

1 放射線と放射能

1.1 基礎知識

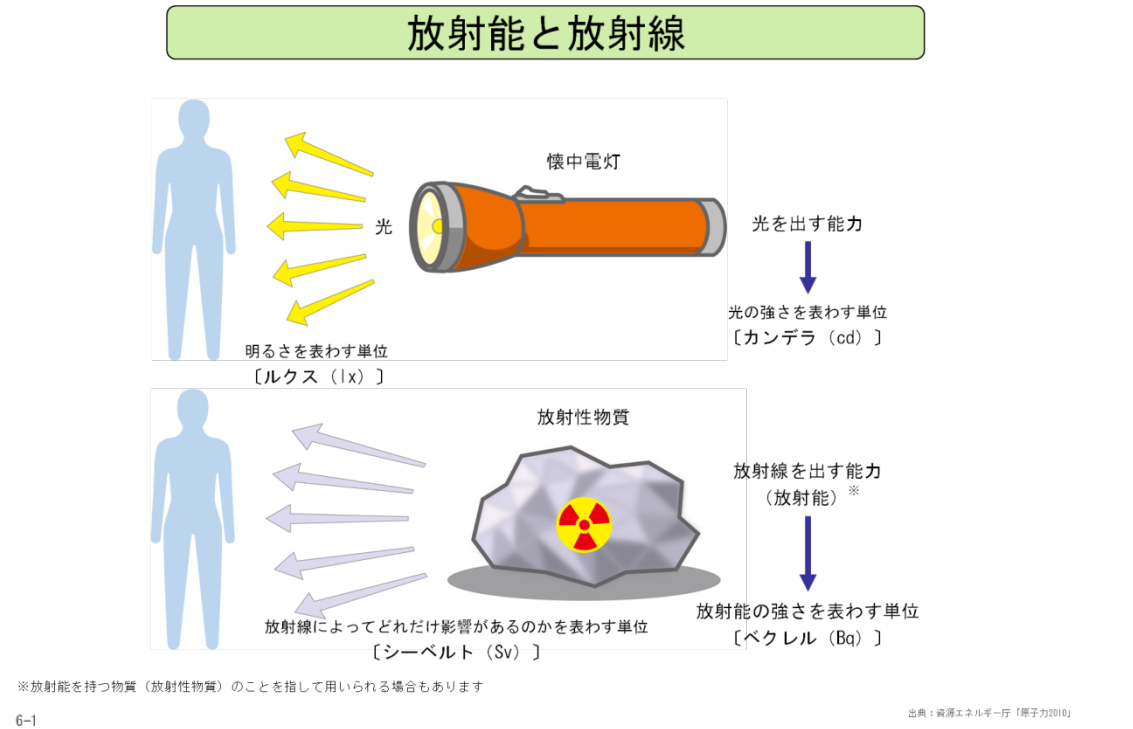


図 1 放射能と放射線[2]

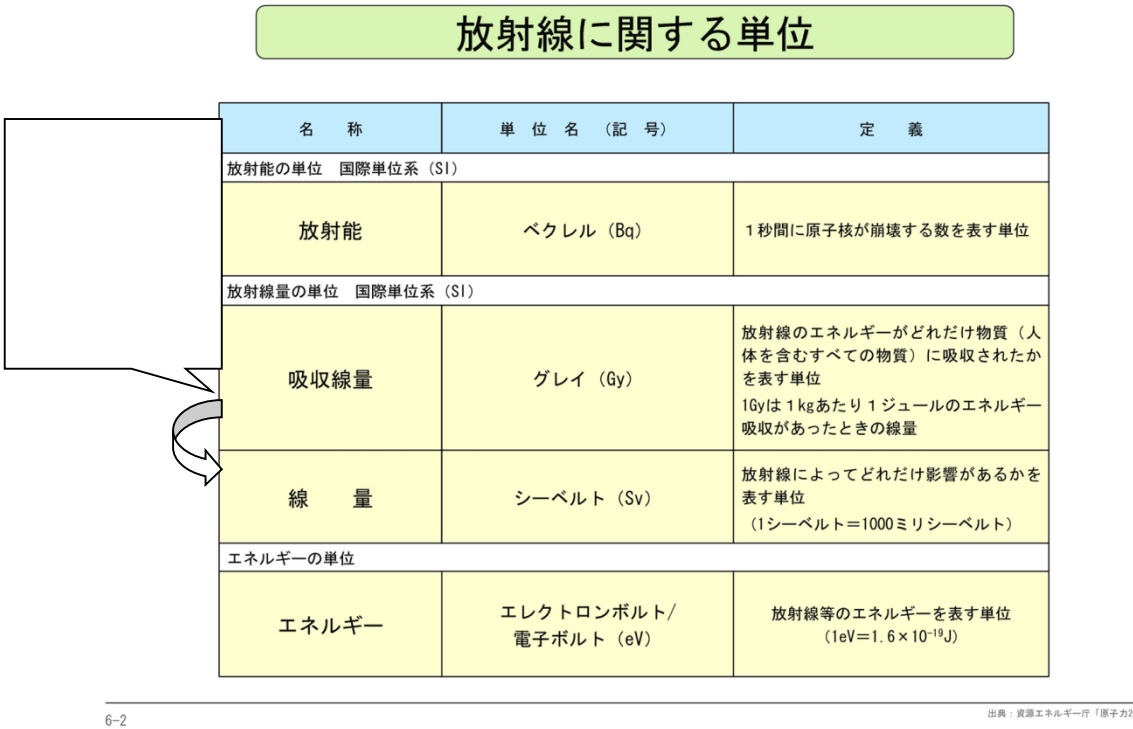
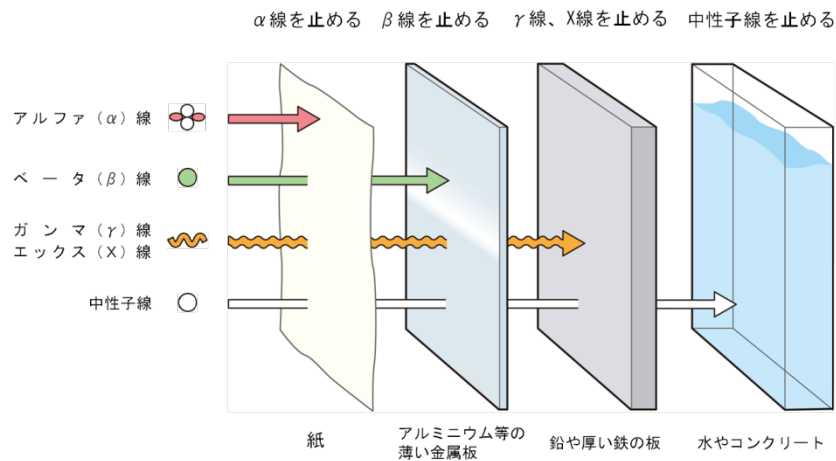


図 2 放射線に関する単位[2]

放射線の種類と透過力

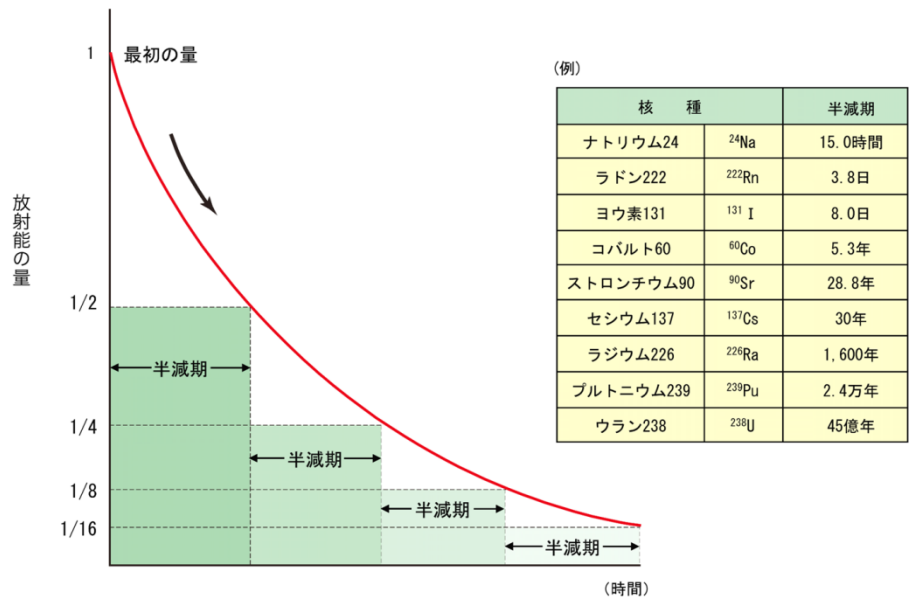


6-4

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」

図 3 放射線の種類と透過力[2]

放射能の減り方



6-5

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」他

図 4 放射能の減り方[2]

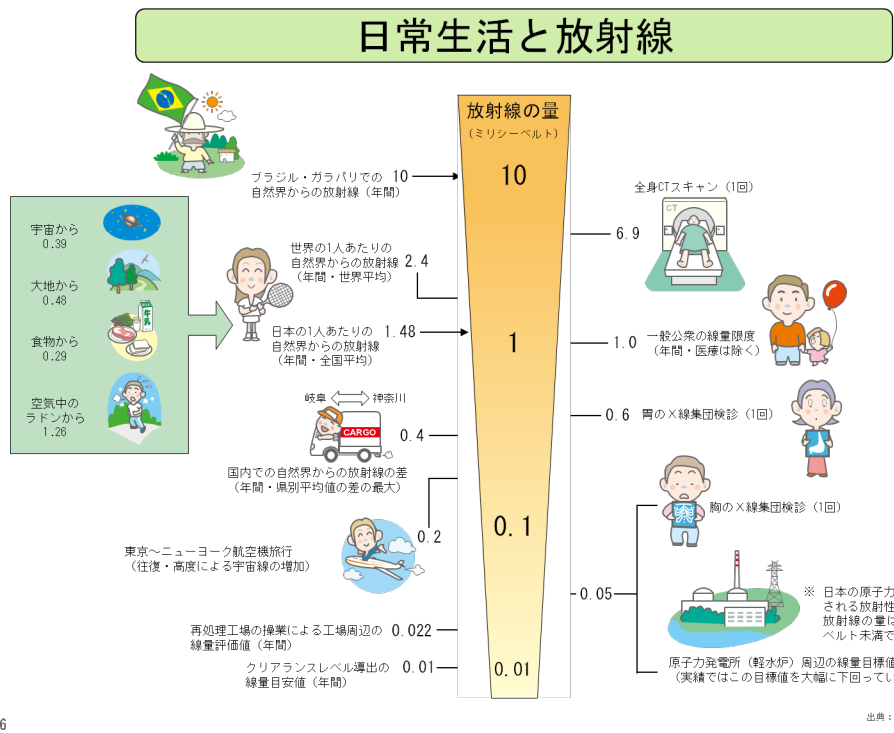


図 5 日常生活と放射線[2]

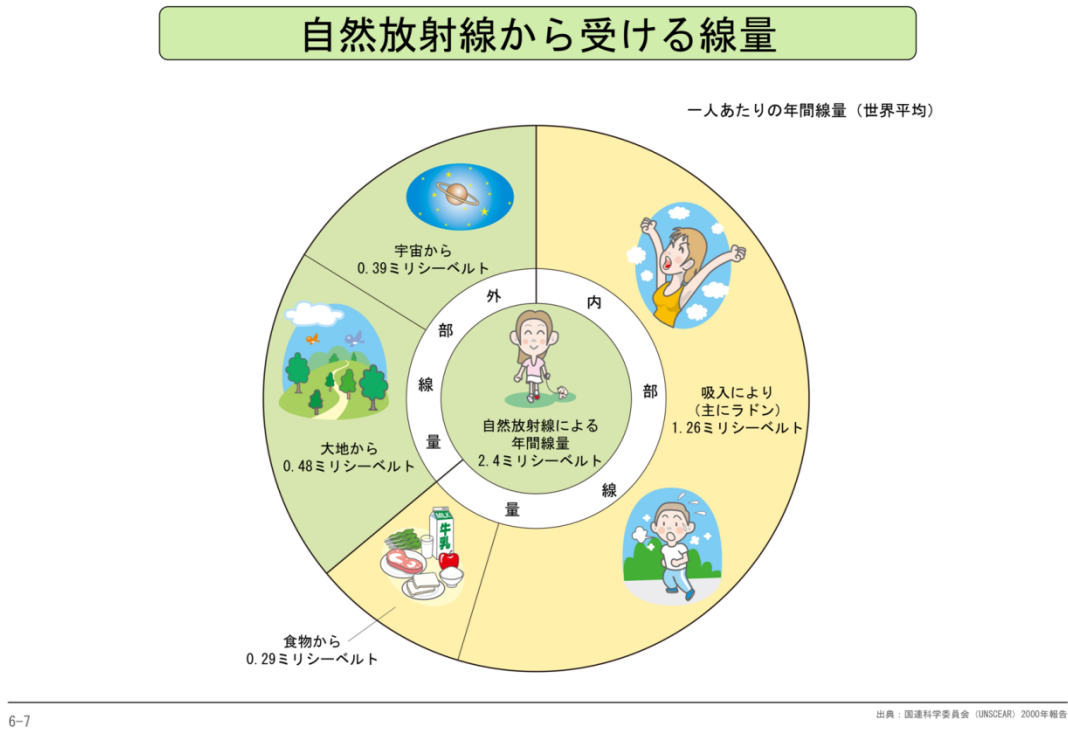
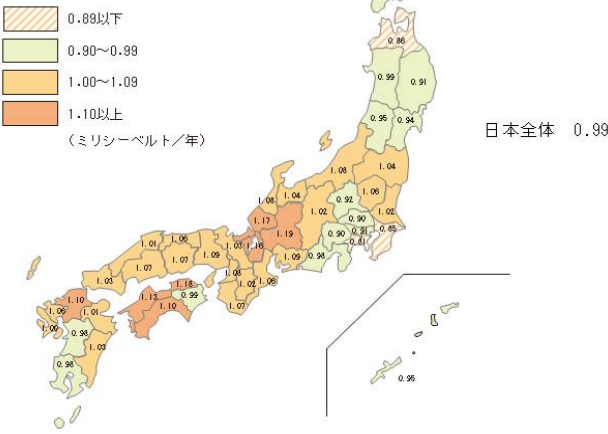


図 6 自然放射線から受ける線量[2]

全国の自然界からの放射線量

宇宙、大地からの放射線と食物摂取  
によって受ける放射線量  
(ラドン等の吸入によるものを除く)



6-8

出典：資源エネルギー庁『原子力2010』

図 7 全国の自然界からの放射線量[2]

体内、食物中の自然放射性物質

●体内の放射性物質の量



●食物中のカリウム40の放射線量（日本）

(単位：ベクレル/kg)



6-9

出典：旧科学技術庁パンフレット

図 8 体内、食物中の自然放射性物質[2]

自然および人工放射線源から受ける一人あたり年間線量

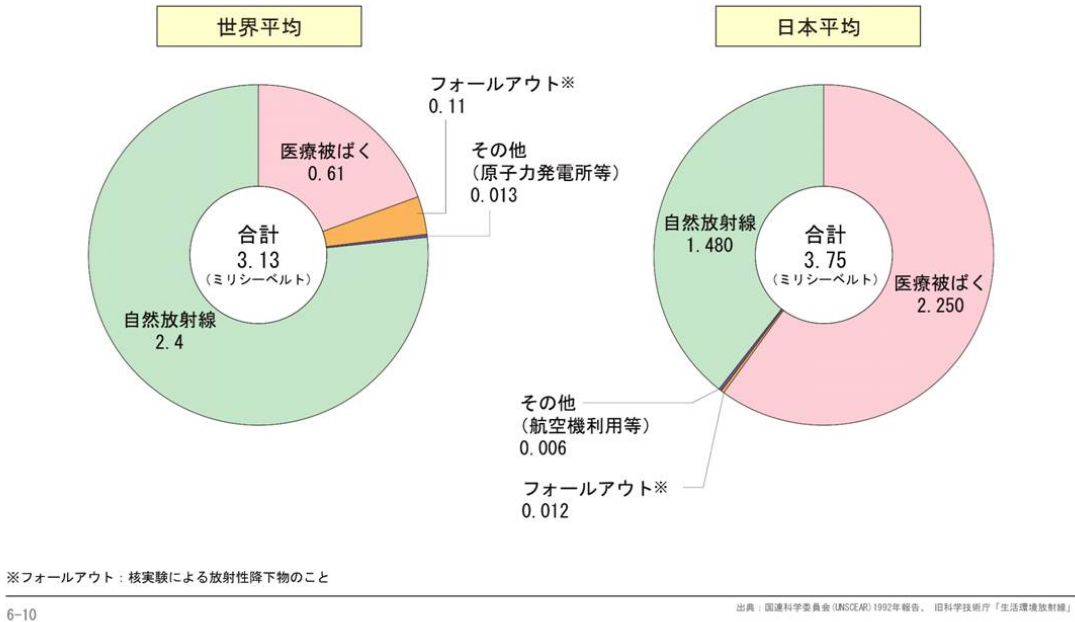


図 9 自然及び人工放射線源から受ける一人あたり年間線量[2]

放射線のいろいろな利用

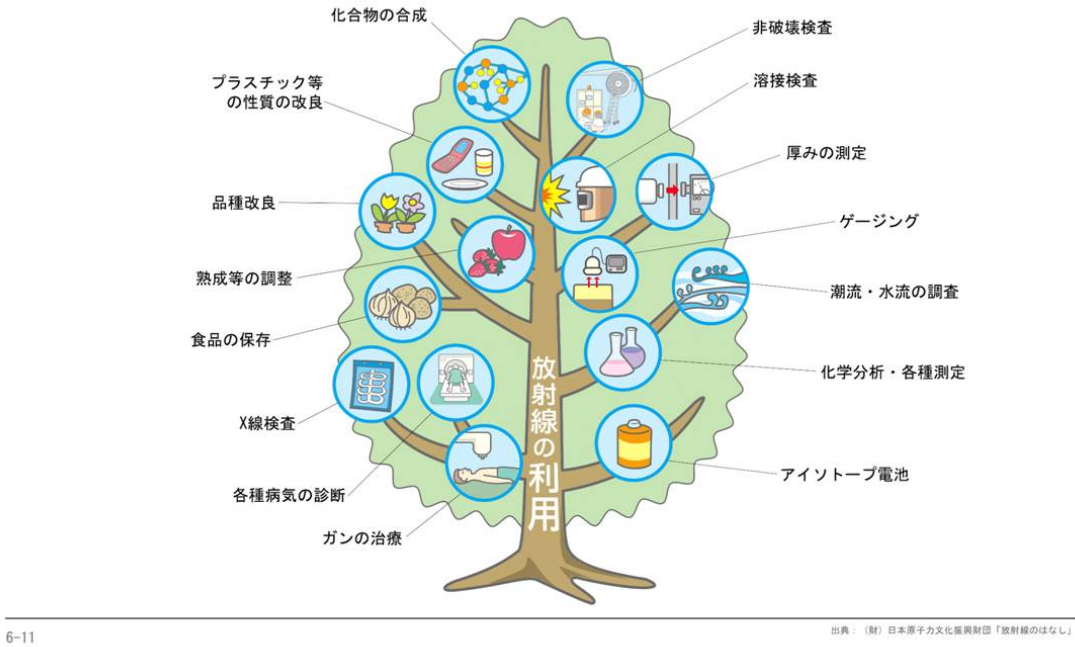


図 10 放射線のいろいろな利用[2]

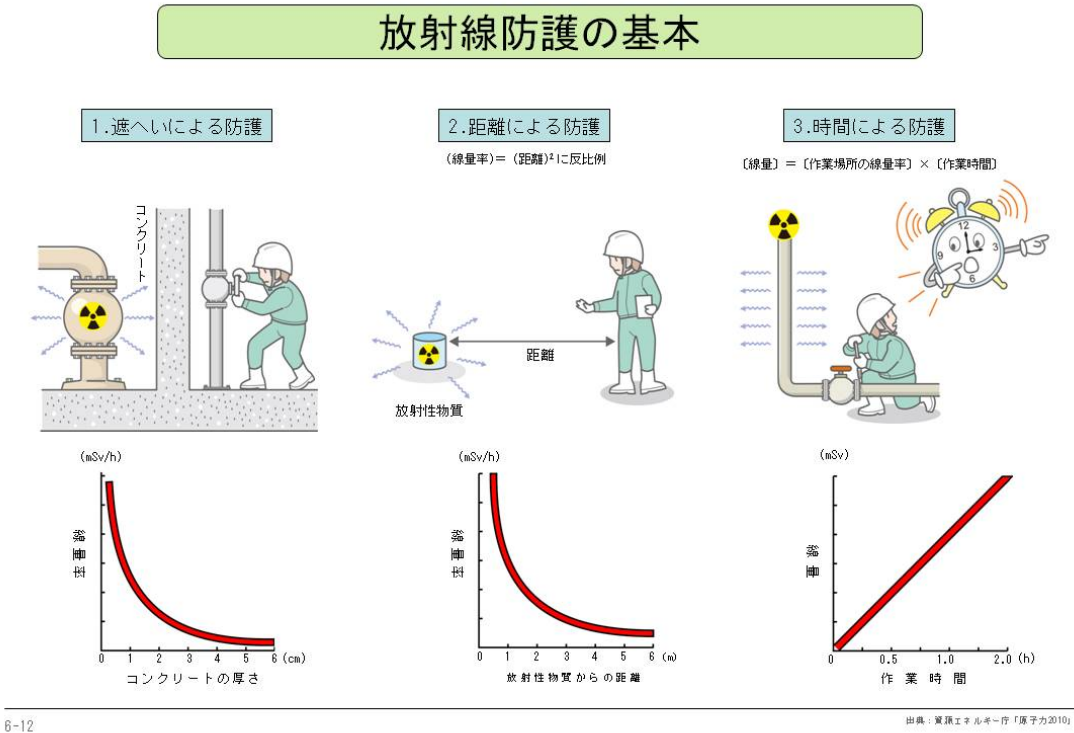


図 11 放射線防護の基本[2]

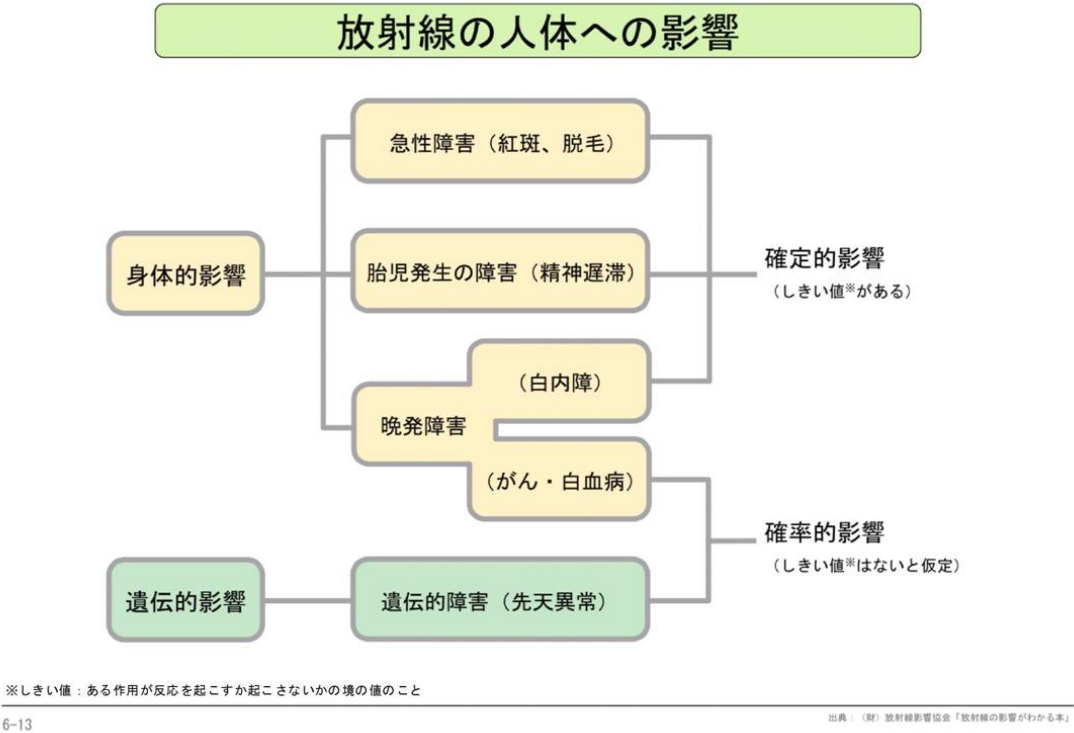


図 12 放射線の人体への影響[2]

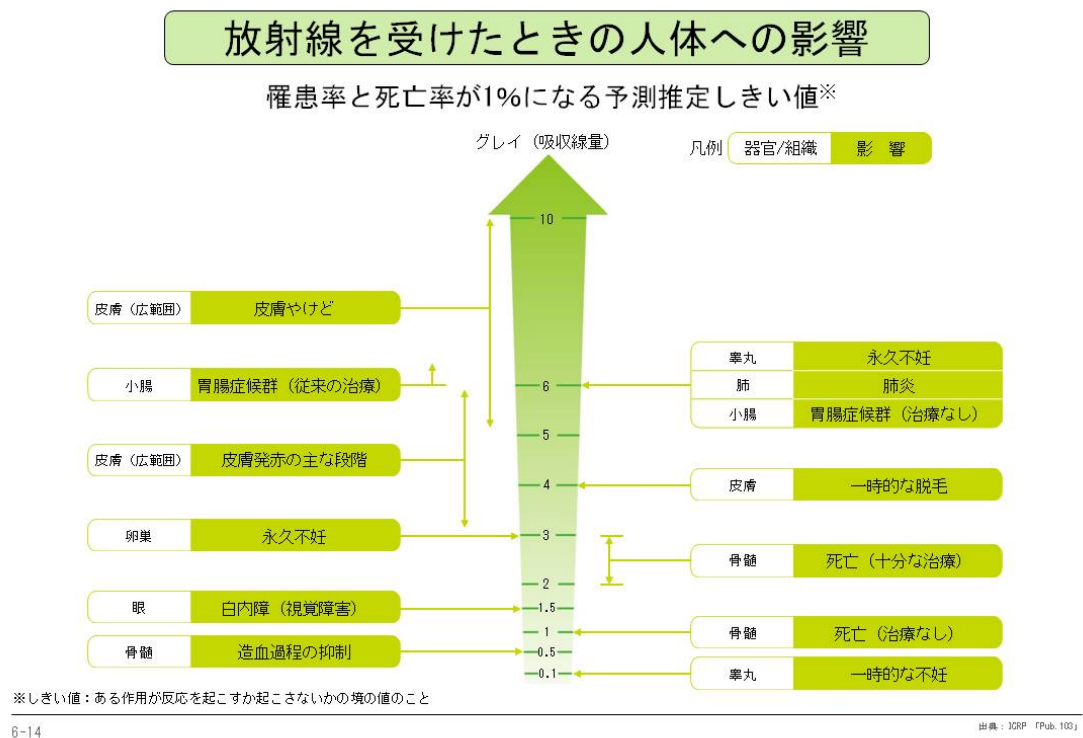


図 13 放射線を受けたときの人体への影響[2]

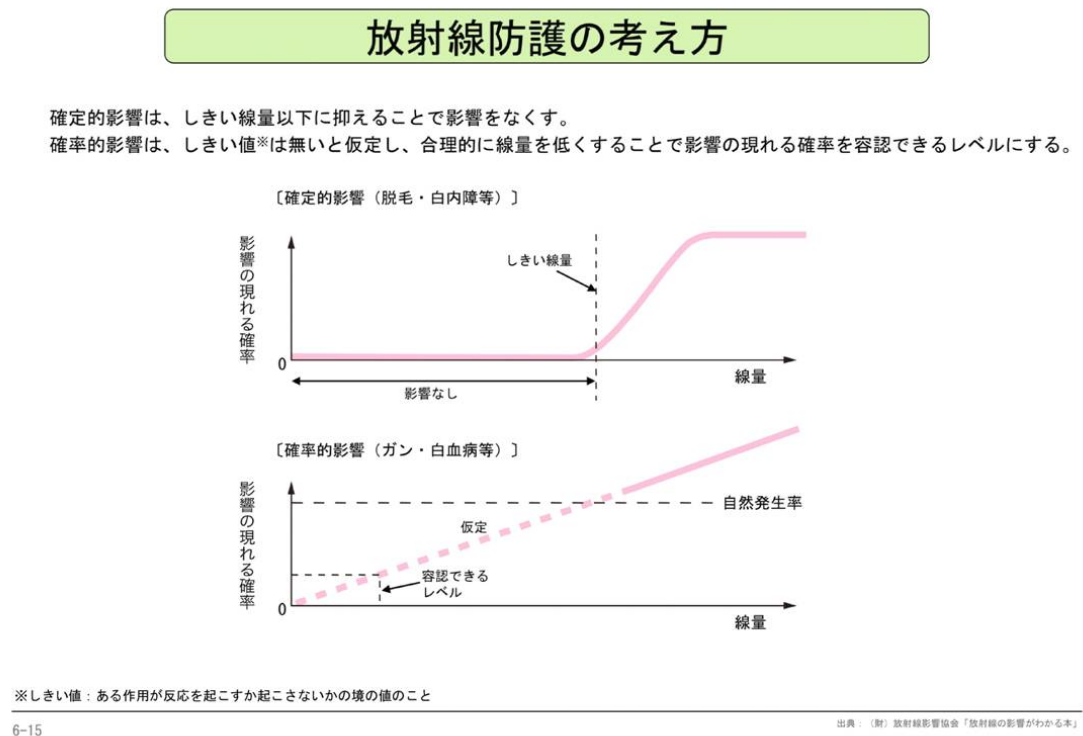


図 14 放射線防護の考え方[2]



## 1.2 放射線

電離作用など物質に影響を与えるビーム

$\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線

X 線、中性子線、重イオン、陽子線、電子線、・・・・・・

## 1.3 放射能

放射線を出す能力（activity : dps (disintegration per second)）Bq

放射性の原子が  $\Delta t$  の時間に壊変する確率（ $p$ ）は、その原子の過去の履歴、環境条件に無関係に決まる。

$$p = \lambda \Delta t \quad \lambda : \text{崩壊定数} [s^{-1}] \text{ decay constant} \quad (1.1)$$

いま、 $N$  個の原子があるとする。そのうち、 $\Delta t$  の間に壊変する数の統計的な期待値は、次のようになる。（実際は統計現象、ポアソン分布）

$$\begin{aligned} -\Delta N &= Np = N \lambda \Delta t \\ \therefore -\frac{dN}{dt} &= \lambda N = A \quad \text{ただし、} A : \text{放射能 (dps)} \end{aligned} \quad (1.2)$$

これにより、 $N = N_0 e^{-\lambda t}$  を得る。したがって、放射能  $A$  は  $t=0$  における放射能  $A_0$  を用いて、次のように求められる。

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

ここで、半減期を  $T_{1/2}$  とすると、

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \\ \therefore T_{1/2} &= \frac{1}{\lambda} \ln 2 = \frac{0.693}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.4)$$

となり、半減期と崩壊定数の関係が得られる。(1.4)式を用いて  $N$  を表せば、 $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$  と書くこともできる。

## ミニ問題

- ① ガンマ線と X 線の違いを述べよ。
- ②  $^{60}_{27}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 5.26$  年) 1mg は何ベクレルか。



## 1.4 原子核の壊変と放射線

核種：原子番号、質量数、エネルギー状態で決まる原子核の種類（同位元素、同位体）

### ① α 壊変

α 線、線スペクトル

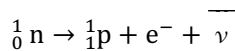
( $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} [\text{Joule}]$ )

### ② β 壊変

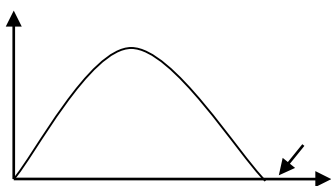
β<sup>-</sup>壊変、β<sup>+</sup>壊変

電子捕獲 (electron capture : EC)

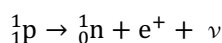
#### ➤ β<sup>-</sup>壊変



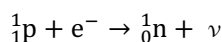
( $\text{e}^- \rightarrow \beta^-$ )



#### ➤ β<sup>+</sup>壊変



#### ➤ 電子捕獲



( $\text{e}^-$  : 軌道電子)

電子捕獲をして壊変した後の原子は、

軌道電子が 1 個欠けている。

→外側の殻の電子によって補充される。

→特性 X 線が放射

EC の後で放射される特性 X 線は、外部にそのまま出るものもあるが、一部は軌道電子と相互作用 (光電効果) をして、外部に電子を放出することがある (Auger (オージェ) 電子)。Auger 電子の運動エネルギーは、特性 X 線のエネルギーから軌道電子の結合エネルギーを差し引いた値に等しい。核種ではなく原子に固有なエネルギーとなる。(～keV 以下)

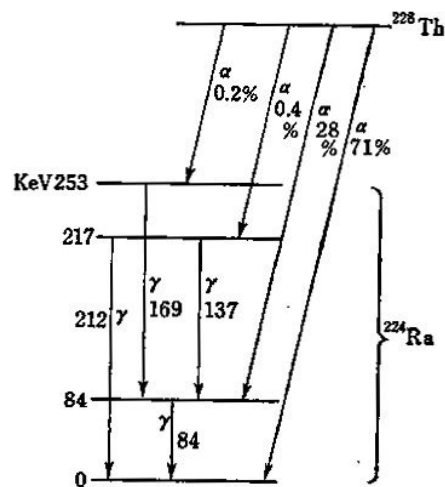


図 15  ${}^{228}\text{Th}$ の壊変様式図[3]

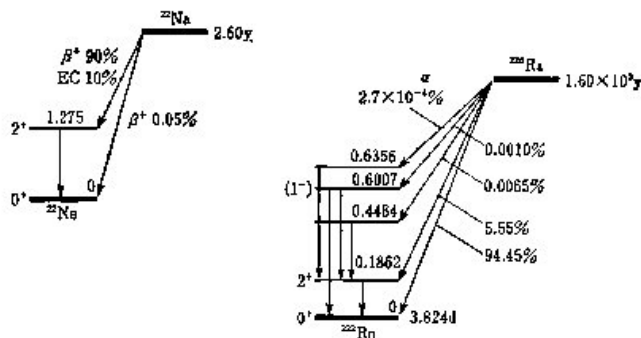
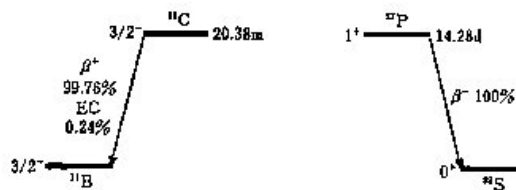


図 16 壊変図式の例[4]

③  $\gamma$  壊変

- 励起状態にある原子核の緩和時に発生する電磁波
  - 通常は $10^{-13} \sim 10^{-16}$  [秒]の間に起こる
  - 緩和が起こりにくい場合、測定しうる長さの半減期は $10^{-6} \sim 10^{-9}$  [秒]より大きい
- 核異性体、核異性体転移（isomeric transition）

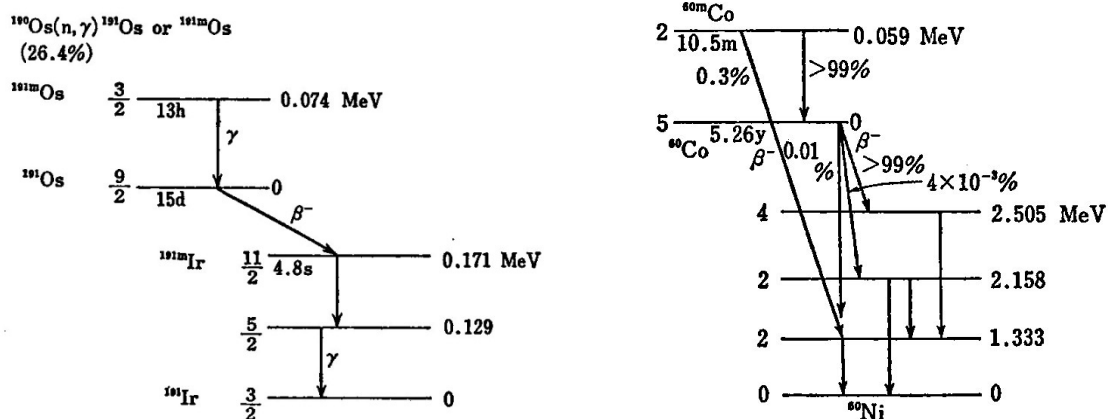


図 18  $^{60m}\text{Co}$ と $^{60}\text{Ni}$ の壊変様式図[5]

➤  $\gamma$  線のエネルギー

線スペクトル、核種によって決まる

➤ 内部転換（internal conversion）

原子核の壊変前後のエネルギー差に相当するエネルギーを軌道電子が受け取って、外部に加速された電子が放出。加速された電子を、（内部）転換電子（conversion electron）と呼ぶ。

転換電子の運動エネルギー $E_k$ は、

$$E_k = E_\gamma - E_b \quad (1.5)$$

$E_k$ ：線スペクトル、 $E_b$ ：軌道電子の結合エネルギー

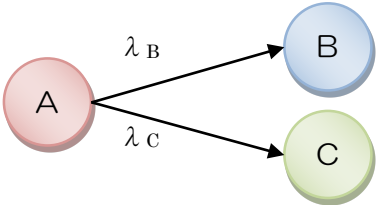
表 1 壊変様式と放出粒子[3]

壊変様式	放 出 粒 子*	$\Delta Z$	$\Delta A$
$\alpha$ 壊変	$\alpha$	-2	-4
自発核分裂	$f, n, \beta^-, \gamma, (\alpha(d)(t))$	$\sim \frac{Z}{2}$	$\sim \frac{A}{2}$
$\beta$ 壊変	$\beta^-$ 壊変 $\beta^-, \nu_-, ((n))$	+1	0
	$\beta^+$ 壊変 $\beta^+, \nu_+$	-1	0
	電子捕獲 $\nu_+$	-1	0
核異性体転移 ( $\gamma$ 壊変)	$\gamma, e^-, ((e^-, e^+))$	0	0

\*  $f$  は核分裂片を表わす。カッコ内のは放出をともなうこともありうる粒子、二重カッコで示したものはごくまれに放出をともなうものを示している。

1.5 分岐壊変

$$\begin{aligned}
 -\frac{dN_A}{dt} &= \lambda_B A + \lambda_C A \\
 &= (\lambda_B + \lambda_C) A
 \end{aligned}$$

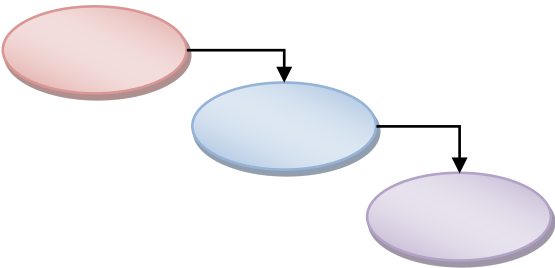


参考 1 分岐壊変

1.6 放射平衡

$$\begin{cases}
 -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \\
 \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2
 \end{cases}$$

$N_1$  : 核種 1 の時刻  $t$  における数  
 $N_2$  : 核種 2 の時刻  $t$  における数



これを解いて、

$$\begin{cases}
 N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \\
 N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left( e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t}
 \end{cases}$$

(a) 過渡平衡

$T_1 > T_2$  のとき、十分時間が経過すると次の関係が成立する。

$$N_2 \cong \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$$

$$\therefore \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda_1 N_1$$

$$\text{または、} A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1$$

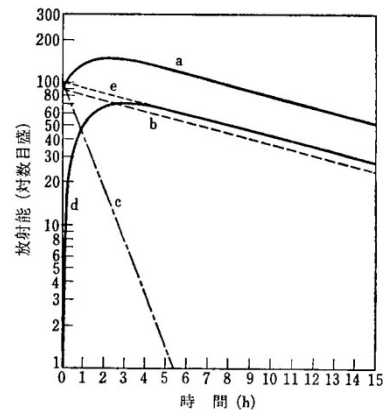


図 2.7 過渡平衡

a : はじめに親のみであったフラクシヨンの全放射能(=b+d).  
b : 親の放射能( $T_1=8.0$  h).  
c : 新たに分離した娘の壊変( $T_2=0.80$  h).  
d : 新たに精製した親から生成する娘の放射能.  
e : 親と娘のフラクシヨンの娘の全放射能(=c+d).  
(a, b, e の勾配は  $T_1=8.0$  h に相当).

図 19 過渡平衡[4]

(b) 永続平衡

$T_1 \gg T_2$  のとき、十分時間が経過すると、次の関係が成立する。

$$N_2 \cong \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1$$

$$A_2 = A_1$$

→核種 1 と核種 2 の放射能は同じになる。

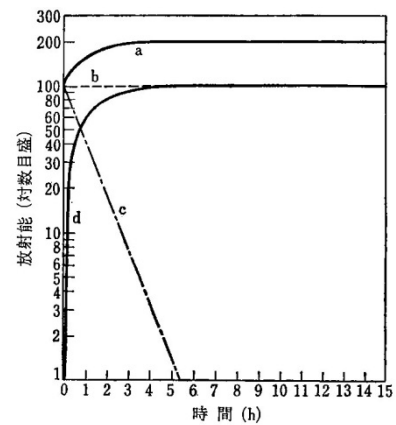


図 2.8 永続平衡

- a : はじめに親のみであったフラクシヨンの全放射能 (=b+d).
- b : 親 ( $T_1 = \infty$ ) の放射能 (=c+d).
- c : 新たに分離した娘の放射能 ( $T_2 = 0.80$  h).
- d : 新たに精製した親から生成する娘の放射能.

図 20 永続平衡[4]

放射平衡の例

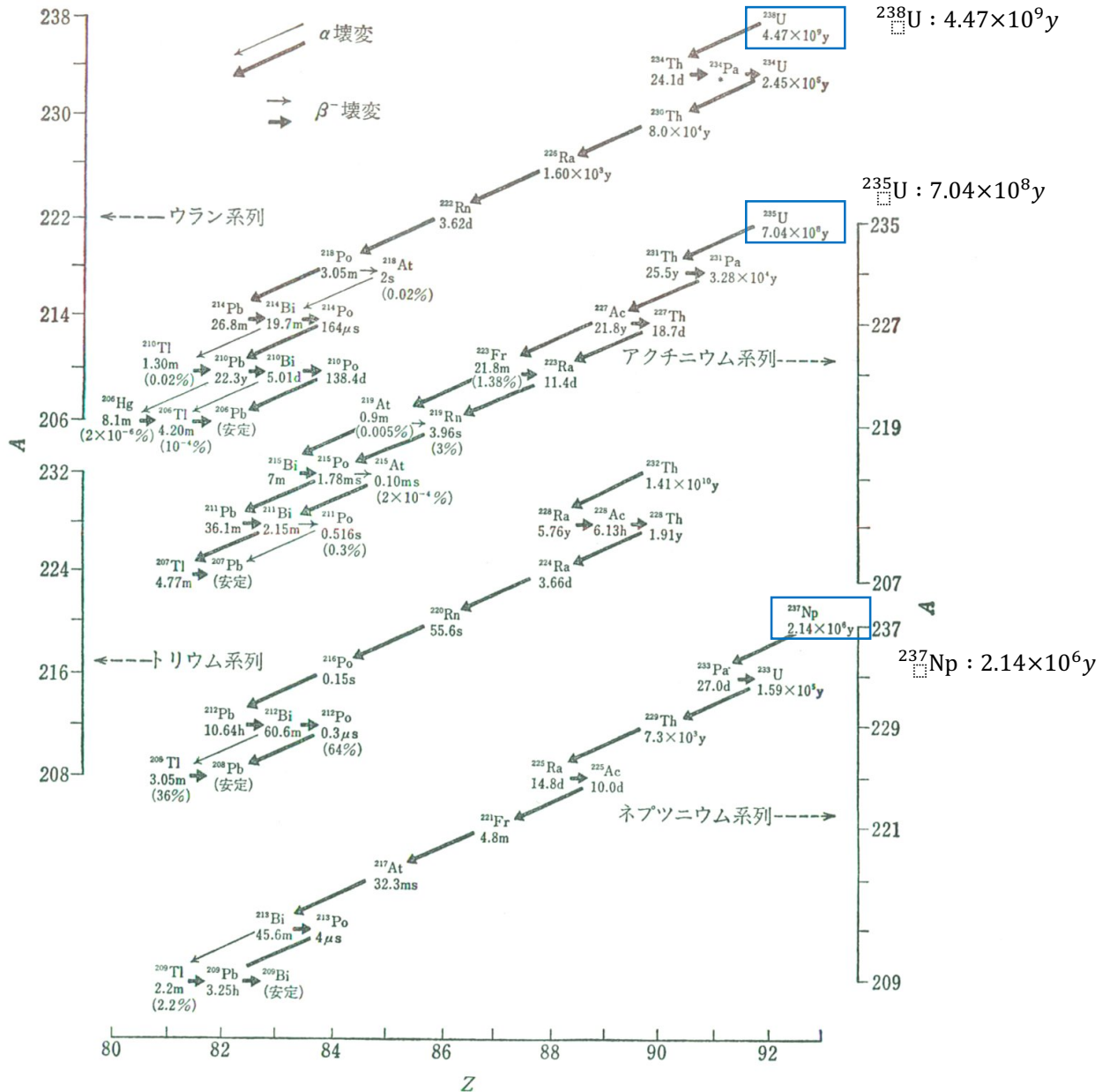


図 2.9 放射壊変系列

各核種についての主壊変経路を太い矢印で、分岐壊変の際の分岐比の小さい壊変経路を細い矢印で示す。また核種に付した百分率(括弧内)は、その核種を生じる壊変の分岐比(%)で、100%に近いものは省略した。

\* の部分は、次のように壊変する：

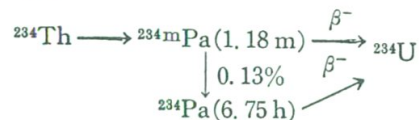


図 21 放射壊変系列[4]

- $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_i N_i$  ( $T_1 \gg T_2, T_3, \dots, T_i$  のとき)
- 過去には、 ${}^{235}\text{U}$  の濃度が今の 0.7% より高い時期があった。→ 天然原子炉オクロ

## 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.