

平成 27 年度放射線対策委託費
(放射能測定法シリーズ改訂) 事業
業務報告書

平成 28 年 3 月

公益財団法人 日本分析センター

本報告書は、原子力規制委員会 原子力規制庁の平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業における委託業務として、公益財団法人日本分析センターが実施した成果を取りまとめたものです。

目次

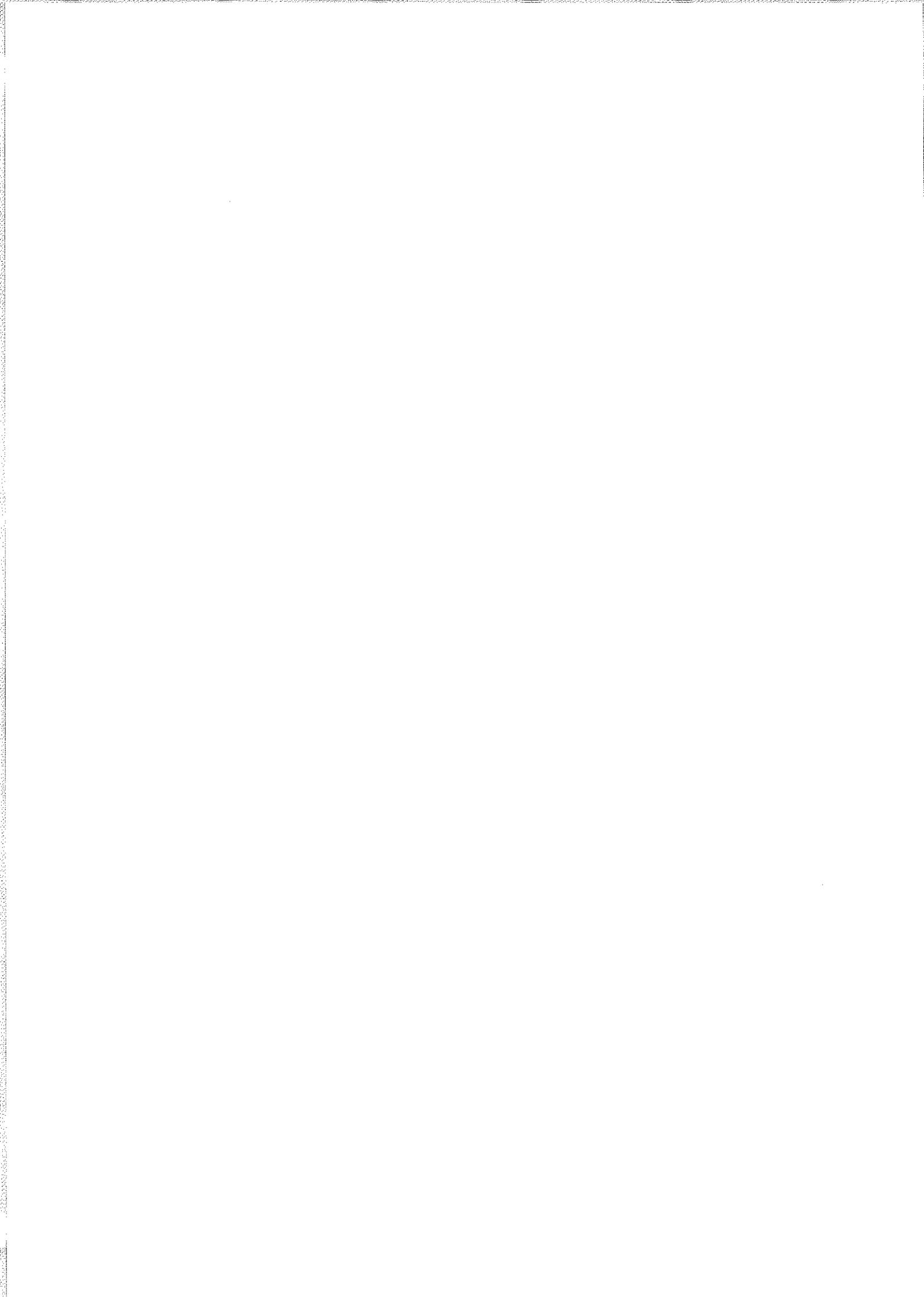
1. 業務目的	1
2. 実施期間	1
3. 業務内容	1
3.1 概要	1
3.2 委員会開催	3
3.2.1 委員構成	3
3.2.2 委員会開催日と議題	4
4. 放射能測定法シリーズ改訂に係る検討事項及び結果	5
4.1 連続モニタによる環境 γ 線測定法	5
4.1.1 簡易型電子線量計の調査	5
4.1.2 走行サーベイ等の調査	7
4.1.3 検出器の測定高に関する調査・検討	12
4.1.4 各機関の整備状況に関する調査	16
4.2 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法	17
4.2.1 校正・測定可能範囲に関する調査・検討	17
4.2.2 シミュレーション効率に関する調査・検討	22
4.3 緊急時の放射性ストロンチウム分析	26
4.3.1 放射性ストロンチウム分析	26
4.3.2 目標とする分析所要時間と検出下限値	28
4.3.3 抽出クロマトグラフィーによる分離・精製	29
4.3.4 固相抽出ディスクによる分離・精製	34
4.3.5 液体シンチレーションカウンタによる測定	35
4.3.6 ベータ線スペクトロメータによる測定	38
4.3.7 ICP-MS による測定	40
4.3.8 IAEA Method Validation について	45
4.3.9 自動分析装置による迅速法の検討	54
4.3.10 緊急時の放射性ストロンチウム分析法のまとめ	56
4.4 放射能測定法シリーズ改訂原案に係る意見について	58
4.5 現状調査	64
4.5.1 文献調査	64
5. まとめ	65

参考資料 1 平成 27 年度 放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

参考資料 2 調査文献リスト

別冊 1 「連続モニタによる環境 γ 線測定法」

別冊 2 「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」



1. 業務目的

原子力規制委員会では、環境放射能の水準を把握するための調査や、陸域、海域、空域の各種放射線モニタリングを実施している。また、都道府県、市町村、原子力事業者及び研究機関等、さまざまな主体が放射線モニタリングを実施している。これらの結果の精度を保つため、及び今後万が一原子力災害が発生した際に適切な放射線モニタリングを実施できるようにするためには、標準的な分析・測定手法を定義する必要がある。

環境放射能分野における標準的な分析・測定法マニュアルとしては、「文部科学省放射能測定法シリーズ」（以下「測定法」という。）が34種作成されているが、中には刊行から40年程度経過しているものも存在し、技術の進展等が反映されていない場合があると考えられることから、これらの測定法の内容を精査し、改訂等を行うこととする。

2. 実施期間

平成27年9月28日～平成28年3月31日

3. 業務内容

3.1 概要

本業務の内容は(1)～(4)のとおりとする。業務に当たっては、専門的知見を持つ者から意見を聴取する等、技術的妥当性に留意するとともに、適宜、原子力規制庁担当官と調整を行った。(1)～(2)の改訂案を作成するに当たっては、JIS原案作成のための手引（第16版）を参考にした。また、(1)～(3)に共通し、以下の項目に留意した。

- ・ 平成26年度放射線対策委託費(放射能測定法シリーズ改訂)事業報告書を参照する。
- ・ 改訂の前後での過去の測定結果との連続性。
- ・ 単位系等が現在国際的に使用されているものか。
- ・ 記載された方法を実施するにあたり、現時点において機器の校正等に必要な線源等が入手できるか。
- ・ 測定法の記述が曖昧で測定者の裁量に委ねられている手法がないか。
- ・ 技術の進展が適切に測定法に反映されているか。
- ・ 新たに実験・検証が必要な項目がある場合、その事項を一覧にするとともに、契約期間内に報告書案の作成も含めて可能と見込まれるものに限り実験等を実施するものとした。

(1) 環境γ線測定法の見直し

測定法 No. 17 連続モニタによる環境γ線測定法を見直し、改訂案を作成した。改訂案の作成に当たっては、以下の点に留意した。

- ・ 測定法 No. 20 に含まれる記述 (NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ等)との統合を検討した。
- ・ 可搬型モニタリングポスト及び簡易型電子線量計についての記載を検討した。
- ・ 緊急時の測定にあたり、測定器の汚染防止策についての記載を検討した。
- ・ 緊急時の測定地点の選定についての記載を検討した。

- ・ 測定高さによる測定値の変動についての記載を検討した。
- ・ 車両による移動式放射線測定に関する記載を検討した。
- ・ 車両内部に検出部を搭載するタイプの放射線計測機器の遮蔽計算方法を検討した。
- ・ 空気カーマと空気吸収線量、実効線量と周辺線量当量など同一単位で異なる値を持つものについて解説の記載を検討した。
- ・ JISZ4325(2008)等、関連する規格を考慮した。

(2) ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の見直し

測定法 No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法を見直し、改訂案を作成した。改訂案の作成に当たっては、以下の点に留意した。

- ・ 測定法 No. 20 に含まれる記述（ゲルマニウム半導体スペクトロメータ等）との統合を検討した。
- ・ 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故を踏まえ、校正、測定可能範囲、測定可能時期についての記載を検討した。

(3) 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討

現行の放射性ストロンチウム分析法については、測定法 No. 2 放射性ストロンチウム分析法が存在するが、化学分析・測定に時間を要するため緊急時の運用には不向きであり、より迅速に定量できる手法の開発が望まれていることから、その検討を行った。なお、検討に当たっては以下の点に留意した。

- ・ 一定の技術的な検証がなされている手法を用いる。
- ・ 夾雑核種が存在している場合の定量可能濃度範囲についての記載を検討した。

(4) 報告書の作成

(1)～(3)の結果を取りまとめるとともに、業務の報告書を作成した。

3.2 委員会開催

放射能測定法シリーズ改訂検討委員会を3回開催し、実施計画、内容及び改訂案等について審議を行った。

委員及び委員会の開催状況は、3.2.1及び3.2.2に示す。

3.2.1 委員構成

(五十音順、敬称略、平成28年3月現在)

氏名	所属	役職名
(委員長) 中村尚司	東北大学	名誉教授
阿部幸雄	福島県環境創造センター環境放射線センター	次長兼 分析・監視課長
大野剛	学習院大学理学部化学科	助教
木村秀樹	青森県原子力センター	所長
黒澤忠弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門放射線標準研究グループ	主任研究員
斎藤公明	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門福島環境安全センター東京事務所	特任参与
三枝 純	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門福島環境安全センター 放射線計測技術グループ	研究主幹 兼サブリーダー
玉柿励治	福井県原子力環境監視センター 福井分析管理室	主任研究員
長岡鋭	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	研究嘱託
藤田博喜	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部環境監視課	課長代理

3.2.2 委員会開催日と議題

第1回、第2回及び第3回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会の日時、場所、出席者及び議題を以下に示す。また、それぞれの委員会要旨については、参考資料1に示す。

第1回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

日時 平成27年11月4日(水)10時00分～12時00分
場所 航空会館 201会議室
出席者 中村委員長、阿部委員、木村委員、黒澤委員、斎藤委員、三枝委員
玉柿委員、長岡委員、藤田委員
議題 (1)放射能測定法シリーズ改訂の実施計画及び現状調査について
(2)その他

第2回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

日時 平成28年1月14日(木)13時30分～16時40分
場所 東京国際フォーラム G402会議室
出席者 中村委員長、阿部委員、大野委員、木村委員、黒澤委員、斎藤委員
三枝委員、玉柿委員、長岡委員、藤田委員
議題 (1)第1回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について
(2)原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からのご意見について
(3)放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について
(4)その他

第3回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会

日時 平成28年3月4日(金)13時30分～16時30分
場所 東京国際フォーラム G610会議室
出席者 中村委員長、大野委員、木村委員、黒澤委員、斎藤委員、三枝委員
玉柿委員、藤田委員
議題 (1)第2回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について
(2)放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について
(3)業務報告書について
(4)その他

4. 放射能測定法シリーズ改訂に係る検討事項及び結果

4.1 連続モニタによる環境γ線測定法

4.1.1 簡易型電子線量計の調査

(1) 目的

広範囲にわたる地域の空間放射線量率を把握するために、従来の固定式連続モニタだけでなく、簡易型電子線量計によるモニタリングが実用化されている。この簡易型電子線量計による測定方法について、改訂案に記載するために検討を行った。

(2) 方法

簡易型電子線量計を整備している島根県の運用方法について、機器の特性、設置条件、各種条件等の現地調査を行った。

また、簡易型電子線量計の製造業者に対して聞き取り調査を実施し、検出器部のシリコン半導体検出器について、特性データ等の情報を入手した。

これらの調査結果を踏まえ、改訂案の新規項目として、簡易型電子線量計に関して記載を行った。

①島根県の現地調査

調査日 平成27年12月21日（月）～12月22日（火）

調査者 （公財）日本分析センター放射能分析事業部 磯貝部長、
放射能分析事業部γ線解析グループ 松田上級技術員

調査先 島根県防災部原子力安全対策課 島根県原子力環境センター

②製造業者への聞き取り調査

調査日 平成27年12月8日（火）

調査者 （公財）日本分析センター放射能分析事業部γ線解析グループ
新田グループリーダー、松田上級技術員

調査先 応用光研工業株式会社、日立アロカメディカル株式会社

(3) 結果

①島根県の現地調査結果

島根県では、平成26年度から簡易型電子線量計の整備を開始し、平成27年度も引き続き増設している。平常時から簡易型電子線量計は設置しており、原子力災害時に速やかに運用できるようにしている。設置地点は、緊急防護措置を準備する区域（UPZ: Urgent Protective action Planning Zone）である原子力施設から30 km圏内の固定局が設置されていない地域であり、市町村の所有地に整備を進めている。図4.1及び図4.2に示したとおり、機器への電力供給は、太陽光とバッテリーの併用で運用しているものの、日照が足りず、十分な電力供給が見込めないこともあることから、商用電源による電力供給も整備している。測定単位は空気吸収線量（Gy）であり、周辺線量当量（Sv）への換算

には対応していない機器であった。島根県では、簡易型電子線量計だけではなく、可搬型モニタリングポストの設置も進めている。



図 4.1 簡易型電子線量計（前面から）



図 4.2 簡易型電子線量計（背面から）

今回の現地調査結果を踏まえて、簡易型電子線量計の仕様例及び設置に係る留意事項等を別冊1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」の第4章から第7章に記載した。

②製造業者への聞き取り調査結果

簡易型電子線量計で使用されている検出器の特性を調査するために、2つの製造業者に訪問し、聞き取り調査を行った。

簡易型電子線量計で使用されている検出器は、シリコン半導体検出器であり、その測定原理は、電離箱線量計と同様である。得られる信号は電流パルスであるため、この電流パルスに線量率に換算する係数を乗ずることによって線量率を算出することができる。

なお、電離箱線量計と同様に、エネルギー情報を得ることはできない。

製造業者から入手した検出器の特性については、別冊 1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」の解説 B に記載した。

4.1.2 走行サーベイ等の調査

(1) 目的

走行サーベイによるモニタリングは、移動しながら広範囲の地域を効率良く、かつ迅速に実施するための測定方法である。主に道路上及び道路沿い地域の線量率分布を知ることができるとともに、局所的に高線量率となっている地点（ホットスポット）を比較的容易に発見することができる。福島第一原子力発電所事故後では、測定器の小型化及び GPS 情報と連動させて、地図上に測定データを表示（マッピング）する機能をもつシステムも活用されている。この走行サーベイによる測定について、改訂案に新規項目として記載するために検討を行った。

(2) 方法

走行サーベイシステムを保有し、運用している機関に対して現地調査を実施し、測定器の仕様、検出器設置状況、収集データのマッピングシステム、運用方法及び保守管理について聞き取り調査を行った。

調査日 平成 27 年 11 月 10 日（火）～11 月 13 日（金）

調査者 （公財）日本分析センター放射能分析事業部 γ 線解析グループ
松田上級技術員、田中上級技術員

調査先 福島県環境創造センター
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
茨城県原子力オフサイトセンター

(3) 結果

走行サーベイシステムには、いわゆるモニタリングカーと称される車両に検出器が固定された固定型タイプと、検出器を含むシステムの取り外し及び設置が容易である可搬型タイプの二つに種別される。

今回現地調査を実施した福島県環境創造センターでは、可搬型タイプである KURAMA (KURAMA : Kyoto University Radiation MApping system) 及び KURAMA II を保有している。KURAMA 及び KURAMA II をそれぞれ図 4.3 及び図 4.4 に示した。KURAMA では一般的に使用されている NaI (TI) シンチレーションサーベイメータが検出器として用いられている。KURAMA II では CsI (TI) シンチレーション検出器を用いている。KURAMA II は小型の収納ケースに収まるよう設計されており、容易に持ち運び、車内の任意の場所に設置することができる。

現地調査及び文献調査の結果を踏まえて、現行マニュアルに記載されていない CsI (TI) シンチレーション検出器の原理・構成及び特性等を別冊 1「連続モニタによる環境 γ 線測

定法」の解説Bに記載した。

日本原子力研究開発機構及び茨城県原子力オフサイトセンターに整備されている走行サーベイシステムは、車両に検出器が固定された固定型タイプである。固定型タイプの中には、検出器を車両上部の車外に設置する車外設置タイプと、車内の決められた位置において地上高1mとなるように設置された車内設置タイプの2種類がある。日本原子力研究開発機構で調査した走行サーベイシステムは車外設置タイプであり、図4.5及び図4.6に示した。また、茨城県原子力オフサイトセンターで調査した走行サーベイシステムは車内設置タイプであり、図4.7及び図4.8に示した。

走行サーベイシステムには特有の注意事項があり、測定機器への安定した電力供給の確保と車両自体の遮へいによる車内外補正係数を予め求めておくことが必要である。

バッテリーについては、車両だけに使用するものより大きくする必要があり、安定した電力を測定機器に供給する上では、無停電電源装置（UPS）を接続することが有効である。

また、車内設置タイプについては、車両による遮へい効果による測定値への影響を考慮する必要がある。車内外補正係数の算出方法としては、検出器を車内と車外に設置してそれぞれ測定を行う方法と、車体下部に点線源を配置して測定を行う方法がある。前者は、線量率の異なる多数の地点で測定することによって検量線を作成し、後者は点線源の位置を変更して多数のデータを取得することによって精度よく補正係数を算出することができる。

今回の現地調査結果を踏まえて、走行サーベイの仕様例及び設置に係る留意事項等を別冊1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」の第4章から第7章及び解説Fに記載した。



図4.3 KURAMAを車両に搭載した様子



図4.4 KURAMA II



図4.5 日本原子力研究開発機構所有のモニタリングカー



図4.6 日本原子力研究開発機構所有のモニタリングカー車内



図4.7 原子力規制委員会所有のモニタリングカー



図4.8 原子力規制委員会所有のモニタリングカー車内

4.1.3 検出器の測定高に関する調査・検討

(1) 目的

「原子力災害対策指針」（原子力規制委員会、平成27年8月全部改正）では、原子力災害時における周辺住民等に対する防護措置実施の判断に必要な情報として、地上高1 mにおける空間放射線量率とされていることから、固定式連続モニタについて、検出器の測定高を現状調査した。また、測定高の違いによる測定値への影響の程度を把握し、改訂案に記載するために検討を行った。

(2) 方法

連続モニタを設置している機関との意見交換及び文献調査によって、検出器の測定高を調査した。地上高1 mに設置された検出器と地上高1 mに設置されていない検出器での測定値への影響の程度を調査した。また、測定高の違いによる地上高1 mへの測定値の換算の必要性を検討した。

(3) 結果

固定式連続モニタの検出器の測定高を調査したところ、大きく①から④の4つに区分された。

- ①地上高1 m
- ②地上高1.5～1.8 m
- ③モニタリング局舎上（地上高約3 m）
- ④地上高数十 mの高所

各々の高さに対する測定対象については、別冊1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」の第5章に記載した。



図4.9 路地上 地上高1 m 設置状況の一例（愛知県）



図 4.10 路地上 地上高 1.5~1.8 m 設置状況の一例（青森県）



図 4.11 モニタリング局舎上設置状況の一例（茨城県）

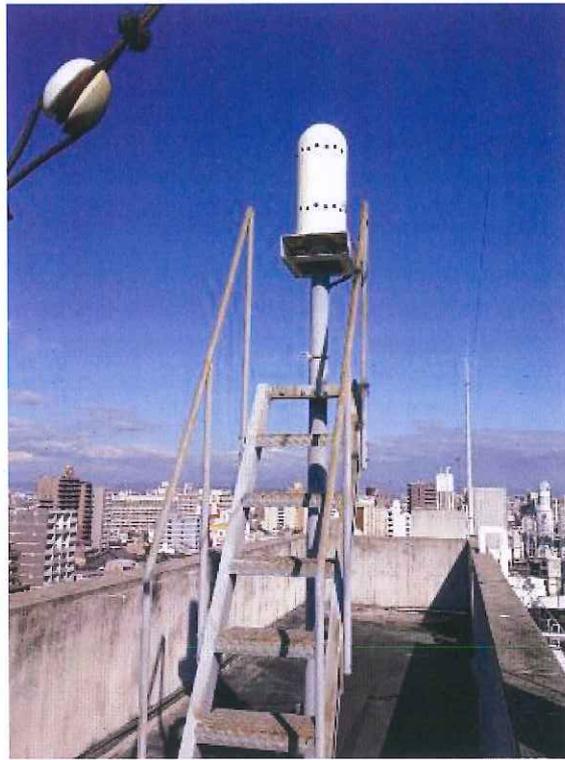


図 4.12 地上高数十 m の高所設置状況の一例（愛知県）

測定高の違いによる地上高 1 m への測定値の換算については、固定式連続モニタの設置環境等は様々であることから、個々の固定式連続モニタに対して、厳密な換算係数を設定することは不可能であると考えられた。原子力災害対策指針の補足参考資料である「緊急時モニタリングについて」（原子力規制庁監視情報課、平成 27 年 8 月）に記載があるとおり、地上高 1 m としての測定値かどうか明確にするため、報告等の際には測定値とともに測定高さを明確にしておくことが重要と考えられた。

以下に、別冊 1「連続モニタによる環境 γ 線測定法」の解説 K に取りまとめた、4 つに区分した設置高における地上高 1 m への換算の考え方を示す。

①地上高 1 m（路地上）

測定値を用いる（換算の必要なし）。

「原子力災害対策指針」に示されている運用上の介入レベル（OIL）の判断基準に固定型連続モニタの測定値を活用することを踏まえ、今後整備されるものについては、地上高 1 m に設置することが望ましい。

②地上高 1.5～1.8 m 程度（路地上）

設置地上高を明示し、特段換算を必要としない。

連続モニタ周辺に沈着した人工放射性核種の地表面からの鉛直分布によって、それぞれの地上高に対する線量率寄与割合が異なる。周辺線量当量の地上高度による変化を表したグラフを図 4.13 に示す。この図から、原子力災害が発生した初期段階では、放射性物質

の鉛直分布のパラメータである緩衝深度 β (g/cm^2) が小さく、緩衝深度 β が0.1の場合でも、地上高1 mでの測定値に対して地上高2 mまでの測定値の変化は10%以内であることから、地上高1 mの換算の必要がないと考えられた。なお、この緩衝深度 β は土壌への地中に指数関数分布した ^{137}Cs 線源で評価したものであり、連続モニタ周辺の地表面の状況(土壌、草地、砂利、アスファルト及びコンクリート等)によってその影響は異なる。

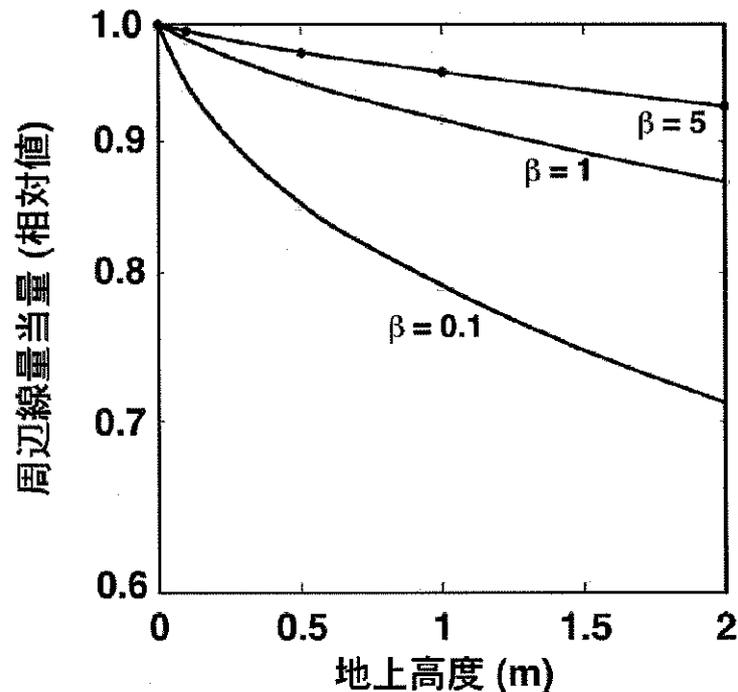


図 4.13 地中に指数関数分布する線源による周辺線量当量の地上高度による変化
(斎藤公明他 “Ⅲ環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係”
RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014))

③地上高約3 m (局舎上)

設置地上高を明示し、特段換算を実施しない。

地上高約3 m (局舎上) では、地上高1 m (路地上) での測定では測定対象が異なることから、緩衝深度 β を考慮して、地上高1 m (路地上) の換算係数を求めておくことは困難である。ただし、原子力災害が発生した初期段階では、放射性物質が地表面に沈着したばかりの限られた期間であれば、地上高1 mと同等とみなすことが考えられた。

なお、緩衝深度 β が大きくなると、地上高3 mで得られた測定値と地上高1 mで得られた測定値の割合が大きくなることから、可搬型モニタリングポスト(地上高1 mに設置)等を設置して、地上高1 mの測定値を取得することが望ましい。

④地上高数十 m

設置地上高を明示し、特段換算を実施しない。

地上高数十 m では、数階建てのコンクリート製建造物の屋上等に設置されており、③地

上高約 3 m（局舎上）と同様に地上高数十 m での測定値と地上高 1 m（路地上）での測定では測定対象が大きく異なることから、予め換算係数を求めておくことは困難である。

そのため、可搬型モニタリングポスト（地上高 1 m に設置）等を設置して、地上高 1 m の測定値を取得することが望ましい。

4.1.4 各機関の整備状況に関する調査

(1) 目的

現行の測定法は平成 8 年に改訂されてから 20 年近く経過しているため、実態と異なっていることも考えられることから、連続モニタ機器の整備状況を調査した。その際、「平成 25 年度緊急放射線モニタリング動員可能資機材リスト策定等業務 業務報告書」（（公財）原子力安全技術センター、平成 25 年度）を活用して、測定法の改訂案に記載すべき連続モニタ機器を選定するための検討を行った。

(2) 方法

電力会社、各種研究施設、指定公共機関及び地方公共団体等に対して実施したアンケート結果を基に、改訂案に追加が必要と考えられる機器の選定を行った。

(3) 結果

アンケート結果は、緊急時モニタリングに必要と考えられる資機材及び、放射線・放射能モニタリング全般にわたる内容であり、改訂案に関する内容は網羅されていることが分かった。

また、東北地方太平洋沖地震直後の状況に対するヒアリング結果には、整備状況だけでなく、連続モニタ機器の運用面で大変有用な内容があり、改訂案に記載すべき内容が含まれていた。具体的には、地震直後の津波によって、資機材等が流出もしくは浸水し使用不可となった、データの伝送システムが使用不可となった等である。

これらについては、別冊 1「連続モニタによる環境γ線測定法」の第 3 章及び第 5 章に、伝送システムの多重化及び設置の際の一般的な留意事項を記載した。

4.2 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法

4.2.1 校正・測定可能範囲に関する調査・検討

(1) 目的

現行の測定法では、in-situ 測定時に自然に存在する放射性核種のピークをエネルギー校正に利用できると記載している。しかし、原子力災害時にそれらを利用できるかは検討されていなかった。また、測定可能範囲について、検出可能レベル（下限）は記載されているが、測定上限については記載されていなかった。

そこで、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、原子力災害時におけるエネルギー校正及び測定可能範囲（測定上限）について記載することを目的として本検討を行った。

(2) 方法

①原子力災害時におけるエネルギー校正

原子力災害時には、事故に伴い放出された多量の人工放射性核種の影響によって、コンプトン連続領域の計数が増加することが想定されるため、線量率が高い地点における測定データを用いて、エネルギー校正に利用できる放射性核種の確認・選定を実施した。確認・選定には、福島県内において2011年12月27日に測定したデータを使用した。

②測定可能範囲（測定上限）

線量率が高い地点での測定は、光子の入射数が増加するため、検出器の不感時間（デッドタイム）が増大し、数え落とし又はパイルアップ等によって放射能濃度を過小評価する危険性が高まることが想定されるため、一般的なMCAの性能から測定上限を検討した。検討には、測定機器メーカーからの聞き取り調査及び文献調査を実施した。

また、サーベイメータの線量率と in-situ Ge のデッドタイムの関係から測定上限を判断することを検討した。検討には、福島県内において2012年8月～9月に測定したデータを使用した。

(3) 結果

①原子力災害時におけるエネルギー校正

in-situ 測定時に、エネルギー校正に利用できる自然放射性核種とその γ 線エネルギーを表4.1に示した。また、福島県内において2011年12月27日に測定したスペクトルを図4.14に示した。

表4.1の放射性核種のうち、特に低エネルギー領域の核種についてはピークが確認できず、エネルギー校正に利用できない可能性があった（図4.14）。その場合には、表4.2のような原子力災害に伴い放出された人工放射性核種のピークをエネルギー校正に利用することを考慮する必要があると考えられた。

表 4.1 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 γ 線エネルギー

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比*
^{212}Pb	239	0.434
^{214}Pb	352	0.369
^{208}Tl	583	0.306
^{214}Bi	609	0.469
^{228}Ac	911	0.290
^{40}K	1461	0.107
^{208}Tl	2615	0.359

* ^{238}U 及び ^{232}Th 系列については親核種の壊変当たりの放出比

(ICRU Rep. 53 Table 3.4 から抜粋)

表 4.2 原子力災害時にエネルギー校正に利用できる
人工放射性核種と γ 線エネルギーの例

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比
^{134}Cs	605	0.975
^{137}Cs	662	0.849
^{134}Cs	796	0.851
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	885	0.729
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1384	0.243
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1505	0.131

(ICRU Rep. 53 Table A.1 から抜粋)

福島県内における測定データ (2011年12月27日測定)

Real time : 4478.5 秒 Live time : 3600 秒 DT : 32.7 %

線量率 : 6 μ Sv/h

^{134}Cs : 8.0×10^5 Bq/m², ^{137}Cs : 9.3×10^5 Bq/m², $^{110\text{m}}\text{Ag}$: 3.5×10^3 Bq/m²

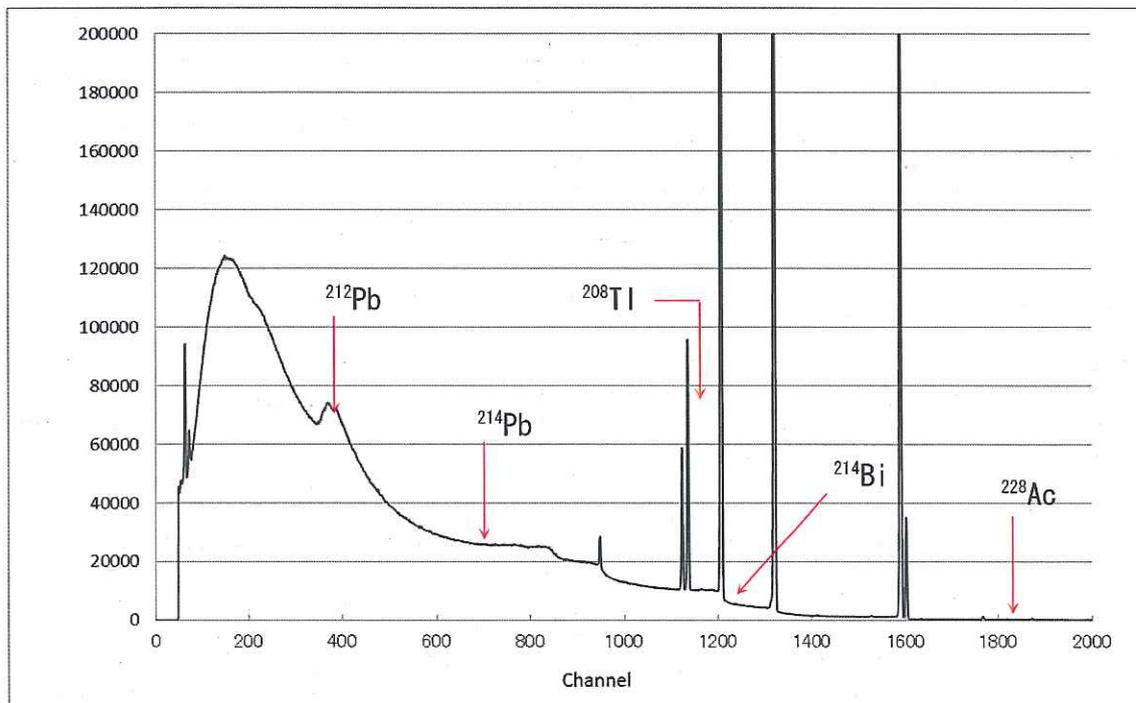
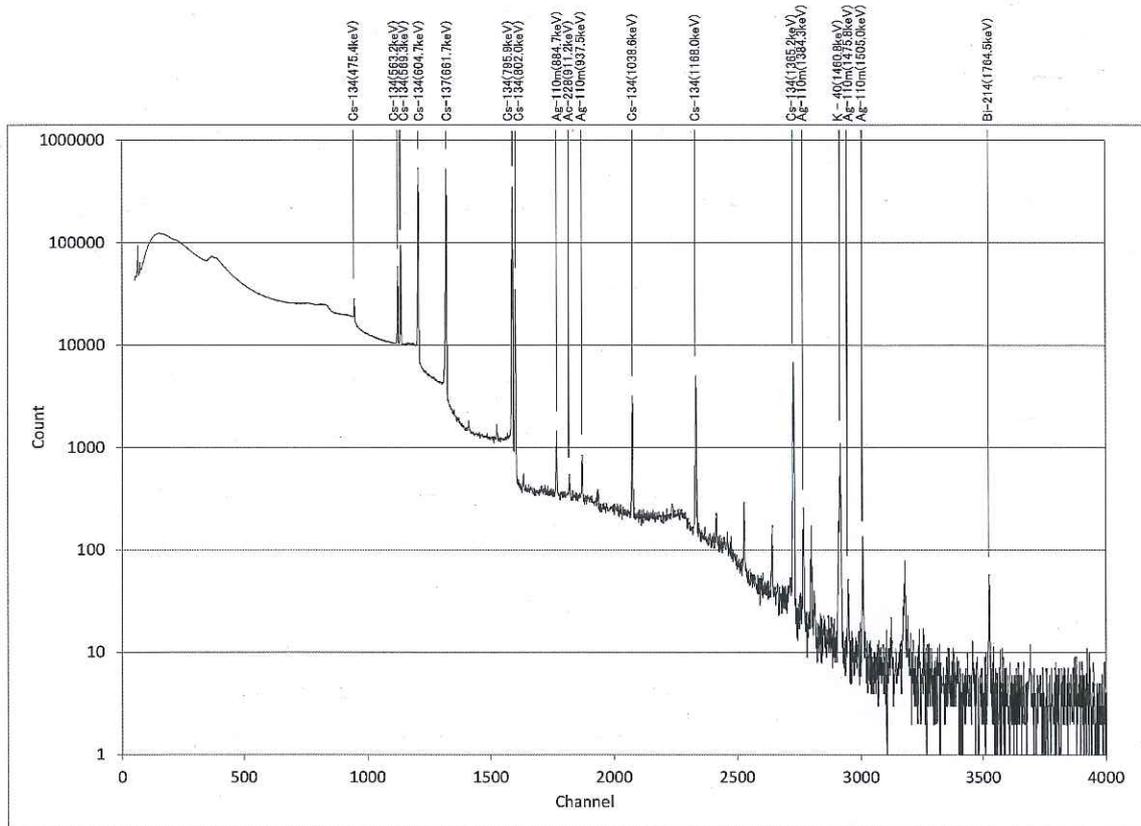


図 4.14 低エネルギー領域の自然放射性核種がエネルギー校正に利用できない事例

上記の調査・検討結果について、別冊2「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」の解説Dに記載した。

②測定可能範囲（測定上限）

一般的な MCA の性能について、図 4.15～図 4.18 に示した。検出器へ入射する光子の数（Input Count Rate）がある一定以上まで増えると、検出される光子の数（Throughput Count Rate）は減少し（図 4.15）、分解能は大きくなり（図 4.16）、デッドタイムは増大する（図 4.17）。また、デッドタイムの割合（100-% Live time）が増大すると検出されたピーク面積の測定誤差は大きくなる（図 4.18）。

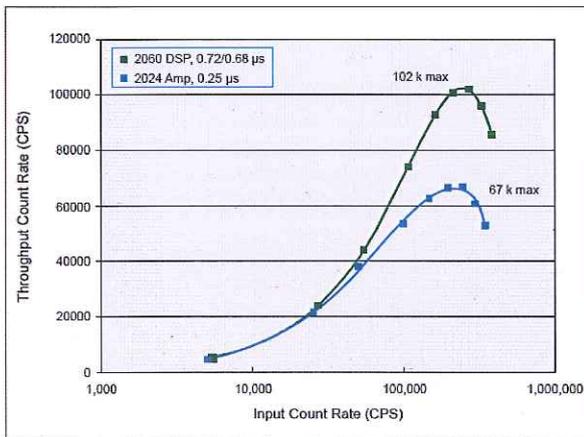


図 4.15 Input Count Rate と Throughput Count Rate の関係*1

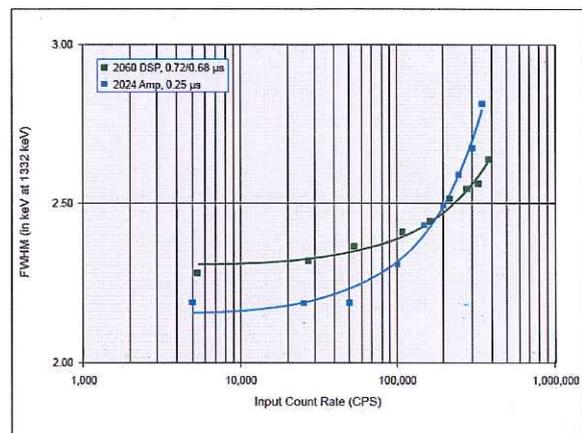


図 4.16 Input Count Rate と FWHM の関係*1

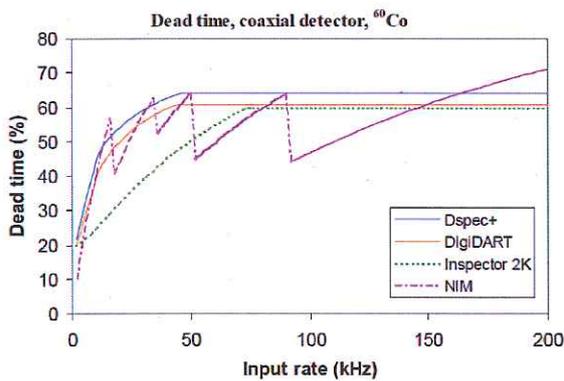


図 4.17 Input Rate と デッドタイムの関係*2

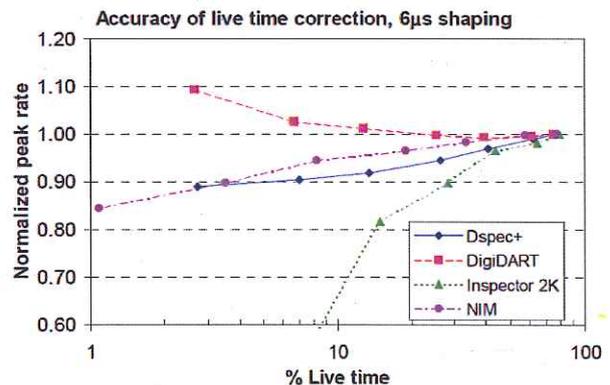


図 4.18 % Live Time と ピーク面積の関係*2

*1 「Performance of Digital Signal Processors for Gamma Spectrometry」, Canberra Industries, Inc., Application Note (2008)

*2 「Comparisons of the Portable Digital Spectrometer Systems」, Duc T. Vo, Phillis A. Russo, LA-13895-MS, Los Alamos NATIONAL LABORATORY (2002)

Input Count Rate、分解能、デッドタイムから測定の可否を判断するためには、まず in-situ 測定を実施する必要がある。また、in-situ 測定時に Input Count Rate を用いて測定の可否を判断することは困難であるため、実際の運用上では in-situ 測定前に判断できる目安があることが望ましいと考えられた。

そこで、in-situ 測定前にその場所で測定したサーベイメータの線量率から測定上限を判断することを検討するため、福島県内において測定した結果（測定日：2012年8月～9月、同一機種相対効率 20.6% の in-situ Ge 1 台分）を用いて、サーベイメータで測定した線量率と in-situ Ge のデッドタイムの関係を図 4.19 に示した。

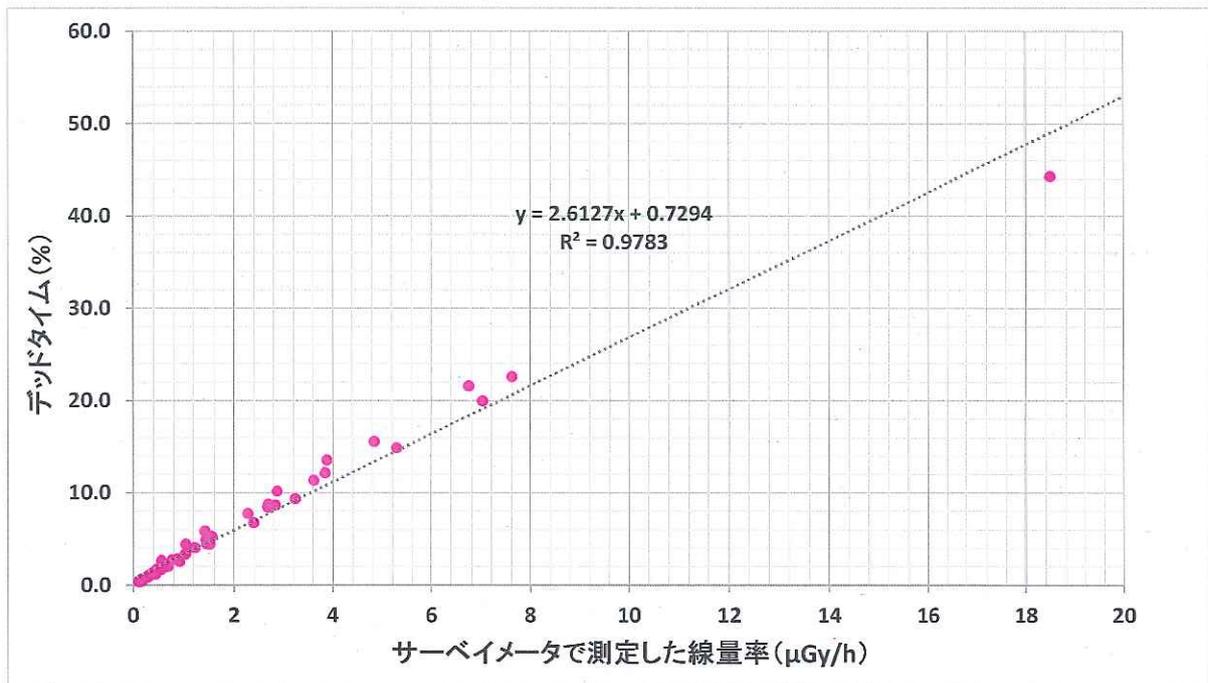


図 4.19 サーベイメータによる線量率と in-situ Ge のデッドタイムの関係

図 4.19 の結果と次の条件を基に、サーベイメータによる線量率とデッドタイム及び測定時間の関係を、表 4.3 に示した。

- ・ 測定時間 30 分
- ・ 相対効率 20.6% の Ge 半導体検出器を使用

表 4.3 サーベイメータによる線量率とデッドタイム及び測定時間の関係

サーベイメータで測定した線量率 (μGy/h)	デッドタイム (%)	測定時間 (分)
1	3	31
5	14	35
10	27	41
15	40	50
20	53	64

表 4.3 から、サーベイメータで測定した線量率が $20 \mu\text{Gy/h}$ の時にデッドタイムが約 50% になることが想定される。デッドタイムが 50% の場合、測定に要する時間が 2 倍かかることになり、作業効率及び作業員の被ばくの観点から、更にデッドタイムが大きくなる地点での測定を実施することは現実的ではないことから、 $20 \mu\text{Gy/h}$ を測定上限とした。機種間によって処理時間が異なるので、ここで示した測定上限はあくまで目安である。

以上のように、線量率が高い地点では数え落とし又はパイルアップ等によって、デッドタイムが大きくなり、検出器へ入射する光子の数 (Input Count Rate) に対して検出される光子の数 (Throughput Count Rate) は減少する。

一方、対象となる人工放射性核種のピーク計数は増加するため、その人工放射性核種だけを測定対象とする場合には短時間でも十分な測定精度が得られることが想定される。そのため、測定対象核種、測定精度、作業員の被ばくの面から総合的に判断して、測定上限を設定することが重要であると考えられた。

上記の調査・検討結果について、別冊 2「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」の解説 B に記載した。

4.2.2 シミュレーション効率に関する調査・検討

(1) 目的

現行の測定法では、詳しく記載されていないシミュレーション計算によるピーク効率の算出について、マニュアル改訂原案に記載することを目的として本検討を行った。

(2) 方法

①算出方法の調査

測定機器メーカーが提供しているシミュレーション計算ソフトウェアにおけるピーク効率の計算方法及び計算コード等について、測定機器メーカーからの聞き取り調査及びカタログ等の文献調査を実施した。

②標準点線源で作成したピーク効率との比較

相対効率 30.1% の Ge 半導体検出器を用いて、標準点線源によって作成したピーク効率 (以下「線源効率」という。) とシミュレーション計算によって作成したピーク効率 (以下「シミュレーション効率」という。) を比較した。線源効率作成には、 ^{241}Am (59.5 keV)、 ^{133}Ba (81.0 keV、356.0 keV)、 ^{137}Cs (661.7 keV)、 ^{60}Co (1173.2 keV、1332.5 keV) の標準点線源を使用した。シミュレーション効率は、線源効率と同様の核種及びエネルギーについて、ピーク効率シミュレーションソフトウェア (計算コード: MCNP モンテカルロコード^{*3}) を使用して作成した。

^{*3} Briesmeister, J.F., 「MCNP-A general Monte Carlo N particle Transport Code Version 4C」, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

また、条件の異なる5地点で in-situ 測定したスペクトルについて、それぞれのピーク効率を用いて U 系列、Th 系列、 ^{40}K 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs について放射能濃度及び線量率を解析し、比較した。なお、U 系列としては ^{214}Bi 及び ^{214}Pb を、Th 系列としては ^{208}Tl 及び ^{228}Ac を解析対象核種とした。また、解析のための重量緩衝深度 β は 1.4 g/cm^2 とした。

(3) 結果

①算出方法の調査

測定機器メーカーが提供しているシミュレーション計算ソフトウェアは、計算コードとして MCNP モンテカルロコード等を使用しており、 γ 線エネルギー及び幾何学的条件（距離、入射角度等）との関係について検出器をあらかじめモデル化することによって、任意のエネルギー、測定試料の形状、大きさに対応したピーク効率を短時間で作成することができる。

ただし、トレーサビリティの確保された標準点線源を用いてのピーク効率校正とは異なるため、シミュレーション計算によって得られたピーク効率の信頼性については、標準点線源を用いて作成したピーク効率と比較することによって、定期的に確認しておくことが望ましい。

使用する場合には、検出器情報を含め計算条件をよく吟味し、更に計算結果の妥当性を十分に確認した上で慎重に用いる必要がある。また、検出器のモデル化データがシミュレーション計算に必要なため、検出器の特性が変化しない管理が重要となる。具体的には、Ge 半導体検出器を常に冷却し、検出器の不感層を変化させない管理をすることが望ましい。

②標準点線源で作成したピーク効率との比較

線源効率とシミュレーション効率を比較した結果を表 4.4 に示した。

表 4.4 線源効率とシミュレーション効率の比較

核種	エネルギー (keV)	線源効率 (A)	シミュレーション効率 (B)	比率 (B) / (A)
Am-241	59.5	1.729E-04	1.613E-04	0.933
Ba-133	81.0	1.676E-04	1.666E-04	0.994
Ba-133	356.0	8.353E-05	8.201E-05	0.982
Cs-137	661.7	5.119E-05	4.925E-05	0.962
Co-60	1173.2	3.060E-05	3.108E-05	1.016
Co-60	1332.5	2.715E-05	2.832E-05	1.043

約 60 keV～1300 keV のエネルギー範囲において、線源効率とシミュレーション効率はおおむね 5 %以内で一致していた。

条件の異なる5地点で in-situ 測定したスペクトルについて、それぞれのピーク効率を

用いて解析した放射能濃度及び線量率を比較した結果を表 4.5～表 4.9 に示した。

表 4.5 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(草地 1、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	3.7	7.2	—	3.3	6.3	—	0.89	0.87
Th系列	—	5.8	11.3	—	6.2	11.6	—	1.05	1.03
K-40	1.99E-01 Bq/g	8.3	16.1	1.85E-01 Bq/g	7.7	14.5	0.93	0.93	0.90
Cs-134	2.98E+09 Bq/km ²	12.4	24.0	3.18E+09 Bq/km ²	13.2	24.9	1.07	1.07	1.04
Cs-137	1.32E+10 Bq/km ²	21.3	41.3	1.40E+10 Bq/km ²	22.6	42.7	1.06	1.06	1.03
合計	—	51.6	—	—	53.1	—	—	—	—

表 4.6 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(砂利、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	37.1	36.4	—	36.6	34.8	—	0.99	0.96
Th系列	—	34.8	34.1	—	37.1	35.3	—	1.07	1.03
K-40	1.09E-01 Bq/g	4.5	4.4	1.01E-01 Bq/g	4.2	4.0	0.93	0.93	0.90
Cs-134	2.22E+09 Bq/km ²	9.2	9.0	2.37E+09 Bq/km ²	9.8	9.4	1.07	1.07	1.03
Cs-137	1.01E+10 Bq/km ²	16.3	16.0	1.07E+10 Bq/km ²	17.4	16.5	1.06	1.06	1.03
合計	—	102.0	—	—	105.1	—	—	—	—

表 4.7 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(アスファルト、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	10.1	20.7	—	9.7	20.0	—	0.96	0.96
Th系列	—	10.9	22.3	—	11.6	23.8	—	1.06	1.06
K-40	4.00E-01 Bq/g	16.7	34.0	3.71E-01 Bq/g	15.5	31.7	0.93	0.93	0.93
Cs-134	9.85E+08 Bq/km ²	4.1	8.4	1.05E+09 Bq/km ²	4.4	8.9	1.07	1.07	1.07
Cs-137	4.43E+09 Bq/km ²	7.2	14.6	4.72E+09 Bq/km ²	7.6	15.6	1.06	1.06	1.07
合計	—	49.0	—	—	48.8	—	—	—	—

表 4.8 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(草地 2、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	8.3	17.9	—	7.8	16.6	—	0.94	0.93
Th系列	—	8.2	17.7	—	8.7	18.4	—	1.06	1.04
K-40	1.99E-01 Bq/g	8.3	17.8	1.84E-01 Bq/g	7.7	16.3	0.93	0.93	0.91
Cs-134	1.88E+09 Bq/km ²	7.8	16.8	2.00E+09 Bq/km ²	8.3	17.6	1.07	1.07	1.05
Cs-137	8.53E+09 Bq/km ²	13.8	29.7	9.07E+09 Bq/km ²	14.7	31.1	1.06	1.06	1.05
合計	—	46.4	—	—	47.2	—	—	—	—

表 4.9 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(コンクリート (建屋内地下)、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	19.8	25.7	—	19.8	25.9	—	1.00	1.01
Th系列	—	25.6	33.3	—	27.3	35.7	—	1.06	1.07
K-40	7.57E-01 Bq/g	31.6	41.0	7.03E-01 Bq/g	29.3	38.4	0.93	0.93	0.94
Cs-134	— Bq/km ²	—	—	— Bq/km ²	—	—	—	—	—
Cs-137	— Bq/km ²	—	—	— Bq/km ²	—	—	—	—	—
合計	—	76.9	—	—	76.3	—	—	—	—

全 5 地点において、各放射能濃度及び線量率の解析結果はおおむね 10 %以内で一致していた。シミュレーション効率を運用する上では、定期的に線源効率で解析した結果との差を把握しておくことが重要である。

上記の調査・検討結果について、別冊 2「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」の解説 A に記載した。

4.3 緊急時の放射性ストロンチウム分析

4.3.1 放射性ストロンチウム分析

(1) 放射能測定法シリーズにおける放射性ストロンチウム分析の現状

現在、放射性ストロンチウムの分析方法として文部科学省放射能測定法シリーズ No. 2 「放射性ストロンチウム分析法」(以下「現行の分析法」という。)がある。現行の分析法は、種々の環境試料から酸によりストロンチウムを抽出し、イオン交換法、発煙硝酸法、シュウ酸塩法及び溶媒抽出法によってストロンチウムを分離精製し、低バックグラウンドベータ線測定装置により測定する方法である。現行の分析法のフロー図を図 4.20 に示す。

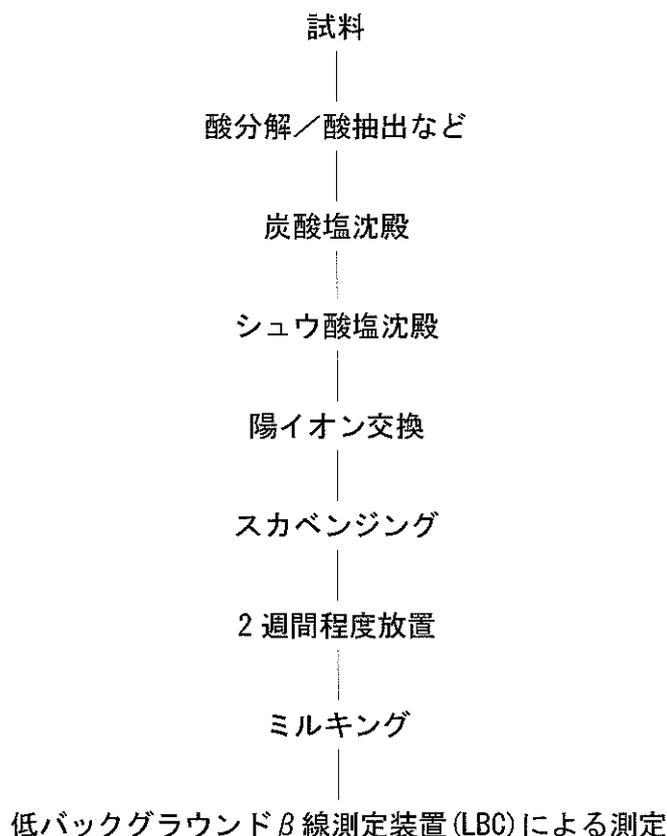


図 4.20 現行の分析法のフロー図

・ 酸抽出

灰試料は硝酸で分解した後、塩酸に溶解される。土壌試料などは塩酸で抽出した後、ろ過により抽出液と試料が分離される。供試量が灰試料で生 1 kg 相当、土壌で 100 g と多いため、有機物を多く含む灰試料などでは硝酸による分解に時間を要する。

・ 分離精製

ストロンチウムを含む抽出液から炭酸塩沈殿及びシュウ酸塩沈殿によりストロンチウムを粗分離する。シュウ酸塩沈殿は加熱分解により炭酸塩とした後に塩酸で溶解し、この溶解液をイオン交換樹脂カラムに通液してストロンチウムを精製する。この工程は炭酸塩沈

殿調製—遠心分離—シュウ酸塩沈殿調製—ろ過—シュウ酸塩の加熱分解—イオン交換分離と非常に長く、さらにイオン交換樹脂カラムに通液する液量が多いことから、分離精製工程全体の作業期間として1週間程度を要する。

・スカベンジングから測定まで

イオン交換樹脂カラムにより精製したストロンチウムを含む溶液は乾固後、少量の塩酸に溶解される。溶液に含まれるイットリウム 90 をスカベンジングにより除去した後に 2週間程度放置し、新たに生成したイットリウム 90 をミルキングして低バックグラウンドベータ線測定装置により測定する。分離精製から測定までに2週間の放射平衡を待つため、結果を得るまでに長時間を要する主な要因となっている。

ストロンチウム 89 を分析対象とする場合には、イオン交換樹脂カラムにより精製したストロンチウムをスカベンジング後に炭酸ストロンチウム沈殿として、ろ紙上にマウントする。2週間程度放置してストロンチウム 90 とイットリウム 90 の放射平衡を待った後、先の炭酸ストロンチウム沈殿を低バックグラウンド β 線測定装置で測定する。(炭酸ストロンチウム沈殿の測定ではストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 が測定される。)測定が終了した炭酸ストロンチウム沈殿を塩酸に溶解し、その溶液からミルキングによりイットリウム 90 を水酸化鉄に共沈させて低バックグラウンドベータ線測定装置により測定する。イットリウム 90 の測定結果よりストロンチウム 90 の放射能を求め、炭酸ストロンチウム沈殿の測定結果からストロンチウム 90 及びイットリウム 90 の寄与分を差引きすることで、ストロンチウム 89 の放射能を求める。このようにストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を分析対象とする場合、測定及び放射能濃度の算出が複雑となり、ストロンチウム 90 のみを対象とする場合と比べて更に時間を要する。

(2) 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の概念

現行の分析法では、分離精製工程の複雑さ及び放射平衡を待つ期間などにより分析所要期間が長くなっているため、迅速性が不可欠な緊急時のストロンチウム分析法は分離精製を簡便で迅速なものとし、放射平衡を待たずに測定する方法が必須であると考えられる。ストロンチウム迅速分析法のイメージを図 4.21 に示す。

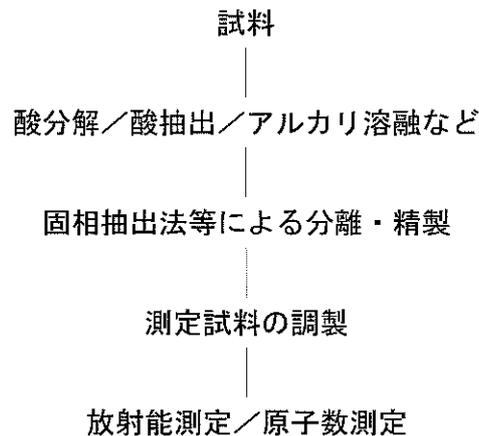


図 4.21 ストロンチウム迅速分析法のイメージ

また、分析所要時間や検出下限値は分析供試量やストロンチウムの分離精製方法と密接に関係するため、これらについても検討が必要であると考えられる。

そこで、本検討では目標とする分析所要時間や検出下限値を検討するとともに、抽出クロマトグラフィーや固相抽出ディスクによる迅速な分離精製方法及び液体シンチレーションカウンタや ICP-MS による放射平衡を待たずに測定する方法、自動分析装置による迅速法について検討を行った。

4.3.2 目標とする分析所要時間と検出下限値

(1) 目標とする分析所要時間について

緊急時の放射性ストロンチウム分析に係る分析所要時間について現状調査を行った。現状調査の結果、目標とすべき分析所要時間を定めたものはないことが分かった。

また、緊急時を想定した迅速分析法について調査したところ、IAEA が作成した牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法^{*4}が公表されていた。当該迅速分析法はおおむね 1 日程度で終了する方法となっていた。

さらに、IAEA は土壌試料中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法を検討しており、その分析法のドラフト案（以下「ドラフト案」という。）もストロンチウムの抽出方法の違いはあるが、おおむね 1 日程度で分析できる方法となっている。

これらのことを踏まえると、目標とする分析所要時間については 1 日（24 時間程度）とすることが妥当であると考えられた。

^{*4} Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting

(http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-AQ-27_web.pdf より入手可能)

(2) 目標とする検出下限値について

緊急時の放射性ストロンチウム分析に係る検出下限値について現状調査を行ったものの、明確に目標とすべき検出下限値を定めたものはないことが分かった。

IAEAが公表している緊急時を想定した牛乳中のストロンチウム89及びストロンチウム90迅速分析法について調査したところ、液体シンチレーションカウンタによるチェレンコフ光測定及びシンチレーション測定の実験結果からストロンチウム89及びストロンチウム90を求める方法が採用されていた。なお、測定法の詳細は4.3.5 液体シンチレーションカウンタによる測定に述べる。その方法の検出下限値は Sr-89/Sr-90 比が3程度の場合は Sr-89 で 0.9 Bq/sample、Sr-90 で 0.6 Bq/sample、Sr-89/Sr-90 比が12程度の場合は Sr-89 で 0.4 Bq/sample、Sr-90 で 10 Bq/sample あった。

また、現在、IAEAにおいて作成が進められている土壌中のストロンチウム89及びストロンチウム90迅速分析法についても同様の測定手法が採用されようとしていることから、土壌についても検出下限値は牛乳と同程度と考えられた。

本検討においても、検出下限値については、IAEAが採用している方法による検出下限値を目標とすることが妥当であると考えられた。

4.3.3 抽出クロマトグラフィーによる分離・精製

(1) Eichrom 社製 Sr Resin について

抽出クロマトグラフィーとして一般的に用いられているものとして、Eichrom 社製の Sr Resin がある。Sr Resin は樹脂のみと 2 mL、5 mL、10 mL の樹脂をカラムに充填したものが市販されている。Sr Resin はクラウンエーテル系の抽出剤(図 4.22)を保持し、ストロンチウムを選択的に抽出するため、簡単な操作でストロンチウムを分離精製できる特徴を持っている。

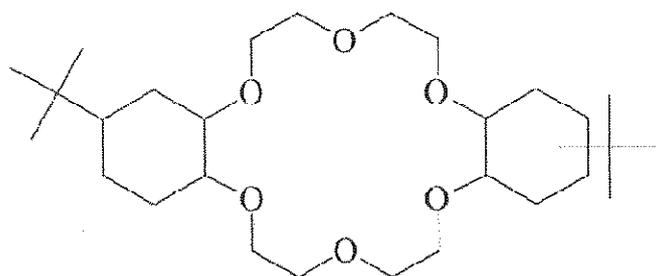


図 4.22 Sr Resin に採用されている抽出剤

(http://www.eichrom.com/eichrom/products/info/sr_resin.aspx より引用)

(2) Sr Resin の分離性能について

Sr Resin 分配係数と硝酸濃度の関係を図 4.23 及び図 4.24 に示す

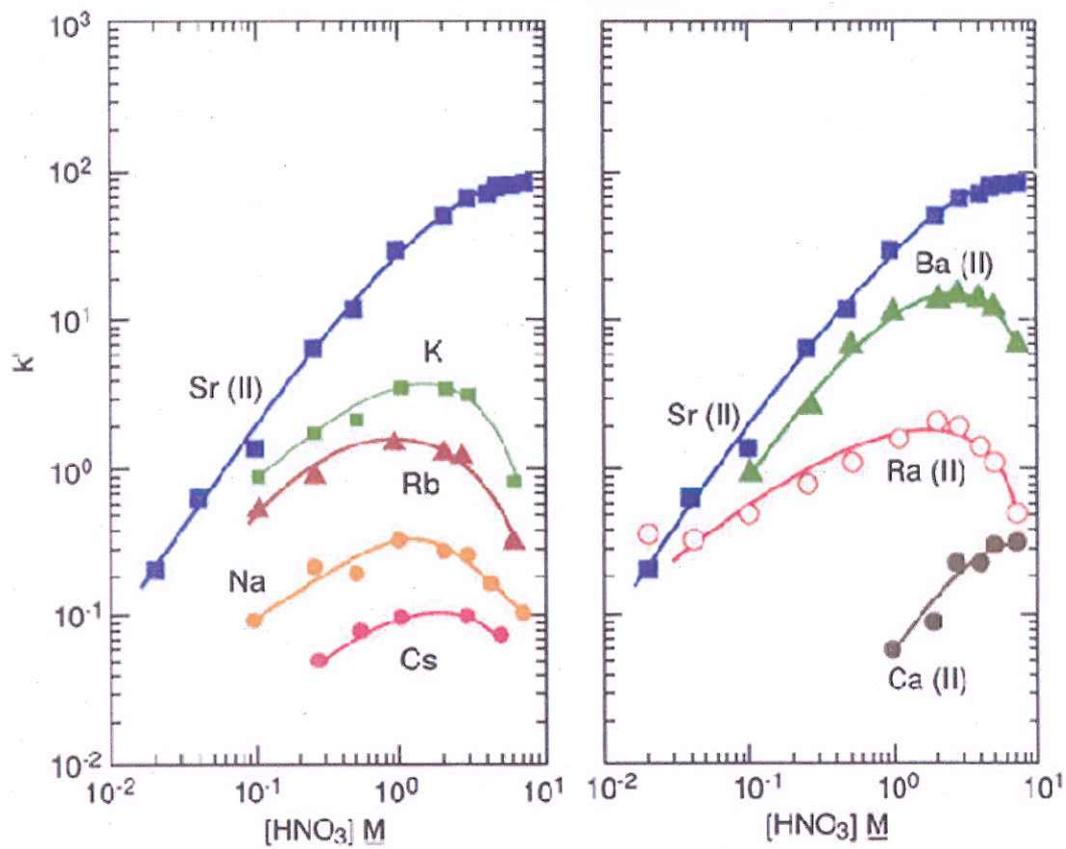


図 4.23 Sr Resin の分配係数と硝酸濃度の関係

(http://www.eichrom.com/eichrom/products/info/sr_resin.aspx より引用)

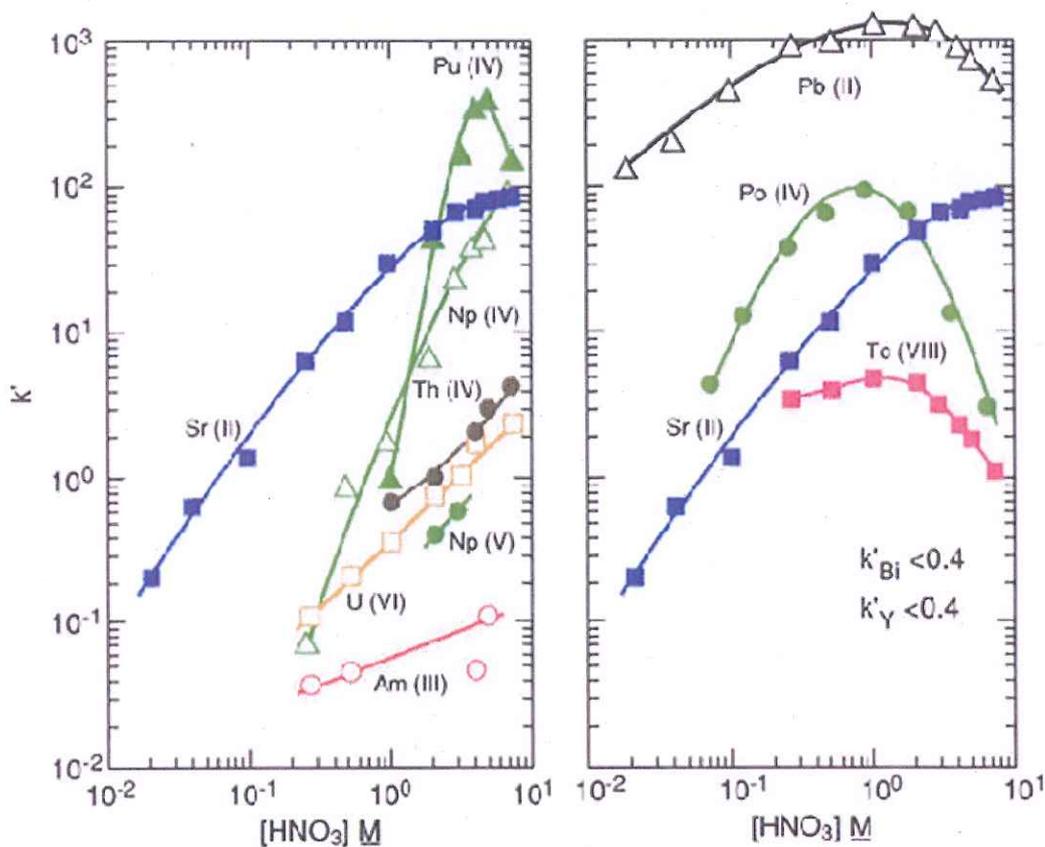


図 4.24 Sr Resin の分配係数と硝酸濃度の関係

(http://www.eichrom.com/eichrom/products/info/sr_resin.aspx より引用)

図 4.23 のとおり、Sr Resin に対してストロンチウムは硝酸濃度が高いほど樹脂に吸着し、硝酸濃度が低いほど吸着しない(溶離する)ことが分かる。ストロンチウムとカルシウムの分配係数は硝酸濃度が 10 M 付近で $10^2 \sim 10^3$ 程度の差があるため、Sr Resin にストロンチウムは吸着するが、カルシウムは Sr Resin に吸着せずに溶液とともに通過すると考えられた。

そこで、Sr Resin は通常 2 mL で市販されているため、Sr Resin 2 mL に対する特性を調査した。

カルシウム量及び安定ストロンチウムと放射性ストロンチウム(ストロンチウム 85)の回収率の関係を図 4.25 及び図 4.26 示す。

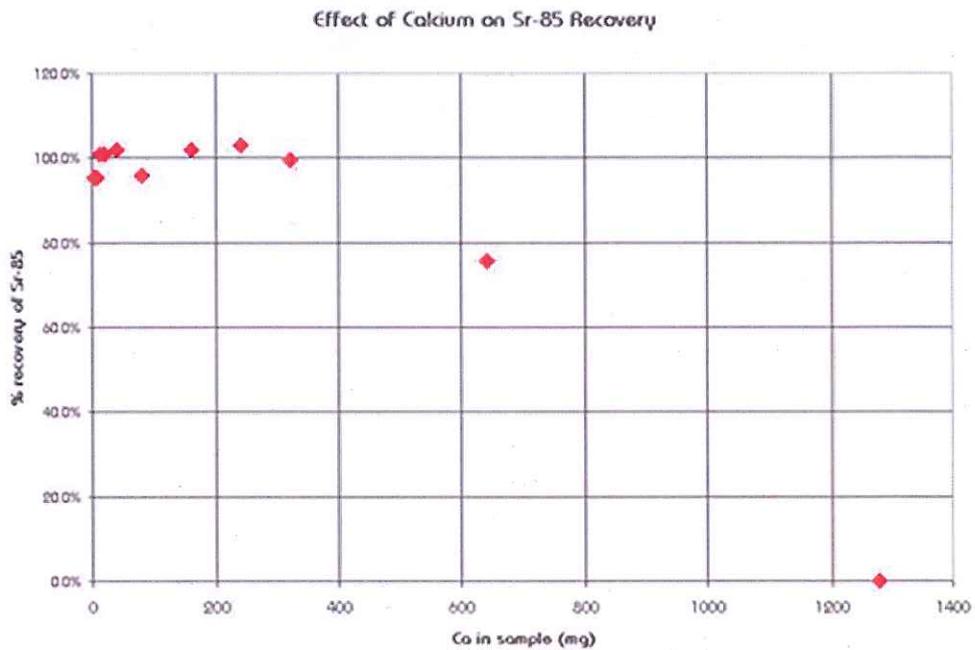


図 4.25 カルシウム量とストロンチウム回収率の関係
 (http://www.eichrom.com/eichrom/products/info/sr_resin.aspx より引用)

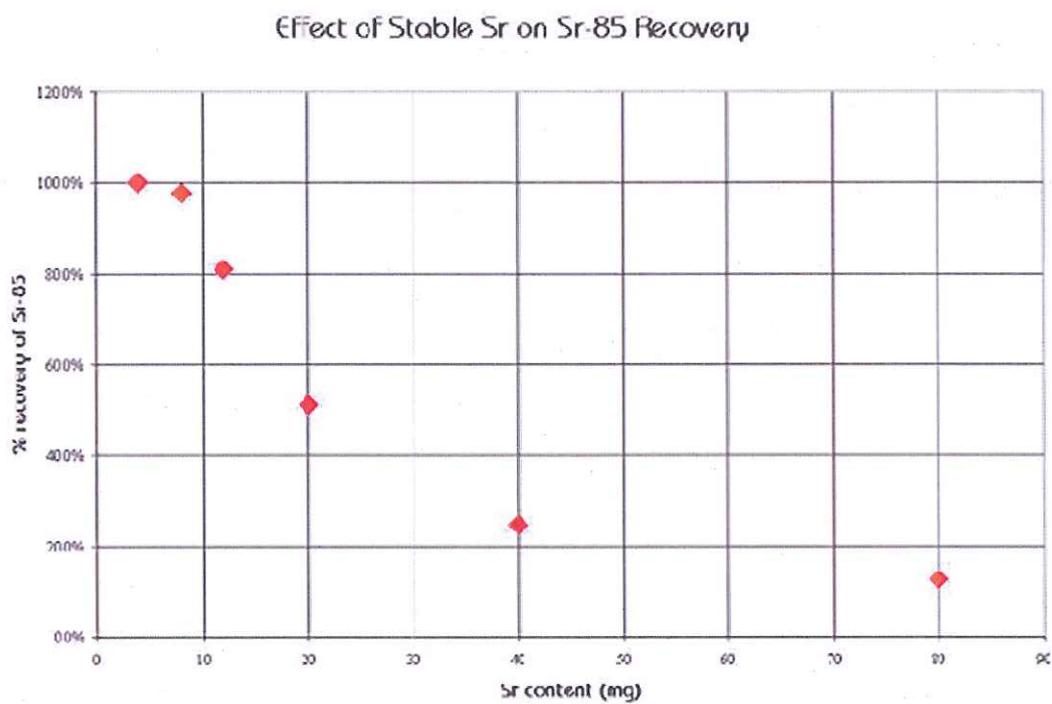


図 4.26 安定ストロンチウム量とストロンチウム回収率の関係
 (http://www.eichrom.com/eichrom/products/info/sr_resin.aspx より引用)

Sr Resin 2 mL 当たりカルシウム 320 mg を試料に含んでいても、ストロンチウム 85 は定量的に分離精製できることが示されている。

また、Sr Resin 2 mL 当りに吸着する安定ストロンチウムの量は 4 mg 及び 8 mg までは定量的ではある。それ以上のストロンチウム量においては、ストロンチウム回収率は低下し、ストロンチウムの損失が見られる。Eichrom 社は Sr Resin 2 mL 当たり安定ストロンチウムは 8mg までを推奨している。

主な元素の分離について、表 4.10 に示す。

表 4.10 Sr Resin による主な元素の分離

Element	PERCENT OF ELEMENT FOUND IN F.C.V. #						F.C.V.
	1-5	3 M HNO ₃ - 0.01 M Oxalic Acid				0.05 M HNO ₃	
	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-40	
Li	100	—	—	—	—	—	—
Na	100	—	—	—	—	—	—
K	56	35	—	—	—	—	—
Rb	100	—	—	—	—	—	—
Cs	100	—	—	—	—	—	—
Mg	100	—	—	—	—	—	—
Ca	100	—	—	—	—	—	—
Sr	—	—	—	—	—	—	99
Ba	—	—	53	42	6	0.7	—
Ra	—	99	1	—	—	—	—
Al	100	—	—	—	—	—	—
Cr	100	—	—	—	—	—	—
Mn	100	—	—	—	—	—	—
Fe	99	0.5	0.2	0.4	—	—	—
Co	100	—	—	—	—	—	—
Ni	100	—	—	—	—	—	—
Cu	100	0.2	—	—	—	—	—
Zn	100	0.2	—	—	—	—	—
Y	100	0.1	—	—	—	—	—
Zr	91	0.4	0.2	—	—	—	—
Mo	—	84	—	16	—	—	—
Tc	57	43	—	—	—	—	—
Ru	100	—	—	—	—	—	—
Rh	100	—	—	—	—	—	—
Pd	100	—	—	—	—	—	—
Ag	15	88	2	—	—	—	—
Cd	100	0.1	—	—	—	—	—
La-Eu	100	0.1	—	—	—	—	—
Hx	5	5	19	40	19	10	5

Column parameters: Particle size = 50-100 µm, Bed Volume = 1.0 cm³, Bed height = 5.0 cm, and 1 F.C.V. = 0.60 mL.

(http://www.eichrom.com/eichrom/products/info/sr_resin.aspx より引用)

Sr Resin による分離精製は単独での利用もさることながら、シュウ酸塩沈殿等の分離精製と組み合わせることにより、十分な除染がなされることと考えられた。

また、夾雑核種が存在している場合においても、十分な除染が期待され、特段の配慮は必要ないと考えられた。

4.3.4 固相抽出ディスクによる分離・精製

(1) 3M 社製 Sr RAD disk について

ストロンチウムに選択性を持つ固相抽出ディスクは 3M 社より Sr RAD disk として市販されている。Eichrom 社の Sr Resin と同様にクラウンエーテル系の抽出剤を持つと思われるが、具体的な抽出剤は公表されていないため不明である。

(2) 3M 社製 Sr RAD disk の分離性能について

3M 社は Sr RAD disk による捕集方法として硝酸系による方法^{*5}を公開している。塩酸系による分離性能については Mahmood ら^{*6}により検討がなされている。Mahmood らによると、塩酸濃度が 4M から 6M の範囲でストロンチウムは定量的にディスクに捕集される。

また、試料中にカルシウムが存在した場合にストロンチウム回収率へ与える影響を表 4.11 に示す。

表 4.11 Sr RAD disk における共存カルシウム濃度の影響^{*6}

共存 Ca (mg/sample)	Sr 回収率 (%)	
	2M HCl	6M HCl
100	87.8	98.4
1000	79.9	87.3
10000	0.0	—

Ca 及び Sr 0.8 mg を 2 M 又は 6M 塩酸中に添加し、Sr RAD disk に通液して回収率を検討した。

このことから、ストロンチウムに対してカルシウムが 100 倍程度ではストロンチウムの回収は定量的であり、カルシウムが 1000 倍程度であってもストロンチウムの損失 10 %程度であることが分かった。

Sr 3mg を 6 M 塩酸中に添加し、Na、K、Mg、Ca イオン等を加えた溶液を Sr RAD disk に通液し、Pb、Bi の除染を検討した結果を

表 4.12 に示す。

^{*5} 3M エムポアディスク製品技術資料(SCED11-011)

^{*6} Z. U. W. Mahmood, W. Nitta, Jurnal Sains Nuklear Malaysia, Vol. 20, No. 1&2(2002), 37-47

表 4.12 Sr RAD disk による鉛及びビスマスの除染^{*7}

	存在量 (%)		
	Sr	Pb	Bi
ディスク上	96.12	85.63	99.05
通過液中	3.88	0.01	0.95

このことから、鉛及びビスマスについてはディスク上に残存することが分かった。鉛やビスマスをほとんど含まない試料については、固相抽出ディスクを用いた分離精製方法としては優れているが、鉛やビスマスなどを含む試料については、その除染が十分でないおそれがあることから、使用には注意する必要があると考えられた。

4.3.5 液体シンチレーションカウンタによる測定

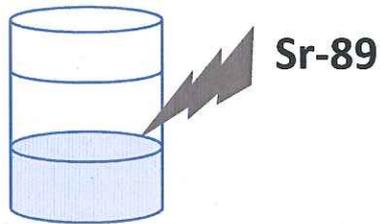
液体シンチレーションカウンタによるストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の測定では、ストロンチウム 90 の放射平衡を待つことなくストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の定量が可能であり、IAEA が牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の迅速分析法における測定方法として採用している。

また、土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 測定法としてドラフト案に採用されていることから、今後も IAEA が中心的な測定方法として採用することが考えられたため、液体シンチレーションカウンタによる測定法を調査した。

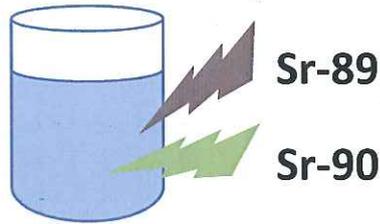
(1) 測定方法の概要

液体シンチレーションカウンタによる放射性ストロンチウムの測定は2回の測定が1組を成している。スカベンジングによりイットリウム 90 が除去された後、最初の測定はチェレンコフ光測定により、主にストロンチウム 89 を測定する。チェレンコフ光測定に引き続き、シンチレータと試料溶液を混合して、シンチレーション測定を行う。この測定はストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 を測定対象としているが、イットリウム 90 はスカベンジング後であることから、生成量は少ない。この2回の測定結果から、計算によりストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の放射能を算出する。液体シンチレーションカウンタによる測定イメージを図 4.27 に示す。

^{*7} Z. U. W. Mahmood, W. Nitta, Jurnal Sains Nuklear Malaysia, Vol. 20, No. 1&2 (2002), 37-47



1回目
 チェレンコフ光測定
 主にストロンチウム 89 を測定



2回目
 シンチレーション測定
 ストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 を測定
 (イットリウム 90 はほとんど生成していない)

図 4.27 液体シンチレーションカウンタによる測定イメージ

(2) 液体シンチレーションカウンタによる計数効率

液体シンチレーションカウンタによりストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を測定した際の計数効率を表 4.13 に示す。

表 4.13 液体シンチレーションカウンタにおける計数効率

核種	計数効率	
	チェレンコフ光測定	シンチレーション測定
Sr-89	0.385	0.998
Sr-90	0.033	1.000
Y-90	0.582	1.000

チェレンコフ光測定では、ストロンチウム 89 及びイットリウム 90 の計数効率が高く、他の 2 核種と比較してエネルギーが低いストロンチウム 90 の計数効率は低い。このため、チェレンコフ光測定前にスカベンジングによりイットリウム 90 が除去されていることを踏まえ、チェレンコフ光測定ではストロンチウム 89 が主な測定対象となる。

シンチレーション測定では、ストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 の計数効率はいずれも高く、ほとんど 100 %である。ただし、スカベンジングによりイット

リウム 90 が除去されており、スカベンジング後から時間はそれほど経過していないことを踏まえると、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 が主な測定対象である。

チェレンコフ光によるストロンチウム 89 及びシンチレーション測定におけるストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の計数効率は高く、液体シンチレーションカウンタによる測定は計数効率の高い測定方法であると考えられた。

(3) 計算方法

ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 放射能濃度の計算方法を以下に示す。

$$A_{t1}^{Sr90} = \frac{N_{t2}^s \cdot \varepsilon_c^{Sr89} - N_{t1}^c \cdot \varepsilon_s^{Sr89} \cdot f_3}{y}$$

$$A_{t1}^{Sr89} = \frac{N_{t1}^c (y + \varepsilon_c^{Y90} \cdot \varepsilon_s^{Sr89} \cdot f_1 \cdot f_3 + \varepsilon_c^{Sr90} \cdot \varepsilon_s^{Sr89} \cdot f_3) - N_{t2}^s (\varepsilon_c^{Sr90} \cdot \varepsilon_c^{Sr89} + \varepsilon_c^{Y90} \cdot \varepsilon_c^{Sr89} \cdot f_1)}{\varepsilon_c^{Sr89} \cdot y}$$

ここで、

A_{t1}^{Sr90} : チェレンコフ光測定時のストロンチウム 90 放射能 (Bq)

A_{t1}^{Sr89} : チェレンコフ光測定時のストロンチウム 89 放射能 (Bq)

f_1 : スカベンジングからチェレンコフ光測定までのイットリウム 90 生成に係る補正係数

f_2 : スカベンジングからシンチレーション測定までのイットリウム生成 90 に係る補正係数

f_3 : チェレンコフ光測定からシンチレーション測定までのストロンチウム 89 の減衰補正に係る補正係数

ε_c^{Sr89} : チェレンコフ光測定におけるストロンチウム 89 の計数効率

ε_c^{Sr90} : チェレンコフ光測定におけるストロンチウム 90 の計数効率

ε_c^{Y90} : チェレンコフ光測定におけるイットリウム 90 の計数効率

ε_s^{Sr89} : シンチレーション測定におけるストロンチウム 89 の計数効率

ε_s^{Sr90} : シンチレーション測定におけるストロンチウム 90 の計数効率

ε_s^{Y90} : シンチレーション測定におけるイットリウム 90 の計数効率

N_{t1}^c : チェレンコフ光測定時の正味計数率

N_{t2}^s : シンチレーション測定時の正味計数率

$$y = \varepsilon_c^{Sr89} \cdot \varepsilon_s^{Sr90} + \varepsilon_c^{Sr89} \cdot \varepsilon_s^{Y90} \cdot f_2 - \varepsilon_s^{Sr89} \cdot \varepsilon_c^{Sr90} \cdot f_3 - \varepsilon_s^{Sr89} \cdot \varepsilon_c^{Y90} \cdot f_1 \cdot f_3$$

$$f_1 = 1 - \exp(-\lambda_{Y90} \cdot (t_1 - t_0))$$

$$f_2 = 1 - \exp(-\lambda_{Y90} \cdot (t_2 - t_0))$$

$$f_3 = \exp(-\lambda_{Sr89} \cdot (t_2 - t_1))$$

である。

以上のことから、液体シンチレーションカウンタによる測定は放射平衡を待たないため、迅速性に優れた測定方法であると考えられた。

4.3.6 ベータ線スペクトロメータによる測定

低バックグラウンドβ線測定装置はβ線によるカウントのみが得られるのに対し、β線スペクトロメータではβ線スペクトルが得られる。このスペクトルを利用したストロンチウム89及びストロンチウム90の定量方法について調査した。

Kameo^{*8}らはβ線スペクトロメータで得られたスペクトル(図4.28)より放射性廃液中のストロンチウム89及びストロンチウム90の放射能を定量している。その方法は以下のとおりである。

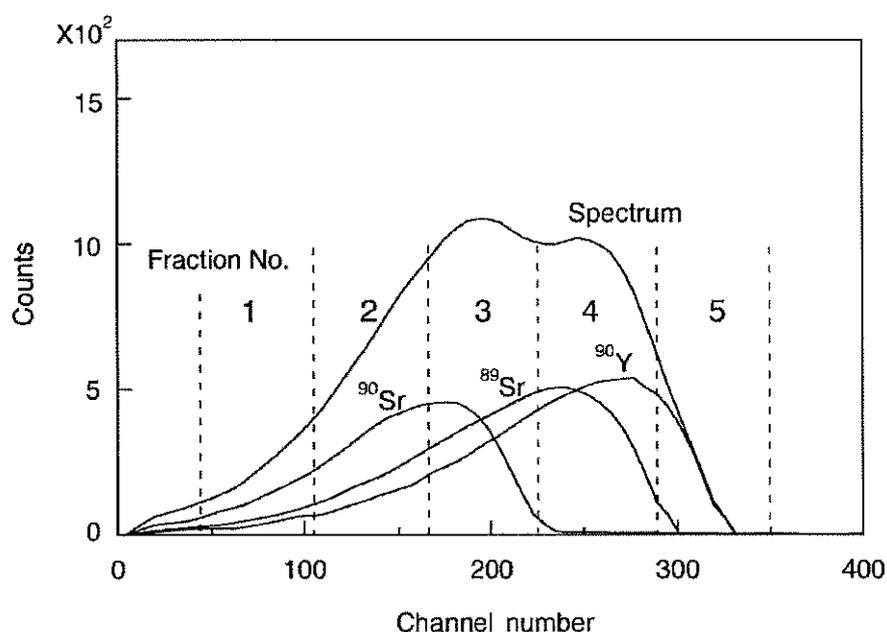


図 4.28 ストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及び
イットリウム 90 のβ線スペクトル

(Y. Kameo et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., 274 (2007) 71 より引用)

*8 Y. Kameo et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., 274 (2007) 71

β 線スペクトルを n 個の領域に分け、各々の領域はストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 のカウントの合計であるため、以下のような式が成り立つ。

$$\begin{aligned} F_1^{89} \cdot X_{89} + F_1^{90} \cdot X_{90} + F_1^{90Y} \cdot X_{90Y} &= N_1 \\ F_2^{89} \cdot X_{89} + F_2^{90} \cdot X_{90} + F_2^{90Y} \cdot X_{90Y} &= N_2 \\ &\vdots \\ F_n^{89} \cdot X_{89} + F_n^{90} \cdot X_{90} + F_n^{90Y} \cdot X_{90Y} &= N_n \end{aligned}$$

ここで、 F は計数効率、 X は放射能 (Bq)、 N は計数率 (cpm) を示す。89、90、90Y はストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 を表し、添字の 1、2、 \dots 、 n はスペクトルの領域の番号を示している。

計数効率 F は別途、求めることができるため、この式を解くことによってストロンチウム 89、ストロンチウム 90 及びイットリウム 90 の放射能を求めることができる。(計算の詳細は西川ら^{*9}を参照のこと。)

Kameo らは低レベル放射性廃液中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を β 線スペクトロメータ及び低バックグラウンド β 線測定装置で測定した結果を比較し、良好な結果を得ていることから、 β 線スペクトロメータを利用した測定例は少ないものの、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を定量できることが分かった。

*9 西川ら, Radioisotopes, 29 (1980) 542

4.3.7 ICP-MSによる測定

(1) トリプル四重極 ICP-MS (ICP-MS/MS)による測定

学習院大学理学部化学科村松研究室大野剛助教を訪問し、国内調査を行った。以下に、調査結果及び大野剛助教らの研究成果を示す。

村松研究室では土壌試料中に含まれるストロンチウム 90 のトリプル四重極 ICP-MS (以下「ICP-MS/MS」という。)による測定を研究している。

土壌の分析方法を図 4.29 に示す。

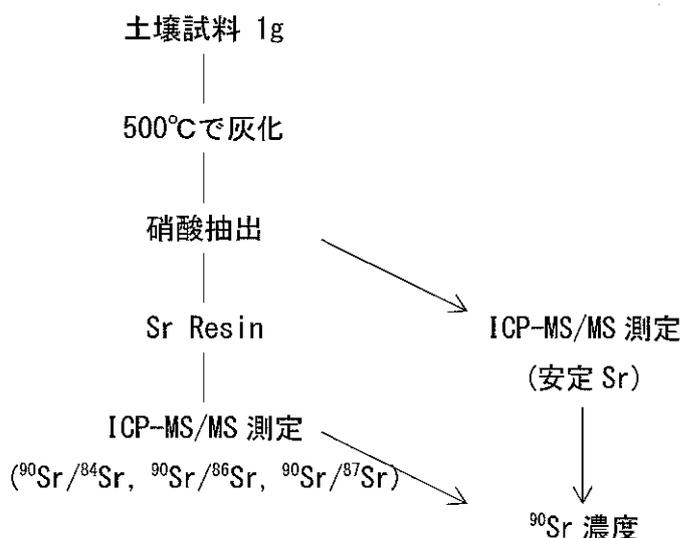


図 4.29 土壌の分析フロー

土壌 1 g を 500 °C で灰化して有機物を分解し、硝酸でストロンチウムを抽出する。抽出液の一部を分取して安定ストロンチウムを定量するとともに、残りの抽出液を Sr Resin による分離精製を 2 回繰り返して ICP-MS/MS 測定 (⁹⁰Sr/⁸⁴Sr, ⁹⁰Sr/⁸⁶Sr, ⁹⁰Sr/⁸⁷Sr) を行う。

ICP-MS/MS による測定では安定ストロンチウム量とストロンチウム 88 とストロンチウム 90 原子数比を測定し、それらに乗ずることでストロンチウム 90 放射能を算出している。この方法は分析者がストロンチウムの回収率を意識する必要がないのが特徴である。また、装置は市販品ベースの ICP-MS/MS であり、特別な装置や改造等を必要としない。このため、ICP-MS に習熟した者であれば特別な装置や操作を必要とせず、本方法を導入できると考えられた。

ICP-MS/MS による測定では ⁹⁰Sr⁺ に干渉する ⁹⁰Zr⁺ を酸素ガスをリアクションガスとして用いて、ジルコニウムの除去を行っている。図 4.30 にリアクションセル内におけるジルコニウムの除去の概念を示す。

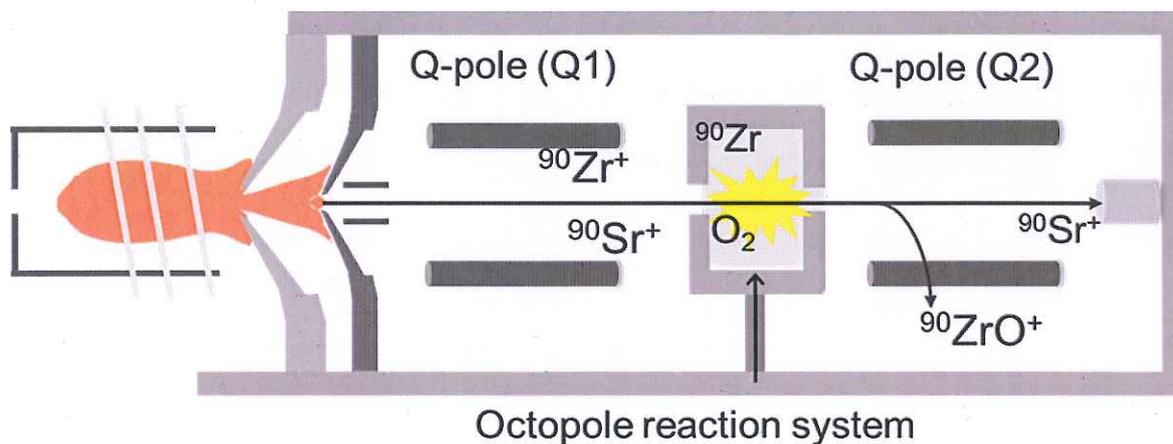


図 4.30 リアクションセル内におけるジルコニウム除去の概念

酸素ガスにより $^{90}\text{Zr}^+$ が $^{90}\text{ZrO}^+$ となって効率的に除去できる。酸素ガスの流量と $^{90}\text{Zr}^+$ 及び $^{88}\text{Sr}^+$ 信号強度の関係を図 4.31 に示す。酸素ガスの流量を調節することにより $^{90}\text{Zr}^+$ の信号強度は減少するものの、 $^{88}\text{Sr}^+$ の信号強度は大きく減少しない。この傾向は ICP-MS、ICP-MS/MS に共通であるが、ストロンチウムによる信号強度とジルコニウムの信号強度の減少の関係から、ICP-MS/MS はストロンチウムの信号強度の強度劣化が小さく、ジルコニウムによる信号強度の減少が大きいため、ICP-MS による測定より有利であることが分かる。

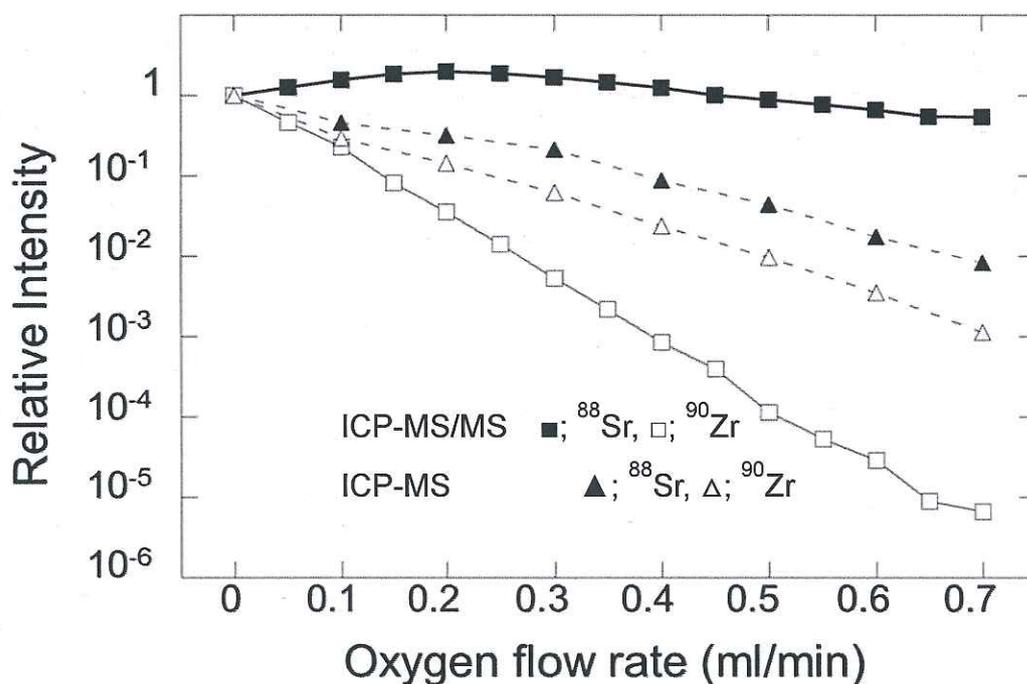


図 4.31 酸素ガス流量と $^{90}\text{Zr}^+$ 及び ^{88}Sr 信号強度の関係

また、安定ストロンチウム溶液を測定した際の信号強度は図 4.32 のようになり、ICP-MS/MS はストロンチウム 90 測定の際に安定ストロンチウムであるストロンチウム 88 の影響を受けにくいことが分かる。

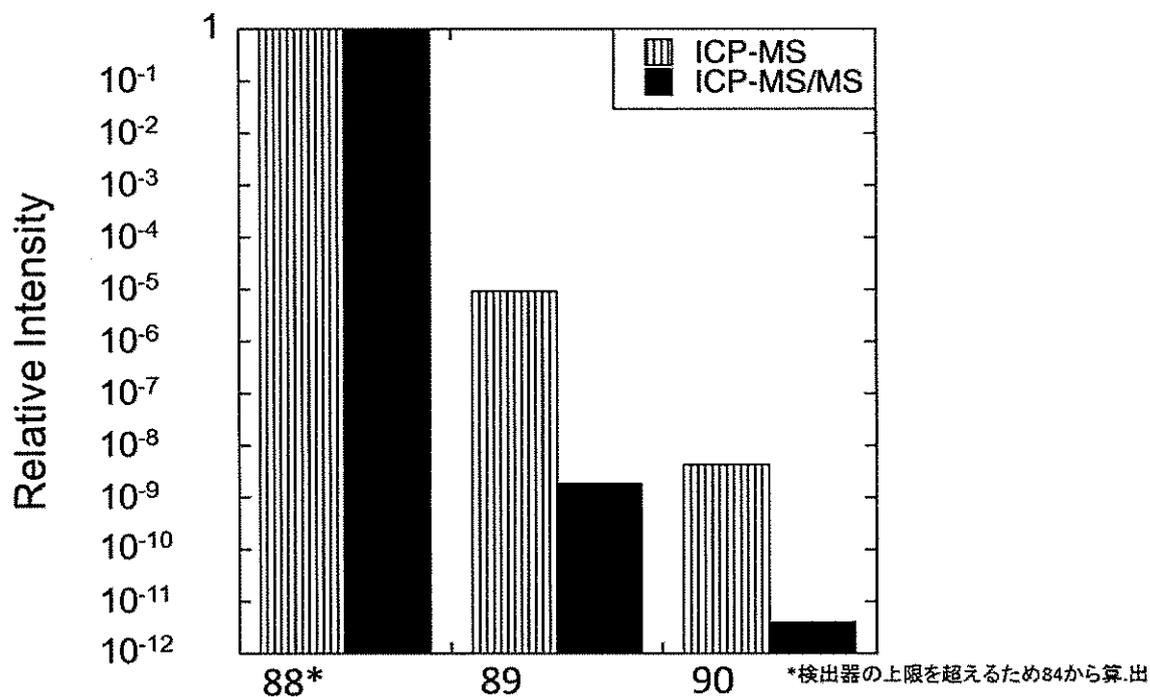


図 4.32 安定ストロンチウム測定時における信号強度比

さらに、試料導入部への脱溶媒装置の導入や、インタフェース部の高真空化やサンプリングコーンの最適化などを行うことにより、より高感度な測定が可能となる。

脱溶媒、高真空及びコーン位置の最適化の高感度化への寄与について図 4.33 に示す。

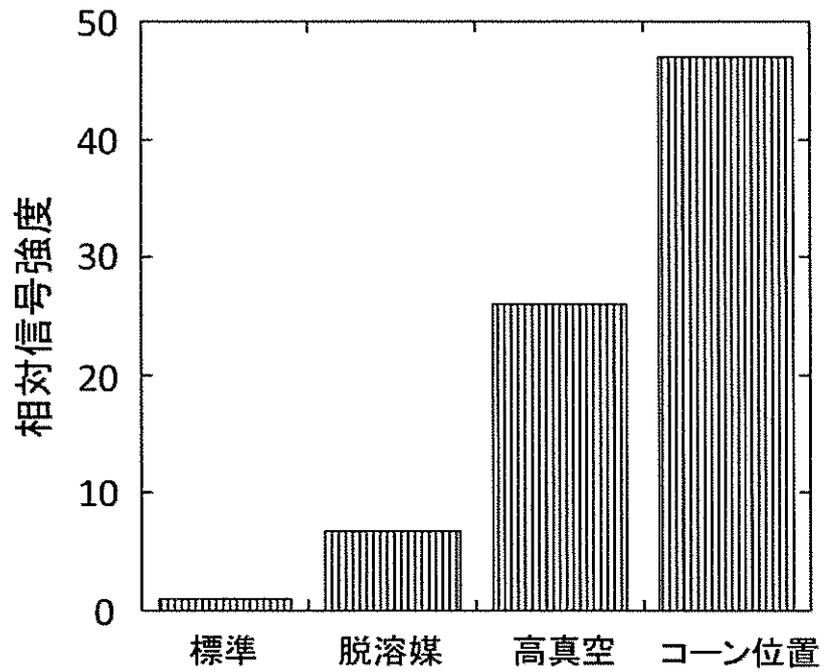


図 4.33 脱溶媒、高真空及びコーン位置最適化の高感度化への寄与

これから、高真空化やコーン位置の最適化が高感度化に重要であることが分かる。

日本分析センターで工程管理に使用している所内標準土壌、IAEA 372 (grass)、IAEA375 (soil) や大熊町で採取された土壌などを分析した結果を図 4.34 に示す。

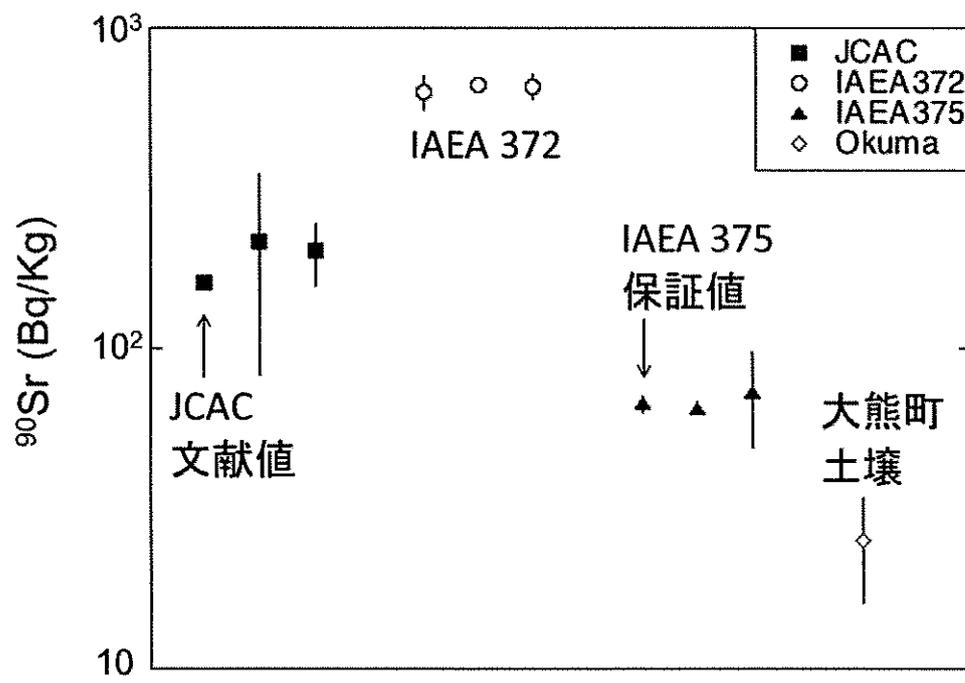
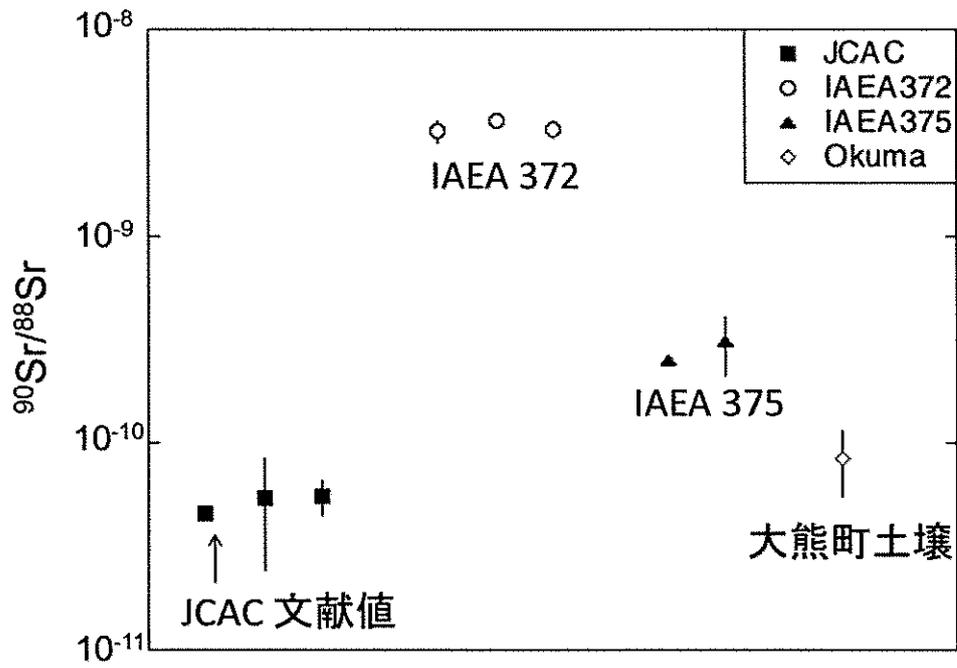


図 4.34 分析結果

日本分析センターの所内標準土壌は $^{90}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ 比が小さいために測定誤差が大きくなっているが、IAEA 372、IAEA375などは精度良く測定できることが分かった。

(2) フローインジェクションを備えた ICP-MS による測定

フローインジェクションを備えた ICP-MS による測定について、文献調査を行った。

福島大学の高貝らは ICP-MS とフローインジェクションを組み合わせたシステムを構築し、土壌中のストロンチウム 90 の定量を行っている^{*10}。当該システムでは Sr Resin により土壌中の ⁹⁰Zr などを分離し、続いて超音波ネブライザーを利用した脱溶媒により ICP-MS 内に導入される。ICP-MS 内部では、リアクションセルに酸素ガスを流して ⁹⁰Zr を ⁹⁰ZrO⁺ として分離する。このようにして ⁹⁰Zr を除去し、⁹⁰Sr のみを検出することを達成している。

当該システムはスイッチングバルブを備え、Sr Resin によりストロンチウムを分離精製している際に除去される夾雑核種を ICP-MS に導入せずには排出することができ、装置への負荷が軽減されるように配慮されている。

質量分析計における ⁸⁸Sr と ⁹⁰Sr のイオン検出効率ほぼ同程度(図 4.35)であることから、非放射性的な ⁸⁸Sr を標準として放射性的な ⁹⁰Sr を間接的に定量することができる。

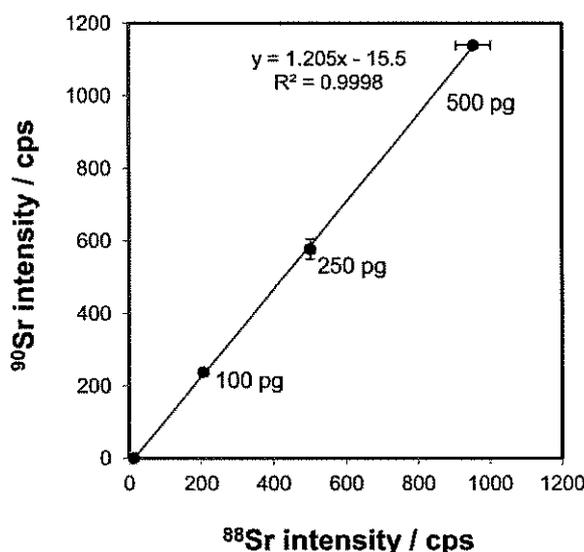


図 4.35 ⁸⁸Sr と ⁹⁰Sr の信号強度の関係

(Takagai, Y., et al., Anal. Methods, 6, 355—362 (2014) より引用)

4.3.8 IAEA Method Validation について

IAEA は Sr Resin を用いた牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法を既に公開しているが、同様に Sr Resin を用いた土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法を検討している。現在、迅速分析法のドラフト案が作成され、ドラフト案の妥当性を確認するために Method Validation が実施されている。Method Validation は、10 機関程度にストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を添加した土壌を配布してドラフト案に従って分析した結果の報告を受け、そのドラフト案の妥当性を確認するプログラムである。本検討では、IAEA Method Validation を活用し、Sr Resin による土壌の分離精製法につ

^{*10} Takagai, Y., et al., Anal. Methods, 6, 355—362 (2014)

いて検討した。平成 16 年度に実施した文部科学省からの委託事業「環境試料測定法調査」の結果によると、土壤に適用可能な分離精製方法は降下物、陸水、牛乳、葉菜にも適用可能であった。その結果を踏まえると、今回の IAEA Method Validation で土壤試料について検討した分離精製方法は、他の環境試料にも広く適用できるものと考えられ、今後の分析法検討の中で中心的な分離精製法と成りうるものと思われる。

IAEA が示した分析法ドラフト案のフローを

図 4.36 及び図 4. に、ドラフト案における共存元素の除去について図 4. に示す。

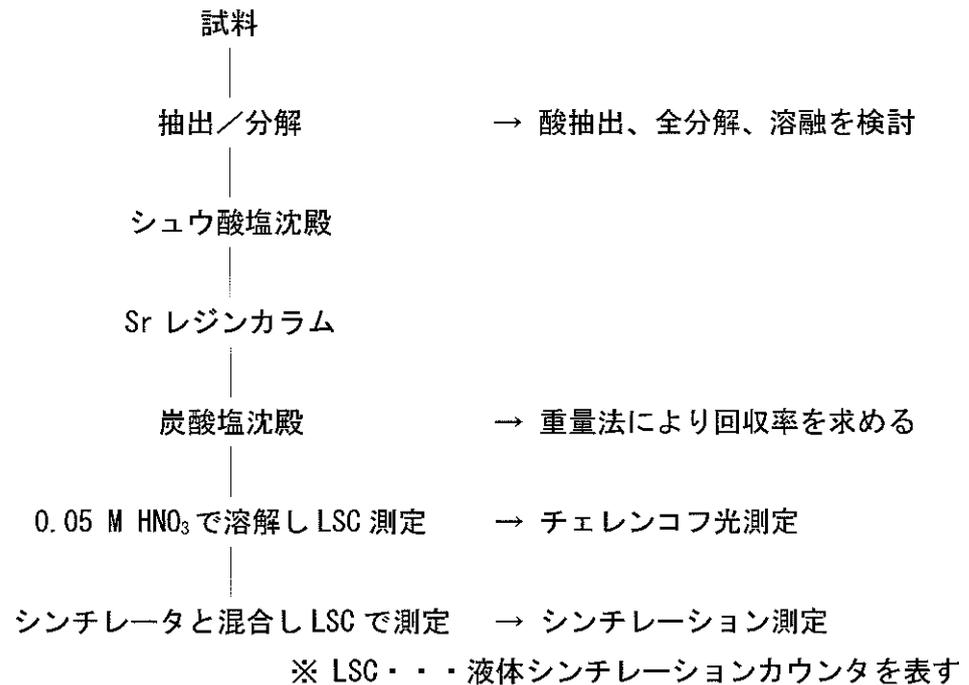


図 4.36 IAEA による土壤中ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法ドラフト案のフロー（概略）

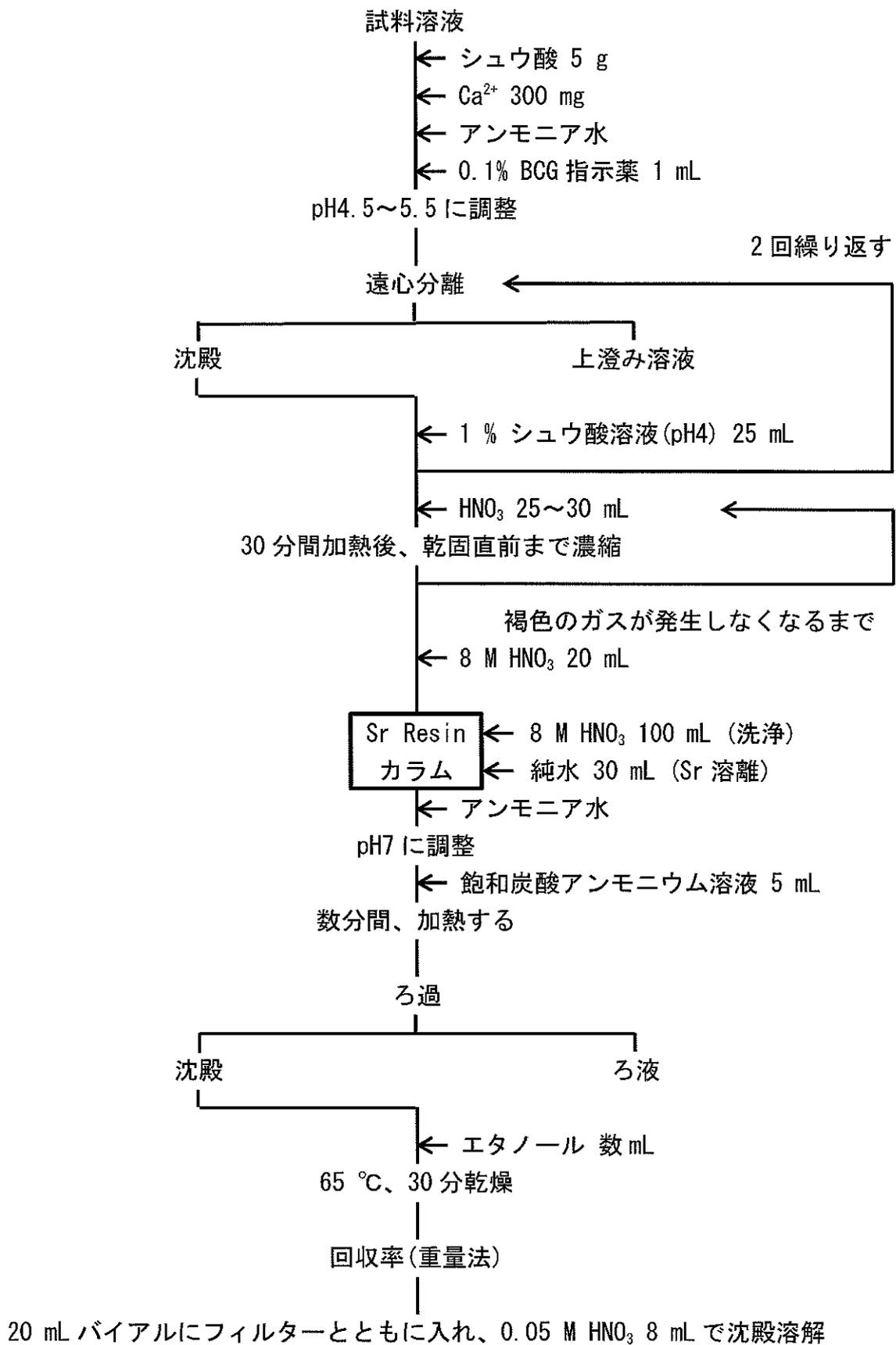


図 4.37 IAEA による土壤中ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法ドラフト案のフロー(詳細)

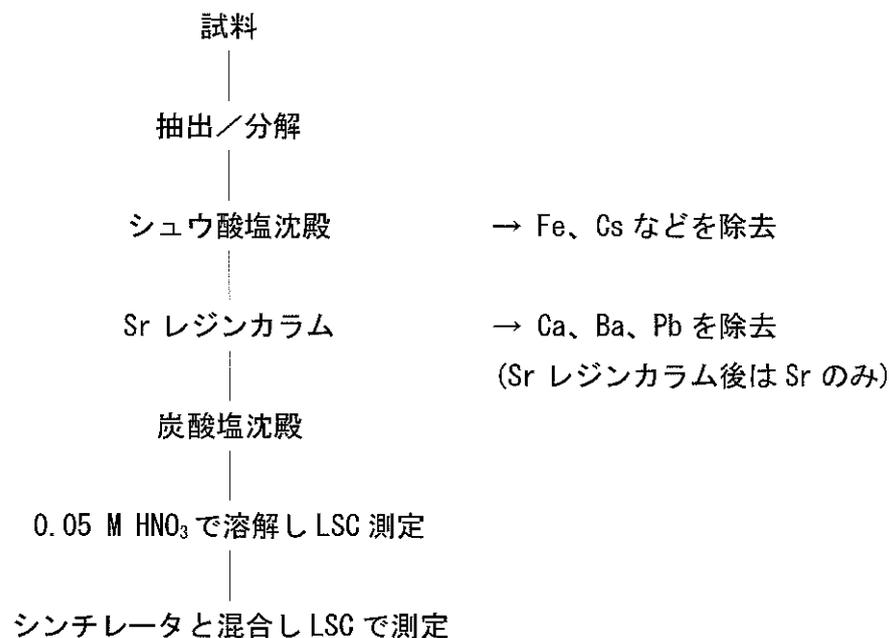


図 4.38 IAEA による土壤中ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法ドラフト案における妨害元素の分離

ドラフト案では放射性セシウムや多くの元素はシュウ酸塩沈殿による分離で取り除かれ、アルカリ土類金属や鉛などが Sr Resin によって取り除かれる。

また、ドラフト案では、試料からストロンチウム抽出する方法として、酸抽出、フッ化水素酸による全分解、溶融による全分解及びマイクロウェーブによる全分解の 4 法が候補となっている。放射性ストロンチウムの抽出条件を表 4.14 に示す。

表 4.14 IAEA ドラフト案における試料の抽出条件

酸抽出法	600 °Cで灰化した土壌 1 g 王水 ⇒ 硝酸 ⇒ 1M 硝酸
全分解法	600 °Cで灰化した土壌 1 g フッ化水素酸 (2 回繰り返す) ⇒ 硝酸 (3 回繰り返す) ⇒ 塩酸 + ホウ酸 ⇒ 硝酸 ⇒ 1 M 硝酸
溶融法	乾土 0.5 g 0.2 g NaNO ₃ / 0.2 g Na ₂ CO ₃ / 2.0 g LiBO ₂ / 0.1 g KI Fluxer Claisse、マッフル炉、ガスバーナーで溶融

ドラフト案では溶融法が IAEA 推奨の方法と位置付けられており、その理由として短時間で処理可能なこと、及び難溶性の放射性ストロンチウムが存在した場合でも過小評価とならないことを挙げている。溶融法に用いる装置として、fluxer と呼ばれる自動溶融装置(図 4.) やマッフル炉、ガスバーナーのいずれを使用しても良いとされている。処理時間が最も短い方法はガスバーナーによる溶融であるが、fluxer を使用した溶融でも 1 時間程度で処理可能とされている。

なお、マイクロウェーブ分解装置による全分解法については、分解中に分解容器の変形が見られることが分かった。

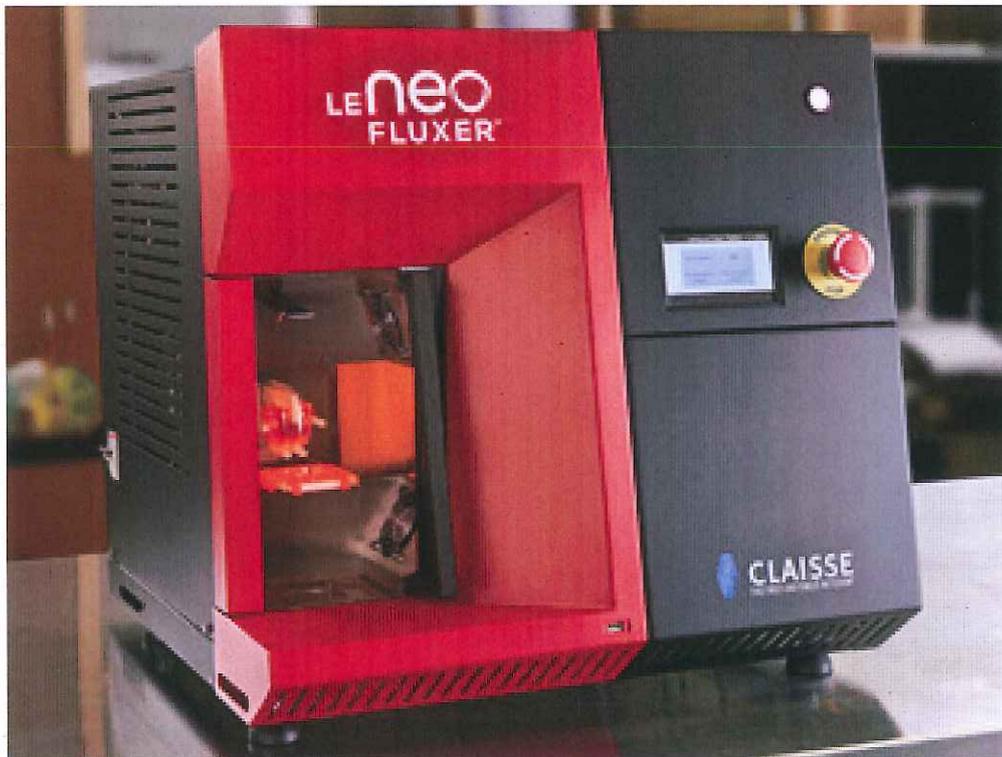


図 4.39 自動溶融装置の例

(<http://www.claisse.com/leneo-automatic-electric-fluxer-fusion-xrf-aa-icp.php> より引用)

ドラフト案による分析と並行して、現行の測定法で土壌試料の分析を行った。分析法のフローを図 4.40 に示す。

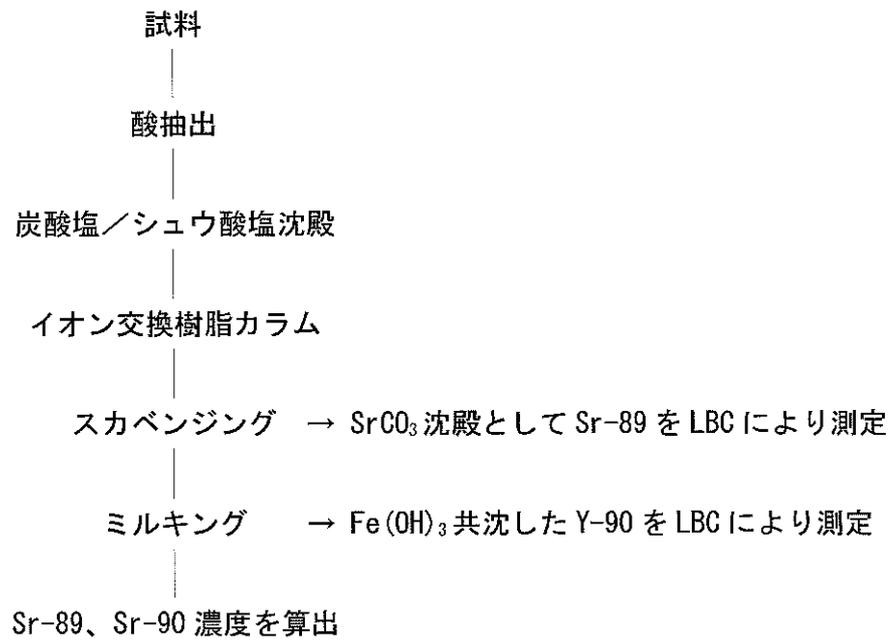


図 4.40 現行の分析法のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 分析法のフロー

土壌試料の分析結果を
表 4.15 及び表 4.16 に示す。

表 4.15 土壌試料をドラフト案により分析した際のストロンチウム回収率

試料*	抽出法	回収率 (%)
Soil (bottle 1)	酸抽出	87
	全分解	86
	溶融	76
Soil (bottle 2)	酸抽出	91
	全分解	83
	溶融	81
Soil (bottle 3)	酸抽出	85
	全分解	85
	溶融	73
Soil (bottle 4)	酸抽出	81
	全分解	85
	溶融	77
Soil (bottle 5)	酸抽出	82
	全分解	87
	溶融	78

* bottle1~3 の土壌試料は $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ が概ね 5、10、20 のもの、bottle4 は $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ が概ね 5 であり放射能濃度が他と比較して低いもの、bottle5 は $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ が概ね 5 であり加熱処理されたものである。

表 4.16 IAEA Method Validation による土壌試料の分析結果

試料名	分析法	試料分解法	⁹⁰ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比	⁹⁰ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比
Soil (bottle 1)	IAEA Draft manual	酸抽出 全分解 溶融	9080 ± 220 9960 ± 260 9670 ± 490	0.92 ± 0.02 1.01 ± 0.03 0.98 ± 0.05	1820 ± 88 1920 ± 88 1620 ± 150	1.00 ± 0.05 1.06 ± 0.05 0.89 ± 0.08
	従来法	酸抽出	9770 ± 180	—	1820 ± 34	—
	従来法	酸抽出	10100 ± 180	—	1760 ± 34	—
	IAEA Draft manual	酸抽出 全分解 溶融	10800 ± 230 11700 ± 280 11800 ± 470	0.96 ± 0.02 1.04 ± 0.02 0.96 ± 0.04	1010 ± 90 831 ± 91 1070 ± 140	1.04 ± 0.09 0.86 ± 0.09 1.14 ± 0.15
Soil (bottle 2)	従来法	酸抽出	11500 ± 150	—	964 ± 25	—
	従来法	酸抽出	10700 ± 160	—	970 ± 26	—
	IAEA Draft manual	酸抽出 全分解 溶融	19200 ± 300 20900 ± 340 20200 ± 610	0.97 ± 0.02 1.08 ± 0.02 1.03 ± 0.03	981 ± 120 839 ± 110 806 ± 180	1.06 ± 0.12 0.91 ± 0.12 0.88 ± 0.19
	従来法	酸抽出	19700 ± 180	—	917 ± 25	—
Soil (bottle 3)	従来法	酸抽出	19300 ± 170	—	925 ± 24	—
	IAEA Draft manual	酸抽出 全分解 溶融	1230 ± 150 1150 ± 170 1230 ± 360	0.92 ± 0.12 0.92 ± 0.13 0.92 ± 0.28	200 ± 55 277 ± 51 * (215 ± 100)	0.93 ± 0.28 1.30 ± 0.23 1.02 ± 0.47
	従来法	酸抽出	1190 ± 63	—	208 ± 12	—
	従来法	酸抽出	1380 ± 64	—	218 ± 12	—

表 4.16 IAEA Method Validation による土壌試料の分析結果(つづき)

試料名	分析法	試料分解法	⁸⁹ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比	⁹⁰ Sr (Bq/kg 乾土)	従来法との比
Soil (bottle 5)	IAEA	酸抽出	8970 ± 230	0.86 ± 0.02	1900 ± 91	0.97 ± 0.05
	Draft	全分解	11100 ± 270	1.05 ± 0.03	2050 ± 89	1.08 ± 0.05
	manual	溶融	10700 ± 470	1.05 ± 0.05	2370 ± 140	1.23 ± 0.07
	従来法	酸抽出	10400 ± 190	—	1920 ± 34	—
	従来法	酸抽出	10400 ± 190	—	1960 ± 35	—

誤差は計数誤差を示した。

分析供試量は抽出法及び全分解法は 1 g 乾土、溶融法は 0.5 g 乾土、従来法は 2 g である。

回収率はいずれの試料及び抽出方法でも 70%を超えており、問題はないと考えられた。

ドラフト案によるストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 の分析結果は、従来法による分析結果とおおむね一致しており、検討した分離精製方法は放射性ストロンチウムを分離精製する方法として適用できると考えられた。

この Sr Resin による分離精製方法は土壌への適用が可能であることから、過去の環境試料測定法調査の経験によれば、他の環境試料への適用も可能であると考えられた。

4.3.9 自動分析装置による迅速法の検討

(1) 自動分析装置について

放射性核種自動分析装置（以下「自動分析装置」という。）は株式会社柴崎製作所と日本分析センターが共同で開発した灰化済みの食品試料に含まれるストロンチウム 90 を自動的に分析する装置である。自動分析装置の概略を図 4.41 に示す。

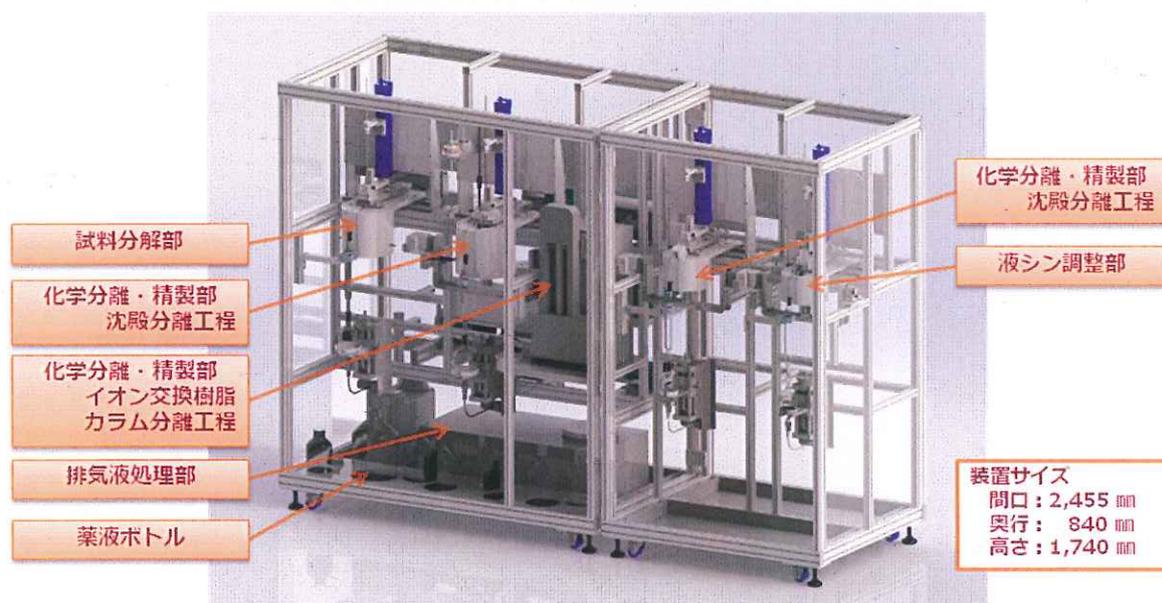


図 4.41 自動分析装置の概略

同装置は試料分解部、化学分離・精製部、液体シンチレーション測定のための試料調製部及び測定部から構成される。

灰試料を分取したフラスコは試料分解部に接続され、自動的に硝酸が添加された後、あらかじめ設定されたプログラムに従って加熱される。灰試料が酸分解し、酸分解された試料は塩酸に溶解され、化学分離・精製部へ送られる。

化学分離・精製部では炭酸塩沈殿及びシュウ酸塩沈殿分離がなされる。現行の分析法では炭酸塩沈殿の回収には遠心分離を用いるが、装置の大型化を防ぐために自動分析装置ではろ過により沈殿と上澄み溶液を分離する。炭酸塩は塩酸に溶解され、シュウ酸塩沈殿が調製される。現行の

分析法では、電気炉による灰化でシュウ酸塩を分解するが、装置の大型化を避けるため、自動分析装置ではシュウ酸塩沈殿は硝酸と過酸化水素水により湿式分解される。シュウ酸塩分解物は乾固し、塩酸に溶解される。その後、溶液はイオン交換樹脂カラムによる分離工程に移送される。

イオン交換樹脂カラムによる分離工程では、現行の測定法に準じてカルシウムやバリウムなどが取り除かれ、ストロンチウムが精製される。ストロンチウムを含む溶離液は乾固された後、少量の塩酸に溶解され、液体シンチレーション測定のための試料調製部へ移送される。

液体シンチレーション測定のための試料調製部では、試料に鉄担体を添加した後にアンモニアが添加され、水酸化鉄沈殿が調製される。この水酸化鉄沈殿にイットリウム 90 が共沈し、イットリウム 90 が取り除かれる（スカベンジング）。

この試料の酸分解からスカベンジングまでの工程は現行の測定法に準ずる方法となっており、装置オペレーターは灰試料をフラスコに分取して自動分析装置に取り付け、装置の運転を開始するだけで、自動的に分析を行うことができる。1 試料当たり、自動分析装置による分離精製はおおむね 24 時間程度で完了する。

(2) 自動分析装置による環境試料の分析

自動分析装置の環境試料への適用性を検討するため、種々の環境試料を自動分析装置により分析し、ストロンチウムの回収率を確認した。結果を表 4.17 に示す。

表 4.17 自動分析装置による環境試料分析時の回収率

工程		回収率 (%)					
		精米	玄麦	大根	鮭	ワカメ	牛乳
試料分解		100	98	100	100	96	100
分離 精製	炭酸塩	94	95	100	100	97	100
	シュウ酸塩	96	93	100	100	88	100
	イオン交換	95	82	95	89	87	100

自動分析装置によるストロンチウム 90 分析における回収率はいずれも 80%以上と良好で、環境試料への適用も可能であることが分かった。

続いて自動分析装置の妥当性を確認するために、日本分析化学会が頒布している魚類認証標準物質(JSAC0785、魚骨、100mL 容器入り)を分析した。自動分析装置の分析結果と比較するため、分析技術者による現行の分析法を並行して実施した。結果を表 4.18 に示す。

表 4.18 自動分析装置による分析結果

分析方法	分析結果 (Bq/kg 灰)
技術者	11.5 ± 0.58
	12.7 ± 0.61
自動分析装置	11.8 ± 1.6
	13.0 ± 1.6
認証値	11.5 ± 1.2

分析結果の誤差は計数誤差を示した。

認証値には拡張不確かさ (k=2) を付した。

分析供試量は技術者は 10 g、自動分析装置は 5 g である。

この結果より、自動分析装置と技術者による分析結果に有意な差はなく、さらに認証値とも一致していることが分かった。現状では自動分析装置は灰試料のみの適用となるが、迅速に分離精製ができることが分かった。

4.3.10 緊急時の放射性ストロンチウム分析法のまとめ

緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討に資するため、目標とする分析所要時間や検出下限値、分離精製法、測定方法について調査・検討を実施した。

目標とする分析所要時間は、IAEA が開発した牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法や開発中の土壌の分析法の検討した結果、1 日程度で放射性ストロンチウムの分析が完了することを踏まえ、目標とする分析所要時間は 1 日程度とした。その時の検出下限値は Sr-89/Sr-90 比が 3 程度の場合は Sr-89 で 0.9 Bq/sample、Sr-90 で 0.6 Bq/sample、Sr-89/Sr-90 比が 12 程度の場合は Sr-89 で 0.4 Bq/sample、Sr-90 で 10 Bq/sample であることを踏まえ、目標の検出下限値とすることとした。

分離精製方法として、抽出クロマトグラフィーと固相抽出ディスクによる方法について検討を行った。抽出クロマトグラフィーによる分離精製方法は IAEA が牛乳中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法の分離精製法として採用されており、土壌中のストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 迅速分析法にも採用が検討されている。当該ドラフト案に従ってストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 が添加された土壌を分析した結果、従来法である放射能測定法シリーズによる分析結果と一致した。これより、抽出クロマトグラフィーによる分離精製は所要時間も短く、分離精製方法として優れていることを確認した。固相抽出ディスクによる分離精製は鉛やビスマスなどの除染が不十分であることから、使用時には十分注意が必要と考えられた。

測定方法としては、液体シンチレーションカウンタ、ベータ線スペクトロメータ、ICP-MS について検討を行った。液体シンチレーションカウンタは放射平衡を待たずに、チェレンコフ光測定及びシンチレーション測定を行うことで、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を定量でき、迅速な分析方法に適するものと考えられた。

ベータ線スペクトロメータはその利用例は多くないものの、ストロンチウム 89 及びストロンチウム 90 を個別に定量できることが分かった。

ICP-MS についてはタイプの異なる 2 つのシステムについて検討した。何れの方法も迅速にストロンチウム 90 を測定できる方法であった。

放射能測定法シリーズに準じた方法で灰化した食品試料中のストロンチウム 90 分析を行うことができる自動分析装置について検討を行った。種々の食品試料を自動分析装置により分析を行ったところ、ストロンチウムの回収率は 80%以上であった。日本分析化学会が頒布している魚類認証標準物質 (JSAC0785、魚骨、100mL 容器入り) を自動分析装置により分析し、技術者による結果と比較したところ、両者に有意な差は無かった。また、自動分析装置による結果は認証値と一致していた。

本年度の検討より、抽出クロマトグラフィーを用いた分離精製及び液体シンチレーションカウンタによる測定を組み合わせることで、24 時間程度で結果を得ることができることを確認した。本年度は土壌試料のみの検討であることから、今後、多様な環境試料への適用性や試料からのストロンチウム抽出方法について検討するとともに、クロスチェックなどによる作成した分析法マニュアル原案の妥当性確認が必要である。

4.4 放射能測定法シリーズ改訂原案に係る意見について

放射能測定法シリーズ改訂原案の作成及び検討実験を実施するに当たって、マニュアル改訂案等の主な利用者となる地方公共団体の分析機関に対して、原子力施設等放射能調査機関連絡協議会を通じて、2回意見聴取した。

第1回（平成27年12月15日時点）

『No.17 連続モニタによる環境γ線測定法の改訂』について

1) マニュアルの構成

○現行マニュアルは冒頭「固定式連続モニタ」、「気象観測データ等との比較対照によって異常の早期発見と原因調査に役立つ」と記載があり固定型の機器を対象としているが、これに可搬型や移動式を含めると内容がより複雑なものとなる。緊急時と平常時の使用目的や使用方法によっても記載内容が変わると考えられ、作成にあたっては、記載内容を整理し、必要に応じて章立て、マニュアル自体を分割するなどわかりやすいマニュアルとなるよう、記載方法に十分な検討と配慮を求める

○標準的な仕様（基本仕様）を掲載してはどうか

※仕様については一覧表にまとめてはどうか

※大気常時監視マニュアルの標準仕様の記載が参考になる

※走行サーベイや可搬型モニタリングポスト、簡易電子式線量計なども含めたものとする

○5章は固定式、移動式を分けたうえで、それぞれについて留意事項などを記載した方がよい

2) 検出器

○次の検出器について追加できないか

・ Ge 半導体検出器（使用している自治体あり）

・ SrI₂シンチレーション検出器（近年市販された）

※いずれもスペクトル解析が可能

○掲載順は利用実績の多い順としてはどうか

3) 構造、機能

○次の項目を記載してはどうか

・ 建物、機器設置における耐震設計

・ 津波を考慮した場所の設定

・ 回線の二重化

○G(e)関数を用いた線量測定法についてより具体的に記載してはどうか

※DBM方式などとの関係の理解が必要

※各メーカーの採用している演算方法について解説が必要

○テレメータシステムについて、伝送方法など現状に合わせた記載とすること

4) 可搬型モニタリングポスト

○次の事項の記載が必要である

①検出器高さ

<ul style="list-style-type: none"> ②測定範囲 ③測定間隔、伝送間隔
<p>5) 簡易電子式線量計</p> <ul style="list-style-type: none"> ○各自治体で整備が進められている機器であり、実用例、改善点の考証が不十分であり、整備済みの機器だけを考慮して作成することで、内容が偏ったものにならないよう注意が必要である
<p>6) 走行サーベイ</p> <ul style="list-style-type: none"> ○次の事項の記載が必要である <ul style="list-style-type: none"> ①検出器および車両内部の汚染対策（サーベイ中に環境試料採取などの車外での活動を行うことも想定されるため、汚染した人や物への配慮が必要） ②検出器高さ ③1 m 高さへの換算方法 ④測定範囲 ⑤測定間隔、伝送間隔 ⑥走行速度 ⑦GPS の精度 ⑧車による遮へい ○モニタリングカー、KURAMA 以外に、ラジプローブ、PEGASUS などのシステムがあり、例示に加えてはどうか ○停車測定を行う場合があるため、走行測定と区別が必要である
<p>7) 解析</p> <ul style="list-style-type: none"> ○スペクトル解析において、事故影響の把握と評価の方法について記載を求める ○NaI 以外の検出器も加えてはどうか
<p>8) 解説</p> <ul style="list-style-type: none"> ○できる限りわかりやすい記述を期待する ○異常値の原因として「雷雨」ではなく「落雷」として整理してはどうか ○構成例、設置例を示しながら、機器の解説などを加えてはどうか ○各装置について、外観例、写真等を加えてはどうか ○単位の換算方法（Gy から Sv）について根拠を加え、わかりやすく記載
<p>9) その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ○記載の古い箇所の修正が確実に実施されるよう期待する ○航空サーベイはどう扱うのか

『No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の改訂』について

1) 設置

- 汚染対策について詳細に書かれることを期待する
- 手順について、測定前の準備の項を設け、準備物や機器の冷却について記載してはどうか

2) 測定機

- Ge に限定せず、必要な性能を記載し、これを満たすことができれば in-situ 測定に使用できるよう記載してはどうか
- ※SrI シンチレーション検出器を用いた機器の開発例があり、参考に記載してはどうか

3) 土壌採取

- スクレイパープレートによる採取をどのような位置づけで行うのかの整理が必要
- ※相当の労力を要し、現地測定という in-situ 測定の趣旨に反する
- 現行マニュアルの「フルエンス率の比から算出する方法」について東電 1F 事故の際の適用について検証し、記載すべき
- 土壌密度の確認、評価方法を記載すべき

4) 解説

- 利用しているのは市販の解析ソフトが一般的であり、これらの解説を加え、操作マニュアルを添付できないか検討してはどうか

5) その他

- 移動中に電力供給する場合、安定的な電力供給が可能なハイブリット車や電気自動車が有効である
- 汚染対策について、通気冷却の機種に関しては吸気口にフィルターを設置する例がある
- 運搬時の汚染対策も記載が必要である
- 測定時間について、サーベイメータによる線量率測定を現地で行い、初期設定できるよう標準化できないか
- ※高線量区域で作業員が長時間滞在することを防ぐため、なるべく速やかに作業できるようにすべき
- ※高線量区域 (10 μ Sv/h あるような区域) では5分程度で十分な情報が得られる
- デットタイムに関する記載を高線量区域の測定事例として記載できないか

『緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討』について

1) 検討条件の設定

- 目的に応じて検出下限値や検出範囲、分析時間などが決まるため、どんな目的に対して用いる方法なのか整理が必要である
- 緊急時に本当に必要な試料 (Ge による核種分析だけでは不十分なもの) に限定してはどうか
- 測定法、測定機器の長所、短所の整理を本業務内でできないか
- 評価の際、作業効率からの視点も迅速化ということでは重要である
 - ※一度に処理できる試料数など
- 現行測定法シリーズの行程の省略化等で達成できる可能性があるのではないか

2) その他

- 高濃度試料を扱った際のコンタミ防止について考慮が必要 ※特に自動分析装置
- Sr-89 測定の必要性について整理、記載すべき

改訂全般について

- 部分改訂とするのではなく、基本的に全面改訂するよう検討してほしい
- 「～することが望ましい」との記載がある場合には、その適用の可否による影響についてきちんと明記してほしい

『No. 17 連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂』について

1) マニュアルの構成

- 改訂（案）の記載は解説を主体としているが、本書に基づき実務担当者が環境 γ 線測定を的確に実施できる手順書となるような記載方法および構成によって作成すること
- 第1回検討委員会の資料に基づく意見でも述べたとおり、今回の改訂で固定式と可搬式の装置を合わせて記載したことで内容が非常に分かり難いものとなっており、第3章以降の記述の構成について見直すこと
- 構成の見直しに際しては、「固定式と可搬式」の区分に加え、「平常時と緊急時」の違いにも考慮が必要である
- 各章に使用されている見出しがばらばらであり、記載順や語句を統一すべきである
- 温度特性など類似の記載が各章に点在しているため、構成の見直しに合わせて記載場所を整理して見出しにあったものとする必要がある
- 同じ区分であると思われる留意事項等の記載が、機器によっては別の章となったり、解説に記載されたりしており、上記と同様に記載場所と内容の見直しが必要である

2) 機器類に関する記述

- 測定のために照らした具体的な仕様例を示し、その機器に必要な性能、あるいは持っていることが望ましい機能を整理した記述とすべきである
 - ※簡易電子線量計については、国が仕様の考え方を示しており、これとの整合にも配慮が必要である
 - ※仕様例では、できる限り数値やその範囲などで示すべきであり、現状では電離箱についてしか詳細な記載がないため、その他の検出器についても記載が必要である
- 本マニュアルにおいて、測定システムのうち『どこまでを対象にしているのか（本書の適用範囲）』を明確にする（定義する）必要がある（具体的には、筐体や建築物の構造、テレメータシステムの機能、保守点検等についてであるが、様々な考え方があるため、最初に明確にしなければならない）
- 第1回検討委員会の資料に基づく意見で述べた事項のうち、耐震性能や回線の二重化などの災害対策の実施については、明確に記載すべき
- 局舎上に設置した検出器のデータから1m高さのデータを算出できないことは大きな問題であり、国の意向も確認しながら、必要に応じて追加の技術的検討や記載方法の検討が必要である

3) 解析と評価に関する記述

- 平常時、緊急時、事故後のそれぞれについて記載されたが、具体的な記述が必要であり、一部解説に記載はされたものの、東電事故の経験を踏まえて、プルーム通過時や通過後の連続モニタの変化など多くの知見の掲載を期待する

○単位の換算の記載については、本書を見ながら測定で得られた結果を実際に換算できるように、その手順を明確にしておく必要がある

4) その他

○スペクトル解析に関する記載がないが、早急に案を作成し、示されることを期待する

○「JIS原案作成のための手引き」では、「規格は、規格の利用者の立場に立って、分かりやすく、かつ、読みやすい文章であり、専門家でなくても理解できる」よう留意するとしており、主要な用語は本編とするが、本書の理解に必要となる基本的な用語についても解説において整理してはどうか

○用語の定義の記載を整理したほうがよい

『No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の改訂』について

1) 測定条件に関する記述

○測定時間の設置については、解説の記載からも計数率や線量率、デッドタイムを見て判断することが適当であり、それぞれこの程度であれば何分ぐらいに設定するといった具体的な記載が望ましい

2) 土壌の採取に関する記述

○土壌の採取と β の評価については、スクレイパープレートによる詳細な評価も必要だが、容易かつ簡易な方法によっておおよその数値を判断できる必要もあり、それらの方法も合わせて記載すべき

全般について

○No. 17 と No. 33 のマニュアルの記載方法や構成を統一するとともに、それぞれがわかりやすいものとなるよう十分検討すること

○統合するとした No. 20 空間 γ 線スペクトル測定法の取扱いは再検討する必要がある

4.5 現状調査

4.5.1 文献調査

文献調査を行って得られた主な文献を、参考資料2 調査文献リストに示す。

5. まとめ

原子力規制委員会では、環境放射能の水準を把握するための調査や、陸域、海域、空域の各種放射線モニタリングを実施している。また、都道府県、市町村、原子力事業者及び研究機関等、さまざまな主体が放射線モニタリングを実施している。これらの結果の精度を保つため、及び今後万が一原子力災害が発生した際に適切な放射線モニタリングを実施できるようにするためには、標準的な分析・測定手法を定義する必要がある。

本年度については、以下の項目について、業務を実施した。業務に当たっては、専門的知見を持つ者から意見を聴取する等、技術的妥当性に留意するとともに、適宜、原子力規制庁担当官と調整を行った。

- ・ 環境 γ 線測定法の見直し
- ・ ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の見直し
- ・ 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討
- ・ 報告書の作成

(1) 環境 γ 線測定法の見直し

測定法 No. 17 連続モニタによる環境 γ 線測定法を見直し、改訂案を作成した。改訂案を作成するに当たっては、簡易型電子線量計、走行サーベイ等、検出器の測定高に関する調査・検討及び各機関の整備状況に関する調査を実施した。また、測定単位、連続モニタの設置地上高における換算方法、走行サーベイシステムにおける車内外補正方法に留意して、改訂案を作成した。

(2) ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の見直し

測定法 No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法を見直し、改訂案を作成した。改訂案の作成に当たっては、校正・測定可能範囲に関する調査・検討、シミュレーション効率に関する調査・検討を実施した。

(3) 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討

現行の放射性ストロンチウム分析法については、測定法 No. 2 放射性ストロンチウム分析法が存在するが、化学分析・測定に時間を要するため緊急時の運用には不向きであり、より迅速に定量できる手法の開発が望まれていることから、その検討を行った。

検討に当たっては、分析所要時間や検出下限値、抽出クロマトグラフィーによる分離・精製、固相抽出ディスクによる分離・精製、液体シンチレーションカウンタによる測定、ICP-MS による測定、自動分析装置による迅速法の検討を実施した。

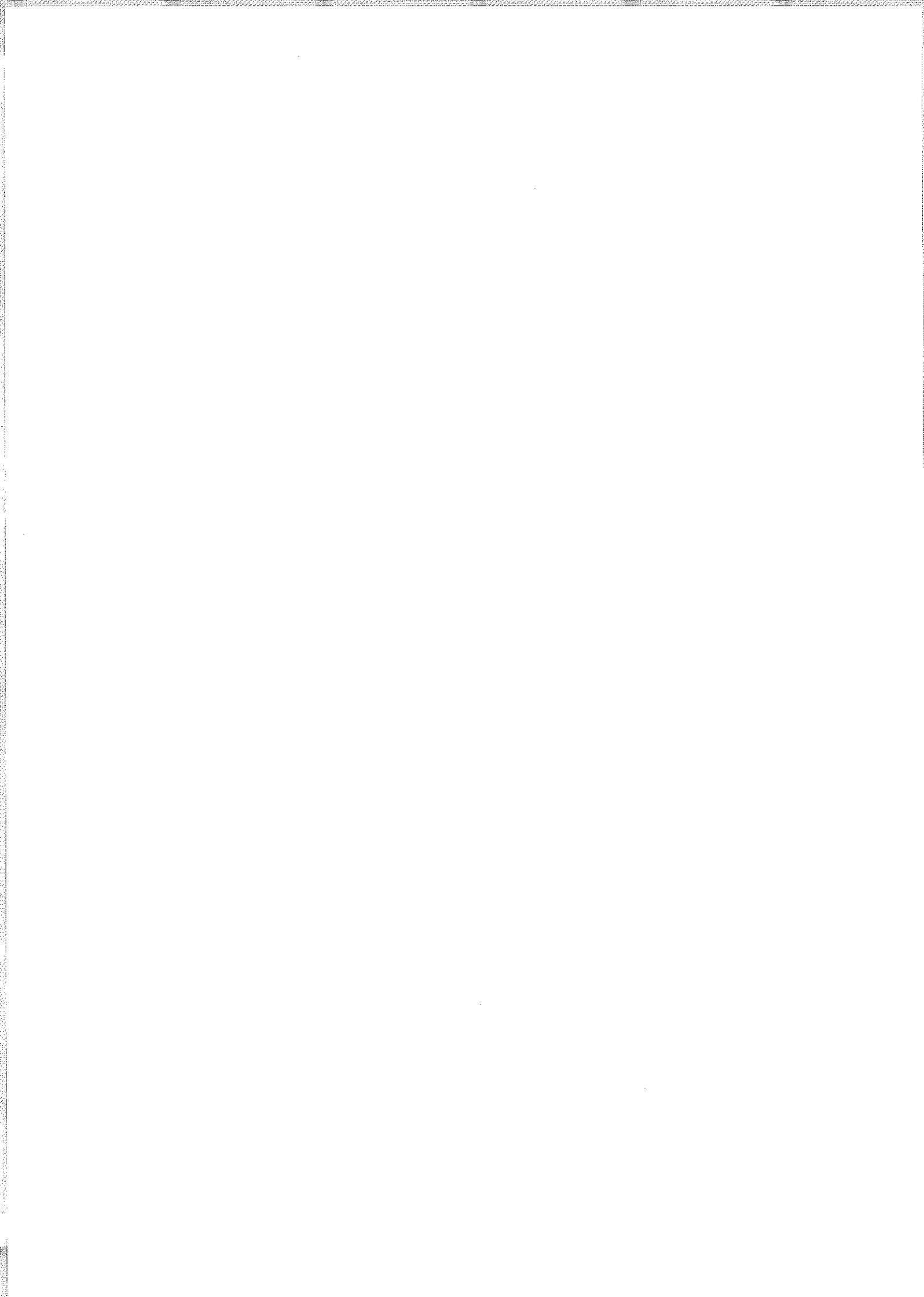
(4) 報告書の作成

(1)環境 γ 線測定法の見直し、(2)ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の見直しについては、検討結果を取りまとめるとともに、改訂案を作成した。(1)～(2)の改訂案を作成するに当たっては、JIS 原案作成のための手引(第16版)を参考にした。また、(3)緊急時

の放射性ストロンチウム分析法の検討については、マニュアル改訂に必要な検討項目を取りまとめた。マニュアル改訂案の主な利用者となる地方公共団体の分析機関に対して、原子力施設等放射能調査機関連絡協議会を通じて、意見聴取して、マニュアル改訂案に反映した。その他に、マニュアル改訂及び検討に必要な事項を調査するために、国内の分析機関を訪問するとともに、文献を入手して調査を実施した。

本業務を実施するに当たっては、学識経験者等からなる委員会「放射能測定法シリーズ改訂検討委員会」を設置し、検討内容及び検討結果、マニュアル改訂案等について、総合的な評価・検討を行った。

参考資料 1 平成 27 年度 放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨



平成 27 年度 第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

1. 日時 平成 27 年 11 月 4 日(水) 10 時 00 分～12 時 00 分

2. 場所 航空会館 201 会議室

3. 出席者(敬称略)

委員長	中村尚司	東北大学
委員	阿部幸雄	福島県環境創造センター
	木村秀樹	青森県原子力センター
	黒澤忠弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	斎藤公明	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	三枝純	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	玉柿励治	福井県原子力環境監視センター
	長岡鋭	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	藤田博喜	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	(大野剛	学習院大学 欠席)

原子力規制庁 竹田雅史、大平智章、及川真司

オブザーバー 応用光研工業(株)(鎌田貴志)、キャンベラジャパン(株)(武藤儀一、鈴木考宏、堤大輔)、セイコー・イージーアンドジー(株)(齋藤正喜)、日立アロカメディカル(株)(吉田信司、中嶋貴士)、富士電機(株)(伊藤勝人)

事務局 公益財団法人 日本分析センター

上原理事長、池内理事、磯貝放射能分析事業部長、伴場、新田、前山、佐藤、松田、田中、伊藤、小沼

4. 議題

- (1) 放射能測定法シリーズ改訂の実施計画及び現状調査について
- (2) その他

5. 配付資料

- | | |
|--------|---------------------------------------|
| 資料 1-1 | 平成 27 年度放射能測定法シリーズ改訂検討委員会 委員名簿 |
| 資料 1-2 | 平成 27 年度放射能測定法シリーズ改訂事業について |
| 資料 1-3 | 連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂について |
| 資料 1-4 | ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の改訂について |
| 資料 1-5 | 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討 |
| 資料 1-6 | マニュアル作成手引きの考え方について(案) |
| 参考資料 1 | JIS 原案作成のための手引き(第 16 版)(抜粋) |
| 常備資料 1 | 放射能測定法シリーズ |
| | ・ No. 2 放射性ストロンチウム分析法 |
| | ・ No. 17 連続モニタによる環境 γ 線測定法 |
| | ・ No. 20 空間 γ 線スペクトル測定法 |
| | ・ No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法 |

6. 議事概要

- (1) 議事に先立ち、日本分析センター上原理事長より、本委員会の委員長を中村委員に依頼した。
- (2) 事務局から資料 1-2 に基づき、平成 27 年度放射能測定法シリーズ改訂事業について説明があった。
- (3) 事務局から資料 1-3 に基づき、連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂について説明があり、以下の意見等があった。
 - ①放射能測定法シリーズ全体のマニュアルの構成等及び改訂時期について、委員より質問があった。マニュアルの構成等について、簡単な手引きを作成したいと事務局より説明があった。マニュアルは全部で 34 種類あるため改訂の優先順位を考えて、また、測定法シリーズ全体の構成については、本事業で作成される改訂案を参考にしたいと原子力規制庁より回答があった。
 - ②放射能測定法シリーズ No. 20「空間 γ 線スペクトル測定法」の取扱いについて、委員より質問があった。今回の改訂において、No. 20 から抜粋して No. 17 と統合するため、No. 20 の今後の取扱いについて、原子力規制庁と相談したいと事務局より回答があった。
 - ③空間放射線量率とはどのようなものなのか、環境条件によってどのように変化するのかなどについて、詳細を解説に載せてほしいと委員より意見があった。
 - ④空間線量率に関する単位、特に Sv と Gy の関係について、明瞭に記載してほしいと委員より意見があった。
 - ⑤連続モニタの測定値の単位について、Sv と Gy の両方を出すよう要求した方がよいと委員より意見があった。また、使用する機種に依存することもあるので、メーカー等に情報提供を依頼してマニュアルに反映すると事務局より回答があった。
 - ⑥マニュアルを統合する際には、以前に記載された重要な情報が消失しないようにと委員より意見があった。
 - ⑦走行サーベイについて、マニュアルにどのような記載になるかと委員より質問があった。他の測定器と同様な記載になる予定であり、福島第一原子力発電所事故後の走行サーベイによる調査を参考に作成したいと事務局より回答があった。
 - ⑧マニュアルの序論の書き方によりマニュアルの方向性が決まると委員より意見があった。序論の内容について、事実関係を書く予定であり、今後の委員会で審議して頂きたいと事務局より回答があった。
 - ⑨マニュアルの書き方として「～すべき」という表現を用いるのかと委員より意見があった。放射能測定法シリーズをどのような位置付けにするのかは、原子力規制庁と相談したいと事務局より回答があった。
 - ⑩IEC 国際規格に環境放射線モニタリングに関する規格があるため、参考にしてほしいと委員より意見があった。
 - ⑪福島第一原子力発電所事故の際、モニタリングカーや連続モニタの表面に付着した放射性核種の取り扱いに苦慮したとの委員より意見があった。事故当時の経験を踏まえ、マニュアルに反映したいと事務局より回答があった。
 - ⑫現在、厳密に言えば DBM 回路は使用されていないため、G(E) 関数を詳細に記載するなど、マニュアル内での取り扱いに注意してほしいと委員より意見があった。メーカーに協力してもらい、マニュアルに反映すると事務局より回答があった。
 - ⑬連続モニタを設置する高さによる測定値の違いを詳しく書いた方がよいと委員より意見があった。
- (4) 事務局から資料 1-4 に基づき、ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の

改訂について説明があり、以下の意見等があった。

- ①効率シミュレーションの表現について、委員より質問があった。概要を本文に記載し、線源を用いる方法とシミュレーションの方法を比較した結果を解説に記載する予定であり、次回以降の委員会で議論して頂きたいと事務局より回答があった。
 - ②エネルギー校正を線量率の高低に分けて書くのかと委員より質問があった。現行のマニュアルを引き継ぎ、線量率の高低に分けて書くと事務局より回答があった。
 - ③ β 値の求め方、代表値、土質による違い等、状況に合わせた β 値の選択方法を載せてほしいと委員より意見があった。平均的な β 値を使えば測定値が得られ、 β 値は砂質以外の土質の違いによる影響はあまり受けないと委員よりコメントがあった。
 - ④福島第一原子力発電所事故後、in-situ 測定の意義について説明を求められたことがあったため、in-situ 測定及び他の測定のメリット・デメリットを載せてほしいと委員より意見があった。
 - ⑤マニュアルに Ge 半導体検出器による測定例が載っていることから、in-situ 測定の測定例も載せた方がよいと委員より意見があった。
 - ⑥ICRU53 レポートは Gy 単位だけを取り扱っているが、Sv についても評価してマニュアルに反映した方がよいと委員より意見があった。
 - ⑦核データの更新に何を使用するのかと原子力規制庁より質問があった。ENSDF や Table of Isotopes 第 8 版を使用する予定であると事務局より回答があった。
 - ⑧IEC 国際規格にゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法に関する規格があるため、参考にしてほしいとの委員より意見があった。
- (5) 事務局から資料 1-5 に基づき、緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討について説明があり、以下の意見等があった。
- ①緊急時の Sr 測定法マニュアルを作成するのかと委員より質問があった。今年度は検討まででマニュアル原案は作成しないと事務局より回答があった。
 - ②ICP-MS を用いた測定法において、質量分析計の仕様、検量線作成に用いる標準物質(安定元素または⁹⁰Sr) について、委員より質問があった。事務局より、国内及び海外の現状調査を行い、一般的な方法を検討すると事務局から回答があった。
 - ③昨年度の委託調査報告書では、迅速分析法も考慮して現行のマニュアルについても改訂する方針だったが、現行マニュアルの改訂はどうなっているのかと委員より質問があった。緊急時測定法には平常時の測定法にも使用できる箇所があり、現行マニュアルには発煙硝酸法等が記載されていることから、今後は安全で簡単な測定法を作成してもらいたいと原子力規制庁より回答があった。
 - ④検出下限値をどのように設定するのかと委員より質問があった。次回の委員会で審議したいと事務局より回答があった。
 - ⑤マニュアルの本文に分析操作の意味、留意点ができるだけわかるように書いてほしい。また、マニュアルには、非常によい条件での検出下限値である分析目標値より、通常の条件で測定した場合の定量可能レベルを記載してほしいと委員から意見があった。
 - ⑥対象試料について、委員より質問があった。委員会等で意見を頂いて決めたいと事務局より回答があった。

(6) 事務局から資料1-6に基づき、マニュアル作成手引きの考え方について(案)について説明があった。

7. その他

日程調整はできるだけ早めを実施して、審議時間を多くとれる午後に委員会を開催してほしいと委員より意見があった。

以上

平成 27 年度 第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

1. 日時 平成 28 年 1 月 14 日(木) 13 時 30 分～16 時 40 分

2. 場所 東京国際フォーラム G402 会議室

3. 出席者(敬称略)

委員長	中村尚司	東北大学
委員	阿部幸雄	福島県環境創造センター
	大野剛	学習院大学
	木村秀樹	青森県原子力センター
	黒澤忠弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	斎藤公明	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	三枝純	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	玉柿励治	福井県原子力環境監視センター
	長岡鋭	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	藤田博喜	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力規制庁 門倉真士、竹田雅史、大平智章

オブザーバー 応用光研工業(株)(鎌田貴志)、キャンベラジャパン(株)(鈴木考宏、堤大輔)、
セイコー・イージーアンドジー(株)(板津英輔)、日立アロカメディカル(株)
(吉田信司、中嶋貴士)

事務局 公益財団法人 日本分析センター
上原理事長、池内理事、磯貝放射能分析事業部長、
伴場、新田、前山、太田、松田、田中、小沼

4. 議題

- (1) 第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について
- (2) 原子力施設等放射能調査機関連絡協議会からのご意見について
- (3) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について
- (4) その他

5. 配付資料

- | | |
|----------|---------------------------------------|
| 資料 2-1 | 平成 27 年度放射能測定法シリーズ改訂検討委員会委員名簿 |
| 資料 2-2 | 平成 27 年度第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨 |
| 資料 2-3 | 測定法シリーズ改訂に関する放調協意見 |
| 資料 2-4-1 | 連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂について |
| 資料 2-4-2 | 連続モニタによる環境 γ 線測定法 |
| 資料 2-5-1 | ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の改訂について |
| 資料 2-5-2 | ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法 |
| 資料 2-6 | 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討 |
| 常備資料 | 放射能測定法シリーズ |
| | ・ No. 2 放射性ストロンチウム分析法 |
| | ・ No. 17 連続モニタによる環境 γ 線測定法 |
| | ・ No. 20 空間 γ 線スペクトル測定法 |
| | ・ No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法 |

6. 議事概要

(1) 事務局から資料 2-2 に基づき、第 1 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨の説明があり、審議の結果、了承された。

(2) 事務局から背景説明がされた後、玉柿委員から資料 2-3 に基づき、放射能測定法シリーズ改訂に関する放調協意見について説明があった。事務局から現在の対応状況について、以下の回答があった。

①連続モニタ

- ・放調協からの意見については、おおむね対応済みである。
- ・ただし、ヨウ化ストロンチウムシンチレーション検出器等の要望された機器については、事例が少ないこと、モニタリングに実証されていないことから、対応していないところがある。

②in-situ 測定

- ・放調協からの意見については、おおむね対応済みである。
- ・まだ検討実験が終了していないところがあるため、対応中の箇所がある。
- ・ただし、市販ソフトウェアの操作マニュアルを添付すること等については、放射能測定法シリーズの趣旨から対応しない予定である。

③ストロンチウム分析

- ・放調協からの意見を考慮し、検討実験を実施していきたい。

(3) 事務局から資料 2-4-1 及び資料 2-4-2 に基づき、連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂について説明があり、以下の意見等があった。

①連続モニタの設置高さの違いによる評価方法、走行サーベイシステム及び測定データの線量換算について本委員会で議論してほしいと原子力規制庁より意見があった。

②連続モニタの設置高さの違いによる評価方法について、地上数十メートルの高所を除けば、ある程度補正ができるのではないかと委員より意見があった。また、過去の研究成果があるので、データを事務局に送付して評価方法を検討したほうがよいと委員より意見があった。

③走行サーベイシステムの車内タイプについては、車内と車外で測定した結果を測定して換算係数を求めている。ただし、空間線量率が低い地域では換算係数がばらつくが仕方ないと委員より意見があった。

④原子力規制庁で購入したモニタリングカーについて、線源を用いた車両による遮へい実験を行ったことがあると原子力規制庁より意見があった。それらの実験結果について、データを事務局に送付して調べてもらうほうがよいと委員より意見があった。

⑤線量には、吸収線量、1 cm 周辺線量当量、実効線量など様々な単位があるため、放射線障害防止法、原子力規制法などの法令でどのように取り扱われているか参考にしたほうがよいと委員より意見があった。

⑥マニュアルの使用者ができるだけ判断する事項が少なくなるように、マニュアルを作成する際に必要であると委員より意見があった。

⑦マニュアルを使用する対象者を明記することも検討してはどうかと委員より意見があった。

⑧連続モニタについて、機器の種類などが様々あることから、報告様式例を記載してはどうかと委員より意見があった。

⑨マニュアル中の使用頻度を考慮して、用語集で取り上げる用語を選択してはどうかと委員より意見があった。

- ⑩No. 20「空間 γ 線スペクトル測定法」にあるスペクトル解析を記載しないのかと委員より意見があった。スペクトル解析の部分を章立てして追記すると事務局より回答があった。
- ⑪スペクトルが取得できる連続モニタ機器が多くなっているので、スペクトル情報を用いた評価方法を充実した記載にしたかどうかと委員より意見があった。
- (4) 事務局から資料 2-5-1 及び資料 2-5-2 に基づき、ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の改訂について説明があり、以下の意見等があった。
- ①マニュアル内におけるシミュレーション計算による校正の位置付けを明確にする必要があると委員より意見があった。
- ②シミュレーション計算を行う際に、ゲルマニウム半導体検出器の不感層の評価が非常に重要であり、正確に評価を行うには、コリメートした放射線を照射してデータを取得するなど作業が煩雑であると委員から意見があった。
- ③シミュレーション計算で用いるコードには、使用権など明確でないものもあるため、マニュアルにコードを記載する場合には注意する必要があるとメーカーより意見があった。
- ④スクレーパープレートを用いた β 値の算出する方法については、どの程度のデータをとればよいか、また緊急時にはスクレーパープレートで土壌を採取することと、スペクトルを取得することについて、どちらを重要視するか整理する必要があると委員より意見があった。
- ⑤測定上限に関する検討に用いた機器特性は同じものかと委員より質問があった。ゲルマニウム半導体検出器については、特性が異なるものも含まれているため、Cs-137 レスポンスを評価して特性による影響を配慮したと事務局より回答があった。
- ⑥in-situ Ge のデッドタイムによる上限の検討を行う際に、線源とパルサーを用いた実験が一般的であると委員より意見があった。
- (5) 事務局から資料 2-6 に基づき、緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討について説明があり、以下の意見等があった。
- ①測定法シリーズにおいてはなるべく多くの方法を記載し、利用者が目的や都合に応じて選択できるようにしてほしいと委員より意見があった。
- ②マニュアルに掲載する分析法としては、操作的に難しくないとを前提に、誰にでも使える方法がよいと委員より意見があった。

7. その他

- ①放射能測定法シリーズ改訂案については、2つの改訂案の体裁等をよく整えてほしいと委員より意見があった。
- ②本事業により作成された放射能測定法シリーズ改訂案がそのまま公表されるのかと委員より質問があった。そのまま採用するか、改めて審議の場を設けるかは未定であると原子力規制庁より回答があった。
- ③今回審議した資料のコメントについては、1月を目途に事務局に提出していただきたいと事務局より連絡があった。

以上

平成 27 年度 第 3 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨

1. 日時 平成 28 年 3 月 4 日(金) 13 時 30 分～16 時 30 分

2. 場所 東京国際フォーラム G610 会議室

3. 出席者(敬称略)

委員長 中村尚司 東北大学

委員 大野剛 学習院大学

木村秀樹 青森県原子力センター

黒澤忠弘 国立研究開発法人産業技術総合研究所

斎藤公明 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

三枝純 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

玉柿励治 福井県原子力環境監視センター

藤田博喜 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力規制庁 南山力生監視情報課長、佐々木潤、門倉真士、竹田雅史、及川真司、
大平智章

オブザーバー 応用光研工業(株)(渡井勝範)、セイコー・イメージアンドジー(株)(水井雅之、
板津英輔)、日立アロカメディカル(株)(中嶋貴士)、富士電機(株)(伊藤勝人)

事務局 公益財団法人 日本分析センター

上原理事長、池内理事、磯貝放射能分析事業部長、
伴場、新田、前山、太田智、佐藤、松田、田中、小沼

4. 議題

- (1) 第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について
- (2) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について
- (3) 業務報告書について
- (4) その他

5. 配付資料

資料 3-1 平成 27 年度第 2 回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨 (案)

資料 3-2-1 連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂について

資料 3-2-2 連続モニタによる環境 γ 線測定法

資料 3-3-1 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法の改訂について

資料 3-3-2 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法

資料 3-4 緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討

資料 3-5 業務報告書について

常備資料 放射能測定法シリーズ

- ・ No. 2 放射性ストロンチウム分析法
- ・ No. 17 連続モニタによる環境 γ 線測定法
- ・ No. 20 空間 γ 線スペクトル測定法
- ・ No. 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法

6. 議事概要

(1) 第2回放射能測定法シリーズ改訂検討委員会要旨について

事務局から資料3-1に基づき説明があり、審議の結果、了承された。

(2) 放射能測定法シリーズ改訂案及び検討結果について

①連続モニタ

事務局から資料3-2-1及び資料3-2-2に基づき、連続モニタによる環境 γ 線測定法の改訂について説明があり、委員より以下の意見等があった。

○測定単位について

- ・空気吸収線量から周辺線量等量の換算は、本マニュアルにおいては、測定単位を明確にしておくことを明示して、平常時、原子力災害時の状況に応じた換算については、本文ではなく解説に例示することとなった。
- ・マニュアル原案に記載してある引用文献については、更に元文献があるので、元文献も引用することとなった。
- ・線量評価対象年齢を0歳児と仮定しているが、年齢は関係しないので削除すべきである。

○連続モニタ設置地上高における換算について

- ・地上高1m(路地上)は測定値を用いる。地上高1.5m~1.8m、地上高約3m(局舎上)及び地上高数十mにおいては、設置地上高を明示し、換算を実施しない。
- ・地上高約3m(局舎上)において、原子力災害直後の放射性物質が地表面に沈着した期間については、地上高1mと同等と見なす旨解説に記載することとなった。また、可能であれば、シミュレーションなどで確認することとなった。
- ・連続モニタの設置場所としては地上高1mが望ましく、今後地上での測定に移設していくことが望ましい。しかし、地上への設置が困難な自治体もあるのが現状であるため、換算などの応用的な部分についても、解説でもよいので記載してほしい。
- ・緊急時においては可搬型モニタリングポスト等を活用する旨をマニュアルに記載する。
- ・地上高1mと3m(局舎上)の線量を実測し、比較データがあるとよい。

○走行サーベイシステムにおける車内外補正について

- ・平常時については、自然放射性核種が寄与する補正係数を適用することでよい。
- ・事故直後については、予め算出しておいた車内外補正係数(1.3:福島事故後に採用されたもの)を適用することでよい。

○その他

- ・Cs-137及びCo-60基準 γ 線源の線量率校正の精度が「 $\pm 5\%$ 」となっているが、この基準は厳しすぎるのではないか。線源の成績書の精度を引用している可能性があるため、見積もりの見直しが必要である。
- ・ γ 線源の線量率の値付けについては、表現の妥当性を確認し、修正文を事務局に送ることとなった。
- ・原子力規制庁より、連続モニタのマニュアル案については、実際の運用面の観点から、原子力規制庁で別途議論する予定であるとコメントがあった。

②in-situ測定

事務局から資料3-3-1及び資料3-3-2に基づき、ゲルマニウム半導体検出器を用いたin-situ測定法の改訂について説明があり、委員より以下の意見等があった。

○シミュレーション計算によるピーク効率の算出について

- ・シミュレーション計算だけではトレーサビリティを確保できないため、シミュレーション計算については本文ではなく解説として記載することとなった。

- ・ in-situ 測定スペクトル解析結果の比較表において、核種の項目に「U 系列」「Th 系列」とあるが、具体的に核種を明記した方がよい。
- ・ 標準線源の形状について質問があり、事務局より、点線源である旨回答した。

○測定上限について

- ・ 相対効率 20% の Ge 半導体検出器を用いて 30 分間測定した場合、デッドタイムが約 50 %となる 20 μ Gy/h を測定上限の目安とすることとなった。
- ・ 測定上限については、総合的な判断をする旨記載した方がよい。

○その他

- ・ 福島事故後の β 値（重量緩衝深度 (g/cm^2)) の経時変化のデータについては、原子力規制庁の了解後、分布調査の最新版の報告書のデータに差し替えることとなった。

③緊急時の放射性ストロンチウム分析法

事務局から資料 3-4 に基づき、緊急時の放射性ストロンチウム分析法の検討について説明があり、委員より以下の意見等があった。

- ・ 試料の代表性の担保については、今後検討する必要がある。設定した供試量における分析値のばらつきをおさえるべきである。
- ・ 下限値について、Sr-89/Sr-90 の比をどのように想定すればよいか、今後検討する必要がある。
- ・ 検出下限値を優先するか迅速性を優先するかを含め、事故の状況に応じた下限値の設定が必要である。
- ・ 緊急時のストロンチウム分析法において、Ca との分離について検討をする必要がある。
- ・ IAEA が溶融法を推奨する理由はあるのかとの質問があり、事務局より、迅速であることと、酸抽出されにくいストロンチウムへの対処策であると回答した。
- ・ 緊急時の目標レベルはどの程度かとの質問があり、事務局より、牛乳 250 mL の場合は数 Bq/L、土壌 1 g の場合は 600 Bq/kg 程度であると回答した。
- ・ 測定装置にピコベーターが入っていないが記載しないのかとの質問があり、事務局より、迅速法では使用していないが、既存の測定機器については記載する予定であると回答した。

(3) 業務報告書について

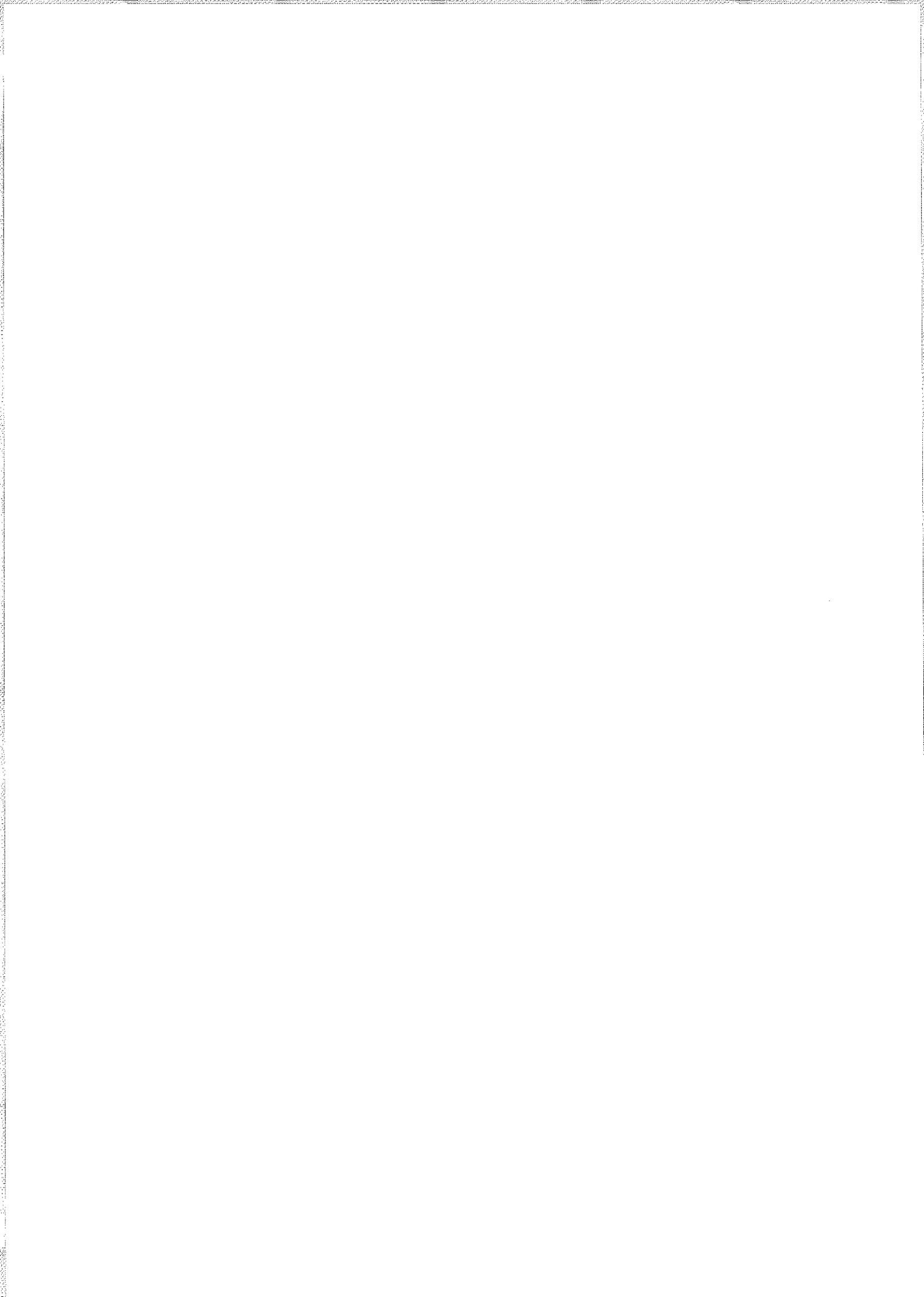
事務局から資料 3-5 に基づき説明があり、業務報告書の目次案について了承された。

(4) その他

- ・ 事務局より、マニュアル原案（連続モニタによる環境 γ 線測定法、ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法）のコメントは 3 月 11 日までに事務局に送付してほしい旨連絡があった。
- ・ マニュアル原案の最終版を含む業務報告書については、中村委員長、原子力規制庁と事務局において協議することとなった。

以上

参考資料 2 調査文献リスト



- 連続モニタによる環境 γ 線測定
 1. 公益財団法人 原子力安全技術センター
平成 25 年度電子線量計を使った簡易型放射線量率測定システムの技術調査業務報告書
平成 26 年 3 月
 2. 津田 修一 他
走行サーベイシステム KURAMA II を用いた測定の基盤整備と実測への適用
JAEA-Technology 2013-037
 3. 斎藤 公明、遠藤 章
Ⅲ 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係
RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014)
 4. 公益財団法人原子力安全技術センター
平成 25 年度緊急放射線モニタリング動員可能資機材リスト策定等業務 業務報告書
平成 26 年 3 月
 5. 公益財団法人原子力安全技術センター
平成 26 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業報告書
平成 27 年 3 月

- ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定
 1. Canberra Industries, Inc.
Performance of Digital Signal Processors for Gamma Spectrometry
Canberra Industries, Inc., Application Note (2008)
 2. Duc T. Vo, Phyllis A. Russo
Comparisons of the Portable Digital Spectrometer Systems
Los Alamos NATIONAL LABORATORY : LA-13895-MS, (2002)
 3. Briesmeister, J.F.
MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code Version 4C
Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

- 緊急時の放射性ストロンチウム分析
 1. Rapid Simultaneous Determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk: A Procedure Using
Gerenkov and Scintillation Counting
(http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-AQ-27_web.pdf)
 2. Y. Kameo et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., 274 (2007) 71
 3. 西川ら, Radioisotopes, 29 (1980) 542
 4. Takagai, Y., et al., Anal. Methods, 6, 355-362 (2014)
 5. Z. U. W. Mahmood, W. Nitta, Jurnal Sains Nuklear Malaysia, Vol.20, No. 1&2 (2002),
37-47

リサイクル適正の表示：印刷用の紙にリサイクルできます。

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料「Aランク」のみを用いて作製しています。

連続モニタによる環境 γ 線測定法

本報告書は、原子力規制委員会 原子力規制庁の平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業における委託業務として、公益財団法人日本分析センターが実施した成果を取りまとめたものです。

目 次

第1章 序 論	1
第2章 用語の定義	2
第3章 連続モニタの機器構成	6
3.1 概説	6
3.2 連続モニタ検出器	6
3.3 測定値の記録	8
3.4 テレメータシステム	8
第4章 連続モニタを用いた測定システム	10
4.1 概説	10
4.2 固定式連続モニタ	10
4.3 可搬式連続モニタ	13
4.4 走行サーベイシステム	15
第5章 測定システムの設置	19
5.1 連続モニタ設置の際の一般的な留意事項	19
5.2 固定式連続モニタ	20
5.3 可搬式連続モニタ	25
5.4 走行サーベイシステム	26
第6章 測定と校正	28
6.1 使用上の留意事項	28
6.2 固定式連続モニタ	31
6.3 可搬式連続モニタ	34
6.4 走行サーベイシステム	34
第7章 測定結果の解析と評価	36
7.1 概説	36
7.2 平常時における解析と評価	36
7.3 緊急時における解析と評価	38
7.4 測定単位	40
7.5 各測定システムにおける解析と評価	41
第8章 NaI モニタによる空間 γ 線スペクトル計測	44
8.1 概説	44

8.2	空間 γ 線スペクトル計測に必要なシステム構成	44
8.3	計測の準備	45
8.4	測定データの一次処理	47
8.5	エネルギー校正のためのデータ取得	47
第9章	NaI モニタの計測データに用いるレスポンス関数	48
9.1	レスポンス関数の意味	48
9.2	レスポンス関数の作成	48
9.3	レスポンス関数の適用	49
第10章	NaI モニタによる空間 γ 線スペクトル計測データの処理	50
10.1	測定されたパルス波高分布のエネルギー校正	50
10.2	入射スペクトルへの変換	51
10.3	結果の表現	52
10.4	放射性核種別線量寄与の算出	52
解 説		
解説 A	連続モニタによる環境 γ 線測定における一般的事項	57
解説 B	各モニタの原理、構成及び特性	59
解説 C	基準 γ 線源	77
解説 D	校正時の散乱線対策	79
解説 E	可搬型モニタリングポストを用いた連続測定における留意点	83
解説 F	走行サーベイシステムにおける留意点	88
解説 G	測定結果の解析	94
解説 H	連続モニタにおける比較測定による健全性確認	104
解説 I	事故時の線量率寄与割合	107
解説 J	環境 γ 線量率測定に係る単位の考え方	110
解説 K	環境 γ 線量率測定に係る測定地上高の考え方	122
解説 L	レスポンス関数の作成	124
付 録		
付録 1	ストリッピング法による NaI モニタのデータ処理の例	139
付録 2	逐次近似法による NaI (Tl) シンチレーションスペクトルの アンフォールディングの例	151
付録 3	レスポンス関数の計算例	155
付録 4	参考文献	167

第1章 序 論

本測定法は、主として原子力施設周辺の環境放射線モニタリングの一環として実施される固定式連続モニタによる環境 γ 線量率の測定法について定めることを目的として、昭和57年に初版が制定されたものである。その後、平成8年の改訂を経て現在に至っている。

平成23年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一原発事故」という。）後に、これまでのモニタリング体制が見直され、平成24年10月に原子力規制委員会から「原子力災害対策指針」が新たに示された。この指針では、これまでのモニタリング体制に比べ、連続モニタの位置付けが、更に重要なものとなった。これらの情勢を受けて、今回の改訂では、基本的概念及び目的は継承しながら、近年の測定機器の進展、計測に用いられている測定単位及び福島第一原発事故後の経験及び問題点を踏まえ、現状を反映した内容とした。

従来、連続モニタの役割は原子力施設に起因する異常の有無の監視及び外部被ばく線量評価に資する情報を与えることであったが、福島第一原発事故後には更に原子力災害時に住民等への防護措置実施の判断に必要な情報として活用されることとなっている。

福島第一原発事故の経験から、ひとたび原子力災害が発生すると、放出される放射性核種の影響は広範囲にかつ長期的な影響を与えることとなる。従来の「固定式」の連続モニタだけのモニタリングでは十分ではなく、効率的かつ迅速にモニタリングを実施するために、様々な手法が開発され、活用されている。本測定法ではその現状を踏まえ、「可搬型」の連続モニタ及び「走行サーベイ」についても含むものとした。また、環境 γ 線量率と併せて γ 線エネルギースペクトルは、異常値の原因の推定に非常に有効な情報を与える。そのため、放射能測定法シリーズ No. 20「空間 γ 線スペクトル測定法」の内容を記載し、統合を図った。

本測定法に記載する「環境 γ 線量率測定」は、測定の都度不確定要素が含まれることから、様々な状況に適用できる測定法でなければならない。測定値に含まれる不確定要素についてあらかじめ整理し、その特徴を理解することによって、福島第一原発事故のような原子力災害においても対応することが可能であると考えられる。ユーザーがそれぞれの状況下において適切な測定作業を行うための判断材料として本測定法を利用されたい。

なお、本測定法の対象とする主なユーザーは、原子力施設の監視業務等に従事する自治体担当者等としている。

第2章 用語の定義

自然放射性核種（天然放射性核種）*1

天然に存在する放射性核種。

人工放射性核種*1

核分裂及び放射化等によって人工的に生成される放射性核種。

エネルギー特性

放射線計測器のレスポンスまたは校正定数が放射線のエネルギーに依存する性質をいう。

方向特性

放射線計測器のレスポンスまたは校正定数が放射線の検出器に対する入射方向に依存する性質をいう。

高エネルギー成分、低エネルギー成分

環境放射線は主として宇宙線、環境に存在する放射性物質からの放射線及び原子力施設から放出される放射性物質からの放射線に大別できるが、このうち宇宙線を除いては、そのエネルギーは3 MeV以下が大部分であり、本測定法では3 MeVを超えるものを高エネルギー成分、それ以下を低エネルギー成分として区別する。

レスポンス

モニタ指示値と測定すべき量との比である。普通、感度には感度限界の意味も含み、まぎらわしいので、ここではレスポンスという。校正定数の逆数である。

パルス波高分布

測定されたままのパルスのスペクトルの波高分布。

補正波高分布

パルス波高分布に補正を加え、エネルギーに対する波高値の比が一定になるようにした分布。

入射 γ 線スペクトル

補正波高分布を基にして、レスポンス関数を適用し、 γ 線エネルギースペクトルに戻す処理をしたスペクトル分布。

自己汚染

放射線検出器の構成材料中に微量の放射性核種が含まれ、測定システムに影響を及ぼすような場合、自己汚染があるといい、低レベルの放射能（線）測定において問題となる。

原子力災害対策指針

福島第一原発事故後に原子力規制委員会によって示された原子力災害時におけるモニタリングに関する考え方を示した指針。

OIL

原子力災害対策指針に示されている運用上の介入レベル Operational Intervention Level の略。防護措置の実施を判断する基準として、環境 γ 線量率及び環境試料中の放射性物質の濃度等の計測可能な値で設定されている。

*1 JIS Z4001 : 1999 原子力用語及び JIS Z8103 : 2000 計測用語

EPZ

福島第一原発事故以前の「原子力施設等の防災対策について」において用いられていた定義。防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲。Emergency Planning Zone の略。

UPZ

原子力災害対策指針において、EPZ に代わるものとして示された緊急時防護措置を準備する区域。Urgent Protective action Planning Zone の略。おおむね原子力施設から 30km 圏内を目安とする。

全面緊急事態

原子力災害対策指針において、「原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性が高い事象が生じたため、確定的影響を回避し、確率的影響のリスクを低減する観点から、迅速な防護措置を実施する必要がある段階」と定義されている。

組織荷重係数^{*1}

それぞれの被ばくに由来する相対的な確率的損害を考慮するために、組織又は臓器の等価線量に乗じる係数。係数の値は、組織又は臓器ごとに与えられている。

放射線荷重係数^{*1}

健康への影響に対する、種類の異なる放射線の効果の違いを考慮するためのもので、吸収線量に乗じられる相対的係数。

非破壊検査^{*1}

対象物を破壊することなく検査する方法の総称。放射線、超音波、電磁誘導、蛍光染料などを利用するものがある。非破壊試験ともいう。

放射性医薬品^{*1}

放射性核種で標識された医薬品で、診断及び治療に用いられるもの。

フォールディング^{*1}

放射線計器のエネルギー応答関数と入射放射線のエネルギースペクトルから、その計測器の出力波高分布を求める数学的手法。

アンフォールディング^{*1}

放射線検出器の出力波高分布とその検出器のエネルギー応答関数から、元の入射放射線のエネルギースペクトルを求める数学的手法。

レスポンス関数

検出されたパルス波高分布から検出器へ入射した γ 線のスペクトルを求める際に用いられ、単一エネルギー光子入射時における検出器の示す応答に関する検出器の効率を含めた関数。

逐次近似法

複数のレスポンス関数（レスポンスマトリックス）から γ 線入射スペクトルを得る際（デコンボリューション deconvolution、またはアンフォールディング unfolding）に生ずる不正確さを近似の次数を逐次高めて最小にする解析法。

ジオメトリ^{*1}

様々な要素の空間的配置を表現するために使われる用語。幾何学的配置ともいう。

組織等価物質^{*1}

実効原子番号が、生体組織と等しい物質。

空気等価物質 *1

実効原子番号が、空気と等しい物質。

ファントム *1

生体中における放射線の減衰、散乱、又は放射性物質の分布などを模擬し、測定するために用いる人体模型。

ICRU 球 *1

密度 1 g/cm^3 の組織等価物質からなる直径 30 cm の球状均質ファントム。質量組成は、酸素 76.2 %、炭素 11.1 %、水素 10.1 %、窒素 2.6 %。

パルス増幅器 *1

パルス信号を増幅するために広帯域特性をもたせた増幅器。

前置増幅器 *1

放射線検出器の直後に接続され、インピーダンス整合及び信号対雑音比の改善に用いられる増幅器。

比例増幅器 *1

入力信号の波高値に比例した波高値の信号を出力するパルス増幅器又は直流増幅器。通常、前置増幅器の後に接続され、主増幅器として使われる。

アナログ・デジタル変換器 *1

アナログ信号をデジタル量の出力に変換するための装置。波高分析装置等に用いられる。略号 ADC。

波高分析器 *1

パルス信号の波高値の度数分布を測定する装置。

シングルチャネル波高分析器 *1

波高分析器の一種で、所定の波高範囲内の入力パルスを選別して論理信号を出力し、計数できるようにしたもの。略号 SCA。

マルチチャネル波高分析器 *1

波高分析器の一種で、多数の記憶素子をもち、入力信号を波高別にそれぞれ蓄積して計数できるようにしたもの。多重波高分析器ともいう。略号 MCA。

光電子増倍管 *1

光を電気信号に変換するための真空管であって、基本的には光電陰極と電子増倍管から構成される。略号 PMT。

検出器窓 *1

検出しようとする放射線の透過が容易であるように設計された検出器の部分。

環境放射線モニタリング設備 *1

原子力施設周辺又は放射線施設周辺の照射線量率などを測定する設備の総称。土壌、海水などの環境試料中の放射性物質濃度の測定設備、気象観測設備も含まれる。

モニタリングステーション *1

原子力施設周辺又は放射線施設周辺において、野外の照射線量率等、浮遊じん放射能の測定などを行う放射線測定装置の集中施設。

モニタリングポスト *1

環境における照射線量率等、中性子フルエンス率などを連続測定する野外の固定施設。

モニタリングカー *1

環境中の放射線又は放射能を測定する装置を搭載して、移動測定をする自動車。

シンチレーション *1

電離放射線による原子の励起に基づく発光で、その持続時間が数マイクロ秒程度のもの。

シンチレーション減衰時間 *1

単一励起を受けた後、シンチレーションの光子放出率が、その初期値の $1/e$ (e は自然対数の底) に減衰するまでに要する時間。

(検出器) 実効中心 *1

照射線量又は照射線量率に対する検出器の出力特性を求める場合に中心とみなし得る有効容積内の点。その条件によっては、幾何学的中心とは無視することはできない差異が生じる。

数え落とし (計数損失) *1

パルス信号を計数するとき、検出器又は計数装置の不感時間、分解時間、パルスのパイルアップなどによって測定計数値が本来の値を下回ること。

不感時間 *1

計数管、計数回路などが一度動作した後、検出能力、計数能力を失っている時間。その間に入射した放射線に対して計数できない。

分解時間 *1

引き続き発生した二つのパルス又は電離現象に対して、これを独立した二つのパルス又は現象として識別するのに必要な最短の時間差。

パイルアップ *1

パルスの尾の部分に、後続のパルスが重なった場合、その結果としてパルス波高の指示が不正確になる現象。

トレーサビリティ *1

不確かさが全て表記された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結び付けられ得る測定結果又は標準の値の性質。基準は通常、国家標準又は国際標準である。

基準 γ 線源

線量率の値付けについて、国家標準とのトレーサビリティが確立されている γ 線源である。通常線源中心から 1 m の点の照射線量率が値付けされている。

表示付認証機器

設計認証及び特定設計認証制度によって認証された機器。製造・輸入事業者から販売され、簡単な届出を監督官庁（原子力規制庁）に行うことによって利用できる。

ウェザリング効果

風雨等の自然要因による放射線量率及び放射能濃度の減衰。

第3章 連続モニタの機器構成

3.1 概説

連続モニタを用いた環境 γ 線量率測定は、原子力施設に起因する異常の有無の確認及び周辺住民の被ばく線量評価に資する情報として利用される。さらに、福島第一原発事故後には原子力災害時における周辺住民等に対する防護措置実施の判断に必要な情報として活用されることとなった。

連続モニタに用いる機器には、様々な測定原理、信号の処理方式が採用されており、出力される測定値は種々の成分が含まれた結果としての数値となる。測定値である環境 γ 線量率に含まれる成分には、自然放射線と人工放射線に区分され、それぞれは時間的な変動特性及びエネルギースペクトル分布、気象的要因の影響を受けたものとなる。

ユーザーは、上記内容を十分理解しておく必要があり、連続モニタに用いる機器の測定原理及び信号の処理方式については、第3章「連続モニタの機器構成」を、測定値に含まれる種々の成分、その変動要因及びスペクトル解析に関しては第7章「測定結果の解析と評価」及び第10章「NaIモニタによる空間 γ 線スペクトル計測データの処理」を参照のこと。

なお、本測定法で取り上げている検出器並びに各種システムは、環境 γ 線量率測定を実施するために必要な機器の代表例であり、それ以外の機器を取り扱うことを除外するものではない。特に原子力災害時においては、限られた人員、時間及び機器の中で最適なモニタリングを実施する必要がある。

よって、その置かれている状況下において、目的を達成するために必要な仕様を満たしていることが重要である。

3.2 連続モニタ検出器

本項では、各モニタ検出器の特徴等について示す。^{*1}

3.2.1 電離箱式検出器

電離箱式検出器は、放射線の電離作用を利用して放射線を検出する検出器であり、放射線の発見時点から活用されてきている極めて原初的な測定器である。

放射線（ γ 線）の入射に伴って、放射線（ γ 線）と電離箱壁との相互作用によって2次電子が発生する。発生した電子が電離箱内気体中を通過する際に封入ガスがプラスイオンと電子に電離され、高電圧を印加することによって、それぞれを陰極と陽極に集荷して電流が流れる。電流を高抵抗に通すことによって電流-電圧変換のアナログ出力、または一定時間間隔の電流積分による電荷のデジタル出力等で線量率を表示する。

常圧空気型（1気圧）と加圧型の電離箱線量計の二つがあり、連続モニタとして広く利用されているのは加圧型である。常圧空気型（1気圧）は、加圧型と比較して検出器が大きくなることから一般的ではなかったが、福島第一原発事故後には、高線量率領域測定用として

^{*1} Radiation protection instrumentation - Transportable, mobile or installed equipment to measure photon radiation for environmental monitoring IEC 61017 Ed. 1.0:2016(b)

の使用例がある。検出器としてのエネルギー特性及び線量率直線性の各種特性については、方式の区別はなく同等であり、詳細については解説 B に示す。

(1) 常圧空気型（1 気圧）電離箱

この機種は厚さ 5 mm 程度の空気等価とみなされる壁材（樹脂等）を用いた有効体積約 20 L の密封型構造の検出器である。

(2) 加圧型電離箱

放射線検出部に充填されたガスを大気圧以上に加圧した電離箱である。例えば、1 気圧換算体積 20 L 以上の純アルゴンガスを $8\sim 20 \text{ kg/cm}^2$ （約 8～19 気圧）の圧力で封入したアルミニウム又はステンレスを壁材とした電離箱であり、小型で高い感度を得られる。

エネルギー特性及び線量率直線性は、解説 B に示すとおりであり、壁材にアルミニウムを使用した機種とステンレスを使用した機種を比較すると、100 keV 以下の領域に大きな差がある。これは、緊急時に測定対象となる、放射性プルーム中の ^{133}Xe (81 keV) の線量率全体に占める割合が大きい場合には、測定値の取扱いに注意が必要であることを意味している。

3.2.2 NaI(Tl)シンチレーション式検出器

NaI (Tl) シンチレーション検出器は γ 線に対して高い感度をもつため、低い線量率レベルの測定には有効なものである。しかし、エネルギー特性の影響によって低エネルギー領域 (100 keV 付近) において過大応答を示す特性を有しており、これを補正するために代表的な方式として G(E) 関数法が採用されている。G(E) 関数法に関する解説を解説 B に示す。

放射線の入射に伴って、NaI (Tl) 結晶中で発生する励起発光（蛍光）を光電子増倍管にて光電子に変換、増幅して光の強さに比例したパルスを出力する。出力されるパルス信号には入射放射線のエネルギーとの比例関係があることから、 γ 線スペクトルを解析することによって、放射性核種の定性又は定量が可能となる。

検出器としての特徴は、放射線の吸収反応を電離又はエネルギーの形で直接的に測定するものではなく、光による間接的な測定である点にあり、光-電子変換効率の低さから発生する光電子の数が少ないため、エネルギー分解能が高くないという特性がある。その反面、光電子増倍管の電子増倍率が非常に高いことによって、極めて低い信号にかかわらず波高弁別器でシグナルとノイズを識別・分離できるため、高い安定した放射線検出を行える特徴がある。

3.2.3 シリコン半導体式検出器

シリコン半導体式検出器は電離箱式検出器と同等の測定原理を有し、「固体電離箱」と呼ばれることもある。

入射放射線とシリコン結晶との相互作用の結果、二次電子が発生する。この二次電子の電離作用によって電子正孔対が生成され、高電圧を印加することによって、それぞれを陰極と陽極に集荷して電流が流れる。信号はパルスとして出力され、換算係数を乗ずることによって線量率を算出する。シリコン半導体式検出器のエネルギー特性を含む各種特性については解説 B に示す。

シリコン半導体式検出器の感度は、NaI (Tl) シンチレーション式検出器と比較して劣るという特徴も有している。この感度が劣る特徴を活かして、高線量率領域用の検出器として使用されている。

3.2.4 CsI (Tl) シンチレーション検出器

CsI (Tl) シンチレーション式検出器は、NaI (Tl) シンチレーション式検出器と同じ測定原理をもつシンチレーション式検出器である。この検出器の特徴は、NaI (Tl) シンチレーション検出器と同様に γ 線に対し高い感度を有していることである。一般的にシンチレーション式検出器は、蛍光体であるシンチレータと光検出器等から構成されている。代表的な光検出器は、光電子増倍管である。しかし、シンチレータの種類によって蛍光波長は異なり、組合せる光検出器も機種によって最大感度波長が異なる。現在は電子技術の進歩によって、これらの特徴を考慮し、最適な組合せが構成され製品化されている。

3.3 測定値の記録方式

各モニタにおける測定値の記録は、デジタル形式として電子ファイルが測定装置そのものに保存される方式と、チャート紙等にアナログ出力される方式とがある。また、多くの場合が、ある一定の伝送間隔にて「テレメータシステム」にデータが送られ、システム内においても記録がなされている。

3.4 テレメータシステム

テレメータシステムとは、各連続モニタからデータを収集し、保存、解析及び配信を一元的に実施するシステムである。以下にテレメータシステムの機能に関する一例を示す。

(1) データ収集

- ① 連続モニタ（固定測定局）※必要に応じて気象データの収集も可能
- ② 可搬型モニタリングポスト
- ③ モニタリングカー
- ④ 簡易型電子線量計
- ⑤ 関連事業者（異なったモニタリング機関）の連続モニタ
- ⑥ 隣接自治体

(2) 伝送方式等

伝送方式は、有線回線、衛星回線、アナログ無線回線等から設置環境に応じた適切な方式を選択する。また、システムにサーバ多重化又は多拠点化等を実施する。

(3) データ配信

モニタリング機関に関連する組織間において情報共有システム等が存在する場合には、該当するシステムにデータを配信する。また、隣接する自治体等に対しても配信する。その他、関連機関への配信等を実施し情報共有を求められることがあるため、都度対応可能な仕様としておくことが望ましい。

(4) データ表示

収集したデータを一般公開用ホームページにリアルタイムでアップする機能、及び関係各所に設置された表示機に出力する機能を有していることが望ましい。「(3) データ配信」と同様に、都度対応可能な仕様としておくことが望ましい。

(5) データの蓄積・保存

データベースへの永年蓄積、過去データの移行機能を有していることが望ましい。膨大な情報量ではあるものの必要な情報であるため、蓄積容量の増量も考慮しメモリの増設等にも対応可能であることが重要である。

(6) データ監視・解析

GIS 地図^{*2}によるリアルタイム監視を実施でき、各種帳票、グラフ、報告書の出力が可能である機能を有していることが望ましい。また、リアルタイムスペクトル解析を実施でき、必要に応じた単位換算、拡散予測についても対応可能な仕様とすることが望ましい。

(7) 通報機能

異常値が検知された際に、電話、電子メール、警報ランプによる発報機能を有していると早期対応が可能となる。

(8) 収集間隔

線量率データ及び気象データの最小収集間隔は2分値以下とする。ただし、平常時は任意で10分値、1時間値等を設定できること。スペクトルデータの収集間隔は、その検出器の種類及びサイズにもよるが、10分値程度～とする。

なお、平常時又は緊急時等の状況に応じて、データの情報量及び消費電力等を勘案して最適な収集間隔を任意で設定できる必要がある。

^{*2} Geographic Information System 地理情報システムの略

第4章 連続モニタを用いた測定システム

4.1 概説

第3章で述べた各種検出器は、連続モニタとして多種類のシステムに活用されている。検出器にはそれぞれに特徴があり、長所及び短所を有している。各システムに活用されている検出器は、その検出器の長所を生かせるように選定されている。

本章では、第3章で述べた検出器における各システムへの活用例を示す。

なお、可搬型モニタリングポストは、従来の活用方法としては「可搬式」であるため4.3項の「可搬式連続モニタ」に記載している。しかし、記載はこれを固定式連続モニタと同様に活用するための内容についても言及している。

4.2 固定式連続モニタ

4.2.1 電離箱モニタ

3.2.1項で述べている加圧型電離箱が固定式連続モニタとして主に高線量率領域の測定用に使用されている。電離箱モニタの仕様は各製造業者によって若干の違いがあるものの、ほぼ同等の仕様となっている。電離箱モニタの構成は、検出器、断熱カバー、温度制御装置及び測定部からなる。また、エネルギー特性等の測定値に影響を及ぼす因子は、主に壁材とその厚さ及び封入ガス種とその圧力である。

なお、環境 γ 線量率測定を実施するに当たり、検出器を製造した際の原材料の品質によっては、原材料を要因とした自己汚染寄与分が、測定値に対して無視できない影響をもたらす場合がある。自己汚染の有無については、機器納入の際に製造業者または第三者機関に依頼する等して、あらかじめ自己汚染寄与分を把握しておくことが望ましい。

連続モニタとして活用される電離箱線量計の形状は、主に球形である。これは方向依存性による測定値への影響を小さくするためである。

表4.1に電離箱モニタの仕様例を示す。

表 4.1 電離箱モニタの仕様例

	加圧型電離箱の仕様例			
電離箱壁材、 厚さ、容量 及び形状	ステンレス 2 mm 鉄 1.2 mm 14 L 球形	アルミニウム 3 mm 14 L 球形	アルミニウム 2 mm 14 L 球形	アルミニウム 3 mm 14 L 球形
封入ガス種 及び圧力	アルゴン または (及び) 窒素 4 気圧	アルゴン または窒素 4 気圧	アルゴン 及び窒素 8 気圧	アルゴン 6 気圧
検出 γ 線 エネルギー領域	60 keV ~ ∞			
測定可能 線量率範囲	10 nGy/h ~ 100 mGy/h			
温度制御の方式	加温式 または送風式		加温式	
検出器 断熱カバーの 材質及び厚さ	樹脂 3 mm	アルミニウム 1.2 mm または 樹脂 3 mm	アルミニウム 1 mm	樹脂 1.5 mm
エネルギー特性	80 keV ~ 3 MeV ± 30 %程度	80 keV ~ 3 MeV ± 10 %程度		
線量率直線性	0.4 μ Gy/h ~ 1000 μ Gy/h ± 5 %程度			

4.2.2 NaI モニタ

主に低線量率領域の測定用に使用されており、「警戒事態」においては平常時モニタリングの強化としても活用されることとなっている。以前はG(E)関数法による線量換算を電子回路によって自動化した方法としてDBM法^{*1}が主流として広く活用されてきた。DBM方式は、回路内における演算実施に必要な時間の長さの影響から高計数率時には数え落としによって感度が低下してしまう特徴を有していた。このため現在は、G(E)関数法を自動でデジタル処理することによって、数え落としの影響が抑制されている。

固定式連続モニタにおいて装備されているNaI (Tl)シンチレーション検出器の形状は、主に2 in ϕ \times 2 in、3 in ϕ \times 3 inの円柱形のものが広く活用されており、光子の入射角30° ~ 120°程度までは最大10%程度の過大応答をする特徴を有している。

表 4.2 に NaI モニタの仕様例を示す。

^{*1} Discrimination Bias Modulation 法の略

表 4.2 NaI モニタの仕様例

		NaI モニタの仕様		
検出器の寸法 及び形状		2 in ϕ \times 2 in 円柱形	3 in ϕ \times 3 in 円柱形	3 in ϕ 球形
エネルギー補償		<ul style="list-style-type: none"> ・デジタル処理 (G(E)関数法) ・DBM 方式 		
温度補償回路		有り		
温度制御装置		<ul style="list-style-type: none"> ・加温式 ・送風式 		
断熱カバーの材質		<ul style="list-style-type: none"> ・樹脂 3.0 mm ・樹脂 2.5 mm ・樹脂 1.5 mm ・アルミ 2.0 mm 及び樹脂 2.0 mm ・アルミ 1.2 mm ・アルミ 1.0 mm 		
ディסקリ	LLD	50 keV		
	ULD	3000 keV または ∞		
測定可能線量率範囲		10 nGy/h \sim 10 μ Gy/h		
NaI 結晶光学窓材質		<ul style="list-style-type: none"> ・硼硅酸ガラス ・低 K ガラス ・石英 		
光電子増倍管窓材質		<ul style="list-style-type: none"> ・硼硅酸ガラス ・低 K ガラス ・石英 		
その他		測定単位は、Sv/h (周辺線量当量率) 及び Gy/h (空気吸収線量率) の双方で測定可能であることが望ましい。		

※ディスクリ : Discriminator (波高弁別器) の略。

4.2.3 簡易型電子線量計

簡易型電子線量計は元来個人被ばく線量計 (積算線量計) としての機能を有し、活用されてきたものである。また多くの簡易型電子線量計がシリコン半導体検出器を装備している。福島第一原発事故後に原子力規制委員会から示された原子力災害対策指針では、これまでの EPZ とは異なり UPZ として原子力施設からおおむね 30 km までの広範囲における環境放射線

モニタリングが求められるようになり、緊急時用の連続モニタとして利用されるようになった。

線量率演算方式は、収集したパルスに ^{137}Cs の 662 keV にて算出した換算係数にて、線量率に換算する方式が一般的である。この方式の場合、エネルギー情報が失われるため、核種同定及びエネルギー特性の補償が出来ないことに留意しなければならない。

表 4.3 に簡易型電子線量計の仕様例を示す。

表 4.3 簡易型電子線量計の仕様例

	簡易型電子線量計の仕様
検出器	シリコン半導体検出器
測定線量率範囲	0.2 $\mu\text{Sv/h}$ ~ 10 mSv/h (周辺線量当量率)
測定エネルギー範囲	60 keV~1.5 MeV γ (X)線
測定時間	2分値以下 (緊急時) ~10分値 (平常時)
使用温度環境	$\pm 20\%$ -10 $^{\circ}\text{C}$ ~+40 $^{\circ}\text{C}$
使用湿度環境	$\pm 20\%$ 35 $^{\circ}\text{C}$ を基準とし 40 %~90 %RH
エネルギー特性 (^{137}Cs 基準)	-50 %~30 % 60 keV~100 keV 未満 $\pm 30\%$ 100 keV~1.5 MeV
線量率特性 (^{137}Cs 基準)	$\pm 20\%$ 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ ~10 mSv/h
測定精度 (^{137}Cs 基準)	$\pm 10\%$ 1 μSv ~999.99 mSv ※電子線量計本体での測定が積算方式で行う場合だけ
方向特性 (^{137}Cs 基準)	$\pm 30\%$ 0 $^{\circ}$ $\pm 60^{\circ}$
温度特性	$\pm 20\%$ ※使用温度範囲内で+20 $^{\circ}\text{C}$ を基準
電源	・一次電源 : AC100 V ・二次電源 : バッテリー (1週間以上稼働が可能なこと) ※太陽光発電設備を併設する方式も可

(“簡易型電子線量計に係る仕様の考え方” 原子力規制庁 監視情報課)

4.3 可搬式連続モニタ

4.3.1 可搬型モニタリングポスト

(1) NaI(Tl)シンチレーション検出器

原子力災害対策指針では「警戒事態」に設置し、「緊急事態」には測定を実施する対象となっている機器である。福島第一原発事故後においては、平常時モニタリングにおいても外部電源及び伝送システムを装備することによって活用されている。線量演算の方式は、G(E)関数方式又はDBM方式等を採用している。

可搬型モニタリングポストは、原子力災害時に使用することを想定しており、測定可能線

量率範囲は、バックグラウンドレベル～数百 mSv/h (数百 mGy/h) 程度である。

代表的な機種では、低線量率領域を NaI (Tl) シンチレーション検出器で、高線量率領域をシリコン半導体検出器等の他種の検出器でそれぞれ測定するものがある。これは NaI (Tl) シンチレーション検出器の特徴である、高線量率検出時にパイルアップ又は数え落としの影響によって正確に線量率を評価できない欠点を補うための仕様である。しかし、測定可能線量率範囲内全てを NaI (Tl) シンチレーション検出器だけで測定可能とする機種もある。この場合、低線量率領域では DBM 回路等による線量演算方式が採用され、高線量率領域ではパルス処理ではなく電流値から線量演算することによって、数え落としの影響がなく高線量率領域までの測定を可能としている。ただし、この場合はエネルギー情報が失われるため、核種同定、G(E) 関数又は DBM 回路によるエネルギー特性の補償が出来ないことに留意しなければならない。

(2) シリコン半導体検出器

上記(1)で示したように、低線量率領域用に NaI (Tl) シンチレーション検出器、高線量率領域用としてシリコン半導体検出器が装備されている機種が存在する。また、シリコン半導体検出器だけを搭載する機種もある。これは、NaI (Tl) シンチレーション検出器と比較して軽量かつ省電力型であることから、素子数を増加させ検出効率を上げることによって低線量率領域からの測定も可能としたものである。

線量演算方式は、簡易型電子線量計と同様である。また、データ伝送については、伝送機能を元々装備したシステム、又は伝送システムを附属することによって簡易型電子線量計と同様のデータ伝送が可能である。

表 4.4 に可搬型モニタリングポストの仕様例を示す。

表 4.4 可搬型モニタリングポストの仕様例

	A タイプ		B タイプ		C タイプ	
	低線量	高線量	低線量	高線量	低線量	高線量
検出器	NaI(Tl)シンチレーション検出器	シリコン半導体検出器	NaI(Tl)シンチレーション検出器		シリコン半導体検出器	
検出器寸法	2 in ϕ \times 2 in 円柱形	—	2 in ϕ \times 2 in 円柱形		—	
測定線量率範囲	BG \sim 11 μ Gy/h	9 μ Gy/h \sim 100 mGy/h	0.01 \sim 500 μ Gy/h	300 μ Gy/h \sim 100 mGy/h	BG \sim 100 mGy/h	
測定エネルギー範囲	50 keV \sim 3 MeV	50 keV \sim ∞	50 keV \sim 3 MeV	50 keV \sim ∞	50 keV \sim ∞	
線量演算方式	デジタル処理 G(E)関数法	パルス換算方式	DBM	電流測定方式	パルス換算方式	
収集間隔	1分値 または 10分値		1分値 または 10分値		1分値 または 10分値	
時定数	10秒, 100秒		10秒, 60秒, 100秒		—	
記録方式	電子メモリ方式		電子メモリ方式		電子メモリ方式	
電源	AC100 V 及び内蔵バッテリー ※オプションによって外部バッテリー太陽光発電 装備可		AC100 V 及び内蔵バッテリー ※オプションによって外部バッテリー太陽光発電 装備可		AC100 V 及び内蔵バッテリー ※オプションによって外部バッテリー太陽光発電 装備可	
寸法	約 345 \times 348 \times 205 mm		約 670 \times 440 \times 450 mm		約 600 \times 1450 \times 250 mm	
重量	約 10 kg		約 15 kg		約 30 kg	
その他	測定単位は、Sv/h (周辺線量当量率) 及び Gy/h (空気吸収線量率) の双方で測定可能であることが望ましい。					

4.4 走行サーベイシステム

走行サーベイシステムは、その機動力を生かし広範囲に渡って効率良くモニタリングを実施することができるシステムとして活用されている。

走行サーベイシステムには、いわゆるモニタリングカーと称される車両に検出器が固定された固定型タイプと、車両が異なっても検出器を含むシステムの取り外し及び設置が容易で

ある可搬型タイプの二つに種別される。固定型及び可搬型に活用されている検出器を次に示す。

なお、走行サーベイという特殊な用途となるため、走行サーベイに適した特有の仕様（測定間隔、時定数及び方向特性等）を確認し活用する必要がある。詳細については解説 F を参照。

4.4.1 固定型タイプ

(1) NaI(Tl)シンチレーション検出器

これまでに述べている固定式連続モニタと同様の仕様の機種が一般的である。検出器の形状も 2 in ϕ \times 2 in 円柱形が代表的な仕様となっている。

(2) シリコン半導体検出器

可搬型モニタリングポストと同様に高線量率領域測定用として活用されている。

仕様に関しては可搬型モニタリングポストと同様である。

4.4.2 可搬型タイプ

現在、可搬型タイプの走行サーベイシステムには主に CsI(Tl)シンチレーション検出器が活用されている。この検出器の特徴である軽量・小型を生かし、伝送装置を含めたユニットを堅牢な専用小型ケースに収納することによって、設置の際の煩雑性を解消している。

固定型タイプ及び可搬型タイプの仕様例を表 4.5 及び表 4.6 に示す。

表 4.5 走行サーベイシステム（固定型タイプ）の仕様例

	走行サーベイシステム（固定型タイプ）の仕様	
	低線量	高線量
検出器	2 in ϕ × 2 in 円柱形 NaI (Tl) シンチレーション 検出器	シリコン半導体検出器
測定線量率範囲	10 nGy/h ~ 10 μ Gy/h	10 μ Gy/h ~ 100 mGy/h
測定エネルギー範囲	50 keV ~ 3 MeV	50 keV ~ ∞
エネルギー補償 線量率演算方式	G(E) 関数法	パルス換算
検出器収納筐体	検出器カバー、線源校正治具取り付け台含む	
測定時間	1 秒 ~ 99999 秒 任意設定可能	
温度制御	車内空気を循環	
データ収集装置	(1) データ収集用 PC (2) データ収集・処理ソフト (3) プリンタ (4) データ伝送用通信装置 (5) GPS	
振動対策	防振台設置	
電源	測定機器用発電機を搭載 ※出力は 4500 W 程度	
配電盤	メインブレーカー及び測定系ごとに電源を分割しブレーカーを設置。	

表 4.6 走行サーベイシステム（可搬型タイプ）の仕様例

	走行サーベイシステム（可搬型タイプ）の仕様
検出器	CsI(Tl)シンチレーション検出器 13 mm×13 mm×20 mm
光検出素子	マルチピクセル半導体
測定線量率範囲	1 nSv/h～300 μ Sv/h
測定エネルギー範囲	30 keV～2 MeV
計数効率	^{137}Cs 0.01 μ Sv/hにおいて40 cpm以上
エネルギー分解能	8 % ^{137}Cs 662 keV
エネルギー補償 線量率演算方式	G(E)関数法
検出器収納筐体	アルミ製収納ボックス 175 mm × 345 mm × 240 mm 除熱用排気ファン付き
測定時間	1 秒～60 秒 任意設定可能
動作温度範囲	-10～50 $^{\circ}\text{C}$
データ収集装置	(1) 組み込み用コンピュータ (2) データ収集・処理ソフト (3) データ伝送用通信装置 (4) GPS
電源	12 V / 24 V 直流電源 ※自動車用アクセサリソケット及びアクセサリ電源から電源供給が可能であること

第5章 測定システムの設置

5.1 連続モニタ設置の際の一般的な留意事項

連続モニタの設置に当たっては、次の事項に留意しなければならない。

- (1) モニタの設置場所は、原子力施設の位置、風向分布、集落分布、地形などを考慮して選定する。
- (2) 周囲が開放され、立ち入りが容易であり、水はけのよい場所を選定する。また、水はけの観点からも隣接地が水田である場所はできる限り避ける方がよい。水田は水が張られている時期と潤れている時期があるため、環境γ線量率の変動要因となる。また、休耕地であっても、水田の特性上、保水率が高いため降雨があった際に土壌が含水した状態が長く続くことがある。
- (3) 高温、多湿などの悪環境の場所を避ける。
- (4) 検出器周辺の地形、建物などによる遮へい効果などを最小にする。
- (5) 同一地点で複数の連続モニタを同時に使用する場合には互いに干渉し合わない範囲で可能な限り近接して設置し、地上高などの条件を統一しなければならない。
- (6) 連続モニタの設置場所周辺はフェンスなどで囲み、人為的な影響による線量率の変動がないようにすべきである。
- (7) 無線を用いてデータ伝送を行う場合には、発射された電波による影響を考慮して、無線局の位置、空中線の指向性、電源回路及び諸ケーブルに対する電波のまわり込み等の防止処置に十分に留意しなければならない。
- (8) 大規模な自然災害を伴う原子力災害の場合は、供給電源等のインフラが断たれてしまう可能性がある。このような場合を想定し、自家発電機の併設又は太陽光発電設備等によって電源供給方法を2系統以上整備しておくことが望ましい。ただし、発電機は継続して供給可能な燃料（軽油、LPGなど）を確保する必要があり、太陽光発電の場合は日照が不足している時間帯（夜間、悪天候時など）の予備電源の確保が必要である。また、データ伝送の手段が断たれることも想定し、災害に強い衛星通信等も整備しておくことが望ましい。
- (9) 予期せぬ落雷によってAC電源を介して測定器の電気系統が故障してしまう原因となる可能性がある。このような事態を回避するためには、アレスタ等の避雷器を設置しておくことが望ましい。
- (10) 東日本大震災の際には、大規模地震後の津波によって連続モニタが破壊されて使用不能となる事象が見られたことから、海に近い地点に設置する連続モニタについては、津波の影響がない高台への設置を検討する必要がある。一方では海岸沿いに集落がある場合には、海に近い地点に連続モニタを設置せざるを得ない。よって、万が一使用不能となった場合には、可搬式連続モニタで代用等を行い対応する必要がある。
- (11) 検出器設置地上高について、どの検出器及び設置条件に対しても共通する事項としては、定期的なゲインの調整等の機器調整が必要であるため、保守の容易さ等を考慮した高さに設置されることが望ましい。

5.2 固定式連続モニタ

5.2.1 電離箱モニタ

固定式連続モニタとして活用される電離箱モニタは、5.1 項以外に電離箱モニタ固有の留意事項がある。以下に、電離箱モニタ固有の留意事項を示す。

- (1) 常圧空気型電離箱は直射日光を避け、百葉箱等に設置すべきである。
- (2) 津波による影響にかかわらず、やむを得ず設置したモニタが測定不能となった場合には、可搬型モニタリングポスト等で補填する必要がある。
- (3) 電離箱モニタの設置地上高は、それぞれの目的に応じた設置環境を選択し、その意図を明確にしておく必要がある。

① 路地上 地上高 1 m

原子力災害対策指針に示されている運用上の介入レベル (OIL) にもあるとおり、地上高 1m において、地表面に沈着した放射性物質からの γ 線測定をすることを主な目的としている。

② 路地上 地上高 1.5~1.8 m 程度

① 路地上 地上高 1 m と同様の目的とした設置地上高である。ただし、豪雪地域では積雪によって検出器が埋もれてしまうことが想定される。このため、冬季においても有効に測定を実施するために設定された地上高である。

③ モニタリング局舎上

モニタリング局舎（地上高約 3 m）の屋根の上に約 0.6~1.0 m の高さに設置されているものである。これは、局舎脇の路地上に設置することによって上空を浮遊する放射性物質からの γ 線が、局舎によって遮へいされることを避けるために、モニタリング局舎上が選択されている。局舎上に設置することによって、占有面積が小さく済むことと、上空を浮遊する放射性プルーム等に対して敏感に反応することができることが利点である。ただし、その測定値には局舎屋根の材質中に含まれる放射性物質、及び周辺の樹木及び局舎による遮へい効果の影響のない周辺地表面等の路地上と比較して、より広範囲な測定対象となる。

④ 地上高数十 m の高所

これまでに設置されている連続モニタの中には、フォールアウトを測定対象とするために広い範囲を平均的に測定することを目的とし、例えば地上 3~5 階建て等の建屋屋上にモニタを設置しているものもある。これは、③局舎上と同様に放射性プルーム等に対して敏感に反応することが利点である。

5.2.2 NaI モニタ

固定式連続モニタとして活用される NaI モニタは、5.1 項及び 5.2.1 項と同様の留意事項をもつ。

固定式連続モニタの各条件における設置例を図 5.1~図 5.4 に示す。



図 5.1 路地上 地上高 1 m 設置状況の一例（愛知県）



図 5.2 路地上 地上高 1.5~1.8 m 設置状況の一例（青森県）



図 5.3 モニタリング局舎上 設置状況の一例（茨城県）



図 5.4 地上高数十 m の高所 設置状況の一例（愛知県）

5.2.3 簡易型電子線量計

固定式連続モニタとして活用される簡易型電子線量計は、5.1 項以外に簡易型電子線量計固有の留意事項がある。以下に、簡易型電子線量計固有の留意事項を示す。

なお、簡易型電子線量計は、福島第一原発事故の経験を踏まえてモニタリング対象範囲が拡大されたことに伴い、モニタリング空白地域を対象とするために導入されているものである。

(1) 架台

ステンレス製等の堅牢な材質を用いる。ただし、散乱体及び遮へい体となるため、できる限り細くする等の配慮が必要である。架台には、検出器・伝送装置・データロガーの収納箱、バッテリー収納箱及び太陽光発電装置等が設置される。架台前部には、検出器を含む収納箱が設置され、検出器の実効中心が地上高1mとなるように設置される。よって、架台前部方向には遮へい体とならないように、バッテリー収納箱の設置は避ける。なお、検出器上部を覆ってしまわないように太陽光発電設備を設置する必要がある。

(2) データ伝送

通常は短期間における時系列の測定データを測定システム内に蓄積し、別途データファイルを出力する必要がある。しかし、連続モニタとして活用するためには、電離箱モニタ及びNaIモニタにおける固定式連続モニタと同様にリアルタイムでデータを収集し、その測定値を確認できることが必要となる。よって、データ伝送システムが備わっていない場合には追加装備する必要がある。以下にデータ伝送方式例を示す。

- ・携帯電話回線
- ・衛星携帯電話回線

携帯電話回線は、電波基地局の設置状況と通信可能エリアを把握した上で活用することができれば、比較的安定した電波状況でデータ伝送ができる。携帯電話回線は、プロバイダごとに電波基地局が設置されているため、電波状況もその設置環境に左右される。現在の携帯電話が普及したインフラ状況下において、市街地等の人口密集地では、どのプロバイダを選択しても、比較的安定した電波状況を得ることができる。しかし、山間部等の過疎地においては、プロバイダによっては安定した電波状況が得られないこともある。また、どのプロバイダを選択しても携帯電話回線を活用できないこともある。

このような状況下においては、緊急時においても電波基地局の設置の有無に関係することなく利用することができる衛星携帯電話回線を装備または併設しておくことが望ましい。

衛星携帯電話回線は利用料金が携帯電話回線と比較して高価であるため、利用に際しては各回線における電波状況を踏まえて、データ伝送方法を選択することが重要である。

(3) 駆動電源

簡易型電子線量計は、通常外部AC電源を供給することによって駆動させることができる。内蔵バッテリーを装備している機種については、その容量に応じた時間内においては駆動させることができる。しかし、連続モニタとして活用するためには、ある程度の長期間において電源供給を続けられる装備が求められる。また、データ伝送システム等の附属システムにおいても電源供給を必要としているため、内蔵バッテリーだけで賄うことは困難である。よって、以下に示す電源供給方法を組合せて使用すべきである。

① AC 電源

この方法は、安定して電源を供給することが可能であることが利点である。しかし、AC 電源を確保することは容易ではない場合もある。また、AC 電源を活用できる状況下においても、一般家庭等の屋外用電源コンセントから電源を供給する場合には、5.1 項に示したとおりアレスタ等の避雷器を設置することが望ましい。

② 外部バッテリー

外部バッテリーは、AC 電源又はほかの供給電源が断たれてしまった際に、活用できるよう予備電源として装備しておくことが望ましい。現在、活用されているバッテリーは船舶用バッテリー等の大容量のもので、バッテリーを 2 台直列する等して最大 7 日間程度の駆動容量を有しているものもある。外部バッテリーが消耗してしまった場合でも、ほかの供給電源が復旧した際には、このバッテリーに対して充電する機能が備わっていることが望ましい。外部バッテリーは物理的に大型となるため、測定すべき線の遮へい体とならないように測定器本体の真下に配置する等、配置位置には注意する必要がある。

③ 太陽光発電

太陽光発電は、AC 電源供給が望めない山間部等の電線設備の空白地点、及び停電等によってインフラが断たれている状況においても長期間に渡って比較的安定した電源供給が可能な方法である。この方法を採用する場合には、日照（理想は直射日光）の確保が重要になる。測定の観点からも周辺が開けた環境に設置することが望ましい。しかし、設置した際には日照を遮る物体が無かったとしても、その後樹木の生長や新たな建造物等によって状況が変わることも考えられる。設置の際には、設置期間と周辺状況の変化予測等に留意する必要がある。

簡易型電子線量計における設置状況の一例を図 5.5 に示す。



図 5.5 簡易型電子線量計 設置状況の一例（島根県）

5.3 可搬式連続モニタ

可搬型モニタリングポストは、従来の活用方法としては「可搬式」であるため本項の「可搬式連続モニタ」に記載している。しかし、記載はこれらを固定式連続モニタと同様に活用するための内容についても言及している。

5.3.1 可搬型モニタリングポスト

可搬式連続モニタとして活用される可搬型モニタリングポストは、5.1 項以外に可搬型モニタリングポスト固有の留意事項がある。以下に、可搬型モニタリングポスト固有の留意事項を示す。

(1) 架台

現在、市販されている可搬型モニタリングポストは、装置下部に架台等を設置することによって地上高1mに設置することができる構造になっている。しかし、附属している架台は簡易的なものであるため、連続モニタとして長期間使用する場合には、堅牢な架台が必要となる。ただし、測定器下部及びその周囲に、堅牢性が過剰な架台を設置してしまうと、地表面に沈着した放射性物質からの γ 線の散乱体及び遮へい体となるため、できる限り細くする等の配慮が必要である。

設置に際しては、遮へい効果の影響を考慮した架台を選択するとともに、その架台を含めたシステム全体が設置された状況において、設置前の測定値と比較する等によって、架台による遮へい効果がどの程度であるかを把握しておくことが重要である。

(2) データ伝送

簡易型電子線量計と同様である。

(3) 駆動電源

簡易型電子線量計と同様である。

なお、太陽光発電設備を採用した場合、日照条件を優先することによって、測定器自体も直射日光を受けることとなる。可搬型モニタリングポストは、温度補償回路は装備しているものの、固定式連続モニタとは異なり温度制御装置を装備していることは少ない。この場合、直射日光による急激な温度変化に温度補償回路が対応しきれずに感度変化が大きくなってしまふことがある。長期的に安定した電源を確保するためには、この設備を有効に活用する必要があり、日照が不可欠である。しかし、測定器に対しては望ましい条件ではない。

よって、測定値の変動要因として温度変化による影響が含まれていることを把握しておくことが重要である。詳細は解説Eに示す。

上記以外の項目については、固定式連続モニタと同様の考え方でよい。可搬型モニタリングポストにおける設置状況の一例を図5.6に示す。



図 5.6 可搬型モニタリングポスト 設置状況の一例
(検出器位置：地上高 1 m、太陽光発電及び外部バッテリー設備有り)

5.4 走行サーベイシステム

走行サーベイに活用されるシステムは、走行サーベイシステム固有の留意事項がある。以下に、走行サーベイシステム固有の留意事項を示す。

なお、ここでは固定型タイプについては代表的なモニタリングカーを例として、可搬型タイプについては、福島第一原発事故後に開発、活用されている測定器を例として、その留意点等について記載する。

(1) 固定型タイプ

固定型タイプの走行サーベイシステムは、いわゆる「モニタリングカー」を意味している。よって、検出器は車両上部の車外に設置される車外設置と、車内の決められた位置において地上高 1m となるように設置される車内設置との 2 タイプに区別される。

車外設置の代表例を図 5.7 に示す。

車外設置の検出器は地上高 2 m 程度に設置されることが多い。

測定機器を設置するに当たって、供給電源を確保する必要がある。代表的なものとしては、車両のバッテリーから電源を供給する方法であるが、この場合、バッテリー容量を車両だけに使用するものよりも大きくする必要がある。また、車両の発電機能（ダイナモ）にからバッテリーを充電している最中は電源電圧が不安定なため、そのままでは精密機器への供給電源には適さない。この場合は、UPS（無停電装置）等を連結し、電源電圧の安定化をすることが望ましい。

車内設置の検出器は地上高約 1 m となるように車内に設置される。

車内に検出器が設置されるため、周辺機器及び車体自体による遮へい効果の影響を評価する必要がある。遮へい効果の影響を一定とするために、検出器並びにその周辺機器の幾何学的な条件を常に同一にする必要があり、測定の際は、遮へいとなり得る物品の積載を避ける必要がある。また、電源に関する事項については、上記車外設置と同様である。



図 5.7 固定型タイプ（車外設置）の一例

柴道 ほか, “福島環境におけるモニタリングカー車内外空間線量率換算手法の検討”

日本放射線安全管理学会 第 14 回学術大会, 2015

(2) 可搬型タイプ

可搬型タイプの走行サーベイシステムは、福島第一原発事故後に広く活用されるようになり、今後も導入を検討するモニタリング機関が増えることが想定される。

可搬型タイプの代表例を図 5.8 に示す。

可搬型タイプに使用される検出器には、市販のサーベイメータを車内に仮設することによって活用されるシステム、及び走行サーベイを目的として専用の収納容器に納められ、多種類の車両に積載できるシステムが存在する。いずれのシステムにおいても、設置に関する事項は同様の考え方に基づいている。

設置に際しては、検出器を含めたシステムを車内の任意の位置に設置固定する。この設置条件に応じた車内外補正係数を使用する必要があるため、測定作業実施中は検出器の位置が変わらないように固定することが重要である。供給電源は、市販のサーベイメータを用いている場合には、そのサーベイメータの仕様に従った電源供給となる。一般的なものとしては、乾電池にて駆動させている。また、走行サーベイを目的として設計されたシステムについては、現在車両のシガーソケットに接続することによって車両のバッテリーから電源供給がされている走行サーベイシステムもある。



図 5.8 可搬型タイプの一例（左 設置時、右 収納ケース内部）

“GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA” 京都大学原子炉実験所

福島原子力災害対策支援グループホームページ

第6章 測定と校正

6.1 使用上の留意事項

連続モニタは複雑な機構を有し、きびしい野外環境において無人の状態でも長期間放置されるうえ、欠測を最小にすることが要求される。このようなきびしい条件を満足するためには、十分吟味された製品を使用することはもちろん日常の綿密な保守・管理が必要である。

連続モニタを使用するうえで留意すべき事項は数多くあるが、その主なものを示せば次のとおりである。

- (1) 使用するモニタの諸特性（エネルギー特性、方向特性、温度特性等）をよく把握しておくとともに、検出部の構造、電子回路の機能等についても、可能であるならば製造業者から十分な情報を得ておく。万一、モニタの性能がモニタリングの目的に対して不十分であると思われた場合は、適切な対策を講じなければならない。
- (2) モニタの取り扱いの説明書にしたがって正しく行う。
- (3) 一定期間ごとに、必要に応じて点検及び校正を実施する。
- (4) 検出部は一般に衝撃に対して非常に弱いので、取り扱いに際しては細心の注意を払う。
- (5) 検出部には高電圧が供給されており、高圧端子等は湿気、塵埃の付着で電氣的漏えいを生じて雑音の原因となるおそれがあるので、定期的に清掃する。また乾燥剤を用いている場合には定期的に交換する。
- (6) 落雷による事故を防ぐためにアレスタ（避雷器）を内蔵した機種にあっては、定期的に点検を行う必要があり、とくに雷の多い地域ではその点検を頻繁に行う。
- (7) 連続モニタの測定結果には、モニタの設置状況及び測定条件等の様々な要素が含まれており、これらを測定結果とともに明確にすることによって、測定に含まれる情報を知ることができる。固定式及び可搬式連続モニタについての記録様式の例を表 6.1 に示す。

以上の各モニタに共通する事項のほか、各方式のモニタに対する留意事項としては次のようなものがある。

① 電離箱モニタ

電離箱モニタは定期的にゼロ点の確認を行う（自動化されているものもある）。また、密封の破壊による圧力の変化に注意する。圧力の変化は、加圧型電離箱では指示値の著しい減少によって、また常圧型電離箱では大気圧への依存性が現れることによって発見することができる。

② NaI モニタ

NaI モニタは一般にいくらかの温度特性を示す可能性があるため、指示値の日変化及び季節変化に注意し、必要ならば適切な対策を講ずる。

③ 簡易型電子線量計

温度特性に留意する必要がある。また、簡易型電子線量計の多くが検出器としてシリコン半導体検出器を搭載している。この場合、ほかの検出器に比べエネルギー特性による影響が大きいことも把握しておく必要がある。

④ 可搬型モニタリングポスト

NaI モニタ及び簡易型電子線量計と同様に装備されている測定機種に応じた温度特性を有している。その特性が測定値に与える影響については解説 E に記載する。可搬型モニタリングポストという性質上、簡易的な装置であるため温度制御装置を装備していない。よって、測定値の代表的な変動要因として温度変化に起因したものが含まれる。

⑤ 走行サーベイシステム

可搬型モニタリングポスト等とは異なり測定に影響する検出器並びに検出器周辺温度は、車内の空気を循環することによってある程度コントロールされているため、測定値に対してそれほど大きな影響を与えない。走行サーベイシステムを用いた調査目的の性質上、測定対象範囲、すなわち方向特性が重要な変動要因を占める。移動手段である車両も含めた方向特性を把握した上で、測定を実施することが重要である。

また、走行サーベイシステムが活用されるタイミングとして、緊急時の最中であることは容易に想像できる。この場合、一度モニタリングに活用してしまうと、車両のタイヤハウス内及びエアフィルター等が汚染してしまい、バックグラウンドが上昇してしまうことがある。この影響を差し引くためには、測定開始前と終了後に線量率の変動のない同一地点で測定を実施し、車両の汚染レベルを把握することによって、必要に応じて測定値から差し引く等の評価を行う。

6.2 固定式連続モニタ

6.2.1 校正と調整

「調整」とは、機器を健全に保つために各種設定を適切な状態にする行為であり、その結果、測定値が「相対基準誤差±20 %」の許容範囲内であれば合格とすることは JIS においても明記されていることである。

一方「校正」とは、国家標準との間にトレーサビリティを確保することによって、計測値と値付けとの比から真値を導くために必要な校正定数を与える行為である。

上記のように「調整」と「校正」は異なった行為であり、「調整」は「校正」を代替するものではない。しかし、設置済みの連続モニタに対して「校正」を実施することは困難であるため、「調整」が実施されているのが現実である。

連続モニタの測定値に対する要求として、いわゆる“モニタ”であるならば「調整」を実施することで要求を満足するための健全性は確保することができる。しかし、OIL の判断基準、及び後に外部被ばく線量評価に資するデータとなるのであれば、国家標準とトレーサビリティを確保することができる「校正」を行うことが望ましい。

(1) 校正

校正照射場における校正又は製造業者が行う引き渡し試験と同等の試験をモニタの設置場所で行うことは困難である。しかし、モニタの設置場所において、国家標準とのトレーサビリティが明確な基準器によって、その基準器による校正、もしくは基準 γ 線源を用いた JIS Z 4511 : 2005 に規定する線源法又は逆二乗法による実用校正は可能である。

基準 γ 線源は通常線源から 1 m の点における照射線量率が値付けされている。線源と検出器中心を結ぶ線が地表面または床面に平行であるならば、散乱 γ 線の寄与率はある範囲内で線源及び検出器の地表からの高さが低いほど、また検出器の線源からの距離が離れるほど大きくなり、高さが高いほど、距離が近づくほど小さくなる（解説 D 参照）。しかし、距離が著しく近くなると実効中心の変化が無視できなくなる。

以下に主な校正条件・方法を記載する。

- ① モニタ校正用の基準 γ 線源の核種は、 ^{60}Co または ^{137}Cs とする。ただし、 ^{226}Ra を用いてもよい。
- ② 校正方向は、検出器の中心軸に水平又は垂直とする。また、周囲近傍の散乱体の影響の少ない方向を選ぶ。
- ③ 電離箱の実効中心から校正方向の上方に基準 γ 線源の校正距離と等しい距離に線源を固定する。また、高さ及び距離に応じて散乱線の寄与を考慮し、必要があれば補正する（解説 D 参照）。
- ④ 基準 γ 線源と検出器間の距離は、1 m 以上とすることが望ましい。通常、線源と検出器間の距離は 1 m が基準となる。
- ⑤ 通常校正結果に影響を及ぼすような気象条件を避けて行う。
具体的には校正作業中にバックグラウンドの線量率が変動してしまうような降雨等の気象条件は避ける必要がある。
- ⑥ モニタの動作が十分安定になった状態で行う。

⑦ 次式から校正定数 K を算出する。

$$K = \frac{D}{\dot{Q} - \dot{Q}_b}$$

ここに、 \dot{D} : 校正時における標準 γ 線源の線量率

\dot{Q} : 標準 γ 線源による照射時の指示値

\dot{Q}_b : 環境 γ 線の線量率による指示値

⑧ 校正実施の頻度は、四季の気象・環境の変化を考慮すれば年間 4 回が望ましい。しかし、年間 4 回が不可能な場合には、確認用線源を用いて、可能な限り短い間隔で確認を行うことによって、十分な信頼性とトレーサビリティの確認ができる。

⑨ 校正の日時、校正条件及び結果は記録しておかなければならない。

なお、多くの地点で校正を行う場合、各地点の周辺環境の違いのため散乱線などの影響は異なる。したがってできるならば散乱の少ない環境で十分に校正された線量（率）計を各モニタリング機関が基準測定器として、設置場所にて被校正モニタとの比較校正を行うのがよい。

(2) 調整

モニタの調整を実施するに当たり、各機器及び各設定について点検を実施する必要がある。以下に点検・調整項目の一部について例を示す。

- ① 外観検査、各部清掃
- ② 絶縁抵抗
- ③ 加温装置における温度指示制度、警報動作
- ④ 電源電圧精度
- ⑤ 線量率指示精度、スケーラ動作の確認
- ⑥ ゼロ点の確認
- ⑦ ゲイン調整
- ⑧ 線源照射試験

6.2.2 電離箱モニタ

(1) 測定時間の決定

電離箱モニタは、多くの場合、高線量率測定用として整備されている。高線量率時における測定値の 1 データの積算計数時間は 2 分程度で十分であり、また緊急時における測定値の変動の把握のためにも 2 分程度であることが望ましい。平常時においては、我が国における自然放射線の線量率レベルを勘案すると、1 データの積算計数時間は～10 分程度とすることが適当である。

(2) データ処理

① 記録

データの記録は、3.3 項に記載したとおりである。その内容は線量率測定値が記録され

る。

② 処理

データの処理は、3.4 項に記載したとおりである。平均値、最大値及び最小値等が計算・解析され、異常値の抽出がされる。

6.2.3 NaI モニタ

(1) 測定時間の決定

測定値の 1 データの積算計数時間は、3 in ϕ × 3 in NaI (Tl) シンチレーション検出器使用の場合、計数値の統計誤差の変動からみて数分の測定時間で十分な精度が得られる。しかし実際には変動特性を考慮して測定時間を決定する必要がある。

自然放射線の変動と施設起因放射線の変動をその変動周期の違いから区別するには、解説 B に示すような理由から 1 データの積算計数時間を数分から 10 分程度に選ぶのが適当である。線量率の変動パターンをより忠実に再現するために積算時間を 2 分程度とし、後のデータ処理の際に平滑化又は平均操作を行う方法もあるが、データの処理が膨大になり過ぎる。測定段階でデータ数を減らしておいた方がよい。

(2) データ処理

① 記録

データの記録は、3.3 項に記載したとおりである。その内容は線量率測定値及び計数値等が記録される。また、スペクトル情報が得られるシステムの場合は、スペクトルデータも記録される。

② 処理

データの処理は、3.4 項に記載したとおりである。平均値、最大値及び最小値等が計算・解析され、異常値の抽出がされる。

6.2.4 簡易型電子線量計

(1) 測定時間の決定

簡易型電子線量計における測定時間の考え方は、6.2.3 項と同様である。

(2) データ処理

① 記録

データの記録は、3.3 項に記載したとおりである。その内容は線量率測定値が記録される。また、外部バッテリーによる電源供給を採用している場合は、バッテリー電圧のモニタリングも不可欠であるため、この情報も伝送し記録されることが望ましい。

② 処理

データの処理は、3.4 項に記載したとおりである。平均値、最大値及び最小値等が計算・解析され、異常値の抽出がされる。

6.3 可搬式連続モニタ

6.3.1 校正と調整

可搬式連続モニタにおける校正と調整の考え方は、6.2.1 項と同様である。なお、エネルギー情報が得られないシステムの場合は、線源の値付け（照射値）と測定値の比較において、調整等を実施する。

6.3.2 可搬型モニタリングポスト

(1) 測定時間の決定

可搬型モニタリングポストにおける測定時間の考え方は、6.2.3 項と同様である。

(2) データ処理

① 記録

データの記録は、3.3 項に記載したとおりである。その内容は線量率測定値及び計数値等が記録される。スペクトル情報が得られるシステムの場合は、スペクトルデータも記録される。また、外部バッテリーによる電源供給を採用している場合は、バッテリー電圧のモニタリングも不可欠であるため、この情報も伝送し記録されることが望ましい。

② 処理

データの処理は、3.4 項に記載したとおりである。平均値、最大値及び最小値等が計算・解析され、異常値の抽出がされる。ただし、平常時におけるデータの伝送間隔は、消費電力と装備している電力の許容量とを勘案して設定することもある。

6.4 走行サーベイシステム

走行サーベイという測定の特徴上、静止した条件で測定するのではなく、常に移動しながら測定を実施する事が多い。しかし、モニタリングカーを停車し、定点測定として活用することもあるが、定点測定に関する考え方は固定式連続モニタ及び可搬式連続モニタと同様であるため、ここでは移動しながら測定することにだけ言及する。

6.4.1 校正と調整

サーベイメータ等を用いている場合には、通常使用時と同様に定期的な校正も実施する必要がある。また、測定器の状態を健全に保つために必要な調整は、固定局等で使用されている同一機器と同様である。

なお、測定器を車内に設置しているシステムの場合は、得られた測定値を車外における地上高 1m の値に換算する必要がある。車内外補正係数に関する算出法の一例を、第 7 章 測定結果の解析と評価に記載する。

6.4.2 測定時間の決定

走行サーベイの場合、測定時間の間隔が短いほど、より細かい間隔で走行ルート上の測定値を得ることができる。これは、測定時間の間隔が短いほど走行ルート上周辺における線量率の変動を敏感に把握しやすくなる。一方、測定時間の間隔が長くなるほど、走行ルート上

周辺の平均的な線量率分布を得ることができる。

走行サーベイ中の走行速度は、法令に定められた制限速度にて走行することとなるのが現実的である。解説 F に測定時間と測定値の得られる距離間隔との関係を示す。また、検出器の種別によって検出効率が異なるため、測定時間を設定するに当たり、得られる測定値のばらつきは重要な情報である。解説 F に、走行サーベイシステムに利用されている一般的な測定仕様における測定値のばらつきについて示す。

6.4.3 データの処理

「モニタリングカー」として整備されたシステムについては、まず車内においてその測定値をレートメータ^{*1}等でリアルタイムに確認することができるものが一般的である。また、これらのデータはデジタルファイルとして蓄積されデータ収集装置及び制御用 PC 内などに保存される。さらに、近年の GPS^{*2}の精度向上とそれに付随する機器の進歩によって、リアルタイムで地図上にマッピングされるものが活用されてきている。このマッピングデータはクラウドサーバ等で収集管理されることによって、アクセスさえ可能なツールをもち合わせていけば、何時、何処からでもデータの確認をすることができる。

市販のサーベイメータを活用している場合は、そのサーベイメータのディスプレイ表示で確認するほか、上記モニタリングカーと同様に、マッピングデータをクラウドサーバ等で収集管理されることによって、アクセスさえ可能なツールをもち合わせていけば、何時、何処からでもデータの確認をすることができる可搬型走行サーベイシステムもある。

*1 線量率及び計数率の情報をアナログ量としてメータに表示させる装置

*2 Global Positioning System : 「全地球測位システム」の略

第7章 測定結果の解析と評価

7.1 概説

各システムに共通した考え方として、環境 γ 線の連続測定記録は、平均値に対して有意な変動を抽出し、解析されることがこれまで一般的であった。ここでは、平常時における代表的な解析と評価の手法・考え方、モニタリングデータの取り扱いについて記載する。また、福島第一原発事故時及び事故後においては、この考え方が成立しない状況も存在するため、緊急時及び事故後のモニタリングにおける解析と評価の手法についても記載する。

7.2 平常時における解析と評価

原子力安全委員会（当時）から示されている「環境放射線モニタリング指針」においては、平常時モニタリングの目的として、「原子力施設の周辺住民等の健康と安全を守るため、環境における原子力施設に起因する放射性物質又は放射線による周辺住民等の線量が、1年間の線量限度を十分に下回っていることを確認し、その結果を周辺住民等に提供することである。」と記載されている。また、この目的以外にも、「環境における放射性物質の蓄積状況の把握」、「原子力施設からの予期しない放射性物質又は放射線の放出の早期検出及び周辺環境への影響評価」及び「異常事態又は緊急事態が発生した場合における環境放射線モニタリングの実施体制の整備」が記されている。これら目的を達成するために、解析と評価方法の一例を以降に記す。

7.2.1 平均値と標準偏差の算出

環境 γ 線の連続測定記録は、平均値に対して有意な変動を抽出し、解析する。このため、長期に渡る測定結果について単位時間の測定値の平均と分散を求める。単位時間は1時間とし、必要に応じて短くする。

単位時間の測定値の算術平均をとる。n個の測定値についてそれぞれの値を mi すると、平均値 \bar{m} は

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^n mi/n \quad \text{で決まる。}$$

分散 σ^2 を

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (\bar{m} - mi)^2 / (n-1)$$

で算出し、この平方根 σ を標準偏差とする。

平均値及び標準偏差は着目する母集団のとり方によって異なる。母集団の選定については解説Gに示す。

7.2.2 異常値の抽出

異常値は、平均値に対して単位時間の測定値がそれらの数値の分布を考慮して過大または過小であるかを一定の基準にしたがって判別して決定する。この基準のとり方には色々あるが、本測定法では測定値が $\bar{m} \pm 3\sigma$ の範囲を超えるものを異常値とする。解説Gに示したように母集団の分布の形によってこれを超える確率は異なり、たとえば正規分布では0.3%、指数分布では2%となる。

また、現在主流となっている多くの NaI モニタでは、エネルギー情報の取得が可能な仕様となっているため、この情報を活用した異常値の抽出も有効である。

具体例としては、原子力災害時に放出される人工放射性核種の多くが低エネルギー領域内（約 80 keV～約 1400 keV）の光子エネルギーの核種がほとんどであることに着目し、このエネルギー領域間の計数率と全線量率との比（全線量率／低エネルギー領域計数率）を常に算出し、平常時に算出される比よりも低い値であれば人工放射性核種による影響が観測されていることとなり、平常時に算出される比よりも高い値であれば降雨等に伴う天然放射性核種による影響が観測されていることとなる。

また、NaI モニタにおいて G(E) 関数法によって線量率演算を実施しているシステムでは、NaI 検出器によって得られたエネルギー波高分布の計数値を、エネルギー特性を補償するためにエネルギーごとに換算係数の異なる G(E) 関数に応じた加重演算を実施し、加重演算前後の計数値を比較することによる「通過率」を用いて、人工放射性核種寄与による線量率上昇の目安を知ることできる。

なお、校正及び調整を実施することによって、健全性を十分に確保した可搬型測定機器（NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ等）を用いた比較測定によって、既設モニタが正常に動作し正しい測定値が得られていることを確認することができる。比較測定に関する解説を、解説 H に示す。

7.2.3 異常値の原因の解析

3σ を超えたために異常値と判定された測定値には、前項に示す割合で正常値が含まれる。このほか、連続観測においては、自然現象ならびに人工的な要因によって環境放射線が特定の期間変動し、統計的な確率を上回って異常値が観測される。異常値の原因について解析する場合には、このことを十分考慮しなければならない。

異常値の生ずる主な要因は、母集団の大きさ及び分布の形に依存する統計的な確率のほか（i）降水、（ii）積雪、（iii）その他の自然現象、例えば逆転層等による放射線レベルの変動、（iv）大気圏内の核爆発実験、（v）原子力施設等人工的な放射線源、（vi）測定器の異常、などがある。

これらの要因について解析を行うには、

- (1) それぞれの要因について情報を得る。
- (2) 測定時間間隔を選択する。
- (3) 母集団を選択する。

ことが必要である。解説 G には、母集団のとり方、おもな異常値の発生原因、及びこれら解析に必要な時間間隔のとり方を例示する。図 7.1 に異常値解析のフローチャートの一例を示す。

また、昨今整備されている連続モニタでは、スペクトル情報を線量率の測定と同時に得られていることも多い。この場合は、スペクトル解析によって核種毎の線量率寄与分を評価することもできる。解析・評価方法については第 10 章に示す。

7.3 緊急時における解析と評価

原子力施設から放射性物質が放出された可能性がある状況下において、測定される可能性のあるデータについて記載する。

7.3.1 緊急時及び事故後における測定対象核種

緊急時には放射性プルームが通過している時と、フォールアウト等によって放射性セシウム等の粒子状放射性物質が地表面に沈着した後とは、測定対象核種が異なる。環境 γ 線量率測定は核種ごとに濃度及び線量率を評価することが最終目標ではないが、検出器がエネルギー特性を有しているため、核種とそのエネルギーの違いによって測定値が過大に評価されることを把握する必要がある。

昨今、電子機器の向上によって、エネルギースペクトル情報が得られるモニタが増えている。緊急時において、線量率に寄与している人工放射性核種を把握する上で、このエネルギースペクトル情報を有効に活用することができる。

緊急時及び事故後に線量率が上昇した状況の一例を解説 I に示す。

また、事故後において、外部被ばく線量評価に資するデータの取得を目的としている場合においては、人工放射性核種の物理減衰、ウェザリング効果及び土壌の鉛直分布方向への浸透等によって、時間の経過とともに線量率が低下する。よって、以下に示す評価を行うことで、迅速に異常値を抽出することができる。

- ・ 物理減衰等による線量率の低下を考慮し、1ヶ月程度の間隔でしきい値を更新
- ・ 比較測定によって測定システムの健全性を把握

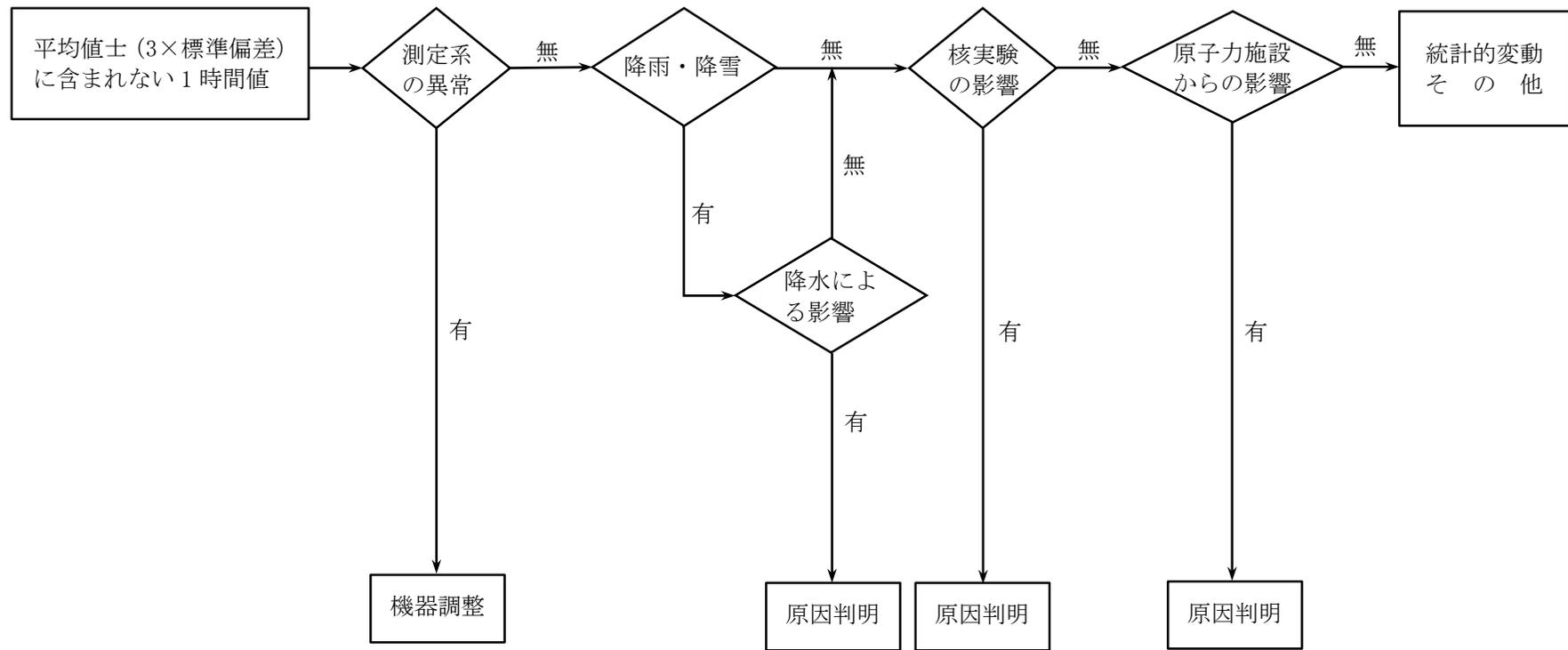


図 7.1 異常値解析のフローチャート例

7.4 測定単位

環境 γ 線量率の測定単位には、「空気吸収線量 (Gy)」及び「周辺線量当量 (Sv)」がある。

原子力災害対策指針の補足参考資料である「緊急時モニタリングについて」(原子力規制庁平成27年8月)に記載があるとおり、計測後に単位の換算が必要になる場合があるため、報告等の際には観測結果とともに単位を明確にしておくべきである。

なお、それぞれの単位における考え方を解説Jに示す。

表 7.1 測定単位に関する定義

量	単位	内容
照射線量	クーロン/キログラム (C/kg)	放射線によって空気 1 kg で生成された電荷量。 線量の基本となっている単位。 旧単位はレントゲン (R)。
吸収線量	グレイ (Gy)	物質に吸収された放射線のエネルギーを表したもの。 1 Gy=1 J/kg。 環境放射線モニタリングでは、空気吸収線量が測定される。
カーマ	グレイ (Gy)	放射線によって物質の単位質量当たりが発生する荷電粒子の初期運動エネルギーの総和で定義されたもの。作用する物質が空気の場合には、「空気カーマ (Gy)」と呼ばれ、空気カーマと空気吸収線量は等しいとみなされることもある。
等価線量	シーベルト (Sv)	人への影響を評価するに当たって放射線の種類及びエネルギーを考慮したもの。 組織・臓器の吸収線量に放射線加重係数を乗じて、組織・臓器ごとに算出する。
実効線量	シーベルト (Sv)	人への影響を評価するに当たって被ばくした部位を考慮したもの。 組織・臓器の等価線量に組織加重係数を乗じ、全身について合計して算出する。 平常時の環境放射線モニタリングでは、 1 Gy (空気吸収線量) =0.8 Sv 緊急時は、1 Gy=1 Sv。 環境放射線モニタリングに関する指針にて被ばく線量評価を実施する単位として示されている。
周辺線量当量 (1 cm 線量当量)	シーベルト (Sv)	人体を模擬した密度及び元素組成をもつ 30 cm の球 (ICRU 球) の表面から深さ 1 cm における線量当量である。

7.5 各測定システムにおける解析と評価

7.4 項までは、各測定システムに共通する事項について述べているが、本項はシステムごとに解析と評価の方法及び考え方が異なる内容について記載する。

7.5.1 固定式連続モニタ（電離箱モニタ、NaI モニタ及び簡易型電子線量計）

(1) 測定地上高の考え方

OIL に基づく防護措置の判断のためには、1 m 高さによる測定値が必要である。第 5 章で示したとおり、固定型連続モニタは様々な目的のために異なる高さで計測されており、原子力災害対策指針の補足参考資料である「緊急時モニタリングについて」（原子力規制庁 平成 27 年 8 月）に記載があるとおり、計測後に設置地上高による換算が必要になる場合があるため、報告等の際には観測結果とともに測定高さを明確にしておくべきである。

また、異なる測定地上高間における測定値の考え方を解説 K に示す。

(2) 検出器に応じた結果の評価

緊急時と判断された状況下においては、環境 γ 線量率は既に高線量率となっていることが予想される。

放射性プルーム通過時では、解説 I に示したとおり、 ^{133}Xe による低エネルギー（81 keV）光子による寄与割合が大きく、これが主要因となり高線量率になっていることが想定される。この状況下においては、数え落としの影響のない電離箱モニタ等の適切な検出器を選択する必要がある。

粒子状の放射性物質がフォールアウト等によって地表面に沈着した後においては、原子力災害対策指針にて、各 OIL による初期設定値が示されている。OIL1、2、及び 6 において、それぞれ $500 \mu\text{Sv/h}$ 、 $20 \mu\text{Sv/h}$ 及び $0.5 \mu\text{Sv/h}$ となっており、これらを測定し評価をするために適した測定器を選択する必要がある、それぞれのモニタにおける測定可能線量率範囲を把握しておく。よって、選択した検出器に応じた評価をすることが必要である。

状況に応じた測定器の選択をするに当たり必要な各検出器の特性について、解説 B を参照のこと。

簡易型電子線量計は、検出器前方に対して感度が大きい方向特性を有している。言い換えると検出器後方に対しては前方と比較して感度が低下するため、測定対象範囲を設定するに当たり検出器の設置方向について、勘案する必要がある。

7.5.2 可搬式連続モニタ（可搬型モニタリングポスト）

(1) 異常値の抽出

可搬型モニタリングポストの設置場所は、「緊急時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）」において「固定観測局が自然災害の影響によって作動していない地点及び固定観測局が設置されていない地点」と記されている。また、「放出源の状況に応じて、追加で空間放射線量率の把握が必要な地点」も対象となることも併せて記されている。これらの目的によって設置されている場合については、OIL の各初期設定値が測定対象線量率範囲内である検出器を設置する必要がある。

しかし、「固定観測局が設置されていない地点」となる場所に設置している場合には、固定局と同様の考え方にに基づき異常値の抽出を行えることが必要である。

(2) 温度特性による影響の把握

第4章でも述べたとおり、可搬型モニタリングポストは、温度補償回路は装備されているが、温度制御装置は備わっていない。更に設置条件として、上方方向が比較的開けていることが望ましいことと、電源供給方式に太陽光発電が採用されていることが多い。このような場合、検出器自身も直射日光を受けることによって、温度補償回路では補償しきれないほどの感度変化を起こすことも考えられる。よって、測定をある程度長期間に渡って同一地点で実施する場合には、温度による感度変化についても把握しておくことが重要である。

7.5.3 走行サーベイシステム

(1) 外部被ばく線量評価への適用

固定型タイプにおける車外設置の場合、車両周辺の放射性物質からの一次放射線を直接測定することができる。しかし、車両直近から数 m 以内は車体による遮への影響によって測定値に対する寄与分は少なくなる。よって、車両上部に検出器が設置されている車外タイプの場合は、測定対象範囲が車両から少し離れた位置から外側の範囲へと広がっている。通常、屋根に固定（車上に突き出した）した検出器を備えた車両は、放出中の放射性プルーム通過時の測定に適しており、校正されている。これを地表に沈着した放射性物質からの線量率測定に用いる場合は、車両の遮へい及び高さ等のジオメトリを考慮した評価方法を検討しておくことが重要である。

固定型タイプまたは可搬型タイプであっても車内に測定器が設置されている場合、車内外の補正係数をあらかじめ求めておき、測定値を評価する必要がある。以下に補正係数の算出手順を示す。

- ① 平たんで開けた場所であり、かつ車両周辺の線量率が均一な地点に車両を駐車する。
- ② 車内の所定の位置に設置した可搬型測定器にて、測定を実施する。
- ③ 車両を移動し、車両が無くなった②の測定地点において、測定地上高：1m、測定単位：周辺線量当量率の測定条件で測定を実施する。
これらの測定を線量率の異なる複数地点で実施する。
- ④ ②及び③で得られた結果の比を算出し、車内外の補正係数とする。

この方法によって算出した補正係数には、高さ及び車体による遮への影響を換算するための補正項が含まれている。

可能であるならば、上記補正係数を算出するための測定は、線量率の異なる複数地点で求め、車内と車外の線量率からの回帰式として用いることが望ましい。

また、上記考え方は、基準となる車外での測定値が正しいことが前提となる。よって、使用する測定器は国家標準とトレーサビリティが確保されている必要がある。

固定型タイプの車外設置の走行サーベイシステムによって得られた測定値に、車内外の補

正係数の考え方を適用させることによって、車両の遮へい及び高さ等のジオメトリを考慮した評価についても解決することができる。

ここまでに記載した車内外補正係数を採用する場合には、前回実施した補正係数算出のための測定地点を基準点とし、活用前に同地点にて車内外補正係数値の算出を行うことによって、妥当性確認を実施する必要がある。

なお、本項の車内外補正係数の考え方は、平常時と原子力災害時で入射光子のエネルギー分布及び入射角度が異なるため、平常時と原子力災害時で異なる車内外補正係数を求める必要がある。突然発生する原子力災害時に車内外補正係数を算出することが困難な場合においては、暫定的に福島第一原発事故後に採用されている車内外補正係数の「1.3」を使用し、後にあらためて車内外補正係数を算出することが望ましい。

(2) 異常値の抽出

走行サーベイシステムにおいて異常値を抽出するためには、平常時に定期ルートにてバックグラウンドの線量率を測定し、そのレベルを把握しておく必要がある。自然界における環境 γ 線量率（バックグラウンド）は、周辺環境によってその数値が大きく異なる。よって、平常時からバックグラウンドレベルを把握しておき、異常値の抽出に資することが重要である。解説Gに周辺環境（天然）に起因する環境 γ 線量率の変動を示す。

また、複数の異なる車両又は方法を用いて線量率を測定する場合、あらかじめ同一地点において比較測定を実施し、異なる測定条件間の関係を把握しておくことが線量率分布の評価には重要である。

緊急時には、平常時に調査を実施している定期ルートにおいてモニタリングできるとは限らない。その場合には、事故初期段階においては、それぞれの地点における絶対値を評価することとなる。また、事故から数年程度の月日が経過し物理減衰及び人為的な活動などによって線量率が低下した時期においては、天然放射性核種寄与分と事故の影響等によって沈着した人工放射性核種寄与分とを弁別して評価する必要がある。

第8章 NaI モニタによる空間 γ 線スペクトル計測

8.1 概説

NaI モニタを用いて取得した γ 線スペクトルを解析することによって、天然放射性核種であればウラン系列核種、トリウム系列核種及び ^{40}K による寄与線量率を評価することができる。また、人工放射性核種についても NaI(Tl)シンチレーション検出器の分解能によって、あまり複雑ではないエネルギー波高分布であれば、特定の核種による寄与線量率を算出することができる。寄与線量率算出までの大まかな流れは以下のとおりである。

- (1) 調整された NaI モニタにて空間 γ 線スペクトルを計測する。
- (2) 取得したパルス波高分布のエネルギー校正を行う
- (3) あらかじめ作成しておいたレスポンス関数を使用して、ストリッピング法又はレスポンスマトリックス法にてアンフォールディングを行い、入射 γ 線スペクトルに変換し線量解析を行う。

実態としては、NaI モニタを用いて取得した空間 γ 線スペクトルをテレメータシステムに伝送後、組み込まれたプログラムソフトによって随時スペクトル解析が実施され、核種毎の寄与線量率を評価することによって、人工放射性核種による影響の有無を確認することができる。

本章以降においては、空間 γ 線スペクトル解析の基本的な原理とその手法について記載する。

8.2 空間 γ 線スペクトル計測に必要なシステム構成

現在整備されている多くの NaI モニタでは、 γ 線スペクトルを計測している。

連続モニタとして整備されている NaI モニタの構成は、NaI(Tl)シンチレーション検出器（シンチレータ、光電子増倍管、前置増幅器）、比例増幅器、データ処理部からなる。NaI モニタの構成にその代表的な系統図を図 8.1 に示す。

空間 γ 線スペクトル計測を実施する場合、MCA で集積されたパルス波高分布を基に解析が行われる。このような MCA で集積されたパルス波高分布をデータ処理部またはテレメータシステムで収集した後に、エネルギースペクトルに変換し、線量計算などの解析を行うこととなる。

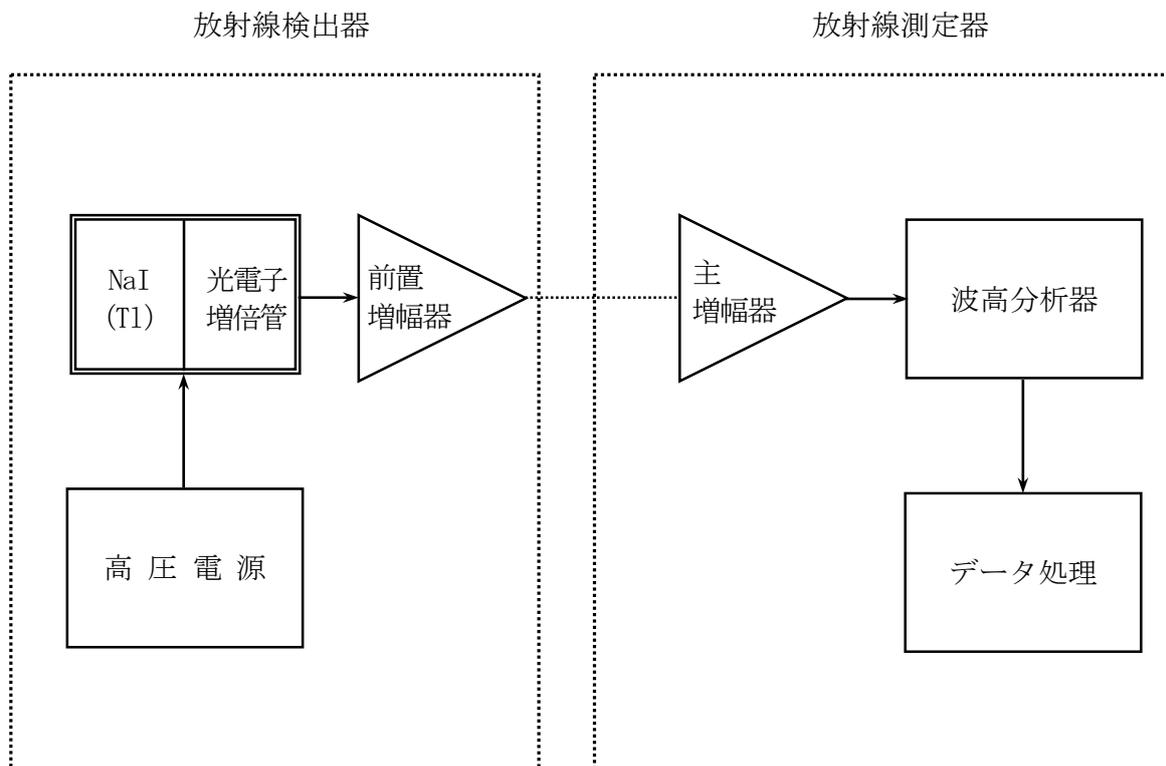


図 8.1 NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータの構成

8.3 計測の準備

連続モニタにて測定を実施する一環として空間 γ 線スペクトル計測を行うため、通常は特別な計測を別途実施することはない、自動で連続収集される。

ここでは、空間 γ 線スペクトル計測に対する基本的な考え方として、可搬型の NaI スペクトロメータを用いて別途測定を行った際の基本的な手順を示す。

測定システムは、①放射線検出器、②放射線の信号パルスの増幅、整形を行う前置増幅器、主増幅器、③波高分析器、④測定結果の記録装置の各部によって構成される。信頼性の高い測定結果を得るためにはシステムを構成する各要素についてその働き、特性を十分に理解し、それぞれが良好に動作する範囲で組合わせ使用しなければならない。システムの使用条件を決める際の調整、選択箇所の主要なものは、

- ① 検出器の印加電圧
- ② 主増幅器の利得、波形整形条件、直流再生回路の直流レベル
- ③ 波高分析器の A/D 変換器の変換利得、使用チャンネル数

である。この中で、波形整形条件はパルス分解能に関係するだけでなく、シンチレーションパルスの減衰時間に関係してパルス波高値の温度依存性を変化させるので、この点も考慮して条件を選定する。波形整形時定数は通常 $0.5 \sim 2 \mu s$ の範囲で選ばれる。

MCA の使用チャンネル数については、NaI(Tl)シンチレーション検出器によるスペクトルの 1 チャンネル当たりのエネルギー幅が数 ~ 20 keV 程度、通常 $5 \sim 10$ keV/ch が適当なところから $500 \sim 1000$ チャンネルとし、 3 MeV 以上に宇宙線の情報が十分にとれるように配慮する。

以上の各点について方針が決まれば、各ユニットの正常動作を確認しつつ次の各項目について点検と調整を行う。

- ① 直流再生回路の直流レベルの調整
- ② ノイズレベルの試験
- ③ 測定エネルギー範囲の試験と確認
- ④ MCA の異常の有無の確認
- ⑤ 検出器のエネルギー分解能(半値幅による)試験
- ⑥ パルス波高値対チャンネル番号の直線性試験

①の調整(装置によってはないものもある)はチェック線源(例えば ^{137}Cs の 662 keV γ 線)を用い、オシロスコープによってパルス波形を見て調整する。

②については③の試験と並行して行う。 γ 線の測定エネルギー範囲は最低 40 keV から 3 MeV 以上にわたっており、この範囲に波高分析器の低域波高弁別器(Lower Level Discriminator;LLD)及び高域波高弁別器(Upper Level Discriminator;ULD)のレベルを設定する。30~40 keV に近い位置に強いノイズが現れる場合は低エネルギー γ 線の測定精度を悪くするだけでなくパルス波高全体の分解能を損なう原因ともなるので、その原因の除去対策を考えなければならない。LLD はノイズの影響が出ない範囲でできるだけ低く設定し、ULD は宇宙線成分の情報を多く得るためにできるだけ高く設定する。

④は、単一エネルギーの γ 線を用い、パルス波高分布全体の形状、光電ピーク *¹の対称性等について異常の有無を確認する。また、宇宙線によるパルスのような過大な信号入力があった場合、増幅回路そのほかの過渡特性によって γ 線領域に異常な信号を出すこともあるので、十分な点検が必要である。

⑤については、 ^{137}Cs の 662 keV γ 線を用い、光電ピークの分解能で良否を判定する。通常 7~9 %程度が正常値であり、製造業者の成績書等と比較し異常の有無の確認を行う。

⑥については、電気回路部だけの特性と、NaI(Tl)結晶の発光特性を含めた特性についてこれらを区別して試験を行う。電気的な回路部の特性はパルサー*²等を用い、アッテネータ *³を通した各種出力とこれに対応する MCA のチャンネル番号の関係から調べる。パルス波高値がゼロに相当するチャンネル番号は γ 線のエネルギーを基準にして得たものとは異なるので、パルス波高分布のエネルギー校正に関連してこれらの関係を正確に把握しておく(エネルギー校正については後述)。

*¹ γ 線のエネルギースペクトルを測定したとき、入射 γ 線のエネルギーが光電効果によって検出器内で全て吸収されて、エネルギースペクトルに生ずるピーク

*² 電氣的に任意のエネルギー(チャンネル)にパルスを発生させる装置

*³ 減衰器、パルスを適切なレベルに減衰させる電子機器

8.4 測定データの一次処理

エネルギー校正に備え、チェック線源によるパルス波高分布データ及び本測定によるパルス波高分布データから、 γ 線エネルギーに対応する光電ピークチャンネルのデータの整理を行う。エネルギー対チャンネル番号の関係はほぼ直線関係にあり、測定ごとにその傾斜に大きな差がなければ正常な測定がなされたものと判断できる。

8.5 エネルギー校正のためのデータ取得

あらかじめ定めたエネルギー校正法に従い必要に応じエネルギー校正を実施する。校正に用いる γ 線のエネルギーは測定対象の γ 線のエネルギー範囲全体にわたって細かく得ておくことが望ましいが、運用上は ^{40}K の1461 keVとあらかじめ確認しておいたゼロ点に相当するエネルギーの2点で校正を行う。詳細は第10章を参照。

もしも特段の制約がなく γ 線源を使用することができるのであれば以下の理想的な方法が適用できる。

使用できるチェック線源に限りがあるので、少数の線源で必要な情報を得る方法をあらかじめ検討しておく。校正点は少なくとも、50~200 keVの範囲で1点、1~2 MeVの間で1点を選ぶようにする。このためには、一例として低エネルギー側の校正点として ^{57}Co の0.122 MeV、高エネルギー側の校正点としての天然核種 ^{40}K の1.46 MeV又はRa線源中の ^{214}Bi の1.76 MeVが適当である。これ以外のエネルギーで校正する場合は、第10章を参照して精度の高いエネルギー校正を実施しなければならない。

第9章 NaI モニタの計測データに用いるレスポンス関数

9.1 レスポンス関数の意味

検出器から出力される波高分布から入射 γ 線スペクトルを観測して、検出器への入射 γ 線スペクトルを求めるには、単一エネルギー光子が入射したときに検出器が示す応答(レスポンス)に関する知識が必要である。エネルギースペクトル $N(E)$ (E はエネルギー)をもつ光子を観測してパルス波高分布 $P(h)$ を得たとすれば、一般に

$$P(h) = \int_0^E \varepsilon(E)K(E, h)N(E)dE \quad (9.1)$$

の積分方程式で表現できる。この式中の $\varepsilon(E)$ は検出器の効率である。この式の核 $K(E, h)$ または $\varepsilon(E)K(E, h)$ をレスポンス関数と呼ぶ。前者は単一エネルギー光子入射時に得られるパルス波高分布群の面積を全て1に規格化したものであり、後者は単一エネルギー光子入射時に得られるパルス波高分布群の意味である。

レスポンス関数は実験的方法かモンテカルロシミュレーションによって決定する。レスポンス関数は対象とする放射線源と使用する検出器の配置に依存するものである。環境における放射線は一般に等方的でないから、方向依存性の小さい検出器(球形)を用いるか、円柱形の検出器を使用するときには方向依存性に対する特別の考慮が必要である。

9.2 レスポンス関数の作成

幾つかの異なったエネルギーの単一エネルギー光子に対する検出器のパルス波高分布群を測定し、それぞれ対応した入射光子フルエンスで除することによって得る。このとき線源は円柱形検出器の軸に直角の方向に置き、散乱線の寄与が少なく、かつ平行ビームに近くなるような照射条件とする。任意のエネルギーのパルス波高分布は補間によって求める。ほかにモンテカルロシミュレーションによる作成法もある。

レスポンス関数の区切り幅(またはチャンネル)は10、20、50、100 keV等々、解析の目的に応じて適当に選ぶ。またレスポンス関数は10行10列又は、50行50列の行列表示にして使われることもある。

レスポンス関数を行列表示し、列(または行)について各要素を加えた値は、その列の対応するエネルギーの単一光子入射時の効率を与える。この値を検出器について式(9.2)によって理論的に算出した効率 η_t と比較して、作成したレスポンス関数(行列)の妥当性を検討することができる。両者はほとんど一致するか、その差はできるだけ小さいことが望ましい。

$$\eta_t = 1 - \frac{2}{(\mu d)^2} + 2e^{-\mu d} \left\{ \frac{1}{(\mu d)^2} + \frac{1}{\mu d} \right\} \quad (9.2)$$

(この式で、 μ はシンチレータの線減衰係数、 d は検出器の直径である。)

また、レスポンス関数によってP/T比を算出し、実験値と比較することもできる。この場合、実験によるパルス波高分布には散乱線の寄与が入るので、実験的に求めたP/T比のほう
が5%~10%程度小さくなる(付録3「レスポンス関数の計算例」参照)。

9.3 レスポンス関数の適用

異なったエネルギーの単一エネルギー光子が、いろいろな強度で混在して観測されるパルス波高分布を解析し、それぞれの光子エネルギーと強度を知るには、最高エネルギー位置に認められる全(エネルギー)吸収ピークに着目し、レスポンス関数を順々にあてはめて最高エネルギー側からはぎとるストリッピング法(ピールオフ法)が適用される。このとき、レスポンス関数と最高エネルギー側のピークに合わせて次々に差し引く方法、差し引いた残差の二乗を最小にする最小二乗法を適用する方法、全エネルギー吸収ピークとP/T比を基に最高エネルギー側から差し引く方法などがある。

数種の単一エネルギー光子と散乱線が重なって観測される環境放射線のような場合には、ストリッピング法のほかに逆行列法、逐次近似法等の解析法によって入射 γ 線スペクトルが求められる。上述の逆行列法以下の方法ではレスポンス関数を行列表示したレスポンス行列が使われる。

解析結果としての入射 γ 線スペクトルの正確さを決めるものは、波高分布の統計誤差及び解析方法はもとより、レスポンス関数(またはレスポンス行列)と実際の測定系の応対の適合性も問題である。

第 10 章 NaI モニタによる空間 γ 線スペクトル計測データの処理

NaI モニタによって得た波高分布の処理は、特別のピークに着目するよりも、全波高分布を入射スペクトルに引き戻し、幾つかのチャンネルをひとまとめにしたエネルギーブロックごとに扱うことが多い。

その処理内容としては計測波高分布のエネルギー校正、入射スペクトルへの変換、またその結果の具体的利用のための幾つかの解析があげられる。

10.1 測定されたパルス波高分布のエネルギー校正

測定されたパルス波高分布は、エネルギーと波高値すなわちチャンネル数が一般には必ずしも直線関係にない。直線関係が成立している時は、この項をとばして差し支えない。この関係が成立しないと、検出系の分解能が高くないことから、解析結果に偏りを生じがちになる。そのために、これを校正する必要がある。このためにはチャンネルとエネルギーとの関係を明らかにする処理、通常はチャンネル当たり一定のエネルギー幅(チャンネル幅)をもつ波高分布に変換する処理を行う。この校正処理を行うには、パルス波高分布のチャンネルとエネルギーの関係を、スペクトル上のピークの中心チャンネルとそれに対応するエネルギーの幾組かの点に最も近似する多項式を選び、それを用いて変換する。多項式としては、ゼロ点付近のエネルギー(例えば ^{241}Am 60 keV、 ^{57}Co 122 keV、または入力信号ゼロを特定エネルギー(例えば -17 keV)とする、 ^{40}K 1461 keV、トリウム系列の ^{208}Tl 2615 keV の 3 点について近似した一次式(直線)が一般に用いられる(図 10.1)。更に細かく校正するためには高次の式を用いて変換を行うが、このためには必要数(n 次式なら $(n+1)$ 点以上)の対応するピークエネルギーを選ぶ必要がある。エネルギー/チャンネルの関係式を得たなら、各チャンネルのエネルギー校正のための変換は容易である。この変換後のスペクトルを補正波高分布と呼ぶ。直線近似の場合、この波高分布のチャンネル幅は 1 チャンネル当たり、10、20、50 keV などが選ばれるが、まれに 100 keV または 200 keV の例もある。この補正の不正確さは解析後の最終結果の不確かさとして直接影響するので重要である。

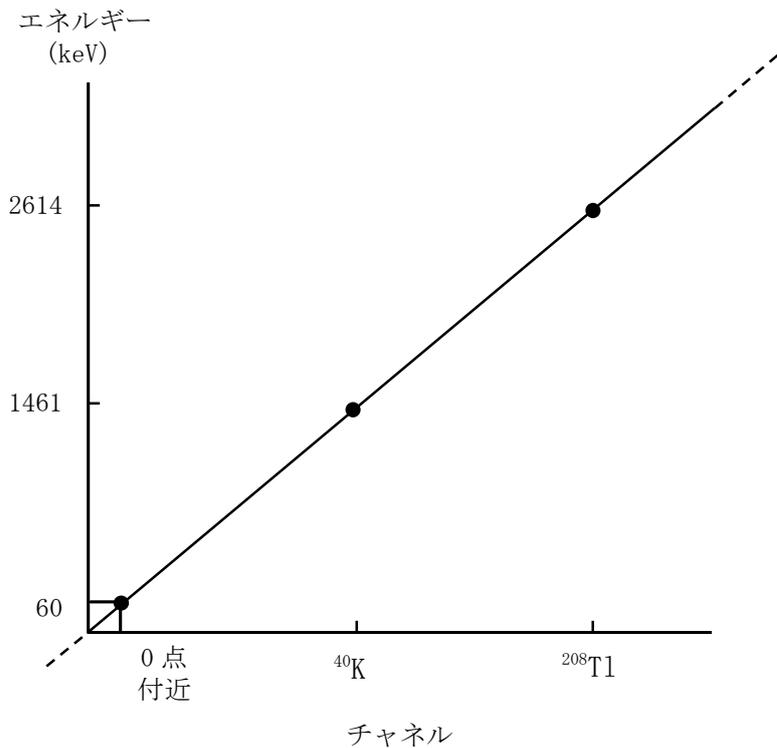


図 10.1 3点の直線近似の適用例

10.2 入射スペクトルへの変換

入射スペクトルへの変換は、補正波高分布から入射 γ 線エネルギースペクトルを得るためのデータ処理を言い、第9章のレスポンス関数を適用することによって行われる。この場合レスポンス関数にはどのような内容が含まれているかを、あらかじめ明らかにしておかなければならない。すなわちレスポンス関数が作られたときの条件、現場で実際に測定したときの条件との差の検討、特に放射線の入射方向などに注意すべきである。変換手法は大別して次の二つになる。すなわちストリッピング法(ピールオフ法)とレスポンス行列法である。

(1) ストリッピング法

ストリッピング法は補正波高分布の高エネルギーチャンネルに対応する単一ピークのレスポンス関数を補正波高分布から差し引き、高エネルギーチャンネルの値をほぼゼロにするという操作を順次低エネルギー側に適用する手法である。このために低エネルギー領域の分布を求めるレスポンス関数、その際の定数の導入の仕方が処理後に得られる入射 γ 線スペクトルの正確さに影響する。したがって、はぎとるレスポンス関数の形と数値を明確にしておかなければならない。またその作成上の条件を示しておくことが必要である。

ストリッピング法の一例を付録1に挙げた。

(2) レスポンス行列法

レスポンス行列法は、あらかじめ特定の光子エネルギーを定め、補正波高分布にみあうレスポンス関数(エネルギー領域毎の数値行列)を作り、実測した補正波高分布に対し各エネルギーの行列を連立方程式の解法によって解く手法で、あらかじめ共役マトリックスを作り解

く方法と逐次近似法によって解く方法とがある。この方法は、ストリッピング法と同様、レスポンス行列を作ったときの測定条件と現場での測定条件が同一であることが望まれる。両者の条件の差が結果の不確かさの一因となる。

逐次近似法によるアンフォールディングの例を、付録2に挙げた。

以上2方法ともその適用に当たって大切なことは、用いられるレスポンス関数が的確なことである。レスポンス関数を定めた検出体と実際に環境計測に使用する検出体が異なる場合は、検出体の種々の差、特にシンチレータの寸法、形、重量、ケースなどの構造の差及び分解能の相違によって結果に差が生ずることがある。重量の差については断面積の差として補正することができる。入射 γ 線のエネルギースペクトルの変換に当たっては、更に高エネルギー領域から寄与してくる宇宙線の寄与、及び検出体自身に由来するバックグラウンドを考慮することが必要となることもある。

なお、現在は検出器の形状及び寸法ごとに、分解能の異なるシンチレーションスペクトロメータにも対応できるレスポンス関数が公表されており、解析ソフトウェアに組み込まれて市販されている。

10.3 結果の表現

測定結果の解析内容の表現は数多くある。すなわち、①全計数率値、②補正波高分布についてその全計数率値、③ γ 線束密度(全エネルギー領域及び特定領域内)、④空気吸収線量率(全エネルギー領域及び特定領域内)、⑤NaI(Tl)の吸収線量率、更にこれらの指定された内容のグラフ表示などがある。また計数値の統計誤差、精密さ、チャンネル校正に関する内容、使用関数とその精密さ、検出体の寸法構造、使用した定数、基本定数、データ処理手法、処理プログラム、バックグラウンドの取扱いなど多岐にわたる。これらのうち上記①②③④の内容、更には④に対する②、③の比などが代表的なものとして取り上げられることが多い。

なお、高エネルギー領域から求められる宇宙線の線束密度とその推定線量があると、環境における放射線の様相を把握するのに有用である。この際、スペクトル中の γ 線以外の成分をどのように扱っているのか明記しないと、結果の解釈上不明な点が残る。全エネルギー領域にわたる空気吸収線量率と光子束密度または計数率との関係が一定であれば、光子束密度は計数率から直ちに空気吸収線量率を得ることができる。この場合においても入射 γ 線スペクトルが求められているので、エネルギー領域ごとに空気吸収線量率を求めることができる。

10.4 放射性核種別線量寄与の算出

スペクトロメータによる空間 γ 線スペクトル測定法では、環境の放射性核種成分別の線量寄与を求めることが行われる。NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータでは、ゲルマニウム半導体検出器のような高分解能は期待できないため、限られた種類の人工放射性核種(例えば ^{131}I 、 ^{137}Cs など)が存在する場合に限られる。一方通常的环境放射線場においては天然放射性核種として、カリウム、ウラン、及びトリウム系列による線量寄与の分離が代表的である。

10.4.1 ピーク領域の計数値の利用

このデータ解析は、スペクトル中に存在するピーク領域と、これに該当する核種のエネルギー、放出率、検出器の検出効率の適用によって行う。

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータにおいては、放出ガンマ線のそれぞれのエネルギーに対応したピークを拾い出すことは一般に容易でないため比較的単純なガンマ線を放出する限られた数の核種の存在にだけ適用される。

10.4.2 マトリックス解法による核種別線量寄与の決定

シンチレーションスペクトロメータにおいては、既にのべた理由によって、数多くのエネルギーのガンマ線を放出する核種については核種別の線量寄与の分離は容易でない。このためあらかじめエネルギー領域を広い範囲に定め、マトリックス解析を行うのが一般的である。特に天然放射性核種が主な成分である通常環境放射線の測定においてはこの方法がとられる。次にこの方法を示す。

通常、環境における天然放射性核種による線量寄与は、カリウム、ウラン及びトリウム系列によるもので、その分離が代表的であるが、ときにはこれに人工放射性核種の寄与が加わる。

この天然の主たる三成分についての線量寄与の分離には、あらかじめそれぞれに対応するエネルギー領域を定め、単位線量率当りの各領域に含まれる寄与(線量率、計数率、線束密度など)を成分別に基礎資料として整え、マトリックスを解く。この際とられるエネルギー領域は次の範囲を標準とする。また各領域間の線量率寄与を表すマトリックス定数の例を表 10.1 に示した。

カリウム領域(1.34~1.60 MeV)
 ウラン系列領域(1.61~2.30 MeV)
 トリウム系列領域(2.31~3.00 MeV)

表 10.1 マトリックスを解くための領域間の寄与係数(8.7 nGy/h 当たりの各領域内の空気吸収線量率、カッコ内は 3 in 球形シンチレータの場合の cps)

	K-40 領域	U 系列領域	Th 系列領域
K - 4 0	0.5 (1.5)	0 (0.0)	0 (0.0)
U 系 列	0.106(0.508)	0.255(0.565)	0.024(0.0236)
Th 系 列	0.043(0.689)	0.124(0.674)	0.275(0.343)

(注)この係数は次の測定データに基づいている。

K - 4 0 : 標準線源(KC1)
 U 系 列 : ヒューストンのラドンの充満した洞穴
 Th 系 列 : インドのケララ地方

これらの係数を用いて得られたそれぞれの値を加算したものは測定された全線量率値に一致しなければならない。しかしマトリックス係数、計数誤差、測定環境の条件による違いがあり、10 %程度の差が生ずることがあり、これを上回る差が生じた場合は内容を検討する必要がある。お互いの差が10%を上まわったときには結果の採用をひかえることが望ましい。

解 説

解説 A 連続モニタによる環境 γ 線測定における一般的事項

本マニュアルで対象とするモニタは、一般環境中の電離放射線のうち少なくとも数 10 keV から数 MeV までのエネルギー範囲の γ 線を測定でき、短い時間間隔の計数値を連続的に得て、その値を実時間で出力（アナログまたはデジタル表示）できる、いわゆる“連続モニタ”である。環境 γ 線の連続モニタとしては、現在、歴史的な背景及び技術の進歩を反映して多くの方式のものが使用されており、その特性及び性能はかなり異なっている。しかしいずれの方式のモニタについても、それらから得られる計測値は主として、検出器の置かれた場所での空気吸収線量率（ μ Gy/h 等）、周辺線量当量率（ μ Sv/h 等）または検出器の計数率（cps、cpm 等）である。

連続モニタの使用によって連続的な実時間データが得られるため、線量率の時間的変化を追うことができ、気象観測データと組み合わせることなどによって、その変動の原因追究がより容易になる。これは長時間の積算線量を与える熱ルミネセンス線量計（TLD）及び蛍光ガラス線量計（RPLD）等と比較して特徴的なことである。また、連続記録のパターンの解析等から自然放射線と人工放射線の弁別が可能となることもあり、そのような場合には原子力施設からの寄与分を推定することができる。また、現在活用されている多くのシステムではエネルギー情報の取得が可能であり、この情報を用いることで、より精度の高い弁別も可能となる。

一方、連続モニタは一般的に複雑な機構をもち、保守・管理にかなりの手間がかかること、高価であること、電力を必要とすることなどの理由から、多数のモニタを設置することは困難である。したがって、周辺地域のきめ細かい線量測定は TLD 及び RPLD に委ねるのが普通であったが、昨今はこの役割を可搬型モニタリングポスト及び簡易型電子線量計が担うこともある。

現在の各方式のモニタから得られる測定値間には、その検出器の種類、検出器まわりの構造、装置の特性、信号処理回路などの違いのために、同一地点における同時の測定でも差が生じる場合がある。宇宙線の寄与、遮へい効果、方向特性、エネルギー特性等の違いなど、検出器付近だけを見ても問題となる事項は多い。特に平常時のモニタリングの際に留意する事項として、例えば宇宙線の寄与について、シンチレータを検出器に用いた G(E) 関数方式では、一般の使用では 3 MeV 以上の宇宙線を含む高エネルギー成分も含まれるが、3 MeV 以上のものを分離した使用法が現在は主流であり、仕様内容を十分把握しておく事が重要である。シンチレータを検出器としたモニタの線量率指示値は、電離箱を検出器としたものに比較して、通常宇宙線寄与分に相当する値だけ低いと考えてよい。また、同一の検出器であっても製造ロットの違い等によっては、自己汚染による寄与線量率の違いも測定値間の相互比較を困難にしている。自己汚染による寄与線量率は、環境 γ 線量率及び宇宙線線量率の寄与を低減させた地下室等において測定をし、 ^{40}K のピーク計数率から評価する方法、又は検出器を構成する材質から、その材質毎の代表値を用いる方法がある。

したがって、これらを考慮して測定値の補正が行われれば異なった機種での測定値の比較ができるわけであるが、現状ではこのような補正は容易ではない。したがって、異種の検出器を持った装置及び異質の測定装置を同一地点に併設してある場合のバックグラウンドレベル

での測定値を相互に比較することは注意を要する。

解説 B 各モニタの原理、構成及び特性

解説 B.1 電離箱式モニタ

現在、実用化されている電離箱式連続モニタの電離箱検出器には、純アルゴンガスまたは窒素ガスを高圧に封入した金属製球形電離箱などがある。感度を高くするためには容積を増したり封入ガスを加圧する。電離箱式モニタは高抵抗に電離電流を通すことによる電流-電圧変換のアナログ出力、または一定時間間隔の電流積分による電荷のデジタル出力等で線量率を表示する。電離箱式モニタは仕様にもよるが、エネルギー特性及び方向特性が良好で、線量率測定範囲を大きく取り得る。各種電離箱のエネルギー特性及び線量率直線性を、それぞれ図 B.1 及び図 B.2 に示す。

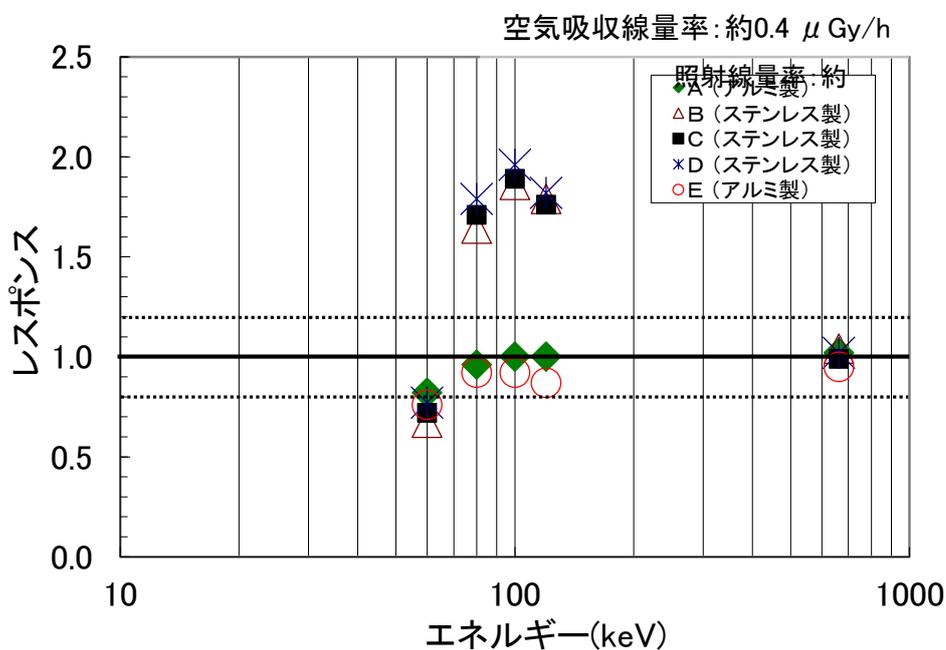


図 B.1 加圧型電離箱のエネルギー特性の一例

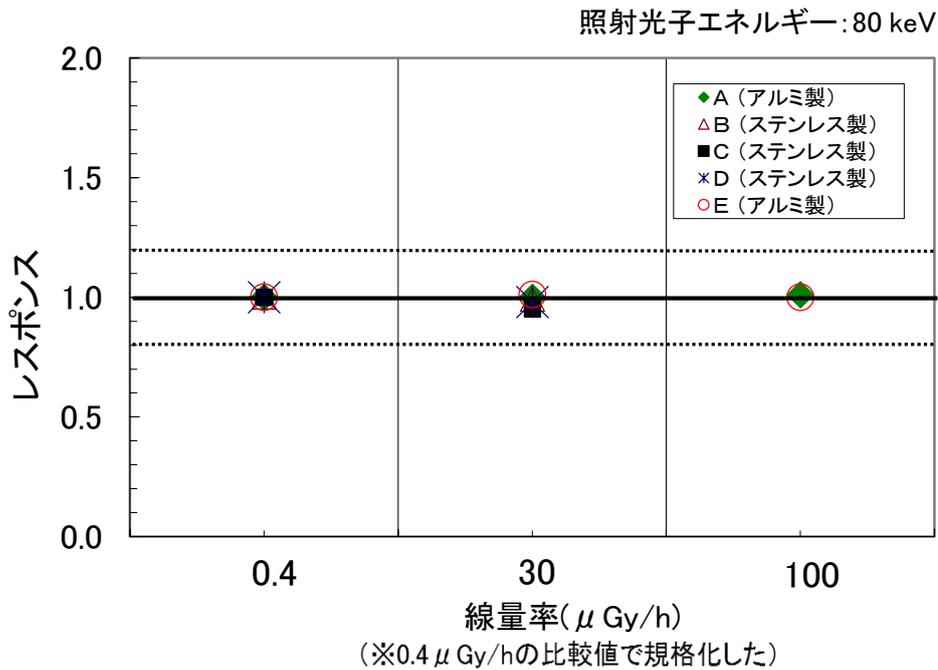


図 B. 2 加圧型電離箱の線量率直線性の一例

本文第4章でも述べたとおり、電離箱線量計のエネルギー特性等の測定値に影響を及ぼす因子は、主に壁材とその厚さ及び封入ガス種とその圧力である。

線量測定のためには、測定しようとする線量単位に応じて、検出器の材質を選択できることが理想的である。空気吸収線量を測定するのならば空気と等価な物質、組織吸収線量を測定するのならば組織と等価な物質が理想となる。環境 γ 線モニタリングでは空気吸収線量を測定することから、空気等価電離箱が最もよい選択となるが、低線量率測定では、感度が不十分な場合が多い。連続モニタとして用いられている電離箱では、感度を高めるためにアルミニウム又はステンレス製容器にアルゴンガス等が加圧封入されている。ステンレス及びアルゴンガスは空気と比較して原子番号及び密度が大きいため、感度は高いが低エネルギー領域で質量エネルギー吸収係数が著しく大きくなり、レスポンスが大きくなってしまう。また、さらに低エネルギー領域の γ 線では、ステンレス壁に吸収されてしまいレスポンスが急激に低下する。これらを総合して電離箱のエネルギー特性となり表現される。

解説 B.2 G(E)関数方式NaI(Tl)シンチレーション式モニタ

B.2.1 モニタの原理と構成

NaI(Tl)シンチレーションスペクトル分布から吸収線量及び周辺線量当量を評価する方法のひとつとして、 γ 線波高のスペクトル分布に直接加重関数を適用して線量計算を行うスペクトル線量変換演算子による方法がある。いわゆるG(E)関数法である。

G(E)関数法は、スペクトル線量変換演算子(G(E))を用いて γ 線波高分布から直接的に線量率を評価する方法である。

波高分布をP(E)、その場の線量率をDとすると、Dは両者のスペクトル線量変換演算子G(E)を介して次のように結びつけられる。式の1行目はG(E)関数法の原理を表し、2行目は実際に多重波高分析器によって測定した波高分布から線量率を計算する際の適用の仕方を表す。

$$\begin{aligned} D &= \int_{E_{min}}^{E_{max}} P(E) \cdot G(E) dE \\ &= \sum_{I=I_{min}}^{I=I_{max}} P(I) \cdot G(I) \end{aligned} \quad (B.1)$$

ここで、

D	: 線量率 (nGy/h)
$P(E)$: 波高分布 (cpm/keV)
$P(I)$: 多重波高分析器で測定した波高分布 (cpm/チャンネル)
E	: 波高 (keV)
I	: チャンネル番号
E_{min}	: 波高の測定下限 (keV)
E_{max}	: 線量率評価の上限 (keV)
I_{min}	: E_{min} に対応するチャンネル番号
I_{max}	: E_{max} に対応するチャンネル番号
$G(E)$, $G(I)$: スペクトル線量変換演算子 (nGy/h/cpm)

上記計算式に基づく線量計算を、パルス波高のアナログ信号と電子回路によって行う方法をDBM法と呼び、それに対応するモニタをDBMモニタと呼ぶ。近年はコンピュータ技術が進み、小型で高速の演算が可能となったため、パルス波高をデジタル化し、直接G(E)関数を乗じて線量に換算する方法が主流である。

E_{min} 、 E_{max} は、それぞれ線量率評価対象エネルギー範囲の下限及び上限で、環境 γ 線を測定対象とするときには、通常 $E_{min}=30\sim 50$ keV、 $E_{max}=3000$ keVである。この式から分かるように、G(E)関数はエネルギーに応じた一種の加重関数の働きをしている。この方法では、波高分布を入射 γ 線エネルギースペクトルに変換することなしに線量率を評価できるという利点をもつ。

個々の検出器に対する G(E) 関数は、検出器の形状、サイズに応じて別途決定される。G(E) 関数の例を図 B.3 に示す。

NaI(Tl) 検出器の場合、応答関数及び G(E) 関数を決定する最も重要な因子は、NaI(Tl) 結晶の形状、寸法及び結晶容器の形状である。NaI(Tl) 検出器の場合、形状と寸法が同一であればその応答特性も同一であるから、ある型式の NaI(Tl) 検出器に対する G(E) 関数を一旦求めておけば、その G(E) 関数は同じ型式の他の NaI(Tl) 検出器に対してもそのまま適用できる。

G(E) 関数法は当初 NaI(Tl) 検出器による γ 線線量 (率) 測定を念頭において開発されたものであるが、NaI(Tl) 検出器と同様に、入射放射線のエネルギー情報 (波高分布) が得られる検出器であれば適用可能である。*1 *2

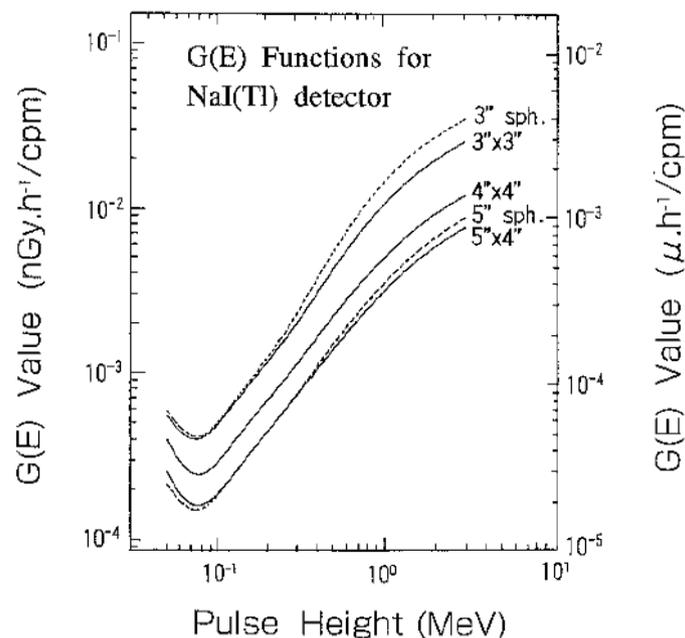


図 B.3 NaI(Tl) 検出器の G(E) 関数

B.2.2 モニタの特性

(1) 安定性

① 検出器

この方式のモニタでレスポンス (感度) 変化に関係した最も重要な項目は、環境の外気温の変化に対する検出器及び回路の安定性である。温度変化に対する検出器の不安定性要因は、NaI(Tl) シンチレーションの発光効率と光の減衰時間の温度依存性及び光電子増倍管の光電面の光電子放射の温度依存性の二つに分けることができる。通常この二つの変化の重なったものが検出器の温度特性となり、これと電子回路 (デジタルではアナログに比べ温度変化に影響されにくい) のパルス整形の時定数の組合わせでモニタの温度依存性が現れる。

*1 長岡鋭; “G(E) 関数法”, 日本分析センター広報 No. 32 1998

*2 堤正博, 齋藤公明, 森内茂; “実効線量当量単位に対応した NaI(Tl) シンチレーション検出器の G(E) 関数 (スペクトル線量変換演算子) の決定”, JAERI-M 91-204 (1991)

② 電子回路

高圧電源の温度特性もまた重要である。一般に、放射線計測に使用されている光電子増倍管の利得（ゲイン）変化は高電圧の変動率の10倍近い値となり、利得（ゲイン）変化で±1%以内の安定性を要求する場合、高圧電源の安定性は±0.1%以下（±1V相当以下）でなければならない。

③ 安定化対策

年間を通じて気温変動幅の大きい環境のγ線モニタリングでは特に温度特性についての配慮が大切で、年間を通して少なくとも±（3～5%）の幅に安定度を確保したい。現在市販の装置の多くは種々の安定化対策、例えばプローブの断熱対策、恒温処置、電子回路による温度補償対策等が講じられ、年間を通じ十分な安定性が得られている。ただし、これは固定局またはそれに相当する仕様の場合であり、可搬型モニタリングポスト等のようにシステムの性質上、恒温処置等の対策をすることが出来ない場合は、変動幅も大きくなる。

(2) エネルギー特性

G(E)関数方式モニタのエネルギー特性は通常0.1～3 MeVの範囲で±20%以内（図B.4）となっており、環境γ線のエネルギー分布を勘案すると、この特性で十分である。なお、プローブのカバーによるγ線の吸収でもこの特性は変化するので、不必要に厚いカバーの使用は避けなければならない。図B.4の60 keVにおけるレスポンスが低いのは、このためである。

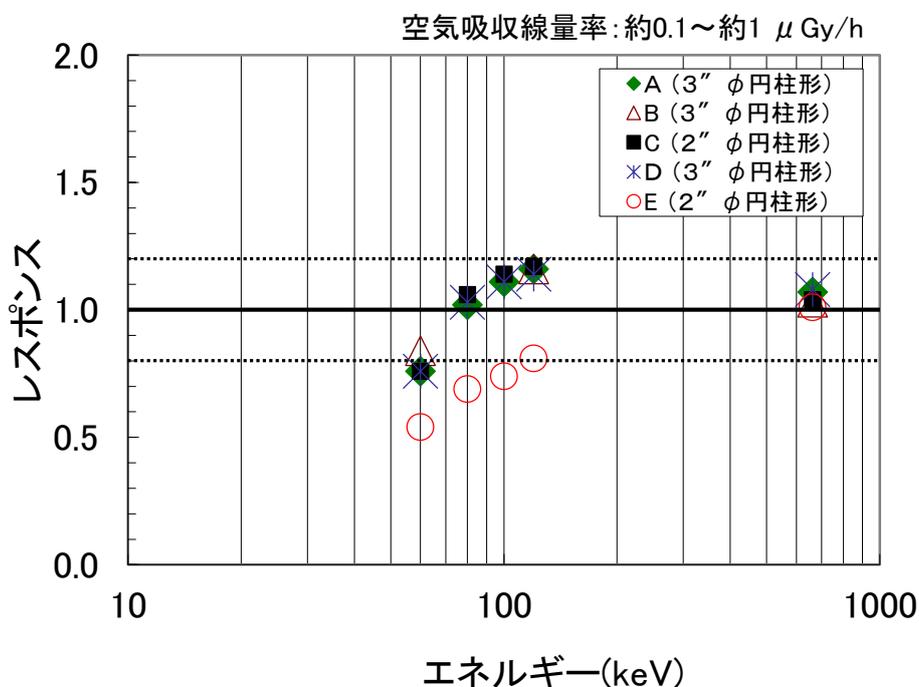


図 B.4 G(E)関数方式 NaI モニタのエネルギー特性

(3) レスポンスと計数誤差

この方式の測定器は、エネルギー補償範囲とレスポンスの間に密接な関係があり、補償範囲を狭くするとレスポンス（この場合、単位線量率当たりの計数率）が増加し、広くするとレスポンスが減少する性質がある（図 B. 3）。環境 γ 線のエネルギー範囲は、自然放射線では 2.62 MeV が最高で、施設起因のものについても ^{16}N からの γ 線を除き、3 MeV を超す有意なものは存在しないので、3 MeV までエネルギー補償されていれば十分である。

測定値の標準偏差は上記に示したレスポンスと測定時間とを考慮して計算できる。これについては、B. 2.3(6)に触れられている。なお、図 B. 5 にいろいろな寸法のシンチレータに対する 10 分間測定における計測誤差の計算例を示した。

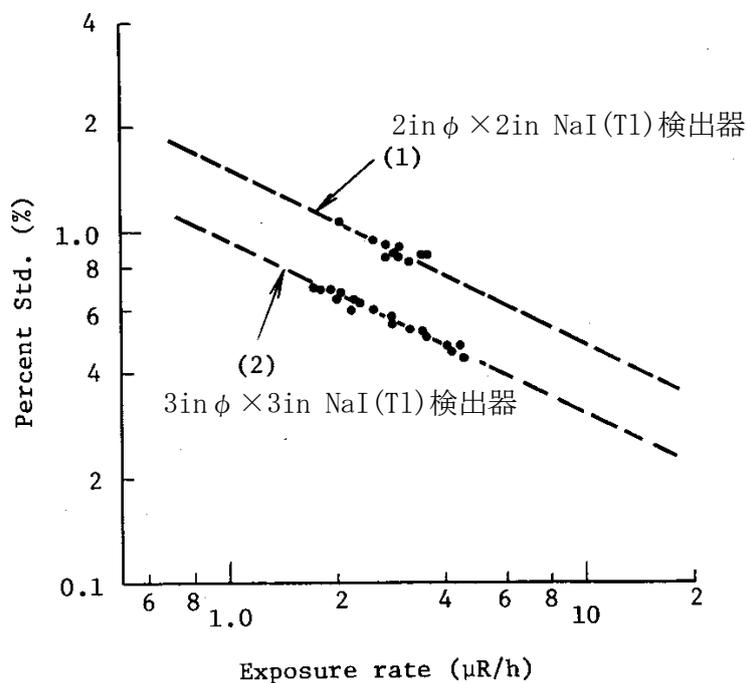


図 B. 5 G(E) 関数方式による環境 γ 線の 10 分測定における統計誤差 (1σ)

(4) 方向特性

NaI(Tl) シンチレータは形状によって方向特性が異なるが、実際の実験は使用状態のプロープの構造によってさらに変わる。球形シンチレータは方向特性に優れ、円柱形のものでは、径と高さの比率が 4 : 3 の時、最も良好な方向特性を示す。径と高さの等しいシンチレータの場合、軸方向と横方向で感度に 8 % 程度の差が生じる。しかし個々のプロープで使用状態における構造に差があるので、正確な方向特性は実測によって決めるべきである。図 B. 6 及び図 B. 7 に、3 in ϕ × 3 in 円柱形及び 3 in ϕ 球形の軸方向感度を 1.0 とした場合の方向特性の一例を示した。

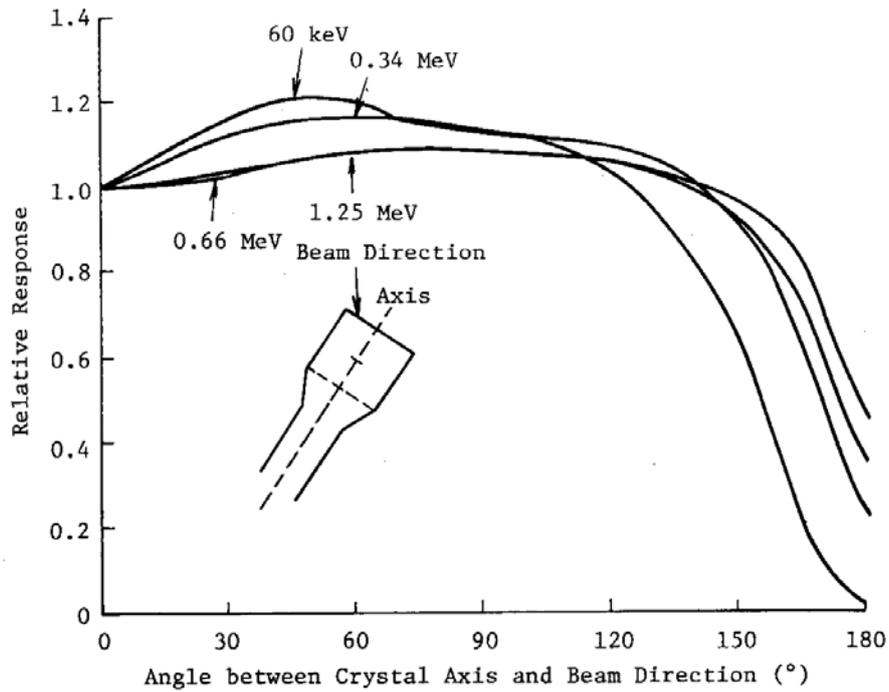


図 B.6 NaI(Tl)シンチレータ (3 in ϕ \times 3 in 円柱形) 方向特性の一例

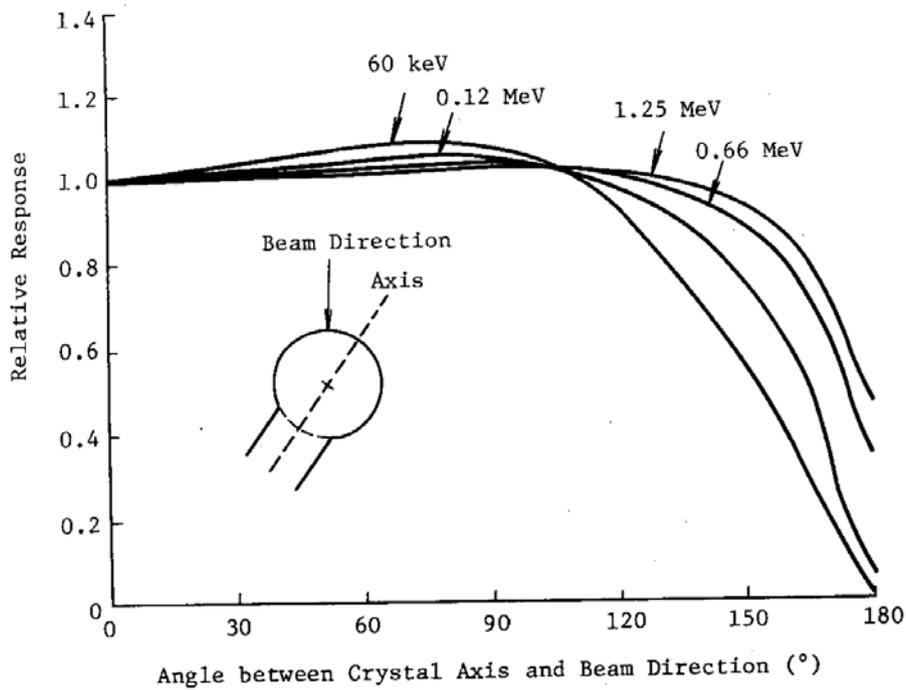


図 B.7 NaI(Tl)シンチレータ (3 in ϕ 球形) 方向特性の一例

(5) 宇宙線と自己汚染の寄与

① 宇宙線の寄与

宇宙線成分は、パルス波高値で 3 MeV 相当以下のパルスと 3 MeV 相当以上のものに分けて取り扱うのが合理的である。3 MeV 以下に入る成分は環境の γ 線のスペクトルに重なる

ために地上での分離評価は極めて難しい。通常、地殻からの γ 線のない海上又は湖上において測定したり、飛行機によって高空観測値を地上に補外したりして評価が行われる。

高空観測で得られたデータに基づく我が国の低地における宇宙線成分は、3 in ϕ \times 3 in 円柱形 NaI(Tl)シンチレーション検出器の場合、3 MeV 以下で約 2 nGy/h 相当値である。3 MeV 以上の成分は換算係数に依存して変わるが、標準的には約 3 nGy/h 相当 (1.2×10^2 cpm に対応するもの)となる。緯度及び高度が変化すると宇宙線強度は変化するが、3 in ϕ \times 3 in 円柱形シンチレータ使用の場合、3 MeV 以上の計数率 1 cpm につき 0.02 nGy/h として計算される。

② 自己汚染の寄与

自己汚染の寄与については、検出器のガラス材料中の ^{40}K による放射線だけを考えればよい。 ^{40}K の寄与は、実用上、外部からの ^{40}K の影響のない遮蔽体中で測定された ^{40}K の 1.46 MeV γ 線のピーク計数率に、3 in ϕ \times 3 in、2 in ϕ \times 2 in のそれぞれのシンチレータについて 0.16 nGy/h/cpm または、0.04 nGy/h/cpm を乗じて算出する(表 B. 2)。通常 0.9 nGy/h 相当以下で、カリウムの少ないガラスを NaI(Tl)シンチレータ及び光電子増倍管の窓面に使用してあれば ^{40}K の寄与はほとんどない。

表 B. 2 NaI(Tl)シンチレーション式モニタの ^{40}K 汚染の寄与

検出器寸法	1.46MeV の全吸収ピーク計数率からの換算係数 (nGy \cdot h ⁻¹ /cpm)
2 in ϕ \times 2 in	1.6×10^{-1}
3 in ϕ \times 3 in	4.0×10^{-2}

B. 2. 3 測定法と校正

(1) 安定性に対する配慮

この方式のモニタで最も大切なことは温度特性に対する配慮と回路調整である。環境の年間の気温は、ほぼ-10 $^{\circ}\text{C}$ から +35 $^{\circ}\text{C}$ までの範囲で非常に大きく変動する。したがって、モニタの購入時又は使用前に、温度変化に対して対策を講じておく必要がある。

また、温度特性はパルス増幅器の微・積分時定数によっても変わるので、時間分解能を損なわぬ範囲で最も高い安定性の得られるパルス処理条件で使用する。

(2) 装置の構成

モニタの構成は、基本的には図 B. 8 のとおりであるが、エネルギー分布についての情報を利用した自然放射線と施設起因放射線の弁別、宇宙線成分の分離測定等を考えるときはマルチチャンネルアナライザー (MCA) またはシングルチャンネル波高分析器 (SCA) を併用したシステムとする。

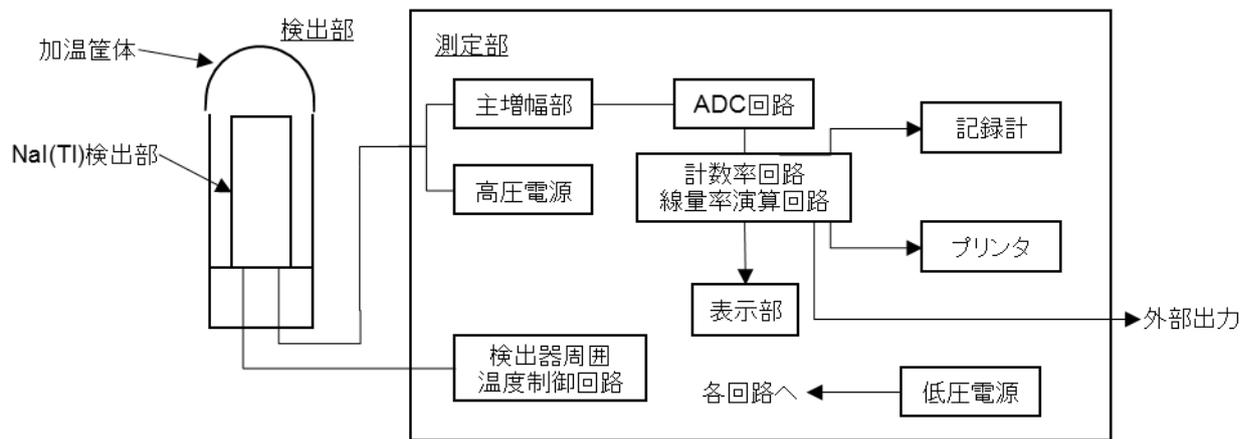


図 B.8 G(E) 関数方式 NaI (Tl) シンチレーション式モニタのブロックダイアグラム

(3) データの記録方式

モニタの付帯装置として大きいものにデータ収集・処理装置がある。環境 γ 線のモニタリングでは長期の連続観測が行われるとともに、その結果の解析を実施して原因別の線量寄与分の分離評価が行われるのが普通である。現在整備されている多くのモニタでは、デジタル処理された波高分布、線量率及び任意で設定したエネルギー範囲における計数率等の情報が電子媒体で保存される。さらにバックアップとしてチャート紙等に上記情報が出力されている。

(4) 測定時間の決定

測定値の 1 データの積算計数時間は $3 \text{ in } \phi \times 3 \text{ in}$ 円柱形 NaI (Tl) シンチレーション検出器使用の場合、計数値の統計的変動から、数分の測定時間で十分な精度が得られる。測定時間の決定にあたっては、降水、フォールアウト及び原子力施設の寄与のそれぞれの時間的パターンを考慮することが必要である。一般に自然放射線は、降雨、降雪などによる線量率の急激な上昇があっても減衰はラドン子孫核種の実効的な半減期 35 分又は 40 分から早くなることはなく、その変動は比較的ゆっくりしているのが普通である。これに対し施設寄与のものは、急激な立ち上がりと下降及び数分～数 10 分の短い変動周期を示すのが普通である。しかし、施設起因と判別できない種々のパターンがある。このような性質を考慮して測定時間を適当に選べるような装置を使用することが望ましい。例えば、自然放射線の変動と施設起因放射線の変動をその変動周期の違いから区別できるよう 1 データの積算計数時間は数分から 10 分程度に選ぶのが適当である。パターンをより忠実に再現するために積算時間を 1～3 分程度とし、後のデータ処理の際に平滑化又は平均操作を行う方法もあり、テレメータに収集された後に整理することは現在のシステムでは比較的容易である。

なお、走行サーベイシステムに活用される場合は、上記考え方とは異なるため、別途解説 F に示す。

(5) 感度調整と校正

G(E) 関数方式のモニタは増幅器の利得 (ゲイン) の変化に伴って感度に変化するので、常にその測定系に適合する正確な波高・エネルギー比 (例えば $1.50 \text{ V} / 0.662 \text{ MeV}$) を供給し

なければならない。このために校正に先立ち、利得（ゲイン）の調整を行う。この調整は一般的にメーカー等によって実施されているが、参考までにその方法の概略を示す。

① 感度調整

装置を使用状態に接続し、 ^{137}Cs の 0.662 MeV γ 線の全吸収ピークに相当するパルス波高値及び全吸収ピークの計数値が規定どおりになるように利得（ゲイン）調整を行う。

現在多くの連続モニタシステムでは波高分布スペクトルの情報が得られる。この情報を利用してことによって利得（ゲイン）の調整を行うことができる。また、現在のシステムでは、例えば ^{137}Cs 線源を検出器周辺に設置し、上記のような調整を自動で実施することができるシステムも存在する。この場合、実際には利得（ゲイン）を調整するのではなく、印加電圧を上下させることによって調整を実施している。多くの場合、この調整でも問題とはならないが、より詳細な調整が必要な場合は利得（ゲイン）を調整する必要がある。

② 校正

校正は、A：基準 γ 線源を用いて行う方法、B： γ 線源を任意の場所において基準 γ 線量をスペクトルー線量変換演算子法によって評価する方法の二つがある。いずれの場合も校正に先立ち、まず確認用線源を用いてモニタを正規の動作状態に合わせる。

A 基準 γ 線源を用いて行う方法

この場合は、距離の逆二乗則による線量率と計数率から換算係数を計算する。散乱線があればそれだけ校正が不正確になるので、校正に当たっては散乱線に特に注意を払い、精度の保持に努める（散乱線の評価については解説 D 参照）。

B 基準となる γ 線量をスペクトルー線量変換演算子法によって評価する方法

この場合は、基準 γ 線源法に比べて値付け誤差及び散乱線（これを含めて評価するので）の影響はほとんどないが、変換に用いる関数の誤差、及びそれを決定する際に使用する検出器と被校正検出器との間の条件の差、例えばプローブ容器の厚さの違いによる吸収の差などが評価精度を低下させる原因となる。

校正後の感度合わせ、感度確認は全て感度調整時に用いた確認用線源によって行う。これらの線源は、複数の種類とすることが望ましい。また線源使用時には、増幅器出力を波高分析器に入れて、全吸収ピークチャンネルのドリフトがないことを確認する。

(6) 測定可能線量率範囲

① G(E) 関数方式

環境放射線のモニタは、自然放射線レベルから事故時の高線量率レベルまで可能な限り広い線量率範囲の測定ができることが要求される。固定式のいわゆる“連続モニタ”の場合、主に NaI モニタと電離箱モニタを併設し、それぞれのモニタに適した線量率範囲を受け持つことによって、環境放射線の広い線量率範囲をカバーしている。

γ 線のエネルギーによって単位線量率当たりの線束密度は大きく異なり、特に、低エネルギーではパルスの時間分解能の関係から飽和する上限線量率は高いエネルギーよりも低くなる。これは、パルスアンプの分解能に関する不感時間中に数え落としを引き起すためである。この特性は、検出器の大きさ、光子エネルギー及び計数率（線量率）が関係している。空気吸収線量率と検出器の関係を図 B.9 に示す。この図からも分かるように、2 in ϕ \times 2 in 及び 3 in ϕ \times 3 in 円柱形の検出器において、光子エネルギーが 100 keV 付近である場合、空気吸収線量率に対するレスポンスに 10 %程度の精度を要求するには、2 μ Gy/h 程度までとなる。電離箱モニタへの切り替えレベルは、線量率ではなく光子エネルギー及び計数率を参考にするといよい。

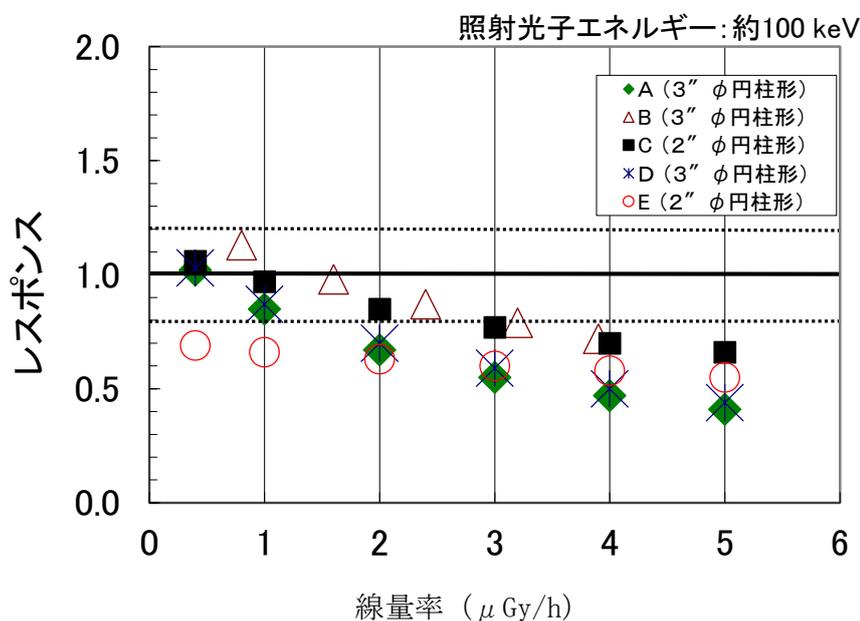


図 B.9 NaI(Tl) シンチレーションモニタにおける線量率依存性の一例

解説 B.3 シリコン半導体検出器

B.3.1 モニタの原理と構成

シリコン半導体検出器の測定原理は、電離箱線量計と同様である。ただし、得られる情報はパルスであるため、このパルスに線量率に換算する係数を乗ずることによって線量率を算出することができる。なお、上記測定原理のため、電離箱線量計と同様にエネルギー情報を得ることは出来ない。

B.3.2 モニタの特性

(1) 線量率直線性

検出器の特性上、高線量率の測定に適している。よって、NaI(Tl) シンチレーション検出器では測定が困難な数百 mGy/h 程度までの測定可能線量率範囲を持つ。

10 $\mu\text{Gy/h}$ ~100 mGy/h までの線量率直線性の一例を図 B. 10 に示す。

シリコン半導体検出器の線量率直線性は、全ての線量率において照射値に対して $\pm 10\%$ 以内で良好であり、NaI(Tl)シンチレーション検出器等に見られる数え落としの影響による感度の低下はない。これは JIS Z4325 : 2008 の基準である $\pm 20\%$ 以内であり、基準を満たしている。

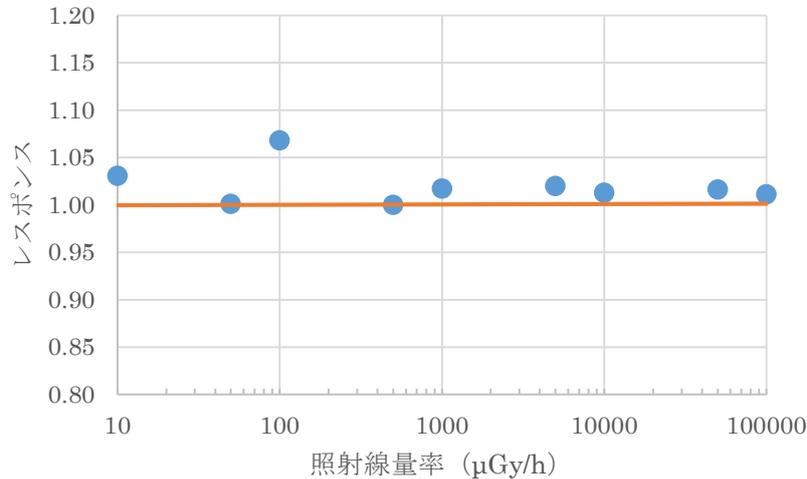


図 B. 10 シリコン半導体検出器における線量率直線性の一例

(2) 方向特性

シリコン半導体検出器における方向特性は、測定システムの構成及び検出器の形状等によって当然異なる。ここでは、あるシステムにおける方向特性を示したグラフを一例として図 B. 11 に示す。なお、照射方向は検出器の実効中心から鉛直上方向を 0° とし、 30° ごとに $\pm 90^\circ$ までの方向について特性を示した。各角度のレスポンスは $\pm 10\%$ 以内であり、良好な感度を示している。また、これは JIS Z4325 : 2008 の基準である $\pm 20\%$ 以内であり、基準を満たしている。

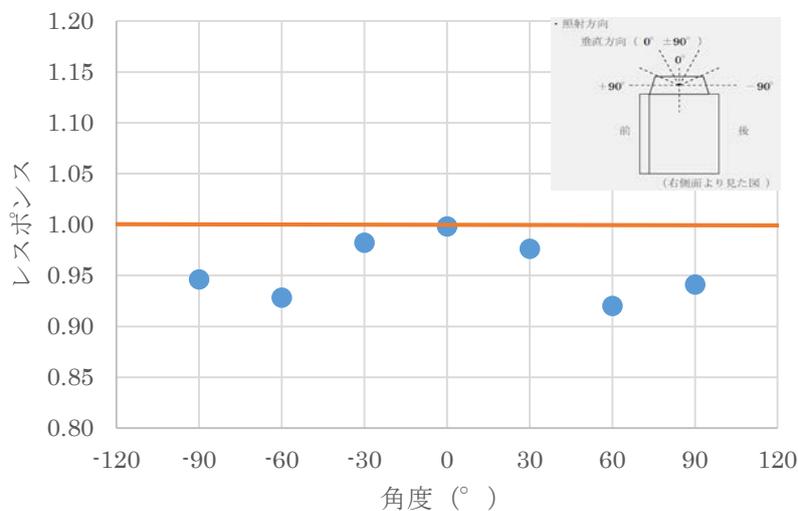


図 B. 11 シリコン半導体検出器における方向特性の一例

(3) エネルギー特性

^{137}Cs の 662 keV のレスポンスで規格化した各エネルギーのレスポンスを表したグラフを図 B. 12 に示す。なお、各エネルギーの空気吸収線量率は、約 1000 $\mu\text{Gy/h}$ である。

各エネルギーのレスポンスは、約 50 keV のエネルギーでレスポンスの低下が見られるが、これは検出器カバーによる遮への影響が表れている。また、約 80 keV 付近でレスポンスの過大応答が見られるが、これは光電効果による影響が表れている。なお、全体的なエネルギー特性は、検出器カバーによる遮への影響の見られた 50 keV を除き JIS Z4325 : 2008 の基準内である。

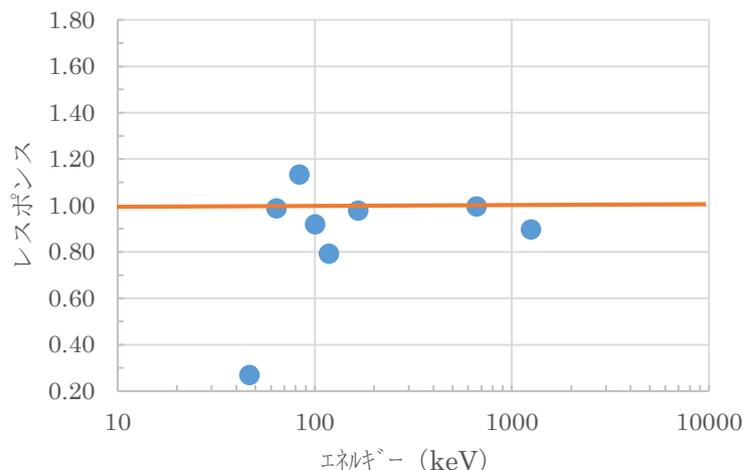


図 B. 12 シリコン半導体検出器におけるエネルギー特性の一例

解説 B. 4 CsI(Tl)シンチレーション検出器

B. 4.1 モニタの原理と構成

NaI(Tl)シンチレーション式モニタと同様に、吸収線量及び周辺線量当量を評価する方法として G(E) 関数法が活用されている。なお、CsI(Tl)シンチレーション検出器を用いたモニタには、組み合わせる光検出器の種類によって、測定可能なエネルギー範囲が異なる。これはそれぞれの用途及び特徴に合わせて、仕様を選択するべきである。

γ 線検出器に活用されている代表的な各シンチレータ及び光検出器の特徴をまとめた一覧を、表 B. 3 に示す。

CsI(Tl)シンチレーション検出器の主な特徴としては、NaI(Tl)シンチレーション検出器と比較して密度が大きいことである。これは、検出器が小さくても高い感度をもつ事を意味しており、更に波長感度の相性のよい光検出器を組み合わせることによって、非常にコンパクトなシステム構成が可能となっている。一方、減衰定数は NaI(Tl)シンチレーション検出器と比較して大きい値となっている。これは、 γ 線光子が検出器に入射しシンチレーションが発光した後に、その光が減衰するまでの時間が長いことを意味している。このため、高線量率(高計数率)時の測定の際には減衰までの間に入射してきた光子を数え落とすことになる。

よって、過小評価となってしまうため、高線量率（高計数率）時には測定値の取扱いに注意を要する。特に緊急時には低エネルギー側の核種からの寄与によって高線量率になっていることが想定されるため、線量率の寄与に占める核種毎の割合によっては、測定可能線量率の上限値の設定に注意する必要がある。ただし、現在は電子技術の進歩によって、回路内処理に必要な時間を短縮することによって計数特性が改善されたシステムも存在する。

なお、ここで記載した CsI (Tl) シンチレーション検出器は、スペクトル情報を得ることを目的としたシステムに活用されているものであり、別用途として存在するシステムではエネルギー情報が得られなく、測定対象エネルギー範囲が本記載とは異なるものもある。

表 B. 3 シンチレータ及び光検出器の特徴

蛍光体	密度 ^{a)} (g/m ³)	減衰定数 ^{a)} (nsec)	潮解性 ^{a)}	最大蛍光波長 ^{a)} (nm)	光検出器 最大感度波長 (nm)	
					PMT ^{b)c)}	MPPC ^{d)e)}
NaI (Tl)	3.67	230	有	410	420	500
CsI (Tl)	4.51	1000	有	565		

a) 八木秀之 ほか “シンチレーション発光のパルス波形測定” JAERI-Tech 98-043 (1998)

b) “光電子増倍管と関連製品” 浜松ホトニクス株式会社

c) PMT : Photomultiplier Tube (光電子増倍管) の略

d) “MPPC データシート” 浜松ホトニクス株式会社

e) MPPC : Multi-Pixel Photon Counter の略

「MPPC は、浜松ホトニクス株式会社の登録商標です。」

ここでは、連続モニタ（特に走行サーベイシステム）として活用する事が前提であるため、緊急時においても重要となる低エネルギー側まで測定が可能であるモニタの代表例について記載する。なお、以降の記載は、走行サーベイシステム KURAMA-II に係るレポート^{*2}から引用した。

CsI(Tl) 結晶に光子が入射すると、光信号は低電圧で高増倍率を得られる MPPC (Multi-Pixel Photon Counter, マルチピクセル半導体光検出素子) を介して増幅される。その後、基板上の回路内で処理された波高または線量率データは、USB ケーブルを介して出力可能で、パソコンに直接接続すれば、附属の専用ソフトウェアを用いて線量率とともに波高スペクトルデータを取得できる。電源は USB を介して供給され、測定対象の γ 線のエネルギー範囲は、30 keV~2000 keV である。測定器の構成を図 B. 13 に示す。なお、本システムは、線量率演算方

^{*2}津田修一ほか, “走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の基盤整備と実測への適用” JAEA-Technology 2013-037

式に G(E) 関数法が採用されており、エネルギー補償しつつ線量率演算を実施できる仕様である。

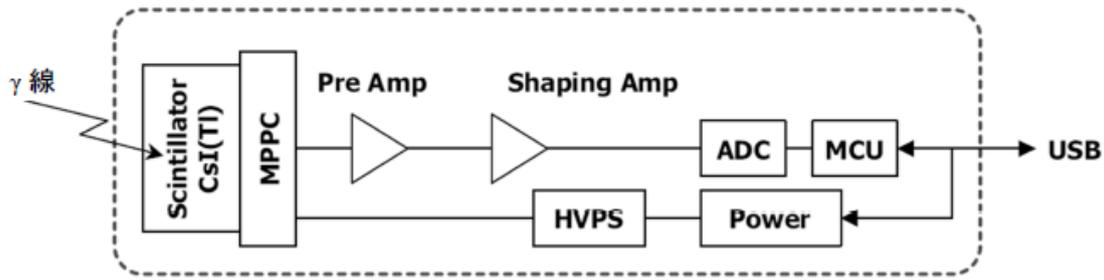


図 B. 13 CsI(Tl)シンチレーション検出器の構成例

B. 4. 2 モニタの特性

(1) 線量率直線性

測定器の構成性質上または性質上、NaI(Tl)シンチレーション検出器と同様に高線量率（高計数率）となると、数え落としの影響によって感度が低下する。 ^{137}Cs の 662 keV において $0.2 \mu\text{Sv/h}$ （周辺線量当量率）～ $30 \mu\text{Sv/h}$ の範囲では、レスポンスの変化は±15%程度である。また、さらに線量率が増加し、 $100 \mu\text{Sv/h}$ では3割、 $200 \mu\text{Sv/h}$ では5割程度の指示値の低下がある。図 B. 14 に線量率直線性を表したグラフを示す。

なお、現在は電子回路の改良に伴いデータ処理速度が速くなったため、線量率直線性が向上している。使用機器の仕様において最新の特性を把握しておくことが重要である。

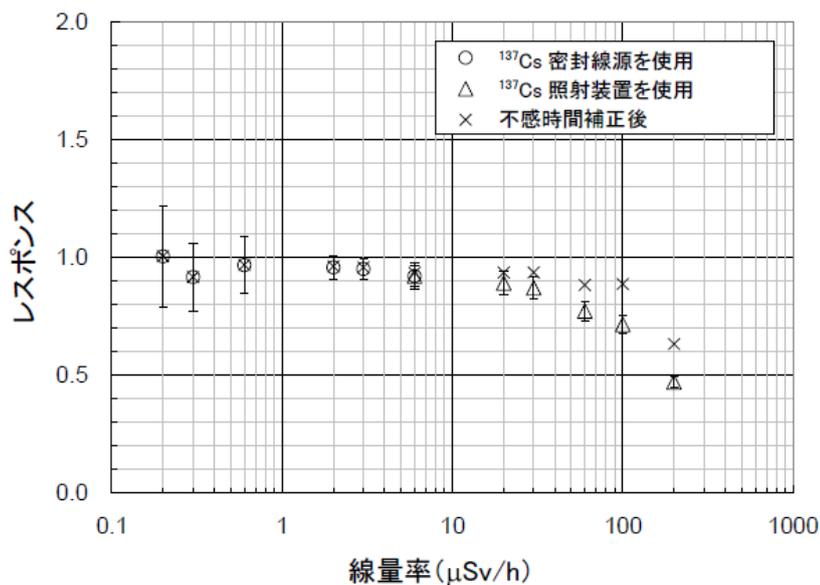


図 B. 14 CsI(Tl)シンチレーション検出器における線量率直線性

(2) 指示値の変動

測定時間 3 秒の条件で、各線量率において繰り返し測定した際の平均値（指示値）と変動係数から指示値の変動を評価すると、約 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の線量率では JIS Z4333 : 2014 の基準である 15 % 以下である。平均値（指示値）と変動係数との関係を図 B.15 に示す。

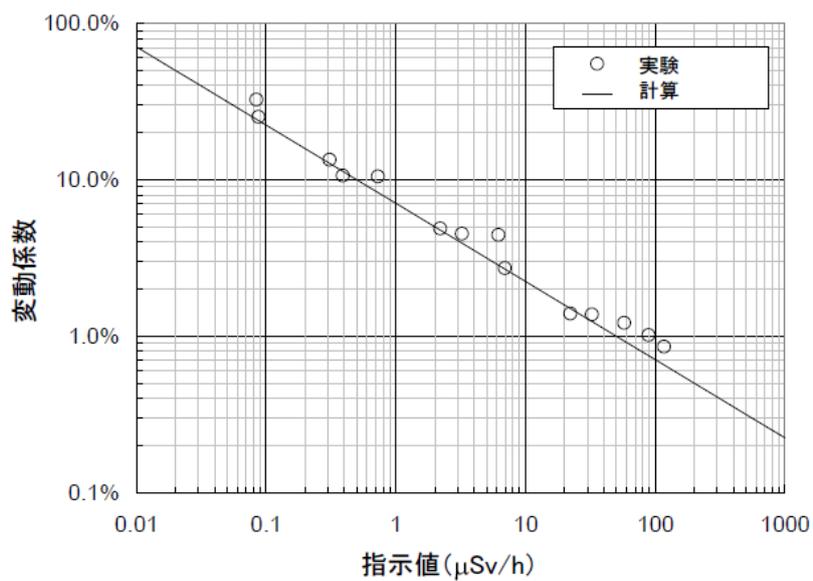


図 B.15 CsI(Tl)シンチレーション検出器における指示値変動
(計算 : $0.01 \mu\text{Sv/h}$ 当たり 40 cpm として)

(3) 入射方向特性

0° 方向におけるレスポンスで規格化した場合、検出器後方 (180°) からデータ処理・送信用基板が配置された方向 (270°) にかけて若干感度の低下は見られるが、全方位における感度の変化は-23%~+10%で程度である。方向特性を表した図を図 B.16 に示す。

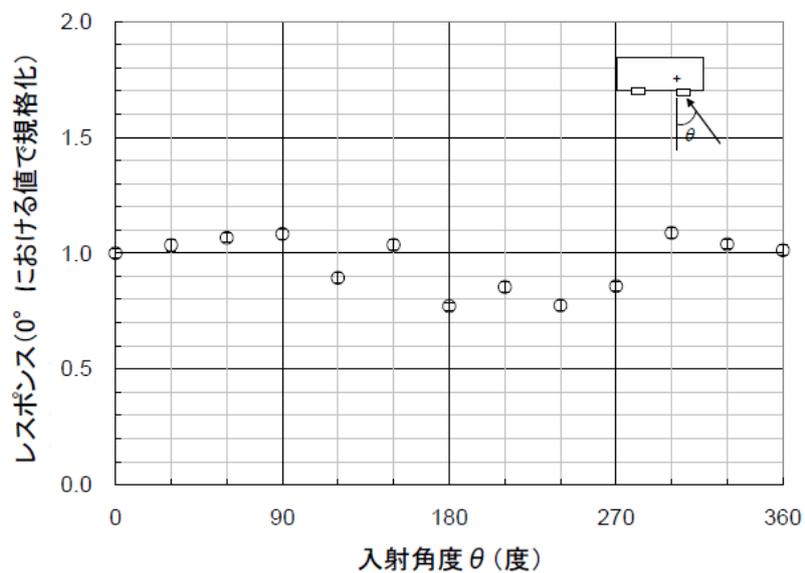


図 B.16 CsI(Tl)シンチレーション検出器における方向特性
(本方向特性は、走行サーベイシステム KURAMA II 用に
専用の収納容器に納めた状態での特性である)

(4) エネルギー特性

CsI(Tl)シンチレーション検出器とG(E)関数法の組合わせによる測定システムにおいて、各エネルギーの γ 線光子を照射した際の γ 線エネルギー（各実効エネルギーは、 ^{241}Am : 60 keV、 ^{133}Ba : 340 keV、 ^{137}Cs : 662 keV、 ^{60}Co : 1250 keV）とレスポンスの関係を図B.17に示す。また、モンテカルロ計算から求めたシミュレーション結果についても併せて示す。 ^{241}Am については、筐体による遮蔽の影響から若干レスポンスの低下が見られるものの、その他のエネルギーにおいては比較的良好なエネルギー特性を示しており、使用に際しては特段その影響を考慮する必要はない。

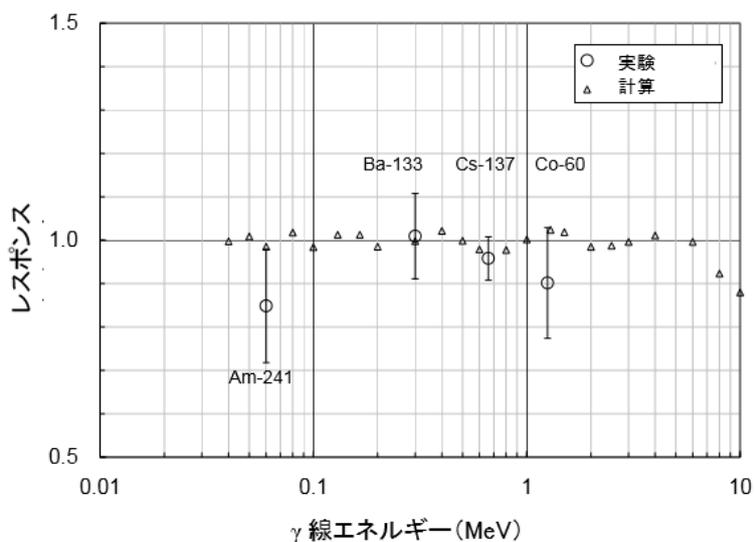


図 B.17 CsI(Tl)シンチレーション検出器におけるエネルギー特性

解説 C 基準 γ 線源

解説 C.1 基準 γ 線源の適用

基準 γ 線源は線源から一定の距離（通常 1 m）における γ 線空気吸収線量率が値付けされたトレーサビリティの明確な γ 線源で、これをモニタの校正に使用する。

解説 C.2 基準 γ 線源と線量率

環境の γ 線は数 10 keV から数 MeV の範囲のエネルギースペクトルをもち、また線量率は 50 nGy/h 程度である。連続モニタ校正用の基準 γ 線源としては、これらのことを考慮し、長半減期であることと入手の容易さを条件として、本文に示す ^{137}Cs 、 ^{60}Co のほか ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 ^{133}Ba を加えた 5 核種を選択した。 ^{241}Am 、 ^{57}Co 及び ^{133}Ba は、低エネルギー領域におけるエネルギー特性確認用で、放射能は 10 MBq 程度とした。この γ 線源は、表示付認証機器であると移動使用が容易であり、野外に設置されたモニタの校正の場合に便利である。

解説 C.3 線量率校正の精度

^{137}Cs 及び ^{60}Co 基準 γ 線源の場合、線量率校正の精度は特別な場合を除き $\pm 10\%$ 程度、 ^{241}Am 、 ^{57}Co 及び ^{133}Ba は $\pm 30\%$ 程度とされる。

解説 C.4 基準 γ 線源の入手

基準 γ 線源は公益社団法人日本アイソトープ協会から供給されている。公益社団法人日本アイソトープ協会は、国立研究開発法人産業技術総合研究所から高精度の一次基準を受け、基準 γ 線源の値付けと供給を行う。

解説 C.5 γ 線源の線量率の値付け

C.5.1 比較法による値付け

基準 γ 線源は、国家標準によって校正された特定二次標準器によって値付けされる。しかし、場合によっては施設で基準 γ 線源によってほかの γ 線源の線量率を校正し実用基準 γ 線源とすることもできる。この場合、基準 γ 線源と校正する γ 線源は同一核種としておくのがよい。仲介用検出器は安定性とエネルギー特性のよいものであれば特に限定しない。図 C.1 のように、検出器から一定の距離 L をとり基準 γ 線源の指示値を Q_s とする。ついで校正する γ 線源におきかえたときの指示値が Q であるとする。基準 γ 線源の 1 m での線量率を \dot{X}_s とすると、値付けする γ 線源の 1 m における線量率 \dot{X} は次式で求められる。

$$\dot{X} = \dot{X}_s \frac{Q}{Q_s} \quad (\text{C.1})$$

上式は L に無関係に成立するので、線量率によって適当な距離を選べばよい。少なくとも 2 回以上繰り返して測定し、結果については平均値をとるのがよい。10 MBq 程度の γ 線源であれば、仲介用検出器として現用しているモニタを使用することができる。

C.5.2 基準測定器による値付け

基準測定器である高精度の電離箱式線量・線量率計で線量率が値付けされた γ 線源は、基準 γ 線源とすることができる。

散乱線の寄与については、解説Dを参照されたい。

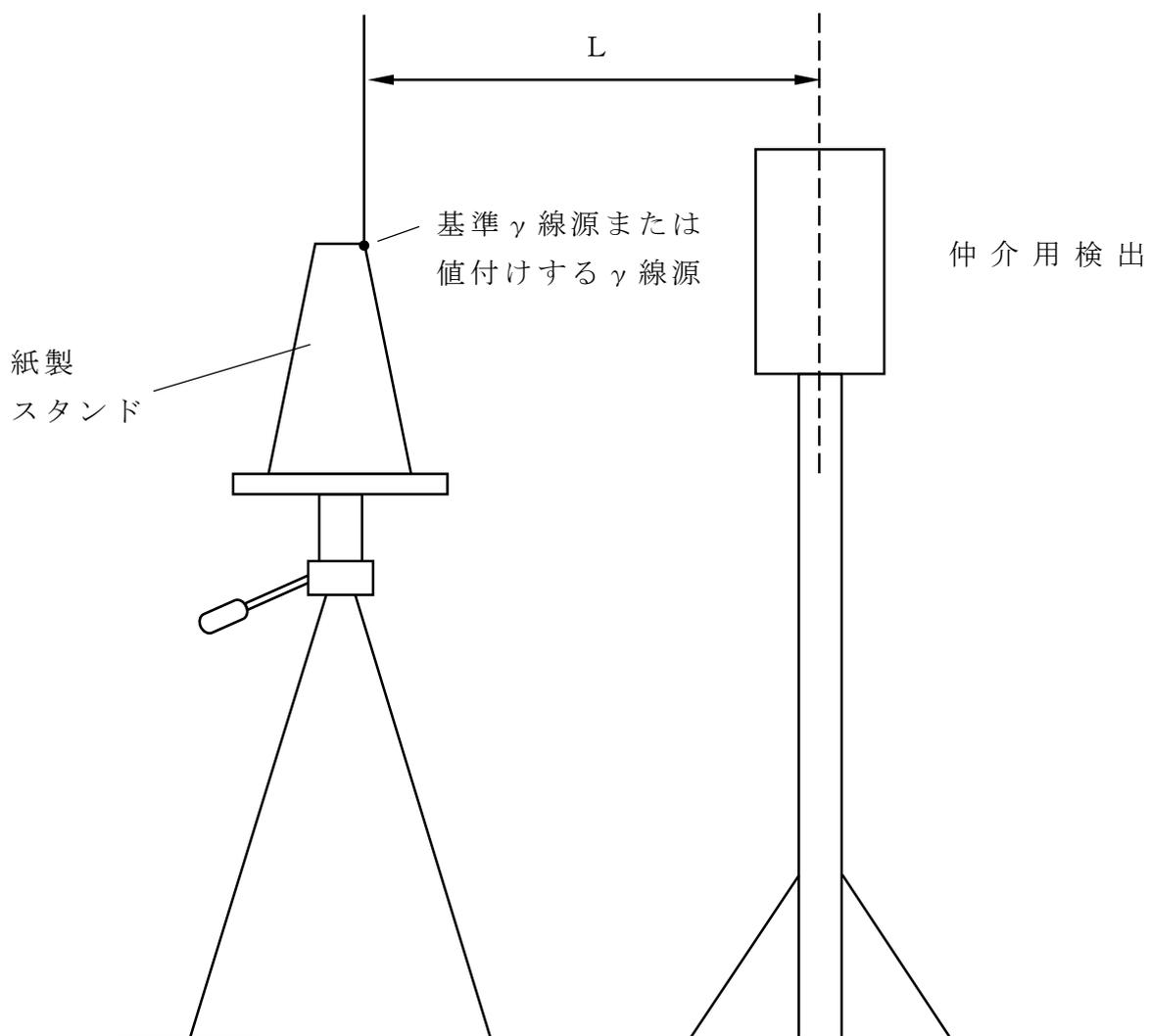


図 C.1 比較法による γ 線源線量率の値付けの一例

解説 D 校正時の散乱線対策

基準 γ 線源による校正時の線量率 \dot{X} は、線源からの直接の γ 線による線量率 \dot{X}_d と周囲からの散乱 γ 線の線量率 \dot{X}_b との和である。

$$\dot{X} = \dot{X}_d + \dot{X}_b \quad (\text{D. 1})$$

散乱 γ 線の寄与率 \dot{X}_b / \dot{X}_d は、線源と検出器間の距離、線源及び検出器の地表面（または床面）からの高さ、周囲物体等の条件によって変わり、ある範囲内で線源と検出器間の距離が近いほど、線源及び検出器の地上高が高いほど、また周囲物体が遠くかつ少ないほど小さい。

校正に際しては、散乱 γ 線の寄与の程度を知っておく必要がある。また散乱 γ 線のエネルギーは一般的に直接 γ 線のエネルギーに比較してかなり低く、検出器の特性によっては散乱 γ 線の影響が見かけ上大きくなる場合がある。校正は散乱 γ 線の寄与の小さい状態で行うのが望ましい。

連続モニタの設置状況は種々であるが、広い地表面上のある高さに検出器が設置されているとする。校正方向（線源と検出器を結ぶ線）は地表面に平行または垂直とする（図 D. 1）。

校正方向が地表面に平行な場合の散乱 γ 線の寄与率については、図 D. 2 及び図 D. 3 に示すようなデータがある。図 D. 3 中の曲線は、地表がコンクリート及び線源が ^{60}Co の場合について、Chilton が半実験的に求めたものである。また、種々の条件下において ^{60}Co 線源を用いて得られた実験結果も同図に示してある。表 4.1 は、やはり Chilton のデータで、線源と検出器の高さが異なる場合及び ^{137}Cs 線源についての結果も含まれている。

また、モニタリングポスト屋上の検出器から 1 m の高さに γ 線源を置いて測定した結果によれば、散乱 γ 線の寄与率は ^{60}Co 線源を用いたとき、鉄製屋根で 2.3 %、コンクリート屋根で 2.45 %、また ^{137}Cs 線源についてはそれぞれ 2.6 % 及び 3.5 % であった。

散乱 γ 線源の寄与率の測定にはシャドーシールド法及びスペクトル測定法等がある。ここでは原理的に簡単なシャドーシールド法を説明しておく。

シャドーシールド法は、図 D. 4 に示すように、線源と検出器の間に鉛ブロックをおき、直接線を遮って周囲からの散乱 γ 線を測定する方法である。鉛ブロックは直接線を十分（1/1000 程度）減衰させる厚さとする。鉛ブロックの支持台は発泡スチロールのような軽量なものがよい（散乱体とならないため）。

鉛ブロックがないときの指示値を I_d 、置いたときの指示値を I_s とすると、散乱 γ 線の直接 γ 線に対する寄与率 η は

$$\eta = I_s / (I_d - I_s) \quad (\text{D. 2})$$

で求まる。鉛ブロック支持台からの散乱を確認しておくのがよい。無視できなければ次式によって η を求める。すなわち、支持台だけを置いたときの指示値を I_o とすると（ I_s 、 I_d については式(D. 2)と同じ）

$$\eta = \frac{Is - (Io - Id)}{Io - Is} \quad (D.3)$$

であらわされる。

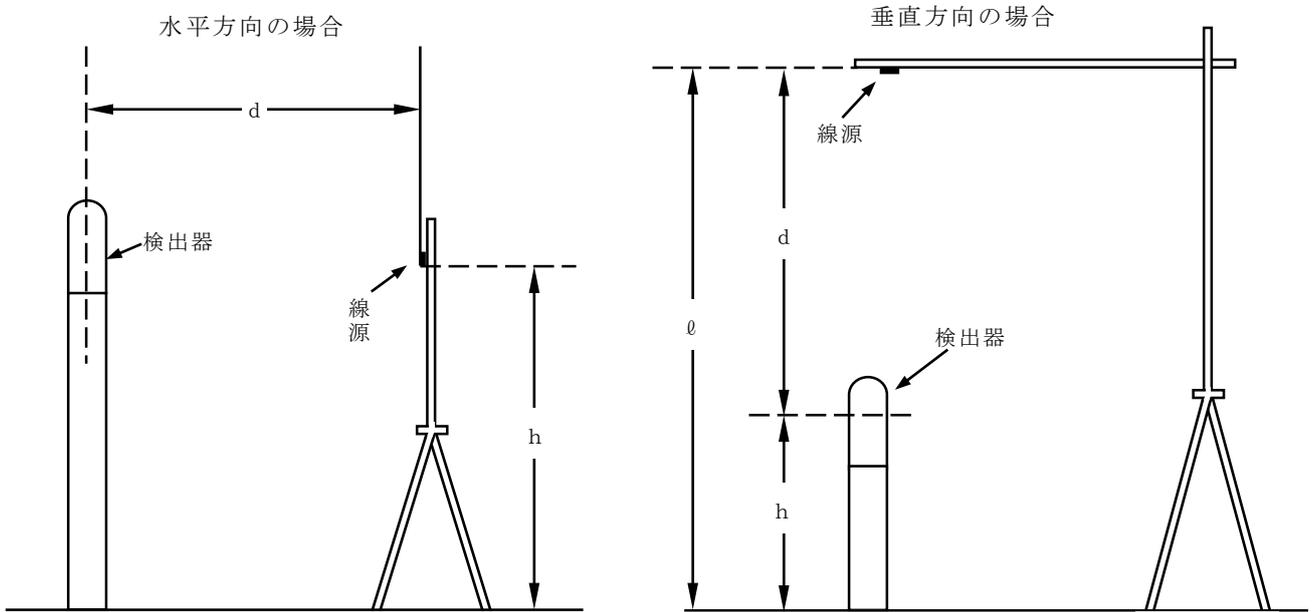


図 D.1 校正における線源と検出器の配置

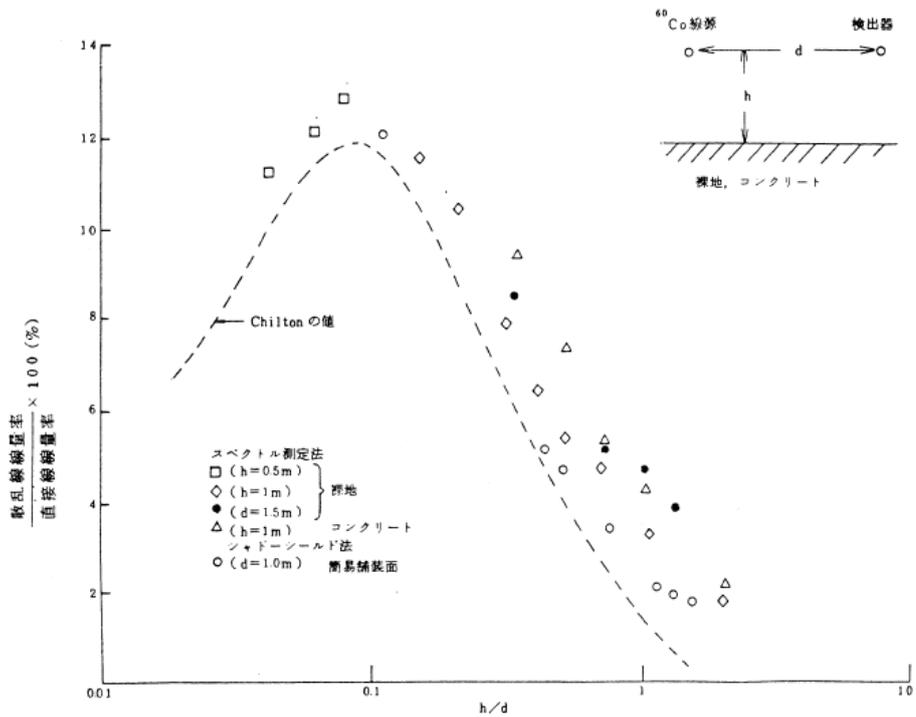
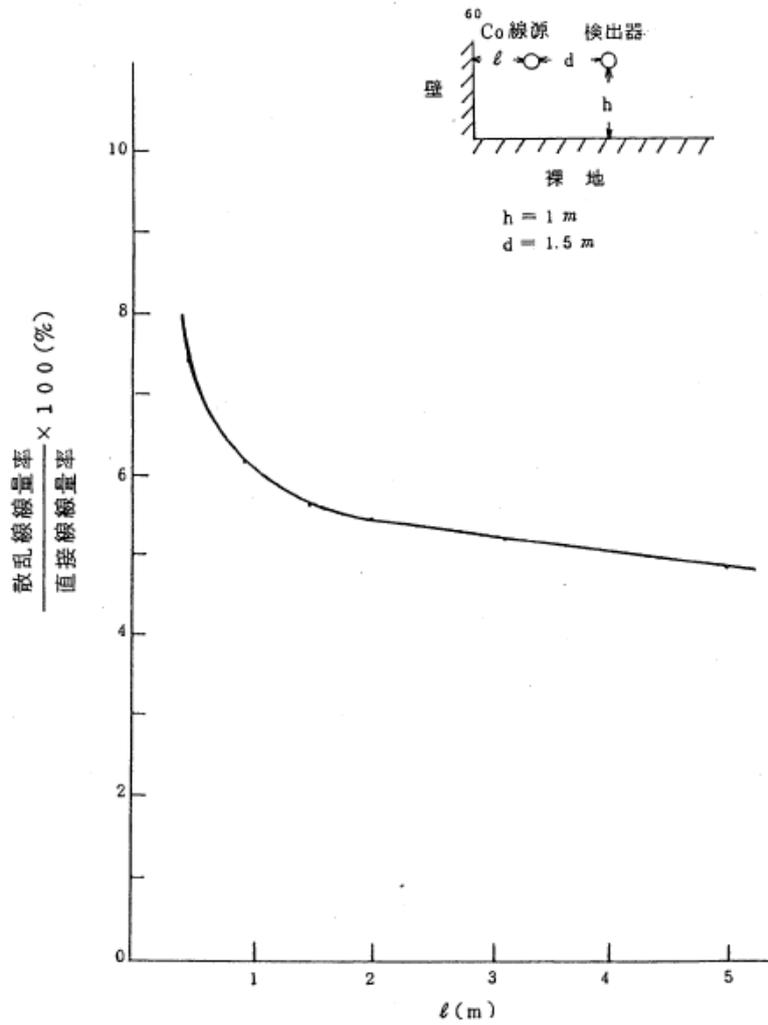


図 D.2 Chilton 等の半実験的結果 (曲線) と測定結果



図D.3 軽量ブロック壁がある場合の散乱線寄与

表 D.1 コンクリートまたは類似物質による散乱 γ 線の寄与率 $\left(\frac{\text{散乱線線量率}}{\text{直接線線量率}} \right)$

$\frac{h}{\ell}$	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0	32.0	64.0
^{137}Cs (0.662 MeV)									
1	0.002	0.007	0.024	0.062	0.107	0.134	0.118	0.083	0.053
2	0.017	0.026	0.049	0.088	0.127	0.132	0.102	0.068	0.042
4	0.052	0.060	0.081	0.113	0.138	0.125	0.090	0.059	0.036
8	0.087	0.094	0.109	0.132	0.142	0.118	0.082	0.053	0.032
16	0.115	0.119	0.129	0.145	0.143	0.113	0.077	0.049	0.030
32	0.133	0.135	0.142	0.152	0.142	0.109	0.074	0.047	0.029
64	0.144	0.146	0.150	0.156	0.141	0.106	0.072	0.046	0.028
128	0.150	0.152	0.155	0.158	0.140	0.105	0.071	0.045	0.027
∞	0.161	0.162	0.164	0.163	0.140	0.105	0.071	0.045	0.027
^{60}Co (1.25 MeV)									
1	0.001	0.004	0.014	0.038	0.073	0.109	0.110	0.083	0.054
2	0.010	0.015	0.029	0.057	0.093	0.115	0.099	0.069	0.043
4	0.030	0.035	0.050	0.076	0.108	0.113	0.088	0.059	0.037
8	0.052	0.057	0.069	0.092	0.116	0.109	0.081	0.053	0.033
16	0.070	0.074	0.083	0.103	0.119	0.105	0.076	0.049	0.030
32	0.083	0.085	0.093	0.110	0.120	0.102	0.072	0.047	0.029
64	0.091	0.093	0.099	0.114	0.119	0.099	0.070	0.046	0.028
128	0.095	0.097	0.103	0.117	0.119	0.098	0.069	0.045	0.028
∞	0.103	0.105	0.111	0.121	0.120	0.097	0.069	0.044	0.027

(A. B. Chilton, Nucl. Sci. Eng., 27, pp. 403-410(1967))

h: 検出器高さ, ℓ : 線源高さ, d: 線源・検出器間水平距離

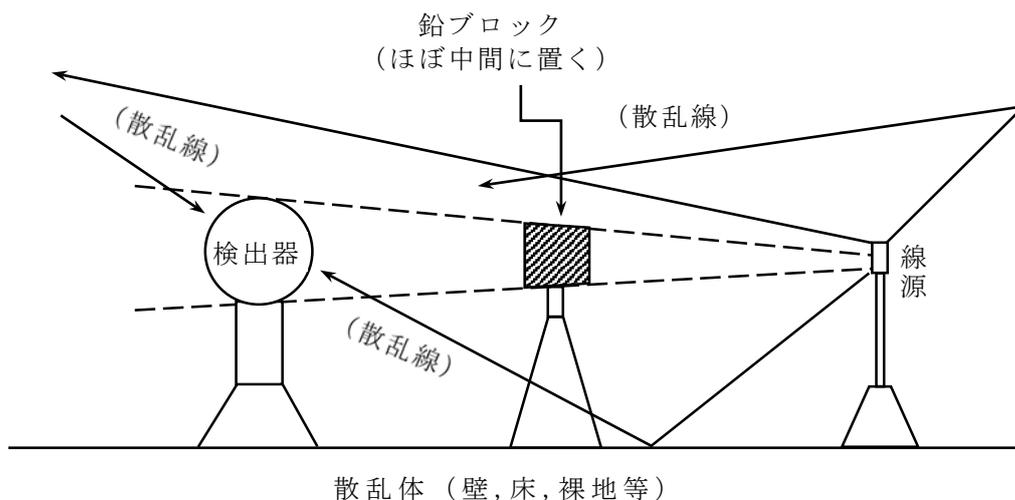


図 D.4 シャドーシールド法の配置図

解説 E 可搬型モニタリングポストを用いた連続測定における留意点

解説 E.1 主な留意事項

本文でも述べているが、可搬型モニタリングポストを活用し、連続測定を実施する場合には、代表的な留意点として以下の項目等が挙げられる。

- ① 測定方式の把握
- ② 温度特性
- ③ 供給電源
- ④ 設置場所の選定
- ⑤ 維持管理

これらの留意点のうち、③及び④については本文中で述べているため、ここでは①測定方式の把握、②温度特性及び⑤維持管理について解説する。

解説 E.2 測定方式の把握

可搬型モニタリングポストは、元々は固定局としての連続モニタ（NaI モニタ及び電離箱モニタ）が担う役割を、緊急時に必要となった地点において、一時的に 1 台の装置で対応することを目的として製品化されているものである。これは、平常時に相当する低線量率から、電離箱モニタが担うほどの高線量率までの広い測定可能線量率範囲が必要であることを意味する。よって、メーカーごとに種々の測定方式及び検出器を活用することで、これに対応している。表 E.1 に各種測定方式をまとめたものを示す。

検出器の組み合わせ及び測定方式の選択によって、広い線量率範囲において測定が可能となっている。しかし、それぞれの組み合わせによって特徴は種々存在し、その効果は一長一短である。購入に際しては、エネルギー情報取得の必要性及びコストを勘案して仕様を検討する必要がある。また、使用に際しては装置の特徴を把握し、仕様を考慮した上でデータの評価をする必要がある。

解説 E.3 温度特性

本文でも述べているが、通常は温度制御装置を装備できていない。基本的には温度補償回路によって、温度特性による感度変化は小さく抑えられるような仕様となっている。しかしながら、直射日光等による急激な温度変化には十分に追従できていないとは言えない。図 E.1 及び図 E.2 にメーカーによる出荷時の温度特性試験結果の一例を、図 E.3 及び図 E.4 に屋外に設置した際の連続測定時における温度変化の影響を示す。なお、図 E.1 及び図 E.2 と図 E.3 及び図 E.4 は同一メーカーの装置ではないため一概に比較することはできない。

図 E.1 の NaI 検出器では、温度が上昇すると感度も上がり、温度が低下すると感度も低下していることが分かる。図 E.2 のシリコン半導体検出器では、NaI 検出器とは逆に温度が上がると感度が低下し、温度が下がると感度が上がっていることが分かる。連続測定した際の温度変化の影響を示した図 E.3 及び図 E.4 においても、同様の傾向を示している。しかし、温度特性試験時では±5 %程度の変化であるが、一方で屋外で急激に温度変化の影響を受けた際の感度は最大で 30 %程度の変化を起こすこともある。

よって、可搬型モニタリングポストにおける温度変化に対する留意点は、「①NaI 検出器とシリコン半導体検出器では感度変化の傾向が真逆である。」ことと、「②屋外で大きな温度変化に曝された場合、温度特性試験時よりも感度変化が大きいこともある（temperature shock）。」として、注意しなければならない。

解説 E.4 維持管理

これまでに述べてきたとおり、「可搬型」であるがゆえに種々の変動要因が存在する。もしも、本システムを長期間に渡って設置し連続測定を実施する場合には、以下の維持管理方法が参考となる。

(1) 比較測定

可搬型モニタリングポストの検出器の周囲において、校正・点検がなされている健全な別の測定器（サーベイメータ等）を用いて同一の地上高で測定を行い、その測定値を比較することによって、可搬型モニタリングポストが適正に稼働していることを確認する。しかし、周辺線量率分布に有意な不均一がある場合には、比較する際に注意が必要である。

(2) 点検・校正

点検・校正は、測定装置を健全に保つための有効な手段であるが、温度による影響を受け易い可搬型モニタリングポストの場合は、季節ごとの温度状況を勘案し、点検・校正の頻度を四半期ごと（季節ごと）に実施することが推奨される。

表 E.1 各種測定方式と特徴

検出器	上段：低線量率領域	測定方式	特徴
	下段：高線量率領域		
NaI	NaI (Tl) シンチレーション検出器	<ul style="list-style-type: none"> • G(E) 関数方式 • DBM 方式 	<ul style="list-style-type: none"> • エネルギー特性が良好 • エネルギー情報の取得可 • 数え落としによる感度の低下に注意
		<ul style="list-style-type: none"> • 電流方式 	<ul style="list-style-type: none"> • 同一検出器で高線量率まで測定が可能 • 線量率依存性が良好 • エネルギー情報の取得不可
NaI+半導体	NaI (Tl) シンチレーション検出器	<ul style="list-style-type: none"> • G(E) 関数方式 • DBM 方式 	<ul style="list-style-type: none"> • エネルギー特性が良好 • エネルギー情報の取得可 • 数え落としによる感度の低下に注意
	シリコン半導体検出器	<ul style="list-style-type: none"> • パルス方式 	<ul style="list-style-type: none"> • 高線量率までの測定が可 • エネルギー情報の取得不可 • 検出器の切替りによる感度変化に注意
半導体	シリコン半導体検出器	<ul style="list-style-type: none"> • パルス方式 	<ul style="list-style-type: none"> • 素子数を増加させることによって低線量率の測定も可 • 宇宙線に対して有感であるため、低線量率測定では注意 • エネルギー情報の取得不可 • 高線量率までの測定が可 • エネルギー情報の取得不可 • 検出器の切替りによる感度変化に注意

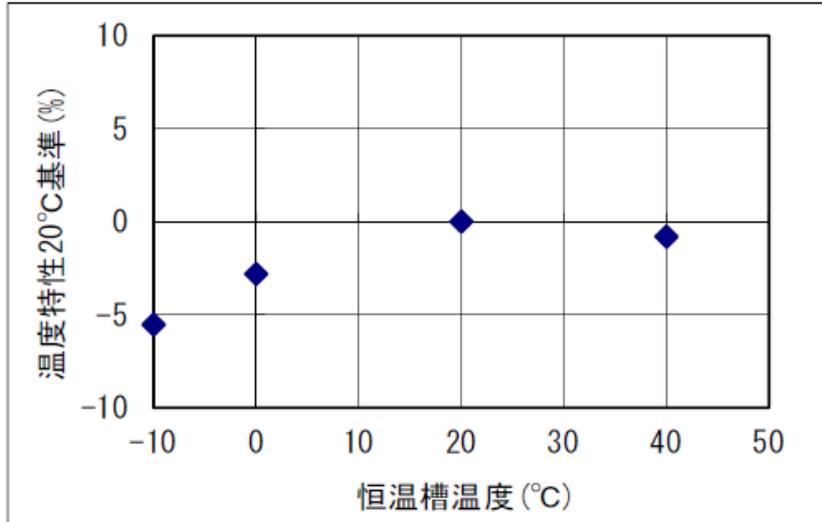


図 E.1 可搬型モニタリングポスト (NaI)
温度特性試験結果の一例

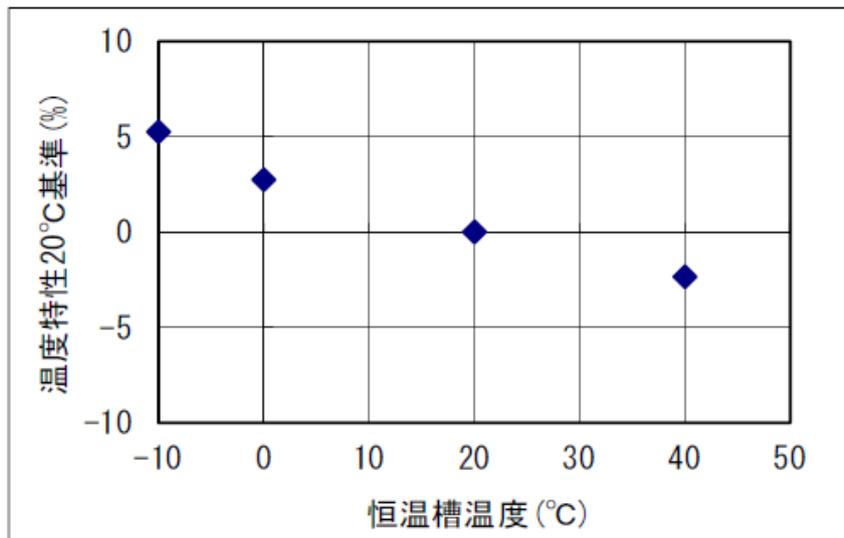


図 E.2 可搬型モニタリングポスト (シリコン半導体)
温度特性試験結果の一例

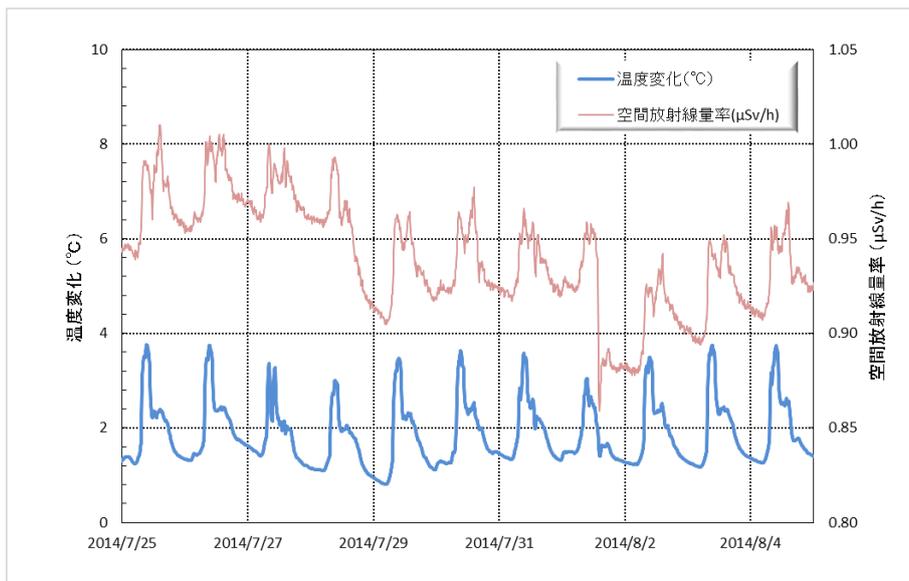


図 E. 3 可搬型モニタリングポスト (NaI)
連続測定時における温度変化の影響

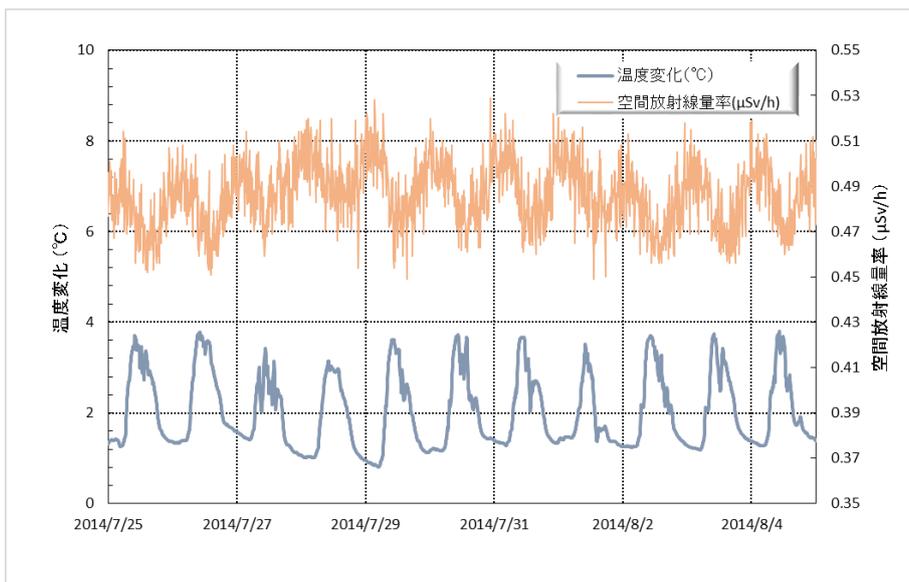


図 E. 4 可搬型モニタリングポスト (シリコン半導体)
連続測定時における温度変化の影響

解説 F 走行サーベイシステムにおける留意点

解説 F.1 概要

走行サーベイシステムを用いたモニタリングは、環境γ線量率を測定する機能を有した測定機器を積載した車両を用いて、移動しながら広範囲におけるモニタリングを効率良く実施するための測定方法である。

この方法によって得られるデータから、主に道路上及び道路沿い地域の線量率分布を知ることができるとともに、局所的に高線量率となっている地点（ホットスポット）を比較的容易に発見することができる。このデータを活用することによって、地域全体の被ばく線量評価及びホットスポットの除染促進に役立てることができる。

解説 F.2 モニタリング実施のための留意点

走行サーベイシステムを用いたモニタリングを実施するに当たり、留意する事項について以下に示す。

F.2.1 測定時間・収集間隔

本モニタリングは移動しながら実施するため、固定式モニタとは異なり測定対象地点（範囲）が常に変化していることになる。測定対象地点（範囲）の変化を適切に捉えるためには、測定データ収集間隔は短時間であることが望ましい。このことは、線量率分布図を作成する際のマッピング分解能、及びホットスポットを発見するために地点を細分化したデータを取得することにつながる。

現在実施されている走行サーベイシステムによるモニタリングでは、他車両の交通の妨げになるような極端な低速度で走行するのではなく、法令に従った制限速度にて走行している。これは、今後モニタリングが実施されることがあっても同様であると思われる。表 F.1 に速度 40 km/h で走行した場合の経過時間と移動距離を示す。

表 F.1 走行経過時間と移動距離の関係

経過時間 (秒)	移動距離 (m)
1	11
3	33
5	56
10	111
20	222
30	333
60	667

(速度 40 km/h で走行した場合)

測定範囲は必ずしも同一ではないが、検出器を地表面に対し直角方向に地上高 1 m に設置した場合、図 F.1 に示すように半径 10 m 以内からの γ 線線量率の寄与割合が 60~80 % となる。表 F.1 及び図 F.1 を考慮すると、1~3 秒の経過時間 (測定時間・収集間隔) であれば、移動距離が短く、細分化したデータを取得することができる。

各走行サーベイシステムにおいて設置状況は種々あるため、それぞれの設置状況に対して寄与割合の範囲がどの程度であるかをあらかじめ把握しておくことが望ましい。

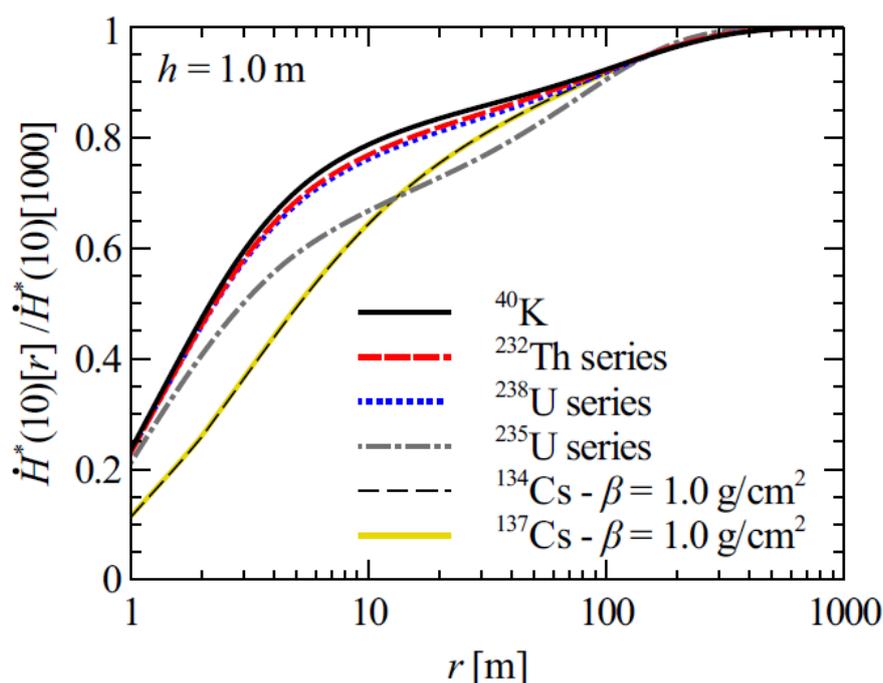


図 F.1 天然放射性核種が土壤中に均一に分布、及び ^{134}Cs 及び ^{137}Cs が指数分布 ($\beta : 1.0 \text{ g/cm}^2$) している場合の地上高 1 m での周辺線量当量の周囲からの寄与割合

(Alex et al.: Fields of View for Environmental Radioactivity)

F.2.2 測定精度

「F.2.1 測定時間・収集間隔」において、2～3 秒間の測定時間であれば細分化したデータを取得することができることを述べたが、測定時間が短ければ当然測定精度は下がる。解説 Bにおいて、測定時間 3 秒で線量率ごとに繰り返し測定を行った際の変動係数を示している。この結果から、福島第一原発事故後の経験上、走行サーベイシステムによるモニタリング対象地域となるであろう約 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ の線量率であれば、15 %程度の変動係数で測定できることが分かる。

走行サーベイシステムを用いてモニタリングを実施するに当たり、測定条件を設定するために上記内容を参考とされたい。

また、参考として測定時間 3 秒の測定条件において道路周辺において定点測定した結果を比較した例を図 F.2 に示す。この結果から、走行サーベイ結果と定点による地上高 1 m の空間放射線量率がよい相関関係を示しており、定点による地上高 1 m の測定値は、走行サーベイ結果と比較して 1.2 倍程度高い値となっている。これは、言い換えると、道路上を含めた範囲を測定対象としている走行サーベイシステムによるモニタリング結果には、道路上でその効果が比較的大きい「ウェザリング効果」等の影響によって、周辺の定点よりも低い値を示す傾向があることを意味する。これは、原子力災害発生からの経過日数によって、その影響は異なる。このような種々の情報が測定値には含まれていることを把握しておくことは重要である。

なお、以降に示す本項の解説は、津田修一ほか，“走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の基盤整備と実測への適用” JAEA-Technology 2013-037 より引用した。

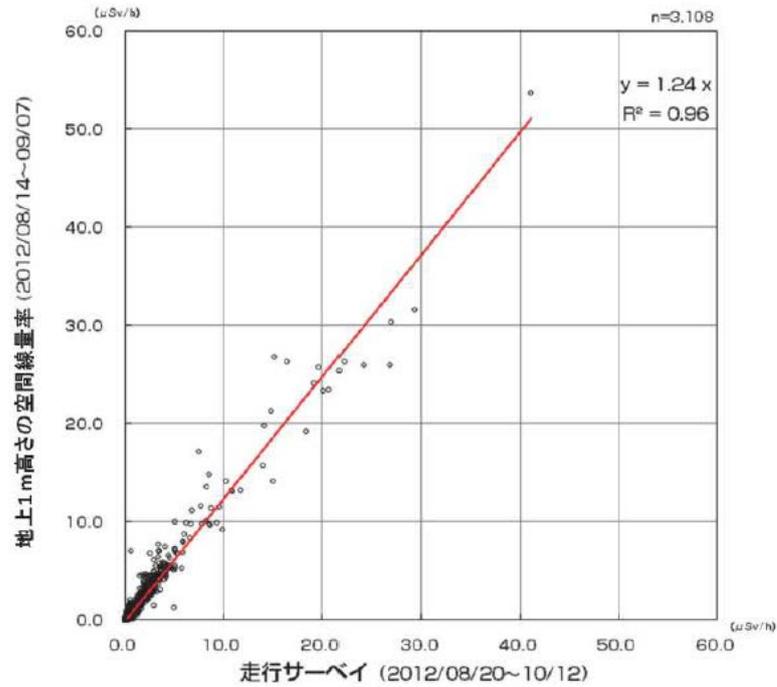


図 F.2 走行サーベイシステムによる測定結果（100 m 四方のメッシュ内の平均値）
と、その走行ルート周辺の線量率との関係

（津田修一ほか，“走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の
基盤整備と実測への適用” JAEA-Technology 2013-037）

F.2.3 自動車の車体による遮へいの影響

車両を用いたモニタリングを実施するに当たり、車両による遮へいの影響を把握しておくことは重要である。ここでは、その遮へいの影響について解説する。また、車内に検出器を設置する場合に、車内外補正係数を算出する必要があるが、これについても解説を示す。

車内に検出器を設置して測定を実施した場合、通常車外で測定した測定値と比較して低めの値を示す。これは車体による遮へいによるものである。車内及び車外において測定し比較した結果の例を図 F.3 に示す。

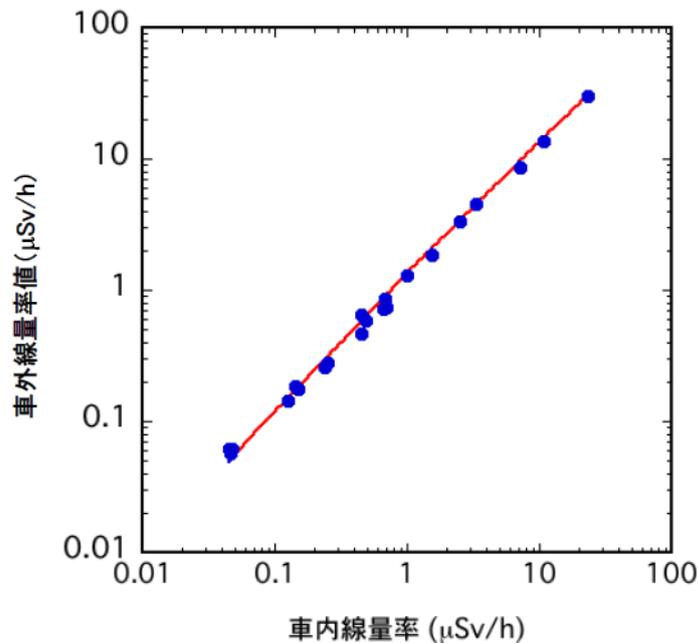


図 F.3 車内及び車外において測定した線量率の関係

(津田修一ほか, “走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の
基盤整備と実測への適用” JAEA-Technology 2013-037)

比較した結果を見ると車内及び車外間の線量率には良好な相関関係が得られていると考えられる。しかし、線量率が低くなるとそのばらつきが大きくなる傾向もある。これは、車種及び測定する際の測定環境の違いによって、線量率のばらつきへの影響の大小は異なるため、測定する条件に応じて、線量率のばらつきへの影響をあらかじめ把握しておくことは重要である。参考として車種間において比較した結果を図 F.4 及び図 F.5 に示す。

車内及び車外間の線量率の関係を確認するためには、広く均一に放射性物質が沈着(分布)しているとみなせる線量率の異なる複数地点において、車内の既定の位置に検出器を設置して測定した後に、車両のない状態で地上高 1 m の線量率を測定し、比較することによって確認することができる。

また、この車内及び車外間の線量率の関係を確認する方法は、平常時の環境レベルにおいても適用することができる。ただし、低線量率地点での測定を実施する場合には、検出器の大きさにもよるが、測定時間を長くするなど、測定の統計精度を上げることによって車内外補正係数を活用することができる。

なお、車体下部に γ 線源を設置し、車体がある場合とない場合でそれぞれ測定を実施することによって、下方向からの γ 線に対する、車内検出器設置位置の違いによる遮へい効果の影響を確認することができる。また 1 箇所だけでなく γ 線源の設置位置を変更してデータを多数取得することによって、遮へい効果の少ない車内の適切な位置に、検出器を設置することができる。

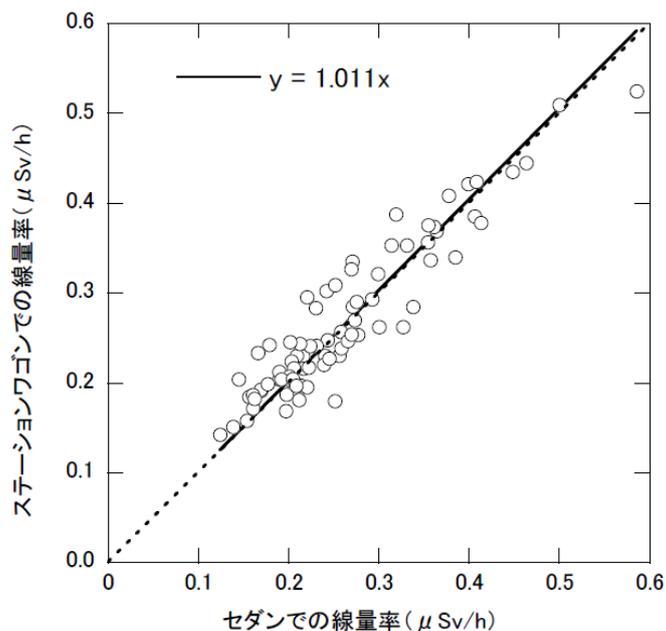


図 F.4 車種間における線量率の比較（ステーションワゴンとセダン）
 （津田修一ほか，“走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の
 基盤整備と実測への適用” JAEA-Technology 2013-037）

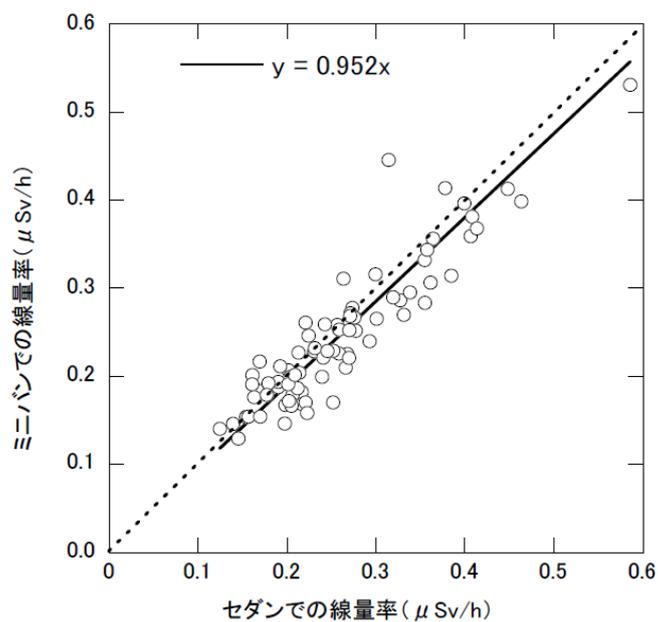


図 F.5 車種間における線量率の比較（ミニバンとセダン）
 （津田修一ほか，“走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の
 基盤整備と実測への適用” JAEA-Technology 2013-037）

解説 G 測定結果の解析

本文 6.2.3 において述べられているモニタの指示値の時間変動は表 G.1 のようにまとめられる。すなわち環境 γ 線の変動の原因は大別すると自然現象、医療・産業用放射性核種及び原子力施設に起因するものなどに分類できる。測定結果の解析は、これらの変動を抽出してその原因を調べ、変動分の原因究明ならびに線量評価をすることである。通常連続測定によって得られる測定結果の変動のパターンは変化の速度及び周期性によって特徴付けられるが、変動の原因はほかの情報との相関によって知られることが多い。

一方、モニタ指示値には以下のほか、統計的な現象に起因する本質的な変動があり、これは測定器自身に関するものと放射線源に関するものとの二つに大別される（前者は純粋な計数統計によるものが含まれる）。

測定結果の解析には母集団の選定、平均値及び標準偏差の計算、異常値の抽出等が含まれるが、特に母集団の選び方は重要である。また、近年は線量率測定値と同時に得られる γ 線スペクトル等のエネルギー情報を解析することによって異常値の判定をすることができる。

解説 G.1 母集団の選定

選定に際しては次の事項について考慮する必要がある。

G.1.1 測定時間と時定数

測定時間とは、測定し取得した計数等の情報から線量率を算出するために、任意に設定する時間間隔のことである。本測定法にて記載している測定時間とは、このことである。

これとは別に、放射線の計測機器には時定数という定義がある。時定数は、測定されている瞬時値（リアルタイムの値）をレートメータにて読み取る際に重要となる。代表的な測定器としてはサーベイメータがあり、連続モニタとして活用されている NaI モニタ及び電離箱モニタ等も、「測定時間」とは別に「時定数」が定められている。ただし、時定数は測定時間に直接関与するものではない。

測定値は、時定数の 3 倍経過するとその場所の本来の値の 95 % に、5 倍経過すると 99 % に達する。サーベイメータを例とした時定数と測定値との時間変化の関係を図 G.1 に示す。

多くの測定システムでは、時定数の設定が数とおり選択できる仕様となっている。時定数の設定値が短ければ、上記に示したとおり測定値は、その場所の本来の線量率を敏感に感じる事ができる。また、図 G.1 のとおり、時定数設定値の 3 倍以上の時間が経過すると、論理的にはその場所の線量率に対して、その割合が 95 % 以上に達することができる。しかし、その反面、時定数の設定値が短いということは、測定器が時定数の間隔において得られる計数等の情報が少ないため、測定値のバラツキは大きくなる。また、時定数の設定値を長くすると、上記とは反対に測定値のバラツキは比較的小さく抑えることができるが、測定値が得られるまでの時間が長くなってしまふ。表 G.2 に各線量率における時定数ごとの測定値のバラツキを示す。

表 G.1 モニタの指示値の時間変動

変動の原因		変動のパターン	変動の頻度	増加量
自然現象による変動	降雨・降雪	<ul style="list-style-type: none"> ・ 降雨中ゆるやかな変動をもつ ・ 増加と減少が複雑に入り混じる 	年間 100 回程度地域によって差がある	≈ 100 nGy/h ≈ 0.88 mGy/y 程度
	落雷	急激に増加して約 30 分の半減期で減少	地域によって差がある (日本海側では冬期に多い)	最高数十 nGy/h 程度になることがある
	積雪	積雪による遮へい効果	地域によって差がある	$\approx 10 \sim 30$ nGy/h 程度減少
	その他の気象	逆転層による日周期	冬期に多い	≈ 10 nGy/h 程度
		地表の水分による放射線の吸収		2 nGy/h 程度減少
大気圏内核爆発実験		実験の数日後に変動が現れ経過時間にはほぼ比例して増加量を示す。		経過日数の短いほど大で、2~3 日後の場合は通常レベルの数倍になる場合がある。
原子力施設		一定しない、特に風下方向軸で線量率の上昇があり、変動が短い周期を持つ		
測定器の特性		主として温度変化による	温度変化の日変化、年変化	温度によって数 %~10 %におよぶ場合がある。
測定器の故障		過大または過小な値を示す		

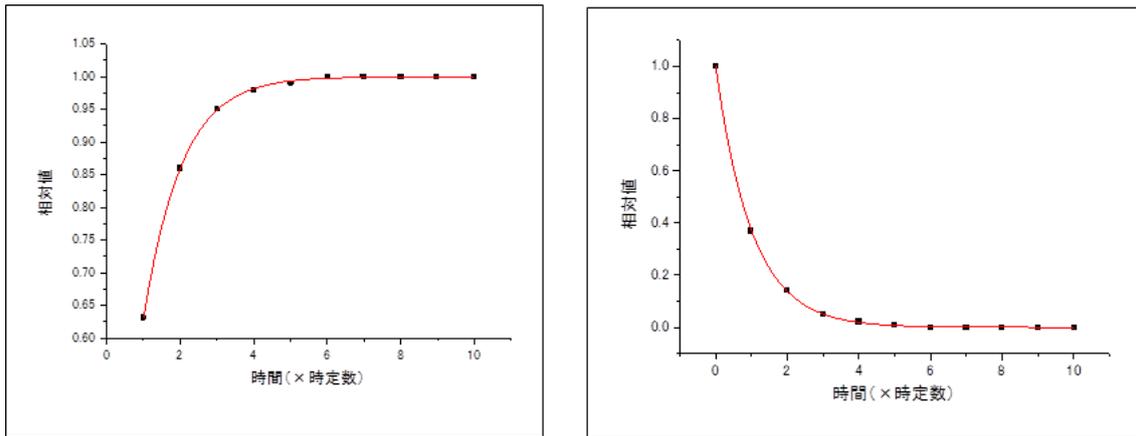


図 G.1 時定数と測定値との時間変化の関係

表 G.2 線量率における時定数ごとの測定値のバラツキ

τ : 時定数

線量率 (nGy/h)	CV (%)		
	τ (3 s)	τ (10 s)	τ (30 s)
10	77	42	24
20	54	30	17
50	34	19	11
100	24	13	8
200	17	9	5
500	11	6	3
1000	8	4	2
2000	5	3	2
5000	3	2	1
10000	2	1	1
20000	2	1	1

(1 in ϕ × 1 in 円柱形 NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ)

G.1.2 時間間隔

1 データの積算計数時間またはデータの打ち出し時間間隔は、着目する事象の線量率の変動速度に見合うものとする必要がある。降雨など自然現象を対象とした場合に用いられる時間間隔は数分～数10分である。原子力施設に基づく変動を対象とするときは、その数分の1またはそれ以下の短い間隔、フォールアウトの場合は数倍またはそれ以上の長い間隔が適用される（なお、自然現象には1日及び1年の周期変動などがある）。したがって、連続測定に際してのデータの抽出間隔は5分、10分、15分のいずれかを標準とし、短い間隔が必要なときは1分、2分、3分、5分のいずれかとする。

現在我が国で行われている連続測定においては、この標準間隔で得られる計数の統計誤差は2～5%で、検出しようとする変動に対して無視できる。しかし数分以下の場合は、計数統計（測定結果の数値のバラツキ）を考慮する必要がある。

これらのデータから、あとの解析のための1時間値を求める。

G.1.3 母集団に含めるデータの数

母集団に含めるデータの数は多ければ多いほど真の分布に近づくので、数10以上とすることが望ましい。降水時のデータだけの母集団を作るような場合以外は、この程度のデータ数を得ることは容易である。

母集団は平常時、降水時、積雪時、核実験直後及びこれら以外に大別される。

- (1) 平常時はさらに、日変動及び年変動を考慮して特定の時刻及び月ごとに分けることが有用な場合がある。
- (2) 降水時は雷雨、小雨、台風、降雪さらには前線の性質などでさらに分類できるが、通常、雷雨、その他の降水及び降雪に分類しておくとうい。また積雪時は放射線レベルが低下するので母集団を別にする必要がある。
- (3) 核実験直後に増加がみられた場合は別の母集団とする必要がある。通常、核実験の初期のフォールアウトの寄与は、実験が行われた時刻からの経過時間を t として $t^{-1.2}$ で減衰することから、 t の数分の1の時間間隔、すなわち実験が行われてから5日後は1日、10日後は2日ごとのデータを採取し、データが平常値の標準偏差の3倍以内に入るまで別の母集団とする。

解説 G.2 異常値の抽出と原因の究明

母集団ごとにその母集団のもつ分布の標準偏差の3倍を超えるものを異常値とし、その原因を調べることになるが、その際次の点に注意する必要がある。

平常値は無降雨時の観測値の分布は通常、正規分布となり（無降雨時の観測値の分布は、実際には土中水分及び大気放射能（ ^{222}Rn 3.7 Bq/m³で約2 nGy/h）の変動のため、分布の裾のあたりで広がる傾向がある。）、一方、降雨時は高線量率側がほぼ指数関係で表されるような分布になる。なお、降雨時の標準偏差 σ' は無降雨時の標準偏差 σ より一般に大きい。

無降雨時の観測値が平均 $\pm 3\sigma$ を超える確率は、0.3%程度であり、降雨時の観測値が平均値 $\pm 3\sigma'$ を超える確率は約2%である。

以上のような考慮をほらっても、なお標準偏差の3倍の範囲を超えるような自然現象として雷雨をあげることができる。

モニタが過大（ときには過小）な指示値を与えたときの異常値の抽出と原因究明の手続きは、まずモニタの点検から始めるのがふつうである。

モニタの動作が正常であることが確かめられたならば、降水等の自然現象で説明できるかどうか調べる。この場合、降水等を含む平常時のデータからなる母集団の分布と比べるか、あるいは、もしデータの十分な蓄積があって、降水時のデータだけからなる母集団の分布と比べるか、あるいは、もしデータの十分な蓄積があった、降水時のデータだけからなる母集団の分布が得られていれば、それと比べる。なお、我が国における年間線量に対する降水の

寄与は 10 μ Gy 程度である。

また、宇宙線中性子による半導体素子のソフトエラーである可能性も考えられる。

以上の手続きによってもなお原因が究明されないときには、原子力施設の影響を疑う必要がある。この場合には気象条件（風向、風速、大気安定度等）を調べ、施設の排気筒位置に対して各方位におかれた複数のモニタの指示値の相関を検討して、風下方向におかれたモニタの指示値が過大であるかどうかを見る。施設の運転状況に関する情報が得られればなおよいことはもちろんである。

排気筒からのプルームが原因である場合、比較的短周期の変動を示すことが多く、したがって変動パターンを知ることも原因究明に役立つが、そのためにはデータ抽出の時間間隔を標準値よりも短くしなければならない。また、施設に原因がある場合には γ 線のエネルギー分布も平常とは異なってくるのが普通であるから、エネルギー情報も有力な決め手のひとつとなることがある。

以上の手続きを経てもなお原因が不明の場合は必ず記録にとどめ、後日の検討資料としておく必要がある。

解説 G.3 環境 γ 線量率の変動事例

G.3.1 気象等の自然変動を要因とした線量率の変動

上記までは環境 γ 線量率の変動に関して統計的なアプローチから解説してきたが、ここでは、実際の代表的な変動事例を参考に示す。

降雨及び降雪があった際に、環境 γ 線量率が一時的に上昇することは良く知られている。

これは、大気中を浮遊している不活性ガスのラドンの子孫核種が、雨滴又は雪と共に地表面に降下することによって一時的に線量率が上昇する「ウォッシュアウト」、降雨又は降雪をもたらす雲が生成される段階で、ラドンの子孫核種を上昇気流によって取り込むため、雨滴そのものにラドンの子孫核種等が含まれた状態で降下することによって一時的に線量率が上昇する「レインアウト」の二つの現象によるものである。

また、降雨又は降雪が多量であった場合には、地表面に滞留した水分によって地殻から放出される γ 線を遮へいすることによる線量率の一時的な減少（積雪による遮へいの影響では長期に渡る場合もある）も見られることがある。気象現象に伴う線量率の変動が確認された事例を参考として図 G.2 及び図 G.3 に示す。

福島第一原発事故後の事例では、地表面に極端に高濃度の放射性セシウムが沈着している地点において、少量の降雨でもラドン等の降下による微量な線量率の増加よりも、地表面水分の遮へい効果による線量率の減少が顕著となることが確認されている。降雨等の気象に伴う変動以外に自然現象を要因とした変動事例では、温度変化に伴う感度変化が確認されている。温度変化に依存する事例については、解説 F の記載を参考とされたい。

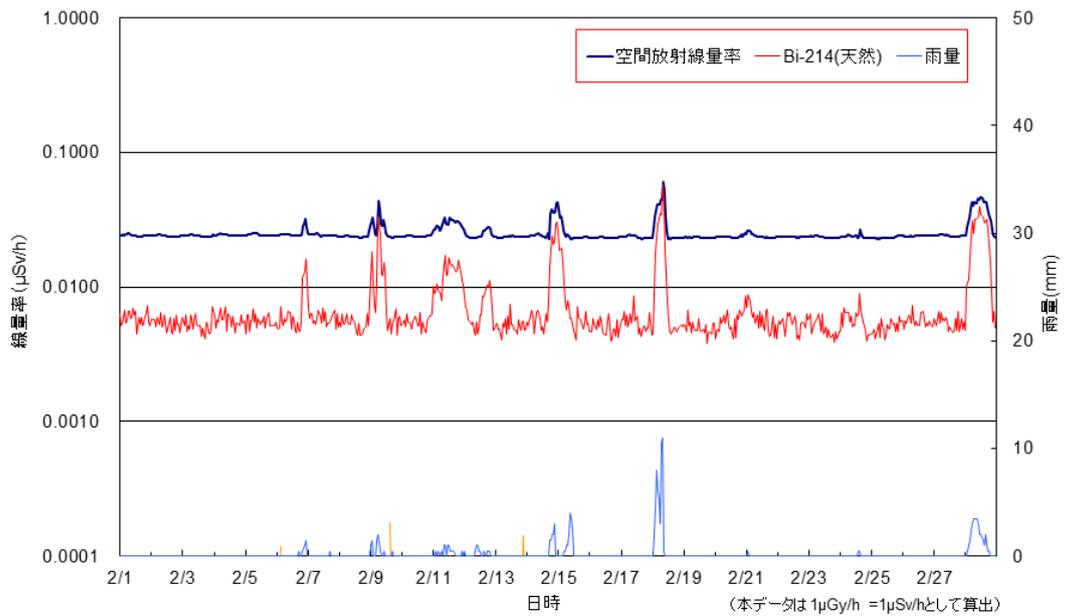


図 G.2 降雨による環境 γ 線量率上昇の一例

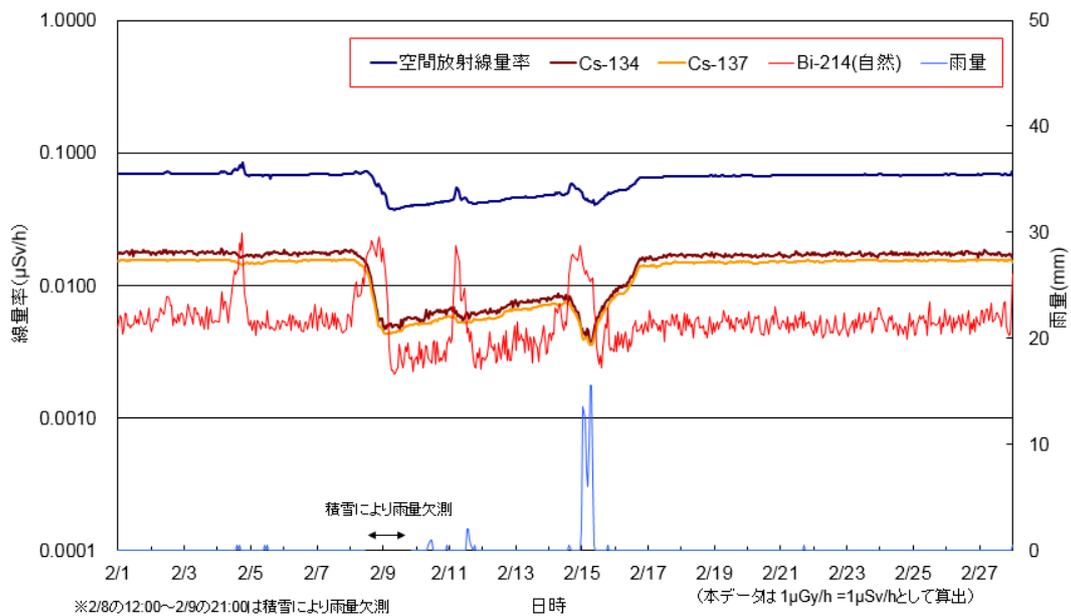


図 G.3 積雪による環境 γ 線量率下降の一例

G.3.2 周辺環境の変化による線量率の変動

周辺環境が変化すると、連続モニタの測定値に様々な影響をもたらす可能性がある。

平常時のモニタリングにおいては、連続モニタ周辺での車両駐車による遮へい効果のための線量率の一時的減少、コンクリート建造物の新築に伴う線量率の上昇、アスファルト敷設による線量率の上昇等が起こりえる。図 G.4 に変動事例を示す。

この図を見ると、周辺環境が①土壌（芝地）、②アスファルト、③コンクリート、④その他建造物、等の変化によって線量率も変動していることが確認できる。これは周辺環境の物質

中に含まれている天然放射性核種の濃度に起因しているためである。よって、「土壌」であっても、一概に同じような線量率の傾向を示すわけではなく、その土壌中に含まれる天然放射性核種の濃度によってその線量率も異なる。なお、「④その他建造物」に該当する神社仏閣等に建造されている石碑等は、御影石（花崗岩系岩石）が使用されることが多い。この花崗岩系岩石には、天然放射性核種が比較的多量に含まれていることは一般的に知られているが、この影響によって若干ではあるが高い線量率を示すこともある。

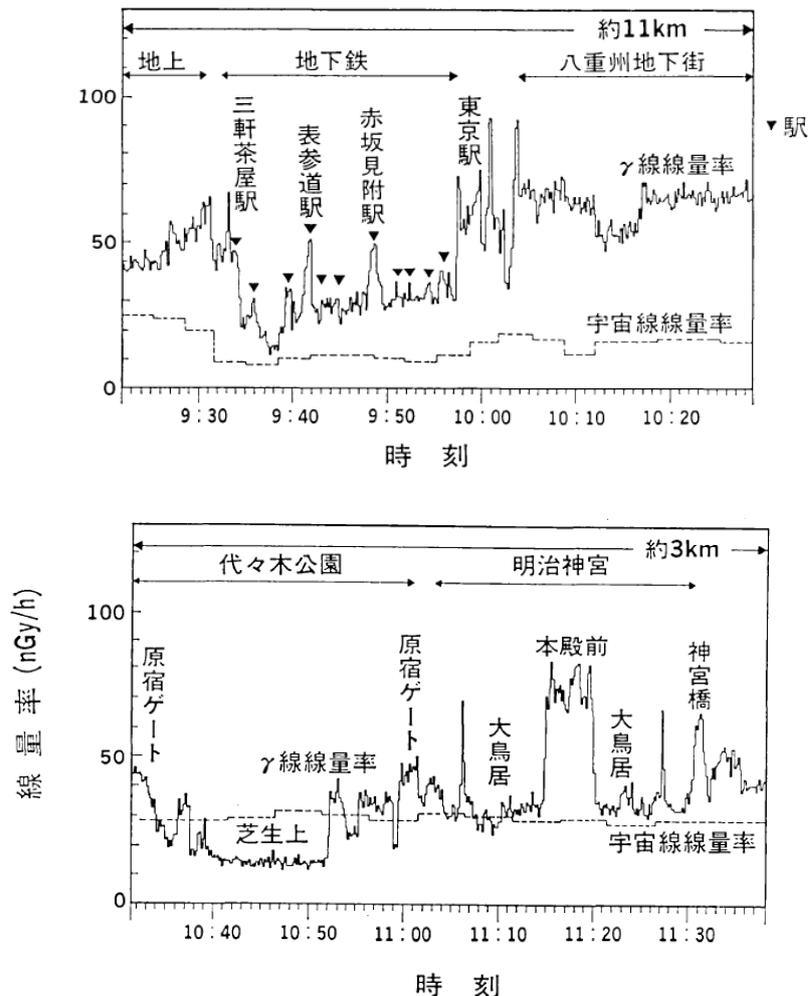


図 G.4 周辺状況の変化による線量率の変動事例
 (長岡鋭 ほか “生活環境中におけるγ線及び宇宙線線量率分布と
 その特徴” 保健物理 26, 1991)

また、福島第一原発事故後の事例では、除染による線量率の減少、連続モニタ周辺に除染廃棄物仮置きする事による一時的線量率の上昇、同じく連続モニタ周辺に除染廃液処理用プラント施設を設置し、その稼働による一時的線量率の増減等が起こりえる。

G.3.3 その他の要因による線量率の変動

(1) 医療用放射性物質

現在、我が国では放射性物質を体内に投与し、その挙動を確認する等によって医療に活用されている。よって、医療用放射性物質を投与された人が、連続モニタ周辺を通行することによって線量率が上昇した事例が過去に報告されている。表 G.3 に、医療用として活用されている主な γ 線放出核種を示す。また、医療用放射性物質投与者の影響による検出事例を図 G.5 に示す。

図 G.5 は医療用として ^{67}Ga を投与者が連続モニタ (NaI モニタ) に接近した際に検出された γ 線スペクトルである。 ^{67}Ga は、表 G.3 に示しているように、複数のエネルギーの光子を放出する。図 G.5 では、95 keV 付近等の計 4 本のピークが確認できる。このような場合は、それぞれの γ 線光子エネルギーに該当する核種を確認し、同定することができる。

(2) 非破壊検査

非破壊検査では、 γ 線透過試験用に工業用 γ 線装置が用いられている。活用される主な γ 線放出核種は、 ^{192}Ir (0.317 MeV ほか)、 ^{60}Co (1.332 MeV ほか) 及び ^{169}Yb (0.198 MeV ほか) 等である。

また、エックス線発生装置が用いられることもあり、エックス線に対しても感度をもつ連続モニタでは、しばしば検出されることがある。非破壊検査による影響の検出事例を図 G.6 に示す。

工業用エックス線発生装置は、一部を除いて低エネルギー (数十 keV~300 keV 程度) 領域の X 線を照射し、非破壊検査を実施している。図 G.6 に示したものは、この低エネルギー領域の X 線を検出した際のスペクトルである。X 線のエネルギーは、X 線発生装置における X 線管に掛ける「管電圧」に依存しており、使用の都度目的等に応じて、その値は異なる。また、この非破壊検査に用いられる制動 X 線のエネルギー分布は「連続スペクトル」と言い、 γ 線のような鋭いピークを持つエネルギー分布は示さず、広いエネルギー分布となる。

なお、 γ 線スペクトロメトリーを実施する際にしばしば触れることがある「特性 X 線」は、上記制動 X 線とは異なり、 γ 線と同様のピークを持つエネルギー分布を示す。

ここで示した変動要因以外にも、種々の変動要因が存在する。

環境放射線モニタリングでは、変動したデータから、その要因を追及し人工放射性核種による寄与であるか否かを確認することが必要である。

そのためには、各地点の物理的状況を常に把握し、できる限り付随する気象データの取得に努める必要がある。また、エネルギー情報の取得が可能なシステムが整備されているならば、その情報を線量率と共に注視することによって、いち早く変動要因を確認することができる。

表 G.3 放射性医薬品として活用されている主な γ 線放出核種の一例

核種	半減期	主な γ 線のエネルギー (MeV) と放出割合
^{51}Cr	27.70 d	0.320 — 9.92 % 0.0050 — 19.7 % V-K $_{\alpha}$
^{67}Ga	3.261 d	0.0933 — 39.2 % 0.185 — 21.2 % 0.300 — 16.8 % 0.0086 — 50.3 % Zn-K $_{\alpha}$ 0.0096 — 6.8 % Zn-K $_{\beta}$
^{81}Rb	4.576 h 娘 $^{81\text{m}}\text{Kr}$	0.190 — 64.0 % $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 0.466 — 23.2 % 0.510 — 5.3 %
^{99}Mo	65.94 h 娘 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	0.181 — 6.0 % 0.739 — 12.1 %
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.01h 娘 ^{99}Tc	0.141 — 89.1 % 0.0184 — 6.1 % Tc-K $_{\alpha}$
^{111}In	2.805 d	0.171 — 90.2 % 0.245 — 94.0 % 0.0232 — 67.8 % Cd-K $_{\alpha}$ 0.0261 — 14.5 % Cd-K $_{\beta}$
^{123}I	13.27 h 娘 $^{123\text{m}}\text{Te}$	0.159 — 83.3 % 0.0275 — 70.7 % Te-K $_{\alpha}$ 0.0310 — 16.0 % Te-K $_{\beta}$
^{131}I	8.021 d 娘 $^{131\text{m}}\text{Xe}$	0.284 — 6.1 % 0.364 — 81.7 % 0.637 — 7.2 %
^{133}Xe	5.243 d	0.0810 — 38.0 % 0.0310 — 40.3 % Cs-K $_{\alpha}$ 0.0350 — 9.4 % Cs-K $_{\beta}$
^{201}Tl	72.91 h	0.167 — 10.0 % 0.0708 — 73.7 % Hg-K $_{\alpha}$ 0.0803 — 20.4 % Hg-K $_{\beta}$ 0.00999 — 46.0 % Hg-L

(“核医学におけるアイソトープ利用” 尾川浩一 核データニュース, No. 70 (2001)
及び“アイソトープ手帳 11 版” 公益社団法人日本アイソトープ協会)

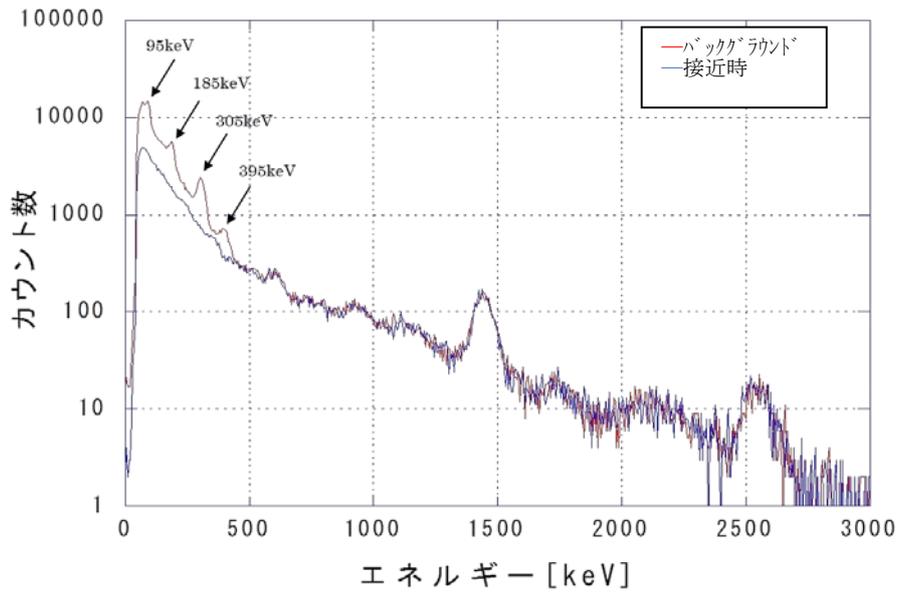


図 G.5 医療用放射性物質 (^{67}Ga) 被投与者接近時の NaI スペクトル

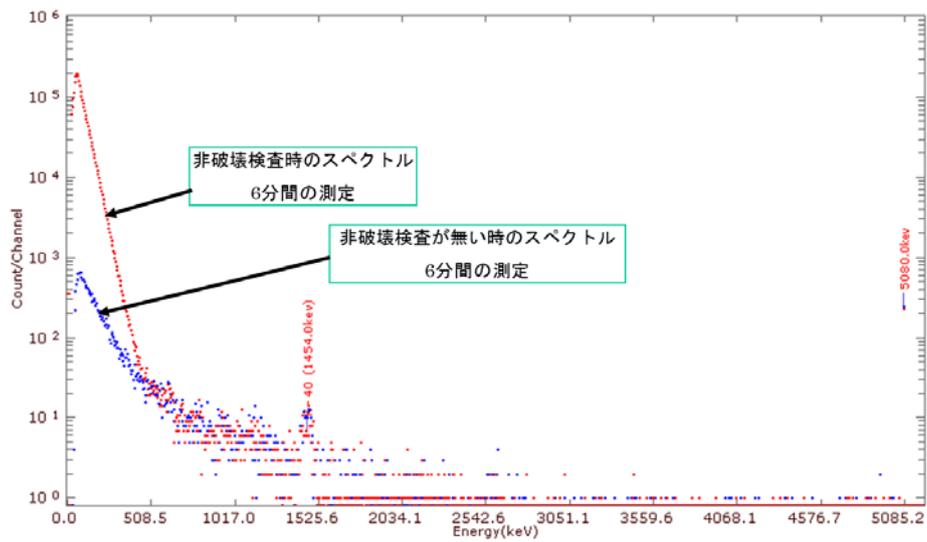


図 G.6 非破壊検査時におけるエックス線発生装置による影響の検出事例

解説 H 連続モニタにおける比較測定による健全性確認

解説 H.1 概要

連続モニタは、風雨、温度変化、多湿等、場合によっては劣悪な環境下でも常時測定が行われている。しかし、環境放射線モニタリングの意義を勘案すると、劣悪な環境下であったとしても測定システムの健全性が保たれていなければならない。また、原子力施設等を起因とした異常の有無を監視するだけの目的ではなく、平常時から周辺住民の被ばく線量評価に資するためや、OIL の判断、事故後の被ばく線量評価等に連続モニタのデータが活用されることを考慮すると、健全性の維持は非常に大事なことと言える。ここでは、測定不能及び物理的損傷等、明らかに健全ではない状況ではなく、場の代表として適切な測定値が得られているか否かの確認方法について一例を解説する。

解説 H.2 方法

設置されている連続モニタの測定値が、その場の線量率を適切に測定出来ているか否かを確認するためには、同一の場所において適切に調整された別の測定装置で測定を行い、その値を比較することによって確認することができる。しかし、既に設置されている連続モニタを容易に取り外すことはできない。このため、以下の方法で比較測定を行うことによって得られたデータから解析し、比較・確認を実施することができる。

(1) 測定地点の選定

設置された連続モニタの中心点を通るように、最低 3 軸の直線を引く。この直線上に連続モニタ中心点から 0.25 m～0.5 m 程度置きに、測定地点を選定する。

(2) 測定

ゲイン調整及び電氣的ゼロ点の確認・調整された健全な NaI(Tl) シンチレーションスペクトロメータを用いて、(1) で選定した各測定地点で測定を行う。また、その測定装置において宇宙線寄与線量率の評価が可能であり、セルフドーズが求められている機種を採用する。

(1)測定地点及び(2)測定を実施した結果の一例を図 H.1 及び図 H.2 に示す。

(3) 解析

得られた測定結果から解析する方法を以下に示す。

- ① 軸ごとに 1 次、2 次及び 3 次の近似式を算出する。
- ② 得られた各近似式から、連続モニタが設置されている地点の値を内挿して求める。
- ③ 内挿から求めた連続モニタ設置地点の線量率の誤差が、一番小さい近似式を軸ごとに採用する。
- ④ 軸ごとに採用された近似式から、連続モニタ設置地点の値を加重平均し求める。
- ⑤ 求めた加重平均値から、宇宙線寄与線量率及びセルフドーズを差し引き、連続モニタが設置されている地点の純粋な環境 γ 線量率を算出する。
- ⑥ 算出した環境 γ 線量率に、連続モニタ測定値に含まれている宇宙線寄与線量率及びセルフドーズを足し込み、連続モニタ測定値と比較する。

解説 H.3 比較測定の可否

比較測定は、周辺の測定を実施している間に、環境 γ 線量率が変動しないことが前提条件である。よって、測定中に降雨等による線量率の変動、及び周辺環境の変化（車両の移動等）が無い状況で実施する必要がある。

また、比較の条件として、宇宙線寄与線量率及びセルフドーズを評価しなければならない。このため、測定機器の仕様を十分に把握しておく必要がある。

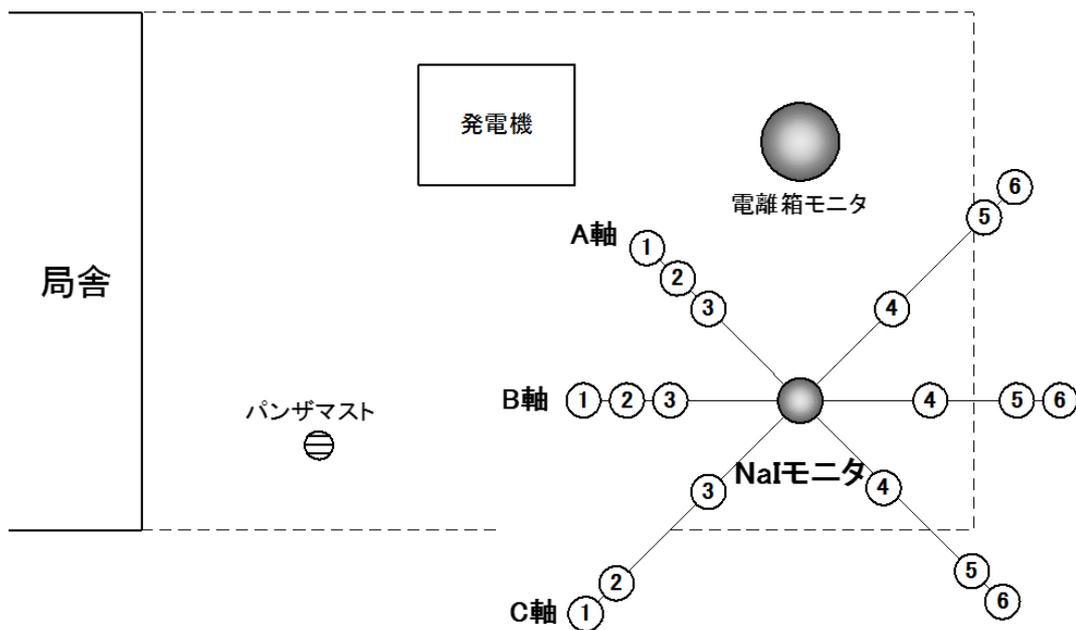


図 H.1 比較実施時の測定地点とその略図の一例
(○付き数字は、各軸の測定地点番号を表す)

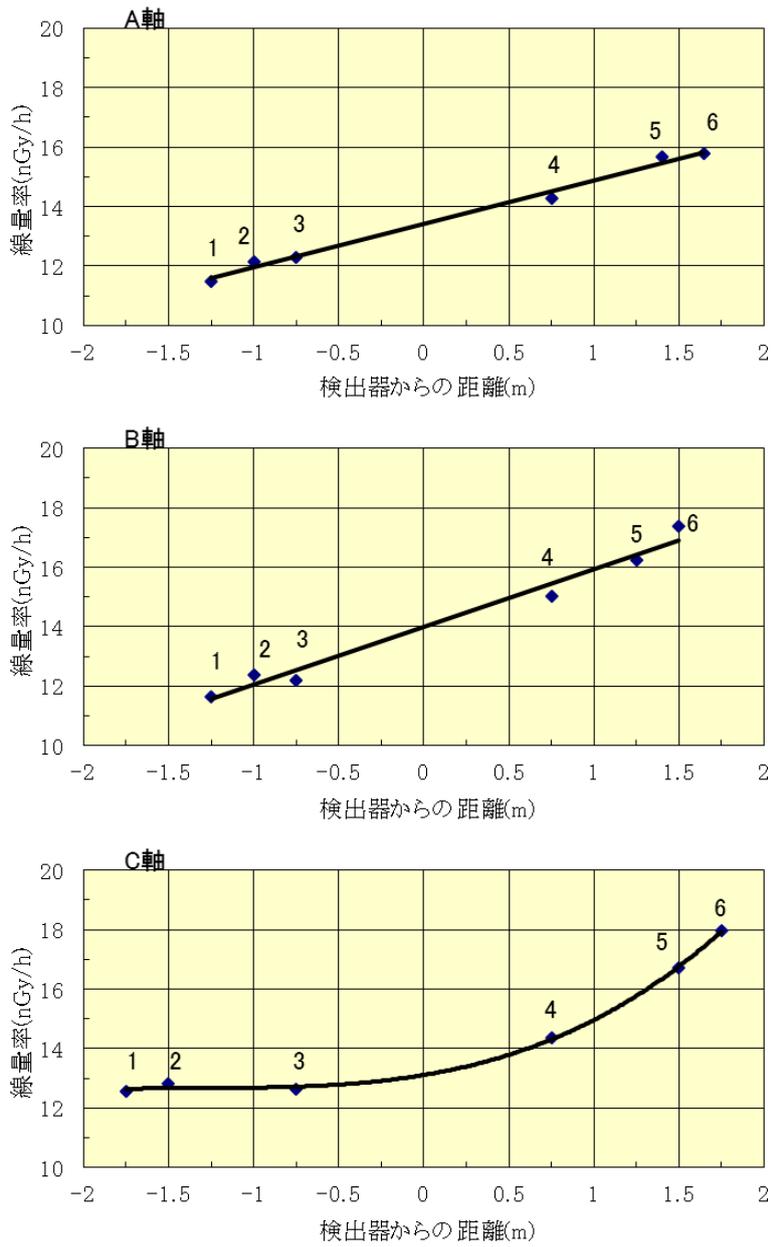


図 H. 2 H. 1 図の測定地点における測定結果

解説 I 事故時の線量率寄与割合

解説 I.1 概要

環境 γ 線量率は、平常時では主に地殻に存在する天然放射性核種からの γ 線、及び周辺建造物中に含まれる天然放射性核種からの γ 線が寄与している。しかし、原子力事故が起きた際の緊急時においては、その寄与割合が変わる。ここでは、福島第一原発事故時において、線量率が上昇した際のその寄与割合について解説する。

解説 I.2 放射性プルーム通過時

福島第一原発事故が発生した平成23年3月15日から3月31日までのトレンドグラフを図I.1に示す。

東京電力福島第一原子力発電所において、圧力ベント又は水素爆発によって大気中に放出された放射性プルーム通過時（3月15日頃）において、線量率が上昇した際のそれぞれの寄与割合等を示したものを図I.2に示す。

図I.1中の放射性プルームが通過したと思われる3月15日頃を見ると、降雨が存在しない気象条件において、寄与線量率順に ^{133}Xe （5日）、 ^{132}I （2時間）、 ^{131}I （8日）、 ^{132}Te （3日）、 ^{134}Cs （2年）、 ^{137}Cs （30年）等人工の γ 線放出核種が存在していることが分かる。これらの核種は ^{134}Cs 及び ^{137}Cs を除いて半減期が十数日以内の短半減期のものが多い。

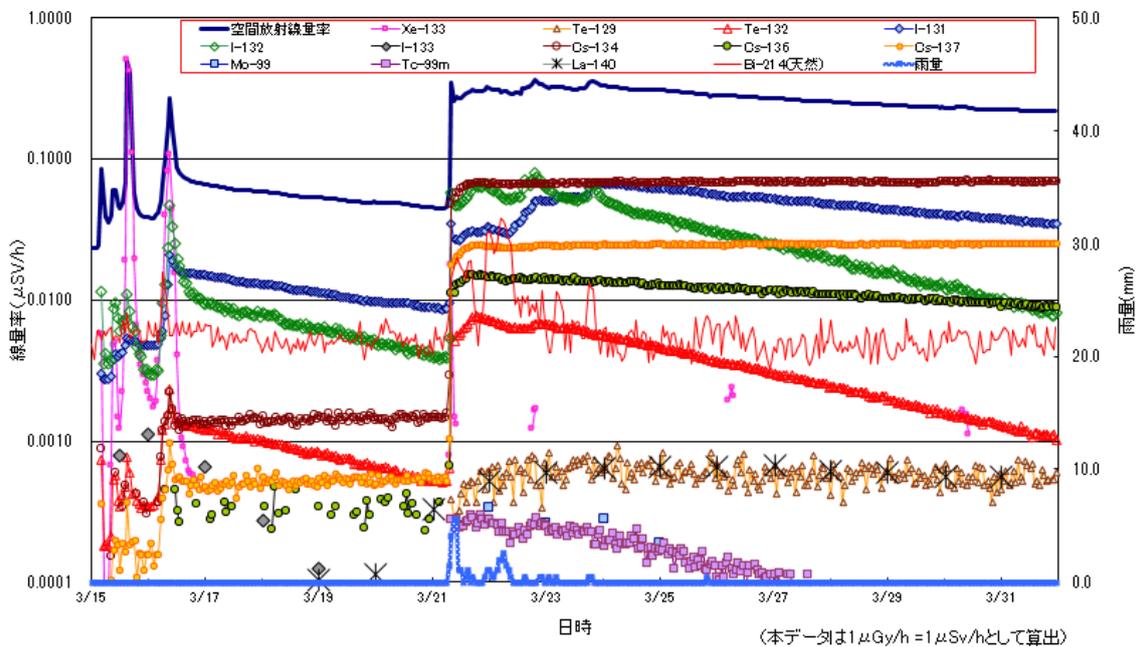


図 I.1 環境 γ 線量率と各核種の寄与線量率（平成23年3月）
（公益財団法人 日本分析センター ホームページ）

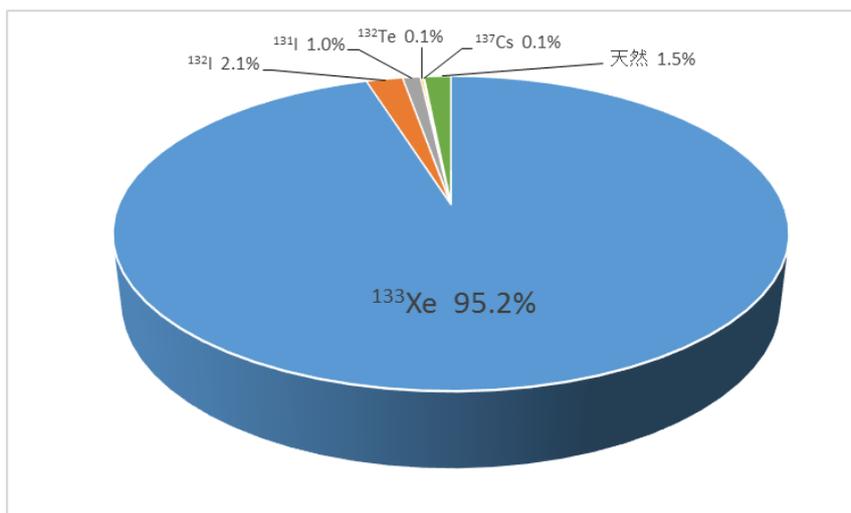


図 I. 2 放射性プルーム通過時における線量率寄与割合の一例

このことから分かるように、放射性プルーム通過時には ^{133}Xe (81 keV) の線量率寄与割合が全体の 9 割以上を占めることとなる。よって、緊急時、特に放射性プルームの通過する事故の初期段階においては、低エネルギー側より線放出核種によって高線量率となるため、低エネルギー領域におけるエネルギー特性をあらかじめ把握しておくことが重要である。

解説 I. 3 フォールアウト時 (後)

解説 I. 2 で示したとおり事故初期の段階に放射性プルームが通過した。その後、同じく図 I. 1 に示したとおり、3 月 21 日に降雨があり大気中を浮遊していた粒子状放射性核種である放射性セシウム等が雨滴と共に地表面に降下した (フォールアウト)。このフォールアウト発生時の線量率寄与割合を図 I. 3 に示す。

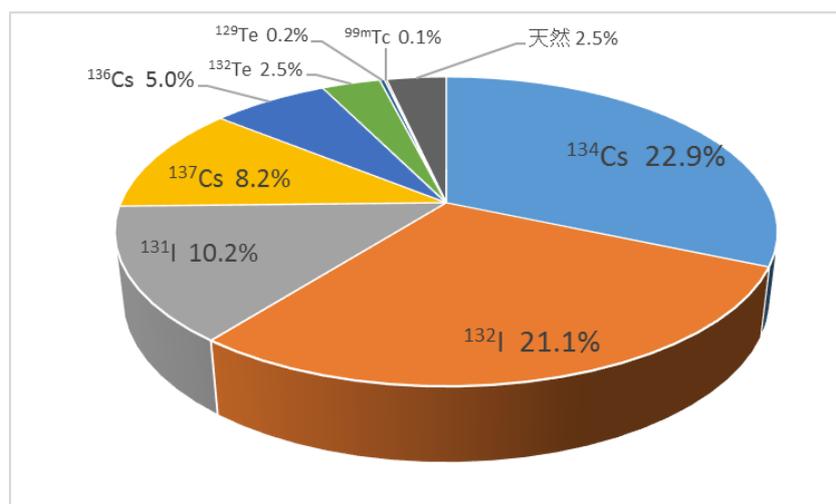


図 I. 3 フォールアウト時における線量率寄与割合の一例

また、フォールアウトから 60 日経過した時期の寄与割合を図 I. 4 に示す。

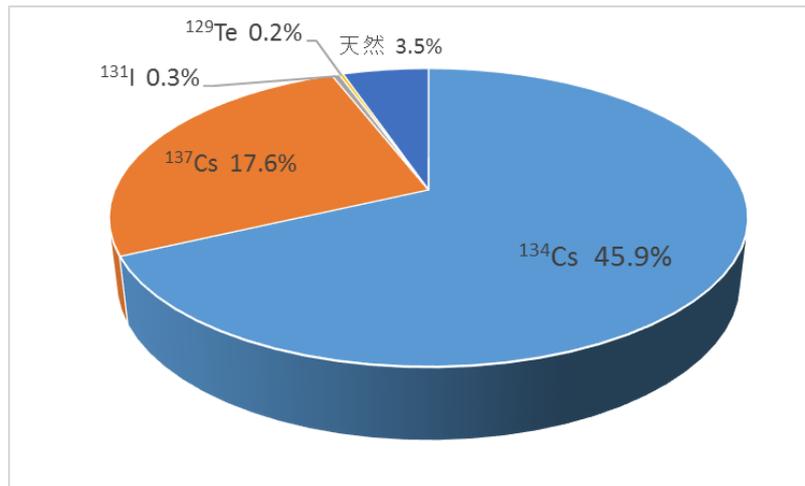


図 I. 4 フォールアウトから 60 日経過後の線量率寄与割合の一例

図 I. 3 では放射性セシウム及び放射性ヨウ素の寄与割合が多く、フォールアウトから 60 日経過した図 I. 4 では放射性セシウムの寄与割合が圧倒的に多くなっている。これは発電所からの放出が無くなり、沈着した放射性核種の物理的半減期及びウェザリング効果によって減衰したため、半減期の比較的長い核種の寄与割合が多くなっているためである。

これらのことから、事故が発生した際には、①放射性プルーム通過時、②フォールアウト発生時、③放出停止後の三段階に分別され、それぞれの状況に応じた線量率寄与割合が存在することが分かる。このため、それぞれの寄与核種におけるγ線エネルギーに応じた測定値の評価、及びそのような情報が含まれているデータであることについて、連続モニタを用いたモニタリングに従事する者が把握しておくことは極めて重要である。

解説 J 環境 γ 線量率測定に関する単位の考え方

環境放射線モニタリングを取り巻く単位は多種類存在する。本解説では、それぞれの単位が意味する内容を示すと共に、それぞれの単位間の換算についても述べる。

解説 J.1 単位

(1) 照射線量

ガンマ線照射線量の基本単位は、質量 dm の空気から生成された全二次電子によって作られた正、負いずれかの電離電荷の総量を dQ としたとき、照射線量 X は、

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

として示される。

dQ をクーロン (C)、 dm をキログラム (kg) として C/kg で示される。

従来の 1 R は、 2.58×10^{-4} C/kg である。

(2) 吸収線量

「環境放射線モニタリングに関する指針」において、環境放射線モニタリングの対象となる線量として示されている単位であり、現在多くの連続モニタで測定されている線量である。

電離放射線によって物質に与えられるエネルギーで、物質の適当に小さい体積要素に付与される平均エネルギーを $d\bar{\epsilon}$ 、体積要素の質量を dm とすると、吸収線量 D は

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

で与えられる。

言い換えれば、放射線によって物質の単位質量当たり付与された平均のエネルギーが吸収線量である。物質が空気であれば「空気吸収線量」となる。単位はグレイ (Gy) であり、物質 1 kg 当たり 1 ジュール (J) のエネルギーが付与されたとき、吸収線量は 1 Gy となる。

(3) カーマ

カーマとは、放射線によって物質の単位質量当たりに発生する荷電粒子の初期運動エネルギーの総和で定義され、制動放射によって物質外へ逃れる分も含めた量である。作用する物質が空気の場合には、「空気カーマ (Gy)」と呼ばれる。同様な種類の線量として、(2) で述べている空気吸収線量が使われている。

空気カーマと空気吸収線量の相違は、制動放射によって系外へ逸脱する分を考慮するか、考慮しないかによる。 γ 線のエネルギーが 300 keV 以下では両者は等しいが、エネルギーが高くなるにつれて制動放射で逃れる確率が高くなり、差が生じる。ただし、10 MeV までのエネルギー範囲では両者の差は小さく、空気カーマと空気吸収線量は等しいとみなされることもある。

(4) 等価線量

放射線の人体への影響は、同一吸収線量であっても、放射線の種類によって異なることから、放射線加重係数を用いる必要がある。等価線量は、組織・臓器の吸収線量に放射線加重係数を乗じたもので、以下の式で表される。

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ は放射線Rによる吸収線量を組織・臓器Tにわたって平均したもの、また W_R は放射線Rに対する放射線加重係数である。

W_R は、放射線の種類、エネルギーによる人体への確率的影響の違いに対応する係数であり、光子及び電子の場合は1が用いられる。

(5) 周辺線量当量

我が国の法令ではモニタリング量として実用量の周辺線量当量（1 cm 線量当量）を測定することとしている。これは、ICRU（国際放射線単位測定委員会）において、放射線場のモニタリングに用いる量として示されている。

周辺線量当量は、一方向、平行照射の放射線場における照射方向に一致する ICRU 球の中心軸上で照射方向に対向する面から 1 cm の深さにおける線量当量（周辺線量当量 $H^*(10)$ ）である。

ICRU 球は人体組織等価物質（O：76.2 %、C：11.1 %、H：10.1 %、N：2.6 %）で作られた直径 30 cm の球である。現在の法令では、場所における線量の測定は、特殊な場合を除いて周辺線量当量 $H^*(10)$ で行うことになっており、単位は、シーベルト（Sv）で示される。

(6) 実効線量

ICRP（国際放射線防護委員会）において、身体に対して定義されている防護量の単位である。

この単位は各臓器の等価線量に組織加重係数を掛けたものの総和である。

放射線の人体への影響は、照射された臓器・組織にも依存することから、組織・臓器の等価線量に、組織加重係数を乗じ、合計した線量が実効線量として定義されている。

$$E = \sum_T W_T H_T$$

W_T は組織・臓器Tの組織加重係数、 H_T は組織・臓器Tの等価線量である。

現在、人体に対する放射線の影響は確率的影響と非確率的影響に分類されて考えられている。実効線量及び等価線量を算出するための放射線加重係数及び組織加重係数は、確率的影響に着目した係数であり、非確率的影響には直接関連しない。したがって実効線量は確率的影響を制限するための放射線防護上の線量といえる。

単位は、シーベルト（Sv）で示される。

解説 J.2 単位間の考え方

実効線量は、放射線被ばくによるリスクが組織・臓器によって異なることを考慮した線量であることから、同一物理的線量場、例えば同一空気吸収線量場であっても人体の多様さや被ばくの幾何学的形態に起因して異なったものとなり、実測することはできない。

しかし、先に述べたとおり、環境放射線モニタリングに関する指針において被ばく線量の推定と評価を実施する単位として実効線量が示されている。

実効線量とは別に、環境放射線モニタリングにおける運用上の単位として空気吸収線量及び周辺線量当量が存在する。なお、周辺線量当量の測定は、測定用サーベイメータ等のシーベルト表示の線量計によって直接測定することができる。

現在、原子力災害対策指針において示されている単位はこの周辺線量当量であり、実効線量とは異なるものである。

空気カーマに対する周辺線量当量と実効線量との関係を、図 J.1 に示す。

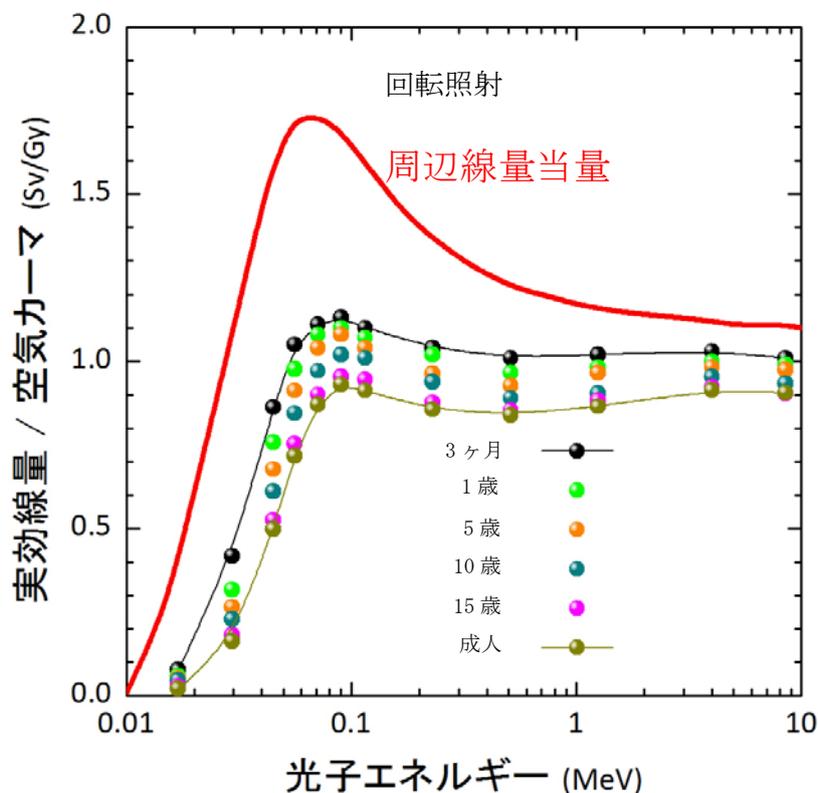


図 J.1 周辺線量当量と実効線量との関係

(第9回原子力委員会資料)

実効線量は、どのような照射形状を適用するか、どのような年齢を対象にするかによって、無視できない違いが生じる。また、実用量である周辺線量当量は、様々な体格、あらゆる被ばく状況に対して、実効線量を過小に見積もることなく評価している。

原子力災害対策指針で示されている OIL の判断に、連続モニタの値を採用する場合は、以下の点に留意する必要がある。

現在、連続モニタによって直接周辺線量当量を計測できる機器も市販されているものの、

環境放射線モニタリングの固定局の多くは、空気吸収線量率の測定を行っている。空気吸収線量から、周辺線量当量に換算する場合には詳細なエネルギー情報が必要となる。JIS Z4511:2005にも示されているとおり、エネルギーごとに Sv/Gy の換算係数は異なる(表 J.1)^{*1}。しかし、ここで示した換算係数は単一光子エネルギーによるものであり、複数のピークエネルギー及び散乱線の影響が加味されている環境 γ 線には適用することは困難である。

解説 I にも示したとおり、原子力施設の事故初期段階では、放射性プルームに含まれる ^{133}Xe (81 keV) による線量率寄与割合が最大となり、また、粒子状の放射性物質が地表面に沈着した後では、 ^{137}Cs (662 keV) による同割合が最大となる。これらのことから机上で容易に換算係数を算出することは困難である。

福島第一原発事故後に、エネルギー情報が得られた事例として、当該施設周辺に設置されていた連続モニタで得られた γ 線スペクトルの事例を図 J.2、図 J.3 及び図 J.4 に示す。

図 J.2 は、東京電力福島第一原子力発電所周辺における 2011 年 3 月 12 日の NaI スペクトル(600 秒測定)である。検出されている核種は、主に ^{132}I であることが分かる。線量率にもよるが NaI(Tl)シンチレーション検出器のもつ分解能でも、ある程度は核種の同定を行うことができる。

図 J.3 は、図 J.2 の翌日にあたる 2011 年 3 月 13 日に同一地点の連続モニタで得られた NaI スペクトル(600 秒測定)である。検出されている核種は、主に ^{133}Xe 、 ^{132}Te 及び ^{132}I であることが分かる。

図 J.4 も上記までの図と同一地点において得られたものである。 ^{132}I らしきピークも若干確認できるが、主に ^{133}Xe とそのパイルアップの影響によるスペクトルとなっていることが分かる。 ^{133}Xe 以外の核種については、同定することは困難であるが、明らかに ^{133}Xe の影響が多大であることは容易に理解することができる。

^{*1} JIS Z4511:2009 照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法

表 J.1 1 cm 線量当量換算係数 (場所にかかわる 1 cm 線量当量)
(この表は, ICRP Pub. 74 によった。)

X 線及び γ 線のエネルギー ^{a)} Me V	空気カーマから 1cm 線量当量への換算係数 Sv/Gy
0.010	0.008
0.015	0.26
0.020	0.61
0.030	1.10
0.040	1.47
0.050	1.67
0.060	1.74
0.080	1.72
0.10	1.65
0.15	1.49
0.20	1.40
0.30	1.31
0.40	1.26
0.50	1.23
0.60	1.21
0.66 ^{b)}	1.20
0.80	1.19
1.0	1.17
1.25 ^{c)}	1.16
1.5	1.15
2.0	1.14
3.0	1.13
4.0	1.12
5.0	1.11
6.0	1.11
8.0	1.11
10	1.10

- a) 線源から放出される X 線及び γ 線のエネルギーが、単一エネルギーの場合には光子エネルギー、単一エネルギーでない場合には実効エネルギーとする。該当するエネルギーがない場合は、補間法によって求める。
- b) ^{137}Cs γ 線のエネルギーである。
- c) ^{60}Co γ 線の等価換算係数に対応するエネルギーである。

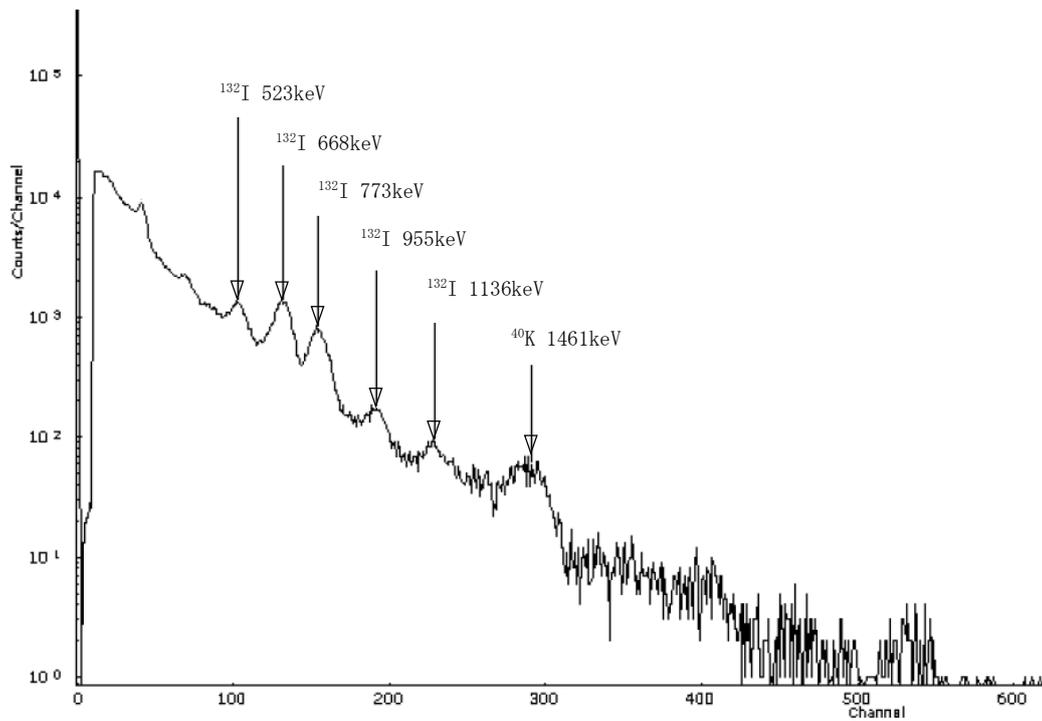


図 J.2 東京電力福島第一原子力発電所周辺における
2011年3月12日のNaIスペクトル(600秒測定)

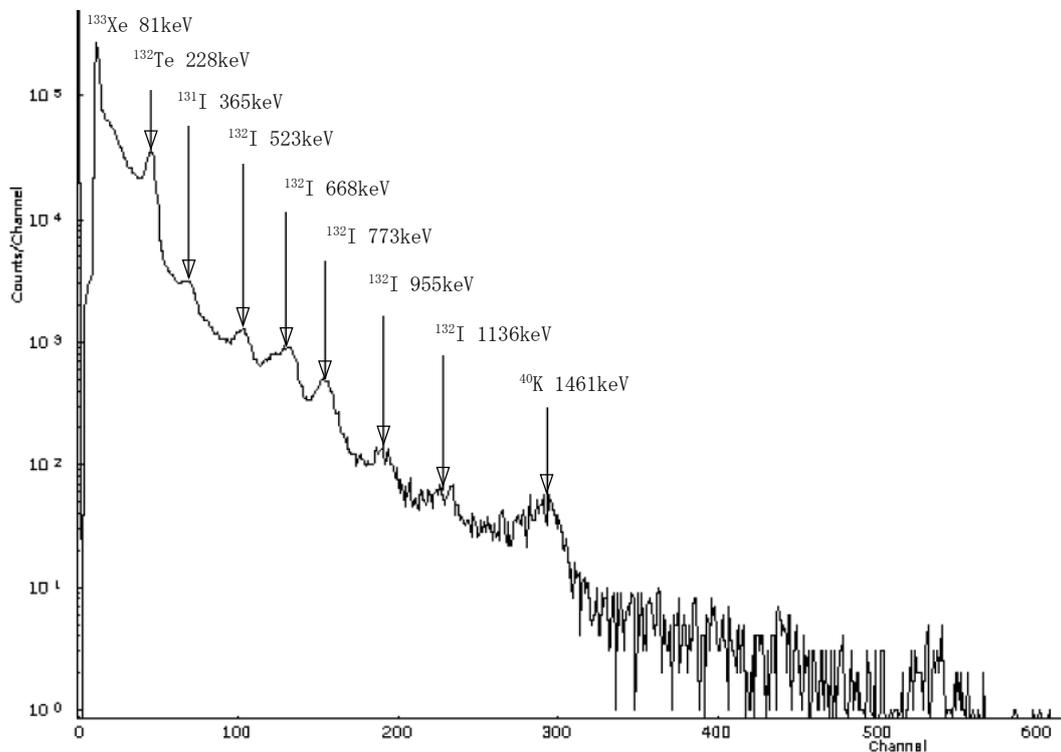


図 J.3 東京電力福島第一原子力発電所周辺における
2011年3月13日のNaIスペクトル(600秒測定)

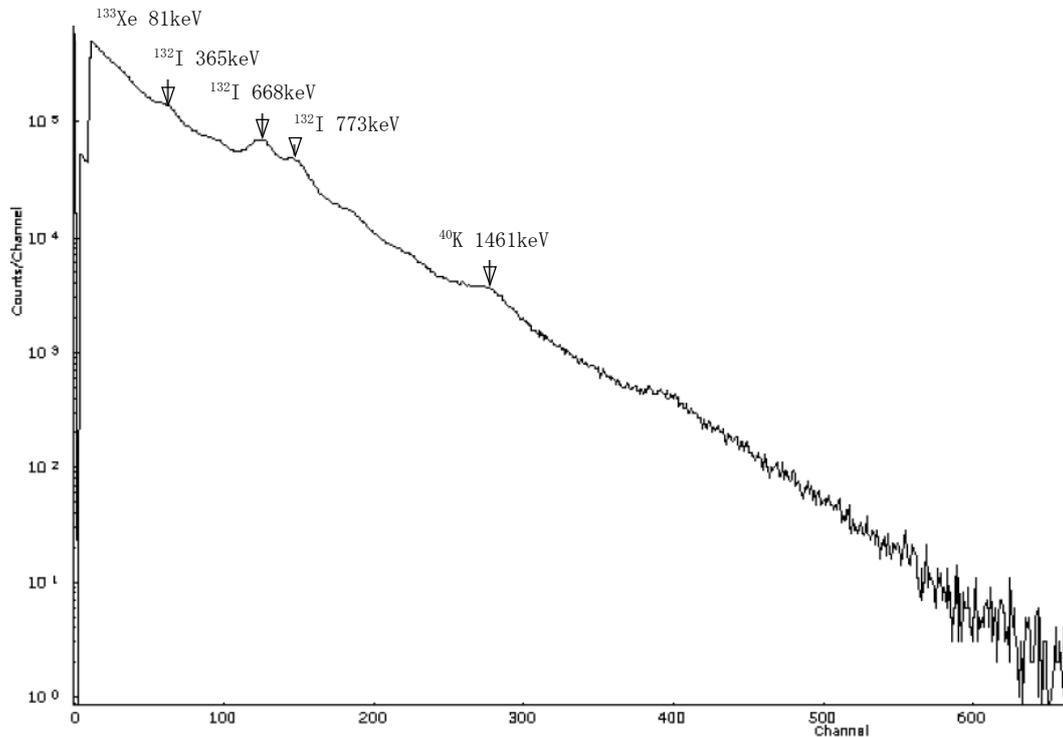


図 J. 4 東京電力福島第一原子力発電所周辺における
2011年3月14日のNaIスペクトル(600秒測定)

(図 J. 2、図 J. 3、図 J. 4: 福島県ホームページ)

http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec_file/monitoring/etc/supekutor_1.pdf

本文第7章でも記載したように、防護措置の判断を実施するための空気吸収線量から周辺線量当量に換算するには、環境γ線のエネルギー分布に応じた単位換算が必要となる。これは言い換えると、平常時、原子力災害時における原子力施設から放射性物質放出中、沈着及び短半減期核種減衰後と置かれている状況下の違いに応じて、適切な換算が必要であることを示している。原子力災害時においても、逐次エネルギー分布が変わることは本解説J内でも述べたとおりである。

(1) 空気吸収線量と周辺線量当量

① 平常時

平常時において、空気吸収線量から周辺線量当量に換算するためには、地中に一様に分布する天然放射性核種(ウラン系列核種、トリウム系列核種及び⁴⁰K)について考える必要がある。空気吸収線量で重み付けされた地上高1 mにおけるγ線平均エネルギーはこれら天然放射性核種間で同程度であるため、空気カーマから実効線量への換算係数(Sv/Gy)も近い値が得られる。地中の天然放射性核種濃度(Bq/kg)から地上1 mの空気カーマ率(Gy/h)を計算するための換算係数を表J.2に示す。また、同じく天然放射性核種濃度(Bq/kg)から地上1 mの周辺線量当量率(Sv/h)を計算するための換算係数も合わせて示す。なお、ここでは、空気吸収線量を空気カーマとして扱うこととする。

表 J.2 地中に一様に分布する天然放射性核種の濃度から空気カーマ及び
周辺線量当量への換算係数

核種	濃度当たりの空気カーマ率 (空気吸収線量率) (nGy/h per Bq/kg)	濃度当たりの周辺線量当量率 (nSv/h per Bq/kg)
²³⁸ U 系列	0.463	0.564
²³² Th 系列	0.604	0.749
⁴⁰ K	0.0417	0.0512

(斎藤公明 ほか “Ⅲ 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係”
RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014))

表 J.2 に基づき、空気カーマ率（空気吸収線量率）と周辺線量当量率との関係を表したグラフを図 J.3 に示す。

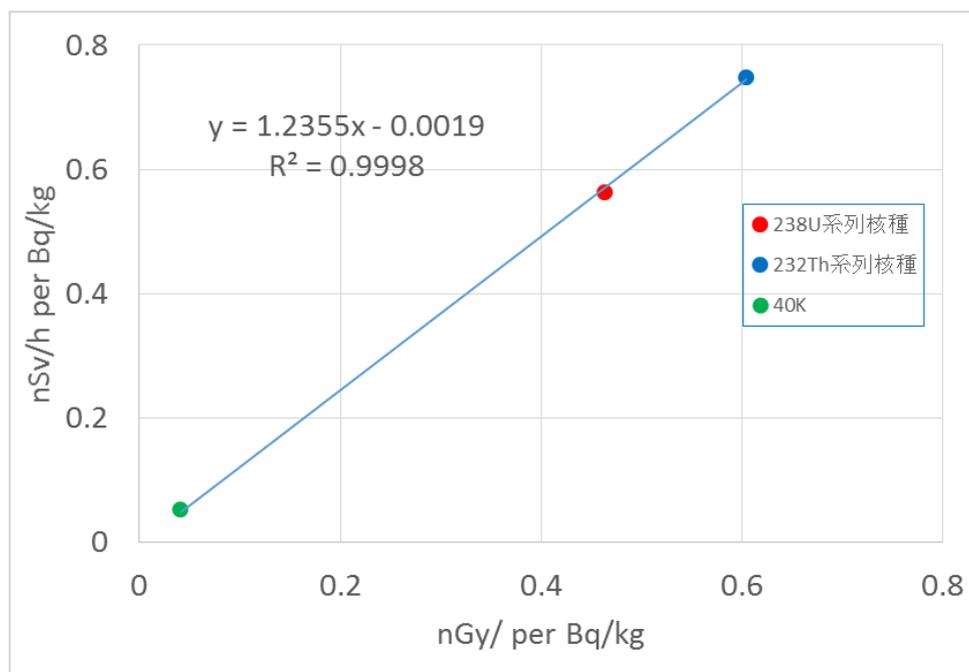


図 J.5 天然放射性核種の濃度における空気カーマ率（空気吸収線量率）と
周辺線量当量率との関係

図 J.5 の回帰直線から分かるように、地中に一様に分布する天然放射性核種濃度における空気カーマ率（空気吸収線量率）と周辺線量当量率間の換算係数は安全性を考慮して 1.3 ということになる。

② 原子力災害時（原子力施設から放射性物質を放出中）

空中の一様分布線源からの γ 線によって地面に直立した人間が受ける実効線量並びに地

上 1 m の周辺線量当量を図 J. 6 及び図 J. 7 に示す。これらの図は、地上 1 m の空気カーマで規格化された実効線量を、環境中線源のエネルギーの関数として表している。

空中に一様分布した線源と沈着面線源からの実効線量を比較すると、沈着面線源の実効線量が少し大きな値を示す。沈着面線源の場合は、 γ 線が水平方向から主に入射し、水平方向からの γ 線に対して人体は遮へい効果が小さいためにこのような差が表れるが、その差はそれ程大きくない。

よって、原子力施設から放射性物質を放出中（放射性プルーム通過中）においては、図 J. 2、図 J. 3 及び図 J. 4 に示した福島第一原発事故後のモニタリングデータからも分かる通り、 ^{133}Xe による 81 keV の γ 線エネルギー光子による線量率寄与が多である。このため、図 J. 6 及び図 J. 7 における 81 keV 付近に相当する周辺線量当量と空気カーマの関係から、より安全側な評価となる図 J. 7 から換算係数を 1.7 とする。

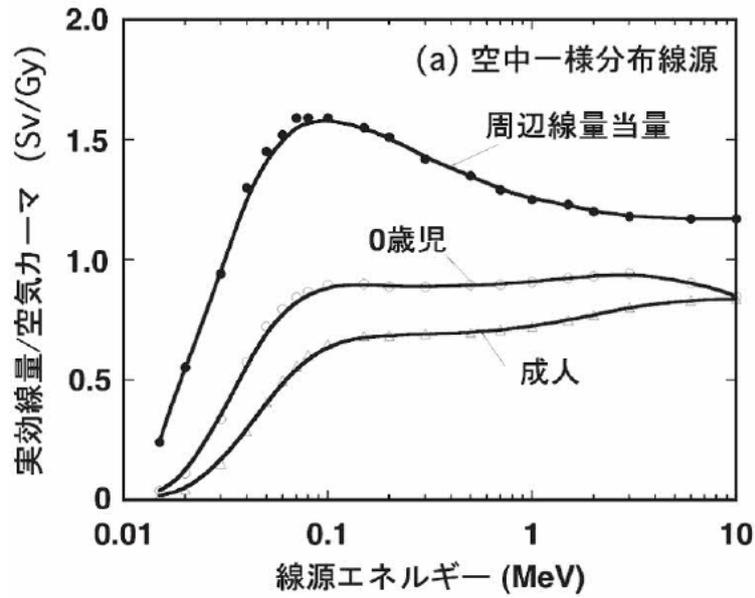


図 J.6 空中の一様分布線源からの γ 線によって地面に直立した人間が受ける実効線量並びに地上1 mの周辺線量当量 (斎藤公明 ほか “Ⅲ 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係” RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014))

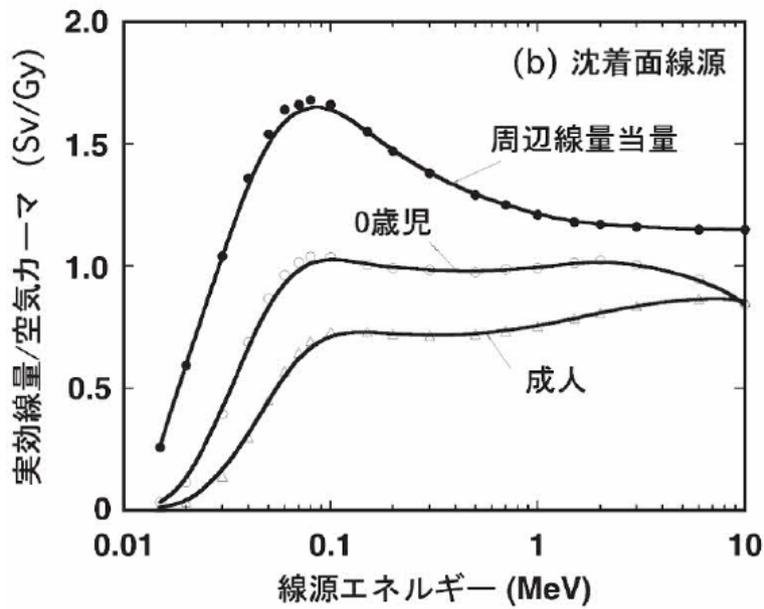


図 J.7 地中の 0.5 g/cm^2 の深さに存在する平面線源からの γ 線によって地面に直立した人間が受ける実効線量並びに地上1 mの周辺線量当量 (斎藤公明 ほか “Ⅲ 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係” RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014))

③ 原子力災害時（原子力施設から放射性物質を放出停止後地表面沈着時）

原子力施設からの放出が停止し放射性プルームが通過した後に、放射性ヨウ素及び粒子状放射性物質である放射性セシウム等が地表面に沈着する。このような状況は、解説 I で述べたとおりである。

地中に指数関数分布した放射性核種に対する空気カーマ（空気吸収線量）から周辺線量当量への換算係数を表 J.3 に示す。

ここで示している放出停止後に放射性物質が地表面沈着している状況では、線量率に寄与している核種として ^{131}I 等が挙げられる。表 J.3 を見ても、核種別の換算係数は ^{131}I によるものが数値として一番大きい。これらのことから、放射性物質が地表面沈着している状況においては、換算係数 1.4 を用いる。なお、表中の緩衝深度は、事故直後であることを想定すると表面沈着を意味する「0」と考えられる。

表 J.3 地中に指数関数分布した放射性核種に対する空気カーマからの
周辺線量当量への換算係数

緩衝深度 (g/cm ²)	周辺線量当量／空気カーマ				
	^{134}Cs	^{137}Cs	^{131}I	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{129\text{m}}\text{Te}$
0	1.24	1.24	1.32	1.20	0.79
0.2	1.24	1.24	1.33	1.20	0.92
0.5	1.24	1.24	1.33	1.21	0.98
1.0	1.25	1.25	1.34	1.21	1.03
5.0	1.26	1.26	1.37	1.22	1.14

（斎藤公明 ほか “Ⅲ 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係”
RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014)）

④ 原子力災害時（短半減期核種減衰後）

原子力施設からの放出が停止し放射性プルームが通過した後にある程度の時間が経過し、採取した環境試料中の核種分析が実施される。この核種分析結果から短半減期核種減衰が認められたと判断された時期からは、表 J.3 における放射性セシウム (^{134}Cs 及び ^{137}Cs) における換算係数 1.3 を用いる。

(2) 空気吸収線量と実効線量

モニタリング運用上の単位として空気吸収線量及び周辺線量当量について述べたが、これとは別に被ばく線量評価として「実効線量 (Sv)」が用いられる場合がある。モニタリング運用上の単位から実効線量への換算についての考え方は以下のとおりである。

環境放射線モニタリングに関する指針では、平常時は被ばくの幾何学的な条件を考慮して

$$1 \text{ Gy (吸収線量)} = 0.8 \text{ Sv (実効線量)}$$

として算出することとなっている。

また、緊急時には、 γ 線エネルギーと被ばくの幾何学的な条件が特定できる場合には、それらに応じた換算を行う。ただし、緊急時の初期にはそれらが把握できないことが想定されるので、その場合は

$$1 \text{ Gy (吸収線量)} = 1 \text{ Sv (実効線量)}$$

として換算することとなっている。

解説 K 環境 γ 線量率測定に關係する測定地上高の考え方

本文第 5 章で述べたとおり、固定型連続モニタの設置地上高は、①地上高 1 m (路地上)、②地上高 1.5~1.8 m 程度 (路地上)、③地上高約 3 m (局舎上) 及び④地上高数十 m の 4 パターンとなる。よって、原子力災害対策指針の補足説明資料である「緊急時モニタリングについて」(原子力規制庁 平成 27 年 8 月) に記載があるとおり、報告等の際には観測結果とともに測定高さを明確にしておくべきである。本解説では、異なる測定地上高間における測定値の考え方について述べる。

解説 K.1 地上高 1 m (路地上)

測定値を用いる (換算の必要なし)。

OIL の判断基準に固定型連続モニタを活用するのであれば、今後整備されるものについては、地上高 1 m に設置することが望ましい。

解説 K.2 地上高 1.5~1.8 m 程度 (路地上)

設置地上高を明示し、特段換算を必要としない。

地上高 1.5~1.8 m 程度 (路地上) での測定値と地上高 1 m (路地上) の測定値との間では、連続モニタ周辺に沈着した人工放射性核種の地表面からの鉛直分布によって、それぞれの地上高に対する線量率寄与割合が異なる。しかし、地上高の変化に対する線量率の変動が、比較的大きいとされる原子力災害が発生した初期段階に相当する鉛直分布のパラメータである緩衝深度 β (g/cm^2) が 0.1 の場合であっても、地上高 1 m での測定値に対して地上高 2 m までの測定値の変化は 10 %以内であり、換算の必要がないと考えてよい。周辺線量当量の地上高度による変化を表したグラフを図 K.1 に示す。

なお、このパラメータは土壌への地中に指数関数分布した ^{137}Cs 線源で評価したものであり、連続モニタ周辺の地表面の状況 (土壌、草地、砂利、アスファルト及びコンクリート等) によってその影響は異なる。

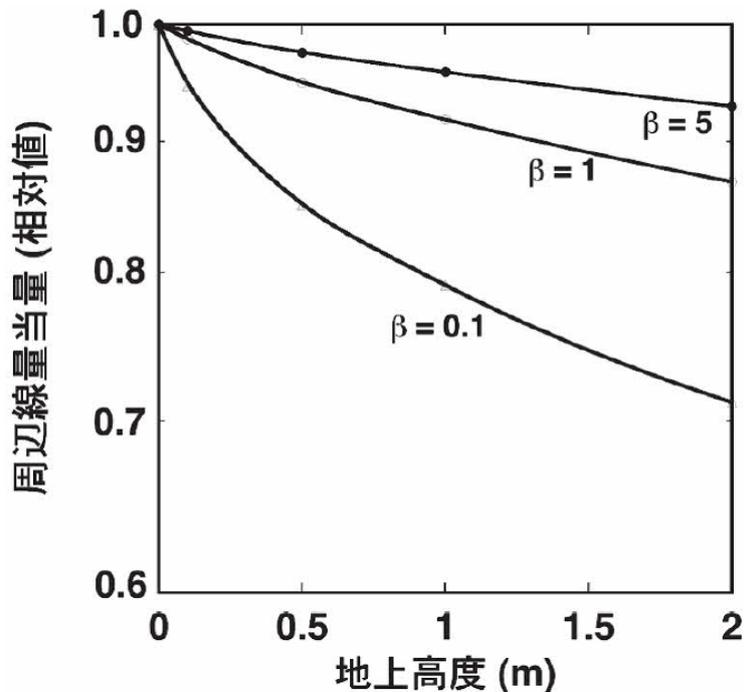


図 K.1 地中に指数関数分布する線源による周辺線量当量の地上高度による変化
 (斎藤公明 ほか “Ⅲ 環境γ線の特徴と被ばく線量との関係”
 RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014))

解説 K.3 地上高約 3 m (局舎上)

設置地上高を明示し、特段換算を実施しない。

地上高約 3 m (局舎上) では、地上高 1 m (路地上) とは異なり局舎の遮への影響、周辺建造物及び樹木の影響も無視できなくなる。これらのことから、地上高約 3 m (局舎上) での測定値と地上高 1 m (路地上) での測定では測定対象が大きく異なることから、予め換算係数を求めておくことは困難である。

ただし、原子力災害直後の放射性物質が地表面に沈着したばかりの限られた期間であれば、地上高 1 m と同等とみなすことができる。

なお、本測定地上高によって得られた測定値を地上高 1 m に換算することは困難であるが、緊急時においては暫定的に OIL の判断基準に使用し、放射性物質沈着後は可搬型モニタリングポスト (地上高 1 m に設置) 等を活用して確認することが望ましい。

解説 K.4 地上高数十 m

設置地上高を明示し、特段換算を実施しない。

地上高数十 m では、数階建てのコンクリート製建造物の屋上等に設置されており、③ 地上高約 3 m (局舎上) と同様に地上高数十 m での測定値と地上高 1 m (路地上) での測定では測定対象が大きく異なることから、予め換算係数を求めておくことは困難である。

なお、本測定地上高によって得られた測定値を地上高 1 m に換算することは困難であるが、緊急時においては暫定的に OIL の判断基準に使用し、放射性物質沈着後は可搬型モニタリングポスト (地上高 1 m に設置) 等を活用して確認することが望ましい。

解説 L レスポンス関数の作成

解説 L.1 レスポンス関数の意味

検出器から出力波高分布を観測し、検出器へ入射した放射線(本測定法では光子を対象としている)のエネルギースペクトルを求めるアンフォールディングでは、単一エネルギー放射線に対する検出器の応答の形(レスポンス関数)に関する知識が必要である。このレスポンス関数がいかに検出器の応答に適合しているかが解析結果に大きく影響する。

入射光子のスペクトルを $N(E)$ (E はエネルギー)で表し、波高 h と $h+\Delta h$ の間に観測されるパルス数を $P(h)\Delta h$ とすると、レスポンス関数を $K(E, h)$ 、検出器の検出効率を $\varepsilon(E)$ とし、次式

$$P(h)\Delta h = \Delta h \int_0^E \varepsilon(E)K(E, h)N(E)dE \quad (\text{L. 1})$$

が成立する。

単一エネルギー光子の場合 $N(E)$ はデルタ関数と見なされる。このとき $\varepsilon(E)$ は定数となるから、上式は

$$P(h)\Delta h = \Delta h \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(E)K(E, h)\delta(E - x)dx \quad (\text{L. 2})$$

$$P(h) = \varepsilon(E)K(E, h) \quad (\text{L. 3})$$

となり、波高分布を $\varepsilon(E)$ で割ったものがレスポンス関数となる。

また式(L.1)で $\varepsilon(E)K(E, h)$ をまとめて $R(E, h)$ と表現すれば、入射光子のスペクトル $N(E)$ に対する波高分布 $P(h)$ は次式のように表現される。

$$P(h)\Delta h = \Delta h \int_0^{\infty} R(E, h)N(E)dE \quad (\text{L. 4})$$

$R(E, h)$ は E のエネルギーをもった入射光子が検出器中で波高 h のパルスを生ずる確率である。

単一エネルギーの光子を測定して得られる波高分布を検出器へ入射した線束密度で割れば、単位線束密度の単一エネルギー光子が検出器へ入射したときの波高分布が得られ、これが $R(E, h)$ を表すので後者レスポンス関数の意味が理解しやすい。

式(L.1)の $K(E, h)$ はそれぞれ異なる光子エネルギー E について波高分布の面積が全て 1 となるような分布を表している。

レスポンス関数は線源と検出器の配置、検出器の形状に固有のものである。比較的よく使われているレスポンス関数またはレスポンス行列の例を表 L.1 に示す。この表に示したもののほかにも多くのレスポンス関数が作成されている。また特定の線源と検出器の配置におけ

るレスポンス関数の実験的決定と、それを基礎にして、任意のエネルギーのレスポンス関数を補間する方法が Heath¹⁾によって集大成されている。

解説 L.2 レスポンス関数の作成

レスポンス関数は検出系と線源の配置に固有のものである。レスポンス関数を決定するには主に①実験的に決定する方法と②モンテカルロシミュレーションによる方法²⁾がある。前者は前節でもふれたように Heath によって代表される方法である。後者の方法では実際に使用される装置及び幾何学的配置などによる付加的な条件も考慮に入れなければならないが、このような手続きは煩雑であるので、裸の検出器に光子が入射したという条件でシミュレーションを行うことが多い。

(1) 実験的作成法

この方法は、種々の単一エネルギーの光子に対する検出器の出力波高分布を求めることから始まる。この方法の長所は、使用する検出系固有の諸条件による波高分布への寄与、例えば前方散乱線及び後方散乱線などを全てレスポンス関数の中に入れることができることである。遮蔽体を含む検出系全体を常に同じ条件に保っておけば、これらを一つの検出器と見なすことができる。また、自然環境における光子スペクトルの評価のためには、ブロードな入射ビームの条件で、単一エネルギー光子による波高分布群を測定する。レスポンス関数の作成によく使われる単一エネルギー光子の光子線源には表 L.2 に示したようなものがある。これらの線源について全て測定する必要はない。測定に当たっては散乱線の放出ができるだけ少ない構造の線源を使用する必要がある。

表 L.1 NaI(Tl) 検出器のレスポンス関数、レスポンス行列

形状	製作者または 使用機関	行・列数	条件 (エネルギー範囲、 bin 幅、対象など)	文献
(a) 3 in ϕ \times 3 in 円柱形	(i) Heath	—	0.335~2.75 MeV ; 任意エネルギーの レスポンス関数を補間	(a)
	(ii) Zerby- Moran	—	0.679~6 MeV ; 任意波高分布を Monte Carlo 計算	(b)
	(iii) Berker- Seltzer	—	2~20 MeV ; 1 MeV ごとの波高分布を Monte Carlo 計算	(c)
	(iv) 京大工	20 \times 20	0~1.44 MeV ; 72 keV/bin, 均等分割 ; 透過スペクトル研究用	(d)
	(v) 名工試	22 \times 22	0~2.61 MeV ; 単色エネルギーピーク 幅による不均等分割 ; 自然環境用	(e)
	(vi) 名大工	46 \times 46	0~9.2 MeV ; 200 keV/bin, 均等分割 ; 原子炉周辺環境用	(f)
	(vii) 機 構	—	様々な形状、寸法の検出器に対して 10 MeV までの γ 線を対象に任意の幅 のレスポンス行列を計算可能	(g)
(b) 3 in ϕ 球形	(i) 理 研	10 keV 間隔、連続	0~3.0 MeV ; 10 keV/bin, 均等分割 BG(固有のバックグラウンド、宇宙線 分布差し引き) ; 自然環境用	(h)
	(ii) 機 構	60 \times 60 295 \times 295	0.05~3 MeV ; 50 keV 又は 10 keV/bin, 均等分割 ; 自然環境用	(i)
	(iii) 京大炉	34 \times 34	0~0.1 MeV ; 20 keV/bin, 0.1~3 MeV 100 keV/bin ; 自然環境用	(j)
	(iv) 名工試	22 \times 22	0~2.614 MeV ; 単色エネルギーピーク 幅による不均等分割 ; 自然環境用	(k)
	(v) 名大工	22 \times 22	0.1~3 MeV ; 対数波高軸を均等分割 ; 自然環境用	(l)
(c) 2 in ϕ \times 2 in 円柱形	(i) 日 立	14 \times 14	0~1.4 MeV ; 100 keV/bin, 均等分割 ; 逆行列 ; 散乱線研究用	(m)
	(ii) 機 構	60 \times 60	0.05~3 MeV ; 50 keV/bin, 均等分割	(n)

参考文献

- (a) R.L.Heath ; IDO-16880-1 (1964)
 (b) C.D.Zerby and H.S.Moran ; ORNL-3169(1961)
 (c) M.J.Berger and S.M.Seltzer ; Nuclar Instr. Meth., 104, 317 (1972)
 (d) T.Hyodo and F.Makino ; Memoi.Fac.Engin., Kyoto Univ., 14, 291 (1962)
 (e) 湊進 ; 名工試報告, 27, 384(1978)
 (f) Y.Nakashima ; Thesis. Fac. Engin., Nagoya Univ., (1980)
 (g) 森内茂, 堤正博, 斎藤公明 ; 保健物理, 42, 71-83, (2007)
 (h) M.Okano ; Natural Radiation Environment III, Symposium Series D0F51
 (CONF-780422) 867 (1980)
 (i) S.Moriuchi ; Personal Communication
 (j) I.Urabe, T.Tsujimoto, K.Yamazaki and K.Katsuramata ; Jour. Rad.
 Res., 19, 163 (1978)
 (k) S.Minato ; Personal Communication
 (l) 明野吉成 ; 卒業論文 ; 名大工、原子核工学科、Mar. (1982)

(m) 石松健二 ; 日本原子力学会誌、4, 24(1962)

(n) S. Moriuchi ; Personal Communication

表 L.2 レスポンス関数の作成に使える核種と γ 線エネルギー
(○はよく使われている核種)

核種	エネルギー (MeV)	核種	エネルギー (MeV)
○ ^{241}Am	0.060	○ ^{85}Sr	0.513
$^{129\text{m}}\text{Te}$	0.109	$^{91\text{m}}\text{Y}$	0.555
○ ^{57}Co	0.122	○ ^{137}Cs	0.662
^{47}Sc	0.155	^{95}Nb	0.764
^{139}Ce	0.166	○ ^{54}Mn	0.835
^{97}Ru	0.213	^{92}Nb	0.930
^{135}Xe	0.250	^{86}Rb	1.080
○ ^{203}Hg	0.279	○ ^{65}Zn	1.114
○ ^{51}Cr	0.320	^{41}Ar	1.290
$^{115\text{m}}\text{In}$	0.335	^{42}K	1.510
^{195}Au	0.411	^{26}Al	1.780
^7Be	0.478	^{24}Na	1.369, 2.754

こうして得られた単一エネルギーの光子に対する波高分布群を、検出器の効率を考慮して入射光子数に対して規格化する。すなわち測定で得られた波高分布群を全て面積が 1 になるように規格化したのち、それぞれの波高分布にそれぞれの入射光子のエネルギーを考慮して効率

$$\varepsilon(E) = 1 - \exp\{-\mu(E)\bar{\ell}\} \quad \text{をかける。}$$

ここで $\mu(E)$ はエネルギー E の光子に対する検出体の線減衰係数、 $\bar{\ell}$ は検出体中の光子の平均通過距離である。任意のエネルギーの入射光子に対するレスポンス関数は、さきに求めた単一エネルギー光子に対する波高分布群によってグラフ的補間によって求めることができる。

Heath¹⁾ はグラフ的補間法を発展させ、計算機でこれを行うプログラムを作っているので、以下にその原理を紹介する。同一条件の下で測定した単一エネルギー光子に対する波高分布群を三次元的に配置し、それらを滑らかな曲面で覆うとレスポンス曲面となる。

このようにして得られたレスポンス曲面の全エネルギー吸収ピークを次のガウス分布の式で内挿する。

$$y = y_0 \exp\left\{-\frac{(X-X_0)}{b_0}\right\} \quad (\text{L. 5})$$

この式で y_0 はガウス分布のピークの高さ、 b_0 は半値幅に関係した量で入射光子のエネルギー E_γ の関数として実験的に決定することができる。次にコンプトン効果による波高分布について、コンプトン終端のエネルギー、すなわちコンプトン効果による最大エネルギーを次の式から求める。

$$E_c = E_\gamma - E_\gamma / \left\{ 1 + \frac{2E_\gamma}{m_0c^2} \right\} \quad (\text{L. 6})$$

さらに後方散乱によるピーク E_b 、電子対生成反応による消滅光子のシングルエスケープピーク E_{PS} 、ダブルエスケープ E_{PD} のエネルギーを決定する。

$$E_b = E_\gamma / \left\{ 1 + \frac{2E_\gamma}{m_0c^2} \right\} \quad (\text{L. 7})$$

$$E_{PS} = E_\gamma - 0.511(\text{MeV}) \quad (\text{L. 8})$$

$$E_{PD} = E_\gamma - 1.022(\text{MeV}) \quad (\text{L. 9})$$

E_c 、 E_b 、 E_{PS} 及び E_{PD} の位置によって波高分布を L_1, L_2, \dots, L_5 の 5 区分に分割する。(図 L. 1 参照)。当然のことながら、 $E_\gamma < 1.02\text{MeV}$ のときは L_1, L_2, L_3 の 3 区分に分割すればよい。(図 L. 2 参照)。それぞれの区間で次の多項式によって波高分布を表現する。

すなわち L_i 区分の波高分布 $g(X)$ は

$$g(X) = a + bX + \sum_{k=1}^N b_k \sin \frac{k\pi X}{M-1} \quad (\text{L. 10})$$

と表せる。 X はパルスの波高値である。この式で M は区間内のデータ点数、 N は展開の項数で普通 $M/2$ 程度となる。測定した単一エネルギー光子の波高分布全体について上式を用いて適合させる。係数 a, b, b_k について各分割区間 L_i ごとに E_γ に関して補間を行う。こうして得られた a, b, b_k とさきに得た b_0, y_0 を用いれば、任意の E_γ の入射光子の検出器に対する波高分布を式(L. 4)及び式(L. 10)によって計算することができる。

これらの波高分布群を行列表示するには、任意のエネルギー E_j に対するレスポンス行列の i, j 要素 R_{ij} を次式によって決定する。

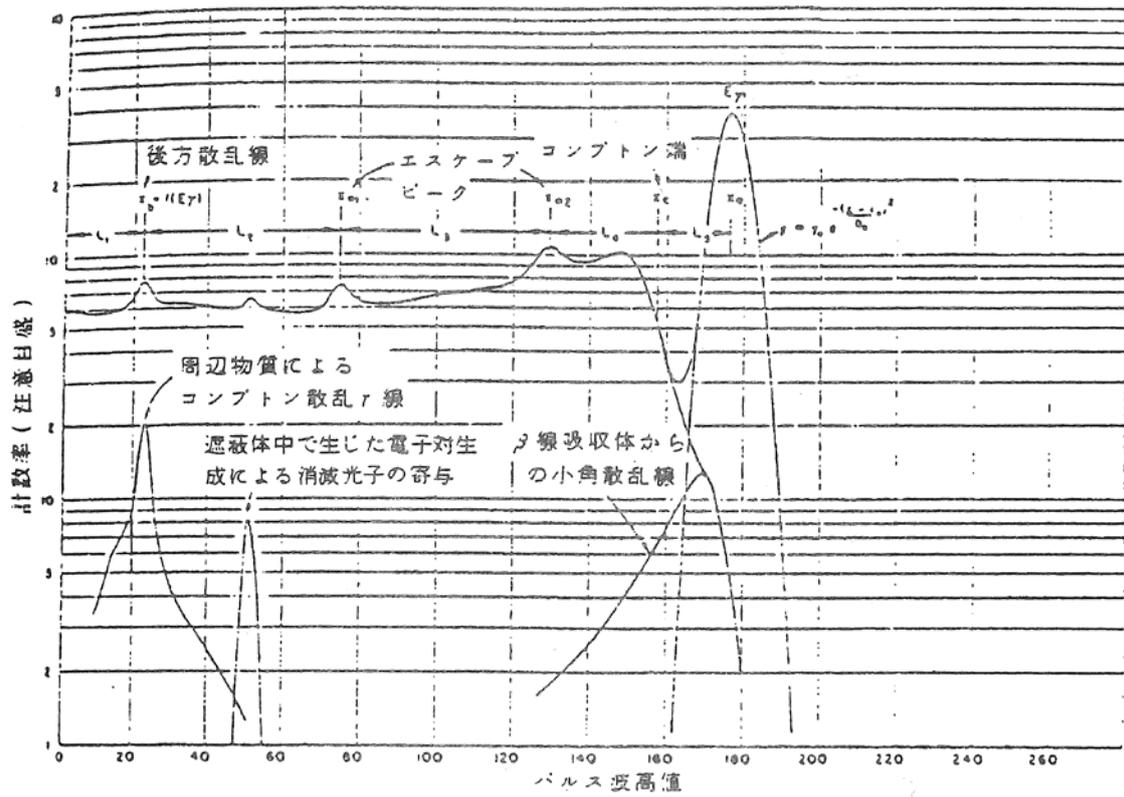


図 L.1 3 in×3 in NaI (Tl) 検出器の 1.78 MeV γ 線に対する応答

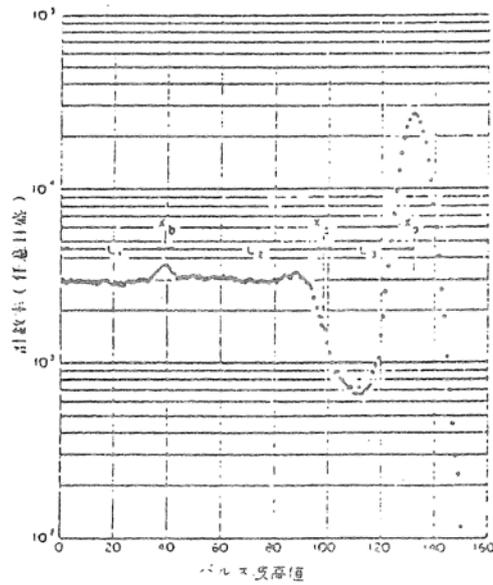


図 L.2 3 in×3 in NaI (Tl) 検出器の応答 (1.02 MeV 以下の場合)

$$R_{ij} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} R(X, E) dx \quad (\text{L. 11})$$

レスポンス行列の行及び列の数は光子スペクトルの形、適用する分析法、データ処理能力などによって適当な数に選ぶ。連続スペクトルを解析する場合には多くの行、列の数は必要でないが、多数の単一エネルギー光子群によって成るスペクトルが予想される場合には行、列の数を多く取る必要がある。

(2) モンテカルロシミュレーション^{2)・3)}

光子が検出器へ入射したとき、検出体との相互作用によって二次電子が発生する。二次電子はそのエネルギーを検出体中で消費する。光子と検出体との主な相互作用は光電効果、コンプトン効果、電子対生成の作用によるものである。モンテカルロシミュレーションでは、乱数を使用して、入射した1個の光子の検出体内での履歴(ヒストリー)を追跡する。光子が衝突を起すごとに二次電子が発生し、二次電子は電離・励起によってエネルギーを失うが、入射光子のエネルギーが数 MeV 以下の場合には、検出体内で発生する二次電子の飛程は短いので、二次電子のエネルギーは全て検出体内で吸収されるものとして取扱うことが多い。しかし、光子エネルギーが高いときには、二次電子の追跡が必要になる。散乱した光子は再び追跡され、検出体内部で全てのエネルギーを失うか、又はあるカットオフエネルギー以下になるか、または検出体内へ逸出するまで追跡される。

発生する二次電子のエネルギーが大きい場合には、モンテカルロシミュレーションのプログラムは光子を追跡するルーティンと二次電子を追跡するルーティンの二つのサブプログラムを含む、より複雑なものとなる。

モンテカルロシミュレーションでレスポンス関数を決定する場合の簡単なシミュレーションの大略(電子を追跡しない場合)を図 L. 3 に示した。

まず入力データとして検出器の形状(半径、長さ)、密度、エネルギーの区分、レスポンス行列の行及び列の数、検出器の分解能、各相互作用による減衰吸収係数の値、電子の追跡が必要な場合はそれらに関する定数、ヒストリー数などを与える。個々の過程は確率的であるから、各過程の追跡には乱数(たいていの場合(“0”、“1”)なる一様乱数)が使われる。光子の初期条件として、検出器に対して入射する位置と入射する方向を決める。次にこの光子が相互作用を起すまでに検出体中を進行する距離と相互作用点の座標を決定する。そのとき相互作用点が検出体の外部であれば、初めに戻って次の光子の追跡を始める。相互作用点が検出体の内部であれば、その相互作用が光電効果、コンプトン効果、及び電子対生成のいずれであるか決定する。相互作用として光電効果が生じたときには光子の全エネルギーは検出体内で吸収されたものとして、その量を記録するエネルギー区分を決め、次の光子の追跡へ移る。コンプトン効果が生じた場合、散乱光子のエネルギーと散乱方向を決定する。このとき元の光子エネルギーと散乱光子のエネルギーの差を吸収エネルギーとする。散乱光子は初めと同様にさらにシンチレータ内での進行距離と次の相互作用点の座標の決定へと追跡を繰返して、カットオフエネルギー以下となるか検出器の外へ逸出するまで追跡される。

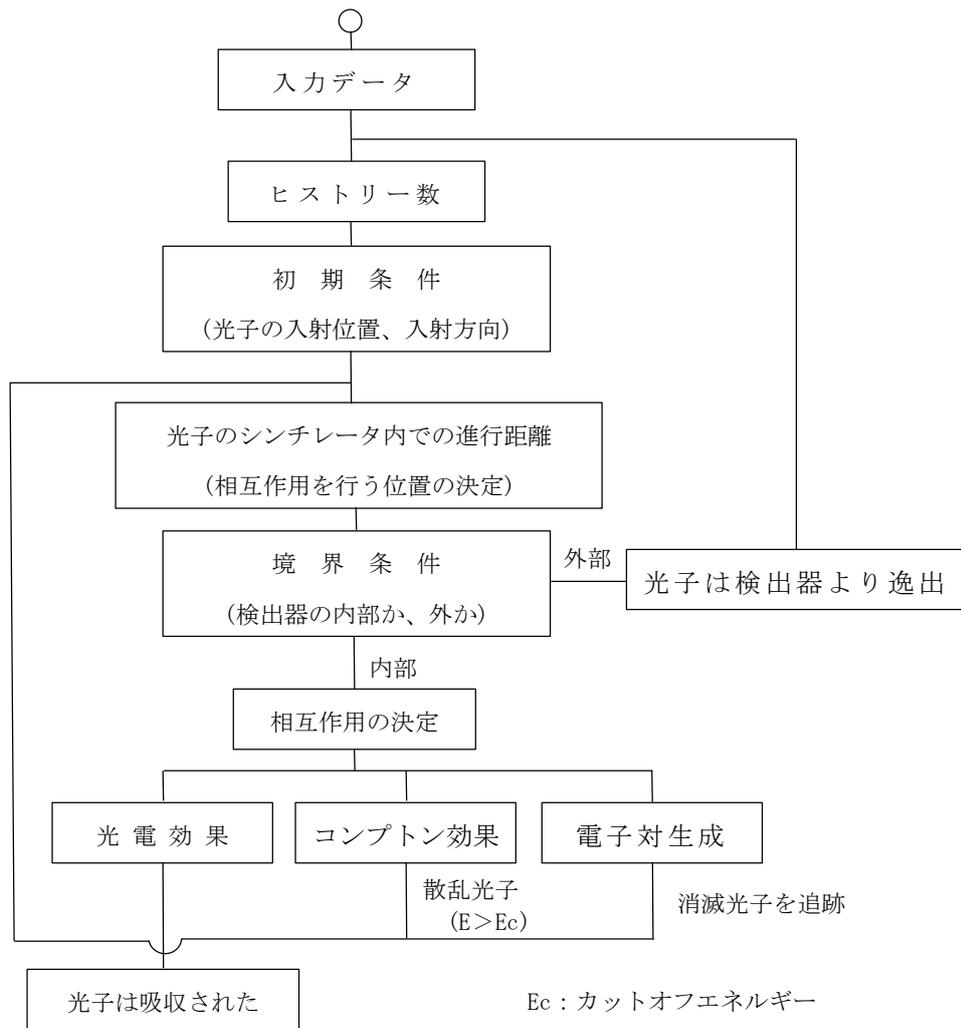


図 L.3 モンテカルロシミュレーション法による
レスポンス関数作成のフローチャート
(簡略化されている)

このとき、カットオフエネルギーとなるまでに二次電子に与えたエネルギー、または検出体へ逸出するまでに二次電子に与えたエネルギーを加え合わせ、相当するエネルギー区分に記録する。電子対生成が生じた場合、元の光子のエネルギーと 1.022 MeV の差を吸収エネルギーとし、相互作用位置で、0.511 MeV の光子が 2 個 180° 方向に発生したものとして、それぞれの光子を別々に追跡し、検出体内で吸収されるエネルギーを加え合せ、相当するエネルギー区分に記録する。

以上の過程で 1 個の光子につき検出体内で吸収されるエネルギーを決定し、検出体のエネルギー分解能を考慮して、この吸収エネルギーが初めに入力データとして与えたエネルギー区分のどの bin に入るかを決定し記録する。以上述べた過程を初めに与えたエネルギー区分の数のそれぞれについて、ヒストリーの数だけ繰返せば、レスポンス関数が決定される。

解説 L.3 レスポンス関数作成上の諸問題

検出器と線源を固定した配置でレスポンス関数を実験的に作成する場合と異なり、環境放射線を測定する際には、いろいろな方向からの放射線の寄与があるので、レスポンス関数の作成に当たって考慮すべき事項が多い。

モンテカルロシミュレーションに際しては、検出系のレスポンス関数に影響すると考えられる①検出器のアルミニウムケースと MgO 反射による吸収、散乱、②シンチレータ窓及びライトガイドによる散乱、③光電子増倍管の光電面による散乱、④ヨウ素の KX 線のエスケープ、⑤方向依存性、⑥波高分解能、⑦検出器の効率、⑧ピーク対コンプトン比などを全て含むようなプログラムを作成することは大変なことである。また、これらのほかに発光量と二次電子エネルギーの間の非直線性なども考慮すべき因子として存在する。次に内容のあらましを示す。

①には入射 1 次光子束の減衰と散乱線によるビルドアップが寄与する。すなわち、単一エネルギーの光子の場合、1 次光子束は $\exp\{-\mu'(E)\bar{d}\}$ にしたがって減衰するが、そのうちの何%かは散乱線として検出体へ入射する。ここで $\mu'(E)$ は吸収体(ケース等)の線源衰係数、 \bar{d} は吸収体中の光子の平均通過距離である。したがって正確なエネルギースペクトルを評価するためには、一次光子束の減衰だけでなく、このような散乱線の寄与もレスポンス関数に含めることが必要である。②は検出体中での発光の出口に存在する数 mm のガラス等の影響である。一次光子が検出体の前方から入射したとき、検出体を透過した光子がこの部分で後方散乱して再び検出体で吸収される割合が問題となる。単一エネルギー光子を測定したとき、180 keV 付近に観測されるピークはこのような散乱線の寄与である。③の寄与は、②の部分透過した光子がさらに光電子増倍管の光電面で後方散乱した成分の検出体による再吸収である。この成分の寄与は②よりも小さいと考えられる。④の寄与は検出体の構造と関係し、検出体のごく表面で相互作用が起こった場合、すなわち低エネルギー光子に対して重要となる。⑥、⑧は検出体だけではなく測定系を含む全体の系の特性が関与する。

①～⑤の寄与はモンテカルロシミュレーションのプログラムに組込むか³⁾、実験に基づく解析的方法で補正するよりほかに正確に評価する方法はない。前者の場合、検出体の構造上、部分的にアルミニウム板の重なり及び反射材の不均一さがあるので単純化された境界条件を設定せざるを得ない。後者の場合、低エネルギー光子ほどこれらの寄与は無視できないと考えられるので、単一低エネルギー線減が必要となる。ケースによる散乱線の寄与は、一般にケースが薄いので、1 回散乱線を考慮すれば充分と考えられる。方向依存性はケースの構造に関係して、特に低エネルギー領域で顕著に現れる。以上を要約すれば、裸の検出体について作成されたレスポンス行列 R に、吸収散乱の寄与を表す行列 M_s 及び方向依存性を補正するための行列 D を乗じてレスポンス行列を修正し、実際の系に近い形 R_m を求めることができる。

$$R_m = D \times M_s \times R \quad (L.12)$$

しかし、①から 5 の補正を行わなくても、得られる結果は数%の誤差にとどまる。

⑥～⑧についての補正は、裸の検出体で作成されたレスポンス関数(行列)を実際の系に適合させる場合、又は既に発表されたレスポンス関数を利用して実際に使用する検出系に適合

させる場合に重要である。分解能を補正するには、コンプトン効果による分布は連続分布であるから、全吸収ピークの部分だけを、ピーク対コンプトン比を考慮して、使用する系の分解能に適合させれば充分である。このようにして補正されたレスポンス関数(行列)はその面積(要素)を各入射光子エネルギーごとに統計したものは全効率となるはずであるから、検出体の減衰係数を用いて理論的に得られる全効率 $\varepsilon(E) = 1 - \exp\{-\mu(E)\bar{t}\}$ と比較して細部を再修正することもできる。

裸の $3 \text{ in } \phi$ NaI(Tl) 検出器についてモンテカルロシミュレーションによって求めたレスポンス関数(行列)に、MgO 反射材及び Al ケースの影響を平板近似によって計算で補正した 22 行 22 列、不均等分割のレスポンス関数(行列)の例を表 L. 3 に示した。各エネルギーに対するヒストリー数は 50000 である。また各要素の数値を 1000 で割れば単一エネルギー単一光子入射に対する応答となる。

表 L.3 一様入射 γ 線場に対する 3 in ϕ NaI(Tl) シンチレータの 22 \times 22 のレスポンス行列の一例

E	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.32	1.465	1.615	1.765	1.970	2.205	2.410	2.615	2.860	3.100
0.1	979.7	0.0																				
0.2	27.0	916.6	0.7																			
0.3	71.7	17.3	759.6	1.6	0.0																	
0.4	80.8	66.4	15.6	593.6	10.1	0.0																
0.5	92.1	73.7	58.1	17.8	473.4	13.8	0.0															
0.6	83.3	73.0	66.7	51.5	20.6	381.8	17.8	0.0														
0.7	73.5	66.4	60.7	59.2	45.8	22.6	318.8	17.8	0.0													
0.8	63.4	60.5	55.7	55.0	56.6	40.6	23.0	270.0	21.5	0.0												
0.9	54.6	52.4	49.1	48.2	47.8	52.6	34.6	26.5	234.8	23.2	0.0											
1.0	46.0	44.7	44.3	42.5	41.0	44.3	49.3	32.7	27.0	210.3	25.0											
1.1	42.5	40.3	37.3	38.6	37.7	38.6	39.9	48.9	31.1	27.4	188.1	24.6	0.0									
1.2	36.8	34.0	33.8	34.0	34.2	34.4	34.9	38.2	48.0	28.7	28.5	168.2	26.1	0.0								
1.32	31.8	30.4	29.2	28.3	29.4	29.2	28.5	30.2	35.3	43.0	35.1	17.3	180.9	11.8	0.0							
1.465	26.8	27.8	25.0	23.9	24.8	24.3	24.3	25.2	26.5	30.3	38.4	41.9	24.3	169.7	10.5	0.0						
1.615	22.4	21.3	21.9	21.3	21.2	24.6	20.6	22.6	22.1	23.5	29.4	33.5	58.1	27.0	152.4	11.8	0.0					
1.765	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	21.3	21.7	18.6	19.7	20.0	25.7	44.7	57.7	29.8	143.6	12.7	0.0				
1.970	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	18.2	19.2	16.4	17.5	26.3	43.9	53.7	34.0	157.2	1.5	0.0			
2.205	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	14.9	21.7	22.1	24.6	33.5	47.8	72.4	140.0	5.3	0.0		
2.410	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	21.7	27.0	21.1	26.8	84.6	50.0	126.5	8.6	0.0	
2.615	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.1	11.8	15.6	31.6	21.5	50.4	70.3	46.7	122.4	7.0	0.0
2.860	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.2	9.2	11.8	16.0	23.0	45.8	37.7	68.0	53.3	131.6	2.6
3.100	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	7.2	8.8	9.2	9.4	35.3	20.9	32.5	70.4	73.0	105.0

参考文献

1) R. L. Heath ; ID0-16880-1(1964)

” ” ; ID0-17017 (1965)

Heath の日本語資料としては

天道芳彦 : γ 線スペクトルの解析法

;Radioisotopes Vol. 12, No. 2, 200~205(1963)

ニコラス ツルファニデス(坂井英次訳) : 放射線計測の倫理と演習

(下巻・応用編第 11, 12 章) ; 現代工学社(1986)

R. L. Heath, R. G. Helmer, L. A. Schmittroth and G. A. Cazier

Method for Generation Single Gamma-Ray Shapes for the Analysis of
Spectra, Nucl. Instr. Meth. 47:281~304(1967)

2) C. D. Zerby ; “Methods in Computational Physics” I, 89~134

(B. Alder and S. Fernbach eds.)Academic Press(1963)

3) 斎藤公明、森内茂、JAERI-M9741(1981)

付 録

付録1 ストリッピング法による NaI モニタのデータ処理の例

このデータ処理は 3 in ϕ 球形 NaI (Tl) シンチレータを用いて得られたパルス波高分布を処理し、0~3 MeV 領域の γ 線、ならびに宇宙線に関する情報を得るための計算処理である。

このデータ処理は(1)測定結果を 10 keV/ch に変換する処理、(2)処理に必要な入力データの選択と導入、(3)上記の入力データに基づいて行う計算、(4)計算結果の表示、などに大別される。

(1) 測定結果を 10 keV/ch に変換する処理

この変換処理はエネルギー校正すなわち得られたパルス波高分布のチャンネルとエネルギーの関係を規格化(全エネルギー領域についてチャンネル幅を一定にする)する。この校正はチャンネル間の数値の補間で行っている。通常ゼロ点、 ^{40}K (1461 keV)、 ^{208}Tl (2614 keV) の 3 点を用い、一次式で補正を行うが、高次の歪の補正には測定されたパルス波高分布のチャンネルとエネルギーの関係の(次数+2)組以上を用い、n 次式でフィッティングを行う。チャンネル間の数値の補間は比例配分によって決定する。10 keV/ch に変換した結果は(2)以後のデータ処理の基本となるので、この校正の正確さは結果の精度に影響する。

(2) 処理に必要な入力データ

処理に必要な入力データのうち検出体(NaI (Tl) シンチレータ)の P/T 比が、この解析に必要な唯一の実測データである。この値は単色 γ 線の点線源を用いて求められ、付図 1.1、付表 1.1 にその例を示す。

このほか、処理に必要な全計数効率のデータは、 γ 線とシンチレータとの作用断面積等の定数の文献値から計算によって求める。

(3) 入力データに基づいて行う計算処理

10 keV/ch に変換した測定結果の処理は(a)コンプトン寄与の差し引き、及び(b)ピーク効率の適用である。ピーク効率(PE)は P/T 比(PTTR)を用い、球形シンチレータの直径 d と NaI (Tl) シンチレータの減衰係数 μ から次式

$$PE = \left\{ 1 - \frac{2}{(\mu d)^2} + 2e^{-\mu d} \left[\frac{1}{(\mu d)^2} + \frac{1}{\mu d} \right] \right\} (PTTR)$$

によって求めることができる。3 in ϕ 球形 NaI (Tl) シンチレータについて算出されたピーク効率の値を付表 1.2 に示した。ピーク領域カウント N_p とコンプトン連続部分のカウント N_c とは第 1.2 表に示した。

$$N_c = N_p(1 - PTTR)/(PTTR)$$

N_p から上式によって N_c を求め、 N_c をコンプトン連続部分の各チャンネルに均等に振り分けて差し引く。

これは、コンプトン連続部分を短形で近似することに相当する。(付図 1.2)。実際には、まず 3 MeV に相当するチャンネル(10 keV 幅)をエネルギー E_γ の光子の全吸収ピーク(面積 N_p カウント)と見做し、この N_p から求められた N_c を、コンプトン端 E_c (MeV) ($= E_\gamma / (1+0.511/2E_\gamma)$) から 0 まで、対応する各チャンネルに均等に振り分けて差し引き、この操作を高エネルギー側から順次低エネルギー側に向けて繰り返す。この様にしてコンプトンの寄与を除いたスペクトルが得られ、エネルギーごとのピーク効率及びシンチレータケースによる γ 線の減衰率をチャンネルごとに適用すれば、 γ 線線束密度で表された光子スペクトルがえがかれる。さらに、エネルギーごとの光子束密度-照射線量換算係数を適用すれば、エネルギー別の照射線量率も求められる。

(4) 結果の信頼性

この方法における誤差には、統計的なものとして計算過程を含めた計数誤差、また系統的な誤差として、数え落とし、10 keV/ch の変換のさいの誤差、P/T 比、コンプトン連続部分の差し引き方法(短形と実際の形との差)及び基本定数の選び方、バックグラウンドデータのちがいがなどが考えられる。

(5) 解析と結果の表示

標準的には、0~3 MeV の範囲を γ 線に関する情報、3 MeV 以上の領域を主として宇宙線に関する情報として扱う。

i) 0~3 MeV 領域の解析と表示

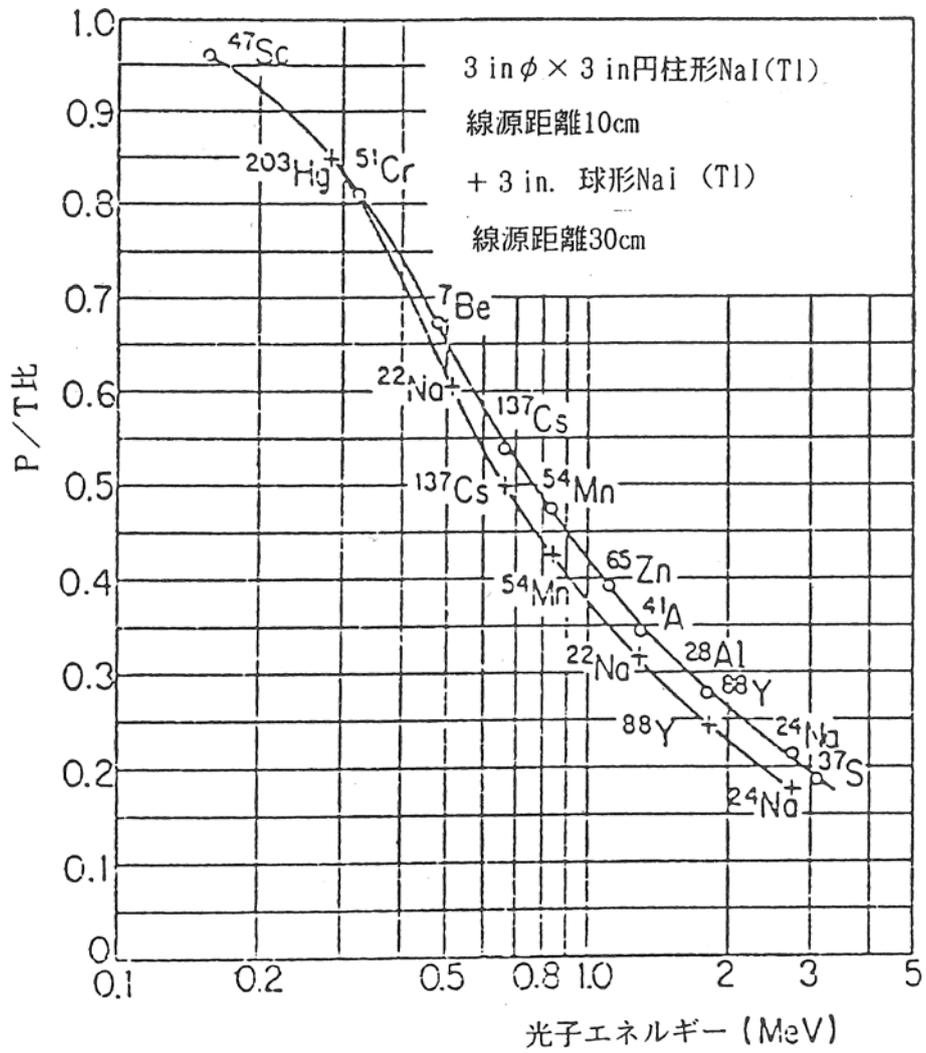
- ① 測定データを 10 keV/ch に変換した結果の表示。
- ② コンプトン寄与の差し引いたスペクトルの表示。
- ③ 上記スペクトルに対し、光子のピーク効率を用いて線束密度を算出した結果の表示、すなわち、光子スペクトルの表示。
- ④ 光子スペクトルから照射線量スペクトルに変換した結果の表示。
- ⑤ ①、③、④について、3 MeV から 10 keV ごとの値を低エネルギー領域まで積分した結果。

これらが標準的な表示である。①、②、③、④については一般に片対数で表示する。④の積算結果については、指定されたエネルギー(通常 30 keV)までの積分値を 1 とした百分率を直線表示する。またデータ番号とともに γ 線、宇宙線線量を付図 1.3 の中に表示することもできる。

ii) 3 MeV 以上の領域の取扱

3 MeV 以上の情報は主として宇宙線に基づくものであり、3 in ϕ 球形 NaI(Tl) シンチレータにおいては、3 MeV 以上の計数率に $0.018(\mu\text{Gy/h}) / (\text{cps})$ という定数(N_3)を乗して、宇宙線線量率相当値とすることができる。

しかし、3 MeV 以上のエネルギーの γ 線が存在する環境(加速器施設、原子炉施設近傍など)にあつては、高エネルギー γ 線を宇宙線寄与として過大に見積もることがある。このような恐れのある場所での測定に際しては、人工放射線に基づく影響の少ないエネルギー領域、例えば 10 MeV 以上の領域を宇宙線線量の算出に利用することが必要である。この際、上記定数としては $N_{10}=0.030(\mu\text{Gy/h})/(\text{cps})$ を用いる。この両定数の比 (N_{10} / N_3) は、環境における宇宙線成分のちがいによって 1.3~1.87 の幅があるが、ここでは 1.65 を用いる。



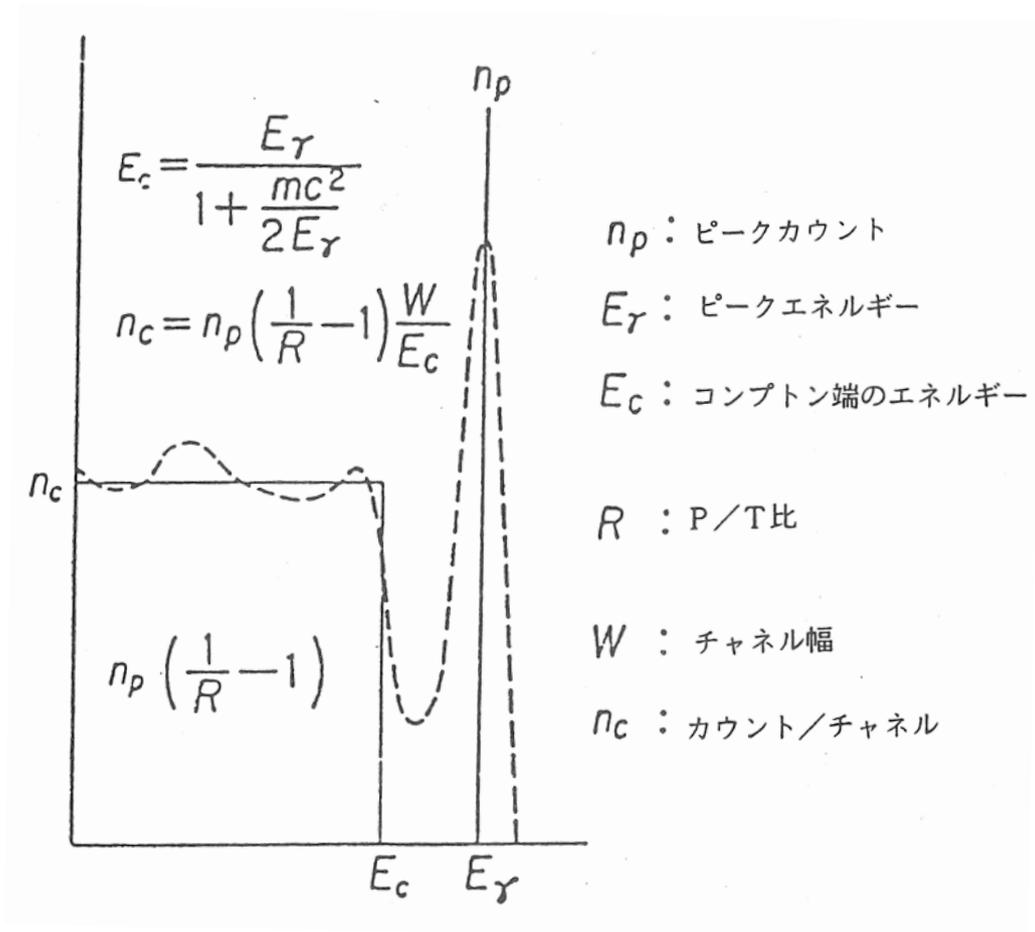
付図 1.1 NaI (Tl) シンチレータの P/T 比-

付表 1.1 3 in ϕ 球形 NaI (Tl) シンチレータの P/T 比

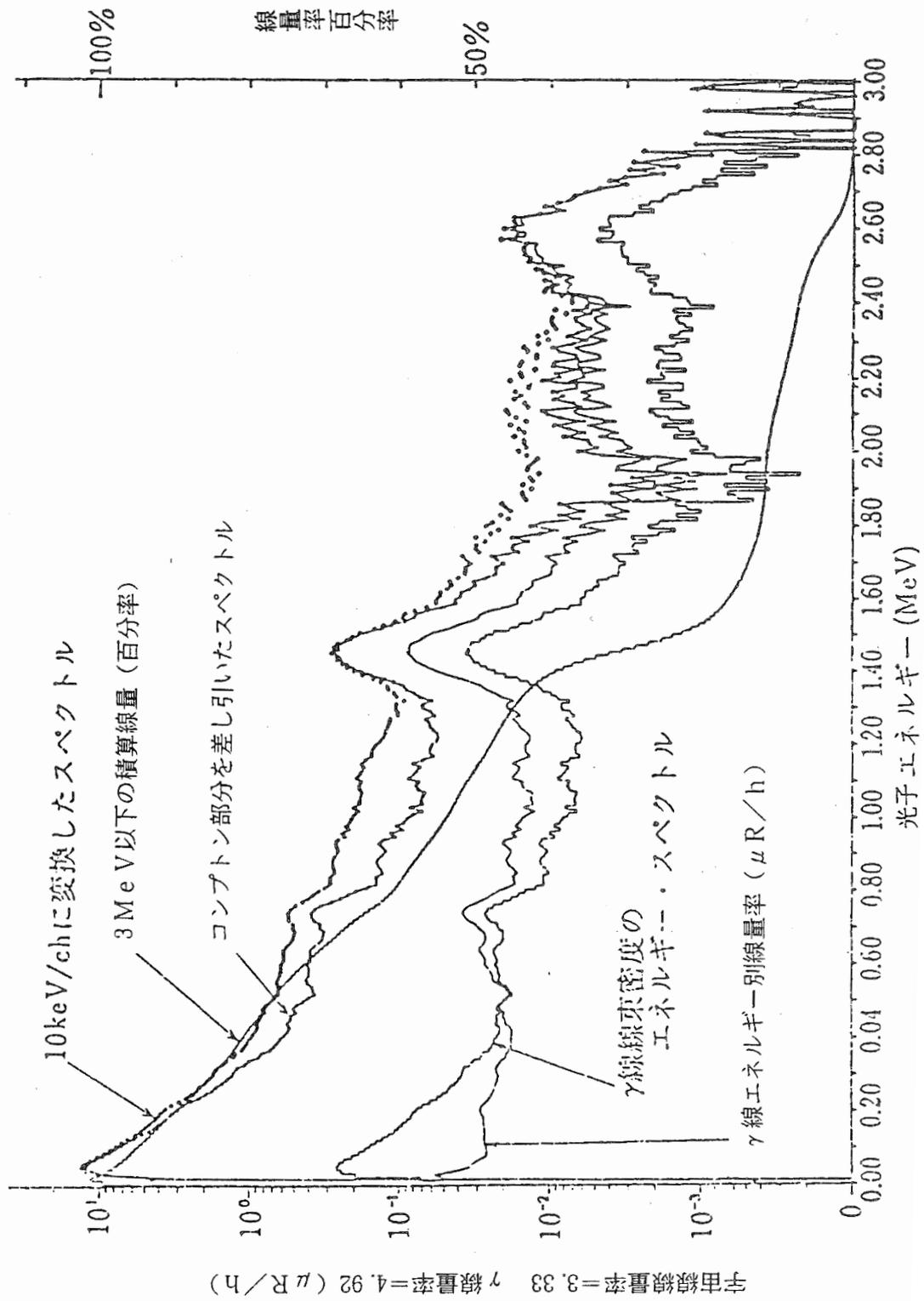
keV	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100	0.99	0.985	0.98	0.97	0.962	0.955	0.945	0.94	0.933	0.925
200	0.916	0.907	0.9	0.89	0.882	0.872	0.862	0.853	0.843	0.83
300	0.82	0.806	0.795	0.785	0.77	0.76	0.746	0.735	0.725	0.713
400	0.703	0.691	0.682	0.67	0.66	0.65	0.641	0.631	0.621	0.612
500	0.604	0.596	0.586	0.578	0.57	0.562	0.555	0.547	0.541	0.535
600	0.527	0.522	0.516	0.51	0.505	0.5	0.495	0.49	0.485	0.48
700	0.475	0.47	0.466	0.461	0.457	0.453	0.449	0.445	0.441	0.438
800	0.434	0.431	0.428	0.425	0.421	0.417	0.414	0.411	0.408	0.405
900	0.401	0.398	0.396	0.393	0.391	0.387	0.385	0.382	0.379	0.376
1000	0.374	0.371	0.369	0.366	0.364	0.361	0.359	0.357	0.355	0.353
1100	0.35	0.348	0.346	0.344	0.342	0.34	0.338	0.336	0.332	0.33
1200	0.33	0.328	0.326	0.324	0.322	0.32	0.318	0.316	0.314	0.312
1300	0.31	0.308	0.307	0.305	0.304	0.302	0.3	0.298	0.296	0.295
1400	0.294	0.292	0.291	0.29	0.289	0.287	0.285	0.284	0.283	0.281
1500	0.28	0.278	0.277	0.276	0.275	0.273	0.272	0.271	0.27	0.269
1600	0.267	0.266	0.265	0.264	0.263	0.261	0.26	0.259	0.258	0.257
1700	0.255	0.254	0.253	0.252	0.251	0.25	0.249	0.248	0.247	0.246
1800	0.245	0.2446	0.243	0.242	0.241	0.24	0.239	0.238	0.237	0.236
1900	0.235	0.234	0.233	0.232	0.231	0.23	0.229	0.228	0.227	0.227
2000	0.226	0.225	0.224	0.224	0.223	0.222	0.221	0.22	0.22	0.219
2100	0.219	0.218	0.217	0.216	0.215	0.214	0.213	0.212	0.211	0.211
2200	0.21	0.209	0.209	0.208	0.208	0.207	0.207	0.206	0.205	0.204
2300	0.204	0.203	0.203	0.202	0.202	0.201	0.2	0.199	0.198	0.197
2400	0.197	0.196	0.196	0.195	0.195	0.194	0.193	0.193	0.192	0.191
2500	0.191	0.19	0.19	0.189	0.189	0.187	0.187	0.186	0.186	0.185
2600	0.185	0.184	0.184	0.183	0.182	0.181	0.181	0.18	0.18	0.179
2700	0.179	0.178	0.178	0.177	0.177	0.176	0.176	0.175	0.175	0.174
2800	0.174	0.173	0.173	0.172	0.172	0.171	0.171	0.17	0.17	0.169
2900	0.169	0.168	0.168	0.167	0.167	0.166	0.165	0.165	0.164	0.164

付表 1.2 3 in ϕ 球形 NaI(Tl) シンチレータのピーク効率

keV	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.999	0.999
100	0.988	0.982	0.976	0.964	0.954	0.945	0.932	0.924	0.913	0.900
200	0.887	0.873	0.861	0.845	0.831	0.815	0.799	0.784	0.768	0.749
300	0.734	0.716	0.700	0.685	0.666	0.652	0.634	0.620	0.607	0.592
400	0.579	0.565	0.554	0.540	0.528	0.516	0.506	0.495	0.484	0.474
500	0.466	0.457	0.447	0.438	0.430	0.421	0.414	0.406	0.400	0.393
600	0.386	0.380	0.374	0.368	0.363	0.358	0.353	0.348	0.343	0.338
700	0.333	0.328	0.324	0.319	0.315	0.311	0.307	0.304	0.300	0.296
800	0.293	0.289	0.286	0.283	0.280	0.276	0.273	0.270	0.267	0.264
900	0.261	0.258	0.256	0.253	0.251	0.248	0.246	0.243	0.241	0.238
1000	0.236	0.234	0.232	0.229	0.227	0.225	0.223	0.221	0.219	0.218
1100	0.215	0.213	0.212	0.210	0.208	0.206	0.204	0.202	0.200	0.198
1200	0.197	0.196	0.194	0.192	0.191	0.189	0.187	0.186	0.184	0.182
1300	0.181	0.179	0.178	0.177	0.176	0.174	0.173	0.171	0.170	0.169
1400	0.168	0.166	0.165	0.164	0.163	0.162	0.160	0.160	0.159	0.157
1500	0.156	0.155	0.154	0.153	0.153	0.151	0.150	0.150	0.149	0.148
1600	0.147	0.146	0.145	0.144	0.144	0.142	0.141	0.141	0.140	0.139
1700	0.138	0.137	0.136	0.136	0.135	0.134	0.134	0.133	0.132	0.131
1800	0.131	0.130	0.129	0.128	0.128	0.127	0.126	0.126	0.125	0.124
1900	0.123	0.123	0.122	0.121	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118	0.118
2000	0.117	0.116	0.116	0.116	0.115	0.114	0.114	0.113	0.113	0.113
2100	0.112	0.112	0.111	0.111	0.110	0.109	0.109	0.108	0.108	0.107
2200	0.107	0.106	0.106	0.106	0.105	0.105	0.105	0.104	0.104	0.103
2300	0.103	0.102	0.102	0.102	0.102	0.101	0.100	0.0997	0.0991	0.0986
2400	0.0985	0.0979	0.0978	0.0972	0.0972	0.0966	0.0960	0.0959	0.0953	0.0948
2500	0.0947	0.0942	0.0941	0.0935	0.0935	0.0924	0.0923	0.0918	0.0917	0.0912
2600	0.0911	0.0906	0.0905	0.0899	0.0894	0.0888	0.0887	0.0882	0.0881	0.0875
2700	0.0875	0.0869	0.0869	0.0864	0.0863	0.0857	0.0857	0.0852	0.0851	0.0846
2800	0.0845	0.0840	0.0840	0.0834	0.0834	0.0829	0.0828	0.0823	0.0822	0.0817
2900	0.0817	0.0811	0.0811	0.0805	0.0805	0.0800	0.0794	0.0794	0.0788	0.0788



付図 1.2 コンプトン連続部分の差し引き方法



付図 1.3 3 in ϕ 球形 NaI (TI) シンチレーション検出器によるスペクトルの解析結果の表示例

DATA NO.	*C*	CHANNEL	KV/CH	TIME	LAST-CH	LIVE-TIME	A	B	E-CNT	CUS-DOSE(U/R/H)	GAMMA(U/R/H)	(CH)	WEIGHT	E/CH
262097.0		1024.0	10.00	2003.40	440.2	2400.0	3443.0	3.041	0.632E+01	3	820.0	6.73		
ORIGHL	RESULTS	PER D	0-70	50-100	100-250	250-500	500-1000	-2000	-2000	-2000	TDUS	0.0484		
DATA	212.08CPS	53.54	-0.278	5.546	51.618	23.424	12.102	6.876	0.730	11(C)	3483.0			
FLUX	5.846	0.913	-3.418	1.081	39.038	21.322	15.537	19.984	4.335	JJ(C)	3020.0	R		
DOSE	6.467	1.00	-2.611	0.303	10.273	13.111	19.431	43.414	13.840	3-MFV	3483.0			
ADUS	5.403	0.853	-0.030	1.460	23.113	22.031	23.409	25.331	4.686	5-REV	3020.0	R		
NO.	DATA(CPS)	PEAK(CPS)	FLUX(CM-2)	DOSE(MHR/H)	SUM OF DATA	SUM OF FLUX	SUM OF DOSE							
1	-0.764E-03	-0.174E+01	-0.382E-01	-0.118E+00	0.213E+03	0.577E+01	0.632E+01							
2	-0.376E-01	-0.178E+01	-0.390E-01	-0.267E-01	0.213E+03	0.581E+01	0.644E+01							
3	-0.108E+00	-0.185E+01	-0.406E-01	-0.118E-01	0.213E+03	0.585E+01	0.647E+01							
4	-0.223E+00	-0.190E+01	-0.416E-01	-0.707E-02	0.213E+03	0.589E+01	0.648E+01							
5	-0.264E+00	-0.184E+01	-0.405E-01	-0.513E-02	0.213E+03	0.593E+01	0.649E+01							
6	-0.384E+00	-0.191E+01	-0.418E-01	-0.528E-02	0.213E+03	0.597E+01	0.649E+01							
7	-0.477E+00	-0.189E+01	-0.414E-01	-0.520E-02	0.213E+03	0.601E+01	0.650E+01							
8	-0.324E+01	-0.177E+01	-0.388E-01	-0.486E-02	0.214E+03	0.605E+01	0.650E+01							
9	0.324E+01	-0.198E+01	0.435E-01	0.603E-02	0.214E+03	0.609E+01	0.651E+01							
10	0.980E+01	0.859E+01	0.188E+00	0.289E-01	0.211E+03	0.605E+01	0.650E+01							
10	0.980E+01	0.859E+01	0.188E+00	0.289E-01	0.211E+03	0.605E+01	0.650E+01							
20	0.596E-01	0.520E+01	0.27E+00	0.451E-01	0.122E+03	0.425E+01	0.508E+01							
30	0.278E+01	0.224E+01	0.652E-01	0.374E-01	0.764E+02	0.322E+01	0.562E+01							
40	0.158E+01	0.114E+01	0.424E-01	0.333E-01	0.544E+02	0.266E+01	0.525E+01							
50	0.861E+00	0.533E+00	0.246E-01	0.248E-01	0.421E+02	0.236E+01	0.498E+01							
60	0.748E+00	0.468E+00	0.261E-01	0.348E-01	0.348E+02	0.211E+01	0.472E+01							
70	0.473E+00	0.226E+00	0.147E-01	0.196E-01	0.277E+02	0.185E+01	0.439E+01							
80	0.384E+00	0.177E+00	0.131E-01	0.195E-01	0.235E+02	0.171E+01	0.420E+01							
90	0.345E+03	0.161E+00	0.134E-01	0.226E-01	0.199E+02	0.159E+01	0.400E+01							
100	0.327E+00	0.171E+00	0.154E-01	0.293E-01	0.165E+02	0.144E+01	0.373E+01							
110	0.230E+00	0.911E-01	0.916E-02	0.184E-01	0.138E+02	0.132E+01	0.351E+01							
120	0.236E+00	0.117E+00	0.129E-01	0.280E-01	0.113E+02	0.120E+01	0.325E+01							
130	0.141E+00	0.854E-01	0.103E-01	0.237E-01	0.939E+01	0.109E+01	0.301E+01							
140	0.161E+00	0.129E+00	0.167E-01	0.403E-01	0.814E+01	0.984E+00	0.276E+01							
150	0.394E+00	0.365E+00	0.507E-01	0.128E+00	0.507E+01	0.611E+00	0.184E+01							
160	0.504E-01	0.259E-01	0.383E-02	0.102E-01	0.302E+01	0.358E+00	0.119E+01							
170	0.481E-01	0.257E-01	0.405E-02	0.113E-01	0.259E+01	0.328E+00	0.111E+01							
180	0.453E-01	0.243E-01	0.407E-02	0.118E-01	0.215E+01	0.292E+00	0.101E+01							
190	0.263E-01	0.807E-02	0.143E-02	0.428E-02	0.179E+01	0.265E+00	0.829E+00							
200	0.233E-01	0.881E-02	0.164E-02	0.508E-02	0.157E+01	0.235E+00	0.900E+00							
210	0.317E-01	0.197E-01	0.383E-02	0.123E-01	0.132E+01	0.232E+00	0.829E+00							
220	0.320E-01	0.214E-01	0.439E-02	0.146E-01	0.101E+01	0.194E+00	0.702E+00							
230	0.186E-01	0.101E-01	0.213E-02	0.739E-02	0.753E+00	0.161E+00	0.593E+00							
240	0.116E-01	0.796E-02	0.177E-02	0.625E-02	0.611E+00	0.144E+00	0.533E+00							
250	0.114E-01	0.115E-01	0.265E-02	0.963E-02	0.513E+00	0.124E+00	0.463E+00							
260	0.366E-01	0.368E-01	0.884E-02	0.329E-01	0.296E+00	0.727E-01	0.273E+00							
270	0.744E-02	0.753E-02	0.184E-02	0.718E-02	0.231E-01	0.275E-02	0.215E-01							
280	-0.663E-03	-0.663E-03	-C.173E-03	-C.670E-03	-0.124E-01	-0.332E-02	-0.133E-01							
290	-0.1462E-03	-0.1462E-03	-0.231E-03	-0.923E-03	-0.470E-02	-0.129E-02	-0.526E-02							
300	-0.124E-02	-0.124E-02	-0.346E-03	-0.141E-02	-0.124E-02	-0.346E-03	-0.141E-02							

付表 1.3 3 in φ 球形 NaI (T1) シンチレーションスペクトルの解析結果の表示例

付表 1.4 付表 1.3 の説明

◎DATA NO. データ番号

測定データの番号で、ABCDEF の 6 個の数字で表す。A は 197A 年、または 198A 年のデータを意味し、BC は、A 年のテープの順番で、ABC がテープ番号となる。DEF には ABC テープのデータ番号をあてる。

◎“ B ” この表示の意味

検出体固有のバックグラウンドまたは特定のデータをバックグラウンドとして差し引いたデータを用いて計算したものであることを示す。

◎“ C ” この表示の意味

バックグラウンドの差し引きは上記に示した差し引きのほか、さらに宇宙線等の寄与分を 3MeV 以上の数 (ABOVE COUNT) から求め、差し引いた結果を用いて計算したものであることを示す。

◎“ D ” この表示の意味

これらのバックグラウンドなどを差し引かない生のデータを用いて計算したものであることを示す。

CANNEL チャンネル数

測定データのチャンネル数、このプログラムでは 1024、または 2048 のいずれかが多い。

KEV/CH チャンネル幅

NO. に示された数のチャンネル幅を示す。通常 10 keV/ch となっている。

TIME 収録時刻

あらかじめセットされた時間によって通常収録された時刻を示す。最初の 2 桁が時間、それぞれ以下は小数点を含む分を示す。また収録データ番号を ADEF. XY とし、DEF よって XY 個データを集めたもの示す場合もある。

LAST-CH 最後のチャンネル

データ解析した場合の最後のチャンネルを示す。通常 3 MeV に相当するチャンネルが示される。

LIVE-TIME 測定時間

計測した時間 (s) を示すものでスペクトルの 0 チャンネルを用いている。ときには、この時間を別に入れる場合があるほか 0 チャンネルの数を数倍したものをを用いる場合 (数え落しの補正など) があり、この場合にはスペクトルの 0 チャンネル (計数時間) を括弧内に示す。

ABOVE-CNT 超過計数

スペクトル解析した最後のチャンネル(LAST CH)から実際に使用した最後のチャンネルまでの全計数値。

COS-DOSE (μGy , H) 宇宙線線量

ABOVE CNT から計算された宇宙線線量 (ABOVE CNT/LIVE TIME) \times K で計算される。K には 2.12 を用いている。別の値を用いた場合は、最後の項にその値が示される。

GAMMA (μGy , H) ガンマ線線量

通常 3 MeV までのスペクトルから計算して得られたガンマ線線量。

(CH)

上の線量計算で採用したエネルギー領域下限を示す数で、この値が 3 であれば、30 keV まで積算したことを示す。通常 2~5 を用いる。この例で 10 keV になっている。

WEIGHT 検出体重量

使用した検出体 (NaI (Tl)) の重量。これをあらかじめ与えることによって、波高分布の各エネルギーに相当する計数率とエネルギーの積の総和 ($\sum N_i \times E_i$) からシンチレータの平均吸収線量率が求められる。

E. CH チャンネル幅

測定データのチャンネル幅を示す。測定されたスペクトルを n 次式で 10 keV/ch に補正しており、この際あらかじめ求めた 1 次式の係数を示してある。

RESULTS ¹⁾ 計算結果

DATA は、10 keV から 3 MeV までの計数率 cps。

FLUX は、10 keV から 3 MeV までの全線束密度 γ/cm^2 。

DOSE は、空気吸収線量率 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ で、10 keV から 3 MeV までを積算したもの。ADOS は、シンチレータ内の平均の吸収線量率 ($\mu\text{Gy}/\text{h}$)。

PER D

RESULTS の各量を照射線量の値で割ったもの、ただし DOSE の値 (これは 1.00 になるはず) はチャンネル領域を (CH) \times 10 keV~3 MeV とした値を 10 keV~3 MeV の値で割っている。このため値は 1.00 とならないことがある。

0~50、50~100、100~250...~3000

この値は、各結果について、それぞれエネルギー領域 0~50 keV、50~100 keV、100~250 keV、250~500 keV、500~1000 keV、1000~2000 keV、2000~3000 keV 間の百分率。

付録2 逐次近似法による NaI(Tl)シンチレーションスペクトルの

アンフォールディングの例

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによって得られるパルス波高分布を光子エネルギースペクトルに変換(レスポンス補正)する方法にはいろいろあるが、ここでは3 inφ球形NaI(Tl)シンチレータで測定されデータを、レスポンスマトリックスを用い、逐次近似法によって解析する例について説明する。

2.1 解析手法の概要

(1) エネルギー校正

エネルギー校正は環境γ線波高分布のうち²⁰⁸Tl(2.61 MeV)と⁴⁰K(1.46 MeV)の全吸収ピークのチャンネル数を計算機を用いて判定し、得られた二つのピークチャンネルとそれに対応するエネルギー、及び通常“ゼロ点”のエネルギーによって、エネルギー校正を行う。

(2) 入力データの調整

パルス波高分布はレスポンスマトリックス分割に合わせるため100 keV以下は20 keVごとに、100 keV以上は100 keVごとに分割し、補正波高分布とする。

(3) バックグラウンド成分の差し引き

宇宙線成分と検出器固有のバックグラウンドを差し引く。宇宙線成分は、プラスチックシンチレーションスペクトロメータ同時計数法によって求める。また検出器固有のバックグラウンドは鉄室内における測定値から得られる。

(4) レスポンス補正

パルス波高分布をレスポンスマトリックスを用いて補正し、入射γ線スペクトルに変換する。(この時に使用したレスポンスマトリックスを付表2.1に示す。また、方法の詳細については2.2で述べる)。

(5) 線量率の計算

入射γ線スペクトルに、それぞれのエネルギーに対応する空気のエネルギー吸収係数を乗ずることなどによって、レントゲン単位で表したエネルギースペクトルとなる。また、これを全エネルギー領域について積分することによって、測定場所における照射線量率が得られる(この方法の詳細については2.3で述べる)。

2.2 逐次近似法によるエネルギー解析

エネルギー E_0 の光子が1個、検出器に入射した時、エネルギー E が吸収される確率を $R(E_0, E)$ とする。入射光子のエネルギー分布が $X(E_0)$ の時、吸収エネルギー E の分布 $Y(E)$ は次式のよう表すことができる。

$$Y(E) = \int_0^{\infty} R(E_0, E) \cdot X(E_0) dE \quad (\text{付 2-1})$$

今、入射エネルギーを吸収エネルギーを等間隔に n 等分すると、(付 2-1)式から E_j ($j=1, 2, \dots, n$)が入射して、吸収されるエネルギー E_i ($i=1, 2, \dots, n$)の分布 $Y(E_i)$ は、

$$Y(E_i) = R_{ij} \cdot X(E_j) \cdot \Delta E \quad (\text{付 2-2})$$

と表現できる。また、 $j=1, 2, \dots, n$ と幅広いエネルギーの E_j が入射した場合には、

$$Y(E_i) = \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot X(E_j) \cdot \Delta E \quad (\text{付 2-3})$$

となる。(付 2-3)式において、 $n \rightarrow \infty$ とすれば(付 2-1)式となる。

$X(E_j)$ ($j=1, 2, \dots, n$)は検出器に入射する放射線のエネルギースペクトルを表し、 $Y(E_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)は検出器で観測されるパルス波高分布である。 R_{ij} はエネルギー E_j の入射放射線に対する検出器のレスポンス関数を表す。

(付 2-3)は、 n 行 n 列の正方行列 R 、 n 次元ベクトル X 、 Y を用いて、次のように表現できる。

$$Y = R \cdot X \quad (\text{付 2-4})$$

つぎに、求めようとするスペクトルの第1近似として、パルス波高分布 Y_0 をとる。

$$X_1 = Y_0 \quad (\text{付 2-5})$$

これに、レスポンスマトリックス R をかけたものを Y_1 とする。

$$Y_1 = R \cdot X_1 \quad (\text{付 2-6})$$

つぎに、第2近似の X_2 として、 X_1 と Y_1 の対応する要素の比に Y_0 の対応する要素をかけたものとする。すなわち X_2 の第1要素は、

$$(X_2)_1 = \frac{(X_1)_1}{(Y_1)_1} \cdot (Y_0)_1 \quad (\text{付 2-7})$$

である。 X_2 にさらに R をかけたものを Y_2 とする。

$$Y_2 = R \cdot X_2 \quad (\text{付 2-8})$$

同様に、

$$(X_3)_1 = \frac{(X_2)_1}{(Y_2)_1} \cdot (Y_0)_1 \quad (\text{付 2-9})$$

このような手続きを 50 回繰り返せば、 $\sim 10^{-1}$ の範囲内に収束する。

2.3 線量変換

逐次近似法によってレスポンス補正を行い、入射 γ 線スペクトルから線量変換するには次式によって行う。

$$D = 1.724 \times \frac{\sum_i (N_i \cdot E_i \cdot \mu_i) \cdot \Delta E}{\pi r^2 \cdot W \cdot T} (\mu\text{Gy/h}) \quad (\text{付 2-10})$$

ここで、

- E_i : i 番目のヒストグラムの中心エネルギー (eV)
- W : 空気の W 値 (33.85 eV/ion pair)
- r : シンチレーターの半径 (3.81 cm)
- μ_i : エネルギー E_i の光子に対する空気の線減衰係数 (cm^{-1})
- N_i : i 番目のヒストグラムにはいる入射光子数/ ΔE (個/(100 keV · s))
- T : 測定時間 (s)

付録3 レスポンス関数の計算例

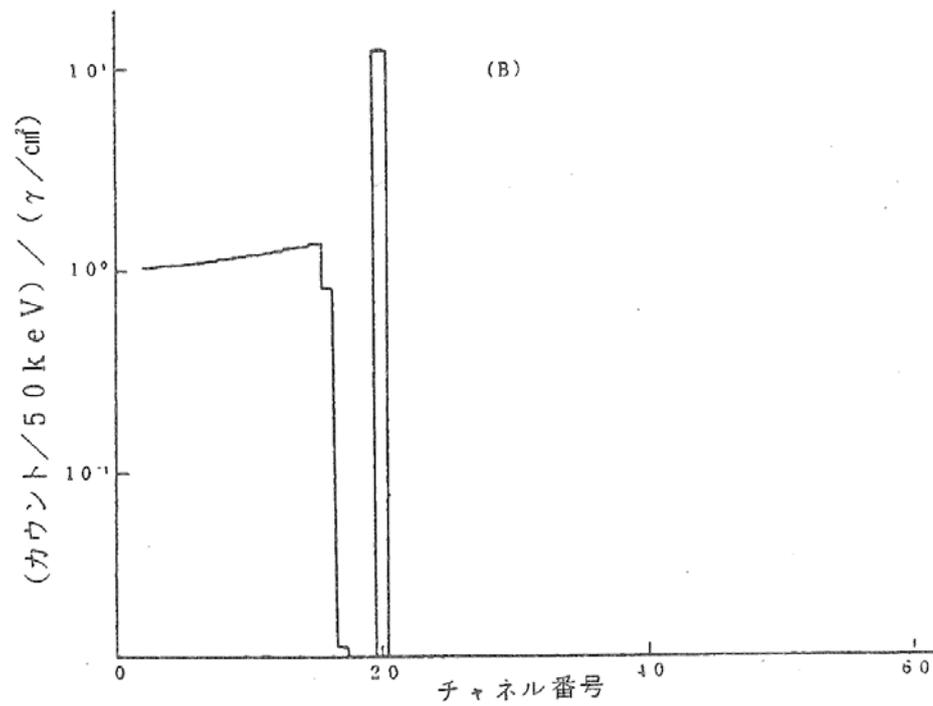
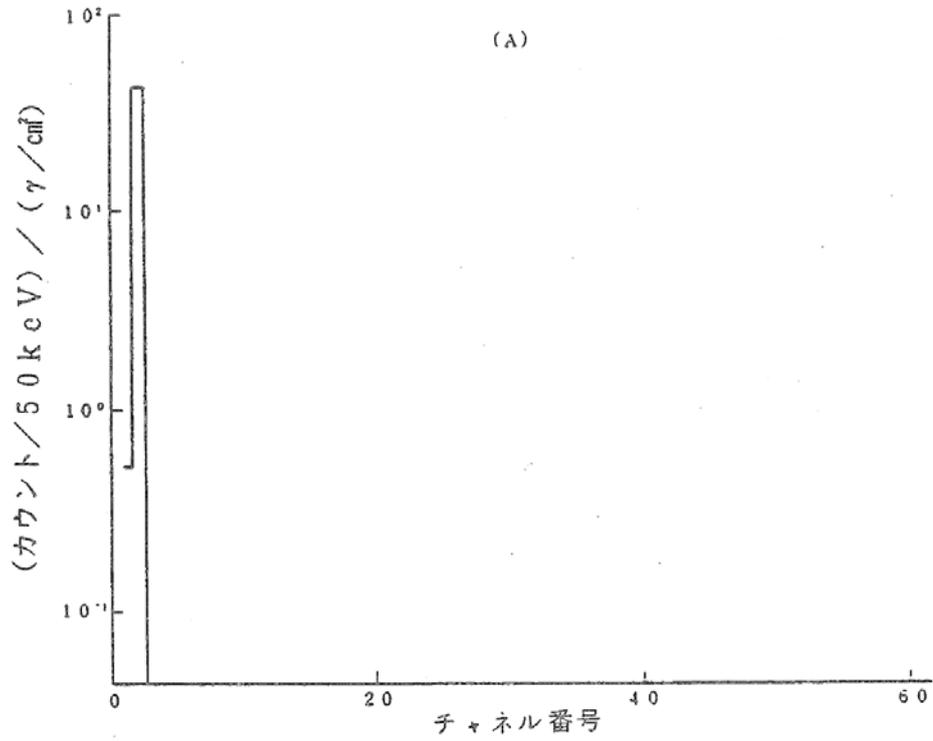
レスポンス関数を構成する成分は、基本的には一次入射光子によるコンプトン分布成分、KX線エスケープ成分、消滅 γ 線スペクトル成分及び全吸収成分から成るが、実際の検出器はNaI(Tl)結晶のほかにそれを包むケース及び光電子増倍管等からの散乱 γ 線の影響もあって、厳密には個々の検出器プローブ固有の形状を示す。厳密な意味でのレスポンス関数は吸収及び散乱成分の含まない標準 γ 線による実験で求めるのが理想的であろうが、現実にはそのような線源の入手は不可能であり、たとえ可能であっても通常の実験環境では高い精度は望めない。一方、このような誤差要因の入らない決定法としては、実際の検出器の形状で理論的に計算して求めることも一つの方法であり、現実には高い精度のレスポンス関数の決定が可能な段階にある。しかし、ここで述べるスペクトル解析は、精度を損なわずに単純な計算コードで実施できることを条件にしているため、レスポンス関数については検出器の形状のモデル化を行い、半実験的な方法で任意のレスポンス関数が計算できるようにしている。

ここで考えるスペクトル分布は、コンプトン成分、KX線エスケープ成分、消滅 γ 線スペクトル成分、全吸収成分によって成るものとして、個々に計算した上で合成する方法で決定する。その基準化は、全吸収成分とその他の成分を実験的に得たピーク効率と全効率で基準化する方法で行われている。

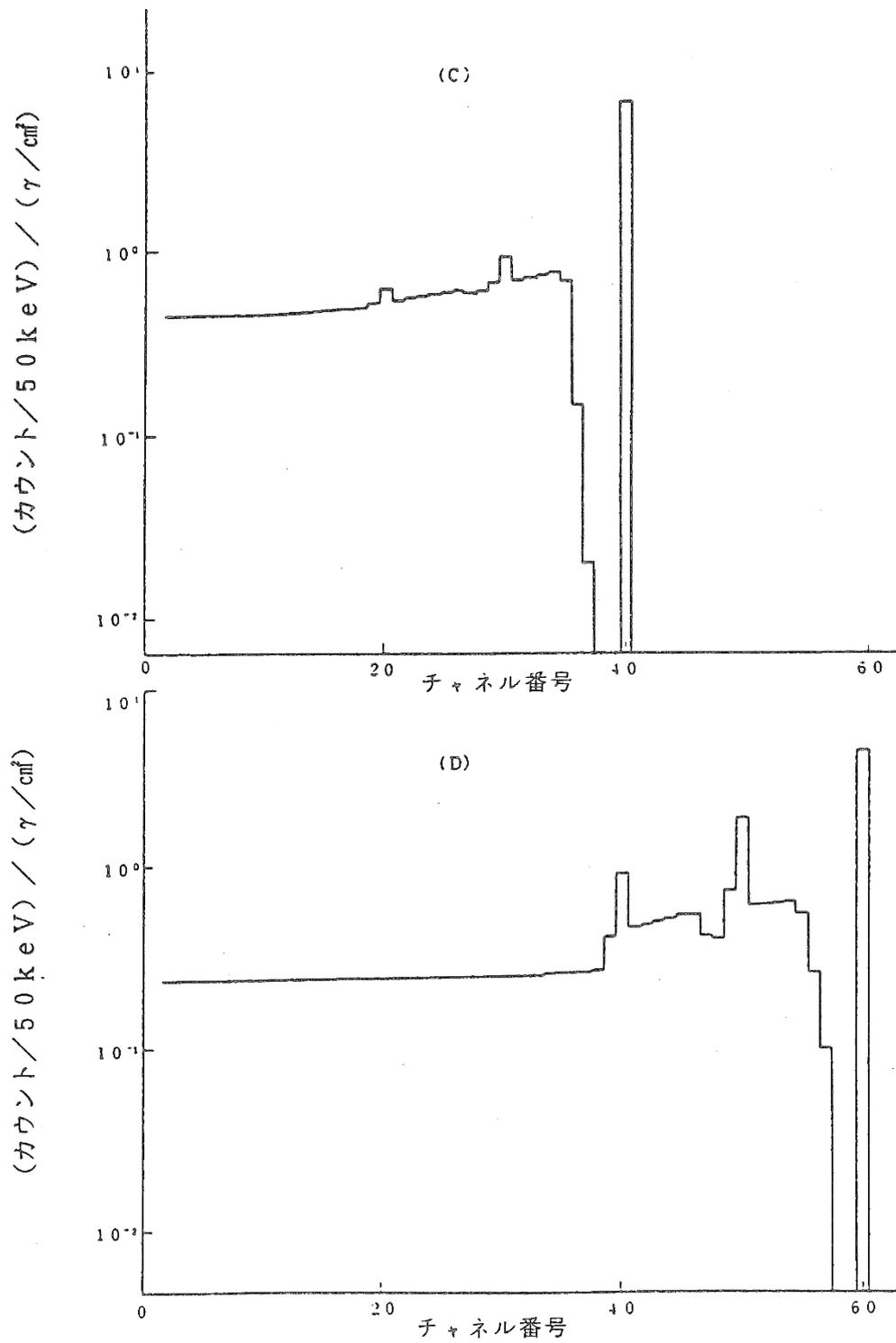
近似の概略は次のとおりである。

- ① コンプトンスペクトル分布
短形分布と指数関数による合成
- ② ヨウ素のKX線エスケープによる、スペクトル分布
ヨウ素のKX線の逃げ率を使ってエスケープを含むスペクトル合成
- ③ 消滅 γ 線によるスペクトル分布
0.51 MeVのレスポンス関数を基に確率計算で合成
- ④ 全吸収成分
これは δ 関数として、消滅 γ 線による全吸収成分も含む形で合成

上の①～④をさらに重ねることによって完全なレスポンス関数が完成する。付図3.1、付図3.2、付表3.1に実際に計算された3 in ϕ 球形NaI(Tl)検出器のレスポンス関数の例を示す。



付図 3.1 レスポンス関数の計算例



付図 3.2 レスポンス関数の計算例

付表 3.1 合成により発生させたレスポンス関数の例

(3 in ϕ 球形シンチレータ用、50 keV/bin)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENERGY ($\delta 0$)	2950 KEV - 3000 KEV									
2.3928E-01	2.3934E-01	2.3940E-01	2.3946E-01	2.3952E-01	2.3958E-01	2.3964E-01	2.3970E-01	2.3976E-01	2.4010E-01	2.4044E-01
2.4067E-01	2.4091E-01	2.4117E-01	2.4143E-01	2.4178E-01	2.4213E-01	2.4252E-01	2.4296E-01	2.4344E-01	2.4397E-01	2.4454E-01
2.4506E-01	2.4522E-01	2.4538E-01	2.4554E-01	2.4570E-01	2.4586E-01	2.4602E-01	2.4618E-01	2.4634E-01	2.4650E-01	2.4666E-01
2.4682E-01	2.4698E-01	2.4714E-01	2.4730E-01	2.4746E-01	2.4762E-01	2.4778E-01	2.4794E-01	2.4810E-01	2.4826E-01	2.4842E-01
2.4858E-01	2.4874E-01	2.4890E-01	2.4906E-01	2.4922E-01	2.4938E-01	2.4954E-01	2.4970E-01	2.4986E-01	2.5002E-01	2.5018E-01
2.5034E-01	2.5050E-01	2.5066E-01	2.5082E-01	2.5098E-01	2.5114E-01	2.5130E-01	2.5146E-01	2.5162E-01	2.5178E-01	2.5194E-01
2.5210E-01	2.5226E-01	2.5242E-01	2.5258E-01	2.5274E-01	2.5290E-01	2.5306E-01	2.5322E-01	2.5338E-01	2.5354E-01	2.5370E-01
2.5386E-01	2.5402E-01	2.5418E-01	2.5434E-01	2.5450E-01	2.5466E-01	2.5482E-01	2.5498E-01	2.5514E-01	2.5530E-01	2.5546E-01
2.5562E-01	2.5578E-01	2.5594E-01	2.5610E-01	2.5626E-01	2.5642E-01	2.5658E-01	2.5674E-01	2.5690E-01	2.5706E-01	2.5722E-01
2.5738E-01	2.5754E-01	2.5770E-01	2.5786E-01	2.5802E-01	2.5818E-01	2.5834E-01	2.5850E-01	2.5866E-01	2.5882E-01	2.5898E-01
2.5914E-01	2.5930E-01	2.5946E-01	2.5962E-01	2.5978E-01	2.5994E-01	2.6010E-01	2.6026E-01	2.6042E-01	2.6058E-01	2.6074E-01
2.6090E-01	2.6106E-01	2.6122E-01	2.6138E-01	2.6154E-01	2.6170E-01	2.6186E-01	2.6202E-01	2.6218E-01	2.6234E-01	2.6250E-01
2.6266E-01	2.6282E-01	2.6298E-01	2.6314E-01	2.6330E-01	2.6346E-01	2.6362E-01	2.6378E-01	2.6394E-01	2.6410E-01	2.6426E-01
2.6442E-01	2.6458E-01	2.6474E-01	2.6490E-01	2.6506E-01	2.6522E-01	2.6538E-01	2.6554E-01	2.6570E-01	2.6586E-01	2.6602E-01
2.6618E-01	2.6634E-01	2.6650E-01	2.6666E-01	2.6682E-01	2.6698E-01	2.6714E-01	2.6730E-01	2.6746E-01	2.6762E-01	2.6778E-01
2.6794E-01	2.6810E-01	2.6826E-01	2.6842E-01	2.6858E-01	2.6874E-01	2.6890E-01	2.6906E-01	2.6922E-01	2.6938E-01	2.6954E-01
2.6970E-01	2.6986E-01	2.6992E-01	2.7008E-01	2.7024E-01	2.7040E-01	2.7056E-01	2.7072E-01	2.7088E-01	2.7104E-01	2.7120E-01
2.7136E-01	2.7152E-01	2.7168E-01	2.7184E-01	2.7200E-01	2.7216E-01	2.7232E-01	2.7248E-01	2.7264E-01	2.7280E-01	2.7296E-01
2.7312E-01	2.7328E-01	2.7344E-01	2.7360E-01	2.7376E-01	2.7392E-01	2.7408E-01	2.7424E-01	2.7440E-01	2.7456E-01	2.7472E-01
2.7488E-01	2.7504E-01	2.7520E-01	2.7536E-01	2.7552E-01	2.7568E-01	2.7584E-01	2.7600E-01	2.7616E-01	2.7632E-01	2.7648E-01
2.7664E-01	2.7680E-01	2.7696E-01	2.7712E-01	2.7728E-01	2.7744E-01	2.7760E-01	2.7776E-01	2.7792E-01	2.7808E-01	2.7824E-01
2.7840E-01	2.7856E-01	2.7872E-01	2.7888E-01	2.7904E-01	2.7920E-01	2.7936E-01	2.7952E-01	2.7968E-01	2.7984E-01	2.7992E-01
2.8008E-01	2.8024E-01	2.8040E-01	2.8056E-01	2.8072E-01	2.8088E-01	2.8104E-01	2.8120E-01	2.8136E-01	2.8152E-01	2.8168E-01
2.8184E-01	2.8200E-01	2.8216E-01	2.8232E-01	2.8248E-01	2.8264E-01	2.8280E-01	2.8296E-01	2.8312E-01	2.8328E-01	2.8344E-01
2.8360E-01	2.8376E-01	2.8392E-01	2.8408E-01	2.8424E-01	2.8440E-01	2.8456E-01	2.8472E-01	2.8488E-01	2.8504E-01	2.8520E-01
2.8536E-01	2.8552E-01	2.8568E-01	2.8584E-01	2.8600E-01	2.8616E-01	2.8632E-01	2.8648E-01	2.8664E-01	2.8680E-01	2.8696E-01
2.8712E-01	2.8728E-01	2.8744E-01	2.8760E-01	2.8776E-01	2.8792E-01	2.8808E-01	2.8824E-01	2.8840E-01	2.8856E-01	2.8872E-01
2.8888E-01	2.8904E-01	2.8920E-01	2.8936E-01	2.8952E-01	2.8968E-01	2.8984E-01	2.8992E-01	2.9008E-01	2.9024E-01	2.9040E-01
2.9056E-01	2.9072E-01	2.9088E-01	2.9104E-01	2.9120E-01	2.9136E-01	2.9152E-01	2.9168E-01	2.9184E-01	2.9200E-01	2.9216E-01
2.9232E-01	2.9248E-01	2.9264E-01	2.9280E-01	2.9296E-01	2.9312E-01	2.9328E-01	2.9344E-01	2.9360E-01	2.9376E-01	2.9392E-01
2.9408E-01	2.9424E-01	2.9440E-01	2.9456E-01	2.9472E-01	2.9488E-01	2.9504E-01	2.9520E-01	2.9536E-01	2.9552E-01	2.9568E-01
2.9584E-01	2.9600E-01	2.9616E-01	2.9632E-01	2.9648E-01	2.9664E-01	2.9680E-01	2.9696E-01	2.9712E-01	2.9728E-01	2.9744E-01
2.9760E-01	2.9776E-01	2.9792E-01	2.9808E-01	2.9824E-01	2.9840E-01	2.9856E-01	2.9872E-01	2.9888E-01	2.9904E-01	2.9920E-01
2.9936E-01	2.9952E-01	2.9968E-01	2.9984E-01	2.9992E-01	3.0008E-01	3.0024E-01	3.0040E-01	3.0056E-01	3.0072E-01	3.0088E-01
3.0104E-01	3.0120E-01	3.0136E-01	3.0152E-01	3.0168E-01	3.0184E-01	3.0200E-01	3.0216E-01	3.0232E-01	3.0248E-01	3.0264E-01
3.0280E-01	3.0296E-01	3.0312E-01	3.0328E-01	3.0344E-01	3.0360E-01	3.0376E-01	3.0392E-01	3.0408E-01	3.0424E-01	3.0440E-01
3.0456E-01	3.0472E-01	3.0488E-01	3.0504E-01	3.0520E-01	3.0536E-01	3.0552E-01	3.0568E-01	3.0584E-01	3.0600E-01	3.0616E-01
3.0632E-01	3.0648E-01	3.0664E-01	3.0680E-01	3.0696E-01	3.0712E-01	3.0728E-01	3.0744E-01	3.0760E-01	3.0776E-01	3.0792E-01
3.0808E-01	3.0824E-01	3.0840E-01	3.0856E-01	3.0872E-01	3.0888E-01	3.0904E-01	3.0920E-01	3.0936E-01	3.0952E-01	3.0968E-01
3.0984E-01	3.0992E-01	3.1008E-01	3.1024E-01	3.1040E-01	3.1056E-01	3.1072E-01	3.1088E-01	3.1104E-01	3.1120E-01	3.1136E-01
3.1152E-01	3.1168E-01	3.1184E-01	3.1200E-01	3.1216E-01	3.1232E-01	3.1248E-01	3.1264E-01	3.1280E-01	3.1296E-01	3.1312E-01
3.1328E-01	3.1344E-01	3.1360E-01	3.1376E-01	3.1392E-01	3.1408E-01	3.1424E-01	3.1440E-01	3.1456E-01	3.1472E-01	3.1488E-01
3.1504E-01	3.1520E-01	3.1536E-01	3.1552E-01	3.1568E-01	3.1584E-01	3.1600E-01	3.1616E-01	3.1632E-01	3.1648E-01	3.1664E-01
3.1680E-01	3.1696E-01	3.1712E-01	3.1728E-01	3.1744E-01	3.1760E-01	3.1776E-01	3.1792E-01	3.1808E-01	3.1824E-01	3.1840E-01
3.1856E-01	3.1872E-01	3.1888E-01	3.1904E-01	3.1920E-01	3.1936E-01	3.1952E-01	3.1968E-01	3.1984E-01	3.1992E-01	3.2008E-01
3.2024E-01	3.2040E-01	3.2056E-01	3.2072E-01	3.2088E-01	3.2104E-01	3.2120E-01	3.2136E-01	3.2152E-01	3.2168E-01	3.2184E-01
3.2200E-01	3.2216E-01	3.2232E-01	3.2248E-01	3.2264E-01	3.2280E-01	3.2296E-01	3.2312E-01	3.2328E-01	3.2344E-01	3.2360E-01
3.2376E-01	3.2392E-01	3.2408E-01	3.2424E-01	3.2440E-01	3.2456E-01	3.2472E-01	3.2488E-01	3.2504E-01	3.2520E-01	3.2536E-01
3.2552E-01	3.2568E-01	3.2584E-01	3.2600E-01	3.2616E-01	3.2632E-01	3.2648E-01	3.2664E-01	3.2680E-01	3.2696E-01	3.2712E-01
3.2728E-01	3.2744E-01	3.2760E-01	3.2776E-01	3.2792E-01	3.2808E-01	3.2824E-01	3.2840E-01	3.2856E-01	3.2872E-01	3.2888E-01
3.2904E-01	3.2920E-01	3.2936E-01	3.2952E-01	3.2968E-01	3.2984E-01	3.2992E-01	3.3008E-01	3.3024E-01	3.3040E-01	3.3056E-01
3.3072E-01	3.3088E-01	3.3104E-01	3.3120E-01	3.3136E-01	3.3152E-01	3.3168E-01	3.3184E-01	3.3200E-01	3.3216E-01	3.3232E-01
3.3248E-01	3.3264E-01	3.3280E-01	3.3296E-01	3.3312E-01	3.3328E-01	3.3344E-01	3.3360E-01	3.3376E-01	3.3392E-01	3.3408E-01
3.3424E-01	3.3440E-01	3.3456E-01	3.3472E-01	3.3488E-01	3.3504E-01	3.3520E-01	3.3536E-01	3.3552E-01	3.3568E-01	3.3584E-01
3.3600E-01	3.3616E-01	3.3632E-01	3.3648E-01	3.3664E-01	3.3680E-01	3.3696E-01	3.3712E-01	3.3728E-01	3.3744E-01	3.3760E-01
3.3776E-01	3.3792E-01	3.3808E-01	3.3824E-01	3.3840E-01	3.3856E-01	3.3872E-01	3.3888E-01	3.3904E-01	3.3920E-01	3.3936E-01
3.3952E-01	3.3968E-01	3.3984E-01	3.3992E-01	3.4008E-01	3.4024E-01	3.4040E-01	3.4056E-01	3.4072E-01	3.4088E-01	3.4104E-01
3.4120E-01	3.4136E-01	3.4152E-01	3.4168E-01	3.4184E-01	3.4200E-01	3.4216E-01	3.4232E-01	3.4248E-01	3.4264E-01	3.4280E-01
3.4296E-01	3.4312E-01	3.4328E-01	3.4344E-01	3.4360E-01	3.4376E-01	3.4392E-01	3.4408E-01	3.4424E-01	3.4440E-01	3.4456E-01
3.4472E-01	3.4488E-01	3.4504E-01	3.4520E-01	3.4536E-01	3.4552E-01	3.4568E-01	3.4584E-01	3.4600E-01	3.4616E-01	3.4632E-01
3.4648E-01	3.4664E-01	3.4680E-01	3.4696E-01	3.4712E-01	3.4728E-01	3.4744E-01	3.4760E-01	3.4776E-01	3.4792E-01	3.4808E-01
3.4824E-01	3.4840E-01	3.4856E-01	3.4872E-01	3.4888E-01	3.4904E-01	3.4920E-01	3.4936E-01	3.4952E-01	3.4968E-01	3.4984E-01
3.4992E-01	3.5008E-01	3.5024E-01	3.5040E-01	3.5056E-01	3.5072E-01	3.5088E-01	3.5104E-01	3.5120E-01	3.5136E-01	3.5152E-01
3.5168E-01	3.5184E-01	3.5200E-01	3.5216E-01	3.5232E-01	3.5248E-01	3.5264E-01	3.5280E-01	3.5296E-01	3.5312E-01	3.5328E-01
3.5344E-01	3.5360E-01	3.5376E-01	3.5392E-01	3.5408E-01	3.5424E-01	3.5440E-01	3.5456E-01	3.5472E-01	3.5488E-01	3.5504E-01
3.5520E-01	3.5536E-01	3.5552E-01	3.5568E-01	3.5584E-01	3.5600E-01	3.5616E-01	3.5632E-01	3.5648E-01	3.5664E-01	3.5680E-01
3.5696										

ENERGY (55) 2700 KEV - 2750 KEV
2.7337E-01 2.7353E-01 2.7370E-01 2.7390E-01 2.7412E-01 2.7436E-01 2.7463E-01 2.7492E-01 2.7525E-01 2.7561E-01
2.7601E-01 2.7646E-01 2.7695E-01 2.7750E-01 2.7811E-01 2.7878E-01 2.7952E-01 2.8035E-01 2.8126E-01 2.8227E-01
2.8339E-01 2.8463E-01 2.8601E-01 2.8753E-01 2.8922E-01 2.9109E-01 2.9316E-01 2.9546E-01 2.9801E-01 3.0082E-01
3.0392E-01 3.0741E-01 3.1124E-01 3.1541E-01 3.1992E-01 3.2478E-01 3.3000E-01 3.3560E-01 3.4209E-01 3.4948E-01
4.5716E-01 4.6556E-01 4.7403E-01 4.8264E+00 4.9141E+00 5.0035E+00 5.0946E+00 5.1878E+00 5.2831E+00 5.3805E+00
2.2261E-01 5.1715E-02 0.0 4.9563E+00

ENERGY (54) 2650 KEV - 2700 KEV
2.8026E-01 2.8044E-01 2.8064E-01 2.8086E-01 2.8111E-01 2.8138E-01 2.8169E-01 2.8202E-01 2.8239E-01 2.8281E-01
2.8326E-01 2.8377E-01 2.8433E-01 2.8495E-01 2.8563E-01 2.8636E-01 2.8714E-01 2.8817E-01 2.8921E-01 2.9036E-01
2.9163E-01 2.9303E-01 2.9459E-01 2.9632E-01 2.9824E-01 3.0036E-01 3.0271E-01 3.0532E-01 3.0820E-01 3.1140E-01
3.1494E-01 3.1886E-01 3.2318E-01 3.2794E-01 3.3316E-01 3.3886E-01 3.4507E-01 3.5181E-01 3.5912E-01 3.6705E-01
4.5116E-01 4.6888E-01 1.0043E+00 1.4176E+00 4.6816E-01 6.5412E-01 6.6409E-01 6.8208E-01 5.8144E-01 2.1304E-01
4.9378E-02 0.0 5.0434E+00

ENERGY (53) 2600 KEV - 2650 KEV
2.9194E-01 2.9238E-01 2.9284E-01 2.9332E-01 2.9382E-01 2.9434E-01 2.9488E-01 2.9545E-01 2.9605E-01 2.9668E-01
2.9734E-01 2.9803E-01 2.9876E-01 2.9952E-01 3.0031E-01 3.0112E-01 3.0195E-01 3.0282E-01 3.0372E-01 3.0465E-01
3.0564E-01 3.0664E-01 3.0768E-01 3.0876E-01 3.1045E-01 3.1266E-01 3.1511E-01 3.1782E-01 3.2082E-01 3.2414E-01
3.2791E-01 3.3191E-01 3.3614E-01 3.4061E-01 3.4534E-01 3.5034E-01 3.5564E-01 3.6124E-01 3.6714E-01 3.7334E-01
4.6007E-01 9.9051E-01 1.3058E+00 6.5317E-01 6.6220E-01 6.7331E-01 6.9223E-01 5.8636E-01 2.0543E-01 4.6990E-02
0.0 5.1177E+00

ENERGY (52) 2550 KEV - 2600 KEV
2.9869E-01 2.9892E-01 2.9919E-01 2.9948E-01 2.9980E-01 3.0014E-01 3.0052E-01 3.0092E-01 3.0147E-01 3.0201E-01
3.0262E-01 3.0328E-01 3.0399E-01 3.0480E-01 3.0570E-01 3.0669E-01 3.0779E-01 3.0901E-01 3.1036E-01 3.1184E-01
3.1352E-01 3.1533E-01 3.1739E-01 3.1964E-01 3.2214E-01 3.2491E-01 3.2798E-01 3.3138E-01 3.3514E-01 3.3931E-01
3.4404E-01 3.4911E-01 3.5451E-01 3.6024E-01 3.6631E-01 3.7274E-01 3.7954E-01 3.8672E-01 4.0317E-01 4.6628E-01
9.4900E-01 1.3456E+00 6.5230E-01 6.6213E-01 6.7407E-01 6.9355E-01 1.9548E-01 5.5778E-01 4.6833E-01 4.6628E-01
0.0 5.2039E+00

ENERGY (51) 2500 KEV - 2550 KEV
3.0715E-01 3.0748E-01 3.0771E-01 3.0804E-01 3.0841E-01 3.0882E-01 3.0926E-01 3.0976E-01 3.1031E-01 3.1092E-01
3.1160E-01 3.1235E-01 3.1318E-01 3.1410E-01 3.1512E-01 3.1625E-01 3.1750E-01 3.1889E-01 3.2043E-01 3.2213E-01
3.2402E-01 3.2611E-01 3.2842E-01 3.3099E-01 3.3383E-01 3.3698E-01 3.4047E-01 3.4433E-01 3.4861E-01 3.5409E-01
7.4343E-01 4.9664E-01 5.1275E-01 5.2909E-01 5.4688E-01 5.6732E-01 5.5735E-01 4.7577E-01 4.2776E-01 9.4930E-01
1.3069E+00 6.5379E-01 6.6453E-01 6.7741E-01 6.9370E-01 1.8601E-01 4.2067E-02 0.0 0.0
5.2922E+00

ENERGY (50) 2450 KEV - 2500 KEV
.....

.....
3.1753E-01 3.1878E-01 3.1955E-01 3.1897E-01 3.1943E-01 3.1995E-01 3.2052E-01 3.2115E-01 3.2186E-01
3.2262E-01 3.2367E-01 3.2548E-01 3.2646E-01 3.2793E-01 3.2936E-01 3.3095E-01 3.3270E-01 3.3465E-01
3.3681E-01 3.3919E-01 3.4306E-01 3.4802E-01 3.5422E-01 3.5581E-01 3.6003E-01 3.6552E-01 7.3177E-01
5.0043E-01 5.1615E-01 5.3290E-01 5.5080E-01 5.6975E-01 5.6177E-01 4.8596E-01 4.8573E-01 9.3166E+00
6.5786E-01 6.6961E-01 6.8356E-01 7.0454E-01 5.8986E-01 1.7796E-01 3.9536E-02 0.0 5.3023E+00

.....
ENERGY (49) 2400 KEV - 2450 KEV
.....
3.2060E-01 3.2896E-01 3.2935E-01 3.2978E-01 3.3026E-01 3.3078E-01 3.3132E-01 3.3202E-01 3.3275E-01 3.3355E-01
3.3435E-01 3.3541E-01 3.3650E-01 3.3770E-01 3.3904E-01 3.4051E-01 3.4215E-01 3.4397E-01 3.4596E-01 3.4820E-01
3.5087E-01 3.5340E-01 3.5638E-01 3.5979E-01 3.6351E-01 3.6763E-01 3.7219E-01 3.7819E-01 5.4552E-01 7.5042E-01
5.2021E-01 5.3658E-01 5.7440E-01 5.7289E-01 4.9625E-01 4.9761E-01 4.9761E-01 9.1447E-01 1.2332E+00 6.6281E-01
6.5763E-01 6.9069E-01 7.1254E-01 5.9411E-01 1.6746E-01 3.6961E-02 0.0 0.0 5.4746E+00

.....
ENERGY (48) 2350 KEV - 2400 KEV
.....
3.4254E-01 3.4294E-01 3.4339E-01 3.4389E-01 3.4444E-01 3.4504E-01 3.4573E-01 3.4646E-01 3.4731E-01 3.4824E-01
3.4926E-01 3.5039E-01 3.5164E-01 3.5303E-01 3.5457E-01 3.5627E-01 3.5814E-01 3.6025E-01 3.6257E-01 3.6514E-01
3.6798E-01 3.7113E-01 3.7483E-01 3.7850E-01 3.8278E-01 3.8763E-01 3.9315E-01 3.9945E-01 4.0657E-01 5.2751E-01
4.6354E-01 5.6077E-01 5.7926E-01 5.7583E-01 5.4065E-01 5.1334E-01 5.0083E-01 1.1997E+00 6.7190E-01 6.8596E-01
7.0233E-01 7.2526E-01 5.9994E-01 1.5751E-01 3.4345E-02 0.0 0.0 5.5719E+00

.....
ENERGY (47) 2300 KEV - 2350 KEV
.....
3.5510E-01 3.5566E-01 3.5617E-01 3.5675E-01 3.5738E-01 3.5806E-01 3.5885E-01 3.5972E-01 3.6067E-01 3.6172E-01
3.6289E-01 3.6419E-01 3.6563E-01 3.6722E-01 3.6898E-01 3.7093E-01 3.7310E-01 3.7550E-01 3.7815E-01 3.8109E-01
3.8435E-01 3.8797E-01 3.9197E-01 3.9640E-01 4.0132E-01 4.0666E-01 4.1252E-01 4.1939E-01 4.2728E-01 5.4870E-01
5.8554E-01 5.8368E-01 5.7995E-01 5.2310E-01 5.2707E-01 8.8472E-01 1.1634E+00 6.7864E-01 6.9385E-01 7.1143E-01
7.3532E-01 6.0697E-01 1.4806E-01 3.1892E-02 0.0 0.0 5.6750E+00

.....
ENERGY (46) 2250 KEV - 2300 KEV
.....
3.6377E-01 3.6430E-01 3.6488E-01 3.6553E-01 3.6624E-01 3.6701E-01 3.6791E-01 3.6892E-01 3.6997E-01 3.7116E-01
3.7249E-01 3.7395E-01 3.7558E-01 3.7738E-01 3.7936E-01 3.8159E-01 3.8404E-01 3.8675E-01 3.8976E-01 3.9309E-01
3.9678E-01 4.0087E-01 4.0540E-01 4.1042E-01 4.1597E-01 4.2212E-01 4.2887E-01 4.3615E-01 4.4404E-01 5.6502E-01
5.8267E-01 5.8054E-01 5.2994E-01 5.3504E-01 8.6234E-01 1.1204E+00 6.7893E-01 6.9504E-01 7.1361E-01 7.3817E-01
6.8667E-01 1.9133E-01 2.9007E-02 0.0 0.0 5.7892E+00

.....
ENERGY (45) 2200 KEV - 2250 KEV
.....
3.7869E-01 3.7930E-01 3.7997E-01 3.8071E-01 3.8154E-01 3.8245E-01 3.8346E-01 3.8456E-01 3.8582E-01 3.8720E-01
3.8872E-01 3.9041E-01 3.9228E-01 3.9436E-01 3.9665E-01 3.9920E-01 4.0202E-01 4.0514E-01 4.0860E-01 4.1243E-01
4.1668E-01 4.2139E-01 4.2680E-01 4.3292E-01 4.3972E-01 4.4728E-01 4.5561E-01 4.6468E-01 4.7451E-01 5.8957E-01
5.8923E-01 5.4517E-01 5.5165E-01 8.4859E-01 1.0840E+00 6.8867E-01 7.0609E-01 7.2600E-01 7.5168E-01 6.9750E-01
1.8287E-01 2.6294E-02 0.0 0.0 5.9009E+00

ENERGY (44) 2150 KEV - 2200 KEV

3.8920E-01 3.8989E-01 3.9065E-01 3.9149E-01 3.9243E-01 3.9347E-01 3.9461E-01 3.9589E-01 3.9730E-01 3.9886E-01
4.0059E-01 4.0251E-01 4.0463E-01 4.0699E-01 4.0960E-01 4.1249E-01 4.1569E-01 4.1924E-01 4.2317E-01 4.2752E-01
4.3235E-01 4.3769E-01 4.4379E-01 4.5000E-01 4.5640E-01 4.6303E-01 4.6983E-01 4.7683E-01 4.8408E-01 4.9166E-01
5.5432E-01 5.6201E-01 5.7018E-01 5.7882E-01 5.8797E-01 5.9764E-01 6.0787E-01 6.1869E-01 6.2999E-01 6.4179E-01
2.3559E-02 0.0 6.0248E+00

ENERGY (43) 2100 KEV - 2150 KEV

4.0907E-01 4.0987E-01 4.1073E-01 4.1173E-01 4.1282E-01 4.1402E-01 4.1536E-01 4.1683E-01 4.1842E-01 4.2026E-01
4.2229E-01 4.2452E-01 4.2699E-01 4.2972E-01 4.3275E-01 4.3610E-01 4.3982E-01 4.4393E-01 4.4850E-01 4.5355E-01
4.5915E-01 4.6548E-01 4.7268E-01 4.8088E-01 4.9013E-01 5.0048E-01 5.1202E-01 5.2480E-01 5.3887E-01 5.5428E-01
5.8497E-01 6.0268E-01 6.2208E-01 6.4333E+00 6.6661E+00 6.9177E-01 7.1992E-01 7.5091E-01 7.8482E-01 8.2161E-01
0.0 0.0 6.1422E+00

ENERGY (42) 2050 KEV - 2100 KEV

4.2234E-01 4.2325E-01 4.2426E-01 4.2538E-01 4.2662E-01 4.2799E-01 4.2951E-01 4.3120E-01 4.3306E-01 4.3513E-01
4.3742E-01 4.3996E-01 4.4277E-01 4.4589E-01 4.4934E-01 4.5317E-01 4.5741E-01 4.6210E-01 4.6770E-01 4.7330E-01
5.7965E-01 5.8958E-01 5.9965E-01 6.1000E-01 6.2078E-01 6.3203E-01 6.4378E-01 6.5607E-01 6.6894E-01 6.8242E-01
8.0367E-01 8.1784E-01 8.3268E-01 8.4824E-01 8.6446E-01 8.8138E-01 9.0000E-01 9.2038E-01 9.4258E-01 9.6664E-01
0.0 0.0 6.2761E+00

ENERGY (41) 2000 KEV - 2050 KEV

4.3644E-01 4.3750E-01 4.3865E-01 4.3993E-01 4.4134E-01 4.4289E-01 4.4458E-01 4.4642E-01 4.4842E-01 4.5058E-01
4.5291E-01 4.5545E-01 4.5819E-01 4.6114E-01 4.6430E-01 4.6768E-01 4.7129E-01 4.7514E-01 4.7924E-01 4.8360E-01
4.8822E-01 4.9304E-01 4.9812E-01 5.0348E-01 5.0914E-01 5.1511E-01 5.2140E-01 5.2802E-01 5.3498E-01 5.4229E-01
9.4100E-01 9.5033E-01 9.6000E-01 9.7014E-01 9.8078E-01 9.9194E-01 1.0088E-01 1.0161E-01 1.0214E-01 1.0248E-01
6.4158E+00

ENERGY (40) 1950 KEV - 2000 KEV

4.5415E-01 4.5534E-01 4.5667E-01 4.5813E-01 4.5975E-01 4.6153E-01 4.6356E-01 4.6584E-01 4.6828E-01 4.7091E-01
4.7374E-01 4.7678E-01 4.8002E-01 4.8348E-01 4.8716E-01 4.9108E-01 4.9526E-01 4.9970E-01 5.0442E-01 5.0943E-01
5.1475E-01 5.2038E-01 5.2732E-01 5.3458E-01 5.4218E-01 5.5014E-01 5.5848E-01 5.6720E-01 5.7632E-01 5.8576E-01
7.3468E-01 7.5045E-01 7.6504E-01 7.8019E-01 7.9584E-01 8.1200E-01 8.2870E-01 8.4598E-01 8.6438E-01 8.8394E-01
6.4158E+00

ENERGY (39) 1900 KEV - 1950 KEV

4.6735E-01 4.6870E-01 4.7021E-01 4.7187E-01 4.7371E-01 4.7576E-01 4.7802E-01 4.8053E-01 4.8331E-01 4.8639E-01
4.8980E-01 4.9358E-01 4.9774E-01 5.0240E-01 5.0754E-01 5.1324E-01 5.1955E-01 5.2648E-01 5.3405E-01 5.4228E-01
5.5120E-01 5.6033E-01 5.7048E-01 5.8178E-01 5.9424E-01 6.0798E-01 6.2302E-01 6.3948E-01 6.5738E-01 6.7674E-01
7.4574E-01 7.6326E-01 7.8022E-01 7.9868E-01 8.1868E-01 8.4028E-01 8.6364E-01 8.8890E-01 9.1620E-01 9.4568E-01
6.4158E+00

ENERGY (38) 1850 KEV - 1900 KEV

4.8545E-01 4.8701E-01 4.8873E-01 4.9063E-01 4.9275E-01 4.9509E-01 4.9768E-01 5.0059E-01 5.0373E-01 5.0726E-01
5.1117E-01 5.1550E-01 5.2029E-01 5.2561E-01 5.3149E-01 5.3801E-01 5.4533E-01 5.5346E-01 5.6241E-01 5.7218E-01
6.0656E-01 6.2024E-01 6.3529E-01 6.4741E-01 6.4909E-01 6.4514E-01 7.4976E-01 8.4054E-01 7.5364E-01 7.7969E-01
8.0894E-01 8.4233E-01 7.7376E-01 1.3005E-01 7.1802E-03 0.0 0.0 6.8747E+00

ENERGY (37) 1800 KEV - 1850 KEV

5.0561E-01 5.0739E-01 5.0937E-01 5.1154E-01 5.1398E-01 5.1676E-01 5.1945E-01 5.2295E-01 5.2666E-01 5.3066E-01
5.3515E-01 5.4012E-01 5.4533E-01 5.5174E-01 5.5850E-01 5.6074E-01 5.6074E-01 5.9586E-01 6.0696E-01 6.1918E-01
6.3267E-01 6.4734E-01 6.6148E-01 6.6934E-01 6.6707E-01 7.4333E-01 8.1391E-01 7.6939E-01 7.9712E-01 8.2792E-01
8.6257E-01 7.8979E-01 1.2279E-01 4.5874E-03 0.0 0.0 7.0394E+00

ENERGY (36) 1750 KEV - 1800 KEV

5.2398E-01 5.2601E-01 5.2827E-01 5.3077E-01 5.3364E-01 5.3681E-01 5.4001E-01 5.4378E-01 5.4796E-01 5.5258E-01
5.5771E-01 5.6339E-01 5.6968E-01 5.7665E-01 5.8373E-01 6.0853E-01 6.0676E-01 6.1738E-01 6.2935E-01 6.4278E-01
6.5742E-01 6.7307E-01 6.8785E-01 7.0614E-01 7.3475E-01 7.8572E-01 7.8572E-01 8.1144E-01 8.4364E-01 8.7947E-01
8.0750E-01 1.1721E-01 2.0316E-03 0.0 0.0 7.2172E+00

ENERGY (35) 1700 KEV - 1750 KEV

5.2883E-01 5.3110E-01 5.3361E-01 5.3639E-01 5.3948E-01 5.4289E-01 5.4668E-01 5.5087E-01 5.5531E-01 5.6066E-01
5.6636E-01 5.7268E-01 5.7968E-01 5.8743E-01 5.9602E-01 6.0554E-01 6.1609E-01 6.2777E-01 6.4072E-01 6.5506E-01
6.7096E-01 6.8856E-01 7.0807E-01 7.2968E-01 7.5363E-01 7.8016E-01 8.0935E-01 8.4242E-01 8.7820E-01 8.0356E-01
1.1127E-01 0.0 0.0 7.4187E+00

ENERGY (34) 1650 KEV - 1700 KEV

5.4467E-01 5.4724E-01 5.5009E-01 5.5323E-01 5.5674E-01 5.6042E-01 5.6491E-01 5.6946E-01 5.7493E-01 5.8077E-01
5.8724E-01 5.9440E-01 6.0234E-01 6.1114E-01 6.2089E-01 6.3168E-01 6.4352E-01 6.5609E-01 6.7159E-01 6.8786E-01
7.0588E-01 7.2585E-01 7.4798E-01 7.7250E-01 7.9966E-01 8.2973E-01 8.6309E-01 9.0004E-01 8.2301E-01 1.1478E-01
0.0 0.0 0.0 7.6314E+00

ENERGY (33) 1600 KEV - 1650 KEV

5.7140E-01 5.7437E-01 5.7766E-01 5.8130E-01 5.8533E-01 5.8982E-01 5.9477E-01 6.0026E-01 6.0633E-01 6.1309E-01
6.2056E-01 6.2883E-01 6.3800E-01 6.4816E-01 6.5941E-01 6.7188E-01 6.8549E-01 7.0109E-01 7.1796E-01 7.3675E-01
7.5756E-01 7.8063E-01 8.0618E-01 8.3449E-01 8.6585E-01 9.0060E-01 9.3911E-01 8.5969E-01 1.1918E-01 0.0
0.0 0.0 7.8017E+00

ENERGY (32) 1550 KEV - 1600 KEV

```

.....
5.8507E-01 5.8841E-01 5.9212E-01 5.9622E-01 6.0077E-01 6.0581E-01 6.1139E-01 6.1758E-01 6.2443E-01 6.3203E-01
6.4044E-01 6.4976E-01 6.6009E-01 6.7153E-01 6.8421E-01 6.9825E-01 7.1382E-01 7.3108E-01 7.5016E-01 7.7132E-01
7.9477E-01 8.2075E-01 8.4953E-01 8.8142E-01 9.1676E-01 9.5590E-01 9.9770E-01 1.0418E-01 1.0888E-01 0.0
8.0219E+00
.....
ENERGY ( 31 ) 1500 KEV - 1550 KEV
.....
6.0178E-01 6.0556E-01 6.0975E-01 6.1439E-01 6.1953E-01 6.2523E-01 6.3144E-01 6.3854E-01 6.4629E-01 6.5487E-01
6.6438E-01 6.7492E-01 6.8660E-01 6.9953E-01 7.1389E-01 7.2975E-01 7.4714E-01 7.6683E-01 7.8863E-01 8.1256E-01
8.3887E-01 8.6824E-01 9.0078E-01 9.3664E-01 9.7678E-01 9.7901E-01 2.5249E+01 0.0 0.0
8.2509E+00
.....
ENERGY ( 30 ) 1450 KEV - 1500 KEV
.....
6.1861E-01 6.2288E-01 6.2762E-01 6.3286E-01 6.3867E-01 6.4511E-01 6.5224E-01 6.6014E-01 6.6890E-01 6.7860E-01
6.8935E-01 7.0125E-01 7.1445E-01 7.2906E-01 7.4524E-01 7.6320E-01 7.8308E-01 8.0510E-01 8.2950E-01 8.5644E-01
8.8649E-01 9.1966E-01 9.5645E-01 9.9719E-01 9.9891E-01 2.5440E+01 0.0 0.0
8.4957E+00
.....
ENERGY ( 29 ) 1400 KEV - 1450 KEV
.....
6.4807E-01 6.5298E-01 6.5843E-01 6.6446E-01 6.7113E-01 6.7856E-01 6.8676E-01 6.9583E-01 7.0593E-01 7.1709E-01
7.2943E-01 7.4313E-01 7.5833E-01 7.7514E-01 7.9378E-01 8.1442E-01 8.3739E-01 8.6263E-01 8.9070E-01 9.2181E-01
9.5627E-01 9.9445E-01 1.0368E+00 1.0379E+00 2.6288E+01 0.0 0.0
8.7407E+00
.....
ENERGY ( 28 ) 1350 KEV - 1400 KEV
.....
6.4113E-01 6.4765E-01 6.5489E-01 6.6290E-01 6.7179E-01 6.8162E-01 6.9252E-01 7.0440E-01 7.1728E-01 7.3201E-01
7.4923E-01 7.6743E-01 7.8740E-01 8.0924E-01 8.3409E-01 8.6211E-01 8.9249E-01 9.2615E-01 9.6345E-01 1.0048E+00
1.0505E+00 1.1013E+00 1.1088E+00 2.8075E+01 0.0 0.0
9.0163E+00
.....
ENERGY ( 27 ) 1300 KEV - 1350 KEV
.....
6.7226E-01 6.8213E-01 6.8976E-01 6.9820E-01 7.0755E-01 7.1791E-01 7.2939E-01 7.4211E-01 7.5621E-01 7.7182E-01
7.8912E-01 8.0829E-01 8.2953E-01 8.5306E-01 8.7912E-01 9.0801E-01 9.4001E-01 9.7546E-01 1.0147E+00 1.0583E+00
1.1065E+00 1.1118E+00 2.8505E+01 0.0 0.0
9.3084E+00
.....
ENERGY ( 26 ) 1250 KEV - 1300 KEV
.....
7.1313E-01 7.2040E-01 7.2844E-01 7.3736E-01 7.4724E-01 7.5818E-01 7.7031E-01 7.8374E-01 7.9862E-01 8.1511E-01
8.3338E-01 8.5333E-01 8.7605E-01 9.0090E-01 9.2843E-01 9.5894E-01 9.9273E-01 1.0302E+00 1.0717E+00 1.1176E+00
1.1194E+00 2.6681E+01 0.0 0.0
9.6195E+00
.....

```

ENERGY (25) 1200 KEV - 1250 KEV
7.5403E-01 7.6374E-01 7.7227E-01 7.8172E-01 7.9219E-01 8.0379E-01 8.1665E-01 8.3089E-01 8.4667E-01 8.6415E-01
8.8352E-01 9.0498E-01 9.2878E-01 9.5510E-01 9.8429E-01 1.0166E+00 1.0525E+00 1.0921E+00 1.1361E+00 1.1866E+00
2.8872E-01 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

ENERGY (24) 1150 KEV - 1200 KEV
8.0108E-01 8.0923E-01 8.1827E-01 8.2829E-01 8.3938E-01 8.5188E-01 8.6530E-01 8.8039E-01 8.9711E-01 9.1583E-01
9.3616E-01 9.5890E-01 9.8409E-01 1.0120E+00 1.0429E+00 1.0772E+00 1.1152E+00 1.1572E+00 1.2038E+00 3.9091E-01
0.0 0.0 0.0 0.0 1.0310E+01

ENERGY (23) 1100 KEV - 1150 KEV
8.7502E-01 8.8394E-01 8.9381E-01 9.0475E-01 9.1687E-01 9.3030E-01 9.4517E-01 9.6166E-01 9.7992E-01 1.0002E+00
1.0226E+00 1.0474E+00 1.0749E+00 1.1054E+00 1.1392E+00 1.1766E+00 1.2181E+00 1.2640E+00 5.1618E-01 0.0
0.0 0.0 0.0 1.0674E+01

ENERGY (22) 1050 KEV - 1100 KEV
9.1611E-01 9.2544E-01 9.3578E-01 9.4723E-01 9.5992E-01 9.7398E-01 9.8958E-01 1.0068E+00 1.0259E+00 1.0471E+00
1.0704E+00 1.0966E+00 1.1254E+00 1.1573E+00 1.1927E+00 1.2319E+00 1.2753E+00 5.1635E-01 0.0 0.0
0.0 1.1115E+01

ENERGY (21) 1000 KEV - 1050 KEV
9.8586E-01 9.9590E-01 1.0070E+00 1.0194E+00 1.0330E+00 1.0481E+00 1.0649E+00 1.0835E+00 1.1040E+00 1.1268E+00
1.1521E+00 1.1801E+00 1.2111E+00 1.2454E+00 1.2835E+00 1.3257E+00 5.3825E-01 0.0 0.0
1.1577E+01

ENERGY (20) 950 KEV - 1000 KEV
1.0598E+00 1.0708E+00 1.0824E+00 1.0958E+00 1.1105E+00 1.1268E+00 1.1448E+00 1.1648E+00 1.1869E+00 1.2114E+00
1.2385E+00 1.2686E+00 1.3020E+00 1.3389E+00 1.3798E+00 5.5082E-01 0.0 0.0 0.0 1.2097E+01

ENERGY (19) 900 KEV - 950 KEV
1.1364E+00 1.1462E+00 1.1590E+00 1.1732E+00 1.1889E+00 1.2063E+00 1.2258E+00 1.2470E+00 1.2707E+00 1.2969E+00
1.3260E+00 1.3582E+00 1.3939E+00 1.4334E+00 6.9931E-01 0.0 0.0 0.0 0.0 1.2693E+01

```

ENERGY ( 18 ) 850 KEV - 900 KEV
.....
1.1879E+00 1.2000E+00 1.2134E+00 1.2282E+00 1.2447E+00 1.2629E+00 1.2831E+00 1.3055E+00 1.3303E+00 1.3578E+00
1.3882E+00 1.4219E+00 1.4593E+00 8.8039E-01 0.0 0.0 1.2629E+00 1.2831E+00 1.3055E+00 1.3303E+00 1.3578E+00
1.3882E+00 1.4219E+00 1.4593E+00 8.8039E-01 0.0 0.0 1.2629E+00 1.2831E+00 1.3055E+00 1.3303E+00 1.3578E+00
.....
ENERGY ( 17 ) 800 KEV - 850 KEV
.....
1.2782E+00 1.2912E+00 1.3056E+00 1.3214E+00 1.3393E+00 1.3589E+00 1.3807E+00 1.4047E+00 1.4314E+00 1.4610E+00
1.4937E+00 1.5300E+00 9.2927E-01 0.0 0.0 0.0 1.4289E+01
.....
ENERGY ( 16 ) 750 KEV - 800 KEV
.....
1.3822E+00 1.3963E+00 1.4119E+00 1.4291E+00 1.4483E+00 1.4695E+00 1.4930E+00 1.5190E+00 1.5479E+00 1.5799E+00
1.6153E+00 9.7867E-01 0.0 0.0 0.0 1.5160E+01
.....
ENERGY ( 15 ) 700 KEV - 750 KEV
.....
1.5022E+00 1.5173E+00 1.5345E+00 1.5533E+00 1.5741E+00 1.5971E+00 1.6227E+00 1.6510E+00 1.6823E+00 1.7170E+00
1.7220E+00 0.0 0.0 0.0 1.6135E+01
.....
ENERGY ( 14 ) 650 KEV - 700 KEV
.....
1.6406E+00 1.6573E+00 1.6758E+00 1.6963E+00 1.7190E+00 1.7442E+00 1.7721E+00 1.8030E+00 1.8372E+00 1.4114E+00
7.3298E-02 0.0 0.0 1.7245E+01
.....
ENERGY ( 13 ) 600 KEV - 650 KEV
.....
1.8002E+00 1.8185E+00 1.8380E+00 1.8614E+00 1.8883E+00 1.9139E+00 1.9445E+00 1.9784E+00 1.6009E+00 7.8516E-02
0.0 0.0 1.8509E+01
.....
ENERGY ( 12 ) 550 KEV - 600 KEV
.....
1.9827E+00 2.0029E+00 2.0253E+00 2.0501E+00 2.0775E+00 2.1080E+00 2.1417E+00 1.9072E+00 2.5606E-01 0.0
0.0 1.9989E+01
.....
ENERGY ( 11 ) 500 KEV - 550 KEV
.....
2.1882E+00 2.2105E+00 2.2351E+00 2.2625E+00 2.2928E+00 2.3264E+00 2.1677E+00 2.7753E-01 0.0 0.0
2.1675E+01

```

ENERGY (10) 450 KEV - 300 KEV
2.4109E+00 2.4355E+00 2.4627E+00 2.4928E+00 2.5267E+00 2.4562E+00 6.0662E-01 0.0 0.0 2.3703E+01

ENERGY (9) 400 KEV - 450 KEV
2.6449E+00 2.6718E+00 2.7017E+00 2.7347E+00 2.7714E+00 8.8260E-01 0.0 0.0 2.6046E+01

ENERGY (8) 350 KEV - 400 KEV
2.8657E+00 2.8949E+00 2.9273E+00 2.9631E+00 1.3043E+00 0.0 0.0 2.8742E+01

ENERGY (7) 300 KEV - 350 KEV
3.0209E+00 3.0517E+00 3.0838E+00 1.9885E+00 0.0 0.0 3.1808E+01

ENERGY (6) 250 KEV - 300 KEV
3.0287E+00 3.0596E+00 2.4769E+00 1.2430E-01 0.0 3.5062E+01

ENERGY (5) 200 KEV - 250 KEV
2.7496E+00 2.6739E+00 4.6531E-01 0.0 3.8185E+01

ENERGY (4) 150 KEV - 200 KEV
2.0801E+00 8.7951E-01 3.5847E-01 4.0634E+01

ENERGY (3) 100 KEV - 150 KEV
7.1101E-01 1.1478E+00 4.3048E+01

ENERGY (2) 50 KEV - 100 KEV
4.5812E+00 4.1723E+01

付録4 参考文献

- (1) JIS Z4001 : 1999 原子力用語
- (2) JIS Z8103 : 2000 計測用語
- (3) Radiation protection instrumentation - Transportable, mobile or installed equipment to measure photon radiation for environmental monitoring IEC 61017 Ed. 1.0:2016(b)
- (4) 「簡易型電子線量計に係る仕様の考え方」原子力規制庁 監視情報課
- (5) 「福島環境におけるモニタリングカー車内外空間線量率換算手法の検討」柴道勝、下村遼平、武石稔、三枝純：日本放射線安全管理学会 第14回学術大会 (2015)
- (6) 「GPS連動型放射線自動計測システム KURAMA」
京都大学原子炉実験所 福島原子力災害対策支援グループホームページ
<http://www.rrri.kyoto-u.ac.jp/kurama/>
- (7) 「環境放射線モニタリング指針」原子力安全委員会 (2008)
- (8) 「緊急時モニタリングについて (原子力災害対策指針補足参考資料)」
原子力規制庁監視情報課 (2015)
- (9) 「G(E)関数法」長岡鋭：日本分析センター広報 No. 32 (1998)
- (10) 「実効線量当量単位に対応したNaI(Tl)シンチレーション検出器のG(E)関数 (スペクトルー線量変換演算子) の決定」堤正博、齋藤公明、森内茂：JAERI-M 91-204 (1991)
- (11) 「シンチレーション発光のパルス波形測定」八木秀之、伊藤浩、浅野芳裕、臼田重和：JAETRI-Tech 98-043 (1998)
- (12) 「光電子増倍管と関連製品」浜松ホトニクス株式会社
- (13) 「MPPC データシート」浜松ホトニクス株式会社
- (14) 「走行サーベイシステム KURAMA II を用いた測定の基盤整備と実測への適用」津田修一、吉田忠義、中原由紀夫、佐藤哲朗、関暁之、松田規宏、安藤真樹、武宮博、谷垣実、高宮幸一、佐藤信浩、奥村良、小林康浩、吉永尚生、吉野泰史、内堀幸夫、石川剛弘、岩岡和輝、齋藤公明：JAEA-Technology 2013-037 (2013)
- (15) 「Fields of View for Environmental Radioactivity」
Alex Malins, Masahiko Okumura, Masahiko Machida, Hiroshi Takemiya and Kimiaki Saito : (2015)
- (16) 「生活環境中における γ 線及び宇宙線線量率分布とその特徴」
長岡鋭、森内茂：保健物理 26 (1991)
- (17) 「核医学におけるアイソトープ利用」尾川浩一：核データニュース, No. 70 (2001)
- (18) 「アイソトープ手帳 11 版」公益社団法人日本アイソトープ協会
- (19) 「日本分析センターにおける空間放射線量率等について」
公益財団法人 日本分析センター ホームページ：<http://www.jcac.or.jp/>
- (20) 「放射線防護で用いられる線量について」遠藤章：第9回原子力委員会資料第1号(2012)
- (21) JIS Z4511:2009 照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当

量測定器の校正方法

- (22) 「モニタリングポストのNaIスペクトルデータについて（大熊町大野）」
福島県ホームページ
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec_file/monitoring/etc/supekutor_1.pdf
- (23) 「福島周辺における空間線量率の測定と評価 III 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係」 斎藤公明、遠藤章：RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014)
- (24) 「Gamma ray fields in the air due to sources in the ground」
Saito K, Jacob P : Radiat. Prot. Dosim, 58, 29-45 (1995)
- (25) 「Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children」
Petoussi-Henss N, Schlattl H, Zankl M, Endo A, Saito K; Phys. Med. Biol. 57, 5679-5713 (2012)
- (26) 「Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground」
Saito K and Petoussi-Henss N : J. Nucl. Sci Technol, (2014)
- (27) 「環境中に分布する放射性核種に対する外部被ばく線量評価に関する研究」
斎藤公明：博士論文，名古屋大学大学院（2013）
- (28) R. L. Heath ; IDO-16880-1 (1964)
- (29) C. D. Zerby and H. S. Moran ; ORNL-3169(1961)
- (30) M. J. Berger and S. M. Seltzer ; Nucl. Instr. Meth., 104, 317 (1972)
- (31) T. Hyodo and F. Makino ; Memoi. Fac. Engin., Kyoto Univ., 14, 291 (1962)
- (32) 湊進 ; 名工試報告, 27, 384(1978)
- (33) Y. Nakashima ; Thesis. Fac. Engin., Nagoya Univ., (1980)
- (34) 森内茂, 堤正博, 斎藤公明 ; 保健物理、42, 71-83, (2007)
- (35) M. Okano ; Natural Radiation Environment III, Symposium Series DOF51 (CONF-780422) 867 (1980)
- (36) S. Moriuchi ; Personal Communication
- (37) I. Urabe, T. Tsujimoto, K. Yamazaki and K. Katsuramata ; Jour. Rad. Res., 19, 163 (1978)
- (38) S. Minato ; Personal Communication
- (39) 明野吉成 : 卒業論文 ; 名大工、原子核工学科、Mar. (1982)
- (40) 石松健二 ; 日本原子力学会誌、4, 24(1962)
- (41) S. Moriuchi ; Personal Communication
- (42) R. L. Heath ; IDO-17017 (1965)
- (43) 天道芳彦 : γ 線スペクトルの解析法; Radioisotopes Vol. 12, No. 2, 200~205 (1963)
- (44) ニコラス ツルファニデス (坂井英次訳) : 放射線計測の倫理と演習 (下巻・応用編第 11, 12 章) ; 現代工学社 (1986)
- (45) R. L. Heath, R. G. Helmer, L. A. Schmittroth and G. A. Cazier
Method for Generation Single Gamma-Ray Shapes for the Analysis of Spectra, Nucl. Instr. Meth. 47; 281~304 (1967)
- (46) C. D. Zerby ; “Methods in Computational Physics” I, 89~134
(B. Alder and S. Fernbach eds.) Academic Press (1963)
- (47) 斎藤公明、森内茂、JAERI-M9741 (1981)

リサイクル適正の表示：印刷用の紙にリサイクルできます。

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料「A ランク」のみを用いて作製しています。

ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法

本報告書は、原子力規制委員会 原子力規制庁の平成 27 年度放射線対策委託費（放射能測定法シリーズ改訂）事業における委託業務として、公益財団法人日本分析センターが実施した成果を取りまとめたものです。

目 次

第1章 序 論	1
第2章 用語の定義	2
第3章 測定機器	4
3.1 機器に必要な要件	4
3.2 機器構成	4
3.3 機器仕様の例	4
3.4 機器校正	7
3.5 機器の汚染対策	12
3.6 その他の準備	14
第4章 測定方法とスペクトル解析	15
4.1 測定場所の選定	15
4.2 測定	15
4.3 記録	17
4.4 スペクトル解析	19
第5章 放射能濃度及び空間放射線量率の算出	21
5.1 解析の条件	21
5.2 放射能濃度の算出	22
5.3 空間放射線量率の算出	32
第6章 測定結果の解釈	36
6.1 解析条件と実際の測定条件が異なった場合の影響	36
6.2 測定結果の精度管理	38
解 説	
解説 A シミュレーション計算によるピーク効率の算出	41
解説 B in-situ 測定可能範囲と測定時間	45
解説 C in-situ 測定スペクトル例	52
解説 D 原子力災害時におけるエネルギー校正	56
解説 E 放射性物質の土壌中における鉛直分布	58
解説 F 解析条件と実際の測定条件が異なった場合の影響	76
解説 G 検出器の方向特性（ピーク効率の角度依存性）	87
解説 H 実際の測定例	89
解説 I 相互比較測定	97

付 録

付録 1	放射性核種濃度と地上高 1 m での γ 線フルエンス率との関係	103
付録 2	線量率と地上高 1 m での γ 線フルエンス率との関係	115
付録 3	放射性核種濃度と地上高 1 m での線量率との関係	137
付録 4	参考文献	149

第 1 章 序 論

原子力施設における事故等の発生時（以下「原子力災害時」という。）等、放射性物質が環境中に放出された場合、優れたエネルギー分解能をもつゲルマニウム（以下「Ge」という。）半導体検出器を用いて、in-situ 測定^{*1}を行うことによって、地表に沈着した放射性物質の特定、放射能濃度及び沈着物に起因する空間放射線量率を求めることができる。

in-situ 測定法は、実際の地表面全体を対象として測定を行うため、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一程度でよい。また、風雨等の影響によって地表面に沈着した放射性物質が均質に分布していない場合に、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沈着し、その沈着の分布図を作成する場合、特に有効な測定法であり、平成 23 年 3 月の東日本大震災に伴い発生した東京電力(株)福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一原発事故」という。）後においても放射性物質の沈着の分布を把握するために活用されてきた。^{*2}また、放射性物質を特定できるため、放出状況を推測することができ、さらに、特定した放射性物質のそれぞれの半減期から、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。

本測定法は、in-situ 測定のための 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 γ 線の測定及び解析方法を記載した。また、福島第一原発事故後の観測例から、原子力災害後の in-situ 測定における平常時とは異なる注意点についても記載した。

解析方法については、HASL^{*3}の方法（H. L. Beck, et al. ; HASL-258(1972)）に準拠し、ICRU^{*4} Rep. 53(1994)等の研究結果も参考にした。HASLの方法では、放射性物質の土壌中における鉛直分布、周囲の地形及び検出器設置高さ等について、ある仮定の下に解析を行うため、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。本測定法では、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（解説 B 参照）。

また、in-situ 測定法は、元々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及び空間放射線量率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。なお、本測定法では「Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定」を「in-situ 測定」という。

^{*2} 「平成 26 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発）事業 成果報告書 放射性セシウム沈着量の面的調査」 三上智、斎藤公明（2015）

^{*3} Health and Safety Laboratory の略称。その後、EML(Environmental Measurements Laboratory) を経て、現在は NUSTL(National Urban Security Technology Laboratory)。

^{*4} International Commission on Radiation Units and Measurements の略称。

第 2 章 用語の定義

in-situ 測定に特有な用語を中心に、以下に定義を記載する。Ge 半導体検出器の基本的な用語については、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」を参照のこと。

in-situ 測定

現場での測定。in-situ はラテン語で現場を示す。

レスポンス

指示値と測定すべき量との比を示す。校正定数の逆数。

角度依存性

Ge 半導体検出器の結晶に入射する γ 線に対するレスポンスが、入射角度に依存する性質。

沈着量

単位面積当たりの土壌に沈着、浸透した放射性物質の量のこと (Bq/cm^2)。

重量深度

単位面積当たりの土壌の重量で表される地表面からの深度 (g/cm^2)。

β

重量緩衝深度 (g/cm^2)。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で、放射能濃度が地表の 37 % ($=1/e$) になる重量深度のこと。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。

スクレーパープレート

土壌を表層から鉛直方向に任意の間隔で削り取って採取する器具であり、地面に固定する金属フレームと、フレーム内の土壌を削り取りながら採取する金属プレートから構成される。金属プレートに任意の深さで金属棒を固定することによって、採取する深さを調節することができる。

無限平面

遮へい物のない無限に開かれた平坦な地面。

鉛直分布

土壌中の放射性物質の深さ方向の分布。

地表面分布

放射性物質が地表面に分布している状態。

指数分布

土壌中の放射性物質が鉛直方向に指数関数的に減少して分布している状態。

均質分布

放射性物質が土壌中に均一に分布している状態。

HASL

Health and Safety Laboratory の略称。その後、EML (Environmental Measurements Laboratory) を経て、現在は NUSTL (National Urban Security Technology Laboratory)。

ICRU

International Commission on Radiation Units and Measurements (国際放射線単位測定委員会) の略称。

第 3 章 測定機器

3.1 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 γ 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、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」及び IEC^{*1}規格を参照のこと。

ただし、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。

- ① 機器の運搬及び設置が容易に行えること。
- ② 屋外の気象条件下において安定して動作すること^{*2}。
- ③ バッテリー駆動が可能なこと。
- ④ デュワー瓶は操作性を確保するとともに検出器に対して過度な遮へい体とならぬよう、大きさを最小限に抑え、できるだけ軽く、頑丈な構造であること。

3.2 機器構成

液体窒素冷却方式の機器構成例を図 3.1 に、電気冷却方式の機器構成例を図 3.2 に示す。

- ① Ge 半導体検出器
- ② ポータブルデュワー瓶（液体窒素冷却方式のみ）
- ③ マルチチャンネルアナライザ（MCA）
- ④ 検出器支持架台
- ⑤ パーソナルコンピュータ（PC）（MCA 制御及びデータ解析用）
- ⑥ ソフトウェア
- ⑦ その他附属品等

電気冷却方式では、検出部・冷却部・MCA・制御部等が一体型のポータブルタイプも市販されている。

3.3 機器仕様の例

in-situ 測定で使用する機器仕様の例を以下に示す。なお、ここで示した仕様は代表例であり、それ以外の機器を使用することを除外するものではない。

- ① Ge 半導体検出器
 - ・ 同軸型高純度 Ge 半導体検出器^{*3}

^{*1} International Electrotechnical Commission の略称。

^{*2} 特に炎天下において直射日光を避けるための対策は、測定機器を安定動作させるために不可欠である。

^{*3} 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 γ 線入射角度依存性が小さいため）。低エネルギーの γ 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、ベリリウム製等の入射窓をも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よい。

- ・ 25 cm 相対効率 25 %程度 *4
 - ・ エネルギー分解能 コバルト 60 1333 keV に対して 半値幅 (FWHM) 2.3 keV 以下 *5
 - ・ ピークコンプトン比 30 ~ 60 : 1*6
 - ・ 測定対象エネルギー範囲 50 keV~2000 keV*7 *8
 - ・ バッテリー駆動時間 (電気冷却方式のみ) 連続運転で最大 8 時間程度
 - ・ 結晶の冷却に要する時間 4 時間以上 *9
 - ・ 検出器を下向きに設置可能であること。 *10
- ② ポータブルデュワー瓶 (液体窒素冷却方式のみ)
- ・ デュワー容量 最大 7 L 程度 *11
- ③ マルチチャンネルアナライザ (MCA) *12
- ・ 高圧電源及びアンプ内蔵
 - ・ アンプゲイン 2~2000 程度 *13
 - ・ HV ±10~5000 V
 - ・ 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もつこと。
- ・ スペクトルメモリ 4 kch ~ 8 kch*14
 - ・ 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 (ポータブルタイプ)。
 - ・ 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。
- ④ 検出器支持架台
- ・ 検出器及びデュワー瓶を地表面上 1 m に下向きに安定した状態で保持できること。

*4 電気冷却式では、10~20 %程度の相対効率の検出器が市販されている。空間放射線量率の高い地点における測定では、相対効率の低い検出器の方が、信号処理が飽和せず測定に有利な場合がある。

*5 電気冷却式の Ge 半導体検出器は液体窒素方式と比較して、機械的なノイズの影響によって、半値幅が大きくなる傾向がある。

*6 ピークコンプトン比は遮へい体内で測定したスペクトルから算出しているため、in-situ 測定の場合、上記ピークコンプトン比は目安である。

*7 低エネルギー X 線 / γ 線を測定対象とする場合は、30 keV~2000 keV 程度とする。

*8 自然に存在する放射性核種の 2000 keV 以上の γ 線 (タリウム 208、2615 keV) 等を対象とする場合は、測定エネルギー範囲の上限を 4000 keV とする。

*9 結晶の大きさ及び冷凍機の冷却性能に依存するので、上記冷却時間は目安である。

*10 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。

*11 操作性及びデュワー瓶による遮へいの影響を考慮する必要があり、一般的には 3~5 L 程度である。

*12 電気冷却方式では検出器本体に内蔵されている機器もある。

*13 スペクトルメモリの範囲で 2000 keV 若しくは 4000 keV に調整できるアンプゲインであること。

*14 チャンネルとエネルギーの対応関係は通常 0.5 keV/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。(2000 keV : 4 kch、4000 keV : 8 kch)

自然に存在する核種の 2000 keV 以上のエネルギーの γ 線 (タリウム 208、2615 keV) 等を対象とする場合は、8 kch を使用する。

- ・ 検出器と地面との間に遮へい物となるものが少ない構造であること。
- ⑤ パーソナルコンピュータ（PC）（MCA 制御及びデータ解析用）^{*15}
- ・ 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。^{*16}
- ⑥ ソフトウェア
- ・ MCA 制御ソフトウェア
 - ・ 解析ソフトウェア
- HASL-258 及び ICRU Rep. 53 方式に準拠していること。（詳細は第 5 章に示した。）
- ⑦ その他の附属品等
- ・ 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）
 - ・ DC-AC 変換器（DC 24 V または 12 V → AC 100 V）（必要に応じて）
 - ・ 検出器、MCA、PC 用予備バッテリー
 - ・ 液体窒素補充用デュワー瓶（容量：20～30 L 程度）（液体窒素冷却方式のみ）
 - ・ その他液体窒素補給に必要な器具一式（液体窒素冷却方式のみ）
 - ・ 校正用 γ 線源
 - ・ γ 線源セット用治具
 - ・ 汚染防止用器具（ビニール袋等）

^{*15} 屋外で使用するため、防水性能を備えた PC が望ましい。

^{*16} PC の液晶ディスプレイは明るい屋外での視認性が悪いため、簡易的な遮光フードのようなものを用意しておくとい。

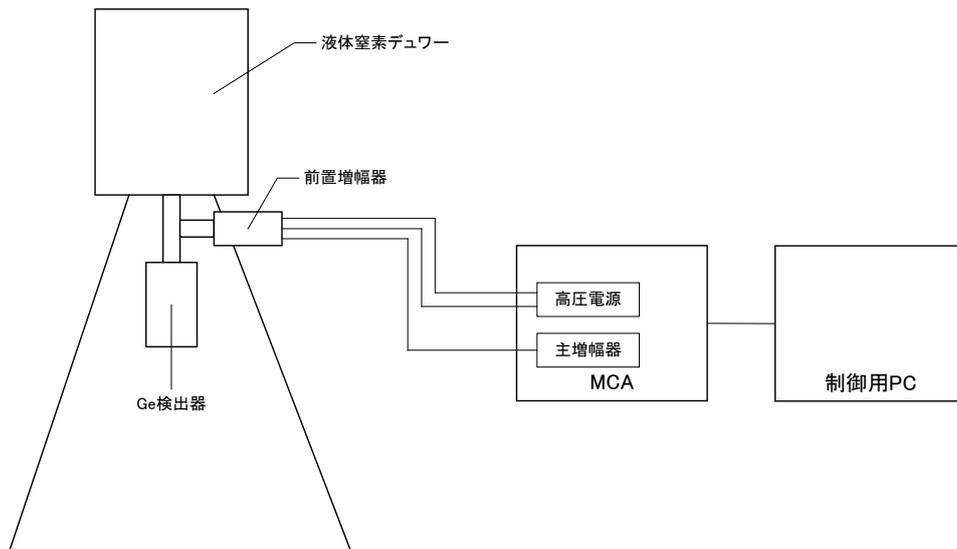
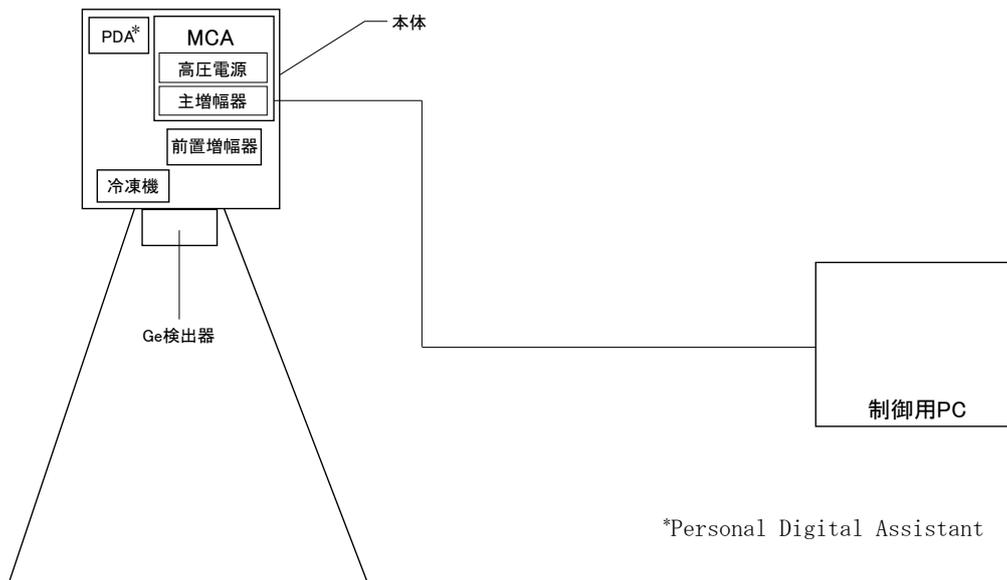


図 3.1 in-situ 測定用機器（液体窒素冷却方式）の構成例



*Personal Digital Assistant

図 3.2 in-situ 測定用機器（電気冷却方式）の構成例
 （検出部・冷却部・MCA・制御部等が一体型のポータブルタイプ）

3.4 機器校正

in-situ 測定では Ge 半導体検出器を地表面から 1 m 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直達 γ 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 γ 線入射角度依存性を考慮する必要がある。角度依存性の校正方法の詳細は第 5 章を参照のこと。本章では、角度依存性の校正の際に必要な、検出器のピーク効率及びその角度依存性についての校正の手順について示す。

3.4.1 エネルギー校正

適当な γ 線源を測定し、 γ 線による全吸収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 等を用いるとよい)。

ソフトウェア上で γ 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。^{*17}

3.4.2 ピーク効率校正

定期的に標準点線源等によるピーク効率校正^{*18}を行い、効率曲線を求めることが望ましい。また、分解能を求め、両者が経時的に大きく変化がないか確認しておくとうよい。

3.4.2.1 標準点線源による校正

3.4.2.1.1 必要な機器

- ① Ge 半導体検出器及び測定回路一式
- ② 標準点線源

測定対象とする γ 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と γ 線エネルギーの例を表 3.1 に示す。

線源強度は数 100 kBq 程度のものを使用する。このレベルの線源は表示付認証機器として、簡易的な届出で使用を開始することができる。使用に当たっては、使用の開始の日から 30 日以内に、「表示付認証機器使用届」を原子力規制委員会に届け出る必要がある。

「表示付認証機器使用届」は線源購入時に購入先から入手するか、又は原子力規制委員会のウェブサイトからダウンロードすることができる。

(http://www.nsr.go.jp/activity/ri_kisei/shinsei/shinsei1-1.html)

^{*17} 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って、スペクトルの横軸を γ 線エネルギーで表示できる。

^{*18} シミュレーション計算によってピーク効率を算出することも可能である (解説 A 参照)。

表 3.1 校正に用いられる核種と γ 線エネルギーの例

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比	半減期
^{241}Am	59.5	0.359	432.6 年
^{133}Ba	81.0	0.355*	10.55年
^{57}Co	122.1	0.856	271.7 日
^{139}Ce	165.9	0.799	137.6 日
^{133}Ba	356.0	0.621	10.55年
^{137}Cs	661.7	0.851	30.08年
^{54}Mn	834.8	1.000	312.2 日
^{88}Y	898.0	0.937	106.6 日
^{60}Co	1173.2	0.999	5.27年
^{22}Na	1274.5	0.999	2.60年
^{60}Co	1332.5	1.000	5.27年
^{88}Y	1836.1	0.992	106.6 日

* ^{133}Ba の 79.6 keV (放出比 : 0.026) のピークが重なるため、それを合算した放出比を記載
(ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) (2016年3月) から引用)

③ 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 (1 m 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 3.3 に示す。

線源の設置に当たっては、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。また、治具の回転中心と検出器の中心を合わせる。



図 3.3 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 $N(\theta)/N_0$ ^{*19} を実測によって求める。ピーク効率の角度依存性は γ 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。

3.4.2.1.2 測定手順^{*20}

- (1) 点線源を治具に固定し、ピークの正味計数が 10000 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よい）。
- (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 (s^{-1}) を求める。
- (4) 用いた標準線源の 1 秒当たりの γ 線放出数及び線源と検出器の距離から、検出器位置における γ 線のフルエンス率 ($cm^{-2} s^{-1}$) を求める（5.2.1(1)参照）。
- (5) (3)の正味ピーク計数率を(4)のフルエンス率で除し、単位フルエンス率当たりのピーク効率を求める。
- (6) γ 線のエネルギーごとに、ピーク効率を角度 θ の関数で表す（ $\theta = 0^\circ$ の値を 1.0 として規格化した後、最小二乗法によって関数化する）。
- (7) 得られた関数式を用い、第 5 章 式(5.6)を用いて角度依存性補正項 N_f/N_0 を γ 線エネルギーごとに計算する。

3.4.2.1.3 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 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 3.4、図 3.5 参照）。

L/D 比が 0.9~1.1 の範囲内の検出器を使用し、200 keV 以下の低エネルギー γ 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_f/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° 方向からの照射だけで校正することもできる。

^{*19} 第 5 章 式(5.6)参照

^{*20} (3)~(7)の手順は、機器メーカーのソフトウェアを用いて自動的に計算することができる。

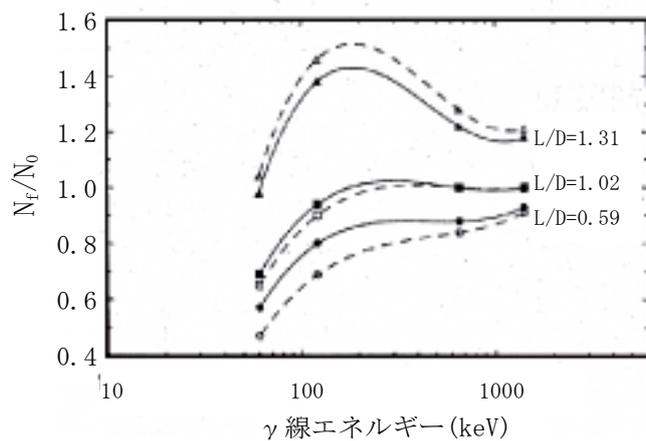


図 3.4 γ 線エネルギーと角度依存性補正項 (N_f/N_0) との関係 (ICRU Rep. 53 から引用)

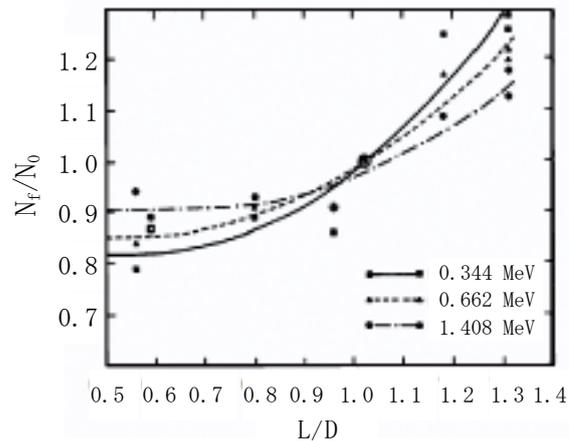


図3.5 Ge半導体検出器の長さ直径の比(L/D)と角度依存性補正項 (N_f/N_0) の関係 (HASL-300 から引用)

3.5 機器の汚染対策

3.5.1 汚染防止策

in-situ 測定する際に機器が汚染してしまっていては信頼性のある測定結果が得られない可能性がある。放射性物質で汚染している場所、又は汚染しているかどうか分からない場所で測定を実施する場合には、事前に汚染防止策を実施しておく必要がある。汚染防止策として、機器をビニール等で養生することが有効である (図 3.6 参照)。また、機器運搬時の汚染防止策として、測定に支障がない範囲でビニールを二重にする、又は検出器用カバーを用いる等、運搬時の汚染を防止するための養生を実施するとよい。運搬車内の養生及び車内に汚染をもち込まないために頻りにビニール等を交換することも重要である。



図 3.6 機器の養生例

(1) 検出器の養生

大型ビニール袋を検出器形状に合うようにカットし、必要に応じてシーラー等で封を行い、検出器本体が汚染しないように養生を実施する（図 3.7 参照）。注意点としては、持ち運びの際のハンドリング、ケーブル類の接続、液体窒素注入口の確保（液体窒素冷却方式のみ）等がある。また、検出器本体に吸排気口がある場合には、埃等が内部に入らないようにフィルター等を取り付けるとよい。

夏季の炎天下での in-situ 測定では、直射日光によってビニール袋内の温度が上昇し、検出器本体に影響を及ぼす可能性があるため、日除け等を必要に応じて用いるとよい。



(液体窒素冷却方式)

(電気冷却方式)

図 3.7 検出器の養生例

(2) MCA 等の養生（検出器本体に MCA を内蔵している場合を除く。）

MCA 及び PC の本体より大きめのビニール袋を使用し、必要に応じてシーラー等で封を行い、本体が汚染しないように養生を実施する。MCA には検出器と接続するケーブル、電源ケーブル及び制御用 PC と接続するケーブルがあるため、これらを接続するために養生を考慮する必要がある。MCA は使用中に発熱する機器であるため、完全密閉をせずに必要に応じて通気できるようにする。また、検出器と同様に日除け等を必要に応じて用いるとよい。

(3) ケーブルの養生

ケーブルの養生には、細長い筒状のビニール袋を使用するとよい。ケーブルは養生を実施する機器の中で取扱い上最もダメージを受けやすいので、擦り切れて穴が開いたりしないようにビニールを二重にする等の対策を実施するとよい。また、コネクター部分に荷重がかからないように養生を実施する。

(4) 検出器支持架台の養生

検出器支持架台の脚の養生には、ケーブルと同様に細長い筒状のビニール袋を使用するとよい。検出器支持架台の脚は in-situ 測定時に常に地面に接する部分であるため、擦り切れて穴が開いたりしないようにビニールを二重にしたり、厚手のビニール袋を使用する等の対

策を実施する。

3.5.2 除染法

in-situ 測定等において機器が汚染してしまった場合には、必要に応じて除染を実施する。汚染箇所を特定できる場合には、その箇所を拭き取る。拭き取りで除染の効果が見られない場合には、汚染箇所の部品を交換する等の対応を検討する。

機器が汚染してしまったことを確認するために、定期的に同一条件でバックグラウンド測定を実施し、バックグラウンドレベルを把握しておくことよい。

3.6 その他の準備

- ・ 検出器は冷却に必要な時間と測定開始予定時間を考慮して、事前に冷却しておくこと。Ge 結晶の劣化を防ぐため、運用上可能であれば常時冷却しておくことが望ましい。長期間常温で保管している場合には、定期的に効率に変化がないことを確認する必要がある。
- ・ バッテリーを充電しておくこと（検出器、ポータブル MCA、PC）。夏季の炎天下での測定では、バッテリー駆動時間が大きく短縮される場合があるので、予備のバッテリーを準備することで現場での測定可能時間を延ばすことができる。
- ・ 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よいが、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。
- ・ 車両用バッテリーから電源を供給する場合には、車両電源の安定性及び機器の仕様を事前に確認しておくこと。

第 4 章 測定方法とスペクトル解析

4.1 測定場所の選定 *1

放射能濃度の算出に当たっては、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、測定場所の選定には以下の点について注意が必要である。

- ・ 測定場所としては、解析の条件（無限平面）に近い場所、すなわち周囲が平たんで開けた場所（理想的には半径 30 m 程度、最低でも半径 10 m 程度開けた場所）を選定するのが望ましい。
- ・ in-situ 測定法によって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又は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 γ 線の遮へいを避けるため、運搬用車両は測定位置から離れた場所に駐車する。

ただし、放射性核種の特特定又は空間放射線量率の算出を目的とする場合には、必ずしも無限平面に近い場所である必要はない。

実際の環境中で測定場所を選定するに当たり、上記の点を満たした理想的な地点を選定することは困難である。in-situ 測定法は、周囲の地形、放射性物質の土壌中における鉛直分布、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（第 6 章参照）。

4.2 測定

4.2.1 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幾何学的中心までの高さが 1 m 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、検出器が地表面に対して水平になるように架台の脚を調整する。
- (2) ポータブル MCA 及び PC を 3 m 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 及び PC を設置する台等を用いる場合は、地表からの γ 線の遮へいが少なくなるよう、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ことによって、温度によるゲイン変動を防止する。*3
- (4) 必要に応じて、架台の脚を地面に固定する等の転倒防止措置を講じる。

4.2.2 検出器の立ち上げ及び測定手順

- (1) PC 及び MCA の電源を入れ、Ge 半導体検出器に高電圧を印加する。しばらくウォーミングアップを行う。ウォーミングアップに必要な時間は機器によって異なるので、あら

*1 解説 F 参照

*2 汚染の可能性がある場所で測定する場合、汚染防止策（3.5.1 参照）を実施しておくこと。

*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よい。

はじめ使用する機器について安定するまでの時間を把握しておく。

- (2) 機器調整のための測定を実施する。通常、カリウム 40 (1461 keV) 等の自然放射性核種に由来するピークが検出されるので、それらを用いてゲイン調整を行うが、原子力災害時では検出された人工放射性核種によるゲイン調整を行うことを考慮する（解説 D 参照）。測定中は電氣的な安定性を考慮し、検出器本体及び MCA はバッテリー駆動することが望ましい。
- (3) 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（解説 B 参照）。
- (4) デッドタイムを確認する。
- (5) 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 γ 線の遮へいを避けるため）。

4.2.3 測定中の確認

in-situ 測定で得られる γ 線スペクトルには、通常は自然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確認が可能である。

スペクトル上でカリウム 40 のピーク (1461 keV) 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から 2 ch 以上ずれていた場合又は FWHM が大きく変化した場合には、ウォーミングアップの不足又は機器に異常がある可能性が考えられるため、再測定、又は機器の点検を行う。

4.2.4 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) スペクトルを概観し、ノイズ又は予期しないピーク等の異常を発見したら原因究明、再測定等の対応をとる。
- (4) in-situ 測定場所で解析を行う場合には、「4.4 スペクトル解析」参照。

以下の (5)～(7) の手順は、次の測定場所での測定までに十分なウォーミングアップ時間をとれない場合、運搬に支障がなければ必ずしも実施する必要はない。

- (5) 高圧電源をシャットダウンし、MCA の電源を切る。
- (6) PC をシャットダウンし、電源を切る。
- (7) MCA と検出器、MCA と PC の接続ケーブルを外す。
- (8) 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。
- (9) 次の測定場所に移動する。

4.3 記録

測定場所及び測定に関して、以下の項目等を記録する。記録用紙の例を表 4.1 に示す。

4.3.1 測定場所に関する記録

- (1) 測定場所周辺^{*4}の状況を記録する。
 - ① 地形（平たん、傾斜地等）
 - ② 土地利用（グラウンド、神社等の一角、耕地、未耕地等）
 - ③ 地面の状況（草地、裸地、芝地、砂地、畑、樹園地、アスファルト等）
 - ④ 土壌の種類（砂質、壤質、粘質等）^{*5}
 - ⑤ 草地等の広がり範囲
 - ⑥ 土壌の状態
 - ⑦ 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））
- (2) 測定場所周辺の状況を写真撮影する。
- (3) 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。^{*6}
- (4) GPS^{*7}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。
- (5) 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）

4.3.2 測定に関する記録

- ① 測定開始年月日、時間
- ② 測定者
- ③ 検出器及び測定器（型番、シリアル番号等）
- ④ 測定スペクトルのデータファイル名
- ⑤ 主要ピーク^{*8}の中心チャンネル等
- ⑥ スペクトルの特徴（特異的な形状又は FWHM の増加等があれば記録）

^{*4} 測定場所を中心として半径 30 m 程度の範囲について、状況を記録する。

^{*5} 土壌の分類は、放射能測定法シリーズ No. 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} 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。

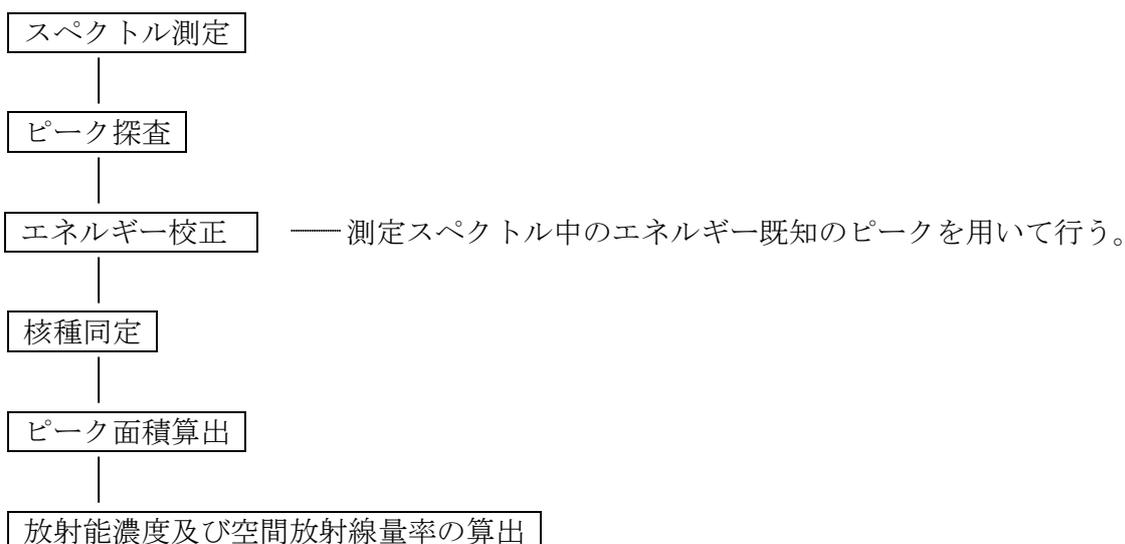
^{*7} Global positioning system

^{*8} 通常検出される放射性核種及びγ線エネルギーについては表 4.3 参照。

4.4 スペクトル解析

Ge 半導体検出器によって得られたスペクトルの解析は、スペクトル中に含まれる単色光子に基づく全吸収ピークに着目して行う。測定機器メーカーが提供する解析ソフトウェアを用いて自動的に解析することは可能であるが、その解析条件を確認した上で使用する必要がある。解析条件の変更による定量上の誤差を避けるため、データの解析に当たっては、機器校正時と in-situ 測定時で同一の解析条件を用いることが重要である。解析条件を変更する場合には、条件の違いが解析結果に及ぼす影響を事前に確認しておくことが望ましい。

4.4.1 解析の手順



4.4.2 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 γ 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 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放射性核種を表 4.2 に示す。

表 4.2 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

原子力災害時等には、人工放射性核種の多数のピークが検出されることが想定されるた

め、核種同定及びピーク面積を算出する際のデータ解析には注意が必要である。

in-situ 測定スペクトル例を解説 C に示す。

4.4.3 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、温度変化の影響又は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 γ 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アンプのゲインが変化し、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 γ 線エネルギーの一例を表 4.3 に示す。原子力災害時には、バックグラウンドレベルの上昇に伴い、表 4.3 の放射性核種のうち、特に低エネルギー領域の放射性核種が校正に利用できない可能性がある。その場合、表 4.4 のような原子力災害に伴い放出された人工放射性核種の γ 線エネルギーを利用してエネルギー校正を行う必要がある（解説 D 参照）。

表 4.3 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 γ 線エネルギー

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比 *
^{212}Pb	239	0.434
^{214}Pb	352	0.369
^{208}Tl	583	0.306
^{214}Bi	609	0.469
^{228}Ac	911	0.290
^{40}K	1461	0.107
^{208}Tl	2615	0.359

* ^{238}U 及び ^{232}Th 系列については親核種の壊変当たりの放出比

(ICRU Rep. 53 Table 3.4 から抜粋)

表 4.4 原子力災害時にエネルギー校正に利用できる人工放射性核種と γ 線エネルギーの例

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比
^{134}Cs	605	0.975
^{137}Cs	662	0.849
^{134}Cs	796	0.851
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	885	0.729
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1384	0.243
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1505	0.131

(ICRU Rep. 53 Table A.1 から抜粋)

第 5 章 放射能濃度及び空間放射線量率の算出

5.1 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（単位面積当たりの放射能：Bq/cm²）及び空間放射線量率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、測定法においても 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、放射性物質の土壌中における鉛直分布、検出器設置高さ等の幾つかの条件を仮定した上で放射能濃度及び空間放射線量率を算出する。仮定条件を表 5.1 に示す。

表 5.1 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）
放射性物質の土壌中における鉛直分布	式 (5.1) で示す分布
検出器設置高さ	地上高 1m

土壌中の重量深度 Z における放射能濃度 $A(Z)$ は次のように表わせる。

$$A(Z) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\beta}\right) \quad (5.1)$$

$A(Z)$: 重量深度 Z における放射能濃度 (Bq/g)

Z : 重量深度 (g/cm²)

単位面積当たりの土壌の重量で表される地表面からの深度。

A_0 : 地表面における放射能濃度 (Bq/g)

β : 重量緩衝深度 (g/cm²)

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。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 % (=1/e) になる重量深度であり、地表面分布の場合 β は限りなく 0 に近づき、土壌中均質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もつような分布となったり、土地の利用、侵食及び除染等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 β を用いることができる（解説 E 参照）。

単位面積当たりの放射能（沈着量） A_a は次のように表わせる。

$$A_a = \beta \cdot A_0 \quad (5.2)$$

A_a : 単位面積当たりの放射能(Bq/cm²)

5.2 放射能濃度の算出

5.2.1 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 （単位面積当たりの放射能；Bq/cm²）は、以下の式によって算出する。

$$A_a = N_f / \frac{N_f}{A_a} \quad (5.3)$$

A_a : 単位面積当たりの放射能(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(s⁻¹)

N_f/A_a : in-situ 測定における効率

N_f/A_a は、以下の式によって算出する。

$$\frac{N_f}{A_a} = \frac{N_0}{\phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\phi}{A_a} \quad (5.4)$$

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

ϕ : フルエンス率 (cm²s⁻¹)

(1) N_0/ϕ

N_0/ϕ は、検出器軸方向 (0°) でのフルエンス率(cm²s⁻¹)当たりのピーク計数率(s⁻¹)である。この値は検出器に依存するもので、測定を行う者が検出器ごとに γ 線源を測定して算出する。

- 検出器の軸方向で 1 m 以上の距離にエネルギーの異なる幾つかの線源を設置する。
- 測定を行い、 N_0 を算出する。
- ϕ は以下の式によって算出する。

$$\phi = \frac{S \cdot a}{4 \cdot \pi \cdot r^2} e^{-\mu_a x} e^{-\mu_h y} \quad (5.5)$$

S : γ 線源の放射能 (Bq)

a : γ 線の放出比

μ_a : γ 線の空気中における減弱係数 (cm^{-1})

x : 線源から検出器キャップ表面までの距離 (cm)

μ_h : γ 線の線源体中 (土壌中) における減弱係数 (cm^{-1})

y : 線源体中 (土壌中) の通過距離 (cm)

r^{*1} : 線源から検出器実効中心までの距離 (cm)

1) γ 線のエネルギーが 1 MeV を超える場合、検出器の実効中心は Ge 結晶の幾何学的中心とする。

2) γ 線のエネルギー 0.1 MeV 未満の場合、検出器の実効中心は Ge 結晶の表面とする。

3) 上記 1) 2) の間のエネルギーの場合、次の式で r を算出する。

$$r = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1 - e^{-\mu d} (\mu d + 1)}{1 - e^{-\mu d}} + d_0 + x$$

μ : γ 線の Ge 結晶中における減弱係数 (cm^{-1})

d : Ge 結晶の厚さ (cm)

d_0 : 検出器キャップ表面と Ge 結晶表面の距離 (cm)

線源から検出器実効中心までの距離 (r) の計算例を表 5.2.1 に示す。

空気による減弱 ($e^{-\mu_a x}$) の計算例を表 5.2.2 に示す。

γ 線の線源体中 (土壌中) における減弱係数 (μ_h) を表 5.2.3 に、その計算に使用された土壌の構成成分を表 5.2.4 に示す。

N_0/ϕ を算出し、エネルギーの関数として表す。例を図 5.1 に示す。

*1 線源と検出器との距離を決める場合、検出器が有限の大きさをもつため検出器の「実効中心」という考えを導入すると便利である。実効中心の導出には幾つかの方法があるが、ここでは IAEA TECDOC-1092 (1999) による方法を示す。

表 5.2.1 線源から検出器実効中心までの距離 (r) の計算例

単位 : (cm)

γ 線エネルギー (MeV)	μ (cm ⁻¹)	Ge 結晶の厚さ d (cm)				
		4	5	6	7	8
0.1	2.94	100.8	100.8	100.8	100.8	100.8
0.15	1.32	101.2	101.3	101.3	101.3	101.3
0.2	0.883	101.5	101.6	101.6	101.6	101.6
0.3	0.601	101.8	101.9	102.0	102.1	102.1
0.4	0.496	101.9	102.1	102.2	102.3	102.4
0.5	0.437	101.9	102.2	102.3	102.4	102.5
0.6	0.397	102.0	102.2	102.4	102.6	102.7
0.8	0.342	102.1	102.3	102.5	102.7	102.9
1	0.305	102.1	102.4	102.6	102.8	103.0

x : 線源から検出器キャップ表面までの距離 = 100cm

μ : γ 線の Ge 結晶中における減弱係数 (cm⁻¹)

d₀ : 検出器キャップ表面と Ge 結晶表面の距離 (cm) = 0.5cm

表 5.2.2 空気による減弱 (e^{-μ_ax}) の計算例

γ 線エネルギー (MeV)	20°Cにおける線減弱係数* (×10 ⁻⁴ cm ⁻¹)	1mの距離での 空気による減弱
0.06	2.159	0.979
0.08	1.945	0.981
0.1	1.820	0.982
0.15	1.616	0.984
0.2	1.476	0.985
0.3	1.281	0.987
0.4	1.148	0.989
0.5	1.048	0.990
0.6	0.9689	0.990
0.8	0.8513	0.992
1	0.7649	0.992
1.5	0.6227	0.994
2	0.5351	0.995

*PHOTX データベース

表 5.2.3 γ 線の線源体中（土壌中）における減弱係数 (μ_h)

γ 線エネルギー (keV)	土壌の質量減弱係数* (cm^2/g)	土壌の線減弱係数** (cm^{-1})
20	2.78	4.45
25	1.52	2.43
30	0.938	1.50
35	0.644	1.03
40	0.471	0.754
45	0.381	0.610
50	0.314	0.502
55	0.277	0.443
60	0.248	0.397
65	0.230	0.368
70	0.214	0.342
75	0.202	0.323
80	0.190	0.304
85	0.185	0.296
90	0.178	0.285
95	0.173	0.277
100	0.167	0.267
150	0.139	0.222
200	0.125	0.200
250	0.115	0.184
300	0.108	0.173
350	0.101	0.162
400	0.0963	0.154
450	0.0919	0.147
500	0.0875	0.140
550	0.0844	0.135
600	0.0813	0.130
650	0.0788	0.126
700	0.0756	0.121
750	0.0731	0.117
800	0.0713	0.114
850	0.0694	0.111
900	0.0675	0.108
950	0.0650	0.104
1000	0.0638	0.102
1500	0.0521	0.0834
2000	0.0449	0.0718
2500	0.0401	0.0642
3000	0.0364	0.0582

*HASL-258 から引用

**土壌密度 1.6 g/cm^3 として計算

表 5.2.4 土壌の構成成分

成分	構成
Al ₂ O ₃	13.5 重量%
Fe ₂ O ₃	4.5 //
SiO ₂	67.5 //
CO ₂	4.5 //
H ₂ O	10 //
ρ (密度)	1.6 g/cm ³

(HASL-258 から引用)

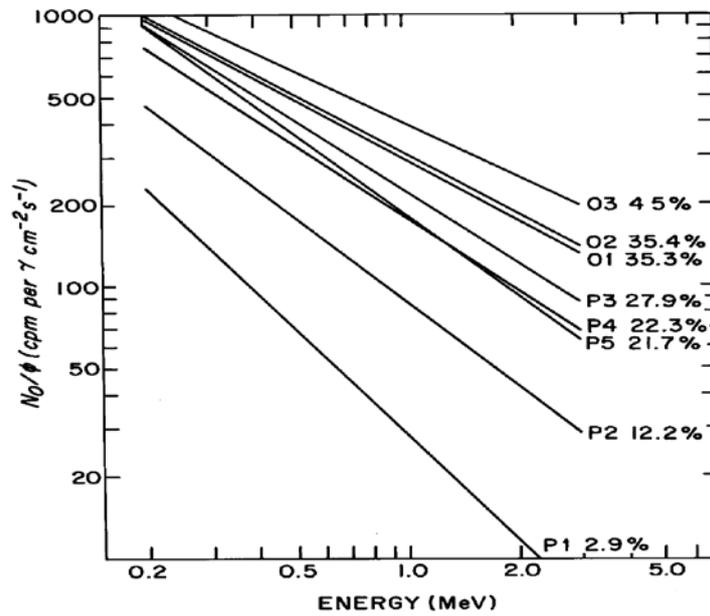


図 5.1 相対効率の異なる幾つかの検出器についてのフルエンス率当たりの計数率 (N_0/ϕ) のエネルギーによる変化

P1～P5 及び O1～O3 は検出器の種類、右側の数字は相対効率を示す。

(HASL-300 から引用)

(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 γ 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って算出する。

$$\frac{N_f}{N_0} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\phi(\theta)}{\phi} \frac{N(\theta)}{N_0} d\theta \quad (5.6)$$

$\phi(\theta)/\phi$: あるジオメトリにおいて、エネルギーEの環境 γ 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 (662 keV) に対して幾つかのジオメトリについて計算した結果を図5.2に示す。なお、この値は γ 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 γ 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幾つかの γ 線源を用いて入射角度を変えて照射を行い算出する。

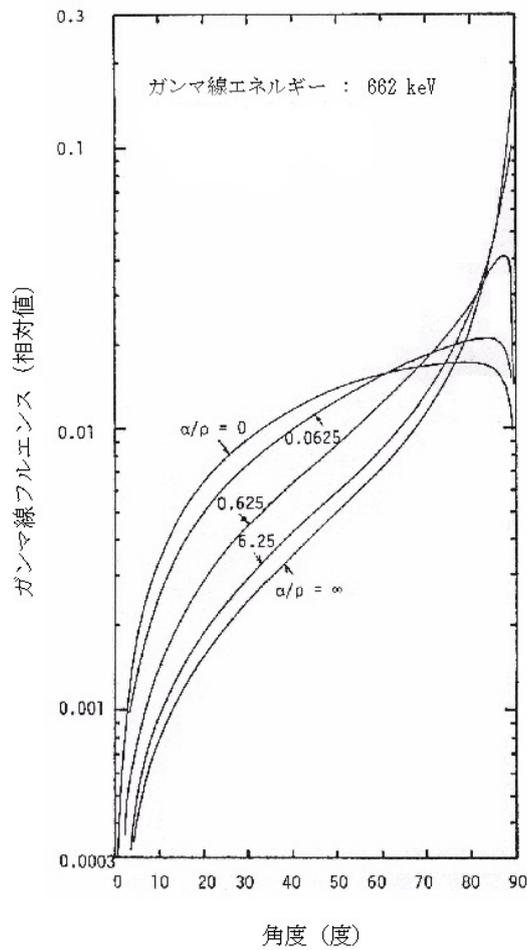


図 5.2 地上高 1 m における γ 線の入射方向分布

図中の α/ρ は式 (5.1) の β の逆数

(JAERI-M 6498 から引用)

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 γ 線が水平に近い方向から入射するため、その方向だけの照射で機器を校正することもできる。その場合式(5.4)は以下のような単純な式となる。

$$\frac{N_f}{A_a} = \frac{N_{90}}{\phi} \cdot \frac{\phi}{A_a} \quad (5.7)$$

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 γ 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 γ 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) ϕ/A_a

ϕ/A_a は、土壤中放射能濃度 (A_a) と検出器位置 (1 m の高さ) の γ 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 (β) ごとに、 ϕ/A_a の値を付表-1 に示す。

β の値は実測から求めることが理想的であるが、通常は相当な困難が伴う。そのため、目安として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 5.3 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、 β は 0.1 g/cm²が適している。表 5.3 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。また、in-situ 測定場所における土壌を層別に採取して人工放射性物質の深度分布を評価することで、より高い精度で in-situ 測定結果を解析することができる。

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 E に記載した。

表 5.3 放射性物質の土壤中における鉛直分布の推奨値

沈着後の経過時間 (年)	沈着後の 降水量(mm)	鉛直分布を表すパラメータ β (g/cm ²)
0~1	<3	0.1
0~1	≥3	1.0
1~5	-	3.0
5~20	-	10

(ICRU Rep. 53 から引用)

5.2.2 土壤中に均質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 など土壤中に均質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、単位重量当たりの放射能 A_m となり、単位は Bq/g である。均質分布として計算した ϕ/A_m を表 5.4 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質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 及び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 γ 線のエネルギー (186 keV) がウラン 235 (186 keV) と重なるため、定量に用いることはできない。

表 5.4 土壤中放射性核種濃度と地上高 1 m での γ 線フルエンス率との関係 (ϕ/A_m)
(放射性物質が土壤中に均質に分布している場合)

系列	核種	エネルギー (MeV)	放出比 *	ϕ/A_m ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)/(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
	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	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	1.73
	^{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

* ^{238}U 及び ^{232}Th 系列については親核種の壊変当たりの放出比

(ICRU Rep. 53 から引用)

5.3 空間放射線量率の算出

地表に沈着した放射性物質又は土壤中に均質に分布する放射性物質による地上高 1 m における空間放射線量率（以下「線量率」という。）は、以下の式によって算出する。

$$I = N_f / \frac{N_f}{I} \quad (5.8)$$

I : 線量率(空気吸収線量率: $\mu\text{Gy/h}$ 、又は周辺線量当量率: $\mu\text{Sv/h}$)

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、以下の式によって算出する。

$$\frac{N_f}{I} = \frac{N_0}{\phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\phi}{I} \quad (5.9)$$

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

ϕ : フルエンス率($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

式 (5.9) は、放射能濃度 A が線量率 I に変わった以外は、式 (5.4) と同様である。 ϕ/I 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 γ 線による γ 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 γ 線の一次線による線量率だけではなく、散乱線及びその放射性物質から放出される全ての γ 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、又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 ϕ/I の値を付表-2-1 (空気吸収線量率: $\mu\text{Gy/h}$ 単位) 及び付表-2-2 (周辺線量当量率: $\mu\text{Sv/h}$ 単位) に、土壤中に均質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 ϕ/I を表 5.5 に示す。ウラン系列核種及びトリウム系列核種の ϕ/I は、系列内のある核種から放出されるある γ 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 γ 線による線量率との関係を表している。したがって、ある核種のある γ 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 (ウラン系列: ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 等) から放出される γ 線、又は一つの核種から放出される複数のエネルギーの γ 線 (^{214}Bi : 609 keV、1765 keV 等) について解析を行う場合、それぞれの γ 線から算出した線量率を平均^{*2}して、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

*1 in-situ 測定の対象エネルギー範囲を 2 MeV までとした場合でも、測定された核種の 2 MeV 以下の γ 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 2 MeV 以上の γ 線による寄与分も含まれることになるので、3 MeV 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。

*2 計数誤差を用いて荷重平均する。

数を付表-3-1（空気吸収線量率： $\mu\text{Gy/h}$ 単位）及び付表-3-2（周辺線量当量率： $\mu\text{Sv/h}$ 単位）に示す。均質分布（自然に存在する放射性物質）の場合の換算係数（空気吸収線量率： $\mu\text{Gy/h}$ 単位）を表 5.6 に示す。表 5.6 中のウラン系列及び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}

^{*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 γ 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 5.5 土壤中に均質に分布する放射性物質による地上高 1 m での線量率と
 γ 線フルエンス率の関係 (ϕ/I)

系列	核種	エネルギー (MeV)	ϕ/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 5.6 土壤中放射能濃度と地上高 1 m での線量率の関係 (I/A_m) *
 (放射性物質が土壤中に均質に分布している場合)

核種	放射能濃度当たりのカーマ率 ($\mu\text{Gy/h}$) / (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 から引用)

第 6 章 測定結果の解釈

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。

6.1 解析条件と実際の測定条件が異なった場合の影響

6.1.1 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 5.4 の ϕ/A 、付表-1 及び表 5.4 の値）は、 γ 線を減弱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。セシウム 137 が土壌中に指数分布（ $\beta:4.8 \text{ g/cm}^2$ ）している場合の地上 1 m 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 6.1 に示す。検出器を中心とした半径 10 m からの寄与分は無限平面全体からの寄与の 85 % に相当する。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 F.1 に記載した。

この過小評価については、放射性物質の沈着の範囲を特定できる場合には、表 6.1 の補正係数を用いて補正することができるが、典型的な状況では補正を行わなくても過小評価の程度は数 10 % 以内である。ただし、 β が 0.1 g/cm^2 で半径 10 m 程度の狭い範囲にだけ放射性物質が沈着している場合は、過小評価の程度が大きいため補正を考慮する必要がある。

補正方法としては、検出器を中心として放射性物質の沈着の範囲（平均的な半径）をメジャー又はテープを用いて算出し、放射能濃度の測定値に表 6.1 の補正係数を乗ずる。表 6.1 は、600 keV 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、その他のエネルギーに対しても適用することができる。人工放射性物質がフォールアウトとして降下してある程度時間が経過した場合など、アスファルト又は建造物への沈着が少なく、草地又は露地等に放射性物質が沈着していると考えられる場合には、草地又は露地等の範囲を基に補正を行う。原子力災害時の初期の段階など、沈着の範囲を特定できないような場合には補正は困難であるため、補正を行う場合は沈着後に行う必要がある。

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。

また、周辺地形の広がりによる線量率への影響はわずかであるため、線量率の測定値については補正する必要はない。

6.1.2 検出器の設置高さ

検出器の設置高さについては、通常 1 m の高さに設置するので補正する必要はない。検出器の設置高さの放射能濃度測定値への影響を解説 F.2 に記載した。

6.1.3 土壤中水分

土壤中水分については、土壤中における放射性物質の鉛直分布（解説 E 参照）の影響に含まれるので補正する必要はない。土壤中水分の放射能濃度測定値への影響を解説 F.3 に記載した。

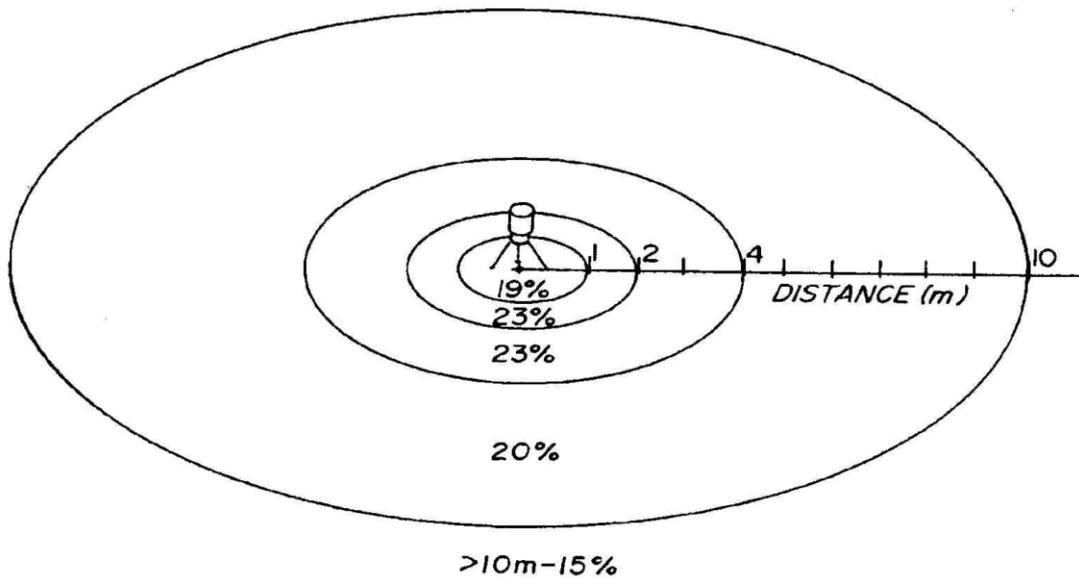


図 6.1 セシウム 137 が土壤中に指数分布 ($\beta : 4.8 \text{ g/cm}^2$) している場合の地上高 1 m での γ 線フルエンスの周囲からの寄与割合 (HASL-300 から引用)

表 6.1 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 β (g/cm^2)	放射性物質の沈着の範囲 (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
4.8	1.2	1.1	1.1	1.0
∞ (均質分布)	1.1	1.0	1.0	1.0

6.2 測定結果の精度管理

6.2.1 日常及び定期点検

in-situ 測定において信頼性のある測定結果を得るためには、以下のような日常及び定期点検を実施することが望ましい。

日常点検

- ・ 検出器を常時冷却している場合には、検出器温度（温度のモニタが可能な場合）と液体窒素消費量（液体窒素冷却方式のみ）を確認する。
- ・ コバルト 60 等の線源を用いてエネルギー分解能を確認する。

定期点検

- ・ ピーク効率を確認する（3.4.2 参照）。
- ・ 測定機器メーカー等による機器点検を実施する。

6.2.2 相互比較測定

in-situ 測定における測定結果の信頼性向上のための精度管理の一環として、測定機器間の相互比較測定が有効である（解説 I 参照）。原子力災害時等において in-situ 測定を急遽実施することも想定されるため、日頃から定期的に機器の状態を確認しておくことも重要である。また、広範囲に沈着した放射性物質の分布状況を調査するために、複数の測定機器で分担して測定を実施する場合には、測定機器間の測定精度に大きな差がないことを事前に確認しておくことが望ましい。

解 説

解説 A シミュレーション計算によるピーク効率の算出

解説 A.1 概説

標準点線源を使わずに、シミュレーション計算によってピーク効率を算出することも可能である。計算コードとして MCNP モンテカルロコード等を用いたピーク効率シミュレーションソフトウェアが利用されている。 γ 線エネルギー及び幾何学的条件（距離、入射角度等）との関係について検出器をあらかじめモデル化することによって、任意のエネルギー、測定試料の形状、大きさに対応したピーク効率を短時間で作成することができる。

ただし、トレーサビリティの確保された標準点線源を用いてのピーク効率校正とは異なるため、シミュレーション計算によって得られたピーク効率の信頼性については、標準点線源を用いて作成したピーク効率と比較することによって、定期的に確認しておくことが望ましい。

使用する場合には、検出器情報を含め計算条件をよく吟味し、更に計算結果の妥当性を十分に確認した上で慎重に用いる必要がある。また、検出器のモデル化データがシミュレーション計算に必要であるため、検出器の特性が変化しない管理が重要となる。具体的には、Ge 半導体検出器を常に冷却し、検出器の不感層を変化させない管理をすることが望ましい。

解説 A.2 標準点線源で作成したピーク効率との比較

相対効率 30.1 %の Ge 半導体検出器を用いて、標準点線源によって作成したピーク効率(以下「線源効率」という。)とシミュレーション計算^{*1}^{*2}によって作成したピーク効率(以下「シミュレーション効率」という。)を比較し、表 A.1 に示した。

表 A.1 線源効率とシミュレーション効率の比較

核種	エネルギー (keV)	線源効率 (A)	シミュレーション効率 (B)	比率 (B) / (A)
Am-241	59.5	1.729E-04	1.613E-04	0.933
Ba-133	81.0	1.676E-04	1.666E-04	0.994
Ba-133	356.0	8.353E-05	8.201E-05	0.982
Cs-137	661.7	5.119E-05	4.925E-05	0.962
Co-60	1173.2	3.060E-05	3.108E-05	1.016
Co-60	1332.5	2.715E-05	2.832E-05	1.043

約 60 keV～1300 keV のエネルギー範囲において、線源効率とシミュレーション効率はおおむね 5 %以内で一致していた。

in-situ 測定したスペクトルについて、それぞれのピーク効率を用いて U 系列、Th 系列、⁴⁰K、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs について放射能濃度及び線量率を解析し、比較した結果を表 A.2～A.6 に示した。なお、U 系列としては²¹⁴Bi 及び²¹⁴Pb を、Th 系列としては²⁰⁸Tl 及び²²⁸Ac を解析対象核種とした。

表 A.2 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(草地 1、 β : 1.4 g/cm²)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
U 系列	—	3.7	7.2	—	3.3	6.3	—	0.89	0.87
Th 系列	—	5.8	11.3	—	6.2	11.6	—	1.05	1.03
K-40	1.99E-01 Bq/g	8.3	16.1	1.85E-01 Bq/g	7.7	14.5	0.93	0.93	0.90
Cs-134	2.98E+09 Bq/km ²	12.4	24.0	3.18E+09 Bq/km ²	13.2	24.9	1.07	1.07	1.04
Cs-137	1.32E+10 Bq/km ²	21.3	41.3	1.40E+10 Bq/km ²	22.6	42.7	1.06	1.06	1.03
合計	—	51.6	—	—	53.1	—	—	—	—

*1 ピーク効率シミュレーションソフトウェア(計算コード: MCNP モンテカルロコード^{*2})を使用した。

*2 Briesmeister, J. F., 「MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code Version 4C」, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

表 A.3 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(砂利、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	37.1	36.4	—	36.6	34.8	—	0.99	0.96
Th系列	—	34.8	34.1	—	37.1	35.3	—	1.07	1.03
K-40	1.09E-01 Bq/g	4.5	4.4	1.01E-01 Bq/g	4.2	4.0	0.93	0.93	0.90
Cs-134	2.22E+09 Bq/km ²	9.2	9.0	2.37E+09 Bq/km ²	9.8	9.4	1.07	1.07	1.03
Cs-137	1.01E+10 Bq/km ²	16.3	16.0	1.07E+10 Bq/km ²	17.4	16.5	1.06	1.06	1.03
合計	—	102.0	—	—	105.1	—	—	—	—

表 A.4 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(アスファルト、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	10.1	20.7	—	9.7	20.0	—	0.96	0.96
Th系列	—	10.9	22.3	—	11.6	23.8	—	1.06	1.06
K-40	4.00E-01 Bq/g	16.7	34.0	3.71E-01 Bq/g	15.5	31.7	0.93	0.93	0.93
Cs-134	9.85E+08 Bq/km ²	4.1	8.4	1.05E+09 Bq/km ²	4.4	8.9	1.07	1.07	1.07
Cs-137	4.43E+09 Bq/km ²	7.2	14.6	4.72E+09 Bq/km ²	7.6	15.6	1.06	1.06	1.07
合計	—	49.0	—	—	48.8	—	—	—	—

表 A.5 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(草地 2、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	8.3	17.9	—	7.8	16.6	—	0.94	0.93
Th系列	—	8.2	17.7	—	8.7	18.4	—	1.06	1.04
K-40	1.99E-01 Bq/g	8.3	17.8	1.84E-01 Bq/g	7.7	16.3	0.93	0.93	0.91
Cs-134	1.88E+09 Bq/km ²	7.8	16.8	2.00E+09 Bq/km ²	8.3	17.6	1.07	1.07	1.05
Cs-137	8.53E+09 Bq/km ²	13.8	29.7	9.07E+09 Bq/km ²	14.7	31.1	1.06	1.06	1.05
合計	—	46.4	—	—	47.2	—	—	—	—

表 A.6 in-situ 測定スペクトルの解析結果の比較
(コンクリート (建屋内地下)、 $\beta : 1.4 \text{ g/cm}^2$)

	線源効率			シミュレーション効率			比率		
	(A)			(B)			(B) / (A)		
	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合	放射能濃度	線量率	核種組成割合
		nGy/h	%		nGy/h	%			
U系列	—	19.8	25.7	—	19.8	25.9	—	1.00	1.01
Th系列	—	25.6	33.3	—	27.3	35.7	—	1.06	1.07
K-40	7.57E-01 Bq/g	31.6	41.0	7.03E-01 Bq/g	29.3	38.4	0.93	0.93	0.94
Cs-134	— Bq/km ²	—	—	— Bq/km ²	—	—	—	—	—
Cs-137	— Bq/km ²	—	—	— Bq/km ²	—	—	—	—	—
合計	—	76.9	—	—	76.3	—	—	—	—

各放射能濃度及び線量率の解析結果はおおむね 10 %以内で一致していた。シミュレーション効率を運用する上では、定期的に線源効率で解析した結果との差を把握しておくことが重要である。

解説 B in-situ 測定可能範囲と測定時間

解説 B.1 検出可能レベル（下限）と測定時間の関係

次の条件を基に、計数誤差の3倍となる値を検出可能レベルとし、表 B.1 に示した。

- ・ 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 50 nGy/h）

表B.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

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って変動するので、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 1 mSv/年（約 140 nGy/h に相当）の約 1/1000 のレベルである。

解説 B.2 測定上限について

線量率が高い地点での測定は、光子の入射数が増加するため、検出器の不感時間（デッドタイム）が増大し、数え落とし又はパイルアップ等によって放射能濃度を過小評価する危険性が高まることが想定される。また、作業員の被ばくの観点からも in-situ 測定の可否を判断するために、測定上限を設定することが必要である。

一般的な MCA の性能として、検出器へ入射する光子の数（Input Count Rate）がある一定以上まで増えると、検出される光子の数（Throughput Count Rate）は減少し（図 B.1）、分解能は大きくなり（図 B.2）、デッドタイムは増大する（図 B.3）。また、デッドタイムの割合（ $100 - \% \text{ Live time}$ ）が増大すると検出されたピーク面積の測定誤差は大きくなる（図 B.4）。

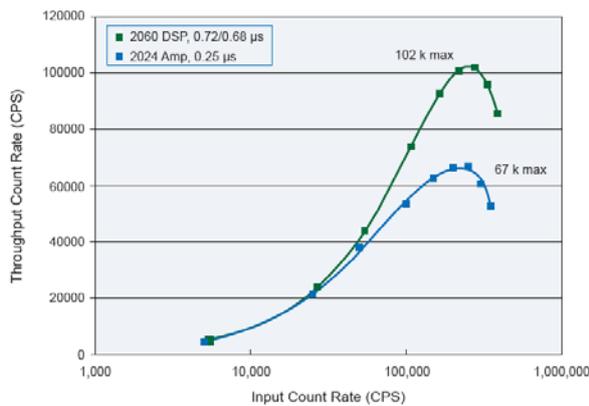


図 B.1 Input Count Rate と Throughput Count Rate の関係^{*1}

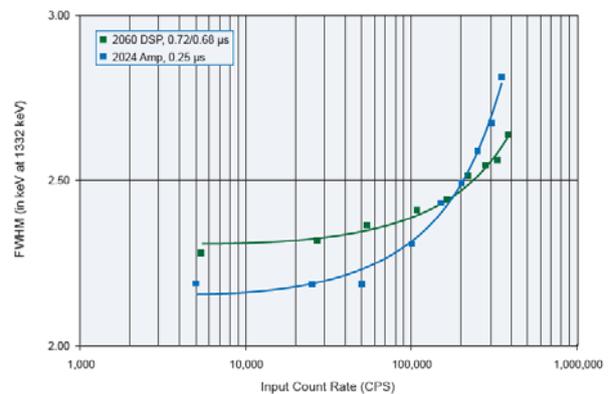


図 B.2 Input Count Rate と FWHM の関係^{*1}

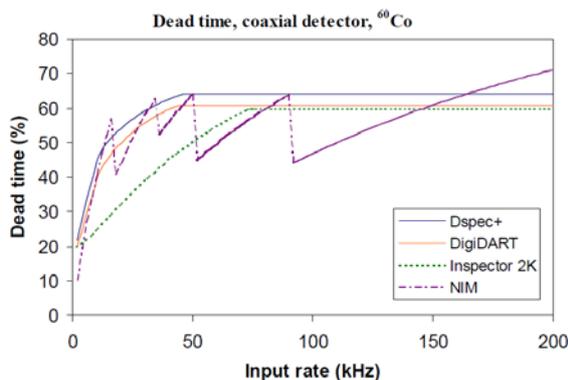


図 B.3 Input Rate と デッドタイムの関係^{*2}

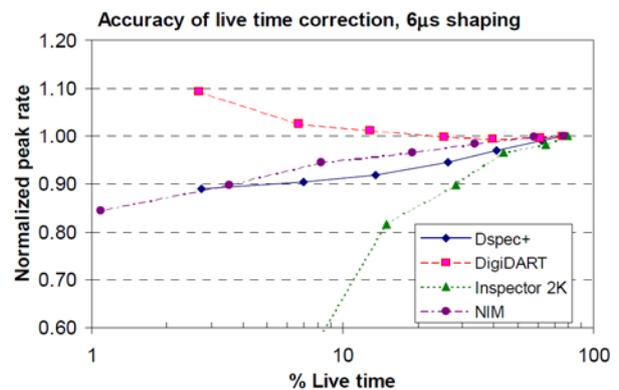


図 B.4 % Live Time とピーク面積の関係^{*2}
(デッドタイム = $100 - \% \text{ Live time}$)

in-situ 測定時に Input Count Rate を用いて測定の可否を判断することは困難であるため、実際の運用上では in-situ 測定前に判断できる目安があることが望ましい。

^{*1} 「Performance of Digital Signal Processors for Gamma Spectrometry」, Canberra Industries, Inc., Application Note (2008)

^{*2} 「Comparisons of the Portable Digital Spectrometer Systems」, Duc T. Vo, Phyllis A. Russo, LA-13895-MS, Los Alamos NATIONAL LABORATORY (2002)

そこで、in-situ 測定前にその場所で測定したサーベイメータの線量率から測定上限を判断することを検討した。福島県内において測定した結果（測定日：2012年8月～9月、同一機種 of in-situ Ge 1台分）を用いて、サーベイメータで測定した線量率と in-situ Ge のデッドタイムの関係を図 B.5 に示した。

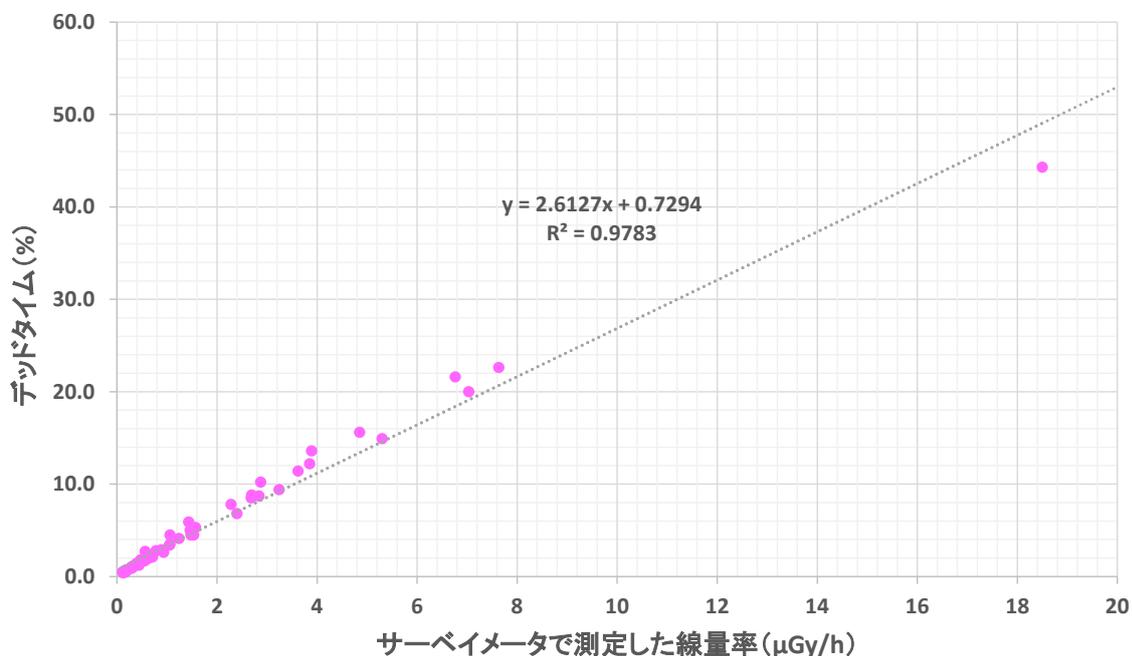


図 B.5 サーベイメータによる線量率と in-situ Ge のデッドタイムの関係

図 B.5 の結果と次の条件を基に、サーベイメータによる線量率とデッドタイム及び測定時間の関係を、表 B.2 に示した。

- ・ 測定時間 30 分
- ・ 相対効率 20.6 % の Ge 半導体検出器を使用

表 B.2 サーベイメータによる線量率とデッドタイム及び測定時間の関係

サーベイメータで測定した線量率 (μGy/h)	デッドタイム (%)	測定時間 (分)
1	3	31
5	14	35
10	27	41
15	40	50
20	53	64

表 B.2 から、サーベイメータで測定した線量率が $20 \mu\text{Gy/h}$ の時にデッドタイムが約 50 % になることが想定される。デッドタイムが 50 % の場合、測定に要する時間が 2 倍かかることになり、作業効率及び作業員の被ばくの観点から、更にデッドタイムが大きくなる地点での測定を実施することは現実的ではないことから、 $20 \mu\text{Gy/h}$ を測定上限とした。機種間によって処理時間が異なるので、ここで示した測定上限はあくまで目安である。

以上のように、線量率が高い地点では数え落とし又はパイルアップ等によって、デッドタイムが大きくなり、検出器へ入射する光子の数 (Input Count Rate) に対して検出される光子の数 (Throughput Count Rate) は減少する。

一方、対象となる人工放射性核種のピーク計数は増加するため、その人工放射性核種だけを測定対象とする場合には短時間でも十分な測定精度が得られることが想定される。そのため、測定対象核種、測定精度、作業員の安全面から総合的に判断して、測定上限及び測定時間を設定することが重要である。線量率が高い地点における測定時間と測定精度の関係について解説 B.3 に示した。

解説 B.3 線量率が高い地点における測定時間と測定精度の関係

線量率が高い地点での測定は、対象となる人工放射性核種のピーク計数の増加によって、短時間の測定でも十分な精度が得られることが想定される。

次に示した福島県内における測定データを用いて検討を行い、in-situ 測定スペクトルを図 B.6 に、検出された人工放射性核種の相対計数誤差を図 B.7 に示した。

福島県内における測定データ (2011年12月27日測定)

Real time : 4478.5 秒 Live time : 3600 秒 DT : 32.7 %

線量率 : 6 μ Sv/h

^{134}Cs : 8.0×10^5 Bq/m², ^{137}Cs : 9.3×10^5 Bq/m², $^{110\text{m}}\text{Ag}$: 3.5×10^3 Bq/m²

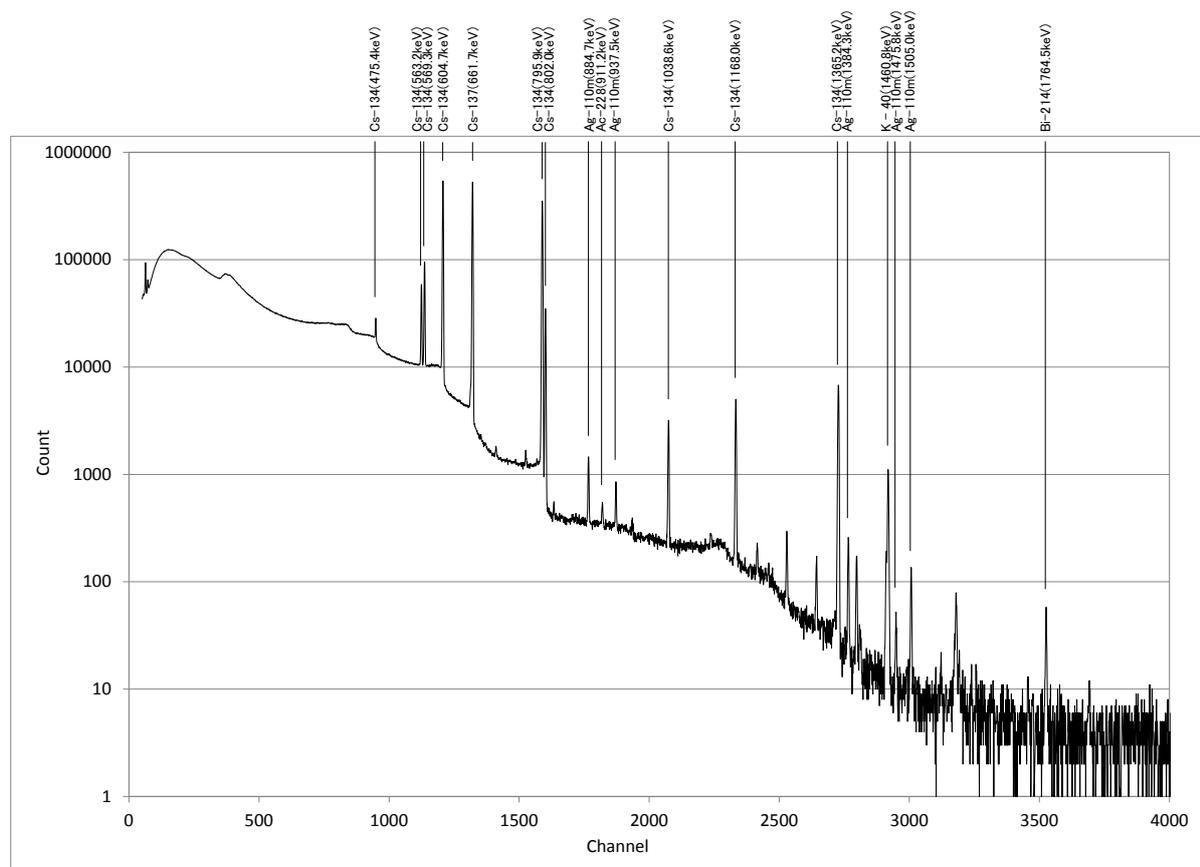
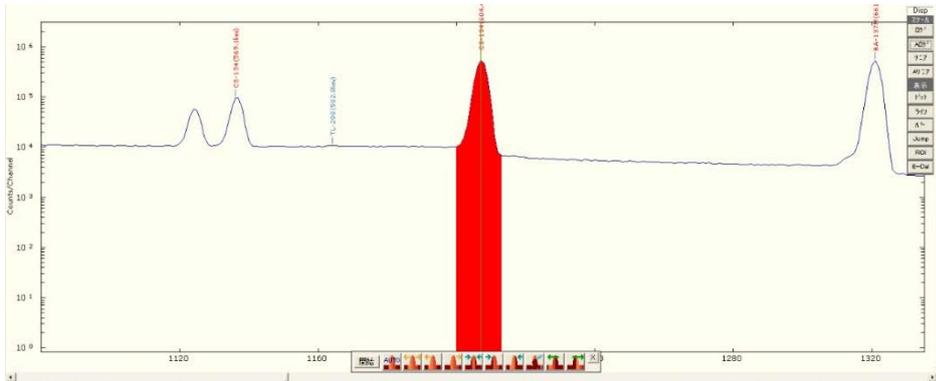


図 B.6 in-situ 測定スペクトル

○ ^{134}Cs (605 keV) (1 時間測定)

総計数 : 2023934 カウント 正味計数 : 1906609 カウント ベース計数 : 117325 カウント

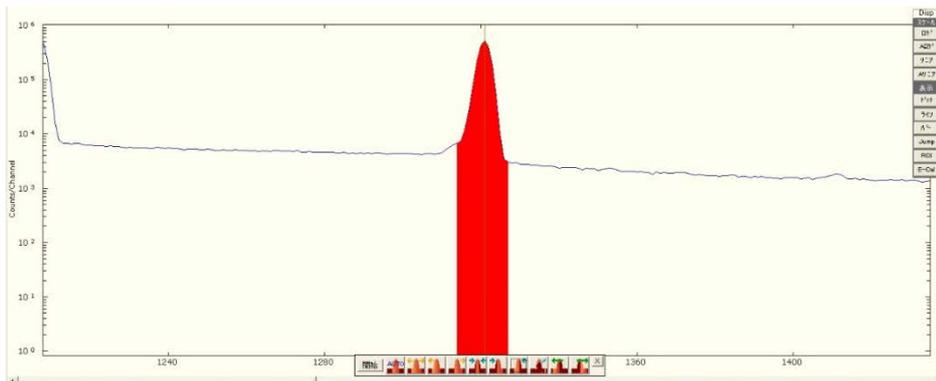
計数誤差 : 1463.3 相対計数誤差 : 0.077 %



○ ^{137}Cs (662 keV) (1 時間測定)

総計数 : 1971520 カウント 正味計数 : 1906912 カウント ベース計数 : 64608 カウント

計数誤差 : 1426.9 相対計数誤差 : 0.075 %



○ $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (885 keV) (1 時間測定)

総計数 : 9098 カウント 正味計数 : 4714 カウント ベース計数 : 4384 カウント

計数誤差 : 116.1 相対計数誤差 : 2.5 %

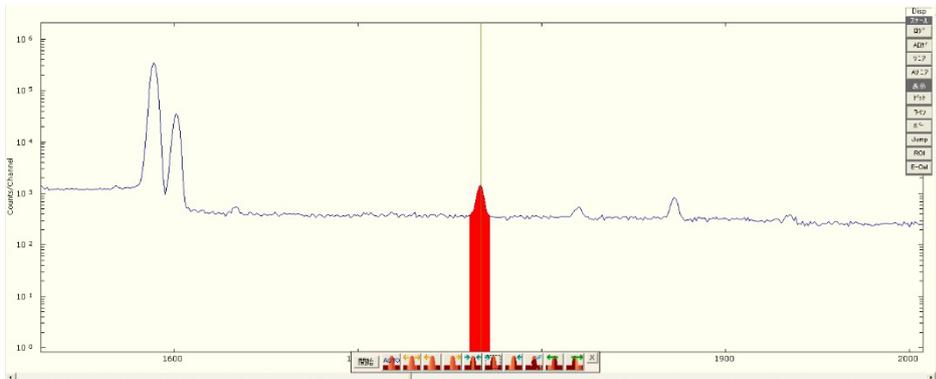


図 B.7 検出された人工放射性核種の相対計数誤差

図 B. 7 から、線量率 $6 \mu\text{Sv/h}$ の地点において、1 時間測定を行った際の ^{137}Cs の相対計数誤差は 0.075% であり、統計的精度として十分過ぎるものである。この測定データを基にして、測定時間の変化による測定精度の変化を評価し、図 B. 8 に示した。

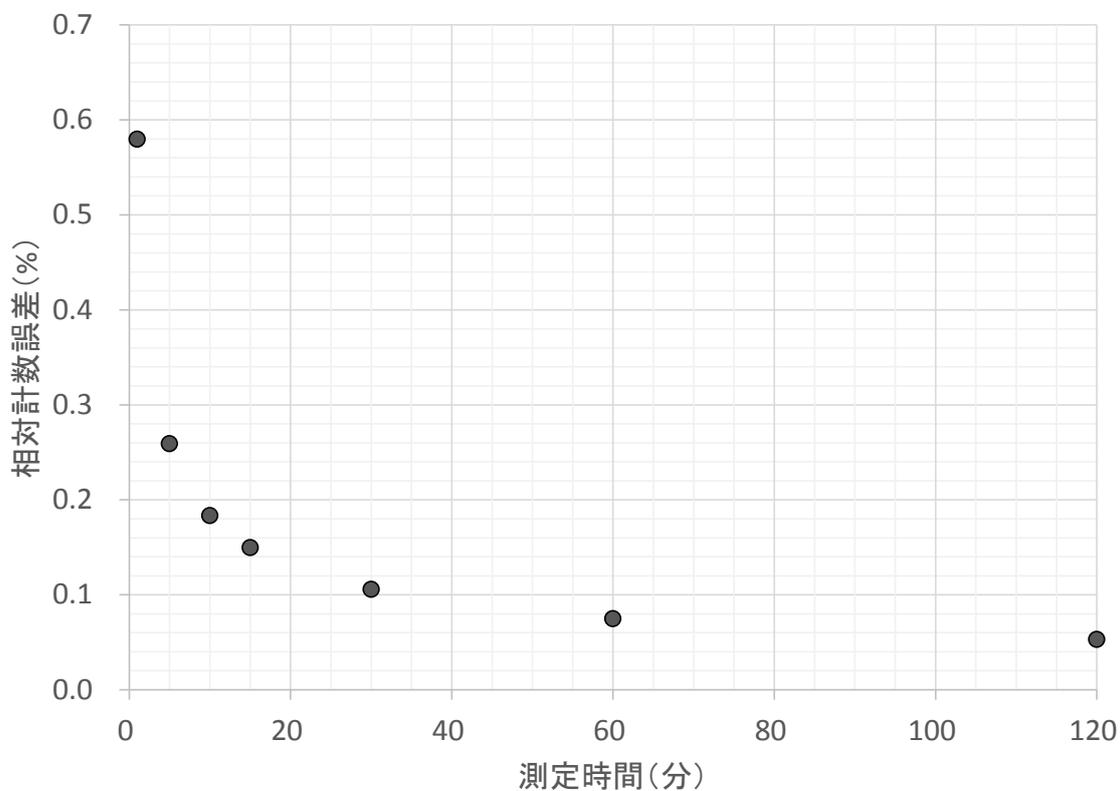
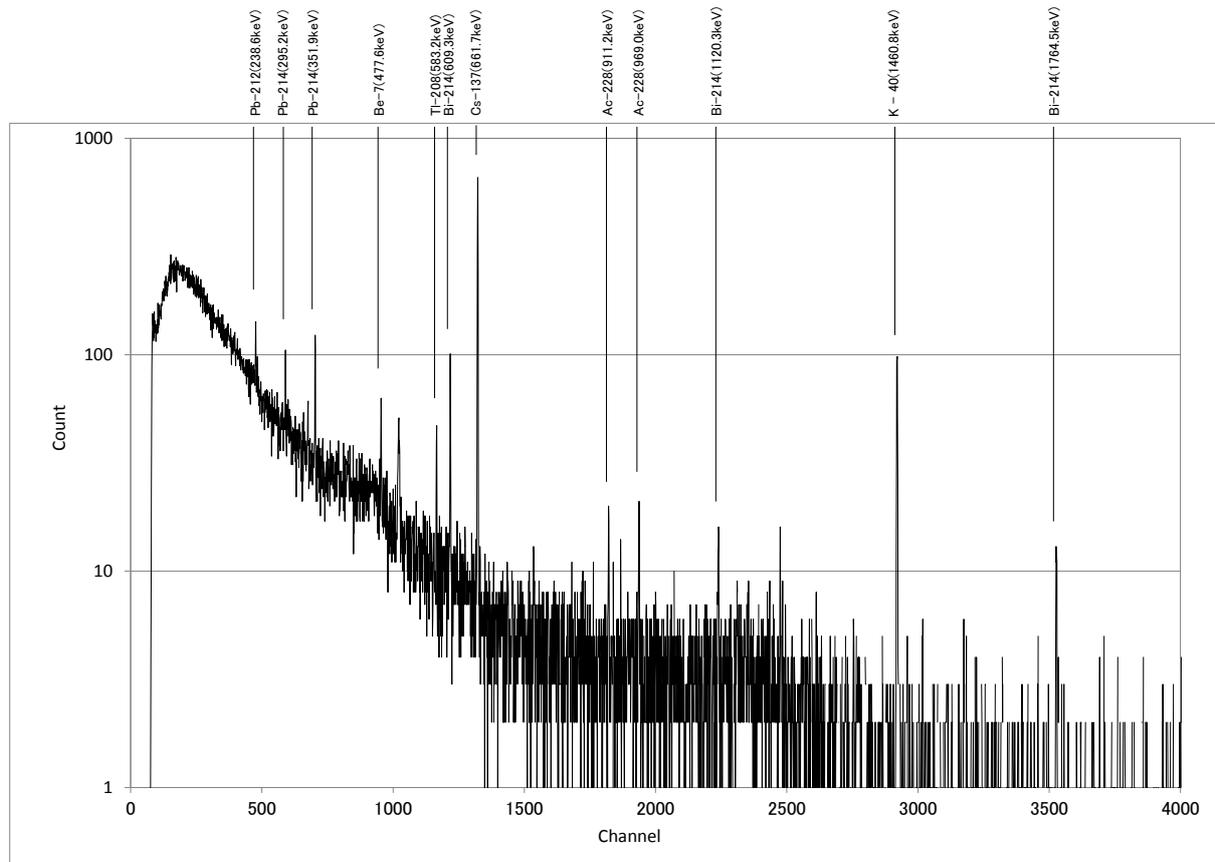


図 B. 8 測定時間と ^{137}Cs の相対計数誤差の関係

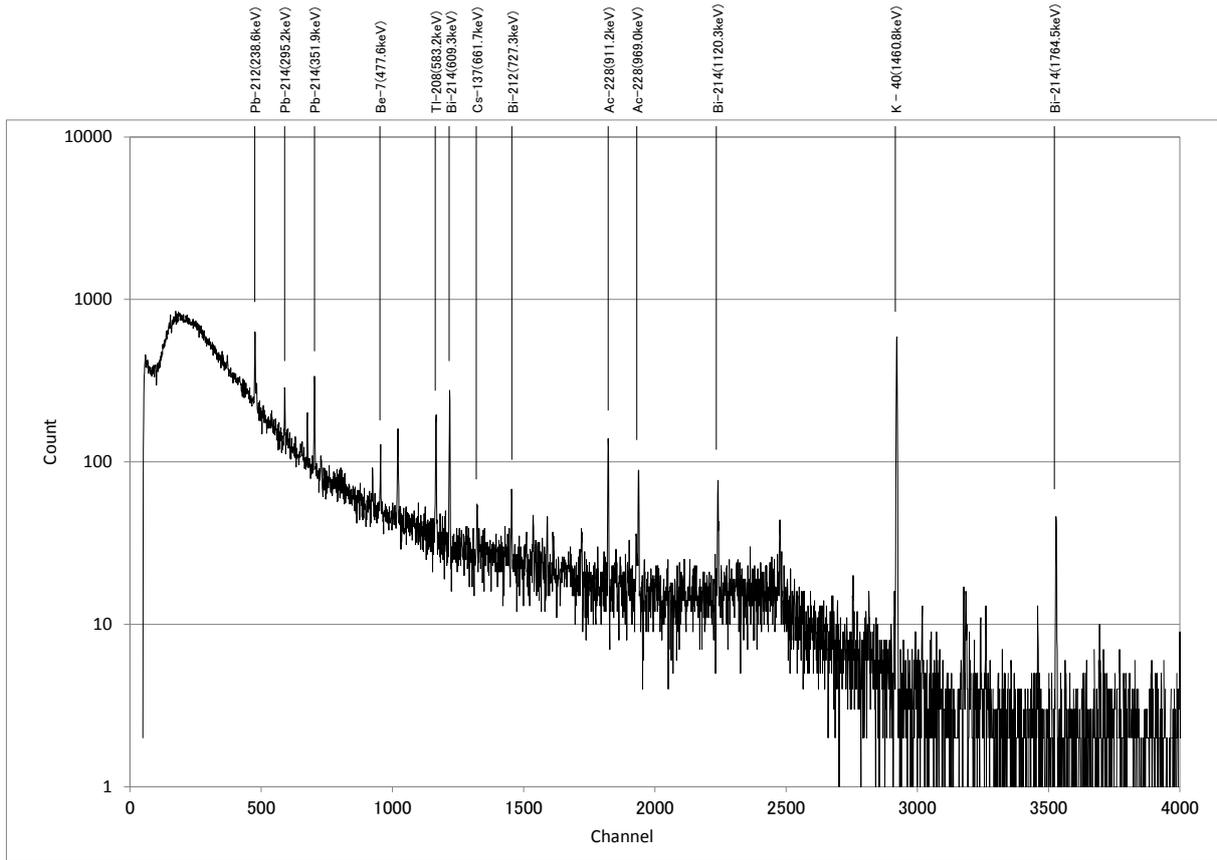
図 B. 8 から、 $6 \mu\text{Sv/h}$ のような高線量率地点の測定では、数分間の測定で相対計数誤差が 1% 以下の測定が可能であり、十分な統計的精度を担保することが可能といえる。測定精度を高めるための長時間測定は被ばく線量の増加を伴うことから、平常時とは異なり、短時間の測定に切り替える必要がある。

解説 C in-situ 測定スペクトル例

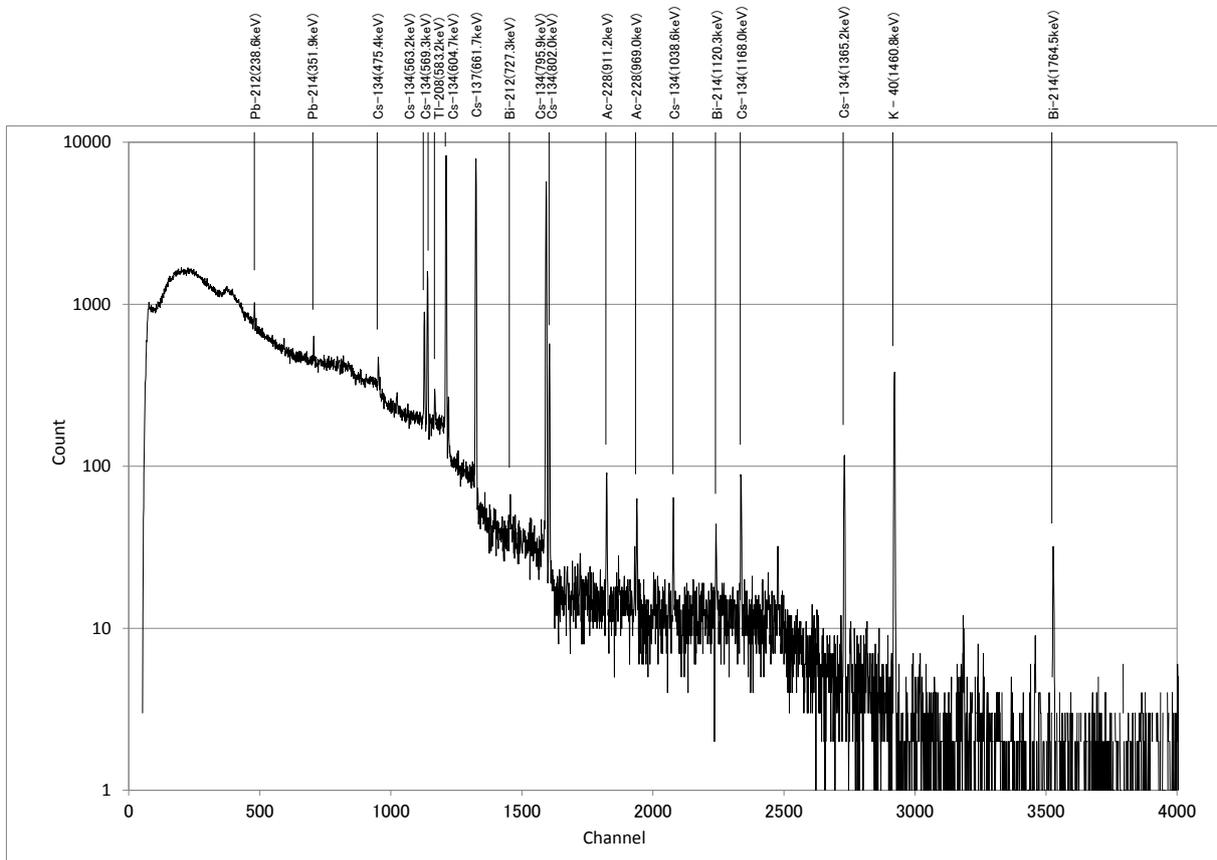
富士山周辺における測定スペクトル (2001年3月7日)



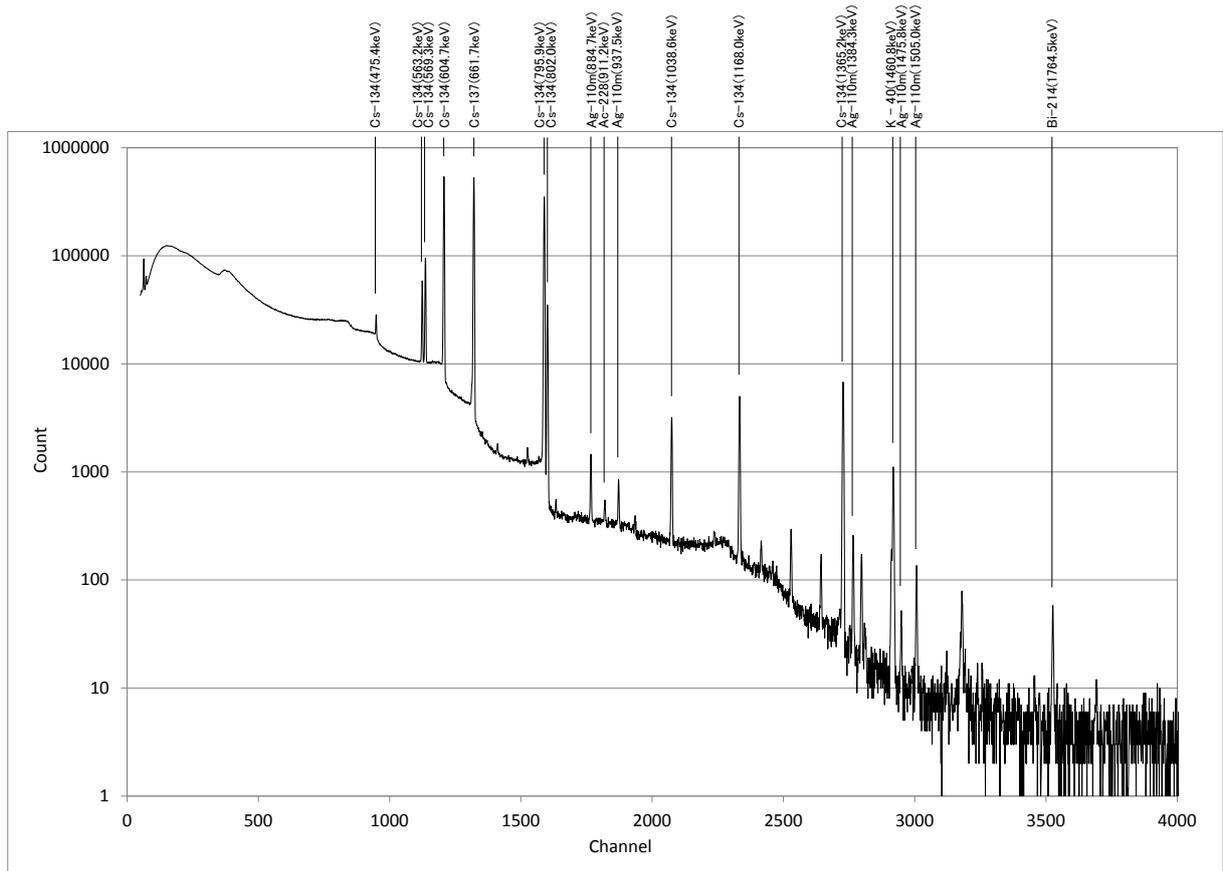
福島第一原発事故前の千葉県における測定スペクトル (2010年12月2日)



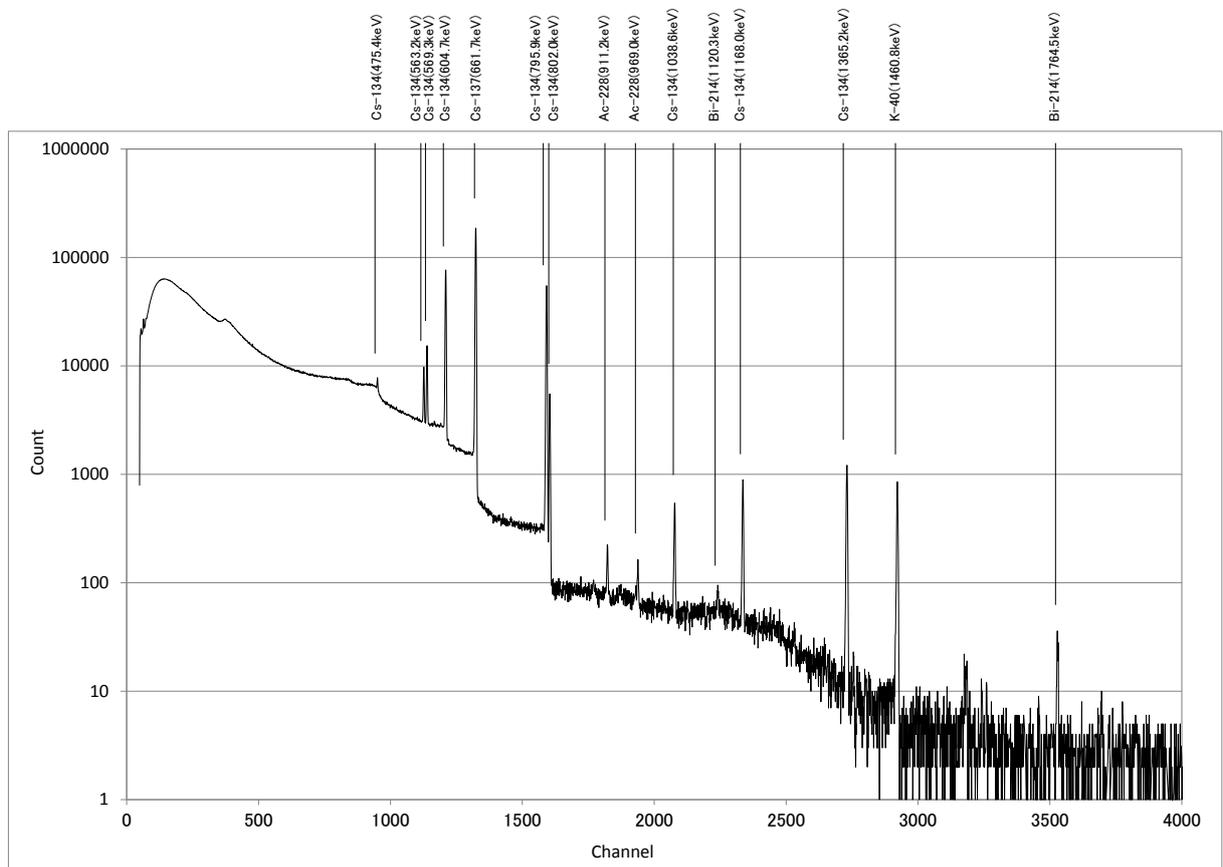
福島第一原発事故から9か月後の千葉県における測定スペクトル (2011年12月7日)



福島第一原発事故から9か月後の福島県における測定スペクトル (2011年12月27日)

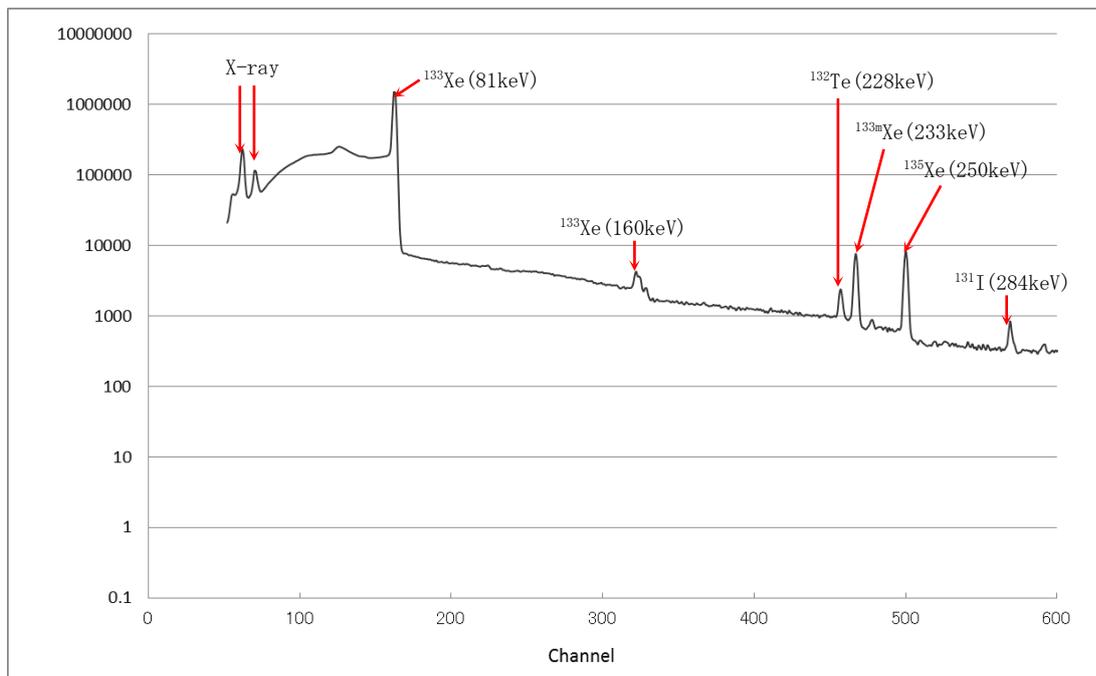
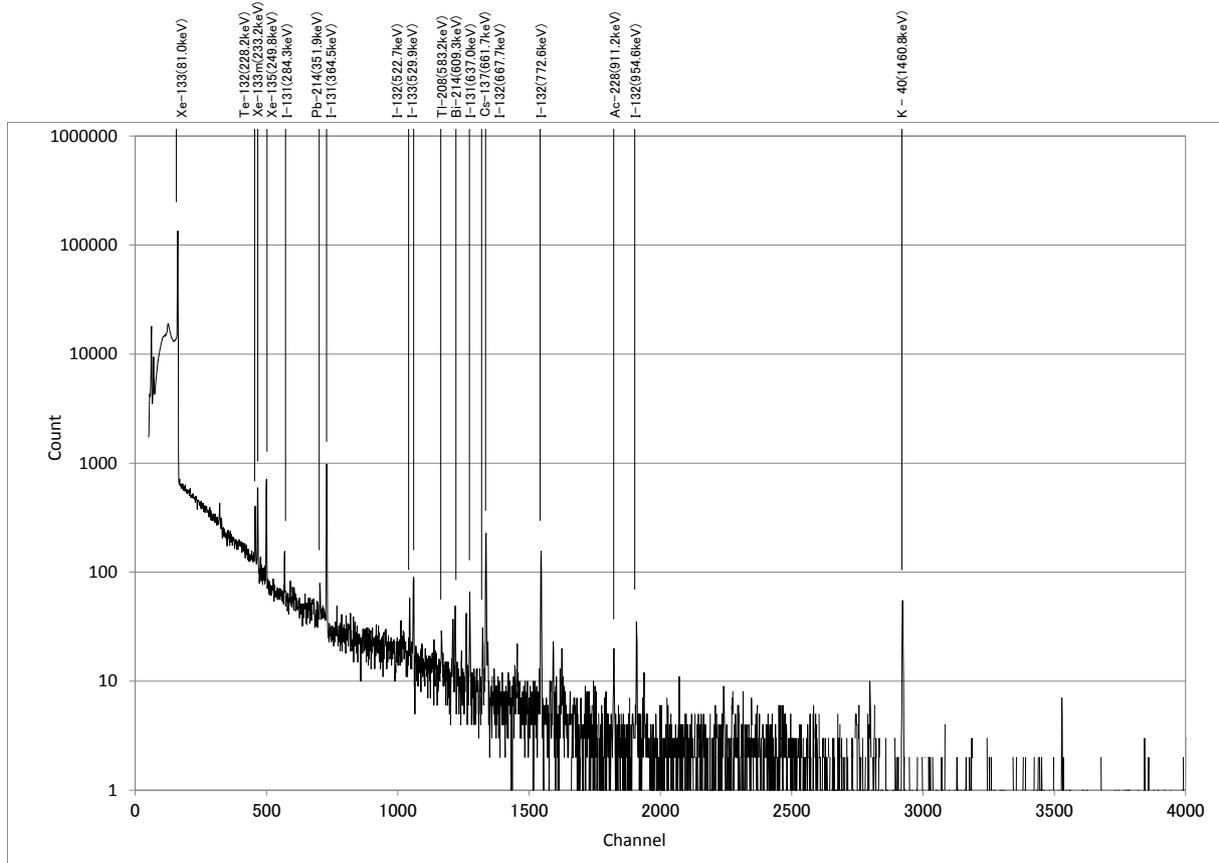


福島第一原発事故から3年8か月後の福島県における測定スペクトル (2014年11月27日)



- ・福島第一原発事故によるプルーム通過時の千葉県における測定スペクトル（2011年3月15日）

（屋外に上向きに常設されている in-situ Ge の測定結果）



プルームを対象とした場合、放射性核種が空気中に一様に分布していることを想定して、放射能濃度及び線量率を算出することが可能である。

解説 D 原子力災害時におけるエネルギー校正

原子力災害時においては、事故に伴い放出された多量の人工放射性核種の影響によって、コンプトン連続領域の計数が増加することが想定される。表 D.1 の放射性核種のうち、特に低エネルギー領域の核種についてはピークが確認できず、エネルギー校正に利用できない可能性がある（図 D.1）。その場合には、表 D.2 のような原子力災害に伴い放出された人工放射性核種のピークをエネルギー校正に利用することを考慮する必要がある。

表 D.1 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 γ 線エネルギー

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比 *
^{212}Pb	239	0.434
^{214}Pb	352	0.369
^{208}Tl	583	0.306
^{214}Bi	609	0.469
^{228}Ac	911	0.290
^{40}K	1461	0.107
^{208}Tl	2615	0.359

* ^{238}U 及び ^{232}Th 系列については親核種の壊変当たりの放出比

(ICRU Rep. 53 Table 3.4 から抜粋)

表 D.2 原子力災害時にエネルギー校正に利用できる人工放射性核種と γ 線エネルギーの例

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出比
^{134}Cs	605	0.975
^{137}Cs	662	0.849
^{134}Cs	796	0.851
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	885	0.729
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1384	0.243
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1505	0.131

(ICRU Rep. 53 Table A.1 から抜粋)

福島県内における測定データ (2011年12月27日測定)

Real time : 4478.5 秒 Live time : 3600 秒 DT : 32.7 %

線量率 : 6 μ Sv/h

^{134}Cs : 8.0×10^5 Bq/m², ^{137}Cs : 9.3×10^5 Bq/m², ^{110m}Ag : 3.5×10^3 Bq/m²

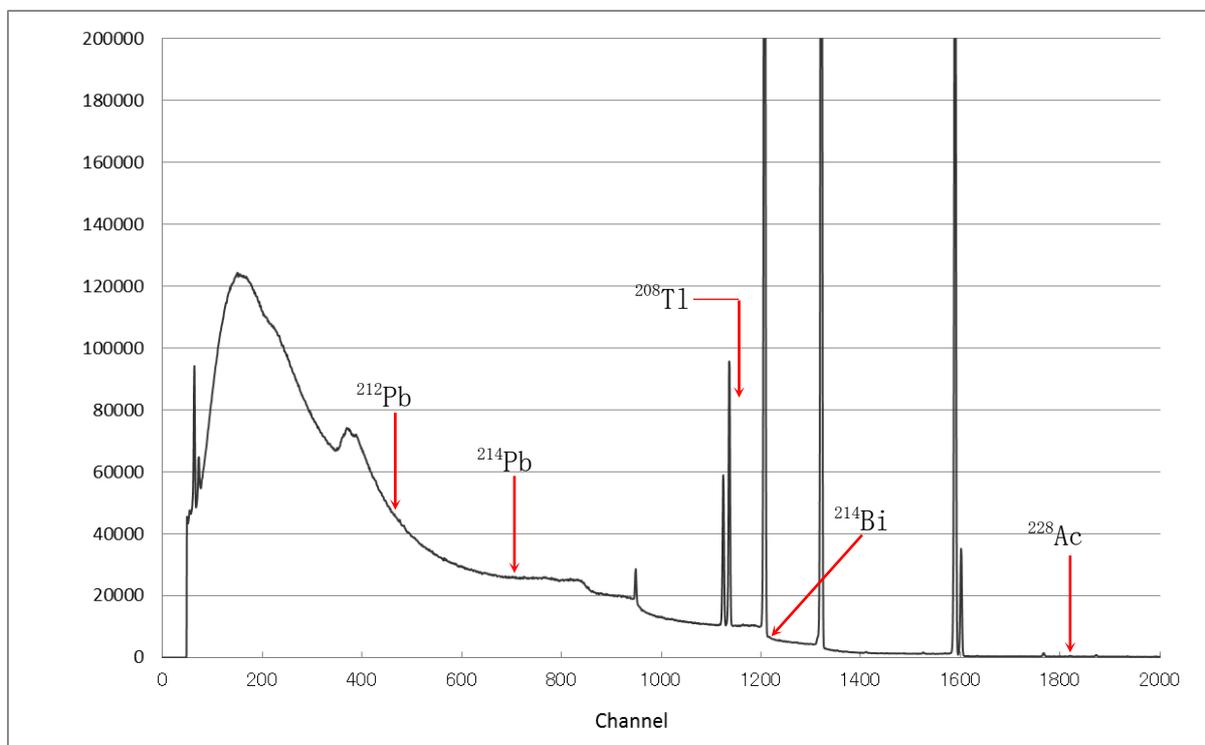
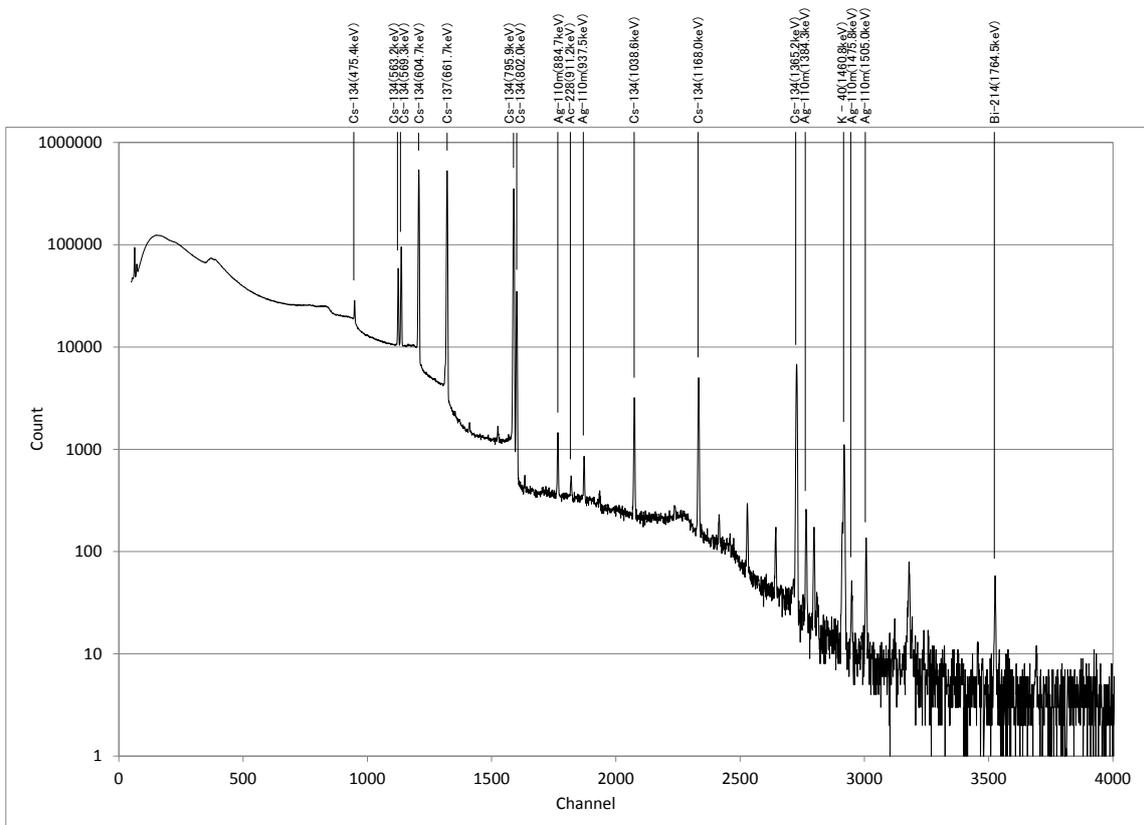


図 D.1 低エネルギー領域の自然放射性核種がエネルギー校正に利用できない事例

解説 E 放射性物質の土壌中における鉛直分布

解説 E.1 鉛直分布を表すパラメータ β 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 β 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、 β 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、地表沈着後の侵食及び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 β を表 E.1 に示す。

表 E.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	β^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 から引用)

E. 1.1 簡易的な評価方法

土質が特殊^{*1}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、表 E. 2（本文中の表 5.3）の値を用いることができる。表 E. 2 の β の値は、地表の粗さの影響も考慮されている。また、福島第一原発事故後の β の経時変化を図 E. 1 に示した。

放射能濃度を解析する際、大きな β を用いるほど解析結果が高くなり安全側の評価になる。したがって、放射性物質沈着後の経過時間又は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 β を用いる必要がある。

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ため、パラメータとしては β (g/cm²)、又は α/ρ (cm²/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壌中における鉛直分布を表すパラメータとして α (cm⁻¹) を入力するものがあるので、 β 及び α 等を換算するための表を表 E. 2 に記載した。

表 E. 2 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の換算表
(土壌密度 (ρ) を 1.6 g/cm³ とした場合)

沈着後の経過時間(年)	降水量(mm)	β (g/cm ²)	RL (cm)	α/ρ (cm ² /g)	α (cm ⁻¹)
0~1	<3	0.1	0.063	10	16
0~1	≥3	1.0	0.63	1.0	1.6
1~5	-	3.0	1.9	0.33	0.53
5~20	-	10	6.3	0.10	0.16
専門部会報告書		4.8	3.0	0.21	0.33 ^{*2}

数値は一部を除き ICRU Rep. 53 から引用

RL は β を土壌密度(ρ)で除したもの、 α/ρ は β の逆数、 α は RL の逆数である。

^{*1} 森林地域では腐葉土の影響によって β は低い傾向にある。

^{*2} 「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）

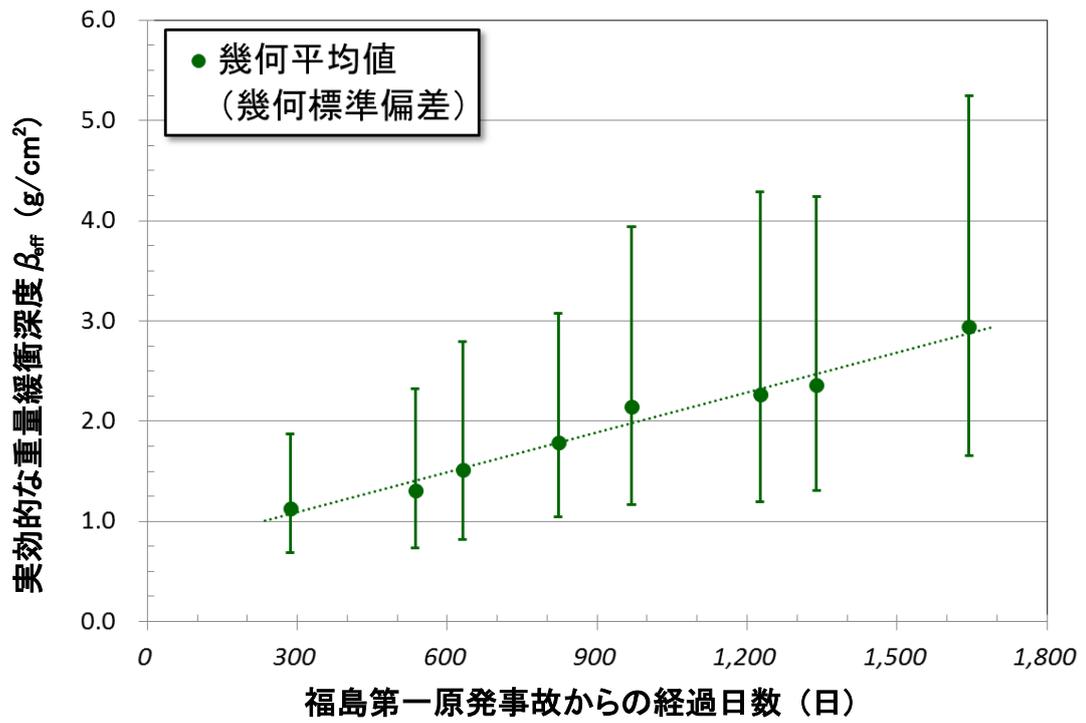


図 E.1 福島第一原発事故後の β の経時変化 ^{*3}

^{*3} データ提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 松田 規宏

E.1.2 土壌を採取して評価する方法

より高い精度で in-situ 測定結果を解析する場合、in-situ 測定場所の土壌中における人工放射性物質の深度分布を評価するために、土壌を層別に採取することが必要である。HASL のマニュアルでは、深さ 0~2.5、2.5~5、5~30 cm 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、10~30 cm の土壌採取を提案している。また、福島第一原発事故から約 4 年半後の福島県内における放射性セシウムの 90 % 深度（放射性セシウムの沈着量の 90 % が含まれる地表面からの深度）は平均 4.1 cm（図 E.2）であったという報告^{*4}があることから、沈着直後から数年は地表に近い所（深さ 10 cm 以内）を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質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、同一地点で多数の土壌を採取する必要はない。広範囲の地域における放射性物質の分布状況を調査する場合には、周辺環境及び土質等を考慮して、採取地点の分布に偏りが無いように幾つかの代表的な地点を選定し、平均的な深度分布を評価する方が効率的である。なお、原子力災害時に土壌採取を実施する場合には、作業員の被ばく低減を考慮することが重要である。

土壌を採取する方法としては、採土器等を用いてコアサンプルを採取する方法、又はスクレーパープレート等を用いて層別に採取する方法がある。採土器等によるコアサンプルの採取は、スクレーパープレートによる採取に比べて時間をかけずに行うことができ、深度分布を簡易的に評価する場合には有効である。採土器等を用いて採取する方法については、放射能測定法シリーズ No.16「環境試料採取法」を参照する。ここでは、採取深度を細かく調節でき、深度分布の精密な評価を行いたい場合に有効であるスクレーパープレートによる採取方法を示す。

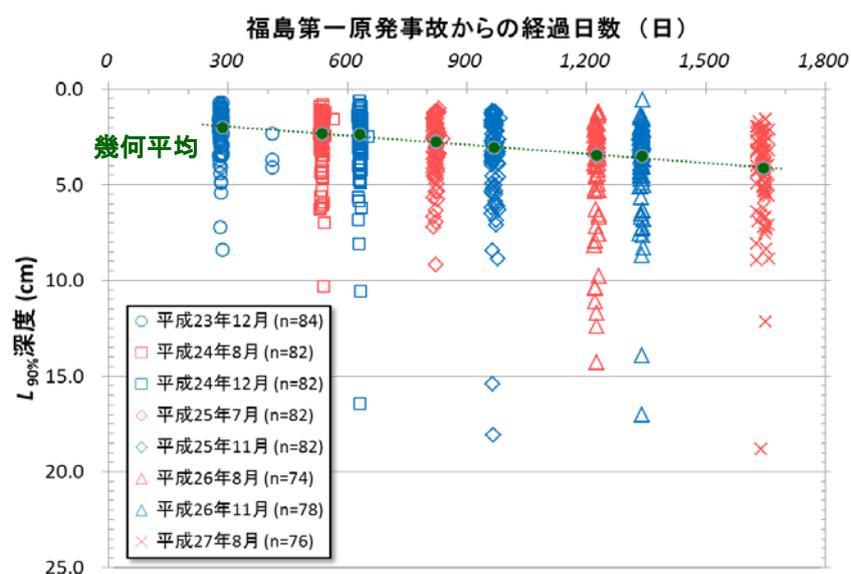


図 E.2 福島第一原発事故からの経過日数と放射性セシウムの 90% 深度の関係^{*4}

^{*4} 「平成 27 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約）事業成果報告書 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」 松田規宏、斎藤公明（2016）

E.1.2.1 スクレーパープレートによる土壌採取

スクレーパープレートは、土壌を表層から鉛直方向に任意の間隔（最小 5 mm 間隔）で削り取って採取する器具（図 E.3 参照）であり、地面に固定する金属フレームと、フレーム内の土壌を削り取りながら採取する金属プレートから構成される。金属プレートに任意の深さで金属棒を固定することによって、採取する深さを調節する。層ごとの土壌を注意深く採取することによって、クロス・コンタミネーションを僅かにすることができる。

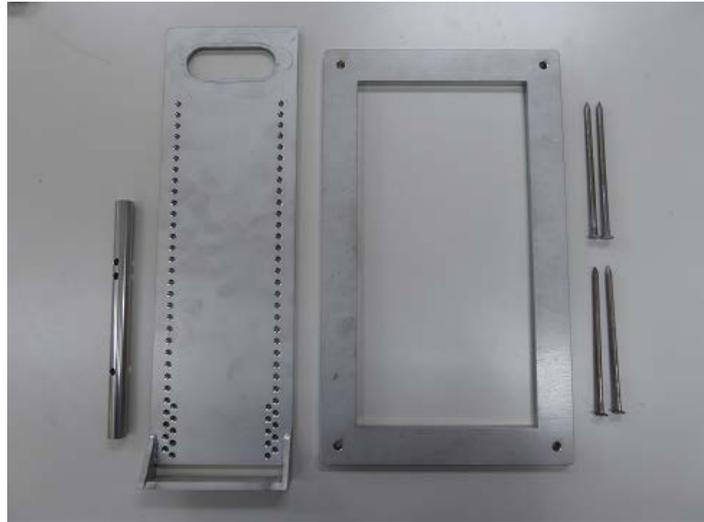


図 E.3 スクレーパープレート

(1) 採取地点の選定

通常 in-situ 測定場所（4.1 参照）の近くで、in-situ 測定場所とできる限り同一の地形条件の場所を採取地点に選定する。1 か所での採取に数時間を要するため、in-situ 測定地点が多い場合に全地点で土壌採取を行うことは現実的に困難である。その場合、周辺環境及び土質等を考慮して、採取地点の分布に偏りがないように幾つかの代表的な地点を選定し、平均的な深度分布を評価する。なお、原子力災害時に土壌採取を実施する場合には、作業員の被ばく低減を考慮することが重要である。

(2) 採取層の決定

放射性物質が地表に沈着してからの経過時間を考慮して採取層を決定する。沈着直後であれば放射性物質は表層付近に分布していると予想されることから、表層付近を細かく層（5 mm 間隔）に分けて重点的に採取する。時間経過とともに放射性物質の移行が認められる場合には、より深い層までの採取が必要になる。また、除染作業の実施等が確認された場合には、適宜採取層を決定する必要がある。

(3) 採取器具の準備

- ① スクレーパープレート
- ② 採取土壌用ビニール袋（採取層ごと）
- ③ バット
- ④ ハンマー、剪定ばさみ、移植ごて、ヘラ、ピンセット
- ⑤ 使い捨てゴム手袋
- ⑥ 採取器具の洗浄用純水（ウェットティッシュでもよい。）
- ⑦ ブルーシート（複数地点で採取する場合には、コンタミネーションを避けるため、使い捨てできる紙等を用いるとよい。）
- ⑧ 量り（現地で土壌重量を測定する場合のみ）
- ⑨ U8 容器（採取層ごと；現地で測定用試料を調製する場合のみ）
- ⑩ 雨除け・日除け用のテント又はパラソル（必要に応じて）

(4) 採取手順

- ① ハンマー等を使用してフレームを土壌表面に固定する（図 E.4 参照）。その際、フレームが土壌表面に密着して接地するように固定する。



図 E.4 フレームの固定

- ② 土壌表面に植物がある場合は、地表に出ている部分だけを剪定ばさみ等を用いて注意深く取り除く（図 E.5 参照）。石がある場合は土壌に埋まっていないものだけを取り除く。これらの植物又は石等を放射能濃度の測定に供する場合は、土壌と分けて採取しておくとうい。



図 E.5 植物の除去（左：除去前、右：除去後）

- ③ 採取したい土壌の深さになるように金属棒をねじでプレートに固定し、採取層を調節する（図 E.6 参照）。

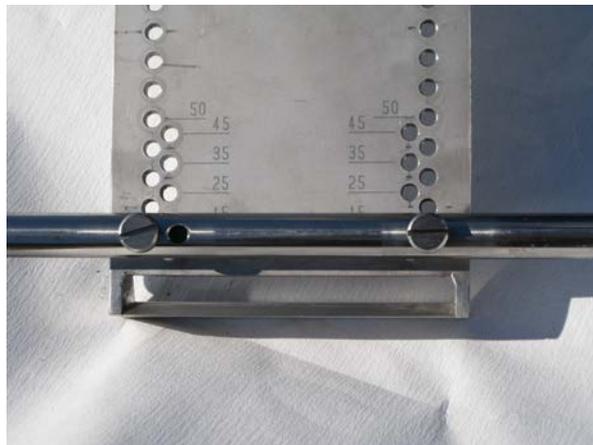


図 E.6 プレートの調節

- ④ プレートをフレーム内で水平方向に移動させて土壌を削り取り、ビニール袋に入れる（図 E.7 参照）。プレートを地面に対して斜めに傾けて採取すると、調節した深さよりも深く採取してしまうことになるため、プレートは垂直に保ちながら採取するように注意する。採取作業は土壌が削り取れなくなるまで行う（図 E.8 参照）。特にフレーム内の端及び角をきれいに採取しないと下層土壌採取時の上層の混入、又は土壌密度算出時の誤差の原因となるので、移植ごて又はヘラ等を用いて注意深く採取する。



図 E.7 スクレーパープレートによる土壌採取



図 E.8 土壌採取後

- ⑤ 層内の土壌採取終了後、次の層の採取時に上層が混入することを防ぐため、土壌が付着したプレート等を純水で洗い、水気を拭き取る（図 E.9 参照）。現場で純水を用意できない場合は、ウェットティッシュ等で土壌を拭き取るとよい。また、採取に使用したゴム袋は捨てて新しいものに交換する。



図 E.9 採取器具の洗浄

- ⑥ ③～⑤の作業を採取する層まで繰り返す。
 - ⑦ 全層の採取終了後、採取で生じた穴を周辺の土等を用いて埋め戻す（埋め戻し方法については事前に決めておくといよい）。
- 以下の⑧～⑩は採取した土壌を実験室等に持ち帰ってから作業してもよい。
- ⑧ 採取した土壌の層ごとの全重量を測定する。フレーム内の面積と採取した土壌の層厚から土壌の体積を求めることによって、層ごとの土壌密度を算出する。^{*5}
 - ⑨ 採取した土壌は、層ごとに湿土のままビニール袋等の容器の中で良く混合する。
 - ⑩ 採取した土壌を層ごとに湿土のまま U8 容器に詰め、詰めた土壌の高さ及び正味重量を計測し、放射能濃度測定用試料とする。

(5) 採取時の留意点^{*6}

- ① 採取作業が進むにつれて、プレートで削った内壁が崩れることによって上層の土壌が落下し混入することも起こり得る。その場合には注意して取り除き、下層土壌への上層土壌のコンタミネーションを避ける。内壁が崩れやすい場合は、霧吹き等で内壁を湿らせて保護するとよい。
- ② 根は剪定ばさみ等で切って、その層の土壌に加える。
- ③ 複数の層にまたがって石が存在する場合には、最も多く含まれている層の土壌に加える。どの層に含まれているか判断がつかない場合は上層に加える（通常、上層の方が放射能濃度が高いため）。
- ④ 地面が凍結している場合は、溶けるのを待つか、ガスバーナー等を用いて溶かした後に採取する。
- ⑤ 積雪がある場合は、土壌表面を乱さないように慎重に雪を取り除いてから採取する。

(6) 記録

- ① 採取地点の位置情報
- ② 採取日時
- ③ 採取時の気象状況
- ④ 採取地点の地目
- ⑤ 採取土壌深度と重量
- ⑥ 写真
採取地点全景・近景、採取状況、採取土壌の様子 等
- ⑦ その他の特記事項

^{*5} 層ごとに土壌密度を算出せずに、採土器等を用いて採取した土壌の重量と採土器の体積から平均的な土壌密度を算出することもできる。

^{*6} 「Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides」 F.Zapata (2010)

E. 1. 2. 2 β の計算方法

(1) 放射性物質の土壤中における鉛直分布が指数関数で近似できる場合

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。指数関数で近似できる場合、採取した土壤の測定結果から β を算出するには、放射能濃度 (Bq/g) を重量深度に対する指数関数で近似して式 (E. 1) を基に β (g/cm²) を算出する。深度 (cm) から重量深度 (g/cm²) に換算するには、その場の土壤密度^{*7}を用いる必要がある。

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

$A(Z)$: 重量深度 Z における放射能濃度 (Bq/g)

Z : 重量深度 (g/cm²)

単位面積当たりの土壤の重量で表される地表面からの深度。

A_0 : 地表面における放射能濃度 (Bq/g)

β : 重量緩衝深度 (g/cm²)

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。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、 β を土壤密度 ρ (g/cm³) で除して RL (cm)、 β の逆数を α / ρ (cm²/g)、RL の逆数を α (cm⁻¹) として表す場合もある。

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壤中における鉛直分布を表すパラメータとして α (cm⁻¹) を入力するものがあるが、その場合には注意が必要^{*8}である。

重量緩衝深度 β の計算例

①採取した土壤の記録及び測定結果から、表 E. 3 のような表を作成する。

重量深度の求め方

採取した土壤の各層の深度は、地表面 (0 cm) から土壤を採取した層の中間までの深度とし、土壤重量は、地表面から直上層までの土壤重量及び当該層の土壤重量の半分の重量の総量とする。また、土壤を採取した面積には、土壤採取で使用した採土器、又はスクレーパープレートのフレーム内の面積を用いる。土壤重量を土壤採取面積で除する

^{*7} 土壤密度として一般的に 1.6 g/cm³ が用いられることがあるが、土壤を採取して β を求める際にはその場の土壤密度を用いる必要がある。

^{*8} 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 β (g/cm²)、又は α / ρ (cm²/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 α (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) α ではなく、土壤を採取して求めた α / ρ (cm²/g) に解析ソフトが仮定している土壤密度 (例 ; 1.6g/cm³) を乗じて、便宜上の α を求めてから解析を行う必要がある。

ことによって、重量深度を算出する。

表 E.3 β 算出のための表作成例

採取層 (cm)	深度 (cm)	採取層における 土壌重量(g)	深度までの 土壌重量(g)	採取面積 (cm ²)	重量深度 (g/cm ²)	セシウム 137 放射能濃度 (Bq/g)
0.0~0.5	0.25	47.4	23.7	450	0.053	1.003
0.5~1.0	0.75	154.2	124.5	450	0.277	0.856
1.0~1.5	1.25	131.5	267.4	450	0.594	0.711
1.5~2.0	1.75	259.2	462.7	450	1.028	0.523
2.0~3.0	2.50	538.5	861.6	450	1.915	0.195
3.0~4.0	3.50	479.1	1370.4	450	3.045	0.065
4.0~5.0	4.50	560.9	1890.4	450	4.201	0.028
5.0~8.0	6.50	1718.2	3029.9	450	6.733	0.009

土壌密度の求め方

表 E.3 の重量深度を深度で除することによって、地表面 (0 cm) から深度までの土壌密度を算出する。

採取層における土壌密度を求める場合は、採取層における土壌重量を土壌体積 (採取層の厚さ×採取面積) で除することによって算出する。

② β の算出

重量深度 Z を X 軸、セシウム 137 放射能濃度 $A(Z)$ を Y 軸としてグラフを作成する。得られたプロットに対して指数関数で近似して、近似式を求める (図 E.10)。

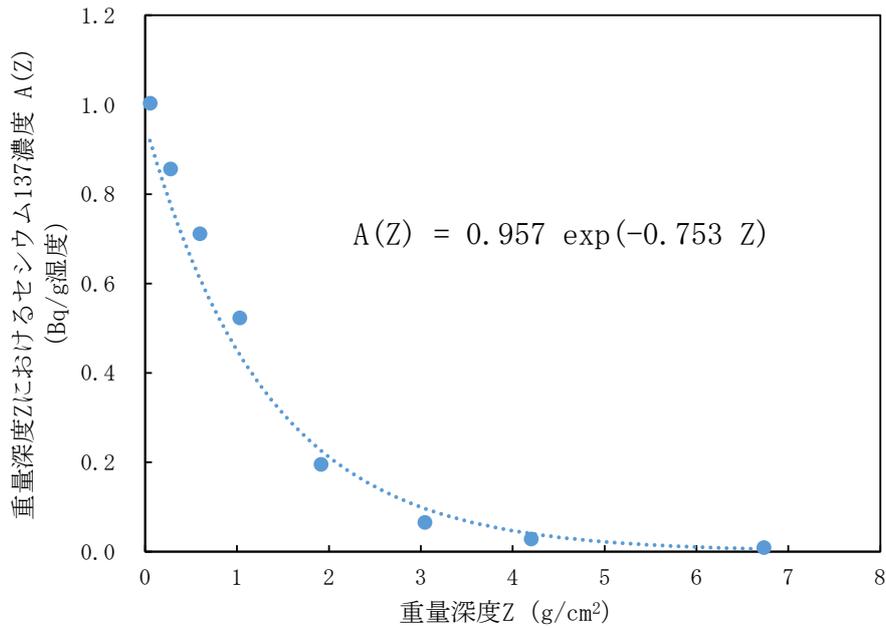


図 E.10 重量深度とセシウム 137 濃度の関係
(指数関数で近似できる場合)

近似式の係数から β を算出する。図 E.10 において、式 (E.1) における $-Z/\beta = -0.753 Z$ となるので、 $\beta = 1.33$ と計算することができる。

(2) 放射性物質の土壌中における鉛直分布が双曲線正割関数で近似できる場合

時間の経過とともに放射性物質の移動及び拡散によってある深さにピークをもつような分布 (図 E.11) が観測される。

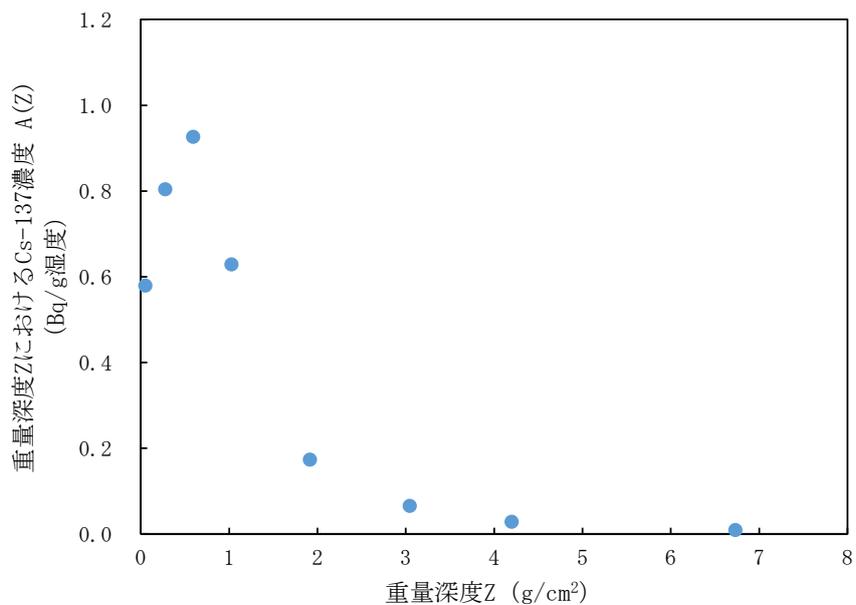


図 E.11 重量深度とセシウム 137 濃度の関係
(双曲線正割関数で近似できる場合)

このような深度分布に対しては、双曲線正割関数に基づく近似式 (E. 2) を用いて β を算出することができる^{*9 *10}。

$$A(Z) = A_0 \cosh(Z_0 / \beta) \operatorname{sech}\{(Z - Z_0) / \beta\} \quad (\text{E. 2})$$

$$* \operatorname{sech}(x) = 1 / \cosh(x), \quad \cosh(x) = \{\exp(x) + \exp(-x)\} / 2$$

Z_0 : 放射能濃度が最大となる重量深度 (g/cm²)

A_0 、 Z_0 及び β は深度分布を基に、反復法アルゴリズムを利用した最小二乗法によって算出する。式 (E. 2) は、土壌の深部において式 (E. 1) と同じ関数形となる特徴を有している。

指数関数的な深度分布の場合は、式 (E. 1) が 2 パラメータ (A_0 及び β) で構成されており、そのうちの重量緩衝深度 β を与えることで深度分布の形状を特定することができるため、in-situ 測定によって、土壌に沈着した放射性セシウムの沈着量 (Bq/cm²) を定量することができる。しかし、ある深さに放射能濃度のピークをもつ深度分布の場合には、式 (E. 2) が 3 パラメータ (A_0 、 Z_0 及び β) で構成されているため、 β を与えるだけでは深度分布の形状を特定することができない。したがって、このような深度分布については、指数関数相当の緩衝深度 (以下「実効的な重量緩衝深度 β_{eff} 」という。) を評価しておくことが解析上便利である。そのため、式 (E. 2) で解析した深度分布の沈着量と線量率の関係が指数関数的な深度分布のそれと同等になるよう斎藤ら^{*11}の換算係数を用いて、線量率を算出するための式 (E. 3) と沈着量を算出するための式 (E. 4) を同時に満足する実効的な重量緩衝深度 β_{eff} を求めることができる^{*10}。

$$\int_0^{\infty} A_{0,\text{eff}} \exp(-Z / \beta_{\text{eff}}) I_{\gamma} C(Z) dZ = \int_0^{\infty} A_0 \cosh(Z_0 / \beta) \operatorname{sech}\{(Z - Z_0) / \beta\} I_{\gamma} C(Z) dZ \quad (\text{E. 3})$$

$$\beta_{\text{eff}} A_{0,\text{eff}} = \beta A_{Z_0} \left[(\pi / 2) - \tan^{-1}\{-\sinh(Z_0 / \beta)\} \right] \quad (\text{E. 4})$$

$A_{0,\text{eff}}$: 実効的な (仮の) 地表面における放射能濃度 (Bq/g)

I_{γ} : 放射性核種が崩壊したときのガンマ線の放出率

$C(Z)$: 斎藤らの換算係数^{*11}

A_{Z_0} : 放射能濃度が最大となる重量深度における放射能濃度 (Bq/g)

β_{eff} : 実効的な重量緩衝深度 (g/cm²)

^{*9} 「Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant」 N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura, J. Takahashi, M. Nakano, K. Shimada, K. Uno, S. Hagiwara, K. Saito : Journal of Environmental Radioactivity 139, 427-434 (2015)

^{*10} 「平成 27 年度放射性物質測定調査委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業成果報告書 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」 松田規宏、斎藤公明 (2016)

^{*11} K. Saito, P. JACOB, Fundamental data on environmental gamma-ray fields in the air due to source in the ground, JAERI-Data/Code 98-001 (1998)

式(E. 1)のように放射能濃度が重量深度に対して指数関数的に減少する深度分布の場合は、式(E. 3)の右辺が左辺と同じ数式になるため、式(E. 1)で得られた重量緩衝深度は、そのまま実効的な重量緩衝深度となる。

指数関数モデルにおける実効的な重量緩衝深度 β_{eff} を用いることで、地上での測定結果を土壌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、実効的な重量緩衝深度 β_{eff} で対応することができる。

採取した土壌から算出した各地点の β を用いて平均値を算出するためには、算術平均値を用いる場合と幾何平均値を用いる場合がある。 β の値について作成した頻度分布が正規分布に近い形の場合は算術平均値を、対数正規分布に近い形の場合は幾何平均値を平均的な β とすることが望ましい。ただし、除染等で人の手が加えられたことによって、鉛直分布が不連続若しくは不自然である地点の β は除外し、平均値の計算に含めない。

E. 1.3 同一核種から放出されるエネルギーの異なる γ 線を利用する方法

同一核種がエネルギーの異なる γ 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 β を推定することができる。セシウム 137 の 662 keV (γ 線) と 32 keV (X線) のフルエンス率の比 (32 keV/662 keV) の β による変化を図 E. 12 に示す。32 keV (X線) と 662 keV (γ 線) の土壌での減弱の差が現れており、これを利用して β を推定することができる。この方法を適用するためには 32 keV 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 か月は短半減期核種からの放射線が 32 keV 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壌中に深く浸透すると 32 keV 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 又はセシウム 134 も適用可能であるが、セシウム 137 ほど有効ではない。

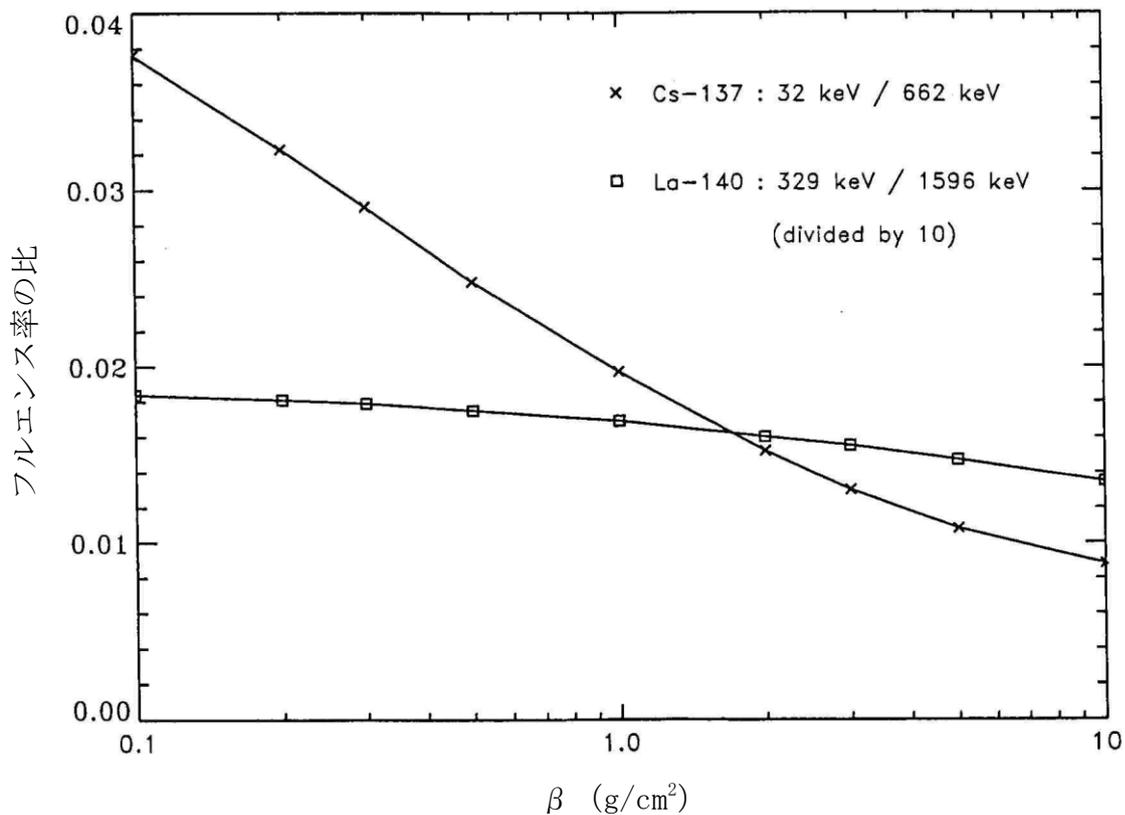


図 E. 12 同一核種から放出されるエネルギーの異なる γ 線のフルエンス率の比と放射性物質の土壌中における鉛直分布 (β) との関係

(ICRU Rep. 53 から引用)

解説 E.2 解析結果への影響

図 E.13 はある場所で測定した一つのスペクトルについて、放射性物質の土壌中における鉛直分布を表すパラメータ β を変えて、線量率及び放射能濃度（単位面積当たりの放射能； Bq/cm^2 ）を解析した結果である。線量率は β に大きく依存しないが、放射能濃度は β に大きく依存する。したがって、放射能濃度を算出する際には、 β の把握が測定の信頼性に関わる最も大きな問題である。大気圏内核実験由来のセシウム 137 を評価するため、現在 β の値として $4.8 \text{ g}/\text{cm}^2$ ($\alpha:0.33 \text{ cm}^{-1}$)^{*12} 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 γ 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、放射性物質の土壌中における鉛直分布の仮定等に問題のある可能性がある。

*12 「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）

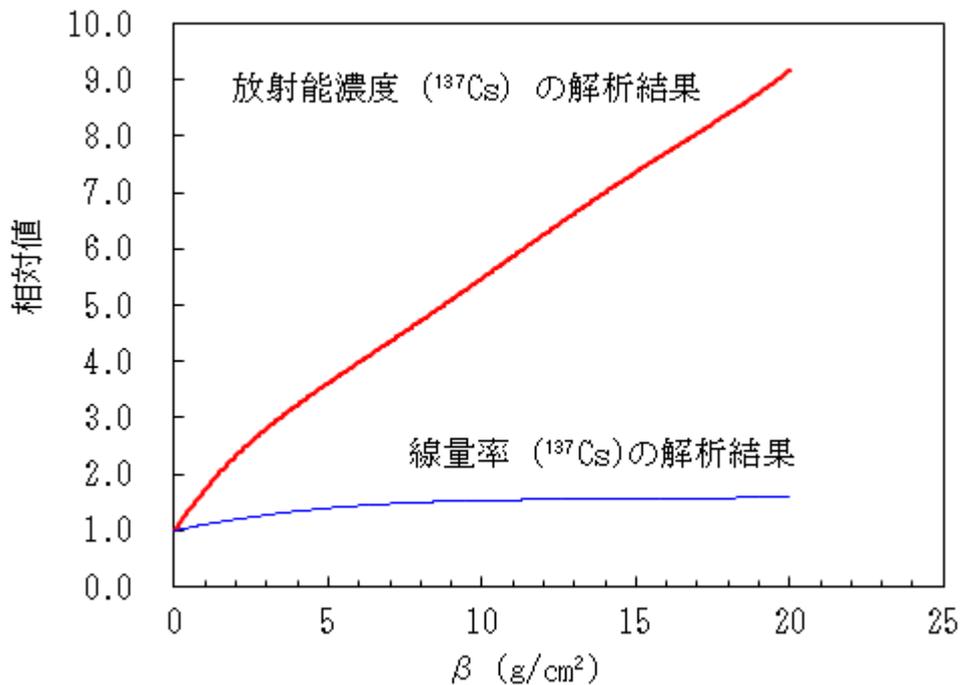


図 E.13 鉛直分布を表すパラメータ β の解析結果への影響

ある測定スペクトルに対してセシウム 137 (¹³⁷Cs) を評価する際に β 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 ($\beta=0$) として解析した結果に対する相対値である。

β 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、 β 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 β 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 F 解析条件と実際の測定条件が異なった場合の影響

解説 F.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 5.4 の ϕ/A 、付表-1 及び表 5.4 の値）は、建物又は車両等の 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（ β ）別に、図 F.1～図 F.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^{*1}^{*2}した効率（ピーク計数率/放射能濃度）で、半径 150 m 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（ $\beta=0.1 \text{ g/cm}^2$ 図 F.1）でセシウム 137（およそ 600 keV）を測定する場合には半径 25 m 以上周囲が開けている必要がある。 $\beta=4.8 \text{ g/cm}^2$ （図 F.5）では半径 10 m、土壤中均質分布では半径 5 m 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 F.1～図 F.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 10 m 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}^{*2}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（ $\beta=0.1 \text{ g/cm}^2$ ）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 F.7 及び図 F.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 G 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 F.9～図 F.11 に示す。なお、図 F.9 は放射性物質の土壤中における鉛直分布（ β ）による違いを示し、図 F.10 及び F.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（計算コード：MCNP モンテカルロコード^{*2}）を使用した。

*2 Briesmeister, J.F., 「MCNP-A general Monte Carlo N particle Transport Code Version 4C」, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

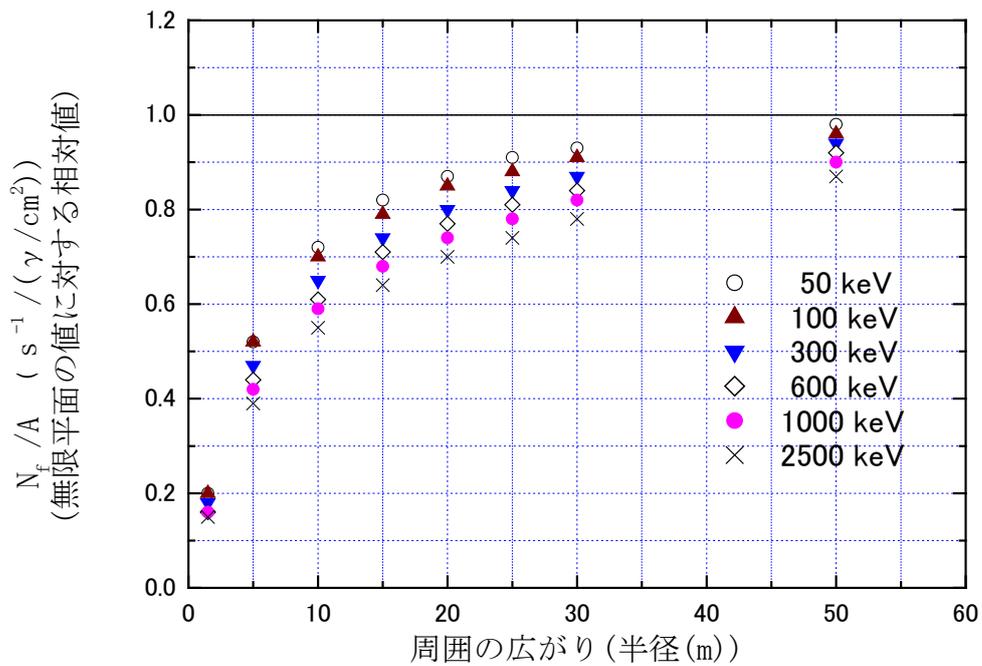


図 F.1 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器 : p 型 $\beta : 0.1 \text{ g/cm}^2$)

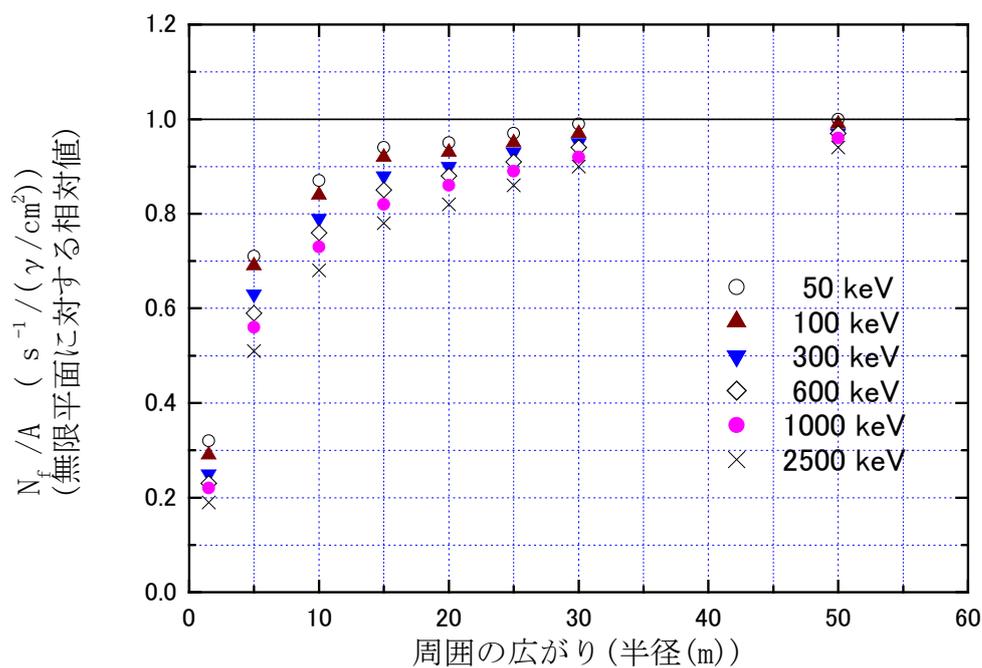


図 F.2 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器 : p 型 $\beta : 1.0 \text{ g/cm}^2$)

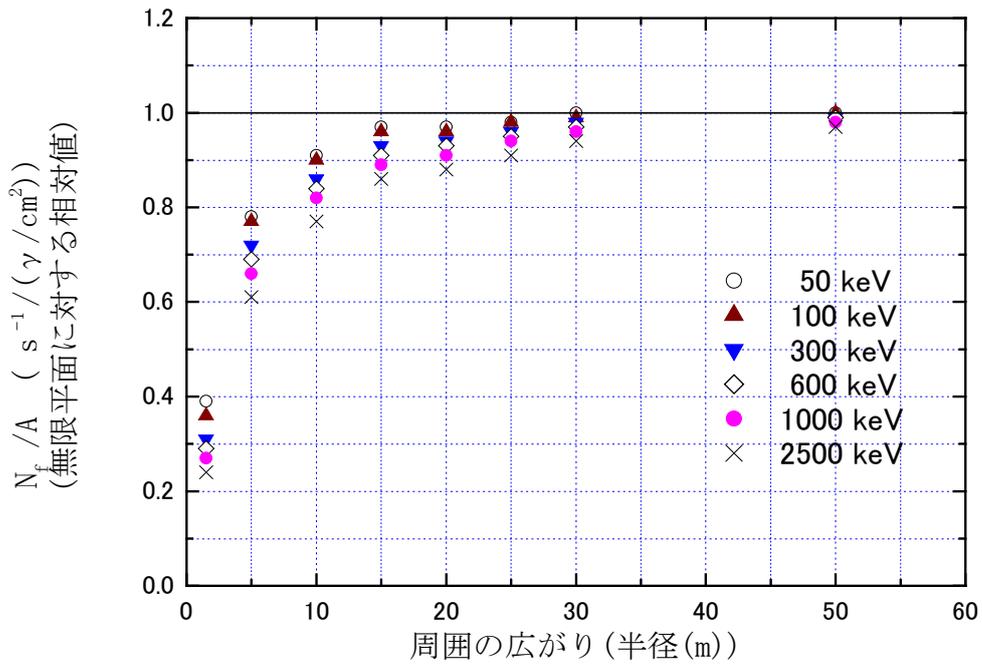


図 F.3 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 β：3.0 g/cm²)

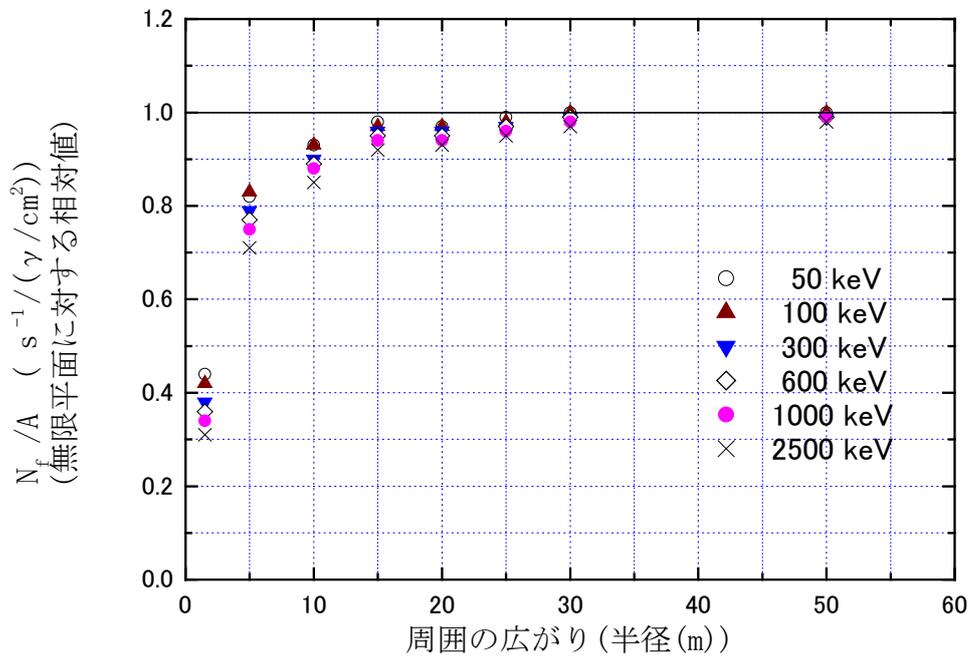


図 F.4 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 β：10 g/cm²)

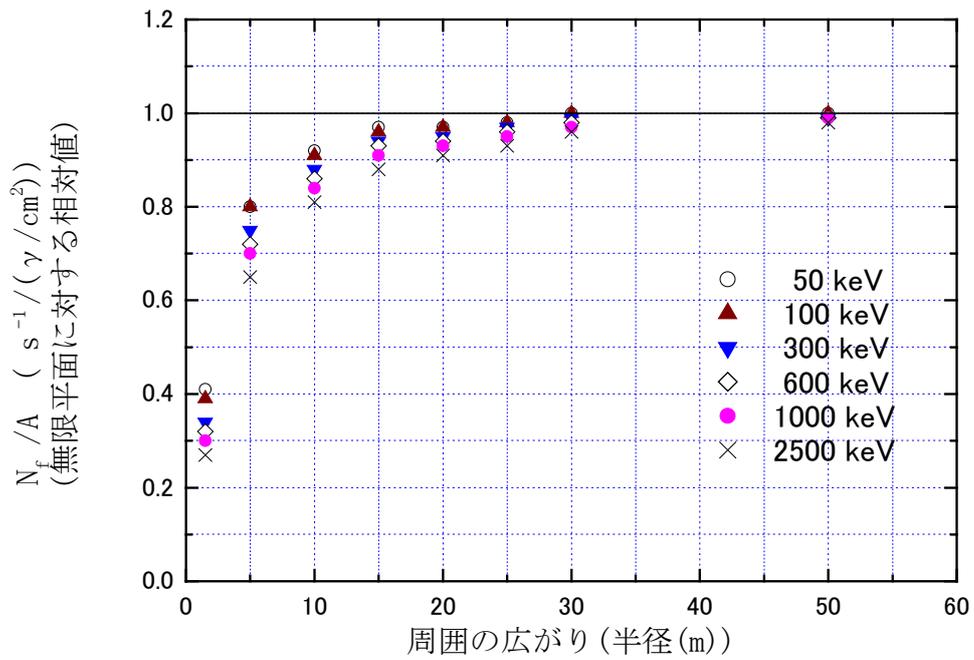


図 F.5 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 β ：4.8 g/cm²)

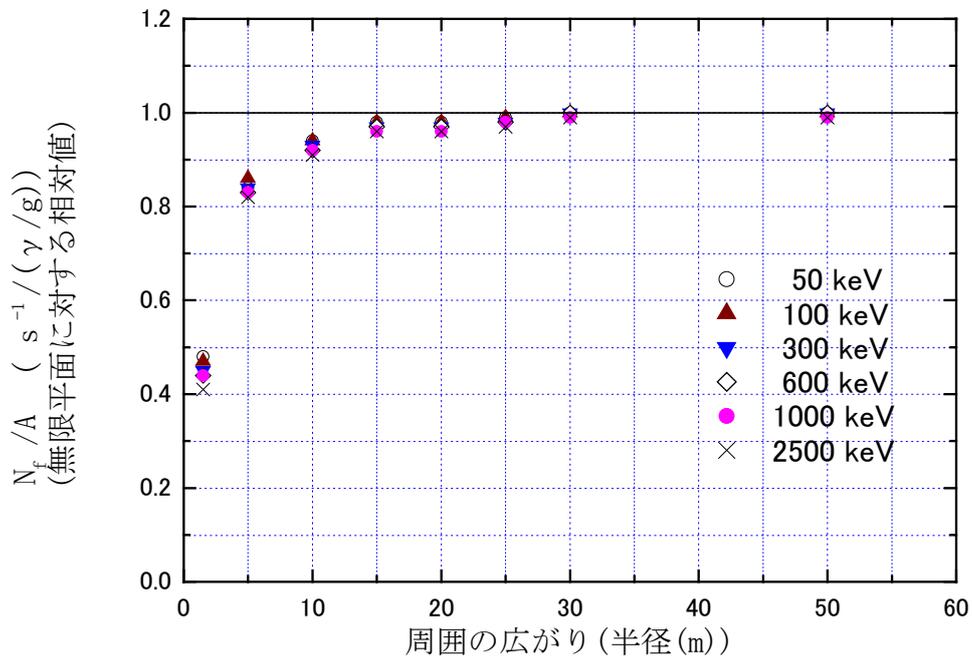


図 F.6 周囲の広がりによる計測値への影響
(検出器：p型 均質分布)

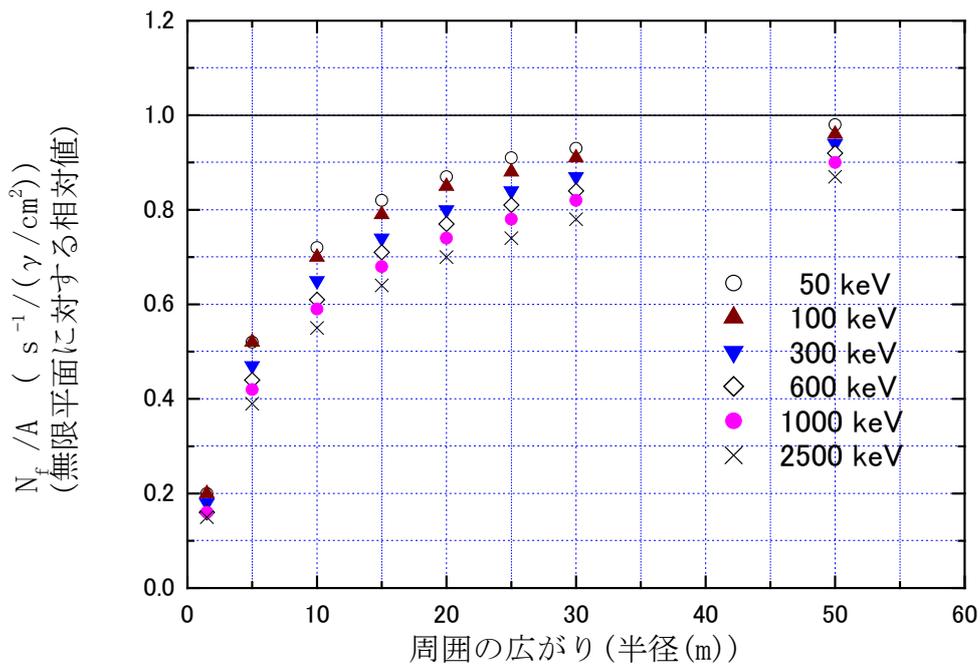


図 F.7 周囲の広がりによる計測値への影響 (β : 0.1 g/cm^2)
 (検出器: p 型、L/D ; 0.9、不感層 ; 1 mm、相対効率 ; 40 %)

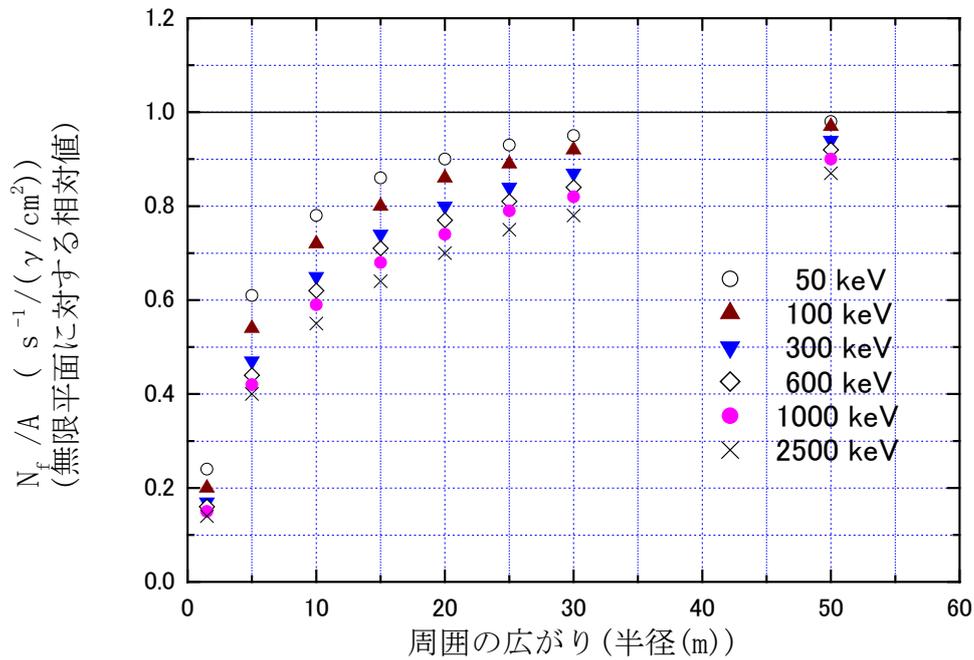


図 F.8 周囲の広がりによる計測値への影響 (β : 0.1 g/cm^2)
 (検出器: n 型、L/D ; 1.0、不感層 ; $0.1 \mu\text{m}$ 、相対効率 ; 25 %)

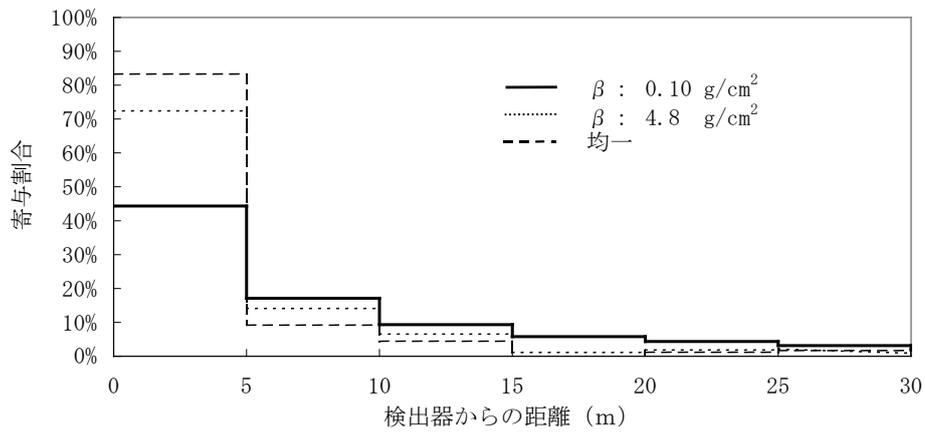


図 F.9 in-situ 測定における周囲からの寄与割合 (γ 線エネルギー600 keV)

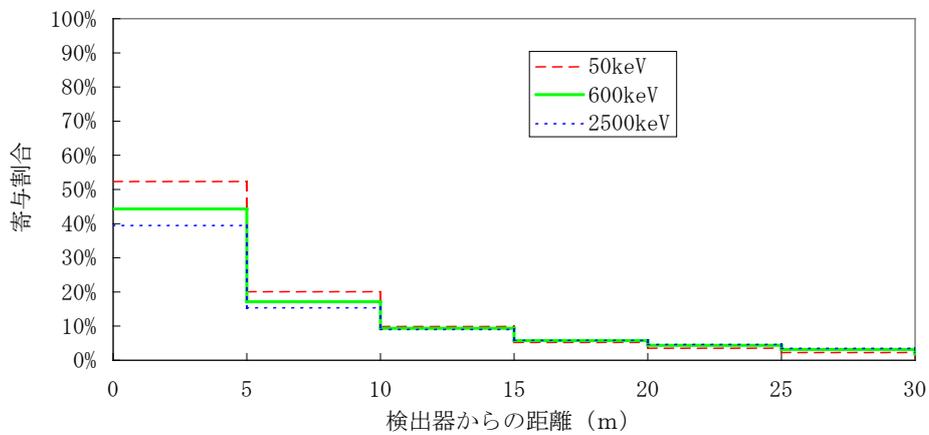


図 F.10 in-situ 測定における周囲からの寄与割合 ($\beta : 0.1 \text{ g/cm}^2$)

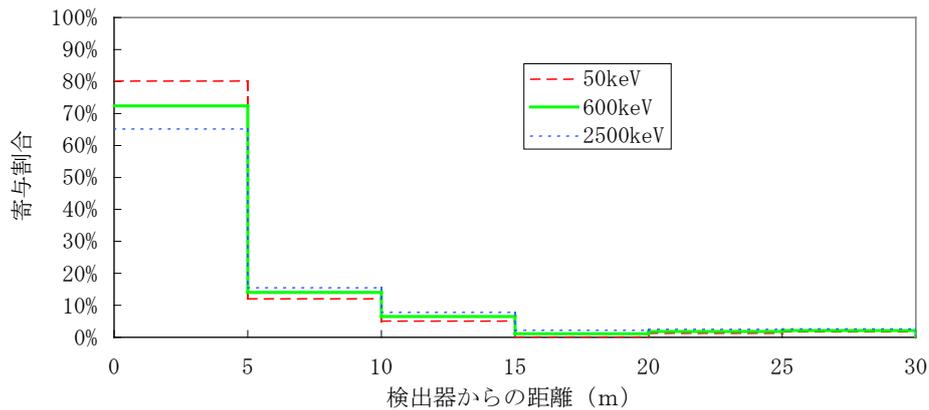


図 F.11 in-situ 測定における周囲からの寄与割合 ($\beta : 4.8 \text{ g/cm}^2$)

解説 F.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 1 m 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 1 m 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って、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。

土壌中における放射性物質の鉛直分布 (β) 別に、in-situ 測定における効率 (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^{*3} ^{*4}した結果を図 F.12~図 F.14 に示す。グラフ中の値は、高さ 1 m 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、効率は低くなる。したがって、やむを得ず 1 m よりも高い位置に検出器を設置した場合、又は崖等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 F.12、 $\beta=0.1 \text{ g/cm}^2$) 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。

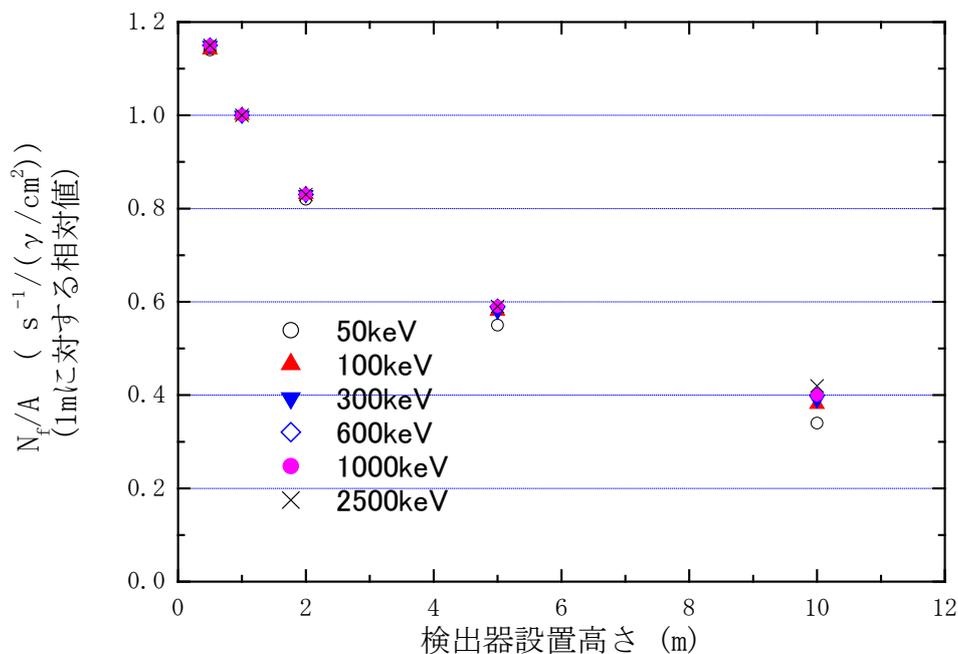


図 F.12 検出器設置高さによる計測値への影響 ($\beta: 0.1 \text{ g/cm}^2$)

^{*3} ピーク効率シミュレーションソフトウェア (計算コード: MCNP モンテカルロコード^{*4}) を使用した。

^{*4} Briesmeister, J.F., 「MCNP-A general Monte Carlo N particle Transport Code Version 4C」, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

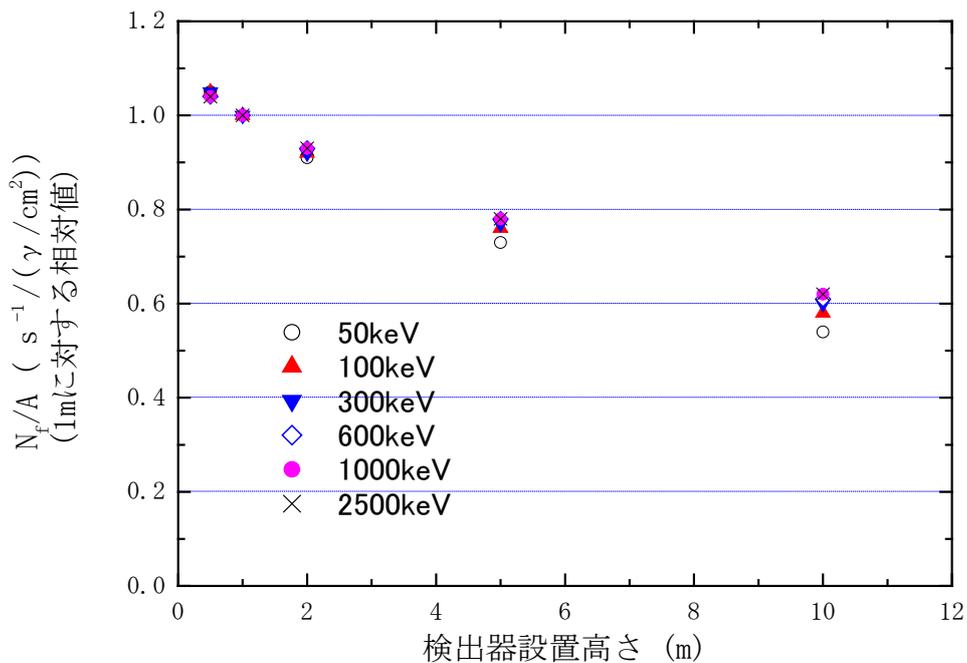


図 F.13 検出器設置高さによる計測値への影響 ($\beta: 4.8 \text{ g/cm}^2$)

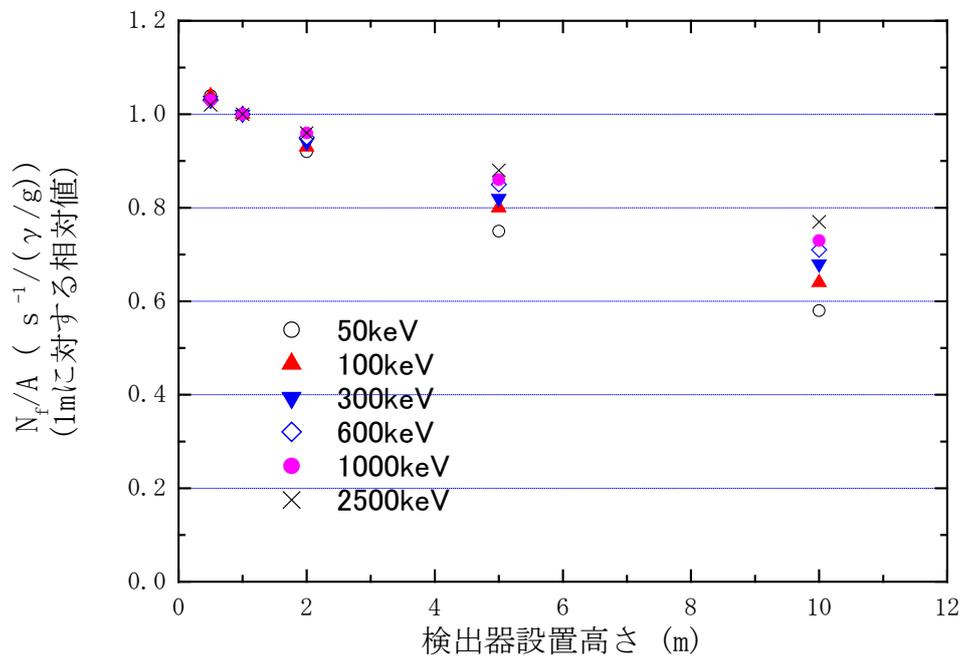


図 F.14 検出器設置高さによる計測値への影響 (均質分布)

解説 F.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 E）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（ β ）別に、in-situ 測定における効率（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^{*5} ^{*6}した結果を図 F.15～図 F.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（ $\beta=0.1 \text{ g/cm}^2$ ）には、当然、土壌中水分の影響は小さい（図 F.15）。放射性物質が土壌にある程度浸透した場合（ $\beta=4.8 \text{ g/cm}^2$ ）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、効率が低くなる（図 F.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。したがって、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。

土壌中均質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 F.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、効率（ $\text{s}^{-1} / (\text{Bq/g 湿土})$ ）が大きく変化しないことを示している。

しかし、乾土当たりの放射能に対する効率（ $\text{s}^{-1} / (\text{Bq/g 乾土})$ ）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だけが生じ、効率が土壌中水分によって変化する（図 F.18）。in-situ 測定で得られるのは、あくまで実際の土壌（湿土）当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当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。

^{*5} ピーク効率シミュレーションソフトウェア（計算コード：MCNP モンテカルロコード^{*6}）を使用した。

^{*6} Briesmeister, J.F., 「MCNP-A general Monte Carlo N particle Transport Code Version 4C」, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

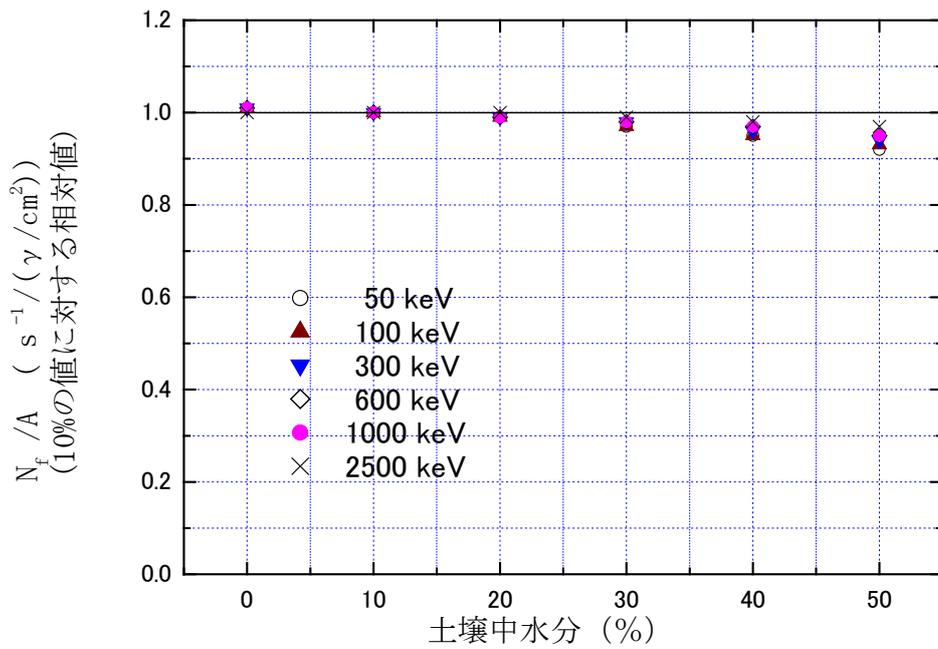


図 F.15 土壌中水分による計測値への影響
(放射性物質が地表近くに分布している場合、 $\beta : 0.1 \text{ g/cm}^2$)

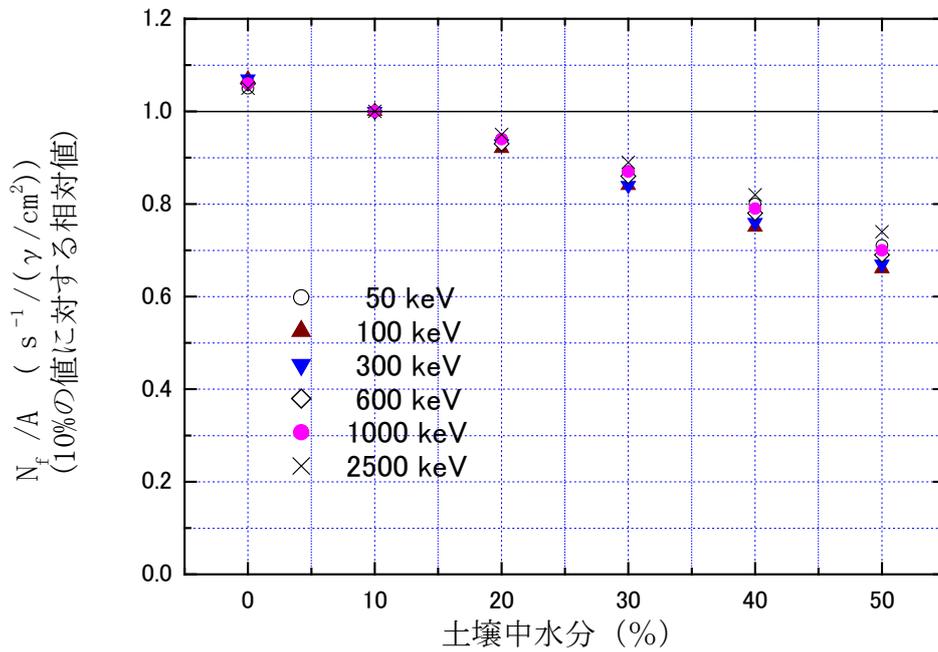


図 F.16 土壌中水分による計測値への影響
(放射性物質が土壌中に浸透した場合、 $\beta : 4.8 \text{ g/cm}^2$)

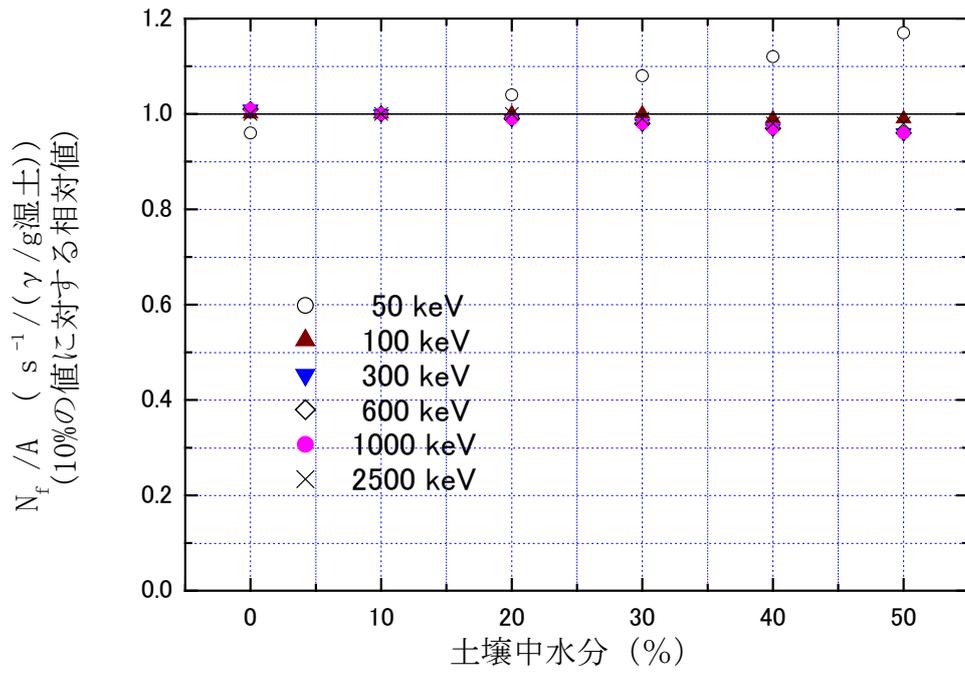


図 F.17 土壤中水分による計測値への影響
(湿土当たりの放射能を計測する場合、均質分布)

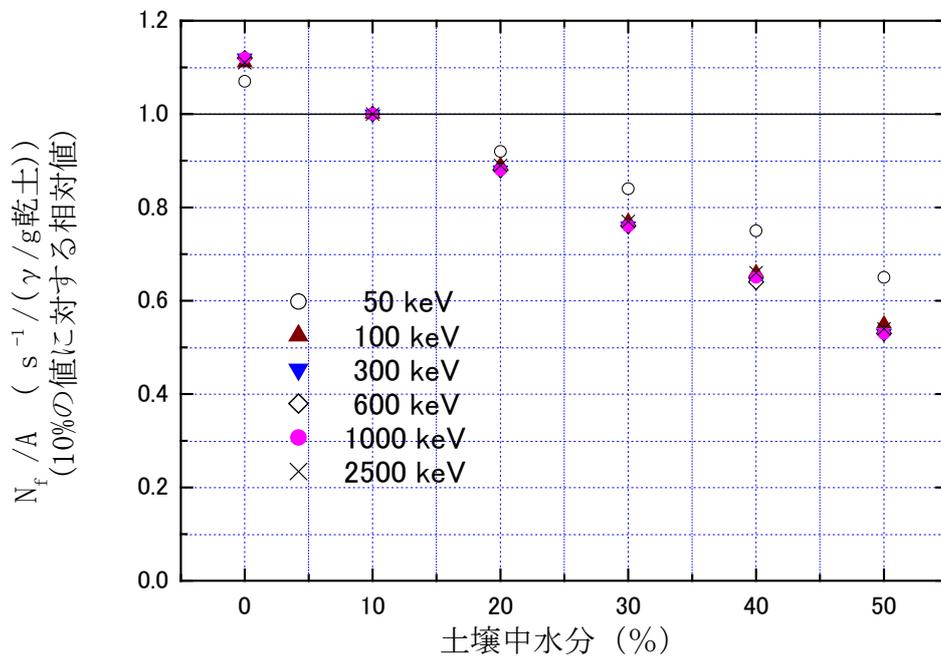


図 F.18 土壤中水分による計測値への影響
(乾土当たりの放射能を計測する場合、均質分布)

解説 G 検出器の方向特性（ピーク効率の角度依存性）

p 型 Ge 半導体検出器及び n 型 Ge 半導体検出器の方向特性の一例を図 G.1 及び図 G.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° で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^{*1}^{*2}した結果である。p 型検出器は相対効率 40%、直径 61 mm、長さ 56 mm、不感層 1 mm、n 型検出器は相対効率 25%、直径 53 mm、長さ 53 mm、不感層 0.1 μm である。

p 型検出器では低エネルギー（50 及び 60 keV）において斜め方向から入射した γ 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。100 keV 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及び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。

*1 ピーク効率シミュレーションソフトウェア（計算コード：MCNP モンテカルロコード）を使用した。

*2 Briesmeister, J.F., 「MCNP-A general Monte Carlo N particle Transport Code Version 4C」, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)

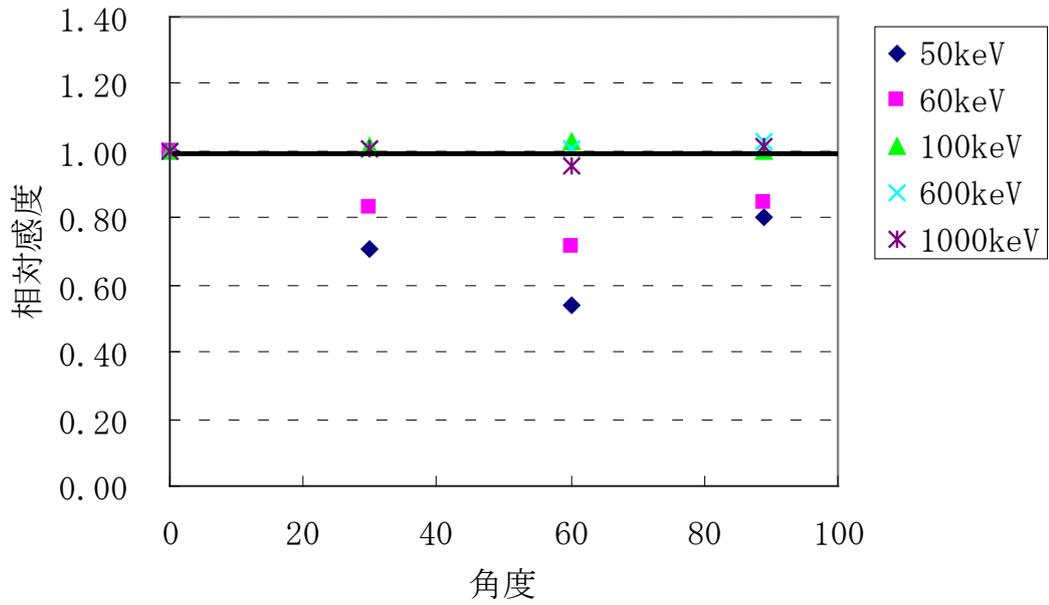


図 G.1 ピーク効率の角度依存性の例
 (検出器 : p 型、L/D ; 0.9、不感層 ; 1 mm、相対効率 ; 40 %)

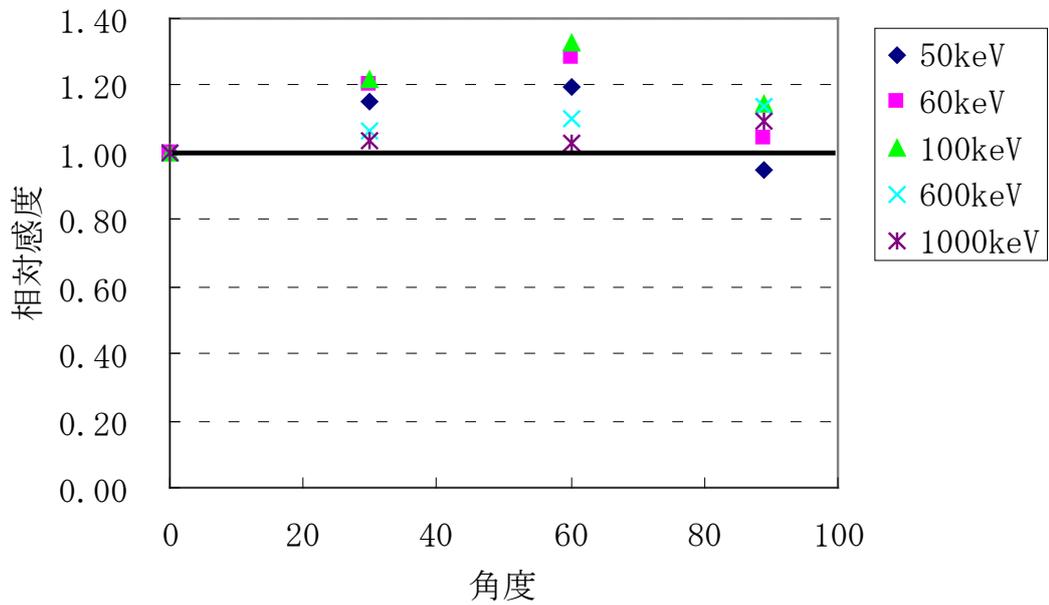


図 G.2 ピーク効率の角度依存性の例
 (検出器 : n 型、L/D ; 1.0、不感層 ; 0.1 μ m、相対効率 ; 25 %)

解説 H 実際の測定例

解説 H.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 γ 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って富士山周辺を選定した。

(1) in-situ 測定

平たんで、樹木は別として周囲が 10 m 以上開けている場所で測定を行った。測定は地上 1 m 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 γ 線量率を算出した。使用した検出器の仕様を表 H.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 5 cm ϕ の採土器を用い、深さ 30 cm までの土壌を 5 cm ごとの 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 70000 秒測定し、得られた γ 線スペクトルからセシウム 137 の放射能濃度を求めた。

表 H.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 (A1)	0.1 μ m	5.0
B	25	54.6	54.7	1.00	1.27 (A1)	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 H.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 $\beta=4.8 \text{ g/cm}^2$ 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H.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		^{137}Cs の放射能濃度 (kBq/m ²)		備考
	β (g/cm ²)	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)	4.8	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)	4.8	2	2	4.0	
	15.4 ²⁾	—	4.2		

1) 2) 採取した土壌から得られた値

$\beta=4.8 \text{ g/cm}^2$ 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 H.1、図 H.2 参照) 及び各地点の土壌の密度から β を求めた。^{*1} これらの β (表 H.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 H.3 及び図 H.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 $A(Z)=\exp(-\alpha Z)$ に適合させて $\alpha (\text{cm}^{-1})$ を求め、 $\beta=\rho/\alpha$ (ρ : 採取土壌の密度) によって β を求めた。

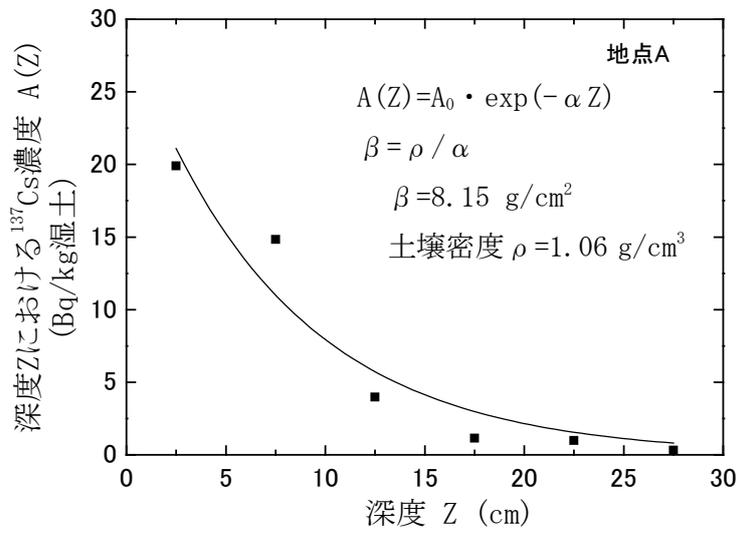


図 H.1 土壤中のセシウム 137 濃度と深度の関係 (地点 A)

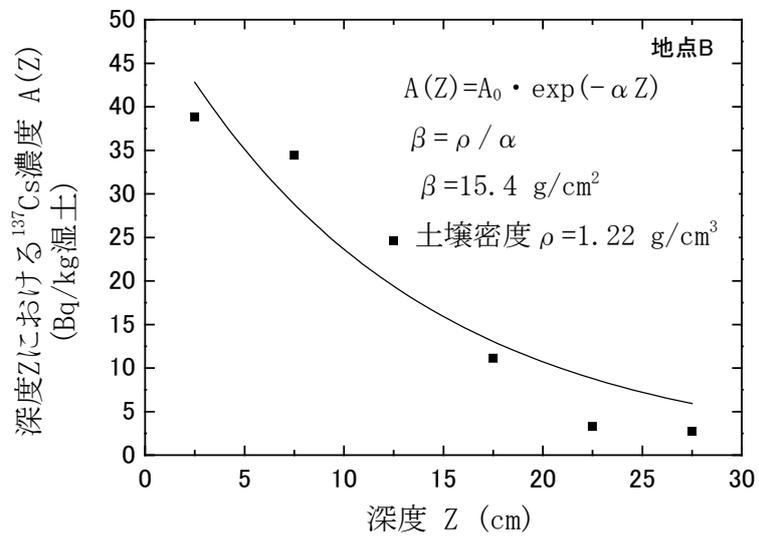


図 H.2 土壤中のセシウム 137 濃度と深度の関係 (地点 B)

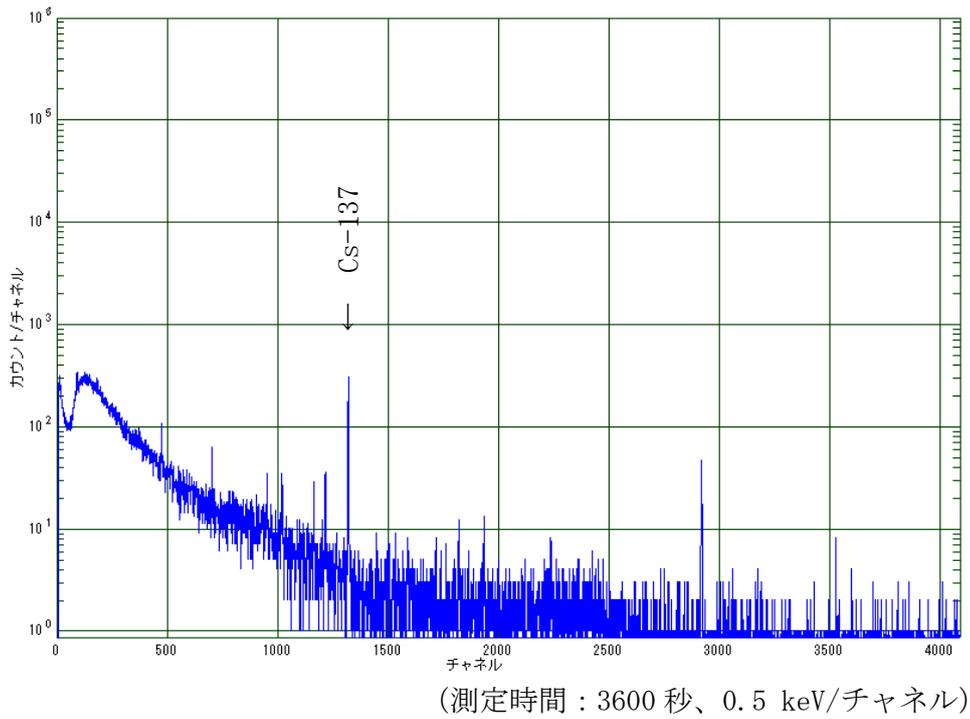


図 H. 3 Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定スペクトル
(地点 A)

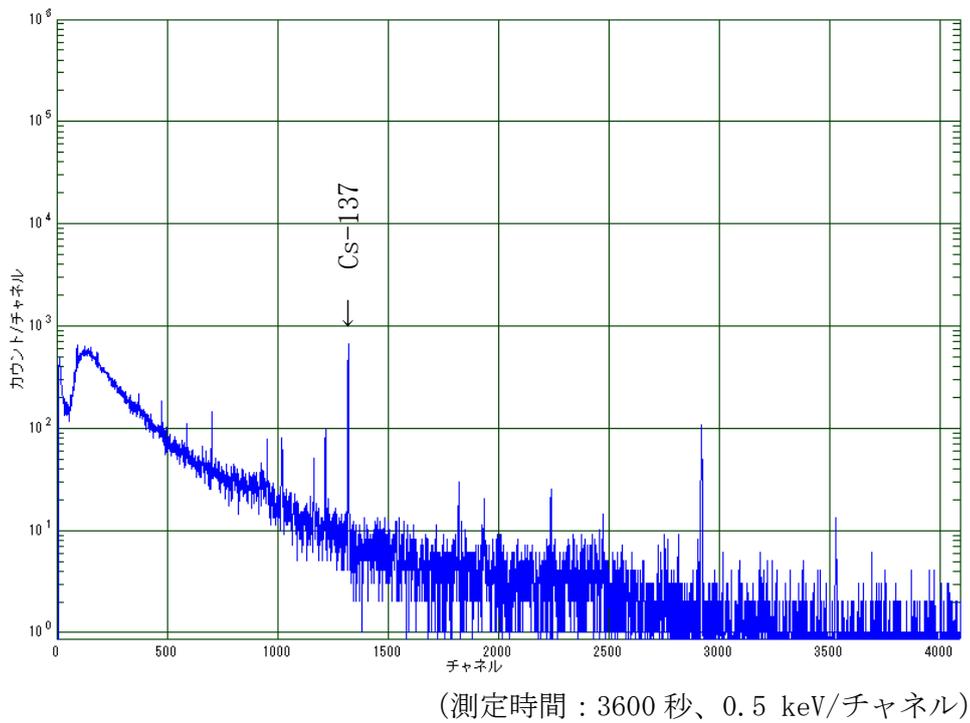


図 H. 4 Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定スペクトル
(地点 B)

解説 H.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 γ 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 10 m 以上開けている場所を選定し、地上 1 m 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 70000 秒測定し、得られた γ 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 H.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、土壌中の分布は均質であると仮定した。

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 H.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 H.6 に、測定されたスペクトルの一例を図 H.7 に示した。

表H.3 in-situ測定結果と採取した土壌のγ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、土壌中に均質に分布するとして解析した。

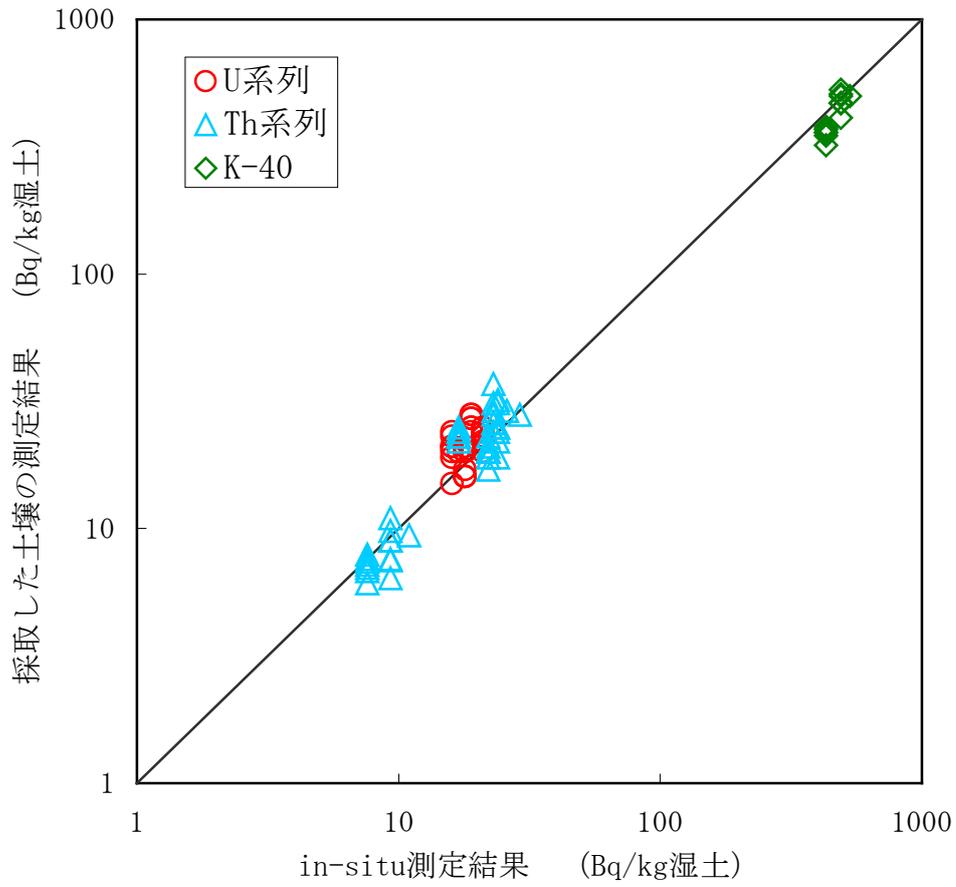
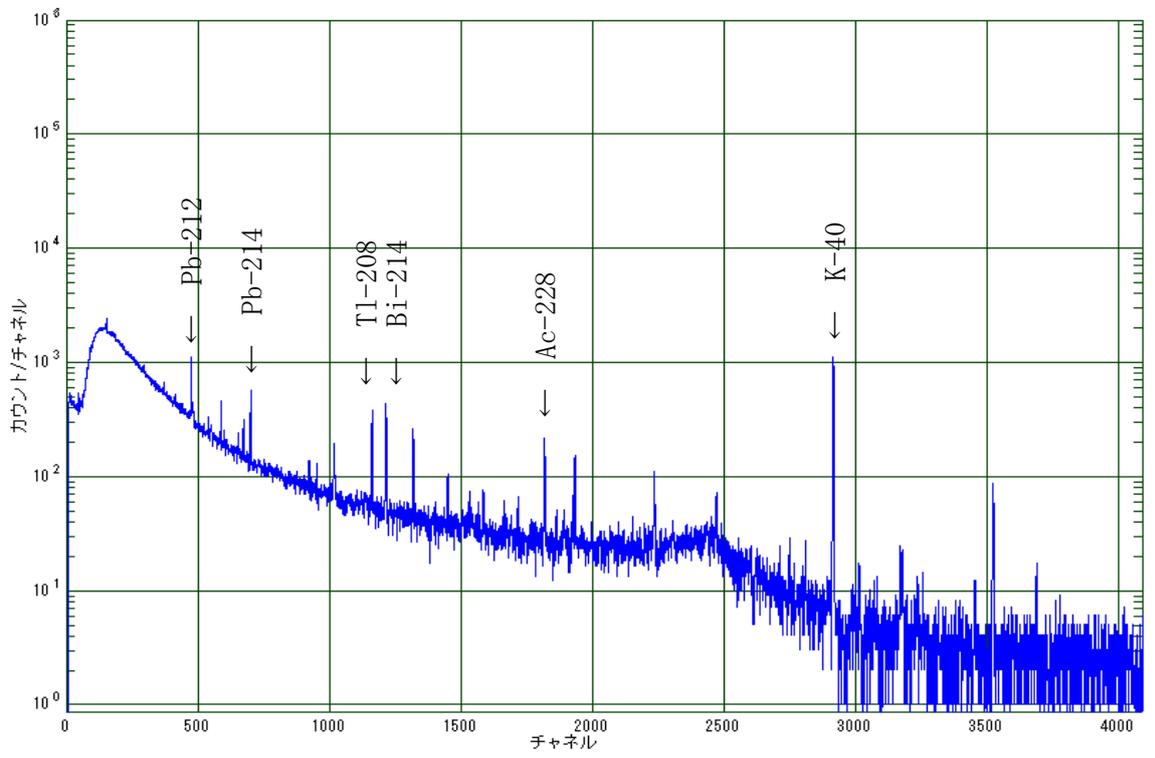


図 H.5 in-situ 測定結果と、各地点で採取された土壌の γ 線スペクトロメトリーによる結果との比較



図 H.6 in-situ 測定風景



(測定時間：3600 秒、0.5 keV/チャンネル)

図 H.7 Ge 半導体検出器を用いた in-situ 測定スペクトルの例

解説 I 相互比較測定

in-situ 測定における測定結果の信頼性向上のための精度管理の一環として、測定機器間の相互比較測定が有効である。原子力災害時等において in-situ 測定を急遽実施することも想定されるため、日頃から定期的に機器の状態を確認しておくことも重要である。また、広範囲における放射性物質の分布状況を調査するために、複数の測定機器で分担して測定を実施する場合には、測定機器間の測定精度に大きな差がないことを事前に確認しておくことが望ましい。

(1) 場所の選定

「4.1 測定場所の選定」参照。

(2) 周辺状況の確認

サーベイメータ等を用いて相互比較測定実施予定場所周辺（理想的には半径 30 m 程度の範囲）で線量率の分布の差が小さいことを確認する。

(3) 測定方法

測定方法として、以下の 2 通りの方法があげられる。

- ①なるべく狭い範囲（例えば同心円上）にお互いが遮へいとならないように機器を設置して同時に行う測定（図 I. 1、図 I. 2）
- ②同一地点で 1 機器ずつ順番に行う測定

測定場所における環境の状況が刻々と変化する可能性があるため、特に②の場合は速やかに測定作業を実施する必要がある。

また、in-situ 測定結果の妥当性を確認するため、同一地点でサーベイメータによる線量率測定を併行して実施するとよい。

(4) 結果の評価

検出された人工及び自然放射性核種それぞれについて比較を行う。測定地点間、又は環境の変化による差が大きい等の理由で補正する必要がある場合には、サーベイメータで測定した線量率で補正して比較すると、その影響を緩和できる場合がある（図 I. 3）。



図 I. 1 相互比較測定の様子（同時測定）^{*1}

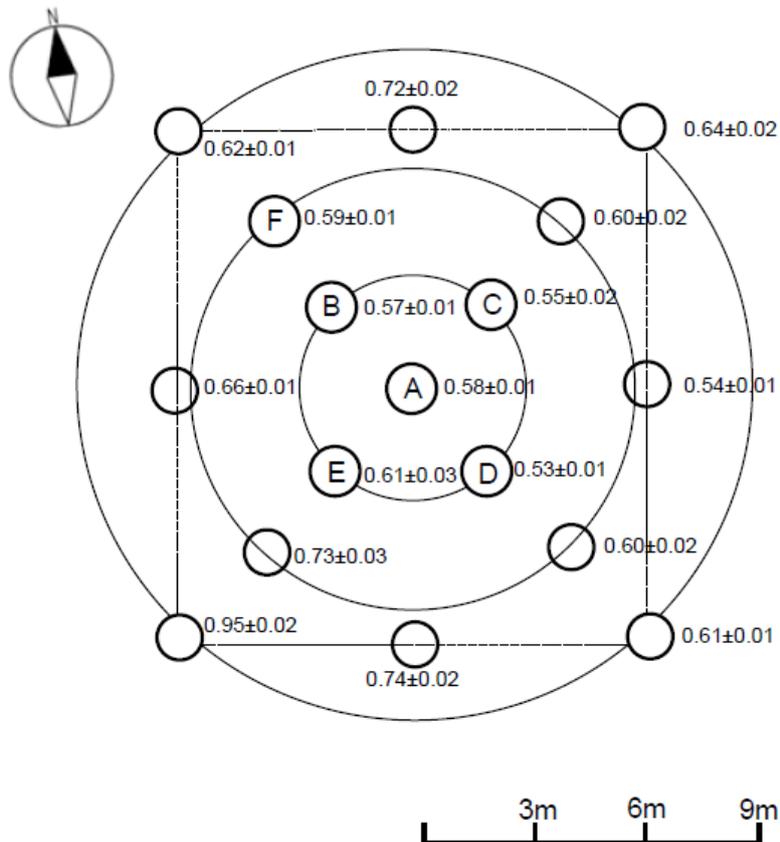


図 I. 2 相互比較測定（同時測定）の配置例^{*1}

(3つの同心円内の小さな円はサーベイメータによる線量率測定地点を表し、その脇の数字は地上高1 mにおける線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) の平均値とその標準偏差 (n=5) を示す。A~Fの地点にGe半導体検出器を設置して同時に測定し、相互比較測定を実施。)

^{*1} 「In Situ Gamma Spectrometry Intercomparison in Fukushima, Japan」 S. Mikami, S. Sato, Y. Hoshide, R. Sakamoto, N. Okuda, K. Saito, Jpn. J. Health Phys., 50 (3), 182 ~ 188 (2015)

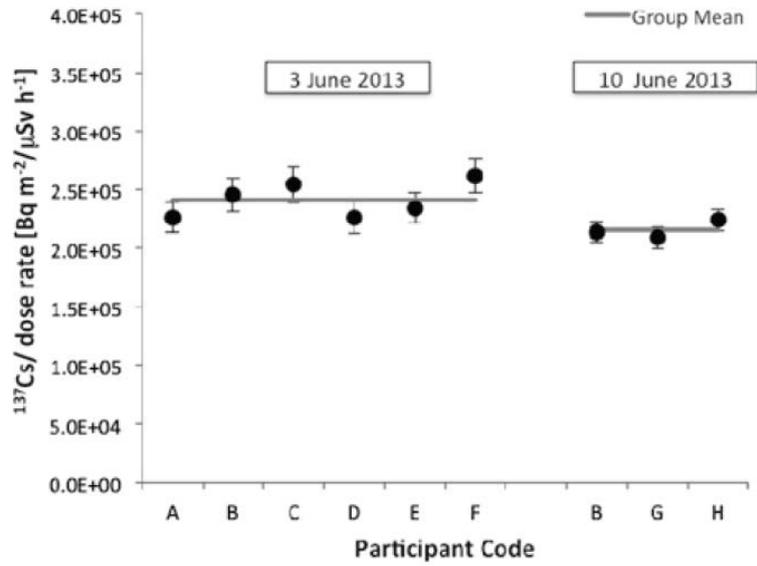


図 I. 3 セシウム 137 の相互比較測定結果例 *1

(縦軸はサーベイメータで測定した線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) と Ge 半導体検出器で測定したセシウム 137 の沈着量 (Bq/m^2) の比を表す。)

付 録

付録 1 放射性核種濃度と地上高 1m での γ 線フルエンス率との関係

付表-1 放射性核種濃度と地上高1mでのγ線フルエンス率との関係

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\text{Bq}/\text{cm}^2)$

エネルギー 放出比			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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)								
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	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	6.55 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		

付表-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\text{Bq}/\text{cm}^2)$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)								
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0		
86.5	0.309	Eu-155	5.29 1E-01	4.41 1E-01	3.92 1E-01	3.58 1E-01	3.10 1E-01	2.42 1E-01	1.75 1E-01		
86.9	0.089	Sn-126	1.53 1E-01	1.27 1E-01	1.13 1E-01	1.03 1E-01	8.96 1E-02	6.99 1E-02	5.06 1E-02		
87.6	0.370	Sn-126	6.33 1E-01	5.29 1E-01	4.70 1E-01	4.30 1E-01	3.73 1E-01	2.91 1E-01	2.11 1E-01		
91.1	0.279	Nd-147	4.78 1E-01	4.00 1E-01	3.57 1E-01	3.26 1E-01	2.84 1E-01	2.22 1E-01	1.61 1E-01		
97.1	0.166	U-237	2.85 1E-01	2.40 1E-01	2.14 1E-01	1.96 1E-01	1.71 1E-01	1.35 1E-01	9.86 1E-02		
98.4	0.157	Pa-233	2.71 1E-01	2.28 1E-01	2.04 1E-01	1.87 1E-01	1.63 1E-01	1.29 1E-01	9.42 1E-02		
99.6	0.147	Cm-243	2.53 1E-01	2.13 1E-01	1.91 1E-01	1.75 1E-01	1.53 1E-01	1.21 1E-01	8.86 1E-02		
99.6	0.157	Np-239	2.70 1E-01	2.27 1E-01	2.04 1E-01	1.87 1E-01	1.63 1E-01	1.29 1E-01	9.44 1E-02		
99.6	0.185	Cm-245	3.17 1E-01	2.67 1E-01	2.40 1E-01	2.19 1E-01	1.92 1E-01	1.51 1E-01	1.11 1E-01		
101.1	0.266	U-237	4.59 1E-01	3.87 1E-01	3.47 1E-01	3.18 1E-01	2.78 1E-01	2.19 1E-01	1.61 1E-01		
103.8	0.059	Am-242	1.02 1E-01	8.60 1E-02	7.71 1E-02	7.07 1E-02	6.18 1E-02	4.89 1E-02	3.59 1E-02		
103.8	0.236	Cm-243	4.06 1E-01	3.43 1E-01	3.08 1E-01	2.82 1E-01	2.47 1E-01	1.95 1E-01	1.43 1E-01		
103.8	0.251	Np-239	4.33 1E-01	3.65 1E-01	3.28 1E-01	3.00 1E-01	2.63 1E-01	2.08 1E-01	1.53 1E-01		
103.8	0.295	Cm-245	5.09 1E-01	4.30 1E-01	3.85 1E-01	3.53 1E-01	3.09 1E-01	2.44 1E-01	1.80 1E-01		
105.3	0.206	Eu-155	3.55 1E-01	3.00 1E-01	2.69 1E-01	2.47 1E-01	2.16 1E-01	1.71 1E-01	1.26 1E-01		
106.1	0.272	Np-239	4.70 1E-01	3.97 1E-01	3.56 1E-01	3.27 1E-01	2.86 1E-01	2.26 1E-01	1.66 1E-01		
117.3	0.066	Cm-245	1.14 1E-01	9.66 1E-02	8.68 1E-02	7.98 1E-02	7.00 1E-02	5.55 1E-02	4.10 1E-02		
121.1	0.173	Se-75	3.01 1E-01	2.56 1E-01	2.30 1E-01	2.12 1E-01	1.86 1E-01	1.48 1E-01	1.09 1E-01		
122.1	0.855	Co-57	1.49	1.27	1.14	1.05	9.20 1E-01	7.30 1E-01	5.41 1E-01		
127.5	0.141	Cs-134m	2.46 1E-01	2.09 1E-01	1.88 1E-01	1.74 1E-01	1.53 1E-01	1.21 1E-01	8.99 1E-02		
133.0	0.419	Hf-181	7.35 1E-01	6.27 1E-01	5.64 1E-01	5.21 1E-01	4.58 1E-01	3.64 1E-01	2.71 1E-01		
133.5	0.111	Ce-144	1.94 1E-01	1.66 1E-01	1.49 1E-01	1.38 1E-01	1.21 1E-01	9.65 1E-02	7.18 1E-02		
136.0	0.590	Se-75	1.04	8.85 1E-01	7.96 1E-01	7.36 1E-01	6.47 1E-01	5.15 1E-01	3.84 1E-01		
136.5	0.106	Co-57	1.87 1E-01	1.60 1E-01	1.44 1E-01	1.33 1E-01	1.17 1E-01	9.31 1E-02	6.93 1E-02		
140.5	0.890	Tc-99m	1.57	1.34	1.21	1.12	9.83 1E-01	7.83 1E-01	5.84 1E-01		
143.8	0.110	U-235	1.93 1E-01	1.66 1E-01	1.49 1E-01	1.38 1E-01	1.22 1E-01	9.70 1E-02	7.24 1E-02		
145.4	0.484	Ce-141	8.55 1E-01	7.33 1E-01	6.61 1E-01	6.12 1E-01	5.39 1E-01	4.30 1E-01	3.21 1E-01		
158.6	0.864	Sn-117m	1.54	1.32	1.19	1.10	9.74 1E-01	7.79 1E-01	5.84 1E-01		
159.0	0.840	Te-123m	1.50	1.28	1.16	1.07	9.47 1E-01	7.58 1E-01	5.68 1E-01		
162.6	0.062	Ba-140	1.11 1E-01	9.52 1E-02	8.57 1E-02	7.95 1E-02	7.02 1E-02	5.62 1E-02	4.22 1E-02		
165.9	0.238	Ba-139	4.24 1E-01	3.65 1E-01	3.28 1E-01	3.05 1E-01	2.69 1E-01	2.16 1E-01	1.62 1E-01		
174.9	0.095	Cm-245	1.71 1E-01	1.47 1E-01	1.32 1E-01	1.23 1E-01	1.08 1E-01	8.71 1E-02	6.55 1E-02		
181.1	0.061	Mo-99	1.09 1E-01	9.40 1E-02	8.45 1E-02	7.84 1E-02	6.94 1E-02	5.59 1E-02	4.21 1E-02		
185.7	0.572	U-235	1.03	8.90 1E-01	8.01 1E-01	7.43 1E-01	6.57 1E-01	5.31 1E-01	4.00 1E-01		
186.0	0.033	Ra-226	5.92 1E-02	5.10 1E-02	4.59 1E-02	4.26 1E-02	3.77 1E-02	3.04 1E-02	2.29 1E-02		
202.5	0.958	Y-90m	1.75	1.51	1.35	1.26	1.11	9.02 1E-01	6.82 1E-01		
205.3	0.050	U-235	9.14 1E-02	7.89 1E-02	7.09 1E-02	6.59 1E-02	5.83 1E-02	4.73 1E-02	3.57 1E-02		
208.0	0.216	U-237	3.95 1E-01	3.41 1E-01	3.06 1E-01	2.84 1E-01	2.52 1E-01	2.04 1E-01	1.54 1E-01		
210.5	0.223	Te-134	4.08 1E-01	3.52 1E-01	3.17 1E-01	2.94 1E-01	2.61 1E-01	2.12 1E-01	1.60 1E-01		
228.2	0.106	Cm-243	1.95 1E-01	1.68 1E-01	1.51 1E-01	1.41 1E-01	1.25 1E-01	1.01 1E-01	7.68 1E-02		
228.2	0.113	Np-239	2.08 1E-01	1.80 1E-01	1.62 1E-01	1.50 1E-01	1.33 1E-01	1.08 1E-01	8.19 1E-02		
228.2	0.882	Te-132	1.63	1.40	1.26	1.18	1.04	8.46 1E-01	6.41 1E-01		
234.7	0.261	Nb-95m	4.82 1E-01	4.17 1E-01	3.75 1E-01	3.49 1E-01	3.10 1E-01	2.52 1E-01	1.91 1E-01		
238.6	0.434	Pb-212	8.03 1E-01	6.95 1E-01	6.25 1E-01	5.82 1E-01	5.17 1E-01	4.20 1E-01	3.18 1E-01		
241.0	0.040	Ra-224	7.36 1E-02	6.36 1E-02	5.73 1E-02	5.33 1E-02	4.74 1E-02	3.85 1E-02	2.91 1E-02		
264.7	0.591	Se-75	1.11	9.58 1E-01	8.64 1E-01	8.05 1E-01	7.16 1E-01	5.82 1E-01	4.42 1E-01		
266.9	0.068	Y-93	1.27 1E-01	1.10 1E-01	9.95 1E-02	9.27 1E-02	8.25 1E-02	6.71 1E-02	5.09 1E-02		
275.2	0.068	Pm-151	1.27 1E-01	1.10 1E-01	9.92 1E-02	9.25 1E-02	8.24 1E-02	6.70 1E-02	5.09 1E-02		
277.6	0.140	Cm-243	2.63 1E-01	2.28 1E-01	2.06 1E-01	1.92 1E-01	1.71 1E-01	1.39 1E-01	1.05 1E-01		
277.6	0.144	Np-239	2.71 1E-01	2.35 1E-01	2.12 1E-01	1.97 1E-01	1.76 1E-01	1.43 1E-01	1.09 1E-01		
278.0	0.209	Te-134	3.93 1E-01	3.41 1E-01	3.07 1E-01	2.87 1E-01	2.55 1E-01	2.08 1E-01	1.58 1E-01		
279.5	0.252	Se-75	4.74 1E-01	4.11 1E-01	3.71 1E-01	3.46 1E-01	3.08 1E-01	2.51 1E-01	1.90 1E-01		
285.9	0.001	Pm-149	1.84 1E-03	1.60 1E-03	1.44 1E-03	1.34 1E-03	1.20 1E-03	9.75 1E-04	7.41 1E-04		
293.3	0.420	Ce-143	7.96 1E-01	6.91 1E-01	6.24 1E-01	5.82 1E-01	5.19 1E-01	4.22 1E-01	3.21 1E-01		
300.1	0.066	Pa-233	1.26 1E-01	1.10 1E-01	9.89 1E-02	9.23 1E-02	8.23 1E-02	6.71 1E-02	5.10 1E-02		
306.1	0.051	Rh-105	9.76 1E-02	8.47 1E-02	7.66 1E-02	7.14 1E-02	6.37 1E-02	5.19 1E-02	3.95 1E-02		
312.0	0.386	Pa-233	7.36 1E-01	6.39 1E-01	5.78 1E-01	5.39 1E-01	4.81 1E-01	3.92 1E-01	2.99 1E-01		
314.1	0.610	Sb-128	1.16	1.01	9.14 1E-01	8.52 1E-01	7.61 1E-01	6.20 1E-01	4.72 1E-01		
318.9	0.192	Rh-105	3.67 1E-01	3.19 1E-01	2.88 1E-01	2.69 1E-01	2.40 1E-01	1.96 1E-01	1.49 1E-01		
320.1	0.098	Cr-51	1.88 1E-01	1.63 1E-01	1.48 1E-01	1.38 1E-01	1.23 1E-01	1.00 1E-01	7.64 1E-02		
330.9	0.780	Sb-130	1.50	1.30	1.18	1.10	9.79 1E-01	7.99 1E-01	6.10 1E-01		
340.1	0.225	Pm-151	4.32 1E-01	3.76 1E-01	3.40 1E-01	3.17 1E-01	2.84 1E-01	2.31 1E-01	1.77 1E-01		
340.5	0.422	Cs-136	8.11 1E-01	7.04 1E-01	6.38 1E-01	5.95 1E-01	5.31 1E-01	4.34 1E-01	3.32 1E-01		
342.1	0.067	Ag-111	1.28 1E-01	1.12 1E-01	1.01 1E-01	9.43 1E-02	8.42 1E-02	6.87 1E-02	5.26 1E-02		
344.3	0.266	Eu-152	5.11 1E-01	4.44 1E-01	4.03 1E-01	3.75 1E-01	3.35 1E-01	2.74 1E-01	2.09 1E-01		

付表-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (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 β (g・cm ⁻²)							
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
345.9	0.120	Hf-181	2.31 1E-01	2.01 1E-01	1.82 1E-01	1.70 1E-01	1.52 1E-01	1.24 1E-01	9.46 1E-02	
364.5	0.812	I-131	1.57	1.37	1.24	1.16	1.03	8.44 1E-01	6.47 1E-01	
400.7	0.116	Se-75	2.26 1E-01	1.97 1E-01	1.79 1E-01	1.67 1E-01	1.49 1E-01	1.22 1E-01	9.40 1E-02	
402.5	0.690	Cm-247	1.35	1.17	1.07	9.49 1E-01	8.91 1E-01	7.29 1E-01	5.62 1E-01	
414.8	0.833	Sb-126	1.64	1.42	1.29	1.21	1.08	8.85 1E-01	6.83 1E-01	
417.9	0.010	Te-127	1.95 1E-02	1.69 1E-02	1.54 1E-02	1.43 1E-02	1.29 1E-02	1.05 1E-02	8.13 1E-03	
418.0	0.341	I-130	6.71 1E-01	5.84 1E-01	5.31 1E-01	4.95 1E-01	4.44 1E-01	3.63 1E-01	2.80 1E-01	
427.9	0.294	Sb-125	5.80 1E-01	5.05 1E-01	4.59 1E-01	4.28 1E-01	3.84 1E-01	3.14 1E-01	2.43 1E-01	
435.1	0.186	Te-134	3.66 1E-01	3.19 1E-01	2.90 1E-01	2.71 1E-01	2.43 1E-01	1.99 1E-01	1.54 1E-01	
438.6	0.949	Zn-69m	1.88	1.63	1.49	1.39	1.24	1.02	7.88 1E-01	
459.6	0.074	Te-129	1.46 1E-01	1.27 1E-01	1.16 1E-01	1.08 1E-01	9.71 1E-02	7.96 1E-02	6.18 1E-02	
461.0	0.099	Te-134	1.96 1E-01	1.71 1E-01	1.56 1E-01	1.45 1E-01	1.30 1E-01	1.07 1E-01	8.29 1E-02	
462.8	0.307	Cs-138	6.12 1E-01	5.32 1E-01	4.86 1E-01	4.52 1E-01	4.06 1E-01	3.33 1E-01	2.59 1E-01	
463.4	0.105	Sb-125	2.08 1E-01	1.81 1E-01	1.65 1E-01	1.54 1E-01	1.38 1E-01	1.13 1E-01	8.79 1E-02	
469.4	0.175	Ru-105	3.50 1E-01	3.04 1E-01	2.78 1E-01	2.59 1E-01	2.32 1E-01	1.91 1E-01	1.48 1E-01	
473.0	0.247	Sb-127	4.94 1E-01	4.30 1E-01	3.92 1E-01	3.65 1E-01	3.28 1E-01	2.69 1E-01	2.09 1E-01	
477.6	0.103	Be-7	2.07 1E-01	1.80 1E-01	1.64 1E-01	1.53 1E-01	1.37 1E-01	1.13 1E-01	8.77 1E-02	
479.5	0.253	W-187	5.06 1E-01	4.40 1E-01	4.02 1E-01	3.74 1E-01	3.36 1E-01	2.76 1E-01	2.15 1E-01	
479.5	0.900	Y-90m	1.80	1.57	1.43	1.33	1.20	9.81 1E-01	7.64 1E-01	
482.0	0.830	Hf-181	1.66	1.45	1.32	1.23	1.10	9.06 1E-01	7.05 1E-01	
487.0	0.459	La-140	9.19 1E-01	8.00 1E-01	7.31 1E-01	6.81 1E-01	6.12 1E-01	5.02 1E-01	3.91 1E-01	
497.1	0.889	Ru-103	1.79	1.55	1.42	1.32	1.19	9.77 1E-01	7.62 1E-01	
507.7	0.053	Zr-97	1.07 1E-01	9.30 1E-02	8.50 1E-02	7.92 1E-02	7.12 1E-02	5.85 1E-02	4.56 1E-02	
511.0	0.301	Co-58	6.06 1E-01	5.28 1E-01	4.83 1E-01	4.50 1E-01	4.05 1E-01	3.32 1E-01	2.59 1E-01	
511.0	1.810	Na-22	3.64	3.17	2.90	2.70	2.43	2.00	1.56	
511.9	0.207	Rh-106	4.17 1E-01	3.63 1E-01	3.32 1E-01	3.09 1E-01	2.78 1E-01	2.28 1E-01	1.78 1E-01	
526.5	0.450	Sb-128	9.07 1E-01	7.91 1E-01	7.24 1E-01	6.74 1E-01	6.07 1E-01	4.99 1E-01	3.89 1E-01	
529.9	0.863	I-133	1.74	1.52	1.39	1.29	1.16	9.57 1E-01	7.48 1E-01	
531.0	0.131	Nd-147	2.64 1E-01	2.30 1E-01	2.11 1E-01	1.96 1E-01	1.77 1E-01	1.45 1E-01	1.13 1E-01	
536.1	0.990	I-130	2.00	1.74	1.60	1.49	1.34	1.10	8.60 1E-01	
537.3	0.244	Ba-140	4.92 1E-01	4.30 1E-01	3.93 1E-01	3.66 1E-01	3.30 1E-01	2.71 1E-01	2.12 1E-01	
544.7	0.179	Sb-129	3.62 1E-01	3.16 1E-01	2.89 1E-01	2.70 1E-01	2.43 1E-01	2.00 1E-01	1.56 1E-01	
550.3	0.220	Pm-148	4.45 1E-01	3.88 1E-01	3.55 1E-01	3.31 1E-01	2.98 1E-01	2.45 1E-01	1.92 1E-01	
550.3	0.944	Pm-148m	1.91	1.67	1.53	1.42	1.28	1.05	8.23 1E-01	
551.5	0.059	W-187	1.19 1E-01	1.04 1E-01	9.52 1E-02	8.87 1E-02	7.99 1E-02	6.57 1E-02	5.14 1E-02	
555.6	0.949	Y-91m	1.92	1.68	1.53	1.43	1.29	1.06	8.29 1E-01	
566.0	0.183	Te-134	3.70 1E-01	3.23 1E-01	2.96 1E-01	2.76 1E-01	2.49 1E-01	2.05 1E-01	1.60 1E-01	
569.3	0.150	Cs-134	3.04 1E-01	2.66 1E-01	2.43 1E-01	2.27 1E-01	2.04 1E-01	1.68 1E-01	1.32 1E-01	
600.6	0.178	Sb-125	3.62 1E-01	3.17 1E-01	2.90 1E-01	2.70 1E-01	2.44 1E-01	2.01 1E-01	1.58 1E-01	
602.7	0.979	Sb-124	1.99	1.74	1.60	1.49	1.34	1.11	8.69 1E-01	
604.6	0.975	Cs-134	1.99	1.74	1.59	1.48	1.34	1.10	8.66 1E-01	
606.6	0.050	Sb-125	1.02 1E-01	8.95 1E-02	8.20 1E-02	7.65 1E-02	6.89 1E-02	5.69 1E-02	4.46 1E-02	
610.3	0.056	Ru-103	1.14 1E-01	9.99 1E-02	9.15 1E-02	8.54 1E-02	7.69 1E-02	6.35 1E-02	4.98 1E-02	
618.4	0.073	W-187	1.48 1E-01	1.30 1E-01	1.19 1E-01	1.11 1E-01	1.00 1E-01	8.26 1E-02	6.48 1E-02	
621.8	0.098	Rh-106	2.00 1E-01	1.75 1E-01	1.61 1E-01	1.50 1E-01	1.35 1E-01	1.12 1E-01	8.76 1E-02	
628.7	0.310	Sb-128	6.33 1E-01	5.55 1E-01	5.08 1E-01	4.74 1E-01	4.28 1E-01	3.53 1E-01	2.77 1E-01	
630.0	0.886	Pm-148m	1.81	1.59	1.45	1.36	1.22	1.01	7.93 1E-01	
635.9	0.113	Sb-125	2.31 1E-01	2.03 1E-01	1.86 1E-01	1.73 1E-01	1.56 1E-01	1.29 1E-01	1.01 1E-01	
636.2	0.360	Sb-128	7.36 1E-01	6.45 1E-01	5.91 1E-01	5.52 1E-01	4.98 1E-01	4.11 1E-01	3.23 1E-01	
637.0	0.073	I-131	1.49 1E-01	1.30 1E-01	1.19 1E-01	1.11 1E-01	1.00 1E-01	8.30 1E-02	6.52 1E-02	
641.3	0.474	La-142	9.69 1E-01	8.50 1E-01	7.79 1E-01	7.27 1E-01	6.56 1E-01	5.42 1E-01	4.26 1E-01	
647.5	0.194	Te-133m	3.97 1E-01	3.48 1E-01	3.19 1E-01	2.98 1E-01	2.69 1E-01	2.22 1E-01	1.75 1E-01	
657.7	0.947	Ag-110m	1.94	1.70	1.56	1.46	1.32	1.09	8.55 1E-01	
657.9	0.983	Nb-97	2.01	1.77	1.62	1.51	1.37	1.13	8.88 1E-01	
661.6	0.899	Ba-137m	1.84	1.62	1.48	1.38	1.25	1.03	8.13 1E-01	
664.5	0.053	Ce-143	1.08 1E-01	9.45 1E-02	8.67 1E-02	8.09 1E-02	7.30 1E-02	6.04 1E-02	4.75 1E-02	
666.3	0.997	Sb-126	2.05	1.80	1.65	1.54	1.39	1.15	9.02 1E-01	
667.7	0.987	I-132	2.03	1.78	1.63	1.52	1.37	1.14	8.94 1E-01	
668.5	0.961	I-130	1.97	1.73	1.59	1.48	1.34	1.11	8.71 1E-01	
676.4	0.157	Ru-105	3.22 1E-01	2.82 1E-01	2.59 1E-01	2.42 1E-01	2.18 1E-01	1.81 1E-01	1.42 1E-01	
685.7	0.353	Sb-127	7.26 1E-01	6.38 1E-01	5.85 1E-01	5.46 1E-01	4.93 1E-01	4.08 1E-01	3.21 1E-01	
685.8	0.316	W-187	6.50 1E-01	5.71 1E-01	5.23 1E-01	4.89 1E-01	4.41 1E-01	3.65 1E-01	2.88 1E-01	
695.0	0.997	Sb-126	2.05	1.80	1.65	1.55	1.39	1.16	9.10 1E-01	
697.0	0.289	Sb-126	5.96 1E-01	5.23 1E-01	4.80 1E-01	4.48 1E-01	4.05 1E-01	3.35 1E-01	2.64 1E-01	

付表-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\text{Bq}/\text{cm}^2)$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)								
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0		
720.5	0.538	Sb-126	1.11	9.78 1E-01	8.97 1E-01	8.38 1E-01	7.57 1E-01	6.28 1E-01	4.95 1E-01		
722.0	0.051	Ce-143	1.06 1E-01	9.31 1E-02	8.54 1E-02	7.98 1E-02	7.20 1E-02	5.97 1E-02	4.71 1E-02		
723.3	0.197	Eu-154	4.07 1E-01	3.58 1E-01	3.28 1E-01	3.07 1E-01	2.77 1E-01	2.30 1E-01	1.81 1E-01		
724.2	0.444	Zr-95	9.19 1E-01	8.08 1E-01	7.41 1E-01	6.93 1E-01	6.25 1E-01	5.18 1E-01	4.09 1E-01		
724.3	0.473	Ru-105	9.78 1E-01	8.60 1E-01	7.88 1E-01	7.37 1E-01	6.65 1E-01	5.52 1E-01	4.35 1E-01		
725.7	0.327	Pm-148m	6.77 1E-01	5.95 1E-01	5.45 1E-01	5.10 1E-01	4.60 1E-01	3.82 1E-01	3.01 1E-01		
727.2	0.068	Bi-212	1.40 1E-01	1.23 1E-01	1.13 1E-01	1.05 1E-01	9.50 1E-02	7.88 1E-02	6.21 1E-02		
739.5	0.122	Mo-99	2.53 1E-01	2.22 1E-01	2.04 1E-01	1.91 1E-01	1.72 1E-01	1.43 1E-01	1.13 1E-01		
739.5	0.823	I-130	1.71	1.50	1.37	1.29	1.16	9.63 1E-01	7.60 1E-01		
742.6	0.151	Te-134	3.13 1E-01	2.75 1E-01	2.52 1E-01	2.36 1E-01	2.13 1E-01	1.77 1E-01	1.39 1E-01		
743.3	1.000	Sb-128	2.07	1.82	1.67	1.56	1.41	1.17	9.24 1E-01		
748.3	0.008	Pr-145	1.56 1E-02	1.37 1E-02	1.26 1E-02	1.18 1E-02	1.06 1E-02	8.83 1E-03	6.97 1E-03		
754.0	1.000	Sb-128	2.08	1.83	1.67	1.57	1.41	1.17	9.27 1E-01		
756.7	0.549	Zr-95	1.14	1.00	9.19 1E-01	8.60 1E-01	7.76 1E-01	6.45 1E-01	5.09 1E-01		
763.9	0.224	Ag-110m	4.65 1E-01	4.09 1E-01	3.75 1E-01	3.51 1E-01	3.17 1E-01	2.63 1E-01	2.08 1E-01		
765.8	1.000	Nb-95	2.08	1.83	1.68	1.57	1.42	1.18	9.30 1E-01		
767.2	0.290	Te-134	6.04 1E-01	5.31 1E-01	4.87 1E-01	4.56 1E-01	4.11 1E-01	3.42 1E-01	2.70 1E-01		
772.6	0.762	I-132	1.59	1.40	1.28	1.20	1.08	8.99 1E-01	7.10 1E-01		
773.7	0.382	Te-131m	7.95 1E-01	6.99 1E-01	6.41 1E-01	6.00 1E-01	5.42 1E-01	4.50 1E-01	3.56 1E-01		
778.9	0.130	Eu-152	2.70 1E-01	2.38 1E-01	2.18 1E-01	2.04 1E-01	1.84 1E-01	1.53 1E-01	1.21 1E-01		
783.7	0.145	Sb-127	3.03 1E-01	2.66 1E-01	2.44 1E-01	2.29 1E-01	2.06 1E-01	1.72 1E-01	1.36 1E-01		
793.4	1.000	Sb-130	2.09	1.84	1.68	1.58	1.42	1.18	9.37 1E-01		
793.8	0.139	Te-131m	2.89 1E-01	2.55 1E-01	2.33 1E-01	2.19 1E-01	1.97 1E-01	1.64 1E-01	1.30 1E-01		
795.8	0.851	Cs-134	1.78	1.57	1.43	1.34	1.21	1.01	7.98 1E-01		
810.8	0.994	Co-58	2.08	1.83	1.68	1.58	1.42	1.18	9.36 1E-01		
811.8	0.103	Eu-156	2.16 1E-01	1.90 1E-01	1.74 1E-01	1.63 1E-01	1.47 1E-01	1.23 1E-01	9.70 1E-02		
812.8	0.430	Sb-129	9.01 1E-01	7.93 1E-01	7.27 1E-01	6.81 1E-01	6.15 1E-01	5.12 1E-01	4.05 1E-01		
815.8	0.236	La-140	4.95 1E-01	4.36 1E-01	4.00 1E-01	3.75 1E-01	3.38 1E-01	2.82 1E-01	2.23 1E-01		
818.5	0.997	Cs-136	2.09	1.84	1.69	1.58	1.43	1.19	9.41 1E-01		
834.8	1.000	Mn-54	2.10	1.85	1.70	1.59	1.44	1.20	9.47 1E-01		
839.4	1.000	Sb-130	2.10	1.85	1.70	1.59	1.44	1.20	9.49 1E-01		
841.6	0.146	Eu-152m	3.07 1E-01	2.70 1E-01	2.48 1E-01	2.32 1E-01	2.10 1E-01	1.75 1E-01	1.38 1E-01		
846.8	0.989	Mn-56	2.08	1.83	1.68	1.58	1.42	1.19	9.40 1E-01		
846.8	0.999	Co-56	2.10	1.85	1.70	1.59	1.44	1.20	9.50 1E-01		
847.0	0.954	I-134	2.01	1.77	1.62	1.52	1.37	1.14	9.07 1E-01		
852.2	0.206	Te-131m	4.35 1E-01	3.83 1E-01	3.51 1E-01	3.29 1E-01	2.97 1E-01	2.48 1E-01	1.96 1E-01		
856.7	0.176	Sb-126	3.72 1E-01	3.28 1E-01	3.00 1E-01	2.82 1E-01	2.54 1E-01	2.12 1E-01	1.68 1E-01		
864.0	0.156	Te-133m	3.29 1E-01	2.90 1E-01	2.66 1E-01	2.50 1E-01	2.25 1E-01	1.88 1E-01	1.49 1E-01		
873.2	0.115	Eu-154	2.43 1E-01	2.14 1E-01	1.96 1E-01	1.84 1E-01	1.66 1E-01	1.39 1E-01	1.10 1E-01		
881.6	0.420	Br-84	8.88 1E-01	7.83 1E-01	7.18 1E-01	6.74 1E-01	6.08 1E-01	5.08 1E-01	4.03 1E-01		
884.1	0.649	I-134	1.37	1.21	1.11	1.04	9.40 1E-01	7.84 1E-01	6.23 1E-01		
884.7	0.729	Ag-110m	1.54	1.36	1.25	1.17	1.06	8.81 1E-01	6.99 1E-01		
889.3	1.000	Sc-46	2.12	1.87	1.71	1.61	1.45	1.21	9.61 1E-01		
911.3	0.290	Ac-228	6.16 1E-01	5.43 1E-01	4.98 1E-01	4.68 1E-01	4.22 1E-01	3.53 1E-01	2.80 1E-01		
912.7	0.550	Te-133m	1.17	1.03	9.44 1E-01	8.88 1E-01	8.01 1E-01	6.69 1E-01	5.32 1E-01		
914.6	0.200	Sb-129	4.26 1E-01	3.76 1E-01	3.44 1E-01	3.24 1E-01	2.92 1E-01	2.44 1E-01	1.94 1E-01		
914.8	0.109	Te-133m	2.32 1E-01	2.04 1E-01	1.87 1E-01	1.76 1E-01	1.59 1E-01	1.33 1E-01	1.05 1E-01		
914.8	0.115	Pm-148	2.43 1E-01	2.15 1E-01	1.97 1E-01	1.85 1E-01	1.67 1E-01	1.39 1E-01	1.11 1E-01		
915.3	0.171	Pm-148m	3.63 1E-01	3.21 1E-01	2.94 1E-01	2.76 1E-01	2.49 1E-01	2.08 1E-01	1.65 1E-01		
934.5	0.139	Y-92	2.96 1E-01	2.61 1E-01	2.39 1E-01	2.25 1E-01	2.03 1E-01	1.70 1E-01	1.35 1E-01		
934.9	0.190	Sb-130	4.05 1E-01	3.57 1E-01	3.27 1E-01	3.08 1E-01	2.78 1E-01	2.32 1E-01	1.85 1E-01		
937.5	0.343	Ag-110m	7.32 1E-01	6.46 1E-01	5.91 1E-01	5.57 1E-01	5.02 1E-01	4.20 1E-01	3.34 1E-01		
954.5	0.181	I-132	3.86 1E-01	3.41 1E-01	3.12 1E-01	2.94 1E-01	2.65 1E-01	2.22 1E-01	1.77 1E-01		
963.3	0.120	Eu-152m	2.57 1E-01	2.27 1E-01	2.08 1E-01	1.96 1E-01	1.77 1E-01	1.48 1E-01	1.18 1E-01		
964.1	0.145	Eu-152	3.10 1E-01	2.74 1E-01	2.51 1E-01	2.36 1E-01	2.13 1E-01	1.78 1E-01	1.42 1E-01		
964.8	0.055	Ac-228	1.17 1E-01	1.03 1E-01	9.44 1E-02	8.88 1E-02	8.02 1E-02	6.71 1E-02	5.34 1E-02		
966.4	0.077	Sb-129	1.65 1E-01	1.45 1E-01	1.33 1E-01	1.25 1E-01	1.13 1E-01	9.48 1E-02	7.55 1E-02		
969.2	0.175	Ac-228	3.74 1E-01	3.30 1E-01	3.02 1E-01	2.85 1E-01	2.57 1E-01	2.15 1E-01	1.71 1E-01		
984.5	0.278	Np-238	5.96 1E-01	5.27 1E-01	4.83 1E-01	4.55 1E-01	4.10 1E-01	3.44 1E-01	2.74 1E-01		
996.3	0.103	Eu-154	2.21 1E-01	1.96 1E-01	1.79 1E-01	1.69 1E-01	1.52 1E-01	1.28 1E-01	1.02 1E-01		
1004.8	0.174	Eu-154	3.74 1E-01	3.31 1E-01	3.03 1E-01	2.86 1E-01	2.58 1E-01	2.16 1E-01	1.72 1E-01		
1009.8	0.298	Cs-138	6.42 1E-01	5.67 1E-01	5.20 1E-01	4.90 1E-01	4.42 1E-01	3.71 1E-01	2.96 1E-01		
1013.8	0.202	Pm-148m	4.35 1E-01	3.84 1E-01	3.52 1E-01	3.32 1E-01	3.00 1E-01	2.51 1E-01	2.00 1E-01		
1025.9	0.096	Np-238	2.07 1E-01	1.83 1E-01	1.67 1E-01	1.58 1E-01	1.42 1E-01	1.19 1E-01	9.53 1E-02		
1028.5	0.203	Np-238	4.37 1E-01	3.87 1E-01	3.54 1E-01	3.34 1E-01	3.01 1E-01	2.53 1E-01	2.02 1E-01		

付表-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (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 β (g・cm ⁻²)										
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0				
1030.1	0.126	Sb-129	2.72 1E-01	2.40 1E-01	2.20 1E-01	2.07 1E-01	1.87 1E-01	1.57 1E-01	1.25 1E-01				
1038.8	0.080	I-135	1.73 1E-01	1.53 1E-01	1.40 1E-01	1.32 1E-01	1.19 1E-01	1.00 1E-01	7.98 1E-02				
1048.1	0.798	Cs-136	1.72	1.52	1.40	1.32	1.19	9.97 1E-01	7.96 1E-01				
1072.6	0.150	I-134	3.24 1E-01	2.86 1E-01	2.63 1E-01	2.48 1E-01	2.24 1E-01	1.88 1E-01	1.50 1E-01				
1076.6	0.088	Rb-86	1.90 1E-01	1.68 1E-01	1.54 1E-01	1.45 1E-01	1.31 1E-01	1.10 1E-01	8.80 1E-02				
1085.9	0.099	Eu-152	2.15 1E-01	1.90 1E-01	1.74 1E-01	1.64 1E-01	1.48 1E-01	1.25 1E-01	9.96 1E-02				
1099.2	0.565	Fe-59	1.23	1.08	9.94 1E-01	9.38 1E-01	8.47 1E-01	7.12 1E-01	5.69 1E-01				
1112.1	0.136	Eu-152	2.95 1E-01	2.60 1E-01	2.39 1E-01	2.25 1E-01	2.04 1E-01	1.71 1E-01	1.37 1E-01				
1115.5	0.148	Ni-65	3.22 1E-01	2.85 1E-01	2.61 1E-01	2.47 1E-01	2.23 1E-01	1.87 1E-01	1.50 1E-01				
1115.5	0.507	Zn-65	1.10	9.74 1E-01	8.94 1E-01	8.44 1E-01	7.62 1E-01	6.41 1E-01	5.12 1E-01				
1120.5	1.000	Sc-46	2.17	1.92	1.76	1.66	1.50	1.26	1.01				
1121.3	0.349	Ta-182	7.59 1E-01	6.70 1E-01	6.16 1E-01	5.81 1E-01	5.25 1E-01	4.41 1E-01	3.53 1E-01				
1125.5	0.114	Te-131m	2.48 1E-01	2.19 1E-01	2.02 1E-01	1.90 1E-01	1.72 1E-01	1.44 1E-01	1.15 1E-01				
1131.5	0.228	I-135	4.96 1E-01	4.38 1E-01	4.02 1E-01	3.79 1E-01	3.43 1E-01	2.88 1E-01	2.31 1E-01				
1153.5	0.071	Eu-156	1.55 1E-01	1.37 1E-01	1.26 1E-01	1.19 1E-01	1.07 1E-01	9.03 1E-02	7.22 1E-02				
1157.5	0.113	I-130	2.47 1E-01	2.18 1E-01	2.00 1E-01	1.89 1E-01	1.71 1E-01	1.44 1E-01	1.15 1E-01				
1173.2	0.999	Co-60	2.18	1.93	1.77	1.67	1.51	1.27	1.02				
1189.0	0.164	Ta-182	3.59 1E-01	3.17 1E-01	2.91 1E-01	2.75 1E-01	2.49 1E-01	2.09 1E-01	1.68 1E-01				
1204.9	0.003	Y-91	6.57 1E-03	5.81 1E-03	5.34 1E-03	5.04 1E-03	4.56 1E-03	3.84 1E-03	3.08 1E-03				
1206.6	0.098	Te-131m	2.14 1E-01	1.89 1E-01	1.74 1E-01	1.64 1E-01	1.48 1E-01	1.25 1E-01	1.00 1E-01				
1221.4	0.273	Ta-182	5.99 1E-01	5.30 1E-01	4.87 1E-01	4.60 1E-01	4.16 1E-01	3.51 1E-01	2.81 1E-01				
1230.7	0.089	Eu-156	1.94 1E-01	1.72 1E-01	1.58 1E-01	1.49 1E-01	1.35 1E-01	1.14 1E-01	9.12 1E-02				
1231.0	0.116	Ta-182	2.54 1E-01	2.24 1E-01	2.06 1E-01	1.95 1E-01	1.76 1E-01	1.48 1E-01	1.19 1E-01				
1235.4	0.200	Cs-136	4.40 1E-01	3.89 1E-01	3.58 1E-01	3.38 1E-01	3.06 1E-01	2.58 1E-01	2.06 1E-01				
1238.3	0.670	Co-56	1.47	1.30	1.20	1.13	1.02	8.61 1E-01	6.90 1E-01				
1242.4	0.067	Eu-156	1.47 1E-01	1.30 1E-01	1.20 1E-01	1.13 1E-01	1.02 1E-01	8.62 1E-02	6.91 1E-02				
1260.4	0.289	I-135	6.37 1E-01	5.63 1E-01	5.18 1E-01	4.89 1E-01	4.43 1E-01	3.74 1E-01	2.99 1E-01				
1274.4	0.355	Eu-154	7.82 1E-01	6.91 1E-01	6.37 1E-01	6.01 1E-01	5.44 1E-01	4.59 1E-01	3.68 1E-01				
1274.5	0.999	Na-22	2.20	1.95	1.79	1.69	1.53	1.29	1.04				
1291.6	0.432	Fe-59	9.53 1E-01	8.43 1E-01	7.76 1E-01	7.33 1E-01	6.64 1E-01	5.60 1E-01	4.49 1E-01				
1332.5	1.000	Co-60	2.21	1.96	1.80	1.70	1.54	1.30	1.05				
1354.5	0.026	La-141	5.84 1E-02	5.16 1E-02	4.76 1E-02	4.50 1E-02	4.07 1E-02	3.44 1E-02	2.76 1E-02				
1368.6	1.000	Na-24	2.22	1.96	1.81	1.71	1.55	1.31	1.05				
1383.9	0.900	Sr-92	2.00	1.77	1.63	1.54	1.40	1.18	9.51 1E-01				
1384.3	0.243	Ag-110m	5.42 1E-01	4.79 1E-01	4.42 1E-01	4.18 1E-01	3.79 1E-01	3.20 1E-01	2.57 1E-01				
1408.0	0.209	Eu-152	4.65 1E-01	4.11 1E-01	3.79 1E-01	3.59 1E-01	3.25 1E-01	2.75 1E-01	2.21 1E-01				
1435.9	0.763	Cs-138	1.71	1.51	1.39	1.32	1.19	1.01	8.13 1E-01				
1457.6	0.087	I-135	1.96 1E-01	1.73 1E-01	1.60 1E-01	1.51 1E-01	1.37 1E-01	1.16 1E-01	9.35 1E-02				
1460.8	0.107	K-40	2.40 1E-01	2.12 1E-01	1.96 1E-01	1.85 1E-01	1.68 1E-01	1.42 1E-01	1.14 1E-01				
1465.1	0.222	Pm-148	4.97 1E-01	4.40 1E-01	4.06 1E-01	3.84 1E-01	3.49 1E-01	2.95 1E-01	2.38 1E-01				
1481.8	0.235	Ni-65	5.27 1E-01	4.66 1E-01	4.31 1E-01	4.07 1E-01	3.70 1E-01	3.13 1E-01	2.52 1E-01				
1505.0	0.131	Ag-110m	2.95 1E-01	2.60 1E-01	2.41 1E-01	2.28 1E-01	2.07 1E-01	1.75 1E-01	1.41 1E-01				
1524.6	0.189	K-42	4.25 1E-01	3.76 1E-01	3.48 1E-01	3.29 1E-01	2.99 1E-01	2.53 1E-01	2.04 1E-01				
1596.2	0.954	La-140	2.16	1.91	1.76	1.67	1.52	1.29	1.04				
1678.0	0.096	I-135	2.19 1E-01	1.94 1E-01	1.79 1E-01	1.70 1E-01	1.54 1E-01	1.31 1E-01	1.06 1E-01				
1691.0	0.488	Sb-124	1.11	9.82 1E-01	9.09 1E-01	8.60 1E-01	7.82 1E-01	6.65 1E-01	5.36 1E-01				
1736.5	0.060	Sb-129	1.36 1E-01	1.21 1E-01	1.12 1E-01	1.06 1E-01	9.63 1E-02	8.19 1E-02	6.61 1E-02				
1771.4	0.155	Co-56	3.55 1E-01	3.14 1E-01	2.91 1E-01	2.75 1E-01	2.51 1E-01	2.13 1E-01	1.72 1E-01				
1791.2	0.078	I-135	1.78 1E-01	1.58 1E-01	1.46 1E-01	1.38 1E-01	1.26 1E-01	1.07 1E-01	8.66 1E-02				
1810.7	0.272	Mn-56	6.23 1E-01	5.52 1E-01	5.12 1E-01	4.84 1E-01	4.41 1E-01	3.76 1E-01	3.03 1E-01				
1897.6	0.147	Br-84	3.39 1E-01	3.01 1E-01	2.79 1E-01	2.64 1E-01	2.40 1E-01	2.05 1E-01	1.66 1E-01				
1901.3	0.072	La-142	1.65 1E-01	1.46 1E-01	1.36 1E-01	1.29 1E-01	1.17 1E-01	9.99 1E-02	8.07 1E-02				
2091.0	0.056	Sb-124	1.30 1E-01	1.16 1E-01	1.07 1E-01	1.02 1E-01	9.26 1E-02	7.92 1E-02	6.41 1E-02				
2113.0	0.143	Mn-56	3.34 1E-01	2.97 1E-01	2.76 1E-01	2.61 1E-01	2.38 1E-01	2.04 1E-01	1.65 1E-01				
2218.0	0.152	Cs-138	3.56 1E-01	3.16 1E-01	2.94 1E-01	2.78 1E-01	2.54 1E-01	2.17 1E-01	1.76 1E-01				
2397.8	0.133	La-142	3.13 1E-01	2.79 1E-01	2.59 1E-01	2.46 1E-01	2.24 1E-01	1.92 1E-01	1.57 1E-01				
2484.1	0.067	Br-84	1.59 1E-01	1.42 1E-01	1.32 1E-01	1.25 1E-01	1.14 1E-01	9.77 1E-02	7.99 1E-02				
2542.7	0.100	La-142	2.37 1E-01	2.12 1E-01	1.97 1E-01	1.86 1E-01	1.70 1E-01	1.46 1E-01	1.19 1E-01				
2598.6	0.167	Co-56	3.98 1E-01	3.56 1E-01	3.31 1E-01	3.13 1E-01	2.86 1E-01	2.45 1E-01	2.01 1E-01				
2639.6	0.076	Cs-138	1.82 1E-01	1.63 1E-01	1.51 1E-01	1.43 1E-01	1.31 1E-01	1.12 1E-01	9.19 1E-02				
2754.0	0.999	Na-24	2.39	2.14	1.99	1.88	1.72	1.48	1.21				
3253.5	0.074	Co-56	1.80 1E-01	1.62 1E-01	1.51 1E-01	1.42 1E-01	1.31 1E-01	1.12 1E-01	9.28 1E-02				
3927.5	0.068	Br-84	1.71 1E-01	1.53 1E-01	1.42 1E-01	1.35 1E-01	1.24 1E-01	1.07 1E-01	8.87 1E-02				

付表-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (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 β (g・cm ⁻²)										
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100				
11.2	0.255	Pb-210	1.49 1E-03	9.01 1E-04	4.51 1E-04	2.26 1E-04	1.51 1E-04	9.09 1E-05	4.54 1E-05				
12.7	0.081	Th-232	7.85 1E-04	4.76 1E-04	2.39 1E-04	1.20 1E-04	8.00 1E-05	4.80 1E-05	2.40 1E-05				
12.7	0.089	Th-228	8.56 1E-04	5.19 1E-04	2.60 1E-04	1.30 1E-04	8.72 1E-05	5.24 1E-05	2.62 1E-05				
13.4	0.079	U-236	9.55 1E-04	5.81 1E-04	2.92 1E-04	1.46 1E-04	9.77 1E-05	5.86 1E-05	2.93 1E-05				
13.4	0.084	U-238	1.01 1E-03	6.13 1E-04	3.08 1E-04	1.54 1E-04	1.03 1E-04	6.19 1E-05	3.09 1E-05				
13.4	0.094	U-234	1.13 1E-03	6.86 1E-04	3.45 1E-04	1.73 1E-04	1.15 1E-04	6.93 1E-05	3.47 1E-05				
13.4	0.102	U-232	1.22 1E-03	7.44 1E-04	3.74 1E-04	1.87 1E-04	1.25 1E-04	7.51 1E-05	3.76 1E-05				
13.7	0.094	Th-234	1.24 1E-03	7.55 1E-04	3.80 1E-04	1.90 1E-04	1.27 1E-04	7.62 1E-05	3.82 1E-05				
13.7	0.562	Np-237	7.44 1E-03	4.53 1E-03	2.27 1E-03	1.14 1E-03	7.62 1E-04	4.57 1E-04	2.29 1E-04				
13.7	0.776	Th-231	1.03 1E-02	6.25 1E-03	3.14 1E-03	1.57 1E-03	1.05 1E-03	6.31 1E-04	3.16 1E-04				
14.1	0.040	Pu-239	5.73 1E-04	3.49 1E-04	1.75 1E-04	8.78 1E-05	5.88 1E-05	3.52 1E-05	1.76 1E-05				
14.1	0.082	Pu-242	1.19 1E-03	7.25 1E-04	3.65 1E-04	1.83 1E-04	1.22 1E-04	7.32 1E-05	3.67 1E-05				
14.1	0.089	Pu-240	1.28 1E-03	7.82 1E-04	3.93 1E-04	1.97 1E-04	1.32 1E-04	7.89 1E-05	3.95 1E-05				
14.1	0.102	Pu-238	1.47 1E-03	8.96 1E-04	4.50 1E-04	2.25 1E-04	1.51 1E-04	9.04 1E-05	4.53 1E-05				
14.1	0.103	Pu-236	1.49 1E-03	9.05 1E-04	4.55 1E-04	2.28 1E-04	1.52 1E-04	9.14 1E-05	4.57 1E-05				
14.4	0.365	Am-241	5.73 1E-03	3.49 1E-03	1.76 1E-03	8.80 1E-04	5.89 1E-04	3.53 1E-04	1.77 1E-04				
14.4	0.575	U-237	9.04 1E-03	5.51 1E-03	2.77 1E-03	1.39 1E-03	9.28 1E-04	5.56 1E-04	2.78 1E-04				
14.8	0.081	Cm-244	1.37 1E-03	8.33 1E-04	4.19 1E-04	2.10 1E-04	1.40 1E-04	8.41 1E-05	4.21 1E-05				
14.8	0.085	Cm-242	1.44 1E-03	8.79 1E-04	4.42 1E-04	2.21 1E-04	1.48 1E-04	8.87 1E-05	4.44 1E-05				
14.8	0.098	Am-242	1.66 1E-03	1.01 1E-03	5.09 1E-04	2.55 1E-04	1.71 1E-04	1.02 1E-04	5.12 1E-05				
14.8	0.461	Cm-243	7.81 1E-03	4.76 1E-03	2.39 1E-03	1.20 1E-03	8.03 1E-04	4.81 1E-04	2.41 1E-04				
14.8	0.471	Cm-245	7.98 1E-03	4.87 1E-03	2.45 1E-03	1.23 1E-03	8.21 1E-04	4.92 1E-04	2.46 1E-04				
15.2	0.273	Am-242m	5.05 1E-03	3.08 1E-03	1.55 1E-03	7.77 1E-04	5.20 1E-04	3.11 1E-04	1.56 1E-04				
15.5	0.161	Am-242	3.27 1E-03	2.00 1E-03	1.01 1E-03	5.05 1E-04	3.38 1E-04	2.03 1E-04	1.02 1E-04				
16.5	0.183	Mo-93	4.69 1E-03	2.87 1E-03	1.45 1E-03	7.28 1E-04	4.87 1E-04	2.93 1E-04	1.47 1E-04				
16.6	0.060	Nb-93m	1.56 1E-03	9.55 1E-04	4.83 1E-04	2.42 1E-04	1.62 1E-04	9.74 1E-05	4.89 1E-05				
16.6	0.350	Mo-93	9.12 1E-03	5.58 1E-03	2.83 1E-03	1.42 1E-03	9.48 1E-04	5.69 1E-04	2.86 1E-04				
18.6	0.090	Mo-93	3.26 1E-03	2.00 1E-03	1.02 1E-03	5.10 1E-04	3.42 1E-04	2.05 1E-04	1.03 1E-04				
20.1	0.184	Rh-103m	8.14 1E-03	5.00 1E-03	2.55 1E-03	1.28 1E-03	8.57 1E-04	5.16 1E-04	2.59 1E-04				
20.2	0.349	Rh-103m	1.58 1E-02	9.75 1E-03	4.97 1E-03	2.50 1E-03	1.67 1E-03	1.01 1E-03	5.06 1E-04				
22.7	0.094	Rh-103m	6.30 1E-03	3.94 1E-03	2.04 1E-03	1.04 1E-03	6.96 1E-04	4.19 1E-04	2.11 1E-04				
25.3	0.410	Sn-117m	3.63 1E-02	2.30 1E-02	1.19 1E-02	6.10 1E-03	4.11 1E-03	2.47 1E-03	1.24 1E-03				
25.6	0.146	Th-231	1.34 1E-02	8.48 1E-03	4.41 1E-03	2.25 1E-03	1.52 1E-03	9.15 1E-04	4.60 1E-04				
26.4	0.156	Sn-126	1.53 1E-02	9.68 1E-03	5.05 1E-03	2.58 1E-03	1.74 1E-03	1.05 1E-03	5.27 1E-04				
27.2	0.103	Te-127m	1.09 1E-02	6.90 1E-03	3.60 1E-03	1.84 1E-03	1.24 1E-03	7.48 1E-04	3.77 1E-04				
27.2	0.127	Te-129m	1.34 1E-02	8.51 1E-03	4.44 1E-03	2.27 1E-03	1.53 1E-03	9.22 1E-04	4.64 1E-04				
27.2	0.327	Te-125m	3.44 1E-02	2.18 1E-02	1.14 1E-02	5.83 1E-03	3.93 1E-03	2.37 1E-03	1.19 1E-03				
27.5	0.193	Te-127m	2.07 1E-02	1.32 1E-02	6.88 1E-03	3.52 1E-03	2.37 1E-03	1.43 1E-03	7.19 1E-04				
27.5	0.237	Te-129m	2.55 1E-02	1.62 1E-02	8.46 1E-03	4.33 1E-03	2.92 1E-03	1.76 1E-03	8.84 1E-04				
27.5	0.611	Te-125m	6.56 1E-02	4.17 1E-02	2.18 1E-02	1.11 1E-02	7.51 1E-03	4.52 1E-03	2.28 1E-03				
27.8	0.156	Te-129	1.72 1E-02	1.09 1E-02	5.72 1E-03	2.93 1E-03	1.97 1E-03	1.19 1E-03	5.98 1E-04				
29.4	0.152	Np-237	1.88 1E-02	1.20 1E-02	6.29 1E-03	3.22 1E-03	2.17 1E-03	1.31 1E-03	6.59 1E-04				
29.5	0.185	I-129	2.30 1E-02	1.47 1E-02	7.67 1E-03	3.93 1E-03	2.65 1E-03	1.60 1E-03	8.04 1E-04				
29.8	0.343	I-129	4.36 1E-02	2.78 1E-02	1.46 1E-02	7.47 1E-03	5.03 1E-03	3.03 1E-03	1.53 1E-03				
30.6	0.092	Cs-134m	1.24 1E-02	7.96 1E-03	4.19 1E-03	2.16 1E-03	1.46 1E-03	8.78 1E-04	4.42 1E-04				
31.0	0.067	Te-127m	9.26 1E-03	5.96 1E-03	3.15 1E-03	1.62 1E-03	1.10 1E-03	6.62 1E-04	3.33 1E-04				
31.0	0.068	Te-129m	9.45 1E-03	6.08 1E-03	3.21 1E-03	1.66 1E-03	1.12 1E-03	6.75 1E-04	3.40 1E-04				
31.0	0.170	Cs-134m	2.35 1E-02	1.51 1E-02	7.98 1E-03	4.11 1E-03	2.78 1E-03	1.68 1E-03	8.45 1E-04				
31.0	0.212	Te-125m	2.93 1E-02	1.89 1E-02	9.96 1E-03	5.14 1E-03	3.47 1E-03	2.09 1E-03	1.06 1E-03				
31.8	0.021	Ba-137m	3.01 1E-03	1.95 1E-03	1.04 1E-03	5.36 1E-04	3.62 1E-04	2.19 1E-04	1.11 1E-04				
32.2	0.038	Ba-137m	5.68 1E-03	3.68 1E-03	1.96 1E-03	1.02 1E-03	6.88 1E-04	4.17 1E-04	2.10 1E-04				
33.6	0.122	I-129	1.98 1E-02	1.30 1E-02	6.97 1E-03	3.63 1E-03	2.46 1E-03	1.49 1E-03	7.53 1E-04				
35.0	0.050	Cs-134m	8.81 1E-03	5.80 1E-03	3.14 1E-03	1.64 1E-03	1.11 1E-03	6.77 1E-04	3.42 1E-04				
35.5	0.067	Te-125m	1.20 1E-02	7.91 1E-03	4.29 1E-03	2.25 1E-03	1.53 1E-03	9.27 1E-04	4.69 1E-04				
38.7	0.223	Nd-147	4.69 1E-02	3.13 1E-02	1.72 1E-02	9.08 1E-03	6.17 1E-03	3.76 1E-03	1.90 1E-03				
39.6	0.075	I-129	1.64 1E-02	1.10 1E-02	6.04 1E-03	3.19 1E-03	2.17 1E-03	1.32 1E-03	6.70 1E-04				
43.0	0.118	Eu-155	2.94 1E-02	1.98 1E-02	1.10 1E-02	5.85 1E-03	3.98 1E-03	2.43 1E-03	1.23 1E-03				
59.5	0.345	U-237	1.25 1E-01	8.67 1E-02	4.98 1E-02	2.71 1E-02	1.86 1E-02	1.14 1E-02	5.83 1E-03				
59.5	0.359	Am-241	1.30 1E-01	9.02 1E-02	5.18 1E-02	2.82 1E-02	1.93 1E-02	1.19 1E-02	6.07 1E-03				
64.3	0.096	Sn-126	3.68 1E-02	2.58 1E-02	1.49 1E-02	8.18 1E-03	5.62 1E-03	3.46 1E-03	1.77 1E-03				
74.7	0.674	Am-243	2.85 1E-01	2.02 1E-01	1.19 1E-01	6.57 1E-02	4.54 1E-02	2.81 1E-02	1.44 1E-02				
74.8	0.104	Pb-212	4.42 1E-02	3.14 1E-02	1.85 1E-02	1.02 1E-02	7.05 1E-03	4.36 1E-03	2.24 1E-03				
77.1	0.176	Pb-212	7.53 1E-02	5.36 1E-02	3.16 1E-02	1.75 1E-02	1.21 1E-02	7.49 1E-03	3.84 1E-03				
84.2	0.067	Th-231	2.99 1E-02	2.14 1E-02	1.27 1E-02	7.09 1E-03	4.92 1E-03	3.06 1E-03	1.57 1E-03				
86.5	0.123	Np-237	5.55 1E-02	3.98 1E-02	2.37 1E-02	1.32 1E-02	9.18 1E-03	5.71 1E-03	2.93 1E-03				

付表-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (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 β (g・cm ⁻²)							
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100	
86.5	0.309	Eu-155	1.40 1E-01	1.00 1E-01	5.97 1E-02	3.33 1E-02	2.31 1E-02	1.44 1E-02	7.38 1E-03	
86.9	0.089	Sn-126	4.04 1E-02	2.90 1E-02	1.73 1E-02	9.63 1E-03	6.68 1E-03	4.16 1E-03	2.14 1E-03	
87.6	0.370	Sn-126	1.68 1E-01	1.21 1E-01	7.20 1E-02	4.01 1E-02	2.79 1E-02	1.73 1E-02	8.91 1E-03	
91.1	0.279	Nd-147	1.29 1E-01	9.30 1E-02	5.57 1E-02	3.11 1E-02	2.16 1E-02	1.35 1E-02	6.93 1E-03	
97.1	0.166	U-237	7.91 1E-02	5.72 1E-02	3.45 1E-02	1.93 1E-02	1.35 1E-02	8.41 1E-03	4.32 1E-03	
98.4	0.157	Pa-233	7.56 1E-02	5.47 1E-02	3.30 1E-02	1.85 1E-02	1.29 1E-02	8.07 1E-03	4.15 1E-03	
99.6	0.147	Cm-243	7.11 1E-02	5.16 1E-02	3.11 1E-02	1.75 1E-02	1.22 1E-02	7.62 1E-03	3.92 1E-03	
99.6	0.157	Np-239	7.58 1E-02	5.49 1E-02	3.32 1E-02	1.86 1E-02	1.30 1E-02	8.12 1E-03	4.18 1E-03	
99.6	0.185	Cm-245	8.91 1E-02	6.46 1E-02	3.90 1E-02	2.19 1E-02	1.53 1E-02	9.55 1E-03	4.91 1E-03	
101.1	0.266	U-237	1.29 1E-01	9.38 1E-02	5.67 1E-02	3.18 1E-02	2.22 1E-02	1.39 1E-02	7.15 1E-03	
103.8	0.059	Am-242	2.89 1E-02	2.10 1E-02	1.27 1E-02	7.13 1E-03	4.98 1E-03	3.11 1E-03	1.60 1E-03	
103.8	0.236	Cm-243	1.15 1E-01	8.36 1E-02	5.06 1E-02	2.84 1E-02	1.98 1E-02	1.24 1E-02	6.39 1E-03	
103.8	0.251	Np-239	1.23 1E-01	8.91 1E-02	5.39 1E-02	3.03 1E-02	2.11 1E-02	1.32 1E-02	6.81 1E-03	
103.8	0.295	Cm-245	1.44 1E-01	1.05 1E-01	6.34 1E-02	3.56 1E-02	2.49 1E-02	1.56 1E-02	8.01 1E-03	
105.3	0.206	Eu-155	1.01 1E-01	7.33 1E-02	4.44 1E-02	2.50 1E-02	1.74 1E-02	1.09 1E-02	5.62 1E-03	
106.1	0.272	Np-239	1.34 1E-01	9.72 1E-02	5.89 1E-02	3.31 1E-02	2.31 1E-02	1.45 1E-02	7.45 1E-03	
117.3	0.066	Cm-245	3.31 1E-02	2.41 1E-02	1.47 1E-02	8.30 1E-03	5.81 1E-03	3.64 1E-03	1.88 1E-03	
121.1	0.173	Se-75	8.81 1E-02	6.44 1E-02	3.93 1E-02	2.22 1E-02	1.56 1E-02	9.74 1E-03	5.03 1E-03	
122.1	0.855	Co-57	4.36 1E-01	3.19 1E-01	1.95 1E-01	1.10 1E-01	7.71 1E-02	4.83 1E-02	2.49 1E-02	
127.5	0.141	Cs-134m	7.27 1E-02	5.33 1E-02	3.25 1E-02	1.84 1E-02	1.29 1E-02	8.10 1E-03	4.19 1E-03	
133.0	0.419	Hf-181	2.19 1E-01	1.61 1E-01	9.85 1E-02	5.59 1E-02	3.92 1E-02	2.46 1E-02	1.27 1E-02	
133.5	0.111	Ce-144	5.81 1E-02	4.26 1E-02	2.61 1E-02	1.48 1E-02	1.04 1E-02	6.52 1E-03	3.38 1E-03	
136.0	0.590	Se-75	3.11 1E-01	2.28 1E-01	1.40 1E-01	7.95 1E-02	5.58 1E-02	3.50 1E-02	1.81 1E-02	
136.5	0.106	Co-57	5.61 1E-02	4.13 1E-02	2.53 1E-02	1.44 1E-02	1.01 1E-02	6.33 1E-03	3.28 1E-03	
140.5	0.890	Tc-99m	4.73 1E-01	3.48 1E-01	2.14 1E-01	1.22 1E-01	8.54 1E-02	5.36 1E-02	2.78 1E-02	
143.8	0.110	U-235	5.87 1E-02	4.33 1E-02	2.66 1E-02	1.52 1E-02	1.06 1E-02	6.68 1E-03	3.46 1E-03	
145.4	0.484	Ce-141	2.60 1E-01	1.92 1E-01	1.18 1E-01	6.73 1E-02	4.73 1E-02	2.97 1E-02	1.54 1E-02	
158.6	0.864	Sn-117m	4.75 1E-01	3.51 1E-01	2.17 1E-01	1.24 1E-01	8.72 1E-02	5.48 1E-02	2.84 1E-02	
159.0	0.840	Te-123m	4.62 1E-01	3.42 1E-01	2.11 1E-01	1.21 1E-01	8.49 1E-02	5.33 1E-02	2.77 1E-02	
162.6	0.062	Ba-140	3.43 1E-02	2.54 1E-02	1.57 1E-02	8.98 1E-03	6.32 1E-03	3.97 1E-03	2.06 1E-03	
165.9	0.238	Ba-139	1.32 1E-01	9.77 1E-02	6.03 1E-02	3.45 1E-02	2.44 1E-02	1.53 1E-02	7.94 1E-03	
174.9	0.095	Cm-245	5.33 1E-02	3.96 1E-02	2.45 1E-02	1.41 1E-02	9.93 1E-03	6.24 1E-03	3.24 1E-03	
181.1	0.061	Mo-99	3.43 1E-02	2.55 1E-02	1.58 1E-02	9.07 1E-03	6.41 1E-03	4.03 1E-03	2.09 1E-03	
185.7	0.572	U-235	3.26 1E-01	2.43 1E-01	1.50 1E-01	8.64 1E-02	6.12 1E-02	3.84 1E-02	2.00 1E-02	
186.0	0.033	Ra-226	1.87 1E-02	1.39 1E-02	8.62 1E-03	4.96 1E-03	3.51 1E-03	2.20 1E-03	1.14 1E-03	
202.5	0.958	Y-90m	5.57 1E-01	4.16 1E-01	2.59 1E-01	1.49 1E-01	1.06 1E-01	6.65 1E-02	3.45 1E-02	
205.3	0.050	U-235	2.92 1E-02	2.18 1E-02	1.36 1E-02	7.83 1E-03	5.55 1E-03	3.49 1E-03	1.81 1E-03	
208.0	0.216	U-237	1.26 1E-01	9.43 1E-02	5.87 1E-02	3.39 1E-02	2.40 1E-02	1.51 1E-02	7.86 1E-03	
210.5	0.223	Te-134	1.31 1E-01	9.78 1E-02	6.09 1E-02	3.51 1E-02	2.49 1E-02	1.57 1E-02	8.16 1E-03	
228.2	0.106	Cm-243	6.30 1E-02	4.72 1E-02	2.95 1E-02	1.71 1E-02	1.21 1E-02	7.65 1E-03	3.98 1E-03	
228.2	0.113	Np-239	6.72 1E-02	5.03 1E-02	3.15 1E-02	1.82 1E-02	1.29 1E-02	8.16 1E-03	4.24 1E-03	
228.2	0.882	Te-132	5.25 1E-01	3.94 1E-01	2.46 1E-01	1.42 1E-01	1.01 1E-01	6.38 1E-02	3.32 1E-02	
234.7	0.261	Nb-95m	1.56 1E-01	1.17 1E-01	7.34 1E-02	4.25 1E-02	3.02 1E-02	1.91 1E-02	9.91 1E-03	
238.6	0.434	Pb-212	2.61 1E-01	1.96 1E-01	1.23 1E-01	7.11 1E-02	5.04 1E-02	3.19 1E-02	1.66 1E-02	
241.0	0.040	Ra-224	2.39 1E-02	1.80 1E-02	1.12 1E-02	6.53 1E-03	4.63 1E-03	2.93 1E-03	1.52 1E-03	
264.7	0.591	Se-75	3.64 1E-01	2.74 1E-01	1.72 1E-01	1.00 1E-01	7.11 1E-02	4.52 1E-02	2.35 1E-02	
266.9	0.068	Y-93	4.20 1E-02	3.16 1E-02	1.99 1E-02	1.16 1E-02	8.21 1E-03	5.22 1E-03	2.71 1E-03	
275.2	0.068	Pm-151	4.20 1E-02	3.16 1E-02	1.99 1E-02	1.16 1E-02	8.24 1E-03	5.24 1E-03	2.73 1E-03	
277.6	0.140	Cm-243	8.71 1E-02	6.56 1E-02	4.14 1E-02	2.41 1E-02	1.71 1E-02	1.09 1E-02	5.66 1E-03	
277.6	0.144	Np-239	8.97 1E-02	6.75 1E-02	4.26 1E-02	2.49 1E-02	1.76 1E-02	1.12 1E-02	5.83 1E-03	
278.0	0.209	Te-134	1.30 1E-01	9.81 1E-02	6.19 1E-02	3.61 1E-02	2.56 1E-02	1.63 1E-02	8.47 1E-03	
279.5	0.252	Se-75	1.57 1E-01	1.18 1E-01	7.47 1E-02	4.36 1E-02	3.09 1E-02	1.97 1E-02	1.02 1E-02	
285.9	0.001	Pm-149	6.12 1E-04	4.62 1E-04	2.92 1E-04	1.70 1E-04	1.21 1E-04	7.69 1E-05	4.00 1E-05	
293.3	0.420	Ce-143	2.66 1E-01	2.00 1E-01	1.27 1E-01	7.41 1E-02	5.25 1E-02	3.35 1E-02	1.74 1E-02	
300.1	0.066	Pa-233	4.22 1E-02	3.19 1E-02	2.02 1E-02	1.18 1E-02	8.37 1E-03	5.35 1E-03	2.78 1E-03	
306.1	0.051	Rh-105	3.27 1E-02	2.47 1E-02	1.57 1E-02	9.18 1E-03	6.50 1E-03	4.15 1E-03	2.16 1E-03	
312.0	0.386	Pa-233	2.47 1E-01	1.87 1E-01	1.19 1E-01	6.95 1E-02	4.93 1E-02	3.15 1E-02	1.64 1E-02	
314.1	0.610	Sb-128	3.91 1E-01	2.96 1E-01	1.88 1E-01	1.10 1E-01	7.80 1E-02	4.98 1E-02	2.60 1E-02	
318.9	0.192	Rh-105	1.24 1E-01	9.34 1E-02	5.93 1E-02	3.48 1E-02	2.47 1E-02	1.58 1E-02	8.22 1E-03	
320.1	0.098	Cr-51	6.33 1E-02	4.79 1E-02	3.04 1E-02	1.78 1E-02	1.27 1E-02	8.08 1E-03	4.22 1E-03	
330.9	0.780	Sb-130	5.06 1E-01	3.83 1E-01	2.43 1E-01	1.43 1E-01	1.02 1E-01	6.48 1E-02	3.39 1E-02	
340.1	0.225	Pm-151	1.47 1E-01	1.11 1E-01	7.07 1E-02	4.16 1E-02	2.96 1E-02	1.89 1E-02	9.87 1E-03	
340.5	0.422	Cs-136	2.75 1E-01	2.09 1E-01	1.33 1E-01	7.81 1E-02	5.54 1E-02	3.54 1E-02	1.85 1E-02	
342.1	0.067	Ag-111	4.36 1E-02	3.31 1E-02	2.10 1E-02	1.24 1E-02	8.80 1E-03	5.62 1E-03	2.94 1E-03	
344.3	0.266	Eu-152	1.74 1E-01	1.32 1E-01	8.39 1E-02	4.94 1E-02	3.51 1E-02	2.24 1E-02	1.17 1E-02	

付表-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\text{Bq}/\text{cm}^2)$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)								
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100		
345.9	0.120	Hf-181	7.85 1E-02	5.96 1E-02	3.79 1E-02	2.23 1E-02	1.59 1E-02	1.01 1E-02	5.30 1E-03		
364.5	0.812	I-131	5.37 1E-01	4.09 1E-01	2.61 1E-01	1.54 1E-01	1.09 1E-01	6.99 1E-02	3.66 1E-02		
400.7	0.116	Se-75	7.81 1E-02	5.96 1E-02	3.82 1E-02	2.26 1E-02	1.61 1E-02	1.03 1E-02	5.41 1E-03		
402.5	0.690	Cm-247	4.67 1E-01	3.56 1E-01	2.28 1E-01	1.35 1E-01	9.65 1E-02	6.16 1E-02	3.24 1E-02		
414.8	0.833	Sb-126	5.68 1E-01	4.34 1E-01	2.78 1E-01	1.65 1E-01	1.18 1E-01	7.52 1E-02	3.96 1E-02		
417.9	0.010	Te-127	6.76 1E-03	5.17 1E-03	3.31 1E-03	1.97 1E-03	1.40 1E-03	8.96 1E-04	4.72 1E-04		
418.0	0.341	I-130	2.33 1E-01	1.78 1E-01	1.14 1E-01	6.78 1E-02	4.85 1E-02	3.09 1E-02	1.63 1E-02		
427.9	0.294	Sb-125	2.02 1E-01	1.55 1E-01	9.93 1E-02	5.90 1E-02	4.22 1E-02	2.69 1E-02	1.42 1E-02		
435.1	0.186	Te-134	1.28 1E-01	9.80 1E-02	6.29 1E-02	3.74 1E-02	2.68 1E-02	1.71 1E-02	9.00 1E-03		
438.6	0.949	Zn-69m	6.56 1E-01	5.02 1E-01	3.23 1E-01	1.92 1E-01	1.37 1E-01	8.76 1E-02	4.62 1E-02		
459.6	0.074	Te-129	5.14 1E-02	3.95 1E-02	2.54 1E-02	1.52 1E-02	1.09 1E-02	6.92 1E-03	3.66 1E-03		
461.0	0.099	Te-134	6.90 1E-02	5.30 1E-02	3.41 1E-02	2.03 1E-02	1.46 1E-02	9.29 1E-03	4.91 1E-03		
462.8	0.307	Cs-138	2.15 1E-01	1.65 1E-01	1.06 1E-01	6.35 1E-02	4.55 1E-02	2.90 1E-02	1.53 1E-02		
463.4	0.105	Sb-125	7.32 1E-02	5.62 1E-02	3.62 1E-02	2.16 1E-02	1.55 1E-02	9.86 1E-03	5.22 1E-03		
469.4	0.175	Ru-105	1.23 1E-01	9.48 1E-02	6.11 1E-02	3.64 1E-02	2.61 1E-02	1.67 1E-02	8.81 1E-03		
473.0	0.247	Sb-127	1.74 1E-01	1.34 1E-01	8.64 1E-02	5.15 1E-02	3.70 1E-02	2.36 1E-02	1.25 1E-02		
477.6	0.103	Be-7	7.30 1E-02	5.62 1E-02	3.62 1E-02	2.16 1E-02	1.55 1E-02	9.88 1E-03	5.23 1E-03		
479.5	0.253	W-187	1.79 1E-01	1.38 1E-01	8.87 1E-02	5.30 1E-02	3.80 1E-02	2.42 1E-02	1.28 1E-02		
479.5	0.900	Y-90m	6.36 1E-01	4.89 1E-01	3.16 1E-01	1.88 1E-01	1.35 1E-01	8.62 1E-02	4.56 1E-02		
482.0	0.830	Hf-181	5.88 1E-01	4.52 1E-01	2.92 1E-01	1.74 1E-01	1.25 1E-01	7.97 1E-02	4.22 1E-02		
487.0	0.459	La-140	3.26 1E-01	2.51 1E-01	1.62 1E-01	9.67 1E-02	6.94 1E-02	4.42 1E-02	2.34 1E-02		
497.1	0.889	Ru-103	6.35 1E-01	4.89 1E-01	3.16 1E-01	1.89 1E-01	1.36 1E-01	8.65 1E-02	4.58 1E-02		
507.7	0.053	Zr-97	3.80 1E-02	2.93 1E-02	1.90 1E-02	1.14 1E-02	8.16 1E-03	5.20 1E-03	2.76 1E-03		
511.0	0.301	Co-58	2.16 1E-01	1.67 1E-01	1.08 1E-01	6.46 1E-02	4.64 1E-02	2.96 1E-02	1.57 1E-02		
511.0	1.810	Na-22	1.30	1.00	6.48 1E-01	3.88 1E-01	2.79 1E-01	1.78 1E-01	9.43 1E-02		
511.9	0.207	Rh-106	1.49 1E-01	1.15 1E-01	7.41 1E-02	4.44 1E-02	3.19 1E-02	2.04 1E-02	1.08 1E-02		
526.5	0.450	Sb-128	3.25 1E-01	2.51 1E-01	1.62 1E-01	9.74 1E-02	7.00 1E-02	4.47 1E-02	2.37 1E-02		
529.9	0.863	I-133	6.24 1E-01	4.82 1E-01	3.12 1E-01	1.87 1E-01	1.35 1E-01	8.60 1E-02	4.56 1E-02		
531.0	0.131	Nd-147	9.47 1E-02	7.31 1E-02	4.74 1E-02	2.84 1E-02	2.04 1E-02	1.31 1E-02	6.92 1E-03		
536.1	0.990	I-130	7.18 1E-01	5.54 1E-01	3.59 1E-01	2.16 1E-01	1.55 1E-01	9.91 1E-02	5.25 1E-02		
537.3	0.244	Ba-140	1.77 1E-01	1.37 1E-01	8.85 1E-02	5.31 1E-02	3.82 1E-02	2.44 1E-02	1.29 1E-02		
544.7	0.179	Sb-129	1.30 1E-01	1.01 1E-01	6.53 1E-02	3.92 1E-02	2.82 1E-02	1.81 1E-02	9.56 1E-03		
550.3	0.220	Pm-148	1.60 1E-01	1.24 1E-01	8.04 1E-02	4.83 1E-02	3.48 1E-02	2.22 1E-02	1.18 1E-02		
550.3	0.944	Pm-148m	6.88 1E-01	5.31 1E-01	3.45 1E-01	2.07 1E-01	1.49 1E-01	9.54 1E-02	5.05 1E-02		
551.5	0.059	W-187	4.29 1E-02	3.32 1E-02	2.15 1E-02	1.29 1E-02	9.31 1E-03	5.96 1E-03	3.16 1E-03		
555.6	0.949	Y-91m	6.93 1E-01	5.35 1E-01	3.48 1E-01	2.09 1E-01	1.50 1E-01	9.63 1E-02	5.10 1E-02		
566.0	0.183	Te-134	1.34 1E-01	1.03 1E-01	6.73 1E-02	4.05 1E-02	2.91 1E-02	1.87 1E-02	9.88 1E-03		
569.3	0.150	Cs-134	1.10 1E-01	8.51 1E-02	5.53 1E-02	3.33 1E-02	2.40 1E-02	1.54 1E-02	8.13 1E-03		
600.6	0.178	Sb-125	1.32 1E-01	1.02 1E-01	6.66 1E-02	4.02 1E-02	2.90 1E-02	1.86 1E-02	9.84 1E-03		
602.7	0.979	Sb-124	7.27 1E-01	5.63 1E-01	3.67 1E-01	2.22 1E-01	1.60 1E-01	1.03 1E-01	5.43 1E-02		
604.6	0.975	Cs-134	7.25 1E-01	5.61 1E-01	3.66 1E-01	2.21 1E-01	1.59 1E-01	1.02 1E-01	5.41 1E-02		
606.6	0.050	Sb-125	3.73 1E-02	2.89 1E-02	1.89 1E-02	1.14 1E-02	8.21 1E-03	5.27 1E-03	2.79 1E-03		
610.3	0.056	Ru-103	4.17 1E-02	3.23 1E-02	2.11 1E-02	1.27 1E-02	9.18 1E-03	5.90 1E-03	3.12 1E-03		
618.4	0.073	W-187	5.43 1E-02	4.21 1E-02	2.75 1E-02	1.66 1E-02	1.20 1E-02	7.70 1E-03	4.07 1E-03		
621.8	0.098	Rh-106	7.34 1E-02	5.69 1E-02	3.71 1E-02	2.24 1E-02	1.62 1E-02	1.04 1E-02	5.51 1E-03		
628.7	0.310	Sb-128	2.32 1E-01	1.80 1E-01	1.18 1E-01	7.12 1E-02	5.14 1E-02	3.31 1E-02	1.75 1E-02		
630.0	0.886	Pm-148m	6.65 1E-01	5.15 1E-01	3.37 1E-01	2.04 1E-01	1.47 1E-01	9.46 1E-02	5.00 1E-02		
635.9	0.113	Sb-125	8.51 1E-02	6.60 1E-02	4.31 1E-02	2.61 1E-02	1.88 1E-02	1.21 1E-02	6.41 1E-03		
636.2	0.360	Sb-128	2.71 1E-01	2.10 1E-01	1.37 1E-01	8.30 1E-02	5.99 1E-02	3.86 1E-02	2.04 1E-02		
637.0	0.073	I-131	5.47 1E-02	4.24 1E-02	2.77 1E-02	1.68 1E-02	1.21 1E-02	7.79 1E-03	4.12 1E-03		
641.3	0.474	La-142	3.57 1E-01	2.77 1E-01	1.81 1E-01	1.10 1E-01	7.91 1E-02	5.10 1E-02	2.69 1E-02		
647.5	0.194	Te-133m	1.46 1E-01	1.14 1E-01	7.44 1E-02	4.50 1E-02	3.25 1E-02	2.09 1E-02	1.11 1E-02		
657.7	0.947	Ag-110m	7.18 1E-01	5.57 1E-01	3.65 1E-01	2.21 1E-01	1.60 1E-01	1.03 1E-01	5.44 1E-02		
657.9	0.983	Nb-97	7.45 1E-01	5.78 1E-01	3.79 1E-01	2.30 1E-01	1.66 1E-01	1.07 1E-01	5.65 1E-02		
661.6	0.899	Ba-137m	6.82 1E-01	5.30 1E-01	3.47 1E-01	2.10 1E-01	1.52 1E-01	9.80 1E-02	5.18 1E-02		
664.5	0.053	Ce-143	3.99 1E-02	3.10 1E-02	2.03 1E-02	1.23 1E-02	8.88 1E-03	5.73 1E-03	3.03 1E-03		
666.3	0.997	Sb-126	7.58 1E-01	5.88 1E-01	3.86 1E-01	2.34 1E-01	1.69 1E-01	1.09 1E-01	5.76 1E-02		
667.7	0.987	I-132	7.50 1E-01	5.83 1E-01	3.82 1E-01	2.32 1E-01	1.67 1E-01	1.08 1E-01	5.71 1E-02		
668.5	0.961	I-130	7.31 1E-01	5.68 1E-01	3.72 1E-01	2.26 1E-01	1.63 1E-01	1.05 1E-01	5.56 1E-02		
676.4	0.157	Ru-105	1.19 1E-01	9.27 1E-02	6.08 1E-02	3.69 1E-02	2.67 1E-02	1.72 1E-02	9.10 1E-03		
685.7	0.353	Sb-127	2.70 1E-01	2.10 1E-01	1.38 1E-01	8.36 1E-02	6.04 1E-02	3.90 1E-02	2.06 1E-02		
685.8	0.316	W-187	2.42 1E-01	1.88 1E-01	1.23 1E-01	7.48 1E-02	5.41 1E-02	3.49 1E-02	1.85 1E-02		
695.0	0.997	Sb-126	7.65 1E-01	5.49 1E-01	3.90 1E-01	2.37 1E-01	1.72 1E-01	1.11 1E-01	5.86 1E-02		
697.0	0.289	Sb-126	2.22 1E-01	1.72 1E-01	1.13 1E-01	6.88 1E-02	4.98 1E-02	3.21 1E-02	1.70 1E-02		

付表-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (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 β (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	4.16 1E-01	3.24 1E-01	2.13 1E-01	1.30 1E-01	9.39 1E-02	6.06 1E-02	3.21 1E-02						
722.0	0.051	Ce-143	3.96 1E-02	3.08 1E-02	2.03 1E-02	1.23 1E-02	8.94 1E-03	5.78 1E-03	3.06 1E-03						
723.3	0.197	Eu-154	1.52 1E-01	1.19 1E-01	7.81 1E-02	4.75 1E-02	3.44 1E-02	2.22 1E-02	1.18 1E-02						
724.2	0.444	Zr-95	3.44 1E-01	2.68 1E-01	1.76 1E-01	1.07 1E-01	7.76 1E-02	5.02 1E-02	2.66 1E-02						
724.3	0.473	Ru-105	3.66 1E-01	2.85 1E-01	1.88 1E-01	1.14 1E-01	8.26 1E-02	5.34 1E-02	2.83 1E-02						
725.7	0.327	Pm-148m	2.53 1E-01	1.97 1E-01	1.30 1E-01	7.89 1E-02	5.72 1E-02	3.69 1E-02	1.96 1E-02						
727.2	0.068	Bi-212	5.23 1E-02	4.07 1E-02	2.68 1E-02	1.63 1E-02	1.18 1E-02	7.63 1E-03	4.05 1E-03						
739.5	0.122	Mo-99	9.48 1E-02	7.38 1E-02	4.86 1E-02	2.96 1E-02	2.15 1E-02	1.39 1E-02	7.36 1E-03						
739.5	0.823	I-130	6.40 1E-01	4.98 1E-01	3.28 1E-01	2.00 1E-01	1.45 1E-01	9.36 1E-02	4.97 1E-02						
742.6	0.151	Te-134	1.17 1E-01	9.14 1E-02	6.03 1E-02	3.67 1E-02	2.66 1E-02	1.72 1E-02	9.12 1E-03						
743.3	1.000	Sb-128	7.78 1E-01	6.06 1E-01	4.00 1E-01	2.43 1E-01	1.76 1E-01	1.14 1E-01	6.05 1E-02						
748.3	0.008	Pr-145	5.87 1E-03	4.57 1E-03	3.02 1E-03	1.84 1E-03	1.33 1E-03	8.61 1E-04	4.57 1E-04						
754.0	1.000	Sb-128	7.81 1E-01	6.08 1E-01	4.02 1E-01	2.45 1E-01	1.77 1E-01	1.15 1E-01	6.09 1E-02						
756.7	0.549	Zr-95	4.29 1E-01	3.34 1E-01	2.21 1E-01	1.34 1E-01	9.75 1E-02	6.30 1E-02	3.35 1E-02						
763.9	0.224	Ag-110m	1.75 1E-01	1.36 1E-01	9.02 1E-02	5.50 1E-02	3.99 1E-02	2.58 1E-02	1.37 1E-02						
765.8	1.000	Nb-95	7.84 1E-01	6.11 1E-01	4.04 1E-01	2.46 1E-01	1.79 1E-01	1.15 1E-01	6.13 1E-02						
767.2	0.290	Te-134	2.27 1E-01	1.77 1E-01	1.17 1E-01	7.14 1E-02	5.18 1E-02	3.35 1E-02	1.78 1E-02						
772.6	0.762	I-132	5.98 1E-01	4.67 1E-01	3.08 1E-01	1.88 1E-01	1.37 1E-01	8.83 1E-02	4.69 1E-02						
773.7	0.382	Te-131m	3.00 1E-01	2.34 1E-01	1.54 1E-01	9.42 1E-02	6.84 1E-02	4.42 1E-02	2.35 1E-02						
778.9	0.130	Eu-152	1.02 1E-01	7.95 1E-02	5.26 1E-02	3.21 1E-02	2.33 1E-02	1.51 1E-02	8.01 1E-03						
783.7	0.145	Sb-127	1.14 1E-01	8.92 1E-02	5.90 1E-02	3.60 1E-02	2.61 1E-02	1.69 1E-02	8.99 1E-03						
793.4	1.000	Sb-130	7.90 1E-01	6.17 1E-01	4.08 1E-01	2.49 1E-01	1.81 1E-01	1.17 1E-01	6.23 1E-02						
793.8	0.139	Te-131m	1.09 1E-01	8.54 1E-02	5.65 1E-02	3.45 1E-02	2.51 1E-02	1.62 1E-02	8.64 1E-03						
795.8	0.851	Cs-134	6.73 1E-01	5.25 1E-01	3.48 1E-01	2.12 1E-01	1.54 1E-01	9.98 1E-02	5.31 1E-02						
810.8	0.994	Co-58	7.90 1E-01	6.17 1E-01	4.09 1E-01	2.50 1E-01	1.82 1E-01	1.18 1E-01	6.26 1E-02						
811.8	0.103	Eu-156	8.18 1E-02	6.39 1E-02	4.24 1E-02	2.59 1E-02	1.88 1E-02	1.22 1E-02	6.49 1E-03						
812.8	0.430	Sb-129	3.42 1E-01	2.67 1E-01	1.77 1E-01	1.08 1E-01	7.86 1E-02	5.09 1E-02	2.71 1E-02						
815.8	0.236	La-140	1.88 1E-01	1.47 1E-01	9.74 1E-02	5.95 1E-02	4.33 1E-02	2.80 1E-02	1.49 1E-02						
818.5	0.997	Cs-136	7.94 1E-01	6.20 1E-01	4.11 1E-01	2.51 1E-01	1.83 1E-01	1.18 1E-01	6.31 1E-02						
834.8	1.000	Mn-54	8.00 1E-01	6.25 1E-01	4.15 1E-01	2.54 1E-01	1.85 1E-01	1.20 1E-01	6.38 1E-02						
839.4	1.000	Sb-130	8.01 1E-01	6.26 1E-01	4.16 1E-01	2.54 1E-01	1.85 1E-01	1.20 1E-01	6.40 1E-02						
841.6	0.146	Eu-152m	1.17 1E-01	9.14 1E-02	6.07 1E-02	3.72 1E-02	2.71 1E-02	1.75 1E-02	9.35 1E-03						
846.8	0.989	Mn-56	7.94 1E-01	6.21 1E-01	4.12 1E-01	2.52 1E-01	1.84 1E-01	1.19 1E-01	6.35 1E-02						
846.8	0.999	Co-56	8.02 1E-01	6.27 1E-01	4.17 1E-01	2.55 1E-01	1.86 1E-01	1.20 1E-01	6.42 1E-02						
847.0	0.954	I-134	7.66 1E-01	5.99 1E-01	3.98 1E-01	2.44 1E-01	1.77 1E-01	1.15 1E-01	6.13 1E-02						
852.2	0.206	Te-131m	1.66 1E-01	1.30 1E-01	8.62 1E-02	5.28 1E-02	3.85 1E-02	2.49 1E-02	1.33 1E-02						
856.7	0.176	Sb-126	1.42 1E-01	1.11 1E-01	7.39 1E-02	4.53 1E-02	3.30 1E-02	2.14 1E-02	1.14 1E-02						
864.0	0.156	Te-133m	1.26 1E-01	9.85 1E-02	6.55 1E-02	4.01 1E-02	2.93 1E-02	1.90 1E-02	1.01 1E-02						
873.2	0.115	Eu-154	9.30 1E-02	7.28 1E-02	4.85 1E-02	2.97 1E-02	2.17 1E-02	1.40 1E-02	7.50 1E-03						
881.6	0.420	Br-84	3.41 1E-01	2.67 1E-01	1.78 1E-01	1.09 1E-01	7.94 1E-02	5.15 1E-02	2.75 1E-02						
884.1	0.649	I-134	5.26 1E-01	4.12 1E-01	2.75 1E-01	1.68 1E-01	1.23 1E-01	7.97 1E-02	4.26 1E-02						
884.7	0.729	Ag-110m	5.91 1E-01	4.63 1E-01	3.09 1E-01	1.89 1E-01	1.38 1E-01	8.95 1E-02	4.78 1E-02						
889.3	1.000	Sc-46	8.13 1E-01	6.37 1E-01	4.24 1E-01	2.60 1E-01	1.90 1E-01	1.23 1E-01	6.58 1E-02						
911.3	0.290	Ac-228	2.37 1E-01	1.86 1E-01	1.24 1E-01	7.62 1E-02	5.56 1E-02	3.61 1E-02	1.93 1E-02						
912.7	0.550	Te-133m	4.50 1E-01	3.53 1E-01	2.36 1E-01	1.45 1E-01	1.06 1E-01	6.85 1E-02	3.67 1E-02						
914.6	0.200	Sb-129	1.64 1E-01	1.29 1E-01	8.59 1E-02	5.27 1E-02	3.85 1E-02	2.50 1E-02	1.34 1E-02						
914.8	0.109	Te-133m	8.93 1E-02	7.00 1E-02	4.67 1E-02	2.87 1E-02	2.09 1E-02	1.36 1E-02	7.27 1E-03						
914.8	0.115	Pm-148	9.38 1E-02	7.36 1E-02	4.91 1E-02	3.01 1E-02	2.20 1E-02	1.43 1E-02	7.64 1E-03						
915.3	0.171	Pm-148m	1.40 1E-01	1.10 1E-01	7.33 1E-02	4.50 1E-02	3.29 1E-02	2.13 1E-02	1.14 1E-02						
934.5	0.139	Y-92	1.14 1E-01	8.98 1E-02	6.00 1E-02	3.69 1E-02	2.70 1E-02	1.75 1E-02	9.37 1E-03						
934.9	0.190	Sb-130	1.56 1E-01	1.23 1E-01	8.21 1E-02	5.04 1E-02	3.69 1E-02	2.39 1E-02	1.28 1E-02						
937.5	0.343	Ag-110m	2.83 1E-01	2.22 1E-01	1.48 1E-01	9.12 1E-02	6.67 1E-02	4.33 1E-02	2.32 1E-02						
954.5	0.181	I-132	1.50 1E-01	1.17 1E-01	7.86 1E-02	4.84 1E-02	3.54 1E-02	2.30 1E-02	1.23 1E-02						
963.3	0.120	Eu-152m	9.97 1E-02	7.83 1E-02	5.25 1E-02	3.23 1E-02	2.36 1E-02	1.53 1E-02	8.22 1E-03						
964.1	0.145	Eu-152	1.20 1E-01	9.45 1E-02	6.33 1E-02	3.90 1E-02	2.85 1E-02	1.85 1E-02	9.93 1E-03						
964.8	0.055	Ac-228	4.53 1E-02	3.56 1E-02	2.38 1E-02	1.47 1E-02	1.07 1E-02	6.97 1E-03	3.74 1E-03						
966.4	0.077	Sb-129	6.40 1E-02	5.03 1E-02	3.37 1E-02	2.07 1E-02	1.52 1E-02	9.85 1E-03	5.28 1E-03						
969.2	0.175	Ac-228	1.45 1E-01	1.14 1E-01	7.64 1E-02	4.70 1E-02	3.44 1E-02	2.24 1E-02	1.20 1E-02						
984.5	0.278	Np-238	2.32 1E-01	1.83 1E-01	1.22 1E-01	7.54 1E-02	5.52 1E-02	3.59 1E-02	1.92 1E-02						
996.3	0.103	Eu-154	8.63 1E-02	6.79 1E-02	4.56 1E-02	2.81 1E-02	2.06 1E-02	1.34 1E-02	7.18 1E-03						
1004.8	0.174	Eu-154	1.46 1E-01	1.15 1E-01	7.27 1E-02	4.76 1E-02	3.49 1E-02	2.27 1E-02	1.22 1E-02						
1009.8	0.298	Cs-138	2.51 1E-01	1.97 1E-01	1.33 1E-01	8.17 1E-02	5.99 1E-02	3.89 1E-02	2.09 1E-02						
1013.8	0.202	Pm-148m	1.70 1E-01	1.34 1E-01	8.98 1E-02	5.54 1E-02	4.06 1E-02	2.64 1E-02	1.42 1E-02						
1025.9	0.096	Np-238	8.09 1E-02	6.37 1E-02	4.28 1E-02	2.64 1E-02	1.94 1E-02	1.26 1E-02	6.77 1E-03						
1028.5	0.203	Np-238	1.71 1E-01	1.35 1E-01	9.06 1E-02	5.60 1E-02	4.10 1E-02	2.67 1E-02	1.43 1E-02						

付表-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (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 β (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	1.06 1E-01	8.37 1E-02	5.63 1E-02	3.48 1E-02	2.55 1E-02	1.66 1E-02	8.91 1E-03				
1038.8	0.080	I-135	6.78 1E-02	5.34 1E-02	3.59 1E-02	2.22 1E-02	1.63 1E-02	1.06 1E-02	5.69 1E-03				
1048.1	0.798	Cs-136	6.76 1E-01	5.32 1E-01	3.58 1E-01	2.21 1E-01	1.62 1E-01	1.06 1E-01	5.68 1E-02				
1072.6	0.150	I-134	1.27 1E-01	1.01 1E-01	6.77 1E-02	4.20 1E-02	3.07 1E-02	2.00 1E-02	1.08 1E-02				
1076.6	0.088	Rb-86	7.48 1E-02	5.90 1E-02	3.97 1E-02	2.46 1E-02	1.80 1E-02	1.18 1E-02	6.33 1E-03				
1085.9	0.099	Eu-152	8.46 1E-02	6.68 1E-02	4.50 1E-02	2.79 1E-02	2.04 1E-02	1.33 1E-02	7.18 1E-03				
1099.2	0.565	Fe-59	4.83 1E-01	3.81 1E-01	2.57 1E-01	1.60 1E-01	1.17 1E-01	7.64 1E-02	4.11 1E-02				
1112.1	0.136	Eu-152	1.16 1E-01	9.18 1E-02	6.20 1E-02	3.85 1E-02	2.82 1E-02	1.84 1E-02	9.92 1E-03				
1115.5	0.148	Ni-65	1.27 1E-01	1.00 1E-01	6.78 1E-02	4.22 1E-02	3.09 1E-02	2.02 1E-02	1.09 1E-02				
1115.5	0.507	Zn-65	4.35 1E-01	3.44 1E-01	2.32 1E-01	1.44 1E-01	1.06 1E-01	6.90 1E-02	3.72 1E-02				
1120.5	1.000	Sc-46	8.59 1E-01	6.78 1E-01	4.58 1E-01	2.85 1E-01	2.09 1E-01	1.36 1E-01	7.34 1E-02				
1121.3	0.349	Ta-182	3.00 1E-01	2.37 1E-01	1.60 1E-01	9.94 1E-02	7.28 1E-02	4.76 1E-02	2.56 1E-02				
1125.5	0.114	Te-131m	9.82 1E-02	7.75 1E-02	5.24 1E-02	3.26 1E-02	2.39 1E-02	1.56 1E-02	8.40 1E-03				
1131.5	0.228	I-135	1.96 1E-01	1.55 1E-01	1.05 1E-01	6.51 1E-02	4.77 1E-02	3.12 1E-02	1.68 1E-02				
1153.5	0.071	Eu-156	6.14 1E-02	4.86 1E-02	3.28 1E-02	2.05 1E-02	1.50 1E-02	9.81 1E-03	5.28 1E-03				
1157.5	0.113	I-130	9.79 1E-02	7.74 1E-02	5.23 1E-02	3.26 1E-02	2.39 1E-02	1.56 1E-02	8.42 1E-03				
1173.2	0.999	Co-60	8.67 1E-01	6.86 1E-01	4.64 1E-01	2.90 1E-01	2.12 1E-01	1.39 1E-01	7.49 1E-02				
1189.0	0.164	Ta-182	1.43 1E-01	1.13 1E-01	7.65 1E-02	4.78 1E-02	3.50 1E-02	2.29 1E-02	1.24 1E-02				
1204.9	0.003	Y-91	2.62 1E-03	2.07 1E-03	1.41 1E-03	8.79 1E-04	6.44 1E-04	4.22 1E-04	2.28 1E-04				
1206.6	0.098	Te-131m	8.52 1E-02	6.74 1E-02	4.57 1E-02	2.86 1E-02	2.09 1E-02	1.37 1E-02	7.41 1E-03				
1221.4	0.273	Ta-182	2.39 1E-01	1.90 1E-01	1.29 1E-01	8.05 1E-02	5.90 1E-02	3.87 1E-02	2.09 1E-02				
1230.7	0.089	Eu-156	7.77 1E-02	6.16 1E-02	4.18 1E-02	2.62 1E-02	1.92 1E-02	1.26 1E-02	6.79 1E-03				
1231.0	0.116	Ta-182	1.01 1E-01	8.03 1E-02	5.45 1E-02	3.41 1E-02	2.50 1E-02	1.64 1E-02	8.86 1E-03				
1235.4	0.200	Cs-136	1.76 1E-01	1.39 1E-01	9.46 1E-02	5.93 1E-02	4.35 1E-02	2.85 1E-02	1.54 1E-02				
1238.3	0.670	Co-56	5.88 1E-01	4.66 1E-01	3.16 1E-01	1.98 1E-01	1.45 1E-01	9.53 1E-02	5.15 1E-02				
1242.4	0.067	Eu-156	5.89 1E-02	4.67 1E-02	3.17 1E-02	1.99 1E-02	1.46 1E-02	9.55 1E-03	5.16 1E-03				
1260.4	0.289	I-135	2.55 1E-01	2.02 1E-01	1.38 1E-01	8.64 1E-02	6.33 1E-02	4.15 1E-02	2.24 1E-02				
1274.4	0.355	Eu-154	3.14 1E-01	2.49 1E-01	1.69 1E-01	1.06 1E-01	7.80 1E-02	5.12 1E-02	2.77 1E-02				
1274.5	0.999	Na-22	8.84 1E-01	7.01 1E-01	4.77 1E-01	3.00 1E-01	2.20 1E-01	1.44 1E-01	7.79 1E-02				
1291.6	0.432	Fe-59	3.83 1E-01	3.04 1E-01	2.07 1E-01	1.30 1E-01	9.54 1E-02	6.27 1E-02	3.39 1E-02				
1332.5	1.000	Co-60	8.94 1E-01	7.10 1E-01	4.84 1E-01	3.05 1E-01	2.24 1E-01	1.47 1E-01	7.97 1E-02				
1354.5	0.026	La-141	2.36 1E-02	1.88 1E-02	1.28 1E-02	8.09 1E-03	5.93 1E-03	3.90 1E-03	2.11 1E-03				
1368.6	1.000	Na-24	9.01 1E-01	7.16 1E-01	4.89 1E-01	3.09 1E-01	2.26 1E-01	1.49 1E-01	8.08 1E-02				
1383.9	0.900	Sr-92	8.13 1E-01	6.46 1E-01	4.41 1E-01	2.79 1E-01	2.05 1E-01	1.35 1E-01	7.31 1E-02				
1384.3	0.243	Ag-110m	2.20 1E-01	1.75 1E-01	1.19 1E-01	7.56 1E-02	5.54 1E-02	3.65 1E-02	1.98 1E-02				
1408.0	0.209	Eu-152	1.89 1E-01	1.51 1E-01	1.03 1E-01	6.52 1E-02	4.78 1E-02	3.15 1E-02	1.71 1E-02				
1435.9	0.763	Cs-138	6.96 1E-01	5.54 1E-01	3.79 1E-01	2.41 1E-01	1.76 1E-01	1.17 1E-01	6.31 1E-02				
1457.6	0.087	I-135	8.00 1E-02	6.38 1E-02	4.37 1E-02	2.78 1E-02	2.03 1E-02	1.34 1E-02	7.29 1E-03				
1460.8	0.107	K-40	9.80 1E-02	7.81 1E-02	5.35 1E-02	3.40 1E-02	2.49 1E-02	1.65 1E-02	8.93 1E-03				
1465.1	0.222	Pm-148	2.03 1E-01	1.62 1E-01	1.11 1E-01	7.07 1E-02	5.18 1E-02	3.42 1E-02	1.86 1E-02				
1481.8	0.235	Ni-65	2.16 1E-01	1.72 1E-01	1.18 1E-01	7.51 1E-02	5.51 1E-02	3.64 1E-02	1.97 1E-02				
1505.0	0.131	Ag-110m	1.21 1E-01	9.64 1E-02	6.61 1E-02	4.21 1E-02	3.09 1E-02	2.04 1E-02	1.11 1E-02				
1524.6	0.189	K-42	1.75 1E-01	1.39 1E-01	9.57 1E-02	6.10 1E-02	4.48 1E-02	2.96 1E-02	1.61 1E-02				
1596.2	0.954	La-140	8.91 1E-01	7.12 1E-01	4.90 1E-01	3.13 1E-01	2.30 1E-01	1.52 1E-01	8.29 1E-02				
1678.0	0.096	I-135	9.10 1E-02	7.28 1E-02	5.03 1E-02	3.22 1E-02	2.37 1E-02	1.57 1E-02	8.57 1E-03				
1691.0	0.488	Sb-124	4.61 1E-01	3.69 1E-01	2.55 1E-01	1.63 1E-01	1.20 1E-01	7.99 1E-02	4.35 1E-02				
1736.5	0.060	Sb-129	5.69 1E-02	4.56 1E-02	3.16 1E-02	2.02 1E-02	1.49 1E-02	9.91 1E-03	5.40 1E-03				
1771.4	0.155	Co-56	1.48 1E-01	1.19 1E-01	8.25 1E-02	5.28 1E-02	3.91 1E-02	2.59 1E-02	1.42 1E-02				
1791.2	0.078	I-135	7.47 1E-02	5.99 1E-02	4.15 1E-02	2.66 1E-02	1.97 1E-02	1.31 1E-02	7.14 1E-03				
1810.7	0.272	Mn-56	2.62 1E-01	2.10 1E-01	1.46 1E-01	9.33 1E-02	6.92 1E-02	4.59 1E-02	2.51 1E-02				
1897.6	0.147	Br-84	1.43 1E-01	1.15 1E-01	8.00 1E-02	5.14 1E-02	3.82 1E-02	2.54 1E-02	1.39 1E-02				
1901.3	0.072	La-142	6.97 1E-02	5.60 1E-02	3.90 1E-02	2.50 1E-02	1.86 1E-02	1.24 1E-02	6.77 1E-03				
2091.0	0.056	Sb-124	5.56 1E-02	4.48 1E-02	3.13 1E-02	2.02 1E-02	1.51 1E-02	1.01 1E-02	5.52 1E-03				
2113.0	0.143	Mn-56	1.43 1E-01	1.15 1E-01	8.07 1E-02	5.21 1E-02	3.89 1E-02	2.59 1E-02	1.42 1E-02				
2218.0	0.152	Cs-138	1.53 1E-01	1.23 1E-01	8.67 1E-02	5.61 1E-02	4.19 1E-02	2.80 1E-02	1.54 1E-02				
2397.8	0.133	La-142	1.36 1E-01	1.10 1E-01	7.75 1E-02	5.04 1E-02	3.78 1E-02	2.53 1E-02	1.39 1E-02				
2484.1	0.067	Br-84	6.94 1E-02	5.62 1E-02	3.97 1E-02	2.58 1E-02	1.94 1E-02	1.30 1E-02	7.17 1E-03				
2542.7	0.100	La-142	1.04 1E-01	8.41 1E-02	5.95 1E-02	3.88 1E-02	2.92 1E-02	1.95 1E-02	1.08 1E-02				
2598.6	0.167	Co-56	1.75 1E-01	1.42 1E-01	1.00 1E-01	6.55 1E-02	4.92 1E-02	3.30 1E-02	1.82 1E-02				
2639.6	0.076	Cs-138	7.98 1E-02	6.48 1E-02	4.59 1E-02	3.00 1E-02	2.26 1E-02	1.52 1E-02	8.38 1E-03				
2754.0	0.999	Na-24	1.06	8.59 1E-01	6.10 1E-01	4.00 1E-01	3.01 1E-01	2.03 1E-01	1.12 1E-01				
3253.5	0.074	Co-56	8.10 1E-02	6.62 1E-02	4.73 1E-02	3.13 1E-02	2.37 1E-02	1.60 1E-02	8.92 1E-03				
3927.5	0.068	Br-84	7.77 1E-02	6.38 1E-02	4.61 1E-02	3.07 1E-02	2.34 1E-02	1.59 1E-02	8.93 1E-03				

付録 2 線量率と地上高 1m での γ 線フルエンス率との関係

付表-2-1 線量率と地上高1mでのγ線フルエンス率との関係

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μ Gy/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 β (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	3.82 1E+01	3.67 1E+01	3.48 1E+01	3.32 1E+01	3.08 1E+01	2.75 1E+01	2.43 1E+01		
12.7	0.081	Th-232	5.26 1E+01	5.49 1E+01	5.52 1E+01	5.47 1E+01	5.44 1E+01	5.28 1E+01	5.02 1E+01		
12.7	0.089	Th-228	4.77 1E+01	4.42 1E+01	4.06 1E+01	3.73 1E+01	3.27 1E+01	2.57 1E+01	1.94 1E+01		
13.4	0.079	U-236	6.11 1E+01	6.40 1E+01	6.51 1E+01	6.55 1E+01	6.56 1E+01	6.51 1E+01	6.43 1E+01		
13.4	0.084	U-238	6.12 1E+01	6.42 1E+01	6.54 1E+01	6.53 1E+01	6.55 1E+01	6.51 1E+01	6.47 1E+01		
13.4	0.094	U-234	6.08 1E+01	6.39 1E+01	6.49 1E+01	6.47 1E+01	6.46 1E+01	6.38 1E+01	6.25 1E+01		
13.4	0.102	U-232	6.03 1E+01	6.33 1E+01	6.37 1E+01	6.30 1E+01	6.25 1E+01	6.04 1E+01	5.76 1E+01		
13.7	0.094	Th-234	4.56 1E+01	3.61 1E+01	2.95 1E+01	2.52 1E+01	2.01 1E+01	1.42 1E+01	1.00 1E+01		
13.7	0.562	Np-237	4.91 1E+01	4.24 1E+01	3.71 1E+01	3.33 1E+01	2.83 1E+01	2.18 1E+01	1.65 1E+01		
13.7	0.776	Th-231	5.49 1E+01	5.21 1E+01	4.90 1E+01	4.62 1E+01	4.24 1E+01	3.63 1E+01	3.05 1E+01		
14.1	0.040	Pu-239	6.30 1E+01	6.91 1E+01	7.04 1E+01	7.05 1E+01	7.05 1E+01	6.92 1E+01	6.70 1E+01		
14.1	0.082	Pu-242	6.96 1E+01	7.31 1E+01	7.43 1E+01	7.46 1E+01	7.49 1E+01	7.53 1E+01	7.53 1E+01		
14.1	0.089	Pu-240	6.93 1E+01	7.29 1E+01	7.37 1E+01	7.41 1E+01	7.47 1E+01	7.49 1E+01	7.49 1E+01		
14.1	0.102	Pu-238	6.97 1E+01	7.32 1E+01	7.43 1E+01	7.48 1E+01	7.47 1E+01	7.52 1E+01	7.49 1E+01		
14.1	0.103	Pu-236	6.92 1E+01	7.28 1E+01	7.35 1E+01	7.41 1E+01	7.41 1E+01	7.41 1E+01	7.37 1E+01		
14.4	0.365	Am-241	5.31 1E+01	4.41 1E+01	3.73 1E+01	3.30 1E+01	2.75 1E+01	2.09 1E+01	1.59 1E+01		
14.4	0.575	U-237	3.34 1E+01	2.21 1E+01	1.65 1E+01	1.35 1E+01	1.01 1E+01	0.64	4.36		
14.8	0.081	Cm-244	7.77 1E+01	8.11 1E+01	8.19 1E+01	8.18 1E+01	8.25 1E+01	8.28 1E+01	8.29 1E+01		
14.8	0.085	Cm-242	7.72 1E+01	8.09 1E+01	8.14 1E+01	8.19 1E+01	8.23 1E+01	8.26 1E+01	8.23 1E+01		
14.8	0.098	Am-242	2.38 1E+01	2.06 1E+01	1.78 1E+01	1.57 1E+01	1.32 1E+01	9.75	7.06		
14.8	0.461	Cm-243	3.27 1E+01	2.12 1E+01	1.57 1E+01	1.26 1E+01	9.37	6.01	3.89		
14.8	0.471	Cm-245	4.18 1E+01	2.91 1E+01	2.22 1E+01	1.82 1E+01	1.38 1E+01	9.08	6.04		
15.2	0.273	Am-242m	7.81 1E+01	8.26 1E+01	8.28 1E+01	8.28 1E+01	8.25 1E+01	8.14 1E+01	7.93 1E+01		
15.5	0.161	Am-242	4.26 1E+01	3.79 1E+01	3.35 1E+01	2.99 1E+01	2.53 1E+01	1.90 1E+01	1.39 1E+01		
16.5	0.183	Mo-93	3.03 1E+01	3.13 1E+01	3.12 1E+01	3.13 1E+01	3.14 1E+01	3.13 1E+01	3.16 1E+01		
16.6	0.060	Nb-93m	5.72 1E+01	6.08 1E+01	6.09 1E+01	6.06 1E+01	6.12 1E+01	6.16 1E+01	6.17 1E+01		
16.6	0.350	Mo-93	5.84 1E+01	6.06 1E+01	6.03 1E+01	6.07 1E+01	6.08 1E+01	6.10 1E+01	6.16 1E+01		
18.6	0.090	Mo-93	1.76 1E+01	1.94 1E+01	2.01 1E+01	2.06 1E+01	2.10 1E+01	2.15 1E+01	2.19 1E+01		
20.1	0.184	Rh-103m	4.42 1E+01	4.51 1E+01	4.49 1E+01	4.43 1E+01	4.41 1E+01	4.36 1E+01	4.33 1E+01		
20.2	0.349	Rh-103m	8.42 1E+01	8.64 1E+01	8.59 1E+01	8.50 1E+01	8.51 1E+01	8.46 1E+01	8.44 1E+01		
22.7	0.094	Rh-103m	2.51 1E+01	2.74 1E+01	2.86 1E+01	2.92 1E+01	3.03 1E+01	3.17 1E+01	3.29 1E+01		
25.3	0.410	Sn-117m	5.10 1E+01	4.08 1E+01	3.49 1E+01	3.11 1E+01	2.63 1E+01	1.97 1E+01	1.44 1E+01		
25.6	0.146	Th-231	2.41 1E+01	3.22 1E+01	3.64 1E+01	3.86 1E+01	4.05 1E+01	4.07 1E+01	3.78 1E+01		
26.4	0.156	Sn-126	4.96 1E+01	4.35 1E+01	3.89 1E+01	3.56 1E+01	3.11 1E+01	2.49 1E+01	1.95 1E+01		
27.2	0.103	Te-127m	6.75 1E+01	7.16 1E+01	7.20 1E+01	7.18 1E+01	7.09 1E+01	6.98 1E+01	6.84 1E+01		
27.2	0.127	Te-129m	4.69 1E+01	4.18 1E+01	3.82 1E+01	3.54 1E+01	3.13 1E+01	2.55 1E+01	1.98 1E+01		
27.2	0.327	Te-125m	6.97 1E+01	7.20 1E+01	7.22 1E+01	7.17 1E+01	7.11 1E+01	7.03 1E+01	6.89 1E+01		
27.5	0.193	Te-127m	1.27 1E+02	1.35 1E+02	1.36 1E+02	1.36 1E+02	1.35 1E+02	1.33 1E+02	1.30 1E+02		
27.5	0.237	Te-129m	8.79 1E+01	7.91 1E+01	7.23 1E+01	6.72 1E+01	5.94 1E+01	4.84 1E+01	3.75 1E+01		
27.5	0.611	Te-125m	1.31 1E+02	1.36 1E+02	1.37 1E+02	1.36 1E+02	1.35 1E+02	1.34 1E+02	1.31 1E+02		
27.8	0.156	Te-129	6.29 1E+01	5.02 1E+01	4.27 1E+01	3.81 1E+01	3.18 1E+01	2.38 1E+01	1.72 1E+01		
29.4	0.152	Np-237	3.49 1E+01	4.49 1E+01	4.91 1E+01	5.03 1E+01	4.99 1E+01	4.64 1E+01	3.98 1E+01		
29.5	0.185	I-129	7.84 1E+01	7.90 1E+01	7.83 1E+01	7.70 1E+01	7.58 1E+01	7.33 1E+01	7.11 1E+01		
29.8	0.343	I-129	1.47 1E+02	1.49 1E+02	1.48 1E+02	1.45 1E+02	1.43 1E+02	1.39 1E+02	1.35 1E+02		
30.6	0.092	Cs-134m	4.79 1E+01	5.07 1E+01	4.88 1E+01	4.60 1E+01	4.20 1E+01	3.57 1E+01	2.91 1E+01		
31.0	0.067	Te-127m	4.78 1E+01	5.34 1E+01	5.52 1E+01	5.60 1E+01	5.67 1E+01	5.74 1E+01	5.78 1E+01		
31.0	0.068	Te-129m	2.75 1E+01	2.59 1E+01	2.42 1E+01	2.29 1E+01	2.07 1E+01	1.73 1E+01	1.37 1E+01		
31.0	0.170	Cs-134m	8.88 1E+01	9.44 1E+01	9.11 1E+01	8.60 1E+01	7.87 1E+01	6.72 1E+01	5.50 1E+01		
31.0	0.212	Te-125m	4.94 1E+01	5.37 1E+01	5.52 1E+01	5.59 1E+01	5.67 1E+01	5.77 1E+01	5.81 1E+01		
31.8	0.021	Ba-137m	1.15	8.64 1E-01	7.26 1E-01	6.42 1E-01	5.35 1E-01	4.02 1E-01	2.91 1E-01		
32.2	0.038	Ba-137m	2.13	1.60	1.35	1.19	1.00	7.51 1E-01	5.48 1E-01		
33.6	0.122	I-129	5.39 1E+01	5.67 1E+01	5.77 1E+01	5.77 1E+01	5.84 1E+01	5.90 1E+01	5.97 1E+01		
35.0	0.050	Cs-134m	2.69 1E+01	2.97 1E+01	2.94 1E+01	2.82 1E+01	2.65 1E+01	2.35 1E+01	2.02 1E+01		
35.5	0.067	Te-125m	1.61 1E+01	1.82 1E+01	1.92 1E+01	1.98 1E+01	2.06 1E+01	2.20 1E+01	2.32 1E+01		
38.7	0.223	Nd-147	4.77 1E+01	4.09 1E+01	3.69 1E+01	3.39 1E+01	3.01 1E+01	2.48 1E+01	1.97 1E+01		
39.6	0.075	I-129	3.47 1E+01	3.83 1E+01	4.03 1E+01	4.11 1E+01	4.30 1E+01	4.54 1E+01	4.84 1E+01		
43.0	0.118	Eu-155	6.01 1E+01	5.55 1E+01	5.20 1E+01	4.90 1E+01	4.46 1E+01	3.85 1E+01	3.27 1E+01		
59.5	0.345	U-237	5.37 1E+01	6.37 1E+01	6.58 1E+01	6.60 1E+01	6.44 1E+01	5.95 1E+01	5.24 1E+01		
59.5	0.359	Am-241	1.40 1E+02	2.07 1E+02	2.43 1E+02	2.66 1E+02	2.88 1E+02	3.07 1E+02	3.12 1E+02		
64.3	0.096	Sn-126	3.91 1E+01	4.41 1E+01	4.56 1E+01	4.62 1E+01	4.61 1E+01	4.49 1E+01	4.23 1E+01		
74.7	0.674	Am-243	2.96 1E+02	3.46 1E+02	3.60 1E+02	3.65 1E+02	3.62 1E+02	3.49 1E+02	3.27 1E+02		
74.8	0.104	Pb-212	2.42 1E+01	2.42 1E+01	2.35 1E+01	2.27 1E+01	2.15 1E+01	1.93 1E+01	1.67 1E+01		
77.1	0.176	Pb-212	4.06 1E+01	4.08 1E+01	3.95 1E+01	3.85 1E+01	3.63 1E+01	3.27 1E+01	2.84 1E+01		
84.2	0.067	Th-231	1.46 1E+01	2.63 1E+01	3.52 1E+01	4.18 1E+01	5.11 1E+01	6.42 1E+01	7.49 1E+01		
86.5	0.123	Np-237	3.30 1E+01	5.45 1E+01	6.78 1E+01	7.63 1E+01	8.66 1E+01	9.86 1E+01	1.04 1E+02		

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)								
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0		
86.5	0.309	Eu-155	1.67 1E+02	1.74 1E+02	1.73 1E+02	1.70 1E+02	1.65 1E+02	1.56 1E+02	1.46 1E+02		
86.9	0.089	Sn-126	3.67 1E+01	4.25 1E+01	4.48 1E+01	4.58 1E+01	4.67 1E+01	4.66 1E+01	4.56 1E+01		
87.6	0.370	Sn-126	1.52 1E+02	1.77 1E+02	1.87 1E+02	1.91 1E+02	1.94 1E+02	1.94 1E+02	1.90 1E+02		
91.1	0.279	Nd-147	6.49 1E+01	6.49 1E+01	6.39 1E+01	6.25 1E+01	6.03 1E+01	5.59 1E+01	5.02 1E+01		
97.1	0.166	U-237	2.61 1E+01	3.26 1E+01	3.47 1E+01	3.54 1E+01	3.56 1E+01	3.46 1E+01	3.21 1E+01		
98.4	0.157	Pa-233	2.04 1E+01	2.26 1E+01	2.30 1E+01	2.28 1E+01	2.21 1E+01	2.07 1E+01	1.85 1E+01		
99.6	0.147	Cm-243	2.67 1E+01	3.23 1E+01	3.40 1E+01	3.44 1E+01	3.42 1E+01	3.26 1E+01	2.97 1E+01		
99.6	0.157	Np-239	2.27 1E+01	2.64 1E+01	2.75 1E+01	2.76 1E+01	2.71 1E+01	2.56 1E+01	2.33 1E+01		
99.6	0.185	Cm-245	4.18 1E+01	5.43 1E+01	5.93 1E+01	6.08 1E+01	6.19 1E+01	6.02 1E+01	5.63 1E+01		
101.1	0.266	U-237	4.21 1E+01	5.26 1E+01	5.62 1E+01	5.75 1E+01	5.79 1E+01	5.62 1E+01	5.24 1E+01		
103.8	0.059	Am-242	3.68 1E+01	5.93 1E+01	7.34 1E+01	8.17 1E+01	9.14 1E+01	1.00 1E+02	1.03 1E+02		
103.8	0.236	Cm-243	4.28 1E+01	5.20 1E+01	5.49 1E+01	5.55 1E+01	5.53 1E+01	5.26 1E+01	4.80 1E+01		
103.8	0.251	Np-239	3.64 1E+01	4.25 1E+01	4.41 1E+01	4.42 1E+01	4.37 1E+01	4.14 1E+01	3.78 1E+01		
103.8	0.295	Cm-245	6.72 1E+01	8.74 1E+01	9.51 1E+01	9.81 1E+01	9.97 1E+01	9.72 1E+01	9.14 1E+01		
105.3	0.206	Eu-155	1.12 1E+02	1.18 1E+02	1.19 1E+02	1.18 1E+02	1.15 1E+02	1.10 1E+02	1.05 1E+02		
106.1	0.272	Np-239	3.95 1E+01	4.62 1E+01	4.79 1E+01	4.82 1E+01	4.75 1E+01	4.49 1E+01	4.10 1E+01		
117.3	0.066	Cm-245	1.50 1E+01	1.96 1E+01	2.14 1E+01	2.22 1E+01	2.26 1E+01	2.21 1E+01	2.08 1E+01		
121.1	0.173	Se-75	1.43 1E+01	1.51 1E+01	1.50 1E+01	1.48 1E+01	1.43 1E+01	1.32 1E+01	1.18 1E+01		
122.1	0.855	Co-57	1.84 1E+02	2.30 1E+02	2.41 1E+02	2.41 1E+02	2.37 1E+02	2.23 1E+02	2.04 1E+02		
127.5	0.141	Cs-134m	8.60 1E+01	1.16 1E+02	1.29 1E+02	1.35 1E+02	1.42 1E+02	1.48 1E+02	1.50 1E+02		
133.0	0.419	Hf-181	2.94 1E+01	2.84 1E+01	2.75 1E+01	2.69 1E+01	2.56 1E+01	2.35 1E+01	2.10 1E+01		
133.5	0.111	Ce-144	1.80 1E+02	1.91 1E+02	1.92 1E+02	1.92 1E+02	1.90 1E+02	1.83 1E+02	1.74 1E+02		
136.0	0.590	Se-75	4.95 1E+01	5.24 1E+01	5.20 1E+01	5.15 1E+01	4.98 1E+01	4.60 1E+01	4.16 1E+01		
136.5	0.106	Co-57	2.31 1E+01	2.90 1E+01	3.04 1E+01	3.06 1E+01	3.02 1E+01	2.84 1E+01	2.62 1E+01		
140.5	0.890	Tc-99m	2.77 1E+02	2.72 1E+02	2.66 1E+02	2.60 1E+02	2.50 1E+02	2.30 1E+02	2.09 1E+02		
143.8	0.110	U-235	1.82 1E+01	2.14 1E+01	2.20 1E+01	2.22 1E+01	2.20 1E+01	2.07 1E+01	1.90 1E+01		
145.4	0.484	Ce-141	2.33 1E+02	2.34 1E+02	2.30 1E+02	2.28 1E+02	2.21 1E+02	2.06 1E+02	1.91 1E+02		
158.6	0.864	Sn-117m	1.50 1E+02	1.67 1E+02	1.72 1E+02	1.75 1E+02	1.76 1E+02	1.72 1E+02	1.63 1E+02		
159.0	0.840	Te-123m	1.79 1E+02	1.90 1E+02	1.93 1E+02	1.92 1E+02	1.91 1E+02	1.83 1E+02	1.71 1E+02		
162.6	0.062	Ba-140	1.19 1E+01	1.21 1E+01	1.19 1E+01	1.17 1E+01	1.13 1E+01	1.05 1E+01	9.55		
165.9	0.238	Ba-139	2.07 1E+02	2.02 1E+02	1.95 1E+02	1.93 1E+02	1.86 1E+02	1.73 1E+02	1.57 1E+02		
174.9	0.095	Cm-245	2.26 1E+01	2.99 1E+01	3.26 1E+01	3.42 1E+01	3.48 1E+01	3.47 1E+01	3.32 1E+01		
181.1	0.061	Mo-99	1.67 1E+01	1.78 1E+01	1.53 1E+01	1.49 1E+01	1.43 1E+01	1.32 1E+01	1.19 1E+01		
185.7	0.572	U-235	9.72 1E+01	1.15 1E+02	1.18 1E+02	1.19 1E+02	1.18 1E+02	1.13 1E+02	1.05 1E+02		
186.0	0.033	Ra-226	1.71 1E+02	1.81 1E+02	1.79 1E+02	1.77 1E+02	1.72 1E+02	1.62 1E+02	1.48 1E+02		
202.5	0.958	Y-90m	6.08 1E+01	5.85 1E+01	5.60 1E+01	5.53 1E+01	5.29 1E+01	4.93 1E+01	4.46 1E+01		
205.3	0.050	U-235	8.62	1.02 1E+01	1.05 1E+01	1.06 1E+01	1.05 1E+01	1.01 1E+01	9.35		
208.0	0.216	U-237	3.62 1E+01	4.63 1E+01	4.96 1E+01	5.14 1E+01	5.25 1E+01	5.23 1E+01	5.02 1E+01		
210.5	0.223	Te-134	1.05 1E+01	1.01 1E+01	9.75	9.55	9.19	8.62	7.80		
228.2	0.106	Cm-243	2.06 1E+01	2.55 1E+01	2.69 1E+01	2.78 1E+01	2.80 1E+01	2.72 1E+01	2.58 1E+01		
228.2	0.113	Np-239	1.75 1E+01	2.10 1E+01	2.18 1E+01	2.21 1E+01	2.21 1E+01	2.15 1E+01	2.02 1E+01		
228.2	0.882	Te-132	1.26 1E+02	1.31 1E+02	1.30 1E+02	1.32 1E+02	1.29 1E+02	1.25 1E+02	1.18 1E+02		
234.7	0.261	Nb-95m	9.36 1E+01	1.28 1E+02	1.22 1E+02	1.26 1E+02	1.29 1E+02	1.28 1E+02	1.21 1E+02		
238.6	0.434	Pb-212	1.09 1E+02	1.14 1E+02	1.13 1E+02	1.12 1E+02	1.09 1E+02	1.03 1E+02	9.52 1E+01		
241.0	0.040	Ra-224	1.56 1E+02	1.54 1E+02	1.50 1E+02	1.48 1E+02	1.42 1E+02	1.33 1E+02	1.21 1E+02		
264.7	0.591	Se-75	5.29 1E+01	5.67 1E+01	5.65 1E+01	5.63 1E+01	5.51 1E+01	5.20 1E+01	4.79 1E+01		
266.9	0.068	Y-93	3.53 1E+01	3.04 1E+01	3.26 1E+01	3.20 1E+01	3.07 1E+01	2.86 1E+01	2.58 1E+01		
275.2	0.068	Pm-151	8.25	8.09	7.87	7.77	7.56	7.08	6.50		
277.6	0.140	Cm-243	2.77 1E+01	3.46 1E+01	3.67 1E+01	3.78 1E+01	3.83 1E+01	3.75 1E+01	3.52 1E+01		
277.6	0.144	Np-239	2.28 1E+01	2.74 1E+01	2.85 1E+01	2.91 1E+01	2.92 1E+01	2.84 1E+01	2.69 1E+01		
278.0	0.209	Te-134	1.01 1E+01	9.77	9.45	9.32	8.98	8.46	7.71		
279.5	0.252	Se-75	2.26 1E+01	2.43 1E+01	2.42 1E+01	2.42 1E+01	2.37 1E+01	2.24 1E+01	2.06 1E+01		
285.9	0.001	Pm-149	1.10 1E+02	1.06 1E+02	1.03 1E+02	1.01 1E+02	9.76 1E+01	9.11 1E+01	8.35 1E+01		
293.3	0.420	Ce-143	5.73 1E+01	5.81 1E+01	5.72 1E+01	5.71 1E+01	5.59 1E+01	5.34 1E+01	4.98 1E+01		
300.1	0.066	Pa-233	9.47	1.09 1E+01	1.11 1E+01	1.13 1E+01	1.12 1E+01	1.08 1E+01	1.00 1E+01		
306.1	0.051	Rh-105	2.76 1E+01	2.66 1E+01	2.57 1E+01	2.52 1E+01	2.43 1E+01	2.28 1E+01	2.08 1E+01		
312.0	0.386	Pa-233	5.53 1E+01	6.33 1E+01	6.52 1E+01	6.58 1E+01	6.53 1E+01	6.28 1E+01	5.87 1E+01		
314.1	0.610	Sb-128	8.53	8.21	7.95	7.82	7.53	7.03	6.39		
318.9	0.192	Rh-105	1.04 1E+02	1.00 1E+02	9.66 1E+01	9.51 1E+01	9.16 1E+01	8.60 1E+01	7.84 1E+01		
320.1	0.098	Cr-51	8.62 1E+01	1.11 1E+02	1.15 1E+02	1.15 1E+02	1.13 1E+02	1.06 1E+02	9.83 1E+01		
330.9	0.780	Sb-130	1.06 1E+01	1.02 1E+01	9.92	9.73	9.41	8.76	7.98		
340.1	0.225	Pm-151	2.81 1E+01	2.76 1E+01	2.70 1E+01	2.66 1E+01	2.61 1E+01	2.44 1E+01	2.26 1E+01		
340.5	0.422	Cs-136	8.93	8.56	8.30	8.15	7.87	7.36	6.72		
342.1	0.067	Ag-111	1.06 1E+02	1.03 1E+02	9.90 1E+01	9.79 1E+01	9.45 1E+01	8.85 1E+01	8.14 1E+01		
344.3	0.266	Eu-152	1.08 1E+01	1.03 1E+01	1.00 1E+01	9.84	9.49	8.87	8.07		

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0
345.9	0.120	Hf-181	9.24	9.10	8.88	8.76	8.49	8.00	7.33
364.5	0.812	I-131	9.02 1E+01	8.73 1E+01	8.44 1E+01	8.35 1E+01	7.98 1E+01	7.54 1E+01	6.94 1E+01
400.7	0.116	Se-75	1.08 1E+01	1.17 1E+01	1.17 1E+01	1.17 1E+01	1.15 1E+01	1.09 1E+01	1.02 1E+01
402.5	0.690	Cm-247	9.31 1E+01	9.21 1E+01	9.07 1E+01	8.55 1E+01	8.65 1E+01	8.17 1E+01	7.58 1E+01
414.8	0.833	Sb-126	1.34 1E+01	1.29 1E+01	1.25 1E+01	1.23 1E+01	1.19 1E+01	1.12 1E+01	1.03 1E+01
417.9	0.010	Te-127	8.63 1E+01	8.33 1E+01	8.15 1E+01	7.99 1E+01	7.82 1E+01	7.29 1E+01	6.78 1E+01
418.0	0.341	I-130	7.08	6.81	6.61	6.49	6.30	5.90	5.44
427.9	0.294	Sb-125	2.70 1E+01	2.70 1E+01	2.67 1E+01	2.64 1E+01	2.59 1E+01	2.47 1E+01	2.31 1E+01
435.1	0.186	Te-134	9.38	9.14	8.92	8.80	8.56	8.09	7.51
438.6	0.949	Zn-69m	9.84 1E+01	9.48 1E+01	9.25 1E+01	9.14 1E+01	8.79 1E+01	8.29 1E+01	7.73 1E+01
459.6	0.074	Te-129	4.23 1E+01	4.58 1E+01	4.68 1E+01	4.70 1E+01	4.69 1E+01	4.55 1E+01	4.35 1E+01
461.0	0.099	Te-134	5.03	4.90	4.80	4.71	4.58	4.35	4.04
462.8	0.307	Cs-138	6.58	6.31	6.15	6.02	5.83	5.46	5.05
463.4	0.105	Sb-125	9.67	9.68	9.59	9.51	9.32	8.90	8.37
469.4	0.175	Ru-105	1.04 1E+01	1.01 1E+01	9.93	9.77	9.47	8.97	8.31
473.0	0.247	Sb-127	1.66 1E+01	1.60 1E+01	1.56 1E+01	1.53 1E+01	1.49 1E+01	1.40 1E+01	1.31 1E+01
477.6	0.103	Be-7	9.16 1E+01	8.82 1E+01	8.63 1E+01	8.45 1E+01	8.20 1E+01	7.74 1E+01	7.19 1E+01
479.5	0.253	W-187	2.15 1E+01	2.11 1E+01	2.06 1E+01	2.03 1E+01	1.98 1E+01	1.86 1E+01	1.75 1E+01
479.5	0.900	Y-90m	6.25 1E+01	6.09 1E+01	5.93 1E+01	5.83 1E+01	5.71 1E+01	5.36 1E+01	4.99 1E+01
482.0	0.830	Hf-181	6.64 1E+01	6.56 1E+01	6.44 1E+01	6.34 1E+01	6.15 1E+01	5.85 1E+01	5.47 1E+01
487.0	0.459	La-140	9.91	9.54	9.29	9.12	8.83	8.28	7.67
497.1	0.889	Ru-103	8.10 1E+01	7.75 1E+01	7.59 1E+01	7.46 1E+01	7.26 1E+01	6.83 1E+01	6.40 1E+01
507.7	0.053	Zr-97	1.30 1E+01	1.26 1E+01	1.23 1E+01	1.21 1E+01	1.17 1E+01	9.88	1.03 1E+01
511.0	0.301	Co-58	1.38 1E+01	1.36 1E+01	1.33 1E+01	1.31 1E+01	1.28 1E+01	1.20 1E+01	1.12 1E+01
511.0	1.810	Na-22	3.89 1E+01	3.74 1E+01	3.66 1E+01	3.59 1E+01	3.49 1E+01	3.28 1E+01	3.06 1E+01
511.9	0.207	Rh-106	4.48 1E+01	4.32 1E+01	4.22 1E+01	4.14 1E+01	4.03 1E+01	3.79 1E+01	3.54 1E+01
526.5	0.450	Sb-128	6.67	6.43	6.30	6.18	6.01	5.66	5.26
529.9	0.863	I-133	6.40 1E+01	6.18 1E+01	6.04 1E+01	5.92 1E+01	5.77 1E+01	5.44 1E+01	5.09 1E+01
531.0	0.131	Nd-147	3.59 1E+01	3.73 1E+01	3.77 1E+01	3.75 1E+01	3.76 1E+01	3.65 1E+01	3.52 1E+01
536.1	0.990	I-130	2.11 1E+01	2.03 1E+01	1.99 1E+01	1.95 1E+01	1.90 1E+01	1.79 1E+01	1.67 1E+01
537.3	0.244	Ba-140	5.28 1E+01	5.47 1E+01	5.44 1E+01	5.39 1E+01	5.31 1E+01	5.07 1E+01	4.80 1E+01
544.7	0.179	Sb-129	5.90	5.68	5.56	5.47	5.31	5.00	4.66
550.3	0.220	Pm-148	1.87 1E+01	1.80 1E+01	1.76 1E+01	1.72 1E+01	1.67 1E+01	1.58 1E+01	1.48 1E+01
550.3	0.944	Pm-148m	2.16 1E+01	2.09 1E+01	2.05 1E+01	2.00 1E+01	1.95 1E+01	1.84 1E+01	1.72 1E+01
551.5	0.059	W-187	5.06	4.98	4.88	4.82	4.70	4.44	4.18
555.6	0.949	Y-91m	7.97 1E+01	7.78 1E+01	7.57 1E+01	7.45 1E+01	7.29 1E+01	6.88 1E+01	6.43 1E+01
566.0	0.183	Te-134	9.49	9.26	9.11	8.96	8.77	8.33	7.80
569.3	0.150	Cs-134	4.44	4.30	4.19	4.13	4.01	3.78	3.55
600.6	0.178	Sb-125	1.68 1E+01	1.70 1E+01	1.69 1E+01	1.67 1E+01	1.65 1E+01	1.58 1E+01	1.50 1E+01
602.7	0.979	Sb-124	2.63 1E+01	2.54 1E+01	2.49 1E+01	2.43 1E+01	2.36 1E+01	2.24 1E+01	2.09 1E+01
604.6	0.975	Cs-134	2.91 1E+01	2.81 1E+01	2.74 1E+01	2.69 1E+01	2.63 1E+01	2.48 1E+01	2.33 1E+01
606.6	0.050	Sb-125	4.74	4.79	4.77	4.72	4.66	4.48	4.25
610.3	0.056	Ru-103	5.16	5.00	4.89	4.82	4.69	4.44	4.18
618.4	0.073	W-187	6.30	6.22	6.10	6.03	5.88	5.58	5.27
621.8	0.098	Rh-106	2.15 1E+01	2.08 1E+01	2.05 1E+01	2.01 1E+01	1.96 1E+01	1.86 1E+01	1.74 1E+01
628.7	0.310	Sb-128	4.65	4.51	4.42	4.35	4.24	4.00	3.75
630.0	0.886	Pm-148m	2.05 1E+01	1.99 1E+01	1.94 1E+01	1.92 1E+01	1.86 1E+01	1.77 1E+01	1.66 1E+01
635.9	0.113	Sb-125	1.07 1E+01	1.09 1E+01	1.08 1E+01	1.07 1E+01	1.05 1E+01	1.02 1E+01	9.62
636.2	0.360	Sb-128	5.41	5.24	5.14	5.06	4.93	4.66	4.37
637.0	0.073	I-131	8.56	8.28	8.10	7.99	7.75	7.41	7.00
641.3	0.474	La-142	1.11 1E+01	1.07 1E+01	1.05 1E+01	1.03 1E+01	9.98	9.41	8.77
647.5	0.194	Te-133m	5.06	4.92	4.83	4.75	4.65	4.40	4.14
657.7	0.947	Ag-110m	1.64 1E+01	1.60 1E+01	1.57 1E+01	1.54 1E+01	1.51 1E+01	1.43 1E+01	1.33 1E+01
657.9	0.983	Nb-97	6.77 1E+01	6.60 1E+01	6.45 1E+01	6.32 1E+01	6.20 1E+01	5.89 1E+01	5.52 1E+01
661.6	0.899	Ba-137m	6.87 1E+01	6.69 1E+01	6.55 1E+01	6.42 1E+01	6.31 1E+01	5.95 1E+01	5.65 1E+01
664.5	0.053	Ce-143	7.77	7.94	7.95	7.93	7.87	7.65	7.36
666.3	0.997	Sb-126	1.68 1E+01	1.64 1E+01	1.60 1E+01	1.57 1E+01	1.53 1E+01	1.45 1E+01	1.36 1E+01
667.7	0.987	I-132	2.05 1E+01	1.99 1E+01	1.95 1E+01	1.91 1E+01	1.86 1E+01	1.78 1E+01	1.66 1E+01
668.5	0.961	I-130	2.08 1E+01	2.02 1E+01	1.98 1E+01	1.94 1E+01	1.90 1E+01	1.80 1E+01	1.69 1E+01
676.4	0.157	Ru-105	9.61	9.40	9.25	9.13	8.90	8.50	7.98
685.7	0.353	Sb-127	2.44 1E+01	2.38 1E+01	2.33 1E+01	2.29 1E+01	2.24 1E+01	2.13 1E+01	2.01 1E+01
685.8	0.316	W-187	2.77 1E+01	2.73 1E+01	2.68 1E+01	2.66 1E+01	2.59 1E+01	2.47 1E+01	2.34 1E+01
695.0	0.997	Sb-126	1.68 1E+01	1.64 1E+01	1.60 1E+01	1.58 1E+01	1.53 1E+01	1.47 1E+01	1.37 1E+01
697.0	0.289	Sb-126	4.89	4.75	4.66	4.57	4.47	4.24	3.99

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)							
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
720.5	0.538	Sb-126	9.10	8.89	8.71	8.54	8.35	7.94	7.48	
722.0	0.051	Ce-143	7.63	7.82	7.83	7.82	7.76	7.56	7.30	
723.3	0.197	Eu-154	7.77	7.60	7.45	7.36	7.19	6.85	6.44	
724.2	0.444	Zr-95	2.85 1E+01	2.76 1E+01	2.70 1E+01	2.67 1E+01	2.60 1E+01	2.47 1E+01	2.32 1E+01	
724.3	0.473	Ru-105	2.92 1E+01	2.87 1E+01	2.81 1E+01	2.78 1E+01	2.71 1E+01	2.59 1E+01	2.44 1E+01	
725.7	0.327	Pm-148m	7.67	7.46	7.31	7.19	7.02	6.69	6.30	
727.2	0.068	Bi-212	2.79 1E+01	2.89 1E+01	2.89 1E+01	2.85 1E+01	2.81 1E+01	2.69 1E+01	2.53 1E+01	
739.5	0.122	Mo-99	3.87 1E+01	4.20 1E+01	3.69 1E+01	3.63 1E+01	3.55 1E+01	3.38 1E+01	3.19 1E+01	
739.5	0.823	I-130	1.80 1E+01	1.75 1E+01	1.71 1E+01	1.69 1E+01	1.65 1E+01	1.57 1E+01	1.48 1E+01	
742.6	0.151	Te-134	8.03	7.88	7.75	7.66	7.50	7.20	6.78	
743.3	1.000	Sb-128	1.52 1E+01	1.48 1E+01	1.45 1E+01	1.43 1E+01	1.40 1E+01	1.33 1E+01	1.25 1E+01	
748.3	0.008	Pr-145	1.37 1E+01	1.34 1E+01	1.32 1E+01	1.31 1E+01	1.27 1E+01	1.22 1E+01	1.16 1E+01	
754.0	1.000	Sb-128	1.53 1E+01	1.49 1E+01	1.45 1E+01	1.44 1E+01	1.40 1E+01	1.33 1E+01	1.25 1E+01	
756.7	0.549	Zr-95	3.53 1E+01	3.41 1E+01	3.35 1E+01	3.31 1E+01	3.23 1E+01	3.07 1E+01	2.89 1E+01	
763.9	0.224	Ag-110m	3.94	3.86	3.77	3.71	3.62	3.44	3.24	
765.8	1.000	Nb-95	6.21 1E+01	6.04 1E+01	5.92 1E+01	5.84 1E+01	5.70 1E+01	5.44 1E+01	5.11 1E+01	
767.2	0.290	Te-134	1.55 1E+01	1.52 1E+01	1.50 1E+01	1.48 1E+01	1.45 1E+01	1.39 1E+01	1.32 1E+01	
772.6	0.762	I-132	1.61 1E+01	1.57 1E+01	1.53 1E+01	1.51 1E+01	1.47 1E+01	1.40 1E+01	1.32 1E+01	
773.7	0.382	Te-131m	1.31 1E+01	1.27 1E+01	1.25 1E+01	1.23 1E+01	1.20 1E+01	1.15 1E+01	1.08 1E+01	
778.9	0.130	Eu-152	5.70	5.55	5.42	5.35	5.21	4.95	4.67	
783.7	0.145	Sb-127	1.02 1E+01	9.93	9.72	9.62	9.36	8.96	8.50	
793.4	1.000	Sb-130	1.48 1E+01	1.45 1E+01	1.41 1E+01	1.40 1E+01	1.37 1E+01	1.29 1E+01	1.23 1E+01	
793.8	0.139	Te-131m	4.75	4.64	4.53	4.49	4.37	4.17	3.94	
795.8	0.851	Cs-134	2.60 1E+01	2.54 1E+01	2.47 1E+01	2.44 1E+01	2.38 1E+01	2.27 1E+01	2.15 1E+01	
810.8	0.994	Co-58	4.75 1E+01	4.70 1E+01	4.63 1E+01	4.59 1E+01	4.48 1E+01	4.26 1E+01	4.03 1E+01	
811.8	0.103	Eu-156	4.03	3.93	3.84	3.79	3.69	3.53	3.32	
812.8	0.430	Sb-129	1.47 1E+01	1.43 1E+01	1.40 1E+01	1.38 1E+01	1.34 1E+01	1.28 1E+01	1.21 1E+01	
815.8	0.236	La-140	5.34	5.20	5.08	5.02	4.88	4.65	4.37	
818.5	0.997	Cs-136	2.30 1E+01	2.24 1E+01	2.20 1E+01	2.16 1E+01	2.12 1E+01	2.02 1E+01	1.90 1E+01	
834.8	1.000	Mn-54	5.66 1E+01	5.61 1E+01	5.54 1E+01	5.45 1E+01	5.35 1E+01	5.11 1E+01	4.81 1E+01	
839.4	1.000	Sb-130	1.49 1E+01	1.46 1E+01	1.43 1E+01	1.41 1E+01	1.38 1E+01	1.32 1E+01	1.24 1E+01	
841.6	0.146	Eu-152m	2.31 1E+01	2.29 1E+01	2.28 1E+01	2.25 1E+01	2.22 1E+01	2.13 1E+01	2.03 1E+01	
846.8	0.989	Mn-56	3.09 1E+01	3.00 1E+01	2.93 1E+01	2.90 1E+01	2.81 1E+01	2.70 1E+01	2.53 1E+01	
846.8	0.999	Co-56	1.58 1E+01	1.54 1E+01	1.52 1E+01	1.50 1E+01	1.46 1E+01	1.39 1E+01	1.31 1E+01	
847.0	0.954	I-134	1.81 1E+01	1.77 1E+01	1.73 1E+01	1.70 1E+01	1.66 1E+01	1.58 1E+01	1.50 1E+01	
852.2	0.206	Te-131m	7.15	6.96	6.83	6.74	6.59	6.31	5.94	
856.7	0.176	Sb-126	3.05	2.98	2.91	2.87	2.80	2.68	2.54	
864.0	0.156	Te-133m	4.20	4.10	4.03	3.99	3.89	3.72	3.52	
873.2	0.115	Eu-154	4.64	4.54	4.45	4.41	4.31	4.14	3.91	
881.6	0.420	Br-84	1.36 1E+01	1.32 1E+01	1.29 1E+01	1.27 1E+01	1.24 1E+01	1.18 1E+01	1.11 1E+01	
884.1	0.649	I-134	1.23 1E+01	1.21 1E+01	1.18 1E+01	1.16 1E+01	1.14 1E+01	1.09 1E+01	1.03 1E+01	
884.7	0.729	Ag-110m	1.31 1E+01	1.28 1E+01	1.26 1E+01	1.24 1E+01	1.21 1E+01	1.15 1E+01	1.09 1E+01	
889.3	1.000	Sc-46	2.51 1E+01	2.44 1E+01	2.38 1E+01	2.36 1E+01	2.30 1E+01	2.20 1E+01	2.08 1E+01	
911.3	0.290	Ac-228	1.42 1E+01	1.43 1E+01	1.42 1E+01	1.41 1E+01	1.38 1E+01	1.33 1E+01	1.26 1E+01	
912.7	0.550	Te-133m	1.49 1E+01	1.46 1E+01	1.43 1E+01	1.42 1E+01	1.38 1E+01	1.32 1E+01	1.26 1E+01	
914.6	0.200	Sb-129	6.94	6.76	6.62	6.56	6.38	6.10	5.79	
914.8	0.109	Te-133m	2.96	2.89	2.83	2.81	2.75	2.63	2.48	
914.8	0.115	Pm-148	1.02 1E+01	1.00 1E+01	9.75	9.64	9.38	8.97	8.54	
915.3	0.171	Pm-148m	4.11	4.02	3.94	3.89	3.80	3.64	3.45	
934.5	0.139	Y-92	2.79 1E+01	2.72 1E+01	2.66 1E+01	2.63 1E+01	2.57 1E+01	2.46 1E+01	2.33 1E+01	
934.9	0.190	Sb-130	2.87	2.81	2.75	2.73	2.67	2.54	2.42	
937.5	0.343	Ag-110m	6.20	6.09	5.93	5.89	5.73	5.50	5.21	
954.5	0.181	I-132	3.91	3.81	3.73	3.70	3.61	3.46	3.29	
963.3	0.120	Eu-152m	1.93 1E+01	1.92 1E+01	1.91 1E+01	1.90 1E+01	1.87 1E+01	1.80 1E+01	1.73 1E+01	
964.1	0.145	Eu-152	6.54	6.39	6.24	6.19	6.03	5.76	5.48	
964.8	0.055	Ac-228	2.70	2.72	2.70	2.68	2.63	2.53	2.41	
966.4	0.077	Sb-129	2.69	2.61	2.56	2.53	2.47	2.37	2.25	
969.2	0.175	Ac-228	8.64	8.71	8.63	8.61	8.43	8.11	7.70	
984.5	0.278	Np-238	2.02 1E+01	2.06 1E+01	2.05 1E+01	2.04 1E+01	2.00 1E+01	1.93 1E+01	1.84 1E+01	
996.3	0.103	Eu-154	4.22	4.16	4.07	4.05	3.95	3.81	3.63	
1004.8	0.174	Eu-154	7.14	7.03	6.89	6.86	6.70	6.43	6.12	
1009.8	0.298	Cs-138	6.90	6.73	6.58	6.52	6.35	6.08	5.77	
1013.8	0.202	Pm-148m	4.93	4.81	4.72	4.68	4.58	4.40	4.18	
1025.9	0.096	Np-238	7.02	7.15	7.08	7.09	6.93	6.69	6.40	
1028.5	0.203	Np-238	1.48 1E+01	1.51 1E+01	1.50 1E+01	1.50 1E+01	1.47 1E+01	1.42 1E+01	1.36 1E+01	

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)							
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
1030.1	0.126	Sb-129	4.43	4.32	4.23	4.19	4.08	3.93	3.73	
1038.8	0.080	I-135	2.70	2.64	2.58	2.56	2.48	2.39	2.27	
1048.1	0.798	Cs-136	1.89	1.85	1.82	1.81	1.76	1.69	1.61	
1072.6	0.150	I-134	2.92	2.86	2.80	2.78	2.71	2.61	2.48	
1076.6	0.088	Rb-86	4.81	4.69	4.60	4.56	4.46	4.28	4.07	
1085.9	0.099	Eu-152	4.54	4.43	4.33	4.30	4.19	4.05	3.85	
1099.2	0.565	Fe-59	2.53	2.44	2.41	2.39	2.33	2.24	2.13	
1112.1	0.136	Eu-152	6.22	6.06	5.95	5.91	5.78	5.53	5.29	
1115.5	0.148	Ni-65	1.46	1.43	1.40	1.39	1.35	1.30	1.24	
1115.5	0.507	Zn-65	4.20	4.31	4.28	4.28	4.19	4.06	3.85	
1120.5	1.000	Sc-46	2.57	2.50	2.45	2.43	2.38	2.29	2.19	
1121.3	0.349	Ta-182	1.38	1.36	1.35	1.34	1.31	1.27	1.21	
1125.5	0.114	Te-131m	4.08	3.98	3.93	3.89	3.81	3.66	3.48	
1131.5	0.228	I-135	7.75	7.55	7.40	7.34	7.16	6.87	6.56	
1153.5	0.071	Eu-156	2.89	2.83	2.78	2.77	2.69	2.59	2.47	
1157.5	0.113	I-130	2.61	2.54	2.49	2.48	2.43	2.34	2.23	
1173.2	0.999	Co-60	2.14	2.10	2.06	2.04	1.99	1.91	1.83	
1189.0	0.164	Ta-182	6.52	6.46	6.37	6.35	6.23	6.01	5.77	
1204.9	0.003	Y-91	4.44	4.34	4.27	4.24	4.15	3.98	3.80	
1206.6	0.098	Te-131m	3.52	3.44	3.39	3.36	3.28	3.18	3.03	
1221.4	0.273	Ta-182	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.01	9.66	
1230.7	0.089	Eu-156	3.62	3.55	3.49	3.47	3.39	3.28	3.12	
1231.0	0.116	Ta-182	4.61	4.56	4.51	4.50	4.40	4.25	4.09	
1235.4	0.200	Cs-136	4.85	4.73	4.66	4.63	4.53	4.37	4.17	
1238.3	0.670	Co-56	1.11	1.08	1.07	1.07	1.03	9.97	9.49	
1242.4	0.067	Eu-156	2.74	2.69	2.65	2.63	2.56	2.48	2.37	
1260.4	0.289	I-135	9.95	9.71	9.54	9.48	9.25	8.93	8.49	
1274.4	0.355	Eu-154	1.49	1.47	1.45	1.44	1.41	1.37	1.31	
1274.5	0.999	Na-22	2.35	2.30	2.26	2.24	2.20	2.12	2.04	
1291.6	0.432	Fe-59	1.96	1.91	1.88	1.87	1.82	1.76	1.68	
1332.5	1.000	Co-60	2.17	2.13	2.09	2.08	2.03	1.96	1.88	
1354.5	0.026	La-141	3.44	3.35	3.31	3.28	3.20	3.10	2.95	
1368.6	1.000	Na-24	1.51	1.47	1.45	1.44	1.41	1.35	1.28	
1383.9	0.900	Sr-92	3.73	3.64	3.58	3.56	3.49	3.36	3.22	
1384.3	0.243	Ag-110m	4.59	4.52	4.44	4.42	4.33	4.19	4.01	
1408.0	0.209	Eu-152	9.81	9.58	9.43	9.42	9.21	8.90	8.53	
1435.9	0.763	Cs-138	1.84	1.79	1.76	1.76	1.71	1.66	1.58	
1457.6	0.087	I-135	3.06	2.98	2.95	2.93	2.86	2.77	2.66	
1460.8	0.107	K-40	3.88	3.79	3.74	3.72	3.64	3.51	3.34	
1465.1	0.222	Pm-148	2.09	2.05	2.01	2.00	1.96	1.90	1.83	
1481.8	0.235	Ni-65	2.40	2.33	2.30	2.29	2.24	2.17	2.08	
1505.0	0.131	Ag-110m	2.50	2.45	2.42	2.41	2.36	2.29	2.20	
1524.6	0.189	K-42	3.73	3.65	3.60	3.59	3.51	3.39	3.25	
1596.2	0.954	La-140	2.33	2.28	2.24	2.24	2.19	2.13	2.04	
1678.0	0.096	I-135	3.42	3.34	3.30	3.29	3.22	3.13	3.01	
1691.0	0.488	Sb-124	1.46	1.43	1.41	1.41	1.38	1.34	1.29	
1736.5	0.060	Sb-129	2.21	2.18	2.15	2.15	2.10	2.05	1.97	
1771.4	0.155	Co-56	2.67	2.62	2.60	2.59	2.55	2.47	2.37	
1791.2	0.078	I-135	2.78	2.72	2.69	2.67	2.63	2.55	2.46	
1810.7	0.272	Mn-56	9.24	9.03	8.94	8.88	8.73	8.53	8.17	
1897.6	0.147	Br-84	5.18	5.08	5.02	4.99	4.90	4.77	4.57	
1901.3	0.072	La-142	1.89	1.84	1.83	1.82	1.78	1.73	1.66	
2091.0	0.056	Sb-124	1.72	1.69	1.66	1.67	1.63	1.60	1.54	
2113.0	0.143	Mn-56	4.96	4.86	4.82	4.79	4.71	4.63	4.45	
2218.0	0.152	Cs-138	3.83	3.75	3.72	3.70	3.65	3.56	3.43	
2397.8	0.133	La-142	3.58	3.52	3.48	3.47	3.41	3.33	3.23	
2484.1	0.067	Br-84	2.43	2.39	2.37	2.36	2.33	2.27	2.20	
2542.7	0.100	La-142	2.71	2.67	2.65	2.62	2.59	2.53	2.45	
2598.6	0.167	Co-56	2.99	2.97	2.96	2.95	2.90	2.84	2.76	
2639.6	0.076	Cs-138	1.96	1.93	1.91	1.90	1.88	1.84	1.79	
2754.0	0.999	Na-24	1.63	1.61	1.59	1.58	1.56	1.53	1.48	
3253.5	0.074	Co-56	1.35	1.35	1.35	1.34	1.33	1.30	1.28	
3927.5	0.068	Br-84	2.61	2.58	2.55	2.55	2.53	2.49	2.44	

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μ Gy/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 β (g・cm⁻²)

(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100
11.2	0.255	Pb-210	2.27 1E+01	2.12 1E+01	1.98 1E+01	1.90 1E+01	1.87 1E+01	1.85 1E+01	1.83 1E+01
12.7	0.081	Th-232	4.91 1E+01	4.71 1E+01	4.46 1E+01	4.29 1E+01	4.21 1E+01	4.14 1E+01	4.09 1E+01
12.7	0.089	Th-228	1.65 1E+01	1.35 1E+01	1.07 1E+01	9.03	8.47	7.98	7.57
13.4	0.079	U-236	6.37 1E+01	6.27 1E+01	6.13 1E+01	6.03 1E+01	5.99 1E+01	5.97 1E+01	5.92 1E+01
13.4	0.084	U-238	6.39 1E+01	6.29 1E+01	6.16 1E+01	6.04 1E+01	6.02 1E+01	6.01 1E+01	5.94 1E+01
13.4	0.094	U-234	6.11 1E+01	5.97 1E+01	5.80 1E+01	5.67 1E+01	5.58 1E+01	5.54 1E+01	5.51 1E+01
13.4	0.102	U-232	5.55 1E+01	5.31 1E+01	4.98 1E+01	4.73 1E+01	4.63 1E+01	4.55 1E+01	4.47 1E+01
13.7	0.094	Th-234	8.27	6.74	5.39	4.61	4.36	4.14	3.98
13.7	0.562	Np-237	1.41 1E+01	1.17 1E+01	9.50	8.20	7.78	7.37	7.07
13.7	0.776	Th-231	2.73 1E+01	2.40 1E+01	2.07 1E+01	1.85 1E+01	1.77 1E+01	1.71 1E+01	1.65 1E+01
14.1	0.040	Pu-239	6.51 1E+01	6.28 1E+01	5.93 1E+01	5.66 1E+01	5.55 1E+01	5.39 1E+01	5.29 1E+01
14.1	0.082	Pu-242	7.48 1E+01	7.50 1E+01	7.48 1E+01	7.47 1E+01	7.44 1E+01	7.43 1E+01	7.43 1E+01
14.1	0.089	Pu-240	7.44 1E+01	7.45 1E+01	7.39 1E+01	7.35 1E+01	7.37 1E+01	7.31 1E+01	7.30 1E+01
14.1	0.102	Pu-238	7.46 1E+01	7.47 1E+01	7.44 1E+01	7.40 1E+01	7.40 1E+01	7.41 1E+01	7.38 1E+01
14.1	0.103	Pu-236	7.30 1E+01	7.24 1E+01	7.13 1E+01	7.06 1E+01	7.00 1E+01	6.98 1E+01	6.93 1E+01
14.4	0.365	Am-241	1.37 1E+01	1.18 1E+01	1.02 1E+01	9.18	8.87	8.57	8.39
14.4	0.575	U-237	3.49	2.71	2.05	1.68	1.55	1.44	1.36
14.8	0.081	Cm-244	8.25 1E+01	8.25 1E+01	8.23 1E+01	8.20 1E+01	8.19 1E+01	8.17 1E+01	8.14 1E+01
14.8	0.085	Cm-242	8.18 1E+01	8.21 1E+01	8.17 1E+01	8.13 1E+01	8.13 1E+01	8.06 1E+01	8.06 1E+01
14.8	0.098	Am-242	5.82	4.70	3.69	3.13	2.95	2.76	2.64
14.8	0.461	Cm-243	3.05	2.33	1.71	1.37	1.26	1.16	1.08
14.8	0.471	Cm-245	4.78	3.75	2.83	2.34	2.17	2.02	1.91
15.2	0.273	Am-242m	7.76 1E+01	7.57 1E+01	7.28 1E+01	7.06 1E+01	6.98 1E+01	6.87 1E+01	6.81 1E+01
15.5	0.161	Am-242	1.15 1E+01	9.30	7.32	6.19	5.83	5.49	5.26
16.5	0.183	Mo-93	3.15 1E+01	3.16 1E+01	3.15 1E+01	3.14 1E+01	3.14 1E+01	3.15 1E+01	3.16 1E+01
16.6	0.060	Nb-93m	6.17 1E+01	6.16 1E+01	6.18 1E+01	6.16 1E+01	6.16 1E+01	6.16 1E+01	6.19 1E+01
16.6	0.350	Mo-93	6.12 1E+01	6.14 1E+01	6.15 1E+01	6.12 1E+01	6.12 1E+01	6.12 1E+01	6.15 1E+01
18.6	0.090	Mo-93	2.19 1E+01	2.20 1E+01	2.22 1E+01	2.20 1E+01	2.21 1E+01	2.21 1E+01	2.22 1E+01
20.1	0.184	Rh-103m	4.31 1E+01	4.31 1E+01	4.30 1E+01	4.25 1E+01	4.29 1E+01	4.26 1E+01	4.29 1E+01
20.2	0.349	Rh-103m	8.36 1E+01	8.41 1E+01	8.38 1E+01	8.31 1E+01	8.35 1E+01	8.35 1E+01	8.38 1E+01
22.7	0.094	Rh-103m	3.33 1E+01	3.40 1E+01	3.44 1E+01	3.46 1E+01	3.48 1E+01	3.46 1E+01	3.49 1E+01
25.3	0.410	Sn-117m	1.19 1E+01	9.54	7.30	6.04	5.61	5.20	4.90
25.6	0.146	Th-231	3.55 1E+01	3.26 1E+01	2.90 1E+01	2.65 1E+01	2.57 1E+01	2.47 1E+01	2.41 1E+01
26.4	0.156	Sn-126	1.68 1E+01	1.42 1E+01	1.18 1E+01	1.04 1E+01	9.89	9.46	9.10
27.2	0.103	Te-127m	6.77 1E+01	6.70 1E+01	6.57 1E+01	6.46 1E+01	6.46 1E+01	6.39 1E+01	6.38 1E+01
27.2	0.127	Te-129m	1.67 1E+01	1.35 1E+01	1.03 1E+01	8.22	7.46	6.73	6.20
27.2	0.327	Te-125m	6.79 1E+01	6.73 1E+01	6.67 1E+01	6.60 1E+01	6.63 1E+01	6.58 1E+01	6.57 1E+01
27.5	0.193	Te-127m	1.29 1E+02	1.28 1E+02	1.26 1E+02	1.24 1E+02	1.23 1E+02	1.22 1E+02	1.22 1E+02
27.5	0.237	Te-129m	3.18 1E+01	2.58 1E+01	1.96 1E+01	1.57 1E+01	1.42 1E+01	1.28 1E+01	1.18 1E+01
27.5	0.611	Te-125m	1.29 1E+02	1.29 1E+02	1.27 1E+02	1.26 1E+02	1.27 1E+02	1.26 1E+02	1.26 1E+02
27.8	0.156	Te-129	1.40 1E+01	1.09 1E+01	8.03	6.31	5.69	5.15	4.71
29.4	0.152	Np-237	3.55 1E+01	3.11 1E+01	2.63 1E+01	2.32 1E+01	2.22 1E+01	2.11 1E+01	2.03 1E+01
29.5	0.185	I-129	6.95 1E+01	6.87 1E+01	6.73 1E+01	6.65 1E+01	6.68 1E+01	6.64 1E+01	6.59 1E+01
29.8	0.343	I-129	1.32 1E+02	1.30 1E+02	1.28 1E+02	1.26 1E+02	1.27 1E+02	1.26 1E+02	1.25 1E+02
30.6	0.092	Cs-134m	2.55 1E+01	2.18 1E+01	1.79 1E+01	1.55 1E+01	1.47 1E+01	1.38 1E+01	1.33 1E+01
31.0	0.067	Te-127m	5.75 1E+01	5.79 1E+01	5.75 1E+01	5.68 1E+01	5.73 1E+01	5.66 1E+01	5.63 1E+01
31.0	0.068	Te-129m	1.18 1E+01	9.67	7.45	6.01	5.46	4.93	4.55
31.0	0.170	Cs-134m	4.83 1E+01	4.14 1E+01	3.41 1E+01	2.96 1E+01	2.80 1E+01	2.65 1E+01	2.54 1E+01
31.0	0.212	Te-125m	5.78 1E+01	5.83 1E+01	5.82 1E+01	5.82 1E+01	5.85 1E+01	5.81 1E+01	5.86 1E+01
31.8	0.021	Ba-137m	2.37 1E-01	1.86 1E-01	1.38 1E-01	1.08 1E-01	9.71 1E-02	8.73 1E-02	8.04 1E-02
32.2	0.038	Ba-137m	4.47 1E-01	3.50 1E-01	2.60 1E-01	2.06 1E-01	1.84 1E-01	1.66 1E-01	1.52 1E-01
33.6	0.122	I-129	5.98 1E+01	6.07 1E+01	6.11 1E+01	6.14 1E+01	6.20 1E+01	6.18 1E+01	6.17 1E+01
35.0	0.050	Cs-134m	1.81 1E+01	1.59 1E+01	1.34 1E+01	1.18 1E+01	1.12 1E+01	1.07 1E+01	1.03 1E+01
35.5	0.067	Te-125m	2.37 1E+01	2.44 1E+01	2.51 1E+01	2.55 1E+01	2.58 1E+01	2.58 1E+01	2.59 1E+01
38.7	0.223	Nd-147	1.70 1E+01	1.42 1E+01	1.12 1E+01	9.26	8.51	7.83	7.28
39.6	0.075	I-129	4.95 1E+01	5.14 1E+01	5.30 1E+01	5.40 1E+01	5.47 1E+01	5.48 1E+01	5.49 1E+01
43.0	0.118	Eu-155	2.91 1E+01	2.58 1E+01	2.23 1E+01	2.00 1E+01	1.92 1E+01	1.84 1E+01	1.79 1E+01
59.5	0.345	U-237	4.83 1E+01	4.27 1E+01	3.69 1E+01	3.27 1E+01	3.11 1E+01	2.95 1E+01	2.84 1E+01
59.5	0.359	Am-241	3.12 1E+02	3.06 1E+02	2.99 1E+02	2.94 1E+02	2.91 1E+02	2.89 1E+02	2.88 1E+02
64.3	0.096	Sn-126	4.04 1E+01	3.79 1E+01	3.48 1E+01	3.29 1E+01	3.19 1E+01	3.12 1E+01	3.06 1E+01
74.7	0.674	Am-243	3.15 1E+02	2.98 1E+02	2.81 1E+02	2.68 1E+02	2.62 1E+02	2.58 1E+02	2.55 1E+02
74.8	0.104	Pb-212	1.53 1E+01	1.35 1E+01	1.15 1E+01	1.00 1E+01	9.46	8.93	8.52
77.1	0.176	Pb-212	2.61 1E+01	2.30 1E+01	1.96 1E+01	1.72 1E+01	1.62 1E+01	1.53 1E+01	1.46 1E+01
84.2	0.067	Th-231	7.93 1E+01	8.23 1E+01	8.36 1E+01	8.34 1E+01	8.31 1E+01	8.27 1E+01	8.22 1E+01
86.5	0.123	Np-237	1.05 1E+02	1.03 1E+02	9.92 1E+01	9.50 1E+01	9.38 1E+01	9.21 1E+01	9.04 1E+01

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)										
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100				
86.5	0.309	Eu-155	1.39 1E+02	1.30 1E+02	1.21 1E+02	1.14 1E+02	1.12 1E+02	1.09 1E+02	1.07 1E+02				
86.9	0.089	Sn-126	4.43 1E+01	4.26 1E+01	4.04 1E+01	3.87 1E+01	3.80 1E+01	3.75 1E+01	3.70 1E+01				
87.6	0.370	Sn-126	1.84 1E+02	1.78 1E+02	1.68 1E+02	1.61 1E+02	1.59 1E+02	1.56 1E+02	1.54 1E+02				
91.1	0.279	Nd-147	4.67 1E+01	4.21 1E+01	3.62 1E+01	3.17 1E+01	2.98 1E+01	2.81 1E+01	2.66 1E+01				
97.1	0.166	U-237	3.05 1E+01	2.82 1E+01	2.56 1E+01	2.33 1E+01	2.26 1E+01	2.17 1E+01	2.11 1E+01				
98.4	0.157	Pa-233	1.71 1E+01	1.53 1E+01	1.31 1E+01	1.16 1E+01	1.09 1E+01	1.04 1E+01	9.88				
99.6	0.147	Cm-243	2.78 1E+01	2.53 1E+01	2.22 1E+01	2.00 1E+01	1.92 1E+01	1.83 1E+01	1.76 1E+01				
99.6	0.157	Np-239	2.18 1E+01	1.97 1E+01	1.75 1E+01	1.58 1E+01	1.51 1E+01	1.44 1E+01	1.39 1E+01				
99.6	0.185	Cm-245	5.34 1E+01	4.97 1E+01	4.51 1E+01	4.16 1E+01	4.05 1E+01	3.93 1E+01	3.81 1E+01				
101.1	0.266	U-237	4.98 1E+01	4.62 1E+01	4.20 1E+01	3.84 1E+01	3.71 1E+01	3.59 1E+01	3.49 1E+01				
103.8	0.059	Am-242	1.01 1E+02	9.77 1E+01	9.20 1E+01	8.74 1E+01	8.59 1E+01	8.41 1E+01	8.25 1E+01				
103.8	0.236	Cm-243	4.49 1E+01	4.10 1E+01	3.61 1E+01	3.25 1E+01	3.11 1E+01	2.98 1E+01	2.87 1E+01				
103.8	0.251	Np-239	3.53 1E+01	3.21 1E+01	2.84 1E+01	2.57 1E+01	2.45 1E+01	2.35 1E+01	2.26 1E+01				
103.8	0.295	Cm-245	8.62 1E+01	8.08 1E+01	7.33 1E+01	6.77 1E+01	6.59 1E+01	6.42 1E+01	6.21 1E+01				
105.3	0.206	Eu-155	1.00 1E+02	9.54 1E+01	9.01 1E+01	8.56 1E+01	8.41 1E+01	8.26 1E+01	8.17 1E+01				
106.1	0.272	Np-239	3.85 1E+01	3.50 1E+01	3.10 1E+01	2.81 1E+01	2.68 1E+01	2.58 1E+01	2.48 1E+01				
117.3	0.066	Cm-245	1.98 1E+01	1.85 1E+01	1.70 1E+01	1.58 1E+01	1.54 1E+01	1.50 1E+01	1.46 1E+01				
121.1	0.173	Se-75	1.10 1E+01	9.91	8.62	7.68	7.32	6.96	6.65				
122.1	0.855	Co-57	1.92 1E+02	1.77 1E+02	1.60 1E+02	1.47 1E+02	1.43 1E+02	1.38 1E+02	1.35 1E+02				
127.5	0.141	Cs-134m	1.49 1E+02	1.46 1E+02	1.39 1E+02	1.32 1E+02	1.30 1E+02	1.28 1E+02	1.26 1E+02				
133.0	0.419	Hf-181	1.94 1E+01	1.75 1E+01	1.51 1E+01	1.32 1E+01	1.25 1E+01	1.18 1E+01	1.11 1E+01				
133.5	0.111	Ce-144	1.66 1E+02	1.57 1E+02	1.45 1E+02	1.35 1E+02	1.32 1E+02	1.28 1E+02	1.26 1E+02				
136.0	0.590	Se-75	3.87 1E+01	3.51 1E+01	3.07 1E+01	2.75 1E+01	2.62 1E+01	2.50 1E+01	2.39 1E+01				
136.5	0.106	Co-57	2.47 1E+01	2.29 1E+01	2.07 1E+01	1.93 1E+01	1.87 1E+01	1.81 1E+01	1.77 1E+01				
140.5	0.890	Tc-99m	1.96 1E+02	1.80 1E+02	1.62 1E+02	1.49 1E+02	1.44 1E+02	1.39 1E+02	1.36 1E+02				
143.8	0.110	U-235	1.78 1E+01	1.63 1E+01	1.46 1E+01	1.33 1E+01	1.27 1E+01	1.23 1E+01	1.19 1E+01				
145.4	0.484	Ce-141	1.79 1E+02	1.67 1E+02	1.51 1E+02	1.39 1E+02	1.35 1E+02	1.31 1E+02	1.27 1E+02				
158.6	0.864	Sn-117m	1.56 1E+02	1.46 1E+02	1.33 1E+02	1.23 1E+02	1.19 1E+02	1.15 1E+02	1.12 1E+02				
159.0	0.840	Te-123m	1.63 1E+02	1.52 1E+02	1.38 1E+02	1.27 1E+02	1.23 1E+02	1.19 1E+02	1.16 1E+02				
162.6	0.062	Ba-140	8.86	8.04	6.98	6.11	5.75	5.43	5.15				
165.9	0.238	Ba-139	1.48 1E+02	1.36 1E+02	1.21 1E+02	1.10 1E+02	1.06 1E+02	1.01 1E+02	9.77 1E+01				
174.9	0.095	Cm-245	3.19 1E+01	3.05 1E+01	2.83 1E+01	2.68 1E+01	2.63 1E+01	2.57 1E+01	2.51 1E+01				
181.1	0.061	Mo-99	1.10 1E+01	9.96	8.59	7.50	7.04	6.58	6.20 1E-02				
185.7	0.572	U-235	9.88 1E+01	9.17 1E+01	8.24 1E+01	7.58 1E+01	7.33 1E+01	7.06 1E+01	6.87 1E+01				
186.0	0.033	Ra-226	1.40 1E+02	1.28 1E+02	1.15 1E+02	1.06 1E+02	1.02 1E+02	9.78 1E+01	9.50 1E+01				
202.5	0.958	Y-90m	4.16 1E+01	3.78 1E+01	3.32 1E+01	2.95 1E+01	2.82 1E+01	2.67 1E+01	2.54 1E+01				
205.3	0.050	U-235	8.85	8.23	7.47	6.87	6.65	6.42	6.22				
208.0	0.216	U-237	4.86 1E+01	4.65 1E+01	4.35 1E+01	4.09 1E+01	4.01 1E+01	3.90 1E+01	3.83 1E+01				
210.5	0.223	Te-134	7.28	6.65	5.75	5.09	4.83	4.55	4.32				
228.2	0.106	Cm-243	2.46 1E+01	2.31 1E+01	2.11 1E+01	1.96 1E+01	1.90 1E+01	1.84 1E+01	1.78 1E+01				
228.2	0.113	Np-239	1.93 1E+01	1.81 1E+01	1.66 1E+01	1.54 1E+01	1.50 1E+01	1.45 1E+01	1.41 1E+01				
228.2	0.882	Te-132	1.12 1E+02	1.05 1E+02	9.50 1E+01	8.71 1E+01	8.42 1E+01	8.15 1E+01	7.87 1E+01				
234.7	0.261	Nb-95m	1.15 1E+02	1.07 1E+02	9.67 1E+01	8.85 1E+01	8.56 1E+01	8.23 1E+01	7.93 1E+01				
238.6	0.434	Pb-212	9.03 1E+01	8.41 1E+01	7.64 1E+01	6.97 1E+01	6.77 1E+01	6.54 1E+01	6.31 1E+01				
241.0	0.040	Ra-224	1.14 1E+02	1.06 1E+02	9.33 1E+01	8.59 1E+01	8.25 1E+01	7.94 1E+01	7.64 1E+01				
264.7	0.591	Se-75	4.53 1E+01	4.22 1E+01	3.77 1E+01	3.46 1E+01	3.34 1E+01	3.23 1E+01	3.11 1E+01				
266.9	0.068	Y-93	2.41 1E+01	2.19 1E+01	1.90 1E+01	1.64 1E+01	1.53 1E+01	1.43 1E+01	1.33 1E+01				
275.2	0.068	Pm-151	6.15	5.68	5.05	4.57	4.36	4.16	3.98				
277.6	0.140	Cm-243	3.40 1E+01	3.22 1E+01	2.96 1E+01	2.76 1E+01	2.68 1E+01	2.62 1E+01	2.54 1E+01				
277.6	0.144	Np-239	2.58 1E+01	2.43 1E+01	2.24 1E+01	2.11 1E+01	2.04 1E+01	1.99 1E+01	1.94 1E+01				
278.0	0.209	Te-134	7.22	6.67	5.84	5.24	4.96	4.72	4.48				
279.5	0.252	Se-75	1.96 1E+01	1.82 1E+01	1.64 1E+01	1.51 1E+01	1.45 1E+01	1.41 1E+01	1.35 1E+01				
285.9	0.001	Pm-149	7.88 1E+01	7.28 1E+01	6.46 1E+01	5.84 1E+01	5.60 1E+01	5.34 1E+01	5.12 1E+01				
293.3	0.420	Ce-143	4.76 1E+01	4.42 1E+01	3.97 1E+01	3.61 1E+01	3.43 1E+01	3.28 1E+01	3.15 1E+01				
300.1	0.066	Pa-233	9.53	8.94	8.05	7.38	7.09	6.89	6.62				
306.1	0.051	Rh-105	1.96 1E+01	1.82 1E+01	1.62 1E+01	1.47 1E+01	1.41 1E+01	1.36 1E+01	1.30 1E+01				
312.0	0.386	Pa-233	5.58 1E+01	5.24 1E+01	4.74 1E+01	4.34 1E+01	4.18 1E+01	4.06 1E+01	3.90 1E+01				
314.1	0.610	Sb-128	6.02	5.51	4.86	4.30	4.06	3.83	3.64				
318.9	0.192	Rh-105	7.43 1E+01	6.87 1E+01	6.11 1E+01	5.58 1E+01	5.35 1E+01	5.16 1E+01	4.95 1E+01				
320.1	0.098	Cr-51	9.30 1E+01	8.63 1E+01	7.70 1E-01	7.01 1E+01	6.76 1E+01	6.46 1E+01	6.23 1E+01				
330.9	0.780	Sb-130	7.52	6.89	6.04	5.36	5.07	4.76	4.51				
340.1	0.225	Pm-151	2.15 1E+01	2.00 1E+01	1.79 1E+01	1.64 1E+01	1.57 1E+01	1.50 1E+01	1.44 1E+01				
340.5	0.422	Cs-136	6.32	5.81	5.10	4.49	4.20	3.98	3.75				
342.1	0.067	Ag-111	7.69 1E+01	7.15 1E+01	6.36 1E+01	5.85 1E+01	5.61 1E+01	5.40 1E+01	5.18 1E+01				
344.3	0.266	Eu-152	7.63	6.98	6.12	5.40	5.06	4.78	4.50				

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)							
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100	
345.9	0.120	Hf-181	6.95	6.49	5.81	5.27	5.06	4.83	4.65	
364.5	0.812	I-131	6.56 1E+01	6.10 1E+01	5.45 1E+01	4.97 1E+01	4.72 1E+01	4.54 1E+01	4.37 1E+01	
400.7	0.116	Se-75	9.73	9.17	8.38	7.82	7.56	7.36	7.16	
402.5	0.690	Cm-247	7.17 1E+01	6.69 1E+01	6.00 1E+01	5.49 1E+01	5.27 1E+01	5.05 1E+01	4.87 1E+01	
414.8	0.833	Sb-126	9.76	9.02	8.01	7.24	6.86	6.48	6.22	
417.9	0.010	Te-127	6.44 1E+01	6.03 1E+01	5.41 1E+01	4.96 1E+01	4.73 1E+01	4.55 1E+01	4.41 1E+01	
418.0	0.341	I-130	5.14	4.76	4.24	3.83	3.65	3.44	3.29	
427.9	0.294	Sb-125	2.20 1E+01	2.06 1E+01	1.85 1E+01	1.69 1E+01	1.62 1E+01	1.54 1E+01	1.48 1E+01	
435.1	0.186	Te-134	7.11	6.67	5.93	5.43	5.19	4.96	4.76	
438.6	0.949	Zn-69m	7.28 1E+01	6.80 1E+01	6.12 1E+01	5.57 1E+01	5.33 1E+01	5.12 1E+01	4.93 1E+01	
459.6	0.074	Te-129	4.18 1E+01	3.95 1E+01	3.57 1E+01	3.28 1E+01	3.15 1E+01	3.00 1E+01	2.88 1E+01	
461.0	0.099	Te-134	3.83	3.61	3.22	2.95	2.83	2.69	2.60	
462.8	0.307	Cs-138	4.74	4.37	3.83	3.38	3.16	2.96	2.78	
463.4	0.105	Sb-125	7.97	7.47	6.74	6.17	5.94	5.63	5.45	
469.4	0.175	Ru-105	7.88	7.35	6.58	5.97	5.70	5.42	5.18	
473.0	0.247	Sb-127	1.23 1E+01	1.16 1E+01	1.03 1E+01	9.38	8.98	8.52	8.22	
477.6	0.103	Be-7	6.82 1E+01	6.41 1E+01	5.76 1E+01	5.26 1E+01	5.05 1E+01	4.82 1E+01	4.67 1E+01	
479.5	0.253	W-187	1.66 1E+01	1.56 1E+01	1.40 1E+01	1.28 1E+01	1.23 1E+01	1.16 1E+01	1.12 1E+01	
479.5	0.900	Y-90m	4.75 1E+01	4.45 1E+01	4.06 1E+01	3.72 1E+01	3.59 1E+01	3.46 1E+01	3.35 1E+01	
482.0	0.830	Hf-181	5.20 1E+01	4.92 1E+01	4.48 1E+01	4.11 1E+01	3.98 1E+01	3.81 1E+01	3.70 1E+01	
487.0	0.459	La-140	7.23	6.69	5.89	5.23	4.92	4.59	4.33	
497.1	0.889	Ru-103	6.05 1E+01	5.69 1E+01	5.13 1E+01	4.68 1E+01	4.50 1E+01	4.28 1E+01	4.16 1E+01	
507.7	0.053	Zr-97	9.72	9.07	8.09	7.26	6.86	6.47	6.19	
511.0	0.301	Co-58	1.06 1E+01	9.88	8.85	8.00	7.61	7.18	6.92	
511.0	1.810	Na-22	2.89 1E+01	2.69 1E+01	2.40 1E+01	2.16 1E+01	2.05 1E+01	1.93 1E+01	1.85 1E+01	
511.9	0.207	Rh-106	3.36 1E+01	4.34 1E+01	2.82 1E+01	2.57 1E+01	2.45 1E+01	2.33 1E+01	2.25 1E+01	
526.5	0.450	Sb-128	5.00	4.67	4.19	3.80	3.65	3.44	3.31	
529.9	0.863	I-133	4.84 1E+01	4.55 1E+01	4.07 1E+01	3.71 1E+01	3.56 1E+01	3.39 1E+01	3.26 1E+01	
531.0	0.131	Nd-147	3.43 1E+01	3.31 1E+01	3.08 1E+01	2.90 1E+01	2.81 1E+01	2.73 1E+01	2.65 1E+01	
536.1	0.990	I-130	1.58 1E+01	1.48 1E+01	1.33 1E+01	1.22 1E+01	1.17 1E+01	1.10 1E+01	1.06 1E+01	
537.3	0.244	Ba-140	4.57 1E+01	4.34 1E+01	3.93 1E+01	3.61 1E+01	3.47 1E+01	3.34 1E+01	3.23 1E+01	
544.7	0.179	Sb-129	4.39	4.12	3.67	3.29	3.12	2.95	2.80	
550.3	0.220	Pm-148	1.39 1E+01	1.30 1E+01	1.16 1E+01	1.03 1E+01	9.80	9.21	8.81	
550.3	0.944	Pm-148m	1.64 1E+01	1.53 1E+01	1.38 1E+01	1.26 1E+01	1.21 1E+01	1.15 1E+01	1.11 1E+01	
551.5	0.059	W-187	3.97	3.76	3.40	3.12	3.00	2.87	2.77	
555.6	0.949	Y-91m	6.13 1E+01	5.73 1E+01	5.19 1E+01	4.75 1E+01	4.56 1E+01	4.36 1E+01	4.21 1E+01	
566.0	0.183	Te-134	7.44	7.01	6.35	5.88	5.64	5.42	5.23	
569.3	0.150	Cs-134	3.36	3.15	2.84	2.58	2.47	2.35	2.25	
600.6	0.178	Sb-125	1.44 1E+01	1.36 1E+01	1.24 1E+01	1.15 1E+01	1.11 1E+01	1.06 1E+01	1.03 1E+01	
602.7	0.979	Sb-124	1.98 1E+01	1.85 1E+01	1.65 1E+01	1.48 1E+01	1.40 1E+01	1.33 1E+01	1.25 1E+01	
604.6	0.975	Cs-134	2.22 1E+01	2.08 1E+01	1.88 1E+01	1.71 1E+01	1.64 1E+01	1.56 1E+01	1.50 1E+01	
606.6	0.050	Sb-125	4.06	3.84	3.52	3.26	3.15	3.01	2.91	
610.3	0.056	Ru-103	3.97	3.76	3.43	3.14	3.04	2.92	2.84	
618.4	0.073	W-187	5.03	4.76	4.34	4.01	3.87	3.70	3.57	
621.8	0.098	Rh-106	1.66 1E+01	2.15 1E+01	1.41 1E+01	1.29 1E+01	1.25 1E+01	1.19 1E+01	1.15 1E+01	
628.7	0.310	Sb-128	3.57	3.35	3.05	2.78	2.68	2.55	2.45	
630.0	0.886	Pm-148m	1.58 1E+01	1.48 1E+01	1.35 1E+01	1.24 1E+01	1.20 1E+01	1.14 1E+01	1.09 1E+01	
635.9	0.113	Sb-125	9.26	8.78	8.03	7.46	7.20	6.91	6.69	
636.2	0.360	Sb-128	4.17	3.91	3.54	3.24	3.12	2.97	2.85	
637.0	0.073	I-131	6.69	6.33	5.78	5.42	5.24	5.06	4.92	
641.3	0.474	La-142	8.28	7.67	6.78	6.04	5.65	5.27	4.92	
647.5	0.194	Te-133m	3.91	3.69	3.32	3.02	2.88	2.72	2.61	
657.7	0.947	Ag-110m	1.27 1E+01	1.19 1E+01	1.07 1E+01	9.78	9.36	8.88	8.46	
657.9	0.983	Nb-97	5.25 1E+01	4.94 1E+01	4.49 1E+01	4.15 1E+01	3.98 1E+01	3.81 1E+01	3.65 1E+01	
661.6	0.899	Ba-137m	5.37 1E+01	5.05 1E+01	4.60 1E+01	4.23 1E+01	4.08 1E+01	3.90 1E+01	3.75 1E+01	
664.5	0.053	Ce-143	7.14	6.84	6.34	6.00	5.80	5.62	5.48	
666.3	0.997	Sb-126	1.30 1E+01	1.22 1E+01	1.11 1E+01	1.03 1E+01	9.83	9.40	9.04	
667.7	0.987	I-132	1.59 1E+01	1.49 1E+01	1.35 1E+01	1.23 1E+01	1.18 1E+01	1.13 1E+01	1.08 1E+01	
668.5	0.961	I-130	1.61 1E+01	1.52 1E+01	1.38 1E+01	1.28 1E+01	1.23 1E+01	1.17 1E+01	1.12 1E+01	
676.4	0.157	Ru-105	7.63	7.19	6.55	6.05	5.83	5.58	5.35	
685.7	0.353	Sb-127	1.91 1E+01	1.81 1E+01	1.65 1E+01	1.52 1E+01	1.47 1E+01	1.41 1E+01	1.36 1E+01	
685.8	0.316	W-187	2.24 1E+01	2.13 1E+01	1.94 1E+01	1.81 1E+01	1.75 1E+01	1.68 1E+01	1.62 1E+01	
695.0	0.997	Sb-126	1.31 1E+01	1.14 1E+01	1.12 1E+01	1.04 1E+01	1.00 1E+01	9.57	9.20	
697.0	0.289	Sb-126	3.81	3.58	3.26	3.02	2.90	2.77	2.67	

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μ Gy/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 β (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-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-1 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Gy}/\text{h})$

エネルギー 放出比

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	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
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

(付表-1と付表-3-1から計算により算出)

付表-2-2 線量率と地上高1mでのγ線フルエンス率との関係

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (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	2.23	1E+02	1.50	1E+02	1.09	1E+02	8.86	1E+01	6.79	1E+01	4.82	1E+01	3.65	1E+01
12.7	0.081	Th-232	2.44	1E+02	2.43	1E+02	2.11	1E+02	1.91	1E+02	1.66	1E+02	1.34	1E+02	1.06	1E+02
12.7	0.089	Th-228	1.31	1E+02	9.07	1E+01	6.64	1E+01	5.35	1E+01	4.00	1E+01	2.59	1E+01	1.71	1E+01
13.4	0.079	U-236	1.83	1E+02	1.97	1E+02	1.82	1E+02	1.74	1E+02	1.64	1E+02	1.51	1E+02	1.41	1E+02
13.4	0.084	U-238	2.39	1E+02	2.58	1E+02	2.40	1E+02	2.28	1E+02	2.15	1E+02	1.97	1E+02	1.83	1E+02
13.4	0.094	U-234	1.93	1E+02	2.05	1E+02	1.87	1E+02	1.76	1E+02	1.64	1E+02	1.45	1E+02	1.30	1E+02
13.4	0.102	U-232	1.86	1E+02	1.91	1E+02	1.72	1E+02	1.58	1E+02	1.44	1E+02	1.22	1E+02	1.03	1E+02
13.7	0.094	Th-234	5.91	1E+01	3.51	1E+01	2.47	1E+01	1.95	1E+01	1.43	1E+01	9.27		6.17	
13.7	0.562	Np-237	9.07	1E+01	6.12	1E+01	4.54	1E+01	3.71	1E+01	2.83	1E+01	1.90	1E+01	1.31	1E+01
13.7	0.776	Th-231	1.39	1E+02	1.08	1E+02	8.55	1E+01	7.24	1E+01	5.82	1E+01	4.18	1E+01	3.05	1E+01
14.1	0.040	Pu-239	1.82	1E+02	1.90	1E+02	1.71	1E+02	1.61	1E+02	1.49	1E+02	1.31	1E+02	1.15	1E+02
14.1	0.082	Pu-242	2.10	1E+02	2.19	1E+02	2.01	1E+02	1.90	1E+02	1.77	1E+02	1.59	1E+02	1.42	1E+02
14.1	0.089	Pu-240	1.91	1E+02	2.03	1E+02	1.90	1E+02	1.82	1E+02	1.74	1E+02	1.64	1E+02	1.58	1E+02
14.1	0.102	Pu-238	2.07	1E+02	2.21	1E+02	2.07	1E+02	1.98	1E+02	1.89	1E+02	1.79	1E+02	1.73	1E+02
14.1	0.103	Pu-236	1.91	1E+02	2.04	1E+02	1.89	1E+02	1.81	1E+02	1.72	1E+02	1.61	1E+02	1.53	1E+02
14.4	0.365	Am-241	6.42	1E+01	4.52	1E+01	3.40	1E+01	2.81	1E+01	2.20	1E+01	1.55	1E+01	1.13	1E+01
14.4	0.575	U-237	3.43	1E+01	1.89	1E+01	1.30	1E+01	1.02	1E+01	7.36		4.63		2.98	
14.8	0.081	Cm-244	2.03	1E+02	2.13	1E+02	1.96	1E+02	1.87	1E+02	1.78	1E+02	1.66	1E+02	1.59	1E+02
14.8	0.085	Cm-242	1.85	1E+02	1.93	1E+02	1.79	1E+02	1.71	1E+02	1.63	1E+02	1.54	1E+02	1.49	1E+02
14.8	0.098	Am-242	3.67	1E+01	2.50	1E+01	1.87	1E+01	1.51	1E+01	1.15	1E+01	7.58		5.05	
14.8	0.461	Cm-243	3.32	1E+01	1.80	1E+01	1.24	1E+01	9.61		6.88		4.24		2.68	
14.8	0.471	Cm-245	4.00	1E+01	2.24	1E+01	1.56	1E+01	1.21	1E+01	8.77		5.47		3.51	
15.2	0.273	Am-242m	2.28	1E+02	2.33	1E+02	2.13	1E+02	2.00	1E+02	1.87	1E+02	1.71	1E+02	1.58	1E+02
15.5	0.161	Am-242	6.56	1E+01	4.62	1E+01	3.52	1E+01	2.88	1E+01	2.21	1E+01	1.48	1E+01	9.92	
16.5	0.183	Mo-93	7.05	1E+01	8.43	1E+01	8.33	1E+01	8.29	1E+01	8.32	1E+01	8.23	1E+01	8.36	1E+01
16.6	0.060	Nb-93m	1.26	1E+02	1.51	1E+02	1.50	1E+02	1.49	1E+02	1.50	1E+02	1.49	1E+02	1.50	1E+02
16.6	0.350	Mo-93	1.36	1E+02	1.63	1E+02	1.61	1E+02	1.61	1E+02	1.61	1E+02	1.60	1E+02	1.63	1E+02
18.6	0.090	Mo-93	4.10	1E+01	5.23	1E+01	5.36	1E+01	5.46	1E+01	5.56	1E+01	5.64	1E+01	5.79	1E+01
20.1	0.184	Rh-103m	6.09	1E+02	6.67	1E+02	6.48	1E+02	6.35	1E+02	6.24	1E+02	6.06	1E+02	6.01	1E+02
20.2	0.349	Rh-103m	1.16	1E+03	1.28	1E+03	1.24	1E+03	1.22	1E+03	1.21	1E+03	1.18	1E+03	1.17	1E+03
22.7	0.094	Rh-103m	3.45	1E+02	4.05	1E+02	4.12	1E+02	4.19	1E+02	4.29	1E+02	4.41	1E+02	4.57	1E+02
25.3	0.410	Sn-117m	4.34	1E+01	3.23	1E+01	2.66	1E+01	2.32	1E+01	1.90	1E+01	1.39	1E+01	9.85	
25.6	0.146	Th-231	6.10	1E+01	6.69	1E+01	6.36	1E+01	6.06	1E+01	5.56	1E+01	4.69	1E+01	3.79	1E+01
26.4	0.156	Sn-126	4.19	1E+01	3.34	1E+01	2.84	1E+01	2.53	1E+01	2.16	1E+01	1.66	1E+01	1.27	1E+01
27.2	0.103	Te-127m	7.66	1E+01	7.72	1E+01	7.46	1E+01	7.33	1E+01	7.16	1E+01	7.02	1E+01	6.91	1E+01
27.2	0.127	Te-129m	5.90	1E+01	4.80	1E+01	4.16	1E+01	3.75	1E+01	3.19	1E+01	2.47	1E+01	1.83	1E+01
27.2	0.327	Te-125m	7.64	1E+01	7.67	1E+01	7.42	1E+01	7.28	1E+01	7.15	1E+01	7.03	1E+01	6.95	1E+01
27.5	0.193	Te-127m	1.44	1E+02	1.46	1E+02	1.41	1E+02	1.39	1E+02	1.36	1E+02	1.34	1E+02	1.31	1E+02
27.5	0.237	Te-129m	1.11	1E+02	9.08	1E+01	7.87	1E+01	7.12	1E+01	6.05	1E+01	4.69	1E+01	3.47	1E+01
27.5	0.611	Te-125m	1.44	1E+02	1.45	1E+02	1.41	1E+02	1.38	1E+02	1.35	1E+02	1.34	1E+02	1.32	1E+02
27.8	0.156	Te-129	5.32	1E+01	4.01	1E+01	3.32	1E+01	2.93	1E+01	2.42	1E+01	1.80	1E+01	1.28	1E+01
29.4	0.152	Np-237	6.45	1E+01	6.47	1E+01	6.01	1E+01	5.60	1E+01	4.99	1E+01	4.04	1E+01	3.17	1E+01
29.5	0.185	I-129	7.21	1E+01	7.17	1E+01	6.88	1E+01	6.75	1E+01	6.55	1E+01	6.30	1E+01	6.12	1E+01
29.8	0.343	I-129	1.35	1E+02	1.35	1E+02	1.30	1E+02	1.27	1E+02	1.23	1E+02	1.20	1E+02	1.16	1E+02
30.6	0.092	Cs-134m	5.35	1E+01	4.68	1E+01	4.19	1E+01	3.88	1E+01	3.44	1E+01	2.82	1E+01	2.23	1E+01
31.0	0.067	Te-127m	5.42	1E+01	5.76	1E+01	5.72	1E+01	5.72	1E+01	5.73	1E+01	5.77	1E+01	5.83	1E+01
31.0	0.068	Te-129m	3.46	1E+01	2.97	1E+01	2.64	1E+01	2.42	1E+01	2.11	1E+01	1.68	1E+01	1.27	1E+01
31.0	0.170	Cs-134m	9.92	1E+01	8.72	1E+01	7.82	1E+01	7.25	1E+01	6.44	1E+01	5.30	1E+01	4.21	1E+01
31.0	0.212	Te-125m	5.41	1E+01	5.72	1E+01	5.67	1E+01	5.68	1E+01	5.70	1E+01	5.77	1E+01	5.85	1E+01
31.8	0.021	Ba-137m	9.28	1E-01	6.99	1E-01	5.86	1E-01	5.19	1E-01	4.31	1E-01	3.23	1E-01	2.31	1E-01
32.2	0.038	Ba-137m	1.71		1.29		1.09		9.62	1E-01	8.05	1E-01	6.05	1E-01	4.36	1E-01
33.6	0.122	I-129	4.96	1E+01	5.14	1E+01	5.08	1E+01	5.05	1E+01	5.05	1E+01	5.07	1E+01	5.14	1E+01
35.0	0.050	Cs-134m	3.00	1E+01	2.74	1E+01	2.52	1E+01	2.38	1E+01	2.17	1E+01	1.86	1E+01	1.55	1E+01
35.5	0.067	Te-125m	1.76	1E+01	1.94	1E+01	1.98	1E+01	2.02	1E+01	2.08	1E+01	2.20	1E+01	2.34	1E+01
38.7	0.223	Nd-147	3.71	1E+01	3.09	1E+01	2.74	1E+01	2.51	1E+01	2.22	1E+01	1.81	1E+01	1.44	1E+01
39.6	0.075	I-129	3.19	1E+01	3.48	1E+01	3.54	1E+01	3.60	1E+01	3.71	1E+01	3.90	1E+01	4.16	1E+01
43.0	0.118	Eu-155	4.23	1E+01	3.62	1E+01	3.31	1E+01	3.08	1E+01	2.78	1E+01	2.37	1E+01	1.98	1E+01
59.5	0.345	U-237	5.52	1E+01	5.44	1E+01	5.19	1E+01	5.00	1E+01	4.69	1E+01	4.15	1E+01	3.58	1E+01
59.5	0.359	Am-241	1.69	1E+02	2.12	1E+02	2.21	1E+02	2.26	1E+02	2.30	1E+02	2.27	1E+02	2.22	1E+02
64.3	0.096	Sn-126	3.30	1E+01	3.39	1E+01	3.33	1E+01	3.29	1E+01	3.20	1E+01	2.99	1E+01	2.75	1E+01
74.7	0.674	Am-243	2.51	1E+02	2.53	1E+02	2.47	1E+02	2.41	1E+02	2.31	1E+02	2.17	1E+02	2.00	1E+02
74.8	0.104	Pb-212	1.94	1E+01	1.78	1E+01	1.69	1E+01	1.61	1E+01	1.51	1E+01	1.33	1E+01	1.14	1E+01
77.1	0.176	Pb-212	3.26	1E+01	3.01	1E+01	2.84	1E+01	2.73	1E+01	2.54	1E+01	2.25	1E+01	1.94	1E+01
84.2	0.067	Th-231	3.71	1E+01	5.46	1E+01	6.14	1E+01	6.56	1E+01	7.02	1E+01	7.41	1E+01	7.50	1E+01
86.5	0.123	Np-237	6.10	1E+01	7.86	1E+01	8.30	1E+01	8.50	1E+01	8.66	1E+01	8.60	1E+01	8.29	1E+01

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (g・cm ⁻²)								
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0		
86.5	0.309	Eu-155	1.18 1E+02	1.13 1E+02	1.10 1E+02	1.07 1E+02	1.03 1E+02	9.60 1E+01	8.84 1E+01		
86.9	0.089	Sn-126	3.10 1E+01	3.26 1E+01	3.28 1E+01	3.26 1E+01	3.23 1E+01	3.11 1E+01	2.96 1E+01		
87.6	0.370	Sn-126	1.28 1E+02	1.36 1E+02	1.36 1E+02	1.36 1E+02	1.35 1E+02	1.29 1E+02	1.23 1E+02		
91.1	0.279	Nd-147	5.06 1E+01	4.90 1E+01	4.75 1E+01	4.62 1E+01	4.44 1E+01	4.08 1E+01	3.65 1E+01		
97.1	0.166	U-237	2.69 1E+01	2.78 1E+01	2.74 1E+01	2.68 1E+01	2.59 1E+01	2.42 1E+01	2.19 1E+01		
98.4	0.157	Pa-233	1.87 1E+01	1.82 1E+01	1.76 1E+01	1.72 1E+01	1.61 1E+01	1.48 1E+01	1.29 1E+01		
99.6	0.147	Cm-243	2.71 1E+01	2.74 1E+01	2.69 1E+01	2.62 1E+01	2.51 1E+01	2.30 1E+01	2.05 1E+01		
99.6	0.157	Np-239	2.13 1E+01	2.14 1E+01	2.09 1E+01	2.03 1E+01	1.94 1E+01	1.78 1E+01	1.58 1E+01		
99.6	0.185	Cm-245	4.00 1E+01	4.19 1E+01	4.15 1E+01	4.06 1E+01	3.93 1E+01	3.62 1E+01	3.27 1E+01		
101.1	0.266	U-237	4.33 1E+01	4.49 1E+01	4.44 1E+01	4.36 1E+01	4.22 1E+01	3.92 1E+01	3.58 1E+01		
103.8	0.059	Am-242	5.67 1E+01	7.23 1E+01	7.71 1E+01	7.86 1E+01	7.97 1E+01	7.80 1E+01	7.34 1E+01		
103.8	0.236	Cm-243	4.35 1E+01	4.42 1E+01	4.33 1E+01	4.23 1E+01	4.06 1E+01	3.71 1E+01	3.30 1E+01		
103.8	0.251	Np-239	3.41 1E+01	3.44 1E+01	3.35 1E+01	3.26 1E+01	3.13 1E+01	2.87 1E+01	2.56 1E+01		
103.8	0.295	Cm-245	6.43 1E+01	6.75 1E+01	6.66 1E+01	6.54 1E+01	6.33 1E+01	5.85 1E+01	5.31 1E+01		
105.3	0.206	Eu-155	7.91 1E+01	7.71 1E+01	7.56 1E+01	7.40 1E+01	7.18 1E+01	6.79 1E+01	6.36 1E+01		
106.1	0.272	Np-239	3.70 1E+01	3.75 1E+01	3.64 1E+01	3.55 1E+01	3.40 1E+01	3.11 1E+01	2.78 1E+01		
117.3	0.066	Cm-245	1.44 1E+01	1.52 1E+01	1.50 1E+01	1.48 1E+01	1.43 1E+01	1.33 1E+01	1.21 1E+01		
121.1	0.173	Se-75	1.26 1E+01	1.18 1E+01	1.13 1E+01	1.09 1E+01	1.03 1E+01	9.43	8.26		
122.1	0.855	Co-57	1.88 1E+02	1.79 1E+02	1.72 1E+02	1.66 1E+02	1.58 1E+02	1.44 1E+02	1.29 1E+02		
127.5	0.141	Cs-134m	9.61 1E+01	1.07 1E+02	1.11 1E+02	1.14 1E+02	1.16 1E+02	1.16 1E+02	1.15 1E+02		
133.0	0.419	Hf-181	2.30 1E+01	2.18 1E+01	2.09 1E+01	2.03 1E+01	1.93 1E+01	1.76 1E+01	1.57 1E+01		
133.5	0.111	Ce-144	1.33 1E+02	1.34 1E+02	1.32 1E+02	1.30 1E+02	1.27 1E+02	1.21 1E+02	1.12 1E+02		
136.0	0.590	Se-75	4.35 1E+01	4.08 1E+01	3.92 1E+01	3.79 1E+01	3.59 1E+01	3.28 1E+01	2.91 1E+01		
136.5	0.106	Co-57	2.36 1E+01	2.25 1E+01	2.17 1E+01	2.11 1E+01	2.01 1E+01	1.84 1E+01	1.65 1E+01		
140.5	0.890	Tc-99m	1.88 1E+02	1.81 1E+02	1.75 1E+02	1.69 1E+02	1.61 1E+02	1.47 1E+02	1.32 1E+02		
143.8	0.110	U-235	1.77 1E+01	1.73 1E+01	1.67 1E+01	1.63 1E+01	1.56 1E+01	1.42 1E+01	1.28 1E+01		
145.4	0.484	Ce-141	1.61 1E+02	1.57 1E+02	1.53 1E+02	1.50 1E+02	1.45 1E+02	1.34 1E+02	1.22 1E+02		
158.6	0.864	Sn-117m	1.27 1E+02	1.32 1E+02	1.31 1E+02	1.30 1E+02	1.28 1E+02	1.21 1E+02	1.11 1E+02		
159.0	0.840	Te-123m	1.36 1E+02	1.38 1E+02	1.37 1E+02	1.35 1E+02	1.32 1E+02	1.24 1E+02	1.14 1E+02		
162.6	0.062	Ba-140	1.00 1E+01	9.71	9.38	9.19	8.83	8.12	7.30		
165.9	0.238	Ba-139	1.43 1E+02	1.39 1E+02	1.34 1E+02	1.31 1E+02	1.26 1E+02	1.16 1E+02	1.05 1E+02		
174.9	0.095	Cm-245	2.16 1E+01	2.31 1E+01	2.28 1E+01	2.28 1E+01	2.21 1E+01	2.09 1E+01	1.93 1E+01		
181.1	0.061	Mo-99	1.31 1E+01	1.26 1E+01	1.21 1E+01	1.18 1E+01	1.13 1E+01	1.04 1E+01	9.36		
185.7	0.572	U-235	9.45 1E+01	9.29 1E+01	9.00 1E+01	8.79 1E+01	8.41 1E+01	7.79 1E+01	7.05 1E+01		
186.0	0.033	Ra-226	1.25 1E+02	1.20 1E+02	1.16 1E+02	1.13 1E+02	1.08 1E+02	9.93 1E+01	9.02 1E+01		
202.5	0.958	Y-90m	4.59 1E+01	4.40 1E+01	4.18 1E+01	4.10 1E+01	3.89 1E+01	3.61 1E+01	3.25 1E+01		
205.3	0.050	U-235	8.39	8.24	7.97	7.80	7.46	6.94	6.30		
208.0	0.216	U-237	3.73 1E+01	3.96 1E+01	3.91 1E+01	3.89 1E+01	3.82 1E+01	3.65 1E+01	3.42 1E+01		
210.5	0.223	Te-134	8.05	7.77	7.48	7.30	7.02	6.52	5.88		
228.2	0.106	Cm-243	2.09 1E+01	2.16 1E+01	2.12 1E+01	2.11 1E+01	2.05 1E+01	1.92 1E+01	1.77 1E+01		
228.2	0.113	Np-239	1.64 1E+01	1.70 1E+01	1.66 1E+01	1.63 1E+01	1.58 1E+01	1.49 1E+01	1.37 1E+01		
228.2	0.882	Te-132	9.59 1E+01	9.66 1E+01	9.55 1E+01	9.52 1E+01	9.29 1E+01	8.87 1E+01	8.25 1E+01		
234.7	0.261	Nb-95m	8.98 1E+01	9.98 1E+01	9.97 1E+01	9.97 1E+01	9.75 1E+01	9.20 1E+01	8.45 1E+01		
238.6	0.434	Pb-212	8.75 1E+01	8.42 1E+01	8.11 1E+01	7.94 1E+01	7.64 1E+01	7.12 1E+01	6.50 1E+01		
241.0	0.040	Ra-224	1.13 1E+02	1.08 1E+02	1.04 1E+02	1.02 1E+02	9.75 1E+01	9.02 1E+01	8.15 1E+01		
264.7	0.591	Se-75	4.64 1E+01	4.41 1E+01	4.26 1E+01	4.15 1E+01	3.98 1E+01	3.71 1E+01	3.35 1E+01		
266.9	0.068	Y-93	2.66 1E+01	2.55 1E+01	2.46 1E+01	2.40 1E+01	2.30 1E+01	2.14 1E+01	1.92 1E+01		
275.2	0.068	Pm-151	6.32	6.11	5.90	5.82	5.61	5.23	4.80		
277.6	0.140	Cm-243	2.82 1E+01	2.94 1E+01	2.90 1E+01	2.88 1E+01	2.81 1E+01	2.64 1E+01	2.42 1E+01		
277.6	0.144	Np-239	2.13 1E+01	2.22 1E+01	2.17 1E+01	2.14 1E+01	2.10 1E+01	1.97 1E+01	1.82 1E+01		
278.0	0.209	Te-134	7.75	7.53	7.24	7.12	6.85	6.40	5.81		
279.5	0.252	Se-75	1.98 1E+01	1.89 1E+01	1.83 1E+01	1.78 1E+01	1.71 1E+01	1.60 1E+01	1.44 1E+01		
285.9	0.001	Pm-149	2.57	2.48	2.37	2.32	2.24	2.08	1.88		
293.3	0.420	Ce-143	4.40 1E+01	4.37 1E+01	4.27 1E+01	4.25 1E+01	4.12 1E+01	3.91 1E+01	3.62 1E+01		
300.1	0.066	Pa-233	8.69	8.80	8.53	8.47	8.15	7.69	7.01		
306.1	0.051	Rh-105	2.06 1E+01	1.98 1E+01	1.90 1E+01	1.86 1E+01	1.79 1E+01	1.66 1E+01	1.50 1E+01		
312.0	0.386	Pa-233	5.08 1E+01	5.11 1E+01	4.98 1E+01	4.94 1E+01	4.76 1E+01	4.49 1E+01	4.11 1E+01		
314.1	0.610	Sb-128	6.86	6.60	6.39	6.26	6.04	5.59	5.07		
318.9	0.192	Rh-105	7.76 1E+01	7.45 1E+01	7.15 1E+01	7.01 1E+01	6.76 1E+01	6.28 1E+01	5.67 1E+01		
320.1	0.098	Cr-51	9.69 1E+01	9.31 1E+01	8.97 1E+01	8.79 1E+01	8.42 1E+01	7.81 1E+01	7.07 1E+01		
330.9	0.780	Sb-130	8.57	8.28	7.97	7.80	7.47	7.01	6.34		
340.1	0.225	Pm-151	2.15 1E+01	2.09 1E+01	2.02 1E+01	1.99 1E+01	1.93 1E+01	1.80 1E+01	1.67 1E+01		
340.5	0.422	Cs-136	7.24	7.04	6.77	6.62	6.36	5.95	5.42		
342.1	0.067	Ag-111	7.90 1E+01	7.67 1E+01	7.32 1E+01	7.20 1E+01	6.96 1E+01	6.48 1E+01	5.87 1E+01		
344.3	0.266	Eu-152	8.20	7.97	7.75	7.58	7.33	6.88	6.28		

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (g・cm ⁻²)								
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0		
345.9	0.120	Hf-181	7.22	6.98	6.74	6.61	6.41	5.99	5.47		
364.5	0.812	I-131	6.83 1E+01	6.62 1E+01	6.36 1E+01	6.27 1E+01	5.99 1E+01	5.63 1E+01	5.09 1E+01		
400.7	0.116	Se-75	9.46	9.08	8.82	8.61	8.28	7.77	7.12		
402.5	0.690	Cm-247	7.18 1E+01	6.88 1E+01	6.69 1E+01	6.24 1E+01	6.32 1E+01	5.88 1E+01	5.40 1E+01		
414.8	0.833	Sb-126	1.07 1E+01	1.03 1E+01	9.92	9.84	9.47	8.85	8.10		
417.9	0.010	Te-127	6.61 1E+01	6.38 1E+01	6.18 1E+01	6.03 1E+01	5.89 1E+01	5.47 1E+01	5.05 1E+01		
418.0	0.341	I-130	5.69	5.46	5.31	5.20	5.04	4.70	4.31		
427.9	0.294	Sb-125	2.17 1E+01	2.16 1E+01	2.11 1E+01	2.08 1E+01	2.03 1E+01	1.91 1E+01	1.77 1E+01		
435.1	0.186	Te-134	7.22	7.04	6.84	6.72	6.53	6.12	5.66		
438.6	0.949	Zn-69m	7.64 1E+01	7.34 1E+01	7.13 1E+01	6.98 1E+01	6.74 1E+01	6.30 1E+01	5.79 1E+01		
459.6	0.074	Te-129	3.58 1E+01	3.66 1E+01	3.64 1E+01	3.61 1E+01	3.57 1E+01	3.43 1E+01	3.24 1E+01		
461.0	0.099	Te-134	3.87	3.77	3.68	3.60	3.49	3.29	3.05		
462.8	0.307	Cs-138	5.51	5.32	5.17	5.05	4.89	4.57	4.20		
463.4	0.105	Sb-125	7.79	7.74	7.57	7.48	7.30	6.89	6.42		
469.4	0.175	Ru-105	8.31	8.06	7.88	7.71	7.46	7.02	6.46		
473.0	0.247	Sb-127	1.27 1E+01	1.23 1E+01	1.19 1E+01	1.17 1E+01	1.13 1E+01	1.06 1E+01	9.81		
477.6	0.103	Be-7	7.06 1E+01	6.79 1E+01	6.59 1E+01	6.46 1E+01	6.23 1E+01	5.85 1E+01	5.41 1E+01		
479.5	0.253	W-187	1.97 1E+01	1.90 1E+01	1.86 1E+01	1.82 1E+01	1.77 1E+01	1.66 1E+01	1.55 1E+01		
479.5	0.900	Y-90m	4.72 1E+01	4.58 1E+01	4.43 1E+01	4.33 1E+01	4.21 1E+01	3.92 1E+01	3.64 1E+01		
482.0	0.830	Hf-181	5.19 1E+01	5.03 1E+01	4.89 1E+01	4.79 1E+01	4.64 1E+01	4.38 1E+01	4.08 1E+01		
487.0	0.459	La-140	8.28	8.00	7.78	7.61	7.37	6.90	6.35		
497.1	0.889	Ru-103	6.22 1E+01	5.96 1E+01	5.82 1E+01	5.69 1E+01	5.53 1E+01	5.20 1E+01	4.82 1E+01		
507.7	0.053	Zr-97	2.27	2.19	2.14	2.09	2.03	1.90	1.76		
511.0	0.301	Co-58	1.16 1E+01	1.12 1E+01	1.09 1E+01	1.07 1E+01	1.04 1E+01	0.971	0.91		
511.0	1.810	Na-22	3.17 1E+01	3.08 1E+01	2.99 1E+01	2.93 1E+01	2.84 1E+01	2.66 1E+01	2.47 1E+01		
511.9	0.207	Rh-106	3.63 1E+01	3.49 1E+01	3.41 1E+01	3.34 1E+01	3.25 1E+01	3.04 1E+01	2.82 1E+01		
526.5	0.450	Sb-128	5.37	5.17	5.06	4.96	4.82	4.50	4.18		
529.9	0.863	I-133	5.06 1E+01	4.90 1E+01	4.78 1E+01	4.66 1E+01	4.53 1E+01	4.25 1E+01	3.96 1E+01		
531.0	0.131	Nd-147	2.79 1E+01	2.82 1E+01	2.81 1E+01	2.78 1E+01	2.77 1E+01	2.67 1E+01	2.56 1E+01		
536.1	0.990	I-130	1.69 1E+01	1.63 1E+01	1.60 1E+01	1.57 1E+01	1.52 1E+01	1.42 1E+01	1.32 1E+01		
537.3	0.244	Ba-140	4.43 1E+01	4.39 1E+01	4.30 1E+01	4.23 1E+01	4.15 1E+01	3.92 1E+01	3.67 1E+01		
544.7	0.179	Sb-129	4.85	4.70	4.59	4.49	4.36	4.10	3.80		
550.3	0.220	Pm-148	1.55 1E+01	1.50 1E+01	1.46 1E+01	1.43 1E+01	1.39 1E+01	1.30 1E+01	1.21 1E+01		
550.3	0.944	Pm-148m	1.72 1E+01	1.68 1E+01	1.64 1E+01	1.60 1E+01	1.56 1E+01	1.45 1E+01	1.36 1E+01		
551.5	0.059	W-187	4.63	4.50	4.41	4.31	4.21	3.96	3.70		
555.6	0.949	Y-91m	6.36 1E+01	6.18 1E+01	6.00 1E+01	5.88 1E+01	5.76 1E+01	5.38 1E+01	4.99 1E+01		
566.0	0.183	Te-134	7.30	7.13	6.98	6.85	6.69	6.31	5.88		
569.3	0.150	Cs-134	3.58	3.48	3.39	3.32	3.23	3.03	2.83		
600.6	0.178	Sb-125	1.36 1E+01	1.35 1E+01	1.33 1E+01	1.31 1E+01	1.29 1E+01	1.23 1E+01	1.15 1E+01		
602.7	0.979	Sb-124	2.17 1E+01	2.10 1E+01	2.06 1E+01	2.02 1E+01	1.96 1E+01	1.85 1E+01	1.72 1E+01		
604.6	0.975	Cs-134	2.34 1E+01	2.28 1E+01	2.22 1E+01	2.17 1E+01	2.12 1E+01	1.99 1E+01	1.86 1E+01		
606.6	0.050	Sb-125	3.82	3.82	3.76	3.71	3.65	3.47	3.26		
610.3	0.056	Ru-103	3.96	3.84	3.75	3.68	3.58	3.38	3.15		
618.4	0.073	W-187	5.76	5.63	5.51	5.39	5.26	4.98	4.66		
621.8	0.098	Rh-106	1.74 1E+01	1.68 1E+01	1.65 1E+01	1.62 1E+01	1.58 1E+01	1.49 1E+01	1.39 1E+01		
628.7	0.310	Sb-128	3.75	3.63	3.55	3.49	3.40	3.18	2.98		
630.0	0.886	Pm-148m	1.63 1E+01	1.60 1E+01	1.55 1E+01	1.53 1E+01	1.48 1E+01	1.40 1E+01	1.31 1E+01		
635.9	0.113	Sb-125	8.65	8.68	8.53	8.40	8.25	7.87	7.37		
636.2	0.360	Sb-128	4.36	4.22	4.13	4.06	3.95	3.70	3.47		
637.0	0.073	I-131	6.48	6.28	6.10	6.00	5.81	5.53	5.13		
641.3	0.474	La-142	9.32	9.08	8.87	8.69	8.45	7.95	7.40		
647.5	0.194	Te-133m	4.11	4.01	3.92	3.84	3.74	3.53	3.31		
657.7	0.947	Ag-110m	1.37 1E+01	1.33 1E+01	1.30 1E+01	1.28 1E+01	1.25 1E+01	1.18 1E+01	1.10 1E+01		
657.9	0.983	Nb-97	5.46 1E+01	5.35 1E+01	5.21 1E+01	5.12 1E+01	5.02 1E+01	4.71 1E+01	4.40 1E+01		
661.6	0.899	Ba-137m	5.53 1E+01	5.42 1E+01	5.29 1E+01	5.19 1E+01	5.08 1E+01	4.79 1E+01	4.49 1E+01		
664.5	0.053	Ce-143	5.97	5.98	5.94	5.91	5.79	5.59	5.36		
666.3	0.997	Sb-126	1.34 1E+01	1.30 1E+01	1.27 1E+01	1.25 1E+01	1.22 1E+01	1.15 1E+01	1.07 1E+01		
667.7	0.987	I-132	1.68 1E+01	1.63 1E+01	1.60 1E+01	1.57 1E+01	1.53 1E+01	1.45 1E+01	1.35 1E+01		
668.5	0.961	I-130	1.67 1E+01	1.62 1E+01	1.59 1E+01	1.55 1E+01	1.52 1E+01	1.44 1E+01	1.34 1E+01		
676.4	0.157	Ru-105	7.65	7.48	7.34	7.20	7.01	6.65	6.20		
685.7	0.353	Sb-127	1.86 1E+01	1.82 1E+01	1.78 1E+01	1.74 1E+01	1.71 1E+01	1.61 1E+01	1.51 1E+01		
685.8	0.316	W-187	2.53 1E+01	2.47 1E+01	2.42 1E+01	2.37 1E+01	2.32 1E+01	2.20 1E+01	2.07 1E+01		
695.0	0.997	Sb-126	1.34 1E+01	1.30 1E+01	1.27 1E+01	1.26 1E+01	1.22 1E+01	1.16 1E+01	1.08 1E+01		
697.0	0.289	Sb-126	3.90	3.79	3.69	3.64	3.55	3.35	3.13		

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (g・cm ⁻²)							
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
720.5	0.538	Sb-126	7.25	7.09	6.90	6.81	6.64	6.28	5.87	
722.0	0.051	Ce-143	5.86	5.89	5.85	5.82	5.71	5.53	5.32	
723.3	0.197	Eu-154	6.95	6.81	6.67	6.55	6.38	6.07	5.69	
724.2	0.444	Zr-95	2.32 1E+01	2.27 1E+01	2.22 1E+01	2.17 1E+01	2.12 1E+01	2.00 1E+01	1.88 1E+01	
724.3	0.473	Ru-105	2.32 1E+01	2.28 1E+01	2.23 1E+01	2.19 1E+01	2.14 1E+01	2.03 1E+01	1.90 1E+01	
725.7	0.327	Pm-148m	6.10	5.97	5.83	5.73	5.59	5.29	4.96	
727.2	0.068	Bi-212	2.62 1E+01	2.57 1E+01	2.52 1E+01	2.46 1E+01	2.41 1E+01	2.28 1E+01	2.13 1E+01	
739.5	0.122	Mo-99	3.03 1E+01	2.98 1E+01	2.93 1E+01	2.88 1E+01	2.81 1E+01	2.67 1E+01	2.51 1E+01	
739.5	0.823	I-130	1.45 1E+01	1.40 1E+01	1.37 1E+01	1.36 1E+01	1.32 1E+01	1.25 1E+01	1.17 1E+01	
742.6	0.151	Te-134	6.17	6.07	5.94	5.86	5.73	5.45	5.11	
743.3	1.000	Sb-128	1.22 1E+01	1.19 1E+01	1.17 1E+01	1.15 1E+01	1.12 1E+01	1.05 1E+01	9.92	
748.3	0.008	Pr-145	1.56 1E+01	1.53 1E+01	1.50 1E+01	1.48 1E+01	1.44 1E+01	1.37 1E+01	1.30 1E+01	
754.0	1.000	Sb-128	1.23 1E+01	1.20 1E+01	1.17 1E+01	1.15 1E+01	1.12 1E+01	1.05 1E+01	9.96	
756.7	0.549	Zr-95	2.88 1E+01	2.81 1E+01	2.75 1E+01	2.70 1E+01	2.63 1E+01	2.49 1E+01	2.33 1E+01	
763.9	0.224	Ag-110m	3.27	3.20	3.13	3.08	2.99	2.84	2.67	
765.8	1.000	Nb-95	5.06 1E+01	4.95 1E+01	4.84 1E+01	4.74 1E+01	4.64 1E+01	4.39 1E+01	4.12 1E+01	
767.2	0.290	Te-134	1.19 1E+01	1.17 1E+01	1.15 1E+01	1.13 1E+01	1.10 1E+01	1.05 1E+01	9.93	
772.6	0.762	I-132	1.31 1E+01	1.28 1E+01	1.25 1E+01	1.24 1E+01	1.20 1E+01	1.14 1E+01	1.07 1E+01	
773.7	0.382	Te-131m	1.03 1E+01	1.01 1E+01	9.91	9.74	9.49	9.02	8.50	
778.9	0.130	Eu-152	4.33	4.27	4.19	4.12	4.03	3.84	3.63	
783.7	0.145	Sb-127	7.77	7.60	7.42	7.32	7.13	6.77	6.38	
793.4	1.000	Sb-130	1.19 1E+01	1.17 1E+01	1.14 1E+01	1.12 1E+01	1.08 1E+01	1.04 1E+01	9.74	
793.8	0.139	Te-131m	3.75	3.69	3.60	3.56	3.45	3.29	3.10	
795.8	0.851	Cs-134	2.09 1E+01	2.05 1E+01	1.99 1E+01	1.96 1E+01	1.91 1E+01	1.82 1E+01	1.71 1E+01	
810.8	0.994	Co-58	3.97 1E+01	3.89 1E+01	3.80 1E+01	3.74 1E+01	3.63 1E+01	3.45 1E+01	3.25 1E+01	
811.8	0.103	Eu-156	3.70	3.61	3.53	3.47	3.37	3.23	3.02	
812.8	0.430	Sb-129	1.21 1E+01	1.18 1E+01	1.15 1E+01	1.13 1E+01	1.10 1E+01	1.05 1E+01	9.85	
815.8	0.236	La-140	4.46	4.36	4.26	4.19	4.07	3.87	3.62	
818.5	0.997	Cs-136	1.87 1E+01	1.84 1E+01	1.79 1E+01	1.76 1E+01	1.71 1E+01	1.63 1E+01	1.54 1E+01	
834.8	1.000	Mn-54	4.76 1E+01	4.66 1E+01	4.57 1E+01	4.48 1E+01	4.38 1E+01	4.17 1E+01	3.91 1E+01	
839.4	1.000	Sb-130	1.20 1E+01	1.18 1E+01	1.15 1E+01	1.13 1E+01	1.10 1E+01	1.05 1E+01	9.86	
841.6	0.146	Eu-152m	1.85 1E+01	1.82 1E+01	1.80 1E+01	1.77 1E+01	1.74 1E+01	1.67 1E+01	1.58 1E+01	
846.8	0.989	Mn-56	2.58 1E+01	2.52 1E+01	2.47 1E+01	2.43 1E+01	2.35 1E+01	2.25 1E+01	2.11 1E+01	
846.8	0.999	Co-56	1.26 1E+01	1.23 1E+01	1.21 1E+01	1.18 1E+01	1.15 1E+01	1.09 1E+01	1.03 1E+01	
847.0	0.954	I-134	1.50 1E+01	1.46 1E+01	1.43 1E+01	1.41 1E+01	1.37 1E+01	1.30 1E+01	1.23 1E+01	
852.2	0.206	Te-131m	5.65	5.54	5.43	5.34	5.20	4.97	4.68	
856.7	0.176	Sb-126	2.43	2.38	2.31	2.29	2.23	2.12	1.99	
864.0	0.156	Te-133m	3.41	3.34	3.27	3.22	3.13	2.99	2.82	
873.2	0.115	Eu-154	4.15	4.07	3.98	3.92	3.82	3.67	3.46	
884.1	0.649	I-134	1.02 1E+01	1.00 1E+01	9.82	9.63	9.40	8.92	8.43	
884.7	0.729	Ag-110m	1.08 1E+01	1.06 1E+01	1.04 1E+01	1.03 1E+01	1.00 1E+01	9.50	8.96	
889.3	1.000	Sc-46	2.08 1E+01	2.04 1E+01	1.99 1E+01	1.96 1E+01	1.90 1E+01	1.81 1E+01	1.71 1E+01	
911.3	0.290	Ac-228	1.35 1E+01	1.33 1E+01	1.31 1E+01	1.29 1E+01	1.26 1E+01	1.20 1E+01	1.13 1E+01	
912.7	0.550	Te-133m	1.21 1E+01	1.19 1E+01	1.16 1E+01	1.14 1E+01	1.11 1E+01	1.06 1E+01	1.01 1E+01	
914.6	0.200	Sb-129	5.71	5.60	5.46	5.39	5.24	5.00	4.72	
914.8	0.109	Te-133m	2.40	2.35	2.30	2.27	2.21	2.11	1.99	
914.8	0.115	Pm-148	8.47	8.30	8.11	8.01	7.80	7.39	6.98	
915.3	0.171	Pm-148m	3.27	3.22	3.14	3.10	3.03	2.88	2.72	
934.5	0.139	Y-92	2.31 1E+01	2.27 1E+01	2.21 1E+01	2.18 1E+01	2.12 1E+01	2.03 1E+01	1.91 1E+01	
934.9	0.190	Sb-130	2.31	2.27	2.21	2.18	2.12	2.04	1.92	
937.5	0.343	Ag-110m	5.15	5.05	4.93	4.89	4.74	4.53	4.28	
954.5	0.181	I-132	3.19	3.13	3.06	3.03	2.95	2.82	2.67	
963.3	0.120	Eu-152m	1.55 1E+01	1.53 1E+01	1.51 1E+01	1.50 1E+01	1.46 1E+01	1.41 1E+01	1.35 1E+01	
964.1	0.145	Eu-152	4.98	4.92	4.83	4.77	4.66	4.47	4.26	
964.8	0.055	Ac-228	2.57	2.53	2.48	2.45	2.39	2.28	2.16	
966.4	0.077	Sb-129	2.21	2.16	2.11	2.08	2.03	1.94	1.84	
969.2	0.175	Ac-228	8.20	8.11	7.95	7.85	7.65	7.31	6.92	
984.5	0.278	Np-238	1.77 1E+01	1.77 1E+01	1.74 1E+01	1.72 1E+01	1.67 1E+01	1.60 1E+01	1.52 1E+01	
996.3	0.103	Eu-154	3.77	3.73	3.64	3.60	3.50	3.38	3.21	
1004.8	0.174	Eu-154	6.38	6.29	6.16	6.10	5.94	5.70	5.41	
1009.8	0.298	Cs-138	5.78	5.67	5.53	5.47	5.33	5.09	4.81	
1013.8	0.202	Pm-148m	3.92	3.86	3.76	3.73	3.65	3.48	3.29	
1025.9	0.096	Np-238	6.16	6.14	6.01	5.96	5.77	5.53	5.29	
1028.5	0.203	Np-238	1.30 1E+01	1.30 1E+01	1.27 1E+01	1.26 1E+01	1.22 1E+01	1.18 1E+01	1.12 1E+01	

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Sv/h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)							
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	
1030.1	0.126	Sb-129	3.65	3.57	3.49	3.44	3.36	3.22	3.04	
1038.8	0.080	I-135	2.26	2.22	2.17	2.14	2.08	1.99	1.89	
1048.1	0.798	Cs-136	1.54 1E+01	1.52 1E+01	1.49 1E+01	1.47 1E+01	1.43 1E+01	1.37 1E+01	1.30 1E+01	
1072.6	0.150	I-134	2.42	2.36	2.33	2.30	2.24	2.14	2.03	
1076.6	0.088	Rb-86	4.09 1E+01	4.01 1E+01	3.92 1E+01	3.86 1E+01	3.74 1E+01	3.59 1E+01	3.42 1E+01	
1085.9	0.099	Eu-152	3.45	3.41	3.35	3.31	3.24	3.14	2.99	
1099.2	0.565	Fe-59	2.11 1E+01	2.06 1E+01	2.02 1E+01	2.00 1E+01	1.94 1E+01	1.86 1E+01	1.77 1E+01	
1112.1	0.136	Eu-152	4.74	4.67	4.60	4.55	4.46	4.30	4.11	
1115.5	0.148	Ni-65	1.21 1E+01	1.18 1E+01	1.15 1E+01	1.15 1E+01	1.12 1E+01	1.07 1E+01	1.01 1E+01	
1115.5	0.507	Zn-65	3.82 1E+01	3.75 1E+01	3.66 1E+01	3.62 1E+01	3.51 1E+01	3.37 1E+01	3.22 1E+01	
1120.5	1.000	Sc-46	2.13 1E+01	2.09 1E+01	2.05 1E+01	2.02 1E+01	1.96 1E+01	1.89 1E+01	1.80 1E+01	
1121.3	0.349	Ta-182	1.15 1E+01	1.13 1E+01	1.11 1E+01	1.10 1E+01	1.07 1E+01	1.03 1E+01	9.86	
1125.5	0.114	Te-131m	3.22	3.17	3.12	3.08	3.01	2.89	2.74	
1131.5	0.228	I-135	6.49	6.35	6.22	6.15	6.00	5.74	5.46	
1153.5	0.071	Eu-156	2.65	2.60	2.56	2.53	2.45	2.37	2.25	
1157.5	0.113	I-130	2.09	2.04	2.00	1.99	1.94	1.86	1.77	
1173.2	0.999	Co-60	1.80 1E+01	1.77 1E+01	1.74 1E+01	1.71 1E+01	1.67 1E+01	1.60 1E+01	1.52 1E+01	
1189.0	0.164	Ta-182	5.46	5.35	5.25	5.21	5.08	4.89	4.69	
1204.9	0.003	Y-91	3.73 1E+01	3.65 1E+01	3.58 1E+01	3.55 1E+01	3.45 1E+01	3.31 1E+01	3.16 1E+01	
1206.6	0.098	Te-131m	2.78	2.74	2.69	2.66	2.59	2.51	2.39	
1221.4	0.273	Ta-182	9.10	8.95	8.79	8.71	8.49	8.22	7.85	
1230.7	0.089	Eu-156	3.32	3.27	3.20	3.17	3.10	2.99	2.84	
1231.0	0.116	Ta-182	3.86	3.78	3.72	3.69	3.59	3.47	3.32	
1235.4	0.200	Cs-136	3.93	3.89	3.80	3.76	3.66	3.53	3.36	
1238.3	0.670	Co-56	8.80	8.61	8.51	8.37	8.16	7.83	7.47	
1242.4	0.067	Eu-156	2.52	2.47	2.43	2.40	2.34	2.26	2.15	
1260.4	0.289	I-135	8.34	8.16	8.02	7.94	7.74	7.45	7.07	
1274.4	0.355	Eu-154	1.33 1E+01	1.31 1E+01	1.29 1E+01	1.28 1E+01	1.25 1E+01	1.21 1E+01	1.16 1E+01	
1274.5	0.999	Na-22	1.91 1E+01	1.89 1E+01	1.85 1E+01	1.83 1E+01	1.79 1E+01	1.72 1E+01	1.65 1E+01	
1291.6	0.432	Fe-59	1.63 1E+01	1.61 1E+01	1.58 1E+01	1.56 1E+01	1.52 1E+01	1.46 1E+01	1.39 1E+01	
1332.5	1.000	Co-60	1.83 1E+01	1.80 1E+01	1.76 1E+01	1.74 1E+01	1.70 1E+01	1.64 1E+01	1.57 1E+01	
1354.5	0.026	La-141	4.63 1E+01	4.57 1E+01	4.49 1E+01	4.46 1E+01	4.34 1E+01	4.17 1E+01	3.97 1E+01	
1368.6	1.000	Na-24	1.29 1E+01	1.26 1E+01	1.25 1E+01	1.24 1E+01	1.21 1E+01	1.16 1E+01	1.10 1E+01	
1383.9	0.900	Sr-92	3.14 1E+01	3.08 1E+01	3.02 1E+01	3.01 1E+01	2.95 1E+01	2.82 1E+01	2.69 1E+01	
1384.3	0.243	Ag-110m	3.82	3.74	3.68	3.67	3.58	3.45	3.29	
1408.0	0.209	Eu-152	7.46	7.38	7.29	7.25	7.11	6.91	6.64	
1435.9	0.763	Cs-138	1.54 1E+01	1.51 1E+01	1.48 1E+01	1.47 1E+01	1.43 1E+01	1.39 1E+01	1.32 1E+01	
1457.6	0.087	I-135	2.57	2.51	2.48	2.45	2.40	2.31	2.21	
1460.8	0.107	K-40	3.30 1E+01	3.22 1E+01	3.18 1E+01	3.16 1E+01	3.09 1E+01	2.98 1E+01	2.82 1E+01	
1465.1	0.222	Pm-148	1.73 1E+01	1.70 1E+01	1.67 1E+01	1.66 1E+01	1.63 1E+01	1.57 1E+01	1.50 1E+01	
1481.8	0.235	Ni-65	1.97 1E+01	1.93 1E+01	1.91 1E+01	1.89 1E+01	1.85 1E+01	1.79 1E+01	1.70 1E+01	
1505.0	0.131	Ag-110m	2.08	2.03	2.01	2.00	1.95	1.89	1.81	
1524.6	0.189	K-42	3.29 1E+01	3.24 1E+01	3.19 1E+01	3.19 1E+01	3.12 1E+01	3.00 1E+01	2.86 1E+01	
1596.2	0.954	La-140	1.95 1E+01	1.91 1E+01	1.87 1E+01	1.87 1E+01	1.83 1E+01	1.77 1E+01	1.69 1E+01	
1678.0	0.096	I-135	2.87	2.81	2.77	2.76	2.69	2.61	2.51	
1691.0	0.488	Sb-124	1.21 1E+01	1.19 1E+01	1.17 1E+01	1.17 1E+01	1.14 1E+01	1.11 1E+01	1.06 1E+01	
1736.5	0.060	Sb-129	1.82	1.80	1.78	1.76	1.73	1.68	1.61	
1771.4	0.155	Co-56	2.13	2.08	2.06	2.04	2.01	1.94	1.86	
1791.2	0.078	I-135	2.33	2.29	2.26	2.24	2.20	2.13	2.05	
1810.7	0.272	Mn-56	7.73	7.59	7.52	7.43	7.31	7.12	6.81	
1901.3	0.072	La-142	1.59	1.56	1.55	1.54	1.51	1.46	1.40	
2091.0	0.056	Sb-124	1.42	1.40	1.38	1.38	1.36	1.32	1.27	
2113.0	0.143	Mn-56	4.14	4.09	4.05	4.01	3.95	3.86	3.71	
2218.0	0.152	Cs-138	3.21	3.16	3.13	3.11	3.06	2.98	2.86	
2397.8	0.133	La-142	3.01	2.98	2.95	2.94	2.89	2.82	2.73	
2542.7	0.100	La-142	2.28	2.26	2.24	2.22	2.19	2.14	2.07	
2598.6	0.167	Co-56	2.38	2.36	2.35	2.32	2.29	2.23	2.18	
2639.6	0.076	Cs-138	1.64	1.63	1.61	1.60	1.58	1.54	1.49	
2754.0	0.999	Na-24	1.39 1E+01	1.38 1E+01	1.37 1E+01	1.36 1E+01	1.34 1E+01	1.31 1E+01	1.26 1E+01	
3253.5	0.074	Co-56	1.08	1.07	1.07	1.05	1.05	1.02	1.00	

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (g・cm ⁻²)									
(keV)	(s ⁻¹ Bq ⁻¹)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100			
11.2	0.255	Pb-210	3.19 1E+01	2.82 1E+01	2.52 1E+01	2.35 1E+01	2.28 1E+01	2.26 1E+01	2.23 1E+01			
12.7	0.081	Th-232	9.38 1E+01	8.15 1E+01	7.01 1E+01	6.32 1E+01	6.11 1E+01	5.86 1E+01	5.67 1E+01			
12.7	0.089	Th-228	1.37 1E+01	1.06 1E+01	8.07	6.63	6.18	5.78	5.48			
13.4	0.079	U-236	1.34 1E+02	1.27 1E+02	1.21 1E+02	1.14 1E+02	1.13 1E+02	1.11 1E+02	1.09 1E+02			
13.4	0.084	U-238	1.74 1E+02	1.64 1E+02	1.55 1E+02	1.44 1E+02	1.42 1E+02	1.39 1E+02	1.34 1E+02			
13.4	0.094	U-234	1.21 1E+02	1.11 1E+02	1.01 1E+02	9.35 1E+01	9.13 1E+01	8.88 1E+01	8.63 1E+01			
13.4	0.102	U-232	9.24 1E+01	8.17 1E+01	7.10 1E+01	6.32 1E+01	6.10 1E+01	5.87 1E+01	5.64 1E+01			
13.7	0.094	Th-234	5.02	3.99	3.19	2.73	2.57	2.44	2.34			
13.7	0.562	Np-237	1.08 1E+01	8.61	6.78	5.79	5.40	5.10	4.90			
13.7	0.776	Th-231	2.56 1E+01	2.09 1E+01	1.69 1E+01	1.47 1E+01	1.38 1E+01	1.31 1E+01	1.26 1E+01			
14.1	0.040	Pu-239	1.06 1E+02	9.56 1E+01	8.41 1E+01	7.50 1E+01	7.27 1E+01	6.94 1E+01	6.62 1E+01			
14.1	0.082	Pu-242	1.31 1E+02	1.19 1E+02	1.04 1E+02	9.06 1E+01	8.59 1E+01	8.08 1E+01	7.58 1E+01			
14.1	0.089	Pu-240	1.55 1E+02	1.52 1E+02	1.49 1E+02	1.45 1E+02	1.47 1E+02	1.46 1E+02	1.43 1E+02			
14.1	0.102	Pu-238	1.69 1E+02	1.66 1E+02	1.64 1E+02	1.60 1E+02	1.61 1E+02	1.61 1E+02	1.57 1E+02			
14.1	0.103	Pu-236	1.50 1E+02	1.45 1E+02	1.40 1E+02	1.36 1E+02	1.36 1E+02	1.35 1E+02	1.31 1E+02			
14.4	0.365	Am-241	9.58	8.17	6.98	6.29	6.11	5.90	5.75			
14.4	0.575	U-237	2.35	1.82	1.36	1.12	1.03	9.62 1E-01	9.08 1E-01			
14.8	0.081	Cm-244	1.55 1E+02	1.50 1E+02	1.43 1E+02	1.37 1E+02	1.36 1E+02	1.34 1E+02	1.30 1E+02			
14.8	0.085	Cm-242	1.46 1E+02	1.44 1E+02	1.41 1E+02	1.38 1E+02	1.40 1E+02	1.39 1E+02	1.37 1E+02			
14.8	0.098	Am-242	4.07	3.17	2.45	2.06	1.91	1.79	1.72			
14.8	0.461	Cm-243	2.08	1.57	1.15	9.23 1E-01	8.47 1E-01	7.80 1E-01	7.30 1E-01			
14.8	0.471	Cm-245	2.76	2.12	1.60	1.33	1.22	1.14	1.09			
15.2	0.273	Am-242m	1.50 1E+02	1.42 1E+02	1.32 1E+02	1.26 1E+02	1.24 1E+02	1.22 1E+02	1.19 1E+02			
15.5	0.161	Am-242	8.01	6.27	4.86	4.07	3.78	3.57	3.42			
16.5	0.183	Mo-93	8.39 1E+01	8.37 1E+01	8.48 1E+01	8.34 1E+01	8.57 1E+01	8.59 1E+01	8.40 1E+01			
16.6	0.060	Nb-93m	1.51 1E+02	1.51 1E+02	1.54 1E+02	1.50 1E+02	1.54 1E+02	1.55 1E+02	1.52 1E+02			
16.6	0.350	Mo-93	1.63 1E+02	1.63 1E+02	1.65 1E+02	1.63 1E+02	1.67 1E+02	1.67 1E+02	1.63 1E+02			
18.6	0.090	Mo-93	5.83 1E+01	5.83 1E+01	5.96 1E+01	5.84 1E+01	6.02 1E+01	6.01 1E+01	5.89 1E+01			
20.1	0.184	Rh-103m	5.94 1E+02	5.92 1E+02	5.86 1E+02	5.90 1E+02	5.91 1E+02	5.98 1E+02	5.91 1E+02			
20.2	0.349	Rh-103m	1.15 1E+03	1.16 1E+03	1.14 1E+03	1.15 1E+03	1.15 1E+03	1.17 1E+03	1.16 1E+03			
22.7	0.094	Rh-103m	4.60 1E+02	4.67 1E+02	4.69 1E+02	4.79 1E+02	4.80 1E+02	4.86 1E+02	4.82 1E+02			
25.3	0.410	Sn-117m	8.05	6.35	4.82	3.99	3.67	3.41	3.23			
25.6	0.146	Th-231	3.33 1E+01	2.84 1E+01	2.37 1E+01	2.10 1E+01	2.00 1E+01	1.91 1E+01	1.84 1E+01			
26.4	0.156	Sn-126	1.08 1E+01	9.05	7.46	6.55	6.24	5.97	5.75			
27.2	0.103	Te-127m	6.77 1E+01	6.70 1E+01	6.59 1E+01	6.52 1E+01	6.46 1E+01	6.39 1E+01	6.47 1E+01			
27.2	0.127	Te-129m	1.50 1E+01	1.19 1E+01	8.74	6.84	6.19	5.55	5.04			
27.2	0.327	Te-125m	6.84 1E+01	6.81 1E+01	6.79 1E+01	6.77 1E+01	6.72 1E+01	6.69 1E+01	6.80 1E+01			
27.5	0.193	Te-127m	1.29 1E+02	1.28 1E+02	1.26 1E+02	1.25 1E+02	1.23 1E+02	1.22 1E+02	1.23 1E+02			
27.5	0.237	Te-129m	2.85 1E+01	2.26 1E+01	1.67 1E+01	1.30 1E+01	1.18 1E+01	1.06 1E+01	9.61			
27.5	0.611	Te-125m	1.30 1E+02	1.30 1E+02	1.30 1E+02	1.29 1E+02	1.28 1E+02	1.28 1E+02	1.30 1E+02			
27.8	0.156	Te-129	1.03 1E+01	7.96	5.84	4.56	4.14	3.74	3.42			
29.4	0.152	Np-237	2.72 1E+01	2.28 1E+01	1.88 1E+01	1.63 1E+01	1.54 1E+01	1.46 1E+01	1.41 1E+01			
29.5	0.185	I-129	5.96 1E+01	5.93 1E+01	5.81 1E+01	5.81 1E+01	5.76 1E+01	5.76 1E+01	5.83 1E+01			
29.8	0.343	I-129	1.13 1E+02	1.12 1E+02	1.11 1E+02	1.11 1E+02	1.09 1E+02	1.09 1E+02	1.11 1E+02			
30.6	0.092	Cs-134m	1.93 1E+01	1.62 1E+01	1.33 1E+01	1.15 1E+01	1.08 1E+01	1.02 1E+01	9.74			
31.0	0.067	Te-127m	5.75 1E+01	5.79 1E+01	5.77 1E+01	5.74 1E+01	5.73 1E+01	5.66 1E+01	5.71 1E+01			
31.0	0.068	Te-129m	1.06 1E+01	8.47	6.32	5.00	4.53	4.07	3.70			
31.0	0.170	Cs-134m	3.67 1E+01	3.08 1E+01	2.53 1E+01	2.19 1E+01	2.06 1E+01	1.94 1E+01	1.86 1E+01			
31.0	0.212	Te-125m	5.83 1E+01	5.91 1E+01	5.93 1E+01	5.97 1E+01	5.93 1E+01	5.90 1E+01	6.06 1E+01			
31.8	0.021	Ba-137m	1.88 1E-01	1.48 1E-01	1.08 1E-01	8.41 1E-02	7.62 1E-02	6.82 1E-02	6.20 1E-02			
32.2	0.038	Ba-137m	3.55 1E-01	2.79 1E-01	2.04 1E-01	1.60 1E-01	1.45 1E-01	1.30 1E-01	1.17 1E-01			
33.6	0.122	I-129	5.13 1E+01	5.24 1E+01	5.28 1E+01	5.37 1E+01	5.35 1E+01	5.36 1E+01	5.46 1E+01			
35.0	0.050	Cs-134m	1.37 1E+01	1.18 1E+01	9.94	8.72	8.22	7.83	7.53			
35.5	0.067	Te-125m	2.39 1E+01	2.47 1E+01	2.55 1E+01	2.61 1E+01	2.62 1E+01	2.62 1E+01	2.68 1E+01			
38.7	0.223	Nd-147	1.24 1E+01	1.03 1E+01	8.15	6.73	6.23	5.74	5.32			
39.6	0.075	I-129	4.25 1E+01	4.44 1E+01	4.58 1E+01	4.72 1E+01	4.72 1E+01	4.75 1E+01	4.86 1E+01			
43.0	0.118	Eu-155	1.78 1E+01	1.56 1E+01	1.36 1E+01	1.23 1E+01	1.17 1E+01	1.13 1E+01	1.10 1E+01			
59.5	0.345	U-237	3.26 1E+01	2.86 1E+01	2.45 1E+01	2.19 1E+01	2.07 1E+01	1.97 1E+01	1.91 1E+01			
59.5	0.359	Am-241	2.17 1E+02	2.11 1E+02	2.06 1E+02	2.01 1E+02	2.00 1E+02	1.99 1E+02	1.97 1E+02			
64.3	0.096	Sn-126	2.59 1E+01	2.41 1E+01	2.20 1E+01	2.08 1E+01	2.01 1E+01	1.97 1E+01	1.93 1E+01			
74.7	0.674	Am-243	1.93 1E+02	1.80 1E+02	1.71 1E+02	1.63 1E+02	1.61 1E+02	1.58 1E+02	1.56 1E+02			
74.8	0.104	Pb-212	1.04 1E+01	9.10	7.77	6.80	6.41	6.06	5.79			
77.1	0.176	Pb-212	1.76 1E+01	1.55 1E+01	1.33 1E+01	1.17 1E+01	1.10 1E+01	1.04 1E+01	9.92			
84.2	0.067	Th-231	7.42 1E+01	7.16 1E+01	6.83 1E+01	6.63 1E+01	6.47 1E+01	6.38 1E+01	6.28 1E+01			
86.5	0.123	Np-237	8.02 1E+01	7.57 1E+01	7.07 1E+01	6.70 1E+01	6.51 1E+01	6.37 1E+01	6.27 1E+01			

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Sv/h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)								
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100		
86.5	0.309	Eu-155	8.48 1E+01	7.87 1E+01	7.38 1E+01	7.01 1E+01	6.79 1E+01	6.70 1E+01	6.59 1E+01		
86.9	0.089	Sn-126	2.85 1E+01	2.71 1E+01	2.56 1E+01	2.44 1E+01	2.39 1E+01	2.36 1E+01	2.34 1E+01		
87.6	0.370	Sn-126	1.18 1E+02	1.13 1E+02	1.06 1E+02	1.02 1E+02	1.00 1E+02	9.83 1E+01	9.73 1E+01		
91.1	0.279	Nd-147	3.40 1E+01	3.05 1E+01	2.64 1E+01	2.30 1E+01	2.18 1E+01	2.06 1E+01	1.94 1E+01		
97.1	0.166	U-237	2.06 1E+01	1.89 1E+01	1.70 1E+01	1.56 1E+01	1.50 1E+01	1.46 1E+01	1.41 1E+01		
98.4	0.157	Pa-233	1.19 1E+01	1.06 1E+01	9.12	8.01	7.59	7.21	6.84		
99.6	0.147	Cm-243	1.90 1E+01	1.70 1E+01	1.50 1E+01	1.35 1E+01	1.29 1E+01	1.24 1E+01	1.19 1E+01		
99.6	0.157	Np-239	1.47 1E+01	1.32 1E+01	1.17 1E+01	1.05 1E+01	1.01 1E+01	9.68	9.31		
99.6	0.185	Cm-245	3.08 1E+01	2.81 1E+01	2.55 1E+01	2.37 1E+01	2.28 1E+01	2.22 1E+01	2.17 1E+01		
101.1	0.266	U-237	3.36 1E+01	3.10 1E+01	2.79 1E+01	2.56 1E+01	2.47 1E+01	2.40 1E+01	2.34 1E+01		
103.8	0.059	Am-242	7.08 1E+01	6.58 1E+01	6.11 1E+01	5.75 1E+01	5.58 1E+01	5.47 1E+01	5.37 1E+01		
103.8	0.236	Cm-243	3.07 1E+01	2.76 1E+01	2.44 1E+01	2.18 1E+01	2.09 1E+01	2.01 1E+01	1.94 1E+01		
103.8	0.251	Np-239	2.38 1E+01	2.14 1E+01	1.90 1E+01	1.71 1E+01	1.64 1E+01	1.57 1E+01	1.52 1E+01		
103.8	0.295	Cm-245	4.98 1E+01	4.57 1E+01	4.14 1E+01	3.84 1E+01	3.71 1E+01	3.63 1E+01	3.54 1E+01		
105.3	0.206	Eu-155	6.12 1E+01	5.77 1E+01	5.49 1E+01	5.26 1E+01	5.12 1E+01	5.07 1E+01	5.02 1E+01		
106.1	0.272	Np-239	2.60 1E+01	2.34 1E+01	2.07 1E+01	1.87 1E+01	1.79 1E+01	1.73 1E+01	1.66 1E+01		
117.3	0.066	Cm-245	1.15 1E+01	1.05 1E+01	9.61	8.96	8.66	8.47	8.32		
121.1	0.173	Se-75	7.66	6.84	5.96	5.30	5.06	4.82	4.61		
122.1	0.855	Co-57	1.21 1E+02	1.10 1E+02	1.01 1E+02	9.24 1E+01	8.94 1E+01	8.70 1E+01	8.50 1E+01		
127.5	0.141	Cs-134m	1.13 1E+02	1.09 1E+02	1.03 1E+02	9.79 1E+01	9.56 1E+01	9.36 1E+01	9.23 1E+01		
133.0	0.419	Hf-181	1.44 1E+01	1.29 1E+01	1.11 1E+01	9.70	9.25	8.72	8.25		
133.5	0.111	Ce-144	1.08 1E+02	1.00 1E+02	9.29 1E+01	8.65 1E+01	8.46 1E+01	8.23 1E+01	8.09 1E+01		
136.0	0.590	Se-75	2.70 1E+01	2.42 1E+01	2.12 1E+01	1.90 1E+01	1.81 1E+01	1.73 1E+01	1.66 1E+01		
136.5	0.106	Co-57	1.56 1E+01	1.43 1E+01	1.30 1E+01	1.21 1E+01	1.17 1E+01	1.14 1E+01	1.12 1E+01		
140.5	0.890	Tc-99m	1.24 1E+02	1.13 1E+02	1.02 1E+02	9.38 1E+01	9.09 1E+01	8.80 1E+01	8.61 1E+01		
143.8	0.110	U-235	1.19 1E+01	1.08 1E+01	9.60	8.74	8.35	8.07	7.86		
145.4	0.484	Ce-141	1.16 1E+02	1.07 1E+02	9.67 1E+01	8.93 1E+01	8.65 1E+01	8.39 1E+01	8.19 1E+01		
158.6	0.864	Sn-117m	1.05 1E+02	9.70 1E+01	8.79 1E+01	8.10 1E+01	7.79 1E+01	7.57 1E+01	7.40 1E+01		
159.0	0.840	Te-123m	1.07 1E+02	9.91 1E+01	8.98 1E+01	8.29 1E+01	8.01 1E+01	7.72 1E+01	7.57 1E+01		
162.6	0.062	Ba-140	6.77	6.08	5.25	4.58	4.36	4.10	3.86		
165.9	0.238	Ba-139	9.85 1E+01	8.96 1E+01	8.01 1E+01	7.26 1E+01	7.01 1E+01	6.74 1E+01	6.51 1E+01		
174.9	0.095	Cm-245	1.84 1E+01	1.72 1E+01	1.60 1E+01	1.52 1E+01	1.48 1E+01	1.45 1E+01	1.43 1E+01		
181.1	0.061	Mo-99	8.64	7.80	6.67	5.81	5.48	5.13	4.80		
185.7	0.572	U-235	6.59 1E+01	6.06 1E+01	5.42 1E+01	4.97 1E+01	4.82 1E+01	4.64 1E+01	4.55 1E+01		
186.0	0.033	Ra-226	8.39 1E+01	7.72 1E+01	6.90 1E+01	6.32 1E+01	6.10 1E+01	5.88 1E+01	5.73 1E+01		
202.5	0.958	Y-90m	3.01 1E+01	2.74 1E+01	2.38 1E+01	2.11 1E+01	2.03 1E+01	1.92 1E+01	1.83 1E+01		
205.3	0.050	U-235	5.90	5.44	4.91	4.50	4.37	4.21	4.11		
208.0	0.216	U-237	3.28 1E+01	3.11 1E+01	2.89 1E+01	2.73 1E+01	2.67 1E+01	2.61 1E+01	2.57 1E+01		
210.5	0.223	Te-134	5.46	4.96	4.29	3.78	3.60	3.39	3.20		
228.2	0.106	Cm-243	1.68 1E+01	1.56 1E+01	1.43 1E+01	1.32 1E+01	1.28 1E+01	1.24 1E+01	1.21 1E+01		
228.2	0.113	Np-239	1.30 1E+01	1.21 1E+01	1.11 1E+01	1.03 1E+01	1.00 1E+01	9.73	9.44		
228.2	0.882	Te-132	7.77 1E+01	7.24 1E+01	6.54 1E+01	5.97 1E+01	5.77 1E+01	5.60 1E+01	5.42 1E+01		
234.7	0.261	Nb-95m	7.88 1E+01	7.27 1E+01	6.50 1E+01	5.92 1E+01	5.70 1E+01	5.50 1E+01	5.30 1E+01		
238.6	0.434	Pb-212	6.11 1E+01	5.68 1E+01	5.17 1E+01	4.74 1E+01	4.58 1E+01	4.43 1E+01	4.29 1E+01		
241.0	0.040	Ra-224	7.59 1E+01	7.00 1E+01	6.22 1E+01	5.68 1E+01	5.47 1E+01	5.27 1E+01	5.07 1E+01		
264.7	0.591	Se-75	3.17 1E+01	2.91 1E+01	2.61 1E+01	2.39 1E+01	2.31 1E+01	2.24 1E+01	2.16 1E+01		
266.9	0.068	Y-93	1.79 1E+01	1.62 1E+01	1.39 1E+01	1.21 1E+01	1.13 1E+01	1.06 1E+01	9.85		
275.2	0.068	Pm-151	4.51	4.15	3.69	3.32	3.18	3.05	2.90		
277.6	0.140	Cm-243	2.32 1E+01	2.17 1E+01	2.00 1E+01	1.85 1E+01	1.80 1E+01	1.77 1E+01	1.72 1E+01		
277.6	0.144	Np-239	1.74 1E+01	1.62 1E+01	1.50 1E+01	1.41 1E+01	1.36 1E+01	1.33 1E+01	1.30 1E+01		
278.0	0.209	Te-134	5.42	4.98	4.36	3.89	3.70	3.52	3.32		
279.5	0.252	Se-75	1.37 1E+01	1.25 1E+01	1.13 1E+01	1.04 1E+01	1.00 1E+01	9.75	9.36		
285.9	0.001	Pm-149	1.77	1.62	1.44	1.30	1.24	1.19	1.13		
293.3	0.420	Ce-143	3.45 1E+01	3.19 1E+01	2.87 1E+01	2.59 1E+01	2.48 1E+01	2.38 1E+01	2.26 1E+01		
300.1	0.066	Pa-233	6.67	6.17	5.58	5.11	4.92	4.78	4.58		
306.1	0.051	Rh-105	1.42 1E+01	1.30 1E+01	1.16 1E+01	1.05 1E+01	1.01 1E+01	9.74	9.27		
312.0	0.386	Pa-233	3.90 1E+01	3.62 1E+01	3.29 1E+01	3.01 1E+01	2.90 1E+01	2.81 1E+01	2.70 1E+01		
314.1	0.610	Sb-128	4.76	4.35	3.80	3.35	3.17	3.00	2.82		
318.9	0.192	Rh-105	5.39 1E+01	4.92 1E+01	4.39 1E+01	4.00 1E+01	3.84 1E+01	3.71 1E+01	3.53 1E+01		
320.1	0.098	Cr-51	6.68 1E+01	6.13 1E+01	5.48 1E+01	4.97 1E+01	4.79 1E+01	4.62 1E+01	4.40 1E+01		
330.9	0.780	Sb-130	5.95	5.45	4.75	4.21	3.98	3.75	3.52		
340.1	0.225	Pm-151	1.58 1E+01	1.46 1E+01	1.31 1E+01	1.19 1E+01	1.14 1E+01	1.10 1E+01	1.05 1E+01		
340.5	0.422	Cs-136	5.07	4.67	4.07	3.58	3.36	3.16	2.98		
342.1	0.067	Ag-111	5.55 1E+01	5.11 1E+01	4.56 1E+01	4.16 1E+01	4.00 1E+01	3.85 1E+01	3.69 1E+01		
344.3	0.266	Eu-152	5.94	5.48	4.77	4.22	3.98	3.75	3.50		

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : $(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) / (\mu\text{Sv/h})$

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 β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)							
(keV)	($\text{s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$)	核種	3.0	5.0	10	20	30	50	100	
345.9	0.120	Hf-181	5.16	4.77	4.27	3.87	3.75	3.58	3.44	
364.5	0.812	I-131	4.84 1E+01	4.47 1E+01	3.98 1E+01	3.62 1E+01	3.46 1E+01	3.33 1E+01	3.18 1E+01	
400.7	0.116	Se-75	6.79	6.33	5.80	5.39	5.23	5.10	4.96	
402.5	0.690	Cm-247	5.12 1E+01	4.72 1E+01	4.22 1E+01	3.84 1E+01	3.71 1E+01	3.56 1E+01	3.42 1E+01	
414.8	0.833	Sb-126	7.63	7.05	6.22	5.57	5.34	5.05	4.78	
417.9	0.010	Te-127	4.79 1E+01	4.42 1E+01	3.96 1E+01	3.62 1E+01	3.48 1E+01	3.36 1E+01	3.21 1E+01	
418.0	0.341	I-130	4.05	3.74	3.30	2.96	2.84	2.69	2.55	
427.9	0.294	Sb-125	1.68 1E+01	1.57 1E+01	1.40 1E+01	1.27 1E+01	1.22 1E+01	1.16 1E+01	1.11 1E+01	
435.1	0.186	Te-134	5.33	4.97	4.43	4.03	3.88	3.69	3.53	
438.6	0.949	Zn-69m	5.47 1E+01	5.07 1E+01	4.54 1E+01	4.12 1E+01	3.97 1E+01	3.81 1E+01	3.67 1E+01	
459.6	0.074	Te-129	3.08 1E+01	2.88 1E+01	2.59 1E+01	2.37 1E+01	2.29 1E+01	2.18 1E+01	2.09 1E+01	
461.0	0.099	Te-134	2.88	2.69	2.40	2.19	2.11	2.01	1.93	
462.8	0.307	Cs-138	3.94	3.63	3.15	2.79	2.61	2.44	2.28	
463.4	0.105	Sb-125	6.10	5.69	5.10	4.64	4.49	4.27	4.08	
469.4	0.175	Ru-105	6.09	5.68	5.05	4.56	4.38	4.15	3.95	
473.0	0.247	Sb-127	9.26	8.59	7.65	6.91	6.65	6.31	6.04	
477.6	0.103	Be-7	5.10 1E+01	4.76 1E+01	4.25 1E+01	3.86 1E+01	3.74 1E+01	3.57 1E+01	3.44 1E+01	
479.5	0.253	W-187	1.47 1E+01	1.38 1E+01	1.23 1E+01	1.12 1E+01	1.08 1E+01	1.03 1E+01	9.85	
479.5	0.900	Y-90m	3.44 1E+01	3.22 1E+01	2.90 1E+01	2.67 1E+01	2.59 1E+01	2.49 1E+01	2.41 1E+01	
482.0	0.830	Hf-181	3.87 1E+01	3.62 1E+01	3.29 1E+01	3.02 1E+01	2.95 1E+01	2.83 1E+01	2.74 1E+01	
487.0	0.459	La-140	5.99	5.54	4.84	4.28	4.03	3.75	3.53	
497.1	0.889	Ru-103	4.54 1E+01	4.22 1E+01	3.79 1E+01	3.44 1E+01	3.34 1E+01	3.18 1E+01	3.05 1E+01	
507.7	0.053	Zr-97	1.66	1.54	1.38	1.24	1.18	1.11	1.06	
511.0	0.301	Co-58	8.47	7.91	7.01	6.33	6.04	5.70	5.43	
511.0	1.810	Na-22	2.33 1E+01	2.16 1E+01	1.91 1E+01	1.71 1E+01	1.64 1E+01	1.53 1E+01	1.46 1E+01	
511.9	0.207	Rh-106	2.67 1E+01	2.49 1E+01	2.21 1E+01	2.00 1E+01	1.93 1E+01	1.84 1E+01	1.75 1E+01	
526.5	0.450	Sb-128	3.95	3.69	3.27	2.97	2.85	2.69	2.57	
529.9	0.863	I-133	3.74 1E+01	3.49 1E+01	3.12 1E+01	2.82 1E+01	2.74 1E+01	2.59 1E+01	2.48 1E+01	
531.0	0.131	Nd-147	2.50 1E+01	2.40 1E+01	2.25 1E+01	2.10 1E+01	2.06 1E+01	2.00 1E+01	1.94 1E+01	
536.1	0.990	I-130	1.25 1E+01	1.16 1E+01	1.04 1E+01	9.43	9.06	8.62	8.20	
537.3	0.244	Ba-140	3.49 1E+01	3.28 1E+01	2.96 1E+01	2.71 1E+01	2.63 1E+01	2.52 1E+01	2.42 1E+01	
544.7	0.179	Sb-129	3.57	3.34	2.95	2.65	2.52	2.38	2.24	
550.3	0.220	Pm-148	1.14 1E+01	1.06 1E+01	9.37	8.37	7.98	7.45	7.07	
550.3	0.944	Pm-148m	1.28 1E+01	1.20 1E+01	1.07 1E+01	9.72	9.37	8.92	8.52	
551.5	0.059	W-187	3.52	3.32	2.99	2.73	2.65	2.53	2.43	
555.6	0.949	Y-91m	4.75 1E+01	4.42 1E+01	3.98 1E+01	3.62 1E+01	3.50 1E+01	3.34 1E+01	3.21 1E+01	
566.0	0.183	Te-134	5.58	5.23	4.74	4.36	4.21	4.04	3.87	
569.3	0.150	Cs-134	2.67	2.50	2.23	2.02	1.95	1.84	1.75	
600.6	0.178	Sb-125	1.10 1E+01	1.03 1E+01	9.38	8.63	8.41	8.05	7.69	
602.7	0.979	Sb-124	1.62 1E+01	1.51 1E+01	1.34 1E+01	1.20 1E+01	1.14 1E+01	1.08 1E+01	1.01 1E+01	
604.6	0.975	Cs-134	1.76 1E+01	1.65 1E+01	1.48 1E+01	1.34 1E+01	1.29 1E+01	1.22 1E+01	1.17 1E+01	
606.6	0.050	Sb-125	3.11	2.93	2.66	2.45	2.38	2.28	2.18	
610.3	0.056	Ru-103	2.98	2.78	2.53	2.31	2.26	2.17	2.08	
618.4	0.073	W-187	4.45	4.21	3.82	3.51	3.42	3.26	3.13	
621.8	0.098	Rh-106	1.32 1E+01	1.23 1E+01	1.11 1E+01	1.01 1E+01	9.82	9.37	8.92	
628.7	0.310	Sb-128	2.82	2.64	2.38	2.17	2.09	1.99	1.90	
630.0	0.886	Pm-148m	1.24 1E+01	1.16 1E+01	1.05 1E+01	9.58	9.25	8.84	8.43	
635.9	0.113	Sb-125	7.09	6.68	6.07	5.60	5.45	5.24	5.01	
636.2	0.360	Sb-128	3.30	3.08	2.77	2.53	2.43	2.33	2.21	
637.0	0.073	I-131	4.93	4.63	4.23	3.94	3.84	3.71	3.58	
641.3	0.474	La-142	6.96	6.44	5.66	5.02	4.71	4.40	4.09	
647.5	0.194	Te-133m	3.13	2.95	2.63	2.38	2.27	2.16	2.06	
657.7	0.947	Ag-110m	1.04 1E+01	9.74	8.71	7.89	7.58	7.20	6.80	
657.9	0.983	Nb-97	4.19 1E+01	3.91 1E+01	3.54 1E+01	3.23 1E+01	3.13 1E+01	2.98 1E+01	2.83 1E+01	
661.6	0.899	Ba-137m	4.26 1E+01	4.02 1E+01	3.61 1E+01	3.30 1E+01	3.20 1E+01	3.05 1E+01	2.89 1E+01	
664.5	0.053	Ce-143	5.18	4.94	4.59	4.30	4.19	4.06	3.93	
666.3	0.997	Sb-126	1.02 1E+01	9.55	8.64	7.91	7.65	7.32	6.95	
667.7	0.987	I-132	1.28 1E+01	1.20 1E+01	1.08 1E+01	9.83	9.44	9.00	8.52	
668.5	0.961	I-130	1.27 1E+01	1.19 1E+01	1.08 1E+01	9.87	9.53	9.13	8.69	
676.4	0.157	Ru-105	5.89	5.55	5.02	4.62	4.48	4.28	4.08	
685.7	0.353	Sb-127	1.44 1E+01	1.35 1E+01	1.22 1E+01	1.12 1E+01	1.09 1E+01	1.04 1E+01	9.95	
685.8	0.316	W-187	1.98 1E+01	1.88 1E+01	1.71 1E+01	1.58 1E+01	1.54 1E+01	1.48 1E+01	1.42 1E+01	
695.0	0.997	Sb-126	1.03 1E+01	8.91	8.72	8.01	7.78	7.45	7.07	
697.0	0.289	Sb-126	2.98	2.79	2.53	2.32	2.25	2.15	2.05	

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (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	5.59	5.26	4.77	4.39	4.25	4.07	3.87	
722.0	0.051	Ce-143	5.14	4.91	4.59	4.30	4.22	4.10	3.97	
723.3	0.197	Eu-154	5.43	5.15	4.62	4.20	4.05	3.84	3.65	
724.2	0.444	Zr-95	1.79 1E+01	1.69 1E+01	1.52 1E+01	1.39 1E+01	1.34 1E+01	1.28 1E+01	1.22 1E+01	
724.3	0.473	Ru-105	1.81 1E+01	1.71 1E+01	1.55 1E+01	1.43 1E+01	1.39 1E+01	1.33 1E+01	1.27 1E+01	
725.7	0.327	Pm-148m	4.72	4.45	4.04	3.70	3.60	3.45	3.31	
727.2	0.068	Bi-212	2.04 1E+01	1.91 1E+01	1.72 1E+01	1.55 1E+01	1.50 1E+01	1.42 1E+01	1.35 1E+01	
739.5	0.122	Mo-99	2.39 1E+01	2.26 1E+01	2.05 1E+01	1.90 1E+01	1.84 1E+01	1.77 1E+01	1.69 1E+01	
739.5	0.823	I-130	1.11 1E+01	1.05 1E+01	9.51	8.73	8.48	8.14	7.77	
742.6	0.151	Te-134	4.88	4.64	4.25	3.95	3.85	3.71	3.58	
743.3	1.000	Sb-128	9.46	8.90	8.08	7.41	7.15	6.87	6.56	
748.3	0.008	Pr-145	1.24 1E+01	1.17 1E+01	1.06 1E+01	9.68	9.30	8.89	8.48	
754.0	1.000	Sb-128	9.50	8.93	8.12	7.47	7.20	6.93	6.61	
756.7	0.549	Zr-95	2.23 1E+01	2.10 1E+01	1.91 1E+01	1.74 1E+01	1.68 1E+01	1.61 1E+01	1.54 1E+01	
763.9	0.224	Ag-110m	2.54	2.38	2.15	1.96	1.89	1.80	1.71	
765.8	1.000	Nb-95	3.92 1E+01	3.70 1E+01	3.34 1E+01	3.06 1E+01	2.97 1E+01	2.82 1E+01	2.70 1E+01	
767.2	0.290	Te-134	9.46	8.98	8.24	7.69	7.50	7.24	6.98	
772.6	0.762	I-132	1.02 1E+01	9.61	8.68	7.97	7.74	7.36	7.00	
773.7	0.382	Te-131m	8.11	7.65	6.91	6.32	6.11	5.82	5.56	
778.9	0.130	Eu-152	3.48	3.30	2.99	2.74	2.64	2.53	2.40	
783.7	0.145	Sb-127	6.06	5.72	5.22	4.83	4.69	4.52	4.34	
793.4	1.000	Sb-130	9.29	8.78	7.97	7.32	7.07	6.76	6.48	
793.8	0.139	Te-131m	2.95	2.79	2.53	2.32	2.24	2.13	2.04	
795.8	0.851	Cs-134	1.63 1E+01	1.54 1E+01	1.40 1E+01	1.28 1E+01	1.25 1E+01	1.20 1E+01	1.14 1E+01	
810.8	0.994	Co-58	3.10 1E+01	2.92 1E+01	2.66 1E+01	2.45 1E+01	2.37 1E+01	2.27 1E+01	2.17 1E+01	
811.8	0.103	Eu-156	2.88	2.70	2.42	2.19	2.09	1.97	1.87	
812.8	0.430	Sb-129	9.40	8.84	8.01	7.30	7.02	6.68	6.36	
815.8	0.236	La-140	3.46	3.25	2.91	2.63	2.52	2.37	2.25	
818.5	0.997	Cs-136	1.46 1E+01	1.38 1E+01	1.26 1E+01	1.15 1E+01	1.11 1E+01	1.05 1E+01	1.02 1E+01	
834.8	1.000	Mn-54	3.74 1E+01	3.53 1E+01	3.19 1E+01	2.93 1E+01	2.84 1E+01	2.71 1E+01	2.59 1E+01	
839.4	1.000	Sb-130	9.42	8.90	8.13	7.47	7.23	6.94	6.65	
841.6	0.146	Eu-152m	1.52 1E+01	1.44 1E+01	1.32 1E+01	1.22 1E+01	1.18 1E+01	1.12 1E+01	1.08 1E+01	
846.8	0.989	Mn-56	2.01 1E+01	1.89 1E+01	1.70 1E+01	1.53 1E+01	1.47 1E+01	1.38 1E+01	1.31 1E+01	
846.8	0.999	Co-56	9.78	9.17	8.24	7.41	7.10	6.67	6.36	
847.0	0.954	I-134	1.17 1E+01	1.11 1E+01	1.00 1E+01	9.17	8.85	8.46	8.08	
852.2	0.206	Te-131m	4.49	4.25	3.87	3.54	3.44	3.28	3.14	
856.7	0.176	Sb-126	1.91	1.80	1.65	1.53	1.49	1.44	1.38	
864.0	0.156	Te-133m	2.70	2.55	2.31	2.12	2.05	1.96	1.87	
873.2	0.115	Eu-154	3.32	3.15	2.87	2.63	2.55	2.42	2.32	
884.1	0.649	I-134	8.04	7.60	6.93	6.32	6.15	5.86	5.61	
884.7	0.729	Ag-110m	8.57	8.09	7.37	6.75	6.54	6.26	5.98	
889.3	1.000	Sc-46	1.64 1E+01	1.55 1E+01	1.40 1E+01	1.28 1E+01	1.23 1E+01	1.17 1E+01	1.12 1E+01	
911.3	0.290	Ac-228	1.09 1E+01	1.03 1E+01	9.39	8.66	8.37	8.02	7.69	
912.7	0.550	Te-133m	9.64	9.12	8.34	7.67	7.41	7.07	6.80	
914.6	0.200	Sb-129	4.51	4.27	3.89	3.56	3.44	3.28	3.15	
914.8	0.109	Te-133m	1.91	1.81	1.65	1.52	1.46	1.40	1.35	
914.8	0.115	Pm-148	6.70	6.29	5.72	5.22	5.05	4.80	4.57	
915.3	0.171	Pm-148m	2.61	2.48	2.28	2.11	2.07	1.99	1.92	
934.5	0.139	Y-92	1.83 1E+01	1.74 1E+01	1.58 1E+01	1.45 1E+01	1.40 1E+01	1.34 1E+01	1.28 1E+01	
934.9	0.190	Sb-130	1.84	1.75	1.60	1.48	1.44	1.38	1.33	
937.5	0.343	Ag-110m	4.10	3.88	3.53	3.26	3.16	3.03	2.90	
954.5	0.181	I-132	2.56	2.41	2.21	2.05	2.00	1.92	1.84	
963.3	0.120	Eu-152m	1.29 1E+01	1.24 1E+01	1.14 1E+01	1.06 1E+01	1.03 1E+01	9.81	9.48	
964.1	0.145	Eu-152	4.10	3.92	3.60	3.33	3.23	3.09	2.97	
964.8	0.055	Ac-228	2.08	1.97	1.80	1.67	1.61	1.55	1.49	
966.4	0.077	Sb-129	1.76	1.67	1.52	1.40	1.36	1.29	1.24	
969.2	0.175	Ac-228	6.65	6.30	5.79	5.34	5.18	4.98	4.78	
984.5	0.278	Np-238	1.46 1E+01	1.39 1E+01	1.26 1E+01	1.16 1E+01	1.12 1E+01	1.07 1E+01	1.03 1E+01	
996.3	0.103	Eu-154	3.08	2.94	2.70	2.49	2.42	2.32	2.22	
1004.8	0.174	Eu-154	5.21	4.98	4.30	4.21	4.11	3.93	3.78	
1009.8	0.298	Cs-138	4.61	4.34	3.96	3.58	3.44	3.27	3.11	
1013.8	0.202	Pm-148m	3.17	3.02	2.79	2.60	2.55	2.47	2.39	
1025.9	0.096	Np-238	5.09	4.83	4.42	4.07	3.94	3.76	3.64	
1028.5	0.203	Np-238	1.08 1E+01	1.02 1E+01	9.36	8.63	8.33	7.97	7.69	

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

付表-2-2 (つづき)

単位 : (cm⁻²・s⁻¹) / (μSv/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 β (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	2.91	2.77	2.55	2.35	2.28	2.18	2.09	
1038.8	0.080	I-135	1.81	1.71	1.56	1.42	1.38	1.31	1.25	
1048.1	0.798	Cs-136	1.25 1E+01	1.19 1E+01	1.09 1E+01	1.01 1E+01	9.82	9.46	9.15	
1072.6	0.150	I-134	1.94	1.86	1.71	1.58	1.54	1.47	1.42	
1076.6	0.088	Rb-86	3.30 1E+01	3.14 1E+01	2.86 1E+01	2.64 1E+01	2.54 1E+01	2.44 1E+01	2.34 1E+01	
1085.9	0.099	Eu-152	2.89	2.77	2.56	2.38	2.32	2.22	2.15	
1099.2	0.565	Fe-59	1.69 1E+01	1.61 1E+01	1.47 1E+01	1.36 1E+01	1.31 1E+01	1.25 1E+01	1.20 1E+01	
1112.1	0.136	Eu-152	3.96	3.81	3.52	3.29	3.20	3.08	2.97	
1115.5	0.148	Ni-65	9.69	9.17	8.41	7.74	7.46	7.09	6.81	
1115.5	0.507	Zn-65	3.09 1E+01	2.94 1E+01	2.69 1E+01	2.49 1E+01	2.41 1E+01	2.30 1E+01	2.21 1E+01	
1120.5	1.000	Sc-46	1.73 1E+01	1.65 1E+01	1.51 1E+01	1.40 1E+01	1.36 1E+01	1.30 1E+01	1.25 1E+01	
1121.3	0.349	Ta-182	9.52	9.15	8.47	7.89	7.62	7.31	7.05	
1125.5	0.114	Te-131m	2.65	2.53	2.35	2.19	2.13	2.05	1.99	
1131.5	0.228	I-135	5.24	4.97	4.57	4.17	4.04	3.84	3.68	
1153.5	0.071	Eu-156	2.16	2.05	1.87	1.74	1.66	1.59	1.52	
1157.5	0.113	I-130	1.70	1.63	1.52	1.42	1.40	1.36	1.32	
1173.2	0.999	Co-60	1.46 1E+01	1.39 1E+01	1.27 1E+01	1.18 1E+01	1.13 1E+01	1.09 1E+01	1.04 1E+01	
1189.0	0.164	Ta-182	4.54	4.36	4.05	3.79	3.66	3.52	3.42	
1204.9	0.003	Y-91	3.04 1E+01	2.89 1E+01	2.67 1E+01	2.46 1E+01	2.38 1E+01	2.27 1E+01	2.19 1E+01	
1206.6	0.098	Te-131m	2.30	2.20	2.05	1.92	1.87	1.80	1.75	
1221.4	0.273	Ta-182	7.59	7.34	6.83	6.39	6.18	5.94	5.76	
1230.7	0.089	Eu-156	2.74	2.60	2.39	2.22	2.13	2.04	1.96	
1231.0	0.116	Ta-182	3.21	3.10	2.88	2.71	2.62	2.52	2.44	
1235.4	0.200	Cs-136	3.25	3.10	2.89	2.72	2.64	2.54	2.48	
1238.3	0.670	Co-56	7.17	6.81	6.25	5.76	5.53	5.29	5.10	
1242.4	0.067	Eu-156	2.07	1.97	1.81	1.69	1.62	1.55	1.49	
1260.4	0.289	I-135	6.82	6.47	6.00	5.54	5.36	5.11	4.90	
1274.4	0.355	Eu-154	1.12 1E+01	1.08 1E+01	1.00 1E+01	9.38	9.18	8.86	8.58	
1274.5	0.999	Na-22	1.58 1E+01	1.51 1E+01	1.41 1E+01	1.32 1E+01	1.29 1E+01	1.24 1E+01	1.21 1E+01	
1291.6	0.432	Fe-59	1.34 1E+01	1.29 1E+01	1.18 1E+01	1.10 1E+01	1.07 1E+01	1.02 1E+01	9.88	
1332.5	1.000	Co-60	1.51 1E+01	1.44 1E+01	1.33 1E+01	1.24 1E+01	1.20 1E+01	1.15 1E+01	1.10 1E+01	
1354.5	0.026	La-141	3.83 1E+01	3.66 1E+01	3.36 1E+01	3.14 1E+01	3.01 1E+01	2.87 1E+01	2.75 1E+01	
1368.6	1.000	Na-24	1.06 1E+01	1.00 1E+01	9.12	8.35	7.93	7.53	7.15	
1383.9	0.900	Sr-92	2.61 1E+01	2.48 1E+01	2.30 1E+01	2.15 1E+01	2.07 1E+01	1.98 1E+01	1.90 1E+01	
1384.3	0.243	Ag-110m	3.19	3.06	2.84	2.70	2.63	2.55	2.48	
1408.0	0.209	Eu-152	6.45	6.27	5.85	5.57	5.43	5.27	5.12	
1435.9	0.763	Cs-138	1.28 1E+01	1.22 1E+01	1.13 1E+01	1.06 1E+01	1.01 1E+01	9.83	9.39	
1457.6	0.087	I-135	2.14	2.04	1.90	1.78	1.72	1.65	1.60	
1460.8	0.107	K-40	2.75 1E+01	2.63 1E+01	2.42 1E+01	2.27 1E+01	2.18 1E+01	2.09 1E+01	2.00 1E+01	
1465.1	0.222	Pm-148	1.45 1E+01	1.38 1E+01	1.29 1E+01	1.23 1E+01	1.19 1E+01	1.15 1E+01	1.11 1E+01	
1481.8	0.235	Ni-65	1.65 1E+01	1.58 1E+01	1.46 1E+01	1.38 1E+01	1.33 1E+01	1.28 1E+01	1.23 1E+01	
1505.0	0.131	Ag-110m	1.75	1.69	1.58	1.50	1.46	1.43	1.39	
1524.6	0.189	K-42	2.78 1E+01	2.64 1E+01	2.45 1E+01	2.29 1E+01	2.21 1E+01	2.11 1E+01	2.03 1E+01	
1596.2	0.954	La-140	1.64 1E+01	1.57 1E+01	1.46 1E+01	1.38 1E+01	1.34 1E+01	1.29 1E+01	1.25 1E+01	
1678.0	0.096	I-135	2.43	2.33	2.19	2.06	2.01	1.93	1.88	
1691.0	0.488	Sb-124	1.03 1E+01	9.89	9.31	8.81	8.57	8.36	8.12	
1736.5	0.060	Sb-129	1.56	1.51	1.43	1.36	1.33	1.30	1.27	
1771.4	0.155	Co-56	1.80	1.74	1.63	1.53	1.49	1.44	1.41	
1791.2	0.078	I-135	2.00	1.92	1.80	1.71	1.67	1.61	1.56	
1810.7	0.272	Mn-56	6.63	6.38	6.01	5.65	5.54	5.34	5.20	
1901.3	0.072	La-142	1.36	1.30	1.22	1.14	1.11	1.07	1.03	
2091.0	0.056	Sb-124	1.24	1.20	1.14	1.09	1.08	1.06	1.03	
2113.0	0.143	Mn-56	3.62	3.50	3.32	3.16	3.11	3.01	2.94	
2218.0	0.152	Cs-138	2.81	2.71	2.58	2.46	2.41	2.35	2.29	
2397.8	0.133	La-142	2.65	2.56	2.42	2.30	2.25	2.18	2.11	
2542.7	0.100	La-142	2.03	1.96	1.86	1.77	1.74	1.68	1.64	
2598.6	0.167	Co-56	2.13	2.08	1.98	1.90	1.88	1.83	1.80	
2639.6	0.076	Cs-138	1.46	1.43	1.37	1.32	1.30	1.28	1.25	
2754.0	0.999	Na-24	1.25 1E+01	1.20 1E+01	1.14 1E+01	1.08 1E+01	1.06 1E+01	1.03 1E+01	9.91	
3253.5	0.074	Co-56	9.88 1E-01	9.68 1E-01	9.35 1E-01	9.10 1E-01	9.05 1E-01	8.89 1E-01	8.83 1E-01	

(付表-1と付表-3-2から計算により算出)

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

単位 : ($\mu\text{Gy/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射線物質の土壌中における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)													
	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	1.33	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	1.02	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-3-1 (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 β ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)													
	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-3-1 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Gy/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)									
	3.0	5.0	10	20	30	50	100			
Be-7	1.07 1E-04	8.77 1E-05	6.28 1E-05	4.11 1E-05	3.07 1E-05	2.05 1E-05	1.12 1E-05			
Na-22	4.50 1E-03	3.72 1E-03	2.70 1E-03	1.80 1E-03	1.36 1E-03	9.22 1E-04	5.11 1E-04			
Na-24	7.27 1E-03	6.11 1E-03	4.54 1E-03	3.13 1E-03	2.42 1E-03	1.67 1E-03	9.51 1E-04			
K-40	3.01 1E-04	2.51 1E-04	1.84 1E-04	1.25 1E-04	9.59 1E-05	6.55 1E-05	3.68 1E-05			
K-42	5.57 1E-04	4.64 1E-04	3.42 1E-04	2.32 1E-04	1.78 1E-04	1.22 1E-04	6.85 1E-05			
Sc-46	4.08 1E-03	3.38 1E-03	2.46 1E-03	1.65 1E-03	1.25 1E-03	8.51 1E-04	4.72 1E-04			
Cr-51	6.81 1E-05	5.55 1E-05	3.95 1E-03	2.54 1E-05	1.88 1E-05	1.25 1E-05	6.77 1E-06			
Mn-54	1.73 1E-03	1.43 1E-03	1.04 1E-03	6.91 1E-04	5.23 1E-04	3.54 1E-04	1.96 1E-04			
Mn-56	3.29 1E-03	2.73 1E-03	2.00 1E-03	1.35 1E-03	1.03 1E-03	7.06 1E-04	3.96 1E-04			
Fe-59	2.36 1E-03	1.96 1E-03	1.43 1E-03	9.65 1E-04	7.36 1E-04	5.01 1E-04	2.80 1E-04			
Co-56	6.43 1E-03	5.36 1E-03	3.95 1E-03	2.68 1E-03	2.05 1E-03	1.41 1E-03	7.90 1E-04			
Co-57	2.27 1E-04	1.80 1E-04	1.22 1E-04	7.47 1E-05	5.40 1E-05	3.49 1E-05	1.85 1E-05			
Co-58	2.04 1E-03	1.69 1E-03	1.22 1E-03	8.08 1E-04	6.10 1E-04	4.12 1E-04	2.27 1E-04			
Co-60	4.93 1E-03	4.10 1E-03	3.00 1E-03	2.03 1E-03	1.55 1E-03	1.05 1E-03	5.90 1E-04			
Ni-65	1.07 1E-03	8.91 1E-04	6.54 1E-04	4.42 1E-04	3.38 1E-04	2.30 1E-04	1.29 1E-04			
Zn-65	1.17 1E-03	9.70 1E-04	7.07 1E-04	4.75 1E-04	3.62 1E-04	2.46 1E-04	1.37 1E-04			
Zn-69m	9.01 1E-04	7.38 1E-04	5.28 1E-04	3.45 1E-04	2.57 1E-04	1.71 1E-04	9.37 1E-05			
Se-75	8.03 1E-04	6.50 1E-04	4.56 1E-04	2.89 1E-04	2.13 1E-04	1.40 1E-04	7.56 1E-05			
Br-84	3.22 1E-03	2.69 1E-03	1.99 1E-03	1.36 1E-03	1.05 1E-03	7.23 1E-04	4.09 1E-04			
Rb-86	1.90 1E-04	1.58 1E-04	1.15 1E-04	7.74 1E-05	5.89 1E-05	4.00 1E-05	2.23 1E-05			
Sr-92	2.61 1E-03	2.17 1E-03	1.59 1E-03	1.08 1E-03	8.24 1E-04	5.62 1E-04	3.15 1E-04			
Y-90m	1.34 1E-03	1.10 1E-03	7.79 1E-04	5.05 1E-04	3.76 1E-04	2.49 1E-04	1.36 1E-04			
Y-91	7.16 1E-06	5.94 1E-06	4.35 1E-06	2.93 1E-06	2.24 1E-06	1.52 1E-06	8.51 1E-07			
Y-91m	1.13 1E-03	9.33 1E-04	6.70 1E-04	4.40 1E-04	3.29 1E-04	2.21 1E-04	1.21 1E-04			
Y-92	5.11 1E-04	4.24 1E-04	3.09 1E-04	2.07 1E-04	1.57 1E-04	1.07 1E-04	5.92 1E-05			
Y-93	1.74 1E-04	1.44 1E-04	1.05 1E-04	7.06 1E-05	5.36 1E-05	3.65 1E-05	2.03 1E-05			
Zr-95	1.55 1E-03	1.28 1E-03	9.25 1E-04	6.11 1E-04	4.61 1E-04	3.11 1E-04	1.72 1E-04			
Zr-97	3.91 1E-04	3.23 1E-04	2.35 1E-04	1.57 1E-04	1.19 1E-04	8.04 1E-05	4.46 1E-05			
Nb-93m	2.53 1E-06	1.55 1E-06	7.82 1E-07	3.93 1E-07	2.63 1E-07	1.58 1E-07	7.90 1E-08			
Nb-95	1.60 1E-03	1.32 1E-03	9.59 1E-04	6.35 1E-04	4.79 1E-04	3.24 1E-04	1.79 1E-04			
Nb-95m	1.36 1E-04	1.09 1E-04	7.59 1E-05	4.80 1E-05	3.53 1E-05	2.32 1E-05	1.25 1E-05			
Nb-97	1.42 1E-03	1.17 1E-03	8.44 1E-04	5.54 1E-04	4.17 1E-04	2.81 1E-04	1.55 1E-04			
Mo-93	1.49 1E-05	9.09 1E-06	4.60 1E-06	2.32 1E-06	1.55 1E-06	9.29 1E-07	4.65 1E-07			
Mo-99	3.11 1E-04	2.56 1E-04	1.84 1E-04	1.21 1E-04	9.10 1E-05	6.12 1E-05	3.37 1E-05			
Tc-99m	2.41 1E-04	1.93 1E-04	1.32 1E-04	8.18 1E-05	5.94 1E-05	3.85 1E-05	2.05 1E-05			
Ru-103	1.05 1E-03	8.59 1E-04	6.16 1E-04	4.04 1E-04	3.02 1E-04	2.02 1E-04	1.10 1E-04			
Ru-105	1.56 1E-03	1.29 1E-03	9.28 1E-04	6.10 1E-04	4.58 1E-04	3.08 1E-04	1.70 1E-04			
Rh-103m	1.89 1E-05	1.16 1E-05	5.93 1E-06	3.01 1E-06	2.00 1E-06	1.21 1E-06	6.04 1E-07			
Rh-105	1.67 1E-04	1.36 1E-04	9.71 1E-05	6.24 1E-05	4.62 1E-05	3.06 1E-05	1.66 1E-05			
Rh-106	4.43 1E-04	2.65 1E-04	2.63 1E-04	1.73 1E-04	1.30 1E-04	8.74 1E-05	4.81 1E-05			
Ag-110m	5.65 1E-03	4.68 1E-03	3.40 1E-03	2.26 1E-03	1.71 1E-03	1.16 1E-03	6.43 1E-04			
Ag-111	5.67 1E-05	4.63 1E-05	3.30 1E-05	2.12 1E-05	1.57 1E-05	1.04 1E-05	5.68 1E-06			
Sn-117m	3.04 1E-04	2.41 1E-04	1.63 1E-04	1.01 1E-04	7.32 1E-05	4.75 1E-05	2.53 1E-05			
Sn-126	9.12 1E-05	6.81 1E-05	4.28 1E-05	2.49 1E-05	1.76 1E-05	1.11 1E-05	5.79 1E-06			
Sb-124	3.68 1E-03	3.05 1E-03	2.23 1E-03	1.50 1E-03	1.14 1E-03	7.76 1E-04	4.33 1E-04			
Sb-125	9.19 1E-04	7.52 1E-04	5.37 1E-04	3.50 1E-04	2.61 1E-04	1.75 1E-04	9.58 1E-05			
Sb-126	5.82 1E-03	4.81 1E-03	3.47 1E-03	2.28 1E-03	1.72 1E-03	1.16 1E-03	6.37 1E-04			
Sb-127	1.41 1E-03	1.16 1E-03	8.35 1E-04	5.49 1E-04	4.12 1E-04	2.77 1E-04	1.52 1E-04			
Sb-128	6.50 1E-03	5.37 1E-03	3.87 1E-03	2.56 1E-03	1.92 1E-03	1.30 1E-03	7.15 1E-04			
Sb-129	2.96 1E-03	2.45 1E-03	1.78 1E-03	1.19 1E-03	9.04 1E-04	6.14 1E-04	3.41 1E-04			
Sb-130	6.73 1E-03	5.56 1E-03	4.02 1E-03	2.67 1E-03	2.01 1E-03	1.36 1E-03	7.51 1E-04			
Te-123m	2.84 1E-04	2.25 1E-04	1.53 1E-04	9.51 1E-05	6.91 1E-05	4.49 1E-05	2.39 1E-05			
Te-125m	5.07 1E-05	3.24 1E-05	1.71 1E-05	8.83 1E-06	5.93 1E-06	3.60 1E-06	1.81 1E-06			
Te-127	1.05 1E-05	8.58 1E-06	6.12 1E-06	3.97 1E-06	2.96 1E-06	1.97 1E-06	1.07 1E-06			
Te-127m	1.61 1E-05	1.03 1E-05	5.48 1E-06	2.85 1E-06	1.92 1E-06	1.17 1E-06	5.91 1E-07			
Te-129	1.23 1E-04	1.00 1E-04	7.12 1E-05	4.64 1E-05	3.46 1E-05	2.31 1E-05	1.27 1E-05			
Te-129m	8.03 1E-05	6.29 1E-05	4.31 1E-05	2.76 1E-05	2.05 1E-05	1.37 1E-05	7.48 1E-06			
Te-131m	2.90 1E-03	2.40 1E-03	1.74 1E-03	1.16 1E-03	8.75 1E-04	5.92 1E-04	3.28 1E-04			
Te-132	4.67 1E-04	3.75 1E-04	2.59 1E-04	1.63 1E-04	1.20 1E-04	7.83 1E-05	4.22 1E-05			
Te-133m	3.73 1E-03	3.09 1E-03	2.24 1E-03	1.49 1E-03	1.13 1E-03	7.67 1E-04	4.26 1E-04			
Te-134	1.80 1E-03	1.47 1E-03	1.06 1E-03	6.89 1E-04	5.16 1E-04	3.45 1E-04	1.89 1E-04			
I-129	3.31 1E-05	2.14 1E-05	1.14 1E-05	5.91 1E-06	3.97 1E-06	2.41 1E-06	1.22 1E-06			
I-130	4.53 1E-03	3.74 1E-03	2.69 1E-03	1.77 1E-03	1.33 1E-03	8.98 1E-04	4.95 1E-04			
I-131	8.18 1E-04	6.70 1E-04	4.79 1E-04	3.10 1E-04	2.31 1E-04	1.54 1E-04	8.38 1E-05			
I-132	4.73 1E-03	3.92 1E-03	2.84 1E-03	1.88 1E-03	1.42 1E-03	9.60 1E-04	5.31 1E-04			

付表-3-1 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Gy/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)						
	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

付表-3-2 放射性核種濃度と地上高1mでの線量率との関係
(土壌中指数分布の場合)

単位 : ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射線物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)													
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0							
Be-7	2.93	1E-04	2.65	1E-04	2.49	1E-04	2.37	1E-04	2.20	1E-04	1.93	1E-04	1.62	1E-04
Na-22	1.15	1E-02	1.03	1E-02	9.70	1E-03	9.23	1E-03	8.56	1E-03	7.51	1E-03	6.32	1E-03
Na-24	1.72	1E-02	1.55	1E-02	1.45	1E-02	1.38	1E-02	1.28	1E-02	1.13	1E-02	9.58	1E-03
K-40	7.28	1E-04	6.58	1E-04	6.16	1E-04	5.85	1E-04	5.43	1E-04	4.77	1E-04	4.04	1E-04
K-42	1.29	1E-03	1.16	1E-03	1.09	1E-03	1.03	1E-03	9.59	1E-04	8.43	1E-04	7.14	1E-04
Sc-46	1.02	1E-02	9.17	1E-03	8.60	1E-03	8.22	1E-03	7.64	1E-03	6.68	1E-03	5.62	1E-03
Cr-51	1.94	1E-04	1.75	1E-04	1.65	1E-04	1.57	1E-04	1.46	1E-04	1.28	1E-04	1.08	1E-04
Mn-54	4.41	1E-03	3.97	1E-03	3.72	1E-03	3.55	1E-03	3.29	1E-03	2.88	1E-03	2.42	1E-03
Mn-56	8.06	1E-03	7.27	1E-03	6.81	1E-03	6.51	1E-03	6.03	1E-03	5.28	1E-03	4.45	1E-03
Fe-59	5.83	1E-03	5.25	1E-03	4.92	1E-03	4.70	1E-03	4.37	1E-03	3.83	1E-03	3.22	1E-03
Co-56	1.67	1E-02	1.51	1E-02	1.41	1E-02	1.35	1E-02	1.25	1E-02	1.10	1E-02	9.24	1E-03
Co-57	7.93	1E-04	7.10	1E-04	6.63	1E-04	6.31	1E-04	5.81	1E-04	5.06	1E-04	4.20	1E-04
Co-58	5.24	1E-03	4.71	1E-03	4.42	1E-03	4.22	1E-03	3.91	1E-03	3.42	1E-03	2.88	1E-03
Co-60	1.21	1E-02	1.09	1E-02	1.02	1E-02	9.75	1E-03	9.06	1E-03	7.95	1E-03	6.70	1E-03
Ni-65	2.67	1E-03	2.41	1E-03	2.26	1E-03	2.15	1E-03	2.00	1E-03	1.75	1E-03	1.48	1E-03
Zn-65	2.88	1E-03	2.60	1E-03	2.44	1E-03	2.33	1E-03	2.17	1E-03	1.90	1E-03	1.59	1E-03
Zn-69m	2.46	1E-03	2.22	1E-03	2.09	1E-03	1.99	1E-03	1.84	1E-03	1.62	1E-03	1.36	1E-03
Se-75	2.39	1E-03	2.17	1E-03	2.03	1E-03	1.94	1E-03	1.80	1E-03	1.57	1E-03	1.32	1E-03
Rb-84	7.63	1E-03	6.89	1E-03	6.46	1E-03	6.16	1E-03	5.72	1E-03	5.03	1E-03	4.25	1E-03
Rb-86	4.65	1E-04	4.19	1E-04	3.93	1E-04	3.76	1E-04	3.50	1E-04	3.06	1E-04	2.57	1E-04
Rb-88	2.84	1E-03	2.56	1E-03	2.40	1E-03	2.29	1E-03	2.13	1E-03	1.86	1E-03	1.57	1E-03
Rb-89	9.63	1E-03	8.68	1E-03	8.14	1E-03	7.77	1E-03	7.22	1E-03	6.33	1E-03	5.33	1E-03
Sr-85	2.90	1E-03	2.58	1E-03	2.42	1E-03	2.30	1E-03	2.13	1E-03	1.86	1E-03	1.57	1E-03
Sr-89	4.50	1E-07	4.05	1E-07	3.79	1E-07	3.63	1E-07	3.37	1E-07	2.95	1E-07	2.48	1E-07
Sr-91	3.67	1E-03	3.30	1E-03	3.10	1E-03	2.96	1E-03	2.74	1E-03	2.40	1E-03	2.02	1E-03
Sr-92	6.37	1E-03	5.75	1E-03	5.39	1E-03	5.12	1E-03	4.75	1E-03	4.18	1E-03	3.53	1E-03
Y-88	1.25	1E-02	1.12	1E-02	1.05	1E-02	1.00	1E-02	9.30	1E-03	8.14	1E-03	6.87	1E-03
Y-90m	3.81	1E-03	3.43	1E-03	3.23	1E-03	3.07	1E-03	2.85	1E-03	2.50	1E-03	2.10	1E-03
Y-90	2.15	1E-08	8.38	1E-09	5.50	1E-09	4.10	1E-09	2.76	1E-09	1.53	1E-09	8.29	1E-10
Y-91m	3.02	1E-03	2.72	1E-03	2.55	1E-03	2.43	1E-03	2.24	1E-03	1.97	1E-03	1.66	1E-03
Y-91	1.76	1E-05	1.59	1E-05	1.49	1E-05	1.42	1E-05	1.32	1E-05	1.16	1E-05	9.75	1E-06
Y-92	1.28	1E-03	1.15	1E-03	1.08	1E-03	1.03	1E-03	9.56	1E-04	8.37	1E-04	7.05	1E-04
Y-93	4.78	1E-04	4.32	1E-04	4.05	1E-04	3.86	1E-04	3.58	1E-04	3.14	1E-04	2.65	1E-04
Zr-89	6.24	1E-03	5.56	1E-03	5.21	1E-03	4.97	1E-03	4.61	1E-03	4.03	1E-03	3.38	1E-03
Zr-95	3.96	1E-03	3.56	1E-03	3.34	1E-03	3.19	1E-03	2.95	1E-03	2.59	1E-03	2.18	1E-03
Zr-97	4.72	1E-03	4.24	1E-03	3.98	1E-03	3.79	1E-03	3.51	1E-03	3.08	1E-03	2.59	1E-03
Nb-93m	3.87	1E-05	1.58	1E-05	1.05	1E-05	7.86	1E-06	5.27	1E-06	2.91	1E-06	1.53	1E-06
Nb-94	8.32	1E-03	7.49	1E-03	7.02	1E-03	6.70	1E-03	6.21	1E-03	5.44	1E-03	4.57	1E-03
Nb-95m	5.37	1E-04	4.18	1E-04	3.76	1E-04	3.50	1E-04	3.18	1E-04	2.74	1E-04	2.26	1E-04
Nb-95	4.11	1E-03	3.70	1E-03	3.47	1E-03	3.31	1E-03	3.06	1E-03	2.69	1E-03	2.26	1E-03
Nb-97m	3.95	1E-03	3.54	1E-03	3.33	1E-03	3.17	1E-03	2.93	1E-03	2.57	1E-03	2.16	1E-03
Nb-97	3.68	1E-03	3.31	1E-03	3.11	1E-03	2.95	1E-03	2.73	1E-03	2.40	1E-03	2.02	1E-03
Mo-93	2.10	1E-04	8.58	1E-05	5.69	1E-05	4.27	1E-05	2.86	1E-05	1.58	1E-05	8.28	1E-06
Mo-99	8.35	1E-04	7.44	1E-04	6.97	1E-04	6.63	1E-04	6.13	1E-04	5.36	1E-04	4.50	1E-04
Mo-101	7.57	1E-03	6.82	1E-03	6.40	1E-03	6.10	1E-03	5.65	1E-03	4.95	1E-03	4.17	1E-03
Tc-99m	8.34	1E-04	7.42	1E-04	6.93	1E-04	6.61	1E-04	6.09	1E-04	5.31	1E-04	4.43	1E-04
Tc-101	2.04	1E-03	1.84	1E-03	1.73	1E-03	1.65	1E-03	1.53	1E-03	1.34	1E-03	1.13	1E-03
Ru-103	2.88	1E-03	2.60	1E-03	2.44	1E-03	2.32	1E-03	2.15	1E-03	1.88	1E-03	1.58	1E-03
Ru-105	4.21	1E-03	3.77	1E-03	3.53	1E-03	3.36	1E-03	3.11	1E-03	2.72	1E-03	2.29	1E-03
Rh-103m	3.22	1E-05	1.59	1E-05	1.13	1E-05	8.86	1E-06	6.23	1E-06	3.63	1E-06	1.98	1E-06
Rh-105	4.73	1E-04	4.28	1E-04	4.03	1E-04	3.84	1E-04	3.55	1E-04	3.12	1E-04	2.63	1E-04
Rh-106	1.15	1E-03	1.04	1E-03	9.73	1E-04	9.26	1E-04	8.56	1E-04	7.51	1E-04	6.32	1E-04
Ag-108m	9.32	1E-03	8.28	1E-03	7.75	1E-03	7.36	1E-03	6.78	1E-03	5.94	1E-03	4.98	1E-03
Ag-110m	1.42	1E-02	1.28	1E-02	1.20	1E-02	1.14	1E-02	1.06	1E-02	9.27	1E-03	7.80	1E-03
Ag-110	1.70	1E-04	1.53	1E-04	1.43	1E-04	1.36	1E-04	1.26	1E-04	1.10	1E-04	9.28	1E-05
Ag-111	1.62	1E-04	1.46	1E-04	1.38	1E-04	1.31	1E-04	1.21	1E-04	1.06	1E-04	8.96	1E-05
Cd-109	4.65	1E-04	2.56	1E-04	1.91	1E-04	1.55	1E-04	1.15	1E-04	7.22	1E-05	4.32	1E-05
Sn-117m	1.21	1E-03	9.99	1E-04	9.05	1E-04	8.45	1E-04	7.62	1E-04	6.46	1E-04	5.25	1E-04
Sn-126	4.94	1E-04	3.89	1E-04	3.45	1E-04	3.16	1E-04	2.77	1E-04	2.25	1E-04	1.71	1E-04
Sb-124	9.17	1E-03	8.27	1E-03	7.75	1E-03	7.37	1E-03	6.83	1E-03	5.99	1E-03	5.06	1E-03
Sb-125	2.67	1E-03	2.34	1E-03	2.18	1E-03	2.06	1E-03	1.89	1E-03	1.64	1E-03	1.37	1E-03
Sb-126m	8.68	1E-03	7.81	1E-03	7.34	1E-03	6.98	1E-03	6.45	1E-03	5.66	1E-03	4.77	1E-03
Sb-126	1.53	1E-02	1.38	1E-02	1.30	1E-02	1.23	1E-02	1.14	1E-02	1.00	1E-02	8.43	1E-03
Sb-127	3.90	1E-03	3.50	1E-03	3.29	1E-03	3.13	1E-03	2.89	1E-03	2.54	1E-03	2.13	1E-03
Sb-128	1.69	1E-02	1.53	1E-02	1.43	1E-02	1.36	1E-02	1.26	1E-02	1.11	1E-02	9.31	1E-03

付表-3-2 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)						
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0
Sb-129	7.46 1E-03	6.72 1E-03	6.30 1E-03	6.01 1E-03	5.57 1E-03	4.88 1E-03	4.11 1E-03
Sb-130	1.75 1E-02	1.57 1E-02	1.48 1E-02	1.41 1E-02	1.31 1E-02	1.14 1E-02	9.62 1E-03
Sb-131	1.02 1E-02	9.21 1E-03	8.63 1E-03	8.24 1E-03	7.64 1E-03	6.70 1E-03	5.64 1E-03
Te-123m	1.10 1E-03	9.29 1E-04	8.47 1E-04	7.95 1E-04	7.20 1E-04	6.13 1E-04	5.00 1E-04
Te-125m	5.84 1E-04	3.69 1E-04	2.91 1E-04	2.43 1E-04	1.86 1E-04	1.19 1E-04	7.02 1E-05
Te-127m	1.84 1E-04	1.16 1E-04	9.14 1E-05	7.64 1E-05	5.85 1E-05	3.76 1E-05	2.23 1E-05
Te-127	2.95 1E-05	2.65 1E-05	2.49 1E-05	2.37 1E-05	2.19 1E-05	1.92 1E-05	1.61 1E-05
Te-129m	2.95 1E-04	2.29 1E-04	2.02 1E-04	1.84 1E-04	1.62 1E-04	1.32 1E-04	1.04 1E-04
Te-129	4.08 1E-04	3.47 1E-04	3.19 1E-04	2.99 1E-04	2.72 1E-04	2.32 1E-04	1.91 1E-04
Te-131m	7.70 1E-03	6.91 1E-03	6.47 1E-03	6.16 1E-03	5.71 1E-03	4.99 1E-03	4.19 1E-03
Te-131	2.42 1E-03	2.17 1E-03	2.03 1E-03	1.93 1E-03	1.79 1E-03	1.56 1E-03	1.31 1E-03
Te-132	1.70 1E-03	1.45 1E-03	1.32 1E-03	1.24 1E-03	1.12 1E-03	9.54 1E-04	7.77 1E-04
Te-133m	9.66 1E-03	8.68 1E-03	8.13 1E-03	7.76 1E-03	7.19 1E-03	6.29 1E-03	5.28 1E-03
Te-133	6.16 1E-03	5.56 1E-03	5.22 1E-03	4.98 1E-03	4.61 1E-03	4.04 1E-03	3.41 1E-03
Te-134	5.07 1E-03	4.53 1E-03	4.24 1E-03	4.03 1E-03	3.72 1E-03	3.25 1E-03	2.72 1E-03
I-128	5.41 1E-04	4.81 1E-04	4.51 1E-04	4.28 1E-04	3.94 1E-04	3.44 1E-04	2.88 1E-04
I-129	3.73 1E-04	2.47 1E-04	1.99 1E-04	1.69 1E-04	1.32 1E-04	8.76 1E-05	5.31 1E-05
I-130	1.18 1E-02	1.07 1E-02	1.00 1E-02	9.52 1E-03	8.81 1E-03	7.73 1E-03	6.50 1E-03
I-131	2.30 1E-03	2.07 1E-03	1.95 1E-03	1.85 1E-03	1.72 1E-03	1.50 1E-03	1.27 1E-03
I-132	1.21 1E-02	1.09 1E-02	1.02 1E-02	9.70 1E-03	8.98 1E-03	7.88 1E-03	6.63 1E-03
I-133	3.44 1E-03	3.10 1E-03	2.91 1E-03	2.77 1E-03	2.56 1E-03	2.25 1E-03	1.89 1E-03
I-134	1.34 1E-02	1.21 1E-02	1.13 1E-02	1.08 1E-02	1.00 1E-02	8.79 1E-03	7.39 1E-03
I-135	7.64 1E-03	6.90 1E-03	6.46 1E-03	6.16 1E-03	5.72 1E-03	5.02 1E-03	4.23 1E-03
Cs-134m	2.56 1E-04	1.95 1E-04	1.70 1E-04	1.53 1E-04	1.32 1E-04	1.04 1E-04	7.82 1E-05
Cs-134	8.50 1E-03	7.64 1E-03	7.17 1E-03	6.83 1E-03	6.32 1E-03	5.54 1E-03	4.66 1E-03
Cs-136	1.12 1E-02	1.00 1E-02	9.42 1E-03	8.99 1E-03	8.35 1E-03	7.30 1E-03	6.13 1E-03
Cs-137	3.15 1E-03	2.83 1E-03	2.65 1E-03	2.52 1E-03	2.32 1E-03	2.04 1E-03	1.71 1E-03
Cs-138	1.11 1E-02	1.00 1E-02	9.40 1E-03	8.95 1E-03	8.30 1E-03	7.29 1E-03	6.16 1E-03
Ba-133	2.81 1E-03	2.40 1E-03	2.21 1E-03	2.07 1E-03	1.88 1E-03	1.60 1E-03	1.31 1E-03
Ba-137m	3.33 1E-03	2.99 1E-03	2.80 1E-03	2.66 1E-03	2.46 1E-03	2.15 1E-03	1.81 1E-03
Ba-139	2.96 1E-04	2.63 1E-04	2.45 1E-04	2.33 1E-04	2.14 1E-04	1.87 1E-04	1.55 1E-04
Ba-140	1.11 1E-03	9.80 1E-04	9.14 1E-04	8.65 1E-04	7.95 1E-04	6.92 1E-04	5.78 1E-04
La-140	1.11 1E-02	1.00 1E-02	9.40 1E-03	8.95 1E-03	8.30 1E-03	7.28 1E-03	6.16 1E-03
La-141	1.26 1E-04	1.13 1E-04	1.06 1E-04	1.01 1E-04	9.38 1E-05	8.24 1E-05	6.96 1E-05
La-142	1.04 1E-02	9.36 1E-03	8.78 1E-03	8.37 1E-03	7.76 1E-03	6.82 1E-03	5.76 1E-03
Ce-141	5.32 1E-04	4.66 1E-04	4.31 1E-04	4.08 1E-04	3.73 1E-04	3.20 1E-04	2.63 1E-04
Ce-143	1.81 1E-03	1.58 1E-03	1.46 1E-03	1.37 1E-03	1.26 1E-03	1.08 1E-03	8.86 1E-04
Ce-144	1.46 1E-04	1.24 1E-04	1.13 1E-04	1.06 1E-04	9.52 1E-05	7.99 1E-05	6.40 1E-05
Pr-143	4.83 1E-11	4.34 1E-11	4.07 1E-11	3.88 1E-11	3.59 1E-11	3.15 1E-11	2.65 1E-11
Pr-144m	1.50 1E-04	1.08 1E-04	9.03 1E-05	7.93 1E-05	6.51 1E-05	4.64 1E-05	3.03 1E-05
Pr-144	1.34 1E-04	1.21 1E-04	1.14 1E-04	1.08 1E-04	1.00 1E-04	8.80 1E-05	7.43 1E-05
Pr-145	1.00 1E-04	8.97 1E-05	8.38 1E-05	7.98 1E-05	7.38 1E-05	6.43 1E-05	5.38 1E-05
Nd-147	9.45 1E-04	8.16 1E-04	7.52 1E-04	7.06 1E-04	6.40 1E-04	5.44 1E-04	4.41 1E-04
Pm-147	3.28 1E-08	2.81 1E-08	2.56 1E-08	2.40 1E-08	2.16 1E-08	1.81 1E-08	1.44 1E-08
Pm-148m	1.11 1E-02	9.96 1E-03	9.35 1E-03	8.90 1E-03	8.23 1E-03	7.22 1E-03	6.07 1E-03
Pm-148	2.87 1E-03	2.59 1E-03	2.43 1E-03	2.31 1E-03	2.14 1E-03	1.88 1E-03	1.59 1E-03
Pm-149	7.17 1E-05	6.46 1E-05	6.07 1E-05	5.77 1E-05	5.35 1E-05	4.69 1E-05	3.94 1E-05
Pm-151	2.01 1E-03	1.80 1E-03	1.68 1E-03	1.59 1E-03	1.47 1E-03	1.28 1E-03	1.06 1E-03
Sm-151	1.33 1E-07	6.82 1E-08	4.90 1E-08	3.86 1E-08	2.74 1E-08	1.60 1E-08	8.75 1E-09
Eu-152m	1.66 1E-03	1.48 1E-03	1.38 1E-03	1.31 1E-03	1.21 1E-03	1.05 1E-03	8.76 1E-04
Eu-152	6.23 1E-03	5.57 1E-03	5.20 1E-03	4.95 1E-03	4.57 1E-03	3.98 1E-03	3.33 1E-03
Eu-154	5.86 1E-03	5.26 1E-03	4.92 1E-03	4.69 1E-03	4.34 1E-03	3.79 1E-03	3.18 1E-03
Eu-155	4.49 1E-04	3.89 1E-04	3.56 1E-04	3.34 1E-04	3.01 1E-04	2.52 1E-04	1.98 1E-04
Eu-156	5.84 1E-03	5.26 1E-03	4.93 1E-03	4.70 1E-03	4.36 1E-03	3.81 1E-03	3.21 1E-03
Tb-160	5.88 1E-03	5.29 1E-03	4.96 1E-03	4.73 1E-03	4.39 1E-03	3.84 1E-03	3.22 1E-03
Yb-169	2.41 1E-03	2.09 1E-03	1.92 1E-03	1.80 1E-03	1.62 1E-03	1.35 1E-03	1.07 1E-03
Hf-181	3.20 1E-03	2.88 1E-03	2.70 1E-03	2.57 1E-03	2.37 1E-03	2.07 1E-03	1.73 1E-03
Ta-182	6.58 1E-03	5.92 1E-03	5.54 1E-03	5.28 1E-03	4.90 1E-03	4.27 1E-03	3.58 1E-03
W-185	3.63 1E-07	3.19 1E-07	2.94 1E-07	2.77 1E-07	2.50 1E-07	2.10 1E-07	1.66 1E-07
W-187	2.57 1E-03	2.31 1E-03	2.16 1E-03	2.06 1E-03	1.90 1E-03	1.66 1E-03	1.39 1E-03
Ir-192	4.90 1E-03	4.42 1E-03	4.16 1E-03	3.96 1E-03	3.67 1E-03	3.22 1E-03	2.71 1E-03
Hg-203	1.48 1E-03	1.34 1E-03	1.25 1E-03	1.19 1E-03	1.11 1E-03	9.70 1E-04	8.14 1E-04
Tl-208	1.45 1E-02	1.31 1E-02	1.23 1E-02	1.17 1E-02	1.09 1E-02	9.57 1E-03	8.08 1E-03
Pb-210	3.55 1E-05	2.09 1E-05	1.71 1E-05	1.49 1E-05	1.23 1E-05	9.01 1E-06	6.09 1E-06
Pb-212	9.18 1E-04	8.25 1E-04	7.71 1E-04	7.33 1E-04	6.77 1E-04	5.90 1E-04	4.89 1E-04
Pb-214	1.54 1E-03	1.39 1E-03	1.31 1E-03	1.24 1E-03	1.15 1E-03	1.00 1E-03	8.42 1E-04

付表-3-2 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)													
	0.0		0.1		0.2		0.3		0.5		1.0		2.0	
Bi-212	5.34	1E-04	4.79	1E-04	4.48	1E-04	4.26	1E-04	3.95	1E-04	3.46	1E-04	2.91	1E-04
Bi-214	7.13	1E-03	6.43	1E-03	6.03	1E-03	5.74	1E-03	5.32	1E-03	4.67	1E-03	3.94	1E-03
Po-216	8.15	1E-08	7.33	1E-08	6.87	1E-08	6.56	1E-08	6.08	1E-08	5.32	1E-08	4.48	1E-08
Ra-224	6.50	1E-05	5.88	1E-05	5.51	1E-05	5.24	1E-05	4.86	1E-05	4.27	1E-05	3.57	1E-05
Ra-226	4.74	1E-05	4.24	1E-05	3.96	1E-05	3.77	1E-05	3.49	1E-05	3.06	1E-05	2.54	1E-05
Ac-228	4.56	1E-03	4.07	1E-03	3.80	1E-03	3.63	1E-03	3.36	1E-03	2.94	1E-03	2.47	1E-03
Th-228	2.99	1E-05	1.82	1E-05	1.52	1E-05	1.36	1E-05	1.17	1E-05	9.50	1E-06	7.43	1E-06
Th-231	3.10	1E-04	1.75	1E-04	1.38	1E-04	1.18	1E-04	9.54	1E-05	7.03	1E-05	5.01	1E-05
Th-232	1.47	1E-05	6.25	1E-06	4.40	1E-06	3.50	1E-06	2.58	1E-06	1.69	1E-06	1.09	1E-06
Th-234	8.80	1E-05	6.53	1E-05	5.76	1E-05	5.29	1E-05	4.68	1E-05	3.84	1E-05	2.98	1E-05
Pa-233	1.45	1E-03	1.25	1E-03	1.16	1E-03	1.09	1E-03	1.01	1E-03	8.73	1E-04	7.28	1E-04
U-232	2.83	1E-05	1.20	1E-05	8.27	1E-06	6.44	1E-06	4.62	1E-06	2.88	1E-06	1.77	1E-06
U-234	2.51	1E-05	1.03	1E-05	6.99	1E-06	5.36	1E-06	3.74	1E-06	2.23	1E-06	1.29	1E-06
U-235	1.09	1E-03	9.58	1E-04	8.90	1E-04	8.45	1E-04	7.81	1E-04	6.82	1E-04	5.67	1E-04
U-236	2.24	1E-05	9.04	1E-06	6.05	1E-06	4.59	1E-06	3.15	1E-06	1.81	1E-06	1.01	1E-06
U-237	1.06	1E-03	8.62	1E-04	7.82	1E-04	7.30	1E-04	6.59	1E-04	5.59	1E-04	4.50	1E-04
U-238	1.81	1E-05	7.28	1E-06	4.87	1E-06	3.70	1E-06	2.54	1E-06	1.47	1E-06	8.20	1E-07
Np-237	3.44	1E-04	2.24	1E-04	1.88	1E-04	1.67	1E-04	1.42	1E-04	1.12	1E-04	8.40	1E-05
Np-238	3.36	1E-03	2.98	1E-03	2.78	1E-03	2.65	1E-03	2.46	1E-03	2.15	1E-03	1.80	1E-03
Np-239	1.27	1E-03	1.06	1E-03	9.78	1E-04	9.20	1E-04	8.40	1E-04	7.26	1E-04	5.98	1E-04
Pu-236	3.19	1E-05	1.33	1E-05	8.96	1E-06	6.81	1E-06	4.65	1E-06	2.65	1E-06	1.44	1E-06
Pu-238	2.92	1E-05	1.21	1E-05	8.13	1E-06	6.16	1E-06	4.18	1E-06	2.35	1E-06	1.26	1E-06
Pu-239	1.29	1E-05	5.54	1E-06	3.81	1E-06	2.95	1E-06	2.08	1E-06	1.25	1E-06	7.39	1E-07
Pu-240	2.76	1E-05	1.15	1E-05	7.69	1E-06	5.83	1E-06	3.97	1E-06	2.24	1E-06	1.21	1E-06
Pu-241	1.33	1E-08	1.03	1E-08	9.25	1E-09	8.60	1E-09	7.74	1E-09	6.56	1E-09	5.29	1E-09
Pu-242	2.33	1E-05	9.90	1E-06	6.75	1E-06	5.19	1E-06	3.63	1E-06	2.15	1E-06	1.25	1E-06
Am-241	3.60	1E-04	2.30	1E-04	1.91	1E-04	1.68	1E-04	1.40	1E-04	1.06	1E-04	7.53	1E-05
Am-242m	8.47	1E-05	3.80	1E-05	2.63	1E-05	2.04	1E-05	1.43	1E-05	8.41	1E-06	4.75	1E-06
Am-242	1.80	1E-04	1.19	1E-04	1.00	1E-04	8.99	1E-05	7.75	1E-05	6.27	1E-05	4.89	1E-05
Am-243	4.59	1E-04	3.75	1E-04	3.39	1E-04	3.16	1E-04	2.83	1E-04	2.33	1E-04	1.80	1E-04
Cm-242	3.10	1E-05	1.34	1E-05	9.07	1E-06	6.92	1E-06	4.73	1E-06	2.68	1E-06	1.44	1E-06
Cm-243	9.33	1E-04	7.76	1E-04	7.11	1E-04	6.67	1E-04	6.09	1E-04	5.26	1E-04	4.33	1E-04
Cm-244	2.67	1E-05	1.15	1E-05	7.84	1E-06	5.99	1E-06	4.11	1E-06	2.35	1E-06	1.28	1E-06
Cm-245	7.92	1E-04	6.37	1E-04	5.78	1E-04	5.40	1E-04	4.88	1E-04	4.17	1E-04	3.39	1E-04
Cm-246	4.09	1E-05	2.69	1E-05	2.28	1E-05	2.06	1E-05	1.80	1E-05	1.47	1E-05	1.18	1E-05
Cm-247	1.88	1E-03	1.70	1E-03	1.60	1E-03	1.52	1E-03	1.41	1E-03	1.24	1E-03	1.04	1E-03
Cm-248	7.09	1E-03	6.37	1E-03	5.97	1E-03	5.71	1E-03	5.30	1E-03	4.64	1E-03	3.90	1E-03

付表-3-2 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)							
	3.0	5.0	10	20	30	50	100	
Be-7	1.43 1E-04	1.18 1E-04	8.52 1E-05	5.60 1E-05	4.14 1E-05	2.77 1E-05	1.52 1E-05	
Na-22	5.59 1E-03	4.63 1E-03	3.39 1E-03	2.27 1E-03	1.70 1E-03	1.16 1E-03	6.46 1E-04	
Na-24	8.51 1E-03	7.16 1E-03	5.36 1E-03	3.70 1E-03	2.85 1E-03	1.98 1E-03	1.13 1E-03	
K-40	3.56 1E-04	2.97 1E-04	2.21 1E-04	1.50 1E-04	1.14 1E-04	7.89 1E-05	4.46 1E-05	
K-42	6.30 1E-04	5.27 1E-04	3.91 1E-04	2.66 1E-04	2.03 1E-04	1.40 1E-04	7.94 1E-05	
Sc-46	4.97 1E-03	4.12 1E-03	3.03 1E-03	2.03 1E-03	1.54 1E-03	1.05 1E-03	5.85 1E-04	
Cr-51	9.47 1E-05	7.81 1E-05	5.55 1E-05	3.58 1E-05	2.65 1E-05	1.75 1E-05	9.59 1E-06	
Mn-54	2.14 1E-03	1.77 1E-03	1.30 1E-03	8.66 1E-04	6.52 1E-04	4.42 1E-04	2.46 1E-04	
Mn-56	3.95 1E-03	3.29 1E-03	2.43 1E-03	1.65 1E-03	1.25 1E-03	8.60 1E-04	4.83 1E-04	
Fe-59	2.85 1E-03	2.36 1E-03	1.75 1E-03	1.18 1E-03	8.93 1E-04	6.12 1E-04	3.43 1E-04	
Co-56	8.20 1E-03	6.84 1E-03	5.06 1E-03	3.44 1E-03	2.62 1E-03	1.80 1E-03	1.01 1E-03	
Co-57	3.59 1E-04	2.89 1E-04	1.94 1E-04	1.19 1E-04	8.62 1E-05	5.55 1E-05	2.93 1E-05	
Co-58	2.55 1E-03	2.11 1E-03	1.54 1E-03	1.02 1E-03	7.68 1E-04	5.19 1E-04	2.89 1E-04	
Co-60	5.92 1E-03	4.92 1E-03	3.64 1E-03	2.46 1E-03	1.87 1E-03	1.28 1E-03	7.22 1E-04	
Ni-65	1.31 1E-03	1.09 1E-03	8.06 1E-04	5.45 1E-04	4.14 1E-04	2.85 1E-04	1.60 1E-04	
Zn-65	1.41 1E-03	1.17 1E-03	8.61 1E-04	5.79 1E-04	4.39 1E-04	3.00 1E-04	1.68 1E-04	
Zn-69m	1.20 1E-03	9.90 1E-04	7.12 1E-04	4.66 1E-04	3.45 1E-04	2.30 1E-04	1.26 1E-04	
Se-75	1.15 1E-03	9.42 1E-04	6.59 1E-04	4.19 1E-04	3.08 1E-04	2.02 1E-04	1.09 1E-04	
Rb-84	3.78 1E-03	3.17 1E-03	2.36 1E-03	1.62 1E-03	1.24 1E-03	8.57 1E-04	4.86 1E-04	
Rb-86	2.27 1E-04	1.88 1E-04	1.39 1E-04	9.32 1E-05	7.08 1E-05	4.83 1E-05	2.70 1E-05	
Rb-88	1.40 1E-03	1.17 1E-03	8.71 1E-04	5.96 1E-04	4.57 1E-04	3.15 1E-04	1.78 1E-04	
Rb-89	4.73 1E-03	3.95 1E-03	2.92 1E-03	1.99 1E-03	1.52 1E-03	1.04 1E-03	5.87 1E-04	
Sr-85	1.38 1E-03	1.14 1E-03	8.26 1E-04	5.44 1E-04	4.03 1E-04	2.70 1E-04	1.49 1E-04	
Sr-89	2.19 1E-07	1.81 1E-07	1.33 1E-07	8.89 1E-08	6.72 1E-08	4.56 1E-08	2.54 1E-08	
Sr-91	1.79 1E-03	1.48 1E-03	1.08 1E-03	7.25 1E-04	5.47 1E-04	3.71 1E-04	2.07 1E-04	
Sr-92	3.12 1E-03	2.60 1E-03	1.92 1E-03	1.30 1E-03	9.89 1E-04	6.81 1E-04	3.84 1E-04	
Y-88	6.10 1E-03	5.09 1E-03	3.78 1E-03	2.57 1E-03	1.96 1E-03	1.35 1E-03	7.60 1E-04	
Y-90m	1.85 1E-03	1.52 1E-03	1.09 1E-03	7.05 1E-04	5.21 1E-04	3.46 1E-04	1.89 1E-04	
Y-90	5.75 1E-10	3.67 1E-10	1.95 1E-10	1.07 1E-10	7.29 1E-11	4.59 1E-11	2.43 1E-11	
Y-91m	1.46 1E-03	1.21 1E-03	8.75 1E-04	5.78 1E-04	4.29 1E-04	2.88 1E-04	1.59 1E-04	
Y-91	8.62 1E-06	7.16 1E-06	5.29 1E-06	3.57 1E-06	2.71 1E-06	1.86 1E-06	1.04 1E-06	
Y-92	6.23 1E-04	5.17 1E-04	3.80 1E-04	2.55 1E-04	1.93 1E-04	1.31 1E-04	7.33 1E-05	
Y-93	2.35 1E-04	1.95 1E-04	1.43 1E-04	9.56 1E-05	7.24 1E-05	4.93 1E-05	2.75 1E-05	
Zr-89	2.99 1E-03	2.47 1E-03	1.81 1E-03	1.21 1E-03	9.07 1E-04	6.15 1E-04	3.42 1E-04	
Zr-95	1.92 1E-03	1.59 1E-03	1.16 1E-03	7.72 1E-04	5.79 1E-04	3.92 1E-04	2.18 1E-04	
Zr-97	2.29 1E-03	1.90 1E-03	1.38 1E-03	9.21 1E-04	6.91 1E-04	4.68 1E-04	2.61 1E-04	
Nb-93m	1.03 1E-06	6.32 1E-07	3.14 1E-07	1.61 1E-07	1.05 1E-07	6.29 1E-08	3.22 1E-08	
Nb-94	4.04 1E-03	3.35 1E-03	2.44 1E-03	1.63 1E-03	1.22 1E-03	8.29 1E-04	4.61 1E-04	
Nb-95m	1.98 1E-04	1.61 1E-04	1.13 1E-04	7.18 1E-05	5.30 1E-05	3.47 1E-05	1.87 1E-05	
Nb-95	2.00 1E-03	1.65 1E-03	1.21 1E-03	8.03 1E-04	6.03 1E-04	4.08 1E-04	2.27 1E-04	
Nb-97m	1.91 1E-03	1.58 1E-03	1.15 1E-03	7.67 1E-04	5.75 1E-04	3.89 1E-04	2.17 1E-04	
Nb-97	1.78 1E-03	1.48 1E-03	1.07 1E-03	7.12 1E-04	5.31 1E-04	3.59 1E-04	2.00 1E-04	
Mo-93	5.59 1E-06	3.43 1E-06	1.71 1E-06	8.73 1E-07	5.68 1E-07	3.41 1E-07	1.75 1E-07	
Mo-99	3.97 1E-04	3.27 1E-04	2.37 1E-04	1.56 1E-04	1.17 1E-04	7.85 1E-05	4.35 1E-05	
Mo-101	3.69 1E-03	3.07 1E-03	2.25 1E-03	1.51 1E-03	1.14 1E-03	7.80 1E-04	4.37 1E-04	
Tc-99m	3.80 1E-04	3.08 1E-04	2.09 1E-04	1.30 1E-04	9.40 1E-05	6.09 1E-05	3.23 1E-05	
Tc-101	9.92 1E-04	8.18 1E-04	5.82 1E-04	3.76 1E-04	2.78 1E-04	1.84 1E-04	1.01 1E-04	
Ru-103	1.40 1E-03	1.16 1E-03	8.34 1E-04	5.49 1E-04	4.07 1E-04	2.72 1E-04	1.50 1E-04	
Ru-105	2.02 1E-03	1.67 1E-03	1.21 1E-03	7.99 1E-04	5.96 1E-04	4.02 1E-04	2.23 1E-04	
Rh-103m	1.37 1E-06	8.44 1E-07	4.35 1E-07	2.17 1E-07	1.45 1E-07	8.63 1E-08	4.38 1E-08	
Rh-105	2.30 1E-04	1.90 1E-04	1.35 1E-04	8.71 1E-05	6.44 1E-05	4.26 1E-05	2.33 1E-05	
Rh-106	5.58 1E-04	4.62 1E-04	3.35 1E-04	2.22 1E-04	1.65 1E-04	1.11 1E-04	6.18 1E-05	
Ag-108m	4.40 1E-03	3.63 1E-03	2.63 1E-03	1.74 1E-03	1.29 1E-03	8.71 1E-04	4.83 1E-04	
Ag-110m	6.90 1E-03	5.72 1E-03	4.19 1E-03	2.80 1E-03	2.11 1E-03	1.43 1E-03	8.00 1E-04	
Ag-110	8.20 1E-05	6.79 1E-05	4.93 1E-05	3.27 1E-05	2.44 1E-05	1.65 1E-05	9.17 1E-06	
Ag-111	7.85 1E-05	6.48 1E-05	4.61 1E-05	2.98 1E-05	2.20 1E-05	1.46 1E-05	7.97 1E-06	
Cd-109	3.16 1E-05	2.10 1E-05	1.17 1E-05	6.25 1E-06	4.31 1E-06	2.64 1E-06	1.35 1E-06	
Sn-117m	4.51 1E-04	3.62 1E-04	2.47 1E-04	1.53 1E-04	1.12 1E-04	7.24 1E-05	3.84 1E-05	
Sn-126	1.42 1E-04	1.07 1E-04	6.77 1E-05	3.94 1E-05	2.79 1E-05	1.76 1E-05	9.16 1E-06	
Sb-124	4.48 1E-03	3.73 1E-03	2.74 1E-03	1.85 1E-03	1.40 1E-03	9.56 1E-04	5.36 1E-04	
Sb-125	1.20 1E-03	9.88 1E-04	7.10 1E-04	4.66 1E-04	3.45 1E-04	2.31 1E-04	1.28 1E-04	
Sb-126m	4.21 1E-03	3.48 1E-03	2.52 1E-03	1.67 1E-03	1.24 1E-03	8.38 1E-04	4.65 1E-04	
Sb-126	7.44 1E-03	6.16 1E-03	4.47 1E-03	2.96 1E-03	2.21 1E-03	1.49 1E-03	8.29 1E-04	
Sb-127	1.88 1E-03	1.56 1E-03	1.13 1E-03	7.45 1E-04	5.56 1E-04	3.74 1E-04	2.07 1E-04	
Sb-128	8.22 1E-03	6.81 1E-03	4.95 1E-03	3.28 1E-03	2.46 1E-03	1.66 1E-03	9.22 1E-04	

付表-3-2 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)													
	3.0	5.0	10	20	30	50	100							
Sb-129	3.64	1E-03	3.02	1E-03	2.21	1E-03	1.48	1E-03	1.12	1E-03	7.62	1E-04	4.26	1E-04
Sb-130	8.50	1E-03	7.03	1E-03	5.12	1E-03	3.40	1E-03	2.56	1E-03	1.73	1E-03	9.62	1E-04
Sb-131	4.99	1E-03	4.15	1E-03	3.06	1E-03	2.06	1E-03	1.56	1E-03	1.07	1E-03	5.98	1E-04
Te-123m	4.30	1E-04	3.45	1E-04	2.35	1E-04	1.46	1E-04	1.06	1E-04	6.90	1E-05	3.66	1E-05
Te-125m	5.03	1E-05	3.20	1E-05	1.68	1E-05	8.61	1E-06	5.85	1E-06	3.54	1E-06	1.75	1E-06
Te-127m	1.61	1E-05	1.03	1E-05	5.46	1E-06	2.82	1E-06	1.92	1E-06	1.17	1E-06	5.83	1E-07
Te-127	1.41	1E-05	1.17	1E-05	8.35	1E-06	5.44	1E-06	4.02	1E-06	2.67	1E-06	1.47	1E-06
Te-129m	8.94	1E-05	7.18	1E-05	5.08	1E-05	3.32	1E-05	2.47	1E-05	1.66	1E-05	9.20	1E-06
Te-129	1.67	1E-04	1.37	1E-04	9.80	1E-05	6.42	1E-05	4.76	1E-05	3.18	1E-05	1.75	1E-05
Te-131m	3.70	1E-03	3.06	1E-03	2.23	1E-03	1.49	1E-03	1.12	1E-03	7.60	1E-04	4.23	1E-04
Te-131	1.14	1E-03	9.41	1E-04	6.74	1E-04	4.40	1E-04	3.27	1E-04	2.19	1E-04	1.20	1E-04
Te-132	6.76	1E-04	5.44	1E-04	3.76	1E-04	2.38	1E-04	1.75	1E-04	1.14	1E-04	6.13	1E-05
Te-133m	4.67	1E-03	3.87	1E-03	2.83	1E-03	1.89	1E-03	1.43	1E-03	9.69	1E-04	5.40	1E-04
Te-133	3.01	1E-03	2.50	1E-03	1.83	1E-03	1.22	1E-03	9.20	1E-04	6.25	1E-04	3.49	1E-04
Te-134	2.40	1E-03	1.97	1E-03	1.42	1E-03	9.28	1E-04	6.91	1E-04	4.63	1E-04	2.55	1E-04
I-128	2.53	1E-04	2.09	1E-04	1.50	1E-04	9.86	1E-05	7.30	1E-05	4.87	1E-05	2.68	1E-05
I-129	3.86	1E-05	2.48	1E-05	1.32	1E-05	6.76	1E-06	4.60	1E-06	2.78	1E-06	1.38	1E-06
I-130	5.75	1E-03	4.76	1E-03	3.45	1E-03	2.29	1E-03	1.71	1E-03	1.15	1E-03	6.40	1E-04
I-131	1.11	1E-03	9.16	1E-04	6.55	1E-04	4.26	1E-04	3.15	1E-04	2.10	1E-04	1.15	1E-04
I-132	5.86	1E-03	4.86	1E-03	3.55	1E-03	2.36	1E-03	1.77	1E-03	1.20	1E-03	6.70	1E-04
I-133	1.67	1E-03	1.38	1E-03	1.00	1E-03	6.63	1E-04	4.93	1E-04	3.32	1E-04	1.84	1E-04
I-134	6.54	1E-03	5.42	1E-03	3.97	1E-03	2.66	1E-03	2.00	1E-03	1.36	1E-03	7.59	1E-04
I-135	3.74	1E-03	3.12	1E-03	2.30	1E-03	1.56	1E-03	1.18	1E-03	8.12	1E-04	4.57	1E-04
Cs-134m	6.41	1E-05	4.91	1E-05	3.16	1E-05	1.88	1E-05	1.35	1E-05	8.65	1E-06	4.54	1E-06
Cs-134	4.12	1E-03	3.41	1E-03	2.48	1E-03	1.65	1E-03	1.23	1E-03	8.35	1E-04	4.64	1E-04
Cs-136	5.42	1E-03	4.48	1E-03	3.27	1E-03	2.18	1E-03	1.65	1E-03	1.12	1E-03	6.21	1E-04
Cs-137	1.51	1E-03	1.25	1E-03	9.09	1E-04	6.03	1E-04	4.50	1E-04	3.04	1E-04	1.69	1E-04
Cs-138	5.45	1E-03	4.54	1E-03	3.36	1E-03	2.28	1E-03	1.74	1E-03	1.19	1E-03	6.72	1E-04
Ba-133	1.13	1E-03	9.16	1E-04	6.41	1E-04	4.09	1E-04	3.01	1E-04	1.99	1E-04	1.08	1E-04
Ba-137m	1.60	1E-03	1.32	1E-03	9.61	1E-04	6.37	1E-04	4.75	1E-04	3.21	1E-04	1.79	1E-04
Ba-139	1.34	1E-04	1.09	1E-04	7.53	1E-05	4.75	1E-05	3.48	1E-05	2.27	1E-05	1.22	1E-05
Ba-140	5.07	1E-04	4.18	1E-04	2.99	1E-04	1.96	1E-04	1.45	1E-04	9.69	1E-05	5.33	1E-05
La-140	5.44	1E-03	4.53	1E-03	3.35	1E-03	2.26	1E-03	1.72	1E-03	1.18	1E-03	6.62	1E-04
La-141	6.16	1E-05	5.13	1E-05	3.81	1E-05	2.58	1E-05	1.97	1E-05	1.36	1E-05	7.66	1E-06
La-142	5.13	1E-03	4.30	1E-03	3.20	1E-03	2.19	1E-03	1.68	1E-03	1.16	1E-03	6.58	1E-04
Ce-141	2.25	1E-04	1.80	1E-04	1.22	1E-04	7.54	1E-05	5.47	1E-05	3.54	1E-05	1.88	1E-05
Ce-143	7.70	1E-04	6.27	1E-04	4.42	1E-04	2.86	1E-04	2.12	1E-04	1.41	1E-04	7.71	1E-05
Ce-144	5.38	1E-05	4.25	1E-05	2.81	1E-05	1.71	1E-05	1.23	1E-05	7.92	1E-06	4.18	1E-06
Pr-143	2.34	1E-11	1.94	1E-11	1.41	1E-11	9.39	1E-12	7.04	1E-12	4.77	1E-12	2.65	1E-12
Pr-144m	2.28	1E-05	1.54	1E-05	8.68	1E-06	4.72	1E-06	3.29	1E-06	2.05	1E-06	1.05	1E-06
Pr-144	6.60	1E-05	5.51	1E-05	4.08	1E-05	2.77	1E-05	2.11	1E-05	1.45	1E-05	8.18	1E-06
Pr-145	4.74	1E-05	3.91	1E-05	2.85	1E-05	1.90	1E-05	1.43	1E-05	9.68	1E-06	5.39	1E-06
Nd-147	3.79	1E-04	3.05	1E-04	2.11	1E-04	1.35	1E-04	9.90	1E-05	6.55	1E-05	3.57	1E-05
Pm-147	1.21	1E-08	9.48	1E-09	6.22	1E-09	3.74	1E-09	2.70	1E-09	1.73	1E-09	9.06	1E-10
Pm-148m	5.36	1E-03	4.43	1E-03	3.22	1E-03	2.13	1E-03	1.59	1E-03	1.07	1E-03	5.93	1E-04
Pm-148	1.40	1E-03	1.17	1E-03	8.58	1E-04	5.77	1E-04	4.36	1E-04	2.98	1E-04	1.67	1E-04
Pm-149	3.46	1E-05	2.85	1E-05	2.03	1E-05	1.31	1E-05	9.72	1E-06	6.45	1E-06	3.53	1E-06
Pm-151	9.31	1E-04	7.62	1E-04	5.40	1E-04	3.49	1E-04	2.59	1E-04	1.72	1E-04	9.40	1E-05
Sm-151	6.04	1E-09	3.73	1E-09	1.92	1E-09	9.57	1E-10	6.40	1E-10	3.80	1E-10	1.92	1E-10
Eu-152m	7.70	1E-04	6.34	1E-04	4.60	1E-04	3.06	1E-04	2.30	1E-04	1.56	1E-04	8.67	1E-05
Eu-152	2.93	1E-03	2.41	1E-03	1.76	1E-03	1.17	1E-03	8.81	1E-04	5.98	1E-04	3.34	1E-04
Eu-154	2.80	1E-03	2.31	1E-03	1.69	1E-03	1.13	1E-03	8.50	1E-04	5.78	1E-04	3.23	1E-04
Eu-155	1.65	1E-04	1.27	1E-04	8.09	1E-05	4.75	1E-05	3.40	1E-05	2.15	1E-05	1.12	1E-05
Eu-156	2.84	1E-03	2.37	1E-03	1.75	1E-03	1.18	1E-03	9.01	1E-04	6.18	1E-04	3.47	1E-04
Tb-160	2.84	1E-03	2.35	1E-03	1.71	1E-03	1.14	1E-03	8.62	1E-04	5.85	1E-04	3.26	1E-04
Yb-169	8.99	1E-04	6.97	1E-04	4.58	1E-04	2.78	1E-04	2.01	1E-04	1.29	1E-04	6.83	1E-05
Hf-181	1.52	1E-03	1.25	1E-03	8.87	1E-04	5.76	1E-04	4.24	1E-04	2.82	1E-04	1.54	1E-04
Ta-182	3.15	1E-03	2.59	1E-03	1.89	1E-03	1.26	1E-03	9.55	1E-04	6.51	1E-04	3.63	1E-04
W-185	1.38	1E-07	1.07	1E-07	6.84	1E-08	4.05	1E-08	2.88	1E-08	1.83	1E-08	9.59	1E-09
W-187	1.22	1E-03	1.00	1E-03	7.20	1E-04	4.73	1E-04	3.51	1E-04	2.36	1E-04	1.30	1E-04
Ir-192	2.38	1E-03	1.96	1E-03	1.40	1E-03	9.10	1E-04	6.73	1E-04	4.47	1E-04	2.46	1E-04
Hg-203	7.14	1E-04	5.85	1E-04	4.12	1E-04	2.64	1E-04	1.95	1E-04	1.28	1E-04	6.98	1E-05
Tl-208	7.19	1E-03	6.04	1E-03	4.49	1E-03	3.08	1E-03	2.36	1E-03	1.63	1E-03	9.27	1E-04
Pb-210	4.67	1E-06	3.19	1E-06	1.79	1E-06	9.61	1E-07	6.61	1E-07	4.03	1E-07	2.04	1E-07
Pb-212	4.27	1E-04	3.45	1E-04	2.38	1E-04	1.50	1E-04	1.10	1E-04	7.20	1E-05	3.87	1E-05
Pb-214	7.36	1E-04	6.04	1E-04	4.27	1E-04	2.75	1E-04	2.03	1E-04	1.34	1E-04	7.34	1E-05

付表-3-2 (つづき)

単位 : ($\mu\text{Sv/h}$) / (kBq/m^2)

核種	放射性物質の土壌における鉛直分布を表すパラメータ β ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)													
	3.0		5.0		10		20		30		50		100	
Bi-212	2.57	1E-04	2.13	1E-04	1.56	1E-04	1.05	1E-04	7.88	1E-05	5.36	1E-05	3.00	1E-05
Bi-214	3.49	1E-03	2.91	1E-03	2.15	1E-03	1.45	1E-03	1.10	1E-03	7.55	1E-04	4.24	1E-04
Po-216	3.96	1E-08	3.28	1E-08	2.39	1E-08	1.60	1E-08	1.20	1E-08	8.13	1E-09	4.53	1E-09
Ra-224	3.15	1E-05	2.57	1E-05	1.80	1E-05	1.15	1E-05	8.47	1E-06	5.56	1E-06	3.00	1E-06
Ra-226	2.23	1E-05	1.80	1E-05	1.25	1E-05	7.85	1E-06	5.75	1E-06	3.74	1E-06	1.99	1E-06
Ac-228	2.18	1E-03	1.81	1E-03	1.32	1E-03	8.80	1E-04	6.64	1E-04	4.50	1E-04	2.51	1E-04
Th-228	6.26	1E-06	4.89	1E-06	3.22	1E-06	1.96	1E-06	1.41	1E-06	9.06	1E-07	4.78	1E-07
Th-231	4.03	1E-05	2.99	1E-05	1.86	1E-05	1.07	1E-05	7.61	1E-06	4.80	1E-06	2.50	1E-06
Th-232	8.37	1E-07	5.84	1E-07	3.41	1E-07	1.90	1E-07	1.31	1E-07	8.19	1E-08	4.23	1E-08
Th-234	2.47	1E-05	1.89	1E-05	1.19	1E-05	6.97	1E-06	4.94	1E-06	3.12	1E-06	1.63	1E-06
Pa-233	6.33	1E-04	5.17	1E-04	3.62	1E-04	2.31	1E-04	1.70	1E-04	1.12	1E-04	6.07	1E-05
U-232	1.32	1E-06	9.11	1E-07	5.27	1E-07	2.96	1E-07	2.05	1E-07	1.28	1E-07	6.67	1E-08
U-234	9.34	1E-07	6.19	1E-07	3.41	1E-07	1.85	1E-07	1.26	1E-07	7.80	1E-08	4.02	1E-08
U-235	4.95	1E-04	4.01	1E-04	2.77	1E-04	1.74	1E-04	1.27	1E-04	8.28	1E-05	4.40	1E-05
U-236	7.12	1E-07	4.57	1E-07	2.42	1E-07	1.28	1E-07	8.63	1E-08	5.27	1E-08	2.70	1E-08
U-237	3.84	1E-04	3.03	1E-04	2.03	1E-04	1.24	1E-04	8.98	1E-05	5.78	1E-05	3.06	1E-05
U-238	5.79	1E-07	3.73	1E-07	1.99	1E-07	1.07	1E-07	7.23	1E-08	4.45	1E-08	2.30	1E-08
Np-237	6.92	1E-05	5.26	1E-05	3.35	1E-05	1.97	1E-05	1.41	1E-05	8.96	1E-06	4.67	1E-06
Np-238	1.59	1E-03	1.32	1E-03	9.68	1E-04	6.49	1E-04	4.92	1E-04	3.35	1E-04	1.86	1E-04
Np-239	5.16	1E-04	4.16	1E-04	2.84	1E-04	1.77	1E-04	1.29	1E-04	8.39	1E-05	4.49	1E-05
Pu-236	9.96	1E-07	6.26	1E-07	3.24	1E-07	1.68	1E-07	1.12	1E-07	6.79	1E-08	3.48	1E-08
Pu-238	8.68	1E-07	5.39	1E-07	2.75	1E-07	1.41	1E-07	9.35	1E-08	5.63	1E-08	2.88	1E-08
Pu-239	5.40	1E-07	3.65	1E-07	2.08	1E-07	1.17	1E-07	8.09	1E-08	5.07	1E-08	2.66	1E-08
Pu-240	8.28	1E-07	5.16	1E-07	2.64	1E-07	1.36	1E-07	9.00	1E-08	5.42	1E-08	2.77	1E-08
Pu-241	4.48	1E-09	3.54	1E-09	2.33	1E-09	1.40	1E-09	1.01	1E-09	6.48	1E-10	3.40	1E-10
Pu-242	9.06	1E-07	6.09	1E-07	3.52	1E-07	2.02	1E-07	1.42	1E-07	9.06	1E-08	4.84	1E-08
Am-241	5.98	1E-05	4.27	1E-05	2.52	1E-05	1.40	1E-05	9.64	1E-06	5.98	1E-06	3.08	1E-06
Am-242m	3.37	1E-06	2.17	1E-06	1.17	1E-06	6.17	1E-07	4.19	1E-07	2.55	1E-07	1.31	1E-07
Am-242	4.08	1E-05	3.19	1E-05	2.08	1E-05	1.24	1E-05	8.93	1E-06	5.69	1E-06	2.98	1E-06
Am-243	1.48	1E-04	1.12	1E-04	6.97	1E-05	4.02	1E-05	2.82	1E-05	1.78	1E-05	9.23	1E-06
Cm-242	9.89	1E-07	6.12	1E-07	3.14	1E-07	1.60	1E-07	1.06	1E-07	6.37	1E-08	3.25	1E-08
Cm-243	3.75	1E-04	3.03	1E-04	2.07	1E-04	1.30	1E-04	9.48	1E-05	6.17	1E-05	3.30	1E-05
Cm-244	8.85	1E-07	5.57	1E-07	2.93	1E-07	1.53	1E-07	1.03	1E-07	6.29	1E-08	3.25	1E-08
Cm-245	2.89	1E-04	2.30	1E-04	1.53	1E-04	9.26	1E-05	6.71	1E-05	4.30	1E-05	2.26	1E-05
Cm-246	1.03	1E-05	8.36	1E-06	6.04	1E-06	4.01	1E-06	3.02	1E-06	2.05	1E-06	1.14	1E-06
Cm-247	9.13	1E-04	7.54	1E-04	5.40	1E-04	3.52	1E-04	2.60	1E-04	1.73	1E-04	9.48	1E-05
Cm-248	3.45	1E-03	2.85	1E-03	2.09	1E-03	1.40	1E-03	1.06	1E-03	7.19	1E-04	4.00	1E-04

付録 4 参考文献

- (1) 「放射性セシウム沈着量の面的調査」
三上智、斎藤公明：平成 26 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発）事業成果報告書(2015)
- (2) 「In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectrometry」
H. L. Beck, J. DeCampo and C. Gogolak : Report HASL-258 (1972)
- (3) 「Gamma-Ray Spectrometry in the Environment」
International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU Report 53(1994)
- (4) 「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」
：放射能測定法シリーズ No.7(1992)
- (5) 「Radiation protection instrumentation - Measurement of discrete radionuclides in the environment - In situ photon spectrometry system using a germanium detector」
：IEC 61275 Ed.2 (2013)
- (6) 「ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File)」
：National Nuclear Data Center, Brookhaven(2016)
- (7) 「Field Gamma-Ray Spectrometry」
K. M. Miller : EML Procedures Manual, HASL-300, Section3.3 (1997)
- (8) 「環境試料採取法」
：放射能測定法シリーズ No.16(1983)
- (9) 「Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency」
International Atomic Energy Agency : IAEA-TECDOC-1092 (1999)
- (10) 「PHOTX データベース」
- (11) 「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)
- (12) 「MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code Version 4C」
Briesmeister, J.F. : Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (2000)
- (13) 「Performance of Digital Signal Processors for Gamma Spectrometry」
Canberra Industries, Inc. : Application Note (2008)
- (14) 「Comparisons of the Portable Digital Spectrometer Systems」
Duc T. Vo, Phyllis A. Russo, Los Alamos NATIONAL LABORATORY : LA-13895-MS, (2002)
- (15) 「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 : (2001)
- (16) 「土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」
松田規宏、斎藤公明：平成 27 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約）事業成果報告書(2016)

- (17) 「Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides」
F. Zapata : (2010)
- (18) 「Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant」
N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura, J. Takahashi, M. Nakano, K. Shimada, K. Uno, S. Hagiwara, K. Saito : Journal of Environmental Radioactivity 139, 427-434 (2015)
- (19) 「Fundamental data on environmental gamma-ray fields in the air due to source in the ground」
K. Saito, P. JACOB : JAERI-Data/Code 98-001 (1998)
- (20) 「In Situ Gamma Spectrometry Intercomparison in Fukushima, Japan」
S. Mikami, S. Sato, Y. Hoshide, R. Sakamoto, N. Okuda, K. Saito : J. Health Phys., 50 (3), 182 ~ 188 (2015)
- (21) 「Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground」
K. Saito, N. Petoussi-Hens : Journal of Nuclear Science and Technology (2014)

リサイクル適正の表示：印刷用の紙にリサイクルできます。

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料「A ランク」のみを用いて作製しています。