

放射線の豆知識

暮らしの中の放射線



大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構
放射線科学センター

放射線の豆知識

暮らしの中の放射線

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構
放射線科学センター

はじめに	1	放射線の利用	58
極微の世界	2	放射線診断	60
原子と分子	6	放射線育種	61
原子核と軌道電子	7	不妊雄技術	62
陽子と中性子	9	放射線で厚さをはかる	63
原子番号と質量数	11	ラジアルタイヤと放射線	64
安定同位元素と放射性同位元素	12	環境を守る放射線利用	65
放射能	13	芸術と放射線	66
放射性壊変	15	おわりに	67
ベータ壊変	16	参考文献	68
アルファ壊変	17		
ガンマ線放射	18		
放射性壊変で生まれる娘核種	19		
半減期	22		
電離と励起	24		
ベータ線の作用	26		
アルファ線の作用	28		
ガンマ線の作用	29		
放射線の透過能力	30		
放射線の種類	32		
放射線の発生源	34		
放射線の検出	36		
日常生活での放射線被ばく	39		
自然放射線の種類	40		
自然放射線の量	41		
室内のラドン濃度	45		
放射性降下物	46		
医療放射線	48		
人体に対する放射線の影響	49		
急性効果	50		
晩発効果	52		
遺伝的影響	53		
胎児への影響	54		
被ばく線量と影響の現れ方	55		
放射線防護の考え方	56		



豆知識

エネルギー	8
物質の根元ーアトムからクオークへー	10
放射能標識	13
電子と陽電子	16
ウラン一族の家系図 親？娘？孫？	17
電磁波	21
ベータ線のエネルギーの行方？	26
放射線・放射能の発見	31
核分裂・核融合	35
男性に多いカリウム -40	42
アルファ線の体内被ばく	49
タバコと放射線	52
遺伝病と放射線	53
リスク	57

単位の話

(1) 国際単位系	4
(2) 放射能	14
(3) エネルギー	20
(4) 線量（照射線量、吸収線量、実効線量）	38



放射線の
世界へようこそ

はじめに

「放射線」とか「放射能」という言葉をよく耳にしますが、これらの言葉の中身はどのくらい正しく知られているのでしょうか？

私たちは、雨上がりの空に浮かぶ七色の虹を目で見ることができます。これは、太陽の光が大気中の水滴で屈折してつくられたものです。また、炬燵（こたつ）や電気ストーブから放射される赤外線を皮膚で暖かく感じます。しかし、放射線は、特別な場合を除いて直接目で見ることや耳で聞くこともできません。皮膚で感じることもなく、味や臭いもないのです。



ところが、人間は大昔から「自然放射線」と呼ばれるものに取りまかれて生きてきました。例えば、宇宙からは常に放射線が地球に降り注いでいます。また、地球上には「放射性同位元素」という放射線を放出する物質が天然に数多く存在しています。大地や大気中に含まれる放射性同位元素は、食物や呼吸を通じて私たち人間の身体の中にも取り込まれます。このような人間と放射線との密接な関係にもかかわらず、人間は“放射線を見る目”を持っていなかったためにその存在について最近まで気がつきませんでした。



キュリー夫人

W.C.レントゲン



レントゲンやベクレル、キュリー夫妻など、優れた科学者がこの放射線や放射性同位元素を発見したのは1890年代です。そして、この100年余りの間に放射線や放射性同位元素に関する研究は飛躍的に進みました。

おそらく、みなさんのほとんどがエックス線レントゲン撮影を経験したことがあるでしょう。エックス線というのは放射線の一種ですが、現在ではこうした医学の分野だけでなく、工業や農林水産業をはじめ多くの分野で、さまざまに放射線が利用され私たちの暮らしに役立っています。

この冊子では、放射線や放射能は難しくてよくわからないという人のために、その基礎的な知識や私たち人間との関わりなどをやさしく紹介します。

極微の世界

放射線のことを理解するためには、物質が何から成り立っているかを知っておく必要があります。まず、次のページの表を手がかりに人間の目では見えない極微の世界を簡単に眺めてみましょう。代表的なものの大きさを比較しやすいように、大きさが10倍違うところに点線を引いてあります。

私たちの体は何十兆個もの細胞から構成されていますが、これは顕微鏡を使ってやっと見えるくらい小さいものです。その細胞も実は分子と呼ばれる非常に多くの目に見えない“小さな粒子”から成り立っています。脊椎動物の体の70～80%を占めるといわれる水の分子は、百億分の数 $m (= 10^{-10} \text{m} \cdot ^1)$ という微少なものです。

そして、この分子は原子という“基本単位”となる粒子が組み合わさってできています。例えば、水分子は2個の水素原子と1個の酸素原子からできています。こうした原子はさらに構造を持ち、原子の中心には中性子と陽子からなる原子核があり、そのまわりをいくつかの電子が運動しています。

原子核の周囲を電子が運動する範囲を原子の大きさと考えると、水素原子の大きさは 10^{-10}m 程度です。水素の原子核は、陽子1個でできていますが、その大きさは 10^{-15}m 程度です。後楽園にある野球場、東京ドームは直径が約201mありますが、銅の原子を東京ドームの大きさに拡大すると、原子核はだいたい東京ドームの中央に置いたパチンコ玉くらいの大きさです。



*1 一億とか百万分の一といった大きな数字や小さな数字を表わすために10の右肩に0の数を添える表記法があります。例えば、

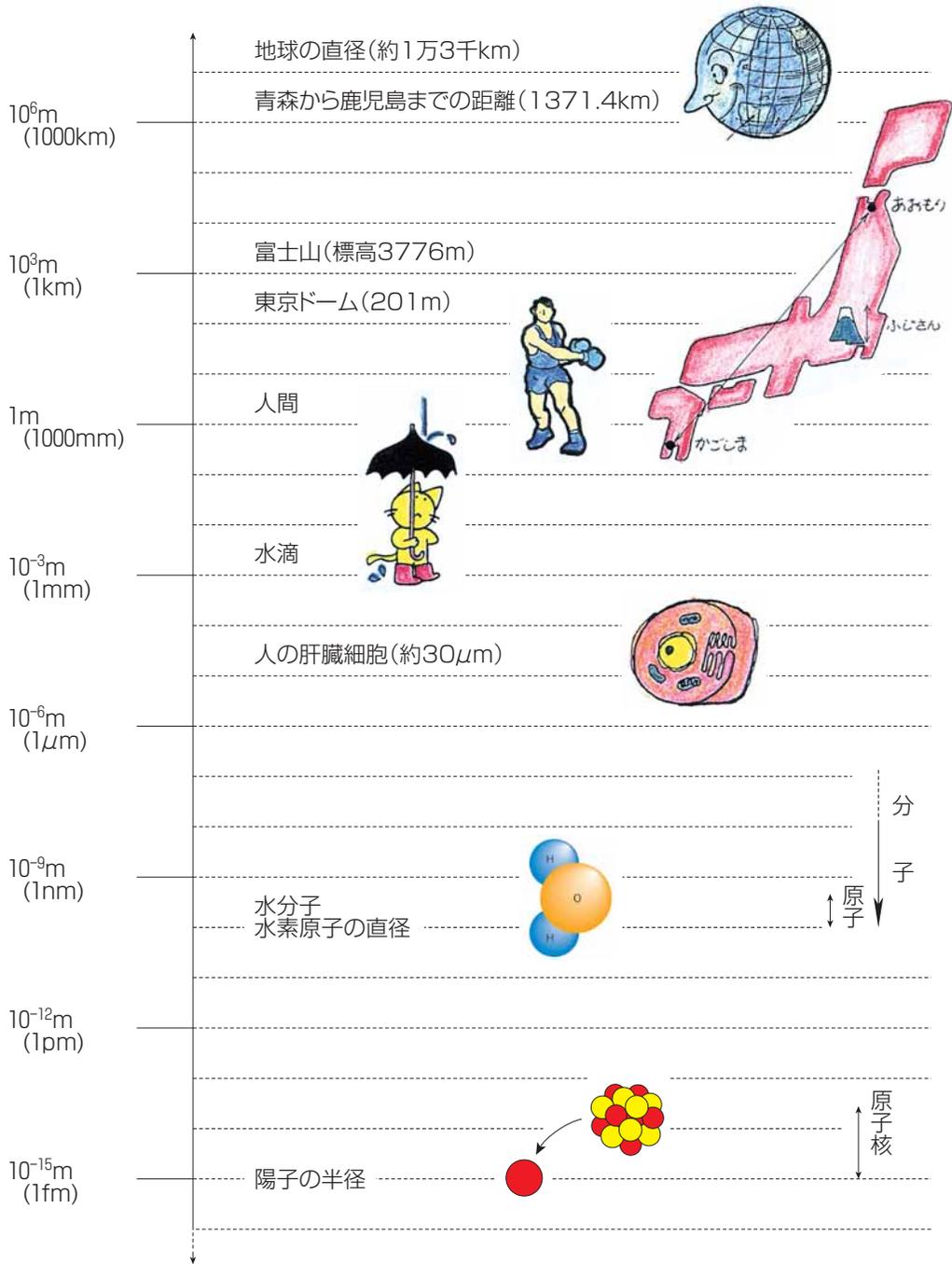
$$\text{一億} = 10000\ 0000 = 10^8, \text{ 百万分の一} = 1 / 100\ 0000 = 10^{-6}$$

また、国際単位系(4ページ参照)では、単位に接頭語(5ページの表参照)を使います。例えば、

$$10000\ \text{m (メートル)} = 10\ \text{km (キロメートル)},$$

と表し、k(キロ)は $1000 = 10^3$ を表す接頭語です。

極微の世界



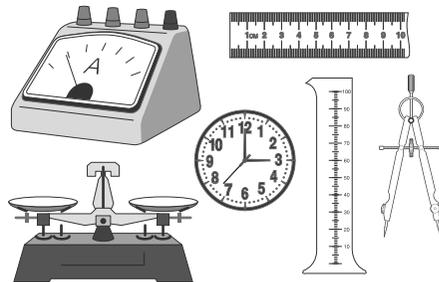
単位の話 (1) 国際単位系

ものの大きさを測る時は単位が使われます。

歴史的にみると、どんな量を基本単位として選ぶかは地域や職域によって大きく異なってきました。例えば、日本では場所や建物などの大きさをいうときには尺貫法が使われていました。また、イギリスやアメリカではヤードポンド法が一般的に使われています。国際的な統一単位の基礎となったメートル法も、初期の頃はフランスにおける地域的単位にしか過ぎませんでした。

メートル法が国際的な地位を得たのは1875年のメートル条約が締結された時からです。しかし時代とともに多数の分派^{*1}が発生し互いに換算することさえ困難な状況になってきました。そこでこれらの分派を排除し、もう一度統一をはかろうとして国際度量衡総会が定めたのが次ページの図に示した「国際単位系」(略称SI単位系)です。

SI単位系は、7種類の**基本単位**、2種類の**補助単位**、そして基本単位と補助単位の組み合わせで表される**組み立て単位**の総称です。また、単位にかけあわせる10の倍数を次のページの表にあるような**接頭語**で表します。



また、いくつかの実用上重要な単位(併用単位)や、特殊な分野で特に重要な単位(暫定単位)が、SI単位系と一緒に使用する単位として決められています。

*1 CGS単位系、MKS単位系、MKSA単位系、重力単位系など。

国際単位系及び併用される単位



SI単位系の接頭語

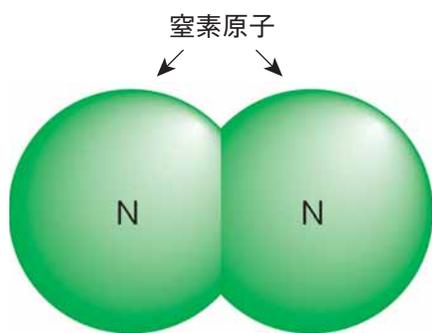
倍数	接頭語の名称	記号	倍数	接頭語の名称	記号
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻¹	デシ	d
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10	デカ	da	10 ⁻¹⁸	アト	a

原子と分子

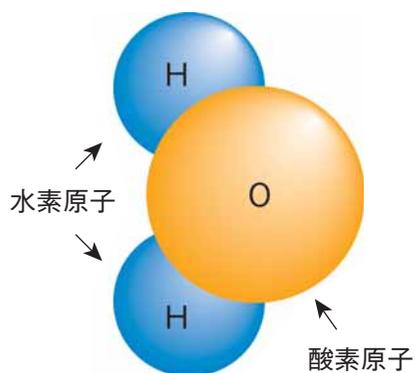
高性能の電子顕微鏡などを使うと**分子や原子**をひとつひとつ“見る”ことができます。これらの測定器で観察すると、**物質はすべて分子や原子が無数に集合したもの**だということがわかります。

普段なにげなく呼吸している空気も酸素分子と窒素分子の集まりです。空気中に最も多く存在する窒素分子は左下の絵のように2個の同じ種類の粒子がつながった構造をしています。それぞれの粒子を窒素原子と言います。酸素分子も2個の酸素原子からできています。水分子はどうでしょう。こちらは、右下の図のように2個の水素原子で1個の酸素原子をはさんだ形をしています。

このように、**分子はいろいろな原子の組み合わせ**で成り立っています。ただ1個の原子のみで構成される分子もあれば、遺伝をつかさどる分子として知られるDNA（デオキシリボ核酸）のように数十万個以上の原子が鎖のようにつながったものもあります。



窒素分子



水分子



物質は原子や分子からできているのか!!

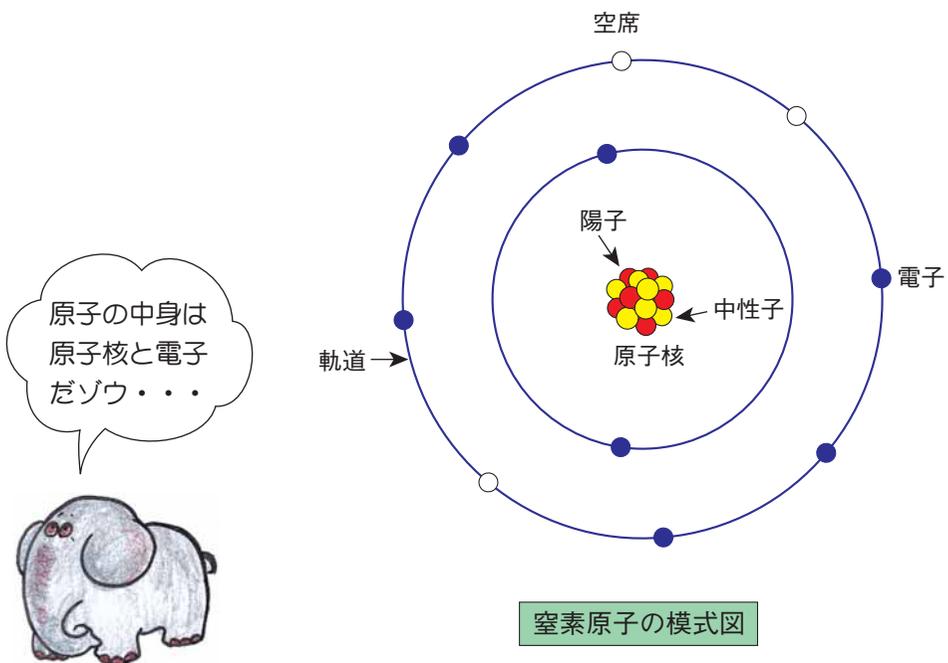
原子核と軌道電子

今度は原子の構造を見てみましょう。下の図は窒素原子の構造をわかりやすく表わしたものです。

中心の粒子は**原子核**と呼ばれ、その周囲を**電子**が運動しています。**原子核はプラスの電気**を、**電子はマイナスの電気**を持ち、お互いに電気的な力で引き合っています。

この電気的な引力のために、電子は勢い良く運動しているにもかかわらず、勝手にどこかへ行ってしまうことはできません。ちょうど、地球や火星などの惑星が太陽のまわりを重力で引っ張られながら軌道を描いて回転しているのに似ています。このように、**原子核のまわりに束縛されている電子を軌道電子**といいます。

軌道電子の運動する軌道は数多くあります。軌道の大きさや形、そして、その軌道上の軌道電子が持つエネルギーは、原子の種類ごとに決まっています。通常、軌道電子は原子核に近い軌道上を運動し、外側の残りの軌道は空席になっています



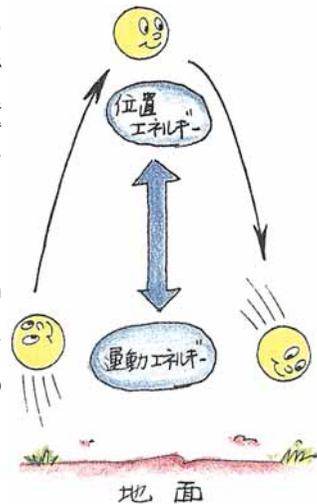
豆知識 エネルギー

あなたは、エネルギーという言葉から何を連想しますか。原子力エネルギー、熱エネルギー、電気エネルギーなどは日常生活でも時々耳にします。ここでは、「運動エネルギー」と「位置エネルギー」を紹介しましょう。

運動エネルギーは、運動によって発生します。ボールを空に向かって投げあげた時このボールの速さが大きいほど運動エネルギーは大きく、同じ速さなら重いボールほど運動エネルギーは大きくなります。

位置エネルギーは、重力などの“力”が働いている場所で生じます。ボールは地球の重力で常に引っ張られているわけですが、地球から遠ざかるほどボールの位置エネルギーは大きくなります。

投げあげたボールは、空高く飛んで行き空中のある地点で止まり、また落ちてきます。ボールの運動エネルギーが位置エネルギーに変わり、再び運動エネルギーに戻ったのです。このように、エネルギーはその姿を変化させるだけで決して消滅しません。



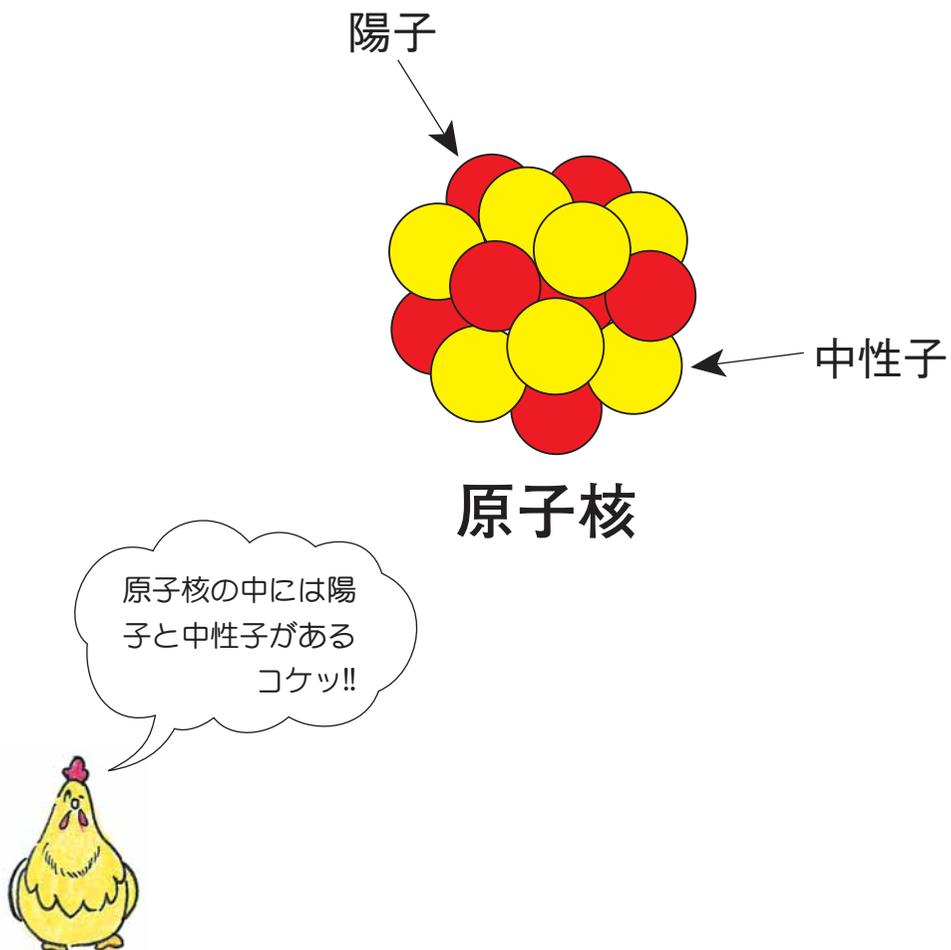
原子の中でも、同じことが言えます。まず、動いている軌道電子は運動エネルギーを持っています。また、軌道電子は原子核に電気的な力（クーロン力）で引っ張られていますから、位置エネルギーも持っています。速い電子ほど大きな運動エネルギーを、そして、原子核から遠くの軌道にいる電子ほど大きな位置エネルギーを持つこととなります。

前のページで出てきたエネルギーとは、実は軌道電子が持つ運動エネルギーと位置エネルギーを合計したものです。

陽子と中性子

原子の中心にある原子核は、**核子**と呼ばれる“小さな粒子”の集合体です。核子には、**プラスの電気を帯びた陽子**と**電氣的に中性な中性子**の2種類があります。

窒素原子の原子核は7個の陽子と7個の中性子からできています。陽子はプラスの電気を持っているのでお互いに反発し合っ**てバラバラになろうと**します。しかし、原子核の中ではこの電氣的な反発力よりも大きな**引力(核力)**が核子同士を引きつけ合うため、原子核という一つの固まりでいら**れる**のです。



豆知識 物質の根元—アトムからクオークへ—



人類が誕生して以来人々はこの世界は何からできているかということを考え続けてきました。エジプトにおこり、アラビアで発展した錬金術では、物質の根源は硫黄、水銀、塩の三元素であるとされています。インドにおこった仏教文明では風、水、土、火を四大と称して万物の根元としています。古代中国の陰陽五行説では現象の根源は陰と陽であり、物質の根源は火、水、木、金、土の五行であるとされています。

しかしこれらの根源説は、哲学、宗教、易、呪術に属するものであって現代の科学とは全く別のものです。近代の科学は、1805年に英国の化学者ダルトンによって唱えられた近代原子論より始まるとされています。

ダルトンは、物質が不連続な構造を持ち、究極的な構造としての“粒子”から構成されると考えました。その“粒子”は**アトム**（ギリシャ語で“分割できないもの”の意）と名付けられました。日本語では原子といいます。ダルトンの提唱したこの原子論はそれまでの物質観を一変させたのです。

しかし、20世紀に入ってから原子にも内部構造があり、更に究極的な粒子があることが分かってきました。すなわち電子、陽子、中性子という3つの粒子が原子を構成する要素であることがわかり、これらの粒子は、**素粒子**と名づけられました。

ところが近年高エネルギー物理学の発展により、素粒子の種類が3種から300種にも達し、さらに質量の重い素粒子にはさらに内部構造があることが分かってきました。この一階層下の粒子に**クオーク**という呼び名を与え、従来の素粒子をこの超素粒子によって説明しようとするクオーク仮説が一般に認められるようになってきました。

物質の根源が何であるかは永遠のテーマです。高エネルギー物理学がギリシア哲学に代って今後さらに多くの知識を私たちにもたらすことでしょう。

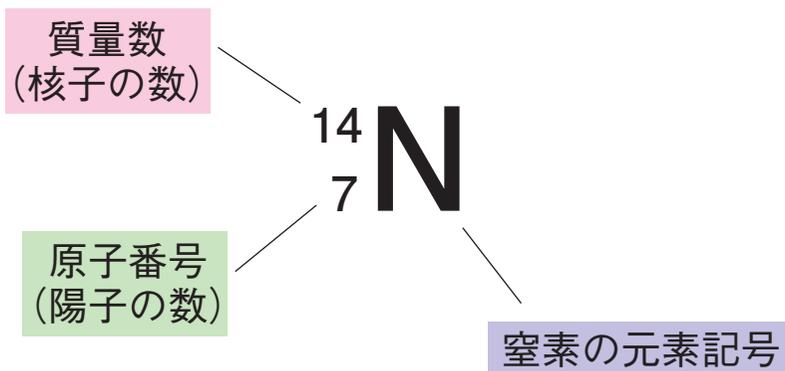
原子番号と質量数

原子核の中の陽子の数を**原子番号**、また、陽子と中性子の合計の数、つまり核子の数を**質量数**といいます。電氣的に中性な原子は、原子核の中の陽子と同じ数の軌道電子を持っています。

原子はそれぞれの原子番号の違いによってまったく個性（化学的性質）が異なるため別々の名前が与えられています。例えば、原子番号1は水素、7は窒素、26は鉄、92はウランという具合です。

こうした原子の種類は自然界に水素からウランまで約90種類ほどあり、“物質としての性質を保った最も元になる小さなもの”という意味で**元素**と呼ばれています。

ある特定の原子を表わすときには、**元素記号**、原子番号、質量数の3つを用いて下の図のように書きます。原子番号は省略されることもあります。例えば ^{14}N と書いて“窒素14”と読みます。



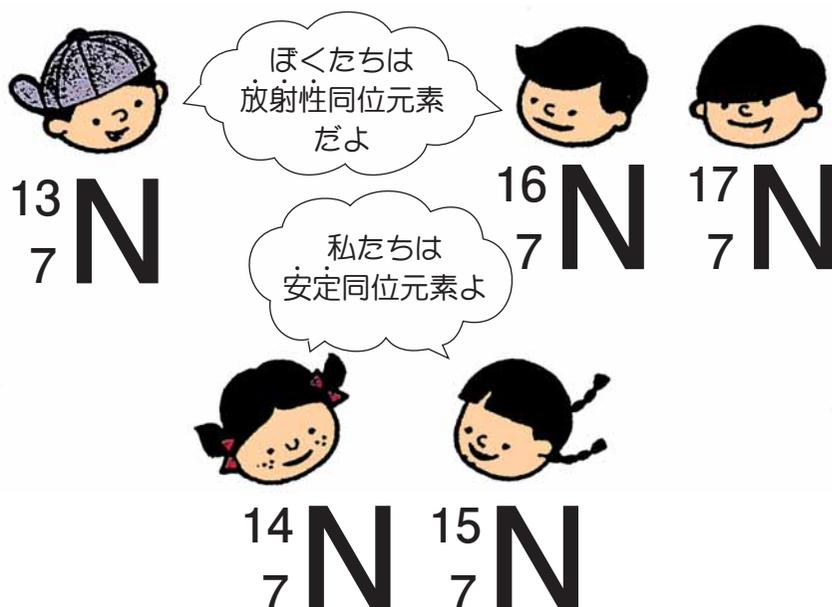
自然界には水素からウランまで約90種類もの元素があるのじゃ

安定同位元素と放射性同位元素

同じ窒素原子でも、質量数が異なるものがあります。陽子と軌道電子の数はそれぞれ7個ですが、原子核の中の中性子の数が違うのです。窒素原子には主に ^{13}N 、 ^{14}N 、 ^{15}N 、 ^{16}N 、 ^{17}N と5種類あることがわかっています。これらは、化学的性質は同じでも質量数が異なる分だけ少しずつ物理的な性質が違います。5つ子の兄弟がお互い良く似ているけれどもどことなく顔がちがうようなものです。この兄弟であることを同位元素(アイソトープ)といいます。

地球上の窒素原子の99.6%以上が ^{14}N という同位元素です。これは非常に安定で自然に壊れたりしないので安定同位元素と呼ばれます。自然界にあるほとんどの原子は安定同位元素です。

ところが、中性子が2個多い ^{16}N (窒素-16)という同位元素は、外から熱や強い力を加えたりしなくても自然に壊れてまったく別の元素 ^{16}O (酸素-16)に変わってしまいます。この時に原子核から放射線が放出されるのでこのような不安定な元素のことを放射性同位元素(ラジオアイソトープ)、あるいは英語の頭文字を取ってRI(アールアイ)といいます。



放射能

^{16}N （窒素-16）のように、自発的に放射線を放出し別の種類の原子になることを**壊変**といい、**壊変しようとする性質を放射性とか放射能**といいます。

放射能という言葉は、実用的には“単位時間当たりにかかる**壊変の数**”（14 ページ参照）を表わします。

しかし、一般的にはもっといろいろな意味で使われています。普段私たちが口にする「放射能がある」という表現は、“放射線が出ている”といった程度の意味で使っています。新聞や雑誌などでも**放射性物質**（放射性同位元素やこれらを多く含んでいる物質）、あるいは放射線そのものを指して放射能と表現していることがあります。



放射能って言葉はいろいろな意味に使われているんだなア

豆知識 放射能標識



これは、**放射能標識**または**RI（アールアイ）マーク**といって、放射性物質であることを示したり、それらを取り扱う場所（**放射線管理区域**）などに表示されています。また、人工的に放射線を発生する放射線発生装置の表面や、それが使用されている場所、例えば、病院のレントゲン室に貼ってあるのもこのマークです。

単位の話 (2) 放射能

ベクレルとキュリーはどちらも放射能の単位で、放射線の発見をした有名な科学者の名前にちなんだものです。ベクレルはウランの放射能を、キュリー夫人はポロニウム元素とラジウム元素を発見しました。ベクレルは Bq、キュリーは Ci という記号で表します。以前はキュリーが単位として使われていましたが、現在ではベクレルが公式に使われることになっています。1 ベクレルは 1 秒間に 1 回の割合で放射性壊変がおこることを意味し、

$$\begin{aligned} 1 \text{ Bq} &\doteq 2.70 \times 10^{-11} \text{ Ci} \\ &= 27 \text{ pCi (ピコキュリー)} \\ 1 \text{ Ci} &= 3.70 \times 10^{10} \text{ Bq} \end{aligned}$$

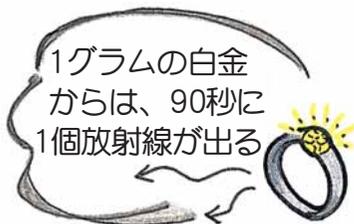
という関係にあります。

370 億ベクレル (1 キュリー) という、ラジウム元素 1 グラムに匹敵する非常に強い放射能です。ガン治療に使用するコバルト -60 ガンマ線源の放射能が数千キュリー、造船所で鉄板などの溶接部分をレントゲン撮影するためのイリジウム -192 ガンマ線源が 10 キュリー程度です。

しかし、私たちの身近にはこれほど強い放射線源はありません。

例えば、1 グラムの白金にはアルファ壊変をする天然放射性同位元素、白金 -190 が 0.012 ベクレル (約 0.31 ピコキュリー *¹) 含まれています。つまり、1 グラムの白金

の中では約 90 秒に 1 回の割合でアルファ線が放出されていることになります。人間の体の中にある天然放射性同位元素カリウム -40 の放射能は 4000 ベクレル程度、核実験がもたらしたセシウム -137 は米 1 キログラムに 0.04 ベクレル程度含まれています。*² 私たちの身のまわりの物質に含まれる放射能の量はたいていがこの程度の微量です。



*1 1 ピコキュリー (pCi) は、1 キュリーの 1 兆分の 1 です。

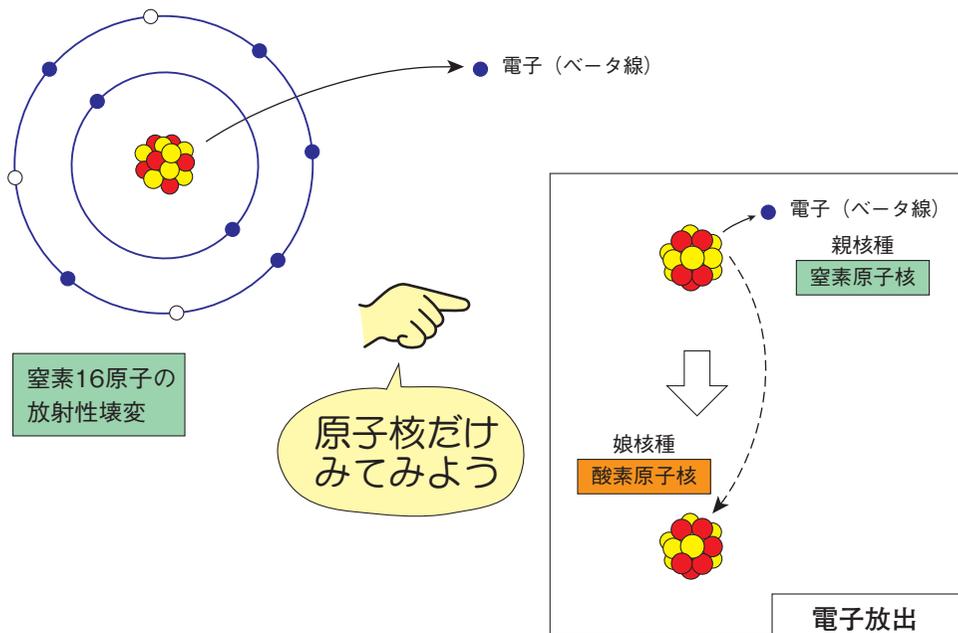
*2 1990 年代前半頃の値。

放射性壊変

放射性同位元素が放射線を放出して壊れることを**放射性壊変**といいます。

窒素-16の放射性壊変の場合をみてみましょう。原子核の中から1個の電子が放出され、壊変の前には中性子9個と陽子7個からできていた原子核が中性子8個と陽子8個に変化します。陽子の数、つまり原子番号が8で決まる化学的性質の持ち主は酸素です。つまり、窒素-16の原子核は電子を放出することによって酸素の原子核に変化します。

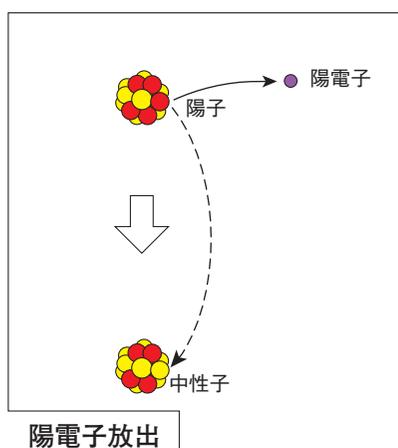
壊変前の窒素原子を**親核種**、壊変後の酸素原子を**娘核種**と呼ぶことがあります。また代表的な壊変の種類には**ベータ壊変**、**アルファ壊変**があり、**ガンマ線放射**がともなうことがあります。その他に中性子や陽子などが放射線として放出される壊変があります。



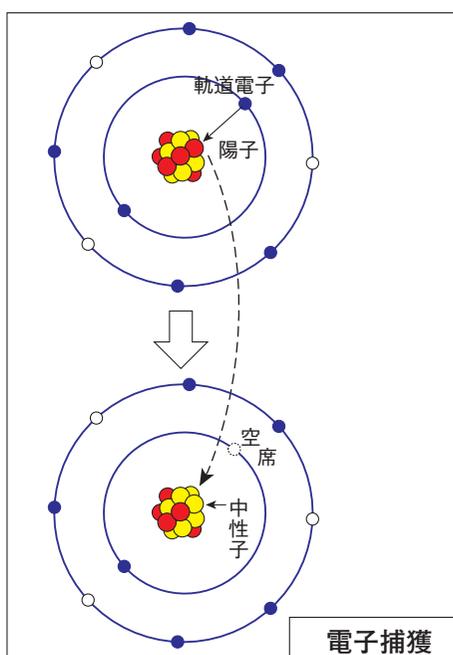
ベータ壊変

窒素-16の放射性壊変で核から放出された電子は、原子核の引力を振り切って原子から飛び出します。この非常に大きな運動エネルギーを持った電子はベータ線と呼ばれます。

電子のかわりに陽電子（陽電子線）が放出されたり、逆に軌道電子が原子核の中に吸収（電子捕獲）されることもあります。このように原子核に対して1個の電子または陽電子が出入りして、質量数は変わらずに原子番号が1だけ増減するような壊変をまとめてベータ壊変と呼んでいます。



どちらの場合も
原子核の中では
1個の陽子が
中性子に変わる



豆知識 電子と陽電子

電子と陽電子は質量や電荷の絶対値が同じです。違うのは、電子はマイナスの、陽電子はプラスの電荷を持っているところです。電子と陽電子のような素粒子の組では、一方の「粒子」に対してもう一つの方を「反粒子」と呼びます。「粒子」と「反粒子」が出会うと、合体して自分たちは消滅し、エネルギーや他の粒子になります。

アルファ壊変

アルファ壊変は、ウランやラジウムなど、原子核の中の核子数が多い放射性同位元素で起こります。

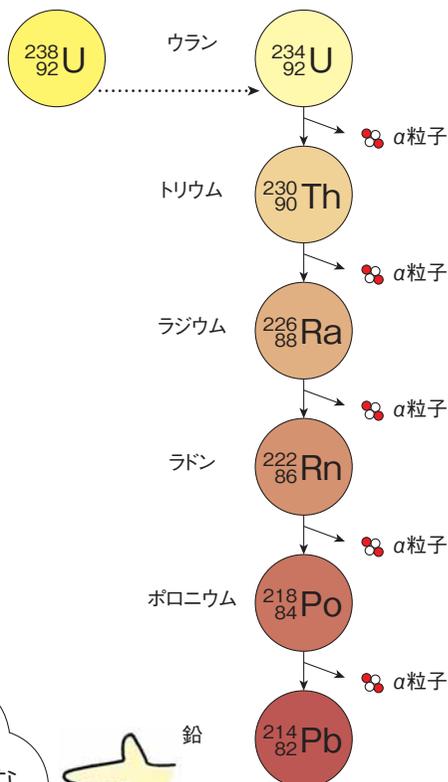
放射線としては中性子2個と陽子2個から成る**アルファ線**が放出されますが、これはちょうどヘリウム原子の原子核と同じ粒子です。親核種の原子核は、壊変後に原子番号が2、質量数が4小さい原子核に変化します。

豆知識 ウラン一族の家系図 親？娘？孫？

ウランには ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{234}U の3種類があります。ウランの原子核は、どれも大変重いので、1個のアルファ線を放出したくらいでは安定同位元素になりません。

娘核種も、次の孫娘核種もやはりアルファ壊変やベータ壊変を次々に繰り返します。

この家系図を逐次(ちくじ)壊変系列といい、図のウラン系列の他にアクチニウム系列、トリウム系列、ネプツニウム系列があります。



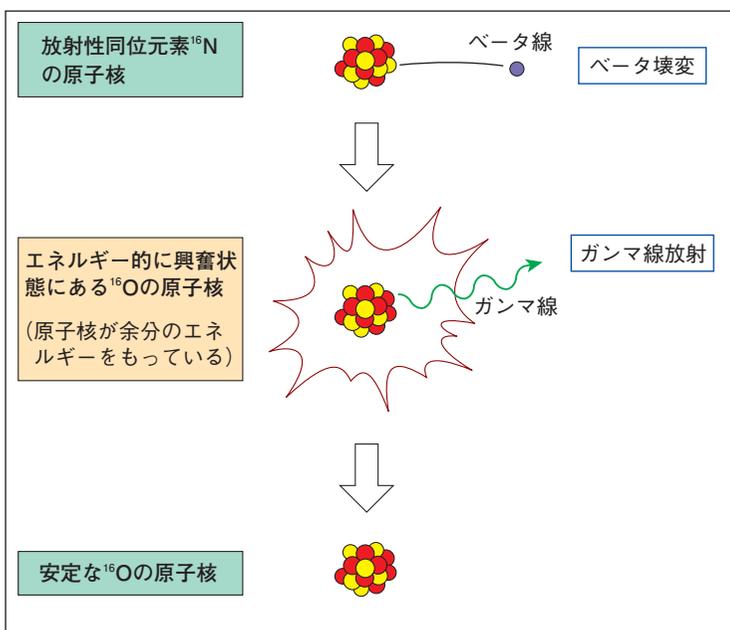
この後は、ベータ壊変とアルファ壊変が続き最後には安定な鉛-206 (^{206}Pb) になります。



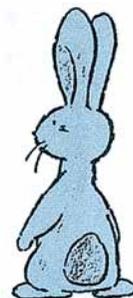
ガンマ線放射

ベータ壊変やアルファ壊変でできた娘核種や、核反応（35 ページ参照）で生成された核は、しばしば興奮状態*¹にあります。この時、多くの場合ガンマ線と呼ばれる高エネルギーの光（電磁波、21 ページ参照）が原子核から放出されます。これをガンマ線放射といい、原子の原子番号や質量数は変わりせん。

窒素-16のベータ壊変で生まれる酸素-16も、壊変の直後は原子核の内部が興奮状態にあり、過剰なエネルギーをすぐにガンマ線として放出し安定な状態*²になります。



放射性物質には、アルファ線やベータ線と同時にガンマ線を放出するものが多いヨ。



*1 “励起状態” といいます。

*2 最も安定な状態（最もエネルギーが低い状態）を原子核の“基底状態” といいます。基底状態にあるものが余分のエネルギーを与えられ興奮状態（励起状態）になることを“励起”（24 ページ参照） といいます。

放射性壊変で生まれる娘核種

放射性壊変を起こした後の原子（娘核種）は、どのようになるかみてみましょう。

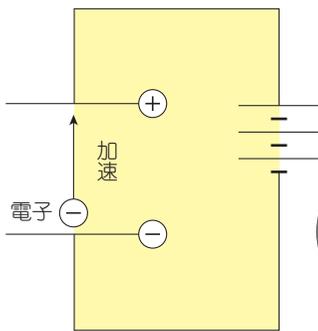
壊変の前後で変化するのは、原子番号と質量数です。変化の仕方は、下の表のように、壊変の時に放出する粒子の種類で異なります。

壊変の種類	放出粒子	原子番号 (Z)	質量数 (A)	壊変前 → 壊変後 (親核種) (娘核種)
ベータ壊変	電子	1 増える	変わらない	$(Z, A) \rightarrow (Z+1, A)$
	陽電子	1 減る	変わらない	$(Z, A) \rightarrow (Z-1, A)$
アルファ壊変	アルファ粒子	2 減る	4 減る	$(Z, A) \rightarrow (Z-2, A-4)$
ガンマ線放射	ガンマ線	変わらない	変わらない	$(Z, A) \rightarrow (Z, A)$



単位の話 (3) エネルギー

電子ボルト (またはエレクトロンボルト *¹) は、放射線のエネルギーの単位としてよく使われます。1V (ボルト) の電池を2枚の金属板に接続して、マイナス側の板の上に電子を置いてやると、マイナスの電気を帯びた電子はプラスの板のほうに引きつけられて動きだし加速していきます。これは電池のなかに蓄えられていた電気エネルギーが電子の運動エネルギーにだんだんと変化していくのです。そして、プラス側の板に到着したときに電子が得た運動エネルギー、これがちょうど1電子ボルトになります。エネルギーの一般的な単位であるジュール (J) *² で表すと、1電子ボルトは $1 \times 10^{-19} \text{ J}$ (0.16 aJ *³) です。



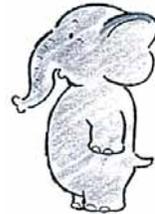
1電子ボルトとは電子が1ボルトの電圧で加速されたときに受けとるエネルギー

1 keV (キロ電子ボルト) = $10^3 \text{ eV} = 1000 \text{ eV}$

1 MeV (メガ電子ボルト) = 10^6 eV

1 GeV (ギガ電子ボルト) = 10^9 eV

エネルギーの単位としてはものすごく小さいんだゾウ!!



*1 電子ボルトはSI単位ではありませんが、放射線関係分野の他にも、高エネルギー物理学など素粒子を扱う分野や原子を扱う研究分野などでは良く使用される単位です。このように特殊な分野での有用性から、SI単位と併用されている単位には、原子レベルでの質量を表す原子質量単位 ($1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$) や天文学で距離を表す天文単位 ($1 \text{ AU} = 149598 \times 10^6 \text{ m}$) などがあります。

*2 エネルギーの単位として良く用いられるものにカロリー (cal) があります。これは1グラムの水の温度を1℃上げるのに必要なエネルギーで、1カロリーは4.2ジュールに相当します。なお、食物の摂取で用いられるカロリーという単位はCalと書いて、前述のcalの1000倍、つまり $1 \text{ Cal} = 4200 \text{ ジュール}$ です。

*3 aJ (アトジュール)、5ページ参照。

豆知識 電磁波

電磁波というと難しいようですが、紫外線や赤外線、可視光、電子レンジに使われているごく超短波などすべての仲間です。

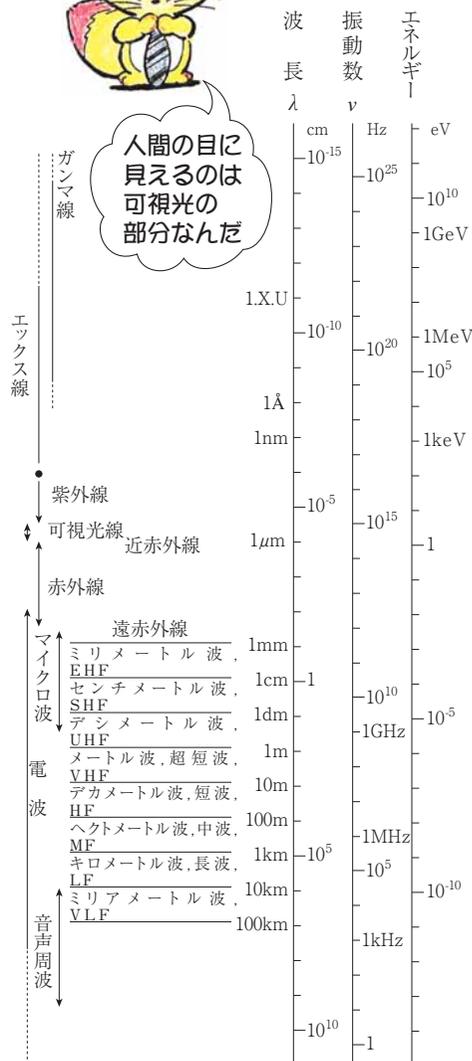
また、レントゲン撮影に使われるエックス線も電磁波です。エックス線はガンマ線より一足先に発見された放射線でエネルギーの大きさも同じ程度なのですが、原子核からではなく、原子核の外の軌道電子から放出されるので違う名前と呼ばれています。

電磁波には波のような性質があり空間を振動しながら伝わっていきます。1秒間に振動する回数を**振動数**、一回振動する間に進む距離を**波長**といいます。

(振動数)×(波長)は、電磁波の速さです。これは一般に**光速**といわれ、電磁波の種類によらず同じです。真空中では約 3×10^8 メートル/秒で、1秒間に地球を7回り半できるほどの速さです。右の図で分かるように、波長が長いほど電磁波のエネルギーは小さくなります。



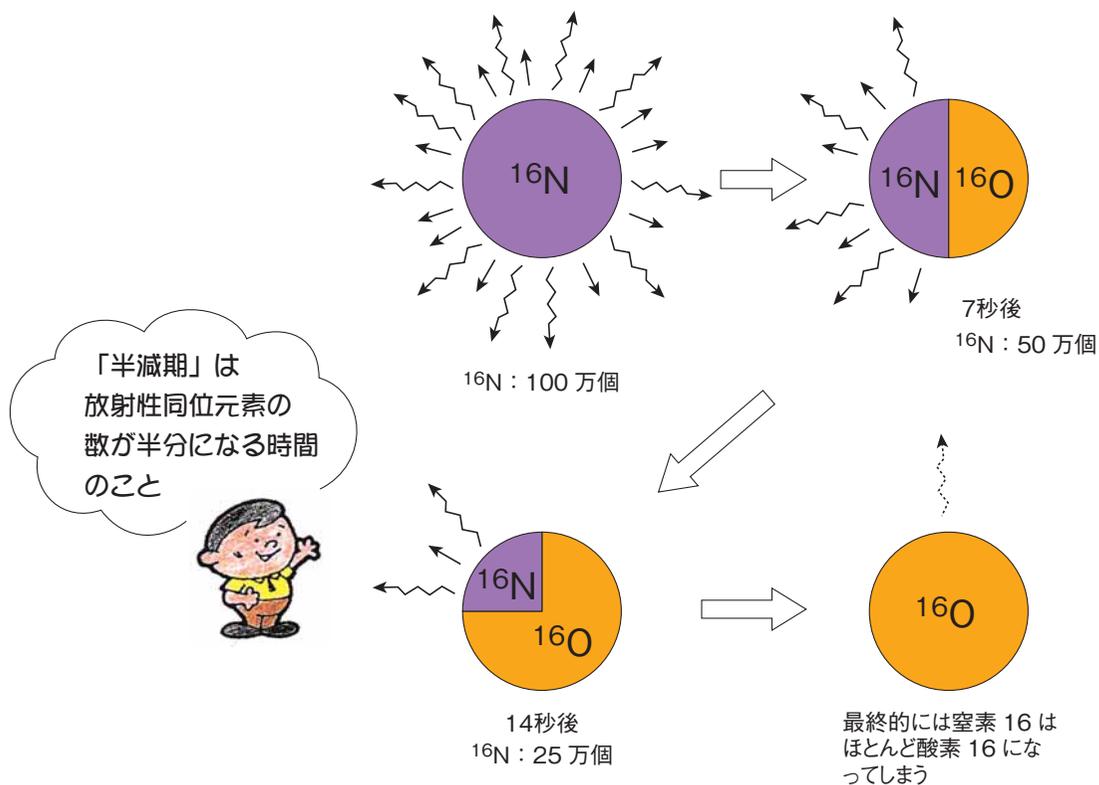
人間の目に見えるのは可視光の部分なんだ



半減期

今ここに、100万個の窒素-16原子があるとしましょう。それぞれの原子は自然に壊れて酸素-16原子に変化します。しかし、100万個全部が一度に放射性壊変をするわけではありません。お互いが好き勝手に気の向いたときに放射線を放出して壊れるのです。だから、私たちは100万個の原子をどんなに注意して観察していても次にどの原子が壊変するか予測できません。

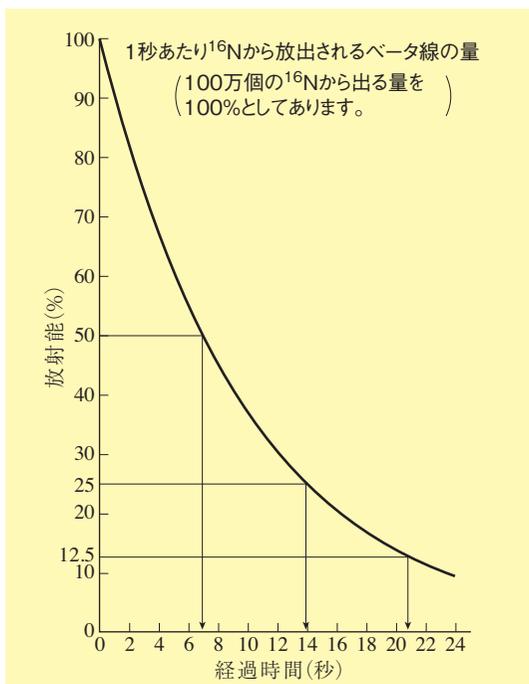
しかし、どの原子が壊変するかはわからないのですが、放射性壊変には統計的な規則性があります。窒素-16の場合は約7秒の間に100万個の約半分、約50万個が壊変するのです。次の7秒間には残っていた50万個の窒素-16原子のうち、約半分の約25万個が酸素原子に変わります。こうして約7秒経過する度に窒素原子の数を数えてやるとほぼ半分の数に減っていきます。



半減期

このように、たくさんの放射性同位元素が次第に壊れて行って元の数の半分に減る時間のことを**半減期**といい、放射性同位元素の種類によって定まった値を持っています。窒素-16の場合は約7秒と短いのですが、 ^{59}Fe （鉄-59）は44日、 ^{137}Cs （セシウム-137）は30年、そして ^{234}U （ウラン-234）の半減期は非常に長く24万5千年です。半減期がわかると、放射性壊変する元素毎にその**平均寿命**を計算できます*¹。

それでは、放射性壊変で放出される放射線の量は時間とともにどのように変化するでしょうか。下の図は半減期が7秒の窒素-16原子の例ですが、放射性壊変で放出されるベータ線の数はだんだん減って行きます。1個の窒素-16原子は放射性壊変で1個のベータ線を放出しますから、最初の7秒間では約50万個、次の7秒間では約25万個のベータ線が出てきます。放射線を出す窒素-16原子の数それ自体が時間とともに減るので、放射線の量も同じ半減期で減って行きます。



半減期たつと放射能も半分になるんだ



*¹ 平均寿命 = $\frac{\text{半減期}}{\log_e 2} \approx 1.443 \times \text{半減期}$ 。

電離と励起

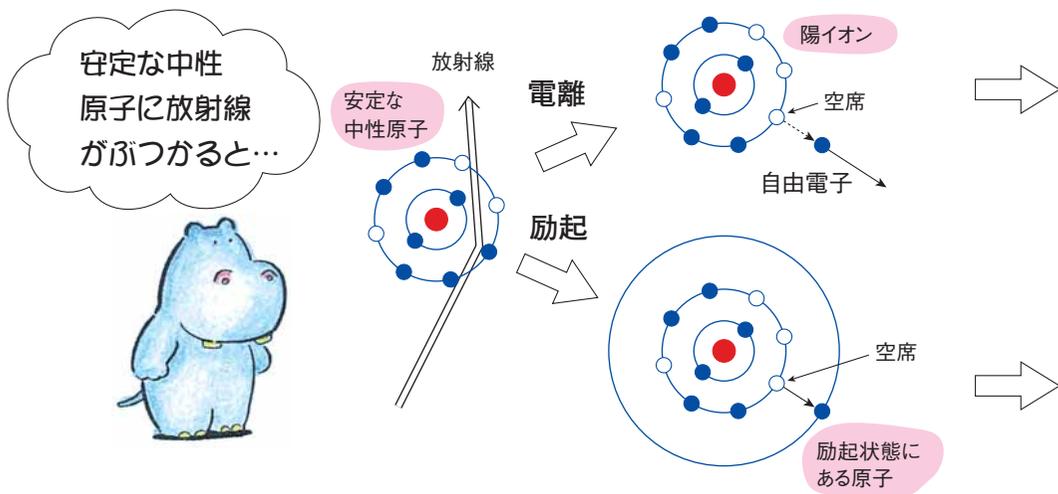
放射線が私たちの体やいろいろな物質を通過すると何が起こるのでしょうか。

放射線と物質を構成する原子や分子は互いに影響を与えます。これを**放射線と物質の相互作用**といいます。まず、放射線とぶつかった原子や分子がどうなるか考えましょう。

放射線は原子や分子とぶつかっても自分自身が方向を変えるだけで相手に何の影響も及ぼさない場合もあります。しかし、ほとんどの場合は原子の一番外側の軌道電子をはじき飛ばし、自分の持っている運動エネルギーの一部をこの軌道電子に分け与えます。

軌道電子が原子の外までたたき出されてしまう場合を**電離**といい、原子核の束縛を離れた電子は**自由電子**になります。電氣的に中性だった原子の方は、マイナスの電荷を持った軌道電子が失われてしまうため、全体としてプラスの電気を帯びることになります。このように、**軌道電子の数が、原子核の陽子の数と一致せずプラスあるいは、マイナスの電気を持つようになった原子や分子をイオン**といいます。

軌道電子が原子から飛び出さず、外側の軌道に飛び移る場合は、原子は電氣的に中性のまま、“**興奮状態**”になります。これを**励起**といいます。



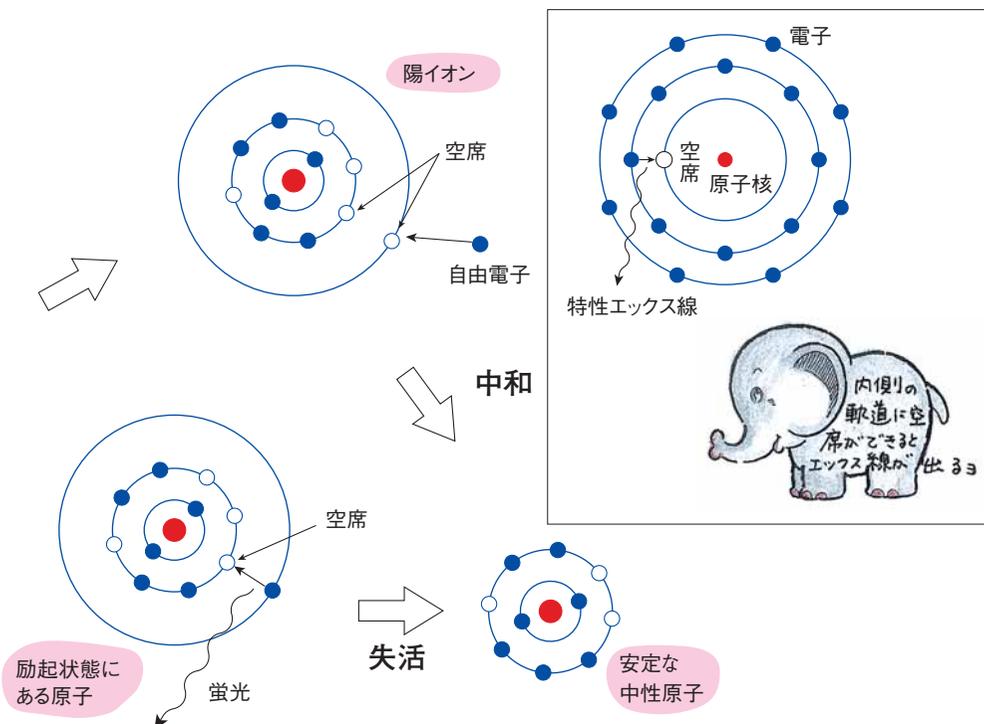
電離と励起

電離や励起を起こした原子は不安定です。まず、イオンになった原子は付近の自由電子を捕まえて電氣的に中性になろうとします。イオンに捕まった電子は最初かなり外側の軌道に入るので、イオンは励起原子の状態になります。

励起原子では、外側の軌道電子がもっと内側の空の軌道に移ろうとします。内側の軌道ほど軌道電子が持つエネルギーは小さいので、電子は余分なエネルギーを光（電磁波）の形で放出します。この励起原子からでる光は**蛍光**と呼ばれています。

電離が起きるとき、内側の軌道電子が飛び出すこともあります。空いた軌道には外側の軌道電子が落ち込んできますが、この時放出される電磁波はエネルギーが高く、元素の種類に特有なことから**特性エックス線**または**固有エックス線**とよばれます（下図参照）。

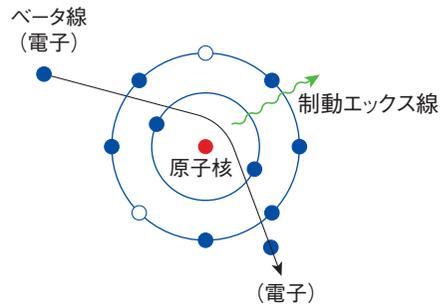
電離や励起がきっかけとなって、まわりの原子や分子と化学反応が起きたり、分子の場合はもっと小さな固まりに壊れたりすることもあります。



ベータ線の作用

今度は放射線の種類別に見てみましょう。

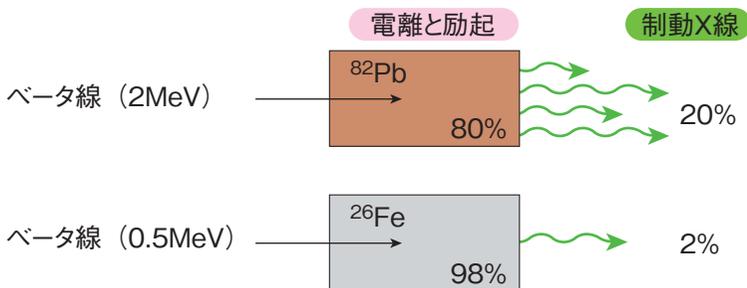
ベータ線の特徴はマイナスの電気を持ち非常に軽いことです。このため、重い原子核の近くを通ると強い力でひっぱられて簡単にその向きが変わります。この時、ベータ線は自分の運動エネルギーの一部をエックス線として放出します。これを制動エックス線または制動放射線といいます。



豆知識 ベータ線のエネルギーの行方？

陽子の数の多い原子核ほどベータ線に大きな引力を及ぼすので、ベータ線の運動エネルギーが制動エックス線として失われる割合が多くなります。また、ベータ線の運動エネルギーが大きくてもこの割合は多くなります。

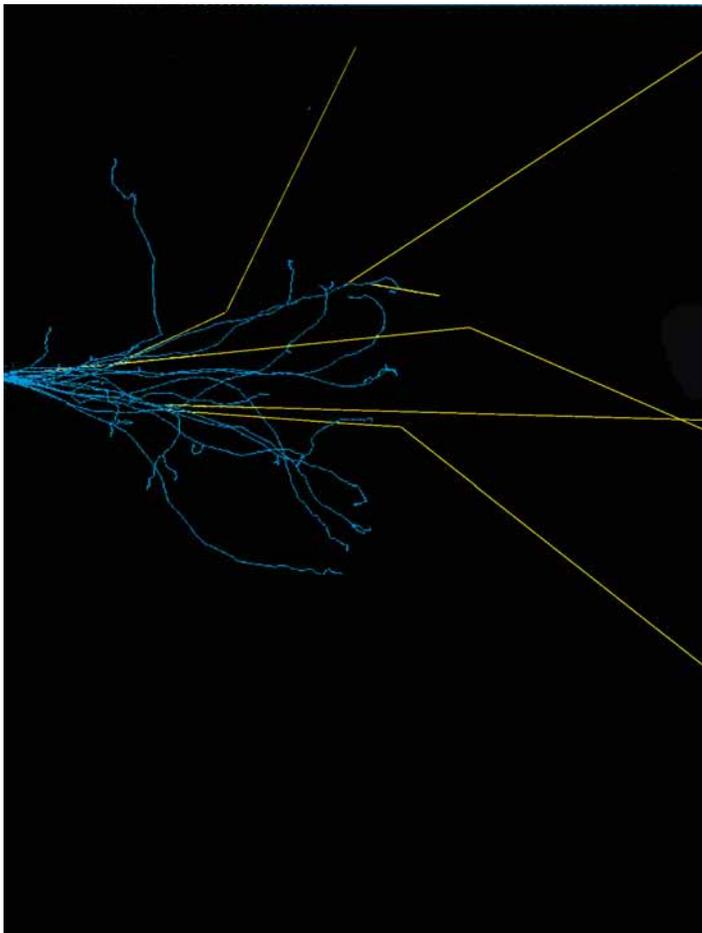
2メガ電子ボルトのベータ線が原子番号82の鉛に飛び込むと運動エネルギーの約2割が制動エックス線となり、残りが鉛原子の電離や励起などに使われます。0.5メガ電子ボルトのベータ線が原子番号26の鉄に飛び込んだ時は、制動エックス線に費やされるのは全体の2%にすぎません。



ベータ線の作用

ベータ線が原子を電離した時、発生した自由電子の多くはそれ自身が再び電離や励起を引き起こす能力を持っています。これらはデルタ線と呼ばれ、行く先々で再び電離と励起を繰り返すので、1個のベータ線が引き金となって、ねずみ算的にデルタ線の数が増えていきます。

しかし、こうして増えたたくさんのデルタ線も衝突の度にだんだんとエネルギーを失って勢いが衰え、ついには物質の中に吸収されてしまいます。



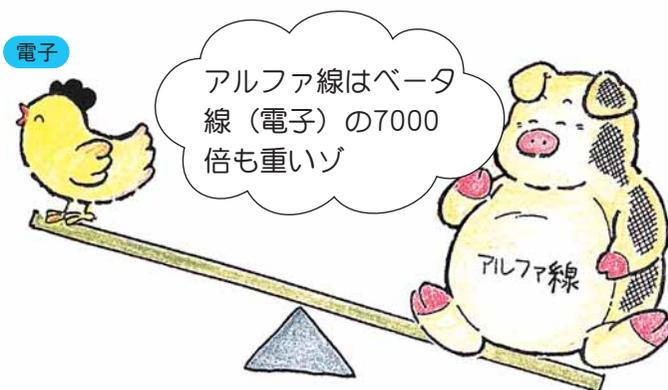
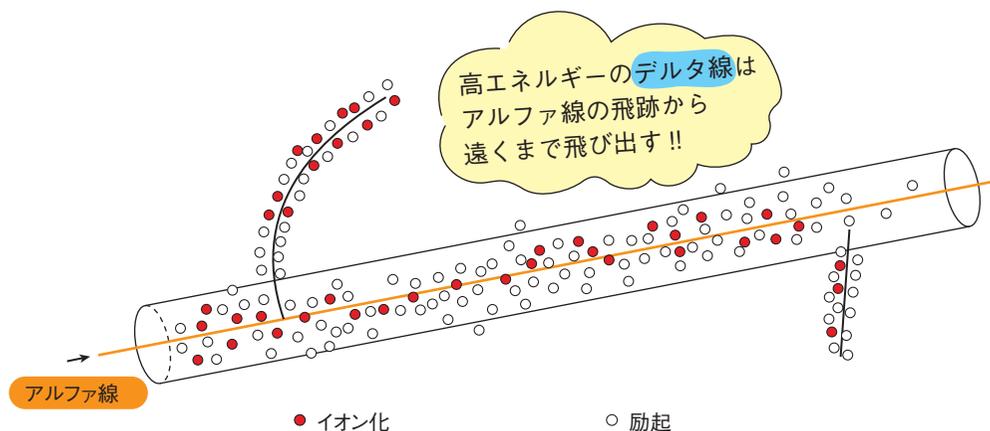
左の図は水と 5MeV のベータ線が相互作用するようすです。左から7個のベータ線が入射しています。青い線がベータ線の飛跡ですが、ずいぶんぐねぐねしています。比較的高いエネルギーのデルタ線がところどころにひげのように枝分れしているのが見えています。ベータ線の飛跡の途中で発生している黄色い線は、制動エックス線です。

電子や陽電子、 γ 線の相互作用を追跡する EGS4
モンテカルロコードによるシミュレーション

アルファ線の作用

アルファ線はベータ線の2倍のプラスの電気を持ち、7千倍以上もの重さを持っています。従って、ベータ線よりもっと頻繁に軌道電子と衝突を繰り返し、しかも原子との衝突で自分の向きをほとんど変えません。

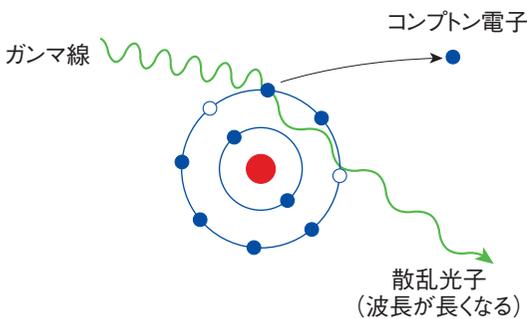
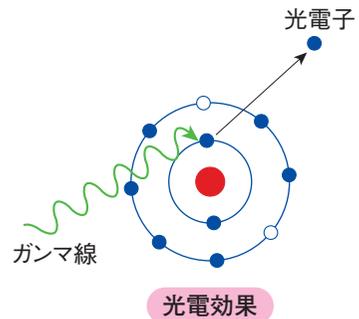
もちろん、原子核のごく近くを通れば大きく向きを変えることがあります。しかし、原子の大きさに比べて原子核がとても小さいので、衝突の確率は非常に低くなります。アルファ線は物質の中をまっすぐに突き進みながら通り道の両側にやはりたくさんのデルタ線を発生させます。



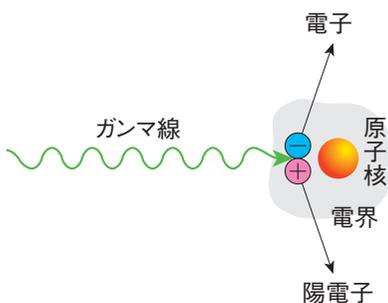
ガンマ線的作用

ガンマ線はベータ線やアルファ線のように重さを持った粒子ではなく、電磁波です。

ガンマ線が自分のエネルギーを全部軌道電子に与え、消滅してしまう場合、これを**光電効果**といいます。そしてガンマ線のエネルギーを全部受け取った軌道電子は、原子から飛び出し電離が起こります。



ガンマ線は粒子のように振る舞う性質があり、電子にぶつかって散乱します。この場合、散乱後のガンマ線のエネルギーは入ってきた時より、電子に与えた分小さくなり方向も変わります（**コンプトン効果**）。



ガンマ線のエネルギーがずっと大きければ、電子や原子核の近くを通った時、自分が消滅するかわりに電子と陽電子の“双子”を1組生み出すことがあります（**電子対生成**）。

電離や電子対生成で生じた電子や陽電子が再び周囲の原子や分子を励起したり電離するのは、ベータ線やアルファ線の場合と同じです。

放射線の透過能力

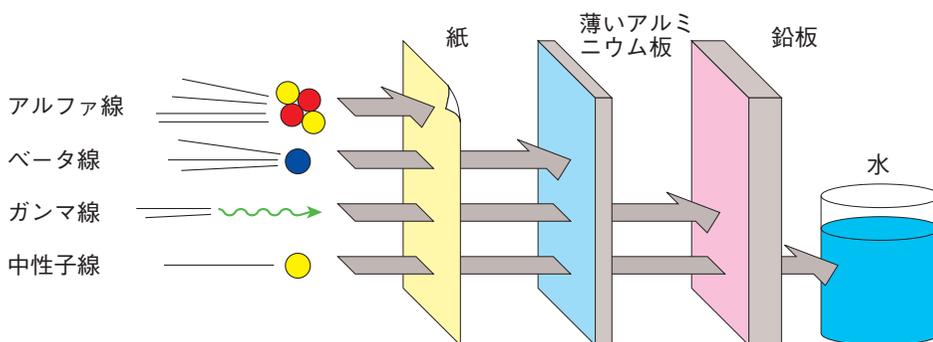
放射線の種類によって、相互作用の様子はだいぶ異なりますが、最終的には放射線は物質の中に吸収されてしまいます。

放射線の性質を特徴づけるものとして**透過能力**があります。これは、放射線が吸収されないで物質を通り抜ける能力のことです。いままで出てきた放射線で比べると**透過能力のいちばん強いのはガンマ線と中性子線**、ついでベータ線、アルファ線の順です。いいかえると、**アルファ線が一番物質と相互作用する力が大きく薄い物質でも簡単に吸収されてしまう**ということになります。



同じエネルギーの放射線の透過力を比べてみましょう。

アルファ線は薄い紙 1 枚でも止まってしまうますが、ガンマ線はアルミの板も通り抜けます。



豆知識 放射線・放射能の発見

1895年11月8日の夕方、ドイツのレントゲンは、非常に透過能力の強いものが放電管から発生していることに気がつきエックス線と名付けました。普通の光は厚いボール紙で簡単に遮ることができるのに、放電管から出るエックス線は彼が分厚い本を放電管と蛍光スクリーン間に置いても遮られずに蛍光スクリーンを光らせたのです。これが人類が放射線に気がついた最初の出来事でした。

このニュースは瞬く間に世界中を駆けめぐり、多くの研究者がエックス線の研究に熱中しました。その中の一人、フランスのベクレルはその翌年、太陽光線をウラン塩にあてて燐光を発生させる実験を繰り返していました。ところが、冬のパリのこと、天気の悪い日が続くのでベクレルはしかたなく黒紙に包んだ写真乾板とウラン塩を同じ引き出しに入れておきました。数日後、ベクレルが取り出した写真乾板は前よりもっと黒く感光していました。彼は、太陽の光が無くてもウラン塩自身が自発的に写真乾板を黒くしてしまうもの(放射線)を放出していると考えました。これが、放射能の発見です。

2年後の1898年には、キュリー夫妻がウランよりも数万倍も強い放射線を出すラジウムを発見し、これと平行してラザフォードが、放射線には透過能力の違う2種類のもの(アルファ線とベータ線)があることを明らかにしました。引き続き、ヴィラールがガンマ線を発見するに至って、原子の奥底から人類に向けられた重要なメッセンジャー、放射線が人類の目の前に勢ぞろいすることになります。

当時、リンゴから天体の運動まで統一的に記述できるニュートン力学とマックスウェルが樹立した電磁気学が完成した美しい理論体系として古典物理学を支配していました。1918年量子論の研究でノーベル賞を受賞したプランクは1870年代後半には学生でしたが、教授に「物理学はすでに完成された学問であり、新しい問題は何も残っていない。」といわれ大変ショックをうけたと伝えられています。しかし、放射線と放射能の発見は、こうした物理学の世界に大きな革命をもたらす導火線となり、人類は未知の領域へと第一歩を踏み出すことになりました。

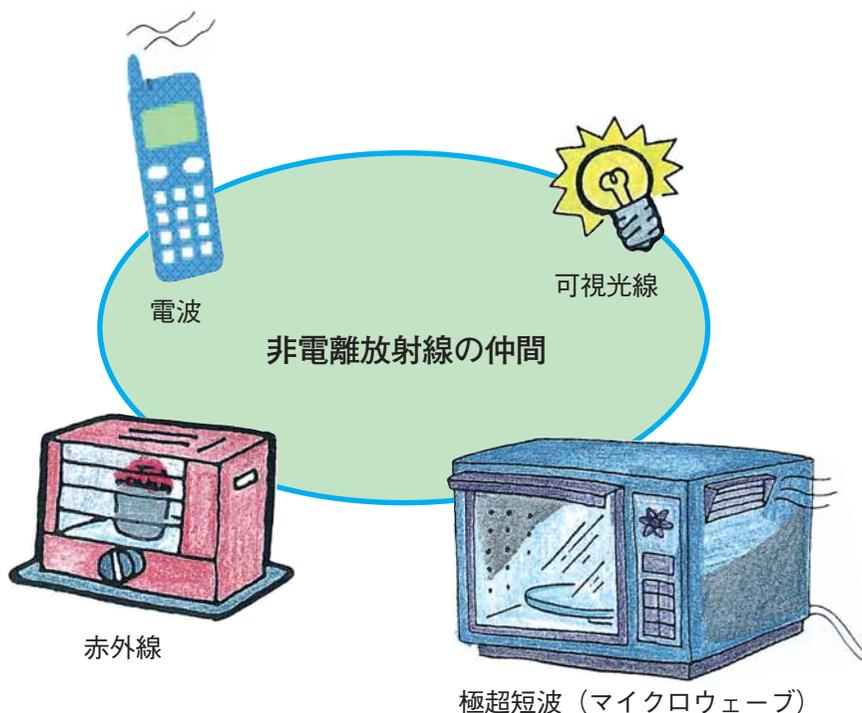
放射線の種類

代表的な放射線として知られるアルファ線、ベータ線、ガンマ線はいずれも不安定な原子核を持つ放射性同位元素から発生し、ベータ線の実体は電子、アルファ線はヘリウム原子核、ガンマ線は電磁波の一種でした。

これらの放射線はどれもエネルギーが大きく、**原子や分子を電離する能力を持っているので電離放射線**といわれます。普通、私たちが放射線という時はこの電離放射線を指しています。

電離放射線には、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、エックス線の他に次のページの表のように**中性子線、陽子線、陽電子線、重イオン線**などがあります。重イオン線はプラスやマイナスの電気を帯びた原子や分子を加速器などで加速してつくられます。

21 ページにあるような電磁波の仲間は、広い意味で全て放射線です。しかし、可視光や赤外線、電子レンジで使われている極超短波、携帯電話やPHS からでる電波はほとんど電離を起こさないので、**非電離放射線**に分類されます。



代表的な放射線

電磁放射線	엑스線	(特性엑스線) 原子中の軌道電子のエネルギー状態の変化に伴って放出される電磁波
		(制動엑스線) 電子や陽電子などが原子核の近くで大きな力を受けたとき放出される電磁波
	ガンマ線	原子核の中の核子のエネルギー状態の変化に伴って放出される電磁波

電気をもった粒子線	ベータ線	原子核から放出される電子でマイナスの電気を持つ
	陽電子線	原子核から放出される陽電子でプラスの電気を持った電子
	陽子線	加速器でつくられる高速の陽子
	アルファ線	原子核から放出されるヘリウム原子核
	重陽子線	加速器でつくられる高速の重陽子(中性子 1 個と陽子 1 個からできている)
	重イオン線	いろいろな原子や分子から軌道電子をはぎ取ったり、付け加えたりして電気を持たせ、加速器で加速したもの
	その他	中間子線など

電気を持たない粒子線	中性子線	主に原子炉や加速器で核分裂や核融合などの原子核反応からつくられる中性子
------------	------	-------------------------------------

放射線の発生源

私たちの身の回りで放射線を発生するものにどんなものがあるのでしょうか。まず、自然界を見てみましょう。

自然界のほとんどの物質には微量の放射性同位元素が含まれています。これまでお話したように放射性同位元素の種類によって、これらから放出される放射線はベータ線だったり、アルファ線だったり、ガンマ線だったりします。同じ放射性同位元素から2種類以上の放射線が出てくることがあります。

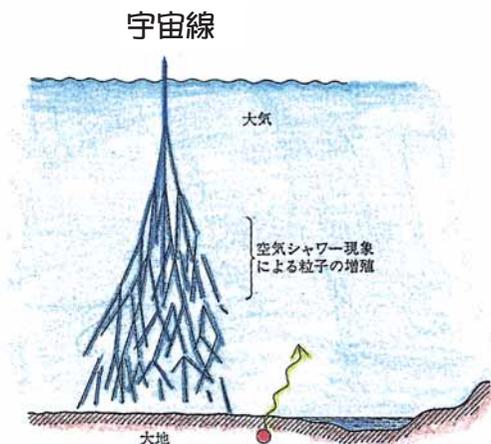
まれに、ウランよりも原子番号の大きな放射性同位元素、キュリウムやカリフォルニウムなどは自然に**核分裂**します。原子核自身が二つに分裂し、同時に数個の中性子と一緒に放出されます。これを、**自発核分裂**といいます。分裂してできた新しい原子核には不安定なものも多く、引き続いていろいろな放射線を放出します。

反対に、水素などの軽い原子核が結合して、一つの原子核になることを**核融合**といいます。この時にも、いろいろな放射線が発生します。核融合は、太陽や恒星の中の超高圧、超高温という極限状態で起こっています。

また、宇宙には電場や磁場が存在し、電子や陽子のように電気を持っている粒子を絶えず加速しています。宇宙から地球に降り注ぐ放射線を**宇宙線**と呼んでいますがその主なものは陽子線です。



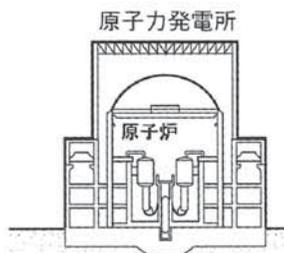
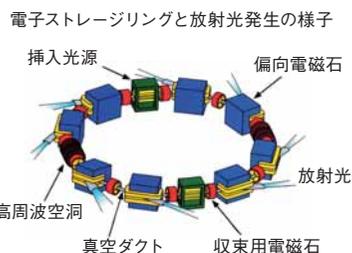
太陽の中では
核融合が起こっている。



放射線の発生源

人工的な放射線の発生源には、一般に**加速器**と呼ばれる**放射線発生装置**や、非破壊検査やレントゲン撮影などに使われる**エックス線発生装置**、**原子炉**などがあります。

加速器は人工的に電場や磁場をつくりだしてその中で電気を持った粒子を加速して運動エネルギーを与え、放射線が発生させる装置です。原子核に加速器でつくった放射線をぶつけることによって、人工的に放射性同位元素をつくったり、核分裂を起こすこともできます。



自然界にある最も重い元素、ウランの原子核に中性子を吸収させることによって人工的に核分裂を起こしているのが原子炉です。原子炉は発電が主な目的ですが、そこで発生するガンマ線や中性子線を利用することもあります。

豆知識 核分裂・核融合

核分裂や核融合のように、原子核が他の粒子と衝突して、別の原子核に変わる現象は原子核反応と呼ばれます。原子核反応では、ベータ崩壊などと比べてかなり大きなエネルギーが放出されます。例えば、一回のベータ崩壊で放出されるエネルギーは、大きくても数メガ電子ボルト程度ですが、ウランの核分裂では約 200 メガ電子ボルトものエネルギーが放出されます。

太陽が放出する核反応のエネルギーは 1 秒間に 3.8×10^{24} ジュール (2.4×10^{43} 電子ボルト) と莫大です。地球は、太陽から 1 億 5 千万 km も離れているのですが、可視光線やエックス線などこの地上にふりそそぐ太陽からのエネルギーが、地球のあらゆる活動の源になっています。

また、太陽からは太陽宇宙線と呼ばれる高エネルギーの陽子線も流れ出ています。

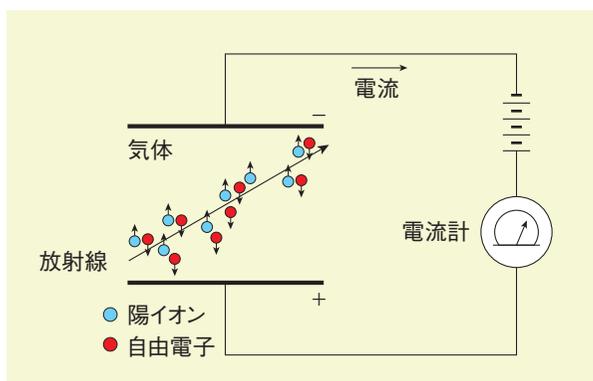
放射線の検出

直接人間が感じることはできない放射線はどうやって検出するのでしょうか。

実際に放射線を検出するには、放射線による電離や励起の結果、物質中につくられるイオンや自由電子、蛍光のような電磁波、あるいは、化学反応などを利用します。

下の図のように電極の間の気体を放射線が電離すると、多数の自由電子が発生します。この時流れる電流信号から放射線の量などを知るのが**電離箱**です。有名な**GM**（ジーエム）計数管^{*1}は、ガンマ線やベータ線の個数を計数しますが、発生した自由電子をさらに電場で加速して周囲の気体分子にぶつけてこれを電離し、もっと多数の自由電子をつくりだす仕組みになっています。自由電子は次々に増えながら電極と呼ばれる細いワイヤーに集められ、大きな電流となって電気回路に流れ込みます。電気回路の方では、この電流信号をもとに、放射線が何個飛んできたかメーターに表示したり、音にして聞こえるようにします。

電離箱やGM計数管のようなものを**放射線検出器**といいます。これを使って私たちは間接的に放射線を目で見、耳で聞くことができるわけです。



放射線による気体の電離作用を利用した放射線検出器の原理：
放射線によって気体が電離されると、陽イオンは負の電極へ電子は正の電極へ引き寄せられて、電流が流れる。

^{*1} 発明した二人の科学者の名前からガイガー・ミュラー計数管と名付けられ、一般的にはGM計数管と略して呼ばれています。放射線検出器としては最も古典的ものですが、簡便なため、現在でも盛んに使われています。

放射線の検出

蛍光を観測する放射線検出器の多くは、実際は光電効果などを利用して光をいったん電子に変えてから、電流や電圧の変化といった電気信号として取り出す仕組みになっています。

化学反応を利用したもっと便利な放射線検出器もあります。感度の高い写真乾板を使えば放射線の飛跡がわかります。コバルトガラスのように放射線の照射により変色するものや、透明なゼリー状の物質に気泡ができるものもあります。色の変わり具合や、飛跡や泡の数でおおまかに放射線の量を知ることができます。

適切な放射線検出器を使えば、放射線の種類やエネルギーの大きさ、どの方向からやってきたかなど様々な情報を得ることができます。

以下に、主に放射線安全管理に使われる放射線検出器の例を示します。

代表的な放射線サーベイメータ



GM サーベイメータ



電離箱サーベイメータ



中性子サーベイメータ



シンチレーションサーベイメータ



単位の話 (4) 線量

照射線量 : C/kg-air (クーロン毎キログラム空気)、
R (レントゲン)

ある場所の엑クス線やガンマ線の量を、それらが空気を電離する割合で表した単位です。1 レントゲンは、1 キログラムの空気の中に約 1.6×10^{15} 個の自由電子を作るような엑クス線やガンマ線の量に相当します。電氣量であらわすと 2.58×10^{-4} クーロンになります。

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg-air}$$

吸収線量 : Gy (グレイ)*¹

放射線が物質と相互作用した結果、物質に吸収されたエネルギーの割合を表わす単位です。1 グレイは、放射線によって1 キログラムの物質中に1J (ジュール) のエネルギーが吸収されることを表します。

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

実効線量 : Sv (シーベルト)*²

人体が放射線を被ばくした場合、吸収線量、つまり人体が吸収したエネルギーの総量は同じであっても、放射線の種類や被ばくした臓器・器官の種類によってその生物学的影響は違います。実効線量とは、放射線防護の目的から放射線の人体に対する影響の程度を考えて定められた単位です。この単位で被ばく量を表せば、条件の異なる放射線照射の人体に対する危険度の目安となります。

*1 吸収線量の古い単位であるラド(rad)とは次の関係にあります。

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

*2 実効線量の古い単位であるレム(rem)とは次の関係にあります。

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

R, rad, rem はいずれも CGS 単位です。

日常生活での放射線被ばく

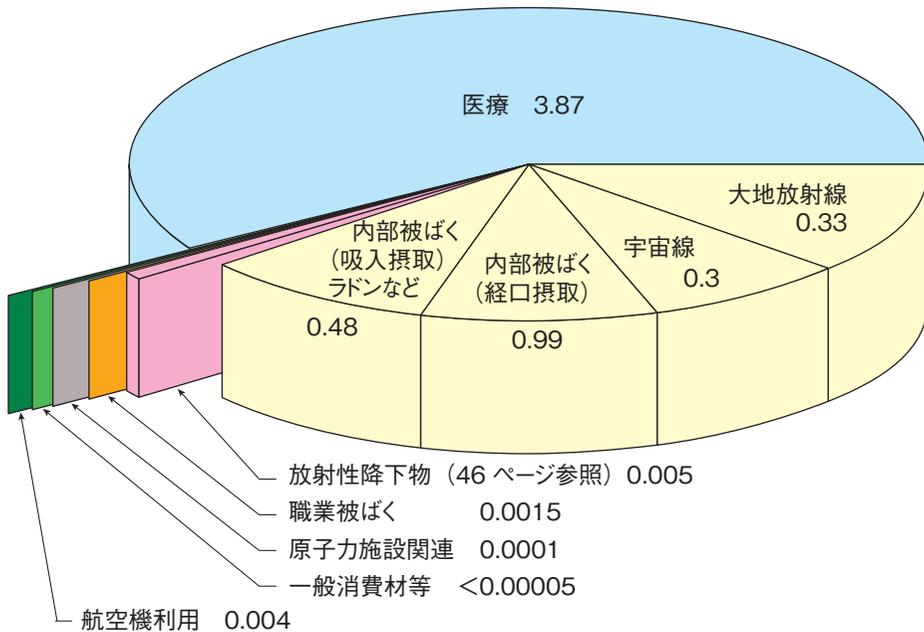
私たちの身近にはどのような放射線があるのでしょうか。

発生源のところ（34、35 ページ参照）で述べたように、放射線や放射性同位元素には自然のものと人工的なものがあります。このうち、日常的に私たちに最も関係が深いのは、**自然放射線**と**医療用放射線**です。

まず、いろいろな放射線発生源から日常生活で人間が被ばくする割合を見てみましょう。2011 年に日本人について調べられたものを例として下に示します。黄色の部分で自然放射線で、全体の 35% をしめています。一般人の放射線被ばくの量の大部分は自然放射線と医療用放射線に起因しています。

調査は東日本大震災の前に行われました。従って、同大震災により福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の影響が現れる期間は調査期間に含まれていません。

一人当たりの線量 5.98mSv/年



日本人の環境放射線被ばく線量 (mSv/年)

〔「新版生活環境放射線」原子力安全研究協会 (2011)。

表 7.1.1、表 7.1.5 および表 7.2.1 の値から作図]

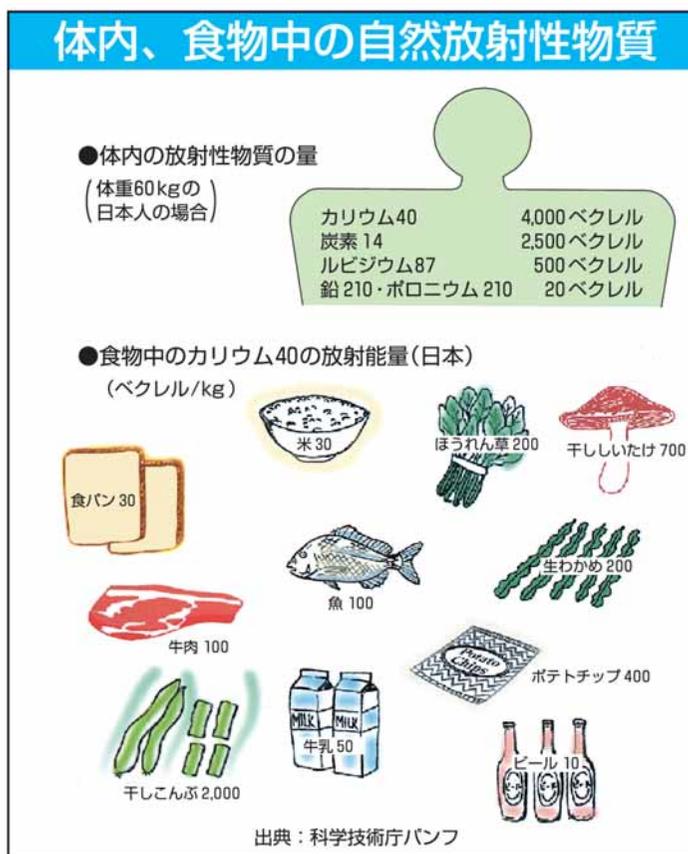
自然放射線の種類

それでは昔から人間がつきあってきた**自然放射線**について見てみましょう。

地球には、**太陽系や銀河系宇宙**から常にいろいろな放射線（**一次宇宙線**）が降り注いでいます。その大部分は高速の陽子線です。これらは、地球大気の大気中の窒素や酸素の原子核と衝突し、高エネルギーの原子核、中性子、中間子、電子、ガンマ線といった放射線（**二次宇宙線**）をつくりだします。地上で私たちが直接あびているのは二次宇宙線のほうです。

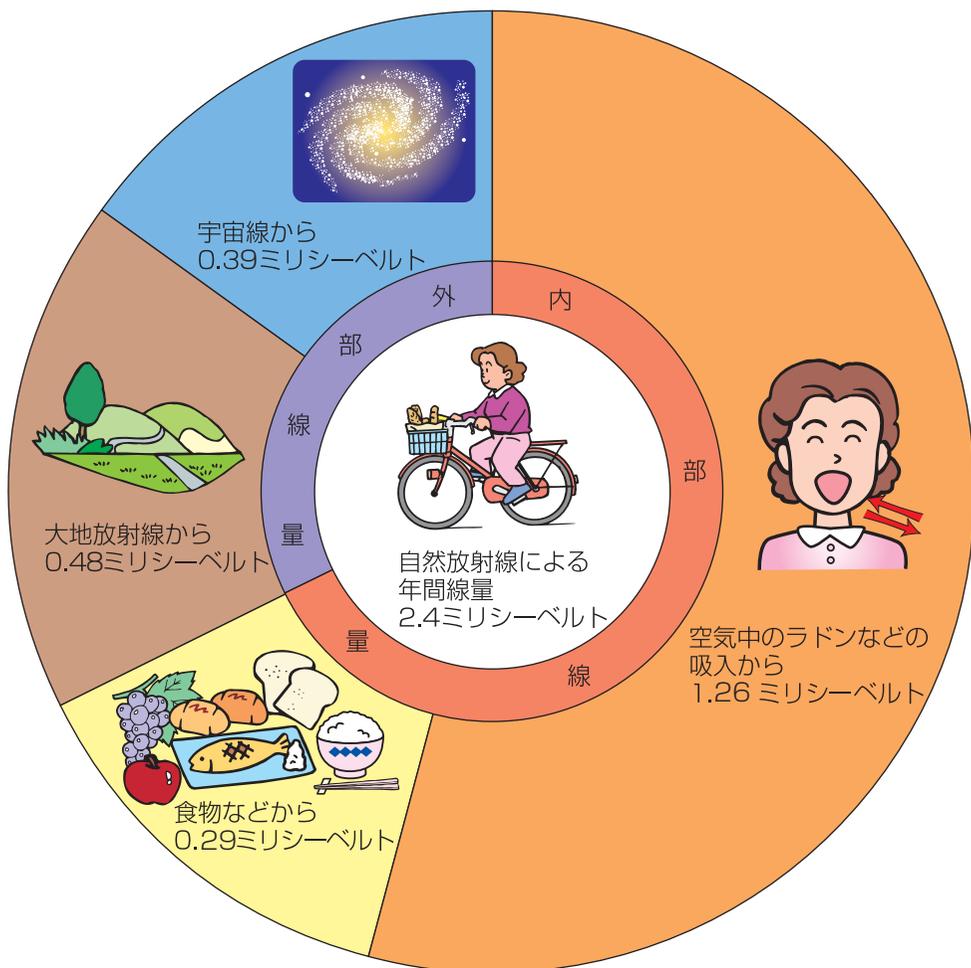
また、**大地**に含まれるウラン、トリウム、カリウム-40 (^{40}K) などの自然の放射性同位元素からはガンマ線が出ています。

これらの放射性同位元素は、**呼吸や食物**などを通じて私たちの体の中に取り込まれます。カリウム-40などは筋肉に多く存在します。空気中のラドンという気体の放射性同位元素や、ラドンが放射性壊変してできた娘核種や孫核種は呼吸によって肺に吸い込まれますがこれらが放出するアルファ線やベータ線は体内被ばくの大きな原因の一つとなっています（49ページ参照）。



自然放射線の量

人間が一年間に被ばくする自然放射の量はどのくらいでしょうか。2008年国連科学委員会の報告では全世界で人類が平均的に被ばくしている自然放射線は下の図のように推定されています。全世界平均では年間2.4ミリシーベルトであり、主要な変動範囲は1-13ミリシーベルトです。日本における値は2.1ミリシーベルト（2011年推定値）となっています。

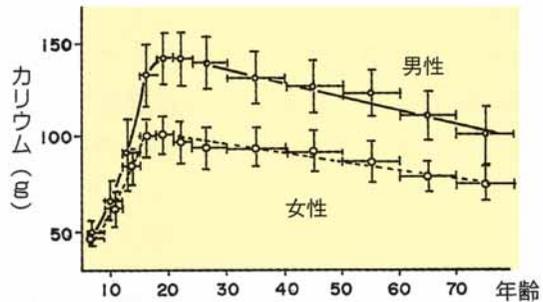


自然放射線の内訳（全世界平均、2008年国連科学委員会報告）

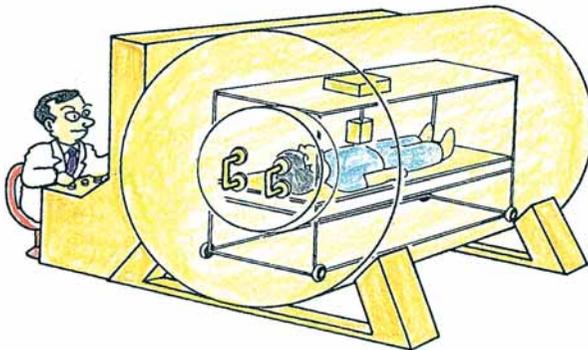
豆知識 男性に多いカリウム -40

人間の筋肉に多く存在するカリウムという元素には放射性同位元素カリウム-40が約1万分の1の割合で含まれています。人間の体には他にも天然の放射性同位元素が存在しますが、カリウム-40が放出するガンマ線は透過能力が強いため、かなりの部分が体の外に通り抜けてきます。

ヒューマンカウンタを使うとカリウム-40のガンマ線を簡単に測定することができます。図はおよそ2000人の人について各人の体から放出されているガンマ線を測定し、全身のカリウム量を推定したデータです。同じ年齢で比較すると女性に比べ筋肉の多い男性の方が1.5倍もカリウム-40による放射能が強いことになりま



す。体重60キログラムの男性は1秒間に480個のガンマ線を体から出している計算です。



ヒューマンカウンタ

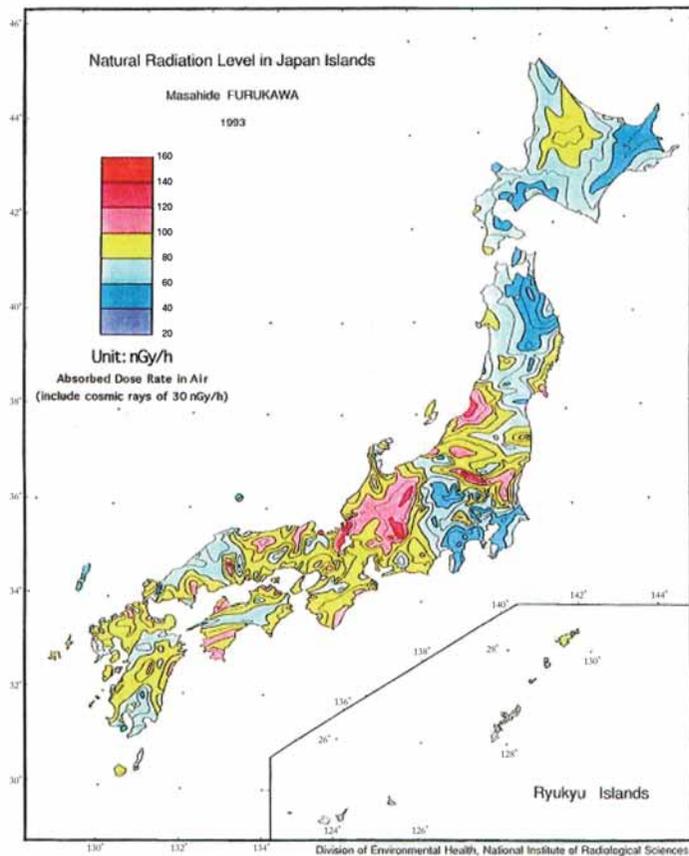
周囲の放射線を遮蔽するため鉄の箱の中に人間が入り、体から出てくるガンマ線の強さやエネルギーを計測すると体内に含まれている放射性同位元素の種類や量を調べることができます。現代人をヒューマンカウンタで測定すると、カリウム-40の他に放射性降下物(46、47ページ参照)から摂取したセシウム-137が検出されます。

自然放射線の量

自然放射線の量は地域によってどのくらい差があるのでしょうか。

日本各地の宇宙線と大地からの放射線の量を下の図で見てください。これには、ラドンなどの内部被ばくは含まれていません。関西や中国地方は放射性同位元素を多く含む花崗岩地帯が多いので大地からのガンマ線の量が多く、逆に、関東平野は火山灰地のためガンマ線の量は少なくなっています。

大地からのガンマ線が高いところとして、外国ではインドのケララ地方やブラジルの一部が知られています。この地域では年間数十ミリシーベルト程度と、なんと日本の数十倍もの値が報告されています。



全国自然放射線量：古川雅英；日本列島の自然放射線レベル、
地学雑誌、102, 868-877 (1993).

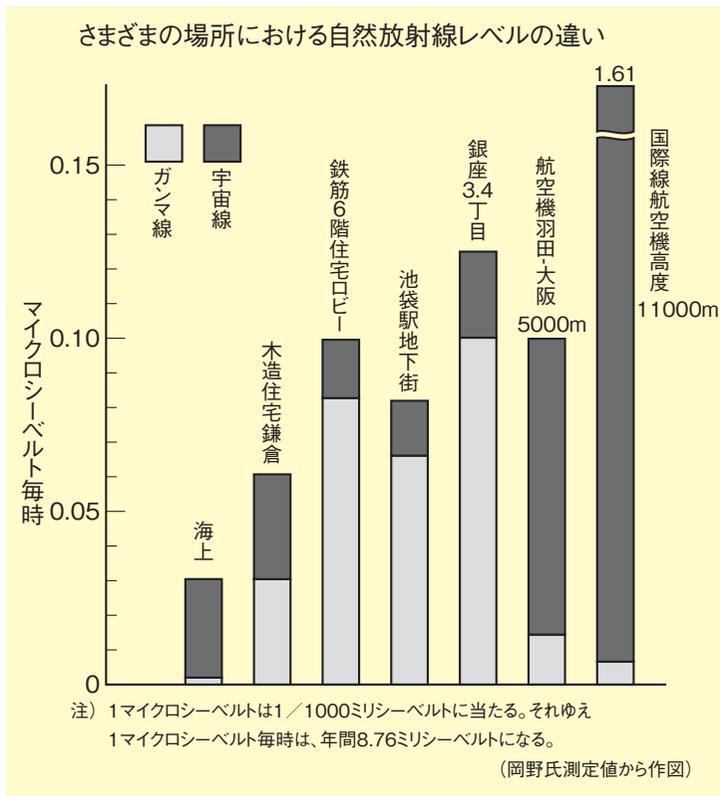
自然放射線の量

生活環境の違いも放射線の量に大きく影響します。

コンクリートの建物は、宇宙線や大地からの放射線を遮る力は大きいのですが、コンクリートや骨材自身が天然の放射性同位元素を比較的多く含むため、木造建築より建物から発生する放射線の量は多くなります。

花崗岩の敷石の道路の両側に立派なビルディングの立ち並ぶ銀座通りは、海の上比べてガンマ線の量が4倍も多くなっています。これは、海上では大地からの放射線が海水によって遮られ、また海水自体は土に比べあまり放射性同位元素を含んでいないからです。

飛行機に乗った場合も大地から遠ざかるので放射線は減るような気がしますが、高度が高いほど宇宙線による被ばくが急激に増えます。例えば、海外に行くとき1万メートルの上空を30時間も飛ぶと地上にいる場合に比べ50マイクロシーベルト（0.05ミリシーベルト）程度多く被ばくすることになります。



室内のラドン濃度

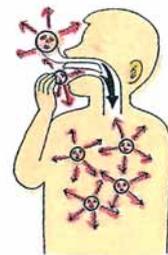
ラドンは地殻中に存在するラジウム-226の娘核種です。気体なので常に大地から大気中に放出されており、その放射能濃度は屋外空気中で1立方メートル中に約5ベクレル程度です。

最近、住居内のラドン濃度の増加が注目されています。昔の日本家屋は木造ですきま風が多かったので室内のラドン濃度はそれほど高くなかったと考えられますが、現在では鉄筋コンクリートの建物が増え、アルミサッシが普及したおかげで室内は密封状態になりやすくなっています。わが国でもコンクリートなどの建築材から放出され室内にたどむラドンの濃度は通常屋外の2～3倍程度高くなっています。

ラドンやその娘核種による体内被ばくは、世界の平均でも自然放射線による被ばく線量の約半分をしめると推定されており、スウェーデンのように特に室内ラドン濃度の高い国では放射線防護の対象として環境問題の重要課題の一つとなっています。

家屋内ラドン濃度と実効線量当量率

国名	濃度 ベクレル/m ³ *	実効線量当量率*** ミリシーベルト/年**
オーストリア	12	0.73
カナダ	17	1.0
デンマーク	4.8	0.3
フィンランド	17	1.0
ドイツ	8.1	0.5
ハンガリー	20	1.2
	120	7.3
ノルウェー	11	0.7
	26	1.6
ポーランド	6-17	0.4-1.0
スウェーデン	60	3.7
イギリス	15	0.9
	13	0.8
アメリカ	15	0.9
ロシア	4.8	0.3
	16	1.0
数カ国	18	1.1



ラドンとその娘核種は体内被ばくの原因となる

* 1ベクレル=27ピコキュリー

** 1ミリシーベルト=100ミリレム

*** 肺の線量に荷重係数0.12を乗じて全身と等価にした値
(国連科学委員会報告1982)

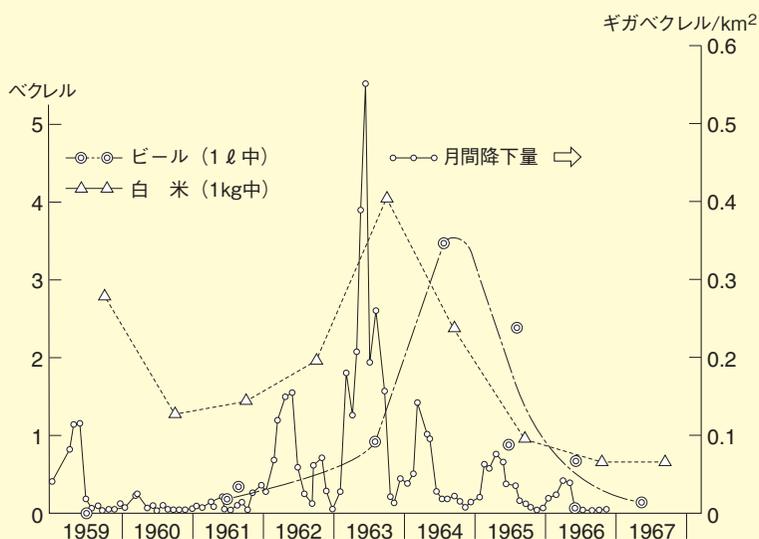
放射性降下物

1950年代末期から1960年代にかけて、世界各地で大型の大気圏内原水爆実験が相次ぎ、いろいろな放射性同位元素が大気中に放出されました。これらは気流に乗って全地球上に広がり、雨などに混じって地上に降ってきて環境の放射線を増す原因となりました。これを**放射性降下物（フォールアウト）**と呼んでいます。

現在でも、私たちが日常食べている食品にはこの放射性降下物による放射性物質が微量ですが含まれています。

有名なセシウム-137 (^{137}Cs) の例を見てみましょう。下の図は東京で測定したセシウム-137の月間降下量と国産穀物中のセシウム-137の量を表わしたものです。セシウム-137の降下量が増えるとその後収穫される米や麦など穀物中のセシウム-137の量も大きく増加することがわかります。

日本産ビール、白米のセシウム137および月別降下量の変化



注) 1ベクレルは約27ピコキュリー、1ギガベクレルは 10^9 ベクレルである。

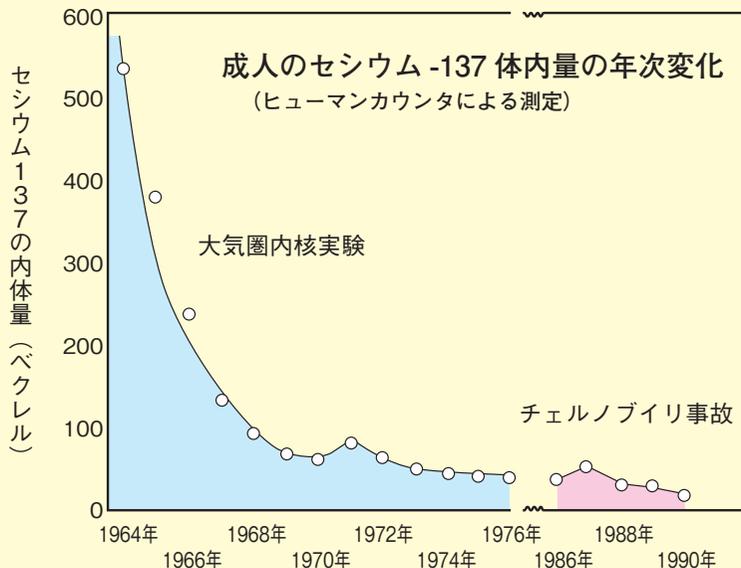
内山正史：セシウム-137の全身内部被曝に関する研究より

放射性降下物

当然、食品を経由して人間の体内に含まれるセシウム-137の量も増えていきます。下の図はヒューマンカウンタで体内のセシウム-137含有量を調べたものです。1962年で米ソの大気圏内での核実験が停止したので、環境中のセシウム-137の量が減り、それにもなると、体の中のセシウム-137も減ってきています。

セシウム-137と並んで重要なのは、ストロンチウム-90です。半減期が短いものは空から地上に落ちてくる前に放射線を放出して安定同位元素に変化してしまい、直接私たちに影響を与えることはありません。しかし、セシウム-137は30年、ストロンチウム-90は28年と半減期が長いため、この二つは長期にわたって空から降り続け、環境を汚染することになります。

1982年の国連科学委員会の報告書ではこれらの放射性降下物が全人類に与える影響は自然放射線源の約3年分に相当すると推定されています。



内山正史：「ホールボディカウンティングと日本人の放射性セシウムによる内部被曝線量」放射線科学、Vol.34、No.6、P169-P170、1991。
1986年以降のデータはセシウム-137とセシウム-134との和である。チェルノブイリ事故（1986年）の影響で1987年のセシウム-137の体内量は再び増加した。

医療放射線

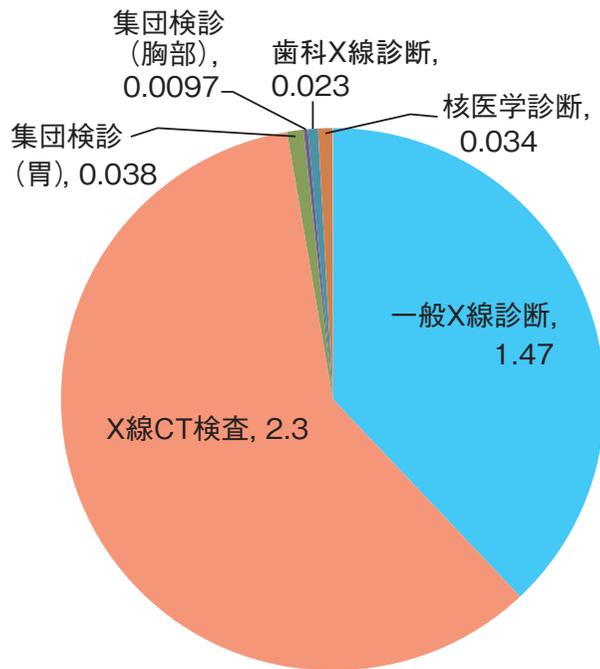
あなたは、胸部エックス線撮影や、バリウムを飲んで行う胃部エックス線撮影、あるいは歯医者さんでレントゲン撮影を経験したことがありますか。

これらは、いずれも人体の各臓器や筋肉、骨や歯に対するエックス線の透過率の違いを利用して体内の写真を取り、治療に役立てるものです。

最近では、エックス線をあらゆる角度から照射し、透過率の違いをコンピュータで解析して、目的の臓器などの映像をブラウン管に映し出せるようにしたものがあります。これをエックス線CT検査、通称シーティースキャンといい、脳内出血などの脳の診断に威力を発揮しています。

医療被ばくには、エックス線撮影の他に、放射性同位元素を投与する肝臓検査やコバルト-60からのガンマ線をつかったガン治療などがあります。図は検査や診断で受ける放射線の量の国民一人当たりの推定値です。X線診断における1検査当たりの平均実効線量は、0.07mSvと報告されています。

(なお、図中のX線CT検査の値のみ、1995年当時の0.8から2001年での2.3(新版生活環境放射線に記載されている値)に変更してあります。)



病院の検査や診断で受ける国民一人当たりの年間実効線量 (mSv/年)

[丸山隆司編：生活と放射線、放医研環境セミナーシリーズ22、1995より]

人体に対する放射線の影響

いままで見てきたように、私たちの身の周りにはいろいろな放射線があり、人体に影響を及ぼしています。

まず、第1が呼吸によって大気中の自然の放射性同位元素を吸い込み主として肺に被ばくを起こす**体内被ばく**、第2が、宇宙線や大地、放射性降下物からのガンマ線を体の外から被ばくする**体外被ばく**、第3が飲食物を通じて体内に取り込んだ放射性同位元素からの**体内被ばく**です。

それでは、放射線は人体にどのような影響を与えるのでしょうか。これには、放射線をあびた本人に影響が現れる**身体的影響**と、その人の子供に影響が現れる**遺伝的影響**があります。また、身体的影響は**急性効果**と**晩発効果**に分けられます。



豆知識 アルファ線の体内被ばく

アルファ線は透過能力が弱いため空気中でもたかだか数 cm しか飛びません。生体物質の中では、さらにその 1000 分の 1、数十 μm (マイクロメートル) です。これは血液中の白血球の直径程度です。アルファ線が体内で発生した場合、生体組織の方から見ると、非常に局所的に莫大な数の電離や励起が突如起こるわけですから、その生物学的影響は大きなものになります。アルファ線による体内被ばくを極力避けなければならないのはこのためです。

急性効果

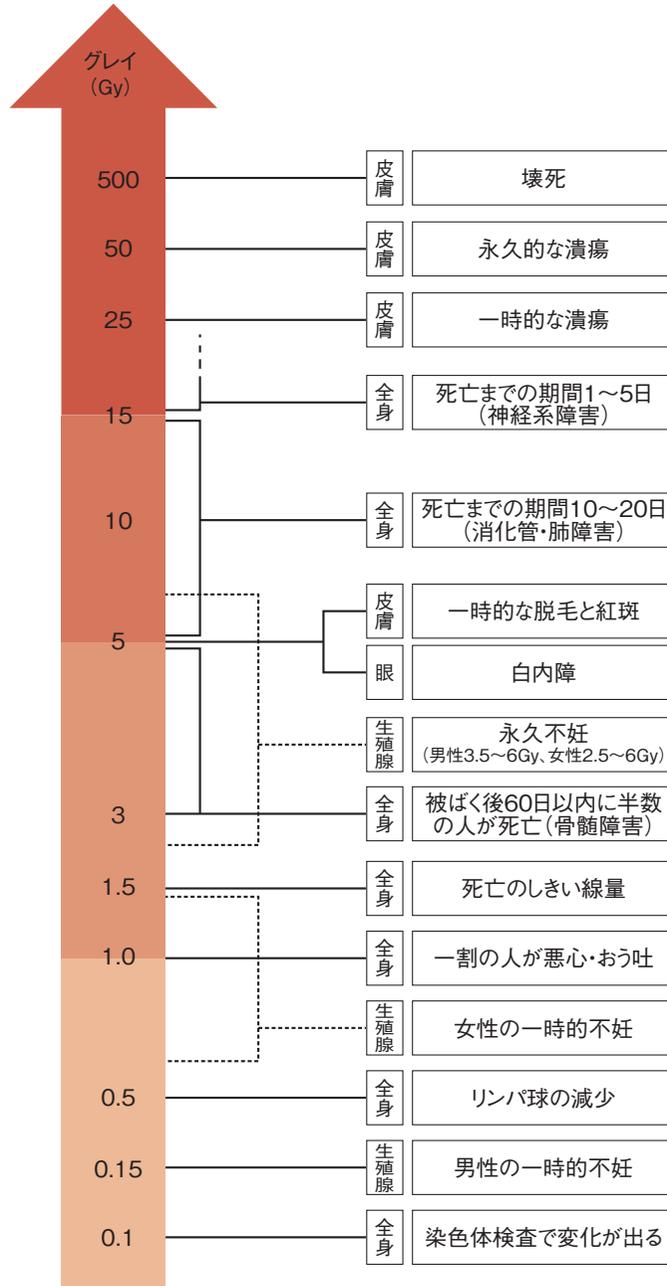
まず、身体的影響のうち、一度に大量の放射線を被ばくした後数週間以内に現れてくる急性効果について説明します。

人体は多くの細胞からできており、健康な細胞は細胞分裂を繰り返しています。細胞に放射線があたると細胞の中で分子の電離や励起が起こり、細胞が死んだり細胞分裂が遅れます。放射線の量が少ない場合には、近くの正常な細胞が分裂して障害を起こした細胞に置き変わり、臓器や組織は元通りに回復します。しかし、一度に大量の放射線を受けると正常細胞の回復力が追いつかず、その臓器や組織に障害が起きることになります。

人間の体は、場所によって放射線に対する感受性が違います。細胞分裂の盛んな組織ほど放射線の影響を受けやすく、造血器官、生殖腺、腸管、皮膚などは放射線に対して高い感受性を持ちます。逆に、肝臓、筋肉、脳など細胞分裂をほとんど起こさないものは放射線の影響を受けにくいといえます。

高感受性の器官や組織全体を含む全身が被ばくすると、人体は致命的な障害を引き起こします。次ページの図は、放射線を全身や一部の器官に一度に被ばくした時どうなるか、被ばく線量の違いで示したものです。全身に3～5グレイの放射線を被ばくすると、60日以内に半数が死亡し、被ばく量が7から10グレイに及ぶと、ほぼ百パーセントの人が死亡するといわれています。人の死亡のしきい線量は1.5グレイとされています。いしかえると、1.5グレイを超えた場合、人によっては死亡する可能性があります。しかし、1グレイ以下では死亡することはありません。

いろいろな症状が現れる被ばく量



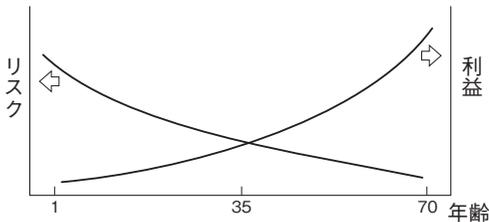
辻本 忠、草間 萌子：放射線防護の基礎、日刊工業新聞 (1995年)、第6章より作図

晩発効果

被ばく後、しばらく症状の現われない潜伏期間があるものを**晩発効果**と
いいます。代表的なものに、**ガン**や**白内障**、**寿命短縮**、**不妊**があります。

放射線によって細胞の中の DNA など遺伝物質が損傷すると細胞再生産
がうまく行われなくなります。発ガンはこれが体細胞について起こった場
合であり、細胞は無秩序に細胞分裂を繰り返します。しかし、DNA が損傷
を受けても生体の修復能力によりほとんどの DNA は元通りになります。

発ガンの潜伏期間は、放射線の量や被ばくした部位、年齢などで異なり
ますが、だいたい 10～30 年程度です。また、死に到るような発ガンの
可能性は、全身に 1シーベルトの放射線をあびた場合、5.5%程度です。
一度に 2シーベルト以上を目に被ばくした場合に起こる白内障の潜伏期間
は数年から数十年といわれています。

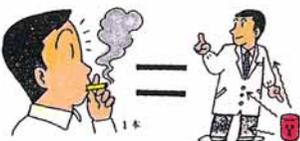


胃部エックス線検査を受ける利益とリスク
(年齢による変化) (概念図)



年をとると、リスクがへる。
これは、晩発効果が数10年の
潜伏期間をもつため、老人の
発ガン率が低くなるためです。

豆知識 タバコと放射線



ガンや白内障は、ほとんどの場合、
放射線に起因するものと他の原因で発
生したものと区別することが困難です。
例えば、1日20本のタバコを1年間吸い
続けた人の発ガンの確率は、70～280ミリシーベルトの放射線被ばく
をうけた人と同じ、という報告もあります。

遺伝的影響

生殖細胞の中の遺伝物質が損傷を受けた場合には**遺伝的影響**が現れることがあります。ショウジョウバエやハツカネズミなどの生物実験では放射線による遺伝子突然変異が証明されています。しかし、人間では放射線による遺伝的影響が確認された例は今のところありません。

生物実験からの推定では、両親のどちらかが1シーベルトの被ばくをした場合、子供または孫に重度の遺伝的障害が現れる確率は0.2%といわれています。

現在、出生児の100人に1人は何らかの遺伝病を持っているとされ、これに比べるとかなりその発生確率は低いといえましょう。

しかし、遺伝的な影響は子孫に伝えられるものですから、放射線防護の立場からは社会的に重要と考えられています。



豆知識 遺伝病と放射線

新生児の100人に1人は、遺伝病を持っているといいましたが、環境因子と組合わさって病気になる障害も含めると10人に1人くらいの数になるといわれています。人間は誰でも平均して数個の有害遺伝子を持っていることから考えるとそれほど不思議なことではないのかも知れません。アメリカの放射線影響研究所のシャム博士は7万人の被ばく者の出生時を対象に死産や先天性奇形などを調べましたが、明らかな被ばくの影響は認められませんでした。むしろ、従兄弟結婚などの近親婚の方が遺伝病への関わりが深いという結果になっています。

胎児への影響

器官や組織が作られる胎生期には細胞分裂が盛んなので、胎児が放射線の影響を受ける可能性は高くなります。

受精後2週から8週までの時期は、器官形成期と呼ばれ、身体の臓器や組織の基ができる時期です。この間に大量の被ばくをすると、**奇形**が発生します。被ばくによる奇形としてこれまでに知られているのは**小頭症**で、0.1グレイ以上の被ばくで発生すると考えられています。

受精後8週から15週の胎児は脳がつくられる時期です。この時期に被ばくすると精神発達が遅れる可能性があります。胎児が0.12～0.2グレイ以上^{*1}の被ばくをすると起こるといわれています。また、8週から25週の期間に被ばくすると、多く被ばくすればするほど知能指数（IQ）が低下することが知られています。1グレイ被ばくした場合には、約4割がIQが67以下の重度の**精神発達遅滞**を起こします。

このように、胎児が一度に100ミリグレイ以上の放射線を受けた場合には胎児に何らかの症状が現れる可能性があります。そのため、妊娠中は不用意に医療被ばくなどしないように注意が必要です。しかし、100ミリグレイに達しないような放射線量では生まれてくる赤ちゃんに奇形や知恵遅れなどの症状が見られることはありません。

*1 広島・長崎の被ばく者のデータから示唆されるしきい線量。

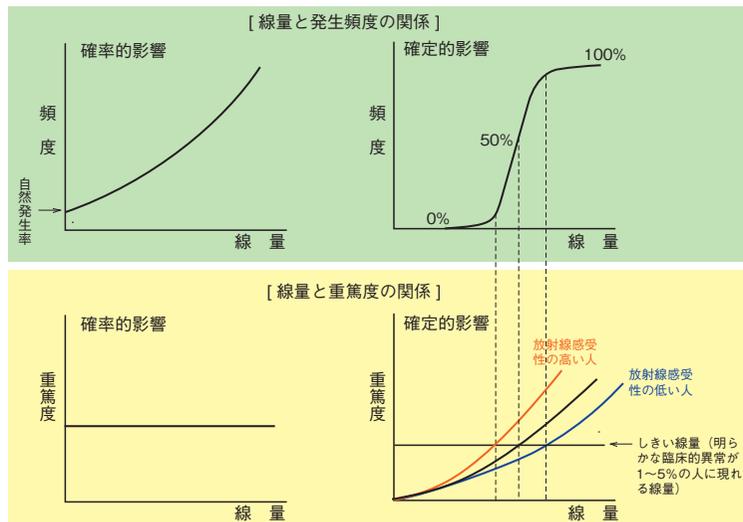
被ばく線量と影響の現れ方

被ばくをすれば、だれでも必ずガンになるというわけではありません。ただ、被ばくしなかった場合に比べ、発病の確率が高くなります。これを、**確率的影響**といいます。

遺伝的影響や、身体的影響のうち白血病や固形ガンなどの症状は、**被ばく線量が増加するほど発生確率も単調に高くなり、発病した場合の重篤度は被ばく線量の大小には関係しない**という特徴があります。

一方、放射線被ばくの量があるしきい値を越えると発生する症状があり、これを**確定的影響**といいます。急性効果と、晩発効果のうち白内障などがその例で、しきい線量を超えて被ばくすると、被ばく線量が大きくなるにつれて症状は重くなっていきます。

一般人がしきい値を超えた被ばくを受け、急性障害が現れるということはガン治療などの医療目的の大量照射を除いてまずありません。しかし、ガンや遺伝的影響は非常に低い被ばく線量からその障害がおきる可能性がある*¹ わけですから、できるかぎり無用な被ばくを避けることは大切なことです。



確率的影響と確定的影響 (ICRP Publ.41,(1984)より作図)

*1 広島・長崎の原爆被爆者に対する調査では、約200mSv以下では、がんの発生確率の増加が認められませんでした。しかし、この結果から「発がんにもしきい線量があるので、それ以下の少ない被ばく量ではがんや遺伝的影響は増加しない」とはっきり結論づけることはできませんでした。それで、放射線防護においては、より安全に考えようという立場に立ち、がんや白血病、遺伝的影響にはしきい線量がなく、少ない被ばく量でもその線量の増加と共に影響の発生確率が増加すると仮定されることになりました。

放射線防護の考え方

放射線に対する安全とは、どのような考え方に基づいているのでしょうか。

放射線の利用は、学術の進歩や産業の発展などに役立つ反面、人体に対し、放射線障害を引き起こす危険（リスク）をあわせ持ちます。この危険を避けるためには放射線の利用をすべて断念すれば良いのですが、一方私達の社会は常に発展を望んでいます。放射線の利用から得られる利益を考えると放射線障害の発生を最小限におさえつつ、その利用を効率的に進めていく必要があります。このような観点から放射線防護の基本的な考え方を世界中の専門家で議論しているのが**国際放射線防護委員会 (ICRP)**です。この委員会は、放射線の人体に対する影響に関する研究成果や社会的要因を考慮に入れ、放射線被ばくによる線量限度を明示する勧告をはじめとし、放射線防護に関する多くの勧告をまとめてきています。

放射線防護の目的は

- ①利益をもたらすことが明らかな行為が放射線被ばくを伴う場合には、その行為を不当に制限することなく人の安全を確保すること、
- ②個人の確定的影響の発生を防止すること、
- ③確率的影響の発生を制限するためにあらゆる合理的な手段を確実にとること

です。ICRP はこれらの目的を達成するために、放射線防護体系に、正当化、最適化、線量限度という「三原則」*¹を導入することを勧告しています。

* 1 三原則：

①**行為の正当化**（放射線被ばくをとまなういかなる行為もその導入が正味でプラスの便益を生むのでなければ採用してはならない。）②**放射線防護の最適化**（正当化された行為であってもその被ばくは経済のおよび社会的要因を考慮に入れながら、合理的に達成できる限り低く保たなければならない。）③**個人線量の限度**（いろいろな被ばくによって個人が受ける線量当量について、超えてはならない年線量限度を設ける。）



放射線防護の考え方

わが国では、ICRPの1962年の勧告を受けて、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」などが作られ、その後の勧告も取り入れられてきました。これらの法令によって、放射線や放射性同位元素を取り扱う事業所では、放射線レベルが法定基準を超える恐れのある場所を「管理区域」とし、管理区域に立ち入って放射線作業を行う者を「放射線業務従事者」として被ばく管理や健康管理、教育訓練を行うことなどが定められています。

1990年には、放射線を取り扱う職業人に対する被ばく線量限度（実効線量）として、5年間の平均が1年あたり20ミリシーベルト（ただし、いかなる年も50ミリシーベルトを越えるべきではないという条件付き）がICRPによって勧告されました。また、一般公衆に対する限度は1年あたり1mSvとなっています。

豆知識 リスク

ある行為や出来事が安全であるかどうかを判断するときに「リスク」という概念が使われます。リスクは危険度とか危険率と訳されることもあります。実用的には、リスクとは「障害の起こる確率と重篤度の積」で、ある危険な障害の起こる予測値と考えることもできます。例として、日本人の日常生活でのリスクを見てみましょう。表は1年間、10万人当たりの死亡にいたるリスクです。窒息、転倒・転落、溺死などのリスクが交通事故のリスクと同程度であることがわかります。また、いろいろな職業についても年間10万人当たりで死亡にいたるリスクが評価されており、日本の全事業の平均（男性）は25.4人、リスクの高い鉱業では262人となっています。放射線業務では、リスクの高い業種のリスクを超えないように被ばく限度が定められています。しかし、実際の被ばく線量の平均は被ばく限度をはるかに下回っており、放射線業務におけるリスクは、一般社会における安全な業種と同程度です。

日常生活での死亡にいたる不慮の事故のリスク
(10万人当たり、年あたり)

窒息	7.5
交通事故	6.0
転倒・転落	5.7
溺死	5.1
火災	1.2
中毒	0.7
その他	4.1
合計	30.3

日常生活での死亡にいたる不慮の事故のリスク（10万人当たり、年あたり）出典：厚生労働省：平成21年度「不慮の事故死亡統計」の概要

放射線の利用

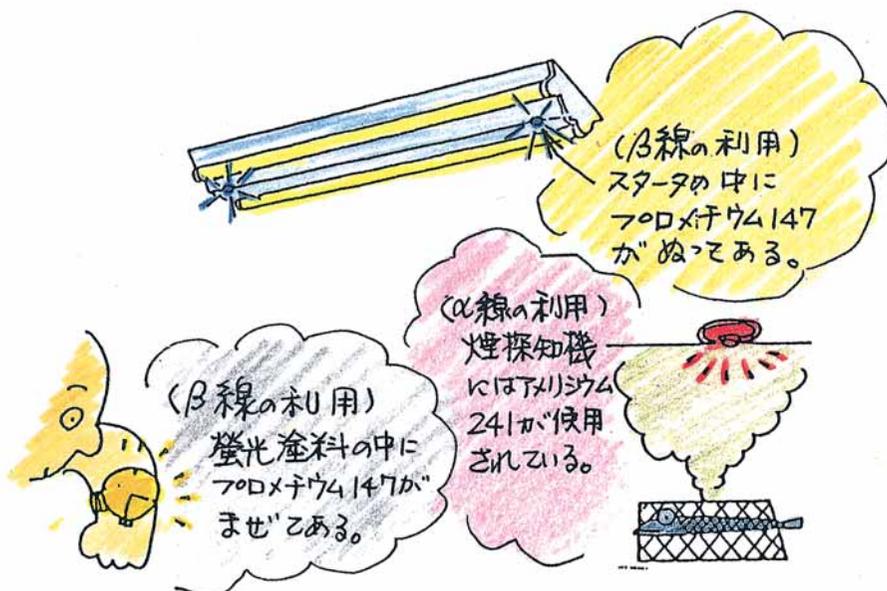
現在、人類が放射線を利用している方法には次ページのように大きく4つあります。

また、透過能力や電離、励起、蛍光などの放射線による**照射効果**を利用するために微量の放射性同位元素を使った製品は身近なところにもいろいろあります。

ベータ線を放出する放射性同位元素（トリチウム、プロメチウム-147）は蛍光体と混ぜ合わせて自発光塗料として夜光時計の文字盤などに使われています。蛍光灯のスタータやカメラのストロボ充電表示などによく使われる表示管は、ベータ線の**電離作用**で放電が確実に始まるよう放射性同位元素が内部に塗られています。

煙探知器にはアメリカシウム-241が使われているものがあり、応答性や感度に優れています。アルファ線の電離作用によって小さな隙間に電流が流れ、この隙間に煙の微粒子が入ると電流を遮るため煙を感知できます。

中性子線を放出するカリフォルニウム-252を利用したものに中性子水分計があります。堤防・ダムなどの水量の管理、コンクリートや製鉄原料などの品質管理に使用されています。



放射線の利用

利用方法		利用例（方法、製品）	
トレーサ利用	物理的トレーサ	流速、流量の調査、漏れ調査、漂砂や河泥の移動調査、機械の摩耗測定、潤滑油の循環状況の調査、溶鉱炉の減損量測定、行程解析	
	化学的トレーサ	分析化学的利用、化学反応の機構の研究、化学構造の決定、生体機能の研究、生化学研究、遺伝子工学研究、医学研究、体内診断薬、体外診断薬、新薬開発	
照射利用	透過、吸収 散乱作用	計測制御	厚さ計、液面計、レベル計、密度計、濃度計、雪量計、地下検層計、中性子水分計、硫黄計
		非破壊検査	ガンマ（エックス）線のラジオグラフィ、中性子ラジオグラフィ
		診断	エックス線撮影、エックス線透視、エックス線造影検査、エックス線CT
	電離、励起 作用	イオン発生	煙感知機、蛍光灯のグロー放電管、表示用放電管、真空計、ガスクロマトグラフ、避雷針
		光の発生	自然光塗料
		分析	蛍光エックス線分析、硫黄計
	化学的作用	改質	耐熱性電線、発泡ポリオレフィン、熱収縮性チューブ、硬化塗料、強化プラスチック、コンクリートポリマー、強化木材
	生物学的作用	殺菌、殺虫、 防虫	医療用具の滅菌、検査用具・実験動物飼料・食品の殺菌、害虫防除
		保存	発芽防止、熟度調整
		育種	品種改良、生育調節
		治療	がんの治療、甲状腺治療
	原子核反応	分析、治療	微量元素分析、アクチバブルトレーサ法、脳腫瘍治療
	熱源利用		アイソトープ電池
年代測定		考古学的、地質学的試料の年代測定	

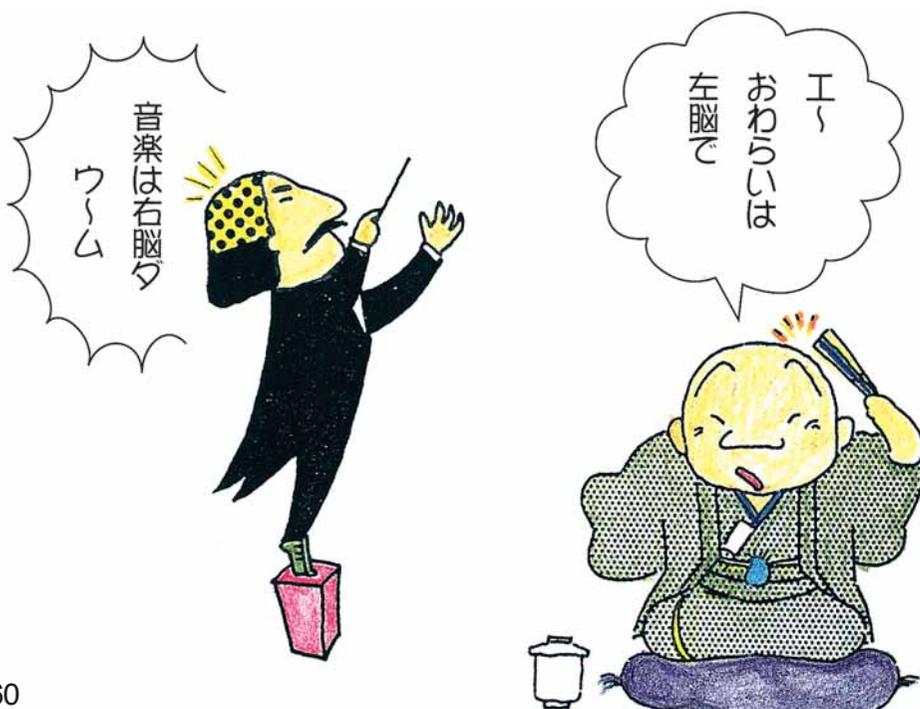
放射線診断

レントゲン撮影、エックス線 CT 検査など放射線による診断は、現在ではほとんど全ての疾患を対象として一般的に行われています。検診も含めると年間の検査件数は数億件に及ぶとされています。胸部エックス線撮影による結核の集団検診がわが国でも大きな効果を上げたことは良く知られています。われわれにとっては最も身近な放射線の利用法といえるでしょう。

最近では精神医学の分野で**ポジトロン CT**が威力を發揮しています。ポジトロンとは陽電子のことです。陽電子は物質に吸収される時に互いに反対方向に 1 対のガンマ線を放出します。体から出てきたガンマ線をポジトロン CT で検出すると陽電子がどこで発生したかわかります。

脳が活動している時にはエネルギー源としてぶどう糖が消費されます。陽電子を放出する放射性同位元素を含んだぶどう糖を人体に投与してからポジトロン CT で脳を観察するとどこでぶどう糖がたくさん消費されているか、つまり、脳のどの部分が働いているか知ることができます。会話している時には左脳に、音楽を聞いている時には右脳にぶどう糖の消費量が高い場所があることが映像からわかるそうです。

不安やストレスを与えた時の大脳皮質の映像の変化も観察できるなど精神医学の分野ではポジトロン CT は大きな武器として期待されています。



放射線育種

ショウジョウバエや大麦などにエックス線照射をすると突然変異の確率が高まり新種ができることが発見されて以来、農業の分野では、品種の改良などに放射線が利用されています。これを**放射線育種**といい、現在では安全性や突然変異を起こす効果の大きいことからガンマ線が最も多く用いられています。

新種の育成は、イネやムギ、レタス、トマトなどの作物の他に、ベゴニア、サツキなど特に園芸分野で盛んです。イネの新種類には、“レイメイ”や“アキヒカリ”などがあり、稲が倒れにくいという特徴を持っています。

最近では、梨の代表的な品種である「二十世紀」の新品種「ゴールド二十世紀」が作り出されました。二十世紀は黒斑病にかかりやすく栽培農家はその農薬散布などの対策に苦しんできました。ゴールド二十世紀は、黒斑病に対する抵抗性を持つ以外はほとんど二十世紀と同じで特定の1形質だけを変えるという突然変異育種の利点を見事に実現したものと高く評価されています。

また、米アレルギーの原因となる16kd グロブリンの含有量が低いものがコシヒカリの照射で発見されたり、人体内での消化率の高いタンパク質であるグルテリンの含有率が低い、肝臓患者のための低タンパク米が実用化されようとしています。



不妊雄技術

不妊雄技術というのは、放射線を照射して不妊化した雄虫を野外に放ち、その雄によって受精した卵が発育段階の途中で死亡することで子孫が増えることを防止する技術です。野生の雄の数以上の不妊雄を繰り返し放飼し続けると、最終的に害虫は根絶します。殺虫剤散布と違い、目的とする害虫にだけ影響を与える方法なので生態系への影響が少なく環境汚染などの恐れがありませんが、莫大な費用と極めて高度な技術が必要です。

農作物の害虫による被害は世界中で大きな被害をもたらしています。特にアジア地域では、ウリミバエ、ミカンコバエといったミバエ類が広く分布しており、植物防疫上寄生植物となる農業生産物の移動が厳しく規制されています。

日本では、小笠原諸島のミカンコバエや久米島のウリミバエなどに不妊雄技術が適応され、これらの病害虫が根絶したおかげで、それぞれの島から本土に農作物を出荷することが可能になりました。



放射線で厚さをはかる

工業の分野では、物質に放射線を照射した時の透過度や吸収の変化を利用する技術が幅広く使われています。食品包装用のラッピングフィルムやアルミ фоль、紙、鉄板など厚さが一様でなければならないような工業製品の工程管理には、連続測定のための厚さ計が用いられます。これは、放射性同位元素から出るベータ線やガンマ線を膜や板の片側から照射して、透過してくる放射線やある角度に散乱してくる放射線の量で製品の厚さを測定するものです。

過疎地の積雪量を遠くで観測するための積雪計や液面の位置を知る液面計なども同じ原理です。

また、人間がエックス線撮影をするように、エックス線やガンマ線を物体に照射して写真を撮ると、調べたい物を破壊せずに内部構造を調べることができます。このような方法をラジオグラフィーといいます。飛行機のジェットエンジンのタービンにひび割れや亀裂などが生じていないか調べたり、中性子線を照射してロケットの固形燃料の充填状態を調べたり、ラジオグラフィーの技術はいろいろなところに応用されています。



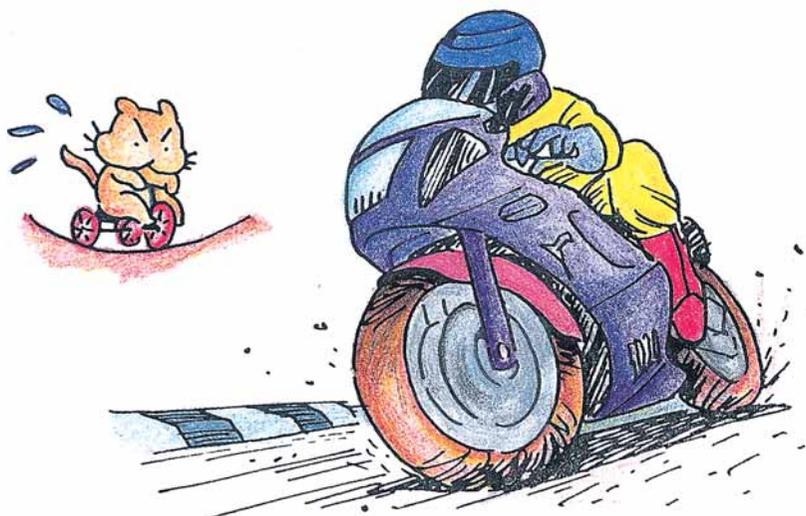
ラジアルタイヤと放射線

放射線照射はプラスチックの耐熱性、耐水性、対衝撃性、硬度などを向上させ、高品質、高機能のさまざまな工業製品が生み出されています。

プラスチック材料の一種であるビニル系モノマーに放射線を照射すると重合開始材が不要なためクリーンなプラスチックを作ることができます。ポーランドでは、ビニルピロリドン電子線で照射してつくった傷・火傷のカバー材が実用化されています。また、電子照射は、溶剤を使わず(無公害)、速く(高生産性)、常温で(省エネルギー)下地の上に高品質のプラスチック硬化塗膜を作ることができるので、紙容器オフセット印刷、フロッピーディスク、トンネル内包材、防曇フィルム、マスキングテープ、感熱紙などに応用されています。

ポリエチレンのようなプラスチック類は、放射線照射によって溶剤や熱に強くなり、機械的強度も向上します。ラジアルタイヤの分野では材料である生ゴムの強度を増し粘着性を下げるために、現在では国内で20台の電子加速器が使用されています。

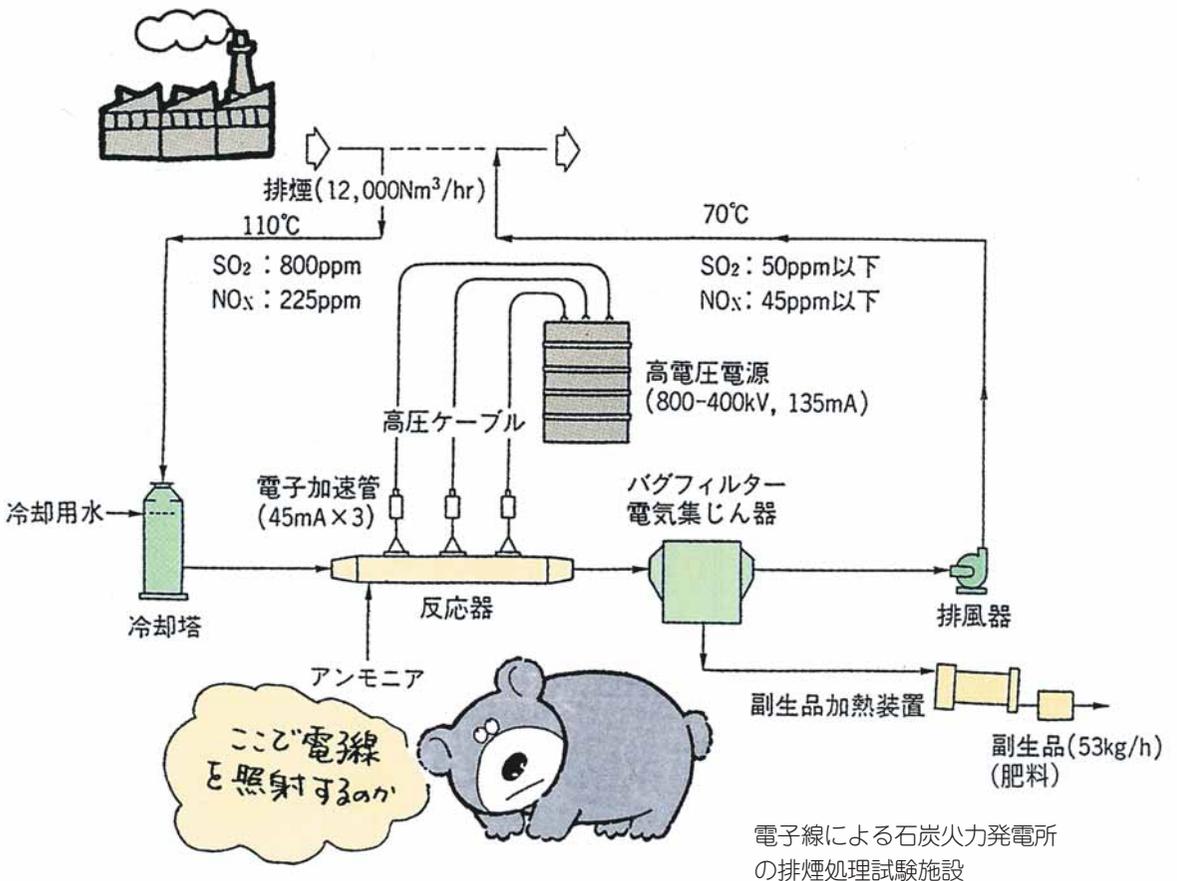
大量の水を含む親水性のプラスチックへの応用も進み、人工角膜や人工血管、ソフトコンタクトレンズといった生体材料や高機能材料への期待も高まっています。



環境を守る放射線利用

最近、環境保全のための放射線への応用が注目されています。現在日本で開発中なのは、火力発電所やゴミ焼却炉から出る排煙に電子線を照射し、排煙中に含まれる窒素酸化物や硫黄酸化物などの大気汚染物質を除去する方法です。NO_x や SO_x は硝酸、硫酸として回収できるので肥料として再使用できます。

また、排水や汚泥に放射線を照射し、有害な汚染物や微生物を分解、殺菌して再利用する技術の開発も各国で進められています。



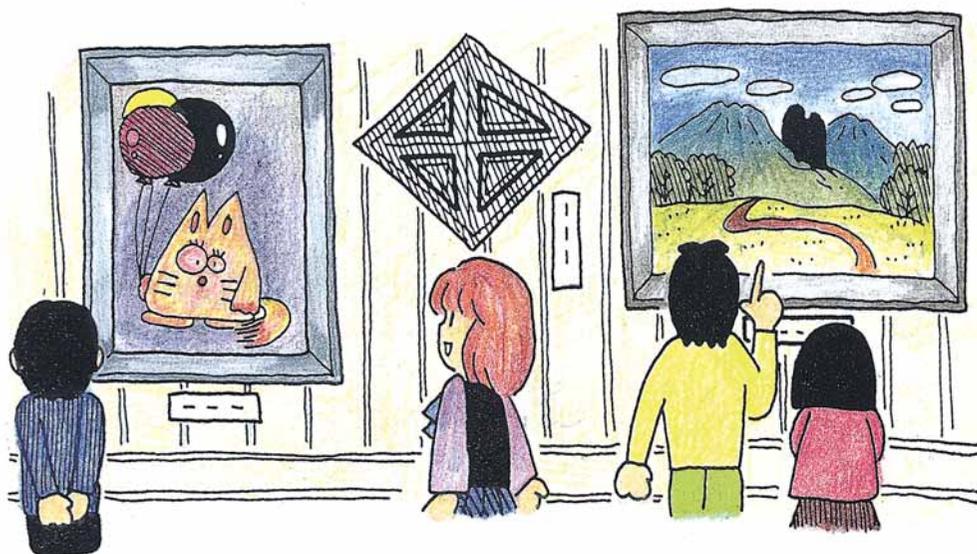
芸術と放射線

調べたい物を傷つけることなく、内部の微細な構造を観察できるというラジオグラフィーの方法は、芸術の分野でもその威力を発揮しています。

ミレーの「種まく人」はラジオグラフィーでその下に車輪が描かれていることがわかったそうですが、このように、名画の下に隠された絵の発見や、一部の書き換えが証明されて話題になったりしています。

古い仏像などでは、その胎内にいろいろなものが納められていることが発見されています。また、法隆寺の国宝、聖徳太子の座像は瞳の部分にコンタクトレンズのようにガラスが張り付けてあることがエックス線撮影で初めて明らかになりました。

こうした知識は、芸術作品の生まれたいろいろな背景や歴史的な変遷などを明らかにする重要な手がかりとなります。また、彫刻にエックス線CTを用いるとその微細な構造まで立体的に知ることができるというので仏像の修復などに利用されている例もあります。



おわりに

この冊子では、放射線や放射能を“できるだけ身近な情報でわかりやすく”説明することをめざしました。そのため放射性同位元素から出る放射線や医療放射線などを中心に話を進めました。物質の構造の話もせいぜい陽子や中性子といった核子のレベルにとどめてあります。

ですから、原子炉や加速器などで作られる特殊な放射線や、非常に高いエネルギーを持った放射線についてはほとんどふれていません。また、これらが引き起こす原子核反応など興味深い多くの現象は割愛しました。

この冊子を読んで、もっと詳しく知りたいと思われる方は巻末にあげた参考文献やもう少し専門の本を参考にしてください。

今後、皆さんが放射線・放射能といった言葉を耳にされた時、この小冊子の内容が少しでもお役にたてば幸いです。また、できるだけやさしく正確にと心がけたつもりですが、不十分なところも多々あります。遠慮なくご意見やご批判をお寄せ下さい。



参考文献

- 理科年表：東京天文台編纂、丸善（2000）
- 放射線のやさしい知識：飯田博美、安齋育郎共編、オーム社（1999）
- 「原子力」図面集：（財）日本原子力文化振興財団（1999）
- －物理工学実験 15－X線回折・散乱技術：菊田惺志、東京大学出版会（1996）
- 新版単位の小辞典：海老原寛、講談社（1994）
- 新・放射線の人体への影響：日本保健物理学会、日本アイソトープ協会編集、丸善（1993）
- 放射線の応用－現状と今後の展望－：原子力工業、Vol.39、No.2（1993）、日刊工業新聞社
- 放射線保健学：（社）日本放射線技師会編、マグプロス出版（1991）
- 国際放射線防護委員会の2007年報告：（社）日本アイソトープ協会、丸善（2009）
- 改訂版・やさしい放射線とアイソトープ：（社）日本アイソトープ協会、丸善（1990）
- 放射線障害の防止に関する法令－概説と要点－：（社）日本アイソトープ協会、丸善（1989）
- 暮らしの放射線学：市川龍資、電力新報社（1988）
- からだのなかの放射能：安齋育郎、合同出版（1987）
- 理化学辞典：岩波書店（1983）
- 放射線データブック：村上悠紀夫、團野皓文、小林昌敏編、地人書館（1982）
- 原子核物理学・微視的物理学入門－共立物理学講座 21－：菊地健、共立出版（1979）
- ラジオアイソトープ－基礎原子力講座 3－：原澤進、コロナ社（1979）
- 原子核の世界－物質の究極を解明する－：森田正人、講談社（1977）

裏表紙の図の説明文

電磁カスケードシャワーモンテカルロ計算コード「EGS5」によるシミュレーション：右下の図は磁場中で運動する電子の様子をシミュレーションしたものです。この図の下側には銅が置いてあり、銅には上方に向かう8.5 MeVの電子（赤色の飛跡）が入射しています。入射点付近から発生している黄色の飛跡は銅の中で電子が発生した制動放射（光子）です。同図の左中央部分には2.6 kGの磁場がかけられており、それによって、電子が右方向へと曲げられ、ミリメートルの孔を通過しています。磁場がない場合には、左上の図のように電子は直進してしまい、ミリメートルの孔を通ることはできません。また、光子も、磁場の影響を受けないので、磁場の中をまっすぐに進みます。

放射線の豆知識

暮らしの中の放射線



2013年12月発行 第4版



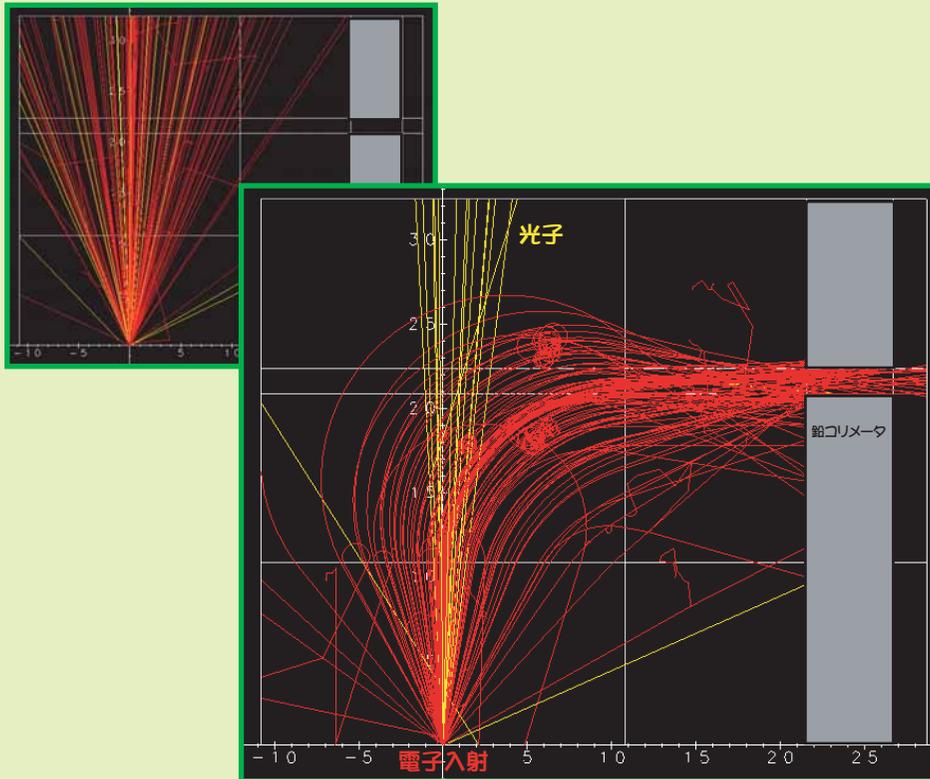
発行

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構
放射線科学センター



〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

電話 029-864-5495



2013年12月発行
高エネルギー加速器研究機構
放射線科学センター