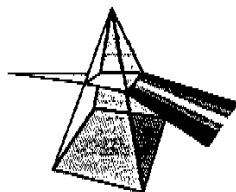


【技術報告】

EGS4汎用ユーザズコードUCGEN
の開発

野尻 一郎 岩井 敏* 佐藤 理*²
高木 俊治*² 澤村 貞史*³ 深作 泰宏*⁴

東海事業所 安全管理部
* 三菱重工業株式会社
*² 株式会社三菱総合研究所
*³ 北海道大学工学部
*⁴ 原子力システム株式会社

資料番号：102-9

Development of EGS4 User's Code for General Purpose

Ichiro NOJIRI Satoshi IWAI* Osamu SATO*²
Shunji TAKAGI*² Sadashi SAWAMURA*³ Yasuhiro FUKASAKU*⁴
Health and Safety Division, Tokai Works.
* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
*² Mitsubishi Research Institute, Inc.
*³ Hokkaido University, Faculty of Engineering.
*⁴ Nuclear Energy System, Inc.

「電磁カスケード」をシミュレーションする3次元モンテカルロコードEGS4を核燃料サイクル施設の遮蔽計算や線量評価に容易に適用できるようにするため、汎用ユーザズコードUCGENを開発した。UCGENにより、幾何学的形状の指定、線源形状の指定等、従来使用者が解析する対象に応じて独自にユーザズルーチンを作成する必要のあったものが、入力データのみで処理できるようになった。UCGENを組み込んだEGS4を用いてγ線スカイシャイン計算を行い、測定値と計算値との比較・検討を行った。

UCGEN has been developed as a general-purpose user code for a 3-dimensional Monte Carlo EGS4 that simulates and "Electromagnetic Cascade" so that EGS4 can be more easily applied to shielding calculations and dose evaluation of nuclear fuel cycle facilities. The UCGEN enables users to process, with only input data, analytical applications including geometric/radiation source modeling which have, until now, required user-written subroutines unique to each such application. Using the UCGEN-incorporated EGS4, γ-ray skyshine was calculated allowing comparison between actual measured values and calculated values.

キーワード

モンテカルロコード、遮蔽計算、線量評価、スカイシャイン評価、電磁カスケード、EGS4、PEGS4、ユーザコード
Monte Carlo Code, Shielding Calculation, Dose Evaluation, Skyshine Electromagnetic Cascade, EGS4, PEGS4, User Code

1. はじめに

EGS4 (Electron Gamma Shower 4)¹⁾は電磁カスケードモンテカルロ計算コードで、任意の3次元体系における電子および光子の挙動を忠実にシミュレーションする。EGS4はすでに高エネルギー物理実験から医学利用に係わる研究まで幅広い分野で使用されており、核燃料サイクル施設の安全評価分野においても、遮蔽計算や線量評価への適用が期待できる。

公開されているEGS4の使用にあたっては、解析する対象に応じて、EGS4独自のプログラム

言語であるMORTRAN3によりユーザズルーチンを作成する必要がある。

このため、東海事業所安全管理部では、安全評価手法整備の一環として、EGS4の計算を容易に行えるようにするため、汎用ユーザズコードUCGEN (EGS4 Users Code for General Purpose)の開発を平成2年度から行い²⁾、平成8年度では完了した。本稿では、UCGEN開発の内容およびγ線スカイシャイン計算への適用例について報告する。

2. EGS 4 の概要

EGS 4 は、電子、陽電子および光子の輸送を原子番号が1から100の元素、化合物および混合物についてシミュレーションできる。適用エネルギー範囲は、荷電粒子で数10keV～数TeV、光子で1 keV～数TeVである。EGS 4 では以下に示す9種類の物理現象が取り扱われている。

- ①制動放射線生成
- ②陽電子消滅
- ③Moliere 多重散乱
- ④Møller (e^-, e^-) および Bhabha (e^+, e^-) 散乱
- ⑤荷電粒子の飛程に沿った連続エネルギー損失
- ⑥電子対生成
- ⑦Compton 散乱
- ⑧Rayleigh 散乱
- ⑨光電効果

EGS 4 では図1に示すように、

- ①幾何学的形状を指定するルーチン (HOWFAR)
- ②粒子の重みを出力するルーチン (AUSGAB)
- ③線源形状の指定や全体をコントロールするプログラム (MAIN)

を、ユーザーズルーチンとして、MORTAN 3 言語で作成することが推奨されている。これが EGS 4 の使用上の大きな特徴であるが、不慣れな使用者にとっては大きな労力となる。

3. UCGENの開発

3.1 既存の汎用モンテカルロコードの調査

(1) 調査項目

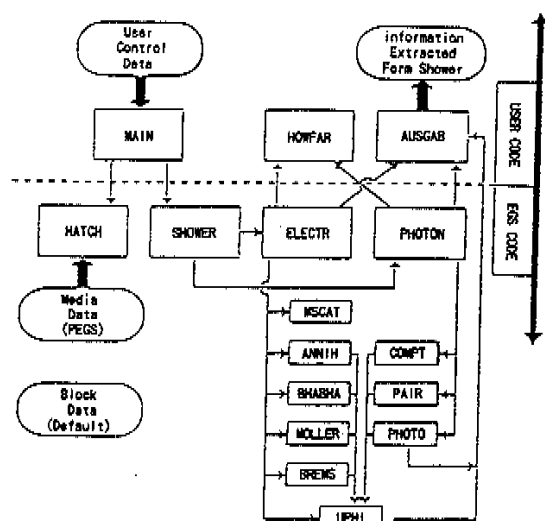


図1 EGS 4 コードの構成

表1 既存モンテカルロコードの調査項目

項目	調査内容	モンテカルロコード
幾何学的形状の表現	三次元の汎用的形状表現ルーチン	MCNP, MORSE-SGC (MARS), KENO V.a, MONK-6, 3
線源の表現	点、面、棒状およびビーム状線源	MORSE-CG, HETC-KFA, FLUKA82
分散低減法	線源バイアス (角度、エネルギー、位置)	MCNP
検出器	点検出器評価法 面交差評価法 次期面交差評価法 飛程長評価法 エネルギー沈着評価法	MORSE-CG
誤差評価	モンテカルロ誤差の評価	MCNP, MORSE-CG

UCGEN は HOWFAR, AUSGAB および MAIN を入力データのみで処理できるようにすることを目的としており、通常のユーザーズルーチンと同様に MORTAN MACRO で記述し、従来の EGS 4 に組み込んで使用する。UCGEN の開発にあたっては、プログラムの設計およびモンテカルロ計算精度の向上のため、遮蔽計算および臨界計算に使用されている代表的なモンテカルロコードを対象として、以下の項目について調査し (表1)、UCGEN で採用する方式の検討を行った。

- ①幾何学的形状の表現方法
- ②線源表現
- ③分散低減法
- ④検出器
- ⑤誤差評価
- (2) 幾何学的形状の表現方法

幾何学的形状の汎用表現ルーチンを設計するため、MORSE-SGC (MARS³⁾)、MCNP⁴⁾、KENO-Va⁵⁾ および MONK-6, 3⁶⁾ の形状表現ルーチンの調査を行った。この結果、基本形状の表現方法は次の2つに分類されることがわかった。

- ①基本形状の境界面を多項式表示で表現する方法 (多項式方式と呼ぶ)
- ②基本形状を位置ベクトル、方向ベクトル等を用いて表現する方法 (いわゆる CG 方式を含む。基本図形方式と呼ぶ)

MARS, KENO-Va および MONK-6, 3 は基本図形方式であり、MCNP は多項式方式である。UCGEN では以下の理由等から MARS の CG 方式を採用することとした。

- ①CG (Combinatorial Geometry) 方式は数多くのコードに用いられており、使用経験のある利用者が多い。
- ②MARS は汎用サブルーチンとして独立の package となっているため、他のコードに組み込み易い。

③MARSの形状 package は他の方法と比較して多大なCPU時間を消費しない。

④8つの基本的形状表現の組み合わせで多くの形状を表現でき、かつ作成した形状の繰り返し表現も可能なため、複雑な形状が比較的容易に表現できる。

(3) 線源表現

線源表現として以下の線源モデルについて調査した。

- ①点線源
- ②面線源
- ③体積線源
- ④ビーム状線源

点線源、面線源および体積線源については、MORSE-CG⁷⁾における表現を調査し、MARSで定義した領域境界面、または領域内一様に線源を設定できることを確認した。ビーム状線源については、HETC-KFA⁸⁾およびFLUKA 82⁹⁾の入力方式の比較検討を行った。この結果、FLUKA82の入力方式は、ビームの広がり角の指定が可能であり、実際のビームの物理的イメージを表現できることが確認され、この方式を採用することとした。

(4) 分散低減法

分散低減法については、MCNPにおいて採用されている方法のうちから以下の方法について調査、検討した。

1) Energy cut-off

粒子の持つエネルギーが指定区間以外有的时候にサンプリングをやめる方法

2) Time cut-off

粒子の持つ時間が指定区間以外有的时候にサンプリングをやめる方法

3) Geometrical splitting with Russian roulette

計算結果への影響の大きい領域(幾何学的空間)を指定してサンプリングを行う方法

4) Energy splitting with Russian roulette

計算結果への影響の大きい領域(エネルギー空間)を指定してサンプリングを行う方法

5) Implicit capture and weight cut-off

粒子が捕獲反応を起こしても除去せず、捕獲確率成分だけ粒子の重みが減少するとして取り扱う方法

6) Forced collision

粒子が透過しやすい媒質で強制的に衝突を起こさせる方法

7) DXTRAN

DXTRAN と呼ばれる小さな球状の空間を指定し、そこへ到達する粒子の数を強制的に多

くする方法

8) Source variable biasing

線源粒子を指定することによって重要度を高める方法

9) Weight window

幾何学的空間もしくはエネルギー空間で、粒子の取りうる重みの範囲を指定し、範囲以外の粒子を分割するか無作為に消滅させる方法

10) Exponential transformation

粒子を長い距離にわたって飛行させるために、衝突点間の距離を仮想的に延ばし、これに対して重みを下げる方法

11) Correlated sampling

小さな摂動の結果生ずる評価量の変化を調べる目的で用いられる方法

この結果、Source variable biasing は、利用者に複雑な判断を要求することなく十分な精度で適切な結果を得るために必要とするcpu時間を節約できることを確認した。

(5) 検出器

検出器については、以下のモデルについて調査した。

①点検出器評価法(Point Detector)

②面交差評価法(Surface Crossing Detector)

③次期面交差評価法(Next Event Surface Crossing Detector)

④飛程長評価法(Track Length Detector)

⑤エネルギー沈着評価法(Energy Deposition Detector)

点検出器評価法、面交差評価法および飛程評価法はMCNPに汎用化されて組み込まれており、参考になることが確認された。

(6) 誤差評価

モンテカルロ法で評価した値は統計誤差を伴うため、その値の持っている誤差評価を行う必要がある。ここでは、MCNPおよびMORSE-CGで用いられている誤差評価法について調査した。

MCNPでは統計精度推定のための指標として $S_Y \sqrt{Y}$ を以下のように定義している。

$$S_Y \sqrt{Y} = \left[\frac{1}{N} \left\{ \frac{Y^2}{(\bar{Y})^2} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 Y : 粒子の検出器応答、

N : 全ヒストリー数

MORSE-CGでは、全ヒストリー数 N を B バッチに分け、各バッチの平均値 Y_b (b はバッチ番号)を用いて、統計精度推定のための指標として $S_{Y_b} \sqrt{Y}$ を以下のように定義している。

$$S_{\gamma_b} \sqrt{Y} = \frac{1}{Y(B-1)} \sum_{b=1}^B (Y_b - \bar{Y})^2 \quad (2)$$

両者を比較して以下のことがわかった。

- ①MCNP の方式はバッチ数に無関係であるが、MORSE-CG の方式はバッチ数に依存する。
- ②MORSE-CG の方式では、1バッチごとのヒストリー数も十分大きい必要がある。
- ③MORSE-CG の FSD を用いる方式は、バッチ数の増大に伴う分散の低減（変動）の様子を調べることにによりバッチ数（およびヒストリー数）が十分であるかどうかを調べる指標として用いることができる。

3.2 UCGEN の設計

(1) 設計の概要

3.1 で実施した既存の汎用モンテカルロコードの調査・検討の結果を反映して、UCGEN のシステム設計を行った。UCGEN において開発、作成した主要な機能は以下のとおりである。

- ①幾何学的形状入力
 - ②線源入力
 - ③検出器 (Estimator)
 - ④分散低減
- (2) 幾何学的形状入力

米国オークリッジ国立研究所で開発された MARS (Multiple Array System) の Geometrical package の機能に山口¹⁰⁾により開発された拡張基本形状を付加して HOWFAR に組み込むこととした。UCGEN の幾何形状入力部は以下の機能を有する。

- 1) 複雑な 3 次元形状は、以下の 12 個の基本形状 (Body) と CG 形式の理論式を用いることで表現できる。
 - ①直方体 (RPP)
 - ②平行六面体 (BOX)
 - ③球 (SPH)
 - ④直正円柱 (RCC)
 - ⑤直楕円柱 (REC)
 - ⑥任意六面体 (ARB)
 - ⑦回転楕円体 (ELL)
 - ⑧くさび形 (WED)
 - ⑨直正円錐台 (TRC)
 - ⑩一般回転楕円体 (GEL)
 - ⑪斜円錐 (台) (QUA)
 - ⑫トーラス (TOR)
- 2) UNIVERSE と呼ぶ直方体を定義し、これを ARRAY 配列を用いた繰り返しを行うことによ

り、繰り返しの多い形状および複雑で大きな形状を比較的容易に表現できる (多重配列機能)。

- 3) 座標の平行移動機能がある。

(3) 線源入力

線源は以下の 5 種類が取り扱えるようにすることとし、線源入力機能を MAIN プログラム支配下のサブルーチン SOURCE として作成する。

1) 点線源

線源位置および粒子放出方向（等方線源も含む）が指定できる。

2) 面線源

4 種類の単純形状（球面、平板、円盤および円柱）で一様に分布する線源が指定できる。粒子放出方向（等方線源も含む）が指定でき、さらに、球面線源では中心に向かう線源、円筒線源では中心軸に向かう線源も指定できる。

3) 体積線源

3 種類の単純な形状（球、直方体、円筒）および CG 形式で定義された領域内の一様体積線源が指定でき、粒子放出方向（等方線源も含む）も指定できる。

4) ビーム状線源

FLUKA82 のビーム線源入力方式を採用しており、一様分布または正規分布をもつビーム状線源として入力できる。

5) コーン線源

一点からコーン状に極角方向の角度分布を持って発生する線源が指定できる。

(4) 検出器 (Estimator)

検出器として以下の 5 種類のプログラムを作成し、AUSGAB ルーチンに組み込むこととした。

- ①点検出器評価法 (Point Detector)
- ②面交差評価法 (Surface Crossing Detector)
- ③次期面交差評価法 (Next Event Surface Crossing Detector)
- ④飛程長評価法 (Track Length Detector)
- ⑤エネルギー沈着評価法 (Energy Deposition Detector)

各検出器の評価検出対象粒子および直接評価する物理量を表 2 に示す。Point Detector, Surface Crossing Detector, Next Event Surface Crossing Detector および Track Length Detector では、表 2 に示す基本的物理量を評価し、それに求めたい物理量の応答関数をかけて、エネルギーについて積分することにより必要な結果を得る。なお、EGS 4 には電子、または光子が原子と衝突することのエネルギー損失を評価する機能があり、この機能が Energy Deposition Detector である。

表2 各検出器の評価対象粒子および物理量

検出器	粒子	評価物理量
エネルギー沈着評価法	電子および陽子 (結合エネルギー)	エネルギー沈着
固交差評価法	光子 電子、陽電子 陽子	粒子個数 粒子線束 検出器応答
次期面交差評価法	光子	粒子個数 粒子線束 検出器応答
飛程評価法	光子 電子、陽電子 陽子	粒子個数 粒子線束 検出器応答
点検出器評価法	光子	粒子線束 検出器応答

(5) 分散低減

分散低減機能として、Source variable biasing、Leading particle biasingおよび制動放射スプリットングを組み込むこととした。

1) Source variable biasing

UCGEN では、線源のエネルギー分布、角度分布とともに離散的な値としてある区間での積分値を入力で与える。したがって、サンプリングも離散的に行われることから、Source variable biasing として線源の角度およびエネルギーの2種類のバイアス (インポートランス) を入力できるようにしている。

2) Leading particle biasing

Leading particle biasing は、電磁シャワーの過程で生じる2次粒子の追跡に関して取り捨て選択を行う分散低減法である。このアルゴリズムは EGS 4 マニュアル¹⁾に示されており、制動放射による光子生成または電子対生成について適用している。Leading particle biasing として、上記のアルゴリズムを光子輸送ルーチン PHOTO および電子輸送ルーチン ELECTR にマクロ指定により組み込んだ。

3) 制動放射スプリットング

電子の制動放射により生じる光子の解析において、電子のエネルギーが低い場合、制動放射断面積が小さいためほとんど光子を発生せず、十分な統計精度を得るために、多大なヒストリーを要することとなる。制動放射スプリットングはこの問題を解決するため EGS 4 マクロに付加された機能である。ただ、この方法は Leading particle biasing とともに使用することはできない。

(6) その他の主要な機能

1) 磁場中の荷電粒子の輸送

EGS 4 マニュアルに示されている磁場中の

荷電粒子の輸送のためのマクロ UCBEND を参考に HOWFAR サブルーチンを改良した。

2) 荷電粒子の輸送におけるステップ幅の最適化
薄い材質中での低エネルギー電子 (<20MeV) のエネルギー沈着の計算において、計算誤差の発生可能性の問題に対処するため、問題に応じて、1ステップあたりの電子エネルギー損失割合の上限値 (ESTEPE) を指定できるようにしている。

3) 統計誤差評価

統計誤差評価機能として、(1)式および(2)式からそれぞれ統計誤差を算出できるようにしている。

4) リスタート

バッチごとにリスタートファイルを出力することにより、任意のバッチから再計算が行えるようにしている。

5) 特性X線の生成および輸送

元素番号 1~92 までの元素について、k-edge 特性X線の生成と輸送の計算が行えるように、EDGSET ルーチンを一部改良して組み込んでいる。

6) 乱数

乱数には、RAN 6 および RANMAR 乱数の2種類の乱数が選択できるようになっている。RAN 6 は EGS 4 のデフォルトの組み込み乱数である¹⁾。RANMAR 乱数は最近のワークステーションの高性能化に伴う大規模計算に対応するため提唱された Fibonacci 乱数の1つである¹¹⁾。この乱数は周期が 2^{120} 程度と極めて長く、長時間の計算に向いている。

7) PRESTA のためのピクセル形状表現

PRESTA (Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm)¹²⁾ は、EGS 4 のために改良された電子輸送計算アルゴリズムであり、ステップ幅の上限値の設定、適切な PLC (Path Length Correction) の導入、ラテラル方向の変位の考慮等について改良がなされ、問題に応じて最適の ESTEPE を使用者が選択することなしに、特に電子の挙動解析が精度良く行うことが可能になる。一方、PRESTA を使用するには、電子 (陽電子) の位置から境界までの最短距離をユーザーコードから与える必要があるが、この処理は MARS 形状表現では難しい。このため、PRESTA の導入とともに、ピクセル形状表現機能の追加を行った。また、この機能の導入により、MARS 形状表現では難しかった体系内の線量分布の評価が容易に行え

ようになる。なお、複雑な3次元体系のピクセル形状入力データの作成を容易にするため、CG入力データをピクセルデータに変換するプログラムEGSPICを作成している。

8) PEGS 4 の改良

PEGS 4 は、EGS 4 で使用する各物資ごとのデータ(断面積、分岐比等)を計算するプログラムである¹⁾。UCGEN の開発の一環として、PEGS 4 の光子断面積データを従来の Storm & Israel のデータ¹³⁾ から Hubbel らの最新データ DLC-136 (PHOTX)¹⁴⁾ に変更した。また、ICRU37¹⁵⁾ の制動X線生成断面積の導入も行った。

4. γ線スカイシャイン計算への適用

4.1 スカイシャイン計算について

スカイシャインは施設から空中に放出された放射線が空気により地上に向かって散乱される現象である。核燃料施設の環境評価においては、スカイシャインによる線量評価は施設から透過される直接線の評価とともに、評価項目の1つとなっている。

スカイシャインによる線量評価は、通常遮蔽計算コードにより解析が行われるが、従来の解析では計算上の制約から十分な安全裕度が見込まれている。これに対して、EGS 4 は複雑な3次元体系において放射線と物質との相互作用を詳細にシミュレートできることから、スカイシャイン線量の詳細な評価への適用が期待できる。

ここでは、UCGEN を用いた EGS 4 のγ線スカイシャイン計算の適用として実施した、カンザス州立大学スカイシャイン実験との比較計算¹⁶⁾ および北海道大学 45MeV 電子線加速器施設 (45 MeV LINAC) 周辺の線量測定との比較計算¹⁷⁾ について報告する。

4.2 カンザス州立大学スカイシャイン実験との比較計算

(1) 実験の概要

カンザス州立大学のγ線スカイシャイン実験¹⁸⁾ は、上方向への放出角が150.5°にコリメートされた⁶⁰Co 線源 (5000、250および10Ci) を用い、上面遮蔽体が無い場合とある場合について、それぞれ線源点から700mの地点までのスカイシャインγ線線量率分布とエネルギースペクトル分布を測定したものである。線量率の測定には10インチ径電離箱が、スペクトル測定にはコリメータ付きのNaI 検出器が用いられている。上面遮蔽のある実験では、遮蔽体として21cmおよび42.8cmのコンクリートが用いられている。

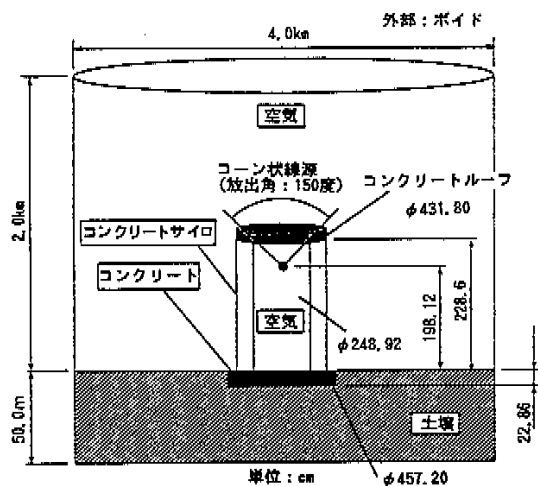


図2 カンザス州立大学スカイシャイン実験計算体系

(2) 計算方法

計算の形状モデルと各領域の材質組成については、MCNP のベンチマーク計算¹⁹⁾ として米国ロスアラモス研究所 (LANL) が行ったこの実験の解析条件と同一のものをを用いた。線源については、⁶⁰Co 線源をコーン状線源で近似した。この計算モデルを図2に示す。検出器には Point Detector、Surface Crossing Detector、および Next Event Surface Crossing Detector を用いて、それぞれγ線エネルギースペクトルを算出した。このスペクトルに ICRP Pub.51²⁰⁾ に記載されているフルエンスから空気吸収線量への換算係数を応答関数として、照射線量率を求めた。

(3) 計算結果

計算結果として、ヒストリー数を500,000として求めた上面遮蔽体なしおよび遮蔽体21cmの場合の照射線量率をそれぞれ図3および図4に示す。この図からわかるように、検出器間の結果は

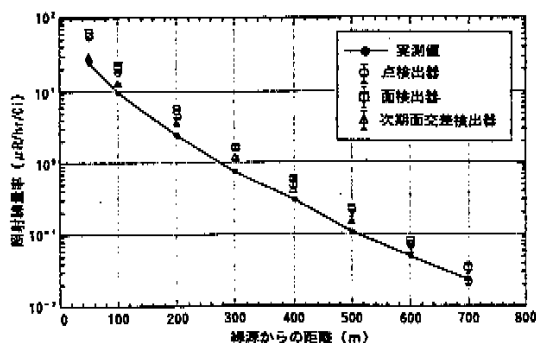


図3 γ線スカイシャイン計算結果(遮蔽体なし)

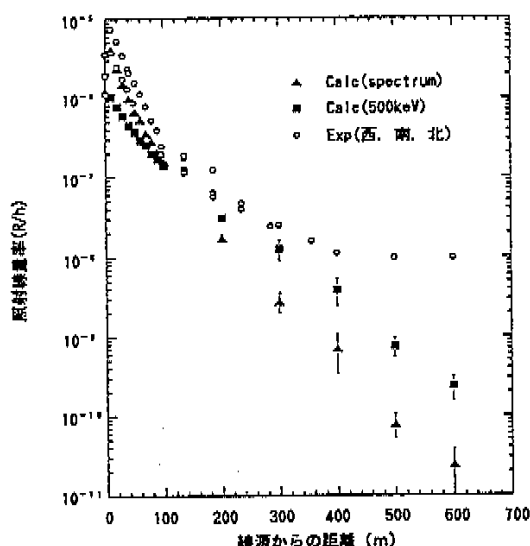


図7 X線スカイシャイン計算結果（測定値と計算値の比較）

これより、漏洩X線は、入射電子のエネルギーが45MeVであるのに対して、およそ50keV~10MeVの範囲に分布し、100keV付近にピークが表れるという結果が得られた。

スカイシャイン計算の結果を、測定値とともに図7に示す。線源から200m以内では計算値は測定値と比較的一致するが、遠方になると計算値は測定値に比べて低い値となる結果が得られた。これから、遠方のスカイシャインは、排気筒出口からの漏洩X線だけでなく、他の部分からの漏洩X線の寄与も考慮する必要があることが示された。

5. おわりに

UCGEN は当初メインフレーム用に開発したが、最近の計算機の処理能力の向上をふまえ、UNIX ワークステーションおよびパーソナルコンピュータ上でも使用が可能なようにプログラムの改良を行っている。

UCGEN を用いることにより、EGS 4 が複雑な体系における遮蔽計算や線量評価に容易に適用できるようになった。また、放射線検出器の感度

解析、 β 線および制動X線の線量評価への適用も期待できる等、電子、 γ 線の挙動について詳細かつ精密な取り扱いが可能なことから、他の遮蔽計算コードの検証にも適用できるものと考えている。

UCGEN の開発に際して多くの助言をいただいた高エネルギー物理学研究所の平山英夫氏ならびに、プログラムのチェックに協力していただいた多くの方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) W. R. Nelson, H. Hirayama, et al., "The EGS4 Code System", SLAC-Report 265 (1985).
- 2) 宮瀬琢哉, 谷井敏, 他: "EGS 4 コード汎用ユーザズ版の開発", KEK Proceedings 91-14, P48-73 (1991).
- 3) J. T. West, M. B. Emmett: "MARS: A Multiple Array System Using Combinatorial Geometry", NUREG/CR-02003 Sec. M9 (1984).
- 4) J. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A", LA-7396-M, Rev.2 (1986).
- 5) L. M. Petrie, N. F. Landers, "KENO-Vs An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping", NUREG/CR-0200 Vol.2 Sec. F11 (1984).
- 6) R. J. Brissenden, "MONK Code User Manual", EW694 Chap.2 (1985).
- 7) M. B. Emmett, "The MORSE Monte Carlo radiation transport code system", ORNL-4972 (1975).
- 8) P. Cloth, D. Filges, et al., "The KFA-Version of the High-Energy Transport Code HETC and the Generalized Evaluation Code SIMPL", JK-Spez-196 (1983).
- 9) P. A. Azarino, J. Ranft, et al., "A Long WRITEUP of the FLUKA 82 PROGRAM", TIS-RP/106-Rev. (CERN) (1984).
- 10) T. Yamaguchi, "DEEP Code to Calculate Dose Equivalents in Human Phantom for External Exposure by Monte Carlo Method", JAERI-M 90-235 (1990).
- 11) G. Marsaglia, A. Zaman, et al., "Toward A Universal Random Number Generator", FSU-SCRI-87-50 (1987).
- 12) A. F. Bielajew, D. W. O. Roger, "The Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm for Electron Monte Carlo Transport", PIRS-0042 (1991).
- 13) RSIC Data Package DLC-15/STORM-ISRAEL
- 14) RSIC Data Package DLC-136/PHOTX
- 15) ICRU Report 37, "Stopping Powers for Electrons and Positrons" (1984).
- 16) I. Nojiri, Y. Fukasaku, et al., "Application of a General Purpose Users Version of the EGS4 Code System to a Photon Skyshine Benchmarking Calculation", KEK Proceedings 94-8, P59-68 (1994).
- 17) S. Sawamura, I. Nojiri, et al., "Calculation of Dose for Skyshine Radiation from a 45MeV Electron LINAC", KEK Proceedings 96-10, P113-121 (1996).
- 18) R. R. Nelson, et al., "A Benchmark Gamma-Ray Skyshine Experiment", Nucl. Sci. Eng., 79, P404-416 (1981).
- 19) R. H. Olsher, et al., "Benchmarking the MCNP Monte Carlo Code with a Photon Skyshine Experiment", Nucl. Sci. Eng., 114, P219-227 (1993).
- 20) ICRP Pub. 51 "Data for Use in Protection against External Radiation" (1987).