

福島第一原発の事故と サーベイメータを用いた 放射能汚染測定について

梶野 良穂

Hino Yoshio

1 はじめに

あの史上最悪と言われたチェルノブイリ事故から25年を迎え、今年は高らかに“原子力復活”を宣言するはずであった。しかし、3月11日の東日本大震災と、それに伴う予測規模を遙かに上回る大津波によって、原子力事故としては最大規模である原子力事象評価尺度暫定レベル7の事態が、我が国で起きている。その現実を目の前にして、様々な人々が、様々な測定器を使って、これまた様々な値を発表している。これは、「放射線防護用設備・機器ガイド」¹⁾を編集している者の責務として、“何を、どのレベルで測定するのか？ それには、どの測定器が最適で、どうすればきちんとした数値が得られるのか？”をもう一度きちんと考えてみる必要を感じ、急遽筆を執った次第である。あまりにも基本的な話が多く、専門家の読者諸氏にはいささか退屈かもしれないが、測定要員を原発事故周辺に派遣する際などのテキストとして、役立てていただければ、誠に幸いである。

2 福島第一原発で何が起きたか？ どんな核種が放出されたか？ そのレベルは

まず、東京電力(株)福島第一原子力発電所で何が起きたかを振り返ってみると、3月11日14時46分にマグニチュード9の巨大地震が発

生じた。原子炉そのものは地震により停止したが、送受電系統損傷で外部電源を喪失し、非常用ディーゼル発電機を起動させた。しかしその1時間後、津波により全交流電源を喪失した。この結果、炉心の冷却ができず、ジルコニウム-水反応によると考えられる大量の水素ガスが発生し、3月12日にまず1号機で水素爆発が起き、3月14日には3号機、そして3月15日未明に2号機格納容器の圧力抑制室が破損し、何と停止中の4号機でも建屋内で水素爆発が起きた。

これらの一連の経過において、3月12日から圧力容器内の放射性ガスが排出され、特に14日午後から15日午前にかけて、水素爆発に伴うと考えられる大量の放射性物質が放出された。これらの放射能及び外部放射線量率の変化は、福島以外の関東各地でも測定されている²⁻⁴⁾。

興味深いのは、放射性物質を含んだ放射能雲の各地への到達時刻である。高エネルギー加速器研究機構は15日朝の4時と9時頃、一方、直線距離で12 km南の産業技術総合研究所では、12時半頃（連続モニタをしていなかったため、早朝のピークがあったかは不明）、産総研から50 km南方の日本分析センターでは、朝の4時頃と午後の4時頃にピークが来ている。一方、東京都日野市では、15日の12時半頃に

ピークが来ている。当時、東北の風で風速は5 m程度（時速20 km程度）であった。これらの事実を見ると、福島第一から放出された放射能雲は、さほど拡散することなく、あたかも九尾の狐の尾のような状態で幾つかの気団に分かれて各地を通過したものと想像される。また、空間線量率の時系列変化から、これら大気中に放出された放射能は、福島県内では3月16日の雨で、関東地区では3月21日の雨により、大部分が地上に降下したものと考えられる。

さて、その降下成分であるが、産総研では地上にビニールシートを張り、その上を定期的に拭き取って、その試料をGe検出器で測定している。その結果、主要な核種として、 ^{132}Te 、 ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 等が検出された。チェルノブイリ事故との比較で見ると、原子炉に大量に残存しているはずの ^{144}Ce など、高沸点金属成分が見付かっていない。その反面、タービン建屋の汚染水中には、かなりの濃度の ^{144}Ce が含まれていることが報告されており、大気中に放出された成分とは、明らかに異なっている。また、興味深いのは、文部科学省から随時更新されて公表されている福島第一原発周辺の土壤中の放射能成分である⁵⁾。ここでは、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs そして $^{129\text{m}}\text{Te}$ が主要な核種として表示されている。その際、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ の ^{137}Cs に対する比率が、北西の飯舘村方向と南のいわき市方面では、いわき市方面が $^{129\text{m}}\text{Te}$ 濃度で3倍程度多い点である。放射能雲の到達時刻の差に関する説明も含め、今後SPEEDIのデータとそれぞれの炉の爆発時の風向き、各地の降雨時刻等との重ね合わせにより、詳細が解明されていくものと期待している。

このようにして放出された放射能が、全体にどのように拡散したかに関する詳細な情報を、文部科学省及び米国エネルギー省による航空機モニタリングの測定結果⁶⁾から見る事ができる。これは、ヘリコプター搭載型の大型NaI(Tl)検出器で上空から測定した γ 線スペクトルを解析し、その地域の ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能面密度

(Bq/m^2)を求めた結果を地図上に表示したもので、全体の分布を一目で見ることができる。データは随時更新されており、最近の結果では測定地域が福島県外にまで拡大されており、さらに日本分析センターや大学などが参加して実施した実際の土壌サンプリング測定の結果と照合され、修正が行われている。したがって、極めて信頼性の高い広範囲の放射能モニタリングマップであるので、是非参照されたい。

これまでの情報を総合すると、空間線量率に寄与したのは ^{133}Xe などの希ガスと ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs などであるが、4月上旬までの緊急時を過ぎた現在は、 ^{131}I より短い半減期成分の放射能は、ほぼ影響のない程度に減衰しており、今後は ^{134}Cs と ^{137}Cs に的を絞って良さそうである。その線量率は、福島県外の周辺地域では概ね $0.1\sim 1\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ 程度、放射能では $30\ \text{Bq}/\text{m}^2$ 以下のレベルである(2011年7月現在)。このレベルは、正に通常管理区域において、管理区域境界や管理区域からの搬出物品のチェックを行ってきたレベルである。

なお、最初に断っておくが、食品に含まれる放射性セシウムの規制レベル(500 Bq/kg)や廃棄物のクリアランスレベル(100 Bq/kg)の微弱な放射能を、一般のサーベイメータで測定するのは極めて困難である。確かに、3月の爆発事故と直後の雨を受けた野菜類には、サーベイメータでも検出できるほどの ^{131}I が付着していたこともあったが、既に十分に減衰しており、もし現時点(6月以降)でサーベイメータにより検出されるほどの汚染食品があれば、まずはサーベイメータの故障を疑うべきである。測定対象は既に ^{131}I から、半減期の長い ^{134}Cs と ^{137}Cs に変わってきているが、例えば1 Lの水(10 cm×10 cm×10 cm)に ^{137}Cs が1,000 Bq溶けている場合、表面から5 cm離れた位置での線量率は、わずか $0.01\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ 弱である。したがって、放射性セシウムが検出されて話題になった牛肉で、出荷前に生きた牛の表面をサーベイメータで測定したが何も検出されなかった

のは当然である。

3 サーベイメータの機種選択

手元に幾つかのサーベイメータがある場合、 γ 線の線量を測定するのか、荷電粒子を測定するのかを決める必要がある。その際に、図1を参考にしたい。この図の左側に示した“線量率”，“荷電粒子”，“スペクトル分析”は、それぞれ線量率を測定するサーベイメータは概ね $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以上が測定の対象であり、表面からの荷電粒子放出を測定する場合は $0.4\sim 400 \text{ Bq/cm}^2$ 程度、それ以下の汚染を測定するには γ 線スペクトル分析を行うことが必要であることを示している。

3.1 線量率測定用サーベイメータ

一般に、サーベイメータは汚染の有無を見るのが主な目的であるから、GM計数管や電離箱では、管理区域境界の $0.6 \mu\text{Sv/h}$ （3月を2,184時間で計算）以上は、良好な直線性を持つが、それ以下の線量率レベルでは、測定値に相当の

ばらつきが出てくる。 $1 \mu\text{Sv/h}$ の線量率から得られる出力は、1 Lサイズの電離箱で数十 fA (f: フェムトは 10^{-15}) のオーダーであり、一般のGM計数管では数 cps の計数率にすぎない。したがって、たとえ時定数を長めに設定しても、測定値がばらつくのは無理もなく、一般環境の $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率を正確に測定したい場合は、より高感度のシンチレーション式サーベイメータを選択することが望ましい。

線量率測定において注意すべきは、機器によってエネルギーレスポンスに大きな違いがあることである。電離箱式サーベイメータは比較的 γ 線エネルギーに感度が影響されないのに対し、GM計数管や、特にシンチレーション式のサーベイメータは、100 keV 近辺の低エネルギー γ 線に感度が高い特徴がある。ただし、最近のシンチレーション式サーベイメータには、エネルギー補償回路の内蔵により、エネルギーレスポンスをフラット化した製品も販売されているので、エネルギー補償機能の有無を確認し

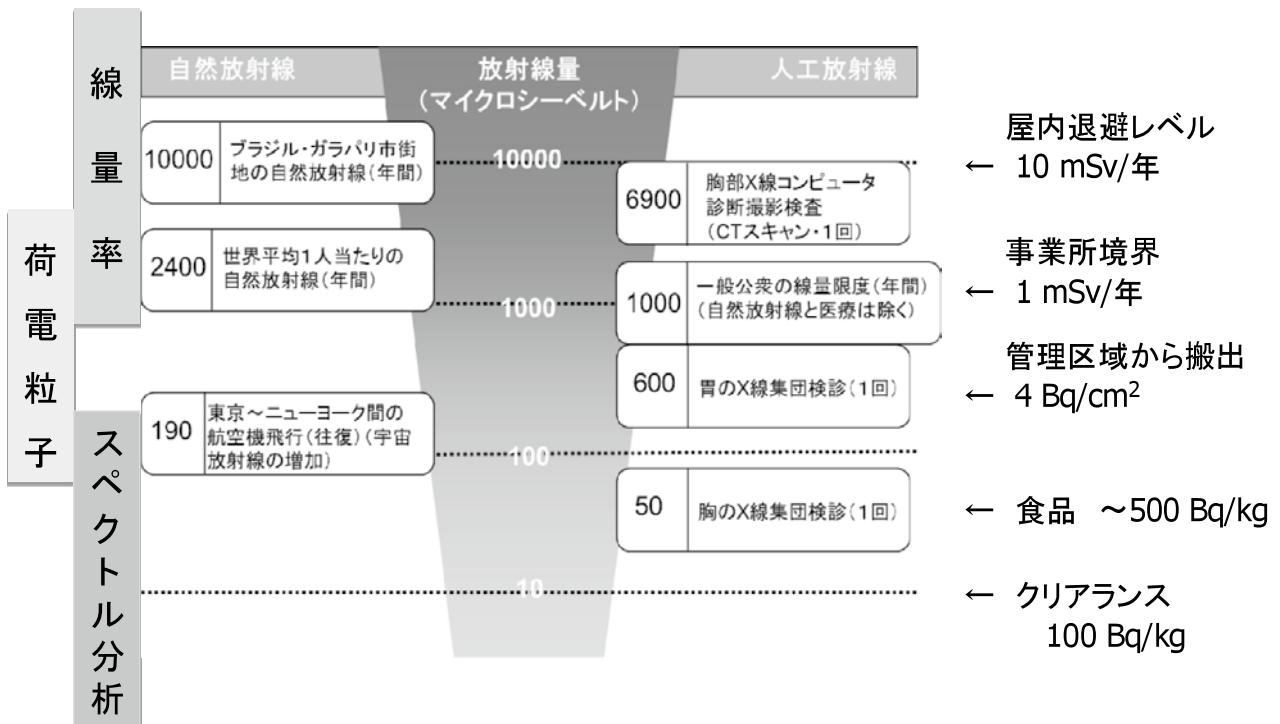


図1 自然または人工的に受ける放射線量

数値は内閣府原子力安全委員会のパンフレットより。1年間=8,766時間として計算

た上で、測定値の解釈をする必要がある。具体的には、原子力百科事典 ATOMICA の“1 cm 線量当量に対する代表的なサーベイメータのエネルギー特性⁷⁾”などを参考にされたい。また、最近多く販売されている低価格・超小型の GM 計数管などでは、無理に感度を上げている結果、低線量率の数値が高め（2倍以上の例も）に出る傾向があり、それらの特徴を理解した上で使用することが必要である。特に海外製品で、後述する荷電粒子と空間線量の両用の測定器の場合、計数値に荷電粒子のパルスも混入し、極端に高い線量率が得られることがあるので、測定結果は十分に吟味して欲しい。

3.2 荷電粒子測定用サーベイメータ

管理区域からの搬出可能レベルである 4 Bq/cm² を通常の線量率測定用サーベイメータで測るのは、ほとんど不可能である。ちなみに、産総研のホームページから公表している換算係数の考察では、半径 20 cm の円盤に 4 Bq/cm² の ¹³⁷Cs による一様汚染があった場合、中心部から 5 cm 離れた位置での線量率はわずかに 0.03 μSv/h である。この 4 Bq/cm² のレベルを確実に測定するために設計されたのが、大面積の荷電粒子測定用サーベイメータである。「放射線防護用設備・機器ガイド」にも多くのタイプが紹介されているので、参照されたい。このタイプの測定器は、cpm 若しくは cps が目盛り表示されているが、放射能面密度 A_s (Bq/cm²) には、次の式から換算できる。

$$A_s = \frac{n - n_b}{\varepsilon_i \times W \times \varepsilon_s}$$

ここで、 n 及び n_b は試料とバックグラウンドの計数率 (s⁻¹) であり、 ε_i は測定器の機器効率、 W は放射線測定器の有効窓（入射窓）面積 (cm²)、 ε_s は測定試料の線源効率である。機器効率は、サーベイメータ製造会社が通常 ³⁶Cl 若しくは ²⁰⁴Tl 線源を用いて校正し、取扱説明書にその値が記されている。一般的に、機器効率は ¹³⁷Cs に対して 0.4~0.6 程度の値である。

有効窓面積も同様に、取扱説明書に値が記されているので、それを使用する。一方、線源効率は、測定対象により大きく異なる。本来、この測定は、防水処理をした机や床、金属機器や皮膚などの“表面汚染”の測定を想定したものであり、土壌など、放射性核種が深くしみ込んでいる場合には適応が難しい。表面汚染に限っては、測定法を規定した JIS Z 4504 (ISO 7503-1) で、β線の最大エネルギーが 400 keV 以上の核種 (¹³⁷Cs はこれに該当) について 0.5 の値を推奨している。また、この規格は線源と測定器の距離は 5 mm に保つことと規定されており、立体的形状が複雑なものや、一様な汚染が期待できない試料については、定義通りの測定ができていない（過小評価してしまう）可能性がある。したがって、例えば今回の原発事故により汚染された可能性がある物品の汚染検査をする際には、まず線量計（理想的にはシンチレーション式サーベイメータ）により、測定対象物品表面がバックグラウンドレベルと変わらないかどうかを確認し、次いで荷電粒子測定に取りかかるべきである。さもないと、荷電粒子の飛程外にある高濃度の汚染を見逃す可能性がある。

4 まとめと一般的な注意事項

今回の事故をきっかけとして、多くの一般市民がサーベイメータを購入し、使用している。その多くは、小型の GM 計数管であるが、中には、荷電粒子を測定できるのに線量率 (Sv/h や mR/h) の目盛りしかないもの、あるいは、cpm と線量率の目盛りが併記されているが、γ線照射での線量率を cpm 換算表示したものなどを見かける。したがって、“β線も測れます”と宣伝しているサーベイメータで線量率を測定する場合は“荷電粒子が混入しないよう”十分配慮して使用する必要がある。γ線と荷電粒子では、計数効率が 2 桁程度異なるため、見掛け上極端に高い線量率となる場合がある。また、シンチレーション式の小型サーベイメータの多くは、エネルギー補償機能が付加されていない

ため、 ^{137}Cs で校正されていても、散乱成分などの低エネルギー γ 線に多く反応する結果、どうしても高めの測定値が出やすい傾向にある。小型のGM計数管も同様で、これらの測定機器は、本来、放射線や放射能汚染の“ある・なし”を“サーベイ”するために作られた製品であることを十分に理解した上で、サーベイメータの表示する数値にあまり振り回されることのないよう、読者諸氏にはお願いしたい。

最後になるが、もともと我々の環境中には自然起源の放射性核種が存在し、例えば代表的なカリウムの同位元素である ^{40}K （半減期 12.5 億年）は、天然のカリウム 1 g に約 30 Bq 含まれており、土壌や食品の中に広く存在している。また、鉱物試料の中には、サーベイメータの動作チェックに用いられるほど、トリウムやウラン、若しくはその系列の放射性核種が含まれているものがある。今回の事故をきっかけに、多くの市民がサーベイメータを持ち、いろいろなものを測定することにより、放射線は常に身の回りに存在すること、食品中の放射能や一般公衆の被ばく限度が、いかに低いレベルに押さえられているのかを実感し、見えない放射線に対

する恐怖心が少しでも治まり、災い転じて福となる日が来ることを期待したい。

参考資料

- 1) 放射線防護用設備・機器ガイド（2010/11年版）、日本アイソトープ協会
- 2) 産総研の公式ホームページ内、「放射線の測定結果」及び「放射線計測の信頼性について」；<http://www.aist.go.jp/>
- 3) 高エネルギー研究所、つくば（KEK）の放射線線量；<http://rcwww.kek.jp/norm/>
- 4) 日本分析センターの福島関連モニタリング；<http://www.jcac.or.jp/fukushima.html>
- 5) 文部科学省：東京電力(株)福島第1及び第2原子力発電所周辺のダストサンプリング、環境試料及び土壌モニタリングの測定結果；http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/syousai/1304006.htm のページにある“5月31日までの測定結果”参照
- 6) 文部科学省：航空機による広域のモニタリング [文部科学省]；http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_MEXT_DOE_airborne_monitoring/
- 7) 原子力百科事典 ATOMICA；<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/09/09040304/03.gif>

（産業技術総合研究所）

サーベイメータの特性と取り扱い

田中 守, 松原 昌平

Tanaka Mamoru Matsubara Shohei

1 はじめに

2011年3月11日の東日本大震災・東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故により放射能汚染が各地に広がり、サーベイメータを用いた環境放射線量の測定(例えばマイクロシーベルト毎時)及び放射能汚染測定(例えばカウント毎分)が様々な分野で行われている。原子炉から漏出した放射性物質による環境、農作物、食肉、水等への汚染の広がりから、個人を含め今まで放射線測定に関わっていなかった人による放射線測定並びに放射線測定器への関心と需要が高まっている。

放射線測定の専門家に対しては甚だもの足りないかもしれないが、ここでは初めてサーベイメータを使い放射線測定に携わる人が理解すべき、サーベイメータの特性や測定する際の注意点について解説する。

2 サーベイメータの仕組み

サーベイメータは検出器、計測部、表示部で基本的に構成されている。

検出器には電離箱、GM管、シンチレーション検出器、半導体等があり、計測部はそれら検出器からの信号を電気信号として処理している。

^{134}Cs (セシウム 134) や ^{137}Cs (セシウム 137) から放出される β 線や γ 線などの放射線は五感で感じることはできないが、検出器に入射すると、検出器に充填されたガスを電離したり、別の種類の検出器では内部の蛍光物質を励起して光を出したりする。

電離箱サーベイメータは、この電離されたものを電流として計測し、この電流を線量 (Sv, μSv 等) や線量率 (Sv/h, $\mu\text{Sv/h}$ 等) に変換し表示する。

GMサーベイメータは、電離されたものを一つひとつ放射線の数として数え、それらを積算したり、cps [cpm] (1秒間 [1分間] 当たり幾つ数えているか) などの計数率で表示したり、これらの計数率から空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$ など) に変換し表示している。

NaI(Tl) (タリウム活性化ヨウ化ナトリウム) のような結晶状の蛍光物質に γ 線が当たると光が変わる。この光 (や現象) のことをシンチレーションと言ひ、NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータは、この光を電気信号に変換し、その数を数えている。数を数えた後の処理はGMサーベイメータと同じである。このほかに半導体検出器やCsI(Tl) (タリウム活性化ヨウ化セシウム)シンチレーション検出器等を用いたサーベイメータもある。

3 線量率測定用サーベイメータ

3.1 測定単位、測定目的について

校庭、住居内、公園等多くの所で線量率の測定が行われている。測定単位は Sv/h（シーベルト毎時）である。多くの場所では μ （マイクロ）Sv/h レベルである。

線量率測定用サーベイメータは生活空間にいる人が、 γ 線によってどの程度外部被ばくによる影響を受けているかを測定するものである。

3.2 γ 線感度について

3月11日以降様々な種類の線量率測定用サーベイメータが多くの人手に渡った。同時に測定値の違いが問題になり、レポートも出されている¹⁾。

γ 線は物質との反応、難しくいえば物質との相互作用があつて初めて測定できる。

γ 線と物質との相互作用の割合は検出器の密度、組成で決まり、相互作用の大きい順に並べるとおおよそ NaI(Tl)シンチレーション検出器 > GM(管) > 電離箱という順番になる。NaI(Tl)シンチレーション検出器が得られる電気信号(パルス)はGM(管)が得られる電気信号(パルス)に比べると1桁以上大きくなる。各サーベイメータでどの程度の線量率について測定ができるかという目安は次のとおりで

ある。

- ・ NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ (TCS-172B) : 0.01~30 μ Sv/h
- ・ GMサーベイメータ (TGS-131) : 0.3~300 μ Sv/h
- ・ 電離箱サーベイメータ (ICS-323C) :
1 μ Sv/h~300 mSv/h

環境レベルの測定は 0.02 μ Sv/h 程度を測定しなければならないため、GMサーベイメータ、電離箱サーベイメータで精度よく測定するのは困難である。

3.3 エネルギー特性について

NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータでもエネルギー補償型かどうかで測定値が大きく異なることがある。ここでは、エネルギー補償型の原理と特性について解説する。

図1に γ 線用NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータの特性及び写真を示す。

¹³⁷Csは0.662 MeV、¹³¹I(ヨウ素131)は0.365 MeV²⁾、⁶⁰Co(コバルト60)は平均1.25 MeVなどのように放出される γ 線は、放射性物質ごとに固有のエネルギーを持っている。

本来NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータの持っている特性は、グラフの中でエネルギー補償なしと書かれたものである。この特性では0.1 MeV程度の γ 線に対して正しい線量の7

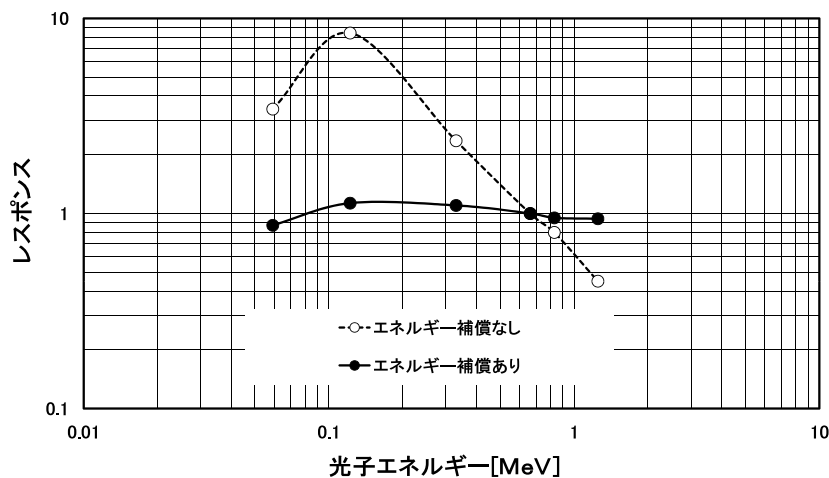


図1 NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ (TCS-172B) の特性及び写真

～8倍高い数値を表示し、逆に ^{60}Co のような強いエネルギーでは正しい値の半分しか表示しない。このような測定する γ 線エネルギーに対する過大評価、過小評価の問題を解決したのがエネルギー補償型NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータである。

γ 線がNaI(Tl)シンチレーション検出器に当たった時、そこでエネルギー伝達が行われ、 γ 線が失ったエネルギーが光に変換される。大きな γ 線エネルギーのときは光の量が多く、大きな電気信号として取り出せる。その信号の大きさを測り、その電気信号（パルス）の大きさに対しレスポンスが1.0になるように固有の関数を乗ずることにより、**図1**“エネルギー補償あり”の特性にする。これをエネルギー補償という。この結果、極めて基準曲線に近い値を測定することが可能になる。

一方、GMサーベイメータは入射する γ 線のエネルギーに関係なく均一な大きさの電気信号に変換するため、前記のような方式のエネルギー補償はできない。

一例として**図2**にGMサーベイメータTGS-131 (121)のエネルギー特性を示す。

このエネルギー特性から、GMサーベイメータ(TGS-131)では0.06 MeV近辺の γ 線に対してはレスポンスが2.0であり、正しい線量率に

対して2倍程度過大評価することを示している。このことがGMサーベイメータとエネルギー補償型NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータによる測定値の違いの一因になっている。

3.4 方向特性について

環境における線量率を測定する時に、検出器を向ける方向によって測定値が違ってしまうと大きな問題である。このことに関係するのが、サーベイメータの持っている方向特性であり、方向特性は、検出器構造と密接な関係がある。

図3に代表的なサーベイメータの方向特性と検出器構造を示す。

校正をする時に放射線の照射方向は→矢印の方向からであるが、ほかの角度から放射線が来たとき、校正方向の値を基準としてどのようなレスポンスの比率になるかを表したものが方向特性である。エネルギー補償型NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータの検出器は直径と長さがほぼ等しい円筒型になっている。検出器の真後以外から来る放射線については1に近い。上や下に検出器を向けることなく周囲からの γ 線を均等に測っていることを示している。地表に広がった放射性物質からの γ 線による影響を調べるには同心円状に他の方向にも影響することを考えれば真後からの寄与分は小さいと考えられるため、検出器を地表に水平にしたま

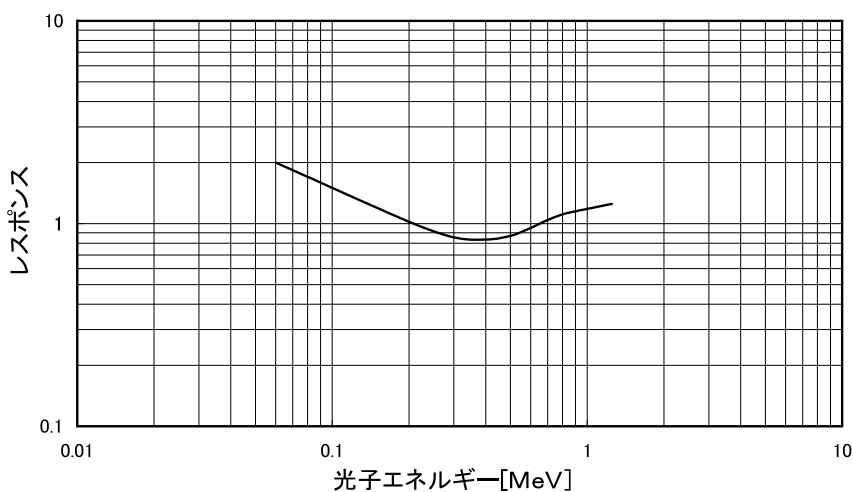
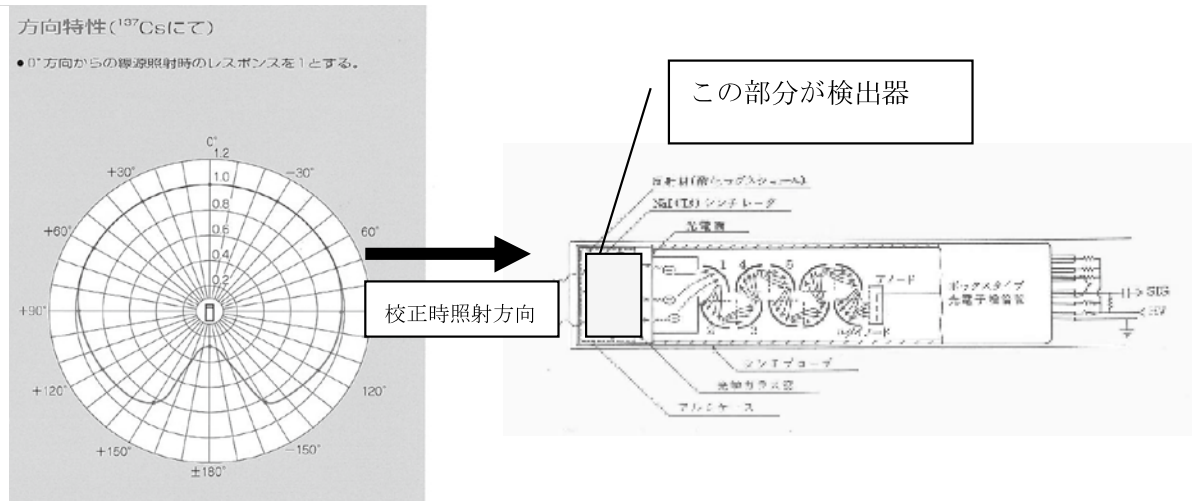
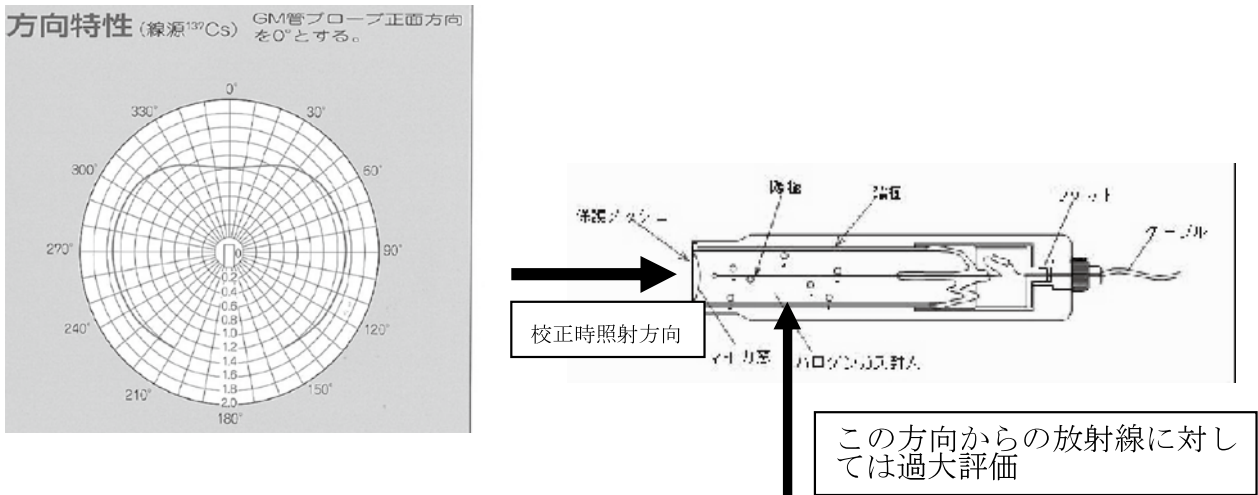


図2 GMサーベイメータ (TGS-131) のエネルギー特性と写真





エネルギー補償型 NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータ (TCS-172B)



GM サーベイメータ (TGS-131)

図3 各サーベイメータの方向特性と検出器構造

ま測定しても問題はない。

一方、GM サーベイメータ (TGS-131, TGS-121 も同じ) では方向特性の問題がある。

このサーベイメータは校正の時に図3 下段に示したように GM 管の入射窓方向から放射線を当てて校正している。これは放射線がこの方向から来れば良いが、今回のように地表に広く放射性物質があるような状況では、検出部を縦にしても横にしても側面方向 (図中、下からの矢印) から放射線を検知する。そうすると γ 線の入射する表面積が増え、その結果 γ 線と物質

との相互作用が増え、同じ線量の場合でも多くの電気信号を発生してしまう。そのため 90° 方向 (検出部が地面に対して水平) では本来の値より 1.4 倍多く指示することになる。

GM サーベイメータ (TGS-131, TGS-121 も同じ) を使って測定すると、エネルギー補償型 NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータより 2 倍程度高い値を示すという指摘があったのは、この方向特性による過大評価と図2 に示したエネルギー特性による過大評価分が加わったためである。

GM サーベイメータを使用する場合は、この点を考慮して使っていただきたい。

3.5 測定時間について

サーベイメータの電源を入れるとすぐに測定値が表示されるが、この表示された数値をどれくらい時間が経ってから読み取るのが良いのか。機器のカタログには時定数又は応答時間が記されている。電源を入れると、検出器から測定部に電流や電気信号（パルス）が送られ、線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）に変換し表示する。短い時間の測定で1時間当たりの線量を表示すると、指示値のばらつきが大きくなるので、一定時間の遅れを持って測定値を表示している。これが、時定数、応答時間である。利用方法としては、指示値の変化を早く見たい場合には短い時定数を使用し、安定した指示値を見たい場合には長い時定数を使用する。繰り返し測定をする場合には、時定数の3倍ごとに読み取ると前に測った値の影響を受けることなく前のデータとは独立した値が得られる。

時定数や応答時間は機種によっては自動的に決まるものもあるが、測定者で選択できるものもある。選択できるものであれば、公園、住居内、校庭等での環境放射線の測定において線量率が小さい場合は、指示値のばらつきが小さくなるように時定数を長めの30秒とすることを推奨する。

3.6 測定範囲と表示範囲

サーベイメータの値を読むときにどこまでの値を読めるのか。

カタログを見ると測定範囲と表示範囲が混在して書かれているものがある。

測定の精度を担保できる表示の範囲が測定範囲であり、表示範囲の桁数がいくら多くても実際には指示値が大きくばらついて正確に読み取れない場合がある。

特に低い線量率を測定する場合は、機種ごとの測定範囲を知っておく必要がある。

3.7 繰り返し測定の必要性

γ 線や β 線は原子核の崩壊によって出てくる

が、この崩壊は確率的であり100 Bq（ベクレル）といっても毎秒ごと100回崩壊しているのではなく、あるタイミングでは99回であったり、103回であったりする。このため放射線の測定値は、一定の値ではなく揺らいでいる。

以上のような理由により、放射線の測定においては、4回程度測定し、平均値を求めるのが好ましい。

4 表面汚染測定用サーベイメータ

β 線は荷電粒子であり、電離能力を持っており、この β 線の電離能力を利用したものが、GM サーベイメータである。GM サーベイメータ（TGS-146B）は今回の震災でも当初、住民のスクリーニングに多く使われた。

GM サーベイメータでは min^{-1} （1分間の計数率）で測定するが、現在問題としている ^{134}Cs や ^{137}Cs はBq（ベクレル）という放射能量を計算によって知ることができる。

ただし β 線は検出器との間に物があると β 線が物に吸収されてしまい測定できない。表面にある放射性物質のみ測るので、表面汚染測定と呼んでいる。

表面汚染密度（単位面積当たりの放射能）を求めるための計算式を次に示す。

表面汚染密度(Bq/cm^2) =

$$\frac{(\text{測定値} - \text{バックグラウンド}) / 60^*}{\text{機器効率} \times \text{線源効率} \times \text{検出器の有効窓面積}}$$

機器効率：図4参照

線源効率： ^{134}Cs や ^{137}Cs は0.5

検出器の有効窓面積：19.6 cm^2 （TGS-146Bの場合）

*Bqは1秒間当たりの数なので、1分間当たりの値から1秒間当たりの計数に直すため60で割る

私たちの周囲には、自然放射線などの放射線（これをバックグラウンドという）が存在し、通常放射線測定を行う際は、それを含めて測定

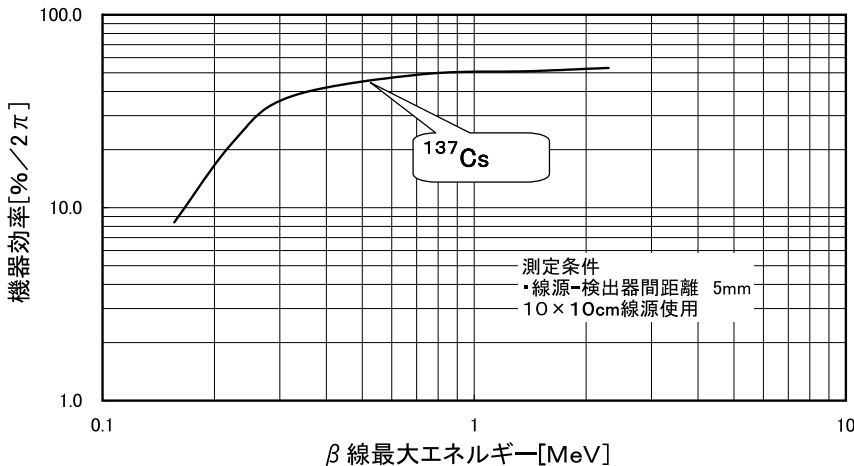


図4 GMサーベイメータ (TGS-146B) の機器効率と写真

していることとなる。

したがって、測定物からの放射線は(バックグラウンド+測定物からの放射線)-(バックグラウンド)で求まる。

同じ放射能濃度を測定する場合、Bqで計算すると検出器面積に比例してしまい、表面汚染の程度が分からない。単位面積当たりの値、Bq/cm²で求めておけば、どの種類のサーベイメータで測定しても比較ができる。

GMサーベイメータは、¹³⁷Csに対しておおよそ45%以上の機器効率があるが、検出器の放射性物質汚染を防ぐ目的から薄いビニールで検出器を包むので、多少機器効率が下がる。そのため¹³⁷Csで機器効率40%と仮定する。

ここで大事なことは、この機器効率を決める検出器と測定物の距離(この場合5mm)である。この距離が変わったら、この機器効率を用いて表面汚染密度を計算することはできない。

5 検出限界計数率

環境レベルの測定を行う際、測定値が非常に低い場合がある。測定結果がバックグラウンドに対して有意な値かどうかを判断するため、検出限界という考えを導入して考える。

検出限界はバックグラウンドの揺らぎの範囲を超えたら放射能が検出されたとする概念で

ある。

検出限界計数率は以下の式より算出できる。

$$N_d = \frac{K}{2} \times \left\{ \frac{K}{nT_s} + \sqrt{\left(\frac{K}{nT_s}\right)^2 + 4 \times N_b \times \left(\frac{1}{nT_s} + \frac{1}{nT_b}\right)} \right\}$$

ここで

N_d : 検出限界計数率 (cps (s⁻¹))

K : バックグラウンドの標準偏差 (通常3を用いる)

N_b : バックグラウンド計数率 (cps (s⁻¹))

T_s : 試料を測定したときの測定時間 (sec)

T_b : バックグラウンドを測定したときの測定時間 (sec)

n : 測定した回数

※サーベイメータのように時定数で動作する装置の場合は、前記の T_s の代わりに $2\tau_s$ 、 T_b の代わりに $2\tau_b$ が入る

τ_s : 試料を測定したときの時定数 (sec)

τ_b : バックグラウンドを測定したときの時定数 (sec)

TCS-172Bの場合、最長の時定数30秒 (sec) を用いる

6 点検・校正について

製品の納入後1年程度を目途に点検・校正を

することを推奨する。

点検とは電氣的・機械的検査をして、納入当時の性能を維持しているか確認、調整をすることである。これによって機器の健全性が保たれる。

校正とは国の持っている基準量にトレーサビリティが取れた基準器を用いて、基準場においてサーベイメータがどう指示するかを相関を取ることである。

例えば、 $5 \mu\text{Sv/h}$ の基準場に線量測定用のサーベイメータを置いた時、 $4.9 \mu\text{Sv/h}$ を示せば校正定数は $5/4.9=1.02$ となる。

これがサーベイメータ本体に貼られている。基準量との相関を取り、測定値の信頼性を維持するためにはこの校正が重要である。

7 まとめと一般的な注意事項

以上、サーベイメータの測定原理、特性を知ることの重要性を解説した。測定値（指示値）がサーベイメータによって異なるのは、先に述べた検出器の γ 線感度、エネルギー特性及び方向特性の違いが要因の 1 つになっているので、使用しているサーベイメータの特性を知っておくことが重要である。

さらに、放射線防護機器ガイド（日本アイソトープ協会発行）などの情報を参考にするほか、製品に付属している取扱説明書を熟読して使用されることを希望する。その他、サーベイメータを使用する際には、以下の一般的な注意事項に十分気をつけて、測定していただき

たい。

- ①測定前には機器が健全か、外観、電池、高圧電源（HV）に異常がないか確認する。
- ②測定者、測定日、機器名、測定対象、場所、測定時定数等測定に関することを記録する。
- ③同じ場所でバックグラウンドを測定する。
- ④検出器汚染防止、サンプル間の相互汚染がないようにビニール等で検出器を保護する。
- ⑤測定マニュアルがあるものはそれに沿って測定する。
- ⑥測定終了後、使用開始時と同一場所でバックグラウンドを測定し、開始時と同じ値になることを確認する。
- ⑦GM サーベイメータで線量率を測定する場合は、必ず β 線カットフィルター（キャップ）を検出器に付けて測定すること。本来、線量率は γ 線の数だけで評価すべきところフィルターを付けずに測定すると β 線を含めた数を数えてしまい、全く違う値になる。

参考文献

- 1) 独立行政法人 国民生活センター編，比較的安価な放射線測定器の性能（2011）
- 2) 日本アイソトープ協会，アイソトープ手帳 第11版（2011）

（日立アロカメディカル(株)）

福島原発事故に関わる 核種分析の実際

武藤 利雄
Mutou Toshio

1 はじめに

東日本大震災により、東京電力(株)福島第一原子力発電所で深刻な事故が発生し、大量の放射性物質が放出された。放射性物質は風に乗って四方に拡散し、降雨により地上に降下して空間線量が上昇した。このようにして関東・東北地方などの広範な地域に放射性物質による環境汚染がもたらされ、農畜水産物、工業製品等様々な物品の汚染を引き起こした。安全性の確認と風評被害の防止のため数多くの試料を測定する必要性が生じ、これまで放射線とは関わりのなかった人も放射線測定に携わるようになった。

本稿では新たに放射線測定を始めた人を対象に、物質中に含まれる放射性物質の種類及び量の測定(核種分析)について、実務に即した事例を重点に述べることにする。

h), ^{134}Cs (2.1 y), ^{136}Cs (12.9 d), ^{137}Cs (30.0 y) など、核分裂収率が高くかつ飛散しやすい多くの核種が検出された。その中で、 ^{131}I の濃度が圧倒的に高かった。事故から3か月経過した2011年6月中旬以降は、半減期が日オーダーの短半減期核種は減衰し、検出される主な核種は ^{134}Cs と ^{137}Cs のみとなった。

表1に ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の核的性質を示した。 ^{137}Cs は ^{235}U の核分裂で直接生成し(核分裂収率6.2%)、 ^{134}Cs は核分裂生成物 ^{133}Cs (収率6.7%、安定)及び ^{133}Xe (収率6.7%、半減期5.2d)の β^- 壊変で生成した ^{133}Cs の中性子捕獲反応によって生成したものである¹⁾。放出される γ 線は、 ^{137}Cs は662 keVのエネルギー1本であるが(正確には ^{137}Cs の β^- 壊変で生成した $^{137\text{m}}\text{Ba}$ からの γ 線)、 ^{134}Cs は主なものでも563~1,365 keVのエネルギーを6本放出する。

表1 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の核的性質

核種	半減期	β 線エネルギー (放出割合)	主な γ 線エネルギー (放出割合)	1 cm線量 当量率定数
^{134}Cs	2.1年	89 keV (27%) 658 keV (70%)	563 keV (8%) 569 keV (15%) 605 keV (98%) 796 keV (86%)	0.249
^{137}Cs	30.1年	514 keV (94%) 1,176 keV (6%)	662 keV (85%)	0.0927

2 核種分析の基礎

2.1 汚染核種とその核的性質

事故による環境中への放射性物質の放出は核燃料の溶融に伴って起こったため、事故当初は ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (半減期2.7 d)、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ - ^{129}Te (33.6 d)、 ^{131}I (8.0 d)、 ^{132}Te - ^{132}I (3.2 d)、 ^{133}I (20.8

^{134}Cs 及び ^{137}Cs の 1 cm 線量当量率定数はそれぞれ 0.249, 0.0927 であり, 空間線量への寄与は, ^{134}Cs が ^{137}Cs に比べて 2.7 倍ほど大きい。

このほか, 環境試料の測定で検出される天然放射性核種として ^{40}K , トリウム系列の ^{208}Tl , ^{228}Ac , ウラン系列の ^{214}Pb , ^{214}Bi などの存在に留意する必要がある。

2.2 γ 線と物質との相互作用及び γ 線スペクトル

放射線測定器には様々な方式があり, 放射線の種類や使用目的により適切な測定器を選択することが基本である。核種分析には NaI(Tl)シンチレーション検出器及び Ge 半導体検出器を使用した γ 線スペクトロメータが用いられる。

γ 線スペクトロメータによって得られるパルス波高分布のことを γ 線スペクトルという。実際に観測される γ 線スペクトルは, 検出器に入射した γ 線が相互作用を起こした結果生じる 2 次電子の挙動を直接反映している。 γ 線などの光子と物質の相互作用としては光電効果, コンプトン散乱, 電子対生成の 3 つの作用がある。

光電効果は γ 線が軌道電子にエネルギーを与えて, 全エネルギーを失う現象をいう。軌道電子は軌道から離れて高速の 2 次電子 (光電子という) になる。生成した光電子は γ 線エネルギーの正確な情報を持ち, γ 線スペクトルでは線スペクトルになる。

コンプトン散乱は γ 線が軌道電子と衝突して, エネルギーの一部を軌道電子に与えて散乱し, 自分自身は, 弱いエネルギーの γ 線となる。はじき出された電子も高速の 2 次電子 (コンプトン電子) となる。コンプトン電子のエネルギーは入射 γ 線と散乱 γ 線のエネルギーの差に相当し, 散乱 γ 線の角度 θ によって変わり, θ が 180° の時に最大になる。このため, γ 線スペクトルでは連続スペクトルになる。

電子対生成は, エネルギーの高い (1,022 keV 以上) γ 線が原子核近傍の電場において, 電子と陽電子に変換される。生成した陽電子は運動エネルギーを失うと近傍の電子と結合し, 2 本

の陽電子消滅放射線 (511 keV) が発生する。陰陽電子対も運動エネルギーを持っているために消滅放射線はドップラー効果を受け, 若干幅を持った線スペクトルとなる。

以上 3 種の相互作用によって生成した 2 次電子は Ge の結晶中でエネルギーを失って, 2 次電子のエネルギーに相当するエネルギーのパルスを発生し, γ 線スペクトルを形成する。図 1 に Ge 半導体検出器による ^{60}Co の γ 線スペクトルを示す。光電効果によるピーク (光電ピーク) は 2 本の γ 線の正確なエネルギーを示している。コンプトン散乱による連続スペクトルと, 180° の角度で散乱したときの連続分布の端 (コンプトン・エッジという) が見られる^{2,3,6)}。

2.3 Ge 半導体検出器

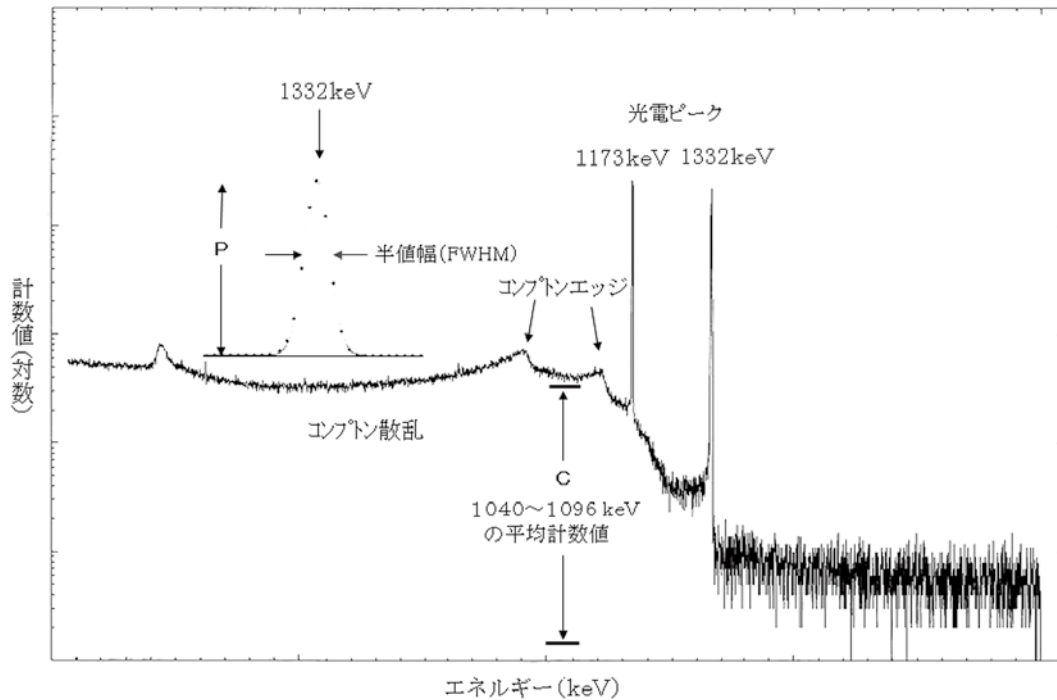
Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメータは検出器, 電子回路 (高圧電源, 増幅器), 波高分析器 (MCA), データ処理機, 遮へい体から構成される。測定には後述の文部科学省マニュアル⁶⁾ に対応して構築されたパソコンシステムを用い, 多様な測定条件の設定, γ スペクトルの解析, 核種の同定, 測定データの保存などの一連の作業を一元化して行われている。

Ge 半導体検出器の性能を評価する項目として, エネルギー分解能, 相対効率, ピーク・コンプトン比の 3 項目がある。

エネルギー分解能は ^{60}Co 1,332 keV の γ 線のピークにおいて, ピークの高さの 1/2 の高さにおけるピークの幅 (半値幅, FWHM) で定義されており (図 1), 値が小さいほど検出器の性能が良い。市販品は概ね 1.8~2.0 keV である。

相対効率は ^{60}Co 点線源から 25 cm の距離において, 1,332 keV の γ 線に対して, $3\phi\times 3$ インチの NaI(Tl)検出器との計数効率の比で, Ge 結晶の体積が大きいほど効率が高くなる。環境放射能測定には概ね 10~40% 程度のものが使われる。

ピーク・コンプトン比は図 1 に示すように, 1,332 keV γ 線の光電ピークの高さ P (計数値) とコンプトン散乱の値 (1,040~1,096 keV の平

図1 ^{60}Co の γ 線スペクトル

均計数值) C の比 (P/C) で定義され、この値が大きいくほど性能が良い。一般的な測定には 35~60 程度のものが使われる。

2.4 放射能の決定

光電ピークから次の式により放射能が決定される。

$$A = (N_p/t) / (\epsilon_p \cdot a)$$

ここで A は放射能 (Bq), N_p は光電ピーク面積 (カウント), ϵ_p はピーク効率, a は γ 線放出割合, t は測定時間 (秒) を表す。

ピーク面積の求め方は、チャンネルごとの計数值を加算する計数值積算法 (コベル法) と関数フィッティング法の 2 通りがある。コベル法は独立したピークに対しては計算が容易で信頼性も高い。コベル法は図 2 に示すように、ピーク領域 ($L \sim H$ チャンネル) のすべてのチャンネルの計数值を積算し (T), その下の平坦部分 (B) を差し引いてピーク面積 ($N \pm \sigma_N$) が求められる³⁾。

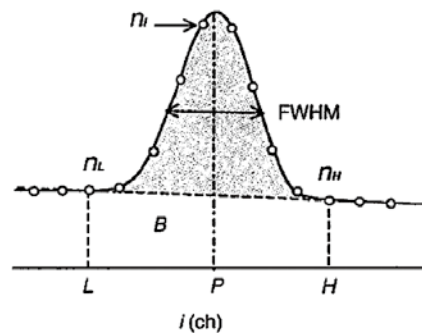


図2 ピーク面積の計算方法 (参考文献 3) から引用)

$$T = \sum_{L}^{H} n_i \quad \begin{array}{l} L \leq P - 1.5 \times \text{FWHM} \\ H \geq P + 1.5 \times \text{FWHM} \end{array}$$

$$B = (N_L + N_H) (H - L + 1) / 2$$

$$\text{ピーク面積: } N = T - B$$

$$\text{計数誤差: } \sigma_N = \sqrt{T + (H - L + 1) / 2 \cdot B}$$

検出下限値は“ 3σ 以上”が多く用いられ、この値を放射能に換算して求められる。

ピーク面積から放射能 (Bq) に換算する計数がピーク効率である。ピーク効率を求めるにはエネルギーの校正と併せて、一般に容積標準

線源セットが使われる。日本アイソトープ協会ではエネルギーが適当に分散した γ 線を放出する9核種が混合された、高さの異なる標準線源が販売されている。

3 核種分析の実際

3.1 主な規制値等

福島第一原発事故発生後、厚生労働省等から通知された主な規制値を表2に示す⁴⁾。放射性セシウムの規制値は年間の実効線量5 mSv、放射性ヨウ素は甲状腺の等価線量50 mSv/年を基に決められた。2011年10月に厚労省より、食品に含まれる放射性セシウムによって受ける実効線量の上限を1 mSvとする見直し案が提示された。これを受け、表2に併せて示したように、2012年4月頃から大幅に引き下げた数値が新規規制値として適用される予定である。

このほか、国土交通省から上下水汚泥等の取扱い指針として、放射性セシウム100,000 Bq/kg以下の汚泥等については処理場の埋め立て敷地などに保管が可能(平成23年6月16日事務連絡)、また、環境省からは一般廃棄物の焼却灰処理方針として、放射性セシウム8,000 Bq/kg以下のものは居住地・農地以外への埋め立て処

分可能(平成23年6月28日事務連絡)、脱水汚泥等を再利用する場合は ^{134}Cs 、 ^{137}Cs ともそれぞれ100 Bq/kg以下、といった値が示されている。

3.2 Ge半導体検出器による核種分析法

前述の規制値等を踏まえて核種分析が行われる。分析は、文部科学省放射能測定法シリーズ(全32巻)「No.7 ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー(1992年3訂)」,「No.29 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法(2004年制定)」,「緊急時における食品の放射能測定マニュアル(2002年制定)」などに準じて行われる。

試料の採取法と前処理法については、放射能測定法シリーズ「No.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(1982年制定)」,「No.16 環境試料採取方法(1983年制定)」,「No.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(1992年制定)」,「食品、添加物等の規格基準(平成11年11月26日厚生省告示第239号)」,「緊急時における食品の放射能測定マニュアルに基づく検査における留意事項について(厚生労働省通知平成23年3月18日)」などに準じて行われる⁵⁾。

これらのマニュアル等を踏まえて、野菜類に

表2 厚生労働省等による規制値

核種	規制値 (Bq/kg)		
	放射性ヨウ素 暫定規制値	放射性セシウム ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)	
		暫定規制値	新規規制値(案)
飲料水	300 (乳児は100)	200	10
牛乳・乳製品	300 (乳児は100)	200	50
野菜類・魚介類	2000	500	100
肉, 魚, 卵	—	500	100
肥料・土壌改良資材・培土中	—	400	—
牛, 馬, 豚, 家きん等用飼料中	—	300	—
養殖魚用飼料中	—	100	—

新規規制値の乳児用食品は50 Bq/kg

ついで一般的な測定試料の調製方法を次に示す。

- ①作業者は、使い捨てのポリエチレン手袋等を着用する。
- ②試料は水洗した後、水切りをする。
- ③可食部以外の部位（根等）を取り除く。
- ④試料を包丁やミキサー等で細かく切り刻む。
- ⑤試料を均一性に留意しながら、葉さじ等を用いて容器内に隙間無く押し詰める。
- ⑥試料の表面を軽く圧縮し、水平にならす。
- ⑦容器に蓋をし、試料の厚さをはかる。
- ⑧容器の外側を、蒸留水等で湿らせたティッシュでよく拭き取る。
- ⑨容器の重量を秤り、風袋重量を差し引き、試料重量を求める。
- ⑩蓋の接合部にビニールテープを巻いて封をする。
- ⑪容器にポリエチレン袋を被せ、口を結んで封入する。

測定容器は一般にU-8容器かマリネリ容器（図3）が使われる。容器の容量はそれぞれ100 mLと2,000 mLであり、表3に示すように採取容量に応じてマリネリ容器の検出下限がU-8



図3 U-8容器（左）とマリネリ容器（右）

表3 U-8容器とマリネリ容器の検出下限

容器名	最大容量	検出下限
U-8	100 mL	^{137}Cs : 4 Bq/kg (水 100 mL, 5,000 秒測定)
マリネリ	2,000 mL	^{137}Cs : 0.4 Bq/kg (水 2,000 mL, 5,000 秒測定)

容器の1/10ほどである。しかし、2,000 mLの試料採取は手間とコストの負担が大きいので、目的とする検出下限値を考慮して、適切な容器を選択すべきである。

核種分析システムに試料名、試料の種類（水、土壌、フィルタなど）、試料形状（U-8、マリネリなど）、試料重量と高さ、測定時間、減衰補正の有無等を入力して測定が開始される。

定期的に容積標準線源を用いて、エネルギー校正とピーク効率の校正を行う必要がある。

3.3 Ge半導体検出器とNaI(Tl)シンチレーション検出器との比較

γ 線スペクトロメータにはGe半導体検出器を使ったもののほかNaI(Tl)シンチレーション検出器を使用したものがある。表4に示したように、NaI(Tl)検出器はエネルギー分解能が劣るため測定精度が劣るものの、簡便でかつ低コストで測定できる利点がある。

図4にGe半導体検出器とNaI(Tl)検出器で測定した土壌試料の γ スペクトルを対比して示した。福島第一原発事故に由来する核種は事実上 ^{134}Cs と ^{137}Cs の2核種のみである。Ge半導体検出器はシャープなピークとなっているが、NaI(Tl)検出器は分解能が劣るため、ブロードなピークとなっており、 ^{134}Cs 563, 569, 605 keVと ^{137}Cs 662 keVの γ 線が重なっている。

表4 Ge半導体検出器とNaI(Tl)検出器の比較

項目	Ge半導体検出器	NaI(Tl)検出器
測定精度 (エネルギー分解能)	高い (1.8~2.0 keV)	低い (45~50 keV)
検出効率	低い (NaI(Tl)の 10~40%)	高い
検出下限	^{137}Cs 4 Bq/kg (100 mL 5,000 秒測定)	^{137}Cs 30 Bq/kg (900 mL 600 秒測定)
設置費用	2,000万円前後	400万円前後
メンテナンス	液体窒素で冷却	特になし
使いやすさ	難しい	やさしい

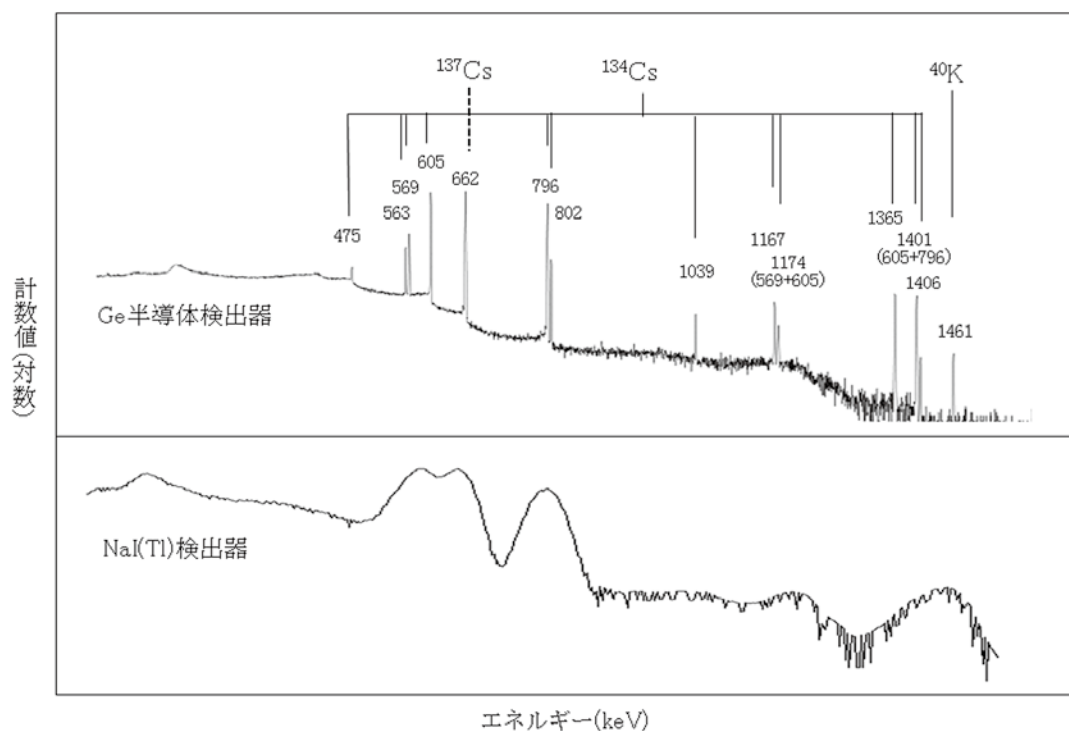


図4 Ge半導体検出器とNaI(Tl)検出器の γ 線スペクトル比較

このため、このままでは定量できない。しかし、重なったピーク面積から、 ^{134}Cs 563, 569, 605 keVの寄与分を差し引くことによって、 ^{137}Cs 662 keVのピーク面積を求めることができる。

放射能検査機器の不足や検査に掛かる時間の関係で、検査件数が制約されている現状から、NaI(Tl)検出器でも一定の測定精度が達成できるため、有効な利用が期待される。

4 おわりに

心理学の知見によれば、“不安”=“ことの重大性”×“曖昧さ”と言われている(2011年11月3日NHK総合テレビ「クローズアップ現代」)。不安を減らすには、リスクを正しく評価して“ことの重大性”を正しく捉え、できるだけ多くの試料を正確に測定して“曖昧さ”を減らすことが重要である。加えて風評被害を防止するためにも、できるだけ多くの試料を測定し、その結果を公表することが重要である。

核種分析の必要性は今後長期間にわたって続くと思われる。NaI(Tl)検出器とGe半導体検出器の特性を把握した上で適宜使い分け、例えば、NaI(Tl)検出器でスクリーニング検査を行い、一定レベルを超えた場合はGe半導体検出器で精度良く測定する、といったことによって信頼性が高くかつ数多くの測定を行っていくことが肝要である。

参考文献

- 1) 千葉豪, Cs-134とCs-137の放射能経時変化, http://nms.qe.eng.hokudai.ac.jp/nuclear_safety/cs.pdf
- 2) 野口正安, 実験と演習 γ 線スペクトロメトリー, 日刊工業新聞社(1980)
- 3) 野口正安, 富永洋, 放射線応用計測 基礎から応用まで, 日刊工業新聞社(2004)
- 4) 米谷民雄, 食品衛生研究, **61**(7), 25(2011)
- 5) 米谷民雄, 食品衛生研究, **61**(8), 17(2011)
- 6) 文部科学省放射能測定法シリーズ No.7 ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー(1992年3訂)
(東京都立産業技術研究センター)

疫学研究から見た低線量放射線の影響 — 専門家によって説明が異なるのはなぜか —

神田 玲子
Kanda Reiko

1 はじめに

平成 23 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故では、空間放射線量率の増加、食品や水道水からの人工放射性物質の検出などが、福島県のみならずかなりの遠隔地からも報告された。日本中の多くの方々が、放射線影響を我がこととして心配していることだろう。

放射線の人体影響は確定的影響と確率的影響の 2 つに大別される (図 1)。確定的影響は、放射線による細胞死が原因となる機能障害で、ある程度の高い線量によって起こり、その影響が発生する最小線量となるしきい値が存在す

る。これまでのところ 1 回あるいは短期被ばくの場合、100 mGy 未満のしきい値は報告されていない。一方、放射線による細胞の変異が主な原因で起こるがんや遺伝性影響といった確率的影響には、しきい値は存在しないと考えられている。これまでに、原爆被爆者も含めヒトでは遺伝性影響が観察されていないことから、累積線量で 100 mSv 以下の放射線影響に関して問題にすべきは発がん影響であると考えられる (注: 確定的影響のしきい値は Gy で標記し、確率的影響のリスク評価に関しては Gy と Sv の両方を用いているが、これは出典に従ったことによる)。

放射線の影響や防護に関する情報を社会に発信する役割は、専門家が担うところが非常に大きい。しかし、長期にわたる低線量放射線の健康影響に関しては、いまだ科学的コンセンサスを得るに至っていない部分も多く、専門家によってかなり異なる情報が発信されている。また、科学的リスク評価と放射線防護のルールが混同されがちで、公衆の中には、線量基準は安全と危険の境界線であるといった誤解をしているケースも見受けられる。

こうした情報の錯綜が社会に不安と混乱をもたらす原因になっていることも否めず、専門家は低線量放射線の健康影響

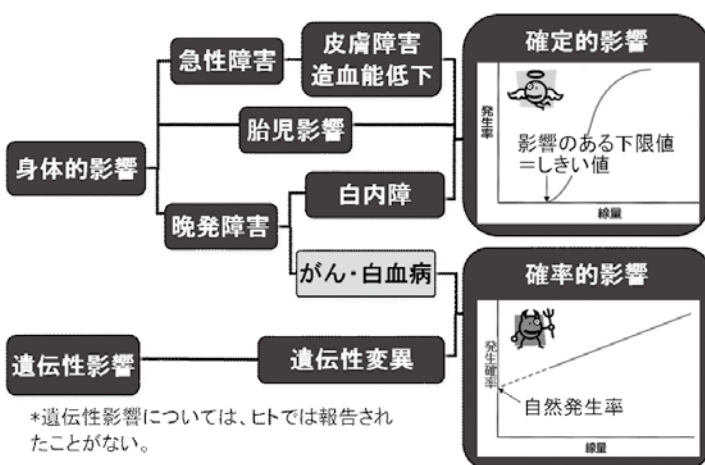


図 1 放射線の人体影響

について説明する際には、自ら提示する情報や見解の素性を明らかにし、誤解の少ない解説を心掛ける必要があると思われる。そこで本稿では、放射線防護の基礎となる疫学研究に関して個別の調査の結果や国際機関の見解を概説する。

2 低線量放射線の疫学研究

低線量放射線被ばくの生体応答は、高線量被ばくの場合と異なっていることが明らかになってきており、低線量被ばくした人集団の疫学調査結果から直接低線量被ばくりスクが推定できるならば、それが一番望ましい。しかしながら、低線量被ばくの場合、必要な統計学的検出力を得るためには大量の調査対象者を確保しなければならない。ICRP 第一専門委員会報告書 (Pub 99)¹⁾によると、100 mGy の被ばくによるがんの増加を疫学手法で明らかにするためには6,400人、10 mGy の被ばくでは62万人の調査対象者が必要と試算されている（非被ばく群のがん死亡リスクが10%、がん死亡リスクが1 Gy 当たり10%増加すると仮定）。

低線量あるいは低線量率被ばくに関する疫学研究の対象となる調査対象集団（以後、調査集団）には、広島・長崎の原爆被爆者、放射線治療患者、高自然放射線地域住民、鉱山労働者や原子力施設作業員などの職業被ばく者、そして核実験やチェルノブイリ原発事故による被ばく者等があるが、個人の線量の推定が難しく、信頼性の高い線量効果関係が得られている調査研究は限られている。

3 広島・長崎の原爆被爆者の健康影響調査

広島・長崎の原爆被爆者の健康影響調査は、幅広い年齢の男女から構成される大規模な調査集団であること、調査期間が長いこと、被ばく線量推定の精度が高く、線量域が広いこと、追跡調査（がん罹患及び全死亡）の完全性が高い

ことなどの点からもっとも信頼されており、国際的放射線防護体系の中核を支えるものである。近年は、心血管疾患など非がん疾患と放射線被ばくの間に関連な線量効果関係が観察されているが、100 mSv 以下では、非がんのリスクはないか、あったとしても極めて低いと考えられている。

原爆被爆者の健康影響調査からは、約100 mSv～4 Sv の間で、放射線と全固形癌の死亡リスクの間に直線性の線量効果関係が得られている。また、臓器別の結果からは、胃癌、肺癌等、ほとんどの臓器（部位）で直線の線量効果関係を示しているが、黒色腫以外の皮膚癌では1 Sv くらいまで影響がないことから、しきい線量 (<1 Sv) の存在が示唆されている²⁾。

4 様々な低線量放射線疫学調査結果の比較

表1は、低線量放射線（平均累積線量20～230 mGy）の放射線疫学研究の主なものをまとめたものである。1 Gy 当たりの過剰相対リスクが0に近ければ放射線の影響がほとんどない、0より大きければ放射線影響がそれだけ大きいことを意味している。6調査の過剰相対リスクを比較すると、研究によって結果が異なることが分かる。また、信頼区間を比較すると、研究によって信頼性がばらついていること、原爆被爆者の調査における信頼区間の幅は飛び抜けて小さく信頼性が高いことが分かる。

そして、単独の調査では十分な対象者数を確保することが難しいため、複数の調査からのデータを一括して解析（プール解析、メタ解析）することも行われている。表1中の15か国の原子力作業員も、複数の調査データをまとめて解析した研究であるが、比較的信頼性が高い6調査集団の結果だけを抜き出したのが図2である。有意にがんリスクが上がっているのはカナダだけで、このカナダのデータがほかの14か国のデータを引き上げている。こうした個々の研究の内容に踏み込んだ詳細な検討は、調査に

表 1 主な放射線疫学研究による結果の概要 (文献 3)

研究対象	人数	平均累積線量 (mGy)	平均追跡年数	固形癌数	1 Gy 当たり過剰相対リスク* (90%信頼区間)
テチャ川流域住民	17,433	40	25.6	1,836	1.00 (0.3~1.9)
15 か国原子力作業員	407,391	19.4	12.7	4,770	0.97 (0.27~1.80)
英国原子力作業員	174,541	24.9	22.3	10,855	0.27 (0.06~0.53)
中国高自然放射線地域住民	80,640	~100	15.5	677	-0.11 (-0.67~0.69)
インド高自然放射線地域住民	385,103	161	10.5	1,379	-0.13 (-0.58~0.46)**
原爆被爆者	105,427	~230	26.2	17,448	0.47 (0.40~0.54)

* 過剰相対リスク：相対リスクは性、年齢などを一致させた対照群（非被ばく群）と比較して被ばく群のリスクが何倍になっているかを表すもの。相対リスクが1であれば、被ばくはリスクに影響を及ぼしていないということを意味する。過剰相対リスクは、相対リスクから1を引いた値

** 95%信頼区間

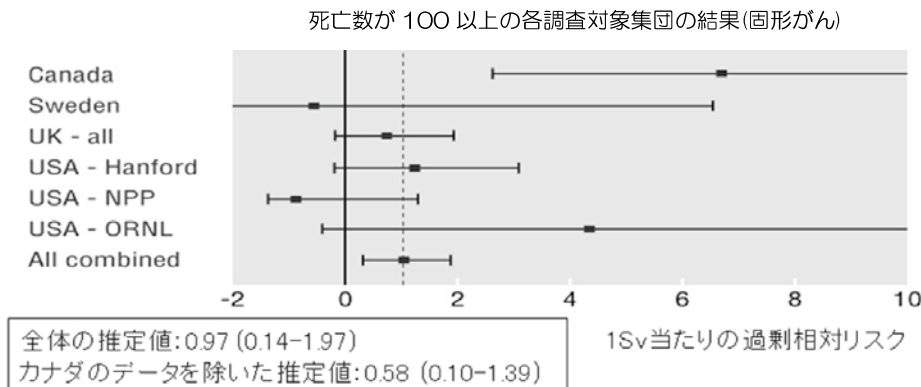


図 2 15 か国原子力作業員の疫学研究(文献 4)
調査対象集団ごとの結果の比較

よって異なる結果を解釈する上で重要である。

5 子どもの放射線感受性（発がん）

小児期の臓器は成人に比べて感受性が高く、子どもは大人に比べ、2~3倍程度発がんリスクが高いと言われている⁵⁾。原爆被爆者のデータからは、子どもは成人に比べ、1~4 Gyの被ばくによる過剰相対リスクが2~3倍程度高いという結果が得られているが、低線量群ではリスクの増加が小さく、成人との感受性の差は検出できない(表 2)⁶⁾。

また、被ばく時年齢による感受性の違いは組織依存的で、子どもでは、外部被ばくによる甲

状腺癌及び皮膚癌の過剰相対リスクが高いことが知られている。また、内部被ばく(¹³¹I)による小児甲状腺癌の過剰相対リスクも2~5と高い。しかし、チェルノブイリ原発事故による疫学調査からは100 mSv以下でのがん増加は確認できず、モデル計算から症例数の増加を推定した研究も

あるが⁷⁾、不確実性は高い。

胎児の被ばくに関しては50年以上前から研究データが蓄積されているが、今のところ以下のような様々な結果が得られている。

- ・原爆被爆者のデータからは、胎児期被ばくによる成人でのがんリスクは、子どもの被ばくに比べ、低い可能性がある⁸⁾。

- ・胎内被ばく後の甲状腺癌リスクに関する報告はほとんどないが⁵⁾、最近、チェルノブイリ原発事故周辺地域で¹³¹Iに胎内被ばくした集団において小児甲状腺癌のリスク増加を示唆する論文が発表された⁹⁾。これについては更なる疫学データを収集して評価する必要がある。

- ・母親が妊娠中にX線診断（平均線量は10~

表2 原爆被ばく者の年齢別相対リスク^a (文献6)

被ばく時年齢	男性 (Gy) ^b			女性 (Gy)		
	0.005~0.5	0.5~1	1~4	0.005~0.5	0.5~1	1~4
0~9 歳	0.96	1.10	3.80	1.12	2.87	4.46
10~19 歳	1.14	1.48	2.07	1.01	1.61	2.91
20~29 歳	0.91	1.57	1.37	1.15	1.32	2.30
30~39 歳	1.00	1.14	1.31	1.14	1.21	1.84
40~49 歳	0.99	1.21	1.20	1.05	1.35	1.56
50 歳以上	1.08	1.17	1.33	1.18	1.68	2.03

a: 0.005 Gy 以下の群を対照群とした場合の相対リスク

b: 結腸の線量

20 mGy 程度) を受診したことで、出生児の小児白血病と小児固形腫瘍のリスクが、対照群の1.5倍になったとの報告がある^{10,11)}。一方その後の調査では、胎児期被ばくによるがんリスクの増加は認められなかった¹²⁾。

6 “放射線影響の知見” と “放射線防護の判断” の違い

前述のように、個別の研究に着目すると結果も質も様々である。そこで国連科学委員会 (UNSCEAR) では、放射線の線量と影響の研究に関する幅広い研究結果を包括的に評価し、世界の研究者に提供している。また、委員会では報告書への引用に際し、文献の評価検討を行っているため、引用された文献はかなりの科学的信頼性があると思っていよい。

国際放射線防護委員会 (ICRP) は UNSCEAR 報告書を重要な基礎資料として、専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行っている。ICRP が出す勧告は、国際原子力機関 (IAEA) の安全基準、世界各国の放射線障害防止に関する法令の基礎にされている。低線量放射線の健康影響に関してはまだ解決されていない部分も多く、またリスク評価には大きな不確実性が伴う。そのため放射線防護では、科学的知見の不

確実性や複雑さは単純化して、原則安全側に割り切って考えられている。

7 ICRP の見解

ICRP の提唱する放射線防護体系は、実用性や便宜性を考慮しつつ、放射線影響を過小評価しないように配慮されている。例えば、子どもと胎児の放射線発がんに関する感受性が、低線量域では成人に比べどのくらいであるのかについては、科学的には解決がついていない。そこで ICRP では、線量によらず小児初期や胎児は成人の3倍の感受性があるとしている¹³⁾。また、発がんのしきい値の有無や線量率効果に関しても、引き続き放射線影響研究からの知見が必要ではあるものの、放射線防護の観点からは“しきい値はない” “低線量率による発がんリスクは高線量率の半分” と仮定することが妥当としている。

こうした仮定と約 100 mSv~4 Sv の間で明確な線量効果関係が得られている原爆被爆者の疫学データから、ICRP は “1 Sv 当たりがん死亡リスク (生涯リスク) が5%増加する” としている。これは、100 mSv で0.5%増加に相当するはずである (図3)。この数値は、公衆に放射線感受性の高い子どもが含まれていることが

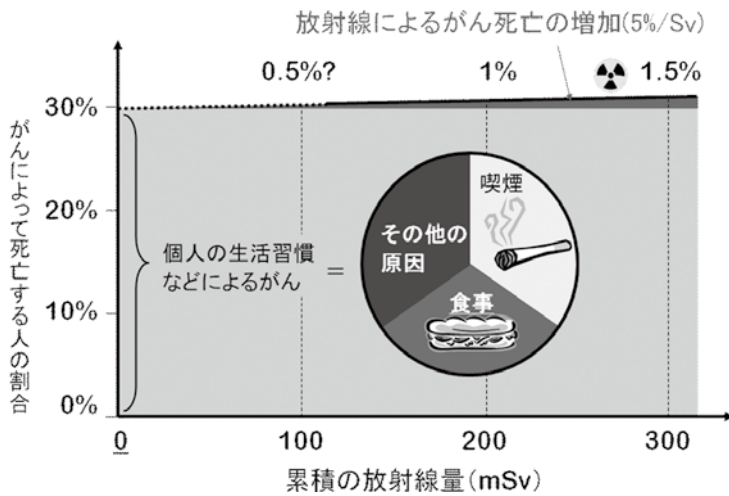


図3 がん死亡への低線量率被ばくの寄与
日本人のがん死亡率を30%と仮定

考慮された結果である。作業者の場合は18歳未満を含まないことから“1 Sv 当たり4%”を適用している¹⁴⁾。

このリスク係数と日本人のがん死亡率（約30%）から、1,000人の日本人が同じように100 mSvの放射線を受けた場合、がんで死亡する人数が300人から305人に増加すると計算できる。しかし、実際にはこの程度のがん死亡増加を疫学調査で検出することは難しい。なおICRPは極低線量の被ばくについて、実効線量から集団に生じるがん死亡数を計算するといった影響の評価は不確実性が大きく適切でないとしている。

8 おわりに

100 mSv という数値については、がんリスク増加を統計学的に検出することが容易ではないため、放射線の影響が見られたという研究も、見られなかったという研究もある。よって専門家が低線量放射線の健康影響を説明する際には、“個別の研究の成果を紹介しているのか”

“国連科学委員会の見解のような包括的評価結果を説明しているのか”，あるいは“放射線防護上のルールに関する説明なのか”を明確にすることにより、無用な誤解や混乱を防ぐことができると考える。

【謝辞】

本稿を執筆するに当たり、放射線医学総合研究所の米原英典、島田義也、吉永信治、今岡達彦の諸先生方から、貴重な助言を賜ったことに深く感謝する。

参考文献

- 1) ICRP, ICRP Publication 99, *Ann. ICRP*, **35** (4) (2005)
- 2) Thompson, D.E., *et al.*, *Radiat. Res.*, **137**, S17-S67 (1994)
- 3) Boice, J.D. Jr., *et al.*, *Radiat. Res.*, **173**, 849-854 (2010)
- 4) Cardis, E., *et al.*, *BMJ*, **331**, 77-82 (2005)
- 5) UNSCEAR, Annex A in 2006 Report Vol. I Effects of Ionizing Radiation (2008)
- 6) Preston, D.L., *et al.*, *Radiat. Res.*, **168**, 1-64 (2007)
- 7) Brenner, A.V., *et al.*, *Environ. Health Perspect.*, **119**, 933-939 (2011)
- 8) Preston, D.L., *et al.*, *J. Natl. Cancer Inst.*, **100**, 428-436 (2008)
- 9) Hatch, M., *et al.*, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **94**, 899-906 (2009)
- 10) Stewart, A., *et al.*, *Br. Med. J.*, **1**, 1495-1508 (1958)
- 11) Bithell, J.F., Stewart, A.M., *Br. J. Cancer*, **31**, 271-287 (1975)
- 12) Schulze-Rath, R., *et al.*, *Radiat. Environ. Biophys.*, **47**, 301-312 (2008)
- 13) ICRP, ICRP Publication 103, *Ann. ICRP*, **37**(2-4) (2007)
- 14) ICRP, ICRP Publication 60, *Ann. ICRP*, **21**(1-3) (1991)

(放射線医学総合研究所
放射線防護研究センター)