

JAERI-M
82-169

原子炉内の放射性核種

1982年12月

吾勝 永子

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。

入手の問い合わせは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

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

原子炉内の放射性核種

日本原子力研究所ラジオアイソトープ・原子炉研修所

吾 勝 永 子

(1982年11月1日受理)

原子炉研修所では、原子炉の運転とそれに伴って派生する各種の業務について、いろいろな研修コースを設けている。前報（JAERI-M 9827）では、諸外国の例を参考に、各研修コースの中に含まれている化学関係の授業について、その授業内容を再検討、整理し、授業内容項目の一案を提出した。さらにその案の初めの部分である“原子炉化学の基礎”の詳細も示した。本報はこれに続くもので、授業内容項目案の第二の部分の詳細、すなわち核分裂生成物の化学、アクチノイドの化学、および炉材料の放射化生成物の化学の詳細を示すものである。

Radioactive Nuclides in Nuclear Reactors

Eiko AKATSU

Radioisotope and Nuclear Engineering School, JAERI

(Received November 1, 1982)

In the Nuclear Engineering School of JAERI, many courses are presented for the people working in and around nuclear reactors. The curricula of the courses contain also chemical subject materials. With reference to the foreign curricula, a plan of educational subject material of chemistry was considered for students of the school in the previous report (JAERI-M 9827), where the first part of the plan, "Fundamentals of Reactor Chemistry", was reviewed. This report is a review of the second part of the plan containing fission products chemistry, actinoids elements chemistry and activated reactor materials chemistry.

Keywords: Education, Radioactive Nuclide, Nuclear Reactor, Fission Products, Actinoids, Activated Reactor Materials Chemistry.

目 次

1. まえがき	1
2. 核分裂生成物の化学	2
2.1 0族元素	2
2.2 1族元素	17
2.3 2族元素	47
2.4 3族元素	48
2.5 4族元素	50
2.6 5族元素	50
2.7 6族元素	54
2.8 7族元素	55
2.9 8族元素	59
2.10 全体としてのFPとその分類	63
2.11 2章引用文献	78
3. アクチノイドの化学	82
3.1 天然のアクチノイド	94
3.2 原子炉における核変換反応	94
3.3 化学的性質	104
3.4 その他	105
3.5 3章引用文献	112
4. 炉材料の放射化生成物	114
4.1 一次冷却水中の放射化生成物	120
4.2 核反応制御材の核反応	120
4.3 トリチウム	130
4.4 各元素の性質, その他	130
4.5 4章参考文献	137

Contents

1.	Foreword	1
2.	Fission products chemistry	2
2.1	Group 0	2
2.2	Group 1	17
2.3	Group 2	47
2.4	Group 3	48
2.5	Group 4	50
2.6	Group 5	50
2.7	Group 6	54
2.8	Group 7	55
2.9	Group 8	59
2.10	Gross fission products and its classification	63
2.11	References of chapter 2	78
3.	Actinoids elements chemistry	82
3.1	Actinoids in nature	94
3.2	Transmutation reactions in nuclear reactors	94
3.3	Chemical properties	104
3.4	Miscellaneous	105
3.5	References of chapter 3	112
4.	Activated reactor materials	115
4.1	Activation products in primary coolant	121
4.2	Transmutation reactions of reactor poisons	121
4.3	Tritium	131
4.4	Chemical properties and miscellaneous	131
4.5	References of chapter 4	138

1. ま え が き

原子炉研修所では、一般課題のような原子力一般を扱う研修コースのほかに、保健物理専門課程その他の専門的なコースがある。前報¹⁾では、諸外国の例を参考に、そのような研修コースの中の化学系の授業を再検討、整理して、原子炉研修所における化学系の授業項目の一案を提出した。また前報には、そのうちの基礎の部分の詳細も含めた。本報では、基礎につゞく、原子炉内の放射性核種の部分の詳細をまとめた。内容は、核分裂生成物、アクチノイド、炉材料の放射化生成物に大別される。

現在の各研修コースでは、これをひとつおとりあげる場合が多いが、講義時間にはかなりの差がある。時間数の多いコースでは、各項目について、専門家を講師に依頼することにより、内容の充実をはかっている。いずれにせよ、研修所の立場では、全体としてどこまでを内容に含めればよいか、考えておく必要がある。そのためにも、また、全体をまとめて短時間に講義する場合の資料としても、あるいは一部分を講義する場合、その講義の位置づけや意味を明確にするためにも役立つ資料があると好都合である。本報ではこのような立場から、原子炉内に生成する核種の種類と量、およびその化学をまとめた。

原子炉の中では、中性子と原子炉燃料や原子炉材料との核反応により、さまざまな放射性および安定核種が生成する。まず核分裂性物質の核反応では、核分裂反応によって核分裂生成物が生じるほか、中性子捕獲によってアクチノイド元素を生じる。そのほか、制御材や被覆管からも、放射性核種を生じる。このような放射性核種を技術的な立場から分類すると、つぎのようになる。²⁾

- (1) 核燃料物質の核反応生成物
 - (a) 核分裂生成物
 - (b) 核変換による生成物 (アクチノイド)
- (2) 核反応制御用炉材料の核反応生成物
- (3) 構造材、冷却材など原子炉材料の核反応によるもの。

本報ではこの分類に準じて、原子炉内に生成する核種とその量、および化学的性質などをまとめた。なお前報¹⁾にも述べたように、核燃料の化学、すなわち核燃料の種類やその化学組成、中性子照射による組成の変化などは、ここに含めなかった。また、研修生の大多数が化学を専門とする者ではない点を考慮して、資料の取捨選択を行なった。

引用文献

- 1) 吾勝永子, JAERI-M 9827 (1981).
- 2) Cohen P., "Water Coolant Technology of Power Reactors", American Nuclear Society (1980).

2. 核分裂生成物の化学

核分裂生成物は元素にして約35, 核種にして200以上のものから成り立っている。すなわちさまざまな物理的性質をもった元素の混合物であり, さまざまな核的性質をもった核種の混合物である。さらに核分裂生成物を取り扱う側の立場もひとつとおりではない。原子炉の安全, 環境, 燃焼率の測定, 廃棄物の処理処分などさまざまである。それぞれの専門分野で注目され, とりあげられる元素や核種が核分裂生成物の一部にかぎられており, 同時に専門分野によって異なっている。しかしいずれにせよまず生成量と各元素の性質とを知る必要がある。ここでは核分裂生成物の性質のうち化学的性質で原子力に関するものを中心にまとめた。すなわち, フィッションチェーンとフィッションチェーンを構成する核種は, 核分裂の化学で扱われる。¹⁾ フィッションチェーンを表2.1に示す^{1,2)}。そこにみられる核種は, それぞれある化学元素の同位体であるが, その元素の化学を周期表の順にしたがってのべることにする。

2.1 0族元素

クリプトン (Kr) とキセノン (Xe)

貴ガス noble gas (希ガス rare gas ともいう) に属する。原子番号, 物理的性質などを表2.2^{3~7)}に示す。またクリプトン, キセノンの水に対する溶解度を表2.3^{3,98)}に示す。クリプトン, キセノンいずれも常温では無色無臭の気体で, 乾燥空气中にそれぞれ 1.1×10^{-4} および 8.6×10^{-6} vol % 含まれている。単原子分子であるため可視, 赤外部に吸収がない。分子が小さく, ゴムやプラスチック類の中の拡散速度が比較的大きい。

酸化状態 oxidation state として0価が安定である。他の原子との化学的な相互作用はほとんどない。化合物としては包接化合物のほか, XeF_2 , $\text{Na}_4\text{XeO}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ など少数が知られているにすぎない。このため貴ガスの分離, 分析では物理的な手段をとるほかに方法がない。分別蒸留, 吸着, 同位体分離などである。⁸⁾ とくに質量分析とガスクロマトグラフィが有効な技術として利用される (表2.4)。

貴ガスのガスクロマトグラフィでは活性炭, シリカゲルなどの分離管カラムとヘリウム, ちっ素などのキャリアーガスを用いて貴ガスの相互分離を行なう。例を図2.1に示す。空気中の貴ガスの分離ではまず主成分のちっ素, 酸素, 水素のほか炭酸ガス, 水などをそれぞれ適当な^{8,9)} 化学的手段で取り除いたのち, 貴ガスの相互分離を行なう。

表 2.1 ファイSSIONンチェーン

質量数	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr	質量数
66	54.8h → 5.10m → st									66
67	60h → st									67
68	(31s) → st									68
69	(13.9h) (58m) → st									69
70	st									70
71	(4.0h) (2.45m) → st ← [(12d)]									71
72	46.5h → 14.2h → st									72
73	(<2m) → 4.8h → st									73
74	8.0m → st ← [(17.6d)] → 32 → st									74
75	(2.0m) → (82m) → st ← [(120d)]									75
76	(32s) → st									76
77	(54s) → 38.7h → st 11.3h [(55m)] → st									77
78	87m → 91m → st									78
79	9.1m → 3.90m [(4.9s)]									79
80	(15s) → st ← 6.5·10 ⁻¹⁰ y → st [4.38h] → st									80
81	(32s) → 61m → st 18.6m → st									81
82	st [35.34h] → st									82
83	69s → 2.42h → 1.87h 25m → st									83
84	3.3m → 31.7m → st [6.0m] → st									84

低陽起の重い核の分裂で検出されたファイSSIONンチェーンを示す。核分裂生成物のはずであるが、いままでのところ、他の核反応によってしか得られていない核種も取り上げられている。また、見い出されていない遮蔽核種 (shielded nuclide) は、銀列の他の核種との比較から検出できると思われるものについてのみ記入した。核分裂生成物系列が次第に明らかになる様子は、この種の古い表と比較すればよくわかる。

表 2.1 ファイSSIONンチェーン (つづき)

質量数	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	質量数
85	39s → 3.00m → 4.40h ⁷⁸ → st									85
86	16s → 54s → st									86
87	55.0s → 76.4m → 5·10 ¹⁰ y → st									87
88	15.9s → 2.79h → 17.8m → st ← [(105d)]									88
89	4.4s → 3.11m → 15.3m → 50.4d → st									89
90	1.6s → 32.1s → 2.90m → 28.0y → 64.0h → st									90
91	8.4s → 71s → 9.67h → 58.9d → st									91
92	1.92s → 5.3s → 2.68h → 3.52h → st									92
93	1.17s → 5.6s → 7.54m → 10.15h → 9.5·10 ⁵ y → 3.7y → st									93
94	1.4s → 2.9s → 79s → 20.3m → st									94
95	s → <2.5s → 0.8m → 10.9m → 65.5d → 90h → st									95
96	(2.3m) → st [23.3h] → st									96
97	17.0h → 60s → 74m → st									97
98	10m → <2m → st [51.5m] → st									98

表 2.1 フィッシュιονチェーン (つづき)

質量数	^{40}Zr	^{41}Nb	^{42}Mo	^{43}Tc	^{44}Ru	^{45}Rh	^{46}Pd	^{47}Ag	^{48}Cd	質量数
99	$\begin{matrix} \xrightarrow{50+} 10s \xrightarrow{32} 6.00h \\ \xrightarrow{36+} 2.4m \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{66.7h} 6h \\ \xrightarrow{2.13 \cdot 10^5 y} st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{11.2m} 5s \\ \xrightarrow{11.2m} st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{70s} 50s \xrightarrow{39.6d} 57.5m \\ \xrightarrow{11.2m} st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{1.1m} 18m \rightarrow st \\ \xrightarrow{4.2m} 10s \xrightarrow{21.3s} 44s \\ \xrightarrow{4.2m} 21.7m \xrightarrow{7 \cdot 10^6 y} st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{40s} 7.7m \rightarrow 4.44h \rightarrow 35.88h \rightarrow st \\ \xrightarrow{369d} 30s \rightarrow st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{4.2m} 10s \xrightarrow{21.3s} 44s \\ \xrightarrow{4.2m} 21.7m \xrightarrow{7 \cdot 10^6 y} st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{4.5m} 16.8s \rightarrow st \\ \xrightarrow{50s} 4.72m \rightarrow 41.2s \\ \xrightarrow{30s} 13.46h \rightarrow st \end{matrix}$	$\begin{matrix} \xrightarrow{5s} st \xrightarrow{24.5s} st \\ \xrightarrow{5s} st \xrightarrow{24.5s} st \end{matrix}$	99
100	$3.0m \rightarrow st$									100
101	$1.0m \rightarrow 14.61m \rightarrow 14.0m \rightarrow st$									101
102	$\begin{matrix} \xrightarrow{11.2m} 5s \\ \xrightarrow{11.2m} st \end{matrix}$									102
103	$70s \rightarrow 50s \rightarrow 39.6d \rightarrow 57.5m$									103
104	$1.1m \rightarrow 18m \rightarrow st$									104
105	$40s \rightarrow 7.7m \rightarrow 4.44h \rightarrow 35.88h \rightarrow st$									105
106	$369d \rightarrow 30s \rightarrow st$									106
107	$4.2m \rightarrow 10s \xrightarrow{21.3s} 44s$									107
108	$4.5m \rightarrow 16.8s \rightarrow st$									108
109	$50s \rightarrow 4.72m \rightarrow 41.2s$									109
110	$30s \rightarrow 13.46h \rightarrow st$									110
111	$\begin{matrix} \xrightarrow{5s} st \xrightarrow{24.5s} st \\ \xrightarrow{5s} st \xrightarrow{24.5s} st \end{matrix}$									111
112	$21.0h \rightarrow 3.14h \rightarrow st$									112

表 2.1 フィッシュιονチェーン (つづき)

質量数	^{48}Pb	^{49}Ag	^{48}Cd	^{49}In	^{50}Sn	^{51}Sb	^{51}Te	^{51}I	^{51}Xe	質量数
113	$1.5m \xrightarrow{90} 1.2m \xrightarrow{14y} 5.3h \rightarrow st$									113
114	$2.4m \rightarrow 5s \rightarrow st$									114
115	$45s \rightarrow 20s \rightarrow 44.2d \rightarrow 4.51h \rightarrow st$									115
116	$2.5m \rightarrow st$									116
117	$\begin{matrix} \xrightarrow{0.7m} 2.5h \rightarrow 41m \rightarrow st \\ \xrightarrow{10+} 3.0h \rightarrow 1.94h \rightarrow 14.0d \end{matrix}$									117
118	$4.9m \rightarrow 5.1s \rightarrow st$									118
119	$\begin{matrix} \xrightarrow{2.7m} 17.7m \rightarrow 95 \rightarrow st \\ \xrightarrow{9.5m} 2.1m \rightarrow st \end{matrix}$									119
120	$< 1m \rightarrow 47s \rightarrow st$									120
121	$\begin{matrix} \xrightarrow{24+} 3.2m \rightarrow 27.3h \rightarrow st \\ \xrightarrow{74+} 30s \rightarrow 27.3h \rightarrow st \end{matrix}$									121
122	$7.5s \rightarrow st$									122
123	$\begin{matrix} \xrightarrow{36s} 127d \rightarrow 40.2m \rightarrow st \\ \xrightarrow{10s} 40.2m \rightarrow st \end{matrix}$									123
124	$\begin{matrix} \xrightarrow{3.6s} st \\ \xrightarrow{21} 2.78y \rightarrow 58d \rightarrow st \\ \xrightarrow{9.4d} 19.0m \rightarrow 12.5d \rightarrow st \end{matrix}$									124
125	$\begin{matrix} \xrightarrow{9.69m} 2.78y \rightarrow 58d \rightarrow st \\ \xrightarrow{9.4d} 19.0m \rightarrow 12.5d \rightarrow st \end{matrix}$									125
126	$\begin{matrix} \xrightarrow{40+} 4.4m \rightarrow 105d \rightarrow 9.35h \rightarrow st \\ \xrightarrow{51+} 2.10h \rightarrow 10.1m \rightarrow 8.8h \rightarrow st \end{matrix}$									126
127	$\begin{matrix} \xrightarrow{40+} 4.4m \rightarrow 105d \rightarrow 9.35h \rightarrow st \\ \xrightarrow{51+} 2.10h \rightarrow 10.1m \rightarrow 8.8h \rightarrow st \end{matrix}$									127
128	$\begin{matrix} \xrightarrow{59.4m} 10.1m \rightarrow 8.8h \rightarrow st \\ \xrightarrow{7m} 4.41h \rightarrow 16 \cdot 10^7 y \rightarrow st \end{matrix}$									128
129	$\begin{matrix} \xrightarrow{7m} 4.41h \rightarrow 16 \cdot 10^7 y \rightarrow st \\ \xrightarrow{33.6d} 68.8m \rightarrow st \end{matrix}$									129

表 2.1 ファッションチェイン (つづき)

質量数	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	質量数	
130	2.6m	6.4m	<10	[12.5h]	→ st					130	
131	65s	→ 23.0m	7	30h	19	8.06d	24.8m	2	[12d]	→ st	131
132	50s	45s	3.1m	77.7h	→ 2.28h	→ st				132	
133	39s	→ 2.6m	52m	13	20.8h	2	[54.2h]	5.270d	→ st	133	
134	→ 20s	→ 1.5s	→ 43m	→ 52.8m	→ st	↓	(2.90h)	[2.05y]	→ st	134	
135	1.9s	→ 29.5m	→ 6.75h	→ 9.16h	→ 2.0·10 ⁶ y	→ st	→ 15.7m	→ 53m	→ 28.7h	135	
136	83s	→ st	[13.5d]	→ st						136	
137	24.4s	→ 3.90m	→ 29.7y	→ st	→ 2.57m					137	
138	6.3s	→ 14.0m	→ 32.2m	→ st						138	
139	2.0s	→ 40s	→ 9.48m	→ 8.29m	→ st					139	
140	13.3s	→ 65s	→ 12.80d	→ 40.23h	→ st					140	

表 2.1 ファッションチェイン (つづき)

質量数	⁵⁴ Xe	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	質量数
141	1.70s	→ 24s	→ 18m	→ 3.88h	→ 32.51d	→ st				141
142	1.15s	→ 2.3s	→ 11m	→ 92.5m	→ st					142
143	0.96s	→ 2.0s	→ 12s	→ 14.0m	→ 33.4h	→ 13.59d	→ st			143
144	-1s	→ s	→ s	→ s	→ 284.4d	→ 17.28m	→ st			144
145					3.0m	→ 5.96h	→ st			145
146					14.2m	→ 24.0m	→ st	[4.4y]	→ st	146
147					65s	→ 12.0m	→ 11.07d	→ 2.26y	→ st	147
148					43s	→ 1.98m	→ st	[(41d)]	→ st	148
149						→ (-2.3m)	→ 1.9h	→ 53.08h	→ st	149
150							→ st	[(2.68h)]	→ st	150

表 2.1 フィッションチェイン (つづき)

質量数	${}_{60}\text{Nd}$	${}_{61}\text{Pm}$	${}_{62}\text{Sm}$	${}_{63}\text{Eu}$	${}_{64}\text{Gd}$	${}_{65}\text{Tb}$	${}_{66}\text{Dy}$	${}_{67}\text{Ho}$	${}_{68}\text{Er}$	質量数
151	(12m) → 28.3h → 93y → st									151
152	(6.0m) → st									152
153	(5.5m) → 46.7h → st									153
154	(2.5m) → st									154
155			21.9m → 1.81y → st							155
156			9.4h → 15.18d → st							156
157			(30s) → 15.16h → st							157
158			45.7m → st							158
159			17.9m → 18.56h → st							159
160			(~2.5m) → st							160
161			(3.7m) → 6.88d → st							161
162			(7m) → st							162
163			6.5h → st							163
164			23h → st							164
165										165
166										166

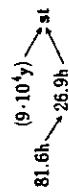
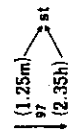


表 2.2 (a) FP元素の物理的性質

元 素 名	ク リ プ ト ン	キ セ ノ ン	ル ビ ジ ウ ム	セ シ ウ ム
原 子 番 号	36	54	37	55
原 子 記 号	Kr	Xe	Rb	Cs
原 子 量	83.80	131.29 ± 3	85.4678 ± 3	132.9054
電 子 配 置	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	(Kr) 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶	(Kr) 5s ¹	(Xe) 6s ¹
酸 化 状 態	0	0	I	I
融 点 (°C)	-156.6	-111.9	388.9	28.5
沸 点 (°C)	-152.3	-107.1	688	690
比 重	3.74 g/l (0°C, 760mmHg)	5.85 g/l (0°C, 760mmHg)	1.53 (20°C) 1.475 (39°C)	1.873 (20°C)
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)	0.059 (20°C)	0.038 (20°C)	0.086 (20°C)	0.053 (20°C)
熱 伝 導 率 (W/cm. deg)	0.94 × 10 ⁻⁴ (300K)	-	0.29 (at m.p.)	0.18 (at m.p.)
比 抵 抗 (Ω. cm)			11 × 10 ⁻⁶	21 × 10 ⁻⁶ (19.4°C)
熱中子吸収断面積 (barn)	25.0	24.5	0.37	29.0
そ の 他	臨 界 圧 54.3 atm 臨 界 温 度 -63.8°C 貴 ガ ス	臨 界 圧 57.64 atm 臨 界 温 度 16.59°C 貴 ガ ス	水と激しく反応 炎色(紅紫) アルカリ金属	水と激しく反応 炎色(青) アルカリ金属
形 状	無色無臭気体	無色無臭気体	銀白色固体	銀白色固体

表 2.2 (b) FP 元素の物理的性質

元 素 名	銀	ス ト ロ ン チ ウ ム	バ リ ウ ム	カ ド ミ ウ ム
原 子 番 号	47	38	56	48
原 子 記 号	Ag	Sr	Ba	Cd
原 子 量	107.8682±3	87.62	137.33	112.41
電 子 配 置	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹	[Kr] 5s ²	[Xe] 6s ²	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
酸 化 状 態	I, II	II	II	II
融 点 (°C)	961.9	769	725	321.11
沸 点 (°C)	2212	1384	1637	765
比 重	10.49 (20°C)	2.6 (20°C)	3.5 (20°C)	8.648 (20°C)
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)	0.0560 (20°C)		0.068 (-185~20°C)	0.0552 (20°C)
熱 伝 導 率 (W/cm.deg)	4.18 (273K)			
比 抵 抗 (Ω·cm)	1.62×10 ⁻⁶ (18°C)	30.7×10 ⁻⁶ (0°C)	2.5×10 ⁴ (18°)	7.3×10 ⁻⁶
熱中性子吸収断面積 (barn)	63.6	1.21	1.2	2450
そ の 他		水と激しく反応 炎色(紅)	水と激しく反応 炎色(黄緑)	空气中常温 表面酸化
形 状	貴 金 属 銀 白 色 金 属	ア ル カ リ 土 類 銀 白 色 固 体	ア ル カ リ 土 類 銀 白 色 固 体	

表 2.2 (c) FP元素の物理的性質

元 素 名	イ ッ ト リ ウ ム	ラ ン タ ン	セ リ ウ ム	プ ラ セ オ ジ ム
原 子 番 号	39	57	58	59
原 子 記 号	Y	La	Ce	Pr
原 子 量	88.9059	138.9055	140.12	140.9077
電 子 配 置	[Kr] 4d ¹ 5s ²	[Xe] 5d ¹ 6s ²	[Xe] 4f ¹ 5d ¹ 6s ²	[Xe] 4f ³ 6s ²
酸 化 状 態	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ, Ⅳ	Ⅲ, Ⅳ
融 点 (°C)	1509	920	795	935
沸 点 (°C)	2927	3469	3468	3127
比 重	4.45	6.174	6.771	6.78
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)			0.0524 kcal / g (20~100°C)	
熱 伝 導 率 (W/cm.deg)				
比 抵 抗 (Ω·cm)			78 × 10 ⁻⁸	
熱中性子吸収断面積 (barn)	1.28	9.0	0.63	11.5
そ の 他	延性・展性はない。熱水と反応。 1495°Cに相転移。	水と反応。445°C以上引火、310°Cで六方(α)→立方(β)	粉末160°C発火。水と反応。ミッシュメタルの主成分。	290°C以上引火。水と反応。
形 状	希土類元素 灰黒色金属	希土類元素 白色金属	希土類元素 灰色金属	希土類元素 銀白色金属

表 2.2 (d) FP 元素の物理的性質

元 素 名	ネ オ ジ ム	プ ロ メ チ ウ ム	サ マ リ ウ ム	ユ ウ ロ ビ ウ ム
原 子 番 号	60	61	62	63
原 子 記 号	Nd	Pm	Sm	Eu
原 子 量	144.24±3	(145)	150.36±3	151.96
電 子 配 置	[Xe] 4f ⁴ 6s ²	[Xe] 4f ⁵ 6s ²	[Xe] 4f ⁶ 6s ²	[Xe] 4f ⁷ 6s ²
酸 化 状 態	III	III, IV	II, III	I, III
融 点 (°C)	1024	1035	1072	826
沸 点 (°C)	3027	2730	1900	1439
比 重	6.80 (六方) 7.004 (立方)		7.536	5.259
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)				
熱 伝 導 率 (W/cm.deg)				
比 抵 抗 (Ω · cm)				
熱中性子吸収断面積 (barn)	50.5	-	5800	4600
そ の 他	水と反応。 868°Cで六方→ 立方	天然には存在しない。	水と反応。	水と反応。希土類中反 応性最大。
形 状	希土類元素 銀 (帯黄) 色	希土類元素	希土類元素 灰白色金属	希土類元素 銀白色金属

表 2.2 (e) FP 元素の物理的性質

元 素 名	ジ ル コ ニ ウ ム	ニ	オ	ブ	ア	ン	チ	モ	ン	モ	リ	ブ	デ	ン
原 子 番 号	40		41		51					42				
原 子 記 号	Zr		Nb		Sb					Mo				
原 子 量	91.22		92.9064		121.75±3					95.94				
電 子 配 置	(Kr) 4d ² 5s ²		(Kr) 4d ⁴ 5s ¹		(Kr) 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³					(Kr) 4d ⁵ 5s ¹				
酸 化 状 態	IV		II, III, IV, V		III, V					II, III, IV, V, VI				
融 点 (°C)	1852		2468		630.7					2610				
沸 点 (°C)	3578		3300		1635					5560				
比 重	6.52 (25°C)		8.56 (25°C)		6.69 (20°C)					10.23				
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)	0.067 (0~100°C)		0.0645		0.049 (20°C)					0.061 (0~100°C)				
熱 伝 導 率 (W/cm.deg)	0.21 (273K)		0.52 (273K)		0.18 (273K)					1.4 (273K)				
比 抵 抗 (Ω·cm)	4.1×10 ⁻⁵ (0°C) 0.75×10 ⁻⁵ (4.21K)		17.0×10 ⁻⁶ (20°C)		電気伝導度 2.48×10 ⁴ (Ω/cm) (0~30°C)					5.2×10 ⁻⁶ (0°C)				
熱中性子吸収断面積 (barn)	0.185		1.15		5.4					2.65				
そ の 他	粉末は空气中発火。相転移 862°C。ジルカロイ主成分。ガス吸収性。		水に不溶。HFに可溶。		水に不溶。有毒。加熱するともえ、Sb ₂ O ₃ 半金属。					熱水と反応。高温でO ₂ とMoO ₃ ステンレス、耐火合金成分。				
形 状	銀灰白色金属		灰白色金属		銀白色金属 無定形、その他					銀白色金属				

表 2.2 (f) FP 元素の物理的性質

元 素 名	テ ル ル	テ ク ネ チ ウ ム	臭 素	ヨ ウ 素
原 子 番 号	52	43	35	53
原 子 記 号	Te	Tc	Br	I
原 子 量	127.60±3	(98)	79.904	126.9045
電 子 配 置	(Kr) 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	(Kr) 4d ⁵ 5s ²	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	(Kr) 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵
酸 化 状 態	-II, IV, VI	IV, V, VII	±I, V	±I, V, VII
融 点(°C)	449.8	2200	-7.2	113.6
沸 点(°C)	1390	5030	58.8	184.4
比 重	6.236 (20°C) 6.00 (無定形)	11.5	3.10 (25°C) 5.480 g/l (87.7°C)	4.93 (25°C)
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)	0.048 (20°C)		Br ₂ (固体) 0.080 (-73°C) (液体) 0.107 (13~45°C)	I ₂ (固体) 0.052 (18°C) (液体) 0.0151 (114~185°C)
熱 伝 導 率 (W/cm.deg)				
比 抵 抗 (Ω·cm)	電 気 伝 導 度 Ag の約 10 ⁵ 分の 1。		11.24 × 10 ⁻¹⁰ (25°C) 蒸 気 圧 -17.5°C 20 mmHg 23.3°C 200 mmHg	蒸 気 圧 105.15°C 60 mmHg 116°C 100 mmHg
熱中性子吸収断面積 (barn)	4.7	-	6.8	6.2
そ の 他	有毒。加熱によりもえて TeO ₂ 。半導体。	O ₂ 中もえて Tc ₂ O ₇ 。天然には存在しない。	特異臭，非金属中常温液体唯一の元素。ハロゲン臨界圧 102 atm 臨界温度 311°C	昇華性，特異臭 ハロゲン
形 状	銀白色金属または無定形	銀灰白色金属	赤褐色液体 赤褐色気体 褐色固体	黒紫色固体，光沢。紫色気体

表 2.2 (g) FP 元素の物理的性質

元 素 名	ル テ ニ ウ ム	ロ ジ ウ ム	パ ラ ジ ウ ム
原 子 番 号	44	45	46
原 子 記 号	Ru	Rh	Pd
原 子 量	101.07±3	102.9055	106.42
電 子 配 置	(Kr) 4d ⁷ 5s ¹	(Kr) 4d ⁸ 5s ¹	(Kr) 4d ¹⁰
酸 化 状 態	II, III, IV, V, VI, VII, VIII	I, II, III, IV	II, IV
融 点(°C)	2250	1963	1554
沸 点(°C)	3900	3727	3167
比 重	12.41 (20°C)	12.41 (20°C)	12.02 (20°C)
定 圧 比 熱 at 1 atm (cal/deg.g)	0.058 (20°C)	0.058 (10~100°C)	0.054 (20°C)
熱 伝 導 率 (W/cm.deg)		1.51 (273 K)	0.7 (273 K)
比 抵 抗 (Ω · cm)	7.46 × 10 ⁻⁶	5.1 × 10 ⁻⁶ (20°C)	10.4 × 10 ⁻⁶
熱中性子吸収断面積 (barn)	2.56	145	6.9
そ の 他	粉末空气中強熱, RuO ₂ , RuO ₄ (700~1200°C) 気体を吸蔵, 相転移。白金族	熱 伝 対 材 料 白 金 族	粉末は常温で体積で900倍のH ₂ を吸蔵。触媒, 合金材料, 白金族
形 状	銀 白 色 金 属	銀 白 色 金 属	銀 白 色 金 属 黒 色 粉 末, など

表 2.3 (a) 貴ガスと空気の 水への溶解度

温度 °C	A r	K r	X e	R n	空 気		気		水の蒸気圧 (mmHg)
	$\alpha \times 10^2$	$\alpha \times 10^2$	$\alpha \times 10^2$	$\alpha \times 10^2$	総 $\ell \times 10^2$	N ₂ $\ell \times 10^2$	O ₂ $\ell \times 10^2$		
0	5.78	11.05	21.80	50.8	2.86	1.84	1.02	4.581	
10	4.13	8.10	15.00	34	2.24	1.45	0.79	9.205	
15	3.70	6.56	12.36	29	2.01	1.31	0.70	12.784	
20	3.37	6.26	11.09	24.5	1.83	1.19	0.64	17.531	
25	3.06	5.35 (24.7)	—	21.5	1.67	1.10	0.57	23.755	
30	2.88	5.11	9.00	19.5	1.54	1.03	0.51	31.825	
40	2.52	4.3	8.12	16	1.32	0.87	0.45	55.339	
50	2.26	3.83	8.78	10	1.14	0.75	0.39	92.557	
60	2.09	3.57	5.00 (59)	8.5	0.98	0.65	0.33	149.46	
70	1.96	2.90 (71.5)	4.28 (71.7)	—	—	—	—	233.79	
80	1.84	—	—	—	0.60	0.40	0.20	355.29	
90	—	—	—	—	—	—	—	525.90	
100	—	—	—	—	0.00	0.00	0.00	760.00	

α : Bunsen吸収係数。気体の分圧が760mmHg であるとき温度 t °C の溶媒 1 mℓ に溶解する気体の体積 (mℓ) を 0 °C, 760mmHg に換算した値。

ℓ : 気相の全圧 (気体分圧 + 溶媒蒸気圧) が 760mmHg であるとき, 温度 t

°C の溶媒 1 mℓ に溶解する気体の体積 (mℓ) を 0 °C, 760mmHg に換算した値。

表 2.3(b) 水に対する気体の溶解

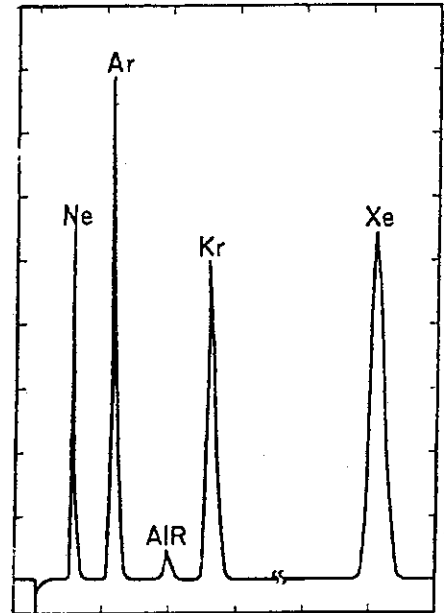
Henry's Law Constant, H - 10 ⁻⁴ atm/mol fraction				
t, °F	O ₂	H ₂	N ₂	Xe
100	5.24	7.46	10.26	1.78
150	6.60	7.45	12.08	2.64
200	7.06	6.81	12.31	3.11
250	6.71	5.89	11.45	3.14
300	5.86	4.92	9.98	2.89
350	4.81	4.01	8.30	2.49
400	3.78	3.20	6.62	2.06
450	2.87	2.51	5.07	1.66
500	2.13	1.94	3.71	1.32
550	1.56	1.47	2.56	1.04
600	1.13	1.08	1.58	

$P_i = HN_i$

P_i : 気体_i の分圧 (気相)

N_i : 気体_i のモル分率 (液相)

H : ヘンリーの法則の定数

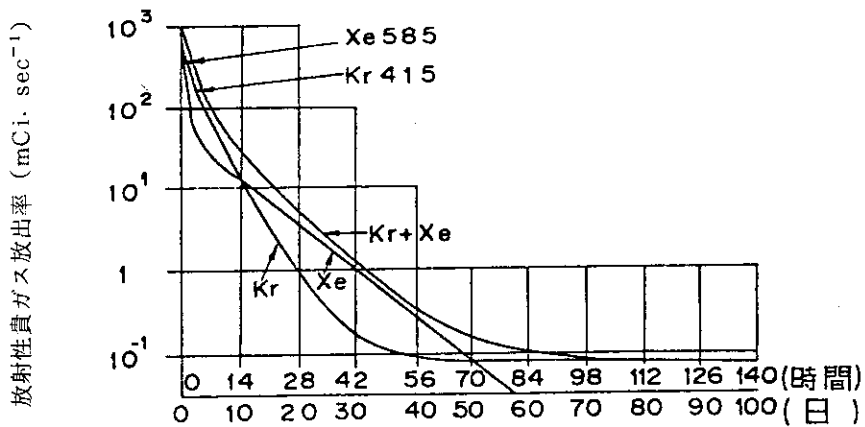


キャリアーガス：ヘリウム

カラム：合成ゼオライト (ケイ酸塩の一種)

たて軸：流出量, 横軸：時間

図 2.1 貴ガスのガスクロマトグラフィ



Kr 保持時間上 (時間)

Xe 保持時間下 (日)

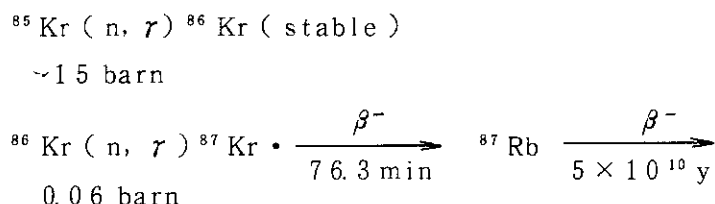
図 2.2 貴ガスの保持時間と放出率

表 2.4 核分裂生成物から各 F.P. 元素の分離法

元 素	分 離 法	文 献
Kr, Xe	吸着 (ガスクロマトグラフィ), 分留, 質量分析	8, 9
Cs, Rb	陽イオン交換, 沈殿 (りんモリブデン酸セシウム, 塩化白金酸塩, 過塩素酸塩, テトラフェニルホウ素塩)	28~31, 97
Ag	沈殿 (Ag_2S , AgCl), 共沈, 同位体交換	32
Sr, Ba	沈殿 (塩化物, 硝酸塩など), イオン交換	34
Cd	溶媒抽出, イオン交換, CdS 沈殿, 電着	35
希 土	陽イオン交換, 溶媒抽出	36, 37
Zr	Ba Zr F_6 沈殿, 溶媒抽出 (TBP, TTA), イオン交換	43~46, 94, 95
Nb	溶媒抽出 (ジイソプロピルケトン, クペロン)	47
Sb	SbH_3 蒸留, 沈殿 (SbS_3 , 8-ヒドロキシキノリン)	49, 50
Mo	沈殿 (α -ベンゾインオキシム, 8-ヒドロキシキノリン), イオン交換, アルミナ吸着, MoO_3 蒸留	52~56
Te	共沈 (Se, CuS など)	57, 58
Tc	蒸留, 沈殿, 共沈, 溶媒抽出	60~63
I, Br	I_2 , Br_2 の CCl_4 抽出, 蒸留など	66
Ru	RuO_4 蒸留, 沈殿 (水酸化物など)	74, 75
Rh	沈殿 (rhodinitrite 塩)	85
Pd	ジメチルグリオキシム沈殿など	86

貴ガスの活性炭に対する吸着挙動は、BWRの貴ガスホールドアップ装置に利用されている^{10,11)}。活性炭は沸点の高い気体、すなわち分子間の相互作用をする力が大きいものほどよく吸着する。排ガスの主成分である空気中の N_2 (b. p. $-195.8^\circ C$) と O_2 (b. p. $-182.9^\circ C$) はほとんど吸着されず、キセノン (b. p. $-107.1^\circ C$) とクリプトン (b. p. $-152.3^\circ C$) は、可逆的に吸着される。このためクリプトンとキセノンは活性炭のカラムを通るときに吸着と脱着をくりかえし、徐々に入口から出口へ移動する。この間に放射性核種が壊変する。これが貴ガスホールドアップ装置の原理である。FP中貴ガスの放射能の減衰と貴ガスホールドアップ装置内の保持時間との関係を表2.5¹²⁾と図2.2¹¹⁾に示す。FP中の貴ガスに含まれるおもな核種は貴ガスホールドアップ装置に入る時点で ^{85m}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{135m}Xe , ^{138}Xe である。また貴ガスホールドアップ装置の効果は排ガス流量 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$ でクリプトン56時間、キセノン40日保持され、放射能の減衰としてクリプトン1/4000, キセノン1/2000である。

再処理の際に出る ^{85}Kr の捕集にも同様の吸着が利用される。集められた大量の ^{85}Kr に対しては消滅処理も可能と考えられている¹³⁾。



FP中クリプトンとキセノンの核種を天然クリプトン、キセノンの同位体比と共に表2.6に示す^{3, 6, 14)}。半減期、壊変型式のほか生成量のめやすとして核分裂収率¹⁵⁾と生成量の計算例¹⁶⁾をおなじ表2.6にあわせて示した。核分裂収率の値にはほかにも報告があるが^{6, 17, 18)}ここではMeekおよびRiderによる表のrecommended valueを採用した。なお表2.6の核分裂収率 fission yield は累積収率 cumulative yield である。また放射性クリプトン、キセノンの最大許容濃度を表2.7に示す^{19, 20)}。なお許容濃度は、法令集にもでている。

原子力プラントの運転では、ハロゲンと共に貴ガスが重要視されるが、これには2つの理由がある。第一は原子炉事故時などに放射線源となりうるために安全性において重要であることで、第二はプラントの性能に対して影響を与える点である。第二の理由は貴ガスが燃料スエリングの原因になること、さらに燃料と燃料被覆管との間のすきま (プレナム、ギャップなど) の気体成分となり、ヘリウム充填燃料ではクリプトン、キセノンの熱伝導がヘリウムよりもひと桁小さいため熱伝導に変化が起ること、プレナム寸法によっては被覆管の内圧が上昇することなどに関連している。このような2点からFP貴ガスの核燃料からの放出挙動が検討されている²¹⁾。

2.2 1 族元素

ルビジウム (Rb) とセシウム (Cs)

物理的性質などを表2.2に示す。ナトリウム、カリウムとおなじアルカリ金属に属し銀白色の軽くてやわらかい固体であるが、ふつう表面が酸化していて黄色っぽく見える。融点が低い

表 2.5 1000 MWe 軽水炉による気体放出放射能推定値

放出率 (Ci/秒)¹⁾

核 種	半 減 期	30分の遅延 ²⁾	1日の遅延 ³⁾	60日の遅延 ⁴⁾
^{83m} Kr	1.86 hr.	3 600	0.5	0
⁸⁵ Kr	10.76 yr.	10	10	10
^{85m} Kr	4.4 hr.	6 400	156	0
⁸⁷ Kr	1.3 hr.	19 200	0.06	0
⁸⁸ Kr	2.8 hr.	20 400	60	0
⁸⁹ Kr	3.2 min.	440	0	0
クリプトン全放射能 (μ Ci/秒)		50 000(約)	226	10
^{131m} Xe	11.9 day	15	15日の遅延 ³⁾ 6	0.4
¹³³ Xe	5.27 day	6 400	880	2
^{133m} Xe	2.3 day	240	2	0
¹³⁵ Xe	9.2 hr.	21 600	0	0
^{135m} Xe	15.6 min.	10 400	0	0
¹³⁷ Xe	3.8 min.	1 120	0	0
¹³⁸ Xe	14 min.	31 200	0	0
Xe 全放射能		72 000(約)	888	2.4
Xe および Kr 全放射能 (μ Ci/秒)		122 000	1,100	12
同 上 (Ci/年)		3 000 000	27,500	300

- 1) 被覆材の0.2%破損下の運転を仮定
- 2) 現在作られているBWR貯留時間の代表的なもの
- 3) チャコールベッドを用いるBWRの代表的貯留時間
- 4) PWRの代表的貯留時間

表 2.6 F P核種と各元素の安定同位体

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission	Yields ^{*1}	Gramms ^{*2} per tonne at 10y	Curies ^{*2} per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n		1 y	10 y
⁷⁸ Kr		0.35%	2×10^{-12}	—			
⁸⁰ Kr		2.27%	2×10^{-6}	1×10^{-6}			
⁸² Kr		11.56%	7×10^{-5}	4×10^{-3}			
^{83m} Kr	IT	1.83 h	0.54	0.29			
⁸³ Kr		11.55%	0.54	0.29	41		
⁸⁴ Kr		56.90%	1.00	0.47	111		
^{85m} Kr	β^- , IT	4.48 h	1.33	0.60			
⁸⁵ Kr	β^-	10.76 y	0.29	0.14	16	10 800	6 050
⁸⁶ Kr		17.37%	1.94	0.74	192		
⁸⁷ Kr	β^-	76.3 m	2.37	0.95			
⁸⁸ Kr	β^-	2.80 h	3.64	1.34			
⁸⁹ Kr	β^-	3.18 m	4.64	1.44			
⁹⁰ Kr	β^-	32.3 s	4.83	1.80			
⁹¹ Kr	β^-	8.6 s	3.25	1.35			
⁹² Kr	β^- , n	1.84 s	1.80	0.83			
⁹³ Kr	β^- , n	1.29 s	0.50	0.31			
⁹⁴ Kr	β^-	0.2 s	0.10	5×10^{-2}			
⁹⁵ Kr	β^-	< 0.5 s	7×10^{-3}	1×10^{-3}			
¹²⁴ Xe		0.096%	—	—			
¹²⁶ Xe		0.090%	9×10^{-7}	2×10^{-8}			
¹²⁸ Xe		1.919%	4×10^{-5}	1×10^{-4}			
^{129m} Xe	IT	8.89 d	5×10^{-10}	1×10^{-8}			
¹²⁹ Xe		26.44%	0.85	1.69			
¹³⁰ Xe		4.08%	3×10^{-4}	5×10^{-3}	11		
^{131m} Xe	IT	12.0 d	2×10^{-2}	2×10^{-2}			
¹³¹ Xe		21.18%	2.77	3.89	409		
¹³² Xe		26.86%	4.13	5.16	1150		
^{133m} Xe	IT	2.2 d	0.19	0.19			
¹³³ Xe	β^-	5.29 d	6.77	6.84			
¹³⁴ Xe		10.44%	7.19	7.22	1530		
^{135m} Xe	IT	15.3 m	1.05	1.06			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission	Yields* ¹	Gramms* ²	Curies* ² per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n	per tonne at 10y	1y	10y
¹³⁵ Xe	β^-	9.17 h	6.72	7.22			
¹³⁶ Xe		8.87%	6.12	6.55	2320		
¹³⁷ Xe	β^-	3.83 m	5.94	6.05			
¹³⁸ Xe	β^-	14.1 m	6.24	5.14			
¹³⁹ Xe	β^-	39.7 s	4.96	4.36			
¹⁴⁰ Xe	β^-	13.5 s	3.83	1.73			
¹⁴¹ Xe	β^-	1.79 s	1.26	0.46			
¹⁴² Xe	β^-	1.24 s	0.37	7×10^{-2}			
¹⁴³ Xe	β^-	0.83 s	5×10^{-2}	1×10^{-2}			
¹⁴⁴ Xe	β^-	< 1 s	6×10^{-3}	1×10^{-3}			
⁸⁵ Rb		72.15%	1.33	0.60	108		
^{86m} Rb	IT	1.02 m	1×10^{-3}	7×10^{-6}			
⁸⁶ Rb	β^- , EC	18.7 d	1×10^{-3}	1×10^{-5}			
⁸⁷ Rb		27.85%	2.56	0.95	239		
	β^-	4.7×10^{10} y					
⁸⁸ Rb	β^-	17.8 m	3.65	1.35			
⁸⁹ Rb	β^-	15.2 m	4.81	1.51			
^{90m} Rb	β^- , IT	4.3 m	0.37	0.16			
⁹⁰ Rb	β^-	2.6 m	5.92	2.11			
⁹¹ Rb	β^-	58 s	5.55	2.24			
⁹² Rb	β^- , n	4.5 s	5.06	2.60			
⁹³ Rb	β^- , n	5.8 s	3.69	2.47			
⁹⁴ Rb	β^- , n	2.69 s	1.61	1.38			
⁹⁵ Rb	β^- , n	0.383 s	0.65	0.30			
⁹⁶ Rb	β^- , n	0.207 s	0.11	6×10^{-2}			
⁹⁷ Rb	β^- , n	0.176 s	3×10^{-2}	6×10^{-3}			
⁹⁸ Rb	β^- , n	0.106 s	1×10^{-3}	1×10^{-4}			
¹³³ Cs		100%	6.77	6.84	1010		
^{134m} Cs	IT	2.90 h	4×10^{-6}	4×10^{-5}			
¹³⁴ Cs	β^- , β^+	2.06 y	1×10^{-5}	8×10^{-5}	6	175 000	8 330
^{135m} Cs	IT	53 m	1×10^{-3}	9×10^{-4}			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission		Gramms* ² per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n		1 y	10 y
¹³⁵ Cs	β^-	2×10^6 y	6.73	7.22	326		
¹³⁶ Cs	β^-	13.0 d	7×10^{-3}	0.10			
¹³⁷ Cs	β^-	30.1 y	6.23	6.53	980	110 000	85 000
¹³⁸ Cs	β^-	32.2 m	6.74	5.65			
¹³⁹ Cs	β^-	9.3 m	6.51	5.80			
¹⁴⁰ Cs	β^-	64 s	5.83	5.03			
¹⁴¹ Cs	β^-	24.7 s	4.37	3.71			
¹⁴² Cs	β^-	1.68 s	2.90	1.62			
¹⁴³ Cs	β^-	1.68 s	1.46	0.52			
¹⁴⁴ Cs	β^-	1.0 s	0.30	0.11			
¹⁴⁵ Cs	β^-	0.61 s	2×10^{-2}	3×10^{-3}			
¹⁰⁷ Ag		51.35%	0.19	3.05			
^{109m} Ag	IT	39.6 s	3×10^{-2}	1.38			
¹⁰⁹ Ag		48.65%	3×10^{-2}	1.38	60		
^{110m} Ag	β^- , IT	250.4 d	6×10^{-9}	6×10^{-6}			
¹¹⁰ Ag	β^- , EC	24.6 s	7×10^{-9}	7×10^{-6}			
^{111m} Ag	IT, β^-	1.2 m	2×10^{-2}	0.27			
¹¹¹ Ag	β^-	7.5 d	2×10^{-2}	0.27			
¹¹² Ag	β^-	3.12 h	1×10^{-2}	0.12			
⁸⁴ Sr		0.56%	8×10^{-11}	6×10^{-11}			
⁸⁶ Sr		9.86%	1×10^{-3}	1×10^{-5}			
^{87m} Sr	IT, EC	2.81 h	4×10^{-8}	6×10^{-8}			
⁸⁷ Sr		7.02%	2.56	0.95			
⁸⁸ Sr		82.56%	3.65	1.35	351		
⁸⁹ Sr	β^-	50.5 d	4.81	1.67			
⁹⁰ Sr	β^-	28.5 y	5.94	2.12	427	75 500	60 400
⁹¹ Sr	β^-	9.5 h	5.72	2.29			
⁹² Sr	β^-	2.71 h	5.96	2.92			
⁹³ Sr	β^-	7.45 m	6.31	3.72			
⁹⁴ Sr	β^-	74 s	6.00	3.90			
⁹⁵ Sr	β^-	24.4 s	5.63	3.19			
⁹⁶ Sr	β^-	1.0 s	2.30	1.64			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission		Gramms* ² per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	Yields* ¹ ²³⁹ Pu thermal n		1y	10y
¹³⁰ Ba		0.101%	—	—			
¹³² Ba		0.097%	2×10^{-9}	5×10^{-10}			
¹³⁴ Ba		2.42%	1×10^{-5}	8×10^{-5}	251		
^{135m} Ba	IT	28.7h	2×10^{-6}	3×10^{-7}			
¹³⁵ Ba		6.59%	6.72	7.22			
¹³⁶ Ba		7.81%	7×10^{-3}	0.10	26		
^{137m} Ba	IT	2.55m	5.82	6.11			
¹³⁷ Ba		11.32%	6.23	6.53	298		
¹³⁸ Ba		71.66%	6.75	5.69	1210		
¹³⁹ Ba	β^-	82.7m	6.58	5.84			
¹⁴⁰ Ba	β^-	12.79d	6.30	5.49			
¹⁴¹ Ba	β^-	18.3m	5.82	5.57			
¹⁴² Ba	β^-	10.7m	5.32	4.48			
¹⁴³ Ba	β^-	20s	4.90	2.95			
¹⁴⁴ Ba	β^-	11.9s	2.86	1.46			
¹⁴⁵ Ba	β^-	5.6s	0.90	0.30			
¹⁰⁶ Cd		1.22%	—	—			
¹⁰⁸ Cd		0.88%	3×10^{-12}	4×10^{-8}			
¹¹⁰ Cd		12.39%	1×10^{-8}	1×10^{-5}			
¹¹¹ Cd		12.75%	2×10^{-2}	0.27			
¹¹² Cd		24.07%	1×10^{-2}	0.12			
¹¹³ Cd		12.26%	1×10^{-2}	8×10^{-2}			
¹¹⁴ Cd		28.86%	1×10^{-2}	5×10^{-2}			
¹¹⁶ Cd		7.58%	1×10^{-2}	4×10^{-2}			
^{89m} Y	IT	16.0s	4×10^{-4}	2×10^{-4}			
⁸⁹ Y		100%	4.81	1.67	465		
^{90m} Y	IT, β^-	3.19h	1×10^{-5}	2×10^{-6}			
⁹⁰ Y	β^-	64.1h	5.94	2.12			
^{91m} Y	IT	49.7m	3.50	1.40			
⁹¹ Y	β^-	58.5d	5.78	2.39			
⁹² Y	β^-	3.54h	5.97	2.93			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission	Yields* ¹	Gramms* ²		Curies* ² per	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n	per tonne at 10y		tonne at	
						1y	10y	
⁹³ Y	β^-	10.1 h	6.41	3.78				
⁹⁴ Y	β^-	19m	6.39	4.29				
⁹⁵ Y	β^-	10.3m	6.47	4.83				
⁹⁶ Y	β^-	9.3 s	5.93	4.51				
¹³⁸ La	EC, β^-	0.089%	2×10^{-6}	2×10^{-6}				
		1.3×10^{11} y						
¹³⁹ La		99.911%	6.59	5.84	1 270			
¹⁴⁰ La	β^-	40.2 h	6.32	5.49				
¹⁴¹ La	β^-	3.93 h	5.87	5.65				
¹⁴² La	β^-	92.5m	5.42	4.97				
¹⁴³ La	β^-	14.3m	5.82	4.31				
¹⁴⁴ La	β^-	39.8 s	5.00	3.45				
¹⁴⁵ La	β^-	29 s	3.37	2.09				
¹³⁶ Ce		0.193%	—	—				
¹³⁸ Ce		0.250%	5×10^{-7}	6×10^{-7}				
¹⁴⁰ Ce		88.48%	6.32	5.50	1 460			
¹⁴¹ Ce	β^-	32.51 d	5.87	5.66	0	570	0	
¹⁴² Ce		11.07%	5.96	4.98	1 180			
¹⁴³ Ce	β^-	33.0 h	5.89	4.37				
¹⁴⁴ Ce	β^-	284.8 d	5.19	3.77	0	456 000	150	
¹⁴⁵ Ce	β^-	3.0m	3.95	2.98				
¹⁴⁶ Ce	β^-	13.9m	2.93	2.30				
¹⁴⁷ Ce	β^-	57 s	2.01	1.46				
¹⁴⁸ Ce	β^-	48 s	1.10	0.76				
¹⁴¹ Pr		100%	5.87	5.96	1 200			
^{142m} Pr	IT	14.6m	5×10^{-8}	1×10^{-6}				
¹⁴² Pr	β^- , EC	19.2 h	1×10^{-7}	3×10^{-6}				
¹⁴³ Pr	β^-	13.58 d	5.92	4.37				
^{144m} Pr	IT, β^-	7.2m	5×10^{-4}	2×10^{-3}				
¹⁴⁴ Pr	β^-	17.3m	5.19	3.77				

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission	Yields* ¹	Gramms* ²		Curies* ² per	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n	per tonne at 10y		tonne at 1 y 10 y	
¹⁴⁵ Pr	β^-	5.98 h	3.95	3.02				
¹⁴⁶ Pr	β^-	24.0 m	3.00	2.48				
¹⁴⁷ Pr	β^-	12.0 m	2.25	1.93				
¹⁴⁸ Pr	β^-	1.98 m	1.67	1.58				
¹⁴² Nd		27.13%	1×10^{-7}	3×10^{-6}	21			
¹⁴³ Nd		12.20%	5.99	4.46	808			
¹⁴⁴ Nd		23.87%	5.20	3.77	1340			
	α	2.1×10^{15} y						
¹⁴⁵ Nd		8.30%	3.95	3.02	706			
¹⁴⁶ Nd		17.18%	3.00	2.48	711			
¹⁴⁷ Nd	β^-	10.98 d	2.26	1.95				
¹⁴⁸ Nd		5.72%	1.69	1.66	378			
¹⁴⁹ Nd	β^-	1.73 h	1.07	1.24				
¹⁵⁰ Nd		5.60%	0.65	0.97	183			
¹⁵¹ Nd	β^-	12.4 m	0.40	0.67				
¹⁵² Nd		11.4 m	0.22	0.37				
¹⁴⁶ Pm	EC, β^-	5.53 y	1×10^{-6}	6×10^{-7}				
¹⁴⁷ Pm	β^-	2.62 y	2.26	1.95	8	85100	78	
^{148m} Pm	β^- , IT	41.3 d	1×10^{-4}	2×10^{-4}				
¹⁴⁸ Pm	β^-	5.37 d	1×10^{-5}	2×10^{-4}				
¹⁴⁹ Pm	β^-	53.1 h	1.07	1.24				
¹⁵⁰ Pm	β^-	2.7 h	9×10^{-4}	3×10^{-2}				
¹⁵¹ Pm	β^-	28 h	0.42	0.76				
¹⁴⁴ Sm		3.16%	—	—				
¹⁴⁷ Sm		15.07%	2.26	1.95	163			
	α	1.06×10^{11} y						
¹⁴⁸ Sm		11.27%	1×10^{-4}	4×10^{-4}	251			
	α	7×10^{15} y						
¹⁴⁹ Sm		13.82%	1.07	1.25	6			
¹⁵⁰ Sm		7.47%	9×10^{-4}	3×10^{-2}	315			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission ^{235}U thermal n	Yields* ¹ ^{239}Pu thermal n	Gramms* ² per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
						1 y	10 y
^{151}Sm	β^-	93 y	0.42	0.77	39	1,150	1,070
^{152}Sm		26.63%	0.27	0.58	92		
^{153}Sm	β^-	46.75 h	0.15	0.38			
^{154}Sm		22.53%	7×10^{-2}	0.27	37		
^{155}Sm	β^-	22.4 m	3×10^{-2}	0.20			
^{156}Sm	β^-	9.4 h	1×10^{-2}	6×10^{-2}			
^{157}Sm	β^-	8.0 m	4×10^{-3}	3×10^{-2}			
^{151}Eu		47.77%	0.44	0.77			
$^{152\text{m}}\text{Eu}$	$\beta^-, \text{EC}, \beta^+$	9.3 h	5×10^{-7}	1×10^{-5}			
^{152}Eu	$\text{EC}, \beta^+, \beta^-$	12.4 y	5×10^{-7}	1×10^{-5}			
^{153}Eu		52.23%	0.16	0.38			
^{154}Eu	β^-, EC	8.5 y	2×10^{-4}	3×10^{-3}	31	6650	4500
^{155}Eu	β^-	4.96 y	3×10^{-2}	0.21	0.1	5090	162
^{152}Gd		0.20%	6×10^{-7}	1×10^{-5}			
^{154}Gd		2.15%	2×10^{-4}	3×10^{-3}			
^{155}Gd		14.7%	3×10^{-2}	0.21			
^{156}Gd		20.47%	1×10^{-2}	8×10^{-2}			
^{157}Gd		15.68%	6×10^{-3}	8×10^{-2}			
^{158}Gd		24.9%	4×10^{-3}	4×10^{-2}			
^{159}Gd	β^-	18.56 h	1×10^{-3}	2×10^{-2}			
^{160}Gd		21.9%	3×10^{-4}	1×10^{-2}			
^{161}Gd	β^-	3.6 m	7×10^{-5}	3×10^{-3}			
^{90}Zr		51.46%	5.94	2.12	143		
^{91}Zr		11.23%	5.92	2.43	609		
^{92}Zr		17.11%	5.99	2.93	663		
^{93}Zr	β^-	1.5×10^6 y	6.41	3.78	735	1.9	1.9
^{94}Zr		17.40%	6.45	4.30	789		
^{95}Zr	β^-	64.0 d	6.50	4.89	0	27900	0
^{96}Zr		2.80%	6.28	4.93	830		
^{97}Zr	β^-	16.8 h	5.93	5.46			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission		Gramms* ² per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	Yields* ¹ ²³⁹ Pu thermal n		1y	10y
⁹⁸ Zr	β^-	30.7 s	5.61	5.20			
⁹⁹ Zr	β^-	2.35 s	5.05	4.61			
^{93m} Nb	IT	13.6 y	6.09	3.59			
⁹³ Nb		100%	6.41	3.78			
^{94m} Nb	IT, β^-	6.26 m	3×10^{-4}	1×10^{-6}			
⁹⁴ Nb	β^-	2×10^4 y	5×10^{-4}	2×10^{-6}			
^{95m} Nb	IT, β^-	86.6 h	8×10^{-2}	7×10^{-2}			
⁹⁵ Nb	β^-	35.15 d	6.51	4.90			
⁹⁶ Nb	β^-	23.4 h	5×10^{-4}	4×10^{-3}			
^{97m} Nb	IT	53 s	5.52	5.12			
⁹⁷ Nb	β^-	74 m	5.95	5.58			
^{98m} Nb	IT	2.9 s	5.73	5.50			
⁹⁸ Nb	β^-	51 m	7×10^{-2}	0.20			
⁹⁹ Nb	β^-	2.6 m	1.88	2.27			
⁹⁹ Nb	β^-	15 s	3.87	4.11			
¹⁰⁰ Nb	β^-	1.5 s	3.11	3.28			
¹⁰⁰ Nb	β^-	3.1 s	3.11	3.28			
¹⁰¹ Nb	β^-	7.1 s	4.85	5.00			
¹²¹ Sb		57.25%	2×10^{-2}	4×10^{-2}	4.5		
^{122m} Sb	IT	4.2 m	1×10^{-6}	2×10^{-5}			
¹²² Sb	β^- , EC, β^+	2.70 d	2×10^{-6}	4×10^{-5}			
¹²³ Sb		42.75%	2×10^{-2}	6×10^{-2}	5.5		
^{124m} Sb	IT	20 m	3×10^{-6}	5×10^{-4}			
¹²⁴ Sb	β^-	60.3 d	1×10^{-5}	9×10^{-2}			
¹²⁵ Sb	β^-	2.77 y	3×10^{-2}	0.11			
^{126m} Sb	β^- , IT	19.0 m	5×10^{-2}	0.14			
¹²⁶ Sb	β^-	12.4 d	5×10^{-2}	0.22			
¹²⁷ Sb	β^-	3.85 d	0.11	0.52			
¹²⁸ Sb	β^-	10.4 m	0.35	0.70			
¹²⁸ Sb	β^-	9.0 h	5×10^{-2}	0.13			
¹²⁹ Sb	β^-	4.32 h	0.65	1.65			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission	Yields* ¹	Gramms* ² per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n		1y	10y
¹³⁰ Sb	β^-	6.5m	0.42	0.66			
¹³⁰ Sb	β^-	40m	1.51	1.78			
¹³¹ Sb	β^-	23m	2.25	3.00			
¹³² Sb	β^-	4.1m	1.66	1.67			
¹³² Sb	β^-	2.8m	2.78	2.50			
¹³³ Sb	β^-	2.3m	3.24	2.34			
¹³⁴ Sb	β^-	10.5s	1.70	0.89			
¹³⁵ Sb	β^-	1.7s	0.55	0.12			
⁹² Mo		15.86%	3×10^{-10}	—			
⁹⁴ Mo		9.12%	5×10^{-4}	2×10^{-6}			
⁹⁵ Mo		15.70%	6.50	4.89	770		
⁹⁶ Mo		16.50%	5×10^{-4}	4×10^{-3}	39		
⁹⁷ Mo		9.45%	5.95	5.58	838		
⁹⁸ Mo		23.75%	5.79	5.71	849		
⁹⁹ Mo	β^-	66.0h	6.14	6.43			
¹⁰⁰ Mo		9.62%	6.29	6.87	971		
¹⁰¹ Mo	β^-	14.6h	5.10	6.02			
¹⁰² Mo	β^-	11.5m	4.21	5.97			
¹⁰³ Mo	β^-	62s	2.85	5.51			
¹⁰⁴ Mo	β^-	1.1m	1.76	4.79			
¹⁰⁵ Mo	β^-	42s	0.76	2.27			
¹²⁰ Te		0.089%	2×10^{-12}	7×10^{-11}			
¹²² Te		2.46%	2×10^{-6}	4×10^{-5}			
¹²³ Te		0.87%	1×10^{-8}	2×10^{-7}			
	EC	1.24×10^{13} y					
¹²⁴ Te		4.61%	1×10^{-5}	9×10^{-2}			
^{125m} Te	IT	58d	5×10^{-3}	2×10^{-2}			
¹²⁵ Te		6.99%	3×10^{-2}	0.11	11		
¹²⁶ Te		18.71%	5×10^{-2}	0.22	20		
^{127m} Te	IT, β^-	109d	4×10^{-2}	9×10^{-2}			
¹²⁷ Te	β^-	9.35h	0.14	0.53			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission	Yields* ¹	Gramms* ² per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	²³⁹ Pu thermal n		1 y	10 y
¹²⁸ Te		31.79%	0.40	0.84	134		
^{129m} Te	IT, β^-	33.6d	0.10	0.28			
¹²⁹ Te	β^-	69.6m	0.61	1.59			
¹³⁰ Te		34.49%	2.00	2.68	426		
^{131m} Te	β^- , IT	30h	0.32	0.80			
¹³¹ Te	β^-	25.0m	2.50	3.22			
¹³² Te	β^-	78h	4.12	5.09			
^{133m} Te	β^- , IT	55.4m	4.19	3.67			
¹³³ Te	β^-	12.5m	2.74	3.11			
¹³⁴ Te	β^-	41.8m	6.38	5.31			
¹³⁵ Te	β^-	18s	3.39	1.82			
^{99m} Tc	IT, β^-	6.0h	5.40	5.66			
⁹⁹ Tc	β^-	2.1×10^5 y	6.14	6.43	835	14	14
¹⁰⁰ Tc	β^-	15.8s	1×10^{-4}	2×10^{-3}			
¹⁰¹ Tc	β^-	14m	5.10	6.04			
^{102m} Tc	β^- , IT	4.3m	4.21	6.03			
¹⁰² Tc	β^-	5.3m	3×10^{-5}	6×10^{-2}			
¹⁰³ Tc	β^-	50s	3.11	6.97			
¹⁰⁴ Tc	β^-	18.0m	1.83	6.01			
¹⁰⁵ Tc	β^-	7.6m	0.83	3.91			
¹⁰⁶ Tc	β^-	36s	0.39	3.42			
¹⁰⁷ Tc	β^-	21s	0.18	1.46			
⁷⁹ Br		50.52%	6×10^{-2}	3×10^{-2}			
⁸¹ Br		49.48%	0.20	0.18	15		
^{82m} Br	IT, β^-	6.1m	2×10^{-5}	7×10^{-5}			
⁸² Br	β^-	35.34h	6×10^{-5}	4×10^{-3}			
⁸³ Br	β^-	2.40h	0.53	0.29			
⁸⁴ Br	β^-	31.8m	0.94	0.44			
⁸⁵ Br	β^-	2.87m	1.18	0.60			
⁸⁶ Br	β^-	54s	1.87	0.74			
⁸⁷ Br	β^- , n	55.7s	2.22	0.89			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission		Gramms*2 per tonne at 10y	Curies*2 per tonne at	
			²³⁵ U thermal n	Yields*1 ²³⁹ Pu thermal n		1 y	10 y
⁸⁸ Br	β^- , n	16.2 s	3.13	1.06			
⁸⁹ Br	β^- , n	4.5 s	3.32	0.76			
⁹⁰ Br	β^- , n	1.63 s	3.51	0.48			
¹²⁶ I	EC, β^-	13.0 d	2×10^{-6}	6×10^{-8}			
¹²⁷ I		100%	0.14	0.53	40		
¹²⁸ I	β^- , EC, β^+	25.0 m	4×10^{-5}	2×10^{-4}			
¹²⁹ I	β^-	1.57×10^7 y	0.85	1.69	233	0.04	0.04
^{130m} I	IT, β^-	9.0 m	2×10^{-4}	2×10^{-3}			
¹³⁰ I	β^-	12.36 h	2×10^{-4}	4×10^{-3}			
¹³¹ I	β^-	8.04 d	2.77	3.89			
¹³² I	β^-	2.38 h	4.13	5.16			
¹³³ I	β^-	20.8 h	6.76	6.83			
¹³⁴ I	β^-	52.0 m	7.18	7.18			
¹³⁵ I	β^-	6.59 h	6.39	6.04			
¹³⁶ I	β^-	83 s	3.49	1.91			
¹³⁷ I	β^-	24.2 s	3.84	3.82			
¹³⁸ I	β^-	6.3 s	2.28	1.94			
¹³⁹ I	β^-	2.3 s	1.25	0.76			
¹⁴⁰ I	β^-	0.87 s	0.64	8×10^{-2}			
⁹⁶ Ru		5.46%	-	-			
⁹⁸ Ru		1.87%	9×10^{-7}	4×10^{-6}			
⁹⁹ Ru		12.63%	6.14	6.43			
¹⁰⁰ Ru		12.53%	1×10^{-4}	2×10^{-3}	56		
¹⁰¹ Ru		17.02%	5.10	6.04	776		
¹⁰² Ru		31.6%	4.21	6.09	768		
¹⁰³ Ru	β^-	39.8 d	3.11	6.97	0	2070	0
¹⁰⁴ Ru		18.87%	1.83	6.03	538		
¹⁰⁵ Ru	β^-	4.44 h	0.95	4.17			
¹⁰⁶ Ru	β^-	368 d	0.39	4.25	0.2	273 000	550
¹⁰⁷ Ru	β^-	3.8 m	0.19	2.89			
¹⁰⁸ Ru	β^-	4.5 m	7×10^{-2}	2.44			
¹⁰⁹ Ru	β^-	34.5 s	3×10^{-2}	1.23			

Nuclide	Decay mode	Natural Abundance or Half-life	Fission ^{235}U thermal n	Yields* ¹ ^{239}Pu thermal n	Gramms per tonne at 10y	Curies* ² per tonne at	
						1 y	10 y
$^{103\text{m}}\text{Rh}$	IT	56.1m	3.07	6.90			
^{103}Rh		100%	3.11	6.97	392		
$^{104\text{m}}\text{Rh}$	IT, β^-	4.4m	5×10^{-8}	2×10^{-5}			
^{104}Rh	β^- , EC	42 s	1×10^{-7}	3×10^{-5}			
$^{105\text{m}}\text{Rh}$	IT	45 s	0.20	0.89			
^{105}Rh	β^-	35.5 h	0.95	5.39			
$^{106\text{m}}\text{Rh}$	β^-	2.2 h	4×10^{-6}	2×10^{-3}			
^{106}Rh	β^-	30 s	0.39	4.25			
^{107}Rh	β^-	22m	0.19	2.97			
^{108}Rh	β^-	16.8 s	7×10^{-2}	2.53			
$^{109\text{m}}\text{Rh}$	IT	50 s	1×10^{-2}	0.69			
^{109}Rh	β^-	80 s	3×10^{-2}	1.38			
^{102}Pd		0.96%	8×10^{-8}	4×10^{-9}			
^{104}Pd		10.97%	1×10^{-7}	3×10^{-5}	246		
^{105}Pd		22.2%	0.95	5.39	294		
^{106}Pd		27.3%	0.39	4.26	448		
$^{107\text{m}}\text{Pd}$	IT	21.3 s	6×10^{-9}	2×10^{-5}			
^{107}Pd	β^-	6.5×10^6 y	0.19	3.00	236		
^{108}Pd		26.7%	7×10^{-2}	2.53	156		
$^{109\text{m}}\text{Pd}$	IT	4.69m	1×10^{-2}	0.69			
^{109}Pd	β^-	13.46 h	3×10^{-2}	1.38			
^{110}Pd		11.8%	2×10^{-2}	0.74	34		
$^{111\text{m}}\text{Pd}$	IT, β^-	5.5 h	3×10^{-4}	9×10^{-3}			
^{111}Pd	β^-	22m	2×10^{-2}	0.27			
^{112}Pd	β^-	20.1 h	1×10^{-2}	0.11			
^{113}Pd	β^-	1.6m	1×10^{-2}	8×10^{-2}			
^{114}Pd	β^-	2.4m	1×10^{-2}	5×10^{-2}			
^{115}Pd	β^-	38 s	1×10^{-3}	2×10^{-2}			

註 文献によって半減期に差があり、この表にある半減期を使って右側のらの Curie 数を計算すると一致しないことがある。

*1 累積収率の値

*2 33000 MWD LWR Fuel (ORNL-4776)

表 2.7 許 容 濃 度
(ICRP-1958 による。○印は科技庁告示の値)

(a) O 族 元 素

放射性核種と 境変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]	水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]
^{85m} Kr ₃₆ β ⁻ , γ (沈積)	全 身			6 × 10 ⁻⁶		○ 10 ⁻⁶
⁸⁵ Kr ₃₆ β (沈積)	全 身			10 ⁻⁵		○ 3 × 10 ⁻⁶
⁸⁷ Kr ₃₆ β ⁻ , γ (沈積)	全 身			10 ⁻⁶		○ 2 × 10 ⁻⁷
^{131m} Xe ₅₄ γ, e ⁻ (浸漬)	全 身			2 × 10 ⁻⁵		○ 4 × 10 ⁻⁶
¹³³ Xe ₅₄ γ, e ⁻ (浸漬)	全 身			10 ⁻⁵		○ 3 × 10 ⁻⁶
¹³⁵ Xe ₅₄ β ⁻ , γ (浸漬)	全 身			4 × 10 ⁻⁶		○ 10 ⁻⁶

(b) 1 族 元 素

放射性核種と 境変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]	水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]
⁸⁶ Rb ₃₇ β ⁻ , γ (可溶)	全 身	30	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷	7 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	脾 臓	30	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷	7 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	肝 臓	40	3 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	10 ⁻⁷
(不溶)	肺			7 × 10 ⁻⁸		○ 2 × 10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		7 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	○ 2 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻⁸
⁸⁷ Rb ₃₇ β ⁻ (可溶)	脾 臓	200	3 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁷	○ 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
	全 身	200	4 × 10 ⁻³	6 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
	肝 臓	200	5 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
	(不溶)	肺			7 × 10 ⁻⁸	
	消化管(大腸下部)		5 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷

放射性核種と 衰変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q〔μCi〕 **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 〔μCi/cm ³ 〕	空气中 〔μCi/cm ³ 〕	水 〔μCi/cm ³ 〕	空气中 〔μCi/cm ³ 〕
¹³¹ ₅₅ Cs e (可溶)	全身	700	0.07	10 ⁻⁵	0.02	4×10 ⁻⁶
	肝臓	800	0.09	10 ⁻⁵	0.03	4×10 ⁻⁶
(不溶)	肺			3×10 ⁻⁶		○10 ⁻⁶
	消化管(大腸下部)		0.03	5×10 ⁻⁶	○9×10 ⁻³	2×10 ⁻⁶
^{134m} ₅₅ Cs β ⁻ , γ, e ⁻ (可溶)	消化管(胃)		0.2	4×10 ⁻⁵	0.06	10 ⁻⁵
	消化管(大腸上部)		0.03	6×10 ⁻⁶	○0.01	○2×10 ⁻⁶
¹³⁴ ₅₅ Cs β ⁻ , γ (可溶)	全身	20	3×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁸	○9×10 ⁻⁵	10 ⁻⁸
	肺			10 ⁻⁸		○4×10 ⁻⁹
(不溶)	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	7×10 ⁻⁹
	肝臓	200	3×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	○10 ⁻³	2×10 ⁻⁷
¹³⁵ ₅₅ Cs β ⁻ (可溶)	脾臓	300	4×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	10 ⁻³	2×10 ⁻⁷
	全身	300	4×10 ⁻³	6×10 ⁻⁷	10 ⁻³	2×10 ⁻⁷
(不溶)	消化管(大腸下部)		7×10 ⁻³	10 ⁻⁶	2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷
	肺			9×10 ⁻⁸		○3×10 ⁻⁸
¹³⁶ ₅₅ Cs β ⁻ , γ (可溶)	全身	30	2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	9×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	肺			2×10 ⁻⁷		○6×10 ⁻⁸
(不溶)	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	○6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	全身	30	4×10 ⁻⁴	6×10 ⁻⁸	○2×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁸
¹³⁷ ₅₅ Cs β ⁻ , γ, e ⁻ (可溶)	肝臓	40	5×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁸	2×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁸
	脾臓	50	6×10 ⁻⁴	9×10 ⁻⁸	2×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁸
筋肉	50	7×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁸	
	肺			10 ⁻⁸		○5×10 ⁻⁹
(不溶)	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		3×10 ⁻³	6×10 ⁻⁷	○10 ⁻³	2×10 ⁻⁷
¹⁰⁵ ₄₇ Ag ε, γ (可溶)	肺			8×10 ⁻⁸		○3×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		3×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	10 ⁻³	2×10 ⁻⁷
^{110m} ₄₇ Ag β ⁻ , γ (可溶)	消化管(大腸下部)		9×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷	○3×10 ⁻⁴	7×10 ⁻⁸
	肺			10 ⁻³		○3×10 ⁻⁹
(不溶)	消化管(大腸下部)		9×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	○4×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
¹¹¹ ₄₇ Ag β ⁻ , γ (可溶)	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	○4×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	○8×10 ⁻⁸

(c) 2 族 元 素

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度				
			1 週 4 0 時間		1 週 168 時間		
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	
$^{85\text{m}}_{38}\text{Sr}$ ϵ, γ	(可溶)	消化管(小腸)		0.2	4×10^{-5}	○ 0.07	○ 10^{-5}
	(不溶)	消化管(小腸)		0.2	3×10^{-5}	0.07	10^{-5}
$^{85}_{38}\text{Sr}$ ϵ, γ	(可溶)	全 身	60	3×10^{-3}	2×10^{-7}	○ 10^{-3}	8×10^{-8}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		5×10^{-3}	10^{-7} 9×10^{-7}	2×10^{-3}	○ 4×10^{-8} 3×10^{-7}
$^{89}_{38}\text{Sr}$ β^-	(可溶)	骨	4	3×10^{-4}	3×10^{-8}	○ 10^{-4}	○ 10^{-8}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	4×10^{-8} 10^{-7}	3×10^{-4}	10^{-8} 5×10^{-8}
$^{90}_{38}\text{Sr}$ β^-	(可溶)	骨	2	10^{-5}	10^{-9}	○ 4×10^{-6}	○ 4×10^{-10}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		10^{-3}	5×10^{-9} 2×10^{-7}	4×10^{-4}	2×10^{-9} 6×10^{-8}
$^{91}_{38}\text{Sr}$ β^-, γ	(可溶)	消化管(大腸下部)		2×10^{-3}	4×10^{-7}	7×10^{-4}	2×10^{-7}
	(不溶)	消化管(大腸下部)		10^{-3}	3×10^{-7}	○ 5×10^{-4}	○ 9×10^{-8}
$^{92}_{38}\text{Sr}$ β^-, γ	(可溶)	消化管(大腸上部)		2×10^{-3}	4×10^{-7}	7×10^{-4}	2×10^{-7}
	(不溶)	消化管(大腸上部)		2×10^{-3}	3×10^{-7}	○ 6×10^{-4}	○ 10^{-7}
$^{131}_{56}\text{Ba}$ ϵ, γ	(可溶)	消化管(大腸下部)		5×10^{-3}	10^{-6}	2×10^{-3}	4×10^{-7}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		5×10^{-3}	4×10^{-7} 9×10^{-7}	○ 2×10^{-3}	○ 10^{-7} 3×10^{-7}
$^{140}_{56}\text{Ba}$ β^-, γ	(可溶)	消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-8}
	(不溶)	骨	4	6×10^{-3}	10^{-7}	2×10^{-3}	4×10^{-8}
		肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	4×10^{-8} 10^{-7}	○ 2×10^{-4}	○ 10^{-8} 4×10^{-8}

(d) 3 族 元 素

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度				
			1 週 4 0 時間		1 週 168 時間		
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	
$^{90}_{39}\text{Y}$ β^-	(可溶)	消化管(大腸下部)		6×10^{-4}	10^{-7}	○ 2×10^{-4}	4×10^{-8}
	(不溶)	消化管(大腸下部)		6×10^{-4}	10^{-7}	2×10^{-4}	○ 3×10^{-8}
$^{91\text{m}}_{39}\text{Y}$ β^-, γ	(可溶)	消化管(小腸)		0.1	2×10^{-5}	○ 0.03	8×10^{-6}
	(不溶)	消化管(小腸)		0.1	2×10^{-5}	0.03	○ 6×10^{-6}

放射性核種と 衰変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q [μCi] **	最大許容濃度				
			1週40時間		1週168時間		
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	
$^{91}_{39}\text{Y}$ β^- , γ	(可溶)	5	消化管(大腸下部) 骨	8×10^{-4} 0.8	2×10^{-7} 7×10^{-8}	3×10^{-4} 0.3	6×10^{-8} 10^{-8}
	(不溶)		肺 消化管(大腸下部)	8×10^{-4}	3×10^{-8} 10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}
$^{92}_{39}\text{Y}$ β^- , γ	(可溶)		消化管(大腸上部)	2×10^{-3}	4×10^{-7}	6×10^{-4}	10^{-7}
	(不溶)		消化管(大腸上部)	2×10^{-3}	3×10^{-7}	6×10^{-4}	10^{-7}
$^{93}_{39}\text{Y}$ β^- , γ , e^-	(可溶)		消化管(大腸下部)	8×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-8}
	(不溶)		消化管(大腸下部)	8×10^{-4}	10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}
$^{140}_{57}\text{La}$ β^- , γ	(可溶)		消化管(大腸下部)	7×10^{-4}	2×10^{-7}	2×10^{-4}	5×10^{-8}
	(不溶)		消化管(大腸下部)	7×10^{-4}	10^{-7}	4×10^{-4}	4×10^{-8}
$^{141}_{58}\text{Ce}$ β^- , γ	(可溶)	30	消化管(大腸下部)	3×10^{-3}	6×10^{-7}	9×10^{-4}	2×10^{-7}
			肝臓 骨	10 40	4×10^{-7} 6×10^{-7}	3 5	2×10^{-7} 2×10^{-7}
	(不溶)		肺		2×10^{-7}		5×10^{-8}
			消化管(大腸下部)	3×10^{-3}	5×10^{-7}	9×10^{-4}	2×10^{-7}
$^{143}_{58}\text{Ce}$ β^- , γ	(可溶)		消化管(大腸下部)	10^{-3}	3×10^{-7}	4×10^{-4}	9×10^{-8}
	(不溶)		消化管(大腸下部)	10^{-3}	2×10^{-7}	4×10^{-4}	7×10^{-8}
$^{144}_{58}\text{Ce}$ α , β^- , γ	(可溶)	5	消化管(大腸下部)	3×10^{-4}	8×10^{-8}	10^{-4}	3×10^{-8}
			骨	0.2	10^{-8}	0.08	3×10^{-9}
	(不溶)	6	肝臓	0.3	10^{-8}	0.1	4×10^{-9}
			肺 消化管(大腸下部)		6×10^{-9} 6×10^{-8}		2×10^{-9} 2×10^{-8}
$^{142}_{59}\text{Pr}$ β^-	(可溶)		消化管(大腸下部)	9×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	7×10^{-8}
	(不溶)		消化管(大腸下部)	9×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}
$^{143}_{59}\text{Pr}$ β^-	(可溶)		消化管(大腸下部)	10^{-3}	3×10^{-7}	5×10^{-4}	10^{-7}
	(不溶)		肺 消化管(大腸下部)		2×10^{-7} 3×10^{-7}		6×10^{-8} 9×10^{-8}
$^{144}_{60}\text{Nd}$ α	(可溶)	0.1	骨	2×10^{-3}	8×10^{-11}	7×10^{-4}	3×10^{-11}
			消化管(大腸下部)	2×10^{-3}	5×10^{-7}	8×10^{-4}	2×10^{-7}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		3×10^{-10} 4×10^{-7}		10^{-10} 10^{-7}	
$^{147}_{60}\text{Nd}$ α , β^- , γ	(可溶)	10	消化管(大腸下部)	2×10^{-3}	4×10^{-7}	6×10^{-4}	10^{-7}
			肝臓	8	4×10^{-7}	3	10^{-7}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		2×10^{-7} 2×10^{-3}		8×10^{-8} 3×10^{-7}	10^{-7}

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q(μCi) **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]	水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]
¹⁴⁹ ₆₀ Nd β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		8×10 ⁻³	2×10 ⁻⁶	○ 3×10 ⁻³	6×10 ⁻⁷
	(不溶) 消化管(大腸上部)		8×10 ⁻³	10 ⁻⁶	3×10 ⁻³	○ 5×10 ⁻⁷
¹⁴⁷ ₆₁ Pm α, β ⁻	(可溶) 消化管(大腸下部)	60	6×10 ⁻³	10 ⁻⁶	○ 2×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷
	骨		1	6×10 ⁻⁸	0.5	○ 2×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			10 ⁻⁷		3×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		6×10 ⁻³	10 ⁻⁶	2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷
¹⁴⁹ ₆₁ Pm β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	○ 4×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	(不溶) 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	○ 8×10 ⁻⁸
¹⁴⁷ ₆₂ Sm α	(可溶) 骨	0.1	2×10 ⁻³	7×10 ⁻¹¹	○ 6×10 ⁻⁴	○ 2×10 ⁻¹¹
	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	7×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷
	(不溶) 肺			3×10 ⁻¹⁰		9×10 ⁻¹¹
	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	7×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
¹⁵¹ ₆₂ Sm β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)	100	0.01	2×10 ⁻⁶	○ 4×10 ⁻³	8×10 ⁻⁷
	骨		2	6×10 ⁻⁸	0.5	○ 2×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			10 ⁻⁷		5×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		0.01	2×10 ⁻⁶	4×10 ⁻³	7×10 ⁻⁷
¹⁵³ ₆₂ Sm β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	○ 8×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷
	(不溶) 消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	8×10 ⁻⁴	○ 10 ⁻⁷
¹⁵² ₆₃ Eu(9.2時間) β ⁻ , ε, γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	○ 6×10 ⁻⁴	○ 10 ⁻⁷
	(不溶) 消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
¹⁵² ₆₃ Eu(13年) β ⁻ , ε, γ	(可溶) 消化管(大腸下部)	20	2×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	○ 8×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷
	腎臓		0.3	10 ⁻⁸	0.09	○ 4×10 ⁻⁹
	(不溶) 肺			2×10 ⁻⁸		6×10 ⁻⁹
	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	8×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
¹⁵⁴ ₆₃ Eu β ⁻ , ε, γ	(可溶) 消化管(大腸下部)	5	6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	○ 2×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁸
	腎臓		0.09	4×10 ⁻⁹	0.03	○ 10 ⁻⁹
	骨		0.09	4×10 ⁻⁹	0.03	10 ⁻⁹
	(不溶) 肺			7×10 ⁻⁹		2×10 ⁻⁹
	消化管(大腸下部)		6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁸
¹⁵⁵ ₆₃ Eu β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)	70	6×10 ⁻³	10 ⁻⁶	○ 2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷
	腎臓		2	9×10 ⁻⁸	0.7	○ 3×10 ⁻⁸
	骨		2	10 ⁻⁷	0.8	3×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			7×10 ⁻⁸		3×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		6×10 ⁻³	10 ⁻⁶	2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷
¹⁵³ ₆₄ Gd ε, γ, e ⁻	(可溶) 消化管(大腸下部)	90	6×10 ⁻³	10 ⁻⁶	○ 2×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷
	骨		5	2×10 ⁻⁷	2	8×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			9×10 ⁻⁸		○ 3×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		6×10 ⁻³	10 ⁻⁶	2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q〔μCi〕 **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 〔μCi/cm ³ 〕	空 気 中 〔μCi/cm ³ 〕	水 中 〔μCi/cm ³ 〕	空 気 中 〔μCi/cm ³ 〕
¹⁵⁹ ₆₄ Gd β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	○ 8×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷
	(不溶) 消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	8×10 ⁻⁴	○ 10 ⁻⁷
¹⁶⁰ ₆₅ Tb β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	○ 4×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	(可溶) 骨	20	2	10 ⁻⁷	0.8	3×10 ⁻⁸
	(可溶) 腎 臓	20	3	10 ⁻⁷	1	4×10 ⁻⁸
	(可溶) 全 身	20	3	10 ⁻⁷	1	5×10 ⁻⁸
(不溶)	肺			3×10 ⁻⁸		○ 10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁸
¹⁶⁵ ₆₆ Dy β ⁻ , γ	(可溶) 消化管(大腸上部)		0.01	3×10 ⁻⁶	○ 4×10 ⁻³	9×10 ⁻⁷
	(不溶) 消化管(大腸上部)		0.01	2×10 ⁻⁶	4×10 ⁻³	○ 7×10 ⁻⁷
¹⁶⁶ ₆₆ Dy β ⁻ , γ, e ⁻	(可溶) 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	○ 4×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁸
	(不溶) 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	○ 7×10 ⁻⁸

(e) 4, 5 および 6 族元素

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q〔μCi〕 **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 〔μCi/cm ³ 〕	空 気 中 〔μCi/cm ³ 〕	水 中 〔μCi/cm ³ 〕	空 気 中 〔μCi/cm ³ 〕
⁹³ ₄₀ Zr β ⁻ , γ, e ⁻	(可溶) 消化管(大腸下部)		0.02	5×10 ⁻⁶	○ 8×10 ⁻³	2×10 ⁻⁶
	(可溶) 骨	100	3	10 ⁻⁷	0.9	○ 4×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			3×10 ⁻⁷		10 ⁻⁷
(不溶)	消化管(大腸下部)		0.02	4×10 ⁻⁶	8×10 ⁻³	10 ⁻⁶
	⁹⁵ ₄₀ Zr β ⁻ , γ, e ⁻		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	○ 6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
(可溶)	全 身	20	3	10 ⁻⁷	1	4×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			3×10 ⁻⁸		○ 10 ⁻⁸
(不溶)	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	⁹⁷ ₄₀ Zr β ⁻ , γ		5×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	○ 2×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁸
(可溶)	消化管(大腸下部)		5×10 ⁻⁴	9×10 ⁻⁸	2×10 ⁻⁴	○ 3×10 ⁻⁸
	^{93m} ₄₁ Nb γ, e ⁻		0.01	3×10 ⁻⁶	○ 4×10 ⁻³	9×10 ⁻⁷
(可溶)	骨	200	3	10 ⁻⁷	1	○ 4×10 ⁻⁸
	(不溶) 肺			2×10 ⁻⁷		5×10 ⁻⁸
(不溶)	消化管(大腸下部)		0.01	2×10 ⁻⁶	4×10 ⁻³	7×10 ⁻⁷
	⁹⁵ ₄₁ Nb β ⁻ , γ		3×10 ⁻³	6×10 ⁻⁷	○ 10 ⁻³	2×10 ⁻⁷
(可溶)	全 身	40	10	5×10 ⁻⁷	4	2×10 ⁻⁷
	(不溶) 肺			10 ⁻⁷		○ 3×10 ⁻⁸
(不溶)	消化管(大腸下部)		3×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	10 ⁻³	2×10 ⁻⁷

放射性核種と 衰変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{97}_{41}\text{Nb}$ β^- , γ	(可溶) 消化管(大腸上部)		0.03	6×10^{-6}	9×10^{-3}	2×10^{-6}
	(不溶) 消化管(大腸上部)		0.03	5×10^{-6}	9×10^{-3}	2×10^{-6}
$^{122}_{51}\text{Sb}$ β^- , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-8}
	(不溶) 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	10^{-7}	3×10^{-4}	5×10^{-8}
$^{124}_{51}\text{Sb}$ β^- , γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	2×10^{-7}	2×10^{-4}	5×10^{-8}
	(可溶) 全 身	10	0.02	2×10^{-7}	6×10^{-3}	7×10^{-8}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	2×10^{-8} 10^{-7}	2×10^{-4}	7×10^{-9} 4×10^{-8}
$^{125}_{51}\text{Sb}$ β^- , γ , e^-	(可溶) 消化管(大腸下部)		3×10^{-3}	6×10^{-7}	10^{-3}	2×10^{-7}
	(可溶) 肺	40	0.04	5×10^{-7}	0.01	2×10^{-7}
	(可溶) 全 身	60	0.05	6×10^{-7}	0.02	2×10^{-7}
	(可溶) 骨	70	0.06	8×10^{-7}	0.02	2×10^{-7}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		3×10^{-3}	3×10^{-8} 5×10^{-7}	10^{-3}	9×10^{-9} 2×10^{-7}
$^{99}_{42}\text{Mo}$ β^- , γ	(可溶) 腎 臓	8	5×10^{-3}	7×10^{-7}	2×10^{-3}	3×10^{-7}
	(可溶) 消化管(大腸下部)		7×10^{-3}	2×10^{-6}	2×10^{-3}	5×10^{-7}
	(不溶) 消化管(大腸下部)		10^{-3}	2×10^{-7}	4×10^{-4}	7×10^{-8}
$^{125m}_{52}\text{Te}$ γ , e^-	(可溶) 腎 臓	20	5×10^{-3}	4×10^{-7}	2×10^{-3}	10^{-7}
	(可溶) 消化管(大腸下部)		5×10^{-3}	10^{-6}	2×10^{-3}	4×10^{-7}
	(可溶) 畢 丸	20	6×10^{-3}	5×10^{-7}	2×10^{-3}	2×10^{-7}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		3×10^{-3}	10^{-7} 6×10^{-7}	10^{-3}	4×10^{-8} 2×10^{-7}
$^{127m}_{52}\text{Te}$ β^- , γ , e^-	(可溶) 腎 臓	7	2×10^{-3}	10^{-7}	6×10^{-4}	5×10^{-8}
	(可溶) 畢 丸	7	2×10^{-3}	10^{-7}	7×10^{-4}	5×10^{-8}
	(可溶) 消化管(大腸下部)		2×10^{-3}	5×10^{-7}	8×10^{-4}	2×10^{-7}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		2×10^{-3}	4×10^{-8} 3×10^{-7}	5×10^{-4}	10^{-8} 9×10^{-8}
$^{127}_{52}\text{Te}$ β^- , γ , e^-	(可溶) 消化管(大腸下部)		8×10^{-3}	2×10^{-6}	3×10^{-3}	6×10^{-7}
	(不溶) 消化管(大腸下部)		5×10^{-3}	9×10^{-7}	2×10^{-3}	3×10^{-7}
$^{129m}_{52}\text{Te}$ β^- , γ , e^-	(可溶) 消化管(大腸下部)		10^{-3}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	7×10^{-8}
	(可溶) 腎 臓	3	10^{-3}	8×10^{-8}	4×10^{-4}	3×10^{-8}
	(可溶) 畢 丸	3	10^{-3}	9×10^{-8}	4×10^{-4}	3×10^{-8}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		6×10^{-4}	3×10^{-8} 10^{-7}	2×10^{-4}	10^{-8} 4×10^{-8}
$^{129}_{52}\text{Te}$ β^- , γ , e^-	(可溶) 消化管(胃)		0.02	5×10^{-6}	8×10^{-3}	2×10^{-6}
	(不溶) 消化管(大腸上部)		0.02	4×10^{-6}	8×10^{-3}	10^{-6}

放射性核種と 変換の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]	水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]
^{131m} ₅₂ Te (可溶) β, γ, e ⁻ (不溶)	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	○ 4×10 ⁻⁴	○ 6×10 ⁻⁸
¹³² ₅₂ Te (可溶) β ⁻ , γ, e ⁻ (不溶)	消化管(大腸下部)		9×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁴	7×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	○ 2×10 ⁻⁴	○ 4×10 ⁻⁸

(f) 7 族元素

放射性核種と 変換の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]	水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]
⁸² ₃₅ Br (可溶) β ⁻ , γ (不溶)	全 身	10	8×10 ⁻³	10 ⁻⁶	3×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷
	消化管(小 腸)		8×10 ⁻³	2×10 ⁻⁶	3×10 ⁻³	6×10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	○ 4×10 ⁻⁴	○ 6×10 ⁻⁸
¹²⁶ ₅₃ I (可溶) β ⁻ , ε, γ (不溶)	甲 状 腺	1	5×10 ⁻⁵	8×10 ⁻⁹	○ 2×10 ⁻⁵	○ 3×10 ⁻⁹
	肺 消化管(大腸下部)		3×10 ⁻³	3×10 ⁻⁷ 5×10 ⁻⁷	9×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ 2×10 ⁻⁷
¹²⁹ ₅₃ I (可溶) β ⁻ , γ, e ⁻ (不溶)	甲 状 腺	3	10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁹	○ 4×10 ⁻⁶	○ 6×10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		6×10 ⁻³	7×10 ⁻⁸ 10 ⁻⁶	2×10 ⁻³	2×10 ⁻⁸ 4×10 ⁻⁷
¹³¹ ₅₃ I (可溶) β ⁻ , γ, e ⁻ (不溶)	甲 状 腺	0.7	6×10 ⁻⁵	9×10 ⁻⁹	○ 2×10 ⁻⁵	○ 3×10 ⁻⁹
	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
	肺			3×10 ⁻⁷		10 ⁻⁷
¹³² ₅₃ I (可溶) β ⁻ , γ, e ⁻ (不溶)	甲 状 腺	0.3	2×10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	○ 6×10 ⁻⁴	○ 8×10 ⁻⁸
	消化管(大腸上部)		5×10 ⁻³	9×10 ⁻⁷	2×10 ⁻³	3×10 ⁻⁷
¹³³ ₅₃ I (可溶) β ⁻ , γ, e ⁻ (不溶)	甲 状 腺	0.3	2×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁸	○ 7×10 ⁻⁵	○ 10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2×10 ⁻⁷	4×10 ⁻⁴	7×10 ⁻⁸
¹³⁴ ₅₃ I (可溶) β ⁻ , γ (不溶)	甲 状 腺	0.2	4×10 ⁻³	5×10 ⁻⁷	○ 10 ⁻³	○ 2×10 ⁻⁷
	消化管(胃)		0.02	3×10 ⁻⁶	6×10 ⁻³	10 ⁻⁶
¹³⁵ ₅₃ I (可溶) β ⁻ , γ, e ⁻ (不溶)	甲 状 腺	0.3	7×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	○ 2×10 ⁻⁴	○ 4×10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		2×10 ⁻³	4×10 ⁻⁷	7×10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
^{96m} ₄₃ Tc (可溶) ε, γ, e ⁻ (不溶)	消化管(大腸下部)		0.4	8×10 ⁻⁵	○ 0.1	3×10 ⁻⁵
	肺 消化管(大腸下部)		0.3	3×10 ⁻⁵ 5×10 ⁻⁵	0.1	○ 10 ⁻⁵ 2×10 ⁻⁵

放射性核種と 変換の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{96}_{43}\text{Tc}$ ϵ, γ	(可溶)	消化管(大腸下部)	3×10^{-3}	6×10^{-7}	10^{-3}	2×10^{-7}
	(不溶)	消化管(大腸下部)	10^{-3}	2×10^{-7}	$\circ 5 \times 10^{-4}$	$\circ 8 \times 10^{-8}$
$^{97m}_{43}\text{Tc}$ ϵ, γ, e^{-}	(可溶)	消化管(大腸下部)	0.01	2×10^{-6}	4×10^{-3}	8×10^{-7}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)	5×10^{-3}	2×10^{-7} 9×10^{-7}	$\circ 2 \times 10^{-3}$	$\circ 5 \times 10^{-8}$ 3×10^{-7}
$^{97}_{43}\text{Tc}$ e	(可溶)	消化管(大腸下部) 腎臓	0.05 60	10^{-5} 10^{-5}	0.02 0.04	4×10^{-6} 4×10^{-6}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)	0.02	3×10^{-7} 4×10^{-6}	$\circ 8 \times 10^{-3}$	$\circ 10^{-7}$ 10^{-6}
	(可溶)	消化管(大腸上部)	0.2	4×10^{-5}	0.06	10^{-5}
$^{99m}_{43}\text{Tc}$ β^{-}, γ	(可溶)	消化管(大腸上部)	0.08	10^{-5}	$\circ 0.03$	5×10^{-6}
	(不溶)	消化管(大腸上部)	0.01	2×10^{-6}	3×10^{-3}	7×10^{-7}
$^{99}_{43}\text{Tc}$ β^{-}	(可溶)	消化管(大腸下部)	5×10^{-3}	8×10^{-7}	$\circ 2 \times 10^{-3}$	$\circ 2 \times 10^{-8}$ 3×10^{-7}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)		6×10^{-8} 8×10^{-7}		$\circ 2 \times 10^{-8}$ 3×10^{-7}

(g) 8 族元素

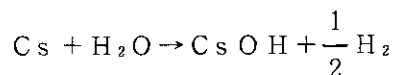
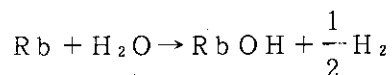
放射性核種と 変換の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{97}_{44}\text{Ru}$ ϵ, γ, e^{-}	(可溶)	消化管(大腸下部)	0.01	2×10^{-6}	4×10^{-3}	8×10^{-7}
	(不溶)	消化管(大腸下部)	0.01	2×10^{-6}	$\circ 3 \times 10^{-3}$	$\circ 6 \times 10^{-7}$
		肺		2×10^{-6}		7×10^{-7}
$^{103}_{44}\text{Ru}$ β^{-}, γ, e^{-}	(可溶)	消化管(大腸下部)	2×10^{-3}	5×10^{-7}	$\circ 8 \times 10^{-4}$	2×10^{-7}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)	2×10^{-3}	8×10^{-8} 4×10^{-7}	8×10^{-4}	$\circ 3 \times 10^{-8}$ 10^{-7}
$^{105}_{44}\text{Ru}$ β^{-}, γ, e^{-}	(可溶)	消化管(大腸上部)	3×10^{-3}	7×10^{-7}	$\circ 10^{-3}$	$\circ 2 \times 10^{-7}$
	(不溶)	消化管(大腸上部)	3×10^{-3}	5×10^{-7}	10^{-3}	2×10^{-7}
$^{106}_{44}\text{Ru}$ β^{-}, γ	(可溶)	消化管(大腸下部)	4×10^{-4}	8×10^{-8}	$\circ 10^{-4}$	3×10^{-8}
	(不溶)	肺 消化管(大腸下部)	3×10^{-4}	6×10^{-9} 6×10^{-8}	10^{-4}	$\circ 2 \times 10^{-9}$ 2×10^{-8}

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容身 体負荷量 q[μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{103m}_{45}\text{Rh}$ γ, e^-	(可溶) 消化管(胃)		0.4	8×10^{-5}	○ 0.1	3×10^{-5}
	(不溶) 消化管(胃)		0.3	6×10^{-5}	0.1	○ 2×10^{-5}
$^{105}_{45}\text{Rh}$ β^-, γ	(可溶) 消化管(大腸下部)		4×10^{-3}	8×10^{-7}	○ 10^{-3}	3×10^{-7}
	(不溶) 消化管(大腸下部)		3×10^{-3}	5×10^{-7}	10^{-3}	○ 2×10^{-7}
$^{103}_{46}\text{Pd}$ ϵ, γ, e^-	(可溶) 消化管(大腸下部)	20	0.01	2×10^{-6}	○ 3×10^{-3}	8×10^{-7}
	腎 臓		0.02	10^{-6}	7×10^{-3}	5×10^{-7}
	(不溶) 肺			7×10^{-7}		○ 3×10^{-7}
$^{109}_{46}\text{Pd}$ β^-, γ, e^-	(可溶) 消化管(大腸下部)		8×10^{-3}	10^{-6}	3×10^{-3}	5×10^{-7}
	(不溶) 消化管(大腸下部)		3×10^{-3}	6×10^{-7}	9×10^{-4}	2×10^{-7}
$^{109}_{46}\text{Pd}$ β^-, γ, e^-	(可溶) 消化管(大腸下部)		2×10^{-3}	4×10^{-7}	○ 7×10^{-4}	○ 10^{-7}
	(不溶) 消化管(大腸下部)		2×10^{-3}	4×10^{-7}	○ 7×10^{-4}	○ 10^{-7}

* 関連臓器は略

** 身体は標準人とする。

のが特徴である。化学的には非常に反応性に富んでおり、空气中常温で燃えておもに過酸化物 RbO_2 、 CsO_2 を生じる。水と激しく反応していちじるしく発熱し、水素を出して水酸化物になる。



アルコールとも同様の反応をする。したがって石油など酸素を含まない溶媒に入れ空気に触れないようにして貯える。また四塩化炭素にも入れてはいけない。

水酸化物は人体にふれると重傷のやけどとなり危険である。融点は、

水酸化ルビジウム $RbOH$ m.p. $300^\circ C$

水酸化セシウム $CsOH$ m.p. $272.3^\circ C$

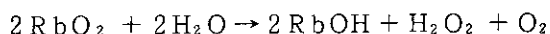
である。いずれもいちじるしく潮解性で水、アルコールにとけて発熱する。水に対する水酸化ルビジウムの溶解度 (wt %) は

$10^\circ C$ 58.53

$50^\circ C$ 67.3

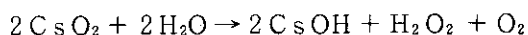
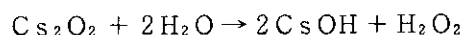
である。水酸化ルビジウム、水酸化セシウムいずれも強熱すると揮発する。

ルビジウムの酸化物としては Rb_2O 、 RbO_2 がある。過酸化ルビジウム RbO_2 はルビジウム金属を空气中で燃やすと生じる。比較的安定で融解することができ、さらに温度を上げると分解して O_2 を出す。また水と反応して過酸化水素と水酸化物を生じる。



Rb_2O は間接的な方法で合成できる。淡黄色で $400^\circ C$ 以上では分解する。

セシウムは空气中室温でもえ出し、ルビジウムと同様橙色の過酸化物 CsO_2 を生じる。 CsO_2 も RbO_2 同様に水と激しく反応する。ほかにセシウム酸化物として Cs_2O 、 Cs_2O_2 がある。 Cs_2O は $250^\circ C$ でいちじるしく気化して分解する。また水と激しく反応して水酸化物を生じる。酸化物の性質を表 2.8、表 2.9 および図 2.3 にまとめて示した^{3, 5, 22)}。



アルカリ金属はその電子構造から最外殻の電子 1 個を失って貴ガスと同じ電子構造になり、安定な +1 価イオンを生じる。金属半径とイオン半径は

	金属半径	イオン半径
Rb	2.48 A	1.48 A
Cs	2.67 A	1.69 A

のように大きな差がある。これは他のアルカリ金属であるリチウム、ナトリウム、カリウムも同じである。すなわちアルカリ金属では価電子が大きな体積を占めており、かなりとれやすく動きやすい電子であることを示している。このことは光電効果が大きいこと、 $M \rightarrow M^+$ のイオ

表2.8 F P 中 元 素 の 酸 化 物 (1)

酸化物	酸化セシウム Rb ₂ O	酸化セシウム Cs ₂ O	酸化銀(I) Ag ₂ O	酸化ストロンチウム SrO	酸化バリウム BaO	酸化イットリウム Y ₂ O ₃	酸化ランタン La ₂ O ₃	酸化セリウム(III) Ce ₂ O ₃
融点(°C)	>400 分解	~490 (N ₂ 中)	300 分解	2430	1923	2410	~2000	1692
沸点(°C)					~2000	~4300	~4000	
比重	3.72(0°C)	4.36(0°C)	7.22	4.7	5.72(等軸)	4.84	6.51(15°C)	6.9~7.0
色	淡黄	橙赤	暗褐	無	無	無	無	黄緑
水との反応	激しく反応して分解	激しく反応して分解	不溶	激しく反応して分解	反応して分解	熱水に不溶	難溶	不溶
特徴		真空中250°C昇華, 350°C分解	酸, アンモニア 水に可溶					200°C発火
酸化物	酸化セリウム(IV) CeO ₂	酸化プラセオジム(N) PrO ₂	酸化ネオジム Nd ₂ O ₃	酸化プロメチウム Pm ₂ O ₃	酸化サマリウム Sm ₂ O ₃	酸化ユウロピウム Eu ₂ O ₃	酸化ガドリニウム Gd ₂ O ₃	酸化ジルコニウム ZrO ₂
融点(°C)	1950(10~30mm)	>300°C分解	~1900	2320	2300±50	2050±30	2330±20	2715
沸点(°C)								4300
比重	7.3	6.82(20°C)	7.24(15°C)	6.85(立方)	7.43	7.42	7.41	5.6(ジルコニア)
色	淡黄	黒	青	淡紫紅	淡褐	無~淡紅	無	無
水との反応	不溶	不溶	不溶	不溶	不溶	難溶	わずかにとける	不溶
特徴	H ₂ SO ₄ , HNO ₃ に可 溶	>300°CはPr ₆ O ₁₁ (市販品の組成)	螢光	>800°C単斜			吸湿性	HF可溶

表 2.8 F P 中 元 素 の 酸 化 物 (2)

酸化物	酸化ニオブ(V) Nb ₂ O ₅	酸化アンチモン(III) Sb ₂ O ₃	酸化アンチモン(V) Sb ₂ O ₅	酸化モリブデン(V) MoO ₃	酸化モリブデン(VI) MoO ₃	二酸化テルル TeO ₂	酸化テクネチウム Tc ₂ O ₇	四酸化二ヨウ素 I ₂ O ₄
融点(°C)	1520	656 (斜方)	300分解	795	795	732.6	119.5	75分解(徐熱)
沸点(°C)		1425		昇華	昇華	790~940昇華	311	130分解(急熱)
比重	4.47	5.7	3.78	6.44(16°C)		5.75		4.2
色	無	無	黄	褐~黒	無	無	黄	黄
水との反応	不溶	難溶	不溶	不溶	微溶	難溶	無色溶液となる	微溶, 分解
特徴	H ₂ F, アルカリ可溶	昇華性, 互かに等軸晶(570°C以下)あり。	粉末		アルカリ, 濃H ₂ SO ₄ に可溶	HCl, HNO ₃ アルカリ可溶, アンモニア水不溶	揮発性, 糊解性 ジオキサン易溶	
酸化物	五酸化二ヨウ素 I ₂ O ₅	酸化ルテニウム(N) RuO ₂	酸化ルテニウム(IV) RuO ₄	酸化ロジウム(III) Rh ₂ O ₃	酸化パラジウム(II) PdO	酸化テルル TeO	三酸化テルル TeO ₃	
融点(°C)	275分解	分解	25.5	1150分解		分解	分解	
沸点(°C)		7.0	100.8(183mm)					
比重	4.79		3.28		8.31		5.07	
色	無	暗青	黄	灰黒	黒	黒	黄(粉末)	
水との反応	易溶, 13°Cで 187.4g/100ml水	不溶	微溶	不溶	不溶	不溶	不溶	
特徴		解離圧~36mm (930°C)	有毒, アルカリ溶液 易溶, 揮発性, 106°C分解		875°C, 解離圧 1 atm	無定形		

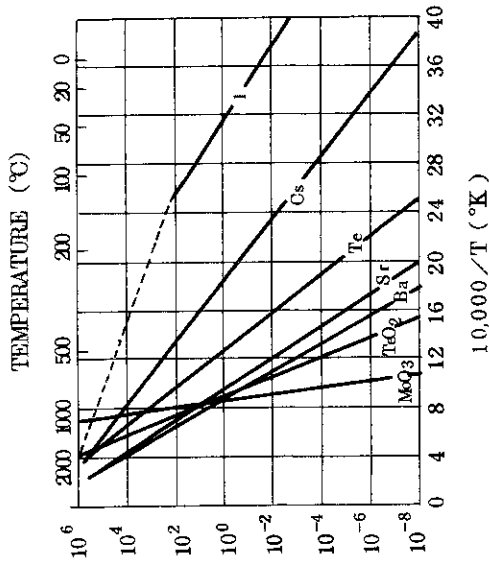


図 2.3 (a)
揮発性元素と酸化物の蒸気圧

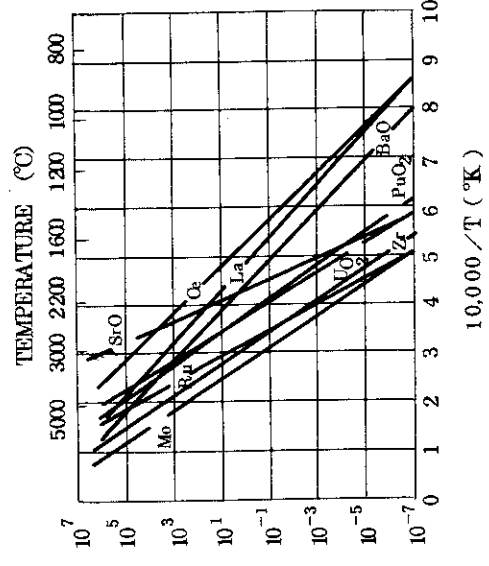


図 2.3 (b)
揮発性の低い元素と酸化物の蒸気圧

表 2.9 核分裂性物質, 核分裂生成物の酸化物生成自由エネルギー

Compound	$-\Delta F^{\circ}_T$ (kcal/gram-atom of oxygen)				
	500°K	1000°K	1500°K	2000°K	2500°K
ThO ₂	135	124	113	101	89
Ce ₂ O ₃	134	123	112	100	90
La ₂ O ₃	132	123	112	101	91
SrO	129	117	106	87	67
BaO	122	111	100	87	70
ZrO ₂	119	108	97	86	75
UO ₂	119	109	99	89	79
U ₃ O ₈	96	86	76	dec	
PuO ₂	128	102	92	dec	
Cs ₂ O	54	34	7	dec	
MoO ₂	55	46	36	26	dec
MoO ₃	50	40	32	29	26
TcO ₂	28	16	5	dec	
RuO ₂	15	5	dec		
RuO ₄	11	6	2	dec	

dec = decomposes

Note; 500°K = 227°C = 440°F; 1000°K = 727°C = 1340°F;
1500°K = 1227°C = 2240°F; 2000°K = 1727°C = 3140°F;
2500°K = 2227°C = 4040°F.

表 2.10 環境に放出される液体廃棄物中に含まれる放射性物質の核種組成

核 種	組 成 (%)	
	B W R	P W R
Cr — 51	2	2
Mn — 54	40	3
Fe — 59	7	2
Co — 58	3	10
Co — 60	30	15
Sr — 89	2	2
Sr — 90	1	1
I — 131	2	15
Cs — 134	5	20
Cs — 137	8	30

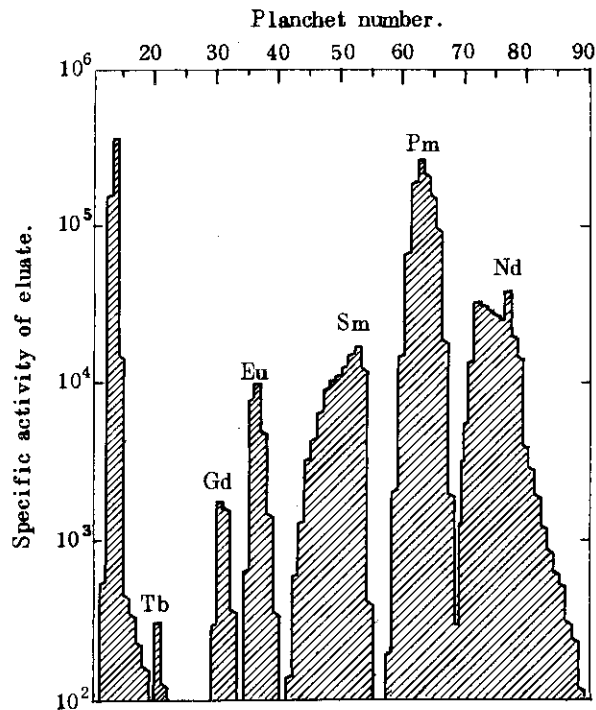


図 2.4 希土類元素のイオン交換分離

イオン交換樹脂Dowex 50, 250~500mesh
 溶離液 0.85~1M乳酸
 試料, 照射ウラン中の希土フラクション

ン化電圧が $M^+ \rightarrow M^{2+}$ のイオン化電圧に比べてひと桁小さいことにもあらわれている。

天然ルビジウム、セシウムそれぞれの同位体比、FP中ルビジウム、セシウムの核種を表 2.6 に示す。セシウムの安定同位体は ^{133}Cs のみであり、FP中の ^{134}Cs はFP ^{133}Cs の中性子捕獲によって生じる。 ^{137}Cs はFPの中で量も多く半減期も長い。 ^{134}Cs と共にFP中セシウムの代表的な核種である。天然ルビジウムにも 27.85%含まれている ^{87}Rb は長半減期の放射性核種である。その他のFPルビジウムは短半減期のものである。

ルビジウム、セシウム放射性核種の最大許容濃度を表 2.7 に示す。

トレーサー量の無担体 ^{137}Cs のような極低濃度のセシウムはガラス器やプラスチック器の壁に吸着されることがある。水のような環境試料を扱うときには採取後すぐに酸を加えて吸着を防ぐ。また濃度が低いので分析や測定のためにはイオン交換や共沈による濃縮が必要である。生物試料は灰化するがセシウムとその酸化物の揮発性による損失がないように注意しなければならない。

また、同じく沸点、融点が低いために酸化物燃料中のFPセシウムが燃料中を移動する。このとき酸化物燃料の酸素ポテンシャルによってセシウムの化学形が変化すると考えられている。酸素ポテンシャルとは酸素化学ポテンシャルの略であり、酸素の化学ポテンシャルすなわち部分モル自由エネルギーである。 $\text{UO}_{2\pm x}$ 、 $(\text{U} \cdot \text{Pu})\text{O}_{2\pm x}$ などの酸素分圧によって酸化物の安定性を表わすための定量的尺度として用いられる。

$$\mu_{\text{O}_2} \equiv \Delta G_{\text{O}_2} = RT \ln p_{\text{O}_2} \text{ [kcal/mole O}_2\text{]}$$

p_{O_2} は固相と平衡にある酸素の分圧で 10^{-50} 気圧のような値がふつうである。 μ_{O_2} は O/M 比、U/Pu 比によって変化する。 μ_{O_2} が小さいほど固相は安定で、燃焼率が上ると共に大きくなる傾向がある。

照射ウラン試料を扱う場合には照射容器や被覆内に入りこんでいるセシウム、親核種キセノンの損失によるマイナスが無視できないほど大きいことがある。

軽水炉からの 134 、 ^{137}Cs の環境への放出はPWRでは放出全放射能の約 1/2 を占めている (表 2.10)²³⁾。ただし全放射能は 0.01~0.25 Ci/年である (1972年)。これは水を回収して再使用し環境への放出をおさえているためである。また破損燃料を検出するための炉水中 ^{137}Cs の定量も可能である^{24, 25)}。燃焼率測定の対象ともなる^{1, 26, 27)}。

セシウムイオン Cs^+ は NH_4^+ 、 K^+ 、 Rb^+ と化学的によく似ており、いずれも通常イオンとして取り扱うことが多く、相互分離、分析はむずかしい。イオン交換のようなクロマトグラフィ的手法が有効である。ただしセシウムだけは、りんモリブデン酸その他の選択的な反応がある (表 2.4)^{28, 29, 30)}。燃焼率測定ではイオン交換分離後塩化白金酸セシウムとする方法がよい³¹⁾。

銀 (Ag)

物理的性質などを表 2.2 に示す。熱伝導度が大きいのが特徴である。展性も金について大きい。

化学的には貴金属*である。すなわち銀の化合物はたやすく金属に還元される。酸素とは直接反応せず、間接的に合成した酸化銀 Ag_2O (暗褐色粉末) も $160\sim 250^\circ\text{C}$ に加熱するだけで分解して金属になる。酸化物としてほかに AgO がある。黒色粉末で、 100°C 以上で $\text{Ag} + \text{O}_2$ となる。分析用試薬として最強の酸化剤である。以前は過酸化物 Ag_2O_2 と考えられたが、正しくは Ag^{I} , $\text{Ag}^{\text{III}}\text{O}_2$ である。硫黄とは化合しやすい。

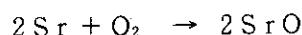
水溶液中では +1 価が安定。不溶性の塩 AgCl は分離分析に非常によく利用される(表 2.4)³²⁾。操作が簡単なこと、および妨害イオンが少ないことがその理由である。ただし塩酸の濃いとこ
ろでは AgCl_2^- などを生じてとける³³⁾。

天然および FP 中の銀の同位体を表 2.6 に示す。FP 中の銀の量は少ない。無担体トレーサ
量の ^{111}Ag はラジオコロイドになる。

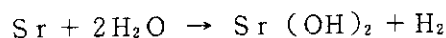
2.3 2 族元素

ストロンチウム (Sr) とバリウム (Ba)

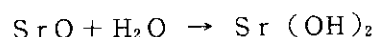
物理的性質などを表 2.2 に示す。カルシウムやラジウムと共にアルカリ土類金属に属し、銀
白色のやわらかい金属である。アルカリ金属よりは高い融点をもっている。酸化状態としては
+2 価が安定で、金属は空气中で酸化して +2 価になる。



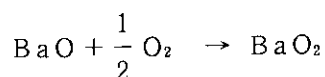
水とは激しく反応するがアルカリ金属ほどではない。やはり水素を出して水酸化物になる。



酸化物は白色無定形の塊である。酸化ストロンチウム SrO は石灰 (酸化カルシウム) CaO
に似た化合物で水と反応して水酸化ストロンチウムを生じる。

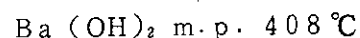
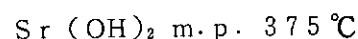


酸化バリウムの性質は表 2.8, 2.9 および図 2.3 を参照されたい。 SrO と同じく融点が高く
水と反応して多量の熱を出す。空气中で加熱すると過酸化バリウム BaO_2 を生じる。



さらに 500°C 以上では逆反応を起して解離する。

水酸化物は白色固体で潮解性があり、融点は、



である。さらに高温では分解する。水に少しとける。水に対する溶解度 (wt%) はつぎのよう
である³⁾。

* 化学では、Au, Ag, および Pt 族元素を貴金属という。貴金属元素の金属は化学変化をうけにくく、空気
中で加熱しても酸化物になりにくいいため、砂金のように、金属の形で産出する。イオン化傾向は小さい。

	25°C	50°C	70°C
Ca(OH) ₂ 粗粉	0.113	0.092	0.069
Ca(OH) ₂ 細粉	0.129	0.097	0.080
Sr(OH) ₂	1.00	2.50	5.11
Ba(OH) ₂	4.47	11.61	38.85 (75°C)

水溶液はアルカリ金属の水酸化物について強いアルカリ性を示す。

ストロンチウム、バリウムいずれも水溶液中では+2価が安定で、硫酸イオン、炭酸イオン、しゅう酸イオンなどと不溶性の塩をつくる。硫酸塩は水ばかりでなく酸にもとけない。このような不溶性塩は分析で利用される³⁴⁾(表2.4)。硫酸塩は炭酸塩にかえて処理すればよい。

天然ストロンチウム、バリウム、FP中ストロンチウム、バリウムの核種を表2.6に許容濃度を表2.7に示す。FP中ストロンチウムのうち⁹⁰Srは量も多く半減期が長く(28.5年)生物学上骨にたまる性質があるので問題となる同位体である。¹³⁷Csと同様フォールアウトに含まれている。娘核種⁹⁰Yと共にベータ線のみを放出する。FP中バリウムの同位体には短寿命のものが多し。¹⁴⁰Ba(12.79日)が最も長寿命であり、燃焼率測定の対象にすることがある。¹⁴⁰Baの娘核種¹⁴⁰La(40.2時間)も放射性である。⁹⁰Sr-Yの場合と同様に放射平衡に注意して取り扱わねばならない。

カドミウム(Cd)

FP中の生成量は少ない。ただし¹¹³Cdの熱中性子吸収断面積が大きいので問題になることがある(表2.11)。カドミウムの物理的性質などを表2.2に、FP中カドミウムの同位体を表2.6に示す。金属はやわらかくて有毒、 α , β , γ の変態があり空気中では表面が酸化して変色する³⁵⁾。空気中でもやすと酸化物CdOを生じる。希硝酸、熱硫酸にとけ、水溶液中ではCd²⁺のみが安定に存在する。亜鉛と共に産出する。

2.4 3族元素

希土類元素

FPに含まれる希土類元素はイットリウム(Y)およびランタノイドのうち原子番号57から68すなわちランタン(La), セリウム(Ce), プラセオジウム(Pr), ネオジウム(Nd), プロメチウム(Pm), サマリウム(Sm), ユウロピウム(Eu), ガドリニウム(Gd), テルビウム(Tb), ジスプロシウム(Dy), ホルミウム(Ho), エルビウム(Er), である。しかしガドリニウム以降は生成量も少なく半減期も短い核種が多い。

ランタノイド lanthanoid は、原子番号57ランタンから71ルテチウムまでの15元素の総称で電子配置上4f電子が順次みたされてゆく一群の元素である。周期表上一括して扱われる。希土類元素 rare earth elements は、これに21番スカンジウム(Sc)と39番イットリウム(Y)を加えた17元素をいう。いずれも+3価が安定である。5f電子が順次みたされる一群の元素、アクチノイドとしばしば対比される。

図 2.11 熱中性子吸収断面積の大きな FPs 核種

	核種	半減期	熱中性子吸収断面積 (barn)	核分裂収率 (%)	
				$^{235}\text{U}_{th}$	$^{239}\text{Pu}_{th}$
0 族	^{82}Kr	stable	45	7×10^{-5}	4×10^{-3}
	^{83}Kr	stable	200	0.54	0.29
	^{131}Xe	stable	90	2.77	3.89
	^{133}Xe	5.29 d	190	6.77	6.84
	^{135}Xe	9.17 h	2.65×10^6	6.72	7.22
1 族	^{133}Cs	stable	29.0	6.77	6.84
	^{135}Cs	2×10^6 y	8.7	6.73	7.22
	^{109}Ag	stable	93.5	3×10^{-2}	1.38
2 族	^{90}Sr	28.5 y	0.9	5.94	2.12
	^{137}Ba	stable	5.1	6.23	6.53
	^{139}Ba	82.7 m	6	6.58	5.84
	^{140}Ba	12.79 d	1.6	6.30	5.49
	^{113}Cd	9×10^{15} y	19910	1×10^{-2}	8×10^{-2}
3 族	^{89}Y	stable	1.28	4.81	1.67
	^{139}La	stable	9.0	6.59	5.84
	^{140}La	40.2 h	2.7	6.32	5.49
	^{141}Ce	32.51 d	29	5.87	5.66
	^{143}Ce	33.0 h	6.0	5.89	4.37
	^{141}Pr	stable	11.5	5.87	5.96
	^{143}Nd	stable	325	5.99	4.46
	^{144}Nd	2.1×10^{15} y	3.6	5.20	3.77
	^{145}Nd	stable	4.2	3.95	3.02
	^{146}Nd	stable	1.3	3.00	2.48
	^{148}Nd	stable	2.48	1.69	1.66
	^{150}Nd	stable	1.2	0.65	0.97
	^{147}Pm	2.62 y	181	2.26	1.95
	^{149}Pm	53.1 h	1400	1.07	1.24
	^{151}Sm	93 y	15000	0.42	0.77
	^{152}Sm	stable	206	0.27	0.58
	^{154}Sm	stable	5.5	7×10^{-2}	0.27
	^{153}Eu	stable	390	0.16	0.38
	^{155}Eu	496 y	4040	3×10^{-2}	0.21
	^{155}Gd	stable	61000	3×10^{-2}	0.21
^{157}Gd	stable	254000	6×10^{-3}	8×10^{-2}	
6 族	^{95}Mo	stable	14.5	6.50	4.89
	^{97}Mo	stable	2.2	5.95	5.58
7 族	^{99}Tc	2.1×10^5 y	19	6.14	6.43
	^{81}Br	stable	2.69	0.20	0.18
8 族	^{129}I	1.57×10^7 y	27	0.85	1.69
	^{103}Rh	stable	146	3.11	6.97

物理的性質などを表 2.2 に示す。電子配置における類似性のために化学的性質が相互によく似ており、希土類元素の相互分離はむづかしい。このためひとつひとつのランタノイド元素に関する詳細な研究や正しい測定値を求める仕事は、ランタノイドの相互分離ができ、純粋な元素が大量に得られるようになってから後、すなわち 1950 年代に入ってから行なわれた。

希土類元素の金属は酸化されやすく、ほとんどの酸化剤と反応する。温度を上げると燃えたり発火したりするものがある。ランタンでは 445 °C 以上、セリウムは 200 °C、酸化セリウム Ce_2O_3 も 200 °C で発火する。しめった空気中ではサマリウム (Sm)、ネオジウム (Nd)、以外の希土類元素が酸化され 2 ~ 3 週間で粉末になる。サマリウムを除き水または熱水と反応し、水素を発生する。いずれも酸にはたやすくとける。

酸化状態は +3 価が安定で酸化物は一般に M_2O_3 の組成をもつ。イットリウム、ランタン以外の酸化物は着色しており、水にとけにくく、一般に融点が高い。水とはゆっくり反応して水酸化物になる。水酸化物も水にはとけにくい。表 2.2, 2.8 を参照されたい。

水溶液中の酸化状態も +3 価が安定である。セリウムだけは比較的安定な +4 価の状態をとり得る。しかし 4 価のセリウムは酸化剤が共存しなければ徐々に還元される³⁶⁾。Ce (IV) の化学的性質はトリウム (Th) に似ていて加水分解しやすい。ユウロピウム、サマリウムなど +2 価をとり得るものもあるが不安定である³⁶⁾。

水にとけにくい化合物として水酸化物のほかにフッ化物、しゅう酸塩があり、分離分析に利用されている^{36, 37)}。いずれの場合も希土類元素がほとんど同じ挙動を示すので、希土類元素をまとめてグループとして他の F P と分ける粗分離に利用される。希土類元素ひとつひとつを分離するにはクロマトグラフィ以外に手段がない^{36, 37)}。とくにイオン交換クロマトグラフィがよく用いられる。ただしセリウムは Ce (IV) として、イットリウムはそれ自身、ランタノイドとは少し異なる化学的挙動を示すことがあるので比較的分離しやすい。また $^{90}Sr - Y$, $^{140}Ba - La$ それぞれ親核種と娘核種の分離はフォールアウトにおける ^{90}Sr , ^{140}Ba の分析などで必要である³⁷⁾。

希土類元素はまたアメリシウム (Am)、キュウリウム (Cm) など +3 価の超プルトニウム元素ともよく似た挙動を示す。このため超プルトニウム元素と希土類元素との相互分離に関連して錯体、および錯体を利用したイオン交換など多数研究され、利用されている^{36, 38, 39)}。

F P 中の希土類元素のうちおもなものを表 2.6 に示す。長寿命の放射性核種には ^{144}Ce (284.8 日), ^{152}Eu (12.4 年), ^{151}Sm (93 年), ^{147}Pm (2.62 年) がある。ネオジウムは核分裂収率が比較的大きく、安定同位体がいくつか生成するなどの点で軽水炉の燃焼率測定のための元素として最も適している¹⁾。F P から分離し、同位体希釈法で定量する。

F P 中の希土類元素ではその他にも安定核種があるが、その中には熱中性子吸収断面積の大きいものがある (表 2.11)。このような核種の蓄積は中性子毒作用のためのぞましくないで、再処理によって取り除かなければならない。

プロメチウム (Pm) は天然にはほとんど存在しない。イオン交換クロマトグラフィの発達によって希土類元素の相互分離ができるようになってから後、1945 年にはじめて 61 番元素として確認された。イオン交換の例を図 2.4 に示す⁴⁰⁾。F P から得られる ^{147}Pm は最も大量に得られるプロメチウムであり、自発光塗料などに利用の道がある⁴¹⁾。その他のプロメチウム同

位体もすべて放射性核種である。

2.5 4 族 元 素

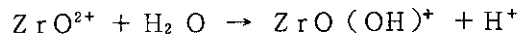
ジルコニウム (Zr)

原子番号, 物理的性質などを表 2.2 に示す。ジルコニウム金属の特長は高融点で耐熱性, 耐食性があること, 熱中性子吸収断面積が小さいこと, および酸素と窒素に対して親和性があることである。粉末, けずりくずなどは空気中でもえるが, 塊は表面に酸化保護被膜を生じるため安定である。同様にして不動態を生じ酸にもなかなかとけない。しかしフッ化水素酸には, ジルコニウムがフッ素イオンと錯体を生じるため激しく反応してとけ, 水素を発生する。

ジルコニウム金属はまた炉材料としてすぐれた性質をもっている。しかし鉱石中のジルコニウムはつねに 2~5% のハフニウム (Hf) を含んでいる。ハフニウムの中性子吸収断面積が大きいので, 原子炉材料ジルコニウムではハフニウムを 100 ppm 以下にしなければならない。ハフニウムとジルコニウムは化学的性質が大変よく似ているので相互分離がむづかしいが原子力分野では重要な技術である。工業的には溶媒抽出が用いられる⁴²⁾。

二酸化ジルコニウム ZrO_2 は水にとけない硬い白色粉末あるいは結晶である。結晶化したものはフッ化水素酸, 硫酸以外にはとけず耐熱性がある。

水溶液中でも酸化状態は +4 価が唯一の安定なものである。しかし Zr^{4+} の形では存在しない。1M 以下の酸性, あるいは錯化剤の存在しない水溶液中では加水分解する。加水分解によって生成する化学種はおもにジルコニルイオン ZrO^{2+} とみられる。 ZrO^{2+} もつぎのようにさらに加水分解する。



F P 中のジルコニウムの同位体を表 2.6 に示す。ジルコニウムは金属, 酸化物いずれも融点が高く化学的に安定であり希土類元素とともに酸化物燃料中では移動しにくい F P 元素のひとつである。また F P ジルコニウムには安定同位体が多く, 元素としては F P 中生成量の最も多いものである。放射性同位体には ^{95}Zr (64.0 日) ^{97}Zr (16.8 時間) がある。いずれも娘核種ニオブが放射性核種である。トレーサー量のジルコニウムは加水分解しやすい性質のためラジオコロイドになりやすく, 器壁に吸着されたりデータに異常を生じたりしやすい。分離法の例を表 2.4 に示す^{43~46, 94, 95)}。

放射性同位体の許容濃度を表 2.7 に示す。

2.6 5 族 元 素

ニオブ (Nb)

物理的性質などを表 2.2 に示す。粉末は灰色で硬い。融点が高く耐熱性耐食性があり熱伝導がよい。塊は空気中で表面が酸化する。不動態を生じやすく, 酸, アルカリにとけず, 化学薬品に対して安定であるがフッ化水素酸とは反応して溶解する。また熔融したアルカリと反応する。

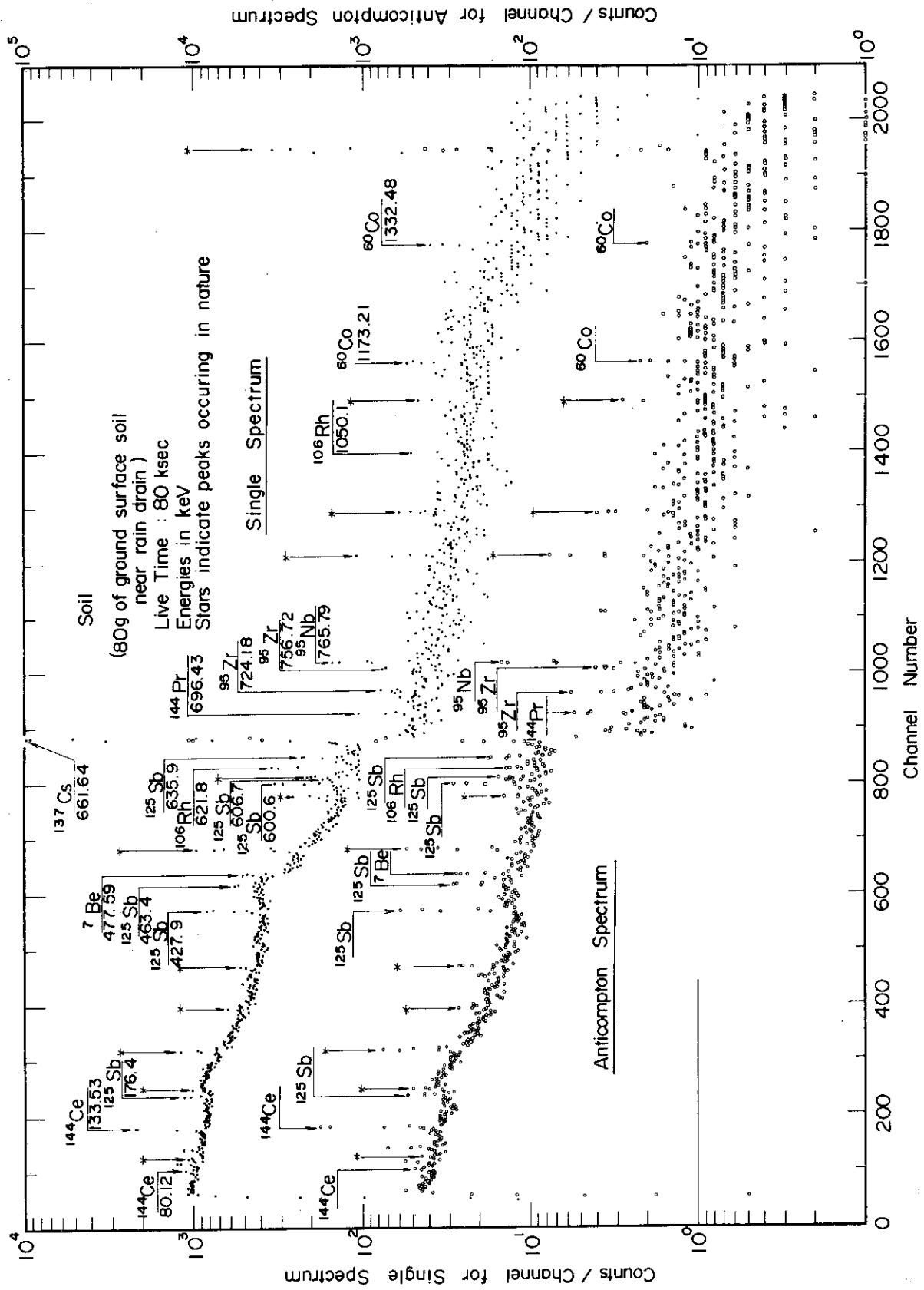


図 2.5 土壤試料のシングルおよびアンチコンプトン・スペクトル〔試料：80 g (主として海岸砂)，有効計数時間：80 k 秒 (22.2 時間)〕

五酸化二ニオブ Nb_2O_5 はニオブの化合物を空気中で強熱するか酸素の中でもやすと得られる。性質は表 2.8 を参照のこと。ほかに酸化物として NbO , Nb_2O_3 , NbO_2 がある。

水溶液中でも酸化状態として +5 価が安定であるが、ジルコニウムと同様 Nb^{5+} は存在し難い。加水分解生成物としてあるいは錯体のイオンとして存在する。またニオブ酸の塩 M_3NbO_4 の形でも水にとけるが、やはり加水分解しやすい⁴⁷⁾。強酸を加えると $Nb_2O_5 \cdot (H_2O)_x$ の沈殿を生じる。

F P ニオブの同位体を表 2.6 に示す。⁹⁵Zr と ⁹⁷Zr の娘核種、⁹⁵Nb (35.15 日) と ⁹⁷Nb (74 分) が代表的なものである。トレーサー量のニオブはジルコニウムと同様加水分解してラジオコロイドとなり器壁に附着し、データに異常を生じることがある。ガラスに附着したトレーサー量のニオブは、うすいフッ化水素酸か、強アルカリで洗浄して除く⁴⁷⁾。HF が共存すると、 NbF_6^- , $NbOF_5^-$ となり、安定にとけている。

アンチモン (Sb)

物理的性質などを表 2.2 に示す。同素体すなわち金属アンチモン、黄色アンチモン、黒色アンチモン、爆発性アンチモンがある。後三者は不安定である。金属アンチモンは大変にもろい。物理的性質からアンチモンは半金属とよばれる。

金属アンチモンは融点以上に加熱すると空気中で燃え、揮発性の三酸化二アンチモン Sb_2O_3 を生じる。赤熱したアンチモンは水蒸気とも反応して Sb_2O_3 を生じる。 Sb_2O_3 は空気中で加熱すると四酸化二アンチモン Sb_2O_4 となる。これは Sb(III), Sb(V) の混合酸化物である。また Sb_2O_3 は高温では揮発し、空気のないところではたやすく昇華する。蒸気圧 (mmHg) は 0.41 (550°C), 7.6 (650°C), 20.8 (750°C, 液体) である⁴⁸⁾。600°C に変態点がある。水、酸、アルカリにはいずれも少ししかとけず、とけた時の化学種はよく分らない。

水溶液中では酸化状態として +3 価のみが安定である。加水分解しやすく、酸素と結合した $KSbO_2$ や $SbOCl$ のような形になり、 Sb^{3+} としては存在しにくい。 $M^I SbO_2$ は亜アンチモン酸の塩 antimonite というが、 $xM_2^I O \cdot ySb_2O_3 \cdot zH_2O$ の形をとり、 SbO_2^- イオンの存在はたしかめられていない。水溶液は加水分解していてアルカリ性を示し、K 塩のみがとける。 $SbOCl$ や $SbONO_3$ はアンチモニル塩 antimonyl といい、アンチモンの塩基性塩であるが SbO^+ は存在しないので酸化塩化アンチモンという方が正しい。

ハロゲン化物、水素化物など揮発しやすい化合物が多く、この性質は、F P 中のアンチモンの分離にも利用される (表 2.4)^{49, 50)}。また試料の加熱溶解では揮発による損失がないように注意しなければならない⁴⁹⁾。

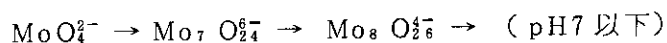
F P 中アンチモンの同位体を表 2.6 に示す。¹²⁵Sb (2.77 年) 以外は短半減期の同位体および安定同位体である。さらに ¹²⁵Sb は F P の中では半減期の長い方に属するため、核分裂収率が小さいにもかかわらず、照射時間または冷却時間の長い F P では無視できぬ量になる。このようにして ¹²⁵Sb は燃焼率の高い燃料やフォールアウトにも検出される。例を図 2.5 に示す⁵¹⁾。

2.7 6族元素

モリブデン (Mo)

原子量, 物理的性質などを表 2.2 に示す。モリブデンはクロム (Cr), タングステン (W) と同族の元素で, 融点が高く, 熱と電気の伝導性がよく, 機械的強度の大きい金属である。空气中常温ではゆっくりと酸化し, 500°C 以上では急速に酸化する。ちっ素とは反応しにくい。希硝酸にはとけるが濃硝酸では表面が不動態となりとけない。水との反応では, 20°C では反応しないが 700°C 以上の熱水蒸気とは反応して二酸化モリブデン MoO_2 を生じる。金属または二酸化モリブデンを空气中で強熱すると, 650°C 以上で三酸化モリブデン MoO_3 となる。 MoO_3 は最もふつうのモリブデン酸化物であり, 水にとけにくい白色粉末である。空气中では非常に安定で融点附近すなわち 780°C 以上で昇華し, 分析の際注意を要する⁵²⁾。アルカリにはとけるがフッ化水素酸, 濃硫酸以外の酸にはとけない。

いろいろな酸化状態が可能であるが水溶液中では +6 価が最も一般的である。通常モリブデン酸イオン MoO_4^{2-} の NH_4^+ , Na^+ などの塩としてアルカリ性でとけている。 Ag^+ , Pb^{2+} の塩は不溶性である。また中性から酸性の溶液では polymolybdate を生じる。



またりん酸, けい酸などとはヘテロポリ酸を作る。

F P 中モリブデンの同位体を天然モリブデンの同位体と共に表 2.6 に示す。生成量が多い方であるが安定同位体と短寿命核種である。安定同位体は酸化物燃料中で酸素ポテンシャルが上ると共に酸化物に移行すると考えられている。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6.0 時間) の親核種, ^{99}Mo (66.7 時間) は, 医学方面における R I 利用で, ジェネレーターとして用いられ, 莫大な需要がある。1979 年度には, 約 2300 Ci 輸入された。分離分析については, 表 2.4^{52~56)} に示す。

テルル (Te)

物理的性質などを表 2.2 に示す。金属テルルと無定形とがある。もろい金属で電氣的に半導体である。酸化状態は +4 価が安定で, 空气中で燃えて二酸化テルル TeO_2 となる。 TeO_2 は加熱すると 790~940°C でさかんに昇華する。水にはとけにくいが強酸, 強アルカリにとける。

テルルは周期表では酸素, 硫黄, セレンと同族であり硫黄を含む鉱石などにセレンと共に少量含まれ, 化学的にセレンあるいは硫黄に似た点が多い。またセレンと同様有毒である。硫化物と同じようなテルル化物をつくる。テルル化鉛 PbTe などである。テルル化物を非酸化性の酸に溶かすとテルル化水素 H_2Te (m. p. -48°C, b. p. -1.8°C) という水に可溶で悪臭のある有毒無色の気体を発生する。硝酸, 王水のような酸化性の酸にはとける。また硫酸と同じような化学種の亜テルル酸がある。

亜テルル酸 H_2TeO_3 tellurous acid の塩 tellurite は水溶液中で比較的安定で分析ではしばしば取扱う^{57, 58)}。クロム酸などで酸化するとオルトテルル酸 telluric acid H_6TeO_6 になる。オルトテルル酸 H_6TeO_6 は 100°C 以下の溶液から得られるものでは四水和物の形をし

ており、130℃では二水和物となり、融点は136℃である。300℃では三酸化テルル TeO_3 となり、さらに赤熱すると $\text{TeO}_2 + \text{O}_2$ となる。またテルル酸の一種 H_2TeO_4 は塩酸、あるいは王水中の塩酸ですぐに分解して亜テルル酸になる。テルル酸は還元されやすくアスコルビン酸、ヒドラジン、 SO_2 などによって還元され、金属テルルになる⁵⁷⁾。この反応は分析でよく利用される(表2.4)。

水溶液では+4価が安定である。ハロゲン化物、水素化物などの揮発性と毒性のため、取扱う際には安全上の配慮が大切である⁵⁷⁾。

F P中のテルル同位体を表2.6に示す。核分裂収率の大きいものが多いが半減期はみじかい。しかし揮発性の化合物があるほか酸化物にも昇華性があり、 ^{132}Te (78時間)の娘核種が放射性の ^{132}I (2.38時間)であることから生じる危険性がある。他方 ^{132}I を得るためのgeneratorとして利用することができる^{53, 54, 59)}。

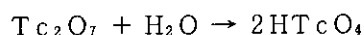
2.8 7族元素

テクネチウム(Tc)

1973年 ^{99m}Tc の発見によって初めて知られた、天然にはほとんど存在しない元素である。同位体はすべて放射性である。F P中のテクネチウムの同位体を表2.6に、物理的性質などを表2.2に示す。

周期表ではマンガン(Mn)、レニウム(Re)と同族であるが、化学的にはレニウムとの共通点が多い。安定な酸化状態は+7価で、酸素の中でテクネチウムをもやす(400~600℃)と七酸化二テクネチウム Tc_2O_7 となる。 Tc_2O_7 は100℃で 10^{-1} mmHgという高い蒸気圧をもち、昇華によって精製できる。これはレニウムとの差のひとつで Re_2O_7 は昇華できない^{60, 61)}。F Pからの分離にも昇華が用いられる^{62, 63)}。

水との化合物、過テクネチウム酸 pertechnetic acid HTcO_4



も同じく高い蒸気圧をもっている。

水溶液中では同じく+7価 pertechnetate TcO_4^- のアンモニウム塩として安定に存在する。アンモニウム塩は水にとけるが Ag^+ 、 Cs^+ 、テトラフェニルアルソニウム塩は水にとけない。この性質を利用するとF P中のテクネチウムの分離ができる。

分析試料は揮発による損失に注意しなければならない。また酸化性ふんい気とのかすと+7価にそろえることができ、担体との一致がよくなって好都合である⁶¹⁾。

臭素(Br)とヨウ素(I)

ハロゲンに属する。物理的性質などを表2.2に示す。

臭素は常温では赤褐色の重い液体で揮発性である。常温でも刺激臭のある赤褐色の蒸気を出す。臭素の蒸気は二原子分子で Br_2 、有毒である〔許容濃度0.1 ppm(0.7 mg/m³)〕⁹⁹⁾。

ヨウ素は常温では固体で融点附近での蒸気圧が大きいので(表2.2参照)、ゆっくり加熱昇温すると融解せずに昇華する。蒸気は二原子分子 I_2 、紫色で有毒である〔許容濃度0.1 ppm

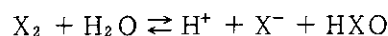
(1.0 mg/m^3)¹⁰⁰) 熱解離度は 2.8% (1000 K), 89.5% (2000 K) である。

臭素, ヨウ素いずれも, 電子構造から電子親和性が大きく, -1 価の酸化状態をとりやすい。常温では二原子分子の形をとるほか, 共有結合性の化合物をつくる。また多くの有機溶媒にとけやすい。水への溶解度はつぎのようである。

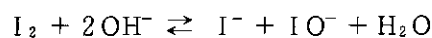
Br ₂	0 °C	{	0.422	25 °C	{	3.46	[g/100g水]
I ₂			0.0162			0.034	

酸素 O₂ とは反応しないが, オゾンとは反応して酸化物を生じる。ハロゲン, およびハロゲン化水素は, 炭化水素の二重結合や三重結合と反応しやすい。

水とヨウ素との反応は, 原子炉冷却水と FP ヨウ素との相互作用を考える上で重要である。Br₂, I₂ いずれも反応する量は少ないが, 水に溶けてつぎの反応を起す。

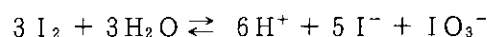


ヨウ素の場合, 純水中, および弱酸性水溶液中で, この反応の平衡は, 左に大きく片寄っている。すなわち平衡定数 $k = 4.3 \times 10^{-13} \text{ M}^2$ (20 °C) である。この反応は当然, 溶液の pH によって状態が変る。すなわちアルカリ性では, I⁻ や IO⁻ が生成しやすくなる^{48, 64~66}。



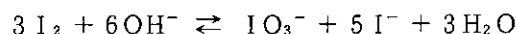
平衡定数は 30 である。臭素の同様の反応では 2×10^8 と大きく, かつ反応速度が速い⁴⁸。

このほか, 水とヨウ素との反応として,



があるが, 中性および酸性ではやはり, 平衡が左に片寄っている

($k = 4 \times 10^{-48} \text{ M}^9$ at 25 °C)。アルカリ性では,

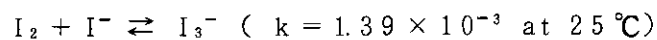


の反応により, ヨウ素酸イオン IO₃⁻ iodate が生成しやすくなる。さらに次亜ヨウ素酸イオン IO⁻ hypoiodate は, 水溶液中でのみ安定に存在しうる化学種であるが, アルカリ性溶液中では,



のような不均化反応を起し, その反応速度は速い。その結果, 強アルカリ性溶液中のヨウ素 I₂ は, 定量的に, IO₃⁻ と I⁻ になる⁴⁸。

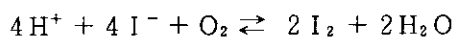
またヨウ素 I₂ は, ヨウ化物が共存する場合には,



の反応を起して, 水にとけやすくなる⁶⁴。

ハロゲン化水素 HX の水溶液は強い一塩性酸である。ヨウ化水素酸 HI は分解しやすい。光と酸素があるとヨウ素と水になる。また臭化水素酸もおなじように酸化されやすく Cl₂ などの酸化剤で Br₂ を生成する。

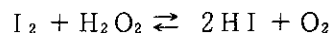
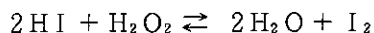
ヨウ素イオンと酸素との反応



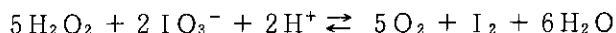
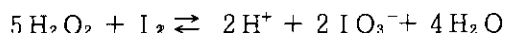
は, 平衡が右に片寄っているが, 常温では起りにくい。光や熱によって起りやすくなる。ヨウ

素が水を酸化して酸素を生じる，すなわち上の化学反応式が右から左へ進む現象はみられない。臭素も同様である。前述のように水との反応では， X^- と XO^- を生じる反応が起る。

放射線の作用により，水の中には過酸化水素が生じる。 H_2O_2 と I^- との反応は， I^- が触媒として働いて H_2O_2 を分解する結果になる。



H_2O_2 と I_2 との反応も，中性溶液では，同様の結果となる。しかし高酸性では，

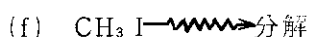
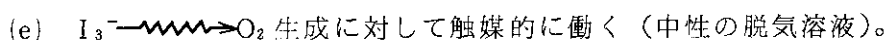
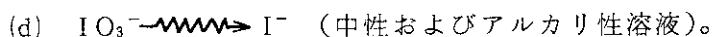
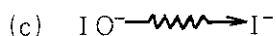


の反応が起り，やはり触媒的に H_2O_2 の分解を生じ，新たな I_2 生成はわずかである^{64, 65)}。

放射線と水との相互作用では，過酸化水素のほかに，水和電子，OHラジカルなどさまざまなものが生じ，これとヨウ素化合物との反応は単純でない⁶⁵⁾。全体としての放射線の効果はつぎのようにまとめられる⁶⁵⁾。

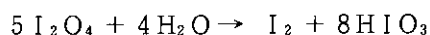


中性，酸性の脱気溶液。ただし生成するヨウ素の濃度は非常に小さい。



したがって，溶存酸素の少ない水中の微量ヨウ素では， I^- がおもな化学種であり，陰イオン交換体に捕集されやすいと考えられる。また，溶存酸素のある条件では， I^- と O_2 との反応により I_2 を生成しうる一方，放射線の効果などによって I_2 から I^- を生じ，一種の平衡状態になると考えられる。

臭素の酸化物は室温では不安定で存在し得ない。ヨウ素では四酸化二ヨウ素 I_2O_4 ，五酸化二ヨウ素 I_2O_5 などの酸化物がある。 I_2O_4 は水と煮沸すると



のように反応してヨウ素酸を生じる。 HIO_3 は水に対する溶解度が $310\text{g}/100\text{g水}(16^\circ\text{C})$ ，濃いところでは $H_2I_2O_6$ を生じてよくとける。 195°C で加熱脱水するとつぎのように反応して五酸化二ヨウ素を生じる。



I_2O_5 はハロゲンの酸化物の中では最も安定なもので不揮発性である。しかし 300°C で，または日光により分解する。水にとけ，上の逆反応によってヨウ素酸 iodic acid を生じる。ヨウ素酸は強い酸化剤である。

FP中のヨウ素と臭素の核種を表2.6に示す。FPのヨウ素はヨウ素がさまざまな化学形をとりうること，ヨウ素とその化合物に揮発性があること，核分裂収率が大きいこと，甲状腺に蓄積し生物学的な危険性があることのため，原子力施設では問題になる。原子炉から出たときに気体としての挙動を示す可能性のあるヨウ素化合物を表2.12に示す⁶⁷⁾。ここにはヨウ化メ

表 2.12 揮発性ヨウ素化合物の物性

化 合 物	分子式	M.P. (°C)	B.P. (°C)	特 性
ヨウ化メチル	CH ₃ I	- 66	42.5	ヨウ素化合物のうちでは安定で、揮発性化合物、水に対する溶解度は小さい。
ヨウ素	I ₂	113.6	184.4	ハロゲン元素の特徴として反応性に富み、水には不溶性であるが僅かに加水分解する。 $I_2 + H_2O \rightleftharpoons HIO + H^+ + I^-$
ヨウ化水素	HI	- 50.6	- 35.4	反応性に富む揮発性化合物である。酸素雰囲気では分解してI ₂ を生成するが、常温附近では時間オーダで安定。吸湿性である。
次亜ヨウ素酸	HIO	-	-	ヨウ素の加水分解により生成するが、さらに分解してヨウ素酸を生ずる。 $5HIO \rightarrow 2I_2 + HIO_3 + 2H_2O$ ヨウ素イオンが存在すれば、弱酸によりヨウ素を遊離する。 $HIO + I^- + H^+ \rightarrow I_2 + H_2O$
ヨウ素酸	HIO ₃	110	175.92	吸湿性ではない。熱的には不安定で70°Cで3I ₂ O ₅ ·H ₂ O(HI ₃ O ₈)、200°C以上でI ₂ O ₅ に変化する。
メタ過ヨウ素酸	HIO ₄	-	-	酸化性の遊離酸、加熱すれば138°Cで分解し、I ₂ O ₅ を生成する。

表 2.13 海産物の濃縮係数

元 素	魚 類	無脊椎動物	海 藻
H	1	1	1
Cr	4 × 10 ²	2 × 10 ³	2 × 10 ³
Mn	6 × 10 ²	10 ⁴	2 × 10 ⁴
Fe	3 × 10 ³	2 × 10 ⁴	5 × 10 ⁴
Co	10 ²	10 ³	10 ³
Sr	1	6	10
I	10	50	4 × 10 ³
Cs	30	20	20

チル CH_3I が含まれている。これはヨウ素が何らかの形で燃料から外へ放出された後に生成するものと考えられている。このようなヨウ素化合物の捕集については多数の研究が行なわれている^{22, 67~70)}。ヨウ化メチルはウランを硝酸にとかしたときにも発生するが、この発生機構も研究された^{71, 72)}。

原子力施設におけるヨウ素は ^{131}I の比放射能が、

発電炉	約 10^{10} $\mu\text{Ci/g}$
^{131}I 製造工程	約 10^{11} $\mu\text{Ci/g}$
再処理施設 (180日冷却)	約 10^3 $\mu\text{Ci/g}$

とされている。これに対して空気中の ^{131}I のモニタリングでは $10^{-8} \sim 10^{-12}$ $\mu\text{Ci/cm}^3$ を扱う。したがってヨウ素の濃度としては

発電炉	$10^{-18} \sim 10^{-22}$ g/cm^3
^{131}I 製造工程	$10^{-19} \sim 10^{-23}$ g/cm^3
再処理施設	$10^{-11} \sim 10^{-15}$ g/cm^3

となる。ところが大気中には自然のヨウ素がありその濃度は $10^{-13} \sim 10^{-11}$ g/cm^3 と考えられるので、一般に原子力施設でモニタリングの対象になる ^{131}I は天然ヨウ素でいちじるしく希釈されていることになる。

また液体ナトリウム中では NaBr , NaI を生じるため水中、空気中とは異なった挙動を示す⁷³⁾。

FP 中ヨウ素の分離では化学形をそろえるのがコツである⁶⁶⁾。ヨウ素を $\text{I}^- \rightarrow \text{I}_2$ として溶媒抽出する方法は分離分析に利用される (表 2.4)。ヨウ素と臭素、塩素とは Pd(II) との沈殿反応により分離できる。

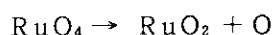
許容濃度を表 2.7 に、海産物への濃縮を表 2.13 に示す²³⁾。

2.9 8 族元素

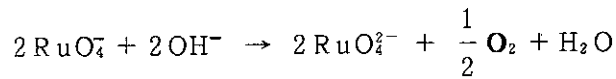
ルテニウム (Ru)

白金族元素のひとつで貴金属である。とり得る酸化状態の数が最も多い元素である。物理的性質などを表 2.2 に示す。

金属は融点が高い。空気、酸素に対してはあまり強くない。加熱すると二酸化ルテニウムの被膜を生じる。ルテニウム金属の粉末を空气中 $700 \sim 1200^\circ\text{C}$ に加熱すると二酸化ルテニウム RuO_2 となるが、一部は四酸化ルテニウム RuO_4 となり揮発する。核分裂生成物を含むものを酸素のあるところで加熱しても、同様の酸化が起るようである。酸化物の性質は表 2.8 を参照。四酸化ルテニウムは m. p. 25.5°C の黄色針状結晶で常温でもたやすく蒸発し、 45°C で気化しはじめる。 100°C 以上に急熱すると爆発することがある。また 106°C で分解する。



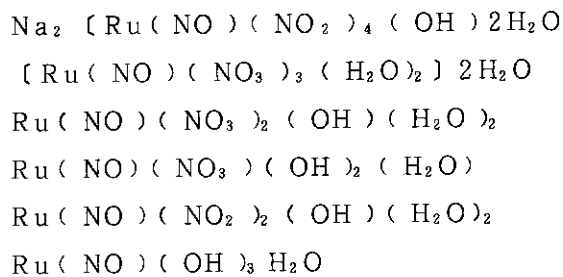
RuO_4 の気体はオゾンのにおいを持ち、有毒である。また RuO_4 の揮発性は分離分析に利用される^{74, 75)}。水への溶解度は $2.03 \text{ g}/100 \text{ g}$ (20°C) で、水のほか有機溶媒にもとけやすい。アルカリ性水溶液にもとけて過ルテニウム酸 perruthenate RuO_4^- となる。アルカリ性ではさらに還元されて徐々にルテニウム酸 ruthenate となる。



F P 中ルテニウムの同位体を表 2.6 に示す。安定同位体も多く生成量が多い。放射性同位体として ^{103}Ru (39.8 日) と ^{106}Ru (368 日) がある。 $^{103}, ^{106}\text{Ru}$ は再処理施設から環境へ放出される放射性核種に含まれる。

ルテニウムは他の元素よりも安定なニトロシル錯体 nitrosylruthenium complex を数多く生成する。これは Ru(II) にニトロシル基 NO^+ がついたもの $\text{Ru}(\text{NO})^{3+}$ で、これに Cl^- , NO_3^- , OH^- , NO_2^- , H_2O などが配位する。使用済み燃料を硝酸で溶解するとき大量の酸化ちっ素が発生し、酸化ちっ素との反応でルテニウムはニトロシル化合物になるといわれている^{76~79)}。しかしその種類が多く、海水中に入ればまた別な化合物に変わるほか、不安定なものもあり明らかでない点もある⁸⁰⁾。いずれにせよ数種のニトロシル錯体が生じ、それぞれが再処理工程の中で異なった挙動を示し、そのうちのごく一部ではあるが環境へ放出されるためにやっかいなものとしてされている。

このようなニトロシルルテニウムの化合物にはつぎのようなものがある。



いろいろなニトロシルルテニウム化合物の間の平衡は硝酸イオンと亜硝酸イオンの濃度、酸性によって左右される。再処理工程においてはほとんどのルテニウムが高レベル廃液に入るとはいえ、化学形の異なるさまざまなルテニウム化合物が全く同一の挙動をとることはなく、少しずつ有機相と水相、沈殿と上澄みなどの間で分配されてしまう。これがルテニウムの扱いをやっかいなものにしている。分離分析においてもルテニウムの化学的性質、酸化状態と化学種の多様性のために定量的扱いがむずかしい。

許容濃度を表 2.7 に示す。

ロジウム (Rh) とパラジウム (Pd)

白金族元素でいずれも貴金属である。物理的性質などを表 2.2 に示す。ロジウムは融点が高く白金やパラジウムよりも硬い金属である。展性もある。塊は王水も含めてすべての酸 (100 °C) にとけない。またよく知られているように熱電対の材料である。酸化状態として +3 価が安定であるが、これは白金族元素としては異色の性質である。金属を空気中で加熱すると Rh_2O_3 を生じる。

パラジウムは白金と似ている。白金族元素としては酸にとけやすい方で、王水にもたやすくとける。またパラジウムは大量の水素を吸蔵することで知られ、触媒として有用である。酸化状態として +2 価が安定で、空気中で加熱すると酸化パラジウム PdO を生じる。酸化パラジウムは酸、王水にはとけない。水溶液では Pd^{2+} が安定である。 Pd^{2+} の水溶液から水和酸化

物の沈殿を生じるが、煮沸したものは、酸およびアルカリにとけない。

FP中のロジウム、パラジウムの核種を表2.6に示す。ルテニウムと共にFP中の安定核種の利用検討の対象になっている。白金族元素は量こそ少ないが化学工業における触媒、通信機などエレクトロニクス機器における接点など多方面で利用され需要は増加しつつある。他方その産地にはかたよがりがあり、FP中の生成量は少なくない。このような事情を背景にFP中白金族元素がとりあげられている。図2.6、2.7に発電用原子炉中に生成するロジウム、パラジウムの量の予想^{81, 82)}、図2.8、表2.14にFPからのロジウム、パラジウムの放射能に関するデータを示す^{83, 84)}。またFP中ロジウム、パラジウムの核種を表2.6に示す。

ロジウム、パラジウム、ジルコニウムなど核分裂で生成した高融点の金属は、酸化物燃料中では酸化物として保持されるか、あるいはMo-Tc-Ru-Rhのような合金相を形成している。分離分析については表2.4を参照されたい^{85, 86)}。

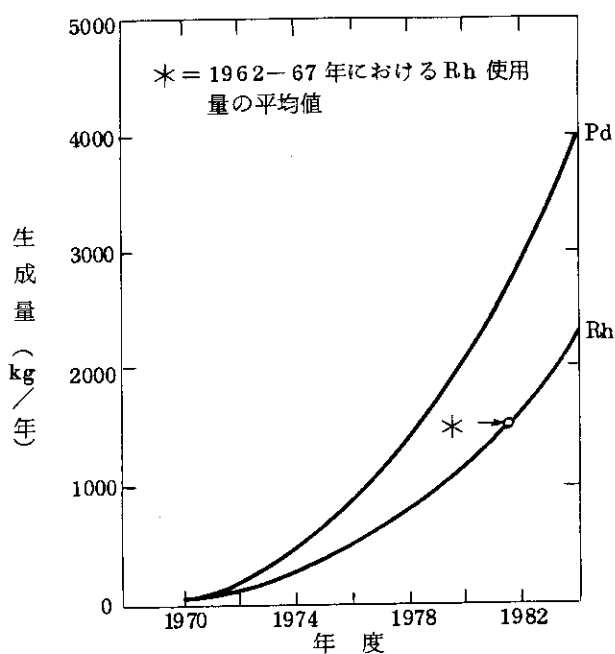


図2.6 米国における原子炉燃料から得られるロジウムとパラジウムの予想。
原子炉からとり出してのち1年冷却、回収率90%とする。

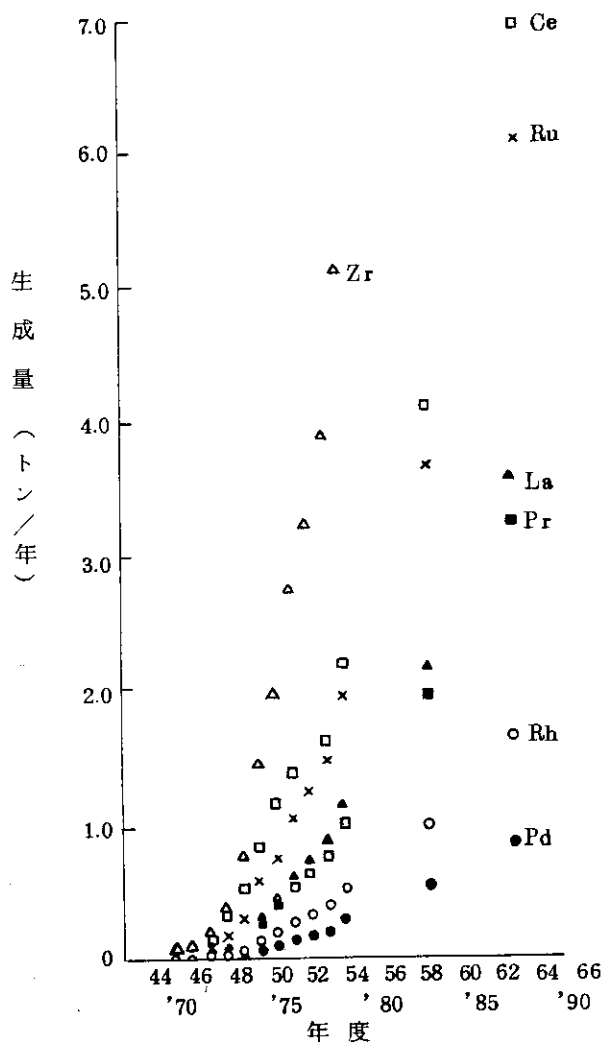


図2.7 日本の発電用原子炉中に生成する核分裂生成物の量

表 2.14 核分裂生成物から分離したロジウム中の¹⁰²,^{102m}Rh の測定例

試料	実測値 (μCi/g)		計算値 (μCi/g)*	
	¹⁰² Rh	^{102m} Rh	¹⁰² Rh	^{102m} Rh
燃焼率 33000	25 ± 10	120 ± 25	1900 ± 700	280 ± 60
(MWD/T) 33000	25 ± 10	130 ± 25	1900 ± 700	300 ± 60
37000	35 ± 10	180 ± 40	2600 ± 1000	420 ± 90
ピュレックス法廃液 1年冷却	19.3 ± 0.5	7 ± 2	85 ± 20	10 ± 3
12年冷却	検出できず	1.7 ± 0.5	—	30 ± 9

* 原子炉からとりだした時点での値を実測値から計算したもの。

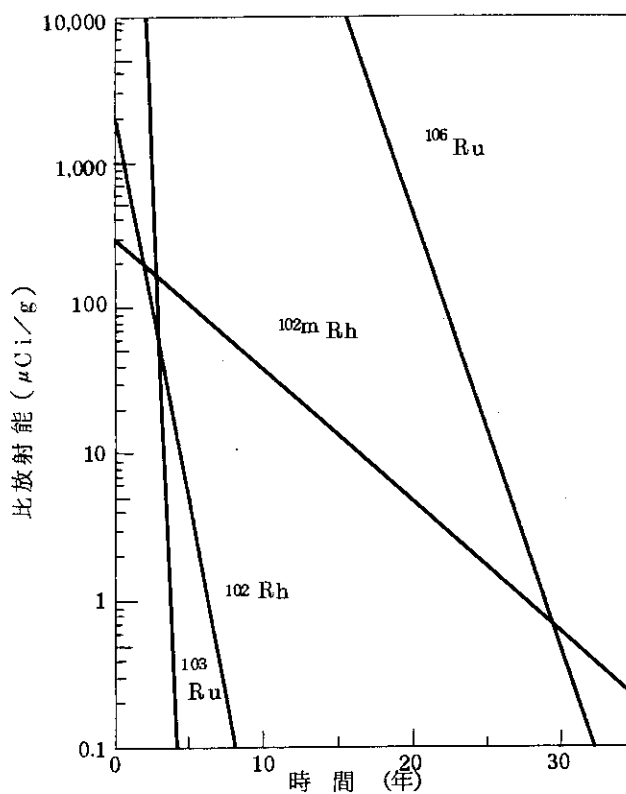


図 2.8 放置時間に対するルテニウムとロジウムの比放射能の変化

2.10 全体としてのFPとその分類

これまでFPを構成しているおもな元素についてのべてきた。このほかにニッケル，銅，亜鉛，ガリウム，ゲルマニウム，ヒ素，セレン，インジウム，すずの各元素がフィッシュンチエインの中にみとめられる。このような混合物が全体としてまとまったときどのような姿になるであろうか。

まず質量数と核分裂収率の図を示す。(図2.9)⁸⁷⁾。

FPは短いものから長いものまでさまざまな半減期をもった放射性核種の混合物である。このため照射期間によって生成量，さらに冷却期間によって壊変量が異なり，放射性核種の混合物として見た場合照射期間，冷却期間によって異なるのは当然である。図2.10に瞬間的な核分裂の結果生成した放射性核種の放射能の相対的な時間変化を示す^{45, 88)}。

FPにはガンマ線を放出する核種が多いのでガンマ線スペクトルはFPの全体の様子を知るのによい手掛りとなる。核分裂性核種，照射時間，冷却時間の異なるいくつかの例を図2.11～2.16に示す^{89～91)}。照射期間が長い，すなわち燃焼率が大きい場合には，核分裂収率が低いが半減期の長い放射性核種¹²⁵Sbや^{110m}Ag，¹⁵⁴Euさらに蓄積した安定核種¹³³Csの¹³³Cs (n, γ)¹³⁴Csの核反応によって生成する¹³⁴Csなどの全エネルギー吸収ピークがみられる様子が分る。また冷却期間が短い場合には半減期の短い放射性核種が多数あり複雑なγ線スペクトルを示している。

このようなFPはまえがきにものべたように物理的，化学的，生物学的にさまざまな性質をもった核種の混合物であるから取り扱う立場によって問題とする核種に差が出てくる。たとえば原子炉関係では貴ガスとヨウ素をすぐに思いうかべ，フォールアウトを取扱う人は¹³⁷Cs，⁹⁰Srなどを，燃焼率測定ではネオジウムなどを考える。また人によっては放射能の塊であったり重さや形のある塊であったりする。専門分野による対象元素のちがいを，その様子を表2.15に示す。しかし燃焼率測定のように対象とする元素に大きな変化がなかろうと思われる分野もある一方，ネガティブな問題として対象となっている分野では，問題が解決したときにあらたに別な元素や核種が対象となることもあると思われる。このようなFPを扱いやすくするためにそれぞれの分野，FPを扱う立場に都合のよい分類が行われている。その例を図2.17および表2.16～2.18に示す。図2.17²²⁾は全く化学的な分類で，化学的性質の似かよったものをまとめてそれぞれのグループ全体の放射能の経時変化が示されている。表2.16¹²⁾は原子炉全体において生成する放射性核種の分類で，FPのうち貴ガスとハロゲンを別格にし放射化生成物が加えられている。放射化生成物の核種については，あとでのべる。表2.17は揮発性の差による分類である²²⁾。

(貴ガスとヨウ素)は揮発性で量も多いので最も重要なグループに入る。ヨウ素は甲状腺にたまる性質があるのでとくに問題がある。

(セシウム)は量はそれほど多くないが長い半減期をもち，高温では揮発性がある。生物学的には全身に影響がある。

(テルル)は半減期の短い放射性核種が多いが核分裂収率が高く，生物学的半減期が長く骨と肺にとどまる性質がある。また元素として有毒である。

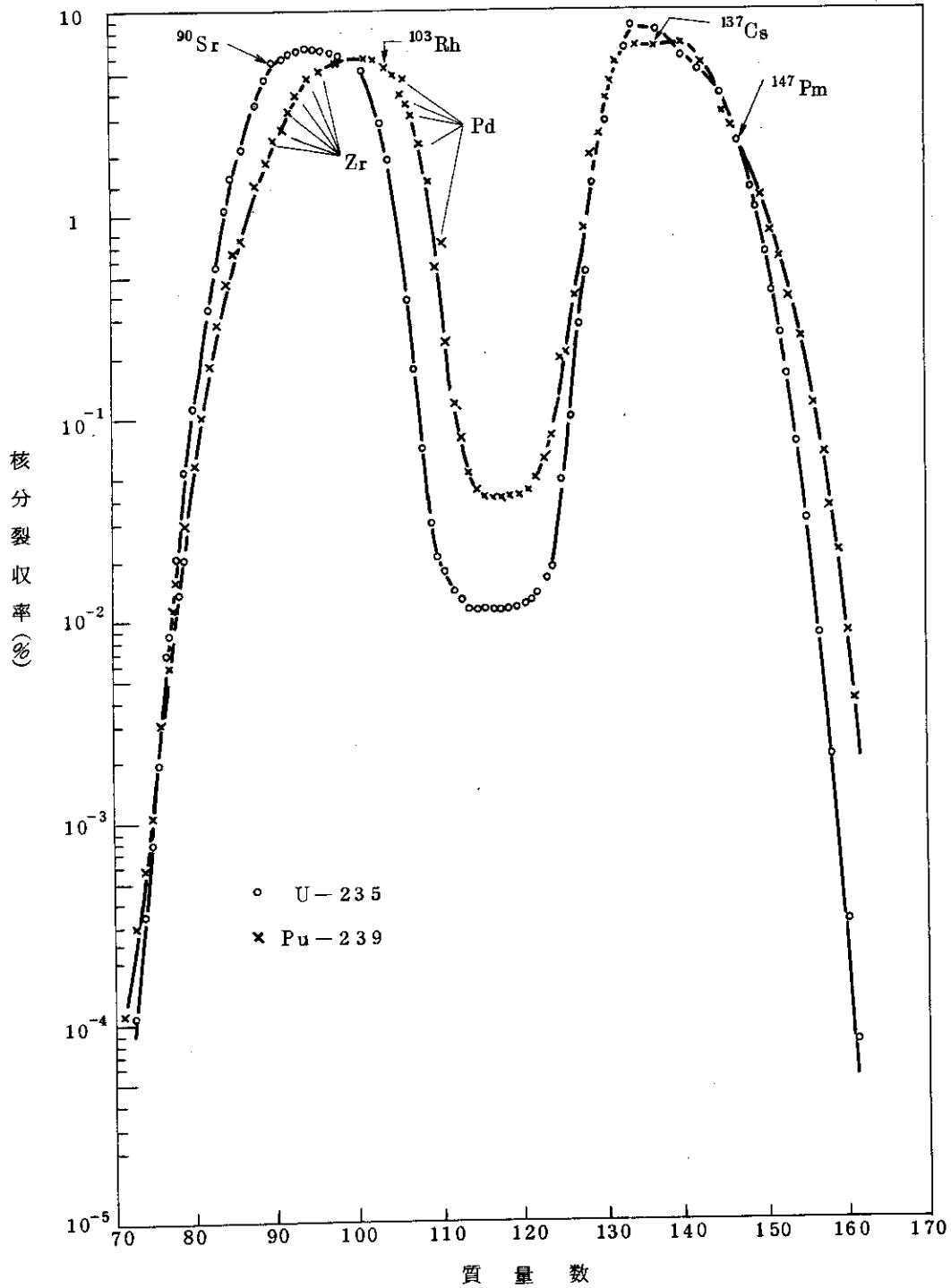
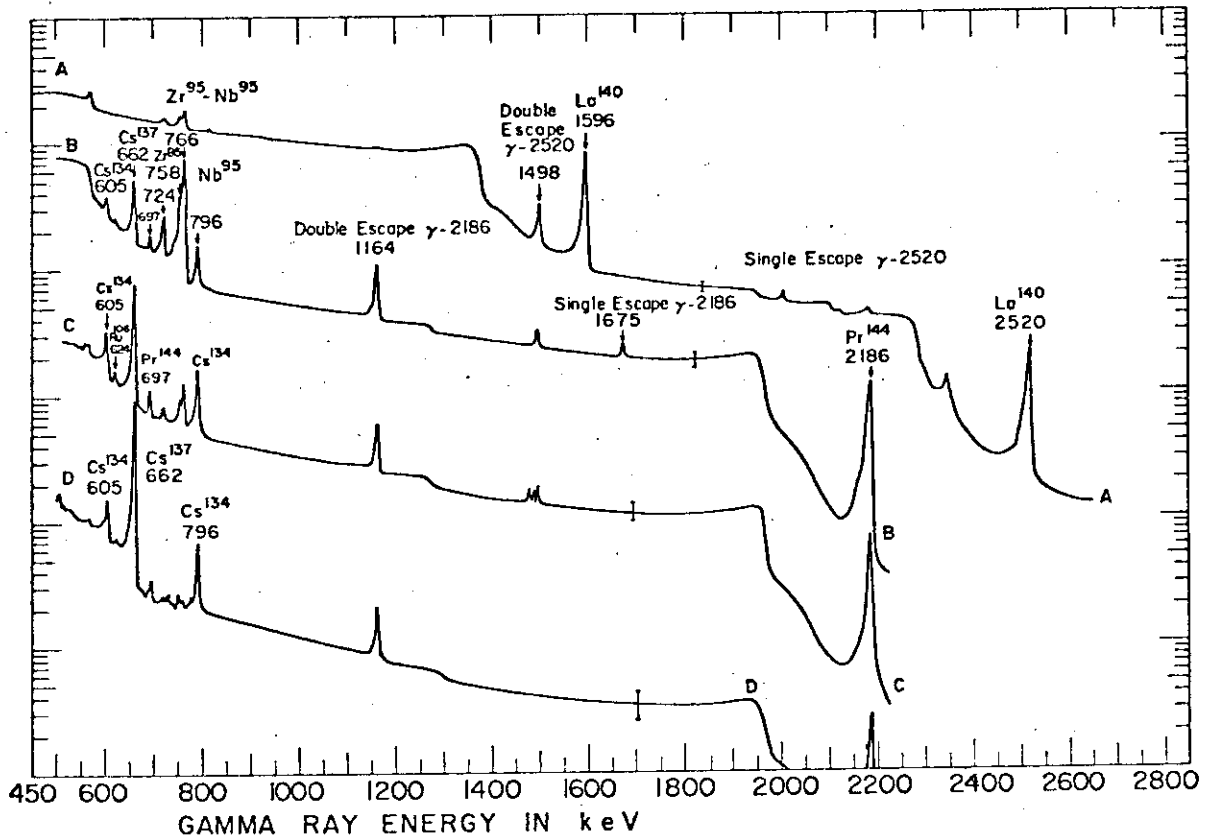


図 2.9 ^{235}U と ^{239}Pu の熱中性子による核分裂における核分裂収率 (質量収率)



Curve	Fuel Element	Cooling Time
A	2M31	1-1/2 weeks
B	2M19	9 mo.
C	2M22	1 yr 6 mo.
D	2M1	1 yr 6 mo.

図 2.11 MITR使用済燃料のガンマ線スペクトル
 (冷却時間による変化)
 Ge(Li) 0.6 cm³, 7.7°K

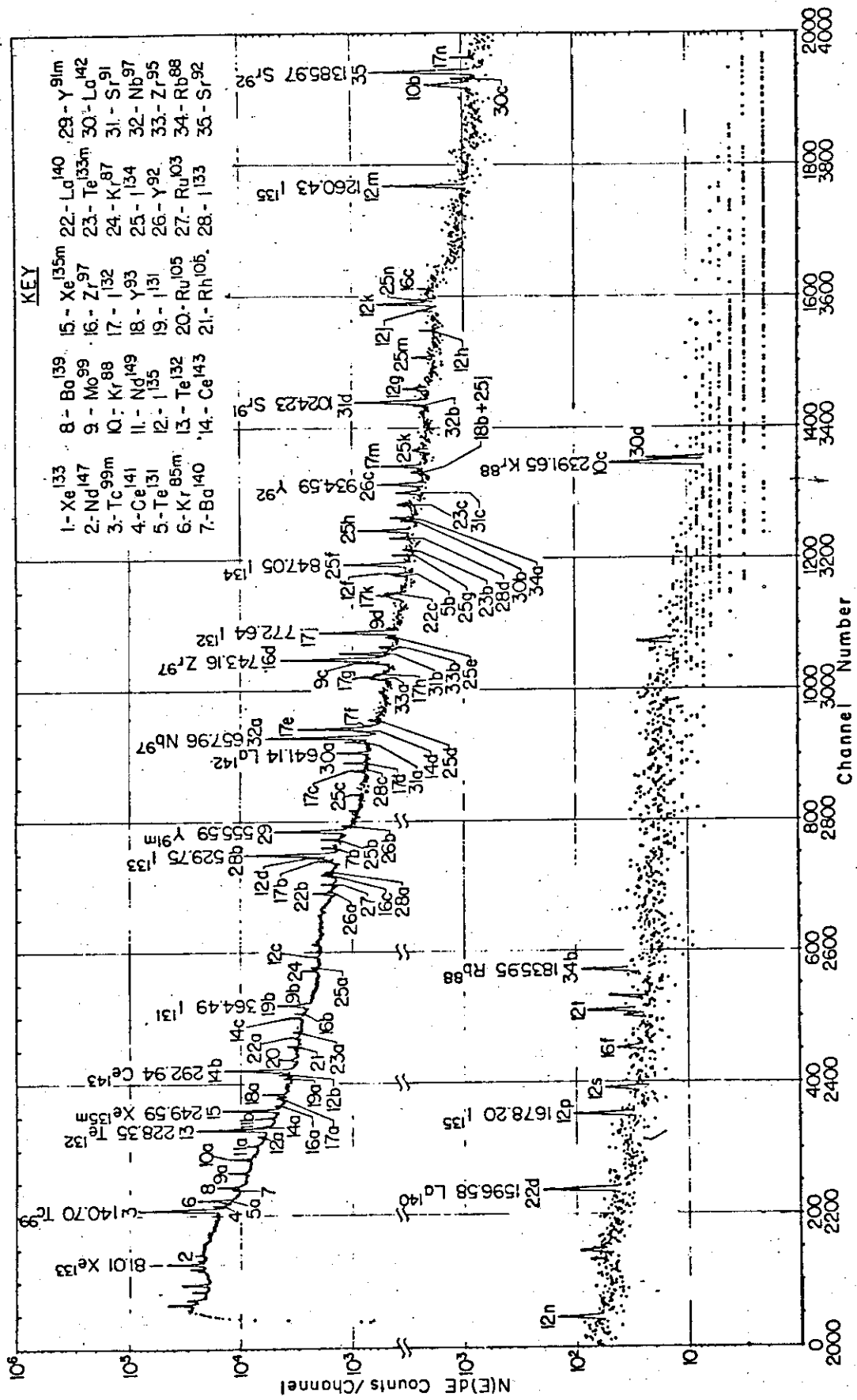


図 2.12 MTRで照射した ²³⁵U のガンマ線スペクトル。冷却時間 3 0 分。

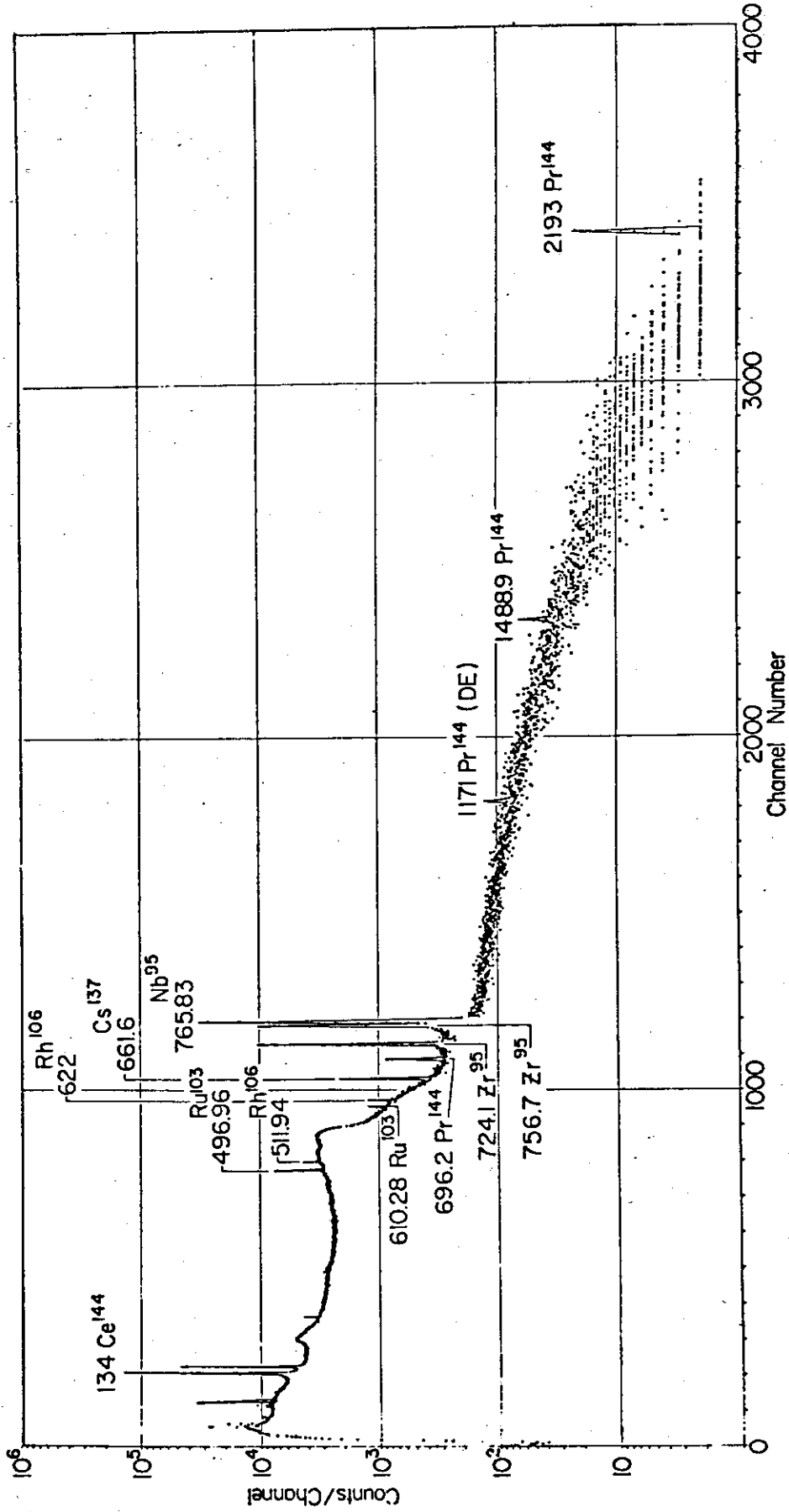


図 2.13 核分裂生成物のガンマ線スペクトル。²³⁵U を中性子束 $1.0 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ で燃焼率 5% まで照射し、180 日冷却したものの。

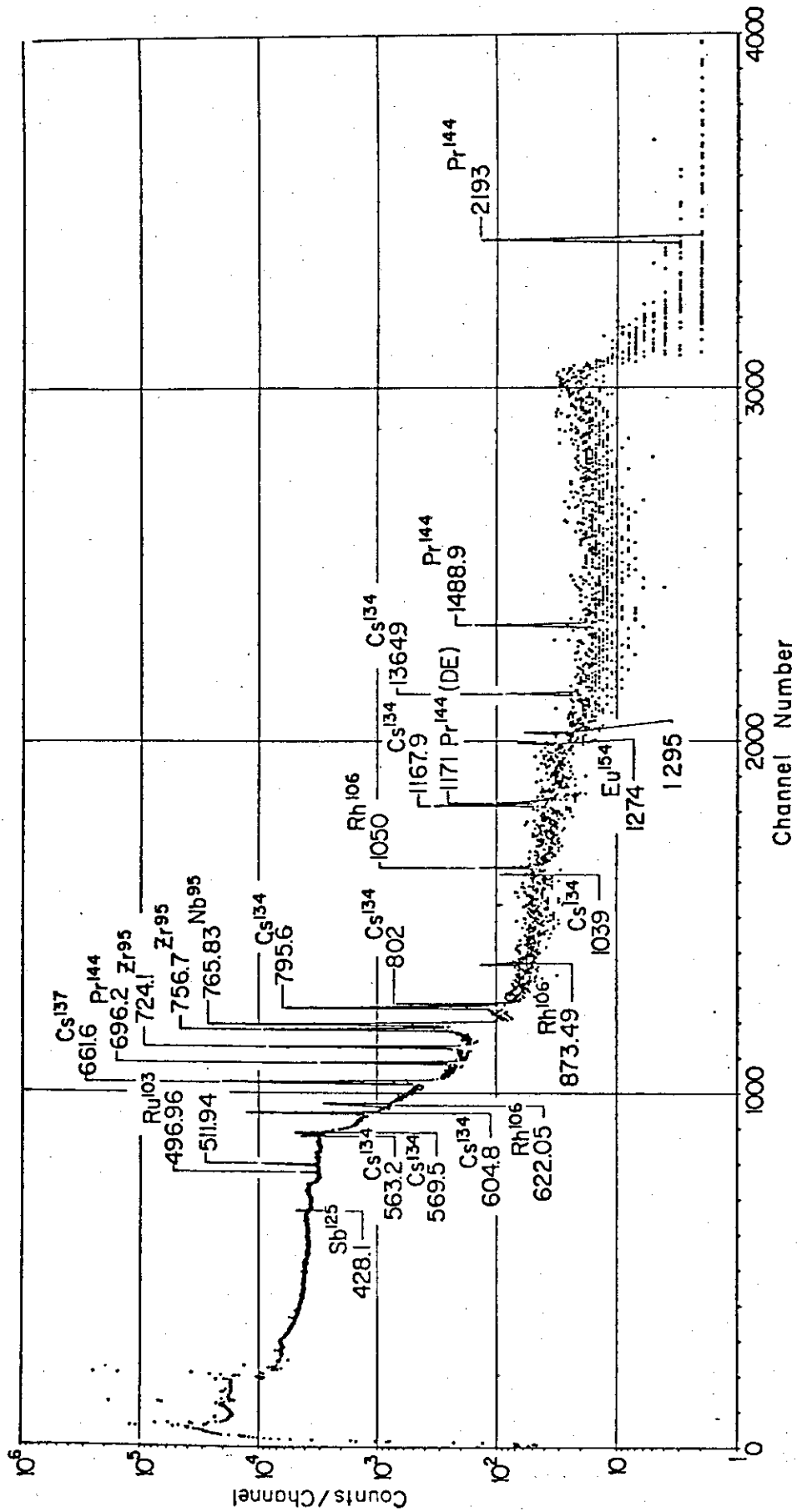


図 2.14 核分裂生成物のガンマ線スペクトル。²³⁵U を燃焼率 50% まで照射し、250 日冷却したものの。

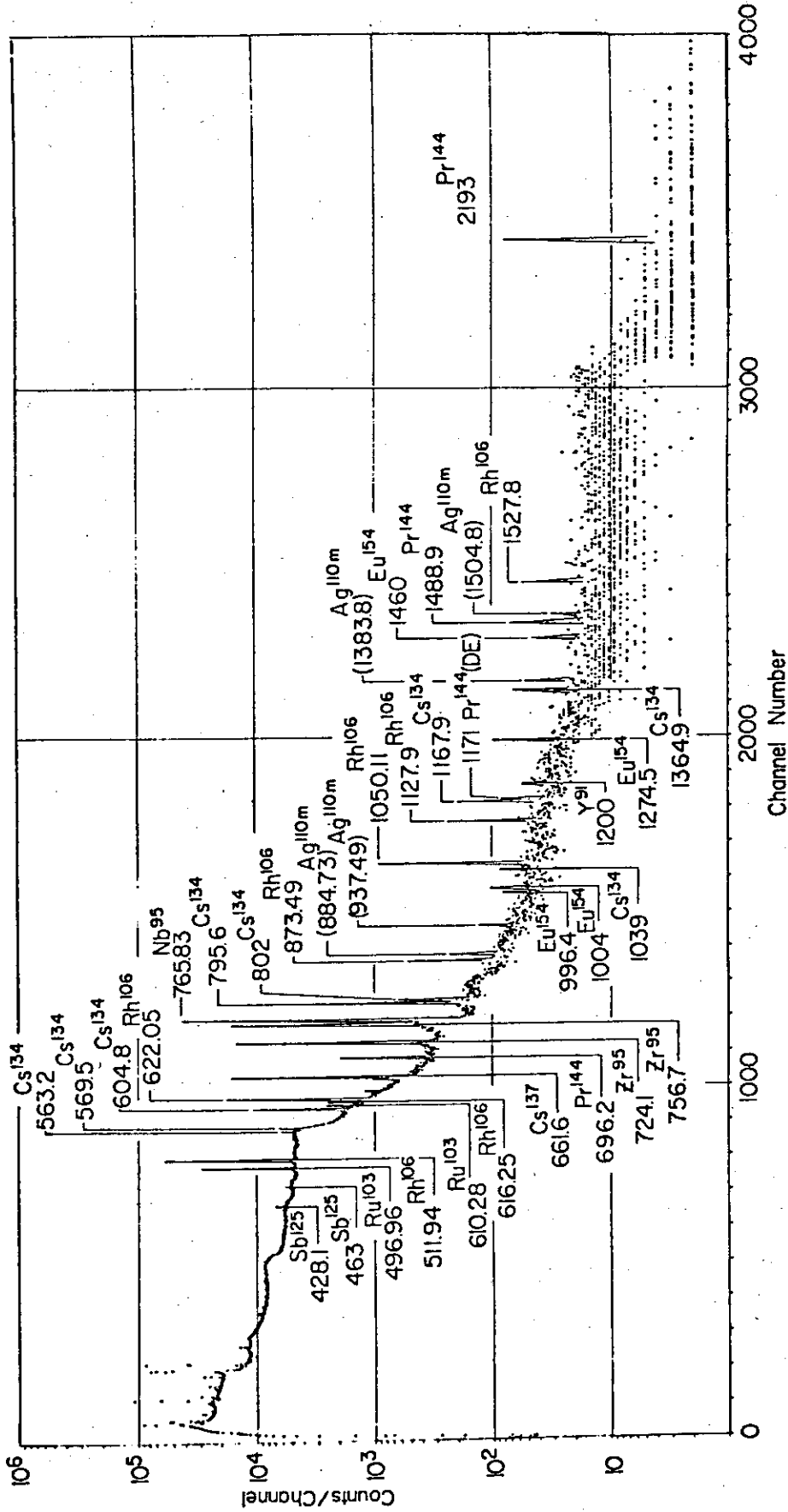
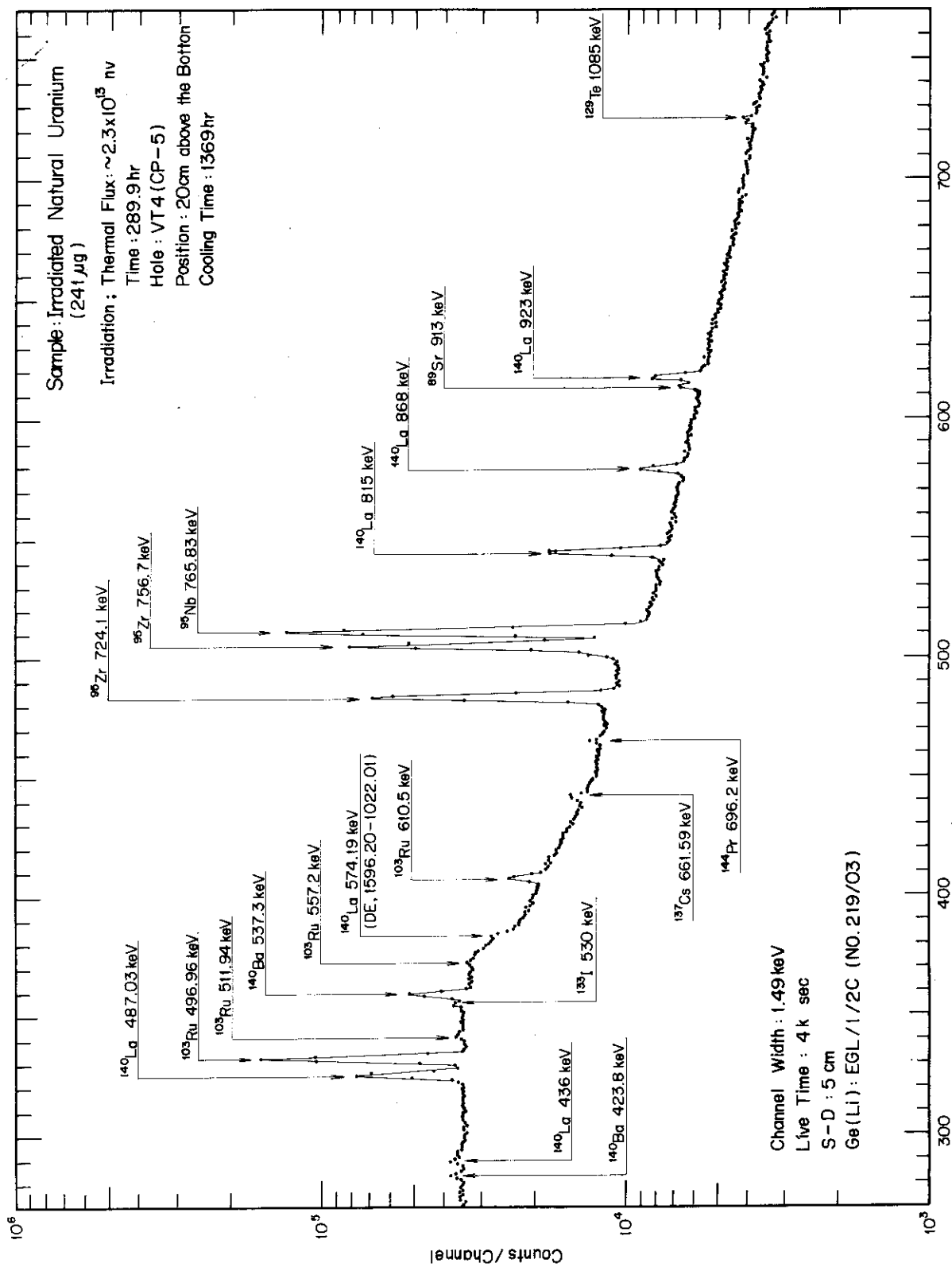


図 2.15 核分裂生成物のガンマ線スペクトル。²³⁹Pu を中性子束 $2 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ で燃焼率 70% まで照射, 180 日冷却したものの。



Channel Number

図 2.16 使用済天然ウラン燃料のガンマ線スペクトル

表2.15 F Pに含まれる元素とF Pを扱う分野

	Kr	Xe	Rb	Cs	Ag	Sr	Ba	Y	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Zr	Nb	Sb	Mo	Te	Te	Br	I	Ru	Rh	Pd	アウチノイド	T
燃 焼 率 測 定				○			○			○		○								○									
Fall Out (環 境 試 料)				○			○			○									○						○				○
原 子 炉 安 全 (気 体)	○																						○						
再 処 理 廃 棄 物	○			○		○				○								○					○						○
廃 棄 物 処 分				○		○																							○
F P の 利 用	○			○		○																		○					
R I 製 造				○		○							○											○			○		
原 子 炉 廃 棄 物 (液 体 , 気 体)	○			○		○																		○					○
酸 化 物 燃 料 の 照 射 拳 動	○			○						○														○					
酸 化 物 燃 料 ヒ フ ク 管 と の 相 互 作 用				○																				○					
原 子 炉 に お け る 中 性 子 毒 作 用		○																											

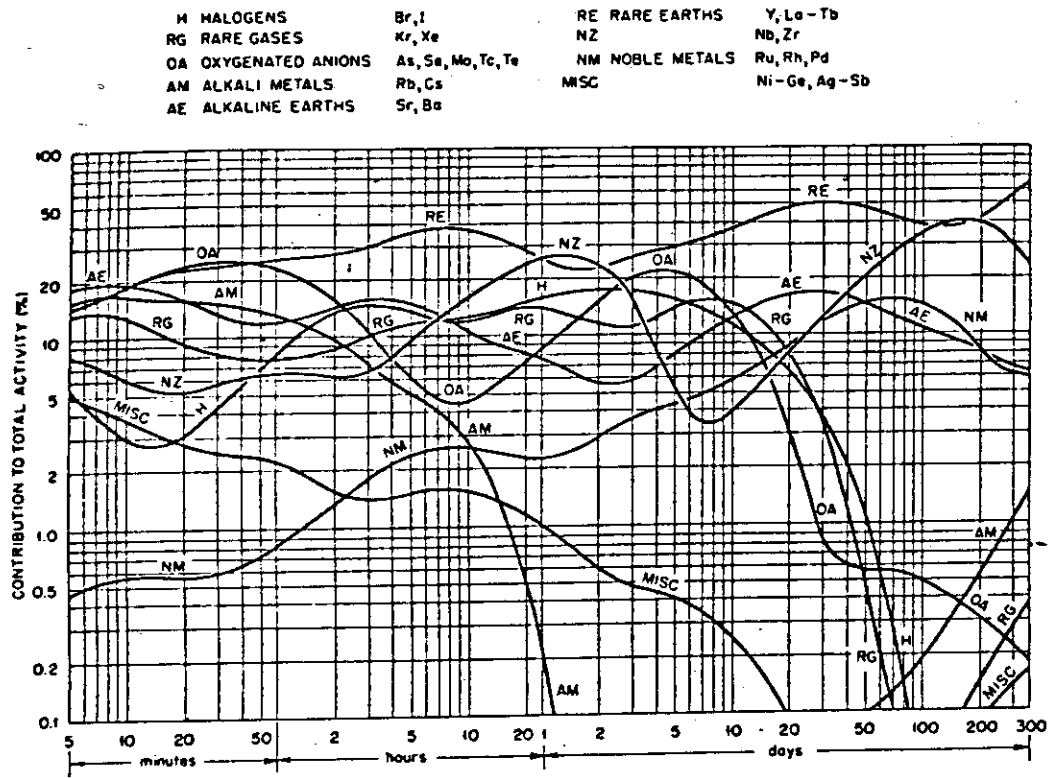


図 2.17 計算による ^{235}U の瞬時的核分裂後の F P グループの量

表 2.16 1100MW_e PWRの停止時および減衰時間による放射能計算値

減衰時間 (日)	放射能 (M Ci)							合計	全熱出力 (kW)
	沃素および 臭素同位体	貴ガス	全核分裂 生成物	アクチノイド	放射 生成物	化 合物	計		
0	1435	1240	13800	3450	10.6		17250	225000	
1	265	221	2890	1330	9.19		4230	17400	
5	101	105	1870	432	8.42		2310	9720	
15	28.7	29.0	1280	39.7	7.50		1330	5600	
30	6.74	4.77	947	9.35	6.40		963	4060	
60	0.494	0.784	656	6.32	4.76		666	2350	
120	0.00282	0.659	401	5.90	2.76		410	1740	
210	0.00000309	0.648	244	5.56	1.36		250	1100	
365	0.00000218	0.630	146	5.17	0.614		152	659	
1097	0.00000218	0.553	47.3	4.45	0.324		52.0	204	
3653	0.00000218	0.353	17.9	3.27	0.132		21.3	67	

* 原子炉は比出力37.5MW/tonで連続運転(293日)されたのち、燃料交換の直前に停止したと仮定。これ以前1100日の平均比出力は30MW/t、炉の燃料は3.3%濃縮ウランで、濃縮ウランの全量は82ton。

表 2.17 おもな核分裂生成物の放射能
(揮発性の差により分類)

Element	Activity (keurie/Mw(t)) for 1 Year of Operation		Weight (g)
	At shutdown	1 day after shutdown	
Rare gases (Xe, Kr)	385	62	61
I	289	53	2.6
Te, Cs	220	37	40
Ru	27	27	19
Sr, Ba	144	98	31

熱中性子束 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$, 軽水炉燃料。

表 2.18 廃棄物としてのFPの分類

Nuclides	Half-life	Process and remarks
^{90}Sr	28 years	Storage-decay (and burn?)
^{137}Cs , ^{135}Cs	30 years, 3×10^6 years	Storage-decay
^{85}Kr	10.6 years	Storage-decay
^{129}I	1.7×10^7 years	Storage (and burn?)
Most other fission products	Short (or low toxicity)	Storage-decay
Pu, transplutonium	Medium-long	Storage, burn, ETT ^a
$^{242,244}\text{Pu}$ and $^{247,248}\text{Cm}$	Very long	Storage or ETT ^a

^a Extraterrestrial transport.

(ストロンチウムとバリウム)は揮発性は低いが核分裂収率が高く、生物学的半減期が長く骨と肺にどどまる。

(ルテニウム)は酸化性ふんい気で簡単に揮発し、しかも有毒である。

(その他のFP)は半減期が短い、生成量が少ない、毒性が低いなどの理由でまとめて扱う。

表 2.18 では廃棄物処理の立場での分類が行なわれている¹⁶⁾。ここでは半減期の長い β , γ 放射体、半減期が極めて長く毒性もある α 放射体がグループになっている。アルファ放射体核種については、あとでのべる。核分裂生成物でこの種の分類の対象となる高レベル放射性廃棄物は表 2.6 から分るがこのほかに再処理廃液中のFP各元素の濃度を計算した例を表 2.19 に示す^{92, 93)}。形のない、放射能だけの塊ではなく、重さと形のある化学物質として扱われるFPのひとつの姿がある。さらに、長期間にわたる処分の観点から計算された、核分裂生成物元素の相対的放射能強度を図 2.18 に示す⁹⁶⁾。

表 2.19 おもな核分裂生成物の生成量

元 素	再処理廃液中核分裂生成物濃度 (M) *1		核分裂生成物重量 (g) *2
	20,000 MWD/T at 15 MW/T	45,000 MWD/T at 30 MW/T	
Mo	0.065	0.130	85
Tc	0.014	0.031	25
Sr	0.0155	0.036	40
Ba	0.0195	0.041	40
Cs	0.035	0.078	110
Rb	0.007	0.014	—
Y+R.E.	0.12	0.274	315
Zr	0.065	0.143	115
Ru	0.032	0.082	55
Rh	0.0074	0.013	12
Pd	0.017	0.043	—
Ag	0.0008	0.0016	—
Cd	0.0008	0.0025	—
Te	0.0064	0.014	—
全 F.P.s.	0.91	2.11	982

* 1 軽水炉燃料中のウラン1トンから100ガロン(378ℓ)の廃液がえられるとした場合の計算値

* 2 天然ウラン1トン, 1000MWD, 100日冷却のときの値

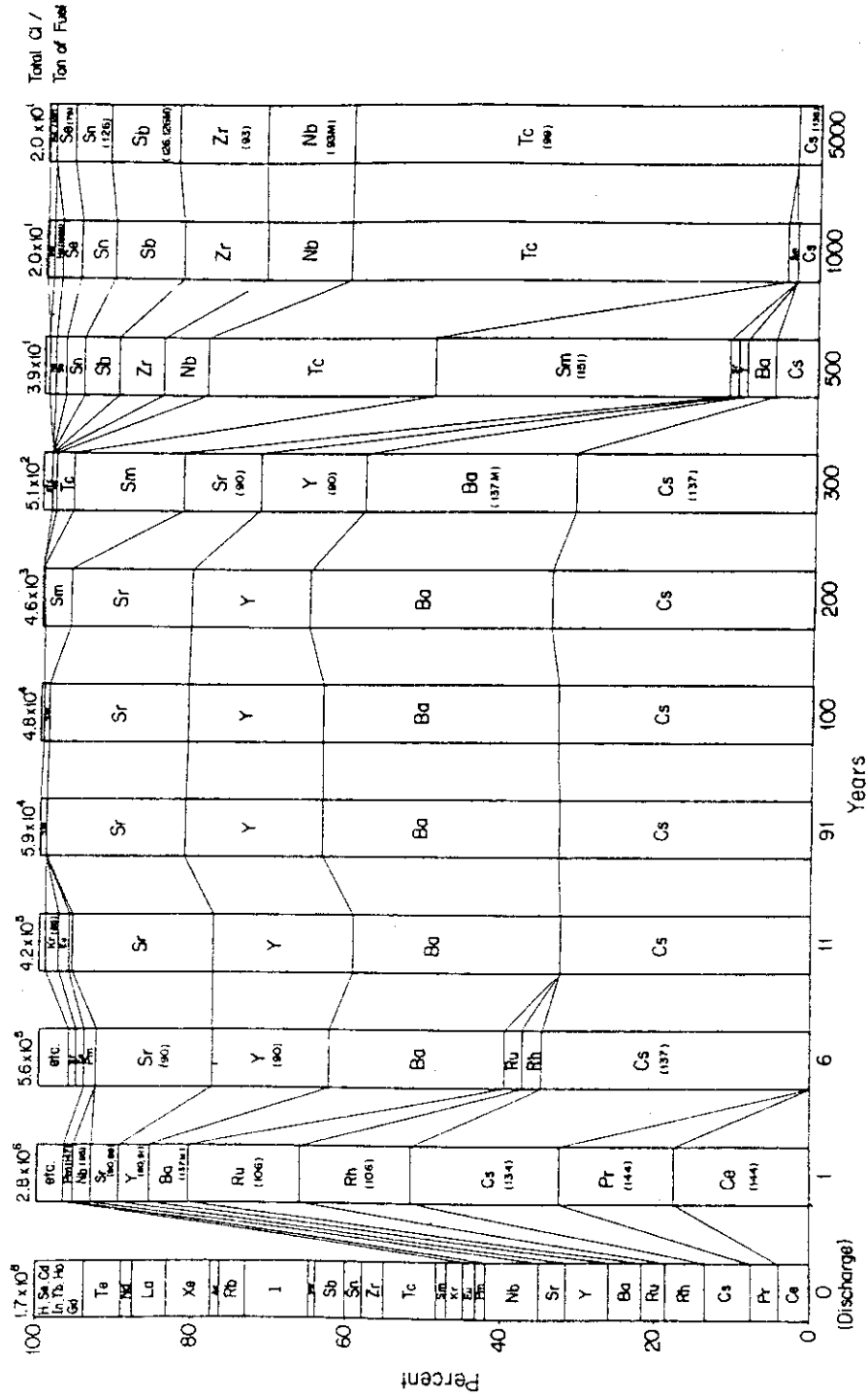


図 2.18 核分裂生成物元素の相対的放射能強度 (燃焼度 48200 MWD/T) ; 括弧内の数字は主要核種の質量数, 上辺の数字はその時点での全放射能。出力 33.0 MW/T, 中性子束 $3.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 3% 濃縮 UO_2 燃料の PWR で 4 年間の照射を仮定。

2.11 2章引用文献

- 1) 石森富太郎 編：“原子炉工学講座 1,” 培風館, 東京, (1972).
- 2) Herrmann G.: Radiochim. Acta, 3, 169 (1964).
- 3) 日本化学会 編：“化学便覧, 基礎編 I,” 丸善, 東京 (1975).
- 4) 日本化学会原子量小委員会：化学と工業, 35, (4) (1982).
- 5) 玉虫文一, 富山小太郎, 小谷正雄, 安藤鋭郎, 高橋秀俊, 久保亮五, 長倉三郎, 井上敏 編：“岩波理化学辞典,” 岩波書店, 東京 (1975).
- 6) Seelman-Eggebert W., Pfennig G. and Münzel H.: “Karlsruher Nuklidkarte”, Gersbach u. Sohn Verlag, München (1974).
- 7) Heslop R. B., Jones K.; 斎藤喜彦 訳：“無機化学, (上), (下),” 東京化学同人, 東京 (1978).
- 8) Cook G. A.: “Treatise on Analytical Chemistry” Part II, Vol. 1, Interscience Publishers, New York, p. 207 (1961).
- 9) Momyer F. F., Jr.: NAS-NS-3025 (1960).
- 10) 村田寿典：空気清浄, 10, (2) 55 (1972).
- 11) 板倉哲郎, 橋本達也, 目黒芳紀, 空気清浄, 10, (2) 16 (1972).
- 12) 米原子力委員会 編, 木原博, 向坊隆, 村主進, 監訳：“原子力安全性ハンドブック,” 産報, 東京 (1975).
- 13) 天野恕：化学と工業, 26, (1) 2 (1973).
- 14) Lederer C. M., Hollander J. M. and Pelman I.: “Table of Isotopes”. sixth edition, John Wiley & Sons, New York (1967).
- 15) Meek M. E. and Rider B. F.: NEDO-12154 (1972).
- 16) Rupp A. F.: ORNL-4776 (1972).
- 17) Crouch E. A. C.: Atomic Data and Nucl. Data Tables, 19, (5) (1977).
- 18) Katcoff S.: Nucleonics, 16, 78 (1958).
- 19) 日本アイソトープ協会編：“ラジオアイソトープ講義と実習,” 丸善, 東京 (1973).
- 20) 山崎文男, 玉木英彦 編：“体内放射線の許容量に関する専門委員会Ⅱの報告,” 日本放射性同位元素協会, 仁科記念財団, 東京 (1960).
- 21) U. S. NRC, Core Performance Branch: NUREG-75/077 (1975).
- 22) Thompson T. J. and Beckerley J. G. edited: “The Technology of Nuclear Reactor Safety,” Vol. 2, MIT Press, Cambridge (1973).
- 23) 原子力委員会：“発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する評価指針について,” (1976).
- 24) 石渡名澄 JAERI-M 5440 (1973).
- 25) 石渡名澄 JAERI-M 7092 (1977).
- 26) 橋谷博, 小森卓二, 山本忠史：日本原子力学会誌, 13, 335 (1971).
- 27) Natsume H., Umezawa H., Okazaki S., Suzuki T., Sonobe T. and Usuda

- S.: J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 9, 737 (1972).
- 28) Finston, H. L., Kinsley, M. T.: NAS-NS-3035 (1961).
- 29) Kallmann S.: "Treatise on Analytical Chemistry," Part II, Vol. 1, Interscience Publishers, New York, p. 301 (1961).
- 30) Leddicotte G. W.: NAS-NS-3053 (1962).
- 31) Okashita H. and Natsume H.: J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 9, 241 (1972).
- 32) Sunderman D. N. and Townley C. W.: NAS-NS-3047 (1961).
- 33) Keim R.: "Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie," Silber Teil B1, Verlag Chemie, Weinheim, p. 61 (1971)
- 34) Sunderman D. N. and Townley C. W.: NAS-NS-3010 (1960).
- 35) DeVOE J. R.: NAS-NS-3001 (1960).
- 36) Stevenson P. C. and Nervik W. E.: NAS-NS-3020 (1961).
- 37) Ryabchiokov D. I. and Ryabkhin V. A., translated by Aladjem A.: "Analytical Chemistry of Yttrium and the Lanthanide Elements," Ann Arbor-Humphrey Science Publishers, Ann Arbor (1970).
- 38) 中井敏夫, 斎藤信房, 石森富太郎 編: "無機化学全書, XVⅡ-3, 放射性元素," 丸善, 東京 (1974).
- 39) Keller C.: "The Chemistry of the Transuranium Elements," Verlag Chemie, Weinheim (1971).
- 40) Freiling E. C. and Bunny L. R.: J. Am. Chem. Soc., 76, 1021 (1954).
- 41) Wheelwright E. J. edited: "Promethium Technology," American Nuclear Society, Hinsdale (1973).
- 42) 別刷化学工業, 12, (10)工場操作シリーズ抽出編, 化学工業社, 東京, p. 117 (1968).
- 43) Hahn R. B.: "Treatise on Analytical Chemistry," Part II, Vol. 5, Interscience Publishers, New York, p. 61 (1961).
- 44) Steinberg E. P.: NAS-NS-3011 (1960).
- 45) 日本化学会 編: "実験化学講座12, 放射化学," 丸善, 東京, p. 353 (1956).
- 46) Ishimori T. and Kobayashi Y.: J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 2, 108 (1965).
- 47) Steinberg E. P.: NAS-NS-3039 (1961).
- 48) Bailer J. C., Emeleus H. J., Nyholm R. and Trotman-Dickenson A. F. edited: "Comprehensive Inorganic Chemistry," Pergamon Press, Oxford (1973).
- 49) Maeck W. J.: NAS-NS-3033 (1961).
- 50) Akatsu, E., Tomizawa, T., Aratono, Y.: J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 11, 571 (1974).

- 51) 東条隆夫, 近藤真: JAERI-M 6555 (1976).
- 52) Scadden E. M. and Ballou N. E.: NAS-NS-3009 (1960).
- 53) 天野恕, 中村治人, 久保田益充, 高橋智子, 館盛勝一: JAERI-4051 (1969).
- 54) Kubota M. and Amano H.: J. Radioanal. Chem.: 40, 41 (1977).
- 55) Kubota M. and Amano H.: J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 14, 376 (1977).
- 56) Motojima K., Tanase M., Suzuki K. and Iwasaki M.: Int. J. Appl. Radiat. Isot., 28, 485 (1977).
- 57) Green T. E. and Turley M.: "Treatise on Analytical Chemistry," Part II, Vol. 7, Interscience Publishers, New York, p. 137 (1961).
- 58) Leddicotte G. W.: NAS-NS-3038 (1961).
- 59) Tanase M. and Motojima K.: Int. J. Appl. Radiat. Isot., 28, 641 (1977).
- 60) 三宅泰雄, 宮嶋竜興, 木越邦彦, 池田長生, 斎藤一夫, 塩川孝信, 中井敏夫 編: "放射化学ハンドブック," 朝倉書店, 東京, p. 231 (1962).
- 61) Anders E.: NAS-NS-3021 (1960).
- 62) Colton R.: "The Chemistry of Rhenium and Technetium," Interscience Publishers, London (1965).
- 63) Peacock R. D.: "The Chemistry of Technetium and Rhenium," Elsevier Publishing Co., Amsterdam (1966).
- 64) 柴田雄次, 山崎一雄 編: "無機化学全書Ⅲ, ハロゲン新版," 丸善, 東京 (1958).
- 65) Sellers, R. M.: RD/B/N4009 (1977).
- 66) Kleinberg J. and Cowan G. A.: NAS-NS-3005 (1960).
- 67) 木谷進, 高田準一, 宇野清一郎: 空気清浄, 10, (2) 63 (1972).
- 68) 木谷進, 池沢芳夫: 保健物理, 9, 223 (1974).
- 69) 吉田芳和, 成富満夫: 保健物理, 9, 233 (1974).
- 70) Tachikawa E., Tanase M. and Motojima K.: Int. J. Appl. Radiat. Isotop., 26, 758 (1975).
- 71) Numakura K., Saeki M. and Tachikawa E.: J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 10, 762 (1973).
- 72) Saeki M., Numakura K. and Tachikawa E.: Int. J. Appl. Radiat. Isot., 25, 407 (1974).
- 73) 山崎弥三郎, 平野見明, 助川友英, 滝洋, 錦沢友俊, 柴房雄, 千田豊一, SILグループ: 日本原子力学会, 昭和48年秋の分科会, 予稿集(II), p. 228, p. 230 (1973).
- 74) Wyatt E. I. and Rickard R. R.: NAS-NS-3029 (1961).
- 75) Walsh T. J. and Hausman E. A.: "Treatise on Analytical Chemistry," Part II, Vol. 8, Interscience Publishers, New York, p. 379 (1963).
- 76) Story A. H. and Gloyna E. F.: ORO-620 (1963).

- 77) 星野忠也, 渡利一夫: 化学の領域, 28, 211 (1974).
- 78) 木村健二郎 監修: “原子力研究の進歩 (材料, 化学編), ” 南江堂, 東京, p. 211 (1960).
- 79) Brown P. G. M., Fletcher J. M., Hardy C. J., Kennedy J., Scargill D., Wain A. G. and Woodhead J. L.: 第2回ジュネーブ会議, p/31, Vol. 17, United Nations, Geneva, p. 118 (1958).
- 80) 石川昌史: 化学の領域, 28, 404 (1974).
- 81) Rohrmann C. A.: Isot. Radiat. Technol., 6, No. 4, 352 (1969).
- 82) Rohrmann C. A.: BNWL-SA-2786 (1969).
- 83) Roberts F. P.: BNWL-cc-2239 (1969).
- 84) Roberts F. P.: BNWL-1308-5, p. 11 (1970).
- 85) Armstrong J. C., Jr.: NAS-NS-3008 (1965).
- 86) Høgdahl Ove T.: NAS-NS-3052 (1961).
- 87) Katcoff S.: Nucleonics, 18, 201 (1960).
- 88) Hunter H. F. and Ballou N. E.: Nucleonics, 9, No. 11C-2 (1951).
- 89) Rasmussen N. C.: WASH-1076, p. 130 (1967).
- 90) Heath R. L.: WASH-1076, p. 115 (1967).
- 91) 東条隆夫, 私信
- 92) The staff of ORNL, ORNL-4451 (1970).
- 93) Fletcher J. M.: 第一回ジュネーブ会議, p/413, 9, 459 (1956).
- 94) Akatsu, E. Aratono, Y.: Anal. Chim. Acta, 84, 347 (1976).
- 95) Akatsu, E. Aratono, Y.: Radiochem. Radioanal. Let., 19, 179 (1974).
- 96) 篠原伸夫, 岡下宏, 私信 (1981).
- 97) 上野景平, 斉藤幹彦, 玉奥克己, 分析化学, 18, 81 (1968); 17, 1548 (1967).
- 98) Cohen P., “Water Coolant Technology of Power Reactors”, American Nuclear Society (1980).
- 99) 日本化学会編, “化学便覧, 応用編”, 改定3版, 丸善, 東京 (1980).
- 100) 堀口博, “化学物質の安全性・危険性”, 三共出版, 東京 (1976).

3. アクチノイドの化学

核燃料物質に含まれる核種の核変換反応 transmutation reaction を原子炉技術者の立場から分類すると、つぎのようになる。

- (a) 核分裂性核種を生成する核反応。いわゆる親物質 fertile material から ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{233}U のような核種を生じるもので、増殖炉に関連のある核変換反応。
- (b) 核分裂性でない核種を生成する核反応。たとえば ^{236}U , ^{240}Pu , 超プルトニウム元素に属する ^{241}Am などを生じるもので、長寿命のアルファ放射体として、廃棄物の処理処分に関連がある。

さらにアイソトープ利用の立場から、高中性子束の原子炉を用いて、 ^{252}Cf の製造も行なわれる。このような核反応によって生成する核種の系統図を図 3-1 (a)と(b)に示す。このような核種はすべて、アクチノイド actinoids に属する。表 3.1 にアクチノイドの元素を示す。

表 3.1 アクチノイド元素

原 番	子 号	記号	名 称	電 子 構 造	原子価状態
89	Ac	アクチニウム (Actinium)		6d 7s ²	3
90	Th	トリウム (Thorium)		6d ² 7s ²	(2) <u>3, 4</u>
91	Pa	プロトアクチニウム (Protactinium)		5f ² 6d 7s ²	(3) <u>4, 5</u>
92	U	ウラン (Uranium)		5f ³ 6d 7s ²	2, 3, 4, <u>5, 6</u>
93	Np	ネプツニウム (Neptunium)		5f ⁴ 6d 7s ²	3, 4, <u>5, 6, 7</u>
94	Pu	プルトニウム (Plutonium)		5f ⁵ 6d 7s ² or 5f ⁶ 7s ²	3, <u>4, 5, 6, 7</u>
95	Am	アメリシウム (Americium)		5f ⁷ 7s ²	<u>3, 4, 5, 6, (7)</u>
96	Cm	キュリウム (Curium)		5f ⁷ 6d 7s ²	(2) <u>3, 4</u>
97	Bk	バークリウム (Berkelium)		5f ⁸ 6d 7s ² or 5f ⁹ 7s ²	<u>3, 4</u>
98	Cf	カリホルニウム (Californium)		5f ¹⁰ 7s ² or 5f ⁹ 6d 7s ²	2, <u>3, 4, (5)</u>
99	Es	アインスタイニウム (Einsteinium)		5f ¹¹ 7s ² or 5f ¹⁰ 6d 7s ²	2, <u>3</u>
100	Fm	フェルミウム (Fermium)		5f ¹² 7s ² or 5f ¹¹ 6d 7s ²	2, <u>3</u>
101	Md	メンデレビウム (Mendelevium)		5f ¹³ 7s ² or 5f ¹² 6d 7s ²	2, <u>3</u> 下線最も安定
102	No	ノーベリウム (Nobelium)		5f ¹⁴ 7s ²	2, 3 カッコ不確定
103	Lr	ローレンシウム (Lawrencium)		5f ¹⁴ 6d 7s ²	3

また、表 3.2 には、おもなアクチノイド核種の半減期と熱中性子による核反応断面積¹⁾、図 3.2 (a)~(c)に ^{238}U と ^{232}Th の (n, 2n) 反応断面積を^{2~4)}、表 3.3(a)~(d)には、おもなアクチノイドの壊変系列 disintegration series^{1, 5, 6)}を示す。

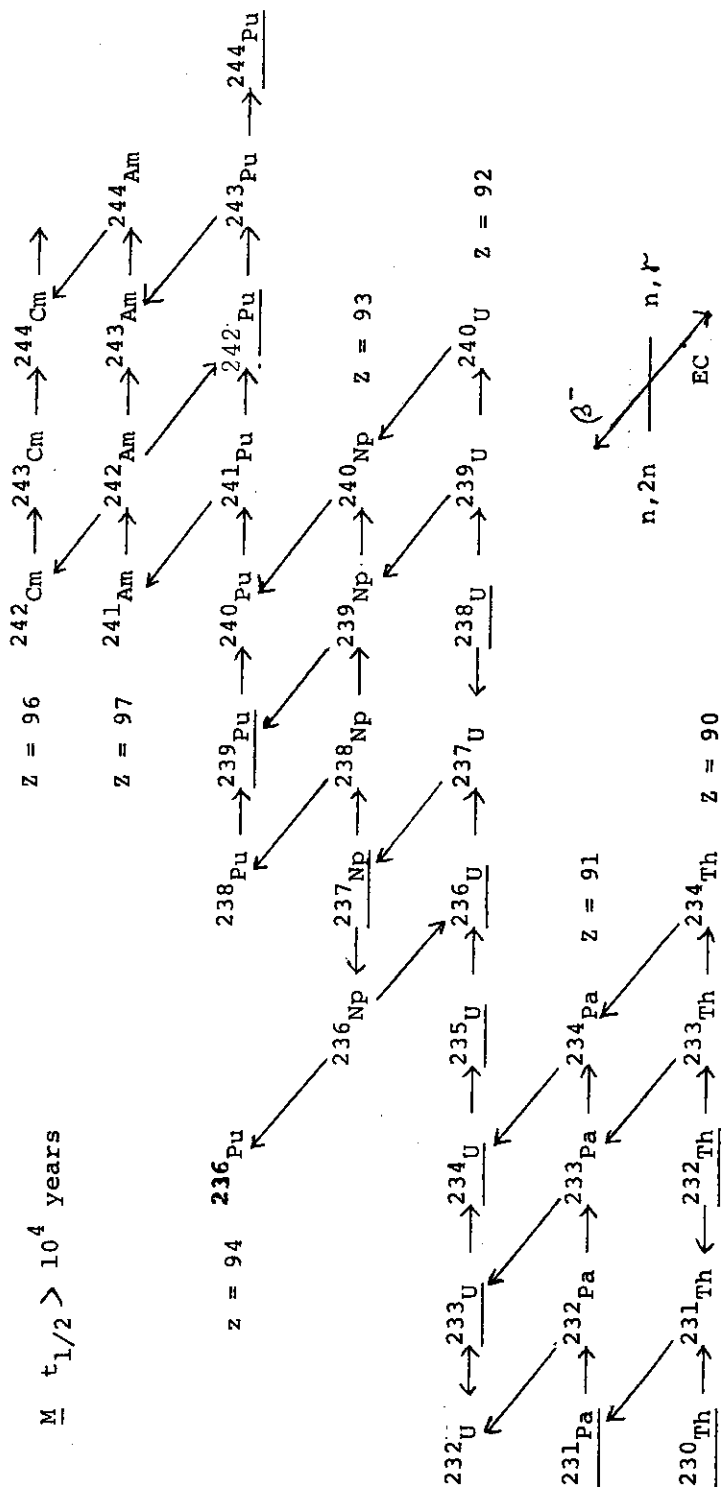


図 3.1 (a) 核燃料物質における核反応径路図 (1)

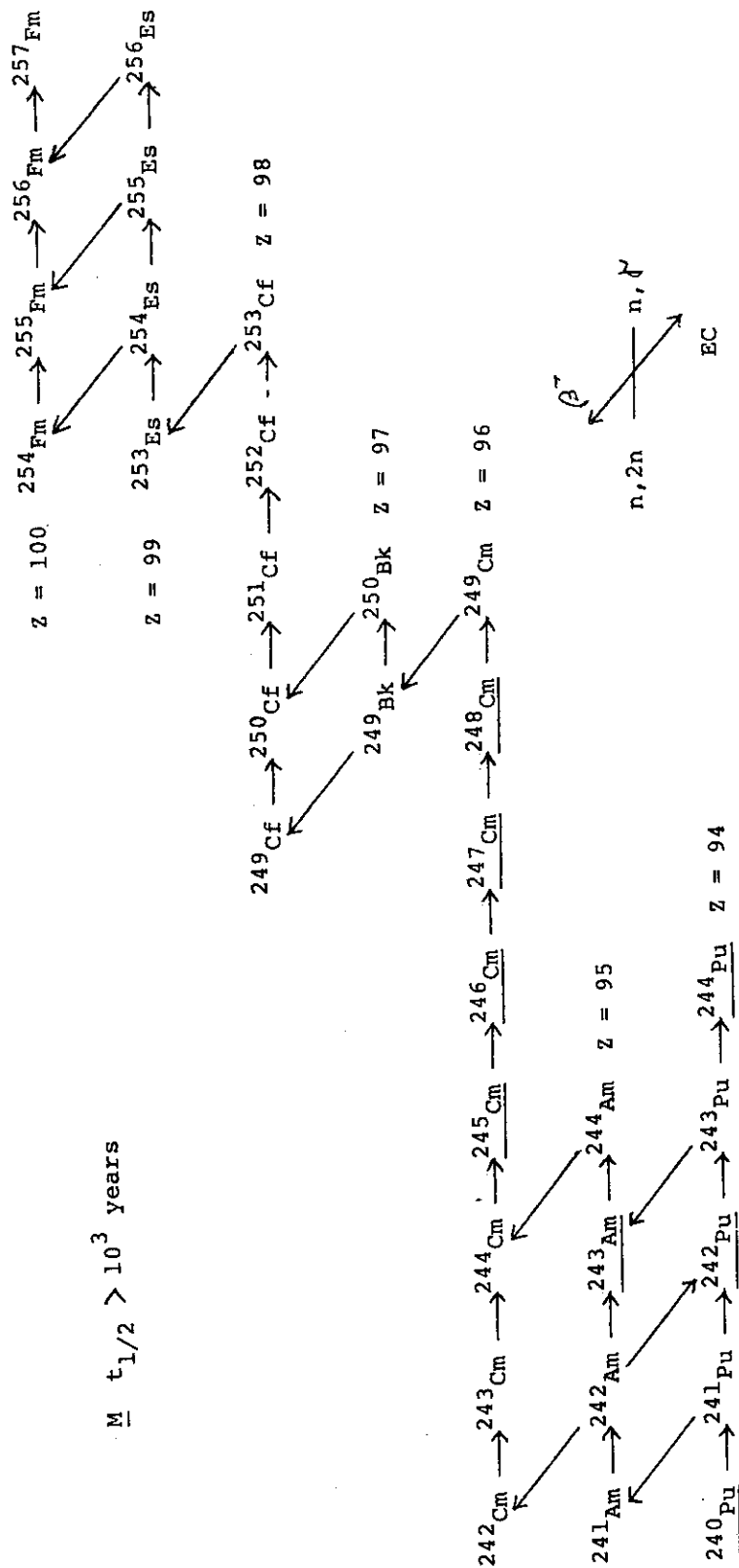


図 3.1 (b) 核燃料物質における核反応径路図 (2)

表 3.2 おもなアクチノイドの半減期と核反応断面積

核種	壊変形式	半減期 (同位体比)	自発核分裂 半減期 [year]	中性子捕獲断 面積 [barn]*1	核分裂断面積 [barn]*1
²²⁷ Ac	β^- 98.62% α 1.38%	21.773 y		900 ± 150	$< 3.5 \times 10^{-4}$
²²⁸ Ac	β^-	6.13 h			
²²⁷ Th	α	18.718 d			200 ± 20
²²⁸ Th	α	1.9131 y		100 ± 20	< 0.3
²²⁹ Th	α	7.3×10^3 y			30 ± 3
²³⁰ Th	α	8.0×10^4 y	$\geq 1.5 \times 10^{17}$	40 ± 10	< 0.001
²³¹ Th	β^-	25.52 h			
²³² Th	α	1.41×10^{10} y (100%)	$> 1 \times 10^{21}$	7.4 ± 0.1	5.6 ± 1.2
²³³ Th	β^-	22.3 m		$(1.4 \pm 0.1) \times 10^3$	15 ± 2
²³⁴ Th	β^-	24.10 d		2.0 ± 0.5	< 0.01
²³⁰ Pa	EC 90.5% β^- 9.5% α (0.0032%)	17.7 d			$(1.5 \pm 0.3) \times 10^3$
²³¹ Pa	α	3.28×10^4 y	$\geq 1.1 \times 10^{16}$	200 ± 30	$(1.9 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
²³² Pa	β^-	1.31 d		800 ± 100	700 ± 100
²³³ Pa	β^-	26.95 d		19 ± 3 *2 20 ± 4 *3	< 0.1
²³⁴ Pa	β^-	6.75 h			$< 5 \times 10^3$
^{234m} Pa	β^- 99.87% IT 0.13%	1.175 m			< 500
²³⁰ U	α	20.8 d			20 ± 10
²³¹ U	EC > 99% α 0.0055%	4.2 d			300 ± 300
²³² U	α	71.7 y	$\sim 8 \times 10^{13}$	74 ± 4	76 ± 4
²³³ U	α	1.591×10^5 y	1.2×10^{17}	46 ± 3	530 ± 5
²³⁴ U	α (0.0054%)	2.446×10^5 y	2×10^{16}	100 ± 5 *4	< 0.005
²³⁵ U	α (0.720%)	7.038×10^8 y	3.5×10^{17}	98 ± 1	580 ± 2
^{235m} U	IT	24.7 m			

核種	壊変形式	半減期 (同位体比)	自発核分裂 半減期 [year]	中性子捕獲断面積 [barn] *1	核分裂断面積 [barn] *1
²³⁶ U	α	2.342×10^7 y	2×10^{16}	5.1 ± 0.3	
²³⁷ U	β^-	6.752 d		400 ± 100	< 0.35
²³⁸ U	α	4.468×10^9 y (99.275%)	8.19×10^{15}	2.7 ± 0.1	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^{-6}$
²³⁹ U	β^-	23.54 m		22 ± 2	15 ± 3
²⁴⁰ U	β^-	14.1 h			
²³⁴ Np	EC > 99% β^+ 0.05%	4.40 d			$(1.0 \pm 0.4) \times 10^3$
²³⁵ Np	EC > 99% α 0.0016%	396 d		160 ± 20 *5	
²³⁶ Np	EC 91.1% β^- 8.9%	11×10^5 y			$(3.0 \pm 0.6) \times 10^3$
²³⁶ Np	EC 50% β^- 50%	22.5 h			
²³⁷ Np	α	2.14×10^6 y	$> 1 \times 10^{18}$	180 ± 20	$(2.0 \pm 0.5) \times 10^{-2}$
²³⁸ Np	β^-	2.117 d			$(2.1 \pm 0.5) \times 10^3$
²³⁹ Np	β^-	2.346 d		20 ± 20 *6 32 ± 6 *7	< 0.001
²⁴⁰ Np	β^-	67 m			
^{240m} Np	β^- 99.887% IT 0.113%	7.50 m			
²³⁶ Pu	α	2.851 y	3.5×10^9		150 ± 20
²³⁷ Pu	EC > 99% α 0.0033%	45.3 d			$(2.1 \pm 0.3) \times 10^3$
²³⁸ Pu	α	87.71 y	4.8×10^{10}	500 ± 50	17 ± 1
²³⁹ Pu	α	2.413×10^4 y	5.5×10^{15}	271 ± 3	742 ± 3
²⁴⁰ Pu	α	6.570×10^3 y	1.34×10^{11}	290 ± 10	< 0.08
²⁴¹ Pu	β^- > 99% α 0.00245%	14.355 y		370 ± 10	$(1.01 \pm 0.01) \times 10^3$
²⁴² Pu	α	3.763×10^5 y	6.75×10^{10}	19 ± 2	< 0.2
²⁴³ Pu	β^-	4.955 h		100 ± 50	200 ± 50
²⁴⁴ Pu	α	8.1×10^7 y	6.6×10^{10}	1.7 ± 0.2	
²⁴⁵ Pu	β^-	10.48 h		150 ± 30	
²⁴⁶ Pu	β^-	10.85 d			

核種	變形式	半減期 (同位体比)	自発核分裂 半減期 [year]	中性子捕獲断面積 [barn] *1	核分裂断面積 [barn] *1
²⁴¹ Am	α	432.0 y	1.15×10^{14}	562 ± 20 *8 62 ± 7 *9	3.24 ± 0.15
²⁴² Am	β^- 82.7% EC 17.3%	16.01 h			$(2.1 \pm 0.2) \times 10^3$
^{242m} Am	IT > 99% α 0.48%	152 y	9.5×10^{11}	$(1.65 \pm 0.40) \times 10^3$	$(7.36 \pm 0.50) \times 10^3$
²⁴³ Am	α	7370 y	2.0×10^{14}	6 ± 2 *10 80 ± 20 *11	< 0.08
²⁴⁴ Am	β^-	10.1 h			$(2.2 \pm 0.3) \times 10^3$
^{244m} Am	β^- > 99% EC 0.036%	26 m			$(1.6 \pm 0.3) \times 10^3$
²⁴⁵ Am	β^-	2.05 h			
²⁴² Cm	α	162.8 d	6.09×10^6	20 ± 10	< 5
²⁴³ Cm	α 99.74% EC 0.26%	28.5 y		130 ± 10	610 ± 30
²⁴⁴ Cm	α	18.10 y	1.345×10^7	14 ± 4	1.0 ± 0.5
²⁴⁵ Cm	α	8540 y		350 ± 50	$(2.0 \pm 0.2) \times 10^3$
²⁴⁶ Cm	α	4710 y	1.80×10^7	1.3 ± 0.5	0.2 ± 0.1
²⁴⁷ Cm	α	1.56×10^7 y		60 ± 30	100 ± 20
²⁴⁸ Cm	α 91.47% SF 8.26%	3.40×10^5 y	8.26%	4 ± 1	0.3 ± 0.1
²⁴⁹ Cm	β^-	65.3 m		2 ± 1	
²⁴⁹ Bk	β^- > 99% α 0.00145%	325 d	1.87×10^9		< 6
²⁵⁰ Bk	β^-	3.222 h			$(1.0 \pm 0.2) \times 10^3$
²⁴⁹ Cf	α	351 y	6.9×10^{10}	480 ± 30	$(1.63 \pm 0.03) \times 10^3$
²⁵⁰ Cf	α	13.08 y	1.66×10^4	$(2.0 \pm 0.2) \times 10^3$	< 350
²⁵¹ Cf	α	900 y		$(2.9 \pm 0.2) \times 10^3$	$(4.5 \pm 1.0) \times 10^3$
²⁵² Cf	α 96.91% SF 3.09%	2.646 y	(3.09%)	20 ± 2	32 ± 4
²⁵³ Cf	β^- 99.69% α 0.31%	17.82 d		18 ± 2	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^3$
²⁵³ Es	α	20.47 d	6.3×10^5	< 3 *12 160 ± 20 *13	< 60
²⁵⁴ Es	α	275.7 d	$> 2.5 \times 10^7$	< 40	$(2.8 \pm 0.1) \times 10^3$

核種	壊変形式	半減期 (同位体比)	自発核分裂 半減期 [year]	中性子捕獲断面積 [barn] *1	核分裂断面積 [barn] *1
^{254m} Es	β^- 99.59%	39.3 h	$> 1 \times 10^5$		$(1.8 \pm 0.1) \times 10^3$
	EC 0.08%				
	α 0.33%				
²⁵⁵ Es	β^- 92.0%	38.3 d	(0.004%)	65 ± 20	
	α 8.0%				
	SF 0.004%				
²⁵⁶ Es	β^-	22 m			
²⁵⁶ Es	β^-	7.6 h			
²⁵⁴ Fm	$\alpha > 99\%$	3.24 h	(0.0590%)		
	SF 0.0590%				
²⁵⁵ Fm	α	20.07 h	1.0×10^4	26 ± 3	$(3.3 \pm 0.3) \times 10^3$
²⁵⁶ Fm	SF 91.9%	2.63 h	(91.9%)		
	α 8.1%				
²⁵⁷ Fm	$\alpha > 99\%$	100.5 d	(0.210%)		$(3.0 \pm 0.2) \times 10^3$
	SF 0.210%				

* 1 the cross section for thermal neutrons

ただし, subcadmium (≤ 0.5 eV), および reactor spectrum (中性子エネルギーがはっきりしないが, およそ熱中性子とみなせる) の中性子によるデータを一部含む。

- * 2 to ²³⁴Pa
- * 3 to ^{234m}Pa
- * 4 to ²³⁵U
- * 5 to 22.5 h ²³⁶Np
- * 6 to ²⁴⁰Np
- * 7 to ^{240m}Np
- * 8 to ²⁴²Am
- * 9 to ^{242m}Am
- * 10 to ²⁴⁴Am
- * 11 to ^{244m}Am
- * 12 to ²⁵⁴Es
- * 13 to ^{254m}Es

表 3.3 (a) ^{238}U の壊変系列

核種	半減期(同位体比)	おもな放射線 (MeV)		
		α	β	γ
^{242}Pu	$3.76 \times 10^5 \text{ y}$	4.901	—	—
^{238}Np	2.12 d	4.857	—	—
^{238}Pu	87.71 y	—	1.236	1.029
^{238}U	$4.468 \times 10^9 \text{ y}$ (99.275%)	—	0.28	1.026
^{234}Th	24.10 d	—	0.25	0.984
^{234}Pa	1.175 m	—	—	—
^{234}Pa	6.75 h	—	—	—
^{234}U	$2.45 \times 10^5 \text{ y}$ (0.0054%)	5.498	—	—
^{230}Th	$8.0 \times 10^4 \text{ y}$	5.454	—	—
^{226}Ra	1599 y	4.196	—	—
^{222}Rn	3.8235 d	—	0.199	0.0928
^{218}Po	3.05 m	—	0.104	0.0923
^{218}At	~ 2 s	—	—	0.0633
^{218}Rn	35 ms	—	2.29	—
^{214}Pb	26.8 m	—	0.68	0.946
^{214}Bi	19.7 m	—	0.51	0.927
^{214}Po	164 μs	—	0.28	0.926
^{210}Pb	22.3 y	—	—	0.883
^{210}Bi	5.01 d	—	—	0.733
^{210}Po	138.38 d	—	—	0.570
^{206}Hg	8.1 m	—	—	0.226
^{206}Tl	4.18 m	—	—	0.131
^{206}Pb	(24.1%)	—	—	—

表 3.3(b) ^{235}U の壊変系列

核種	半減期(同位体比)	おもな放射線 [MeV]		
		α	β	γ
^{239}U	23.5 m	—	1.29	0.0747
^{239}Np	2.35 d	—	1.21	—
^{239}Pu	2.41×10^4 y	5.155	—	—
$^{235\text{m}}\text{U}$	24.7 m	—	—	—
^{235}U	7.04×10^8 y (0.720%)	4.392	—	0.186
^{235}U		4.358	—	0.144
^{231}Th	25.5 h	—	0.302	0.0842
^{231}Th			0.218	0.0256
^{231}Th			0.138	—
^{231}Pa	3.28×10^4 y	5.058	—	—
^{231}Pa		5.029	—	—
^{231}Pa		5.012	—	—
^{231}Pa		4.951	—	—
^{227}Ac	21.77 y	4.951	0.0455	—
^{227}Ac		4.938	—	—
^{227}Th	18.72 d	6.038	—	0.256
^{227}Th		5.978	—	0.236
^{227}Th		5.757	—	0.0502
^{223}Fr	21.8 m	5.34	1.12	0.080
^{223}Ra	11.43 d	5.717	—	0.050
^{223}Ra		5.608	—	0.269
^{219}At	0.91 m	6.28	—	—
^{219}Rn	3.96 s	6.819	—	0.402
^{219}Rn		6.553	—	0.271
^{215}Bi	7.4 m	—	—	—
^{215}Po	1.78 ms	7.386	—	—
^{215}At	0.10 ms	8.00	—	—
^{211}Pb	36.1 m	—	1.36	0.832
^{211}Pb				0.427
^{211}Pb				0.405
^{211}Bi	2.15 m	6.623	—	0.351
^{211}Bi		6.279	—	0.351
^{211}Po	0.52 s	7.450	—	—
^{207}Tl	4.79 m	—	1.431	—
^{207}Pb	(22.1%)	—	—	—

表 3.3(c) ^{232}U および ^{232}Th の壊変系列

核種	半減期(同位体比)	おもな放射線 (MeV)		
		α	β	γ
^{240}Pu	$6.57 \times 10^3 \text{ y}$	5.168	—	—
$^{236}\text{Np}^*$	22.5 h	—	0.537	0.688
^{236}Pu	2.85 y	5.768	—	—
^{236}U	$2.342 \times 10^7 \text{ y}$	5.721	—	—
^{232}U	71.7 y	4.494	—	—
^{232}Th	$1.41 \times 10^{10} \text{ y}$	4.445	—	—
^{228}Ra	5.77 y	5.321	—	—
^{228}Ac	6.13 h	5.264	—	—
^{228}Th	1.9131 y	4.016	—	—
^{228}Ra	—	3.958	0.039	—
^{228}Ac	—	—	0.0145	—
^{228}Th	—	—	2.18	0.969
^{228}Th	—	—	1.85	0.911
^{228}Th	—	—	1.11	0.338
^{228}Th	—	—	0.45	0.322
^{228}Th	—	5.423	—	2.615
^{228}Th	—	5.341	—	0.727
^{228}Th	—	—	—	0.583
^{228}Th	—	—	—	0.511
^{228}Th	—	—	—	0.239
^{224}Ra	3.66 d	—	—	0.241
^{224}Ra	—	5.686	—	—
^{220}Rn	55.6 s	—	—	—
^{216}Po	0.15 s	6.288	—	—
^{216}Po	—	6.779	—	—
^{212}Pb	10.64 h	—	0.569	0.239
^{212}Pb	—	—	0.331	—
^{212}Bi	60.60 m	—	0.569	0.239
^{212}Bi	—	6.090	2.250	2.614
^{212}Bi	—	6.051	1.55	0.727
^{212}Bi	—	—	—	0.583
^{212}Bi	—	—	—	0.511
^{212}Po	0.30 μs	8.784	—	—
^{208}Tl	3.053 m	—	1.80	2.615
^{208}Tl	—	—	1.52	0.860
^{208}Tl	—	—	1.29	0.583
^{208}Tl	—	—	—	0.511
^{208}Tl	—	—	—	0.277
^{208}Pb	(52.3%)	—	—	—

* ^{236}Np には、 $t_{1/2} 1.1 \times 10^5 \text{ y}$ の核異性体があり、91.1%がEC壊変、8.9%が β^- 壊変である。

表 3.3 (d) ^{237}Np の壊変系列

核種	半減期(同位体比)	おもな放射線 [MeV]		
		α	β	γ
^{241}Pu	14.355 y	4.896	0.0208	—
$\downarrow >99\%$		4.853		
^{241}Am	432.0 y	5.486	—	0.0595
$\downarrow 0.00245\%$		5.443		
^{237}U	6.752 d	—	0.245	0.208
\downarrow			0.09	0.101
^{237}Np	2.14×10^6 y	4.788	—	0.0595
\downarrow		4.770		0.0865
\downarrow		4.765		0.0294
^{233}Pa	26.95 d	—	0.257	0.312
\downarrow			0.145	0.300
\downarrow				0.0984
^{233}U	1.59×10^5 y	4.824	—	0.0947
\downarrow		4.783		—
^{229}Th	7340 y	4.901	—	0.211
\downarrow		4.845		0.193
\downarrow				0.157
\downarrow				0.154
\downarrow				0.143
\downarrow				0.137
\downarrow				0.132
\downarrow				0.124
^{225}Ra	14.8 d	—	0.320	0.040
\downarrow				—
^{225}Ac	10.0 d	5.830	—	—
\downarrow		5.794		
\downarrow		5.732		
^{221}Fr	4.8 m	6.341	—	0.218
\downarrow		6.126		
^{217}At	32.3 ms	7.067	—	—
$\downarrow 0.012\%$				
^{217}Rn	0.54 ms	7.742	—	—
\downarrow				
^{213}Bi	45.6 m	5.869	1.420	0.440
$\downarrow 97.84\%$			1.018	
^{213}Po	4.2 μ s	8.375	—	—
$\downarrow 2.16\%$				
^{209}Tl	2.20 m	—	1.8	1.566
\downarrow				0.465
\downarrow				0.117
^{209}Pb	3.25 h	—	0.645	—
\downarrow				
^{209}Bi	(100%)	—	—	—

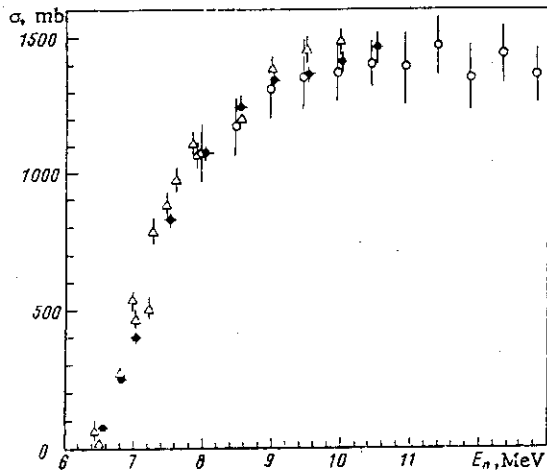


図 3.2 (a)
 $^{238}\text{U} (n, 2n)$ の核反応断面積
 (実測値)

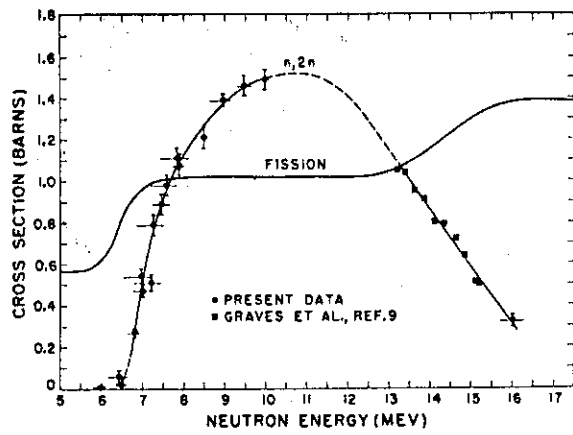


図 3.2 (b)
 $^{238}\text{U} (n, 2n)$ の核反応断面積

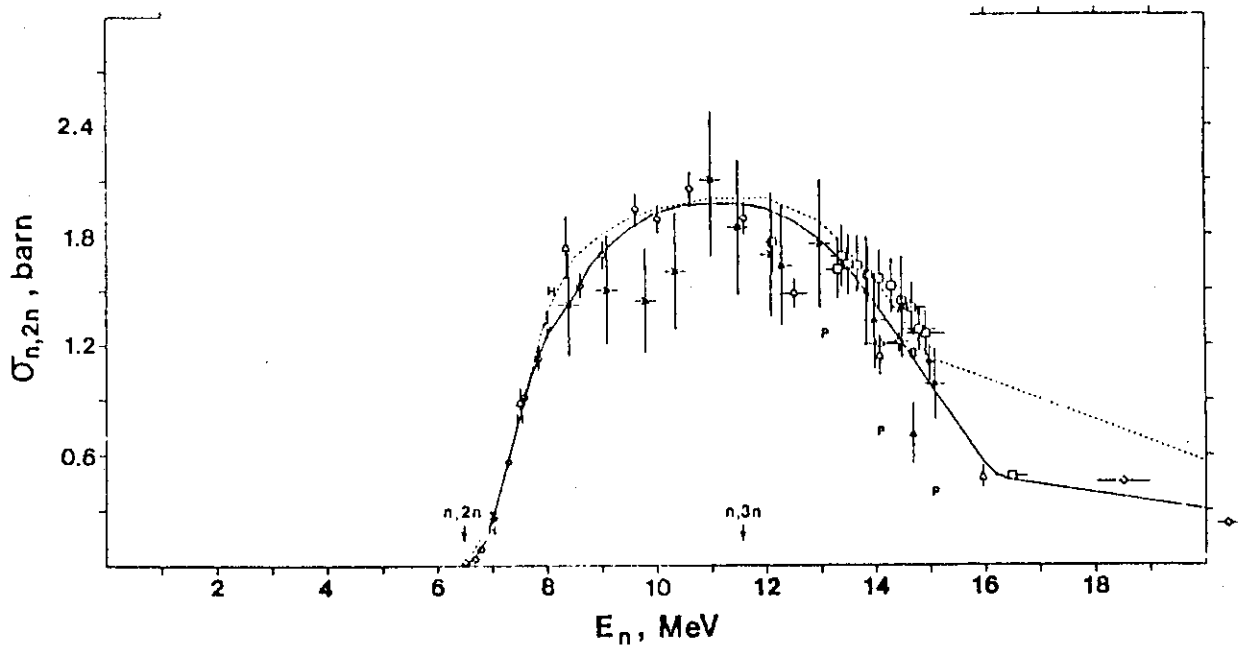


図 3.2 (c) $^{232}\text{Th} (n, 2n)$ の核反応断面積

アクチノイドは表 3.1 にあるような一群の元素の名称で、原子番号 89 のアクチニウムから、103 のローレンシウムまでの総称である。古くは原子番号 90 のトリウムからローレンシウムまでをアクチノイド元素 actinide elements と呼んだ。電子配置上、5 f 軌道が順次満たされる形になっており、4 f 軌道が順次満たされるランタノイド lanthanoids に対応する。周期表上、いずれも 3 族 A 亜族に属し、物理的、化学的性質が相互によく似ている。表 3.2 から分るように、アクチノイドの核種はすべて放射性で、その壊変形式は、おもにアルファ壊変である。アクチノイド元素に特有の性質としては、自発核分裂 spontaneous fission および誘導核分裂 induced fission がある。このような核的性質にもとづいて、おもに原子力関係で取り扱われるので、“元素”としての性質よりは、“核種”としての性質が重要になる。なおアクチノイド関係の用語で、原子番号 93 以上を超ウラン元素 transuranium elements、95 以上を超プルトニウム元素 transplutonium elements ということがある。

3.1 天然のアクチノイド

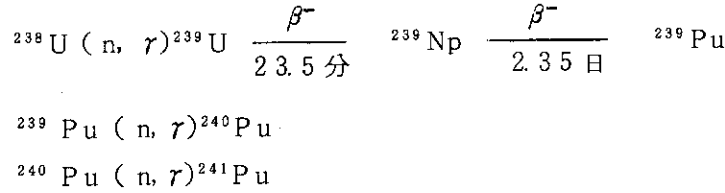
現在の地球上には、半減期の長いアクチノイドがその娘核種とともに存在する。図 3.1 (a)では半減期 10^4 年以上、(b)では 10^3 年以上の核種に下線をつけてある。地球の年齢は 4.5×10^9 年とされているが、現在は、これに近い半減期をもつウランとトリウムの核種がいくつか残っている。トリウムは、アクチノイド中存在量が最も多い元素で、 ^{232}Th (1.39×10^{10} 年、同位体比 100%) が、インドをはじめ、カナダ、ブラジル、アメリカなどで鉱石として産出する。天然ウラン natural uranium は、 ^{234}U (2.47×10^5 年、同位体比 0.0056%)、 ^{235}U (7.1×10^8 年、同位体比 0.7205%)、 ^{238}U (4.51×10^9 年、同位体比 99.2739%) の混合物である。鉱石としてピッチブレンドほか多数あり、コンゴ、カナダ、チェコスロバキヤなどに産出する。トリウムは、その化学的性質のため、ウランに比べると、自然条件の下で水溶性化合物をつくりにくい。このため、河川水や海水に含まれるトリウムの濃度は、ウランの濃度よりも低い。日本の河川水では、ウランが約 0.2 pCi l^{-1} 、トリウムが約 $0.3 \times 10^{-2} \text{ pCi l}^{-1}$ とされている⁷⁾。海水では、ウラン⁸⁾が $1 \sim 3 \mu\text{g l}^{-1}$ 、トリウム⁹⁾が $(2 \sim 6) \times 10^{-4} \mu\text{g l}^{-1}$ 含まれている。海水の量が莫大であることから、海水中のウランを採る計画がある¹⁰⁾。その他の天然に存在するアクチノイド元素は、ウランやトリウムの放射性壊変生成物として、鉱石中などに存在する。プロトアクチニウムがおもなもので、鉱石中のウラン 1 g あたり $3.2 \times 10^{-1} \mu\text{g}$ 含まれている。またごく微量のネプツニウムとプルトニウムが、ウラン鉱石中に検出されている^{8, 11)}。鉱石からウラン、プロトアクチニウム、トリウムの分離^{8, 9)}、ウランの同位体濃縮^{7, 12~15)}、原子炉燃料としての利用^{7, 13, 14)} については成書を参照されたい。

3.2 原子炉における核変換反応

ウランやトリウムを原子炉内で中性子照射すると、図 3.1 の径路にしたがって、さまざまな核種を生じる。超ウラン元素は、このようにして人工的に作られる。

原子炉燃料のひとつとして知られるプルトニウムのほとんどは、原子炉内で中性子照射をう

けたウラン燃料から得られる。ネプツニウムやその他の超ウラン元素の場合も、ウラン燃料やプルトニウム燃料中に生成する。プルトニウム同位体を生じる経路を詳しくかくと、つぎのようである。



^{238}U から生じるものであるから、天然ウラン、劣化ウラン、あるいは低濃縮ウランを原子炉燃料として使用すると、大量に生成する。天然ウラン黒鉛減速炉の場合に、いくつかの条件を仮定して計算したプルトニウム同位体の生成量を図 3.3^{11, 16)} に示す。 ^{239}Pu と ^{241}Pu は、表 3.4¹⁷⁾

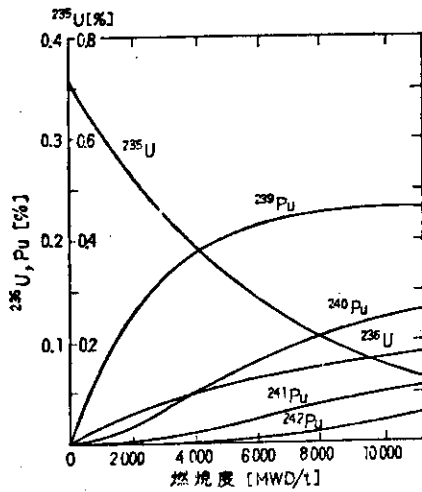


図 3.3 原子炉運転に伴うプルトニウムの生成 (天然ウラン黒鉛減速炉の一例)

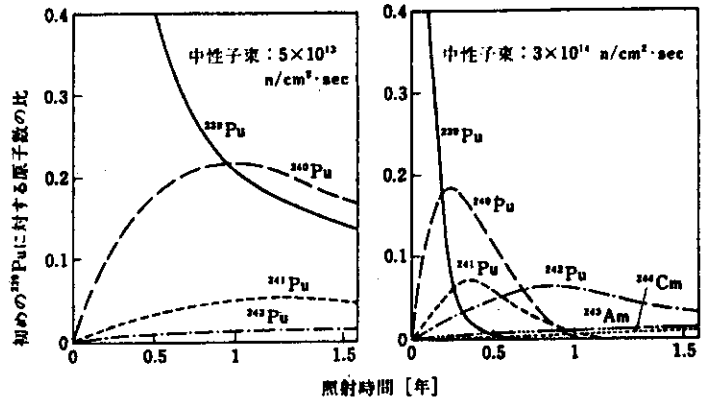


図 3.4 ^{239}Pu の中性子照射による Pu 同位体 Am, Cm の生成

表 3.4 Pu 同位体の中性子捕獲および核分裂断面積と壊変定数

核種	σ_c [b]	$\sigma_c \phi^*$	σ_f [b]	$\sigma_f \phi^*$	λ [sec ⁻¹]
^{239}Pu	274	7.22×10^{-8}	741	2.22×10^{-7}	8.99×10^{-13} α^{**}
^{240}Pu	286	8.58×10^{-8}	<0.08	< 2.4×10^{-11}	3.33×10^{-12} α
^{241}Pu	425	1.28×10^{-7}	950	2.85×10^{-7}	1.66×10^{-9} β^-
^{242}Pu	19	5.7×10^{-9}	<0.2	< 6×10^{-11}	5.78×10^{-14} α

σ_c : 中性子捕獲断面積, σ_f : 核分裂断面積, λ : 壊変定数

* $\phi = 3 \times 10^{14}$ n/cm²-sec, ** 壊変形式

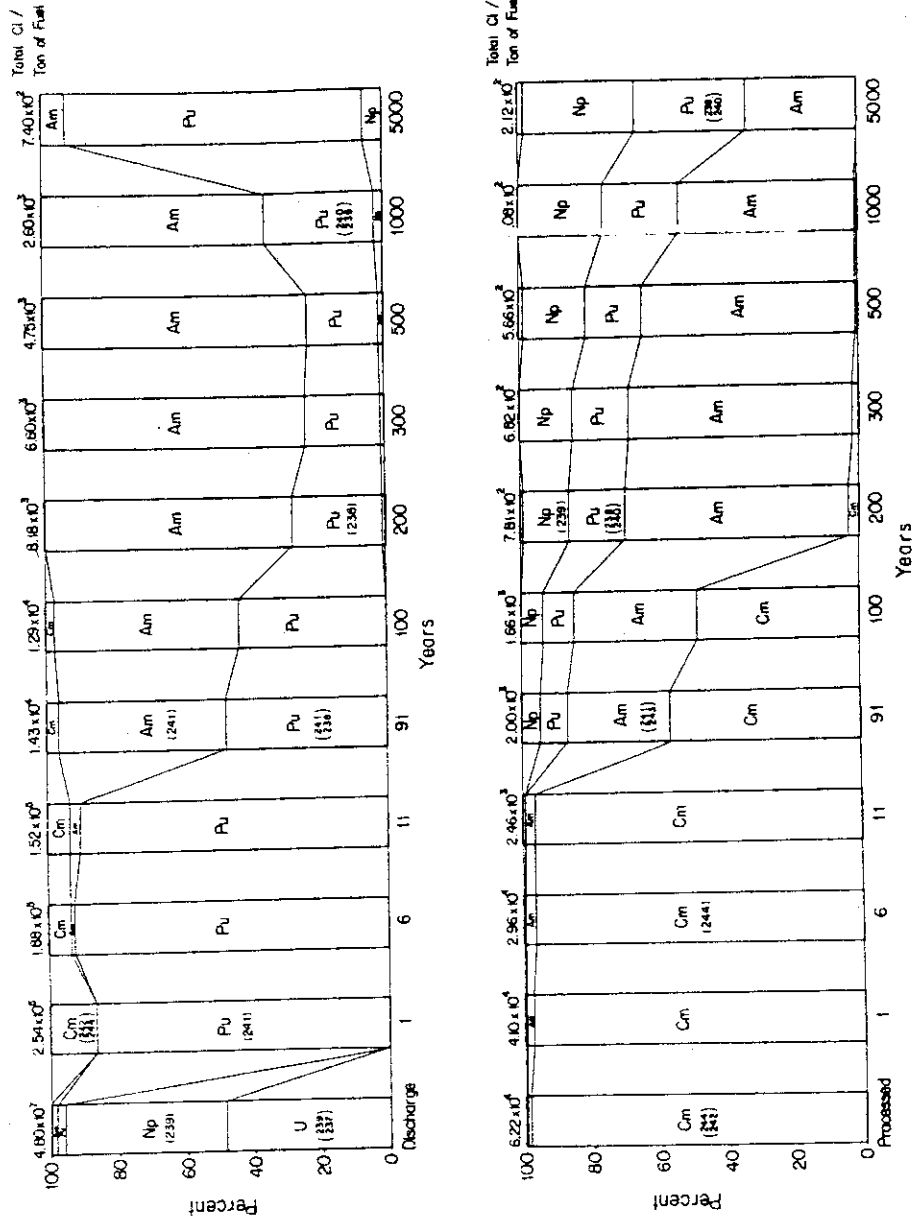


図 3.5 アクチノイド元素の相対的放射能強度

上図は照射後（燃焼度 4820 MWD/T）。下図は 1 年冷却後再処理したもの（燃焼度：60300 MWD/T）。括弧内の数字は主要核種の質量数、上辺の数字はその時点での全放射能。出力 33.0 MW/T, 中性子束 $3.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, 3%濃縮の UO_2 燃料の PWR で 4 年間の照射（上図）を仮定。

表 3.5 原子炉燃料中に生成する Pu, Am, Cm
(33000 MWD LWR fuel, ORNL-4776)

Nuclide	Half-life	Grams/tonne at-			Curies/tonne at-		
		1 year	10 years	90 days	1 year	10 years	100 years
²³⁹ Pu	24400 years	5380		330	330		
²⁴⁰ Pu	6600 years	2170		478	478		
²⁴¹ Pu	13.2 years	975		116000	111000		
²⁴² Pu	380,000 years	349		1.4	1.4		
²⁴³ Pu	5 hr						
²⁴⁴ Pu	7 × 10 ⁷ years						
²⁴⁵ Pu	11 hr						
²⁴⁶ Pu	11 days						
²⁴¹ Am	462 years	928		172	301		
^{242m} Am	152 years			4	4		
²⁴³ Am	7370 years	90		17	17		
²⁴⁴ Am	10 hr	0					
²⁴² Cm	163 days	1.8		19300	6000		
²⁴³ Cm	35 years	0.1		4	4		
²⁴⁴ Cm	18.1 years	30		2500	2430		

表 3.6 使用済燃料より抽出したPuの同位体組成 (%)

核 種	ガス炉	軽 水 炉				高速増殖炉 ブランケット
		使用済燃料	4年リサイ クル1回	4年リサイ クル2回	4年リサイ クル3回	
²³⁸ Pu	0.08	2	3	4	6	0
²³⁹ Pu	77.75	61	45	34	29	95
²⁴⁰ Pu	18.57	24	28	29	27	5
²⁴¹ Pu	3.18	10	16	18	17	0
²⁴² Pu	0.52	3	9	15	21	0
Pu _{fissile}	80.93	71	61	52	46	95

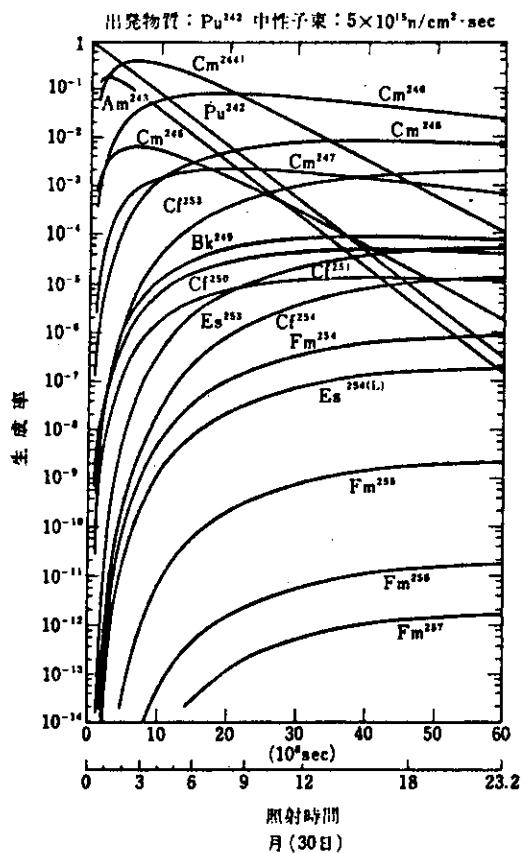
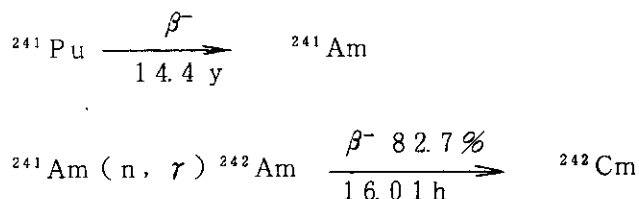


図 3.6 ²⁴²Pu の中性子照射による超プルトニウム元素の生成

に示すように、熱中性子による核分裂反応の断面積が大きく、燃料中に生じたものの一部は核分裂する。さらに長期間使用した原子炉燃料では、プルトニウムの高位同位体が生じると同時に



のような径路により、アメリシウムやキュリウムなど、超プルトニウム元素を生じる。図 3.4¹⁷⁾ に、²³⁹Pu を中性子照射したときの超プルトニウム元素の生成を示す。表 3.4 から分るように、²⁴⁰Pu は核分裂断面積が小さい。一方 ²³⁹Pu と ²⁴¹Pu は核分裂断面積が大きく、熱中性子により、それぞれ 73%、69% が核分裂し、27%、31% が ²⁴⁰Pu、²⁴²Pu になる。図 3.5¹⁸⁾ と表 3.5¹⁹⁾ に、再処理に関連して計算された、原子炉燃料中アクチノイド元素の生成量の例を示す。ネプツニウムやアメリシウム、キュリウムは再処理の際にプルトニウムやウランから分離される。一方核燃料としてくり返し使用されるプルトニウムは、同位体組成が変化し、核燃料としての性質が変化する。その様子を表 3.6 に示す⁶⁾。

一方、超プルトニウム元素の製造を目的としたプルトニウムの中性子照射が行なわれることもある^{20, 21)}。この場合の超プルトニウム元素の生成の様子を計算した例¹⁷⁾ を図 3.6 に示す。²³⁹Pu を出発物質とする場合、途中で ²⁴²Pu、²⁴³Am、²⁴⁴Cm を大量の核分裂生成物から一たん分けて、高中性子束の原子炉で再び照射し、微量の ²⁵²Cf を得る。たとえば 10 kg の ²³⁹Pu から、5.2 mg の ²⁵²Cf を得る²¹⁾。さらに ²⁵²Cf の中性子照射を行なうと、アインスタイニウム、フェルミウムが生成する。核的性質のため、フェルミウム以上のアクチノイドを原子炉でつくるのはむずかしい。

プルトニウムや照射プルトニウムの取扱いには特殊な設備が必要である。ひとつはラジウムの数倍とされるプルトニウムの化学的毒性のため、ひとつはアルファ放射体であることから放射線防護のためである。通例グローブボックスのような密閉、減圧の設備内で取扱われる。²⁴¹Pu の娘核種である ²⁴¹Am の量が多い場合には、ガンマ線に対する遮蔽が必要になることがある。プルトニウムの高位同位体や ²⁵²Cf を含む試料では、自発核分裂のため、また混在する物質によって (α, n) 反応が起る場合⁴⁷⁾ にも、中性子に対する配慮が必要である。また、中性子照射プルトニウムではほとんどが核分裂生成物という試料もあり得るから、ガンマ線に対する遮蔽も必要となり、特殊な設備を用いる^{20, 21)}。

トリウムの中性子照射では、²³⁹Pu と同様にして、核分裂性の ²³³U を生じる。

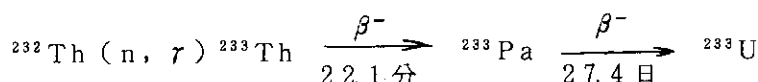


図 3.7 に、²³²Th の熱中性子照射による ²³³U 生成量を示す¹⁴⁾。一方、図 3.1 に示すように、($n, 2n$) 反応によって、同時に ²³¹Th が生成し、²³¹Th から ²³²U (71.7 年) を生じる。したがって照射済みトリウム燃料から得られる ²³³U は、目的とする ²³³U (1.62 × 10⁵ 年) のほかに ²³²U を含む。その量は燃料の組成や照射条件によって約 100 ppm から 5000 ppm までさま

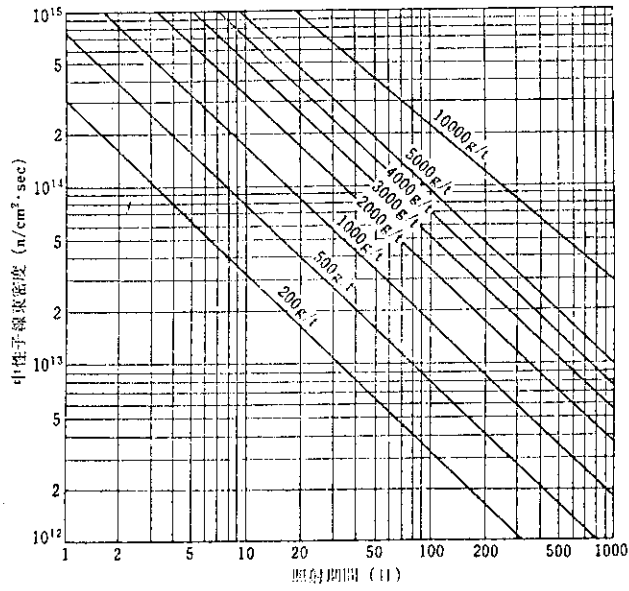


図 3.7 中性子線束密度，照射期間と 1 t の Th から生成される ²³³U の量との関係

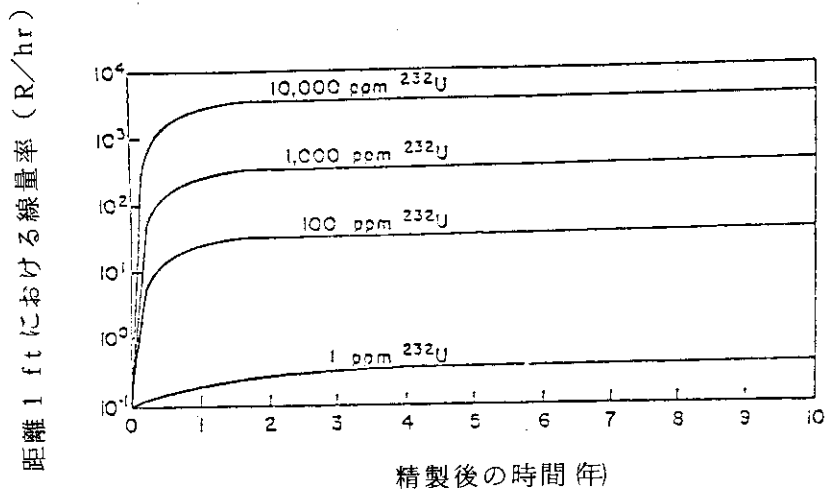


図 3.8 ²³³U (5 kg) 中の ²³²U の含有量とその線量率の時間的变化

表 3.7 (a) アクチノイドとその壊変生成物の性質

元 素 名	タ リ ウ ム	鉛	ビ ス マ ス	ポ ロ ニ ウ ム
原子番号	81	82	83	84
原子量	204.383	207.2	208.9804	(209)
電子配置	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴
酸化状態	I, III	II, IV	III, IV	II, IV, VI
融点 [K]	577	600	544	527
沸点 [K]	1660	2030	1853	1235
密度 [gcm ⁻³]	11.85	11.34	9.8	9.196 (α)
中性子吸収断面積 [barn]	3.4	0.170	0.034	
そ の 他	HC l不溶；HNO ₃ ， H ₂ SO ₄ ，王水可溶； III価安定 白色，空气中酸化被 膜	空气中表面酸化して鉛 色；HNO ₃ 可溶 白色金属	水に不溶；HNO ₃ 王水，熱H ₂ SO ₄ に 溶；別名蒼鉛；III価 安定 銀白色金属	水に不溶；濃HNO ₃ 溶；揮発性，ワング リングあり；すべて 放射性 銀白色金属

表 3.7 (b) アクチノイドとその壊変生成物の性質

元 素 名	ア スタ チ ン	ラ ド ン	フ ラ ン シ ウ ム	ラ ジ ウ ム
原子番号	85	86	87	88
原子量	(210)	(222)	(223)	226.0254
電子配置	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶	[Rn]7s ¹	[Rn]7s ²
酸化状態	-I, 0, I, V	0	I	II
融点 [K]	-	202	-	970
沸点 [K]	-	211	-	1973
密度 [gcm ⁻³]	-	-	-	5
中性子吸収断面積 [barn]	-	²²² Rn : 0.72 (3.824 日)	-	²²⁶ Ra : 20 (1600 年)
そ の 他	ハロゲン，すべて放射 性，トレーサー量しか 得られない。 ²¹⁰ At， ²¹¹ At が代表的。	すべて放射性；貴ガス ；エタノール，エーテ ルに可溶。	アルカリ金属；セシ ウムに類似；すべて 放射性。	すべて放射性；アル カリ土類金属；水， 酸に可溶；炎色紅 白色金属

表 3.7 (c) アクチノイドとその壊変生成物の性質

元 素 名	アクチニウム	トリチウム	プロトアクチニウム	ウ ラ ン
原子番号	89	90	91	92
原子量	227.0278	232.0381	231.0359	238.0289
電子配置	[Rn] 6d ¹ 7s ²	[Rn] 6d ² 7s ²	[Rn] 5f ² 6d ¹ 7s ²	[Rn] 5f ³ 6d ¹ 7s ²
酸化状態	III	(III), IV	IV, V	III, IV, V, VI
融点 [K]	1320	2020	2150	1405
沸点 [K]	約 3500			4090
密度 [g cm ⁻³]	10.0	11.72	15.37	19.04 (α)
中性子吸収断面積 [barn]	²²⁷ Ac : 830 (21.8 年)	²³² Th : 7.4 (1.39×10 ¹⁰ 年)	²³¹ Pa : 200 (3.25×10 ⁴ 年)	nat, 7.68 ²³⁵ U σ f 580 (7.1×10 ⁸ 年) ²³⁸ U σ f 2.73 (4.51×10 ¹⁰ 年)
そ の 他	すべて放射性 銀白色金属	IV 価安定; すべて放射性 銀灰色金属	V 価安定; すべて放射性 灰色金属	VI 価安定; すべて放射性 銀白色金属

表 3.7 (d) アクチノイドとその壊変生成物の性質

元 素 名	ネプツニウム	プルトニウム	アメリシウム	キュリウム
原子番号	93	94	95	96
原子量	237.0482	(244)	(243)	(247)
電子配置	[Rn] 5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	[Rn] 5f ⁶ 7s ²	[Rn] 5f ⁷ 7s ²	[Rn] 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²
酸化状態	III, IV, V, VI, VII	III, IV, V, VI, VII	III, IV, V, VI,	III, IV
融点 [K]	910	913	1269	1340
沸点 [K]		3510	2870	
密度 [g cm ⁻³]	20.45 (α)	19.73 (α)	13.67 (α)	13.51
中性子吸収断面積 [barn]	²³⁷ Np : 170 (2.14×10 ⁶ 年)	²³⁹ Pu : 266 (2.44×10 ⁴ 年) σ f 742	²⁴³ Am : 68 (7950 年)	
そ の 他	V 価安定; 希 HCl 溶; すべて放射性 銀白色金属	IV 価安定; HCl 溶, HNO ₃ 不溶; すべて放射性 銀白色金属	III 価安定; すべて放射性 銀白色金属	III 価安定; すべて放射性 銀白色金属

表 3.8 アクチノイドの酸化物とフッ化物の例

化合物	色	密度 [g cm ⁻³]	結 晶	融 点 [K]
Ac ₂ O ₃	白		六方 (A型)	
ThO ₂	白	10.053	CaF ₂ 型	3663
Pa ₂ O ₅	白		5型あり	
α-UO ₃	オレンジ	7.29	層 状	1000 (分解)
UO ₃ - II	赤		ReO ₃ 型	
U ₃ O ₈	黒～暗緑	7.9 ~ 8.5	α, βともに斜方	
UO ₂	黒 ~ 褐	10.9	CaF ₂ 型	
NpO ₂	カ ー キ	11.14	CaF ₂ 型	2573
PuO ₂	カ ー キ	11.46	CaF ₂ 型	2673
AmO ₂	暗 褐	11.7	CaF ₂ 型	1270 (分解)
Am ₂ O ₃	赤 橙	10.5	3型あり	1073 (相転移)
CmO ₂		11.8	CaF ₂ 型	873 (Cm ₂ O ₃ へ)
Cm ₂ O ₃	白	10.8	5型あり	1073 (相転移)
Bk ₂ O ₃	淡 褐			
BkO ₂	褐		立方 (C型)	
Cf ₂ O ₃			立方 (C型)	
ThF ₄	白	6.32	単斜, UF ₄ 型	~ 1370
UF ₄	緑	8.95	単斜	1233 (昇華)
UF ₆	白	5.09	八面体分子	56.5 (昇華)
NpF ₆	オレンジ	5.00	八面体分子	326 (沸点 328)
PuF ₃	紫	9.32	六方, LaF ₃ 型	1698
PuF ₄	青 褐	7.0	単斜, UF ₄ 型	1310
PuF ₆	褐	~ 5	八面体分子	325 (沸点 336)
AmF ₃	ベージュ	9.5	六方, LaF ₃ 型	1666
CmF ₃	白		六方, LaF ₃ 型	1679
BkF ₃	淡黄緑	9.70	2型あり	973 (相転移)

ざまである。当然高速中性子炉での生成量が大きい。 ^{232}U の娘核種は ^{228}Th で、表3.3(c)にも示すように、その壊変系列には高エネルギーのガンマ線を放出する核種がある。図3.8⁶⁾に、 ^{232}U を含む ^{233}U (5 kg)の線量率の経時変化を示す。

^{228}Th は当然、照射済みトリウム燃料から回収したトリウムにも含まれている。トリウム燃料の再処理では、 ^{228}Th の壊変系列に由来する放射線に対し配慮が必要であるほか、 ^{233}Pa の半減期が長いため、長い冷却期間が必要であるなどの問題がある。逆に ^{232}U の存在により ^{233}U の取扱いがむずかしくなるため、 ^{239}Pu と比べて核不拡散上、このましいとする考え方もある⁶⁾。人間が直接扱うことのできる ^{233}U は、分離直後を除いて、 ^{232}U 含有量数 ppm までとされている。

3.3 化学的性質

アクチノイドは、周期表上3族A亜族に属し、ランタノイドの下に位置する。アクチノイドの96番までの元素とその放射性壊変生成物元素の性質を表3.7に示す^{22~24)}。

ランタノイドで安定な酸化状態はすべて+3価である。アクチノイドでも+3価が安定な元素が多い。しかしアクチノイドでは、5f電子が4f電子よりも低い結合エネルギーをもち、かつ外殻電子による遮蔽効果が小さいため、3価以上の4価や5価の酸化状態をとり得る。表3.1、表3.7には、このような酸化状態を示した。比放射能の高いアルファ放射性の元素として得られる場合には、自分自身のアルファ線によって酸化状態が低くなる、いわゆる自己還元 autoreduction の現象が知られている。

バークリウム以上の元素では、半減期や調製法に制約があるため大量に得るのはむずかしく、固体化合物として確認されたものは多くない。化合物の合成では、超微量のアクチノイドを扱う技術が開発された。プルトニウム以下のアクチノイドでは、多数の化合物が知られている。アクチノイドの酸化物とフッ化物のおもなものを表3.8に示す^{9, 11, 22, 23, 25)}。 Cm_2O_3 のA型は、 ^{244}Cm のアルファ放射線により、C型またはB型から生成する。バークリウムやカリホルニウムの化合物は、マイクログラム量における合成による。アクチノイド元素の化学の詳細については、成書を参照されたい^{8, 9, 11, 20, 25, 26)}。

化学分離法としては、イオン交換や溶媒抽出がよく用いられる。ウランやトリウムでは、通常の重量分析も行なわれるが、アメリシウム以上では、放射化学分析が主となる^{25~32)}。よく知られているように、使用済み原子炉燃料の再処理では、りん酸トリブチルによる溶媒抽出が行なわれる^{12~14, 33, 34)}。超プルトニウム元素の分離では、すべて+3価が安定なことから、核分裂生成物中の希土類元素と+3価の超プルトニウム元素との相互分離が必要になる。化学的性質がよく似ているため、錯化剤を用いるイオン交換クロマトグラフィや抽出クロマトグラフィを用いる。放射線分解の影響をさけるために流速をはやくする目的で圧力をかける、高圧イオン交換法もある。分離分析の詳細については、成書を参照されたい^{8, 9, 11, 20, 27~32)}。

3.4 その他

アクチノイド元素には、いくつかの利用法がある。ウラン、プルトニウム、トリウムの原子炉燃料としての利用はよく知られている。使用済燃料は再処理にまわされ、回収された核燃料物質は再利用される。このような、核燃料物質の一連の循環プロセス、すなわち鉱石から原子炉燃料へ、そして再処理、再加工を経て再び原子炉へ、のプロセスを核燃料サイクル nuclear fuel cycle という。核燃料サイクルの化学については、核燃料関係の成書^{7, 12~15)}のほか、文献³⁵⁾を参照されたい。

原子炉内に生成した超プルトニウム元素やネプツニウムの場合、その利用量はごく一部に限られ、ほとんど全部が廃棄物となる。利用例としては、中性子源 (表 3.9)³⁶⁾ やエネルギー源^{37, 38)}がある。

表 3.9 中性子線源

線	源	中性子収量 $n \cdot \text{sec}^{-1}, \text{Ci}^{-1}$
²⁴¹ Am	Be (金属)	2.2×10^6
²⁴¹ Am	Be (セラミック)	10^6
²⁴¹ Am	B	$\sim 5 \times 10^5$
²⁴¹ Am	F	$\sim 1.5 \times 10^5$
²⁴¹ Am	Li	$\sim 4 \times 10^4$
²⁴² Cm	Be	$\sim 2.5 \times 10^6$
²³⁸ Pu	Be	$\sim 2.2 \times 10^6$
²²⁸ Th	Be	$\sim 2 \times 10^7$
²⁵² Cf		4.4×10^9

アクチノイドの多くは長半減期のアルファ放射体であり、化学的毒性もあるため、その許容量は低い。許容量を壊変生成物の許容量とともに表 3.10^{39~41)}に示す。このようなアクチノイドの廃棄物処理処分法として、群分離や消滅処理の研究が行なわれている^{19, 42~46)}。アクチノイドの消滅処理では、核変換ではなく、核分裂によって、全体として半減期をより短いものにする、というのが考え方の基本である。

アクチノイドの壊変生成物表 3.7のうち、ポロニウム、アスタチン、ラドン、フランシウム、ラジウムは、アクチノイドと同様、すべて放射性核種である。ポロニウムでは、²¹⁰Po (138.4日) がビスマスの中性子照射により人工的にも作られる。²¹⁰Po はそれ自身のアルファ線のため、化学的取扱いがむずかしい。6族B亜族に属し、テルルと同族である。安定な酸化状態は+4価でPoX₄²⁺ (X=ハロゲン)などの錯体をつくる。トレーサー量ポロニウムが容器の壁づたいに外へ出る現象があり、wandering という。アスタチンはハロゲンの一員であるが、短

半減期の同位体ばかりであり、よく分らないことが多い。貴ガスのひとつであるラドンでは、地表に近い空気中に ^{222}Rn が存在する。 ^{226}Ra (1600年)の娘核種で、 ^{226}Ra の定量に利用される²⁷⁾。フランシウムは、アルカリ金属のひとつで化学的にはセシウムと大変よく似ており、短半減期の同位体ばかりである。ラジウムはアルカリ土類に属し、 ^{226}Ra が重要な同位体である。ウラン鉱石から得られ(ウラン1トンあたり300mg)、表3.9と同様の $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$ 中性子線源として利用される。非密封の ^{226}Ra では、娘核種 ^{222}Rn が気体であるため、長期にわたって周囲に放射性汚染を生じ、やっかいである。

アクチノイドの壊変生成物のタリウムは、表3.3にあるように、すべて短半減期の放射性核種であるが、天然には安定同位体がある。3族B亜族に属し、アルミニウムと同族の元素であるが、酸化状態に+1と+3がある。Tl(I)はアルカリ金属に、Tl(III)はFe(III)に似た化学的挙動を示す。鉛は、蓄電池、合金その他広く工業的に利用されているが、人体に有毒であるため、さまざまな試料で化学分析の対象となっている。4族B亜族に属し、スズやゲルマニウムと同族である。金属には変態がなく、柔らかい。ビスマスは5族B亜族に属し、アンチモンと同族である。融点の低い合金の成分として用いられる。

アクチノイドの壊変生成物の化学の詳細については、成書を参照されたい^{22, 23, 27)}。

表 3.10 許 容 濃 度 (1)

放射性核種 と壊変の型	決定臓器*	最大許容 身体負荷量 q [μCi] **	最大許容濃度			
			1週40時間		1週168時間	
			水中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空气中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空气中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{210}_{82}\text{Pb}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	腎 臓	0.4 4	4×10^{-6} 4×10^{-6}	10^{-10} 10^{-6}	10^{-6} 10^{-6}	4×10^{-11} 4×10^{-10}
	肺 化 管 (大腸下部)		5×10^{-3}	2×10^{-10} 9×10^{-7}	2×10^{-3}	8×10^{-11} 3×10^{-7}
$^{212}_{82}\text{Pb}$ (可溶) $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (不溶)	腎 臓	0.02	6×10^{-4} 6×10^{-4}	2×10^{-8} 10^{-7}	2×10^{-4} 2×10^{-4}	6×10^{-9} 4×10^{-8}
	肺 化 管 (大腸下部)		5×10^{-4}	2×10^{-8} 9×10^{-8}	2×10^{-4}	7×10^{-9} 3×10^{-8}
$^{210}_{83}\text{Bi}$ (可溶) α, β^- (不溶)	消 化 管 (大腸下部) 腎 臓	0.04	10^{-3} 2×10^{-3}	3×10^{-7} 6×10^{-9}	4×10^{-4} 5×10^{-4}	9×10^{-8} 2×10^{-9}
	肺 化 管 (大腸下部)		10^{-3}	6×10^{-9} 2×10^{-7}	4×10^{-4}	2×10^{-9} 7×10^{-8}
$^{212}_{83}\text{Bi}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	消 化 管 (胃) 腎 臓	0.01	0.01 0.02	2×10^{-6} 10^{-7}	4×10^{-3} 8×10^{-3}	8×10^{-7} 3×10^{-8}
	肺 化 管 (胃)		0.01	2×10^{-7} 2×10^{-6}	4×10^{-3}	7×10^{-8} 6×10^{-7}
$^{210}_{84}\text{Po}$ (可溶) α (不溶)	脾 臓 腎 臓	0.03 0.04	2×10^{-5} 2×10^{-5}	5×10^{-10} 5×10^{-10}	7×10^{-6} 8×10^{-6}	2×10^{-10} 2×10^{-10}
	肺 化 管 (大腸下部)		8×10^{-4}	2×10^{-10} 2×10^{-7}	3×10^{-4}	7×10^{-11} 5×10^{-8}
$^{220}_{86}\text{Rn}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	肺			3×10^{-7}		10^{-7}
$^{222}_{86}\text{Rn}$ α, β, γ	肺			3×10^{-8}		10^{-8}
$^{223}_{88}\text{Ra}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	骨	0.05	2×10^{-5}	2×10^{-9}	7×10^{-6}	6×10^{-10}
	肺 化 管 (大腸下部)		10^{-4}	2×10^{-10} 2×10^{-8}	4×10^{-5}	8×10^{-11} 7×10^{-9}
$^{224}_{88}\text{Ra}$ (可溶) $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (不溶)	骨	0.06	7×10^{-5}	5×10^{-9}	2×10^{-5}	2×10^{-9}
	肺 化 管 (大腸下部)		2×10^{-4}	7×10^{-10} 3×10^{-8}	5×10^{-5}	2×10^{-10} 9×10^{-9}
$^{226}_{88}\text{Ra}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	骨	0.1	4×10^{-7}	3×10^{-11}	10^{-7}	10^{-11}
	消 化 管 (大腸下部)		9×10^{-4}	2×10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-8}
$^{227}_{89}\text{Ac}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	骨	0.03	6×10^{-5}	2×10^{-12}	2×10^{-5}	8×10^{-13}
	肺 化 管 (大腸下部)		9×10^{-3}	3×10^{-11} 2×10^{-6}	3×10^{-3}	9×10^{-12} 5×10^{-7}
$^{228}_{89}\text{Ac}$ (可溶) $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (不溶)	消 化 管 (大腸上部) 骨 肝 臓	0.04 0.05	3×10^{-3} 2 2	6×10^{-7} 9×10^{-8} 8×10^{-8}	9×10^{-4} 0.5 0.6	2×10^{-7} 3×10^{-8} 3×10^{-8}
	肺 化 管 (大腸上部)		3×10^{-3}	2×10^{-8} 4×10^{-7}	9×10^{-4}	6×10^{-9} 2×10^{-7}
$^{227}_{90}\text{Th}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	消 化 管 (大腸下部) 骨	0.02	5×10^{-4} 8×10^{-3}	10^{-7} 3×10^{-10}	2×10^{-4} 3×10^{-3}	4×10^{-8} 10^{-10}
	肺 化 管 (大腸下部)		5×10^{-4}	2×10^{-10} 9×10^{-8}	2×10^{-4}	6×10^{-11} 3×10^{-8}
$^{228}_{90}\text{Th}$ (可溶) $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (不溶)	骨	0.02	2×10^{-4}	9×10^{-12}	7×10^{-5}	3×10^{-12}
	肺 化 管 (大腸下部)		4×10^{-4}	6×10^{-12} 7×10^{-8}	10^{-4}	2×10^{-12} 2×10^{-8}
$^{230}_{90}\text{Th}$ (可溶) α, γ (不溶)	骨	0.05	5×10^{-5}	2×10^{-12}	2×10^{-5}	8×10^{-13}
	肺 化 管 (大腸下部)		9×10^{-4}	10^{-11} 2×10^{-7}	3×10^{-4}	3×10^{-12} 6×10^{-8}
$^{231}_{90}\text{Th}$ (可溶) α, β, γ (不溶)	消 化 管 (大腸下部)		7×10^{-3}	10^{-6}	2×10^{-3}	5×10^{-7}
	消 化 管 (大腸下部)		7×10^{-3}	10^{-6}	2×10^{-3}	4×10^{-7}

表 3.10 許 容 濃 度 (2)

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容 身体負荷 量q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]	水 中 [μCi/cm ³]	空 気 中 [μCi/cm ³]
²³² ₉₀ Th (可溶) α, β, γ, e ⁻ (不溶)	骨	0.04	5 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹²	2 × 10 ⁻⁵	7 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	10 ⁻¹¹ 2 × 10 ⁻⁷	4 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹² 7 × 10 ⁻⁸
²³⁴ ₉₀ Th (可溶) β, γ (不溶)	消化管(大腸下部) 肺	4	5 × 10 ⁻⁴ 1	10 ⁻⁷ 6 × 10 ⁻⁸	2 × 10 ⁻⁴ 0.5	4 × 10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁸
	肺 消化管(大腸下部)		5 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁸ 9 × 10 ⁻⁸	2 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ 3 × 10 ⁻⁸
⁹⁰ Th (可溶) α, β, γ, e ⁻ (天然)(不溶)	骨	0.01	3 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹²	10 ⁻⁵	6 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹² 5 × 10 ⁻⁸	10 ⁻⁴	10 ⁻¹² 2 × 10 ⁻⁸
²³⁰ ₉₁ Pa (可溶) α, β, ε, γ (不溶)	消化管(大腸下部) 骨	0.07	7 × 10 ⁻³ 0.04	2 × 10 ⁻⁶ 2 × 10 ⁻⁹	2 × 10 ⁻³ 0.01	5 × 10 ⁻⁷ 6 × 10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		7 × 10 ⁻³	8 × 10 ⁻¹⁰ 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻¹⁰ 4 × 10 ⁻⁷
²³¹ ₉₁ Pa (可溶) α, β, γ (不溶)	骨	0.02	3 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹²	9 × 10 ⁻⁶	4 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²³³ ₉₁ Pa (可溶) β, γ (不溶)	消化管(大腸下部) 腎 臓	40	4 × 10 ⁻³ 10	8 × 10 ⁻⁷ 6 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³ 5	3 × 10 ⁻⁷ 2 × 10 ⁻⁷
	肺 消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷ 6 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	6 × 10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁷
²³⁰ ₉₂ U (可溶) α, β, γ (不溶)	腎 臓	0.01	7 × 10 ⁻⁵	3 × 10 ⁻¹⁰	2 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻⁸	5 × 10 ⁻⁵	4 × 10 ⁻¹¹ 8 × 10 ⁻⁹
²³² ₉₂ U (可溶) α, β, γ, e ⁻ (不溶)	骨	0.01	2 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹⁰	8 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻¹¹
	肺 消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻¹¹ 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	9 × 10 ⁻¹² 5 × 10 ⁻⁸
²³³ ₉₂ U (可溶) α, γ (不溶)	骨	0.05	10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻¹⁰	4 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		9 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 6 × 10 ⁻⁸
²³⁴ ₉₂ U (可溶) α, γ (不溶)	骨	0.05	10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻¹⁰	4 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		9 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 6 × 10 ⁻⁸
²³⁵ ₉₂ U (可溶) α, β, γ (不溶)	腎 臓 骨	0.03 0.06	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻¹⁰ 6 × 10 ⁻¹⁰	4 × 10 ⁻⁵ 5 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²³⁶ ₉₂ U (可溶) α, γ (不溶)	骨	0.06	10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻¹⁰	5 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹⁰
	肺 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 6 × 10 ⁻⁸
²³⁸ ₉₂ U (可溶) α, γ, e ⁻ (不溶)	腎 臓	5 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁵	7 × 10 ⁻¹¹	6 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻¹¹
	肺 消化管(大腸下部)		10 ⁻³	10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻⁷	4 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻¹¹ 6 × 10 ⁻⁸

表 3.10 許 容 濃 度 (3)

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容 身体負荷 量q(μCi) **	最 大 許 容 濃 度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水 中 (μCi/cm ³)	空 気 中 (μCi/cm ³)	水 中 (μCi/cm ³)	空 気 中 (μCi/cm ³)
⁹² U-天然(可溶) α,β,γ,e ⁻ (不溶)	腎 臓	5 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁵	7 × 10 ⁻¹¹	6 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻¹¹
	肺 消化管(大腸下部)		5 × 10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻¹¹ 8 × 10 ⁻⁸	2 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹¹ 3 × 10 ⁻⁸
²⁴⁰ U+ ²⁴⁰ Np(可溶) α,β,γ,e ⁻ (不溶)	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	8 × 10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻⁸
²³⁷ ₉₃ Np (可溶) α,β,γ (不溶)	骨	0.06	9 × 10 ⁻⁵	4 × 10 ⁻¹²	3 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹²
	肺 消化管(大腸下部)		9 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²³⁹ ₉₃ Np (可溶) α,β,γ (不溶)	消化管(大腸下部)		4 × 10 ⁻³	8 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		4 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
²³⁸ ₉₄ Pu (可溶) α,γ (不溶)	骨	0.04	10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹²	5 × 10 ⁻⁵	7 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻¹¹ 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²³⁹ ₉₄ Pu (可溶) α,γ (不溶)	骨	0.04	10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹²	5 × 10 ⁻⁵	6 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		9 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²⁴⁰ ₉₄ Pu (可溶) α,γ (不溶)	骨	0.04	10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹²	5 × 10 ⁻⁵	6 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²⁴¹ ₉₄ Pu (可溶) α,β,γ (不溶)	骨	0.9	7 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻¹¹	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻¹¹
	肺 消化管(大腸下部)		0.04	4 × 10 ⁻⁸ 7 × 10 ⁻⁶	0.01	10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁶
²⁴² ₉₄ Pu (可溶) α (不溶)	骨	0.05	10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹²	5 × 10 ⁻⁵	6 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		9 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
²⁴³ ₉₄ Pu (可溶) α,β,γ,e ⁻ (不溶)	消化管(大腸下部)		0.01	2 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻³	6 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		0.01	2 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻³	8 × 10 ⁻⁷
²⁴⁴ ₉₄ Pu (可溶) α,β,γ,e ⁻ (99.7%) 自発核分裂(0.3%)	骨	0.04	10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻¹²	4 × 10 ⁻⁵	6 × 10 ⁻¹³
	肺 消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻¹¹ 6 × 10 ⁻⁸	10 ⁻⁴	10 ⁻¹¹ 2 × 10 ⁻⁸
²⁴¹ ₉₅ Am (可溶) α,γ (不溶)	腎 臓 骨	0.1 0.05	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻¹² 6 × 10 ⁻¹²	4 × 10 ⁻⁵ 5 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹² 2 × 10 ⁻¹²
	肺 消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰ 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻¹¹ 5 × 10 ⁻⁸
^{242m} ₉₅ Am (可溶) α,β,γ,ε,e ⁻ (不溶)	骨 腎 臓	0.07 0.1	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴	6 × 10 ⁻¹² 6 × 10 ⁻¹²	4 × 10 ⁻⁵ 5 × 10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻¹² 2 × 10 ⁻¹²
	肺 消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻¹⁰ 5 × 10 ⁻⁷	9 × 10 ⁻⁴	9 × 10 ⁻¹¹ 2 × 10 ⁻⁷
²⁴² ₉₅ Am (可溶) α,β,γ,ε,e ⁻	消化管(大腸下部)		4 × 10 ⁻³	8 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
	肝 臓	0.06	0.9	4 × 10 ⁻⁸	0.3	10 ⁻⁸
	肺 消化管(大腸下部)		4 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁸ 7 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁷

表 3.10 許 容 濃 度 (4)

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容 身体負荷 量q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{243}_{95}\text{Am}$ α, β, γ (可溶)	骨 腎 臓	0.05 0.1	10^{-4} 10^{-4}	6×10^{-12} 6×10^{-12}	4×10^{-5} 5×10^{-5}	2×10^{-12} 2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	4×10^{-11} 5×10^{-8}
$^{244}_{95}\text{Am}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (可溶)	消化管(小 腸) 骨 腎 臓	0.2 0.2	0.1 90.0 100.0	3×10^{-5} 4×10^{-6} 4×10^{-6}	0.05 30.0 30.0	10^{-5} 10^{-6} 10^{-6}
	(不溶) 肺 消化管(小 腸)		0.1	2×10^{-5} 2×10^{-5}	0.05	8×10^{-6} 8×10^{-6}
$^{242}_{96}\text{Cm}$ α, γ (可溶)	消化管(大腸下部) 肝 臓	0.05	7×10^{-4} 3×10^{-3}	2×10^{-7} 10^{-10}	2×10^{-4} 9×10^{-4}	5×10^{-8} 4×10^{-11}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	2×10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	6×10^{-11} 4×10^{-8}
$^{243}_{96}\text{Cm}$ α, γ (可溶)	骨	0.09	10^{-4}	6×10^{-12}	5×10^{-5}	2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	2×10^{-4}	3×10^{-11} 4×10^{-8}
$^{244}_{96}\text{Cm}$ α, γ (可溶)	骨	0.1	2×10^{-4}	9×10^{-12}	7×10^{-5}	3×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	3×10^{-11} 5×10^{-8}
$^{245}_{96}\text{Cm}$ α, β, γ (可溶)	骨	0.04	10^{-4}	5×10^{-12}	4×10^{-5}	2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	4×10^{-11} 5×10^{-8}
$^{246}_{96}\text{Cm}$ α (可溶)	骨	0.05	10^{-4}	5×10^{-12}	4×10^{-5}	2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	4×10^{-11} 5×10^{-8}
$^{247}_{96}\text{Cm}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (可溶)	骨	0.04	10^{-4}	5×10^{-12}	4×10^{-5}	2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		6×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	2×10^{-4}	4×10^{-11} 4×10^{-8}
$^{248}_{96}\text{Cm}$ α (89%) 自発核分裂 (11%) (不溶)	骨	5×10^{-3}	10^{-5}	6×10^{-13}	4×10^{-6}	2×10^{-13}
	肺 消化管(大腸下部)		4×10^{-5}	10^{-11} 7×10^{-9}	10^{-5}	4×10^{-12} 2×10^{-9}
$^{249}_{96}\text{Cm}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (可溶)	消化管(胃) 骨	1.0	0.06 300.0	10^{-5} 10^{-5}	0.02 100.0	5×10^{-6} 4×10^{-6}
	(不溶) 消化管(胃)		0.06	10^{-5}	0.02	4×10^{-6}
$^{249}_{97}\text{Bk}$ α, β, γ (可溶)	消化管(大腸下部) 骨	0.7	0.02 0.07	4×10^{-6} 9×10^{-10}	6×10^{-3} 0.02	10^{-6} 3×10^{-10}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		0.02	10^{-7} 3×10^{-6}	6×10^{-3}	4×10^{-8} 10^{-6}
$^{250}_{97}\text{Bk}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$ (可溶)	消化管(大腸上部) 骨	0.05	6×10^{-3} 10.0	10^{-6} 10^{-7}	2×10^{-3} 4.	5×10^{-7} 5×10^{-8}
	(不溶) 消化管(大腸上部)		6×10^{-3}	10^{-6}	2×10^{-3}	4×10^{-7}
$^{249}_{98}\text{Cf}$ α, γ (可溶)	骨	0.04	10^{-4}	2×10^{-12}	4×10^{-5}	5×10^{-13}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	2×10^{-4}	3×10^{-11} 4×10^{-8}

表 3.10 許 容 濃 度 (5)

放射性核種と 壊変の型	決定臓器*	最大許容 身体負荷 量q[μCi] **	最 大 許 容 濃 度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	水 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]	空 気 中 [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]
$^{250}_{98}\text{Cf}$ α	(可溶) 骨	0.04	4×10^{-4}	5×10^{-12}	10^{-4}	2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	3×10^{-11} 4×10^{-8}
$^{251}_{98}\text{Cf}$ α, γ	(可溶) 骨	0.04	10^{-4}	2×10^{-12}	4×10^{-5}	6×10^{-13}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	3×10^{-11} 5×10^{-8}
$^{252}_{98}\text{Cf}$ α, γ	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.04	7×10^{-4} 2×10^{-3}	2×10^{-7} 2×10^{-11}	2×10^{-4} 6×10^{-4}	5×10^{-8} 7×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	10^{-10} 10^{-7}	2×10^{-4}	4×10^{-11} 4×10^{-8}
$^{253}_{98}\text{Cf}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.04	4×10^{-3} 0.06	9×10^{-7} 8×10^{-10}	10^{-3} 0.02	3×10^{-7} 3×10^{-10}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		4×10^{-3}	8×10^{-10} 7×10^{-7}	10^{-3}	3×10^{-10} 3×10^{-7}
$^{254}_{98}\text{Cf}$ 自発核分裂	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	7×10^{-4}	4×10^{-6} 4×10^{-4}	8×10^{-10} 5×10^{-12}	10^{-6} 10^{-4}	3×10^{-10} 2×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		4×10^{-6}	5×10^{-12} 6×10^{-10}	10^{-6}	2×10^{-12} 2×10^{-10}
$^{253}_{99}\text{Es}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.04	7×10^{-4} 0.06	10^{-7} 8×10^{-10}	2×10^{-4} 0.02	5×10^{-8} 3×10^{-10}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		7×10^{-4}	6×10^{-10} 10^{-7}	2×10^{-4}	2×10^{-10} 4×10^{-8}
$^{254m}_{99}\text{Es}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.02	5×10^{-4} 0.4	10^{-7} 5×10^{-9}	2×10^{-4} 0.1	4×10^{-8} 2×10^{-9}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		5×10^{-4}	6×10^{-9} 10^{-7}	2×10^{-4}	2×10^{-9} 3×10^{-8}
$^{254}_{99}\text{Es}$ $\alpha, \beta, \gamma, e^-$	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.02	4×10^{-4} 10^{-3}	9×10^{-8} 2×10^{-11}	10^{-4} 5×10^{-4}	3×10^{-8} 6×10^{-12}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		4×10^{-4}	10^{-10} 7×10^{-8}	10^{-4}	4×10^{-11} 3×10^{-8}
$^{255}_{99}\text{Es}$ α, β, γ	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.04	8×10^{-4} 0.04	2×10^{-7} 5×10^{-10}	3×10^{-4} 0.01	6×10^{-8} 2×10^{-10}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		8×10^{-4}	4×10^{-10} 10^{-7}	3×10^{-4}	10^{-10} 5×10^{-8}
$^{254}_{100}\text{Fm}$ α, β, e^- (99.9448%) 自発核分裂(不溶) ($5.52 \times 10^{-2}\%$)	(可溶) 消化管(大腸上部) 骨	0.02	4×10^{-3} 5.0	8×10^{-7} 6×10^{-8}	10^{-3} 2.0	3×10^{-7} 2×10^{-8}
	(不溶) 肺 消化管(大腸上部)		4×10^{-3}	7×10^{-8} 6×10^{-7}	10^{-3}	2×10^{-8} 2×10^{-7}
$^{255}_{100}\text{Fm}$ α, γ	(可溶) 消化管(大腸下部) 骨	0.04	10^{-3} 1.0	2×10^{-7} 2×10^{-8}	3×10^{-4} 0.4	7×10^{-8} 6×10^{-9}
	(不溶) 肺 消化管(大腸下部)		10^{-3}	10^{-8} 2×10^{-7}	3×10^{-4}	4×10^{-9} 6×10^{-8}
$^{256}_{100}\text{Fm}$ 自発核分裂	(可溶) 消化管(大腸上部) 骨	8×10^{-4}	3×10^{-5} 0.2	6×10^{-9} 3×10^{-9}	9×10^{-6} 0.07	2×10^{-9} 10^{-9}
	(不溶) 肺 消化管(大腸上部)		3×10^{-5}	2×10^{-9} 5×10^{-9}	9×10^{-6}	6×10^{-10} 2×10^{-9}

* 関連臓器は略 ** 身体は標準人とする

3.5 3章引用文献

- 1) Lederer C. M. and Shirley V. S. edited : "Table of Isotopes", 7th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York (1978).
- 2) Kornilov N. V., Zhuravlev B. V., Sal'nikov O. S., Raich P., Sh. Nad', Sh. Darotsi, Sailer K. and Chikai I. : Soviet Atomic Energy, 49, 722 (1980).
- 3) Knight J. S., Smith R. K. and Warren B. : Phys. Rev., 112, 259 (1958).
- 4) Meadows J., Poenitz W., Smith A., Smith D. and Whalen J. : ANL/NDM-35 (1978).
- 5) Bowman W. W. and MacMaurdo K. W., : Atomic Data and Nucl. Data Tables, 13, 89 (1974).
- 6) 「トリウムサイクル調査」研究専門委員会, "トリウムサイクル", 日本原子力学会, 東京 (1980).
- 7) 浅田忠一, 大山彰, 倉本昌昭, 法貴四郎, 三島良績 監修, "原子力ハンドブック", オーム社, 東京 (1976).
- 8) 中井敏夫 編, "無機化学全書 XVII-1, ウラン", 丸善, 東京 (1953).
- 9) 中井敏夫, 齊藤信房, 石森富太郎 編, "無機化学全書 XVII-3, 放射性元素", 丸善, 東京 (1974).
- 10) 「海水ウラン採取」研究専門委員会, 日本原子力学会誌, 22, 31 (1980).
- 11) 中井敏夫, 齊藤信房, 石森富太郎 編, "無機化学全書 XVII-2, プルトニウム", 丸善, 東京 (1967).
- 12) 山本寛 編, "原子力化学工学", 日刊工業新聞社, 東京 (1976).
- 13) 三島良績, 中村康治, 武谷清昭, "核燃料工学", 同文書院, 東京 (1972).
- 14) 長谷川正義, 三島良績 監修, "原子炉材料ハンドブック", 日刊工業新聞社, 東京 (1977).
- 15) 管野昌義, "原子力工学シリーズ2, 原子炉燃料", 東京大学出版会, 東京 (1976).
- 16) 小川洋, 小野勝章, 原子力発電, 1, (4) 43 (1957).
- 17) 石森富太郎 編, "原子炉工学講座1", p. 258, 培風館, 東京 (1972).
- 18) 篠原伸夫, 岡下宏, 私信 (1981).
- 19) Rupp A. F. : ORNL-4776 (1972).
- 20) Baybarz R. D. : Atomic Energy Review, 8, (2) 327 (1970).
- 21) 上野馨, 原子力工業, 20, (4) 9 (1974).
- 22) 日本化学会 編, "化学便覧, 基礎編I", 丸善, 東京 (1975).
- 23) Heslop R. B. and Jones K. : "Inorganic Chemistry", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam (1976) : 齊藤喜彦訳, "無機化学上, 下", 東京化学同人, 東京 (1978).

- 24) Seelman-Eggebert W., Pfennig G. and Münzel H. : "Karlsruher Nuklidkarte", Gersbach u. Sohn Verlag, München (1974).
- 25) Keller C. : "The Chemistry of the Transuranium Elements", Verlag Chemie, Weinheim (1971).
- 26) 原田吉之助他 編, JAERI-M 5567, p. 312 (1974).
- 27) 日本化学会 編, "新実験化学講座 9, 分析化学 [I]", 丸善, 東京 (1976).
- 28) Katz J. J. and Seaborg G. T. : "The Chemistry of the Actinide Elements", Methuen & Co., London (1957).
- 29) Kolthoff I. M., Elving P. J. and Sandel E. B. edited : "Treatise on Analytical Chemistry", Part II, Vol. 5, Interscience Publishers, New York (1961).
- 30) Idem. : "Treatise on Analytical Chemistry", Part II, Vol. 6, Interscience Publishers, New York (1964).
- 31) Idem. : "Treatise on Analytical Chemistry", Part II, Vol. 9, Interscience Publishers, New York (1962).
- 32) Ulstrup J. : Atomic Energy Review, 4, (4) 3 (1966).
- 33) 内藤奎爾, "原子力工学シリーズ 5, 原子炉化学下", 東京大学出版会, 東京 (1978).
- 34) 長谷川修, 大田正男, 三石信雄, "原子炉工学大要", 養賢堂, 東京 (1977).
- 35) Wymer R. G. et al. : "Chemical Aspects of the Nuclear Fuel Cycle-A Special Issue", Radiochim. Acta, 3/4, (1978).
- 36) アイソトープニュース, 1976年, 5月号, p. 33.
- 37) Corliss W. R. and Harvey D. G. : "Radioisotope Power Generation", Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs (1964).
- 38) 榎本茂正, 和田延夫, 原子力工業, 20, (4) 15 (1974).
- 39) 日本アイソトープ協会 編, "新版ラジオアイソトープ, 講義と実習", 丸善, 東京 (1966).
- 40) 国際放射線防護委員会, "体内放射線の許容量に関する専門委員会 II の報告 (翻訳)", 日本放射性同位元素協会, 仁科記念財団, 東京 (1960).
- 41) "放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法令集", 日本アイソトープ協会, 東京 (1981).
- 42) Harries J. R. : AAEC/E 326 (1974).
- 43) Clairborne H. C. : ORNL-TM 3964 (1972).
- 44) Mitani H., Koyama K. and Kuroi H. : JAERI-M 8133 (1979).
- 45) 日本原子力産業会議, 原子力資料, no. 63 (1973).
- 46) 中村治人, 日本原子力学会誌, 21, 293 (1979).
- 47) 村田徹, 田村俊幸 : 日本原子力学会誌, 24, 2 (1982).

4. 炉材料の放射化生成物

現在の発電用原子炉では、軽水減速軽水冷却の、いわゆる軽水炉が主流である。その原子炉容器、炉内構造物、冷却系配管などには、低合金鋼、ステンレス鋼、インコネルなどの合金が用いられ、中性子束の最も高い炉心の燃料被覆管には、ジルカロイが用いられている。

燃料被覆管や構造物の放射化生成物に関連のある問題は、まず被覆管ほか、炉心構造物の放射性廃棄物としての問題と、一次冷却水中で構造物の腐食生成物が放射化され、これが一次系の各所に蓄積して、原子炉の保守管理にあたる作業者の被曝量を増加させる問題がおもなものである。一次冷却系に使われる合金類は、もともと腐食抵抗の大きなものであり、構造上の強度を維持するという点では、粒界腐食や応力腐食割れのような局部腐食の方が問題であり、均一腐食にはほとんど意味がない。逆に腐食生成物が一次冷却水中にとりこまれて炉心へ移動し、放射化され、さらに移動して一次系の各所に析出し、放射線源となる、という点で、均一腐食は、非常に大きな重要性をもっている。この意味で、水との接触面積の大きい材料が重要である。表 4.1 に、軽水炉における相対接水面積、および各合金の組成を示す^{1~3)}。

表 4.1 (a) 代表的原子炉における材料の相対接水面積

炉 型	材 料	相対接水面積
PWR (USA)	ジルカロイ	20%
	インコネル600	75
	ステンレス鋼	5
BWR (USA)	ジルカロイ	48%
	ステンレス鋼	44
	炭素鋼	~8
CANDU-PHW	ジルカロイ	13%
	モネル, インコネル またはインコイ	77
	炭素鋼	10

燃料被覆管は、最も放射化されやすい条件のもとにあり、かつ接水面積も大きい。ジルカロイの場合表面に強力な保護被膜を生成するため、均一腐食の点では問題にならない。放射性廃棄物としてみた場合にはどうか、3.3w/o UO₂ を用いた PWR におけるジルカロイ-4 について、中性子束 $3.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、出力 33.0 MW/T、照射時間 4 年、燃焼度 48200 MWD/T、の条件で計算した例を、図 4.1 に示す⁴⁾。

炉材料の放射化生成物としては、このほかに、冷却材それ自身や制御材の放射化生成物がある。

表 4.1(c) Compositions of Carbon Steel and Copper Alloys

Material and Specification	Composition, Weight Percent											
	C	Mn	P	S	Si	Fe	Cr	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
1. Monel ^a ASTM-B165-61 Nominal	0.03	2.0 ^a	—	0.024 ^a	0.5 ^a	2.5 ^a	—	66.5	bal	—	—	—
2. Admiralty ^d Brass ASTM-B111-61 Nominal	—	—	—	—	—	0.06 ^a	—	—	71.5	bal	1.05	0.07 ^a
3. 90-10 Cu-Ni ^d ASTM-B111-61 Nominal	—	1.0 ^a	—	—	—	1.25	—	10	86.5 ^b	1.0 ^a	—	0.05 ^a
4. 70-30 Cu-Ni ^d ASTM-B111-61 Nominal	—	1.0 ^a	—	—	—	0.55	—	31.0	65.0 ^b	1.0 ^a	—	0.05 ^a
5. 70-30 Cu-Ni ^{e,4} Ion-Modified ASTM-B111-61 Nominal	—	1.0 ^a	—	—	—	4.0	—	bal	65.0 ^b	1.0 ^a	—	0.05 ^a
6. Carbon Steel ^e SAE-1010	0.08	0.3	0.01	0.02	<0.02	bal	0.012	0.008	0.03	—	—	—
7. Monel 400 ^e	0.11	1.0	—	0.01	<0.02	0.96	—	bal	32.5	—	—	—

^a Maximum.^b Minimum.^c Heat treated prior to fabrication; solution anneal 1516 °F, ½ h, water spray quench; stabilizing anneal 1022 °F, 1 h.^d Tested by Brush and Pearl.⁷⁰^e Tested by Bryant and Le Surf.⁵⁰

表 4.1 (d) 代表的なステンレス鋼の組成と特性

1) オーステナイト系										
系 列	JIS (SUS)	化 学 成 分 (%)								特 性
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	そ の 他	
Cr-Mn系	201 202	≤0.15 ≤0.15	≤1.00 ≤1.00	5.50/7.50 7.50/10.00	≤0.060 ≤0.060	≤0.030 ≤0.030	3.50/5.50 4.00/6.00	16.00/18.00 17.00/19.00	N≤0.25 N≤0.25	Niの一部を Mn および Nにて置換 304の代用品 強度高い
>17-7系	301	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	6.00/8.00	16.00/18.00	—	オーステナイト不安定、冷間加工硬化大 304より 耐食性やや劣る *任意 同、耐熱性付与
	302 AISI 302 B	≤0.15 ≤0.15	≤1.00 2.00/3.00	≤2.00 ≤2.00	≤0.040 ≤0.045	≤0.030 ≤0.030	8.00/10.00 8.00/10.00	17.00/19.00 17.00/19.00	Mo*≤0.60	
鉄 鋼 系	303 303 Se	≤0.15 ≤0.15	≤1.00 ≤1.00	≤2.00 ≤2.00	≤0.20 ≤0.20	≤0.15 ≤0.060	8.00/10.00 8.00/10.00	17.00/19.00 17.00/19.00	Se≥0.15	切削性の改良
>18-8系	304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00/10.50	18.00/20.00	—	"18-8" 代表型 極低炭素で耐粒界腐食性の向上、溶接のまま使用 302, 304よりオーステナイト安定、加工硬化、磁 性変化少なし 同、302, 304より一般に耐食性良、304の溶接降
	304L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00/13.00	18.00/20.00	—	
	305	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.50/13.00	17.00/19.00	—	
	305 J1	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	11.50/13.50	18.50/19.00	—	
	308	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00/12.00	19.00/21.00	—	
22-12系 以上	309S 310S	≤0.08 ≤0.08	≤1.00 ≤15.0	≤2.00 ≤2.00	≤0.040 ≤0.040	≤0.030 ≤0.030	12.00/15.00 19.00/22.00	22.00/24.00 24.00/26.00	— —	Cr, Ni 量の増加に応じて耐食性、耐熱性を向上 加工硬化少なし、冷間加工による磁性はほぼなし
	AISI 314	≤0.25	1.50/3.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	19.00/22.00	23.00/25.00	—	
17-10, Mo系 Mo+Cu系	316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00/14.00	16.00/18.00	Mo 2.00~3.00	還元性の酸に対する耐食性を向上、極低炭素化し て粒界腐食防止 Cu 添加し耐熱性向上 極低炭素化 Moの増加によりさらに耐食性を向上
	316L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	12.00/15.00	16.00/18.00	Mo 2.00~3.00	
	316 J1	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00/14.00	17.00/19.00	Mo 1.20~2.75 Cu 1.00~2.50	
	316 J 1 L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	12.00/16.00	17.00/19.00	Mo 1.20~2.75 Cu 1.00~2.50	
	317 317 L	≤0.08 ≤0.030	≤1.00 ≤1.00	≤2.00 ≤2.00	≤0.040 ≤0.040	≤0.030 ≤0.030	11.00/15.00 11.00/15.00	18.00/20.00 18.00/20.00	Mo 3.00~4.00 Mo 3.00~4.00	
Ti, Nb 安定型	321 347	≤0.08 ≤0.08	≤1.00 ≤1.00	≤2.00 ≤2.00	≤0.040 ≤0.040	≤0.030 ≤0.030	9.00/13.00 9.00/13.00	17.00/19.00 17.00/19.00	Ti≥5×C% Nb+Ta ≥10×C% Co≤0.2 Ta≤0.1 原子炉用	炭化物性元素添加によって炭化物を安定化し、 粒界腐食を防止 冷間加工による硬化度小 コールドヘッダ用材よりすぐれている
	AISI 348	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00/13.00	17.00/19.00	Nb≥10×C%	
冷間成形 型	384 385	≤0.08 ≤0.08	≤1.00 ≤1.00	≤2.00 ≤2.00	≤0.040 ≤0.040	≤0.030 ≤0.030	17.00/19.00 14.00/16.00	15.00/17.00 11.50/13.50	— —	
2) オーステナイト・フェライト系										
	329 J1	≤0.08	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	3.00/6.00	23.00/28.00	Mo 1.00~3.00	耐孔食、耐応力腐食
3) フェライト系										
系 列	JIS (SUS)	化 学 成 分 (%)								特 性
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	そ の 他	
12~13Cr系	405	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤1.040	≤0.030	(1)	11.50/14.50	Al 0.10~0.30	溶接性良
16~18Cr系	429	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	14.00/16.00	—	耐錆性、耐酸化性向上、溶接性良 "、耐熱性良、加工性良、"18Cr代表型" 切削性改善 Moにより耐食性向上 リッジング防止
	430	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	16.00/18.00	—	
	430F	≤0.12	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≤0.15	(1)	16.00/18.00	(2)	
	434	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	16.00/18.00	Mo 0.75~1.25	
	AISI 436	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	—	16.0/18.0	Mo 0.75~1.25 Nb+Ta≥25×C% ≤0.70	
20~30 Cr	AISI 442 AISI 446	≤0.20 ≤0.20	≤1.00 ≤0.75	≤1.00 ≤1.50	≤0.040 ≤0.040	≤0.030 ≤0.030	— ≤0.50	18.0/23.0 23.0/30.0	— N 0.10~0.25	耐酸化、耐イオウ性大、 耐摩耗性良
4) マルテンサイト系										
12~13Cr系	403	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	11.50/13.00	—	"13Cr 代表型" 自硬性大、耐酸化性良 Mo 0.30~0.60 耐熱、高温強さ 切削性改善、[416 Se] もある 強度、耐摩耗性大、 C増大によりさらに硬度大 快削鋼
	410	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	11.50/13.50	—	
	410 J1	0.08/0.18	≤0.60	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	11.50/14.00	Mo 0.30~0.60	
	416	≤0.15	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≤0.15	(1)	12.00/14.00	(2)	
	420 J1	0.16/0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	12.00/14.00	—	
	420 J2 420 F	0.26/0.40 0.26/0.40	≤1.00 ≤1.00	≤1.00 ≤1.25	≤0.040 ≤0.060	≤0.030 ≤0.15	(1) (1)	12.00/14.00 12.00/14.00	(2) (2)	
16~18Cr系	431	≤0.20	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	1.25/2.50	15.00/17.00	—	Niにより強じん性改良 高強度の付与、耐摩耗性の向上 C増大によりさらに硬度大 切削性改善
	440 A	0.60/0.75	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	16.00/18.00	(3)	
	440 B	0.75/0.95	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	16.00/18.00	(3)	
	440 C	0.95/1.20	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	(1)	16.00/18.00	(3)	
	440 F	0.95/1.20	≤1.00	≤1.25	≤0.060	≤0.15	(1)	16.00/18.00	(3)	
5) 析出硬化系										
17-4 Cu, Nb	630	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	3.00/5.00	14.50/17.50	Cu 2.00/5.00 Nb+Ta 0.15/0.45	Cu 析出相による微細析出強化
17-7 Al	631 631 J1	≤0.09 ≤0.09	≤1.00 ≤1.00	≤1.00 ≤1.00	≤0.040 ≤0.040	≤0.030 ≤0.030	6.50/7.75 7.00/8.50	16.00/18.00 16.00/18.00	Al 0.75/1.50 Al 0.75/1.50	Ni-Al 化合物による強化

(注) 1) Ni は 0.60% 以下含有してもさしつかえない
 2) Mo は 0.60% 以下添加することができる
 3) Mo は 0.75% 以下添加することができる

表 4.1(e) 原子炉に使用される耐食、耐熱合金の化学組成

合金	該 当 規 格		AMS	化 学 成 分 (wt%)											備 考		
	JIS	AI SI		ASTM	C	Si	Mn	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ti		Al	Fe
インコニール 800	NCF 2				0.05	0.50	0.75	32.5	21.0					0.38	0.38	46	
801			5652, 5742	B-163, B-407 B-408, B-409	0.05	0.50	0.75	32.0	20.5				1.13	0.38	44.5		
802			5660, 5661		0.32	0.38	0.75	32.5	21.0				0.75	0.58	46		
901			5925, 5731, 5732 5734, 5735, 5736 5737, 5804, 5805 7235, 7473, 7479 7481	A-453, A-461	0.05	0.40	0.45	42.7	13.5	6.2			2.5	0.25	残	0.015B	
A-286	SUH 660	660			0.05	0.40	1.40	26	15	1.25			2.15	0.2	残	0.03V	
HK-40	SCH 22			A-297, A-351, A-367 A-494, B-295, B-304 B-333, B-335	0.41	1.02	0.87	20.53	24.37	0.01					残		
ハステロイ B			5396		0.05	1.0	1.0	残	1.0	2.50	28				5		
C			5388, 5389, 5530 5750	A-194, A-567, B-295 B-304, B-234, B-336	0.04	0.50	0.35	残	16.0	1.0	16.0	4.0			6	0.2V	
C-276			5390, 5536, 5587 5588, 5754, 5798 5799, 7237	B-435	0.004	<0.01	0.34	残	16.4	1.1	16.3	3.7		0.22	6	0.2V	
X		680			0.10	1.0	1.0	残	22	2.0	9	0.5			18		
ハステロイ R-225		686			0.15			残	15.5	Max. 2.5	5.5		2.5	2.0	10		
インコニール 600	NCF 1			B-163, B-166 B-167, B-168	0.08	0.25	0.5	76.0	15.5						8.0		
601			5540, 5580, 5665 5683, 5687, 7232		0.05	0.25	0.5	60.5	23.0					1.35	14.1	0.25Cu	
617			5599, 5656	B-443, B-444 B-446	0.03	0.43	0.04	残	20.5	12.0	8.5		0.35	1.20			
625					0.05	0.25	0.25	61.0	21.5	9.0		3.7	0.2	0.2	2.5		
700			5550		0.16	0.25	0.10	残	15.0	3.0			2.2	3.0	0.07		
702			5383, 5589, 5590 5596, 5597, 5562 5563, 5564, 5832		0.04	0.20	0.05	残	15.6				0.7	3.4	0.4		
718			5542, 5582, 5598 5657, 5665, 5669 5670, 5671, 5699 5779		0.04	0.30	0.20	残	18.6	3.1		5.0	0.9	0.4	18.5		
X-750(NCF 3)		688		A-461	0.04	0.70	0.30	残	15.0			0.90	2.50	0.80	6.80		
Nimonic 80A					0.05	0.50	0.70	残	20.0	Max. 2.0			2.30	1.2	Max. 5.0		
Pyromet 860					0.05	0.10	0.25	44	13	4.0	6.0		3.0	1.0	残	0.01B	

表 4.1 (f) Zirconium Alloys

Designation	Composition, Percent					Form and Utilization
	Sn	Nb	Fe	Ni	Cr	
Zircaloy-2	1.20-1.70		0.07 0.2	0.03 0.08	0.05 0.15	Sheets, Tubes, Cladding of Ceramic Fuels, Pressure Tubes
Zircaloy-4	1.20-1.70		0.18 0.24	0.007 Max	0.07 0.13	
Nickel-free Zircaloy-2	1.20-1.70		0.18	0.007 Max	0.05 0.15	
Zr-2 $\frac{1}{2}$ Nb		2.5				
Ozhennite-0.5	0.2	0.1	0.1	0.1		

表 4.1 (g) ジルコニウム合金の化学成分

元 素	ジルコイ-2			ジルコイ-4			Zr-2.5% Nb	
	ASTM 規 格	沸騰水型軽水炉 (BWR) 用 被 覆 管		ASTM 規 格	加圧水型軽水炉 (PWR) 用 被 覆 管		重水炉用圧力管	
		外国規格例	通常製品の 分 析 例		外国規格例	通常製品の 分 析 例	外国規格例	通常製品の 分 析 例
Sn (%)	1.20~1.70	1.20~1.70	1.50	1.20~1.70	1.20~1.70	1.50	—	—
Fe	0.07~0.20	0.07~0.20	0.13	0.18~0.24	0.18~0.24	0.20	—	—
Cr	0.05~0.15	0.05~0.15	0.10	0.07~0.13	0.07~0.13	0.10	—	—
Nb	—	—	—	—	—	—	2.40~2.80	2.60
Ni	0.03~0.08	0.03~0.08	0.06	—	—	—	—	—
Fe+Cr+Ni	0.18~0.38	0.18~0.38	0.29	0.28~0.37	0.28~0.37	0.30	—	—
Al (ppm)	75Max.	70Max.	40	75Max.	75Max.	40	75Max.	40
B	0.5	0.5	<0.5	0.5	0.5	<0.5	0.5	<0.5
Cd	0.5	0.5	<0.5	0.5	0.5	<0.5	0.5	<0.5
C	270	270	30	270	270	10	270	120
Cr	—	—	—	—	—	—	200	80
Co	20	20	1	20	20	5	20	<5
Cu	50	50	30	50	50	20	50	<25
Hf	200	100	70	200	100	60	200	60
H	25	25	20	25	25	15	25	10
Fe	—	—	—	—	—	—	1500	800
Pb	—	—	—	—	—	—	100	<20
Mg	—	—	—	—	—	—	20	<5
O	—	700~1500	1250	—	1000~1600	1400	900~1300	1220
Mn	50	50	20	50	50	25	50	<10
Mo	—	—	—	—	—	—	50	<10
Ni	—	—	—	70	70	20	70	15
N	80	80	30	80	80	35	65	45
Si	200	120	30	120	120	20	120	60
Sn	—	—	—	—	—	—	100	30
Ta	—	—	—	—	—	—	200	<200
Ti	50	50	20	50	50	10	50	<50
W	100	100	40	100	100	10	100	<25
U	3.5	3.5	<1	3.5	3.5	<1	3.5	<1
V	—	—	—	—	—	—	10	<5

4.1 一次冷却水中の放射化生成物

炉心の冷却水（軽水）中の放射化生成物は、つぎの3種に大別される。

- (1) 純水（軽水）それ自身の放射化生成物
- (2) 水中の不純物と添加物の放射化生成物
- (3) 構造材、配管の腐食生成物の放射化生成物

このような放射化生成物を表 4.2³⁾、4.3⁵⁾、4.4⁵⁾ に示す。

水すなわち、 H_2O の放射化生成物は、気体成分が多い。そのうちの ^{16}N 、 ^{17}N は、半減期は短い、放出する放射線のエネルギーが高い。このため原子炉の運転中に作業者が一次系に近づく必要のある場所では遮蔽が必要になる。またBWRでは、一部が水蒸気とともにタービンへゆく。空気中のアルゴンが水にとけた場合も ^{37}Ar や ^{41}Ar を生じ、同様である。いずれも、気体排出物の放射線モニタリングに際し、考慮しなければならないものである。トリチウムについては、あとでのべる。

腐食生成物そのものの成分をみると、鉄が最も多い。炉心に入る給水中の鉄は、通常10～1 ppbにおさえられる。しかし、鉄1 ppb、給水流量6000 t/hrと仮定すると、炉心への鉄の年間流入量は、50 kgを越す。この鉄は、いわゆるクラッドを形成するが、クラッドには通常ニッケルも含まれている。燃料被覆管表面に析出したクラッド成分の分析例を、表 4.5⁶⁾、4.6⁷⁾、4.7³⁾に示す。表 4.6の例では、 $NiFe_2O_4$ に近い組成を示す。クラッドには少量のコバルトも含まれる。コバルトは、ステライトのようなコバルト主成分の合金のほか、ニッケル主成分のインコネル中ニッケルや、ステンレス鋼中ニッケルの不純物として含まれているものである。なお、析出したクラッド、冷却水中に浮遊しているクラッド、さらにクラッドを生じることになった合金、それぞれの組成は、決して同じではない。その例を表 4.8³⁾に示す。複雑なクラッド生成機構の一端を示すデータである。

クラッド中の放射性核種としては、成分である鉄、ニッケル、コバルトなどの放射化生成物がおもなものである。304 ステンレス鋼における ^{60}Co 、 ^{54}Mn 、 ^{58}Co の放射能生成量の計算例を表 4.9³⁾に示す。このほか、表 4.2、4.4の中で重要なものは、 ^{51}Cr 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 、 ^{65}Zn で、半減期の長いものほど蓄積するため、問題が大きい。蓄積放射能の成分の例を表 4.6、4.10⁷⁾、4.11⁷⁾、4.12⁸⁾に示す。 ^{60}Co は、放出するガンマ線のエネルギーが高く、1壊変あたりのガンマ線放出率も大きいため、線量率に対する寄与が大きいことが表 4.12から分る。このような ^{60}Co の、各種炉材材料における発生割合をBWRについて計算した例を図 4.2⁹⁾に示す。また、BWRの一次冷却系放射線量率を再循環配管で測定した様子を図 4.3に示す¹⁰⁾。このほか、クラッド中放射性核種の測定例を表 4.13 (PWR)³⁾、4.14 (BWR)³⁾に示す。

4.2 核反応制御材の核反応生成物

固体の棒の形で、あるいは水溶液の形で原子炉の制御に使われる物質のおもなものを表 4.15に示す^{2,3,11)}。この種の核種の中性子捕獲反応では、安定核種や、半減期の短い核種を生成する例が多い。

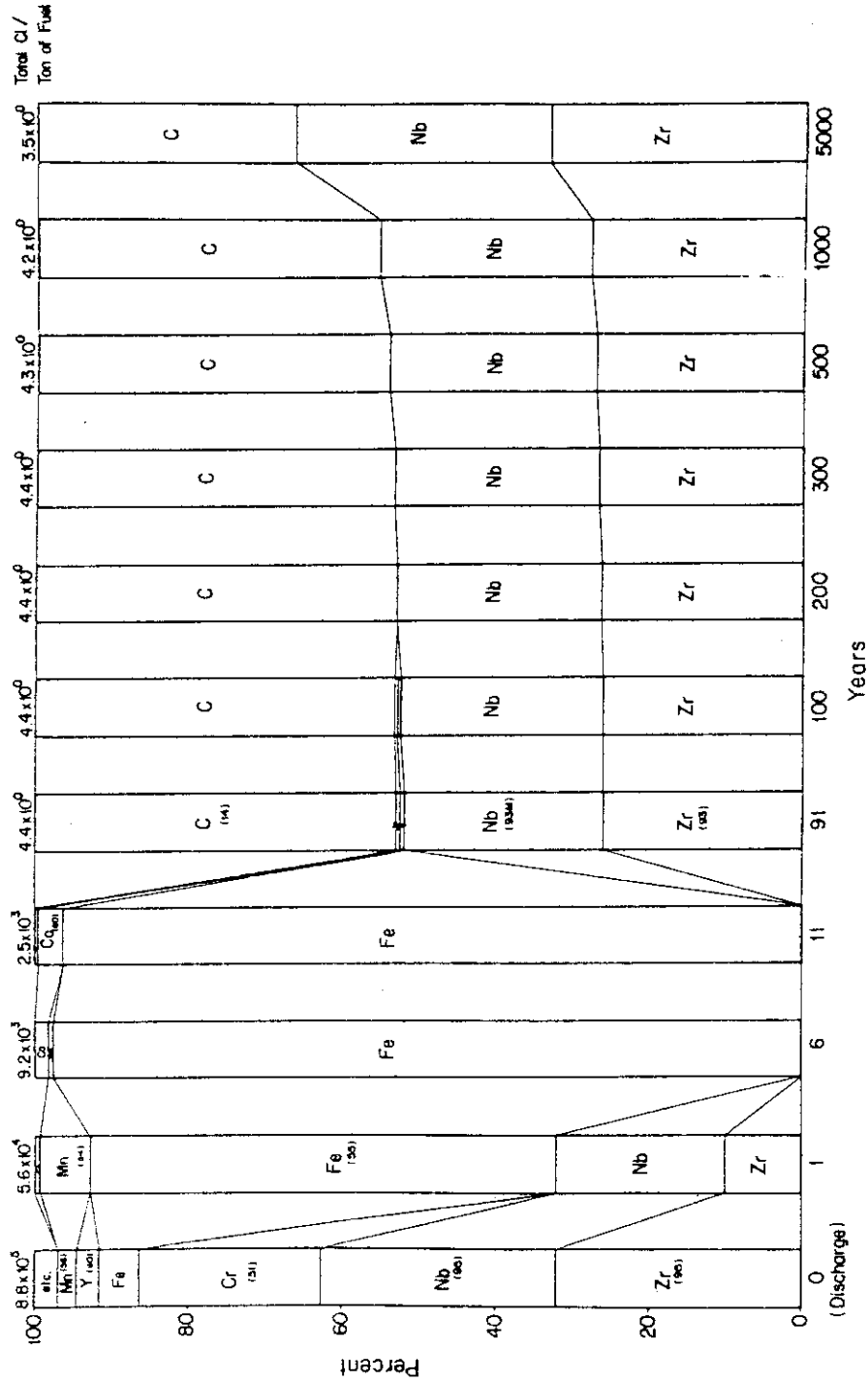


図 4.1 被覆材の相対的放射能強度

括弧内の数字は主要核種の質量数，上辺の数字はその時点での全放射能

表 4.2 Water Reactor Radionuclides

σ_0 Barns	Nuclide	$t_{1/2}$	Activity	Formation	Target Isotopic Abundance, Percent
Coolant Activation					
	^{13}N	10.0 min	β^+	$^{16}\text{O}(p, \alpha)$	99.76
0.019 ^a	^{16}N	7.38 sec	β^-, γ	$^{16}\text{O}(n, p)$	99.76
0.0052 ^a	^{17}N	4.14 sec	β^-, n	$^{17}\text{O}(n, p)$	0.0374
	^{18}F	110 min	β^+	$^{18}\text{O}(p, n)$	0.2039
Dissolved Impurities or Additives					
945	^3H	12.26 year	β^-	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$	
0.536	^{24}Na	15.0 h	β^-, γ	$^{23}\text{Na}(n, \gamma)$	
0.57 ^a				$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	
0.53	^{41}A	1.83 h	β^-, γ	$^{40}\text{A}(n, \gamma)$	99.6
1.24	^{42}K	12.36 h	β^-, γ	$^{41}\text{K}(n, \gamma)$	6.88
Materials of Construction					
16	^{41}Cr	27.8 day	EC, γ	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)$	4.31
65	^{54}Mn	303 day	EC, γ	$^{54}\text{Fe}(n, p)$	5.82
13.3	^{56}Mn	2.58 h	β^-, γ	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma), ^{56}\text{Fe}(n, p)$	100
0.71 ^a					
2.3	^{55}Fe	2.60 year	EC	$^{54}\text{Fe}(n, \gamma)$	0.33
1.01	^{59}Fe	45 day	β^-, γ	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$	00.33
90 ^a	^{58}Co	71 day	EC, β^+, γ	$^{58}\text{Ni}(n, p)$	67.88
36	^{60}Co	5.26 year	β^-, γ	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	100
1.5	^{65}Ni	2.56 h	β^-, γ	$^{64}\text{Ni}(n, \gamma)$	1.08
4.5	^{64}Cu	12.8 h	EC, β^-, β^+, γ	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	69.09
0.47	^{65}Zn	245 day	EC, γ	$^{64}\text{Zn}(n, \gamma)$	48.89
4.3	^{76}As	26.8 h	β^-, γ	$^{75}\text{As}(n, \gamma)$	100.0
0.078	^{92}Zr	65 day	β^-, γ	$^{92}\text{Zr}(n, \gamma)$	17.4
	^{95}Nb	35.1 day	β^-, γ	$^{95}\text{Zr}(\beta^-)$	(fission product)
0.51	$^{99}\text{Mo}^{99}\text{Tc}$	67 h	β^-, γ	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)$	23.78
3.2	$^{100\text{m}}\text{Ag}$	253 day	β^-, γ	$^{100}\text{Ag}(n, \gamma)$	48.65
5.9	^{122}Sb	2.74 day	β^-, γ	$^{121}\text{Sb}(n, \gamma)$	57.25
4.1	^{124}Sb	60 day	β^-, γ	$^{123}\text{Sb}(n, \gamma)$	42.75
33	^{134}Cs	2.0 year	β^-, γ	$^{133}\text{Cs}(n, \gamma)$	100.
10	^{181}Hf	45 day	β^-, γ	$^{180}\text{Hf}(n, \gamma)$	35.24
19	^{182}Ta	115 day	β^-, γ	$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$	99.99
34	^{187}W	24 h	β^-, γ	$^{186}\text{W}(n, \gamma)$	28.41
3.8	^{203}Hg	47 day	β^-, γ	$^{202}\text{Hg}(n, \gamma)$	29.80
2.71	^{239}Np	2.35 day	β^-, γ	$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	

^a Cross section in millibarns for fission neutron spectrum—C. H. Hogg and L. D. Weber, Symposium on Radiation Effects on Metals, and Neutron Dosimetry, pp. 133-140, American Society for Testing Materials, Philadelphia (1963).

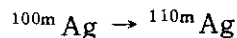
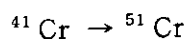


表 4.3 原子炉冷却水の放射化生成物

Nuclide	Reaction	Half-life	Most significant decay particles (Mev and percent)			Total decay energy(Mev)
			Beta	Positron	Gamma	
H ³ ^a	H ² (n, γ) Li ⁶ (n, α) ^b Fission product	12.26 year	0.0186 ¹⁰⁰			0.0186
N ¹³	O ¹⁶ (p, α)	10.0 min		1.19 ¹⁰⁰		2.21
N ¹⁶	O ¹⁶ (n, p) N ¹⁵ (n, γ)	7.4 sec	10.4 ²⁶ 4.3 ⁶⁸		6.13 ⁷³ 7.12 ⁵	10.4
N ¹⁷	O ¹⁷ (n, p)	4.14 sec	3.7			8.8
O ¹⁹	O ¹⁸ (n, γ)	29 sec	3.25 ⁵⁸ 4.60 ⁴²		0.20 ⁹⁶ 1.36 ⁵⁴	4.80
F ¹⁸	O ¹⁸ (p, n)	1.87 hr	EC ^{3c}	0.65 ⁹⁷		1.67
Ar ^{37d}	Ar ³⁶ (n, γ)	35 day	EC ¹⁰⁰			0.82
Ar ^{41d}	Ar ⁴⁰ (n, γ)	1.83 hr	1.20 ⁹⁹ 2.49 ¹		1.29 ⁹⁹	2.49

^a Tritium. While tritium is a gas, it usually is only present in readily detectable quantities as the oxide in liquid wastes discharged from light-water-cooled reactors and aqueous fuel reprocessing plants. It may be present in hazardous amounts in the coolant of heavy-water reactors.

^b Lithium is sometimes added to coolants for pH control. Li OH has been in use at Shippingport.

^c Electron capture. Gamma rays characteristic of the daughter are emitted.

^d Ar³⁷ and Ar⁴¹ may build up in small amounts if the water is not deaerated.

表 4.4 原子炉冷却水中不純物および腐食生成物の放射化生成物

Radioactive nuclide	Half-life	Nuclear reaction	Most significant decay particles (Mev and Percent)			Total decay energy (Mev)
			Beta	Positron	Gamma	
Na ²⁴	15.0 hr	Al ²⁷ (n, α) Na ²³ (n, γ)	1.39 ¹⁰⁰		2.75 ¹⁰⁰ , 1.37 ¹⁰⁰	5.51
Al ²⁸	2.30 min	Al ²⁷ (n, γ)	2.87 ¹⁰⁰		1.78 ¹⁰⁰	4.65
Si ³¹	2.62 hr	P ³¹ (n, p)	1.48			1.48
Cl ³⁸	37.3 min	Cl ³⁷ (n, γ)	4.8 ⁵³ , 1.1 ³¹		2.1 ⁴⁷ , 1.6 ³¹	4.8
Ar ³⁷	35 day	Ar ³⁶ (n, γ)	EC ^{100a}			0.82
Ar ⁴¹	1.83 hr	Ar ⁴⁰ (n, γ)	1.20 ⁹⁹ , 2.49 ¹		1.29 ⁹⁹	2.49
Ca ⁴⁵	160 day	Ca ⁴⁴ (n, γ)	0.25 ¹⁰⁰			0.25
Cr ⁵¹	27.8 day	Cr ⁵⁰ (n, γ)	EC		0.32 ¹⁰	0.75
Mn ⁵⁴	280 day	Fe ⁵⁴ (n, p)	EC ¹⁰⁰		0.84 ¹⁰⁰	1.38
Fe ⁵⁵	2.6 year	Fe ⁵⁴ (n, γ)	EC ¹⁰⁰			0.22
Mn ⁵⁶	2.58 hr	Fe ⁵⁶ (n, p)	2.86 ⁶⁰ , 1.05 ²⁴		0.84 ⁹⁹ 2.11 ¹⁴ , 1.81 ²³	3.70
Co ⁵⁸	71 day	Mn ⁵⁵ (n, γ) Ni ⁵⁸ (n, p)	EC ⁸⁵	0.48 ¹⁵	0.81 ¹⁰⁰ , 1.62 ^{0.5}	2.31
Fe ⁵⁹	45 day	Co ⁵⁹ (n, p)	0.46 ⁵³ , 0.27 ⁴⁶		1.10 ⁵⁶ , 1.29 ⁴⁴	1.56
Co ⁶⁰	5.27 year	Co ⁵⁹ (n, γ)	0.31 ¹⁰⁰		1.33 ¹⁰⁰ , 1.17 ¹⁰⁰	2.81
Cu ⁶⁴	12.9 hr	Cu ⁶³ (n, γ)	0.57 ³⁸ , EC ⁴³	0.66 ¹⁹	1.34 ¹	c
Ni ⁶⁵	2.56 hr	Ni ⁶⁴ (n, γ)	2.10 ⁶⁹ , 0.6 ²³		1.49 ²⁰ , 1.11 ¹⁰	2.10
Zn ⁶⁵	245 day	Zn ⁶⁴ (n, γ)	EC ⁹⁸	0.33 ²	1.11 ⁵⁰	1.35
Cu ⁶⁶	5.1 min	Cu ⁶⁵ (n, γ)	2.63 ⁹¹ , 1.59 ⁹		1.04 ⁹	2.63
Sr ⁸⁹	51 day	Sr ⁸⁸ (n, γ)	1.46 ¹⁰⁰			1.46
Zr ⁹⁵	65 day	Zr ⁹⁴ (n, γ)	0.40 ⁵⁵ , 0.36 ⁴³		0.72 ⁵⁵ , 0.76 ⁴³	1.12
Hf ¹⁸¹	45 day	Hf ¹⁸⁰ (n, γ)	CE ^b 0.41		0.137	1.02
Ta ¹⁸²	115 day	Ta ¹⁸¹ (n, γ)	0.51 ⁸		0.10 ⁵⁶ , 1.12 ³³ 0.122 ⁴⁸ , 1.19 ¹⁵	1.73
Ta ¹⁸³	5.0 day	Ta ¹⁸² (n, γ)	0.61 ⁹¹		0.108 ⁴⁴ , 0.246 ⁸⁵	1.07
W ¹⁸⁷	24.0 hr	W ¹⁸⁶ (n, γ)	0.63 ⁷⁰ , 1.31 ²⁰		0.69, 0.48, 0.134	1.31

a Electron capture. b Conversion electron. c EC and positron, 1.68, beta, 0.57.

表 4.5 被覆に附着しているクラッド成分の例

Composition	Fe ₃ O ₄	Ni	Cr	Cu	Co
(%)	98 ~100	0.5 ~2	0.1 ~0.5	0.01 ~0.1	0.01 ~0.05

表 4.6 CANDU炉における燃料棒付着物の分析例

燃料棒位置	1	2	3	4
照射時間(月)	30	47	33	33
燃焼度(MWh/kgU)	47	309	101	166
付着物の化学分析($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				
Fe	54	90	137	170
Ni	25	43	62	85
Cu	0.35	2.0	<0.8	1.5
Cr	0.96	0.85	2.0	0.85
Co	0.26	0.76	0.8	1.15
付着物の放射化学分析($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)				
⁵⁸ Co	0.10	—	0.36	—
⁵¹ Cr	—	—	3.3	—
⁶⁰ Co	5.2	27	18	25
⁶⁰ Co 比放射能 g ⁶⁰ Co/ ⁵⁸ Co	0.018	0.032	0.02	0.019

表 4.7 Composition of Dresden Fuel Element Deposits

Component	Percent
Fe ₂ O ₃	33.6
CuO	3.4
Cr ₂ O ₃	1.7
NiO	31.2
dpm ⁶⁰ Co/mg Fe	2.84×10^7

表 4.8 Comparison of Corrosion Film and Base Metal Composition as Oxides Stainless-steel Cladding Saxton and Yankee Reactors

	Weight Percent			
	Fe	Ni	Cr	Mn
YANKEE*				
Fuel Clad Film	24	11	36	
Circulating Corrosion Products	58	8	2	0.4
Base Metal	49	8	13	1.4
SAXTON*				
Fuel Clad Film	42	14	14	
Circulating Corrosion Products	40	7	20	1.8
Base Metal	48	6.5	12.4	0.7

* 16 months 515 °F Coolant
 H_2 —25 cm³/kg—ion exchange purification—neutral water

* 6.4 months 530 °F Coolant
 H_2 , 10-90 cm³/kg
 4 months, 2.4 ppm KOH
 2.4 months, 0.9 ppm KOH
 750-1200 ppm boron as H_3BO_3

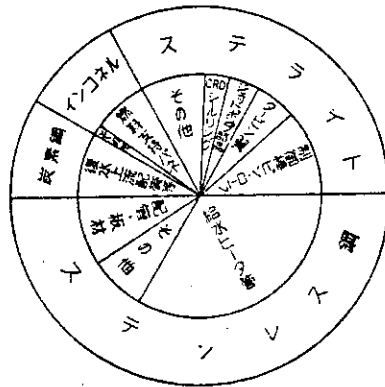


図 4.2 1次冷却系構造材の ⁶⁰Co 発生割合 (BWR)

表 4.9 Radioactive Buildup of ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, and ⁵⁸Co in 304 Stainless Steel

Nuclide	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	⁵⁸ Co
Target element	Co	Fe	Ni
Composition percent	0.05	70	9
Precursor isotope	⁵⁹ Co	⁵⁴ Fe	⁵⁸ Ni
Isotope abundance, percent	100	5.82	67.88
σ_0 (2200 m/sec flux)	36		
σ (fission spectrum averaged, millibarns)		65	90
Decay constant λ , sec ⁻¹	4.15×10^{-9}	2.43×10^{-8}	1.13×10^{-7}
ϕ_0 (2200 m/sec flux)	4×10^{13}		
ϕ (Fission flux) n/(cm ² sec)		10^{14}	10^{14}
a_t dis/(sec mg)			
t , years 0.1			1.9×10^6
0.3			3.75×10^6
0.5	4.60×10^5	9.4×10^5	4.72×10^6
1.0	9.00×10^5	1.59×10^6	
2.0	1.69×10^6	2.33×10^6	
3.0	2.38×10^6	2.66×10^6	
∞	7.30×10^6	2.95×10^6	5.67×10^6

表 4.10 ドレスデン1号機における蓄積放射性核種

核種	放射能濃度 (Ci)	放射能濃度 (%)
⁶⁰ Co	2,160	72.0
⁵⁸ Co	630	21.0
¹⁴⁴ Ce- ¹⁴⁴ Pr	117	3.0
⁵⁴ Mn	30	1.0
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	21	0.7
⁵⁷ Co	15	0.5
¹⁴¹ Ce	15	0.5
¹⁰³ Ru	9	0.3
その他核分裂生成成分	3	0.1
合計	3,000	100.0

表 4.11 放射能濃度と化学成分の各元素による割合

核種(元素名)	試料採取個所		復水ポンプ出口		低圧給水加熱器出口	
	放射能 (%)	化学成分 (%)	放射能 (%)	化学成分 (%)	放射能 (%)	化学成分 (%)
⁶⁰ Co (コバルト)	40	—	39	—	—	—
⁵⁴ Mn (マンガン)	34	—	38	—	—	—
⁶⁵ Zn (亜鉛)	12	n.d	8	n.d	—	—
⁵⁹ Fe (鉄)	7	97	8	100	—	—
⁵⁸ Co	4	—	4	—	—	—
⁹⁵ Zr (ジルコニウム)	4	—	4	—	—	—
(銅)	—	3	—	n.d	—	n.d
(ニッケル)	—	n.d	—	n.d	—	n.d
合 記	101	100	101	100	—	—

n.d: 未検出

† 検出された放射能濃度の合計に対する割合

†† 検出された化学成分濃度の合計に対する割合

表 4.12 一次冷却系配管放射線量率に対する核種別寄与

核種	Co-60 (%)	Co-58 (%)	Mn-54 (%)	Fe-59 (%)	Zn-65 (%)	Zr-95 (%)	Ru-103 (%)	EFPPY (mR/Hr)
発電所	65.1	2.7	13.1	12.8	0	3.0	3.1	3.45(145)
ナインマイルポイント	83.0	3.5	3.2	1.8	1.0	3.5	4.0	3.46(490)
モンティセロ	50.8	4.0	2.5	1.9	6.2	19.0	15.0	2.83(500)
ミルストーン-1	70.3	6.1	7.1	3.0	0.3	6.6	6.6	2.72(160)
クォードシティ-1	95.2	2.8	1.8	—	0	0	0.2	2.79(400)

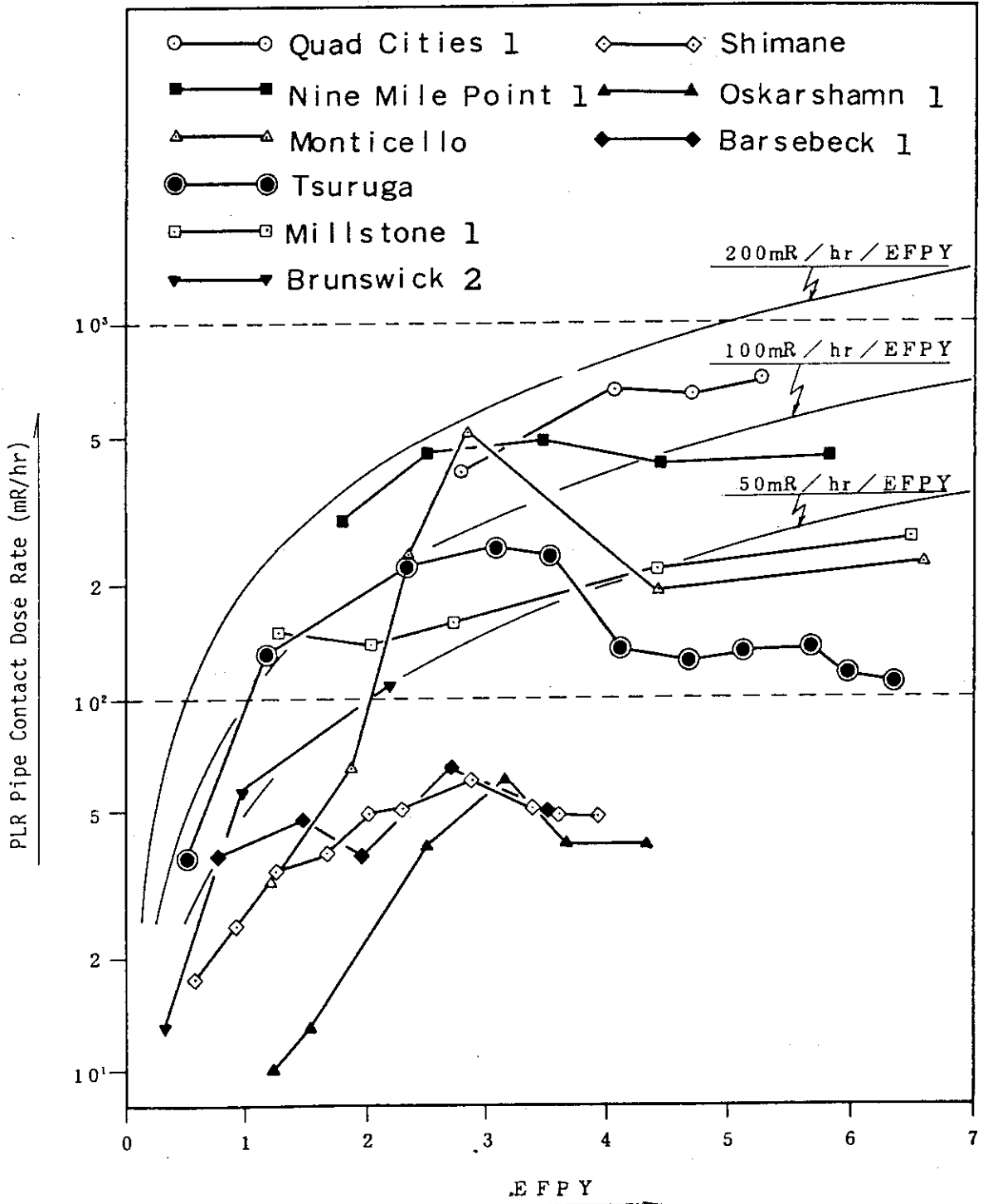


図 4.3 Radiation Build-up in BWR Primary System
EFPY (実効全出力運転年)

表 4.13 Crud and Nonfilterable Activity - Shippingport Core-II

Relative Power %	EFPH	Crud Conc ppb	Crud Activity dpm/mg at 120 h					R	Nonfilterable Activity dpm/liter at 120 h			
			Nuclide Unit	⁶⁰ Co 10 ⁶	⁵⁸ Co 10 ⁶	⁵⁹ Fe 10 ⁵	⁵⁴ Mn 10 ⁵		⁵⁸ Co / ⁶⁰ Co	⁶⁰ Co 10 ⁴	⁵⁸ Co 10 ⁴	⁵⁹ Fe 10 ³
	625	6.5		1.42	4.62	7.65	1.16	1.9	1.46	5.25	—	6.15
52.6	1828	10.5		3.28	9.28	2.08	0.25	2.8	0.87	0.94	1.08	0.36
33.7	2580	2.6		4.88	15.5	14.5	4.13	3.2	1.04	1.29	0.98	1.41
58.0	3636	5.4		5.57	20.4	14.4	4.40	3.7	1.83	2.70	2.94	1.52
54.6	4475	1.9		6.75	19.2	14.7	4.96	2.8	2.50	2.88	3.71	1.33
34.8	5350	2.6		7.68	18.6	13.6	5.37	2.4	0.69	1.14	0.88	1.22
37.4	6650	5.2		10.0	17.2	16.0	9.48	1.7	5.65	5.68	4.55	0.89
51.2	7540	3.3		9.70	16.9	22.4	17.1	2.0	1.02	1.03	0.65	1.60
40.5	8300	5.0		16.8	26.4	33.2	22.5	1.6	1.71	1.34	0.67	5.95
55.6	9357	1.15		31.2	45.0	61.8	34.9	1.4	0.33	0.26	0.59	2.96
31.4	10308	2.3		43.3	45.2	43.2	37.2	1.0	1.73	1.50	2.40	2.92

Plant Design and Operating Parameters: Zircaloy 2-clad core, Inconel-600 Steam Generators; bypass purification NH₄-OH resin. H₂, 40-60 cm³/kg; O₂ < 10 ppb. Coolant temperature at power ~ 530°F. In-line filtration; nonfilterables collected on ion-exchange resins.

表 4.14 Crud and Nonfilterable Activity - Dresden Core -1

EFPH	Crud* 10 ⁶ dpm/mg Fe				R	Nonfilterable Activity dpm/liter—in units shown				
	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁹ Fe	⁵⁴ Mn		⁵⁸ Co / ⁶⁰ Co	⁶⁰ Co 10 ⁴	⁵⁸ Co 10 ⁴	⁵⁹ Fe 10 ³	⁵⁴ Mn 10 ⁴
22	0.0086	0.099	0.039	0.01	11.5	—	0.08	—	—	
52	0.31	1.82	0.61	0.20	5.9	—	0.12	—	0.15	
107	0.77	3.57	1.27	0.36	6.2	—	0.13	—	0.13	
283	2.44	15.6	2.86	0.62	6.4	0.56	17.4	0.14	0.88	
567	1.96	16.0	1.0	0.34	8.1	1.00	10.5	0.16	0.25	
1120	2.0	30.2	0.78	0.45	15.1	2.37	53.0	0.96	0.54	
2280	8.1	10.7	3.43	1.64	13.2	7.13	13.3	0.36	3.71	
3675	4.86	55.9	1.27	0.67	11.5	2.74	25.2	0.15	0.25	

* Crud—Average 0.2 ppm Fe, Fe content ~ 38.5%.

Plant design and operating parameters: Zircaloy-2-clad core. Secondary steam generator, piping and steam drum liner, 304 SS. Feedwater heaters, cupro-nickel condensate demineralization. Bypass purification primary system, H-OH resin. H₂, 0.4-0.6 cm³/kg; O₂, 0.2 to 0.3 cm³/kg. Coolant temperature at power 545 F. Batch sampling and filtration.

4.3 トリチウム

原子炉材料から生じる放射性核種のなかに、トリチウムがある。トリチウムは、さまざまな核反応によって原子炉内に生じる。まず、核燃料内に、三体分裂 ternary fission によって生成する。三体分裂は、 ^{235}U の熱中性子による核分裂では、核分裂約 400 回に 1 回の割合で起り、通常の核分裂片のほか、つぎのような軽い分裂片を生じる¹²⁾。

^4He	100 (とする)
^6He	1.4
^3H	6.3
^2H	0.4
^{10}Be	0.30
その他 ^7Li , ^8He など	

原子炉における生成量は、電気出力 1000 MW あたり、1.5 g (15 kCi) のトリチウムとなる¹³⁾。生成したトリチウムは、ジルカロイ被覆の場合、ほとんど被覆管内にとどまり、再処理の際に放出される。

つぎに、制御棒中のホウ素から、 $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ のほか、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ によって生じた ^7Li と速中性子との反応で、年間 2~20 kCi のトリチウムを生じる¹³⁾。また PWR においては、pH 制御用の ^6Li から熱中性子との反応 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ で少量 (^6H を減らした濃縮リチウムを使うと、生成量が少なくなる)、ケミカルシム用のホウ素から、電気出力 1000 MW の PWR で年間 500 Ci~1 kCi のトリチウムが生成する¹³⁾。軽水中の重水素から来るトリチウムは、同じく電気出力 1000 MW の PWR で約 10 Ci/年程度である¹³⁾。

自然界には、核爆発に由来するトリチウムがあり、その現在量は、天然の平衡存在量を上まわる。一方原子力プラントにおける生成量が、発電量とともに増加することになる^{13, 14)}。トリチウムは、その半減期 (12.24 年) と、生物学的な重要性から、特別な意味のある放射性核種として、環境への放出に関連して、とくに研究が行なわれている。

4.4 各元素の性質、その他

4 章でとりあげた放射性核種の許容濃度を表 4.16 にまとめた^{15, 16, 17)}。また表 4.17 には、4 章でとりあげた元素のうち、おもなものの物理的性質などをまとめた^{11, 18~20)}。ただし、すべて天然の同位体組成をもつ物質に関するデータである。とくに水素の性質は、 ^1H (99.985%) を主とした水素の性質であり、重水素、トリチウムの場合、 ^1H とは差がある。すなわち、沸点では D_2 の場合、 H_2 よりも 3.1 K 高い 23.5 K²⁰⁾、 T_2 の場合約 25 K²¹⁾ であり、融点では D_2 の場合 18.65 K²⁰⁾ である。トリチウムは、水の形で取り扱う場合が多いので、 H_2O 、 D_2O と共に、 T_2O の性質を表 4.18 に示した^{21, 22)}。

地球における水素は、ほとんどが化合物の形で存在し、かつ動植物に欠かせぬ構成成分元素である。水素 H_2 は無色無臭の軽い気体で、表 2.3 に示すように水にはほとんどとけない。天然の水素は ^2H (D) を 0.01492% 含んでいる。水 H_2O の成分元素である。

表 4.15 おもな制御材用元素

元素 および 断面積の大きな同位体	存在比 [%] または半減期	熱中性子吸収 断面積 [barn]
B	—	759
¹⁰ B	19.61	3837
Ag	—	63.6
¹⁰⁷ Ag	51.35	35
¹⁰⁹ Ag	48.65	92.5
Cd	—	2450
¹¹³ Cd	12.26	20000
In	—	194
¹¹³ In	4.28	11.1
¹¹⁵ In	95.72	204
Eu	—	4400
¹⁵¹ Eu	47.82	8804
¹⁵³ Eu	52.18	390
Gd	—	49000
¹⁵⁵ Gd	14.73	61000
¹⁵⁷ Gd	15.68	254000
Hf	—	105
¹⁷⁴ Hf	0.18	400
¹⁷⁶ Hf	5.20	15
¹⁷⁷ Hf	18.50	370
¹⁷⁸ Hf	27.14	80
¹⁷⁹ Hf	13.75	65
¹⁸⁰ Hf	35.24	12.6
Ta	—	21
¹⁸¹ Ta	99.9877	21
¹⁸² Ta	半減期 115 日	8200

表 4.16 許 容 濃 度

放射性核種と 壊変の型	決定臓器 (関連臓器は略)	最大許容 身体負荷 量 q (μCi) (標準人)	最大許容濃度			
			1 週 40 時間		1 週 168 時間	
			水中 (μCi/cm ³)	空气中 (μCi/cm ³)	水中 (μCi/cm ³)	空气中 (μCi/cm ³)
³ H (H ₂ O) (可溶) ^{β-} (H ₂) (浸漬)	身体組織		0.1	2 × 10 ⁻⁵	0.03	5 × 10 ⁻⁶
	皮膚			2 × 10 ⁻³		4 × 10 ⁻⁴
²⁴ Na (可溶) ^{β-, γ}	消化管(小腸)		6 × 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		8 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁸
³¹ Si (可溶) ^{β-, γ}	消化管(胃)		0.03	6 × 10 ⁻⁶	9 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁶
	消化管(大腸上部)		6 × 10 ⁻³	10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
³⁶ Cl (可溶) ^{β-, γ}	消化管(胃)		0.01	3 × 10 ⁻⁶	4 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻⁷
	消化管(胃)		0.01	2 × 10 ⁻⁶	4 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁷
³⁷ Ar ε (沈積)	皮膚			6 × 10 ⁻³		10 ⁻³
⁴¹ Ar β-, γ (沈積)	全身			2 × 10 ⁻⁶		4 × 10 ⁻⁷
⁴² K (可溶) ^{β-, γ}	消化管(胃)		9 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		6 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻⁸
⁴⁵ Ca (可溶) ^{β-}	骨	30	3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁸	9 × 10 ⁻⁵	10 ⁻⁸
	肺消化管(大腸下部)		5 × 10 ⁻³	10 ⁻⁷ 9 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁸ 3 × 10 ⁻⁷
⁵¹ Cr (可溶) ε, γ	消化管(大腸下部) 全身	800	0.05 0.6	10 ⁻⁵ 10 ⁻⁵	0.02 0.2	4 × 10 ⁻⁶ 4 × 10 ⁻⁶
	肺消化管(大腸下部)		0.05	2 × 10 ⁻⁶ 8 × 10 ⁻⁶	0.02	8 × 10 ⁻⁷ 3 × 10 ⁻⁶
⁵⁴ Mn (可溶) ε, γ	消化管(大腸下部) 肝臓	20	4 × 10 ⁻³ 0.01	8 × 10 ⁻⁷ 4 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³ 4 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁷
	肺消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁸ 6 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁷
⁵⁶ Mn (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部)		4 × 10 ⁻³	8 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
⁵⁵ Fe (可溶) ε	脾臓	10 ³	0.02	9 × 10 ⁻⁷	8 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
	肺消化管(大腸下部)		0.07	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵	0.02	3 × 10 ⁻⁷ 4 × 10 ⁻⁶
⁵⁹ Fe (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部) 脾臓	20	2 × 10 ⁻³ 4 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁷	6 × 10 ⁻⁴ 10 ⁻³	10 ⁻⁷ 5 × 10 ⁻⁸
	肺消化管(大腸下部)		2 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁸ 3 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻⁸ 9 × 10 ⁻⁸
⁵⁸ Co (可溶) ^{β+, ε}	消化管(大腸下部) 全身	30	4 × 10 ⁻³ 0.01	8 × 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁶	10 ⁻³ 4 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷ 3 × 10 ⁻⁷
	肺消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁸ 5 × 10 ⁻⁷	9 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁷
⁶⁰ Co (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部) 全身	10	10 ⁻³ 4 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷ 4 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁴ 10 ⁻³	10 ⁻⁷ 10 ⁻⁷
	肺消化管(大腸下部)		10 ⁻³	9 × 10 ⁻⁹ 2 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁹ 6 × 10 ⁻³
⁶⁵ Ni (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部)		4 × 10 ⁻³	9 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	5 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁷
⁶⁴ Cu (可溶) ^{β-, β+, ε, γ}	消化管(大腸下部)		0.01	2 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		6 × 10 ⁻³	10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷
⁶⁵ Zn (可溶) ^{β-, e-, γ}	全身 立身 前肝臓	60 70 80	3 × 10 ⁻³ 4 × 10 ⁻³ 4 × 10 ⁻³	10 ⁻⁷ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁷	10 ⁻³ 10 ⁻³ 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁸ 4 × 10 ⁻⁸ 5 × 10 ⁻⁸
	肺消化管(大腸下部)		5 × 10 ⁻³	6 × 10 ⁻⁸ 8 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁸ 3 × 10 ⁻⁷
⁷⁵ As (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部)		6 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻⁸
	消化管(大腸下部)		6 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁸
¹⁸⁷ Hf (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部) 脾臓	4	2 × 10 ⁻³ 0.9	4 × 10 ⁻⁷ 4 × 10 ⁻⁸	7 × 10 ⁻⁴ 0.3	2 × 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸
	肺消化管(大腸下部)		2 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁸ 4 × 10 ⁻⁷	7 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁷
¹⁸² Ta (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部) 肝臓	7	10 ⁻³ 0.9	3 × 10 ⁻⁷ 4 × 10 ⁻⁸	4 × 10 ⁻⁴ 0.3	9 × 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁸
	肺消化管(大腸下部)		10 ⁻³	2 × 10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁷	4 × 10 ⁻⁴	7 × 10 ⁻⁹ 7 × 10 ⁻⁸
¹⁸⁷ W (可溶) ^{β-, γ}	消化管(大腸下部)		2 × 10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁷	7 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻⁷
	消化管(大腸下部)		2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁷	6 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
²⁰³ Hg (可溶) ^{β-, γ, e-}	腎臓	4	5 × 10 ⁻⁴	7 × 10 ⁻⁸	2 × 10 ⁻⁴	2 × 10 ⁻⁸
	肺消化管(大腸下部)		3 × 10 ⁻³	10 ⁻⁷ 6 × 10 ⁻⁷	10 ⁻³	4 × 10 ⁻⁸ 2 × 10 ⁻⁷

表 4.17 (1) 物理的性質

元素名	水素	ホウ素	クロム	マンガン
原子番号	1	5	24	25
原子量	1.0079	10.81	51.996	54.9380
電子配置	1s ¹	[He] 2s ² 2p ¹	[Ar] 3d ⁵ 4s ¹	[Ar] 3d ⁵ 4s ²
酸化状態	I	III	II, III, IV, V	II, III, IV, V, VI
融点 [K]	14.0	2570	2180	1517
沸点 [K]	20.4	2820	2755	2370
密度 [gcm ⁻³]		2.4	7.14	7.21 ~ 7.44
中性子吸収断面積 [barn]	0.332	759	3.1	13.3
その他	水素化物を生成する 元素多い、 非金属元素 分子はH ₂ 無色気体 (常温) 宇宙で最も多い元素	変態は複雑 結晶は硬い 非金属元素 結晶: 黒色金属光沢 無定形: 黒褐色	V 価有毒, 変態は複雑, HCl, 希H ₂ SO ₄ に可溶 銀白色金属	熱水, 酸に可溶, II 価安定 銀白色金属 鉄より硬く, もろい。

表 4.17 (2) 物理的性質

元素名	鉄	コバルト	ニッケル	亜鉛
原子番号	26	27	28	30
原子量	55.847	58.9332	58.69	65.38
電子配置	[Ar] 3d ⁶ 4s ²	[Ar] 3d ⁷ 4s ²	[Ar] 3d ⁸ 4s ²	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
酸化状態	II, III	II, III	II, III	II
融点 [K]	1808	1760	1728	692
沸点 [K]	3023	約3400	3005	1180
密度 [gcm ⁻³]	7.9	8.9	8.9	7.1
中性子吸収断面積 [barn]	2.55	37.2	4.6	1.10
その他	水に不溶, 酸に可溶, 濃硝酸では不働態 灰白色金属	II 価安定, III 価錯体 として存在 灰白色金属	II 価安定 銀白色金属	非酸化性の酸, 強アルカリ中に可溶 青白色金属

表 4.17(3) 物理的性質

元 素	ハフニウム	タンタル
原子番号	72	73
原子量	178.49	180.9479
電子配置	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ² 6s ²	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ²
酸化状態	IV	II, III, IV, V
融点 [K]	2470	3270
沸点 [K]	5700	5700
密度 [gcm ⁻³]	13.3	16.6
中性子吸収断面積 [barn]	105	21
そ の 他	HF, 融 NaF に可 溶, 化学性質 Zr に よく似る 灰色金属	酸に不溶, HF, 融 アルカリ可溶, V価 安定 灰黒色金属

表 4.18 H₂O, D₂O, T₂O の性質

性 質	H ₂ O	D ₂ O	T ₂ O
融点 (1気圧) [°C]	0.0	3.82	—
沸点 (1気圧) [°C]	100.0	101.42	101.51
三重点温度 [°C]	0.010	3.82	4.49
三重点圧 [mmHg]	4.58	5.02	4.87
沸点における蒸発熱 [kcal mol ⁻¹]	9.72	9.9	10.1
融解熱 [kcal mol ⁻¹]	1.436	1.529	—
比熱 [cal g ⁻¹ deg ⁻¹]	1.00	1.02	—
298.16K における エントロピー [eu]	16.75	18.9	19.0
最大密度 [g cm ⁻³]	0.999973 at 3.98 °C	1.10589 at 11.2 °C	1.2150 at 13.4 °C
比 重 ²⁵	0.99708	1.10714	—
粘度 [milipoise]	10.60	12.60	—
分子氷点降下	1.86	2.05	—
表面張力 (20°C) [dyne cm ⁻¹]	72.75	67.8	—
屈折率 n _D	1.33300	1.32844	—
イオン積 (25°C)	1.0 × 10 ⁻¹⁴	0.16 × 10 ⁻¹⁴	—
誘電率 ε (0°C)	81.5	80.7	—

ホウ素はアルミニウムと同族の元素であるが、典型的非金属元素のひとつである。ホウ酸 H_3BO_3 あるいはその塩の形で産する。元素（単体）のホウ素は融点が高く、ホウ素原子間の結合が強いことが分る。ホウ酸は、ふつうのホウ酸 H_3BO_3 （オルトホウ酸ともいう）のほか、ホウ酸の加熱によりメタホウ酸 HBO_2 を生じる。PWRにおいてケミカルシムに使われるが、水溶液における化学種は、pHや塩の形によって異なる³⁾。オルトホウ酸の融点は185℃（分解）、水に対する溶解度は約4 g/100 g水（20℃）であるが、詳細は文献を参照されたい³⁾。

表4.17にあげた元素のうち、水素とホウ素以外はすべて金属元素である。クロムは6族A亜族でモリブデンと同族であるが、+3価が安定に存在する。+6価のクロムは CrO_4^{2-} 、 $Cr_2O_7^{2-}$ の形をとり、強い酸化剤で有毒である。合金成分として、あるいはメッキに用いられる。マンガンはテクネチウムと同族の元素で、合金成分として用いられる。+7価のマンガンは、過マンガン酸塩 MnO_4^- の形で、アルカリ性溶液中で安定に存在し、強力な酸化剤である。

鉄、コバルト、ニッケルはいずれも8族元素で、周期表上横に並んでいるが、化学的性質が似ている。いずれも空气中で加熱すると酸化物を生じ、微粉末の鉄とニッケルでは発火する。鉄は地球上に多い元素で、金属としてはほとんど役立たないが、合金はきわめて有用である。コバルトとニッケルは化学的によく似ており、鉱石中に、しばしば、両者が同時に含まれている。いずれも合金として利用される。鉄、コバルト、ニッケルいずれも酸にとけやすい、化学的に活性のある金属である。熱硝酸中では不働態を生じる。鉄はさびやすい、すなわち湿った空气中で酸化されやすいが、コバルトとニッケルは空气中で安定であり、ニッケルメッキが用いられるのはこのためである。鉱石は硫化物などすべて化合物の形をとる。とり得る酸化状態も三者おなじであるが、安定性には差がある。なお、+2、+3 価以外の酸化状態にある化合物、たとえばニッケルカルボニルなども知られている²⁰⁾。

亜鉛はカドミウム、水銀と共に2族B亜族に属する。金属としては融点および沸点が低い。天然には ZnS の形で産する。合金、トタン板に利用される。金属は酸化性の酸、強アルカリにとける、独特の挙動を示す。

ハフニウムはジルコニウムと非常によく似た化学性質をもった元素で、チタンやジルコニウムと同族である。ジルコニウムの鉱石中に必ず少量含まれ、工業的には、溶媒抽出法により、ジルコニウムと分離される。表4.15に示すように中性子捕獲断面積が大きいので、制御材として利用される²⁾。タンタルは5族A亜族で、バナジウムやニオブと同族である。金属の密度が大きいのが特長である。ニオブと同様産出量の少ない元素で、必ずニオブと共に産出する。タンタル金属は耐食性があるため、化学工場などで利用される。+5価が最も安定で、化学挙動はニオブとよく似ている。

上記の元素の化学、分析化学の詳細などは、成書を参照されたい^{2, 18, 20, 23)}。

4.5 4章参考文献

- 1) 石樽顕吉, 日本原子力学会誌, 22, 9 (1980).
- 2) 長谷川正義, 三島良績監修, "原子炉材料ハンドブック", p395, 日刊工業新聞社, 東京 (1977).
- 3) Cohen P.: "Water Coolant Technology of Power Reactors", American Nuclear Society (1980).
- 4) 篠原伸夫, 岡下宏, 私信 (1981).
- 5) Thompson T. J. and Beckerley J. G. edited: "The Technology of Nuclear Reactor Safety", Vol. 2, MIT Press, Cambridge (1973).
- 6) 古稻豊, 中庭一彦, 和泉敏太郎, 日本原子力学会誌, 23, 829 (1981).
- 7) 神山弘章, 黒沢辰雄, 立川円造, 近藤達男, 日本原子力学会誌, 17, 629 (1975).
- 8) 目黒芳紀, 酒井伸一, 若松浩造, 山本龍美, 原子力工業, 25, (5) 25 (1979).
- 9) 長尾博之, 逸見幸雄, 石井英臣, 佐藤康彦, 日本原子力学会誌, 23, 796 (1981).
- 10) Meguro Y.: "Primary System Corrosion Product and Radiation Control at Tsuruga", IAEA Specialist's Meeting on Influence of Power Reactor Water Chemistry on Fuel Cladding Reliability (1981).
- 11) Seelman-Eggebert W., Pfennig G. and Münzel H.: "Karlsruher Nuklidkarte", Gersbach und Sohn Verlag, München (1968).
- 12) Vandenbosch R. and Huizenga J. R.: "Nuclear Fission", Academic Press, New York, p. 379 (1973).
- 13) Mogissi A. A. and Carter M. W. edited: "Tritium", p. 38, Kouts H.: Messenger Graphics, Phoenix (1973).
- 14) 木原博, 向坊隆, 村主進監訳, "原子力安全性ハンドブック"; USAEC, WASH-1250 (1973), 産報, 東京 (1975).
- 15) 日本アイソトープ協会 編, "新版ラジオアイソトープ, 講義と実習", 丸善, 東京 (1966).
- 16) 国際放射線防護委員会, "体内放射線の許容量に関する専門委員会IIの報告", 日本放射性同位元素協会, 仁科記念財団, 東京 (1960).
- 17) "放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法令集", 日本アイソトープ協会, 東京 (1981).
- 18) 日本化学会 編, "化学便覧, 基礎編I", 丸善, 東京 (1975).
- 19) 日本化学会原子量小委員会, 化学と工業, 35, (4) (1982).
- 20) 齊藤喜彦訳, "無機化学上, 下", 東京化学同人, 東京 (1977); Heslop R. B. and Jones K.: "Inorganic Chemistry".
- 21) トリチウム研究専門委員会報告書, "トリチウム, その性質と挙動", 日本原子力学会, 東京 (1972).
- 22) 山崎昶, 化学の領域, 21, 62 (1967).
- 23) 日本化学会 編, "新実験化学講座9, 分析化学(I)", 丸善, 東京 (1976)