

第1章 放射線の正体

目には見えなくてもその存在や名前をだれもが知っている「放射線」。放射線が発見されたのは1895年のことです。

放射線の研究と利用の歴史は、ドイツの物理学者であったレントゲン博士が実験中に不思議な光線を見つけたことから始まります。その光線はX線と名付けられ、歴史的な大発見となりました。以来、世界中の学者たちが研究を重ね、謎に包まれていた放射線の正体が少しずつ解明されてきています。

放射線にはX線だけでなく、様々な種類があることもわかってきました。アルファ線やベータ線、ガンマ線、中性子線などです。

この章では、まず放射線の正体について基本的なことから見えていくことにしましょう。

放射線の発見

◎目に見えない光線「X線」の発見

1895年11月8日、大学で実験をしていたヴィルヘルム・レントゲン博士は、それまで見たこともなかった現象を体験しました。暗室にあった蛍光板が蛍光を発していたのです。

彼が行っていたのは、内部の空気を抜いた真空度の高いガラス管の中に発生させた電子ビーム（陰極線）を観察する実験でした。このときガラス管は黒い紙で覆れていました。それにもかかわらず、蛍光板が光っていたのです。

「光以外の何か黒い紙を通り抜けて出てきているに違いない。そして、それが蛍光板に当たって光らせているのではないか」

そう考えたレントゲン博士はこの不思議な現象をさらに詳しく調べてみました。そうすると、黒い紙を通り抜けてきた何ものかは、写真乾板も感光さ



レントゲン



レントゲンが撮影したX線写真

せることが分かりました。さらに、光っている蛍光板の上に手をかざすと、手の骨の部分だけは蛍光板が光らず、影になることもわかりました。この光線を当てると手が透けて骨の形だけを見ることができるとのことです。レントゲン博士は、この光線を「X線（エックス線）」と名づけました。数学で未知の数を表すときに使う「X」を仮の名前として使ったのです。この成果を学会で発表すると、大きな反響を呼びました。現在、X線のことをレントゲン線と呼んだり、X線写真を撮ることをレントゲンを撮るといったりしますが、これはヴィルヘルム・レントゲン博士の名からきているのです。レントゲン博士は1901年に第1回ノーベル物理学賞を受賞しました。

◎ウランからも放射線を発見

レントゲン博士がX線を発見した翌年の1896年に、また新しい発見がありました。放射線が鉱物からも発生することを、フランスの物理学者アンリ・ベクレル博士が見つけたのです。

ベクレル博士は蛍光物質を研究していました。蛍光物質というのは光を当てたときに、その光を吸収し自ら発光する物質のことです。X線発見のニュースを聞いたベクレル博士は、蛍光物質がX線も同時に発しているのではないかと考えました。そこで、黒い紙で遮光した写真乾板の上に蛍光物質であるウラン化合物の結晶を乗せ、日光に当てる実験を行いました。ところがある日、日が陰ってしまったので実験をあきらめて机の引き出しに実験セットをしまいこみました。その数日後、日光に当てないまま乾板を現像してみると、ウラン化合物の結晶を乗せた部分が感光し、その形が鮮明に写っていました。写真乾板の上に薄い銅の十字架を置き実験を繰り返すと、写真乾板に十字架の形の陰がはっきりと写りました。こうしてベクレル博士は、ウラン化合物が自然に（光を当てなくても）X線に似た性質（物質透過性と写真乾板感光性）をもつ「放射線」を出していることを発見したのです。

◎キュリー夫人が「放射能」と命名

このような放射線を出す物質が他にもあることを発見し、放射線を出す性質のことを「放射能 (Radioactivity)」と名付けたのが、ポーランド生まれのマリー・キュリー博士です。日本ではキュリー夫人という名で呼ばれることが多いのは、夫のピエール・キュリー博士も物理学者で、夫妻で協力して様々な研究成果を挙げたからでしょう。

1898年、キュリー夫人はウランを含む鉱物であるピッチブレンドから、放射線を出す物質を2つも分離することに成功しました。この発見のために、数トンもの鉱石を砕き、さらに化学処理して試行錯誤し、4年の月日がかかったとい

いますから、大変な情熱です。新しく分離した物質は、キュリー夫人によってポロニウムとラジウムと名付けられました。ポロニウムは、キュリー夫人の故郷のポーランドにちなんだ名で、ラジウムはラテン語で放射線を意味する radius に由来しています。この功績により、1903年に、キュリー夫人には、ピエール・キュリー博士、アンリ・ベクレル博士と共同でノーベル賞が授与されました。

放射線の種類と性質

◎放射線はどこから生まれるのか

ベクレル博士やキュリー夫人が発見したように、地球上には自ら放射線を発する物質「放射性物質」があります。このような不思議な物質が、なぜ存在するのでしょうか。放射線はどこから生まれているのでしょうか。

その答えは、物質を構成している原子にあります。原子は陽子と中性子と電子でできた小さな粒ですが（コラム①参照）、同じ種類の原子でも中性子の数が違うバリエーションが存在します。たとえば、C（炭素）原子には、6個の陽子と6個の中性子をもつ ^{12}C と、7個の中性子をもつ ^{13}C 、8個の中性子をもつ ^{14}C などがあります。このようなバリエーションを「同位体」といいます。

原子の中の陽子と中性子と電子は、お互いが引き合って絶妙なバランスで存在していますが、ときにはバランスが崩れてエネルギー状態が不安定になることがあります。不安定な原子は、エネルギーを放出して安定な状態になろうとします。このときに放出されるエネルギーが放射線です。

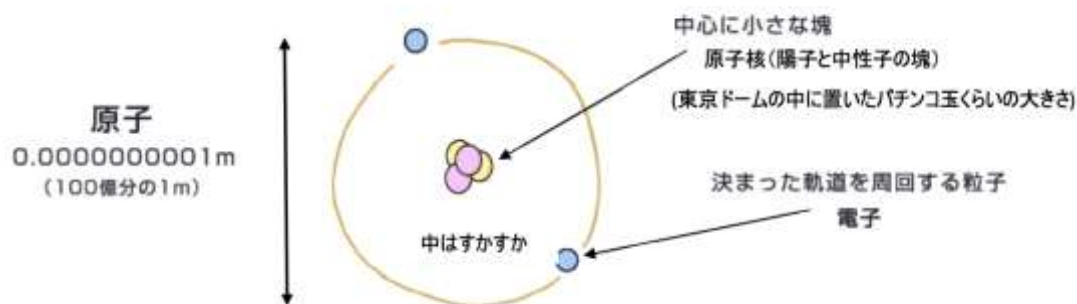
不安定な原子は安定になるまで放射線を出し続けますが、安定な状態になれば放射線の放出は止まります。そのため、一定期間がたつと放射性物質は放射能を失い、放射性物質ではなくなるのです。もともとあった放射性物質の量が半分になるまでにかかる時間を「半減期」といいます。半減期は放射性物質の種類によって異なり、何百万分の一秒というものや何億年というものまであります（表1-1）。

表 1-1. 放射性物質の半減期の例

放射性物質	半減期	放射性物質	半減期
トリウム 232	141 億年	ストロンチウム 90	28.8 年
ウラン 238	45 億年	トリチウム	12.3 年
カリウム 40	13 億年	コバルト 60	5.3 年
プルトニウム 239	2.4 万年	セシウム 134	2.1 年
炭素 14	5,700 年	ヨウ素 131	8 日
ラジウム 226	1,600 年	ラドン 222	3.8 日
セシウム 137	30 年	ナトリウム 24	15 時間

コラム① 原子の構造

原子は原子核とその周りを取り巻くいくつかの電子からできています。原子核をさらに詳しくみると、陽子と中性子というものが集まってできています。陽子はプラスの電気を持った粒子であり、中性子の重さは陽子と同じですが、電気を持っていません。その周りを回っている電子はマイナスの電気を帯びた粒子で非常に小さいものです。そして通常はどの原子をみても、原子核にある陽子の数と同じだけの数の電子が周囲を回っています。プラスとマイナスが同数なので、打ち消しあって原子としては電氣的に中性になっています。



原子核の構造 (ヘリウムの例)

◎放射線の種類

放射線の正体は、バランスを崩した原子が発するエネルギーだったわけですが、そのエネルギーにもいくつかの種類があります。

安定な状態になるために原子はエネルギーを発しますが、何を放出するかによって放射線の種類が変わります。陽子2個と中性子2個で構成されるアルファ粒子を放出するのが「アルファ線」です。プラスの電気を帯びた陽子が2個も含まれているので、全体的にもプラスの電気を帯びています。アルファ線は他の放射線に比べると物を突き抜ける力は弱く、薄い紙1枚でさえぎられてしまいます。そのかわり、通過する部位に与えるエネルギーは大きく、放射線としての作用は強くなります。

あとで詳しく説明しますが、放射線は物質を通り抜けるときに、物質を構成している原子のもつ電子をはじき飛ばして「電離」させる作用をもっています。この電離する力が最も強い放射線がアルファ線です。

電子またはプラスの電気を帯びた陽電子で構成されているのが「ベータ線」で

す。アルファ線に比べると物質に及ぼす作用は小さいのですが、透過力は大きいという特徴があり、空気中で数十センチから数メートルまで飛んでいきます。

アルファ線やベータ線は粒子のビームでしたが、「ガンマ線」とX線は電磁波です。電磁波というと難しく聞こえますが、たとえば光やテレビ放送に使われている電波なども同じ電磁波です。ガンマ線やX線は電波と同じように空間を伝わって広がっていくとともに、物質の中を比較的よく通り抜けていきます。

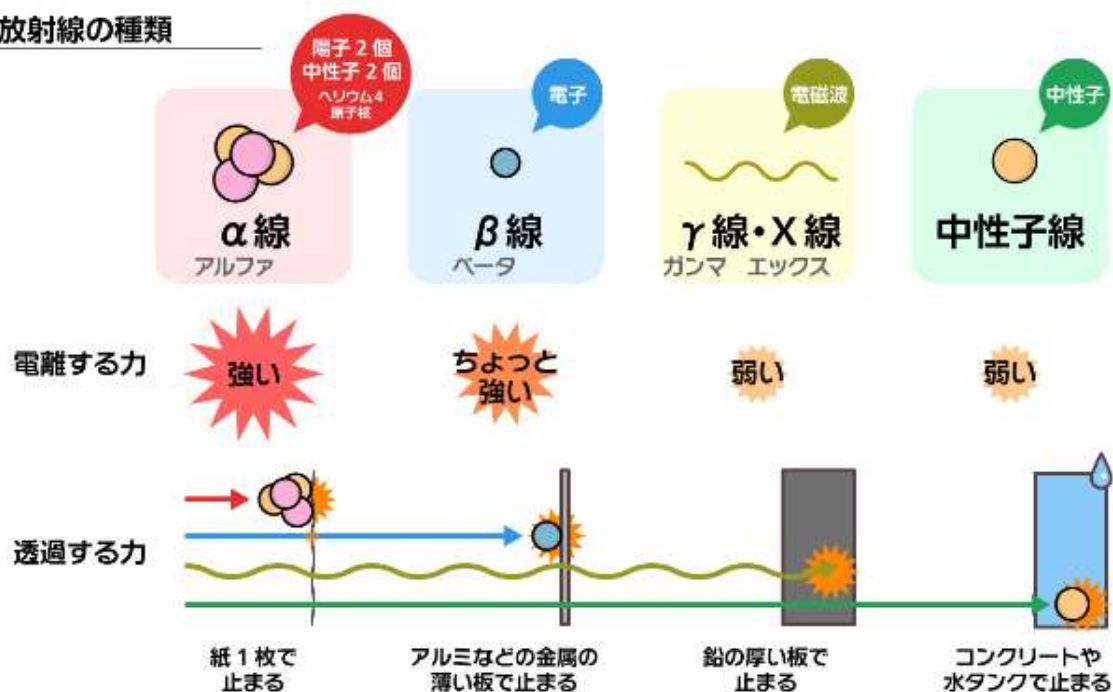
電磁波は波長の長さで分類されています。波長の短いものがガンマ線やX線です。その次に紫外線、可視光線、赤外線と続きます。波長が赤外線よりも長い電磁波を、単に電波と呼んでいます。

ガンマ線は、原子核が変化して出てくるものです。これに対しX線は、ふつうは高速の電子を真空管の一種であるX線管の陽極にあてて発生させるものです。

放射線にはこのほかに中性子線というものもあります。原子核を構成している粒子の一つである中性子が原子核から出てくるもので、原子炉の中でウランなどの原子核が核分裂をすると中性子が出てきます。発電用の原子炉などでは、この中性子が大きな役割を果たしています。

それぞれの放射線の名前と特徴について図1-1にまとめていますので、参照してください。

放射線の種類



出典：物理学素材集^{参考1}

図1-1. 放射線の種類

この他に、放射性同位元素に由来するものではありませんが、宇宙から高速度で飛んでくる陽子やミューオンなどの粒子も電離放射線の仲間です。

コラム② 放射線は微量でも検出できる

放射線は物質を電離する力があります。放射線は目には見えませんが、物質が電離したことは簡単に電気信号として検出できますから、この性質を利用すれば、ごく微量の放射線をも測定することができます。個人が被ばくした線量や環境の放射線も比較的容易に感度の高い測定ができるのです。例えば、1秒間に1個の原子が壊変したときに放射性物質から出る放射線でも測定が可能です。ふつうの化学物質では、このような微量の測定をすることはできません。

放射線の物質への作用

目に見える光（可視光線）や紫外線などと比べて、放射線は強いエネルギーをもっています。光は物質で遮られますが、放射線はある程度、通過することができます。ただし、その伝わり方は前述したように放射線の種類によっても変わり、空気などの軽い物質の中の方がよく通りますが、金属などの重い物質の中では通りにくくなります。放射線は物質の中を通過するとき、もっているエネルギーをその物質に与えるという特徴があります。空気や水や生物の体などにあたったときに、これらを構成している原子から電子をはじき飛ばしてしまうのです。電子はマイナスの電気を帯びているので、原子から電子がはじき出されると、マイナスの電気が減って、原子全体としてはプラスの電気を帯びることになります。このように、プラスの電気をもつ原子とマイナスの電気をもつ電子に分かれることを「電離」といいます。

電子は原子と原子をつなぐ糊のような役割ももっています。その糊がなくなってしまうと、結びついていた原子がばらばらに分離してしまいます。水素と酸素の2種類の原子からできている水のような単純な物質では、分離してもすぐに再結合してもとに戻ります。しかし、生物の細胞のように複雑な物質が大量の放射線を浴びて、いくつもの分離が同時に起こってしまうと大変です。再び結合しようとしても間違った原子とつながってしまい、違う物質になることも起こるのです。

ここでは放射線の電離作用の説明をしましたが、放射線にはそのほかにも蛍光物質を光らせる蛍光作用や写真乾板を感光させる写真作用等があります。

放射線を測る単位

長さや重さはメートルやキログラムと言った単位が決められていますが、放

放射線の話をするときにも、やはりきちんと単位を決めておかないといろいろな比較ができません。このため、いくつかの単位が決められています。

◎放射線に関する物理的な単位

不安定な状態の原子は安定な状態になるために放射線を放出するという話をしましたが、このときに陽子と中性子でつくられた「原子核」の構成要素が変わります。これを「放射性壊変」といいます。放射性物質が、1秒間に1回、放射性壊変を起こすとき、その放射性物質の放射能は1ベクレル(Bq)であると言います(例えば、1,000ベクレルの放射能があるというのは1秒間に1,000個ずつ放射性壊変を起こしている状態を意味し、数値が大きい程、放射能が高いこととなります)。冒頭で紹介したベクレル博士の名に由来する国際単位です。過去にはキュリー夫人にちなんで、キュリーという単位も使われていました。

放射線が物質に当たると、エネルギーの一部または全部がその物質に与えられます。単位質量あたりの物質が受けるエネルギー(熱量)を「吸収線量」と呼び、国際単位ではグレイ(Gy)が用いられます。これは英国の物理学者であり、放射線生物学の先駆者でもあったハロルド・グレイにちなんで名付けられました。単位質量当たりのエネルギー(ジュール/キログラム)(J/kg)が使われることもあります。人体の吸収線量は特定の臓器や組織の重さで割った平均線量で表します。1ジュールの熱量は約0.24カロリーですので、1グラムの水を約0.24℃上昇させるエネルギー相当を1kgの臓器や組織に与えるのが1グレイということになります。

◎放射線防護のための目安を定める単位(防護量)

第3章で詳しく説明しますが、放射線の人体影響には「確定的影響」と「確率的影響」の2種類があります。確定的影響は、一定量以上の放射線を受けると必ず身体症状として影響が現れる現象で、「組織反応」とも呼ばれます。一方、確率的影響は、一定量の放射線を受けたとしても必ずしも影響が現れるわけではなく、放射線の量が増えると影響が現れる確率が高くなる現象のことをいいます。がんや遺伝的影響がこれに当たります。

確定的影響については、吸収線量(グレイ(Gy))を用いますが、1950年代後半に認識された確率的影響は、確定的影響と異なり、これ以上超えたら害になるという「しきい線量」はないと考えられました。そこで、国際放射線防護委員会(ICRP)は放射線防護のため、放射線による発がんのリスク指標の目安を定めることとしました。具体的には、組織・臓器に対する「等価線量」と全身に対する「実効線量」と言う量を考案し、それを放射線防護の中核をなす線量と位置付けました。すなわち、放射線の種類や組織・臓器ごとに異なる放射線に対する発が

んの感受性を考慮して、吸収線量を補正した量を定義したわけです。これらの量の単位がシーベルト (Sv) です。

なぜ、確率的影響では単位が違うのでしょうか。

すでに説明したように、放射線にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線などいろいろな種類があります。組織内を通過する距離やその間に与えるエネルギーの密度が放射線の種類によって違うため、同じ吸収線量でも確率的影響の出方に差が生じます。

そこで、放射線の種類を区別せずに組織・臓器ごとの確率的影響のリスクを表すことのできる線量を考案したわけです。放射線の種類による確率的影響の出方の相対的違いを補正するための係数を「放射線加重係数」と呼びます。ある臓器の平均吸収線量にこの係数を掛けて、同じ尺度で被ばくの大きさを表すことができるように作られたのが「等価線量」です。等価線量の単位は吸収線量と同じく J/kg ですが、国際単位ではシーベルト (Sv) という名称が与えられています。これは、スウェーデンの科学者で ICRP の初代委員長を務め、放射線防護で功績のあったロルフ・シーベルトにちなんで名付けられました。ICRP の 2007 年勧告^{参考2}では、放射線加重係数の一部が変更され、ガンマ線や X 線などの光子とベータ線に 1、陽子に 2、アルファ線に 20 という値が定められました。中性子の加重係数はエネルギーの連続関数として与えられています。すなわち、ガンマ線やベータ線 1 グレイを受けた臓器の等価線量は 1 シーベルトですが、アルファ線 1 グレイを受けた臓器の等価線量は 20 シーベルトで、発がんリスクが 20 倍高いのです。

等価線量を用いることにより、人体の組織・臓器への被ばくの確率的影響（発がんリスク）は放射線の種類によらず、統一的な尺度で評価できるようになりました。では、人体の被ばく管理に当たり、臓器線量を表す等価線量ですべての状況が説明できるでしょうか。全身にほぼ均等に放射線が当たった場合、放射線発がんリスクに関して、放射線に敏感な組織・臓器とあまり敏感でない組織・臓器に同じ線量が与えられることとなります。確率的影響に対する防護を行うためには、人体全体の総合的な確率的影響の指標となる線量が必要です。この目的で考案されたのが「実効線量」です。実効線量は、等価線量に組織・臓器ごとの放射線による確率的影響（発がん）に対する敏感さ（感受性）の違いを補正するための係数「組織加重係数」を掛け合わせて、全ての臓器について合計した数値として表されます。組織・臓器ごとに割り振られた組織加重係数の総和は 1 になります。単位はシーベルト (Sv) です。なお、等価線量も実効線量も同じシーベルト単位なので、単に「何々シーベルト」と言っただけでは区別が付きません。このため、例えば「甲状腺の等価線量は〇〇ミリシーベルト」や「実効線量で××ミリシーベルト」のように、等価線量なのか実効線量なのかが分かるように表現する必要があります。

◎等価線量や実効線量の計算方法

等価線量及び実効線量の計算方法を図 1-2 に示します。

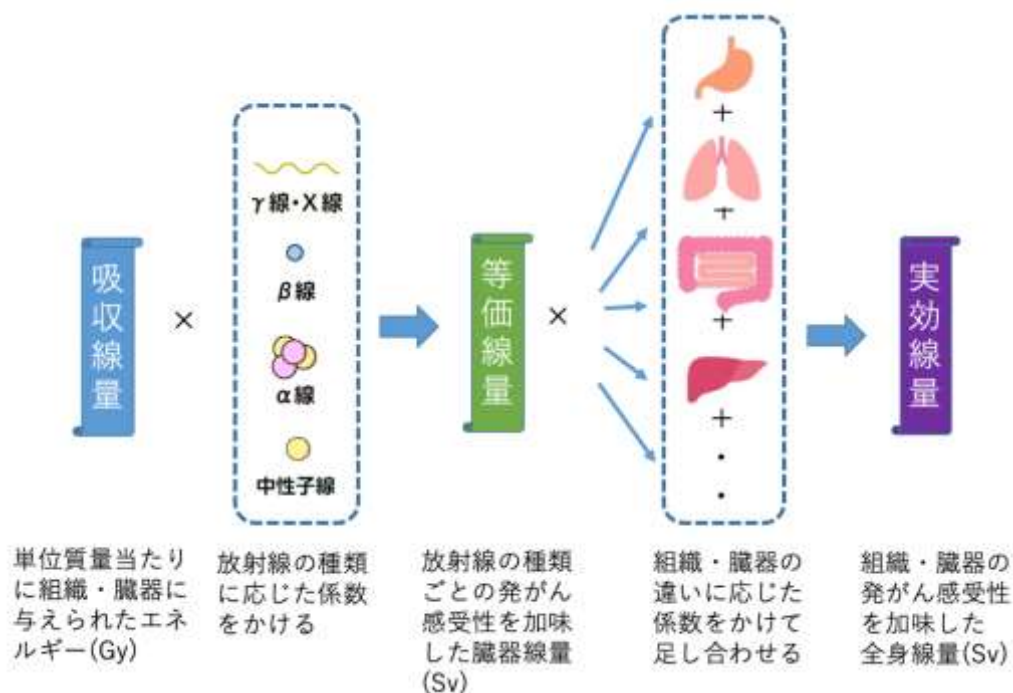


図 1-2. 等価線量及び実効線量の計算方法

確率的影響（発がん）の感受性を考慮して、放射線の種類の違いを加味した係数は「放射線加重係数」、組織・臓器の敏感さの違いを補正するための係数は「組織加重係数」と呼ばれ、ICRP 勧告で定義されています。現在（2020年時点）の日本の法令の基礎となっている係数値は、ICRP の 1990 年勧告^{参考3}の値ですが、2007 年勧告ではこれらの係数が見直されています。2007 年勧告でのこれらの値を表 1-2 に示します。また、ICRP では、これらの係数だけでなく内部被ばく計算のための人体モデルや外部被ばく計算のための方法も適宜、見直しが行われます。今後、2007 年勧告の日本の法令への取り入れにおいて、被ばく計算のための係数値やモデルが見直されていることがあるので注意が必要です。

表 1-2. 放射線加重係数及び組織加重係数（ICRP 2007 年勧告の値）

放射線の種類	放射線加重係数	組織・臓器	組織加重係数
ガンマ線、X線	1	骨髄(赤色)、結腸、肺、胃、乳房、 残りの 14 組織の合計	0.12
ベータ線	1	生殖腺	0.08
アルファ線	20	膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04
中性子線	2.5~21 (エネルギーに応じて)	骨表面、脳、唾液腺、皮膚	0.01

コラム③ 等価線量と実効線量は放射線防護のために定義された量

放射線防護のための目安である等価線量や実効線量は、35歳の西洋人標準男性(身長176cm, 体重73kg)と標準女性(163cm, 60kg)の解剖学的人体モデルと消化管モデル、呼吸器モデルなどの生理学的人体動態モデルを用いて計算で求められます。標準男女別に等価線量を計算した後、男女平均の標準人等価線量を求め、これに組織加重係数をかけて全臓器の総和として実効線量が計算されます。

放射線加重係数や組織加重係数は、本来男女、年齢など個人の属性によって異なるものですが、その平均値を考慮して、ICRPの判断で決められた数値です。従って、きわめて大まかな、大きな誤差を含む値です。その値を用いて計算される等価線量や実効線量は、あくまでも防護の目的で、放射線防護のための管理目標値を定めたり、それを遵守したかどうかを判断する指標として用いるものです。

◎放射線管理に用いる測定量の単位(実用量)

吸収線量は、グレイと言う単位を用いていますが、元はジュール/キログラム(J/kg)なので、物理的に定義された量で、測定により直接測ることができます。しかしながら、計算で求められる等価線量や実効線量は実測できません。日常的に放射線管理をするためには、実際に測定でき、実効線量を下回ることなく、安全側に評価できる、言い換えれば、実効線量の安全側の近似値である線量が必要です。国際放射線単位測定委員会(ICRU)が外部被ばくに対して勧告した「実用量」は放射線管理に用いられる測定量です。実用量は線量当量と表示され、単位はシーベルトです。作業場所などの放射線の測定に用いるサーベイメータの目盛である1時間当たりのマイクロシーベルト($\mu\text{Sv}/\text{時}$)単位や、個人線量計の集積線量ミリシーベルト(mSv)の単位で表示されます。測定器によっては吸収線量の単位を用いていることもあります。福島第一原子力発電所事故以降は、新聞紙上などでもこれらの単位がよく見られるようになりました。

一方、内部被ばくの場合は、等価線量または実効線量をあらわすための実用量は定義されていません。各種の測定結果から得られる放射性物質の体内摂取量の計算に基づいています。すなわち、体内に残留している放射性物質から放出されるガンマ線等を放射線検出装置で測定する方法(体外計測法と呼びます)や便や尿などの排泄物中の放射性物質の量を化学的な分析方法によって測定する方法(バイオアッセイ法と呼びます)によって、呼吸(吸入摂取)あるいは飲水・飲食(経口摂取)による摂取量(ベクレル)を推定して、その値にICRPの勧告する係数(1ベクレルの摂取量で生涯にわたって被ばくする線量を表し、線量係数と呼びます)をかけ算して、等価線量や実効線量をシーベルトの単位で求めます。その場合、体内に残留する放射能から大人の場合は摂取した後の50年間、

子どもの場合は摂取した後の70年間に受ける線量を、摂取時または摂取した年に一度に受けたと仮定した線量（実際の実効線量より大きくなる）として求めます。この線量を「預託線量」と呼びます。体外計測法の一つであるホール・ボディ・カウンター（WBC）と言う装置の名称も、新聞紙上などで見られるようになりました。

測定量の単位の大きさについては、自然界から受ける放射線などのような低い線量の測定ときは、シーベルトという単位では大きすぎるので、その1000分の1の「ミリシーベルト（mSv）」や、さらにその1000分の1（シーベルトの100万分の1）の「マイクロシーベルト（ μ Sv）」の単位を使います。

コラム④ 放射線防護に係る国際機関の活動

本書に登場する「国際放射線防護委員会(ICRP)」は、1928年に「国際X線・ラジウム防護委員会」として設立され、その後1950年に現在の名称に変わったもので、放射線利用に伴う人体の安全確保と環境保全のために、世界の専門家が集まって検討を行い、放射線の防護基準についての勧告を出しています。ICRPは、民間の非営利団体であり、放射線物理学や医学、生物学、遺伝学などの専門家が個人の資格で参加していて、各国の政府とは独立して活動しています。各国はこの勧告を尊重しており、これに準じてそれぞれの国の基準を決めています。現在(2020年時点)の放射線防護に関する日本の法令は、1990年のICRP勧告に基づいて決められていますが、2007年に改訂されたICRP勧告の取り入れについて専門家の委員会で検討されています。

また、国際放射線単位測定委員会(ICRU)は、1925年の第1回国際放射線医学会からその学会の下に置かれ1950年まで存続した「X線単位委員会」が始まりです。ICRUはICRP同様、設立の当初から非営利団体であり、世界の物理学者、放射線医学者、技術者等がボランティアで参加しています。放射線防護、放射線科学、核医学、放射線治療(がん治療)等の分野に関連し、放射能・放射線の単位・量の定義、計測と換算係数、計測技術や機器の標準化、基礎データの整備等を検討し、成果を報告書として取りまとめています。

この本ではUNSCEARと言う言葉も出てきます。UNSCEARは「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」の略語で、1950年代に行われた核実験の影響について調査するために1955年に国連に設置された委員会です。現在は自然放射線や人工放射線の状況や放射線による人や環境への影響について世界の知見を集約し、報告書をまとめています。これらの報告書はICRPが勧告を検討するときの科学的な基礎資料になります。

参考資料（第1章）

- 参考 1. Higgs Tan、物理学素材集（放射線いろいろ）（<http://higgstan.com/type-of-radiation/>）
- 参考 2. 国際放射線防護委員会、「国際放射線防護委員会の 2007 年勧告」、ICRP Publication 103
- 参考 3. 国際放射線防護委員会、「国際放射線防護委員会の 1990 年勧告」、ICRP Publication 60