

「第2回EGS4研究会」

要旨集

1992年7月20-22日

高エネルギー物理学研究所

高エネルギー物理学研究所

放射線安全管理センター

目 次

EGS 4システムの紹介

1. EGS 4システムの概要 高エネ研 平山 英夫 1
2. HOWFARの内容と例 高エネ研 平山 英夫 14
3. EGS 4のインストールとPEGS 4の使い方
高エネ研 波戸 芳仁 22
4. EGS 4ユーザコードの例 高エネ研 平山 英夫 35
5. 放射線安全管理センターにおけるEGS 4システム使用環境
高エネ研 波戸 芳仁 42
6. UNIX Workstation への組み込み時のトラブル対策
高エネ研 波戸 芳仁 47

EGS 4を使用した研究報告

1. EGS 4コードの教育用ユーザインターフェイス
動燃 小無 健司 他 51
2. 高速中性子による鉄の γ 線生成断面積の測定
京大 田辺 英治 他 53
3. 光核反応断面積測定のための制動放射線束の評価
東北大 宇野 喜智 他 56
4. 陽子線照射治療に伴う放射化空気の放射能濃度測定における検出器の較正
筑波大 多田 順一郎 他 59
5. EGS 4による放射性ガスモニターの応答計算
動燃 鳥居 建男 他 61

6. NaI (Tl) のシンチレーション効率に関する研究とそのEGS4の利用
高エネ研 佐々木 慎一 他 63
7. 陽子線衛星搭載用 Si 半導体検出器の応答関数計算
東北大 高木 俊治 66
8. γ 線、低エネルギーX線照射時の均質ファントム内吸収線量の測定
船研 成山 展照 他 69
9. 人体形状ファントムモデルを用いた線量当量計算計算への応用
動燃 野尻 一郎 他 71
10. コバルト-60治療装置の光子エネルギースペクトルと吸収線量の計算
都立医療技術短大 斎藤 秀敏 他 73
11. ポジトロンファクトリー用電子ライナックおよびターゲット系に関する
考察
原研 高崎研 金子 広久 他 75
12. Linac による低速陽電子の生成率評価
京大 道下 敏則 77
13. EGS4を用いた核融合ダイバータへの逃走電子エネルギー沈着解析
原研 功刀 資彰 他 78

EGS4システムの概要

高エネルギー物理学研究所

平山 英夫

はじめに

EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) は、電子・光子を対象とする様々な分野で幅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。電子（または陽電子、以下特に明記しない限り電子と言う）を含む計算では、光子の計算に較べて考慮しなければならない事が多い。本冊子は、EGS4で使用されている各反応の扱いを紹介する事を通じて「電磁カスケード計算をモンテカルロ法で計算する」方法を概説したものである。また、これまでモンテカルロ計算を行った経験が無い人のために、サンプリング法についても簡単に紹介を行う。

1. サンプリング法

ここでは、SLAC-265¹ の 2.2 節 (Probability Theory and Sampling Methods-A short tutorial) で紹介しているサンプリング法のうち基本となる事のみを説明する。詳細について知りたい場合には、2.2 節の最初に紹介しているいくつかの参考文献を参照するのが良い。

1.1 Direct method

$f(x)$ が連続な関数で、 x が x と $x+dx$ の間にある確率が $f(x)dx$ であり、 x が $a \leq x < b$ の範囲の変数とすると、

$$\int_a^b f(x) dx = 1 \quad (1.1)$$

であり、 ξ を 0 - 1 の一様乱数とすると

$$\xi = F(x) = \int_a^x f(x) dx \quad (1.2)$$

から x を一義的に決める事が出来る。 $f(x)$ を確率密度関数、 $F(x)$ を確率分布関数と呼ぶ。

x が x_i の時、確率 p_i であるような離散的な値をとる場合は

$$F(x_n) = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1.3)$$

である。一様乱数 ξ が

$$\sum_{j=1}^i p_j \leq \xi < \sum_{j=1}^{i+1} p_j \quad (1.4)$$

の時、 x は x_i と決める事ができる。

この様に、確率分布関数から直接変数 x を決定するサンプリングを direct method という。

1.2 Combination of the 'composition' and 'rejection' techniques

$f(x)$ が

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x) g_i(x) \quad (1.5)$$

の形で表される時、

$$1. \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j < \xi_1 \leq \sum_{j=1}^i \alpha_j \quad (1.6)$$

の条件を満たす i を選ぶ

2. $f_i(x)$ から次の関係式を解くことにより、 x を決める。

$$\int_{-\infty}^x f_i(x) dx = \xi_2 \quad (1.7)$$

$$3. \xi_3 < g_i(x) \quad (1.8)$$

であれば、 x を採用する。

そうでなければ、ステップ 1 に戻ってやり直す。

ξ_1, ξ_2, ξ_3 は 0 - 1 の一様乱数。

この様にして、 x をサンプリングする方法を Combination of the 'composition' and 'rejection' techniques と言い、EGS 4 でしばしば使用される方法である。全ての i について $g_i=1$ の時 'composition' 法、 $n=1$ の時 'rejection' 法と呼ばれている。EGS 4 では、 f_i から x をサンプリングする場合にも上記の方法が使用される場合がある。例えば、

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_{2i}(x) g_{2i}(x) \quad (1.9)$$

で表される時、同じ様な方法で、 x をサンプリングする事が出来る。

1.3 一様乱数

モンテカルロ計算において、使用される一様乱数は非常に重要な役割をもっている。乱数の一様性に問題があったり、周期が短かったりすると正しい結果を得る事ができない。一様乱数やそのテストについては古くから多くの研究がされているが、最近のものも含めて Andreo が簡潔にまとめている²。以下に、簡単に紹介する。

最も一般に用いられている乱数は、multiplicative-linear-congruential 法と呼ばれる、Lehman の次の様な方法で得られる一様乱数である。

$$\xi_i = (A \xi_{i-1} + B) \text{ modulo } M \quad (1.10)$$

ξ_i は、一様乱数、 ξ_0 は initial seed として与えられる。

A は multiplier, M は modulus, B は常数である。 M は普通 2^b (b は使用する計算機の整数表現のビット数) が使用される。この場合、乱数の周期は $2^{-2}M$ である。 ξ と M の逆数の積が 0 - 1 の一様乱数である。 A と B は良い乱数が得られるように決める。有名なものとして、次の様なものがある。

RANDU --- $A=65539, B=0, M=2^{31}$

SLAC RN1 --- $A=69069, B=0, M=2^{32}$

SLAC RNG --- $A=663608941, B=0, M=2^{32}$

RNG は、EGS4 にインライン乱数として組み込まれている乱数である。最近、このような乱数ではなく Fibonacci RNG と呼ばれる次の様な乱数を使用すべきであるという意見が出されている。

$$\xi_i = (\xi_{i-p} \oplus \xi_{i-q}) \text{ modulo } M \quad (1.11)$$

\oplus は、binary または logical なオペレータであり、 $p > q$ 、 $M=2$ である。このタイプの一つである RANMAR は、 2^{144} ($\sim 2 \times 10^{43}$) という非常に長い周期の乱数である。

2. 電磁カスケードで扱われる反応

2.1 光子の反応

光子と物質の相互作用については、Hubbell が分かりやすく整理している³ (第1表)。EGS4 では、第1表の反応の内実線で囲まれた反応が扱われている。Rayleigh 散乱については、オプションとして組み入れられる様になっている。Compton 散乱については、自由電子との散乱として扱われているが、最近束縛効果を含めた incoherent 散乱を扱う試みがなされている。光核反応は、EGS4 では無視されている。

2.2 電子・陽電子の反応

電子・陽電子と物質の相互作用としては、

- a) 制動輻射
- b) 自由電子との散乱 (Møller 散乱 [e^-e^-]、Bhabha 散乱 [e^+e^-])
- c) 陽電子消滅
- d) 連続エネルギーロス
- e) 多重散乱

が扱われる。

電子・陽電子は、物質中で非常に多くの散乱を行うので、全ての散乱をそのままシミュレーションする事は現実的でない。エネルギーの非常に低い電子のみを対象とする計算コード以外では、あるエネルギー以上の散乱のみを散乱として扱い、それ以下のエネルギーの散乱は連続エネルギーロスとして扱い、電子の飛程を細かく分け (Step size)、それぞれの Step で多くの散乱による角度の変化を多重散乱モデルに基づいて決めるのが普通の方法である。EGS4 では、光子のカットオフエネルギー以下の制動輻射も連続減衰に含めている。多重散乱のモデルはいろいろあるが、EGS4 では、Molière の多重散乱理論を使用している。電子・陽電子のエネルギーが低くなると Molière の理論に基づく EGS4 の多重散乱の扱い、Step size の決め方に問題があることが判っており、この解決策の一つとして PRESTA⁴ 等が提案されている。

3. 反応断面積とサンプリング法

3.1 Particle Transport

平均自由行程 (mfp) は、巨視的断面積を用いて次の式で与えられる。

$$\lambda = 1/\Sigma = M / (N_0 \rho \sigma_t) \quad (3.1)$$

Na = Avogadro's number

ρ = density

M = molecular weight

σ_t = total cross section per molecule.

n を mfp 数とすると、次の衝突点までの n の確立密度関数 (pdf) は、

$$f(n)dn = \exp(-n)dn \quad (3.2)$$

で与えられる。直接サンプリング法により

$$\zeta = F(n) = \int_0^n f(x)dx = \int_0^n \exp(-x)dx = 1 - \exp(-n) \quad (3.3)$$

$$n = -\ln(1 - \zeta) \quad (3.4)$$

乱数として $1-\zeta$ と ζ は等価であるので、

$$n = -\ln(\zeta) \quad (3.5)$$

により、mfp 数を定める事ができる。

3.2 光子の場合

光子の場合について、実際のサンプリング手順は次のようになる。最初に、乱数を使って mfp 数 n を求める。

1. 粒子が現在いる場所の λ を計算する。
2. $t_1 = \lambda n$ とする。
3. 光子の進行方向で最も近い境界までの距離を d とする。
4. t_2 を t_1 と d の内小さい方の値とし、 t_2 だけ粒子を移動させる。
5. n から t_2/λ を引き、新たな mfp 数とする。 $t_2 = t_1$ の時は、衝突点に達したとして、ループ外にジャンプし、反応の種類を決定する。
6. $t_2 = d$ の時は、境界に達した事になる。次の領域の物質が同じであれば、2 のステップから繰り返し、物質が異なる場合はステップ 1 からやり直す。

3.3 電子・陽電子

電子・陽電子 (荷電粒子) の輸送の場合には、エネルギーがゼロに近づくときほとんどの反応断面積が無限大になるという問題がある。通常は様々な補正を行い有限な値となるが、それでも値そのものは大きく、しかも正確な値は判っていないことが多い。従って、荷電粒子の場合には、全ての反応を扱うことは現実的ではない。そこで、Condensed history ('macroscopic') techniques と呼ばれる手法を使う事が多い。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、ステップ中でのエネルギー減衰と角度の変化を多重散乱モデルに基づいて考慮する。Condensed history 法では、全ての反応に適用する場合とエネルギー減衰や角度変化の少ない反応にのみ適用し主な反応は離

散的反応として個別に扱う場合がある。(図 3.1 参照) 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 δ 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。その他の反応は連続的であると仮定する。連続的なエネルギー減少の内主として多重クーロン散乱により粒子の方向が変化し、光子の時の様な直線の飛跡にはならない。以上の事から、荷電粒子の輸送では、反応点に達する間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。

$$\sigma_{t, \text{fict}}(x) = \sigma_{t, \text{real}}(x) + \sigma_{\text{fict}}(x) = \text{constant} = \sigma_{t, \text{real}}(x_0) \quad (3.6)$$

反応点に達した時、乱数を発生し、乱数が $\sigma_{t, \text{real}}(x) / \sigma_{t, \text{real}}(x_0)$ 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。

3.4 反応の決定

粒子が反応点に達すると反応の種類を決定する。反応の種類決定は、次の離散的な確率分布関数を用いて行われる。i を可能な反応の数とする。

$$F(i) = \sum_{j=1}^i \sigma_j / \sigma_t \quad (3.7)$$

σ_j は j 番目の反応の断面積で σ_t は全断面積である。すなわち $F(i)$ は分岐比である。次の条件を満たす i を生じた反応とする。

$$F(i-1) < \delta < F(i) \quad (3.8)$$

3.5 反応により生成した粒子のパラメータの決定

反応の種類が決定すると、次のステップでは反応によって生じた粒子の各パラメータ (エネルギー、方向等) を決めなければならない。EGS4 で扱っている全ての反応のパラメータ決定法については、SLAC-265 に書かれている。

3.6 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

$$-\left(\frac{dE_z}{dx}\right)_{\text{Continuous}}^{\text{Total}} = -\left(\frac{dE_z}{dx}\right)_{\text{Bremsstrahlung}}^{\text{Soft}} - \left(\frac{dE_z}{dx}\right)_{\text{Atomic Electrons}}^{\text{Sub-Cutoff}} \quad (3.9)$$

で表すことができる。EGS4 では、最初の項は電子と陽電子について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 restricted stopping power を使用している。

$$\left(-X_0 \frac{dE_z}{dx}\right)_{\text{Atomic Electrons}}^{\text{Sub-Cutoff}} = \frac{X_0 n^2 \pi r_0^2 m}{\beta^2} \left[\ln \frac{2(\tau+2)}{(I_{adj}/m)} + F^{\pm}(\tau, \Delta) - \delta \right] \quad (3.10)$$

$$\gamma = E_0/m$$

$$\eta = (\gamma^2 - 1)^{1/2} = \beta \gamma = p_0 c/m$$

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

$$T'_E = T_E/m = \text{K.E. cutoff in electron mass units}$$

$$\tau = \gamma - 1$$

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

$$T'_{max} = \text{maximum energy transfer} = (\tau \text{ if positron, } \tau/2 \text{ if electron})$$

$$\Delta = \text{restricted maximum energy transfer} = \min(T'_E, T'_{max})$$

$$I_{adj} = \text{average adjusted mean ionization energy,}$$

$$\delta = \text{density effect correction}$$

$$F^-(\tau, \Delta) = -1 - \beta^2 + \ln[(\tau - \Delta)\Delta] + \tau/(\tau - \Delta) + \left[\frac{\Delta^2}{2} + (2\tau + 1) \ln \left(1 - \frac{\Delta}{\tau} \right) \right] / \gamma^2 \quad (3.11)$$

$$F^+(\tau, \Delta) = \ln(\tau \Delta) - \frac{\beta}{\gamma} \left[\tau + 2\Delta - \frac{3\Delta^2 y}{2} - (\Delta - \Delta^3/3)y^2 - (\Delta^2/2 - \tau \Delta^3/3 + \Delta^4/4)y^3 \right] \quad (3.12)$$

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、

$$-\left(\frac{dE_t}{dx} \right)_{\text{Continuous}}^{\text{Total}}$$

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。通常の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、Landau distribution 等からエネルギー損失量を計算しなければならない。

3.7 多重散乱

第 3.2 図に多重散乱を模式的に示す。粒子は、直線距離 s (step size) 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 Δx , Δy だけづ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、EGS 4 では Moliere 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。電子・陽電子の実際のふるまいを多重散乱モデルでどの程度制度よく評価できるかということは選ばれる step size にも大きく依存する。特に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、EGS 4 の default step size をそのまま使用しない方がよい。この問題を解決する方法として、step size を標準よりも小さくして計算する方法、ESTEPE Option、と Bielajew と Rogers によって開発された PRESTA を使用する方法がある。前者の方が組み込み方は簡単であるが、どの程度小さくすれば良いかは問題により異なることから、問題毎の最適な step size を調べなければならない事、step size を小さくすればするほど計算時間が長くなる等の問題点があるので、PRESTA を使用の方がよい。PRESTA は、標準では無視している Δx , Δy を評価したり、境界での取扱をより厳密に行う機能が含まれており、計算時間にはあまり大きな影響を与えない。

但し、PRESTA を使用する場合には、region 内で境界までの最短距離を与えなければならないので使用する geometry routine 毎に変更が必要である。(Sample User Code 参照)

4. EGS4の構成とカスケードの追跡方法

EGS4の flow control を第 4-1 図に示す。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 CALL することにより 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 CALLし、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は、メインプログラムで HATCH を CALL する前に行われる。HOWFAR は粒子が移動するたびに CALL され、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光電吸収の生じる前

に CALL される。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 CALL するようにする事ができる。

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。(第 4-2 図参照)
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で使用されている主な変数

EGS4で使用されている変数とその意味については、SLAC-265のAPPENDIX 2で説明されている。ユーザコードを書く上で必要と思われる主な変数を以下に示す。

COMMON/STACK

粒子の位置 : X(NP), Y(NP), Z(NP)
粒子の方向余弦 : U(NP), V(NP), W(NP)
粒子の重み : WT(NP)
粒子のエネルギー : E(NP) ; 静止質量を含む全エネルギー (MeV)
粒子の電荷 : IQ(NP)
粒子のリージョン : IR(NP)
スタック数 : NP

COMMON/BOUNDS

各リージョンでの荷電粒子のカットオフエネルギー : ECUT
各リージョンでの光子のカットオフエネルギー : PCUT

COMMON/EPCONT

吸収エネルギー (MeV) : EDEP
反応点までの直線距離 : TSTEP
移動する実際の距離 : TUSTEP
前のリージョン : IROLD
次のリージョン : IRNEW

COMMON/MEDIA

物質の数 : NMED ; ユーザコード中で使用する物質の数
物質の radiation length : RLC
物質の密度 : RHO

メインプログラムで粒子の初期値は次のように設定し、CALL SHOWERの引き数としてSUBROUTINE SHOWERに渡される。SUBROUTINE SHOWER内でこれらの初期値は、\$STRANSFER PROPERTIESマクロによって、例えば、

X(1)=XI; Y(1)=YI; Z(1)=ZI;

のように、スタック数1の各パラメータに割り振られる。

入射粒子の位置 : XI, YI, ZI
入射粒子の方向余弦 : UI, VI, WI
入射粒子のエネルギー : EI
入射粒子の電荷 : IQI
粒子の入射リージョン : IRI
入射粒子の重み : WTI

6. 得たい情報の収集

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。予め、著者が設定した限りの情報を入力データで選択する方式のコードと異なり、自分の計算目的を明確にし、その目的にあうように AUSGAB を書かなければならないので特に初心者には使いにくいという印象を与えるが、自分の目的とする情報の物理的意味を知った上でコーディングすることは当然のことである。そのためには、どのような変数を使えばよいかという事を知っている必要がある。具体的には、サンプルプログラムを参照してもらうとして、ここでは最低知っておく必要のある基本的な事を紹介する。

6.1 エネルギー吸収量の計算

最も一般的な物理量は、エネルギー吸収量である。粒子の移動や反応に伴って物質に吸収されるエネルギーは、変数 EDEP である。この量をどのような形で収集するかは計算毎に異なる。例えば、検出器の検出効率を計算している場合や、高エネルギーのカロリメータでは、エネルギー吸収が検出器部に相当するリージョンで発生した時のみに、所定の変数に加えていく。物質中のエネルギー分布の状況を計算している場合には、エネルギー吸収量をリージョン毎に加える。

6.2 粒子束の計算

リージョン境界の面を横切る粒子束を計算するには、まず粒子が面を横切ったかどうかの判断をし (IF (IR (NP).NE. IROLD))、その上で、粒子が自分の目的とする粒子であるかどうかの判断をし、所定の配列に加えていく。粒子の横切った面がどの面かについては、ユーザが自分の使用している形状に即して判断する。Z-軸に垂直な無限平板が組み合わせられた形状の場合も粒子の進行方向によって同じリージョンにいる場合でも横切る面が異なることに注意する必要がある。光子束の計算の場合には、通常的光子輸送計算コードで行っているように、面に対する粒子の角度を補正するのが普通である (平面の場合は、その面に対する方向余弦で割る)。面を横切る光子の数を求める場合には、このような補正は行わない。エネルギースペクトルを計算する場合には、更に、粒子の運動エネルギーによって、エネルギー区分を決定し、該当する区分に割り当てる作業が必要である。

6.3 粒子束を用いて計算する量

光子の場合には、エネルギー吸収量を光子束とエネルギー吸収係数から求める場合がある。例えば、物質中での照射線量計算はこの方法の方が現実的である。この場合には、6.2 で求めた光子束等に対応する係数 (先の例であれば、エネルギー吸収係数) を掛けたものを加えていく。

6.4 Track length の計算

計算する量が、track length に比例する場合や、光核反応生成量を計算する場合には、粒子の実際の移動距離 TUSTEP を加えていく。エネルギー依存の track lengthの場合には、エネルギースペクトルの場合と同様にエネルギー区分毎に加えていくことになる。

6.5 ウェイトを使用する場合

通常の計算では、粒子のウェイト $WT(NP)$ は常に 1 であるが、線源条件にウェイトを用いたり、なんらかのバイアス法のより、粒子にウェイトを割り当てる場合には、 $WT(NP)$ を掛けた量を保存する必要がある。間違いをなくすためにも、常に $WT(NP)$ を掛けた量扱うようにする方が良い。

7. EGS4 で使用されている配列の大きさ

EGS4 で使用されている配列の大きさの標準値は、EGS4MAC.MORTRAN で次の様に決められている。

`$MXMED----`10; ユーザコード中で使用する物質の数

`$MXREG--`2000; リージョン数

`$MXSTACK--`40; スタック数 NP の最大値

通常は、これらの大きさを変更する必要は無いが、メモリーの節約のためリージョン数を減らしたい時、あるいはリージョン数が 2000 では足りない場合には、ユーザコードにおいて次のように再定義すればよい。

`PARAMETER $MXREG=20;`

他の場合についても同様である。同じように、ジオメトリマクロを使用する場合の平板数等に関連する配列の大きさも次のように標準値が決められており、変更は同様にユーザコードでの `PARAMETER` 文で行う事ができる。

`$MXPLNS---`100; 平板の最大数

`$MXCYLS----`75; 円筒の最大数

`$MXSPHE----`75; 球の最大数

`$MXCONES---`75; 円錐の最大数

References

- 1) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, 'EGS4 Code System', SLAC-265, December 1985.
- 2) P. Andreo, 'Monte Carlo techniques in medical radiation physics', Phys. Med. Biol., 36 (1991) 861-920.
- 3) J. H. Hubbell, 'Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV', NSRDS-NBS 29.
- 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.

Table 1 Classification of elementary photon interaction³

Type of interaction	Absorption	Scattering		Multi-photon effects
		Elastic (coherent) (b)	Inelastic (incoherent) (c)	
Interaction with:	(a)	(b)	(c)	(d)
(1) Atomic electrons	Photoelectric effect $\tau_{pe} \sim Z^4$ (low energy) $\tau_{pe} \sim Z^5$ (high energy)	Rayleigh scattering, $\sigma_R \sim Z^3$ (low energy limit)	Compton scattering, $\sigma_C \sim Z$	Two-photon Compton scattering, $\sim Z$
(2) Nucleons	Photonuclear reactions (γ, n), (γ, p), photo-fission, etc. $\sigma_{ph} \sim Z$ ($E \geq 10$ MeV)	Elastic nuclear scattering, ($\gamma, \gamma) \sim Z^2$	Inelastic nuclear scattering, ($\gamma, \gamma')$	
(3) Electric field surrounding charged particles	(1) Electron-positron pair production in field of nucleus, $\kappa_n \sim Z^2$ ($E \geq 1.02$ MeV) (2) Electron-positron pair production in electron field, $\kappa_e \sim Z$ ($E \geq 2.04$ MeV) (3) Nucleon-antinucleon pair production ($E \geq 3$ GeV)	Delbrück scattering, $\sim Z^4$		
(4) Mesons	Photomeson production, ($E \geq 130$ MeV)	Modified (γ, γ)		

Fig. 3-1 Energy-distance diagram of the Class II procedure used to describe the electron (and photon) tracks shown in the upper part of the figure. Electron 'catastrophic' collisions occur at position 1 (bremsstrahlung interaction), 2 and 3 (knock-on inelastic collisions), and 5 (elastic collision, no energy loss). The photon is scattered by a Compton interaction at position 4. All secondary electrons (bottom of lower figure) are followed down to the transport cut-off of the simulation, E_{cut} , where they are absorbed (stars). The broken descendent line from E_0 corresponds to a calculation of the electron energy loss based on the continuous-slowing-down approximation (CSDA) (5).

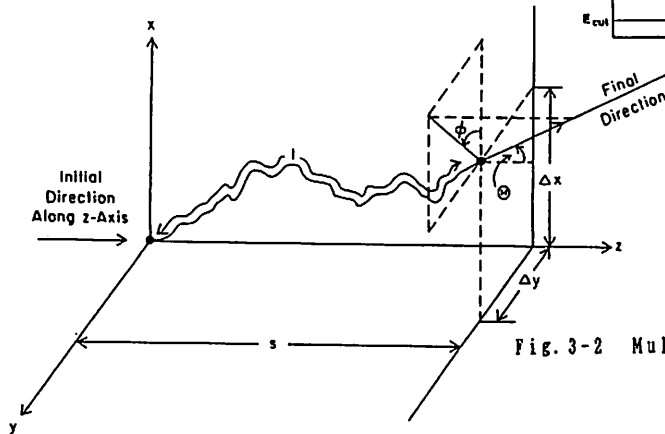
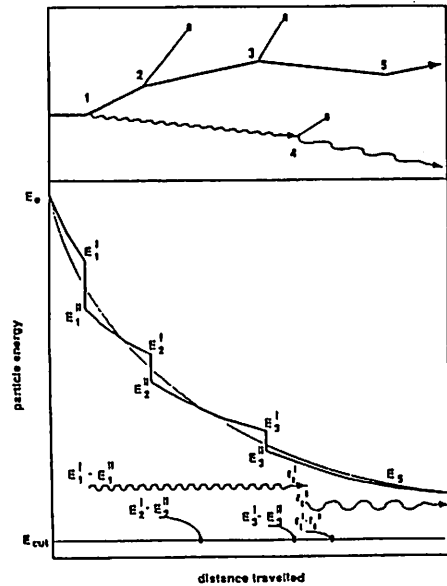


Fig. 3-2 Multiple scattering diagram¹

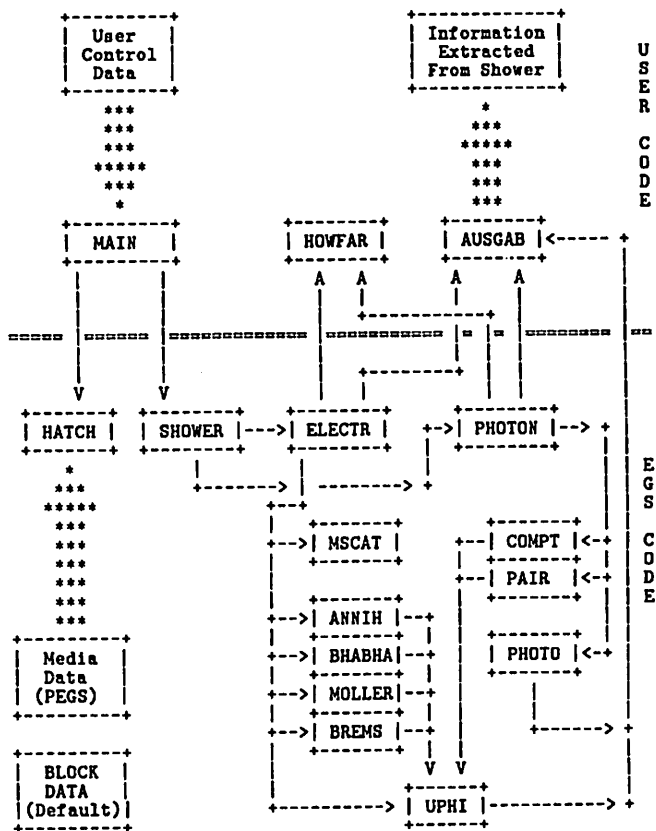


Fig. 4-1 Flow control with User Using EGS

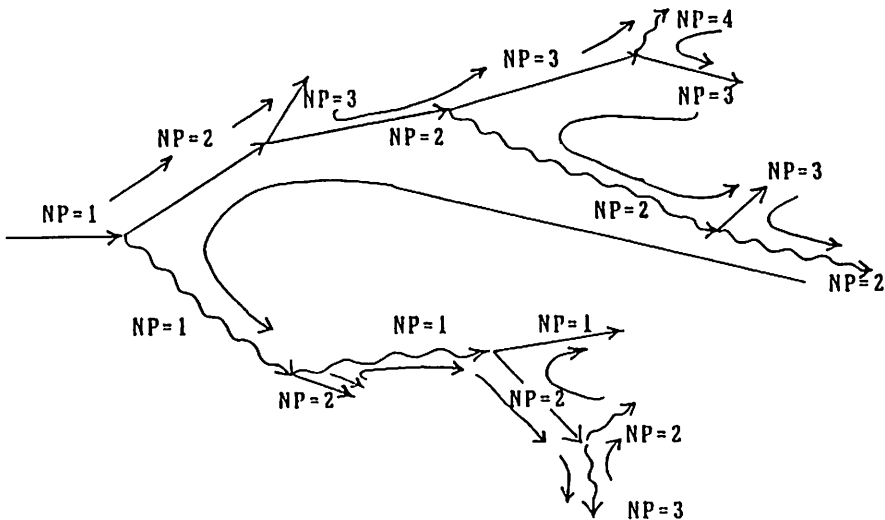


Fig. 4-2 Flow control of cascade in EGS4

HOWFARの内容と例

高エネルギー物理学研究所

平山 英夫

1. SUBROUTINE HOWFAR の機能

SUBROUTINE HOWFAR は、粒子の進行方向の隣接するリージョン境界までの距離を計算し、その距離と SUBROUTINE ELECTR あるいは SUBROUTINE PHOTON で決められた粒子の直線飛程 (USTEP) と比較し、隣接距離の方が小さい場合のみ、USTEP を隣接距離に置き換え、新しいリージョン (IRNEW) を次に粒子が入っていくリージョンに置き換える。また、体系外に粒子が出た場合などで計算を止める場合には、IDISC=1; RETURN; を実行するようにすればよい。HOWFAR の基本構成は次のようになる。

```

IF ( 追跡終了 ) [IDISC=1; RETURN;]

-----
粒子の進行方向で隣接リージョンまでの最短距離 (例えば、TVAL) の
計算とその時のリージョン番号 (例えば、IRNEXT) の決定
-----

$CHGTR (TVAL, IRNEXT);
(IF (TVAL.LE.USTEP) [USTEP=TVAL; IRNEW=IRNEXT;])

RETURN;
    
```

\$CHGTR マクロの内容が () 内に示した Statement である。使用するマクロによっては、\$CHGTR を含んでいるものもあるので常に、\$CHGTR が必要ではないが機能上は上記の様になる。

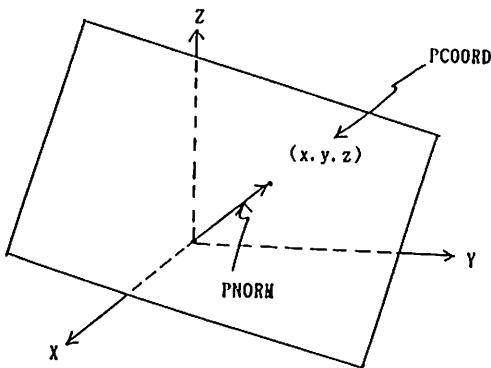
HOWFAR でこのような処理を行うには、各形状に関連した COMMON と共に、最低 COMMON /EPCONT と COMMON/STACK が必要である。

2. マクロを用いた計算形状

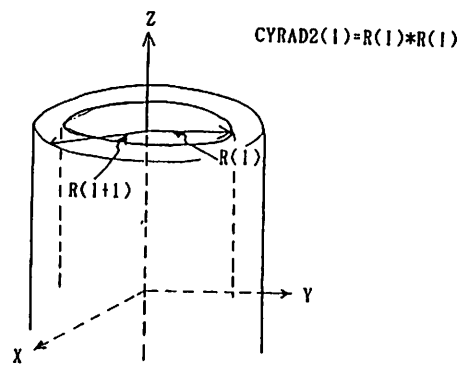
2. 1 形状の定義

①平面 (PLANE)

平面は座標原点を通り平面に垂直な直線方向余弦 (PNORM(I, JP)) と、直線と平面との交点の座標 (PCOORD(I, JP)) で定義される。JP は平面ナンバーで、使用する平面毎に、PNORM と PCOORD を定義する。通常は、メインプログラムでこれらの値を設定する。PNORM と PCOORD は COMMON/PLDTA を介して HOWFAR で使用される。



平面



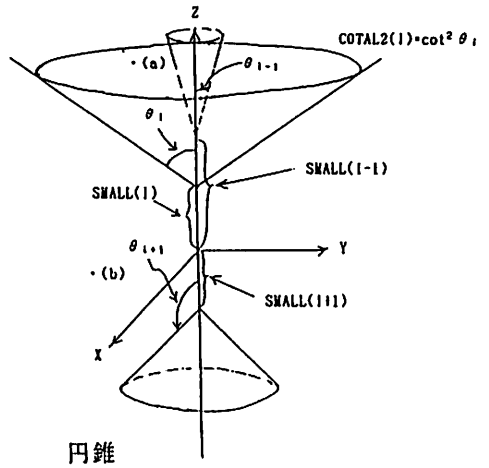
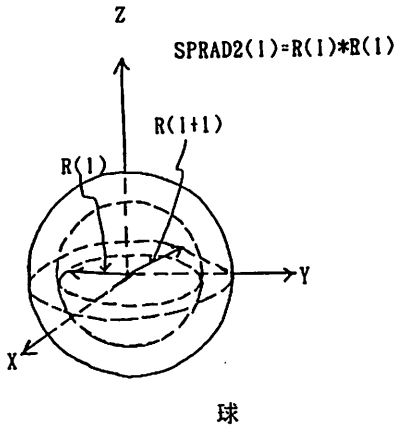
円筒

②円筒 (CYLINDER)

マクロに組み込まれている円筒は、その軸が Z- 軸に一致しているものである。円筒の定義は、その半径 (CYRAD(NCYL)) でされるが、実際に HOWFAR で使用されるのは、半径の自乗 (CYRAD2(NCYL)) であるので、COMMON/CYLDTA には、CYRAD2 のみが定義されている。

③球 (SPHERE)

マクロに組み込まれている球は、中心が座標原点に一致しているものだけで、円筒の場合と同じように球の半径 (SPRAD(NSPH)) で定義される。実際に HOWFAR で使用されるのは、半径の自乗 (SPRAD2(NSPH)) であるので、COMMON/SPHDTA には、SPRAD2 のみが定義されている。



④円錐 (CONE)

マクロに組み込まれている円錐は、軸が Z- 軸に一致しているものだけである。円錐は、頂点の Z 座標 (SMALL(NCONE))、 $COT^2 \theta$ (COTAL2(NCONE)、 θ は円錐の頂角) で定義され、COMMON/CONEDTA を介して HOWFAR で使用される。

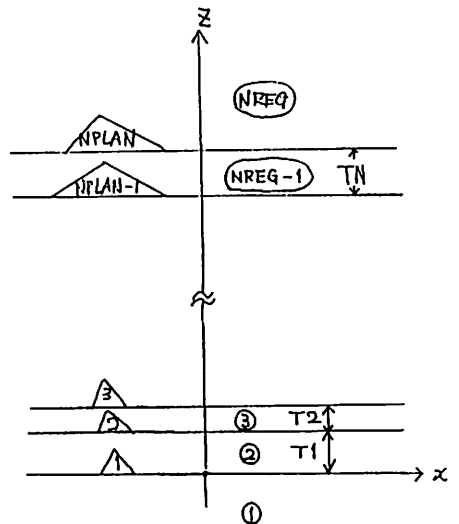
2. 2 具体的な形状への応用例

① 1次元平板形状

右図の様な、NPLAN 枚の 1次元平板形状を扱う。リージョン番号は、図に示す様に体系前の領域を 1 に最後の平板の外側を NREG とする。NREG=NPLAN+1; である。PNORM, PCOORD は、次のように定義する。

```
DO I=1,NPLAN [
/PCOORD(1,I),PCOORD(2,I),PCOORD(3,I)/=0.0
/PNORM(1,I),PNORM(2,I)/=0.0;
PNORM(3,I)=1.0]
```

```
PCOORD(3,2)=PCOORD(3,1)+T1;
PCOORD(3,3)=PCOORD(3,2)+T2;
.....
.....
```



```
PCOORD(3,NPLAN)=PCOORD(3,NPLAN-1)+TN;
```

リージョン 1 または NREG に粒子が達した場合には追跡を終了とした場合の SUBROUTINE HOWFAR は、

```
IRL=IR(NP);
IF(IRL.EQ.1.OR.IRL.EQ.NREG) [IDISC=1; RETURN;]
$PLAN2P(IRL,IRL+1,1,IRL-1,IRL-1,-1);
RETURN;
```

\$PLAN2P マクロの各引き数の意味は、(平板番号、次のリージョン番号、向き、平板番号、次のリージョン番号、向き)である。上の例では、平板 IRL の内側に粒子がいる場合の平板 IRL までの距離と平板 IRL-1 の外側に粒子がいる場合の平板 IRL-1 までの距離を計算し、正で短い距離と USTEP を比較し、境界までの距離が短い場合には IRNEW を対応する次のリージョン番号に置き換える機能を行っている。

②有限な平板形状

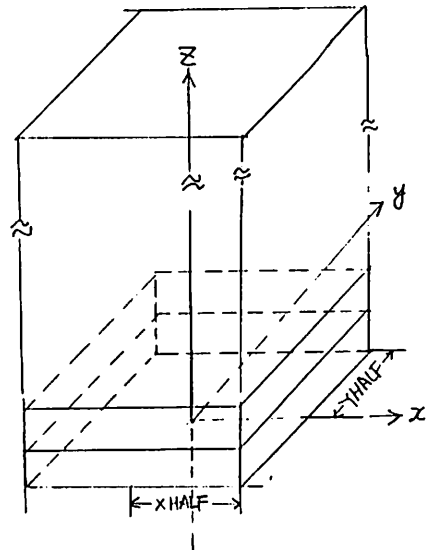
Z 方向は①の形状と同じで、X-,Y- 方向が有限な右図のような形状を扱う。平板の数 NPLAN は、①の例より 4 枚多く必要となる。

リージョンの総数は、NREG=NPLAN-2; となる。Z 方向の最後の平板の後ろを NREG-1 のリージョンに、X または Y 方向の平板の外を NREG のリージョンとする。PNORM, PCOORD は、次のように定義する。

```
DO I=1,NPLAN [
/PCOORD(1,I),PCOORD(2,I),PCOORD(3,I)/=0.0;
/PNORM(1,I),PNORM(2,I),PNORM(3,I)/=0.0;]
NPLANZ=NPLAN-4;
DO I=1,NPLANZ [
PNORM(3,I)=0.0;]
PCOORD(3,2)=PCOORD(3,1)+T1;
PCOORD(3,3)=PCOORD(3,2)+T2;
.....
.....
PCOORD(3,NPLANZ)=PCOORD(3,NPLANZ-1)+TN;
/PNORM(2,NPLANZ+1),PNORM(2,NPLANZ+2)/=1.0;
PCOORD(2,NPLANZ+1)=-YHALF;
PCOORD(2,NPLANZ+2)=YHALF;
/PNORM(1,NPLANZ+3),PCOORD(1,NPLANZ+4)/=1.0;
PCOORD(1,NPLANZ+3)=-XHALF;
PCOORD(1,NPLANZ+4)=XHALF;
```

対応する HOWFAR は、つぎのようにすれば良い。

```
IRL=IR(NP);
```



```

IF (IRL.EQ.1.OR.IRL.LE.NREG-1) [IDISC=1; RETURN;]
$PLAN2P (IRL, IRL+1, 1, IRL-1, IRL-1, -1);
$PLAN2P (NPLANZ+2, NREG, 1, NPLANZ+1, NREG, -1);
$PLAN2P (NPLANZ+4, NREG, 1, NPLANZ+3, NREG, -1);
RETURN;

```

③球形状

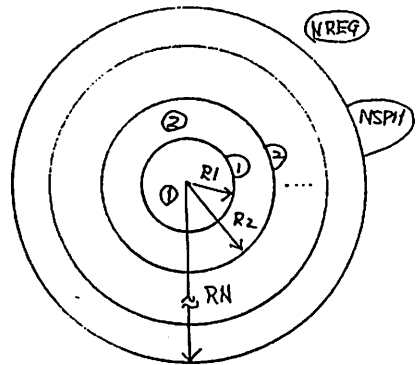
右図の様な NSPH 個の球からなる 1 次元球体系を扱う。リージョン番号は、一番内側の球の内部を 1 に、一番外側の球の外側を NREG である。NREG=NSPH+1; である。SPRAD2 は次のように定義する。

```

SPRAD (1)=R1; SPRAD (2)=R2;.....
SPRAD (NSPH)=RN;
DO I=1, NSPH [
SPRAD2 (I)=SPRAD (I)*SPRAD (I);
]

```

NREG に粒子が出ると追跡を止めるとすると、HOWFAR は、次のようにすれば良い。
リージョン 1 の場合には、横切る対象となる球が 1 個しか無いために特別な扱いをする。



```

IRL=IR (NP);
IF (IRL.EQ.NREG) [IDISC=1; RETURN;]
IF (IRL.NE.1) [
$SPH2 (IRL-1, IRL-1, IRL, IRL+1);]
ELSE [$SPHERE (1, 1, IHIT, TSPH);
$CHGTR (TSPH, 2);]
RETURN;

```

\$SPH2 の引き数の意味は、粒子の内側の球番号、内側のリージョン番号、外側の球番号、外側のリージョン番号である。\$SPHERE の場合は、対象となる球番号、粒子が球の内側か外側かを示す整数 (0: 外側、1: 内側)、粒子が実際に球面を横切るかどうかを示す変数 (1: 横切る、0: 横切らない)、横切る場合の境界面までの距離を意味する。

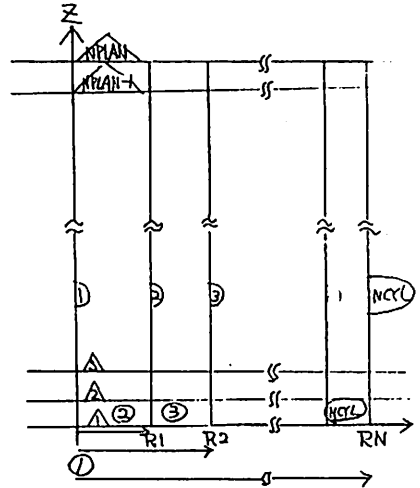
④ 円筒平板形状

最も多く使われる形状の一つが円筒と平板の組合せからなるこの形状である。Z-方向の平板の定義は①の1次元平板形状の場合と同じである。(平板の数を NPLAN とする) 円筒の定義は、球の場合と同じように、CYRAD2 によって定義する。(円筒の数を NCYL とする)

```

CYRAD(1)=R1;  CYRAD(2)=R2;.....
CYRAD(NSPH)=RN;
DO I=1,NSPH [
CYRAD2(I)=CYRAD(I)*CYRAD(I);
]

```



リージョンの指定の仕方は HOWFAR と密接な関係がある。この例¹⁾では、平板 NPLAN の外側を NREG-1 に、円筒 NCYL の外側を NREG とし、図のように平板で囲まれた領域を円筒の内側から順にリージョン番号を割り当てる。
 $NREG = (NPLAN - 1) * NCYL + 3;$

```

IRZ=NREG-3;
/MED(1),MED(NREG-1),MED(NREG)/=0;  "VACUUM REGION"
MED(1)=1; ..... "ASSIGN MATERIAL"
MED(NREG-2)=3;

```

この場合、HOWFAR は次のようにすればよい。

```

IRL=IR(NP);
IF(IRL.EQ.1.OR.IRL.GE.IRZ+2) [IDISC=1; RETURN;]

NSLAB=(IRL-2)/NCYL+1;  "SLAB NUMBER"
NANNU=IRL-1-NCYL*(NSLAB-1);  "ANNULUS NUMBER"
NPL1=NSLAB+1; NPL2=NSLAB;
IF(NSLAB.LT.NPLAN-1) [NRG1=IRL+NCYL;]
ELSE [NRG1=IRZ+2;]
IF(NSLAB.GT.1) [NRG2=IRL-NCYL;]
ELSE [NRG2=1;]
$PLAN2P(NPL1,NRG1,1,NPL2,NRG2,-1);

IF(NANNU.LT.NCYL) [NRG2=IRL+1;]
ELSE [NRG2=IRZ+3;]
IF(NANNU.GT.1) [NRG1=IRL-1; NCL2=NANNU; NCL1=NANNU-1;]
$CYL2(NCYL1,NRG1,NCL2,NRG2); RETURN;]
$CYLINDR(1,1,IHIT,TCYL);
IF(IHIT.EQ.1) [
$CHGTR(TCYL,NRG2);]
RETURN;

```

粒子を含む2平面
までの距離と次の
リージョンの計算

粒子を含む2円筒
までの距離とリー
ジョンの計算

\$CYL2 の各引き数の意味は、粒子の内側の円筒番号、そのリージョン番号、外側の円筒番号、リージョン番号である。この例では、まず平板について境界までの距離を計算し、USTEP と比較し、USTEP、IRNEW を決定し（境界までの距離が短い場合のみこれらの値が変わる。）、その次に円筒について同じ事を行っている。この順番が逆になっても問題は無い。IRZ、NCYL 等メインプログラムで定義され HOWFAR で使用される変数を COMMON 宣言しておかなければならない事はいうまでもない。

⑤ 3次元平板形状

3次元平板形状も円筒平板形状と同じようにリージョンの指定方法により異なった HOWFAR が必要である。ここでは、Stevenson が提案した方法²を紹介する。

X-, Y-, Z- 方向のビン数をそれぞれ \$NXBIN, \$NYBIN, \$NZBIN とする。(PARAMETER \$NXBIN=4; の様に指定すればよい)

$IXY = \$NXBIN * \$NYBIN$; $IXYZ = IXY * \$NZBIN$;

$NREG = IXYZ + 6$;

$NPLAN = \$NXBIN + \$NYBIN + \$NZBIN + 3$;

リージョン番号は、各 Z-方向のビン毎に図に示すように順に割り当てる。各平板の定義は次の様に行う。

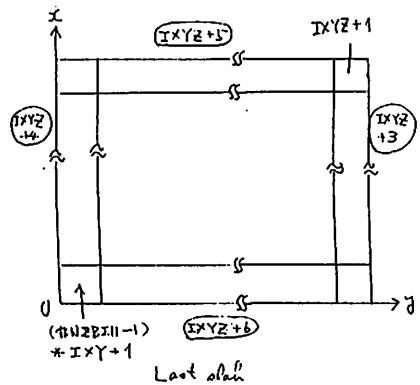
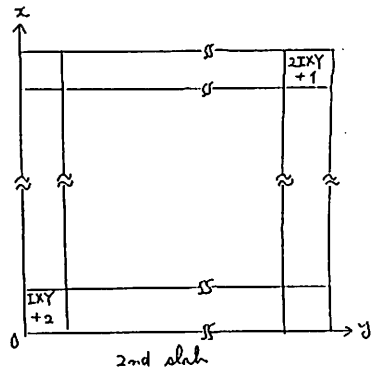
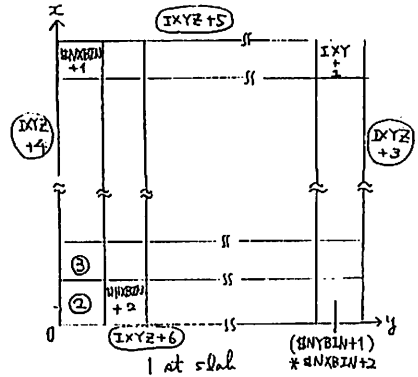
```
DO I=1,NPLAN [
DO J=1,3 [/PCOORD(J,I),PNORM(J,I)/=0.0:]
ID1=$NZBIN+1; ID2=ID1+1; ID3=ID2+$NYBIN;
ID4=ID3+1; ID5=ID4+$NXBIN;
DO I=1,ID1 [PNORM(3,I)=1.0:]
DO I=ID2,ID3 [PNORM(2,I)=1.0:]
DO I=ID4,ID5 [PNORM(1,I)=1.0:]
```

各平板の PCOORD を定義する。

この様なリージョン番号割当に対応する HOWFAR は次のようになる。

```
IRL=IR(NP);
IF(IRL.EQ.1.OR.IRL.GE.IXYZ+2)
[IDISC=1;RETURN;]

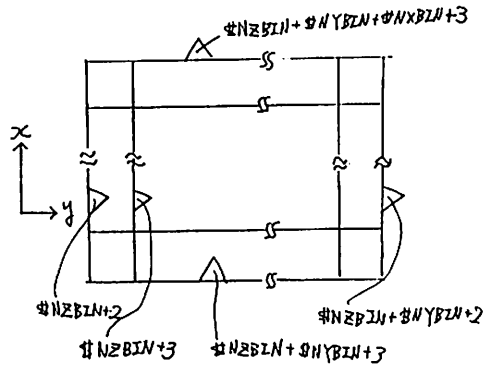
IZ=(IRL-2)/IXY+1; 'SLAB NUMBER'
JY=(IRL-2-IXY*(IZ-1))/\$NXBIN+1;'COLUMN NUMBER'
KX=IRL-1-IXY*(IZ-1)-\$NXBIN*(JY-1);'ROW NUMBER'
NPL1=IZ+1; NPL2=IZ;
IF(IZ.LT.$NZBIN) [NRG1=IRL+IXY;]
ELSE [NRG1=IXYZ+2;]
IF(IZ.GT.1) [NRG2=IRL-IXY;] ELSE [NRG2=1;]
$PLAN2P(NPL1,NRG1,1,NPL2,NRG2,-1); 'Z-PLANE'
NPL2=$NXBIN+1+JY; NPL1=NPL2+1;
IF(JY.LT.$NYBIN) [NRG1=IRL+$NXBIN;]
```



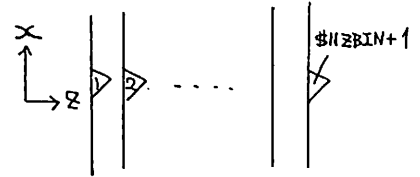
```

ELSE [NRG1=IXYZ+3:]
IF (JY.GT.1) [NRG2=IRL-$NXBIN:]
ELSE [NRG2=IXYZ+4:]
$PLAN2P (NPL1, NRG1, 1, NPL2, NRG2, -1): 'Y-PLANE'
NPL2=$NZBIN+$NYBIN+2+KX; NPL1=NPL2+1;
IF (KX.LT.$NXBIN) [NRG1=IRL+1:]
ELSE [NRG1=IXYZ+5:]
IF (KX.GT.1) [NRG2=IRL-1:] ELSE [NRG2=IXYZ+6:]
$PLAN2P (NPL1, NRG1, 1, NPL2, NRG2, -1): 'X-PLANE'
RETURN;
END;

```



この例では、まず Z- 方向の 2 平面について境界までの距離の計算を行い、USTEP と比較し、次に Y- 方向、最後に X- 方向の 2 平面について計算比較を行っている。また、各方向で、1 番目と一番最後の面の外側の領域をそれぞれ別のしているが、円筒平板形状の時の様に 1 つのリージョンとすることもできる。その場合には、NREG の値と上記 HOWFAR で最初または最後の面の場合の NRG2 または、NRG1 の指定を変えなければならない。



3. MORSE-CG を使用する計算形状

HOWFAR は、最初に述べた機能を果たすものであればどの様なものでも良い。具体例として、多群モンテカルロ計算コード MORSE で使用されている MORSE-CG (Combinatorial Geometry Routine) を使用した HOWFAR については、EGS 4 システムのサンプルプログラムの一つに例示されている (UCSAMPCG, Section 4.4 of SLAC-265)。複雑な形状を扱う場合には、マクロ等を用いて計算するよりも CG を使用する方がユーザコードは早く完成することが出来る。しかしながら、CG を使用した場合には、マクロを使う場合よりも長い計算時間を要するので簡単な形状の場合にはマクロを使用するほうが良い。

References

- 1) G. R. Stevenson, 'A Cylindrical Geometry Package for HOWFAR in the EGS Electron Gamma Shower Program', CERN Internal Report HS-RP/TM/80-78 (1980)
- 2) G. R. Stevenson, 'A 3-Dimensional Cartesian Geometry Package for HOWFAR in the EGS Electron Gamma Shower Program', CERN Internal Report HS-RP/TM/80-78 (1980)

EGS 4のインストールと PEG S 4の使い方

高エネルギー物理学研究所

波戸 芳仁

1. はじめに

EGS4のDEC STATION 5000へのインストール及びPEGS4の使用法について述べる。
対象とするプログラムは、Alex Bielajew(NRCC,Canada)によるegs4/unix ver.1.1である。
これは、オリジナルのEGS4にSUN/Sparcstation上で動くようにパッチをあて、低エネルギーの電子、光子の輸送に関する若干改良を加えたものである。EGS4のインストールの目標は、UCSAMPL4.MORというユーザーコードを動かして、SLAC-265に示されている出力と同一の出力を得る事である。PEGS4のインストールの目標は、本説明に示す exam.in.mor の出力と同等の出力を得る事である。

KEK内のユーザーは、所内ネットワーク(Ethernet)を介して、放射線安全管理センター内のDEC STATION 5000(node name:kekrc, IP address:130.87.45.1)上でただちにEGS4を走らせてみる事ができる。kekrcのIDを取得した後rloginし、

```
egs4run ucsampl4.mor sampl4.dat
```

と入力するとUCSAMPL4が実行され、SLAC-265に記されているUCSAMPL4の結果と同一の出力が得られる。また、PEGS4(EGS4用断面積編集プログラム)を試しに実行するには、

```
pgs4run sampl4.inp sampl4.out
```

と入力する。sampl4.outに光子と電子に関する物質データが出力される。

2. ファイル入手

egs4/unix ver.1.1 のファイルを手入手するには下記の方法がある。

egs4/unixのカートリッジMT

egs4/unixのフルセットの納められたカートリッジMTからダンプする。多くのサンプルコードの出力ファイルやグラフィックサンプルがegs4本体と同時にダンプされるため100MByte弱の空きディスクが必要である。ダンプの方法はREAD.MEファイルを参照する。カートリッジMTは、SUN用とDEC/STATION用があり、随時遮蔽グループから貸し出している。

ftpによる転送

所内ユーザーはftpにより必要なファイルを手入手できる。
本文で使用するファイルは、

1. egs4run	2. ucsampl4.mor	3. sampl4.dat
4. pgs4run	5. sampl4.inp	6. pegs4.mortran
7. exam.in.mor	8. kek4mac.mortran	9. egs4mac.mortran

10. egs4.mortran	11. egs4blok.mortran	12. pgs4pepr.dat
13. pgs4form.dat	14. aprime.data	15. mortran3.f
16. mornew77.raw	17. check77.mor	

No.1-8,10,15-17は /usr/users/namito/KEKに、No.9-11 は /usr/users/namito/SLAC に、No.12-14 は /usr/users/namito/NRCC/pegs4 にある。ファイルのあるディレクトリが不明時には、「 find / -name 'FILE NAME' -print 」というコマンドで探す。

MS-DOSフロッピー

上記ファイルをMS-DOSフロッピーにより入手し、手元の PC9800 にロードレシーサネット等により自分のワークステーションに送る。

3. MORTRANのインストール

MORTRANは本体である mortran3.f と 変換規則が含まれるデータファイル 'mornew77.raw' よりなっている。mortran3.f は次の2通りのモードで動く；

- I. mortran3.dat作成モード
- II.mortran3.dat使用モード

Mortranインストール時に、mornew77.rawを16進形式に変換し mortran3.datというファイル名で保存する。この変換のために mornew77.f をモードIで使用する。モードIIは mortran3.dat を用いて Mortran でかかれた ファイル を Fortran に変換するためのモードである。モードは mornew77.f 実行時の Unit 5 への入力の有無により制御する。すなわち、Unit 5 にファイルをアロケートしなければモード Iで動き、Unit 5 にファイルをアロケートすればモードIIで動く。

3. 1 mortran3.datの作成

mortran3.fへのopen文追加

```
open(unit=1, file='mornew77.raw', status='old')
open(unit=6, file='junk', status='new')
open(unit=7, file='mortran3.dat', status='new')
```

ここで、mortran3.f にすでに open(unit=5, ---) が含まれている場合には、必ずこの unit=5 に対する open 文をコメントアウトすること。

実行

```
f77 mortran3.f
a.out
```

mortran3.f は、SLAC-265 では、MORNEW77.F
と呼ばれている。

ヘッダの削除

作成されたmortran3.datの一行目は不用なヘッダ行であるので、vi または emacs 等のエディタを用いて削除する。

3. 2 check77.morによるMortranの動作確認

CHECK77.MORは Mortran の動作を確認するための長さ10行余りのコンパクトなMortran プログラムである。これが、正常に Fortran プログラムに変換されれば、Mortran のセットアップが正常に行われたと判断できる。

mortran3.fへのopen文追加

```
open(unit=1, file='mortran3.dat', status='old')
open(unit=5, file='check77.mor', status='old')
open(unit=6, file='junk.dat')
open(unit=7, file='check77.f')
```

UNIT 5 にファイルがアロケートされているのでmortran3.fはモードII (Mortran->Fortran 変換モード)で動く。Unit 5 は Mortran File. Unit 7 は変換された Fortran Fileである。Unit 6 には、Mortran Fileの解析結果が出力される。

mortran3.fの実行

```
f77 mortran3.f
a.out
```

check77.fが作成される。vi などのエディタで、マクロ等がすべて Fortran 文に変換されているか確認し、もし異常があればここまでの手順を見直す。

check77.fの実行

```
f77 check77.f -static
a.out
```

図 1 に示す出力と同一の出力が得られれば、ここまでのインストールがすべて適切に行われたと判断できる。

3. 3 mortran3の保存

mortran3.f内の open文を egs4用に変更したのち、mortran3.f をコンパイルし実行可能ファイルを mortran3 というファイル名で保存する。

mortran3.f の open 文の変更

```
open(unit=1, file='mortran3.dat', status='old');  
open(unit=5, file='mortjob.mortran', status='old');  
open(unit=6, file='mortjob.list', status='new');  
open(unit=7, file='mortjob.f', status='new');
```

mortran3.f のコンパイルと実行ファイルの保存

```
f77 mortran3.f  
mv a.out mortran3
```

ここまでの作業によりワークステーションへの Mortran のインストールはすべて終了した。以下に示す手順により EGS4、PEGS4 を走らせる準備がすべて整ったことになる。

4. EGS4のインストール

EGS4 の本体は、既に SUN/Sparc Station および DEC Station 5000 で 正常に動作することが確認されている。ここでは、ユーザーコード ucsampl4.mor を Unix コマンドで走らせ、SLAC-265 と同一の出力を得る手順を述べる。目的は、EGS4 本体ファイルの動作確認と Unix ワークステーション 上での EGS4 実行手順の説明である。EGS4 の実行は、ユーザーコードと EGS4 本体との接続、Mortran File の Fortran File への変換、Fortran File の実行という3部分に分けることができる。

ユーザーコードとegs4本体との接続 (egs4run参照)

```
cat egs4mac.mortran kek4mac.mortran ucsampl4.mor¥  
egs4blok.mortran egs4.mortran > mortjob.mortran
```

ここで ¥ 記号はコマンド行の継続を示し、端末、プリンタによってはバックスラッシュで表示されることもある。

Mortran File の Fortran File への変換

```
mortran3
```

と入力すれば前節で作成した mortran3 が走り、mortjob.mortran が読み込まれて mortjob.f (Fortran File) が作成される。

mort.job.fの実行

まず、mortjob.fにopen文を書く；

```
open(unit=8 ,file='mortjob.junk')
open(unit=12,file='sampl4.dat')
```

コンパイルし、実行する；

```
f77 mortjob.f -static
a.out
```

出力を図2に示す SLAC-265 の ucsampl4.mor の出力と比較する。両方が同じであれば、EGS4 のインストールが終わったことになる。以後ユーザーコードを作成し自分のワークステーションで EGS4 を走らせることができる。出力が異なる場合には、インストールが正しく行われていない可能性が高いので原因を調べる必要がある。

5. PEGS4のインストール

5. 1 PEGS4実行可能ファイルの作成

PEGs4は通常変更しないので、mortran3と同様に実行可能ファイル(大型機のロードモジュール)の形で保存する。

OPEN文の追加

```
open(5, file='pgs4job.pgs4inp');
open(6, file='pgs4job.pgs4lst');
open(7, file='pgs4job.pgs4dat');
open(8, file='/usr/users/namito/NRCC/pgs4/pgs4pepr.dat');
open(9, file='/usr/users/namito/NRCC/pgs4/pgs4form.dat');
open(10, file='pgs4job.pgs4err');
open(21, file='pgs4job.pgs4plot');
open(22, file='user/users/namito/NRCC/pgs4/aprime.data');
```

unit 8.9.22はpegs4の各入力データをルートから指定する。

コンパイル

mortran3を用いてpegs4.mortranをコンパイルし、実行可能ファイルを PEGS4.EXE というファイル名で保存する。

```
mv pegs4.mortran mort.job.mortran
mortran3
f77 mort.job.f -static
mv a.out pegs4.exe
```

5. 2 PEGS4の実行

```
cp sampl4.inp pgs4.job.pegs4inp
pegs4.exe
```

sampl4.inp は pgs4 の インプットファイル である。出力は、 pgs4.job.pegs4datに書き込まれる。

5. 3 PEGS4の動作確認

PEGS4 は自動的にエネルギー分点を設定し、その分点の間での物理量（例えば全断面積）を直線内挿しその直線の係数を出力する。自分の ワークステーション 上での PEGS4 の動作を調べるために基準となる計算機での PEGS4 出力と ワークステーション での PEGS4 出力を較べることが必要であるが、出力を直接較べるのは困難である。計算精度の違いなどにより、エネルギー分点が違っていると同一物理量でも見かけ上全く違う表現になるからである。このため、PEGS4 の動作確認には EXAMIN.MOR というEGS4のユーザーコードを使用する。EXAMIN.MOR は、PEGS4 データを読み込みそれを表の形で出力し SHOWER を CALL せずに終了するユーザーコードで、

```
egs4run examin.mor pgs4.output
```

という形で使用する。第二オペラントに自分の ワークステーション で PEGS4 を走らせて作成したデータと kekrc で作成したデータを入力し、両方の出力を diff コマンドで比較する。全く同一であるか、5桁目が何箇所か違う位であれば、自分の ワークステーション 上で PEGS4 が、kekrc上での pgs4 と同じ動作をしたと考えられる。明かに異なれば原因をさがす必要がある。図3 に示される sampl4.inp を入力として、PEGS4 を DEC-Station 5000 で走らせて得られたファイル sampl4.pgsout の EXAMIN.MOR による分析結果を図 4 に示す。

6. インストールのまとめ

DEC/Station 5000 上に Mortran, EGS4, PEGS4 をインストールする手順および各段階でのチェックの方法について述べた。インストール後に EGS4 を走らせるには、図 5 に示すバッチファイルを用いる。この使い方は EGS4 使用環境で述べる。egs4/unix には、Mortran, PEGS4 の実行可能ファイル、egs4 のコンパイル及び実行用 C shell procedure 'egs4.compile' 及び 'egs4.run' が含まれているので、SUN または IRIS 上で使用する場合には、本文によらずそれらを利用する方がよい。しかし、DEC/Station 等それ以外のワークステーションで使用する場合には、本文が役に立つはずである。

7. PEGS4の使用方法

PEGS4は、EGS4用物質データを作成するためのプログラムである。PEGS4を使用するには、入力データを作成する。PEGS4 の INPUT FILE は対象とする物質が、元素、化合物、混合物のどれであるかによって3種類に分けられる。

元素用INPUT FILE

鉄の物質データを10keV-50MeVの範囲で標準的に作成するための入力ファイルを示す。

1234567891123456789212345678931234567894

```
ELEM
  &INP IAPRIM=1,IRAYL=1 &END
FE-RAYLEIGH                FE
FE
ENER
  &INP AE=0.521,UE=50.0,AP=0.01,UP=50.0 &END
TEST
  &INP &END
PWLf
  &INP &END
DECK
  &INP &END
```

1行目の ELEM は物質が単一の元素からなる事を示している(1カラムから入力)。2行目は、namelist という IBM 拡張 FORTRAN の入力である。namelist はプログラム中で変数の既定値を与えておき、変更の必要な時にのみ入力するための入力形式である。namelist では、&INP と &END の間に「変数名=値」という組を「.」で区切りながら入力する。namelist 入力は複数行にわたってもよい。「IAPRIM=1」は電子の放射阻止能が ICRU Report 37 に等しくなるように制動輻射断面積を規格化するオプションである。「IRAYL=1」は

Coherent 散乱を含めるオプションである。3行目の FE-RAYLEIGH は作成中の物質データの名称である。EGS4ユーザーコードで各領域に物質を割り当てるとき、ここに書かれた名前指定する。その右の FE は、密度効果に関する Sternheimer-Seltzer-Berger係数を指定する変数である。対象とする元素が SLAC-265 の TABLE 2.13.2 に含まれている場合には、その中から選んで入力する。TABLE 2.13.2 にない場合には、Sternheimer-Peierls の標準的な式により計算が行われる。この場合は、31カラム以降は空白でも元素名を入力してもよい。この変数は必ず31カラム目から入力しなければならない。4行目の FE は元素を指定するための原子記号である。PEGS4 はこの記号により元素を決め、密度等を自動的に設定する。

ENER は、エネルギーカットオフの指定開始を指示し、その次の行の namelist 入力で具体的にカットオフを与える。AE, UE は電子下限、上限エネルギー、AP, UP は光子光子下限、上限エネルギー (MeV単位) である。電子に対しては静止エネルギーを含んだ全エネルギーで指定する。従って決してAE<0.511としてはならない。AE=0.01 などとすると PEGS4 は誤動作し混乱した出力が得られる。 TEST はプロットを指示し、PWLF は区間毎に直線フィットすることを指示する。DECK はフィットした直線を表す係数を出力することを指示する。

上記入力の網かけの部分を変更することにより多くの場合必要な入力ファイルを作成できる。ここに示す以外にも例えば物質の密度などを namelist-入力に変更できる。SLAC-265 の Appendix3 を参照されたい。

化合物用INPUT

1234567891123456789212345678931234567894

```

COMP
  &INP NE=3, RHO=1.055, PZ=3, 3, 1 &END
ACRYLE                                ACRYLE
C   H   N
ENER
  &INP AE=0.561, UE=50.0, AP=0.001, UP=10.0 &END
TEST
  &INP &END
PWLF
  &INP &END
DECK
  &INP &END

```

1行目で COMP とすることにより化合物入力になる。2行目の namelist 入力中で、NE は元素の数、RHO は密度 (g/cm³)、但しガスは NTP での密度である。「GASP=ガス圧力」と書くことにより化合物の状態が気体であるとともにその圧力をatm 単位で指定できる。PZ は化合物中の原子の数の相対値。3行目は ELEM と同じである。SSB係数指定のための31カラムからの入力は、対象とする化合物が SLAC-265 の TABLE 2.13.2 に含まれてい

る場合には、その中から選んで入力する。TABLE 2.13.2 がない場合には、31カラム以降は空白でも化合物名を入力してもよい。4行目は元素記号を、PZ に対応する順番で (A2, 1X) 書式で列記する。後の部分は ELEM と同じである。

混合物用INPUT

```
MIXT
  &INP NE=3, RHO=6.2, RHOZ=0.7427, 0.164, 0.0933 &END
PBO/SIO2-CONVERTER
C   H   N
ENER
  &INP AE=0.561, UE=50.0, AP=0.001, UP=10.0 &END
TEST
  &INP &END
PWLF
  &INP &END
DECK
  &INP &END
```

1行目で MIXT とすることで混合物入力になる。2行目の namelist 入力で NE は混合物中の元素の数、RHO は混合物密度 (g/cm³)、RHOZ は混合物中の原子の相対量 (質量比) である。「GASP=ガス圧力」と書くことにより混合物の状態が気体であるとするとともにその圧力を atm 単位で指定できる。3行目で物質名を入力する。31カラムからの SSB 係数に関する入力は化合物の場合と同じである。4行目で RHOZ と同順で元素記号を列記する。以下は ELEM と同じである。

図1 check77.f 出力

```
THE FIRST TEN INTEGERS AND THEIR SQUARES:
I= 1 ( ODD INTEGER)   1
I= 2 (EVEN INTEGER)   4
I= 3 ( ODD INTEGER)   9
I= 4 (EVEN INTEGER)  16
I= 5 ( ODD INTEGER)  25
I= 6 (EVEN INTEGER)  36
I= 7 ( ODD INTEGER)  49
I= 8 (EVEN INTEGER)  64
I= 9 ( ODD INTEGER)  81
I=10 (EVEN INTEGER) 100
```

図2 UCSAMPL4.MOR 出力

```
EGS SUCCESSFULLY 'HATCHED' FOR 2 MEDIA.
1
SHOWER RESULTS:

      E           Z           W           IQ   IR   IARG
1000.000  0.0000000E+00  1.0000000  -1    2   -1
163.9947  3.0000000  0.9999851  0    3    3
236.1792  3.0000000  0.99995280  0    3    3
147.1071  3.0000000  0.9994786  0    3    3
123.6069  3.0000000  0.9999503  0    3    3
194.9121  3.0000000  0.9999163  0    3    3
1000.000  0.0000000E+00  1.0000000  -1    2   -1
107.8514  3.0000000  0.9982859  0    3    3
113.2714  3.0000000  0.9999673  0    3    3
1000.000  0.0000000E+00  1.0000000  -1    2   -1
133.4544  3.0000000  0.9980150  0    3    3
1000.000  0.0000000E+00  1.0000000  -1    2   -1
339.5282  3.0000000  0.9995891  0    3    3
448.6773  3.0000000  0.9999374  0    3    3
1000.000  0.0000000E+00  1.0000000  -1    2   -1

INCIDENT TOTAL ENERGY OF ELECTRON= 1000.0 MEV
IRON SLAB THICKNESS= 3.000 CM
NUMBER OF CASES IN RUN= 10
LAST RANDOM NUMBER= 1903435093

ENERGY DEPOSITION SUMMARY:

FRACTION IN REGION 1= 0.0000000
FRACTION IN REGION 2= 0.3319157
FRACTION IN REGION 3= 0.6680843

TOTAL ENERGY FRACTION IN RUN= 1.000000
WHICH SHOULD BE CLOSE TO UNITY
```

図3 samp14.inp

```
ELEM
&INP IRAYL=1 &END
FE-RAYLEIGH           FE
FE
ENER
&INP AE=1.5,UE=20000.,AP=0.1,UP=20000. &END
TEST
&INP &END
PWL
&INP &END
DECK
&INP &END
```

図5 egs4run 引数

```
SHEN_HOUSE=/usr/users/namito/SLAC      # Directory Name of EGS4 system
KEK_HOUSE=/usr/users/namito/KEK        # Directory Name of KEK expansions
# .....
# ..... NATIONAL LABORATORY FOR HIGH ENERGY PHYSICS.....
# .....
# ..... EGS4RUN .....
# .....
# ..... 29 MAY 1991/1515= .....
# .....
# PROGRAMMER: Y. Namito
# This program is made from egs4_compile and egs4_run by Alex Bielajew(NRCC)
# .....
# Usage: egs4run $1 $2
# $1: Name of User Code. ex. ucseapl4.mor
# $2: Name of Cross Section File. ex. samp14.dat
# .....
echo "egs4run for slac ver started"
echo "user/egs4 configuration entered": echo " "
rm mortjob.*
rm a.out
cp $HEN_HOUSE/egs4mac.mor mortjob.mortran
cat $KEK_HOUSE/kek4mac.mortran >> mortjob.mortran #USER CODE is joined.
cat $1 >> mortjob.mortran
cat $KEK_HOUSE/time1.mor >> mortjob.mortran
cat $HEN_HOUSE/egs4blok.mor >> mortjob.mortran
cat $HEN_HOUSE/egs4.mor >> mortjob.mortran

cp $2 mortjob.xsec #Xsec data is copied.

echo "mortran3 procedure entered": echo " "
$KEK_HOUSE/mortran3

echo "f77 procedure entered": echo " "
f77 mortjob.f -static

echo "a.out procedure entered": echo " "
time a.out # time a.out & will do background job.
echo "egs4run procedure finished"
```

図4 EXAMIN.MOR出力 (光子部分)

SUMMARY OF PHOTON DATA STORED FOR MEDIUM-FE IN FILE:
 =====

ELECTRON KINETIC ENERGY RANGE: 0.989 19999.488 MEV PHOTON ENERGY RANGE: 0.100 20000.000 MEV
 RADIATION LENGTH= 1.76084 CM DENSITY= 7.8600 G/CM**3

PHOTON ENERGY	GAMMA MEAN FREE PATH(cm)	PHOTOELECTRIC	COMPTON	PAIR	TOTAL	
					cd**2/G	cd**--1
0.100	0.3744	0.59346	0.40654	0.0000	3.398E-01	2.671E+00
0.125	0.5482	0.43702	0.56298	0.0000	2.321E-01	1.824E+00
0.150	0.6984	0.31742	0.68258	0.0000	1.822E-01	1.432E+00
0.200	0.9215	0.17492	0.82508	0.0000	1.381E-01	1.085E+00
0.300	1.1971	0.06787	0.93213	0.0000	1.063E-01	8.353E-01
0.400	1.3837	0.03478	0.96522	0.0000	9.195E-02	7.227E-01
0.500	1.5365	0.02105	0.97895	0.0000	8.280E-02	6.508E-01
0.600	1.6724	0.01456	0.98544	0.0000	7.608E-02	5.980E-01
0.700	1.7975	0.01086	0.98914	0.0000	7.078E-02	5.563E-01
0.800	1.9158	0.00852	0.99148	0.0000	6.641E-02	5.220E-01
1.000	2.1367	0.00587	0.99413	0.0000	5.954E-02	4.680E-01
1.250	2.3867	0.00426	0.99222	0.0035	5.335E-02	4.193E-01
1.500	2.6152	0.00332	0.98847	0.0082	4.865E-02	3.824E-01
2.000	2.9910	0.00234	0.96428	0.0334	4.254E-02	3.343E-01
3.000	3.5194	0.00152	0.89238	0.1061	3.615E-02	2.841E-01
4.000	3.8473	0.00113	0.81360	0.1853	3.307E-02	2.599E-01
5.000	4.0505	0.00090	0.73966	0.2594	3.161E-02	2.469E-01
6.000	4.1703	0.00074	0.67312	0.3261	3.051E-02	2.398E-01
7.000	4.2389	0.00062	0.61473	0.3846	3.001E-02	2.359E-01
8.000	4.2737	0.00053	0.56420	0.4353	2.977E-02	2.340E-01
10.000	4.2776	0.00017	0.48090	0.5189	2.974E-02	2.338E-01
12.500	4.2181	0.00000	0.40219	0.5978	3.016E-02	2.371E-01
15.000	4.1373	0.00000	0.34410	0.6559	3.075E-02	2.417E-01
20.000	3.9642	0.00000	0.26451	0.7355	3.209E-02	2.523E-01
30.000	3.6847	0.00000	0.17882	0.8212	3.453E-02	2.714E-01
40.000	3.4782	0.00000	0.13400	0.8660	3.658E-02	2.875E-01
50.000	3.3234	0.00000	0.10481	0.8932	3.828E-02	3.009E-01
60.000	3.2029	0.00000	0.08862	0.9114	3.972E-02	3.122E-01
70.000	3.1130	0.00000	0.07577	0.9242	4.087E-02	3.212E-01
80.000	3.0401	0.00000	0.06625	0.9337	4.185E-02	3.289E-01
100.000	2.9321	0.00000	0.05303	0.9470	4.339E-02	3.411E-01
125.000	2.8384	0.00000	0.04253	0.9575	4.482E-02	3.523E-01
150.000	2.7695	0.00000	0.03555	0.9644	4.594E-02	3.611E-01
200.000	2.6753	0.00000	0.02686	0.9731	4.756E-02	3.738E-01
300.000	2.5701	0.00000	0.01819	0.9818	4.950E-02	3.891E-01
400.000	2.5117	0.00000	0.01384	0.9862	5.065E-02	3.981E-01
500.000	2.4742	0.00000	0.01123	0.9888	5.142E-02	4.042E-01
600.000	2.4478	0.00000	0.00946	0.9905	5.198E-02	4.085E-01
700.000	2.4282	0.00000	0.00820	0.9918	5.240E-02	4.118E-01
800.000	2.4129	0.00000	0.00723	0.9928	5.273E-02	4.144E-01
1000.000	2.3906	0.00000	0.00589	0.9941	5.322E-02	4.183E-01
1250.000	2.3719	0.00000	0.00480	0.9952	5.364E-02	4.216E-01
1500.000	2.3588	0.00000	0.00406	0.9959	5.394E-02	4.239E-01
2000.000	2.3415	0.00000	0.00311	0.9969	5.434E-02	4.271E-01
3000.000	2.3231	0.00000	0.00215	0.9978	5.477E-02	4.305E-01
4000.000	2.3131	0.00000	0.00165	0.9983	5.500E-02	4.323E-01
5000.000	2.3049	0.00000	0.00135	0.9987	5.515E-02	4.335E-01
6000.000	2.3026	0.00000	0.00114	0.9989	5.525E-02	4.343E-01
7000.000	2.2994	0.00000	0.00099	0.9990	5.533E-02	4.349E-01
8000.000	2.2969	0.00000	0.00088	0.9991	5.539E-02	4.354E-01
10000.000	2.2934	0.00000	0.00072	0.9993	5.548E-02	4.360E-01
12500.000	2.2905	0.00000	0.00058	0.9994	5.555E-02	4.366E-01
15000.000	2.2884	0.00000	0.00050	0.9995	5.560E-02	4.370E-01
20000.000	2.2858	0.00000	0.00038	0.9996	5.566E-02	4.375E-01

図4続き EXAMIN.MOR出力 (電子部分)

SUMMARY OF ELECTRON DATA STORED FOR MEDIUM=FE IN FILE:

ELECTRON KINETIC ENERGY RANGE: 0.989 19999.488 MEV PHOTON ENERGY RANGE: 0.100 20000.000 MEV
 RADIATION LENGTH= 1.76084 cm DENSITY= 7.8600 g/cm³
 200.τTEFF0= 0.0594 cm

KINETIC ENERGY MeV	STEP SIZE cm	•(-) DEDX MeV/cm	•(+) DEDX MeV/cm	ENERGY LOSS	•(-)•(+) MEAN FREE PATH(BREM FRACTION) cm	
0.989	1.001E-02	10.368	10.113	0.105	9.173E-01(1.00000)	6.797E-01(0.74102)
1.000	1.018E-02	10.363	10.104	0.105	9.114E-01(1.00000)	6.761E-01(0.74190)
1.250	1.426E-02	10.311	9.971	0.118	8.046E-01(1.00000)	6.129E-01(0.75989)
1.500	1.882E-02	10.325	9.920	0.130	7.398E-01(1.00000)	5.724E-01(0.77376)
2.000	2.941E-02	10.416	9.919	0.153	6.497E-01(0.99340)	5.193E-01(0.79372)
3.000	5.614E-02	10.340	10.021	0.193	4.802E-01(0.86472)	4.542E-01(0.81792)
4.000	5.940E-02	10.375	10.133	0.154	4.174E-01(0.84114)	4.129E-01(0.83189)
5.000	5.940E-02	10.424	10.228	0.124	3.819E-01(0.83511)	3.845E-01(0.84068)
6.000	5.940E-02	10.475	10.308	0.104	3.563E-01(0.83264)	3.615E-01(0.84758)
7.000	5.940E-02	10.519	10.374	0.089	3.377E-01(0.83980)	3.440E-01(0.85241)
8.000	5.940E-02	10.558	10.430	0.078	3.237E-01(0.83910)	3.304E-01(0.85634)
10.000	5.940E-02	10.624	10.520	0.063	3.040E-01(0.84330)	3.105E-01(0.86151)
12.500	5.940E-02	10.687	10.603	0.051	2.855E-01(0.84894)	2.915E-01(0.86665)
15.000	5.940E-02	10.737	10.666	0.043	2.722E-01(0.85375)	2.775E-01(0.87045)
20.000	5.940E-02	10.809	10.756	0.032	2.536E-01(0.86131)	2.579E-01(0.87591)
30.000	5.940E-02	10.897	10.861	0.022	2.322E-01(0.87106)	2.353E-01(0.88249)
40.000	5.940E-02	10.948	10.921	0.016	2.194E-01(0.87733)	2.218E-01(0.88672)
50.000	5.940E-02	10.982	10.960	0.013	2.106E-01(0.88183)	2.125E-01(0.88979)
60.000	5.940E-02	11.005	10.987	0.011	2.039E-01(0.88533)	2.055E-01(0.89225)
70.000	5.940E-02	11.023	11.007	0.009	1.986E-01(0.88813)	2.000E-01(0.89427)
80.000	5.940E-02	11.037	11.023	0.008	1.943E-01(0.89045)	1.955E-01(0.89596)
100.000	5.940E-02	11.054	11.044	0.007	1.875E-01(0.89410)	1.884E-01(0.89870)
125.000	5.940E-02	11.070	11.062	0.005	1.812E-01(0.89752)	1.820E-01(0.90134)
150.000	5.940E-02	11.080	11.073	0.004	1.744E-01(0.90015)	1.770E-01(0.90342)
200.000	5.940E-02	11.091	11.085	0.003	1.694E-01(0.90401)	1.699E-01(0.90657)
300.000	5.940E-02	11.098	11.095	0.002	1.605E-01(0.90896)	1.609E-01(0.91075)
400.000	5.940E-02	11.100	11.097	0.002	1.548E-01(0.91216)	1.551E-01(0.91355)
500.000	5.940E-02	11.100	11.098	0.001	1.507E-01(0.91448)	1.509E-01(0.91561)
600.000	5.940E-02	11.100	11.098	0.001	1.475E-01(0.91628)	1.476E-01(0.91725)
700.000	5.940E-02	11.100	11.099	0.001	1.449E-01(0.91775)	1.450E-01(0.91858)
800.000	5.940E-02	11.100	11.099	0.001	1.427E-01(0.91897)	1.428E-01(0.91971)
1000.000	5.940E-02	11.100	11.099	0.001	1.392E-01(0.92094)	1.393E-01(0.92154)
1250.000	5.940E-02	11.100	11.099	0.001	1.359E-01(0.92281)	1.360E-01(0.92330)
1500.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.334E-01(0.92427)	1.334E-01(0.92469)
2000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.295E-01(0.92647)	1.295E-01(0.92679)
3000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.244E-01(0.92935)	1.244E-01(0.92957)
4000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.210E-01(0.93126)	1.211E-01(0.93142)
5000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.185E-01(0.93266)	1.186E-01(0.93260)
6000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.166E-01(0.93378)	1.166E-01(0.93389)
7000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.150E-01(0.93469)	1.150E-01(0.93478)
8000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.136E-01(0.93544)	1.136E-01(0.93554)
10000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.114E-01(0.93669)	1.115E-01(0.93676)
12500.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.093E-01(0.93790)	1.093E-01(0.93794)
15000.000	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.077E-01(0.93883)	1.077E-01(0.93887)
19999.488	5.940E-02	11.100	11.100	0.000	1.052E-01(0.94026)	1.052E-01(0.94030)

WHAT FRACTION SHOULD TMSX BE:

EGS4 ユーザコードの例

高エネルギー物理学研究所

平山 英夫

1. NaI(Tl) 検出器のレスポンス計算

UCNAI は、NaI(Tl) 検出器のレスポンスを計算するユーザコードである。計算形状は、第1図に示すような円筒と平板の組み合わせたものである。

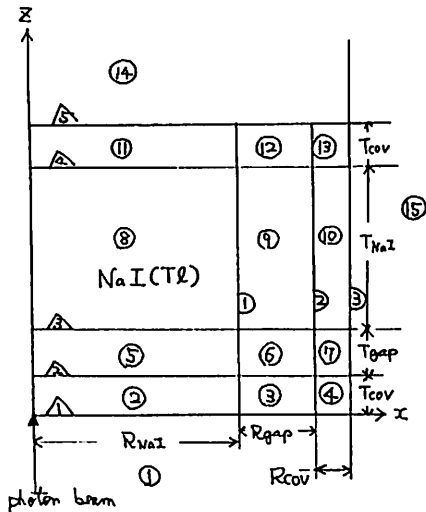


Fig. 1 UCNAI の形状

検出器とケースの間のギャップで、TGAP (cm) と RGAP (cm) でその厚さを決める。UCNAI では、この領域は真空 (物質番号 0) としている。Region 8 が NaI(Tl) 検出器で、物質番号 1 が割り当てられ、その大きさは、厚さ TDE (cm) で半径 RDET (cm) である。

IEDGEFL(8) に I の原子番号である 53 を割り当てると、NaI(Tl) の領域である Region 8 で I の k-吸収端のエネルギーより高いガンマ線により光電吸収が生じると I の k-X 線を発生するように扱う事ができる。0 を割り当てた場合には、k-X 線は発生しない。

ジオメトリーは、平板〔位置 (PCOORD(I, J)) と傾き (PNORM(I, K)) により定義される〕と円筒〔半径 (CYRAD(I)) により定義される〕により規定される。円筒は Z-軸を軸とするとしている。この例では平面は X-Y 平面上にあるので

$$/PCOORD(1, J), PCOORD(2, J) / = 0.0;$$

$$/PNORM(1, J), PNORM(2, J) / = 0.0; PNORM(3, J) = 1.0;$$

である。PCOORD(3, J) は、各平面と Z-軸との交点である。円筒については、形状の計算では半径の自乗が使われるので

$$CYRAD2(I) = CYRAD(I) * CYRAD(I);$$

を計算するようにしている。

入射ガンマ線のエネルギーは、EI (MeV) で、Al ケースの中心に Z-軸方向にペンシルビームとして入射する (入射の位置は XI, YI, ZI で、入射方向は UI, VI, WI で指定する)。入射ビームに広がりをもたせたり、平行ビームとして計算する場合には、各ヒストリーの最初 (DO I=1, NCASES [の次]) で、Al ケースへの入射位置を決定するようにすればよい。入射の Region を IRI で与えておく。この例

ユーザコードで使用される物質は MEDARR(24, 2) で定義され、定義された順に番号が割り当てられる。この例では、NaI と Al の 2 つの物質が定義され、NaI に 1 が Al に 2 が割り当てられている。MEDARR に割り当てる名前は、PEGS4 で物質データを作る際につけた名称である (24 文字)。別の物質を使用する場合には、この部分を変更する。又、物質の種類を増やす場合には、配列の引き数 2 の部分と NMED の値を使用する物質数に変更する。

Region への物質の割当は MED(I) に該当する物質の番号を割り当てることにより行う。Region 2, 3, 4, 7, 10, 11, 12, 13 は、Al ケースで、物質番号 2 が割り当てられる。その軸方向の厚さは TCOV (cm)、半径方向の厚さは RTCOV (cm) である。Region 5, 6, 9 は、

では、IRI=2 であるが、検出器内に線源がある場合には、IRI=8 とする。

NaI(Tl) の出力は、検出器中での吸収エネルギーに比例すると考えられるので、AUSGAB では、現在粒子のいる region が NaI(Tl) の場合 (MED(IRL)=1) に、エネルギー吸収量 EDEP を DEPE に加える。ヒストリーが終了すると、DEEP の値により該当するエネルギー区分に分類する。UCNAI では、区分幅は DELTAE で (例では 50 keV)、区分数は \$NEBIN で指定できる。

Geometry を調べるサブルーチン HOWFAR は、SLAC で開発された Geometry macro である \$PLAN2P, \$CYL2 等を使って書かれている。CYLINDER-SLAB 形状でこの HOWFAR を使用する場合には、Fig. 1 の様に region を義する必要がある。粒子が検出器の体系の外に出た場合には、ヒストリーを終了する。(IDISC=1;)

UCNAI は、PRESTA アルゴリズムを使用している。PRESTA を使用しない場合には、ユーザコード中のマクロ、\$PRESTA-ON を 1 にすればよい。

計算結果は、各エネルギー区分毎の計数値が /MeV/incident の形で計算誤差と共に出力される。ENERGY DEPOSITION SAMMARY は、SUBROUTINE ECNSVI で集計されたもので、粒子毎、Region 毎、エネルギー吸収を生じた要因毎の energy fraction の出力である。計算が正しく行われているかどうかのチェックに役立つので出力するようにしておく方がよい。

Appendix 1 に、USER PRESTA マクロを、Appendix 2 に UCNAI の MORTRAN リストを、Appendix 3 に UCNAI の出力を示す。

2. UCCAL カロリメータのエネルギー分解能の計算

UCCAL は、高エネルギー物理実験で使用されるサンプリングタイプのカロリメータの電子・陽電子、光子に対するエネルギー分解能を計算するユーザーコードである。計算形状は、第2図に示す様な Z-軸に垂直な無限平面である。

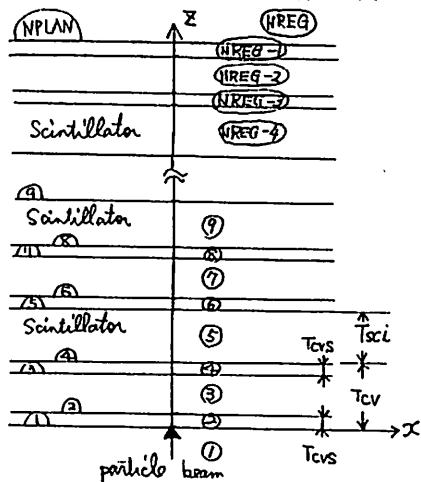


Fig. 2 UCCAL の形状

カロリメータは、鉛またはウランのコンバータとプラスチックシンチレータの検出器が交互に組み合わされたものである。計算時間を有効に使用するために、コンバータの表面部を別の Region とし、電子・陽電子のカットオフエネルギー (ECUT(I) 全エネルギーで表現) を中心部では高く、表面部では低く設定している。(この例では、中心部 1.511, 表面部 0.811 MeV) 表面部の厚さ (TCVS) は、中心部で追跡を止める粒子の飛程より十分厚くとしている。コンバータと検出器の数は、\$NDET で指定するようにしている。それぞれの厚さは、この例では、cm で与えているがカロリメータでは、radiation length 単位で設程する方が便利な場合がある。そのような場合には、radiation length 単位の厚さ TRAD

を与え、それを cm 単位の厚さ TCV に変換すればよい。

$$TCV = TRAD * RLC(MED(2));$$

粒子の種類は、IQI に電荷数を設定することにより指定する。(電子 : -1, 光子 : 0, 陽電子 : 1) 粒子は、原点に垂直に入射しているが、角度を持って斜めに入射する場合の計算を行う場合には、UI, WI を次のように入射角度により決めればよい。(PI を使うために COMIN に UPHIOT を加えておく)

ANGLE=60.0; "Incident angle in degree"

WI=COS(PI*ANGLE/180.0);

UI=SQRT(1.0-WI*WI);

検出器のエネルギー分解能は、検出器部分に吸収されたエネルギーのヒストリー毎のばらつきから得られる。(シンチレータの出力は、シンチレータの吸収エネルギーに比例すると仮定している。) 計算された分解能の誤差を評価するために、ヒストリーを \$NBATCH に分割し、各バッチ毎のエネルギー分解能を求め、そのばらつきから誤差を評価している。エネルギー分解能は、ガウス分布をしているとして計算し、全データから求めたものと 3σ 内の結果のみを使用した場合の 2 種類の結果が得られる。

UCCAL では、LATCH マクロを使ってシンチレータ部に入った時の粒子の種類及びエネルギー区分毎のエネルギー吸収及び粒子数を求めている。粒子がシンチレータ部に入った時 (IROLD.NE.IRL.AND.MED(IRL).EQ.1) 、

粒子は光子であれば、LATCH(NP)=8; とし、電子・陽電子の場合にはその運動エネルギーにより、1 から 7 に分類する。シンチレータ部でのエネルギー吸収があると LATCH(NP) の値により、区分毎のエネルギー吸収に分類される。LATCH の値は、LATCH マクロにより引き継がれていくのでシンチレータ内部で反応が生じ、新しい粒子が生じて問題ない。

計算結果としては、エネルギー分解能、シンチレータ部での吸収エネルギーと要因別のシンチレータ部に入っていった粒子数と吸収エネルギー、各シンチレータでの吸収エネルギーが出力される。又、参考のために、全ヒストリーを使用したエネルギー分解能も併せて出力している。

エネルギー分解能、シンチレータ部での吸収エネルギー共にカットオフエネルギーの影響を受ける。一方、電子・陽電子のカットオフエネルギーを低くすれば急速に計算時間が長くなる。従って、実際にいろいろなエネルギーやコンバータと検出器の組み合わせで計算を行う前に、比較的低いエネルギーで、カットオフエネルギーを変えてみて結果に大きな影響を与えない範囲でできるだけ高いカットオフエネルギーを決めておく方がよい。

Appendix 4 に UCCAL の MORTRAN リストを示す。UCNAI と共通である SUBROUTINE ECNSV は省略している。Appendix 5 に UCCAL の最終結果の部分を示す。

3. UCEDEP 物質中のエネルギー吸収量の計算

UCEDEP は、物質中に平面平行電子ビームが入射した場合の物質中のエネルギー吸収量を計算するユーザコードである。形状は、UCCAL と同じように無限平面である。UCCAL は、P. Andreo 等が発表した I T S / T I G E R による計算結果と比較する事を目的としたものである。(P. Andreo, R. Ito and T. Tabata, "Tables of Charge- and Energy-Deposition Distributions in Elemental Materials Irradiated by Plane-Parallel Electron Beams with Energies between 0.1 and 100 MeV", ISSN 0917-8015) 計算対象とする区分数は、\$NDET で指定する。平板の数は、\$NDET+1 である。

入射エネルギーは、ISSN 0917-8015 と対応させるために DATA 文で定義した EPRI の配列の引き数を IEINC で指定する形で決める。電子・陽電子のカットオフエネルギーは、入射電子の運動エネルギーの 5% と 0.5 MeV の小さい方のエネルギーの運動エネルギーに対応する全エネルギーに設定される。光子の散乱に関して Coherent 散乱を含めるために各領域で IRAYLR(1)=1; を設定している。Coherent 散乱を含める物質データは、PEGS4 を使用する時に IRAYL=1 を宣言しておく必要がある。IRAYLR(1)=0; とすれば、Coherent 散乱を含まない計算となる。

平板の間隔は、一定で continuous slowing-down range $RO(IEINC)$ (g/cm^2) 単位で指定し (UBYRO)、

$$UTHICK=UBYRO * RO(IEINC) / RHO(MEDID);$$

により cm 単位に変換する。

平行平面のビームに対する吸収線量は、原点にペンシルビームで入射する線源条件で、半径方向には積分することにより計算する。

計算結果は、ISSN 0917-8015 に対応する様に、RO 単位の深さ(前面と後面での値)と g/cm^2 単位の中心での値と共に $MeV \text{ cm}^2/g/\text{incident electron}$ 単位で吸収エネルギーを出力する。

Appendix 6 に UCEDEP の MORTRAN リストを、Appendix 7 に UCEDEP の最終結果を示す。

4. UCBFSP 点等方ガンマ線ビルドアップ計数の計算

UCBFSP は、点等方ガンマ線ビルドアップ計数を計算するユーザコードで、Next event surface crossing、Exponential transform が用いられている。

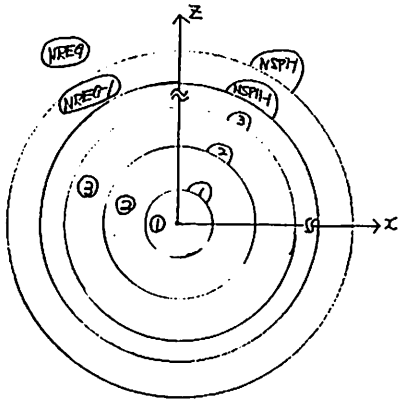


Fig. 3 UCBFSP の形状

計算は、球形状で球の中心に点等方線源が置かれている。各球の半径は、0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mfp で、球の数は、NDET で指定する。NDET には、中心部も含める。NDET にどのような数を設定しても、最も外側の球殻の厚さは、2 mfp にとられるようになっている。厚さを、mfp 単位で設定する為に通常とは異なり、STEP. 4 で初期エネルギーを指定し、\$SET INTERVAL GLE, GE; \$EVALUATEGMFPRO USINGGMFP(GLE); 等のマクロを使って、mfp を計算している。各球殻を横切る光子スペクトルの計算結果を出力するかどうかは ISPECP で指定する。(1 の時のみ出力する。) 出力する位置は、IPRINT の該当する値を 1 にすることにより行われる。

各球殻を横切る光子のスペクトルは、光子がリージョンを変える事なく移動する度に、その位置からその後反応を受けずに球殻に達する確率を計算する next event surface crossing を用いて評価される。ビルドアップ計数としては、このようにして得られた光子束に空気のエネルギー吸収係数を掛けて得られる Exposure build-up factor、光子束について得られる Number build-up factor 及び光子束に線量当量換算係数を掛けて得られる Dose-equivalent build-up factor が計算される。

深部での統計を良くするために、\$SELECT-PHOTON-MFP; を Appendix 8 に示すようなマクロに置き換えることにより、粒子が球の外側に向かっている時は、飛程距離を増やし、内側に向かっている時は、短くするという Exponential transform が適用される。このようなバイアス法が使われる場合には、ECONSV2 で計算するエネルギー収支は Appendix 9 に示されているように 1 には近いが厳密には 1 にはならない。

Appendix 8 に UCBFSP の MORTYRAN リストを、Appendix 9 に UCBFSP の出力を示す。

放射線安全管理センターにおける E G S 4 システム使用環境

高エネルギー物理学研究所

波戸 芳仁

1. EGS4の実行

放射線安全管理センタの2台の DEC/Station 5000 (kekrc.kekrc2) には、EGS4 をユーザーコードからただちに実行するためのバッチファイル egs4run が用意されている。作業を行うディレクトリにユーザーコードと物質データを置き、

```
egs4run ユーザーコード名 物質データファイル名
```

と入力する。ここでユーザーコード名、物質データファイル名は拡張子も含めて指定する。この時作成されるファイルは、

mort.job.out	EGS4 の出力
mort.job.list	User Code の Mortran3 による分析結果 Nesting Level 付き Mortran List、Mortran Error 表示
mort.job.xsec	物質データの実行用コピー
mort.job.junk	物質データのエコーバック
mort.job.f	User Code + EGS4 の Fortran Source
a.out	User Code + EGS4 の実行可能ファイル

ここで mort.job.out、mort.job.xsec、mort.job.junk はユーザーコード中に置かれたopen文により作成される。従って次の3行の open 文を Main Program STEP 2 に書く必要がある；

```
OPEN (UNIT=6, FILE=' mort.job.out' );  
OPEN (UNIT=8, FILE=' mort.job.junk' );  
OPEN (UNIT=12, FILE=' mort.job.xsec', status=' old' );
```

CPU 時間などのジョブの実行状態は「ps コマンド」で調べられる。

2. PEGS4の実行

PEGS4 の実行もバッチファイルにより行われる。「PEGS4 の使い方」で述べた方法で PEGS4 入力ファイルを作成し作業ディレクトリに置く。実行は、

```
pgs4run 入力ファイル 出力ファイル
```

と入力する。ファイル名は拡張子も含めて指定する。この出力ファイルが物質データファイルである。作成された物質データファイルの内容を検討するには EXAMIN.MOR を用いる。

```
egs4run EXAMIN.MOR 物質データファイル
```

3. 基本的なUNIXコマンド

DEC Station/5000 で EGS4 を動かすために最低限必要なコマンドについて述べる。

3. 1 ファイル関係

コマンド	内容
ls	ファイル名一覧を表示
cp FILE1 FILE2	FILE1 を FILE2 にコピー
mv FILE1 FILE2	FILE1 を FILE2 に rename
rm FILE1	FILE1 を削除
cat FILE1 FILE2	FILE1 を FILE2 にコピー
cat FILE1 >> FILE2	FILE1 を FILE2 の後に書き足す

3. 2 vi の操作

EGS4 の出力ファイルを見たりユーザーコードを書き換えるには vi エディタを用いる。以下計算機への入力を「」で示す。

出力ファイルを見るための操作

自分の今いるディレクトリに mortjob.out というファイルがあって、この内容を見たいとする。vi の起動は「 vi mortjob.out 」である。上下の矢印キーによりスクロールができる。一部分を印刷のため別ファイル名で保存するとする。まず行番号をつける。ESCキーと「:」キーを押した後「 set nu 」とする。100 行目から 200 行目までを saveするには、「 100,200 w 新ファイル名 」とする。viを終了するには、ESCキーと「:」キーを押してから「 q 」を入力する。DEC Station/5000 では F11 キーが ESC キーとしてアサインされているので本文の「EGS キー」は「F11 キー」と読み変えること。

ユーザーコードを書き換えるための操作

ucsamp14.mor の中で入射電子のエネルギーは 1GeV であるが、これを 10GeV に変えてみる。このために「EI=1000.E0」という文をテキスト中から探し、これを変更する。まずファイルを ucl0gev.mor という作業ファイルにコピーし、ucl0gev.mor の編集を始める。

```
cp ucsampl4.mor ucl0gev.mor
vi ucl0gev.mor
```

「1000.E0」を含む行を捜しその行を複写する。

```
ESC キーの後で、「/1000.E0」
1000.E0を含む行にカーソルを置き「yyp」と入力
```

EI=1000.E0:という行が2回繰り返されるはずである。上の行をコメントアウトし下の行を変更する。上の行の先頭にカーソルをおき、「i」と入力する。するとカーソルの直前にテキストが入力できるようになるので、「*」を入力する。このようにテキストを入力できる状態を vi の入力モードといい、通常の vi への命令を行う状態を vi のコマンドモードという。コマンドモードにおいてこの i 等のキー入力により入力モードになり、逆に入力モードで ESC キーを押すことによりコマンドモードにもどる。コマンドモードでは、カーソルがある行の上にある時にはコマンドはその行にはたらき、カーソルが画面一番下の命令入力行にある時にはコマンドは vi 全体に対してはたらく。テキスト行から命令入力行にカーソルを移動するには、「:」キーを押す。さてここではダブルクォーテーションを入力したら、ESCキーを押してからカーソルをセミコロン「:」の上に移動する。ここで「a」と入力することにより、カーソルの直後にテキストを入力する入力モードにする。そして再び「*」を入力する。ここまでの操作でテキストは、

```
"EI=1000.E0:"
EI=1000.E0:
```

となったはずである。ここで ESC キーをおしてコマンドモードにしてからカーソルを動かす。ESC キーを押さずに↑↓←→キーを押すと、テキストには A,B,C,D という文字が1字ずつ書かれた行が挿入されてしまう、

```
D
C
B
A
"EI=1000.E0:"
EI=1000.E0:
```

このような場合には、ESC キーを押してコマンドモードにした後不要な行の上にカーソルを移動して「dd」と入力することによりそれらの行を削除する。「dd」はカーソルがある行を削除するコマンドである。

次に2行目の変更をする。1の上にカーソルを置き、「cw」と入力する。これは単語変

更を行う入力モードへの切り替えである。そこで、「10000」と入力しESCキーを押す。テキストは、

```
'EI=1000.E0:'  
EI=10000.E0;
```

となったはずである。

これでテキストの変更が終了した。このテキストを保存するには、ESC キーと「:」キーを押した後「wq」と入力する。作業の途中で混乱したりしたため保存せず終了しようとする時には、「q!」と入力する。変更箇所を確認するには、viを終了させた後diffコマンドを用いる。下のようになれば両ファイルの相違点が表示される。

```
diff ucsampl4.mor ucl0gev.mor
```

3. 3 PC9800-DEC/STATION 通信関係

DEC/Station 5000 に PC9800 からリモートログインするための基本的な操作と、DEC/Station 5000 から PC9800 にファイルを受け取るための基本的な操作を述べる。

リモートログイン関係

操作	内容
tn 130.87.45.1	kekrc への接続
tn 130.87.45.2	kekrc2 への接続
set term=vt100	vi 使用のための画面設定
logout	session の終了

F T P 関係

操作	内容
ftp 130.87.45.1	kekrc とのファイル授受開始
ftp 130.87.45.2	kekrc2 とのファイル授受開始
get ファイル1 D:ファイル2	DEC/Station 上のファイル1をフロッピーに ファイル2 としてsave
close	通信相手との接続断
bye	ftp の終了

UNIXワークステーションへの 組み込み時のトラブル対策

高エネルギー物理学研究所

波戸 芳仁

1. はじめに

大型機で作成したユーザーコードをワークステーションに移して使用する際に起こり易いいくつかのトラブルについてその原因と対策を述べる。

2. 複数の同一名称サブルーチン使用法

EGS4等の汎用コードを変更して使う場合に、EGS4本体の一部であるサブルーチンを変更してユーザーコードに組み込むことがある。例えば SUBROUTINE COMPT を一部変更して、専用の COMPT を作りユーザーコードに付け加えることがある。このような場合ユーザーコードと EGS4 本体を一つのファイルにした段階で、複数の同じ名称 COMPT のサブルーチンが一つのファイルに存在することになる。

```
<USER CODE>
MAIN;

SUBROUTINE COMPT;
    <EGS4.MOR>
SUBROUTINE COMPT;
```

IBM 系大型機ではこのような場合、最初または最後に現れた SUBROUTINE COMPT を使用する。最初か最後かは処理系により異なるが再現性がある。一方、DEC/Station5000 などのワークステーションでは、SUBROUTINE 名が重複しているという FATAL ERROR になる。これを回避するためには、このユーザーコード専用で SUBROUTINE COMPT を除いた EGS4.MOR ファイルを持つ必要があったが、非常に不便であった。

解決法

ユーザーコードの最後に下記 REPLACE 文を置く。

```
REPLACE {SUBROUTINE COMPT;} WITH {SUBROUTINE DUMMY1;}
```

REPLACE 文はファイル内でその REPLACE 文よりも後の全部の文に作用する。従ってこの REPLACE 文は、ユーザーコード内にあった「SUBROUTINE COMPT;」には作用せず、EGS4.MOR 内にあった「SUBROUTINE COMPT;」のみに作用し、SUBROUTINE DUMMY1; に変える。上記 ERROR を回避しながら、SUBROUTINE COMPT; をユーザーコードに書かれたものに置き換えることができた。この対策によってユーザーが自分の領域に EGS4.MOR を複写、修正して使用する必要がなくなった。

3. FORTRAN文法の違いによること

IBM 大型機およびその互換機で使われている FORTRAN とワークステーションの FORTRAN はいくつかの細かい点でことなる。その差異により Fatal Error とされる場合はプログラムの該当箇所の書き方を変更する必要がある。

WRITE文またはOUTPUT文での余分な括弧

これは、DEC/Station 5000 の RISC-Fortran では FATAL ERROR とされ、DEC-FORTRAN では全く問題にならない。

```
(ERROR)      WRITE(6,601) ((A(I),I=1,10), (B(I),I=1,10))
              OUTPUT ((A(I),I=1,10), (B(I),I=1,10));

(Modified)   WRITE(6,601) (A(I),I=1,10), (B(I),I=1,10)
              OUTPUT (A(I),I=1,10), (B(I),I=1,10);
```

型宣言と同時のデータ文

```
(ERROR)      CHARACTER TEMP(24,1)/$'FE'.22*' '/;

(Modified)   CHARACTER TEMP(24,1);
              DATA TEMP(24,1)/$'FE'.22*' '/;
```

4. 乱数マクロ

EGS4で唯一 IBM 大型機の内部表現に依存した部分は、乱数発生ルーチンである。次のマクロをユーザーコードの冒頭に置くことにより、乱数発生ルーチンをワークステーションで使用可能かつ IBM系の RAN6 乱数ルーチンと等価なものに置き換えられる。

```
REPLACE {;COMIN/RANDOM/;} WITH {;COMIN/RANDOM/IXX;}
REPLACE {$RANDOMSET#;} WITH {IXX=IXX*663608941;
{P1}=IXX*0.23283064E-09; IF (IXX.LT.0) {P1}={P1}+1.0;}
```

5. 引き数の型の不一致

IBM 系大型機ではサブルーチンコール時に引き数を数値で渡す。このため、たとえば実引き数が単精度実数、仮引き数が倍精度実数という不一致があっても通常誤動作しない。そのため、ユーザーコードを組む際に型の違う引き数を使ってしまうことがある。ワークステーションでは、引き数のアドレスのみをサブルーチンに渡すので、型の不一致はただちに誤動作をおこす。従って、ユーザーコードを大型機からワークステーションに移して結果が明らかに異なったら、引き数の型の不一致をうたがう必要がある。\$TRACE, \$SITRACEマクロで関連のありそうな変数の値を調べるとこれを発見しやすい。

6. 文字化け

KEK の HITAC M880H と DEC/Station 5000 の間で ftp より EGS4 ユーザーコードのファイル転送をすると「\$」と「¥」が相互に変換され、これ以外の文字は変わらない。これは、M880Hのftpの方針による。ftp で M880H から DEC/Station 5000 にユーザーコードを移す時には、下記のバッチファイル yen_dollar をもちいて、「¥」を「\$」に戻している。

```
tr '¥¥' '$' < $1 > temp
rm $1
mv temp $1
```

このバッチファイルを使うには、例えば「yen_dollar ucsamp14.mor」と入力する。

mornew77.raw の最初の4行に EGS4 で通常使われるすべての文字が現れる。従って入手した EGS4 が文字化けしているかどうかは、そこをしらべればわかる。参考のため、KEK の HITAC M880H 上の M@rnew77.RAW の最初4行を示す。DEC/Sation 5000(kekrc) で使用している mornew77.raw の最初4行もこれと同一である。

```
CCCCCCCC.1...v...2...v...3...v...4...v...5...v...6...v...7...
0123456789ABCDEFGHIJKLMNQPQRSTUVWXYZ$(.=-+/*)abcdefghijklmnopqrstuvwxy?
.v...8...v...9...v...0...v...1...v...2C USER F77 11JUN85
[::"#@"!]{<>|&~ *^x^?????ClrC]bdep<>#???????
```

EGS4コードの教育用インターフェイス

動燃 小無健司、加瀬健
CSK 今西一文、中村裕治

1.はじめに

ワークステーション(WS及び)パソコン(PC)の性能向上に伴い、これまで大型計算機で使用されてきた科学技術用計算コードが、WS及びPCに移植され利用される様になって来ている。WS及びPCは、大型よりも、グラフィックが簡単に行なえるという利点がある。そこで、WSのGUI (graphic user interface)環境を利用してEGS4コードの入力、結果のグラフ表示が行なえるようなユーザーインターフェースを作成した。このプログラムは、WS及びPC上でのEGS4コードの簡易計算に利用できるばかりではなく、EGS4コードのCAI (computer assisted instruction) としても利用できる。

2.計算機環境

本研究に使用した計算機環境を表1に示す。

表1 計算機環境

ハード

ワークステーション	DEC station 5000モデル200
CPU	R3000(25MHz)
MIPS値	24
メモリ容量	16Mbyte
CRT	19インチカラー(1280×1024)

ソフト

EGS4	UNIX用EGS4
GUI	X-Window Ver.11
使用言語	C, FORTRAN

3.特徴

このインターフェースでは、図1に示す画面上で、計算条件を入力でき、かつ同じ

画面でリアルタイムに計算内容と計算結果を表示できる。今回は例として、一次元平板及び円柱ターゲットに電子、陽電子、 γ 線が入射する場合を取り扱った。入力できる変数を次に示す。

- (1)入射粒子種 (電子、陽電子、 γ 線)
- (2)入射粒子エネルギー (MeV単位)
- (3)入射粒子数
- (4)ターゲット物質 (Fe,Pb)
- (5)ターゲット厚さ (cm単位)

結果の表示モードは、モニターモードとバッチモードの2種類がある。モニターモードでは、入射粒子1個ずつについて、モンテカルロにより選ばれる物理過程を画面上でモニターしながら計算を行なうことができる。多数個結果を見る場合には、バッチモードでモニター無しに結果だけを表示できる。

4.実施例

図1に示す例は、厚さ3cmの鉄の円柱ターゲットに1000MeVの電子を10発入射した場合のターゲット中での電磁シャワーである。図1の画面のしたのボックスは入力データ用であり、画面右側のボックスは、モニター情報の表示用である。粒子のエネルギー、相互作用が起きた位置、eventの種類(IARG)を表示できる。

5.今後の課題

今後出力結果としては、図1の様な電磁シャワーに加えて、 γ 線スペクトル、照射線量等を表示することを予定している。このインターフェースを利用して、EGS4コードの教育用に幾つかの問題を作成しようと考えている。また、WSと同じものをP Cに移植しユーザー数を増やしたいと考えている。

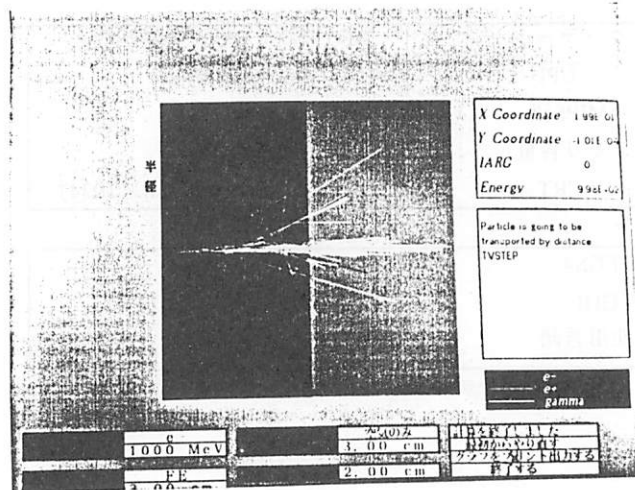


図1 画面表示例

3-33MeV 中性子による鉄の γ 線生成断面積の測定

京大・工 田辺 英治、秦 和夫

1 序

今日医療用照射施設や核分裂生成物の消滅処理施設、物性研究などの工学的応用等広い分野への加速器の応用が盛んになっている。このような施設では現在原子炉や核融合炉で対象とされているエネルギーより高いエネルギーを持つ放射線が発生、利用される。

これらの放射線のうち、特に中心的な役割を果たすのは中性子である。しかしこのような中性子についてみると必要とされる数十 MeV 以上のエネルギーにおいて核データの測定例は極めて少ない。

本研究では、中性子データのうち特に γ 線の生成断面積を取り上げ、鉄についての測定を行った。鉄を取り上げたのは構造材として鉄が多く利用されるからである。

2 実験

実験は東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンターの AVF サイクロトロンを用いて行った。

実験に使用した中性子は 35MeV に加速した陽子を、厚さ 20mm の Be ターゲットに入射させ、(p,n) 反応により放出されたものである。

実験の配置は Fig.1 の通りである。

γ 線スペクトルの測定には直径 2 インチ、長さ 1 インチの BGO 固体シンチレータを用いた。また、中性子スペクトルの測定は直径 3 インチ、長さ 3 インチの NE-213 有機液体シンチレータを、ビーム軸上の鉄サンプルの位置に置いて行った。

測定したデータは、波高、立ち上がり時間、飛行時間の 3 次元のデータである。

3 解析

3.1 BGO の γ 線に対するレスポンス関数の計算

BGO のレスポンス関数は、EGS4 電子-光子モンテカルロ計算コードを用いて計算した。計算は 2MeV 以下は 0.25MeV 毎に、10MeV までは 0.5MeV 毎に、更に 30MeV までは 1.0MeV 間隔で、50MeV までは 2.0MeV 間隔で実施し、Am-Be および ^{137}Cs の γ 線の測定値を用いて分解能を決めた。最終的には 0 ~ 50MeV までの 54×54 のレスポンス行列として構成した。

3.2 中性子スペクトル

NE-213 の入射粒子による立ち上がり時間の違いを利用して測定したデータの n- γ 分離を行った。

中性子のエネルギーは Time Of Flight 法により求めた。Be ターゲットで発生した中性子が検出器に来るまでの時間 t がわかっているならば、ターゲットから検出器までの距離を L 、中性子の静止質量を M 、光速を c として、中性子のエネルギー E は、

$$E = Mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - L^2/c^2 t^2}} - 1 \right)$$

で与えられる。飛行時間の測定データより t を求め、これから中性子のエネルギー E を求める。

以上によって求めたエネルギー分布を検出器の検出効率で割ると、中性子のエネルギースペクトルが求められる。Be ターゲットからの中性子スペクトルを Fig.2 に示す。

3.3 γ 線スペクトル

実験で測定した γ 線の波高分布から γ 線のエネルギースペクトルを求めるために、波高分布を入射中性子のエネルギーについてまとめあげる。入射中性子のエネルギー区間幅は統計に十分なように3MeVの幅とした。

この波高分布より、FERDO計算コードにより先に計算したBGOのレスポンス関数を用いてアンフォールディングを行った。

なおこの際、波高分布と γ 線エネルギーのキャリブレーションを ^{137}Cs 、Am-Be γ 線源によって行った。

3.4 γ 線生成断面積

これまでで中性子スペクトル $\Phi(E)$ 、 γ 線スペクトル $\phi(E')$ がわかっているのので、求める γ 線生成断面積 $\sigma(E, E')$ は、鉄サンプルの体積を V 、鉄の原子密度を N として、

$$\phi(E') = \Phi(E)\sigma(E, E')\eta_n\eta_\gamma NV$$

と書ける。ただし、 η_n, η_γ はそれぞれ中性子、 γ 線の減衰に対する補正項である。

η_γ は、鉄サンプル中で発生した γ 線が鉄により減衰されるための補正項である。物質内での γ 線の吸収は、物質の吸収係数を μ 、物質を通過した距離を x とすると、 $e^{-\mu x}$ だけであるので、今考えている体系では γ 線の発生が一様であるとして、

$$\eta_\gamma = \frac{1}{l} \int_0^l e^{-\mu x} dx$$

とできる。ただし、 l はサンプルの厚さである。この取り扱い、EGS4によるモンテカルロ計算の結果とほぼ一致した結果が得られた。

η_n は、鉄サンプル中での減衰が非弾性散乱のみによるものとし、減衰した中性子はすべてなくなると取り扱った。鉄サンプル中の深さ x での中性子束を $\phi_n(x)$ とし、非弾性散乱断面積を σ_{non} とすると、 $\phi_n(x) = \phi_n(0)e^{-N\sigma_{non}x}$ 。鉄サンプル中での反応が一様であると考え、これを積分して

$$\eta_n = \frac{1}{l} \frac{1}{N\sigma_{non}} (1 - e^{-Nl\sigma_{non}})$$

となる。

4 結果

本研究によって求められたエネルギー微分 γ 線生成断面積の一部をFig.3に示す。

またエネルギー積分 γ 線生成断面積をFig.4に示す。

これらの結果は、文献値のある低い中性子エネルギーの範囲でDickensら¹⁾、Chapmanら²⁾の値と誤差の範囲内で良い一致を示した。また、Youngら³⁾のGNASHによる計算とも良い一致が得られた。さらに測定例の無い20MeV以上でのデータを与えることができた。

参考文献

- 1) J.K.Dickens, G.L.Morgan, and F.G.Derey, *NSE* 50, 311-336(1973)
- 2) G.T.Chapman, G.L.Morgan, and F.G.Derey, ORNL-TM-5416, ORNL(1976)
- 3) P.Young, Private communication

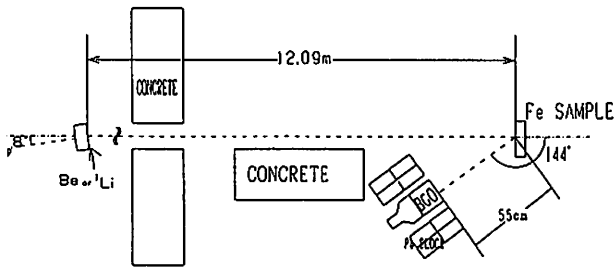


Fig.1 Experimental arrangement for measuring neutron induced gamma-ray from iron sample by BGO spectrometer

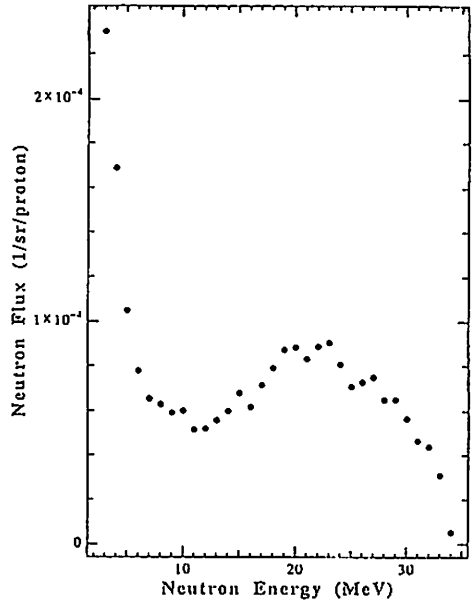


Fig.2 Emitted neutron spectrum from 20mm thick Be target bombarded by 35MeV proton

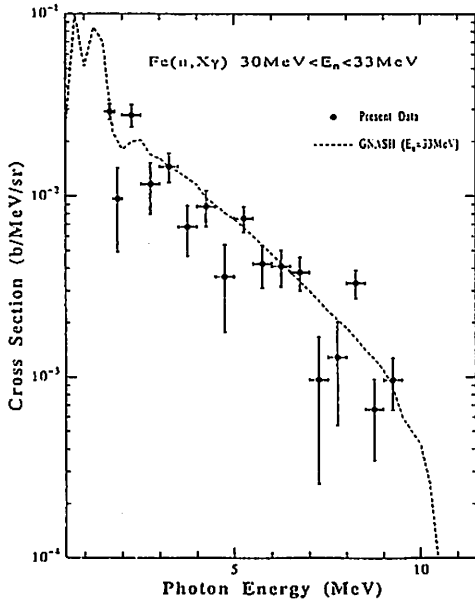


Fig.3 Differential cross section for neutron induced gamma-ray from iron between 30 and 33 MeV

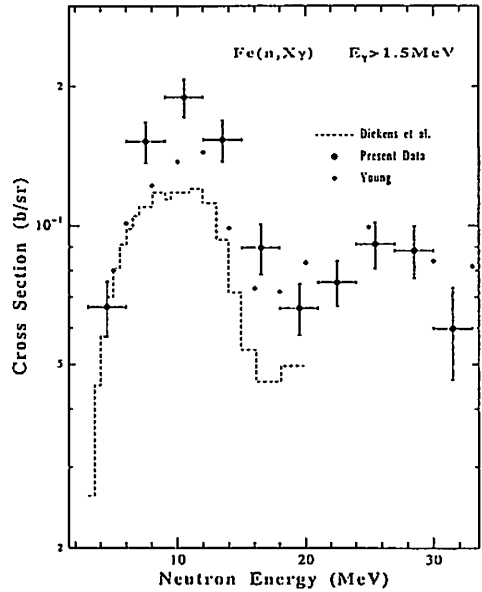


Fig.4 Total gamma-ray production cross section for gamma-ray energy above 1.5MeV

光核反応断面積測定のための制動放射線束の評価

東北大学サイクロトロン・RIセンター 宇野 喜智、山寺 亮、中村 尚司

1. はじめに

光核反応による高レベル放射性廃棄物の消滅処理の基礎研究として、 ^{90}Sr と ^{137}Cs 付近の核種の (γ, n) 反応断面積の同位体依存性を調べるために、 ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{88}Sr 、 ^{85}Rb 、 ^{87}Rb 、 ^{98}Ru 、 ^{104}Ru の濃縮同位体サンプルを用いて (γ, n) 反応断面積を測定した。

2. 制動放射線束の決定

実験は東北大学理学部附属原子核理学研究施設の電子ライナックを用いて行った。照射配置図を図1に示す。電子ライナックにより60MeVに加速された電子を、直径18mm、厚さ1mmの白金コンバータに入射させて制動放射線を発生させて試料を照射した。コンバータを透過した電子はすぐ後ろに置かれたスweepマグネットで掃引して下方の水槽に入射させ、試料に入射しないようにした。

照射後、試料を高純度 Ge 検出器で測定し γ 線スペクトロメトリーにより放射化率を求めた。制動放射線束の絶対値は、試料と同時に照射した金箔の放射化率と EGS4 で計算した入射電子1個当たりの制動放射線スペクトルから求めた。金の放射化率 P_{Au} は

$$P_{Au} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \sigma_{Au}(E) \cdot \phi(E) dE \quad (1)$$

と表わされる。制動放射線束 $\phi(E)$ は、EGS4 で計算した入射電子1個当たりの制動放射線束 $\phi_{EGS4}(E)$ に平均電流値に相当する定数 C を乗じたものであるとする。

$$\phi(E) = C \cdot \phi_{EGS4}(E) \quad (2)$$

定数 C は (1) 式と (2) から、

$$C = \frac{P_{Au}}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \sigma_{Au}(E) \cdot \phi_{EGS4}(E) dE} \quad (3)$$

として求めることができ、制動放射線束の絶対値が得られる。 $\sigma_{Au}(E)$ には Dietrich らの文献値 [1] を用い、積分範囲は $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ 反応の巨大共鳴ピークを含むように $E_{min}=8\text{MeV}$ 、 $E_{max}=25\text{MeV}$ とした。

EGS4 による計算は、図2のような体系で行った。スweepマグネットや試料台などは省略した。電子は白金コンバータの中心から半径2mmの円内に垂直に入射するものとし、白金コンバータ以外の場所は空気 ($\text{N}_2:80\%$, $\text{O}_2:20\%$) とした。計算された制動放射線スペクトルと、 $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ 反応の励起関数を図3に示した。実験での実際の定数 C の値は、 $C = 1.11 \times 10^{14} \pm 2.83 \times 10^{12}$ となった。

3. 平均断面積の計算結果

制動放射線は入射電子のエネルギーを最大エネルギーとする、連続スペクトルなので実験では、平均断面積しか得られない。試料の放射化率を P とすると平均断面積 $\bar{\sigma}$ は次の式で計算される。

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \sigma(E) \cdot \phi(E) dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi(E) dE} = \frac{P}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi(E) dE} \quad (4)$$

積分の範囲は (γ, n) 反応の巨大共鳴領域を含むように、 $E_{min} = 9\text{MeV}$ 、 $E_{max} = 25\text{MeV}$ とした。図4に実験から求めた Sr, Rb, Ru の平均断面積を、励起関数に文献値 [1] を用いて計算した Ge, Se, Zr, Mo の平均断面積の値とともに示した。

4. まとめ

- EGS4 により計算した制動放射線束とモニター用金箔の放射化率から、制動放射線束の絶対値を求めた。
- ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{88}Sr 、 ^{85}Rb 、 ^{87}Rb 、 ^{98}Ru 、 ^{104}Ru の (γ, n) 反応の平均断面積を測定し、 (γ, n) 反応の同位体依存性を調べた。

参考文献

- (1) S.S.Dietrich and B.L.Berman: "Atlas of Photoneutron Cross Section Obtained with Monoenergetic Photons", UCRL-94820(1986)
- (2) 中村 尚司他: 「超ウラン元素を含む放射性廃棄物の光分解消滅のための基礎研究 (V)」動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書, PNC PJ1601 91-003

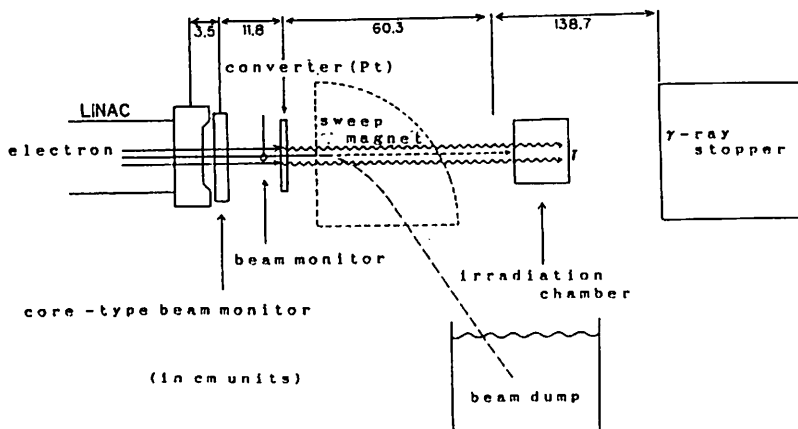


図 1: 照射配置図

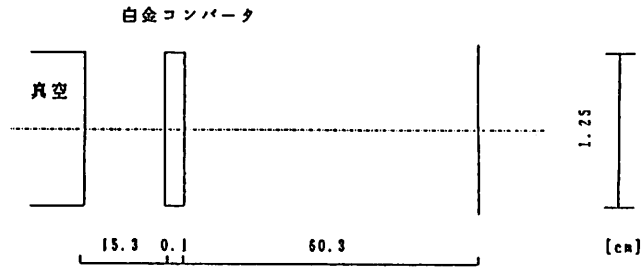


図 2: EGS4 による計算の幾何条件

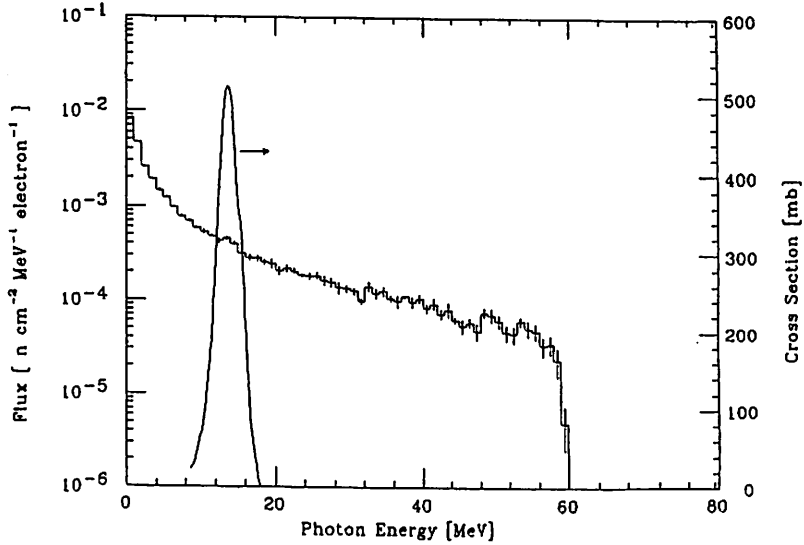


図 3: EGS4 で計算した制動放射線スペクトルと $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ 反応の励起関数

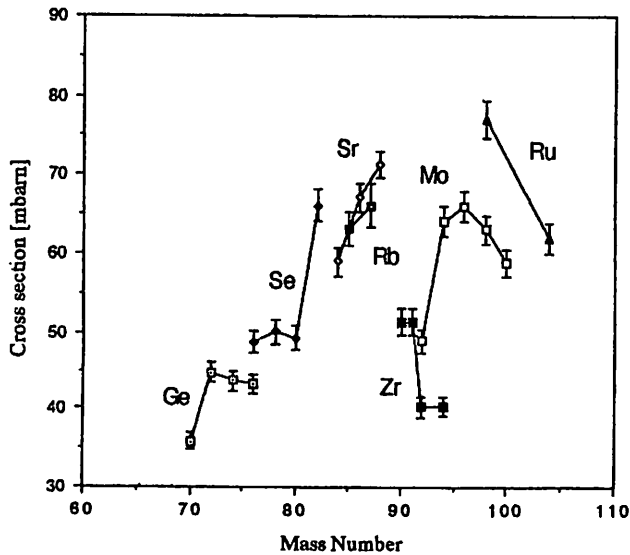


図 4: ^{90}Sr 付近の各種の平均断面積の同位体依存性

陽子線治療に伴う放射化空気の 放射能濃度測定における検出器の校正

筑波大学陽子線医学利用研究センター：多田 順一郎
 三菱原子力工業株式会社大宮研究所：岩井 敏
 株式会社三菱総合研究所：佐藤 理

がんの陽子線による治療では、陽子ビームが空気中を通過するため、空気の放射化が生じる。放射化物による照射室内空気の汚染濃度の測定は、陽子線治療施設における放射線診療従事者等の内部被曝線量評価に不可欠な情報である。放射化した空気に含まれる主な放射性同位元素は、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O である。これ等の陽電子放出核種は、何れも半減期が極めて短いため、ガスモニターの指示値校正に用いる標準濃度資料が存在しない。そこで、これ等の放射性同位元素と、ガスモニターが既に較正值を与えられている ^3H とに関し、EGS4によりモニター・チャンバー内へのエネルギー沈着量を算出し、上記短半減期核種に関する較正值を決定して、照射室内空気の測定を行った。

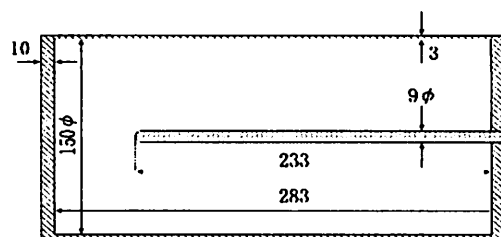
ガスモニターの構造は、右図の様に、内直径150mm・内法長さ283mm(材質ABS樹脂：側壁厚3mm、内面を厚さ0.2mmの銅で鍍金、端壁厚10mm)、中心電極直径9mm、同長さ233mm(材質アルミ、先端部を半球状に加工)の同軸円筒型である。

モンテカルロ計算により得られた電離箱のエネルギー沈着量(β 又は β^+ 粒子1個当りの平均沈着エネルギー)は、以下の通りであった。(ヒストリー数100,000)尚、線源は電離箱の中の1気圧の空气中に均一に分布し、その初期運動エネルギースペクトルは、フェルミ函数を用いた理論式で与えた。

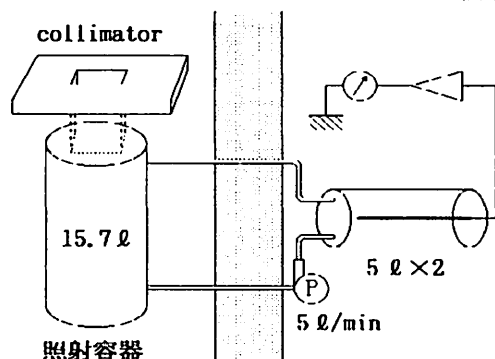
$$^3\text{H} \quad 5.9\text{keV} \quad ^{11}\text{C} \quad 57 \text{ keV} \quad ^{13}\text{N} \quad 53 \text{ keV} \quad ^{15}\text{O} \quad 48 \text{ keV}$$

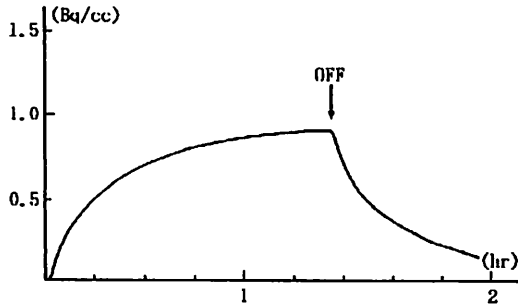
ガスモニター(アロカ、トリチウムモニターMGR-120X)は、既に ^3H 濃度に対して値付けされて居り、算出されたエネルギー沈着量は、3つの陽電子放出核種に関して(沈着エネルギースペクトルにおいても)ほぼ同程度の数値を示す事から、防護の目的では、これ等3種の核種の混合比の如何に拘らず、モニターの指示値の1/10をもって、陽電子放出核種による空気汚染濃度と看做してよいことがわかる。

陽子線照射による陽電子放出核種の生成量と濃度を測定するため、図の様な実験を行った。空気は毎分5ℓの割合で閉



アロカ、トリチウム・モニター MGR-120X
電離箱構造図



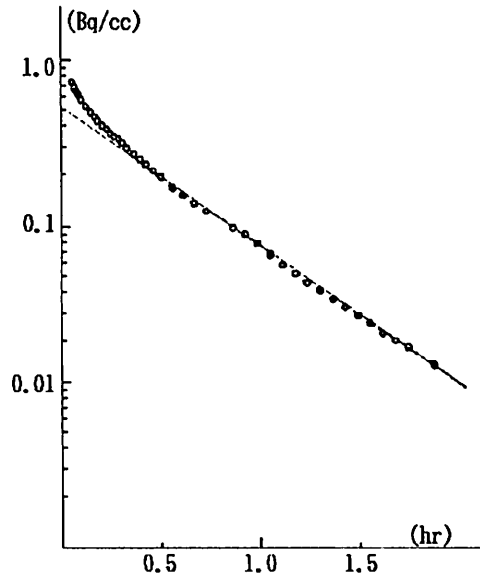


回路を循環し、エネルギー200MeV、及び160MeVの陽子線が、 $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ の容積を照射する。ガスモニターの設置場所は陽子線照射中0.5mrem/hr程度の線量率の中性子線に曝されているが、モニター自身が密閉型の電離箱を持ち、中性子線に対するレスポンスの分を補償する機構になっている。

エネルギー160MeV線量率約0.31Gy/min ($\dot{\Phi} = 6.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)で85min照射

した資料の減衰曲線を下図に示す。 ^{11}C の飽和濃度は、ほぼ0.6Bq/ccであった。この放射能濃度は、エネルギー200MeVの場合にも殆ど変化せず、通常の陽子線照射治療の条件では、この濃度が目安となる事がわかった。

一方、Rudstamの半経験的spallation断面積公式を用いて算出された ^{11}C の飽和濃度は4.4Bq/ccであり、測定値の8倍程度の値となる。実験では、照射室外へガスを導くために、比較的長いホースを使用せざるを得なかったが、そのホース表面での吸着等が影響し、低い測定値を与えていた可能性も考えられる。また、断面積からの計算は、 ^{13}N が、 ^{11}C の約2倍の生成量を示すが、減衰曲線から見る限り、それほど多くの ^{13}N が存在する様には見えない。高エネルギー物理学研究所の加藤等によれば、放射化で生成した ^{13}N は、他の核種に比べて物の表面に吸着され易い傾向があるとの事である。懼く、高度にイオン化された状態で精製する ^{11}C と ^{13}N は、速やかに酸化物に変わることが期待されるので、酸化物としての反応性の高い ^{13}N の方が、より多く途中のものの表面に捕えられる可能性がある様に思われる。



併し、放射線管理の実際上は、spallation断面積に基づくそれぞれの核種の生成比を基に、 ^{11}C の計測量から他の核種の濃度を推定することで十分であろう。

Rudstam, G. Z.: Naturf., 21a, 1027, (1966)

以上

EGS4による放射性ガスモニタの応答計算

動燃^A, VIC^B 鳥居建男^A, 杉田武志^B, 大野幸子^A
野崎達夫^A, 安藤秀樹^A

1. はじめに

原子炉施設、核燃料使用施設等では、気体状放射性廃棄物のモニタリングに種々のガスモニタが使用されている。動燃・大洗工学センターでは、⁸⁵Kr等の標準ガスとガスモニタ校正ループを用いて、これらのガスモニタの実ガス校正を行っている¹⁾。しかし、破損燃料からの短寿命のFPガスについては、標準ガスがないため実験的に濃度評価することが困難である。また、加速器施設では、加速器の運転に伴い¹³N、¹⁵O等の β 線放出ガスが生成されるが、 β 線を放出する標準ガスはなく、これらについても同様に感度評価が困難である。

そこで、これらの核種に対するガスモニタのエネルギー応答評価を目的として、ガスモニタ検出器の体系を模擬し、EGS4コード²⁾を用いてモニタの応答を求め、実ガス校正実験結果との比較を行った。さらに、実験的に感度評価が困難な核種に対するガスモニタ感度を推定したので、その結果について報告する。

2. ガスモニタのモデル化と計算

応答計算を行ったガスモニタは、大洗工学センターで排気系モニタとして最も多く用いられているプラスチックシンチレータを検出器とするガスモニタ(図1参照)である。EGS4で考慮したモデル化の範囲は、ガスサンプリングタンクとシンチレータであり、PEGS4を用いてそれらの断面積等を作成した。その形状・組成を図2に示す。さらに、乱数を用いてタンク内での位置、飛行方向、及びエネルギーを決定するものとして、各核種の β 線の連続スペクトル³⁾(図3参照)を考慮した電子(陽電子)発生モデルを作成し、タ

ンク内の粒子の挙動をシミュレーションした。計算ヒストリー数は各 β 線放出モードに対して10万とし、光子・電子のエネルギー下限値を10keVとしてそれ以上のものについて追跡した。評価対象核種は、実ガス校正実験によりガスモニタの応答が得られている¹⁴C、⁴¹Ar、⁸⁵Kr、¹³³Xeの4核種と、 β 線放出ガスである¹³N、¹⁵O、及び短寿命FPガスである¹³⁵Xeの3核種である。

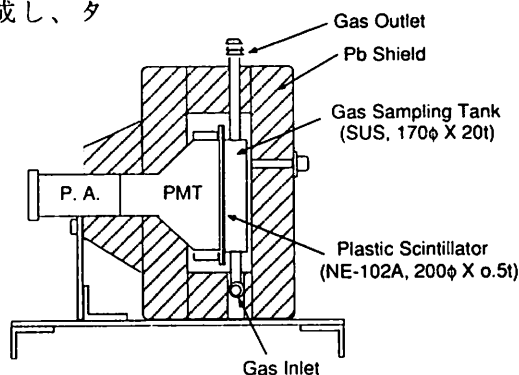


図1 ガスモニタの断面図

3. 計算結果

実ガス校正実験値と計算値（エネルギー沈着量50keV以上のもの）を、図4に示す。この結果、計算値と実験値は測定誤差範囲内で非常に良く一致し、本計算モデルは実験を十分に再現していることが分かった。このことから、実験的に感度評価が困難な核種に対しても本モニタの応答特性の推定が可能となり、一例として、 ^{13}N の場合、検出感度は $2.7 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$ となった。

また、参考として行った感度寄与評価のためのモデル計算により、 ^{13}N の場合、 β^+ 線のタンク壁面等による後方散乱による計数は全体の約24%であり、消滅 γ 線に対する感度の寄与は極めて低いことが分かった。

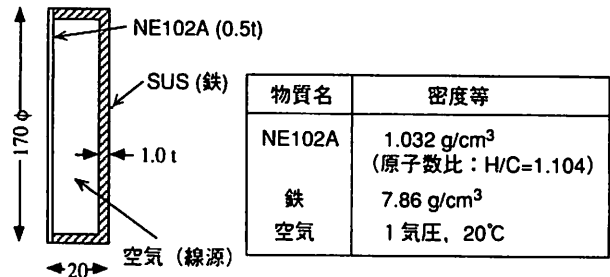


図2 計算体系

4. まとめ

以上のことから、実験による感度評価が困難な核種に対してモニタ感度の推定に十分に適用できることが分かった。また、形状、組成等が異なるガスモニタについても、本手法による解析により、実ガスを用いることなく感度推定ができることと思われる。今後、測定対象核種の検出に適したモニタの設計等に本手法を適用していきたい。

<参考文献>

- 1) 武田、鳥居他：保健物理学会第18回研究発表会 (1983)
- 2) W.R.Nelson, H.Hirayama & D.W.O.Rogers: SLAC-265 (1985)
- 3) (財) 原安センター編：放射線施設のしゃへい 計算実務マニュアルII (1990)

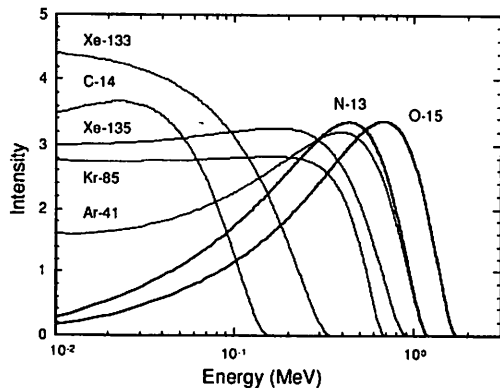


図3 β^{\pm} 線のエネルギースペクトル

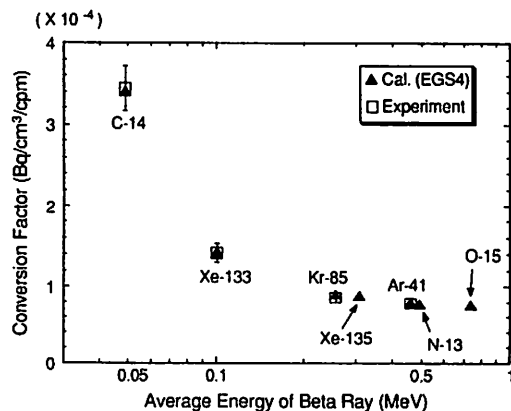


図4 ガスモニタの応答計算結果

NaI (Tl) のシンチレーション効率 に関する研究とそのEGS4の利用

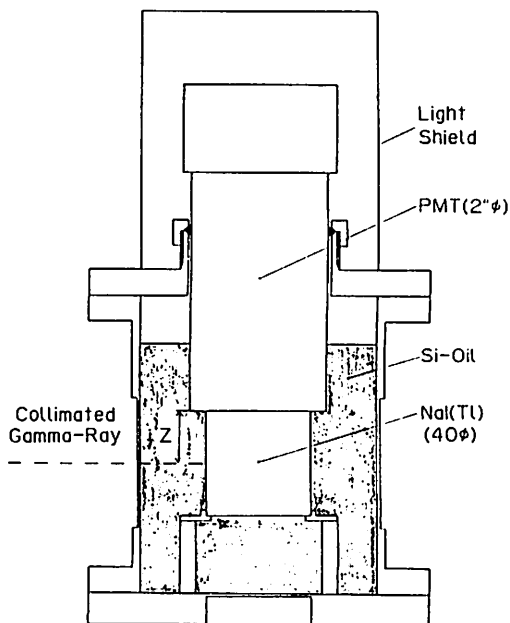
高エネ研、埼玉衛生短大[△] 佐々木慎一、宮島光弘、柴村英道[△]

1. はじめに

シンチレーション（蛍光）は、電離現象とともに放射線によって物質中に生じる最も基礎的な過程の一つであり、その結果生成した光子数或いはイオン対数が物質中で吸収された放射線のエネルギーに比例するという事実は、放射線検出器の原理となっている。しかしながら、電離効率が多くの物質に対して精密に調べられてきたのに対して、蛍光効率は現在でもよく知られていない。このことは、光子数の絶対測定が、電離電荷数測定に比べて実験上はるかに難しい問題を多く含むことによる。例えば、シンチレーションのような微弱光の測定には、通常光電子増倍管が使用されるが、増倍管では光電子変換カソードの量子効率が測定できるだけで、第1ダイノードの光電子収集効率、各ダイノード増倍利得等を測定することは極めて難しい。また、シンチレータでは反射材の反射効率、窓やシンチレータ自体の光子の吸収率等が不明で、増倍管の集光窓での光子収集効率等を測定することは同様に難しい。

しかしながら、増倍管をダイオードとして使用するならば、カソードからの光電子をすべて収集することが可能で、その数を測定することができる⁽¹⁾。さらに、量子効率が既知の増倍管を使用し、発光波長に透明な窓材を選定し、検出ジオメトリを工夫することにより、シンチレーション光子を計数できる。我々は、この方法により、固体シンチレータ並びに希ガス気・液体中で1シンチレーション光子を生成するために必要な放射線の平均エネルギー (W_p) の実験的決定を行ってきた⁽¹⁻²⁾。

NaI(Tl)結晶は、各種シンチレータの中でも最も大きい発光量を示すものの一つである。結晶は潮解を防ぐ目的で容器に密封され、光子収率をあげるため容器内面には反射材が用いられている。しかしながら、反射材の効率が不明であるため、 W_p 決定の際に曖昧さが残る。そこで、その曖昧さを除き直接 W_p を測定する試みの一つとして、裸のNaI(Tl)からのシンチレーションを観測する事を計画した。この場合、シンチレーション強度は、シンチレータ自体の光子吸収を無視すると、発光点から集光窓を見込む立体角のみで決定されると予想される。ここでは、EGS4を用いてこの方法によって得られるシンチレーションスペクトラムを計算し、ガンマ線の入射位置と立体角及び分布中心の相関を調



第1図

べ、試験実験の結果と比較することで、本方法の可能性を論じる。

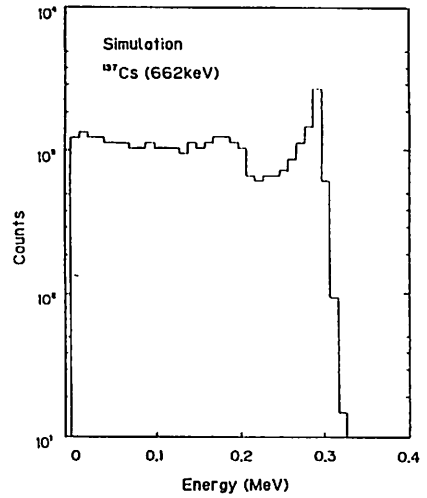
2. 実験装置

装置を図1に示す。容器は黒テフロン塗布したアルミ製で、その中に裸の NaI(Tl) 結晶 (40 mmφ × 60 mm) が、結晶と類似の屈折率をもつシリコンオイル中に浸されている。容器側部から1 mmφにコリメートしたガンマ線を入射位置を変えながら結晶に照射し、シンチレーションを量子効率既知の増倍管で測定する。

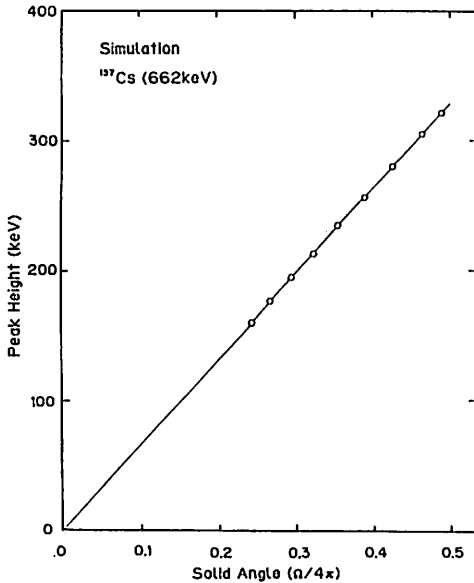
3. 結果と考察

EGS4を用いて、シンチレータ内でエネルギー吸収が起こった時にその座標から集光窓を見込む立体角を計算し、吸収エネルギー量を立体角で規格化した。計算した¹³⁷Cs ガンマ線に対するスペクトラムを図2に示す。光电吸収に対応するピークは、立体角が全立体角の最大1/2であるためそのエネルギーの半分以下の値となり、分解能は立体角が変化するため劣化する。図3には、ガンマ線の入射位置を変えて計算したピーク波高値とその位置における中心軸上での立体角の相関を示す。波高値と軸上立体角の間には明瞭な直線関係がある。

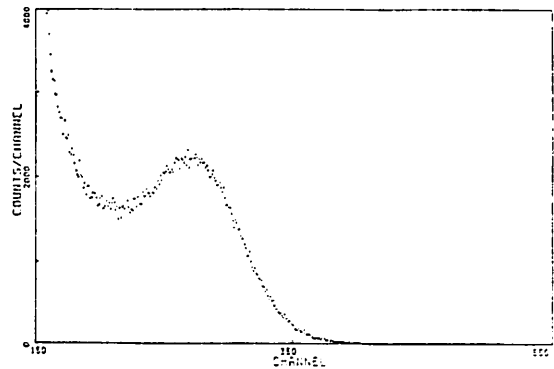
図4に¹³⁷Cs に対して測定した波高分布を示す。分布は計算から予測される形状に類似しているが、分解能は約30%で反射材付結晶で測定した場合の3倍程度わるい。図5には光電子数換算したピーク波高値と軸上立体角の関係を示した。



第2図

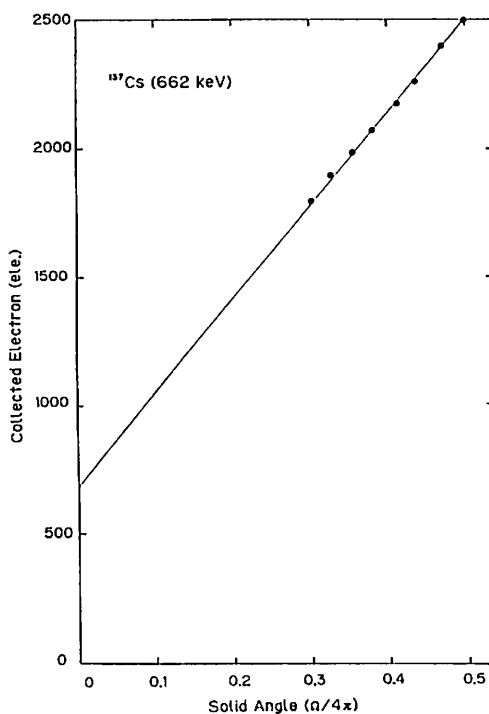


第3図



第4図

図5に示されているように、現在のところ計算結果と一致する実験結果は得られていない。実験における最大の立体角(0.42、距離3mm)での測定結果から W_p を求めると36eV程度となり、反射材付結晶で得られる値(23eV)に比してかなり大きい値となる。この値は ^{60}Co ガンマ線を用いた場合でも変わりがないことから、シンチレータ内での光子の吸収、つまりシンチレータ自体の透明度を疑ってみる必要がある。また、実験上発光点を固定できないため、シンチレータの寸法が大きいと、発光点の僅かなばらつきが大きな立体角の変化を生じさせ、分布中心の位置や分解能に影響を及ぼす。この方法における測定精度を向上させるためには、裸の結晶の取扱いやシンチレータの形状に対するより詳細な検討が必要であろう。



第5図

参考文献

- (1) M. Miyajima, S. Sasaki and E. Shibamura, Nucl. Instr. & Meth., 224 (1984) 331.
- (2) M. Miyajima, S. Sasaki and E. Shibamura, Nucl. Instr. & Meth., B63 (1992) 297.

陽子線衛星搭載用 Si 半導体検出器の応答計算

東北大学 サイクロ RI センター 高木俊治

1 はじめに

宇宙科学研究所の科学衛星 EXOS-D(「あけぼの」)¹⁾に搭載されている高エネルギー荷電粒子検出器 (high energy particle monitor, HPM) は、SSD を用いた dE/dx 検出器である。この検出器により、衛星軌道 (高度 270 ~ 11000km、軌道傾斜角 75.1°) での宇宙放射線の測定を行うことができる。この宇宙空間は、一般に放射線帯と呼ばれ、陽子、電子等の荷電粒子が地球磁場により捕捉されており、粒子強度が高くなっている。検出器は、設計段階で阻止能の計算から Si 中での入射粒子のエネルギー損失を計算し、測定可能なエネルギー範囲を求められた。この測定エネルギー範囲を決定することは重要な要素であるが、地上実験で較正されなかったので、EGS4 コード³⁾を用いて SSD での吸収エネルギーの三次元シミュレーション計算を試みた。

2 HPM 検出器

検出器に用いられている SSD は、有効直径 10mm、厚さ 0.2mm である。この SSD を 4 枚用い、また、太陽光や低エネルギー粒子を遮蔽するために外側に Al(厚さ 0.1mm) を、さらに SSD の間に 2 枚の Cu(厚さ 0.3mm、1.0mm) を配置して、測定エネルギー範囲を高くしている。検出器の概略図を Fig. 1 に示す。

設計用に、それぞれの SSD で吸収されるエネルギーは陽子、 α 粒子については Zeigler の阻止能と飛程の計算コード TRIM85²⁾を用い、電子に関しては、物質中での励起、電離で失うエネルギーを与える次式から計算された。

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[\ln \left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1}mc^2}{I} \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left\{ \frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (2\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right\} \right]$$

ここで、

$$\gamma = \frac{T + Mc^2}{Mc^2}$$

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

T : 運動エネルギー

Z : 物質の原子番号

M : 粒子の静止質量

r_0 : 古典的電子半径 = $2.818 \times 10^{-15} \text{m}$

mc^2 : 電子の静止質量エネルギー = 0.511MeV

N : 粒子が通る物質中の 1m^3 当たりの原子の個数

z : 入射粒子の電荷

I : 物質の平均励起ポテンシャル

Fig.2 はその結果を図示したものである。

Fig.2 から入射粒子の違いにより、SSD で失うエネルギーが違うので、SSD1 の出力信号に LLD1(60 keV)、LLD2(600keV)、LLD3(6MeV) の 3 つのディスクリレベルを設けるこ

とにより、粒子の弁別が行われる。また、SSD2、SSD3、SSD4において、SSD1とコインシデンス、SSD2、SSD3、SSD4 どうしてアンチコインシデンスをとることにより、電子と陽子に関しては、3つのエネルギー範囲について測定が行われる。

3 計算方法

測定は、SSD1とSSD2、SSD3、SSD4のコインシデンスをとるので、検出器の窓以外から混入してくる粒子は少ないと考えられる。そこで、Al、Si、Cuの円盤を配置しただけの体系を考えることにする。(Fig.3) 入射粒子は、円盤に対して垂直のビーム線源を考えた。

4 結果

ESTEPE の効果

SSDの厚さが0.2mmと薄いのでstep-sizeに注意しなければならない。そこで、ESTEPEを変化させてその影響を見た。また、PRESTAによる計算も試みた。電子のエネルギーが500keVの時、SSD1で失うエネルギーの変化をFig.4に示す。ESTEPEをdefaultで用いた時と0.1%で計算した場合は、30%の違いが得られた。一方、PRESTAを用いた場合は、step-sizeに影響なくほぼ0.20MeVという結果が得られた。

吸収エネルギーの計算結果

PRESTAを用いて、SSDでの吸収エネルギーを計算した結果をFig.5に図示する。dE/dxによる計算値と比較すると、EGS4は電子の軌跡を忠実に追えるので、SSD中のpath-lengthが長くなり、吸収エネルギーの最大値が大きくなる。また、吸収材(Al、Cu、前面のSSD)での吸収も大きくなるので、グラフが右側にシフトし、測定エネルギー範囲が高エネルギー側になっている。

吸収エネルギーのピークが、dE/dx計算によるものと比較して緩やかになっているのも、SSD中を斜めに通過していく粒子による影響で、吸収材中の散乱により後のSSDほど顕著に表れている。

References

- [1] EXOS-D 中間報告書、文部省宇宙科学研究所, 1988
- [2] J.F.Ziegler,J.P.Biersack,U.Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, 1985
- [3] W.R.Nelson,II.Hiryama,D.W.O.Rogers, *The EGS4 Code System*, SLAC-265, 1985

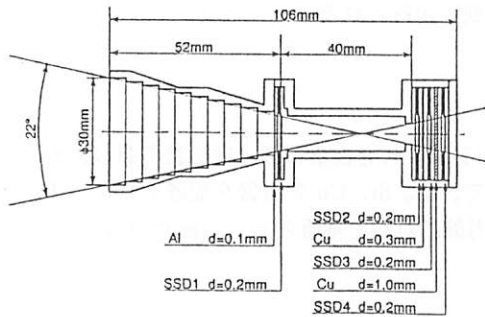


Figure 1: IIPM 検出器概略図

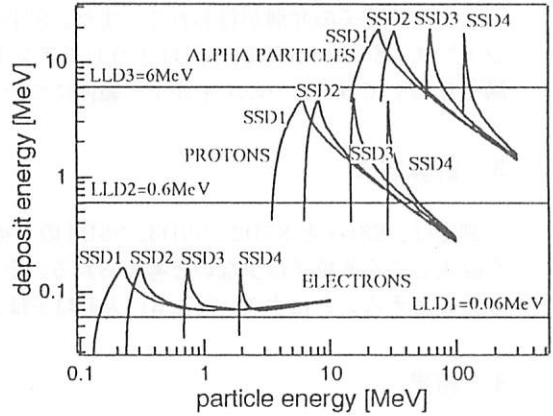


Figure 2: IIPM 検出器レスポンス

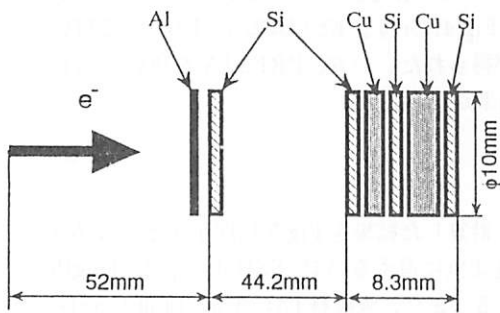


Figure 3: EGS4 計算体系

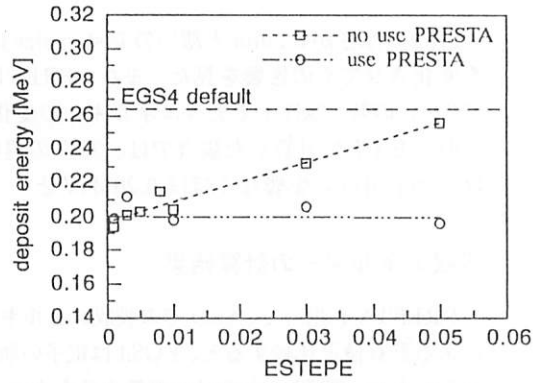


Figure 4: ESTEPE による吸収エネルギーの変化

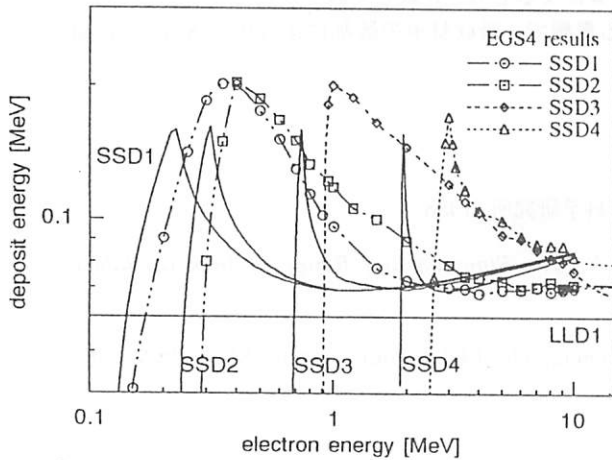


Figure 5: 吸収エネルギーの計算結果

γ線、低エネルギーX線照射時の 均質ファントム内吸収線量分布計算

船研^A、原研^B、高エネ研^C 成山展照^A、田中俊一^B、波戸芳仁^C、吉澤道夫^B、
平山英夫^C、伴秀一^C、中島宏^B、中根佳弘^B

1. はじめに

従来50 keV以下の低エネルギーX線は強い線源がないこともありあまり重視されてこなかったが、最近の放射光施設の普及によりこうしたX線に対する線量評価を精度よく行う必要性が高まってきた。EGS4は元来高エネルギー放射線用に開発されてきたコードではあるが、光子エネルギーで1 keV、電子エネルギーで10 keVまで計算できるようになっておりこうした低エネルギー領域においてもその適用が期待される。そこでまず精度評価のもととなる実験として放射光からの単色X線に対する線量分布を測定し、この実験結果をもとにEGS4コードの低エネルギー領域における計算精度の評価および改良を行った。

2. 実験

X線の照射は高エネ研の放射光実験施設(PF)を利用した。線源は30 keV単一のエネルギーをもつ5 mm四方の平行ビームである。用いた均質ファントムは軟組織等価な組成をもち(表1)、1辺30 cmの立方体をなしている。ビームはそのファントム表面中心に垂直に入射させた。線量計には組織等価で厚さ65 μmのLi₂B₄O₇(Cu) TLDと380 μmのLiF TLD¹⁾を用い、ファントム内のビーム軸上とビーム軸から距離1、3、5 cm離れた地点の同心円上にそれぞれ配置した。測定結果を図1に示す。ファントム表面近くでビーム軸から1 cm離れると2桁、5 cm離れると3桁減衰することがわかった。

また比較のため⁶⁰Co、¹³⁷Csガンマ線を用いた実験も行ったので¹³⁷Csの結果を図2に示す。全面入射なので2次元的な分布はない。

3. 計算

EGS4による¹³⁷Cs照射の計算結果は図2のように実験値と一致したが、低エネルギーX線の場合¹³⁷Csなどのγ線と異なりコヒーレント散乱の影響を無視できない²⁾。EGS4はオプションとしてコヒーレント散乱を組み込んでおり、PEGS4の入力でIRAYL=1を、EGS4のユーザールーチンで各領域のIRAYLR=1とすれば計算できる。そこでその影響度を試算したところ、本実験体系においてコヒーレント散乱の無視はビーム軸上で最大70%過大、周辺部で数%の過小評価につながることを確認した。

さらに低エネルギーX線に対してはこのほかにコンプトン散乱における電子束縛の影響もある。つまりコンプトン散乱はふつうKlein-仁科の式で表現されるが、これは原子内の電子を自由電子として扱ったもので入射光子のエネルギーが小さくなってくるとその仮定が成り立たなくなる。EGS4はこうした効果を考慮していなかったのでインコヒーレント散乱関数 $S(x, Z)$ を用いて新たにコードに組み込んだ。計算結果を図1に示す。電子束縛の影響を考慮しないと中心軸上

で40%、周辺部で15%ほど過小評価になり、改良により低エネルギーに対する適用性の増すことが確認できた。実験値とも表面近くを除き誤差内で一致した。表面近くで一致しない原因の1つは直線偏光すなわち放射光の電気変位あるいは磁気変位の方向に偏りがあることに起因する微分散乱断面積の違いを考慮しなかったためであり、現在コードに組み込み計算中である。

4. まとめ

従来のEGS4にコンプトン散乱における電子束縛の効果を付け加えることによってその適用性を50keV以下まで拡充した。その精度は放射光を用いた実験に基づき確認した。

参考文献

- 1) Nariyama N., et al., "Development of a Glow Curve Measuring System of TLDs and its Applications", JAERI-M 92-023 (1992)
- 2) Beernink K.P., et al., "Considerations of Coherent Scattering and Electron Binding in Incoherent Scattering, in Computation of Dose Deposition in Tissue from Low-Energy Photon Beams", Radiat. Res., 96, 429 (1983)

表1 ファントム組成

element	wt%
H	8.4
O	15.5
C	68.2
N	3.76
Cl	3.2
P	0.9
density	1.072g/cm ³

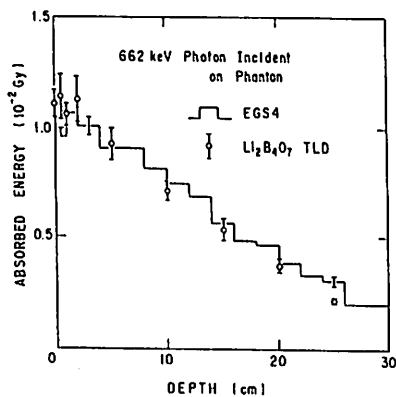


図2 ¹³⁷Cs γ 線照射時のファントム内線量分布

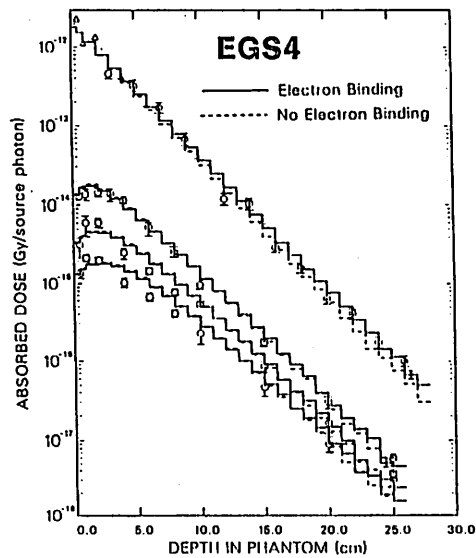


図1 30keV X線照射時のファントム内線量分布

人体形状ファントムモデルを用いた線量当量計算への適用

動燃・東海 三菱原子力 野尻一郎, 百瀬琢磨, 牧野明寛, 成田 脩
原子力システム 岩井 敏, 深作泰宏

1. はじめに

EGS4は任意の3次元体系における電子及び光子の挙動を忠実にシミュレーションできるコードであり、核燃料サイクル施設の安全評価の分野においても、しゃへい計算や線量当量評価への適用が期待できることから、動燃では安全評価手法整備の一環として、EGS4コード汎用ユーザーズ版の開発を行っている¹⁾。汎用ユーザーズ版では、従来MORTRAN3により使用者が作成することが推奨されているMAIN, HOWFAR及びAUSGABが入力データのみで処理されるため、複雑な幾何形状の体系においてもCG形式で簡単に形状指定が行えるようになったことから、線量当量評価への適用のための検討として、人体形状ファントムモデルを用いて線量当量計算を行った。

2. 計算方法

人体形状ファントムモデルは、MIRDパンフレット5²⁾を基にしたファントムモデルにLewisの食道ファントム³⁾を追加したモデルであり、男女の器官を兼ね備え、肺組織2、軟組織37、骨組織22の合計61の臓器・組織により構成されている。これらの臓器・組織の幾何学的形状の入力は、汎用ユーザーズ版ではHOWFARに組み込んである拡張MARS形状入力機能を用いるため、各臓器・組織の形状をCG形式の理論式で表現することにより作成される。

計算では、ファントムに光子平行ビームが人体軸に垂直に前方(AP)、後方(PA)及び側方(LAT)の各方向から入射する照射ジオメトリーに関して、各臓器・組織における沈着エネルギーをEGS4により求め、この結果を用いて単位フルエンス当たりの組織線量当量(等価線量)を算出した。線源形状は基本的にはファントム全体を含むように設定したが、対象とする臓器が小さく十分な統計精度が期待できない場合については、照射野を絞って計算することとした。入射光子エネルギーは、0.1~3.0MeVの範囲で5点選んだ。

3. 計算結果及び考察

計算結果として、図-1に肺(女性)、図-2に睾丸についてのAP照射及びLAT照射に対する単位フルエンス当たりの臓器線量当量をICRP Pub. 51付録2²⁾で与えられている値とともに示す。これらの結果は、いずれもヒストリー数10000とした場合のもので、肺のAP照射及びLAT照射並びに睾丸のAP照射については概ねICRP Pub.51の値と一致しているものと考えられる。一方、睾丸のLAT照射についてはICRP Pub.51の値を大きく下回るとともに、相対標準偏差も25%~30%と大きくなっている。これは、睾丸の計算に用いた照射野の絞り込み(10cm×10cm)がAP照射においては適切であったが、線源までの距離が長いLAT照射では有効な線源領域を包含できなかったことを示している。また、睾丸のLAT照射では、

臓器の形状が小さいこと、また、臓器と線源との間に存在する他の臓器によるしゃへい効果により、計算に十分な粒子数を確保できなかったことが、相対標準偏差の増大をもたらしたものと考えられる。

4. まとめ

EGS4コード汎用ユーザーズ版を用いて人体形状ファントムモデルにより臓器線量当量の計算を行った。計算結果によれば、形状の小さい器官及び深部に存在する器官の評価においては、照射野の改善、統計精度向上のための検討等がさらに必要なことが明らかになったものの、概ねICRP Pub.51の値と一致しており、汎用ユーザーズ版の核燃料サイクル施設の線量当量評価への適用の見通しが得られた。

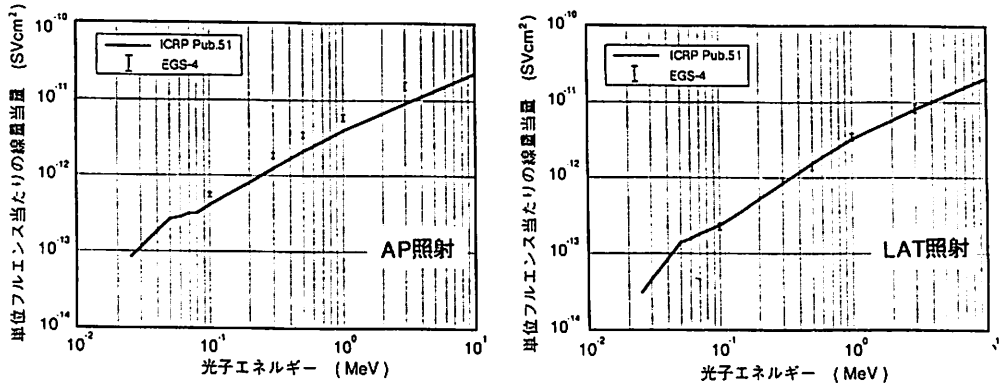


図-1 肺(女性)についての組織線量当量の計算結果

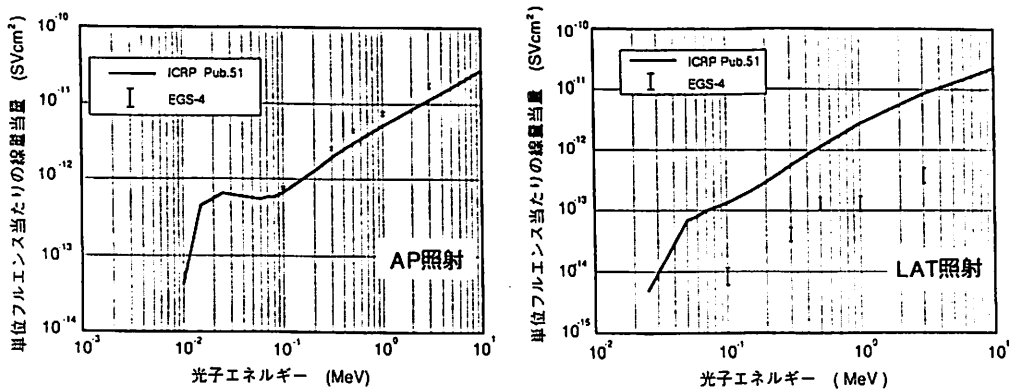


図-2 卵巣についての組織線量当量の計算結果

参考文献

- 1) 百瀬, 他 EGS4コード汎用ユーザーズ版の開発, KEK Proceedings 91-14, p.48-73 (1991)
- 2) W. S. Snyder et al., NM/MIRD Pamphlet No.5 (revised), J. Nucl. Med. 19 Supplement : 5-67 (1978)
- 3) C. A. Lewis et al., Phys. Med. Biol. Vol.24 No.5 p.1019-1024 (1979)
- 4) ICRP Pub.51 Data for Use in Protection against External Radiation

コバルト60治療装置の光子エネルギースペクトルと 吸収線量の計算

東京都立医療技術短期大学 齋藤秀敏, 入船寅二, 福田賢一
福士政広, 三枝健二

1 はじめに

放射線治療の精度向上のためには体内の吸収線量分布を高い精度で計算する必要がある。しかし、従来の体内吸収線量計算アルゴリズムでは複雑な肺・骨などの不均質が存在する部位の吸収線量計算を高い精度で実施することは難しい。X線CTが提供する患者の精密な3次元電子密度データを利用し、3%の精度¹⁾で吸収線量計算を実施するためのアルゴリズムとして放射線と物質の相互作用を物理的に忠実にレイトレースすることができ、散乱線の振舞いを考慮した真の3次元線量分布計算が可能なモンテカルロ法が注目されている²⁾。

モンテカルロ法で線量計算するためには各種の物理データが必要である。EGS4コードシステムでは計算に使用する放射線の物質に対する相互作用の断面積データはPEGS4によって計算できるが、放射線治療装置に固有なエネルギースペクトルは我々ユーザが用意しなければならない。しかし、一般に治療装置が発生するビームはエネルギーが高く線量率が大いため、半導体検出器やシンチレータによるスペクトル測定は難しい。

そこで我々はEGS4³⁾を使用して、遠隔コバルト60治療装置が発生する治療線束中の光子のエネルギースペクトルを計算により求めたので報告する。

2 方法

シミュレーションの対象とした遠隔コバルト治療装置は島津社製RTGS-2型である。照射ヘッドは線源格納部分と1次コリメータ、多重絞りによる照射野コリメータの照射野限定機構から構成されている。シミュレーションでは図1のように線源格納部分は線源カプセルの周囲をタングステンで囲み、さらにその周りを鉛で囲んだ構造とした。1次コリメータと照射野コリメータの材質はタングステンである。照射野コリメータは多重絞り機構であるが、シミュレーションではモノブロックコリメータとし、簡略化した。線源の⁶⁰Coはベレット形状で、日本アイソトープ協会のP150型のステンレス製カプセルに封入されている。線源と線源カプセルの材質と寸法を精密にコーディングし、⁶⁰Coは密度5.6 g/cm³の様な金属として計算した。

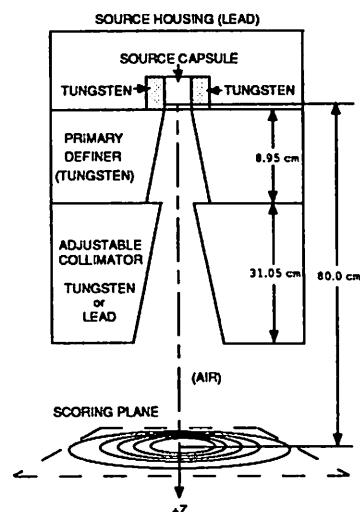


Fig. 1 Schematic diagram of the Cobalt-60 radiation therapy unit on our simulation.

3 結果・考察

照射野 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ ，線源からの 1.17 MeV と 1.33 MeV の光子，各2百万個について計算した結果，ビーム軸を中心とした半径 15 cm の円の中に $37,291$ 個の光子が到達し， ^{60}Co 線源からの1次線は $24,310$ 個，散乱光子は $12,981$ 個であり，その比は $0.652 : 0.348$ であった⁴⁾。AECL社製Theratron780遠隔コバルト治療装置による同様のシミュレーションでも1次線と散乱光子の比は約2:1であった⁹⁾。

1次線を除いた散乱光子のスペクトルを図2に示す。散乱光子の23.8%は照射野限定機構で発生し， 0.8 MeV 以上の比較的高いエネルギーであった。線源から照射野の反対方向に放出された光子は線源カプセル内で後方に散乱し，散乱光子の14.1%に相当する量が治療線束に混入した。この散乱光子は 0.4 MeV 以下のエネルギーをもち， $0.20\text{-}0.25 \text{ MeV}$ にピークがあった。線源と線源カプセルから発生する散乱光子は 0.35 MeV 以上ではほぼ一様に分布した。また，エネルギースペクトルの $0.50\text{-}0.55 \text{ MeV}$ のピークは電子対生成によって生じた陽電子の消滅放射線によるものである。

以上の結果から放射線治療に使用する遠隔コバルト60治療装置が発生する光子は単色エネルギーではなく，連続スペクトルをもち，実効エネルギーは約 1 MeV であることがわかった。このスペクトルを使用して水中のビーム中心軸上の吸収線量分布を計算した結果を図3に示す。計算値は電離箱線量系による実測値と計算値は良く一致した。

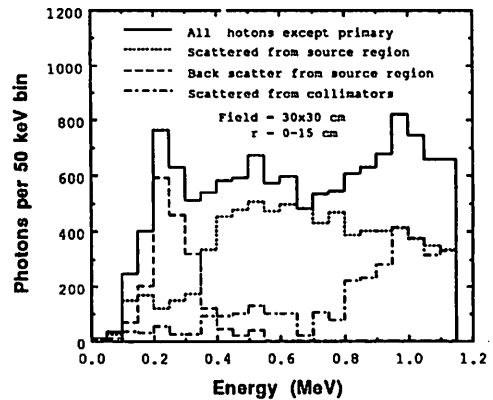


Fig.2 Energy spectrum of photons except the unscattered primary photon.

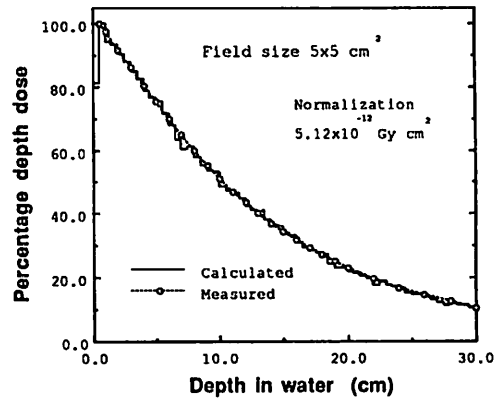


Fig.3 Comparison of percentage depth dose curve as calculated with EGS4 code system vs. measured with ionization chamber.

参考文献

- 1) Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or Gamma rays in radiotherapy procedures: ICRU report 24, 12-15, 1976.
- 2) 伊藤彬：PC user groupセミナー資料「モンテカルロコード・EGS4と線量計算への応用」，1-13, 1988.
- 3) Nelson, W. R., Hirayama, H., Rogers, D. W. O.: The EGS4 code system, SLAC report-265, 1985.
- 4) 齋藤秀敏，入船寅次，福士政広他：遠隔治療装置の光子スペクトル：東京都立医療技術短期大学紀要 5, 1-5, 1992.
- 5) Han, K., Chui, B. C., Mohan, R.: Monte Carlo simulation of a cobalt-60 beam: Med. Phys. 14, 414-419, 1987.

ポジトロンファクトリー用電子リニアック 及びターゲット系に関する考察

原研高崎 金子広久、岡田漱平

1. はじめに

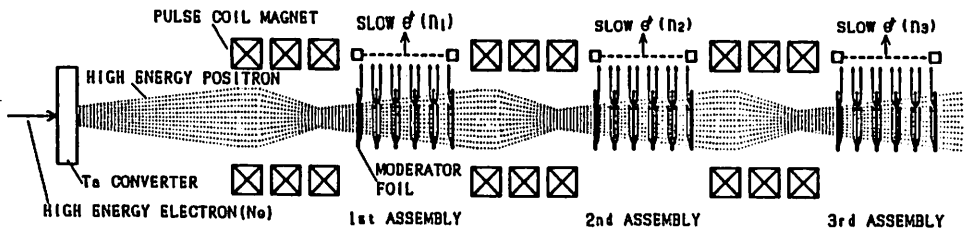
原研高崎では、100kW級の専用電子リニアックを用いて、 10^{10} 個/秒以上の高強度単色陽電子ビームを発生させ、高度な材料キャラクタリゼーションや、基礎物理・化学・生物学に応用することを目指すポジトロンファクトリー計画¹⁻³⁾が検討されている。その中のターゲット系について、モンテカルロ計算に基づく検討を行い、電子リニアックのビームエネルギーとして、どの程度のものが最適であるか検討を行った。

2. 方法

高エネルギーの電子が入射するコンバータ部での、制動放射と対生成のカスケード反応による高エネルギー陽電子の発生シミュレーションにはEGS4を用いた。USER CODEは、平山氏によって作成されたUCPOSIT⁴⁾をベースに、 10° ステップの放出角度分布が各コンバータ厚さ毎に求められるようモディファイしたものを使用した。低速陽電子を取り出すモデレータ中での高エネルギー陽電子の挙動(熱化、拡散、消滅、再放出)のシミュレーションには、自作のモンテカルロコードSPG (Slow Positron Generation)⁵⁾を使用した。

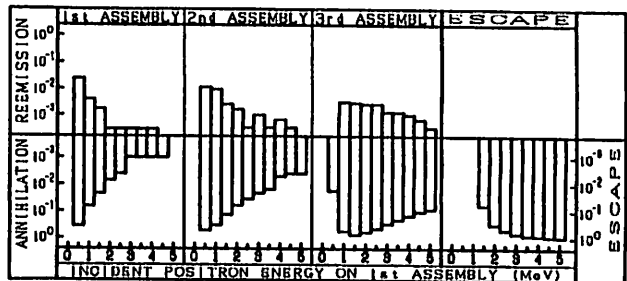
3. 計算結果及び考察

ポジトロンファクトリーの設計検討においては、図1に示すような多チャンネル低速陽電子ビーム同時取り出しのためのターゲット系を提案している^{2, 3, 6, 6)}。このような複数



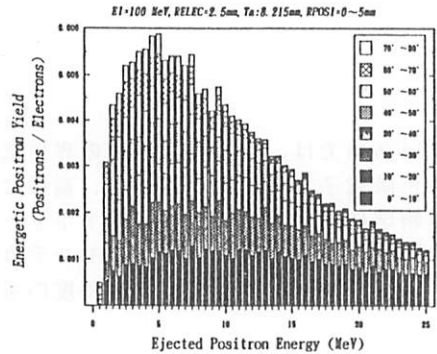
〔図1〕複数のモデレータアセンブリー配置による多チャンネル低速陽電子ビーム同時取り出しの概念

のモデレータアセンブリーに、コンバータからいろいろなエネルギーの陽電子が入射した場合、それがどの程度の割合で低速陽電子に変換されるかをSPGで計算した結果を図2に示す。従来方式の単一モデレータアセンブリー(図中の第1アセンブリーのみ)では、高エネルギーの陽電子は透過してしまい低速陽電子生成への寄与は少ない。複数のアセンブリーを並べると後段のアセンブリー



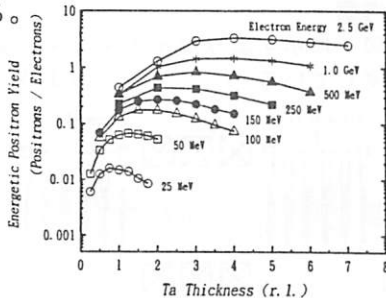
〔図2〕コンバータから種々のエネルギーの陽電子が入射した場合の多チャンネルモデレータアセンブリーにおける低速陽電子再放出、消滅、透過の確率(計算値)。W図面における再放出分率率は1/3とした。アセンブリー構成は、第1が2μm厚W×20枚、第2が2μm厚W×18枚を25μm厚W2枚ではさんだもの、第3が25μm厚W×20枚とした。

一で高エネルギー成分を有効に利用できるようになる。それにしても、高エネルギー成分の利用効率は低い。従って、今後いろいろなモデレータの形式を考えるにせよ、コンバータから放出されたモデレータに入射する陽電子のうち低速陽電子生成に有効なのはせいぜい10 MeV程度までのエネルギーのものと考えてよい。図3は、コンバータから放出される陽電子のエネルギー及び角度分布を、電磁カスケードモンテカルロコードEGS4を用いて計算した例である。放出陽電子の低エネルギー側ほど全角度にわたって分布していることがわかる。このような計算を、入射電子エネルギー及びコンバータ厚さを色々変えて行った結果が図4である。各入射電子エネルギーでの最適なコンバータ厚さがわかる。図5は、電子ビーム出力を100 kW一定とした場合に、コンバータから放出される陽電子のうち、低速陽電子生成に有効と考えられるもの(陽電子エネルギー5 MeV以下及至10 MeV以下)の数を、電子ビームエネルギーに対してプロットしたものである。コンバータの厚さとしては、各電子ビームエネルギーに対して最適なものを選んだ。コンバータからの陽電子の放出角度については、モデレータに入射する有効な立体角を考え20°以内とした。図には、参考のため全角度に放出される25 MeVまでの陽電子についてもプロットした。これから明らかのように、低速陽電子生成のために最適な電子ビームエネルギーは100 MeV程度である。

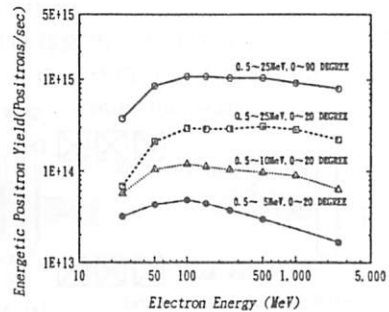


【図3】Taコンバータから放出される陽電子のエネルギー及び放出角度分布(EGS4による計算値)

図4は、各入射電子エネルギーでの最適なコンバータ厚さがわかる。図5は、電子ビーム出力を100 kW一定とした場合に、コンバータから放出される陽電子のうち、低速陽電子生成に有効と考えられるもの(陽電子エネルギー5 MeV以下及至10 MeV以下)の数を、電子ビームエネルギーに対してプロットしたものである。コンバータの厚さとしては、各電子ビームエネルギーに対して最適なものを選んだ。コンバータからの陽電子の放出角度については、モデレータに入射する有効な立体角を考え20°以内とした。図には、参考のため全角度に放出される25 MeVまでの陽電子についてもプロットした。これから明らかのように、低速陽電子生成のために最適な電子ビームエネルギーは100 MeV程度である。



【図4】各エネルギーの電子ビームを入射した場合に、コンバータから放出される高エネルギー陽電子の生成効率と、コンバータの厚さとの関係(計算値)。



【図5】Taコンバータへの入射電子ビーム(径5mm)の出力を一定(100kW)とした場合の、電子ビームエネルギーとコンバータ(半径5mm以内)からの放出陽電子数との関係(計算値)。図中の数値は放出陽電子のエネルギー及び放出角度範囲。

4. まとめ

ポジトロンファクトリーターゲット系のシミュレーションに、EGS4及びSPGコードを使用して最適リニアックエネルギーを求めてみた。ビーム出力を100 kWと限定した場合、エネルギー100 MeVのリニアックが最適であると考えられる。なお今年度中には、EGS4とSPGを結合させて、低速陽電子収率(再放出低速陽電子数/コンバータへの入射電子数)が、一挙に求められるようになる予定である。

参考文献

- 1) S.Okada: Proc. 2nd Int. Symp. Advanced Nuclear Energy Research (Mito, 1990)p. 324
- 2) S.Okada and H.Sunaga: Nucl. Instr. and Meth. B56/57 (1991)604
- 3) S.Okada and H.Sunaga, H.Kaneko, H.Tachibana, K.Yotsumoto and J.Okamoto: Proc. Int. Conf. on Evolution in Beam Application (Takasaki, 1991)p. 257
- 4) H.Hirayama: KEK Internal Report 89-17 (1990)
- 5) 金子広久、岡田淑平: 第39回応用物理学関係連合講演会(習志野, 1992)
- 6) 金子広久、岡田淑平: 第29回理工学における同位元素研究発表会(東京, 1992)

L i n a c による
低速陽電子の生成率評価

京大 道下

E G S 4 を用いた核融合炉ダイバータへの逃走電子エネルギー沈着解析

原研^A、備三菱総研^B 功刀資彰^A、秋場真人^A、小川益郎^A
佐藤 理^B、中村充志^B

1. はじめに 国際熱核融合炉 (ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor) 等(図1)におけるプラズマディスラプション時には、熱クエンチや電流クエンチが生ずることが指摘されている¹⁾。電流クエンチでは、トロイダル磁場で加速された高エネルギー逃走電子(Runaway Electrons)がダイバータ(図2)等のプラズマ対向機器(PFC: Plasma Facing Components)へ直接入射・散乱し、PFC部材内での体積発熱が大きくなる為、熱構造上の問題となっている。本報告は、高エネルギーの逃走電子のPFC内エネルギー沈着量を評価するためのEGS4ユーザー・コード・システムの開発、同種コードであるGEANT3との比較検討および本コードシステムのITERダイバータ構造への適用に関するものである。

2. 解析手法 高エネルギーの逃走電子をモンテ・カルロ法によって追跡し、PFC部材内でのエネルギー沈着量を評価するため、高エネルギー物理学分野で開発されたEGS4を基本としたユーザー・コードを開発した²⁾。EGS4コードシステムは、数keVから数TeVまでのエネルギー領域で、電子対生成、コンプトン散乱、制動放射、電子陽電子消滅、イオン化および多重散乱等を考慮しており、10~600MeVのエネルギーを持つと想定されている核融合炉の逃走電子に対する電磁カスケード・シミュレーションが可能である。

3. 解析結果 核融合炉ダイバータの一例として比較的単純な構造(炭素材アーマータ付きモリブデン鋼)を対象とし(図3)、入射エネルギーの大きさ(10~300MeV)および入射角度(0.5°~25°)をパラメータとして、H. CalenらのGEANT3コード(CERNが開発)を用いた解析結果³⁾と比較検討した。その結果、EGS4の全エネルギー沈着量はGEANT3より大きな値を示すが、モリブデン鋼の炭素材側の界面近傍に生ずる沈着エネルギーのピークはGEANT3より低い値を示す傾向のあることが分かった。この傾向が一般的なものであるかどうかは、他の物質に対するシミュレーションを実施して確認する必要がある。また、ITER候補ダイバータ構造についても予備的な解析を行った。この際、300MeVの逃走電子が3種類のダイバータ構造に対して0.5°で入射すると仮定した。その結果、入射角度が比較的小さいため、ダイバータ表面での反射が大きく、ダイバータ内部構造の違いによるエネルギー沈着量の差はほとんど見られなかった。入射角が大きくなればこの差は大きくなると推定され、現在解析中である。今回は、磁場を考慮しておらず、電子の磁力線への絡み付きや反射電子の再入射挙動をシミュレートできていない。今後、これらの影響を考慮したユーザー・コードの改良を行うと共に、実験結果等によるコードの検証を進める予定である。

参考文献

- [1] T. Kuroda and G. Vieider, "ITER Plasma Facing Components," ITER Doc. No. 30 (1990)
- [2] T. Kunugi, O. Sato, M. Nakamura, M. Akiba and M. Ogawa, "The Simulation of the Energy Deposition from Runaway Electrons in Plasma Facing Components with EGS4," Fusion Technology, vol. 21, pp.1868-1872 (1992)
- [3] H. Calen, S. Kullander and A. Mortzell, "Energy Deposition in Tokamaks by Impact of Runaway Electrons," Dep. of Rad. Sci., Uppsala Univ., UU-267(1989)

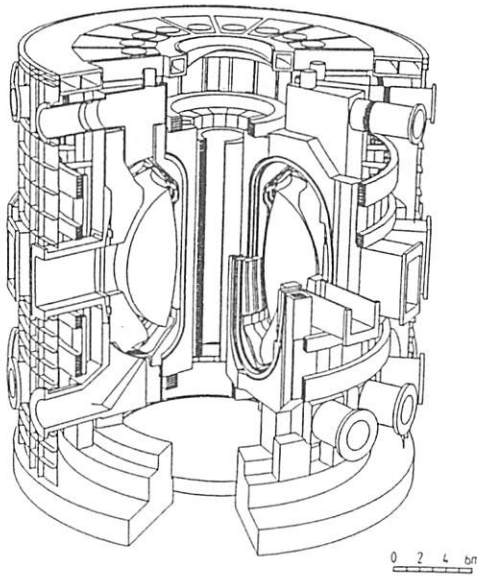


図1 ITER外観

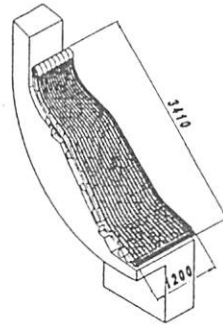
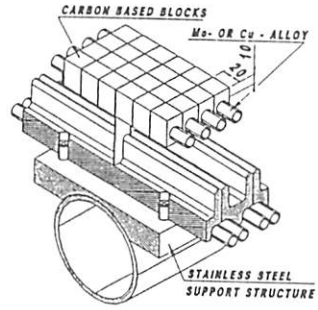


図2 ダイバータ構造例

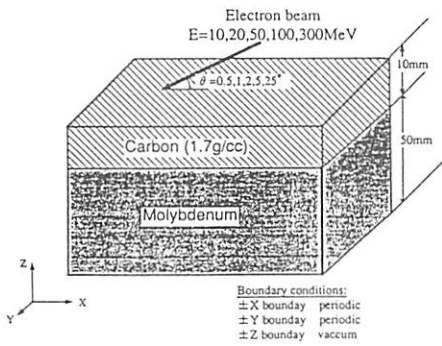


図3 解析体系

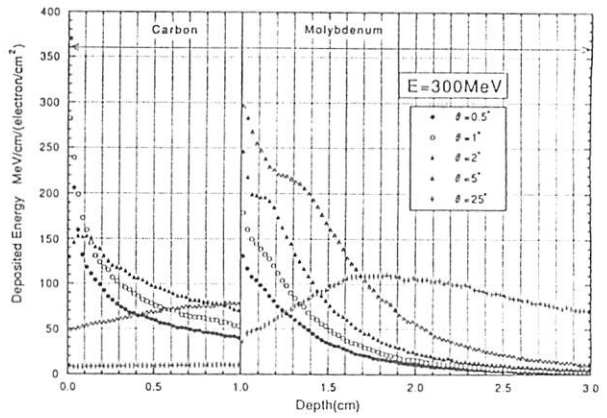


図4 エネルギー沈着分布計算例

EGS 4 システムの入手方法と 使用にあたってのお願い

EGS 4 システムは、多くの分野で広く使用してもらうことを目的に希望者には無料で配布しています。但し、コードの信頼性を保持するために、次の事項を守ることをお願いします。

1. EGS 4 の入手を希望するものは、SLAC の W. R. Nelson にその旨を伝え、ユーザとして登録する。その際、希望すれば SLAC-265 を送ってもらえる。KEK を通じてシステムを入手する場合には、必ずその旨を明記しておく。
2. 入手したシステムを勝手に第3者に渡さない。希望者には、1 の措置をとるように伝える。
3. MORTRAN マクロを使用しての変更以外は EGS 4 そのものの変更は原則として行わない。(間違った修正をさけるため、FORTRAN 段階での修正は問題が生じた場合に追跡不能となる事による。)
4. EGS 4 で計算した結果が異常な場合には、著者と連絡をとり、EGS 4 そのものの問題であることを確認してから評価の公表を行うこと。(EGS 4 のバグであれば、ユーザ全体に必要な情報であり、全体に伝える必要がある。もし、ユーザコードの問題であれば、EGS 4 の評価とは別であり、誤った評価となってしまう。)
5. EGS 4 を使用した論文には、必ず SLAC-265 を引用する。

EGS 4 を使用した研究の状況を把握するために、できれば、EGS 4 を使用した論文を書いた場合には別刷りを Nelson 及び平山に送付してください。