

資料 1 - 3

ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法 (案)

平成 年

文 部 科 学 省

科学技術・学術政策局

原子力安全課防災環境対策室

付録4 参考文献 95

第 1 章 序 論

優れたエネルギー分解能を持つゲルマニウム（以下「Ge」という。）半導体検出器を用いて in-situ^{*1}測定を行うと、放射性核種を容易に特定することができ、原子力施設における原子力緊急事態の発生時（以下「緊急時」という。）等において、状況を把握するのに有効である。

放射性物質が環境中に放出された場合には、Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定（以下「in-situ 測定」という。）法により、地表に沈着した放射性物質の放射能濃度(Bq/m²)及び空間放射線量率(Gy/h)を求めることができる。

in-situ 測定法は、土壌を採取して実験室に持ち帰り測定する方法と比較して、測定時間は十分の程度でよく、また、地表面に沈着した放射性物質が均一に分布していない場合でも、測定地点周辺の平均的な測定結果を得ることができる。したがって、放射性物質が環境中に放出され広い範囲に放射能汚染が生じ、その汚染の分布を作成する場合等に特に有効な測定法である。

本マニュアルは、Ge 半導体検出器の校正方法、地表に沈着した放射性物質からの線の測定及び解析方法を記載した。

解析方法については、HASL^{*2}方式（H.L.Beck, et al.; HASL-258(1972)）に準拠し、ICRU^{*3} Rep. 53(1994)等の最近の研究結果も参考にした。HASL 方式では、放射性物質の土壌における鉛直分布、周囲の地形及び検出器設置高さ等について、ある仮定のもとに解析を行うため、仮定と実際の条件が異なった場合の解析結果への影響を把握しておく必要がある。本マニュアルでは、それらの影響を明確にするとともに、補正方法等も記載した。

検出可能レベルは、1 時間の測定で、地表に沈着した放射性核種に対して、0.03 kBq/m²程度、それらの核種からの空間放射線量率として 0.1 nGy/h 程度である。検出可能レベルを表 1.1 に示す。

また、in-situ 測定法は、もともと自然に存在する放射性物質であるウラン系列核種、トリウム系列核種、カリウム 40 等についても、土壌中の放射能濃度（Bq/kg）及び空間放射線量率（Gy/h）を求めることが可能であることから、その方法についても記載した。

*1 「in-situ」とは「現場」を示す。

*2 Health and Safety Laboratory（現在は Environmental Measurements Laboratory）

*3 International Commission on Radiation Units and Measurements

表1.1 検出可能レベルの例

測定時間 (分)	¹³⁷ Csの検出可能レベル	
	放射能濃度 (kBq/m ²)	線量率 (nGy/h)
1	0.34	0.87
5	0.13	0.32
10	0.09	0.22
20	0.06	0.15
30	0.05	0.12
60	0.03	0.08

下記の条件を基に、計数誤差の3倍となる値を検出可能レベルとした。

- ・ セシウム 137 が地表（無限平面）に分布
- ・ 相対効率 25%の Ge 半導体検出器を使用
- ・ バックグラウンドが日本の平均的なレベル（線量率 50nGy/h）

検出可能レベルは、セシウム 137 以外の放射性核種の影響により変動するので、ここに示した値はあくまで参考とする。

なお、in-situ で 60 分間測定した場合の検出可能レベル（放射能）は、実験室でマリネリ容器を用いて 10 時間測定した場合と同程度である。また、検出可能レベル（線量率）は 1mSv/年（約 140nGy/h に相当）の約 1/1,000 のレベルである。

第 2 章 測定機器

2.1 機器に必要な要件

in-situ 測定に用いられる Ge 半導体検出器は、実験室で環境試料の測定に用いられる通常の線スペクトロメータと基本的には同じである。検出器及び各機器の詳細については、文部科学省放射能測定法シリーズ 7「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」を参照のこと。

但し、屋外の測定に対応するため、通常のスเปクトロメータとしての性能に加え、以下の要件が必要となる。

機器の運搬及び設置が容易に行えること。

屋外の気象条件下において安定して動作すること。

バッテリー駆動が可能なこと。

2.2 機器構成

Ge 半導体検出器及びポータブルデュワー瓶

ポータブル マルチチャンネルアナライザ (MCA)

検出器支持架台

パーソナルコンピュータ (PC) (測定制御及び解析用)

ソフトウェア

その他付属品

なお、in-situ 測定においては通常遮蔽体は使用しない。

2.3 機器仕様の例

Ge 半導体検出器及びポータブルデュワー瓶

- ・ 同軸型高純度 Ge 半導体検出器^{*1}
- ・ 25cm 相対効率 25%以上
- ・ エネルギー分解能 コバルト 60 1,333keV に対して 半値幅 (FWHM) 1.9keV 以下
- ・ ピークコンプトン比 54 以上
- ・ 測定対象エネルギー範囲 40keV ~ 2,000keV^{*2 *3}
- ・ デュワー容量 2~5 リットル
- ・ 検出器を下向きに設置可能であること。

(検出器をどのような方向に向けても液体窒素の漏れが生じないこと)

^{*1} Ge 結晶の直径と長さが同程度である検出器が望ましい (ピーク効率の線入射角度依存性が小さいため)。低エネルギーの線 / X線を測定対象とする場合には n 型検出器を用いるが、ベリリウム製の入射窓を持つものは破損し易く、屋外での使用には適さないことから、アルミニウム製エンドキャップの方が良い。

^{*2} 低エネルギー X線 / 線を測定対象とする場合は、30keV ~ 2,000keV 程度とする。

^{*3} 自然に存在する放射性核種の 2,000keV 以上の線 (タリウム 208、2,615keV) 等を対象とする場合は、測定エネルギー範囲の上限を 4,000keV とする。

検出器支持架台

- ・ 検出器及びデュワー瓶を地表面上 1m に下向きに安定した状態で保持できること。
- ・ 検出器と地面との間に遮蔽物となるものが少ない構造であること。

ポータブル MCA

- ・ 高圧電源及びアンプ内蔵
- ・ アンプゲイン 2~2,000 程度
- ・ HV $\pm 10 \sim 5,000V$
- ・ 検出器保護回路
検出器の温度が上昇した場合に自動的に高電圧を遮断する機能を有すること。
- ・ スペクトルメモリ 4kch ~ 8kch ^{*4}
- ・ 積分非直線性 0.025%以下
- ・ 微分非直線性 1%以下
- ・ バッテリーで駆動可能であること。
- ・ 本体にディスプレイを持たず、接続した PC でスペクトルの表示及び測定制御を行うタイプの場合、PC の電源を切った状態でも測定が継続できること。

PC (MCA 制御及びデータ解析用)

- ・ ポータブル MCA と接続し、測定の制御ができること。
- ・ バッテリー駆動が可能であること。
- ・ 屋外の明るさでも判読が可能なディスプレイを備えていること。^{*5}

ソフトウェア

- ・ MCA 制御ソフトウェア
- ・ 解析ソフトウェア
HASL 方式に準拠していること。(詳細は第 4 章に示した。)

その他必要な付属品等

- ・ 検出器、MCA、PC の運搬用ケース
- ・ ケーブル類 (MCA-検出器、MCA-PC 接続ケーブル、電源ケーブル等)
- ・ MCA 及び PC 用予備バッテリー
- ・ 液体室素補充用デュワー瓶 (容量 : 20 ~ 30 リットル程度)
- ・ その他液体室素補給に必要な器具一式
- ・ 校正用 線源
- ・ 線源セット用治具
- ・ 汚染防止用器具 (ビニール袋等)

^{*4} チャンネルとエネルギーの対応関係は原則として 0.5keV/ch とし、測定対象のエネルギー範囲に応じて使用するチャンネル数を選択する。(2,000keV : 4kch、4,000keV : 8kch)

自然に存在する核種の 2,000keV 以上のエネルギーの線 (タリウム 208、2,615keV) 等を対象とする場合は、8kch を使用する。

^{*5} PC の液晶ディスプレイは明るい屋外での視認性が悪いいため、簡易的な遮光フードのようなもの

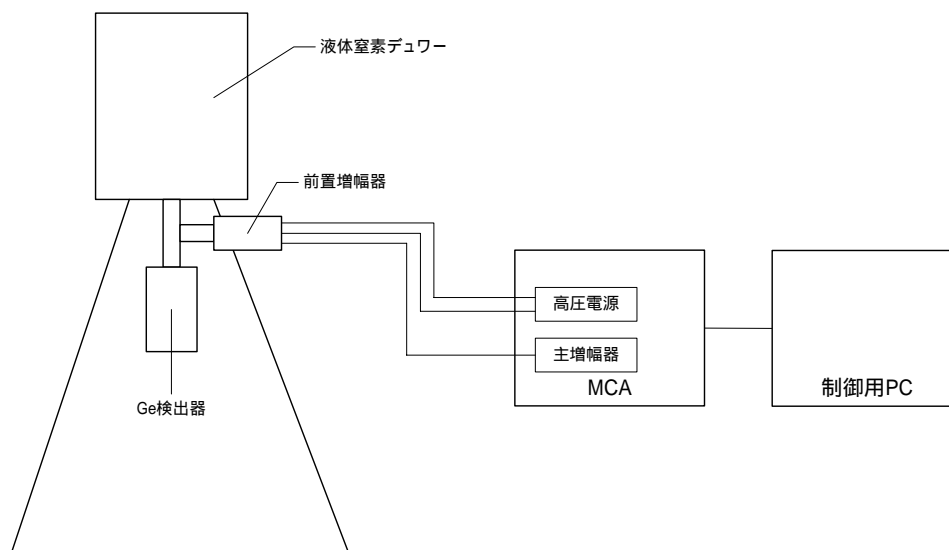


図 2.1 in-situ 測定用機器の構成例

2.4 機器校正

in-situ 測定では Ge 半導体検出器を地上面から 1m の位置に下向きに設置して測定を行う。この場合、地表に沈着した放射性物質からの線は、検出器の中心軸方向を 0° とした場合 $0^\circ \sim 90^\circ$ の方向から検出器に入射する。そのため、検出器のピーク効率の角度依存性を考慮する必要がある。HASL 方式による角度依存性の校正方法の詳細は第 4 章を参照のこと。本章では線源を用いて検出器のピーク効率及びその角度依存性を実測する手順について示す。

2.4.1 ピーク効率校正

2.4.1.1 必要な機器

Ge 半導体検出器及び測定回路一式

標準点線源

測定対象とする線エネルギー範囲をカバーするように核種を選択する。

校正用に用いられる核種の例と線エネルギーを表 2.1 に示す。

を用意しておくが良い。

表 2.1 校正に用いられる核種と 線エネルギーの例

核種	線エネルギー (keV)
^{241}Am	59.5
^{133}Ba	81.0
^{57}Co	122.1
^{139}Ce	165.8
^{133}Ba	356.0
^{137}Cs	661.6
^{54}Mn	834.8
^{88}Y	898.0
^{60}Co	1173.2
^{22}Na	1274.5
^{60}Co	1332.5
^{88}Y	1836.0

(Atomic Data and Nuclear Data Tables (1983)より引用)

検出器、線源固定用治具

Ge 半導体検出器と線源との距離を一定 (1m 以上) に保ち、かつ線源と検出器を結ぶ線と検出器中心軸とがなす角度を変えられること。(10° ~ 15° 刻みで設定できること) 測定に用いられる治具の例を図 2.2 に示す。

線源の設置にあたっては、線源自体による遮へいが生じないように線源の向きに注意する (図 2.2 参照)。また治具の回転中心と検出器の中心を合わせる (図 2.2 参照)。



図 2.2 治具の例

角度依存性の補正を行うため、検出器のピーク効率の角度依存性 $N(\theta)/N_0$ ^{*6} を実測によって求める。ピーク効率の角度依存性は線エネルギーに依存するため、複数のエネルギーについて実測する必要がある。

2.4.1.2 測定手順

- (1) 点線源を治具に固定し、ピークの計数が 10,000 カウント程度になるまで測定を行う。
(複数の線源を同時にセットして測定しても良い)
- (2) 角度を変えて同様の測定をくり返す。
(角度は $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲とする)
- (3) それぞれの測定結果について目的核種の正味ピーク計数率(cps)を求める。
- (4) 用いた標準線源の 1 秒あたりの線放出数および線源と検出器の距離から、検出器位置における線のフルエンス率($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)を求める。
- (5) (3)のピーク計数率を(4)のフルエンス率で除し、単位フルエンス率あたりのピーク効率を求める。
- (6) 線のエネルギーごとに、ピーク効率を角度の関数で表す。($\theta = 0^\circ$ の値を 1.0 として規格化した後、最小二乗法により関数化する)
- (7) 得られた関数式を用い、第 4 章 式(4.6)を用いて角度依存性補正項を線エネルギーごとに計算する。

2.4.1.3 角度依存性

Ge 結晶の長さ (L) と直径 (D) の比が 1 に近い検出器の場合、低エネルギー領域以外 ($>200\text{keV}$) におけるピーク効率の角度依存性は小さく、角度依存性の補正項は 1 に近くなる (図 2.3、図 2.4 参照)。

L/D 比が 0.9~1.1 の範囲内の検出器を使用し、200keV 以下の低エネルギー線 / X 線を測定対象としない場合には、角度依存性補正項 N_i/N_0 はほぼ 0.9~1.1 の範囲内に収まる。このような場合は角度依存性の校正を必ずしも行う必要はなく、 90° 方向からの照射のみで校正することもできる。

^{*6} 第 4 章 式(4.6)参照

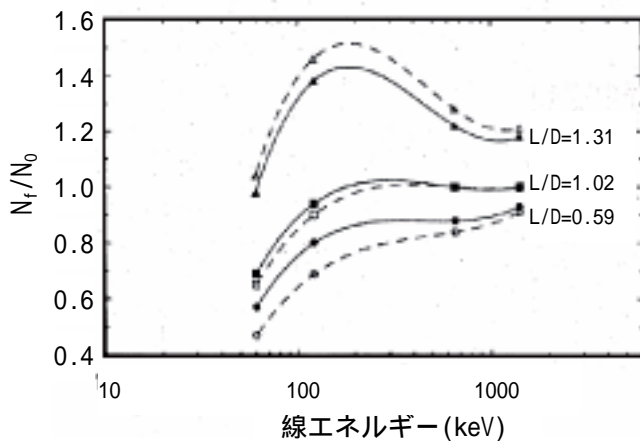


図 2.3 線エネルギーと角度依存性補正項 (N_f/N_0) との関係 (ICRU Rep.53 より引用)

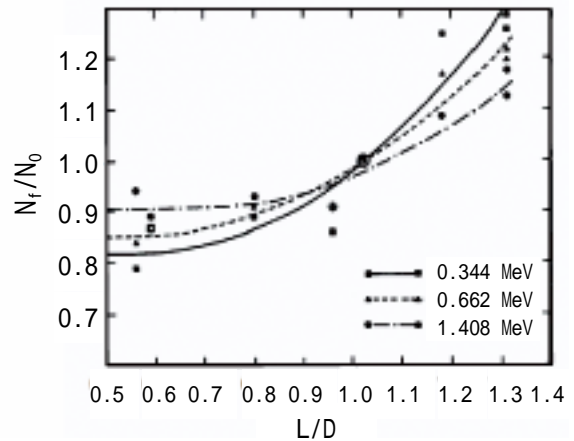


図 2.4 Ge 半導体検出器の長さ と直径の比 (L/D) と角度依存性補正項 (N_f/N_0) の関係 (HASL-300 より引用)

2.4.2 エネルギー校正

適当な線源を測定し、線による光電ピークが目的のチャンネルに来るようにアンプのゲイン及びアナログデジタルコンバータ (ADC) のゼロレベルを調整する。(コバルト 57、コバルト 60 等を用いると良い)

ソフトウェア上で線エネルギーとチャンネルの関係を関数化し、得られた校正式をファイルに保存しておく。⁷

通常、in-situ 測定においては、測定場所を移動する際には測定装置の電源を切るため、測定場所が変わるごとに機器を立ち上げ直す必要がある。機器を安定させるためには立ち上げ後ある程度時間をおいてから測定を開始した方が良いが、一般的に in-situ 測定の場合ウォームアップ時間をとる余裕はないことが多い。機器の安定性が高い場合は高電圧印加後数分後に測定を開始しても問題はないが、ウォームアップに必要な時間は装置によって異なるので、事前に確認しておくこと。

2.4.3 その他の準備

液体窒素は測定開始の 6 時間前には充填しておくこと。

バッテリーを充電しておくこと。(ポータブル MCA 及び PC)

バッテリー駆動できない機器がある場合は発電機を使用しても良いが、測定にノイズの影響が出ないことを事前に確認しておくこと。

⁷ ほとんどの MCA では、事前にエネルギー校正を行った結果を保存しておくことにより、スペクトルの横軸を線エネルギーで表示できる。

第 3 章 測定方法とスペクトル解析

3.1 測定場所の選定^{*1}

- ・ 測定場所としては、平坦で開けた場所（原則として最低で半径 10m 程度開けた場所）を選定する。
- ・ 草地や裸地等が広がっている場所で、放射性物質が降下した後、人の手の入っていないそのままの状態となっている場所が望ましい。
- ・ 車による 線の遮蔽を避けるため、運搬用車両は測定位置から 20m 以上離れた場所に駐車する。

3.2 測定

3.2.1 機器の設置手順

- (1) 選定した測定場所の中央に、Ge 半導体検出器を地表面から検出器結晶の中心までの高さが 1m になるように下向きに架台にセットし、地表面の起伏に合わせ、安定するように架台の脚を調整する。
- (2) ポータブル MCA 及び PC を 3m 以上離れた場所に設置し^{*2}、検出器との間のケーブルを接続する。MCA および PC を設置する台等を用いる場合は、地表からの 線の遮蔽が少なくなるよう、必要最小限の大きさとする。
- (3) 気象条件に応じて、機器内の温度を動作保証範囲内に保つような措置を講ずる。^{*3}

3.2.2 検出器の立ち上げ及び測定手順

- (1) MCA の電源を入れ、Ge 半導体検出器に高電圧を印加する。
- (2) 測定時間をプリセットし、測定を開始する。測定時間は 30 分～1 時間程度とするが、測定されたスペクトルを見てその都度判断する。（測定時間と検出可能レベルの関係については表 1.1 参照。）
- (3) デッドタイムを確認する。
- (4) 測定を開始したら、検出器周辺には近づかないようにする。（地表からの 線の遮蔽を避けるため。）

3.2.3 測定中のチェック

in-situ 測定で得られる 線スペクトルには、通常は自然に存在する放射性核種に由来するピークが検出されるので、それらを用いた測定中のスペクトルチェックが可能である。スペクトル上でカリウム 40 のピーク（1,461keV）の位置（中心チャンネル）及び FWHM を確認する。ピークが本来検出されるべき位置より 2keV 以上ずれていた場合や FWHM が大き

^{*1} 解説 A、D-1 参照。なお、周辺地形の広がりに対する補正方法については第 5 章参照。

^{*2} 汚染の可能性のある場所で測定する場合、検出器、ケーブル及び MCA をビニール等で覆っておくこと。

^{*3} 夏季の炎天下の測定では日除け、冬季には保温カバー等を必要に応じて用いると良い。

く変化した場合には、機器に異常がある可能性が考えられるため点検を行う。

3.2.4 測定終了時の手順

- (1) プリセットした測定時間に達しているかを確認する。
- (2) データ収集が停止しているのを確認した後、スペクトルをデータファイルに保存し、ファイル名を記録する。
- (3) 高圧電源をシャットダウンし、MCAの電源を切る。
- (4) PCをシャットダウンし、電源を切る。
- (5) MCAと検出器、MCAとPCの接続ケーブルを外す。
- (6) 検出器に衝撃を与えないように注意しながら支持架台から外し、運搬用ケースに収納する。
- (7) 次の測定場所へ移動する。

3.3 記録

測定場所や測定に関して、以下の項目等を記録する。

3.3.1 測定場所に関する記録

- ・ 測定場所周辺^{*4}の状況を記録する
 - 地形（平坦、傾斜地等）
 - 土地利用（グラウンド、神社等の一角、耕地、未耕地等）
 - 地面の状況（草地、裸地、芝地、砂地、畑、樹園地、アスファルト等）
 - 土壌の種類（砂質、壤質、粘質等）^{*5}
 - 草地等の広がり範囲
 - 土壌中水分^{*6}
 - 周囲の建物の状況（測定地点から建物までの距離、建物の大きさ、建材（木造、コンクリート等））
- ・ 測定場所周辺の状況を写真撮影する。
- ・ 測定地点付近の線量率をサーベイメータで測定し、記録する。^{*7}
- ・ GPS^{*8}が使用可能であれば、測定場所の緯度・経度を測定し、記録する。
- ・ 天候（降雨状況を詳細に記録、可能ならば風向、風速及び気温等も記録）

3.3.2 測定に関する記録

^{*4} 周囲 30m の範囲について、状況を記録する。

^{*5} 土壌の分類は、放射能測定法シリーズ 16「環境試料採取法」参照。また特殊な土壌（腐葉土等）の場合はその内容を記録する。

^{*6} 可能ならば表土を採取して測定する。

^{*7} 局所的に線量率の高い又は低い場所を測定していないことを確認するため。

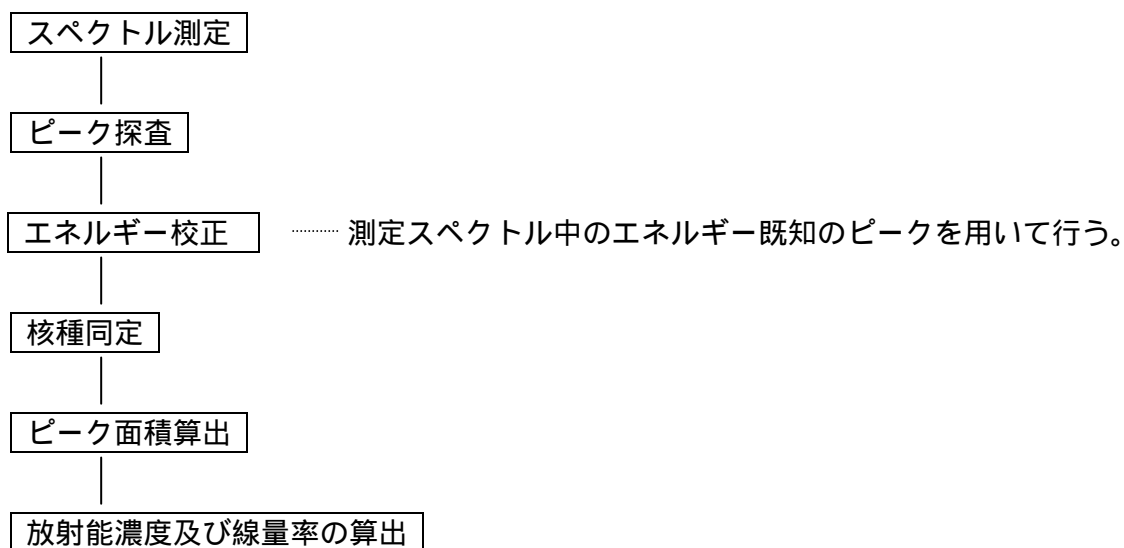
- ・ 測定開始年月日、時間
- ・ 測定者
- ・ 検出器及び測定器（型番、シリアル番号等）
- ・ 測定スペクトルのファイル名
- ・ 主要ピーク^{*9}の中心チャンネル等
- ・ スペクトルの特徴（特異的な形状や FWHM の増加等があれば記録）

3.4 土壌の採取

in-situ 測定によって人工放射性物質が沈着していることが判明した場合には、付近（5m 以内）の土壌をコアサンプルとして採取しておく有効である。（解説 C-2(2)参照）

3.5 スペクトル解析

3.5.1 解析の手順



^{*8} Global positioning system

^{*9} 通常検出される放射性核種及び線エネルギーについては表 3.2 参照。

3.5.2 ピーク探査、核種同定及びピーク面積算出

ピーク探査、核種同定及びピーク面積算出については、通常の線スペクトロメトリーと同様であるため、放射能測定法シリーズ7を参考に実施する。

平常時に一般的に検出される核種を表3.1に示す。

表3.1 in-situ測定において一般的に検出される放射性核種

自然に存在する放射性核種			人工放射性核種
ウラン系列	トリウム系列	その他	
^{214}Pb ^{214}Bi	^{208}Tl ^{212}Pb ^{212}Bi ^{228}Ac	^{40}K ^7Be	^{137}Cs

3.5.3 エネルギー校正

エネルギー校正については、野外での測定であり、温度変化の影響や電源投入後比較的短時間の内に測定を開始しなければならないことなどから、in-situ測定特有の注意が必要である。実験室等での線源を用いたエネルギー校正時から、温度変化等によってピークがシフトしてしまう可能性があるため、in-situ測定したスペクトルについて、その中に検出されたエネルギー既知のピークを用いてエネルギー校正を再度実施する。in-situ測定では、大抵の場合自然に存在する放射性核種が検出されるため、それらのピークを利用することができる。放射性核種と放出線エネルギーの一例を表3.2に示す。

表3.2 エネルギー校正に利用できる自然に存在する放射性核種と線エネルギー

核種	線エネルギー (keV)	放出率 (%)
^{212}Pb	239	43.4
^{214}Pb	352	36.9
^{208}Tl	583	30.6
^{214}Bi	609	46.9
^{228}Ac	911	29.0
^{40}K	1461	10.7
^{208}Tl	2615	35.9

(ICRU Rep.53 より引用)

第 4 章 放射能濃度及び空間放射線量率の算出

4.1 解析の条件

in-situ 測定では、地表面に沈着した放射性物質について放射能濃度（単位面積あたりの放射能：Bq/m²）及び空間放射線量率(Gy/h)を算出することができる。これらを評価するために、Beck らが開発した HASL の解析法（以下「HASL 方式」という。）が世界的に利用されており、また国際放射線単位測定委員会（ICRU）においてもこの方式が採用されていることから、本マニュアルにおいても HASL 方式に基づいて解析を行うものとする。

HASL 方式では、周囲の地形、放射性物質の土壤中における鉛直分布、検出器設置高さ等のいくつかの条件を仮定した上で放射能濃度や空間放射線量率を算出する。仮定条件を表 4.1 に示す。

表 4.1 in-situ 測定における仮定条件

条件	内容
周囲の地形	無限に開かれた平らな地形（無限平面）
放射性物質の土壤中における鉛直分布	地表面分布、指数分布、均一分布
検出器設置高さ	地上高 1m

土壌中の深さ Z における放射能濃度 $A(Z)$ は次のように表わせる。

$$A(Z) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\beta}\right) \quad (4.1)$$

$A(Z)$: 深さ Z における放射能濃度(Bq/g)

Z : 深さ(g/cm²)

A_0 : 地表面における放射能濃度(Bq/g)

: 放射性物質の土壤中における鉛直分布を表すパラメータで、単位は g/cm² である。 β は浸透の程度を表し、数値が大きい程深く浸透していることを示す。

β の値は放射能濃度が地表の 37% になる深さであり、地表面分布の場合 β は限りなく 0 に近づき、土壌中均一分布の場合無限大となる。指数関数モデルは単なる近似であるが、放射性物質の沈着後ある程度の期間においてはかなり現実的なものである。時間の経過とともに放射性物質の移動・拡散によってある深さにピークを持つような分布となったり、土地の利用や侵食によって指数分布ではなくなる可能性がある。しかしながら、これらのような場合であっても、地上での測定結果を土壌中線源に関連付けるために、実効的なを用いることができる。

単位面積あたりの放射能（総沈着量；インベントリー） A_s は次のように表わせる。

$$A_a = \beta \cdot A_0 \quad (4.2)$$

A_a : 単位面積あたりの放射能(Bq/cm²)

A_0 : 地表面における単位重量あたりの放射能(Bq/g)

: 鉛直分布を表すパラメータ(g/cm²)

4.2 放射能濃度の算出

4.2.1 地表に沈着した放射性物質の解析

地表に沈着した放射性物質の評価について、放射能濃度 A_a (単位面積あたりの放射能 ; Bq/cm²) は、以下の式により算出する。

$$A_a = N_f / \frac{N_f}{A_a} \quad (4.3)$$

A_a : 単位面積あたりの放射能(Bq/cm²)

N_f : in-situ 測定におけるあるエネルギーEのピーク計数率(cps)

N_f/A_a : in-situ 測定における効率

N_f/A_a は、以下の式により算出する。

$$\frac{N_f}{A_a} = \frac{N_0}{N_0} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{1}{A_a} \quad (4.4)$$

N_0 : 検出器軸方向(0°)から入射するエネルギーEの線によるピーク計数率(s⁻¹)

: フルエンス率(cm⁻²s⁻¹)

(1) N_0

N_0 は、検出器軸方向(0°)でのフルエンス率(cm⁻²s⁻¹)あたりのピーク計数率(cps)である。この値は純粋に検出器に依存するもので、測定を行う者が検出器毎に線源を使った照射実験によって算出する。

- ・ 検出器の軸方向で1m以上の距離にエネルギーの異なるいくつかの線源を設置する。
- ・ 検出器の実効中心は、高エネルギー(>1MeV)の場合には幾何学的中心とし、低エネルギー(<0.1MeV)の場合には検出器結晶面とする。その間のエネルギーでは平均通過距離の深さを実効中心とする(表4.2)。平均通過距離は線の数が最初の37%になる深さである。

表 4.2 線の Ge 半導体検出器中における平均通過距離

線エネルギー (MeV)	平均通過距離 (cm)
0.1	0.3
0.15	0.8
0.2	1.1
0.3	1.7
0.4	2.0
0.5	2.3
0.6	2.5
0.8	2.9
1	3.3

- 平均通過距離の深さが幾何学的中心を超える場合には幾何学的中心を実効中心とする。
- 測定を行い、 N_0 を算出する。
- は以下の式により算出する。

$$= \frac{S \cdot a}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (4.5)$$

S : 線源の放射能(Bq)

a : 線の放出比

r : 線源と検出器実効中心の距離(cm)

- $N_0/$ を算出し、エネルギーの関数として表す。例を図 4.1 に示す。

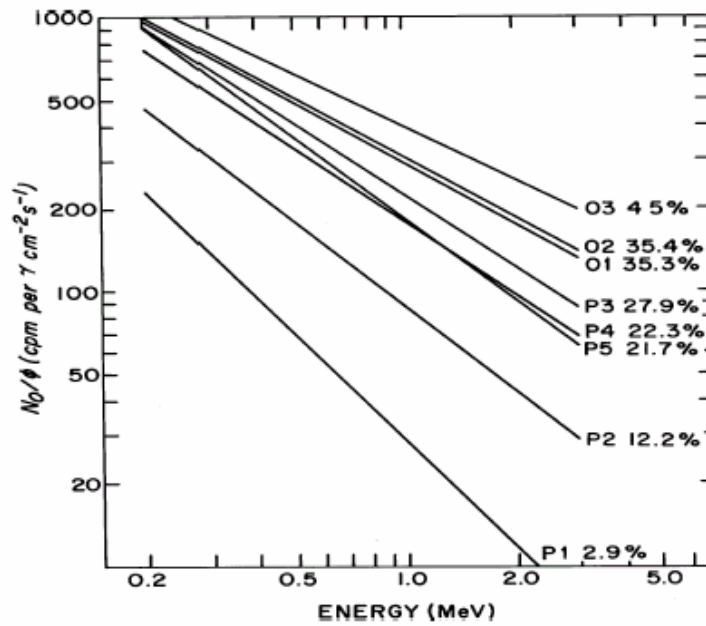


図 4.1 相対効率の異なるいくつかの検出器についてのフルエンス率あたりの計数率 (N_0/ϕ) のエネルギーによる変化

P1~ P5 および O1~ O3 は検出器の種類、右側の数字は相対効率を示す。

(HASL-300 より引用)

(2) N_f/N_0

N_f/N_0 は検出器の方向依存性を補正するための項で、環境線の入射方向と検出器の方向依存性を考慮して以下の式により算出する。

$$\frac{N_f}{N_0} = \int_0^{\pi/2} \frac{\phi(\theta)}{\phi} \frac{N(\theta)}{N_0} d\theta \quad (4.6)$$

$(\phi(\theta)/\phi)$: あるジオメトリにおいて、エネルギーEの環境線が θ の角度から検出器に入射する割合。例として、セシウム 137 (662keV) に対していくつかのジオメトリについて計算した結果を図 4.2 に示す。なお、この値は線エネルギーによって大きく変化しない。

$N(\theta)/N_0$: エネルギーEの線が θ の角度から入射する場合の相対感度 (0° での感度を基準)。エネルギーの異なるいくつかの線源を用いて入射角度を変えて照射を行い算出する。

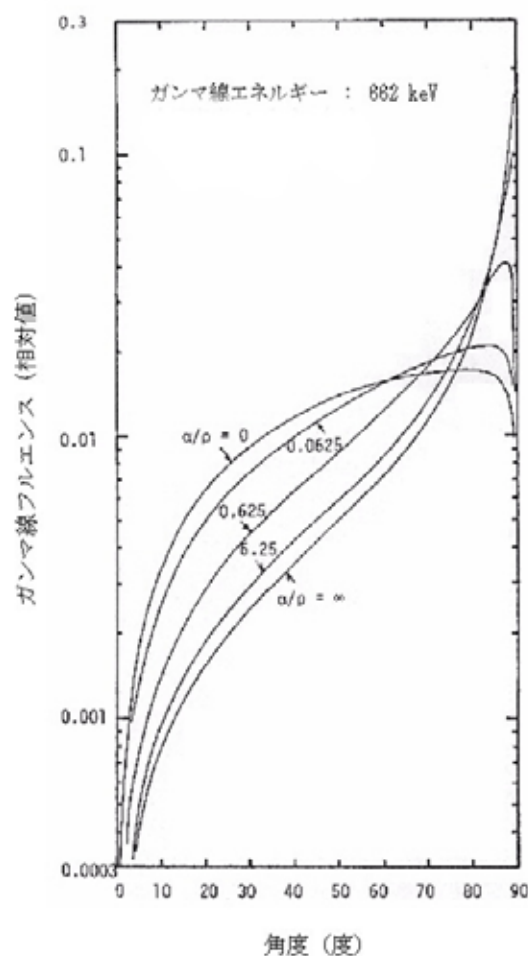


図 4.2 地上高 1m における 線の入射角度依存性
(JAERI-M 6498 より引用)

Ge 結晶の長さ (L) と直径 (D) がほぼ同じ検出器の場合には、検出器感度の角度依存性が小さいため、補正項 N_f/N_0 は 1 に近く、また in-situ 測定では多くの 線が水平方向から入射するため、その方向のみの照射で機器を校正することもできる。その場合式(4.4)は以下のような単純な式となる。

$$\frac{N_f}{A_a} = \frac{N_{90}}{A_a} \quad (4.7)$$

N_{90} : 検出器軸に対し 90° 方向から入射するあるエネルギー E の 線によるピーク計数率 (s^{-1})。

in-situ 測定では通常検出器を下向きにして使用し、環境 線の多くは水平方向から入射するため、 $N_{90}=N_f$ とすることができる。

(3) λ/A_a

λ/A_a は、土壤中放射能濃度 (A_a) と検出器位置 (1m の高さ) の 線フルエンス率の関係を示し、線源分布によって異なった値となる。代表的な核種について、放射性物質の土壤中における鉛直分布 () ごとに、 λ/A_a の値を付表-1 に示す。

には放射性物質沈着後の経過時間及び降水量に応じて、基本的に表 4.3 の値を用いることができる。また、透過性のない地表面(屋根、アスファルト、コンクリート)の場合には、 λ は 0.1 g/cm^2 が適している。表 4.3 の値は、土質が特殊(腐葉土等)ではなく、人間活動による土地の乱れがない場合に適用できる。

なお、放射性物質の土壤中における鉛直分布を正確に把握することが in-situ 測定の信頼性を高める最も効果的な方法であることから、詳細を解説 C に記載した。

表 4.3 放射性物質の土壤中における鉛直分布

沈着後の経過時間 (年)	降水量(mm)	鉛直分布を表すパラメータ (g/cm ²)
0～1	<3	0.100
0～1	>3	1.00
1～5	-	3.00
5～20	-	10.0
指針*		4.85

数値は一部を除き ICRU Rep.53 より引用

* 「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」
原子力安全委員会（平成 13 年）

4.2.2 土壤中に均一に分布する放射性物質の解析

ウラン系列核種、トリウム系列核種及びカリウム 40 など土壤中に均一に分布していると考えられる自然に存在する放射性物質についても、前述と同様に算出することができる。ただし、放射能濃度は、単位重量あたりの放射能 A_m となり、単位は Bq/g である。均一分布として計算した式(4.4)中の A_m を表 4.4 に示す。

大抵の自然状況において、自然に存在する放射性物質が土壤中に均一に分布するとの仮定は有効である。ただし、近くに建造物がある場合には、その中にも自然に存在する放射性物質が存在し、その影響を受けるため注意が必要である。

なお、ウラン系列核種を解析する場合には放射平衡について注意が必要である。ラドン 222 が土壌から散逸するため、ラドン 222 の壊変生成物である鉛 214、ビスマス 214 などは低い値を示すことがある。ラドン 222 の散逸は一般的に 15%程度であるが、大気中の壊変生成物が測定に影響するため、一概に過小評価の程度を決めることはできない。また、降雨時には雨滴とともにラドン 222 やその壊変生成物が地表面に集まるため、降雨時及び降雨後数時間以内の測定は、土壌中のウラン系列核種を解析する場合には適さない。

ウラン系列のラジウム 226 は、放出線のエネルギー（186keV）がウラン 235（186keV）と重なるため、定量に用いることはできない。

表 4.4 土壤中放射性核種濃度と地上高 1m での線フルエンス率との関係 (λ/A_m)
 (放射性物質が土壤中に均一に分布している場合)

系列	核種	エネルギー MeV	放出比* $s^{-1}Bq^{-1}$	λ/A_m $(cm^{-2}s^{-1})/(Bq/g)$
^{238}U	^{214}Pb	0.295	0.192	0.828
	"	0.352	0.369	1.71
	^{214}Bi	0.609	0.469	2.75
	"	0.665	0.0158	0.0965
	"	0.768	0.0497	0.325
	"	0.934	0.0319	0.229
	^{234m}Pa	1.001	0.00845	0.0629
	^{214}Bi	1.120	0.155	1.22
	"	1.238	0.0610	0.507
	"	1.378	0.0410	0.361
	"	1.408	0.0250	0.223
	"	1.509	0.0220	0.203
	"	1.730	0.0300	0.298
	"	1.765	0.162	1.62
	"	1.847	0.0216	0.222
	"	2.119	0.0125	0.138
	"	2.204	0.0525	0.592
	"	2.448	0.0162	0.193
	^{232}Th	^{212}Pb	0.239	0.434
^{224}Ra		0.241	0.0397	0.158
^{228}Ac		0.338	0.120	0.547
"		0.463	0.0464	0.241
^{208}Tl		0.511	0.0809	0.438
"		0.583	0.306	1.76
^{212}Bi		0.727	0.0675	0.430
^{228}Ac		0.795	0.0484	0.322
^{208}Tl		0.861	0.0453	0.313
^{228}Ac		0.911	0.290	2.060
"		0.965	0.0545	0.398
"		0.969	0.175	1.282
"		1.588	0.0371	0.352
^{212}Bi		1.621	0.0149	0.143
^{228}Ac		1.630	0.0195	0.187
^{208}Tl		2.615	0.359	4.418
^{40}K	^{40}K	1.461	0.107	0.971

* 親核種の壊変あたりの放出

(ICRU Rep.53 より引用)

4.3 空間放射線量率の算出

地表に沈着した放射性物質あるいは土壤中に均一に分布する放射性物質による地上高 1m における空間放射線量率（以下「線量率」という。）は、以下の式により算出する。

$$I = N_f / \frac{N_f}{I} \quad (4.8)$$

I : 線量率(nGy/h)

N_f : in-situ 測定におけるあるエネルギーE のピーク計数率(s^{-1})

N_f/I は、以下の式により算出する。

$$\frac{N_f}{I} = \frac{N_0}{N_0} \cdot \frac{N_f}{I} \quad (4.9)$$

N_0 : 検出器軸方向 (0°) から入射する 線によるピーク計数率(s^{-1})

: フルエンス率($cm^{-2}s^{-1}$)

式(4.9)は、放射能濃度 A が線量率 I に変わった以外は、式(4.4)と同様である。線量率の単位は空気カーマである。 $//$ は、あるジオメトリにおける放射性物質からのエネルギーE の 線による 線フルエンス率とその放射性物質からの全線量率との関係を表す係数である。線量率 I には、エネルギーE の 線の一次線による線量率のみではなく、散乱線及びその放射性物質から放出される全ての 線の寄与を含める必要がある。散乱線の評価にはモンテカルロ計算またはボルツマン輸送方程式を用いる必要がある。放射性物質が土壤中に指数分布している場合について計算された $//$ の値を付表-2 に、土壤中に均一に分布している場合(自然に存在する放射性物質)についての $//$ を表 4.5 に示す。ウラン系列核種やトリウム系列核種の $//$ は、系列内のある核種から放出されるある 線のフルエンス率と、系列内の全ての核種から放出される 線による線量率との関係を表している。従って、ある核種のある 線について線量率を算出すると、その系列の全ての核種からの線量率^{*1} となる。系列内の複数の核種から放出される 線または一つの核種から放出される複数の 線について解析を行う場合、それぞれの 線から算出した線量率を平均して^{*2}、その系列の線量率とする。

また、線量率は、放射能濃度から算出することも可能である。指数分布の場合の換算係数を付表-3 に示す。均一分布(自然に存在する放射性物質)の場合の換算係数を表 4.6 に

^{*1} in-situ 測定の対象エネルギー範囲を 2MeV までとした場合でも、測定された核種の 2MeV 以下の 線を解析して得られる線量率には、その核種が属する系列の 2MeV 以上の 線による寄与分も含まれることになるので、3MeV まで測定した NaI(Tl)シンチレーション検出器等による線量率と同等の結果を得ることができる。

示す。表 4.6 中のウラン系列やトリウム系列の合計の値は、系列核種が放射平衡となっているとして算出している。^{*3}

^{*2} 計数誤差を用いて荷重平均する。

^{*3} ウラン系列核種には気体のラドンが含まれるため、放射平衡が成立していないことが考えられるが、in-situ 測定において測定対象となるのはラドン 222 以降の鉛 214 及びビスマス 214 などであり、また線量に寄与するのも鉛 214 及びビスマス 214 の線が主であるため、通常放射平衡が成立していないことを問題にする必要はない。

表 4.5 土壤中に均一に分布する放射性物質による地上高 1m での線量率と線フルエンス率の関係 (I/I)

系列	核種	エネルギー (MeV)	I/I ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)/($\mu\text{Gy/h}$)
^{238}U	^{214}Pb	0.295	1.79
	"	0.352	3.70
	^{214}Bi	0.609	5.95
	"	0.665	0.209
	"	0.768	0.703
	"	0.934	0.496
	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.001	0.136
	^{214}Bi	1.120	2.64
	"	1.238	1.10
	"	1.378	0.781
	"	1.408	0.483
	"	1.509	0.439
	"	1.730	0.645
	"	1.765	3.51
	"	1.847	0.481
	"	2.119	0.299
	"	2.204	1.28
"	2.448	0.418	
^{232}Th	^{212}Pb	0.239	2.86
	^{224}Ra	0.241	0.262
	^{228}Ac	0.338	0.906
	"	0.463	0.399
	^{208}Tl	0.511	0.725
	"	0.583	2.91
	^{212}Bi	0.727	0.712
	^{228}Ac	0.795	0.533
	^{208}Tl	0.861	0.518
	^{228}Ac	0.911	3.41
	"	0.965	0.659
	"	0.969	2.12
	"	1.588	0.583
	^{212}Bi	1.621	0.237
^{228}Ac	1.630	0.310	
^{208}Tl	2.615	7.31	
^{40}K	^{40}K	1.461	23.3

線量率 (I) は、系列核種の放射平衡が成立しているものとして、系列核種全てによる線量率とする。

表 4.6 土壤中放射能濃度と地上高 1m での線量率の関係 (I/A_m)
(放射性物質が土壤中に均一に分布している場合)

核種	放射能濃度あたりのカーマ率 ($\mu\text{Gy/h})/(\text{Bq/g})$
^{238}U series	
^{238}U	$4.33 \cdot 10^{-5}$
^{234}U	$5.14 \cdot 10^{-5}$
^{234}Th	$9.47 \cdot 10^{-4}$
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$
^{234}Pa	$4.49 \cdot 10^{-4}$
^{230}Th	$6.90 \cdot 10^{-5}$
^{226}Ra	$1.25 \cdot 10^{-3}$
^{222}Rn	$8.78 \cdot 10^{-5}$
^{214}Pb	$5.46 \cdot 10^{-2}$
^{214}Bi	$4.01 \cdot 10^{-1}$
^{210}Tl	$1.15 \cdot 10^{-4}$
^{210}Pb	$2.07 \cdot 10^{-4}$
Total	$4.62 \cdot 10^{-1}$
^{232}Th series	
^{232}Th	$4.78 \cdot 10^{-5}$
^{228}Ra	$5.45 \cdot 10^{-5}$
^{228}Ac	$2.21 \cdot 10^{-1}$
^{228}Th	$3.44 \cdot 10^{-4}$
^{224}Ra	$2.14 \cdot 10^{-3}$
^{220}Rn	$1.73 \cdot 10^{-4}$
^{212}Pb	$2.77 \cdot 10^{-2}$
^{212}Bi	$2.72 \cdot 10^{-2}$
^{208}Tl	$3.26 \cdot 10^{-1}$
Total	$6.04 \cdot 10^{-1}$
^{40}K	$4.17 \cdot 10^{-2}$

放射平衡が成立しているとしての値である。

(ICRU Rep.53 より引用)

第 5 章 測定結果の補正

in-situ 測定法は、周囲の地形、検出器設置高さ等を仮定して解析を行うため、解析の条件と実際の条件が異なった場合の解析結果への影響を把握しておく必要がある。

in-situ 測定で放射能濃度を算出する際に必要な係数（式 4.4 の λ 、付表-1 及び表 4.4 の値）は、 γ 線を減衰させるような障害物が周囲になく、無限に開かれた地形（無限平面）を仮定しての計算値である。しかし、実際の測定では完全な無限平面地形はあり得ないため、無限平面を仮定して放射能濃度を解析すると過小評価となる（解説 B-1）。この過小評価については、周辺の広がり把握することで補正することができる。なお、定点での変動監視を目的として in-situ 測定を行う場合には、必ずしも補正の必要はない。

検出器の設置高さについては、通常 1m の高さに設置するので補正する必要はなく、土壌中の水分については、土壌中における放射性物質の鉛直分布（解説 A）の影響に含まれるのでこれについても補正する必要はない。

なお、検出器設置高さの放射能濃度測定値への影響は解説 B-2 に、土壌中水分の影響は解説 B-3 に記載した。

また、空間放射線量率の測定値については、十分に開かれていない場所で測定したスペクトルを無限平面として解析すると、直接 γ 線と散乱線の寄与割合が異なるため、線量率の解析結果は過大評価となる。しかし、その影響はわずかであるため、空間放射線量率の測定値については補正する必要はない。

5.1 周辺地形の広がりに対する補正

セシウム 137 が土壌中に指数分布（ $\lambda: 4.85 \text{ g/cm}^2$ ）している場合の地上 1m 位置の γ 線フルエンス率について、周囲からの寄与割合を図 5.1 に示す。周囲が半径 10m 開けている場合の測定値は、無限平面の場合の測定値の 85%となる。無限平面でないことに伴う過小評価の程度は、放射性物質の土壌中における鉛直分布によって異なり、厳密には γ 線エネルギーにも依存する。詳細は解説 B-1 に記載した。

補正方法としては、検出器を中心として開かれた範囲（平均的な半径）をメジャーやテープを用いて算出し、放射能濃度の測定値に表 5.1 の補正係数を乗ずる。表 5.1 は、600keV の γ 線を対象とした場合の補正係数であるが、エネルギーの違いによる補正係数の差異は大きくないため、他のエネルギーに対しても適用することができる。なお、基本的に、空間放射線量率の測定値を補正する必要はない。

また、補正には、開かれた範囲を特定する必要がある。人工放射性物質がフォールアウトとして地表に沈着した場合において、アスファルトや建造物への沈着が少ないと考えられる場合には、土が露出している範囲を開かれた範囲とする。沈着が少ないかどうかの判断には、サーベイメータによる測定結果や放射性物質が降下してからの経過時間等を参考にする。

表 5.1 周辺地形の広がりに対する補正係数

鉛直分布を表すパラメータ (g/cm^2)	周辺地形の広がり (半径: m)			
	10	15	20	25
0.100	1.6	1.4	1.3	1.2
1.00	1.3	1.2	1.1	1.1
3.00	1.2	1.1	1.1	1.1
10.0	1.1	1.1	1.0	1.0
4.85	1.2	1.1	1.1	1.0
(均一分布)	1.1	1.0	1.0	1.0

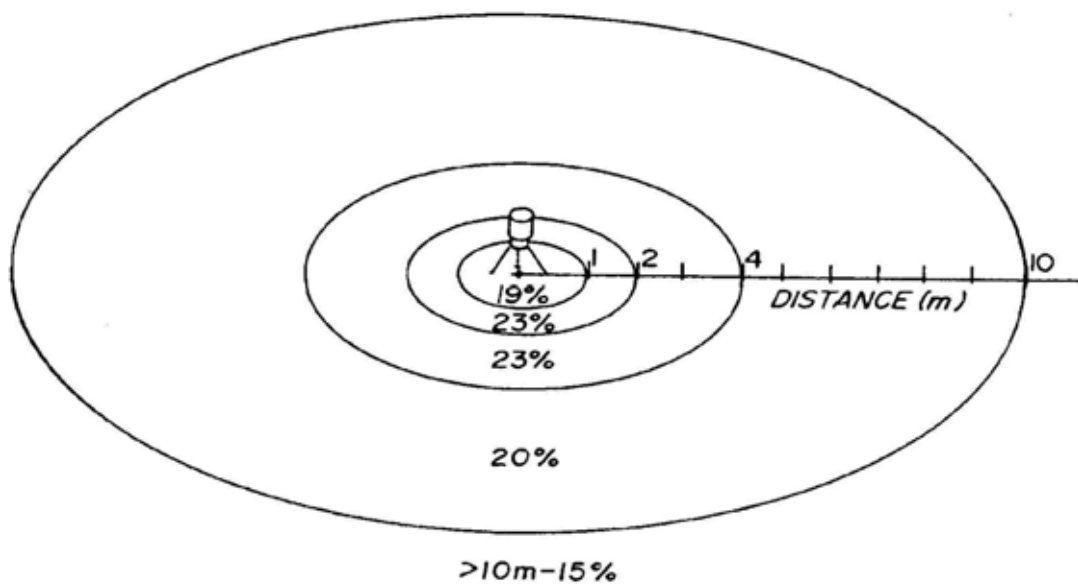


図 5.1 セシウム 137 が土壤中に指数分布 (: $4.85 \text{ g}/\text{cm}^2$) している場合の地上高 1m での線フルエンスの周囲からの寄与割合 (HASL-300 より引用)

解 説

解説 A in-situ 測定法の目的及び測定場所

本マニュアルに示した測定法は、放射性物質が環境中に放出され地表に沈着した場合において、下記に示す項目を目的に実施される。

- ・ 放射性核種の特定
- ・ 放射能濃度の算出（放射性核種毎）
- ・ 空間放射線量率の算出（放射性核種毎）

上記項目の内、放射能濃度の算出にあたっては、測定場所について注意が必要である。測定場所の状況が放射能濃度の解析結果に大きく影響するので、解析の条件（無限平面）に近い場所、すなわち周囲が十分に開放されている場所（原則として最低で半径 10m 程度開けた場所）を確保する必要がある。また、in-situ 測定法により得られる放射能濃度は地表に沈着した量なので、降下した量と比較検討するような場合には、アスファルト等で覆われた場所ではなく、放射性物質が保持されていると考えられる草地や裸地等が広がっている場所で、放射性物質が降下した後、人の手の入っていないそのままの状態となっている場所が望ましい。

なお、放射性核種の特定や空間放射線量率の算出を目的とする場合には、場所を特に限定せずに測定することができる。

解説 B in-situ 測定法の有効性

1. 緊急時等の初期の段階においては、サーベイメータと in-situ 測定法との併用により、より詳細に状況を把握することができる。in-situ 測定法を用いると放射性核種を特定できるので、放射性物質の放出状況を把握することが可能であり、さらに、特定した放射性核種のそれぞれの半減期により、測定後の空間放射線量率の変化を予測し正確な線量評価に資することができる。

ただし、本マニュアルに示した測定法は放射性物質が地表に沈着した場合を想定しており、緊急時等の初期の段階では、希ガスや施設からの直接 線等が測定に影響する可能性もあるので、正確な放射能濃度を算出することは容易ではないと考えられる。*

2. 放射性物質が環境に放出され広い範囲に放射能汚染が生じ、その汚染の分布を作成するような場合には、in-situ 測定法は特に有効である。

降雨とともに降下した放射性物質は窪んだ地形に集まりやすく、地表面では風の影響によってある場所に滞まることもあるため、放射性物質は測定地点周辺において均一に分布しない可能性がある。このような場合、土壌を採取して代表的な値を得るのは困難であるが、in-situ 測定法によれば測定地点周辺の平均的な放射能濃度を求めることができる。

* 緊急時等の初期の段階においても、解説 A 同様、放射性核種の特定や空間放射線量率の算出は可能である。

解説 C 放射性物質の土壌における鉛直分布

解説 C-1 解析結果への影響

土壌中の深さ Z における放射能濃度 $A(Z)$ を以下のように表した場合について、放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ の解析結果への影響を図 C.1 に示す。

$$A(Z) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\beta}\right) \quad (\text{C.1})$$

$A(Z)$: 深さ Z における放射能濃度 (Bq/g)

Z : 深さ (g/cm²)

A_0 : 地表面における放射能濃度 (Bq/g)

: 放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータで、単位は (g/cm²) である。 は浸透の程度を表し、数値が大きい程深く浸透していることを示す。

パラメータとしては、 を土壌密度 (g/cm³) で除して $RL(\text{cm})$ 、 の逆数を / (cm²/g)、 RL の逆数を (cm⁻¹) として表す場合もある。

図 C.1 はある場所で測定した一つのスペクトルについて、放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ を変えて、線量率及び放射能濃度 (単位面積あたりの放射能; Bq/cm²) を解析した結果である。線量率は に大きく依存しないが、放射能濃度は に大きく依存する。従って、放射能濃度を算出する際には、 の把握が測定の信頼性に関わる最も大きな問題である。フォールアウトのセシウム 137 を評価するため、現在 の値として 4.85 g/cm² (: 0.33cm⁻¹)^{*1} が一般的に利用されているが、この値をそのまま事故直後の地表面分布に適用してしまうと放射能濃度を約 3 倍に過大評価することになる。

また、同一核種からエネルギーの異なる複数の 線が放出される場合において、エネルギーによって放射能濃度の解析結果に差異が認められる場合には、放射性物質の土壌における鉛直分布の仮定等に問題のある可能性がある。

*1 「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」
原子力安全委員会 (平成 13 年)

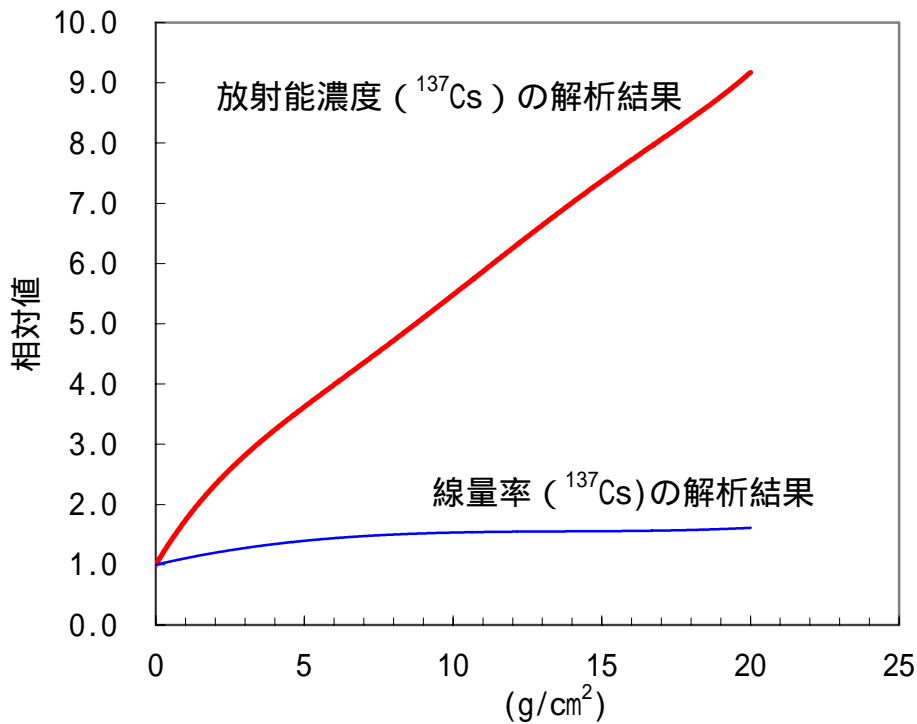


図 C.1 鉛直分布を表すパラメータ の解析結果への影響

ある測定スペクトルに対してセシウム 137 (^{137}Cs) を評価する際に、 μ の値を 0 から 20 まで変化させて解析した結果で、地表面分布 ($\mu=0$) として解析した結果に対する相対値である。

μ を大きくする程、放射能濃度の解析結果も増加する。これは、 μ が大きいということは、放射性物質が地中深くに浸透したことを意味し、測定したピーク計数率 (ここでは一定の値) を小さくなった効率 (N_f / A_a) で除することで、大きな放射能濃度が算出されるためである。

線量率が μ に大きく依存しないのは、放射性物質が深く浸透しても、線量率のための効率 (N_f / I) が大きく変化しないためである。

解説 C-2 鉛直分布を表すパラメータ の評価

放射性物質の土壌中における鉛直分布を表すパラメータ を正確に把握することが、in-situ 測定の信頼性を高める最も効果的な方法であるが、 は、土質、気象状況、経過年数によって大きな変動を示すため、正確に評価するのは容易ではない。また、地表沈着後の侵食や人間活動による土地の乱れも考慮する必要がある。参考としてさまざまな研究グループが報告したセシウムについての を表 C.1 に示す。

表 C.1 放射性物質（セシウム）の土壤中における鉛直分布の評価例

沈着後の 経過時間	フォールアウト の種類	場所	^a g/cm ²	参照
3-4 weeks	Chernobyl	Western Russia	0.1-2.0 ^b	Golikov <i>et al.</i> , 1993
5-6 weeks	Chernobyl	Germany	0.5-1.0 ^b	Jacob and Meckbach, 1992
<1y	Chernobyl	Sweden	2.2	Karlberg, 1987
<1y	Chernobyl	Germany	1.4	Winkelmann <i>et al.</i> , 1988
<1y	Chernobyl	Germany	0.5-4	Jacob <i>et al.</i> , 1994a
1-3y	Chernobyl	Germany	1.0-10	Jacob <i>et al.</i> , 1994a
1-3y	Chernobyl	Western Russia	1.4 ± 0.2	Golikov <i>et al.</i> , 1993
4y	Chernobyl	Western Russia	1-7	Miller <i>et al.</i> , 1991
4y	Chernobyl	Belarus, Ukraine	1.4-5.6	IAEA, 1991a
1-5y	Weapons test	Eastern U.S.	4.2	Beck, 1966
5y	Chernobyl	Western Russia	2-4.5	Jacob <i>et al.</i> , 1994a
3-6y	Chernobyl	Germany	2.5-15	Jacob <i>et al.</i> , 1994a
3-6y	Chernobyl	Ukraine	1-4	Jacob <i>et al.</i> , 1994a
3-6y	Chernobyl	Western Russia	3.3 ± 0.7 ^b	Golikov <i>et al.</i> , 1993
>15y	Weapons test	Western U.S.	14 ± 4 ^c	Beck and Krey, 1980
>15y	Weapons test	Western U.S.	2.9 ± 1.6 ^d	Miller and Helfer, 1985
>15y	Weapons test	Southern U.S.	14-20	Faller, 1992
>15y	Weapons test	Eastern U.S.	2-7(forests) 8-19(fields)	Miller <i>et al.</i> , 1990

^a ± は標準偏差を示す。

^b 降雨による沈着。

^c 乾燥地域、灌漑した芝地。

^d 乾燥地域、未耕地。

(ICRU Rep.53 より引用)

(1) 簡易的な評価方法

放射性物質の土壤中における鉛直分布についての指数関数モデルは単なる近似であるが、放射性物質の降下後ある程度の期間においてはかなり現実的なものである。時間の経過とともに放射性物質の移動・拡散によってある深さにピークを持つような分布となったり、土地の利用や侵食によって指数分布ではなくなる可能性がある。しかしながら、これらのような場合であっても、指数関数モデルにおける実効的な λ を用いることで、地上での測定結果を土壤中線源に関連付けることができる。また、地表の粗さの影響についても、実効的な λ で対応することができる。

土質が特殊^{*2}ではなく、人間活動による土地の乱れがない場合には、放射性物質沈着後の経過時間及び降水量に応じて、本文中の表 4.3 の値を用いることができる。表 4.3 の λ の値は、地表の粗さの影響も考慮されている。

図 C.1 に示したように、放射能濃度を解析する際、大きな λ を用いるほど解析結果が高くなり安全側の評価になる。従って、放射性物質沈着後の経過時間や降水量に不確定な要素がある場合には、想定される範囲内で大きな λ を用いる必要がある。

放射性物質の土壤中における鉛直分布を表す際、その場の土壤密度を考慮する必要があるため、パラメータとしては (g/cm^2) または λ / ρ (cm^2/g) を用いるべきである。しかし、現在市販されている解析ソフトの一部には放射性物質の土壤中における鉛直分布を表すパラメータとして (cm^{-1}) を入力するものがあるので、 λ 及び λ / ρ 等を換算するための表を表 C.2 に記載した。

表 C.2 放射性物質の土壤中における鉛直分布を表すパラメータの換算表

(土壤密度 ρ を $1.6g/cm^3$ とした場合)

沈着後の 経過時間(年)	降水量 (mm)	RL		λ / ρ	
		(g/cm^2)	(cm)	(cm^2/g)	(cm^{-1})
0~1	<3	0.100	0.0625	10.0	16.0
0~1	>3	1.00	0.625	1.00	1.60
1~5	-	3.00	1.88	0.333	0.533
5~20	-	10.0	6.25	0.100	0.160
指針 ^{*3}		4.85	3.03	0.206	0.330

数値は一部を除き ICRU Rep.53 より引用

RL は λ を土壤密度 ρ で除したものの、 λ / ρ は λ の逆数、 ρ は RL の逆数である。

*2 森林地域では腐葉土の影響により λ は低い傾向にある。

*3 「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」
原子力安全委員会（平成 13 年）

(2) 土壌を採取する方法

土質が特殊な場合や、より正確に放射性物質の土壌中における鉛直分布を評価するためには、深さ 30cm までの土壌を層別に採取する。HASL のマニュアルでは、深さ 0~2.5、2.5~5、5~30cm の土壌採取、放射性物質が地中深く浸透していると考えられる場合には深さ 0~5、5~10、10~30cm の土壌採取を提案している。沈着直後は地表に近い所をさらに細かく採取するのが有効と考えられる。放射性物質は水平方向では不均一分布になる可能性があるが、鉛直分布については土質が同等であれば大きな違いは生じないと考えられるため、多数の土壌を採取する必要はない。

採取した土壌（コアサンプル）の測定結果から鉛直分布を算出するには、放射能濃度 (Bq/g) を深さに対する関数（指数関数）で近似して式 (C.1) を基に (g/cm^2) を算出する。ここで、深さ (cm) を重量厚 (g/cm^2) に換算するには、その場の土壌密度^{*4} を用いる必要がある。

現在市販されている解析ソフトの一部には放射性物質の土壌中における鉛直分布を表すパラメータとして (cm^{-1}) を入力するものがあるが、その場合には注意が必要^{*5}である。

また、土壌を採取するなら in-situ 測定が無意味と思われがちであるが、環境への影響を評価するには代表的な値が必要であり、in-situ 測定はそのために重要な意味を持つため、土壌採取と in-situ 測定の併用が最も理想的な測定手法といえる。

*4 土壌密度として一般的に $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ が用いられることがあるが、土壌を採取して \int を求める際にはその場の土壌密度を用いる必要がある。

*5 放射性物質の土壌中における鉛直分布を表す際、その場の土壌密度を考慮する必要があるため、パラメータとしては (g/cm^2) または $\int / (\text{cm}^2/\text{g})$ を用いるべきである。しかし現在市販されている解析ソフトの一部には (cm^{-1}) を入力するものがある。この場合には、実際の（見かけ上の） \int ではなく、土壌を採取して求めた $\int / (\text{cm}^2/\text{g})$ に解析ソフトが仮定している土壌密度（例； $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）を乗じて、便宜上の \int を求めてから解析を行う必要がある。

(3) 同一核種から放出されるエネルギーの異なる 線を利用する方法

同一核種がエネルギーの異なる 線を放出している場合には、それらのフルエンス率の比から放射性物質の土壤中における鉛直分布()を推定することができる。セシウム 137 の 662keV (線) と 32keV (X線) のフルエンス率の比(32keV/662keV) の による変化を図 C.2 に示す。32keV (X線) と 662keV (線) の土壤中での減弱の差が現れており、これを利用して放射性物質の土壤中における鉛直分布を推定することができる。この方法を適用するためには 32keV を測定するため低エネルギーまで測定可能な n 型の Ge 半導体検出器を用いる必要がある。

この方法は地面の粗さの影響も低減できるため有効である。ただし、事故後の 1 ヶ月は短半減期核種からの放射線が 32keV の領域の測定を妨害するため適用は困難である。また、長期間経過の場合にもセシウムが土壤中に深く浸透すると 32keV の X線が検出できなくなるので適用は困難である。

ランタン 140 やセシウム 134 も適用可能であるが、セシウム 137 ほど有効ではない。

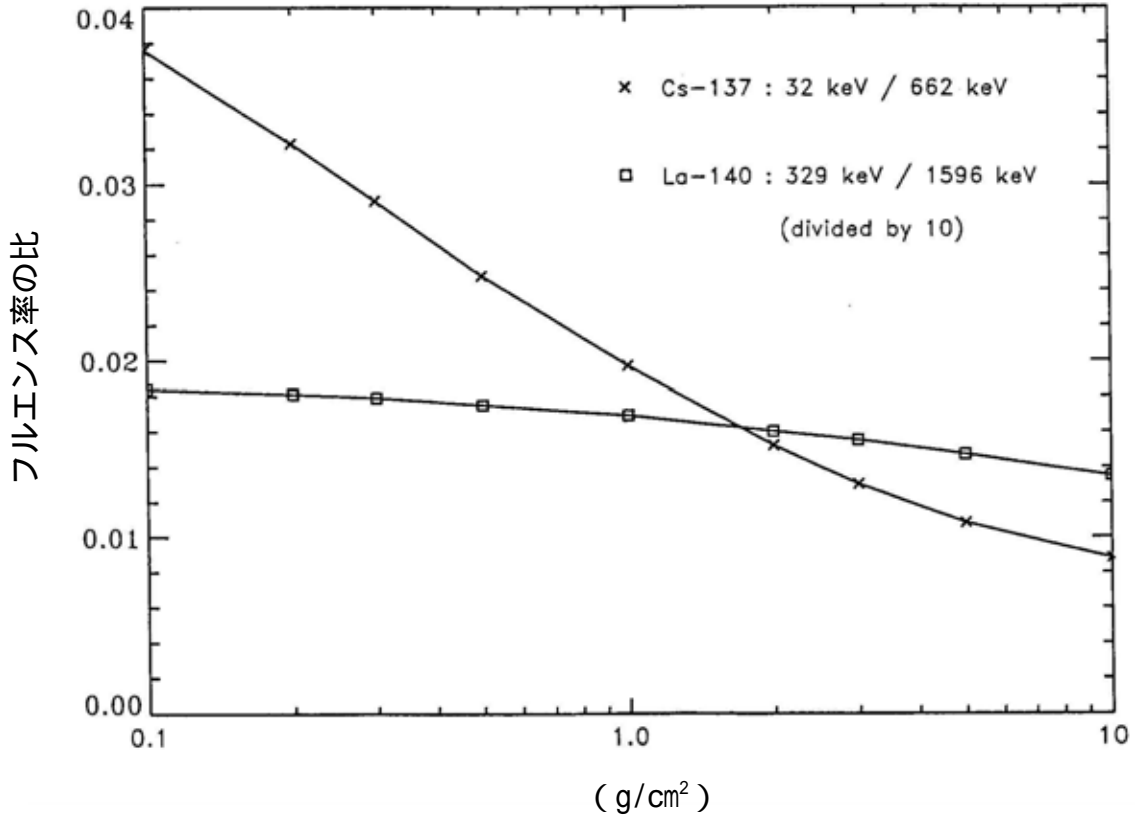


図 C.2 同一核種から放出されるエネルギーの異なる 線のフルエンス率の比と
 放射性物質の土壤中における鉛直分布 () との関係
 (ICRU Rep.53 より引用)

解説 D 解析条件と実際の測定条件が異なった場合の影響

解説 D-1 周辺地形の広がり

in-situ 測定で放射能濃度を算出する際に必要な係数(式 4.4 の μ/A 、付表-1 及び表 4.4 の値)は、 γ 線を減衰させるような障害物が周囲になく、無限に開かれた地形(無限平面)を仮定しての計算値である。しかし、実際の測定では完全な無限平面地形はあり得ないため、無限平面を仮定して放射能濃度を解析すると過小評価になってしまう。

周囲の広がりによる計測値への影響を、放射性物質の土壤中における鉛直分布()別に、図 D.1~図 D.6 に示す。グラフ中の値は、周囲の広がりを変えてシミュレーション計算したピーク効率(ピーク計数率/放射能濃度)で、半径 150m 開けている場合(無限平面と見なせる)の値に対する相対値である。このグラフを参考に過小評価の程度を判断することができる。

過小評価の許容範囲を -20% とすると、地表面近くに分布している状況($\rho=0.1\text{g/cm}^2$ 図 D.1) でセシウム 137 (およそ 600keV) を測定する場合には半径 25m 以上周囲が開けている必要がある。 $\rho=4.85\text{g/cm}^2$ (図 D.5) では半径 10m、土壤中均一分布では半径 5m 周囲が開けている必要がある。

十分に開放された場所の確保が困難な場合には、図 D.1~図 D.6 を参考に測定結果を補正することができる。ただし、補正に伴う不確かさを小さくするため、地表面近くに分布している状況等では最低でも 10m 程度は開けていることが望ましい。

これらの結果は、シミュレーション計算^{*1}を基にしており、Ge 半導体検出器としては、p 型の比較的方向依存性の少ない検出器について計算した結果である。地表面近くに分布している場合($\rho=0.1\text{g/cm}^2$) について、一般的な p 型検出器と低エネルギーまで測定可能な n 型検出器について計算した結果を図 D.7 及び図 D.8 に示す。周囲の広がりによる計測値への影響において、検出器の違いによる差は大きくない。なお、それぞれの検出器の方向依存性については解説 E を参照のこと。

また、周囲のどの範囲からどの程度の γ 線が in-situ 測定に寄与しているかを、図 D.9 ~図 D.11 に示す。なお、図 D.9 は放射性物質の土壤中における鉛直分布()による違いを示し、図 D.10 及び D.11 は γ 線エネルギーによる違いを示している。

*1 ピーク効率シミュレーションソフトウェアを使用した。

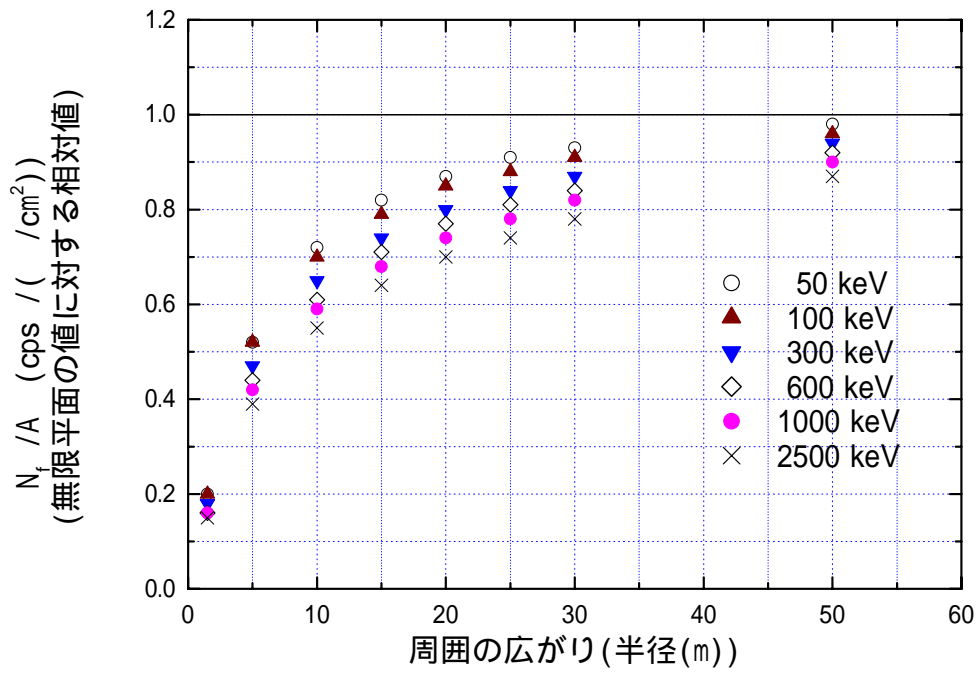


図 D.1 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p 型 : 0.1g/cm²)

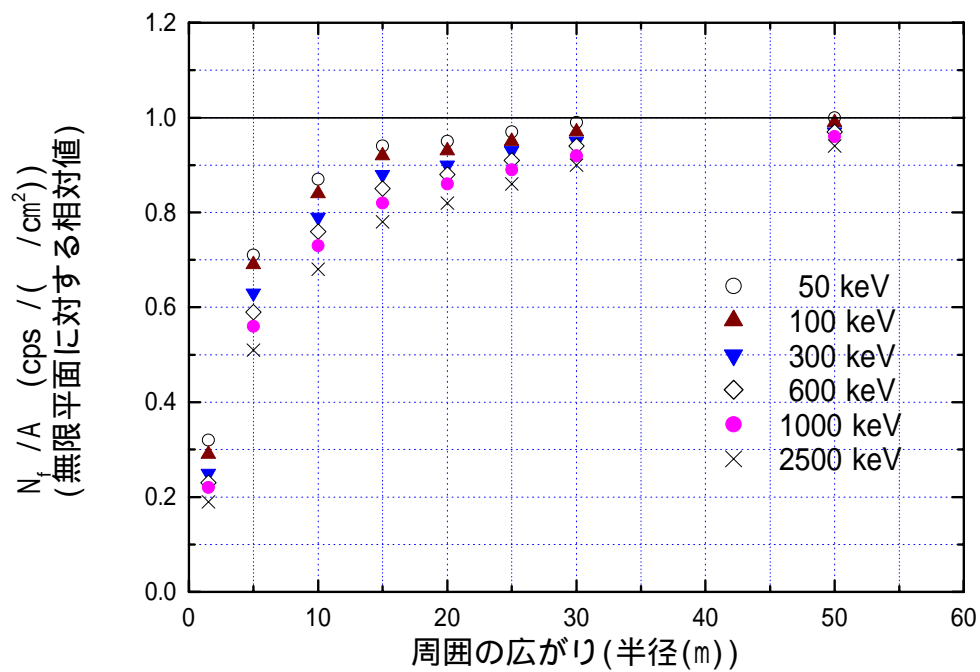


図 D.2 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p 型 : 1.0g/cm²)

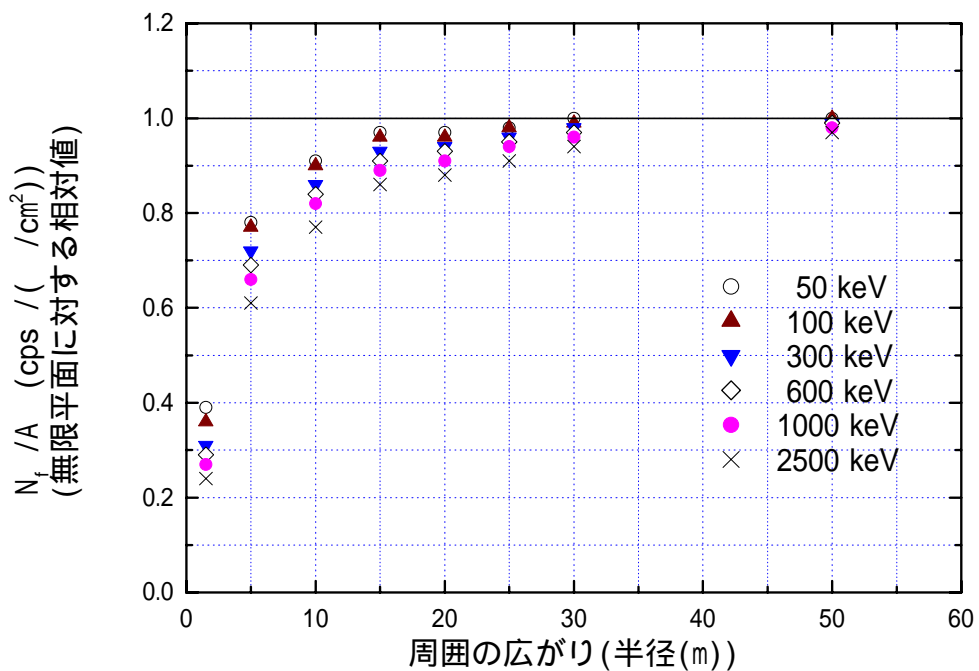


図 D.3 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 : 3.0g/cm²)

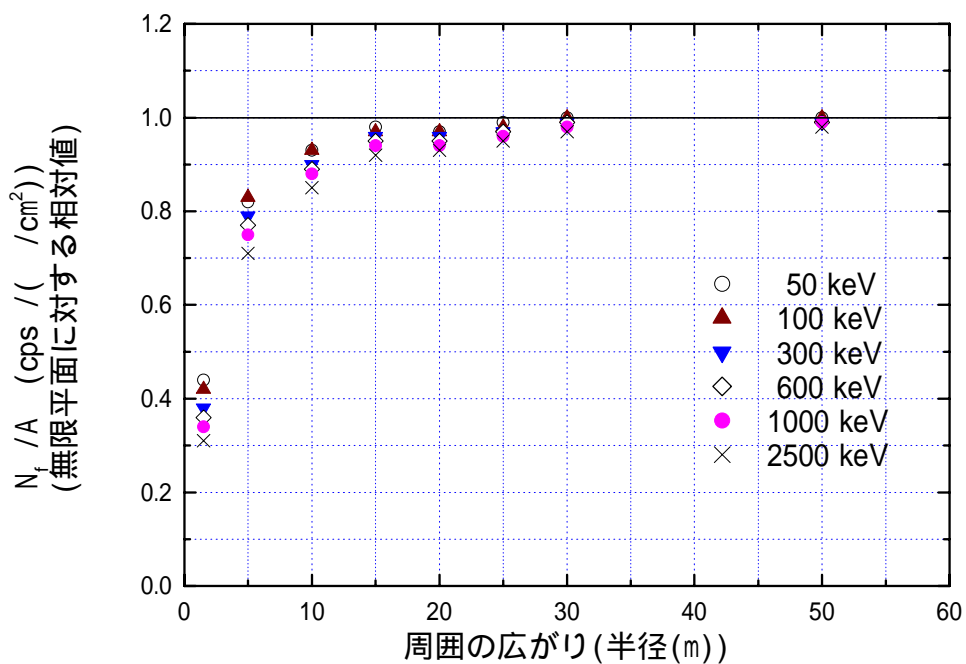


図 D.4 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 : 10.0g/cm²)

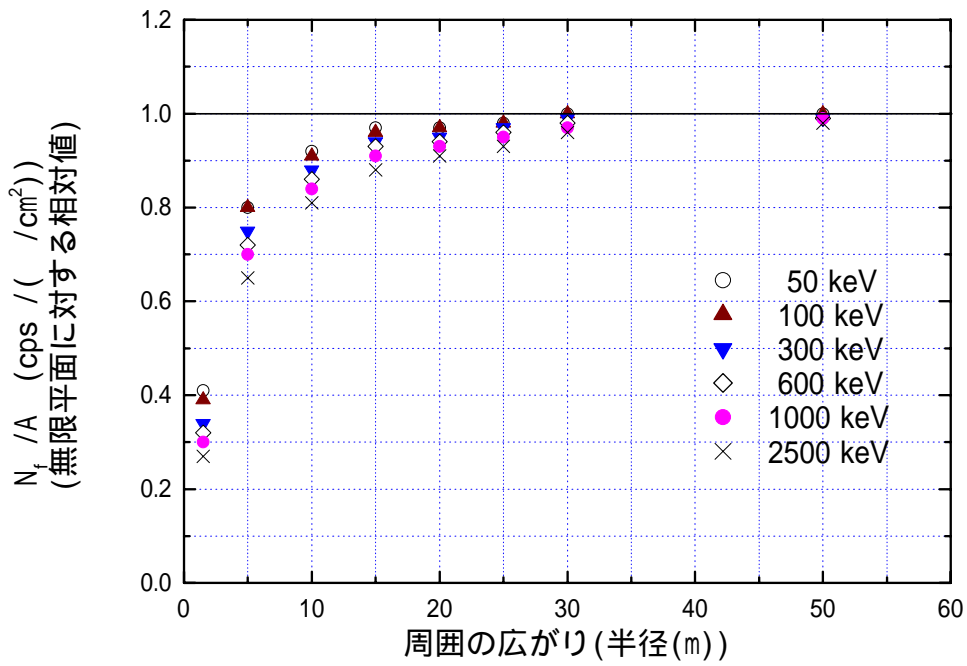


図 D.5 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 : 4.85g/cm²)

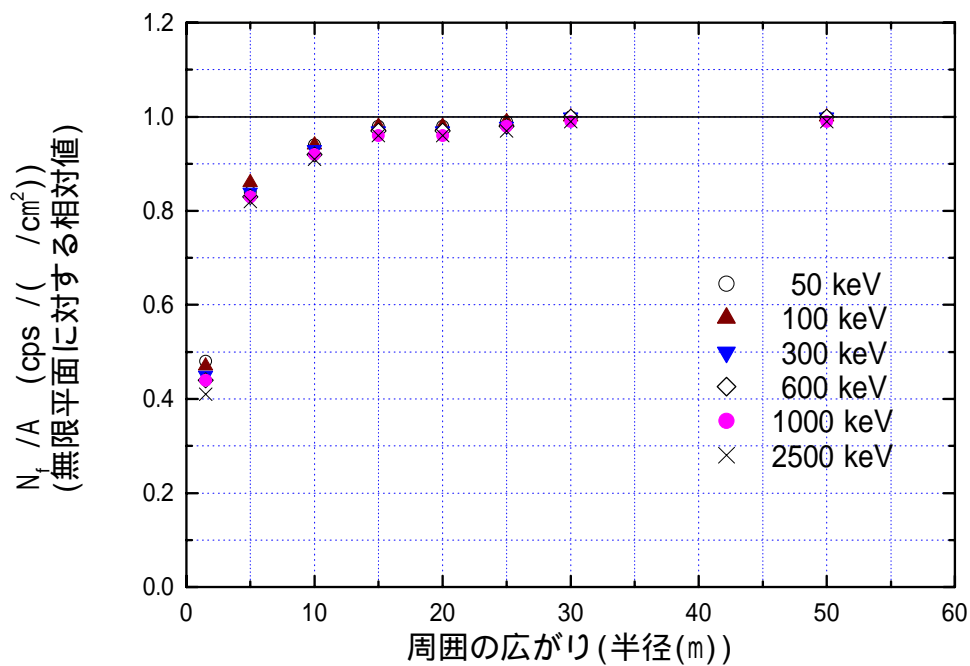


図 D.6 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 均一分布)

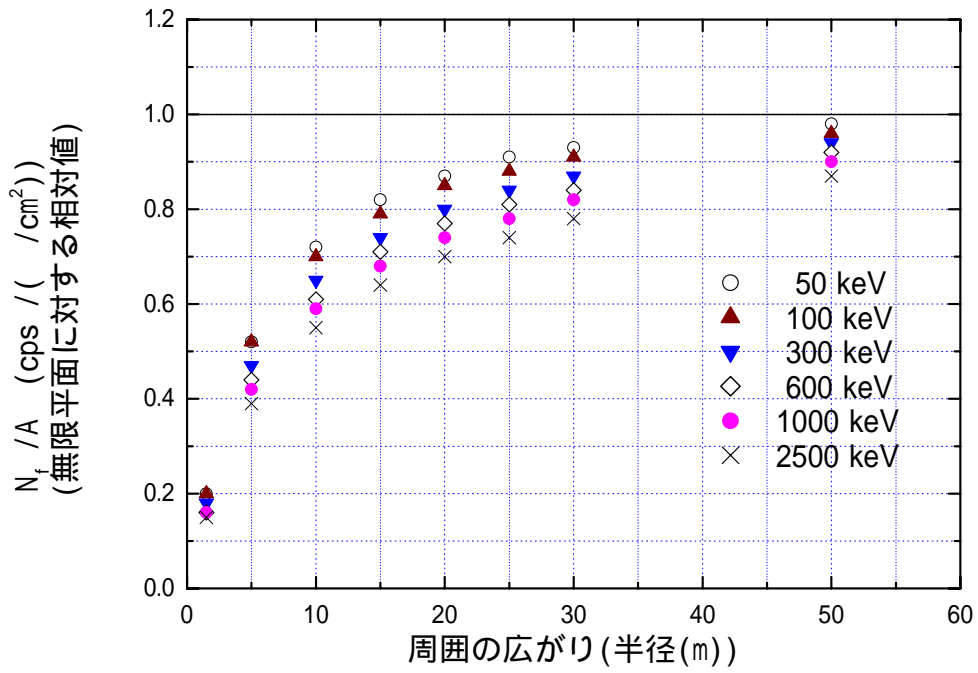


図 D.7 周囲の広がりによる計測値への影響 (: 0.1g/cm²)
 (検出器 : p 型、L/D ; 0.9、不感層 ; 1mm、相対効率 ; 40%)

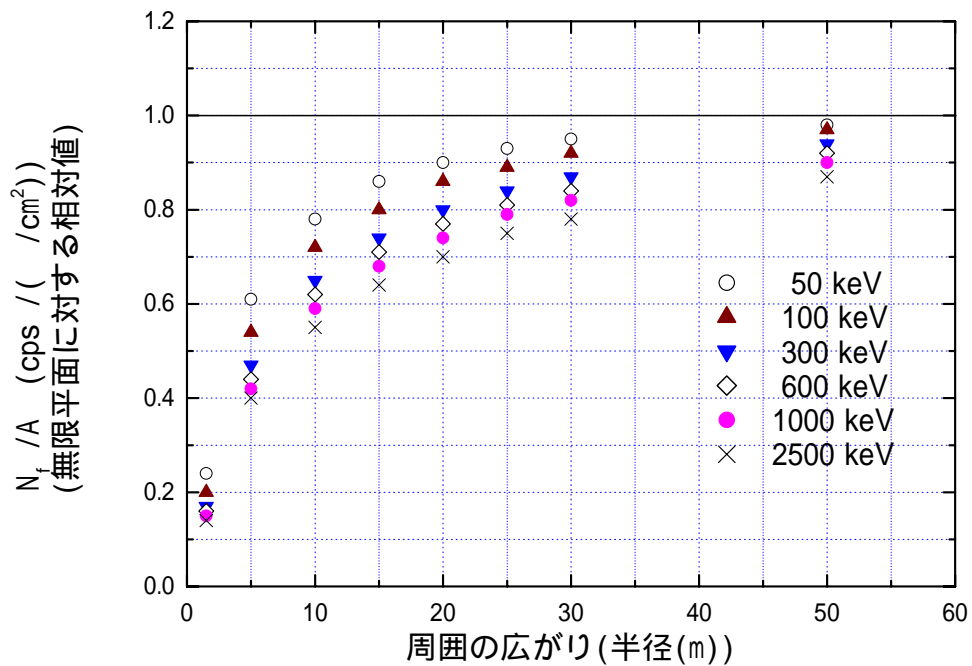


図 D.8 周囲の広がりによる計測値への影響 (: 0.1g/cm²)
 (検出器 : n 型、L/D ; 1.0、不感層 ; 0.1 μm、相対効率 ; 25%)

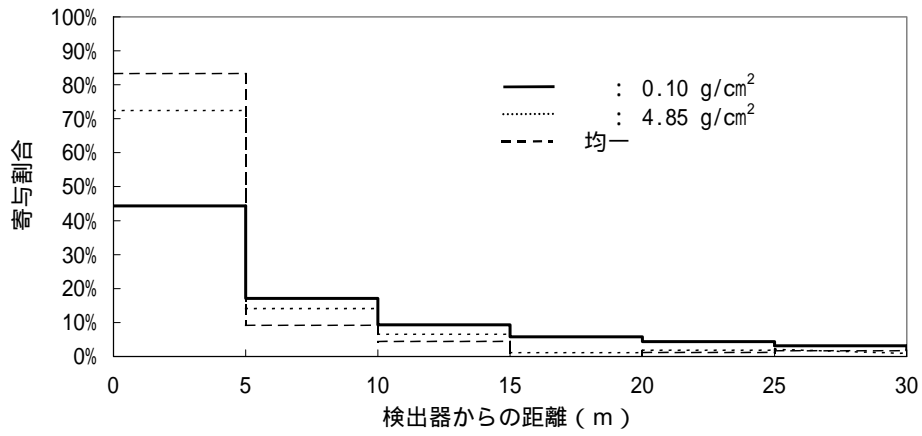


図 D.9 in-situ 測定における周囲からの寄与割合 (線エネルギー600keV)

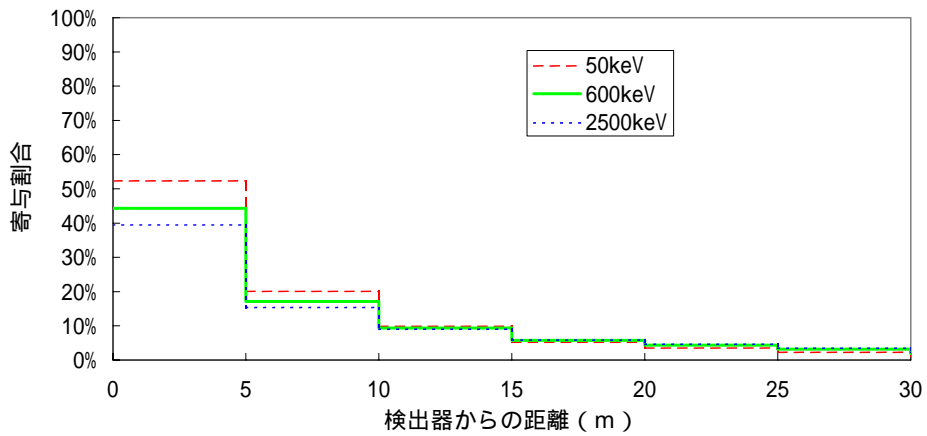


図 D.10 in-situ 測定における周囲からの寄与割合 (β : 0.1 g/cm²)

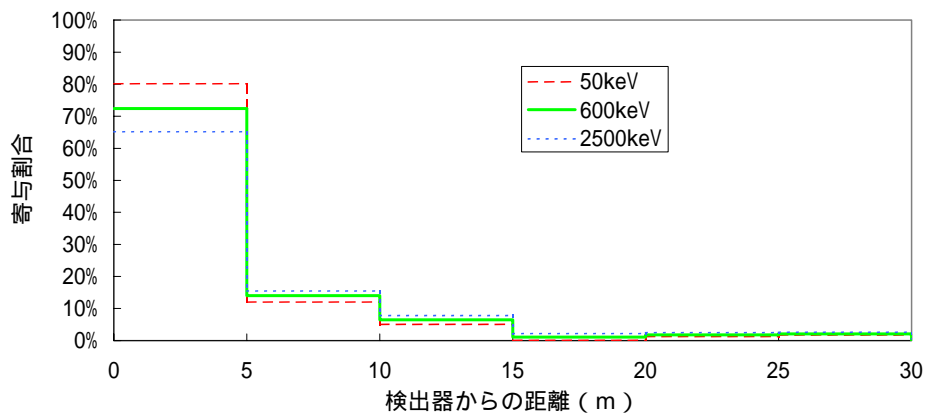


図 D.11 in-situ 測定における周囲からの寄与割合 (β : 4.85 g/cm²)

解説 D-2 検出器の設置高さ

in-situ 測定法では、検出器を地表面から 1m の高さに設置して測定したという前提で解析が行われる。通常、検出器は 1m の高さに設置されるため補正の必要はないが、周辺地形の状況等により、やむを得ず異なる高さに検出器を設置しなければならないことも考えられることから、検出器設置高さの計測値への影響を以下に記載した。

土壤中における放射性物質の鉛直分布()別に、in-situ 測定におけるピーク効率(ピーク計数率/放射能濃度)について、検出器設置高さを変えてシミュレーション計算した結果を図 D.12～図 D.14 に示す。グラフ中の値は、高さ 1m での値に対する相対値である。

検出器設置高さが高いほど、ピーク効率は低くなる。従って、やむを得ず 1m よりも高い位置に検出器を設置した場合や、崖などがあって周辺地形が下がっている場合には、過小評価することになるので注意が必要である。

放射性物質が地表面近くに分布している場合(図 D.12、 $\rho = 0.1\text{g/cm}^2$)には、検出器の設置高さによる影響が大きくなるため特に注意が必要である。

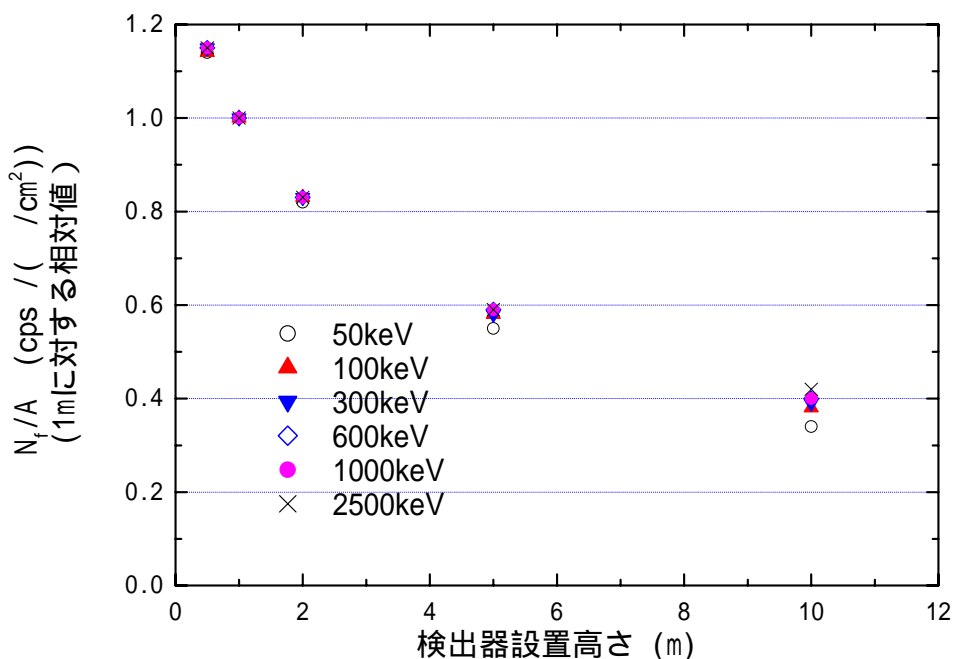


図 D.12 検出器設置高さによる計測値への影響 ($\rho : 0.1\text{g/cm}^2$)

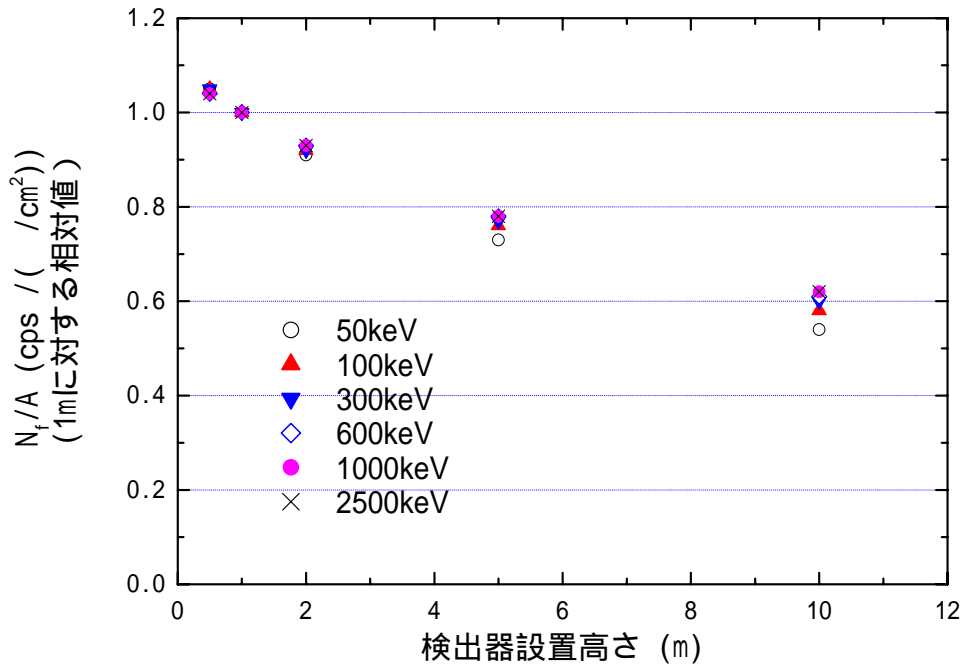


図 D.13 検出器設置高さによる計測値への影響 (: 4.85g/cm²)

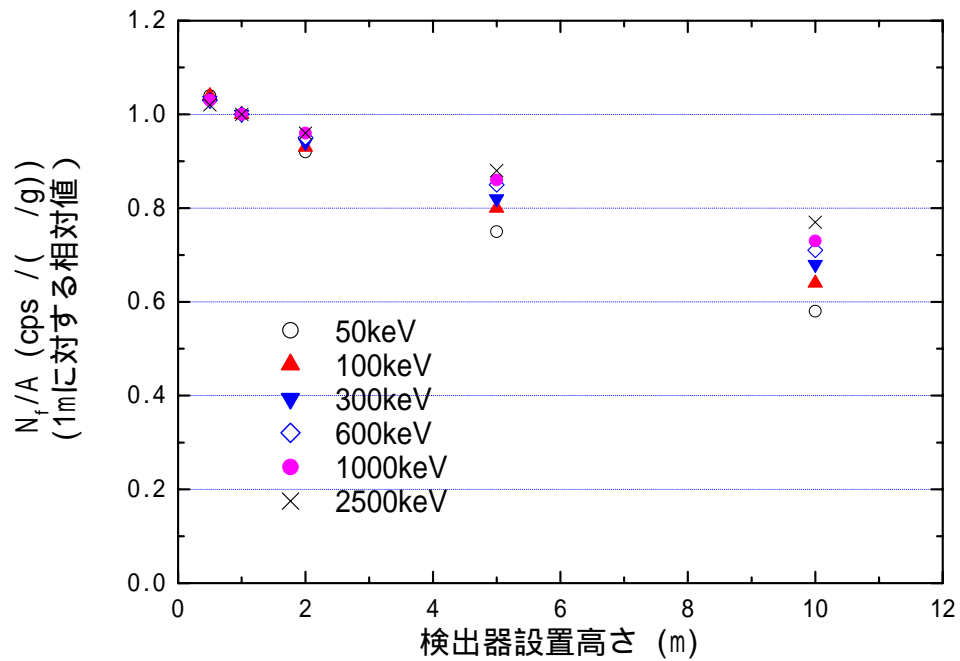


図 D.14 検出器設置高さによる計測値への影響 (均一分布)

解説 D-3 土壌中水分

土壌中水分の影響は、土壌中における放射性物質の鉛直分布（解説 C）の影響に含まれるため、特別な場合を除いて補正の必要はない。しかし、同一地点を継続的に測定するような場合には、異なる時期での in-situ 測定結果を比較することが考えられ、晴天時と降雨直後の測定結果を比較するような場合も想定されることから、土壌中水分の計測値への影響を以下に記載した。

土壌中における放射性物質の鉛直分布（ ）別に、in-situ 測定におけるピーク効率（ピーク計数率/放射能濃度）について土壌中水分を変えてシミュレーション計算した結果を図 D.15～図 D.18 に示す。グラフ中の値は、水分が 10% の場合の値に対する相対値である。

放射性物質が地表面近くに分布している場合（ $=0.1\text{g/cm}^2$ ）には、当然、土壌中水分の影響は小さい（図 D.15）。放射性物質が土壌にある程度浸透した場合（ $=4.85\text{g/cm}^2$ ）には、土壌中の水分が大きいほど水による遮へいによって、ピーク効率が低くなる（図 D.16）。すなわち計測値が低くなる。放射性物質の沈着直後には土壌中水分の影響は無視できるが、沈着後時間が経過し放射性物質が土壌中に浸透した場合においては、測定時の土壌中水分によって異なる測定結果が得られるので注意が必要である。従って、可能ならば測定時の土壌中水分を測定し記録することが望ましい。

土壌中均一分布の放射性核種を解析する場合には、土壌中水分の影響はほとんど見られない（図 D.17）。これは、水の遮へいによる計数率の減少と、放射能濃度の水による希釈効果が均衡し、ピーク効率（cps / (Bq/g 湿土)）が大きく変化しないことを示している。

しかし、乾土あたりの放射能に対するピーク効率（cps / (Bq/g 乾土)）では、放射能濃度の水による希釈効果がないため、水分が大きいほど水の遮へいによる計数率の減少のみが生じ、ピーク効率が土壌中水分によって変化する。in-situ 測定で得られるのは、あくまで湿土あたりの放射能の結果である。通常、実験室で測定される土壌中放射能の値は乾土あたりで示されているので、その値と比較する場合には注意が必要である。

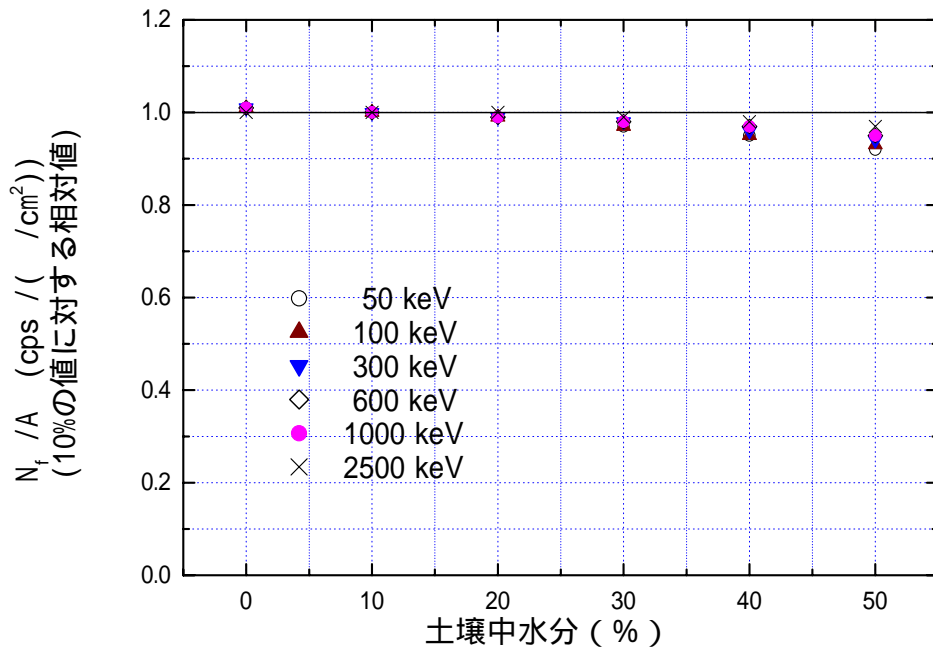


図 D.15 土壌中水分による計測値への影響
 (放射性物質が地表近くに分布している場合、 $\rho = 0.1\text{g/cm}^2$)

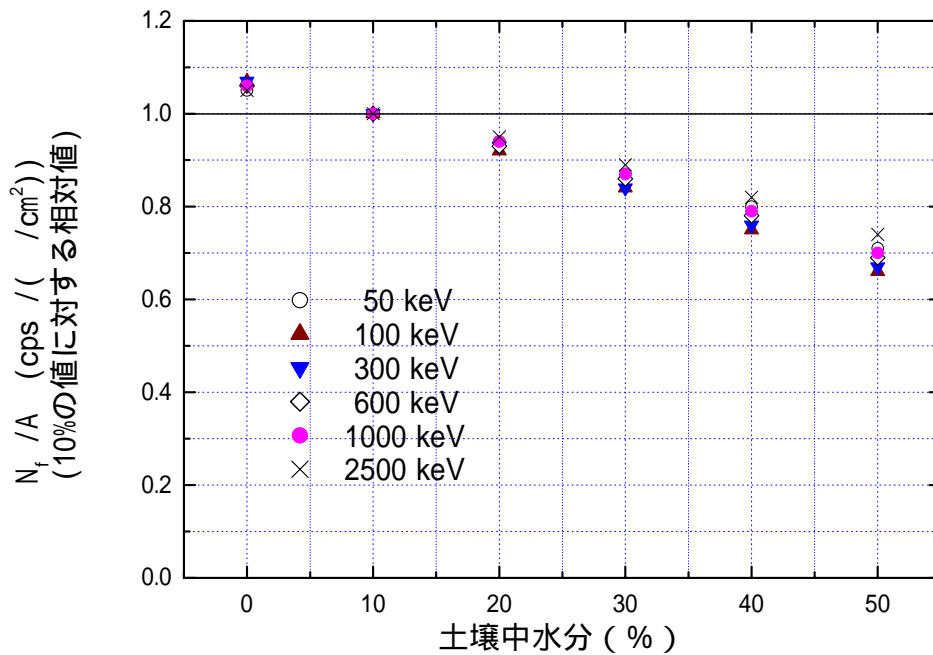


図 D.16 土壌中水分による計測値への影響
 (放射性物質が土壌中に浸透した場合、 $\rho = 4.85\text{g/cm}^2$)

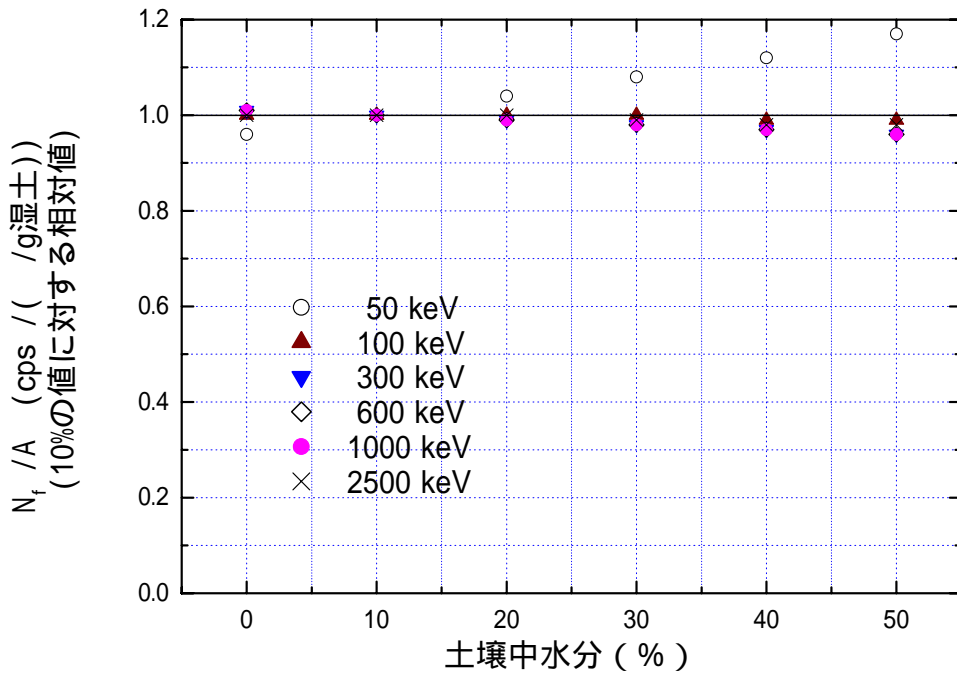


図 D.17 土壤中水分による計測値への影響
(湿土あたりの放射能を計測する場合、均一分布)

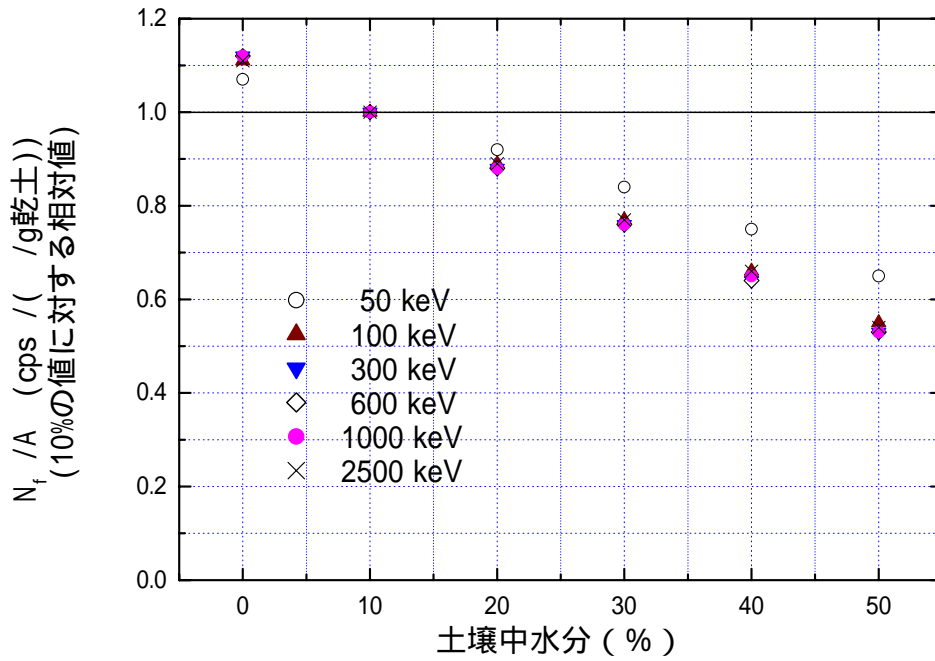


図 D.18 土壤中水分による計測値への影響
(乾土あたりの放射能を計測する場合、均一分布)

解説 E 検出器の方向特性（ピーク効率の角度依存性）

p 型 Ge 半導体検出器および n 型 Ge 半導体検出器の方向特性の一例を図 E.1 および図 E.2 に示す。検出器は in-situ 測定では通常下向きにセットされる。真下方向を 0° とし、 0° の効率に対する各角度での効率の相対値を示した。なお、線源と検出器の距離を 1 m としてシミュレーション計算した結果である。p 型検出器は相対効率 40%、直径 61mm、長さ 56mm、不感層 1mm、n 型検出器は相対効率 25%、直径 53mm、長さ 53mm、不感層 $0.1\mu\text{m}$ である。

p 型検出器では低エネルギー（50 及び 60keV）において斜め方向から入射した線に対して低い傾向が見られる。これは、斜め入射によって不感層の通過距離が長くなり、そのための減衰によるものと考えられる。100keV 以上のエネルギーにおいては方向依存性がほとんど認められない。

n 型検出器では、不感層が非常に薄いため、低エネルギーで斜め方向から入射した場合にもピーク効率が低くなることはなく、逆に高くなる傾向が見られた。これは、低エネルギーではピーク効率が、検出器の体積よりも断面積に依存するためと考えられる。全体的には大きな方向依存性は認められなかった。

ここで示した検出器は、長さ と直径の比 (L/D) がほぼ 1.0 に近い検出器であるが、 L/D が 0.9~1.1 の範囲から外れるような検出器や低バックグラウンドのための特殊な検出器では大きな方向依存性を示すことがあるので、そのような検出器を使用する場合には十分に方向特性を把握しておく必要がある。

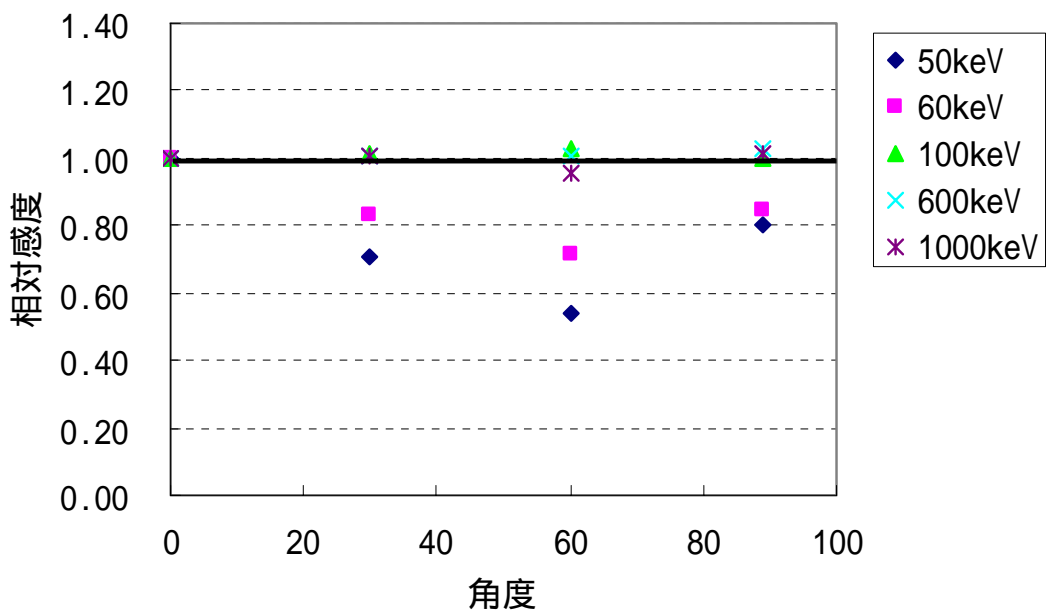


表 E.1 ピーク効率の角度依存性の例
 (検出器 : p 型、L/D ; 0.9、不感層 ; 1mm、相対効率 ; 40%)

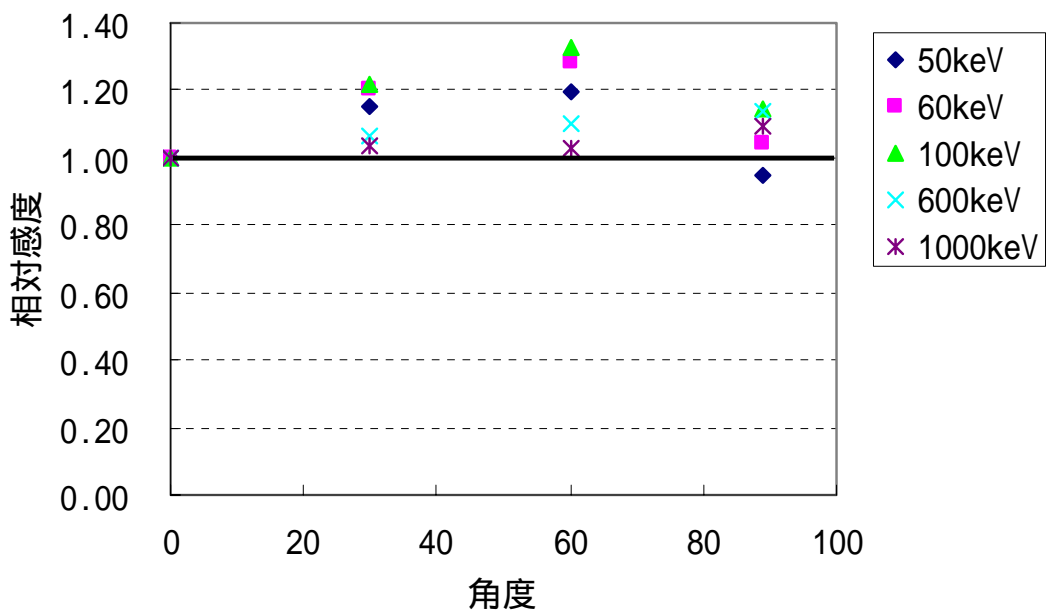


表 E.2 ピーク効率の角度依存性の例
 (検出器 : n 型、L/D ; 1.0、不感層 ; 0.1 μ m、相対効率 ; 25%)

解説 F 実際の測定例

解説 F-1 地表に沈着した人工放射性物質

1. 目的

地表に沈着した人工放射性物質に対する in-situ 測定の妥当性を確認する。

2. 検討方法

実際の環境場において in-situ 測定及び採取した土壌の線スペクトル測定を実施し、両者の結果を比較した。測定場所は、自然に存在する放射性物質の濃度が低く、人の手が入っていない未造成地があるという理由により富士山周辺を選定した。

(1) in-situ 測定

平坦で、樹木は別として周囲が 10m 以上開けている場所で測定を行った。測定は地上 1m の高さに Ge 半導体検出器を設置して 1 時間スペクトルを収集し、HASL 方式で解析を行い、土壌中のセシウム 137 放射能濃度及び測定場所における線量率を算出した。使用した検出器の仕様を表 F.1 に示した。

(2) 土壌サンプリング及び測定

測定地点近傍において 5cm の採土器を用い、深さ 30cm までの土壌を 5cm 毎の 6 層に分けて採取した。採取した土壌は乾燥せず、大きな石等を取り除いた後に測定容器(U-8)に詰め、測定室の Ge 半導体検出器で約 70,000 秒測定し、得られた線スペクトルからセシウム 137 の放射能濃度を求めた。

表 F.1 in-situ 測定に用いた Ge 半導体検出器の仕様

検出器	相対効率 (%)	結晶の直径(D) (mm)	結晶の長さ(L) (mm)	(L/D)	エンドキャップ (mm)	不感層	エンドキャップと結晶の距離 (mm)
A	25	53	53	1.00	0.5 (Al)	0.1 μm	5.0
B	25	54.6	54.7	1.00	1.27(Al)	0.7 mm	3.0

3. 結果及び考察

in-situ 測定及びサンプリングした土壌から得られたセシウム 137 の放射能濃度を表 F.2 に示す。

in-situ 測定結果から放射能濃度を算出する際には放射性物質の土壌中における鉛直分布が必要であるが、ここでは一般的に用いられている $\rho = 4.85 \text{ g/cm}^3$ と、それぞれの測定地点における実際の値の両方を用いて解析を行った。

表F.2 富士山での放射能濃度測定結果

測定場所	in-situ解析に用いた 鉛直分布パラメータ (g/cm^3)	^{137}Cs の放射能濃度 (kBq/m^2)			備考
		in-situ (検出器 A)	in-situ (検出器 B)	サンプリング土壌	
地点A (富士宮市 人穴地区)	4.85	1.6	1.6	1.7	腐葉土
	8.15 ¹⁾	-	2.1		
地点B (富士山スカイ ライン)	4.85	2	2	4.0	
	15.4 ²⁾	-	4.2		

1) 2) 採取した土壌から得られた値

$\rho = 4.85 \text{ g/cm}^3$ を用いて解析した結果について、in-situ 法とサンプリング土壌の測定結果は、地点 A についてはほぼ一致したが、地点 B については約 2 倍の違いが見られた。これは、解析時に仮定した放射性物質の土壌中の鉛直分布が実際の分布と異なっていることに起因すると考えられる。

それぞれの地点で採取して得られたセシウム 137 の土壌中の鉛直分布 (図 F.1、図 F.2 参照) 及び各地点の土壌の密度から ρ を求めた。^{*1} これらの (表 F.2 1) 2)) を用いて in-situ 測定結果を解析した結果は、採取した土壌から得られた ^{137}Cs の放射能濃度に近い値となった。

各地点で測定された in-situ スペクトルを図 F.3 及び図 F.4 に示した。

^{*1} 土壌の採取深度 $Z(\text{cm})$ と、深度 Z における ^{137}Cs の放射能濃度 $A(Z)$ (Bq/kg 湿土) を、指数関数 $A(Z) = \exp(-\lambda Z)$ に適合させて λ (cm^{-1}) を求め、 $\rho = A(Z) / (A(0) \cdot Z)$ (ρ : 採取土壌の密度) により ρ を求めた。

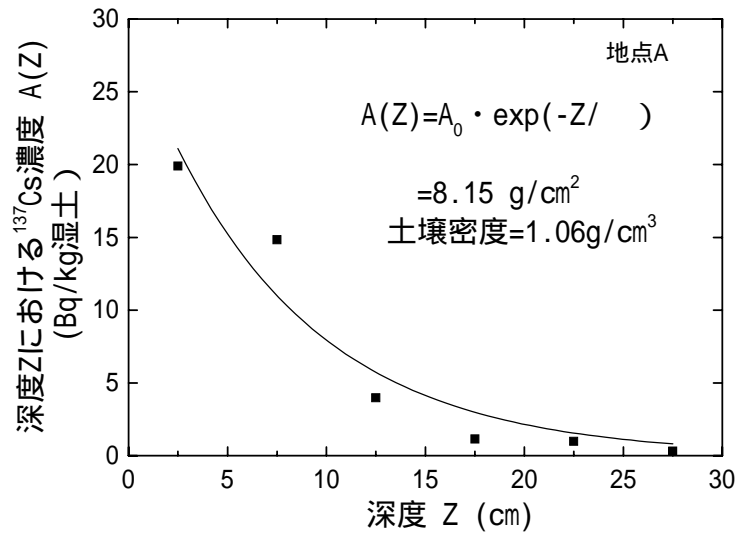


図 F.1 土壤中のセシウム 137 濃度と深度の関係 (地点 A)

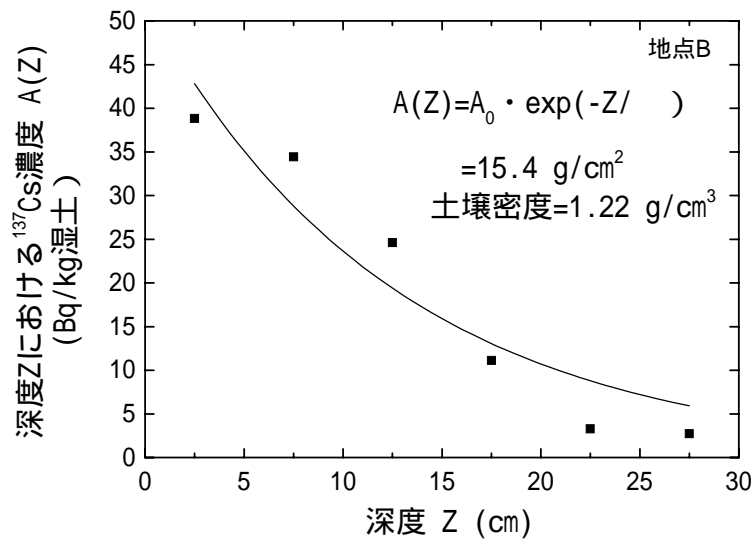


図 F.2 土壤中のセシウム 137 濃度と深度の関係 (地点 B)

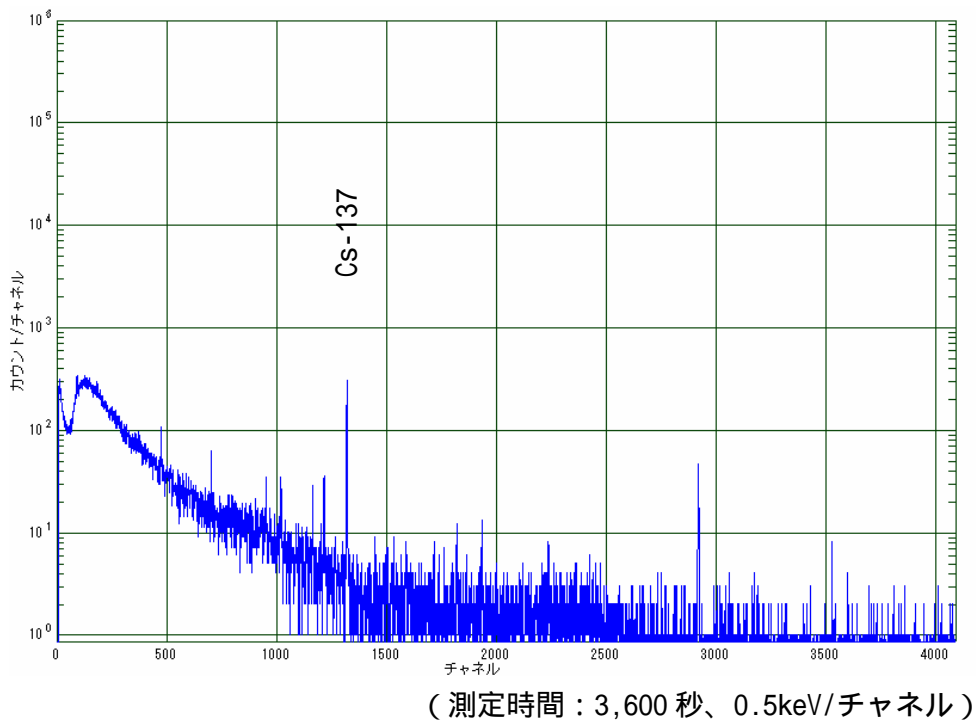


図 F.3 Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定スペクトル
(地点 A)

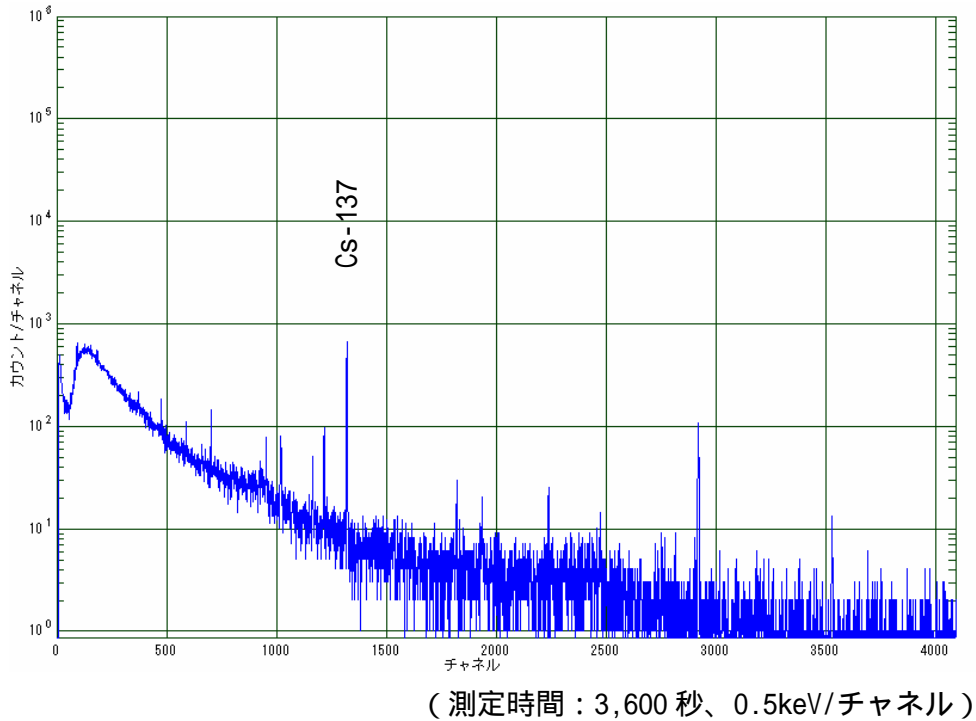


図 F.4 Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定スペクトル
(地点 B)

解説 F-2 自然に存在する放射性物質

1. 目的

土壌中の、自然に存在する放射性物質に対する in-situ 測定の妥当性を確認する。

2. 検討方法

実際の環境場において、in-situ 測定及び、採取した土壌の線スペクトル測定を実施し、両者の結果を比較した。

(1) in-situ 測定

周囲が 10m 以上開けている場所を選定し、地上 1m の高さに Ge 半導体検出器を設置して 1 時間測定を行った。得られたスペクトルを HASL 方式で解析し、土壌中の自然に存在する放射性物質の放射能濃度を算出した。

(2) 土壌採取及び測定

測定地点周辺において採土器を用いて土壌を採取した。採取した土壌は乾燥せず、大きな石等を取り除いた後に測定容器(U-8)に詰め、測定室の Ge 半導体検出器で約 70,000 秒測定し、得られた線スペクトルから放射能濃度を求めた。

3. 結果及び考察

in-situ 測定結果と、各測定地点で採取された土壌の測定結果を表 F.3 に示した。自然に存在する放射性核種の測定結果について、in-situ 測定から得られた結果と採取した土壌の結果はよく一致していた。なお、in-situ 測定結果の解析の際には、土壌中の分布は均一であると仮定した。

in-situ 測定の結果得られた値と、各地点で採取された土壌の測定結果の関係を図 F.5 に示す。in-situ 測定結果とサンプリング土壌の結果には良い相関が見られた。

in-situ の測定風景の一例を図 F.6 に、測定されたスペクトルの一例を図 F.7 に示した。

表F.3 in-situ測定結果と採取した土壌の線スペクトロメトリーの結果との比較

単位：Bq/kg湿土

採取/測定地点	U系列		Th系列			K-40	
	²¹⁴ Pb (352.0keV)	²¹⁴ Bi (609.3keV)	²⁰⁸ Tl (583.1keV)	²¹² Pb (238.6keV)	²²⁸ Ac (911.1keV)	⁴⁰ K (1460.8keV)	
地点1							
コンポジット試料	25 ± 1.0	23 ± 1.0	7.2 ± 0.47	24 ± 0.7	17 ± 1.6	380 ± 10	
コア試料							
0~5cm	25 ± 0.8	22 ± 0.8	7.4 ± 0.32	23 ± 0.6	19 ± 1.1	370 ± 8	
5~10cm	27 ± 0.8	23 ± 0.7	6.8 ± 0.29	23 ± 0.6	20 ± 0.9	350 ± 6	
10~15cm	28 ± 1.2	25 ± 1.3	7.9 ± 0.58	25 ± 0.9	20 ± 2.0	360 ± 12	
15~20cm	27 ± 0.8	23 ± 0.9	7.6 ± 0.34	22 ± 0.6	20 ± 1.2	370 ± 8	
20~25cm	24 ± 1.2	20 ± 1.1	6.1 ± 0.44	24 ± 0.9	21 ± 1.4	320 ± 8	
25~30cm	27 ± 1.1	24 ± 1.2	7.0 ± 0.53	23 ± 0.8	23 ± 2.0	360 ± 11	
in-situ	19	21	7.6	17	22	430	
地点2							
コンポジット試料	19 ± 0.6	16 ± 0.5	7.5 ± 0.26	26 ± 0.5	22 ± 0.8	470 ± 6	
コア試料							
0~5cm	15 ± 0.9	16 ± 1.0	6.4 ± 0.48	24 ± 0.7	19 ± 1.7	410 ± 11	
5~10cm	21 ± 0.6	17 ± 0.6	9.0 ± 0.31	28 ± 0.5	25 ± 1.0	470 ± 7	
10~15cm	20 ± 0.6	16 ± 0.6	7.6 ± 0.26	26 ± 0.5	24 ± 0.8	470 ± 6	
15~20cm	21 ± 1.0	20 ± 1.0	9.1 ± 0.50	31 ± 0.8	31 ± 1.8	510 ± 12	
20~25cm	23 ± 0.7	20 ± 0.7	9.8 ± 0.31	29 ± 0.5	25 ± 1.1	500 ± 8	
25~30cm	24 ± 0.8	21 ± 0.7	11 ± 0.3	37 ± 0.7	32 ± 1.1	530 ± 8	
in-situ	16	18	9.3	23	24	490	
地点3							
コンポジット試料	20 ± 0.7	20 ± 0.7	9.4 ± 0.33	29 ± 0.5	28 ± 1.1	500 ± 8	
in-situ	17	18	11	26	29	530	

コンポジット： 測定地点から2m四方の4点で採取した土壌を混合した試料
 コア試料： 測定地点直下で深度別に採取した試料
 in-situ測定結果は、土壌中に放射性物質が均一に分布するとして解析した。

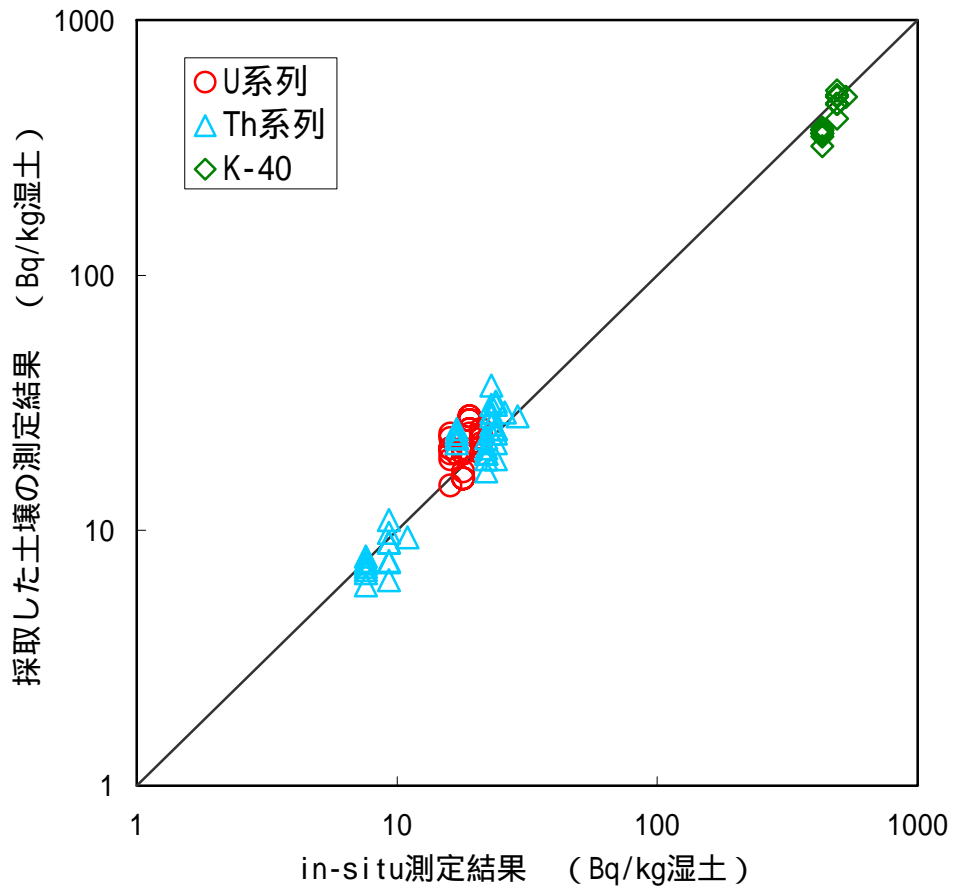


図 F.5 in-situ 測定結果と、各地点で採取された土壌の線スペクトロメトリーによる結果との比較



図 F.6 in-situ 測定風景

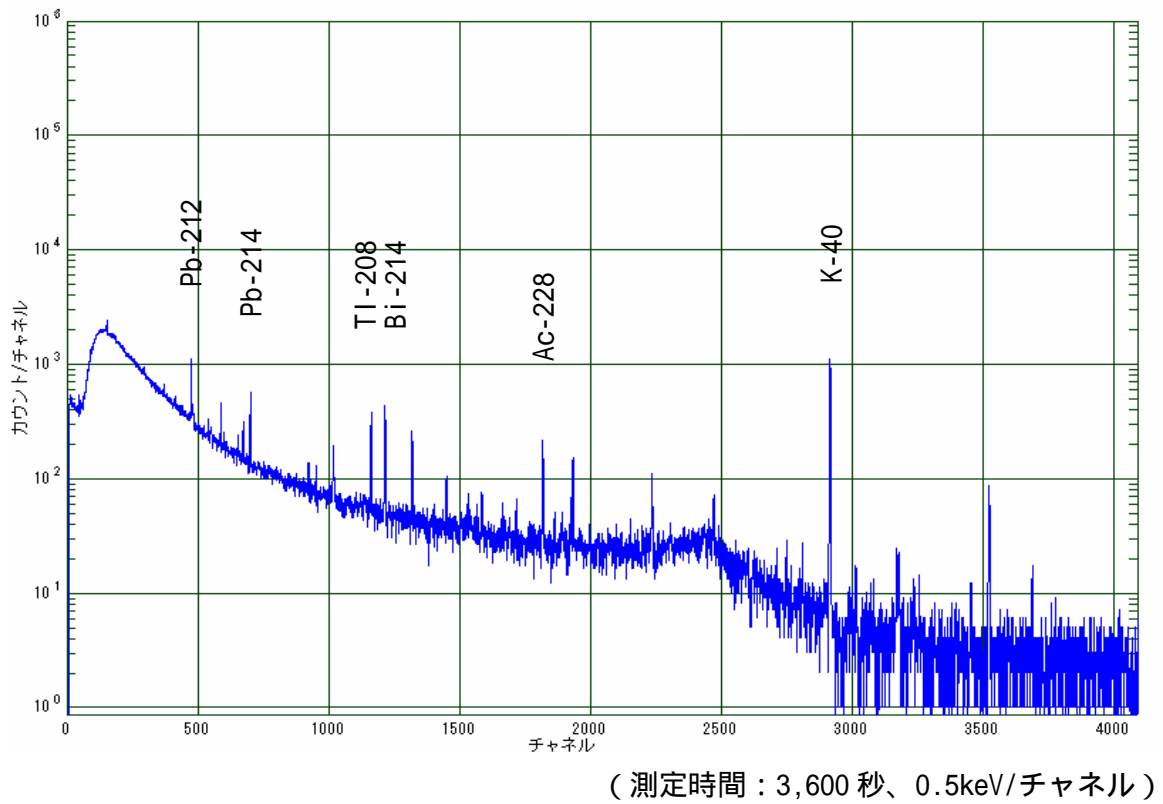


図 F.7 Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定スペクトルの例

付 録

付録 1 放射性核種濃度と地上高 1m での線フルエンス率との関係

付録 2 土壌中に指数分布する放射性核種による地上高 1m での線量率と
線フルエンス率の関係

付表-2(つづき)

単位：(cm⁻²・s⁻¹)/(μGy/h)

エネルギー 放出比			放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ (g・cm ⁻²)							
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100	
720.5	0.538	Sb-126	7.15	6.74	6.14	5.70	5.46	5.22	5.04	
722.0	0.051	Ce-143	7.08	6.80	6.34	6.00	5.84	5.67	5.53	
723.3	0.197	Eu-154	6.15	5.83	5.28	4.81	4.60	4.38	4.20	
724.2	0.444	Zr-95	2.22 1E+01	2.09 1E+01	1.90 1E+01	1.75 1E+01	1.68 1E+01	1.61 1E+01	1.55 1E+01	
724.3	0.473	Ru-105	2.35 1E+01	2.21 1E+01	2.03 1E+01	1.87 1E+01	1.80 1E+01	1.73 1E+01	1.66 1E+01	
725.7	0.327	Pm-148m	6.02	5.68	5.20	4.81	4.65	4.45	4.29	
727.2	0.068	Bi-212	2.42 1E+01	2.29 1E+01	2.06 1E+01	1.89 1E+01	1.80 1E+01	1.72 1E+01	1.64 1E+01	
739.5	0.122	Mo-99	3.05 1E+01	2.88 1E+01	2.64 1E+01	2.45 1E+01	2.36 1E+01	2.27 1E+01	2.18 1E+01	
739.5	0.823	I-130	1.41 1E+01	1.33 1E+01	1.22 1E+01	1.13 1E+01	1.09 1E+01	1.04 1E+01	1.00 1E+01	
742.6	0.151	Te-134	6.50	6.22	5.69	5.33	5.16	4.99	4.83	
743.3	1.000	Sb-128	1.20 1E+01	1.13 1E+01	1.03 1E+01	9.49	9.17	8.77	8.46	
748.3	0.008	Pr-145	1.11 1E+01	1.05 1E+01	9.56	8.76	8.36	8.05	7.71	
754.0	1.000	Sb-128	1.20 1E+01	1.13 1E+01	1.04 1E+01	9.57	9.22	8.85	8.52	
756.7	0.549	Zr-95	2.77 1E+01	2.61 1E+01	2.39 1E+01	2.19 1E+01	2.11 1E+01	2.03 1E+01	1.95 1E+01	
763.9	0.224	Ag-110m	3.10	2.91	2.65	2.43	2.33	2.22	2.13	
765.8	1.000	Nb-95	4.90 1E+01	4.63 1E+01	4.21 1E+01	3.87 1E+01	3.74 1E+01	3.55 1E+01	3.42 1E+01	
767.2	0.290	Te-134	1.26 1E+01	1.20 1E+01	1.10 1E+01	1.04 1E+01	1.00 1E+01	9.71	9.42	
772.6	0.762	I-132	1.26 1E+01	1.19 1E+01	1.08 1E+01	1.00 1E+01	9.65	9.20	8.83	
773.7	0.382	Te-131m	1.03 1E+01	9.75	8.85	8.12	7.82	7.47	7.16	
778.9	0.130	Eu-152	4.47	4.21	3.84	3.51	3.36	3.22	3.08	
783.7	0.145	Sb-127	8.09	7.69	7.07	6.56	6.33	6.10	5.91	
793.4	1.000	Sb-130	1.17 1E+01	1.11 1E+01	1.01 1E+01	9.33	9.00	8.60	8.30	
793.8	0.139	Te-131m	3.76	3.56	3.25	2.97	2.87	2.74	2.63	
795.8	0.851	Cs-134	2.06 1E+01	1.94 1E+01	1.78 1E+01	1.64 1E+01	1.59 1E+01	1.52 1E+01	1.47 1E+01	
810.8	0.994	Co-58	3.87 1E+01	3.65 1E+01	3.35 1E+01	3.09 1E+01	2.98 1E+01	2.86 1E+01	2.76 1E+01	
811.8	0.103	Eu-156	3.16	2.97	2.68	2.42	2.31	2.19	2.08	
812.8	0.430	Sb-129	1.16 1E+01	1.09 1E+01	9.94	9.08	8.69	8.29	7.95	
815.8	0.236	La-140	4.17	3.92	3.54	3.22	3.07	2.90	2.76	
818.5	0.997	Cs-136	1.83 1E+01	1.72 1E+01	1.57 1E+01	1.44 1E+01	1.39 1E+01	1.33 1E+01	1.28 1E+01	
834.8	1.000	Mn-54	4.62 1E+01	4.37 1E+01	3.99 1E+01	3.68 1E+01	3.54 1E+01	3.39 1E+01	3.26 1E+01	
839.4	1.000	Sb-130	1.19 1E+01	1.13 1E+01	1.03 1E+01	9.51	9.20	8.82	8.52	
841.6	0.146	Eu-152m	1.96 1E+01	1.86 1E+01	1.71 1E+01	1.59 1E+01	1.53 1E+01	1.46 1E+01	1.41 1E+01	
846.8	0.989	Mn-56	2.41 1E+01	2.27 1E+01	2.06 1E+01	1.87 1E+01	1.79 1E+01	1.69 1E+01	1.60 1E+01	
846.8	0.999	Co-56	1.25 1E+01	1.17 1E+01	1.06 1E+01	9.51	9.07	8.51	8.13	
847.0	0.954	I-134	1.44 1E+01	1.36 1E+01	1.24 1E+01	1.14 1E+01	1.09 1E+01	1.05 1E+01	1.00 1E+01	
852.2	0.206	Te-131m	5.72	5.42	4.95	4.55	4.40	4.21	4.05	
856.7	0.176	Sb-126	2.44	2.31	2.13	1.99	1.92	1.84	1.79	
864.0	0.156	Te-133m	3.38	3.19	2.92	2.69	2.59	2.48	2.37	
873.2	0.115	Eu-154	3.77	3.57	3.28	3.01	2.90	2.76	2.67	
881.6	0.420	Br-84	1.06 1E+01	9.93	8.94	8.01	7.56	7.12	6.72	
884.1	0.649	I-134	9.87	9.34	8.57	7.85	7.59	7.25	6.98	
884.7	0.729	Ag-110m	1.05 1E+01	9.89	9.09	8.36	8.07	7.72	7.43	
889.3	1.000	Sc-46	1.99 1E+01	1.88 1E+01	1.72 1E+01	1.58 1E+01	1.52 1E+01	1.45 1E+01	1.39 1E+01	
911.3	0.290	Ac-228	1.22 1E+01	1.15 1E+01	1.06 1E+01	9.76	9.39	9.00	8.69	
912.7	0.550	Te-133m	1.21 1E+01	1.14 1E+01	1.05 1E+01	9.73	9.38	8.93	8.62	
914.6	0.200	Sb-129	5.54	5.27	4.83	4.43	4.26	4.07	3.93	
914.8	0.109	Te-133m	2.39	2.27	2.08	1.93	1.85	1.77	1.71	
914.8	0.115	Pm-148	8.16	7.71	7.05	6.45	6.20	5.93	5.70	
915.3	0.171	Pm-148m	3.33	3.17	2.93	2.74	2.67	2.57	2.49	
934.5	0.139	Y-92	2.23 1E+01	2.12 1E+01	1.94 1E+01	1.78 1E+01	1.72 1E+01	1.64 1E+01	1.58 1E+01	
934.9	0.190	Sb-130	2.32	2.21	2.04	1.89	1.84	1.76	1.70	
937.5	0.343	Ag-110m	5.01	4.74	4.35	4.04	3.90	3.73	3.61	
954.5	0.181	I-132	3.17	2.98	2.77	2.57	2.49	2.40	2.32	
963.3	0.120	Eu-152m	1.67 1E+01	1.59 1E+01	1.48 1E+01	1.38 1E+01	1.33 1E+01	1.28 1E+01	1.24 1E+01	
964.1	0.145	Eu-152	5.26	5.00	4.62	4.27	4.11	3.94	3.82	
964.8	0.055	Ac-228	2.32	2.20	2.03	1.88	1.81	1.74	1.68	
966.4	0.077	Sb-129	2.16	2.05	1.89	1.74	1.68	1.60	1.55	
969.2	0.175	Ac-228	7.44	7.04	6.53	6.02	5.81	5.59	5.41	
984.5	0.278	Np-238	1.77 1E+01	1.69 1E+01	1.55 1E+01	1.43 1E+01	1.38 1E+01	1.32 1E+01	1.27 1E+01	
996.3	0.103	Eu-154	3.49	3.33	3.08	2.85	2.75	2.64	2.56	
1004.8	0.174	Eu-154	5.91	5.64	4.91	4.82	4.67	4.48	4.34	
1009.8	0.298	Cs-138	5.53	5.21	4.80	4.35	4.16	3.97	3.79	
1013.8	0.202	Pm-148m	4.05	3.86	3.59	3.38	3.30	3.18	3.11	
1025.9	0.096	Np-238	6.18	5.90	5.43	5.00	4.84	4.63	4.48	
1028.5	0.203	Np-238	1.31 1E+01	1.25 1E+01	1.15 1E+01	1.06 1E+01	1.02 1E+01	9.82	9.47	

付表-2(つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μGy/h)

エネルギー 放出比			放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ (g・cm ⁻²)							
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100	
1030.1	0.126	Sb-129	3.58	3.42	3.16	2.92	2.82	2.70	2.61	
1038.8	0.080	I-135	2.18	2.06	1.89	1.73	1.67	1.59	1.52	
1048.1	0.798	Cs-136	1.55 1E+01	1.48 1E+01	1.37 1E+01	1.27 1E+01	1.23 1E+01	1.19 1E+01	1.15 1E+01	
1072.6	0.150	I-134	2.38	2.29	2.11	1.96	1.90	1.82	1.77	
1076.6	0.088	Rb-86	3.94 1E+01	3.73 1E+01	3.45 1E+01	3.18 1E+01	3.06 1E+01	2.95 1E+01	2.84 1E+01	
1085.9	0.099	Eu-152	3.71	3.53	3.28	3.05	2.94	2.84	2.76	
1099.2	0.565	Fe-59	2.05 1E+01	1.94 1E+01	1.80 1E+01	1.66 1E+01	1.59 1E+01	1.52 1E+01	1.47 1E+01	
1112.1	0.136	Eu-152	5.09	4.86	4.53	4.21	4.07	3.92	3.82	
1115.5	0.148	Ni-65	1.19 1E+01	1.12 1E+01	1.04 1E+01	9.55	9.14	8.78	8.45	
1115.5	0.507	Zn-65	3.72 1E+01	3.55 1E+01	3.28 1E+01	3.03 1E+01	2.93 1E+01	2.80 1E+01	2.72 1E+01	
1120.5	1.000	Sc-46	2.11 1E+01	2.01 1E+01	1.86 1E+01	1.73 1E+01	1.67 1E+01	1.60 1E+01	1.56 1E+01	
1121.3	0.349	Ta-182	1.17 1E+01	1.12 1E+01	1.05 1E+01	9.65	9.35	9.02	8.71	
1125.5	0.114	Te-131m	3.39	3.23	3.01	2.81	2.73	2.64	2.56	
1131.5	0.228	I-135	6.30	5.98	5.53	5.09	4.88	4.68	4.49	
1153.5	0.071	Eu-156	2.37	2.26	2.08	1.92	1.84	1.76	1.69	
1157.5	0.113	I-130	2.16	2.07	1.94	1.84	1.80	1.74	1.70	
1173.2	0.999	Co-60	1.76 1E+01	1.67 1E+01	1.55 1E+01	1.43 1E+01	1.37 1E+01	1.32 1E+01	1.27 1E+01	
1189.0	0.164	Ta-182	5.59	5.36	5.00	4.64	4.49	4.34	4.22	
1204.9	0.003	Y-91	3.66 1E+01	3.48 1E+01	3.24 1E+01	3.00 1E+01	2.88 1E+01	2.78 1E+01	2.68 1E+01	
1206.6	0.098	Te-131m	2.94	2.81	2.63	2.47	2.39	2.31	2.26	
1221.4	0.273	Ta-182	9.34	9.00	8.43	7.82	7.57	7.33	7.11	
1230.7	0.089	Eu-156	3.00	2.87	2.65	2.45	2.36	2.26	2.18	
1231.0	0.116	Ta-182	3.95	3.81	3.56	3.31	3.21	3.11	3.01	
1235.4	0.200	Cs-136	4.05	3.86	3.62	3.41	3.30	3.20	3.12	
1238.3	0.670	Co-56	9.14	8.69	8.00	7.39	7.07	6.76	6.52	
1242.4	0.067	Eu-156	2.27	2.17	2.01	1.86	1.79	1.71	1.65	
1260.4	0.289	I-135	8.20	7.80	7.26	6.75	6.47	6.22	5.99	
1274.4	0.355	Eu-154	1.27 1E+01	1.22 1E+01	1.14 1E+01	1.07 1E+01	1.04 1E+01	1.01 1E+01	9.86	
1274.5	0.999	Na-22	1.96 1E+01	1.88 1E+01	1.77 1E+01	1.67 1E+01	1.62 1E+01	1.56 1E+01	1.52 1E+01	
1291.6	0.432	Fe-59	1.62 1E+01	1.55 1E+01	1.45 1E+01	1.35 1E+01	1.30 1E+01	1.25 1E+01	1.21 1E+01	
1332.5	1.000	Co-60	1.81 1E+01	1.73 1E+01	1.61 1E+01	1.50 1E+01	1.45 1E+01	1.40 1E+01	1.35 1E+01	
1354.5	0.026	La-141	2.85 1E+01	2.72 1E+01	2.52 1E+01	2.35 1E+01	2.25 1E+01	2.17 1E+01	2.09 1E+01	
1368.6	1.000	Na-24	1.24 1E+01	1.17 1E+01	1.08 1E+01	9.87	9.34	8.92	8.50	
1383.9	0.900	Sr-92	3.11 1E+01	2.98 1E+01	2.77 1E+01	2.58 1E+01	2.49 1E+01	2.40 1E+01	2.32 1E+01	
1384.3	0.243	Ag-110m	3.89	3.74	3.50	3.35	3.24	3.15	3.08	
1408.0	0.209	Eu-152	8.29	7.99	7.52	7.13	6.90	6.72	6.58	
1435.9	0.763	Cs-138	1.53 1E+01	1.47 1E+01	1.37 1E+01	1.28 1E+01	1.22 1E+01	1.19 1E+01	1.15 1E+01	
1457.6	0.087	I-135	2.57	2.46	2.30	2.17	2.08	2.01	1.95	
1460.8	0.107	K-40	3.26 1E+01	3.11 1E+01	2.91 1E+01	2.72 1E+01	2.60 1E+01	2.52 1E+01	2.43 1E+01	
1465.1	0.222	Pm-148	1.77 1E+01	1.70 1E+01	1.59 1E+01	1.51 1E+01	1.46 1E+01	1.42 1E+01	1.39 1E+01	
1481.8	0.235	Ni-65	2.02 1E+01	1.93 1E+01	1.80 1E+01	1.70 1E+01	1.63 1E+01	1.58 1E+01	1.53 1E+01	
1505.0	0.131	Ag-110m	2.14	2.06	1.94	1.86	1.81	1.76	1.73	
1524.6	0.189	K-42	3.14 1E+01	3.00 1E+01	2.80 1E+01	2.63 1E+01	2.52 1E+01	2.43 1E+01	2.35 1E+01	
1596.2	0.954	La-140	1.98 1E+01	1.90 1E+01	1.78 1E+01	1.69 1E+01	1.63 1E+01	1.58 1E+01	1.54 1E+01	
1678.0	0.096	I-135	2.93	2.81	2.65	2.52	2.42	2.35	2.29	
1691.0	0.488	Sb-124	1.25 1E+01	1.21 1E+01	1.14 1E+01	1.09 1E+01	1.05 1E+01	1.03 1E+01	1.00 1E+01	
1736.5	0.060	Sb-129	1.92	1.86	1.78	1.70	1.65	1.61	1.58	
1736.5	0.060	Sb-129	1.92	1.86	1.78	1.70	1.65	1.61	1.58	
1771.4	0.155	Co-56	2.30	2.22	2.09	1.97	1.91	1.84	1.80	
1791.2	0.078	I-135	2.40	2.31	2.18	2.08	2.01	1.96	1.91	
1810.7	0.272	Mn-56	7.96	7.69	7.30	6.91	6.72	6.50	6.34	
1897.6	0.147	Br-84	4.44	4.28	4.02	3.78	3.64	3.51	3.40	
1901.3	0.072	La-142	1.62	1.55	1.46	1.37	1.33	1.28	1.24	
2091.0	0.056	Sb-124	1.51	1.47	1.40	1.35	1.32	1.30	1.27	
2113.0	0.143	Mn-56	4.35	4.21	4.04	3.86	3.78	3.67	3.59	
2218.0	0.152	Cs-138	3.37	3.25	3.13	2.98	2.91	2.85	2.79	
2397.8	0.133	La-142	3.16	3.05	2.90	2.77	2.70	2.62	2.54	
2484.1	0.067	Br-84	2.16	2.09	1.99	1.90	1.85	1.80	1.75	
2542.7	0.100	La-142	2.41	2.33	2.23	2.13	2.09	2.02	1.97	
2598.6	0.167	Co-56	2.72	2.65	2.53	2.44	2.40	2.34	2.30	
2639.6	0.076	Cs-138	1.76	1.71	1.66	1.60	1.57	1.55	1.52	
2754.0	0.999	Na-24	1.46 1E+01	1.41 1E+01	1.34 1E+01	1.28 1E+01	1.24 1E+01	1.22 1E+01	1.18 1E+01	
3253.5	0.074	Co-56	1.26	1.24	1.20	1.17	1.16	1.13	1.13	
3927.5	0.068	Br-84	2.41	2.37	2.32	2.26	2.23	2.20	2.18	

付録 3 放射性核種濃度と地上高 1m での線量率との関係

付表-3 放射性核種濃度と地上高1mでの線量率との関係
(土壤中指数分布の場合)

単位 : ($\mu\text{Gy/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壤中における鉛直分布を表すパラメータ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
Be-7	2.26 1E-04	2.04 1E-04	1.90 1E-04	1.81 1E-04	1.67 1E-04	1.46 1E-04	1.22 1E-04	
Na-22	9.36 1E-03	8.47 1E-03	7.93 1E-03	7.53 1E-03	6.97 1E-03	6.09 1E-03	5.10 1E-03	
Na-24	1.47 1E-02	1.33 1E-02	1.25 1E-02	1.19 1E-02	1.10 1E-02	9.70 1E-03	8.19 1E-03	
K-40	6.19 1E-04	5.59 1E-04	5.24 1E-04	4.97 1E-04	4.62 1E-04	4.04 1E-04	3.41 1E-04	
K-42	1.14 1E-03	1.03 1E-03	9.66 1E-04	9.17 1E-04	8.53 1E-04	7.46 1E-04	6.28 1E-04	
Sc-46	8.46 1E-03	7.67 1E-03	7.17 1E-03	6.82 1E-03	6.31 1E-03	5.51 1E-03	4.62 1E-03	
Cr-51	2.18 1E-04	1.47 1E-04	1.29 1E-04	1.20 1E-04	1.09 1E-04	9.39 1E-05	7.77 1E-05	
Mn-54	3.71 1E-03	3.30 1E-03	3.07 1E-03	2.92 1E-03	2.69 1E-03	2.35 1E-03	1.97 1E-03	
Mn-56	6.74 1E-03	6.11 1E-03	5.73 1E-03	5.45 1E-03	5.05 1E-03	4.41 1E-03	3.71 1E-03	
Fe-59	4.87 1E-03	4.42 1E-03	4.13 1E-03	3.93 1E-03	3.64 1E-03	3.18 1E-03	2.67 1E-03	
Co-56	1.33 1E-02	1.20 1E-02	1.12 1E-02	1.06 1E-02	9.86 1E-03	8.64 1E-03	7.27 1E-03	
Co-57	8.09 1E-04	5.51 1E-04	4.74 1E-04	4.35 1E-04	3.88 1E-04	3.28 1E-04	2.65 1E-04	
Co-58	4.38 1E-03	3.89 1E-03	3.63 1E-03	3.44 1E-03	3.17 1E-03	2.77 1E-03	2.32 1E-03	
Co-60	1.02 1E-02	9.20 1E-03	8.61 1E-03	8.18 1E-03	7.59 1E-03	6.64 1E-03	5.58 1E-03	
Ni-65	2.20 1E-03	2.00 1E-03	1.87 1E-03	1.78 1E-03	1.65 1E-03	1.44 1E-03	1.21 1E-03	
Zn-65	2.62 1E-03	2.26 1E-03	2.09 1E-03	1.97 1E-03	1.82 1E-03	1.58 1E-03	1.32 1E-03	
Zn-69m	1.91 1E-03	1.72 1E-03	1.61 1E-03	1.52 1E-03	1.41 1E-03	1.23 1E-03	1.03 1E-03	
Se-75	2.10 1E-03	1.69 1E-03	1.53 1E-03	1.43 1E-03	1.30 1E-03	1.12 1E-03	9.22 1E-04	
Br-84	6.54 1E-03	5.93 1E-03	5.56 1E-03	5.29 1E-03	4.90 1E-03	4.30 1E-03	3.63 1E-03	
Rb-86	3.95 1E-04	3.58 1E-04	3.35 1E-04	3.18 1E-04	2.94 1E-04	2.57 1E-04	2.16 1E-04	
Sr-92	5.36 1E-03	4.86 1E-03	4.55 1E-03	4.32 1E-03	4.01 1E-03	3.51 1E-03	2.95 1E-03	
Y-90m	2.88 1E-03	2.58 1E-03	2.41 1E-03	2.28 1E-03	2.10 1E-03	1.83 1E-03	1.53 1E-03	
Y-91	1.48 1E-05	1.34 1E-05	1.25 1E-05	1.19 1E-05	1.10 1E-05	9.64 1E-06	8.10 1E-06	
Y-91m	2.41 1E-03	2.16 1E-03	2.02 1E-03	1.92 1E-03	1.77 1E-03	1.54 1E-03	1.29 1E-03	
Y-92	1.06 1E-03	9.61 1E-04	8.99 1E-04	8.54 1E-04	7.91 1E-04	6.91 1E-04	5.79 1E-04	
Y-93	3.60 1E-04	3.62 1E-04	3.05 1E-04	2.90 1E-04	2.69 1E-04	2.35 1E-04	1.97 1E-04	
Zr-95	3.23 1E-03	2.93 1E-03	2.74 1E-03	2.60 1E-03	2.40 1E-03	2.10 1E-03	1.76 1E-03	
Zr-97	8.21 1E-04	7.39 1E-04	6.91 1E-04	6.55 1E-04	6.06 1E-04	5.92 1E-04	4.43 1E-04	
Nb-93m	8.53 1E-05	3.93 1E-05	2.58 1E-05	1.93 1E-05	1.29 1E-05	7.05 1E-06	3.73 1E-06	
Nb-95	3.35 1E-03	3.03 1E-03	2.84 1E-03	2.69 1E-03	2.49 1E-03	2.17 1E-03	1.82 1E-03	
Nb-95m	5.15 1E-04	3.26 1E-04	3.07 1E-04	2.76 1E-04	2.40 1E-04	1.97 1E-04	1.58 1E-04	
Nb-97	2.97 1E-03	2.68 1E-03	2.51 1E-03	2.39 1E-03	2.21 1E-03	1.92 1E-03	1.61 1E-03	
Mo-93	4.88 1E-04	2.31 1E-04	1.52 1E-04	1.13 1E-04	7.58 1E-05	4.15 1E-05	2.19 1E-05	
Mo-99	6.54 1E-04	5.29 1E-04	5.53 1E-04	5.26 1E-04	4.85 1E-04	4.23 1E-04	3.54 1E-04	
Tc-99m	5.66 1E-04	4.93 1E-04	4.55 1E-04	4.30 1E-04	3.93 1E-04	3.40 1E-04	2.79 1E-04	
Ru-103	2.21 1E-03	2.00 1E-03	1.87 1E-03	1.77 1E-03	1.64 1E-03	1.43 1E-03	1.19 1E-03	
Ru-105	3.35 1E-03	3.00 1E-03	2.80 1E-03	2.65 1E-03	2.45 1E-03	2.13 1E-03	1.78 1E-03	
Rh-103m	4.43 1E-04	2.35 1E-04	1.63 1E-04	1.27 1E-04	8.82 1E-05	5.05 1E-05	2.75 1E-05	
Rh-105	3.53 1E-04	3.19 1E-04	2.98 1E-04	2.83 1E-04	2.62 1E-04	2.28 1E-04	1.90 1E-04	
Rh-106	9.30 1E-04	8.40 1E-04	7.86 1E-04	7.46 1E-04	6.90 1E-04	6.02 1E-04	5.03 1E-04	
Ag-110m	1.18 1E-02	1.06 1E-02	9.96 1E-03	9.46 1E-03	8.76 1E-03	7.64 1E-03	6.41 1E-03	
Ag-111	1.21 1E-04	1.09 1E-04	1.02 1E-04	9.63 1E-05	8.91 1E-05	7.76 1E-05	6.46 1E-05	
Sn-117m	1.03 1E-03	7.91 1E-04	6.90 1E-04	6.30 1E-04	5.52 1E-04	4.54 1E-04	3.58 1E-04	
Sn-126	4.17 1E-04	2.99 1E-04	2.52 1E-04	2.25 1E-04	1.92 1E-04	1.50 1E-04	1.11 1E-04	
Sb-124	7.58 1E-03	6.86 1E-03	6.43 1E-03	6.12 1E-03	5.67 1E-03	4.95 1E-03	4.16 1E-03	
Sb-125	2.15 1E-03	1.87 1E-03	1.72 1E-03	1.62 1E-03	1.48 1E-03	1.27 1E-03	1.05 1E-03	
Sb-126	1.22 1E-02	1.10 1E-02	1.03 1E-02	9.81 1E-03	9.07 1E-03	7.91 1E-03	6.62 1E-03	
Sb-127	2.97 1E-03	2.68 1E-03	2.51 1E-03	2.38 1E-03	2.20 1E-03	1.92 1E-03	1.60 1E-03	
Sb-128	1.36 1E-02	1.23 1E-02	1.15 1E-02	1.09 1E-02	1.01 1E-02	8.82 1E-03	7.39 1E-03	
Sb-129	6.14 1E-03	5.56 1E-03	5.20 1E-03	4.94 1E-03	4.58 1E-03	4.00 1E-03	3.35 1E-03	
Sb-130	1.41 1E-02	1.27 1E-02	1.19 1E-02	1.13 1E-02	1.04 1E-02	9.12 1E-03	7.64 1E-03	
Te-123m	8.36 1E-04	6.74 1E-04	6.01 1E-04	5.56 1E-04	4.96 1E-04	4.15 1E-04	3.32 1E-04	
Te-125m	6.40 1E-04	3.93 1E-04	2.99 1E-04	2.47 1E-04	1.87 1E-04	1.19 1E-04	7.08 1E-05	
Te-127	2.26 1E-05	2.03 1E-05	1.89 1E-05	1.79 1E-05	1.65 1E-05	1.44 1E-05	1.20 1E-05	
Te-127m	2.09 1E-04	1.25 1E-04	9.47 1E-05	7.80 1E-05	5.91 1E-05	3.78 1E-05	2.25 1E-05	
Te-129	3.45 1E-04	2.77 1E-04	2.48 1E-04	2.30 1E-04	2.07 1E-04	1.75 1E-04	1.42 1E-04	
Te-129m	3.71 1E-04	2.63 1E-04	2.20 1E-04	1.95 1E-04	1.65 1E-04	1.28 1E-04	9.62 1E-05	
Te-131m	6.08 1E-03	5.50 1E-03	5.14 1E-03	4.88 1E-03	4.51 1E-03	3.93 1E-03	3.30 1E-03	
Te-132	1.29 1E-03	1.07 1E-03	9.66 1E-04	8.97 1E-04	8.05 1E-04	6.75 1E-04	5.44 1E-04	
Te-133m	7.84 1E-03	7.07 1E-03	6.60 1E-03	6.27 1E-03	5.79 1E-03	5.05 1E-03	4.23 1E-03	
Te-134	3.90 1E-03	3.49 1E-03	3.25 1E-03	3.08 1E-03	2.84 1E-03	2.46 1E-03	2.05 1E-03	
I-129	3.43 1E-04	2.24 1E-04	1.75 1E-04	1.48 1E-04	1.14 1E-04	7.53 1E-05	4.57 1E-05	
I-130	9.48 1E-03	8.58 1E-03	8.03 1E-03	7.63 1E-03	7.05 1E-03	6.15 1E-03	5.15 1E-03	
I-131	1.74 1E-03	1.57 1E-03	1.47 1E-03	1.39 1E-03	1.29 1E-03	1.12 1E-03	9.32 1E-04	
I-132	9.88 1E-03	8.94 1E-03	8.37 1E-03	7.95 1E-03	7.35 1E-03	6.42 1E-03	5.38 1E-03	

付表-3(つづき)

単位：(μGy/h) / (kBq/m²)

核種	放射性物質の土壤中における鉛直分布を表すパラメータ (g・cm ⁻²)									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0			
I-133	2.72 1E-03	2.46 1E-03	2.30 1E-03	2.18 1E-03	2.01 1E-03	1.76 1E-03	1.47 1E-03			
I-134	1.11 1E-02	1.00 1E-02	9.39 1E-03	8.93 1E-03	8.26 1E-03	7.21 1E-03	6.05 1E-03			
I-135	6.40 1E-03	5.80 1E-03	5.43 1E-03	5.16 1E-03	4.79 1E-03	4.19 1E-03	3.52 1E-03			
Cs-134	6.85 1E-03	6.19 1E-03	5.80 1E-03	5.50 1E-03	5.09 1E-03	4.44 1E-03	3.72 1E-03			
Cs-134m	2.86 1E-04	1.80 1E-04	1.46 1E-04	1.29 1E-04	1.08 1E-04	8.20 1E-05	5.98 1E-05			
Cs-136	9.08 1E-03	8.22 1E-03	7.69 1E-03	7.30 1E-03	6.75 1E-03	5.90 1E-03	4.94 1E-03			
Cs-138	9.30 1E-03	8.43 1E-03	7.90 1E-03	7.51 1E-03	6.96 1E-03	6.10 1E-03	5.13 1E-03			
Ba-137m	2.68 1E-03	2.42 1E-03	2.26 1E-03	2.15 1E-03	1.98 1E-03	1.73 1E-03	1.44 1E-03			
Ba-139	2.05 1E-04	1.81 1E-04	1.68 1E-04	1.58 1E-04	1.45 1E-04	1.25 1E-04	1.03 1E-04			
Ba-140	9.32 1E-04	7.86 1E-04	7.22 1E-04	6.79 1E-04	6.21 1E-04	5.35 1E-04	4.42 1E-04			
La-140	9.27 1E-03	8.39 1E-03	7.87 1E-03	7.47 1E-03	6.93 1E-03	6.06 1E-03	5.10 1E-03			
La-141	1.70 1E-04	1.54 1E-04	1.44 1E-04	1.37 1E-04	1.27 1E-04	1.11 1E-04	9.36 1E-05			
La-142	8.75 1E-03	7.93 1E-03	7.44 1E-03	7.09 1E-03	6.57 1E-03	5.76 1E-03	4.86 1E-03			
Ce-141	3.67 1E-04	3.13 1E-04	2.87 1E-04	2.69 1E-04	2.44 1E-04	2.09 1E-04	1.68 1E-04			
Ce-143	1.39 1E-03	1.19 1E-03	1.09 1E-03	1.02 1E-03	9.28 1E-04	7.90 1E-04	6.45 1E-04			
Ce-144	1.08 1E-04	8.70 1E-05	7.76 1E-05	7.17 1E-05	6.37 1E-05	5.27 1E-05	4.13 1E-05			
Pr-145	1.14 1E-04	1.02 1E-04	9.52 1E-05	9.03 1E-05	8.32 1E-05	7.23 1E-05	6.03 1E-05			
Nd-147	7.36 1E-04	6.16 1E-04	5.59 1E-04	5.22 1E-04	4.71 1E-04	3.97 1E-04	3.21 1E-04			
Pm-148	2.38 1E-03	2.15 1E-03	2.02 1E-03	1.92 1E-03	1.78 1E-03	1.55 1E-03	1.30 1E-03			
Pm-148m	8.83 1E-03	7.98 1E-03	7.46 1E-03	7.09 1E-03	6.55 1E-03	5.71 1E-03	4.78 1E-03			
Pm-149	1.68 1E-06	1.51 1E-06	1.40 1E-06	1.33 1E-06	1.23 1E-06	1.07 1E-06	8.87 1E-07			
Pm-151	1.54 1E-03	1.36 1E-03	1.26 1E-03	1.19 1E-03	1.09 1E-03	9.46 1E-04	7.83 1E-04			
Eu-152	4.74 1E-03	4.29 1E-03	4.02 1E-03	3.81 1E-03	3.53 1E-03	3.09 1E-03	2.59 1E-03			
Eu-152m	1.33 1E-03	1.18 1E-03	1.09 1E-03	1.03 1E-03	9.47 1E-04	8.20 1E-04	6.81 1E-04			
Eu-154	5.24 1E-03	4.71 1E-03	4.40 1E-03	4.17 1E-03	3.85 1E-03	3.36 1E-03	2.81 1E-03			
Eu-155	3.16 1E-04	2.54 1E-04	2.27 1E-04	2.10 1E-04	1.88 1E-04	1.55 1E-04	1.20 1E-04			
Eu-156	5.36 1E-03	4.84 1E-03	4.53 1E-03	4.30 1E-03	3.98 1E-03	3.48 1E-03	2.92 1E-03			
Hf-181	2.50 1E-03	2.21 1E-03	2.05 1E-03	1.94 1E-03	1.79 1E-03	1.55 1E-03	1.29 1E-03			
Ta-182	5.51 1E-03	4.91 1E-03	4.57 1E-03	4.33 1E-03	4.00 1E-03	3.48 1E-03	2.91 1E-03			
W-187	2.35 1E-03	2.09 1E-03	1.95 1E-03	1.84 1E-03	1.70 1E-03	1.48 1E-03	1.23 1E-03			
Pb-210	2.07 1E-04	8.54 1E-05	5.34 1E-05	3.97 1E-05	2.71 1E-05	1.58 1E-05	9.15 1E-06			
Pb-212	7.37 1E-04	6.08 1E-04	5.54 1E-04	5.19 1E-04	4.74 1E-04	4.07 1E-04	3.34 1E-04			
Bi-212	5.01 1E-04	4.25 1E-04	3.91 1E-04	3.68 1E-04	3.38 1E-04	2.93 1E-04	2.45 1E-04			
Ra-224	4.71 1E-05	4.12 1E-05	3.82 1E-05	3.61 1E-05	3.33 1E-05	2.89 1E-05	2.40 1E-05			
Ra-226	3.46 1E-05	2.82 1E-05	2.57 1E-05	2.41 1E-05	2.19 1E-05	1.88 1E-05	1.55 1E-05			
Ac-228	4.33 1E-03	3.79 1E-03	3.50 1E-03	3.31 1E-03	3.05 1E-03	2.65 1E-03	2.22 1E-03			
Th-228	8.20 1E-05	3.73 1E-05	2.49 1E-05	1.95 1E-05	1.43 1E-05	9.59 1E-06	6.54 1E-06			
Th-231	7.85 1E-04	3.63 1E-04	2.41 1E-04	1.85 1E-04	1.31 1E-04	8.11 1E-05	5.02 1E-05			
Th-232	6.80 1E-05	2.77 1E-05	1.68 1E-05	1.22 1E-05	7.89 1E-06	4.28 1E-06	2.31 1E-06			
Th-234	1.14 1E-04	6.34 1E-05	4.82 1E-05	4.09 1E-05	3.33 1E-05	2.50 1E-05	1.84 1E-05			
Pa-233	1.33 1E-03	1.01 1E-03	8.87 1E-04	8.19 1E-04	7.37 1E-04	6.24 1E-04	5.09 1E-04			
U-232	8.70 1E-05	3.62 1E-05	2.23 1E-05	1.62 1E-05	1.06 1E-05	5.81 1E-06	3.16 1E-06			
U-234	7.98 1E-05	3.30 1E-05	2.02 1E-05	1.46 1E-05	9.47 1E-06	5.08 1E-06	2.69 1E-06			
U-235	1.06 1E-03	7.75 1E-04	6.77 1E-04	6.22 1E-04	5.55 1E-04	4.69 1E-04	3.82 1E-04			
U-236	6.71 1E-05	2.78 1E-05	1.69 1E-05	1.22 1E-05	7.90 1E-06	4.21 1E-06	2.21 1E-06			
U-237	1.09 1E-03	7.36 1E-04	6.17 1E-04	5.53 1E-04	4.80 1E-04	3.90 1E-04	3.07 1E-04			
U-238	7.07 1E-05	2.93 1E-05	1.79 1E-05	1.29 1E-05	8.33 1E-06	4.44 1E-06	2.32 1E-06			
Np-237	6.36 1E-04	3.23 1E-04	2.30 1E-04	1.86 1E-04	1.42 1E-04	9.77 1E-05	6.68 1E-05			
Np-238	2.95 1E-03	2.56 1E-03	2.36 1E-03	2.23 1E-03	2.05 1E-03	1.78 1E-03	1.49 1E-03			
Np-239	1.19 1E-03	8.59 1E-04	7.43 1E-04	6.78 1E-04	6.02 1E-04	5.03 1E-04	4.05 1E-04			
Pu-236	8.81 1E-05	3.72 1E-05	2.30 1E-05	1.66 1E-05	1.08 1E-05	5.75 1E-06	3.00 1E-06			
Pu-238	8.67 1E-05	3.66 1E-05	2.26 1E-05	1.63 1E-05	1.06 1E-05	5.60 1E-06	2.91 1E-06			
Pu-239	3.73 1E-05	1.52 1E-05	9.28 1E-06	6.72 1E-06	4.38 1E-06	2.37 1E-06	1.27 1E-06			
Pu-240	7.61 1E-05	3.21 1E-05	1.98 1E-05	1.43 1E-05	9.25 1E-06	4.91 1E-06	2.55 1E-06			
Pu-242	7.03 1E-05	2.97 1E-05	1.83 1E-05	1.32 1E-05	8.56 1E-06	4.53 1E-06	2.35 1E-06			
Am-241	4.35 1E-04	2.36 1E-04	1.74 1E-04	1.43 1E-04	1.12 1E-04	7.86 1E-05	5.35 1E-05			
Am-242	2.77 1E-04	1.45 1E-04	1.05 1E-04	8.65 1E-05	6.76 1E-05	4.87 1E-05	3.50 1E-05			
Am-242m	2.47 1E-04	1.07 1E-04	6.75 1E-05	4.94 1E-05	3.25 1E-05	1.77 1E-05	9.44 1E-06			
Am-243	3.89 1E-04	2.74 1E-04	2.32 1E-04	2.09 1E-04	1.81 1E-04	1.45 1E-04	1.10 1E-04			
Cm-242	7.41 1E-05	3.19 1E-05	1.99 1E-05	1.44 1E-05	9.38 1E-06	4.99 1E-06	2.60 1E-06			
Cm-243	9.48 1E-04	6.59 1E-04	5.61 1E-04	5.08 1E-04	4.47 1E-04	3.71 1E-04	2.98 1E-04			
Cm-244	6.98 1E-05	3.02 1E-05	1.88 1E-05	1.37 1E-05	8.87 1E-06	4.72 1E-06	2.45 1E-06			
Cm-245	7.58 1E-04	4.92 1E-04	4.05 1E-04	3.60 1E-04	3.10 1E-04	2.51 1E-04	1.97 1E-04			
Cm-247	1.45 1E-03	1.27 1E-03	1.18 1E-03	1.11 1E-03	1.03 1E-03	8.92 1E-04	7.41 1E-04			

付表-3 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Gy/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壤中における鉛直分布を表すパラメータ									
	($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)									
	3.0	5.0	10	20	30	50	100			
I-133	1.29 1E-03	1.06 1E-03	7.66 1E-04	5.04 1E-04	3.79 1E-04	2.54 1E-04	1.40 1E-04			
I-134	5.33 1E-03	4.41 1E-03	3.21 1E-03	2.14 1E-03	1.62 1E-03	1.10 1E-03	6.10 1E-04			
I-135	3.11 1E-03	2.59 1E-03	1.90 1E-03	1.28 1E-03	9.78 1E-04	6.67 1E-04	3.74 1E-04			
Cs-134	3.27 1E-03	2.70 1E-03	1.95 1E-03	1.29 1E-03	9.71 1E-04	6.55 1E-04	3.61 1E-04			
Cs-134m	4.87 1E-05	3.65 1E-05	2.34 1E-05	1.39 1E-05	9.92 1E-06	6.35 1E-06	3.33 1E-06			
Cs-136	4.35 1E-03	3.60 1E-03	2.61 1E-03	1.74 1E-03	1.32 1E-03	8.90 1E-04	4.93 1E-04			
Cs-138	4.54 1E-03	3.78 1E-03	2.77 1E-03	1.88 1E-03	1.44 1E-03	9.81 1E-04	5.51 1E-04			
Ba-137m	1.27 1E-03	1.05 1E-03	7.55 1E-04	4.96 1E-04	3.73 1E-04	2.51 1E-04	1.38 1E-04			
Ba-139	8.93 1E-05	7.21 1E-05	4.99 1E-05	3.14 1E-05	2.31 1E-05	1.51 1E-05	8.13 1E-06			
Ba-140	3.87 1E-04	3.16 1E-04	2.25 1E-04	1.47 1E-04	1.10 1E-04	7.31 1E-05	4.00 1E-05			
La-140	4.51 1E-03	3.75 1E-03	2.75 1E-03	1.85 1E-03	1.41 1E-03	9.64 1E-04	5.40 1E-04			
La-141	8.28 1E-05	6.90 1E-05	5.07 1E-05	3.44 1E-05	2.63 1E-05	1.80 1E-05	1.01 1E-05			
La-142	4.31 1E-03	3.61 1E-03	2.67 1E-03	1.82 1E-03	1.40 1E-03	9.67 1E-04	5.47 1E-04			
Ce-141	1.45 1E-04	1.15 1E-04	7.82 1E-05	4.83 1E-05	3.50 1E-05	2.27 1E-05	1.21 1E-05			
Ce-143	5.59 1E-04	4.53 1E-04	3.20 1E-04	2.05 1E-04	1.53 1E-04	1.02 1E-04	5.53 1E-05			
Ce-144	3.49 1E-05	2.72 1E-05	1.80 1E-05	1.10 1E-05	7.89 1E-06	5.08 1E-06	2.69 1E-06			
Pr-145	5.30 1E-05	4.37 1E-05	3.16 1E-05	2.10 1E-05	1.59 1E-05	1.07 1E-05	5.93 1E-06			
Nd-147	2.76 1E-04	2.21 1E-04	1.54 1E-04	9.81 1E-05	7.25 1E-05	4.80 1E-05	2.61 1E-05			
Pm-148	1.15 1E-03	9.54 1E-04	6.96 1E-04	4.67 1E-04	3.55 1E-04	2.41 1E-04	1.34 1E-04			
Pm-148m	4.20 1E-03	3.47 1E-03	2.50 1E-03	1.64 1E-03	1.23 1E-03	8.30 1E-04	4.57 1E-04			
Pm-149	7.77 1E-07	6.35 1E-07	4.52 1E-07	2.91 1E-07	2.16 1E-07	1.44 1E-07	7.82 1E-08			
Pm-151	6.83 1E-04	5.56 1E-04	3.94 1E-04	2.54 1E-04	1.89 1E-04	1.26 1E-04	6.86 1E-05			
Eu-152	2.28 1E-03	1.89 1E-03	1.37 1E-03	9.14 1E-04	6.93 1E-04	4.69 1E-04	2.60 1E-04			
Eu-152m	5.97 1E-04	4.91 1E-04	3.54 1E-04	2.34 1E-04	1.77 1E-04	1.20 1E-04	6.61 1E-05			
Eu-154	2.47 1E-03	2.04 1E-03	1.48 1E-03	9.87 1E-04	7.48 1E-04	5.07 1E-04	2.81 1E-04			
Eu-155	1.01 1E-04	7.68 1E-05	4.93 1E-05	2.92 1E-05	2.07 1E-05	1.32 1E-05	6.88 1E-06			
Eu-156	2.59 1E-03	2.15 1E-03	1.58 1E-03	1.07 1E-03	8.14 1E-04	5.57 1E-04	3.12 1E-04			
Hf-181	1.13 1E-03	9.19 1E-04	6.52 1E-04	4.23 1E-04	3.14 1E-04	2.09 1E-04	1.14 1E-04			
Ta-182	2.56 1E-03	2.11 1E-03	1.53 1E-03	1.03 1E-03	7.79 1E-04	5.28 1E-04	2.94 1E-04			
W-187	1.08 1E-03	8.84 1E-04	6.33 1E-04	4.14 1E-04	3.10 1E-04	2.08 1E-04	1.14 1E-04			
Pb-210	6.55 1E-06	4.25 1E-06	2.28 1E-06	1.19 1E-06	8.08 1E-07	4.91 1E-07	2.48 1E-07			
Pb-212	2.89 1E-04	2.33 1E-04	1.61 1E-04	1.02 1E-04	7.45 1E-05	4.88 1E-05	2.63 1E-05			
Bi-212	2.16 1E-04	1.78 1E-04	1.30 1E-04	8.64 1E-05	6.55 1E-05	4.44 1E-05	2.47 1E-05			
Ra-224	2.09 1E-05	1.70 1E-05	1.20 1E-05	7.60 1E-06	5.61 1E-06	3.69 1E-06	1.99 1E-06			
Ra-226	1.34 1E-05	1.09 1E-05	7.50 1E-06	4.70 1E-06	3.44 1E-06	2.25 1E-06	1.20 1E-06			
Ac-228	1.95 1E-03	1.62 1E-03	1.17 1E-03	7.81 1E-04	5.92 1E-04	4.01 1E-04	2.22 1E-04			
Th-228	5.20 1E-06	3.84 1E-06	2.43 1E-06	1.44 1E-06	1.03 1E-06	6.57 1E-07	3.46 1E-07			
Th-231	3.77 1E-05	2.60 1E-05	1.52 1E-05	8.50 1E-06	5.92 1E-06	3.70 1E-06	1.91 1E-06			
Th-232	1.60 1E-06	1.01 1E-06	5.36 1E-07	2.80 1E-07	1.90 1E-07	1.16 1E-07	5.87 1E-08			
Th-234	1.50 1E-05	1.12 1E-05	7.05 1E-06	4.12 1E-06	2.91 1E-06	1.84 1E-06	9.59 1E-07			
Pa-233	4.43 1E-04	3.57 1E-04	2.51 1E-04	1.60 1E-04	1.18 1E-04	7.76 1E-05	4.20 1E-05			
U-232	2.20 1E-06	1.40 1E-06	7.51 1E-07	3.95 1E-07	2.70 1E-07	1.65 1E-07	8.42 1E-08			
U-234	1.85 1E-06	1.15 1E-06	5.95 1E-07	3.05 1E-07	2.06 1E-07	1.25 1E-07	6.30 1E-08			
U-235	3.30 1E-04	2.65 1E-04	1.82 1E-04	1.14 1E-04	8.35 1E-05	5.44 1E-05	2.91 1E-05			
U-236	1.50 1E-06	9.26 1E-07	4.76 1E-07	2.42 1E-07	1.63 1E-07	9.82 1E-08	4.95 1E-08			
U-237	2.59 1E-04	2.03 1E-04	1.35 1E-04	8.28 1E-05	5.98 1E-05	3.87 1E-05	2.05 1E-05			
U-238	1.58 1E-06	9.74 1E-07	5.00 1E-07	2.55 1E-07	1.71 1E-07	1.03 1E-07	5.20 1E-08			
Np-237	5.29 1E-05	3.86 1E-05	2.39 1E-05	1.39 1E-05	9.79 1E-06	6.20 1E-06	3.24 1E-06			
Np-238	1.31 1E-03	1.08 1E-03	7.88 1E-04	5.28 1E-04	4.01 1E-04	2.72 1E-04	1.51 1E-04			
Np-239	3.48 1E-04	2.78 1E-04	1.90 1E-04	1.18 1E-04	8.62 1E-05	5.62 1E-05	3.01 1E-05			
Pu-236	2.04 1E-06	1.25 1E-06	6.38 1E-07	3.23 1E-07	2.17 1E-07	1.31 1E-07	6.59 1E-08			
Pu-238	1.97 1E-06	1.20 1E-06	6.05 1E-07	3.04 1E-07	2.04 1E-07	1.22 1E-07	6.14 1E-08			
Pu-239	8.80 1E-07	5.56 1E-07	2.95 1E-07	1.55 1E-07	1.06 1E-07	6.53 1E-08	3.33 1E-08			
Pu-240	1.72 1E-06	1.05 1E-06	5.32 1E-07	2.68 1E-07	1.79 1E-07	1.08 1E-07	5.41 1E-08			
Pu-242	1.59 1E-06	9.67 1E-07	4.88 1E-07	2.45 1E-07	1.64 1E-07	9.85 1E-08	4.94 1E-08			
Am-241	4.17 1E-05	2.95 1E-05	1.73 1E-05	9.59 1E-06	6.64 1E-06	4.12 1E-06	2.11 1E-06			
Am-242	2.85 1E-05	2.15 1E-05	1.38 1E-05	8.16 1E-06	5.80 1E-06	3.70 1E-06	1.94 1E-06			
Am-242m	6.51 1E-06	4.07 1E-06	2.13 1E-06	1.10 1E-06	7.45 1E-07	4.53 1E-07	2.29 1E-07			
Am-243	9.05 1E-05	6.78 1E-05	4.23 1E-05	2.45 1E-05	1.73 1E-05	1.09 1E-05	5.64 1E-06			
Cm-242	1.76 1E-06	1.07 1E-06	5.41 1E-07	2.72 1E-07	1.82 1E-07	1.10 1E-07	5.51 1E-08			
Cm-243	2.56 1E-04	2.04 1E-04	1.40 1E-04	8.73 1E-05	6.37 1E-05	4.16 1E-05	2.23 1E-05			
Cm-244	1.66 1E-06	1.01 1E-06	5.09 1E-07	2.56 1E-07	1.71 1E-07	1.03 1E-07	5.17 1E-08			
Cm-245	1.67 1E-04	1.30 1E-04	8.65 1E-05	5.26 1E-05	3.78 1E-05	2.43 1E-05	1.29 1E-05			
Cm-247	6.51 1E-04	5.32 1E-04	3.80 1E-04	2.46 1E-04	1.83 1E-04	1.22 1E-04	6.65 1E-05			

付録 4 参考文献

- (1) 「In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectrometry」
H.L.Beck, J.DeCampo and C.Gogolak: Report HASL-258 (1972)
- (2) 「Gamma-Ray Spectrometry in the Environment」
International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU Report
53(1994)
- (3) 「可搬型 Ge(Li)検出器を用いた環境ガンマ線の in-situ 測定」
阪井英次、寺田博海、片桐政樹：JAERI-M6498 (1976)
- (4) 「Field Gamma-Ray Spectrometry」K.M.Miller:
EML Procedures Manual, HASL-300, Section3.3 (1997)

「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法(案)」誤記一覧

修正箇所

13ページ

26ページ

53ページ

66ページ

3.5.2 ピーク探査、核種同定及びピーク面積算出

ピーク探査、核種同定及びピーク面積算出については、通常の線スペクトロメトリーと同様であるため、[文部科学省放射能測定法シリーズ No.7「ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」](#)を参考に実施する。

平常時に一般的に検出される核種を表 3.1 に示す。

表 3.1 in-situ 測定において一般的に検出される放射性核種

自然に存在する放射性核種			人工放射性核種
ウラン系列	トリウム系列	その他	
^{214}Pb ^{214}Bi	^{208}Tl ^{212}Pb ^{212}Bi ^{228}Ac	^{40}K ^7Be	^{137}Cs

3.5.3 エネルギー校正

エネルギー校正については、野外での測定であり、温度変化の影響や電源投入後比較的短時間の内に測定を開始しなければならないことなどから、in-situ 測定特有の注意が必要である。実験室等での線源を用いたエネルギー校正時から、温度変化等によってピークがシフトしてしまう可能性があるため、in-situ 測定したスペクトルについて、その中に検出されたエネルギー既知のピークを用いてエネルギー校正を再度実施する。in-situ 測定では、大抵の場合自然に存在する放射性核種が検出されるため、それらのピークを利用することができる。放射性核種と放出線エネルギーの一例を表 3.2 に示す。

表3.2 エネルギー校正に利用できる自然に存在する放射性核種と線エネルギー

核種	線エネルギー (keV)	放出率 (%)
^{212}Pb	239	43.4
^{214}Pb	352	36.9
^{208}Tl	583	30.6
^{214}Bi	609	46.9
^{228}Ac	911	29.0
^{40}K	1461	10.7
^{208}Tl	2615	35.9

(ICRU Rep.53 より引用)

第 5 章 測定結果の補正

in-situ 測定法は、周囲の地形、検出器設置高さ等を仮定して解析を行うため、解析の条件と実際の条件が異なった場合の解析結果への影響を把握しておく必要がある。

in-situ 測定で放射能濃度を算出する際に必要な係数（式 4.4 の λ 、付表-1 及び表 4.4 の値）は、 γ 線を減衰させるような障害物が周囲に無く、無限に開かれた地形（無限平面）を仮定しての計算値である。しかし、実際の測定では完全な無限平面地形はあり得ないため、無限平面を仮定して放射能濃度を解析すると過小評価となる（解説 BD-1）。この過小評価については、周辺の広がりを把握することで補正することができる。なお、定点での変動監視を目的として in-situ 測定を行う場合には、必ずしも補正の必要はない。

検出器の設置高さについては、通常 1m の高さに設置するので補正する必要はなく、土壌中の水分については、土壌中における放射性物質の鉛直分布（解説 AC）の影響に含まれるのでこれについても補正する必要はない。

なお、検出器設置高さの放射能濃度測定値への影響は解説 BD-2 に、土壌中水分の影響は解説 BD-3 に記載した。

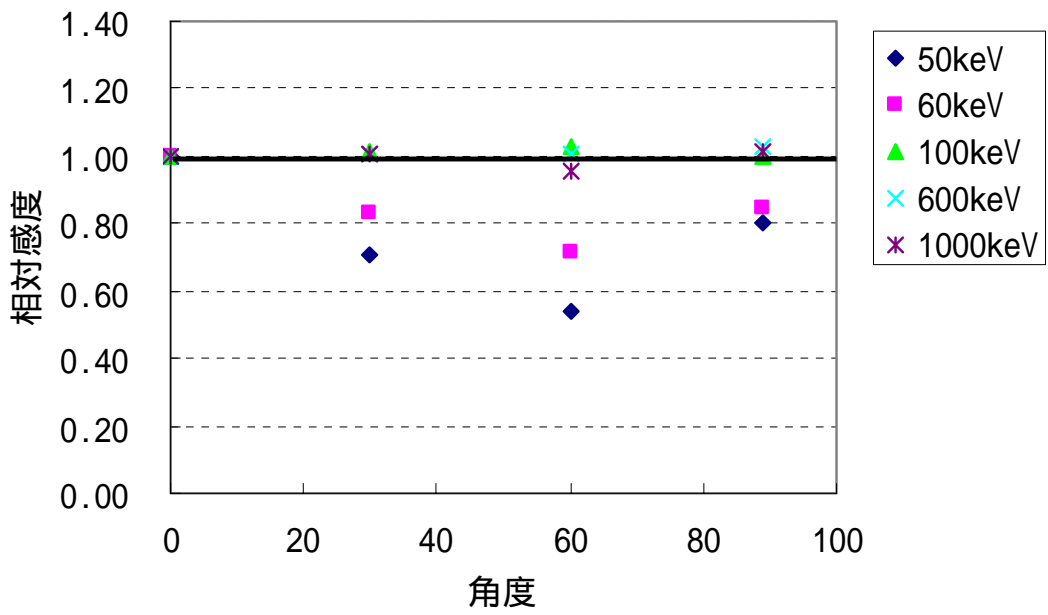
また、空間放射線量率の測定値については、十分に開かれていない場所で測定したスペクトルを無限平面として解析すると、直接 γ 線と散乱線の寄与割合が異なるため、線量率の解析結果は過大評価となる。しかし、その影響はわずかであるため、空間放射線量率の測定値については補正する必要はない。

5.1 周辺地形の広がりに対する補正

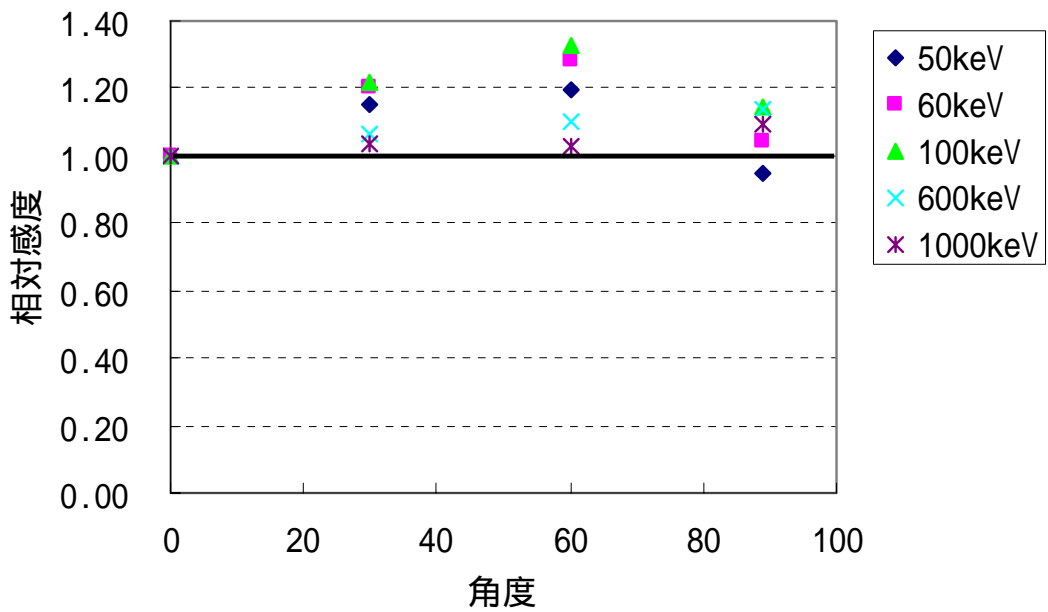
セシウム 137 が土壌中に指数分布（ $\lambda: 4.85 \text{ g/cm}^2$ ）している場合の地上 1m 位置の γ 線フルエンス率について、周囲からの寄与割合を図 5.1 に示す。周囲が半径 10m 開けている場合の測定値は、無限平面の場合の測定値の 85% となる。無限平面でないことに伴う過小評価の程度は、放射性物質の土壌中における鉛直分布によって異なり、厳密には γ 線エネルギーにも依存する。詳細は解説 BD-1 に記載した。

補正方法としては、検出器を中心として開かれた範囲（平均的な半径）をメジャーやテープを用いて算出し、放射能濃度の測定値に表 5.1 の補正係数を乗ずる。表 5.1 は、600keV の γ 線を対象とした場合の補正係数であるが、エネルギーの違いによる補正係数の差異は大きくないため、他のエネルギーに対しても適用することができる。なお、基本的に、空間放射線量率の測定値を補正する必要はない。

また、補正には、開かれた範囲を特定する必要がある。人工放射性物質がフォールアウトとして地表に沈着した場合において、アスファルトや建造物への沈着が少ないと考えられる場合には、土が露出している範囲を開かれた範囲とする。沈着が少ないかどうかの判断には、サーベイメータによる測定結果や放射性物質が降下してからの経過時間等を参考にする。



表図 E.1 ピーク効率の角度依存性の例
 (検出器 : p 型、L/D ; 0.9、不感層 ; 1mm、相対効率 ; 40%)



表図 E.2 ピーク効率の角度依存性の例
 (検出器 : n 型、L/D ; 1.0、不感層 ; 0.1 μ m、相対効率 ; 25%)

付表-1 放射性核種濃度と地上高1mでの線フルエンス率との関係 (/ A)
(土壌中指数分布の場合)

単位 : (s⁻¹ · cm⁻²) / (Bq / cm²)

エネルギー 放出比			放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ (g · cm ⁻²)							
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
11.2	0.255	Pb-210	7.90 1E-02	3.13 1E-02	1.86 1E-02	1.32 1E-02	8.35 1E-03	4.34 1E-03	2.22 1E-03	
12.7	0.081	Th-232	3.58 1E-02	1.52 1E-02	9.27 1E-03	6.67 1E-03	4.29 1E-03	2.26 1E-03	1.16 1E-03	
12.7	0.089	Th-228	3.91 1E-02	1.65 1E-02	1.01 1E-02	7.27 1E-03	4.68 1E-03	2.46 1E-03	1.27 1E-03	
13.4	0.079	U-236	4.10 1E-02	1.78 1E-02	1.10 1E-02	7.99 1E-03	5.18 1E-03	2.74 1E-03	1.42 1E-03	
13.4	0.084	U-238	4.33 1E-02	1.88 1E-02	1.17 1E-02	8.43 1E-03	5.46 1E-03	2.89 1E-03	1.50 1E-03	
13.4	0.094	U-234	4.85 1E-02	2.11 1E-02	1.31 1E-02	9.44 1E-03	6.12 1E-03	3.24 1E-03	1.68 1E-03	
13.4	0.102	U-232	5.25 1E-02	2.29 1E-02	1.42 1E-02	1.02 1E-02	6.63 1E-03	3.51 1E-03	1.82 1E-03	
13.7	0.094	Th-234	5.20 1E-02	2.29 1E-02	1.42 1E-02	1.03 1E-02	6.70 1E-03	3.56 1E-03	1.84 1E-03	
13.7	0.562	Np-237	3.12 1E-01	1.37 1E-01	8.54 1E-02	6.19 1E-02	4.02 1E-02	2.13 1E-02	1.10 1E-02	
13.7	0.776	Th-231	4.31 1E-01	1.89 1E-01	1.18 1E-01	8.54 1E-02	5.55 1E-02	2.94 1E-02	1.53 1E-02	
14.1	0.040	Pu-239	2.35 1E-02	1.05 1E-02	6.53 1E-03	4.74 1E-03	3.09 1E-03	1.64 1E-03	8.51 1E-04	
14.1	0.082	Pu-242	4.89 1E-02	2.17 1E-02	1.36 1E-02	9.85 1E-03	6.41 1E-03	3.41 1E-03	1.77 1E-03	
14.1	0.089	Pu-240	5.27 1E-02	2.34 1E-02	1.46 1E-02	1.06 1E-02	6.91 1E-03	3.68 1E-03	1.91 1E-03	
14.1	0.102	Pu-238	6.04 1E-02	2.68 1E-02	1.68 1E-02	1.22 1E-02	7.92 1E-03	4.21 1E-03	2.18 1E-03	
14.1	0.103	Pu-236	6.10 1E-02	2.71 1E-02	1.69 1E-02	1.23 1E-02	8.00 1E-03	4.26 1E-03	2.21 1E-03	
14.4	0.365	Am-241	2.31 1E-01	1.04 1E-01	6.49 1E-02	4.72 1E-02	3.08 1E-02	1.64 1E-02	8.52 1E-03	
14.4	0.575	U-237	3.64 1E-01	1.63 1E-01	1.02 1E-01	7.44 1E-02	4.85 1E-02	2.59 1E-02	1.34 1E-02	
14.8	0.081	Cm-244	5.42 1E-02	2.45 1E-02	1.54 1E-02	1.12 1E-02	7.32 1E-03	3.91 1E-03	2.03 1E-03	
14.8	0.085	Cm-242	5.72 1E-02	2.58 1E-02	1.62 1E-02	1.18 1E-02	7.72 1E-03	4.12 1E-03	2.14 1E-03	
14.8	0.098	Am-242	6.60 1E-02	2.98 1E-02	1.87 1E-02	1.36 1E-02	8.91 1E-03	4.75 1E-03	2.47 1E-03	
14.8	0.461	Cm-243	3.10 1E-01	1.40 1E-01	8.80 1E-02	6.41 1E-02	4.19 1E-02	2.23 1E-02	1.16 1E-02	
14.8	0.471	Cm-245	3.17 1E-01	1.43 1E-01	9.00 1E-02	6.55 1E-02	4.28 1E-02	2.28 1E-02	1.19 1E-02	
15.2	0.273	Am-242m	1.93 1E-01	8.84 1E-02	5.59 1E-02	4.09 1E-02	2.68 1E-02	1.44 1E-02	7.49 1E-03	
15.5	0.161	Am-242	1.18 1E-01	5.50 1E-02	3.52 1E-02	2.59 1E-02	1.71 1E-02	9.25 1E-03	4.85 1E-03	
16.5	0.183	Mo-93	1.48 1E-01	7.23 1E-02	4.74 1E-02	3.54 1E-02	2.38 1E-02	1.30 1E-02	6.92 1E-03	
16.6	0.060	Nb-93m	4.88 1E-02	2.39 1E-02	1.57 1E-02	1.17 1E-02	7.89 1E-03	4.34 1E-03	2.30 1E-03	
16.6	0.350	Mo-93	2.85 1E-01	1.40 1E-01	9.17 1E-02	6.86 1E-02	4.61 1E-02	2.53 1E-02	1.35 1E-02	
18.6	0.090	Mo-93	8.60 1E-02	4.49 1E-02	3.05 1E-02	2.33 1E-02	1.59 1E-02	8.91 1E-03	4.79 1E-03	
20.1	0.184	Rh-103m	1.96 1E-01	1.06 1E-01	7.32 1E-02	5.63 1E-02	3.89 1E-02	2.20 1E-02	1.19 1E-02	
20.2	0.349	Rh-103m	3.73 1E-01	2.03 1E-01	1.40 1E-01	1.08 1E-01	7.51 1E-02	4.27 1E-02	2.32 1E-02	
22.7	0.094	Rh-103m	1.11 1E-01	6.44 1E-02	4.66 1E-02	3.71 1E-02	2.67 1E-02	1.60 1E-02	9.05 1E-03	
25.3	0.410	Sn-117m	5.25 1E-01	3.23 1E-01	2.41 1E-01	1.96 1E-01	1.45 1E-01	8.96 1E-02	5.17 1E-02	
25.6	0.146	Th-231	1.89 1E-01	1.17 1E-01	8.78 1E-02	7.15 1E-02	5.30 1E-02	3.30 1E-02	1.90 1E-02	
26.4	0.156	Sn-126	2.07 1E-01	1.30 1E-01	9.80 1E-02	8.01 1E-02	5.97 1E-02	3.74 1E-02	2.17 1E-02	
27.2	0.103	Te-127m	1.41 1E-01	8.95 1E-02	6.82 1E-02	5.60 1E-02	4.19 1E-02	2.64 1E-02	1.54 1E-02	
27.2	0.127	Te-129m	1.74 1E-01	1.10 1E-01	8.40 1E-02	6.90 1E-02	5.17 1E-02	3.26 1E-02	1.90 1E-02	
27.2	0.327	Te-125m	4.46 1E-01	2.83 1E-01	2.16 1E-01	1.77 1E-01	1.33 1E-01	8.37 1E-02	4.88 1E-02	
27.5	0.193	Te-127m	2.65 1E-01	1.69 1E-01	1.29 1E-01	1.06 1E-01	7.97 1E-02	5.03 1E-02	2.93 1E-02	
27.5	0.237	Te-129m	3.26 1E-01	2.08 1E-01	1.59 1E-01	1.31 1E-01	9.80 1E-02	6.19 1E-02	3.61 1E-02	
27.5	0.611	Te-125m	8.39 1E-01	5.36 1E-01	4.09 1E-01	3.36 1E-01	2.52 1E-01	1.59 1E-01	9.29 1E-02	
27.8	0.156	Te-129	2.17 1E-01	1.39 1E-01	1.06 1E-01	8.76 1E-02	6.59 1E-02	4.17 1E-02	2.44 1E-02	
29.4	0.152	Np-237	2.22 1E-01	1.45 1E-01	1.13 1E-01	9.35 1E-02	7.09 1E-02	4.53 1E-02	2.66 1E-02	
29.5	0.185	I-129	2.69 1E-01	1.77 1E-01	1.37 1E-01	1.14 1E-01	8.64 1E-02	5.52 1E-02	3.25 1E-02	
29.8	0.343	I-129	5.05 1E-01	3.33 1E-01	2.59 1E-01	2.15 1E-01	1.63 1E-01	1.05 1E-01	6.15 1E-02	
30.6	0.092	Cs-134m	1.37 1E-01	9.12 1E-02	7.12 1E-02	5.94 1E-02	4.54 1E-02	2.93 1E-02	1.74 1E-02	
31.0	0.067	Te-127m	9.98 1E-02	6.68 1E-02	5.23 1E-02	4.37 1E-02	3.35 1E-02	2.17 1E-02	1.30 1E-02	
31.0	0.068	Te-129m	1.02 1E-01	6.81 1E-02	5.33 1E-02	4.46 1E-02	3.42 1E-02	2.22 1E-02	1.32 1E-02	
31.0	0.170	Cs-134m	2.54 1E-01	1.70 1E-01	1.33 1E-01	1.11 1E-01	8.50 1E-02	5.51 1E-02	3.29 1E-02	
31.0	0.212	Te-125m	3.16 1E-01	2.11 1E-01	1.65 1E-01	1.38 1E-01	1.06 1E-01	6.87 1E-02	4.11 1E-02	
31.8	0.021	Ba-137m	3.09 1E-02	2.09 1E-02	1.64 1E-02	1.38 1E-02	1.06 1E-02	6.95 1E-03	4.19 1E-03	
32.2	0.038	Ba-137m	5.71 1E-02	3.87 1E-02	3.05 1E-02	2.56 1E-02	1.98 1E-02	1.30 1E-02	7.89 1E-03	
33.6	0.122	I-129	1.85 1E-01	1.27 1E-01	1.01 1E-01	8.54 1E-02	6.66 1E-02	4.44 1E-02	2.73 1E-02	
35.0	0.050	Cs-134m	7.69 1E-02	5.35 1E-02	4.29 1E-02	3.64 1E-02	2.86 1E-02	1.93 1E-02	1.21 1E-02	
35.5	0.067	Te-125m	1.03 1E-01	7.16 1E-02	5.75 1E-02	4.90 1E-02	3.86 1E-02	2.62 1E-02	1.64 1E-02	
38.7	0.223	Nd-147	3.51 1E-01	2.52 1E-01	2.06 1E-01	1.77 1E-01	1.42 1E-01	9.86 1E-02	6.33 1E-02	
39.6	0.075	I-129	1.19 1E-01	8.59 1E-02	7.05 1E-02	6.08 1E-02	4.90 1E-02	3.42 1E-02	2.21 1E-02	
43.0	0.118	Eu-155	1.90 1E-01	1.41 1E-01	1.18 1E-01	1.03 1E-01	8.38 1E-02	5.96 1E-02	3.92 1E-02	
59.5	0.345	U-237	5.85 1E-01	4.69 1E-01	4.06 1E-01	3.65 1E-01	3.09 1E-01	2.32 1E-01	1.61 1E-01	
59.5	0.359	Am-241	6.08 1E-01	4.88 1E-01	4.23 1E-01	3.80 1E-01	3.22 1E-01	2.41 1E-01	1.67 1E-01	
64.3	0.096	Sn-126	1.63 1E-01	1.32 1E-01	1.15 1E-01	1.04 1E-01	8.86 1E-02	6.73 1E-02	4.70 1E-02	
74.7	0.674	Am-243	1.15	9.49 1E-01	8.36 1E-01	7.62 1E-01	6.56 6.55 1E-01	5.06 1E-01	3.60 1E-01	
74.8	0.104	Pb-212	1.78 1E-01	1.47 1E-01	1.30 1E-01	1.18 1E-01	1.02 1E-01	7.84 1E-02	5.58 1E-02	
77.1	0.176	Pb-212	2.99 1E-01	2.48 1E-01	2.19 1E-01	2.00 1E-01	1.72 1E-01	1.33 1E-01	9.49 1E-02	
84.2	0.067	Th-231	1.15 1E-01	9.55 1E-02	8.48 1E-02	7.74 1E-02	6.70 1E-02	5.21 1E-02	3.76 1E-02	
86.5	0.123	Np-237	2.10 1E-01	1.76 1E-01	1.56 1E-01	1.42 1E-01	1.23 1E-01	9.63 1E-02	6.96 1E-02	