

放射能および放射線をどのように測定するか？

平井 昭 司

1 はじめに

2011年3月11日のM9.0の東日本大震災とそれに伴う大津波により発生した福島第一原子力発電所（東京電力）の事故は、放射性物質の環境中への放出あるいは流出を起こし、われわれの居住への被害や食生活などに異常なほどの不安を招いている。その一方、放射性物質に関連する数値、放射線量率の $\mu\text{Sv/h}$ （マイクロシーベルト/時）や放射能強度のBq（ベクレル）の単位により、原子炉事故の状態や環境に流出した放射性物質からの人体や食物・飲料水などへの影響が、連日、発表・報道されている。しかし、放射能あるいは放射線の測定方法について、一般の人はもちろんのこと多くの化学を専門とする者にとってもなじみの薄いことであった。

本稿では、どのように放射線を測定して放射線量率を算出するか、あるいはどのように放射性物質を測定して放射能強度を算出するかの概略および測定における注意点を解説する。ここで、放射能と放射能強度と語句を使い分けているが、本来の放射能の定義は、「エネルギーの高い状態にある原子核が、エネルギーを放出してより安定な状態になる現象あるいは性質」のことで、別の言い方をすると「原子核がエネルギーを外部に放出しながら壊変し、別の原子核（核種）となる現象あるいは性質」のことである。この原子核が壊変する割合または速度を放射能強度（壊変率）といい、この強度を省略して放射能ということもある。このように放射能は、現象や性質あるいは壊変速度を示す用語として使われてきたが、最近では放射性物質までを表すように間違っ使われることも多い。本稿では、放射能強度を表す用語として放射能の用語を使用する。なお、原子核が壊変する現象は、確率的な事象であり、その放射能（強度）は放射性核種に固有な値（壊変定数）となる。また、先に示した単位Bqは、1秒間に原子核が壊変する速度を示し、そこに存在する原子の数に比例する。すなわち、放射能（強度） A は、 $A = -dN/dt = \lambda N$ となる。ここで、 λ ：壊変定数（ $=0.693/T$ 、 T ：半減期）、 N ：原子数となる。この原子の数は、 $N = N_0 \exp(-\lambda t)$ のように時間 t の変化と共に指数的に変化する。半減期は、原子の数 N が1/2になるまでの時間であり、放射能（強度）が1/2になるまでの時間と同じである。なお、 $t=0$ のときの原子の数が N_0 である。

2 核分裂生成物の発生

発電用原子炉の燃料は、主に ^{235}U が3~5%の濃縮ウランを使用しているが、熱中性子（おおよそ0.5 eV以下のエネルギーでマックスウエル・ボルツマン分布則に従った運動エネルギーをもつ。室温（300 K）での熱中性子のエネルギーは0.025 eV、その速度は $2200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ になる。）が ^{235}U と核反応を起こすと、中性子は ^{235}U に捕獲され複合核を形成し、その後二つの原子核に分裂するとともに2~3個の中性子や γ 線を同時に放出する。分裂した二つの原子核は核分裂片（fission fragment）あるいは核分裂生成物（fission product）と呼ばれ、図1¹⁾に示すように質量数が約90~95にピークをもつ軽い原子核の分布と、質量数が約135~140にピークをもつ重い原子核の分布が生じる。図の縦軸は1回の核分裂における核分裂片あるいは核分裂生成物の生成の確率 {核分裂収率 (%) } である。1回の核分裂で2個の核分裂片が生じるので、全体では200%になっている。また、1回の核分裂で生じるエネルギーは約200 MeV ($1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$) となり、このエネルギーは核分裂片および発生した中性子や γ 線等の運動エネル

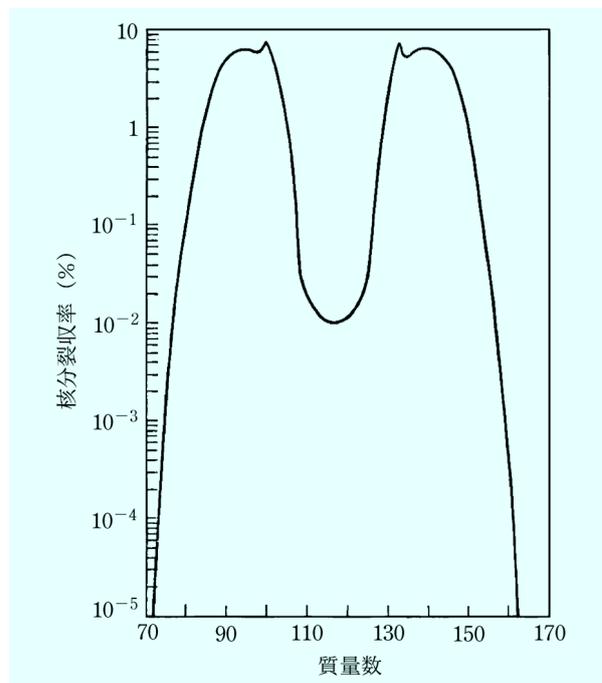
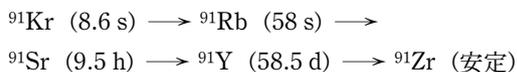


図1 熱中性子による ^{235}U の核分裂収率

ギーに分配され、熱エネルギーとして発生する。なお、核分裂片と核分裂生成物の違いは、運動エネルギーを持った状態では核分裂片と呼び、静止した状態では核分裂生成物と呼ぶ。

核分裂生成物の多くは中性子過剰な原子核であるので、 β^- 壊変を繰り返し、安定な核種に移行する。例えば、 ^{91}Kr は次々と β^- 壊変を繰り返して数種の同重体を経て、最後に安定な ^{91}Zr になる。すなわち、



のような β^- 壊変系列を形成する。核分裂直後に生成する核分裂生成物は、一次分裂生成物と呼ばれ、壊変系列を通じ壊変し、多くの安定な核種あるいは数年以上の長寿命核種を生成することとなる。一次分裂生成物の化学組成としては、希土類元素、希ガス (Kr, Xe), Zr, Mo, Cs, Ru, Sr, Te, Ba, ハロゲン元素 (I, Br), その他の元

表 1 半減期が数日以上の主な核分裂生成物

核分裂生成物	^{235}U 核分裂収率 (%)	半減期	核分裂生成物	^{235}U 核分裂収率 (%)	半減期
^{85}Kr	1.5	10.76 y	$^{129\text{m}}\text{Te}$	1.0	33.6 d
^{89}Sr	4.8	50.5 d	^{131}I	2.9	8.04 d
^{90}Sr	5.8	28.5 y	^{132}Te	4.3	78 h
^{90}Y		64.1 h	^{133}Xe	6.5	5.29 d
^{91}Y	5.8	58.5 d	^{137}Cs	5.9	30.1 y
^{95}Zr	6.3	640 d	^{137}Ba		2.55 m
^{95}Nb		35.15 d	^{140}Ba	12.79 d	
^{99}Mo	6.1	66.0 h	^{140}La	6.4	40.2 h
$^{99\text{m}}\text{Tc}$		6.0 h	^{141}Ce	5.7	32.51 d
^{103}Ru	2.9	39.35 d	^{143}Pr	6.2	13.57 d
$^{103\text{m}}\text{Rh}$		56.1 m	^{144}Ce	6.0	284.8 d
^{106}Ru	0.38	368 d	^{144}Pr		17.3 m
^{106}Rh		30 s	^{147}Nd	10.98 d	
$^{127\text{m}}\text{Te}$	0.25	109 d	^{147}Pm	2.6	2.62 y

[組み合わせの核種は放射平衡を表す。]

素の順になっている。安定核種あるいは長寿命核種の一次分裂生成物は原子炉内で中性子を吸収し、新たな放射性核種、高次分裂生成物を生成する。高次分裂生成物の生成確率は、安定な一次分裂生成物の熱中性子吸収断面積の大きさに比例するので、核分裂生成物の放射能の評価を行うときには考慮すべき事項である。

一般に多くの一次分裂生成物の多くは短寿命核種が多いので、冷却時間を置くことにより安定核種あるいは長寿命核種となり、これらの放射能はほとんど無視できるが、表 1²⁾ に示すような数日以上寿命をもつ核分裂生成物の放射能が強く現れ、これらの核種の測定と放射能評価が重要となってくる。なお、放射平衡が成り立っているときの娘核種の半減期は、親核種の半減期と等しくなっているので、放射能の減衰についても注意を要する。

3 核燃料から超ウラン元素の生成

ウラン燃料の同位体組成は、約 5 % が ^{235}U であり、残りの約 95 % が ^{238}U である。 ^{235}U は、前述したように熱中性子により核分裂を起こすが、また、 ^{235}U および ^{238}U は中性子を吸収し、新たな核種になるとともに、 α 壊変、 β^- 壊変などを繰り返し、超ウラン元素を生成する。その一例を図 2³⁾ に示す。図中の口で囲った核種は核分裂を起こし、斜めの太い矢印でも示している。核種の下あるいは上に記した時間は半減期で、その核種は α 壊変を起こす。破線の矢印は β^- 壊変を表し、その半減期も記している。また、IT は核異性体転移を表している。さらに、矢印の上に記されている (n, γ) あるいは (n, 2n) は中性子捕獲反応の種類を示している。 ^{235}U あるいは ^{238}U が中性子を捕獲した核種が短寿命の β^- 壊変を起こすと原子番号の大きい超ウラン元素が次々と生成してくる。その核種の中には、 ^{235}U と同様に核分裂を起こす核分裂性物質が生成する。それゆえ、運転中の核燃料および使用済み核燃料の中には、核分裂生成物と燃料のウランを含めてこれら超ウラン元素が含有

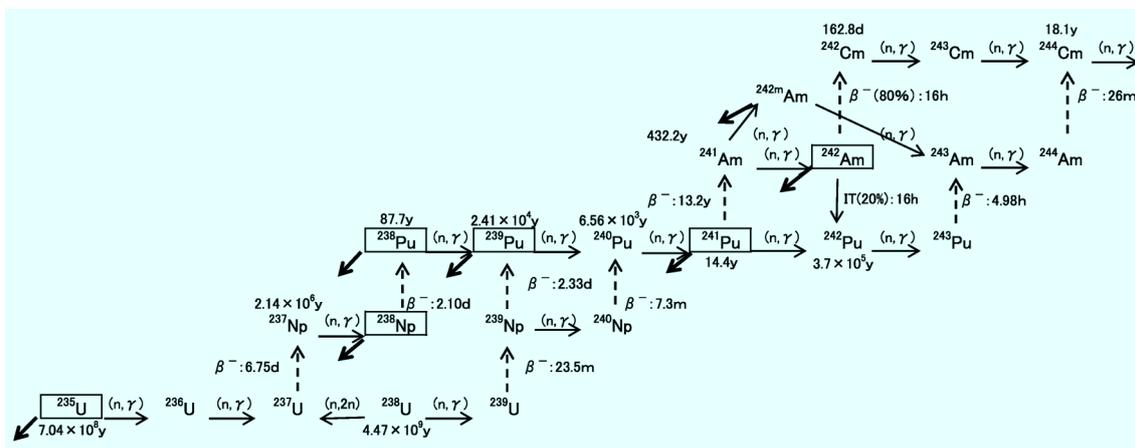


図 2 ウラン核燃料中の主なる核反応 [μ : (n, f) 反応, \uparrow : β^- 壊変, \rightarrow : (n, γ) 反応]

されている。ウラン及び超ウラン元素はすべて放射性核種であるが、その壊変形式の大部分は、比較的半減期が長い α 壊変を起こす。なお、地球の年齢 (4.6×10^9 y) と半減期を考えると、天然にはウラン及びトリウム以降の超ウラン元素の放射性核種が存在しないことになるが、ウラン鉱床付近では、宇宙線の影響により極わずかの ^{237}Np 、 ^{239}Np や ^{239}Pu が存在している。また、1960年代の核実験の影響で極わずかながら環境中にも ^{239}Pu が存在している。

4 放射性核種の同定

核分裂生成物の多くは、 β^- 壊変を繰り返しながら安定核種に壊変する。そのとき、大部分の核種は、 β^- 線と γ 線を同時に放出するが、中には β^- 線しか放出しない核種も存在する。表1の中で ^{89}Sr 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{143}Pr の4核種は β^- 線しか放出しない核種である。 γ 線のエネルギーは、放射性核種固有の値をもつことから γ 線エネルギーを測定することで放射性核種の種類を同定することができる。例えば、 ^{131}I (半減期: 8.04 d) は、主に 80.2 keV (2.6 %), 284 keV (6.1 %), 364 keV (81.7 %), 637 keV (7.2 %), 723 keV (1.8 %) の γ 線を放出する。 γ 線エネルギーのあとの()内はそれらの相対的放出割合を示す。それゆえ、Ge検出器とマルチチャンネル波高分析器とを組み合わせた γ 線測定システムで ^{131}I を含有する試料を測定し、これらの γ 線エネルギーに関する γ 線ピークを検出することにより ^{131}I の同定が行われる。

一方、 β^- 線のエネルギーはある最大値から0までの連続の値をとることから β 線測定だけでは放射性核種の種類を同定できない。そのため、試料の前処理操作として放射化学的にある特定の化学種だけを分離して放射能測定を行わなければならないことになる。

核燃料に関係するウラン及び超ウラン元素の大部分は α 線を放出する。 α 線のエネルギーは放射性核種固有の値をもつが、多くの放射性核種では類似したエネルギーを放出しているため、特定が困難なことも多いことと、 α 線は空気中でもエネルギーを損失して検出することができなくなることで、マトリックスから特定核種を放射化学的に分離し、放射能測定を行わなければならない。

5 放射能測定

核分裂生成物および核燃料から誘導される放射性核種並びに原子力発電所から放出される可能性のある放射性核種が環境中に排出されたときの放射性核種の放射能測定法について、文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室から「放射能測定法シリーズ No. 1~No. 34」および「技術参考資料 No. 1」が、基準となる分析・測定方法の詳細なマニュアルとして財団法人日本分析センターより発行されている。表2に「放射能測定

法シリーズ No. 1~No. 34」および「技術参考資料 No. 1」の一覧を示すが、本マニュアルは日本分析センターのホームページ (<http://www.jcac.or.jp/series.html>, 2011.4) から無料でダウンロードすることができる。分析対象試料としては、特定する放射性核種により試料の種類は多少異なるが、大気浮遊じん・降下物・降水・陸水・土壌・河底土・湖底土・排水・穀類・野菜類・茶・牛乳・牧草・淡水産物・日常食・指標生物・海水・海底土・海産物のように細分化された試料や、大気浮遊じん・水試料(海水, 陸水)・土試料(土壌, 海底土)・生物試料(海産物, 陸産物)のように大別した試料の分析・測定方法が準備されている。なお、本マニュアルのうち1960年代から1970年代に制定されたものについては、放射能の単位が旧単位のCi(キュリー)($1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$)で記載されているものもある。

以下、具体的な分析・測定法はマニュアルに委ねるので、分析・測定のポイントとなるところを解説する。

5.1 γ 線スペクトロメトリー

事故を起こした原子力発電所から出てくる放射性核種の大部分は、 γ 線を放出する核種である。これらの放射能を測定するためには、Ge検出器とマルチチャンネル波高分析器とを組み合わせた γ 線測定システムが用いられる。一般にGe検出器は鉛および/または鉄からなる遮蔽体の中に設置され、環境中にある放射線量率を低減して試料中の放射能を測定する。この環境中の放射性核種として ^{238}U 、 ^{235}U および ^{232}Th を親核種とするウラン系列、アクチニウム系列およびトリウム系列に属する娘核種からの γ 線や、 ^{40}K を代表とするような壊変系列を作らない天然の放射性核種からの γ 線の影響を考慮しなければならない。また、収集した γ 線スペクトルにおいて、線状の γ 線ピークの位置が放射性核種を特定するための γ 線エネルギーに相当するが、この γ 線ピークより低エネルギー側に必ず連続スペクトルをなすコンプトン帯が形成される。複数の放射性核種が存在すると、コンプトン帯の上に重なり γ 線ピークが出現する。それゆえ、注目する正味の γ 線ピークの面積(カウント)は、注目する全 γ 線ピーク的面積から天然の放射性核種によるバックグラウンドとコンプトン帯によるバックグラウンドを差し引いた値(カウント)となり、この値を測定時間(秒)で除した計数率cps(カウント/秒)で算出する。この計数率から放射能Bqに換算するためには、あらかじめ放射能が既知の複数の標準線源を利用して、 γ 線エネルギーと波高分析のチャンネル数の関係(エネルギー校正)および γ 線エネルギーごとの計数効率を求め、測定した計数率と計数効率から放射能を算出することができる。特に、注目する放射性核種の標準線源があれば、その標準線源の γ 線ピークとの比から放射能を求めることができる。標準線源は所定の手続きのもと、財

表 2 文部科学省が発行している放射能測定マニュアル

	No.	書名	制定(改訂)	No.	書名	制定(改訂)
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)	18	熱ルミネセンス線量計を用いた 環境 γ 線量測定法	平成 2 年 2 月 (1 訂)
	2	放射性ストロンチウム分析法	平成 15 年 7 月 (4 訂)	19	ラジウム分析法	平成 2 年 2 月
	3	放射性セシウム分析法	昭和 51 年 9 月 (1 訂)	20	空間 γ 線スペクトル測定法	平成 2 年 2 月
	4	放射性ヨウ素分析法	平成 8 年 3 月 (2 訂)	21	アメリカシウム分析法	平成 2 年 11 月
	5	放射性コバルト分析法	平成 2 年 2 月 (1 訂)	22	プルトニウム・アメリカシウム逐 次分析法	平成 2 年 11 月
	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	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)
	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)	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
	8	放射性ジルコニウム分析法	昭和 51 年 9 月	25	放射性炭素分析法	平成 5 年 9 月
	9	トリチウム分析法	平成 14 年 7 月 (2 訂)	26	ヨウ素-129 分析法	平成 8 年 3 月
	10	放射性ルテニウム分析法	平成 8 年 3 月 (1 訂)	27	蛍光ガラス線量計を用いた環境 γ 線量測定法	平成 14 年 7 月
	11	放射性セリウム分析法	昭和 52 年 10 月	28	環境試料中プルトニウム迅速分 析法	平成 14 年 7 月
	12	プルトニウム分析法	平成 2 年 11 月 (1 訂)	29	緊急時におけるガンマ線スペク トル解析法	平成 16 年 2 月
	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	30	環境試料中アメリカシウム-241, キュリウム迅速分析法	平成 16 年 2 月
	14	ウラン分析法	平成 14 年 7 月 (2 訂)	31	環境試料中全アルファ放射能迅 速分析法	平成 16 年 2 月
	15	緊急時における放射性ヨウ素測 定法	平成 14 年 7 月 (1 訂)	32	環境試料中ヨウ素-129 迅速分 析法	平成 16 年 2 月
	16	環境試料採取法	昭和 58 年 12 月	33	ゲルマニウム半導体検出器を用 いた in-situ 測定法	平成 20 年 3 月
	17	連続モニタによる環境 γ 線測定 法	平成 8 年 3 月 (1 訂)	34	環境試料中ネプツニウム-237 迅速分析法	平成 20 年 3 月
技術参考資料	1	大気中放射性物質のモニタリン グに関する技術参考資料	平成 15 年 7 月			

日本アイソトープ協会 (<http://www.jrias.or.jp/index.cfm/6,9868,110,151,html>, 2011.4) から購入できる。標準線源には点線源と体積線源が用意されているが、分析試料が体積試料になるときは同一のジオメトリーになる体積線源を使用するのが望ましいが、体積線源を用意できない場合には点線源で測定し、計算により体積線源に換算し、求めることも可能である。

また、分析試料には ^{131}I しか存在しないようなときには、Ge 検出器の代わりに検出効率の高い NaI (Tl) 検出器を用いて測定することができる。この場合、標準線源として ^{131}I の γ 線スペクトルに模した線源 (^{133}Ba と ^{137}Cs の混合) を利用することができる。いずれにしても γ 線スペクトロメトリーによる方法では、同時に多くの放射性核種を同定し、放射能を求めることができる。さらに、あまりにも強い放射能の試料を検出器に近接させて測定すること(高計数率測定)は、計数値の数え落としが起るので望ましくない。検出器から適当な距離を置いて測定するのがよく、目安として波高分析に付置している不感時間率のメータの 10% 程度以下で測定すればよい。

5・2 GM 計数装置あるいはガスフロー計数装置による β^- 線測定

多くの放射性核種は β^- 壊変を起こしていることから、放射性核種を特定しないで、放射能の値を概略的に算出するときには GM 計数装置が使用される。本装置は他の放射線測定装置に比較して安価であり、操作も簡便であるので、古くからよく使用されている。ただし、 ^3H や ^{14}C からの軟 β 線の測定はできない。 β^- 線測定では試料自体でエネルギーが吸収されるため、できるだけ厚みのない状態で測定する必要があり、乾燥や灰化により試料体積を減らして測定する必要がある。試料の自己吸収の補正には、試料量を変えた KCl 試薬中に含有する ^{40}K (同位体比; 0.0118%, 半減期; 1.26×10^9 y) の β^- 線を測定して行うとよい。また、自己吸収の影響が少ない試料では日本アイソトープ協会が頒布している標準線源(表面放出率が一定で放射能が既知の線源および放射能が既知の点線源) (^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{204}Tl , ^{147}Pm , ^{60}Co , ^{137}Cs) を利用して、放射能の値を求めることができる。なお、放射能測定シリーズにおけるマニュアルでは U_3O_8 試料の使用が記述されているが、放射性物質としての購入が困難なことから最近ではあまり使われな

い。また、 β^- 線計測において高計数率になると γ 線スペクトロメトリーの時以上に計数値の数え落としがあるので、あらかじめ数え落としがない測定領域を標準線源で算出しておく必要がある。

β^- 線を放出する核種を特定してその放射能を測定するには、担体を使用して共沈法あるいはイオン交換クロマトグラフィーなどの分離操作を行い、目的核種を選択的に分離してからその β^- 線測定を行う。目的核種の放射能が弱いような場合には、感度の良いガスフロー計数装置を使用して測定を行えるが、高放射能の試料ではGM計数装置でも測定が可能である。核分裂生成物で β^- 線しか放出しない核種は、前述したように4核種であり、このうち ^{90}Sr と ^{90}Y は壊変系列をなし、放射平衡になる核種である。また、 ^{89}Sr と ^{90}Sr は化学的に分離できない。このような場合には、まず、SrとYとの分離を行い、 ^{89}Sr と ^{90}Sr の全放射能と ^{90}Y の放射能を別々に測定し、その後、 ^{90}Y の放射能から ^{90}Sr の放射能を計算で求め、 ^{89}Sr と ^{90}Sr の全放射能から ^{90}Sr の放射能を差し引いて ^{89}Sr の放射能を求めることができる。特に、 ^{90}Y の半減期が64.1hであることから ^{90}Sr と ^{90}Y とが放射平衡になるまでには約1か月が必要となり、分析結果がでるまでに多少の時間を要する。

5.3 α 線スペクトロメトリー

α 壊変を起こす核種(α 放射体)は質量数が140以上の核種に存在し、 α 線エネルギーは核種固有のエネルギーを放出する。しかし、その飛程は一般の物質で数十~数百 μm 、空気中で数cmと非常に短い。そのため、一般には真空状態で測定するとともに、マトリックス自身によりエネルギーの減衰が起こるので、目的核種を選択的に分離し、金属板に電着等を行い、均一の薄い試料にしてから測定を行う必要がある。目的核種を選択的分離方法は β^- 線の場合と類似した化学的分離法で行う。 α 線を検出する方法でガスフロー計数装置を用いることができるが、 α 線と β 線との分離は印加電圧の大きさによって弁別するが、 α 核種同士の区別をすることができない。一般の測定では、表面障壁型のSi検出器とマルチチャンネル波高分析器が用いられるが、 γ 線のようにエネルギー分解能が高くないので、多くの α 核種を同時に同定することができない。また、非常に弱い放射能をもつ α 核種を検出するときには、検出効率が100%に近い液体シンチレーションとマルチチャンネル波高分析器の組み合わせの装置により定量できる。

5.4 放射線測定における計数誤差

すべての放射線測定で共通する事項であり、忘れてはならない重要な事項がある。最初に述べたように原子核が壊変する現象は、確率的な事象であるということである。すなわち、一定の数式に従って必ず壊変するのでは

なく、揺らぎをもちながら平均的に一定の数式に従って壊変するのである。確率的な壊変の事象は、正規分布をもつことが知られているので、測定した計数値も正規分布をなす。それゆえ、 t 時間測定し、 n カウントの計数値を収集した場合、その標準偏差(σ)は \sqrt{n} となり、計数値にはいつもこの標準偏差、いわゆる計数誤差を伴っていることになる。長寿命核種の試料を同一条件で再び繰り返し測定しても全く同じ計数値が得られないのはこの理由による。この計数誤差があることで、放射能計算をするときに注意しなければならないことがある。先に示したように、正味の計数率から放射能を算出するとき、全計数率からバックグラウンド計数率を差し引いている。全計数率及びバックグラウンド計数率にもそれぞれ計数誤差があることから、正味の計数率にも当然のことながら計数誤差が含まれる。この計数誤差は、誤差^{でんぱ}伝播の法則により次のように導くことができる。正味の計数率は、

$$(n_t/t_t - n_b/t_b) \pm \sqrt{(n_t/t_t^2 + n_b/t_b^2)}$$

となる。ここで、 n_t は全計数値、 n_b はバックグラウンド計数値、 t_t は試料計数時間、 t_b はバックグラウンド計数時間である。全計数率とバックグラウンド計数率の値がほぼ同レベルであると、計数誤差が大きくなることは上式から予想がつくと思う。できるだけ全計数率とバックグラウンド計数率との差を大きくして測定することが望ましい。

6 放射線量あるいは放射線量率の測定

放射線が人体を含めていろいろな物質に影響を与えるのは、放射線の種類とそのエネルギーの大きさと線量である。これらは線量強度あるいは線量で表され、その時間的変化は線量率で示されている。その影響の程度はどれだけのエネルギーがその物質に吸収されたかを示す単位($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}=\text{Gy}$, グレイ)があり、吸収線量あるいはカーマの名称で呼ばれている。吸収線量は、電離放射線により物質の単位質量に付与された平均のエネルギーを示すものであり、カーマは、光子や中性子のような電荷をもたない間接電離放射線によって物質の単位質量あたりから二次的に放出される電子やイオンなどの荷電粒子の初期運動エネルギーの総和である。このような定義であるので物理的定義は吸収線量とカーマは異なるが、場におかれた物質が放射線によって与えられる吸収線量の値はほぼ近い値となるとともに、対象とする物質によっても異なるのでその物質名を明記する必要がある。空気カーマや組織カーマ(生体組織に対して)の語句がある。特に、光子に対しての吸収線量は空気カーマの値が国際的に使用されている。

また、光子を放出する放射性核種(多くの β^- 線を放出する核種が該当)には、放射能A(Bq)である点線

源から真空中で距離 L (m) のところの δ より高いエネルギーの光子による空気カーマ率定数 Γ_δ ($\text{m}^2 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m}^2 \cdot \text{Gy} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) ($\Gamma_\delta = L^2 K_d / A$) が便覧⁴⁾等に示されているので、核種、放射能 A 、距離 L および空気カーマ率 K_d がわかれば、カーマ率を計算できる。なお、X線や γ 線の光子の放射線場に対する強度を表す物理量として照射線量 ($\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, C:クーロン) (照射された単位量の空気から放出される電子が空气中で完全に静止するまでに電離する正または負イオンの全電荷の絶対値) があり、SI単位にトレーサブルに測定できる。その方法が自由空気電離箱による測定で、照射線量の原器ともなっている。その装置を小型化し、使いやすとした装置として空洞電離箱がある。

放射線量の単位には、物理量としての吸収線量、カーマ、照射線量以外に、放射線防護を目的とした等価線量と実効線量 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{Sv}$, シーベルト) とがある。吸収線量の Gy も等価線量・実効線量の Sv もどちらの単位も $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ である。すなわち、等価線量は、臓器または組織の吸収線量に、該当する放射線荷重係数 (β 線・ γ 線・X線; 1, 中性子線; 5~20 (エネルギーに依存), α 線; 20, 等) を乗じた量で、放射線場がいろいろな種類からのときは、吸収線量を複数のブロックに分け、それらの等価線量を合計する総等価線量が求められる。実効線量は、臓器または組織の等価線量に、臓器・組織の被ばくによる相対的な確率的損害を考慮した組織荷重係数 (生殖腺; 0.20, 骨髄; 0.12, 結腸; 0.12, 肺; 0.12, 胃; 0.12, 甲状腺; 0.05, 乳房; 0.05, 皮膚; 0.01, 等) を乗じた値と定義され、防護量として使われている。また、放射線測定器 (放射線モニター) からの線量測定値と実効線量を関連付けるための実用量として線量当量がある。例えば、ICRU球 (人体モデルとして密度 1 g/cm^3 の組織等価物質 (酸素; 76.2%, 炭素; 11.1%, 水素; 10.1%, 窒素; 2.6% - 質量組成) からなる直径 30 cm の球状均質ファントムを放射線場に置いたとき、表面からある深さ (1 cm あるいは $70 \mu\text{m}$) の線量を線量当量といい、深さ 1 cm でのところを 1 cm 線量当量, $70 \mu\text{m}$ のところを $70 \mu\text{m}$ 線量当量と呼び、測定器の実効線量あるいは等価線量の校正のため利用される。

以上のように求めようとする線量単位により、種々の測定装置を使用することができる。主要な測定装置について概説する。

6.1 吸収線量の測定

吸収線量を測定するのに空洞電離箱、熱量計 (カロリーメーター)、フリッケ線量計、セリウム線量計、蛍光ガラス線量計あるいは熱蛍光線量計などがある。空洞電離箱が一般的で、気体中での放射線の電離作用に基づいてエネルギー吸収量を求める。放射線が気体である物質と

衝突すると電子イオン対が生成する。この電子イオン対からなる電荷量は放射線量とも比例し、電圧を印加することにより電荷量を収集することができる。印加電圧の程度により、再結合領域、電離領域、比例領域、GM領域、連続放電領域と分類され、収集電荷量もこの順で多くなる。このうち電離領域とGM領域では収集電荷量の大きさは異なるが、印加電圧にほとんど無関係な一定な収集電荷量 (プラトー領域) になり、線量測定に使用される。比例領域では一次電離以外に二次の電離が起こり、増幅的な電荷量を得ることができるので、エネルギー測定や放射線の識別が可能である。前述したガスフロー計数装置はこの原理に基づいた測定器である。また、広く利用されているGM計数管は、放射線の種類により発生する電荷の量も異なるとともに、検出効率も異なってくる。GM計数管内に入射した β 線では100%の効率をもっているが、 γ 線では計数管壁からの二次電子により応答し、1%以下の効率である。 α 線や重荷電粒子では入射窓を非常に薄くしなければならず、一般には測定対象にはしない。

熱量計はエネルギー吸収による温度上昇を測定するので技術的に非常に困難なことが多いが、吸収線量の絶対測定や線源強度の絶対測定に利用されることもある。フリッケ線量計は吸収されたエネルギーの化学的変化に基づいて測定するもので、吸収線量の絶対測定に利用される。その原理は、硫酸第一鉄水溶液中の第一鉄イオン (Fe^{2+}) が放射線により酸化し、第二鉄イオン (Fe^{3+}) に変化する程度を分光光度計で測定するもので、30~350 Gyの大線量の測定に使用される。セリウム線量計はフリッケ線量計と同様に化学的変化に基づいて測定され、第二セリウムイオン (Ce^{4+}) が放射線による還元により第一セリウムイオン (Ce^{3+}) に変化する量から求めるもので、 $10^3 \sim 10^5$ Gyと非常に大線量の測定に使用される。蛍光ガラス線量計はラジオホルミネセンス (RPL) 現象を利用し、熱蛍光線量計は熱ルミネセンス (TL) 現象を利用した測定器であり、どちらも蛍光体に放射線による照射を受けるとそのエネルギーが蓄積される。その状態に熱を加えるか紫外線を加えるかによって蛍光線が放出する。その量により吸収線量を測定する。これらは個人の被ばく線量や長期環境モニタリングに適している。

6.2 放射線モニタリングのための測定

放射線防護のために、放射線、放射能あるいは個人被ばく量などを計画的測定し、その結果を評価・判断することを放射線モニタリングといい、大きく分けて施設・環境モニタリングと個人モニタリングに分けられる。前者にはサーベイメーターが、後者には個人被ばく線量計がある。

サーベイメーターには、電離箱式サーベイメーター、

GM 計数管式サーベイメーター、NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメーター、比例計数管式サーベイメーター、ZnS (Ag) 式シンチレーション式サーベイメーターなどがある。電離箱式サーベイメーター、GM 計数管式サーベイメーター、NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメーターは、主に γ 線、X 線、 β 線測定用に、比例計数管 (BF₃ 比例計数管あるいは ³H 比例計数管) 式サーベイメーターは中性子測定用に、ZnS (Ag) 式シンチレーション式サーベイメーターは α 線測定用に使用される。これらは、測定対象となる放射線の線質や線量率によって使い分ける必要がある。これらのサーベイメーターの中で、1 cm 線量当量率 (μ Sv/h) を計測できるものは原理的に電離箱式サーベイメーターである。また、他のサーベイメーターは原理的に入射した放射線量率をパルスの形で計測し、 μ Sv/h に変換していることと、サーベイメーターの種類によっては放射線のエネルギーに対する感度 (レスポンス) が異なるため不確かさが多い表示ともなる。

各種サーベイメーターの特性として①エネルギー依存性、②時定数、③校正定数の問題があり、これらの特性を理解しないと正確な計測ができない。エネルギー依存性は JIS Z 1433 により規定され、そのエネルギー依存性の許容範囲は ¹³⁷Cs の 662 keV の γ 線エネルギーに対するレスポンス (相対感度) で表されている。この値が 1 に近ければ良好な特性を示すことになる。電離箱式、GM 計数管式、NaI (Tl) シンチレーション式の順に特性は悪くなる。そのため、特性の悪いエネルギーでは校正定数から補正しなければならない。感度としては、この逆となり、NaI (Tl) シンチレーション式が最も高感度で、電離箱式が最も低感度である。

サーベイメーターは計数率計であるので必ず時定数がある。時定数の時間で計測すると指針は、最終指示値の約 63 % しか値を示さず、3 倍の時定数の計測時間で約 95 %、4 倍の時定数の計測時間で 98 % を示すことになるので、正確な数値を得るには 4 倍の時定数以上の計測時間で測定する必要がある。時定数を短くして計測すると応答は速くなるが、計数率が低い場合には針の動きが速く、指示値を読み取ることができない。逆に高計数率の場合には、時定数を短くして計測するほうがよい。

サーベイメーターの指示値は必ずしも正確な値ではないので、正確な値をとるためには校正機関で国家標準とのトレサビリティをとり、校正定数を求めておかなければならない。このような処置を行うと、校正定数に基づいて指示値から正確な線量率を求めることができる。

個人被ばく線量計には吸収線量計のところでも記述した蛍光ガラス線量計、熱蛍光線量計や写真の放射線による黒化作用を利用したフィルムバッジなどがある。表 3⁵⁾にこれら線量計の種類と特性を示す。これらは個人が長期間着用し、被ばくした累積線量を知ることができ

表 3 個人被ばく線量計の種類と特性

線量計	測定放射線	測定エネルギー範囲	測定線量範囲
蛍光ガラス線量計	γ, X, β	10 keV~10 MeV (γ, X)	0.01 mSv~10 Sv (γ, X)
光刺激蛍光線量計	γ, X, β , 中性子 (熱・速)	5 keV~10 MeV (γ, X)	0.01 mSv~10 Sv (γ, X)
熱蛍光線量計	γ, X, β , 中性子 (熱)	20 keV~3 MeV (γ, X)	1 μ Sv~200 mSv (γ, X)
フィルムバッジ	γ, X, β , 中性子 (熱・速)	10 keV~3 MeV (γ, X)	0.1 mSv~300 mSv (γ, X)
固体飛跡検出器	中性子 (熱・速)	0.025 eV~数 MeV (中性子)	0.1 mSv~60 mSv (γ, X)
ポケット線量計 (シリコン半導体)	γ, X	20 keV~ (γ, X)	1 μ Sv~10 Sv (γ, X)
ポケット線量計 (電離箱)	γ, X	15 keV~10 MeV (γ, X)	1 μ Sv~40 Sv (γ, X)
アラームメーター (シリコン半導体)	γ, X	15 keV~10 MeV (γ, X)	1 μ Sv~999 μ Sv (γ, X)
アラームメーター (GM 管式)	γ, X	30 keV~10 MeV (γ, X)	1 μ Sv~999 μ Sv (γ, X)

る。サーベイメーターと同様に線量計の種類ごとに測定エネルギー範囲や測定線量範囲が異なってくる。また、短期間用の線量計としてポケット線量計やアラームメーターがある。これらの特性も表 3 に示す。個人被ばく線量計の着用は、法令によって規定され、男子は胸部・上腕部、女子は腹部・大腿部に付ける。いずれの個人被ばく線量計も外部被ばく線量測定のものであり、法令に基づく作業者が使用するものである。なお、個人被ばく線量計の管理の大部分は関係する機関によってなされているので、関係する機関の規定あるいは注意事項を順守して使用するのが望ましい。

7 おわりに

今回の福島の原子炉事故のように環境中に多くの放射性核種を飛散させたときには、第一には、放射線量モニタリングポストやサーベイメーターによりどれだけの放射線量率 (μ Sv/h) が増加したかを把握する必要がある。放射線量率を把握した後、第二には、どのような放射性核種がどれだけの放射能濃度 (Bq/kg あるいは Bq/L) で存在しているかを知る必要がある。特に、放射能濃度の定量には測定対象ごとに前処理法が規定されているので、その方法に従わなくてはならないとともに、認証標準物質を使用する計量学的なトレサビリティの取れた方法で放射能測定を行わないと、得られた数値の信頼性が欠けることになる。

本稿では、放射能あるいは放射線量率を求めるための主なる放射線測定器の原理・特性・使用上の注意等を概説した。さらに詳しく学びたい場合は関係する成書^{6)~11)}を参考にされたい。

文 献

- 1) 富永 健, 佐野博敏: “放射化学概論第 2 版”, p. 106

- (1999), (東京大学出版会).
- 2) 内藤奎爾：“原子炉化学上”，p. 65 (1978), (東京大学出版会).
 - 3) 内藤奎爾：“原子炉化学下”，p. 165 (1978), (東京大学出版会).
 - 4) 日本アイソトープ協会編：“10版アイソトープ手帳”，p. 20 (2002), (日本アイソトープ協会).
 - 5) 西谷源展, 山田勝彦, 前越 久：“放射線計測学”，p. 180 (2009), (オーム社).
 - 6) 花田博之編著：“放射化学”，(2004), (オーム社).
 - 7) 野口正安：“実験と演習γ線スペクトロメトリー”，(1980), (日刊工業新聞社).
 - 8) 関口 晃：“放射線計測概論”，(1979), (東京大学出版会).

- 9) 河田 燕：“放射線計測技術”，(1978), (東京大学出版会).
- 10) 西谷源展, 山田勝彦, 前越 久：“放射線計測学”，(2009), (オーム社).
- 11) 石森富太郎編：“放射線防護”，(1983), (培風館).



平井昭司 (Shoji Hirai)

東京都市大学。東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。工学博士。《現在の研究テーマ》分析の信頼性にかかわる教育と文化財鉄器の材質・産地推定の研究。《主な著書》“現場で役立つ化学分析の基礎” (監修) (オーム社)。《趣味》趣味の域を超えたテニス。E-mail: shirai@tcu.ac.jp

日本分析化学会研究懇談会の御案内

日本分析化学会の研究懇談会に入会御希望の方は下記に照会ください。

- ① ガスクロマトグラフィー研究懇談会
- ② 高分子分析研究懇談会
- ③ X線分析研究懇談会
- ④ 液体クロマトグラフィー研究懇談会
- ⑤ 分析試薬研究懇談会 (旧有機試薬研究懇談会)
- ⑥ 有機微量分析研究懇談会
- ⑦ 溶液界面研究懇談会 (旧非水溶媒研究懇談会)
- ⑧ 化学センサー研究懇談会
- ⑨ 電気泳動分析研究懇談会
- ⑩ イオンクロマトグラフィー研究懇談会
- ⑪ フローインジェクション分析研究懇談会
- ⑫ 環境分析研究懇談会
- ⑬ 表示・起源分析技術研究懇談会
- ⑭ 熱分析研究懇談会
- ⑮ レアメタル分析研究懇談会

◇照会先

- ①～④：〒141-0031 東京都品川区西五反田1-26-2 五反田サンハイツ304号 社団法人日本分析化学会 [電話：03-3490-3351]
- ⑤：〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1 上智大学理工学部化学科分析化学研究室内 橋本 剛 [電話：03-3238-3371]
- ⑥：〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部応用化学科内 竹内豊英 [電話：058-293-2806, E-mail: take-t@gifu-u.ac.jp]

- ⑦：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学大学院理学研究科化学専攻内 大塚利行 [電話：078-803-5682, E-mail: osakai@kobe-u.ac.jp]
- ⑧：〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1 慶應義塾大学理工学部応用化学科分析化学研究室 鈴木孝治 [電話：045-566-1568]
- ⑨：〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1 近畿大学薬学部薬品分析学教室内 鈴木茂生 [電話：06-6721-2332 内線5550]
- ⑩：〒739-8529 東広島市鏡山1-5-1 広島大学大学院国際協力研究科 田中一彦 [電話：082-424-6927]
- ⑪：〒470-0392 豊田市八草町八千草1247 愛知工業大学応用化学科 手嶋紀雄 [電話：0565-48-8121 内線2218]
- ⑫：〒376-8515 桐生市天神町1-5-1 群馬大学大学院工学研究科 角田欣一 [電話：0277-30-1254]
- ⑬：〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2 東京電機大学工学部環境化学科内 保倉明子 [電話：03-5280-3764]
- ⑭：〒305-8563 つくば市梅園1-1-1 中央第3 (株)産業技術総合研究所内 津越敬寿 [電話：029-861-4997, E-mail: tsugoshi.takahisa@aist.go.jp]
- ⑮：〒262-0045 千葉県花見川区作新台6-10-3-415 下総希元素分析研究所内 小熊幸一 [電話：090-3876-1559, E-mail: piano@gk9.so-net.ne.jp]