

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ①

どこまでの被曝をガマンするか の考え方

今中 哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

「福島原発事故により関東以北の本州太平洋側には無視できない放射能汚染が生じ、汚染の主役が半減期三〇年のセシウム137であることを考えると、日本に住んでいる私たちは、これから五〇年、一〇〇年にわたって放射能汚染と向き合わざるをえなくなった」と私はいつも講演会で言っている。そして、専門家の一人として、「放射能、放射線とはなにか、被曝とはどういうことか、被曝の結果どんな影響が考えられるかは説明できません。しかし、どの程度の汚染なら住んでもいいとか、避難した方がいいとかを私が決めることはできません。それぞれの方が自分で考えて判断して下さい。私の役割は、みなさんが判断するためのお手伝いをする事です」と付け加えている。

原子力を専門として四〇年以上メシを食ってきた知識と経験に基づいて、被曝というのは微量であつてもそれなりの害(リスク)を我々の身体にもたらすと私は考えている。つまり、放射能汚染の中で暮らすとは、それなりの被曝リスクを受けながら生きることであり、問題は結局、それぞれの人が「どこまでの被曝をガマンするか、受け入れるのかに帰着する」というの

が放射能汚染に向き合うときの基本である。

「東京はどこへいっても放射性セシウムまみれです」と聞かされて、東京で子どもを育てていいのかと若いお母さんが考えるのは当然だし、余計な被曝を避けるために実際に居を移された方々の気持ちは理解できる。福島原発事故は国や東電に責任のある不始末であり、一般の私たちが被曝をガマンさせられる謂われはなく、「福島原発からの放射能は1ベクレルたりとも被曝は1マイクログラムたりともいやだ」という権利は私たちにはある。しかしながら、私たちはもともと自然放射線被曝を受けながら生活していること、また一九六〇年代の大気内核実験の放射能汚染が北半球のどこにも残っていることなどを考えると、「被曝ゼロで放射能汚染ゼロ」という生活は福島事故以前よりそもそも存在しなかった。医療用の被曝も無視できない。福島原発事故の放射能汚染は、従来の日常的な被曝の上に余計な被曝を加えていることになる。

住む場所を選ぶのに自然放射線が強いか弱いかにこだわる方がいないことを考えるなら、自然放射線による被曝量を尺度にして、「汚染はしゃくだけどしゃくない」と言える汚染レベルや被曝量レベルがあるだろうと私自身は思っている。今回の連載では、「しゃくない」と言えるかどうかみなさん自身で判断して頂くため、ベクレルとは、シーベルトとは、被曝リスクとはといった、放射能と放射線についての基礎知識をまとめておく。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ②

放射能と放射線

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

ベクレルとシーベルトという言葉になじんでもらう最初のステップとして、「放射能」と「放射線」について説明しておこう。「放射能」を広辞苑で引くと「放射性物質が放射線を出す現象または性質」となっている。広辞苑にケチをつけるのは恐れおおいが、この説明は不十分である。放射能という言葉には二つの使い方があって、①放射性物質自体をさす場合と、広辞苑の言うように②放射線を出す性質・能力をさす場合がある。「放射能汚染」とか「放射能もれ」といった場合は①で、「コバルト60は放射能をもっている」といった時は②の意味である。放射能・放射線に慣れている人は使い分けに不自由を感じていないが、一般の方は混乱するかも知れない。

放射線の方は、細かいことにこだわるともつとややこしい。広辞苑によると「①放射性元素の崩壊に伴って放出される粒子線または電磁波。アルファ線・ベータ線・ガンマ線の三種類をいうが、それらと同じ程度のエネルギーをもつ粒子線・宇宙線も含める。(中略)一八九六年ベクレルにより最初ウラン化合物から発見された。②広義には種々の粒子線および電磁波の総

称」である。②の説明は、問題はないが具体性に欠ける。①の方は、具体的ではあるが不正確で間違っている。

①に従うと、病院で受けるX線は、装置で発生するものなので放射線に入らないことになる。またベクレルの業績は、ウランにX線のようなものを発生する能力、つまり放射能を見つけたことであって放射線の発見ではない。放射線の発見は一八九五年のレントゲンによるX線の発見に帰するのが普通である。

②の広義の意味に従うと、光や電波も電磁波の一種なので放射線である。しかし、私たちの日常感覚では、光や電波は放射線に含まれない。本稿で問題とする放射線は、広義の放射線のうち、「物質と相互作用を起こしたときに、その物質に含まれる原子・分子から電子をはぎ取ることのできるエネルギーをもった放射線」である。正確には「電離放射線」と呼ばれ、定義①の放射線にX線を加えたものになる。放射線の発生源は、放射性物質(放射能)、放射線発生装置、宇宙から地球に飛び込んでくる宇宙線の三つである。

ベクレルとは、放射性物質がもっている放射能の強さを表す単位である。放射性物質の中では、放射性元素の原子核が「崩壊」しながら、アルファ線、ベータ線、ガンマ線といった放射線を放出している。一ベクレルの放射能とは、その放射性物質の中で「毎秒一回の原子核崩壊」が起きていることを示す。一方、シーベルトとは、人間の身体がどれだけ放射線を浴びたか、つまり放射線被曝を表す単位である。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ③

なぜ放射性物質から放射線が出るのか ①

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

放射性物質からは、その原子核が壊変する際に、アルファ線、ベータ線、ガンマ線といった放射線が放出される。この現象を説明するにあたっては、まず、原子というものが、中心にある原子核とその周りを回っている電子とで出来ていること、そして原子核は陽子と中性子が集まって出来ていることを理解してほしい。次に、元素の周期律表を思い浮かべてほしい。「スイヘーリーベボクノフネ」というやつである。世の万物、我々の身体から宇宙の星々まで、元素の組み合わせで出来ている。その元素を、一番小さくて軽い水素から順番に並べたものが周期律表で、自然界に存在する元素で最も重たいのが九二番目に来るウランである。この順番のことを原子番号という。原子番号を決めているのは、原子核の中に含まれている陽子の数である。水素の原子核には陽子が一個、ウランの原子核には九二個含まれている。陽子はプラス一の電荷をもっている、原子核は、その原子番号に相当するだけのプラスの電荷をもっている。中世のヨーロッパでは「錬金術」というのが盛んであった。鉄や銅を、煮たり焼いたり酸に溶かしたりして金や銀に変えて

やろうという試みである。ことごとく失敗したものの、錬金術を通じて得られた知識が後の化学の基礎になったそうだ。今流に言えば、「錬金術」とは、原子核中の陽子の数を人工的に変えてやろうという試みである。

前回、一八九六年にベクレルがウランに放射能があることを発見したと述べた。これは、ウランの原子核が自然に「壊変」、つまり別の原子核に変わる現象である。原子核には、陽子と同時に中性子が含まれている。陽子にはプラスの電荷があるので陽子どしは反発するはずであるが、その陽子が原子核という狭い空間に収まっているのは、そこに中性子があつて「強い力」で陽子をつなぎ止めているからである。原子番号が大きくなると、中性子が頑張つて陽子を引き留めようとしても、陽子が自然に原子核から飛び出てゆく。自然界にはウラン235とウラン238という二種類のウランが存在している。235や238とは、原子核の陽子と中性子を合わせた数で、質量数と呼ばれる。陽子の数は九二個なので、ウラン235の原子核に含まれている中性子は一四三個で、ウラン238では一四六個である。ウラン235やウラン238の原子核では、原子核に閉じ込めきれない陽子が時々外に飛びだしている。ただ、陽子一個ではなく、「陽子二個と中性子二個の塊」となつて飛び出している。この現象がアルファ壊変で、飛び出ているのがアルファ線である。ウラン238の原子核は、アルファ線が飛び出すと、陽子九〇個と中性子一四四個のトリウム234に変身する。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ④

なぜ放射性物質から放射線が出るのか②

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

今回は、ウランを例にとつて「アルファ壊変」の説明をした。アルファ線(粒子)とは、アルファ壊変の際に、原子核の中に閉じ込められていたはずの陽子と中性子が「陽子二個と中性子二個からなる塊」となつて原子核から飛び出す現象であつた。

原子核がアルファ壊変(崩壊ともいう)を起こすと、その原子核は、原子番号が二つ減り、質量数は四つ減つた原子核に変身する。自然界に存在するウランには、ウラン二三五とウラン二三八の二種類があつてどちらもアルファ壊変する。

いまウランの原子核が一万個あつたとしよう。そのうちどれか一個がアルファ壊変すると残りは九九九九個である。またどれかがアルファ壊変すると、残りは九九九八個。そして、九九九七、九九九六……と数が減つて行き、「半減期」に相当する時間が経つと残りは五〇〇〇個になる。原子核の数が半分になるといふことは、アルファ線を出す強さ、つまり毎秒当りのアルファ線放出数も半分になる。そして、次の半減期が過ぎると、五〇〇〇個の原子核は二五〇〇個になる。さらに半減期毎に残つている原子核の数は一二五〇個、六二五個……というように

減つて行く。ウラン二三五の半減期は七億年で、ウラン二三八は四五億年である。地球が誕生したのは四六億年前とされているが、二種類のウランはその時から地球上に存在していた。いま二つのウランの自然界での比率はウラン二三八が九九・三%でウラン二三五が〇・七%である。地球が生まれたときには、ウランの量はいまよりずっと多かつた。簡単な数学で計算できるが、地球誕生のときのウランの量はいまの二・七倍で、比率は二三八が七五・二%、二三五が二四・八%であつた。

二〇世紀の初頭、原子・原子核についての物理学の知識はめざましい進歩をとげ、X線、アルファ線、ベータ線、ガンマ線といった放射線の正体が解明された。一九三二年には英国のチャドウィックによつて中性子が発見され、人工的に中性子を発生させることもできるようになつた。一九三八年、ドイツの研究所でウランの原子核に中性子をあてる実験が行われていた。実験を行つていたのは化学者のハーンで、目的はウランの原子核を人工的に変化させて原子番号がウランより大きな新元素を作り出すことだつた。ウランの原子核に中性子をあてて出来た物質を化学的な方法で分離してみると、ウランよりずっと軽い、原子番号五六のバリウムが出来ているようだつた。ハーンは、研究所の元同僚で、当時ナチスから逃れてスウェーデンに亡命していた物理学者マイトナーに実験結果の解釈を相談した。そして、マイトナーと甥の物理学者フリッシュの出した結論が「ウランの原子核分裂が起きている」ということだつた。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑤

なぜ放射性物質から放射能が出るのか③

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

たいていの方は、「コバルト60」というコトバを耳にされたことがある。ガンの放射線治療などに使われている放射線源である。コバルト60は半減期五年でベータ線とガンマ線を放出するが、天然に存在するコバルトはその一〇〇%がコバルト59で非放射性(安定同位体)である。コバルトの原子番号(周期表での順番)は27なので、コバルト59には二七個の陽子と三二個の中性子が含まれている。コバルト60を作るためには、天然のコバルトを原子炉の中に置いておけばよい。原子炉では、核燃料(普通はウラン)の核分裂連鎖反応を維持するため大量の中性子が飛び交っている。中性子がコバルト59の原子核に衝突して吸収されると、中性子がひとつ増えて、コバルト59がコバルト60になる。コバルト60の原子核は、「中性子の数が多めでちよつと不安定」な状態にある。そこで起きるのがベータ崩壊である。中性子のどれかひとつが、ベータ線(電子)を放出して、陽子に「変身」する。すると、陽子がひとつ増えて原子番号は28、中性子はひとつ減って32になる。原子番号28はニッケルで、ニッケル60となり、放射

線を出さない安定同位体となる。ただ、コバルト60が安定なニッケル60へ「変身」するプロセスで、原子核の余分なエネルギーが電磁波の形で放出される。これがガンマ線である。

前回、ウランに中性子を当てて核分裂が起きる現象が一九三八年に発見されたと述べた。核分裂の際には、原子核が二つに割れて、中性子が二個か三個放出される。この中性子を使ってうまく隣のウランも核分裂を起こすように工夫できれば「核分裂連鎖反応」が成立する。ここでは、核分裂して出来る二つの破片、いわゆる核分裂生成物について考えて見よう。ウラン235には、陽子九二個と中性子一四三個が含まれている。ウラン235の核分裂によって原子番号56のバリウムができて、新たに三つの中性子が放出されたでしょう。このときの核分裂生成物の片割れは、原子番号(92-56=36)のクリプトンとなる。このバリウムとクリプトンに配分される中性子の数は、 $(143 + 1 - 3) = 141$ 個となる。ここでは、バリウムに八四個、クリプトンに五七個の中性子が配分されたでしょう。そうすると、この核分裂によってできる核分裂生成物は、バリウム140とクリプトン89で、それぞれ半減期一三日と三分でベータ崩壊する。バリウム140のベータ崩壊によって出来るランタン140も半減期二日でベータ崩壊し、58番のセリウム140になって安定同位体となる。クリプトン89も次々とベータ崩壊を繰り返して、原子番号44のルテニウム99に至って安定同位体となる。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑥

原子炉の中でできる放射能（放射性物質） ①

今中哲二（京都大学原子炉実験所助教）

原子炉の中では、中性子を媒介役としてウランの核分裂連鎖反応が続いていて、核分裂した核燃料の分だけ核分裂生成物が溜まって行く。では、原発の原子炉（炉心）にはどれくらいの量の放射能（放射性物質）が溜まっているだろうか。

まずは、重さ（質量）で考えてみよう。原発の型や出力によって違うが、日本で使われているタイプの原発では、濃縮度三〇～五〇％の濃縮ウランが約一〇〇トン入っている。（濃縮ウランとは、天然ウランに含まれているウラン235とウラン238という二種類のウランのうち、核分裂しやすいウラン235の割合を、もともとの割合である〇・七％から増やしたウランのことである。）電気出力一〇〇万kwの原発が一日運転されると、約三kgのウラン235が核分裂を起こす。一年間では、その三六五倍で約一〇〇〇kgということになる。原発の燃料は年一回の定期検査のときに全体の約四分の一を取り替えている。ということは、何年も運転を続けている一〇〇万kwの原発の核燃料は、平均して約二年原子炉の中にあり、溜まっている核分裂生成物の質量は約二トンということになる。

核分裂によってどんな放射能ができるかは、ウラン235に中性子がぶつかって、『九二個の陽子と一四四個の中性子』がどのように二つの核分裂生成物に配分されるかで決まってくる。福島原発事故による放射能汚染で最も問題となる核分裂生成物は、半減期三〇年のセシウム137（陽子五五個、中性子八二個）であるが、核分裂の際にセシウム137が出来る確率は約六％である（これには、半減期三・八分のキセノン137が最初に出来て、ベータ崩壊してセシウム137に変身するように、質量数が同じで半減期の短い核分裂生成物が順にベータ崩壊してからセシウム137になったものも含む）。

二トンのウラン235に含まれる原子の数は何個だろうか。（化学の授業で習ったように！）二トンのウラン235のモル数は、 $2000000 \text{ g} \div 235 \text{ g} \parallel 850000 \text{ mol}$ である。どんな元素についても、一モルに含まれる原子の数は $6 \cdot 0 \times 10^{23}$ の二乗と決まっているので、二トンのウラン235が起こした核分裂の数は、 $5 \cdot 1 \times 10^{27}$ で、できたセシウム137の原子核数は、その六％の $3 \cdot 1 \times 10^{26}$ となる。セシウム137の原子核は毎秒一定の確率でベータ崩壊を起こす。その確率は、半減期から計算でき（プロセス省略） $7 \cdot 2 \times 10^{-10}$ のマイナス一〇乗である。従って、原発に溜まっているセシウム137の放射線エネルギー（ベクレル）は、 $(3 \cdot 1 \times 10^{26}) \times (7 \cdot 2 \times 10^{-10})$ のマイナス一〇乗  $\parallel 2 \cdot 2 \times 10^{17}$ の二六乗  $\times (7 \cdot 2 \times 10^{-10})$ のマイナス一〇乗  $\parallel 2 \cdot 2 \times 10^{17}$ の二七乗（二二二京）ベクレルと見積もることができる。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑦

原子炉の中でできる放射能（放射性物質） ②

今中 哲二（京都大学原子炉実験所助教）

これまでに、原子炉の中ではウランの核分裂にともなって様々な放射性物質（核分裂生成物）ができることを説明した。原子番号九二番のウランの核分裂によってできる放射性物質は、原子番号（原子核の中の陽子の数）で言えば、周期表三五番の臭素から六二番のサマリウムの範囲に広く分布する。それぞれの原子番号（元素）には、中性子の数が異なる同位体が複数あるので、運転中の原子炉の中には数百種類の核分裂生成物が蓄積されている（半減期が一ミリ秒といった短いものも含めると千種類を越える）。ウランが核分裂を起こした際に、新しくどのような原子核ができるかの確率（核分裂収率と呼ばれる）は分かっている。たとえば、セシウム137の収率は六%で、ヨウ素131の収率は三%である。

原子炉の運転にともなって、炉心の燃料棒の中には核分裂生成物がどんどん蓄積される。蓄積放射エネルギーを考えると、半減期三〇年のセシウム137の場合は、核分裂量（出力×運転時間）に比例して溜まって行くと考えてよい。一方、ヨウ素131の場合には半減期が八日と短いので、ある程度溜まった段

階で、核分裂によって生成する量とベータ崩壊して減る量とが釣り合って蓄積量は一定（平衡状態）になる。メルトダウンを起こした福島第一原発1〜3号機の電気出力を合計すると約二〇〇kwで、原子力保安院のデータによると、二〇一一年三月十一日時点で三つの原子炉に溜まっていた放射エネルギーの合計は、セシウム137で七・一×一〇の一七乗ベクレル、ヨウ素131で七・四×一〇の一八乗ベクレル、などなどである。（一×一〇の一五乗を「ペタ」で表すと、七一〇ペタベクレルと、七四〇〇ペタベクレル。）保安院のデータにでている五〇種類の核分裂生成物の蓄積量を合計すると三八万ペタベクレルになる。

核燃料であるウランも自然の放射性物質であるが、半減期が長い分（ウラン238は四五億年で、ウラン235は七億年）重さ当りの放射能は弱い。1〜3号機合わせて約三〇〇トンのウランが装荷されていたが、もともとの放射エネルギーは全部で〇・〇〇四ペタベクレルにしかない。原子炉の運転にともなって蓄積される核分裂生成物の放射エネルギーはその約一億倍となる。

わたしは、原発用核燃料の成形加工工場を見学したことがあるが、新しくできた燃料集合体ひとつからの放射線量は、表面近くで毎時二マイクロシーベルト程度だったと記憶している。その一億倍とは毎時二〇〇シーベルトであり、人間の致死線量を四シーベルトとすると一分余りで死に至る被ばくを受けることになる。原子力をエネルギー源として利用するとは、新たな放射性物質を莫大に作り出すことである。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑧

原子炉の中でできる放射能（放射性物質） ③

今中哲二（京都大学原子炉実験所助教）

原子炉の中で生まれる放射性物質は、核分裂生成物だけではない。連載の第五回でコバルト60について説明したことを思い出して欲しい。自然界にあるコバルトの一〇〇％は安定同位体のコバルト59（陽子二七個と中性子三二個）だが、コバルトを原子炉の中に入れておくと、原子核が中性子を吸収して放射性同位体のコバルト60（陽子二七個、中性子三三個、半減期五年）に変身する。原発のお釜、いわゆる原子炉圧力容器の材料には大量の鉄やステンレスが用いられているので、運転にもなつて鉄55（半減期二・七年）、コバルト60、ニッケル63（同一〇〇年）といった放射化生成物が蓄積される。一〇〇万kwの原発が四〇年間運転されて蓄積される放射化生成物の量は一〇〇ペタベクレル程度と言われている。福島1〜3号機に蓄積されていた核分裂生成物の量三八万ペタベクレルに比べると、放射化生成物の放射エネルギーは多くはない。放射化生成物の問題のひとつは、通常運転時に原子炉材料の腐食にともない、冷却水中に少しずつ溶け出してくることである。そうした放射能は液体廃棄物となって温排水と一緒に放出される。もうひとつは、廃炉

のときの後始末の問題である。国の計画では、廃炉にもなつて発生する、解体された原子炉圧力容器など放射能の強い構造物は、地下五〇〜一〇〇mに埋めることになっている。

原子炉の中でできる三つめの放射能は、「超ウラン元素」とよばれるもので、核燃料であるウランが中性子を吸収したりして変身して出来る放射性物質である。天然のウランには二種類あつて、核分裂を起こしやすいウラン235の割合は〇・七％で、核分裂を起こしにくいウラン238が九九・三％である。普通の原発では、ウラン235を三〜五％に濃縮したものを核燃料として用いている。

原子炉の中でウラン235は核分裂を起こすが、ウラン238の方はもっぱら中性子を吸収してしまう。するとウラン239（陽子九二個、中性子一四七個）ができる。ウラン239は半減期二〇分でベータ崩壊しネプツニウム239（陽子九三個、中性子一四六個）に変身し、ネプツニウム239は半減期二・三五日でベータ崩壊しプルトニウム239（陽子九四個、中性子一四五個）に変身する。プルトニウム239はアルファ崩壊を起こすがその半減期は二万四〇〇〇年と長いので、原子炉の中にどんどん貯まってゆくことになる。プルトニウム239がさらに中性子を吸収してプルトニウム240やアメリカシウム241といった、原子番号がウランより大きな、さまざまな超ウラン元素が原子炉に貯まってゆく。超ウラン元素はアルファ線を出して半減期が長いものが多いので始末が悪い。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑨

放射線と放射線被曝 ①

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

これまでの連載では、もっぱら放射能(放射性物質)とは何かについて説明してきた。放射性物質(放射性同位体)の原子核は、核内の陽子の数と中性子の数のバランスが悪く不安定なので、ベータ線(電子)を出したりアルファ線(陽子二個と中性子二個の塊)を出したりして、より安定な他の元素の原子核へと変身(崩壊)する。中性子過剰の場合はベータ崩壊が起きて、陽子過剰の場合はアルファ崩壊が起きる。ガンマ線というのは、変身直後の出来たてホヤホヤの原子核内の陽子や中性子が、新たな座席に落ち着くプロセスで、余ったエネルギーが電磁波として放出されるものである。「放射能(放射性物質)とは何か?」と聞かれたら「原子核の崩壊にもなつてアルファ線、ベータ線、ガンマ線といった放射線を出す物質」と答えて間違いない。

一方、「放射線とは何か?」となると、結構ややこしい話になるが、この連載で扱う放射線は、アルファ線、ベータ線、ガンマ線に、X線を加えた四つで間に合うと思っっている。ガンマ線、X線とともに電磁波であるが、X線とは、「装置を使って

発生させるエネルギーの大きい電磁波」と承知して欲しい。医療用のレントゲンでは、真空管内に約一〇万ボルトの電圧をかけて、電子を加速し(つまり運動エネルギーを与え)、高速電子をターゲット電極の金属原子に衝突させてX線を発生させる。ご承知のように、電波、赤外線、可視光線、紫外線も電磁波であり、放射線の一種であるが、この連載では放射線には含めない。連載2回目です述べたように、ここで扱う放射線は、「物質と相互作用を起こしたときに、その物質に含まれる原子・分子から電子をはぎ取ることのできるエネルギーをもった放射線」である。正確には「電離放射線」と呼ばれるべきものを、放射線と呼ぶことにしている。

では、どれくらいのエネルギーをもつと放射線に分類されるかについて、正式に決まっている値とかはない。空気分子(窒素や酸素)を電離(イオン化)させるのに必要なエネルギーは約三〇電子ボルト(eV)で、水(H<sub>2</sub>O)の電離には一〇数電子ボルト(eV)が必要とされる。感覚的には、一〇〇〇eV(一keV)を越えたと放射線である。一〇万ボルトのレントゲン装置で発生するX線の最大エネルギーは一〇万電子ボルト(一〇〇keV)である。セシウム137から放出されるガンマ線のエネルギーは六六万二〇〇電子ボルト(662keV)に決まっている。電磁波というと、いかにも「波」を思わせるが、エネルギーが大きくなると(衝突して散乱したりする)「粒子」としての性質が強くなるので、「光子(フォトン)」とも呼ばれる。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑩

放射線と放射線被曝 ②

今中 哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

放射線がいやらしいのはまず第一に目に見えないこと、つまり五感で感じるができないことだろう。そして、五感で感じられないままに、私たちの身体に害を及ぼしていることだろう。

放射線の特徴付けているのは、アルファ線、ベータ線、ガンマ線 (X線) といった粒子のひとつひとつがもっているエネルギー (X線) といった粒子のひとつひとつがもっているエネルギー (ガンマ線、X線は、ここでは光子という粒子として考える。) 放射線のエネルギーの大きさを表すには、電子ボルト (eV) という単位を用いるのが普通である。真空管に100Vの電圧をかけて、陰極を熱して電子を真空中に飛ばし、電場で加速されて陽極まで達したときの電子がもっているエネルギーが100電子ボルトである。セシウム137の原子核がベータ崩壊を起こしてバリウム137に変身する際には、(原子核から) ベータ線 (電子) とガンマ線が放出される。そのときのベータ線のエネルギーは平均一八万七〇〇〇 (最大一一八万) 電子ボルトで、ガンマ線のエネルギーは六六万二〇〇〇電子ボルトである。(ベータ線のエネルギーはゼロから最大値まで連続的にいろいろで、ガンマ線のエネルギーは一定。)

一方、私たちの身体を構成している原子や分子が結びついている強さ (化学的な結合エネルギー) は数電子ボルトからせいぜい一〇電子ボルトである。(たとえば、水分子のO (酸素原子) とH (水素原子) の結合エネルギーは約五電子ボルト。) また、私たちは、生命活動を維持するため、毎日食事をとって消化・吸収してエネルギー源としている。ブドウ糖といったエネルギー源は、細胞内のミトコンドリアにおいて分解され、その過程でATP (アデノシン3リン酸) が作られる。そして、筋肉収縮や物質代謝といった生命活動に必要なエネルギーのすべては、細胞内でATPがADP (アデノシン2リン酸) に変化するこ

とにより賄われている。ATP分子ひとつがADPに変化する際に消費されるエネルギー量は約0・5電子ボルトである。放射線粒子のもっているエネルギー量は、生体組織や生命維持活動でやりとりされている量に比べるとんでもなく大きい。

放射線が身体組織に飛び込んだ状況を想像してほしい。身体組織に限らず、万物は原子の組み合わせであり、それぞれの原子は、プラスの電荷をもつ中心の原子核とその周辺の電子から構成されていることは以前に説明した。ざっくり言って、原子核の大きさは一兆分の一センチメートルで、原子の大きさ (原子核のまわりの電子軌道の大きさ) は一億分の一センチメートルである。つまり、原子核の大きさは原子に比べると微々たるものなので、放射線が物質に飛び込んで相互作用を起こす相手は、もっぱら個々の電子か原子全体である。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑪

放射線と放射線被曝 ③

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

前回までに、私たちの身体を含め、物質はいろんな原子の組み合わせで構成され、原子は中心の原子核とまわりの電子で構成されていること、原子核の大きさは約一兆分の一センチメートルで、原子の大きさは約一億分の一センチメートルと説明した。つまり、私たちの身体を微視的に眺めると、電子が集まった大きな雲の中に、原子核が見えるか見えないうぐらいの点状に散在しているような状態にある。

(プラスの電荷をもつ)アルファ線や(マイナスの電荷をもつ)ベータ線といった荷電粒子が私たちの身体に飛び込んで来たでしょう。アルファ線やベータ線は、電気的な力によって、通り道(軌跡)で出くわした電子を、元の位置から引っぱがしたりはじき出したりしながら進むことになる。その分、荷電粒子のエネルギーは徐々に小さくなり、やがて止まってしまふ。最後には、ベータ線の場合はただの電子に、アルファ線の場合は電子二つをとりこんで、電気的に中性な、ただのヘリウム原子となる。飛び込んでから止まるまでの距離を飛程と呼ぶ。飛程の長さは、エネルギーによるが、一〇〇万電子ボルトのベータ線

の身体組織での飛程は約四ミリメートルである。ベータ線に比べ重くてスピードが遅く(約一〇〇分の一)、電荷が大きい(二倍)アルファ線の飛程は、ベータ線より短い。五〇〇万電子ボルトのアルファ線で約五〇マイクロメートル(〇・〇五ミリメートル)である。荷電粒子が電子をひとつはじき飛ばすのに使われるエネルギーを二〇電子ボルトとしよう。そうすると、一〇〇万電子ボルトのベータ線の軌跡一マイクロメートル当りに発生するはじ取り電子数は平均十二・五個で、五〇〇万電子ボルトのアルファ線では五〇〇〇個となる。アルファ線は紙一枚で止まり、ベータ線はアルミ板一枚で止まるが、そのことは、それぞれの電子のはじ取り能力の違いを反映している。

ガンマ線と物質との相互作用は、少しややこしい。というか、ガンマ線(電磁波)には電荷がないので、物質中を通過しても何もしない。ことがあふ。たとえば、人間の胴体を厚さ一五センチメートルの水とみなし、そこにセシウム137からのガンマ線(六六万二〇〇電子ボルト)が垂直に入射した場合、ガンマ線の約三〇%は何もせずに通過するだけで、何の悪さもしない。被曝として問題になるのは、物質を構成する原子や電子と衝突(相互作用)を起こしたガンマ線である。ガンマ線が原子や電子と衝突すると、ガンマ線の吸収や散乱が起きて、ガンマ線エネルギーの全部またはかなりの部分が移行した電子が放出される。この電子は、大きなエネルギーをもっているの

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑫

放射線と放射線被曝 ④

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

前は、放射線と原子・分子との間で起きる相互作用についてミクロに考えてみた。今回は、もう少しマクロに考えて、被曝した量を測る物差し(被曝量)について説明する。

放射線が身体組織で最初に引き起こすことは、軌跡に沿って原子・分子から電子を引きはがすことだった。電子を引きはがされた原子・分子は、「ラジカル」と呼ばれる反応性の強い「暴れ者」になる。反応性が強い分、大部分は直ちに回りの原子・分子と結合して大人しい安定物に戻るの害をもたらさないが、一部は「活性酸素」などを生成したりして身体組織に害をもたらす。放射線による害の標的として最も重要と考えられているのはDNAである。放射線がDNAから電子をはぎ取ってしまうと、DNAの切断がおきたり、DNAの並びに変化が起きたりする。また、活性酸素のような生成物がDNAと反応してDNA損傷をもたらすこともある。前者は放射線の「直接作用」と呼ばれ、後者は「間接作用」と呼ばれている。

放射線をたくさん浴びると、DNAがズタズタになってしまい、その細胞は死んでしまう。ある臓器で死んだ細胞が増える

と、臓器としての機能を果たせなくなり臨床症状が現れ、被曝がさらに大きくなると個体そのものが死んでしまう(急性障害)。また、DNAの傷の量が、細胞が死んでしまうほどでなくても、後になって白血病やガンになったりする(晩発性障害)。

被曝の影響を分析するためには、放射線をどれだけ浴びたか、つまり被曝した量を数字で表すことが不可欠である。被曝の指標としては、ひとつの細胞をガンマ線が何本通過したかといったことを単位にすることもできるが、セシウム137とコバルト60ではガンマ線のエネルギーが違うし、細胞だって大きいものや小さいものがある。できるだけ一般性を持つように選ばれたのが、原子・分子との相互作用を通じて放射線が組織の重さ(kg)当りに与えるエネルギー量である。この単位は「吸収線量グレイ(Gy)」と名付けられ、「組織1kg当り1ジュール(J)のエネルギー付与が1Gy」と定義されている。これまで放射線のエネルギーは「電子ボルトeV」で表してきた。マクロな量Jとミクロな量eVとの関係は、 $1\text{J} = 1 \cdot 6 \times 10^{19} \text{eV}$ である。人間ひとりの細胞数は約 $6 \times 10^{14}$ 個と言われている。体重を60kgとすると、1kg当りの細胞数は1兆(10の十二乗)となる。1グレイの被曝とは、細胞当り $1 \cdot 6 \times 10^{10}$ の七乗、つまり $1 \cdot 6 \times 10^7 \text{eV}$ のエネルギー付与である。電子はぎ取り当りのエネルギーを $2 \times 10^4 \text{eV}$ とすると、1グレイの被曝とは1細胞当り80万個のラジカル生成に相当し、1マイクログレイでは1細胞当り0.8個のラジカル生成となる。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑬

放射線と放射線被曝 ⑤

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

この連載を始めて三年がたち、今回で一三回になる。これまで、アルファ線・ベータ線・ガンマ線、ベクレルという放射能・放射線の話をして、前回は被曝量グレイの説明をした。今回から被曝量の「真打ち」、シーベルトの話に入ろう。

世界各国の放射線防護基準の元締めをやっているICRP(国際放射線防護委員会)がシーベルトという被曝単位を導入したのは一九七七年勧告のときだった。その勧告を読んで私は「よくまあ、こんないい加減な単位を作ったもんだ!」と思った。というのは、物理的な定義が明確なグレイに比べ、シーベルトは複雑なうえに、根拠あいまいな恣意性が入っており、為替相場ではないが、将来得られる知見次第で変わってくる可能性があったからである。いまでは少なくとも五種類の異なった被曝量が同じ「シーベルト」という単位名で表現されている。

読者の頭が少々混乱するのは承知でシーベルトの説明に移ろう。一九七七年にICRPがシーベルトを導入した主な理由は、①同じグレイの被曝を受けても、放射線の種類によって出てくる健康被害の大きさが違ってくること(アルファ線や中性子線

は、ガンマ線やベータ線に比べ、ガン誘発効果は大きい)と、②頭や肺だけといった部分被曝と全身の被曝とを統一的な尺度で比較したいということからだった。

等価線量シーベルト①の問題に対処するため、放射線荷重係数WRが導入され、ベータ線とガンマ線については一、アルファ線については二〇という値が採用された。たとえば、肺がガンマ線によって一グレイの被曝を受けたときの等価線量は一シーベルトだが、アルファ線によって被曝した場合は二〇倍の二〇シーベルトとする、といった具合である。

実効線量シーベルト②の問題に対処するため、全身を各臓器・組織に分けてそれぞれに重みをつける組織荷重係数WTが導入された(WTの総和は一)。甲状腺のWTは〇・〇三で、甲状腺だけが一シーベルトの被曝を受けたときの実効線量は〇・〇三シーベルトとなる。七七年勧告では身体は七つに区分されていたが、最新の〇七年勧告では一四に区分されている。

シーベルトが恣意的な単位である理由のひとつは、WRやWTの値が、時代とともに変わっているからである。たとえば、甲状腺のWTについては〇・〇五、七七年勧告で〇・〇三だったものが、九〇年勧告では〇・〇五、〇七年勧告では〇・〇四と変わっている。実体は同じ甲状腺被曝に対して、時代によって実効線量シーベルトが違うという奇妙なことが起きている。

今回は、預託実効線量シーベルト、周辺線量当量シーベルト、個人線量当量シーベルトについて説明する。

放射能汚染と向かい合うための基礎知識 ⑭

放射線と放射線被曝 ⑥

今中哲二 (京都大学原子炉実験所助教)

シーベルトには少なくとも五種類があり、前回はそのうち、「等価線量シーベルト」と「実効線量シーベルト」を説明した。今回は、「預託実効線量シーベルト」、ならびに「周辺線量当量シーベルト」と「個人線量当量シーベルト」を説明する。

● 預託実効線量シーベルト…「預託ナントカ」と言われると、お金をどこかに預けたりすることを思い出すが、このシーベルトは、内部被曝にともなう先々の被曝まで考慮した実効線量を表す。内部被曝は、核種によっては臓器に蓄積され長期間の被曝をもたらすが、被曝量を毎年に分けて計算するのは面倒なので、長期間にわたる内部被曝を、放射能を取り込んだ時点で一度に被曝したことにしよう、というのが預託実効線量である。ICRPでは、飲食物で取り込んだ場合（経口摂取）と呼吸にともなう取り込んだ場合（吸入摂取）に分けて、年齢グループ別に、さまざまな核種について一ベクレル摂取したときの預託実効線量を表で示している。たとえば、一〇歳の子どもが一ベクレルのセシウム137を経口摂取した場合には〇・〇一マイクロシーベルト、一ベクレルのプルトニウム239の吸入摂

取では一九マイクロシーベルトとなっている。

これまで説明した三つのシーベルト、つまり等価線量、実効線量、預託実効線量はいずれも直接には測定できない。これらは、被曝管理のために測定と計算を組み合わせて算出される量で「防護量シーベルト」と呼ばれている。一方、これから説明する「周辺線量当量」と「個人線量当量」は、防護量を見積もるための測定値で「実用量シーベルト」と呼ばれている。

● 周辺線量当量シーベルト…テレビニュースでサーベメータ（携帯測定器）をもつて放射線量を測定している場面がしばしば出てくるが、そのときに測っているのが周辺線量当量である。その場所に人体組織があったとして（どの方向から放射線がきても）皮膚表面から深さ一cmのところでの等価線量を示すように作られている。

● 個人線量当量シーベルト…福島の汚染地域では子ども達にガラスバッジを支給して個人被曝量のモニタリングが行われている。ガラスバッジや放射線管理区域に入る際に装着するポケット線量計によって測定しているのが個人線量当量シーベルトである。もともと放射線作業従事者の被曝管理を想定しているので、前方からやってくる放射線を対象に、測定器を胸に装着したときに深さ一cmの等価線量を示すように工夫して作られている。福島のように四方八方から放射線を受けるような状況では、背中側からの放射線は人体で減衰するため、ガラスバッジは小さめの値を示すことになる。