

放射線学習指導資料

中学校・高等学校における放射線に関する学習指導の手引き
(改訂版)

2010年7月

NPO 法人放射線教育フォーラム

放射線学習指導資料

—中学校・高等学校における放射線に関する学習指導の手引き(改訂版)—

目次

(第一部) 放射線・放射能の基礎	
はじめに——本資料作成の趣旨など	1
1. 放射線・放射能発見以来の歴史	2
2. 放射線・放射能の基礎	4
2-1 大きい世界、小さい世界を眺めて見よう	4
(指導のねらい) 量的観念の重要性について	5
2-2 原子と分子、原子核と軌道電子	6
2-3 原子核の構造と安定性	7
2-4 放射性同位体と半減期	8
2-5 核分裂	9
2-6 原子炉と原子力発電	10
2-7 核燃料と核燃料サイクル	11
2-8 放射性廃棄物処理	13
(トピックス1) プルトニウムについて	14
(トピックス2) 放射性元素はどのようにして生まれたか	16
(トピックス3) 臨界と天然原子炉	18
(トピックス4) 核融合	19
3. 日常生活と放射線	21
4. 放射線の性質	24
5. 放射線の利用	25
5-1 医学的利用	25
5-2 産業への利用	27
6. 放射線の人体への影響	30
6-1 放射線が安全か安全でないかは量で決まる	30
6-2 高線量放射線の影響	31
6-3 低線量・低線量率放射線の影響	32
6-4 身体と放射線	33
7. 放射線の防護——放射線はどのように防ぐか	34
(Q&A)「少量の放射線被ばく(約100ミリシーベルト以下)は心配する必要がない理由」	36
8. おわりに——エネルギー問題・原子力・放射線に関する教育について	37
9. 参考文献リスト	38
第二部 「放射線実習の手引書」	39
第三部 「放射線の性質と利用」学習指導事例案	51

はじめに——本資料作成の趣旨など

学習指導要領が改訂され（平成23年度から全面実施）、中学校で約30年ぶりに理科（第一分野）で「科学技術と人間」のところで、エネルギー資源に関連して、「放射線の性質と利用にも触れること」という、やや消極的な表現ながら放射線のことを取り扱われることになりました。これに関して学習指導要領解説では、人間が水力、火力、エネルギー資源などを利用していることを教える際に、「原子力発電ではウランなどの核燃料からエネルギーを取り出していること、核燃料は放射線をだしていることや放射線は自然界にも存在すること、放射線は透過性を持ち、その性質を医療や製造業などで利用していることなどにも触れる」というように教えるべき内容の説明がされています。

NPO 法人放射線教育フォーラムは、社会及び学校における放射線やエネルギー問題に関する正しい知識の普及を目指して活動しているボランティア組織ですが、すべての中学校においてこの改訂に沿って放射線に関する教育指導が行われるよう、心から願っており、この目的のために組織を挙げて協力をしようとしています。この教師用指導資料の作成はその努力の一つである。

資料作成の参考にするために、最近全国の中学校の理科の教員にアンケート調査（5,000校に発送、23%回収）を行ったが、その集計結果によれば、中学校での放射線教育に関する30年の空白の影響は大きく、中学校の理科の教員でこれまで放射線に関して断片的にでも授業で取り上げた経験のあるのは50%以下で、また教員自身も学校で放射線を習ったことがない割合が30%もありました（アンケートの集計結果については、放射線教育フォーラムのホームページで公開しています）。

本資料の作成に当たっては、編集者の判断で放射線に関連して重要と考える諸項目について、上記の学習指導要領解説で述べられた項目に限定せず、教員の方々が基本的知識として学んでいただけるよう、多数の文献を参考にしてできるだけ簡潔に記述しました。教員の方々におかれては、各項目についてのご自身の興味と重要度に関する価値判断にしたがって、また実際に利用可能な年間の授業時間に応じて、自由に取り扱っていただくことを期待する。

ただし、放射線教育では、生徒一人一人は無理としても、1台の放射線測定器を使用したデモンストラーションによって、身の回りの環境に自然放射線があることを実感させることが極めて有効です。このことは義務教育の段階でぜひとも行っていただきたいことです。本資料でも放射線実習について特別に解説を加えました。

本資料は、あとの「奥書」にあるように、文部科学省の公募プロジェクトのテーマ「原子力に対する信頼醸成のための社会的アプローチ」の研究課題「学校教育現場との対話に基づく原子力・放射線学習プログラム開発」（研究代表者：北海道大学大学院杉山憲一郎教授）からの委託事業として実施されたものです。2008年度は中学校の教員を対象として、基本的な内容を取り上げて「試作版」としましたが、今年度は、高等学校での教育のために少し高度の内容を加えて、中学校・高校共通のものとなりました。最終年度の計画では、教員の方々のご要望に沿って、授業で直ぐに利用できるような資料とその解説を作成することを計画しています。

本資料の読者におかれては、この資料を利用して実際に教室で実践を行っていただき、その結果を今後の資料作成に役立てたいので、ご協力を心から希望します。また、放射線は基礎的にも応用的にも多岐にわたる専門的分野に関連しているので、現在の資料による記述だけでは理解しにくい箇所があると考えられる。その場合は私どもにご指摘いただければ、できる限りご要望にお答えしたいと考えています。

2010年3月

放射線に関する教育資料作成委員会委員長

(NPO 法人放射線教育フォーラム事務局長) 松浦辰男

1. 放射線・放射能発見以来の歴史

X線や放射能の発見から100年以上の歳月が過ぎました。これまでの研究によって、私たちが住む地球や宇宙の様子が徐々に明らかとなり、生物の身体や物質をつくっている限りなく小さな電子、原子核、クォークなどの世界が見えてきました。放射線、同位体、原子核、素粒子関連のノーベル賞の授与数は60件を超えています。

レントゲンによるX線の発見は、ベクレルによるウランからの放射線の発見、キュリー夫妻のラジウムの発見はラザフォードの放射性元素の壊変説につながりました。当時、ベルリンに留学していた長岡半太郎からX線の発見が伝えられ、X線の発見の翌年、日本でもX線写真の撮影に成功しました。

レントゲンは真空管の中で放電させて飛び出す陰極線がガラスにぶつかり、強い蛍光を出す実験をしているとき、ガラスから輻射線(X線)が出ていることを発見しました。フランスの数学者ポアンカレは太陽の紫外線により蛍光を発するウラン化合物などの結晶からも蛍光線とともに輻射線が出ているかも知れないとベクレルに伝え、蛍光現象を研究していたベクレルは紫外線がなくても輻射線(ベクレル線、放射線)が出ていること、また、蛍光性のない金属ウランからも「放射線」が出ていることを発見しました。マリー・キュリーは放射線の発生現象の研究に取り組み、夫のピエールの発明したピエゾ電位計を用いて多数の化合物について放射線の強度を明らかにしました。さらに、ウラン化合物からウランよりももっと多量の放射線を出す性質を示す放射性元素、ポロニウムとラジウムの取り出しに成功し、「放射能」(放射線を放出する能力)という用語を初めて使用しました。ついでラザフォードはウランから放出される放射線の電離作用をしらべ、それらが α 線、 β 線、 γ 線の混合したものであることを確かめました。このようにして、X線、放射線、放射能の研究の夜明けとなりました。

その後、英国ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所では素粒子の研究が始まり、トムソン、ラザフォード、ウィルソン、アストンなどの研究者を輩出しました。この頃、アインシュタインは特殊相対性理論を発表し、質量とエネルギーの等価式を導き、200年も続いたニュートン力学に代わる新しい物理学の考え方を示しました。日本では長岡半太郎、飯盛里安らの科学者が活躍しました。さらに素粒子と原子核研究の中でラザフォード、ジョリオ・キュリー夫妻、チャドウィック、フェルミらの活躍があり、核分裂の発見がありましたが、これが直ちに第二次大戦で原子爆弾の投下という目的に使われたのは不幸なことでした。戦後、原子力の平和利用が唱えられ、放射線・放射能利用が進み、現在は原子力発電の利用や素粒子研究の進展へと続いています。

放射線・放射能関連年表(太字はノーベル賞受賞者)

1895年	レントゲン(独)	X線の発見
1896年	ベクレル(仏)	ウラン鉱からの放射線の放出を発見 山川健次郎(東京帝国大学)、村岡範為(第三高等学校)、島津源蔵(京都島津製作所)によるX線写真撮影の成功
1897年	トムソン(英)	電子の存在を確認
1898年	マリー・キュリー、ピエール・キュリー夫妻(仏)	放射性元素のポロニウムとラジウムを発見
1899年	ラザフォード(英)	アルファ線、ベータ線の性質の解明
1903年	ラザフォード、ソディ(英)	放射性元素の壊変説を発表
	長岡半太郎(日)	土星型原子模型を発表
1905年	アインシュタイン(独)	特殊相対性理論を発表

- 1910年 ヘス (オーストリア) 宇宙線を発見
- 1911年 ウイルソン (英) 霧箱を発明
- 1913年 ボーア (デンマーク) 原子模型を発表
モーズリー(英) 元素と特性X線との関係を見
- 1919年 ラザフォード(英) アルファ粒子による原子核の人工変換の成功と陽子の発見
飯盛里安(日) アイソトープの訳語「同位元素」を提案
- 1927年 マラー(米) キイロショウジョウバエを用いX線による突然変異の発見
- 1928年 ガイガー、ミュラー (独) GM管を発明
- 1932年 チャドウィック(英) 中性子を見
- 1934年 フレデリック・ジョリオ、イレーヌ・ジョリオ・キュリー夫妻 (仏)
人工放射性同位元素を見
フェルミ(伊)ら 中性子による原子核の人工変換に成功
- 1935年 湯川秀樹 (日) 中間子の存在を予測
- 1939年 ハーン、シュトラスマン(独) ウランの原子核分裂を見
- 1942年 フェルミ シカゴ大学で組み立てた原子炉を初めて臨界にした
- 1943年 オッペンハイマー (米) ロス・アラモス研究所所長に就任、原爆製造に取り組む
- 1945年 原子爆弾投下 (広島:ウラン型 15キロトン、長崎:プルトニウム型 22キロトン)
- 1950年 国際放射線防護委員会 (ICRP) 発足
- 1952年 ハーシェイ (米) P-32 トレーサー実験でDNAは遺伝子であると発表
- 1954年 カルビン (米)ら C-14を用い、植物の光合成反応を解明
ビキニ環礁で水爆実験、第五福龍丸乗務員が被災
- 1955年 第1回国連原子力平和利用国際会議 (ジュネーブ)
日本で原子力基本法成立 (平和利用三原則、民主、自主、公開)
- 1956年 国際原子力機関 (IAEA) 設立、日本参加 10月26日
黒田和夫 (米) 地球上に天然の原子炉が約 20 億年前に存在したことを予言
- 1959年 バーンソン、ヤロー (米) ラジオイムノアッセイ法(放射免疫測定法)を開発
- 1963年 10月26日 日本原子力発電所で原子力発電試験に成功、2400kW
後にこの日を「原子力の日」と定められた
- 1964年 ゲルマン、ツヴァイク(米) クォーク理論を提唱
- 1972年 ハウンズフィールド(英) X線コンピュータ断層撮影法 (CT) を開発
日本で放射線照射じゃがいもを食品として認可
- 1975年 フェルプス(米) ポジトロン断層撮影法 (PET) の実用化
- 1980年 ラッキー (米) 放射線ホルミシス効果を提唱
- 1986年 チェルノブイリ原子力発電所事故
- 1994年 米フェルミ国立加速器研究所で最後の基本粒子、トップクォークを確認
- 1999年 東海村 JCO 施設での臨界事故
- 2002年 小柴昌俊 (日) 宇宙からのニュートリノ観測でノーベル物理学賞を受賞
- 2004年 理化学研究所 日本初の 113 番新元素を見
- 2005年 国際熱核融合実験炉の建設地がフランス (欧州連合、EU) に決定
- 2008年 南部陽一郎 (米)、小林 誠 (日)、益川敏英 (日) 素粒子物理学の理論づくりに貢献したことでノーベル物理学賞を受賞
- 2009年 原子力発電プラントの現状 (日本の発電施設 53基 48百万kW、
世界の発電施設 432基 390百万kW)

2. 放射線・放射能の基礎

2-1 大きい世界、小さい世界を眺めてみよう

宇宙の一角に銀河系があり、その中に太陽系があります。太陽のまわりに水星、金星、地球、火星、木星、土星などの惑星がまわっています。地球はわれわれ人類が住む美しい天体です。人の体はたくさんの細胞からできていますが、その小さい細胞も、無数の原子からできています。

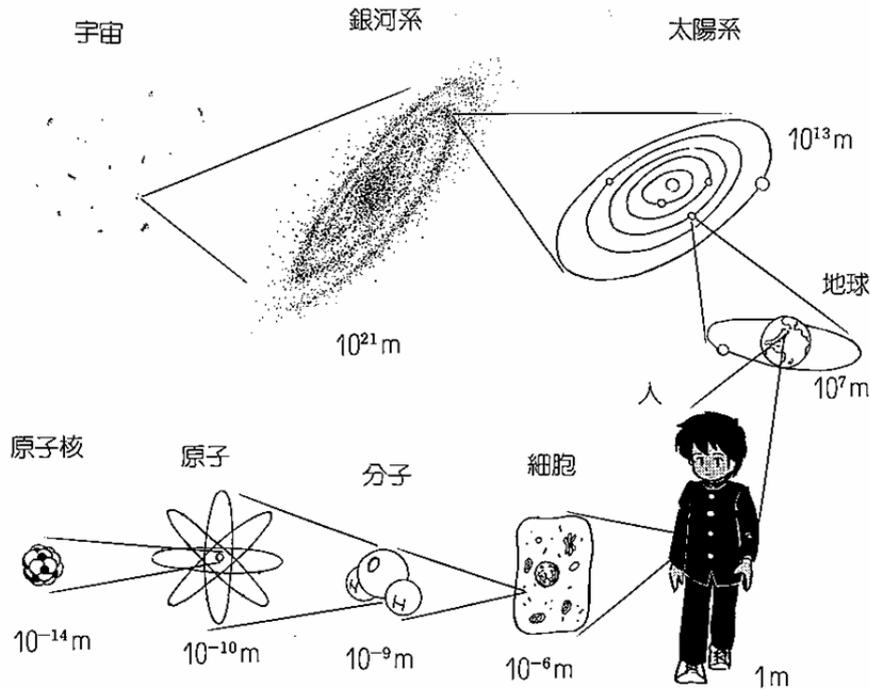


図2-1 ものの大きさ、日本アイソトープ協会「放射線のABC」より

これから勉強するアルファ線、ベータ線、ガンマ線などの放射線は、実は原子よりもさらに小さいところ、すなわちあとで説明しますが原子核のなかで誕生するのです。

この図で示したように、大きな数量・小さな数量の表し方については、10の何乗、10のマイナス何乗という表し方がゼロをたくさん並べるよりも能率的な方法です。また、その代わりに、キロ(k、 10^3)とかセンチ(c、 10^{-2})、ミリ(m、 10^{-3})などの補助的な記号を主な単位の記号につけて表す方法があることを知る必要があります。(表2-1)

表2-1、補助的な記号とその読み

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

指導のねらい： 定量的理解を心がけることの重要性について

われわれの身の回りに存在する全てのものにはある大きさと形（またある重さ）をもっている物体もしくは物質、（それらの大部分は人間の目に見えるが小さくて目に見えないものもある）と、現象としては存在するが物質としてではなく（熱や光のような）「エネルギー」や「力（引力や斥力）」といったある作用をする能力だけをもっているものに分類できます。

すべての物質やエネルギーの性質を理解し、人間の役に立つように利用するには、そのものもっている性質をできるだけ定量的に理解するとともに、その性質が種々の条件でどのように変わってくるか、またある価値判断に応じて取捨選択する努力が必要です。

この章では物質の大きさを数量的に考えて見ました。図 2-1 はあらゆる物質の大きさをメートルの単位を用いてあらわしたものです。このとき、極端に大きかったり小さかったりしたときは通常の数値によらず「対数」「指数」を用いることが合理的であり、また（キロとかミリとかいった）補助単位を用いれば便利であることがわかります。

物質の性質には、大きさとかさなどのように、直観的に容易に理解できるもののほかに、密度（単位体積あたりの重量）とか速度（単位時間あたりに動いた距離）のように、2 種類以上の単位が組み合わさったものがあります。それらの実例を表 2-2 に示します。

表 2-2 基本的単位と組み合わされた単位

名称	物理的意味	単位名	記号
大きさ	空間的広がり大きさ(1次元)	メートル	m
質量	物質の基本的な量	キログラム	kg
時間		秒	s
大きさ	(2次元的一面積)	平方メートル	m ²
大きさ	(3次元的一体積)	立方メートル	m ³
密度	単位体積当たりの質量	g/cm ³ 、kg/m ³ など	
速度	単位時間当たりの距離	m/s、km/h など	
加速度	単位時間当たりの速度増加率	m/s ²	
運動量	質量×速度	kg・m/s	
力	質量×加速度	ニュートン N(=kg・m/s ²)	
圧力	単位面積当たりの力	パスカル Pa(=N/m ²)	
仕事、エネルギー	(力×距離、1Nの力で1mを動かすときの仕事)	ジュール J	
位置のエネルギー	(E _p)= 質量×重力加速度×高さ		
運動のエネルギー	(E _k)= 1/2 ×質量×(速度) ²		
熱量	熱のエネルギー ミクロな世界でのエネルギー単位	カロリー cal(=4.184 J) エレクトロンボルト eV (=1.602×10 ⁻¹⁹ J)	
仕事率	単位時間あたりの仕事	ワット W(=J/s)	
吸収線量	単位質量当たりの吸収エネルギー	グレイ Gy(=J/kg)	
実効線量	放射線による人体への影響度を表す線量単位	シーベルト Sv	
線量率	単位時間当たりの線量	Gy/s, Sv/hr, mSv/year など	
放射能の量	単位時間当たりの放射性原子の壊変数	ベクレル Bq	

2 - 2 原子と分子、原子核と軌道電子

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、物質は原子や分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いいます。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個の水素原子が1個の酸素原子をはさんだ形をしています。

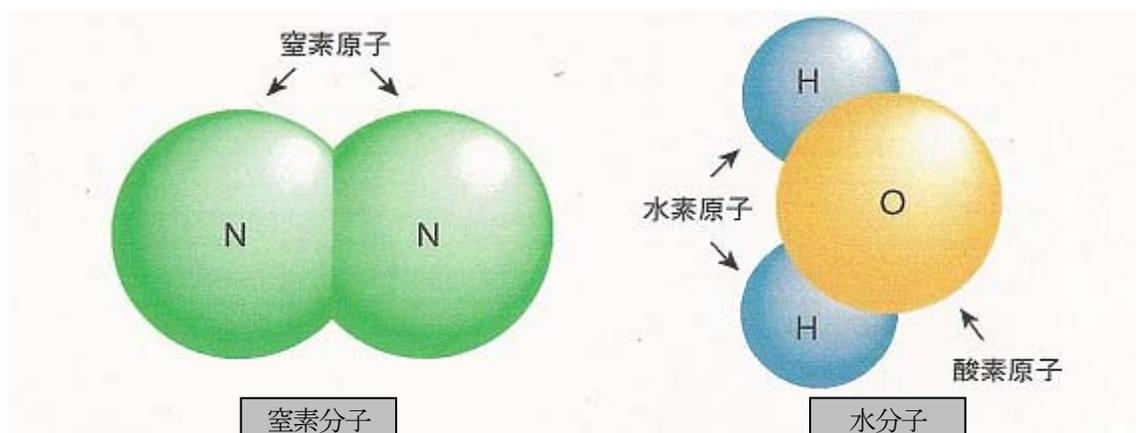


図2-2 原子と分子

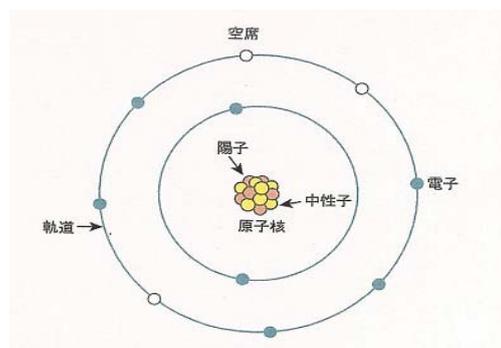
このように、分子は原子の組み合わせで成り立っています。ただ1個の原子のみで構成される分子があれば、遺伝をつかさどる分子として知られるDNA（デオキシリボ核酸）のように数十万個以上の原子が鎖のようにつながったものもあります。

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

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もち、お互いに電氣的な力で引き合っています。

この電氣的な引力のために、電子は勢いよく運動しているにもかかわらず、勝手にどこかに行ってしまうことはありません。ちょうど、地球や火星などの惑星が太陽の周りを重力で引っ張られて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。

軌道電子の一部が何かの原因で失われているときは、原子全体は電氣的に中性でなくなり、プラスの電気をもちます。このような状態になることを電離といい、電離した原子や分子をイオン（陽イオン）といいます。逆に、中性の原子に外部から電子がくっついた状態を陰イオンといいます。



窒素原子の模式図

原子核の大きさは 10^{-15} メートル程度です。それはプラスの電荷をもっている陽子と、陽子とほぼ同じ大きさで電荷をもたない中性子からできています。

図2-3 窒素原子の構造

2 - 3 原子核の構造と安定性

陽子と中性子、質量数と同位体 原子核は陽子と中性子からなっていて、陽子の数は原子番号 (Z) に等しく、原子核のまわりにまわっている電子の数に等しいので、陽子の数が原子の化学的性質をきめます。陽子の数と中性子の数の和を質量数といいます。陽子の数が同じで中性子の数 (すなわち質量数) が違う原子を同位体といいます。(このような原子核の種類を表すのに、例えば ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^{12}C 、 ^{14}C 、 ^{235}U 、 ^{238}U というように元素記号の左上に質量数を小さい数字で付けて表します。このとき元素記号の左下に原子番号を小さく付けることもあります。 ^{238}U をU-238と表すこともあります。)

原子核の安定性と放射性同位体 一般に原子核の中に複数の陽子があると、陽子のプラス電荷同士が反発して不安定になるので、原子核内に存在する中性子が核力という強い引力を働かせてつなぎとめる役割を果たしています。安定に存在している同位体について陽子に対する中性子の割合を調べると、原子核が比較的小さいときはその比はほぼ1 : 1ですが、原子核がおおきくなるに従って陽子に対する中性子の数の割合がだんだんと大きくなり、ウランでは1 : 1.5以上になります。その様子を下に示します。

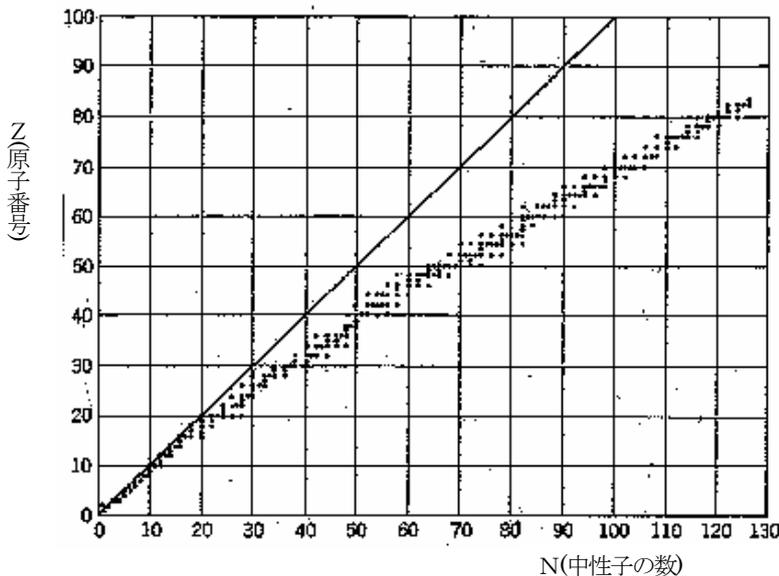


図2-4 安定な原子核における陽子と中性子の割合

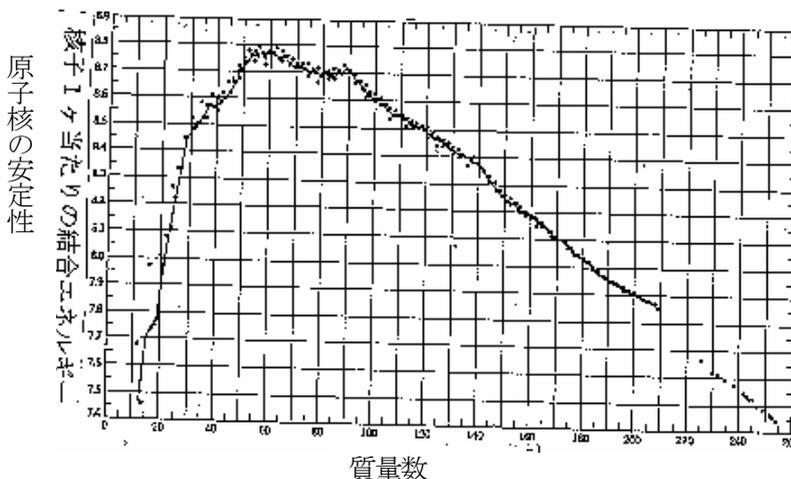


図2-5 原子核の安定性と質量数の関係

その原子番号を少しずつ大きくしたときの原子核の安定性を調べてみると、原子番号があまり小さくても、またあまり大きすぎても安定度は低くなり、原子番号が50程度 (すなわち元素でいうと鉄とかニッケルあたりに相当する) くらいが最も安定であることがわかります。(指導のポイント) 「元素」というのは、酸素とか、水素とか、化学的性質に着目したときの原子の種類を表し方で、「核種」は原子核の種類に着目したものです。

原子核で最も安定なのは鉄-56で、陽子26個、中性子30個の原子核です。鉄-56より小さな原子核は陽子や中性子を取り込んだり、原子核同士が融合 (核融合) してエネルギーを放出してより安定な原子核に変化し、鉄-56よりも大きな原子核は陽子や中性子を放出したり、原子核が分裂 (核分裂) してエネルギーを放出して安定な原子核になるとします。

2 - 4 放射性同位体と半減期

不安定な原子核である放射性同位体は、安定になろうとして、その余分なエネルギーをα線、β線、あるいはγ線などの放射線の形で放出して別の放射性同位体が変わってゆきます。これを（放射性）壊変（または崩壊）といいます。

α壊変 原子核の中の陽子数があまり大きくなると、中性子を増やしても原子核はもはや安定に存在できなくなります。そのときどうなるかという、原子核から一塊りの粒子を放出して原子核の大きさを少しでも小さくします。この場合普通2個の陽子と2個の中性子が一緒になったヘリウムの原子核の形で放出します。この現象がα壊変で、放出される放射線がα線、すなわちヘリウム原子核の流れです。

（その結果、元の原子核の質量数は4だけ減少し、原子番号が2だけ減少した別の元素になります。）

β壊変 原子核の中の陽子と中性子の数のバランスの悪いときも核が不安定なので、そのバランスを良くしようとします。そのときは、原子核の中で中性子が陽子になると同時に、電子を放出します。これがβ壊変で、そのとき放出される放射線がβ線という電子の流れです。（β線放出の結果、質量数は変わらないが原子番号が一つ上の元素になります。例えばC-14はβ壊変をしてN-14になります。）

γ壊変 α線やβ線の放出直後の原子核はまだ不安定で高いエネルギーを持っていることが多く、そのときはγ線を放出して核は安定化します。γ線はX線と同様の電磁波の1種で、それが放出されても原子核の質量や原子番号は影響がなく、原子核のエネルギーが低くなるだけです。

壊変系列 放射性壊変が一度だけで完全に核を安定化することはまれで、重い原子核は何度もα壊変及びβ壊変を繰り返して最終的に安定になります。この壊変にはいくつかの系列があります。ウラン系列を図2-6に示します。ウラン系列のほか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。

半減期 以上述べたように、放射性同位体は放射線を出してより安定な原子に変化します。放射性同位体が壊変で減っていく割合は、個々の同位体ごとに決まっていますこの減り方の割合は放射能の量がもとの半分になるまでの時間（半減期）によっても表せません（図2-7）。

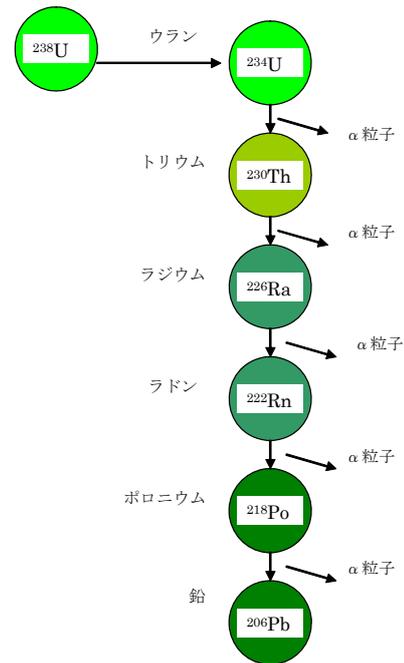


図2-6 ウラン壊変系列

表2-3 主な放射性同位体の半減期

核種	半減期
ヨウ素 131	8.0 日
コバルト 60	5.3 年
セシウム 137	30 年
ラジウム 226	1600 年
プルトニウム 239	2.4 万年
ウラン 238	45 億年

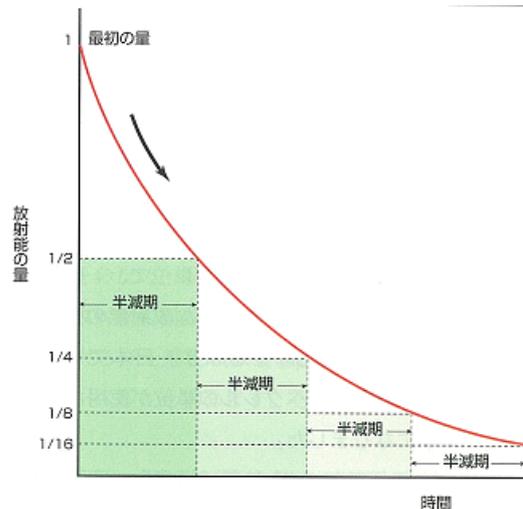


図2-7 放射能の減り方

2 - 5 核分裂

天然のウランには、 ^{238}U が 99.3%、 ^{235}U が 0.7% の 2 種（正確にはごく微量の ^{234}U が存在する）の同位体で構成されています。 ^{235}U の原子核は中性子を吸収して核分裂を起こしやすい性質があります。ウランの核分裂によるエネルギーを効率的に取り出すためには、天然のウラン中の ^{235}U の割合を「濃縮」して同位体の比率を高めておく必要があります。

一方、 ^{238}U は、中性子を吸収すると、 ^{239}U になります。これは 2 回 β 壊変を行って ^{239}Pu になります。 ^{239}Pu は、 ^{235}U と同様に中性子を吸収して核分裂を起こします。

核分裂の結果生まれたばかりの中性子は、エネルギーの高い状態の「速い中性子」であり、これがまわりの物質と何度も衝突を繰り返すと、その速度が遅くなって、「熱中性子」（まわりの原子や分子の熱運動と同じ程度の運動エネルギーをもつ中性子）になります。この熱中性子のほうがウランの核分裂を起こしやすいのです。このため、平和利用を目的とした「原子炉」では、核燃料のほかに中性子を減速するための「減速材」を燃料体のそばに置いてあります。また、核分裂で二つの原子核に分かれる仕方をよく調べてみると、大きさがちょうど半分に分れるのではなく、図 2-9 に示すように、質量数がかかなり違う割合で生まれてくるのがわかっています。

核分裂の際に大きなエネルギーが発生します。そのエネルギーは核分裂で生じた粒子放射線のエネルギー（原子核及び中性子の運動エネルギー）です。燃料中に生じた高エネルギーの原子核は燃料体を構成する多くの原子核と衝突を繰り返し、その摩擦熱で燃料体の温度を高め、それが燃料体の周りに循環している液体（通常は水）を沸騰させるほど加熱し、その水蒸気で発電機のタービンを回し、発電するのです。つまり、核エネルギーが電気エネルギーに変換される過程では、熱エネルギーだけでなく、放射線エネルギーを経由していることが分かります。

核分裂で生じた中性子は燃料体の他のウラン原子に衝突し、さらに核分裂を起こします。1 個の ^{235}U の核分裂の際に 2~3 個の中性子が発生しますから、これらが次の核分裂に利用されると連鎖的に反応は進みます。原子炉では、一定の速度でこの連鎖が起こるように制御して、核分裂反応のエネルギーを安全に取り出します。

核分裂直後に生じた核分裂生成物としての原子核内では、中性子が過剰になっているために不安定ですので、その原子核の中で中性子が陽子に転換し電子を放出する β 壊変を生じます。また、1 度の壊変では安定せず、何度も壊変を繰り返します。

なお、核分裂の前後で始めの状態（核燃料原子と 1 個の中性子）と後の状態（核分裂生成物と複数の中性子）を質量で比べてみると、後の状態のほうが質量で軽くなっています。このように核反応の前後で一部の質量が失われたように思われますが、この質量は核分裂のエネルギーとして一定の割合で生まれ変わっているのです。数値的には、1 個の ^{235}U 原子核の核分裂で 200MeV（ミリオンエレクトロンボルト）のエネルギーが生まれます。

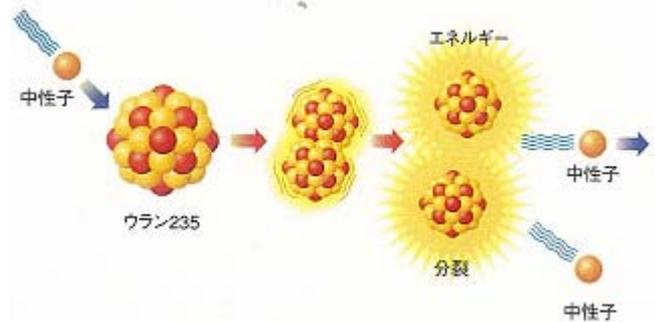


図 2-8 ウラン 235 の核分裂と中性子放出
 高校生のための原子カブック（茨城県）

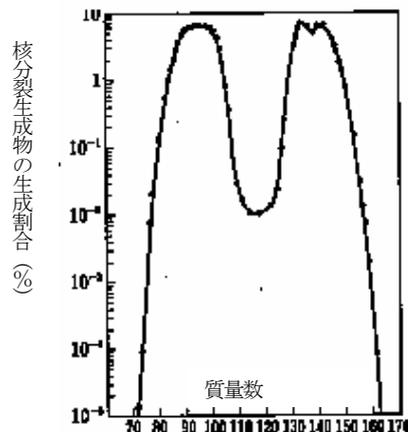


図 2-9 遅い中性子によるウラン 235 の生成物の質量数と生成割合との関係

2 - 6 原子炉と原子力発電

① **原子炉** 核分裂の連鎖反応を一定のコントロールのもとに持続的に行わせる装置が原子炉です。原子炉は、濃縮ウランからなる核燃料を通常、棒状にした燃料棒、減速材（中性子の速度を遅くして核分裂しやすいようにする材料）、冷却材（核分裂の熱を炉心から取り出す媒体）、制御棒（通常は中性子を吸収しやすいカドミウムなどの材料を含んだ制御棒）、及び炉心の放射線を弱めるための遮蔽材や構造体からできています。

原子炉の運転は、制御棒を炉心に出し入れすることによって操作します。スタートするときは、制御棒を引き抜いて炉心の中性子の吸収を減らします。すると、炉は臨界を超えた状態となり、中性子の発生が吸収よりも多くなり、そして中性子の数がどんどん増え、核分裂が盛んになります。こうして予定した出力に近づくと、制御棒を入れて炉心での中性子の吸収を多くしバランスの取れた臨界の状態にします。炉を止めたいときはこの状態から制御棒を入れます。そうすると未臨界の状態になり、核分裂の回数が減少し、出力はゼロに向かいます。

② **原子力発電の仕組み** 原子力発電の仕組みは、基本的には火力発電と変わりません。火力発電では、ボイラーで石油や石炭などを燃やし、その熱で蒸気をつくりタービンを回して発電します。原子力発電の場合は、ボイラーの代わりに原子炉を置き、この中でウランを核分裂させ、そのときに発生する熱エネルギーで蒸気をつくり、タービンを回して発電します。

③ **原子炉の種類** 原子炉にはいろいろな利用目的があります。大きく分けて研究用と発電用の原子炉があります。発電用の原子炉には軽水炉、重水炉、ガス炉、高速炉などがありますが、わが国で使われているのは軽水炉です。世界全体では90%は軽水炉であり、「加圧水型炉」(PWR)、「沸騰水型炉」(BWR)の2種類があります。

④ **燃料** 原子力発電に使う燃料は、核燃料または原子燃料といえます。この燃料は天然ウランを濃縮し、成型加工し、燃料集合体に仕上げ、原子炉に装荷して利用します。

天然ウランは、核分裂しやすい ^{235}U と、核分裂しにくい ^{238}U から構成されます。 ^{235}U の割合は0.7%に過ぎないため、核分裂しやすくするため濃縮処理します。このように濃縮されたウランのことを濃縮ウランといえます。原子力発電の場合は ^{235}U の割合が2~5%の「低濃縮ウラン」を使いますが、原子爆弾のように瞬間的に核分裂を行わせるためには90%以上の濃縮ウランが必要となります。

図1-8 原子力発電と原子爆弾の違い

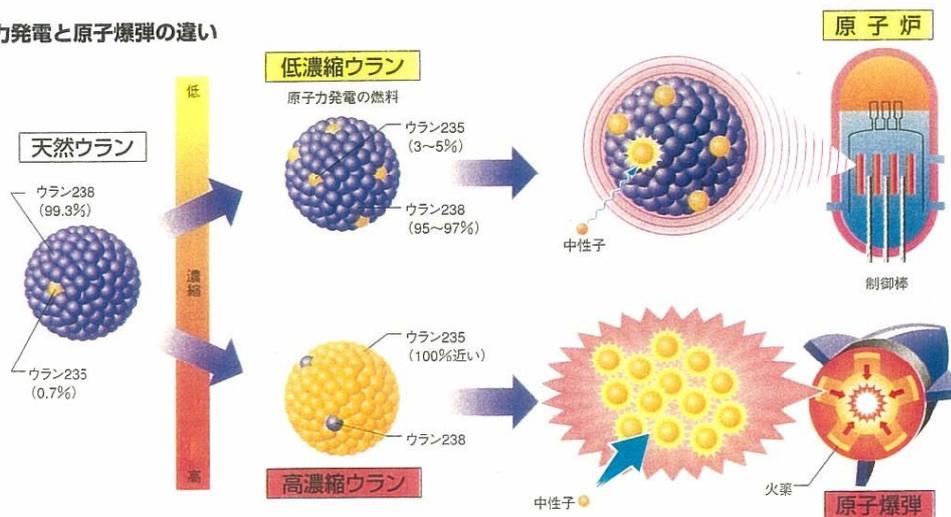


図2-10 原子力発電と原子爆弾の違い

2-7 核燃料と核燃料サイクル

核燃料とは、ウラン (U)、プルトニウム (Pu) とトリウム (Th) の金属あるいはそれらの化合物で原子炉の燃料として使用できる物質をいいます。天然のウランは、0.7%の ^{235}U と 99.3%の ^{238}U が存在します。 ^{235}U は原子炉内で中性子により核分裂 (燃焼) しますが、 ^{238}U は核分裂しにくいのです。その一部は中性子を吸収し、核分裂 (燃焼) 可能なプルトニウム (^{239}Pu) に変換します。この原子炉内での核反応の模式図を下記に示します。

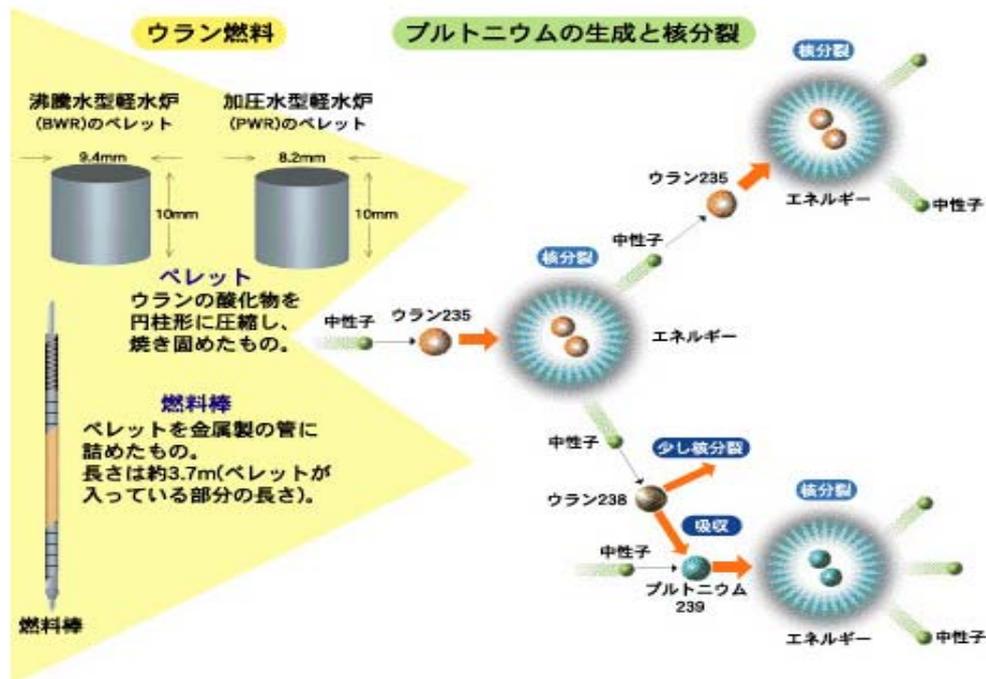


図2-11 原子炉内でのウラン (^{235}U) の燃焼 (核分裂) と ^{239}Pu の生成

この図から分かるように、 ^{235}U が核分裂してその時に発生する中性子で次々と ^{235}U が連鎖的に核分裂することを原子炉が臨界になったといいます。このようにして核燃料を燃やした (核分裂させた) あとの使用済み燃料には、核分裂生成物とともに ^{235}U と ^{239}Pu の燃え残りが残存します。したがって、使用済み燃料を化学的に溶解し、 ^{239}Pu を取り出して、 ^{238}U と混ぜて再び原子炉で燃焼させることを核燃料サイクルといいます。この模式図を次ページに示します。

この図の各プロセスを説明すると次のようになります。

1. ウランの採鉱、精錬

ウラン鉱山で採取したウラン鉱石を溶解し、精錬し、純粋なウラン酸化物 (UO_2 イエローケーキ) 粉末にする。

2. 転換

天然ウラン中の燃える ^{235}U の存在率が小さいため、天然ウランをそのまま燃料とすると効率が悪く、大きな原子炉を必要とするので、 ^{235}U 濃度を高めるために固体の UO_2 から気体のフッ化ウラン (UF_6) に転換する。

3. 濃縮

フッ化ウランを光速で回転する遠心分離式ウラン濃縮機により、 ^{235}U の濃度 0.7% から 3~5% まで高める。

4. 再転換

気体のウラン (UF_6) を再び、固体のウラン (UO_2) に戻す。

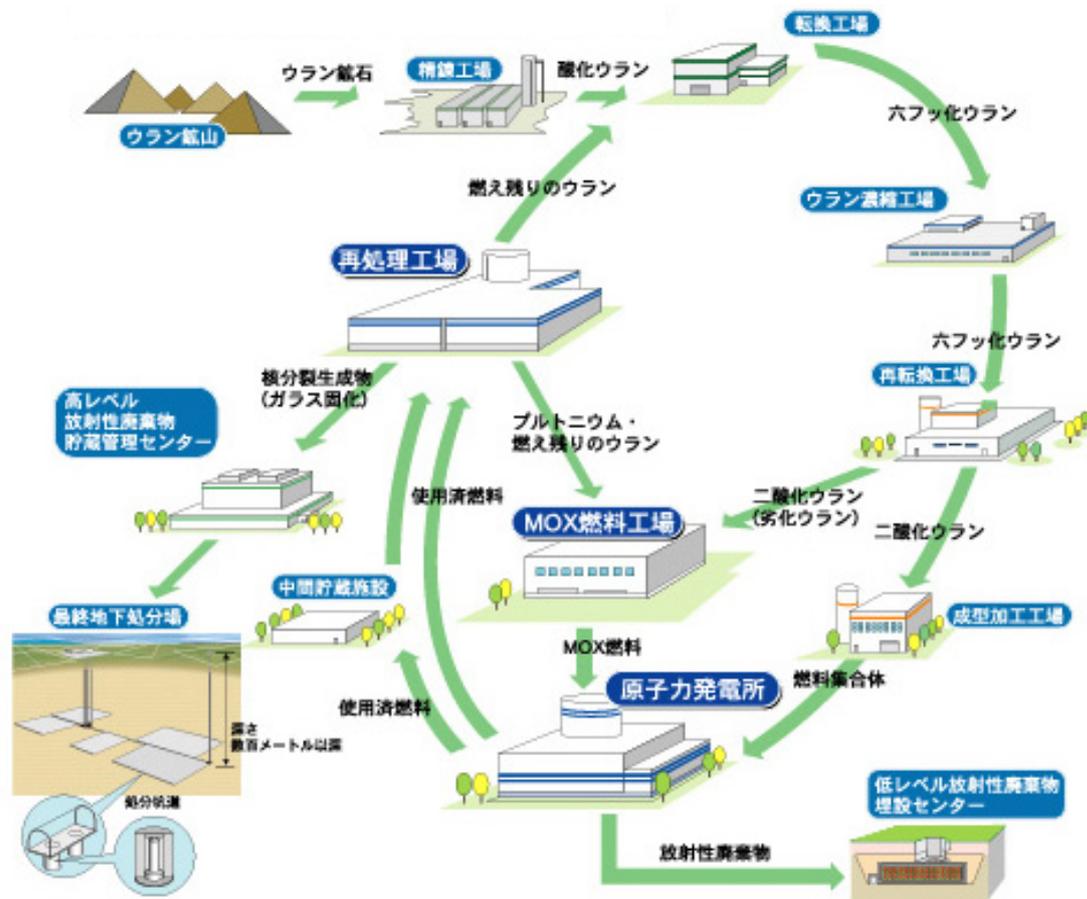


図 2-12 核燃料サイクル

5. 燃料成形加工工場

二酸化ウラン (UO_2) 粉末を長さ 1 cm、直径 1 cm の形状に焼きかためた後、長さ約 4 m のジルコニウム製合金の鞘管 (被覆管) に入れ、溶接封入する。さらに、この燃料棒を 9×9 または、 19×19 列に束ねた燃料集合体を製造する。

6. 原子力発電

この集合体は水を張った原子炉内に入れ、中性子の強さを制御しながら原子力発電を行う。

7. 再処理

原子炉で使用した燃料は使用済燃料と呼び、再処理工場に運び、細断し濃硝酸に溶解した後、有機溶媒を利用して、ウラン、プルトニウムと核分裂生成物 (燃えかす) を分離し、さらにウランとプルトニウムを分離する。使用済燃料の一部は中間貯蔵に保管する。

8. MOX 燃料製造工場

再処理で取り出したプルトニウム酸化物 (PuO_2) は、ウラン濃縮工場から出る絞りがすの劣化酸化ウラン (UO_2) と混ぜた後、ウラン燃料工場と同じように燃料集合体を製造する。ここで、MOX 燃料とは、ウラン酸化物—プルトニウム酸化物混合物燃料 (Mixed Oxide) のことを言う。

9. 廃棄物処理施設

原子炉等から発生する廃棄物は低レベル放射性廃棄物施設で、再処理工場から発生する廃棄物は高レベル放射性廃棄物施設でそれぞれ処理後、処分場で地層処分する。

2-8. 放射性廃棄物処理

原子炉の運転や放射性利用に伴い、放射性核種が廃棄物として生じます。廃棄物の形態には気体・液体・固体の各状態があり、放射能の強さによって便宜的に高レベル・中レベル・低レベルに分類されています。

放射性廃棄物の処理（treatment、物理的・化学的捜査を加えて「処分」しやすいようにすること）・処分（disposal、再び取り出す意図なしに永久的に処分すること）の方法の原則は、廃棄物を発生段階で普通の産業廃棄物よりももっと厳しく適切に管理して、その容積を少なくして閉じ込め、生活環境や生物圏から隔離することです。原子力発電所で行われている放射性廃棄物の処理・管理の方法を図に示します。

核燃料再処理施設からは前の節で示したように、高レベル放射能をもつ廃液が発生します。これを濃縮して容量を減らしたあと、ガラス原料に混ぜて、高温で溶かしてから、丈夫なステンレス容器に流入して冷やし固めます。容器内部からの放射能に起因する発熱も考慮しながら、地表から約300mの深い地層に「地層処分」するのが最も良いとされています。

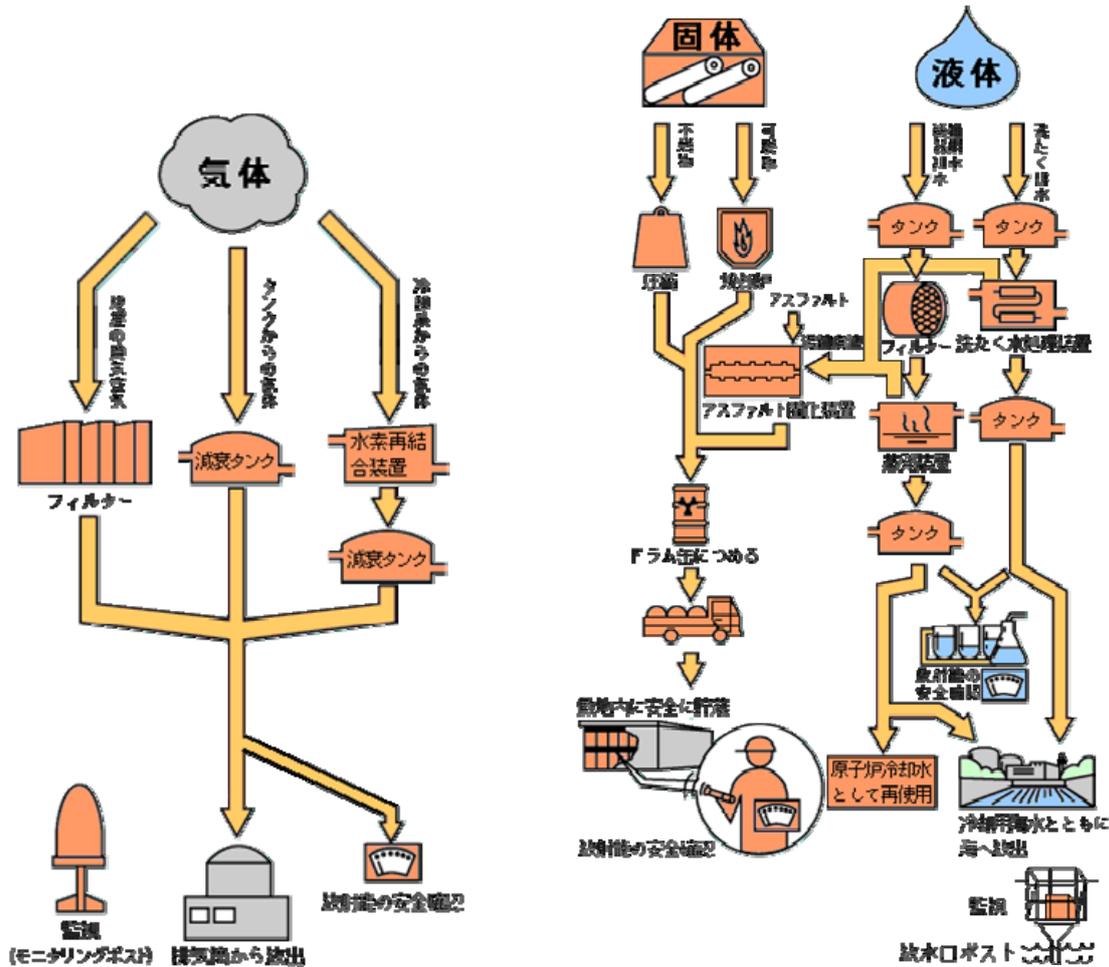


図2-13 原子力発電所の運転に伴って発生する放射性廃棄物の処分の概要
(北海道電力のホームページから)

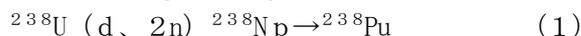
(トピックス1)プルトニウムについて

1. プルトニウムの発見の歴史

プルトニウムは原子番号 94 の天然には存在しない元素です。元素記号は Pu。密度 19.9 g/cm^3 。(ちなみに、ウランの密度は 18.7、金が 19.3、鉛が 11.34、銀は 10.50、銅は 8.93、鉄は 7.86、アルミニウムは 2.69。)

プルトニウムは同位体が 15 種類あります (質量数 232~246)。すべて放射性で、最も重要な同位体は核分裂する性質のある ^{239}Pu と ^{241}Pu です。

プルトニウム (^{238}Pu 、半減期 87.7 年) は 1940 年にアメリカのシーボルクらによって始めて作られました。それは、カリフォルニア大学のサイクロトロンで加速した重陽子 (d) をウラン (U) に照射し、次の核反応でできました。(式 1)。



(プルトニウム (原子番号 94) という元素名は、天体の冥王星 (Pluto) の名称からきています。ウラン (原子番号 92) から二つ目の元素 (94 番) であることからプルトニウムと命名されました。ウランの名称は天王星 (Uranus) から、その次は海王星 (Neptunium)、さらには冥王星です。)

^{238}Pu よりも長半減期 ($2,411 \times 10^4$ 年) の ^{239}Pu は、1941 年にカリフォルニア大学の同じ研究グループによって生成されました。その反応は (式 2) のとおりです。



^{239}Pu は、原子力発電所のウラン燃料 (通常は 3~5% に濃縮されている) 中の ^{238}U が中性子を吸収し生産されます。一方、軍事的に使うプルトニウムは、90% 以上の高純度のものでプルトニウム専用炉によってつくられます。

2. 原爆とプルトニウム、「高速炉」とプルトニウム

長崎に投下された原爆は、プルトニウム (^{239}Pu) が約 13Kg の入っていたといわれています。一方、広島に投下されたのは、同位体濃度 100% に近い ^{235}U でした。

高速増殖炉の高速とは、核分裂をおこす中性子の速度の平均エネルギーが、およそ 200 keV (キロエレクトロンボルト) と高速なことに由来します。軽水炉のように熱中性子 (1 eV 以下のエネルギーの中性子) を用いないので、減速材は必要とせず、核燃料としてウランやプルトニウムを燃料として用います。我が国の高速実験炉「常陽」は、ウランのほかにもプルトニウムを用いますが、これより実用段階により近い高速原型炉「もんじゅ」はプルトニウム燃料を使います。

3. プルサーマル

プルサーマルとは、プルトニウム (Pu) の「プル」と熱中性子 (サーマル) 炉を組み合わせた和製英語です。我が国のおもな原子炉 (軽水炉) は、核分裂性のウラン-235 と軽水による減速によって発生する熱中性子を反応させ発生するエネルギーを利用して使っています。

プルサーマルでは、燃料としてウランにプルトニウムを混合した MOX (混合酸化物) 燃料を用いています。プルサーマルは、実証試験が各国ではじまっています。わが国でも、幾つかの原子炉でその試用が開始されています。

4. プルトニウム 239 の毒性

金属プルトニウムは、銀白色で反応性が高く、空気中では酸化され発火します。プルトニウムは、核燃料として利用されますが、高純度の ^{239}Pu で 5kg を超えると核爆発を起こします。

^{238}Pu (半減期 88 年) は原子力電池として人工衛星の電源や心臓ペースメーカーの電源として使われています。プルトニウムは放射性物質としてだけでなく、化学的にも毒性が強いため、その取扱いに当たっては吸入摂取、経皮摂取、経口摂取などから体内に取り入れれないように注意しなければ

なりません。

プルトニウムが体内に入った場合の毒性については、「耳搔き 1 杯で 100 万人を殺す」といったような、極端に危険性が高いということが書いてある本があります(1) (坂本龍一、ロッカショ、講談社、2007 年)。しかし、これは間違いです。プルトニウムの化学的毒性は、重金属の 1 種として水銀カドミウム、あるいはウランと同じようなもので、体内に入ると腎臓障害を与えるとのことです。しかし、それよりも体内に入ったときの放射線障害はるかに大きいといわれています。

プルトニウムからの放射線は主にアルファ線で、その透過力は非常に弱く、空気中で吸収されてしまいます。また、プルトニウムが皮膚に触れても、アルファ線は皮膚の中には入っていきません。プルトニウムが口から食べ物と一緒に入っても、消化管からの吸収率は 0.1%以下で、体内にはほとんど吸収されません。空気と一緒に肺に吸収されたときは問題です。犬を用いた実験では、一定量以上のプルトニウムを口から吸入させると、肺がんなどの障害を作ったという報告があるとのことです。

もし万一、何かの原因で大量のプルトニウムが体内に吸収されたときの対策は、キレート剤という、金属元素と結びつきやすい薬を注射して、プルトニウムを体内から尿中に排泄させる処方とられます。

~~~~~

(38 ページより続く)

38. 電気事業連合会「図表で語るエネルギーの基礎」、2008 年 1 月、61pp
39. 茨城県「中学生のための原子力ブック」(2008 年度版)、平成 20 年 3 月、48pp
40. 日本原子力文化振興財団「放射線の世界 2008」、平成 20 年 4 月、148pp
41. 大阪公立大学共同出版会「みんなのくらしと放射線」、2008 年 8 月、196pp
42. 放射線利用振興協会「原子力・放射線用語集」、平成 20 年 7 月、32pp
43. 輪島隆博「教科書に載っていない放射線のはなし」、北海道エナジートーク 21、2008 年、49pp
44. FBNews 編集委員会「初級放射線教育講座－放射線に従事する方のために－」、千代田テクニク、2009 年 1 月、86pp
45. 資源エネルギー庁「原子力 2009」、(財)日本原子力文化振興財団、2009 年 9 月、149pp
46. NPO 安心科学アカデミー「日常生活で受ける放射線」、平成 21 年 10 月、27pp
47. 文部科学省・資源エネルギー庁「わくわく原子力ランド (小学生のためのエネルギー副読本) 教師用」、平成 22 年 2 月、73pp (生徒用は 41pp)
48. 文部科学省・資源エネルギー庁「チャレンジ! 原子力ワールド (中学生のためのエネルギー副読本) 教師用解説編」、平成 22 年 2 月、81pp  
(その他、発行年数不明のもの)
49. (財)放射線影響協会「放射線」、14pp
50. (財)原子力安全技術センター「放射線利用 Q to Z くらしとアイソトープ」、31pp
51. 高木仁三郎「単位の小事典」、岩波ジュニア新書 90、1985 年 3 月、212pp
52. 鶴田隆雄「放射線入門(第 2 版)」、通商産業研究所、2008 年 2 月、159pp
53. 鶴田隆雄「原子炉入門」、通商産業研究所、2009 年 3 月、183pp

## (トピックス2) 自然放射線はどのようにして生まれたか

コンクリートの壁に「はかるくん」を近づけてみたり、霧箱キットの工作をして掃除機の紙フィルターに付着したゴミの中からでるアルファ線の飛跡を眺めたりして、自然界に存在する放射性元素を確認する実験を経験された方も多いと思います。世界中のどこでもこの実験を繰り返すとほぼ同じような結果が得られる、つまり普遍性があることに驚かされます。世界中のコンクリートが同じような時期に同じような材料から作られたのでしょうか。それは地球上にあるすべての元素、月、火星、金星、太陽、木星、土星など太陽系のすべてのものが同じ材料から同時に作られたことを意味します。また放射性元素の数量はどうやって調べることができるでしょうか。

【超新星爆発】この起こりは超新星爆発です。宇宙には1千億個という銀河があり、その中の一つ私たちの「天の川」銀河の中でもまた1千億個という星があるといわれ、そして星の中心部は重力で高温になり原子核どうしの融合反応が進んでいます。大きい星ほど反応が速くすすみ、寿命が尽きると爆発を起こして星間空間にそれまでに作ってきた原子を撒き散らします。これをはるか遠くから観ると急に明るい星が出現したようなので超新星爆発とよばれますが、これによって最初は水素（原子核は陽子）だけの宇宙空間に超新星爆発が起こる度に新しく重い原子核が加わって豊かな自然へと進化してきたのです。原子核は陽子と中性子の集合体ですが、その組み合わせで不安定なものは時間をかけて安定なものへと変化します。さらに宇宙空間に散らばった原子は化学的な性質によって結合して分子を形成したり、そして何万年何千万年の間宇宙に漂っているうちに、そのつぎに起こる超新星爆発によって高速で通過していく陽子（これがまさに宇宙線の正体です）によって原子の周りの電子がはじき飛ばされてイオンが出来るため化学結合が起こりやすいのです。こうして水素、酸素、炭素、窒素原子の漂う星間空間のなかでは水、メタン、アンモニアなどの分子をはじめ、つぎつぎに多数の複雑な分子が合成されていきます。あたかも星の中が原子核合成工場なら、星間空間はまるで化学合成工場といってもいいほどです。

【太陽系の誕生】いまから46億年前のこと、宇宙空間のあるところ（私たちの銀河系の中のいま太陽系が存在しているところ）で、星間物質（ガス状分子と塵）の密度が比較的濃くなったところを中心に重力がはたらき収縮が起こりました。ガスと塵の成分は90%以上は水素、それ以外にヘリウム、炭素、酸素、窒素、鉄をはじめ、私たちが知っているあらゆる元素がすでに含まれています。収縮がすすむとガスと塵は全体として円盤状に回転するようになり、中心部分は温度が上昇して(数百万度)水素と水素の核融合反応が始まり光りだして太陽になりました。まわりの回転する物質も大小いくつかの渦に分かれ、ちょうど塵がはき集められたように集積して惑星になります。円盤の内側では岩石や金属を主成分とする水星、金星、地球、火星などが、中心から離れた円盤の外側では水素や氷を主とする木星、土星、天王星などの惑星ができました。

こうしてみると太陽系は、もちろん太陽を主として、その周りに岩石を主とする惑星、そして小惑星帯、木星のようにガスを主とする大型の惑星、そのまわりを彗星のふるさとと呼ばれるカイパーベルト（多数の氷の塊）から構成されています。それらがすべて同じガスと塵から同時期（今から46億年前）に誕生したこと、さらに惑星の運行を解析することから太陽系の全質量の99.8%が中心の太陽にあることも分かります。そこで太陽系の元素分析は太陽だけを分析して代表させてもいいということにも納得できるでしょう。

【太陽の元素分析】太陽からの光は6千度Cの高温物体から放出される波長が広い範囲で連続的に分布するスペクトルをもちますが、そこには多数の暗線（光が吸収されたところ）がみられます。この暗線の波長を詳しく調べると地球上でみられる元素が示すものと同じ吸収線が確認できます。こうして太陽光線のスペクトルを調べることから太陽（太陽系の99.8%を占める）に存在する原子

の種類（元素）を分析することができます。ときどき地球上に落下してくる隕石、月から持ち帰った石などを丁寧に化学分析して求められた太陽系の元素組成の表を以下に示します。ここではケイ素（Si）を  $10^6$  としたときの他の元素の存在割合を示しています。左側の欄には水素を気体元素を示し、右側には鉄（Fe）やマグネシウム（Mg）など、さらにウラン（U）やトリウム（Th）などの金属を示しています。ただし左欄の酸素の一部（ $3.8 \times 10^6$ ）は最初から右側の金属と結合していたと考えられます。

## 太陽系元素存在度( $10^6$ Si 規格値)

(Anders and Crevesse, 1989)

### 揮発性(木星型)元素と不揮発性(地球型)元素

|                           |                       |      |                    |
|---------------------------|-----------------------|------|--------------------|
| • H                       | $2.79 \times 10^{10}$ | • Mg | $1.07 \times 10^6$ |
| • He                      | $2.72 \times 10^9$    | • Si | $1.00 \times 10^6$ |
| • O                       | $2.38 \times 10^7$    | • Fe | $9 \times 10^5$    |
| • (− $3.8 \times 10^6$ →) |                       | • Ni | $4.9 \times 10^4$  |
| • C                       | $1.01 \times 10^7$    | • Al | $8.49 \times 10^4$ |
| • Ne                      | $3.44 \times 10^6$    | • Ca | $6.11 \times 10^4$ |
| • N                       | $3.13 \times 10^6$    | • K  | 3770               |
| • Ar                      | $1.01 \times 10^5$    | • Th | 0.0335             |
| • Xe                      | 4.7                   | • U  | 0.009              |

【地球における元素分布】太陽系の惑星の元素組成も上の表で表されるものですが、太陽に近い地球のような岩石型の惑星では、上の表の右側の欄に示す不揮発性元素からなる組成（最初から金属と結合した酸素も含む）を主としており、太陽系の外側を回る惑星では、左側の揮発性元素からなる組成を主としているとされます。地球誕生の際には、つぎつぎと小さい微惑星が降りそそいで地球は岩石をも溶かすほどの高温になったので、重い金属の鉄・ニッケルは地球の中心部（コア）に、つぎに比重の大きい岩石がマントル部分を、一番上に比重の軽い岩石が地殻を形成しました。岩石の隙間にしみ込んでいた水、メタン、アンモニアなどが高温状態で岩石と反応して海水、窒素や二酸化炭素などの大気となって地球の層構造が出来上がったと考えられています。わずかに含まれていたトリウム（Th）やウラン（U）は酸素と結合して比重が比較的になくなるので、地球上では地殻に存在します。そして地殻のなかでも軽い花崗岩といっしょに存在することが知られています。岩石が風化を受けて砂になり、土になってもウランも行動をともし、雨が降って溶け出したウランは海水に流れます。地球上のどこでもほぼ同じ程度のウランが含まれていることとなります。もちろん元素の分布が完全に均一ということはなく、地球は絶えず激しい活動を続けてきているのでウランの濃度の高いところ（ウラン鉱山とよばれる）もできています。

### (トピックス3) 臨界と天然原子炉

#### 1. 臨界

原子炉またはウランなどの核分裂性物質を含む系で、単位時間に核分裂で発生する中性子の数と、原子核への吸収や系外への漏れによって消失する中性子の数が等しい状態を臨界といいます。臨界状態では定常的な中性子密度が保持され、また単位時間あたりの核分裂が起こる回数が一定となっています。

臨界になるために必要な核燃料の量（臨界質量）は、核燃料の種類や濃縮度、形状、水のような減速材や中性子反射体の有無などの条件によって変わります。

1999年には東海村で「臨界事故」がありました。臨界状態はその工場で 約数時間継続したといわれています。これは濃縮ウランを扱っていたウラン加工工場で、ウランの製品を扱うときに、臨界状態にならないように規則を守って厳重に注意をすべきであったのを怠っていたために起こった事故です。

#### 2. 天然原子炉

天然ウランは  $^{238}\text{U}$  が 99.3%、 $^{235}\text{U}$  が 0.7%の割合で産出されます。これらはそれぞれ半減期が 45 億年、7 億年と異なりますので、大昔には  $^{235}\text{U}$  の割合が今よりもっと多い、濃縮された状態だったのです。

ウランの化学的性質に精通していた無機・放射化学のベテラン黒田和夫博士は、1950年代からアメリカの大学（アーカンソー）大学で教鞭をとっていましたが、約 20 億年にウラン鉱山がひとりでの臨界状態になりうるのではないかということを目撃しました。

このことが 1972 年になって、アフリカのガボン協和国でのオクロ鉱山で発見されました。核分裂が連鎖的に起きるためには、燃料である  $^{235}\text{U}$  が高い密度で集まっていること、もう一つは、その場所に水が存在することです。水があることによって、水と衝突してエネルギーの小さくなった中性子が核分裂を起こしやすくするからです。

重い元素であるウランは、地球上では花崗岩（御影石）の中に多く含まれています。花崗岩が雨風にさらされ、長い年月を経て侵食され、ウランが溶け出し、溶け出したウランは少しずつ川の中に沈殿して、ウラン濃度の高い地層ができます。これがウラン鉱床になります。約 20 億年前では、天然ウラン中の  $^{235}\text{U}$  の濃度は約 4%になります。この濃度は、現在、原子力発電に利用されている軽水炉の燃料の濃度と同じです。このようにして今から約 20 億年前、ウラン鉱床で連鎖核分裂反応を起こす条件が満たされて、天然原子炉ができました。

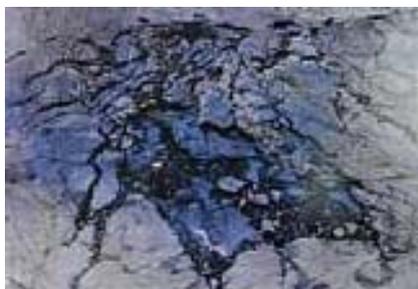


図 2-14 砂岩上に刻まれた天然原子炉の跡（1984.4.藤井勲氏撮影）

## (トピックス4) 核融合

核融合 (反応) とは、複数の原子核が融合し、反応前に比べて質量の大きい原子核を生成する反応の総称であり、一般的には鉄より軽い原子核同士が融合して重い原子核をつくる反応のことをいいます。プラスの電荷をもつ原子核同士が融合するためには、そのクーロン斥力を乗り越え、核力によって引きつけられる範囲 ( $\sim 2 \times 10^{-15}$  m) にまで原子核同士が接近する必要があります。この条件はいくつかの状況によって達成されますが、その一つに高温・高密度状態があります。そこで起こる反応は熱核融合反応 (thermonuclear fusion reaction) と呼ばれ、太陽をはじめとする恒星のエネルギー源になっています。巨大な重力場をもつ太陽 (中心温度約 1700 万度) では、重水素 ( ${}^2\text{H} \equiv \text{D}$ ) とヘリウム-3 ( ${}^3\text{He}$ ) を生成する経路をたどりますが、一言でいうと 4 個の水素が融合して 1 個のヘリウム-4 ( ${}^4\text{He}$ ) をつくる陽子-陽子反応

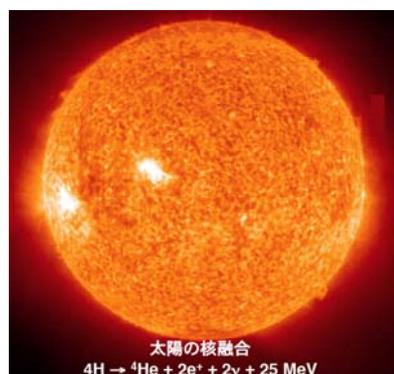


図 2-15 太陽の核融合



(ここで  $\text{e}^+$  は陽電子,  $\nu$  はニュートリノ) が起き、莫大なエネルギーを放出します。

このエネルギー源を地球上に実現をしようとするのが核融合炉です。重力の小さい地球上では原子核を超高温 (数億度) に加熱しなければならないため、利用可能な反応は D とトリチウム ( ${}^3\text{H} \equiv \text{T}$ ) が融合してヘリウム-4 ( ${}^4\text{He}$ ) をつくる D-T 反応



や重水素同士が融合して  ${}^3\text{He}$  あるいは T になる D-D 反応



[(3)と(4)の反応確率はほぼ等しい] などに限られます。その中で、D-T 反応は“比較的低い温度 (それでも 1 億度以上)” で進行しますので、この反応を利用する制御核融合炉 (CTR: Controlled Thermonuclear Reactor) の実現の可能性が最も高いといわれています。この反応では、重水素とトリチウムの混合燃料 1 グラムから石油約 8 トン分のエネルギーが得られる勘定になります。重水素の天然存在比は 0.0153% と小さいのですが、地球の全海水に含まれる重水素の量は莫大ですから資源の問題はなく、究極のエネルギー源と期待されています。一方、トリチウムは天然にほとんど存在しないため、核融合炉に最初に注入する燃料トリチウムは人工的につくらなければなりません。運転開始後は炉内でトリチウムを自ら増殖し、消費分を補充するように工夫して問題を解決できます。

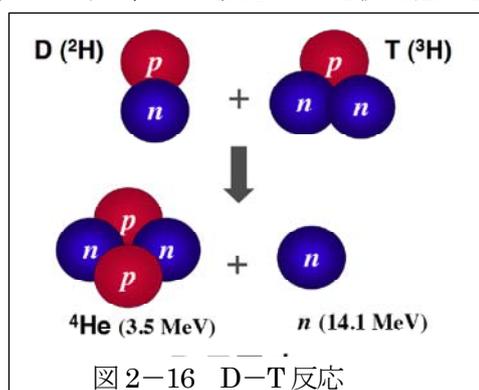


図 2-16 D-T 反応

核融合炉の実現をめざす研究が本格化したのは 1960 年代後半です。超高温の水素同位体プラズマを閉じ込め核融合反応を起こさせる方法として、強力な磁場を使う磁気閉じ込めと、高強度レーザーなどを用いる慣性閉じ込めがあり、両方式での研究が進められました。1980 年代後半には磁場閉じ込め方式の大型プラズマ実験装置が日本 (JT-60), 米国 (TFTR) および EU (JET) で相次いで建設され、プラズマ制御技術は格段に進歩しました。現在では、プラズマの最高到達温度は約 5.2 億度に、最長閉じ込め時間は約 30 秒に達しています。

1985年の米ソ首脳会談を契機に、国際共同研究が米国、ソ連、EU および日本の4極が参加して進められることになりました。イーター (ITER: International Termonuclear Experimental Reactor) と呼ばれる国際熱核融合実験炉の概念設計です。研究成果を受けて、2001年には実機の建設をめざす政府間協議が開始されました。その後中国、韓国およびインドがこのプロジェクトに加わり、現在では7国が共同でITERの建設に取り組んでいます。EUと日本の間に激しい誘致合戦がありましたが、2005年にITER本体はフランスのカダラッシュに建設することが決まり、日本(六ヶ所村)にも関連施設が建設されることになりました。2007年に本体の建設を開始し、2016年にはプラズマ実験を開始する予定でしたが、建設費の膨張もあり、着工は2010年以降になる見込みです。長期計画では、最初の商用核融合炉の運転開始を2050年としています。計画の具体化はなお時間がかかりそうです。

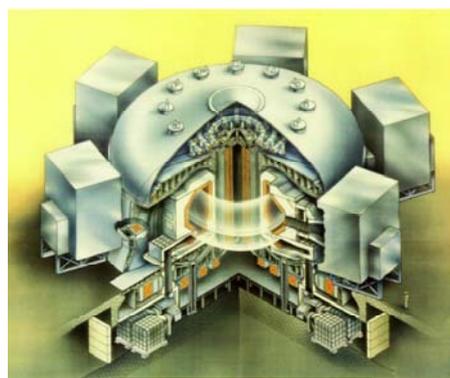


図2-17 核融合炉(CTR)の想像図

(核融合に関連したトピックス)

一 核融合の軍事的利用(水素爆弾) 一 ビキニ事件

アメリカは1954年(昭和29年)3月1日、太平洋のマーシャル諸島(現在はマーシャル諸島共和国)史上最大の水爆実験を行いました。この爆弾は、当時は秘密にされていましたが、原爆を起爆剤とし核融合反応を利用した水素爆弾で、広島に投下された原子爆弾の約1000倍の強力な破壊力をもつものでした。その結果、公海上にいた第五福竜丸やマーシャル諸島の住民たち、アメリカの観測兵らが被曝しました。わが国では放射性物質に汚染された魚を廃棄しましたが、被災した漁船の数は856隻に達しました。この事件で、大量の放射能によって太平洋の広い海域が汚染され、日本や太平洋諸国の漁業は甚大な損害を被りました。

第五福竜丸の乗組員23名全員は被ばくして急性放射能症にかかりましたが、2週間後の3月14日に母港焼津に帰港しました。乗組員が持ち帰った爆発の灰(「死の灰」と呼ばれました)を科学分析した結果、灰の本体は新型の水素爆弾によるものとわかり、アメリカの秘密兵器と核兵器開発の実態を明らかにする結果となりました。乗組員全員は東京で入院して治療が施されましたが、9月23日に最年長だった無線長の久保山愛吉さんが死去して国中に衝撃を与えました。ただし、その死因は肝臓障害といわれています。

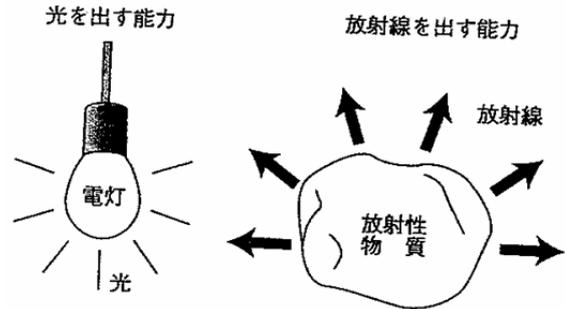
### 3. 日常生活と放射線

#### 3-1 放射線・放射能の単位と自然放射線・天然に存在する放射性物質

##### 3-1-1 放射線と放射能（放射性物質）の用語について

放射線は光のようなもので、それは放射能すなわち放射性をもった物質から放出されているものです。

「放射能」というのは、本来は放射線を出す能力・性質のことですが、今では放射能の性質を持った物質すなわち放射性物質のことを俗に言っています。よくマスコミで「放射線漏れ」とか「放射能漏れ」という言葉を使い、これがしばしば混同されていますが、前者は光が漏れたようなものですが、後者は物質が移動しているのです。



放射線と放射能の関係

図3-1 放射線と放射能の関係

##### 3-1-2 放射線と放射性物質の単位について

はじめに放射性物質の強さの単位、ベクレル (Bq) について述べます。1ベクレルは、毎秒に1個、放射線の粒子を放出する能力を言います。以前はキュリー (Ci) という単位が使われていました。(今も時々使われています。) これは1グラムのラジウムが毎秒に放出する放射線の数です。ベクレルとキュリーとの関係は、1キュリー=  $3.7 \times 10^{10}$  ベクレルです。

一方、放射線の作用を表すには、物質の単位重さ当たり吸収された放射線エネルギーを表すためにグレイ (Gy) があります。これは物理学でエネルギーを表す単位であるジュール (J) とは  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$  の関係があり、物質1キログラム当たり何ジュール吸収されたかというエネルギーの量を表します。

同じく吸収された放射線エネルギー（これを吸収線量といいます）ですが、人体への影響が加味された単位としてシーベルト (Sv) があります。これもグレイと同じく吸収体の単位質量当たりの放射線エネルギーに比例する単位です。これらの単位には、実用的にはミリグレイ、マイクロシーベルト、といったように、種々の補助単位が使われます。

放射線の単位は、放射線の影響を定量的に理解するために重要なものですが、ここで早めに知って頂きたいことは、放射線による吸収線量が、ある時間を掛けて測定された「総線量」か、単位時間当たりの「線量率」かということです。

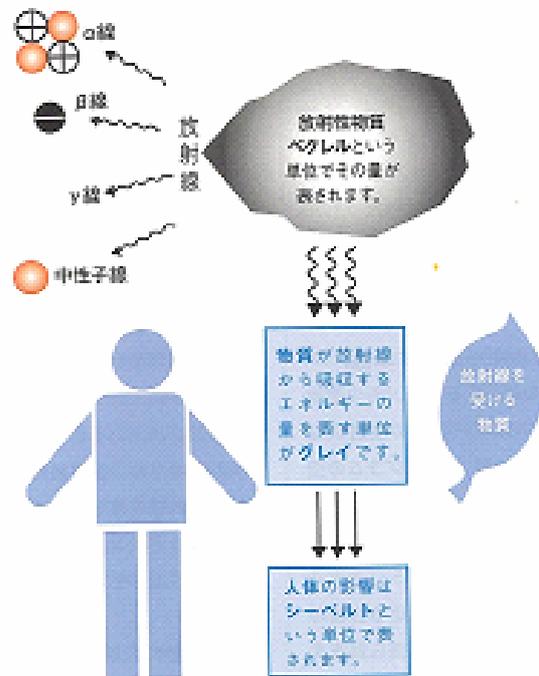


図3-2 放射線に関する諸単位

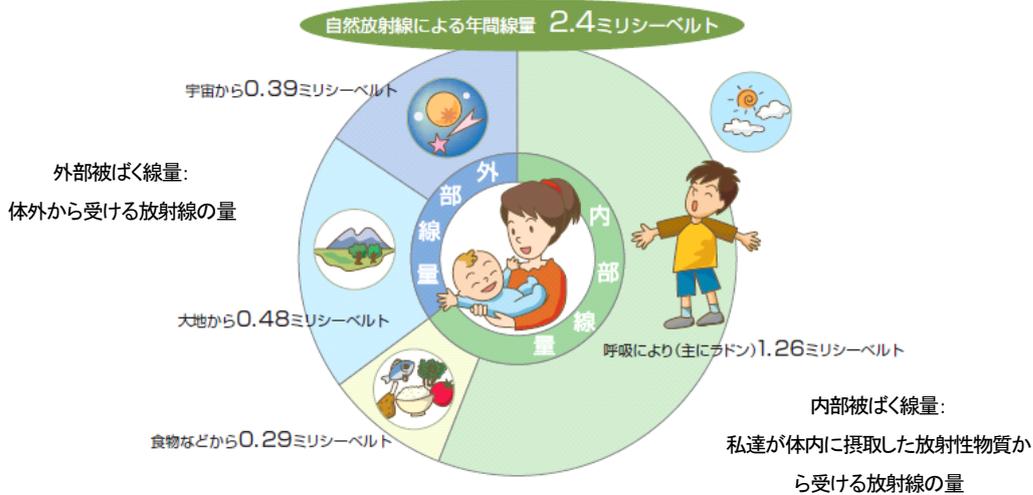
(原文振「放射線の世界」平成20年4月)

### 3 - 2 自然放射線

放射性物質は、われわれ人類誕生の時にはすでに地球上に存在しており、われわれ人類は放射線を全身に受け続けてきました。自然界に存在する放射線を自然放射線といいます。それにはいろいろな発生源があり、空から降り注ぐ宇宙線をはじめ、大地から出る放射線、食物の中に含まれる放射性物質からの放射線があり、されには空気中にもラドンなどに起因する放射性物質があり、私たちがこうして自然界から年間 2.4 シーベルトの放射線を受けています。

図 3-3 わたしたちが一年間に受ける自然放射線量

(資源エネルギー庁「放射線と暮らし」2007年11月)



● 大気圏外からやってくる放射線「宇宙線」 宇宙から私たちが1時間あたりに受ける線量は高さや緯度によって異なります。その様子は、海面では0.03マイクロシーベルトですが、高度4,000メートルではその約7倍の0.2マイクロシーベルトとなり、高度12,000メートルでは更にその25倍の5マイクロシーベルトとなりますので、東京—ニューヨーク間を旅客機で1回往復すると0.2ミリシーベルト浴びることになります。また宇宙旅行では1日に1~3ミリシーベルトですので、1年間に地上で受ける線量を1日で受けることとなります。これまでの宇宙探査で6ヶ月宇宙に滞在した宇宙飛行士の線量は400ミリシーベルトであったとのこと。

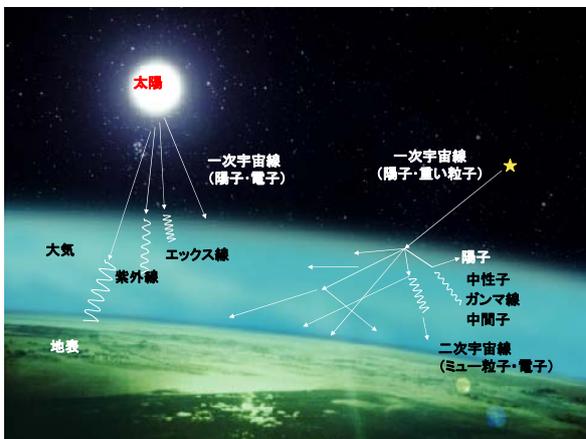


図 3-4 空からの放射線—宇宙線—  
(環境研サイエンスノートNo.4, 平成13年)

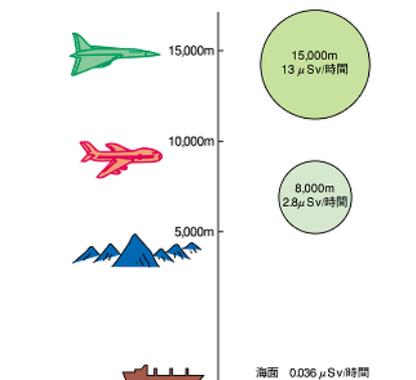


図 3-5 宇宙線の高度変化  
(1993年国連放射線影響科学委員会報告)

● **大地からの放射線** 大地から私たちが受ける線量は、日本各地で地域によって異なります。これは土や岩石に含まれている放射性物質の量が地域によって異なっているためです。中部地方以西では花崗岩地帯が多いので、土壌中にウランなどの放射性物質が多く含まれており、そのために関東以北に比べて放射線の強度が高くなっています。

世界的には、大地だけからの線量は平均値で 0.50 ミリシーベルト、日本の平均値は 0.43 ミリシーベルト（最高値 1.20 ミリシーベルト）ですが、ブラジルのガラパリでは平均 5.5 ミリシーベルト、インドのケララでは平均 3.8 ミリシーベルト、というふうに、日本の数倍から数十倍も高いところがあります。ガラパリとケララは放射性同位体であるトリウムを含む砂が多く、イランのラムサルでは温泉の噴出でたまったラジウムが原因であることがわかっています。

● **大気中の放射性物質からの放射線**

宇宙からの放射線のほかに、私達の環境に存在する放射線として、空気中に含まれる放射性同位体ラドンとその壊変生成物（ポロニウムや鉛など）による体外からの被ばくがあります。これらの放射性物質は空気中のちりに吸着して漂っており、人間は呼吸によりこれを取り込み、その被ばく量は年間 1.3 ミリシーベルトです。

● **体内の放射性物質からの放射線**

大地に含まれている放射性物質の一部は地下水に移行します。また私達が食用にしている野菜や肉、海産物などはすべて大地あるいは海の産物です。これらを食品として摂取したとき、肥料や飼料、海水中に含まれていたウランやカリウム 40 などの天然の放射性物質が間接的に人体内に入ってきています。食品中のカリウム 40 はどのくらいかという図に示すとおりです。この結果から、体重 60 キログラムの人の体内にはカリウム 40 が約 4,000 ベクレル含まれていることがわかります。その他の放射性同位体によるものを含めると、被ばく線量は平均で年間 0.3 ミリシーベルトとなります。

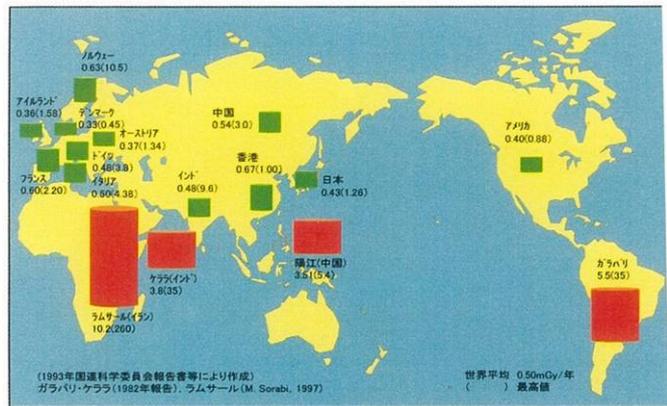


図 3-6 世界各地の大地からの放射線が多い地域  
 (「世界の大地放射線」放射線利用促進協議会、2000年5月)



図 3-7 食物中の自然放射性物質  
 ((財)放射線影響協会「放射線」)

3-3 人工放射線

人工的に発生させる放射線で、医療、工業、農業等に利用されています。

● **放射性物質からの放射線**

人工的に作られた放射性同位体（放射性核種）から発生する放射線で、代表的な放射性物質としては、コバルト 60 があります。放射性同位体は原子炉や加速器を用いて人工的に作られます。

● **放射線発生装置からの放射線**

放射線発生装置から出る放射線で、代表的な発生装置としては、エックス線発生装置や加速器があります。

### 3 - 4 自然および人工放射線から受ける線量

日本では、自然放射線のほかに人工放射線を利用した医療診断によって、国民1人当たり平均で年間2.25ミリシーベルトの線量を受けています。自然放射線と人工放射線を合わせると、平均して4ミリシーベルト近くの線量を受けています。

### 4. 放射線の性質

放射線の性質は透過と作用（物質への「はたらき」）に分けられます。 $\alpha$ 線や $\beta$ 線の場合、透過は慣性運動であり、外部の電磁場が存在しない真空中では等速直線運動を続けます。物質中では放射線は透過しながら繰り返し作用して物質にエネルギーを分け与え、最終的にエネルギーを失って放射線ではなくなり、物質の一部となります。

作用には電離、励起、弾性散乱、原子核反応など様々な種類がありますが、その種類や大きさは物質の種類や放射線のエネルギーに依存します。放射線の利用や人体への影響に着目する場合は、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線のような電荷をもつ放射線が起こす電離がすべての作用のうちで最も重要です。電離作用は物質を構成する原子内の電子を弾き飛ばすことによって、その原子を活性なイオンにすることです。X線、 $\gamma$ 線、中性子線のように電荷をもたない放射線は、それら自体は直接的に電離作用を起こしませんが、独自の作用によって電荷をもつ放射線を副次的に発生するので、間接的には電離作用を起こす能力もっています。

電離作用をもとに引き起こされる化学反応や生物反応が医療や製造業に広く利用されています。中性子線の場合の特徴的な作用は核分裂反応に代表される原子核反応で、その作用は原子力発電に役立てられます。

放射線の透過力は放射線の種類や放射線のエネルギーに依存しますが、透過力は放射線が透過していく間に物質から受ける反作用に依存し、放射線が失うエネルギーが大きいほど透過力は弱まります。 $\alpha$ 線は電離作用が大きいので透過力が小さく、紙1枚で止まります。 $\beta$ 線は電離作用が相対的に小さいので、 $\alpha$ 線より透過力が高く、薄い金属板で止まります。 $\gamma$ 線、X線、および中性子線は直接的な作用を物質のなかで起こしにくいので透過力が大きいですが、鉄、鉛、コンクリート、水などで効果的に止まります。ただし、以上の比較はあくまで一般論です。放射線を止めることを遮蔽といいます。放射線を遮蔽するのに必要な厚さは、放射線の種類、エネルギー、遮蔽する材料の密度によっても変わります。

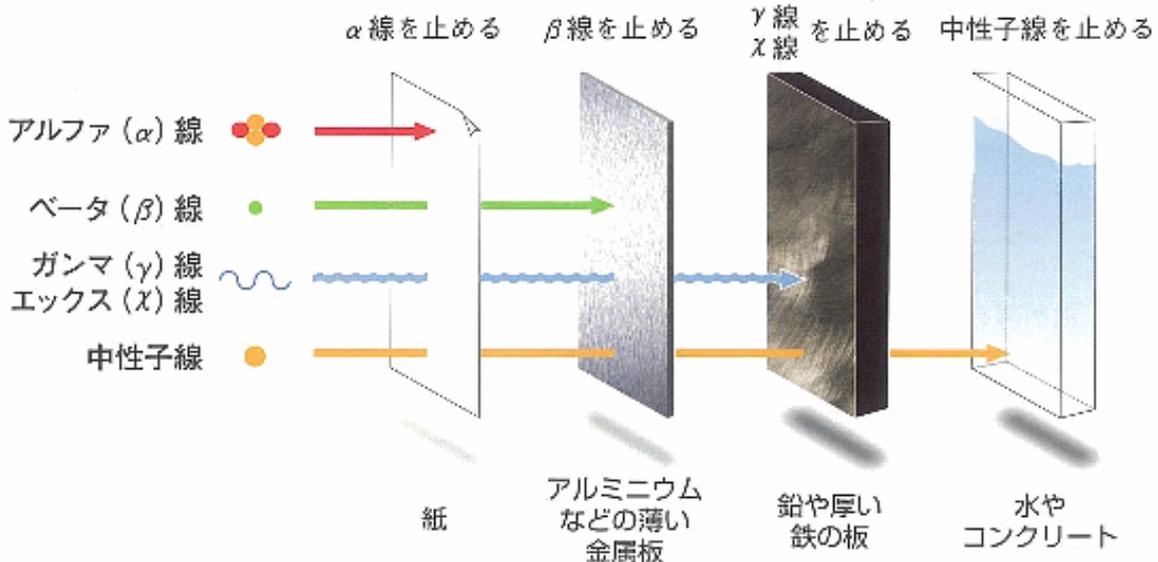


図4-1 放射線の種類と透過力 (資源エネルギー庁「原子力2005」)

## 5. 放射線の利用

放射線の利用は、産業・医療・学術分野の広い範囲にわたっています。以下、医療への利用と産業への利用に大別して述べます。

### 5 - 1 医療への利用

医療への利用には検査・診断と治療があります。診断ではレントゲン撮影、CT、PET診断などがあります。治療ではX線治療のほかに、最近では重粒子線によるがん治療が注目されています。

#### ● 検査・診断への利用

##### 放射線発生装置を用いた診断

X線発生装置により単純撮影や造影剤を用いた撮影を通して、患部を見つけて診断したり、コンピュータ断層診断装置を用いて体の各部断面の像を作り出して診断することができます。

##### 放射性同位体を用いた診断

がんの診断等では、がん組織に集まりやすい放射性物質を注射し、組織からの放射線を体外から検出し、がんの広がりを知ることができます。

| 検査・診断  | 原理と特徴                                                                                           |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X線     | 体外から放射線を透過させ、体内の様子を知る。                                                                          |
| X線CT   | 身体の周りを一周するようにX線を照射し、透過したX線量を計測し、コンピュータ処理することによって輪切り像（横断像）を作成する。組織の形態が観察できる。                     |
| 放射性同位体 | 体内にRIを注入し、体外からその臓器分布を計測・画像化し、病変部の発見や診断を行う。                                                      |
| PET    | トレーサーとして陽電子を放出する放射性同位体を標識した化合物を投与し、陽電子の消滅時に発生する $\gamma$ 線を体外で検出し体内分布を画像化し生体の機能を観察する。           |
| PET-CT | PETの「機能」画像とX線CTの「形態」画像を連結したもの。放射性トレーサーを投与し、PET画像とX線CT画像を撮影する。より高精度の検査・診断、特に早期発見・治療効果確認に有効である。   |
| 体外診断   | 血液中に存在する極微量の物質の濃度を測定するのに用いる。例えば、腫瘍マーカーによく結合する化合物に放射性同位体を標識し、試験管内で反応させ結合したRIを測定し当該腫瘍マーカー濃度を測定する。 |

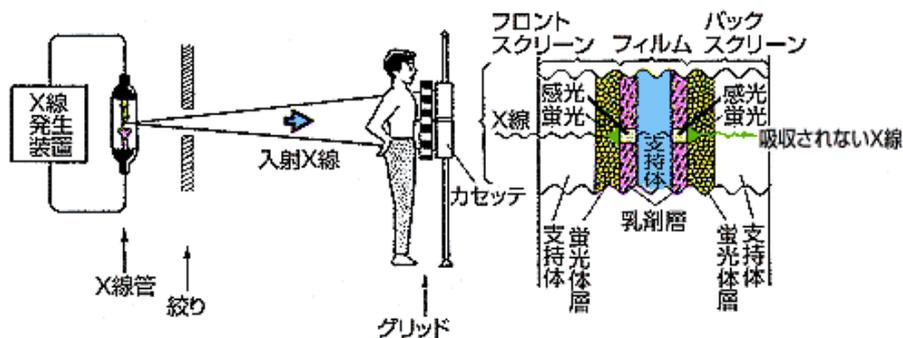


図5-1 スクリーンとフィルムの感光の仕方の拡大図

● 放射線治療

放射線発生装置を用いた治療

がん細胞に対して殺傷能力が高く、健康な細胞への影響が少ないエネルギーの高いX線を体外から照射してがん治療が行われています。最近では、重粒子を利用したがん治療も行われています。

放射性同位体を用いた治療

がん治療では、コバルト-60等の放射性同位体から放出される放射線を体外から照射します。がんに集まりやすい放射性薬剤を体内に注入し、がん治療を行うこともあり、さらに半減期の短い放射性同位元素を微小カプセルに密閉して病巣に埋め込み、放射線照射して治療する方法が米国を中心として行われています。その例として前立腺がん治療などがあります。

| 照射方法            | 線源                                    | 適用                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 外部照射            | X線・ガンマ線・粒子線・陽子線・重粒子線                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○体外の照射装置から患部に集中照射：ほとんどの固形がん</li> <li>○術中照射：切除不能の限局したがんはその部分を開いて照射する。隣接臓器で再発する危険性がある場合や、がん切除後に念のために行う。</li> <li>○予防的全脳照射：原発性のがんが高頻度で脳転移を起こす可能性がある場合、脳に対して行う。</li> <li>○ラジオサージャリー（定位放射線治療）：周辺の正常組織を傷つけないように、病変の形状に正確に一致させて放射線を集中照射する治療法。放射性同位体を線源に用いたガンマナイフ、重粒子、高エネルギー装置（ライナック）などを用いたラジオサージャリーがある。</li> </ul> |
| 内部照射<br>（小線源照射） | ガンマ線（線源は：Co-60、Cs-137、Ir-192等の放射性同位体） | <ul style="list-style-type: none"> <li>○組織内照射、腫瘍内（あるいは近傍）埋め込み：頭頸部、前立腺、卵巣、乳房、肛門周囲、骨盤領域などのがん</li> <li>○腔内（管内）照射—アプリケータ挿入：子宮や舌などのがん</li> </ul>                                                                                                                                                                                                        |
| 全身的放射線治療        | I-131、Sr-89                           | ○飲み薬や注射薬として投与：甲状腺がん、成人非ホジキンリンパ腫                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |



図5-2 治療における放射線の利用

## 5-2 産業への利用

### (1) 工業分野への利用

工業分野において放射線は、暮らしのなかに深く浸透しているケイタイ・パソコン、クルマなど工業製品に広く利用されています。工業利用はわが国の放射線利用のなかで最も経済規模が大きいのですが、個々の部品はブラックボックス化していますので、部品の製造段階で放射線が利用されている実態は見えにくく、その認知度はあらゆる放射線利用になかで最も低くなっています。

#### A. 半導体製造

携帯電話やパソコンをはじめとする電気製品は半導体部品が重要な構成要素となっています。半導体部品は原材料であるシリコンなどを微細に加工することによって製造されていますが、そのいくつかの製造工程において放射線が多様な目的で繰り返し使われています。それらのうち最も重要な放射線利用は、半導体集積回路(IC)の品質を決定づける回路原版(フォトマスク)の作成に電子線が使われていることです。

電子線の場合、電界で精密に操作することによって最小直径は10万分の1ミリメートル以下の極めて細いビームをつくることが可能です。この電子線の透過力や作用力によって、携帯電話やパソコンに組み込まれるIC製造の鍵となる高解像度のフォトマスクが作られています。

現在期待されている集積度のさらに高いICの製造において、解像度の高い作用性を持つ放射線の利用はその有用性をますます高めており、将来のナノテクノロジーの発展を支える技術の基盤となっています。

#### B. 自動車部品

今日の日常生活に欠かせないクルマを構成している数多くの部品の製造に放射線が利用されています。ラジアルタイヤ、電線・ケーブル、内装材などに放射線を照射した高性能の高分子材料が使われています。高分子に放射線を当てると、不安定で反応性の高い原子や分子であるラジカルが生じ、それを起点に糸状の長い分子の間で結合が起こって網目状となり、熱に強く固い高分子材料となり、クルマの厳しい要求性能に応えられる性能が得られます。放射線を使うことは、加熱を

図5-3 クルマと放射線

**耐環境の電線被覆**  
放射線重合。熱・水・油に耐えるケーブル



**エンジンの耐摩耗性**  
放射性同位体を用いた摩耗度計測



**タイヤ**

かたく、摩耗しにくく、かつ、加工し易くする



**ボディ**

鋼板製造における厚み等のオンライン品質管理



**内装材**

高分子材料の重合。発泡材。防水・耐熱・耐変形

必要としないため、素材の形や性質を変えずに、熱に強く強靱な材料を作れます。また、化学物質を使わないので環境負荷を減らすことができるという利点もあります。ラジアルタイヤの加工では、ゴム製の部材を組み合わせていく製造工程での電子線照射によって、タイヤ強化だけでなく接着性、軽量化、作業性の向上も実現されています。

### C. 非破壊試験など

放射線による身体の診断と同様に、透過性の高い放射線の特徴を活かすと、構造物を傷つけたり、ばらばらにしたりすることなく、その内部に隠れている欠陥や危険物を遠隔的に観察できる利点があります。大型の産業機器や公共インフラを支える大量輸送システムなどの複雑な構造物の品質管理や施工管理を主な目的とする非破壊検査とともに、危険物の持ち込みを調べる空港手荷物検査がその代表例です。最近ではテロを未然に防止するための検知法としても放射線は有力な手段となっています。

物体に接触することなく計量できるという特長を活かすと、板あるいは紙、フィルム状の製品の厚さを生産ライン上で自動的に制御できる利点があります。乗用車のボディ軽量化の主演となっている薄い鋼板の製造における品質管理では、非接触、連続的、かつ高温な状態で計測することが要求されますが、放射線以外に適切な手段がありません。このように、産業・交通技術の公共的な安全や品質という生活基盤を支えるために、放射線が重要な役割を担っています。

## (2) 農業分野への放射線利用

わが国の食糧自給率は主要先進国の中では最低の40%であり、安全保障の重要課題であり、食糧の安定供給のため、安全かつ多様な手段を確保する必要があります。農業分野への放射線利用は工業や医療の分野に比べて規模は大きくありませんが、生活に密着しているため国民の関心度が高い分野です。

### A. 食品照射

食品の放射線照射は、食中毒菌の殺滅、微生物汚染低減、穀物害虫の被害軽減、植物防疫、発芽防止などを目的として実施されています。包装したまま連続処理できるので、衛生的で簡便である、温度上昇がわずかであるため香りや新鮮さが保てる、化学薬品のような残留毒性や環境負荷の問題がない、などのメリットがある反面、消費者の拒否反応がある、食品によっては向き不向きがある、コストが高い、などのデメリットがあります。



図5-4 ジャガイモの照射設備



図5-5 照射したジャガイモ(左)と照射していないジャガイモ(右)

(北海道河東郡士幌町農業協同組合照射センター)

わが国は食品照射を原則として禁止していますが、ジャガイモの発芽防止を例外として1972年に照射を許可しました。世界では、57カ国で230品目が認可されており、32カ国で40品目実用化されています。国際連合食糧農業機関（FAO）、世界保健機関（WHO）、国際原子力機関（IAEA）は合同で食品照射の安全性を繰り返し解析（研究報告数1200）してきましたが、97年に「適正な線量を照射した食品は、適正な栄養を有し安全に摂取できる」と結論しました。しかし、その安全性に疑問をもつ市民グループが存在します。

香辛料については、現在実施中の高圧蒸気殺菌では香味が失われるので、業界から放射線照射許可の要望書を出しましたが、一部の消費者の強い反対があるという事情があり、厚生労働省では検討を継続中です。消費者の自由な選択を尊重するため、流通において照射ジャガイモの表示を義務付けました。わが国では違法な照射製品の輸入を抑止するため、照射を検知する公定技術の確立が間近です。米国、カナダ等では、照射食品は安全であるとの考えから、こうした検知は行っていません。

## B. 放射線育種

植物育種の方法には交配と遺伝的変異がありますが、交配は親品種の形質に制約されるため、新品種を生み出すには遺伝的変異を必要としています。放射線育種は作物に放射線を照射し、突然変異を誘発させて品種を改良する方法ですが、放射線の生物的な作用として生じるDNA分子の切断等を利用する方法です。DNAの切断が一時的に起きても、大部分は修復機能が働いて元通りになりますが、一部にDNA配列が変化した安定な変異体が生成します。このなかから農産物として有用なものを選別しています。DNAとしての化学的性質には変わらないので、食物としての安全性が損なわれるわけではありません。

世界中で2000近くの品種がこれまでに育成されており、国内の成功例は100以上あります。主な成功例としては、茎が短く風に強く倒れにくいイネの突然変異種「レイメイ」、黒斑病に弱い「二十世紀」ナシを改良した耐病性品種「ゴールド二十世紀」などが知られています。放射線育種には従来ガンマ線やX線が利用されてきましたが、近年、加速器からのイオンビーム（重粒子線）照射によって従来のガンマ線などでは得難い有用な突然変異が誘発されることがわが国で見出され、実用化も進んでいます。



図5-6 黒斑病（右図）と耐性のゴールド20世紀ナシ（左図）

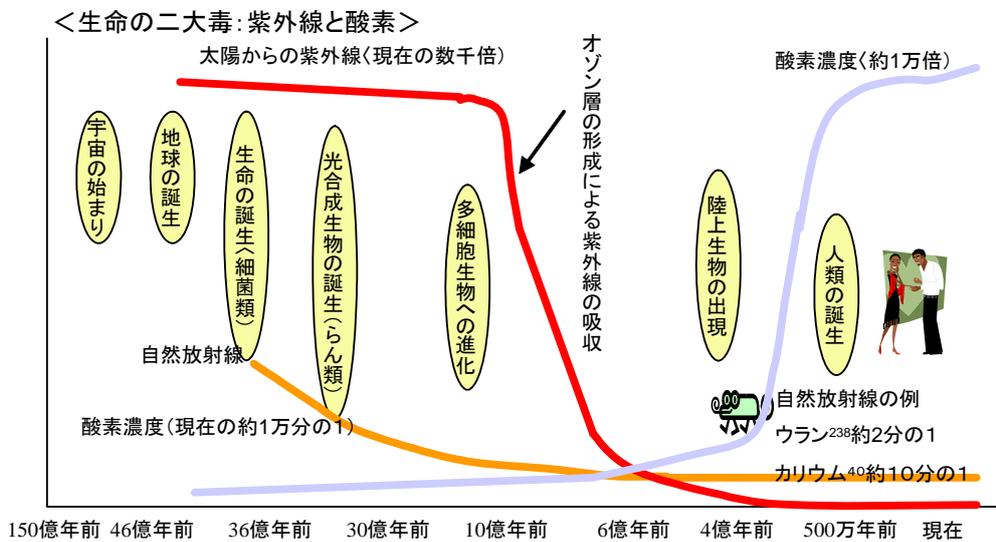
## 6. 放射線の人体への影響

### 6-1 放射線が安全か安全でないかは量で決まる

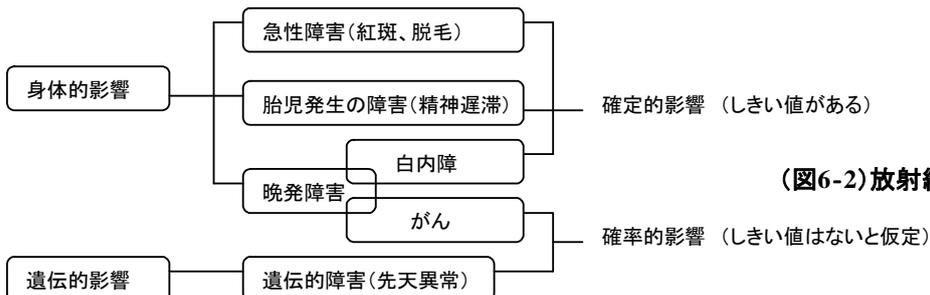
1999年9月に東海村のJCOのウラン加工工場で発生した臨界事故で2人の方が亡くなりました。この人たちは、私たちが日常1年間に受けている自然放射線量の約5千倍にあたる10,000ミリシーベルトもの量を一瞬の間に受けたのです。これは原爆のときに爆心地におられた被災者と同じ状況でした。1年間に受ける自然放射線量の5千倍以上の量は致死量ですが、1千倍程度までは死亡する危険はなく、JCO事故で亡くなった人から少し離れていて助かった方の被ばく線量は、この程度であったといわれています。放射線が安全か安全でないかは、線量で決まるのです。

放射線の人体に対する影響については、その危険性に無知であった時代の取扱いによる放射線障害や、原爆被災者や職業的に放射線を被ばくしている種々のグループの疫学的調査、膨大な動物実験などにより非常によくわかってきています。大量の放射線を一度に受けたときは臓器や組織に生じた傷は回復できず、障害があらわれます。被ばく線量が少ないときは、人間の体に備わった修復能力により、受けた傷はほぼ100%もと通りに回復します。体の細胞は、毎日どんどん新しく生まれ変わっていますから、少しぐらいの線量は、そのほかの毒物に対してと同様に、身体への刺激として受け止めて、十分に健康を維持できるのです。

生命が地球上に誕生したのは約30億年前ですが、そのときは自然放射線は今よりも多量に存在していました。生命は自然放射線に対しては十分の防禦機構ができていると考えられています(図6-1)。その生命の進化の結果、人類が誕生しました。



(図6-1)放射線とお付き合いは大昔から



(図6-2)放射線の人体への影響の分類

## 6-2 高線量放射線の影響

高線量の放射線を受けた場合の人体への影響は、大きく二つに分けられます。一つは放射線を受けた身体に出る「身体的影響」であり、もう一つはその人の子孫に現れるかもしれない「遺伝的影響」です(図6-2)。身体的影響はさらに二つに分けられます。放射線を受けて数週間以内に症状が出る「急性障害」と、数ヶ月から数年～数十年後になって症状が出てくる「晩発障害」です。この症状がでるまでの時間を潜伏期といいます(図6-3)。なお、人が生まれる前の、つまり母親の胎内での被ばくによる影響も身体的影響の一つであり、胎児の場合にも「急性障害」と「晩発障害」があります。こうした影響は、受けた放射線の種類や量はもちろんですが、全身に受けたのか体の一部に受けたのかによって異なります。

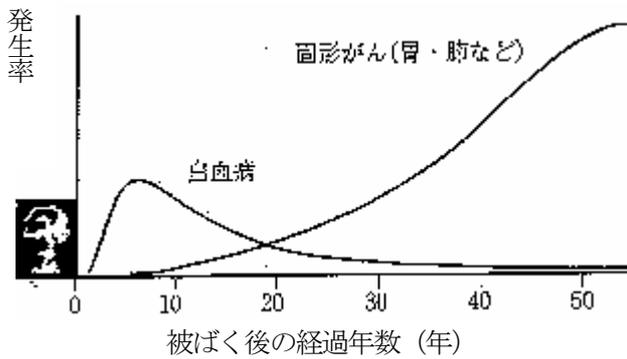
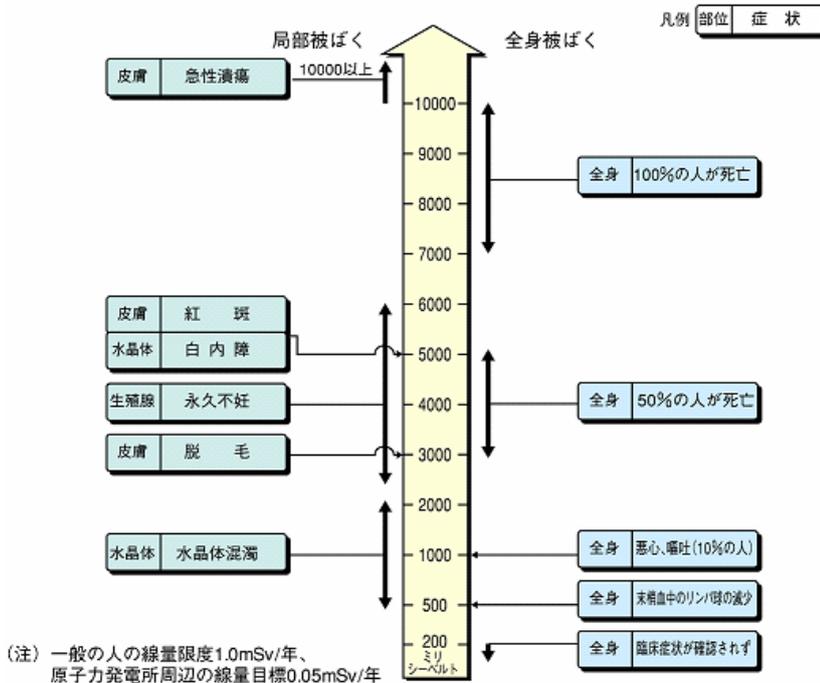


図6-3 被ばく後の晩発障害発生傾向

急性障害の例では、全身に約500ミリシーベルト以上を受けると、白血球の減少が起こります。約1000ミリシーベルト以上の放射線を受けると、吐き気がしたり脱毛が始まります。また、全身がだるい感じがします。一度に4000ミリシーベルト程度を全身に受けると、被ばくした人の半数が死亡します(図6-3)。

急性障害はしきい値(限界値)以上の線量で生じ、このしきい値は被ばくした器官によって異なります。

精子や卵子の遺伝子が放射線によって変化して、それが子や孫に伝えられると、障害を持つ可能性があります。こうした遺伝的影響が起きるのは動物実験では確かめられていますが、人間の場合、広島・長崎の被ばく者の調査をはじめ、そのほかの調査でも遺伝への影響は認められていません。



(注) 一般の人の線量限度1.0mSv/年、  
原子力発電所周辺の線量目標0.05mSv/年

図6-4 短時間に多量の放射線を受けた場合の障害

### 6-3 低線量・低線量率放射線の影響

低線量とは、人体が受ける放射線量が約 100 ミリシーベルト以下とされています。

原爆被災者にはこの程度の放射線被ばくを受けた方々がありますが、この方々の調査ではがんの増加を示す明確なデータは得られておりません。また、自然放射線の量が世界平均より多い地域の住民の調査では、がんの増加は認められておりません。

低線量の放射線ががんの発生に及ぼす影響について、しきい値がないという見解としきい値があるという見解があります。これまでは、被ばく後かなり時間がたってから発症するがんについても、放射線はいかに微量でも有害であるとする「直線しきい値なしモデル」(LNT モデル)に従って起こると放射線防護の立場から考えられてきました。この考え方は放射線作業員および一般公衆の被ばく低減に貢献してきましたが、一方では人々の放射線恐怖症を助長し、必要以上の規制により社会的・経済的負担も大きくなっています。

放射線の人体影響は、線量が低い時には人体の中の防御機構が有効にはたらい、悪影響が顕れないことが近年わかってきました。それどころか、少量の線量によってかえって健康に有益な効果が生じている場合も見られます。この現象を放射線ホルミシスあるいは適応応答といいます。放射線ホルミシスの考え方は、少量の線量は、無害であるばかりでなく、有益な刺激効果として作用し、人間の健康に良い、とするもので、その効果は、①動物や植物の成長を促進する。②がんの発生や転移を抑制する、③炎症を軽減する、④放射線障害への抵抗性を増す、⑤鎮痛・沈静作用(ラドン温泉の効用とされています)などです。同様の例に太陽紫外線があります。大量の紫外線は有害ですが、浴びた紫外線によって体内にビタミン D の生成が促進されることが分かっています。塩分、アルコール、カフェイン等の化学物質の適度な摂取においても同様な現象が見られます。

したがって LNT モデルは、現在は放射線防護のためには有効に機能するとしても、科学的には裏付けされていないと考える研究者が多くなっています。具体的には、がんの発症においても 100 ミリシーベルトくらいまでは心配ないと考えてもよいようです。

現在では、身体の細胞の中のもっとも大切な部分である DNA 分子が放射線やその他の原因で損傷を受けても、それを修復する機能が備わっています。一方、修復できずにおおきな損傷が残って細胞全体の生存に支障を来す場合は、細胞が自ら死を選ぶことによって組織から排除され、生命全体の健全性を保つアポトーシスという機能があることが分かっています。それでも一部の異常な細胞が残留して増殖したものががん細胞であると考えられています。(図 6-5) たゞ放射線を受けなくても、DNA 分子の傷は細胞 1 個当たり毎日数万回も起こり、修復されているのだそうです。

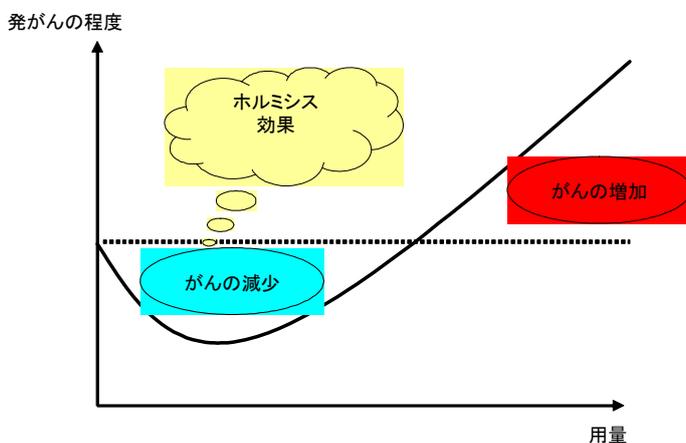


図 6-5 発がんにおけるホルミシス効果

放射線の人体に対する影響は、同一の線量でも、放射線の種類によっても異なります。それを線質効果といいます。それを加味して人体への影響度を表す単位がシーベルトです。同一の線量でも、 $\alpha$ 線の人体に対する影響度は $\beta$ 線や $\gamma$ 線よりも 20 倍も高いとされています。シーベルトで表された線量が同じならば、人工放射線であっても、人体への影響度は自然放射線の場合と同じです。ただし、シーベルト値は同じでも、放射線を全身に受けたときのほうが、体の一部に受けたときよりも影響は大きいのです。

## 6-4 身体と放射線

人間の身体は、細胞、組織、臓器から作られています。細胞は、身体を構成する基本単位で、身体の中には何十兆ものいろいろな種類の細胞があります。たとえば、神経細胞、筋肉細胞、脂肪細胞、脳細胞などです。赤血球、白血球、精子、卵子などもそれぞれ細胞の一つです。いくつかの種類

の細胞が多数集まって、組織や臓器が構成されています。組織や臓器には、放射線の影響を受けやすいものと、受けにくいものがあります。これを放射線感受性といいます。一般には、細胞分裂をして次々と新しい細胞ができる臓器、例えば血液をつくる造血臓器、精子や卵子ができる生殖腺（精巣や卵巣）や小腸（消化管粘膜）は放射線感受性が高いといわれています。一方、肝臓、筋肉、脳などのように、細胞分裂をほとんど行わない組織・臓器は放射線の影響を受けにくいのです。

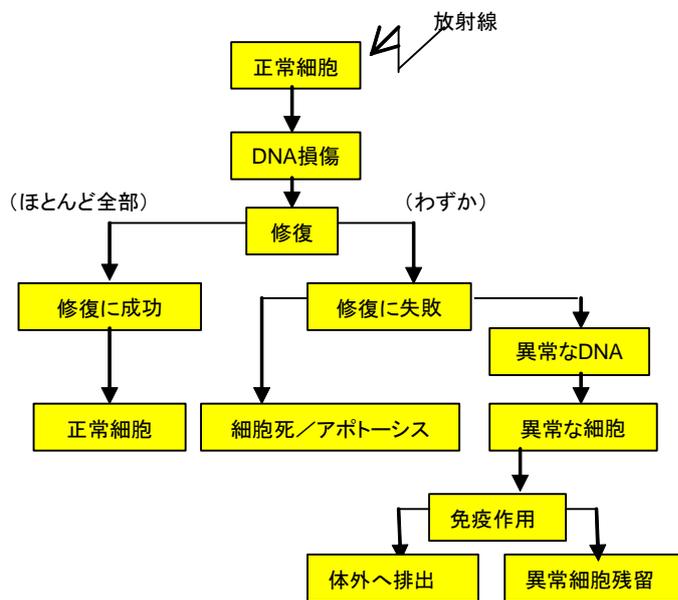


図 6-6 放射線による細胞への影響と防御

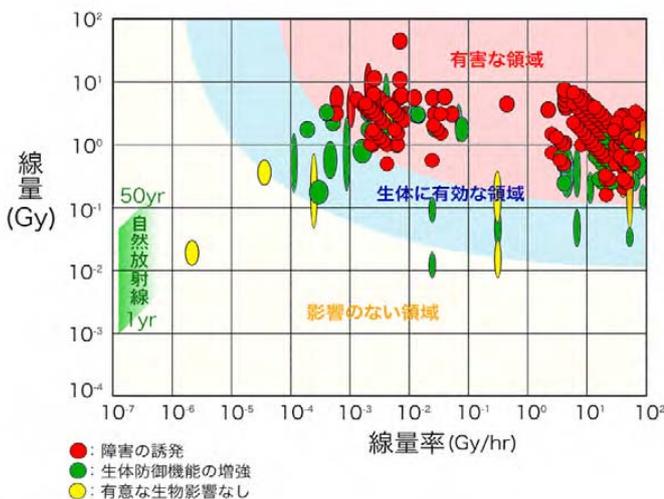


図 6-7 線量・線量率効果

(電中研報告書 LO7001、2008 年 4 月)

放射線は人体を通り抜ける間に、組織を構成する細胞の主要部分（DNA など）に直接的に作用して損傷を与えたり、あるいは細胞内に多量に存在する水分子にまずエネルギーを与えてラジカルのような反応性の大きい物質をつくりこれが作用して細胞を傷つけたり、細胞が正しく働くための種々の構造に傷をつけます（これを間接作用といいます）。その結果、身体に備わっている修復能力でその傷を治しきれないとき、放射線障害が発生します。しかし、放射線量が比較的低く、損傷が小さい時は、組織や臓器の機能は回復し、特に症状は表れません。

造血臓器、消化管粘膜、皮膚の表皮は放射線障害を受けやすい臓器や組織です。それらは細胞分裂を繰り返している細胞が多く、放射線の影響を受けやすいからです。そういうわけで、同じ量の放射線を受けても、それを短い時間に受けたときよりも、長い時間にわたって受けたときのほうが回復が十分におこなわれるので影響が少なくなります。これを線量率効果といいます（図 6-7）。

## 7. 放射線防護——放射線はどのように防ぐか

### 7-1 放射線障害の経験

1895年のX線の発見、1898年のラジウムの発見以来、人類は放射線、放射性物質および原子力の利用による恩恵を受ける一方で、放射線障害という望ましくない経験も積み重ねてきました。それらを体験した人々とは、1) 職業上放射線を受けた人々、2) 放射線や放射性物質を用いて診断、治療を受けた患者、3) 核爆発による被ばく者でした。

### 7-2 国際放射線防護委員会 (ICRP) の設置

放射線の利用と放射線による障害の経験から、1928年に国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) という非政府専門組織が作られ、放射線防護についての勧告がなされるようになりました。日本をはじめ各国の放射線に関する法律や行政は、基本的にICRPの勧告を遵守する姿勢をとっています。

### 7-3 ICRPの放射線防護の基本原則

国際放射線防護委員会 (ICRP) は、放射線防護の観点から、放射線の人体への影響に関して、被ばく線量のしきい値があることがわかっている**確定的影響**と、しきい値がない可能性が大きいと思える**確率的影響**に大別し、そのうえで、放射線防護の目的を ①確定的な影響 (嘔吐、脱毛、不妊、白内障など) を防止し、②確率的影響 (白血病、固形がんなど) を容認できるレベル以下に制限することとしています。

また、この目標を達成させるため、次に3つからなる放射線防護体系を勧告しています。

- 1) 放射線を使用する便益が、使用時に予測される放射線被ばくのリスクより明らかに大きい、とわかっているときだけ放射線を使用する。
- 2) すべての放射線被ばくを、合理的に達成できる限り低く保つ。
- 3) 個人の被ばく線量については、定められた線量限度を超えないように管理する。

放射線被ばくについては、次の3種類に分類します。

- 1) 職業被ばく：放射線の使用を職業としている人 (放射線業務従事者) が作業員として受ける被ばく
- 2) 公衆被ばく：一般公衆の被ばく
- 3) 医療被ばく：医療分野の診断・治療で、患者や検査をされる人が受ける被ばく

### 7-4 線量限度 (わが国の法令\*)

- 1) 職業被ばくに対する線量限度：5年間に100mSv、ただし1年間に50mSv以下
- 2) 公衆被ばく：1年間に1mSv
- 3) 医療被ばくについては、医師が放射線の使用を判断し (そして患者側が受け入れたときは)、明らかにこれにより便益がある場合なので、被ばく線量に限度値をおかない。

\*体の全身に対する被ばく線量の限度ですが、体の一部分だけに対しての被ばくの場合は、法令では眼の水晶体、皮膚について作業員、一般公衆それぞれについて線量限度が決められています。

## 7-5 放射線被ばく低減のための基本

### 1. 外部被ばく低減のための3原則とは

人間が体の外から放射線をうけることを外部被ばくをいいますが、放射線が明らかに自然放射線よりも高いレベルで存在している場所での作業において、作業員の放射線被ばく量を少しでも少なくするために心得ていなければならない基本的事項をいいます。

#### 1) 線源から距離を取る

放射線の強さは線源からの距離の二乗に反比例するので、線源からの距離を十分にとって作業します。線源を動かす必要があるときは、物を挟む道具（ピンセットやトンダなど）を用いて線源との距離をとり、被ばくを減らします。

#### 2) 作業時間を短くする

作業手順を確認し、迅速に作業を行うように務めます。必要な場合は、模擬的にリハーサルを行った後作業します。

#### 3) 線源からの放射線を遮へいする

遮へいの方法は放射線の種類に依存します。α線は紙で、β線はアルミニウムなどの薄い金属板で、γ線やX線は鉛や鉄の板、コンクリートブロックなどで、中性子線は水やコンクリートで遮へいできます。

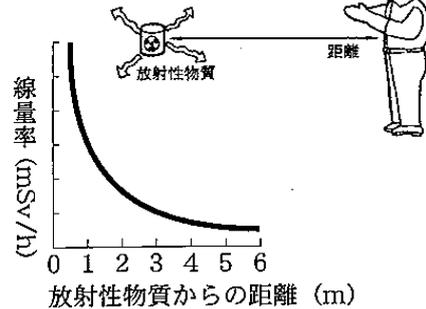
### 2. 内部被ばくを防ぐには

身体内部に入った放射性物質から放射線をうけることを内部被ばくをいいますが、放射性物質が食物や呼吸する気体として体内に入ると、消化器官から吸収されて血液中に含まれて内臓や骨に濃縮されたり、呼吸気管や肺に沈着して局所的な被ばくが起こり、体内の組織が放射線被ばくをします。

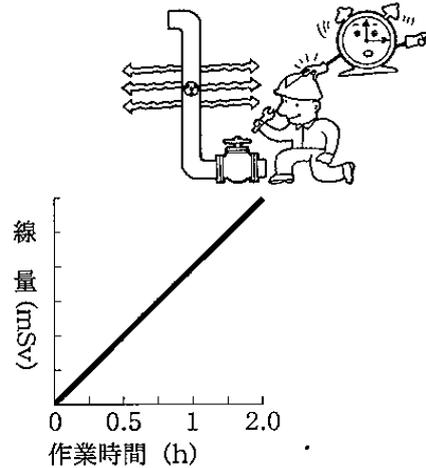
内部被ばくを防ぐには、放射性物質が含まれた食物をできるだけ食べない、また放射性物質で汚染された空気を（マスクを使用するなどして）吸いこまない、などの注意が必要です。また放射性物質で汚染された物品があるときは、それに触れることができるだけ避けて、皮膚や傷口からの侵入を防ぐという注意が必要です。

### 放射線防護の基本

- 距離による防護  
〔線量率〕=〔距離〕<sup>2</sup>に反比例



- 時間による防護  
〔線量〕=〔作業場所の線量率〕×〔作業時間〕



- 遮へいによる防護

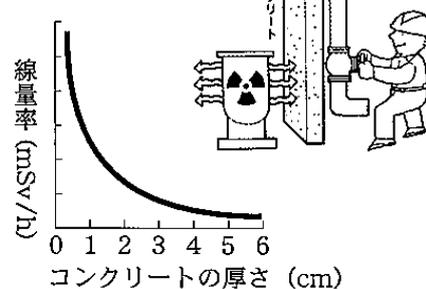


図7-1 放射線防護の基本

(日本原子力文化振興財団「原子力図面集 2002-2003」, p.121)

(Q&A 1) 少量の放射線 (約 100 ミリシーベルト以内) であれば、全く心配することはない。この理由をなぜですか。

二つの理由があります。ひとつは放射線に対して、人体には防御機構がそなわっているという身体のメカニズムであり、もう一つは放射線を受けた人の疫学的データです。

生命が誕生した 30 億年前から、生命体は放射線による刺激に耐える機能を有するようになっていきます。人類についても誕生した 500 万年前から自然放射線を受け続けてきました。

体内では、新陳代謝の過程や放射線などによって、活性酸素などのフリーラジカルが作られ、これらによって、細胞や細胞内で一番重要な染色体内の DNA 分子が損傷を受けます。しかし、生体はこの損傷を修復する機能が備わっています。一度に大量の放射線を受けると、この修復力を超えるために骨髄や内蔵などの機能が低下し、最悪の場合、死にいたることがありますが、線量が少ないときは、DNA に生じた傷はほとんど修復されます。

まれに修復に失敗して傷が残った不良の細胞ができると、その存在は生命体全体に悪い影響があるので、不良細胞がひとりで自爆して組織から排除されます。これをアポトーシスといいます。

これらは動物実験などによって確認されています。

(Q&A 2) 発がんに関する疫学的データから少なくとも 100 ミリシーベルト以内は安全と考えられる理由。

- ① 放射線による障害は、同じ線量でも短時間に受けるほど影響が大きいことがわかっていますが、非常に短い時間で被ばくした原爆被爆者の場合でも、発ガンなどの発生に統計的に有意な影響が見られるのは 100 ミリシーベルト程度以上です
- ② 地球上には、自然放射線レベルの高い地域として、インド [ケララ、土地からだけの平均値 3.8 ミリグレイ/年] やブラジル [ガラパリ、平均値 5.5 ミリグレイ/年]、イラン (ラムサール、10.5 ミリグレイ/年) などの地域があります。世界平均は 0.5 ミリグレイ/年 (土地からだけの平均値) ですが、これらの地域の住民の健康に悪い影響は統計的に顕れていません。中国広東省陽江県には、自然放射線量が通常の 3 倍の地域があり、ここでは合計約 11 万人に対する健康調査が 10 数年にわたっておこなわれていて、現在のところがん死亡率は、むしろ放射線レベルの高い地域の方が低いという統計データが示されています。
- ③ 長期間にわたり、低線量の放射線を受けていた種々の職業集団についての被ばく線量の調査があります。英国の放射線科医師による X 線の生涯被ばく線量とがん死亡率との関係は、初期の頃 (1897-1920) は、年間の被爆量が約 1 グレイ、生涯被ばくが 20 グレイもありましたので、一般臨床医と比較すると、放射線医師のがん死亡率は 1.75 倍でしたが、近年 (1955-1979) では年間被ばく線量が約 5 グレイ、生涯被ばく線量が約 100 ミリグレイと少なくなると、がん死亡率は、むしろ一般の臨床医師より約 30% も低いという統計データが示されています。
- ④ そのほか、日本の原子力発電施設等の放射線業務従事者や米国原子力船修理事業者についての調査、米国・英国・カナダの原子力従事者についての調査、欧州の定期航空便のパイロットのがん死亡率の調査などでも、低線量被ばくの影響が見られないか、むしろ健康に有益と見なされる統計データがいくつか示されています。考えられる事実がいくつかあります。

(100 ミリシーベルトの被ばくは高い線量率、つまり短い時間に同じ線量を受けた場合のしきい値です。低い線量率での被ばく、あるいは体の一部分だけの被ばくの場合、しきい値はこれより高い線量になります。)

## 8. 終わりに——エネルギー問題・原子力・放射線に関する教育について

1. 地球上のエネルギー資源、とくに石油、石炭、天然ガスなどの化石資源は有限であり、しかも現在のこれらの資源の消費量は発見量を大きく上回っているので、このままでいけば遠くない将来に化石資源の枯渇が現実となる可能性が見えてきています。
2. したがって、基本的に、地球上のあらゆる国の人々はこれらの資源を無駄に消費することをやめなければなりません。これまでのように、国家としては自由に資源を消費して経済的生産高（GDP）を増加させる、という政策を改めるとともに、個人としては「つつましい」生活をして資源の浪費を減らす、というライフスタイルに変更せねばなりません。——このことを、世界的に著名なノーベル賞受賞科学者である台湾の李遠哲博士の最近の講演会でお聞きしました。
3. 太陽光、風力等の自然エネルギーの利用を進めなければならないのは当然ですが、技術的また能力的に大きな制約があり、すべてのエネルギーを自然エネルギーでまかなうのは無理です。新エネルギーのうちでも原子力は、とくにわが国では、エネルギー源を支える重要な担い手となっています。
4. 原子力発電について一般社会人は不安を持っているようですが、この原因は何でしょうか。この資料で説明している放射線の人体影響についての正しい知識が行き渡っていないことも原因の一つを思われます。

もし大地震で原子炉施設が損壊を受けた場合でも、施設の主要部分は堅固な岩盤上に建設されているなど耐震性には十分に配慮された設計になっているうえに、原子炉の燃料体の構成は、燃料はせいぜい3~5%の低濃縮ウランであるので、原子爆弾のような爆発は起こりようがありません。運転中の原子炉に航空機が衝突したと仮定した場合も同様です。
5. 放射性廃棄物の処理・処分についても、「技術はまだ確立されていない」と簡単にかかれていような教科書もありますが、この問題は技術的な問題というより、この資料で取り上げた低レベルの放射線のリスクおよび原子力技術に関する社会での受け入れの問題になっているというべきかと思えます。
6. 最近ある学校教員の方の「化学と教育」誌で「放射性同位体の半減期には非常に長いものがあるので、原爆被災地である広島や長崎では、他の地域より環境放射線のレベルが高いのではないか」、と疑問を持った生徒さんとともに広島へ放射線の測定に行かれて、そのような事実はみつからなかったということをご報告しておられます。このような疑問を持って原爆の被災地を訪れて種々の勉強をしていただくことを奨励したいところですが、先生方におかれては、原子力や放射線についても、できるだけ正しい知識を普段から持っていていただき、生徒さんからの質問に的確にお答えいただきたいと希望します。

(文責： 松浦辰男)

(この資料を読まれた学校の先生方からのご意見をとりいれてさらに改訂したいと考えております。ご質問などを歓迎いたします。)

NPO 法人放射線教育フォーラムの連絡先：

〒105 - 0003 東京都港区西新橋 3-23-6 第一白川ビル 5階

電話： 03-3433-0308 ファックス： 03-3433-4308

E-mail： [mt01-ref@kt.rim.or.jp](mailto:mt01-ref@kt.rim.or.jp) URL： <http://www.ref.or.jp>

## 9. 参考文献

1. 飯田晴美・安齋育郎「放射線のやさしい知識」、オーム社、1984年5月、175pp
  2. 森永晴彦「放射線を考える―危険とその克服」、講談社ブルーバックス、1984年5月、244pp
  3. 市川龍資「暮らしの放射線学」電力新報社、1985年12月、135pp
  4. 国連環境計画（UNEP）編、吉澤康雄・草間朋子訳「放射線 その線量、影響、リスク」、同文書院、1988年7月、64pp
  5. 日本アイソトープ協会「放射線のABC」、丸善、1990年3月、82pp
  6. 草間朋子「放射能 見えない危険」、読売新聞社、1990年4月、227pp
  7. 九州環境管理協会「LET'S THINK いっしょに考えよう、放射能」1990年10月、37pp
  8. 近藤宗平「人は放射線になぜ弱いのか」、講談社ブルーバックス、1991年3月、241pp
  9. 文部省「環境教育指導資料（中学校・高等学校編）」、MESSCI-9102、1991年6月、121pp
  10. 松浦辰男「放射性元素物語」、研成社、1992年3月、154pp
  11. 日本保険物理学会ほか「新・放射線の人体への影響」、丸善、1993年、81pp
  12. 長崎市「ながさき原爆の記録」、1993年3月、48pp
  13. エネルギー環境教育情報センター「エネルギーKin Kon Kan」、1995年6月、76pp
  14. 文部省「環境教育指導資料（事例編）」、MESSCI-9521、1995年9月、146pp
  15. I.G.Draganic,Z.D.Draganic,J.P.Adloff 共著、松浦辰男・今村昌・長谷川園彦・橋本哲夫・朝野武美・小高正敬共訳、「放射線と放射能―宇宙・地球環境におけるその存在と働き―」、学会出版センター、1996年5月、280pp
  16. 森内和之「放射線ものがたり」、裳華房、1996年10月、200pp
  17. エネルギー環境教育情報センター「エネルギー・環境教育教師用ガイドブック」（高等学校用）、平成10年3月、90pp
  18. 日本原子力学会「原子力がひらく世紀」、1998年3月、309pp
  19. 広島平和記念資料館「ヒロシマを世界に」、1999年3月、127pp
  20. 渡利一夫・稲葉次郎編「放射能と人体―くらしの中の放射線」、研成社、1999年6月、122pp
  21. 有馬朗人・岸川俊明「21世紀のパワー」現代工学社、1999年7月、357pp
  22. (財)放射線影響協会「放射線の影響がわかる本」（増補改訂版）、2000年、190pp
  23. 長崎・ヒバクシャ医療国際協力会「放射線Q&A」2000年6月、43pp
  24. (財)日本原子力文化振興財団「「原子力」図面集2002-2003」、2002年12月、280pp
  25. 生活情報シリーズ⑫、「環境とエネルギー」、電気事業連合会、2002年3月、72pp
  26. 岩崎氏子「知っていますか？放射線の利用」、丸善、2003年7月、220pp
  27. (財)環境科学技術研究所「環境研ミニ百科集」2004年10月、235pp
  28. 武田篤彦ほか「世界の大地放射線」、放射線照射利用促進協議会、2005年5月、29pp
  29. 近藤宗平「線量放射線の健康影響」、近畿大学出版局、2005年9月、250pp
  30. 佐々木康人「身近な放射線の知識」、丸善、2006年3月、157pp
  31. 土居雅広ほか共編「虎の巻 低線量放射線と健康影響 先生、放射線を浴びても大丈夫？と聞かれたら」、医療科学社、2007年7月、226pp
  32. 茨城県「高校生のための原子力ブック」（2006年度版）平成18年3月、60pp
  33. 茨城県「小学生のための原子力ブック」（2006年度版）平成18年3月、44pp
  34. (財)環境科学技術研究所「原子力と環境のかかわり」、平成19年1月、10pp
  35. 資源エネルギー庁「わたしたちの暮らしとエネルギー」、2007年7月、22pp
  36. 資源エネルギー庁「放射線とくらし」、2007年11月、パンフレット、6pp
  37. 坂本浩・工藤博司「放射性元素・核種の小さな物語」、日本放射化学会、平成19年9月、108pp
- （以下の参考文献は15ページに掲載）