

CERN/CHARM における 24 GeV/c 陽子を用いた遮蔽・迷路実験

SHIELDING AND MAZE EXPERIMENTS USING 24 GeV/c PROTONS AT CERN/CHARM

中尾徳晶^{#,A)}, 佐俊俊哉^{B)}, 梶本剛^{C)}, 八島浩^{D)}, フロツシュル ロバート^{E)}, ボザット ダビデ^{E)},
イリオボウロウ エルピーダ^{*E)}, インファンティーノ アンジェロ^{E)}, 李恩智^{†,F)}, 大山隆弘^{B)}, 萩原雅之^{‡,B)}, 長畔誠司^{B)},
松本哲郎^{G)}, 増田明彦^{G)}, 上菘義朋^{§,A)}, デビエンヌ アーノ^{**E)}, ポッツィ ファビオ^{E)}, ティズィ マルコ^{E)},
ローレンツォ トマーゾ^{E)}, メナ ナビル^{E)}, ビンケ ハイנטツ^{E)}, ロスラー シュテファン^{E)}, ブルーガー マルクス^{E)}
Noriaki Nakao^{#,A)}, Toshiya Sanami^{B)}, Tsuyoshi Kajimoto^{C)}, Hiroshi Yashima^{D)}, Robert Froeschl^{E)}, Davide Bozzato^{E)},
Elpida Iliopoulou^{*E)}, Angelo Infantino^{E)}, Eunji Lee^{†,F)}, Takahiro Oyama^{B)}, Masayuki Hagiwara^{‡,B)}, Seiji Nagaguro^{B)},
Tetsuro Matsumoto^{G)}, Akihiko Masuda^{G)}, Yoshitomo Uwamino^{§,A)}, Arnaud Devienne^{**E)}, Fabio Pozzi^{E)}, Marco Tisi^{E)},
Tommaso Lorenzon^{E)}, Nabil Mena^{E)}, Heinz Vincke^{E)}, Stefan Roesler^{E)} and Markus Brugger^{E)}

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

^{B)} Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki, Japan

^{C)} Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Hiroshima, Japan

^{D)} Kyoto University Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science (KURNS), Osaka, Japan

^{E)} Radiation Protection Group, CERN, Geneva, Switzerland

^{F)} Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan

^{G)} National Metrology Institute of Japan (NMIJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki, Japan

Abstract

Measurements of high-energy neutrons through shield and maze were performed at the CERN High-energy Accelerator Mixed-Field (CHARM) facility. The protons of 24 GeV/c were injected onto a 50-cm-thick copper target and the released neutrons were transmitted through shields and a maze in the facility. The transmitted neutrons were measured using activation detectors placed behind various materials and thicknesses of the shields and at several locations in the maze. From the radionuclide production rates in the activation detectors, the attenuation profiles through the shield thickness and along the maze were obtained for the reactions of $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}(x = 4-9)$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$, and $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$. Monte Carlo simulations were performed with three codes, PHITS, FLUKA, and GEANT4, which had good agreement with the measurements within a factor of 2 for the production rates.

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、CERN の高エネルギー加速器混合粒子場(CHARM)施設における遮蔽および迷路における高エネルギー中性子を放射化検出器により実験的に評価した。これまでに、バルク遮蔽実験(2015 年)[1]、改造遮蔽体系の実験(2016-2022 年)[2]、迷路漏洩実験(2018 年)[3]を行ない、更に、実験を模擬したモンテカルロ法によるシミュレーションの結果とも比較・議論を行なった。

2. 実験

2.1 施設

CERN の東ホール棟(East Hall)にある CHARM を含む施設の平面図を Fig. 1 に示す。陽子シンクロトロン(PS)で加速された 24 GeV/c の陽子が図に示すように輸送され、CHARM の中心に設置された銅標的(直径 8 cm、厚さ 50 cm)に照射される。標的を突き抜けた陽子は下流のビームダンプに送られる。陽子ビームラインと標的室はコ

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

Present address: ^{*}Hirslanden Private Hospital Group, Radiation Oncology Institute, Lausanne, Switzerland. [†]Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki, Japan. [‡]Institute for Advanced Synchrotron Light Source, National Institutes for Quantum Science and Technology (QST), Miyagi, Japan. [§]Japan Radioisotope Association, Tokyo, Japan. ^{**}ITER Delivery Department, Fusion For Energy, Barcelona, Spain.

ンクリートと鉄遮蔽で囲まれており、標的室へは運転停止時に迷路を通じて人が入域可能である。

Figures 2 と 3 は CHARM 施設の縦断面図(標的中心位置におけるビームライン垂直面)で、それぞれ 2015 年の元々のバルク遮蔽体系、2016 年以降の改造後の遮蔽体系を示している。標的中心は床から 129 cm のビームラインに位置している。標的の右側には可動式遮蔽があり、鉄(20 cm 厚)とコンクリート(20 cm 厚)を 4 枚重ねた形で構成されている。標的室の天井の上には、ビームラインから 185 cm 上に、10 cm 厚の大理石が設置されており、さらに、ビームラインから 240 cm 上に、80 cm の鉄と 360cm のコンクリートがバルク遮蔽として積み上げられている。これらのコンクリート、鉄、大理石の比重は、それぞれ 2.4、7.2、2.71 である。

Figures 3 と 4 は、改造後の遮蔽体系を示しており、以下の 2 種類の遮蔽実験を行なうことができる。一つは、普通コンクリート製の「試料ブロック」(removable sample block)であり、40 cm 厚の天井鉄遮蔽の上に設置されている。これには試料設置孔が 3 つの異なる高さに設けられている。もう一つは、「遮蔽材試験部」(material test location)であり、様々な種類や厚さの遮蔽試験体を設置することができる。

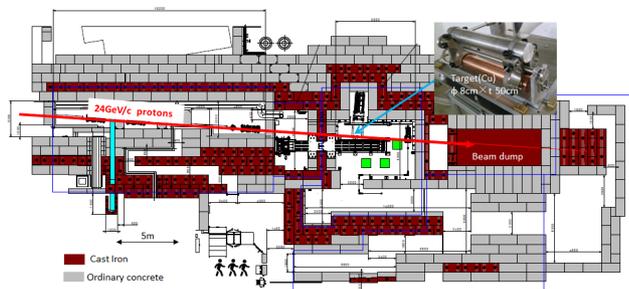


Figure 1: Plane view of the East Hall including the CHARM facility at the beam line height.

2.2 放射化検出器試料と実験体系

バルク遮蔽実験(2015 年)では、ビスマスとアルミニウムを放射化検出器として用いた。大きさは直径 8 cm×厚さ 1 cm および直径 4 cm×厚さ 0.4 cm の 2 種類であり、遮

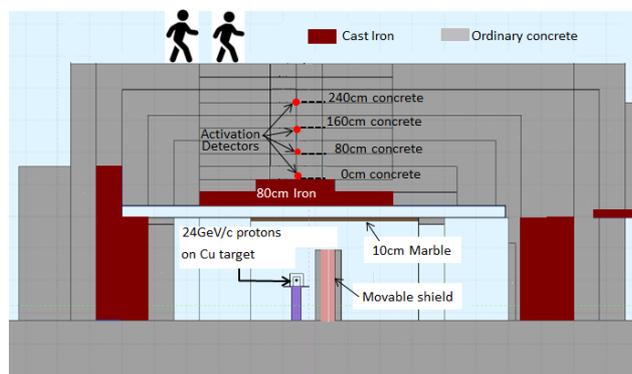


Figure 2: Vertical cross section of the original shield structure in the CHARM facility perpendicular to the beam axis at the target location. The beam travels from the front to back of this figure.

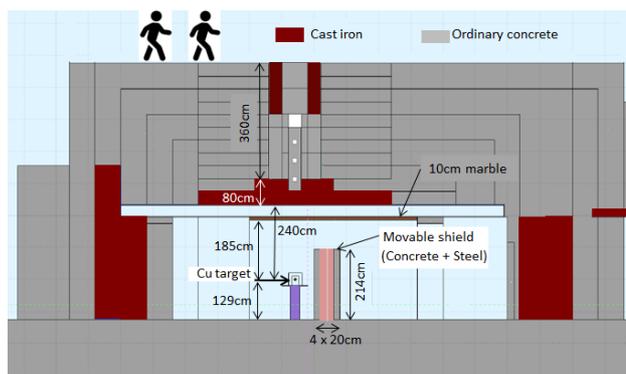


Figure 3: Vertical cross section of the modified shield structure in the CHARM facility perpendicular to the beam axis at the target location. The beam travels from the front to back of this figure.

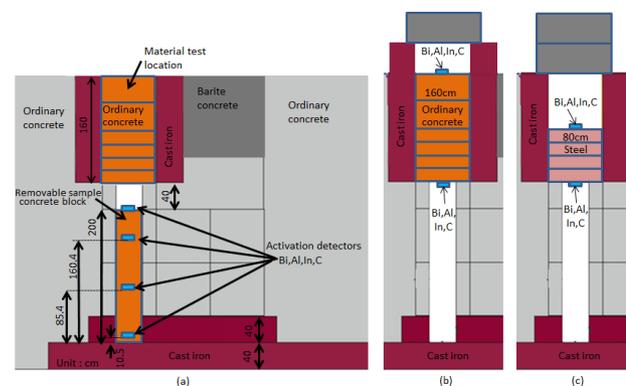


Figure 4: Locations of the activation detectors and configurations of the measurement in the modified shield structure showing shielding experiments with (a) the removable sample concrete block, and (b) concrete and (c) steel shields in the material test location.

蔽厚による中性子強度に応じて大きさの選定を行なった。遮蔽上部のコンクリートブロックを一旦取り除き、Fig. 2 に示す様に、試料を 0、80、120、240 cm のコンクリート厚に設置し、コンクリートブロックを戻して照射を行なった。

一方、Fig. 3 と Fig. 4 に示した 2016 年以降における改造後の遮蔽体系においては、放射化検出器として、上記の 2 つに加え、インジウムとグラフアイトを用いた。大きさは上記と同じ 2 種類で、遮蔽厚に応じて選定した。Fig. 4(a)に示す様に、試料を removable block の試料孔 3 カ所および最上端の合計 4 カ所に設置した。一方、Fig. 4(b)(c)に示す material test location では、普通コンクリート 40-160 cm 厚または鋼鉄 20-80cm 厚を用いて、材質と厚さを変え、その遮蔽の上および下に放射化検出器を設置した。これら removable block と material test location で用いられるコンクリートと鋼鉄の比重は、それぞれ 2.23 と 7.77 である。

迷路での漏洩中性子の測定には、アルミニウム検出器のみを用いた。大きさは上記と同じ 2 種類を中性子強度に応じて選定した。Fig. 5 に迷路の構造と検出器を設置した位置を示す。検出器は 5 つの通路の左右壁から中心位置およびビームラインの高さに 10 カ所設置した。

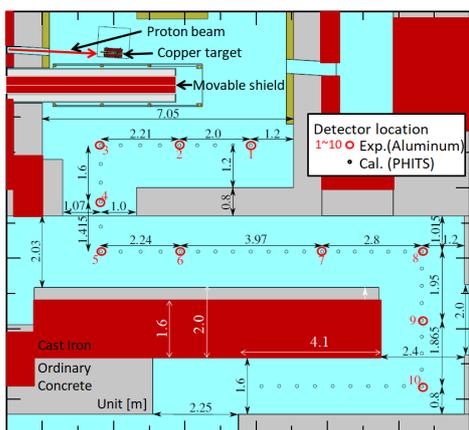


Figure 5: Maze structure and detector locations.

2.3 照射

CHARM における 24 GeV/c 陽子ビームの強度は最大で 6.7×10^{10} proton/s [4]である。相対ビーム強度を二次粒子モニター(Secondary Emission Chamber, SEC)で測定を行なった。遮蔽実験では、試料や遮蔽厚に応じて夜間を含めて 1~18 時間の照射を行ない、試料交換の際にはビームを一時停止して、遮蔽体の移動と試料交換を行なった。一方、迷路実験の際には、週末の 2 日半の照射を行なった。

2.4 放射能測定とデータ解析

取り出した試料は、CERN 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、 $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}(x=4-9)$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ 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。ビスマスに関しては、短半減期の ^{201}Bi と ^{202}Bi に対して 3 時間、中半減期の ^{203}Bi と ^{204}Bi に対して 15 時間、長半減期の ^{205}Bi と ^{206}Bi に対して 24 時間の測定を行なった。一方、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、インジウムに関しては 3 時間、グラフィットに関しては 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[5]を用いた。

3. モンテカルロ計算

各実験に対し、モンテカルロ法によるシミュレーションを実施した。

2015 年のバルク遮蔽体系に関しては、計算コードに PHITS Ver 3.02 [6]を用いた。このバルク遮蔽は、実際の施設が比較的簡素な構造で広い平板体系をしているため、シミュレーションでは簡易体系による 2 段階の計算を行ない、計算時間の短縮を図った。まず、24 GeV/c 陽子による銅標的から生成する 1 MeV 以上の中性子エネルギースペクトル角度分布を算出した。得られた 90 度方向

のエネルギースペクトルを線源として 2 段階目の遮蔽深層透過計算を行なった。十分広い 10 m の半径を持つ円板体系を用いて、線源位置から 10 cm 厚の大理石、80 cm 厚の鉄、800 cm 厚のコンクリートを配置し、ペンシルビームの中性子線源を大理石の中心に照射した。2 段階目の計算では、インポート法による分散低減法を用いて効率よく統計を蓄積し、コンクリート 40 cm 厚毎に表面交差評価法(surface crossing estimator)を設置して、10 m 半径の同円上を交差した中性子を全て積算して、その厚さの中性子エネルギースペクトルを評価した。この手法は、無限平板一様平行ビームによる次元の計算と理論的に等価の計算である。中性子エネルギースペクトルの絶対値は、最終的に、各評価位置と線源の距離の二乗で除すことにより、点線源としての結果が得られた。

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

Reaction	Half Life	Photon Energy [keV] (Emission Probability)
$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	4.486 h	336.0 (0.458)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	14.96 h	1368.6 (1.000) 2754.6 (0.999)
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	20.39 min	511.0 (1.995)
$^{209}\text{Bi}(n,4n)^{206}\text{Bi}$	6.24 d	803.1 (0.989) 881.0 (0.662) 1718.7 (0.318)
$^{209}\text{Bi}(n,5n)^{205}\text{Bi}$	15.31 d	703.4 (0.310) 1764.4 (0.325)
$^{209}\text{Bi}(n,6n)^{204}\text{Bi}$	11.22 h	899.2 (0.988) 984.0 (0.593)
$^{209}\text{Bi}(n,7n)^{203}\text{Bi}$	11.76 h	820.2 (0.297) 825.3 (0.146) 1847.4 (0.114)
$^{209}\text{Bi}(n,8n)^{202}\text{Bi}$	1.72 h	422.2 (0.837) 657.5 (0.606) 960.7 (0.994)
$^{209}\text{Bi}(n,9n)^{201}\text{Bi}$	1.80 h	629.1 (0.240)

2016 年から 2022 年の改造後の遮蔽体系に関しては、3 つの計算コード FLUKA Ver.4-2.2 (FLUKA.CERN) [7,8], PHITS Ver 3.24 [6], GEANT Ver 4.10.07-02 [9,10]を用いてシミュレーションを実施した。これらの計算においては、詳細な遮蔽形状を構築し、飛程長評価法(track-length estimator)を用いて検出器領域における中性子エネルギースペクトルを評価した。統計精度を上げるためにインポート法による分散低減法を用いた。中性子エネルギーの下限値は、FLUKA で熱中性子エネルギー、PHITS で 0.1 MeV、GEANT4 で 0.315 MeV である。

2018 年の迷路実験に関しては、2 つの計算コード、PHITS Ver.3.10 [6]および FLUKA [7,8]を用いてシミュ

レーションを実施した。Figure 5 に示す詳細な遮蔽形状を構築し、飛程長評価法を用いて検出器領域における中性子エネルギースペクトルを評価した。検出器領域の中心は、水平方向は、左右の壁から中心の位置に、垂直方向はビームラインの高さに設置した。

全てのモンテカルロシミュレーションにおいて、得られた中性子エネルギースペクトルは、 $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}(x=4-9)$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ および $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ に対する放射化断面積[11]を用いて積分し、放射性核種生成率を評価した。

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、2015 年のバルク遮蔽体系に対し Fig. 6 に示し、改造後の遮蔽体系に対し Fig. 7, 8 および 9 に示す。また、迷路における同様の減衰分布を Fig. 10 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 [5]によるゲルマニウム検出器の検出効率の誤差(4.3%)および SEC ビームモニタの誤差(7%)は含まれていない。また、Figs. 6-10 には、シミュレーションの結果も示して比較した。

Figure 6 では、生成率はバルク遮蔽の厚さに対して指数関数的な減衰が観察できる。シミュレーションとの比較では、 ^{24}Na や ^{206}Bi に対し 20%程度以内で、 ^{205}Bi 、 ^{204}Bi 、 ^{203}Bi に対し 30~50%以内で一致を示しており、 ^{202}Bi および ^{201}Bi に対しては 2 倍程度の過大評価を示している。

Figures 7, 8 および 9 は、改造後の遮蔽体系における、それぞれ Removable block、コンクリートおよび鋼鉄に対する生成率の減衰分布を示している。Removable block 体系では、FLUKA が実験データを 10%以内で再現している一方で、PHITS は 35%から 60%程度の過大評価を、GEANT4 は 2 倍程度の過大評価を示した。また、Material test location におけるコンクリートと鋼鉄に対しては、FLUKA が 30%以内、PHITS が 20%以内、GEANT4 が 40%以内の一致をそれぞれ示した。

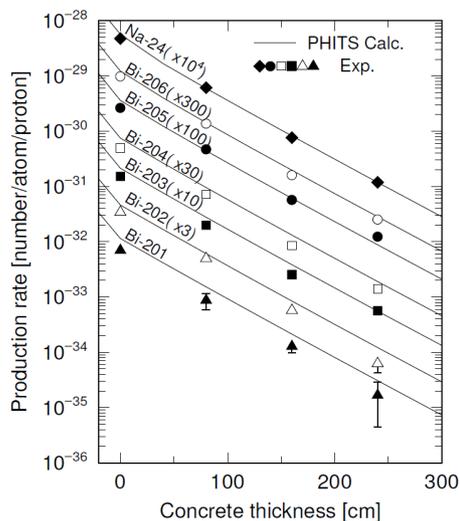


Figure 6: Comparison of experimental and simulated attenuation profiles of the radionuclide production rates in the original shield structure in the CHARM facility.

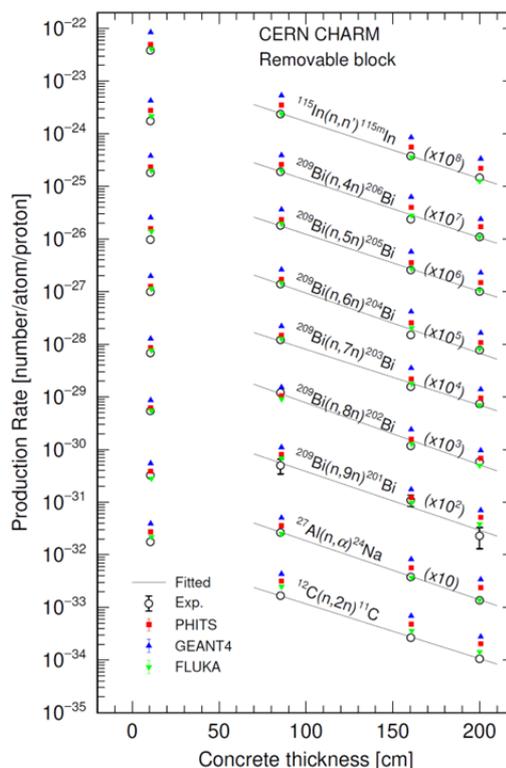


Figure 7: Attenuation profile of experimental and calculated production rates as a function of concrete thickness for the removable block configuration.

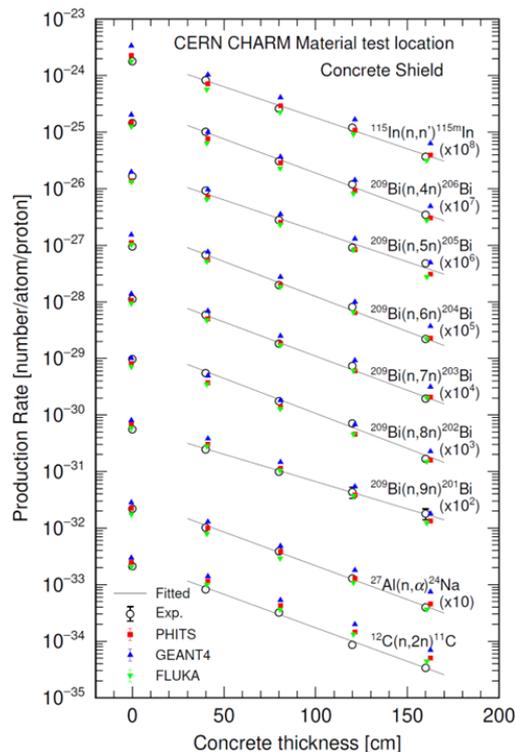


Figure 8: Attenuation profile of experimental and calculated production rates as a function of concrete thickness in the material test location.

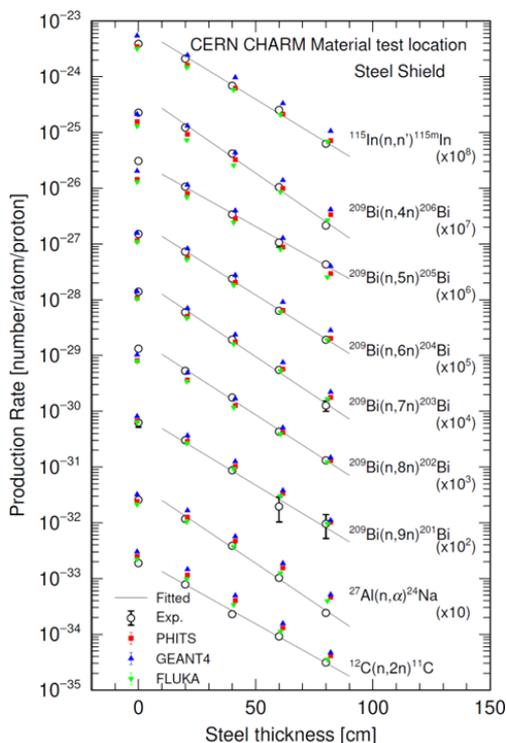


Figure 9: Attenuation profile of experimental and calculated production rates as a function of steel thickness in the material test location.

迷路における減衰分布を Fig. 10 に示す。 ^{24}Na の生成率が通路に沿った標的からの距離に応じて減衰していく分布が観察できる。シミュレーションの結果は全般的に良い一致を示しており、第 1 脚、第 2 脚で特に良い一致が見られた。一方、第 3 脚、第 4 脚において過大評価が見られるが、2 倍以内の差であった。検出器の第 8 番目より、直後の第 9 番目において高い生成率が実験とシミュレーションの両方で観察された。これは第 1 脚と第 2 脚の間の 80 cm の壁における高エネルギー中性子透過成分が大きく寄与していることが、追加のシミュレーションにより明らかとなった。

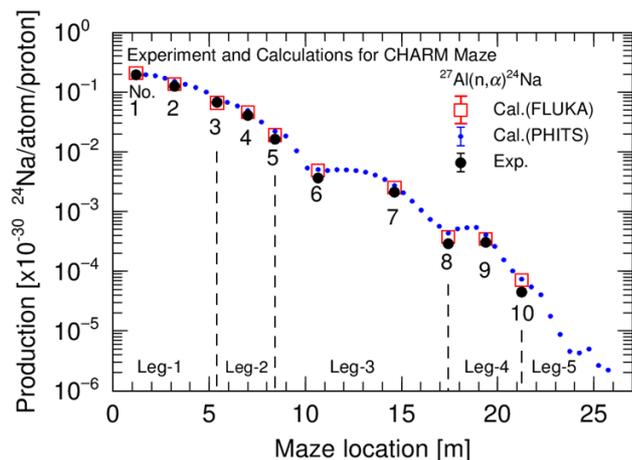


Figure 10: Attenuation profile of experimental production rates along the maze compared with the calculated ones.

5. 結論

CERN の CHARM 施設において、24 GeV/c 陽子ビームを用いた遮蔽および迷路の実験を行なった。バルク遮蔽および様々な遮蔽体を透過する中性子や、迷路を漏洩する中性子を放射化検出器により測定した。放射化検出器における $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}$ ($x = 4-9$), $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ 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評価し、その減衰分布を得た。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。本実験は、高エネルギー陽子加速器施設における中性子の遮蔽深層透過や迷路漏洩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

本実験を遂行するにあたり CERN の加速器制御室のスタッフおよび IRRAD、CHARM 両施設の実験グループスタッフ、ガンマ線スペクトル測定室のスタッフに多大なご協力を頂いた。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Nakao *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., 57, 9, 1022 (2020).
- [2] N. Nakao *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., (2023), doi:10.1080/00223131.2023.2239243
- [3] N. Nakao *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., 58, 8, 899 (2021).
- [4] L. Gagnon, Technical Report EAT8, EDMS, CERN 1270807 (2013).
- [5] F. L. Bronson, J. Radioanal. Nucl. Chem., 255, 137 (2003).
- [6] T. Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., 55, 684 (2018).
- [7] C. Ahdida *et al.*, Front. Phys., 9, 788253 (2022).
- [8] G. Battistoni *et al.*, Ann. Nucl. Energy, 82, 10 (2015).
- [9] J. Allison *et al.*, Nucl. Instr. Meth., A835, 186 (2016).
- [10] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A, 506, 250 (2003).
- [11] F. Maekawa *et al.*, Proc. 10th Int. Symp. on Reactor Dosimetry, p. 417, Osaka, Japan, September 12–17, 1999, American Society for Testing and Materials (2001).