

核データ部会企画セッション

「ミューオンの物質内輸送とその学際的応用」

(3) ミューオン輸送の PHITS シミュレーション

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
安部 晋一郎
abe.shinichiro@jaea.go.jp

1. はじめに

ミューオンは第二世代の荷電レプトンで、質量は電子の 200 倍程度、その平均寿命はおよそ $2.2 \mu\text{sec}$ である。現在まで、様々なミューオンの応用研究が行われている。例えば、高エネルギー二次宇宙線ミューオンを利用した構造物の透視（ミューオンラジオグラフィ）があり、透過法による火山やピラミッドなどの巨大構造物の内部イメージング[1-3]や、散乱法による原子炉やコンテナ中の核物質の検出[4, 5]などに利用されている。ミューオンラジオグラフィ以外にも、二次宇宙線ミューオンが生成した地中の放射性核種による地質年代測定[6, 7]や、原子が負ミューオンを捕獲した際に放出される特性 X 線を用いた非破壊元素分析[8, 9]、重水素または三重水素に負ミューオンを捕獲させることで連鎖的に核融合を起こさせるミューオン触媒核融合[10]、負ミューオン原子核捕獲反応を利用した核変換[11]などが応用研究として挙げられる。

日本原子力研究開発機構（JAEA）、高度情報科学技術研究機構（RIST）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）が中心となって開発を進めている粒子輸送計算コード PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）[12]は、任意の体系中の放射線の核反応と輸送を計算する汎用モンテカルロコードである。最近の開発で、ミューオンと物質との相互作用（制動放射、電子陽電子対生成、ミューオン光核反応、負ミューオン捕獲反応）の計算モデルを構築し、現在開発中の PHITS に導入した。これにより、稀反応過程を除くほぼ全てのミューオンと物質との相互作用を計算できるようになった。

この記事では、PHITS に搭載したミューオン反応計算モデルの概要を記すと共に、モデルのベンチマーク結果を示す。またシミュレーションへの応用例として、負ミューオン捕獲反応による長寿命放射性核種の核変換および二次宇宙線ミューオン起因ソフトウェアに関する PHITS シミュレーションの結果を紹介する。

2. PHITS のミュオン輸送に関するモデルの概要

2.1 ミュオンの制動放射

ミュオンの制動放射には、標的原子核からの寄与と原子電子からの寄与が存在する。PHITS では、Kelner らにより提案された原子核に依る制動放射の微分断面積[13]と、原子電子に依る制動放射の微分断面積[14]を採用した。これらを積分することで制動放射の断面積を算出するとともに、ミュオンから制動放射光子へのエネルギー移行割合 ν_b のサンプリングを行う。制動放射によるミュオンの散乱角度 $\theta_{\mu,b}$ に関しては、散乱角度の二乗平均平方根 (Root Mean Square, RMS) を分散に持つガウス分布からサンプリングする。RMS の算出には、Ginneken [15]により導出された経験式を用いる。また、制動放射による標的原子核の反跳エネルギーは無視できるほど小さいと仮定し、エネルギー保存則および運動量保存則から制動放射光子のエネルギーと放出角度を計算する。

2.2 ミュオンによる電子陽電子対生成

ミュオンによる電子陽電子対生成に関して、PHITS では Kokoulin と Petrukhin により提案された微分断面積[16, 17]に基づいて、ミュオンから電子・陽電子対へのエネルギー移行割合 ν_p および電子と陽電子のエネルギー差を意味する非対称パラメータ ρ をサンプリングする。電子陽電子対生成によるミュオンの散乱角度 $\theta_{\mu,p}$ は、制動放射と同様に Ginneken [15]により導出された経験式より RMS を計算し、ガウス分布からサンプリングを行う。また、電子陽電子対生成における標的原子核の反跳エネルギーも無視できるほど小さいと仮定し、エネルギー保存則および運動量保存則から電子および陽電子のエネルギーと放出角度を計算する。

2.3 ミュオン光核反応

高エネルギーのミュオンは、仮想光子を介して原子核と相互作用する。実光子の光核反応と同様に、仮想光子のエネルギーに応じてその反応メカニズムは異なる。PHITS では、Minorikawa [18]によって理論的に導出された微分断面積を用いて、入射ミュオンから仮想光子へのエネルギー移行量 ν_v と四元運動量移行の 2 乗 Q^2 のサンプリングを行い、 ν_v と Q^2 に基づき反応後のミュオンと仮想光子のエネルギー及び運動方向を決定する。仮想光子と標的原子核との相互作用は、仮想光子のエネルギーおよび実光子に関する光核反応断面積に基づいて、巨大共鳴反応、準重陽子崩壊反応、核子共鳴反応、核子非共鳴反応から反応チャネルを選択した後、PHITS 搭載の光核反応モデル[19]で計算を行う。

2.4 負ミュオン捕獲反応

負ミュオンは標的の中で減速を受けて静止すると標的原子によって捕獲され、その結

果としてミュオン原子が形成される。捕獲された負ミュオンは内側の軌道へと遷移し、その過程において特性 X 線が放出される。1s 軌道まで遷移した負ミュオンは軌道上で崩壊するか、原子核との弱い相互作用により次の素過程の原子核吸収反応を起こす。



PHITS では、muonic atom cascade program [20]を用いて原子に捕獲された負ミュオンの遷移過程を計算する。また、軌道上での負ミュオンの崩壊率は真空中での崩壊率に Huff factor [21, 22]を乗じて算出する。捕獲率の計算には Goulard-Primakoff formula [23]を用いる。算出した崩壊率、捕獲率に基づき、軌道上の負ミュオンがどちらの反応へ向かうかを決定する。原子核捕獲が選択された際、(1)の反応によって核子が得るエネルギーは Amado [24]による原子核内の核子の運動量分布と Singer [25]により提示された励起関数に基づいてサンプリングする。原子核内でのカスケード過程は JQMD モデル[26, 27]で、その後の蒸発過程は GEM [28]を用いてそれぞれ計算する。

3. ミュオン輸送に関する測定実験の PHITS 解析

制動放射、電子陽電子対生成、ミュオン光核反応に起因するミュオンの阻止能のベンチマークとして、地中での二次宇宙線ミュオンの輸送計算を行った。EXPACS [29]で得られた 100GeV から 20TeV までの二次宇宙線ミュオンを地面へ垂直に入射させた条件について、深さ方向のミュオン透過フラックスを計算した。その結果、図 1 に示すように PHITS は測定値[30, 31]を非常に良く再現した。

高エネルギーミュオンの相互作用による粒子生成の評価として、CERN で実施された NA54 実験[32]および NA55 実験[33]について計算を行った。NA54 実験では、厚さ 3m 程度のコンクリート壁の後方に標的を配置し、100GeV/c および 190GeV/c のミュオンをコンクリート壁前面から照射し、標的内で得られた放射性核種の生成断面積が測定された。地質年代測定で利用される放射性核種の生成反応である $O(\mu, x)^{10}\text{Be}$ 、 $O(\mu, x)^{14}\text{C}$ 、 $\text{Si}(\mu, x)^{26}\text{Al}$ および $\text{Ca}(\mu, x)^{36}\text{Cl}$ の生成断面積の測定値と計算結果を図 2 に示す。 ^{14}C 以外の

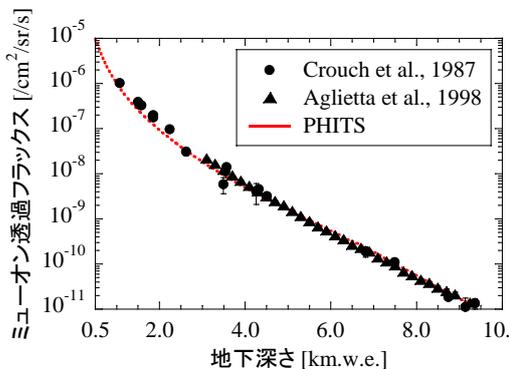


図 1. 地中における二次宇宙線ミュオン透過フラックス [30, 31]

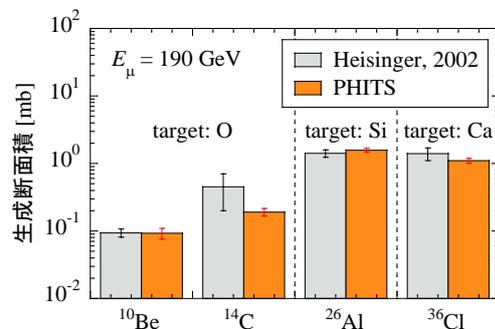


図 2. 190GeV/c ミュオン照射により得られる放射性核種の生成断面積 [32]

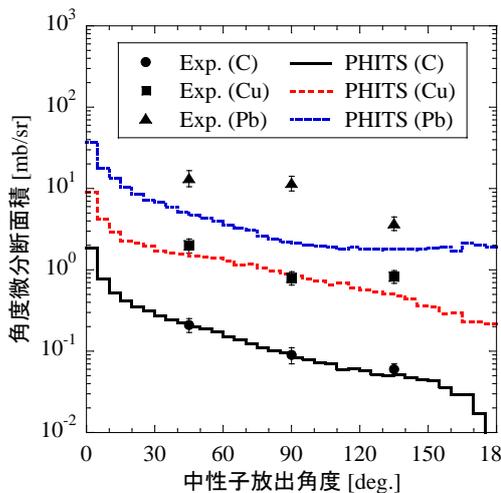


図 3. 190GeV/c ミューオン照射により得られる
中性子の角度微分断面積 [33]

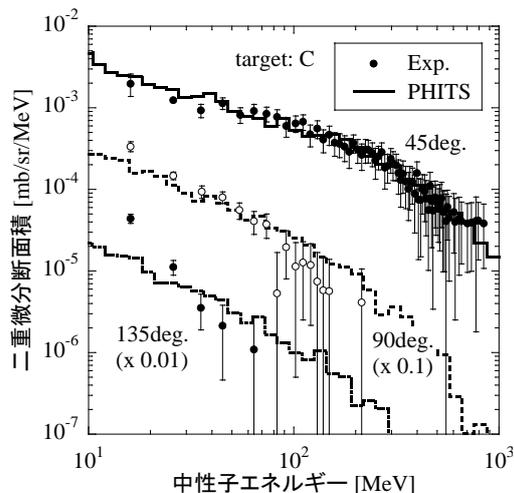


図 4. 190GeV/c ミューオン照射により得られる
中性子の二重微分断面積 [33]

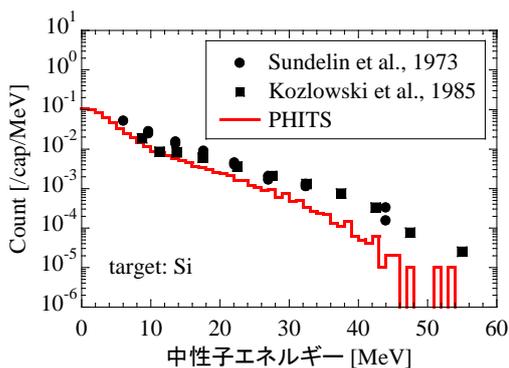


図 5. Si による負ミューオン捕獲反応から得られ
る中性子の放出エネルギー分布 [34, 35]

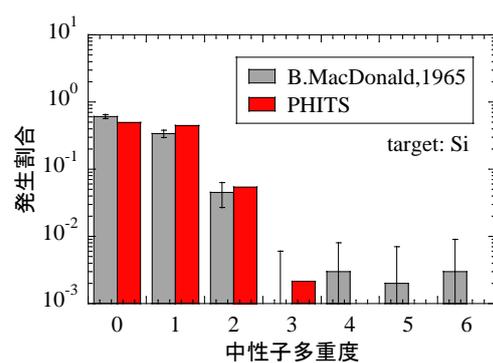


図 6. Si による負ミューオン捕獲反応から得られ
る中性子多重度 [36]

生成核種に関しては実験値を非常に良く再現しており、 ^{14}C に関しても誤差の範囲内での一致が得られることが実証された。NA55 実験では、炭素標的 (直径 8cm、厚さ 75cm)、銅標的 (直径 10cm、厚さ 25cm)、鉛標的 (直径 20cm、厚さ 10cm) に 100GeV/c および 190GeV/c のミューオンを照射し、ミューオン照射方向に対して 45 度、90 度、135 度方向に放出される 10MeV 以上の中性子が測定された。図 3 に各標的に関する角度微分断面積の実験値と計算結果を示す。鉛標的からの中性子放出は全放出角度で過小評価する一方、炭素、銅標的に関しては実験値との良い一致が得られた。また、図 4 に炭素標的に関する二重微分断面積の実験値と計算結果を示す。放出中性子のエネルギー分布の計算結果について、135 度方向への放出では実験値の傾向と差異が見られるが、45 度および 90 度方向への放出に関しては実験値との良好な一致を示した。

負ミューオン捕獲反応からの粒子生成について評価するため、標的内で静止する程度

のエネルギーの負ミューオン照射による中性子生成に関して計算を行った。図 5 にシリコン標的から生成される中性子の放出エネルギー分布の実験値[34, 35]と計算結果を示す。高エネルギー中性子放出に関して実験値の過小評価が見られるが、その他は概ね実験値と一致する結果となった。図 6 に 1 回の反応から放出される中性子数を意味する中性子多重度の実験値[36]と計算結果を示す。中性子多重度に関して、実験値の信頼できる範囲において 30%以内の一致が得られた。

4. 負ミューオン捕獲反応による核変換の解析

原子力利用において放射性廃棄物の処理・処分の負担軽減が課題となっており、高レベル放射性廃棄物の分離・核変換技術の研究が進められている[37]。マイナーアクチノイドを核変換した結果、放射性廃棄物の長期保管の主因は残された長寿命核分裂生成物(LLFP)となる。よって LLFP の核変換を行うことで更なる負担軽減が期待され、中性子、光子、負ミューオンを用いた核変換の反応経路の研究が行われている[38, 39]。

本研究では負ミューオン捕獲反応による核変換に着目し、LLFP である ^{79}Se および ^{135}Cs 標的への負ミューオン照射計算を行った。PHITS で計算した負ミューオン捕獲反応により得られる放射性核種の生成割合と、それぞれの核種の崩壊系列を表 1 および表 2 に示す。 ^{79}Se 標的に関しては 20%程度、 ^{135}Cs 標的に関しては 13%程度の生成核種がベータ崩壊を経て変換前の核種に戻る一方、80%程度は安定核種または短寿命核種に変換されることが分かった。

計算結果から得られた変換効率より、核変換に要する時間を次式で概算した。

$$t = N_A \times \frac{g}{M} \times \frac{\alpha}{\phi} \quad (2)$$

ここで、 N_A はアボガドロ数、 g は使用済核燃料に含まれる LLFP の質量、 M は LLFP の質量数、 α は変換効率、 ϕ は負ミューオン源の強度である。1 トンの使用済核燃料に含まれる ^{135}Cs は 500 g 程度であり[40]、負ミューオン源の強度として RCNP の MuSIC [41] で得られる最大値である $10^8 \mu/\text{sec}$ を想定した場合、核変換には 850 万年程度要することが

表 1. ^{79}Se 標的からの生成核種の割合

| 生成割合 [1/muon] | 0.076 | 0.265 | 0.304 | 0.201 |
|------------------|--|--|--|---|
| 崩壊系列 (半減期) | ^{76}As (1.09d) ▼ ^{76}Se (stable) | ^{77}As (1.62d) ▼ ^{77}Se (stable) | ^{78}As (1.51h) ▼ ^{78}Se (stable) | ^{79}As (9.01m) ▼ ^{79}Se (3e+5y) |

表 2. ^{135}Cs 標的からの生成核種の割合

| 生成割合 [1/muon] | 0.129 | 0.224 | 0.393 | 0.125 |
|------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|---|
| 崩壊系列 (半減期) | ^{132}Xe (stable) | ^{133}Xe (5.25d) ▼ ^{133}Cs (stable) | ^{134}Xe (stable) | ^{135}Xe (9.14h) ▼ ^{135}Cs (2.3e+6y) |

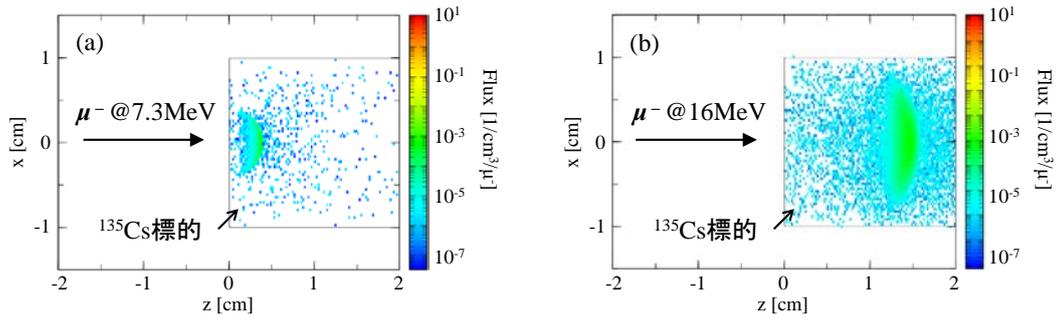


図7. ^{135}Cs 標的への単色エネルギー負ミューオン照射により生成される核種の空間分布

分かった。この結果より、負ミューオンを用いた LLPF の核変換の実現には非常に高強度の負ミューオン源が必要となることが示された[42]。図7に ^{135}Cs 標的へ単色エネルギーの負ミューオンを照射した際に生成される核種の空間分布に関する PHITS 計算結果を示す。負ミューオンは静止直前に捕獲されるため、入射エネルギーに応じた深さで核種が生成されることが確認できる。一方で、多重クーロン散乱の影響により、高エネルギー照射になるほど生成核種の動径方向分布がより広がることも判明した。

将来、高強度の負ミューオン源が開発されて LLFP の核変換を行う際、標的サイズ・形状や負ミューオン照射条件などの最適化に PHITS が貢献することを期待している。

5. 二次宇宙線ミューオン起因ソフトエラーの解析

放射線が半導体デバイスに入射した際に生じる電子機器の一時的な誤動作はソフトエラーと呼ばれ、地上環境下では主に二次宇宙線中性子がソフトエラーの主因となる。しかし、半導体デバイスの微細化に伴い放射線耐性は低下しており、また中性子は建屋やサーバー筐体による遮蔽による効果を受ける一方でミューオンは透過性が高いため、近年は二次宇宙線ミューオンによる影響が懸念されている。

本研究では、設計ルール（半導体部品での基本的な配線の太さ）25nm の NMOSFET に関して、PHITS と多重有感領域モデル[43]を用いたソフトエラーシミュレーションを実施した。初めに、遮蔽物として地面を想定し、二次宇宙線起因ソフトエラー率の地下深さ方向に対する依存性を調査した。図8に二次宇宙線中性子起因ソフトエラー率と二次宇宙線ミューオン起因ソフトエラー率を示す。地表面付近では二次宇宙線中性子がソフトエラーの主因である一方、深さ数 m では中性子遮蔽効果により二次宇宙線中性子起因ソフトエラー率は1%未満まで低下し、二次宇宙線ミューオンがソフトエラーの主因となることがわかった。この結果より、中性子が遮蔽された環境においては二次宇宙線ミューオンの影響を考慮する必要があることが示された。

二次宇宙線ミューオン起因ソフトエラー率に対する、各物理過程の寄与を調査した結果を図9に示す。ここで臨界電荷量とは、ソフトエラーが発生するために必要な収集電

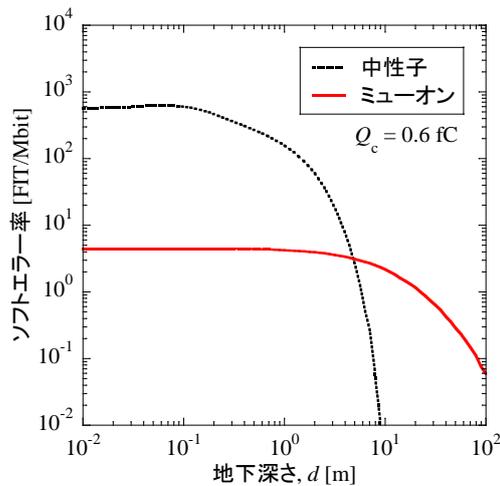


図 8. 地下での二次宇宙線中性子・ミュオン起因ソフトウェア率

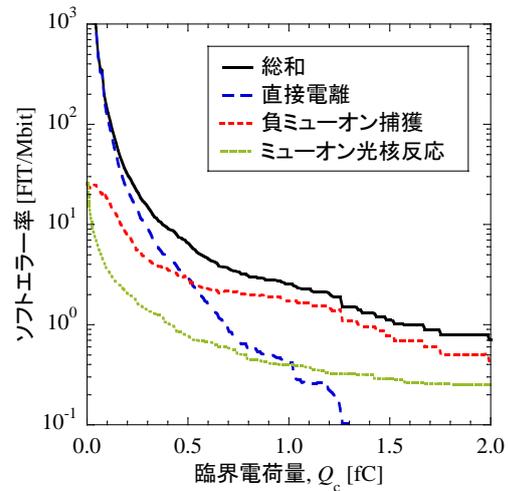


図 9. 地上における二次宇宙線ミュオン起因ソフトウェア率への各反応過程の寄与

荷量の閾値を意味する。入射ミュオンによる直接電離の影響は臨界電荷量の低い領域でのみ顕著であり、臨界電荷量が 0.6fC 以上の領域では負ミュオン捕獲反応が主因となる事が判明した。ミュオン起因ソフトウェアの測定実験は現在のところ正ミュオン照射のみ実施されているが、本解析結果は負ミュオン照射実験の必要性を示唆している。[44]

6. おわりに

本稿では、PHITS に導入したミュオン反応モデルの概要を記すと共に、モデルのベンチマークを行った。その結果、地中でのミュオン透過フラックスに関して測定値を非常に良く再現した。ミュオン反応からの生成粒子情報についても概ね良い一致が得られたが、鉛標的からの中性子生成に関しては実験値を過小評価することが分かった。鉛標的からの中性子生成の過小評価は、他の計算コードでも同様に報告されており[45-47]、検討を進めるためにも新たなミュオン照射実験の実施が求められる。また PHITS のミュオン応用研究への適用例として、負ミュオン捕獲反応による長寿命放射性核種の核変換と、二次宇宙線ミュオンによるソフトウェアに関する研究成果を紹介した。今回ミュオン反応モデルを実装した PHITS が、ミュオン応用研究分野で利用され、研究の発展に貢献できれば幸いである。

謝辞

本研究の一部は京都女子大学の水野義之教授、九州大学の渡辺幸信教授の御協力を頂き実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Alvarez LW, Anderson JA, Bedwei FEI et al. Search for Hidden Chambers in the Pyramids. *Science*. 1970; 167:832-839.
- [2] Nagamine K, Iwasaki M, Shimomura K et al. Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction. *Nucl. Instr. Meth. A* 1995; 356:585-595.
- [3] Carbone D, Gibert D, Marteau J et al. An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy). *Geophys. J. Int.* 2013; 196:633-643.
- [4] Morris CL, Alexander CC, Bacon JD et al. Tomographic Imaging with Cosmic Ray Muons. *Sci. Global Security* 2008; 16:37-53.
- [5] Miyadera H, Borozdin KN, Greene SJ et al. Imaging Fukushima daiichi reactors with muons. *AIP Advances* 2013; 3:052133.
- [6] Stone JOH, Evans JM, Fifield LK et al. Cosmogenic chlorine-36 production in calcite by muons. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1998; 62:433-454.
- [7] Kim KJ, Englert PAJ. Profiles of in situ ^{10}Be and ^{26}Al at great depths at the Macraes Flat, East Otago, New Zealand. *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2004; 223:113-126.
- [8] Reidy JJ, Hutson RL, Daniel H et al. Use of Muonic X Rays for Nondestructive Analysis of Bulk Samples for Low Z Constituents. *Anal. Chem.* 1978; 50:40-44.
- [9] Kubo MK, Moriyama H, Tsuruoka Y et al. Non-destructive elemental depth-profiling with muonic X-rays. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2008; 278:777-781.
- [10] Nagamine K. *Introductory Muon Science*. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 2003. p.1-208.
- [11] Charalambus S. Nuclear Transmutation by Negative Stopped Muons and the Activity Induced by the Cosmic-Ray Muons. *Nucl. Phys. A.* 1971; 166:145-161.
- [12] Sato T, Niita K, Matsuda N et al. Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2013; 50:913-923.
- [13] Kelner SR, Kokoulin RP, Petrukhin AA. About Cross Section for High-Energy Muon Bremsstrahlung. MEPHI-024-95, CERN preprint 1995.
- [14] Kelner SR, Kokoulin RP, Petrukhin AA. Bremsstrahlung from Muons Scattered by Atomic electrons. *Phys. Atom. Nucl.* 1997; 60:657-665.
- [15] Ginneken AV. Energy Loss and Angular Characteristics of High Energy electromagnetic Processes. *Nucl. Instr. Meth. A.* 1986; 251:21-39.
- [16] Kokoulin RP, Petrukhin AA. Influence of the Nuclear Formfactor on the Cross-Section of Electron Pair Production by High Energy Muons. *Proc. 12th Int. Cosmic Ray Conf.*; 1971 Aug 16-25; Hobart (Australia). vol.6. p.2436.

- [17] Kelner SR. Pair Production in Collisions between Muons and Atomic Electrons. *Phys. Atom. Nucl.* 1998; 61:448-456.
- [18] Minorikawa Y, Kitamura T, Kobayakawa K. The photonuclear Energy Loss of Cosmic-Ray Muons and its Relation with Photon-Nucleon Cross-Section. *Il Nuovo Cimento* 1981; 4C:471-485.
- [19] Noda S. Improvement of photonuclear reaction model below 140 MeV in the PHITS code. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2014; 52:57-62.
- [20] Akylas VR, Vogel P. Muonic Atom Cascade Program. *Comput. Phys. Commu.* 1978; 15:291-302.
- [21] Suzuki T, Measday DF. Total nuclear capture rates for negative muons. *Phys. Rev. C.* 1987; 35:2212-2224.
- [22] Kossov MV. Chiral invariant phase space event generator. *Eur. Phys. J. A.* 2007; 33:7-10.
- [23] Goulard B, Primakoff H. Nuclear muon-capture sum rules and mean nuclear excitation energies. *Phys. Rev. C.* 1974; 10:2034-2044.
- [24] Amado RD. Momentum distributions in the nucleus. *Phys. Rev. C.* 1976; 14:1264-1270.
- [25] Singer P. Neutron Emission Following Muon Capture in Heavy Nuclei. *Il Nuovo Cimento* 1962; 23:669-689.
- [26] Niita K, Chiba S, Maruyama T et al. Analysis of the (N,xN') reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model. *Phys. Rev. C.* 1995; 52:2620-2635.
- [27] Ogawa T, Sato T, Hashimoto S et al. Energy-dependent fragmentation cross sections of relativistic ^{12}C . *Phys. Rev. C.* 2015; 92:024614.
- [28] Furihata S, Niita K, Meigo S et al. The GEM code - a simulation program for the evaporation and the fission process of an excited nucleus. JAERI-DATA/Code 2001-015.
- [29] Sato T. Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS. *PLOS ONE* 2015;10:e0144679.
- [30] Crouch M. An improved world survey expression for cosmic ray vertical intensity vs. depth in standard rock. *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf.; 1987 Aug 2-15; Moscow (USSR).* vol.6. p.165.
- [31] Aglietta M, Alpat B, Alyea ED et al. Muon "depth-intensity" relation measured by the LVD underground experiment and cosmic-ray muon spectrum at sea level. *Phys. Rev. D.* 1998; 58:092005.
- [32] Heisinger B, Lal D, Jull AJT et al. Production of selected cosmogenic radionuclides by muons 1. Fast muons. *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2002; 200:345-355.
- [33] Chazal V, Boehm F, Cook B et al. Investigations of fast neutron production by 190 GeV/c muon interactions on different targets. *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002; 490:334-343.

- [34] Sundelin RM, Edelman RM. Neutron Asymmetries and Energy Spectra from Muon Capture in Si, S, and Ca. *Phys. Rev. C.* 1973; 7:1037-1060.
- [35] Kozłowski T, Bertl W, Povel HP et al. Energy Spectra and asymmetries of neutrons emitted after muon capture. *Nucl. Phys. A.* 1985; 436:717-732.
- [36] MacDonald B, Diaz JA, Kaplan SN et al. Neutrons from Negative-Muon Capture. *Phys. Rev.* 1965; 5B:1253-1263.
- [37] OECD/NEA, Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation. OECD/NEA; 2011, OECD/NEA-Report no.6894.
- [38] Yang WS, Kim Y, Hill RN et al. Long-Lived Fission Product Transmutation Studies. *Nucl. Sci. Engineering.* 2004; 146:291-318.
- [39] Imasaki K, Li D, Miyamoto S et al. Gamma-ray beam transmutation. *Energy Conversion and Management.* 2008; 49:1922-1927.
- [40] Ando Y, Takano H. Estimation of LWR Spent Fuel Composition. JAERI; 1999, JAERI-Research 99-004 [in Japanese].
- [41] Hino Y, Kuno Y, Sato A et al. A Highly intense DC muon source, MuSIC and muon CLFV search. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* 2014; 253-255:206-207.
- [42] Abe S, Sato T. Feasibility study of nuclear transmutation by negative muon capture reaction using the PHITS code. *EPJ Web of Conferences*, in press.
- [43] Abe S, Sato T. Soft error rate analysis based on multiple sensitive volume model using PHITS. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2016; 53:451-458.
- [44] Abe S, Sato T, Matsuba H et al. Effects of Muon Interactions with Matter on Terrestrial Muon-induced Soft Errors. *Proc. 11th RASEDA and 7th AMDE; 2015 Nov 11-13; Ibaraki (Japan).* p.45.
- [45] Araujo HM, Kudryavtsev VA, Spooner NJC et al. Muon-induced neutron production and detection with GEANT4 and FLUKA. *Nucl. Instr. Meth. A* 2005; 545:398-411.
- [46] Marino MG, Detwiler JA, Henning R et al. Validation of spallation neutron production and propagation within Geant4. *Nucl. Instr. Meth. A* 2007; 582:611-620.
- [47] Lindote A, Araujo HM, Kudryavtsev et al., Simulation of neutron production by high-energy muons underground. *Astroparticle Phys.* 2009; 31:366-375.