞれフィッティングを行った結果を、Fig. 1 中に黒い直線と赤い直線で示している。出力増加後の方が直線の傾きが大きく、ビーム出力の増加により、コリメータ周辺の線量も増加していることが考えられる。

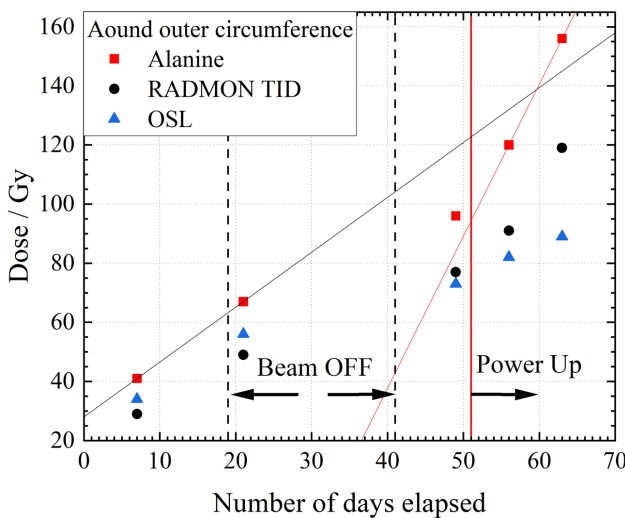
Figure 1(b)に、アラニン線量計の測定結果に対して RADMON TID と OSL 線量計の測定結果をプロットしたものを示す。アラニン線量計の測定結果の増加傾向は、RADMON TID の増加傾向とよく一致していた。

3.2 通路側外周付近での線量測定結果

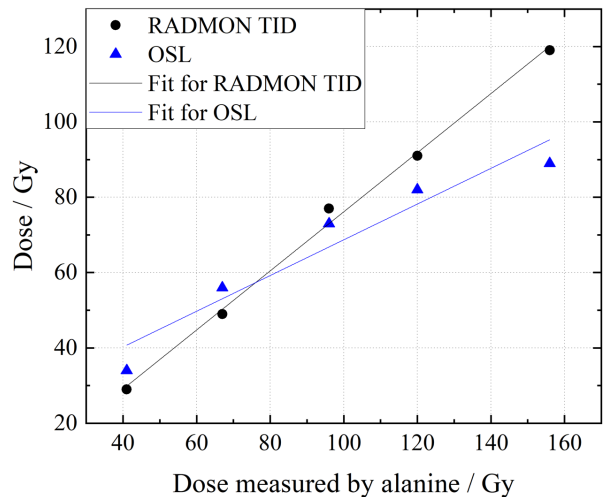
通路側外周でのアラニン線量計、RADMON TID、OSL 線量計による線量測定結果を Fig. 2(a)に示す。どの測定器も経過日数が長くなるにつれて、線量が大きくなっているが、OSL 線量計は測定可能線量付近に到達しているために、線量の増加量が小さくなっている。コリメータ付近での結果と同様に、アラニン線量計の測定値は RADMON TID の測定値よりも大きく、約 1.3 倍から 1.4 倍であった。

通路側外周付近においても、加速器の出力増加前の最初の 2 点のアラニン線量計測定点と、出力増加後の 2 点の測定点に対しフィッティングを行った結果をそれぞれ黒い線と赤い線で示している。出力増加後の測定点に対するフィッティングの方が傾きが大きく、通路側外周付近でもビーム出力増加により線量が増加していることが考えられる。

Figure 2(b)に、アラニン線量計の測定結果に対し



(a) Change in dose with respect to the number of days elapsed.



(b) Correlation between dose measured by the alanine dosimeter and RADMON TID and between dose measured by the alanine dosimeter and dose measured by the OSL dosimeter.

Figure 2: Results of the alanine dosimeter, RADMON and the OSL dosimeter measurements around the outer circumference.

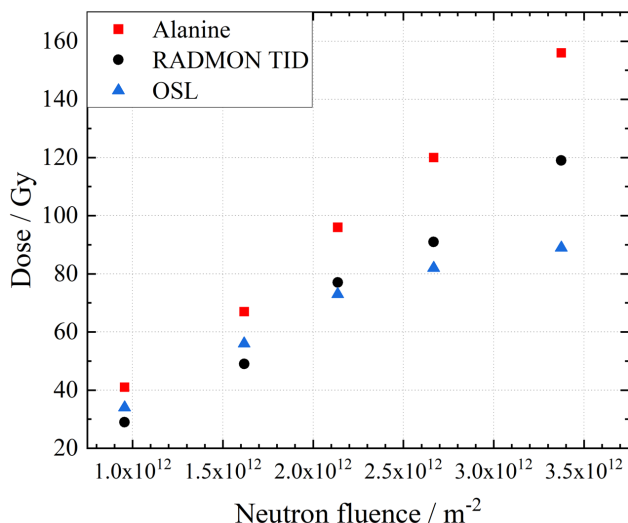


Figure 3: Increase in dose to neutron fluence measured by RADMON.

て RADMON TID と OSL 線量計の測定結果をプロットしたものを示す。RADMON TID の方が、アラニン線量計と相関が高い結果となった。

通路側外周の RADMON では中性子フルエンスが測定できていたので、中性子フルエンスに対してアラニン線量計、RADMON TID、OSL 線量計の測定線量をプロットしたものを Fig. 3 に示す。積算の中性子フルエンスが増加するにつれて線量が増加しているように見える。しかし、本研究で線量計を設置した場所は純粋な中性子場ではなくガンマ線なども混在している場であり、中性子による各線量計に対する線量寄与が明らかとなっていないため、実際に中性子フルエンスの増加によって線量が増加したのかどうか、今後さらなる実験を行い確かめる必要がある。

4. まとめ

アラニン線量計を使用して、大強度陽子加速器周辺の線量測定が可能かどうか検証した。本研究により、数十 Gy から数 kGy までアラニン線量計により線量測定が実現可能であることが示された。中性子やガンマ線などが混在した場であるため、より正確に線量を評価するためには、各粒子がどのようなエネルギースペクトルを持ち、異なるエネルギー領域に対してアラニン線量計がどのような応答を示すか明らかにする必要がある。

謝辞

本研究は、2019 年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」により実施されたものである。

また、本研究の成果は、量子科学技術研究開発機構の施設共用制度を利用して得られたものである。

参考文献

- [1] H. Yamaguchi *et al.*, “Feasibility Study of Alanine Dosimeter for Carbon-Beam Dosimetry”, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018. IFMBE Proceedings, 2019, pp. 565-569.
- [2] H. Yamaguchi *et al.*, “Development of postal dosimetry service using an alanine dosimeter in Japan”, Rad. Meas., 135, 2020; doi: 10.1016/j.radmeas.2020.106339
- [3] M. Glaser *et al.*, “Dosimetry assessments in the irradiation facilities at the CERN-PS accelerator”, 2005 8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Cap d'Agde, 2005, pp. PI5-1-PI5-7, doi: 10.1109/RADECS.2005.4365632.