

第2章 さまざまな被ばく

私たちの周りの物質は様々な「元素」から作られています。元素は物質の最小の成分のことです。元素と原子はほぼ同じものを指しますが、物質の粒に着目するときは原子を使い、種類に着目するときは元素という語を用います。今では様々な元素が存在していますが、宇宙が生まれた直後は元素の種類はごく少数であったと考えられています。

私たちの住む宇宙は、138 億年ほど昔に、ビッグバン(大爆発)によって生まれたとされています。その後、宇宙は膨張し、冷えながら種々の物質を作り出しました。このなかで星や銀河、超銀河集団などが誕生しましたが、星ができる過程などで起きる元素同士が融合して、より重い元素になる「核融合反応」が起こり、新しい元素が生まれていきました。そのなかには放射性元素もたくさんありました。このようにしてできた放射性元素は、何千種類もあるといわれています。このいろいろな元素のガスやちりがもとになって、私たちの太陽系が 46 億年前に誕生したのです。

したがって、地球を構成している元素にも、もともと多くの種類の放射性元素がありました。これらはアルファ線、ベータ線、ガンマ線などを出しながら、次第に別の安定な元素に変わっていきました。つまり、地球には最初から放射性元素と放射線が存在していたのです。地球の年齢は約 46 億年ですが、現在でも半減期の長い放射性元素がたくさん残っており、放射線を出し続けています。また、このほか地球には宇宙からのさまざまな放射線が常に降りそそいでいます。

つまり、放射線は、生物誕生以前からずっと存在し続け、私たち生物は、誕生した当初から宇宙や大地からの放射線を受け続けながら生きてきたのです。今後その状況は変わることはなく、地球上の生物はすべて自然界にある放射線と共存していくことになります。

この章では、自然界にある放射線や医療や産業で使う放射線と人体の関係を見ていきましょう。

自然界にある放射線

◎大気圏外からやってくる放射線「宇宙線」

自然界には放射線を出すものがいろいろあって、私たちは知らず知らずのうちに、いつも放射線を受けています。

まず、宇宙からは宇宙線といわれる放射線が降りそそいでいます。宇宙線を放出している代表的なものは太陽です。しかし、太陽とは反対の方向からも宇宙線は降りそそいできます。宇宙のあらゆる方向から宇宙線が降ってくるのです。太

陽系の外の超新星からも宇宙線はやってきます。

地球の外から地球に降りそそぐ宇宙線を「一次宇宙線」と呼びます。この一次宇宙線が地球に入り、大気中の窒素、酸素などの原子と衝突して「二次宇宙線」を作り出します。私たちの受けている宇宙線の多くはこの二次宇宙線です。

一次宇宙線は高エネルギーの陽子が全体の 90%強を占めており、残りはアルファ線やベータ線、荷電粒子などです。一次宇宙線は大気中に存在する原子と相互作用して、中性子線やガンマ線などの二次宇宙線を作ります。また、トリチウムやベリリウム等の宇宙線起源の放射性物質も生成します。

高度の高いところにいくと宇宙線をさえぎる大気の層が薄くなるので、平地にいるよりも宇宙線を多く受けることになります。例えば、富士山の頂上に 1 年間いれば宇宙線による被ばくは 1 ミリシーベルトを上回るようになります。南米アンデス山脈には海拔 4,000 メートルという高地がありますが、そこに住む人も同様です。また、国際線の旅客機の巡航高度の 11km 前後では、線量率は地上でのおよそ 100 倍とされていますので、旅客機の乗務員や乗客は、宇宙線による被ばくが多くなります。例えば、東京からニューヨークへの片道飛行で約 0.1 ミリシーベルトを被ばくします。

高度だけでなく、太陽の活動によっても宇宙線は変化します。太陽活動が強い時には、太陽から出てくる粒子の数が増えるので、その影響で他の銀河等の太陽系の外から来る宇宙線が乱されて、地上や航空機高度の宇宙線の量は減少します。

国連科学委員会（UNSCEAR）の 2008 年報告書^{参考 1}によれば、地表で生活する人々が宇宙線により 1 年間に人が受ける線量は、世界の平均で 0.39 ミリシーベルトで、原子力安全研究協会の「生活環境放射線 第 3 版」^{参考 11}によると、日本の平均で 0.3 ミリシーベルトとなっています。

◎大地からの放射線

放射線は空から降り注ぐだけではありません。地面からも発せられているのです。ウランやトリウムが壊変してできた放射性物質やカリウム 40 などの天然に存在する放射性物質が土壌に含まれているからです。関西に住んでいる人は関東の人よりも多くの自然放射線を受けているといわれますが、事実その通りで、これは場所によって土壌に含まれている鉱物が少しずつ異なることなどが原因になっています。

例えば、大阪では 1 人 1 年間に大地から平均 0.40 ミリシーベルトの放射線を受けるのに対し、東京では 0.21 ミリシーベルトと少なくなっています。関西は、地表が放射性物質の比較的多い花崗岩を多く含んだ地層であり、東京の関東ローム層の方が、出てくる放射線が少ないのです。

一方、職業によっては放射線を受ける量が少なくなる人もいます。長い期間を海上で過ごす漁業関係者や船員などです。海水に含まれている放射性物質は、大地の土壌や岩石に含まれている放射性物質に比べてその量が格段に少ないからです。

大地からの1年間の線量は、国連科学委員会（UNSCEAR）の2008年報告書によれば世界の平均は約0.48ミリシーベルトで、原子力安全研究協会の「生活環境放射線 第3版」によれば日本の平均では約0.33ミリシーベルトとなっています。

このように大地からくる放射線の地域による違いは、日本国内だけでなく地球上のどこにでもみられる現象です。UNSCEARの2008年報告書では、自然放射線のレベルが高い地域として、中国、ブラジル、チェコ、イタリア、インドなどのデータが取りまとめられています。その中には、1時間当たりの屋外の吸収線量率が毎時0.3マイクログレイ（ $\mu\text{Gy}/\text{時}$ ）を超える場所が多くあり、高い放射線のレベルの場所について研究が行われています。イランのラムサールのように最大で100 $\mu\text{Gy}/\text{時}$ のようなところもあります。

このような自然放射線レベルが高い地域において、イラン、チェコ及びスペインでは実際に人が住んでいる場所での被ばく線量の分布も調査されています。イランのラムサールでは1年間10ミリシーベルト以上のところに20万人以上の人が住んでいます。

自然放射線が高い地域におけるがん発生率などの調査は、世界のいろいろな機関で行われていますが、このような地域でもがんの発生が多いということは確認されていません。



出典：原子力安全研究協会「新版生活環境放射線」（平成23年）のデータから作成
（「生活環境放射線 第3版」でも変更なし）

図2-1. 各都道府県における大地からの放射線（ミリシーベルト/年）

◎体内にも放射性物質

私たちの体の中には食物などを通じて吸収されたいろいろな放射性物質があり、それらからも放射線を受けています。そのような体の中にある放射性物質の主なものは、カリウム 40 や鉛 210、ポロニウム 210 などです。

これらの放射性物質による被ばく線量は、計算によって求めることができます。たとえば、体の中にどのくらいカリウムが含まれているかを調べると、そのなかに放射性のカリウム 40 がどのくらいの割合で含まれているかが分かっていますので、これによってその線量を計算することができるのです。このような計算をすると、カリウムによる被ばく線量は、平均的日本人で 1 年間に約 0.18 ミリシーベルト程度になります。

体内のカリウムやその他いろいろな放射性物質から受ける線量の合計は、世界平均で 1 年間に約 0.29 ミリシーベルト、日本の平均では約 0.99 ミリシーベルトです。日本人の値が高いのは、欧米諸国の人に比べて魚介類の摂取量が多く、魚介類に含まれるポロニウム 210 の寄与が大きくなっているからで、日本人特有の食生活を表しています。

●体内の放射性物質の量

(体重60 kilogramsの日本人の場合)

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

●食物中のカリウム40の放射性物質の量(日本)

(単位:ベクレル/キログラム)

		
干しこんぶ 2,000	干しいたけ 700	ポテトチップ 400
		
生わかめ 200	ほうれん草 200	魚 100
		
牛乳 50	食パン 30	米 30
		
		ビール 10

出典：原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」

図 2-2. 体内及び食物中の放射性物質

コラム⑤ 放射性同位体

私たちの身のまわりには多数の元素が存在しています。そのうち、陽子数は等しく中性子数が異なるものがあり、これらを互いに同位元素(アイソトープ)または同位体と呼びます。「同位」とは元素周期律表の同じ位置を占めるという意味です。ちなみに、同位体のように陽子数と中性子数の違いがある原子核の種類を区別するときは「核種」という言葉を用います。

同位元素のうち、放射線を放出する能力(放射能)を持つものを特に放射性同位元素(ラジオアイソトープ:RI)または放射性同位体と呼びます。

例えば、私たちの生活の中で、カリウムは野菜などに多く含まれる人体に必須の栄養素ですが、実は多くの同位体があることが知られています。天然のカリウムのほとんどはカリウム 39 ですが、0.0117%は放射性同位体のカリウム 40 です。カリウムは食物等に含まれているため、カリウム 40 も私たちの体の中にも入っています。このように、身の回りには多くの放射性同位体が存在しています。

◎空気中の放射性物質「ラドン」

気体状の天然放射性物質であるラドンは、鉱山労働者の肺がんの原因といわれています。ラドンは世界中の岩石や土壌にあり、容易に大気中に出ています。ラドンそのものは他の物質と化合しないので空気中に漂っていますが、時間が経つにつれて別の放射性物質に変化していきます。変化してできた放射性物質の大部分は、空気中のちりなどにくっつきます。空気中に浮かんでいるこれらが吸入されることで、気管や気管支、肺に放射性物質がくっついて、細胞にダメージを与え肺がんになる恐れがあるのです。

具体的な事例でみると、ドイツのシュネーベルグ鉱山で 16 世紀頃から肺の病気による死亡率が高いことが分かっていたことが、1900 年にドイツの物理学者フリードリッヒ・エルンスト・ドルンによってラドンが発見され、鉱山の肺の病気の原因はラドンではないかと考えられて調査が行われてきました。1950 年代になって、ラドンの被ばくは、希ガスであるラドン自体ではなく、ラドンが壊変してできた放射性物質が呼吸器官に沈着することが原因だと分かりました。

コンクリートの家などは密封性が高いため、室内の空気にラドンガスが多く含まれていることが確認されています。色も匂いもないので、家の中の空気にも含まれていますが、それと気づきません。また、ラドンは地中や建材などに含まれているラジウムの原子が変化して出てくるため、鉱泉水などにも含まれています。

UNSCEAR 報告書^{参考 3, 4}によると、屋内のラドン濃度の世界の平均値は 1 立方メートル当たり 46 ベクレル (Bq/m³) で、屋外の平均値は 10 Bq/m³ です。各国

の屋内ラドン濃度の平均値は、図 2-3 に示すとおりです。欧州、北米及び中国では、ラドン濃度が比較的高いところについて、住居内のラドンのリスクを推定するための健康影響の調査が行われています。国によっては濃度に非常にバラつきがあり、注意すべき高い濃度の場所への出入りを制限している国もあります。

日本国内のラドン濃度についても、これまでに種々の調査が行われています。住居のラドン濃度については、1980 年代から 2000 年代にかけて、放射線医学総合研究所（約 7,000 家屋）^{参考 5}、日本分析センター（約 900 家屋）^{参考 6、7、8}、及び国立保健医療科学院等（約 3,900 家屋）^{参考 9}による全国調査が行われています。放射線医学総合研究所の調査では平均値で 20.8 Bq/m³、日本分析センターの調査では平均値で 15.5 Bq/m³、国立保健医療科学院等による調査では平均値で 14.3 Bq/m³でした。また、日本分析センターによる調査では、表 2-1 に示す通り、住居だけでなく屋外の調査も行われており、平均値は 6.1 Bq/m³ で住居よりも低い値となっています。これらの濃度は諸外国と較べて比較的低いと言えます。

こうしたラドンやそれが変化してできる放射性物質から、一般家庭でどのくらいの放射線を受けるのか気になるところです。木造で開放的な家屋構造が多い日本ではその量は低く、平均して 1 年間に 0.47 ミリシーベルトと算定されています。一方、コンクリートや石造りで、しかも密閉度の高い北欧では線量は高く、スウェーデンでは平均して日本の約 4 倍と見積もられています。世界の平均では 1 年間に 1.26 ミリシーベルトです。これらは、各国のラドン濃度の調査結果を反映したものとなっています。

なお、ラドンによる被ばくの評価方法については国際放射線防護委員会^{参考 10}や国連科学委員会で今も議論が行われており、今後見直しが行われることもあり得ます。



図 2-3. 世界各国の屋内ラドン濃度 (Bq/m³)

表 2-1. 日本国内のラドン濃度レベル

調査場所	ラドン濃度 (Bq/m³) (平均値±標準偏差)
屋外	6.1±1.9
住居	15.5±13.5
作業場等	
オフィス	22.6±17.0
工場	10.1±8.3
学校	28.4±24.5
病院	19.8±24.4



図 2-4. 屋外ラドン濃度の分布 (Bq/m³)

医療に伴う患者の被ばく

例えば歯医者へ行って、「レントゲン写真をとみましょう」と言われたときに、嫌だと拒否する人はほとんどいません。なぜなら、歯の治療をするためにはレン

トゲン写真が必要だということを知っているからです。風邪をこじらせて医者へ行ったときに、胸のレントゲン写真をとられることもあります。また、このような診断時だけでなく、がんの治療にも放射線は使われます。

医療に伴う患者の被ばくは、大きく分けると放射線装置を用いた診断に伴う被ばくと治療に伴う被ばくがあります。放射線診断は、画像診断が主であり、X線検査、X線CT検査（X-ray Transmission Computed Tomography：X線透過型コンピュータ断層撮影）、核医学検査などのように、病気を発見したり、病気の状態を知り治療などに必要な情報を得たりするために行われます。また、放射線治療は、放射線のがんの病巣に照射し、がん細胞を死滅させるために行われます。

放射線診断に伴う機器のうち、特に近年はX線CT装置の数が増加する傾向にあります。経済協力開発機構（OECD）の統計^{参考 12}によると各国における人口100万人当たりのX線CT装置の数は図2-5のとおりです。日本のX線CT装置の数（2017年のデータ）は他国よりも多い状況にあり、およそ人口1万人当たり1台強のX線CT装置があります。

X線CT検査による各国の平均実効線量は図2-6のとおりです。日本においても、1回のCT検査で数ミリシーベルト～10数ミリシーベルトの放射線を受けています。診断に伴う日本人の被ばくは、医療技術の進展とともに年々増加しており、1人当たり年間平均で2.6ミリシーベルト^{参考 11}とされています。世界平均の0.6（範囲：0～数十）ミリシーベルトと比較して高い状況にあります。医療診断ごとの被ばくでも図2-7のとおり、X線診断とX線CT検査によるものが主要なものとなっています。

医療分野における放射線の利用は、世界中で際立って主要な人工放射線源となっています。世界の人口に対する被ばくとして見ると、自然放射線源に次ぐ2番目に大きな要因です。医療に関連する被ばくのほとんどは、医療に多くの資源を投入できて、放射線機器が広く普及している先進国でのものです。放射線診断を行うのは、放射線を被ばくすることで障害が発生する可能性よりも、診断がついたり、病気のないことが分かる方が患者の健康上の利益が十分に大きいからです。当然ながら、障害が発生しないよう、あるいは最小のものとなるように診断参考レベルなどを利用して適切に実施される必要があります。日本でも医療被ばく研究情報ネットワーク（J-RIME）が、2015年に「最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定」、2020年に改訂版となる「日本の診断参考レベル（2020年版）」として、日本のデータをもとに独自に設定した値を公表しています。

一方、放射線治療については、以前はコバルト60などの放射性核種からのガンマ線を用いた治療が行われていましたが、近年は電氣的に発生させたX線や電子線を利用した治療が行われるようになっていきます。この他にも、様々な照射設備が開発されています。例えば、正常組織への影響を抑えることが可能な、陽

子線治療や、炭素イオンを用いた重粒子線治療（合わせて粒子線治療と呼びます）も用いられるようになってきました。日本の治療施設は人口 100 万人当たり 5.7 施設、治療装置数は人口 100 万人当たり、放射性核種を用いたものが 0.33 台、放射線治療装置のリニアック（直線加速器）が 5.81 台、小線源治療装置が 2.7 台とされています。

放射線治療において患者に照射される線量は代表的な放射線治療方法で 12 グレイ～60 グレイ、小児では 10 グレイ～40 グレイ程度となっています。

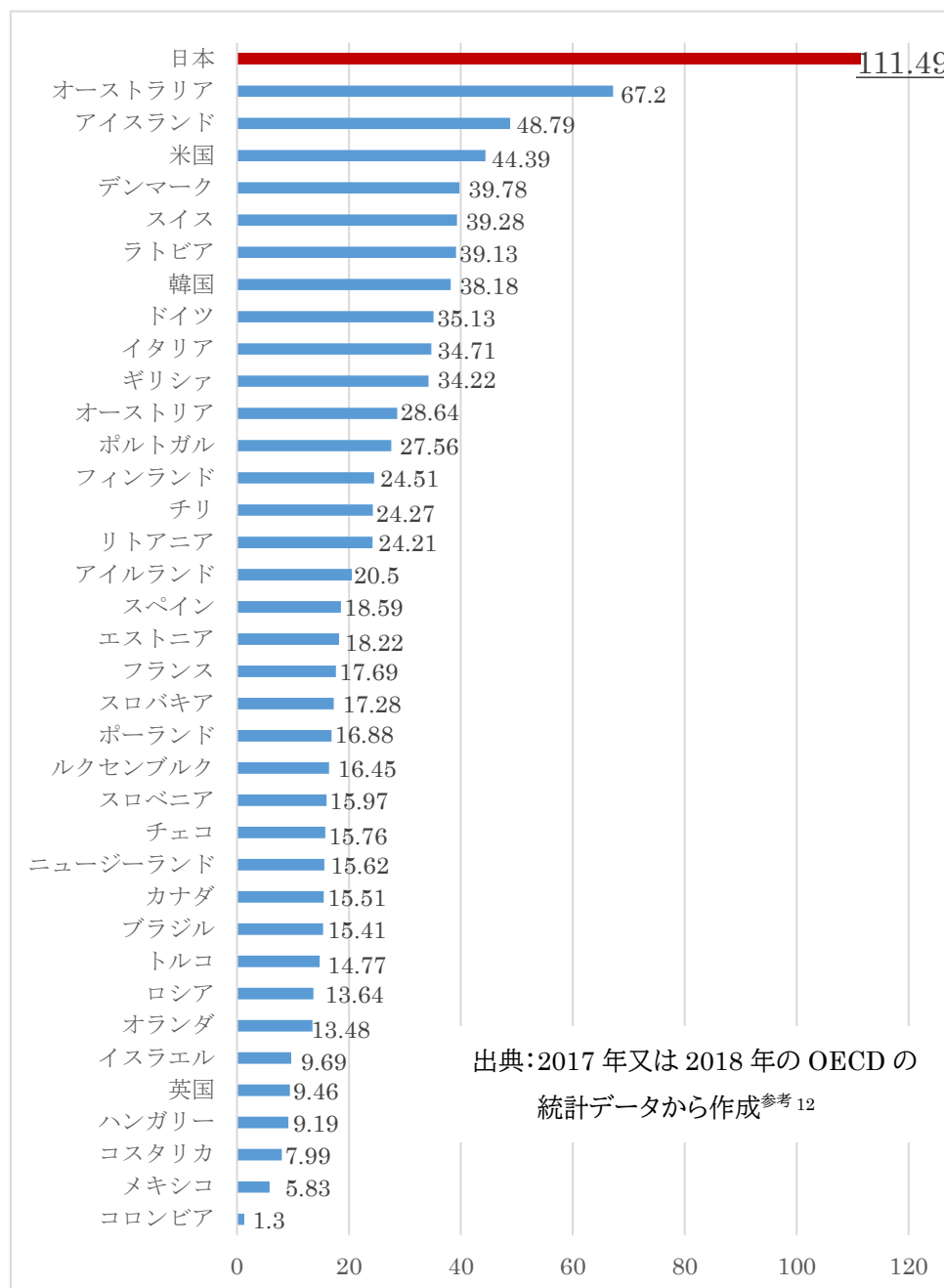


図 2-5. OECD 加盟国における人口 100 万人当たりの CT 装置数

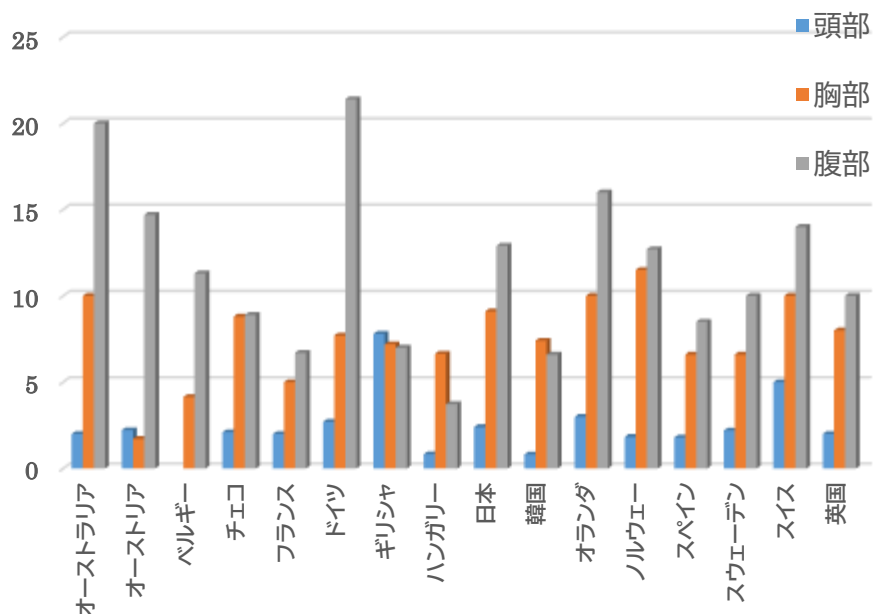


図 2-6. CT 検査による平均実効線量（ミリシーベルト/回）

出典：UNSCEAR 2008 報告書のデータから作成^{参考 1}

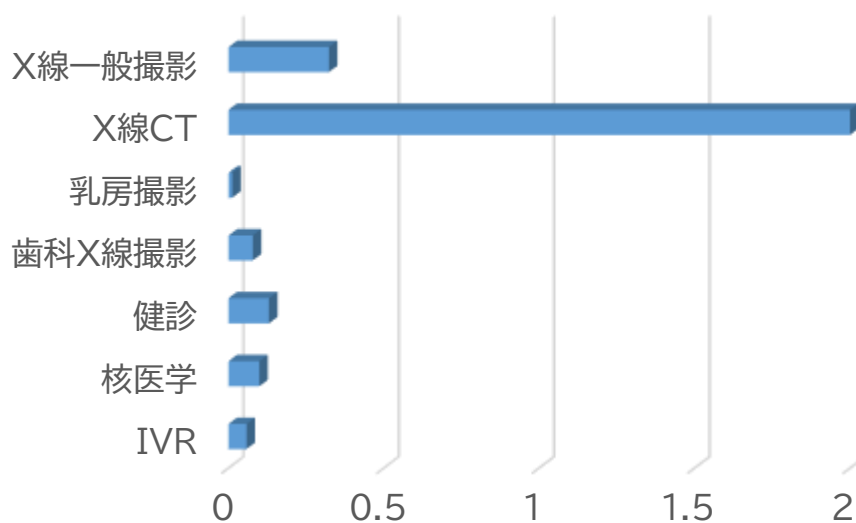


図 2-7. 放射線診断による国民一人当たりの年間実効線量（ミリシーベルト/年）

出典：「生活環境放射線 第3版」のデータから作成^{参考 11}

産業及びその他の利用による被ばく

放射線は幅広い分野の産業に利用されています。

以下にその例を挙げてみます^{参考 13}。

- ・ 医療器具及び医薬品の殺菌
- ・ 食品の保存や害虫駆除に用いられる工業用の放射線照射
- ・ 溶接された金属の接合部を検査するための非破壊検査（放射線透過試験）
- ・ 鉱石・石油・ガス探査において地質の特徴を測定するための使用
- ・ 物質の厚み、湿度、密度のレベルを計測する機器に用いられる線源
- ・ 半導体製造
- ・ タイヤなどの材質強化
- ・ 研究に用いられる密封放射線源

ほかにも、自然起源放射性物質（NORM：Naturally Occurring Radioactive Materials）（一般的には、ラジウムとトリウムの同位体）の濃度が高められた工業製品、副産物、廃棄物によって、公衆に被ばくをもたらす恐れのあるいくつかの種類の施設が世界各地にあります。このような施設の中で最も重要なものは、採鉱などのための施設です。

鉱石の処理に関連する作業も、NORM のレベルを高める原因になる可能性があります。これらの活動には、金属の精錬、リン酸塩の生産、石炭採鉱と石炭火力発電、石油とガスの掘削、レアアース及び酸化チタン産業、ジルコニウム及びセラミック産業及び NORM の利用があります。

また、日常で使用するために購入される数多くの製品には、その化学的性質や放射能特性を利用するために、少量の放射性物質が付加されているものがあります。代表的な例として、20 世紀初めに夜光塗料が発明された当初は、放射性のラジウムが使われていました。1960 年代ごろからは放射線量が少ないプロメチウムやトリチウムが使われるようになりましたが、数十年前からは、安全性や、廃棄された後の環境汚染への配慮から、放射性物質を含まない塗料に切り替わってきています。また、煙感知器の中には、放射性物質であるアメリシウム 241 の小さな金属片を使っているものがありました。しかし、日本では平成 17 年の法律改正で、それまでは放射性同位元素の規制の対象ではなかったものが、規制の対象となったことから、放射性物質を使用したタイプの煙感知器から光電式のタイプが主流となっています。

身の回りの放射線から受ける線量の合計は？

このように、放射線は自然界に存在するだけでなく、医療や産業などの分野でも広く利用されています。地球上に生息する生物はすべて、いつも自然界から放射線を受けているのです。また、私たちの身のまわりには今も、過去のたび重な

る核実験で地球規模に拡散した人工的な放射性物質が、ごくわずかながら存在しています。

宇宙線や大地などからくる放射線はいってみれば体の外からやってくるわけで、これを受けることを「外部被ばく」といいます。これに対して食べ物や空気といっしょに放射性物質を飲み込んだり吸い込んだりして放射性物質が体内に取りこまれ、それにより放射線を受けることを「内部被ばく」といいます。

すでに述べたように、UNSCEAR の 2008 年報告書における世界の平均では、1人当たり1年間に外部被ばくによって 0.87 ミリシーベルト、内部被ばくによって 1.55 ミリシーベルト、合計 2.4 ミリシーベルトの自然放射線を受けていると報告されています。これに対して、「生活環境放射線 第3版」においては日本人一人当たりの年間被ばく線量の平均は、外部被ばくによって約 0.63 ミリシーベルト、内部被ばくによって約 1.46 ミリシーベルト、合計 2.1 ミリシーベルトと推定されています。

さらに、医療における診断に伴う日本人の被ばくは1人当たり年間平均で 2.6 ミリシーベルトとされており、世界平均の 0.6（範囲：0～数十）ミリシーベルトと比較して高い状況にあることもすでに説明しました。

これらを合計したものが図 2-8 です。私たちは普段の生活の中であまり意識せずにこのような被ばくをしています。実際に人体への影響が明らかになるのはもっと高い被ばくを受けた場合ですが、これらについては次の章以降で見いきましょう。

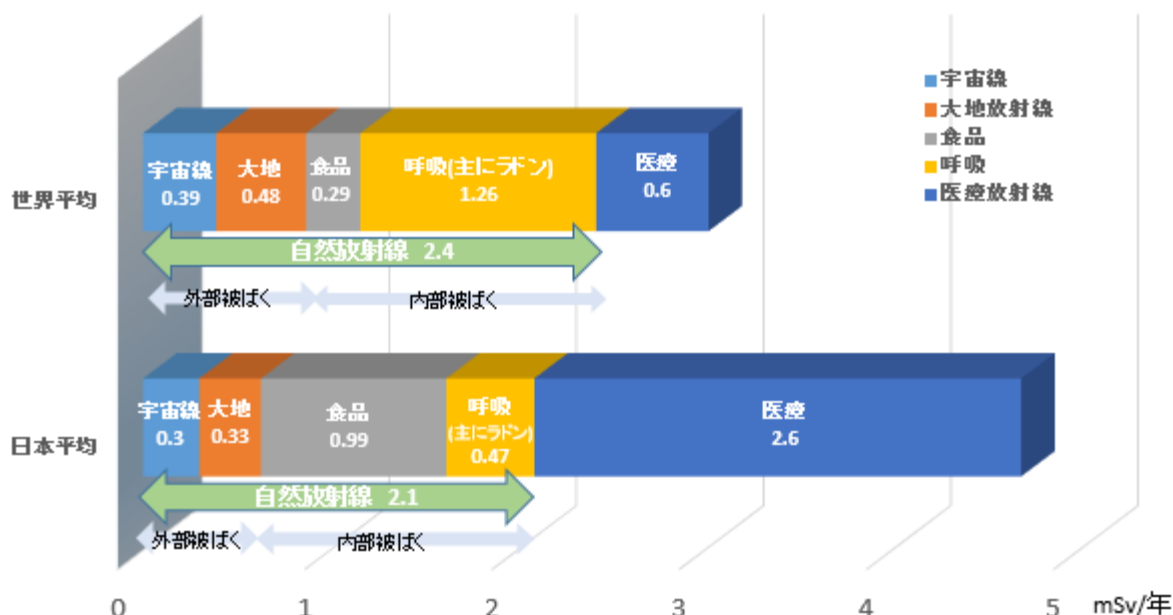


図 2-8. 身の回りの放射線から受ける 1 年間の線量の合計

コラム⑥ 広く利用されている放射線

私たちは放射線や放射線を出す物質を人工的に作り、様々な場面で便利に活用しています。

人工放射線として早くから利用されているのは X 線で、とくに病気の診断などのために日常的に使われています。X 線による診断では、胸部、食道、胃、十二指腸、腹部、骨、歯などの撮影が行われます。単純撮影や造影剤を用いる撮影、コンピュータ断層診断 (CT) の画像はフィルムに記録して観察していましたが、最近はデジタルに記録し、画像表示装置上で診断することが広く普及しています。

診断には放射性物質もよく使われます。例えば、骨に集まる化合物にテクネチウム 99m のような放射性同位元素をつけた放射性医薬品を注射した後、外部からガンマ線を測定して骨シンチグラムと呼ばれる画像を作成して骨の異常を診断できます。また、プラスの電荷をもつ電子（陽電子：ポジトロン）を放出する短半減期の放射性核種、例えばフッ素 18 を利用して解像度の良い断層像を撮影する PET (Positron Emission Tomography: 陽電子放射型断層撮影) も普及しています。フッ素 18 デオキシグルコース(FDG)PET と CT を組み合わせた全身 PET/CT によるがんの診断の有用性は広く認められています。

人工放射線は、工業や農業などの分野でも広く利用されています。工業利用では、放射性物質を線源として利用する非破壊検査などがあります。古くなった金属材料やその溶接部などに放射線をあて、透過した放射線によって写真フィルムを感光させて、内部にある傷を検出したりすることをラジオグラフィーといい、X線やガンマ線が使われます。農業分野では、少量の放射性物質を肥料の中に入れて植物に取り込ませ、肥料の植物への分布を調べたり、植物に放射線をあてて突然変異を起こさせ、品種改良を行ったりしています。じゃがいもに放射線をあてて発芽力をなくし、保存期間を長くするというのもよく知られた利用法です。



参考資料（第2章）

- 参考 1. 原子放射線の影響に関する国連科学委員会、「放射線の線源と影響」、UNSCEAR 2008 年報告書
- 参考 2. 公益財団法人原子力安全研究協会、「新版 生活環境放射線（国民線量の算定）」、平成 23 年 12 月
- 参考 3. 原子放射線の影響に関する国連科学委員会、「放射線の線源と影響」、UNSCEAR 2000 年報告書
- 参考 4. 原子放射線の影響に関する国連科学委員会、「放射線の影響」、UNSCEAR 2006 年報告書
- 参考 5. 藤元憲三他、屋内ラドン濃度全国調査、保健物理 32(1), (1997)
- 参考 6. Sanada, et al., Measurement of nationwide indoor Rn concentration in Japan, Journal of Environmental Radioactivity, 45(1999)
- 参考 7. Oikawa, et al., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan, Journal of Environmental Radioactivity, 65(2003)
- 参考 8. Oikawa, et al., A survey of indoor workplace radon concentration in Japan, Journal of Environmental Radioactivity, 87(2006)
- 参考 9. Gen Suzuki 他、A Nation-Wide Survey on Indoor Radon from 2007 to 2010 in Japan, Journal of Radiation Research, 51 (2010)
- 参考 10. ICRP 2014, Radiological Protection against Radon Exposure, Publication 126
- 参考 11. 公益財団法人原子力安全研究協会、「生活環境放射線（国民線量の算定）第3版」、令和2年11月
- 参考 12. 経済協力開発機構（OECD）の統計データ、
(<https://data.oecd.org/healthqt/computed-tomography-ct-scanners.htm>)
- 参考 13. 国連環境計画「放射線 影響と線源」2017 年 11 月