放射能測定法シリーズ (No. 17) DR-CNT

連続モニタによる環境γ線測定法

平成29年12月改訂

原子力規制庁監視情報課



第1	章	序 論	1
第2	章	用語の解説 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
	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の留意点	37
	7.4	線量	40
	7.5	各測定システムにおける解析と評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46
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

- 9.3 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	58
解説 C	基準γ線源	76
解説 D	校正時の散乱線対策	78
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 ・・・・・・・・	82
解説 F	走行サーベイシステムにおける留意点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	87
解説 G	測定結果の解析	93
解説 H	比較測定による測定値の簡易的な確認方法	103
解説 I	事故時の線量率寄与割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	106
解説 J	レスポンス関数の作成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	109

付 録

付録1	レスポンス関数の計算例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	123
付録 2	ストリッピング法による NaI モニタのデータ処理の例 ・・・・・・・・・・	135
付録3	逐次近似法による NaI (T1) 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	146
付録4	参考文献	150

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場合もある。

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」の一部内容を記載し、統合を図った。

本測定法に記載する「環境 y 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。

1

第2章 用語の解説

本章には、本測定法シリーズに記載されている用語を解説し、また、環境ガンマ線量率測 定作業を実施するにあたり、重要な用語についても解説を記載した。

自然放射性核種(天然放射性核種)(文献1)

天然に存在する放射性核種。

人工放射性核種(文献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又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又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が原子力災害対策を円滑に実施するために定めた 指針。緊急時におけるモニタリングに関する考え方についても示している。 UPZ

原子力災害対策指針において示されている緊急時防護措置を準備する区域。<u>Urgent</u> Protective action <u>Planning Zone</u>の略。発電用原子炉施設では、おおむね 30km 圏内を目 安としている。

組織加重係数(文献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。

放射線加重係数(文献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(文献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(文献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(文献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 (文献 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、又はアンフォールディング unfolding)に生じる不 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(文献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(文献1)

実効原子番号が、生体組織と等しい物質。

空気等価物質(文献1)

実効原子番号が、空気と等しい物質。

ファントム (文献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 (文献 1)

密度1g/cm³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(文献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。

前置增幅器(文献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。

比例增幅器(文献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(文献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(文献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(文献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(文献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(文献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(文献 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

原子力施設周辺又は放射線施設周辺の空間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

原子力施設周辺又は放射線施設周辺において、野外の空間線量率、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

環境における空間線量率、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 (文献 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(文献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(文献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(文献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)(文献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(文献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(文献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(文献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 (文献 2)

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。

3.1 概説

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。

使用者は、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、本章、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 y 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。

連続モニタによる環境 y 線測定における一般的事項について解説 A に示す。

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(文献 3)。

3.2.1 電離箱

電離箱は、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、又は一定時間間隔 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、エネルギー 特性は、常圧空気型(1気圧)は良好である。加圧型は検出器壁の材質、封入ガスによりレス ポンスが異なる。また、線量率測定範囲は、常圧空気型(1気圧)及び加圧型ともに大きくと ることができる。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

6

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 以上のアルゴンや窒素ガスを 8~20 kgf/cm²(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、小型で高い感度が得られる。

エネルギー特性及び線量率直線性は、解説 B.1 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¹³³Xe (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(T1)シンチレーション検出器

NaI (T1) 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.2 に示す。

放射線の入射に伴って、NaI(T1)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ら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、極めて低い信号にもかかわらず波高 弁別器でシグナルとノイズを識別・分離できるため、高く安定した放射線検出を行える特徴 がある。

3.2.3 シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器は電離箱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、それぞれを陽極と 陰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.3 に示す。

シリコン半導体検出器の感度は、NaI(T1)シンチレーション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。

7

3.2.4 CsI (T1) シンチレーション検出器

CsI (T1) シンチレーション検出器は、NaI (T1) シンチレーション検出器と同じ測定原理を もつシンチレーション検出器である。この検出器の特徴は、NaI (T1) 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。CsI (T1) シンチレーション検出器 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

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 電子式線量計
 - 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。

(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蓄積が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*1 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る ことが望ましい。なお、各種帳票では異常値の抽出に資する為に、平均値、最大値及び最小 値を任意に設定し出力できることが望ましい。

(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

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。

^{*&}lt;sup>1</sup> 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、4.3項に示す可搬型モニタリングポストは、福島第一原発事故以降、固定式連続モニ タと同様の扱いで設置・運用されていることを踏まえ、記載することとした。

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。

測定原理は、電離箱に入射する荷電粒子及び二次的に発生する荷電粒子が、電離箱の気体 中を通過する際に気体分子を電離し、生成した電子とイオン対の電位差によって流れる電流 を検出する。この電流値を照射線量(C/kg又はR)に換算し、その後空気カーマ、空気吸収 線量及び周辺線量当量等に換算して線量率を算出する。

よって、構造としては、電離箱の壁厚は、荷電粒子平衡が成立し、強度が十分で、かつ入射 ガンマ線の大きな減衰がないことを考慮する必要がある。

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又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。

10

	加圧型電離箱の仕様例				
電離箱壁材、	ステンレス 2 mm	アルミニウム	アルミニウム	アルミニウム	
厚さ、容量	鉄 1.2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	
及び形状	14 L 球形	14 L 球形	14 L 球形	14 L 球形	
封入ガス種 及び圧力	アルゴン 又は(及び) 窒素 4 気圧	アルゴン 又は窒素 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 $\sim \infty$				
測定可能 線量率範囲		10 nGy/h \sim 10	00 mGy/h		
温度制御の方式	加油 又は這	且式 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 又は 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	3 MeV 80 keV ~ 3 MeV 度 ±10 %程度			
線量率直線性	0.4 μGy/h ~1 mGy/h 土5 %程度				

表 4.1 電離箱モニタの仕様例

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、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 $\phi \times 2$ in、3 in $\phi \times 3$ 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

		•				
			NaI モニタの仕様			
検出器の寸法		2 in $\phi \times 2$ in	3 in $\phi imes 3$ in	り;ちょ武武		
及び形	状	円柱形	円柱形	3 IN Ø म्ह्रत्तारु		
テマルギ	一站位	・デジタル処理 (G	(E)関数法)			
	衎頂	・DBM 方式				
温度補償	回路	有り				
泪 宙 制 准	「た田	・加温式				
価 <u></u> 反 前 仰	液回	・送風式				
		•樹脂3.0 mm				
		• 樹脂 2.5 mm				
断動カバー	の材質	・樹脂 1.5 mm				
町飛みへ	の的貝	・アルミニウム 2.0 mm 及び樹脂 2.0 mm				
		・アルミニウム 1.2 mm				
		・アルミニウム 1.0 mm				
ディフカル	LLD	50 keV				
	ULD	3000 keV				
測定可能線量率範囲		10 nGy/h \sim 10	μ Gy/h			
		・硼硅酸ガラス				
NaI 結晶光学	学窓材質	・低 K ガラス				
		・石英				
		・硼硅酸ガラス				
光電子增倍	管窓材質	・低 K ガラス				
		・石英				

表 4.2 NaI モニタの仕様例

※ディスクリ: Discriminator (波高弁別器)の略。

4.2.3 電子式線量計

電子式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。また多くの電子式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、UPZ として発電用原 子炉施設からおおむね 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¹³⁷Csの662 keV にて算出した換算係数を用いて、線 量率に換算する方式が一般的である。この方式の場合は、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できないことに留意しなければならない。

表4.3に電子式線量計の仕様例を示す。

	電子式線量計の仕様
検出器	シリコン半導体検出器
測定線量率範囲	0.2 μSv/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 °C~+40 °C
使用湿度環境	±20 % 35 ℃を基準とし 40 %~90 %RH
エネルギー特性	-50 %~30 % 60 keV~100 keV 未満
(¹³⁷ Cs 基準)	± 30 % 100 keV ~ 1.5 MeV
線量率特性	+20.% 0.2 See /h = 10 See /h
(¹³⁷ Cs 基準)	$\pm 20\%$ 0.2 μ SV/m ² 10 mSV/m
測定精度	$\pm 10 \%$ 1 μ Sv \sim 999.99 mSv
(¹³⁷ Cs 基準)	※電子式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	$+20 \% 0^{\circ} + 60^{\circ}$
(¹³⁷ Cs 基準)	
温度特性	±20 % ※使用温度範囲内で+20 ℃を基準
	・一次電源:AC100 V
電源	・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

表 4.3 電子式線量計の仕様例(文献 4)

4.3 可搬式連続モニタ

可搬式連続モニタとは、固定せずに移動・運搬することが可能な可搬型モニタリングポス ト等を仮固定することにより、連続モニタとして活用する機器のことを表している。

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いる。測定可能線 量率範囲は、バックグラウンドレベル~数百 mGy/h(数百 mSv/h)程度であり、原子力災害時 等に固定式連続モニタが設置されていない空白地域や、何らかの原因によって測定不能とな った測定器の代替器として活用される機器である。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連続モニタとし て活用されている。

4.3.1 可搬型モニタリングポスト

(1) NaI(T1)シンチレーション検出器

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。

代表的な機種では、低線量率領域を NaI (T1) 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 (T1) シンチレーション検出器では、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 (T1) 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 G(E) 関数法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でき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(T1)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(T1)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、電子式線量計と同様である。

表4.4に可搬型モニタリングポストの仕様例を示す。

	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(T1)シン チレーション 検出器	シリコン 半導体 検出器	NaI (T1) 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 inφ×2 in 円柱形	_	2 inφ 円木	×2 in 主形	_	
測定 線量率 範囲	ΒG∼ 11 μGy/h	9 μ Gy/h \sim 100 mGy/h	0.01~ 500 μGy/h	300 μ Gy/h \sim 100 mGy/h	BG∼1	00 mGy/h
測定 エネルギ ー範囲	50 keV \sim 3 MeV	50 keV $\sim \infty$	50 keV \sim 3 MeV	50 keV $\sim \infty$	50 k	zeV∼∞
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 又は 10分値		1分値 又は 10分値		1分値 3	スは 10 分値
時定数	10秒,100秒		10秒,60秒,100秒		自重	動切替
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 ※オプショ 部バッテリ 装備可	内蔵バッテリー ンによって外 ー太陽光発電
寸法	約 345×348	imes 205 mm	約 670×440×450 mm		約 600×4	480×250 mm
重量 約10		kg	約1	5 kg	約	30 kg

表 4.4 可搬型モニタリングポストの仕様例

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わた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 照のこと。

4.4.1 固定型タイプ

(1) NaI(T1)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 $\phi \times 2$ 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、代表例のひとつとして CsI (T1) 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。

	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(T1)シンチレーション 検出器			
測定線量率範囲	10 nGy/h \sim 10 μ Gy/h	10 μ Gy/h \sim 100 mGy/h		
測定エネルギー範囲	50 keV \sim 3 MeV	50 keV $\sim\infty$		
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 きょう(筐)体	検出器カバー、線源校正治具取付け台含む			
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 (3) プリンタ (4) データ伝送用通信装置 (5) GPS 	F		
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す ーを設置	系ごとに電源を分割しブレーカ		

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(可搬型タイプ)の仕様 CsI(T1)シンチレーション検出器 検出器 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 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 \sim 300 μ Sv/h 測定エネルギー範囲 $30 \text{ keV} \sim 2 \text{ MeV}$ ¹³⁷Cs 0.01 µSv/hにおいて40 cpm以上 計数効率 8 % ¹³⁷Cs 662 keV エネルギー分解能 エネルギー補償 G(E) 関数法 線量率演算方式 アルミニウム製収納ボックス 検出器収納 175 mm \times 345 mm \times 240 mm きょう(筐)体 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 °C (1) 組み込み用コンピュータ (2) データ収集・処理ソフト データ収集装置 (3) データ伝送用通信装置 (4) GPS 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 雷源 源供給が可能であること

表 4.6 走行サーベイシステム (可搬型タイプ)の仕様例

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涸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で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 ないようにするのがよい。
- (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、比較的災害の影響を受けな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 ことがある。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。しかし、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、 測定の目的を勘案するほか、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、百葉箱等に設置するのがよい。
- (2) 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

地上高 1m において、人体への被ばく線量評価に資する基本的な測定地上高である。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及び路地上等に存在する放射性物質の寄与が含まれる。 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、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モニタリング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。

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。

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 項以外に 5.2.1 項の(2)~(3)と同様の留意事項をもつ。



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 電子式線量計

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

なお、電子式線量計は、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、太陽光発電設 備は、検出器上部を覆ってしまわないように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を行うことができる。携帯電話回線は、プ ロバイダー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 バイダーを選択しても、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、プロバイダー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、どのプロバイダー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又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

電子式線量計は、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、次に示す電源供給方法を組合せて使用するのがよい。

AC 電源

AC 電源は、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γ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わた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。

電子式線量計における設置状況の一例を図 5.5 に示す。



図 5.5 電子式線量計 設置状況の一例(島根県)

5.3 可搬式連続モニタ

福島第一原発事故以降、可搬式連続モニタのうち可搬型モニタリングポストについては、 固定式連続モニタと同様の扱いで設置・運用されていることを踏まえ、設置に際しての留意 事項等を以下に記載した。

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

電子式線量計と同様である。

(3) 駆動電源

電子式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レスポンスの変化が大き くなってしまうことがある。長期的に安定した電源を確保するためには、太陽光発電設備を 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.3 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1m、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2m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)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 (無停電電源装置)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1m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(文献 5)

(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 項は次に示す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。車内にて 測定し得られる測定値を車外における線量率とするために、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り、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)(文献 6)

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長期間放置され るうえ、欠測を最少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) モニタの取り扱いは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はらう。
- (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、ほこりの付着で電気的漏えい 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。

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ので、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電子式線量計

温度特性に留意する必要がある。また、電子式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 モニタ及び電子式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.3 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では、測定におけ る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の遮へい等も含めた測定にお ける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。

表 6.1 固定式及び可搬式連続モニタについての記録様式の例

連続モニタによる空間放射線量率調査結果報告

	住所					
測定場所	緯度	:	:			
	経度		:			
地点名						
モニタ名	Nalモニタ・	電離箱	省モニタ・その他 ()		
地上からの高さ						
宇宙線 (含 ・ 除)		含	•	除		

調査	年度	
担当	研究所	
主任	調査員	
担当	者	

	天候	空間線量率					 I
測定年月日		平均值	標準偏差	測定時単位	測定時間	データ数	備考
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h(周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h (空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			
				nGy/h(空気吸収線量率)			
				nSv/h (周辺線量当量率)			

6.2 固定式連続モニタ

6.2.1 確認校正と校正

「確認校正」とは、定期的な性能維持の確認を目的として、実用線源を用いて校正定数の 変動の有無に着目して行う簡易的な校正であり、測定値が「相対基準誤差±10%」の許容範 囲内であれば合格とすることは JIS Z 4511:2005 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、計測値と値付け間に存在する差の補正に必要な校正定数を与える行為 である。

上記のように「確認校正」と「校正」は異なった行為であり、「確認校正」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」を実施することは現 行、実用的でないため、「確認校正」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「確認校正」 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。確認校正あるいは 校正作業に使用する基準γ線源に関する解説を解説 Cに示す。なお、確認校正は、点検項目 の一環として行われることが一般的である。

(1) 確認校正及び校正の方法

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との比較測定による校正(in-situ校正)を行うことは可能である。 また、検出器が取り外せる測定システムについては、校正照射場における校正は可能である。

実用線源は通常線源から1m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又は床面に平行であるならば、散乱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。確認校正は、この散乱線の評価をすること が難しいことから、確認校正時の指示値と初期指示値との比に変化がないことを調べること により、測定器の機能が健全に保たれていることを確認するものである。

以下に主な確認校正の条件・方法を記載する。

- ① 確認校正用の実用線源の核種は、60Co又は¹³⁷Csとする。ただし、²²⁶Raを用いてもよい。
- ② 照射方向は、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 連続モニタ検出器の実効中心と線源の校正距離を決め、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 線源と実効中心の距離は、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 通常確認校正結果に影響を及ぼすような気象条件を避けて行う。 具体的には確認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。

次式から校正定数 K を算出する。

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

ここに、 D : 確認校正時に用いる実用線源の線量率

Q:実用線源による照射時の指示値

Q_h:環境γ線の線量率による指示値

- ⑧ 確認校正実施の頻度は、四季の気象・環境の変化を考慮すれば四半期毎の年間4回が望ましい。しかし、年間4回が不可能な場合には、実用線源を用いて、可能な限り短い間隔で確認を行うことによって、機器の健全性の確認ができる。
- ⑨ 確認校正の日時、確認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、多くの地点で確認校正を行う場合、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。
- (2) 点検項目

モニタの点検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。 以下に点検項目の一例を示す。

- 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精度、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。

32
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(T1)シンチレーション検出器使 用の場合、計数値の統計誤差的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 分以下とし、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。また、波高分布については、その検出 器の種類及びサイズにもよるが、10 分程度の積算値を連続的に収集する。

- (2) データ処理
 - 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 電子式線量計
- (1) 測定時間の決定

電子式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 確認校正と校正

可搬式連続モニタにおける確認校正と校正の考え方は、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、確認校正等を実施する。

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 確認校正と校正

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確認校正は、固定局等で使用されている機器と同様である。

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 の線量率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.2 に走行経過時間と移動距離の関係を示す。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.2 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 れば、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れば、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} <u>G</u>lobal <u>P</u>ositioning <u>S</u>ystem:「全地球測位システム」の略

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

平常時モニタリングの目的(文献7)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、環境における当該原子力施設起因の放射性物質又は放射線による周辺住民等の被ば く線量を推定し、評価することとする。」がある。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「緊急事態が発生した場合への平常時からの備え」 がある。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、 長期にわた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

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

分散 σ²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.1 に示す。

7.2.2 施設寄与の影響を含む可能性のある測定値の抽出

施設寄与の影響を含む可能性のある測定値は、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+3σの範囲を超えるものを施設寄与の影響を含む可能性のある測定値とする。

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、この情報を活用して、施設寄与の有無を確認することも有効である。

具体例としては、福島第一原発事故後の特に環境中に放射性セシウムが支配的に存在する ような状況の場合、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自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 の目安を知ることもできる。

なお、校正及び確認校正を実施する、もしくは解説 H に示す比較測定による測定値の簡易 的な確認方法によって、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。

7.2.3 施設寄与の影響を含む可能性のある測定値の原因の解析

3σを超えたために施設寄与の影響を含む可能性のある測定値と判定された測定値には、正 常値が含まれる。このほか、連続観測においては、自然現象並びに医療、産業等の人工的な 要因によって環境放射線が特定の期間変動し、3σを上回る値が観測される。施設寄与の影響 を含む可能性のある測定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。

3σを上回る値の生じる主な要因は、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)降雨、(ii)積雪、(iii)そのほかの自然現象、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、(vii)医療、産業等の人工的な放射線源などがある。

これらの要因について解析を行うには、以下のことが必要である。

(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。

解説 G には、母集団のとり方、おもな 3 σ を上回る値の発生原因、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 に施設寄与の影響を含む可能性のある測定値解析のフ 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の留意点

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。

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放射性物質が地表面に沈着した後とでは、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。

また、事故後においては、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、物理減衰等 による線量率の低下を考慮し、1か月程度の間隔でしきい値を更新し、異常値の抽出を行う。 また、機器異常でないことを確認するために、比較測定による測定値の簡易的な確認方法(解 説 H)によって、測定システムが正常に動作していることを確認することも重要である。



図 7.1 施設寄与の影響を含む可能性のある測定値を弁別するための基本的なフローチャート例

7.4 線量

環境γ線量には、「空気吸収線量(Gy)」及び「周辺線量当量(Sv)」をはじめ様々なものが 存在する。

それぞれの線量は、モニタリングの目的に応じて使い分けされるべきであり、測定者は報 告等の際には観測結果とともに線量の単位を明確にしておくべきである。

線量	単位等	内容
照射線量	クーロン/キログラム	放射線によって空気1 kg で生成された電荷量
	(C/kg)	線量の基本となっている線量
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
カーマ	グレイ(Gy)	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
		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、環境放射線モニタリングでは、
		空気カーマと空気吸収線量は等しいとみなされる
		ことが多い。
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。
周辺線量当量	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
(1 cm線量当量)		(ICRU球)の表面から深さ1 cmにおける線量当量
		である。

表 7.1 線量の一覧

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モニタ及び電子式線量計)

(1) 測定地上高

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、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。

(2) 検出器に応じた結果の評価

福島第一原発事故初期の放射性プルームでは、解説 I.2 に示したとおり、¹³³Xe 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 た。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。

一方、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の状況においては、測 定可能線量率範囲を考慮して測定器を選択することで、測定値を正確に評価することができ 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。

電子式線量計は、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)」(文献 8)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。

平常時において、設置予定地点をあらかじめ選定できるのであれば、平常時にバックグラ ウンドレベルを把握するための参照データを蓄積しておく必要がある。

なお、「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では、固定局 と同様の考え方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5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て も、温度制御装置は備わっていない。さらに設置条件として、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 どのレスポンスの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わたっ て同一地点で実施する場合には、温度によるレスポンスの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) 車両の遮へい等を考慮した補正係数の算出

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いの影響によって測 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。

固定型タイプ又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。

- 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い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。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、 後に改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.3 に周辺環境に起因する環境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、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、自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。 8.1 概説

NaI モニタを用いて取得した y 線スペクトルを解析することによって、自然放射性核種で あればウラン系列核種、トリウム系列核種及び ⁴⁰K 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(T1)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。

- 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 y 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 y 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 y 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 y 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、y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(T1)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)、主増幅器、ADC 回路、線量率演算回路、デー タ表示部、データ処理部、記録計、MCA 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又はテレメータシス 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 モニタの構成例

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く、自動で連続収集される。

ここでは、空間 y 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、

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 0.5~2 µs の範囲で選ばれる。

MCA の使用チャネル数については、NaI(T1)シンチレーション検出器によるスペクトルの1 チャネル当たりのエネルギー幅が数~20 keV 程度、通常5~10 keV/ch が適当なところから 500~1000 チャネルとし、また、3 MeV 以上に宇宙線の情報がとれるようにすることもできる。

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 に が のた は 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)はチェッキング線源(例えば¹³⁷Cs 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、全吸収ピーク*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、¹³⁷Csの662 keV y 線を用い、全吸収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(T1)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)。

8.4 測定データの一次処理

エネルギー校正に備え、チェッキング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ネルのデータの整理 を行う。エネルギー対チャ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。

^{*1} 入射γ線のエネルギーが検出器内で全て吸収されて、γ線スペクトル上に生じるピーク

^{*2} 電気的に任意のエネルギー(チャネル)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

8.5 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⁴⁰K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方法が適用できる。

使用できるチェッキング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⁵⁷Co の 0.122 MeV、高エネルギー側の校正点としての自然放射性核種⁴⁰K の 1.46 MeV 又は⁶⁰Co 線源 の 1.33 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。

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

$$P(h) = \int_{0}^{E} \varepsilon (E)K(E,h)N(E)dE$$
(9.1)

の積分方程式で表現できる。この式中のε(E)は検出器の効率である。この式のK(E,h)又 はε(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(解説 J.2 参照)。

レスポンス関数の区切り幅(又はチャネル)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(又は行)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。

$$\eta_{t} = 1 - \frac{2}{(\mu d)^{2}} + 2e^{-\mu d} \left\{ \frac{1}{(\mu d)^{2}} + \frac{1}{\mu d} \right\}$$
(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 1 「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(又はレスポンス行列)と実際の測定系の応答の適合性 も問題である。 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ときは、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、通常はチャネル当たり一定のエネルギー幅(チャネル幅)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²⁴¹Am 60 keV、⁵⁷Co 122 keV、又は入力信号ゼロを特定エネルギー(例えば -17 keV))、⁴⁰K 1461 keV、トリウム系列の²⁰⁸T1 2614 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)。さら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/チャネルの関係式を得たなら、各チャ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ネル幅は1チャネル当たり、10、20、50 keV などが選ばれるが、 まれに 100 keV 又は 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2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3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じることがある。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 一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、③γ線束密度(全エネルギー領域及び特定領域内)、④照射線量率(全エネルギー領域及び特定領域内)、⑤NaI(T1)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 域にわたる照射線量率と光子束密度又は計数率との関係が一定であれば、光子束密度は計数 率から直ちに照射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照射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(T1)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¹³¹I、¹³⁷Cs など)が存在する場合に限られる。一方通常の環境放射線場においては自然放射 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(T1)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。 特に自然放射性核種が主な成分である通常の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、環境における自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。

この自然放射性核種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(1 μ R/h 当たりの各領域内の照射線 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 O	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おり、当時の測定単位である R の記載として 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%程度の差が生じることがあり、これを上まわ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

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+ 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(アナログ又はデジタル表示)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)又は検出器の計数率(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電子式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、 一般の使用において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、⁴⁰K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。

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。

57

解説 B.1 電離箱モニタ

現在、連続モニタとして実用化されている電離箱には、純アルゴンガス又は窒素ガスを高 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、又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、基本的には空気吸 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、更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(T1) シンチレーションモニタ

B.2.1 モニタの原理と構成

NaI(T1)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 クトルー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、スペクトルー線量変換演算子(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ー線量変換演算子 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。

$$D = \int_{E_{min}}^{E_{max}} P(E) \cdot G(E) dE$$

= $\sum_{I=I_{min}}^{I=I_{max}} P(I) \cdot G(I)$ (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/チャネル)
Ε	:波高 (keV)
Ι	: チャネル番号
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} に対応するチャネル番号
I_{max}	: E _{max} に対応するチャネル番号
G (E)	:スペクトルー線量変換演算子 (nGy/h/cpm/keV)
G(I)	: スペクトルー線量変換演算子 (nGy/h/cpm/チャネル)

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} =30~50 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(T1)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(T1)結晶の形状、寸法及び結晶容器の形状である。NaI(T1)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(T1)検出器に対するG(E)関数を一旦求めておけば、そのG(E)関数は同じ型式のほかのNaI(T1)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(T1)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(T1)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(文献 9、文献 10)。



図 B.3 NaI(T1)検出器のG(E)関数

B.2.2 モニタの特性

(1) 安定性

検出器

この方式のモニタでレスポンスの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(T1)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み合わせでモニタの温度依存性が現れ る。

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 は固定局又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できない場合は、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。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 ¹⁶N 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。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)(文献 11) (注)文献 11 から引用している図であるため、旧単位の R の記載としている。

(4) 方向特性

NaI(T1)シンチレータは形状によって方向特性が異なるが、実際の特性は使用状態のプロ ーブの構造によって更に変わる。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のとき、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、軸方向と横方向でレスポンスに8%程度の差が生じる。しかし個々のプロ ーブ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 球形の軸方向のレスポンス を 1.0 とした場合の方向特性の一例を示した。



図 B.6 NaI(T1)シンチレータ(3 in $\phi \times 3$ in 円柱形)方向特性の一例(文献 11)



図 B.7 NaI(T1)シンチレータ(3 in ¢ 球形)方向特性の一例(文献 11)

(5) 宇宙線と自己汚染の寄与

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 ×3 in 円柱形 NaI(T1)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(1.2×10² 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、3in ϕ ×3in 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 ⁴⁰K による放射線だけを考えればよ い。⁴⁰K の寄与は、実用上、外部からの ⁴⁰K の影響のない遮へい体中で測定された ⁴⁰K の 1.46 MeV γ 線のピーク計数率に、3 in ϕ × 3 in、2 in ϕ × 2 in のそれぞれのシンチレータにつ いて 0.16 nGy/h/cpm 又は、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(T1)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 ⁴⁰K の寄与はほとんどない。

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・h ⁻¹ /cpm)
2 in $\phi \times 2$ in	1.6×10^{-1}
3 in $\phi \times 3$ in	4.0×10^{-2}

表 B.2 NaI(T1)シンチレーションモニタの⁴⁰K 汚染の寄与

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 ℃から+35 ℃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 チチャネルアナライザー(MCA)又はシングルチャネルアナライザー(SCA)を併用したシス テムとする。



図 B.8 G(E) 関数方式 NaI(T1) シンチレーション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 in $\phi \times 3$ in 円柱形 NaI (T1) 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 間の決定に当たっては、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~数十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が変化するので、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 V/0.662 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、¹³⁷Cs 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 利用することによって利得(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¹³⁷Cs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係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 $\phi \times 2$ in 及び3 in $\phi \times 3$ 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よい。



図 B.9 NaI(T1)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、電離箱と同様にエネルギー情報を得ることはで きない。

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(T1)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 μGy/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±10%以 内で良好であり、NaI(T1)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。



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 ±90°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±10%以内であり、良好 なレスポンスを示している。また、これはJIS Z4325:2008の基準である±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

¹³⁷Cs 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 μ 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いの影響が一因として考えられる。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いの影響の見られた50 keV を除き概ね 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(T1)シンチレーション検出器

B.4.1 モニタの原理と構成

NaI(T1)シンチレーションモニタと同様に、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(T1)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 (T1) シンチレーション検出器の主な特徴としては、NaI (T1) 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 (T1) 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 (T1) 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。

蛍光体			潮解性。)		光検出器	
	密度 ^{a)} 減	減衰定数 ^{a)} (nsec)		最大蛍光波長 ^{a)} (nm)	最大感度波長	
	(g/cm^3)				(nm)	
					PMT ^{b)*1}	MPPC ^{c)*2}
NaI (T1)	3.67	230	有	410	420	500
CsI (T1)	4.51	1000	無*3	565	720	000

表 B.3 シンチレータ及び光検出器の特徴

a) 文献 12、b) 文献 13、c) 文献 14

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

*2 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ある。」

*3 わずかに潮解性があるとしている文献もある。

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 に係るレポートから引用し た(文献 15)。

CsI(T1)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又は線量率データは、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(T1)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

測定器の構成上又は性質上、NaI (T1)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。¹³⁷Csの662 keV において 0.2 μ Sv/h(周辺線量当量率)~30 μ Sv/hの範囲では、レスポンスの変化は±15 %程度である。また、更に線量率が増加し、100 μ Sv/hでは 30 %、200 μ Sv/hでは 50 %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(T1)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 μSv/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(T1)シンチレーション検出器における指示値変動
 (計算:0.01 µSv/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、全方位におけるレスポンスの変化は-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 (T1) 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 (T1) シンチレーション検出器とG(E) 関数法の組み合わせによる測定システムにおいて、 各エネルギーの y 線光子を照射した際の y 線エネルギー(各実効エネルギーは、²⁴¹Am:60 keV、¹³³Ba:340 keV、¹³⁷Cs:662 keV、⁶⁰Co: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。²⁴¹Am につ いては、きょう(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.1 基準 y 線源の適用

基準γ線源は線源から一定の距離(通常1m)における照射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 線は数十 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、適切な 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¹³⁷Cs、⁶⁰Co のほか²⁴¹Am、⁵⁷Co、 ¹³³Ba を加えた 5 核種を選択した。²⁴¹Am、⁵⁷Co 及び ¹³³Ba 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。基準 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

¹³⁷Cs 及び⁶⁰Co 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±10 %程度、²⁴¹Am、 ⁵⁷Co 及び¹³³Ba は±30 %程度とされる。

解説 C.4 基準 y 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 Qs とする。次いで校正する 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 xs とす ると、値付けするγ線源の 1 m における線量率 x は次式で求められる。

$$\dot{X} = \dot{X}s \frac{Q}{Qs} \tag{C.1}$$

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で線量率が値付けされた y 線源は、基準 y 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 y 線源線量率の値付けの一例

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。

$$\dot{X} = \dot{X}d + \dot{X}b \tag{D.1}$$

散乱γ線の寄与率Xb/Xdは、線源と検出器間の距離、線源及び検出器の地表面(又は床面) 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)は地表面に平行又は垂直とする(図 D.1)。

校正方向が地表面に平行な場合の散乱 y 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.2 中の曲線は、地表がコンクリート及び線源が⁶⁰Co の場合につい て、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⁶⁰Co 線源を用いて得られた 実験結果も同図に示してある。表 D.1 は、線源と検出器の高さが異なる場合及び¹³⁷Cs 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⁶⁰Co線源を用いたとき、鉄製屋根で2.3%、コンクリート屋根 で2.5%、また¹³⁷Cs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 y 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 Id、置いたときの指示値を Is とすると、散乱 γ 線の直接 γ 線に対する寄与率 η は

$$\eta = \mathrm{Is} / (\mathrm{Id} - \mathrm{Is}) \tag{D.2}$$

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 Io とすると(Is、Id に ついては式(D.2)に同じ)

$$\eta = \frac{Is - (Io - Id)}{Io - Is}$$
 (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 コンクリート又は類似物質による散乱γ線の寄与率

(散乱線線量率)
(直接線線量率)

$\frac{d}{d}$									
$\frac{h}{\ell}$ h	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0	32.0	64.0
	¹³⁷ C s (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

h:検出器高さ, l:線源高さ, d:線源・検出器間水平距離(文献 16)



散乱体 (壁,床,裸地等)

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。

- 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していることは少ない。基本的には温 度補償回路によって、温度特性によるレスポンスの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るとは 言えない。図 E.1 及び図 E.2 にメーカ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 する傾向がある。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る傾向がある。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、屋外で急激に温度変化の影響を受けた際のレスポンスは最大で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わた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 やす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。

上段:低線量率領域 下段:高線量率領域

検出器		測定方式	特徴	
	NaI(T1)	・G(E)関数方式 ・DBM 方式	 ・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 	
NaI	シンチレーション検出器	・電流方式	 ・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(T1) シンチレーション検出器	・G(E)関数方式 ・DBM 方式	 ・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	・パルス方式	 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レスポンスの変化に注意 	
半導体	シリコン半導体検出器	・パルス方式	 ・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 	



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 次に示す。

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。 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。

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

表 F.1 走行経過時間と移動距離の関係

(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壌中に均一に分布、及び¹³⁴Cs 及び¹³⁷Cs が指数分布(β:1.0 g/cm²)している場合の地上高1mでの周辺線量当量の周囲からの寄与割合(文献17)

F.2.2 測定精度

「F.2.1 測定時間・収集間隔」において、1~3 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.4 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 μSv/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1m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1m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(文献 15)から引用した。



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(文献 15)

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、車体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(文献 15)

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)(文献 15)



図 F.5 車種間における線量率の比較(ミニバンとセダン)(文献 15)

解説 G 測定結果の解析

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、変動分の原因究明並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、施設寄与の影響を含む可 能性のある測定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 施設寄与の有無を確認できる場合がある。

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。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、測定値のばらつきは大きくなる。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ばらつき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う。表 G.2 に各線量率における 時定数ごとの測定値のばらつきを示す。

	変動の原因	変動のパターン	変動の頻度	線量レベル
	吹玉 吹香	・ゆるやかな変動をもつ	地域によって差がある	100 nGy/h 程度まで及ぶ場合がある ^{*1}
自然	降雨・降当	・増加と減少が複雑に入り混じる	(年間 100 回程度)	
現免	æ	各海」、1前前1 マ 各海」、2千小上マ	地域によって差がある	
家 に ト	置	急激に増加して急激に減少する	(日本海側の冬季に多い)	
よる変	積雪	積雪による遮へい効果	地域によって差がある	10~30 nGy/h 程度減少 ^{※2}
動	乙四州四岸舟	逆転層による日周期	冬季に多い	10 nGy/h 程度增加
	その他の気象	地表の水分による放射線の吸収		2 nGy/h 程度減少 ^{※2}
大気圏内核爆発実験		過去の核実験においては、実験の数日後に変動		経過日数が短い程増加量が大きく、2
		が現れ、一定期間は日数の経過に伴い増加を示		~3日後には環境放射線レベルの数倍
		した		程度まで及ぶ場合がある
医療	・産業用の放射線源	医療用放射性同位元素の存在や非破壊検査等に		
	等	よる放射線発生装置の利用により増加を示す		
原子力施設		一定しない、特に風下方向軸で線量率に上昇が		
		あり、変動が短い周期を持つ		
測定器の特性		- ナトリーブ洞座亦(いたトフ	温度変化によって差がある	10 ※印座ナベル ど坦へぶた 7
		土として価度変化による	(日変化・年変化)	10 % 住 皮 よ じ 仅 か 場 合 か め る
	測定器の故障	過大又は過小な値を示す		

表 G.1 モニタの指示値の時間変動

※1 一時的には 100nGy/h 程度まで及ぶ場合があり、降雨による増加分は年間 10 µ Gy 程度である。また、大陸性気団を起源とする降雨の場合は増加量が大きく、海 洋性気団を起源とする降雨の場合は増加量が小さい傾向がある。

※2 自然放射性核種が環境中に支配的に存在する場合。



図 G.1 時定数と測定値との時間変化の関係

線量率	変動係数(%)					
(nGy/h)	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			

表 G.2 線量率における時定数ごとの測定値のばらつき τ:時定数

 $(1 in \phi \times 1 in 円柱形 NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ)$

G.1.2 時間間隔

1 データの積算計数時間又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~数十分である。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又 はそれ以下の短い間隔、フォールアウトの場合は数倍又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 (測定結果の数値のばらつき)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、数十以上とするこ 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) 平常時は更に、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、降雪更には前線の性質などで分類できるが、通常、雷雨、 その他の降水及び降雪に分類しておくとよい。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 施設寄与の影響を含む可能性のある測定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倍を超えるものを施設寄与の影響を含 む可能性のある測定値とし、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、正規分布となる(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(²²²Rn 3.7 Bq/m³で約2 nGy/h)の変動のため、分布の裾の あたりで拡がる傾向がある。)。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はらっても、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。

モニタが過大な指示値を与えたときの原因究明の手続き^{*1}は、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

^{*1} 原因究明の手続きの順番については、第7章「測定結果の解析と評価」に示す図7.1のフロ ーチャート例に沿って記載しているが、特段この順番にこだわる必要はない。

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。

施設の測定値の状況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 μGy 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。このほ か、測定器等の異常や外部要因(医療、産業等)の影響がないか調べることも必要である。

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 y 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、雨滴又は雪とともに地 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、ラドン及び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 長期にわたる場合もある)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、温度変化に伴うレスポンスの変化が確認 されている。温度変化に依存する事例については、解説 E.3 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 y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変化、アスファルト敷設 による線量率の変化等が起こり得る。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 中に含まれている自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自然放射 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、自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(文献 18)

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 廃棄物を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得る。

- 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 ⁶⁷Ga 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 y 線スペクトルである。⁶⁷Ga 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 y 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、y線透過試験用に工業用y線装置が用いられている。活用される主なy 線放出核種は、¹⁹²Ir(0.317 MeV ほか)、⁶⁰Co(1.332 MeV ほか)及び¹⁶⁹Yb(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+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線管にかける「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、 y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とも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

土なγ禄成山後悝の一例(又厰 19、 又厥

核種	半減期	主なγ緩	泉のコ	ロネルギー	(MeV) と放出割合
⁵¹ Cr	27.70 d	0.320	_	9.92 %	
		0.0050	—	19.7 %	V-K _a
⁶⁷ Ga	3.261 d	0.0933		39.2 %	
		0.185	_	21.2 %	
		0.300	_	16.8 %	
		0.0086	_	50.3 %	Zn-K _a
		0.0096	_	6.8 %	Zn-K _β
⁸¹ Rb	4.576 h	0.190	_	64.0 %	^{81m} Kr
	娘 ^{81m} Kr	0.466	—	23.2 %	
		0.510	_	5.3 %	
⁹⁹ Mo	65.94 h	0.181	_	6.0 %	
	娘 ^{99m} Tc	0.739	—	12.1 %	
^{99m} Tc	6.01h	0.141		89.1 %	
	娘 ⁹⁹ Tc	0.0184	_	6.1 %	Tc-K _a
¹¹¹ In	2.805 d	0.171	_	90.2 %	
		0.245	_	94.0 %	
		0.0232	_	67.8 %	Cd-K _a
		0.0261	_	14.5 %	Cd-K _β
¹²³ I	13.27 h	0.159	_	83.3 %	
	娘 ^{123m} Te	0.0275	_	70.7 %	Te-K _a
		0.0310	_	16.0 %	Te-K _β
¹³¹ I	8.021 d	0.284	—	6.1 %	
	娘 ^{131m} Xe	0.364	—	81.7 %	
		0.637		7.2 %	
¹³³ Хе	5.243 d	0.0810	_	38.0 %	
		0.0310	_	40.3 %	Cs-K _a
		0.0350	—	9.4 %	Cs-K _β
²⁰¹ T1	72.91 h	0.167	_	10.0 %	
		0.0708	_	73.7 %	Hg-K _a
		0.0803	_	20.4 %	Hg-K _β
		0.00999	_	46.0 %	HgL



図 G.5 医療用放射性物質(⁶⁷Ga)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.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、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 簡易的な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できているか否かを 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

ゲイン調整及び電気的ゼロ点が確認・調整された健全な NaI (T1) 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。なお、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) 測定地点の選定及び(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次に示す。

- 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 y 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) がな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 (〇付き数字は、各軸の測定地点番号を表す)


図 H.2 測定地点(図 H.1)における測定結果

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自然放射性核種からのγ線、及び周辺建 造物中に含まれる自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日までの千葉県千葉市における環境y線量率のトレンドグラフを図I.1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、降雨のない気象条 件において、寄与線量率順に¹³³Xe(約5日)、¹³²I(約2時間)、¹³¹I(約8日)、¹³²Te(約3日)、 ¹³⁴Cs(約2年)、¹³⁷Cs(約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。括弧内 は物理的半減期を示す。これらの核種は¹³⁴Cs及び¹³⁷Csを除いて半減期が十数日以内の短半 減期のものが多い。

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が通過したと思われる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.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(図 I.1 を基に作成)

このことからも分かるように、福島第一原発事故初期の放射性プルームでは、¹³³Xe (81 keV) の線量率寄与割合が全体の 9 割以上を占めていた。よって、福島第一原発事故初期の放射性 プルームにおいては、低エネルギー側 y 線放出核種によって高線量率となっていたため、低 エネルギー領域におけるエネルギー特性を把握しておくことが重要であることが明らかとな った。

解説 I.3 沈着直後及び沈着から 60 日経過後

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と考えられる。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放射性核種 である放射性セシウム等が雨滴とともに地表面に沈着した。この沈着直後の線量率寄与割合 を図 I.3 に示す。



(図 I.1 を基に作成)

また、沈着から60日経過した時期の寄与割合を図 I.4 に示す。



(図 I.1 を基に作成)

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、沈着から 60 日が経過した 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、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.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+ \angle h の間に観測される パルスの数を P(h) \angle 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 ε (E)とし て、次式

$$P(h) \triangle h = \triangle h \int_{o}^{E} \varepsilon(E) K(E, h) N(E) dE$$
 (J. 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 ϵ (E)は定数となるから、上式は

$$P(h) \angle h = \angle h \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(E) K(E, h) \delta(E - x) dx$$
 (J. 2)

$$P(h) = \varepsilon(E)K(E,h)$$
(J. 3)

となり、波高分布を ε(E)で割ったものがレスポンス関数となる。

また式(J.1)で ϵ (*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。

 $P(h) \angle h = \angle h \int_0^\infty R(E, h) N(E) dE$ (J. 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のパルスを生じる確率である。

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東密度で割れ ば、単位線東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(J.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又はレスポンス行列の例を表 J.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 Heath(文献 22、文献 23、文献 24、文献 25)によって集大成されている。

解説 J.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含めることができることであ る。遮へい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 J.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 J.1 NaI(T1)検出器のレスポンス関数、レスポンス行列

形状	製作者 又は 使用機関	行・列数	条件(エネルギー範囲、 bin 幅、対象など)	文献
	(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) Berger- Seltzer	_	2~20 MeV;1 MeV ごとの波高分布を Monte Carlo 計算	c)
(a) 3 inφ×3 in 円柱形	(iv)京大工	20×20	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	22×22	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	46×46	0~9.2 MeV;200 keV/bin,均等分割; 原子炉周辺環境用	f)
	(vii)原 研	_	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)
	(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)
(b)	(ii)原 研	$\begin{array}{c} 60 \times 60 \\ 295 \times 295 \end{array}$	0.05~3 MeV;50 keV 又は10 keV/bin,均等分割;自然環境用	i)
3 in φ 球形	(iii)京大炉	34×34	0~0.1 MeV;20 keV/bin,0.1~3 MeV 100 keV/bin,;自然環境用	j)
	(iv)名工試	22×22	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	22×22	0.01~3 MeV;対数波高軸を均等分 割;自然環境用	1)
(c) 2 in φ × 2 in	(i) 日 立	14×14	0~1.4 MeV;100 keV/bin,均等分割; 逆行列;散乱線研究用	m)
円柱形	(ii)原 研	60×60	0.05~3 MeV;50 keV/bin,均等分割	n)

参考文献

- a): 文献 22 R.L.Heath ; IDO-16880-1 (1964)
- b): 文献 26 C.D.Zerby and H.S.Moran ; ORNL-3169(1961)
- c): 文献 27 M.J.Berger and S.M.Seltzer ; Nuclear Instr. Meth., <u>104</u>, 317-332 (1972)
- d): 文献 28 T.Hyodo and F.Makino ; Memoi.Fac.Engin., Kyoto Univ., <u>14</u>, 291 (1962)
- e): 文献 29 湊進; 名工試報告, <u>27</u>, 384(1978)
- f): 文献 30 Y.Nakashima ; Thesis. Fac. Engin., Nagoya Univ., (1980)
- g): 文献 31 森内茂, 堤正博, 斎藤公明; 保健物理、 42, 71-83, (2007)
- h):文献 32 M.Okano; Natural Radiation EnvironmentⅢ, Symposium Series DOF51 (CONF-780422) 867 (1980)
- i): 文献 33 S.Moriuchi; Personal Communication
- j): 文献 34 I.Urabe, T.Tsujimoto, K.Yamazaki and K.Katsurayama ; Jour. Rad. Res., <u>19</u>, 163 (1978)
- k): 文献 35 S.Minato; Personal Communication

- 1): 文献 36 明野吉成: 卒業論文; 名大工、原子核工学科、Mar. (1982)
- m): 文献 37 石松健二; 日本原子力学会誌, <u>4</u>, 24(1962)
- n): 文献 38 S.Moriuchi ; Personal Communication

核種	エネルギー(MeV)	核種	エネルギー(MeV)
核種 ^{129m} Te 5 ⁵⁷ Co ⁴⁷ Sc ¹³⁹ Ce ⁹⁷ Ru ¹³⁵ Xe ²⁰³ Hg ⁵¹ Cr ^{115m} In	エネルギー(MeV) 0.060 0.109 0.122 0.155 0.166 0.213 0.250 0.279 0.320 0.335	核種 〇 ⁸⁵ Sr ^{91m} Y 〇 ¹³⁷ Cs ⁹⁵ Nb 〇 ⁵⁴ Mn ⁹² Nb ⁸⁶ Rb 〇 ⁶⁵ Zn ⁴¹ Ar ⁴² K	エネルギー(MeV) 0.513 0.555 0.662 0.764 0.835 0.930 1.080 1.114 1.290 1.510
¹⁹⁵ Au	0. 411	²⁶ A1	1.780
¹⁹⁵ Au	0.411	²⁶ A1	1.780
Ве	0.478	Na	1. 309, 2. 754

表 J.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)

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 $\epsilon(E) = 1 - \exp\{-\mu(E)\overline{\ell}\}$ 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、 $\overline{\ell}$ 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。

Heath 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。

$$y = y_o \exp\left\{-\frac{(X-X_o)}{b_o}\right\}$$
(J. 5)

この式で y。はガウス分布のピークの高さ、b。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。

$$E_c = E\gamma - E\gamma / \left\{ 1 + \frac{2E\gamma}{m_o C^2} \right\}$$
(J. 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。

$$E_{b} = E\gamma / \left\{ 1 + \frac{2E\gamma}{m_{o}C^{2}} \right\}$$
(J.7)

$$E_{PS} = E\gamma - 0.511(MeV) \tag{J.8}$$

$$E_{PD} = E\gamma - 1.022(MeV) \tag{J.9}$$

 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} , … L_{5} の 5 区間に分割する(図 J. 1 参照)。 当然のことながら、 $E_{\gamma} < 1.02 MeV$ のときは L_{1} , L_{2} , L_{3} の 3 区間に分割すればよい(図 J. 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区間の波高分布g(X)は

$$g(X) = a + bX + \sum_{k=1}^{N} b_k \sin \frac{k\pi X}{M-1}$$
 (J. 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_o, y_o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(J.4)及び式(J.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。

$$R_{ij} = \int_{x_{j-1}}^{x_j} R(X, E_i) dx$$
(J. 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。







図 J.2 3 in×3 in NaI (T1) 検出器の応答(1.02 MeV 以下の場合)

(2) モンテカルロシミュレーション(文献 39、文献 40)

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、又は検出体外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 J.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 が相互作用を起こ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と散乱方向を決定する。



図 J.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、又は検出体 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 J.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 Mg0 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 $\exp\{-\mu'(E)\overline{d}\}$ 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)の線減衰係数、 *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の部分を透過 した光子が更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、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源が必要となる。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十分と考えられる。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 Ms 及び方向依存症を補正するた 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。

$$R_m = \mathbf{D} \times \mathbf{M}\mathbf{s} \times \mathbf{R} \tag{J. 12}$$

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十分である。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 $\epsilon(E) = 1 - \exp\{-\mu(E)\overline{\ell}\}$ と比較して細部を 再修正することもできる。

裸の3 in φ NaI (T1) 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、Mg0 反射材及び A1 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 J.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。

EE	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

表 J.3 一様入射 γ線場に対する 3 in φ NaI (T1) シンチレータの 22×22 のレスポンス行列の一例

付 録

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(T1)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。

- コンプトンスペクトル分布
 矩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 y 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を更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 1.1、付図 1.2、付表 1.1 に実際に計算された 3 in φ 球形 NaI(T1)検出器のレスポンス関数の例を示す。



付図 1.1 レスポンス関数の計算例



付図 1.2 レスポンス関数の計算例

合成により発生させたレスポンス関数の例 付表 1.1

50 keV/binゆ 球 形 シン チレー ク 用 、 (3 in

888

	2 6 3 6 7 6 - 0 1 2 6 3 6 7 6 - 0 1 2 6 3 5 7 6 - 0 1 2 5 5 0 4 6 - 0 1 8 5 5 0 4 6 - 0 1 1 6 5 2 9 0 6 0 1 6 3 2 9 0 6 0 0	

	00000000000000000000000000000000000000	
KEV	 	
XEV - 3000	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	
(90) 2950	<pre>4</pre>	
ENERGY	39005396598 39466-01 2.45176-01 2.45946-01 2.459256-01 5.24036-01 5.21946-01	
	2.457355-01 2.40915-01 2.457355-01 2.45735-01 5.03465-01 5.03465-01	
	<pre>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>></pre>	
	00000	

, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	EMERGY < 59) 2900 XEV - 2950 XEV	

ବ୍ତ୍ତ୍ 9 9 9

****	2.4690E-01 2.5089E-01 2.6200E-01 4.8456E-01 6.4372E-01
	2.4669E-01 2.5029E-01 2.6032E-01 8.4406E-01 1.5956E+00 4.6974E+00
	2.6649E-01 2.6974E-01 2.5879E-01 5.6549E-01 1.0970E+00 0.0
3 3 \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	2.4531E-01 2.4925E-01 2.57426-01 2.80192-01 4.1258E-01 4.1258E-01 0.0
	2.4615E-01 2.4880E-01 2.5617E-01 2.7673E-01 4.2163E-01 4.2163E-01 6.0546E-02
	2.46016-01 2.486016-01 2.55058-01 2.73618-01 2.73618-01 5.46558-01 2.55608-01
	2.45882-01 2.4804E-01 2.5404E-01 2.7079E-01 5.6815E-01 5.8070E-01
	2.45766-01 2.4771E-01 2.5313E-01 2.5824E-01 2.4544E-01 5.4544E-01 6.6874E-01
	2.4566E-01 2.4741E-01 2.5231E-01 2.5595E-01 2.6595E-01 5.2402E-01 6.5364E-01
	2,4556E-01 2,4715E-03 2,5156E-03 2,5156E-03 2,6397E-03 5,4774E-01

e 9	0 0	66666
	0 0 0 0	1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
800	8 8 8	2.55
0000	8	
.0.0.0	9	276- 276- 276- 276-
9961	000	2000 A
9999	6 6 6	
9956	9 9 8	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
888	9 9 9 9	. 538 . 573 . 676 . 528 . 528
	କ ମ ଷ ଭ	NNN®~
0 0 0 0	6 6 9	8888 8888 8888 8888 8888 8888 8888 8888 8888
080	2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	567
	9 6 9 6 9 6 9 6	~~~~~
889	8	
99999	. V 	5628
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	0 K (0.00.00.00
9 9 9 9 9	390	6-01 6-01 6-01
2 2 2 2 8		5583 63583 64350 8451 8451 8451
0 0 0	0 X E	~~~~~
8 8 8	285	8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
8 8 8 8 8	8) • • • •	5265 5261 6226 8131 8131
0000	6 5 5 6 6 9 6	~~~~
8 9 6 Q	E B G Y	6 - 01
000	2 € 2 € 2 €	5262 5503 6121 7841 7841
8 6 9 9	9 8 8	~~~~
6 8 6	0000	00000
8 8 9	8	270
3999.	ହ କ କ -	NNNNV
0 0 0 0 0 0 0	9 9 9	6000
8 C C 8	9 8 9 9	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
0 8 8 8	999	~~~~~

			00000000000000000000000000000000000000					
. 69392-01 2.7131 . 8595E-01 5.0479 . 4487E-01 6.4967	2.6765E-01 2 8.3245E-03 4 1.56242400 6 4.75892400	2.6608E-01 5.6323E-01 1.0800E+00 0.0	2.6467E-01 2.8807E-01 4.1975E-01 0.0	2.6360E-01 2.8451E-01 4.2786E-01 5.8417E-02	2.6224E-01 2.8131E-01 5.4779E-01 2.4791E-01	2.0121E-01 2.7841E-01 5.8809E-01 5.8146E-01	2.40276-01 2.75806-01 5.45756-01 6.72066-01	2.5942E-01 2.7344E-01 5.2469E-01 6.5638E-01

	(57) 2800 KEV - 2850 KEV	
	ENERGY (57) 2800 KE	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
00000000000000000000000000000000000000		

2.5541E-01 2.6045E-01 2.7452E-01 5.1785E-01 6.4905E-01
2.59696-01 2.59696-01 2.72366-01 6.98466-01 6.41916-01
2.56996-01 2.56996-01 2.70456-01 6.80106-01 6.36686-01 6.36686-01
2.5466E-01 2.5837E-01 2.6671E-01 8.1342E-01 1.5192E-01 1.5192E+00
2.5446-01 2.57816-01 2.4716-01 2.53896-01 1.05376+00 0.0
2.54276-01 2.57306-01 2.65736-01 2.89206-01 4.18586-01 4.18586-01
2.5411E-01 2.5684E-01 2.6444E-01 2.8563E-01 4.2599E-01 4.2599E-01 5.6235E-02
2.53966-01 2.554266-01 2.653296-01 2.653296-01 2.63296-01 2.63296-03 5.41006-03 5.41006-03
2.53856-01 2.56056-01 2.62246-01 2.62246-01 2.79516-01 5.60176-01 5.73116-01
2.53716-01 2.55716-01 2.61306-01 2.61306-01 2.76886-01 5.38386-01 5.46996-01

аввается в констратовление с полостатово с полосто по полостата полосово с полостата полостата полостата на пол КМЕМСУ (54) 2750 КЕV - 2800 КЕV с лоссовается с полостата полостата полостата по полостата полосто полостата полостата полостата полостата поло

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	2.75355-01 2.95935-01 5.44515-01 6.76385-01
	2.726555501 2.87355-01 5.24245-01 6.59592-01
	2.51085-01 2.5126-01 5.05126-01 6.51316-01
	2,6684E-01 2,7112E-01 2,8310E-01 4,8704E-01 6,4499E-01
	2,06585-01 2,70462-01 2,81285-01 8,06655-01 1,49125-00 1,49125-00 4,89446+00
	2.6637E-01 2.6987E-01 2.7964E-01 5.5685E-01 1.0425E+00 0.0
	2.6618E-01 2.6934E-01 2.7815E-01 3.0271E-01 4.3253E-01 4.3253E-01
	2.6601E-01 2.6886E-01 2.7681E-01 2.9898E-01 2.9898E-01 4.3878E-01 5.4001E-02
	2.65855-01 2.6843E-01 2.7560E-01 2.9561E-01 5.4839E-01 5.4839E-01
	. 6571E-01 . 6804E-01 . 7451E-01 . 9257E-01 . 9257E-01

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	01 2.7561E-01 01 2.8227E-01 01 3.0082E-01 01 5.808E-01 01 5.8081E-01	6 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	01 2.82816-01 01 2.90366-01 01 3.11406-01 01 5.49946-01 01 2.13846-01 01 2.13846-01		01 2.94875-01 01 3.03585-01 01 3.27835-01 01 4.69705-02 01 4.69705-02	9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	01 3.02018-01 01 3.11848-01 01 3.39318-01 01 4.66288-01 02 0.0		01 3.1092E-01 01 3.2213E-01 01 5.4609E-01 01 9.4930E-01 0.0	
	2.7525E-(2.8126E-(2.9801E-(5.4492E-(6.8005E-(9 II 4 6 6 6 6 9 6 9 6 6 9 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6 6 8 6	2.82396-(2.89219-(3.0820£-(5.615£-(5.8144£-1		2.9440E- 3.0225E- 3.2414E- 5.5624E- 2.0543E-	\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	3.02478- 3.202466- 3.253466- 4.695346- 4.695346- 4.5536-	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.10316- 3.20436- 3.48416- 4.74766- 4.74766- 0.0	
	2.7692E-01 2.8035E-01 2.9546E-01 2.9546E-01 5.2504E-01 6.6263E-01	8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	2.82026-01 2.88176-01 3.05326-01 5.44126-01 5.44126-01 6.82086-01		2.9397E-01 3.0106E-01 3.2082E-01 5.6956E-01 5.6636E-01		3.00946-01 3.09016-01 3.31386-01 5.55786-01 1.95486-01		3.0976E-01 3.1889E-01 3.4435E-01 4.757E-01 4.2067E-02	
	2.7463E-01 2.7952E-01 2.9316E-01 5.0630E-01 6.5368E-01	8 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	2.81695-01 2.87245-01 3.02714-01 5.24655-01 6.64095-01	1) 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	2.93596-01 2.99986-01 3.17826-01 5.49136-01 6.92236-01		3.00556-01 5.07796-01 3.27986-01 5.67676-01 5.85336-01		3.0926E-01 3.1750E-01 3.4047E-01 5.5735E-01 1.8601E-01	
кедевивение КЕV • осведеесьоо	2,7436E-01 2,7878E-01 2,9109E-01 4,8841E-01 6.4633E-01	କ ଅକ୍ଷର କ ଅକ୍ଷର ୧୯୯୯ ଜନ୍ମ ସ୍କୁର୍ବ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ କ୍ଷର ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ ଜନ୍ମ	2.81388-01 2.86408-01 3.00368-01 5.0558-01 6.54128-01	еесска с с с с с с с с с с с с с с с с с с	2.93246-01 2.99016-01 3.15116-01 5.29986-01 5.73316-01	сессоссессе КЕV сессоссессе сессессе	3.00166-01 3.06696-01 3.24916-01 5.47696-01 6.93556-01		3.0882E-01 3.1625E-01 3.3698E-01 5.6773E-01 5.8570E-01	
	2.7412E-01 2.7811E-01 2.8922E-01 7.9427E-01 1.4555E+00 4.9563E+00	аевсевеее КЕV - 2700 ссе∎еравеас	2.81116~01 2.85616~01 2.982616-01 4.89056-01 6.46166-01	веваевассод ХЕИ - 2650 Сеесоворо	2.92926-01 2.981326-01 3.12666-01 5.11976-01 5.62206-01	акевсявала ХЕV - 2600 вкогоессее	2.9980E-01 3.0570E-01 3.214E-01 5.2899E-01 6.7407E-01	69988855995 KEV - 2550 9888988888	3.0841E-01 3.1512E-01 3.3383E-01 5.4818E-01 6.9758E-01	
a a o b a a a a a a a a a a a a a a a a	2.7390E-01 2.7750E-01 2.8753E-01 5.5451E-01 1.0243E+00 0.0	86888888888888888888888888888888888888	2.8086E-01 2.8495E-01 2.9532E-01 7.8048E-01 1.4176E+00 5.0434E+00	coosecsesses (53) 2600 sassesses	2.92646-01 2.97346-01 3.10456-01 4.95016-01 4.95016-01 6.53176-01	eesseesses < 52 } 2550 ≈esseses	2.9948E-01 3.0480E-01 3.1964E-01 3.1964E-01 5.1143E-01 6.6213E-01	20005206292 (%1) 2500 9898082030	3.0804E-01 3.1410E-01 3.3099E-01 5.2989E-01 5.7741E-01	
88888888888888888888888888888888888888	2.7570E-01 2.7695E-01 2.8601E-01 3.1124E-01 4.4030E-01 0.0	รถนรถรองนนตร โฟโRGY ของธงมนรถ	2.8044E-01 2.8433E-01 2.9459E-01 5.5101E-01 1.0045E+00 0.0	e s e s a a e e e e e e e e e e e e e e	2.92386-01 2.96636-01 3.08465-01 7.71816-01 1.38586+00 5.11776+00	6 6 9 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	2.99196-01 3.03996-01 3.17396-01 4.94918-01 6.52308-01	ତ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ ଜଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ ଜଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ ଜଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ କଳ	3.07716-01 3.13186-01 3.28426-01 5.12756-01 6.64536-01	8 9 9 8 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9
	2.7353E-01 2.7446-01 2.8445E-01 3.0741E-01 4.4556E-01 4.4556E-01 5.1715E-02		2.8044E-01 2.8377E-01 3.1886E-01 4.4688E-01 4.4688E-01	6 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	2.9215E-01 2.9598E-01 3.0666E-01 5.5277E-01 9.9051E-01 0.0		2.9892E-01 3.0326E-01 3.1535E-01 7.5687E-01 1.3456E+00 1.3456E+00 5.2039E+00	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.07426-01 3.12356-01 3.26116-01 4.96646-01 6.53796-01	
	2.7337E-01 2.7601E-01 2.83398-01 3.0395E-01 5.4981E-01 5.2261E-01		2.8026E-01 2.8326E-01 2.9143E-01 3.1494E-01 4.5116E-01 4.9378E-02	- 9 8 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	2.9194E-01 2.9540E-01 3.0504E-01 3.3191E-01 4.6007E-01 0.0		2.9869E-01 3.0260E-01 3.1352E-01 5.4858E-01 9.6900E-01 0.0		3.07156-01 3.116056-01 3.24026-01 7.43456-01 1.30696+00 5.29226+00	*********

	3.21846-01 3.34456-01 7.31776-01 1.27006+00 5.38236+00		3,3355E-01 3,4826E-01 5,6281E-01 6,6281E-01	6 6 9 4 4 5 4 6 6 6 6 8 8 6 6 6 6 6 6 6 6 8 8 6 6 6 6	3.4824E-01 3.4514E-01 5.2751E-01 4.8594F-01 4.8594F-01		3.6172E-01 3.8109E-01 5.4870E-03 7.1143E-01 7.1143E-01		3.7166-01 3.93096-01 5.65026-01 7.38176-01	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	3,8720E-01 4,1243E-03 5,8957E-01 6,9750E-01
1	3.2115E-01 3.3270E-01 5.45528-01 9.3166E-01 0.0		3,32756-01 3,45966-01 7,20476-01 1,23326+00 5,47446+00	8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	3.4731E-01 3.4231E-01 5.1251E-01 6.7190E-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.60675-01 3.78156-01 5.33026-01 6.93856-01		3.6997E-01 3.8976E-01 5.4846E-01 7.1361E-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.85826-01 4.08606-01 5.7236-03 7.51686-03
	3.2052E-01 3.3095E-01 3.6002E-01 4.8573E-01 6.0		%,3202E-01 3,4397E-01 5,4552E-01 9,1447E-01 0.0	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	3.4640E-01 3.6025E-01 7.1207E-01 1.1997E+00 5,5719E+00	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	3.5972E-01 3.7550E-01 5.1839E-01 6.7864E-01		3.668876-01 3.867876-01 3.33456-01 5.75066-01 6.75066-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.8458E-01 4.0514E-01 5.5619E-01 7.2600E-01
	3.19958-01 3.29368-01 3.55618-01 4.85568-01 4.85568-01 3.95368-02	2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5	3.31376-01 3.4215E-01 3.7219E-01 4.9761E-01 0.0	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	3,45738-01 3,58168-01 5,48568-01 9,00838-01 0.0		3,5006E-01 3,7310E-01 7,0172E-01 1.1634E+00 5.6750E+00	88888888888888888888888888888888888888	3,67918-01 3,86048-01 5,19298-01 6,78938-01	6 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 8 7 8 7 8 7 8	3.8344E-01 4.0202E-01 5.4131E-01 7.0609E-01
	3.1943E-01 3.2793E-01 3.5162E-01 5.6117E-01 1.7796E-01	2388888888888 1999 1998 1998 1998 1998 19	3.3079E-01 3.4051E-01 3.4763E-01 4.9625E-01 3.6961E-02	© + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	3.45068-01 3.56276-01 3.87536-01 5.13346-01 5.13346-01 0.0	8 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	3,58088-01 3,70938-01 5,49868-01 8,84728-01 0.0	a68668698368 3 KEV sssaa668688	5.6704E-01 3.8159E-01 6.8427E-01 1.1204E+00 1.1204E+00 5.7892E+00	6 4 9 6 8 8 8 8 6 9 8 8 0 K K V 6 6 8 9 9 8 8 9 9 8 8	3.8245E-01 3.9920E-01 5.2749E-01 6.8867E-01
1 4 8 8 8 8 8 8 8 8 7 1 1 1	3.18976-01 3.26446-01 3.48046-01 3.48026-01 5.69976-01 5.89866-01	хохаессеесс ХЕV - 2450 ессееств	3.3024E-01 3.3904E-01 3.4572E-01 5.4572E-01	ааааааааа КЕV - 2400 аасасаааааа	3.444E-01 3.5457E-01 3.8278E-01 5.1045E-01 3.4345E-02	essssesesse KEV - 2350 ∎esssesse	3.5758E-01 3.6898E-01 4.0132E-01 5.2707E-01	янассовасее СКЕЧ - 230 осеясос	3.6624E-01 3.79386-01 5.6626E-01 8.6236E-01 8.6236E-01	ессессеесе О ҚЕV - 225 сегсессеес	3.8154E-01 3.9665E-01 6.7784E-01 1.0860E+00 5.9009E+00
	3.1855E-01 3.2248E-01 3.4477E-01 3.4477E-01 7.0454E-01	100403696960 { 49 } 2400	3,2978E-01 3,3770E-01 3,5770E-01 5,7289E-01 5,7289E-01 5,9411E-01	ବଳକ୍ଷ୍ୟାନ୍ତ୍ର (୧୯୦୦) ୧୯୨୦ ଜନ୍ନ୍ରକ୍ତ୍ର୍ବ୍ର	3.4389E-01 3.5505E-01 3.7850E-01 5.7583E-01 1.5751E-01	20022000000000000000000000000000000000	3.5675E-01 3.6722E-01 3.9440E-01 5.2510E-01 3.1692E-02	6600000000000 { 46 } 2250 886560000	3.6553E-01 3.7738E-01 4.1042E-01 5.3504E-01 0.0	6608008668 (45) 220 868888888	3.8071E-01 3.8436E-01 5.4972E-01 8.4859E-01 0.0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3,18178-01 3,24426-01 3,41846-01 5,32906-01 5,32906-01		3.29355-01 3.36505-01 3.56435-01 3.56435-01 3.54105-01 7.12545-01	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	3.4339E-01 3.5164E-01 3.7463E-01 5.7926E-01 5.9994E-01	©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©©	3.5617E-01 3.6563E-01 3.9197E-01 5.7995E-01 5.7995E-01	20000000000000000000000000000000000000	3.6488E-01 3.7558E-01 4.0540E-01 5.2994E-02 2.9007E-02	≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈ ₹₩₹₩₫₹	3.79976-01 3.92265-01 4.26406-01 5.51455-01 0.0
***********	3.17836-01 3.23476-01 3.39196-01 5.14156-01 6.49616-01	9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	3.28946-01 3.35416-01 3.53406-01 5.73466-01 5.90696-01	99 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	3.42946-01 3.50396-01 3.71136-01 5.60776-01 7.25266-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.5566E-01 3.6419E-01 3.8797E-01 5.8368E-01 5.8368E-01		3.6430E-01 3.7395E-01 4.0087E-01 5.8054E-01 5.8054E-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.7930E-01 3.9041E-01 4.2139E-01 5.4517E-01 5.4517E-01
20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2	3.1753E-01 3.2262E-01 3.3681E-01 5.0041E-01 6.5786E-01		3.2860E-01 3.2860E-01 3.3443E-01 3.5067E-01 5.2021E-01 6.7563E-01		5.4254E-01 5.47924E-01 3.4798E-01 5.4354E-01 7.0233E-01		3.55196-01 3.62896-01 3.84356-01 5.65546-01 7.35328-01		3.6377E-01 3.7249E-01 3.9678E-01 5.8267E-01 6.8647E-01	6 8 6 9 6 9 6 9 6 9 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	3.7869E-01 3.8872E-01 4.1668E-01 5.89235-01 1.8287[-01

9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	3.98866-01 4.27526-01 5.91966-01 1.72656-01	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	4.2928E-01 4.5355E-01 5.7571E-01 2.0810E-02	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4.35136-01 4.73076-01 5.9374E-01 0.0	8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	4.5105E-01 5.5951E-01 7.8768E-01 0.0	\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	 4.7091€-01 6.3303€-01 9.0909€-01 6.5587€+00 	8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4.8639E-01 5.7200E-01 7.4057E-01
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	3.97306-01 4.23176-01 5.90635-01 7.00826-01	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	4.1847E-01 4.4850E-01 5.0660E-01 1.6805E-01		4.33066-01 4.67306-01 5.88176-01 1.80546-02	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	6.4869E-01 4.8776E-01 6.1342E-01 0.0	\$ 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	4.4820E-01 5.6531E-01 7.7473E-01 0.0	9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	4.8331E-01 6.2173E-01 8.7109E-01 6.7157E+00
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	3.95898-01 4.19248-01 4.73748-01 7.57398-01	\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	4.16838-03 4.43938-01 4.43938-01 7.20068-01		4.31202-01 4.62102-01 6.12522-01 1.58785-01	4 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	4.4656E-01 4.8182E-01 6.0152E-01 1.5301E-02	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	4.6575E-01 5.0626E-01 6.3274E-01 0.0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4.8053E-01 5.6602E-01 7.5974E-01 0.0
	3.94618-01 4.15498-01 5.58138-01 7.30918-01 7.30918-01	2 6 5 3 3 8 6 8 5 8 5 8 5 8 5 8 5 8 5 8 5 8 5 8 5	4.3536E-01 4.3592E-01 5.8562E-01 7.7863E-01	8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	6.29516-01 6.57416-01 6.07506-01 7.27796-01	8 6 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	4.4446-01 4.74478-01 6.19326-01 1.52106-01	\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	4.6354E-01 5.0009E-01 6.1939E-01 1.2563E-02	4 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	4.7802E-01 5.1955E-01 6.4581E-01 0.0
чааавсекеса КЕV сесесовеска	3.9347E-01 4.1249E-01 5.4370E-01 7.0992E-01	¢ € 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	6.1602E-01 4.3610E-01 4.3610E-01 5.7124E-01 7.5072E-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4.27996-01 4.53176-01 5.91186-01 7.88496-01	1.000000000000000000000000000000000000	4.4291E-01 4.7163E-01 6.1254E-01 7.3698E-01	କର୍ଷ କଳ୍କ କର୍ଷ କରେ କ ମୁକ୍ଳି କର୍ଷ କରେ କରେ କର ଅଧିକ କରିକ କରି କରି କରି କରି କ	4. 61556-01 6.94546-01 6.90566-01 8.90566-01 1.44546-01	8 8 8 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8	4.7576E-01 5.1224E-01 6.3118E-03 9.8509E-03
аваевововича КЕV - 2200 аввеевсеее	3.9243E-01 4.0940E-01 5.3032E-01 6.9147E-01	690469696969 KEV - 2150 Dessesses	4.1282E-09 6.3275E-01 5.5705E-01 7.2808E-01	≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈≈	4.2862E-01 4.4934E-01 5.7818E-01 7.5980E-01	00000000000000000000000000000000000000	4.4134E-01 4.8727E-01 5.9858E-01 7.994E-01	аасеариасов ҚҚУ – 2000 Фесеворресс	4.59756-01 4.89538-01 6.21938-01 7.53278-01	сасасассо КЕV - 1950 авсовсась	4.7371E-01 5.0754E-01 6.3595E-01 1.3448E-01
asasasasas { 44 } 2150 sassassas	3.9149E-01 4.0492E-01 6.0402E-01 1.0446E+00 6.0248E+00 6.0248E+00	сеектопос (43) 2100 прострове	4.11738-01 4.29728-01 5.43938-01 7.08088-01	686266666666 (42)2050 666666666666	4.23388-01 4.45898-01 5.42388-01 7.35738-01	счяке¢ооссо (41) 2000 соебсевьсь	4.3993E-01 4.6333E-01 5.8196E-01 7.6954E-01	232222222222222 { \$ \$ 0 } 1950 \$ \$ \$ 0 \$ 1950	4.58138-01 4.85006-01 6.06258-01 8.16198-01	a¢sa¢¢¢a6a6a6 (39) 1900 ¢≈€≜å¢8262¢¢	4.7187E-01 5.0240E-01 6.2563E-01 7.5802E-01
e e e e e e e e e e e e e e e e e e e	3.90656-01 4.04636-01 5.47956-01 8.28216-01 0.0	e e e e e e e e e e e e e e e e e e e	4.3075E-01 4.2669E-03 6.668E-01 1.0163E+00 6.1422E+00	0 8 8 8 6 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	4.24208-01 4.42778-01 5.49658-01 7.14568-01		4.3865E-01 4.5977E-01 5.6853E-01 7.441E-01	aesecosses ENERGY ¢8000€NERGY	4.5667E-01 4.8992E-01 5.9190E-01 7.8506E-01	868880000 6486000 6446864 00000000000000	4.7021E-01 4.9776E-01 6.1033E-01 8.2533E-01
	3.8989E-01 4.0251E-01 4.3769E-01 5.8201E-01 0.0	6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4.0987E-01 4.2452E-01 5.5662E-01 8.2068E-01 0.0		6.23255-01 4.39965-01 6.49565-01 9.78145-01 6.27615+00	60606666666666666666666666666666666666	4.3750E-01 4.5656E-01 5.5619E-01 7.2203E-01	6 % 6 % 0 % 0 % 0 % 0 % 0 % 0 % 0 % 0 %	4.5534E-01 4.7724E-01 5.7876E-01 7.5845E-01	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	4.8870E-01 4.9358£-01 5.9637E-01 7.9326E-01
200 K K 200 K 1 800 80 200 80 80 80 80 200 80 80 80 80 200 80 80 80	3.8920E-01 4.3059E-01 4.3235E-01 5.5432E-01 2.3559Ê-02	0.000.000.000.000 10.000.000.000 10.000.00	4.0907E-01 4.229E-01 4.5915E-01 4.5915E-01 5.8497E-01 0.0	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	4.2234E-01 4.3742E-01 5.5765E-01 8.0367E-01 0.0		<pre>4.3646€-01 6.5367€-01 6.3927E-01 9.4100E-01 9.4158€*00 </pre>	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	4.5415E-01 4.7391E-01 5.6675E-01 7.3468E-01	5 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	4.6735E-01 4.8980E-01 5.8363E-01 7.6546E-01

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3.0724E-01 5.9411E-01 7.7969E-01		5.30662-01 6.19182-01 8.2792E-01	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	5.5258E-01 6.4278E-01 8.7947E-01	5 0 6	5.60662-01 6.55062-01 8.03562-01	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	5.8077E-01 6.8786E-01 1.1478E-01	6 9 9 9 9 9 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8 9 8	6.1309E-01 7.3675E-01 0.0	
\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	5.0373E-01 5.8277E-01 7.5344E-01		5.2661E-01 6.0696E-01 7.9712E-01	6 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	3.4796E-01 6.2955E-01 8.4364E-01	\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$ \$\$\$ \$\$ \$\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	5.55512-01 6.40722-01 8.78202-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	5.7159E-01 6.7159E-01 8.2301E-01	8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	6.0635E-01 7.1796E-01 1.1919E-01	
କ କ	5.0055E-01 6.1613E-01 8.4054E-01 6.8747E100	ଭକ୍ଷ ଅଭିକ କରିଥିଲି । ଜଣ୍ଡ ଅଭିକ କରିଥିଲି । ଜଣ୍ଡ ଅଭିକ କରିଥିଲି ।	5,2295£-01 5,9586E-01 7,6939E-01		5.4378E-01 6.1758E-01 8.1144E-01		3.5087E-01 6.2777E-01 8.4212E-01		5,6966E-01 6,5690E-01 9.0004E-01		6.0026E-01 7.0102E-01 8.5969E-01	
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4.9768E-01 5.7221E-01 7.4976E-01 0.0	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	5.1317E-01 6.1317E-01 8.1391E-01 7.0394E+00	8 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	5.4001E-01 6.0676E-01 7.8241E-01	ତ କଳିକ କଳିକ କଳିକ କଳିକ କଳିକ କଳିକ କଳିକ କଳି	5.4668E-01 6.1609E-01 8.0935E-01	8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	5.6491E-01 8.4365E-01 8.6309E-01	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	3.9477E-01 6.8549E-01 9.3911E-01	
د ۲	4.9509E-01 5.3801E-01 6.4514E-01 0.0	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	5.16676-01 5.8076E-01 7.4323E-01 0.0	690666586056 KEV * 66688666889	5.3661E-01 6.0853E-01 7.8572E-01 7.2172E+00	60000000000000000000000000000000000000	5.4289E-01 6.0554E-01 7.8016E-01	аврессервессе КЕV с с в с с с с е е е е е е	5.60622-01 6.31682-01 8.29755-01	9 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	5.39826-01 4.71882-01 9.00602-01	се касе се с
କେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେକେ	4.92755-01 5.31495-01 6.49095-01 7.18025-03	60638688066 KEV - 1850 6866833696	\$.1398E-01 5.5850E-01 6.8707E-01 0.0	sepsessese KEV - 3800 øeessessesses	5.3354E-01 5.8737E-01 7.3475E-01 0.0	eesseesseess KEV - 1750 asseesses	5.3948%-01 5.96028-01 7.53638-01 7.41878+00	еессковасер КЕV - 1700 ¢*еесьсь	5.5674E-01 8.2039E-01 7.9966E-01	ееосорболини КЕV - 3650 еесосисти	5,8534E-03 6,5941E-01 8,6585E-01	евоевьевсе КЕV - 1600
10000000000000000000000000000000000000	4.9063E-01 5.2561E-01 6.4741E-01 1.3005E-01	1949666665464 (37) 1800 1800	5.1156E-01 5.5174E-01 6.6954E-01 4.5674E-03		5.3077E-01 5.7665E-01 7.0614E-01 0.0	10010000000000000000000000000000000000	5.3639E-01 5.8763E-01 7.2968E-01 0.0	82866668666 (34) 1650 90082668726	5.53258-01 6.11146-01 7.72506-01 7.61148+00	222560496412 (33) 1600 222066666666	5.8130E-01 6.4816E-01 8.3449E-01	eeeeeeeeeee (32) 1550
1999999999999 199999999999 19999999999	6.8873E-01 5.2029E-01 6.3529E-01 7.7376E-01		5.0937E-01 5.4563E-01 6.6148E-01 1.2279E-01		5.2827E-01 5.6968E-01 6.8725E-01 2.0316E-03		5.341E-01 5.794BE-01 7.0807E-01 0.0		5.5009E-01 6.0234E-01 7.479BE-01 0.0	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	5.7766E-01 6.3800E-01 8.0618E-01 7.8017E+00	00000000000000000000000000000000000000
	4.8701E-01 5.1550E-01 6.2024E-01 8.4223E-01		5.07396-01 5.40126-01 6.47546-01 7.89796-01	6 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	5.26016-01 5.63396-01 6.73076-01 1.17216-01		5.3110E-01 5.7268E-01 6.8856E-01 0.0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	5.4724E-01 5.9440E-01 7.2585E-01 0.0		5.7437E-01 6.2883E-01 7.8063E-01 0.0	
	6.8545E-01 5.1117E-01 6.0656E-01 8.0894E-01		5.0561E-01 5.3515E-01 6.3267E-01 8.6257E-01		5.2398E-01 5.5771E-01 6.5742E-01 8.0750E-01	8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	5.28836-01 5.6636E-01 6.7096E-01 1.1127E-01		5.467E-01 5.8724E-01 7.0588E-01 0.0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	5.7140£-01 6.2056E-01 7.5756E-01 0.0	

 01 6.32036-01 01 7.71326-01 0.0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	01 4.5487E-01 01 8.1236E-01 0.0	0.00 8.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	01 8.7840E-01 01 8.5454E-01 8.4957E+00	8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	01 7.1709E-01 01 9.2181E-01 00		01 7.3281E-01 01 1.0048E+00	66666666688888 166666666666668 166666666	0; 7.7182E-01 90 1.0583E+00	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	01 8.15118-01 30 1.11765.00
 6.2443E-4 7.5016E-0 0.0		6.4629E- 7.8843E- 0.0		6.6890E-6 8.2950E-(0.0	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	7.05936-(8.90706-(8.74076+(0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	7.1798E-(9.6345E-(7.5621E-(1.0147E+(7.9862E-(1.0717E+(
 6,1758E-01 7,3106E-01 1,6188E-01		6.3854E-01 7.6685E-01 0.0	8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	&.6014E-01 8.0510E-01 0.0	6 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	6.9585E-01 8.6263E-01 0.0	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	7.0460E-01 9.2615E-01 9.0165E+00	କୁ କ	7,4211E-01 9,7548E-01	9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	7.8374E-01 1.0302E+00
 6.11396-01 7.13826-01 9.57706-01		6.3154E-01 7.4734E-01 2.5249E-01	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	6.5224E-01 7.8308E-01 0.0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	6.8474E-01 8.3729E-01 0.0		& .9252E-01 8.9249E-01 0.0		7.2939E-01 9.4001E-01 9.3084E+00		7.7051E-01 9.9273E-01
 6.0581E-01 6.9825E-01 9.5590E-01	0 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	6.2523E-01 7.2975E-01 9.7901E-01	а 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	6.4511E-01 7.63206-01 2.5440E-01	1.000.000.000.000 KFV 8.000.000.000	6.7856E-01 8.1442E-01 0.0	ававкоследае XEV © задавсодеа	6.8162E-01 8.6211E-01 0.0	a a a a a a a a a a a a K € V a a a a a a a a a a a a a	7.1791E-01 9.0801E-01 0.0	афоралал КЕV сессество	7.5818E-01 9.5894E-01 9.6195E+00
 6.00776-01 6.8421E-01 9.1676E-01	аевараарар КЕЧ – 1550 вредавеваре	6.39536-01 7.13676-01 9.76786-01	сессьнаясь КЕV — 1500 ессесьна	6.3867E-01 7.4526E-01 9.9871E-01	0 € € 8 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	6.7115E-01 7.9378E-01 2.6288E-01	есаеф 2008600 КЕV - 1600 азеедаворо	6.7179E-01 8.3469E-01 0.0	64666666666666666666666666666666666666	7.0755E-01 8.7912E-01 0.0	22045424688 KEV - 1300 688842823	7.4724E-01 9.2843E-01 0.0
 5.9622E-01 6.7153E-01 8.8142E-01	2022222222222 (31) 1500 22222222222	6.1439E-01 8.9953E-01 9.3664E-01	88838888888888 (30) 1650 88888888888	6.32866-01 7.2906E-01 9.9719E-03	888888844988 (20) 1400 8008888888888	8.6446E-01 7.7514E-01 1.0379E+00	9669686806886 {26}}}350 €868686868686868686	6.4290€-01 8.0994£-01 2.8075€-01	88888888888888 (27) 1300 88888888888888	6.9820E-01 8.5306E-01 0.0	020620869898 (26) 1250 9202698999	7.3736E-01 9.0090E-01 0.0
 5.9212E-01 6.6009E-01 8.4953E-01	●●●■■●●● ENERGY ●●●●●●●●	6.0975E-01 6.8660E-01 9.0078E-01	e e e e e e e e e e e e e e e e e e e	6.2762E-01 7.1445E-01 9.5645E-01	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	6.58436-01 7.58336-01 1.03686400	ଜନ୍ନ ଜନ୍ନ ଅନ୍ତର ଅନ୍ତର ଅନ୍ତି (କୁର୍ଗ୍ରେମ୍ ଜନ୍ମ ଅନ୍ତର ଜନ୍ମ ଅନ୍ତର ଜନ୍ମ ଅନ୍ତର ଜନ୍ମ ଅନ୍ତର	&.5489E-01 7.8760E-01 1.1088E+00	¢¢⇒©©¢¢≥≥¢¢≈ €NENC4 ©⇒©¢≥¢¢≈¢¢	6.8976E-01 8.2953E-01 2.8505E-01	6698669888 669866986 699864	7.2844E-01 8.7605E-01 0.0
 5.8841E-01 6.4976E-01 8.2075E-01 8.0219E+00	6 4 6 2 6 2 7	6.0556E-01 6.7492E-01 8.6824E-01	5 8 5 7 6 8 6 9 6 9 6 9 6 9 6 9 6 9 6 9 6 9 6 9 6 9	6.2288E-01 7.0125E-01 9.1968E-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	6.5298E-01 7.4315E-01 9.9445E-01	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	6.4765E-01 7.6743E-01 1.1013E+00		d.8213£+01 8.0829€-01 1.1118€+00		7.2040E-01 8.5363E-01 2.8681E-01
 5.8507E-01 6.4044E-01 7.9477E-01 0.0	1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	6.0178E-01 6.6438E-01 8.3887E-01 8.2509E+00	0 8 9 0 9 0 9 0 9 0 8	8.1861E-01 6.8935E-01 8.8649E-01	8 8 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	6.4807E-01 7.2945E-01 9.5627E-01	4 6 6 4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	6.4113E-01 7.5923E-01 1.0505E000	9 6 6 7 7 8 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	6.7526E-01 7.8912E-01 1.1065E+00	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	7.1313E-01 8.3338E-01 1.1194E+00

0.6415E-01 1.1346E+00 ЕмЕRGY (24) 1150 КЕV - 1200 КЕV асторовское состоровало саморала самора с 8.2829E-01 8.3938E-01 8.5168E-01 8.6530E-01 8.0039E-01 8.9711E-01 9.1563E-01 1.0120E+00 1.0429E+00 1.0772E+00 1.1152E+00 1.1572E+00 1.2038E+00 3.9091E-01 1.0310E+01 1.0002E+00 0.0 ааларала колоникально каталовиталови каталови катала колоникале колоника катала катала катала катала колоникал 1 1 1100 КЕV - 1150 КЕV 1.0471E+00 0.0 1.2114E+00 1.2097E+01 1.29695:00 1.12685,00 0.0 7.9219E-01 8.0379E-D1 8.1465E-01 8.3039E-01 8.4647E-01 9.8429E-01 1.0164E+00 1.0525E+00 1.0921E+00 1.1341E+00 9.9511E+00 8.9381E-01 9.0475E-01 9.1687E-01 9.3030E-01 9.4517E-01 9.6166E-01 9.7992E-01 1.0749E+00 1.1054E+00 1.1392E+00 1.1766E+00 1.2181E+00 1.2640E+00 5.1618E-01 1.0674E+01 1.0259E+00 0.0 1.0070E+00 1.0194E+00 1.0330E+00 1.0481E+00 1.0649E+00 1.0835E+00 1.1040E+00 1.2111E+00 1.2454E+00 1.2835E+00 1.3257E+00 5.3825E-01 0.0 1.1462€+00 1.1590€+00 1.1732€+00 1.1889€+00 1.2063€+00 1.2256€+00 1.2470€+00 1.2707€+00 1.3582€+00 1.3939€+00 1.4334€+00 6.9931€-01 0.0 0.0 0.0 1.2693€+01 1.08265+00 1.09586+00 1.11056+00 1.12486+00 1.14486+00 1.14486+00 1.18496+00 1.30206+00 1.33896+00 1.37986+00 5.50426-01 0.0 0.0 9.3578E-01 9.4723E-01 9.5992E-01 9.7398E-01 9.8956E-01 1.0068E+00 1.1254E+00 1.1573E+00 1.1927E+00 1.2319E+00 1.2753E+00 5.1635E-01 7.8172E-01 7 9.5510E-01 9 0.0 7.7227E-01 9.2876E-01 0.0 8.1827E-01 9.8409E-01 0.0 9.2344E-01 1.0946E+00 1.1115E+01 7.6374E-01 9.0498E-01 0.0 8.01086-01 8.09236-01 9.36166-01 9.58906-01 0.0 8.7502E-01 8.8394E-01 1.0226E+00 1.0474E+00 0.0 1.0706E+00 1.2686E+00 7.5403E-01 8.8352E-01 9 2.8872E-01 9 9.1611E-01 1.0706E+00 0.0 1.2385€+00 1.1346E+00 1.3260E+00

900 KEV ï 850 KEV ENERGY (18)

1.30556+00 1.3303E+00 1.3578E+00 1.3506E+01 1.2531E+00 0.0 1.2447E+00 1.2629E+00 0.0 0.0 1.2282E+00 8.8839E-01 1.2134E+00 1.4593E+00 1.2000£+00 1.4219E+00 1.1879£+00 1.3882£+00 1.4047E+00 1.4314E+00 1.4410E+00 1.3807E+00 1.4289E+01 1.3393€+00 1.3589€+00 0.0 1.32146+00 0.0 1.3054E+00 9.2927E-01 1.2912E+00 1.5300E+00 1.27826400 1.49378400 1.4483E+00 1.4695E+00 1.4930E+00 1.5190E+00 1.5479E+00 1.5799E+00 0.0 1.4291E+00 0.0 1.4119E+00 0.0 1.3963E+00 9.7867E-01 1.3822E+00 1.6153E+00 солочили одинали на пославни на пославно со стала на послава на послава на послава на послава на послави на пос Е NERGY (15) 700 КЕV - 750 КЕV

1.5971E+00 1.6227E+00 1.6510E+00 1.6023E+00 1.7170E+00

1.5741E+00 1.6135E+01 1.5533£*00 0.0 1.5345E+00 0.0 1.5175E+00 0.0 1.5022€+00 1.3220E+00 1.6963E+00 1.7190E+00 1.7442E+00 1.7721E+00 1.8030E+00 1.8372E+00 1.4116E+00 1.7245E+01 1.4758E+00 0.0 1.6573E+00 0.0 1.6406E+00 7.3296E-02

аликовскоталивиловоговотся спатанновала на макатония на волово на полово по полово по полово с се на полово с п ЕмЕМСУ (13) 600 КЕV - 650 КЕV сколово с на полово с полово с полово по полово на полово на полово по полово на полово с с на полово с на поло

7.85146-02 1.83885+00 1.84145+00 1.88635+00 1.91396+00 1.94455+00 1.97845+00 1.60095+00 1.85095+01 1.80026+00

1.8185E+00 0.0

акогсаловокалалородоналовлянато воряжалаловано покакола на покако на накако на покако на покако на покако на по Е ИЕ ПСУ / 12) 550 КЕV - 600 КЕV во на покако на покак

0.0

1.90726+00 2.5404E-01 2.00296+00 2.02336+00 2.05016+00 2.07756+00 2.10806+00 2.14176+00 1.99696+01 1.98275400

авополятаната полнавала полото полото полото полото полна полна полна пола пола полна полна полна полна полна п ЕмЕRGY (1) 500 KEV - 550 KEV за полна п

2.2105E+00 2.2351E+00 2.2625E+00 2.292BE+00 2.3264E+00 2.1677E+00

2.1382E+00 2.1675E+01

0.0

0.0

2.7753E-01

0.0

133

есликсовскатально состательно состательно состательно состательно политическое политическое состательно состате Какие состательно состательно состательно состательно состательно состательно политические состательно состател 2.3703E+01

0.0 0.0 2.4109E+00 2.4355E+00 2.4627E+00 2.492BE+00 2.5262E+00 2.4562E+00 6.0662E-01 2.6044E+01 0.0 0.0 2.6449E+00 2.6718E+00 2.7017E+00 2.7347E+00 2.7714E+00 8.8260E-01

2.87426401 0.0 2.8657E+D0 2.8945E+D0 2.9273E+00 2.9631E+00 1.3043E+00 0.0 3.1808E+01 0.0 3.02092+00 3.05172+00 3.08582+00 1.98852+00 0.0 3.5062E+01 3.0287E+00 3.0596E+00 2.4769E+00 1.2830E-01 0.0

3.81855+01 2.74966+00 2.6739E+00 4.6531E-01 0.0 2.0501E+00 8.7951E-01 3.5827E-01 4.0634E+01

ЕМЕНСТ (3) 100 КЕV - 150 КЕV Фосеруциянского состововаловаловаловаловаловаловаловала с с с с 150 КЕV

4.304BE+01 1.14785+00 7.1101E-01 4.17236+01 4.58126+00 付録 2 ストリッピング法による NaI モニタのデータ処理の例^{*1}

このデータ処理は3 in ϕ 球形 NaI(T1)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、並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ネル幅を一定にする)する。この校正はチ ャネル間の数値の補間で行っている。通常ゼロ点、⁴⁰K(1461 keV)、²⁰⁸T1(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(T1)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 y 線の点線源を用いて求められ、付図 2.1、付表 2.1 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(T1) 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 (T1) 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 2.2 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_o は下式のとおりとなる。

$$N_C = N_P (1 - PTTR) / (PTTR)$$

^{*1} 放射能測定法シリーズ No. 20「空間 γ 線スペクトル測定法」(平成 2 年)から引用しているため、旧単位の R と rad の記載としている。

N_pから上式によって N_eを求め、N_eをコンプトン連続部分の各チャ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矩形で近似することに相当する(付図 2. 2)。実際には、ま ず 3 MeV に相当するチャネル (10 keV 幅)をエネルギーEyの光子の全吸収ピーク(面積 Np カウント)とみなし、この Np から求められた No を、コンプトン端 Eo (MeV) (= Ey/ (1+0.511/2Ey))から0まで、対応する各チャ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。このよう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 y線の減衰率をチャネルごとに適用すれば、y線線束密度で表された光子スペクトルが 描かれる。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、数え落し、10 keV/ch の変換の際の誤差、P/T 比、コンプトン連続部分の差 し引き方法(矩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違い 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
 - 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。またデータ番号と共にγ線、宇宙線線量を付図2.3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(T1)シンチレ ータにおいては、3 MeV 以上の計数率に 2.12(μ R/h) / (cps)という定数(N₃)を乗じて、 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)にあっては、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。このようなおそ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N₁₀=3.5(μR/h)/(cps)を用いる。この両定数の比(N₁₀/N₃)は、環境における宇宙線成分の違いによって1.3~1.87の幅があるが、ここでは1.65を用いる。



付図 2.1 NaI (T1) シンチレータの P/T 比

付表 2.1 3 in φ 球形 NaI (T1) 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 2.2 3 in φ 球形 NaI (T1) 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 2.2 コンプトン連続部分の差し引き方法


付表 2.3 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

WEIGHT E/CH 820.0 6.73	TDUS 0.0484 11(C) 3443.0 JJ(C) 3020.0 R 3-H[V 3443.0 5-H[V 3020.0 R	SUM OF DOSE 0.6326+01 0.6446+01 0.64476+01 0.64476+01 0.6496+01 0.6506+01 0.6506+01 0.6506+01 0.6506+01 0.6506+01 0.6506+01	0.650E.01 0.608E.01 0.525E.01 0.525E.01 0.472E.01 0.472E.01 0.472E.01 0.472E.01 0.472E.01 0.472E.01 0.472E.01	0.3516+01 0.3256+01 0.3256+01 0.2766+01 0.1196+01 0.1116+01 0.1116+01 0.1016+01 0.9296+00 0.9296+00	0.829E+00 0.702E+00 0.533E+00 0.533E+00 0.463E+00 0.2735+00 0.2735+00 0.2735+00 0.235E-01 -0.1356-01 -0.145E-02
4A(UR/H)(CH) 63ZE+0] 3	- 3000 - 0.730 - 0.730 - 0.735 - 0.735 - 0.1335 - 0.1335 - 0.1335 - 0.1335 - 0.1335 - 0.1355 - 0.0355 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.13555 - 0.135555 - 0.135555 - 0.135555 - 0	SUM DF FLUX 0.5776:01 0.5816:01 0.5896:01 0.5996:01 0.5976:01 0.6016:01 0.6096:01 0.6096:01	0.6056.01 0.4256.01 0.3226.01 0.2566.01 0.2566.01 0.2566.01 0.2566.01 0.116.01 0.116.01 0.116.01 0.1566.01 0.1596.01	0.1326.01 0.1206.01 0.1096.01 0.9846.00 0.5116.00 0.5116.00 0.2386.00 0.2556.00 0.2556.00	0.232E*00 0.194E+00 0.144E+00 0.124E+00 0.124E+00 0.727E-01 0.727E-02 0.575E-02 0.575E-02 0.575E-02
126 (UR/H) GAM	000 -2000 102 6.876 537 19.984 431 43.414 409 25.331	1 0F DATA 222603 222603 222603 222603 222603 2219603 2214603 211603 211603	2116.03 1226.03 7646.02 4216.02 4276.02 1486.02 2356.02 2356.02 1996.02	.1386.02 .1186.02 .9396.01 .8146.01 .5076.01 .2596.01 .2596.01 .1796.01 .1796.01	.1326 +01 .1016 +01 .7535 +00 .5135 +00 .5135 +00 .5135 +00 .2316 -01 .1246 -01 .1246 -02
002-00	500-10 12-10 15-5 19-4 23-4	30000000000000000000000000000000000000			
A (1 E-CN) 3443.0	250-500 23.424 21.372 13.111 13.111 22.631	DDSE (MHR/) -0.1186-01 -0.26186-01 -0.1186-01 -0.1186-01 -0.5506-02 -0.5286-02 -0.5286-02 -0.5286-02 0.6036-02 0.6036-02	0.289E-01 0.451E-01 0.374E-01 0.333E-01 0.333E-01 0.399E-01 0.199E-01 0.226E-01 0.236E-01	0.1846-01 0.2846-01 0.2376-01 0.4026-01 0.1286-00 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01 0.1136-01	0.123E-01 0.146E-01 0.235E-02 0.235E-02 6.955-02 6.955-02 5.329E-01 0.118E-02 -0.178E-02
/E-TIME 2400.0	100-250 51.618 39.038 10.273 23.113	CM-2 CM-2 CM-2 CM-2 CM-2 CM-2 CM-2 CM-2	E + 00 E + 00 56 - 01 56 - 01 56 - 01 56 - 01 56 - 01 16 - 00 16 -	00000000000000000000000000000000000000	999 999 999 999 999 999 990 900 900 900
-CH LIV	50-100 5.548 1.081 0.303 1.460		0,12 0,425 0,425 0,425 0,124 0,124 0,131 0	000000000000000000000000000000000000000	000000000000000000000000000000000000000
1146 LAST- 003.40 448	0-50 -0.296 -3.418 -2.611 -0.030	PFAK (CPS) 0.174(CPS) 0.174(F01 0.176(F01 0.184(F01 0.184(F01 0.184(F01 0.184(F01 0.191(F01 0.198(F01 0.198(F01 0.198(F01	0.8596.01 0.5206.01 0.5206.01 0.1246.01 0.1146.01 0.1246.00 0.1266.00 0.4686.00 0.4686.00 0.1716.00 0.1716.00 0.1716.00	0,911E-01 0.117E.00 0.854E-01 0.199E.00 0.355E-01 0.257E-01 0.257E-01 0.257E-01 0.257E-01 0.257E-01 0.24JE-01 0.8077E-02	0.1976-01 0.2146-01 0.7966-02 0.1156-01 0.1156-01 0.1156-01 0.2666-01 0.7526-02 0.6631-03
СН 00 2	PER D 55.54 0.913 1.00 0.855	20290000000000000000000000000000000000	11100000000	00000011111	11111111111111
AMNEL KEV/ 24.0 10.	HESULTS 12.08CPS 5.846 6.403/ 5.403/	DATA(CF DATA(CF -0.1765- -0.1765- -0.1085* -0.2255* -0.2545* -0.2545* -0.4175* 0.415* 0.9805* 0.9805*	0, 9806 0, 29866 0, 2986 0, 2986 0, 1586 0, 4596 0, 5846 0, 5846 0, 5276 0, 52777 0, 52777 0, 52777 0, 527777 0, 52777777777777777777777777777777777777	00000000000000000000000000000000000000	6.3170 6.3170 6.1150 0.1150 0.1150 0.1160 0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.1657 -0.11557 -0.155777 -0.155777 -0.155777 -0.155777 -0.1557777 -0.1557777 -0.15577777777777777777777777777777777777
NU. «C» CH 097.0 10	00164L 047A 2 FLUX FLUX ADUSE ADUS	2 (1) 4 2 2 4 2 6 0 1 (1) 4 2 2 6 0 0	100 100 100 100 100 100 100 100 100 100	0011 0011 0011 0011 0011 0011 0011 001	210 222 200 200 200 200 200 200 200 200
(1ATA) 2621					

◎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、又は 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又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、更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。

CHANNEL チャネル数

測定データのチャネル数、このプログラムでは1024、又は2048のいずれかが多い。

KEV/CH チャネル幅

NO. に示された数のチャネル幅を示す。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を示す場合もある。

LAST-CH 最後のチャネル

データ解析した場合の最後のチャネルを示す。通常3 MeV に相当するチャネルが示される。

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 チャネルの数を数倍したものを用いる場合(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ネル(LAST CH)から実際に使用した最後のチャネルまでの 全計数値。

COS-DOSE(µR, H) 宇宙線線量

ABOVE CNT から計算された宇宙線線量(ABOVE CNT/LIVE TIME)×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 (µR, 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(T1))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(Σ_iN_i×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 チャネル幅

測定データのチャネル幅を示す。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 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 / cm²。

DOSE は、照射線量率 μ R/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(μ rad/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) はチャネル領域を(CH)×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。

 $0 \sim 50, 50 \sim 100, 100 \sim 250 \cdots \sim 3000$

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。

チャネル番号

データの打出しは、チャネル番号(10 keV/ch)ごとの値が打出されるが、打出す内容は選択 できる。通常1ページに打出すときは1~100 keV までは10 keV/chごと、100 keV~3 MeV ま では100 keV ごとの値を打出す。

◎DATA(cps)

NO.

測定データをn次式で10 keV/ch に補正した各チャネル(10 keV)ごとの計数率値(cps/10 keV)を指定チャネルについて打出す。

◎PEAK(cps)

DATA(cps)からコンプトン寄与を引いた結果で、"B"、"C"の場合は、この際あらか じめ別に与えられたバックグラウンドスペクトルを差し引いたものについて計算が行われる。

 \bigcirc FLUX ($\gamma \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)

PEAK(cps)の結果を検出体のピーク効率で割って得られた、真の光子束密度。

 \bigcirc DOSE (μ R/h)

上記光子東密度から算出した照射線量率。この結果に物質のエネルギー吸収係数等から求 められた係数を乗ずることによって、臓器線量率、実効線量率等が算出できる。

SUM OF DATA, FLUX, DOSE

それぞれの結果を3 MeV から低エネルギー領域の指定チャネルまで積分した値。

^{注1)} RESULTS には、シンチレータケースによる吸収などの補正をした結果、特性のわかった電離箱な どほかの測定値との比較、生殖線線量などの値等、5 組まで計算して打ち出すことが可能である。 この場合 DATA 以外の数値は変わる。

^{注2)} アンダーラインの内容は結果のグラフ表示に際して用いられる内容である。 すなわち、データ番号;C、D、B、の表示;宇宙線線量率C=;ガンマ線量率G=、である。

^{注3)} ◎印の項目はグラフでも表示される。それぞれのグラフは片対数、また SUM OF DOSE は直線 グラフで百分率で示される。これらの数値のうちアンダーラインのデータを逐次グラフにし たものを作ることが行われる。

付録3 逐次近似法による NaI (T1) 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^{*1}

NaI(T1)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 in φ 球 形 NaI(T1)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。

付録 3.1 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²⁰⁸T1(2.61 MeV)と⁴⁰K(1.46 MeV)の全吸収ピー クのチャ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。(このときに使用したレスポンスマトリックスを付表 3.1 に示す。また、方法の詳細 については付録 3.2 で述べる)。

(5) 線量率の計算

入射 y 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付録 3.3 で述べる)。

付録 3.2 逐次近似法によるエネルギー解析

エネルギーE₀の光子が1個、検出器に入射したとき、エネルギーE が吸収される確率をR(E₀、 E)とする。入射光子のエネルギー分布が X(E₀)のとき、吸収エネルギーE の分布 Y(E) は次式の ように表すことができる。

$$Y(E) = \int_0^\infty R(E_0, E) \cdot X(E_0) dE \qquad (\text{ff } 3-1)$$

^{*1} 放射能測定法シリーズ No. 20「空間 γ 線スペクトル測定法」(平成 2 年)から引用しているため、旧単位の R の記載としている。

今、入射エネルギーと吸収エネルギーを等間隔にn等分すると、(付 3-1)式から $E_j(j=1,2,...,n)$ が入射して、吸収されるエネルギー $E_i(i=1,2,...,n)$ の分布 $Y(E_i)$ は、

$$Y(E_i) = R_{ij} \cdot X(E_j) \cdot \Delta E \qquad (\text{ff } 3-2)$$

と表現できる。また、j=1、2、……、nと幅広いエネルギーのE_jが入射した場合には、

$$Y(E_i) = \sum_{j=i}^n R_{ij} \cdot X(E_j) \cdot \Delta E \qquad (\text{ff } 3-3)$$

となる。(付 3-3)式において、n→∞とすれば(付 3-1)式となる。

X(E_j) (j=1、2、…、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、…、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 3-3)式は、n行n列の正方行列R、n次元列ベクトルX、Yを用いて、次のように表現できる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \tag{(ff 3-4)}$$

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 Yoをとる。

$$X_1 = Y_0 \tag{(† 3-5)}$$

これに、レスポンスマトリックスRをかけたものをY1とする。

$$Y_1 = \mathbf{R} \cdot X_1 \tag{(13-6)}$$

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、

$$(X_2)_1 = \frac{(X_1)_1}{(Y_1)_1} \cdot (Y_0)_1 \tag{(† 3-7)}$$

である。X₂に更に R をかけたものを Y₂とする。

$$Y_2 = \mathbf{R} \cdot X_2 \tag{(ff 3-8)}$$

同様に、

$$(X_3)_1 = \frac{(X_2)_1}{(Y_2)_1} \cdot (Y_0)_1 \tag{(13-9)}$$

このような手続きを50回繰り返せば、~10⁻¹の範囲内に収束する。

付録 3.3 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。

$$D = 1.724 \times \frac{\Sigma_i (N_i \cdot E_i \cdot \mu_i) \cdot \Delta E}{\pi r^2 \cdot W \cdot T} (\mu R/h)$$
 ((ff 3-10)

ここで、

- Ei : i番目のヒストグラムの中心エネルギー(eV)
- ₩ : 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入る入射光子数/∠E(個/(100 keV・s))
- T : 測定時間(s)

付表 3.1 3in φ 球形 NaI (T1) シンチレーション検出器のレスポンスマトリックス

光子の中央エネルギー(MeV)

0.01 b.030 b.036 0.077 b (≱ 0.15 0.25 0.35 0.45 0.55 0.65 0.75 0.86 0.95 1.05 1.15 1.25 1.35 1.45 1.55 1	(5 1.75 1.65 1.95 2.05 2.15 2.25 2.35 2.45 2.55 2.63 2.75 2.65 2.95
0.01 1.000	
0.03 0.052 0.783 0.012	
u. 02 0. 0408 0. 112 0.787 0.018	
0.04 0.000 0.110 0.100 0.102 0.113	
0.00 0.003 0.013 0.107 0.11. 0.163 0.021	
0.12 0.022 0.012 0.015 0.013 0.02	
0.25 0.011 0.031 0.027 0.020 0.123 6.058 0.754	
0.35 0.036 0.033 0.031 0.028 0.26 0.129 0.018 0.578	
0.45 0.528 4.027 0.025 0.025 0.12 0.120 0.105 0.005 0.463	
262 0 910 0 200 0 100 0 200 0 FCT 0 167 0 210 0 810 0 161 0 10 0 10 0 10 0 10 0 10	
0.01 0.010 0.015 0.015 0.015 0.15 0.016 0.016 0.022 0.012 (.0)8 0.14 0.0.2	
0 7510.013 0.013 0.0-2 0.012 0.12 0.02 0.02 0.002 0.002 0.003 0.050 0.005 0.005 0.050 0.050 0.023	
0.66 0.011 0.011 0.011 0.010 0.110 0.023 0.053 0.052 6.051 0.072 0.050 0.010 0.255 0.050	
0, 5, 5, 610, 6, 610, 6, 503, 6, 563, 6, 517, 6, 517, 6, 513, 0, 513, 6, 505, 6, 505, 6, 505, 6, 501, 6, 501, 5	
1.02,003 0.003 0.008 0.004 0.043 0.043 0.011 0.012 0.013 0.015 0.044 0.035 0.047 0.035 0.077	
1,15,00,007 0,007 0,007 0,007 0,003 0,035 0,035 0,035 0,035 0,030 0,010 0,011 0,051 0,053 0,031 0,013 0,105 0,008	
1.25 0.053 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.01 0.031 0.031 0.051 0.055 0.059 0.03 0.052 0.027 0.037 3.153	
1.35 0.005 0.005 0.005 0.005 0.005 0.025 0.026 0.027 0.027 0.020 0.100 0.100 0.051 0.051 0.051 0.051 0.051 0.015	
1.45 0.604 0.001 0.005 0.005 0.005 0.053 0.024 0.024 0.027 0.028 0.027 0.028 0.070 0.011 0.050 0.022 0.031 0.12(3.017	
1, 55, 0, 004, 0, 004, 0, 004, 0, 005, 0, 022, 0, 022, 0, 023, 0, 024, 0, 024, 0, 028, 0, 028, 0, 028, 0, 010, 0, 048, 0, 022, 0, 021, 0, 118, 0	.015
1 22 0.004 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.020 0.020 0.020 0.020 0.021 0.021 0.021 0.020 0.020 0.020 0.031 0.021 0.023 0	.113 0.014
1 12 0. 003 0. 003 0. 003 0. 004 0. 004 0. 004 0. 018 0. 018 0 018 0 018 0. 019 0. 023 0. 021 0 023 0. 023 0. 03 0 0 01 0. 023 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	. 022 0.106 0.013
0 440 · 100 0 100 0 100 0 100 0 100 0 100 0 100 0 10 0 10 0 0 10 0 0 10 0 0 10 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	025 0.023 0.098 0.014
1: 55 0: 902 0: 602 0: 002 0: 003 0: 003 0: 012 0 013 0 013 0 014 0: 016 0: 016 0: 019 0 025 0: 022 0: 024 0 026 0: 034 : 036 0	041 0.024 0.026 0.030 0.014
2. 05 0. 002 0.002 0.002 0.002 C 003 0.011 0.011 0.012 0.012 0.013 0.014 0.014 0.018 0.023 0.022 0.022 0.022 0.022 0.022 0.022	0.036 0.038 0.023 0.029 0.083 0.016
2. 15 0. 002 0. 002 0. 002 0 002 0 003 0 011 0 012 0 012 0 012 0 013 0 013 0 014 0 014 0 018 0 022 0 021 0 021 0 022 0 02	039 0.031 0.034 0.021 0.034 0.032 0 014
2 220 : 020 0 20 0 20 0 20 0 20 0 20 0	1.025 0.038 0.023 0.032 0.021 0.077 0.077 0.014
2. 32, 0, 05, 0, 002, 0, 002, 0, 002, 0, 01, 0, 011, 0, 012, 0, 012, 0, 012, 0, 012, 0, 013, 0, 003, 0, 013, 0, 003, 0, 013, 0, 003, 0, 010, 003, 003	0.021 0.026 0.087 0.032 0.030 0.020 0.025 0.078 0.112
2.45 0.642 0.002 0.002 0.002 0.002 1.042 0.010 0.010 0.010 0.011 0.011 0.011 0.011 0.013 0.013 0.013 0.015 0.122 1.020 0	0.018 0.021 0.025 0.036 0.030 0.029 0 020 0.026 0.171 0.012
2 55 6 0 002 0 002 0 002 0 002 0 002 (002 0 010 0 010 0 010 0 010 0 010 0 010 0 011 0 011 0 011 0 011 0 012 0 01 - 1 023	0.019 0.019 0.022 0.026 0.037 0.031 0.029 0.021 0.025 0.059 0.017
2. 62 9. 902 8 902 9. 902 9. 602 7 962 9. 619 9. 610 9. 611 9 911 9 911 9. 611 9. 611 9. 611 9 911 9 911 9 011 9 011 9 012 9 19	0.023 0.019 0.018 0.020 0.026 0.037 0.031 0.028 0.020 0.021 0.015 0.021
2 75 0,000 0 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0	0. 024 0. 019 0 619 0. 021 0. 021 0. 026 0. 039 0. 031 0. 129 0 020 0 022 0. 011 0 022
2 f2	0.015 0 024 0 019 0.017 0.017 0.021 0.026 0 038 0.131 0.027 0.020 0.023 0.039 0 021
2 7 7 10 00 1 00 10 10 10 00 0 00 0 00 10 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0 000 0	0.011 0.016 0 025 0.019 0 019 0.019 0.022 0 028 0.012 0.032 0.030 0.020 0.022 0 038

(V = M) ーキルネエ共中の千米

- 1) JIS Z4001:1999 原子力用語
- 2) JIS Z8103:2000 計測用語
- 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) 柴道勝,下村遼平,武石稔,三枝純,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)
- 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.rri.kyoto-u.ac.jp/kurama/
- 7) 第4回環境放射線モニタリング技術検討チーム、資料3 平常時における環境放射線モニタリング:
 http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/kankyo_housyasen/index. html
- 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(2017)
- 9) 長岡鋭, G(E) 関数法, 日本分析センター広報, No. 32 (1998)
- 10) 堤正博,齋藤公明,森内茂,実効線量当量単位に対応した NaI(T1)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,JAERI-M 91-204 (1991)
- 森内茂, スペクトル荷重関数方式による環境γ線最測定器に関する研究, JAERI-M 7066 (1977)
- 12) 八木秀之, 伊藤浩, 浅野芳裕, 臼田重和, シンチレーション発光のパルス波形測定, JAERI-Tech 98-043 (1998)
- 13) 「光電子増倍管と関連製品」浜松ホトニクス株式会社
- 14) 「MPPC データシート」浜松ホトニクス株式会社
- 15) 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,斎藤公明,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 (2013)
- 16) A.B. Chilton, Nucl. Sci. Eng., 27, 403-410 (1967)
- 17) Alex Malins, Masahiko Okumura, Masahiko Machida, Hiroshi Takemiya and Kimiaki Saito, Fields of View for Environmental Radioactivity, Kyoto University Research Reactor Institute, International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, 28-34 (2015)
- 18) 長岡鋭,森内茂,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)

- 19) 尾川浩一, 核医学におけるアイソトープ利用, 核データニュース, No. 70 (2001)
- 20) 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
- 21) 公益財団法人 日本分析センター ホームページ,
 日本分析センターにおける空間放射線量率等について:http://www.jcac.or.jp/
- 22) R.L.Heath, IDO-16880-1 (1964), IDO-17017 (1965)
- 23) 天道芳彦, γ線スペクトルの解析法, RADIOISOTOPES, Vol. 12, No. 2, 200-205 (1963)
- 24) 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)
- 25) 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)
- 26) C. D. Zerby and H. S. Moran, ORNL-3169 (1961)
- 27) M. J. Berger and S. M. Seltzer, Nuclear Instr. Meth., 104, 317-332 (1972)
- 28) T. Hyodo and F. Makino, Memoi. Fac. Engin., Kyoto Univ., 14, 291 (1962)
- 29) 湊進,環境γ線解析用 3″φ×3″Na1(T1)シンチレータのレスポンス行列,名工試報告,
 27,384 (1978)
- 30) Y.Nakashima, Thesis. Fac. Engin., Nagoya Univ. (1980)
- 31) 森内茂,堤正博,斎藤公明,各種形状寸法のNaI(T1)シンチレーション検出器の γ 線応答関数の整備と試験,保健物理,42,71-83 (2007)
- 32) M. Okano, Natural Radiation EnvironmentⅢ, Symposium Series DOF51 (CONF-780422), 867 (1980)
- 33) S. Moriuchi, Personal Communication
- 34) I.Urabe, T.Tsujimoto, K.Yamazaki and K.Katsurayama, Jour. Rad. Res., 19, 163 (1978)
- 35) S. Minato, Personal Communication
- 36) 明野吉成,卒業論文,名大工,原子核工学科,Mar. (1982)
- 37) 石松健二, 日本原子力学会誌, 4, 24 (1962)
- 38) S. Moriuchi, Personal Communication
- 39) C. D. Zerby, Methods in Computational Physics, I, 89-134, (B. Alder and S. Fernbach eds.) Academic Press (1963)
- 40) 斎藤公明,森内茂,モンテカルロ法を用いた NaI (T1) 検出器応答関数の高精度計算と スペクトル形成過程の解明, JAERI-M9741 (1981)

本書の作成経過、委員会名簿及び会議開催経過

1. 本書の作成経過

本書は平成27年度及び平成28年度放射線対策委託費(放射能測定法シリーズ改訂)事業 で、公益財団法人日本分析センターに委託した成果を、原子力規制委員会が設置した環境放射 線モニタリング技術検討チームにおける議論を経て作成したものである。

- 2. 平成27年度及び平成28年度放射線対策委託費(放射能測定法シリーズ改訂)事業内に設置した「放射能測定法シリーズ改訂検討委員会」の委員名簿と委員会開催日
 - 平成27年度
 - 委員長 中村尚司 東北大学名誉教授
 - 委員 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 特任参事
 - 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

(敬称略・五十音順)

- 事務局 公益財団法人日本分析センター
- 第一回 平成27年11月4日
- 第二回 平成28年1月14日
- 第三回 平成28年3月4日

平成28年度

- 委員長 中村尚司 東北大学名誉教授
- 委員 阿部琢也 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 チームリー

ダー

- 阿部幸雄 福島県環境創造センター 環境放射線センター 主幹兼次長兼分 析・監視課長
- 大野 剛 学習院大学 理学部化学科 准教授

木村芳伸 青森県原子力センター 分析課 研究管理員

- 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 上席主任研究員
- 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 上席嘱託
- 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
- 津田修一 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター 環境・放射線科学デビジョン放射線 挙動解析研究グループ 研究副主幹
- 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

(敬称略・五十音順)

- 事務局 公益財団法人日本分析センター
- 第一回 平成28年12月5日
- 第二回 平成29年1月20日
- 第三回 平成29年3月2日
- 3. 原子力規制委員会 環境放射線モニタリング技術検討チーム構成メンバーと会合開催日

原子力規制委員会

伴 信彦 委員

外部専門家

- 青野辰雄 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研 究所福島再生支援本部環境動態研究チーム チームリーダー
- 飯本武志 東京大学 教授
- 髙橋知之 京都大学原子炉実験所 准教授
- 田上恵子 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研 究所福島再生支援本部環境移行パラメータ研究チーム チームリ ーダー
- 武石 稔 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 分析技術開発アドバイザー

百瀬琢麿 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学 研究所 副所長

- 山澤弘実 名古屋大学 教授
- 吉田政敏 佐賀県環境センター 所長

(敬称略・五十音順)

- 原子力規制庁
 - 片山 啓 核物質·放射線総括審議官

監視情報課

- 武山松次 課長
- 久野 聡 企画官
- 佐々木潤 地方調整専門官
- 相原佑康 課長補佐
- 左海功三 解析評価専門官
- 松田秀夫 解析評価専門官
- 山田純也 課長補佐
- 上杉正樹 技術参与
- 監視情報課放射線環境対策室
 - 根木桂三 室長
 - 及川真司 環境放射能対策官

放射線防護企画課

- 佐藤 暁 課長
- 藤元憲三 技術参与
- 放射線規制部門
 - 中村尚司 技術参与

環境放射線モニタリング技術検討チーム第6回会合 平成29年12月25日開催

- 4. 本書を作成するに当たっては、下記の方々に協力を得た。
 - 紺野慎行 福島県環境創造センター 環境放射線センター 主査
 - 田中孝典 島根県原子力環境センター 島根県防災部原子力安全対策課 監視 情報グループリーダー
 - 田中博幸 公益財団法人日本分析センター 放射能分析事業部 y 線解析グル ープ 上級技術員
 - 谷垣 実 京都大学原子炉実験所 粒子線基礎物性研究部門 助教
 - 新田 済 公益財団法人日本分析センター 放射能分析事業部 y 線解析グル ープ リーダー
 - 松田規宏 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 環境動態研究グループ 研究員

- 松田秀夫 公益財団法人日本分析センター 放射能分析事業部γ線解析グル ープ 上級技術員
- 三上 智 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 環境動態研究グループ 技術副主幹
- 水野 哲 福島県 危機管理部原子力安全対策課 主査

(敬称略・五十音順)

改訂履歴	
昭和 57 年 7 月	制定
平成8年3月	改訂
平成 29 年 12 月	改訂