

東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理について（Ⅶ） ～空間放射線（ γ 線）の発生源と測定器の特性について！（最終）～

技術士（衛生工学・建設・環境）・環境カウンセラー

第一種放射線取扱主任者、甲種危険物取扱者など

環境計画センター 専任理事 ^{かぎや}鍵谷 ^{つかさ}司

これまで「環境施設」No.124号～131号（2011.6～2013.3）に東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理について（Ⅸ）～各地の空間放射線を測定してみました！～と題して各地の空間放射線を同じ測定器を用いて測定し、結果を比較して寄稿しました。

そもそも自然界の空間放射線の発生源が明らかでないので、測定値の変動に関する考察の根拠も薄弱であり、単なる測定値を考察したに過ぎない。今回は、基本である環境に放射線を放出する放射性物質の種類等について整理することにした。また、これまで測定した空間放射線の変動について次のように考察したが、他にも大きな原因があることに気付いたので、まとめた。【】内は追記した要因です。

①地下室など四面がコンクリートに囲まれた場所において放射線が高い理由は、四面からコンクリートに含まれる放射性物質から γ 線が放出されているため。

【 γ 線がコンクリート等により散乱し、エネルギーが小さくなった散乱線を再検知していることに留意】

②地下室等の閉鎖性空間では、コンクリートに含まれている放射性ウランの壊変生成物である放射性ラドン（ガス）が溜っている可能性がある。

【ラドンは気体であり移動が容易である。密閉空間では濃度が高くなることに留意】

③木造建屋では、その底盤や地下室のコンクリートから γ 線が放射され、距離減衰によ

り一階よりも二階の空間放射線が低いと考察した。

【地中や地下建材より放出されたラドンガスの上昇、拡散に考慮する必要あり】

④エネルギー補償機能なしのNaIシンチレーションサーベイメータによる空間放射線の測定値は、機能付きよりも1.5～1.8倍も高かった。

【測定器のエネルギー補償機能の有無により入射する γ 線のエネルギーにより実効線量に換算する場合の換算係数が数倍も異なる】

上記の【】内に記した内容について解説し、空間放射線測定に関する寄稿を最終とします。

なお、筆者は第一種放射線取扱主任者の有資格者ではあるが、実務から長いこと離れていたのでは基本的なことを理解しているにすぎません。したがって、不適切な表現等も多々あるかと思いますが、これから放射性セシウムを付着した災害廃棄物や除染土壌の取り扱い上で、測定が、どのような特性があるかについて実測値に基づいて解説したものです。詳しくは、公共機関で公表しているガイドライン等で勉強してください。

1. 放射線（ γ 線）の発生源について

身の回りには放射線が満ち溢れているとしても、人は放射線を感知できないので、全く無防備である。同じ電磁波でも赤外線は熱く感じるし、可視光線はまぶしく感じる。空間には、人が感知できない様々な電磁波に満ち

溢れている。見えないがラジオや携帯電話はどこでも電波を検知できるし、電磁波があることを認識できる。

しかしながら、放射線と聞くと、同じ電磁波であっても途端に「危険」のイメージが強くなる。空間放射線とはいったい何を測っているのでしょうか？福島原発事故以来、被ばく線量を1 mSv以下に管理すると規定しているが、これはあくまでも事故由来に基づく追加被ばく線量であり、原発から逃げると安全であると思いがちである。しかしながら、自然界には放射性物質が存在するので、どこへ逃げて被ばくする。地域によって違うが、日本人は年間に平均約1.5mSvを被ばくしている。放射性物質は、地球誕生時に地殻中に含まれており、半減期の長いもの及び壊変過程で生成した放射性物質が存在している。そのほかに宇宙から入る放射線がある。

- ①大地（地中）からの放射線；発生源は大地に含まれる放射性物質
- ②建物等の建材からの放射線；放射性物質を含む岩盤が砂利、土壌等になり、建材となる。
- ③体内にある放射性物質からの放射線；土壌や水に含まれる放射性物質が食べ物に移行
- ④大気中の放射性ラドンからの放射線；放射性物質の壊変過程で気体の放射性ラドンとなり、大気に移行するので、これを呼吸で体内に取り入れる。

大地からの自然放射線は、主に地球の誕生時から地殻中に含まれている天然の放射性物質から出ている。天然の放射性物質には次のものがある。

- ①カリウム（ K_{40} ）；半減期は12.48億年、天然存在比が0.0117%で1 gに30.4Bqの K_{40} が含まれるが、 β 崩壊してカルシウムになる。岩石中には0.3～3.3%程度含まれており、土壌では0.008～3.7%の範囲にあり、平均値は1.4%である。このうち、0.0117%が放射性カリウムである。動植物の必須元素であるカリウムは植物中には高い濃度で存在

するので、内部被ばくは避けられない。

- ②ルビジウム（ Rb_{87} ）；半減期は48.8億年、地殻の平均濃度は90ppm（0.009%）ほど含まれ、このうち約27.8%が放射性であり、壊変してストロンチウム87に変わる。海水中には、平均して125 μ g/l程度含まれている。
- ③ウラン（ U_{238} ）；半減期は約45億年で壊変によりラジウム、トリウムやラドン等に変化して最終的に非放射性の鉛になる。一般的な含有量は、重量（kg）あたり玄武岩で0.43mg、花こう岩で4.7mg、石灰岩で4.4mg程度といわれており、花崗岩に多く含まれる。また、海水中には408mg/l、土壌中には0.7～9 mg/kgの範囲にあるとの報告もある。
- ④トリウム（ Th_{232} ）；半減期は141億年で地殻に多く含まれる。重量（kg）あたり玄武岩で1.6mg、花こう岩で23mg、石灰岩で1.7mg、土壌で1～35mg程度、海水中の濃度は非常に低い。
- ⑤ラドン（ ^{222}Rn ）；ラドンの半減期は3.82日で、地殻に存在するラジウム（ ^{226}Ra ）の娘核種であり、気体なので常に大地から大気中に放出されている。日本では、大気中の平均濃度が13Bq/m³、最大濃度は310Bq/m³と報告されている。屋内濃度は、その位置、換気状況、周辺土壌のウラン含有量などによって大きく変動する。コンクリートから放出されるラドンが注目されがちであるが、実際は土壌から放出されるものが重要である。床下では高濃度になり易いが、十分に換気を実施することにより被曝を軽減できるであろう。ラドンによる年間被ばく線量は約0.4mSv程度である。

なお、屋内におけるラドンの放射能濃度は家屋構造材の種類によって異なり、コンクリートブロック造が最も高く42.5Bq/m³、プレハブ造は最も低く10Bq/m³で4分の1程度である。

この他に宇宙から飛んでくる放射線（宇宙

表－１ 家屋構造材と屋内ラドン濃度の調査事例

	調 査 家屋数	ラドン濃度 平均 (Bq/m ³)	ラドン濃度 最大値 (Bq/m ³)
コンクリートブロック造	16	42.5	208
コンクリート造	182	23.1	94
木 造	597	12.9	78
鉄骨フレーム造	90	12.8	77
プレハブ造	6	10.0	17

出典：ATOMICA 表１ 家屋構造材別の屋内ラドン濃度の年平均値

線）と大気との相互作用によって生じた放射性物質が地中に取り込まれるものがわずかながらあり、その主なものとしては次の二つがある。

- ①トリチウム（三重水素H₃）：半減期が12.3年で、地殻中にもかなり豊富に存在（10mg程度）する。水に溶けにくく海水中には少ないが、降雨中濃度は1～3 Bq/ℓ程度である。
- ②放射性炭素（C₁₄）：宇宙線が地球に入ると窒素原子に衝突して放射性炭素（C₁₄）を常に生成する。半減期は約5,730年であり、有機物の主要構成元素であり、動植物に取りこまれる。

なお、大地からの自然放射線量はその地域の地質構造の違いや季節・気候などの環境条件によってかなり変動する。

このように地殻、岩石、土壌、地下水、海水、建材、人体などほとんど全ての物質中に放射性物質が様々な濃度で含まれている。また、石材、砂・砂利、粘土やコンクリートなどの建材にはウランやラジウムなどがわずかに含まれており、家屋の床盤、壁・床や天井からγ線が放出されている。これらの放射性物質は固体であるのでほとんど移動しないが、壊変過程で生成するラドンは気体であり、揮散しやすい。地表深くの基盤からでも空隙あるいは地下水に溶けて地表に到達し、大気中に拡散する。当然、建材中からも放射性ガス

として室内に拡散するので溜る。換気の状態、壁面や天井の塗装などにより放射線量は異なる。

このように大地、構造物、食べ物や大気中の放射性物質が壊変あるいは崩壊する過程でγ線を放出するので、空間放射線はそのエネルギーを検知しているのである。なお、放射性物質の壊変は質量や電荷を持つα壊変やβ壊変であり、壊変後に生成した原子はエネルギー的に不安定なので、γ線を放出して安定化する。γ線は電磁波の一種であり、γ線を放出しても原子そのものは変わらない。また、シンチレーションサーベイメータはγ線のみを検知し、α線やβ線を検知しないことに留意する必要がある。

2. 空間放射線（γ線）のエネルギー分布について

人がγ線により被ばくした場合、γ線のエネルギーにより健康への影響の程度が大きく異なる。たとえば、同じ電磁波である光が人を暴露した場合、エネルギーの低い赤外線は熱く感じるし、高い紫外線は日焼け、免疫機能の低下や皮膚がんなどの健康被害を引き起こす。γ線はさらに高いエネルギーを有するので人の健康への影響も大きい。一般的に、γ線の測定には、シンチレーション式サーベイメータが用いられているが、これは、シンチレーターと呼ばれる固体の結晶にγ線が当

たった際に生じる微弱な発光を光電子倍增管で電気信号に変えて放射線のエネルギーや数を求める方式である。測定値の単位は、入射エネルギー (Gy/h) や γ 線の数だけではなく、人に対する影響を直ぐに判断できる実効線量当量 ($\mu\text{Sv/hr}$) に換算して表示される。シーベルトはグレイに対して放射線の種類や対象組織に対する係数を乗じて得る単位なので、必ずしも厳密ではない。本来、暴露される γ 線のエネルギーにより人に対する影響を評価する実効線量が変わるはずであるが、サーベイメータでは厳密に評価することは難しい。

一方、半導体検出器では、半導体に γ 線が照射すると電子が発生するので、これを増幅器によって電気パルスを増幅し、これを多重波高分析器 (MCA) により電気パルスを4096チャンネルに割り当ててエネルギー解析を行うことができる。

これまで、全国の様々な地点において空間放射線 (γ 線) を測定したが、検出された γ 線のエネルギーについては測定していない。

天然に存在する放射性核種による空間放射線 (γ 線) の測定事例を図-1に示す。約1日間測定した時のスペクトルで、横軸は γ 線のエネルギーを、縦軸はそのエネルギーの γ 線が検出された数 (計数値) を表す。エネルギーからその γ 線を放出している放射性核種がほぼわかる。(厳密には、エネルギーだけでは放射性核種を決定できないことがある。)

3. 空間放射線の測定に用いた測定器について

放射線を直接測定する方法がないので、放射線と物質との様々な相互作用を利用して測定する。たとえば、放射線の電離作用、発光作用、感光作用などを利用するが、放射線の種類 (α 、 β 、 γ 、中性子線等) や入射する放射線のエネルギーが異なるので、それぞれに適合した測定器が用いられる。通常、空間放射線の測定では、線量率の低い γ 線の測定に優れた特性を有するシンチレーション (発光) 式が用いられる。ここでは測定誤差の要

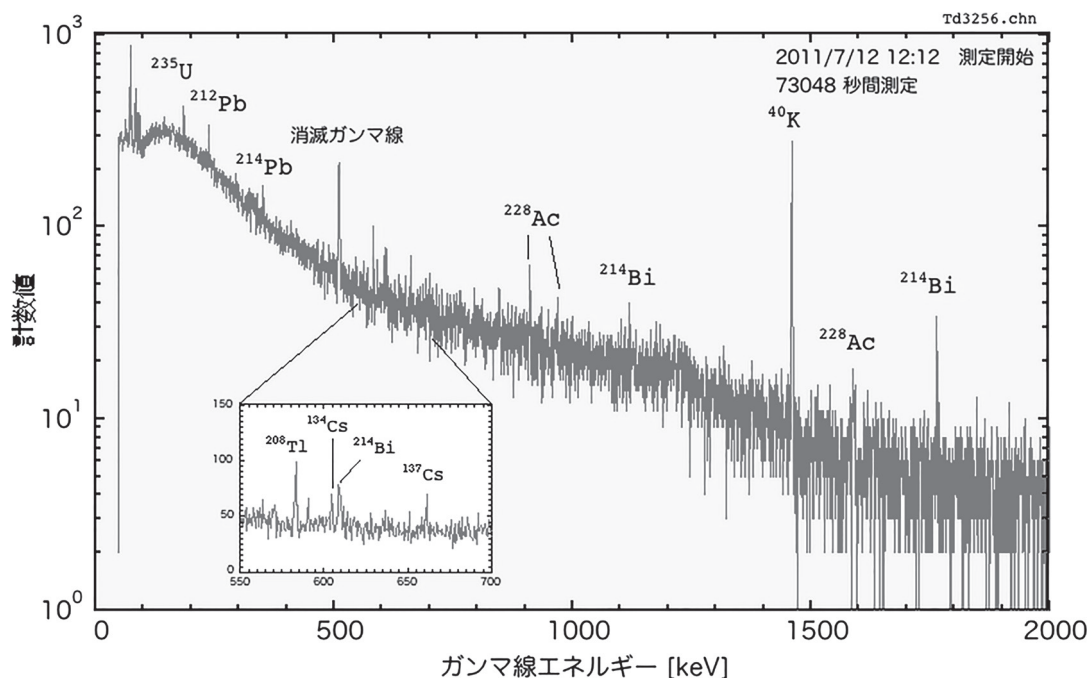


図-1 バックグラウンドの γ 線エネルギーと係数値の測定事例
<http://www.comp.tmu.ac.jp/cosmochem/Fukushima/measure.html>

因、とくにエネルギー補償機能の有無による測定値の変動について基本的なことを解説するが、私が理解している範囲内の知見なので、詳しくは専門書やネットで調べてください。

(1) 測定に用いた測定器 (NaI シンチレーションサーベイメータ) の特性

【 γ 線の測定方法】サーベイメータとは、小型で持ち運べる簡易な放射線測定器のことであり、これには電離箱式、GM 管式、シンチレーション式、半導体式などの検出器がある。それぞれの測定目的、測定対象となる放射線の種類や放射線の強さなどに応じて選択される (図-2)^{*1)}。

NaI シンチレーションサーベイメータは、入射した γ 線がヨウ化ナトリウム (NaI) の結晶にあたると励起状態になり、基底状態に戻るときに光 (シンチレーション) を発するので、この光を増幅して検出し、入射した γ 線の強さに換算する。光の強さを計測するの

で、検出部 (プローブ) 周囲からの光を遮るために真ちゅうなどの筒で囲っている。透過力の弱い α 線や β 線は遮へいされるので γ 線だけが測定され、しかも四方八方から入射する γ 線を検出している。よくプローブ (検出部の筒) を測定方向に向けた写真を見かけるが、これは筒先端の薄膜から入射する β 線を測定する方法である。 γ 線はあらゆる方向から入射するので、このような使い方はしない。正しくは校正時の測定方法と向き、体との位置や高さなど同じ状態で測定する。

ところで、放射性物質から放出される γ 線はランダムであり、連続して入射した場合にはすべてを数えることができない。また、 γ 線は透過力が高いので一部は検出器を通過し、かつエネルギーが低すぎると検出できなくなる。このため、正しい測定値を求めるためには、全ての γ 線が検出された場合に換算 (校正) する必要がある。つまり、測定器で表示される数値は、実際の測定値に校正係数を乗

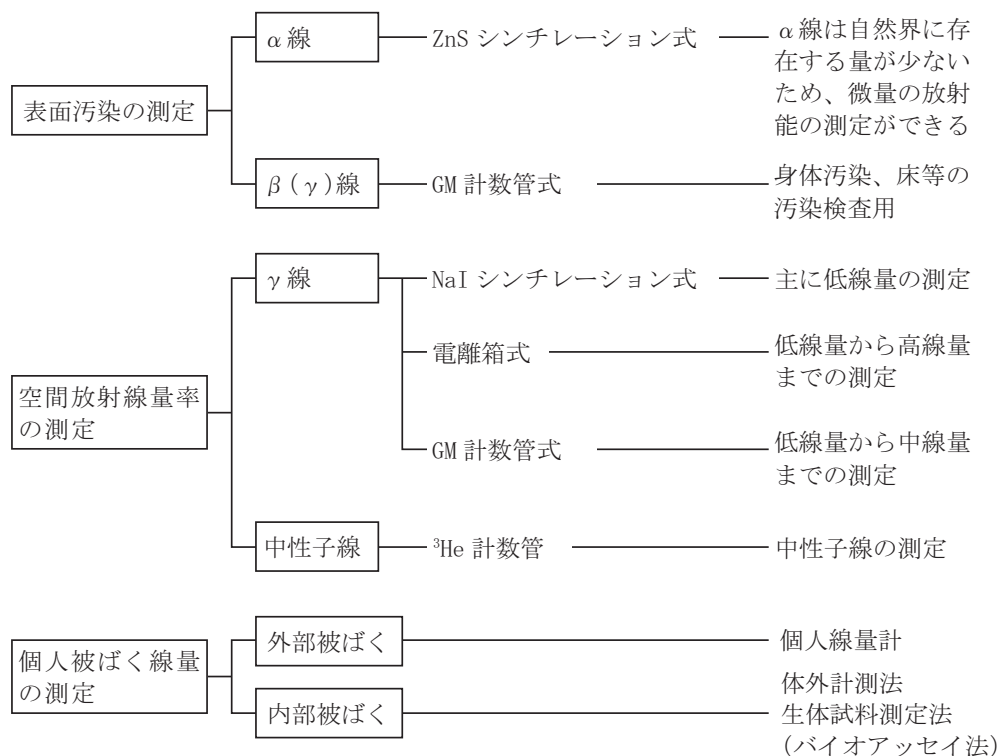


図-2 放射線の使用目的と測定器の種類^{*1)}

じて換算した数値である。(真の値＝指示値
×校正定数)

【測定原理】 γ 線を検知するシンチレーター (γ 線が当たると発光する物質) は、入射した γ 線のエネルギーにより励起状態になり、これが基底状態に戻るときに光を放出して安定状態になる。 γ 線のエネルギーの大きさにより様々なレベルの励起状態になるので、放出される光の種類 (波長) も変わる。エネルギーが高いと γ 線の波長は短くなる。光の波長を検出することにより入射した γ 線のエネルギー情報が得られる。なお、NaI (TI) と表示されている場合は、NaI の結晶を作るときに不純物としてタリウム (TI) を混ぜると検知感度が高くなるためである。

《説明；励起状態と基底状態について》

物質を構成する分子 (ここでは NaI) は、通常、エネルギー的に安定な状態 (基底状態) にある。これに γ 線のような強いエネルギーが当たるとエネルギーレベルが上がり、不安定な状態 (励起状態、活性状態) に転移する。不安定なのでエネルギー (光) を放出して元の安定な状態 (基底状態) に戻る。なお、エネルギーレベルは階段のように不連続なので、特定の光が放出される。

例えば、最下段にある石は位置エネルギーを持たないので基底状態と同じである。これを階段 (不連続) の上へ運ぶと位置のエネルギーが付与され、落下すると運動エネルギーに転換して破壊力を有する。また、上げる階段の高さ (エネルギーレベル) が違うと、それぞれの段から落下する運動エネルギーが異なる。つまり、階段下 (基底状態) へ落下した時の運動エネルギー (光の波長) を測定すると、位置のエネルギーである階段の高さ (入射した γ 線のエネルギー) を算出できる。なお、沢山の石を階段に上げると沢山の石が落下する。つまり放射線の数が多くなり、強い放射線となる。放射線のエネルギー (Kev) と放射線の強さ (Gy/hr, Sv/hr) は違うこと

が理解できたでしょうか。

【測定値は実効線量に換算；校正】

γ 線のエネルギーの強さにより励起状態が異なるので、放出される光の強さが異なる。 γ 線サーベイメータは入射したエネルギー (照射線量；空気中の全電荷量) を表示するのであれば真の値を求めやすいが、1989年4月からは実効線量当量値 (シーベルト；Sv) で表示することになった。放射線測定の目的が人に対する影響を管理するためなので、人に対する影響を直ぐに判断できる実効線量当量で表示することになったといわれている。

しかしながら、ひとが放射線により被ばくした場合、エネルギーの大きさにより細胞に対する影響が異なり、エネルギーの大きな γ 線ほど影響が大きくなる。つまり、入射するエネルギーの大きさにより実効線量当量変動することになる。 γ 線一個ごとにエネルギーを測定して換算することは簡易なサーベイメータでは極めて難しい。一般的に、 γ 線による被ばく量を評価するためには、ひとの皮ふ 1 cm 下の被ばく線量 (1 cm 線量当量) が用いられる。ひとの様々な組織に対する影響はエネルギーの大きさごとに異なるので換算しなければならない。つまり、入射する γ 線のエネルギーがわからなければ正しく換算することができないことになる。

【検出器のエネルギー特性】

入射するガンマ線のエネルギーとひとのモデルを用いて 1 cm 線量当量を正確に測定すると図-3 のようになる。あるエネルギーの放射線を検出器に照射し、照射した線量に対する検出器の指示値の比を求めて各エネルギー毎にグラフ上に表したものである。「1 cm 線量当量対応型」の線が、エネルギーに応じた正しい線量率なので、この曲線に近いほど測定誤差は小さくなる。サーベイメータのエネルギー特性が「1 cm 線量当量曲線」より上側であれば測定器の表示が過大評価になり、下

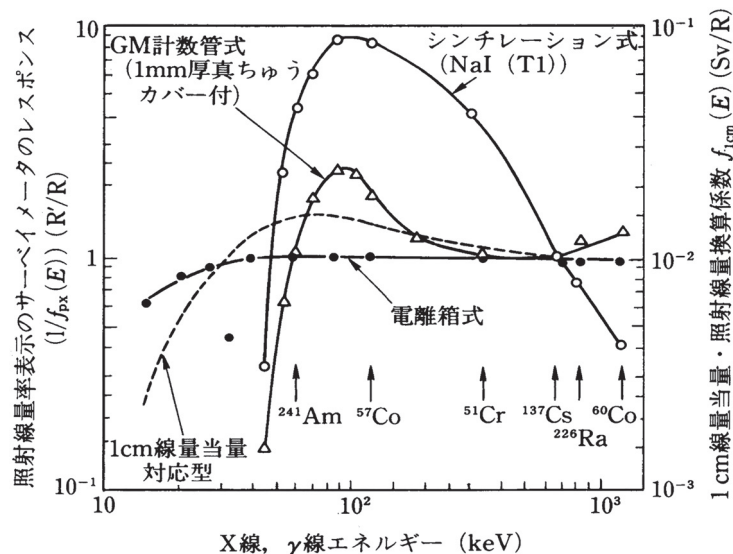


図-3 サーベイメータのエネルギー特性と1 cm線量当量^{※2)}

側であれば過小評価となる。つまり、エネルギー補償機能なしのNaIシンチレーションサーベイメータは、 γ 線のエネルギーが低い範囲では「1 cm線量当量対応型」よりも数倍程度大きな線量当量を示すので、誤差が大きくなることを示す。なお、図からも明らかなようにCs137で校正した場合には、「1 cm線量当量対応型」と同じ表示になるので誤差が小さいことを意味する。

【シンチレーション式測定器が用いられる理由】

図-3から「1 cm線量当量曲線」に近似したエネルギー特性を有する測定方式が最も誤差の小さいことを示す。精度の高い測定器は、電離箱式>GM管式>シンチレーション式であることが分かる。しかしながら、エネルギー特性は優れているが、検出できる感度が大きく異なる。一般的に検出できる強さは次のようにいわれている。

- ①電離箱式では1 μ Sv/hr 以上
 - ②GM管式では0.1 μ Sv/hr 以上、
 - ③シンチレーション式では0.001 μ Sv/hr (バックグラウンド) 以上
- たとえば、日本の自然界の空間線量率は0.02

～0.06 μ Sv/hr程度である。また、追加被ばく線量基準の1 mSv/年を時間あたり空間線量率に換算すると0.2 μ Sv/hr程度である。このような低線量率の測定器としてはシンチレーション式が最も適していることがわかる。シンチレーション式では入射する γ 線のエネルギーを検出することができるので、エネルギー補償機能付き測定器ではいろいろな方法を用いて「1 cm線量当量対応型」になるように換算している。つまり、測定精度がかなり高い表示ができる。一方、エネルギー補償機能なしの測定器では、一般的に図-3に示したCs137で校正するが、Cs137を高い精度で測定できるが、それよりもエネルギーが低い γ 線はかなり過大に換算されることになる。なお、GM管式は入射する γ 線の数測定できるが、エネルギーを測定できないので、物理的な方法で「1 cm線量当量対応型」になるように補正して換算する。

【検出器の方向特性】

γ 線はあらゆる方向から検出器に入射する。検出器に入射する放射線の変化させて、その指示値を円形グラフに表したものがサーベイメータの方向特性である。図-4

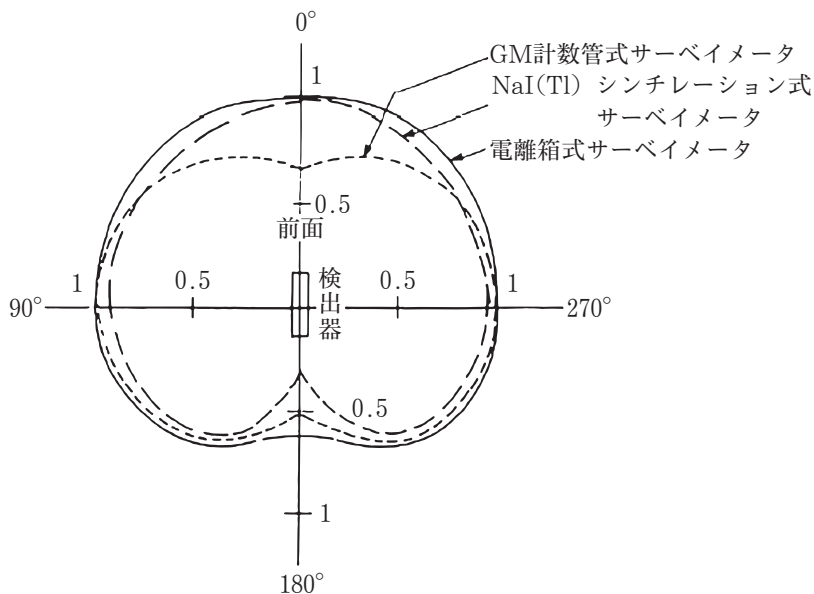


図-4 γ (X) 線用サーベイメータの方向特性の事例^{*3)}

に示したように、一般的に後方から入射する放射線に対して感度が悪くなり、エネルギーが低くなるほどこの傾向が著しくなる。したがって、正確に測定するためには、サーベイメータの校正を行った時と同一の方向で測定を行う必要がある。通常の市販の測定器では0°方向からの線源照射時のレスポンスを1とした場合の方向特性が取扱説明書に掲載されている。

下図からもプローブ（検出部の筒）を外して測定方向に向けたりすると方向特性が変わるので、 γ 線の検出率が校正時と異なった換算係数になるので、その結果測定値に誤差が生じる。

【 γ 線の散乱について】

γ 線は、 α 線や β 線のような重さを持った粒子ではなく、電磁波である。これが原子を構成する軌道電子との相互作用により光電効果、電子対生成、コンプトン散乱によりエネルギーを失う。

①光電効果は、 γ 線が原子核を周る電子にエネルギーを与えて消滅するが、軌道電子が原子から飛び出し、電離が起こる。

②コンプトン効果； γ 線は電磁波（波）であるが、粒子のように振る舞って軌道電子にぶつかり電子を弾き飛ばし、散乱した γ 線は、失った運動エネルギーは入射したときよりも電子に与えた分、小さくなり、方向も変わることをいう。電子が飛び出すので電離する。

③電子対生成とは、 γ 線のエネルギーが非常に大きい場合には、電子や原子核の近くを通る時、自分が消滅して電子と陽子が生成する。

空間放射線を測定する場合には、 γ 線は測定する人や周辺の壁などに衝突して散乱し、エネルギーが低くなったものが再び検出器で検知されうる。とくに、地下室などでは γ 線が散乱して再検出される可能性が高い。散乱線は、エネルギーが低くなるので、 γ 線の数が増えることになる。測定における最も大きな問題は、図-3に示したようにシンチレーションサーベイメータでは、 γ 線のエネルギーが低くなると1 cm線量当量・照射線量換算係数が大きく変動することである。

一般的に測定する γ 線のエネルギーは、50KeV～3 MeV程度である。Cs137は壊変過

程で0.66MeVの γ 線を放出するが、この付近の換算係数は1cm線量当量対応型曲線(図-3の点線)とほぼ同じである。一方、コバルト60は、崩壊生成物のニッケル60が1.17MeVと1.33MeVの2本の γ 線を放出する。この付近の換算係数は1cm線量当量対応型曲線(図-3の点線)の半分程度であり、測定値は小さく表示される。また、放射性K40の壊変に伴う γ 線では1.46MeVであり、換算係数は低くなるので測定値はさらに低く表示される。しかしながら、 γ 線がコンクリートなどに衝突してエネルギーの低い散乱線が再検知されると測定値は大きく換算されるので、実際の真の値を求めることは困難である。

このような理由により、エネルギー補償機能無しシンチレーションサーベイメータでは機能付きサーベイメータと比べて測定値が1.5～1.8倍も高かった理由ではないかと考えられる。

【おわりにあたって】

これまで空間放射線を実測し、機器誤差や測定条件等により測定値が大きく変動する理由を説明したが、最も大きく変動する理由は、シンチレーションサーベイメータのエネルギー特性にあり、空間放射線(γ 線)のエネルギーが校正したセシウム137より低いためであると考察した。

いずれにしてもサーベイメータは簡易測定器であり、測定値の絶対値を評価するのではなく、その測定器での測定値を基準にしてモニタリングあるいは同じ測定器で測定した結果を比較することが基本であることが分かった。

最後に、私は、放射線測定技術の専門家でもないし、経験も少ない。誤解している部分も多々あるかも知れないし、放射線を専門とする分野の方々には常識なことかもしれないが、他分野の人、素人の方々の理解に役立てば幸いである。

〈引用資料〉

-
- ※1) 原子力資料情報室(CNIC); <http://www.cnic.jp/modules/radioactivity/index.php/16.html>
 - ※2) 緊急被ばく医療研修のホームページ; <http://www.remnet.jp/lecture/forum/index2.html>
 - ※3) エネルギー補償機能; <http://www.mikage.to/radiation/info/info0004.html>