

1. 放射線、放射能とは？

放射線は私たちのまわりのどこにでもあります。約 137 億年前に宇宙が誕生してから現在にいたるまで常に自然界に存在しています。しかし、電波と同じように目に見えない、聞こえない、触れない、においもないので、その存在が発見されたのは 1895 年、ほんの 112 年ほど前でした。発見したのは、ドイツの物理学者レントゲンでした。今でも健康診断でエックス線（X 線）による胸の透過写真を「レントゲン」と呼んでいるのはその名前に由来しています。

自然界にある物質から放射線が出ることを見つけたのは、フランスの物理学者ベクレルという人で、1896 年のことでした。ベクレルの名前もあとで説明する放射線の単位の名前となっています。

放射線の正体は何か？というのを理解するためには、まず物質は何で出来ているかを知る必要があります。物質は、原子で構成されており、その原子は原子核と電子とからできています。

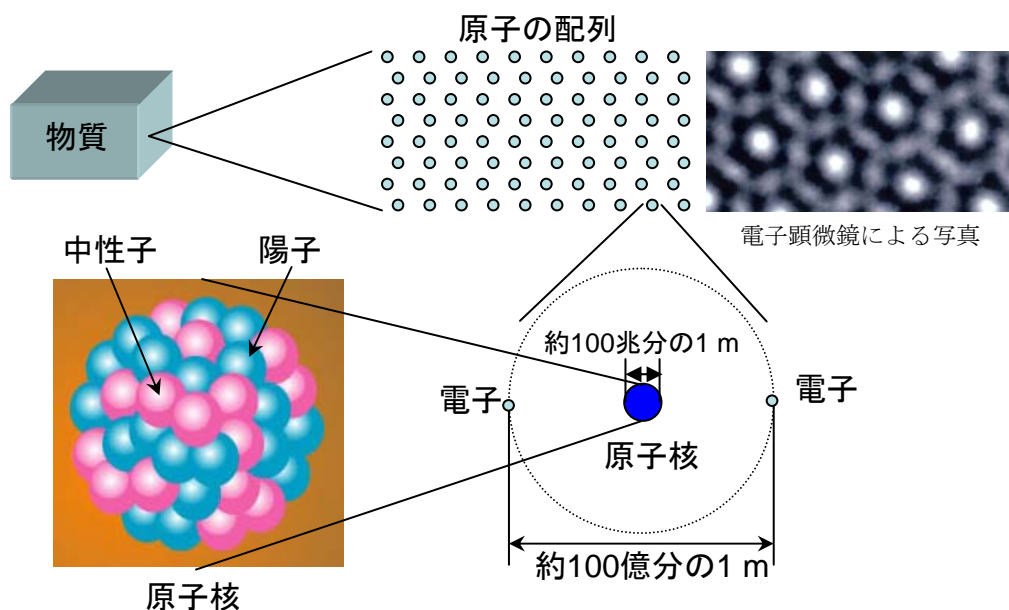


図 1 物質の構成要素

原子核は陽子と中性子とからできています。陽子の個数を Z で表し（これを原子番号といいます）、中性子の個数を N で表した時に、 $Z + N$ を質量数といいます。 Z と N で決まる原子核の特定の種類を核種といいます。元素の名前は Z だけで決まるので、同じ元素でも中性子の数が異なるものがあります。これをたがいに同位体と呼びます。核種は Z と $Z + N$ で決まり、それを表すときは元素記号と質量数を使います。（例えば図 4 のナトリウム 24 は ^{24}Na と表し、この原子核は陽子 11 個、中性子 13 個からできていることとなります。）つまり同位体は同じ元素のなかの異なった核種ということになります。

原子核のなかには、エネルギー的にみて不安定で、時間の経過とともに、より安定な他の原子核に変わっていくものがあります。原子核が自然に変化することを、崩壊または壊変といいます。このとき、放射線が放出されます。このように、自然に放射線を出す核種を放射

* 本稿は日本原子力学会編「原子力がひらく世紀」を大いに参考・引用しています。

性同位体といます。

人工的に放射線を発生させる装置としてはX線管や電子銃、加速器と呼ばれるものがあります。放射線は自然界に存在するものも、人工的に発生させたものも同じ性質をもちます。また、医療診断などで使われる放射性同位体は、そのほとんどが原子炉や加速器を用いて人工的に作られたものですが、これについても自然界の放射性同位体と同じ性質をもちます。

放射性同位体の崩壊の仕方はいろいろな種類があります[†]。

(a) 安定な原子核と比べて中性子が多すぎる場合

原子核が電子を放出することによって、中性子が陽子に変わり、より安定な原子核になります。このとき放出される電子をベータ（β）線といます。（β⁻崩壊）

(b) 安定な原子核と比べて中性子が少なすぎる場合

原子核が陽電子を放出することによって、陽子が中性子に変わり、より安定な原子核になります。このとき放出される電子をベータ・プラス線といます。（β⁺崩壊）

ここで、陽電子とは、正（+）の電荷を持つ電子と同じ質量をもつ粒子です。

(c) ウランのように原子核が大きすぎる場合

原子核がその一部（アルファ（α）粒子）を放出する（α崩壊）、あるいは原子核が2つの原子核に分裂します。（自発核分裂）

ここで、アルファ粒子とは、ヘリウムの原子核のことをいいます。

(d) 原子核が不安定な励起状態にある場合

多くの原子核には、エネルギー的にみて不安定な励起状態というものがあります。とくにベータ崩壊またはアルファ崩壊で生じた原子核は一般にきわめて不安定なので、より安定な状態に移行します。これに伴って余ったエネルギーが電磁波として放出される場合には、その放出される電磁波をガンマ（γ）線とよびます。また、原子核の周囲にとじこめられている（束縛）電子が、この励起状態のエネルギーをもらって、束縛状態から解放されて放出されることがあります。この電子を内部転換電子とよびます。

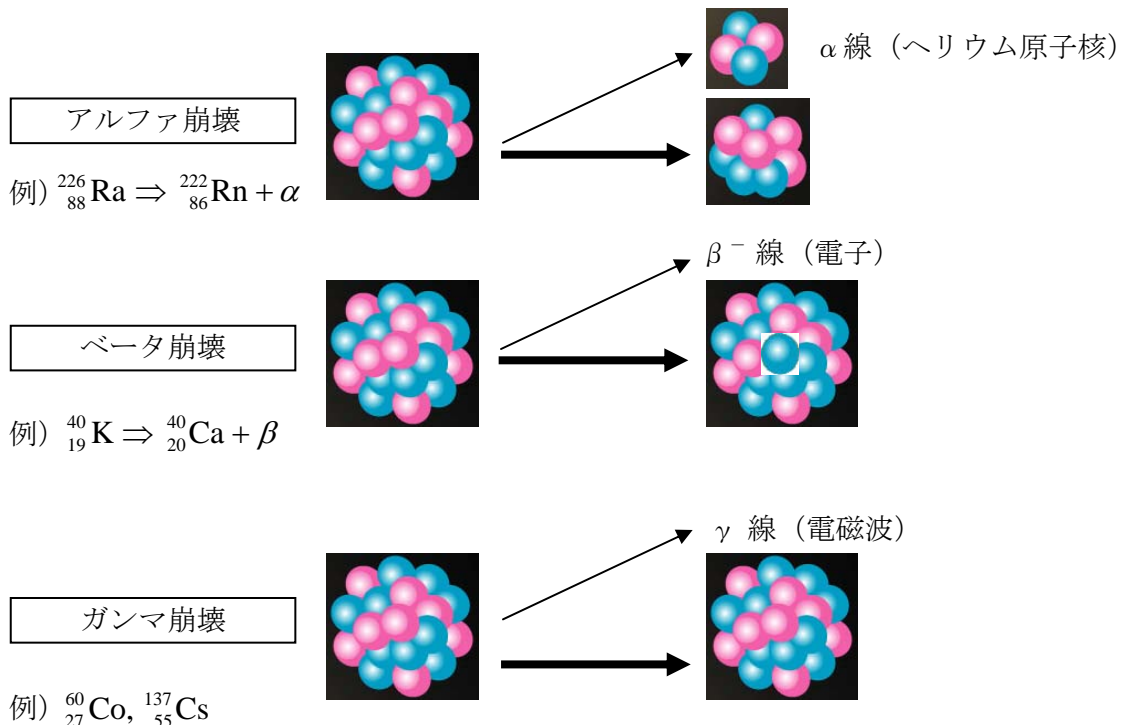


図2 さまざまな崩壊形式

[†] 原子核の崩壊（壊変）形式については巻末の [参考] でもう少し詳しく説明しています。興味のある人はそちらも読んでみてください。

原子核は上記の崩壊のほかに、他の粒子の衝突によって変化する（壊れる）ことがあります。これを核反応といい、その際に放出される放射線としてアルファ線やガンマ線のほかに陽子や中性子などがあります。

放射線と放射能は、しばしば混同されがちですが、意味はまったく違います。放射線とは、上記のように、原子核が崩壊するときなどに放出される高速の粒子（ α 線、 β 線、陽子線、中性子線など）や、高いエネルギーを持った電磁波（波長が100億分の1m程度より短い、X線や γ 線）のことをいいます。（光や電波は低いエネルギーを持った電磁波でこれらより波長はずっと長くなります）放射線は原子を電離させる能力を持つことが特徴です。（ふつう電離というと、水溶液中での電離を思い浮かべますが、水がなくてもイオンの状態になります）

これに対して、放射能とは、放射線を出す性質（能力）のことであり、放射能をもっている物質を放射性物質といいます。また、放射線を照射された物質が放射能を持つ放射性同位体になるのは、一般に中性子や非常に高いエネルギーのガンマ線などを受けた場合で、このような効果が起きた場合を放射化といいます。放射線を利用して物質の機械的・化学的な性質を変えたり滅菌や殺虫を行う場合は、この放射化が起こらないように低いエネルギーのガンマ線や電子線を用います。

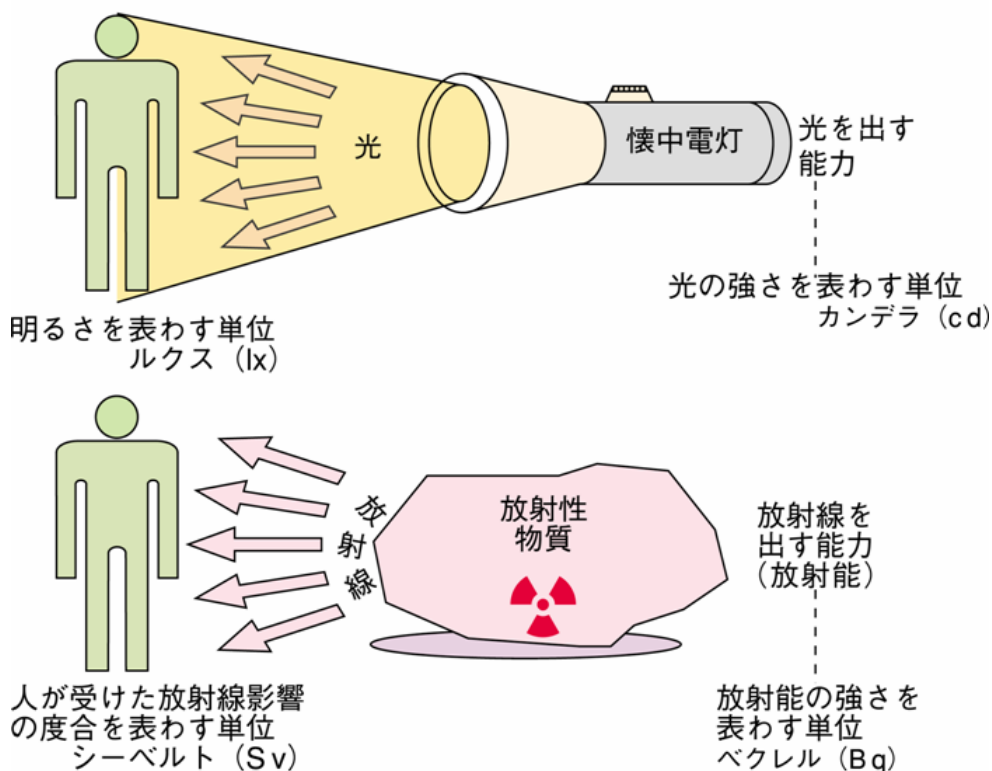


図3 放射線と放射能の違い¹⁾

放射性の物質は、どのようなものであれ、その中の原子核は次々と崩壊してその量が減ります。どの原子核がいつ崩壊するかはランダムな確率現象ですが、時間とともに崩壊する原子核の数は減少し、一定の時間内に放出される放射線の数も減少します。これは、毒性を持つ化学物質と違うところで、毒性を持つ化学物質は人為的に分解されない限りいつまでたっても毒物のままです。

放射能がもとの強さの半分になるまでの時間を半減期といいます。この放射性物質の壊れる速さは放射性同位体によって異なります。たとえば、自然界に広く存在しているウラン238やカリウム40の半減期は、それぞれ45億年と13億年であり、人工的に作られるセシウム137では約30年です。

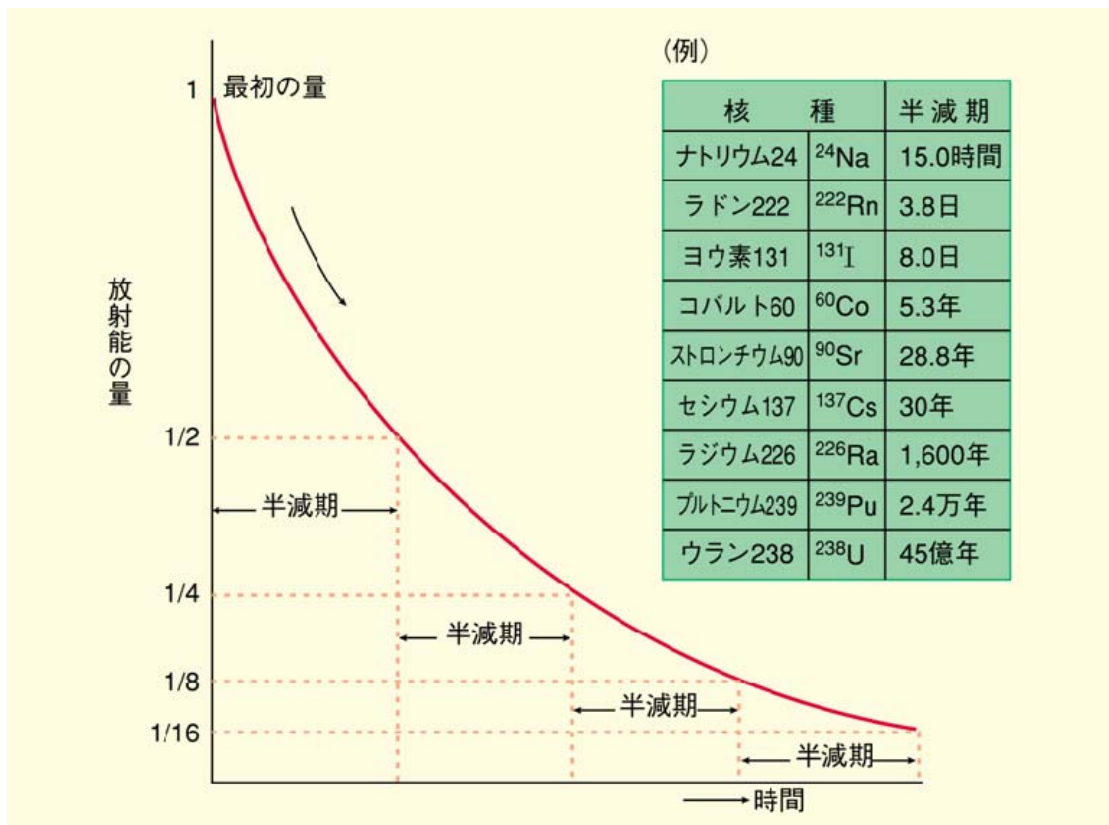


図4 放射能の減衰と半減期の関係¹⁾

2. 放射線の性質と特徴

代表的な放射線である、アルファ線、ベータ線、ガンマ線および中性子の物質の透過力を図5に示します。

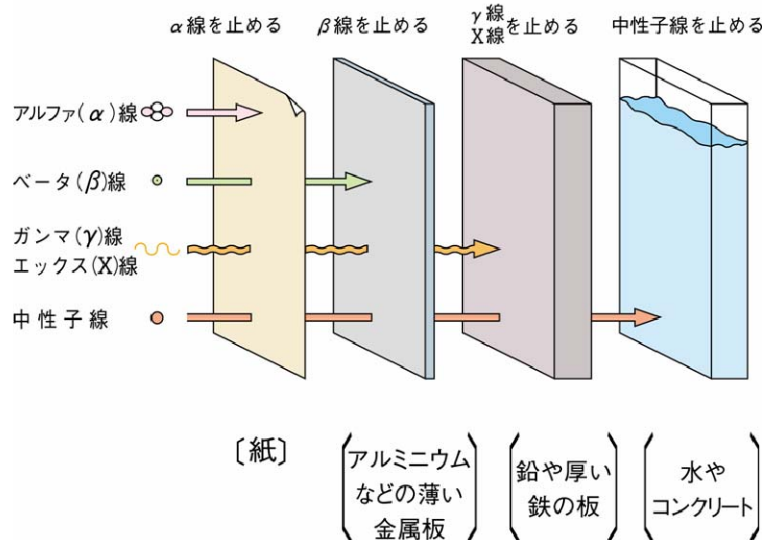


図5 放射線の種類と透過力の関係¹⁾

人間が放射線を受ける(被曝^{ひばく}という)場合に、その受け方によって外部被曝^{ひばく}と内部被曝^{ひばく}に分けられます。人体の外側にある放射性物質(放射線源)から放射線を受けることを外部被曝^{ひばく}といいます。これに対し、体内に取り込まれた放射性物質からの放射線を受けることを内部被曝^{ひばく}といいます。

アルファ線はヘリウムの原子核であり、水中で数 10 マイクロ（数十万分の 1）m（人体組織でもほぼ同じ）、空気中では数 cm で止まってしまいます。人体の場合には、外部からアルファ線を受けても皮膚の表面で止まってしまうため、人体への影響はありません（表皮は生きた細胞ではないので放射線に対する感受性はありません）。しかし、体内にアルファ線を放出する放射性物質（たとえば、ポロニウム 210：ロシアの元スパイのリトビネンコ氏の事件が有名）を摂取した場合、その放射性物質の付着した人体組織の部位が集中してアルファ線の全エネルギーを受け取ることになり、その組織を破壊してしまいます。

ベータ線は、電子であり、アルファ線に比べると物質を透過しやすいのですが、水中では数 mm、空気中では数 m で止まってしまいます。外部からベータ線を受けた場合、大部分のベータ線は皮膚で止まってしまうため、主に皮膚の被曝^{ひばく}が問題となります。体内にベータ線を放出する放射性物質（たとえば、カリウム 40）を摂取した場合、その放射性物質の付着した人体組織やまわりの器官にエネルギーが吸収されることとなります。テレビのブラウン管は、内部の電子銃で電子を発生させて、電子が当たると光る蛍光物質をガラス表面に塗布していますが、ガラス表面で電子は止まってしまう、外部に放出されることはありません。

ガンマ線は、X 線と同じ仲間で、電荷をもたない電磁波なので、物質を透過する性質を持っています。コンクリートや鉄、鉛などの重い物質は、ガンマ線を吸収する能力が大きいため、透過する力を弱めることができます。外部からガンマ線を受けた場合、ガンマ線は皮膚を透過して、体内の組織や器官にまで到達するので、ガンマ線が大量の場合には、人体内の組織や器官にダメージを与えます。体内にガンマ線を放出する放射性物質（たとえば、コバルト 60）を摂取した場合、ガンマ線は、エネルギーの一部を人体組織に与えて外に飛び出してしまいます。そのため、アルファ線やベータ線に比べると人体への影響は小さくなります。

中性子は、ガンマ線と同じように電荷を持たない粒子であり、質量が水素の原子核（陽子）よりほんの少しだけ重いため、衝突した相手の原子核をはじき飛ばしたり、核反応を起したりします。また、電荷をもたないため、ガンマ線と同じように透過力が強く、人体の外部から中性子を受けると皮膚、組織や器官に大きな影響を与えます。中性子は、ガンマ線と異なり、軽い原子核と衝突してそのエネルギーを失います。そのため、水やポリエチレン、コンクリートなどで透過する力を弱めることができます。

3. 放射能と放射線に対する単位

(a) 放射能の単位

放射能の単位は、「ベクレル(Bq)」とよばれる、1 秒間に崩壊する原子核の数で表されます。つまり、1 秒間に原子核が 1 個崩壊するときは、放射能は 1 ベクレルとなります。放射能は次の式で求められます。

$$\text{放射能 (Bq)} = \text{崩壊定数} \times \text{原子数}$$

ここで、原子数は、物質を構成する放射性同位体の量で決まります。崩壊定数は 1 秒間に原子核が崩壊する数で、放射性同位体によって決まり、第 1 章で説明した半減期とは次の関係があります。

$$\text{崩壊定数} = 0.693 \div \text{半減期 (秒単位)}$$

ベクレルで表される放射能の数は同じでも、放射性同位体の種類が異なると、放出される放射線の種類や本数、エネルギーの大きさは異なります。また、1 つの崩壊で 1 種類の放射線しか放出しないということは少なく、何種類かのエネルギーを持つ放射線を何本か出す場

合が多いのです。

(b) 放射線の単位

放射線の単位は、「線量」という単位が用いられます。与えたエネルギーやその影響によって、「線量」の前に、「照射」とか「吸収」や「実効」という言葉をつけて表します。

照射線量とは、放射線の量を、その放射線が空気を電離した量で表すもので、ガンマ線やX線に用いられます。1 kgの空気をどれだけ電離したかをその電荷量で示します。単位はクーロン (C) /Kgです。1 クーロン/Kgは、放射線の電離作用によって、空気1 Kg (約770リットル) 中に1 クーロンの電荷量が生ずることを意味します。なお、1秒間に1クーロンの電荷が流れるときの電流は1アンペア (A) です。

吸収線量とは、放射線が物体を透過したときに、その物体の単位質量当たり吸収したエネルギーを示します。単位はグレイ (Gy) で、イギリスの放射線測定で有名な学者の名前に由来しています。放射線が透過した物体の1Kgが1ジュール (J) のエネルギーを吸収する場合を1グレイといいます。1 Gy = 1 J/Kgで、この単位は放射線や物質が何であってもあてはまるもので、放射線が物質 (人体を含む) に与える影響を表す基本的な量となります。

実効線量とは、放射線が人体に与える影響を表す尺度で、単位はシーベルト (Sv) とよばれます。放射線が人体に入射した場合、吸収した線量 (吸収線量) が同じであっても、放射線の種類やエネルギーの大小や入射した組織や器官によって放射線に対する感受性が異なります。そのため、これらを補正した線量の単位として実効線量が定義されています。実効線量は放射線の種類や被曝のしかた (外部被曝か内部被曝) にかかわらず、人体への影響の程度を示します。たとえば、実効線量が同じ1 mSvであれば、人工の放射性同位体であるセシウム137で被曝した場合でも、自然界に存在するカリウム40で被曝した場合でも、人体への影響は同じです。

これらの単位の1000分の1はm (ミリ)、100万分の1は μ (マイクロ)、10億分の1はn (ナノ) を前につけて表します。たとえば、1 μ Svは100万分の1 Sv (シーベルト) を意味します。

4. 私たちの身のまわりの放射線

私たちの生活している環境には、自然放射線と人工放射線があります。自然放射線は地球が誕生したときに宇宙から集まって構成された元素のうち、岩石や土に含まれている放射性同位体からの放射線や、宇宙や太陽から日夜降りそそいでいる放射線 (宇宙線や太陽風) のように自然界に存在する放射線のことをいいます。

自然放射線の種類とその放射線の被曝はおおむね次の通りです。

- (1) 宇宙線やその核反応で生成される二次的な放射線 (外部被曝)
- (2) 宇宙線で生成される放射性物質を体内に摂取することによる放射線 (内部被曝)
- (3) 天然に存在する放射性物質からの放射線 (外部被曝)
- (4) 食物摂取により体内に摂取された天然の放射性物質 (主にカリウム40) から受ける放射線 (内部被曝)
- (5) 空気中に存在するラドンとその崩壊系列の放射性物質を体内に吸入することにより受ける放射線 (内部被曝)

このように、私たちは宇宙線と大地に存在する放射性物質による放射線を体の外から、また食べ物や呼吸することにより体内に取り込んだ放射性物質による放射線を体の中から、絶えず受けています。これらの自然放射線による実効線量は、世界で平均すると、図6に示すように、1年間で宇宙線から0.39 mSv、大地から0.48 mSv、食べ物から0.29 mSv、呼吸から1.26 mSv、合計約2.4 mSvを1年間に受けています。

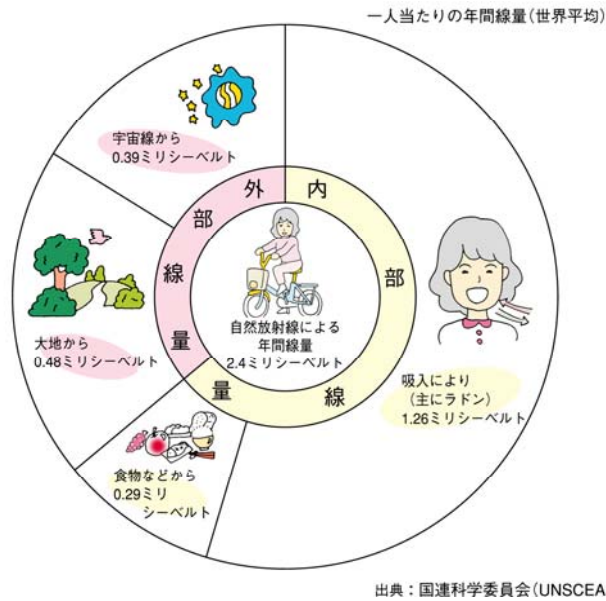


図6 自然放射線から受ける年間の実効線量¹⁾

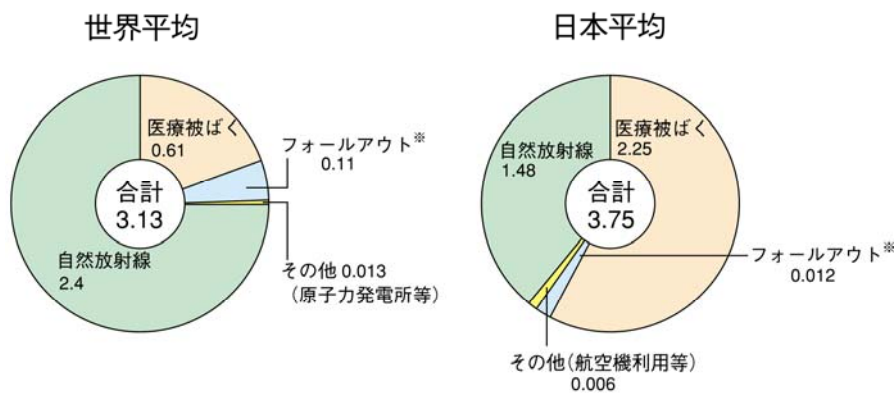
一方、人工的に発生させた放射線や、原子炉や加速器で人工的に作られた放射性同位体からの放射線を人工放射線といいます。人工放射線の代表的なものは、病気の診断に用いられるX線やCTスキャン装置です。人工放射線からの放射線の被曝はおおむね次の通りです。

- (1) 医療放射線 (X線やCTスキャン装置など)
- (2) 大気圏核実験による放射性降下物 (フォールアウト) からの放射線
- (3) 原子力の利用および放射性物質の利用にともなう放射線

これらの人工放射線はいずれも体の内外から受けることになります。

日常生活において1人あたり1年間に受ける実効線量の平均的な値を図7に示します。

(単位：ミリシーベルト)



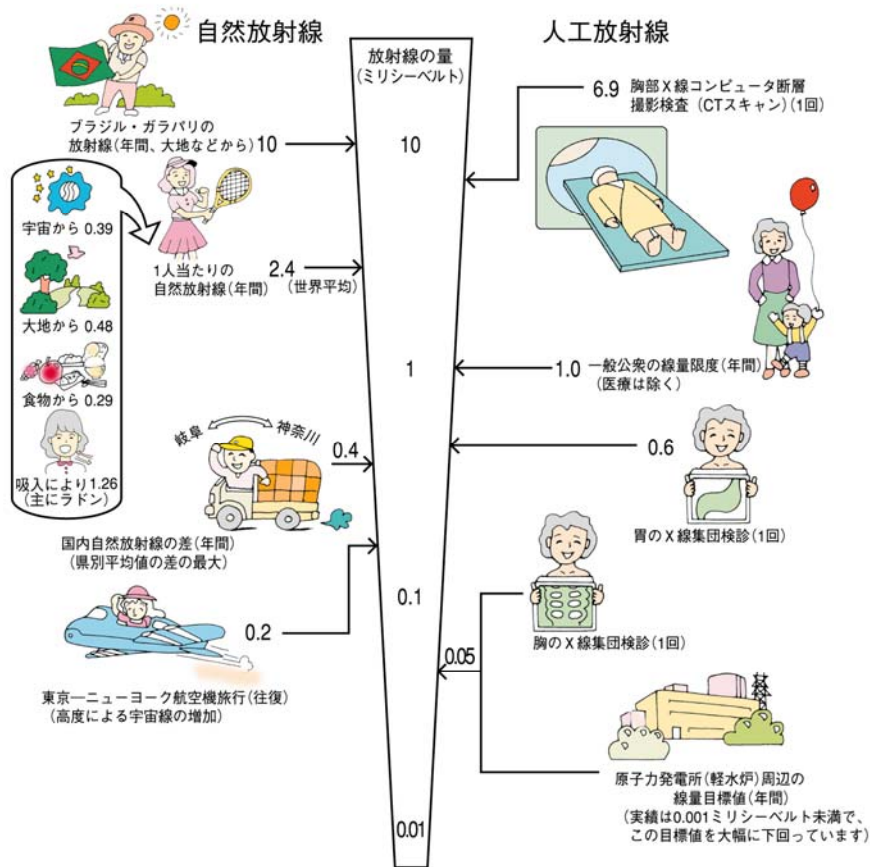
※フォールアウトとは、核実験による放射性降下物

出典：国連科学委員会(UNSCEAR)1992年報告書、旧科学技術庁「生活環境放射線」

図7 自然放射線および人工放射線による年間の実効線量¹⁾

この図より、世界平均では自然放射線が最も大きいのですが、日本平均では、世界平均より、自然放射線がやや少なく、医療放射線による被曝が大きいことがわかります。過去には大気圏における核実験が頻繁に行われていましたが、現在ではほとんど行われず、一部の国による地下核実験のみが行われているので、フォールアウトの影響は少なくなっています。

日本では、発展途上国と比べて病気の診断に X 線や CT スキャン装置を頻繁に用いることが影響していると思われます。しかしながら、合計線量では世界平均と大差ないと考えられます。図 8 に自然放射線および人工放射線による実効線量の大きさの比較を示します。



出典：資源エネルギー庁「原子力2003」他

図 8 自然放射線および人工放射線による実効線量の比較¹⁾

このように、私たちは自然や人工であるかにかかわらず、ある程度の放射線を浴びていることがわかります。放射線が体に当たった場合、細胞の遺伝子 (DNA) を切断したり、生体を構成する水に作用してフリーラジカル[‡]を生成し、そのフリーラジカルが DNA を破壊したり、細胞に損傷を与えることが考えられます。しかしながら、この影響は化学物質の摂取や呼吸により吸収された (放射性でない) 酸素が細胞に運ばれることによって、同じフリーラジカルが発生します。私たちの体には、DNA 損傷の影響を修復したりフリーラジカルの影響を低減するための修復機能が備わっています。太古の昔は、自然放射線は現在より強く、地球上の生物はその環境下でも生命を維持する機能を獲得してきたと考えられています。日常生活では、特に心配したり不安に思ったりすることはありません。

[‡] 原子核のまわりには電子がまわっています。電子の中には、いつもペアになりたがる変わった性格のもの (シングル電子とよびます) があります。約 100 種類ある原子の大部分はシングル電子をもち、水素は一つ、酸素は二つというようにその数もはじめから決まっています。原子はふつう、このシングル電子同士がペアを作ることにより結合しています。たとえば、水素がもつシングルの電子 1 個を、パートナーを求めている 1 本の腕と考えます。同じように酸素にこの腕が 2 本あると考えると、酸素の両手に水素が一つずつつながった時に、全部が落ち着いた関係になります。これが H₂O、つまり水の分子です。この H₂O からむりやり水素電子をひとつはぎとると、パートナーのいない手が 1 本残されます。これがフリーラジカルの一例です。つまりフリーラジカルを一言で言うと、「ペアになっていない電子を抱え、非常に反応しやすくなっている原子や分子」のことです。フリーラジカルの中には、電子のペアを作るために、他の分子から強引に電子を奪う過激分子もいて、その代表格が「活性酸素」です。

5. 放射線の影響を少なくするためには

いままでに、自然界には人工的なものと同様に放射線が存在していることがわかったと思います。身のまわりにも日常的に存在していて、特に不安に考える必要はないことを知りました。しかし、人体に有害な化学物質と同じように、不要なものは避けるのが賢明といえるでしょう。ここでは、放射線の影響を少なくするための3つの方法を説明します。

図9に放射線の影響を少なくするための3つの原則を示します。放射性物質の大きさが十分小さい場合には、放射線は点状の発生源（点線源といいます）から放出されると考えて差し支えありません。その場合は、放射線の強さは距離の二乗に反比例して弱くなります。線源が点でない場合（線とか面の場合）には、距離の二乗に反比例しませんが、距離を離すことによって、被曝線量は少なくなります。従って、第1の原則は、「線源から離れること」です。

第2の原則は、放射線を受ける時間を少なくすることです。同じ強さの放射線を浴びるときは、受ける線量は時間に比例します。従って、第2の原則は、「浴びる時間を減らすこと」です。

第3の原則は、放射線の強さを弱くしたり吸収する物質の後ろにいて、受ける放射線^{さへぎ}を遮ることです。このような物質を「しゃへい材」といいます。放射線の種類や強さによって、用いる「しゃへい材」の材質や厚さは異なってきます。

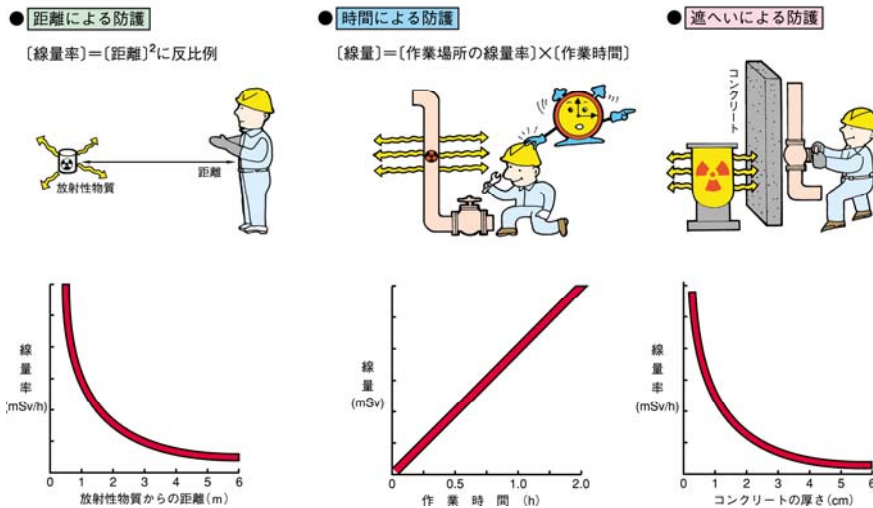


図9 放射線の影響を少なくするための3つの原則¹⁾

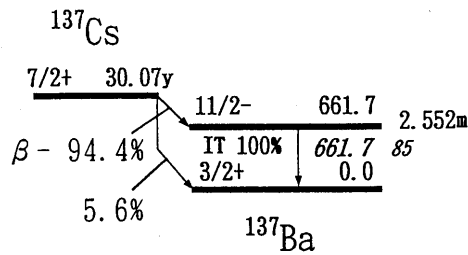
「はかるくん」実験キットでは、ごく弱い放射線源（セシウム 137）と簡易放射線測定器「はかるくん」を使って、これらの「距離の二乗に反比例」することや、鉛などの「しゃへい材」を使って「しゃへい」効果を実験によって実際に確かめることができるようになっていきます。

参考文献 1 「原子力・エネルギー」図面集 2003-2004 (財) 日本原子力文化振興財団
< <http://www.jaero.or.jp/> >

放射性同位体の崩壊形式

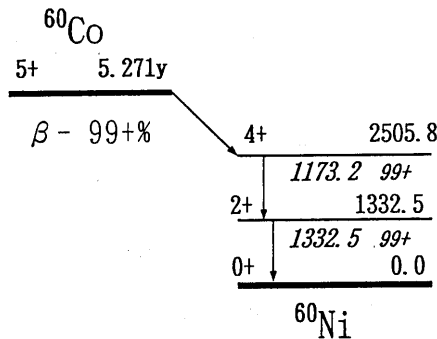
放射性同位体の崩壊には、いろいろな形式があります。それをわかりやすい図で表したものがああります。参考図 1 は、日本アイソトープ協会[§]が発行している「アイソトープ手帳」に載っているセシウム 137 の崩壊を表したものです。

この図の読み方は、セシウム 137 は、あるエネルギー準位（レベルという）から、半減期 30.07 y（年）で β^- 崩壊して、エネルギー的に安定なバリウム 137 という別の核種に変わりますが、そのうち 94.4% の確率で、エネルギー的に不安定な励起準位^{れいき}になります。不安定な励起準位^{れいき}にある原子核は（ある状態から別の状態に飛び移るように）安定な準位に移ります。その時に、661.7 キロ電子ボルト^{**} (keV) のエネルギーのガンマ線を放出することを示しています。不安定な励起準位^{れいき}から安定な準位に移る半減期は 2.552 m（分）です。安定な準位になると、バリウム 137 は放射能を持たない（放射線を出さない）物質となります。



参考図 1 セシウム 137 の崩壊形式

同様に、コバルト 60 の崩壊は参考図 2 のように表すことができます。



参考図 2 コバルト 60 の崩壊形式

この図から、コバルト 60 は半減期 5.271 y（年）で β^- 崩壊して、ニッケル 60 という別の核種に変わりますが、4+ という励起準位から 2+ という励起準位に変わるときに 1173.2 keV のエネルギーのガンマ線を放出し、さらに 2+ という励起準位から安定な準位に変わるときに 1332.5 keV のエネルギーのガンマ線を放出します。つまり、それ以上放射線を出さない安定なニッケル 60 になるまでに、異なったエネルギーのガンマ線を 2 本出すこととなります。

[§] 日本アイソトープ協会 < <http://www.jrias.or.jp/> >

^{**} 電子ボルト（英語では electron volt（エレクトロン・ボルト）： eV）は、電位差が 1 ボルトの間に電子が得るエネルギーの単位です。1 eV はおおよそ 1.602×10^{-19} ジュールに相当します。エネルギーと質量はアインシュタインの特殊相対性理論によると同じものなので、質量に換算すると 1.783×10^{-36} kg となります。