

KEK Preprint 2004-70  
2004 November  
R

# 保健物理分野の研究への EGS4 の応用

## Application of EGS4 Code to Research related to Health Physics

平山 英夫

H. Hirayama

*KEK, High Energy Accelerator Research Organization*  
1-1, Oho, Ibaraki, Tsukuba, 305-0801, Japan

To be published in Jpn. J. health Phys.



High Energy Accelerator Research Organization

# 保健物理分野の研究への EGS4 の応用

## Application of EGS4 Code to Research related to Health Physics

平山 英夫

H. Hirayama

*KEK, High Energy Accelerator Research Organization*  
1-1, Oho, Ibaraki, Tsukuba, 305-0801, Japan

**KEYWORDS:** EGS4, Monte Carlo, electron, photon, radiation detector, dosimetry,  
equivalent dose, education

### Abstract

An outline of the general-purpose electron-gamma shower Monte Carlo code, EGS4, is given together with the code's applications to various types of research related to health physics such as for radiation detectors, dosimeters, and dose evaluations, including effective dose calculations. The applications to medical physics and education concerning radiation are also introduced.

## I はじめに

電磁カスケードモンテカルロコードEGSは、スタンフォード線型加速器研究所(SLAC)を中心に開発されてきたコードである。当初は、高エネルギー分野での使用を目的としたものであったが、バージョン3のEGS3がそのマニュアルであるSLAC-210<sup>1)</sup>と共に公開されて以降、医学物理分野をはじめより低エネルギー分野へと利用が広まった。この傾向は、現在のバージョンEGS4<sup>2)</sup>公開後一層広がり、世界中ではユーザーの6割以上が医学物理の研究者である。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射線科学センターでは、EGS4の公開後も主として低エネルギー光子の扱いに取り組むと共に、わが国においてEGS4の利用を広げるために、毎年「EGS4研究会」を開催し、その一環として「EGS4の講習会」を開催してきた。医学物理や高エネルギー物理以外の分野では、光子の計算において本来必要な電子を考慮せず行う事が長く続けられてきた。しかしながら、非荷電粒子である光子の物質への影響や検出器の出力は、光子の反応により生じた電子によるものであり、電子を無視できるのはある限られた条件の下だけであることは明らかである。このような背景もあり、研究会や学会の発表等を通じてEGS4コードが知られるに伴い様々な分野での使用が広がって来た。わが国のEGS4ユーザーは、原子力分野、放射線計測分野、保健物理分野等が中心で外国とは異なる状況にある。最近では、外国同様に医学物理分野の研究者や学生の関心が増え、講習会参加者の中での比率が高まっている。

本解説では、EGS4コードそのものと保健物理分野を中心にその応用例を応用の可能性や応用する場合の留意点を含めて紹介する。

### EGS4コードの概要

コード作成者の周辺でのみ使用されているコードは別として、汎用の電磁カスケードモンテカルロコードは、“ETRAN”系列のコードと“EGS”系列のコードに大別することができる。ETRAN(Electron TRANsport)<sup>3)</sup>は、1963年に米国NBS(現NIST)のBergerとSeltzerによって作られたモンテカルロコードである。ETRANは、その名前に示されているように、もともとは、数MeVまでの電子の輸送を計算する目的で開発されてきたコードである。その後、高エネルギー領域へ拡張するために制動輻射の発生や輸送がつけ加えられた。原子力分野を中心に、汎用の光子・中性子のモンテカルロ計算コードとして幅広く使用されているMCNP<sup>4)</sup>は、当初は、電子・陽電子の輸送を扱っていなかったが、オプションとして、様々な形状についてETRANを適用したITS<sup>5)</sup>を使用できるようにしている。

一方EGSは、1960年代において電磁カスケードを扱うことができるモンテカルロ計算コードの内唯一公開されていたSHOWERと呼ばれたNagelのコードを基にSLACとスタンフォード大の共同で開発されてきたコードである。バージョン3のEGS3が、そのマニュアル<sup>1)</sup>と共に公開されて以降、広い分野で使用される汎用の計算コードとなった。それに伴い、より低エネルギー領域への拡張が望まれるようになった。この傾向は、SLAC、KEKとカナダ国立研究機関(NRCC)の共同でバージョン4のEGS4<sup>2)</sup>が1985年に公開された事により一層拡大し、EGS4は医学物理分野で最も多く使用されるモンテカルロ計算コードとなった。世界中で6000人を越えるEGS4ユーザーの6割以上が医学物理分野の研究者である。

この傾向はEGS4公開後も続いており、低エネルギー領域での改良が引き続き行われている。高エネルギーから低エネルギーへの拡張という意味では、低エネルギーから高エネルギーへと改良されてきたETRANと全く逆の発展をしてきたコードであるといえる。EGSコードシステムの開発

の歴史を第 1 表に示す。

これまでの改良を組み込んだ新しいバージョン EGS5 の整備を SLAC、ミシガン大学と KEK で進めており、今年の夏に KEK で開催された「第 3 回国際 EGS 研究会」で、近く EGS5 のバージョンを、マニュアルと共に公開することがアナウンスされた。

第 1 表 EGS コードシステム開発の歴史

Period	Program	Language	Authors
1963~1965	SHOWER1	Fortran	Nagel
1966	SHOWER2	Fortran	Nicoli
1967~1972	SHOWER3/PREPRO	Fortran	Ryder, Talwar, Nelson
1970~1972	SHOWER4/SHINP	Fortran	Ford
1974	EGS1/PEGS1	Fortran	Ford, Nelson
1975	EGS2/PEGS2	Mortran 2	Ford, Nelson
1976~1977	EGS3/PEGS3 (SLAC-210 <sup>1)</sup> )	Mortran 2	Ford, Nelson
1982~1985	EGS4/PEGS4 (SLAC-265 <sup>2)</sup> )	Mortran 3	Nelson, Hirayama, Rogers
2004	EGS5(SLAC-R-730 and KEK Report 2004-5)	Fortan	Hirayama, Namito, Bielajew, Wilderman and Nelson

EGS4 コードシステムでは、光核反応を除く以下のような電子(陽電子を含む)及び光子の物理反応が扱われている。

【電子・陽電子】

- ・バーバー散乱 (陽電子 - 電子散乱)
- ・メラー散乱 (電子 - 電子散乱)
- ・制動輻射
- ・陽電子消滅 (飛行行中及び停止時) と消滅ガンマ線の発生
- ・弾性散乱
- ・電離損失
- ・電子衝突電離

【光子】

- ・電子・陽電子対生成
- ・コンプトン散乱
- ・弾性散乱 (レーレー散乱)
- ・光電吸収
- ・直線偏光光子散乱
- ・コンプトン散乱におけるドップラー広がり
- ・特性 X 線及びオージェ電子の発生

上記の反応中「電子衝突電離」、「直線偏光光子散乱」、「コンプトン散乱におけるドップラー広がり」及び「特性 X 線及びオージェ電子の発生の一般的な取扱い」は、KEK が中心になって組み込んだものである。

これらの物理現象に関する諸データは、PEGS4(A Preprocessor for EGS4)と呼ばれるプログラムで事前に計算しておく。条件が同じ(エネルギー範囲、使用するオプション)であれば、PEGS4 の

計算は一度でよい。

EGS4 で扱える運動エネルギーの範囲は、光子では約 1keV、電子では約 10keV から数千 GeV である。入射粒子として扱えるのは、光子、電子、陽電子または中性 中間子の崩壊に伴い発生する 2 つのガンマ線である。

線源の条件(エネルギー分布、空間分布、角度分布等)扱う形状やユーザが求める量については、汎用計算コードでは入力データで制御される形式が多いが、EGS4 ではユーザー自身が、ユーザコードと呼ばれるプログラムにおいて作成する形式になっている。従って、EGS4 の使用に当たっては EGS4 について最低限度の理解が求められる。(この様な理由もあって、「EGS4 講習会」が世界各地で開催されている。)

EGS4 のユーザーは、世界的には医学物理分野の研究者が中心であるが、我が国では、筆者の研究分野と関係した原子力分野や保健物理分野から利用が始まり、最近になって医学物理分野での利用が急速に増えている状況にある。

### 保健物理分野の研究への応用

上記のように、EGS4 コードは、低エネルギーから高エネルギーまでの光子、電子、陽電子の任意の物質中での振る舞いを計算できることから、これらの粒子に関連する研究であれば、どの様なものにも応用が可能であると言える。一方、EGS4 の様なモンテカルロ計算コードの使用においては、様々な限界と制限を持っており、このことを理解して使用する必要がある。以下では、保健物理分野への応用という観点から、考慮すべき点を含めて応用例や応用の可能性について述べる。

#### 1. 放射線検出器に関する研究

光子(X線及びガンマ線)電子及び線用の放射線検出器の特性計算は、EGS4 の様なモンテカルロ計算の最も一般的な応用例である。後で述べる線量計の評価と異なり、物理量を対象とした放射線検出器の特性を評価研究するという点では、保健物理分野特有の応用ではない。保健物理分野の研究としては、水中や空気中の放射能モニターの各放射性核種に対する感度研究<sup>6,7)</sup>やヒュマンカウンターの特性研究<sup>8,9)</sup>への応用例がある。どちらの場合も、使用可能な限られた測定結果と計算結果の比較から、計算の妥当性と精度を検証した上で、実測で得ることが困難な核種に関する情報を計算や、校正手法の研究に応用するという手法がとられている。Fig. 1 に、木名瀬等によるブロック型の水ファントムに対するGe検出器の検出効率についての実測値とEGS4 による計算値の比較を示す<sup>8)</sup>。このような放射線検出器の特性に関する研究では、検出器の応答や検出効率といった物理量について実測値と計算結果を比較したり、評価をしているので、計算結果が測定で得られ量を直接測定している様に考えがちである。しかしながら、計算で求めることができるのは、基本的に検出器媒体中の吸収エネルギーであり、実際の信号になるまでには、様々な物理過程が入っている。例えば、古くから使用されているNaI検出器では、光子の反応により生成した電子により検出器中に生じた励起状態から元の状態に戻る際に放出されるシンチレーション光を光電子増倍管で、光電子に変換し、その電子を管内で増幅して信号としている。信号は、媒質中の吸収エネルギーと相関があると考えられるが、途中の過程で様々な影響を受ける可能性がある。従って、計算コードを使

<sup>1</sup> 新しいバージョンのEGS5 では、EGS4 公開後の様々な改良が全て組み込まれており、オプションフラグで、簡単に on/off できるようになっている。また、計算機の性能向上を考慮し、PEGS による物質データの作成をEGS5 の一部として、実行時に併せて計算できるようになっている。

う際には、計算で得られる量と、測定で得られる量とのこの様な関係を理解して使用する必要がある。<sup>2</sup>

## 2. 線量計及び線量評価に関する研究

保健物理分野の計測で対象となる 1cm 線量当量測定のための個人や場の線量計あるいは線量評価に関する研究も EGS4 の様なモンテカルロ計算コードの重要な応用分野である。しかしながら、1cm 線量当量を対象とした線量計の評価においては、物理量を測定や評価の対象とする上記の場合と異なった注意が必要である。光子の場合についてみると、

- 1) 実際の測定を真空中で行うことはほとんどない。従って、線量計表面の場は、光子により作られた電子と光子による複雑な場となる。即ち、同じエネルギーの光子であっても、線源と線量計との距離によって電子の影響が異なる可能性がある。
- 2) 線量計の出力は、光子の反応により生じた二次電子（エネルギーが高い場合には、陽電子の寄与が含まれる）による。線量計の構造や組成により出力が 1cm 線量当量に近くなるようにしている場合には、EGS4 の様な電子を考慮した計算結果と直接比較することが可能であるが、出力に補正をしている場合には、直接の比較が難しい。
- 3) 場を評価する場合、計算ではその場の光子エネルギースペクトルと 1cm 線量当量への換算係数を用いて変換されることになる。従って、計算で得られる値は、その場の光子の向きを平行ビームに置き換え、そこに ICRU 球を置いた時の軸上 1cm 位置での線量当量となる。
- 4) 測定に用いられる線量計の方は、平行ビームの場で 1cm 線量当量換算係数の応答に近いエネルギーレスポンスを持つように作られ、平行ビームに近い場とするために、Cs-137 又は Co-60 により空気中である距離を置いて校正されたものであるが、実際の測定場は、一般的に平行ビームではない。

の様な事項を考慮する必要がある。ガンマ線モニターへの EGS4 の応用例としては、Fig. 2 に示す Rasolonjatovo 等による CdZnTe を用いた放射線モニター開発の研究がある<sup>11)</sup>。この研究では、検出器の応答を計算で再現できることを確認した後、検出器サイズ、カットオフエネルギー、フィルター（材質と厚さ）を変えたパラメーターサーベイを行い、実効線量と一致するレスポンスを実現している。上記で挙げたことを考慮して、様々な場で特性を検証することが必要ではあるが、シミュレーション計算の特性を生かした研究の例であると言える。この例のような線量計の開発や特性評価だけでなく、実験的に検証することが難しい様々な方向から光子や電子が入射する現実の場で線量計がどのような応答を示すのかということの研究することも計算コードを活用する研究の一つと言える。

## 3. 実効線量等の計算

実効線量等人体そのものの被ばく量を算出する研究は、保健物理分野固有の課題である。外部被ばくに関連する実効線量は、数学ファントムを用いて各臓器の吸収線量を求めることが必要なことから、もっぱらモンテカルロ計算コードが使用されてきた。光子の計算においては、電子の輸送を行わず、光子の反応により生じた電子・陽電子のエネルギーが全てその場所で吸収されるとする力

<sup>2</sup> X線・ガンマ線検出器について、計算結果を使用する際に注意しなければならないことを文献 10 に解説として紹介しているので参照。

ーマ近似に基づく計算結果がICRPで採用されてきた。EGS4 を用いた佐藤の研究<sup>12,13)</sup>で明らかにされているように、カーマ近似では、光子のエネルギーが高くなり、それに伴い生成電子のエネルギーが高くなるに従い臓器の吸収線量が過大評価となっている。CTで得られたデータを基にして作成したボクセルファントムを使用して計算する試みも行われている<sup>14)</sup>。放射線防護のための量については、我が国においても研究を積極的に行い、線量評価についての考え方を含め、具体的なデータをさらに世界に発信することが、必要であると思われる。

#### 4. 医学物理分野での応用

最初に紹介した様に、世界中ではEGS4 ユーザーの過半数以上が医学物理分野の研究者である。計算機の性能の飛躍的な進歩に伴い、CT画像を基にしたモンテカルロ計算による放射線治療が現実のものとなってきている。この様な背景から、我が国でも医学物理分野のユーザーが増えている。医学物理分野では、治療等に直接関係すること以外に、保健物理の対象でもある医師等の被ばく評価についても関心が深まり、防護の効果を検討したり<sup>15)</sup>、適切な局所遮へいを設計する研究が出てきている。医療関係者の被ばくに関連する課題は、医療関係者、保健物理、放射線遮へい等の研究者による共同研究が望まれるものである。

#### 5. 放射線教育への応用

保健物理分野の学生等に対する放射線に関する教育は、後継者育成という観点からも重要な課題である。とすると、放射線に関する教育では、理論や式に基づく説明が中心となり、講義を受ける学生にとってはイメージがわきにくい。実験でも、放射線は見えないことから、実際どのようなことが起きているかを実感することは容易ではない。放射線の物質内での挙動を視覚的に理解することを目的の一つとして、KEKで粒子の飛跡表示システム<sup>16)</sup>が開発されている。このシステムを用いて医学物理分野の学生を対象に行った演習<sup>17)</sup>では、PC上に表示された飛跡から、光子の透過、反応に伴う電子・陽電子の発生等を調べることを通じて光子の反応を理解させる試みや、Fig. 3 に例示した様な検出器に入射した光子毎飛跡の観察を通じて検出器中での反応と応答との関係を理解させる試みが実施されている。表示システム、演習で使用するプログラムは、ホームページで公開している<sup>3)</sup>ので、ダウンロードして使用することが可能である。保健物理分野における放射線教育にも活用できる手法であるので、学生の教育等に広く活用されることが望まれる。

#### EGS 研究会

様々な研究分野でのEGS4 を使用した研究を交流する目的で、1991年から毎年「EGS4 研究会」が高エネルギー加速器研究機構で開催されている<sup>4)</sup>。研究の細分化に伴い、他分野での研究を聞く機会は少なくなっているが、この研究会は「EGS4 を使った研究」が唯一の共通点で、研究分野としては、高エネルギー物理分野から原子力、保健物理や医学物理と多岐にわたっている。異なった研究分野で、似たような手法が使われていることを認識したり、自分の研究を進める上でヒントとなる講演を聴くこともできる場となっている。研究会に併せて、初心者を対象とした講習会が開催さ

<sup>3)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 放射線科学センターのホームページ中 <http://ccwww.kek.jp/kek/rad/center/education.html> から、文献 16, 17 と表示システム、実習に必要なプログラムをダウンロードできる。

<sup>4)</sup> 研究会、講習会に関する情報は、<http://rcwww.kek.jp/egs4conf/> に掲載されている。

れている。

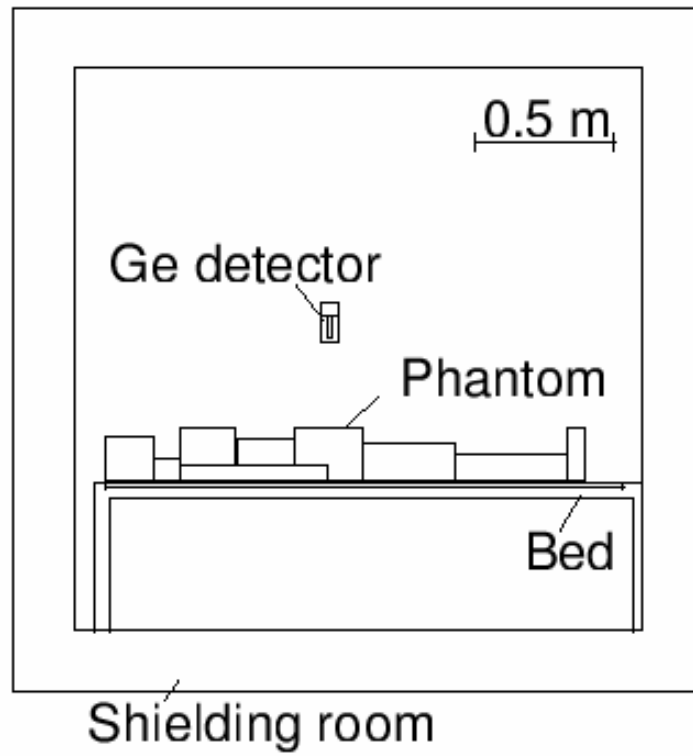
### 参考文献

- 1) R. Ford and W. R. Nelson; The EGS Code System: Computer Programs for the Monte Carlo Simulation of Electromagnetic Cascade Showers (Version 3), Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-210(1978).
- 2) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers; The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-265(1985).
- 3) M. J. Berger and S. M. Seltzer; ETRAN Monte Carlo Code System for Electron and photon Transport Through Extended Media, Radiation Shielding Information Center, Computer Code Collection CCC-107(1968).
- 4) J. F. Briesmeister, Editor; MCNP<sup>TM</sup> – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000).
- 5) J. H. Halbbbeib and T. A. Mehlhorn; ITS: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes, *Nucl. Sci. Eng.* **92**, 338-339 (1986).
- 6) T. Torii, T. Nozaki and H. Ando; 通気型電離箱の電離効率の計算、Proceedings of the Third EGS4 Users' Meeting in Japan, pp.58-61、KEK Proceedings 93-15 (1993).
- 7) T. Torii, T. Sugita, T. Hosono, K. Nomoto; A Study on Calibration Method for Liquid Effluent Monitor, Proceedings of the Fifth EGS4 Users' Meeting in Japan, pp.84-87 KEK Proceedings 95-9(1995).
- 8) S. Kinase, H. Noguchi and T. Nakamura; Application of Ge Semi-conductor Detector to Whole-Body Counter, Proceedings of the Ninth EGS4 Users' Meeting in Japan, pp.30-36 KEK Proceedings 2001-22(2001).
- 9) 木名瀬 栄; 計算シミュレーション手法に基づく体外計測法の高度化に関する研究、学位論文 (2002).
- 10) 平山英夫; 計算と測定の間にあるもの - X線・ガンマ線検出器について -、日本原子力学会誌、 **48**, 610-616(2004).
- 11) A. H. D. Rosolonjatovo, T. Shiomi, T. Nakamura, H. Nishizawa, Y. Tsudaka, H. Fujiwara, H. Araki, and K. Matsuo; Development of Gamma Ray Monitor Using CdZnTe Semiconductor Detector, Proceedings of Second International Workshop on EGS, pp144-151, KEK Proceedings 200-20 (2000).
- 12) O. Sato, S. Iwai, S. Takagi, T. Uehara, Y. Sakamoto, N. Yoshizawa, and S. Furihata; Calculations of equivalent dose and effective dose conversion coefficients for photon from 1 MeV to 10 GeV, *Radat. Prot. Dos.* **62**, 119-130(1995).
- 13) O. Sato, S. Takagi, N. Yoshizawa, S. Furihata, S. Iwai, T. Uehara, S. Tanaka, Y. Sakamoto, and Y. Yamaguchi; Calculation of Photon Fluence to Effective Dose Conversion Coefficient from 1MeV to 10 GeV with Various Irradiation Geometry, Proceedings First International Workshop on EGS4, pp166-173, KEK Proceedings 97-16 (1997).
- 14) J. Funabiki, M. Terabe, M. Zankl, S. Koga, and K. Saito; An EGS4 User Code with Voxel Geometry and a Voxel Phantom Generation System, Proceedings International Workshop on

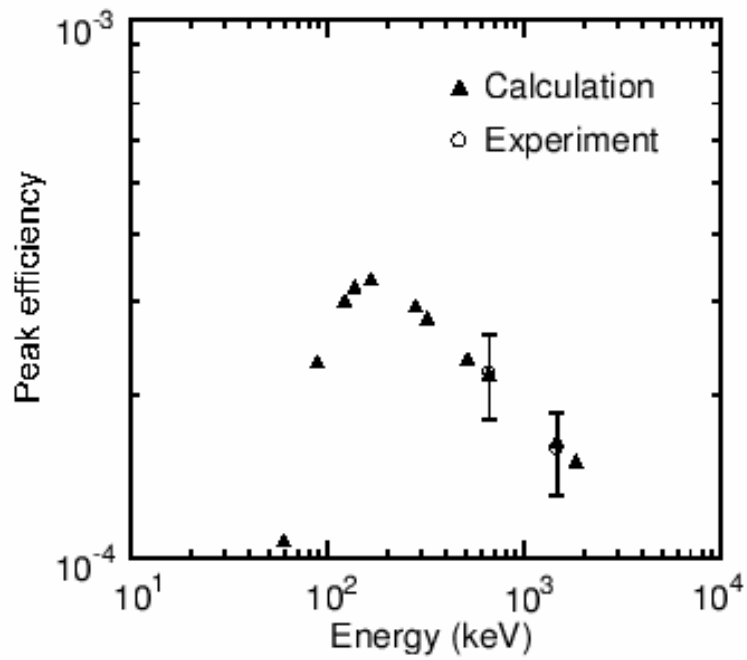


EGS, pp56-63, KEK Proceedings 2000-20(2000).

- 15) K. Koshida, T. Miyati and K. Noto; Estimation of the Efficiency of Protection Coats in Abdominal Angiography, Proceedings of the Eleventh EGS4 Users' Meeting in Japan, pp.97-106 KEK Proceedings 2003-15(2004).
- 16) H. Hirayama, Y. Namito, N. Numajiri, and R. Ikeda; EGS4 Shower Display System (EGS4PICT) Windows 32 Bits Version, KEK Internal 2001-4 (2001).
- 17) H. Hirayama and Y. Namito; Lecture Note - Education for Radiations using EGS4PICT32, KEK Internal 2001-11 (2001).



(a)



(b)

Fig. 1 Peak efficiencies for the water-filled block-shape phantom.<sup>8)</sup>

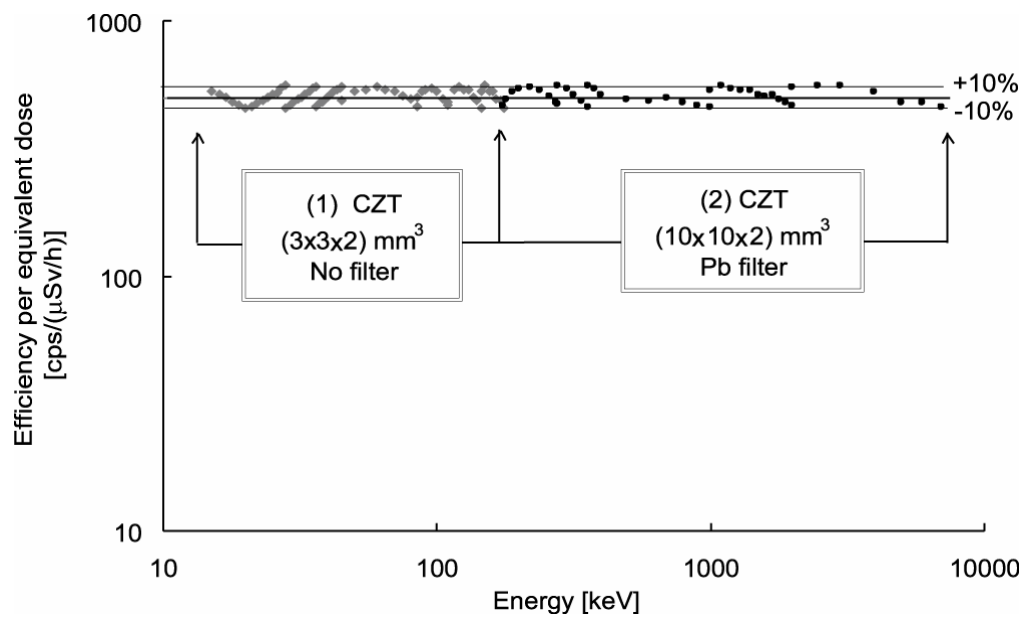


Fig. 2 Energy dependence of detection efficiency to effective dose within 10% difference.<sup>11)</sup>

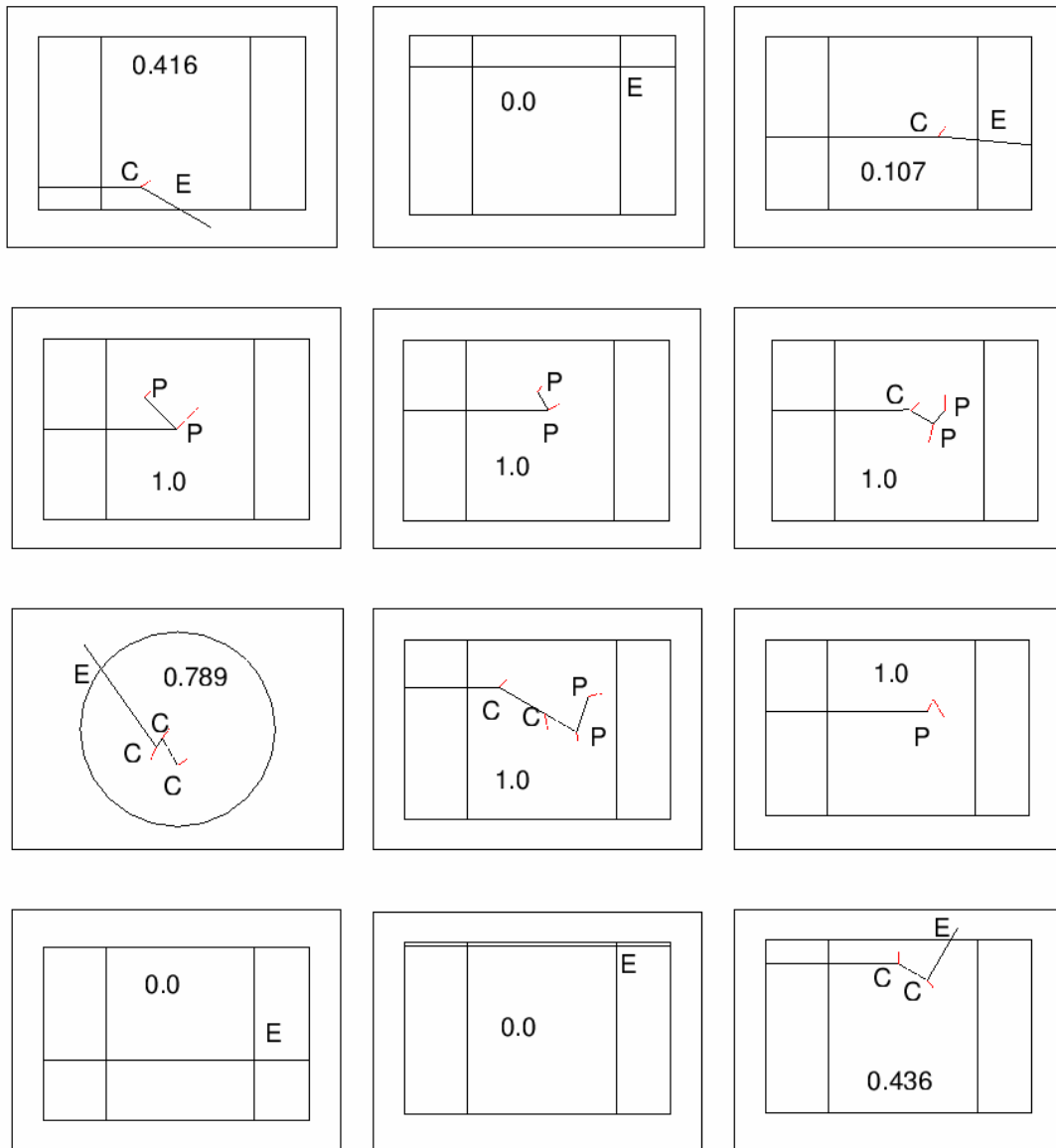


Fig. 3 Example sketches of trajectories. The trajectory of an electron is hard to see due to the short distance. Therefore, the trajectory of the electron in this sketch is written longer than it actually is. C, P, and E in the figure indicate Compton scattering, photoelectric effect and escape from the detector, respectively. The absorbed energy shown at the command prompt (MS-DOS prompt) is also written for each sketch.<sup>17)</sup>