

## 1 概要

汎用電子-光子輸送コード EGS4 (Electron-Gamma-Shower Version 4) の概要について述べる。第1節では電子光子モンテカルロ輸送コードの EGS4 に至る歴史について述べる。第2節では、EGS4 の特徴、取り扱う物理現象、断面積の準備そして言語について述べる。EGS4 のエネルギーの上限は数 1000 GeV である。EGS4 のエネルギーの下限は光子と電子に対してそれぞれ、1 keV と 10 keV である。第3節では EGS4 コードでの粒子輸送の方法について述べる。要点は酔歩の凝縮 (Condensed history) である。その内容は連続減速と多重散乱の近似である。粒子輸送計算での順番についても述べる。計数ルーティン AUGAB を制御するスイッチについても述べる。第4節ではコードからの出力を述べる。第5節ではいくつかのベンチマーク計算について述べる。

## 2 EGS コードの歴史

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としては、次のようなものがあった。

- Messel and Crawford Code - Austria (1958-1970)
  - デジタルコンピュータを高エネルギーのシャワー計算に最初に適用
  - 計算結果は、"Shower Book" として公表された。  
Electron-Photon Shower Distribution Function (Pergamon Press, Oxford, 1970).
  - 計算コードそのものは配布されなかった。
- Zerby and Moran Code - ORNL (1962-1963)
  - SLAC の 2 マイル加速器建設を契機に作られた。
  - エンジニアリング的計算が主である。
  - ORNL の外部には配布されなかった。
- Nagel Code - Bonn, Germany (1963-1967)
  - Nagel の博士論文として書かれたコード (SHOWER)

- 円筒形状のみ
- 物質としては鉛のみ
- versatility, modularity が欠けていた。
- 容易に入手できた。

この内、唯一公開されていた Nagel のコードが SLAC, DESY, MIT に導入され改良されてきた。この内、SLAC 及び Stanford において行われた改良が EGS (Electron Gamma Shower) へと発展していった。EGS system の開発の歴史を表 1 に示す。

EGS システムは、EGS3 の段階でマニュアル (SLAC-210) が整備され、 $e^+e^-$  衝突型の加速器が大成功を納めた時期と重なった事もあり、高エネルギー物理分野で広く使用されようになり、高エネルギー物理分野での標準的なコードとなった。医学物理分野をはじめとする、低エネルギー領域でのユーザが増えると共に、低エネルギー領域への拡張が要望され、現在のバージョン EGS4 へと発展していった。

## 3 EGS4 コードシステム

EGS4 コードシステムは、次のようなシステムである。

- EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) [2] は、その名の様に、電磁カスケードを計算するコードである。電子、陽電子、光子の物質中での挙動を計算することができる。
- EGS は、アナログモンテカルロプログラムである。
  1. 各物理現象は、出来る限り厳密に扱われている。
  2. 高エネルギー実験で使用されるカロリメータの fluctuation の研究に向いている。
  3. 粒子のエネルギーが高くなると長い計算時間が必要になる。
  4. 様々な、分散低減技法はコードには組み込まれていないが、ユーザが組み込む事が出来る。
- EGS4 で使用する各物質の諸データは、PEGS4 (A Preprocessor for EGS4) で計算される。

1. 条件が同じであれば、PEGS4 の計算は一度でよい。
  2. PEGS4 は、断面積、分岐比、散乱係数等必要な全てのデータを、理論式と経験式から計算する。
  3. EGS4 で使用する際の計算時間の短縮のために、テーブルの形ではなく、piece-wise linear fitting されたパラメータの形で出力する。
  4. PEGS4 は、他の目的にも使用できる。  
 サンプリングルーチンのチェック  
 断面積の計算とプロット等
- EGS4 システムは Mortran3 で書かれている。
    1. システムをコンパクトに
    2. 見やすいプログラム
    3. マクロ機能による多様性の確保
  - EGS4 では次の物理現象を扱っている。
    1. 電子・陽電子
      - 制動輻射 (Elwert 補正を除く)
      - バーバー散乱 ( $e^+e^-$ )
      - モラー散乱 ( $e^-e^-$ )
      - 飛行中と停止時の消滅。陽電子は消滅まで追跡される。
      - モリエール多重散乱
      - 電離損失:
        - 個別反応の間で適用
        - 衝突損失で制限付き阻止能を使用
        - スターンハイマー-セルツァー-バーガー法による密度効果
          - 軟制動輻射は衝突損失に加える。
    2. 光子
      - 対生成
      - コンプトン散乱
      - レイリー(コヒーレント)散乱オプション有り
      - 光電効果
        - 光電子生成

- 励起原子のエネルギーはその場で物質に付与。

- 光電子放出角は光子と同一(デフォルト)。角度分布サンプリング法は Biela-jew から入手可

- K-X 生成・輸送のための特別版 PHOTO 有り。その設定用の EDGSET ルーティン有り。

#### ● その他

1. エネルギー範囲 数千 GeV から  
 光子: 1 keV  
 電子・陽電子: 10 keV (Kinetic Energy、以下「K.E.」と略す。)
2. 入射粒子は、光子、電子、陽電子または  $\pi_0$ -崩壊ガンマ線
3. エネルギー分布、空間分布、角度分布等を持つ入射粒子は、ユーザがユーザコードに組み込む事により可能。
4. 幾何ルーティンは SUBROUTINE HOWFAR で扱う。  
 - マクロ、SUBROUTINE、MORSECG 等
5. Mortran のマクロを用いて Importance sampling を使用できる。  
 - Splitting, path-length biasing, Russian roulette.  
 - Leading particle biasing.

## 4 EGS4 における粒子輸送

光子の扱いは、他のモンテカルロコードと基本的に同じであるので、電子(陽電子)の取扱いを中心に説明する。

### 4.1 電子・陽電子の輸送

電子が物質中を通過する時の原子核や軌道電子とのクーロン相互作用の数は非常に多いため、モンテカルロシミュレーションにおいて直接全ての散乱を扱う事は実際的ではない。多くのコードにおいては、個々の散乱を直接扱う事を止め、短い飛跡中での輸送

を、多重散乱と連続減速で近似する“condensed randomwalk (condensed history technique)”と呼ばれる手法が使われる事が多い。ここではこれを「凝縮酔歩」と訳す。

この手法では、荷電粒子の飛跡を多くの散乱を一まとめにしたステップに分割し、ステップ中での散乱を多重散乱モデルに基づいて考慮する。

凝縮酔歩モデルは、相互作用の扱い方によって2つのクラスに分けられる。

クラス I モデルでは、一次電子の全ての相互作用は、それぞれの凝縮酔歩の一步において一括して扱われる。すなわち、図 1 に示されているように、電子は距離  $t$  を移動し、その途中で、2次電子を発生する。Step の最後での電子のエネルギーは、2次電子の生成により直接的には影響されないが、エネルギー損失の分布からのサンプリングにおいて実質的には考慮される。即ち、 $t$  を移動する間のエネルギー損失  $\Delta E(t)$  は、エネルギー損失の分布(ランダウ分布など)からサンプリングされる。ETRAN の系列のコードでは、このモデルを用いている。

クラス II モデルでは、それに対して、あるしきいエネルギー以下の2次粒子だけを一括して扱う。しきいエネルギー以上の2次粒子は、離散的な反応として扱われ、それにより元の電子のエネルギーも方向も変わる。(図 1) EGS4 では、このモデルを用いている。

EGS4 では後者の方法を採用し、荷電粒子と光子のカットオフエネルギーをそれぞれ AE, AP とし AE 以上のエネルギーのデルタ線を生じる散乱と AP 以上のエネルギーの光子を発生する制動輻射を離散的な反応として扱う。カットオフ以下のエネルギーの粒子は連続減速として扱われる。

電子等荷電粒子は移動に伴い、電離や励起により反応点に達するまでに粒子のエネルギーが変化し、従って断面積も変化する事になる。この効果を考慮するために、EGS4 では次のような手法を用いている。すなわち、次のように反応点までのパスの途中では断面積は変化しないとして光子の場合と同じ方法で mfp を決定する。

$$\begin{aligned}\sigma_{t,fict}(x) &= \sigma_{t,real}(x) + \sigma_{fict}(x) = constant \\ &= \sigma_{t,real}(x_0)\end{aligned}\quad (1)$$

反応点に達した時、乱数を発生し、乱数が  $\sigma_{t,real}(x) / \sigma_{t,real}(x_0)$  より大きい場合には反応が生じなかった

として輸送を続け、小さい場合には反応が生じたとして反応の種類を決定する。粒子が反応点に達すると分岐比に従って反応の種類を決定し、決定した反応に従って粒子の各パラメータを決定する。

## 4.2 連続エネルギー損失

先に述べたように EGS4 では、カットオフエネルギー以下の光子を生じる制動輻射とカットオフエネルギー以下の電子を生じる電子・電子または陽電子・電子散乱は連続エネルギー損失として扱われる。従って、単位長さあたりの平均エネルギー損失は

$$\begin{aligned}-\left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{(Continuous)}^{Total} &= -\left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{(bremsstrahlung)}^{Soft} \\ &\quad -\left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{(Atomic\ Electrons)}^{Sub-Cutoff}\end{aligned}\quad (2)$$

で表すことができる。EGS4 では、最初の項については電子と陽電子に同じデータを使用している。(実際は、異なる。) 第2項として EGS4 では Berger と Seltzer によって提唱された次の制限付き阻止能 (restricted stopping power) を使用している。

$$\begin{aligned}\left(-X_0 \frac{d\tilde{E}_{\pm}}{dx}\right)_{(Atomic\ Electrons)}^{Sub-Cutoff} &= \\ \frac{X_0 n 2\pi r_0^2 m}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2(\tau + 2)}{\bar{I}_{adj}/m} + F^{\pm}(\tau, \Delta) - \delta \right]\end{aligned}\quad (3)$$

$\gamma = \tilde{E}_0/m$  : 通常の相対論因子,  $\tilde{E}_0$  は MeV 単位での電子の全エネルギー

$$\eta = \sqrt{\gamma^2 - 1} = \beta\gamma = \dot{p}_0 c/m$$

$$\beta = \sqrt{1 - \gamma^{-2}} = v/c \text{ for incident particle}$$

$T'_E = T_E/m =$  電子静止質量単位での K.E. のカットオフ (K.E. は運動エネルギー)

$$\tau = \gamma - 1$$

$$y = (\gamma + 1)^{-1}$$

$T'_{max} =$  最大エネルギー付与 = ( $\tau$  if positron,  $\tau/2$  if electron)

$\Delta =$  制限付き最大エネルギー付与 =  $\min(T'_E, T'_{max})$

$\bar{I}_{adj} =$  調整済平均電離エネルギー,

$\delta =$  密度効果補正

$$\begin{aligned}
F^-(\tau, \Delta) &= -1 - \beta^2 + \ln[(\tau - \Delta)\Delta] \\
&+ \tau/(\tau - \Delta) \\
&+ \left[ \frac{\Delta^2}{2} + (2\tau + 1) \ln\left(1 - \frac{\Delta}{\tau}\right) \right] / \gamma^2
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
F^+(\tau, \Delta) &= \ln(\tau\Delta) - \frac{\beta^2}{\tau} \left\{ \tau + 2\Delta - \frac{3\Delta^2 y}{2} \right. \\
&- (\Delta - \Delta^3/3)y^2 \\
&\left. - (\Delta^2/2 - \tau\Delta^3/3 + \Delta^4/4)y^3 \right\} \quad (5)
\end{aligned}$$

電子・陽電子の移動に伴うエネルギー損失量（物質側からみれば、吸収エネルギー）は、

$-\left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{(Continuous)}^{Total}$  に粒子の移動距離を掛けることにより計算できる。これにより得られる量は、連続エネルギー損失がガウス分布であるとした時の平均量である。通常物質中でのエネルギー吸収量を求める場合にはこの方法による計算で十分であるが、その厚さが電子・陽電子の飛程に比べて非常に薄い場合には、ランダウ分布等からエネルギー損失量を計算しなければならない。

### 4.3 多重散乱

図2に多重散乱を模式的に示す。粒子は、直線距離  $s$  (step size: 歩長) を移動する間に多重散乱により、曲線  $t$  だけ物質中を動き、本来の方向に進んだ場合から  $\Delta_x, \Delta_y$  だけずれた位置に達するとともに進行方向も変わる。多重散乱のモデルはいくつかあるが、先に述べたように、EGS4ではMolièreの理論を使用している。また、移動後の変位は無視している。

多重散乱の扱いは理論の許す範囲であれば歩長に依存しないはずである。しかしながら、多重散乱モデルが無限媒質中での現象を扱っているのに対して、実際の計算では非均質境界が存在する事があることも影響し、計算結果が歩長に大きく依存する場合がある。(Electron Step-Size Artefacts: 電子歩長依存の人為誤差と呼ばれている。) エネルギーの低い電子(数 MeV 以下)が重要な計算においては、defaultのEGS4は、正しい結果を示さない場合がある事が明らかになっている。

電子の歩長依存の人為誤差については、NRCC (National Resrach Council of Canada) (現ミシガン大)の Bielajew 等が精力的に取り組み[3]、この問題を解決する方法として、PRESTA (the Parameter

Reduced Electron-Step Transport Algorithm)[4]を開発した。

PRESTAでは、電子の実際の飛程と直線距離との関係を表す行程長補正をより厳密に扱い、散乱角の変化に加えてdefaultのEGS4では無視していた横変位(lateral-displacement)を考慮し、物質境界での扱いを改良した新しい境界交差アルゴリズム(boundary-crossing algorithm)を使用している。PRESTAにより、大部分の問題では歩長依存性が解消したが、低エネルギー電子の後方散乱の様に依存性があるケースが残っていた。

この問題を解決するために、Bielajew等はPRESTA-IIと呼ばれる新たなアルゴリズムを開発した。[5, 6]

PRESTA-IIは、これまでのMolièreの理論からではなくGoudsmit-Saundersonから出発した新しい多重散乱理論を使用すると共に、物質境界における問題を抜本的に解決するために、境界近くでは多重散乱理論を用いずに単一散乱で電子の輸送を扱うハイブリッド方式を採用している。図3に境界付近での散乱のPRESTA-IIでの取り扱いを示す。PRESTA-IIにより、歩長依存の人為誤差は基本的に解決するものと期待されている。

### 4.4 EGS4の構成とカスケードの追跡方法

EGS4の流れ制御をFig.4に示す。EGS4で計算を行うためには、計算形状の定義、使用する物質データの定義と各リージョンへの割当、入射粒子に関する初期データの設定等を行い、SUBROUTINE HATCHを呼ぶことによりPEGS4で計算しておいた物質データを読み込み、SUBROUTINE SHOWERを必要なヒストリー回数だけ呼び、得られた結果を編集して出力するルーチンからなるメインプログラム、ジオメトリーを決定するSUBROUTINE HOWFAR、求めようとする結果を蓄積するSUBROUTINE AUSGABで構成されるユーザコードが必要である。(これ以外のSUBROUTINEがユーザコードに含まれても良いが、HOWFARとAUSGABは、必ずなければならない。無限媒質でジオメトリーを考慮する必要が無い場合にも、RETURN; END; だけで構成されるHOWFARが必要である。)

EGS4のジオメトリーの単位は、リージョンであ

る。各リージョンの物質の配置決めは、メインプログラムで HATCH を呼ぶ前に行われる。HOWFAR は粒子が移動するたびに呼ばれ、メインプログラムで定義した形状に関するデータによって、リージョンが変わるかどうかのチェックを行う。

AUSGAB は、標準では、

- 1: 粒子が移動する前
- 2: 粒子のエネルギーが PEGS4 で設定したカットオフエネルギー以下になった時
- 3: 粒子のエネルギーが EGS4 で設定したカットオフエネルギー以下になった時
- 4: 体系外に粒子が出るなどユーザーが追跡を止める様に設定した時 (IDISC=1)
- 5: 光電吸収の生じる前

に呼ばれる。各反応の生じた割合を知りたい場合等には、IAUSFL(IARG) の値を 1 にする事により、知りたい反応の発生前または発生後に AUSGAB を呼ぶようにする事ができる。

表 2 に、EGS4 で使用されている IARG の値の意味を示す。

電磁カスケードでは、反応毎に粒子の数が倍に増える。粒子の数の増加をどの様に扱っていくかは計算コードにより異なるが、EGS4 ではスタック数、NP、を用いて次のような方法でカスケードを追跡している。

1. 入射粒子のスタック数を 1 とする。 (NP=1;)
2. 反応の結果新しい粒子が発生すると、全エネルギーの小さい方の粒子にスタック数 NP+1 を、大きい方の粒子に NP を割り当てる。
3. スタック数の大きい粒子を先に追跡する。
4. 粒子が、体系外に出たり、カットオフエネルギー以下なる等の理由で discard された場合には、スタック数 NP=NP-1 の粒子を次に追跡する。(Fig. 5 参照)
5. スタック数 NP=1 の粒子が discard された時、そのヒストリーが終了したとする。

## 5 EGS4 で得る事ができる情報

EGS4 では、ユーザが自分で得たい情報を SUBROUTINE AUSGAB で変数や配列に割当て、所定のヒストリーが終了したのちに、集計・出力するという思想を持っている。

EGS4 で計算できる主なものは、

- 吸収エネルギー  
最も一般的な物理量であり、目的によって検出器物質のリージョンにおける吸収エネルギーや、個々のリージョンにおける吸収エネルギーを計算する。
- 粒子束の計算 (boundary crossing)  
光子束の場合には、next event surface crossing を使用する事もできる。粒子束を用いて計算される量 (例えば、照射線量) も、当然の事ながら計算可能である。
- トラック長 (Track length)  
計算する量が、トラック長に比例する場合や、光核反応生成量を計算する場合には、当該リージョン内での粒子の実際の移動距離 TVSTEP の和から求める事ができる。

である。

また、IAUSFL フラグを使用する事により、特定の反応 (例えば、制動輻射) の寄与を計算する事も可能である。

## 6 ベンチマーク計算

### 6.1 電子の深さ-線量曲線

Fig. 6 に、円筒形状の空気 (直径 1cm, 長さ 2cm) またはアルミニウム (直径 1cm, 長さ 1cm) が 2cm の深さにある時の水体系中での電子による depth-dose curve の比較を示す。[7] 20-MeV の広い電子ビームが入射した場合の比較である。Fig. 7 には、空気の場合の様々な深さでの径方向分布の比較を示す。[7] いずれの場合も、EGS4 の計算が実験値と良く一致している事が判る。

## 6.2 制動輻射光子生成

前方方向に発生する制動輻射のスペクトルについて、O'Dell 等の実測値 [8] との比較を Fig. 9 に示す。O'Dell 等の実験は、Fig. 8 に示すようにタングステン ( $0.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) と金 ( $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) からなる複合ターゲットから前方方向に放出した制動輻射を  $\text{D}_2\text{O}$  ターゲットにあて、発生した光中性子を T.O.F. 法により測定し、その情報から制動輻射のスペクトルを求めるといふ大がかりな実験である。実験誤差の範囲で、EGS4 の計算は実験値とよく一致している。

角度分布を含めた比較は、Faddegon 等によってなされている。[9] 図 10 に種々のターゲットからのスペクトルを NaI(Tl) シンチレータで測定した結果と EGS4 による計算結果を、図 11 に積分値の M/C を示す。いずれの物質、いずれの角度に対しても EGS4 の結果は実測値とよく一致している。

## 6.3 1 GeV 電子ビームからの水とアルミニウム中のシャワーの深さおよび半径方向分布

Crannell 等は、1-GeV 電子による水及びアルミニウム中の 3 次元のエネルギー分布を測定した。[10] 水体系では、anthracene が、アルミニウム体系では  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレーターが検出器として使用されている。図 12 に測定値と EGS の計算結果の比較を示す。いずれの場合も、測定値と計算値は良く一致している。[1]

## 参考文献

- [1] R. Ford and W. R. Nelson, "The EGS Code System: Computer Programmes for the Monte Carlo Simulation of Electromagnetic Cascade Showers (Version 3)", Stanford Linear Accelerator Center report *SLAC-265*(1985).
- [2] E. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, "The EGS4 Code System". Stanford Linear Accelerator Center report *SLAC-265* (1985).
- [3] A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, "Electron Step-size Artefacts and PRESTA", Monte Carlo Transport of Electrons and Photons, Edited by T. M. Jenkins et al, Plenum Press (1988)pp115-138.
- [4] A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, "The Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm for Electron Monte Carlo Transport", *Nucl. Instr. Methods B18* (1987) 165-181.
- [5] A. F. Bielajew, "A hybrid multiple-scattering theory for electron-transport Monte Carlo calculation", *Nucl. Instr. and Meth. B* 111, 195(1996).
- [6] A. F. Bielajew and I. Kawrakowi, "PRESTA-I  $\Rightarrow$  PRESTA-II: The New Physics", in proceedings of The First International Workshop on EGS4. (to be published as KEK Proceedings).
- [7] K. R. Shortt, C. K. Ross, A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, "Electron Beam Dose Distributions Near Standard Inhomogeneties", *Phys. Med. Biol.* 31(1986)235.
- [8] A. A. O'Dell, C. W. Sandifer, R. B. Knowlen and W. D. George, "Measurement of absolute thick-target bremsstrahlung spectra", *Nucl. Instr. Meth.* 61(1968)340-346.
- [9] B. A. Faddegon, D. W. O. Rogers, C. Ross and L. Van der Zwan, "Bremsstrahlung of 10 to 30 MeV Electrons Incident on Thick Targets", Institute for National Measurement Standards Report, *PIRS 0245*(1991).
- [10] C. J. Crannell, H. Crannell, R. R. Whitney and H. D. Zeman, "Electron-Induced Cascade Showers in Water and Aluminium", *Phys. Rev* 184(1969)426.

表 1 EGS システムの歴史

Period	Programme	Language	Authors
1963~1965	SHOWER1	FORTRAN	Nagel
1966	SHOWER2	FORTRAN	Nicoli
1967~1972	SHOWER3/PREPRO (PREPRO -- >pre-processing)	FORTRAN	Ryder, Talwar and Nelson
1970~1972	SHOWER4/SHINP (SHINP -- >Shower input)	FORTRAN	Ford
1974	EGS1/PEGS1 (PEGS -- >Processor for EGS)	FORTRAN	Ford and Nelson
1975	EGS2/PEGS2	MORTRAN2	Ford and Nelson
1976~1977	EGS3/PEGS3 (SLAC-210)[1]	MORTRAN2	Ford and Nelson
1982~1985	EGS4/PEGS4 (SLAC-265)[2]	MORTRAN3	Nelson, Hirayama and Rogers

表 2(a) IARG の値と対応する場面

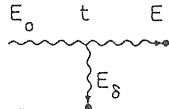
IARG	IAUSFL	場面
0	1	粒子を距離 TVSTEP だけ輸送しようとしている。
1	2	粒子を廃棄しようとしている。そのエネルギーは ECUT (荷電粒子) または PCUT (光子) 以下だが、対応する PEGS カットオフ AE または AP よりは高い。
2	3	粒子を廃棄しようとしている。そのエネルギーは ECUT と AE の両方より低い。(または PCUT と AP の両方より低い。)
3	4	粒子をユーザーの (通常 HOWFAR での) 要求により廃棄しようとしている。
4	5	光電効果が起き次のいずれかの場面となった; a) そのエネルギーが K 殻束縛エネルギー以下なので、入射光子を廃棄する。 b) (蛍光) 光子を K 殻束縛エネルギーで廃棄する。

表 2(b) IARG の値と対応する場面

IARG	IAUSFL	Situation
5	6	粒子を距離 TVSTEP だけ輸送した。
6	7	制動輻射相互作用が起きようとしており、ELECTR から BREM を呼ぼうとしている。
7	8	BREM を呼んだ後、ELECTRA に戻った。
8	9	モラー相互作用が起きようとしており、ELECTR から MOLLER を呼ぼうとしている。
9	10	MOLLER を呼んだ後、ELECTRA に戻った。
10	11	バーバー相互作用が起きようとしており、ELECTR から BHABHA を呼ぼうとしている。
11	12	BHABHA を呼んだ後、ELECTRA に戻った。
12	13	陽電子の飛行中消滅が起きようとしており、ELECTR から ANIHI を呼ぼうとしている。
13	14	ANIHI を呼んだ後 ELECRA に戻った。
14	15	陽電子が静止状態で消滅した。
15	16	対生成相互作用が起きようとしており、PHOTON から PAIR を呼ぼうとしている。
16	17	PAIR を呼んだ後 PHOTON に戻った。
17	18	コンプトン相互作用が起きようとしており、PHOTON から COMPT を呼ぼうとしている。
18	19	COMPT を呼んだ後 PHOTON に戻った。
19	20	光電効果相互作用が起きようとしており PHOTON から PHOTO を呼ぼうとしている。
20	21	PHOTO を呼んだ後 PHOTON に戻った。(NP が非 0 と仮定)
21	22	サブルーティン UPHI に入った。
22	23	サブルーティン UPHI からちょうど抜けた。
23	24	レイリー(コヒーレント)相互作用が起きようとしている。
24	25	レイリー(コヒーレント)相互作用がちょうど起きた。



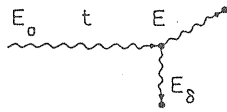
Class I  
Uncorrelated Energy Loss



$$E = E_0 - \Delta E(t)$$

$$E_{dep} = \Delta E(t) - E_\delta$$

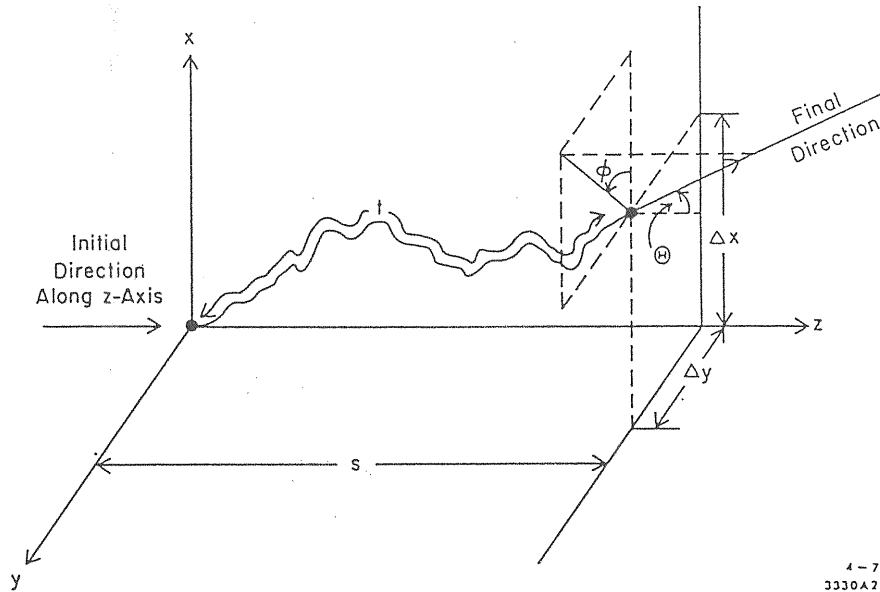
Class II  
Correlated Energy Loss



$$E = E_0 - t L_{col}^{AE} - E_\delta$$

$$E_{dep} = t L_{col}^{AE}$$

図1. クラスIアルゴリズムで使用する非相関エネルギー損失機構とクラスIIアルゴリズムで使用する相関エネルギー損失。単純化のため、ロックオン電子を生じるディスクリートな相互作用だけを考える。 $\Delta E(t)$ はエネルギー損失変動分布からサンプリングしたエネルギー損失。 $L_{col}^{AE}$ はAE以下のエネルギーの2次粒子に対する制限付き衝突阻止能。



4-78  
3330A25

図2 多重散乱図解

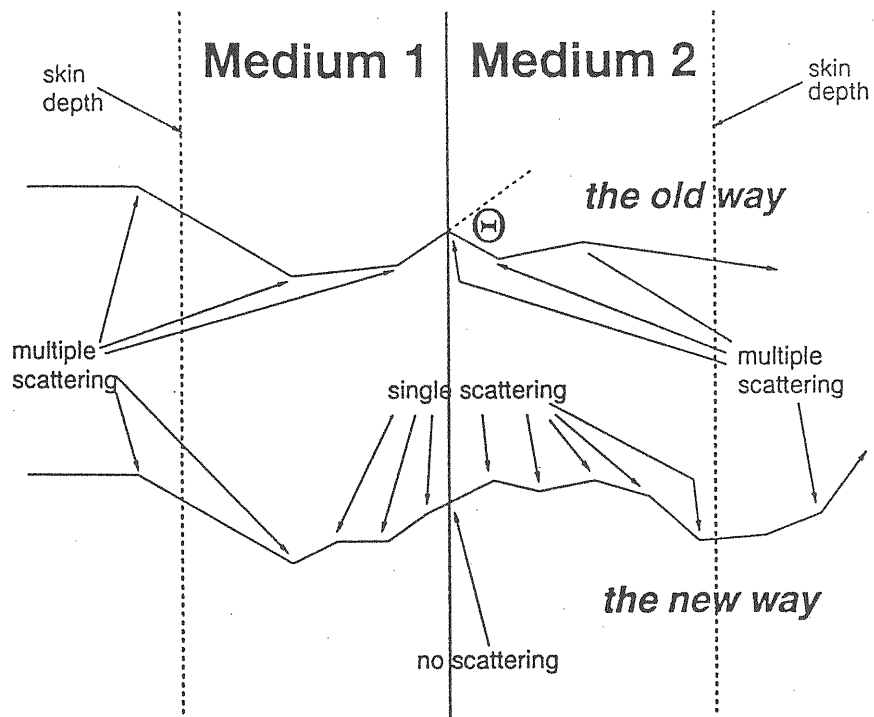


図 3 ハイブリッド型境界交差アルゴリズムの概念図。境界に関連する人為誤差を排除するために考案された。

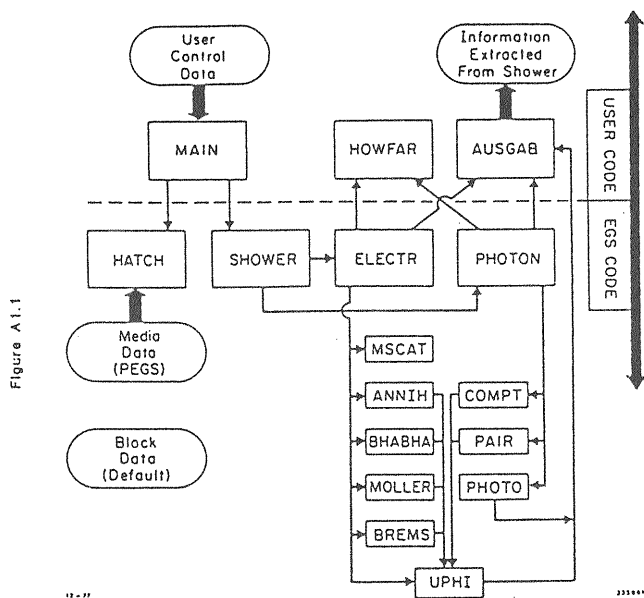


図 4. ユーザーコードによる EGS4 の流れの制御

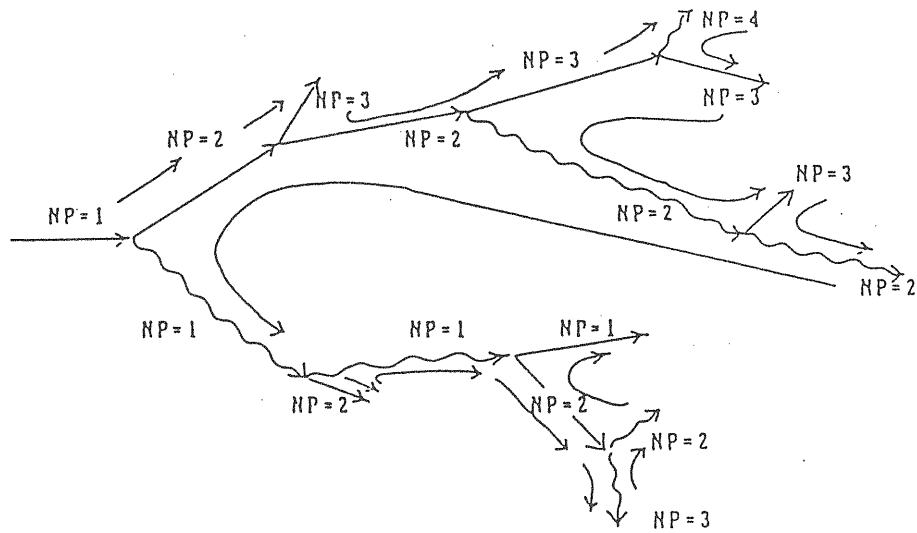


図 5. EGS4でのカスケードの計算の制御

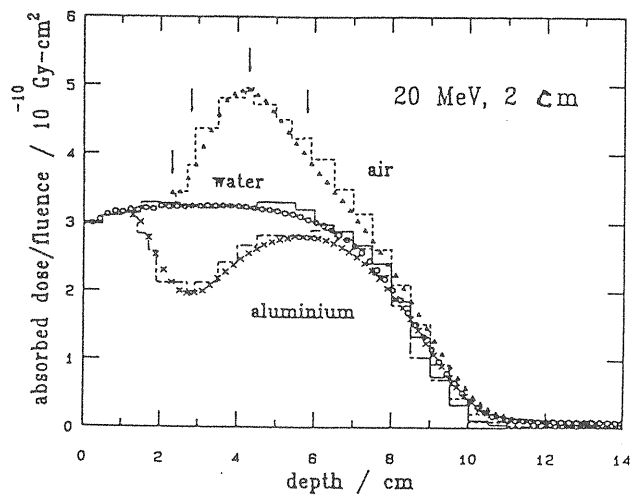


図 6. 20 MeV 電子ビームが水ファントムに入射したときの深さ-線量分布。2 cm の深さの所に空気またはアルミの円柱がある。「o」は均質ファントムのデータを、「x」はアルミ円柱のデータを、三角形は空気のデータを示す。ヒストグラムは20-MeV 電子点線源についてのEGS4の計算結果である。矢印の深さの所での半径方向の分布が次の図に示される。全実験値は、均質カーブの一点を用いて計算に規格化されている。[7]

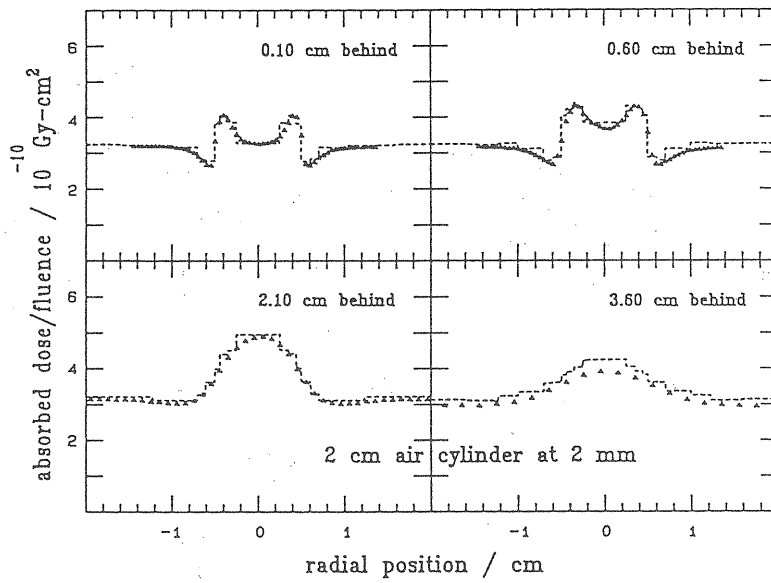


図 7. 20 MeV 電子で照射された水ファントム中の空気円柱背後での半径方向線量分布。シンボルとヒストグラムでそれぞれ実験値と EGS4 計算を示す。3.6 cm の場合のわずかなずれは実験体系のモデル化での小さな差異により説明できる。[7]

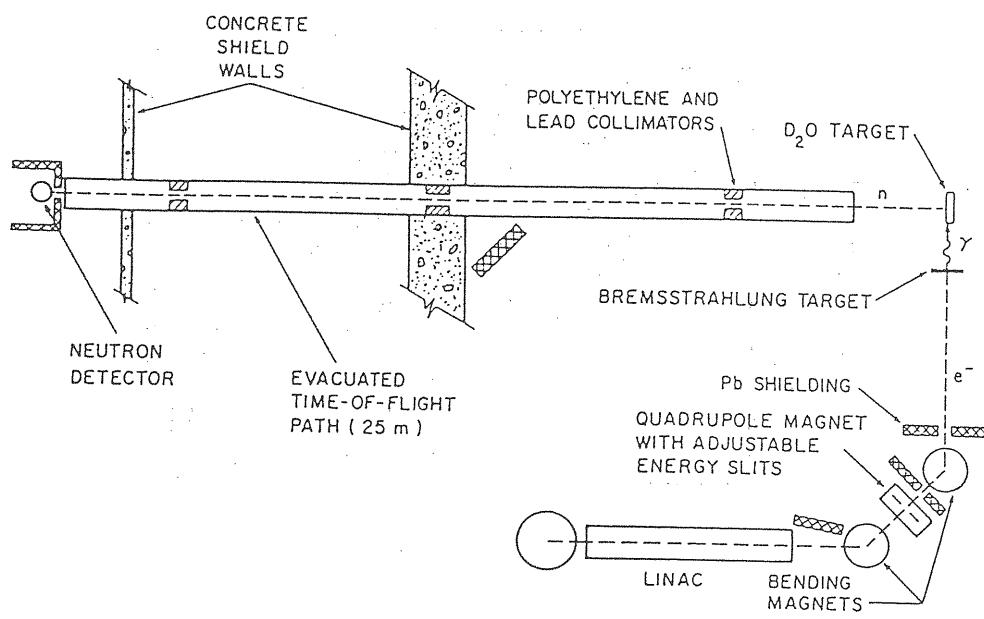


図 8. O'Dell 等の実験体系 [8]

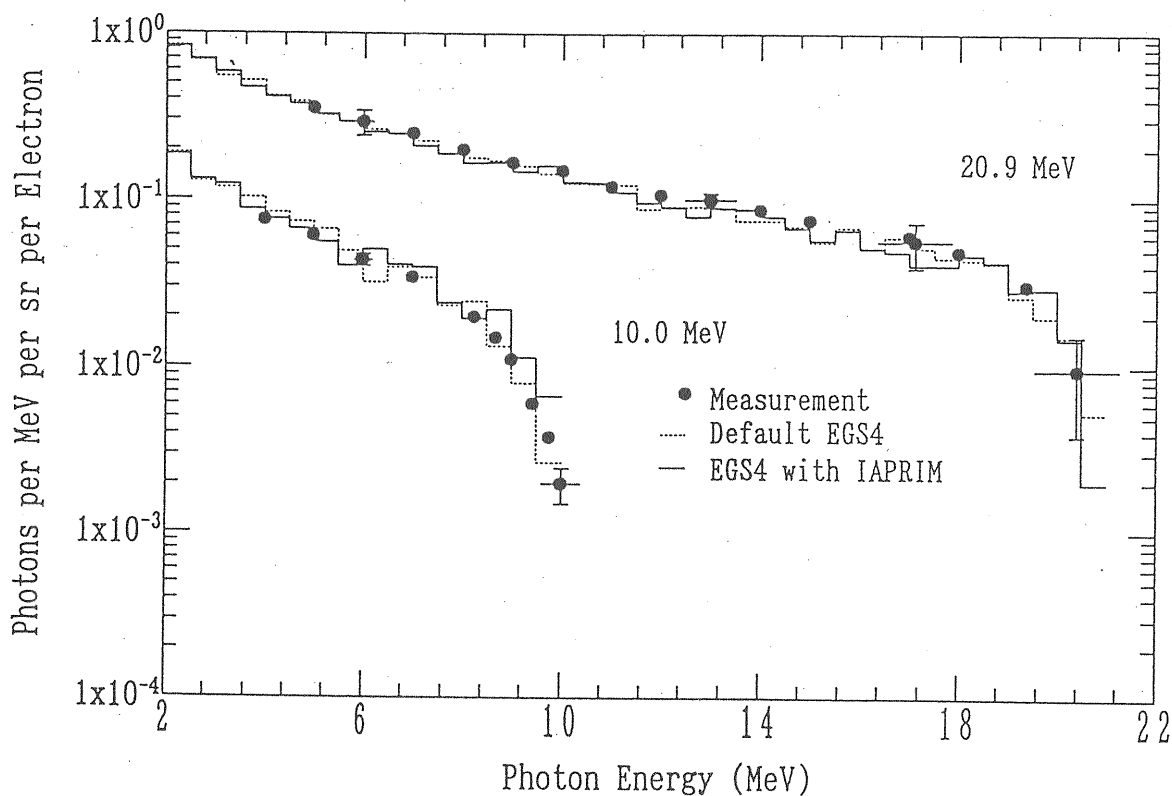


図 9. 10 と 20.9 MeV 電子が複合ターゲットに入射した時に前方に発生する制動輻射スペクトルの測定と実験の絶対値比較。複合ターゲットの第1層はタングステン ( $0.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) であり、第2層は金 ( $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) である。

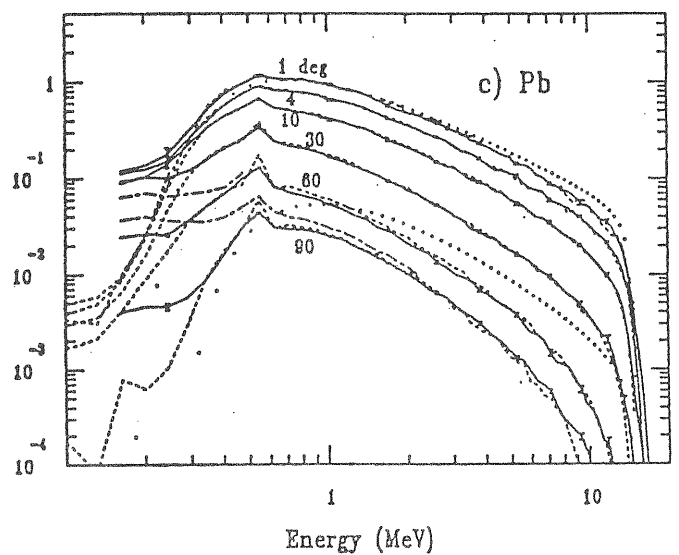
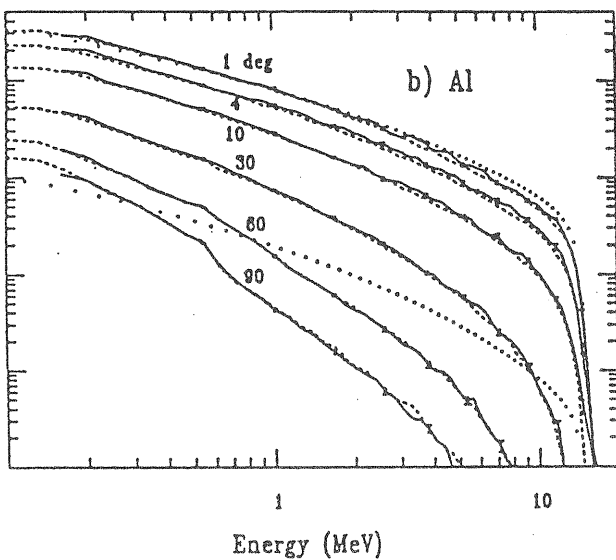
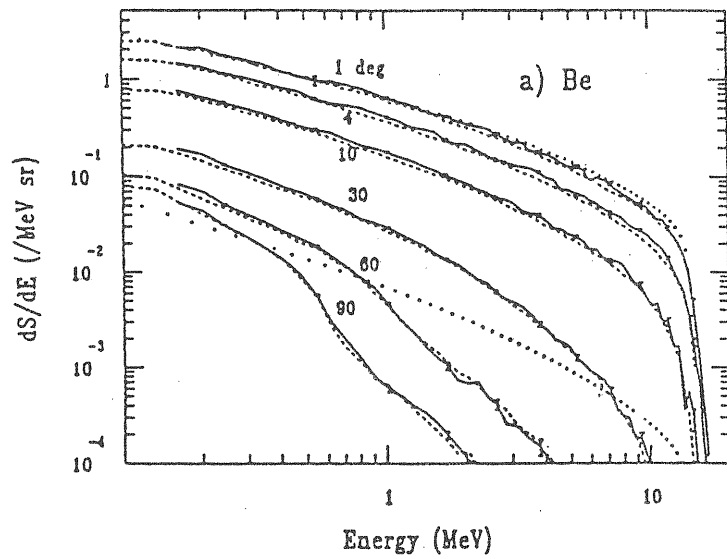


図 10. 15 MeV 電子がターゲットに入射したときに $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $90^\circ$  方向に発生する制動輻射。ターゲットは、a)  $11.67 \text{ g/cm}^2$  厚、 $6.73 \text{ g/cm}^2$  半径の Be、b)  $9.74 \text{ g/cm}^2$  厚、 $9.81 \text{ g/cm}^2$  半径の Al、c)  $9.13 \text{ g/cm}^2$  厚、 $11.75 \text{ g/cm}^2$  半径の Pb である。測定された制動輻射の収率（実線）と計算された制動輻射の収率（破線）を比較する。計算は EGS4 モンテカルロコードシステムで行った。Shiff のスペクトルにターゲットでの減衰を考慮して決まるスペクトル形状を  $0^\circ$  と  $60^\circ$  について点線で示す。（各角度での積分制動輻射量の測定値に規格化してある。）

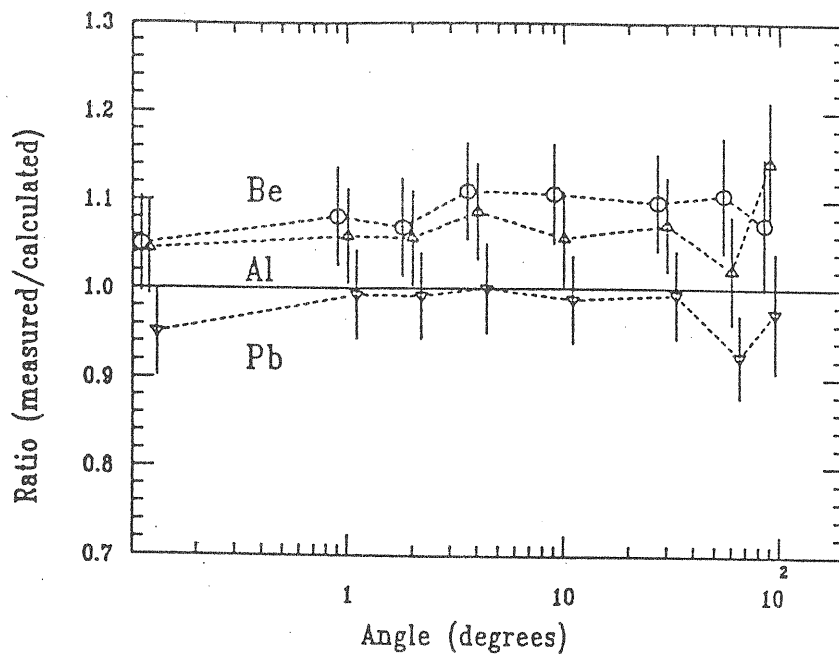


図 11 Be, AlとPbについての積分制動輻射収率の実験と計算の比。角度の関数として表す。

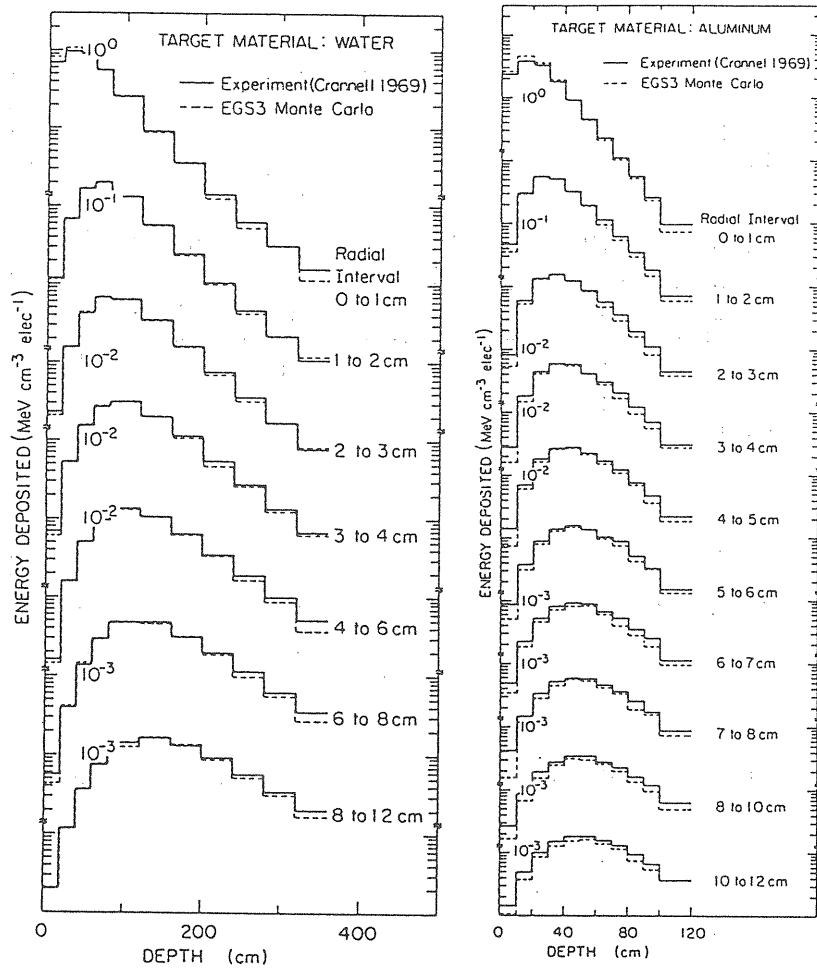


図 12 Cranell *et al*[10] の 1 GeV での水とアルミ中でのシャワー実験と EGS との比較。