

高エネルギー放射線環境下での市販ガラス線量計の測定と計算の比較

COMPARISON OF MEASUREMENTS AND SIMULATION RESULTS OF COMMERCIALLY AVAILABLE GLASS DOSIMETERS UNDER HIGH ENERGY IRRADIATION ENVIRONMENTS

倉田瑞希^{#, A)}, 住友洋介^{A)}, 内永聖哉^{A)}, 鈴木和磨^{A)}, 境武志^{B)}, 早川建^{B)}, 早川恭史^{B)}

Mizuki Kurata^{#, A)}, Yoske Sumitomo^{A)}, Seiya Uchinaga^{A)}, Kazuma Suzuki^{A)},

Takeshi Sakai^{B)}, Ken Hayakawa^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)}

^{A)} CST Nihon University, ^{B)} LEBRA Nihon University

Abstract

We believe that radiation resistance of equipment and materials in high-energy environments will become increasingly important in the space development that is currently being actively conducted. In addition, there are requests from companies that want to conduct irradiation tests at ease. In order to meet these needs, we have started to construct an irradiation environment using the electron linear accelerator at Nihon University. The electron linear accelerator at Nihon University is capable of generating energy up to 100 MeV, and we plan to conduct irradiation tests using the radiation generated during operations. Our goal is to establish an irradiation facility that can be “easily used” for pre-tests, etc. Therefore, the dose during accelerator operation shall be measured using inexpensive commercial dosimeters and compared with simulations to calculate the energy distribution and the dose including neutrons. We aim to establish an irradiation environment that lowers the barrier to use and is very useful for space development by many companies, including venture companies, which will become more active in the future. In this presentation, we will report the progress of dose evaluation during the accelerator operation at the present stage and the comparison of the measurements of glass dosimeters in the high energy environment.

1. はじめに

現在、活発に進められている宇宙開発においては、材料や機器に対する耐放射線評価の重要性がますます高まってくるのが予想される。宇宙空間での放射線による影響評価を行うのに際して、核反応が起こるような高いエネルギー放射線が主体であることを考慮する必要がある。また、企業側から気軽に放射線照射試験を行いたいという要望があり、これらのニーズに応えるため、日本大学の電子線形加速器を活用した高エネルギー放射線照射環境の構築に取り組み始めた。日本大学にある電子線形加速器は、100 MeVまで加速可能であり、高エネルギーかつ高線量での照射試験に対応できる。また、都心からアクセスのしやすい船橋キャンパスに設置されている点や、他の利用者との共存が可能な加速器運転中の線量を活用できる点も大きな利点である。日本大学の電子線形加速器は、電子ビームを2台の45度偏向電磁石で90度に曲げたのち、FELラインへ送っている(Fig. 1)。自由電子レーザーでの発振の高強度化を目的に偏向磁気部でのバンチ圧縮を利用するため、電子ビームにエネルギー幅を持たせた運転が行われており、電子ビームが45度偏向電磁石を曲がる際に損失する電子ビームによる放射線が発生する。私たちは、この放射線を利用し、照射試験環境の構築を目指している。

宇宙開発において、昨今大手企業のみならず中小企業またはベンチャー企業がその促進に重要な役割を果たすようになってきている。しかし、放射線照射に関しては宇宙環境のすべてを模擬評価しようとするとそのコスト

は膨大なものとなることは想像に難くなく、宇宙開発の主要なプレイヤーとして役割を果たしつつある中小企業やベンチャー企業にとっては人材や使用の側面でのハードルが高い。そこで、大学機関として本研究では専門知識と装置が必要となる放射線照射に対して、その使用の敷居を下げ、気軽に利用できるような試験環境の構築を目指している。高エネルギー領域での線量評価では、光電効果、コンプトン効果、電子対生成、または中性子生成などの反応が重要となる。高価な線量計を用いれば全ての反応を考慮できるが、コストが高く、利用の敷居が上がってしまう。そこで、我々は利用の敷居を下げることを重視し、ガラス線量計を用いて線量評価を行う。ガラス線量計は、バックグラウンドから100 Gyまでの幅広い線量を測定することができ、宇宙環境における放射線の評価を安価に行うのに適している。しかし、ガラス線量計では先に述べたような反応をすべて考慮することはできないため、PHITS [1]でのシミュレーションと比較することにより、エネルギー分布や中性子を含めた線量を算出し、その影響評価の信頼を確保しつつ有用なデータを提供できる環境の構築を行っている。

これまでの研究では、日本大学の電子線形加速器において発生する放射線の線量をガラス線量計で測定を実施し、その結果をシミュレーションと比較した[2-4]。しかし、シミュレーションについては遮蔽設定などに不十分な点があり、改善の余地が大きい。現在も引き続き検討と改良を進めている。また、線量測定のプロセスにおいては、高エネルギー環境におけるガラス線量計の校正を重視し、より正確な結果が得られるよう取り組んでいる。

本発表では、高エネルギー放射線環境下でのガラス線量計の校正について、ニュースバル加速器施設での

[#] csmi24010@g.nihon-u.ac.jp

照射実験の結果を報告する。

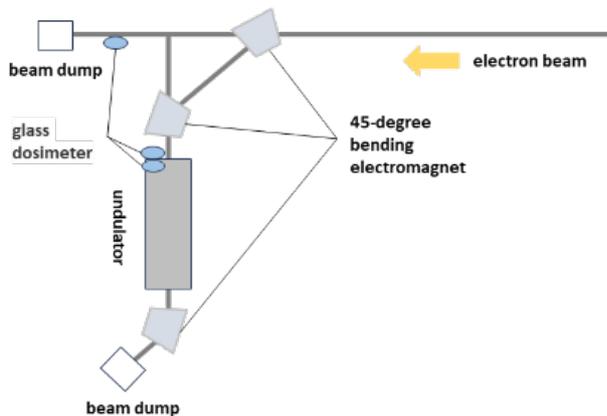


Figure 1: A schematic of the installation of dosimeters [4].

2. シミュレーション校正

加速器運転中の線量測定で使用したガラス線量計は、空気カーマに換算された値となっているため、シミュレーション上でも空気カーマの計算が行われているか確認する。PHITS 上で Cs-137 1 MBq から 1 m の距離における空気での吸収線量と計算で算出した空気カーマ値を比較する。

(1) 計算

Cs-137 の 1 cm 線量当量率定数(周辺線量当量)は、 $0.0927 \mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}/\text{h}$ [5]であるので、1 MBq、1 m における線量当量は、 $0.0927 \mu\text{Sv}/\text{h}$ となる。これを空気カーマに換算する際の Cs-137 の周辺等量換算係数は、 $1.20 \text{ Sv}/\text{Gy}$ [5] である。よって、計算における空気カーマは、 $0.0773 \mu\text{Gy}/\text{h}$ となる。

(2) シミュレーション

線源を Cs-137 1MBq と設定し、1 m の距離における空気での吸収線量を求めた。なお、標的としては 10 cm 四方の空気を仮定した。シミュレーションによる空気カーマは、 $0.0556 \mu\text{Gy}/\text{h}$ となった。吸収線量は空気の電離によって引き起こされるものとなるため、電子の飛跡のシミュレーション結果を Fig. 2 に示す。

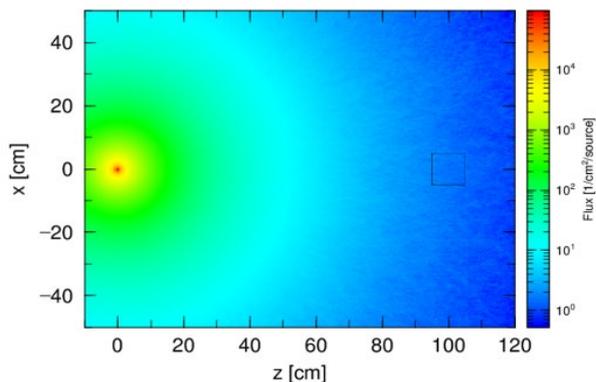


Figure 2: A simulation result of electron tracks assuming Cs-137 1 MBq sources.

これらの結果から PHITS でのシミュレーションの結果と、算定における空気カーマの値が近い値となっており、良い近似で計算が行われていることが確認できた。

3. ガラス線量計の校正について

ガラス線量計は低エネルギーガンマ線源 Cs-137 (0.6 MeV) で校正されているため、高エネルギー放射線環境で使用した時の結果が正しく行われている検討する必要があると考えた。そこで兵庫県にあるニュースバル加速器施設でガラス線量計に対する照射実験を行った。この施設は、レーザーコンプトン散乱による 34 MeV 準単色ガンマ線を生成しており、光子数もわかっていることから、高エネルギーガンマ線に対するガラス線量計の応答を検証するのに適していると考えた。

(1) 実験

7 分、15 分、30 分と実験を行い、配置図を Fig. 3 に、測定結果を Table 1 に示す[6]。

ニュースバル加速器施設は、校正施設ではないため、測定結果の正確性を示すため、シミュレーションとの比較が必要となる。

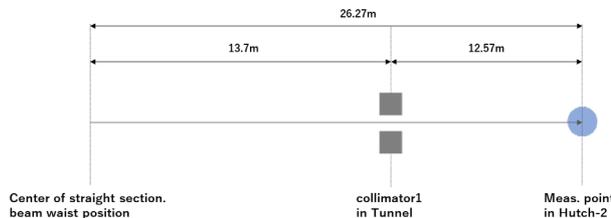


Figure 3: The experimental setup of gamma-rays irradiation at NewSUBARU [7].

Table 1: Measurement Results of Irradiation Experiments [6]

7 min	79 μGy
15 min	134 μGy
30 min	274 μGy

(2) シミュレーションとの比較

実際の運転状況からシミュレーション条件を Table 2 と設定しガラス線量計の吸収線量を求めた。

Table 2: A Set of Simulation Conditions [7]

particle	photon
energy	34 MeV
Number of particles	6500

シミュレーションにおけるガンマ線および電子の飛跡を以下に示す (Fig. 4, 5)。また、測定結果との比較を表 3 に示した。その結果、測定値とは一桁程度の差が見られた。現時点では空気カーマへの換算を行っていないため、換算係数の算出とともに、シミュレーション結果のさらなる理解が必要である。

さらに、ニュースバル加速器施設で実施した照射実験

においては、加速器側からの散乱放射線の影響が含まれている可能性がある。そのため、今後はバックグラウンドを考慮した照射実験を予定している。

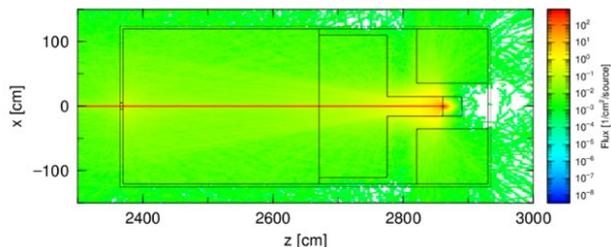


Figure 4: A simulation result of γ -ray trails with the glass dosimeter target.

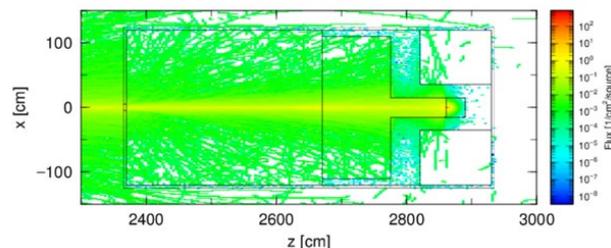


Figure 5: A simulation result of electron trails with the glass dosimeter target.

Table 3: Comparison of Measurement Results and Simulation Results

Time (min)	Measurement results (μGy)	Simulation results (μGy)
7	79	7.44
15	134	15.9
30	274	31.9

4. まとめと今後の展望

本研究では、高エネルギー放射線環境下におけるガラス線量計の校正を目的として、ニュースバル加速器施設にて照射実験を実施し、測定結果とシミュレーションとの比較を行った。その結果、測定値とは一桁程度の差が見られ、シミュレーションのさらなる精度向上が求められることが明らかとなった。特に、空気カーマへの換算を行

うための換算係数の導出や、測定手法の検証が今後の課題として挙げられる。

今後は、ガラス線量計の高エネルギー領域における応答特性をより詳細に理解するため、さまざまなエネルギー条件下での照射実験を実施する予定である。ニュースバル加速器施設では、電子エネルギーおよびレーザー波長の調整によってガンマ線エネルギーの制御が可能であり、これを活用して幅広い条件下でのデータ取得を進めていく。また、加速器側の散乱放射線の影響を評価するため、バックグラウンドを考慮した実験も計画しており、総合的な応答評価と校正手法の確立を目指す。

謝辞

本研究は競輪の補助を受けて実施しました。

参考文献

- [1] T. Sato *et al.*, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol.
- [2] S. Yamato *et al.*, "ASSESSMENT OF A HAND-MADE SCINTILLATOR RADIATION MONITOR BY AN ION CHAMBER TOWARD A POINT DOSE EVALUATION IN ACCELERATOR OPERATIONS", Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 - September 1, 2023, Funabashi, PASJ2023 THP44.
- [3] S. Yamato *et al.*, "DEVELOPMENT OF DOSE ASSESSMENT AROUND ACCELERATOR FOR HIGH-ENERGY IRRADIATION EXPERIMENTS", Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 30 - August 3, 2024, Yamagata, PASJ2024 THP020.
- [4] M. Kurata *et al.*, "SIMULATION DOSE EVALUATION FOR A HIGH-ENERGY RADIATION IRRADIATION ENVIRONMENT", Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 30 - August 3, 2024, Yamagata, PASJ2024 THP019.
- [5] Radioisotope Pocket Data Book 12th Edition.
- [6] M. Kurata *et al.*, "SIMULATION OF RADIATION DOSE AND EVALUATION OF GLASS DOSIMETERS FOR HIGH-ENERGY IRRADIATION ENVIRONMENT", The 68th Annual Meeting, College of Science and Technology, Nihon University.
- [7] M. Kurata *et al.*, "DEVELOPMENT OF A FRIENDLY HIGH-ENERGY IRRADIATION ENVIRONMENT FOR FUTURE SPACE DEVELOPMENTS", IPAC'25 - the 16th International Particle Accelerator Conference.