
臨床指導講演

福島原子力発電所の事故からみた放射性同位元素と放射線

誉田 栄一

キーワード：ベクレル (Bq), グレイ (Gy), シーベルト (Sv)

Radioisotope and Radiation through the Fukushima Daiichi Nuclear Disaster

Eiichi HONDA

Abstract : The words “radiation and radioactivity” have been become famous after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. Alfa, beta, gamma and neutron rays irradiated from radioisotopes are well known to the world. Alfa and beta rays have weak penetration. Alfa and beta rays are stopped by a sheet of paper and a thin aluminum plate, respectively. And those are taken into account at internal exposure because all energy from those rays is absorbed in the surrounding tissues. If DNA strand in the cell is broken by the energy absorbed, some radiation hazard may occur. The units of radiation became also famous. Becquerel (Bq), Sievert (Sv) and Sv/h are addressed under a leaflet for the public by public office and citizen has been to monitor the radiation dose contained in food and water. In the early stage ¹³¹I (iodine) having about 8 days half-life period was emitted into the air and many people were exposed. Recently the ¹³¹I at that time was decayed but two types of radioactive cesium ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs remained. Because ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs have about 2 years and 30 years half-life period respectively and emit beta and gamma ray, no radiation effect will require hundred years. Therefore I hope that many people will acquire the greater knowledge of radiation.

はじめに

放射線や放射性という言葉は、平成23年3月11日に起きた東日本大震災に起因する福島県第1原子力発電所の事故以降、マスコミを中心に話題になってきている。この時に大きな問題となり、現在も解決されていないことのひとつが、放射性同位元素による放射線被曝である。放射性同位元素（または放射性同位体）とは、通常の状態（圧力を加えるとか、温度を上げるとか、光を当てるとかのような外部からのエネルギーを何も与えない）で、絶えず放射線を出している原子のことである。同位元素は、原子番号が同じ（陽子の数が等しい）であるが、中性子の数が異なるために、質量数が異なる原子同士を表している。たとえば炭素原子では、通常のもは¹²C（陽子が6個と中性子が6個）であるが、放射線を出す同位

元素として¹⁴C（陽子が6個と中性子が8個）がよく実験で用いられている。これが放射性同位元素と呼ばれている。放射性同位元素として問題となっているのが放射性セシウムである。現在も福島県を中心としていまだに進行中であることから、放射線についてよりよく正確に知ってもらいたいと考えている。

放射線の種類と被曝との関係

放射性同位元素から出される放射線の種類としては、アルファ（ α ）線、ベータ（ β ）線、ガンマ（ γ ）線、中性子線の4種類が広く知られている。これらは性質が異なり、とくに物質の透過性に差がある。 α 線の実体はヘリウムの原子核で、 α 崩壊により原子核から陽子2個と中性子2個が放出される（表1）。透過性は非常に小さく、

紙一枚または空気中でも3 cm程度で止まってしまう。β線は電子線で原子核内の中性子が陽子、電子、ニュートリノに変化することで放出される。透過性に関しては、厚いプラスチック板や薄いアルミ板で止まる。しかし、γ線や中性子線の透過性は非常に高い。γ線は原子核のエネルギー準位の遷移（励起状態から基底状態になる）によって放出され、厚いコンクリートや鉛などにより、ようやく止めることができる。中性子線は原子核から発生し、鉛などではまったく遮蔽効果がなく、素通り状態となる。遮蔽には水、パラフィンやホウ素などが用いられる。このように、放射線の種類によって大きく透過性が異なるため、被曝に対する防御方法も考慮が必要である。

放射線が人体に対して損傷をあたえる原因は電離にある。上記で説明した放射線の物理学的分類は、電離放射線である。放射線が体内に入ると、細胞内の分子にエネルギーを与え電離が起きる。電離した電子はまた、さらにその電離電子のエネルギーを周囲の水分子に与え、ラジカルを形成させることがある。放射線障害は、この電離電子やラジカルが細胞核内のDNAの2重らせん構造を切断することが原因であるとされている。

被曝を考える上で重要なことは、放射線を発生する線源が体の外にあるものによるか（体外被曝）、体内にあるものによるか（体内被曝）ということである。α線、β線は透過性が低いため、体外からの放射によっては、体の深部への影響は皆無である。ウラン238の崩壊により放出されるα線では軟組織は約40ミクロン、ベータ線では数mmしか透過できない。そこで問題となるのは、体内被曝である。体内被曝の原因は、呼吸、飲食、傷口からの経路による体内侵入である。放射性物質が空气中にただよっていたり、飲食物に含まれたりしていると、知らないうちに体内に取り込まれ放射性物質が停滞し、放射線被曝を周囲の組織に与える。一方、γ線は透過力が高いため、体外被曝も体内被曝も同等であると考えられる。

放射線の単位

放射線を表現するには、放射能や放射線のエネルギーが使われている。放射性同位元素が壊変するときに放射線が放出されるが、どのくらいの頻度でこの現象が起きるかという単位としてBq（ベクレル）が用いられている。1秒間で1回壊変が起きるのが1Bqである。物質の壊変能力を放射能と定義している。しかし放出される放射線は核種ごとにエネルギーが異なる。放射線のエネルギーは通常eV（電子ボルト）として表される。放射線の測定では、この壊変頻度とエネルギーの両方の値が重要である。Bqを測定するには単位時間あたりの壊変数を知る必要があるが、測定機器による値はcpm（count per minute）であることから、Bqにするには換算係数による補正が必要となる。またエネルギーは物質が受け取

るエネルギー量（J、ジュール）である吸収線量（J/kg、補助単位としてGy、）として表現している。線量計での測定は、その場所にいると仮定した場合に吸収されると考えられるエネルギー量を線量としているが、一般的な測定器ではSv（シーベルト）表示となっている（GyとSvとの関連は後述する）。また、単位時間あたりに受け取るエネルギー量として、Sv/hの線量率などが用いられている。

放射線被曝の単位と放射線影響

放射線に被曝した場合、どのように客観的に表現するかというと、特別な単位をもって表現している。放射線被曝量を単位質量あたりに受け取ったエネルギー量（J、ジュール）として換算し、J/kgという単位の吸収線量として定義している。放射線のエネルギーは物理学的には熱エネルギーと同等であるが、量を考慮すると生物にとってはまったく異なる。お茶を飲むためにコップ1パイの水（200ccで温度が20℃を沸騰させるのに必要な熱量は $200 \times (100 - 20)$ から16,000 cal（約67,200 J）と計算されるが、このエネルギーがすべて放射線のエネルギーになるとすると、人にとっては非常に大問題となる。4 Gyを全身に受けると50%の人が2ヶ月以内に死亡するといわれている。体重60 kgの人で換算するとその総エネルギー量は240 J（4 Gy \times 60 kg）となり、先ほどのコップ1杯の水を沸騰させる熱量換算では、280人（67200 / 240）の半分の140人の致死エネルギー量となる。この原因は、放射線のエネルギーは直接人体構成の基本構造のDNAをこわすことにあり、外部からの熱エネルギーではこのようなことは生じないためである。さらに放射線のエネルギーは、同じ吸収線量であっても、受ける放射線の種類により生物での反応は異なることが知られている。そこで生物学的反応を考慮した単位が考えられている。1977年の国際放射線防護委員会（ICRP）勧告（publication 23）では、放射線の種類として、x線とγ線を基準値1として、α線を20、中性子線はエネルギーによって5から20とし、これらを線質係数として定めた。この数値の意味は、同じ生物学的効果が現れる吸収線量の、基準放射線に対する逆数の比（生物学的効果比、RBE：relative biological effect）を意味している。すなわちα線ではx線の1 / 20の吸収線量で、同じ生物学的効果が現れるということである。そして吸収線量に線質係数を乗じたものが、線量当量（J/kg、補助単位としてSv（シーベルト））として定義された。

後に1990年のICRP勧告（publication 60）により、放射線影響を組織・臓器にわたる吸収線量を考慮した線量単位として、今までの等価線量（Sv）を、（等価線量）＝（吸収線量） \times （放射線荷重係数）（2007年勧告で放射線加重係数に変更される）と定義した。放射線影響は、ある線量（しきい値）を超えるまでは障害が発生しない確定的影響と、線量が増加すればするほど発生率が増え

表1 放射線の崩壊形式と代表的核種

崩壊の種類	質量数(A)と原子番号(Z)の変化	代表的核種の変化
α崩壊	${}^A_ZX_1 \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X_2 + {}^4_2\text{He}$	${}^{226}_{88}\text{Ra} \Rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn}$ ラジウムからラドンに変化
β崩壊	${}^A_ZX_1 \longrightarrow {}^A_{Z+1}X_2 + e^-$	${}^{14}_6\text{C} \Rightarrow {}^{14}_7\text{N}$ 炭素から窒素に変化
γ線放射	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_ZX + \gamma$	${}^{60}_{27}\text{Co} \Rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co}$ コバルトのまま

表2 ICRPによる放射線加重係数（1990年勧告は放射線荷重係数）

放射線の種類	2007年勧告	1990年勧告
光子（X線、γ線）、電子線	1	1
陽子線	2	5
α線	20	20
中性子線（エネルギーによる）	約2.5～21	5, 10, 20

表3 ICRPによる組織加重係数（1990年勧告は組織荷重係数）

	2007年勧告	1990年勧告
生殖腺	0.08	0.20
赤色骨髄、結腸、肺、胃	0.12	0.12
乳房	0.12	0.05
膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04	0.05
骨表面、皮膚	0.01	0.01
脳、唾液腺	0.01	なし
残りの臓器	0.12	0.05
合計	1.00	1.00

る確率的影響の2つに分類される。確定的影響を考慮するときに、この等価線量（Sv）で考えることとした。放射線荷重係数は線質係数と基本的に同等である（2007年勧告で陽子線、中性子線の値に変更があった）（表1）。確率的影響の具体的な障害は、がん発生と遺伝的影響の2種類であるが、発生部位や治癒成績の特異性があることから、その影響を組織荷重係数（2007年勧告で組織加重係数に変更）として補正した線量を用い、実効線量（Sv）として定義した。そこでは人体組織をいくつかの部位にわけ（表3）、実効線量 = Σ（等価線量

×（組織加重係数）として算出している。

福島原子力発電所事故による放射性物質

福島第1原子力発電所の事故により、多くの放射性物質が環境中に放出された。初期に問題となったものは、主にヨウ素131である。ヨウ素は甲状腺に特異的に蓄積することが知られていて、とくに幼児や小児では非常に問題となる。しかし半減期が8日間と短いので初期のものは無視できる量となっている。現在では、2種類の放射性セシウム（セシウム134とセシウム137）が多量に環境中に残存している。半減期はセシウム134が2年、セシウム137が30年と長く、無視できるレベルにまで減少するには100年単位の時間が必要となる。セシウムはアルカリ金属類で、その性質がカリウムと類似し、非常に反応性が高く、水に溶けやすい元素であるため、水や植物中などにも簡単に取り込まれる。体内に取り込まれると主に筋肉に蓄積するので、子供よりも大人のほうが蓄積量は多くなる。体内のセシウムは70～90日で約50%が排出される。福島県ではこの放射性セシウムが多量に水、土中に蓄積され、それが一部の農産物、海産物などに溶け込んでいる。政府は2012年4月から食品の安全基準として新基準値を導入し、国民の食の安全性を保障している。また線量が高い地域、具体的には0.23 μSv/h（追加被ばく線量が年間1 mSv相当）以上は、除染対象として各地域で除染活動が行われている。除染方法は、高線量の表土の土の剥ぎ取り、土の入れ替えを行ったり、また高圧洗浄によって壁などの高線量部分を洗い流したりしているが、放射性同位元素は人為的に放射能をなくすることができないために、その場所が減ったとしても、どこかの場所が増えることになる。最終的には、どこかに保管し、半減期による自然の減衰を待つしか方法がないが、これらの高線量の瓦礫、土、汚泥や汚染水などの保管場所をどうするかがいまだに解決されていない。

最後に

放射線は目にみえず、よくわからないことが多いが、今回の福島原子力発電所の事故により、誰もが知らなければならぬものになってきた。たとえば厚生労働省から一般消費者向けに出されている食品中の放射性物質の新たな基準値（厚生労働省ホームページ参照、http://www.mhlw.go.jp/shinsai_jouhou/dl/leaflet_120329.pdf）のなかでは、ミリシーベルト、放射性セシウム、ベクレル/kgなどの専門用語がたくさん記載されている。今回は線量の違いによりどのような障害が起きるのか、またどのくらいの線量ならば安全なのかということに対する議論は時間の関係上することができなかつたが、皆様方には、是非、放射線について深く知ってもらいたいと考えている。