

2 原子核の性質と放射線

2.1 原子核のなりたちと安定性

- 原子・・・ $\sim 10^{-8}\text{cm}$ 、原子核・・・ $\sim 10^{-13}\text{cm}$
- 原子核の半径 r は、近似的に次の式で示される。

$$r = r_0 A^{1/3}$$

ただし、 r_0 は定数で、 $(1.2\sim 1.5)\times 10^{-13}\text{cm}$ 、 A は質量数

原子核の密度は非常に大きく、かつ原子核の種類によらずほぼ一定 ($\sim 3\times 10^{24}\text{g/cm}^3$)

原子核 $\left\{ \begin{array}{l} \text{陽子} \cdots \cdots \text{陽電荷} \\ \text{中性子} \cdots \cdots \text{電荷をもたない} \end{array} \right.$

電子、陽子、中性子などの物質を構成する基本的な粒子→素粒子

表 2 おもな素粒子の固有の性質[4]

名 称	記 号	スピン(\hbar)	磁気モーメント*	電 荷	静止質量**	寿 命(s)
中性微子	ν	1/2	~ 0	0	~ 0	安 定
電 子	e^-	1/2	-1836	-1	0.0005486	安 定
陽 電 子	e^+	1/2	1836	+1	"	安 定
ミ ュ オ ン	μ^+, μ^-	1/2	± 8.891	+1, -1	0.1134	2.2×10^{-6}
π 中 間 子	π^0	0	0	0	0.1449	8.3×10^{-17}
	π^+, π^-	0	0	+1, -1	0.1498	2.6×10^{-8}
陽 子	p	1/2	2.793	+1	1.0072765	安 定
中 性 子	n	1/2	-1.913	0	1.0086650	9.2×10^2

* 単位は核磁子： $e\hbar/2m_p$ (m_p は陽子質量)。

** 単位は原子質量単位 amu ($^{12}\text{C}=12.000000$ の 12 分の 1)。

- 原子核の種類は、陽子の数 (Z)、中性子の数 (N)、エネルギー状態によって決まる
→核種 (nuclide)

- 核化学、放射化学（放射線）などでは、核種を単位として考える。
(参考：「放射化学」と「放射線化学」との違い)
- $N + Z = A$ ：質量数 (mass number) ^A_ZX あるいは ^AX で核種を表す。
エネルギー状態だけが異なる核種は、核異性体 (isomer： $^{Am}_Z\text{X}$) と呼ばれる。
(測定可能な寿命であることが必要)
- 同位体 (isotope)：原子番号が等しい核種
例) ^1_1H と ^2_1H (重水素：D) と ^3_1H (三重水素：T) とは互いに同位体の関係。それぞれの核種を水素の同位体 (アイソトープ：isotope) と呼ぶ。
- 同重体 (isobar)：質量数 A が等しい核種どうし
- 同中性子体 (isotone)：中性子数 N が等しい核種どうし

- 現在知られている核種 ~約 2000 個
安定なもの と 不安定なもの

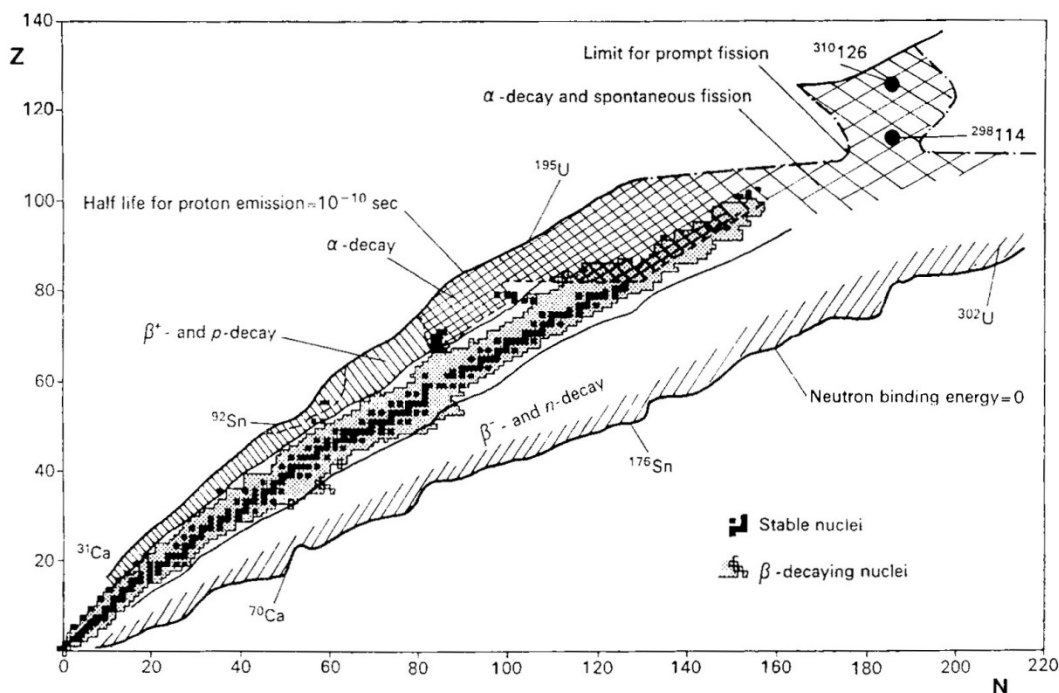


FIG. 3.8. Various modes of nuclear instability as a function of the number of protons (Z) and number of neutrons (N) in the nucleus. (According to I. Bergström.)

図 22 核種と安定性[7]

- 原子量と同位体存在度
 - 元素には 2 つ以上の同位体を持つものが多い。
→異なる質量数の原子（核種）の混合物
 - 同位体の原子がどのような割合で混ざり合っているかを示すのが同位体存在度
例) ^2H : 0.0148%, ^{234}U : 0.0054%, ^{235}U : 0.720%, ^{238}U : 99.275%
 - ^{12}C の質量を 12.000000 とし、原子量の単位に用いる統一スケールの採用
(1961 年)
 - 厳密には、同位体存在度が変動する場合がある。例えば、天然の同位体効果、原子核変換（天然の放射性元素の壊変で生ずる鉛など）、原子力利用による人工的な同位体の分離（→Li、B、U など）

→1975 年より、原子量($A_r(E)$) = $\frac{\text{元素の 1 原子あたり平均質量}}{^{12}\text{C} \text{ 1 原子あたりの質量の } 1/12}$

➤ 原子核の安定性

- 例) ${}^4\text{He}$ 原子核の質量=4.00151[amu]

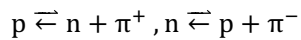
amu: 原子質量単位, ${}^{12}\text{C}$ の原子質量の 1/12
1[amu] の質量はエネルギーに変換すると 931MeV

2 個の中性子と 2 個の陽子の質量の和は、

$$2 \times 1.008665 + 2 \times 1.0072765 = 4.031883[\text{amu}]$$

${}^4\text{He}$ の原子核の質量は、これを構成する核子の質量の和より 0.03037[amu] 小さい。
→ 質量の減少分は、核子間の結合エネルギーに変換 (0.03037[amu] \times 931[MeV/amu]=28.3[MeV] → 核子 1 個あたりの結合エネルギーは約 7[MeV])

- 原子核内の核子を結合する力を核力という。



π 中間子のやりとりによって生ずる近距離の強い力

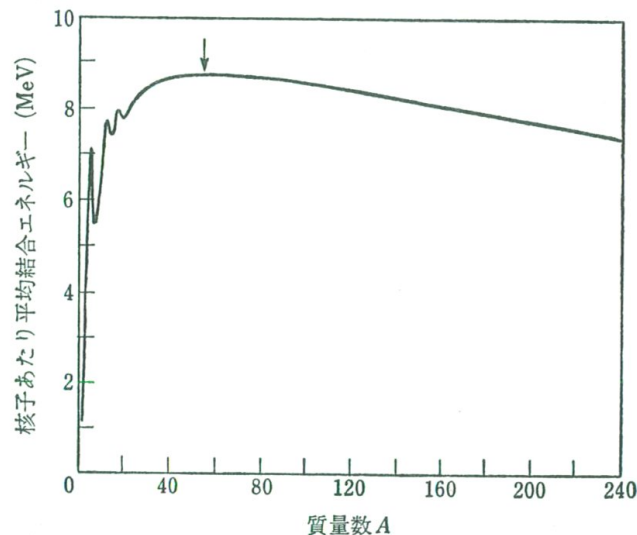


図 2.1 核子 1 個あたりの結合エネルギー
矢印は極大を示す。質量数の小さい側には ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ などのピークが見え、これらの核種がとくに安定なことがわかる。

図 23 核子 1 個あたりの結合エネルギー[4]

- 質量数 55~60 付近の鉄やニッケルがエネルギー的に最も安定している。
(→地球の中心部が鉄やニッケルでできている)
- 質量数 200 を超えるウランなどの原子が核分裂し、質量数 100 前後の核を生じたとすれば、核子 1 個あたりの結合エネルギーに 1[MeV]程度の差
→200[MeV]位のエネルギー放出
- ごく軽い原子核の合成によってもエネルギー放出→核融合

➤ 原子核の模型

□ 原子核のさまざまな性質や振る舞いを説明するためには、これらの核子がどのようにして核を形成しているかという模型を考えると便利である。

- 液滴模型 (liquid drop model) : 電荷をもった液滴で考える
- 殻模型 (shell model) : 核子も原子核内部で一定の規則に則って順位を充填していく

□ 液滴模型

核子は原子核の内部にランダムに分布

Weizsäcker の質量式（半経験式）

$$B(\text{MeV}) = 14.0A - 13.1A^{2/3} - 0.585Z(Z-1)A^{-1/3} - 18.1(A-2Z)^2A^{-1} + \delta A^{-1}$$

$$\delta = \begin{cases} +132 & Z=\text{even}, \quad N=\text{even} \\ -132 & Z=\text{odd}, \quad N=\text{odd} \\ 0 & Z=\text{even}, \quad N=\text{odd} \quad \text{or} \quad Z=\text{odd}, N=\text{even} \end{cases}$$

第 1 項 : 全結合エネルギーが第一近似として核子数に比例

第 2 項 : 表面張力の項。表面付近の核子は相手が少ないために、結合が弱くなる。

第 3 項 : 核内の陽子間のクーロン反発力により結合力が低下。

（陽子の電荷が均一に分布するとしてクーロンエネルギーを評価。

$$- 3e^2Z(Z-1)/5R \quad R \propto A^{1/3}$$

第 4 項 : $A - 2Z = N - Z$ 中性子過剰の効果。中性子と陽子が対になっているものを除くと、 $|N - Z|$ 個の陽子あるいは中性子が残る。Wigner が量子論により評価し、 $(N - Z)^2/A$ に比例

第 5 項 : $n-n$ 、 $p-p$ の対による結合エネルギーの増加を示す項。核子間の結合の飽和によるもので、液滴モデルでは説明できない。

□ 殻模型

陽子や中性子の数が、2、8、20、28、50、82、126 などのときに安定な核ができやすい。同位体存在度が大きく、宇宙での存在量も多い。”magic number”

→原子核内部にも核子のエネルギー準位と殻構造が存在することを示唆

2.2 原子核の壊変現象

不安定な原子核：過剰なエネルギーを放出して安定な状態に移行

=放射壊変（radioactive decay）

2.2.1 α 壊変

質量数 $A \geq 140$ の重い核種で起こる。天然放射性核種から出る α 粒子は、4~8[MeV] のエネルギーを持つ。一方、 α 粒子の重い原子核による散乱では、10[MeV] 近くのエネルギーまでは、原子核の周囲の電場はクーロンの法則に従っている。（トンネル効果による説明）

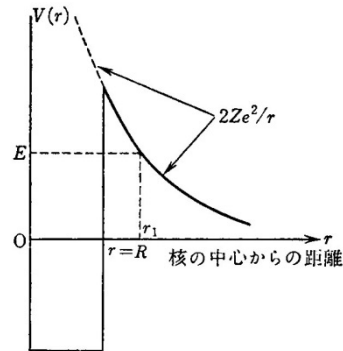


図 24 原子核の近くのポテンシャル曲線[3]

核内の α 粒子についての波動方程式

$$\left[-\frac{1}{2M} \left(\frac{\hbar}{2\pi} \right)^2 \frac{d^2}{dr^2} + V(r) \right] \varphi(r) = E \varphi(r)$$

エネルギー E の α 粒子が核内からポテンシャルの壁にぶつかったとき、 E よりも高いポテンシャルの壁から外に出る確率 P

$$P = \frac{|\varphi(r_1)|^2}{|\varphi(R)|^2} = \exp \left(-2 \int_R^{r_1} \sqrt{2M(2\pi/\hbar)^2 (V - E)} dr \right)$$

α 粒子が単位時間に核外に放出される確率、すなわち崩壊定数 λ は、 P と障壁に粒子が突き当たる頻度 f の積であると考えてよい。

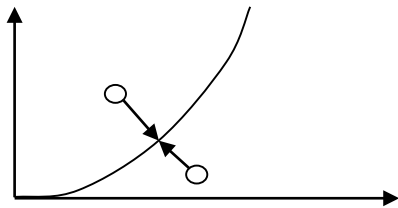
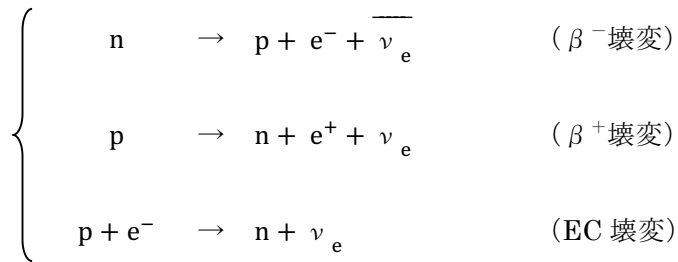
核の内部で v の速度、したがって Mv の運動量を持つ α 粒子を波動と考えたとき、ドゥ・ブローイ波の波長は \hbar/Mv に相当する。 \hbar/Mv が R に近いものとすれば、 λ は次のようにして得られる。

$$\frac{\hbar}{Mv} \cong R \quad \therefore v \cong \frac{\hbar}{MR}$$

$$f = \frac{v}{2R} \cong \frac{\hbar}{2MR^2}$$

$$\lambda \cong \frac{\hbar}{2MR^2} \exp \left(-\frac{8\pi^2 Ze^2}{\hbar v} \right)$$

2.2.2 β 壊変



半経験式を Z について整理すると、

$$E_B = aZ^2 + bZ + c \pm dA^{-1}$$

A 一定 $\rightarrow Z$ に関する 2 次式

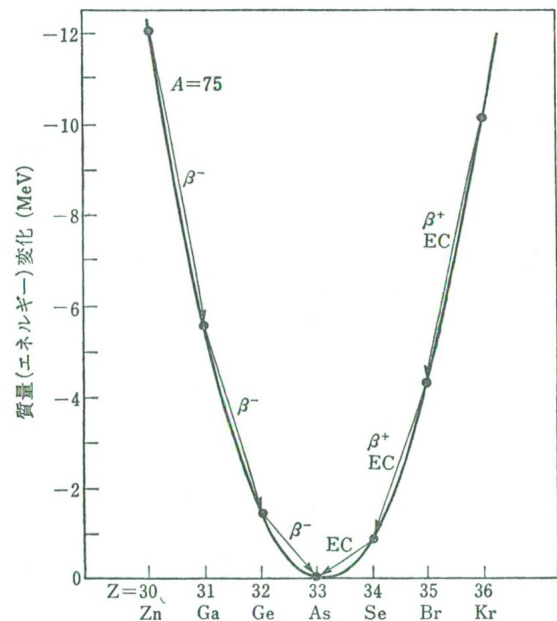
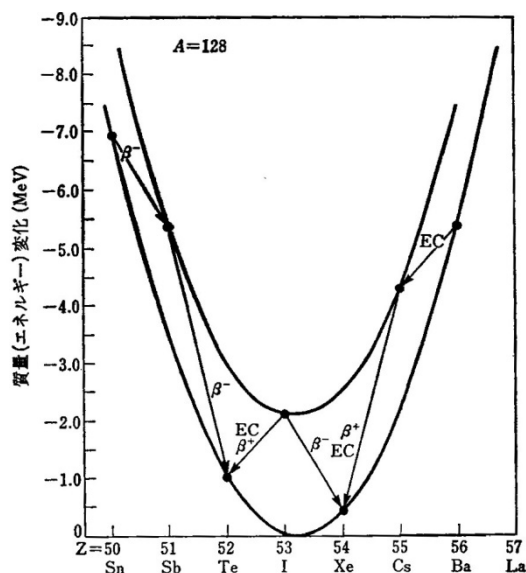


図 26 質量数 75 の同重体核種における
 Z に伴う質量変化を示す質量放物線[4]

※自然界の力

- gravity
- electromagnetic force
- strong interaction force (核力)
- weak interaction force

➤ β 壊変の理論の概略

□ 弱い相互作用を考えることにより 1934 年 E.Fermi により導かれる。

$$\lambda = G|M|^2 f \text{ or } \ln 2 = G|M|^2 f t_{1/2}$$

$G = \text{constant}$

$|M| = \beta$ 壊変の核行列

$f : E_{\max}, Z$ の関数

転移の型	l_i	ΔI	パリティ変化	$\log f_0 t$	例
許容 (favored)	0	0, 1	なし	3	^3H ^{23}Mg
許容 (normal)	0	0, 1	なし	4~7	^{35}S ^{69}Zn
許容 (l -forbidden)	0	1	なし	6~9	^{14}C ^{32}P
第一禁止	1	0, 1	あり	6~10	^{111}Ag ^{143}Ce
第一禁止 (unique)	1	2	あり	~9	^{38}Cl ^{90}Sr
第二禁止	2	2	なし	10~14	^{36}Cl ^{135}Cs
第二禁止 (unique)	2	3	なし	~9	^{10}Be ^{22}Na
第三禁止	3	3	あり	17~19	^{87}Rb
第三禁止 (unique)	3	4	あり	~18	^{40}K
第四禁止	4	4	なし	~23	^{115}In
第四禁止 (unique)	4	5	なし		

□ 核子：自転の角運動量 $\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ （スピン $\frac{1}{2}$ ）を有する。

→原子核もスピンや磁気モーメントを持つ。

$$\text{原子核全体の固有角運動量} = I \frac{h}{2\pi} \quad (I: \text{核スピン})$$

$$= \underbrace{\text{原子核内での核子の運動による軌道角運動量}}_{h/2\pi \text{の整数倍}} + \underbrace{\text{核子のスピン}}_{h/2\pi \text{の半整数倍}}$$

よって、質量数 A が偶数のときは、 $I=0$ または整数、奇数のときは、 $I=\text{半整数}$ となる。

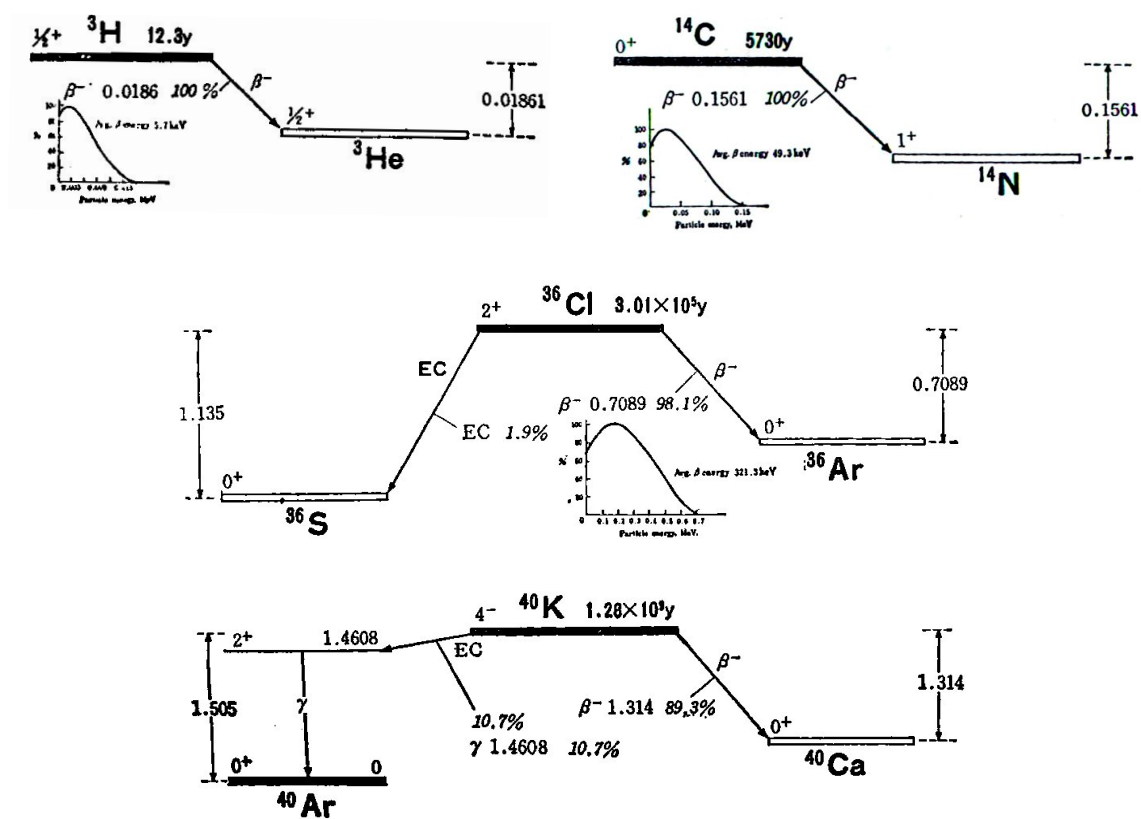


図 27 β 壊変の例[6]

2.2.3 γ 壊変

➤ γ 壊変の理論の概略

① 核内での電荷の分布変化→電気モーメントの変化に伴う電磁波の放出

核内での電流（電荷をもつ粒子の定常的移動）変化

→磁気モーメントの変化に伴う電磁波の放出

	E1		E2		E3		...		El	
	電気双極子	+	電気四極子	+	電気八極子	+	...	+	電気 2^l 極子	+
	-1		+1		-1		...		$(-1)^l$	
	M1		M2		M3		...		Ml	
	磁気双極子	+	磁気四極子	+	磁気八極子	+	...	+	磁気 2^l 極子	+
	+1		-1		+1		...		$(-1)^{l+1}$	
電磁波の角運動量	:	$1 \cdot \frac{h}{2\pi}$		$2 \cdot \frac{h}{2\pi}$		$3 \cdot \frac{h}{2\pi}$...	$l \cdot \frac{h}{2\pi}$	
係数	:	$\alpha \cdot \frac{2\pi R}{\lambda}$		$\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2$		$\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^3$...	$\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^l$	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">{</div> <div> <p>R = 電磁波発生体の直径 \cong 原子核の半径</p> <p>λ = 電磁波の波長</p> </div> </div>										

$\frac{2\pi R}{\lambda} \cong 10^{-3} \sim 10^{-1}$ なので、 l の大きいもの程、強度が急激に低下する。

② 電気モーメントの変化に伴い放出される電磁波のパリティは $(-1)^l$

磁気モーメントの変化に伴い放出される電磁波のパリティは $(-1)^{l+1}$

③ 核スピンの大きさが $I_i \rightarrow I_j$ に変化したとき、核の角運動量の変化は、核の全角運動量ベクトル I_i と I_j の差となる。この差のベクトルの大きさ l だけの角運動量が γ 線によって持ち出される。

$$|I_i - I_j| \leq l \leq I_i + I_j \quad l: \text{整数}$$

また、光量子は固有スピン 1 をもつ。 $\therefore l > 1$

④ E と M の大小関係は、 $E(l+1)$ と $M(l)$ が同程度である。

これらより、 γ 壊変の選択律が導き出される。

表 4 γ 壊変の選択律[3]

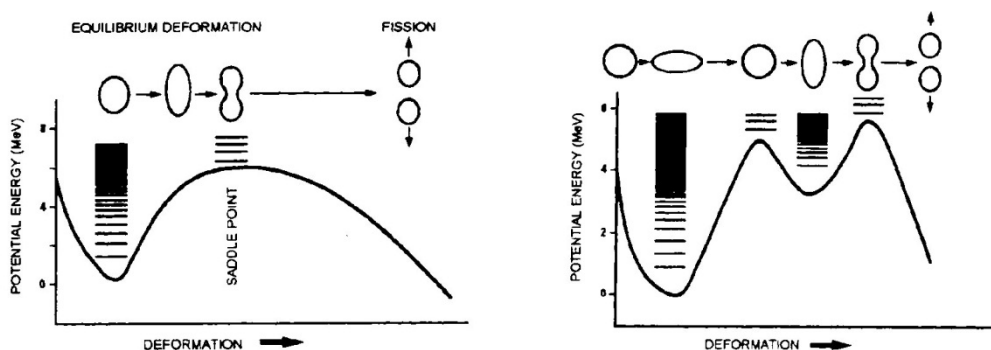
$\Delta I = I_i - I_j $	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4
パリティの変化	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり
許される壊変（多極子放射）の型	M1	E1	M1	E1	E2	M2	M3	E3	E4	M4
（強度の弱いものを除く）	E2		E2			E3	E4			E5

表 5 単一粒子模型で計算された γ 転移の部分壊変定数[3]

(E は MeV で表わした壊変エネルギー)

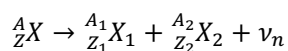
壊変の型	λ_r (sec ⁻¹)	壊変の型	λ_r (sec ⁻¹)
E1	$1.2 \times 10^{14} E^3 A^{2/3}$	M1	$3.1 \times 10^{13} E^3$
E2	$1.0 \times 10^8 E^5 A^{4/3}$	M2	$2.7 \times 10^7 E^5 A^{2/3}$
E3	$5.8 \times 10 E^7 A^2$	M3	$1.4 \times 10 E^7 A^{4/3}$
E4	$2.2 \times 10^{-5} E^9 A^{8/3}$	M4	$5.3 \times 10^{-6} E^9 A^2$
E5	$5.2 \times 10^{-12} E^{11} A^{10/3}$	M5	$1.4 \times 10^{-12} E^{11} A^{8/3}$

2.2.4 自発性核分裂（Spontaneous Fission : SF）

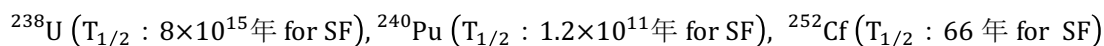


(a) The liquid-drop model potential energy curve. (b) Same, but modified by shell corrections.

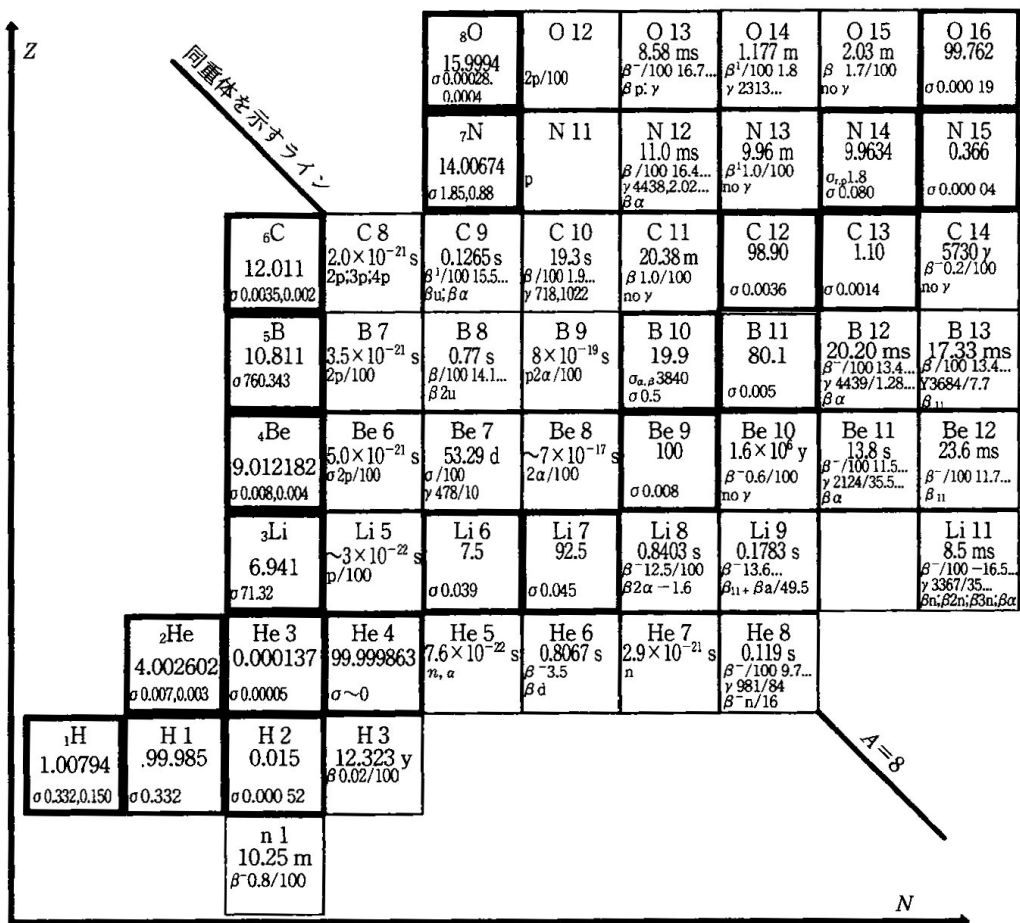
原子番号 Z が大きくなると、 α 崩壊以外に SF が生じる。



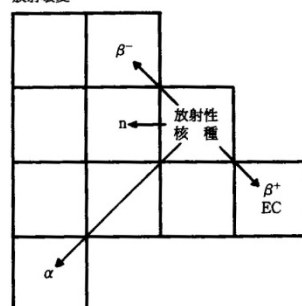
例：



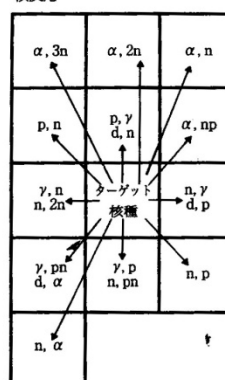
SF の理論は、基本的には low energy neutron による核分裂と同じである。



放射線変



核反応



¹ H	元素記号と質量数
1.0079	原子番号 Z
0.332, 0.150	原子量
	中性子断面積 (共鳴積分) / b
	中性子断面積 / b
	(2200 m s ⁻¹)

C 15	放射性核種
2.449 s	元素記号と質量数
β ⁻ / 100 4.5...	半減期
γ 5298/68	衰変様式: α と β の場合: 存在度 (%)
	と壊変エネルギー / MeV
	γ の場合: エネルギー / keV と
	存在度 (%)

図 29 isotope chart[1]

表 6 核種の表の例[8]

核種	半減期	壊変形式	おもな β 線(または α 線)のエネルギーと放出の割合	おもな γ 線のエネルギーと放出の割合	内部転換電子の放出の割合(%)	1cm線量当量率定数(空気衝突カーマ率定数)	おもな生成反応
^{130}Cs	29.9m	EC β^+ β^-	53% 1.99–44% 0.440–2%	0.536–4.1% 0.586–0.50% 0.895–0.41% 1.615–0.27% 1.687–0.21% 1.997–0.18% 0.511 β^+		0.0829 (0.0685)	$^{127}\text{I}(\alpha, n)^{130}\text{Cs}$
$^{131}\text{Cs}^\dagger$	9.69 d	EC	100%	0.0298 Xe-X		0.00284 (0.00230)	$^{131}\text{Ba} \xrightarrow{11.8\text{d}} ^{131}\text{Cs}$
^{132}Cs	6.48 d	EC β^+ β^-	98% 0.403–弱 0.806–2%	0.668–97% 0.0298 Xe-X 0.465–1.9% 他		0.113 (0.0954)	$^{133}\text{Cs}(\gamma, n)^{132}\text{Cs}$ $^{133}\text{Cs}(p, pn)^{132}\text{Cs}$
$^{134\text{m}}\text{Cs}$	2.91 h	IT	100%	0.0112–弱 0.128–13% 0.0310 Cs-X	99 86	0.00959 (0.00774)	$^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134\text{m}}\text{Cs}$
^{134}Cs	2.062 y	β^-	0.0886–27% 0.415–3% 0.658–70%	0.563–8.4% 0.569–15% 0.605–98% 0.796–85% 0.802–8.7% 1.365–3.0% 他	K 0.12 K 0.49 K 0.22	0.244 (0.208)	$^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134}\text{Cs}$
^{135}Cs	2.3×10^6 y	β^-	0.205–100%				$\text{U}(n, f)^{135}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^-} ^{135}\text{Cs}$
^{137}Cs	30.0 y	β^-	0.512–94% 1.17–6%			0.0910* (0.0771*)	$\text{U}(n, f)^{137}\text{Cs}$
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.551m	IT	100%	0.662–90% 0.0322 Ba-X	10	0.0963 (0.0817)	$\beta^- \downarrow$ (94%) $^{137\text{m}}\text{Ba}$
^{131}Ba	11.8 d 娘 ^{131}Cs	EC	100%	0.124–29% 0.216–20% 0.373–13% 0.496–44% 0.620–1.6% 1.048–1.2% 他 0.0310 Cs-X	26 KL 2 K 0.27 K 0.48	0.0920 (0.0746)	$^{130}\text{Ba}(n, \gamma)^{131}\text{Ba} \xrightarrow{\text{EC}} ^{131}\text{Cs}$

引用文献

- [1] G.R.Choppin and J.Rydberg, *NUCLEAR CHEMISTRY Theory and Applications*.: Pergamon, 1980.
- [2] 日本原子力文化振興財団, 「原子力・エネルギー」図面集, 2011.
- [3] 木越邦彦, 放射化学概説, 培風館, 1968.
- [4] 富永 健, 佐野博敏, 放射化学概論, 東京大学出版会, 1983.
- [5] 木越邦彦, 核化学と放射化学. 裳華房, 1981.
- [6] 村上悠紀雄, 團野皓文, 小林昌敏, 放射線データブック. 地人書館, 1982.
- [7] Choppin Gregory, Liljenzin Jan-Olov, and Rydberg Jan, *RADIOCHEMISTRY and NUCLEAR CHEMISTRY Third Edition*.: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [8] 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳, 丸善, 1989.