

JAERI-M  
93-161

生活環境の放射性核種

1993年9月

上野 馨<sup>\*</sup>・星 三千男

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

## 生活環境の放射性核種

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部  
上野 馨<sup>\*</sup>・星 三千男

(1993年7月30日受理)

生活環境には、地球創世以来の年月を越えて生き残っている放射性物質があり、核爆発実験に由来する放射性物質があり、宇宙線という放射線がある。このような放射性核種に関する授業は、原子力の置かれている状況を正しく把握するために役立つと考え、原子力総合研修センター原子炉研修部門で実施している一般課程において、生活環境の放射性核種というタイトルで講義がおこなわれてきた。1993年、カリキュラムの修正により、この講義が発展的に解消したため、使用してきたテキストをもとに本報告がつくられたものである。内容は、生活環境に見られる天然および人工の放射性核種の由来とその濃度などである。

---

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

\* 金沢大学

Radioactive Nuclides in the Living  
Environment

Kaoru UENO<sup>\*</sup> and Michio HOSHI

Department of Chemistry and Fuel Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 30, 1993)

There are several radioactive nuclides in the living environment, such as those existing since the creation of the earth, those coming from experimental nuclear explosions, and radiations of the cosmic rays. A lesson on these radioactive nuclides was considered useful for understanding the place of nuclear technology, and have been made on the title of "Radioactive Nuclides in the Living Environment" in the general course of the Nuclear Engineering School of Japan Atomic Energy Research Institute. When the curriculum of the general course was modified in 1993, the lesson was left in a changed form. Thus, the textbook of the lesson is presented in this report. The contents are natural and artificial radioactive nuclides in the living environment and where they have come from etc.

Keywords ; Natural Radioactive Nuclides, Induced Radioactive Nuclides, Extinct Radioactive Nuclides, Fallout, Age Determination, Oklo Phenomenon, Artificial Radioactive Nuclides

---

\* Kanazawa University

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 天然放射性核種 .....	3
2.1 起因による分類 .....	3
2.2 分布と放射線被曝 .....	9
2.3 年代測定 .....	13
2.4 オクロ現象 .....	15
3. 人工放射性核種 .....	17
3.1 大気圏での核爆発実験に伴う放射性降下物 .....	17
3.2 原子力施設からの放出（漏洩）放射性核種 .....	20
参考文献 .....	25

## Contents

1. Preface .....	1
2. Radioactive Nuclides in the Environment .....	3
2.1 Classification on the Origin .....	3
2.2 Distribution of Radioactive Nuclides and Radiation Exposure ....	9
2.3 Age Determination .....	13
2.4 Oklo Phenomenon .....	15
3. Artificial Radioactive Nuclides .....	17
3.1 Fallout from Nuclear Explosion in the Atmosphere .....	17
3.2 Radioactive Nuclides Released from Nuclear Facilities .....	20
References .....	25

## 1. はじめに

約45億年前に地球が創成されたときからその構成物中に<sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Thあるいは<sup>238</sup>Uなどの放射性核種が希薄な濃度ではあるが広く分布していたと考えられている。

放射性核種と放射線に関する知見は1895年のW.RöntgenによるX線の発見や、1896年のA.Becquerelによるウランからの放射線の発見が発端となり、その後放射性核種の種類と壊変現象、放射線の種類と物質との相互作用などに係わる研究が精力的に進められ、多くの成果が蓄積されていった。1919年にはE.Rutherfordは原子核の変換に、M.Curieは放射性核種の生成に成功し、1939年にはO.HahnとF.Strassmannによって<sup>235</sup>Uの熱中性子照射による核分裂現象が発見された。このようにして放射性核種および放射線に係わる知的基盤が築かれていった。

1942年E.Fermiによる核分裂連鎖反応装置（いわゆる原子炉）の作製を基点として、研究用原子炉などの中性子照射装置が各地に設置され、急速に多種類の放射性核種が多量に生成されることになり、元素の転換を指向した中世鍊金術の夢を現代風に成就することになった。さらに原子炉の開発研究が進み、発電用原子炉が多数設置され安定的にエネルギーの供給ができるようになった。

ほとんど環境の破壊を伴わない平和的に利用されるエネルギー源としての原子力は、人間の生活に大きく貢献しているが、一方で原子炉内で生成蓄積された核分裂生成物の一部や、使用済み燃料の再処理によって核燃料から分離された放射性物質の一部などが漏洩し、極く僅かではあるが局地的な生活環境の放射性物質による汚染を起こしている。

軍事的目的とした原子爆弾の開発のために<sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Puによる核分裂, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>Hによる核融合爆発装置を用いた大気圏における数多くの爆発実験により多種・多量の放射性核種が生成し、降下物として地表に堆積し地球規模の広範囲に亘る汚染を起こした。

これらの人為的に生成された放射性核種は、従来より天然に存在していた放射性核種に係わる諸研究を妨げることになった。

放射性降下物による地表面の汚染や、原子力発電所の稼動に伴い生成する放射性核種に起因する低線量放射線被曝による人体への悪影響の有無についての国民的強い関心が契機となり、生活環境における極微量放射性核種の分布・挙動の研究の重要性が認識され、多くの研究機関で精力的に研究が進められることになった。並行して、低被曝線量の人体への影響に関する研究も行われた。

放射性核種の分布を図1.1に模式的に示す。

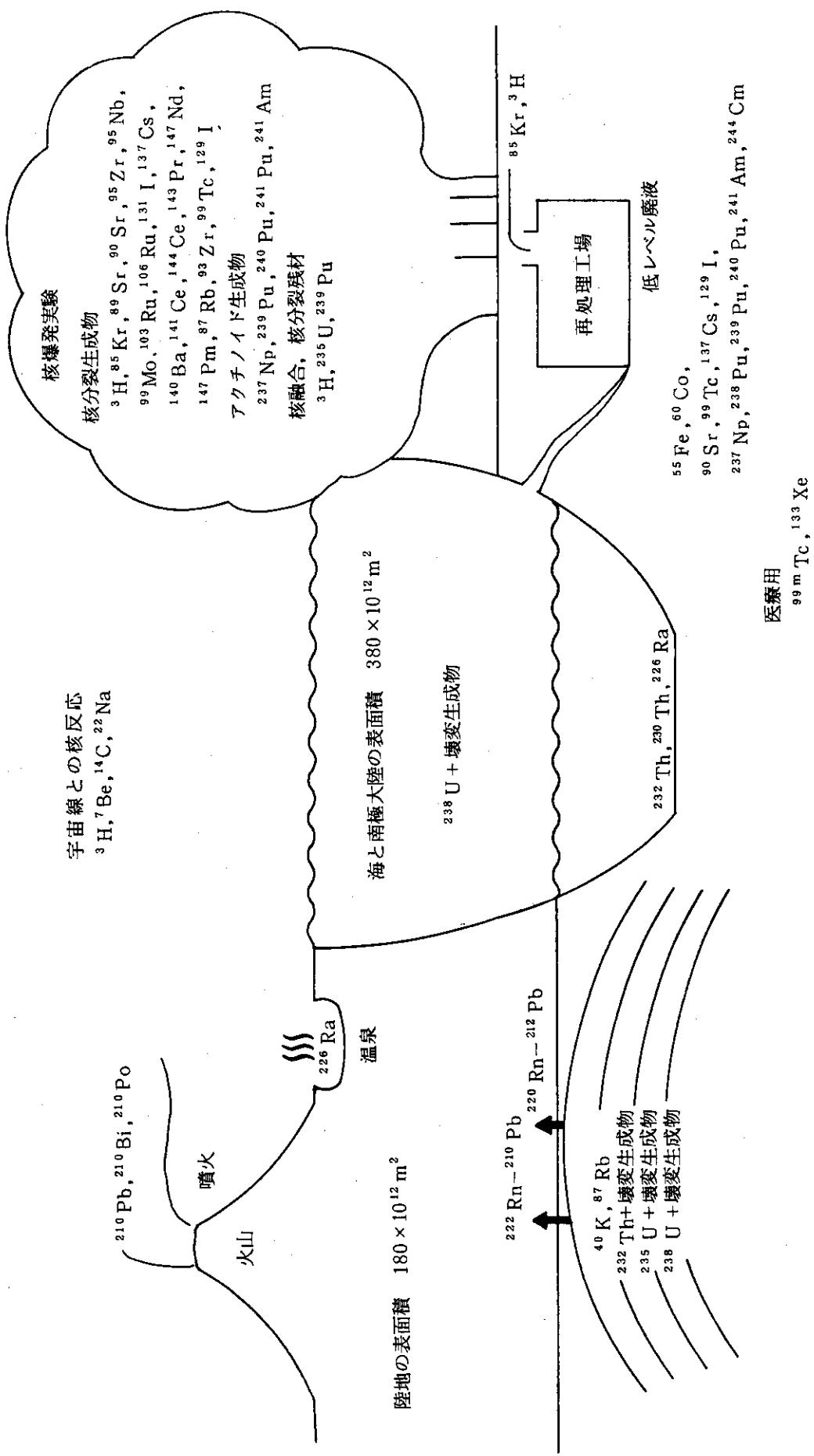


図 1.1 生活環境の放射性核種

## 2. 天然放射性核種

総ての核種を安定な核種と放射性核種に分け、後者を天然放射性核種と人工放射性核種に分ける。

### 2.1 起因による分類

人為的核反応装置が開発される以前から天然に普遍的に存在している放射性核種の分類には種々の方法が採られているが、それらの起因により次のように大別されることが多い。

#### a. 1次天然放射性核種

元素の創成の時に生成し十分長い半減期を有しているため、現在なお存在していると考えられている放射性核種で、ウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列の始祖核種である<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>235</sup>Uと、<sup>40</sup>Kなど系列を構成しない幾つかの核種がこれに属する。この区分に属し最も原子番号と質量数の大きい核種は<sup>244</sup>Puである。

主な1次天然放射性核種を表2.1に示す。<sup>232</sup>Th、<sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U (<sup>244</sup>Pu) を除く核種は一度の壊変で安定な核種に落着くが、<sup>40</sup>Kなどを除き放射能はいずれも非常に微弱であるので、その確認には低エネルギーγ線の精密測定法や質量分析法などの特殊な手段が用いられている。

表2.1 壊変系列をつくらない主な天然放射性核種

核種	同位体存在比 [%]	壊変形式	半減期 [年]
<sup>40</sup> K	0.0117	$\beta^-$ , EC	$1.28 \times 10^9$
<sup>87</sup> Rb	27.83	$\beta^-$	$4.8 \times 10^{10}$
<sup>115</sup> In	95.7	$\beta^-$	$4 \times 10^{14}$
<sup>138</sup> La	0.090	EC, $\beta^-$	$1.013 \times 10^{11}$
<sup>144</sup> Nd	23.80	$\alpha$	$2.1 \times 10^{15}$
<sup>147</sup> Sm	15.00	$\alpha$	$1.06 \times 10^{11}$
<sup>176</sup> Lu	2.60	$\beta^-$	$3.6 \times 10^{10}$
<sup>187</sup> Re	62.60	$\beta^-$	$5 \times 10^{10}$
<sup>190</sup> Pt	0.01	$\alpha$	$6.1 \times 10^{11}$

#### b. 2次天然放射性核種

1次天然放射性核種の壊変および自発核分裂などによって2次的に生成した放射性核種で、それ自身の半減期は短くても、半減期の長い親核種が存在するために現存している。

ウラン系列、トリウム系列、およびアクチニウム系列と呼ばれる3群がよく知られていて、そ

それぞれ図2.1, 2, 3に見られるように放射性壊変系列を構成している。これらの各壊変系列に属する各核種の質量数は、 $4n + 2$ ,  $4n$ および $4n + 3$ で示されるので( $n$ は正整数), それぞれ $4n + 2$ 系列,  $4n$ 系列および $4n + 3$ 系列とも呼ばれている。これにより理論的に $4n + 1$ 系列の存在が予言されていたが, これは天然には存在しないので人工的につくり, ネプツニウム系列と呼んでいる。死滅天然放射性核種に属する。図2.4参照。

### c. 誘導天然放射性核種

天然において最近起こった原子核反応の結果生成した放射性核種である。主な天然放射性核種の種類を表2.2に分布を3に示す。中性子源としては, 宇宙線源の中性子のほか, 放射性鉱物中に起こっている自発核分裂および中性子誘導による核分裂に由来する中性子, ( $\alpha$ ,  $n$ )反応による中性子などが考えられる。

表2.2 主な誘導天然放射性核種

放射性核種	半減期	生 成 核 反 応
$^3\text{H}$	12.323年	宇宙線による $^{14}\text{N}$ ( $n$ , $t$ ) $^{12}\text{C}$ , 宇宙線による破碎反応
$^{14}\text{C}$	5730年	宇宙線による $^{14}\text{N}$ ( $n$ , $p$ ) $^{14}\text{C}$
$^{7}\text{Be}$	53.29日	大気中の $\text{O}_2$ , $\text{N}_2$ に対する宇宙線の作用
$^{10}\text{Be}$	$1.6 \times 10^6$ 年	大気中の $\text{O}_2$ , $\text{N}_2$ に対する宇宙線の作用
$^{22}\text{Na}$	2.602年	大気中の $\text{Ar}$ に対する宇宙線の作用
$^{36}\text{Cl}$	$3.0 \times 10^5$ 年	宇宙線による $^{35}\text{Cl}$ ( $n$ , $\gamma$ ) $^{36}\text{Cl}$
$^{233}\text{U}$	$1.592 \times 10^6$ 年	$^{232}\text{Th}$ ( $n$ , $\gamma$ ) $^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}\text{U}$
$^{237}\text{Np}$	$2.14 \times 10^6$ 年	$^{238}\text{U}$ ( $n$ , $2n$ ) $^{237}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{237}\text{Np}$
$^{239}\text{Pu}$	$2.411 \times 10^4$ 年	$^{238}\text{U}$ ( $n$ , $\gamma$ ) $^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\text{Pu}$
核分裂生成物		$^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ の核分裂

U 92	$^{238}\text{U}$ $4.468 \times 10^9 \text{y}$		$^{234}\text{U}$ $4.446 \times 10^5 \text{y}$				
Pa 91	$\alpha 4.197$ $r.05$ $\beta .20$ .10 $\downarrow r.03-10$	$^{234}\text{Pa}$ 1.17m	$\beta (99.85\%)$ 2.31 IT(0.15 %)	$\alpha 4.775$ 4.723 $r$			
Th 90	$^{234}\text{Th}$ $24.10 \text{d}$		$\beta .16, .55, \dots$ $r.06, \dots$ $^{230}\text{Th}$ $7.54 \times 10^4 \text{y}$				
Ac 89			$\alpha 4.688,$ 4.621 $(r)$				
Ra 88			$^{226}\text{Ra}$ $1600 \text{y}$				
Fr 87			$\alpha 4.78438$ $(r)$				
Rn 86			$^{222}\text{Rn}$ $3.825 \text{d}$				
At 85			$^{218}\text{At}$ $\alpha 5.489$ $\downarrow$	$\text{約} 2 \text{ sec}$			
Po 84		$^{218}\text{Po}$ $3.05 \text{ min}$	$\beta (0.02\%)$ $\alpha 6.694$ $\downarrow$	$^{214}\text{Po}$ $1.64 \times 10^{-4}$ $\text{sec}$		$^{210}\text{Po}$ $138.38 \text{ d}$	
Bi 83			$(99.93\%)$ $\alpha 6.0024$ $\downarrow$	$^{214}\text{Bi}$ $19.9 \text{ min}$	$\beta (99.95\%)$ 1.65, 3.17 $r.45$ $\downarrow$	$^{210}\text{Bi}$ $5.013 \text{ d}$	$\beta$ 1.2 $\alpha$ 5.304 $\downarrow$
Pb 82		$^{214}\text{Pb}$ $26.8 \text{ min}$	$\beta .70,$ 1.0 $r.053$ -.351 $(0.04\%)$	$2.42$ $^{210}\text{Pb}$ $22.3 \text{ y}$	$\beta .023 (5 \times 10^{-5})$ $r$ $\downarrow$	$^{206}\text{Pb}$ $(\text{安定})$	
Tl 81			$^{210}\text{Tl}$ $1.30 \text{ min}$	$\beta^- 1.8$	$^{206}\text{Tl}$ $4.2 \text{ min}$	$\beta 1.5$	

図 2.1 ウラン系列 ((4n + 2) 系列)

Th 90	$^{232}\text{Th}$ $1.405 \times 10^{10} \text{ y}$		$^{228}\text{Th}$ 1.913 y		
Ac 89	$\alpha$ 4.013, 3.95 $r$	$^{228}\text{Ac}$ 6.13 h	$\beta$ 1.2, 2.1 $r$	$\alpha$ 5.423 5.340 ( $r$ )	
Ra 88	$^{228}\text{Ra}$ 5.75 y	$\beta$ . 04	$^{224}\text{Ra}$ 3.66 d		
Fr 87				$\alpha$ 5.685 ( $r$ )	
Rn 86			$^{220}\text{Rn}$ 55.6 sec		
At 85				$\alpha$ 6.288 $r$	$^{216}\text{At}$ 約 $3 \times 10^{-4} \text{ sec}$
Po 84			$^{216}\text{Po}$ 0.15 sec	$\beta$ (0.013 %) (?)	$^{212}\text{Po}$ $3.0 \times 10^{-7} \text{ sec}$
Bi 83			$\sim 100\%$ $\alpha$ 6.778 $r$	$^{212}\text{Bi}$ 60.6 min	$\beta$ (66.3 %) 2.250 $r$
Pb 82			$^{212}\text{Pb}$ 10.64 h	$\beta$ .3 .6 $r$ .239, .....	$^{208}\text{Pb}$ (安定)
Tl 81				$^{208}\text{Tl}$ 3.053 m	$\beta$ 1.8, 2.4, $r$ 2.61

図2.2 トリウム系列 (4n系列)

U 92	$^{235}\text{U}$ $7.038 \times 10^8 \text{ y}$				
Pa 91	$\alpha$ 4.40, 4.58 r. 186 ↓ .094, .143	$^{231}\text{Pa}$ $3.276 \times 10^4 \text{ y}$ $\alpha$ 5.014,			
Th 90	$^{231}\text{Th}$ $25.5 \text{ h}$	$\beta$ 3.02, .094, .216 r. 022 ↓ .230 γ -.303	$^{227}\text{Th}$ $18.72 \text{ d}$		
Ac 89		$^{227}\text{Ac}$ $21.77 \text{ y}$	$\beta$ (96.6%) .0455 γ ↓ .030 -.335	$\alpha$ 5.651 -.6.030 γ .030 -.335	
Ra 88		(1.2%) ( $\alpha$ 4.94) ↓	$^{223}\text{Ra}$ $11.43 \text{ d}$		
Fr 87		$^{223}\text{Fr}$ $21.8 \text{ min}$	$\beta$ 1.15 r. 049, .080 ↓ .44	$\alpha$ 5.716, 5.607 r. 026 -.44	
Rn 86		$\alpha$ ( $4 \times 10^{-3} \%$ ) ↓	$^{219}\text{Rn}$ $3.96 \text{ sec}$		
At 85		$^{219}\text{At}$ $0.9 \text{ min}$	$\beta$ (3%) ↓ .067 -.59	$\alpha$ 6.819, 6.559, 6.434 r. 067 -.59	$^{215}\text{At}$ 約 $10^{-4} \text{ sec}$
Po 84		(97%) $\alpha$ 6.27 ↓	$^{215}\text{Po}$ $1.78 \times 10^{-3} \text{ sec}$	$\beta$ ( $5 \times 10^{-4} \%$ ) ↓ .026	$^{211}\text{Po}$ $0.516 \text{ sec}$
Bi 83		$^{215}\text{Bi}$ $7.4 \text{ min}$	$\beta$ ↓ .7.386	$^{211}\text{Bi}$ $2.17 \text{ min}$	$\beta$ (0.32%) ↓ .7.450
Pb 82			$^{211}\text{Pb}$ $36.1 \text{ min}$	$\beta$ 1.4, .5 r. 065 -.83 ↓ .353	$^{207}\text{Pb}$ (安定)
Tl 81			$^{207}\text{Tl}$ $4.77 \text{ min}$	$\beta$ 1.44 ( $\gamma$ )	

図 2.3 アクチニウム系列 ((4n + 3) 系列)

Np 93		$^{237}\text{Np}$ $2.14 \times 10^6 \text{y}$				
U 92		$\alpha$ 4.788	$^{233}\text{U}$ $1.592 \times 10^5 \text{y}$			
Pa 91		$^{233}\text{Pa}$ 27.0 d	$\beta, \alpha$ .257, .145 $\gamma$ 4.824, 4.783			
Th 90			$^{229}\text{Th}$ 7340 y			
Ac 89			$\alpha$ 4.845, 4.901, 5.02	$^{225}\text{Ac}$ 10.0 d		
Ra 88		$^{225}\text{Ra}$ 14.8 d	$\beta$ .32	$\alpha$ 5.830 $\gamma$ .085		
Fr 87				$^{221}\text{Fr}$ 4.9 min		
Rn 86				$\alpha$ 6.341, 6.126 $\gamma$ .218		
At 85			$^{217}\text{At}$ $32.3 \times 10^{-3} \text{sec}$			
Po 84			$\alpha$ 7.069	$^{213}\text{Po}$ $4.2 \times 10^{-6} \text{sec}$		
Bi 83			$^{213}\text{Bi}$ 45.59 min	$\beta$ (98%) 1.4, .96 $\gamma$ .43, .....	$^{209}\text{Bi}$ 8.376	
Pb 82			(2%) $\alpha$	$^{209}\text{Pb}$ 3.253 h	$\beta$ .63	
Tl 81			$^{209}\text{Tl}$ 2.2 min	$\beta$ 1.8, 2.4 $\gamma$ 5 1.60		

図2.4 ネプツニウム系列 ((4n + 1) 系列)

表2.3 宇宙線との核反応で生成した放射性核種の分布

	核種			
	<sup>3</sup> H	<sup>7</sup> Be	<sup>14</sup> C	<sup>22</sup> Na
半減期	12,323年	53.29日	5,730年	2,602年
単位面積・単位時間当たりの生成原子数 (原子・m <sup>-2</sup> ・s <sup>-1</sup> )				
対流圏	840	270	11,000	0.24
全大気圏	2,500	810	16,000-25,000	0.86
全存在量 (PBq)	1,300	37	8,500	0.4
分布 (%)				
成層圏	6.8	60	0.3	25
対流圏	0.4	11	1.6	1.7
地表面と生物圏	27	8	4	21
深海	30	0.2	92	8
海底堆積物			0.4	
地表面空気中の濃度 (10 <sup>-6</sup> Bq・m <sup>-3</sup> )		3,000		0.3
大陸表面水中の濃度 (Bq・m <sup>-3</sup> )	200 - 900			
陸上生物圏の比放射能 (Bq・kg <sup>-1</sup> )			230	

1Bq = 27pCi

## d. 死滅天然放射性核種

元素の創成の時には存在していたもので、自然界におよぼした影響が現在でも認められるが、その寿命が十分に長くないため現在では壊変してしまったと考えられる。

## 2.2 分布と放射線被曝

岩石中の<sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, および<sup>238</sup>Uの平均濃度を表2.4に示す。

<sup>40</sup>K : 平均的地殻中の濃度は約1.7pCi/g, 海水中のそれは約300pCi/lである。

体重70kgの人体には約140gのカリウムが含まれていて大部分は筋肉中に存在している。<sup>40</sup>Kの比放射能は $8.55 \times 10^2$ pCi/gKであるので、体内の<sup>40</sup>Kの放射能強度は $0.12 \mu\text{Ci}$ となる。

<sup>222</sup>Rn : 大気中<sup>222</sup>Rnの発生源と放出速度を表2.5に示す。各地域での濃度の変動は、地表面からの放出速度や大気での希釈速度などの気象的因子に依存している。土壤からの放出速度は、大気圧が降下すると上昇し、土壤中の水分が増大すると減少する。屋外濃度は0.1~0.5pCi/lで早朝が最も高く、午後遅く最も低くなる。屋内濃度は屋外より高いことが多いが、これは主として建築材からの放出による。表

2.6 に<sup>222</sup>Rn の建室内発生源と濃度を示す。

<sup>226</sup>Ra : 岩石と土壤中には広い濃度範囲で存在する。大西洋の表面水中の濃度は約0.03pCi／ℓであり、深度による変化は少ない。一般の表面水中の濃度は0.1～0.5pCi／ℓで地下水のそれより低い。地下水では濃度が25pCi／ℓを越える場所もあり、5pCi／ℓ以上の水を飲料水として使用している地域がある。5pCi／ℓの水を毎日2ℓ飲み続けると年間150mremの被曝を骨が受けることになり、25pCi／ℓの水ではその値は1remにもなる。

ラジウムはカルシウムと同様に、土壤から植物、植物から人間への、いわゆる食物連鎖により人体に取り込まれる。したがって土壤中のラジウム濃度が、人体中の濃度に直接的に関連してくることになる。人体中の<sup>226</sup>Ra含有量の80%は骨に含まれていて、その濃度範囲は $8 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$ pCi／gCaである。

<sup>232</sup>Th : 岩石中の濃度は火成岩で8.1～33ppmで平均12ppmであり、石灰岩では1ppmである。トリウムは難溶性であり、<sup>232</sup>Thの比放射能が小さいので、生物体内の放射能強度は非常に小さい。

<sup>238</sup>U: 総ての岩石や土壤に含まれている。酸性火成岩中の濃度は約3ppmであるが、これは超塩基性火成岩中の濃度の100倍を越えている。リン酸塩岩石には120ppm程度の高濃度の岩石があり、一部は肥料として市販されている。

土壤と肥料中のウランは食物を経て人体に取り込まれる。食物からの年間摂取量は約0.14nCiである。飲料水からの取り込みは少ないが、仏国やソ連などの一部の地域ではウランを含む飲料水が使用されている。骨のウラン含量は約25 μgで、年間の被曝線量は0.3mremと推定されている。

表2.4 岩石中の<sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th および<sup>238</sup>U の平均的濃度

岩石の種類	<sup>40</sup> K (pCi/g)	<sup>226</sup> Ra (pCi/g)	<sup>232</sup> Th (pCi/g)	<sup>238</sup> U (pCi/g)
火成岩	22	1.3	1.3	1.3
堆積岩				
砂岩	8.8	0.71	0.65	0.4
頁岩	22	1.08	1.1	0.4
石灰岩	2.2	0.42	0.14	0.4

$$1\text{pCi} = 3.7 \times 10^{-2}\text{Bq}$$

表 2.5 大気中<sup>222</sup>Rn の発生源

発 生 源	放出速度 (Ci/y)
土壤	$2 \times 10^9$
地下水	$5 \times 10^8$
海	$3 \times 10^7$
リン酸塩残渣	$3 \times 10^6$
ウラン鉱滓	$2 \times 10^6$
石炭灰	$2 \times 10^4$
天然ガス	$1 \times 10^4$
石炭の燃焼	$9 \times 10^2$
人間の呼吸	$1 \times 10^1$

 $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 表 2.6 種々発生源と室内<sup>222</sup>Rn 濃度

発 生 源	室内濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	
	推定平均値	範 囲
<b>建築材</b>		
煉瓦またはコンクリート建家	3 - 30	0.7 - 100
木造建家	< 1	0.03 - 2
土壤	2 - 60	0.5 - 500
室外空気	3 - 7	1 - 10
<b>その他</b>		
水、天然ガス	< 0.1	0.01 - (10)
<b>総量</b>		
	10 - 100	2 - 500

 $1\text{Bq} = 27\text{pCi}$ 

図 2.5 に生活環境と人体の放射性核種濃度を示す。大気圏での核爆発実験により 1963 年頃の東京での雨水中の<sup>3</sup>H 濃度は、約  $37\text{Bq}/\ell$  まで上昇したが、1989 年には、その値は、約  $1\text{Bq}/\ell$  に低下し、次第に誘導天然放射性核種としての<sup>3</sup>H 濃度に落ち着いている。<sup>222</sup>Rn と、その壊変生成物による人体の内部被曝線量が大きいことから、多くの試料について濃度が測定されている。

一般に鉱泉水中の濃度は非常に高く、増富温泉では、 $1.7 \times 10^4 \text{Bq}/\ell$  の測定値が報告されている。

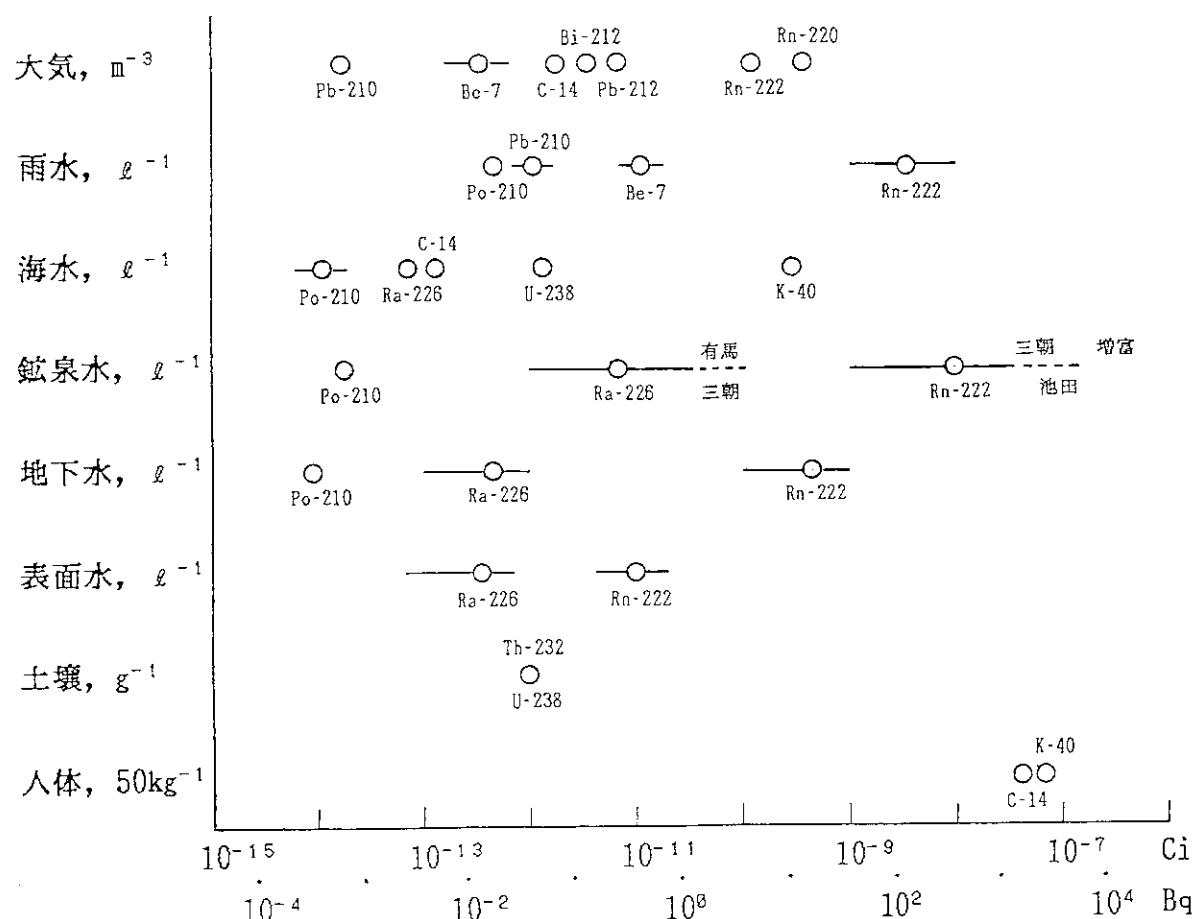


図2.5 生活環境と人体の放射性核種濃度

一般的生活環境における天然放射線源による線量当量推定値を表2.7に示す。体外からの放射線被曝は主に宇宙線、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{232}\text{Th}$ などに起因しているが、体内でのそれは主として $^{40}\text{K}$ 、 $^{220}\text{Rn}$ 、 $^{222}\text{Rn}$ による。

表 2.7 一般的地域における天然放射線源による線量当量推定値

(括弧内は 1982 年報告書の推定値)

被曝源	年間実効線量当量 ( $\mu\text{Sv}$ )		
	体外被曝	体内被曝	合計
<b>宇宙線</b>			
電離成分	300 (280)		300 (280)
中性子成分	55 (21)		55 (21)
宇宙線生成核種		15 (15)	15 (15)
<b>原始放射性核種</b>			
K - 40	150 (120)	180 (180)	330 (300)
Rb - 87		6 (6)	6 (6)
U - 238 系列 :			
U - 238 → U - 234		5 (10)	
Th - 230		7 (7)	
Ra - 226	100 (90)	7 (7)	1300 (1040)
Rn - 222 → Po - 214		1100 (800)	
Pb - 210 → Po - 210		120 (130)	
Th - 232 系列 :			
Th - 232		3 (3)	
Ra - 228 → Ra - 224	160 (140)	13 (13)	340 (330)
Rn - 220 → Tl - 208		160 (170)	
合計	800 (650)	1600 (1340)	2400 (2000)

## 2.3 年代測定

化石や層序などによって地層の相対的な年代が推定されるが、天然に存在する放射性核種の壊变速度の一定性を利用して岩石・鉱物などの絶対年代が決定できる。

放射性核種 A の原子  $N_A$  個の示す単位時間当りの壊变速数は

$$dN_A/dt = -\lambda N_A, \quad N_A = N_{A0} e^{-\lambda t}$$

$N_{A0}$  :  $t = 0$  における  $N_A$  となる。

放射性壊変で生成した娘核種の原子数を  $N_B$  ( $N_B$  は安定) とすれば、

$$\begin{aligned} N_B &= N_{A0} - N_A = N_A / e^{-\lambda t} - N_A \\ &= N_A (e^{\lambda t} - 1) \text{ となる。} \end{aligned}$$

したがって年代  $t$  は

$$t = 1/\lambda \cdot \ln (1 + N_B/N_A)$$

となり  $N_B$  と  $N_A$  を定量すれば  $t$  が求まる。

$10^7$  年とか  $10^8$  年という長い地質時代の岩石の年代を測定するためには、それに見合った長寿命の核種を選ぶ必要がある。表 2.8 に実用化されている主な地質年代測定法とその特徴を示す。

地球の年齢は  $4.55 \times 10^9$  年である。これは隕石中の鉛の同位体比を正確に測定し、アイソクロン図上に示して求められる直線の勾配から年代を算出する鉛法と呼ばれる年代測定法で求められている（図 2.6 参照）。

表 2.8 主な地質年代測定法

方法	同位体	半減期 (年)	試料	年代範囲
K - Ar 法	$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ ( $\rightarrow ^{40}\text{Ca}$ )	$1.25 \times 10^9$	雲母, 角閃石, 海緑石, 火山岩	$> 10^5$ 年
Rb - Sr 法	$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	$4.88 \times 10^{10}$	雲母, カリ長石, 深成岩, 變成岩	$> 10^7$ 年
U, Th - Pb 法	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	$4.47 \times 10^9$ $7.04 \times 10^8$ $1.40 \times 10^{10}$	ジルコン, モナズ石, スフェーン 閃ウラン鉱	$> 10^8$ 年
Sm - Nd 法	$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$	$1.06 \times 10^{11}$	变成岩, 火山岩, 深成岩	$> 10^9$ 年
フィッショ・ トラック法	$^{238}\text{U}$ の自発核分裂	{ $\lambda = (7 \sim 8) \times 10^{-17} / \text{年}$ }	ジルコン, ガラス, リン灰石	$> 10^9$ 年
$^{14}\text{C}$ 法	$^{14}\text{C}$	5730	木片, 泥炭, 貝殻, 骨	$< 5 \times 10^4$ 年

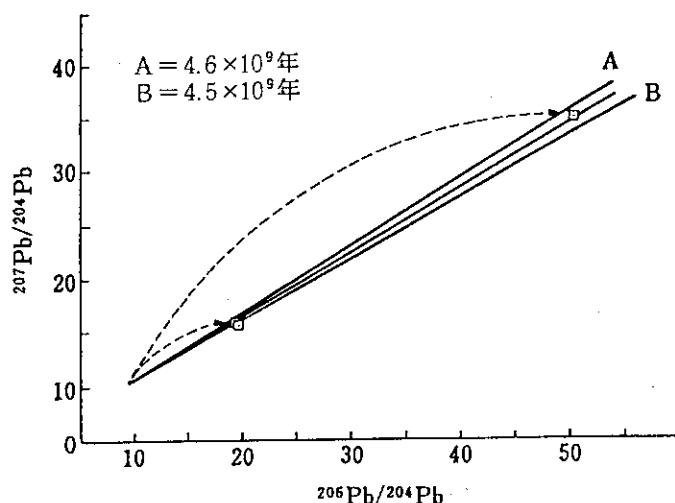


図 2.6 鉛アイソクロンによる隕石の年代

## 2.4 オクロ現象

中央アフリカ赤道直下のガボン共和国にあるオクロウラン鉱床から採掘された鉱石中のウラン試料で、 $^{235}\text{U}$ 同位体存在比が0.7202%より僅かに小さい0.7171%のウランを確認したとの報告が1972年になされた。引き続き行われた同位体組成分析の結果、 $^{235}\text{U}$ の存在比が0.4400%，即ち通常の値の3/5のウランが発見された。これまで天然ウランの同位体組成は常に一定であったので、この大きな差異は科学者に驚きと興味をもたらした。

鉱物のより詳細な分析の結果、典型的な核分裂生成物が含まれていることが判明した。これらの結果からオクロ鉱床では、 $^{235}\text{U}$ の同位体比が約3%であった20億年前に自然発生的に核分裂連鎖反応が起こったという結論になった。1954年に黒田和夫博士が天然原子炉が先史時代に存在していた可能性を発表された18年後の発見となった。

推定された放出エネルギーは約15,000MWYで、これは100万kW級の大型軽水炉5基が1年間稼動したときに相当する。

天然原子炉が作動したと認定されたオクロ鉱床の各点では、生成した核分裂生成物とアクチノイドがその場所に留まるか、あるいは僅かだけ動いた痕跡が認められている（表2.9参照）。このことは、放射性廃棄物を適当な地層に廃棄すれば生活環境への漏洩を防ぎ、安全が確保できることを示唆している。

表 2.9 生成したアクチノイドと核分裂生成物の挙動

元 素	挙 動
Kr	痕跡程度残留, 0.01~1 %
Rb	痕跡程度残留, 1 %以下
Sr	痕跡程度残留, 10 %以下
<sup>90</sup> Sr (現在は <sup>90</sup> Zr)	少量が移動, 大部分がその場で壊変
Zr	大部分, その場で再配分
Nb	大部分が残留
Mo	90 %程度散逸
<sup>99</sup> Tc (現在は <sup>99</sup> Ru)	Tcとして移動
Ru	大部分が残留
Pd, Ag	大部分が残留
Cd	90 %程度が散逸
Te	大部分が残留
I	大部分が散逸
Xe	痕跡程度残留, 0.01~1 %
Cs	痕跡程度 Baとして残留, 大部分は散逸
Ba	大部分が散逸
希土類元素 (Ce, Nd, Sm, Gd)	非常に僅かの部分のみ移動
Pb	再配分, 約2/3が炉心から失われた
Th ( <sup>236</sup> U, <sup>242</sup> Pu)	大部分が残留
Bi ( <sup>237</sup> Np, <sup>241</sup> Pu)	大部分が残留
<sup>235</sup> U ( <sup>239</sup> Pu)	<sup>239</sup> Puは <sup>238</sup> Uから分離されていない
U	恐らく大きな移動はなかった

### 3. 人工放射性核種

#### 3.1 大気圏での核爆発実験に伴う放射性降下物

米国はニューメキシコ州アラモードで1945年6月にTNT火薬 $19 \times 10^3$ tに相当する破壊力を持った最初の核爆発実験に成功し、原子核エネルギーの軍事利用の道が開かれた。同年8月不幸にも原子爆弾による最初の攻撃を広島・長崎両市が受け、多くの人命が瞬時に失われた。その後、米・ソ両核大国において核分裂あるいは核融合反応を用いた大気圏内核爆発実験が数多く行われ、多種多量の放射性核種が飛散し、地表面の放射性核種による汚染が急激に広がり、公衆の放射線被曝が問題視され始めた。1955年12月第10回国連総会で地表面に降下する核爆発実験由来の放射性核種の人類に対する影響を検討するため“原子放射線の影響に関する科学委員会”(UNSCEAR)\*が設置された。その後、生活環境に存在する天然・人工放射性核種の安全に係わる検討が続けられている。

大気圏内で1945年より1980年までに行われた核爆発実験の規模を表3.1に示す。爆発規模はTNT火薬 $10^6$ tに相当する値に換算して記した。回数および爆発規模とも米・ソ両核大国が大部分を占めている。

表3.1 これまでの大気圏内核実験の内訳

期間	実施国	実験回数	爆発収量 (Mt)*	
			核分裂	全体
1945 - 1962	米国	193	72.1	138.6
1949 - 1962	ソ連	142	110.9	357.5
1952 - 1953	英国	21	10.6	16.7
1960 - 1974	仏国	45	10.9	11.9
1964 - 1980	中国	22	12.7	20.7
合 計		423	217.2	545.4

\* TNT火薬換算値

#### a) $^{90}\text{Sr}$ の降下

半減期28.5年の $^{90}\text{Sr}$ はカルシウムと同族で、動物の骨に濃縮され易いので、核分裂生成物の中で人体への放射線影響が最も重視されていることから、各国において多くの試料について濃度が測定されている。

\* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

1980年末までの<sup>90</sup>Srの毎年の降下量と地上での蓄積量を表3.2に示す。年間降下量、蓄積量のいずれも北半球で値が南半球のそれの2~3倍も大きいが、これは核爆発実験の多くが北半球で行われたためである。1962年に米・ソ両国が大気圏内核爆発実験を中止したため年間降下量は1963年を境に次第に減少し、<sup>90</sup>Srの大部分は地表に降下し、大気圏に残留している量は非常に少ない。1980年時点での地表面の<sup>90</sup>Sr蓄積量は $1.05 \times 10^7$ Ci ( $3.9 \times 10^{17}$ Bq) でその約80%が北半球を汚染している。

表3.2 <sup>90</sup>Srの年間降下量と地上蓄積量

	年間降下量 ( $10^{16}$ Bq)			蓄積量 ( $10^{16}$ Bq)		
	北半球	南半球	世界全体	北半球	南半球	世界全体
1958以前	6.68*	2.37	9.05*	6.29	2.22	8.51
1958	2.33	0.95	3.28	8.44	3.11	11.55
1959	3.89	0.68	4.57	12.06	3.70	15.76
1960	0.97	0.62	1.59	12.73	4.22	16.95
1961	1.30	0.64	1.94	13.69	4.77	18.46
1962	5.34	0.98	6.32	18.65	5.59	24.24
1963	9.70	1.14	10.84	27.79	6.59	34.38
1964	6.13	1.56	7.69	33.96	7.99	41.95
1965	2.86	1.32	4.18	35.15	9.10	44.25
1966	1.21	0.77	1.98	35.48	9.62	45.10
1967	0.62	0.41	1.03	35.22	9.81	45.03
1968	0.72	0.38	1.10	35.08	9.92	45.00
1969	0.54	0.52	1.06	34.78	10.21	44.99
1970	0.76	0.47	1.23	34.67	10.43	45.10
1971	0.70	0.56	1.26	34.52	10.73	45.25
1972	0.32	0.35	0.67	33.97	10.80	44.77
1973	0.12	0.11	0.23	33.23	10.66	43.89
1974	0.45	0.14	0.59	32.89	10.55	43.44
1975	0.22	0.13	0.35	32.30	10.40	42.70
1976	0.10	0.08	0.18	31.64	10.25	41.89
1977	0.30	0.08	0.38	31.15	10.06	41.21
1978	0.37	0.07	0.44	30.78	9.88	40.66
1979	0.12	0.04	0.16	30.16	9.70	39.86
1980	0.11	0.04	0.15	29.54	9.51	39.05
降下量積算値 ( $10^{16}$ Bq)	45.86	14.41	60.27			
成層圈内 存在量* <sup>2</sup> ( $10^{16}$ Bq)	0.18	< 0.01	0.18			
1980年まで の注入量 ( $10^{16}$ Bq)	46.0	14.4	60.4			

\*1 蓄積量からの推定値

\*2 1979年7月北半球での実測値から推定

PBq = 27kCi

<sup>90</sup>Srの分布は緯度による相違も著しい。緯度幅を10°区分にした地域への降下積算値とその単位面積当たりの放射能強度を表3.3に示す。30°～60°の北半球の中緯度地帯の降下量が最も多く、人口分布もこの緯度地帯に集中しているので、<sup>90</sup>Srによる体内放射線被曝は北半球中緯度地帯において大きく寄与することになる。

表3.3 <sup>90</sup>Srの降下量の緯度別分布

緯度幅	降下量積算値 (10 <sup>6</sup> Bq)	面 積 (10 <sup>12</sup> m <sup>2</sup> )	単位面積あたり の降下量積算値 (10 <sup>3</sup> Bq m <sup>-2</sup> )	人口分布 (%)	人口の重みづけを した単位面積あたり の降下量積算値 (10 <sup>3</sup> Bq m <sup>-2</sup> )
<b>北半球</b>					
80 - 90	0.10	3.9	0.26	0	
70 - 80	0.79	11.6	0.68	0	
60 - 70	3.29	18.9	1.74	0.4	
50 - 60	7.39	25.6	2.89	13.7	
40 - 50	10.16	31.5	3.23	15.5	
30 - 40	8.53	36.4	2.34	20.4	
20 - 30	7.12	40.2	1.77	32.7	
10 - 20	5.09	42.8	1.19	11.0	
00 - 10	3.57	44.1	0.81	6.3	
合 計	46.0			100.0	2.14
<b>南半球</b>					
00 - 10	2.10	44.1	0.48	54.0	
10 - 20	1.78	42.8	0.42	16.7	
20 - 30	2.81	40.2	0.70	14.9	
30 - 40	2.76	36.4	0.76	13.0	
40 - 50	2.81	31.5	0.89	0.9	
50 - 60	1.21	25.6	0.47	0.5	
60 - 70	0.67	18.9	0.35	0	
70 - 80	0.25	11.6	0.22	0	
80 - 90	0.03	3.9	0.08	0	
合 計	14.4			100.0	0.54
世界全体合計	60.4			89 (N) 11 (S)	1.96

放射性降下物のこの傾向は<sup>137</sup>Csなどの核分裂生成物や、ネプツニウム、プルトニウムなどについても見られる。

#### b) <sup>237</sup>Np, <sup>239</sup>Puなどの降下

核爆発実験の結果大気中に飛散したネプツニウム、プルトニウムはそれぞれ大約2t, 4.2tであり、表3.4に核種別大気中放出量を示す。全世界の<sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu降下量は4～80×10<sup>6</sup>Bq/km<sup>2</sup>であり、北緯40°～50°地帯に多い。

表 3.4 大気圏に放出されたプルトニウムとアメリシウム

核種	量, TBq
$^{238}\text{Pu}$	890 <sup>a</sup>
$^{239}\text{Pu}$	$5.7 \times 10^3$
$^{240}\text{Pu}$	$7.7 \times 10^3$
$^{241}\text{Pu}$	$3.6 \times 10^5$ <sup>b</sup>
$^{241}\text{Am}$	$1.2 \times 10^4$ <sup>c</sup>

TBq = 27Ci

a : SNAP9A の事故による 590TBq を含む

b : 大部分は  $^{241}\text{Am}$  へ 壊変c : 大部分は  $^{241}\text{Pu}$  から生成

表 3.5 に核爆発実験が行なわれた地域および一般環境の  $^{239}, ^{240}\text{Pu}$  の水中および土壤中濃度を示す。

表 3.5 水, 土壤および堆積物中の  $^{239}, ^{240}\text{Pu}$  濃度

場所	濃度
	Bq/1
エニエトック環礁 (地下水)	$7 \times 10^{-6} - 0.03$
ミシガン湖	$7 \times 10^{-6} - 10^{-5}$
大西洋	$4 \times 10^{-6}$
	Bq/kg
ネバダ核実験場 (土壤)	$3000 - 2 \times 10^6$
ビキニ環礁 (土壤)	$20 - 10^4$
トリナチー核実験場 (土壤)	$0.7 - 10$
ミシガン湖 (堆積物)	$3 - 10$
平均的降下物 (土壤)	$0.02 - 0.7$

1Bq = 27pCi

### 3.2 原子力施設からの放出（漏洩）放射性核種

原子核エネルギーの平和利用を円滑に進めるためには、ウランの鉱石採掘場、精錬所、転換工場、濃縮工場と核燃料製造・加工工場、原子力発電所、使用済み燃料再処理工場などが必要である。これらの諸施設には多種多量の放射性物質が内蔵されているが放出低減化装置などの設備が整備されているので、平常の運転に伴って放出される放射性物質の量は少なく、施設周辺のごく限られた場所で極微量の放射性核種が検出されるにすぎない。

#### a. ウラン精錬

精錬は鉱石の運送費などの諸経費を軽減するために、採鉱現場の近くで行われることが多い。従事者の放射線被曝の見地からは核燃料サイクルの先端部で最も影響の大きい段階である。

精錬は鉱物の粉碎、粉化、酸・アルカリ溶液での化学処理、ウラン抽出分離の工程で進

められるが、各段階で放射性廃棄物が発生する。

ウラン抽出残滓（鉱滓）の放射性核種含有量は、鉱物のウラン含有量、精錬の方法で変わる。0.2%ウラン含有鉱石 $3 \times 10^4$ tを毎日処理すると、鉱滓中に $15\text{Ci}$ の $^{230}\text{Th}$ と $^{226}\text{Ra}$ が残るとされている。鉱滓中では両核種は大約放射平衡の状態で残るので $^{230}\text{Th}$ の $7.54 \times 10^4$ 年の半減期で $^{222}\text{Rn}$ を放出し続けることとなる。鉱滓からの $^{222}\text{Rn}$ 量は限られた地域では被曝線量を考慮しなければならないが世界的観点から見ればその量は少ない。米国では2000年までに $10^9\text{t}$ の鉱滓が発生し、年間の $^{222}\text{Rn}$ 放出量は $4 \times 10^5\text{Ci}$ と推定されている。

この鉱滓の処分法としては、採掘した坑道の埋め戻しに使用することが考えられている。

#### b. 原子力発電

1988年来の時点で運転中の全世界の原子力発電設備は420基、総容量は $3.26 \times 10^{11}\text{W}$ である。118基 $1.69 \times 10^{11}\text{W}$ が建設中、88基 $9.06 \times 10^{10}\text{W}$ が計画中で、合計は626基、 $5.23 \times 10^{11}\text{W}$ に達すると推定されている。稼動中発電炉の炉型別発電容量の割合は、軽水炉が約83%を占めており、その約70%が加圧水型発電炉で約30%が沸騰水型原子炉となっている。

発電所からは気体・液体廃棄物として放射性核種が環境へ放出される。

建家の換気空気を含めた気体廃棄物は、一定時間保持して短寿命核種の減衰を待ち、その後フィルターにより微粒子状放射性物質や放射性ヨウ素などを除去して安全性を確認し、排気筒から大気中に放出される。1975年から1979年までの各国の原子力発電所から大気中に放出された放射能量を表3.6に示す。希ガスの放射性核種とトリチウムが主として放出されているが、放射性核種の種類と量は、炉型、排気処理システム、燃料破損の有無などにより大きく変わる。

表3.6 原子力発電所から大気中への放射性物質放出量

放射性物質	放出量, GBq/GW (e) 年, (Ci/GW (e) 年) <sup>*1</sup>			
	PWR	BWR	HWR	GCR
希ガス	$4.3 \times 10^5$ ( $1.6 \times 10^4$ )	$8.8 \times 10^6$ ( $2.38 \times 10^5$ )	$4.6 \times 10^5$ ( $1.24 \times 10^4$ )	$3.24 \times 10^6$ ( $8.76 \times 10^5$ )
$^3\text{H}$	$7.8 \times 10^3$ ( $2.11 \times 10^2$ )	$3.4 \times 10^3$ ( $9.2 \times 10$ )	$5.4 \times 10^5$ ( $1.46 \times 10^4$ )	
ヨウ素	5.0 ( $1.3 \times 10^{-1}$ )	$4.1 \times 10^2$ ( $1.1 \times 10$ )	3.1 ( $8.4 \times 10^{-2}$ )	
微粒子	2.5 ( $5.8 \times 10^{-2}$ )	$5.27 \times 10$ (1.42)	$4.4 \times 10^{-2}$ ( $1.2 \times 10^{-3}$ )	1.0 ( $2.7 \times 10^{-2}$ )
$^{14}\text{C}$ <sup>*2</sup>	$2.22 \times 10^2$ (6)	$5.18 \times 10^2$ ( $1.4 \times 10$ )		

\* 1 : 1975~1979年の平均値

\* 2 : 1976~1978年の西独データ

放流される液体廃棄物は、洗濯液など放射性物質含有量の少ない廃液に限られる。これらの廃液は渁過などの処理をしたのち、復水器冷却水で希釈し、安全を確認して放出口から海水中へ放流される。表3.7に液体廃棄物中の放射性物質量を示す。

表3.7 原子力発電所から放出された液体廃棄物中の放射性物質量

放射性物質	放出量, GBq/GW (e) 年, (Ci/GW (e) 年)*			
	PWR	BWR	HWR	GCR
<sup>3</sup> H	$3.8 \times 10^4$ ( $1 \times 10^3$ )	$1.4 \times 10^3$ ( $3.8 \times 10^2$ )	$3.5 \times 10^6$ ( $9.5 \times 10^5$ )	$2.5 \times 10^4$ ( $6.7 \times 10^3$ )
<sup>3</sup> H以外	$1.8 \times 10^2$ (5)	$2.9 \times 10^2$ (7.8)	$4.7 \times 10^2$ ( $1.3 \times 10^3$ )	$4.8 \times 10^3$ ( $1.3 \times 10^3$ )

\* 1: 1975~1979年の平均値

### c. 再処理工場

原子力発電所から搬入された使用済み燃料は、貯蔵プールで一時保管されたのち、剪断工程で小片に切断され溶解槽へ移される。溶解から抽出分離工程でウランとプルトニウムが抽出分離され核分裂生成物とネプツニウム、アメリシウムなどが水溶液に残る。ウランとプルトニウムは、それぞれ精製・濃縮などの工程を経て製品となり、再利用のために保管される。

各工程と廃棄物貯蔵槽などで発生する気体廃棄物は、化学薬品を入れた洗浄器、ヨウ素フィルターなどを通過させ、含まれている放射性物質を可能な限り除去したのち排気筒から放出される。大気中に放出された放射性物質量を表3.8に示す。

表3.8 1975年-1979年の再処理工場から大気中への放射性物質放出量

年次	発電量 [GW (e) y]	放 出 量 (TBq)				
					粒子状物質	
		<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C	<sup>85</sup> Kr	Total $\alpha$	Total $\beta$
セラフィルド (英國)						
1975	3.2	444		44000	0.0028	0.070
1976	3.2	444		44000	0.0019	0.13
1977	2.1	296		33000	0.0010	0.28
1978	1.8	222	4.1	26000	0.00089	0.34
1979	2.5	290	3.5	35000	0.0010	0.31
1975-1979						
発電量あたりの放出量						
[TBq (GW[e] y) <sup>-1</sup> ]		133	1.8	14000	0.0006	0.088
ラ・ハーグ (仏国)						
1975	1.6	3.3		24000	$5.9 \times 10^{-10}$	0.0006
1976	0.84	1.8		13000	$7.4 \times 10^{-10}$	0.0003
1977	1.8	11		25000	$1.1 \times 10^{-7}$	0.0001
1978	2.1	4.1		29000	$1.1 \times 10^{-6}$	0.0001
1975-1979						
発電量あたりの放出量						
[TBq (GW[e] y) <sup>-1</sup> ]		3.2		14000	$1.9 \times 10^{-7}$	0.0002
マルクール (仏国)						
1975	0.24	4.4		3700	$8.1 \times 10^{-7}$	0.001
1976	0.22	4.4		3500	$6.7 \times 10^{-7}$	0.001
1977	0.32	2.8		4400	$3.2 \times 10^{-6}$	0.0002
1978	0.83	63		11000	$1.7 \times 10^{-6}$	0.0003
1975-1978						
発電量あたりの放出量						
[TBq (GW[e] y) <sup>-1</sup> ]		46		14000	$4.0 \times 10^{-6}$	0.002

1 TBq = 27Ci

液体廃棄物は脱硝酸処理、蒸発濃縮処理などを経て、高レベル廃液として貯蔵されているが、ガラス固化などにより安定化処理したのち、長期貯蔵処分が計画されている。一部の放射性物質含量が少ない廃液は、中和・汎過などの化学処理をしたのち、安全を確かめて放流されている。

セラフィルド再処理工場から低レベル液体廃棄物としてアイリッシュ海に放流された各年の $\beta$ 線、 $\alpha$ 線放射体量を図3.1と2に示す。1975年を境に放出量は減少していく、特に1985年以降は激減している。

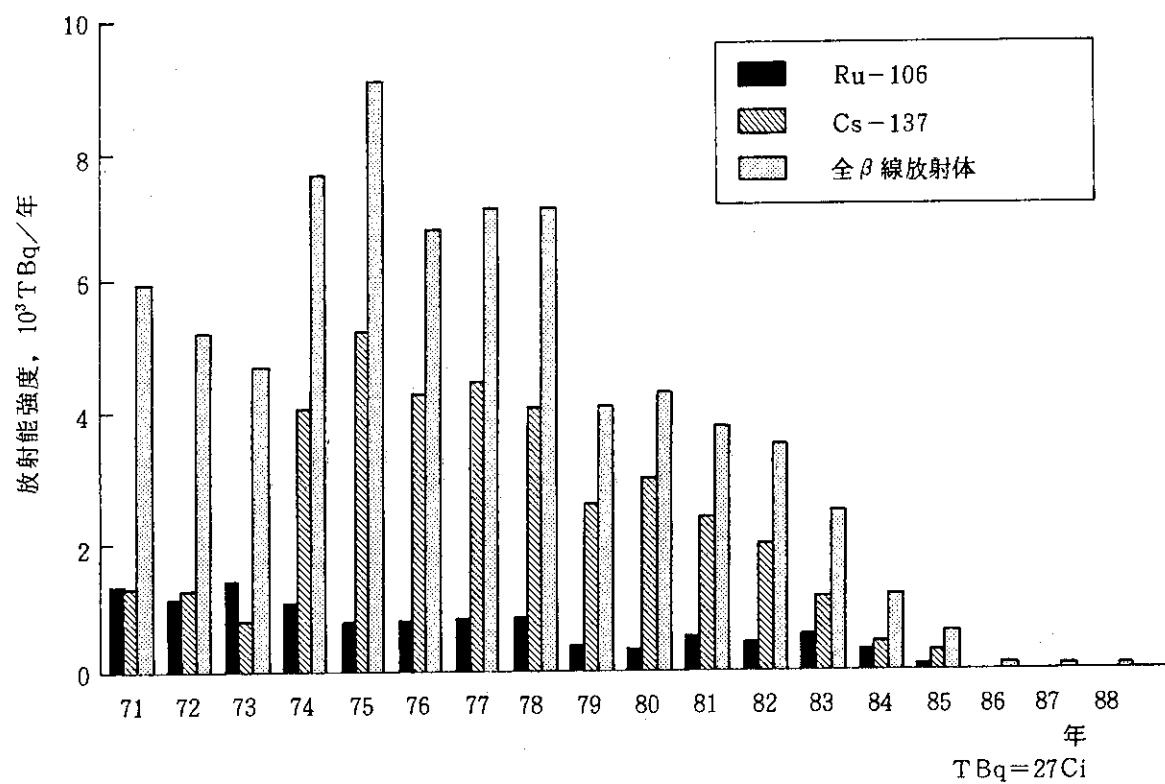


図3.1 海へのβ線放射体の年間放出量推移

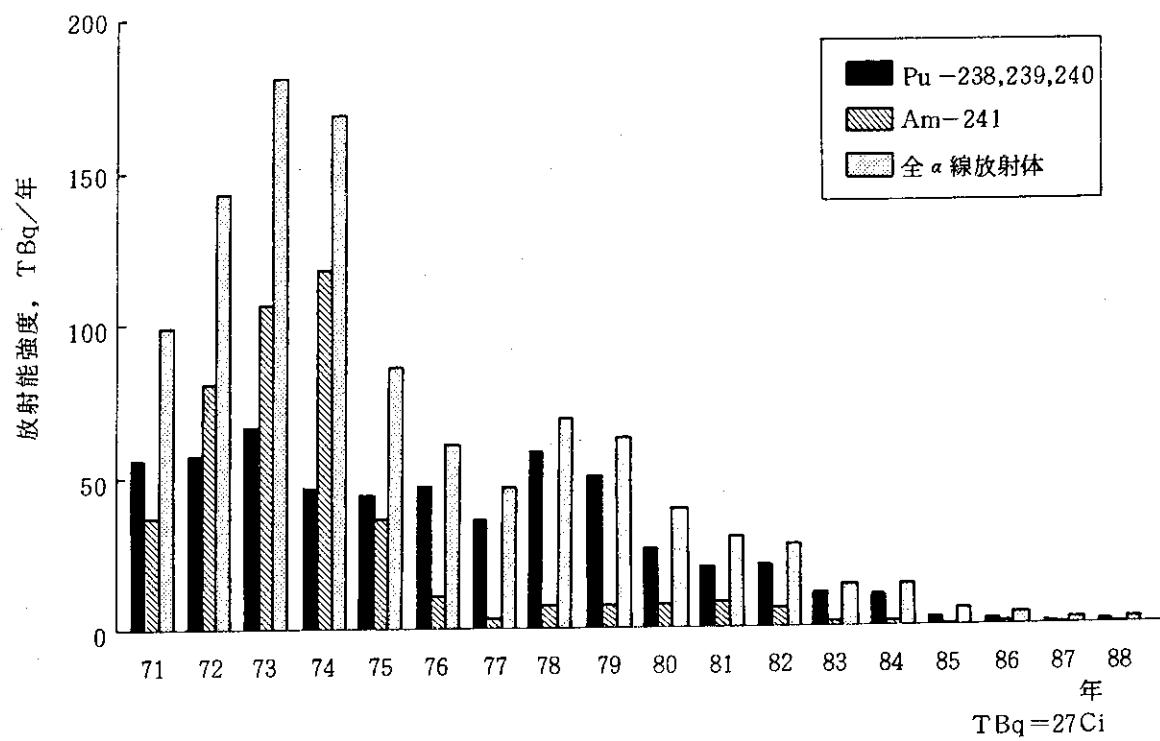


図3.2 海へのα線放射体の年間放出量推移

表3.9に再処理工場近くの水、土壤および堆積物中の<sup>239, 240</sup>Pu濃度を示す。一般の生活環境に比較して、その濃度は著しく高い。

表3.9 再処理工場近くの水、土壤および堆積物中の<sup>239, 240</sup>Pu濃度

場 所	濃 度
	Bq/1
ロス アラモス (処理液、表面水と地下水)	0.005 - 0.6
アイリッシュ海	0.002 - 0.02
サバンナ川	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-5}$
	Bq/kg
ロス アラモス (沖積土)	40 - 10 <sup>4</sup>
アイリッシュ海 (堆積物)	10 - 2000
ロッキーフラット (土壤)	0.1 - 3000
ハンフォード (土壤)	0.1 - 30
サバンナ川 (土壤)	0.2 - 100

### 参 考 文 献

- M.Eisenbud : Environmental Radioactivity – From Natural,Industrial, and Military Sources, Third Edition, Academic Press.ICN (1987).
- R.L.Kathren : Radioactivity in the Environment – Sources,Distribution, and Surveillance, Harwood Academic Pub.(1984).
- P.J.Coughtrey,et al. : Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems – A Critical Review of Data, Vol. 1,2,3,4,5,6, A.ABalkema (1984).
- E.M.Durrance : Radioactivity in Geology – Principles and Applications, Ellis Horwood Limited (1986).
- D.G.Brookins : Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal, Springer – Verlag (1984).
- 石原健彦、大橋弘士訳：放射性廃棄物処分の基礎、現代工学社 (1987).
- 佐伯誠道：環境放射能－挙動・生物濃縮・人体被曝線量評価、ソフトサイエンス社 (1984).

表3.9に再処理工場近くの水、土壤および堆積物中の<sup>239, 240</sup>Pu濃度を示す。一般の生活環境に比較して、その濃度は著しく高い。

表3.9 再処理工場近くの水、土壤および堆積物中の<sup>239, 240</sup>Pu濃度

場 所	濃 度
	Bq/1
ロス アラモス (処理液、表面水と地下水)	0.005 - 0.6
アイリッシュ海	0.002 - 0.02
サバンナ川	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-5}$
	Bq/kg
ロス アラモス (沖積土)	40 - 10 <sup>4</sup>
アイリッシュ海 (堆積物)	10 - 2000
ロッキーフラット (土壤)	0.1 - 3000
ハンフォード (土壤)	0.1 - 30
サバンナ川 (土壤)	0.2 - 100

### 参 考 文 献

- M.Eisenbud : Environmental Radioactivity – From Natural,Industrial, and Military Sources, Third Edition, Academic Press.ICN (1987).
- R.L.Kathren : Radioactivity in the Environment – Sources,Distribution, and Surveillance, Harwood Academic Pub.(1984).
- P.J.Coughtrey,et al. : Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems – A Critical Review of Data, Vol. 1,2,3,4,5,6, A.ABalkema (1984).
- E.M.Durrance : Radioactivity in Geology – Principles and Applications, Ellis Horwood Limited (1986).
- D.G.Brookins : Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal, Springer – Verlag (1984).
- 石原健彦、大橋弘士訳：放射性廃棄物処分の基礎、現代工学社 (1987).
- 佐伯誠道：環境放射能－挙動・生物濃縮・人体被曝線量評価、ソフトサイエンス社 (1984).