

CERN 高エネルギー粒子加速器施設での放射線遮蔽・迷路実験

中尾 徳晶 福田 和寛

(技術研究所)

(土木技術本部)

Shielding and Maze Experiments at CERN High Energy Particle Accelerator facility

Noriaki Nakao and Kazuhiro Fukuda

CERN 高エネルギー加速器施設において、中性子の遮蔽透過および迷路漏洩の実験を行なった。エネルギー24 GeV/cの陽子ビームを50cm厚の銅標的に照射すると、二次中性子が生成し、遮蔽を透過し、迷路を漏洩して行く。実験では遮蔽内の様々な厚さおよび迷路内の様々な場所に放射化検出器を設置して中性子を測定した。放射化検出器の核反応として $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}$ ($x=4-9$)、 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ および $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ を利用し、放射性核種生成率を求め、遮蔽厚および迷路位置に対する減衰分布を得た。モンテカルロ法による放射線解析コードであるPHITS, FLUKA およびGEANT4により、実験を模擬したシミュレーションを実施し、実験値に対し2倍以内の一致を得た。

Shielding and maze experiments of high-energy neutrons were performed at the CERN High-energy Accelerator 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 $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}$ ($x=4-9$), $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$, 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。そのため、建設コストの内、遮蔽のコストが占める割合が上昇し、安全を担保して適切な遮蔽設計を行なうことが重要となる。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CHARM施設を含む東ホール棟の平面図を図-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施設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。

図-2と図-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年の改造前のバルク遮蔽体系、2016年以降の改造後の遮蔽体系を示している。標的中心は床から高さ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360 cm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。

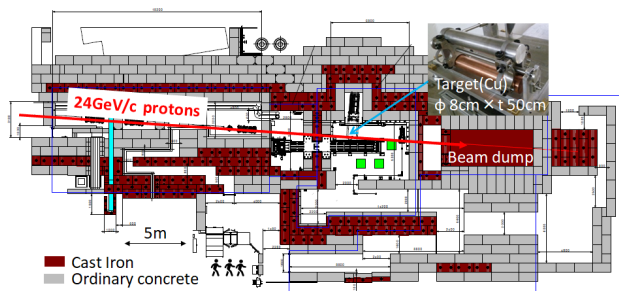


図-1 CHARM施設を含む東ホールのビームライン高さにおける平面図

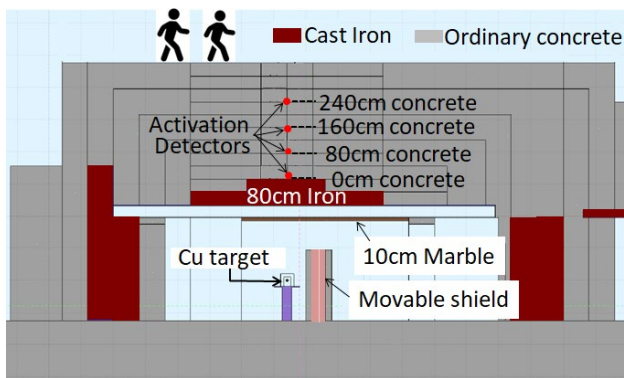


図-2 改造前 CHARM施設の銅標的における縦断面図および放射化検出器の設置位置

図-3と図-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「角柱試料ブロック」(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。

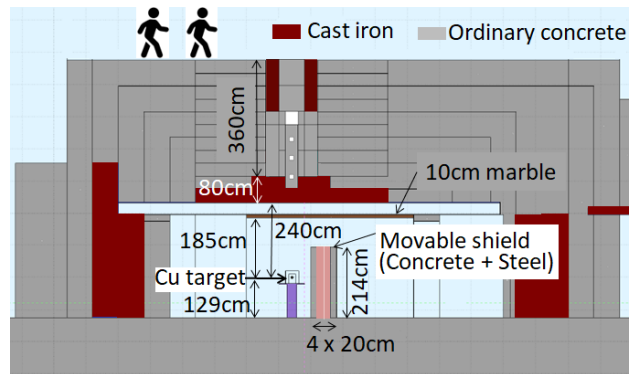


図-3 改造後 CHARM施設の銅標的における縦断面図

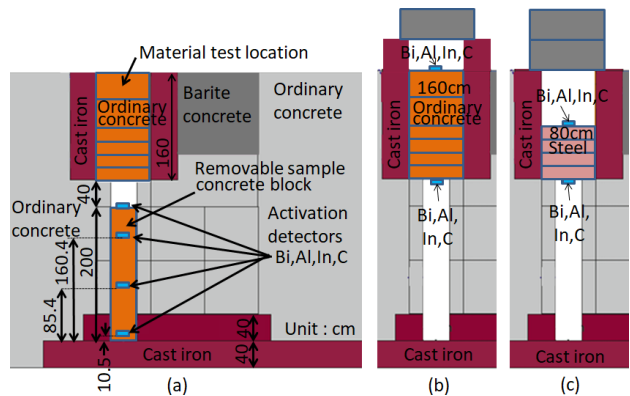


図-4 改造後 CHARM施設の遮蔽上部における縦断面図および放射化検出器の設置位置 (a)角柱試料ブロック、(b)遮蔽材試験部コンクリート、(c)遮蔽材試験部鋼鉄

2.2 放射化検出器試料と実験体系

改造前のバルク遮蔽実験(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、図-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、図-3と図-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ィイトを用いた。大きさは上記と同じ2種類で、遮蔽厚に応じて選定した。図-4(a)に示す様に、試料を角柱試料ブロックの試料孔3カ所および最上

端の合計4カ所に設置した。図-4(b)(c)に示す遮蔽材試験部(material test location)では、普通コンクリート40-160cm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。これら角柱試料ブロックと遮蔽材試験部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。図-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。

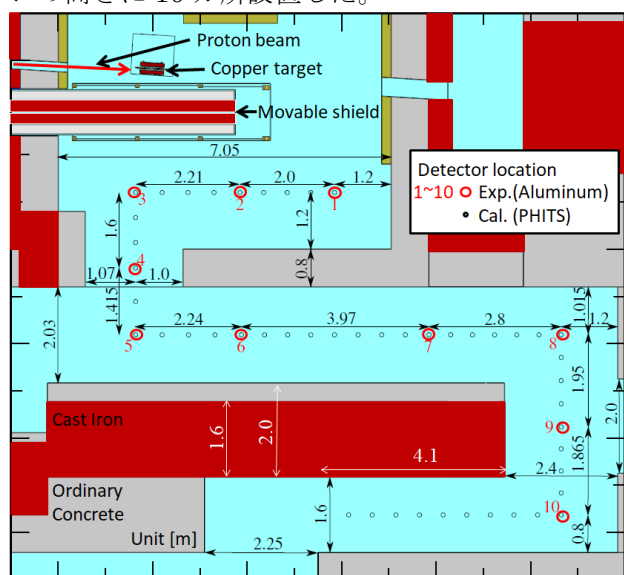


図-5 CHARM 施設の迷路構造と検出器位置

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/s⁴⁾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、 $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}$ ($x = 4-9$)、 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 、

$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ 及び $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ である。表-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、グラフアイトに関しては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。

表-1 放射性核種の生成核反応、半減期、放出ガンマ線エネルギーおよび放出率

核反応	半減期	ガンマ線エネルギー [keV] (放出率)
$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	4.486 時間	336.0 (0.458)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	14.96 時間	1368.6 (1.000) 2754.6 (0.999)
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	20.39 分	511.0 (1.995)
$^{209}\text{Bi}(n,4n)^{206}\text{Bi}$	6.24 日	803.1 (0.989) 881.0 (0.662) 1718.7 (0.318)
$^{209}\text{Bi}(n,5n)^{205}\text{Bi}$	15.31 日	703.4 (0.310) 1764.4 (0.325)
$^{209}\text{Bi}(n,6n)^{204}\text{Bi}$	11.22 時間	899.2 (0.988) 984.0 (0.593)
$^{209}\text{Bi}(n,7n)^{203}\text{Bi}$	11.76 時間	820.2 (0.297) 825.3 (0.146) 1847.4 (0.114)
$^{209}\text{Bi}(n,8n)^{202}\text{Bi}$	1.72 時間	422.2 (0.837) 657.5 (0.606) 960.7 (0.994)
$^{209}\text{Bi}(n,9n)^{201}\text{Bi}$	1.80 時間	629.1 (0.240)

3. モンテカルロ計算

各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を実施した。

2015年の改造前バルク遮蔽体系に関しては、計算コードに PHITS Ver 3.02⁶⁾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、線状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、分散低減法の一つであるインポートランス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領域(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、その位置で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一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。

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 3.24⁶⁾、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。これらの計算では、詳細な遮蔽形状を構築し、飛程長評価領域(track-length estimator)を用いて実験時の検出器に相当する領域での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分散低減法の一つであるインポートランス法を用いた。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.3.10⁶⁾およびFLUKA^{7,8)}を用いてシミュレーションを実施した。図-5に示す詳細な遮蔽形状を構築し、飛程長評価領域を用いて実験時の検出器に相当する領域での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、 $^{209}\text{Bi}(n,xn)^{210-x}\text{Bi}$ ($x=4-9$)、 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ 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年の改造前バルク遮蔽体系に対し図-6に示し、改造後の遮蔽体系に対し図-7、図-8および図-9に示す。また、迷路における同様の減衰分布を図-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、LabSOCS⁵⁾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、図-6~図-10には、シミュレーションの結果も示して比較した。

図-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。

図-7、図-8および図-9は、改造後の遮蔽体系における、それぞれ角柱試料ブロック、遮蔽材試験部コンクリートおよび遮蔽材試験部鋼鉄に対する生成率の減衰分布を示している。角柱試料ブロック体系では、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、遮蔽材試験部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。

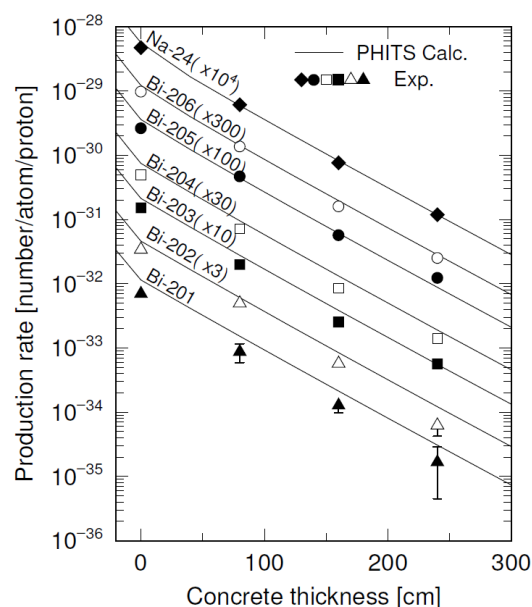


図-6 改造前 CHARM 施設上部遮蔽における放射性核種生成率の実験値と計算値の比較

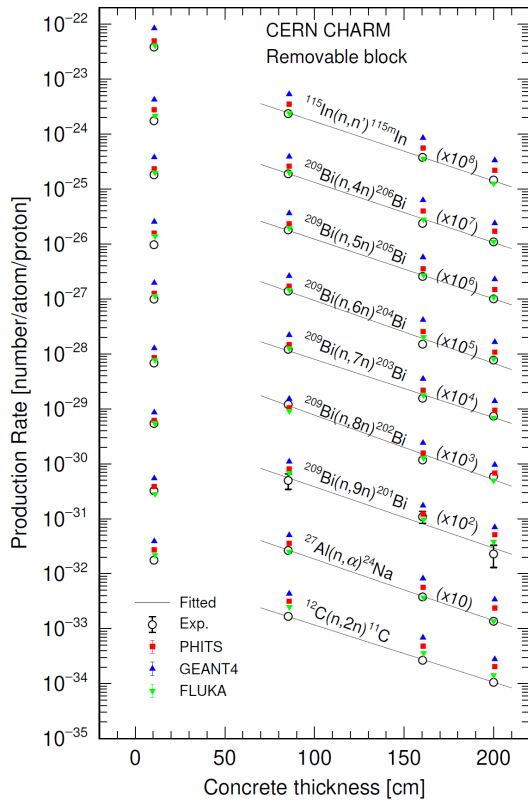


図-7 改造後 CHARM 施設の角柱試料ブロックにおける放射性核種生成率の実験値と計算値の比較

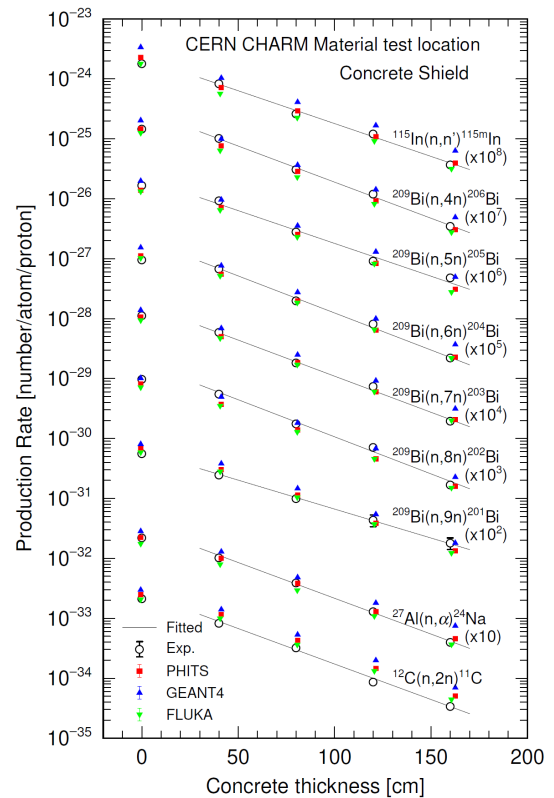


図-8 改造後 CHARM 施設の遮蔽材試験部コンクリートにおける放射性核種生成率の実験値と計算値の比較

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 $^{209}\text{Bi}(n, xn)^{210-x}\text{Bi}$ ($x = 4-9$)、 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 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。

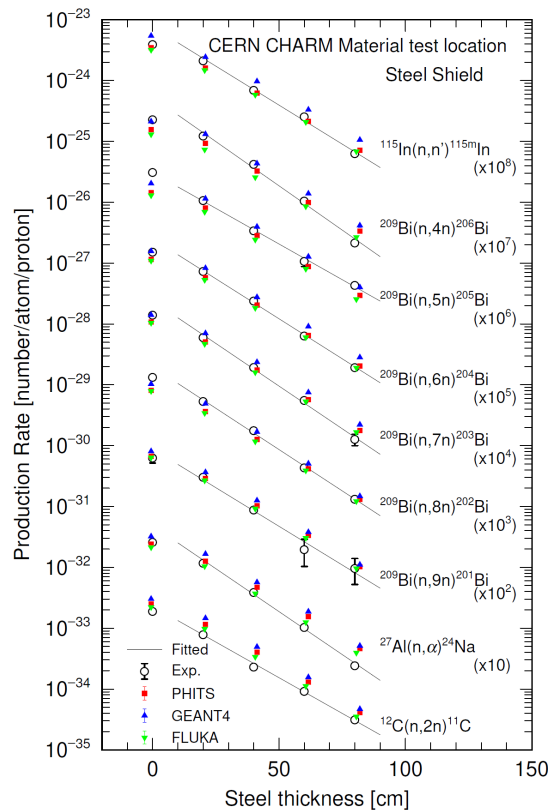


図-9 改造後 CHARM 施設の遮蔽材試験部鋼鉄における放射性核種生成率の実験値と計算値の比較

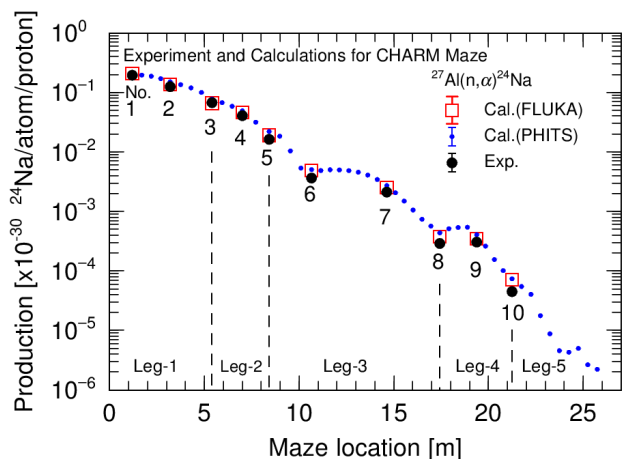


図-10 CHARM 施設迷路内における放射性核種生成率の実験値と計算値の比較

謝辞

本実験は CERN のスタッフ (Robert Froeschl 氏、Davide Bozzato 氏、Elpida Iliopoulou 氏、Angelo Infantino 氏、Arnaud Devienne 氏、Fabio Pozzi 氏、Marco Tisi 氏、Tommaso Lorenzon 氏、Nabil Mena 氏、Nikolas Riggaz 氏、Heinz Vincke 氏、Stefan Roesler 氏、Markus Brugger 氏ら) と共同で行なった。CHARM 施設での照射実験、ガンマ線スペクトル測定室でのゲルマニウム半導体検出器による測定等、CERN 全般での多くの業務、作業、サポート等のご協力を頂いた。ここに深く感謝いたします。

また、高エネルギー加速器研究機構の佐波俊哉教授、萩原雅之准教授、大山隆弘技師、長畔誠司技師、李恩智助教、広島大学の梶本剛助教、京都大学の八島浩助教、産業技術総合研究所の松本哲郎主任研究員、増田明彦主任研究員、日本アイソトープ協会の上叢義朋専務理事、九州大学の執行信寛助教らと実験および解析等を共同で行ない、多くのご協力を得た。ここに深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) N. Nakao et al., "Attenuation Length of High Energy Neutrons Through a Thick Concrete Shield Measured by Activation Detectors at CHARM," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 57, 9, 1022 (2020)
- 2) N. Nakao et al., "Measurement and simulations of high-energy neutrons through a various thickness of concrete and steel shields using activation detectors at CHARM and CSBF," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 61, 4, 429 (2024).
- 3) N. Nakao et al., "Measurements and Monte Carlo Simulations of High-Energy Neutron Streaming Through the Access Maze Using Activation Detectors at 24 GeV/c Proton Beam Facility of CERN/CHARM," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 58, 8, 899 (2021).
- 4) L. Gatignon, "Beam Properties for the East Area Irradiation Facility in the T8 Beam Line," Technical Report EAT8, EDMS, CERN 1270807 (2013).
- 5) 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, 137 (2003).
- 6) 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).
- 7) C. Ahdida et al., "New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code," *Front. Phys.*, 9, 788253 (2022).
- 8) G. Battistoni et al., "Overview of the FLUKA Code," *Ann. Nucl. Energy*, 82, 10 (2015).
- 9) J. Allison et al., "Recent Developments in GEANT4," *Nucl. Instr. Meth.*, A835, 186 (2016).
- 10) S. Agostinelli et al., "Geant4 - A Simulation Toolkit," *Nucl. Instr. Meth. A*, 506, 250 (2003).
- 11) F. Maekawa, et al., "Production of a dosimetry cross section set up to 50 MeV", Proc. 10th International Symposium on Reactor Dosimetry, Sep. 12-17, 1999, Osaka, Japan, American Society for Testing and Materials, p. 417 (2001).