

電磁カスケードモンテカルロコード EGS4と その応用¹ Electromagnetic Cascade Monte Carlo Code EGS4 and its Applications

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
放射線科学センター

平山 英夫

Abstract

EGS4 は、汎用の電子・光子モンテカルロ計算コードの中で最も広く使用されている電磁カスケードモンテカルロ計算コードである。国際的には医学物理の分野での利用が中心であるが、我が国では放射線計測をはじめとして様々な分野での利用が広がっている。EGS4 は、公開後も様々な改良の取り組みが行われてきたが、高エネルギー加速器研究機構では特に低エネルギー光子の取扱の改良を行ってきた。

本稿では、EGS4 コードの概要と高エネルギー加速器研究機構で取り組んできた改良の研究、様々な分野への応用の状況、ユーザーサポート及びその一環として開催してきた「EGS4 研究会」についての紹介を行う。

1 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 である EGS3 がそのマニュアルである SLAC-210[1] 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の利用が広まった。この傾向は、現在のバージョン EGS4[2] 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。

EGS4 の著者の一人として、公開後も主として低エネルギー光子の扱いの改良に取り組むと共に、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。放射線遮蔽や放射線計測分野での光子の計算では、本来必要な電子を考慮せず行うの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。この様な背景もあり、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。この様な背景もあり、わが国の EGS4 ユーザーは、放射線遮蔽、放射線計測、保健物理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。

本稿では、EGS4 の概要と著者のグループが行ってきた改良の取り組みを紹介すると共に、「EGS4 研究会」で発表された研究を中心に EGS4 の様々な分野での応用の状況を紹介します。公開された計算コードのユーザーサポートの取り組みは、コードの開発のための取り組みと同じように重要な事である。この点についても併せて紹介する。

¹RISTNEWS, No.31, pp.20-31, 財団法人高度情報科学時術研究機構、2001,3,31 に掲載

2 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、“ETTRAN”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。

ETTRAN(Electron TRANsport)[3] 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。ETTRAN 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。

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が共同で開発し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 [1] 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、高エネルギー研 (KEK) とカナダ国立研究機関 (NRCC) の共同でバージョン 4 の EGS4[2] が 1986 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よく使用されているモンテカルロ計算コードとなった。

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 ETTRAN と全く逆の発展をしてきたコードであるといえる。

EGS4 コードシステムでは、以下の電子 (陽電子を含む) 及び光子の物理反応が扱われている。光核反応及びその結果生じる粒子の取扱は含まれていない²。

- 電子・陽電子
 - 制動輻射
 - バーバー散乱 (陽電子 - 電子散乱)
 - メラー散乱 (電子 - 電子散乱)
 - 陽電子消滅 (飛行中及び停止時) と消滅ガンマ線の発生
 - 弾性散乱 (モリエール多重散乱モデルを使用)
 - 電離損失
- 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 (特性 X 線については後述)

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 で扱えるエネルギー範囲は、数千 GeV から、光子では約 1keV、電子では約 10keV 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。

多くのコードでは線源の条件 (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は、入力データで制御されるが、EGS4 ではユーザコードと呼ばれ形でユーザ自身が作成する事になっている。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、後述する「EGS4 講習会」が世界各地で開催されている。)

²生成粒子の輸送は出来ないが、光核反応断面積と光子のエネルギー微分飛行長から、粒子の生成スペクトルを求め、中性子計算コードの線源に使用する事は可能である。

3 EGS4の改良

コード発展の経緯から EGS4 は、電子、光子共に低エネルギー領域における扱いが不十分であった。そのため、EGS4 公開後も改良の取り組みが、電子については、ミシガン大と NRCC で、光子については KEK で行われてきた。

低エネルギー電子の取扱の問題は、非均質境界における弾性散乱の問題が中心である。電磁カスケード計算コードでは、電子の弾性散乱を厳密に扱うことが計算時間の関係上現実的でないため、通常多重散乱モデルを使用している。多重散乱モデルは、無限媒質中での散乱のモデル化であることから、実際の計算では避ける事ができない非均質媒質境界での誤差を少なくするための工夫や、使用するモデルが検討課題となってきた。(詳細については、参考文献 [4, 5, 6] を参照)

電子に較べると光子の扱いは簡単であるが、光子についてもエネルギーが低くなると共に散乱相手の電子の状態を考慮せざるを得なくなる。また、K や L 特性 X 線の生成も必要となってくる。これら低エネルギー光子の扱いの改良は、KEK において放射光を線源として行ってきた実験結果と比較しながら行ってきた。以下、KEK で行ってきた改良の概要を紹介する。

3.1 偏光

光子の偏光現象は良く知られた現象であり、コンプトン散乱を記述するクライン - 仁科の式においても考慮されている。しかしながら、通常エネルギー範囲では影響が少ないために無視されてきたものである。放射光は通常ある方向に偏光(直線偏光)しており、放射光を使用した実験では、偏光に垂直な方向と水平な方向で散乱確率が異なる。そのために、偏光を考慮していなかった EGS4 では、実験結果を再現する事ができなかった。コンプトン散乱及び干渉性散乱であるレーレー散乱に偏光効果を組み込む事により、実験結果を再現できるようになった [7, 8, 9]。

RIからの光子は偏光していないが、散乱後の光子は偏光するため光子のエネルギーが低い場合には、形状によっては偏光の影響がでる事が実験的にも確認されている [10]。

3.2 ドップラー拡がり

光子のエネルギーが電子の束縛エネルギーよりも十分高い場合には、散乱相手の電子は自由電子として扱えるが、光子のエネルギーが低くなると共に電子の状態を考慮せざる得なくなる。束縛された電子との散乱は自由電子とのコンプトン散乱とは、全断面積や角度分布が違って来る。

また、個々の散乱を見た場合には散乱相手の電子の動きが影響する。この現象は、ドップラー拡がりと呼ばれ、放射光を用いた物性研究では電子の状態を調べる手段の一つとして用いられているものである。光子の輸送計算では、従来無視されていたが、放射光を用いて行った散乱実験を再現するためにドップラー拡がりを扱うことが出来るように改良を行った [11, 8, 9]。

3.3 特性 X 線の扱い

EGS は、高エネルギーでの電磁カスケード計算から出発したために、計算時間の短縮が重視されてきた。そのため化合物や混合物を実効的な原子番号を持つ元素として扱っている。他の現象においては必要ないが、光電吸収の後の特性 X 線やオージェ電子の発生では、対象となる元素を決める必要がある。EGS4 の作成時点では、化合物や混合物に対して一般的に扱う手法を確立する事ができなかったために、特性 X 線の扱いは将来の課題として残されていた。その後、元素に対してのみ K-X 線を扱う手法が提案され、EGS4 のマニュアルである SLAC-265 に掲載されている。

しかしながら、放射光を用いた KEK での実験との比較から K 殻電子による吸収だけでなく、L 殻電子による吸収を扱うが必要となった。L 殻電子による光電吸収の検討と併せて、化合物や混合物に対する一般的な取扱方法について検討を行い、光電吸収において化合物や混合物中の各元素の寄与から光電吸収を起こした元素を決める手法を導入した [12]。

3.4 実測値と計算との比較

改良前の EGS4 による計算結果と実測値の Ge 検出器の波高分布の比較を第 1 図に示す。実測値は、KEK の放射光研究施設で測定されたものであり、カロリメータで校正した自由電子箱により入射光子の絶対数をモニターし、鉛による単色光子の散乱光を水平方向と垂直方向に置かれた Ge 検出器で測定したものである。入射光子は垂直方向に直線偏光しているため、測定値は水平方向と垂直方向で値が異なっているが、計算値は同じ値となっている。また、ドップラー拡がりにより、コンプトン散乱後の光子エネルギーは幅広い分布をしているが、自由電子のコンプトン散乱では、散乱角度が決まると散乱光子のエネルギーが一義的に決まる事になるため、測定値と形が大きく異なる結果となっている。

KEK における改良後の EGS4 の計算結果と測定値の比較を第 2 図に示す。偏光による垂直方向と水平方向への散乱違い、コンプトン散乱におけるドップラー拡がり、L-1, L-2 及び L-3 X-線が良く再現している。また、鉛で散乱された光子が Ge 検出器中で光電吸収を起こした際に発生する Ge K X-線が検出器外に抜け出る事により起きる Ge エスケープピークなど全体として実測値を良く再現している事がわかる。

3.5 電子電離の組み込み

keV-MeV 領域の電子が物質に当たった際に発生する光子としては、制動輻射と、生成した制動輻射の光電吸収に伴う特性 X 線があるが、物質の原子番号が大きい場合には、電子による K 殻電子電離 (Electron Impact Ionization: EII) に伴い発生する特性 X 線の寄与が無視できなくなる。そのため、EGS4 の結果は、特性 X 線強度を過小評価する可能性がある事が指摘されていた。

電子電離は、光子の反応ではないがその結果生じる特性 X 線は、低エネルギー光子の扱いと共通する点があることから、KEK において組み込みの取り組みを行った [13, 9]。使用する断面積データの検討、K 殻電子が電離された後の扱いの改良を行った結果、実測データを良く再現する事が出来るようになった。第 3 図は、20keV の電子が銅ターゲットに入射した時に、130° 方向に出てくる光子を Si 検出器で測定した実験値と EGS4 の比較である。K-X 線を過小評価している EGS4 の結果が、EII を組み込んだ改良により改善された事が良く判る。

4 各分野での EGS4 応用の状況

最初に述べたように EGS4 にユーザーの 6 割は医学物理分野の研究者である。従って、国際的に見るならば医学物理分野での研究が圧倒的に多いが、我が国では著者の関連研究分野から使用が広がった事も影響し、放射線計測、放射線遮蔽や保健物理等より広い分野で使用されている。以下では、後で紹介する「EGS4 研究会」での発表を中心に、主としてわが国での各分野への応用例を紹介する。個々の応用例を具体的に紹介するにはスペースが足りないため、どの様な分野で、どの様な研究に使用されているかという事の紹介を行う。

4.1 放射線計測分野

Ge 検出器は、エネルギー分解能が良いことから、通常エネルギー領域では、応答関数を必要とする事は少ないが、高エネルギーガンマ線の測定に使用する場合には、応答が複雑になるため、応答関数が必要となる。工藤等はレーザー逆コンプトン光子ビームで得られる 20MeV までの光子測定を目的に Ge 検出器の応答関数計算に EGS4 を使用している [15]。

実験的に求める事ができる検出器の検出効率は、光子のエネルギーや、線源形状が限られている。必要な検出効率を得るために、実験的に得られた結果との比較で計算の精度を確認し、実験的に得られないエネルギーや形状の線源に対する検出効率は計算で求める事が多い。鳥居等は、液体廃液モニターの様々な放射性核種に対する検出効率の計算にこの手法を適用している [16]。

4.2 放射線検出器研究

常温で使用できる半導体検出器として、CdTe や CdZnTe 等が注目されている。これらの検出器は、出力が検出器中の吸収エネルギーに比例しないという問題がある。これら半導体検出器の応答の研究が、エネルギー吸収から出力に至るモデルの検証等と併せて継続されている。(Nelson 等 [17], 西澤等 [18])

シンチレーション検出器の場合でも、シンチレーション光の発生は厳密には検出器にエネルギーを付与する際の電子のエネルギーに依存する。従って、同じエネルギーが吸収された場合でも、電子のエネルギー分布が異なる事から、入射ガンマ線の全エネルギーが検出器中で吸収された場合でも出力の違いが生じる事になる。また、発生したシンチレーション光の全てが光電子増倍管に入り出力に寄与するわけではない。NaI(Tl) 検出器の分解能は、シンチレーション光を発生するのに必要なエネルギーから推定したものより悪いことが従来から知られていた。俵等は、NaI(Tl) の分解能を悪くしている要因として上記の現象に着目し、電子エネルギー依存性を取り入れたシンチレーション光の発生と発生したシンチレーション光の収集効率を加味した応答を EGS4 を使用して計算し、得られた 662keV ガンマ線に対する NaI(Tl) 検出器の応答が測定結果と良く一致する事を報告している [19, 20]。

4.3 放射線遮蔽

線再生係数は、線の遮蔽計算において最もよく使用される量である。実験的に求めることは容易ではないので、データベースの作成は、計算結果により行われてきた。様々な物理現象の効果を調べたり、断面積データの違いを調べる事に EGS4 が利用されてきた(平山 [21, 22])。S_N 計算は、厚い体系の計算に向いているが、光子の計算では角度、空間及びエネルギーメッシュによる影響が大きい事が判っている。スプリットングを適用した EGS4 による 40mfp までの再生係数(平山 [23]) は、S_N 計算の各メッシュサイズの妥当性を検証に使用されている。

実際に多く見られる多重層の場合は、基となるデータの不足もあり研究途上である。著者は、EGS4 による水、鉄及び鉛の様々な組み合わせを広いエネルギー範囲について計算した結果を公表した [24]。公表された結果を使用して、多重層再生係数のフィッティング法の研究が進んでいる(秦等 [25], 播磨等 [26])。

電子加速器において高エネルギー電子から発生する放射線の計算には EGS4 が良く使用されている。光核反応は、EGS4 には含まれていないが、佐藤等は、ターゲット物質中での光子のエネルギー微分飛行長と光核反応断面積を使用して、高エネルギー電子からの高エネルギー中性子の発生 [27] や、物質中の残留核の研究が行われている [28]。武井等は、電子加速器のビームダンプの発熱量計算や線量評価に EGS4 を使用している [29]。

4.4 保健物理

佐藤は、高エネルギー光子による実効線量、線量当量の実用量の系統的な研究に EGS4 を使用している [30]。また、EGS4 で扱っていない光核反応についても EGS4 による光子飛行長と光核反応断面積を使用して評価し、線量当量への寄与が大きい事を明らかにしている。又、電子に対する実効線量の計算(津田等 [31]) や実用量の計算(平山 [32]) へも適用されている。

放射線測定器の 1 種ではあるが、保健物理に直結したホールボディカウンターの研究への応用も行われている(木名瀬等 [33])。

4.5 医学物理

最初に述べたように、EGS4 のユーザーの 6 割以上が医学物理の研究者である。そのため医学物理分野の雑誌の 1 つである *Phys. Med. and Biol.* では、しばしば EGS4 を使用した論文が掲載されている。日本では外国に比べてこの分野での EGS4 を使用した研究が少なかったが、最近増

える傾向がある。昨年開催された第2回国際 EGS 研究会でも、治療時の人体中の線量評価(坂井等 [34])、SPEC 研究への応用(横井等 [35])や診断用 X 線の測定に関する研究(越田等 [36], 宮島等 [37])が、日本のグループから発表されている。講習会への医学物理関係者の参加割合も増えており、今後質量共に向上する事が期待される。

4.6 放射線利用

アイソトープ利用や放射線の工業利用分野においても、EGS4 を応用できるテーマが多く存在すると考えられるが、EGS4 の存在と有効性が知られていないことから、現在までの利用は限られている。

宮井等は、工業用の X 線トモグラフィで使用する検出器システムの設計に EGS4 を使用している [38]。また、X 線非破壊検査の解析(梶原 [39])や密時計の設計・評価(木下 [40])に使用した例もある。

4.7 放射線に対する教育への応用

放射線に対する理解が難しい要因の一つに、放射線は見るできない事があげられる。可視化のシステムは、EGS4 でも UNIX ワークステーション上では複雑な形状を含めて粒子の飛跡を詳細に表示するシステムが公開されていた。しかしながら、UNIX ではグラフィックソフトが必須条件となっており、誰もが簡単に使用できる状況とはなっていなかった。そこで、KEK において形状等の制限はあっても PC 上で簡単に飛跡を表示させるシステムを作成した [41, 42]。PC の能力の向上に伴い、現在では半インタラクティブ的に PC で EGS4 による計算を行いその結果を表示できるようになっている。

物質の種類や大きさ、粒子の種類やエネルギーを入力で指定できる様にユーザーコードを作成しておけば、EGS4 の事を知らなくてもこのシステムを使って物質中での光子や電子の挙動を理解する事が可能となる。このような特性を生かして、放射線に対する学生の教育や研究所の一般公開等で放射線になじみのない方に放射線の事を理解してもらう有効な手段となっている。

4.7.1 光子及び電子の反応の理解

光子や電子の相互作用を断面積の式だけで説明されても、イメージがわからないのが普通である。EGS4 の飛跡表示システムを使って、特定の反応前後の粒子の飛跡を見せることによりイメージを持って反応を理解する事ができる。第4図は、中心に厚さ 0.5 放射長 (1 放射長は、電子や陽電子が制動放射放出によりそのエネルギーが $1/e$ になる距離。鉛の場合は、0.56cm) の鉛を持つ水素泡箱に 1GeV の光子が入射した時の飛跡例である。光子が鉛中で電子対生成により生成した電子と陽電子が、磁場により反対方向に曲げられていること、制動放射の生成により電子、陽電子もエネルギーが減少している事、電子-電子散乱や陽電子-電子散乱、コンプトン散乱による電子の生成の様子がわかる。

4.7.2 物質による光子の減衰の状況

物質の厚さ、物質の種類を変えて、通り抜ける光子の状況を調べる事により、減衰係数や分岐比を理解する事ができる。これらの概念は、イメージがわからないため学生にとって分かりにくいものであるが、PC による表示システムは、学生が興味を持って接するという事も相まって理解を深める面で効果的である。都立保健大学でこのシステムを使った授業を受けた学生から「動いている陽電子が消滅する際には、2つの消滅線が 180度よりも狭い角度で放出する事を知り、PET(Positron Emission Tomography)の誤差の要因になることが判った」[43]といったレポートが出された例からもこのシステムが放射線に関する教育に有効である事が良くわかる。

5 ユーザーサポートとEGS4研究会

計算コードの開発と同じくらい重要な事は、それを使用するユーザーに対するサポートである。ユーザーサポートには、コードのインストール、実際の問題への応用における疑問に関する Q and A や、コード使用の経験交流が含まれている。

計算コードは、その内容や様々な制限を良く知っているコードの開発者以外の多くのユーザーに使用され、そこからのフィードバックを経て使い易いコードとなる。一般ユーザの使用から新たな課題が生じる事もある。計算コードは、この様な過程を経てはじめて、公開されたコードであると言える段階となる。その意味では、ユーザーサポートは、非常に重要な課題である。

初心者を対象とした EGS4 講習会は、毎年世界各国で開催されている。これらの講習会は、1週間程度の時間をかけて、講義と実習を丁寧に行っているが、そのだけに参加料は相当高額である。わが国での講習会の方式についてもいろいろ検討してきたが、外国と同じ様な方式は難しいという判断をし、それに代わって「EGS4を様々な分野に応用した研究を交流する」事を目的とした研究会を開催し、その一環として講習会を行うという形式を取ることにした。この「EGS4研究会」は、高エネルギー加速器研究機構の放射線科学センター主催で10年前から毎年実施してきた。その内2回は、国際研究会として開催された。講習会には、毎回50人程度の参加者がある。時間が限られているので丁寧な講習会にする事は難しいが、講義録を充実させること [44, 45] と電子メールで実際の使用時の質問に答える事で補完している。³

2回の国際会議を含む研究会のプロシーディングは、高エネルギー加速器研究機構の出版物として公表されている。この様な研究会そのものが少ない事、様々な分野へのEGS4応用に関する研究発表がEGS4を利用した研究を進める上で有益である事から、海外を含めて多くの送付要求が寄せられている。

ホームページを開設し、情報を発信していくこともユーザーサポートの観点から重要な事である。EGS4のホームページは、<http://ehssun.lbl.gov/egs/egs.html> であり、ここにはEGS4に関する最新の情報や Q and A を含めて多くの情報が掲載されている。又、KEKのEGS4ホームページ (<http://ccwww.kek.jp/kek/rad/egs4/egs.html>) では、著者のグループが行ってきた改良、EGS4を用いて行った研究、講習会のテキスト等に関する情報を公開している。最近では、国外を含めてホームページの情報から著者に対して様々な質問も寄せられている。

References

- [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] A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, "The Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm for Electron Monte Carlo Transport, *Nucl. Instr. Meth.* **B18**(1987)165-181.

³公開したコードのユーザーは、計算機やコードで扱っている物理現象に対する知識や理解において非常に幅が広く、それだけに寄せられる質問も多岐にわたるものとなる。コード開発者の所属機関は、コード開発の意義は理解しても、ユーザーサポートの重要を理解しない場合がある。開発しただけでは、いかに優れたコードであってもその価値は少ない事をもっと認識する事が望まれる。

- [5] A. F. Bielajew, "A hybrid multiple-scattering theory for electron-transport Monte Carlo calculation", *Nucl. Instr. and Meth.* **B111**(1996)195-208.
- [6] A. F. Bielajew and S. J. Wilderman, "Innovative Electron Transport Methods in EGS5", in Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2000-20*, pp.1-10 (2000).
- [7] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, "Implementation of linearly-polarized photon scattering into the EGS4 code", *Nucl. Instrum. Meth.* **A332**(1993)227-283.
- [8] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, "LSCAT:Low-Energy Photon-Scattering Expansion for EGS4 Code", *KEK Internal 95-10* (1995).
- [9] Y. Namito and H. Hirayama, "LSCAT:Low-Energy Photon-Scattering Expansion for EGS4 Code (Inclusion of Electron Impact Ionization)", *KEK Internal 2000-4* (2000).
- [10] S. Ban, H. Hirayama and Y. Namito, "60-keV Gamma-Ray Streaming in a Two-Bend Duct", *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.* **1**(2000)675-678.
- [11] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, "Implementation of the Doppler broadening of a Compton-scattered photon into EGS4 code", *Nucl. Instrum. Meth.* **A349**(1994).
- [12] H. Hirayama and Y. Namito, "Implementation of a General Treatment of Photoelectric-Related Phenomena for Compounds or Mixtures in EGS4", *KEK Internal 2000-2* (2000).
- [13] Y. Namito and H. Hirayama, "Implementation of electron-impact ionization into EGS4 code", *Nucl. Instrum. Meth.* **A423**(1999)238-246.
- [14] E. Acosta et al., "Measurements of K-shell ionization cross section of Cr, Ni and Cu by impact of 6.5-40 keV electrons", *J. Apply. Phys* **83**(1998)6038.
- [15] K. Kudo et al., "Study of Response Function Measured by a Ge Detector to a Laser Compton-Backscattered Photon Beam Compared with Calculation by EGS4/PRESTA Code Taking Account of the Source Size", in Proceedings of the Seventh EGS4 Users' Meeting in Japan, *KEK Proceedings 98-7*, pp. 40-47(1998).
- [16] T. Torii et al., "A study on Calibration Method for Liquid Effluent Monitor", in Proceedings of the Fifth EGS4 Users' Meeting in Japan, *KEK Proceedings 95-9*, pp. 84-87(1995).
- [17] W. R. Nelson et al., "EGS4 Calculations for a Cd-Zn-Te to Measure Synchrotron Radiation at PEP-II", in Proceedings of the First International Workshop on EGS4, *KEK Proceedings 97-16*, pp. 188-198(1997).
- [18] N. Nishizawa et al., "Calculation of CdTe Semiconductor Detector Response", in Proceedings of the Sixth EGS4 Users' Meeting in Japan, *KEK Proceedings 96-10*, pp. 61-69(1996).
- [19] H. Tawara et al., "Response of NaI(Tl) Scintillation Detectors for Gamma Rays", in Proceedings of the Eighth EGS4 Users' Meeting in Japan, *KEK Proceedings 99-15*, pp. 44-52(1999).
- [20] H. Tawara et al., "A Monte Carlo Method for Determining Absolute Scintillation-Photon Yields and Energy Resolution of Scintillators for Gamma Rays", in Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2000-20*, pp.152-160(2000).

- [21] H. Hirayama and D. K. Trubey, “Effects of Incoherent and Coherent Scattering on the Exposure Buildup Factors of Low-Energy Gamma Rays”, *Nucl. Sci. Eng.* **99**(1988)145-156.
- [22] H. Hirayama, “Effects of the Photon Cross Sections and Energy-Absorption Coefficients of Air to the Gamma-Ray Point Isotropic Exposure Buildup Factors”, *Nucl. Sci. Eng.* **124**(1996)258-270.
- [23] H. Hirayama, “Calculation of gamma-ray exposure buildup factors up to 40 mfp using EGS4 with particle splitting”, *J. Nucl. Sci. Technol.* **32**(1995)1201-1207.
- [24] H. Hirayama and K. Shin, “Application of the EGS4 Monte Carlo code to a study of multilayer gamma-ray exposure buildup factors of up to 40 mfp”, *J. Nucl. Sci. Technol.* **35**(1998)816-829.
- [25] K. Shin and H. Hirayama, “Description of multilayer gamma-ray exposure buildup factors up to 40 mfp by the approximating model”, *ibid.* **35**(1998)865-873.
- [26] Y. Harima et al., “An Improved Approximation Formula of Gamma-Ray Buildup Factors for a Point Isotropic Source in Two Layer Shield”, *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.* pp. 488-492.1(2000)675-678.
- [27] T. Sato et al., “Measurement of the Neutron Spectrum by the Irradiation of a 2.04-GeV Electron Beam into Thick Targets”, to be published to *Nucl. Instrum. Meth. A* (KEK Preprint 2000-109).
- [28] T. Sato et al., “Measurements of high-energy photonuclear reaction yields in the 2.5 GeV electron beam stop”, *Nucl. Instr. Meth.* **A401**(1997)476-490.
- [29] H. Takei and Y. Takeda, “Beam Dump for High Current Electron Beam at JNC”, in Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2000-20*, pp.255-264(2000).
- [30] 佐藤 理, “高エネルギー電子加速器施設からの光子による被曝線量評価に関する研究”, 学位論文 (1999).
- [31] S. Tsuda et al., “Fluence to Effective Dose Conversion Coefficients for Electrons from 1MeV to 100GeV”, in Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2000-20*, pp.40-47(2000).
- [32] H. Hirayama, “Calculation of absorbed dose at 0.07, 3.0, and 10.0 mm depths in a slab phantom for monoenergetic electrons”, *Radiat. Prot. Dosim.* **51**(1994)107-124.
- [33] S. Kinase et al., “Application of EGS4 Code to Whole-body Counting”, in Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2000-20*, pp.31-39(2000).
- [34] R. Sakai et al., “Dose Distribution of Stereotactic Irradiation for Thorax”, *ibid.*, pp.100-106.
- [35] T. Yokoi et al., “Implementation and Performance Evaluation of Iterative Reconstruction Algorithms in SPECT: A Simulation Study Using EGS4”, *ibid.*, pp.224-234.
- [36] K. Koshida et al., “Correction of Measurement by HP-Ge Detector for Incident Diagnostic X-ray Photons”, *ibid.*, pp.235-241.

- [37] S. Miyajima et al., “Response of CdZnTe Detector in Measurement of Diagnostic X-ray Spectra”, *ibid.*, pp.242-249.
- [38] H. Miyai et al., “Array Detector for Third-Generation Industrial High Energy X-Ray Computed Tomography System”, in Proceedings of the First International Workshop on EGS4, *KEK Proceedings 97-16*, pp. 199-207(1997).
- [39] G. Kajiwara, “Examination of the X-ray Piping Diagnostic System Using EGS4 (In case Considering Spectrum of X-Ray)”, in Proceedings of Eighth EGS4 Users’ Meeting in Japan, *KEK Proceedings 99-15*, pp. 71-75 (1999).
- [40] E. Kinoshita, “Simulation of Gauge Stature Used Radioisotope by EGS4 Code”, in Proceedings of Seventh EGS4 Users’ Meeting in Japan, *KEK Proceedings 98-7*, pp. 36-39(1998).
- [41] H. Hirayama et al., “EGS4 Shower Display System, EGS4PICT(2), Windows Version”, *KEK Internal 94-10* (1994).
- [42] H. Hirayama et al., “EGS4 Shower Display System (EGS4PICT), Windows Version 2.0”, *KEK Internal 96-9* (1996).
- [43] M. Fukushi et al., “The Information Education using EGS4 Monte Carlo code of Tokyo Metropolitan University of Health Sciences”, in Proceedings of the Eighth EGS4 Users’ Meeting in Japan, *KEK Proceedings 99-15*, pp. 7-11(1999).
- [44] Y. Namito et al., “Lecture Note, Installation of EGS4 (Revised in 1999)”, *KEK Internal 99-4* (1999).
- [45] H. Hirayama and Y. Namito, “Lecture Notes of EGS4 Course at KEK”, *KEK Internal 99-5* (1999).

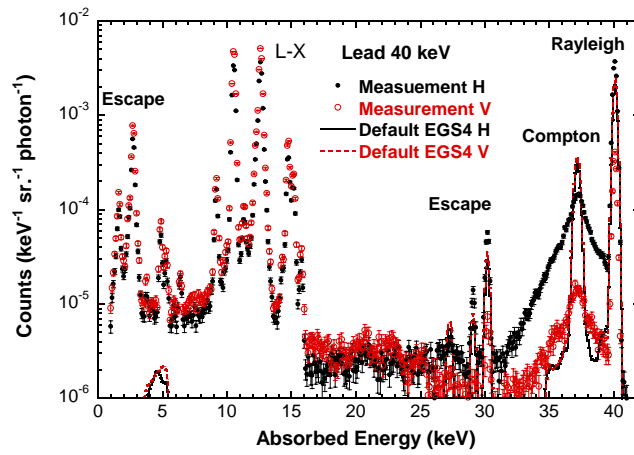


Figure 1: 改良前の EGS4 の計算結果と測定された Ge 検出器の波高分布の比較。線源:40keV 放射光、散乱サンプル:鉛。

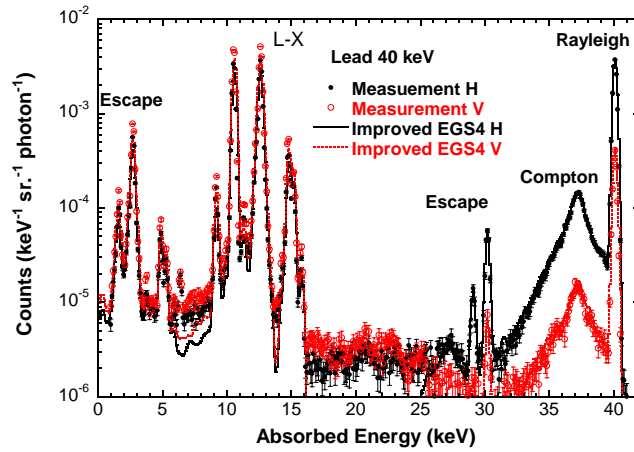


Figure 2: 改良後の EGS4 の計算結果と測定された Ge 検出器の波高分布の比較。線源:40keV 放射光、散乱サンプル:鉛。

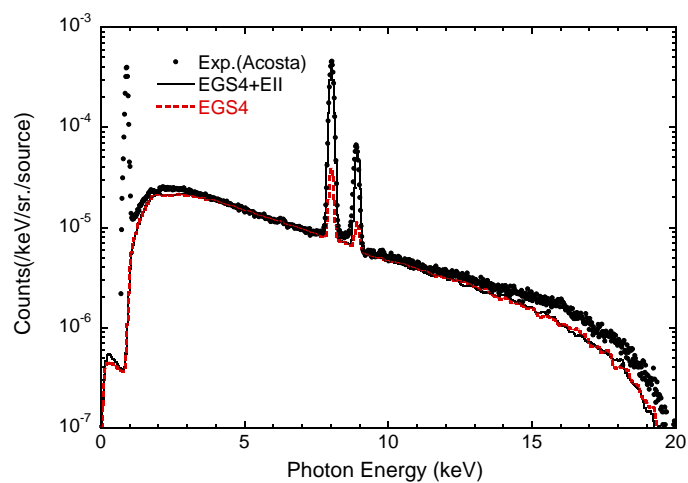


Figure 3: 銅ターゲットから $\theta = 130^\circ$ 方向に放出された制動輻射及び特性 X 線のスペクトル。20 keV 電子は、垂直にターゲットに入射する。シンボルは、Acosta[14] 等による Si 検出器による測定値で、点線は改良前の EGS4、実線は、EII の組み込みを行った EGS4 の計算結果。

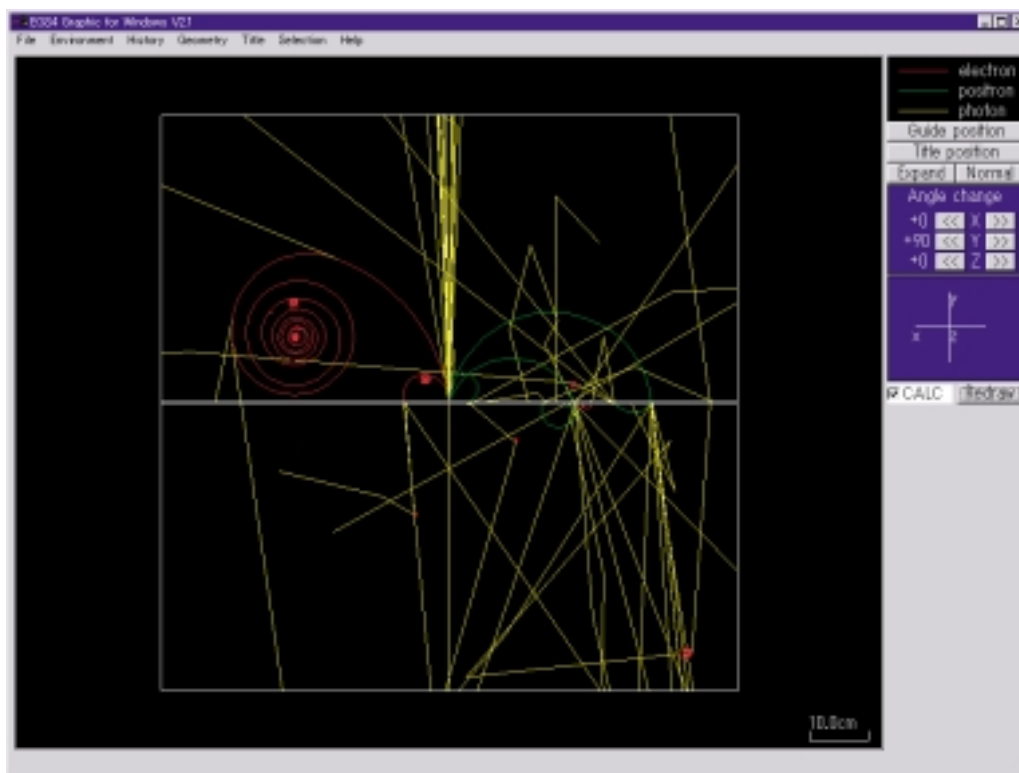


Figure 4: 水素泡箱中での 1GeV 光子による粒子の飛跡。中心は 0.5 放射長の鉛板。