

放射性汚染検出のためのマイクロ・サーベイメータの 計数効率と検出限界

Counting Efficiency and Detectable Limit of Micro Survey-Meter for Detecting Radioactive Contamination

入江 隆 (Takashi Irie)* 松岡 由了 (Yoshinori Matsuoka)[†]
西沢 博志 (Hiroshi Nishizawa)[‡] 山本 幸佳 (Takayoshi Yamamoto)[§]
井上 俊彦 (Toshihiko Inoue)[§]

要約 シンチレーションファイバで構成された検出部を持つ、マイクロ・サーベイメータで狭い隙間や小さい穴の⁶⁰Coによる表面汚染が検出できるかどうかを検討した。モンテカルロシミュレーションコードのEGS4を用いて、マイクロ・サーベイメータのBG計数率と計数効率を求め、これから検出限界を計算して、検出限界表面汚染密度が管理区域からの物品持ち出し基準を満足し、汚染検査に使用可能な条件を求めた。

キーワード EGS4, モンテカルロシミュレーション, マイクロ, サーベイメータ, 計数効率, 検出限界, 汚染検査, プラスチックシンチレーションファイバ, 検出器, 表面汚染密度

Abstract A micro survey-meter having a detector made of scintillation fiber is investigated for the purpose of detecting ⁶⁰Co-contaminated concave surfaces. The background count rate and the counting efficiency of the micro survey-meter was determined by computer simulation using the Monte Carlo code EGS4. The detectable limit was derived from the background count rate and the counting efficiency. Also evaluated, the detector size for the micro survey-meter which can be used for the contamination survey based on the following condition: the detectable limit of the surface contamination density must fall under the acceptable rate of surface density of contamination for an object to be taken out of the radiation controlled area.

Keywords EGS4, Monte Carlo simulation, micro survey-meter, counting efficiency, detectable limit, contamination survey, plastic scintillation fiber, detector, surface contamination density

1. はじめに

原子力発電所の管理区域から、物品を持ち出すときに、その表面のベータ汚染は、GM式の汚染サーベイメータで確認しているが、これは平坦面または凸面にしか適用できない。狭い隙間や小さい穴の汚染は、通常スミヤ法で検査する。しかし、この方法は時間がかかる。

大阪大学は三菱電機と共同で医療用のマイクロ線量計を開発した。その検出部はプラスチックシンチ

レーションファイバで出来ている。

本資料は、大阪大学と三菱電機が開発したマイクロ線量計と同型のマイクロサーベイメータで、狭い隙間や小さい穴の⁶⁰Coによる表面汚染の検査が出来るかどうか検討したものである。モンテカルロシミュレーションコードの「EGS4」を使って、マイクロサーベイメータの検出部の大きさを変えて計数効率と検出限界を求めた。バックグランド計数率も、EGS4を使って求めた。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

[†] (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
現 関西電力(株)本店 人材活性化室

[‡] 三菱電機(株)産業システム研究所

[§] 大阪大学教授

2. モンテカルロシミュレーション

マイクロサーベイメータの検出部の、 ^{60}Co から放出されるベータ（ガンマ）線に対する計数効率、モンテカルロコードのEGS4⁽¹⁾を使ってコンピュータシミュレーションで求めた。計数効率は、線源から放出された電子と光子がマイクロサーベイメータの検出部で検出される確率で定義される。シミュレーションのモデルは図1に示す。検査対象物の穴の内面は ^{60}Co によって一様に汚染されている場合と、点状線源が付着している場合について計算した。

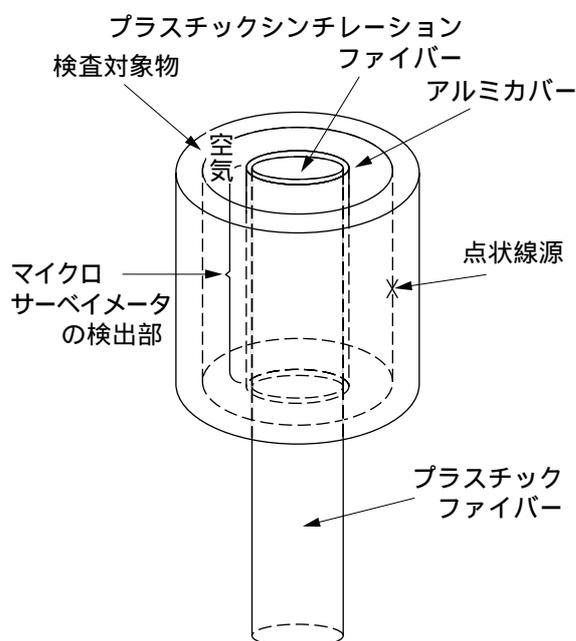


図1 マイクロサーベイメータの検出部のシミュレーションモデル

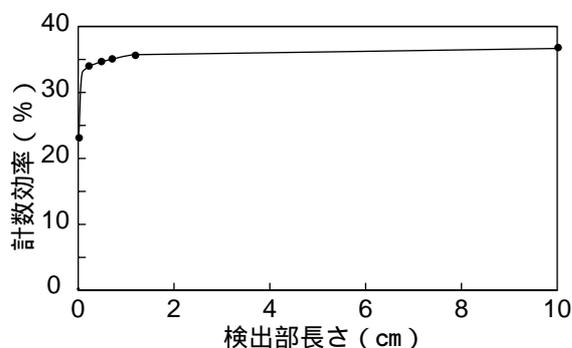


図2 検出部長さに伴う計数効率の変化
検出部直径：5 mm

点状線源の付着場所は円筒形の検査対象物の軸方向長さの中央とした。なお、EGS4使用上の注意事項を付録に添付した。

プラスチックシンチレータは、水素や炭素のように原子番号の小さな元素で出来ているため、光電効果の断面積は非常に小さいので、無視できる。その結果、パルス波高分布では光電ピークは現れずに、コンプトン散乱による連続スペクトルのみが見られる⁽²⁾。

マイクロサーベイメータの検出部の軸方向長さを変えた場合に、EGS4コードを使ったモンテカルロシミュレーションで点状線源による計数効率の変化を求めたのが図2である。プラスチック中の ^{60}Co のベータ線の飛程は1 mm以下なので、図2に示すように検出器の長さを2 mm以上に長くしても効率は改善されない。そのため、検出器の長さは汚染された隙間や穴の深さに等しく決めるべきである。ここでは10 cmと仮定した。

EGS4を用いて ^{60}Co のガンマ線の平行ビームで10 $\mu\text{R/h}$ の場を作り、そこへマイクロサーベイメータの検出部を置いた時の計数率を求め、これをバックグラウンド計数率とした。この方法で、マイクロサーベイメータの検出部直径を変えた場合の、バックグラウンド計数率の変化を求めたものを図3に示す。

検出部に入射したガンマ線の数に対する検出されたガンマ線の数割合（すなわち固有効率）は、(1)式の積分値に等しい⁽²⁾。バックグラウンド計数率を求めたシミュレーションモデルの検出部形状と

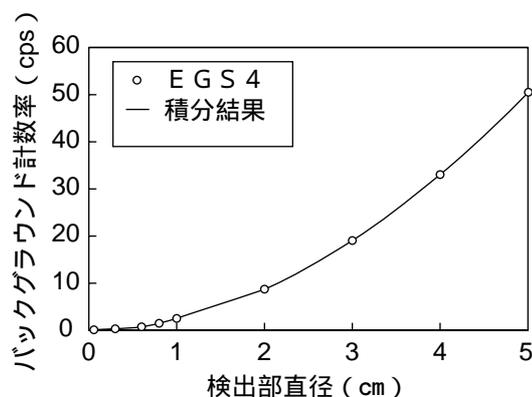


図3 検出部直径に伴うバックグラウンド変化

アイソトープ便覧の減衰係数の値⁽⁵⁾を用い、(1)式の積分を実行して求めた固有効率に、検出部に入射したガンマ線の数に乗じてバックグラウンド計数率を求め、図3に記入した。このカーブは、EGS4によるシミュレーション結果とよく一致している。

$$\int_x \{1 - \exp(-\mu x)\} dx \quad (1)$$

x : 検出部に入射したガンマ線の行路長
 μ : 線減衰係数 (1/cm)

現在、原子力発電所における汚染検査には通常直径5 cmのGMサーベイメータを使っている。そこで、検討するマイクロサーベイメータの検出部の直径は5 cm以下とした。検出部の直径を変えて下表の4ケースについてシミュレーションを行い、マイクロサーベイメータの検出部の計数効率と検出限界を求めた。⁶⁰Coの崩壊数は10⁶回とし、計算時間はワークステーションで約3時間かかった。通常、物体表面の汚染部の面積が放射能測定器の検出器の有効窓面積より小さいときは、有効窓面積当たりにある放射エネルギーと見なし、これを有効窓面積で除して単位面積当たりの計数値とする⁽⁴⁾。平面の検出器ならばこれでよいと考えられるが、マイクロサーベイメータの検出部は円筒状であるため、点状線源からの放射線が検出されるのは検出部の表面積の約1/2

検出部・対象物間距離	変化	一定
面状線源	ケース1	ケース2
点状線源	ケース3	ケース4

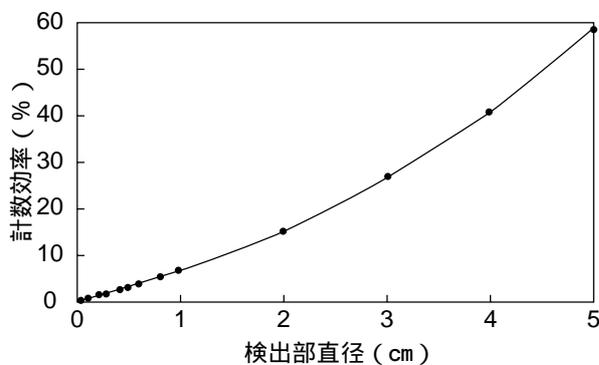


図4 ケース1の計数効率
 検査対象物内径：6 cm

と考えられる。そこで点状線源のケース3、4において検出限界表面汚染密度を求めるときに、検出限界放射エネルギーを、検出部の表面積の1/2で除して換算した。

3. マイクロサーベイメータの検出部の計数効率と検出限界

汚染が検出されるためには、汚染による計数率がバックグラウンド計数率より大きくなる必要がある。その差は、計数統計の3σと等しいか、それより大きい必要がある。この考え方に基づいて南他が導出した検出限界の公式⁽³⁾に、モンテカルロシミュレーションの結果を代入して、検出できる汚染の最低限界を求めた。ケース1から4について検出部直径を変えてシミュレーションによって求めた計数効率を、それぞれ図4、6、8、10に示す。また、これらの計数効率に対応する検出限界は図5、7、9、11に示す。

全てのケースについて検出限界のグラフは同じ形になり、検出部の直径が0.5 ~ 3 mmにおいては、検出限界の値は直径の増加とともに急激に下がる(すなわち低い密度まで検出できる)。さらに、直径が3 mmを超えると、検出限界の変化は緩やかになる。従って、検出部の直径は出来るだけ大きく選ぶことが望ましい。ただし、ケース1及び2においては、検出部直径が0.5 mm以上で検出限界表面汚染密度は、発電所からの持ち出し基準の0.4 Bq/cm²よりも低い(従って十分である)。ケース3では、検出部直径が1 cm以上、ケース4では4 mm以上で検出限界は0.4 Bq/cm²より低くなる。

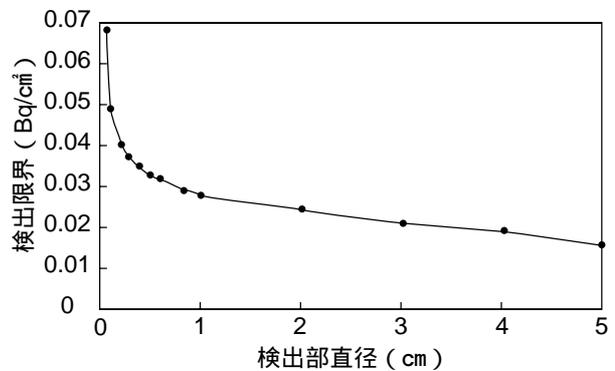


図5 ケース1の検出限界
 検査対象物内径：6 cm

発電所における汚染検査は，サーベイメータの校正の際と同じ幾何学的配置を実現するために，検出部と検査対象との距離を一定に保って測定を行っている．これはケース2あるいは4に該当する．ケー

ス4の点状線源の強さを検出部の表面積の1/2で除して単位面積当たりの表面汚染密度に換算して，検出限界汚染密度をケース2の面線源の場合におけるそれと比較すると，前者の方が値が大きいという意

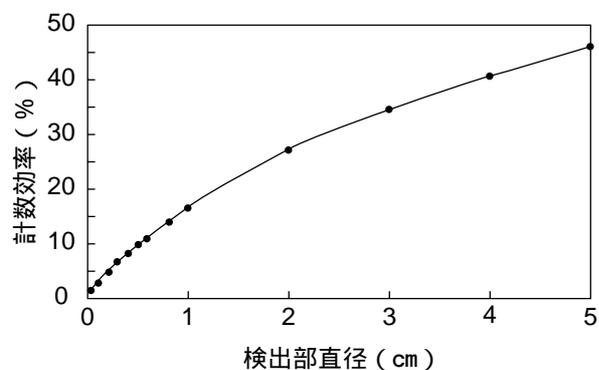


図6 ケース2の計数効率
検出部・検査対象物間距離：1 cm

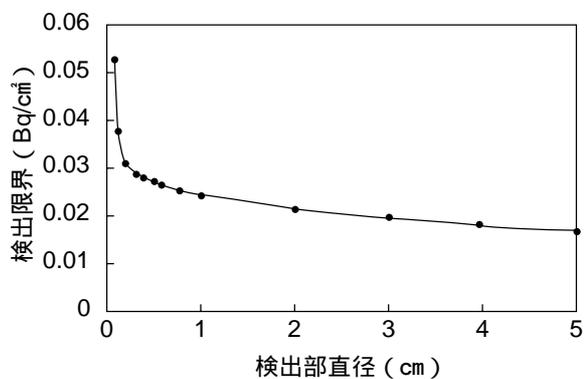


図7 ケース2の検出限界
検出部・検査対象物間距離：1 cm

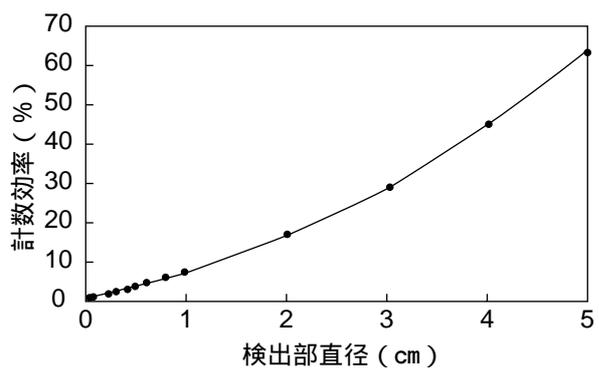


図8 ケース3の計数効率
検査対象物内径：6 cm

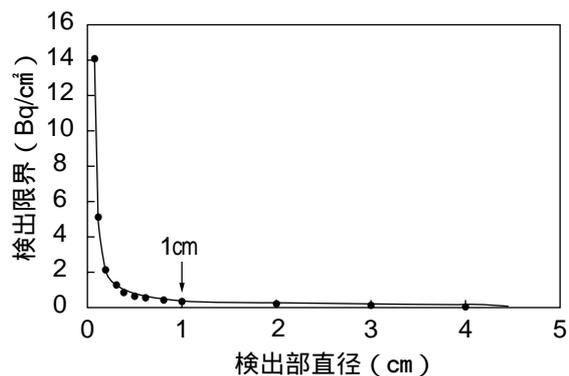


図9 ケース3の検出限界
検査対象物内径：6 cm

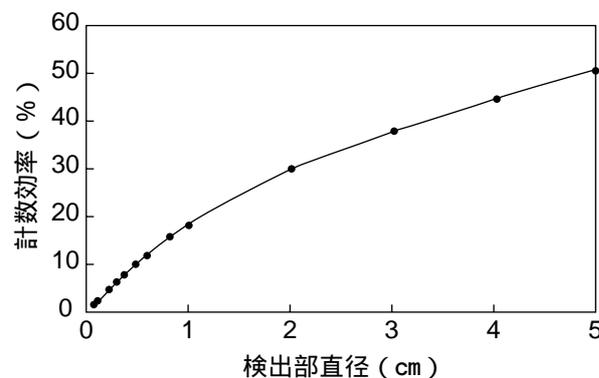


図10 ケース4の計数効率
検出部・検査対象物間距離：1 cm

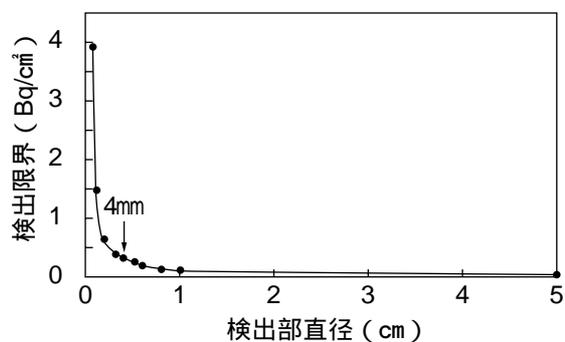


図11 ケース4の検出限界
検出部・検査対象物間距離：1 cm

味で保守的な結果を与える。

ケース 4 においては、

- ・ 検出部直径 4 mm 以上
- ・ 検出部表面と検査対象物の距離 1 cm
- ・ 計測時間 5 分

で 0.4 Bq/cm^2 が検出可能である。

細い検出器を、内径の大きな穴の検査に適用するためには、穴の表面に沿って検出部を移動し、多くの位置で計測を繰り返す必要があるが、それは時間がかかる。また、現場では検査者の疲労、作業者の待ち時間を考えて、汚染検査は短時間で終わるのが望ましい。これらのことと、検出限界のグラフの形からしても、検出部は出来るだけ大きくして検査回数を少なくすることによって検査時間を短くするのがよい。

謝辞

最後に、EGS4 の使用方法について、高エネルギー加速器研究機構の平山教授には、電子メールでの問い合わせに丁寧に答えていただき、おかげでこの論文が書けたことに感謝します。

文献

- (1) W.R.Nelson, H.Hirayama and D.W.O.Rogers, The EGS4 Code System, SLAC - 265, 1985
- (2) G.F.ノル, 放射線計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1982
- (3) 南 賢太郎・佐藤 信之, 放射線管理における計数装置の検出感度について, JAERI-memo - 2703, 1967
- (4) (財)原子力安全技術センター, 放射性表面汚染の測定・評価マニュアル, 1988
- (5) (社)日本アイソトープ協会, 改訂 3 版 アイソトープ便覧, 丸善(株), 1984

付録 EGS4 使用上の注意事項

EGS4 の使用に当たっては、MORTRAN 言語によってユーザーコードを作成しなければならない。ユーザーコードのメインプログラムは、使用する物質データの定義と各領域への割り当て、PEGS4 で計算しておいた物質データの読み込み、計算形状の定義、入射粒子に関する初期データの設定、得られた結果の編集と出力等を行う。また、ユーザーコードの SUBROUTINE HOWFAR ではジオメトリを決定し、SUBROUTINE AUSGAB では求めようとする結果を蓄積する。

ユーザーコードを最初から自分で作成することは容易ではないから、既に作成し使用されたコレクションから自分の目的に近いものを選んで作り替えるのが実際的である。

以下にユーザーコードの作成に役立つと思われる注意事項を収録しておく。

1. EGS4 コード使用時のユーザーコードの作り方は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で各種マニュアルを準備しているのだから、それを読めば大概のことは分かる。それでも分からない場合は、KEK の平山教授に電子メールで問い合わせれば、親切に答えていただける。

2. 実行命令文

PEGS4 の例：`pegs 4 run ch.inp ch.dat`

: `ch.inp` はここではプラスチックの入力データが入っているファイルである。
 : `ch.dat` は PEGS4 で作ったプラスチックの物質データが書き込まれるファイルである。

EGS4 の例：`egs 4 run micro.mor micro.dat`

: `micro.mor` はここでは MORTRAN 言語で記述したマイクロサーベイメータのユーザーコードが入っているファイルである。
 : `micro.dat` PEGS4 で作った必要な物質データを、ユーザーコードで決めた順番

で書き込んだデータファイルである。

計算結果は、`mortjob.output6` というファイルに書き込まれる。

3. 2. 項 の物質データファイルの作り方

ユーザーコードで決めた順番に一つのファイルに書き込んで作る。PEGS4 で作った `ch.dat`, `al.dat`, `air.dat`, `fe.dat` の 4 つの物質データを `micro.dat` に順に書き込む場合は、UNIX の場合

```
cat ch.dat > micro.dat
cat al.dat >> micro.dat
cat air.dat >> micro.dat
cat fe.dat >> micro.dat
とする。
```

4. ユーザーコードのパラメータを変更したとき

粒子数 1000 個で 10 秒くらいの計算を試しに実行してみて、正常に計算することを確認した後、大量粒子数の計算をする。

5. Cut off energy

最初のコード導入時、他の場所ではうまく動いているのに、自分のコンピュータで動かない場合は、cut off energy が適正でない場合があるので、これを高くしてやってみれば、うまく行く場合がある。

6. PCOORD, PNORM の書き方

`PCOORD (,) = 1.0 ;`
 で $\left. \begin{array}{l} 1 : x \\ 2 : y \\ 3 : z \end{array} \right\}$ 軸を表す。

で検出器を構成する平面の番号を表す。

すなわち `PCOORD (1,J) = 1.0 ;` で J 番目の平面と x 軸との交点が $x = 1.0$ であることを表す。

`PNORM (,) = 1.0 ;`
 で $\left. \begin{array}{l} 1 : x \\ 2 : y \\ 3 : z \end{array} \right\}$ 軸を表す。

で検出器を構成する平面の 番号を表す。

すなわち、`PNORM (3,J) = 0.0 ;` で J 番目の平面の法線ベクトル (原点を通る、正の値) の z 成分

は0であることを表す。

7. ガンマ線が検出部に入った後、初めて検出部の構成元素と衝突するまでの距離の求め方

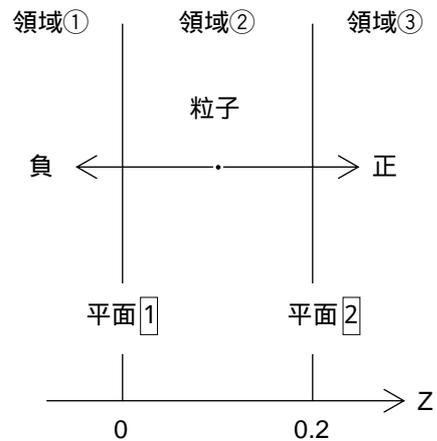
通常のEGS4での計算では使わないが、今回ガンマ線の物質内での吸収係数を、EGS4を使って求めるときにこれを使ったので、ここに示しておく。

SUBROUTINE AUSGABは、ガンマ線が検出部を構成する面を横切って検出部の領域に入ったときにCALLされ、その時のTVSTEPが、次の反応点までの実際の移動距離を表すので、AUSGABの中でTVSTEPを取り出してその値をユーザーコードに返してやり、ユーザーコードの中で必要な処理を行う。

8. \$PLAN2P マクロの書き方

SUBROUTINE HOWFARで、平行平面に挟まれた空間に粒子がある場合には、2つの平面について、実際に横切るかどうかを判定し、横切るときにその平面までの距離を計算するマクロを使うことができる。

```
$PLAN2P(NPL1, NRG1, 1, NPL2, NRG2, -1);
```



- NPL1, NPL2 は、平面の番号を表す。 $\boxed{2}, \boxed{1}$
- NRG1, NRG2 は、粒子の行き先の領域番号を表す。 ,
- 1, -1 は、領域 ② にある粒子の移動する方向を表し、正の方向の移動を考えるとときは 1, 負の方向の移動を考えるとときは -1 とする。

上の図のマクロは次のように書ける。

```
$PLAN2P(2, 3, 1, 1, 1, -1);
```