

高エネルギー放射線照射環境構築に向けたシミュレーションによる線量評価

SIMULATION DOSE EVALUATION FOR A HIGH-ENERGY RADIATION IRRADIATION ENVIRONMENT

倉田瑞希^{#, A)}, 住友洋介^{A)}, 大和紗也香^{A)}, 土屋颯太^{A)}, 日南健^{A)}, 境武志^{B)}, 早川建^{B)}, 早川恭史^{B)}

Mizuki Kurata^{#, A)}, Yoske Sumitomo^{A)}, Sayaka Yamato^{A)}, Sota Tsuchiya^{A)}, Ken Hinami^{A)},

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

^{A)} CST Nihon University

^{B)} LEBRA Nihon University

Abstract

The high-energy radiation dose assessment of materials is becoming increasingly important, especially for the use of space rapid developments. The electron linear accelerator at Nihon University has a potential of acceleration up to 100 MeV that may be useful for the high-energy dose assessment. Additionally, the accelerator locates at Funabashi area, where it is easily accessible from the capital area, hence we expect an enhancement of developments by lowering the threshold for many companies, including venture companies, to use it. In the electron linear accelerator, the electron beams with an energy spread are bent 90 degrees using two 45-degree bending magnets to create an electron beam with a quality suitable for the free electron lasers. In this process, we plan to evaluate the effects of the radiation dose generated by the electron beam losses at first 45-degree bending magnet due to the large energy difference. In this presentation, we will report the results of simulations on the energy dispersion of the electron beam in the accelerator, beam loss, and the amount of radiation generated by the 45-degree bending magnet.

1. はじめに

近年活発に行われている宇宙開発において、宇宙環境下での高エネルギー放射線による材料や機器への影響評価が重要になってくると考えられる。また、気軽に放射線耐性の試験を行いたいという要望も増えている。日本大学理工学部には、100 MeVまで加速可能な電子線形加速器があり、設置されている船橋校舎は首都圏からのアクセスも良く、照射試験を行う上で利便性が高いのが利点である。また、放射線試験を行う上で、加速器の通常運転で発生する高エネルギー放射線を活用することで、加速器の他の利用と共存を行えることを目指している。以上のことから、ベンチャーを始めとした多くの企業の使用に対する敷居を下げ、今後活発になっていく宇宙開発に大いに役立つような照射環境構築を目指し研究を行っている。

電子線形加速器では、自由電子レーザーに適した品質の電子ビームを作成するため、加速の仕方を利用してエネルギー広がりを持つ電子ビームを、45度偏向電磁石を2つ使い90度に曲げて共振型自由電子レーザー装置(FEL line)に送っている。この際に、バンチ圧縮を行うため大きなエネルギー差を設けることから、45度偏向電磁石で真空ダクト内を通過できずに放射線が生成される。この放射線を利用して機器や材料の試験を行う予定である。加速器運転中の線量をガラス線量計で測定し、シミュレーションと比較することで中性子を含めた照射線量を見積もることを計画している。

本研究では、ガラス線量計の校正についてと加速部でのエネルギー分散やビームロス算出し、PHITS[1]でシミュレーションを行い、シミュレーション結果と加速器

運転中に測定した線量を比較することを目的としている。

2. 加速器運転中の線量測定

今回は、ガラス線量計を用いて線量測定を行っている。ガラス線量計の設置場所は、アンジュレータ上流付近とストレートラインである(Fig. 1)。計測の詳細については、[2, 3]を参考にしてほしい。参考までにその際の加速器運転条件をTable 1に示す。

ガラス線量計は背景場から100 Gyまでと広い線量での測定が可能であり、宇宙環境における放射線評価を安価に行う上でも適している。しかし、高いエネルギーのガンマ線に対する線量値の測定に関しては考慮の余地がある。詳細は次節で説明を行う。

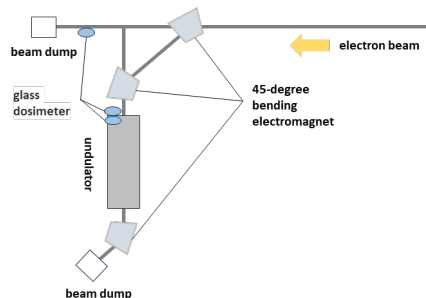


Figure 1: A schematic of the installation of doseimeters.

Table 1: An Set of Operation Parameters

Mode	Burst
Beam energy	78.1 MeV
Straight line current value	49.4 mA
FEL line current value	30.6 mA
Macro pulse width	12 μ s

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

3. ガラス線量計の校正について

測定に使用した線量計は市販のものであり、Cs-137 (0.6 MeV)で校正されているため、高エネルギー環境で正しく測定出来ているかどうか重要となる。そこで、光子数 3500 の単色ガンマ線のエネルギーを 1 MeV-100 MeV まで 1 MeV ごとに変えてガラス線量計に照射し、その時の吸収線量がどのようになるのか PHITS でシミュレーションを行った。結果は、低エネルギーの時は非線形であるが高エネルギーになると線形的に線量の増加がみられた (Fig. 2)。高エネルギー環境下でも、比較的正しい線量を測定出来ると考えられる。

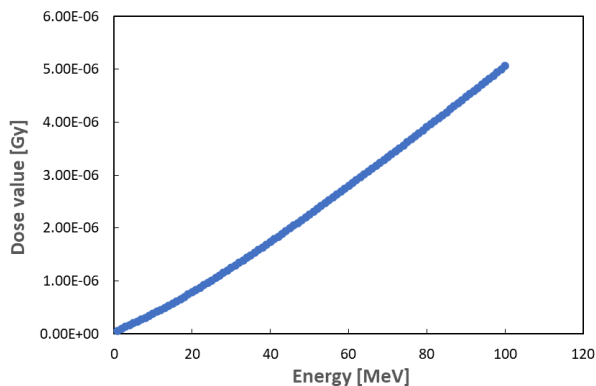


Figure 2: A comparison of dose evaluations against various energies.

また、光と物質の相互作用により光電効果、コンプトン効果、電子対生成が起こり、PHITS でのシミュレーションは、これらの反応も含めて計算している (Fig. 3-5)。ガラス線量計は、放射線により励起された状態を紫外線照射による蛍光量の測定により線量評価が可能となる[4]。ガラス線量計で校正に使用されている Cs-137 は低エネルギーでの反応となり、10 MeV を超えるような高いエネルギーにおける電子対生成や、更には中性子反応も含めた照射線量を正しく評価するためには、高いエネルギー状態でのガンマ線を用いて実験を行う必要がある。なお、高エネルギー γ 線を用いた実験に関しては現在計画中であることにも言及しておく。

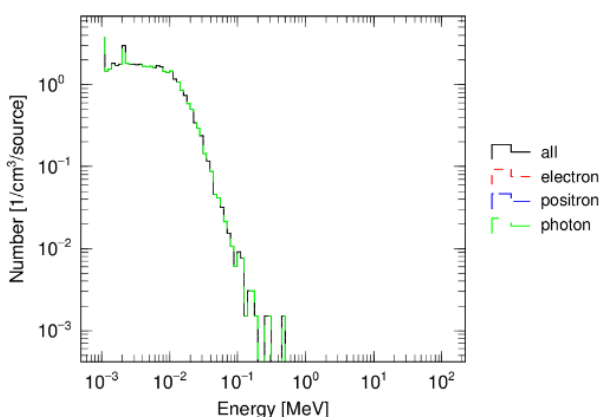


Figure 3: Number of photoelectric effect reactions.

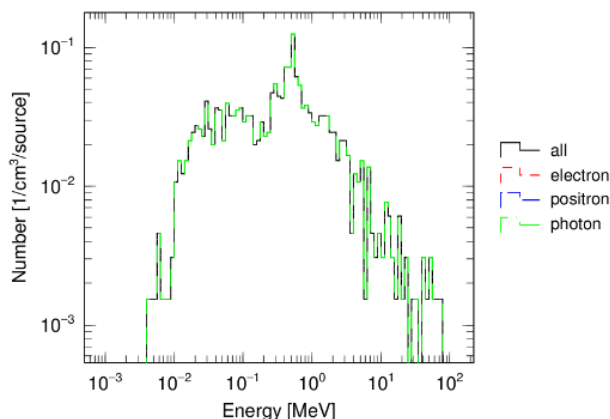


Figure 4: Number of reactions of Compton effect.

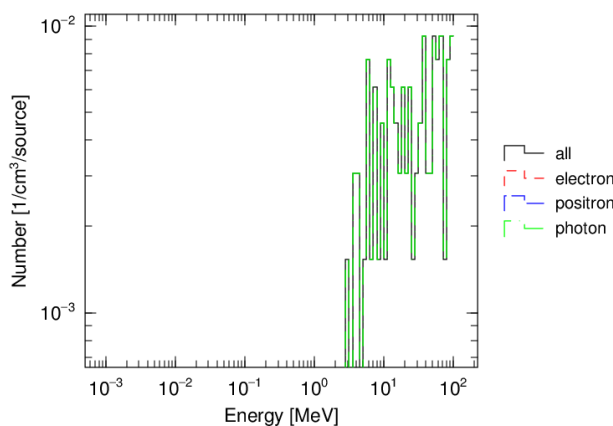


Figure 5: Number of reactions for Electron pair production.

4. シミュレーションによる線量評価

4.1 電子ビーム状態の算出

線量を測定した時の運転条件を入れてシミュレーションを行うため、加速部での電子のエネルギー広がり Astra[5]を用いて算出した[6] (Fig. 6, 7)。加速管1本目と2本目 ($z = 0 \sim 10$ m) で電子を加速させ、加速管3本目 ($z = 10 \sim 19$ m) でエネルギー幅を持たせつつエネルギーは一定となっている。加速管出口 ($z = 19$ m)でのエネ

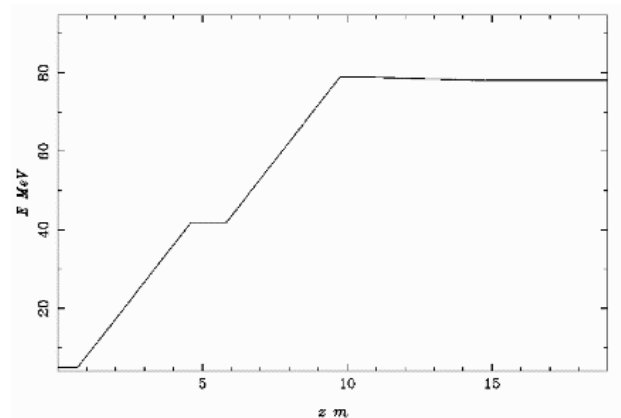


Figure 6: An illustration of the average energy of electrons.

ギーは 78.1 MeV でエネルギー幅は 4.27 MeV であることから $\pm 5\%$ 程度のばらつきをもつ電子ビームとなっている。ただし、加速勾配は実験の値から計算できていないため、仮定となっている。

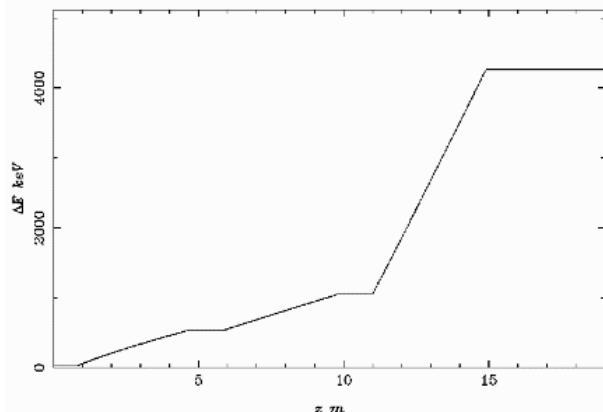


Figure 7: An illustration of the rms energy spread.

次に、このエネルギー広がりを持つ電子ビームがどの程度偏向部で削れるのかを考えてみた。45 度偏向電磁石は、軌道半径 550 mm で中心を通る $\phi 21.48$ mm のチャンバーとなっている。ここからアパーチャーを通る軌道半径が求められるので、Eq. (1)を使い磁場は一定とし、アパーチャーを通れるエネルギー範囲を計算する。

$$E^2 = (eBRc)^2 + (m_0c^2)^2. \quad (1)$$

計算した結果、78.1 MeV から $\pm 1\%$ 程度がアパーチャーを通れるため、 $\pm 4\%$ 程度削れることがわかった。実際には、最初に加速しきれない電子が存在するためもう少し削れている。

4.2 シミュレーションによる加速器運転中の線量

測定時の運転条件を入れた PHITS のシミュレーションから、ガラス線量計の吸収線量 (γ 線)を求め、測定結果と比較する。今回のジオメトリーは、最初の偏向部でほとんどの電子が削れることから、最初のチャンバーから次のチャンバーまでのダクト、遮蔽も含めたものになっている(Fig. 8)。シミュレーション条件を Table 2 として、チャンバーの入口から電子ビームを発生させ磁場をかけて曲げたあとダクトを通るように設定した。電子ビームのエネルギー幅は $\pm 5\%$ 程度を仮定し、ガウス分布としている。

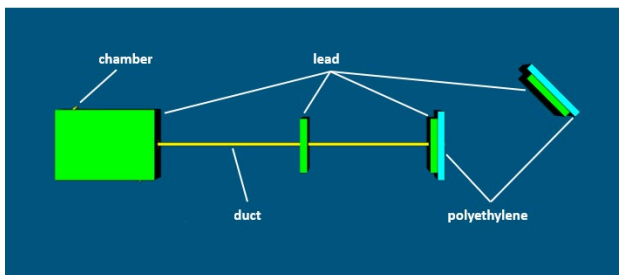


Figure 8: The geometry of dose assessment.

Table 2: A Set of Simulation Parameters

Particle	electron
Radius	0.5 cm
Central value of Gaussian distribution	78.1 MeV/n
Full width at half maximum of Gaussian distribution	10.1 MeV/n
Cutoff minimum of Gaussian distribution	65.3 MeV/n
Cutoff Maximum of Gaussian Distribution	90.9 MeV/n
Number of particles	7.41×10^{12}
Magnetic field	5.5 kG

4.3 結果

電子の飛跡と γ 線の飛跡は、以下のようになった(Fig. 9, 10)。 γ 線の飛跡は見えているが、ガラス線量計の吸収線量は出すことが出来なかったため比較は行えない結果となった。今回は、粒子数を 7.41×10^{12} 、試行回数を 3500 万回として計算を行ったが、タリーするガラス線量計が全体に比べてとても小さいことや、ジオメトリーや設定が複雑であるためもっと試行回数を増やす必要があるのかもしれない。また、遮蔽が完璧ではないことも踏まえて設定を見直し、試行回数を増やしてもう一度計算を行っていききたい。

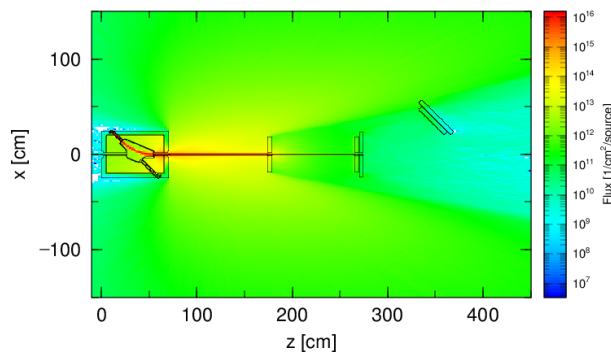


Figure 9: electron track.

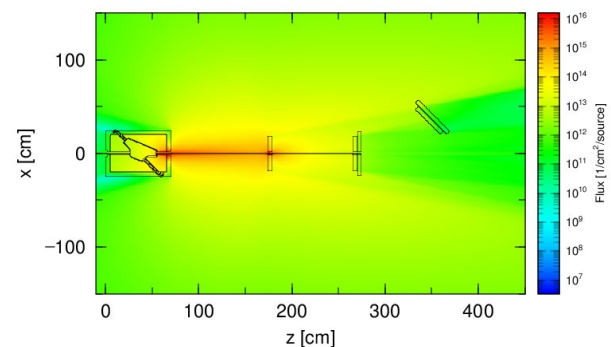


Figure 10: photon track.

5. まとめと今後の展望

今回は、シミュレーションから加速器運転中の線量を求めることが出来なかったため、実際にガラス線量計で

測定した結果と比較は行えなかった。原因を考え、もう一度計算を行っていきたい。現在は、チャンバーとダクト、遮蔽のみとなっているが、最終的には壁も入れて計算を行う予定である。また、高エネルギーによるガラス線量計の校正を考えるため、ニュースバルでのレーザーコンプトンによる準単色ガンマ線 (34 MeV) をガラス線量計に照射することや、原子力機構にある、照射設備でガンマ線をガラス線量計に照射することを予定している。

謝辞

日本大学理工学部の電子線利用研究施設の人たちに感謝します。

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 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 30-August 3, 2024, Yamagata, PASJ2024 THP020.
- [4] Japan Society of Medical Physics, Fluorescent Glass Dosimeters in Radiotherapy Physico-Technical Guidelines.
- [5] K. Floettmann, “Astra user manual”, https://www.desy.de/~mpyflo/Astra_manual/Astra-Manual_V3.2.pdf
- [6] M. Kurata *et al.*, “Dose Evaluation for High Energy Irradiation Environment toward Space Development”, The 61st Annual Meeting on Radioisotopes and Radiation Researches.