

γ線検出システムの設計・最適化用 EGS4-UCDOD ユーザーコードの開発

Development of EGS4-UCDOD User Code for Design and Optimization of Gamma Ray Detection Systems

日本原子力研究所保健物理部
線量計測技術開発室

大石 哲也

様々なタイプの放射線源に対し、γ線検出システムを効率良く設計・最適化するためのEGS4ユーザーコード（EGS4-UCDOD）を開発した。本ユーザーコードは、PRESTAアルゴリズムやCG法を組みこんだPRESTA-CGを基盤としており、これに材質の断面積の計算に関する最新の知見を導入するとともに、既存及び追加の様々な機能を一つに統合し、取り扱いを容易にしたユーザーコードである。放射線源の定義部分と光子の追跡部分との二つに、それぞれ以下の機能を追加した。前者には、取り扱いを容易にするための線源体系の選択機能や計算時間を短縮するための再定義線源の利用に関する機能を追加した。後者には、複数の検出器間における同時・逆同時計数事象を評価する機能及び複数の着目領域における光子の挙動の追跡機能を追加した。本報告では、開発したユーザーコードの適用例を紹介するとともに、その有効性について述べる。

1. はじめに

EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4)¹⁾ は、モンテカルロ法により光子、電子及び陽電子の輸送をシミュレーションする計算コードであり、高エネルギー物理、医学物理や保健物理などの幅広い分野のR & Dにおいて利用されている。EGS4によるシミュレーション計算を行う場合、利用者はユーザーコードと呼ばれる入力ファイルを記述するが、この部分はMortran³⁾で記述しなければならないために本言語に習熟する必要がある。また、計算に使用する体系はサブルーチンプログラム（以下、マクロと呼ぶ）として定義しなければならず、計算条件や計算結果の出力形式なども定義する必要がある。利用者にとってユーザーコードをより記述しやすいものとするために、幾何学体系記述法（以

下、CGと呼ぶ）の一つであるMARS²⁾を導入したユーザーコードが開発されている^{3,4)}。一方、薄い有感部を有する検出器のように応答が電子の挙動に左右されやすい検出器については、光子のみならず電子に関する正確な輸送計算が必要となる。このような計算には、物質の境界付近における電子の輸送を精度良くシミュレーションすることができるPRESTAアルゴリズム⁵⁾を適用することが推奨されている。しかし、MARSを導入した上記のユーザーコードにおいては、PRESTAの適用が同じ形状を組合せた幾何体系（ボクセル、同心球、同心円筒）のみに限定されている。PRESTAが利用可能な他のユーザーコードとしては、PRESTA-CGが開発されている^{6,7)}。本コードは、MARSとは異なるCGを

採用しており、構築した全幾何体系に対してPRESTAアルゴリズムを適用して計算を行うことができる。

このようなシミュレーションコードを利用することにより、 γ 線検出システムの設計や最適化を行うことができるが、これらのシミュレーションを行う際にはいくつかの考慮すべき要件がある。システムの設計や最適化を行う場合、検出器に付与されるエネルギーや検出システムの内部及び周辺における光子（及び電子）の詳細な挙動を適切に評価する必要がある。また、放射線源に対する検出システムのレスポンスを正確にシミュレーションするには、システムを構成する検出器やその周辺構造だけではなく線源部分についても幾何体系を詳細に記述する必要がある。さらに利用者にとっては、入力ファイルの取り扱いを簡易化し、効率よく必要な計算結果を取得することが重要な要件の一つとなる。そこで、以上の要件を考慮したシミュレーション計算を行うために、PRESTA-CGを基盤とした利用し易いユーザーコードEGS4-UCDOD（以下、UCDODと呼ぶ）の開発を行った⁸⁾。本ユーザーコードは、物質の断面積の計算に係る最新の知見や様々な機能一つに統合したコードとなっている。本報告では、開発したユーザーコードの特徴及び適用例について紹介する。

2. ユーザーコードの特徴

(1) 概要

開発したUCDOD（User Code for Design and Optimization of Detection Systems for Photon and Electron Radiations）では、入力ファイルを比較的簡便に取り扱うことにより、複雑な検出システムの設計・最適化に必要なシミュレーション計算を効率よく行うとともに、光子や電子の挙動を詳細に計算することを目的としている。UCDODはPRESTA-CGを基盤として作製しており、入

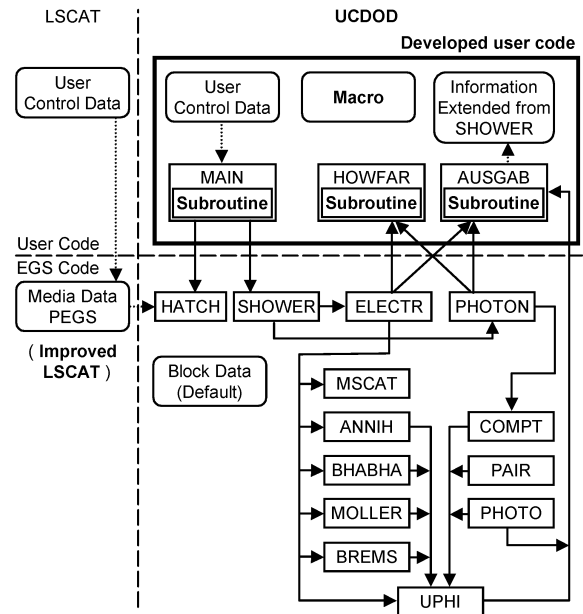


図1 開発したユーザーコードとEGSコードの関係

力ファイルは数字を組み合わせて記述するSYSINデータとして取り扱っている。このため、計算体系の定義や計算条件に関する様々なパラメータの設定を容易に行うことができる。また、精度良く計算を行うために、物質の断面積データの計算を行うPEGS4の最新版⁹⁾や低エネルギー光子を取り扱うLSCATプログラムの改良版^{10,11)}を導入している。開発したユーザーコードとEGSとの関係を図1に示す。UCDODでは、以下に示す物理現象については、計算を行うかどうかを着目する領域毎に指定することができる。①レイリー散乱②非干渉性散乱③直線偏光光子散乱④コンプトン散乱におけるドップラー広がり⑤電子電離衝突⑥K-X線及びL-X線の取り扱い。EGSが取り扱うその他の物理現象については、全領域に対する一括した計算制御が可能である。また、物質毎の断面積データの計算を1度行くと、物質の密度は領域毎に入力ファイル上で指定することができる。

以下、UCDODの機能のうち、放射線源の定義及び光子の追跡に関する主な機能について説明する。

(2) 放射線源の定義

簡便に計算を行うため、様々なタイプの放射線源を想定した線源体系が準備されている。利用者は、必要な体系を指定するだけで簡単に線源体系を定義できる（複雑な形状をした線源体系はCGで記述する）。利用可能な線源形状は、①点、②円、③矩形、④球、⑤立方体（直方体）、⑥円筒、⑦CG形状、⑧物質による定義（物質で指定される領域が線源となる）である。線源形状によっては、設定できる位置が固定されている形状もある。放射線の放出位置は、点、面または体積から選択して指定することが可能であり（形状によって制限あり）、そのエネルギーや放出強度も指定できる。また、線源から放出される放射線の放出方向の指定も可能であり、固定方向又は全方向のどちらかを選択できる。全方向の場合は、放出角度の範囲も指定できる。

CGにより記述した幾何体系を用いて計算を行う場合、マクロで定義した体系を用いた計算と比較してより多くの時間が必要となる。また、放射線源の構造や密度によっては、線源部分の輸送計算時間が全計算時間の大部分を占めてしまう場合がある。同じ放射線源の条件に対して検出システムの設計や最適化を行う場合、一度計算した放射線源の情報を再利用する（以下、再定義線源と呼ぶ）ことにより計算時間の短縮が可能となる。再定義線源による計算では、放射線源の周囲に配置した評価面を通過する光子の情報を記録し、その情報に基づいて評価面から光子を放出させて計算を行う。利用可能な評価面の形状は①円、②矩形、③球、④円筒であり、評価面に記録される情報は光子の入射位置（放出位置）、入射エネルギー（放出エネルギー）及び入射方向（放出方向）である。また、放射線源が対称的な構造の場合、配置した複数の評価面の全情報を、1個の評価面における放出源情報として取り扱うことも可能である。

(3) 光子の追跡

複数の検出器を含む複雑な検出システムの応答を解析する場合、同時あるいは逆同時計数した波高分布の評価が必要となることがある。UCDODでは、主検出器とその他の検出器との同時・逆同時事象を容易に取り扱うことができる。入力ファイルにおいて各検出器間の同時あるいは逆同時の関係を指定するとともに、必要があればエネルギー弁別レベルを検出器毎に指定するだけで本機能を使用できる。同時事象の判定は、個々の光子のヒストリー毎に行われる。追跡した光子が、主検出器を含む指定した全検出器にエネルギーを付与した場合は同時事象と判定され、主検出器にのみエネルギーを付与した場合には同時事象としては扱われない。逆同時事象の判定は、同時事象の場合とは反対となる。同時または逆同時事象の判定後にエネルギー弁別レベルと付与されたエネルギーが比較され、設定した条件に合致する結果のみが記録される。結果の出力は、あらかじめ指定したエネルギービン幅のエネルギー分布として得られる。

主検出器で観測される波高分布には、検出器の有感部分に直接に入射する光子だけではなく、検出システムやその周辺の部屋等を構成する物質と相互作用した光子の入射による成分も含まれる。波高分布に及ぼす影響の度合いを評価し、その結果をシステムの設計や最適化に反映することは重要である。UCDODでは、検出器に入射する光子の経路を、その経路を構成する領域の組合せで指定し（複数の領域が指定可能）、検出器に付与するエネルギー分布をその経路別に計算できる。さらに、検出器にエネルギーを付与した光子が他の領域に移動した場合、次に相互作用した領域について記録することもできる。

3. UCDODの適用例の紹介

開発したUCDODの妥当性は検証済みであ

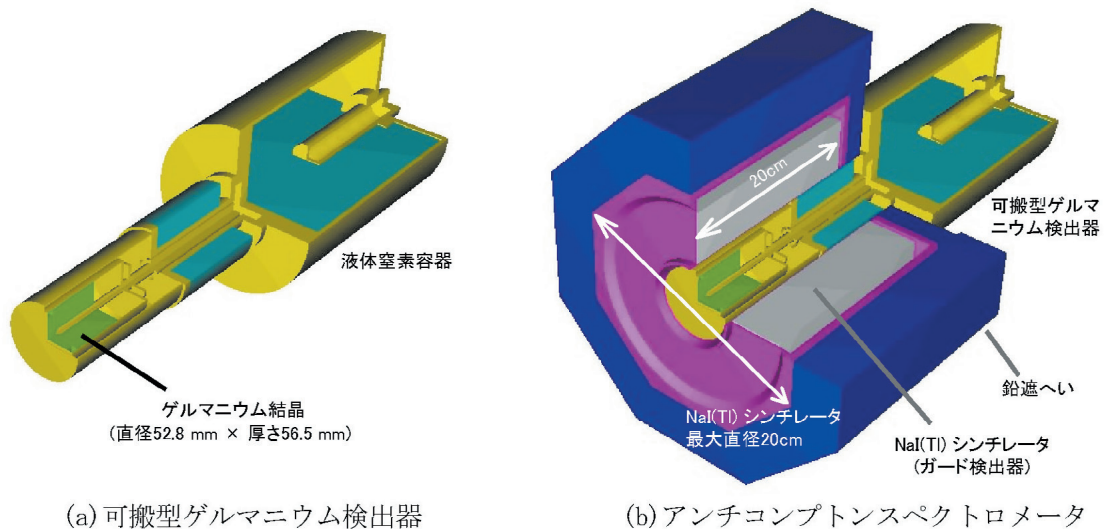


図2 計算体系

る^{8,12,13}。ここでは、UCDODに追加された機能を用いた計算例を示し、その有効性について述べる。

(1) 適用した検出システム

UCDODでは、PRESTA-CGと同様に、立方体（直方体）、球、円柱、円錐、トーラス（ドーナツ形状）の5個の基本となる形状を組み合わせて計算する幾何体系を記述する。これにより、実際の検出システムを詳細に記述することができる。以下に説明するUCDODの適用例においては、可搬型ゲルマニウム検出器（1.33MeVの光子に対して相対効率25%）及びアンチコンプトンスペクトロメータ¹²の2種類の検出システムが用いられている。図2に、それぞれの検出システムの幾何体系を示す。(a)は1個のゲルマニウム検出器からなる単純なシステムであり、(b)は可搬型ゲルマニウム検出器とガード検出器、さらにその周囲を覆う鉛遮へいから構成される複雑なシステムである。ガード検出器は八角柱のNaI(Tl)シンチレータで作製されており、シンチレータの長さ及び最大直径ともに20cmである。ガード検出器を覆っている

鉛遮へいの厚さは、側面5cm、背面2.5cmである。アンチコンプトンスペクトロメータでは、ゲルマニウム検出器とガード検出器との同時事象を計数しないことにより、波高分布のコンプトン連続部分を抑制することができる。図に示した詳細な幾何体系は前述の5個の形状のみの組み合わせで構成されており、位置と寸法を指定した形状に番号を指定し、その番号を用いて包含・排他関係を定義することにより体系が記述されている。

(2) 屋内バックグラウンドモデルを用いた計算への適用

屋内バックグラウンド放射線場における検出システムの応答は、コンクリート球殻体系モデルを用いて評価することができる¹³。本モデルでは、屋内バックグラウンド放射線場を、図3に示す球殻形状のコンクリート¹⁴層中の自然放射線放出核種から放出される放射線場として取り扱っている。コンクリート内の主な自然放射性核種として表1に示す核種が選択され、その放出放射線は放出強度を考慮して決定されている。

UCDODにおける球面形状の放射線源体系

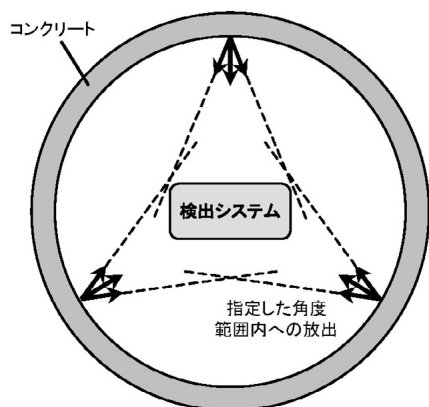


図3 屋内バックグラウンドモデル

を適用することにより、簡便かつ効率的に本モデルを用いた計算を行うことができる。コンクリート球殻体系モデルの内表面と同一半径を有する球面形状の線源体系を設定し、その中心に検出システムを配置する。コンクリート内部から放出される光子のエネルギー分布に従って線源体系の内表面から光子を放出させる。光子の放出方向は、光子の発生位置を頂点とし、発生位置と中心を結ぶ線を垂線とする円錐の範囲に限定する。この時、円錐の角度は、検出システム全体を包含するように指定する(図3を参照)。このようにして計算を行い、立体角の補正を行うことにより、効率よく実際のバックグラウンドに対する検出システムの応答を評価できる。

ゲルマニウム検出器及びアンチコンプトンスペクトロメータに対して本計算モデルを適用し、屋内バックグラウンド放射線に対する応答を計算した。また、コンクリート建造物内の測定室において実測を行い、計算結果との比較を行った。図4に示す比較結果より、両者が全エネルギー領域にわたり良く一致していることがわかる。

UCDODにおいては、検出システムの幾何体系を適切に構築し、必要な線源体系の選択及び光子の放出方向の指定などの設定を行うだけで、構造の複雑さにかかわらず様々な検

系列	核種	放出放射線数
ウラン系列	^{40}K	1
	^{214}Pb	3
	^{214}Bi	19
トリウム系列	^{228}Ac	18
	^{212}Pb	1
	^{212}Bi	2
	^{208}Tl	5
	^{224}Ra	1

表1 計算に用いた自然放射線放出核種

出システムに対する精度の良いシミュレーションが可能となる。

(2) 再定義した放射線源の適用

対称性を有した放射線源を測定対象として検出システムの設計や最適化を行う場合、再定義放射線源を適用することにより効率良く計算を行うことができる。例として、200Lドラム缶形状の放射性廃棄物を測定対象として仮定し、再定義放射線源を用いた検出システムの応答の計算方法やその意義を説明する。図5に、実際の放射線源、再定義線源に用いる評価面及び検出システムの配置を示す。本計算体系では、原点を中心とする円筒を放射線源とし、その側面に検出システムや4個の評価面(円)を配置している。検出システムの前面に一個の評価面が配置されており、線源から検出システムを見た場合にシステム全体が覆い隠せるように評価面の大きさを設定した。他の3個の評価面は、Z軸に対して対称となる位置に配置した。評価面を通過する光子の情報を記録する際には、検出システムで散乱される光子の影響を避けるために、その幾何体系を取り除いて計算を行う。評価面を再定義放射線源として利用する際には、各評価面に記録された全情報を、検出システム前面に配置された1個の評価面から放出され

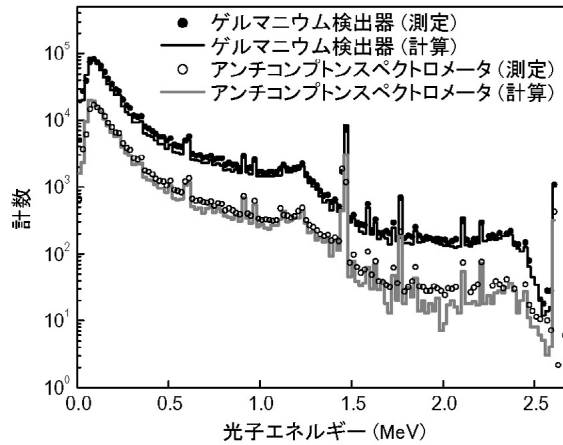


図4 バックグラウンドの計算及び測定結果

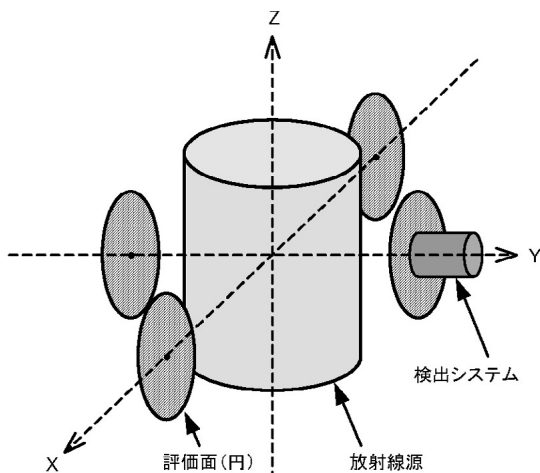


図5 バックグラウンドの計算及び測定結果

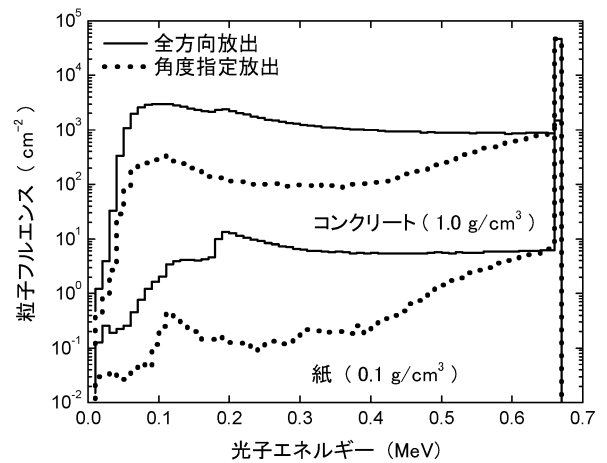


図6 全方向放出と角度指定放出における評価面のエネルギースペクトルの比較

る光子の情報として取り扱う。よって、本配置の場合、再定義線源の機能を使用した計算結果は、使用しない場合の結果と比較して4倍の計数を得ることができる。

より短時間において多くの計数を得るためには、線源からの放出放射線の方法を制限する方法もある。ただし、検出システムに入射する放射線のエネルギー分布は、実際の分布と異なってしまふ。評価面は粒子フルエンスの情報を記録することも可能であり、放射線源の材質をコンクリート¹⁴⁾ または紙(セルロースで近似)と仮定した場合の粒子フルエンスを図6に示す。放射線源の核種及び放射能

分布の条件としては、線源の中心に¹³⁷Csの放射能が点状に存在していると仮定した。図6において、実線は光子の放出方向を全方向とした場合の結果を示しており、点線は放出方向を円錐の角度で指定した場合の結果を示している。光子の放出方向を円錐の角度で指定することにより、効率良く検出システムに光子を入射させることができるが、全方向に光子を放出した計算結果とはエネルギー分布の形状が異なることがわかる。対称性のある放射線源に対して詳細なシミュレーション計算を行う場合、再定義線源を適用することにより計算時間の短縮が可能であるばかりではな

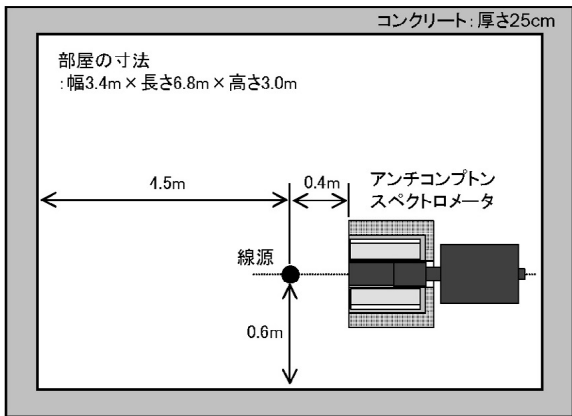


図7 測定室における検出システム及び線源の配置

く、エネルギー分布についても詳細な解析が可能である。

(3) アンチコンプトンスペクトロメータへの適用

アンチコンプトンスペクトロメータにUCDODを適用し、複雑な検出システムに対する同時事象を解析する機能の有効性を示す。計算及び測定は、アンチコンプトンスペクトロメータをコンクリート建屋の測定室に設置し（幅方向に対しては中央の位置に配置）、スペクトロメータの前方40cmの位置に¹³⁷Cs点状線源を配置して行った。図7に、測定室の寸法、アンチコンプトンスペクトロメータ並びに線源の配置を示す。計算及び測定により得られたエネルギー波高分布の結果を図8に示す。逆同時計数の有無にかかわらず、両結果とも良く一致していることがわかる。ただし、400keV以下の領域においては、計算と測定の結果が少々異なっている。この理由としては、計算では壁、床、天井のみを考慮しているが、実際の測定場所では測定器の周囲に台座や実験台、棚などが散乱・吸収体として存在していることが挙げられる。また、検出システムを詳細にモデル化しているが、実際の構造との違いが影響していることも考

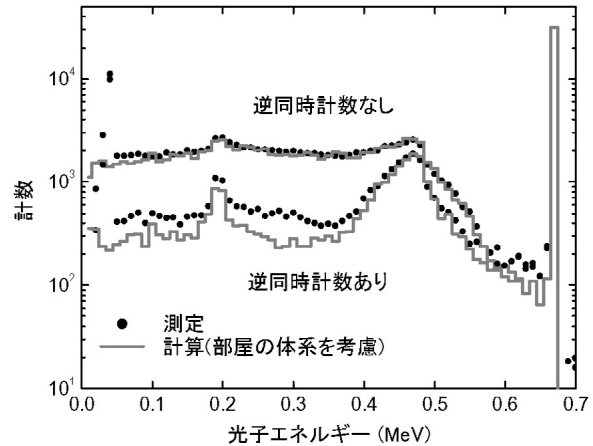


図8 点状線源に対する計算結果と測定結果との測定

えられる。このように、計算と測定とは若干の差があるが、同時事象を解析する機能は、アンチコンプトンスペクトロメータのような複数の検出器を有する複雑な検出器に対しても有効である。

着目領域で相互作用した光子を追跡する機能を適用し、部屋の構造物（天井、壁、床）による散乱線が検出システムの応答に与える影響を計算により評価した。計算条件は図7と同一とし、光子を追跡して計算した結果を図9に示す。本計算における放射線源や検出システムの配置の場合、天井よりも床や壁からの影響が大きいことがわかる。散乱線によるエネルギー分布は、300keV近辺を境界として低エネルギー側と高エネルギー側の2つに分けられる。低エネルギー側の成分は、主として、線源から放出された光子が部屋の構造物に散乱されて検出システムに入射したものである。高エネルギー側の主な成分は、検出器で散乱された光子が部屋の構造物に散乱されて再度入射した成分である。実際に検出システムを設置した条件での測定結果の評価、または検出システムを構成する機器の形状や材質を検討する場合、追跡機能は有効であり、検出システムの設計・最適化に必要な計算データを比較的容易に得ることができる。

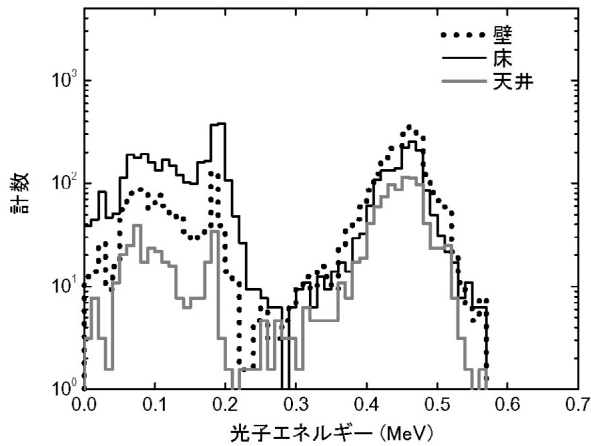


図9 部屋の構造材で相互作用した光子が検出器に付与したエネルギー分布

4. まとめ

γ 線検出システムの設計・最適化を行うため、EGS4ユーザーコードとしてUCDODを開発した。本ユーザーコードはPRESTA-CGを基盤とし、利用者にとって取り扱いが容易な入力構造とした。また、既存機能や追加機能の一つに統合し、目的に応じた計算が効率良く行えるコードとして開発した。UCDODを用いることにより、単純な構造の γ 線検出システムのみならず、複数の検出器を組み合わせた複雑な γ 線検出システムに対しても設計・最適化作業の効率化を図ることができる。

References

- 1) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, *The EGS4 Code System*, SLAC-265, (1985).
- 2) J. T. West and M. B. Emmett, *MARS: A Multiple Array System Using Combinatorial Geometry*, NUREG/CR-0200-vol. 3, (1984).
- 3) O. Sato, S. Iwai and M. Nakamura, et al., *UCMARS A User Code with a Multiple-Array System using Combinatorial Geometry for EGS4*, KEK Internal 94-12, (1994).
- 4) I. Nojiri, S. Iwai and O. Sato, "Development of EGS4 User's Code for General Purpose," *Donen-Giho*, 102, 59 (1997), [in Japanese].
- 5) A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, "PRESTA: the Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm for Electron Monte Carlo Transport," *Nucl. Instr. and Meth.* 227, 535 (1987).
- 6) T. Torii and T. Sugita, "Development of PRESTA-CG incorporating combinatorial geometry in EGS4/PRESTA," *Proc. 1st Int. Workshop on EGS4*, Tsukuba, Japan, Aug. 26-29, 1997, 66 (1997).
- 7) T. Torii and T. Sugita, "Development of PRESTA-CG incorporating combinatorial geometry in EGS4/PRESTA," *JNC TN1410 2002-001*, (2002).
- 8) T. Oishi, M. Tsutsumi and T. Sugita, et al., "An EGS4 User Code Developed for Design and Optimization of Gamma-Ray Detection Systems," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 40[6], 441 (2003)
- 9) Y. Namito and H. Hirayama, Implementation of a General Treatment of Photoelectric-Related Phenomena for Compounds or Mixtures in EGS4, *KEK Internal 2000-3*, (2000).
- 10) Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, LSCAT: Low-Energy Photon-Scattering Expansion for the EGS4 Code, *KEK Internal 95-10*, (1995).
- 11) Y. Namito and H. Hirayama, LSCAT: Low-Energy Photon-Scattering Expansion for the EGS4 Code (Inclusion of Electron Impact Ionization), *KEK Internal 2000-4*, (2000).
- 12) M. Tsutsumi, T. Oishi, N. Kinouchi, et al., "Design of an Anti-Compton Spectrometer for Low-Level Radioactive

- Wastes using Monte Carlo Method,” J. Nucl. Sci. Technol., 39 [9], 957 (2002).
- 13) M. Tsutsumi, T. Oishi and N. Kinouchi, et al., “Simulation of the background for gamma detection system in the indoor environments of concrete building,” J. Nucl. Sci. Technol., 38[12], 109 (2001).
- 14) Y. Kanemori, “Dose buildup factors of plane parallel barriers for ^{137}Cs plane monodirectional source,” Nucl. Sci. Technol. Eng., 28, 144 (1967).