

緊急連載 「放射能・放射線を正しく理解する」

日本中が震撼した3月11日の東日本大震災を境に、絶対に安全と言われてきた原子力発電の神話が一瞬にして崩れ、私たちの生活を脅かしています。特に原子力発電所からの放射性物質の環境への漏洩は、最も憂慮される事態であり、世界各国がその成り行きを注視しています。放出された放射性物質を短期間に回収することは難しく、今後、広範囲、かつ長期間にわたるモニタリングが必要とされるでしょう。一方、今回の事故に関して、これまでに分析値が各分野に影響を及ぼしています。報道されている分析値の意味について、分析化学の立場からも把握し、現状の正確な理解を促す責務があります。このような事態に鑑みて、「ぶんせき」編集委員会では、今回の事故に関連した放射性物質について、まずはこれらのふるまいなどを正しく理解するために最小限必要となる基礎的知識を、広く会員に提供する必要があると考えました。本連載は、原発事故で注目される放射性物質に限定して、分析化学的視点に基づいて事態を正しく解釈できることを目指し、少しでも役立つものを提供できればと企画するものであります。

まず、本号においては、今回の原発事故に関連する「放射能・放射線」の測定値を正しく理解するため、基本的な知識の提供を目的に二つの記事を紹介します。一つ目は特に、「放射能」「放射線」といった、誤解されやすい用語の本質・定義を示した上で、報道されている「数値をどのようにみるか」を解説しました。さらに二つ目として、具体的な放射能・放射線の各種測定方法について、核分裂生成物などの挙動を解説した上で、測定上のポイント・注意点などを含めて概説しました。詳細については既刊の測定マニュアルを参照できるようにも配慮されております。

今後、環境中における放射性物質の動態とその測定技術などの企画を進めて参ります。会員皆様の理解の一助としていただければ幸いです。

〔「ぶんせき」編集委員会〕

放射エネルギー・放射線量の数値をどのようにみるか？

花岡 宏史，上原 知也，荒野 泰

1 はじめに

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、 ^{131}I などの放射性物質が原子力発電所外に放出され、環境や人体に及ぼす影響が懸念されている。インターネット上では、行政機関の公表から、真偽不明でいたずらに恐怖心を煽る記述まで様々な情報が溢れている。こうした状況にある今こそ放射線等についての正しい知識を持ち、冷静かつ適切な対応が求められる。本稿では、放射能と放射線についての基礎知識をまとめ、放射線量に対する基本的な考え方を記す。

2 放射能と放射線

2.1 放射性物質

元素のなかには、同じ元素でありながら（陽子数が同じ）、中性子数が異なる同位体（同位元素）が存在する。

同位体のうち、時間とともに原子核の陽子と中性子の数が変化（壊変）して放射線を放出するものが放射性同位体（放射性同位元素）である。

放射性物質とは、放射能を持つ物質の総称であり、 ^{235}U や ^{131}I などの放射性同位元素や、核反応を起こして生成する放射化物質などを指す。ここで、「放射能」とは、放射線を放出する能力の大小を表す用語であり、「放射性物質」が「放射線」を出す能力が「放射能」である。これまで「放射能漏れ」という誤った表現で、漠然と恐怖心を煽る報道が多かったが、漏れたのは、どの放射性同位元素で、どのような性質であるかを正確に把握して、それに適した対応を考えることが重要である。なお、放射能の量を表す単位として「ベクレル (Bq)」、放射線の強度や生体に与える影響を表す場合に「グレイ (Gy)」、「シーベルト (Sv)」などの単位が用いられる。これについては後述する。

2・2 自然放射線と人工放射線

放射線を出す放射性物質は地球の誕生以来、存在し続けている。また、宇宙からも放射線が降り注いでいる。地球の起源は約46億年前、人類は400～500万年位前に出現したといわれる。したがって人類は、様々な放射線が存在する中で誕生し、その生涯を過ごしていることをまず理解しておく必要がある。

現在検出できる自然界に存在する放射性同位体には、①壊変系列をつくるもの、②単独で存在するもの、③宇宙線や天然の放射線による核反応で絶えずつくられるものに分けられる。これらの詳細は省略するが、代表的な放射性核種として、①に対応するのが ^{235}U 、 ^{238}U などの天然放射性元素とその放射性壊変で生成する ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 等である。②の代表例は ^{40}K であり、地球上に存在するカリウムのうちの0.012%が ^{40}K である。 ^{40}K は海水中、食物中、そして、私たちの体内に存在するカリウム中にも同じ割合で存在する。 ^{40}K は半減期が 1.28×10^9 年で β 線、 γ 線とX線を放出する(図1)。体重60kgの人では、およそ3700 Bqの ^{40}K が存在し、これにより年間0.17 mSv程度の被ばくを受けている。 ^{14}C は、宇宙線から2次的に生成する中性子と大気中の窒素との核反応により生成し、半減期5730年で β 線を放出する。大気中の ^{14}C の割合も一定に保たれており、天然存在比は0.0000000012%である。 ^{14}C は大気循環に組み込まれて大気から生体に摂取される。生体が活動中は、 ^{14}C の生体内存在比は天然存在比と同じであるが、生体の死後は ^{14}C の供給を受けないため半減期5730年で ^{14}C の割合は低下する。 ^{14}C を利用した年代測定は、

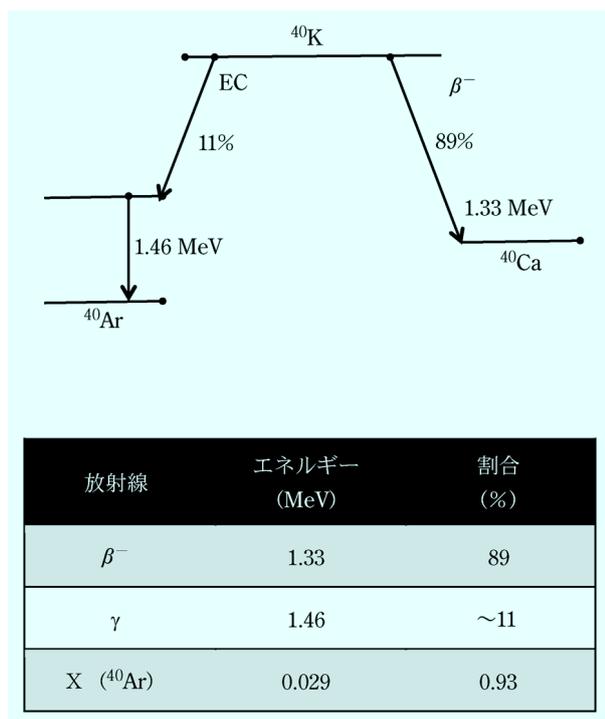


図1 ^{40}K の壊変

これを利用したものである。人の体に存在する ^{14}C からも約2500 Bqに相当する放射線が放出されている。

これに対して、臨床診断で用いられるX線や γ 線、そして、現在問題とされる原子力発電所の事故で放出された ^{131}I や ^{137}Cs 等から放出される放射線を人工放射線とよぶ。 ^{131}I や ^{137}Cs は原子力発電所で使用されるウランの核分裂反応により生じ、自然界には存在しない。したがって、これらの放射性同位体が検出された場所には、原子力発電所の事故等により放射性物質が飛散したことを示す。

2・3 放射線の種類と被ばくによる影響

放射線は不安定な原子核が安定な原子核に移る際に放出される粒子や電磁波であり、 α 線、 β 線、 γ 線、X線、中性子線等がある。放射線が物質中を透過するとき、エネルギーを物質に与え、自らはエネルギーを失う。このエネルギーにより、原子核周辺の電子がはじき飛ばされ、原子が電荷を持つ。これを電離作用という。放射線が単位長さを進む間に物質に与えるエネルギー付与率を線エネルギー付与(LET)といい、電離作用の強い放射線を高LET放射線という。放射線の種類により物質の透過性やエネルギー付与率が異なるため、生体に及ぼす影響にも相違がある。

α 線は陽子2個と中性子2個からなる+2価の荷電粒子で、ヘリウム原子核と同じである。 α 線は電離作用がたいへん強い高LET放射線であるが、透過性が弱く、紙一枚で遮へいされる。したがって、外部被ばくへの影響は無視できるが、体内に取り込まれた場合には大きな作用を及ぼすため、内部被ばくへの影響は大きい。

β 線は電子そのものであり、陰電子である β^- 線と陽電子である β^+ 線が存在する。このうち陽電子は自然界では不安定で、物質中の陰電子とすぐに結合して同時に2個の光子(消滅放射線)を反対方向に放出する。これを利用したのが、ポジトロン断層撮像法(PET)である。一般的に β 線と呼ぶ場合は、通常 β^- 線のことを指す。 β^- 線は、そのエネルギーに応じて物質との相互作用の程度が異なる。アルミの板で遮へいできる程度の透過力なので外部被ばくへの影響は小さいが、内部被ばくには留意する必要がある。

γ 線やX線は共に電磁波であり、粒子としての性質もあわせ持つことから光子とも呼ばれる。 γ 線やX線は透過力が強く、その遮へいには鉛やタングステンなどの原子番号の大きな物質が用いられる。透過力の強い性質を利用して胸部X線検査やCT検査に利用されており、医療被ばくのほとんどが γ 線やX線による。透過力は強いが電離作用は小さいため、外部被ばくの主たる原因となるが内部被ばくへの影響は小さい。 ^{131}I や ^{137}Cs は γ 線の他に β^- 線も放出するため、内部被ばくと外部被ばくの双方に影響を及ぼす。

中性子線はその名のとおりに中性子そのものであり電荷を持たないので、物質中を透過しやすい。中性子線は核分裂に伴い放出されるが、放射性物質の壊変では放出されない。中性子が生体内の水素（水分子は人体の70%）の原子核にぶつくと、陽子のはじき飛ばされて体内に存在する周辺の分子をイオン化して、細胞の構成分子を破壊する。中性子による電離作用は、その軌跡に沿って密に生じるため、外部被ばくに留意する必要がある。

3 測定数値の見方

3.1 外部被ばくと内部被ばくの評価

前述のように放射能は放射線を放出する能力の大きさであり、1 Bq は 1 秒間に 1 個の壊変が起こる放射線源の強さ（壊変の度合い）を示す。電球に例えると電球が出す光の強さが放射能であり、光が放射線に相当する。ある放射性核種 A が放射壊変により B へと変化する場、その壊変の速さはそのときに存在する原子の個数に比例する。半減期は通常、物理学的半減期を指し、放射性同位体の数が半分になるまでの時間を示す。半減期は放射性核種に固有の値であり、例えば ^{131}I であれば 8.02 日、 ^{137}Cs は 30 年で放射能は半分になる。過去の核実験等により生じた ^{137}Cs が現在も存在しているのはその長い半減期による。

放射線の生体に対する影響は、放射線が生体に当たり、生体にエネルギーが付与されることで生じる。放射線が物質に与えるエネルギーの大きさを表す単位（吸収線量）をグレイ（Gy）という。1 Gy とは放射線によって 1 kg あたり 1 J（ジュール）のエネルギーを与えられた状態である。一方、生体に対する放射線の影響は、同じ吸収線量でも放射線の種類により異なる。生体に対する影響の度合いは、放射線により生体に与えられるエネルギー（吸収線量）に、放射線の種類を考慮した係数（放射線荷重係数）を乗じた等価線量で評価される。単位はシーベルト（Sv）である。

等価線量 (Sv) = 吸収線量 (Gy) × 放射線荷重係数
β線とγ線の放射線荷重係数は1であるが、α線の放射線荷重係数は20である。

対象とする空間の単位時間あたりの放射線量を空間線量率といい、単位として Sv/h あるいは Gy/h が用いられる。空間線量率 (Sv/h) に、存在時間を乗ずることで外部被ばく量が算出できる。この場合、β⁻線とγ線が対象となるので、1 Gy/h ≒ 1 Sv/h である。

体内に取り込まれた物質の半分が排泄されるのに必要な時間を生理学的(生物学的)半減期という。生体に入った放射性物質は物理学的半減期と生理学的半減期の双方によって減衰する。この双方をあわせた減衰時間が実効(有効)半減期であり、物理学的半減期および、生理学的半減期をそれぞれ T_p , T_b とすると、実効(有効)半

減期 T_e は

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

で表される。この式から、実効(有効)半減期は、物理学的半減期あるいは生物学的半減期のうちの短いほうよりも短いことが分かる。体外被ばくでは物理学的半減期が、体内被ばくでは、実効(有効)半減期が重要な指標となる。

生体に及ぼす放射線の影響は、放射線の種類やエネルギーのほかに、生体の組織や臓器によって異なる。これを考慮した放射線量が実効線量(単位は Sv)である。組織や臓器の放射線感受性を考慮した係数である組織荷重係数を用いて組織ごとに「等価線量 × 組織荷重係数」を計算し、これを合計した線量が実効線量となる。すなわち、実効線量を E , 組織荷重係数を w_T , 等価線量を H_T とすると、

$$E = \sum_T w_T \times H_T \quad \text{ただし、} \sum w_T = 1$$

である。細胞分裂の盛んな組織や未分化な組織は放射線の感受性が高く、組織荷重係数が大きい(赤色骨髄、結腸、肺、胃=0.12)。

食事や呼吸などによって人の体内に放射性物質が取り込まれた場合の内部被ばくの算出は、その放射線による組織または臓器の内部被ばくを将来にわたって推定する必要がある。この評価に用いられる預託等価線量 ($H_T(\tau)$) とは、放射性物質を体内に摂取した後、体内に残存する放射性物質からその組織または臓器が受ける等価線量率を時間積分した線量である。

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt$$

ここで、 $H_T(\tau)$ は時刻 t における組織や臓器中の等価線量率、 τ は積分を行う期間である。積分期間が与えられない場合は、成人に対しては被ばく時から 50 年、子供に対しては 70 年までとされる。

預託等価線量に組織や臓器の荷重係数 w_T を乗じ、それぞれの値を加え合わせたのが預託実効線量 ($E(\tau)$) であり、次式で表記される。

$$E(\tau) = \sum_T w_T \times H_T(\tau)$$

預託実効線量は、放射性物質の物理学的半減期や体内での代謝、排泄に組織や臓器の放射線感受性を加味した線量であり、成人では摂取後 50 年(子供では 70 年)の積分期間の総計を示す。

しかし、体内に取り込まれた放射性物質の体内残存量を経時的に計測することは極めて困難である。そこで、摂取した放射性物質の量と組織や臓器が受ける線量との関係を予め算出し、この値(実効線量係数)を用いて摂取した放射性物質質量から預託実効線量が算出されている。

$$\text{預託実効線量 (mSv)} = \text{実効線量係数 (mSv/Bq)} \\ \times \text{放射性物質摂取量 (Bq)}$$

実効線量係数は、放射性同位体の種類、体内への取り込み経路(経口か呼吸か)、そして、組織や臓器によって、それぞれ異なる値が定められている。これを用いることで、飲料水中に含まれる放射性物質による内部被ばくが以下の式で求められる。

$$\text{預託実効線量} = (\text{飲食物摂取量 [kg/day]}) \times (\text{摂取日数 [day]}) \times (\text{実効線量係数 [mSv/Bq]}) \times (\text{放射能濃度 [Bq/kg]}) \times (\text{市場希釈係数}) \times (\text{調理等による減少補正})$$

例えば、¹³¹I濃度が2000 Bq/kgのほうれん草(基準値上限)を毎日50gずつ1年間摂取したとすると、¹³¹Iの経口摂取した実効線量係数=2.2×10⁻⁵ [mSv/Bq]、市場希釈係数と調理等による減少補正を1とすると、

$$\text{預託実効線量} = 0.05 \times 365 \times 2.2 \times 10^{-5} \times 2,000 \\ = 0.803 \text{ [mSv]}$$

と算出される。水洗や調理によって多くの¹³¹Iは除かれるので、実際は、これよりもはるかに小さい値となる。

3.2 数値をどう読むか

前述のように、自然界には多くの放射性物質があり、それらから放射線が放出されている。自然放射線には、宇宙、大地等の外部から受ける放射線と植物摂取や空気中のラドンの吸入などによって内部から受ける放射線がある。世界平均では1年間に一人当たり、その合計は2.4 mSvとなる(図2)が、その地域差(1~10 mSvの範囲)は大きい。一方、日本人は、宇宙線、大地、食物、大気中ラドンから、それぞれ0.29, 0.38, 0.40, 0.41

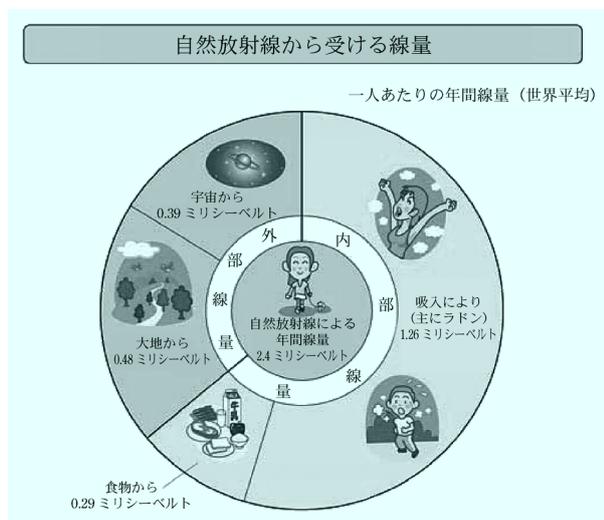


図2 自然放射線から受ける線量 (原子力・エネルギー図面集 2011より)。

mSvの放射線を受け、その合計は1.48 mSvである。日本国内においても年間で0.4 mSv程度の地域差がある。たとえば東京の銀座通りは、他の東京の地域に比べて約3倍強い放射線を出している。その原因は、歩道に敷き詰められた花崗岩による。また、花崗岩を使った立派なビルも建ち並んでいる。花崗岩には、⁴⁰Kや²²⁶Raなどの天然に存在する放射性同位体が含まれ、その量が他の岩石よりも多いからである。自然放射線に医療被ばく等の人工放射線による被ばくを加えた年間の実効線量は、日本人一人当たり1年間に平均3.75 mSvである。また、2007年ICRP (International Commission on Radiological Protection: 国際放射線防護委員会) 勧告によると、医師、診療放射線技師、看護師などが職務の遂行により受ける被ばく量(職業被ばく)は、5年間の平均値として20 mSv(1年当たりの上限値を50 mSv)と定められている。

放射線の体に及ぼす影響には、低線量では影響が出ないが、ある一定の値(しきい値)以上になると線量に応じて重篤度が増加する確定的影響と、受ける線量が多くなるほど影響の出る確率が高まる確率的影響に区別して評価される。前者には白内障や脱毛が、後者には発がんや遺伝的影響が考えられている。後者によるがんの発生率と遺伝的影響に対する損害リスク係数は、ICRP2007勧告では、それぞれ0.055/Sv, 0.002/Svと見積もられている。これは、がんや遺伝的影響の出るリスクが1 Sv当たり5.5%, 0.2%増加することを示す。これを先ほど例示した2000 Bq/kgのほうれん草50gを1年間摂取した場合に当てはめると、がんになる確率は、(5.5×10⁻³×0.803より)0.004%増加することになる。現在の日本でがんになる確率は、男性で53.6%, 女性で40.5%であるから、男性では、その確率が(53.6+0.004=)53.604%に増加することを示す。なお、ここで注意を要するのは、これらは、原爆やチェルノブイリの事故等により高線量の放射線を一度に浴びた人の調査に基づく結果であることである。実際、100 mSv以下の線量では、がんによる死亡者が増加する明確な結果は得られていない。低線量の放射線を長期間受けたときには、高線量の放射線を一度に受けたときとは異なる生体反応が進行することを示す実験結果も多く、高線量の放射線の被ばくから得られた数値を低線量の放射線に対する影響の評価に用いるのは適切ではない。低線量の放射線により生体免疫系が活性化され、がんの抑制効果を示す「放射線ホルミシス」を支持する研究成果も多く報告されている。伝承的に健康に良いとされているラジウム温泉やラドン温泉などの放射能泉の効能と低線量放射線による影響との関係に関する研究も進められ、温熱効果(温泉で体が温められる効果)、化学効果(皮膚や呼吸を通して吸収する化学物質による効果)、そして放射線効果が効能に関与すると考えられている。

4 おわりに

放射線には様々な種類があり、その性質も異なる。「放射性物質が検出された」ことが直ちに「危険」と考える前に、それによる被ばく線量が自然放射線や人工放射線により受ける被ばく線量に比べてどの程度なのかを考える必要がある。一般公衆の年間被ばく線量である1 mSv (1.48 mSv) を越えることが、直ちに危険な状態につながるわけでは決してない。そして、検出された放射性物質がどのような放射線を、どの程度の半減期で放出し、体内でどのような体内動態を示すのか、を考えた上で冷静に対応することが必要である。また報道されている測定値も様々な単位で表記されており、何を表す単位であるのかを正しく把握することも重要である。本稿が放射能・放射線に対する理解を深め、今回の事故に対する対応の一助となれば幸いである。

5 参考文献

本稿を作成する上で、以下の書籍等を参考にした。
新放射化学・放射性医薬品学 (改定第2版), 佐治英郎, 前田 稔, 小島周二編, 南江堂
放射化学と放射線化学, 河村正一, 井上 修, 荒野泰, 川井恵一著, 通商産業研究社
放射線安全管理学, 飯田博美, 安東 醸, 川井恵一著, 通商産業研究社
元素 111 の新知識 (Blue Backs) 第2版, 桜井 弘編, 講談社
人は放射線になぜ弱いのか (Blue Backs) 第3版, 近藤宗平
本当は怖いだけじゃない放射線の話, 大脇博善, ワック株式会社
日本放射線影響学会ホームページ: <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jrr/index-j.html>
日本核医学会ホームページ: <http://www.jsnm.org/>
原子力・エネルギー図面集 2011: <http://www.fepc.or.jp/library/publication/pamphlet/nuclear/zumenshu/digital/index.html>
財団法人癌研究振興財団 がんの統計 (2010年版):

<http://www.fpcr.or.jp/pdf/statistics/fig09.pdf>

日本放射線技術学会雑誌 (学術交流委員会報告): http://www.jstage.jst.go.jp/article/jjrt/63/11/1320/_pdf/-char/ja/

放射線医学総合研究所ホームページ内放射線被ばくに関する基礎知識 第6報: http://www.nirs.go.jp/data/pdf/i14_j1.pdf

文部科学省人体と放射線の関係: http://294bros.heteml.jp/jishin/hibaku_list.html (財)日本原子力文化振興財団が開設している原子力・エネルギー教育支援情報提供サイト (http://www.atomin.go.jp/data/pdf/reference/radiation/jintai_05.pdf) から転記。



花岡宏史 (Hirofumi HANAOKA)

千葉大学大学院薬学研究院 (〒260-8675 千葉市中央区亥鼻 1-8-1)。京都大学大学院薬学研究科修了。博士 (医学)。《現在の研究テーマ》がんの診断・治療用の放射性薬剤の開発。《主な著書》“がんの分子標的治療” (分担執筆) (南山堂)。《趣味》ゴルフ

E-mail: hhanaoka@chiba-u.jp



上原知也 (Tomoya UEHARA)

千葉大学大学院薬学研究院 (〒260-8675 千葉市中央区亥鼻 1-8-1)。京都大学大学院薬学研究科修了。博士 (薬学)。《現在の研究テーマ》放射性薬剤の設計。《主な著書》“Technetium - 99m Radiopharmaceutical: Status and Trends” (分担執筆) (IAEA)。《趣味》ボウリング, ツーリング。

E-mail: tuehara@p.chiba-u.ac.jp



荒野 泰 (Yasushi ARANO)

千葉大学大学院薬学研究院 (〒260-8675 千葉市中央区亥鼻 1-8-1)。京都大学大学院薬学研究科修了。薬学博士。《現在の研究テーマ》SPECT 薬剤やアイソトープ治療薬剤の開発研究。《主な著書》“IAEA Human Health Series (No. 8) Clinical Translation of Radiolabelled Monoclonal Antibodies and Peptides”. (分担執筆) (IAEA)。《趣味》読書, 食べ呑み歩き, 野球 (今はもっぱら観戦)。

E-mail: arano@p.chiba-u.ac.jp