

# 空間 $\gamma$ 線スペクトル測定法

平成 2 年

文 部 科 学 省

## 放射線審議会測定部会の委員及び専門委員

### 委員(部会長)

浜池市柏阪佐鈴谷団敦浜山	田川木上藤木村野賀口県	達長平三	二生郎寛信平生雄文人博登	社団法人 日本アイソトープ協会 社団法人 日本アイソトープ協会 国立がんセンター 電子技術総合研究所 元 金沢大学 電子技術総合研究所 国立衛生試験所 国立衛生試験所 南九州大学 財団法人 海洋生物環境研究所 財団法人 日本分析センター 元 国立公衆衛生院
--------------	-------------	------	--------------	---

### 専門委員

阿石岡葛小塩原	部川野城林崎	史友眞幸宏	朗清治雄信愈助	放射線医学総合研究所 財団法人 セコム科学技術振興財団 元 理化学研究所 元 気象研究所 元 農業環境技術研究所 海上保安庁 セイコー電子工業株式会社
---------	--------	-------	---------	---

本分析法の作成にあたっては、上記委員のほか次の方々の協力を得た。

飯伊笠桂加河黒河清高高滝寺辻中中橋武松松森	島澤井山藤田川野水橋橋沢西本島島本藤岡本田	敏正幸良郁幹寿行英敬敏達信茂	哲実篤典朗燕康夫誠二郎雄三忠行行也正明健樹	元 日本原子力研究所 元 放射線医学総合研究所 元 日本原子力研究所 近畿大学 財団法人 日本保安用品協会 電子技術総合研究所 元 動力炉・核燃料開発事業団 関西電力株式会社 東京大学 京都大学 立教大学 秋田大学 電子技術総合研究所 京都大学 名古屋大学 放射線医学総合研究所 日本原子力発電株式会社 元 動力炉・核燃料開発事業団 財団法人 九州環境管理協会 電子技術総合研究所 元 茨城県公害技術センター
-----------------------	-----------------------	----------------	-----------------------	--

(敬称略・五十音順)

## 目 次

序 論	1
第1章 NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータによる空間 $\gamma$ 線計測手順	4
1.1 シンチレーションスペクトロメータの構成と必要な機器類	4
1.2 計測の手順(測定機器の事前点検と性能試験)	6
1.3 野外測定の実施	7
1.4 測定データの一次処理	9
1.5 エネルギー校正のためのデータ取得	11
第2章 NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータの計測データに用いるレス ポンス関数	12
2.1 レスポンス関数の意味	12
2.2 レスポンス関数の作成	12
2.3 レスポンス関数の適用	13
第3章 NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータによる計測データの処理	14
3.1 測定されたパルス波高分布のエネルギー補正	14
3.2 入射スペクトルへの変換	15
3.3 結果の表現	16
3.4 放射性核種別線量寄与の算出	17
第4章 ゲルマニウム半導体スペクトロメータによる空間 $\gamma$ 線計測手順	20
4.1 計測の概要	20
4.2 ゲルマニウム半導体スペクトロメータの具備すべき条件	20
4.3 計測の手順	21
第5章 ゲルマニウム半導体スペクトロメータによる計測データの処理	28
5.1 処理の手順	28
5.2 平滑処理(スムージング)	30
5.3 ピークの検索とピーク面積の求め方	30
5.4 核種の同定	33
5.5 光子束密度の計算	35
5.6 放射性核種の同定にもとづく直接 $\gamma$ 線線量の決定	36
5.7 放射性核種別線量寄与の算出	37

第6章	ゲルマニウム半導体スペクトロメータを用いて得た処理結果の表現	41
6.1	放射能レベルの推定	41
6.2	線量評価	42
第7章	基準 $\gamma$ 線源の利用と校正	44
解 説		47
1.	NaI(Tl)シンチレーション検出器の特性	49
2.	ゲルマニウム半導体検出器の特性	54
3.	レスポンス関数の作成	56
4.	実効エネルギーと散乱 $\gamma$ 線	69
5.	基準 $\gamma$ 線源の利用と校正	83
6.	環境放射能レベル推定に使われる式	96
7.	環境 $\gamma$ 線の現地測定におけるデータの処理法	100
7.1	HASL法	100
7.2	ストリッピング法	105
7.3	マトリックス法による天然放射性核種別線量寄与の解析	113
付 録		115
1.	ストリッピング法によるNaI(Tl)シンチレーション スペクトロメータのデータ処理の例	117
2.	逐次近似法によるNaI(Tl)シンチレーション スペクトルのアンフォールディングの例	130
3.	レスポンス関数の計算例	135
4.	線量換算係数	147
参考資料		151
1.	NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる測定結果の不確かさ (精密さと正確さ)と問題点	153
2.	各種計測器による測定結果の比較例	156
参考文献		159

## 序 論

本マニュアルは、NaI(Tl)シンチレーション検出器又はゲルマニウム半導体検出器を備えたガンマ線スペクトロメータによる、現場における環境ガンマ線スペクトルの測定とそのモニタリングへの応用に関する標準的な手法を示したものである。

原子力施設周辺における環境ガンマ線モニタリングには、現在、TLDが集積線量の測定に、また連続モニタが主として線量率の変動の監視に使用され、十分にその機能を果たしている。しかしながら、たとえば放射線発生源の特性の変化など異常の原因究明や、線量に対する核種別の寄与の割合の評価のためには、上記のデータに加えてさらにこれを補強するデータが必要であり、そのうちで最も有力と考えられるのが、環境ガンマ線のエネルギー情報である。エネルギー情報があれば、人体の深部線量当量の算定や、緊急時における環境の放射性核種の迅速な同定などにも役立たせることができる。

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータと、ゲルマニウム半導体スペクトロメータには、それぞれの特性にちがいがあり、その特長とそれを生かした役割は以下のようである。

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータは、ゲルマニウム半導体スペクトロメータにくらべてエネルギー分解能が劣るが、検出器の形状が規格化されているなど構造が画一化されているため、出力波高分布の解析方法を統一することによって、測定結果の一致性を良くすることができる。また、現場での取扱も容易である。その主な役割は環境ガンマ線のスペクトルとエネルギー別の線量寄与の測定および線源核種のおよその同定と考えられる。

これに対し、ゲルマニウム半導体スペクトロメータは、その形状が規格化できないため、各自がデータ解析に必要な基礎データを得る必要があり、また現場での取扱がやや面倒であるなどの欠点があるが、その代わり抜群のエネルギー分解能をもっている。したがって、その第一の役割は環境に存在する放射性核種の同定と定量であり、またそれにもとづいて核種別の線量寄与を知ることも可能である。

本マニュアルは、以上のような両者の相補的役割を認めた上で、上記各項目のそれぞれについて適用方法を述べてある。第1章から第3章まではNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータに関する事項、第4章から第6章まではゲルマニウム半導体スペクトロメータに関する事項、また第7章には両者に共通の事項が取り扱われている。

本マニュアルに使用している用語の意味は次のとおりである。

○検出器保護ケース

野外環境で放射線測定を行う場合、検出器を保護する目的で、金属または合成樹脂などで作られたケース内に検出器を納めて用いることが多い。このケースを検出器保護ケースという。

○デュワ

ゲルマニウム半導体検出器冷却用に用いられる液体窒素充填用容器と冷却装置（クライオスタット）部まで含めたものをいう。

○基準 $\gamma$ 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線源をいう。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。

○放射能標準線源

放射能（Bq）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線源をいう。

○エネルギー校正線源

放出 $\gamma$ 線についてそのエネルギーが正確に求められている線源をいう。

○チェック用線源

計測装置の動作などを点検する目的で使用される長半減期の密封線源で、その強度は参考程度の値付けがなされているのが普通である。

○直接線

線源から検出器まで無散乱（微小角散乱を含む）で到達した光子線。

○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 $\gamma$ 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をいう。

○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 $\gamma$ 線入射スペクトルを得る際（デコンボリューションdeconvolution, またはアンフォールディングunfolding）に生ずる不正確さを近似の次数を逐次高めて最小にする解析法。

○ストリップング法

レスポンス関数を用いて入射 $\gamma$ 線スペクトルを得るスペクトル解析法。高エネルギー領域の数をレスポンス関数と一致させる定数を定め、逐次低エネルギー領域にこの操作を進めて解析を行う。高いエネルギーから逐次はぎとることからこの名がある。ピーリングオフともいう。

○粒子束密度（光子束密度）

単位時間あたりの粒子フルエンス（個/cm<sup>2</sup>）で、単位は個/cm<sup>2</sup>・sである。

○実効エネルギー

複数または連続的なエネルギー分布を持つ放射線によって物質に生ずる効果と同一の効果を持つ、単一エネルギー放射線に置き換えそのエネルギー値を実効エネルギーといい、普通おなじ半価層を示す単一エネルギーを用いることが多い。

○ $\gamma$ 線エネルギースペクトル

$\gamma$ 線場の真のエネルギースペクトルをいう。

○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をいう。

○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をいう。

○入射 $\gamma$ 線スペクトル

補正波高分布をもとにして、レスポンス関数を適用し、 $\gamma$ 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をいう。

○放射能レベル

計測地点における入射 $\gamma$ 線光子束密度から得られた環境の平均放射能濃度。一般に表面分布の場合は単位面積当たりの放射能、それ以外の場合は単位体積あたり又は単位質量あたりの放射能で表す。

# 第1章 NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータ による空間 $\gamma$ 線計測手順

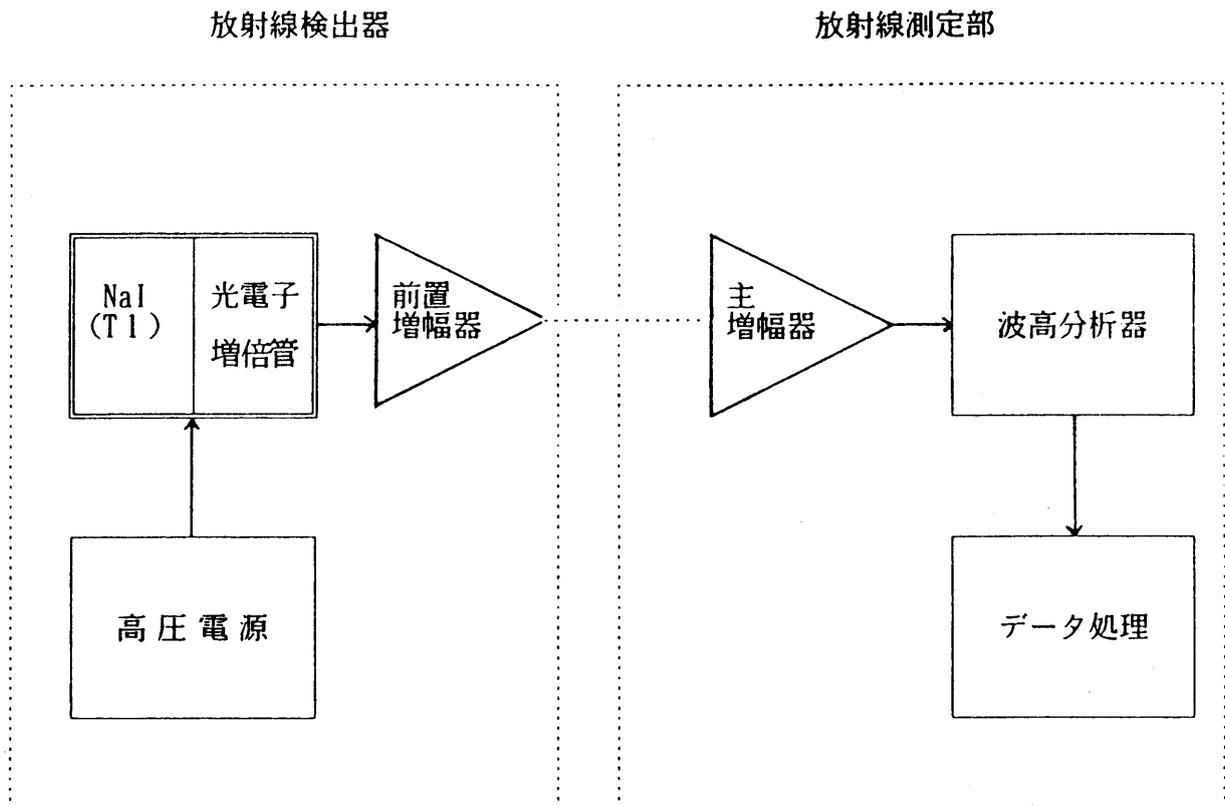
## 1.1 シンチレーションスペクトロメータの構成と必要な機器類

### 1.1.1 シンチレーションスペクトロメータの構成

シンチレーションスペクトロメータは検出器、比例増幅器、波高分布器、データ処理部より構成されている。その代表的な系統図を第1.1図に示す。

検出器とは、シンチレータ、光電子増倍管、前置増幅器を組み合わせたものをいい、光学的に透明な結晶体のシンチレータに放射線が入射すると、パルス的な蛍光を発する。この光を光電子増倍管で電気信号（パルス信号）に変換し、前置増幅器を介して比例増幅器に送るものである。この時のパルス信号の大きさは入射した放射線がシンチレータ内で失ったエネルギーにほぼ比例する。パルス信号の測定には波高分析器を用いる。波高分析器は比例増幅器を通過したパルス信号を波高別に分析する装置で、マルチチャンネル波高分析器を用いると短時間のうちに能率よくパルス波高分布の集積ができる。このほか比例増幅器からの信号をA/D変換し、変換コードを実時間で記録するためにインタフェースを用い直列に並べ、オーディオ用ステレオテープレコーダなどに一旦記録させ、このテープを後日実験室で再生することによりパルス波高分布を得る方式もあり、現場でのスペクトル測定によく用いられる。いずれにしても波高分析器で集積されたパルス波高分布をもとに解析が行われる。このような波高分析器で集積されたパルス波高分布をデータ処理部で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。

データ処理には主としてコンピュータを使用する。コンピュータが波高分析器に内蔵されているもの、波高分析器とマイクロコンピュータが直接接続されているもの、またオフラインで大型コンピュータに接続し処理するものなどがある。



第1.1図 NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータの構成

### 1.1.2 必要な機器類

環境放射線の測定は野外現場に測定器を持ち出して実験することが多い。この場合、測定器の調整が十分でなかったために、必要な結果が得られないこともあり、また、現場作業であるので、部品の一部を忘れたために測定ができないようなことも起きる。

ここでは測定前の調整に必要な試験用機器と現場測定に必要な機器の品目についての一例を以下に示す。

#### 1) 試験用機器一覧

- ① パルサ (水銀パルサ等)
- ② アッテネータ (1/1～1/1,000)
- ③ オシロスコープ
- ④ テスタ
- ⑤ チェッキング線源

#### 2) 現場測定用機器

- ① 検出器保持用三脚（または四脚）および取付台
- ② 線源保持用三脚および取付台
- ③ 鉛シャドーシールドおよび取付台
- ④ 波高分析器用台、日覆い等
- ⑤ その他

} 校正時に使用

電源コード、テーブルタップ、巻尺、ビニールテープ、ポリ袋（防水用）、発電機、アース棒、筆記用具等を必要に応じ携帯する。

## 1.2 計測の手順（測定機器の事前点検と性能試験）

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より構成される。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み合わせ使用しなければならない。システムの使用条件を決める際の調整、選択箇所の主要なものは、

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

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

波高分析器の使用チャンネル数については、NaI(Tl)シンチレーション検出器によるスペクトルの1チャンネルあたりのエネルギー幅が数 $\sim 20 keV$ 程度、通常 $5 \sim 10 keV/ch$ が適当なところから $500 \sim 1,000$ チャンネルとし、 $3 MeV$ 以上に宇宙線の情報が十分とれるように配慮する。

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

- ① 直流再生回路の直流レベルの調整
- ② ノイズレベルの試験
- ③ 測定エネルギー範囲の試験と確認

- ④ パルス波高分布の異常の有無の確認
- ⑤ 検出器のエネルギー分解能（半値幅による）試験
- ⑥ パルス波高値対チャンネル番号の直線性試験

①の調整（装置によってはないものもある）はチェック線源（例えば $^{137}\text{Cs}$ の $0.662\text{MeV}$   $\gamma$ 線）を用い、オシロスコープにより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。 $\gamma$ 線の測定エネルギー範囲は最低 $40\text{keV}$ から $3\text{MeV}$ 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）、高域波高弁別器（Upper Level Discriminator; ULD）のレベルを設定する。 $30\sim 40\text{keV}$ に近い位置に強いノイズが現れる場合は低エネルギー $\gamma$ 線の測定精度を悪くするのみ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出来るだけ低く設定し、ULDは宇宙線成分の情報を多く得るために出来るだけ高く設定する。

④は、単一エネルギーの $\gamma$ 線を用い、パルス波高分布全体の形状、光電ピーク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、増幅回路その他の過渡特性により $\gamma$ 線領域に異常な信号を出すこともあるので、十分な点検が必要である。

⑤については、 $^{137}\text{Cs}$ の $0.662\text{MeV}$   $\gamma$ 線を用い、光電ピークの分解能で良否を判定する。通常 $7\sim 9\%$ が正常値であり、 $10\%$ を越す場合は異常とみて原因の調査を行う。

⑥については、電気回路部のみの特性と、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 結晶の発光特性を含めた特性についてこれらを区別して試験を行う。電気的な回路部の特性は水銀パルサー等を用い、アッテネータを通した各種出力とこれに対応する波高分析器のチャンネル番号の関係から調べる。パルス波高値が0に相当するチャンネル番号は $\gamma$ 線のエネルギーを基準にして得たものとは異なるので、パルス波高分布のエネルギー校正に関連してこれらの関係を正確に把握しておく（エネルギー校正については後述）。

### 1.3 野外測定の実施

野外測定は室内試験では見られない厳しい環境、例えば極端な高・低温、高湿度下、ほこりの多い場所、振動のある状態などのもとで行われる場合が多く、これらに対し

てはあらかじめ検出器の断熱対策、装置全体の日覆い、防湿対策等を十分に考えておくことが必要である。NaI(Tl)シンチレーション検出器は特に機械的なショックにより破損の恐れがあり、また重力のかかる方向によってシンチレータとガラス間の剥離を起こしやすいので、運搬に際してはシンチレータを上側に垂直にした状態で運ぶよう心掛けることが必要である。測定に際しては測定器の各部に対し日覆いをほどこすことによる温度上昇の防止、保温材による保温対策等を考える。

測定を実施するにあたり検出器の設置高さや方向を測定対象に応じ統一する。検出器は原則として遮蔽を付けずに、高さを1 mに設定して測定する。この際検出器の方向を記録する。

次の各項目について確認の上、本測定に入る。

① 機器の使用条件、測定条件の確認

- ・ 高圧電源電圧
- ・ 主増幅器の利得、波形整形時定数
- ・ 波高分析のLLD、ULD、A/D変換利得、チャンネル数選定

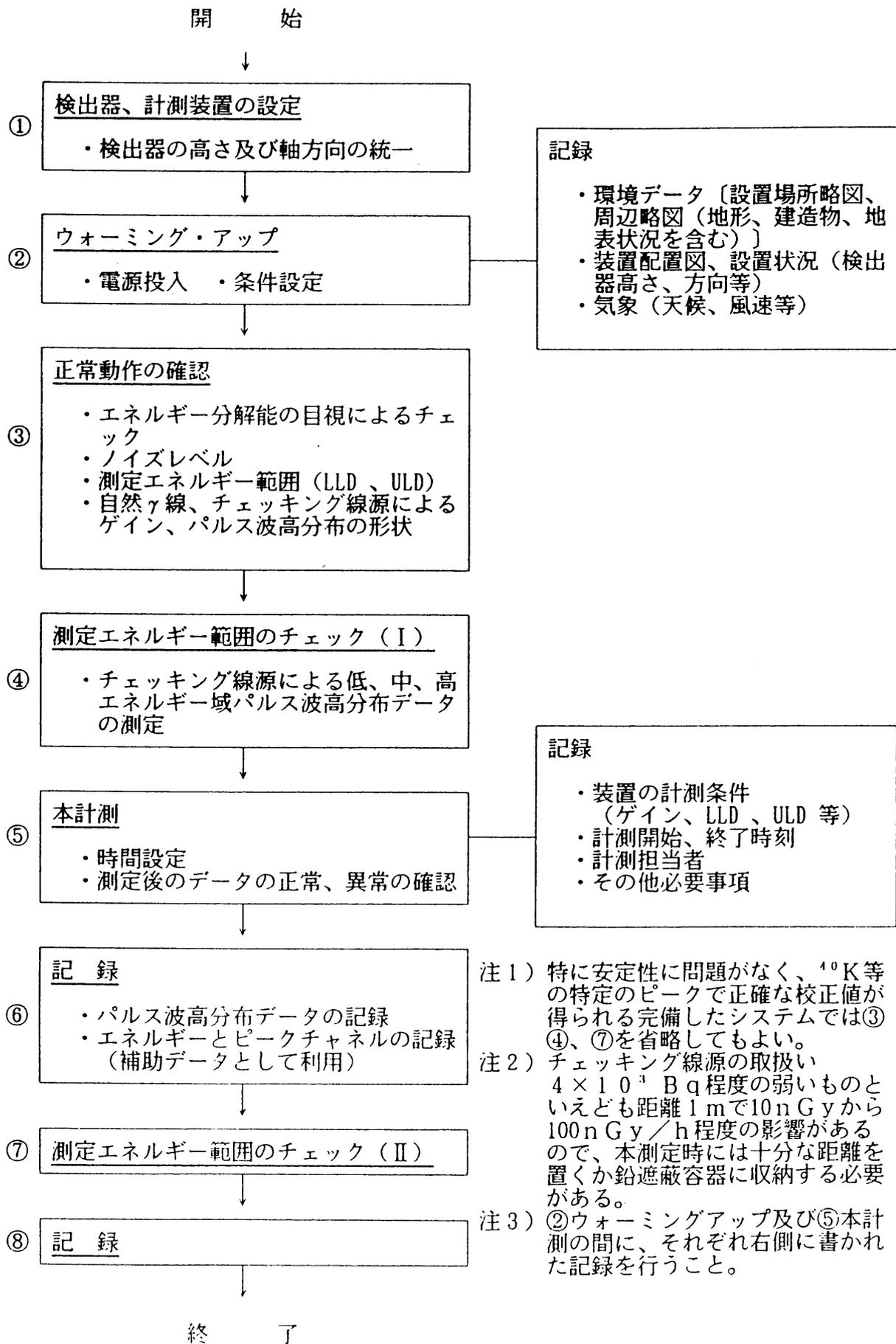
② 自然放射線およびチェック線源による正常動作の確認

ピーク位置があらかじめ予定した位置に来るかどうか、またパルス波高分布が正しい形状を示しているか、ノイズその他異常な成分が重なっていないかを確認する。

なお、自然 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルから得られるエネルギー情報のみでエネルギー校正に十分な情報が得られないときは、本測定の前後に数核種のチェック線源によりパルス波高分布を測定、記録しておく。一連の測定では機器の使用条件、測定条件を変えないことが原則であり、条件を変えなければ、システムの安定性、特性変化に関する正確な情報につかめる。測定が長時間に及ぶ時は、温度変化によるゲイン変動に留意し、また測定条件を変える際は変更前後にチェック線源により十分な特性データをとる。なお、第1.2図に測定手順例を参考として挙げた。使用するチェック線源は $4 \times 10^3$  Bq前後あるいはこれ以下の強さのものが適当である。しかし、この程度のもので、検出器までの距離が1 mで10~100 nGy/h前後になり得るので、本測定時には十分な距離を置くか、鉛遮蔽容器に収納するか適当な対策をとる必要がある。

#### 1.4 測定データの一次処理

エネルギー校正に備え、チェック線源によるパルス波高分布データおよび本測定によるパルス波高分布データから、 $\gamma$ 線エネルギーに対応する光電ピークチャンネルのデータの整理を行う。エネルギー対チャンネル番号の関係はほぼ直線関係にあり、各測定毎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。



第 1.2 図 測定手順フローチャートの例

## 1.5 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 $\gamma$ 線のエネルギーは測定対象の $\gamma$ 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、使用できるチェック線源に限りがあるので、少数の線源で必要な情報を得る方法をあらかじめ検討しておく。校正点は少なくとも、50～200keVの範囲で1点、1～2MeVの間で1点を選ぶようにする。このためには、一例として低エネルギー側の校正点として $^{57}\text{Co}$ の0.122MeV、高エネルギー側の校正点として天然核種 $^{40}\text{K}$ の1.46MeVあるいはRa線源中の $^{214}\text{Bi}$ の1.76MeV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3章を参照して精度の高いエネルギー校正を実施しなければならない。

## 第2章 NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータの計測データに用いるレスポンス関数 (解説3 参照)

### 2.1 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て、検出器への入射 $\gamma$ 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

$$P(h) = \int_0^E \epsilon(E) K(E, h) N(E) dE \quad (2-1)$$

の積分方程式で表現できる。この式中の $\epsilon(E)$ は検出器の効率である。この式の核 $K(E, h)$ または $\epsilon(E) K(E, h)$ 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すべて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。

### 2.2 レスポンス関数の作成

いく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り得る。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り求める。他にモンテカルロシミュレーションによる作成法もある。

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

レスポンス関数を行列表示し、列 (または行) について各要素を加えた値は、その

列の対応するエネルギーの単一光子入射時の効率を与える。この値を検出器について(2-2)式より理論的に算出した効率 $\eta_1$ 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。

$$\eta_1 = 1 - \frac{2}{(\mu d)^2} + 2 e^{-\mu d} \left\{ \frac{1}{(\mu d)^2} + \frac{1}{\mu d} \right\} \quad (2-2)$$

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

### 2.3 レスポンス関数の適用

いくつかの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、それぞれの光子の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より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引く方法、差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比をもとに最高エネルギー側より差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他に逆行列法、逐次近似法等の解析法により入射 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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や解析方法はもとより、レスポンス関数(またはレスポンス行列)と実際の測定系の応答の適合性も問題である。

## 第3章 NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータ による計測データの処理

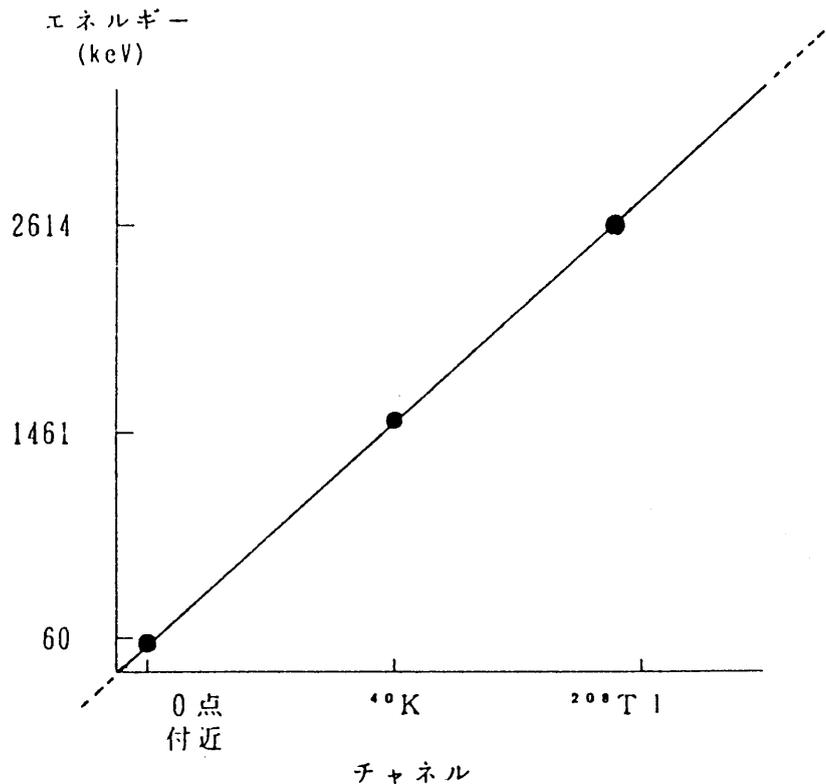
NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータによって得た波高分布の処理は、特別のピークに着目するよりも、全波高分布を入射スペクトルに引き戻し、いくつかのチャンネルをひとまとめにしたエネルギーブロックごとに扱うことが多い。

その処理内容としては計測波高分布のエネルギー補正、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いくつかの解析があげられる。解析等に使用される波高分布は磁気テープ、フロッピーディスクなどに収録されたものであり、そのデータ量の多さから計算機による処理が可能であるように、入・出力のインターフェース、計算プログラムを伴っていることが望ましい。

### 3.1 測定されたパルス波高分布のエネルギー補正

測定されたパルス波高分布は、エネルギーと波高値すなわちチャンネル数が一般には必ずしも直線関係にない。直線関係が成立している時は、この項をとばして差し支えない。この関係が成立しないと、検出系の分解能が高くないことから、解析結果に偏りを生じがちになる。そのために、これを補正する必要がある。このためにはチャンネルとエネルギーとの関係を明らかにする処理、通常はチャンネル当り一定のエネルギー幅（チャンネル幅）を有する波高分布に変換する処理を行う。この補正処理を行うには、パルス波高分布のチャンネルとエネルギーの関係を、スペクトル上のピークの中心チャンネルとそれに対応するエネルギーの幾組かの点に最も近似する多項式を選び、それを用いて変換する。多項式としては“0”点付近のエネルギー（たとえば  $^{241}\text{Am}$  {59.5 keV}、 $^{207}\text{Bi}$  {78 keV}、 $^{57}\text{Co}$  {122.1 keV}、または入力信号“0”を特定のエネルギー（たとえば -17 keV）とする、 $^{40}\text{K}$  (1461 keV)、トリウム系の  $^{208}\text{Tl}$  (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（第3.1図）（補正の具体的手順については解説5を参照）。さらに細かく補正するためには高次の式を用いて変換を行うが、このためには必要数（ $n$ 次式なら  $(n+1)$ 点以上）の対応するピークエネルギーを選ぶ必要がある。エネルギー／チャンネルの関係式を得たなら、各チャンネルのエネルギー補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

チャンネル幅は1チャンネル当り、10、20、50 keVなどが選ばれるが、まれに100 keVまたは200 keVの例もある。この補正の不正確さは解析後の最終結果の不確かさとして直接影響するので重要である。



第3.1図 3点の直線近似の適用例

### 3.2 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 $\gamma$ 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2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2つになる。すなわちストリッピング法（ピールオフ法）とレスポンス行列法である

#### 1) ストリッピング法

ストリッピング法は補正波高分布の高エネルギーチャンネルに対応する単一ピークのレスポンス関数を補正波高分布から差引き、高エネルギーチャンネルの値をほぼ0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決めるレスポンス関数やその際の定数の導入の仕方が処理後に得られる入射 $\gamma$ 線スペクトルの正確さに影響する。したがって、はぎとるレスポンス関数の形と数値を明確にしておかなければならない。またその作成上の条件を示しておくことが必要である。

ストリッピング法の一例を付録1に挙げた。

## 2) レスポンス行列法

レスポンス行列法は、あらかじめ特定の光子エネルギーを定め、補正波高分布にみあうレスポンス関数（エネルギー領域毎の数値行列）を作り、実測した補正波高分布に対し各エネルギーの行列を連立方程式の解法によって解く手法で、あらかじめ共役マトリックスを作り解く方法と逐次近似法より解く方法とがある。この方法は、ストリッピング法と同様、レスポンス行列を作ったときの測定条件と現場での測定条件が同一であることが望まれる。両者の条件の差が結果の不確かさの一因となる。

逐次近似法によるアンフォールディングの例を、付録2に挙げた。

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

## 3.3 結果の表現

測定結果の解析内容の表現は数多くある。すなわち、①全計数率値、②補正波高分布についてその全計数率値、③ $\gamma$ 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(Tl)の吸収線量率、さらにこれらの指定された内容のグラフ表示などである。また計数値の統計誤差、精密さ、チャンネル校正に関する内容、使用関数とその精密さ、検出体の寸法構造、使用した定数、基本定数、データ処理手法、処理プログラム、バックグラウンドの取扱いなど多岐にわたる。これらのうち上記①②③④の内容、さらには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。測定上の不確かさについては参考資料1に示した。

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 $\gamma$ 線以外の成分をどのように扱っているか明記しないと、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または計数率との関係が一定であれば、光子束密度は計数率からただ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 $\gamma$ 線スペクトルが求められているので、各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。

### 3.4 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 $\gamma$ 線スペクトル測定法では、環境の放射性核種成分別の線量寄与を求めることが行われる。NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータでは、ゲルマニウム半導体検出器のような高分解能は期待できないため、限られた種類の人工放射性核種（例えば $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 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天然放射性物質として、カリウム、ウランおよびトリウム系列による線量寄与の分離が代表的である。

#### 3.4.1 ピーク領域の計数値の利用

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

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータにおいては放出ガンマ線のそれぞれのエネルギーに対応したピークをひろ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のみ適用される。ピーク領域が明確で、ピーク領域に含まれる目的核種の計数値が的確に把握できた場合には、5.7に準じて解析を行う。

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

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

この天然の主たる三成分についての線量寄与の分離には、あらかじめそれぞれに対応するエネルギー領域を定め、単位線量率当りの各領域に含まれる寄与（線量率、計数率、線束密度など）を成分別に基礎資料としてととのえ、マトリックスを解く（解説3.4）。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3.1に示した。

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

表3.1 マトリックスを解くための領域間の寄与係数（ $1 \mu\text{R/h}$ あたりの各領域内の照射線量率、カッコ内は3in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-40	0.5 (1.5)	0 (0.0)	0 (0.0)
U系列	0.106 (0.508)	0.255 (0.565)	0.024 (0.0236)
Th系列	0.043 (0.689)	0.124 (0.674)	0.275 (0.343)

注) この係数は次の測定データに基づいている。

- K-40 : 標準線源 (KCl)
- U系列 : ヒューストンのラドンの充満した洞穴
- Th系列 : インドのケララ地方

これらの係数を用いて得られたそれぞれの値を加算したものは測定された全線量率値に一致しなければならない。しかしマトリックス係数、計数誤差、測定環境の条件による違いがあり、10%程度の差が生ずることがあり、これを上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。

## 第4章 ゲルマニウム半導体スペクトロメータによる 空間 $\gamma$ 線計測手順

### 4.1 計測の概要

計測システムの構成は、図4.1で示されているように、実験室の環境試料用のゲルマニウム半導体スペクトロメータと基本的に同様であるが、ゲルマニウム半導体スペクトロメータそのものを計測現場（野外等）に設置し、数十分以上環境 $\gamma$ 線スペクトルを計測した結果から計測地点における放射性核種に関する情報を得るものである。

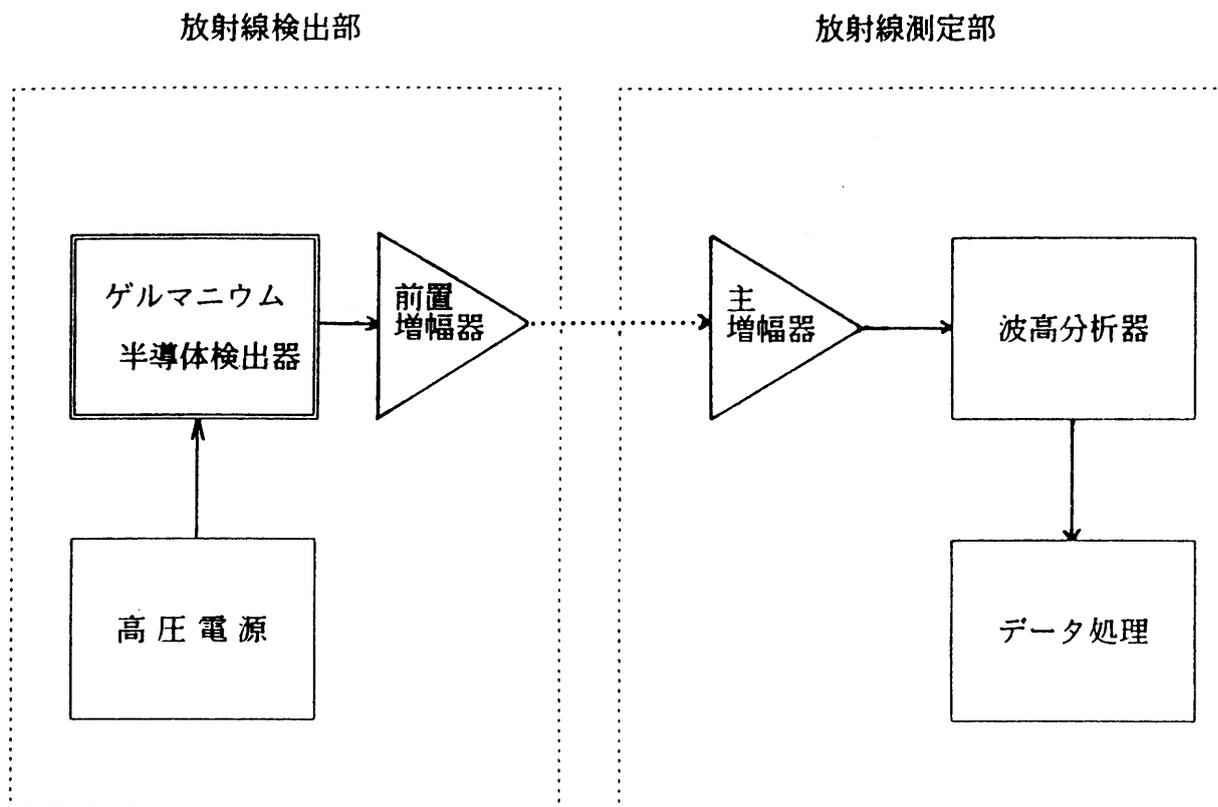
計測手順のフローチャートを第4.2図に示す。

### 4.2 ゲルマニウム半導体スペクトロメータの具備すべき条件

ゲルマニウム半導体検出器を現地測定に用いる目的は、検出器位置での $\gamma$ 線スペクトルを計測し、放射性核種の情報等を得ることにある。このために、検出器の $\gamma$ 線に対するピーク検出効率はできるだけ大きく、短時間の計測で解析に十分な計数が得られるものであること、環境に分布する微量の人工放射性核種を容易に検出するために、エネルギー分解能およびピーク対コンプトン比が良いこと、また計算を簡単にするために、検出器の $\gamma$ 線入射角度依存性はできるだけ小さなことなどが望ましい。その目安として検出器のGe結晶の軸方向と、それと直角方向の断面積が同程度の検出器を選定するのがよい。

可搬型検出器とするために、デュワはできるだけ軽く、頑丈な構造であること。風圧等による転倒防止なども考え、デュワを含めた放射線検出部をアルミニウム製固定台に固定し、固定台に取手および四脚支持台取り付け用ネジを設け、移動および設置を簡単に行えるようにするのが望ましい。

なお、移動等を簡単に行うために固定台をあまり軽くしたりすると、風等による検出器の振動によりノイズが発生することがあるので注意する必要がある。



第4.1図 ゲルマニウム半導体スペクトロメータの構成

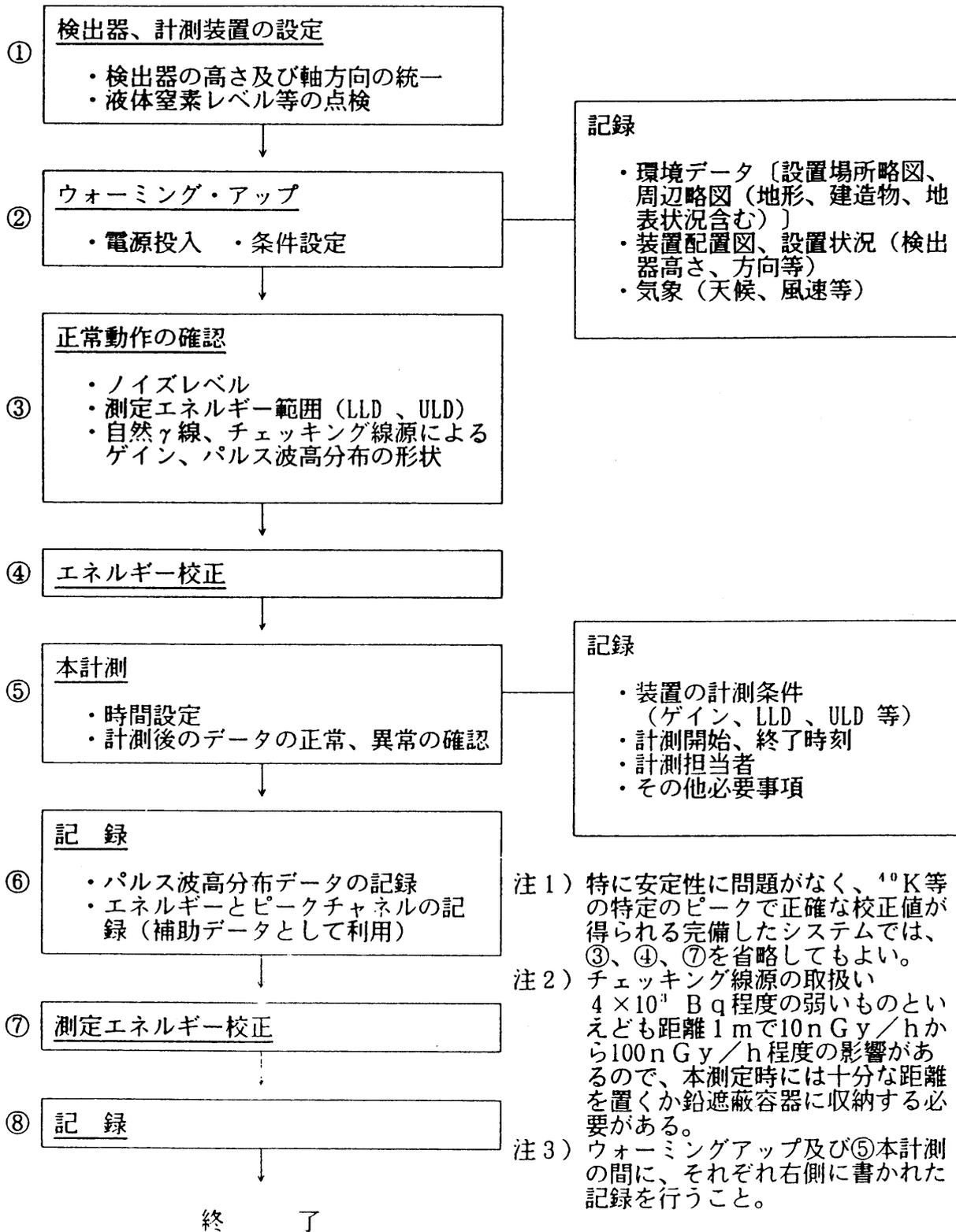
### 4.3 計測の手順

#### 4.3.1 通常時の保守管理

定期的に全計測システムを使用可能状態に組上げてみる。その際、不足なケーブル、部品、消耗品等がないかあらかじめ作っておいた全装備のチェックシートでチェックし、不足なものは早急に補完するようにする。もちろん校正用線源など自然に消耗していくものについては、初めから目安の時期を作っておいて、購入等の措置を講じ、システムのチェックなどに不便を来たさないようにしておく。

定期的に校正用線源等による校正を行い、効率曲線を求める。また分解能を求め、両者が経時的に異常がないかどうか確かめておく。

開 始



第4.2図 測定手順フローチャートの例

#### 4.3.2 計測に先立つ準備

- ① 校正日前に液体窒素を検出器デュアに充填しておく。
- ② 放射能既知の  $^{226}\text{Ra}$  等 (3.7 MBq) を用いて、それぞれの  $\gamma$  線エネルギーについてのピーク効率および分解能の変化がないかどうか、以前の記録と照らし合わせ確認する。
- ③ ピーク効率については検出器中心から ( $\theta = 0^\circ$ ) 0.5 ~ 1 m の位置に各種線源 ( $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等) を置き、各ピークの高さが10,000カウント程度になるまで計測する。  
各ピーク面積から次式により効率を求める。

$$F = \frac{N_{e,i}}{t \cdot A \cdot (\eta / 100) \cdot f_{s,i} \cdot \exp(-\lambda T) / 4 \pi d^2}$$

F : ピーク効率 (cps / (cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>))

N<sub>e,i</sub> : ピーク面積 (counts)

A : 放射能 (製造日の放射能、Bq)

T : 線源検定日から計測開始までの時間 (s)

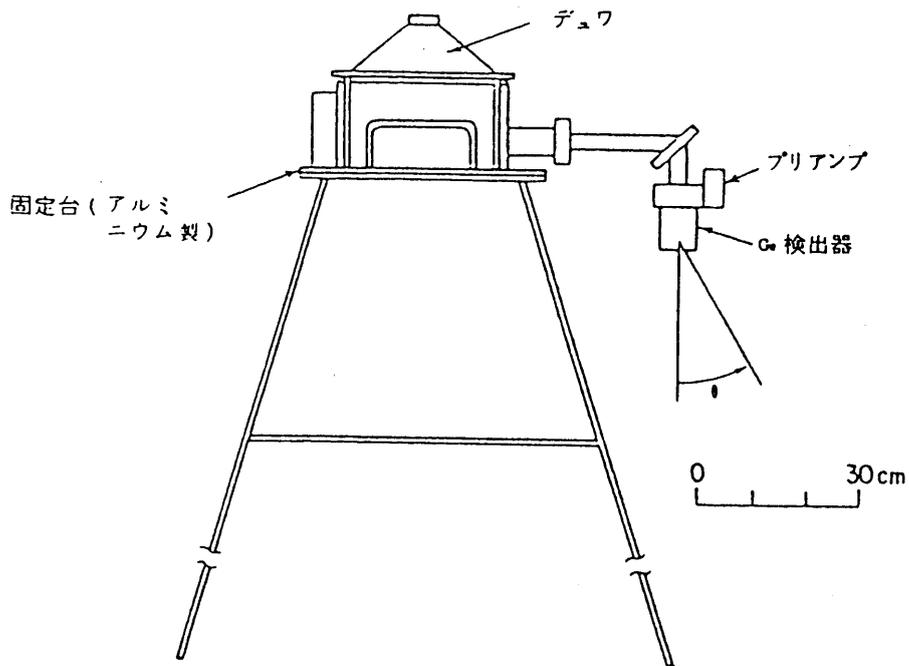
$\lambda$  : 壊変定数 (s<sup>-1</sup>)

t : 計測時間 (s)

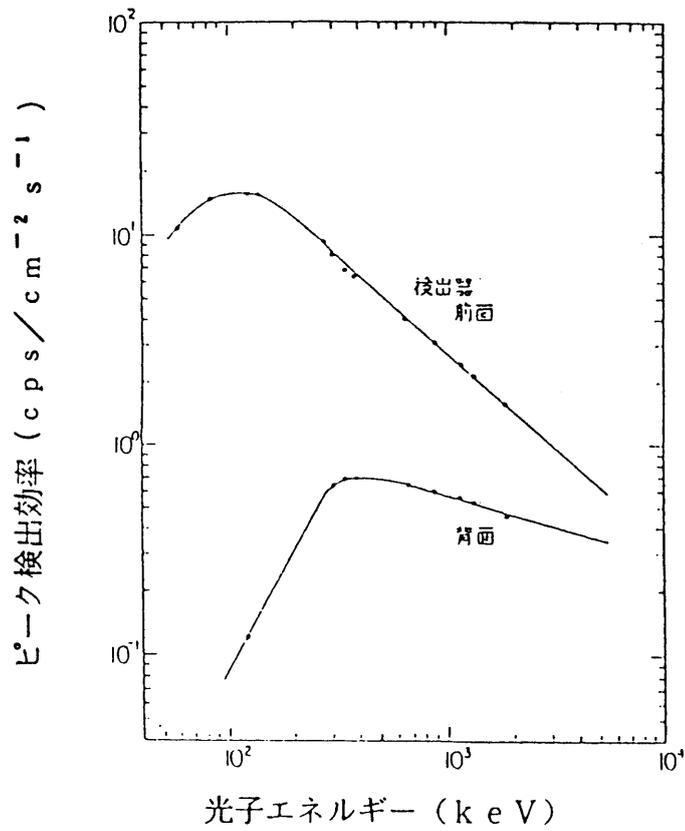
$\eta$  : 着目  $\gamma$  線の放出百分率 (%)

f<sub>s,i</sub> : 線源カプセル等による減衰の補正係数

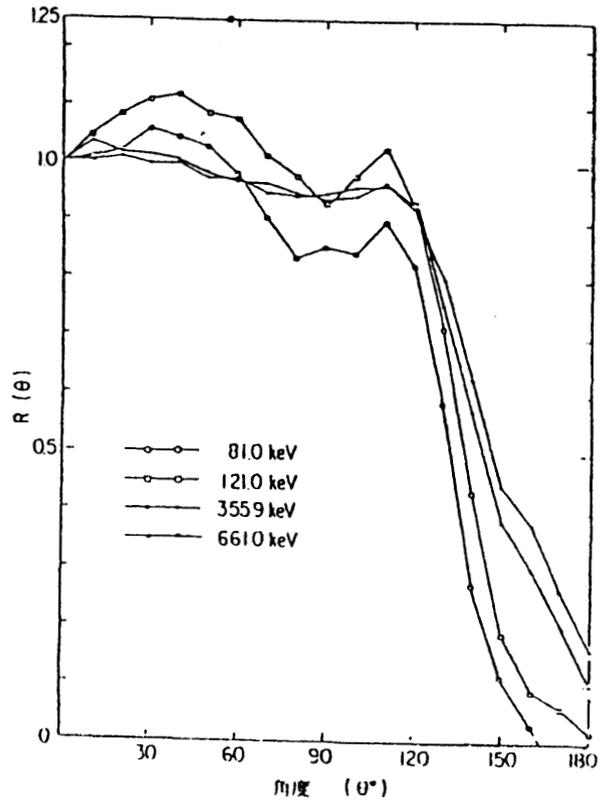
d : 検出器中心から線源までの距離 (cm)



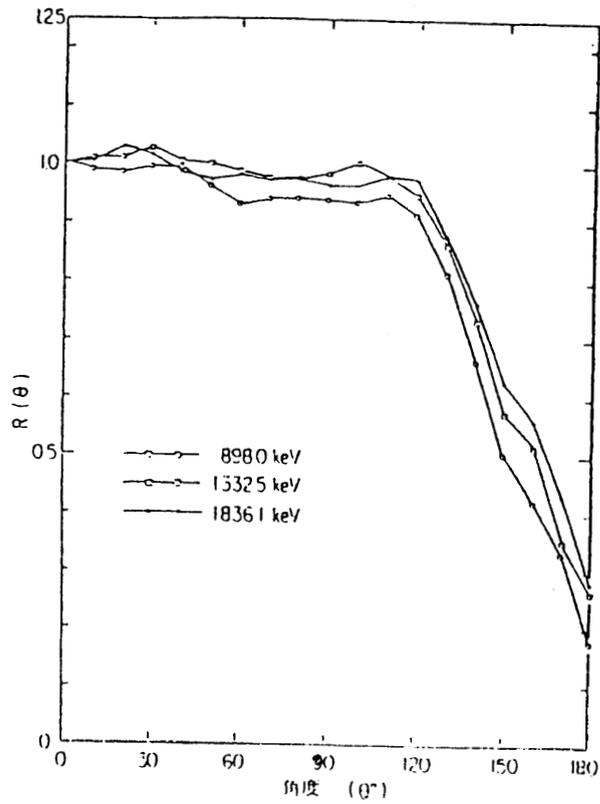
第 4.3 図 ゲルマニウム半導体スペクトロメータの設置例



第 4.4 図 ゲルマニウム半導体検出器のピーク効率の例



第4.5図 ゲルマニウム半導体検出器の相対ピーク効率の角度分布 (1)



第4.5図 ゲルマニウム半導体検出器の相対ピーク効率の角度分布 (2)

なお、角度依存性を求めるために、上記と同様に適当な間隔で $\theta = 180^\circ$ までの効率を求めておく。ゲルマニウム半導体スペクトロメータ設置例を第4.3図に示す。また、ゲルマニウム半導体スペクトロメータのピーク検出効率および角度分布の一例を第4.4図、第4.5図および第4.6図に示す。

- ④ 分解能については $^{60}\text{Co}$ 線源を検出器エンドキャップ端より25cmの距離に置き、1,332 keVのピークの高さが10,000カウント程度になるまで計測し、半値幅を求める。
- ⑤  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 等を用いて3 MeVのエネルギー範囲まで計測できるように、COARSE GAIN、FINE GAINを調整する。

#### 4.3.3 現地での計測

- ① ゲルマニウム半導体検出器を注意深く輸送容器から取り出す。
- ② 検出器デュワに液体窒素を充填する。計測上の安定性確保のために液体窒素は前日から入れてデュワを冷却しておくことが望ましい。
- ③ 検出器と波高分析器についてプリアンプ電源、信号、高圧ケーブルを接続する。
- ④ 検出器の設置高さ、方向を計測対象に応じ統一する。検出器は原則として遮蔽を付けずに下向きにし、高さ1 mに設定して計測する。
- ⑤ 検出部、信号ケーブルおよび計測部はなるべく日陰に置き、温度によるゲイン変動を防止する。
- ⑥ 波高分析器の電源を入れ高圧電源等を所定の値に設定する。
- ⑦ 適切な時間（30分以上）ウォーミングアップ後、 $^{212}\text{Pb}$  (238.6 keV)、 $^{137}\text{Cs}$  (661.6 keV)、 $^{40}\text{K}$  (1460.7 keV)、 $^{208}\text{Tl}$  (2614.5 keV)等により、計測すべきエネルギー範囲にゲインが調整されていることを確認する。
- ⑧ 計測時間を設定し、プロセスメモリー内に以前のデータが残っていないことを確認後、計測を開始する。
- ⑨ 種々の条件の記録洩れがないことの確認をする。

#### 4.3.4 データの取得

- ① 計測終了ごとに波高分析器のデータを磁気記録装置等に伝送する。
- ② 磁気記録装置等に入力した順番およびデータの計測時間（0または1チャンネルに表示）、 $^{40}\text{K}$ のピークカウント等を記録しておく（計測時間が同一の場合、データ処理時にスペクトルを間違えないために $^{40}\text{K}$ ピークのカウント数を記録しておくとう便利である）。

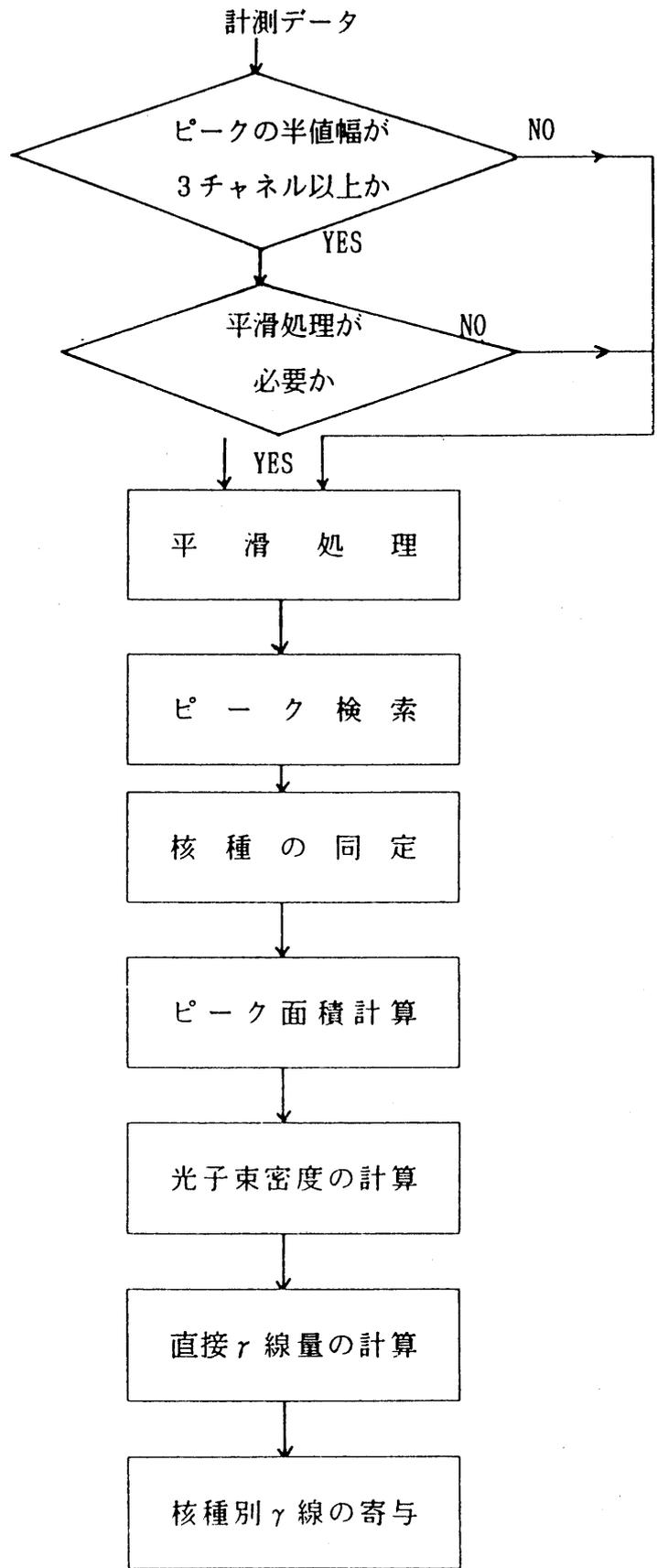
## 第5章 ゲルマニウム半導体スペクトロメータによる 計測データの処理

### 5.1 処理の手順

ゲルマニウム半導体スペクトロメータによって得られた波高分布の処理は、スペクトル中に含まれる単色光子に基づく全吸収ピークに着目して行う。着目 $\gamma$ 線の数が少ない場合には手計算によっても可能であるが、現在の通常の計測システムには自動解析処理コードが準備されており、特に環境 $\gamma$ 線の計測のように天然放射性核種に起因する核種からの $\gamma$ 線が多いデータの処理には、電子計算機の利用は有効である。計算機処理プログラムは種類が多く、その内容は多岐にわたる。スペクトル解析についてはエネルギー校正の近似曲線の求め方、計数効率曲線の決定、ピーク面積の求め方等、それぞれ独自の方法が採用されている。これらは計測結果の実例から検討するか、プログラムをチェックすることにより内容の把握につとめることが望まれる。場合によっては解析の方法についての詳しい情報が得られないままブラックボックスとして使用される場合がある。

したがって、計測条件、計測システムの特性的変化の予期できない原因による定量上の誤差をさけるため、データの解析にあたってはそれぞれの計測システムについて、定まった条件設定、同一データ処理手法を用い、検出体の試験時の条件と現地測定時の条件を合致させて行うことが必要である。特に実験室内での定まった系における計測と異なり、計測条件に前後違った組合せが取られがちな野外測定では、方式の規格化と統一を心がける必要がある。計測データの処理手順が特性試験のときの手順と違ったり、特性的変化が生じることがある。このような場合には条件の違いが評価結果におよぼす影響の度合を事前に確認しておかなければならない。

次に標準的なピーク処理の方法を示す。計算機処理による解析を行っている場合でも試験が必要な場合の確認に使える。



第5.1図 手順のフローチャート

## 5.2 平滑処理（スムージング）

平滑が必要でない場合は、このステップを飛ばし次の処理に移る。

解析するパルス波高分布データが統計的にバラツキが大きくピークの確認および定量が困難な場合にはスペクトルの平滑処理を行う。ただし、ピークの半値幅が3チャンネル以下の場合には適用することはできない。一般にこの操作によってピークのエネルギー校正精度あるいはピーク面積の定量精度の向上が期待できるが、その方法によっては見かけ上分解能を低下させることがあるため注意を要する。

平滑化は通常、ピークの半値全幅が3チャンネル以上にわたる場合に、連続する5点以上の奇数個のデータを用い、データ数に応じた最適の次数の多項式で係数を決定する。平滑後の値は中心チャンネル位置の計算値として求まる。この際、用いるデータの点数は、全吸収ピークの半値幅（FWHM）より大きく、しかもこれに最も近くとるのがよい。また、次に示すように荷重関数を用いる平滑の方法も簡便で大きな効果が得られる。すなわち、

$$N_{s,i} = k_0 \cdot N_i + k_1 (N_{i-1} + N_{i+1}) + k_2 (N_{i-2} + N_{i+2})$$

ここで、チャンネル番号  $i-2$ 、 $i-1$ 、 $i+1$ 、 $i+2$  は  $i$  番チャンネル前後のチャンネルを意味し、 $N_{i-2} \sim N_{i+2}$  は平滑前の計数值、 $N_{s,i}$  は平滑後の計数值、 $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  は荷重係数で、それぞれ  $17/35$ 、 $12/35$ 、 $-3/35$  である。

## 5.3 ピークの検索とピーク面積の求め方

ピークの検索にはピークを中心チャンネルの決定とチャンネル幅の決定とがあり、これがエネルギーおよび  $\gamma$  線強度の決定の基礎となる。

野外の一般環境での計測では、天然核種  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$  からの多数の  $\gamma$  線からなる複雑なスペクトルが示されるが、さらに核実験等のフォールアウトの  $^{137}\text{Cs}$  からの  $0.662\text{MeV}$   $\gamma$  線が重なって現在観測される（第5.3図参照）。これらは十分に知り尽くされた既知核種の  $\gamma$  線ばかりである。一方、原子力施設周辺での平常時・異常時の計測では、上述の  $\gamma$  線をバックグラウンドとして、施設起因の放射性  $\text{Kr}$ 、 $\text{Xe}$ 、 $^{41}\text{Ar}$  等の希ガス、放射性ヨウ素等からの  $\gamma$  線が重なる場合がある。

(1) ピークチャンネル値の決定\*1)

i) ピークの同定・定量が既知の $\gamma$ 線のみを対象とする場合は目視により容易に判断することができる。

ii) 半値幅3チャンネル以下のピーク中心の決定

ピーク中の最も計数率の高いチャンネル $h$ を中心に上下1チャンネルの計数値それぞれ $N_{h-1}$ 、 $N_{h+1}$ とすると、ピーク位置 $P$ は次式から求まる。\*2)

$$P = h - \frac{1}{2} \left[ \frac{N_{h-1} + N_{h+1}}{2N_h - (N_{h-1} + N_{h+1})} \right]$$

iii) 半値幅3チャンネル以上のピーク中心の決定

ピーク領域で相隣り合う最も高い計数値に対応する2つのチャンネルを $h$ 、 $h'$ として、それぞれのチャンネルにおける一次微分係数 $\Delta N_n$ （ただし、 $n = h$ または $h'$ ）を次式より計算する。

$$\Delta N_n = (-2N_{n-2} - N_{n-1} + N_{n+1} + 2N_{n+2}) / 10$$

ここで、 $\Delta N_h$ 、 $\Delta N_{h'}$ が共に正であれば、 $h$ 、 $h'$ を1チャンネル高い方にずらし、反対に共に負であれば1チャンネル低い方にずらし、再度 $\Delta N_n$ を計算する。得られた一次微分係数 $\Delta N_h$ 、 $\Delta N_{h'}$ よりピーク位置 $P$ を次式より求める。

$$P = h + \Delta N_h / (\Delta N_h - \Delta N_{h-1})$$

---

\*1) 科学技術庁放射能測定法シリーズ7、ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法（昭和54年3月）

\*2) ピークの形が正規分布から極端にずれているような場合は上式は適用できない。

電算機利用の場合も基本的に上の場合と同様の考えで、チャンネル列の微分操作を行うから、ピークの二次式近似あるいはガウス分布近似などの過程を経て微分を行い、微係数の値が0となるチャンネルをピークチャンネルとして検出する。電算機の処理コードにより処理内容の違いがあることが考えられるので、可能な範囲で標準的な方法との違いを検討しておく。

## (2) ピーク面積の決定

ピーク面積を決める前に先ずピーク領域の境界を決定する。これを行う場合、あらかじめ光子エネルギーとピークの分解能（便宜的な指標としてFWHMが通常用いられる）の関係が明らかになっていなければならない。

先ず、ピークチャンネルの真の計数値を $n_p$ とし、これを $h$ チャンネルの計数値 $n_h$ とバックグラウンドレベルとして決めた計数値 $n_c$ の差から求める。すなわち、

$$n_p = n_h - n_c$$

ここで $n_c$ は、ピーク領域に最も近くしかもその影響を受けていないと見なせるピークを挟む両側のチャンネルの計数値から求められる。すなわち、この点より低いエネルギー側3チャンネル分( $N_{c1}$ )、高エネルギー側3チャンネル分( $N_{c2}$ )の2つの平均値から計算( $n_c = (N_{c1} + N_{c2}) / (2 \times 3)$ )するかあるいは図から読み取る。

ピークの上下の境界領域幅 $m$ は、以上の方法で求めた $n$ 。および先に求めてある光子エネルギー対FWHMの関係からFWHMを読み取り、第5.2図により決定する。ここで境界領域は $h - m$ 、 $h + m$ と決まる。もし、ピークが2つ以上重なるもの場合は高・低エネルギー側ともピークをはずれた位置のチャンネルを取る。

ピーク面積の算出にあたり、ピークの上、下限値の決定に際しとった方法と同じ考えで再度ピークを挟むバックグラウンドの値を決定する。ピークに含まれるバックグラウンドの全計数値 $N_B$ はこの上下の値を結ぶ直線の $h - m$ から $h + m$ までの計数値を積算することにより求める。ピークの真の計数値 $N$ はピークチャンネル $h$ を中心として $h - m$ から $h + m$ までを積算した全計数値 $N_r$ から $N_B$ を差し引いて求める。すなわち、 $N = N_r - N_B$ 。

#### 5.4 核種の同定

決定された $\gamma$ 線全吸収ピークのエネルギーを核種データベースと対照することにより核種の同定を進める。

天然核種およびフォールアウト核種などを対象として放射能レベルおよび放射線量の算定を行う場合には第5.1表中◎印のエネルギーに着目して計算を行うとよい。

施設からの人工放射性核種を識別する必要がある場合は、放射性のクリプトン、キセノン、ヨウ素その他の核分裂生成核種を検索する。

第5.1表 地上1mにおける $\gamma$ 線放出比、 $\phi/S$ 、 $\phi/\dot{X}$  (HASL-258による)

核種	$\alpha$	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	$\gamma$ 線放出比	$\phi/S$ *	
				$\frac{\gamma}{\text{pCi/g}} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$	$\frac{\phi/\dot{X}}{\mu\text{R/h}} / \frac{\gamma}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$
$^{40}\text{K}$	0	1460.0	0.107	0.0363	0.203
$^{226}\text{Ra}$	0	186.1	0.034	0.00458	0.00252
$^{214}\text{Pb}$ + $^{214}\text{Bi}$	0	241.9	0.070	0.104	0.00572
		295.2	0.179	0.0291	0.0160
		⊙ 352.0	0.350	0.0601	0.0330
		⊙ 609.3	0.430	0.0942	0.0518
		666.0	0.015	0.00339	0.00186
		768.7	0.048	0.0117	0.00643
		934.8	0.031	0.00810	0.00445
		⊙ 1120.4	0.145	0.0421	0.0231
		1238.3	0.056	0.0172	0.00945
		1379.0	0.046	0.0149	0.00819
		1402.0	0.038	0.0125	0.00687
		1408.0	}	}	}
		1509.0			
		⊙ 1764.0	0.147	0.0539	0.0296
		1848.0	0.021	0.00791	0.00435
2204.0	0.047	0.0195	0.0107		
2435.0		0.00666	0.00366		
$^{228}\text{Ac}$ + $^{208}\text{Tl}$	0	129.0	0.025	0.00290	0.00103
		209.0	0.041	0.00580	0.00206
		⊙ 238.6	} + 282keV	}	}
		270.0			
		277.6	}	}	}
		328.0			
		338.0	0.172		
		⊙ 463.0	0.047	0.0128	0.00773
		510.7	0.096	0.00920	0.00326
		⊙ 583.2	0.300	0.0193	0.00684
		727.2	0.079	0.0639	0.0227
		779.0		0.0186	0.00660
		785.4			
		790.0			
		831.0			
860.1	0.047	0.0118	0.00418		
⊙ 911.2	0.290	0.0755	0.0268		
966.0	0.230	0.0613	0.0217		
968.9	}	}	}		
⊙ 2614.5				0.3	0.167
$^{137}\text{Cs}$	1	661.6	0.846	0.00308	0.499
$^{60}\text{Co}$	1	1173.2	1.0	0.0081	0.188
		1332.5	1.0	0.0082	0.191

\*  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ については  $\frac{\gamma}{\text{pCi/g}} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$

## 5.5 光子束密度の計算

全吸収ピークから、あらかじめ得られている検出器の検出効率を用い光子束密度を計算する。もし、光子の入射方向分布と検出効率の方向依存性が判明している場合は次式で補正を行う。

$$N_{\gamma} = K \cdot \int_0^{\pi} S(\theta) d\theta$$

ここで、

$$K = \frac{N_{\text{net}}}{\varepsilon \cdot \int_0^{\pi} f(\theta) \cdot S(\theta) d\theta}$$

- $\varepsilon$  : ピーク効率 (例えば、cps/(cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>))
- $f(\theta)$  : 検出効率の相対角度分布
- $S(\theta)$  : 入射光子の相対角度分布
- $N_{\text{net}}$  : 全吸収ピークの計数值 (例えばcps)

第5.2表 光子束密度 (photon/(cm<sup>2</sup>·s))と照射線量率 (μR/h)の換算係数 (W<sub>air</sub>=33.7 eV)

光子エネルギー (MeV)	空気の質量エネルギー減衰係数 (μ <sub>en</sub> /ρ)(cm <sup>2</sup> /g)	(μR/h)	(cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
		(cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	(μR/h)
0.01	4.61	3.058	0.327
0.015	1.27	0.6780	0.791
0.020	0.511	0.6780	1.475
0.030	0.148	0.2946	3.395
0.040	0.0669	0.1775	5.633
0.050	0.0406	0.1347	7.425
0.060	0.0305	0.1214	8.237
0.080	0.0243	0.1290	7.753
0.10	0.0234	0.1552	6.441
0.15	0.0250	0.2488	4.019
0.20	0.0268	0.3556	2.812
0.30	0.0288	0.5732	1.745
0.40	0.0295	0.7829	1.277
0.50	0.0296	0.9819	1.018
0.60	0.0295	1.174	0.852
0.80	0.0289	1.534	0.652
1.0	0.0278	1.844	0.542
1.5	0.0254	2.528	0.396
2.0	0.0234	3.105	0.322
3.0	0.0205	4.080	0.245
4.0	0.0186	4.936	0.2026
5.0	0.0174	5.772	0.1733
6.0	0.0164	6.528	0.1532
8.0	0.0152	8.068	0.1240
10.0	0.0145	9.620	0.1040

### 5.6 放射性核種の同定にもとづく直接γ線線量の決定

放射性核種の同定とそれらによる直接γ線線量の決定は、核種から放出されるγ線が<sup>40</sup>Kや<sup>137</sup>Csのように一本の場合と、U系列、Th系列など天然の放射性物質や二本以上γ線を放出する放射性核種の場合では異なる。γ線が一本の場合はピークの中心チャンネルから求めたγ線エネルギーから核種が決定でき、また直接線による照射線量率 $\dot{X}$  (μR/h)はピーク面積から算出された線束密度 $\phi$  (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)、γ線エネルギーE (MeV)、空気の質量エネルギー減衰係数 $\mu_{en}/\rho$  (cm<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>)から次式によって算出される。この際参考として、計算に使用した質量エネルギー吸収係数の値を記載しておく。第5.2表はその例である。

$$\dot{X} = 66.34 \phi \cdot E \cdot \mu_{en} / \rho$$

なお、 $W_{air} = 33.85 \text{ e V}$ を使用するときには、上式の係数66.34の代わりに66.05を用いる。

一方、 $\gamma$ 線が複数個ある場合にはすべての $\gamma$ 線について上式によって直接線による照射線量率を求めさらにそれぞれのエネルギーに対応するビルドアップ係数を乗じ加算する。しかし一般には、崩壊系列に属する代表となる $\gamma$ 線エネルギーに着目し、このエネルギーピークによる直接線の線束密度 $\phi$  ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )と、ビルドアップ係数を含め環境における分布を考慮した崩壊系列に属する全ての $\gamma$ 線による照射線量率 $\dot{X}$  ( $\mu\text{R/h}$ )との関係を与える係数 $K$ を定めておき、これによって算出する。

すなわち

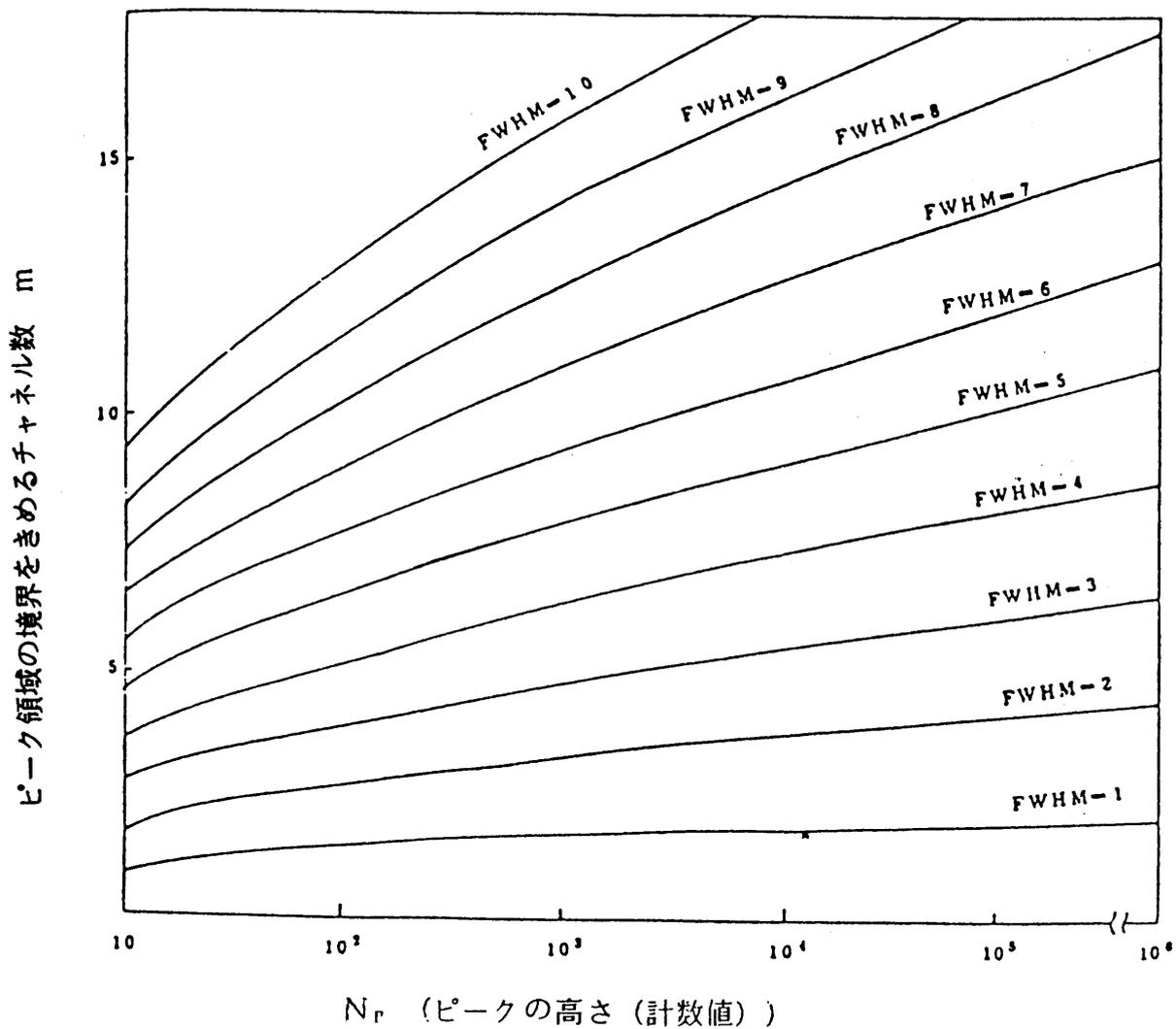
$$\dot{X} = \phi \cdot K$$

によって求める。

## 5.7 放射性核種別線量寄与の算出

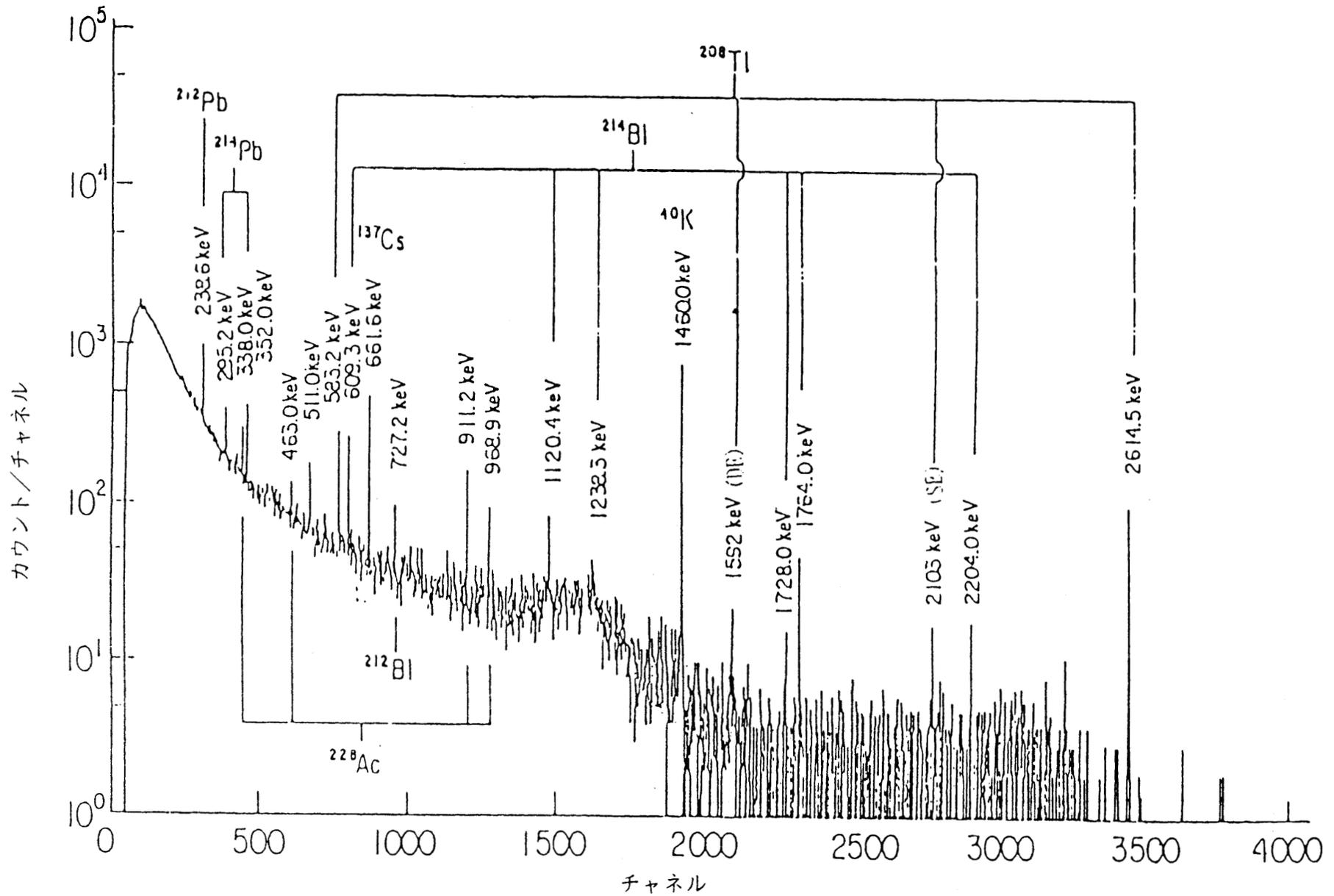
ゲルマニウム半導体スペクトロメータはエネルギー分解能が良いので、特定のガンマ線エネルギーに着目して解析することができる。天然放射性核種については第5.1表の◎印のガンマ線エネルギーに着目して解析を行う。解析に際しては複数のガンマ線のピークが利用でき、この場合にはそれぞれのピークについて有意な数値（計数値が計数誤差の3倍を越えたピーク）をとりあげ、誤差を考慮した平均値を採用する。人工放射性核種についてもこれに準じて行うが、散乱線を含む核種毎の線量寄与をみつめる際には、放射性物質の環境における分布の状況を考慮することが必要となる。このためそれぞれの核種について利用したピークのエネルギー、直接線および散乱線を含んだ線量値を併記することを要する。

この際、係数 $K$ は目的核種から放出される放射線の放出率をそのまま加味した形となっておらず、また線源の分布による吸収、散乱のため幅があることに注意する必要がある。使用した係数 $K$ についてはこれを明記する。ビルドアップ係数については第5.4図に示す。散乱 $\gamma$ 線の詳細については解説4に述べられている。

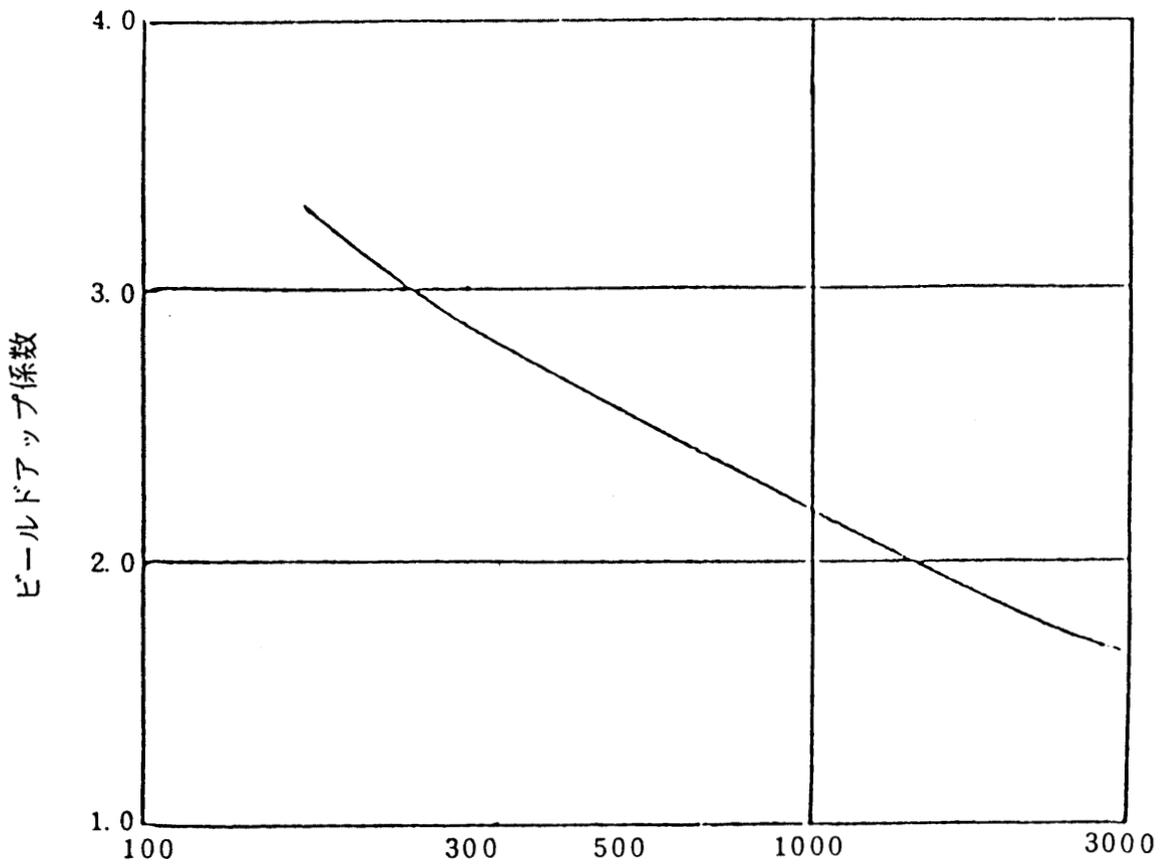


第5.2図

FWHMとピーク計数值より最も適当なピーク領域境界を決定するための図  
 ( FWHMが10を越える場合は、FWHM=1、2、………を  
 FWHM=10、20とし、境界チャンネルの5、10、15、………  
 を50、100、150 ………と読む。 )



第5.3図 芝地の現地 $\gamma$ 線スペクトル



光子エネルギー (k e v)

第5.4図 ビルドアップ係数の例

## 第6章 ゲルマニウム半導体スペクトロメータを用いて得た 処理結果の表現

### 6.1 放射能レベルの推定

ゲルマニウム半導体スペクトロメータによる放射能レベルの推定は、ゲルマニウム半導体スペクトロメータのもつ高エネルギー分解能の特徴から核種の同定が容易であり、放射性核種別のレベル比較ができる特長がある。しかし、核種別の線量評価（散乱線を含む）、さらに全体の線量決定は難しく、電離箱やNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータなどによる他の計測結果と比較して検討する必要がある。特に球形NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータとの併用は空間放射線計測の一つの手法といえる。次にゲルマニウム半導体スペクトロメータによる核種別放射能レベル推定の意義、手法、手順、問題点を示す。

#### 6.1.1 核種別放射能レベル推定の意義

環境の放射線および放射性物質について、天然ならびに人工放射線に関し核種別の内容の把握の要求が高まっている。第一は天然放射性核種と人工放射性核種（大気圏内の核爆発実験の影響、原子力利用、予期しない放射性物質の放出など）の寄与の分別計測。第二は天然放射性核種、特に<sup>40</sup>K、U系列、Th系列の寄与の割合比率について、場所の差、時間変化などの把握。さらに核種別の被曝（主として体外被曝、時には体内被曝）線量の推定のため、核種別の放射能レベルの資料を得るなど、その目的が多様化してきた。

#### 6.1.2 推定のための手法

推定の手法としては環境に存在する放射性核種から放出される単色光子（ $\gamma$ 線）のエネルギーを計測し、これによって核種を決定し、合わせてその強度から存在核種の放射能レベルを知る。

#### 6.1.3 推定の手順

推定の手順はすでに示されたとおりであるが、ゲルマニウム半導体スペクトロメータを用いて現地測定を行い、得られた波高分布データを第5章のように処理、解

析することにより、環境に存在する放射性核種からの直接 $\gamma$ 線強度（線束密度）を得、核種別の放射能レベルを知る。

現地測定では、常に環境中に天然放射性核種が存在する場での計測であることに留意し、天然放射性核種に関する種々のデータを有効に利用し計測の助けとする。

#### 6.1.4 問題点とその解決方法

環境に存在する放射性核種から放出される $\gamma$ 線によって環境の放射能レベルを得るには多くの問題がある。すなわち検出体の方向特性、環境に存在する放射性核種の分布、存在分布に基づく放射線の入射方向分布ならびに環境物質による吸収の補正などである。いずれについても的確な資料が必要であるが、多くの場合その内容が把握しにくく、不明のまま複雑に組み合わさっている。

これらの問題の解決としては、ある種の条件による割り切りによらなければならない。現在これについては環境における放射性核種の分布に特定の条件を与えて取り扱うことが行われている。すなわち、全方向（ $4\pi$ ）一様分布（水中、地中、空間中）、無限平面上の高さ（1 m）で土壌中の放射性核種が一様分布または深度分布が指数関数的に減少、などが代表的な分布としてとられている。この場合には数式処理ができ、それぞれ指数積分、 $E_2$  関数、 $E_1$  関数の適用によって $\gamma$ 線束密度と環境中の放射性核種濃度が関係づけられる。さらにこの場合は、これらから逆に計測点の線量評価を行うことが多くをの人々によって試みられている。

しかしながら実際の分布がこの条件に適合する場合はまれで、多少の差を生ずることは止むを得ない。

#### 6.2 線量評価

環境に存在する放射性核種についてそれぞれ独立に線量評価を行う一方、全成分に関する計測場所の線量が参考として示される。存在する核種ごとの線量は主として放射性核種からの直接 $\gamma$ 線を利用して求める。

しかし、特定の条件下においては基礎となる内容（計測条件、使用した定数など）を記載の上、直接線から散乱線を含む線量決定を行うことができる（解説7.1）。この際は使用した定数、計測条件を明記する。

### 6.2.1 直接線による核種別線量評価

直接線による核種別線量は5.7に示す方法の式により算出することができる。算出結果、主要直達光子束密度の他、この際に使用した計測器の仕様（ゲルマニウム半導体検出器の形、大きさ、検出効率、方向特性、波高分析器の機種、使用条件など）、計測条件（計測点、日時、計測時間、検出器設置状況など）、データの内容（保存場所、認識内容など）、結果を導くのに使用した定数などを記録する。

このための書式を定め、内容を理解し易いものとするが良い。

### 6.2.2 散乱線を含む線量推定

上記直接線による線量に対する散乱線による線量の割合は、多くの資料があるわけではないが、いくつかの例から見積もることができる。通常、直接線に対しほぼ同量から2倍程度の寄与がみられる。この値はエネルギーの関数で、低エネルギー領域（ $\sim 0.3 \text{ MeV}$ ）で2倍、高エネルギー領域（ $\sim 1.5 \text{ MeV}$ ）で同程度である。これを利用することにより全線量の評価を行う。すなわち直接線による線量に対して2～4の係数を定め、全線量を決定する（解説7.1参照）。

一方、スペクトル中に含まれる散乱線の連続スペクトル成分をNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータにおけるスペクトル解析手法と同様の方法で解析し、線量を求める方法がある。解説7.2、7.3にその例を示した。

### 6.2.3 宇宙線

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータにおける場合と同様3MeV以上のエネルギースペクトル領域から宇宙線に関する情報を得ることができるが、ゲルマニウム半導体スペクトロメータは形状が特定できないことと計数値が多くないことから、宇宙線に関する内容は原則として特定しにくい。

## 第7章 基準 $\gamma$ 線源の利用と校正

### (解説4.5、参考資料1および2参照)

校正用 $\gamma$ 線源には、(1) エネルギー校正用 $\gamma$ 線源と(2) 照射線量率が値付けされた基準 $\gamma$ 線源とがある。エネルギー校正用 $\gamma$ 線源は、 $\gamma$ 線のスペクトルからパルス波高分布のチャンネルとエネルギーとの関係を決定する、いわゆるエネルギー校正に用いられる。一方、基準 $\gamma$ 線源は、基準となる照射線量率の場により、照射線量率計としてのスペクトロメータの精度(正確さと精密さ)を確保するための、いわゆる線量率校正に用いられる。

このほか、スペクトロメータの性能の安定性を日常的に点検する目的のために用いられるチェック用線源がある。また、 $\gamma$ 線源の利用にはレスポンス関数の決定も含まれるが、これについては第2章に述べられている。

#### 7.1 エネルギー校正

一般的に、エネルギー校正は測定装置のハード面である検出体の性能とその経年変化や、波高分析器の性能ならびに調整の適否を確認するため行うものである。

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータのエネルギー校正には $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{207}\text{Bi}$ などエネルギースペクトルが比較的単純な $\gamma$ 線源を使用する。また、ゲルマニウム半導体スペクトロメータに対しては、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ など多くのエネルギーからなる複合 $\gamma$ 線を放出する核種が利用できる。これらの校正には、一般に市販されている小型の放射能標準線源が利用できるが、このほか、バックグラウンドスペクトル中に含まれる天然放射性核種 $^{40}\text{K}$ (1460 keV)、 $^{214}\text{Bi}$ (1765 keV)、 $^{208}\text{Tl}$ (2614 keV)からの $\gamma$ 線のピークも、エネルギー校正に有用である。

#### 7.2 線量率校正

線量率校正は、基準 $\gamma$ 線源から一定の距離(普通1 m)における照射線量率が値付けられており、その正確さが明確であることから、この線量率を基準として測定結果と比較・検討し、測定方法やデータ処理の妥当性を確認するために行う。基準 $\gamma$ 線には $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{241}\text{Am}$ などがあり、所要のエネルギーに対応して適当なものを選択することができるが、環境 $\gamma$ 線量の測定の目的には $^{137}\text{Cs}$ が最も適している。なお、 $^{226}\text{Ra}$ のように複数の $\gamma$ 線を放出する核種については、実効エ

エネルギーを用いることが多い（解第5.2表参照）。

基準 $\gamma$ 線源は通常、線源から1mの距離で散乱の少ない条件における照射線量率が値付けられているので、原則としてこれとおなじ線源距離において、かつ散乱の少ない条件で、校正を行うべきである。JIS Z 4511-1987「照射線量測定器及び照射線量率測定器の校正方法」が参考になる。必要とする照射線量率の関係でそれ以外の距離を採用するときは、距離の逆二乗則を利用する。ただし、距離が近いときには検出器の寸法による誤差、遠いときには散乱線の影響による誤差の発生に留意する必要がある。また常に、半減期による減衰の補正を行う。

なお、ゲルマニウム半導体スペクトロメータによる線量率測定は、検出器に入射する光子束密度にもとづいて計算によって行われる。したがって、放射能標準線源を用いた検出効率の決定（方向特性を含む）を行う必要はあるが、基準 $\gamma$ 線源を用いた線量率校正は一般に行われない。

### 7.3 チェック用線源による日常点検

測定系の安定性の確認には適当な強度をもつ長寿命の $\gamma$ 線源を利用する。このような確認は定期的に行うことが望ましい。

また、線量率の変化が無視できる環境（屋内、屋外の定まった箇所）や、遮蔽体内のバックグラウンドを特定しておき、これらの箇所において定期的に測定を行い、測定結果を比較・検討し、有意な変化の有無を見ることも、測定系の信頼度確認の一方法として推奨される。

測定結果に計数の統計誤差を上回る差（2ないし3 $\sigma$ ）を生じた場合には、ハード・ソフトの両面から測定系の点検を行うことが必要である。

なお、検出器を交換した際にも、線源を用いる校正を行い、その結果を記録しておくことが望ましい。校正の記録様式の一例を解説5に示す。

# 解 說

# 解説1 NaI (Tl) シンチレーション検出器の特性

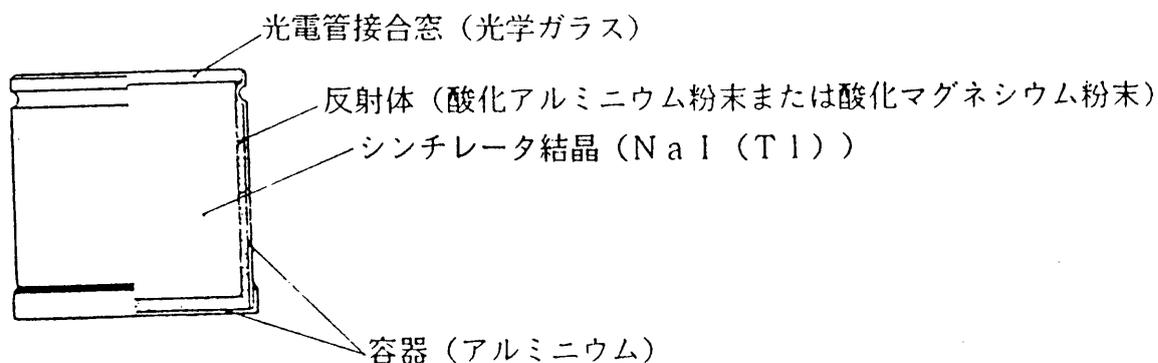
## 1.1 概要

放射線検出器はシンチレータ、光電子増倍管、検出器の保護ケースより構成されている。NaI (Tl) スペクトロメータにより空間 $\gamma$ 線スペクトルを測定する場合、検出器の特性がエネルギースペクトルの解析および線量評価に影響を与える。ここでは検出器の主な特性について述べる。

## 1.2 シンチレータ

シンチレータは入射する放射線の種類により各種のものが用いられている。 $\gamma$ 線のエネルギー分析用にはタリウムで活性化されたヨウ化ナトリウム (NaI (Tl)) が最も多く利用され $\gamma$ 線に対して感度が高い。しかし、湿気に対して潮解性を有するのでガラス窓 (光学窓) を付けたアルミニウム容器に密封されている。なお、このシンチレータは熱的、機械的な衝撃を受けると破損しやすいので、取扱いは慎重にしなければならない。光学窓は光電子増倍管の受光面に接着し、シンチレータ内で生じた光を転送する。

NaI (Tl) の結晶とアルミニウムの容器の間には反射体 (酸化マグネシウム、酸化アルミニウムなど) が詰められている。この反射体に局所的な片寄りが生じ、検出器の効率に影響を与えることがあるので、波高値および分解能に変化が認められた時には調査が必要である。解第1.1図に代表的なNaI (Tl) シンチレータの構造図を示す。



解第1.1図 NaI (Tl) シンチレータの構造

シンチレータは各種の形状のものが作られているが、環境放射線測定用として多く使用されているものは球形と円柱形である。このうち球形のもの（解第1.2図）は方向依存性が小さいので、野外環境のような全方向からの $\gamma$ 線を測定する場合に適している。

入手できるシンチレータの寸法は3in $\phi$ 球または3in $\phi$ ×3in, 2in $\phi$ ×2inのものが一般的であり最も多く使用されている。また円柱形のものに対する寸法の精度については、シンチレータの大きさおよびフランジの形でA～Dの4種類に分類され、それぞれの直径、厚さ、光学窓の厚さ等の許容誤差がJ I S Z 4321によって決められている。これらの一例を解第1.3図に示した。しかし、球形のものについては、このような規格は設けられていない（1989年12月現在）。

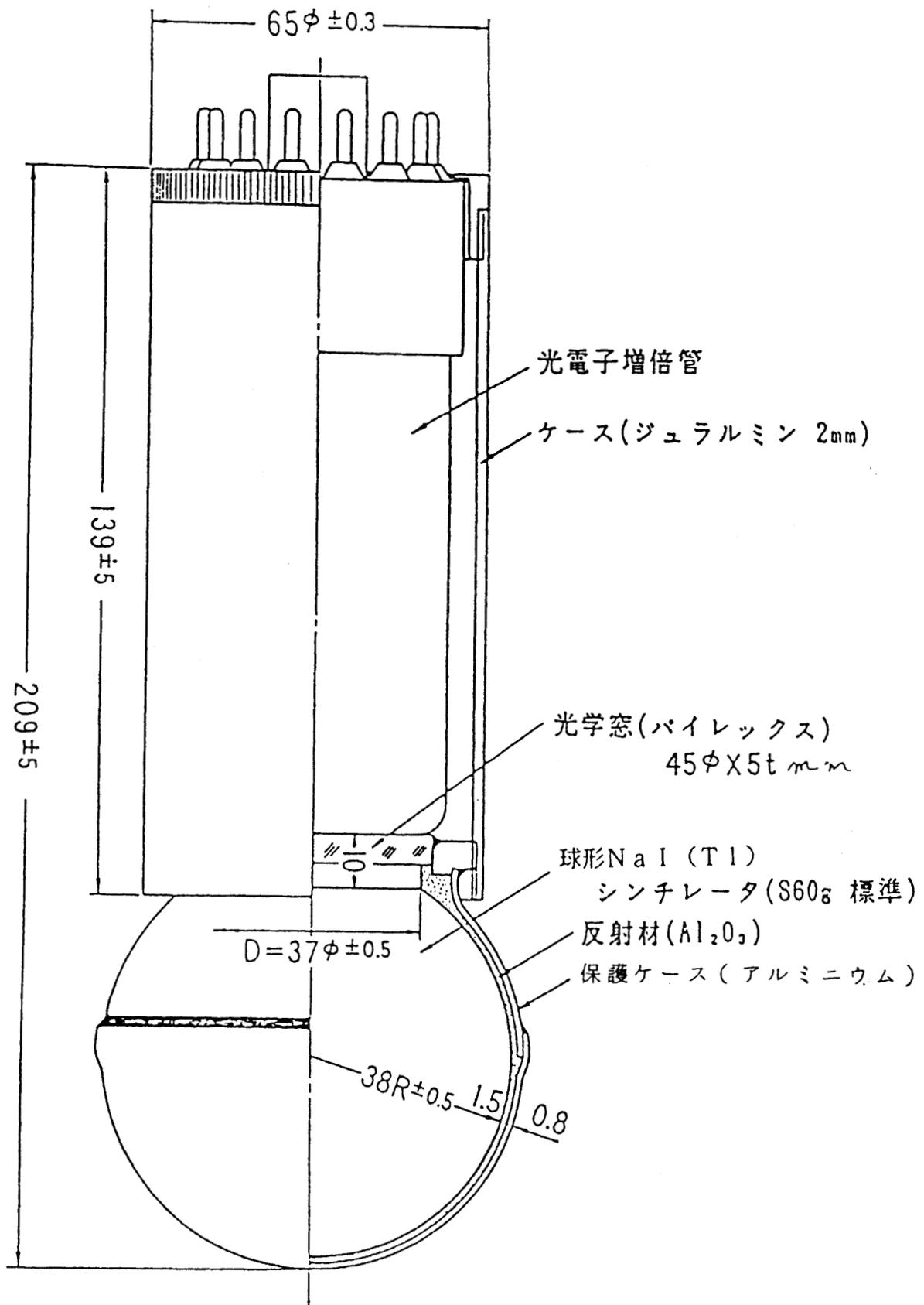
シンチレータの精密さはスペクトル解析および線量算出を行う場合に、得られた結果に片寄りを与えるものであるから、購入に際して正確な寸法および重量等のデータを入手しておくことが望ましい。また、これらのデータが入手できない時にはラジオグラフィー等によって調べることもできる。

### 1.3 光電子増倍管

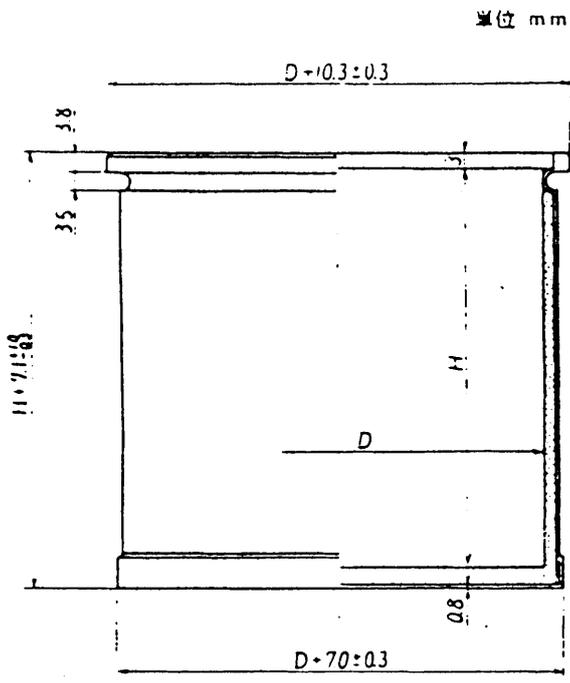
光電子増倍管は光電陰極（受光部）、ダイノード、アノードより成っている。受光部はシンチレータの直径と同じ径のものが普通であるが、シンチレータより小さい受光部の光電子増倍管を用いる場合にはシンチレータと光電子増倍管の接合部にライトパイプを使用することもある。ダイノードの構造にはいろいろな形式のものがあり、一般に磁場の影響を受けやすい。したがって光電子増倍管はミューメタルなどで十分に磁気遮蔽を施す必要がある。

### 1.4 検出器の保護ケース

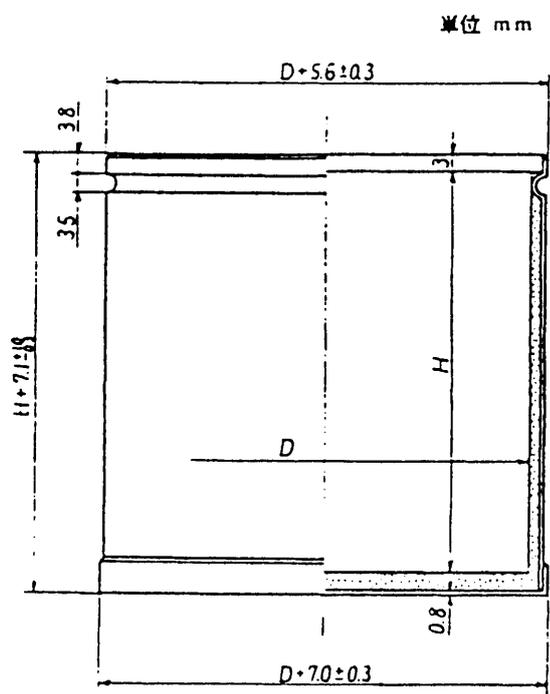
野外環境で放射線の測定を行う場合の検出器には、丈夫な保護ケースを用いていることが多い。この保護ケースの材質は黄銅、ステンレススチールなどいろいろなものがあり、厚みも0.5～5mm程度である。このような保護ケースは検出器に対して $\gamma$ 線の遮蔽になり、また散乱体にもなる。そこで $\gamma$ 線エネルギースペクトルの解析や線量評価を行う場合には、これらの効果を補正しなければならない。そのため、保護ケースの材質および厚みなどの正確な資料を入手しておく必要がある。



解第1.2図 球形NaI (Tl) シンチレータ検出器 (3 in)の構造

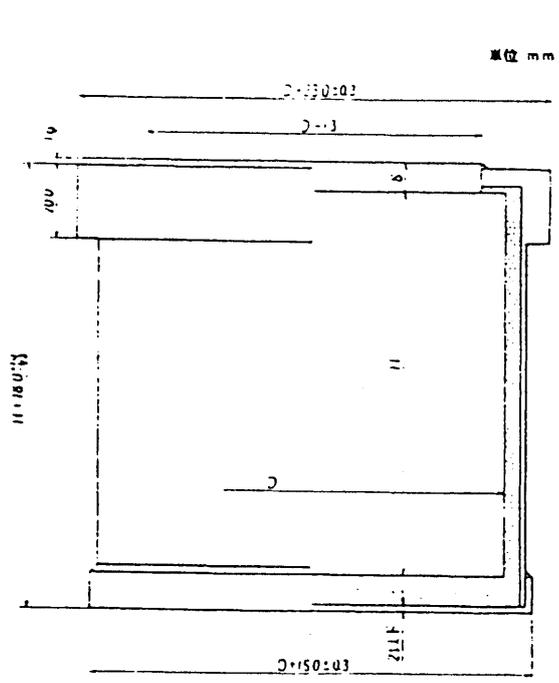


A 形

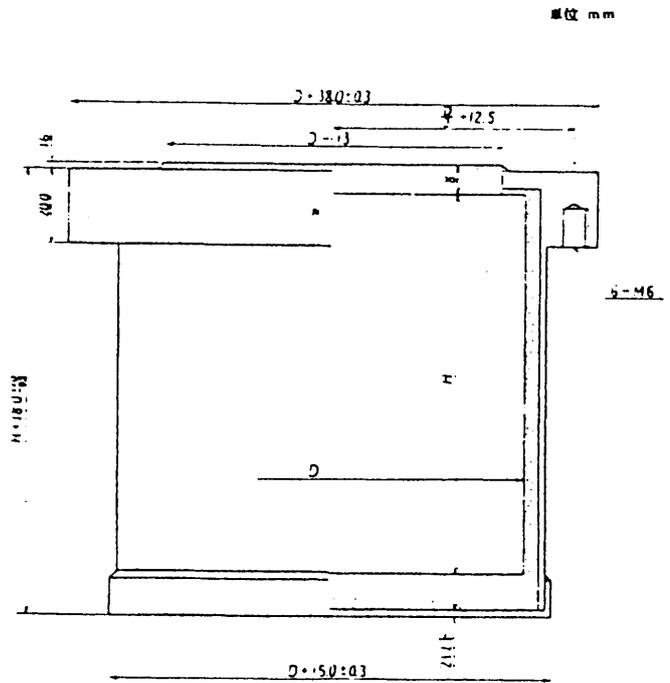


B 形

D : 直径 127 ~ 762 ± 0.5  
 H : 高さ 127 ~ 762 ± 0.5



C 形



D 形

D : 直径 88.9 ~ 127.0 ± 1.0  
 H : 高さ 254 ~ 127.0 ± 1.0

解第1.3図 円柱形NaI (T1) シンチレータの寸法

## 1.5 検出器固有のバックグラウンド

シンチレータを密封する容器の材料には普通アルミニウムが用いられている。アルミニウムの中には微量ではあるがラジウム系列の放射性核種が含まれている。また、シンチレータからの光を効率よく取り出すための光学窓および光電子増倍管の管壁ガラス材料中にも<sup>40</sup>Kが含まれている。これらからの放射線は固有のバックグラウンドとしてパルス波高分布に寄与する。

## 1.6 温度特性

NaI(Tl)シンチレータおよび光電子増倍管等の電子回路部品には温度依存性をもつものが多い。野外環境は温度の変化の著しいので、野外で環境 $\gamma$ 線スペクトルを測定する場合には、できるだけ温度依存性の小さいものを用いることが望ましい。

## 1.7 エネルギー分解能

エネルギー分解能にはシンチレータの固有の分解能以外に光電子増倍管などの影響も含まれる。そこで、これらを総合したものは、総合分解能として示される。エネルギー分解能は、個々のスペクトロメータで異っており、 $\gamma$ 線エネルギースペクトルの解析手法によっては、これが線量評価の結果に影響を与えるので、正確な値を知っておかなければならない。また、この値は経時的に変化することがあるので定期的に測定をすることが望ましい。一般に用いられている3in $\phi$ ×3inのNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータのエネルギー分解能は<sup>137</sup>Csの $\gamma$ 線で7～8%程度である。

## 1.8 検出器のゲインドリフト

シンチレーション検出器のゲインは高圧電源の出力電圧の変動、温度変化その他の影響で数%から10%近くまで変動する。野外で環境の $\gamma$ 線エネルギースペクトルなどを測定する場合、測定を長時間かけて行うため、できるだけドリフトの少ない装置を選ぶように心掛けることが望ましい。

## 解説 2 ゲルマニウム半導体検出器の特性

ゲルマニウム半導体検出器 (Ge (Li) または、高純度 Ge 検出器と前置増幅器を含む系) の特性として、①25cm 相対効率、②エネルギー分解能、③P/T 比、④ピークの形の非対称、などの他にデュワおよび入射窓厚を示すことが多い。

以下には、これらについて定義と数値を示す。

### 2.1 25cm 相対効率

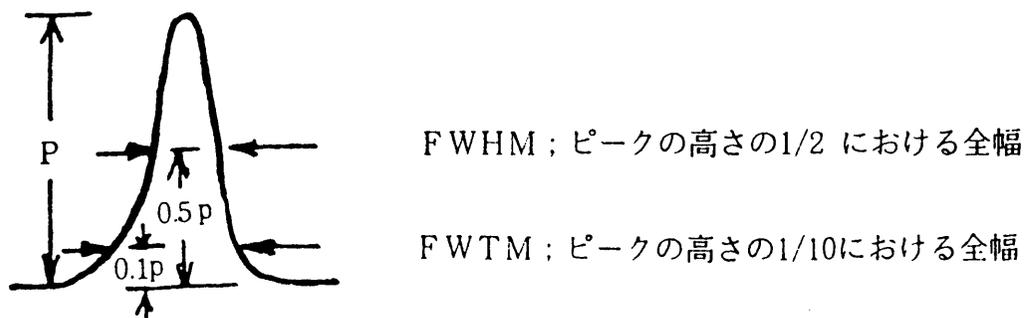
$^{60}\text{Co}$  の点状線源から 25cm の距離に、Ge 検出器と  $3\text{in}\phi \times 3\text{in NaI (Tl)}$  検出器をそれぞれ置いて  $\gamma$  線を計測し、1332 keV の光子に対する全吸収ピーク計数率を比較することによって決定する。

$$\text{25cm 相対効率} = \frac{\text{Ge 検出器によるピーク領域の計数率}}{\text{NaI (Tl) 検出器によるピーク領域の計数率}} \times 100(\%)$$

この値は、有効容積  $60 \sim 120\text{cm}^3$  の検出器では  $10 \sim 20\%$  である。環境における計測ではこの値の大きいことのほか、方向特性のよいことが望ましい。

### 2.2 エネルギー分解能

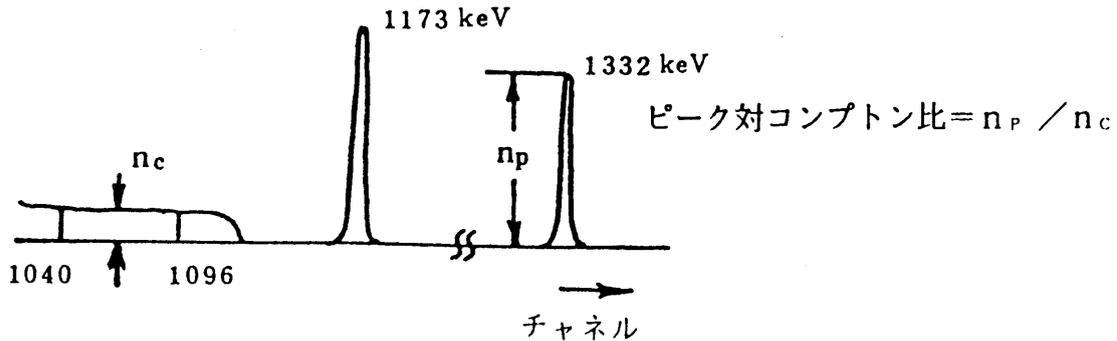
半値幅 (FWHM (keV) と略記することが多い) および  $1/10$  幅 (FWTM (keV) ) と略記することが多い) は次図のように定義する。標準的な検出器では  $\text{FWTM} \leq 2 \text{FWHM}$  なる関係がある。



FWHM の標準的な値は  $2 \text{keV}$  前後、FWTM は  $4 \text{keV}$  前後である。

### 2.3 ピーク対コンプトン比

$^{60}\text{Co}$  の 1332 keV 光子に対して、ピークの高さ  $n_p$  と、コンプトン連続分布のうち 1040~1096 keV の領域の平均値  $n_c$  の比をいう。



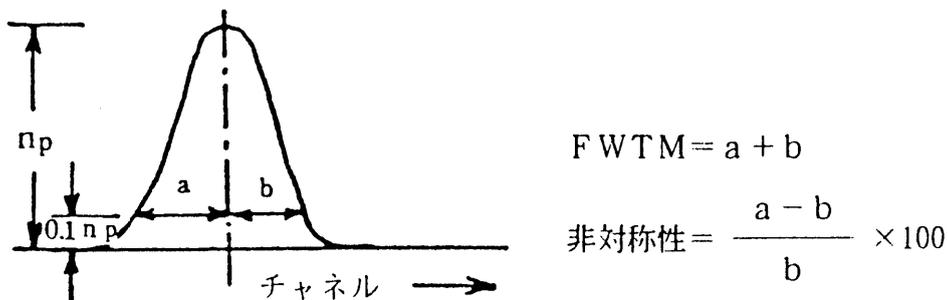
大体の目安は 25~40 である。この値は有効容積の大きな検出器程大きくなる。

### 2.4 ピークの形の非対称性

ピークの形の非対称性はデータ処理の際に重要となる。

この値は次図に示すように定義される。

前もってポールゼロキャンセルなど回路の調整を十分行い、さらに線源と Ge 検出器の間および周辺で生ずる散乱線をできるだけ減らすよう留意すれば、この値の大体の目安は FWTM において 10% 以下である（なお非対称性を  $b/a$  で表すこともある。）。



デュワ：液体チッ素の日消費量の目安は 1~2 l/day である。

入射窓厚：0.5~1 mm のアルミニウム窓の他に約 1 mm のテフロン、約 0.5 mm の n 層などが加わる（使用する検出器の構造を購入時に十分調べておくことが重要である）。

## 解説 3 レスポンス関数の作成

### 3.1 レスポンス関数の意味

検出器からの出力波高分布を観測し、検出器へ入射した放射線（本マニュアルでは光子を対象としている）のエネルギースペクトルを求めるアンフォールディングでは、単一エネルギー放射線に対する検出器の応答の形（レスポンス関数）に関する知識が必要である。このレスポンス関数がいかに検出器の応答に適合しているかが解析結果に大きく影響する。

入射光子のスペクトルを  $N(E)$  ( $E$  はエネルギー) で表し、波高  $h$  と  $h + \Delta h$  の間に観測されるパルス数を  $P(h) \Delta h$  とすると、レスポンス関数を  $K(E, h)$ 、検出器の検出効率を  $\epsilon(E)$  とし、次式

$$P(h) \Delta h = \Delta h \int_0^E \epsilon(E) K(E, h) N(E) dE \quad (\text{解3-1})$$

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  $\epsilon(E)$  は定数となるから、上式は

$$P(h) \Delta h = \Delta h \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon(E) K(E, h) \delta(E - x) dx \quad (\text{解3-2})$$

$$P(h) = \epsilon(E) K(E, h) \quad (\text{解3-3})$$

となり、波高分布を  $\epsilon(E)$  で割ったものがレスポンス関数となる。

また (解3-1) 式で  $\epsilon(E) K(E, h)$  をまとめて  $R(E, h)$  と表現すれば、入射光子のスペクトル  $N(E)$  に対する波高分布  $P(h)$  は次式のように表現される。

$$P(h) \Delta h = \Delta h \int_0^{\infty} R(E, h) N(E) dE \quad (\text{解3-4})$$

$R(E, h)$  は  $E$  のエネルギーをもった入射光子が検出器中で波高  $h$  のパルスを生ずる確率である。

単一エネルギーの光子を測定して得られる波高分布を検出器へ入射した線束密度で割れば、単位線束密度の単一エネルギー光子が検出器へ入射したときの波高分布が得

られ、これが $R(E, h)$ を表すので後者レスポンス関数の意味が理解しやすい。

(解3-1)式の $K(E, h)$ 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すべて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。比較的良好に使われているレスポンス関数またはレスポンス行列の例を解第3.1表に示す。この表に示したものの他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<sup>1)</sup>により集大成されている。

### 3.2 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<sup>2)</sup>がある。前者は前節でもふれたようにHeathにより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や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、例えば前方散乱線や後方散乱線などをすべてレスポンス関数の中に入れることができることである。遮蔽体を含む検出系全体を常に同じ条件に保っておけば、これらを一つの検出器と見なすことができる。また、自然環境における光子スペクトルの評価のためには、ブロードな入射ビームの条件で、単一エネルギー光子による波高分布群を測定する。レスポンス関数の作成によく使われる単一エネルギー光子の光子線源には解第5.1表に示したようなものがある。これらの線源についてすべて測定する必要はない。測定にあ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。

解第3.1表 NaI(Tl) 検出器のレスポンス関数、レスポンス行列

形状	製作者または 使用機関	行・列数	条件(エネルギー範囲、 bin幅、対象など)	文献
(a) 3inφ×3in 円柱形	(i) Heath	—	0.335 ~ 2.75MeV; 任意エネルギー のレスポンス関数を補間	(a)
	(ii) Zerby- Moran	—	0.679 ~ 6MeV; 任意波高分布を Monte Carlo 計算	(b)
	(iii) Berger- Seltzer	—	2 ~ 20MeV; 1MeVごとの波高分布を Monte Carlo 計算	(c)
	(iv) 京大工	20×20	0 ~ 1.44MeV; 72keV/bin, 均等分割; 透過スペクトル研究用	(d)
	(v) 名工試	22×22	0 ~ 2.61MeV; 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 ~ 9.2MeV; 200keV/bin, 均等分割; 原子炉周辺環境用	(f)
(b) 3inφ 球形	(i) 理研	10keV 間隔、連続	0 ~ 3.0MeV; 10keV/bin, 均等分割 BG (固有のバックグラウンド、 宇宙線分布差引き); 自然環境用	(g)
	(ii) 原研	60×60 295×295	0.05 ~ 3MeV; 50keV又は10keV/bin, 均等分割; 自然環境用	(h)
	(iii) 京大炉	34×34	0 ~ 0.1MeV; 20keV/bin, 0.1 ~ 3MeV 100keV/bin; 自然環境用	(i)
	(iv) 名工試	22×22	0 ~ 2.614MeV; 単色エネルギーピー ク幅による不均等分割; 自然環 境用	(j)
	(v) 名大工	22×22	0.01 ~ 3MeV; 対数波高軸を均等分 割; 自然環境用	(k)
(c) 2inφ×2in 円柱形	(i) 日立	14×14	0 ~ 1.4MeV; 100keV/bin, 均等分割; 逆行列; 散乱線研究用	(l)
	(ii) 原研	60×60	0.05 ~ 3MeV; 50keV/bin, 均等分割	(m)

参考文献

- (a) R. L. Heath ; 100-16880-1 (1964)
- (b) C. D. Zerby and H. S. Moran ; ORNL-3169 (1961)
- (c) M. J. Berger and S. M. Seltzer ; Nuclear Instr. Meth., 104, 317 (1972)
- (d) T. Hyodo and F. Makino ; Memoi. Fac. Engin., Kyoto Univ., 14, 291 (1962)
- (e) 湊進 ; 名工試報告, 27, 384 (1978)
- (f) Y. Nakashima ; Thesis, Fac. Engin., Nagoya Univ., (1980)
- (g) M. Okano ; Natural Radiation Environment III, Symposium Series DUF51  
(CONF-780422) 867 (1980)
- (h) S. Moriuchi ; Personal Communication
- (i) I. Urabe, T. Tsujimoto, K. Yamazaki and K. Katsurayama ; Jour. Rad. Res.,  
19, 163 (1978)
- (j) S. Minato ; Personal Communication
- (k) 明野吉成 ; 卒業論文 ; 名大工、原子核工学科、Mar. (1982)
- (l) 石松健二 ; 日本原子力学会誌、4, 24 (1962)
- (m) S. Moriuchi ; Personal Communication

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すべて面積が1となるように規格化したのち、それぞれの波高分布にそれぞれの入射光子のエネルギーを考慮して効率  $\varepsilon(E) = 1 - \exp\{-\mu(E)T\}$  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、 $T$  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よりグラフ的補間によって求めることができる。

Heath<sup>1)</sup> はグラフ的補間法を発展させ、計算機でこれを行うプログラムを作っているので、以下にその原理を紹介する。同一条件の下で測定した単一エネルギー光子に対する波高分布群を三次元的に配置し、それらを滑らかな曲面で覆うとレスポンス曲面となる。

このようにして得られたレスポンス曲面の全エネルギー吸収ピークを次のガウス分布の式で内挿する。

$$y = y_0 \exp \left\{ - \frac{(X - X_0)}{b_0} \right\} \quad (\text{解 3 - 5})$$

この式で  $y_0$  はガウス分布のピークの高さ、 $b_0$  は半値幅に関係した量で入射光子のエネルギー  $E_\gamma$  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。

$$E_c = E_\gamma - E_\gamma / \left\{ 1 + \frac{2 E_\gamma}{m_0 c^2} \right\} \quad (\text{解 3 - 6})$$

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  $E_{ps}$ 、ダブルエスケープピーク  $E_{pd}$  のエネルギーを決定する。

$$E_b = E_\gamma / \left\{ 1 + \frac{2 E_\gamma}{m_0 c^2} \right\} \quad (\text{解 3 - 7})$$

$$E_{ps} = E_\gamma - 0.511(\text{MeV}) \quad (\text{解 3 - 8})$$

$$E_{PD} = E_{\gamma} - 1.022(\text{MeV}) \quad (\text{解3-9})$$

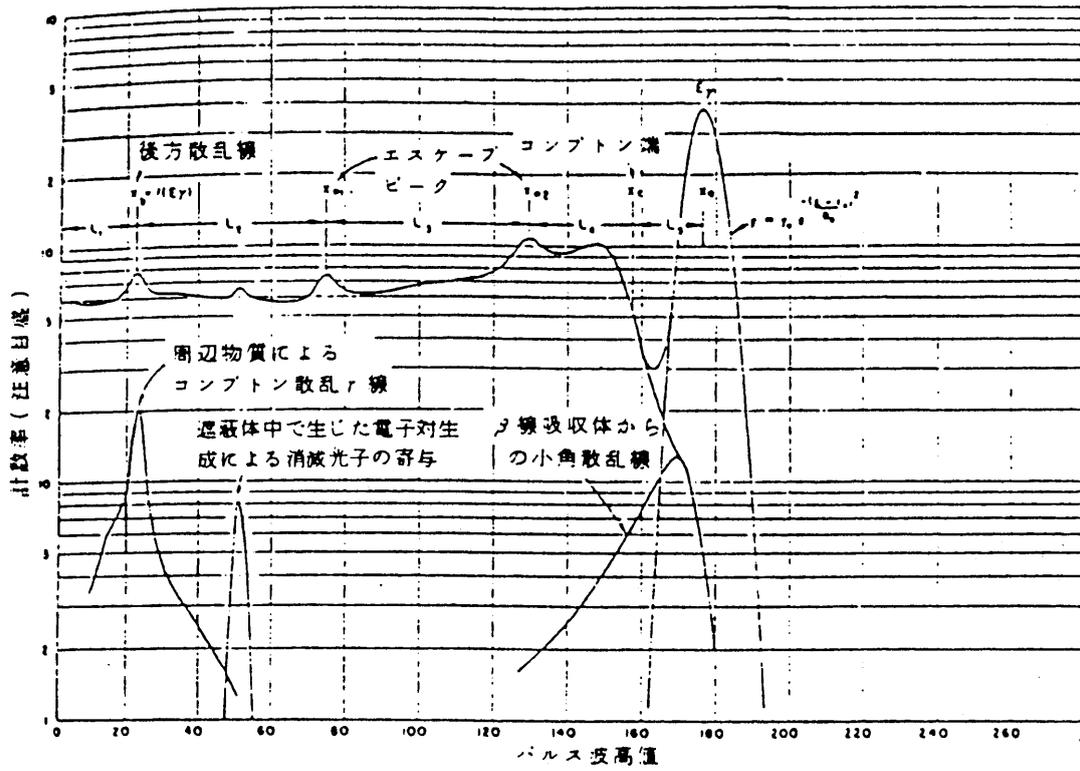
$E_c$ 、 $E_b$ 、 $E_{PS}$ および $E_{PD}$ の位置によって波高分布を $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\dots$ 、 $L_5$ の5区間に分割する(解第3.1図参照)。当然のことながら、 $E_{\gamma} < 1.02\text{MeV}$ のときは $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ の3区間に分割すればよい(解第3.2図参照)。それぞれの区間で次の多項式によって波高分布を表現する。

すなわち $L_i$ 区間の波高分布 $g(X)$ は

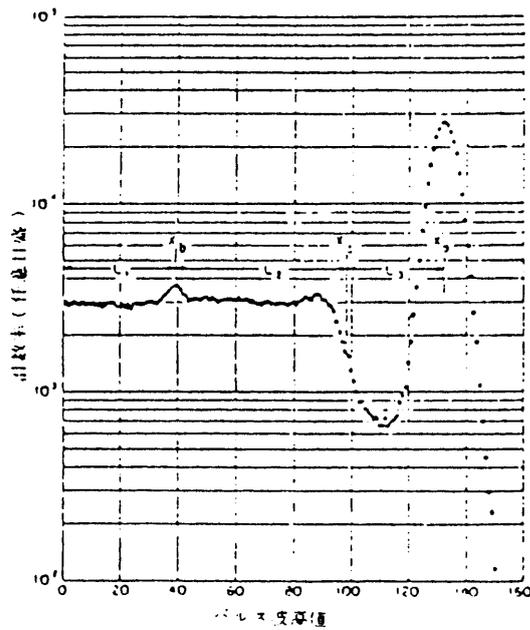
$$g(X) = a + bX + \sum_{k=1}^N b_k \sin \frac{k\pi X}{M-1} \quad (\text{解3-10})$$

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 $E_{\gamma}$ に関して補間を行う。こうして得られた $a$ 、 $b$ 、 $b_k$ とさきに得た $b_0$ 、 $y_0$ を用いれば、任意の $E_{\gamma}$ の入射光子の検出器に対する波高分布を式(解3-4)および(解3-10)より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 $R_{ij}$ を次式により決定する。



解第3. 1図 3 in x 3 in NaI (Tl) 検出器の 1.78 MeV  $\gamma$  線に対する応答



解第3. 2図 3 in x 3 in NaI (Tl) 検出器の応答 (1.02Me以下の場合)

$$R_{ij} = \int_{X_{i-1}}^{X_i} R(X, E) dX \quad (\text{解3-11})$$

レスポンス行列の行および列の数は光子スペクトルの形や、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より成るスペクトルが予想される場合には行、列の数を多くとる必要がある。

## (2) モンテカルロシミュレーション<sup>2), 3)</sup>

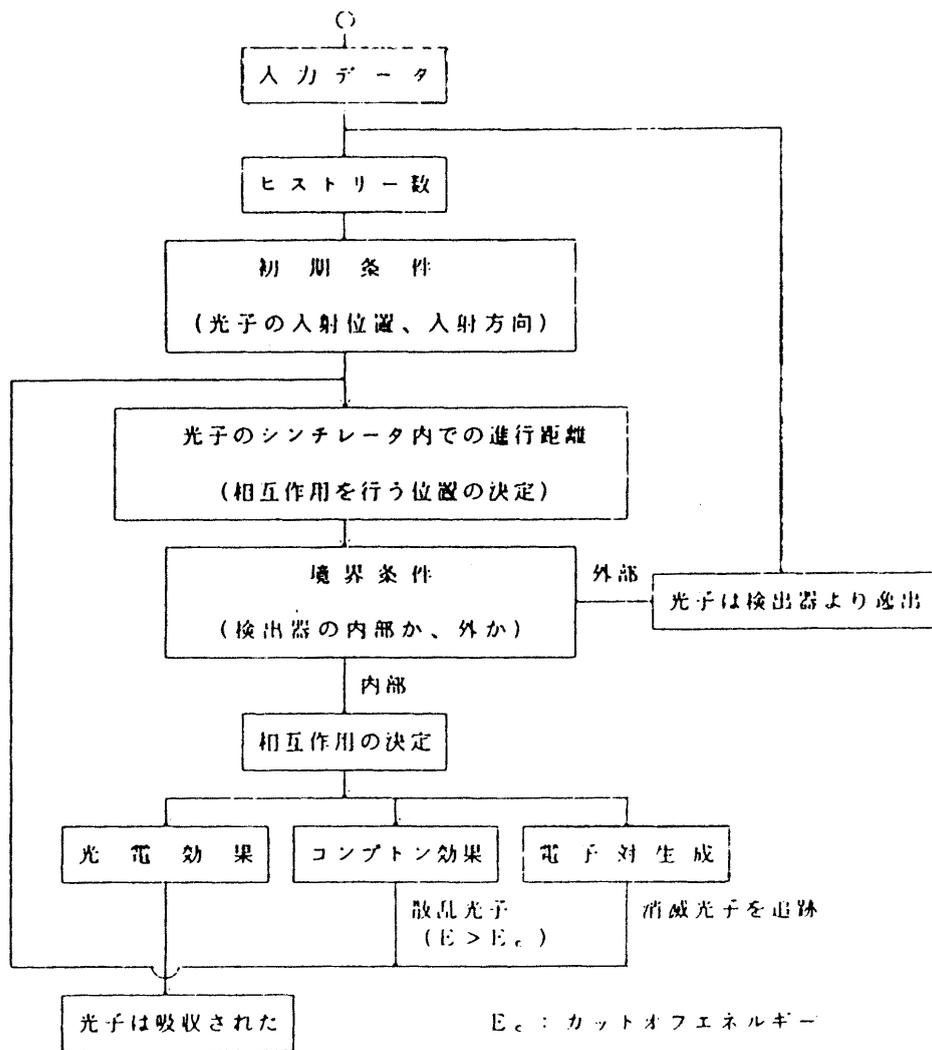
光子が検出器へ入射したとき、検出体との相互作用により二次電子が発生する。二次電子はそのエネルギーを検出体中で消費する。光子と検出体との主な相互作用は光電効果、コンプトン効果、電子対生成の作用によるものである。モンテカルロシミュレーションでは、乱数を使用して、入射した1個の光子の検出体内での履歴（ヒストリー）を追跡する。光子が衝突を起すごとに二次電子が発生し、二次電子は電離・励起によりエネルギーを失うが、入射光子のエネルギーが数MeV以下の場合には、検出体内で発生する二次電子の飛程は短いので、二次電子のエネルギーはすべて検出体内で吸収されるものとして取扱うことが多い。しかし、光子エネルギーが高いときには、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、検出体内部ですべてのエネルギーを失うか、あるいはあるカットオフエネルギー以下になるか、または検出体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2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）を解第3.3図に示した。

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および列の数、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方向を決める。次にこの光子が相互作用を起すまでに検出

体中を進行する距離と相互作用点の座標を決定する。そのとき相互作用点が検出体の外部であれば、初めに戻って次の光子の追跡を始める。相互作用点が検出体の内部であれば、その相互作用が光電効果、コンプトン効果、および電子対生成のいずれであるかを決定する。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。このとき元の光子のエネルギーと散乱光子のエネルギーの差を吸収エネルギーとする。散乱光子は初めと同様にさらにシンチレータ内での進行距離と次の相互作用点の座標の決定へと追跡を繰返して、カットオフエネルギー以下となるか検出器の外へ逸出するまで追跡される。



解第 3.3 図 モンテカルロシミュレーション法による  
レスポンス関数作成のフローチャート  
(簡略化されている)

このとき、カットオフエネルギーとなるまでに二次電子に与えたエネルギー、または検出体へ逸出するまでに二次電子に与えたエネルギーを加え合せ、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。

### 3.3 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あたって考慮すべき事項が多い。

モンテカルロシミュレーションに際しては、検出系のレスポンス関数に影響すると考えられる①検出器のアルミニウムケースとMgO反射材による吸収・散乱、②シンチレータ窓およ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K X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すべ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、これらの他に発光量と二次電子エネルギーの間の非直線性なども考慮すべき因子として存在する。次に内容のあらましを示す。

①には入射1次光子束の減衰と散乱線によるビルドアップが寄与する。すなわち、単一エネルギーの光子の場合、1次光子束は  $\exp\{-\mu'(E) \bar{x}\}$  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、 $\bar{x}$  は吸収体中の光子の平均通過距離である。従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、180keV付近に観測されるピークはこのような散乱線の寄与である。③の寄与は、②の部分透過した光子がさらに光電子増倍管の光電面で後方散乱した成分の検出体による再吸収である。この成分の寄与は②よりも小さいと考えられる。④の寄与は検出体の構造と関係し、検出体のごく表面で相互作用が起った場合、すなわち低エネルギー光子に対して重要となる。⑥、⑧は検出体のみならず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<sup>1)</sup>、実験にもとづく解析的方法で補正するより他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や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充分と考えられる。方向依存性はケースの構造に関係して、特に低エネルギー領域で顕著に現われる。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わす行列Ms および方向依存性を補正するための行列Dを乗じてレスポンス行列を修正し、実際の系に近い形R<sub>m</sub>を求めることができる。

$$R_m = D \times M_s \times R \quad (\text{解3-12})$$

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、あるいはすで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のみを、ピーク対コンプトン比を考慮して、使用する系の分解能に適合させれば充分である。このようにして補正されたレスポンス関数(行列)はその面積(要素)を各入射光子エネルギーごとに総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  $\epsilon(E) = 1 - \exp\{-\mu(E)\bar{t}\}$  と比較して細部を再修正することもできる。

裸の3inφ NaI(Tl)検出器についてモンテカルロシミュレーションにより求めたレスポンス関数(行列)に、MgO反射材およびAlケースの影響を平板近似により計算で補正した22行22列、不均等分割のレスポンス関数(行列)の例を解第3.2表に示した。各エネルギーに対するヒストリー数は50,000である。また各要素の数値を1,000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。

解第3.2表 一様入射 $\gamma$ 線場に対する3in $\phi$ NaI(Tl)シンチレータの22 $\times$ 22のレスポンス行列の一例

E	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.32	1.465	1.615	1.765	1.970	2.205	2.410	2.615	2.860	3.100	
0.1	979.7	0.0																					
0.2	27.0	916.6	0.7																				
0.3	71.7	17.3	759.6	1.6	0.0																		
0.4	80.8	66.4	15.6	593.6	10.1	0.0																	
0.5	92.1	73.7	58.1	17.8	473.4	13.8	0.0																
0.6	83.3	73.0	66.7	51.5	20.6	381.8	17.8	0.0															
0.7	73.5	66.4	60.7	59.2	45.8	22.6	318.8	17.8	0.0														
0.8	63.4	60.5	55.7	55.0	56.6	40.6	23.0	270.0	21.5	0.0													
0.9	54.6	52.4	49.1	48.2	47.8	52.6	31.6	26.5	234.8	23.2	0.0												
1.0	46.0	44.7	44.3	42.5	41.0	44.3	49.3	32.7	27.0	210.3	25.0												
1.1	42.5	40.3	37.3	38.6	37.7	38.6	39.9	48.9	31.1	27.4	188.1	24.6	0.0										
1.2	36.8	34.0	33.8	34.0	34.2	34.4	34.9	38.2	48.0	28.7	28.5	168.2	26.1	0.0									
1.32	31.8	30.4	29.2	28.3	29.4	29.2	28.5	30.2	35.3	43.0	35.1	17.3	180.9	11.8	0.0								
1.465	26.8	27.8	25.0	23.9	24.8	24.3	24.3	25.2	26.5	30.3	38.4	41.9	24.3	169.7	10.5	0.0							
1.615	22.4	21.3	21.9	21.3	21.2	24.6	20.6	22.6	22.1	23.5	29.4	33.5	58.1	27.0	152.4	11.8	0.0						
1.765	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	21.3	21.7	18.6	19.7	20.0	25.7	44.7	57.7	29.8	143.6	12.7	0.0					
1.970	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	18.2	19.2	16.4	17.5	26.3	43.9	53.7	34.0	157.2	1.5	0.0				
2.205	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	14.9	21.7	22.1	24.6	33.5	47.8	72.4	140.0	5.3	0.0			
2.410	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	21.7	27.0	21.1	26.8	84.6	50.0	126.5	8.6	0.0		
2.615	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.1	11.8	15.6	31.6	21.5	50.4	70.3	46.7	122.4	7.0	0.0	
2.860	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.2	9.2	11.8	16.0	23.0	45.8	37.7	68.0	53.3	131.6	2.6	
3.100	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	7.2	8.8	9.2	9.4	35.3	20.9	32.5	70.4	73.0	105.0	

## 参考文献

1) R. L. Heath ; IDO-16880-1 (1964),

“ ” ; IDO-17017 (1965),

Heathの日本語資料としては

天道芳彦： $\gamma$ 線スペクトルの解析法

； Radioisotopes Vol. 12, No. 2, 200～205(1963)

ニコラス ツルファニデス（坂井英次訳）：放射線計測の論理と演習（下巻・  
応用編第11, 12章）； 現代工学社（1986）

R. L. Heath, R. G. Helmer, L. A. Schmittroth and G. A. Cazier

Method for Generation Single Gamma-Ray Shapes for the Analysis of  
Spectra, Nucl. Instr. Meth. 47:281～304(1967)

2) C. D. Zerby ; “Methods in Computational Physics” I. 89～134

（B. Alder and S. Fernbach eds.） Academic Press（1963）.

3) 齊藤公明、森内茂； JAERI-M9741（1981）

## 解説 4 実効エネルギーと散乱 $\gamma$ 線

### 4.1 実効エネルギー

実効エネルギー（第7章および解5.2表参照）について以下に説明を述べる。

複数または連続的なエネルギー分布を持つ放射線により、物質に生じる効果を考える場合、同一の効果を持つ放射線の単一エネルギーを考えることができる。このエネルギーが、効果を対象とした実効エネルギーである。

現在、環境 $\gamma$ 線の測定は空気吸収線量で行われている。したがって、複数エネルギーのX、 $\gamma$ 線の場合、空気吸収線量についての実効エネルギーをとることが合理的である。

次式により、空気の等価質量減衰係数 $(\mu_{en}/\rho)_{eff}$ を定義する。

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{eff} = \frac{\sum_E E \phi_E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_E}{\sum_E E \phi_E} \quad (\text{解4-1})$$

ここで、

$E$  : 光子エネルギー

$\phi_E$  : エネルギー $E$ の光子束密度

$(\mu_{en}/\rho)_E$  : エネルギー $E$ の光子に対する空気の質量減衰係数

この $(\mu_{en}/\rho)_{eff}$ に対応するエネルギーがこの場合の実効エネルギーである。光子が単一エネルギーのときは、実効エネルギーはそのエネルギーである。

しかし、上記の実効エネルギーを求めるのは容易でないので、半価層に対する実効エネルギーがとられることが多い。これは、照射線量が $1/2$ となるフィルタ厚、すなわち半価層を測定し、同一半価層を持つ単一エネルギーの光子のエネルギーを実効エネルギーとするやり方である。

測定器の校正等を行う際に実効エネルギーを用いることは、フィルタの材質、測定条件等によって変化はあるものの実用的といえる。

$^{137}\text{Ba}$ や $^{226}\text{Ra}$  $\gamma$ 線の実効エネルギーについては、二、三の数値が報告されているが、解第5.2表には代表的とみられる数値をとった。

#### 4.2 基準 $\gamma$ 線源と校正における散乱 $\gamma$ 線の寄与

基準 $\gamma$ 線源は、一般に線源から1 mの点における照射線量率が値付けされている。値付けは $\gamma$ 線の散乱の少ない状況のもとで実施されるので、この線量率は線源から直接の $\gamma$ 線に対してであり、周囲からの散乱 $\gamma$ 線による寄与はほとんど含まれていない（ただし、線源部分からの散乱によるものは含まれる）。

実際に基準 $\gamma$ 線源で測定機器を校正する場合、散乱を最小にすることはできないので、線量率 $\dot{X}$ は直接線による線量率 $\dot{X}_0$ と周囲からの散乱 $\gamma$ 線による線量率 $\dot{X}_s$ との和になる。すなわち、

$$\dot{X} = \dot{X}_0 + \dot{X}_s$$

したがって、校正の場合、散乱 $\gamma$ 線の寄与 $\dot{X}_s / \dot{X}_0$ を評価しておくことが望ましい。もし、 $\dot{X}_s / \dot{X}_0$ が十分小さければ無視してよいであろうし、大きければ補正が必要となってくる。

しかしながら、校正に際して散乱 $\gamma$ 線の寄与を測定するのは容易ではない。そこで、散乱 $\gamma$ 線寄与についてのデータが報告されているので、それらを利用し、評価するのが实际的である。しかし、それらの種々のデータは特定の条件におけるものであり、一方、実際の条件は千差万別なので、できるだけ実際の条件に近いデータを用いて散乱 $\gamma$ 線寄与を評価するようにする。

解第4.1～3図に散乱 $\gamma$ 線寄与についてのデータの例を示す。解第4.1図はChilton等の半実験式および実測によるものであって、 $^{60}\text{Co}$ 線源の場合、たとえば線源・検出器間距離が1 m、それら高さが1.5 mであると、実測値から、散乱 $\gamma$ 線寄与は裸地でもコンクリートでも概略3%程度となる。

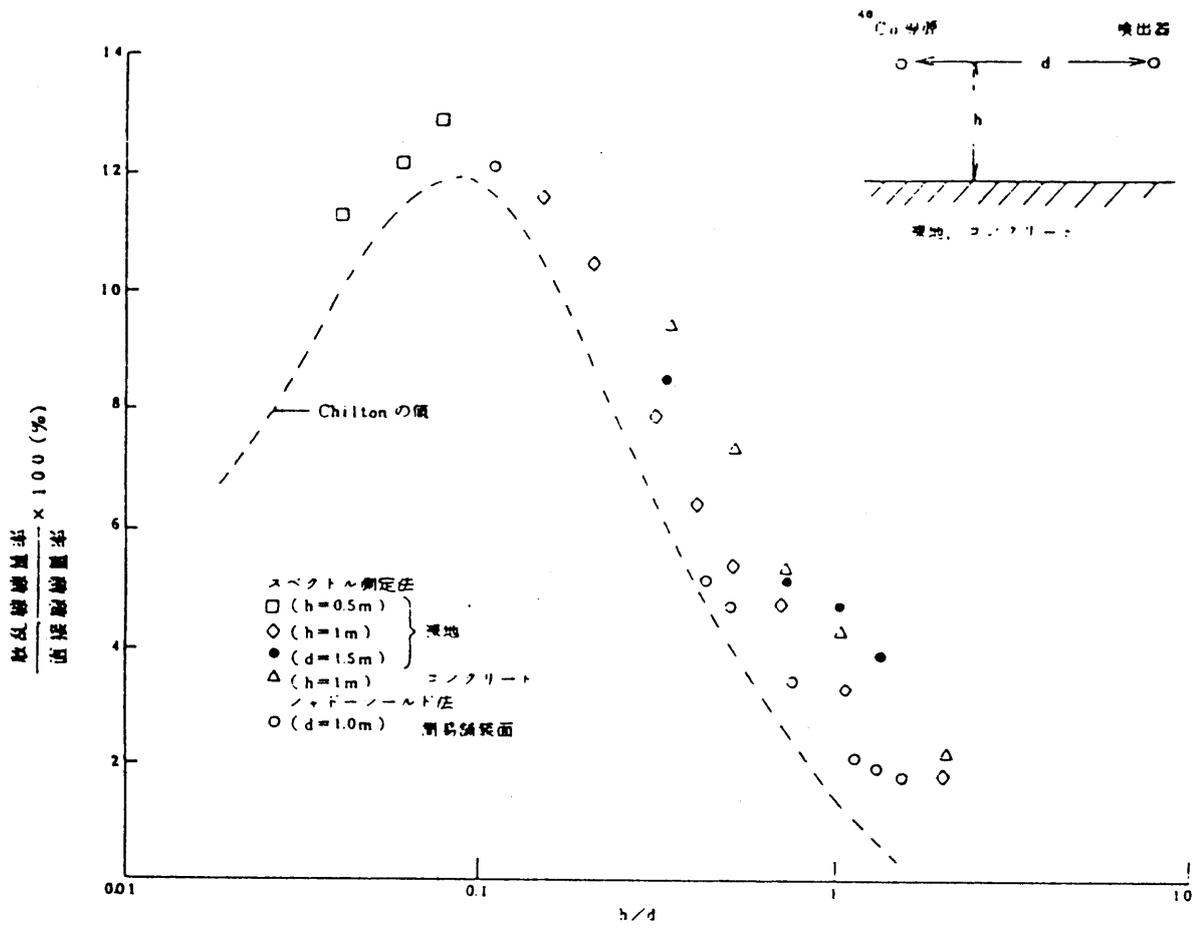
解第4.2図は壁が近傍にある場合である。また、コンクリート製キュービクルの上に設置されている検出器を校正するような場合の散乱 $\gamma$ 線寄与の実測値の一例を解第4.1表に示す。

校正条件の多様さからいえば、散乱 $\gamma$ 線寄与に関するデータはいまだ不十分で、これからもデータを蓄積していかなければならないが、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 線源については解第4.2図等を参照して、散乱 $\gamma$ 線寄与を評価するのが妥当といえよう。

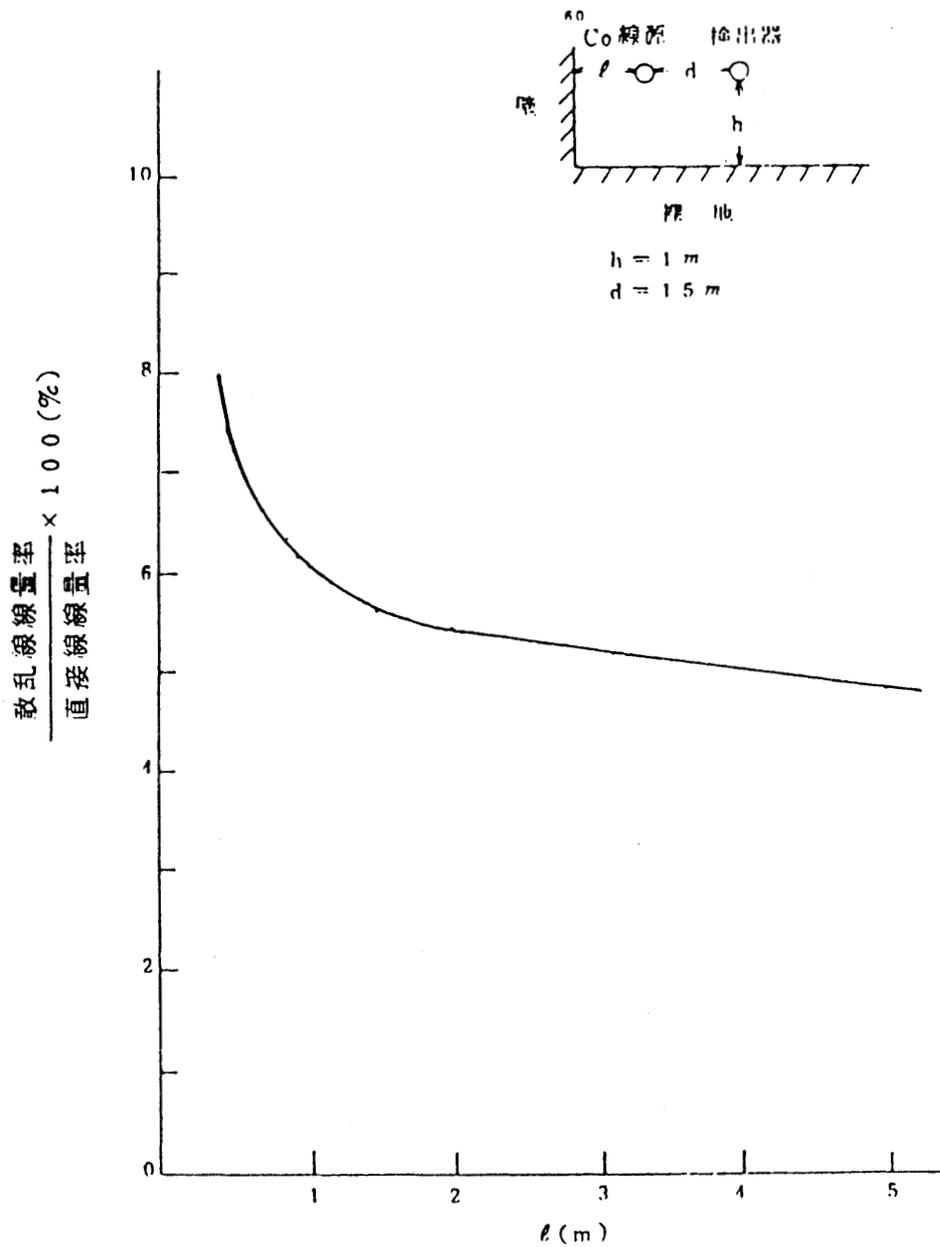
もっとも、線源・検出器間距離が1 m、それら高さが1.5 mの場合、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ に対し、散乱 $\gamma$ 線寄与は2～4%であり、データの不確さを考慮すれば3%と評

価しておいてまず問題ないと言えよう。

解第4.3図は、線源・検出器間距離の関数として表した、散乱線寄与率についての他のデータである。



解第 4.1 図 散乱  $\gamma$  線に関する Chilton 等の半実験的結果 (曲線) と測定結果

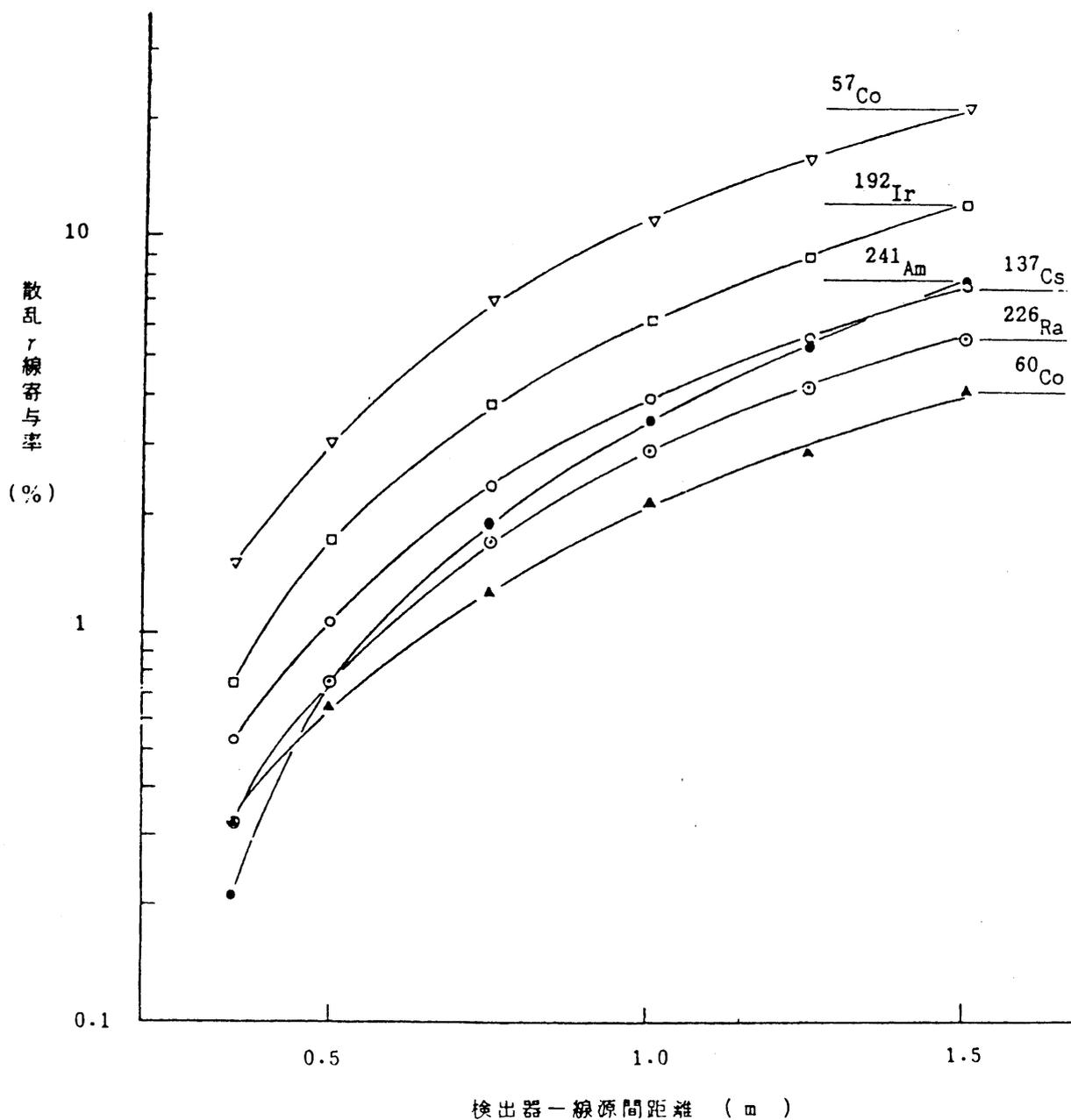


解第4.2図 軽量ブロック壁がある場合の散乱線寄与

解第4.1表 検出器をキュービクル上に設置したときの散乱 $\gamma$ 線の割合

核種	方法	A 局		B 局	
		垂直 (%)	水平 (%)	垂直 (%)	水平 (%)
$^{60}\text{Co}$	b	2.3	2.5	2.3	3.5
	c	2.3	2.7	2.4	3.6
	d	1.7	3.2	3.5	4.7
Ra	c	2.2		2.2	4.2
$^{137}\text{Cs}$	b	2.9	3.5	3.8	5.2
	c	2.6	3.4	3.5	6.7
	d	2.3	3.3	5.6	39.2
$^{133}\text{Ba}$		3.8		5.7	7.6
$^{57}\text{Co}$	a	3.5	3.8	8.3	9.8
	b	4.8	5.1	6.9	11
	c	1.1	2.3		19
$^{241}\text{Am}$	a	0.6	0.5	2.8	3.5
	b	36			2.8
	c			11	5.7

- 1) 散乱 $\gamma$ 線の割合は直接線に対する照射線量の百分率である。
- 2) A局は高さ2.3 m、広さ1.6 m×1.6 m  
B局は高さ2.3 m、広さ4.5 m×3.4 m
- 3) 線源・検出器間距離は1 m
- 4) 方法
  - a. スペクトル測定法、G(E)関数部分計算
  - b. スペクトル測定法、G(E)関数全範囲計算
  - c. シャドーシールド法
  - d. 3in $\phi$ 球形NaI(Tl)検出器を用いたレスポンスマトリックス法



解第4.3図 各核種からの $\gamma$ 線についての検出器・線源間距離に対する散乱 $\gamma$ 線の寄与  
 (床面積 $4 \times 5 \text{ m}^2$ 、天井高さ2.5 mのコンクリート建屋、測定器は電離箱・  
 シャドーシールド法により測定)

### 4.3 環境の散乱 $\gamma$ 線

地中の放射性核種による環境 $\gamma$ 線の場合は、地中での多重散乱による $\gamma$ 線を多く含み、計測器の校正に用いる散乱線の少ない場とは異なるものである。このような散乱線の多い場における $\gamma$ 線のエネルギースペクトル、直接線に対する散乱線の割合等の特性を調べるには、いわゆるモンテカルロ法を用いて計算を行う例が多い。ここでは、無限平面の均質の地面を仮定し、点線源が地中 $Z$  cmの深さにある場合の、地上1 mにおける無限平面での直接線および散乱線について、空気との相互作用を無視して計算した。なお、地中深さ方向の線源強度分布は一定とし、各点線源から $4\pi$ 方向に合計一万個の $\gamma$ 線を打ち出した。この結果は次のとおりである。なお、土壌の密度は $1.6 \text{ g/cm}^3$ である。

解第4.4図は1 MeV線源の深さと、散乱線のエネルギースペクトルとの関係を示すものでチャンネル幅は50 keVである。250 keV以下の散乱線が非常に強く現れているが、これは数～十数回の多重散乱を土中で起こした部分で、線源が表層にある場合は後方散乱によるもの、深部線源の場合は前方散乱によるものが主である。 $\gamma$ 線エネルギーが50 keV以下になると光電効果の断面積が急激に大きくなり、光電吸収により散乱線が消滅してしまうので、50 keV以下の散乱線はほとんど現れず、したがって150 keV付近にピークを示すことになる。線源位置が深くなるに従い、このピークは低エネルギー側（ほぼ80 keV）にシフトしている。なお、実際には空気によるスカイシャイン等の散乱が加わるので、低エネルギー散乱線が増大し、ピークはさらに低エネルギー側にシフトすることになる。

解第4.5図は1 MeVおよび0.5 MeV線源による、照射線量に換算した直接線と散乱線とによる線量率の線源深さ依存性 $\dot{X}_D(z)$ 、 $\dot{X}_S(z)$ を示すものである。地上で観測される散乱線と直接線の照射線量率の比（ $\dot{X}_S / \dot{X}_D$ ）は次式で与えられる。

$$\frac{\dot{X}_S}{\dot{X}_D} = \frac{\int_0^{\infty} \dot{X}_S(z) dz}{\int_0^{\infty} \dot{X}_D(z) dz}$$

直接線は線源の深さとともに指数関数で減少するのに対し、散乱線はゆるやかにしか低減せず、1 MeV線源の場合、50 cm以上の深さまで影響を及ぼすようである。こ

の条件における計算結果では、散乱線による線量率は、1 MeV および 0.5 MeV  $\gamma$  線の場合、直接線に対しおのおの 0.9 および 1.2 倍であった。

解第 4.6 図はゲルマニウム半導体検出器の全吸収ピークに影響を及ぼす微小角散乱線の線源深さ依存性を示すもので、直接線より 5 keV 低いエネルギー範囲〔 $(E_0 - 5) \leq E < E_0$ 、 $E_0$  : 直接線のエネルギー (keV 単位)] の散乱線の、規格化されたフルエンス (散乱線の目盛は 100 倍に拡大) を表す。この場合の散乱線の直接線に対する割合は、1 MeV および 0.5 MeV  $\gamma$  線でおのおの 0.7 および 1.4 % であった。

ゲルマニウム半導体検出器系のエネルギー分解能 (FWHM) は一般に、1 MeV および 0.5 MeV  $\gamma$  線に対しおのおの 2 keV および 1.5 keV 以内であるので、全吸収ピークに及ぼす微小角散乱線の寄与は、上記  $\gamma$  線に対し、0.3 ~ 0.4 % 以内であろう。

このように微小角散乱線の割合が小さいのは、開き角  $\theta$  方向の微分散乱断面積\*  $d\sigma$  は、 $d\rho = (d\rho/d\Omega\theta) \cdot 2\pi \sin\theta d\theta$  であるので、 $\theta$  が小さい範囲では  $d\sigma$  は  $\theta$  に比例し。散乱角が小さくなると微小角散乱線の発生の確率が減少するためである。

なお、地中での  $\gamma$  線の打ち出し角度と、地上の直接線、散乱線の数との関係を解第 4.7 図に示す。打ち出し角  $0^\circ$  は、地中の線源からみて Z 軸の地上方向にとってある。検出器に入射する直接線強度の角度分布は、この打ち出し角に対するものと合致する。線源強度の深さ方向分布が均一の場合、直接線の平均の入射角は 1 MeV  $\gamma$  線の場合  $50^\circ$  弱である。人工放射性核種のように地表面の線源強度が強い場合には、平均入射角は大きくなり、この方向から入射する直接線が強いことになる。これは検出器から地中の体積線源を見込む立体角内の線源の面積と、土層による減衰を考慮した実効的な線源強度との積が、この角度で最も大きくなるためである。

散乱線に関しては、打ち出し角と検出器入射角とは当然合致せず、種々の角度で地上に放出される。線源位置が浅い程後方散乱線が地上に出て行く割合が大きいことが示されている。

以上 1 MeV の  $\gamma$  線源について主に示したが、この他のエネルギーの  $\gamma$  線源に関しても定性的な特性は同様である。

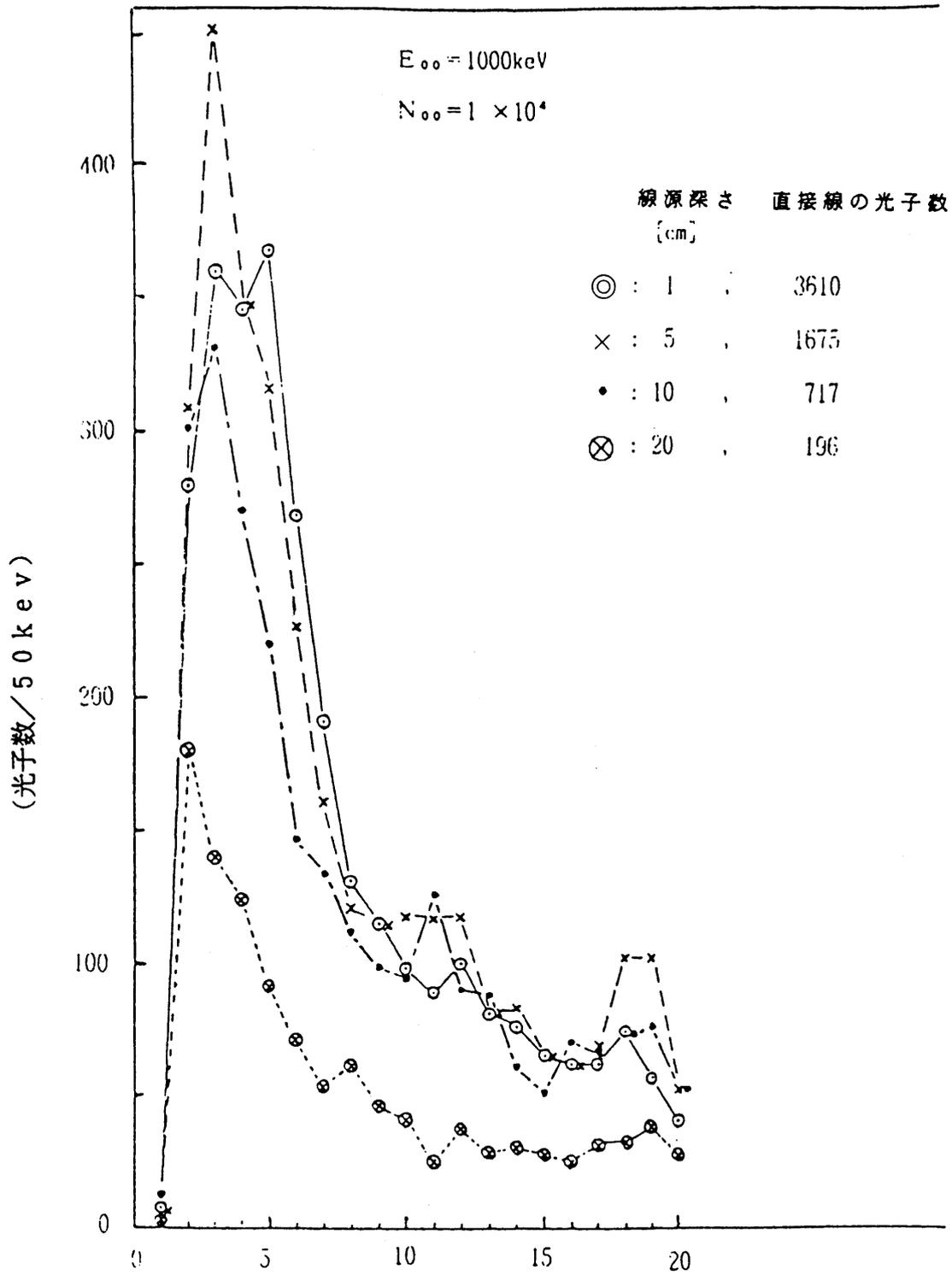
---

\* 自由電子によるコンプトン微分散乱断面積を $(d\sigma_{KN}/d\Omega)$ とおくと、束縛電子による散乱断面積 $(d\sigma/d\Omega)$ は、 $(d\sigma/d\Omega)=(d\sigma_{KN}/d\Omega)\cdot S(V)$ とおかれる。ここに $S(V)$ は電子が束縛されていることによる自由電子モデルの補正項である。散乱体の原子番号を $Z$ 、光子エネルギーを $E_0$  MeV とおくと、 $V=178.4 Z^{-2/5} \cdot E_0 \sin(\theta/2)$ であり、 $V=1$ 以上では $S(V)\approx 1$ 、また $V$ が1より小さく0に近づくと $S(V)$ も急速に0に近づき、散乱断面積 $(d\sigma/d\Omega)$ が小さくなる。土の平均の原子番号を8.2とおくと、 $V$ が1になる散乱角 $\theta$ は $E_0$ が1および0.5MeVに対しおのおの0.65度および1.3度であり、散乱線のエネルギー $E(V=1)$ に換算すると、 $E(V=1)=E_0-0.13\text{keV}$ となる。つまり、1000keVの直接線に対し、999.87keV以上のエネルギーをもつ散乱線の発生確率は非常に小さいことになる。''

#### 参考文献

1) N B S Circular 542(1953)

「Graphs of the Compton Energy-Angle Relationship and Klein-Nishina  
Formula from 10keV to 500MeV」

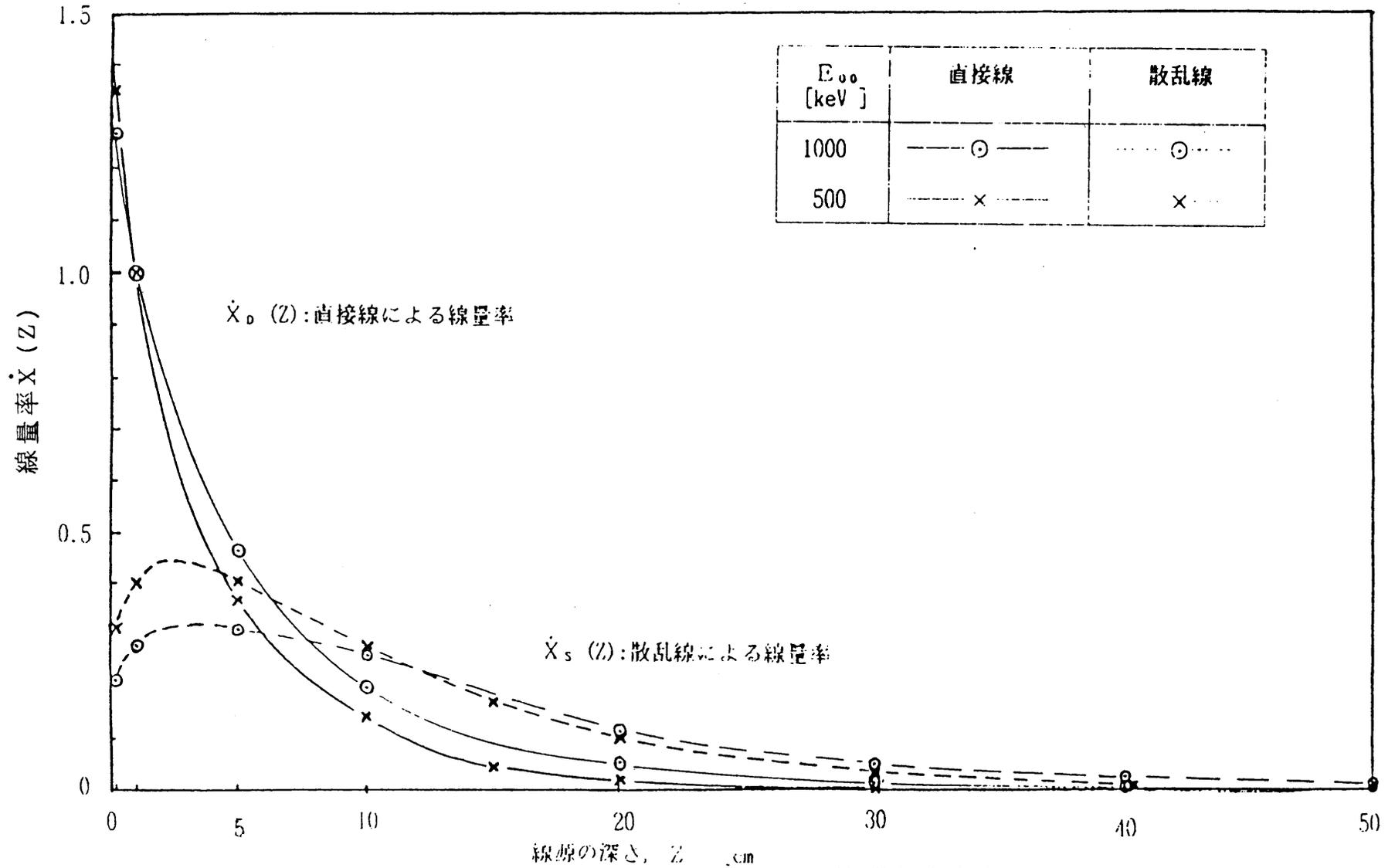


チャンネル番号 (チャンネル幅: 50keV)

解第4.4図 線源の深さと散乱線のエネルギースペクトル

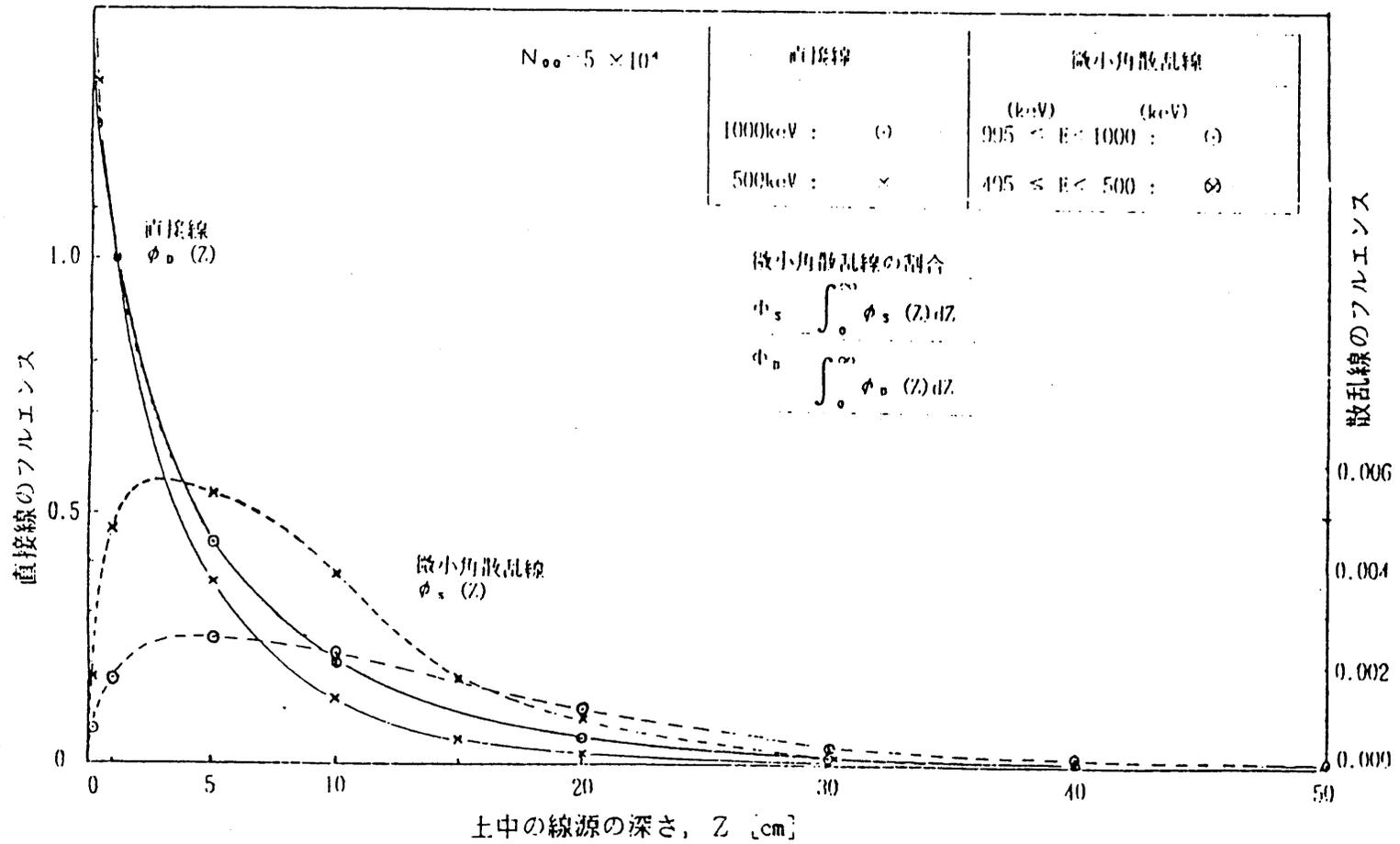
(モンテカルロ計算による)

$E_{00}$ および $N_{00}$ は線源から放出された光子のエネルギーおよび数である。

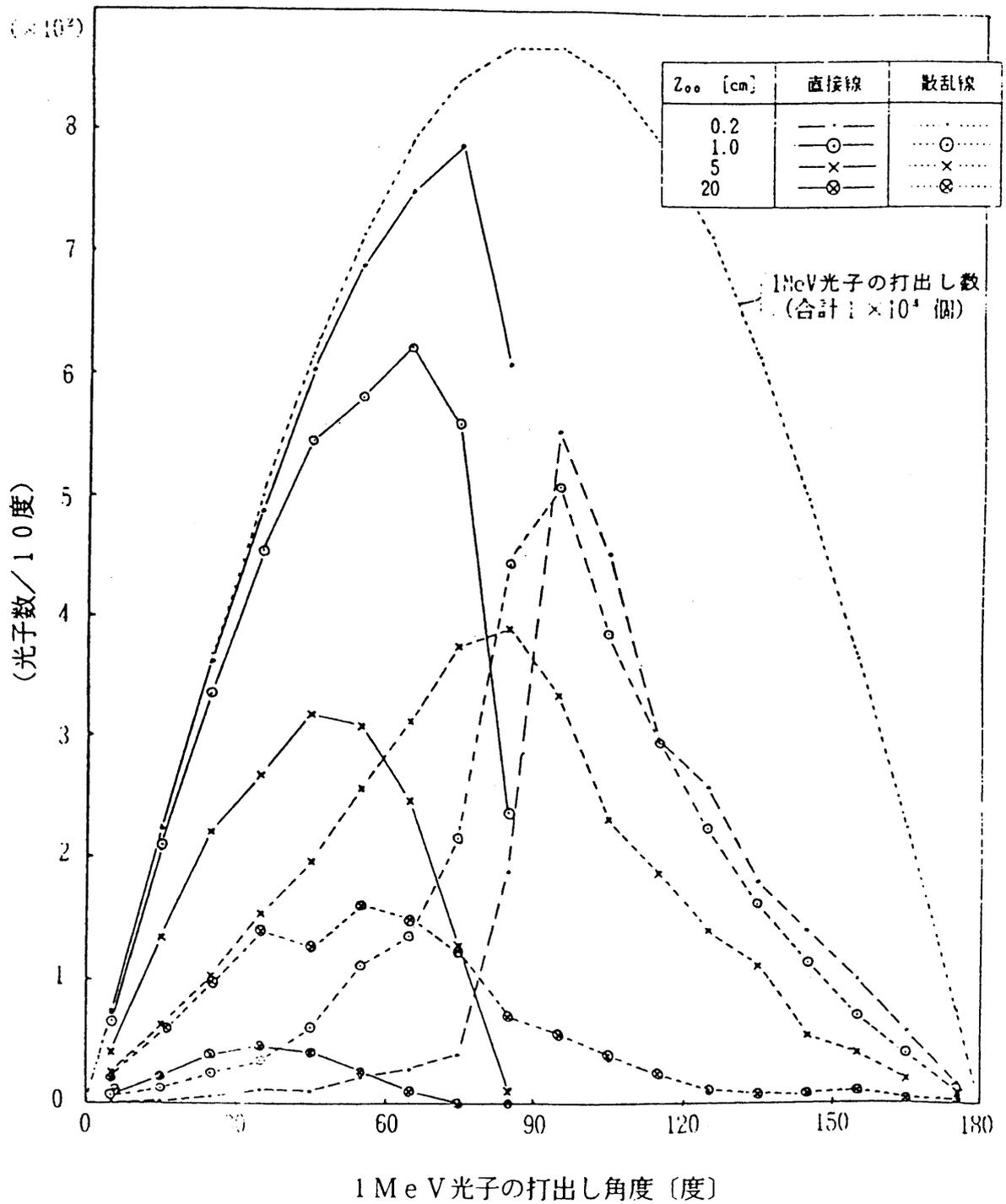


解第 4.5 図 直接線と散乱線とによる、地上の照射線量率の線源深さ依存性

(深さ 1 cm における直接線の照射線量率を 1 とした)



解第 4. 6 図 直接線および微小角散乱線の線源深さ依存性  
 (深さ 1 cm における直接線のフルエンスを 1 とした。)



解第4.7図 地中の線源からの $\gamma$ 線打出し角度と、地上における直接線および散乱線の数  
計算条件は解第4.4図とおなじである。

## 解説5 基準 $\gamma$ 線源の利用と校正

### 5.1 利用一般

放射線計測器の試験や校正に用いられる基準 $\gamma$ 線源には、計測に必要な範囲の $\gamma$ 線エネルギーと、十分長い半減期とをもつ核種が選ばれている。環境レベルに用いられる基準 $\gamma$ 線源には照射線量率が値付けされたものと、放射能が値付けされたものがある。前者は電離箱、TLDのような照射線量計測器の校正に用いられ、比較的丈夫なカプセルに収納され、線源から1mの距離における照射線量率( $C/(kg \cdot h)$ )または $R/h$ )が値付けされており、線量率基準 $\gamma$ 線源と呼ばれている。

後者は、半導体検出器の効率決定等に用いられる。放出 $\gamma$ 線のエネルギーが正確に求められているものを、通常、エネルギー校正線源と呼び、さらに半減期、 $\gamma$ 線放出率が正確に求められ窓材による減衰を小さくし、その放射能( $Bq$ または $Ci$ )が値付けされたものを放射能標準線源と呼んでいる。

スペクトロメータに使用される検出器の主要な特性の試験と校正には次のような項目がある。

- ① エネルギー校正：入射 $\gamma$ 線エネルギーと全吸収ピーク位置（波高分析器のチャンネル番号）との対応づけ。
- ② 検出効率の校正：着目する $\gamma$ 線エネルギー範囲のピーク検出効率曲線の作成。
- ③ 方向特性試験： $\gamma$ 線の入射方向による検出効率の変化の割合の決定。

①項の校正には $\gamma$ 線エネルギーが明確であることが必要である。線源の核種が確定していれば、放出 $\gamma$ 線のエネルギーが明確であることからエネルギー校正線源として使用することができる。この場合、フルエンスの絶対値は確定していなくてもよく、したがって線源の放射能が確定していなくても差し支えない。②項の校正の場合、 $\gamma$ 線エネルギーとフルエンスが明確であることが必要である。したがって、線源の核種と共に放射能が確定していることが必要となる。フルエンスは放射能から算定できる。②項の校正には核種と放射能が確定している放射能標準線源が用いられる。もちろん、放射能標準線源をエネルギー校正にも適用することができる。

③項の試験では、線源と検出器との間の距離を一定に保てば、基準入射軸の検出効率で規格化された相対値を求めれば十分であり、このような場合には放射能の正確な値付けは不要なので、取扱いの容易なチェック用線源が利用される。このように

相対値のみでよい試験項目としては、検出効率の距離依存性試験、ピーク位置の安定性（温度依存性）試験等がある。

## 5.2 NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータのエネルギー校正

### 5.2.1 概要

パルス波高スペクトルのエネルギー校正には、通常適当な2種類以上の既知エネルギーの $\gamma$ 線の全吸収ピークを通る直線が使われる(2測定点校正)。しかし、よく知られているとおりNaI(Tl)結晶の発光効率は電子エネルギーに多少依存するため、全吸収ピークチャンネルと $\gamma$ 線エネルギーの直線は完全な直線関係にはならない。このため校正の方法によっては非常に大きな誤差を伴うことがある。用いるチェック線源と校正誤差の関係を幾つかの例について下に示す。

### 5.2.2 使用する線源と校正誤差の関係

パルス波高分布の全吸収ピークにはNaI(Tl)結晶の中で起こる光電効果の全吸収によるものに加えて2回以上の散乱の結果全吸収を起こしたものも含まれるため、全吸収ピークに関係した発光効率はその $\gamma$ 線エネルギー相当の電子の発光効率とは一般に等しくない。全吸収ピークを形成する光電吸収分と多重散乱分の割合が異なれば実効的な発光効率も変化するので、厳密にはNaI(Tl)結晶の大きさによっても違いが生じることになるが、ここではこの問題を無視し、資料としてHeath<sup>1)</sup>が3in $\phi$ ×3in NaI(Tl)結晶について実験的に得た結果を用いてエネルギー校正誤差を計算してみた。ここで波高分析器は完全な直線性があるものとの仮定を置いた。

標準 $\gamma$ 線エネルギーには自然 $\gamma$ 線のうちで卓越したピークを示す<sup>40</sup>Kの1.460 MeV、<sup>208</sup>Tlの2.614 MeVの他、エネルギー校正によく用いられる<sup>137</sup>Csの0.662 MeVの3種を用い、それぞれの3例の組み合わせを選んで比較した。

解第5.1図にそれぞれ2点校正における、実際の $\gamma$ 線エネルギーと校正エネルギーの関係を示した。いずれの場合も低エネルギー側で実際のエネルギーよりかなり小さく評価する結果を示している。

一方、波高分布の波高“0”の点を $\gamma$ 線エネルギーで-10keV~-20keV相当とする方法で同様の比較計算を試みた。この場合のエネルギー校正曲線は、波高

“0”が-10keV~-20keV相当の点を必ず通り、高エネルギー側で1点あるいはそれ以上のエネルギー点を最小二乗近似で通る一次曲線となる。ここでは校正エネルギーとして0.662MeV、1.460MeV、2.614MeVの中の1種、“0”波高のエネルギー( $E_0$ )として-17keVの組み合わせで計算した。この結果を解第5.2図に示すが、低エネルギー側での校正誤差が大幅に改善されている。

以上のように使用する校正線源によって誤差の分布が大きく変化するので、測定対象の $\gamma$ 線のエネルギー分布に適した校正線源で校正を実施する必要がある。

### 5.2.3 エネルギー校正の実際例

解第5.2図に示したいくつかの計算例の中で、(2)の(-17keV、1460keV)の2点による校正結果が、広いエネルギー範囲にわたって平均的に良い結果を示している。任意の $\gamma$ 線エネルギーにより、これと同等の校正を行う方法について以下に2つの例を示す。

#### (1) 2点あるいはこれ以上で行うエネルギー校正

2点のエネルギー校正で解第5.2図の(2)と同じ校正結果を得るには、 $\gamma$ 線エネルギー $E_1$ 、 $E_2$ それぞれに図から読み取れる誤差分を加算したものを校正の $\gamma$ 線エネルギーとしてあてる。すなわち $E_1$ での誤差が+1.0%であれば、計算に用いる $\gamma$ 線エネルギーは $E_1 \times 1.01$ となる。この修正ファクターをそれぞれ $F_1$ 、 $F_2$ とすれば、校正の一次式は次のとおりとなる。

$$E = \frac{(E_2 \times F_2 - E_1 \times F_1)}{(CH_2 - CH_1)} \times CH - E_0 \dots\dots\dots (\text{解5-1})$$

ここで、

$CH_1$  :  $\gamma$ 線エネルギー $E_1$ の全吸収ピークのチャンネル(bin)番号

$CH_2$  :       "        $E_2$        "

$CH$  : 任意の $\gamma$ 線エネルギー $E$ に対応するチャンネル(bin)番号

$E_0$  : チャンネル(bin)番号“0”に対応するエネルギー

$\gamma$ 線エネルギーが3点以上におよぶ場合は最小二乗法により傾斜を決定する。

#### (2) “0”点を固定して行うエネルギー校正

まず、パルス波形を実際の放射線パルスの波形に近似させたパルスジェネレータを用い、パルス波高値とチャンネル(bin)番号の対応曲線(波高分析器が正常な

らば、直線となる) から入力信号“0”のチャンネル(bin)番号CH<sub>0</sub>を補間で求める。この点をエネルギー-17keVの位置として座標を(CH<sub>0</sub>-17keV)とする。

校正γ線のエネルギーをE<sub>2</sub>、(1)の場合と同様に修正ファクタをF<sub>2</sub>とすると、校正の一次式は次式のとおりとなる。

$$E = \frac{(E_2 \times F_2 + 17)}{(CH_2 - CH_0)} \times CH - 17 \quad \dots\dots\dots (\text{解5-2})$$

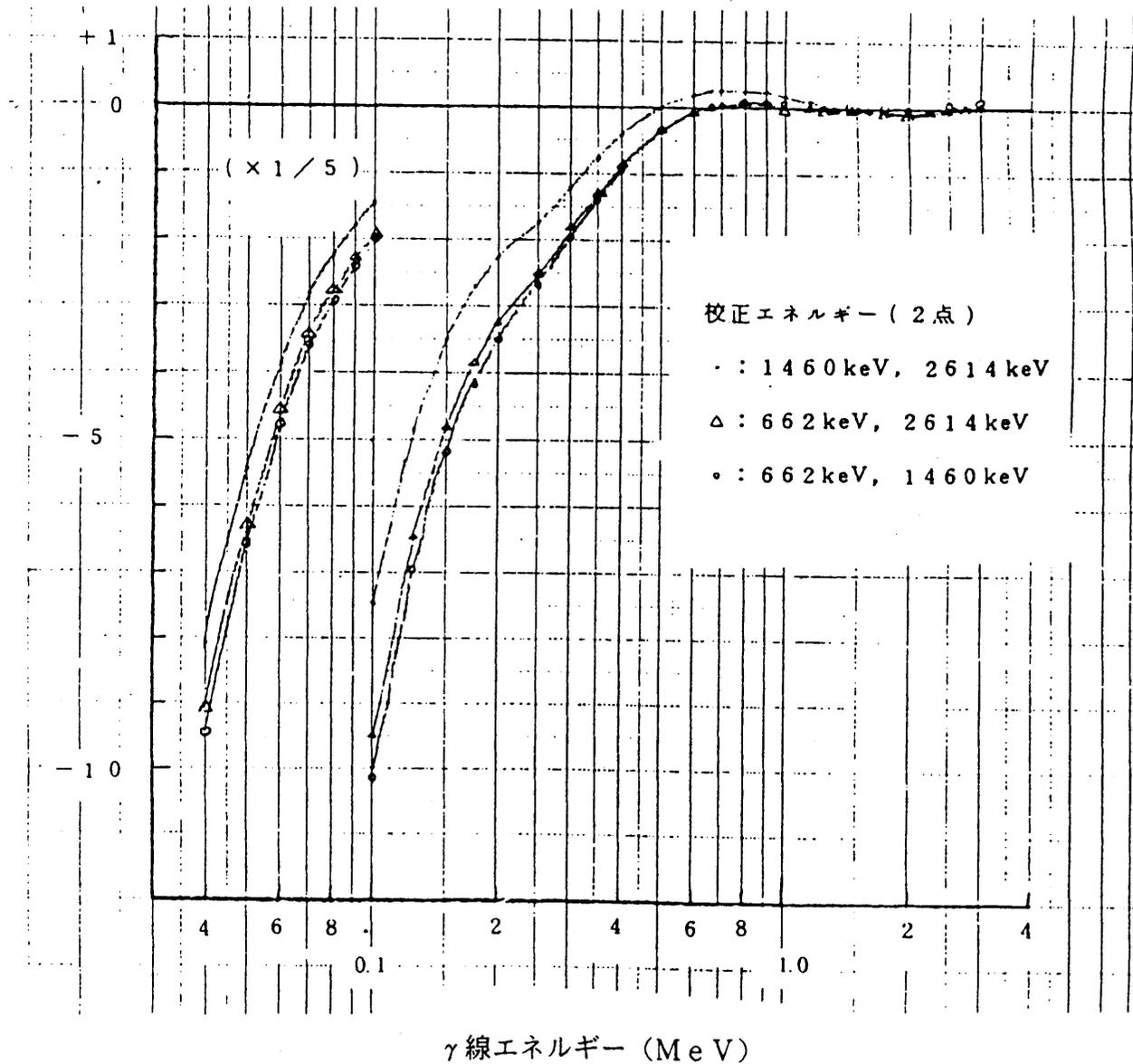
ここで、CH<sub>0</sub> : 入力信号“0”に対応するチャンネル(bin)番号、γ線エネルギーが2点以上におよぶ場合は最小二乗法により傾斜を決定する。

なお、計算に使用した Heathの実験による発光効率に関する資料<sup>1)</sup>を解第5.3図に挙げた。

#### 参考資料

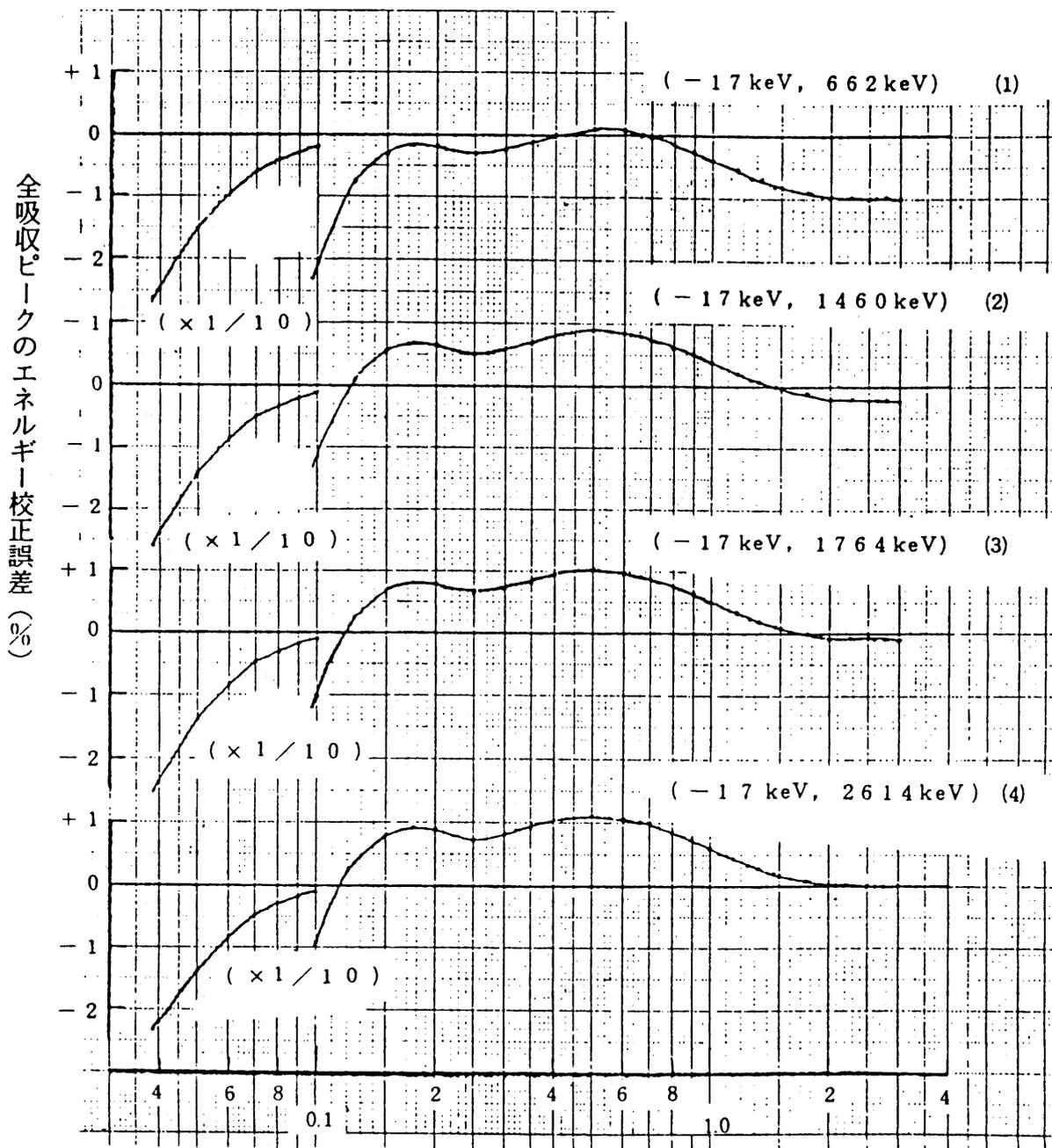
- 1) R. L. Heath ; I D O-16880-1 (1964)

全吸収ピークのエネルギー校正誤差 (%)

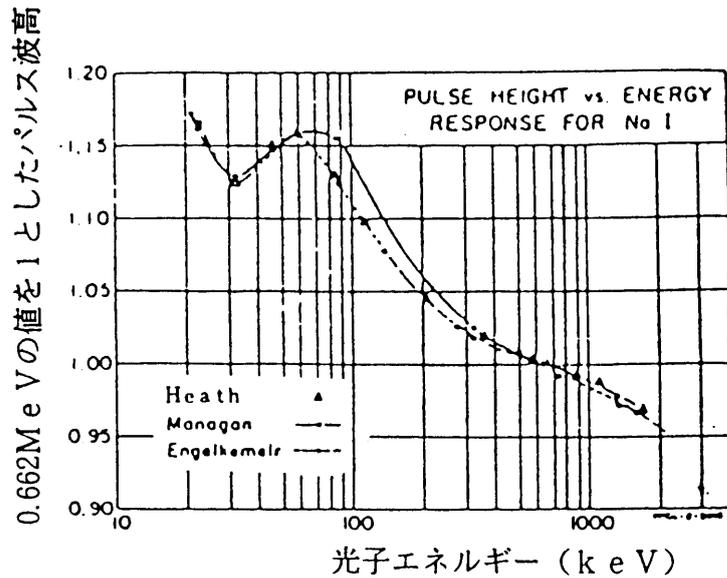


解第5.1図 2点エネルギー校正における校正誤差

校正エネルギー (1点)



解第5.2図 1測定点および-17keV点を用いた  
エネルギー校正における校正誤差



解第5.3図 3 in × 3 in φ / NaI (Tl) シンチレーション検出器のパルス波高 / γ線エネルギー比(0.662MeVの値を基準にした)

### 5.3 NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータのレスポンス関数の作成

NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータによるエネルギースペクトル測定の場合、レスポンス関数を決定しなければならない。このレスポンス関数は、単一エネルギーのγ線を放射する放射能標準線源によって求めることができる。放射能が確定されていることから検出器へ入射するγ線の粒子束密度が求められる。レスポンス関数の求め方については第2章を参照されたい。

解第5.1表にレスポンス関数の作成に用いられる核種とγ線エネルギーを示す。

解第5.1表 レスポンス関数の作成に使える核種と $\gamma$ 線エネルギー  
(○はよく使われる核種)

核種	エネルギー (MeV)	核種	エネルギー (MeV)
○ $^{241}\text{Am}$	0.060	○ $^{85}\text{Sr}$	0.513
$^{129\text{m}}\text{Te}$	0.109	$^{91\text{m}}\text{Y}$	0.555
○ $^{57}\text{Co}$	0.122	○ $^{137}\text{Cs}$	0.662
$^{47}\text{Sc}$	0.155	$^{95}\text{Nb}$	0.764
$^{139}\text{Ce}$	0.166	○ $^{54}\text{Mn}$	0.835
$^{97}\text{Ru}$	0.213	$^{92}\text{Nb}$	0.930
$^{135}\text{Xe}$	0.250	$^{86}\text{Rb}$	1.080
○ $^{203}\text{Hg}$	0.279	○ $^{65}\text{Zn}$	1.114
○ $^{51}\text{Cr}$	0.320	$^{41}\text{Ar}$	1.290
$^{115\text{m}}\text{In}$	0.335	$^{42}\text{K}$	1.510
$^{195}\text{Au}$	0.411	$^{26}\text{Al}$	1.780
$^7\text{Be}$	0.478	$^{24}\text{Na}$	1.369, 2.754

#### 5.4 線量率基準 $\gamma$ 線源

一定線量率の $\gamma$ 線を検出器に照射し、スペクトルから求めた線量率と比較することによって、スペクトロメータの信頼度を確認することができる。

線源から一定の距離における照射線量率が値付けされた $\gamma$ 線源を線量率基準 $\gamma$ 線源という。照射線量に対しては国家標準が設定されており、線量率基準 $\gamma$ 線源については国家標準とのトレーサビリティが明確である。線量率は周囲からの散乱寄与を除いた線源からの直接 $\gamma$ 線に対して値付けされている。

解第5.2表に、現在入手可能な線量率基準 $\gamma$ 線源を示す。

線量率は直接の $\gamma$ 線に対して値付けられており、使用のとき周囲からの散乱 $\gamma$ 線の寄与を考慮することが必要である。線量率は1mの点について値付けされているが、1m以外の点については距離逆二乗法則と空気中での減衰、周囲からの散乱寄与を考慮して求めることができる。解第4.1図に地表で使用した場合の散乱線寄与の1例を示す。

解第5.2表 線量率基準 $\gamma$ 線源に用いられる核種の特性

核種	半減期	崩壊形式	主な $\gamma$ 線エネルギー-(keV)と放出率(%)	実効エネルギー
$^{57}\text{Co}$	271.65日	E C	122.06 (85.6) 136.47 (11.1)	120keV
$^{60}\text{Co}$	5.272年	$\beta^-$	1173.21 (100) 1332.47 (100)	1250keV
$^{133}\text{Ba}$	10.66年	E C	79.63 (2.8) 302.85 (18.2) 81.00 (34.3) 356.01 (62.1) 276.60 (7.1) 383.85 (9.0)	300keV
$^{137}\text{Cs}$	30.17年	$\beta^-$	661.65 (85.0) $^{137\text{m}}\text{Ba}$ $\gamma$ 線	660keV
$^{226}\text{Ra}$	1599年	$\alpha$	186.18 (4.4) 934.06 (3.27) 241.92 (9.2) 1120.29 (15.9) 295.22 (21.8) 1238.11 (6.3) 351.99 (41.0) 1377.67 (4.2) 609.31 (48.1) 1729.60 (9.07) 768.36 (5.1) 1764.50 (16.6) 2204.21 (5.4)	830keV
$^{241}\text{Am}$	432.0 <sub>2</sub> 年	$\alpha$	59.54 (35.8)	60keV

(参考文献)

C. M. Lederer and V. S. Shirley (ed.): Table of Isotopes 7th ed. J. Wiley & Sons Inc. New York.

$^{226}\text{Ra}$ の実効エネルギーについては、ANSI N323-1978.

線量率基準 $\gamma$ 線源は密封線源で、線量率値付けの精度は核種および放射能によって異なるが、10~15%とされている。

## 5.5 ゲルマニウム半導体スペクトロメータの校正と基準線源

### 5.5.1 エネルギー校正

ゲルマニウム半導体検出器のパルス波高のエネルギー校正は、エネルギー校正用または放射能標準線源を用い、通常2種類以上の $\gamma$ 線を利用し、全吸収ピークに対応するチャンネル番号と $\gamma$ 線エネルギーとの直線関係を用いて行われる。この直線関係が良好なことは、Ge結晶内での電子-正孔対生成エネルギーが、 $\gamma$ 線により発生する二次電子の運動エネルギーに依存せず一定であるためで、全吸収ピーク位置(小数点を含むチャンネル番号)を正確に決定すると、0.1%程度の精度でエネルギー校正を行うことが可能である。

$\gamma$ 線エネルギーをE、これに対応する全吸収ピーク位置を $N_E$ とおくと、増幅器ゲイン、波形整形時間等AD変換されるまでの条件を一定に設定した場合、 $\alpha$ 、 $\beta$ を定数として次式が成立する。

$$E = \alpha + \beta N_E \dots\dots\dots (解5-1)$$

エネルギー校正を行うということは、(解5-1)式の $\alpha$ 、 $\beta$ の値を求めることにはかならない。二種類の $\gamma$ 線エネルギー $E_1$ 、 $E_2$ を用いたエネルギー校正では、これらに対応する全吸収ピーク位置を $N_1$ 、 $N_2$ とおくと、 $\beta = (E_2 - E_1) / (N_2 - N_1)$ 、 $\alpha = E_1 - \beta N_1$  ( $i = 1$ または $2$ )により求められる。通常は数点の $\gamma$ 線エネルギーを用い、直線回帰でフィットさせ、 $\alpha$ 、 $\beta$ の係数を求める。高精度で校正を行うには、全吸収ピーク位置を正確に求めることが不可欠で、ピーク位置近辺のバックグラウンド計数を補正したピーク波形から、その中心位置を決定する<sup>1)</sup>。なお、エネルギー校正用線源の放出 $\gamma$ 線エネルギーは5桁以上、正確に求められている。

### 5.5.2 検出効率の校正

$\gamma$ 線エネルギーの全吸収ピークの検出効率(ピーク効率)は、個々の検出器の形状によって異なり、また線源と検出器との間の距離、 $\gamma$ 線のビームの大きさ、および入射方向に依存する。一般には、検出器の $\gamma$ 線入射窓方向25cmの位置に点線源を設定し、ゲルマニウム結晶全体を照射する条件で試験される。しかし、環境 $\gamma$ 線の計測では線源と検出器との距離が離れているので、放射能標準線源と検出器との距離は0.5~1m程度として校正することが望ましい。

エネルギーEの $\gamma$ 線のピーク検出 $\epsilon_E$ は次式で定義されている。

$$\epsilon_E = \frac{A_E}{n_E} \dots\dots\dots (解5-2)$$

ただし、 $n_E$ は有効計数時間(ライブタイム)内に検出器に入射するエネルギーEの $\gamma$ 線の総数。

$A_E$ は $\gamma$ 線の総数 $n_E$ に対応する全吸収ピークの計数でバックグラウンド計数の補正を行った値(ピーク面積)。

$\gamma$ 線の総数 $n_E$ は、Ge結晶の有効面積を $S_{eff}$ 、有効計数時間を $t_{eff}$ とおくと、

$$n_E = \phi_E \cdot t_{eff} \cdot S_{eff} \dots\dots\dots (解5-3)$$

である。ただし、 $S_{eff}$  は結晶の有効体積を  $V_{eff}$ 、有効厚さを  $T_{eff}$  とおいて、

$$S_{eff} = V_{eff} / T_{eff} \text{ で表わされる。}$$

$\phi_E$  は放射能標準線源の値付けされた放射能を  $\theta_0$  [Bq]、エネルギー  $E$  の  $\gamma$  線の放出割合を  $\eta_E$  とおいて、

$$\phi_E = \theta_0 \cdot \eta_E \cdot \frac{1}{4\pi L^2} \cdot f_\gamma \cdot f_{at} \dots\dots \text{(解5-4)}$$

で与えられる。ここに  $L$  は線源と検出器との距離、 $f_\gamma$  は半減期による放射能の補正係数、 $f_{at}$  は線源カプセル等による  $\gamma$  線の減衰補正係数である。

検出効率  $\varepsilon_E$  と  $\gamma$  線エネルギー  $E$  との関係は効率曲線と呼ばれ、種々の実験式が用いられている。<sup>2)・3)</sup> これらの実験式の一例を示す。

$$\varepsilon_E = k [1 - \exp(-\tau_E \cdot T_{eff}) + \alpha \sigma_E \cdot \exp(-\beta \cdot E)] \dots\dots \text{(解5-5)}$$

ここで、 $T_{eff}$  は結晶の有効厚さ、 $\tau_E$ 、 $\sigma_E$  はそれぞれ  $Ge$  の光電吸収およびコンプトン吸収の減衰係数を示し、 $k$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  の各定数は実験と適合するよう定める。

### 5.5.3 エネルギー校正線源および放射能標準

$Ge$  半導体検出器のエネルギーおよび検出効率の校正に使用される、エネルギー校正線源および放射能標準線源が、(社)日本アイソトープ協会から供給されている。

放射能標準線源は、アクリルまたはジュラルミンカプセルを用い、 $\gamma$  線出射窓は光子減衰補正の誤差を小さくするため、軟  $\gamma$  線用では一般  $0.1 \text{ mm Be}$ 、その他の  $\gamma$  線用では  $0.1 \text{ mm Al}$  が用いられ、放射能は  $4 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6 \text{ Bq}$  の範囲である。

放射能の値付けの精度は  $\pm 5\%$  ( $3\sigma$  レベル) 以内、一般には  $3 \sim 4\%$  の精度である。

この他、 $\gamma$  線エネルギーのチェック用または、サーベイメータ等のチェック用として、取扱いが容易で丈夫な密封線源も利用されている。

(社)日本アイソトープ協会から供給されている放射能標準線源の核種一覧を解第5.3表に示す。

環境レベルの照射線量率計の校正用としては、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  および  $^{60}\text{Co}$  の6核種が線量率基準(標準)  $\gamma$  線源があり、精度  $5 \sim 15\%$  程度(放射能、核種で異なる)で、散乱線を含まない直接線のみによる、

線源から1 mの距離における照射線量率が値付けされている。なお、データブック等に与えられている照射線量率定数等は目安を与える数値で、カプセルの材質、厚さ、カプセル材からの散乱線等によって影響を受けるので、使用するさいには注意を要する。

(参考文献)

1) JIS Z 4520 (1979)

「ゲルマニウム・ガンマ線検出器の試験方法」

2) T. Paradellis and S. Hontzeas, Nucl. Instr. and Meth. 7 3, 211(1966)

「A Semi-empirical Efficiency Equation for Ge(Li) Detectors」

3) 放射線データブック、p. 363、地人書館(昭和57年)



## 解説6 環境放射能レベル推定に使われる式

環境に分布する放射性核種から放出される光子は直接線（1次線、単一エネルギーをもつ）と散乱線（連続スペクトルをもつ）に分けられる。Ge(Li)または高純度Ge半導体検出器を用い、直接線についてそのエネルギーを確定し、核種を同定することができる。一方、環境中での放射性核種の分布を仮定すれば、着目する点を単位時間に通過する（着目するエネルギーの）直接線の線束密度を算定することができる。したがってGe(Li)または高純度Ge半導体検出器を使用して環境で計測した波高スペクトル中の着目エネルギー( $E_j$ )のピークについて、検出器の検出効率、方向特性などを補正して、線束密度 $N_{p,j}$  ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )を求めれば、これは環境中の放射性核種の濃度 $C_o$  ( $\text{Bq}/\text{cm}^3$ など)に対応した量となっている。

以下に、環境中の放射性核種の濃度分布を①無限体積中に一様分布、②無限平面上に一様分布、③半無限体積中に指数分布、および④半無限体積中に一様分布、とした代表的な場合について、環境中の放射性核種濃度 $C_o$ と環境中の着目する点P（②、③および④では地表面上 $h$  (cm)）での直接線の線束密度 $N_{p,j}$ を対応付ける関係式を示す。

使用する記号

$C_o$  : 環境中に分布する放射性核種の濃度（①および④では $\text{Bq}/\text{cm}^3$ 又は $\text{Bq}/\text{g}$ 、  
②および③では $\text{Bq}/\text{cm}^2$ ）

$n_j$  : 放射性核種1壊変あたり放出されるエネルギー $E_j$ の光子の数 (photons/dis)

$\mu_j$  : エネルギー $E_j$ の光子に対する媒質の全減衰係数( $\text{cm}^{-1}$ )

$\mu_{s,j}$  : エネルギー $E_j$ の光子に対する土壌の全減衰係数( $\text{cm}^{-1}$ )

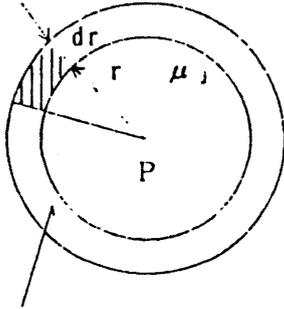
$\mu_{a,j}$  : エネルギー $E_j$ の光子に対する空気的全減衰係数( $\text{cm}^{-1}$ )

$h$  : 地表面から着目する点までの高さ (cm)

なお、その他使用する記号はそれぞれの場合の付図にて示す。

### 6.1 無限体積中の一様分布

解第6.1図のような配置でP点における直接線の線束密度は次式のように表現できる。



$$N_{p,j} = \int_0^{\infty} \frac{1}{4\pi r^2} \cdot C_0 \cdot n_j \exp(-\mu_j r) dV$$

$$= C_0 \cdot n_j \int_0^{\infty} \exp(-\mu_j r) dr$$

$$dV = 4\pi r^2 dr$$

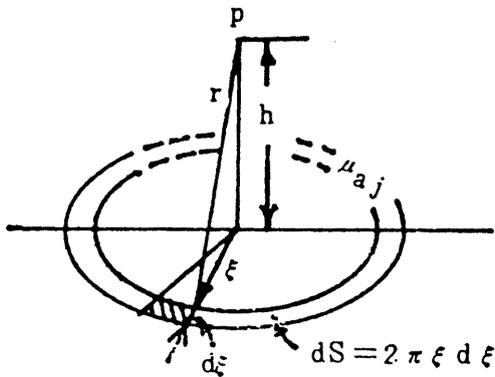
解第6.1図 無限体積中に一様分布

これを積分して

$$N_{p,j} = \frac{n_j}{\mu_j} \cdot C_0 \cdot (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \dots\dots\dots(\text{解6-1})$$

### 6.2 無限平面上一様分布

解題6.2図のような配置で空気中のP点における直接線の線束密度は次式のように表現できる。



$$N_{p,j} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2\pi r^2} \cdot C_0 \cdot n_j \exp(-\mu_{a,j} r) ds$$

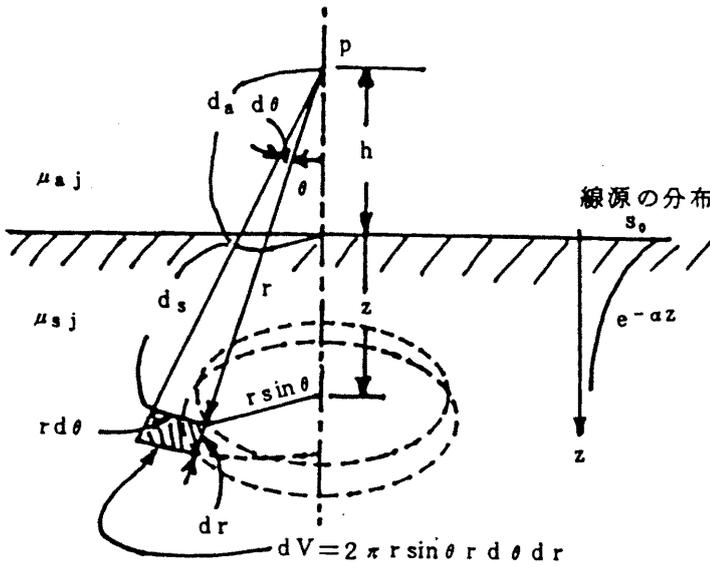
$$= \frac{C_0 \cdot n_j}{2} \int_{\mu_{a,j} h}^{\infty} \frac{\exp(-\mu_{a,j} r)}{r} dr$$

解第6.2図 無限平面上に一様分布

これを積分して

$$N_{p,j} = \frac{n_0}{2} \cdot E_1(\mu_{a,j} h) \cdot C_0 \cdot (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \dots\dots(\text{解6-2})$$

### 6.3 半無限体積中に指数分布



解第6.3図のような配置を考え、線源の分布を

$S(z) = S_0 \exp(-\alpha z)$  とする。 $S_0$  は地表面のごく近傍での単位体積中の放射性核種の濃度である。

$\alpha$  は深度分布の様子を示す定数である（一様分布のとき  $\alpha = 0$ 、表面分布のとき  $\alpha = \infty$  となる）。

解第6.3図 半無限体積中に指数分布

P点でのエネルギー  $E_j$  の光子の線束密度は次式のように表現できる。

$$N_{p,j} = \int_0^{\pi/2} \int_h^{\infty} \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp(-\alpha z) \exp(-\mu_{s,j} \sec \theta - \mu_{a,j} h \sec \theta) dv \dots\dots\dots (解6-3)$$

$$= \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} \exp\{-(\alpha + \mu_{s,j} \sec \theta)z\} \exp(-\mu_{a,j} h \sec \theta) \tan \theta dz d\theta$$

$$= \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\alpha + \mu_{s,j} \sec \theta} \exp(-\mu_{a,j} h \sec \theta) \tan \theta d\theta$$

ここで  $y = \mu_{a,j} h \sec \theta$  とおいて上式を変形すると

$$N_{p,j} = -\frac{S_0}{2} \int_{\mu_{a,j} h}^{\infty} \frac{1}{\alpha + \frac{\mu_{s,j} y}{\mu_{a,j} h}} \cdot \frac{e^{-y}}{y} dy$$

簡単のため  $q = \mu_{s,j} / \mu_{a,j} h$ 、 $x = \mu_{a,j} h$  とおくと

$$N_{p,j} = -\frac{S_0}{2\alpha} \int_x^{\infty} \left\{ \frac{1}{y} - \frac{1}{\alpha/q + y} \right\} e^{-y} dy$$

$$N_{p,j} = -\frac{S_0}{2\alpha} \left\{ E_1(\mu_{a,j} h) + \exp(\alpha \mu_{a,j} h / \mu_{s,j}) \cdot E_1\left[-\mu_{a,j} h \left(1 + \frac{\alpha}{\mu_{s,j}}\right)\right] \right\}$$

$$N_{p,j} = \frac{n_j}{2\alpha} \left\{ \exp(\alpha \mu_{a,j} h / \mu_{s,j}) \cdot E_1\left[\mu_{a,j} h \left(1 + \frac{\alpha}{\mu_{s,j}}\right)\right] - E_1(\mu_{a,j} h) \right\} C_0$$

..... (解6-4)

#### 6.4 半無限体積中に一様分布

この場合には、(解6-3)式で $\alpha = 0$ とおき、計算を進めればよい。

$$N_{p,j} = \int_0^{\pi/2} \int_{h \sec \theta}^{\infty} \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp(-\mu_{s,j} z \sec \theta) \exp(-\mu_{a,j} h \sec \theta) dv$$

$$N_{p,j} = \frac{n_j}{2\mu_{s,j}} \cdot \{\mu_{a,j} h E_1(-\mu_{a,j} h) + \exp(-\mu_{a,j} h)\} C_0 \dots \dots (解6-5)$$

$h$ が小さい時には空気による減衰の項は無視できる。このとき式(解6-5)は

$$N_{p,j} = \frac{n_j}{2\mu_{s,j} h} C_0$$

となり、無限体積中一様分布の式(解6-1)の $1/2$ となっている。

## 解説7 環境γ線の現地測定におけるデータの処理法

### 7.1 HASL法

ここで述べるデータの処理方法はH. Beckらが開発したHASL方式によるものである。まず土壌中の放射性核種の濃度(S)は次式により求めることができる。

$$\frac{N_r}{S} = \frac{N_0}{\phi} \cdot \frac{N_r}{N_0} \cdot \frac{\phi}{S} \dots\dots\dots (\text{解7-1})$$

ここで

$N_r / S$  : 単位体積の土壌中の単位γ線放出率あたりのピーク計数率 (cps)

$N_0 / \phi$  : 点線源を検出器直下 ( $\theta = 0^\circ$ ) に距離 h 離しておいた時の単位γ線線束密度当りのピーク計数率

$N_r / N_0$  : 検出器のピーク効率の角度依存性  $R(\theta)$  と検出器位置での直接γ線束の角度分布から、次式により計算する。

$$\frac{N_r}{N_0} = \frac{1}{\phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) \cdot \frac{d\phi}{d\theta} d\theta \dots\dots (\text{解7-2})$$

$\phi / S$  : 単位体積土壌中の単位γ線放出率あたりの、検出器に入射する直接γ線の線束密度

である。次に、解第7.1図に示したように土壌中のγ線源の分布を

$$S = S_0 \cdot \exp(-\alpha z) \dots\dots\dots (\text{解7-3})$$

と仮定すれば、地表からの高さ h における直接γ線の線束密度  $\phi$  は

$$\begin{aligned} \phi &= \iiint \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp[-(\alpha/\rho)(\rho z)] \exp(-\mu_s z/\cos\theta) \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \\ &\quad \times 2\pi r \sin\theta r dr d\theta \\ \phi &= \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \exp[-\{(\alpha/\rho)\rho + (\mu_s \cdot h/\cos\theta)\}z] \\ &\quad \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \sin\theta dr d\theta \dots\dots\dots (\text{解7-4}) \end{aligned}$$

となる。または  $d\phi / d\theta$  は

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{S_0}{2\rho} \frac{\sin\theta}{(\alpha/\rho)\cos\theta + (\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \dots (\text{解7-5})$$

により計算される。ここで $S_0$ は地表面における単位体積あたりの土壌から単位時間あたりの光子放出数、 $\alpha$ は土壌中の $\gamma$ 線源の分布状態を示す減衰係数( $\text{cm}^{-1}$ )である。 $\mu_s$ 、 $\mu_a$ は土壌中および空気中の $\gamma$ 線減衰係数、また $\rho$ は土壌の湿潤みかけ密度である。ここで計算に使用するそれぞれの係数の値を解第7.1表、解第7.2表に示す。

自然放射性核種の $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ とそれぞれの娘核種および $^{40}\text{K}$ のようなものは深さ方向に一様分布であるとすれば、 $\alpha=0$ となり、式(解7-4)、(解7-5)はそれぞれ

$$\phi = \frac{S_0/\rho}{2(\mu_s/\rho)} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\mu_a h}{\cos\theta}\right) \sin\theta d\theta \dots (\text{解7-6})$$

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{(S_0/\rho)\sin\theta}{2(\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \dots (\text{解7-7})$$

となる。また降下直後のフォールアウト核種のように地表面のみに核種が平面分布する場合は、 $\alpha \rightarrow \infty$ となり、式(解7-4)、(解7-5)はそれぞれ

$$\begin{aligned} \phi &= (S_0/\rho) / [2\mu_s/\rho] \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \sin\theta d\theta \\ &= (S_A/2) E_1(\mu_a h) \dots (\text{解7-8}) \end{aligned}$$

$$\frac{d\phi}{d\theta} = (S_A/2) \tan\theta \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \dots (\text{解7-9})$$

となる。ここで $S_A$ は地表単位面積あたりに降下したフォールアウト核種からの単位時間あたりの $\gamma$ 線放出数である。 $E_1$ は指数積分関数である。

同様に、空間照射線量率( $I$ )は

$$\frac{N_r}{\dot{X}} = \frac{N_0}{\phi} \cdot \frac{N_r}{N_0} \cdot \frac{\phi}{\dot{X}} \dots (\text{解7-10})$$

を用いて計算することができる。ここで

$\phi/\dot{X}$ : 土壌中の核種の放出するあるエネルギーの $\gamma$ 線の、検出器位置における直接 $\gamma$ 線線束密度を、その核種の放出する全 $\gamma$ 線が検出器位置において与える線量率で割った値

である。線量率を評価する場合には直接線のみならず、散乱線の寄与も考慮する必要がある。この散乱線の寄与を計算するには、モンテカルロ法、輸送方程式などがある。ここでは後者の方法により計算した結果を解第7.3表に示す。また H. Beckらが計算した地上1 mでの直接 $\gamma$ 線束密度の値を解第7.4表に示す。

なお、主要核種の $\phi/S$ 、 $\phi/\dot{X}$ についての計算結果を本文5.1表に示してある。

解第7.1表 土壌および空気の減衰係数

$\gamma$ 線エネルギー (keV)	土壌の質量減衰係数 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	空気の線減衰係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )
20	2.78	0.000823
25	1.52	
30	0.938	0.000380
35	0.644	
40	0.471	0.000271
45	0.381	
50	0.314	0.000233
55	0.277	
60	0.248	0.000213
65	0.230	
70	0.214	
75	0.202	
80	0.190	0.000194
85	0.185	
90	0.178	
95	0.173	
100	0.167	0.000182
150	0.139	0.000162
200	0.125	0.000148
250	0.115	
300	0.108	0.000123
350	0.101	
400	0.0963	0.000115
450	0.0919	
500	0.0875	0.000105
550	0.0844	
600	0.0813	0.0000970
650	0.0788	
700	0.0756	
750	0.0731	
800	0.0713	0.0000851
850	0.0694	
900	0.0675	
950	0.0650	
1000	0.0638	0.0000765
1500	0.0521	0.0000623
2000	0.0449	0.0000535
2500	0.0401	
3000	0.0364	0.0000431
4000		0.0000371
5000		0.0000330
6000		0.00003025
8000		0.0000268
10000		0.0000245

(H A S L -258 (1972) より引用)

解第7.2表 土壌の構成成分

成分	構成
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.5 重量%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.5 "
SiO <sub>2</sub>	67.5 "
CO <sub>2</sub>	4.5 "
H <sub>2</sub> O	10 "
ρ (密度)	1.6 g/cm <sup>3</sup>

解第7.3表 土壌中の単位γ線放出率 ( $\gamma$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、 $\alpha/\rho=0$ の場合は  $\gamma$  g<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) あたりの地上1m高における照射線量率 ( $\mu$  R h<sup>-1</sup>)

線源の 光子エネルギー (keV)	$\alpha/\rho - \text{cm}^3/\text{g}$						
	0 (Uniform)	0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	$\infty$ (Plane)
50	0.88	-	-	-	-	-	-
100	2.05	~0.095	0.185	0.215	0.270	0.400	0.438
150	3.39	0.140	0.285	0.335	0.418	0.620	0.700
200	4.88	0.200	0.390	0.460	0.570	0.845	0.960
250	6.37	0.258	0.491	0.583	0.731	1.08	1.25
364	10.2	0.404	0.771	0.896	1.11	1.63	1.91
500	14.4	0.558	1.03	1.23	1.52	2.27	2.60
662	19.6	0.738	1.37	1.60	1.97	2.95	3.39
750	22.6	0.837	1.54	1.80	2.21	3.32	3.80
1000	30.4	1.10	2.00	2.32	2.85	4.20	4.86
1173	36.2	1.28	2.31	2.63	3.27	4.87	5.52
1250	38.4	1.33	2.41	2.79	3.42	5.14	5.86
1333	41.8	1.42	2.56	2.95	3.62	5.35	6.16
1460	45.1	1.54	2.75	3.18	3.88	5.73	6.56
1765	54.6	1.78	3.25	3.75	4.40	6.45	7.78
2004	62.2	2.07	3.60	4.13	5.00	7.15	8.20
2250	69.5	-	-	-	-	-	-
2500	77.2	-	-	-	-	-	-
2750	85.0	-	-	-	-	-	-

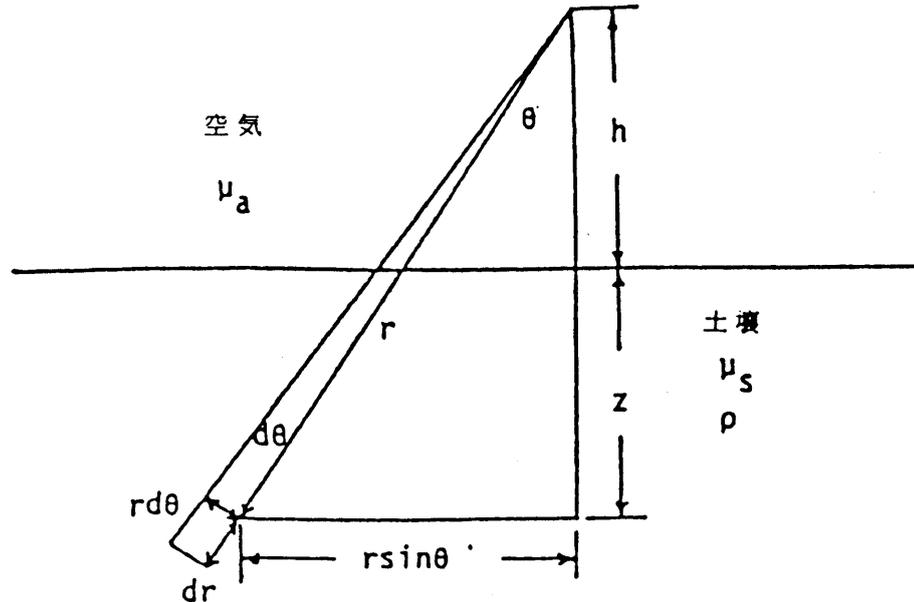
地表面1cm<sup>2</sup>、深さ無限大の柱状部分で光子が毎秒1個放出される場合の、地上高1mにおける照射線量率 ( $\mu$  R h<sup>-1</sup>)。線源の深さ方向の分布を  $\exp(-\alpha z)$  で表す。ただし、 $\alpha/\rho=0$  ( $\rho$ は土壌の密度)の場合については、土壌のグラム当たり、光子が毎秒1個放出されるとき照射線量率の値を示す。

(HASL-258より引用)

解第7.4表 土壤中の単位 $\gamma$ 線放出率 ( $\gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $\alpha/\rho=0$ の場合は  
 $\gamma \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) あたり地上1m高における直接 $\gamma$ 線の線束密度 ( $\gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

線源の 光子エネルギー (keV)	$(\alpha/\rho) \text{ - cm}^2/\text{g}$						
	0 (Uniform)	0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	- (Plane)
50	1.4403	0.0816	0.2245	0.3049	0.4748	1.147	1.577
100	2.7744	0.1458	0.3627	0.4708	0.6786	1.359	1.710
150	3.3264	0.1702	0.4103	0.5261	0.7438	1.427	1.775
200	3.7056	0.1843	0.4550	0.5770	0.8018	1.483	1.804
250	4.0640	0.2008	0.4697	0.5910	0.8185	1.506	1.863
364	4.7184	0.2268	0.5158	0.6429	0.8775	1.578	1.933
500	5.3904	0.2519	0.5595	0.6918	0.9334	1.650	1.995
662	6.1456	0.2789	0.6041	0.7412	0.9889	1.719	2.054
750	6.5312	0.2919	0.6257	0.7649	1.015	1.752	2.084
1000	7.5280	0.3245	0.6769	0.8209	1.077	1.830	2.151
1173	8.1472	0.3437	0.7067	0.8531	1.113	1.874	2.189
1250	8.4384	0.3523	0.7190	0.8675	1.129	1.895	2.205
1333	8.7504	0.3617	0.7336	0.8826	1.145	1.914	2.224
1460	9.1472	0.3731	0.7511	0.9011	1.166	1.941	2.247
1765	10.091	0.3997	0.7897	0.9428	1.211	1.997	2.294
2004	10.818	0.4188	0.8173	0.9725	1.243	2.036	2.334
2250	11.397	0.4357	0.8414	0.9982	1.271	2.071	2.358
2500	12.173	0.4536	0.8667	1.025	1.300	2.105	2.385

(HASL-258より引用)



解第7.1図 土壌中に分布する $\gamma$ 線放出核種の地上1 m高での直接 $\gamma$ 線束密度( $\phi$ )とその角度分布( $d\phi/d\theta$ )

## 7.2 ストリッピング法

照射線量率を得る目的で、ゲルマニウム半導体検出器によるパルス波高分布の解析にストリッピング法を適用した例を紹介する<sup>1)</sup>。この方法はNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータにおけるストリッピング法と同等の内容であるが、Ge半導体検出器は分解能が優れているので、これに見合ったコンプトン分布の差し引きを採用している点が異なっている。

ゲルマニウム半導体検出器で計測されたパルス波高分布は、入射 $\gamma$ 線のエネルギーを完全に吸収した分布、一部のみを吸収した分布、および宇宙線の荷電粒子の通過により生ずる分布から成り立っている。パルス波高分布から照射線量率を求めるには、後の2つの分布を差し引き、 $\gamma$ 線の全エネルギー吸収のみから成る分布を求める必要がある。全エネルギー吸収から成る分布が求めれば、対応する区間の計数をそれぞれ検出器のピーク効率で割って入射エネルギースペクトルを得ることができる。

### 7.2.1 宇宙線による分布

宇宙線による分布はパルス波高分布の3~4 MeVの間の計数率を平均し、この計数率が低エネルギー域まで均一に分布していると仮定して差し引くことができる。この領域による計数率は大変少ないので宇宙線線量についてはかなりの誤差をも

つ、またこの領域に $\gamma$ 線が存在することがあることも考慮しておくことが必要である。

### 7.2.2 入射 $\gamma$ 線の部分的エネルギー吸収による分布

ゲルマニウム半導体検出器内で入射 $\gamma$ 線のエネルギーの一部が吸収されて生ずる分布で、コンプトン効果による最大エネルギー端から低エネルギーまで連続的に分布する。コンプトン端のエネルギー $E_c$  (MeV) は入射 $\gamma$ 線のエネルギーを $E_p$  (MeV) とすれば、次式で表現できる。

$$E_c = E_p - E_p \left/ \left\{ 1 + \frac{2 E_p}{0.511} \right\} \right.$$

ゲルマニウム半導体検出器によるパルス波高分布には、解第7.3図の実線で示したように、 $E_c$ 以下の非直線分布のほかに、 $E_c$ と $E_p$ の間にもかなりの計数の分布が認められる。これは検出器内で生ずる多重散乱によるものである。

部分的エネルギー吸収による分布を差し引くため、解第7.3図の点線で示したようにコンプトン端 $E_c$ 以下の分布を等間隔で10区間に、 $E_p$ と $E_c$ の間を等間隔の4区間に分割する。

この分布の形は、実際は、 $\gamma$ 線のエネルギーと検出器への入射角の関数である。照射線量率へ大きな寄与をするより高いエネルギー域で、エネルギーと入射角によってパルス波高分布の形が大きく変化することのない形状の検出器を使用する。解第7.3図で0.185MeV (=  $E_p - E_c$ ) のところに認められるピークは、検出器結晶を取り付けているコールドフィンガーで生じた後方散乱 $\gamma$ 線の全エネルギー吸収によるものである。このピークは $\gamma$ 線が検出器軸に平行に近い角度で入射するときのみ認められるもので、全立体角 $4\pi$ に対して小さい割合を占めるにすぎないので、フィッティングの際には特に考慮する必要はない。

### 7.2.3 ストリッピング操作

宇宙線と入射 $\gamma$ 線の部分的エネルギー吸収に対して仮定した分布を用いて、計測したパルス波高分布にコンピュータで次式のようなストリッピング操作を行う。

$$N_i' = N_i - \sum_{j=i+1}^1 f_{ij}(r_j - 1) N_j' - N_c$$

この式で

- $N_i'$ 、 $N_j'$  : 入射 $\gamma$ 線の全エネルギー吸収による、あるエネルギー区間の計数  
 $N_i$  : 全ての線源による、あるエネルギー区間の計数  
 $L$  : 最大エネルギー $\gamma$ 線(2.615MeV)を含むエネルギー区間  
 $f_{ij}$  : エネルギー区間 $j$ に入射した $\gamma$ 線の部分的エネルギー吸収によるエネルギー区間 $i$ での連続分布中の計数の割合  
 $r_j$  : エネルギー区間 $j$ に入射した $\gamma$ 線の全エネルギー吸収ピーク計数に対する全体の計数の比(すなわち $P/T$ 比の逆数)  
 $N_i$  : あるエネルギー区間 $i$ での、一定と仮定した宇宙線による計数

である。

最適な分解能を得るには1keV/チャンネルとした方がよいが、ストリッピング操作における処理時間を短くするため10keV/チャンネルとする。この変更により結果の精度を悪くすることなく、処理時間を短くできる。

ストリッピング操作は最大エネルギー(2.615MeV)を含む区間から始める。

この操作の概念図を解第7.4図に示した。

$r$ は次式のように求める。

$$r(E) = \varepsilon_i(E) / \varepsilon_p(E)$$

ここで、 $\varepsilon_i(E)$  = エネルギー $E$ の平行入射線束に対する全エネルギー吸収ピーク効率、 $\varepsilon_p(E)$  = エネルギー $E$ の平行入射線束に対する全(ピーク+連続)効率である。両効率は、散乱線の影響を除くためシャドーシールドコーンを用いて、実験的に決定する。

円筒型Ge半導体検出器は全ての入射角にわたって $r(E)$ が一樣な応答を示すことはない。部分的エネルギー吸収による分布の形は入射角によって大きく変化することはないが、 $r(E)$ の入射角依存性を考慮に入れる。 $r(E)$ の角度依存性は入射 $\gamma$ 線のエネルギーによって大きく変化することはないので、照射線量率に影響のあるより高いエネルギーについて補正した値を用いる(解説7.1参照)。

#### 7.2.4 線束密度の計算

ストリッピング操作を施した分布の各エネルギー区間を、それぞれ対応した全エネルギー吸収ピーク効率と計測時間で割って入射線束密度を求める。すなわち、

$$\phi_i = N_i / (\epsilon_{p,i} \cdot T)$$

ここで、 $\phi_i$  = エネルギー区分  $i$  の入射線束密度、 $T$  = パルス波高分布の計測時間である。 $\epsilon_{p,i}$  は全立体角  $4\pi$  にわたって平均した値を用いる。

### 7.2.5 照射線量率の計算

照射線量率を次式によって計算する。

$$\dot{X} = 66.05 \sum_{i=1}^L \phi_i \cdot E_i \cdot (\mu_{en}/\rho)_i$$

ここで

$\dot{X}$  : 照射線量率 ( $\mu R/h$ )、 $E_i$  = 区分の平均エネルギー (MeV)  
 $(\mu_{en}/\rho)_i$  : 区分  $i$  の平均エネルギーの  $\gamma$  線に対する空気の質量エネルギー吸収係数 ( $cm^2/g$ )

66.05 : MeV / (g · s) から  $\mu R/h$  への変換因子である (5.6 参照)。  
 これにさらに  $8.73 \times 10^{-3}$  を乗じれば、空気吸収線量率 ( $\mu Gy/h$ ) が求められる。

なお、低エネルギー領域は電気回路の雑音などの影響を受けるので、実際上的下限は 0.05 MeV とする。

### 7.2.6 使用シンチレータによる吸収線量

補正波高分布が得られると、検出体の質量から検出体の平均吸収線量率が得られる。この値は放射線場が一定であれば一定の数値を示すので、エネルギー校正、シンチレータの質量の差など測定に際してのハード、ソフトに関するチェックとして役立つ。算出は次式による。

$$\sum_{II} N_{XX} \times (CH_{XX} - 0.5) \times 0.6 \times 3.6 \times 10^{-2} \times E_{XX} / W_s$$

ここで  $II$  と  $JJ$  は計算されるエネルギー領域、 $N_{XX}$ 、 $CH_{XX}$  はそれぞれ  $XX$  チャネルの計数率値 (cps)、チャンネル番号 (10 keV/ch) およびエネルギーで  $W_s$  シンチレータの重量である。通常環境においては 3 in の球形 NaI (TI) シンチレータにあっては  $1 \mu R/h$  に対して、約  $0.85 \mu rad/h$  となる。

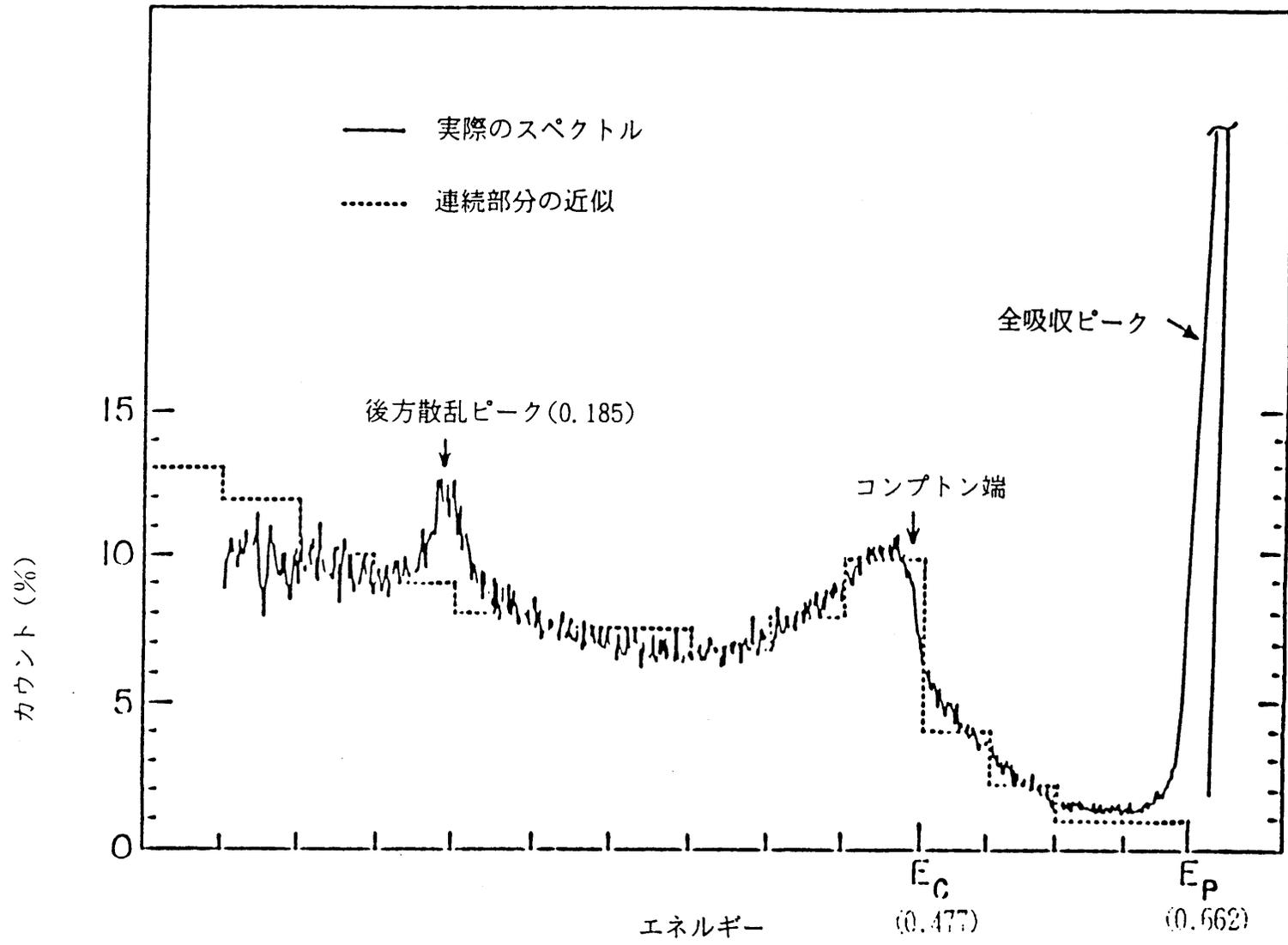
### 7.2.7 結果の例

ストリッピング操作を施した結果の 1 例を解第 7.5 図に示した。実線は元のパル

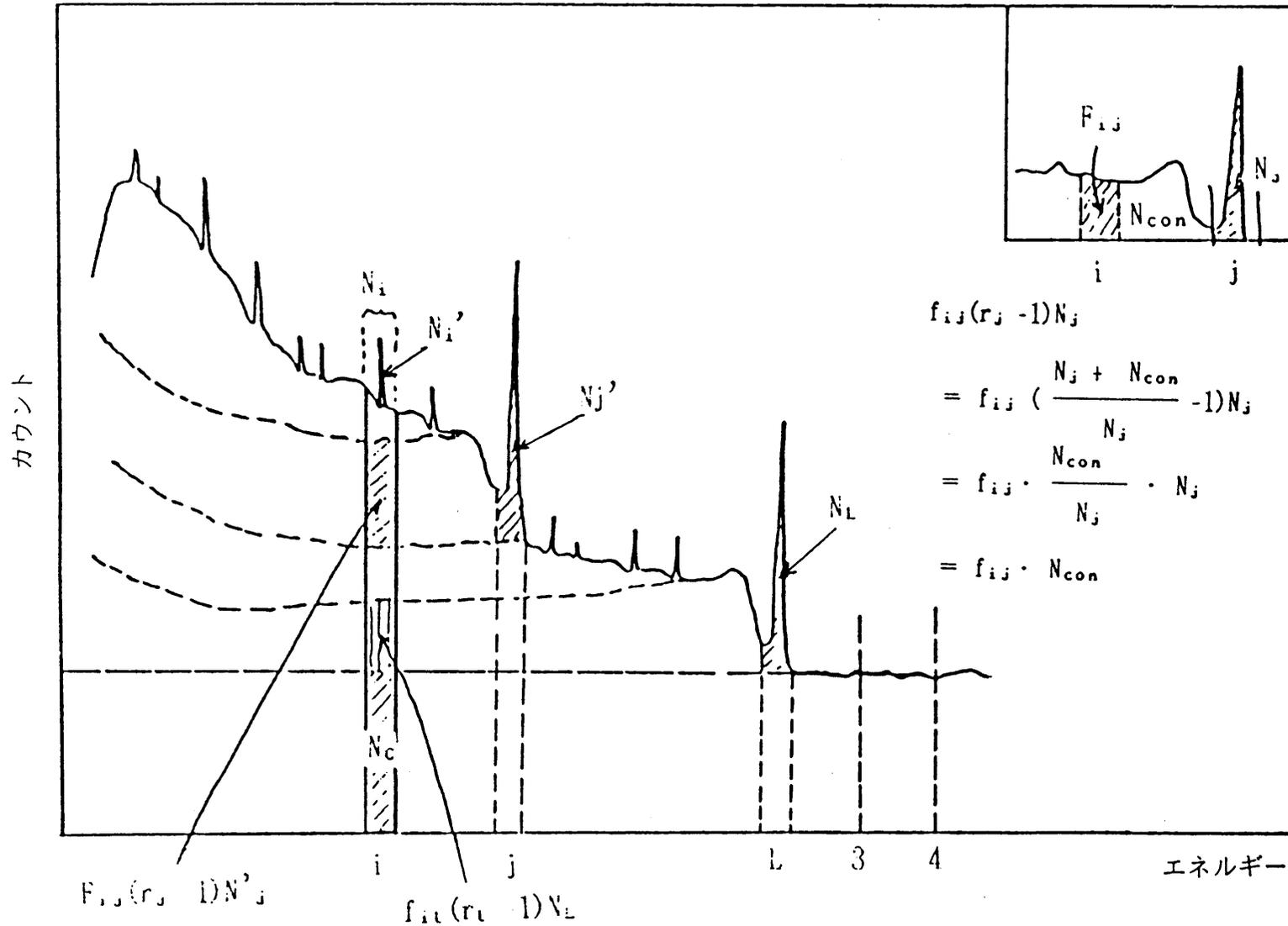
ス波高分布で、点線は操作後の分布である（クローズドエンド同軸型、59mmφ×35mmℓの場合）。約55～65%の計数の減少が認められる。

(参考文献)

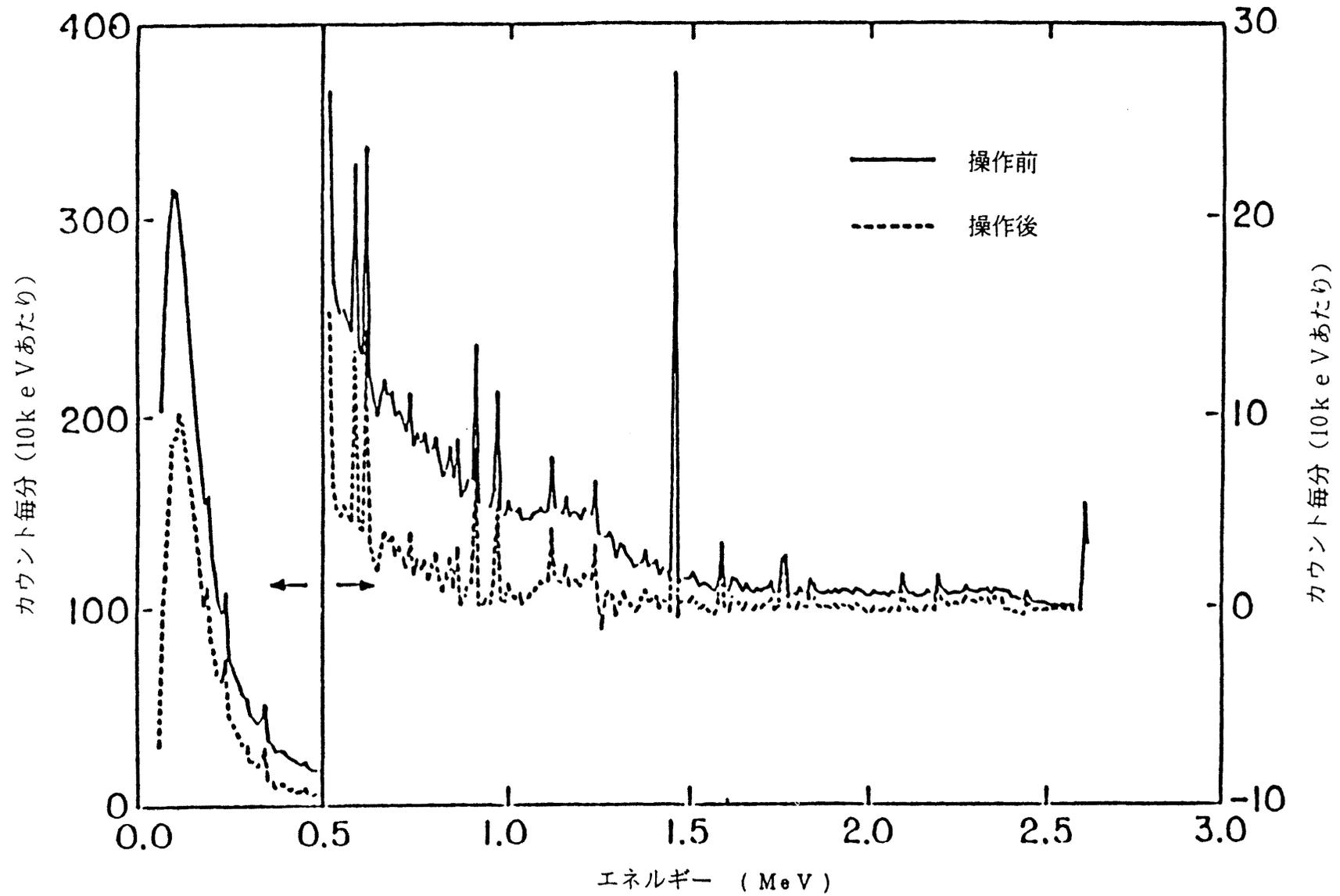
- 1) K. M. Miller; "A Spectral Stripping Method for a Ge Spectrometer used for Indoor Gamma Exposure Rate Measurements", EML419, DOE, July, (1984)  
K. M. Miller & H. L. Beck  
Indoor Gamma-ray and Cosmic-ray Exposure-rate Measurements using a Ge Spectrometer and Pressurized Ionization Chamber  
Radiation Protection Dosimetry 7:185 ~ 189(1984)



解第 7.3 図 0.662 MeV  $\gamma$  線が検出器軸に平行に入射するときのパルス波高分布 (実線) と、ストリッピング操作における多重ステップ関数近似 (点線)



解第7.4図 ストリッピング法の概念図



解第7.5図 ストリッピング操作前 (実線) と後 (直線) の分布

### 7.3 マトリックス法を用いた天然放射性核種別線量寄与の解析<sup>1)</sup>

環境放射線のスペクトルはK-40、U系列、Th系列のスペクトルの合成である、という観点から、連立方程式による解析が行われる。標準となる各線源の、各領域に対する線量寄与をまとめると、次のようになる。

	線源	K-40 領域	U系列領域	Th系列領域
K-40	線量寄与 寄与率 寄与率の変形	$N_{kk}$	$N_{ku}$ $R_{ku} = N_{ku}/N_{kk}$ $N_{ku} = R_{ku} \cdot N_{kk}$	$N_{kth}$ $R_{kth} = N_{kth}/N_{kk}$ $N_{kth} = R_{kth} \cdot N_{kk}$
U系列	線量寄与 寄与率 寄与率の変形	$N_{uk}$ $R_{uk} = N_{uk}/N_{uu}$ $N_{uk} = R_{uk} \cdot N_{uu}$	$N_{uu}$	$N_{uth}$ $R_{uth} = N_{uth}/N_{uu}$ $N_{uth} = R_{uth} \cdot N_{uu}$
Th系列	線量寄与 寄与率 寄与率の変形	$N_{thk}$ $R_{thk} = N_{thk}/N_{thth}$ $N_{thk} = R_{thk} \cdot N_{thth}$	$N_{thu}$ $R_{thu} = N_{thu}/N_{thth}$ $N_{thu} = R_{thu} \cdot N_{thth}$	$N_{thth}$

環境放射線の測定結果から領域を選び、それぞれ3つの領域の数値から線量寄与(計数寄与)を求める。すなわち各領域の計数率を $N_{sk}$ 、 $N_{su}$ 、 $N_{sth}$ とし、測定結果中のK-40、U系列、Th系列の主領域への線量寄与を $N_k$ 、 $N_u$ 、 $N_{th}$ とすると、表の式を用いて次のように表わすことができる。

$$N_{sk} = N_k + R_{uk} \cdot N_u + R_{thk} \cdot N_{th}$$

$$N_{su} = R_{ku} \cdot N_k + N_u + R_{thu} \cdot N_{th}$$

$$N_{sth} = R_{kth} \cdot N_k + R_{uth} \cdot N_u + N_{th}$$

これをマトリックスを用いて表すと、

$$\begin{pmatrix} N_{sk} \\ N_{su} \\ N_{sth} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{uk} & R_{thk} \\ R_{ku} & 1 & R_{thu} \\ R_{kth} & R_{uth} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_k \\ N_u \\ N_{th} \end{pmatrix}$$

逆マトリックスを用いると、

$$\begin{pmatrix} N_k \\ N_u \\ N_{th} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{uk} & R_{thk} \\ R_{ku} & 1 & R_{thu} \\ R_{kth} & R_{uth} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} N_{sk} \\ N_{su} \\ N_{sth} \end{pmatrix}$$

となる。

この式に得られたデータを代入すると、その領域の、その線源のみの寄与を求めることができる。

照射線量率を得るデータ処理によって求めた値を $N_r$ とすると、この方法で算出した値 $N = N_k + N_u + N_{ch}$ と一致しなければならない。通常の測定では、両者の差が10%以内であれば、 $N_k$ 、 $N_u$ 、 $N_{ch}$ の値は信頼できる。なお $N_r > N + (N \times 10\%)$ となった際には、人工放射性核種の存在を考慮して検討をすることが必要となる。

(参考文献) 1) NCRP Report No. 50, Environmental Radiation Measurements, p. 84-94.

# 付 録

## 付録1 ストリッピング法によるNaI (Tl) シンチレーション スペクトロメータのデータ処理の例

このデータ処理は3 inφ球形NaI (Tl) シンチレータを用いて得られたパルス波高分布を処理し、0～3 MeV領域のγ線、ならびに宇宙線に関する情報を得るための計算処理である。

このデータ処理は(1)測定結果を10keV/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もとづいて行う計算、(4)計算結果の表示、などに大別される。

### (1) 測定結果を10keV/chに変換する処理

この変換処理はエネルギー校正すなわち得られたパルス波高分布のチャンネルとエネルギーの関係を規格化(全エネルギー領域についてチャンネル幅を一定にする)する。この校正はチャンネル間の数値の補間で行っている。通常“0”点、<sup>40</sup>K (1461keV)、<sup>208</sup>Tl (2614keV)の3点を用い、一次式で補正を行うが、高次の歪の補正には測定されたパルス波高分布のチャンネルとエネルギーの関係の(次数+2)組以上を用い、n次式でフィッティングを行う。チャンネル間の数値の補間は比例配分によって決定する。10keV/chに変換した結果は(2)以後のデータ処理の基本データとなるので、この校正の正確さは結果の精度に影響する。

### (2) 処理に必要な入力データ

処理に必要な入力データのうち検出体(NaI (Tl) シンチレータ)のP/T比が、この解析に必要な唯一の実測データである。この値は単色γ線の点線源を用いて求められ、付第1.1図、付第1.1表にその例を示す。

このほか、処理に必要な全計数効率等のデータは、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) 入力データにもとづいて行う計算処理

10keV/chに変換した測定結果の処理は(a)コンプトン寄与の差引き、および(b)ピーク効率の適用である。ピーク効率(PE)はP/T比(PTTR)を用い、球形シンチレータの直径dとNaI (Tl) シンチレータの減衰係数μから次式

$$PE = \left\{ 1 - \frac{2}{(\mu d)^2} + 2 e^{-\mu d} \left[ \frac{1}{(\mu d)^2} + \frac{1}{\mu d} \right] \right\} (PTTR)$$

によって求めることができる。3 inφ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第1.2表に示した。ピーク領域カウント $N_p$ とコンプトン連続部分のカウント $N_c$ とは第1.2表に示した。

$$N_c = N_p (1 - PTTR) / (PTTR)$$

の関係にある。 $N_p$ から上式により $N_c$ を求め、 $N_c$ をコンプトン連続部分の各チャンネルに均等に振り分けて差引く。

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(付第1.2図)。実際には、まず3 MeVに相当するチャンネル(10 keV幅)をエネルギー $E_\gamma$ の光子の全吸収ピーク(面積 $N_p$ カウント)と見做し、この $N_p$ から求められた $N_c$ を、コンプトン端 $E_c$ (MeV) ( $= E_\gamma / (1 + 0.511 / 2 E_\gamma)$ )から0まで、対応する各チャンネルに均等に振り分けて差し引き、この操作を高エネルギー側から順次低エネルギー側に向けて繰り返す。この様にしてコンプトンの寄与を除いたスペクトルが得られ、各エネルギーごとのピーク効率およびシンチレータケースによる $\gamma$ 線の減衰率をチャンネルごとに適用すれば、 $\gamma$ 線線束密度で表された光子スペクトルがえがかれる。さらに、各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) 結果の信頼性等

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の変換のさいの誤差、P/T比、コンプトン連続部分の差引き方法(矩形と実際の形との差)および基本定数の選び方、バックグラウンドデータのちが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 $\gamma$ 線に関する情報、3 MeV以上の領域を主として宇宙線に関する情報として扱う。

##### i) 0~3 MeV領域の解析と表示

- ① 測定データを10 keV/chに変換した結果の表示。
- ② コンプトン寄与の差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より10 keV毎の値を低エネルギー領域まで積分した結果。

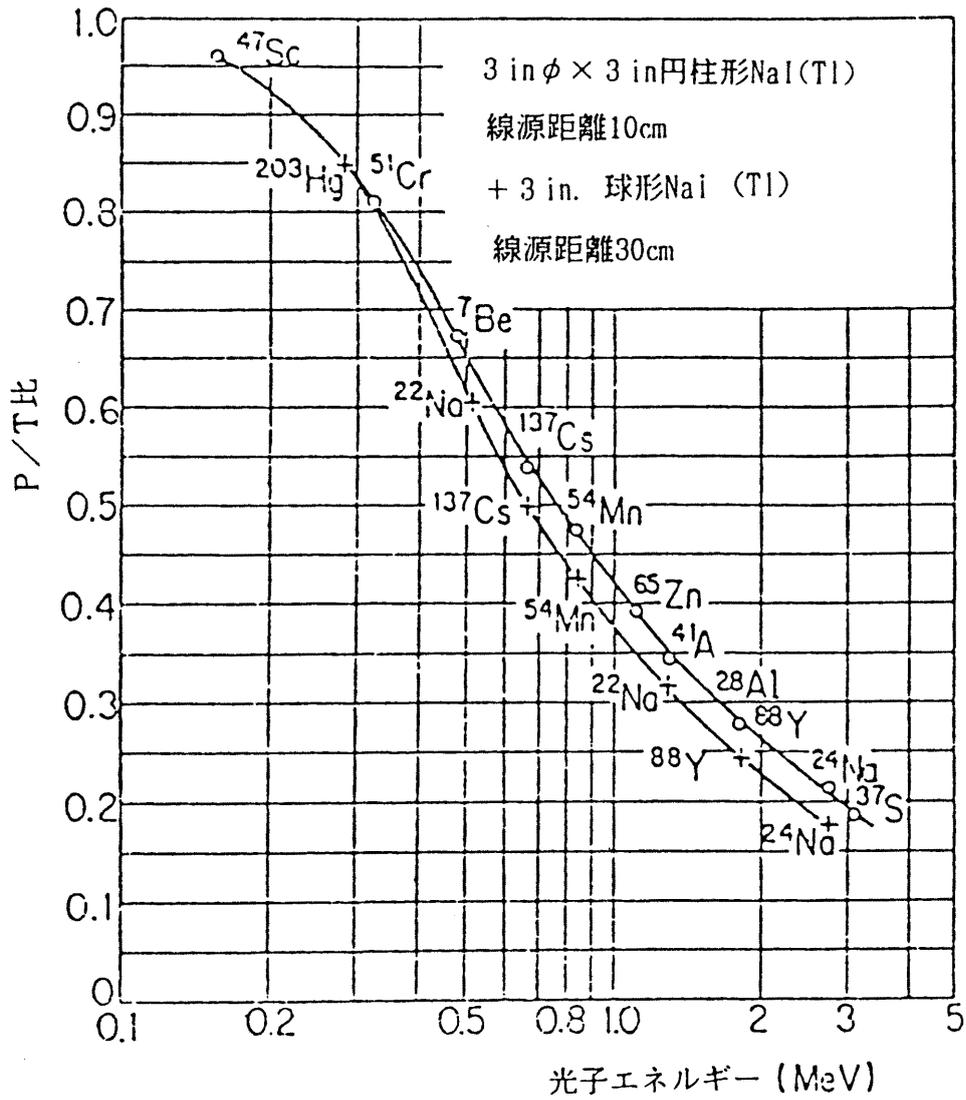
これらが標準的な表示である。①、②、③、④については一般に片対数で表示する。

④の積算結果については、指定されたエネルギー（通常30 keV）までの積分値を1とした百分率を直線表示する。またデータ番号とともに $\gamma$ 線、宇宙線線量を付第1.3図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もとづくものであり、3 in  $\phi$ 球形NaI (T1) シンチレータにおいては、3 MeV以上の計数率に $2.12 (\mu\text{Rh}^{-1}) / (\text{cps})$ という定数 ( $N_3$ ) 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 線を宇宙線寄与として過大に見積もることがある。このような恐れのある場所での測定に際しては、人工放射線にもとづく影響の少ないエネルギー領域、例えば10 MeV以上の領域を宇宙線線量の算出に利用することが必要である。この際、上記定数としては $N_{10} = 3.5 (\mu\text{R}/\text{h}) / (\text{cps})$ を用いる。この両定数の比 ( $N_{10}/N_3$ ) は、環境における宇宙線成分のちがいにより1.3~1.87の幅があるが、ここでは1.65を用いる。



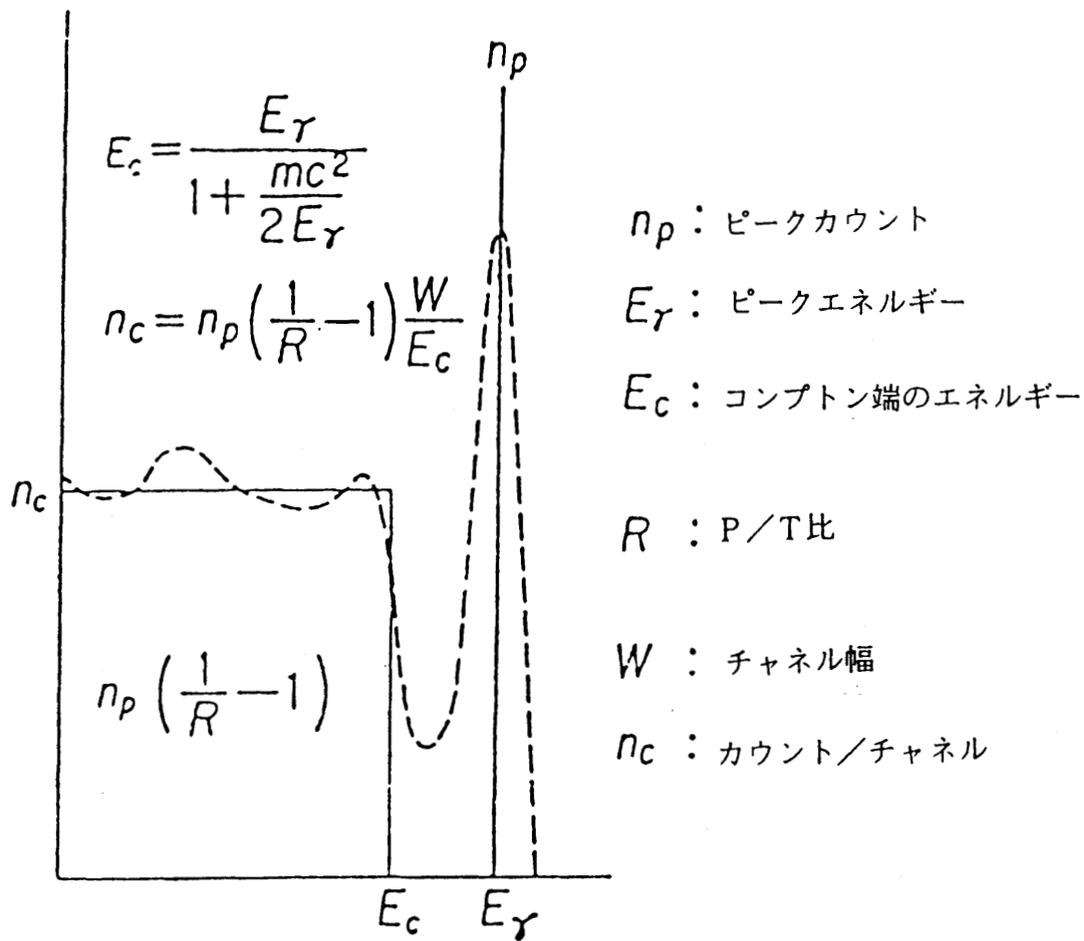
付第1.1図 NaI(Tl) シンチレータのP/T比

付第1.1表 3 inφ球形NaI (TI) シンチレータのP/T比

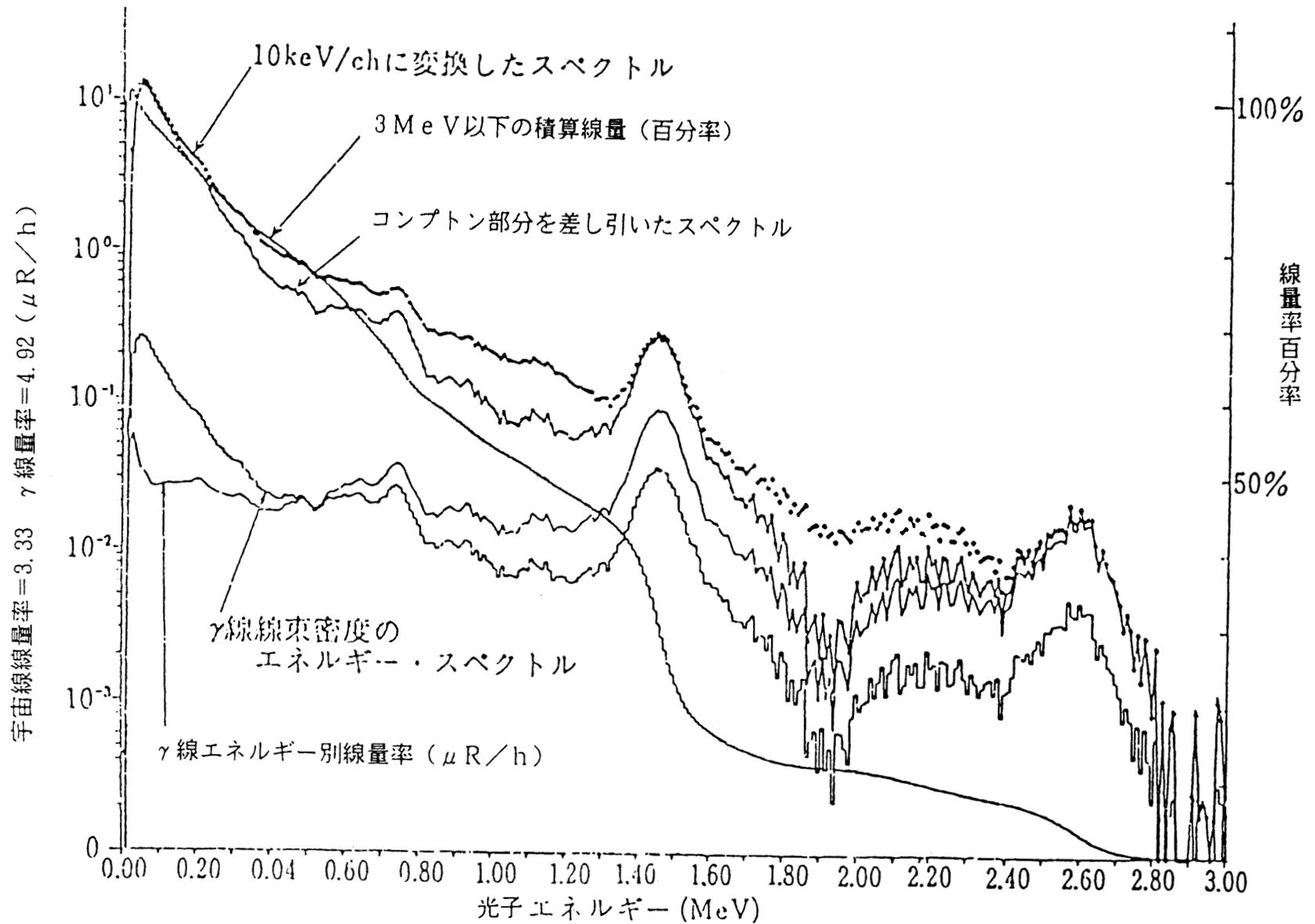
keV	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100	0.99	0.985	0.98	0.97	0.962	0.955	0.945	0.94	0.933	0.925
200	0.916	0.907	0.9	0.89	0.882	0.872	0.862	0.853	0.843	0.83
300	0.82	0.806	0.795	0.785	0.77	0.76	0.746	0.735	0.725	0.713
400	0.703	0.691	0.682	0.67	0.66	0.65	0.641	0.631	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

付第1.2表 3 in  $\phi$  球形 Na I (Tl) シンチレータのピーク効率

keV	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.999	0.999
100	0.988	0.982	0.976	0.964	0.954	0.945	0.932	0.924	0.913	0.900
200	0.887	0.873	0.861	0.845	0.831	0.815	0.799	0.784	0.768	0.749
300	0.734	0.716	0.700	0.685	0.666	0.652	0.634	0.620	0.607	0.592
400	0.579	0.565	0.554	0.540	0.528	0.516	0.506	0.495	0.484	0.474
500	0.466	0.457	0.447	0.438	0.430	0.421	0.414	0.406	0.400	0.393
600	0.386	0.380	0.374	0.368	0.363	0.358	0.353	0.348	0.343	0.338
700	0.333	0.328	0.324	0.319	0.315	0.311	0.307	0.304	0.300	0.296
800	0.293	0.289	0.286	0.283	0.280	0.276	0.273	0.270	0.267	0.264
900	0.261	0.258	0.256	0.253	0.251	0.248	0.246	0.243	0.241	0.238
1000	0.236	0.234	0.232	0.229	0.227	0.225	0.223	0.221	0.219	0.218
1100	0.215	0.213	0.212	0.210	0.208	0.206	0.204	0.202	0.200	0.198
1200	0.197	0.196	0.194	0.192	0.191	0.189	0.187	0.186	0.184	0.182
1300	0.181	0.179	0.178	0.177	0.176	0.174	0.173	0.171	0.170	0.169
1400	0.168	0.166	0.165	0.164	0.163	0.162	0.160	0.160	0.159	0.157
1500	0.156	0.155	0.154	0.153	0.153	0.151	0.150	0.150	0.149	0.148
1600	0.147	0.146	0.145	0.144	0.144	0.142	0.141	0.141	0.140	0.139
1700	0.138	0.137	0.136	0.136	0.135	0.134	0.134	0.133	0.132	0.131
1800	0.131	0.130	0.129	0.128	0.128	0.127	0.126	0.126	0.125	0.124
1900	0.123	0.123	0.122	0.121	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118	0.118
2000	0.117	0.116	0.116	0.116	0.115	0.114	0.114	0.113	0.113	0.113
2100	0.112	0.112	0.111	0.111	0.110	0.109	0.109	0.108	0.108	0.107
2200	0.107	0.106	0.106	0.106	0.105	0.105	0.105	0.104	0.104	0.103
2300	0.103	0.102	0.102	0.102	0.102	0.101	0.100	0.0997	0.0991	0.0986
2400	0.0985	0.0979	0.0978	0.0972	0.0972	0.0966	0.0960	0.0959	0.0953	0.0948
2500	0.0947	0.0942	0.0941	0.0935	0.0935	0.0924	0.0923	0.0918	0.0917	0.0912
2600	0.0911	0.0906	0.0905	0.0899	0.0894	0.0888	0.0887	0.0882	0.0881	0.0875
2700	0.0875	0.0869	0.0869	0.0864	0.0863	0.0857	0.0857	0.0852	0.0851	0.0846
2800	0.0845	0.0840	0.0840	0.0834	0.0834	0.0829	0.0828	0.0823	0.0822	0.0817
2900	0.0817	0.0811	0.0811	0.0805	0.0805	0.0800	0.0794	0.0794	0.0788	0.0788



付第1.2図 コンプトン連続部分の差引き方法



付第1.3図 3 in  $\phi$ 球形NaI (Tl) シンチレーション検出器によるスペクトルの解析結果の表示例

DATA NO. \*C\* CHANNEL KEV/CH TIME LAST-CH LIVE-TIME A N E-CNT COS-DOSE(UR/H) GAMMA(UR/H)(CH) WEIGHT E/CH  
 262097.0 1024.0 10.00 2003.40 446.2 2400.0 3443.0 3.041 0.632E+01 3 820.0 6.73

ORIGHL RESULTS PER D 0-50 50-100 100-250 250-500 500-1000 -2000 -3000 • TDUS 0.0484  
 DATA 212.08CPS 33.54 -0.296 5.548 51.618 23.424 12.102 6.876 0.730 • 11(C) 3443.0  
 FLUX 5.846 0.913 -3.418 1.881 39.038 21.322 15.537 19.984 4.335 • JJ(C) 3020.0 R  
 DOSE 6.467 1.00 -2.611 0.303 10.273 13.111 19.431 43.414 13.840 • J-H(EV) 3443.0  
 ADUS 5.403 0.853 -0.030 1.460 23.113 22.031 23.409 25.331 4.686 • J-H(EV) 3020.0 R

NO.	DATA(CPS)	PEAK(CPS)	FLUX(CM-2)	DOSE(MMR/H)	SUM OF DATA	SUM OF FLUX	SUM OF DOSE
1	-0.764E-03	-0.174E+01	-0.382E-01	-0.118E+00	0.212E+03	0.577E+01	0.632E+01
2	-0.376E-01	-0.178E+01	-0.390E-01	-0.267E-01	0.212E+03	0.581E+01	0.644E+01
3	-0.108E+00	-0.185E+01	-0.406E-01	-0.118E-01	0.212E+03	0.583E+01	0.647E+01
4	-0.223E+00	-0.190E+01	-0.416E-01	-0.707E-02	0.212E+03	0.589E+01	0.648E+01
5	-0.264E+00	-0.184E+01	-0.405E-01	-0.515E-02	0.212E+03	0.593E+01	0.649E+01
6	-0.384E+00	-0.191E+01	-0.418E-01	-0.528E-02	0.213E+03	0.597E+01	0.649E+01
7	-0.477E+00	-0.189E+01	-0.414E-01	-0.520E-02	0.213E+03	0.601E+01	0.650E+01
8	-0.413E+00	-0.177E+01	-0.388E-01	-0.486E-02	0.214E+03	0.605E+01	0.650E+01
9	0.324E+01	0.198E+01	0.435E-01	0.605E-02	0.214E+03	0.609E+01	0.651E+01
10	0.980E+01	0.859E+01	0.188E+00	0.289E-01	0.211E+03	0.605E+01	0.650E+01
10	0.980E+01	0.859E+01	0.188E+00	0.289E-01	0.211E+03	0.605E+01	0.650E+01
20	0.596E+01	0.520E+01	0.127E+00	0.451E-01	0.122E+03	0.423E+01	0.608E+01
30	0.278E+01	0.224E+01	0.635E-01	0.374E-01	0.764E+02	0.322E+01	0.562E+01
40	0.158E+01	0.114E+01	0.424E-01	0.333E-01	0.541E+02	0.266E+01	0.523E+01
50	0.861E+00	0.533E+00	0.246E-01	0.244E-01	0.427E+02	0.236E+01	0.498E+01
60	0.748E+00	0.468E+00	0.261E-01	0.308E-01	0.348E+02	0.211E+01	0.472E+01
70	0.473E+00	0.226E+00	0.147E-01	0.199E-01	0.277E+02	0.185E+01	0.439E+01
80	0.384E+00	0.177E+00	0.131E-01	0.199E-01	0.235E+02	0.171E+01	0.420E+01
90	0.345E+00	0.161E+00	0.134E-01	0.226E-01	0.199E+02	0.159E+01	0.400E+01
100	0.327E+00	0.171E+00	0.158E-01	0.293E-01	0.165E+02	0.144E+01	0.373E+01
110	0.230E+00	0.911E-01	0.916E-02	0.184E-01	0.138E+02	0.132E+01	0.351E+01
120	0.236E+00	0.117E+00	0.129E-01	0.280E-01	0.113E+02	0.120E+01	0.325E+01
130	0.141E+00	0.854E-01	0.103E-01	0.237E-01	0.939E+01	0.109E+01	0.301E+01
140	0.161E+00	0.129E+00	0.167E-01	0.402E-01	0.814E+01	0.984E+00	0.276E+01
150	0.394E+00	0.365E+00	0.509E-01	0.128E+00	0.507E+01	0.611E+00	0.184E+01
160	0.504E-01	0.259E-01	0.383E-02	0.102E-01	0.302E+01	0.358E+00	0.119E+01
170	0.481E-01	0.257E-01	0.405E-02	0.113E-01	0.259E+01	0.328E+00	0.111E+01
180	0.455E-01	0.243E-01	0.407E-02	0.118E-01	0.215E+01	0.292E+00	0.101E+01
190	0.263E-01	0.807E-02	0.143E-02	0.428E-02	0.179E+01	0.265E+00	0.929E+00
200	0.233E-01	0.881E-02	0.164E-02	0.508E-02	0.157E+01	0.255E+00	0.900E+00
210	0.317E-01	0.197E-01	0.383E-02	0.123E-01	0.132E+01	0.232E+00	0.829E+00
220	0.320E-01	0.214E-01	0.439E-02	0.146E-01	0.101E+01	0.194E+00	0.702E+00
230	0.186E-01	0.101E-01	0.215E-02	0.739E-02	0.753E+00	0.161E+00	0.593E+00
240	0.116E-01	0.796E-02	0.177E-02	0.625E-02	0.611E+00	0.144E+00	0.533E+00
250	0.114E-01	0.115E-01	0.265E-02	0.463E-02	0.513E+00	0.124E+00	0.463E+00
260	0.366E-01	0.368E-01	0.884E-02	0.329E-01	0.296E+00	0.277E-01	0.273E+00
270	0.744E-02	0.752E-02	0.188E-02	0.718E-02	0.231E-01	0.575E-02	0.213E-01
280	-0.663E-03	-0.663E-03	-0.172E-03	-0.670E-03	-0.124E-01	-0.332E-02	-0.133E-01
290	-0.862E-03	-0.862E-03	-0.231E-03	-0.423E-03	-0.470E-02	-0.129E-02	-0.526E-02
300	-0.124E-02	-0.124E-02	-0.346E-03	-0.141E-02	-0.124E-02	-0.346E-03	-0.141E-02

付第1.3表 3inφ球形NaI(Tl)シンチレーションスペクトルの解析結果の表示例

付第 1.4 表 付第 1.3 表の説明

◎ <u>DATA NO.</u>	データ番号	測定データの番号で、ABCDEFの6個の数字で表す。Aは197A年、または198A年のデータを意味し、BCは、A年のテープの順番で、ABCがテープ番号となる。 DEFにはABCテープのデータ番号をあてる。
◎ <u>" B "</u>	この表示の意味	検出体固有のバックグラウンドまたは特定のデータをバックグラウンドとして差引いたデータを用いて計算したものであることを示す。
◎ <u>" C "</u>	この表示の意味	バックグラウンドの差引きは上記に示した差し引きのほか、さらに宇宙線等の寄与分を3 MeV以上の数 (ABOVE COUNT)から求め、差引いた結果を用いて計算したものであることを示す。
◎ <u>" D "</u>	この表示の意味	これらのバックグラウンドなどを差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	チャンネル数	測定データのチャンネル数、このプログラムでは1024、または2048のいずれかが多い。
KEV/CH	チャンネル幅	NO. に示された数のチャンネル幅を示す。通常10keV/CHとなっている。
<u>TIME</u>	収録時刻	あらかじめセットされた時間により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よりXY個データを集めたものを示す場合もある。
LAST-CH	最後のチャンネル	データ解析した場合の最後のチャンネルを示す。通常3MeVに相当するチャンネルが示される。

LIVE-TIME	測定時間	計測した時間 (s) を示すものでスペクトルの 0 チャンネルを用いている。ときには、この時間を別に入れる場合があるほか 0 チャンネルの数を数倍したものをを用いる場合 (数え落しの補正など) があり、この場合にはスペクトルの 0 チャンネル (計数時間) を括弧内に示す。
ABOVE-CNT	超過計数	スペクトル解析した最後のチャンネル (LAST CH) から実際に使用した最後のチャンネルまでの全計数値。
<u>COS-DOSE</u> ( $\mu$ R, H)	宇宙線線量	ABOVE CNT から計算された宇宙線線量 (ABOVE CNT/LIVE TIME) $\times$ K で計算される。K には 2.12 を用いている。別の値を用いた場合は、最後の項にその値が示される。
<u>GAMMA</u> ( $\mu$ R, 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 (TI)) の重量。これをあらかじめ与えることによって、波高分布の各エネルギーに相当する計数率とエネルギーの積の総和 ( $\sum N_i \times E_i$ ) からシンチレータの平均吸収線量率が求められる。
E. CH	チャンネル幅	測定データのチャンネル幅を示す。測定されたスペクトルを n 次式で 10 keV / CH に補正しており、この際あらかじめ求めた 1 次式の係数を示してある。
<u>RESULTS</u>	注1) 計算結果	DATA は、10 keV から 3 MeV までの計数率 cps。 FLUX は、10 keV から 3 MeV までの全線束密度

$\gamma/\text{cm}^2$ 。

DOSEは、照射線量率  $\mu\text{R}/\text{h}^{-1}$  で、10keV から3MeVまでを積算したもの。

ADOSは、シンチレータ内の平均の吸収線量率 ( $\mu\text{rad}/\text{h}$ )。

PER D

RESULTSの各量を照射線量の値で割ったもの、ただしDOSEの値（これは1.00になるはず）はチャンネル領域を(CH)×10keV～3MeVとした値を10keV～3MeVの値で割っている。このため値は1.00とならないことがある。

0～50、50～100、100～250

この値は、各結果について、それぞれエネルギー領域0～50keV、50～100keV、100～250keV、250～500keV、500～1000keV、1000～2000keV、2000～3000keV間の百分率。

……—3000

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他の測定値との比較、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。

NO.	チャンネル番号	データの打出しは、チャンネル番号（10keV/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ページに打出す時は1～100 keVまでは10keV/CHごと、100keV～3 MeVまでは100keV毎の値を打出す。
◎DATA (cps)		測定データをn次式で10keV/CHに補正した各チャンネル(10keV)ごとの計数率値(cps/10keV)を指定チャン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引いたものについて計算が行われる。
◎FLUX ( $\gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )		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。
◎DOSE ( $\mu\text{R/h}$ )		上記光子束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、実効線量当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ンネルまで積分した値。

◎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2 逐次近似法によるNaI(Tl)シンチレーション スペクトルのアンフォールディングの例

NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータにより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3inφ球型NaI(Tl)シンチレータで測定されたデータを、レスポンスマトリックスを用い、逐次近似法により解析する例について説明する。

### 2.1 解析手法の概要

#### (1) エネルギー校正

エネルギー校正は環境γ線の波高分布のうち<sup>208</sup>Tl(2.61MeV)と<sup>40</sup>K(1.46MeV)の全吸収ピークのチャンネル数を計算機を用いて判定し、得られた2つのピークチャンネルとそれに対応するエネルギー、および通常“零点”のエネルギーより、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の分割に合わせるため100keV以下は20keVごとに、100keV以上は100keV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り求める。また検出器固有のバックグラウンドは鉄室内における測定値から得られる。

#### (4) レスポンス補正

パルス波高分布をレスポンスマトリックスを用いて補正し、入射γ線スペクトルに変換する(この時に使用したレスポンスマトリックスを付第2.1表に示す。また、方法の詳細については2.2で述べる)。

#### (5) 線量率の計算

入射γ線スペクトルに、それぞれのエネルギーに対応する空気のエネルギー吸収係数を乗ずることなどにより、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り、測定場所における照射線量率が得られる(この方法の詳細については2.3で述べる)。

## 2.2 逐次近似法によるエネルギー解析

エネルギー  $E_0$  の光子が1個、検出器に入射した時、エネルギー  $E$  が吸収される確率を  $R(E_0, E)$  とする。入射光子のエネルギー分布が  $X(E_0)$  の時、吸収エネルギー  $E$  の分布  $Y(E)$  は次式のように表すことができる。

$$Y(E) = \int_0^{\infty} R(E_0, E) \cdot X(E_0) dE \dots\dots\dots (付2-1)$$

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2-1)式から  $E_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) が入射して、吸収されるエネルギー  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) の分布  $Y(E_i)$  は、

$$Y(E_i) = R_{ij} \cdot X(E_j) \cdot \Delta E \dots\dots\dots (付2-2)$$

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

$$Y(E_i) = \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot X(E_j) \cdot \Delta E \dots\dots\dots (付2-3)$$

となる。(付2-3)式において、 $n \rightarrow \infty$  とすれば(付2-1)式となる。

$X(E_j)$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) は検出器に入射する放射線のエネルギースペクトルを表し、 $Y(E_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は検出器で観測されるパルス波高分布である。 $R_{ij}$  はエネルギー  $E_j$  の入射放射線に対する検出器のレスポンス関数を表す。

(付2-3)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。

$$Y = R \cdot X \dots\dots\dots (付2-4)$$

つぎに、求めようとするスペクトルの第1近似として、パルス波高分布  $Y_0$  をとる。

$$X_1 = Y_0 \dots\dots\dots (付2-5)$$

これに、レスポンスマトリックスRをかけたものをY<sub>1</sub>とする。

$$Y_1 = R \cdot X_1 \dots\dots\dots (付2-6)$$

つぎに、第2近似のX<sub>2</sub>として、X<sub>1</sub>とY<sub>1</sub>の対応する要素の比にY<sub>0</sub>の対応する要素をかけたものとする。すなわちX<sub>2</sub>の第1要素は、

$$(X_2)_1 = \frac{(X_1)_1}{(Y_1)_1} \cdot (Y_0)_1 \dots\dots\dots (付2-7)$$

である。X<sub>2</sub>にさらにRをかけたものをY<sub>2</sub>とする。

$$Y_2 = R \cdot X_2 \dots\dots\dots (付2-8)$$

同様に、

$$(X_3)_1 = \frac{(X_2)_1}{(Y_2)_1} \cdot (Y_0)_1 \dots\dots\dots (付2-9)$$

このような手続きを50回繰り返せば、 $\sim 10^{-1}$ の範囲内に収束する。

### 2.3 線量変換

逐次近似法により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り行う。

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

ここで、

E<sub>i</sub> : i番目のヒストグラムの中心エネルギー (eV)

W : 空気のW値 (33.85 eV/ion pair)

- $r$  : シンチレーターの半径 (3.81cm)  
 $\mu_i$  : エネルギー  $E_i$  の光子に対する空気の線減衰係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )  
 $N_i$  :  $i$  番目のヒストグラムにはいる入射光子数 /  $\Delta E$  (個 / (100 keV · s))  
 $T$  : 測定時間 (s)

付第 2.1 表 3 in  $\phi$  球形 NaI (Tl) 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)

光子の中央エネルギー (MeV)

	0.01	0.03	0.05	0.07	0.10	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.05	1.15	1.25	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05	2.15	2.25	2.35	2.45	2.55	2.65	2.75	2.85	2.95					
0.01	1.000																																						
0.03	0.029	0.783	0.012																																				
0.05	0.008	0.112	0.787	0.018																																			
0.07	0.008	0.110	0.106	0.763	0.011																																		
0.09	0.002	0.013	0.107	0.111	0.763	0.011																																	
0.15	0.022	0.016	0.012	0.009	0.721	0.838																																	
0.25	0.011	0.031	0.027	0.020	0.327	0.058	0.754																																
0.35	0.036	0.033	0.031	0.028	0.126	0.126	0.018	0.578																															
0.45	0.028	0.027	0.027	0.026	0.110	0.110	0.105	0.095	0.463																														
0.55	0.017	0.019	0.018	0.016	0.118	0.091	0.139	0.063	0.016	0.397																													
0.65	0.016	0.015	0.015	0.015	0.15	0.076	0.076	0.029	0.072	0.018	0.011	0.012																											
0.75	0.013	0.013	0.012	0.012	0.12	0.062	0.062	0.069	0.081	0.059	0.006	0.023	0.023																										
0.85	0.011	0.011	0.011	0.010	0.116	0.053	0.053	0.057	0.061	0.072	0.050	0.010	0.055	0.016																									
0.95	0.010	0.010	0.009	0.009	0.119	0.047	0.047	0.047	0.049	0.050	0.055	0.045	0.012	0.021	0.018																								
1.05	0.008	0.008	0.008	0.008	0.108	0.040	0.040	0.041	0.042	0.043	0.045	0.044	0.037	0.012	0.010	0.007																							
1.15	0.007	0.007	0.007	0.007	0.108	0.036	0.036	0.037	0.039	0.040	0.041	0.041	0.043	0.031	0.013	0.013	0.008																						
1.25	0.005	0.005	0.005	0.005	0.106	0.028	0.031	0.031	0.031	0.031	0.036	0.039	0.043	0.042	0.027	0.037	0.013	0.013																					
1.35	0.005	0.005	0.005	0.005	0.105	0.025	0.026	0.027	0.029	0.030	0.030	0.033	0.039	0.045	0.051	0.024	0.035	0.011	0.011																				
1.45	0.004	0.004	0.005	0.005	0.105	0.023	0.024	0.024	0.027	0.028	0.029	0.032	0.037	0.041	0.046	0.022	0.031	0.012	0.012																				
1.55	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.022	0.022	0.023	0.023	0.021	0.024	0.028	0.028	0.032	0.036	0.040	0.048	0.022	0.027	0.018	0.015																		
1.65	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.020	0.020	0.020	0.020	0.021	0.024	0.021	0.025	0.026	0.030	0.038	0.040	0.017	0.024	0.023	0.013	0.014																	
1.75	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.017	0.018	0.018	0.018	0.018	0.019	0.023	0.020	0.021	0.025	0.028	0.037	0.039	0.047	0.021	0.022	0.106	0.013																
1.85	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.018	0.022	0.021	0.022	0.023	0.027	0.038	0.039	0.044	0.025	0.023	0.098	0.014															
1.95	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.016	0.016	0.019	0.025	0.022	0.023	0.024	0.026	0.036	0.041	0.024	0.026	0.090	0.014															
2.05	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.016	0.018	0.023	0.022	0.022	0.023	0.027	0.040	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	0.011	0.012	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.014	0.018	0.022	0.021	0.021	0.022	0.026	0.039	0.031	0.034	0.021	0.034	0.082	0.014												
2.25	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.014	0.017	0.022	0.020	0.021	0.022	0.026	0.038	0.033	0.032	0.021	0.027	0.077	0.014											
2.35	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.013	0.017	0.023	0.029	0.020	0.026	0.032	0.030	0.020	0.025	0.078	0.012												
2.45	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.013	0.013	0.013	0.013	0.015	0.020	0.018	0.021	0.025	0.036	0.030	0.029	0.020	0.026	0.071	0.012										
2.55	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.011	0.023	0.019	0.019	0.022	0.026	0.037	0.031	0.029	0.021	0.025	0.059	0.017								
2.65	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.015	0.024	0.019	0.019	0.021	0.021	0.026	0.039	0.031	0.029	0.020	0.022	0.041	0.022						
2.75	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.015	0.024	0.019	0.019	0.021	0.021	0.026	0.039	0.031	0.029	0.020	0.022	0.041	0.022						
2.85	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.011	0.015	0.024	0.019	0.017	0.017	0.021	0.026	0.038	0.031	0.027	0.020	0.023	0.039	0.021					
2.95	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.016	0.025	0.019	0.019	0.019	0.023	0.028	0.042	0.032	0.030	0.020	0.022	0.038						

### 付録3 レスponse関数の計算例

レスponse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、K X線エスケープ成分、消滅 $\gamma$ 線スペクトル成分および全吸収成分から成るが、実際の検出器はNaI(Tl)結晶のほかにそれを包むケースや光電子増倍管等からの散乱 $\gamma$ 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ponse関数は吸収および散乱成分の含まない標準 $\gamma$ 線による実験で求めるのが理想的であろうが、現実にはそのような線源の入手は不可能であり、たとえ可能であっても通常の実験環境では高い精度は望めない。一方、このような誤差要因の入らない決定法としては、実際の検出器の形状で理論的に計算して求めることも一つの方法であり、現実には高い精度のレスponse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ponse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ponse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、K X線エスケープ成分、消滅 $\gamma$ 線スペクトル成分、全吸収成分より成るものとして、個々に計算した上で合成する方法で決定する。その基準化は、全吸収成分とその他の成分を実験的に得たピーク効率と全効率で基準化する方法で行われている。

近似の概略は次のとおりである。

① コンプトンスペクトル分布

矩形分布と指数関数による合成

② ヨウ素のK X線エスケープによるスペクトル分布

ヨウ素のK X線の逃げ率を使ってエスケープを含むスペクトル合成

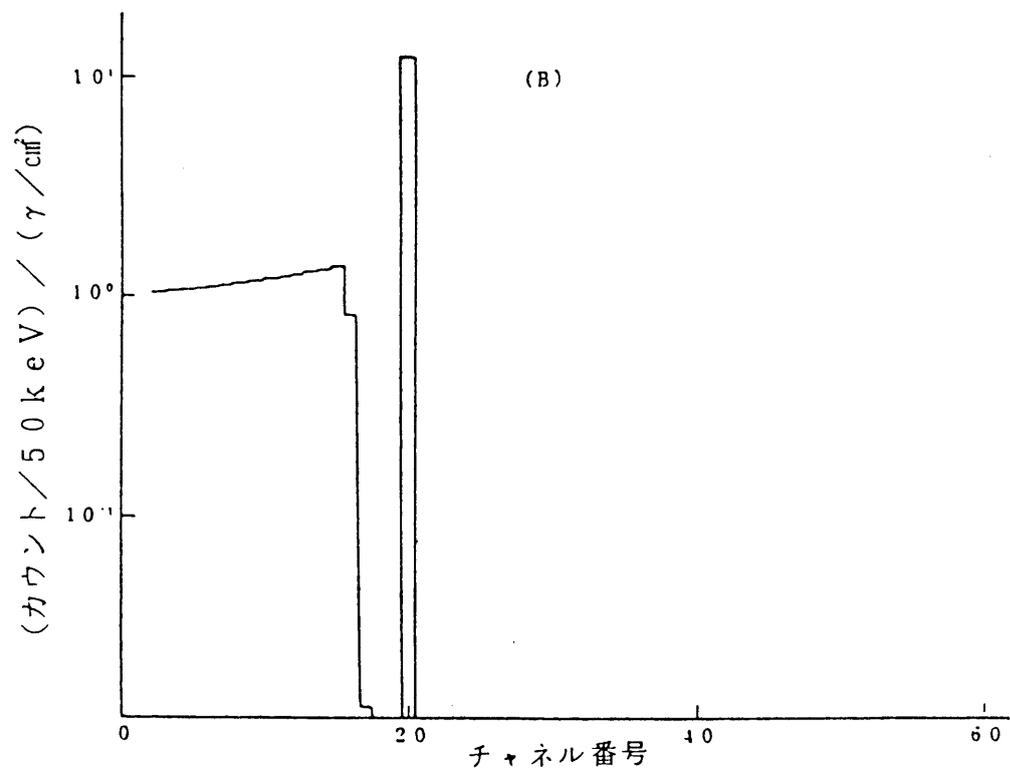
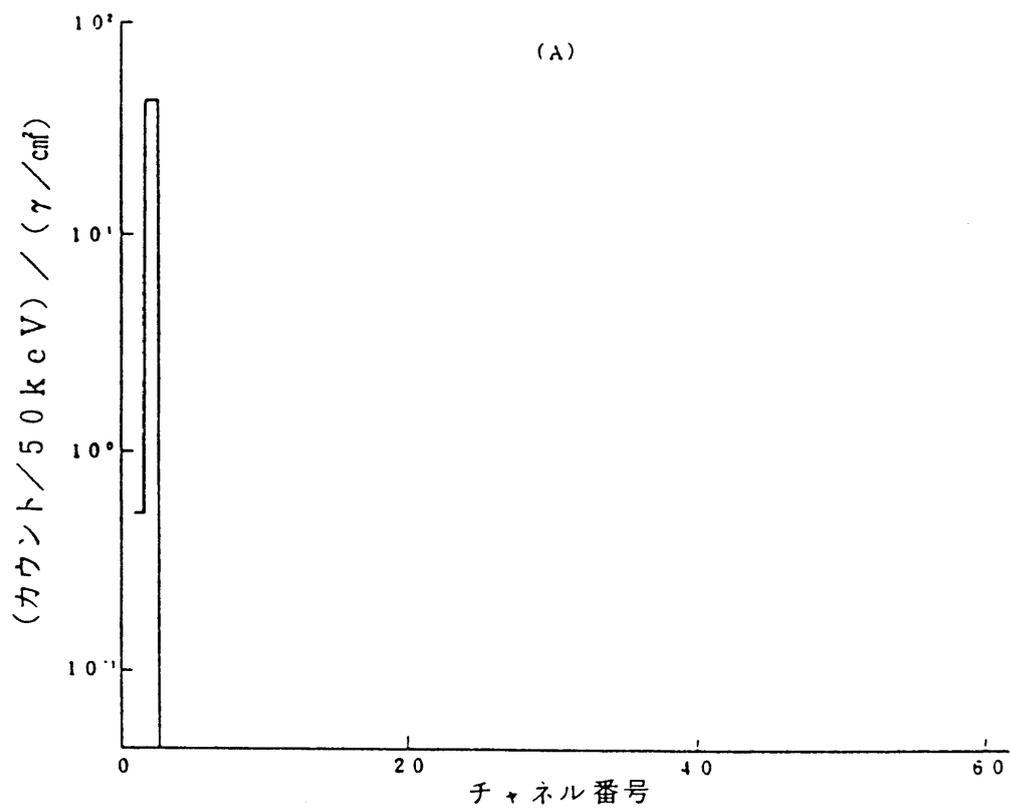
③ 消滅 $\gamma$ 線によるスペクトル分布

0.51MeVのレスponse関数をもとに確率計算で合成

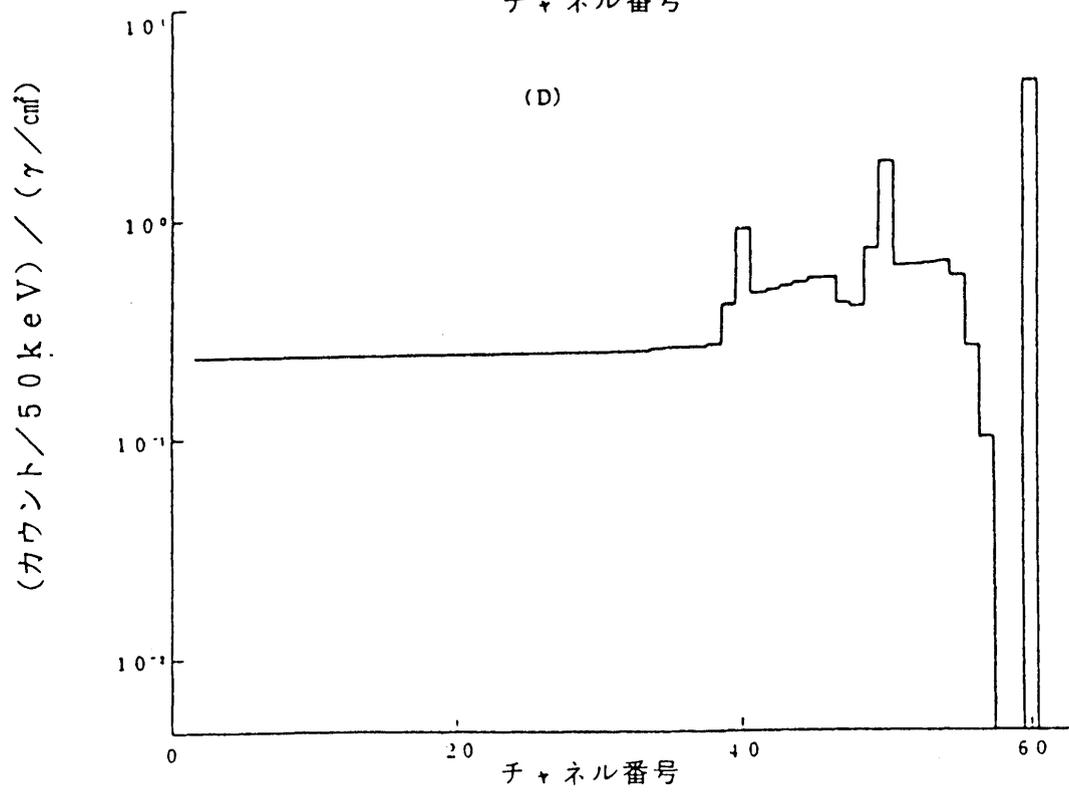
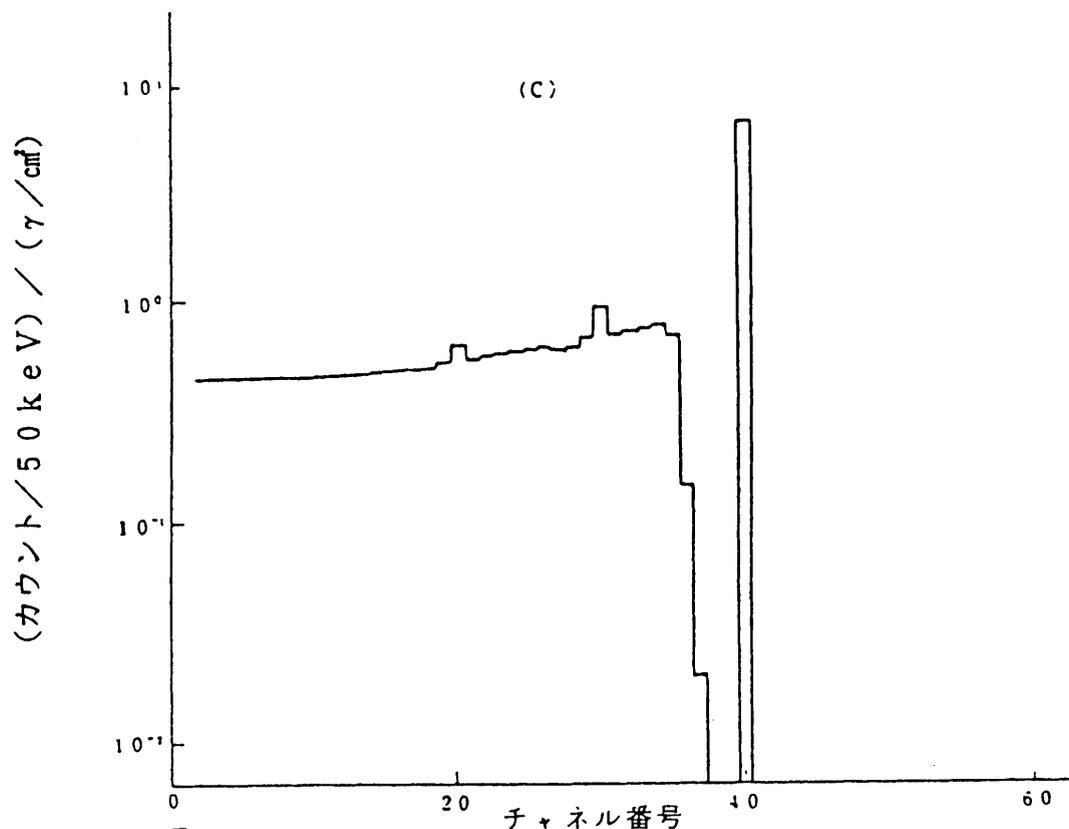
④ 全吸収成分

これは $\delta$ 関数として、消滅 $\gamma$ 線による全吸収成分も含む形で合成

上の①～④をさらに重ねることによって完全なレスponse関数が完成する。付第3.1図、付第3.2図、付第3.1表に実際に計算された3in $\phi$ 球形NaI(Tl)検出器のレスponse関数の例を示す。



付第3.1図 レスポンス関数の計算例



付第3.2図 レスポンス関数の計算例

付第3.1表 合成により発生させたレスポンス関数の例

(3 in φ球形シンチレータ用、50 keV/bin)

ENERGY ( 60 ) 2950 KEV - 3000 KEV										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	2.3928E-01	2.3936E-01	2.3946E-01	2.3956E-01	2.3967E-01	2.3980E-01	2.3994E-01	2.4010E-01	2.4027E-01	2.4046E-01
10	2.4067E-01	2.4091E-01	2.4117E-01	2.4146E-01	2.4178E-01	2.4213E-01	2.4252E-01	2.4296E-01	2.4344E-01	2.4397E-01
20	2.4456E-01	2.4522E-01	2.4594E-01	2.4675E-01	2.4764E-01	2.4863E-01	2.4972E-01	2.5093E-01	2.5227E-01	2.5376E-01
30	2.5541E-01	2.5723E-01	2.5925E-01	2.6149E-01	2.6398E-01	2.6673E-01	2.6977E-01	2.7315E-01	5.6835E-01	8.5604E-01
40	4.8389E-01	5.0346E-01	5.2408E-01	5.4586E-01	5.6894E-01	5.4610E-01	4.1633E-01	4.0640E-01	1.1145E+00	1.6290E+00
50	6.4348E-01	6.4679E-01	6.5194E-01	6.6651E-01	5.7949E-01	2.6361E-01	6.2622E-02	0.0	0.0	4.4382E+00
ENERGY ( 59 ) 2900 KEV - 2950 KEV										
	2.4556E-01	2.4566E-01	2.4576E-01	2.4588E-01	2.4601E-01	2.4615E-01	2.4631E-01	2.4649E-01	2.4669E-01	2.4690E-01
	2.4715E-01	2.4741E-01	2.4771E-01	2.4804E-01	2.4840E-01	2.4880E-01	2.4925E-01	2.4974E-01	2.5029E-01	2.5089E-01
	2.5156E-01	2.5231E-01	2.5313E-01	2.5404E-01	2.5505E-01	2.5617E-01	2.5742E-01	2.5879E-01	2.6032E-01	2.6200E-01
	2.6387E-01	2.6595E-01	2.6824E-01	2.7079E-01	2.7361E-01	2.7673E-01	2.8019E-01	5.6549E-01	8.4406E-01	4.8456E-01
	5.0377E-01	5.2402E-01	5.4544E-01	5.6815E-01	5.4655E-01	4.2163E-01	4.1258E-01	1.0970E+00	1.5956E+00	6.4372E-01
	6.4774E-01	6.5364E-01	6.6874E-01	5.8070E-01	2.5560E-01	6.0546E-02	0.0	0.0	4.6974E+00	
ENERGY ( 58 ) 2850 KEV - 2900 KEV										
	2.5259E-01	2.5270E-01	2.5282E-01	2.5295E-01	2.5310E-01	2.5326E-01	2.5345E-01	2.5365E-01	2.5387E-01	2.5412E-01
	2.5439E-01	2.5470E-01	2.5503E-01	2.5541E-01	2.5582E-01	2.5628E-01	2.5678E-01	2.5735E-01	2.5797E-01	2.5866E-01
	2.5942E-01	2.6027E-01	2.6121E-01	2.6224E-01	2.6340E-01	2.6467E-01	2.6608E-01	2.6765E-01	2.6939E-01	2.7131E-01
	2.7344E-01	2.7580E-01	2.7841E-01	2.8131E-01	2.8451E-01	2.8807E-01	5.6323E-01	8.3245E-01	4.8595E-01	5.0479E-01
	5.2469E-01	5.4575E-01	5.6809E-01	5.4779E-01	4.2786E-01	4.1975E-01	1.0800E+00	1.5624E+00	6.4487E-01	6.4967E-01
	6.5638E-01	6.7206E-01	5.8146E-01	2.4791E-01	5.8417E-02	0.0	0.0	4.7589E+00		
ENERGY ( 57 ) 2800 KEV - 2850 KEV										
	2.5371E-01	2.5383E-01	2.5396E-01	2.5411E-01	2.5427E-01	2.5446E-01	2.5466E-01	2.5488E-01	2.5513E-01	2.5541E-01
	2.5571E-01	2.5605E-01	2.5642E-01	2.5684E-01	2.5730E-01	2.5781E-01	2.5837E-01	2.5899E-01	2.5969E-01	2.6045E-01
	2.6130E-01	2.6224E-01	2.6329E-01	2.6444E-01	2.6572E-01	2.6714E-01	2.6871E-01	2.7045E-01	2.7238E-01	2.7452E-01
	2.7688E-01	2.7951E-01	2.8241E-01	2.8563E-01	2.8920E-01	5.5389E-01	8.1342E-01	4.8010E-01	4.9846E-01	5.1785E-01
	5.3838E-01	5.6017E-01	5.4100E-01	4.2599E-01	4.1858E-01	1.0537E+00	1.5192E+00	6.3668E-01	6.4191E-01	6.4905E-01
	6.6489E-01	5.7311E-01	2.3927E-01	5.6255E-02	0.0	0.0	4.8330E+00			
ENERGY ( 56 ) 2750 KEV - 2800 KEV										
	2.6571E-01	2.6585E-01	2.6601E-01	2.6618E-01	2.6637E-01	2.6658E-01	2.6682E-01	2.6708E-01	2.6736E-01	2.6768E-01
	2.6804E-01	2.6843E-01	2.6886E-01	2.6934E-01	2.6987E-01	2.7046E-01	2.7112E-01	2.7184E-01	2.7264E-01	2.7353E-01
	2.7451E-01	2.7560E-01	2.7681E-01	2.7815E-01	2.7964E-01	2.8128E-01	2.8310E-01	2.8512E-01	2.8735E-01	2.8983E-01
	2.9257E-01	2.9561E-01	2.9898E-01	3.0271E-01	5.5685E-01	8.0665E-01	4.8704E-01	5.0512E-01	5.2424E-01	5.4451E-01
	5.6606E-01	5.4839E-01	4.3878E-01	4.3253E-01	1.0425E+00	1.4912E+00	6.4499E-01	6.5131E-01	6.5959E-01	6.7638E-01
	5.7974E-01	2.3156E-01	5.4001E-02	0.0	0.0	4.8944E+00				

ENERGY ( 55 ) 2700 KEV - 2750 KEV

2.7337E-01	2.7333E-01	2.7370E-01	2.7390E-01	2.7412E-01	2.7436E-01	2.7463E-01	2.7492E-01	2.7525E-01	2.7561E-01
2.7601E-01	2.7646E-01	2.7695E-01	2.7750E-01	2.7811E-01	2.7878E-01	2.7952E-01	2.8035E-01	2.8126E-01	2.8227E-01
2.8339E-01	2.8463E-01	2.8601E-01	2.8753E-01	2.8922E-01	2.9109E-01	2.9316E-01	2.9546E-01	2.9801E-01	3.0082E-01
3.0395E-01	3.0741E-01	3.1124E-01	5.5451E-01	7.9427E-01	4.8861E-01	5.0630E-01	5.2504E-01	5.4492E-01	5.6608E-01
5.4981E-01	4.4556E-01	4.4030E-01	1.0243E+00	1.4555E+00	6.4633E-01	6.5348E-01	6.6263E-01	6.8005E-01	5.8081E-01
2.2261E-01	5.1715E-02	0.0	0.0	4.9563E+00					

ENERGY ( 54 ) 2650 KEV - 2700 KEV

2.8026E-01	2.8044E-01	2.8064E-01	2.8086E-01	2.8111E-01	2.8138E-01	2.8169E-01	2.8202E-01	2.8239E-01	2.8281E-01
2.8326E-01	2.8377E-01	2.8433E-01	2.8495E-01	2.8563E-01	2.8640E-01	2.8724E-01	2.8817E-01	2.8921E-01	2.9036E-01
2.9163E-01	2.9303E-01	2.9459E-01	2.9632E-01	2.9824E-01	3.0036E-01	3.0271E-01	3.0532E-01	3.0820E-01	3.1140E-01
3.1494E-01	3.1886E-01	5.5101E-01	7.8048E-01	4.8905E-01	5.0634E-01	5.2465E-01	5.4412E-01	5.6485E-01	5.4996E-01
4.5116E-01	4.4688E-01	1.0043E+00	1.4176E+00	6.4618E-01	6.5412E-01	6.6409E-01	6.8208E-01	5.8144E-01	2.1384E-01
4.9378E-02	0.0	0.0	5.0434E+00						

ENERGY ( 53 ) 2600 KEV - 2650 KEV

2.9194E-01	2.9215E-01	2.9238E-01	2.9264E-01	2.9292E-01	2.9324E-01	2.9359E-01	2.9397E-01	2.9440E-01	2.9487E-01
2.9540E-01	2.9598E-01	2.9663E-01	2.9734E-01	2.9813E-01	2.9901E-01	2.9998E-01	3.0106E-01	3.0225E-01	3.0358E-01
3.0504E-01	3.0666E-01	3.0846E-01	3.1045E-01	3.1266E-01	3.1511E-01	3.1782E-01	3.2082E-01	3.2414E-01	3.2783E-01
3.3191E-01	5.5277E-01	7.7181E-01	4.9501E-01	5.1197E-01	5.2998E-01	5.4913E-01	5.6956E-01	5.5624E-01	4.6317E-01
4.6007E-01	9.9051E-01	1.3658E+00	6.5317E-01	6.6220E-01	6.7331E-01	6.9223E-01	5.8636E-01	2.0543E-01	4.6990E-02
0.0	0.0	5.1177E+00							

ENERGY ( 52 ) 2550 KEV - 2600 KEV

2.9869E-01	2.9892E-01	2.9919E-01	2.9948E-01	2.9980E-01	3.0016E-01	3.0055E-01	3.0099E-01	3.0147E-01	3.0201E-01
3.0260E-01	3.0326E-01	3.0399E-01	3.0480E-01	3.0570E-01	3.0669E-01	3.0779E-01	3.0901E-01	3.1036E-01	3.1186E-01
3.1352E-01	3.1535E-01	3.1739E-01	3.1964E-01	3.2214E-01	3.2491E-01	3.2798E-01	3.3138E-01	3.3514E-01	3.3931E-01
5.4858E-01	7.5687E-01	4.9491E-01	5.1143E-01	5.2899E-01	5.4769E-01	5.6767E-01	5.5578E-01	4.6837E-01	4.6628E-01
9.6900E-01	1.3456E+00	6.5230E-01	6.6213E-01	6.7407E-01	6.9355E-01	5.8533E-01	1.9548E-01	4.4553E-02	0.0
0.0	5.2039E+00								

ENERGY ( 51 ) 2500 KEV - 2550 KEV

3.0715E-01	3.0742E-01	3.0771E-01	3.0804E-01	3.0841E-01	3.0882E-01	3.0926E-01	3.0976E-01	3.1031E-01	3.1092E-01
3.1160E-01	3.1235E-01	3.1318E-01	3.1410E-01	3.1512E-01	3.1625E-01	3.1750E-01	3.1889E-01	3.2043E-01	3.2213E-01
3.2402E-01	3.2611E-01	3.2842E-01	3.3099E-01	3.3383E-01	3.3698E-01	3.4047E-01	3.4433E-01	3.4861E-01	5.4609E-01
7.4345E-01	4.9664E-01	5.1275E-01	5.2989E-01	5.4818E-01	5.6773E-01	5.5735E-01	4.7577E-01	4.7476E-01	9.4930E-01
1.3069E+00	6.5379E-01	6.6453E-01	6.7741E-01	6.9758E-01	5.8570E-01	1.8601E-01	4.2067E-02	0.0	0.0
5.2922E+00									

ENERGY ( 50 ) 2450 KEV - 2500 KEV

```

.....
3.1753E-01 3.1783E-01 3.1817E-01 3.1855E-01 3.1897E-01 3.1943E-01 3.1995E-01 3.2052E-01 3.2115E-01 3.2184E-01
3.2262E-01 3.2347E-01 3.2442E-01 3.2548E-01 3.2664E-01 3.2793E-01 3.2936E-01 3.3095E-01 3.3270E-01 3.3465E-01
3.3681E-01 3.3919E-01 3.4184E-01 3.4477E-01 3.4802E-01 3.5162E-01 3.5561E-01 3.6002E-01 5.4552E-01 7.3177E-01
5.0043E-01 5.1615E-01 5.3290E-01 5.5080E-01 5.6997E-01 5.6117E-01 4.8558E-01 4.8573E-01 9.3166E-01 1.2700E+00
6.5786E-01 6.6961E-01 6.8356E-01 7.0454E-01 5.8986E-01 1.7796E-01 3.9536E-02 0.0 0.0 5.3823E+00

```

```

.....
ENERGY ( 49 ) 2400 KEV - 2450 KEV
.....

```

```

3.2860E-01 3.2896E-01 3.2935E-01 3.2978E-01 3.3026E-01 3.3079E-01 3.3137E-01 3.3202E-01 3.3275E-01 3.3355E-01
3.3443E-01 3.3541E-01 3.3650E-01 3.3770E-01 3.3904E-01 3.4051E-01 3.4215E-01 3.4397E-01 3.4598E-01 3.4820E-01
3.5067E-01 3.5340E-01 3.5643E-01 3.5979E-01 3.6351E-01 3.6763E-01 3.7219E-01 5.4552E-01 7.2047E-01 5.0487E-01
5.2021E-01 5.3658E-01 5.5410E-01 5.7289E-01 5.6572E-01 4.9625E-01 4.9761E-01 9.1447E-01 1.2332E+00 6.6281E-01
6.7563E-01 6.9069E-01 7.1254E-01 5.9411E-01 1.6748E-01 3.6961E-02 0.0 0.0 5.4766E+00

```

```

.....
ENERGY ( 48 ) 2350 KEV - 2400 KEV
.....

```

```

3.4254E-01 3.4294E-01 3.4339E-01 3.4389E-01 3.4444E-01 3.4506E-01 3.4573E-01 3.4648E-01 3.4731E-01 3.4824E-01
3.4926E-01 3.5039E-01 3.5164E-01 3.5303E-01 3.5457E-01 3.5627E-01 3.5816E-01 3.6025E-01 3.6257E-01 3.6514E-01
3.6798E-01 3.7113E-01 3.7463E-01 3.7850E-01 3.8278E-01 3.8753E-01 5.4856E-01 7.1207E-01 5.1251E-01 5.2751E-01
5.4356E-01 5.6077E-01 5.7926E-01 5.7383E-01 5.1065E-01 5.1334E-01 9.0083E-01 1.1997E+00 6.7190E-01 6.8596E-01
7.0233E-01 7.2526E-01 5.9994E-01 1.5751E-01 3.4345E-02 0.0 0.0 5.5719E+00

```

```

.....
ENERGY ( 47 ) 2300 KEV - 2350 KEV
.....

```

```

3.5519E-01 3.5566E-01 3.5617E-01 3.5675E-01 3.5738E-01 3.5808E-01 3.5886E-01 3.5972E-01 3.6067E-01 3.6172E-01
3.6289E-01 3.6419E-01 3.6563E-01 3.6722E-01 3.6898E-01 3.7093E-01 3.7310E-01 3.7550E-01 3.7815E-01 3.8109E-01
3.8435E-01 3.8797E-01 3.9197E-01 3.9640E-01 4.0132E-01 5.4986E-01 7.0172E-01 5.1839E-01 5.3302E-01 5.4870E-01
5.6554E-01 5.8368E-01 5.7995E-01 5.2310E-01 5.2707E-01 8.8472E-01 1.1634E+00 6.7864E-01 6.9385E-01 7.1143E-01
7.3532E-01 6.0697E-01 1.4806E-01 3.1692E-02 0.0 0.0 5.6750E+00

```

```

.....
ENERGY ( 46 ) 2250 KEV - 2300 KEV
.....

```

```

3.6377E-01 3.6430E-01 3.6488E-01 3.6553E-01 3.6624E-01 3.6704E-01 3.6791E-01 3.6889E-01 3.6997E-01 3.7116E-01
3.7249E-01 3.7395E-01 3.7558E-01 3.7738E-01 3.7938E-01 3.8159E-01 3.8404E-01 3.8675E-01 3.8976E-01 3.9309E-01
3.9678E-01 4.0087E-01 4.0540E-01 4.1042E-01 5.4626E-01 6.8627E-01 5.1929E-01 5.3345E-01 5.4866E-01 5.6502E-01
5.8267E-01 5.8054E-01 5.2994E-01 5.3504E-01 8.6234E-01 1.1204E+00 6.7893E-01 6.9506E-01 7.1361E-01 7.3817E-01
6.8647E-01 1.9133E-01 2.9007E-02 0.0 0.0 5.7892E+00

```

```

.....
ENERGY ( 45 ) 2200 KEV - 2250 KEV
.....

```

```

3.7869E-01 3.7930E-01 3.7997E-01 3.8071E-01 3.8154E-01 3.8245E-01 3.8346E-01 3.8458E-01 3.8582E-01 3.8720E-01
3.8872E-01 3.9041E-01 3.9228E-01 3.9436E-01 3.9665E-01 3.9920E-01 4.0202E-01 4.0514E-01 4.0860E-01 4.1243E-01
4.1668E-01 4.2139E-01 4.2660E-01 5.4972E-01 6.7784E-01 5.2749E-01 5.4131E-01 5.5619E-01 5.7223E-01 5.8957E-01
5.8923E-01 5.4517E-01 5.5165E-01 8.4859E-01 1.0860E+00 6.8867E-01 7.0609E-01 7.2600E-01 7.5168E-01 6.9750E-01
1.8287E-01 2.6294E-02 0.0 0.0 5.9009E+00

```

.....  
ENERGY ( 44 ) 2150 KEV - 2200 KEV  
.....

3.8920E-01	3.8989E-01	3.9065E-01	3.9149E-01	3.9243E-01	3.9347E-01	3.9461E-01	3.9589E-01	3.9730E-01	3.9886E-01
4.0059E-01	4.0251E-01	4.0463E-01	4.0699E-01	4.0960E-01	4.1249E-01	4.1569E-01	4.1924E-01	4.2317E-01	4.2752E-01
4.3235E-01	4.3769E-01	5.4795E-01	6.6400E-01	5.3032E-01	5.4370E-01	5.5813E-01	5.7374E-01	5.9063E-01	5.9196E-01
5.5432E-01	5.6201E-01	8.2821E-01	1.0446E+00	6.9147E-01	7.0992E-01	7.3091E-01	7.5739E-01	7.0082E-01	1.7265E-01
2.3559E-02	0.0	0.0	6.0248E+00						

.....  
ENERGY ( 43 ) 2100 KEV - 2150 KEV  
.....

4.0907E-01	4.0987E-01	4.1075E-01	4.1173E-01	4.1282E-01	4.1402E-01	4.1536E-01	4.1683E-01	4.1847E-01	4.2028E-01
4.2229E-01	4.2452E-01	4.2699E-01	4.2972E-01	4.3275E-01	4.3610E-01	4.3982E-01	4.4393E-01	4.4850E-01	4.5355E-01
4.5915E-01	5.5662E-01	6.6068E-01	5.4393E-01	5.5705E-01	5.7124E-01	5.8662E-01	6.0332E-01	6.0660E-01	5.7571E-01
5.8497E-01	8.2068E-01	1.0163E+00	7.0808E-01	7.2808E-01	7.5072E-01	7.7863E-01	7.2006E-01	1.6805E-01	2.0810E-02
0.0	0.0	6.1422E+00							

.....  
ENERGY ( 42 ) 2050 KEV - 2100 KEV  
.....

4.2234E-01	4.2325E-01	4.2426E-01	4.2538E-01	4.2662E-01	4.2799E-01	4.2951E-01	4.3120E-01	4.3306E-01	4.3513E-01
4.3742E-01	4.3996E-01	4.4277E-01	4.4589E-01	4.4934E-01	4.5317E-01	4.5741E-01	4.6210E-01	4.6730E-01	4.7307E-01
5.5765E-01	6.4956E-01	5.4965E-01	5.6238E-01	5.7618E-01	5.9118E-01	6.0750E-01	6.1252E-01	5.8817E-01	5.9874E-01
8.0367E-01	9.7814E-01	7.1456E-01	7.3573E-01	7.5960E-01	7.8849E-01	7.2779E-01	1.5878E-01	1.8054E-02	0.0
0.0	6.2761E+00								

.....  
ENERGY ( 41 ) 2000 KEV - 2050 KEV  
.....

4.3646E-01	4.3750E-01	4.3865E-01	4.3993E-01	4.4134E-01	4.4291E-01	4.4464E-01	4.4656E-01	4.4869E-01	4.5105E-01
4.5367E-01	4.5656E-01	4.5977E-01	4.6333E-01	4.6727E-01	4.7163E-01	4.7647E-01	4.8182E-01	4.8776E-01	5.5951E-01
6.3927E-01	5.5619E-01	5.6853E-01	5.8196E-01	5.9658E-01	6.1254E-01	6.1932E-01	6.0152E-01	6.1342E-01	7.8768E-01
9.4100E-01	7.2203E-01	7.4441E-01	7.6954E-01	7.9944E-01	7.3698E-01	1.5210E-01	1.5301E-02	0.0	0.0
6.4158E+00									

.....  
ENERGY ( 40 ) 1950 KEV - 2000 KEV  
.....

4.5415E-01	4.5534E-01	4.5667E-01	4.5813E-01	4.5975E-01	4.6155E-01	4.6354E-01	4.6575E-01	4.6820E-01	4.7091E-01
4.7391E-01	4.7724E-01	4.8092E-01	4.8500E-01	4.8953E-01	4.9454E-01	5.0009E-01	5.0624E-01	5.6531E-01	6.3303E-01
5.6675E-01	5.7878E-01	5.9190E-01	6.0625E-01	6.2193E-01	6.3056E-01	6.1939E-01	6.3274E-01	7.7673E-01	9.0909E-01
7.3668E-01	7.5845E-01	7.8506E-01	8.1619E-01	7.5327E-01	1.4434E-01	1.2563E-02	0.0	0.0	6.5587E+00

.....  
ENERGY ( 39 ) 1900 KEV - 1950 KEV  
.....

4.6735E-01	4.6870E-01	4.7021E-01	4.7187E-01	4.7371E-01	4.7576E-01	4.7802E-01	4.8053E-01	4.8331E-01	4.8639E-01
4.8980E-01	4.9358E-01	4.9776E-01	5.0240E-01	5.0754E-01	5.1324E-01	5.1955E-01	5.6602E-01	6.2173E-01	5.7200E-01
5.8363E-01	5.9637E-01	6.1033E-01	6.2563E-01	6.3595E-01	6.3118E-01	6.4581E-01	7.5974E-01	8.7109E-01	7.4057E-01
7.6546E-01	7.9326E-01	8.2533E-01	7.5802E-01	1.3448E-01	9.8509E-03	0.0	0.0	6.7157E+00	

ENERGY ( 38 ) 1850 KEV - 1900 KEV

4.8545E-01	4.8701E-01	4.8873E-01	4.9063E-01	4.9275E-01	4.9509E-01	4.9768E-01	5.0055E-01	5.0373E-01	5.0726E-01
5.1117E-01	5.1550E-01	5.2029E-01	5.2561E-01	5.3149E-01	5.3801E-01	5.7221E-01	6.1613E-01	5.8277E-01	5.9411E-01
6.0656E-01	6.2024E-01	6.3529E-01	6.4741E-01	6.4909E-01	6.6514E-01	7.4976E-01	8.4054E-01	7.5344E-01	7.7969E-01
8.0894E-01	8.4223E-01	7.7376E-01	1.3005E-01	7.1802E-03	0.0	0.0	6.8747E+00		

ENERGY ( 37 ) 1800 KEV - 1850 KEV

5.0561E-01	5.0739E-01	5.0937E-01	5.1156E-01	5.1398E-01	5.1667E-01	5.1965E-01	5.2295E-01	5.2661E-01	5.3066E-01
5.3515E-01	5.4012E-01	5.4563E-01	5.5174E-01	5.5850E-01	5.8076E-01	6.1317E-01	5.9586E-01	6.0696E-01	6.1918E-01
6.3267E-01	6.4754E-01	6.6148E-01	6.6954E-01	6.8707E-01	7.4323E-01	8.1391E-01	7.6939E-01	7.9712E-01	8.2792E-01
8.6257E-01	7.8979E-01	1.2279E-01	4.5674E-03	0.0	0.0	7.0394E+00			

ENERGY ( 36 ) 1750 KEV - 1800 KEV

5.2398E-01	5.2601E-01	5.2827E-01	5.3077E-01	5.3354E-01	5.3661E-01	5.4001E-01	5.4378E-01	5.4796E-01	5.5258E-01
5.5771E-01	5.6339E-01	5.6968E-01	5.7665E-01	5.8737E-01	6.0853E-01	6.0676E-01	6.1758E-01	6.2955E-01	6.4278E-01
6.5742E-01	6.7307E-01	6.8725E-01	7.0614E-01	7.3475E-01	7.8572E-01	7.8241E-01	8.1144E-01	8.4364E-01	8.7947E-01
8.0750E-01	1.1721E-01	2.0316E-03	0.0	0.0	7.2172E+00				

ENERGY ( 35 ) 1700 KEV - 1750 KEV

5.2883E-01	5.3110E-01	5.3361E-01	5.3639E-01	5.3948E-01	5.4289E-01	5.4668E-01	5.5087E-01	5.5551E-01	5.6066E-01
5.6636E-01	5.7268E-01	5.7968E-01	5.8743E-01	5.9602E-01	6.0554E-01	6.1609E-01	6.2777E-01	6.4072E-01	6.5506E-01
6.7096E-01	6.8856E-01	7.0807E-01	7.2968E-01	7.5363E-01	7.8016E-01	8.0955E-01	8.4212E-01	8.7820E-01	8.0356E-01
1.1127E-01	0.0	0.0	0.0	7.4187E+00					

ENERGY ( 34 ) 1650 KEV - 1700 KEV

5.4467E-01	5.4724E-01	5.5009E-01	5.5325E-01	5.5674E-01	5.6062E-01	5.6491E-01	5.6966E-01	5.7493E-01	5.8077E-01
5.8724E-01	5.9440E-01	6.0234E-01	6.1114E-01	6.2089E-01	6.3168E-01	6.4365E-01	6.5690E-01	6.7159E-01	6.8786E-01
7.0588E-01	7.2585E-01	7.4798E-01	7.7250E-01	7.9966E-01	8.2975E-01	8.6309E-01	9.0004E-01	8.2301E-01	1.1478E-01
0.0	0.0	0.0	7.6114E+00						

ENERGY ( 33 ) 1600 KEV - 1650 KEV

5.7140E-01	5.7437E-01	5.7766E-01	5.8130E-01	5.8534E-01	5.8982E-01	5.9477E-01	6.0026E-01	6.0635E-01	6.1309E-01
6.2056E-01	6.2883E-01	6.3800E-01	6.4816E-01	6.5941E-01	6.7188E-01	6.8569E-01	7.0100E-01	7.1796E-01	7.3675E-01
7.5756E-01	7.8063E-01	8.0618E-01	8.3449E-01	8.6585E-01	9.0060E-01	9.3911E-01	8.5969E-01	1.1919E-01	0.0
0.0	0.0	7.8017E+00							

ENERGY ( 32 ) 1550 KEV - 1600 KEV

```

.....
5.8507E-01 5.8841E-01 5.9212E-01 5.9622E-01 6.0077E-01 6.0581E-01 6.1139E-01 6.1758E-01 6.2443E-01 6.3203E-01
6.4044E-01 6.4976E-01 6.6009E-01 6.7153E-01 6.8421E-01 6.9825E-01 7.1382E-01 7.3106E-01 7.5016E-01 7.7132E-01
7.9477E-01 8.2075E-01 8.4953E-01 8.8142E-01 9.1676E-01 9.5590E-01 9.9707E-01 1.6188E-01 0.0 0.0
0.0 8.0219E+00

```

```

.....
ENERGY ( 31 ) 1500 KEV - 1550 KEV
.....

```

```

6.0178E-01 6.0556E-01 6.0975E-01 6.1439E-01 6.1953E-01 6.2523E-01 6.3154E-01 6.3854E-01 6.4629E-01 6.5487E-01
6.6438E-01 6.7492E-01 6.8660E-01 6.9953E-01 7.1387E-01 7.2975E-01 7.4734E-01 7.6683E-01 7.8843E-01 8.1236E-01
8.3887E-01 8.6824E-01 9.0078E-01 9.3684E-01 9.7678E-01 9.7901E-01 2.5249E-01 0.0 0.0 0.0
8.2509E+00

```

```

.....
ENERGY ( 30 ) 1450 KEV - 1500 KEV
.....

```

```

6.1861E-01 6.2288E-01 6.2762E-01 6.3286E-01 6.3867E-01 6.4511E-01 6.5224E-01 6.6014E-01 6.6890E-01 6.7860E-01
6.8935E-01 7.0125E-01 7.1445E-01 7.2906E-01 7.4526E-01 7.6320E-01 7.8308E-01 8.0510E-01 8.2950E-01 8.5654E-01
8.8649E-01 9.1968E-01 9.5645E-01 9.9719E-01 9.9891E-01 2.5440E-01 0.0 0.0 0.0 8.4957E+00

```

```

.....
ENERGY ( 29 ) 1400 KEV - 1450 KEV
.....

```

```

6.4807E-01 6.5298E-01 6.5843E-01 6.6446E-01 6.7115E-01 6.7856E-01 6.8676E-01 6.9585E-01 7.0593E-01 7.1709E-01
7.2945E-01 7.4315E-01 7.5833E-01 7.7514E-01 7.9378E-01 8.1442E-01 8.3729E-01 8.6263E-01 8.9070E-01 9.2181E-01
9.5627E-01 9.9445E-01 1.0368E+00 1.0379E+00 2.6288E-01 0.0 0.0 0.0 8.7407E+00

```

```

.....
ENERGY ( 28 ) 1350 KEV - 1400 KEV
.....

```

```

6.4113E-01 6.4765E-01 6.5489E-01 6.6290E-01 6.7179E-01 6.8162E-01 6.9252E-01 7.0460E-01 7.1798E-01 7.3281E-01
7.4923E-01 7.6743E-01 7.8760E-01 8.0994E-01 8.3469E-01 8.6211E-01 8.9249E-01 9.2615E-01 9.6345E-01 1.0048E+00
1.0505E+00 1.1013E+00 1.1088E+00 2.8075E-01 0.0 0.0 0.0 9.0165E+00

```

```

.....
ENERGY ( 27 ) 1300 KEV - 1350 KEV
.....

```

```

6.7526E-01 6.8213E-01 6.8976E-01 6.9820E-01 7.0755E-01 7.1791E-01 7.2939E-01 7.4211E-01 7.5621E-01 7.7182E-01
7.8912E-01 8.0829E-01 8.2953E-01 8.5306E-01 8.7912E-01 9.0801E-01 9.4001E-01 9.7546E-01 1.0147E+00 1.0583E+00
1.1065E+00 1.1118E+00 2.8505E-01 0.0 0.0 0.0 9.3084E+00

```

```

.....
ENERGY ( 26 ) 1250 KEV - 1300 KEV
.....

```

```

7.1313E-01 7.2040E-01 7.2844E-01 7.3736E-01 7.4724E-01 7.5818E-01 7.7031E-01 7.8374E-01 7.9862E-01 8.1511E-01
8.3338E-01 8.5363E-01 8.7605E-01 9.0090E-01 9.2843E-01 9.5894E-01 9.9273E-01 1.0302E+00 1.0717E+00 1.1176E+00
1.1194E+00 2.8681E-01 0.0 0.0 0.0 9.6195E+00

```

ENERGY ( 25 ) 1200 KEV - 1250 KEV

7.5603E-01	7.6374E-01	7.7227E-01	7.8172E-01	7.9219E-01	8.0379E-01	8.1665E-01	8.3089E-01	8.4667E-01	8.6415E-01
8.8352E-01	9.0498E-01	9.2876E-01	9.5510E-01	9.8429E-01	1.0166E+00	1.0525E+00	1.0921E+00	1.1361E+00	1.1346E+00
2.8872E-01	0.0	0.0	0.0	9.9511E+00					

ENERGY ( 24 ) 1150 KEV - 1200 KEV

8.0108E-01	8.0923E-01	8.1827E-01	8.2829E-01	8.3938E-01	8.5168E-01	8.6530E-01	8.8039E-01	8.9711E-01	9.1563E-01
9.3616E-01	9.5890E-01	9.8409E-01	1.0120E+00	1.0429E+00	1.0772E+00	1.1152E+00	1.1572E+00	1.2038E+00	3.9091E-01
0.0	0.0	0.0	1.0310E+01						

ENERGY ( 23 ) 1100 KEV - 1150 KEV

8.7502E-01	8.8394E-01	8.9381E-01	9.0475E-01	9.1687E-01	9.3030E-01	9.4517E-01	9.6166E-01	9.7992E-01	1.0002E+00
1.0226E+00	1.0474E+00	1.0749E+00	1.1054E+00	1.1392E+00	1.1766E+00	1.2181E+00	1.2640E+00	5.1618E-01	0.0
0.0	0.0	1.0674E+01							

ENERGY ( 22 ) 1050 KEV - 1100 KEV

9.1611E-01	9.2544E-01	9.3578E-01	9.4723E-01	9.5992E-01	9.7398E-01	9.8956E-01	1.0068E+00	1.0259E+00	1.0471E+00
1.0706E+00	1.0966E+00	1.1254E+00	1.1573E+00	1.1927E+00	1.2319E+00	1.2753E+00	5.1635E-01	0.0	0.0
0.0	1.1115E+01								

ENERGY ( 21 ) 1000 KEV - 1050 KEV

9.8584E-01	9.9590E-01	1.0070E+00	1.0194E+00	1.0330E+00	1.0481E+00	1.0649E+00	1.0835E+00	1.1040E+00	1.1268E+00
1.1521E+00	1.1801E+00	1.2111E+00	1.2454E+00	1.2835E+00	1.3257E+00	5.3825E-01	0.0	0.0	0.0
1.1577E+01									

ENERGY ( 20 ) 950 KEV - 1000 KEV

1.0598E+00	1.0706E+00	1.0826E+00	1.0958E+00	1.1105E+00	1.1268E+00	1.1448E+00	1.1648E+00	1.1869E+00	1.2114E+00
1.2385E+00	1.2686E+00	1.3020E+00	1.3389E+00	1.3798E+00	5.5062E-01	0.0	0.0	0.0	1.2097E+01

ENERGY ( 19 ) 900 KEV - 950 KEV

1.1346E+00	1.1462E+00	1.1590E+00	1.1732E+00	1.1889E+00	1.2063E+00	1.2256E+00	1.2470E+00	1.2707E+00	1.2969E+00
1.3260E+00	1.3582E+00	1.3939E+00	1.4334E+00	6.9931E-01	0.0	0.0	0.0	1.2693E+01	

## ENERGY ( 18 ) 850 KEV - 900 KEV

1.1879E+00 1.2000E+00 1.2134E+00 1.2282E+00 1.2447E+00 1.2629E+00 1.2831E+00 1.3055E+00 1.3303E+00 1.3578E+00  
 1.3882E+00 1.4219E+00 1.4593E+00 8.8839E-01 0.0 0.0 0.0 1.3506E+01

## ENERGY ( 17 ) 800 KEV - 850 KEV

1.2782E+00 1.2912E+00 1.3056E+00 1.3216E+00 1.3393E+00 1.3589E+00 1.3807E+00 1.4047E+00 1.4314E+00 1.4610E+00  
 1.4937E+00 1.5300E+00 9.2927E-01 0.0 0.0 0.0 1.4289E+01

## ENERGY ( 16 ) 750 KEV - 800 KEV

1.3822E+00 1.3963E+00 1.4119E+00 1.4291E+00 1.4483E+00 1.4695E+00 1.4930E+00 1.5190E+00 1.5479E+00 1.5799E+00  
 1.6153E+00 9.7867E-01 0.0 0.0 0.0 1.5160E+01

## ENERGY ( 15 ) 700 KEV - 750 KEV

1.5022E+00 1.5175E+00 1.5345E+00 1.5533E+00 1.5741E+00 1.5971E+00 1.6227E+00 1.6510E+00 1.6823E+00 1.7170E+00  
 1.3220E+00 0.0 0.0 0.0 1.6135E+01

## ENERGY ( 14 ) 650 KEV - 700 KEV

1.6406E+00 1.6573E+00 1.6758E+00 1.6963E+00 1.7190E+00 1.7442E+00 1.7721E+00 1.8030E+00 1.8372E+00 1.4116E+00  
 7.3296E-02 0.0 0.0 1.7245E+01

## ENERGY ( 13 ) 600 KEV - 650 KEV

1.8002E+00 1.8185E+00 1.8388E+00 1.8614E+00 1.8863E+00 1.9139E+00 1.9445E+00 1.9784E+00 1.6009E+00 7.8516E-02  
 0.0 0.0 1.8509E+01

## ENERGY ( 12 ) 550 KEV - 600 KEV

1.9827E+00 2.0029E+00 2.0253E+00 2.0501E+00 2.0775E+00 2.1080E+00 2.1417E+00 1.9072E+00 2.5606E-01 0.0  
 0.0 1.9969E+01

## ENERGY ( 11 ) 500 KEV - 550 KEV

2.1882E+00 2.2105E+00 2.2351E+00 2.2625E+00 2.2928E+00 2.3264E+00 2.1677E+00 2.7753E-01 0.0 0.0  
 2.1675E+01

```

.....
ENERGY ( 10 ) 450 KEV - 500 KEV
.....
2.4109E+00 2.4355E+00 2.4627E+00 2.4928E+00 2.5262E+00 2.4562E+00 6.0662E-01 0.0 0.0 2.3703E+01
.....
ENERGY ( 9 ) 400 KEV - 450 KEV
.....
2.6449E+00 2.6718E+00 2.7017E+00 2.7347E+00 2.7714E+00 8.8260E-01 0.0 0.0 2.6044E+01
.....
ENERGY ( 8 ) 350 KEV - 400 KEV
.....
2.8657E+00 2.8749E+00 2.9273E+00 2.9631E+00 1.3043E+00 0.0 0.0 2.8742E+01
.....
ENERGY ( 7 ) 300 KEV - 350 KEV
.....
3.0209E+00 3.0517E+00 3.0858E+00 1.9885E+00 0.0 0.0 3.1808E+01
.....
ENERGY ( 6 ) 250 KEV - 300 KEV
.....
3.0287E+00 3.0596E+00 2.4769E+00 1.2630E-01 0.0 3.5062E+01
.....
ENERGY ( 5 ) 200 KEV - 250 KEV
.....
2.7496E+00 2.6739E+00 4.6531E-01 0.0 3.8185E+01
.....
ENERGY ( 4 ) 150 KEV - 200 KEV
.....
2.0801E+00 8.7951E-01 3.5822E-01 4.0634E+01
.....
ENERGY ( 3 ) 100 KEV - 150 KEV
.....
7.1101E-01 1.1478E+00 4.3048E+01
.....
ENERGY ( 2 ) 50 KEV - 100 KEV
.....
4.5812E+00 4.1723E+01

```

## 付録 4 線量換算係数

### 1. 照射線量および空気吸収線量への換算係数

スペクトロメータによって得られた $\gamma$ 線の入射スペクトルから照射線量を求めるには、エネルギーの関数としての光子フルエンス-照射線量換算係数を必要とする。空気のW値を 33.85 eVとしたときのこの換算係数を付第 4.1 表に示す。なお、照射線量はやがて廃止され、空気吸収線量又は空気カーマに移行する気運にあるので、荷電粒子平衡が成立する場合の空気吸収線量への換算係数も同表に加えた。

### 2. 実効線量当量および1 cm深部線量当量への換算係数

昭和63年の法令改正により線量限度は実効線量当量および組織線量当量で定められることとなった。環境モニタリングにおいても空気吸収線量又は実効線量当量で評価が行われることになったので、光子フルエンスからこれらの線量への換算係数を付第 4.2 表に示す。実効線量当量のデータは、成人の人体ファントムを用いた計算結果のうち、環境放射線の方向分布を考慮して、ICRP Publ. 51に示されている等方照射の場合のデータを掲げた。

付第 4.3 表に、おなじく等方照射の場合の照射線量から実効線量当量への換算係数を示す。ここに見られるように rem ( $=10^{-2}$  Sv) で表された実効線量当量は広いエネルギー範囲にわたって、Rで表された照射線量のおよそ 0.7倍である。

通常の屋内、屋外の環境においては散乱線が存在するため、100keV~300keVのエネルギーの放射線が多く、このためICRUの周辺線量当量率は照射線量率に対して大き目に、実効線量当量率(回転照射)は小さ目になる。エネルギースペクトルから得られるこの係数は、それぞれおよそ105%、および65%である。

付第4.1表

光子フルエンスから空気吸収線量および照射線量への換算係数  
(空気のW値を 33.85 e Vとする)

光子エネルギー MeV	空気吸収線量への換算係数 $10^{-12}$ Gy $\text{cm}^2$	照射線量への換算係数 $10^{-10}$ R $\text{cm}^2$
1.0 $10^{-2}$	7.43	8.51
1.5	3.12	3.57
2.0	1.68	1.92
3.0	0.721	0.826
4.0	0.29	0.49
5.0	0.23	0.370
6.0	0.89	0.331
8.0	0.307	0.352
1.0 $10^{-1}$	0.371	0.425
1.5	0.599	0.686
2.0	0.856	0.981
3.0	1.38	1.58
4.0	1.89	2.17
5.0	2.38	2.73
6.0	2.84	3.25
8.0	3.69	4.23
1.0 $10^0$	4.47	5.12
1.5	6.12	7.01
2.0	7.50	8.59
3.0	9.87	11.3
4.0	12.0	13.8
5.0	13.9	15.9
6.0	15.8	18.1
8.0	19.5	22.3
1.0 $10^1$	23.1	26.5

付第4.2表

等方照射の場合における光子フルエンスから実効線量当量への  
換算係数 ( $10^{-12}$  Sv cm<sup>2</sup>)

光子エネルギー MeV	実効線量当量
1.0 $10^{-2}$	0.0220
1.5 $10^{-2}$	0.0570
2.0 $10^{-2}$	0.0912
3.0 $10^{-2}$	0.138
4.0 $10^{-2}$	0.163
5.0 $10^{-2}$	0.186
6.0 $10^{-2}$	0.196
8.0 $10^{-2}$	0.237
1.0 $10^{-1}$	0.284
1.5 $10^{-1}$	0.436
2.0 $10^{-1}$	0.602
3.0 $10^{-1}$	0.949
4.0 $10^{-1}$	1.30
5.0 $10^{-1}$	1.64
6.0 $10^{-1}$	1.98
8.0 $10^{-1}$	2.64
1.0 $10^0$	3.27
1.5 $10^0$	4.68
2.0 $10^0$	5.93
3.0 $10^0$	8.19
4.0 $10^0$	10.2
5.0 $10^0$	12.1
6.0 $10^0$	14.0
8.0 $10^0$	17.8
1.0 $10^1$	21.6

付第4.3表

等方照射の場合における照射線量から実効線量当量への  
換算係数 ( $10^{-2} \text{ S v R}^{-1}$ )

光子エネルギー MeV	換算係数
1.0 $10^{-2}$	0.0030
1.5 $10^{-2}$	0.0160
2.0 $10^{-2}$	0.0495
3.0 $10^{-2}$	0.187
4.0 $10^{-2}$	0.352
5.0 $10^{-2}$	0.488
6.0 $10^{-2}$	0.592
8.0 $10^{-2}$	0.675
1.0 $10^{-1}$	0.668
1.5 $10^{-1}$	0.635
2.0 $10^{-1}$	0.614
3.0 $10^{-1}$	0.600
4.0 $10^{-1}$	0.599
5.0 $10^{-1}$	0.602
6.0 $10^{-1}$	0.609
8.0 $10^{-1}$	0.623
1.0 $10^0$	0.638
1.5 $10^0$	0.666
2.0 $10^0$	0.688
3.0 $10^0$	0.720
4.0 $10^0$	0.739
5.0 $10^0$	0.755
6.0 $10^0$	0.770
8.0 $10^0$	0.797
1.0 $10^1$	0.822

## 参 考 資 料

## 参考資料1 NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータ による測定結果の不確かさ（精密さと正確さ）と問題点

NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータによる測定結果の不確かさに関する因子には次のようなものがある。

- (1) シンチレータ内のすべての位置におけるエネルギー吸収が正確に発光→電気パルスとして測定されているかどうか。これにはシンチレータと光電子増倍管の光学的結合、シンチレータの均一性、集光過程などが関係する。

特に、光子エネルギーの低い場合（表面での発光）と高い場合（深くまで入る）、宇宙線（全体一様）など発光位置の違いによる集光過程上の問題がないかに注意する必要がある。極端な場合、波高値とエネルギーとの比例関係は著しく損なわれることがある。

- (2) シンチレータ内での吸収エネルギーが正確に波高に変換（エネルギー校正）され、かつそれが解析を行う際の波高分布のエネルギーに合致しているかどうか。これは、エネルギー校正の良否によって決まるが、これがどの程度最終結果に影響するかを参第1.1表に示す。この例1は“0”点、 $^{40}\text{K}$ のピーク、 $^{208}\text{Tl}$ のピークのチャンネル値を基準値から変化させたとき得られる $\gamma$ 線線量率値の違いを示したもので、これで見られるように、環境放射線測定の場合、低いエネルギー領域の校正の不確かさが結果の値に大きな影響をもつ。

- (3) このほかに、測定の際の統計誤差がある。統計誤差は計数の統計から算出できるが、実際は同一測定場における繰返し測定によって得られる結果の分布を求め、決定する。参第1.2表は3in球形NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータを用いて、1分測定を90回くりかえし、その結果の分布を示したもので、数 $\mu\text{R}/\text{h}$ 程度の環境における1分間の測定では、 $\gamma$ 線については約2%（ $\sim 0.1 \mu\text{R}/\text{h}$ ）、3MeV以上の計数から求められる宇宙線線量には10%（ $\sim 0.3 \mu\text{R}/\text{h}$ 相当）の相対標準偏差があることがわかる。

参第 1. 1 表 1982年11月 9 日京大原子炉実験所において測定されたスペクトルについて、  
エネルギー、チャンネル間の対応の数値をいろいろ変えて線量率を求めた結果  
の例（アンダーラインは基準となる値）

“0”点を変える エネルギー チャンネル 0keV	K-40ピークを変える エネルギー チャンネル 1461keV	T 1-208ピークを変える エネルギー チャンネル 2614keV	照 射 線量率 ( $\mu$ R/h)
0 <u>1</u> 3 5 7 9	220 ↓	388 ↓	6.55 <u>6.47</u> 6.30 6.14 5.98 5.84
1 ↓	210 212 214 216 218 <u>220</u> 222 224 226	↓ 388 ↓	6.89 6.80 6.72 6.64 6.56 <u>6.47</u> 6.41 6.36 3.27
↓	220 ↓	382 386 <u>388</u> 392 396 400	6.50 6.49 <u>6.47</u> 6.48 6.48 6.48

参第1.2 表 1分間測定の90回分についての測定値の分布

計数値 (cpm)	差	γ線線量率 (μR/hr)	差	宇宙線線量率 (μR/hr)	差
13378.0000	-108.83203	6.48400	-0.06775	3.03900	0.09418
13439.0000	2.16797	6.57400	0.02425	3.28600	0.34118
13453.0000	16.16797	6.69700	0.13825	2.86200	-0.08282
13750.0000	313.16797	6.78300	0.23125	3.14500	0.20018
13565.0000	128.16797	6.76300	0.21125	3.00300	0.05618
13425.0000	-11.83203	6.34700	-0.20275	2.82700	-0.11782
13700.0000	263.16797	6.60700	0.05525	3.49800	0.55318
13620.0000	183.16797	6.70900	0.15725	2.86200	-0.08282
13521.0000	84.16797	6.48600	-0.06575	3.14500	0.20018
13510.0000	73.16797	6.47500	-0.05675	3.42700	0.48218
13472.0000	55.16797	6.58500	0.03425	2.79100	-0.15382
13336.0000	-50.83203	6.67300	0.12125	3.07400	0.12918
13570.0000	133.16797	6.43300	-0.11875	3.21500	0.27018
13554.0000	67.16797	6.43300	-0.11875	2.93300	-0.01182
13571.0000	134.16797	6.61100	0.05925	2.93300	-0.01182
13628.0000	191.16797	6.70100	0.14925	3.85200	0.90618
13261.0000	-175.83203	6.60300	0.04825	2.79100	-0.15382
13428.0000	-8.83203	6.43100	-0.12075	2.86200	-0.08282
13412.0000	-24.83203	6.53300	0.03625	2.68500	-0.25982
13339.0000	-97.83203	6.50700	-0.04275	2.82700	-0.11782
13468.0000	31.16797	6.38100	-0.17075	3.28600	0.34118
13592.0000	-44.83203	6.43700	-0.11275	2.79100	-0.15382
13596.0000	159.16797	6.45700	-0.09275	3.74500	0.80018
13425.0000	-10.83203	6.62900	0.07725	3.32100	0.37618
13440.0000	3.16797	6.24700	-0.26275	3.10900	0.16418
13295.0000	-141.83203	6.56400	-0.01225	2.93300	-0.01182
13533.0000	96.16797	6.34100	-0.21075	3.14500	0.20018
13557.0000	110.16797	6.51100	-0.03275	2.65000	-0.29482
13441.0000	4.16797	6.64100	0.08925	3.21500	0.27018
13700.0000	266.16797	6.44300	0.09625	3.18000	0.23518
13388.0000	-48.83203	6.59000	0.03725	3.18000	0.23518
13573.0000	136.16797	6.57500	0.02325	2.93300	-0.01182
13291.0000	-145.83203	6.79700	0.24725	2.65000	-0.29482
13505.0000	68.16797	6.34500	-0.20675	2.93300	-0.01182
13420.0000	-16.83203	6.56300	0.01125	2.86200	-0.08282
13455.0000	18.16797	6.47500	-0.07675	3.32100	0.37618
13300.0000	-63.83203	6.65300	0.05325	3.25100	0.30618
13546.0000	109.16797	6.39300	-0.15875	2.69700	-0.04782
13321.0000	-115.83203	6.57500	0.02325	2.96600	0.02318
13319.0000	-118.83203	6.54100	-0.01075	3.07400	0.12918
13450.0000	13.16797	6.48300	-0.07075	2.82700	-0.11782
13500.0000	63.16797	6.75400	0.13625	2.54400	-0.40082
13309.0000	-128.83203	6.75400	0.20225	3.14500	0.20018
13247.0000	-147.83203	6.51700	-0.03475	2.65000	-0.29482
13548.0000	111.16797	6.49200	-0.05975	2.57900	-0.36582
13244.0000	-166.83203	6.55500	0.00325	3.17500	0.17518
13430.0000	-6.83203	6.65100	0.11325	3.46300	0.51818
13407.0000	-29.83203	6.45100	-0.09175	2.57400	-0.36582
13611.0000	174.16797	6.54300	-0.01175	2.19100	-0.25382
13467.0000	30.16797	6.57100	0.02525	3.21500	0.27018
13293.0000	-143.83203	6.57100	0.02525	2.86200	-0.08282
13404.0000	-32.83203	6.52300	0.02825	2.64900	-0.29582
13482.0000	45.16797	6.54700	-0.00475	3.00300	0.05618
13424.0000	-12.83203	6.44700	-0.10475	2.65000	-0.29482
13513.0000	76.16797	6.71100	0.15925	3.39200	0.44718
13442.0000	3.16797	6.61600	0.06425	2.86200	-0.08282
13447.0000	-74.83203	6.50700	0.00825	2.61500	-0.32982
13424.0000	-4.83203	6.59000	0.03825	3.46300	0.51818
13433.0000	43.83203	6.60300	0.05625	3.28600	0.34118
13433.0000	66.16797	6.47900	-0.07275	2.82700	-0.11782
13512.0000	-34.83203	6.56100	0.00925	2.82700	-0.11782
13542.0000	105.16797	6.64900	-0.08375	3.03900	0.09418
13542.0000	105.16797	6.34300	-0.20875	2.33200	-0.61282
13405.0000	-31.83203	6.73300	0.15325	2.47300	-0.47182
13554.0000	22.16797	6.73300	0.18125	2.75600	-0.18882
13400.0000	-33.83203	6.57400	0.02225	2.61500	-0.32982
13306.0000	-130.83203	6.52700	-0.02275	2.82700	-0.11782
13405.0000	-31.83203	6.76200	0.21025	3.32100	0.37618
13422.0000	165.16797	6.53700	-0.01275	2.29700	-0.64782
13382.0000	-54.83203	6.65700	0.10725	3.03400	0.09418
13393.0000	-43.83203	6.72400	0.17425	3.25100	0.30618
13487.0000	45.16797	6.35400	-0.19175	2.57400	-0.36582
13422.0000	-14.83203	6.43300	-0.11775	3.14500	0.20018
13466.0000	29.16797	6.53700	0.03825	2.69700	-0.04782
13145.0000	-291.83203	6.45200	-0.09975	3.72100	-0.22382
13449.0000	52.16797	6.74100	0.18925	2.68500	-0.25982
13286.0000	-150.83203	6.53300	-0.30075	3.07400	0.12918
13338.0000	-98.83203	6.53300	-0.03875	2.26100	-0.68382
13230.0000	-206.83203	6.44700	-0.17875	3.74500	0.80018
13227.0000	-207.83203	6.44700	-0.17875	2.93300	-0.01182
13442.0000	25.16797	6.54700	-0.10275	2.42700	-0.11782
13219.0000	-217.83203	6.54700	-0.10275	1.28600	0.34118
13342.0000	-94.83203	6.67400	0.01225	2.79100	-0.15382
13421.0000	-35.83203	6.44500	-0.11275	2.57400	-0.36582
13553.0000	121.16797	6.57700	0.02525	3.25100	0.30618
13272.0000	-164.83203	6.48500	-0.06675	2.29700	-0.64782
13446.0000	209.16797	6.52400	-0.02775	3.21500	0.27018
13361.0000	-75.83203	6.68500	0.13425	2.54400	-0.40082
13435.0000	-1.83203	6.63100	0.07925	2.40300	-0.34182
13443.0000	8.16797	6.70400	0.15625	3.10900	0.16418
		6.47600	-0.07575		

TOTAL COUNTS	13436.8 ± 12.4 (0.0926%)			GAMMA-DOSE	6.552 ± 0.013 (0.1015%)			COSMIC-DOSE	2.945 ± 0.036 (1.2078%)
STAN DEV	118.1 (0.879%)			STAN DEV	0.119 (1.8165%)			STAN DEV	0.3743 (11.46%)

MEAN =	13436.8320	ERROR =	11.45826
STAN. DEV =	118.07481		

MEAN =	6.55175	ERROR =	0.0351
STAN. DEV =	0.11901		

MEAN =	2.94482	ERROR =	0.0351
STAN. DEV =	0.33743		

## 参考資料 2 各種計測器による測定結果の比較例

3地点で3機関のゲルマニウム半導体スペクトロメータと3機関のNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ、さらに3種の電離箱による同時計測を行った。その結果を参考までに見てみることにする。

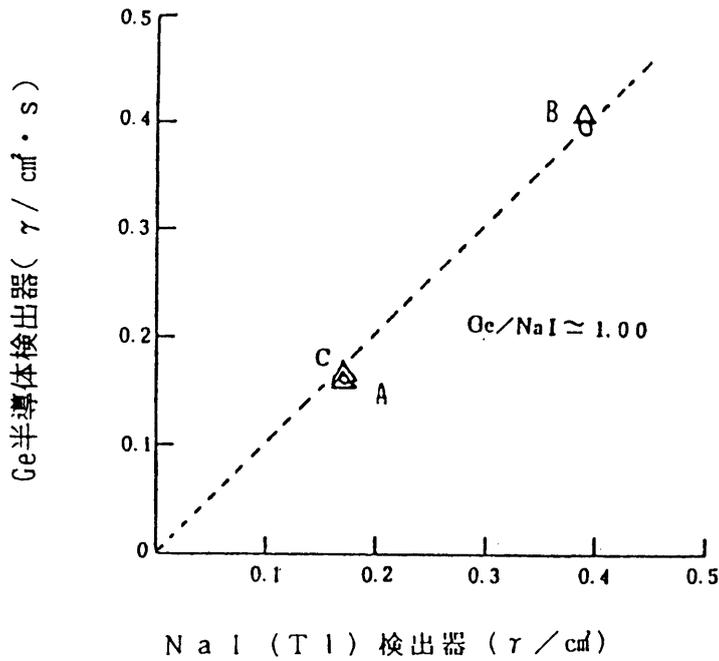
3地点のうち、A地点は屋内(体育館内)で、片側は崖がせまっている。また、屋外では強い降雨があり、空間 $\gamma$ 線量率は計測時間とともに増加傾向にあった。B地点は、広い平坦な裸地であり、表面土壌中の放射性核種の分布は、ほぼ全面で均一であった。しかし、1片の隅で放射線レベルがやや高くなる傾向が示された。計測時間中の空間放射線量はほぼ一定であり、天候も快晴であった。すなわちB地点では理想的な地形、環境条件とみられるところであった。C地点は、ごく近くにコンクリート造りの建物がある芝地で、海岸へ向かってゆるく下がっていく傾斜地であった。天候は、曇一時雨という状況であったが、空間線量率はほぼ一定とみられる状況であった。

参第2.1~2.3は、2機関のゲルマニウム半導体スペクトロメータによる各 $\gamma$ 線束密度計測値と、1機関のNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる $\gamma$ 線束密度計測値とを比較したものである。1.76MeV $\gamma$ 線付近を除き、各地点個々の値を考えれば、平均的にゲルマニウム半導体スペクトロメータによる値とNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる値の比が、ほぼ1.00に近いことがわかる。すなわち、線束密度については、NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ、ゲルマニウム半導体スペクトロメータともに多くの場合良好な値が得られることを示している。ただし、1.76MeV付近のデータについては大気中ラドン濃度の変化のため、個々の装置、個々の地点について相当の差がみられた。ゲルマニウム半導体スペクトロメータで得た線量については、参第2.1表に示される通り各機関(装置、データ処理方法が異なる)間でかなり良く一致している。しかし、NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータとの比較では必ずしもそうはならない。特に、A地点のような条件が複雑な場合には、差がでるのは当然であろう。

普通、こうして得られた比較測定の結果は一般にそのまま適用できるとは限らない。検出器を含む装置の違い、環境条件に対する装置の安定性の差、校正の差、解析や処理の際に使用している基礎データの差、手法の違いなど、偏りを生ずる原因は多く、計測される値には、これらのことにより若干の差が生じ得るものである点に注意が必要である。

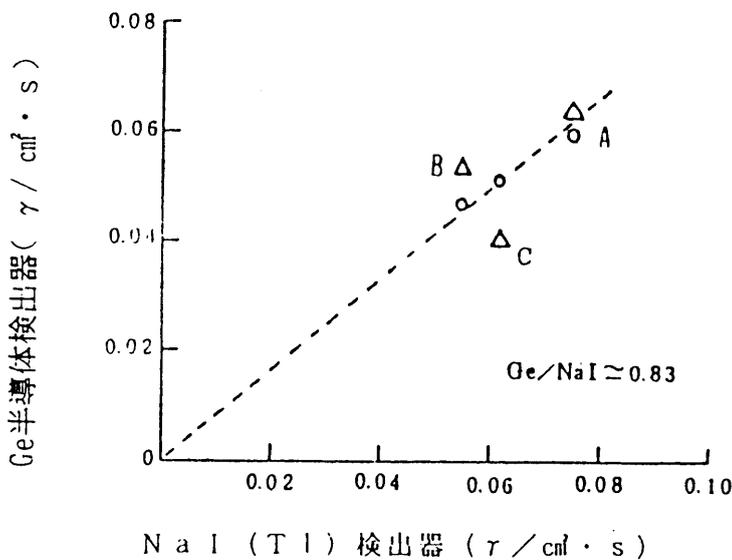
参第2.1表 各機関による計測結果の相互比較（照射線量率の比較）

場 所	番号	NaI(Tl) シンプレ-ションスペクトロメータ			電 離 箱			ゲルマニウム半導体スペクトロメータ		
		機 関 A	機 関 B	機 関 C	機 関 (a)	機 関 (b)	機 関 (c)	機 関 X	機 関 Y	機 関 Z
A 地点	4	7.52	8.70	7.49	11.57	11.8	11.93	6.09	6.06	—
	5	8.31	9.69	8.55	12.46	12.5	12.69	7.11	6.98	—
	6	8.20	9.50	8.25	12.29	12.4	12.54	7.62	6.98	—
	7	8.01	9.30	8.10	12.11	12.23	12.39	7.19	6.75	—
B 地点	8	12.34	13.07	12.1	16.14	16.3	16.43	13.69	12.60	13.34
	9	12.33	13.66	12.1	16.68	16.0	16.39	13.12	13.10	
	10	12.32	13.70	12.0	16.57	16.0	16.30	13.82	13.51	
	11	12.39	13.70	12.0	16.90	16.0	16.41	13.17	13.16	13.65
	12	12.28	14.62	11.9	17.03	16.4	16.35	13.65	13.16	
	13	12.33	13.91	12.0	16.71	16.14	16.30	13.58	12.96	13.49
C 地点	15	7.64	8.64	—	11.68	11.8	11.82	7.81	6.54	—
	16	7.52	8.47	7.61	11.67	11.5	11.67	7.36	6.45	—
	17	7.40	8.52	7.51	11.39	11.6	11.67	7.62	6.39	—
	18	7.52	8.54	7.55	11.43	11.5	11.68	7.41	7.47	—
	19	7.46	8.60	7.54	11.54	11.8	11.68	7.58	6.49	—
	20	7.52	8.55	7.55	11.54	11.64	11.70	7.72	7.15	—



付第2.1図 ゲルマニウム半導体スペクトロメータとNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる $^{208}\text{Tl}$  2.615MeV  $\gamma$ 線の線束密度計測値の比較

A, B, Cは測定地点、○及び△は機関X, YのGe半導体スペクトロメータによる測定値。またNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる測定は機関Cによる。(以下同様)



付第2.2図 ゲルマニウム半導体スペクトロメータとNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータによる $^{211}\text{Bi}$  1.756MeV  $\gamma$ 線の線束密度計測値の比較

## 参考文献

- (1) 小村和久、科学総説No.29、核現象と分析化学、日本化学会編、 p. 27 ~42 (1982)
- (2) 森内茂、JAERI-1209 (1971)
- (3) 阪上正信、「環境放射線——研究の現状と展望」日本原子力学会編 (1982)
- (4) Gogolak, C. V., Miller, K. M., EML 332 (1977)
- (5) Gogolak, C. V., EML 398 (1982)
- (6) Terada, H. et al. J. Nucl. Sci. and Technol., 17、 281~290 (1980)
- (7) 阪井英次等、JAERI M6498 (1976)
- (8) JIS Z 4520 (1979) ゲルマニウム $\gamma$ 線検出差の試験方法
- (9) 岡野真治、電気学会誌NE-79-7、 p. 53~62 (1979)

## 文部科学省放射能測定法シリーズ

- |                                      |                    |
|--------------------------------------|--------------------|
| 1. 全ベータ放射能測定法                        | 昭和 51 年 9 月 (2 訂)  |
| 2. 放射性ストロンチウム分析法                     | 昭和 58 年 12 月 (3 訂) |
| 3. 放射性セシウム分析法                        | 昭和 51 年 9 月 (1 訂)  |
| 4. 放射性ヨウ素分析法                         | 平成 8 年 3 月 (2 訂)   |
| 5. 放射性コバルト分析法                        | 平成 2 年 2 月 (1 訂)   |
| 6. NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータ機器分析法    | 昭和 49 年 1 月        |
| 7. ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー      | 平成 4 年 8 月 (3 訂)   |
| 8. 放射性ジルコニウム分析法                      | 昭和 51 年 9 月        |
| 9. トリチウム分析法                          | 平成 8 年 3 月 (1 訂)   |
| 10. 放射性ルテニウム分析法                      | 平成 8 年 3 月 (1 訂)   |
| 11. 放射性セリウム分析法                       | 昭和 52 年 10 月       |
| 12. プルトニウム分析法                        | 平成 2 年 11 月 (1 訂)  |
| 13. ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法 | 昭和 57 年 7 月        |
| 14. ウラン分析法                           | 平成 8 年 3 月 (1 訂)   |
| 15. 緊急時における放射性ヨウ素測定法                 | 昭和 52 年 10 月       |
| 16. 環境試料採取法                          | 昭和 58 年 12 月       |
| 17. 連続モニタによる環境 $\gamma$ 線測定法         | 平成 8 年 3 月 (1 訂)   |
| 18. 熱ルミネセンス線量計を用いた環境 $\gamma$ 線量測定法  | 平成 2 年 2 月 (1 訂)   |
| 19. ラジウム分析法                          | 平成 2 年 2 月         |
| 20. 空間 $\gamma$ 線スペクトル測定法            | 平成 2 年 2 月         |
| 21. アメリシウム分析法                        | 平成 2 年 11 月        |
| 22. プルトニウム・アメリシウム逐次分析法               | 平成 2 年 11 月        |
| 23. 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法        | 平成 8 年 3 月 (1 訂)   |
| 24. 緊急時におけるガンマ線スペクトロメトリーのための試料前処理法   | 平成 4 年 8 月         |
| 25. 放射性炭素分析法                         | 平成 5 年 9 月         |
| 26. ヨウ素-129 分析法                      | 平成 8 年 3 月         |

## 空間 $\gamma$ 線スペクトル測定法

平成 2年 7月 1日 第1刷 発行  
平成 10年 1月 25日 第3刷 発行

発 行 所

財 団 法 人 日 本 分 析 セ ン タ ー

〒263-0002 千葉県千葉市稲毛区山王町 295-3  
電 話 (043) 423-5325 (代表)  
(043) 424-8663 (直通)  
F A X (043) 423-4071