

数 GeV 電子照射による JLAB ビームダンプ下流における遮蔽実験

SHIELDING EXPERIMENT IN THE DOWNSTREAM OF THE JLAB BEAM DUMP WITH SEVERAL GeV ELECTRON BEAM

中尾徳晶^{#,A)}, ウェルチ キース^{B)}, ワイズマン マーク^{B)}, スタボラ アダム^{B)}, デグティARENKO パベル^{B)}

佐波俊哉^{C)}, 照沼信浩^{C)}, 森川祐^{C)}, 坂木泰仁^{C)}

Noriaki Nakao^{#,A)}, Keith Welch^{B)}, Mark Wiseman^{B)}, Adam Stavola^{B)}, Pavel Degtiarenko^{B)},

Toshiya Sanami^{C)}, Nobuhiro Terunuma^{C)}, Yu Morikawa^{C)}, Yasuhito Sakaki^{C)}

^{A)} Institute of Technology, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan

^{B)} Thomas Jefferson National Accelerator Facility (JLAB), Newport News, VA, USA

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki, Japan

Abstract

A shielding experiment was performed with secondary particles produced from the beam dump interactions with electron beams of several GeV at Thomas Jefferson National Accelerator Facility (JLAB). Electron beam energies were 2.2, 4.3, 6.4 and 8.45 GeV. The beam dump consisted of aluminum with water coolant. Thick concrete shield which is surrounding the beam dump is located in the underground. Three penetration steel pipes of 5.08-cm diameter are equipped at the ground level, reaching to the beam line axis which is 10-m below the ground level. The locations of the pipes are 91-, 273- and 570-cm from the concrete shield surface at the downstream of the beam dump. Activation detector samples of aluminum and graphite were inserted down to the beam line through the pipes. After the irradiation, samples were removed from the pipes and energy spectra of gamma-rays from the samples were measured by HPGe detector. From the analyses of the photo peaks, radionuclide production rates of ^{24}Na and ^{11}C from aluminum and graphite, respectively, were estimated and attenuation curves through concrete thickness were obtained. Monte Carlo simulations were performed and they agreed with experimental data within a factor of 2. This experiment was supported by JLAB and the Department Of Energy (DOE) of USA.

1. はじめに

近年多くの粒子加速器施設が物理、医学、各種産業を目的に建設されている。より効率的で統計精度良い成果を得るために、加速器の性能は益々向上し、加速できるビームの強度やエネルギーも上がっている。このような施設における放射線上の安全を確保するためには、加速ビームや二次粒子による放射線や残留放射能を適切に予測しなければならない。高出力の加速器施設で生成する中性子は透過力が強く、施設の外側の放射線レベルを適切に抑えるためには、非常に厚い遮蔽が必要となる場合がある。建設コストの内、遮蔽のコストが占める割合は非常に高くなるため、安全を担保して適切な遮蔽設計を行なうことは非常に重要である。近年、モンテカルロ法によるシミュレーションが遮蔽設計に広く用いられている。そのため、そのシミュレーションの正確さをベンチマーク実験データにより検証することが不可欠である。しかしながら、高エネルギー領域で信頼できる実験データは極めて少ないのが現状である。

本研究では、現在計画中国際リニアコライダー (ILC) 等の高エネルギー電子加速器建設の遮蔽設計高度化に向けて、理論計算における二次粒子生成や遮蔽内挙動の精度検証に必要なベンチマーク実験データを取得する事を目的として、2020 年から米国トーマス・ジェファソン国立加速器研究施設 (以下 JLAB) の電子加速器施設 (CEBAF) にて遮蔽実験を行なった。

[#] noriaki.nakao@shimz.co.jp

2. 実験

2.1 実験施設

CEBAF の Hall-A ビームラインの最終端には、水冷却アルミ製ビームダンプ (水とアルミの体積比約 1:1) が設置されている。Figure 1 にこのビームダンプ周辺と実験の概要図を示す。ダンプが設置されているトンネルの周囲はコンクリート遮蔽 (上下側方 457.2 cm 厚、前方 570 cm 厚) が設置され、その周囲は土で覆われている。ダンプ下流のコンクリート遮蔽内には、地表面から 10 m の深さにあるビームライン延長線に通じる 3 つの照射孔として鉄製のパイプが設置されている。この 3 つの照射孔は、ダンプ下流のコンクリート表面から 91, 273 および 570 cm の厚さの位置にある。

2.2 放射化検出器

コンクリート遮蔽内の中性子等の二次粒子強度を測定するため、照射孔にアルミまたは黒鉛の放射化検出器試料を設置した。Figure 2(a) に示すように試料のサイズは、直径 3.2 cm、厚さ 1.0 cm であり、それを 3 枚重ねた状態で中心にスチールワイヤーを通して固定した。Figure 2(b) に示すように地上部の照射孔鉄パイプの入口より試料を挿入し、ビーム軸にあたる照射孔の底に設置した。Figure 2(c) に試料設置後の地上部の 3 つの照射孔パイプ入口を示す。照射孔の番号は上流より R3, R2 および R1 である。

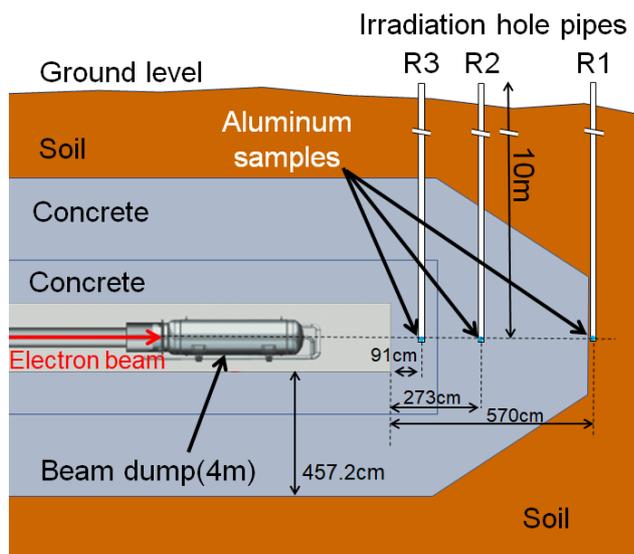


Figure 1: Experimental layout with shields around the beam dump and three irradiation hole pipes.

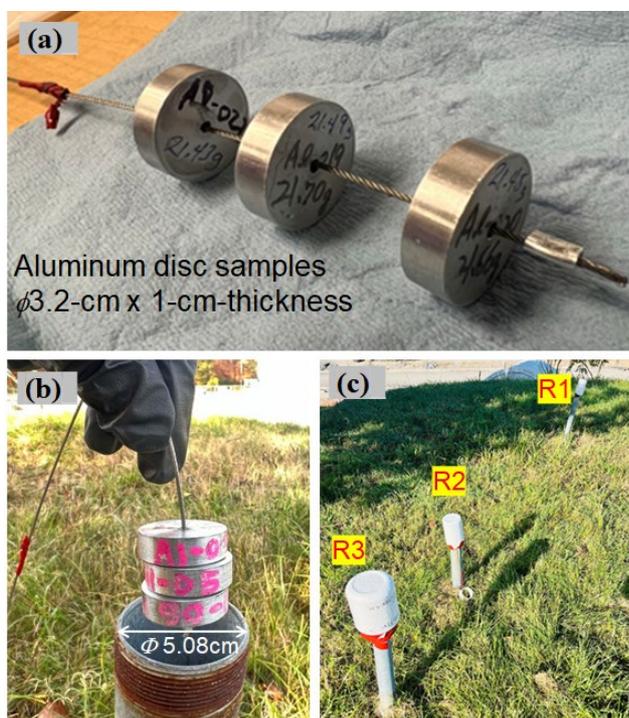


Figure 2: Photos of (a) aluminum disc samples connected with a wire, (b) sample set entering the irradiation pipe, and (c) three irradiation pipes on the ground level.

2.3 照射

照射時の電子ビームエネルギーは、アルミ試料に関して 2.2, 4.3, 6.4 および 8.45 GeV の 4 点で、黒鉛試料に関しては 8.5 GeV の 1 点であった。また、ビーム強度は最大 150 μ A、照射時間はアルミ試料の場合は夜間や週末を利用した半日から数日、黒鉛試料の場合は 2 時間程度であった。

2.4 放射能測定とデータ解析

取り出した試料は、JLAB のガンマ線スペクトル測定室へ運び、試料に生成した放射性核種からのガンマ線スペクトルを高純度ゲルマニウム検出器により測定した。対象の放射性核種生成反応は、 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ および $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ である。Table 1 に、解析した放射性核種の生成反応、半減期、ガンマ線エネルギーとその放出率を示す。それぞれの核種の半減期に応じて、測定時間を設定した。アルミニウムに関しては、測定対象の計数率に応じて 3~24 時間の測定を、グラファイトに関しては 15~30 分の測定を行なった。

対象となる光電ピークのネット計数を解析し、ビーム強度の変動履歴およびゲルマニウム検出器の検出効率を用いて、放射性核種生成率を算出した。検出効率算出には、LabSOCS ソフト[1]を用いた。

Table 1: Production Reactions, Half-lives, and Photon Energies of the Radionuclides in the Activation Detectors

Reaction	Half Life	Photon Energy [keV] (Emission Probability)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	14.96 h	1368.6 (1.000)
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	20.39 min	511.0 (1.995)

3. モンテカルロ計算

実験値との比較のためモンテカルロ計算コード FLUKA2021.2.9 [2, 3] を用いてシミュレーション計算を行なった。計算においては、ビームダンプおよび遮蔽の詳細形状を記述し、遮蔽内に設置したアルミまたは黒鉛試料に生成する放射性核種生成率を計算した。

また、放射性生成率の核反応別の成分を確認するため、電子エネルギー 8.45 GeV でのアルミ試料を用いた計算のみに関して、ビームダンプおよび遮蔽の簡易形状を用いて PHITS Ver 3.32 [4] でモンテカルロ計算を実施した。

4. 結果と議論

遮蔽実験における放射性核種生成率の減衰分布を、アルミ試料に関して Fig. 3 に、黒鉛試料に関して Fig. 4 に示す。図に示す誤差はガンマ線計測の統計誤差であり、LabSOCS [1] によるゲルマニウム検出器の検出効率の誤差(4.3%)は含まれていない。図には FLUKA シミュレーションの結果も示して実験値と比較した。

Figure 3 では、電子エネルギー 2.2 GeV において、最大厚さの R1 では統計不足により実験値が得られていないが、遮蔽の薄い 2 点である R3 および R2 においては、計算値が 2 倍程度の一致を示しており、計算値は指数関数の減衰、つまり中性子の典型的な減衰分布を示している。一方、4.3 GeV, 6.4 GeV および 8.45 GeV では、遮蔽厚の薄い R3 および R2 において計算値は実験値と良く一致したが、最大厚では計算値が 2 倍程度の過小評価を示した。電子エネルギーが高くなるにつれ、減衰分布は最大厚で跳ね上がり、もはや単純な指数関数の

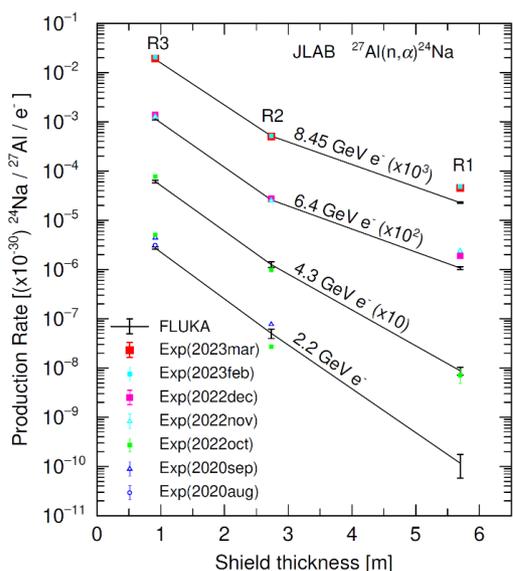


Figure 3: Measurement and FLUKA simulations for attenuation profiles of ^{24}Na production rates from aluminum samples for electron energies of 2.2, 4.3, 6.4 and 8.45 GeV.

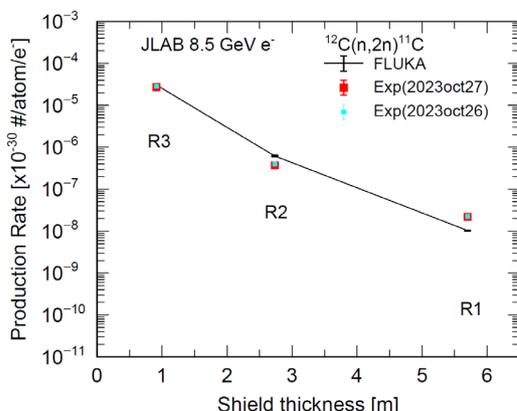


Figure 4: Measurement and FLUKA simulations for attenuation profiles of ^{11}C production rates from graphite samples for electron energy of 8.5 GeV.

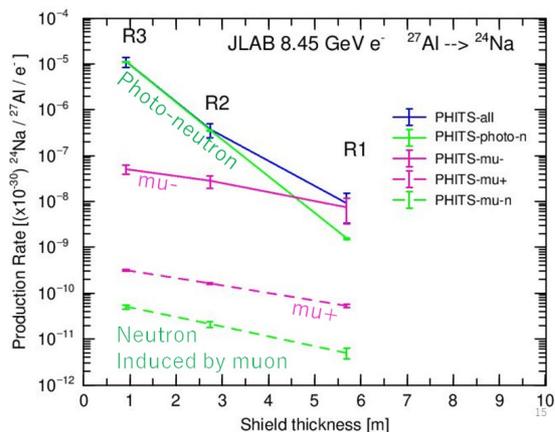


Figure 5: PHITS simulation for attenuation profiles of ^{24}Na production rates from aluminum samples separated by nuclear reactions for electron energy of 8.45 GeV.

減衰とは言えない。Figure 4 の黒鉛試料による 8.5GeV の結果にも同様な結果が得られた。

PHITS コードの簡易計算により、8.45GeV 実験を模擬したアルミ試料における放射性核種生成率を、核反応別の成分に分けて算出し、Fig. 5 に示した。遮蔽の薄い領域では、光核反応による中性子が支配的であり、指数関数的な減衰を示している。一方、負電荷のミュー粒子による反応率の減衰曲線は光中性子に比べ緩やかとなっており、そのため、厚い遮蔽領域において負電荷のミュー粒子による反応が支配的となることで、合計の減衰曲線が厚い遮蔽領域で跳ね上がる結果となった事が判った。また、正電荷のミュー粒子およびミュー粒子により生成した中性子の寄与は無視できることが判った。

5. 結論

JLAB の CEBAF 加速器施設において、数 GeV 電子ビームで照射されたビームダンプの二次粒子による遮蔽実験を行なった。アルミおよび黒鉛の放射化検出器試料を用い、それぞれ $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ および $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 反応による放射性核種生成率を測定し、それらの減衰分布を得た。モンテカルロ法によるシミュレーションの結果、概ね 2 倍以内で一致する事が分かった。また、遮蔽の厚い領域において透過力の高いミュー粒子、とりわけ負電荷のミュー粒子による核種生成反応率が支配的となり、全体の減衰曲線が跳ね上がる結果となった。

本実験は、高エネルギー電子加速器施設における中性子およびミュー粒子の遮蔽深層透過に対する有用なベンチマーク実験データを提供するものであり、今後の遮蔽設計の高度化に寄与するものである。

謝辞

実験遂行にあたりジェファソン研究所(JLAB)の安全環境部(ESH&Q)の方々に多大なご協力を頂きました。心より感謝いたします。本実験は、JLAB および米国エネルギー省(DOE)の協力のもと行なわれた。

参考文献

- [1] F. L. Bronson, "Validation of the accuracy of the LabSOCS software for mathematical efficiency calibration of Ge detectors for typical laboratory samples", J Radioanal Nucl. Chem. 255(1), pp137-141 (2003).
- [2] T.T. Böhlen *et al.*, "The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications", Nuclear Data Sheets 120, 211-214 (2014).
- [3] A. Ferrari *et al.*, "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
- [4] T. Sato *et al.*, "Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33", J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024).