

核データ部会セッション「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

(3) PHITS simulation for transport of muons

*安部 晋一郎¹、佐藤 達彦¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. 背景

近年、様々なミューオン応用研究が進められている。例えば、宇宙線ミューオンを用いた原子炉やコンテナ中の核物質の検出、火山やピラミッドなどの巨大構造物の透過、宇宙線ミューオンによる生成放射性核種を用いた地質年代測定、負ミューオンを用いた核変換や触媒核反応、非破壊元素分析などがある。

原子力機構（JAEA）、高度情報科学技術機構（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[1]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、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）の計算モデルを現在開発中の PHITS に導入した[2]。本発表では、計算モデルのベンチマーク結果とともに、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 シミュレーション結果を報告する。

2. ミュー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、ミューオン光核反応に起因するミューオンの阻止能のベンチマークとして、地中での宇宙線ミューオンの輸送計算を行った。100GeV から 20TeV までの宇宙線ミューオンを地面へ垂直に入射させた条件について、深さ方向のミュー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[3, 4]を非常に良く再現した。

高エネルギーミュー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[5]および NA55 実験[6]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 のミュー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 $O(\mu, x)^{10}\text{Be}$ 、 $O(\mu, x)^{14}\text{C}$ 、 $Si(\mu, x)^{26}\text{Al}$ および $Ca(\mu, x)^{36}\text{Cl}$ 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。

Shin-ichiro Abe¹, Tatsuhiko Sato¹¹Japan Atomic Energy Agency

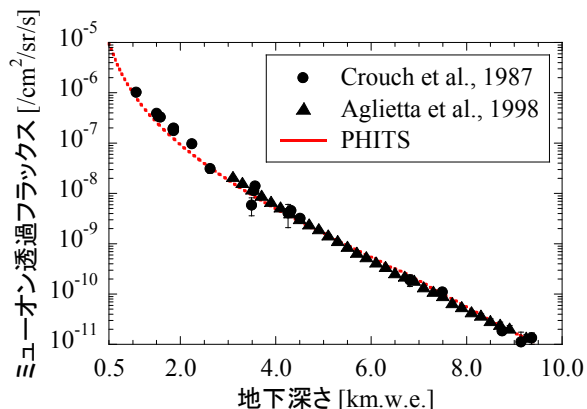


図1. 地中での環境ミュオン透過フラックス [3, 4]

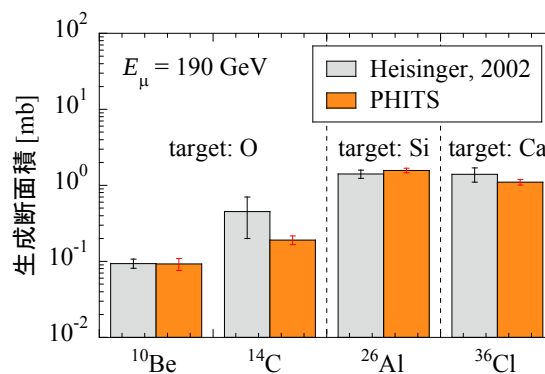


図2. 190GeV/c ミュオン照射により得られる放射性核種の生成断面積 [5]

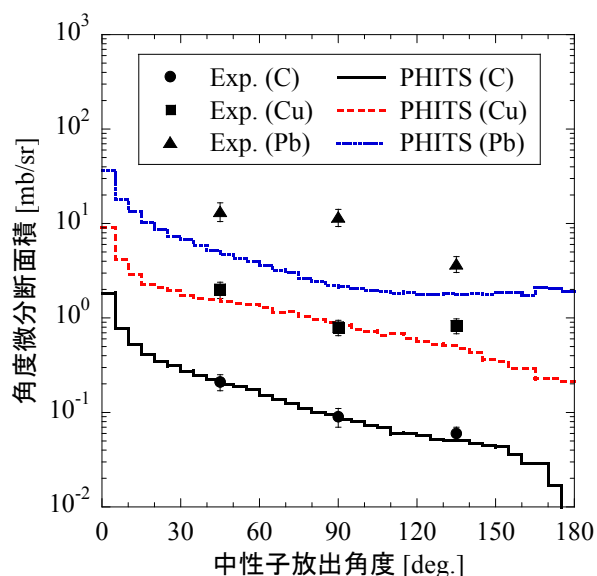


図3. 190GeV/c ミュオン照射により得られる中性子の角度微断面積 [6]

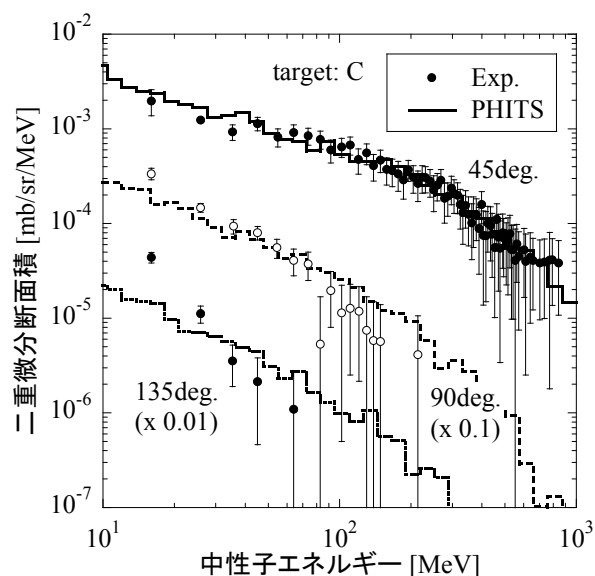


図4. 190GeV/c ミュオン照射により得られる中性子の二重微断面積 [6]

負ミュオン捕獲反応からの粒子生成について評価するため、標的内で停止する程度のエネルギーの負ミュ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[7, 8]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[9]と計算結果を示す。中性子多重度に関しても実験値と30%以内の一致が得られた。

3. 負ミュ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[10]。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、負ミュオンを用いた核変換の反応経路の研究が行われている[11, 12]。

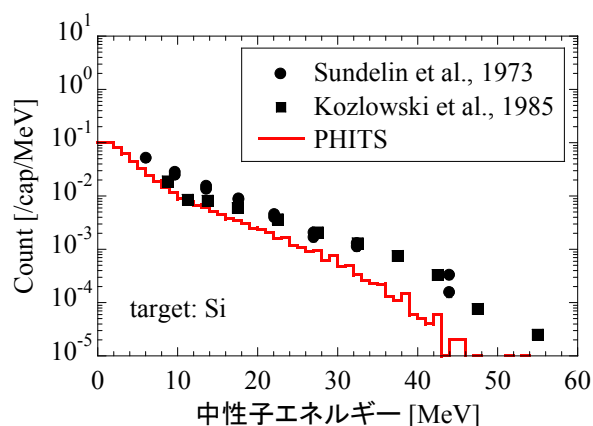


図 5. 負ミューオン捕獲反応により Si 標的から得られる中性子の放出エネルギー分布 [7, 8]

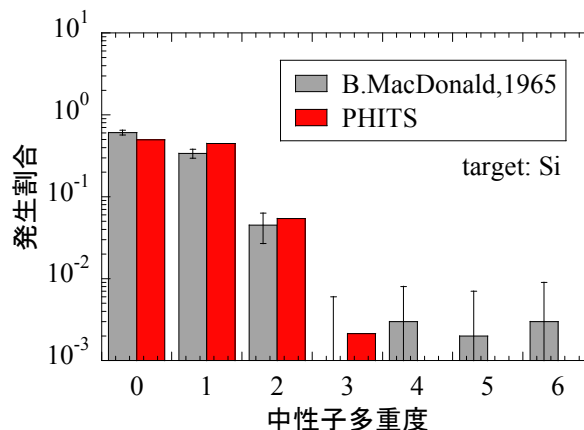


図 6. 負ミューオン捕獲反応により Si 標的から得られる中性子多重度 [9]

表 1. ^{79}Se 標的に関する放射性核種生成割合

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

表 2. ^{135}Cs 標的に関する放射性核種生成割合

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

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、LLPF 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。

また、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。

$$t = N_A \times \frac{g}{M} \times \frac{\alpha}{\phi} \quad (1)$$

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[13]、負ミューオン源の強度として RCNP の MuSIC [14]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分かった。この結果より、負ミューオンを用いた LLFP 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。[15]

4. 二次宇宙線ミューオン起因ソフトウェアの解析

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ウェアと呼ばれ、地上環境下では主に二次宇宙線中性子がソフトウェアの主因となる。しかし、半導体デバイスの微細化に伴

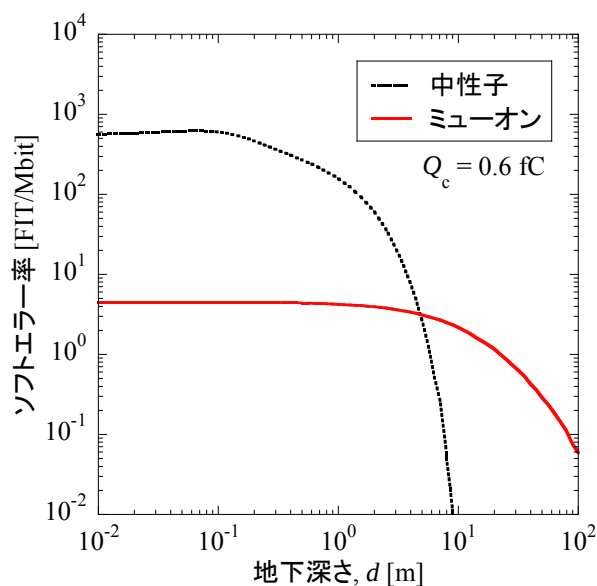


図 7. 宇宙線中性子および宇宙線ミューオン起因
ソフトウェア率の地下深さ依存性

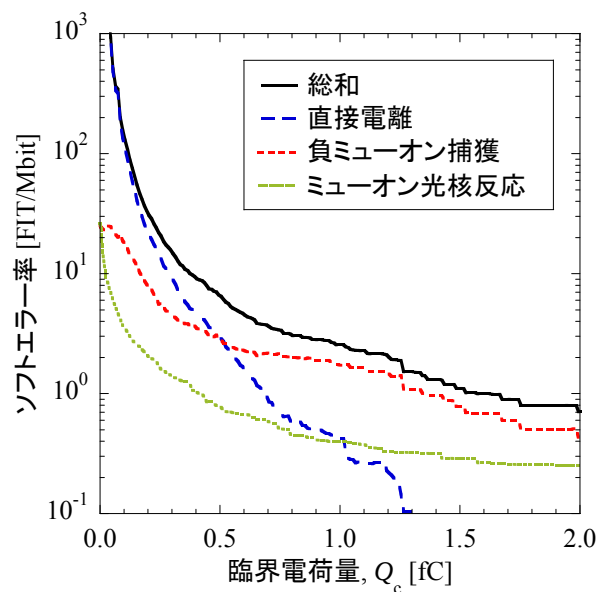


図 8. 宇宙線ミューオン起因ソフトウェア率への
各物理過程の寄与

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[16]を用いたソフトウェア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、宇宙線起因ソフトウェア率の地下深さ方向に対する依存性を調査した。図 7 に宇宙線中性子起因ソフトウェア率と宇宙線ミューオン起因ソフトウェア率を示す。地表面付近では宇宙線中性子がソフトウェアの主因である一方、深さ 5m 付近では中性子遮蔽効果により宇宙線中性子起因ソフトウェア率は 1% 未満まで低下し、宇宙線ミューオンがソフトウェア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。

宇宙線ミューオン起因ソフトウェア率に対する、各物理過程の寄与を調査した結果を図 8 に示す。入射ミュー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ーオン捕獲反応が主因となる事が判明した。ミュー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ーオン照射のみ実施されているが、本解析結果は負ミューオン照射実験の必要性を示唆している。[17]

5. 結論

PHITS に導入したミューオン反応モデルのベンチマークを行った。その結果、地中での環境ミューオン透過フラックスに関しては測定値を非常に良く再現し、ミューオン反応からの生成粒子情報に関し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。

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に関する PHITS 解析では、計算で得た変換効率を用いて核変換に要する時間を概算した結果、500 g の ^{137}Cs の変換に $10^8 \mu\text{sec}$ のミューオン源を用いた場合 850 万年要することが明らかとなった。

宇宙線ミューオン起因ソフトウェアの解析では、宇宙線中性子が遮蔽された環境においてはミューオンがソフトウェアの主因となることを示した。また負ミューオン捕獲反応がソフトウェアの主因であることが判明し、今後の負ミューオン照射によるソフトウェア測定実験の必要性が示唆された。

参考文献

- [1] T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 50, p. 913 (2013).
- [2] S. Abe et al., Abstract PHITS Workshop, Sep 5, 2015, Ibaraki Japan, p. 5 (2015).
- [3] M. Crouch, *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf., Aug 2-15, 1987, Moscow USSR*, vol. 6, p. 165 (1987).
- [4] M. Aglietta et al., *Phys. Rev. D*, vol. 58, p. 092005 (1998).
- [5] B. Heisinger et al., *Earth and Planetary Sci. Lett.*, vol. 200, p. 345 (2002).
- [6] V. Chazal et al., *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 490, p. 334 (2002).
- [7] R. M. Sundelin et al., *Phys. Rev. C*, vol. 7, p. 1037 (1973).
- [8] T. Kozlowski et al., *Nucl. Phys. A*, vol. 436, p. 717 (1985).
- [9] B. MacDonald et al., *Phys. Rev.*, vol. 139, p. B1253 (1965).
- [10] OECD/NEA, *NEA Report No. 6894* (2011).
- [11] W. S. Yang et al., *Nucl. Sci. Engineering*, vol. 146, p. 291 (2004).
- [12] K. Imasaki et al., *Energy Conversion and Management*, vol. 49, p. 1922 (2008).
- [13] R. Ando et al., *JAERI-Research 99-004* (1999).
- [14] Y. Hino et al., *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, vol. 253-255, p. 206 (2014).
- [15] S. Abe et al., *Proc. of CNR*15, Oct 19-23, Tokyo Japan*, P01 (2015).
- [16] S. Abe et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, p. 451 (2016).
- [17] S. Abe, et al., *Proc. of 11th RASEDA, Nov 11-13, Ibaraki Japan*, p. 45-48 (2015).