



## Geometric calibration CsI (TI) scintillation program for low level radioactivity measurement

### CsI (TI)シンチレータによる低レベル放射能測定のための 計数効率キャリブレーション方法

遠藤大二<sup>1)\*</sup>、上田光太郎<sup>1)</sup>、高橋圭司<sup>2)</sup>、五十嵐寛高<sup>1)</sup>、林正信<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 酪農学園大学 獣医学群 獣医学類 放射線生物学ユニット

<sup>1)</sup> Laboratory of Radiation Biology, School of Veterinary Medicine, Rakuno Gakuen University. Bunkyo-dai, Midori-machi, 582-1, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501 Japan

<sup>2)</sup> Laboratory of Quantum Beam Science and Medical Engineering, Research Group of Applied Quantum Beam Engineering, Division of Quantum Science and Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University. Kita13-jo, Nishi8-chome, Sapporo 060-8628 Japan

<sup>3)</sup> 酪農学園大学 農食環境学群 循環農学類 農業施設学教室

<sup>3)</sup> Laboratory of Agricultural Facilities, Department of Sustainable Agriculture, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University. Bunkyo-dai, Midori-machi, 582-1, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501 Japan

#### 要 旨

CsI (TI) シンチレータは、高いエネルギー変換効率、長い発光時間、および比較的低コストという特長から、生物材料の放射能測定に利点を有することが知られている。しかし、販売されている CsI 機器では、一般的に計数の信頼性が低いと判断されているため、低レベルの放射能測定には用いられていない。CsI (TI) シンチレータで測定精度を得るためには、3次元計測効率、試料自体による遮蔽の影響および機器による発光計数効率を計算する必要がある。本研究では、CsI (TI) シンチレーションベクレルモニタの一つである TB800 の幾何補正コンピュータプログラムを作成するとともに、IAEA 標準物質を用いて機器による発光計数効率を推定した。プログラムにより予測された放射能は、ゲルマニウム半導体ガンマ線波高分析器により測定された放射能の 1.0~1.3 倍の値を示した。これらの結果から、低レベルの放射能測定における、幾何学補正プログラムと IAEA 標準による補正の有用性が示唆された。

## 緒 論

CsI (TI)シンチレータは、無機シンチレータの中においては、高いエネルギー変換効率、長い発光時間、および比較的 low コストという特長から、放射線科医療画像を含むアプリケーション、すなわち、単純 X 線撮影、ガンマ線分光法、術中外科用プローブおよび SPECT 核医学に広く用いられている[3,16]。これらの特性を生かす改善として、CsI に混合する金属等を追加するなどの改善も試行されている[11]。

シンチレータの低価格と高効率という特徴から、放射能汚染された食品サンプルのサーベイランス用として、国内外で、CsI(TI)シンチレータを用いた測定器が発売されている(<http://www.polimaster.jp/products>, <http://www.techno-ap.com/seihin.html>, [http://www.clearpulse.co.jp/catalogue/jpn/A2700\\_a.pdf](http://www.clearpulse.co.jp/catalogue/jpn/A2700_a.pdf) 等)。また、CsI(TI)シンチレータ結晶単体としても発売されているため、低価格の測定器製作方法も公開されている([http://www.i-berry.ne.jp/~nakamura/pdf/MCA\\_seisaku.pdf](http://www.i-berry.ne.jp/~nakamura/pdf/MCA_seisaku.pdf))。CsI(TI)シンチレータについては、発光強度とエネルギーの相関の精度が低いため、 $\gamma$ 線等のピークエネルギーの分別カウントが難しく、多数の $\gamma$ 線のエネルギーが混在する放射性同位元素混在環境での各核種の放射能の測定には不向きとされる[22]。また、湿度や測定温度などの影響を受けやすいことから[8,24]、長時間の安定測定は難しいことが示唆される[9]。一方、感度、エネルギー分解能、温度・湿度の影響を勘案すると、対象となる放射性同位元素が限られ、湿度や温度が安定している時間範囲での測定であれば、低コストでの放射能の推定が可能であるともいえるため、限定された信頼性の下では参照することが可能とされる [4,10]。

栃木県・福島県等の福島第一原子力発電所周辺地域では、2017 年時点でも農地および林間地等の土壌には事故時に拡散された放射性同位元素が残存しており、農作物および牧草については、出荷前の測定が義務付けられている。2013 以降においては、土壌中の核種が Cs-134 および Cs-137 に限定された(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/dojo-monitoring.html>)、収穫された農作物や牧草の多くの放射能は低レベルとなっている[5]。その結果、限定された核種についての低レベルの放射能の測定が広く求められ、正確な放射能測定

に用いる Ge 半導体測定器は高価で台数が限られるため、精度がある程度低くても実用的な測定方法として NaI(Tl)シンチレータでの測定が提示されている[9,10]。CsI(TI)シンチレータも、NaI(TI)シンチレータと同様に、限定された核種の低レベルの放射能測定に利用可能であることが示唆されるが、農作物または牧草を測定するためのマリネリ容器や測定場所の温度・湿度等の測定条件による変動が避けられないため、実用にあたっては、キャリブレーションが必要となる[13]。CsI(TI)シンチレーション測定器について、材質および遮蔽版などの材質および立体構造が明示されている場合、EGS 等のコードによって、マリネリ容器内の全ての位置から発生する $\gamma$ 線について補正が可能であるが、一部の材質および形状は製造会社から明示されない場合があることと、計算コードの修正が形状の異なる計測器ごとに必要となることから、現場での広い利用を前提とすると標準試料を用いた補正が適切と判断される。

International Atomic Energy Agency (IAEA)は、魚粉末や水などの各種物質について、特定の核種について低レベル含む材料(IAEA 標準物質)を提供しており[6,8]、放射能測定のためのキャリブレーションのために用いられる[13]。牧草についても 2008 年から Cs-137 の放射能が測定された標準試料が販売されている[18](IAEA-372,西進商事)。

本研究では、比較的 low コストで提供されている CsI(TI)シンチレーション測定器である TC800B ベクレルモニターを事例として、キャリブレーション方法を検討した。第一に試料格納容器中の各位置からシンチレータへの入射効率と、経路における遮蔽を算出することにより、3 次元計測効率と試料自体による遮蔽の影響を推定した。続けて、IAEA 標準試料を均等散布した円盤状の紙に関する計数から、機器による発光計数効率を推定した。最後に、これらの推定値を用いた牧草の放射能を暫定許容値(100 Bq/kg)以下の低レベルでの計数を Ge 測定器による同一試料の計数値と比較することにより、本研究で提示するキャリブレーション方法の精度を検討した。

## 材料および方法

### (1) 放射線測定器

CsI シンチレータを用いた Cs-137  $\gamma$  線計測器と

して、株式会社テクノエーピー社(茨城県ひたちなか市)の TC800B を使用した。TC800B のシンチレータは 8cm×4cm×1.5cm のサイズの CsI(Tl)結晶が測定容器底面の下に装備されている(Fig.1)。

測定対象の放射性同位元素は、公表されている福島県の土壤中放射性同位元素を参照して決定した。福島県の土壤についての 2013 年 10 月の測定結果で Cs-137 は Cs-134 の 2.3 倍であった(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/dojo-monitoring.html>)。この数値と二核種の半減期から 2019 年 2 月時点での放射能を予測した場合、Cs-137 は Cs-134 の 13 倍程度になる。土壤中の Cs-137 と Cs-134 の移動が類似すること[20]から、2019 年以降の測定においては Cs-137 を測定対象とすることにより、代表値が得られることが示唆される。そのため、本研究での計測は Cs-134 および Cs-137 で実施し、予測対象を Cs-137 に限定した。

TC800B による Cs-137 の放射能推定のためには、測定対象を  $\gamma$  線に限定し、検出範囲のエネルギーを Cs-137  $\gamma$  線によって計測されたシンチレータの発光あたりのエネルギー分布において、発光の 80%以上を計測できるエネルギー範囲とした。エネルギー範囲の設定には IAEA-372 標準試料を使用した。放射線エネルギーCs-137 の  $\gamma$  線放出ピークは約 662keV であるが、TC800B の CsI(Tl)での検出では、エネルギー分解能が低いため、マルチチャンネルアナライザーではエネルギー周辺のなだらかなピークとして計測される。本研究では、Cs-137 測定時のピークのカウントが 680 keV であることが示された。Cs-137 から放出される  $\gamma$  線が 662 keV であることを勘案すると、TC800B でのエネルギー推定が実際のエネルギーよりも 18 keV 程度過大になることが示唆された。また、Cs-137 標準試料によるカウントの分布が 650 keV および 710 keV においてピーク時の 60%のカウントになったことから、エネルギーの分布の標準偏差が 30 keV となることが示唆された。これらを踏まえて、20%程度のカウントとなる範囲を測定エネルギー範囲として 620 keV から 740 keV に設定した(Fig.2)。続けて、TC800B の持つエネルギー検出特性を Cs-134 からの  $\gamma$  線に適用し、563、569、605、796 keV それぞれの放出割合が崩壊ごとに 8.4、15.4、97.6 および 85.5%であることに加

え、TC800B ではエネルギーが 18 keV 過大となり標準偏差が 30 keV であることを勘案すると、Cs-134 および Cs-137 が混在する試料での Cs-137  $\gamma$  線の寄与率は 52.04%であることが推定された(付録表 1)。

高精度測定が可能な測定器としては、GEMX10P 高純度ゲルマニウム測定器(ORTEC, テネシー州オークリッジ、米国、北海道大学工学研究院量子理工学部門応用量子ビーム工学分野)を用いた。当該測定器はあらかじめ IAEA-372 標準物質でキャリブレーションを行い、標準測定容器に試料牧草を充填した状態で測定を行った。

## (2) IAEA-372 標準物質円盤

9,703 Bq/kg の Cs-137 の IAEA-372 標準試料は西進商事(兵庫県神戸市)より入手した。標準物質の 3.5g(33.96 Bq)を直径 4cm の紙の円盤に均等に散布し、測定容器内の底面から 0 mm~63 mm の位置に配置し、TC800B で 90 分間測定した。底面からの位置を設定するためには、密度 1 g/cm<sup>3</sup> の紙を積み重ね、その上に標準試料を置いた。

## (3) 牧草

キャリブレーション対象とする牧草は、福島県の農家から提供された。いずれの牧草も法令上給餌可能な放射能濃度であった。

## (4) 計数率および計数効率の算出

試料の放射能は、式 1 に基づき算出された。

$$\text{放射能} = \frac{R}{\epsilon_d \epsilon_g} \quad \text{式 1}$$

ただし、R は測定器で計数された時間当たりの放射線(カウント/秒)、 $\epsilon_g$  は試料と計測器の位置関係から決定される計数効率、 $\epsilon_d$  は TC800B のシンチレータの発光と機器内部での発光の検出効率から決定される機器の検出効率を示す。

$\epsilon_g$  は各地点における円盤での測定効率は立体構造および紙による吸収から予測された。予測のためのプログラムは Ruby(Ver2.3)で作成された。紙および牧草の減弱係数は、NIST(<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>)で示されている値を用いた。

TC800B 内の紙上の標準試料からの  $\gamma$  線測定の幾何学的効率を算出するため、プログラム言語



Ruby を用い、立体構造シミュレーションプログラムを作出した(付録)。まず、測定容器内での各地点からシンチレータへの仰角を算出した。すなわち、測定容器内の任意の点について仰角算出基準直線を設定し(Fig.3B)、仰角算出基準直線でのシンチレータへの仰角  $\theta$  を算出した(Fig.3A)。仰角を 360 度で除算した値は、全方位中のシンチレータに入射する割合を示す。続いて仰角算出基準直線を 0-180 度回転させ(図 2B  $\phi$ )、各仰角算出基準直線での仰角およびシンチレータ入射比率を算出した。各地点における幾何学的計数効率、360 度中の仰角の割合として算出された。続いて各仰角算出基準直線、各地点でのシンチレータ入射割合の平均値を算出することにより特定の地点での幾何学的効率を予測した。プログラムは、標準試料を塗布した円盤の測定位置(底面から 0-63 mm)について、直径 4 cm の円盤上の点をランダムに 1,000 点設定し実行した後、平均値を算出した。

#### (5) IAEA 標準試料および牧草からの $\gamma$ 線測定

TC800B CsI(Tl)検出器から標準試料を散布した円盤を測定容器の底面から 0-63 mm に設置し、距離ごとに 90 分間 3 回測定した。牧草については、測定容器が一杯になるまで充滿し、標準試料と同一条件で 90 分間 3 回測定した。同一の牧草について、GEMX10P 高純度ゲルマニウム測定器での測定を試料ごとに 2400 分実施した。

#### 結果

IAEA 標準物質を散布した円盤を CsI(Tl)シンチレータから 0-63 mm の距離に設置し、測定したところ、標準物質散布円盤からシンチレータまでの距離の増加とともに CsI(Tl)検出器でのカウントが減少することが示された(Table 1)。各距離において 3 回実施した計数値について、計数値の標準偏差と平均の比は、0.055 となった。このことから、90 分間における実測値の誤差が 5%程度であることが示唆される。一方、計数値の平均について、その揺らぎである計数値の平方根と計数値の比を求めたところ、0.027 となり、実際の計数の誤差が計数そのものによる誤差の 2 倍程度であることが示され、TC800B での測定が 90 分間では十分に安定していることが示唆された。

続けて、標準物質円盤の位置に基づくシンチレータへの入射効率、シンチレータまでの物質による  $\gamma$  線の減弱に加え、シンチレータへの入射角に基づくシンチレータ内で  $\gamma$  線が捕捉されて発光する可能性(捕捉効率)をプログラムにより算出し、標準試料円盤の各地点での発光頻度の期待値を算出した(Table 2)。すなわち、測定容器底面からの距離 0~6.3 cm の地点(測定容器底面からの距離)に Cs-137 標準試料を塗布したろ紙円盤を置き、測定器の立体構造(Fig.1)に基づき CsI(Tl)検出器からの距離を算出した。続けて、各 CsI(Tl)検出器からの距離と測定器の立体構造(Fig.1)に基づき、ディスク上のランダムな点から平面上の 360° の角度について、シンチレータ辺縁までの仰角を算出し、辺縁までの仰角よりも小さな仰角であれば  $\gamma$  線はシンチレータに入射することを想定してランダムな地点でのシンチレータ内に入射する  $\gamma$  線の平均仰角(ラジアン)を算出した。同様に、仰角を求める際に想定したランダムな点についてシンチレータまでの平均距離(cm)を求めるとともに、Cs-137 標準物質散布円盤から測定容器底面までに重ねて敷いたろ紙による遮蔽について材質と厚みからシンチレータまでのろ紙による減弱係数(cm-1)を算出した。シンチレータまでの牧草を想定した減弱係数(cm-1)も牧草試料での算出のために算出した。続けて、シンチレータの密度および NIST で公表されている質量減弱係数およびシンチレータの厚みに基づいて、Cs-137  $\gamma$  線のうちシンチレータ内で相互作用する入射光子の割合を求め、遮蔽されなかった  $\gamma$  線が初期エネルギーを維持していることを前提として各地点でのランダムな点から発生する Cs-137  $\gamma$  線のうち、シンチレータに捕捉されて測定対象となる割合(シンチレータによる予測捕捉率)を算出した。続けて、実際の計数平均値と到達が予想される  $\gamma$  線数の比からシンチレータに入射した  $\gamma$  線中で検出器が計数した割合を算出し、それらを掛け合わせることで、幾何学的、減弱および計数器での検出効率を加味した計数効率を算出した。

TC800B で牧草の放射能を測定する際には、測定容器の底から上限まで牧草を収納して測定するため、牧草計測時の計数効率は、Table 2 の各位置での予測計数効率について、一旦、計数容器内の 0 から 6.24 cm までの 0.26 cm の位置について

補間計算により算出し、それらを平均化することにより、測定容器内に牧草を充満した場合の計数効率率は0.0129であることが示された。

これらの数値の算出手順を用いて、福島県内の農場から提供された6種の牧草についてTC800Bベクレルモニターの直接計数値から放射能を予測した。牧草についての正確な放射能は、GEMX10Pゲルマニウム検出器によって計測された(Table3)。

TC800Bベクレルモニター計測を立体構造と $\gamma$ 線のシンチレータへの捕捉率に基づいて算出した予測放射能を、ゲルマニウム半導体計測器による正確な計測と比較した場合、放射能の比率は1.0から1.3となった(Table4)。具体的には、計数容器を充満した場合の平均計数効率0.0129をTC800Bでの試料のカウントに乗じることより、牧草中からの90分あたりの予測 $\gamma$ 線放出数を算出した。計測エネルギー域におけるCs-137 $\gamma$ 線の寄与割合である52.04%を予測 $\gamma$ 線放出数に掛け合わせることで、90分あたりのCs-137由来 $\gamma$ 線数を算出した。この値を元に牧草試料の放射能と試料の比放射能が算出され、GEMX10Pゲルマニウムモニターでの計測結果への換算計数として、1.0から1.3が示された。

#### 考 察

福島第一原子力発電所の事故以降、食品および家畜飼料中の放射能測定に関しては多くの研究が実施されている[1,7,15,23]。事故時に降下した放射性同位元素の大部分は、事故後2年程度で測定上検出されなくなっているが、Cs-134およびCs-137については2013年においても土壤中で検出されている(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/dojo-monitoring.html>)。加えて、物理学的半減期がCs-134は2年でCs-137が30.1年であることを勘案すると、2019年以降の農作物および牧草についての測定は、Cs-137に注目して行われることが示唆される。本研究では、法定測定前に実施する低コストでの測定を想定し、低価格で販売されているTC800Bを事例とし、Cs-137を対象核種として、IAEA標準物質でのキャリブレーション方法を提示した。キャリブレーションのためには、測定容器の立体構造とシンチレータの形状および配置に基づいてシンチレータへの入射効率を

推定することも必要となるが、本研究では、専用のプログラムを作成して算出した。当該プログラムについては、立体構造・配置に関するデータを入れることにより、多様な形状の測定器にも対応できるため、本研究は、多様なシンチレーション検出器にも応用できることが示唆される。

固体シンチレーションカウンタは検出感度が高く、機種によっては、継続測定が可能であることから、現在では、低レベルの放射能測定のために、ゲルマニウム半導体計測器を補完する測定機器としての要望は存在することは想像に難くない。しかしながら、CsI(Tl)等の固体シンチレーションカウンタによる計測は、牧草測定位置や温度などで計数効率が影響されるため[24]、低レベル放射能試料の測定結果を出力する機器は販売されていない。一方、NaI(Tl)シンチレーションカウンタについては、農林水産省と厚生労働省から計数の指針が示されているため、現場での利用が広がることが予想される。本研究の結果では、CsI(Tl)シンチレーションカウンタについても、IAEAから頒布・販売されている標準試料を用いることにより、立体構造や $\gamma$ 線光子の捕集効率などによる補正が可能であることが示唆された。

計数効率の算出にあたっては、測定器内の立体構造などの情報を集約する必要があるため、本研究では、立体構造およびシンチレータに入射するまでの減弱の影響を、単純な表計算で算出せず、補正用のプログラムを開発した(付録)。補正は、 $\gamma$ 線源の位置、シンチレータのサイズおよび位置、試料そのものによる減衰に加え、シンチレータへの入射角度による捕集効率の違いを加味し、実際の計測データの計数効率を予測した。当該プログラムは、Rubyで単純に記載されているため、立体構造が異なる測定器にも応用が可能と考えられる。

牧草での測定にあたり、立体構造等から予測される捕集効率に加え、IAEA標準試料の計数結果との比較から、各位置での計数効率が予測された(Table2)。この計数値の補正方法を、福島県の農家から提供を受けた牧草に適用したところ、ゲルマニウム半導体計測器での測定結果と比較したところ、ゲルマニウム半導体計測器での放射能測定結果と近い値が得られた(Table4)。立体構造等から予測される捕集効率については、実際の試料の

位置と計算上想定した位置との相違やコンピュータ計算時に一部の数値が近似されることによる誤差が想定されるが、いずれの数値についても正確な誤差を得ることができない。本研究で示した方法での補正による計数値の精度は、実測された6件の牧草についてのゲルマニウム半導体計数器での計数との誤差から類推される。6件の牧草については、TC800B計数値からの補正計数とゲルマニウム半導体計数器での計数の比は1.0~1.3が示され、平均値は1.17、標準偏差は0.08となった。統計的に標準偏差の2倍の範囲内に95%程度の値が入ることを勘案すると、TC800Bから本論文で述べた計算方法により算出された比放射能(Bq/kg)に比放射能の0.16倍を加えた値が規制値を下回っているかが一つの目安となることが示唆される。この値を、今回測定した牧草に適用すると、計数が最大となった牧草の39.1 Bq/kgについての誤差を加味した上限値は、45.4 Bq/kgとなる。法令上の制限値が100 Bq/kgとの比較ではこの数値が規制値を下回っていることで予備的な判断が可能となる。さらに、規制値を上回ることを防ぐ方法として、予備的に規制値の1/2または1/10の数値を規制値をみなす管理が知られているが、CsI測定器で放射能を推定する場合には、このような管理が望ましいことが示唆される。

これらの結果から、標準試料と補正プログラムを用いることにより、CsI(Tl)シンチレータによる測定結果から低レベルの放射能を予測することが可能になると考えられる。今後、機種異なる固体シンチレーション測定器についても適用できるよう、プログラムの改善を行うことにより、現在福島原発周辺地域で保有されている固体シンチレーションカウンタを有効利用する使用方法の提示も可能になることが期待される。

#### 謝 辞

この研究は2014年度酪農学園大学共同研究の一部として実施された。ゲルマニウム半導体測定器での測定を実施いただいた北海道大学工学研究院量子理工学部門応用量子ビーム工学分野の藤吉亮子准教授に謝意を表す。

#### 参考文献

1. Itthipoonthanakorn, T., Krisanangkura, P., and Udomsomporn, S. 2013. The study on radioactive contamination in foodstuffs imported from Japan after the Fukushima accident. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 297(3): 419-421.
2. Kagaya, M., Katagiri, H., Enomoto, R., Hanafusa, R., Hosokawa, M., Itoh, Y., and Tanaka, M. M. 2015). Development of a low-cost-high-sensitivity Compton camera using CsI (Tl) scintillators ( $\gamma$ I). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 804: 25-32.
3. Knoll, GF. 1989. Radiation Detection and Measurement. 2.
4. 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課. 2012. 食品中の放射性セシウムスクリーニング法の一部改正について、平成24年3月1日付け厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課事務連絡.
5. 医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部監視安全課. 2019. 食品中の放射性物質の検査結果について (第1022報)  
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000153149.html>
6. (<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r985200000249rb-att/2r985200000249sz.pdf>)
7. Merz, S., Shozugawa, K., Steinhäuser, G. 2015. Analysis of Japanese radionuclide monitoring data of food before and after the Fukushima nuclear accident. *Environmental science & technology*, 49(5): 2875-2885.
8. Moszynski, M., Kapusta, M., Mayhugh, M., Wolski, D., and Flyckt, S. O. 1997. Absolute light output of scintillators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44: 1052-1061.
9. 農林水産省消費・安全局消費・安全政策課. 2011. NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータを用いて測定した結果を適切に評価するために (初心者編) 平成23年12月7日、平成23年12月21日改訂  
([http://www.maff.go.jp/j/syoutan/seisaku/data\\_reliance/pdf/guidance\\_r.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syoutan/seisaku/data_reliance/pdf/guidance_r.pdf))
10. 農林水産省消費・安全局消費・安全政策課長、飼料中の放射性セシウムの検査方法について. 2011. 平成23年8月3日、平成23年9月7日一部改訂.  
([http://www.famic.go.jp/ffis/feed/obj/23\\_2489\\_f2.pdf](http://www.famic.go.jp/ffis/feed/obj/23_2489_f2.pdf))
11. Ovechkina, E. E., Gaysinskiy, V., Miller, S. R., Brecher, C., Lempicki, A., Nagarkar, V. V. 2007. Multiple doping

- of CsI: Tl crystals and its effect on afterglow. *Radiation measurements*, 42(4): 541-544.
12. Parr, R. M., Schelenz, R., and Ballestra, S. 1988. IAEA biological reference materials. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 332(6): 518-523.
  13. Pecourt, S., Chambon, B., De Jésus, M., Drain, D., Gerbier, G., Mallet, J., and Vagneron, L. 1999. Calibration of a CsI (Tl) crystal with nuclear recoils and pulse shape measurements for dark matter detection. *Astroparticle physics*, 11(4): 457-462.
  14. Pham, M. K., Sanchez-Cabeza, J. A., Povinec, P. P., Arnold, D., Benmansour, M., Bojanowski, R., Gascó, C. L. 2006. Certified reference material for radionuclides in fish flesh sample IAEA-414 (mixed fish from the Irish Sea and North Sea). *Applied Radiation and Isotopes*, 64(10): 1253-1259.
  15. Potiriadis, C., Anagnostakis, M. J., Clouvas, A., Eleftheriadis, K., Florou, E., Housiadas, C., and Kehagia, K. 2013. Environmental measurements and inspections on imported foods and feedstuffs in Greece after the Fukushima accident. *Radiation protection dosimetry*, 156(4): 465-474.
  16. Rodnyi, PA. 1997. *Physical Processes in Inorganic Scintillators*. CRC Press; Boca Raton, New York.
  17. Saito, K., and Onda, Y. 2016. Preface to a special issue "Japanese national mapping projects on large-scale environmental monitoring and mapping in Fukushima volume 2". *Journal of Environmental Radioactivity*.
  18. Shakhashiro, A., Sansone, U., Arnold, D., Dryak, P., La Rosa, J. J., Jerome, S. M., and Tarjan, S. 2008. The new IAEA-372 grass-certified reference material for 40 K and <sup>137</sup>Cs. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(11): 1718-1721.
  19. Shimura, T., Yamaguchi, I., Terada, H., Yunokawa, T., Svendsen, E. R., Kunugita, N. 2015. Efficiency of Excess Monitoring for Beef after the Fukushima Accident. *Food Safety*, 3(3): 84-91.
  20. 塩沢 昌, 田野井 慶太郎, 根本 圭介, 吉田 修一郎, 西田 和弘, 橋本 健, 桜井 健太, 中西 友子, 二瓶 直登, 小野 勇治. 2011. 福島県の水田土壌における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度. *RADIOISOTOPE* 60: 323-328.
  21. 肥飼料安全検査部飼料鑑定第一課. 2014. NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる飼料中の放射性セシウムのスクリーニング法例：平成 24 年 3 月の暫定許容値見直しを受けた再検証. 飼料研究報告 39, 157-162.
  22. Syntfeld-Kazuch, A., Swiderski, L., Czarnacki, W., Gierlik, M., Klamra, W., Moszynski, M., and Schotanus, P. 2007. Non-proportionality and energy resolution of CsI (Tl). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 54(5):1836-1841.
  23. Tsubokura, M., Kato, S., Nomura, S., Gilmour, S., Nihei, M., Sakuma, Y., and Hayano, R. 2014. Reduction of high levels of internal radio-contamination by dietary intervention in residents of areas affected by the Fukushima Daiichi nuclear plant disaster: a case series. *PLoS one*, 9(6): e100302.
  24. Valentine, J., Moses, W. W., Derenzo, S. E., Wehe, D. K., and Knoll, G. F. (1992, December). Temperature dependence of CsI (Tl) gamma-ray scintillation decay time constants and emission spectrum. In San Diego'92 (pp. 32-43). International Society for Optics and Photonics.

## Abstract

The high energy conversion efficiency, long luminescence time and its relative low cost are properties known to be beneficially remarkable for CsI(Tl) radioactivity measurement of biological materials. While the CsI(Tl) scintillation counters are not usually utilized for low-level radioactivity counting, there remains a need to calculate the three-dimensional counting efficiency, the influence of self-absorbance of samples and mechanical efficiency of scintillation-detection in order to obtain measurement accuracy. A geometrically-correcting computer program was developed to estimate the three-dimensional counting efficiency and the influence of self-absorbance of samples for a CsI(Tl) scintillation Becquerel monitor (TB800). Additionally, mechanical efficiency of scintillation-detection was estimated using IAEA standard substance. Results presented predicted radioactivities of 1.0 to 1.3 times the value of measured radioactivities from Germanium semiconductor gamma ray spectrometer. These outcomes suggest the usefulness of calibration with geometrically-correcting program and IAEA standard as valuable tool in measuring low level radioactivity.



図表

Table 1. Gamma-ray counts determined with CsI(Tl) scintillator for the IAEA-372 reference sample spreading on disc.

測定容器底面からの距離(cm)	1回目*	2回目*	3回目*	平均	標準偏差
0.00	4451	4466	3661	4192.67	460.50
0.26	3852	3753	3872	3825.67	63.72
0.52	3151	3001	3045	3065.67	77.11
0.78	2777	2831	2673	2760.33	80.31
1.10	2398	2366	2191	2318.33	111.43
1.49	2207	2052	2242	2167.00	101.12
1.88	1732	1669	1721	1707.33	33.65
2.27	1465	1523	1579	1522.33	57.00
3.05	1171	1135	1226	1177.33	45.83
3.70	979	881	946	935.33	49.86
4.34	795	818	803	805.33	11.68
5.00	769	663	640	690.67	68.81
5.65	675	706	641	674.00	32.51
6.30	562	561	766	629.67	118.07

\* 計測は TC800B により 90 分間実施した



Table2 Counting efficiency of radioactivity measurement predicted by geometric modeling

測定容器 底面から の距離 (cm)	CsI(Tl)検出 器からの距 離(cm)	ディス ク上の ランダム な点 におけ る平均 仰角(ラ ジアン)	ディス ク上の ランダ ムな点 からシ ンチレ ータま での平 均距離 (cm)	シンチ レータ までの ろ紙に よる減 弱係数 (cm <sup>-1</sup> )	幾何学的条 件および遮 蔽を加味し た、標準試 料γ線中シ ンチレータ 到達割合 <sup>1)</sup>	標準試料の放射 能およびシン チレータ到達 割合から算出 された90分 あたりのシン チレータへの 入射γ線数 <sup>2)</sup>	実測定計数値 <sup>3)</sup>	計測器の計 数効率 <sup>4)</sup>	幾何学的、 減弱および 計数器での 検出効率を 加味した計 数効率 <sup>5)</sup>
0.00	0.30	0.30	0.70	0.83	0.25	39015	4192.67	0.090	0.0269
0.26	0.56	0.30	1.10	0.81	0.24	37454	3825.67	0.088	0.0245
0.52	0.82	0.29	1.45	0.78	0.22	34333	3065.67	0.075	0.0196
0.78	1.08	0.27	1.76	0.76	0.21	32773	2760.33	0.072	0.0177
1.10	1.40	0.26	2.13	0.74	0.19	29651	2318.33	0.066	0.0149
1.49	1.79	0.25	2.54	0.71	0.18	28091	2167.00	0.068	0.0139
1.88	2.18	0.23	2.94	0.69	0.16	24970	1707.33	0.059	0.0109
2.27	2.57	0.22	3.33	0.66	0.14	21848	1522.33	0.057	0.0098
3.05	3.35	0.19	4.08	0.62	0.12	18727	1177.33	0.053	0.0075
3.70	4.00	0.18	4.70	0.59	0.10	15606	935.33	0.049	0.0060
4.34	4.64	0.16	5.31	0.56	0.09	14045	805.33	0.048	0.0052
5.00	5.30	0.15	5.93	0.53	0.08	12485	690.67	0.048	0.0044
5.65	5.95	0.14	6.55	0.50	0.07	10924	674.00	0.053	0.0043
6.30	6.60	0.13	7.17	0.47	0.06	9364	629.67	0.056	0.0040

- 1) Cs-137 標準試料から発生した γ 線のうち幾何学のおよび機器・試料材質での減弱を加味してシンチレータに入射する γ 線の割合。
- 2) 標準試料円盤上の Cs-137 放射能 33.96 に計測時間(秒)および Cs-137 の崩壊の際に γ 線が放出される割合 0.851 を乗じた値 156,060 カウント/90 分に 1)の値を乗じた値
- 3) IAEA 標準試料を塗布した円盤についての 3 回の 90 分間の測定結果の平均値
- 4) 計数器のシンチレータに到達した γ 線中計数される割合、すなわち 3)を 2)の値で除した値
- 5) 幾何学的要因、標準試料からシンチレータまでの遮蔽および計数器内での検出効率を総合した計数効率

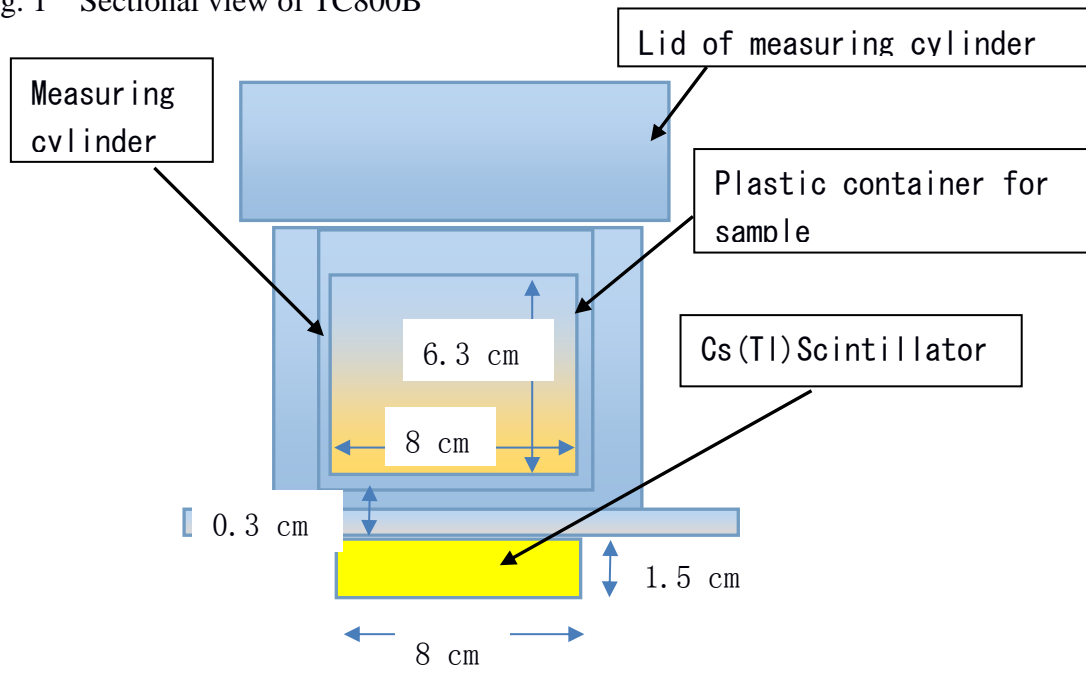
Table 3 Radioactivities of Cs-137 and Cs-134 measured with GMX10P Ge-semiconductor detector

牧草試料番号	Cs-137(Bq/kg)	Cs-137 誤差(Bq/kg)	Cs-134(Bq/kg)	Cs-134 誤差(Bq/kg)
1	33.1	3.6	14.1	1.2
2	9.2	1.0	3.4	0.3
3	11.0	1.2	3.8	0.3
4	7.0	0.8	2.3	0.2
5	13.8	1.5	5.4	0.5
6	8.1	0.9	4.7	0.4

Table 4 Comparisons of CsI(Tl)-measured and geometrically-corrected radioactivities and Ge-semiconductor-measured data

列記号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
試料番号	GMX10PでのCs-137放射能(Bq/kg)	TC800BでのCs-137カウン卜数	器を充満した場合の平均計数効率	カウントと計数効率から予想される牧草中の90分あたりのγ線放出数(b/c)	計測エネルギー域におけるCs-137のγ線の寄与割合	90分あたりのCs-137由来γ線数(d×e)	牧草試料の放射能(Bq, f/(0.851×60×90))	牧草試料の質量(g)	試料の比放射能(Bq/kg, g/(h/1000))	CsI計測からの比放射能のGe計測器との計数の比(i/a)
1	33.1	534	0.0129	41395	0.5204	21541.4701	4.6876	120	39.1	1.2
2	9.2	169	0.0129	13101	0.5204	6817.4315	1.4835	142	10.4	1.1
3	11	223	0.0129	17287	0.5204	8995.7825	1.9576	146	13.4	1.2
4	7	90	0.0129	6977	0.5204	3630.5848	0.7900	111	7.1	1.0
5	13.8	263	0.0129	20388	0.5204	10609.3757	2.3087	139	16.6	1.2
6	8.1	140	0.0129	10853	0.5204	5647.5764	1.2290	121	10.2	1.3

Fig. 1 Sectional view of TC800B



(Size of CsI(Tl)scintillation crystal: 8 cm × 4 cm × 1.5 cm)

Fig.2 Energy spectrum of Cs-137-  $\gamma$  -ray of TC800B

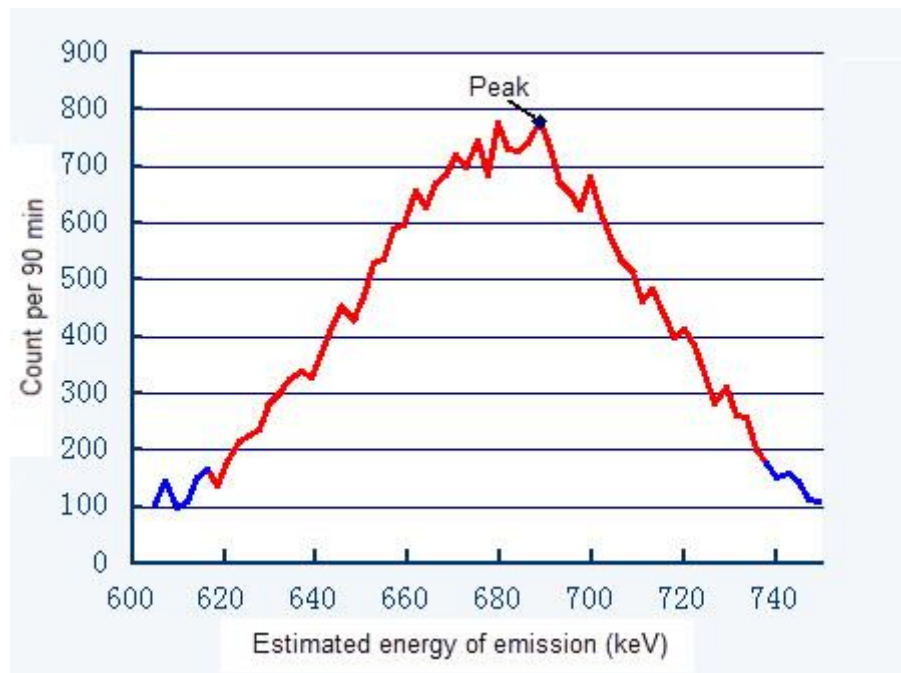
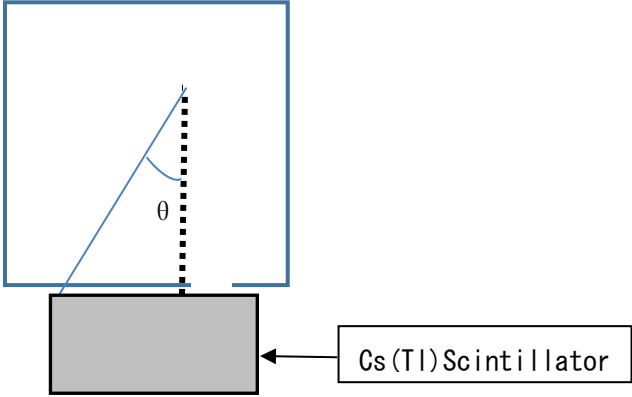
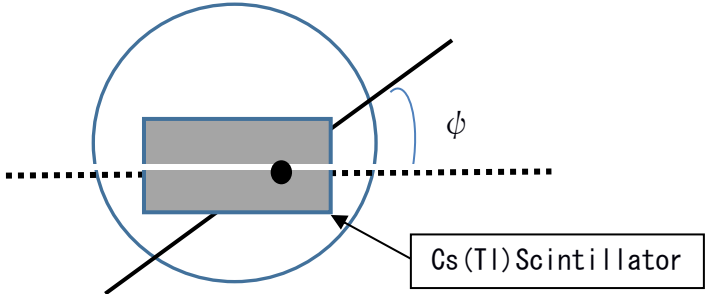


Fig.3 Lines and degrees to calculate geometric efficiency of TC800B.

A Vertical direction



B Horizontal direction





## 付録

計数効率算出のための Ruby プログラム

予測プログラムの概略:

1. 測定容器内での各地点から水平方向の角度(Fig3B)を 360 度回転させつつ、各水平角度についてシンチレータへの仰角(Fig3A)を算出する。
2. シンチレータへの仰角と水平方向の角度からシンチレータ到達までの距離を算出する。
3. 各地点からシンチレータに入射する  $\gamma$  線についてシンチレータ内を通過する距離を算出し、Cs-137 の  $\gamma$  線エネルギー、CsI シンチレータの密度および NIST が提供している質量減弱係数からシンチレータ内で  $\gamma$  線が捕捉される可能性を算出する。
4. 水平および垂直方法の各地点の Cs-137 について 1-3 を 1000 回算出し平均を求める。
5. 4 の結果と標準ディスクの測定結果から、機器としての検出効率を算出する(Table2)。

```
1  require 'matrix'
2  include Math
3  require 'csv'
4  # require 'complex'

5  def calc_degree(ctpos, hsampl, crpos) # ctpos: center position, crpos: cross position [1,2]
      ltbasesq=sqrt((crpos[0]-ctpos[0])**2+(crpos[1]-ctpos[1])**2)
      ppradian= atan(ltbasesq/hsampl.to_f)
      pdegree=ppradian*180/PI
      return pdegree
6  end

7  def calc_degree2(ctpos, hsampl, crpos1, crpos2) # ctpos: center position, crpos: cross position [1,2]
      ltbasesq1=sqrt((crpos1[0]-ctpos[0])**2+(crpos1[1]-ctpos[1])**2)
      ltbasesq2=sqrt((crpos2[0]-ctpos[0])**2+(crpos2[1]-ctpos[1])**2)

      ppradian1= atan(ltbasesq1/hsampl.to_f)
      ppradian2= atan(ltbasesq2/hsampl.to_f)
      pdegree1=ppradian1*180/PI
      pdegree2=ppradian2*180/PI
      return [pdegree1,pdegree2]

8  end

9  def pos_degrees(posview, hsampl, ct)
10 step(180, 1){|ldegr|
      pradian = ldegr.to_f/180*PI
      crpx,crpy, crmx, crmy=0,0,0,0
      if ct[0] <= 4 && ct[1] <= 2 then
          if ldegr <=90 then
              # y when x=4
```

```

crp0y= tan(pradian)*4+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
# x=-4
crm0y= tan(pradian)*(-4)+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
# y=2
crp0x= (2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
# y=-2
crm0x= (-2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
if crp0x > 4 then
    crpx=4; crpy=crp0y
elseif crp0x < -4 then
    crpx=-4; crpy=crp0y
elseif crp0y > 2 then
    crpx=crp0x; crpy=2
elseif crp0y < -2 then
    crpx=crp0x; crpy=-2
else
    crpx=crp0x; crpy=crp0y
end

if crm0x < -4 then
    crmx=-4; crmy=crm0y
elseif crm0x > 4 then
    crmx=4; crmy=crm0y
elseif crm0y < -2 then
    crmx=crm0x; crmy=-2
elseif crm0y > 2 then
    crmx=crm0x; crmy=2
else
    crmx=crm0x; crmy=crm0y
end
else
# y when x=4
crp0y= tan(pradian)*(-4)+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
# x=-4
crm0y= tan(pradian)*4+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
# y=2
crp0x= (2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
# y=-2
crm0x= (-2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
if crp0x > 4 then
    crpx=4; crpy=crp0y
elseif crp0x < -4 then
    crpx=-4; crpy=crp0y
elseif crp0y > 2 then

```

```

        crpx=crp0x; crpy=2
    elsif crp0y < -2 then
        crpx=crp0x; crpy=-2
    else
        crpx=crp0x; crpy=crp0y
    end

    if crm0x < -4 then
        crmx=-4; crmy=crm0y
    elsif crm0x > 4 then
        crmx=4; crmy=crm0y
    elsif crm0y < -2 then
        crmx=crm0x; crmy=-2
    elsif crm0y > 2 then
        crmx=crm0x; crmy=2
    else
        crmx=crm0x; crmy=crm0y
    end

end

# p "#{ldegr} cross ({crpx}, {crpy}), ({crm0x}, {crm0y})"
pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm0x,crmy])
posview[ct] = [-mdeg,pdeg]

elsif ct[1]>2

if tan(pradian) > (ct[1]-2).to_f/(ct[0]+4).to_f && ldegr <=90 then
    # p "mode1"
    crp0y= tan(pradian)*4+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
    # x=-4
    crm0y= tan(pradian)*(-4)+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
    # y=2
    crp0x= (2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
    # y=-2
    crm0x= (-2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
    # p "#{ldegr} ({crp0x}, {crp0y}), ({crm0x}, {crm0y})"
    if crm0x <= -4 then
        # y when x=4
        crpx=-4;crpy=crm0y
        crmx=crp0x;crmy=2
    elsif crm0y <=-2 then
        crpx=crm0x;crpy=-2
        crmx=crp0x;crmy=2
    end

    pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
    mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm0x,crmy])

```

```

        posview[ct] = [mdeg,pdeg]
        # p "#{ldegr} cross ({crp0x}, #{crp0y}), ({crm0x}, #{crm0y}), ({crpx}, #{crpy}),
        ({crm}, #{crmy})"
elseif tan(pradian) > (ct[1]-2).to_f/(ct[0]+4).to_f then
    # p "p mode2"
    crp0y= tan(pradian)*(-4)+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
    # x=-4
    crm0y= tan(pradian)*4+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
    # y=2
    crp0x= (2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
    # y=-2
    crm0x= (-2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)

    if crp0y <= -2 then
        crpx=crm0x; crpy=-2
        crmx=crp0x; crmy=2
    elseif crm0x >= 4 then
        crpx=4; crpy=crm0y
        crmx=crp0x; crmy=2
    end

    end
    pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
    mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm,crmy])
    posview[ct] = [mdeg,pdeg]
    # p "#{ldegr} cross ({crp0x}, #{crp0y}), ({crm0x}, #{crm0y}), ({crpx}, #{crpy}),
    ({crm}, #{crmy})"
else
    # p "no cross"
end
elseif ct[0]>4 then
    crp0y= tan(pradian)*4+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
    # x=-4
    crm0y= tan(pradian)*(-4)+ct[1]-tan(pradian)*ct[0]
    # y=2
    crp0x= (2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
    # y=-2
    crm0x= (-2-ct[1]+tan(pradian)*ct[0])/tan(pradian)
    # p "#{ldegr} #{tan(pradian)} #{(2+ct[1]).to_f/(4+ct[0]).to_f} #{(2+ct[1]).to_f/(ct[0]-4).to_f}
    #{(2-ct[1]).to_f/(-4-ct[0]).to_f} #{(2-ct[1]).to_f/(4-ct[0]).to_f}"
    if tan(pradian) >=0 && tan(pradian) < (2+ct[1]).to_f/(4+ct[0]).to_f then
        # p "mode3"
        crpx=-4; crpy=crm0y
        crmx=4; crmy=crp0y
        pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
        mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm,crmy])
    end
end

```



```

        posview[ct] = [mdeg,pdeg]
        # p "#{ldegr} cross ({crp0x}, #{crp0y}), ({crm0x}, #{crm0y}), ({crpx}, #{crpy}),
        ({crm}, #{crmy})"
        elsif tan(pradian) >= (2+ct[1]).to_f/(4+ct[0]).to_f && tan(pradian) <= (2+ct[1]).to_f/(ct[0]-4).to_f
    then
        # p "mode4"
        crpx=crm0x; crpy=-2
        crmx=4; crmy=crp0y
        pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
        mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm,crmy])
        posview[ct] = [mdeg,pdeg]
        # p "#{ldegr} cross ({crp0x}, #{crp0y}), ({crm0x}, #{crm0y}), ({crpx}, #{crpy}),
        ({crm}, #{crmy})"
        elsif tan(pradian) >= (2-ct[1]).to_f/(4-ct[0]).to_f && tan(pradian) <= (2-ct[1]).to_f/(-4-ct[0]).to_f
    then
        # p "mode5"
        crpx=crp0x; crpy=-2
        crmx=4; crmy=crp0y
        pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
        mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm,crmy])
        posview[ct] = [mdeg,pdeg]
        # p "#{ldegr} cross ({crp0x}, #{crp0y}), ({crm0x}, #{crm0y}), ({crpx}, #{crpy}),
        ({crm}, #{crmy})"
    elsif tan(pradian) > (2-ct[1]).to_f/(-4-ct[0]).to_f && tan(pradian) < 0 then
        # p "mode6"
        crpx=-4; crpy=crm0y
        crmx=4; crmy=crp0y
        pdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crpx,crpy])
        mdeg=calc_degree(ct,hsampl, [crm,crmy])
        posview[ct] = [mdeg,pdeg]
        # p "#{ldegr} cross ({crp0x}, #{crp0y}), ({crm0x}, #{crm0y}), ({crpx}, #{crpy}),
        ({crm}, #{crmy})"
    end

    end
}
return posview
11 end

12 def circle_positions(pradius,hsampl)
    # line : y=tan(sita)*x + y0-tan(sita)*x0
    posview=Hash.new
13 step(pradius,0.1){|cx| # center of x-array
14 step(pradius,0.1){|cy|

```

```

        if cx**2+cy**2 <= 16 then
            ct=[cx,cy]
            pos_degrees(posview, hsampl, ct)
        end
    }
}
# p posview
deg_dist=Hash.new
posview.each{|ct, vdegs|
    unless deg_dist[ct] then
        deg_dist[ct]=Array.new
    end
    a_degs=(vdegs[0].ceil..vdegs[1].floor).to_a
    # a_degs
    # p "#{ct}, #{vdegs}, #{a_degs}"
    a_degs.each{|dg|
        if dg!=0 then
            drad=dg.abs*PI/180
            ltbase=hsampl*tan(drad)
            sdist=sqrt(ltbase**2+hsampl**2)
            # p "#{dg}, #{drad} #{hsampl} #{ltbase} #{tan(drad)}
            #{sdist}"
            deg_dist[ct] << [dg, sdist]
        else
            sdist=hsampl
            deg_dist[ct] << [dg, sdist]
        end
    }
}
# p deg_dist

return posview, deg_dist
15 end
16 # calculate degree from points in measurement cup to CsI crystal

17 # p PI
18 # center=[0,0]
19 # hsampl=2

20 ##### Main Routine #####
21 a_zpos=[0,0.26,0.52,0.78,1.1,1.49,1.88,2.27,3.05,3.7,4.34,5.0, 5.65, 6.3, 8.0]
22 # a_zpos=[100]
23 hight_eff=Array.new

```

```

24 hight_eff << ["z", "hsampl", "av_deg_ratio", "av_dist", "av_dist_att", "av_dist_att_grass"]
25 pradius=4
26 a_zpos.each{|z|
    hsampl=z+0.3
    # p hsampl
    posview, deg_dist=circle_positions(pradius, hsampl)
    # p deg_dist
    deg_ratio=Array.new
    posview.each{|pt,degset|
        deg_ratio << (degset[1]-degset[0])/360
    }
    dist_att=Array.new
    dist_att_grass=Array.new
    dist=Array.new
    deg_dist.each{|pt,distdata|
        distdata.each{|d|
            # p d
            dist << d[1]
            dist_att << exp(-1*d[1]*1*0.088)*exp(-1*0.2*(0.07704*7.9))
            dist_att_grass << exp(-1*d[1]*0.6*0.088)*exp(-
                1*0.2*(0.07704*7.9))
        }
    }
    av_dist=dist.inject(0.0){|r,i| r+=i }/dist.size
    av_deg_ratio=deg_ratio.inject(0.0){|r,i| r+=i }/deg_ratio.size
    av_dist_att=dist_att.inject(0.0){|r,i| r+=i }/dist_att.size
    av_dist_att_grass=dist_att_grass.inject(0.0){|r,i| r+=i }/dist_att_grass.size
    p "#{hsampl}"

    hight_eff << [z, hsampl, av_deg_ratio, av_dist, av_dist_att, av_dist_att_grass]
27 }

28 CSV.open("measurement_eff.csv","wb") do |csv|
    hight_eff.each{|d|
        csv << d
    }
29 end

```

エネルギー分布から予測される寄与率

Cs-137 662 keVγ 線測定			Cs-134 563 keV			569 keV		605 keV		796 keV	
CsI測定器 における 測定対象 として想定 されるγ 線のエネ ルギーの 平均値			CsI測定器 における 測定対象 として想定 されるγ 線のエネ ルギーの 平均値			CsI測定器 における 測定対象 として想定 されるγ 線のエネ ルギーの 平均値		CsI測定器 における 測定対象 として想定 されるγ 線のエネ ルギーの 平均値		CsI測定器 における 測定対象 として想定 されるγ 線のエネ ルギーの 平均値	
Average	662	680	Average	563	583	569	589	605	625	796	816
CsI測定器S.D	30	30	S.D	30	30	30	30	30	30	30	30
測定エネルギー正規分布を想定した際の確率											
460	2.79E-14		460	2.98E-06		1.28E-06		3.59E-09		3.51E-33	
470	3.04E-13		470	1.1E-05		5.09E-06		2.12E-08		1.74E-31	
480	2.97E-12		480	3.67E-05		1.81E-05		1.12E-07		7.67E-30	
490	2.59E-11		490	0.000109		5.74E-05		5.33E-07		3.03E-28	
500	2.03E-10		500	0.000289		0.000163		2.26E-06		1.07E-26	
510	1.42E-09		510	0.000689		0.000415		8.57E-06		3.4E-25	
520	8.85E-09		520	0.001466		0.000944		2.91E-05		9.64E-24	
530	4.96E-08		530	0.002793		0.001923		8.84E-05		2.45E-22	
540	2.48E-07		540	0.004761		0.003503		0.00024		5.55E-21	
550	1.11E-06		550	0.007262		0.005712		0.000584		1.13E-19	
560	4.46E-06		560	0.009912		0.008334		0.001272		2.05E-18	
570	1.6E-05		570	0.012106		0.010881		0.002477		3.33E-17	
580	5.14E-05		580	0.013232		0.012713		0.004317		4.85E-16	
590	0.000148		590	0.012941		0.013291		0.006733		6.32E-15	
600	0.00038		600	0.011326		0.012434		0.009397		7.36E-14	
610	0.000874		610	0.00887		0.010408		0.011736		7.67E-13	
620	0.0018	0.0018	620	0.006216	0.006216	0.007797	0.007797	0.013115	0.013115	7.16E-12	7.16E-12
630	0.003316	0.003316	630	0.003898	0.003898	0.005226	0.005226	0.013115	0.013115	5.98E-11	5.98E-11
640	0.005467	0.005467	640	0.002187	0.002187	0.003135	0.003135	0.011736	0.011736	4.47E-10	4.47E-10
650	0.008066	0.008066	650	0.001098	0.001098	0.001683	0.001683	0.009397	0.009397	2.99E-09	2.99E-09
660	0.010648	0.010648	660	0.000493	0.000493	0.000808	0.000808	0.006733	0.006733	1.79E-08	1.79E-08
670	0.012579	0.012579	670	0.000198	0.000198	0.000347	0.000347	0.004317	0.004317	9.57E-08	9.57E-08
680	0.013298	0.013298	680	7.14E-05	7.14E-05	0.000134	0.000134	0.002477	0.002477	4.58E-07	4.58E-07
690	0.012579	0.012579	690	2.3E-05	2.3E-05	4.6E-05	4.6E-05	0.001272	0.001272	1.96E-06	1.96E-06
700	0.010648	0.010648	700	6.62E-06	6.62E-06	1.42E-05	1.42E-05	0.000584	0.000584	7.54E-06	7.54E-06
710	0.008066	0.008066	710	1.71E-06	1.71E-06	3.9E-06	3.9E-06	0.00024	0.00024	2.59E-05	2.59E-05
720	0.005467	0.005467	720	3.94E-07	3.94E-07	9.62E-07	9.62E-07	8.84E-05	8.84E-05	7.95E-05	7.95E-05
730	0.003316	0.003316	730	8.13E-08	8.13E-08	2.12E-07	2.12E-07	2.91E-05	2.91E-05	0.000218	0.000218
740	0.0018	0.0018	740	1.5E-08	1.5E-08	4.19E-08	4.19E-08	8.57E-06	8.57E-06	0.000537	0.000537
750	0.000874		750	2.48E-09		7.41E-09		2.26E-06		0.001182	
760	0.00038		760	3.67E-10		1.17E-09		5.33E-07		0.002329	
770	0.000148		770	4.86E-11		1.66E-10		1.12E-07		0.004104	
780	5.14E-05		780	5.76E-12		2.1E-11		2.12E-08		0.006473	
790	1.6E-05		790	6.1E-13		2.38E-12		3.59E-09		0.009135	
800	4.46E-06		800	5.79E-14		2.41E-13		5.43E-10		0.011535	
810	1.11E-06		810	4.91E-15		2.19E-14		7.35E-11		0.013035	
820	2.48E-07		820	3.73E-16		1.77E-15		8.9E-12		0.01318	
CsI測定域寄与率	0.1	0.09525		0.099999	0.014194	0.1	0.019195	0.1	0.063103	0.061845	0.000334
		0.952504			0.14194		0.191955		0.631032		0.005398
											0.970325

核種ごとの寄与率

<sup>137</sup>Cs (半減期 30.1671 年) からの主な光子

エネルギー [MeV]	0.662	0.0321	0.0365
頻度	0.851	0.058	0.013
放出確率	0.851		
CsI測定域寄与率	0.952504435		
分裂あたりの寄与率	0.810581274		

<sup>134</sup>Cs (半減期 2.0648 年) からの主な光子

エネルギー [MeV]	0.563	0.569	0.605	0.796	0.802	1.365
頻度	0.084	0.154	0.976	0.855	0.087	0.03
放出確率	0.84	0.154	0.976	0.855		
CsI測定域寄与率	0.098762444	0.14754477	0.656412344	0.000863528		
分裂あたりの寄与率	0.082960453	0.022721895	0.640658447	0.000738316		
						合計寄与率
						0.747079111

	Cs-137	Cs-134	
620-740eV範囲の寄与	0.810581274	0.747079111	1.557660386
	0.520383828	0.479616172	