

放射化学基礎

Radiochemistry

診療放射線技師国家試験の
最初の8問は、放射化学の問題。

診療放射線技師国家試験の過去問題を
参照しながら放射化学の基礎を理解する。

本授業中に他授業のレポート作成は
禁止。

放射性核種と元素名との組合せで正しいのはどれか。 2つ選べ。

1. ^{109}Pd ————— 鉛
2. ^{140}La ————— ランタン
3. ^{144}Ce ————— セシウム
4. ^{226}Ra ————— ラドン
5. ^{239}Pu ————— プルトニウム

Periodic Table of the Elements

Periodic Table of the Elements																	
1 H Hydrogen 1.01																	2 He Helium 4.00
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18
11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31											13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95
19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80
37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 183.91	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (271)	107 Bh Bohrium (272)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (276)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (280)	112 Cn Copernicium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (293)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uuo Ununoctium (294)

Lanthanoid

Actinoid

58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.97
90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

24年国家試験 解答 4

アルカリ土類金属元素はどれか。

1. ^{18}F 2. ^{32}P 3. ^{67}Ga
4. ^{90}Sr 5. ^{131}I

周期表の1列目が(水素を除く)
アルカリ金属 (Alkali metal)

周期表の2列目が
アルカリ土類金属
(Alkaline earth metal)
2価の陽イオンになりやすい

1 H Hydrogen 1.01				
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01			
11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31			
19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94
37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91
55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (265)	105 Db Dubnium (268)



福島第一原発

水素爆発後

何が危険なのか

福島原発で問題になっていること

原子炉（沸騰水型原子炉）が破壊し、
放射能を出す物質（ヨード131、セシウム
137、プルトニウム239 等）
が周囲に飛散した。

放射能：放射線を出す能力

放射性物質：放射線を出す物質

放射線 (Radiation) は、2種類ある。

1. 電磁波 (X線、ガンマ線)

= 空間の振動エネルギー

2. 粒子線 (電子線、アルファ線 等)

= 重さのある粒子の放出

放射能 (Radio-activity) とは、

1秒間に放出される放射線の数。

電磁波(X線、ガンマ線、光線、電波など)
は、空間の振動エネルギー

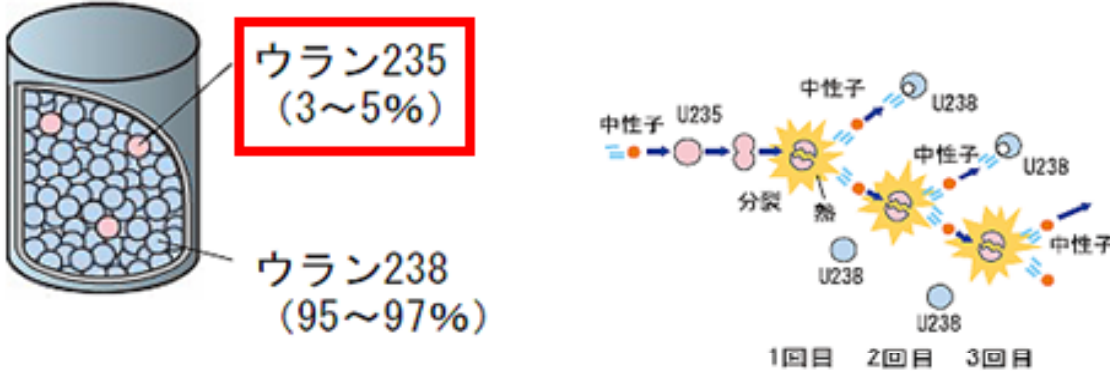
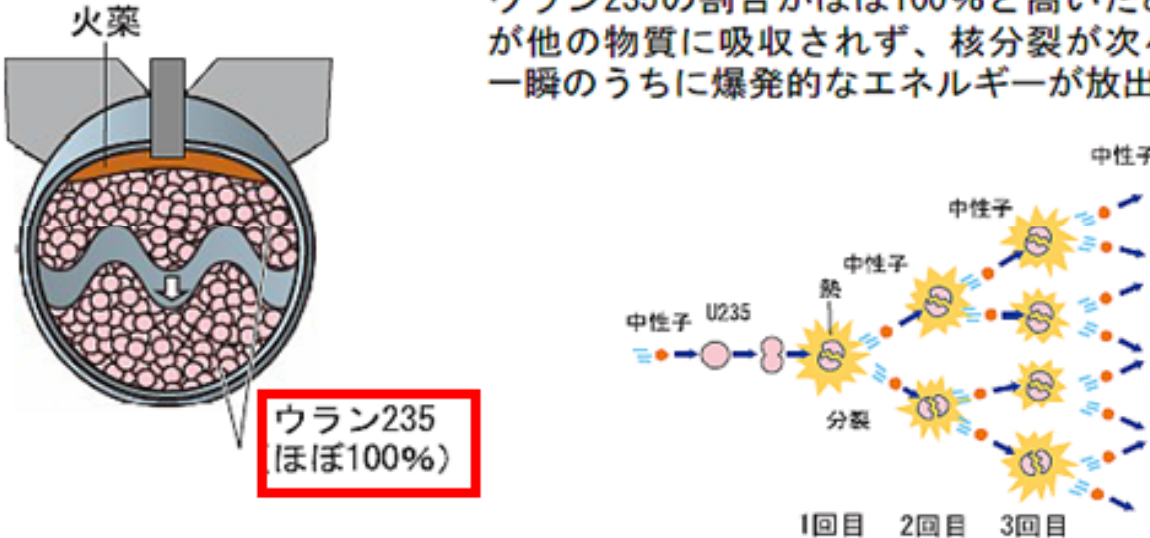
空間(Universe)とは何もない所ではない。
物理学では電磁波を通す場を空間という。
空間は、物理的実在物(構造物)である。
空間で占められた場所が宇宙。
宇宙の外には空間がなく、光、電磁波が
通らない。

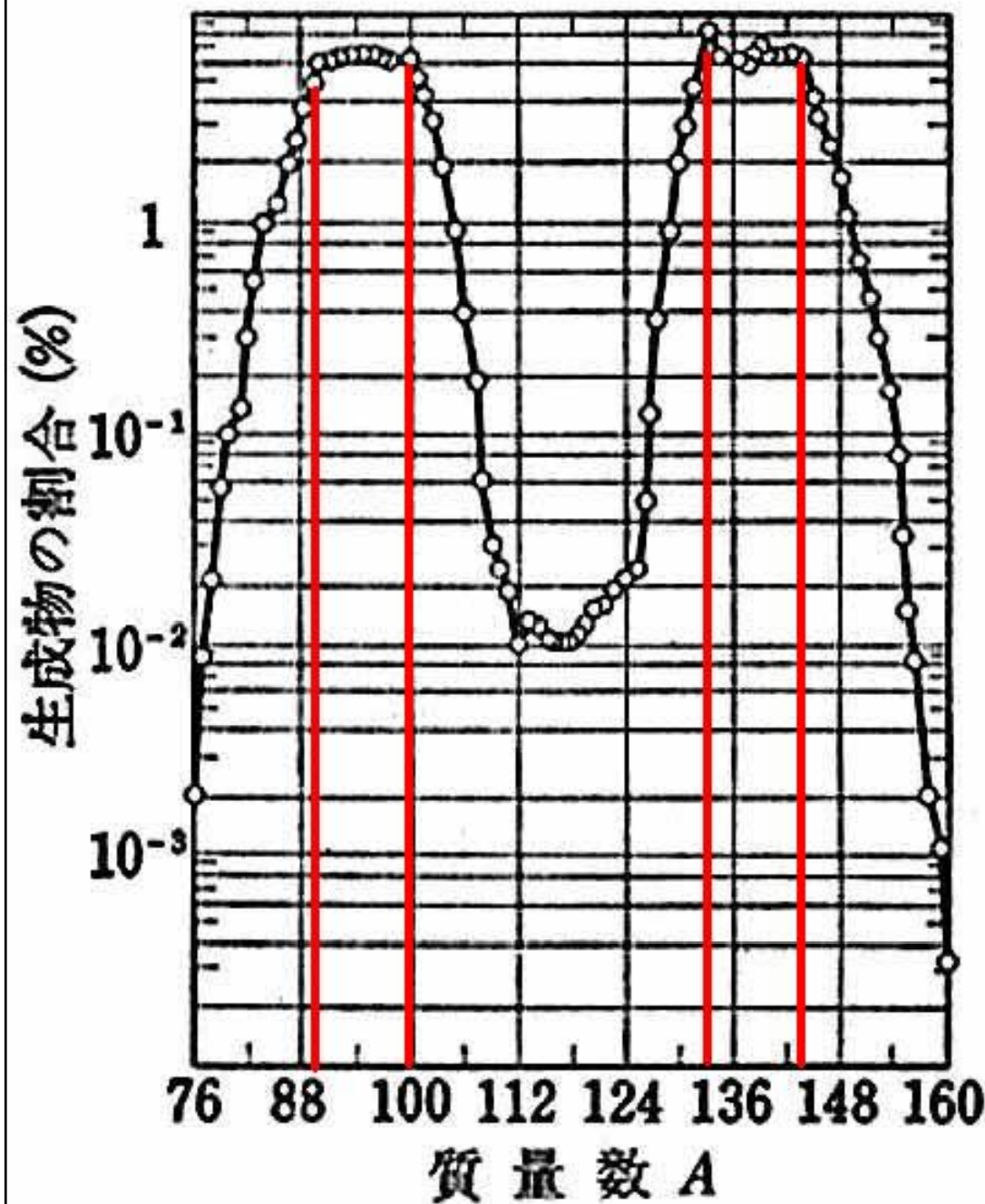
^{90}Sr と ^{137}Cs に共通するのはどれか。2つ選べ。

1. γ 線放出体である。
2. 放射性の娘核種をもつ。
3. アルカリ金属元素である。
4. 骨に集まりやすい核種である。
5. ^{235}U の熱中性子による核分裂で高収率に生成される。

原子炉は、核爆発しない。ウラン235の含有量が少ない。

原子力発電と原子爆弾の違い

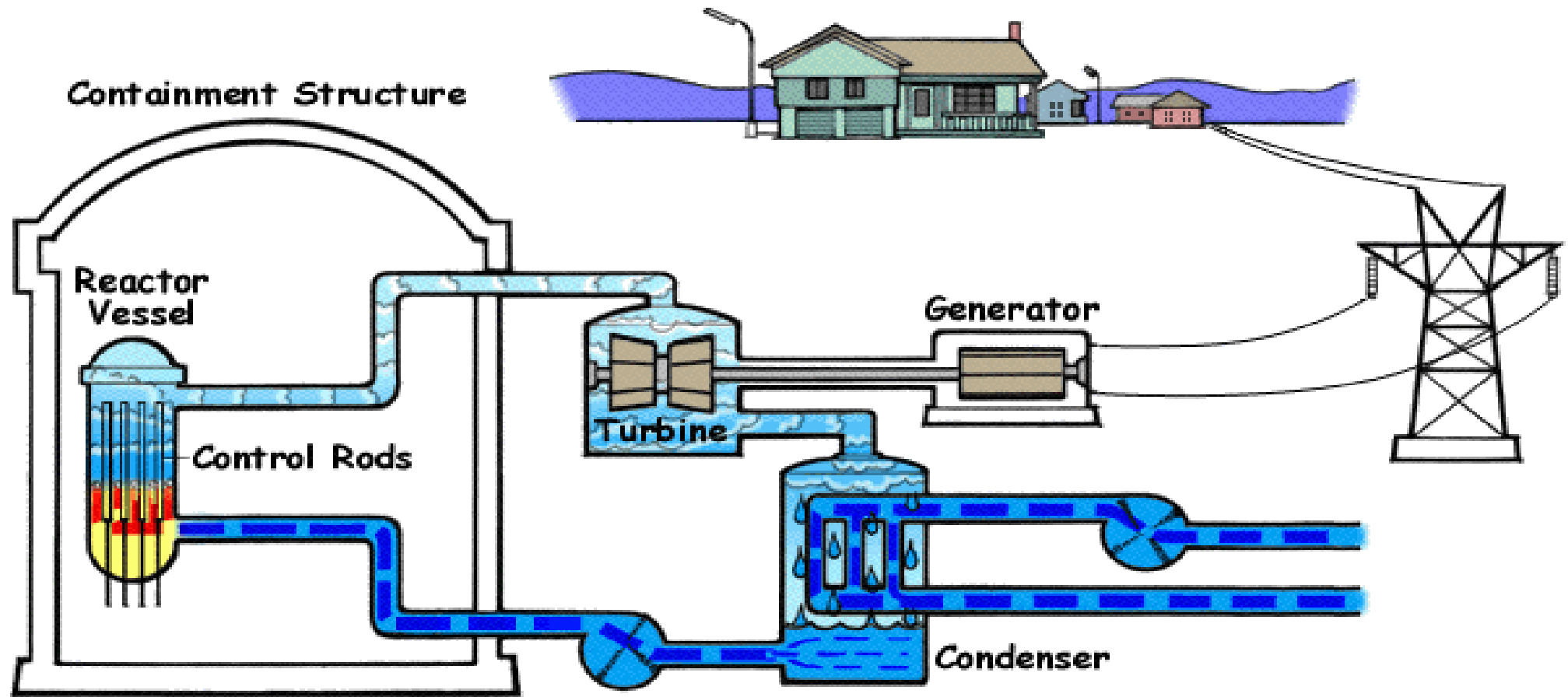
	ウラン235とウラン238の割合と核分裂連鎖反応	核分裂数の制御の方法
原子力発電の場合	ウラン235の割合が低く、中性子がウラン238に吸収される等の理由により核分裂が一定の規模で継続する。  ウラン235 (3~5%) ウラン238 (95~97%) 1回目 2回目 3回目	制御棒が多数設置されており、また自己制御性があるため急激に核分裂数が増加することはない。
原子爆弾の場合	ウラン235の割合がほぼ100%と高いため、中性子が他の物質に吸収されず、核分裂が次々起こり、一瞬のうちに爆発的なエネルギーが放出される。  火薬 ウラン235 (ほぼ100%) 1回目 2回目 3回目	制御棒が設置されておらず、自己制御性がないため、急激に増加する核分裂を止めることはできない。



^{235}U の分裂生成物の分布

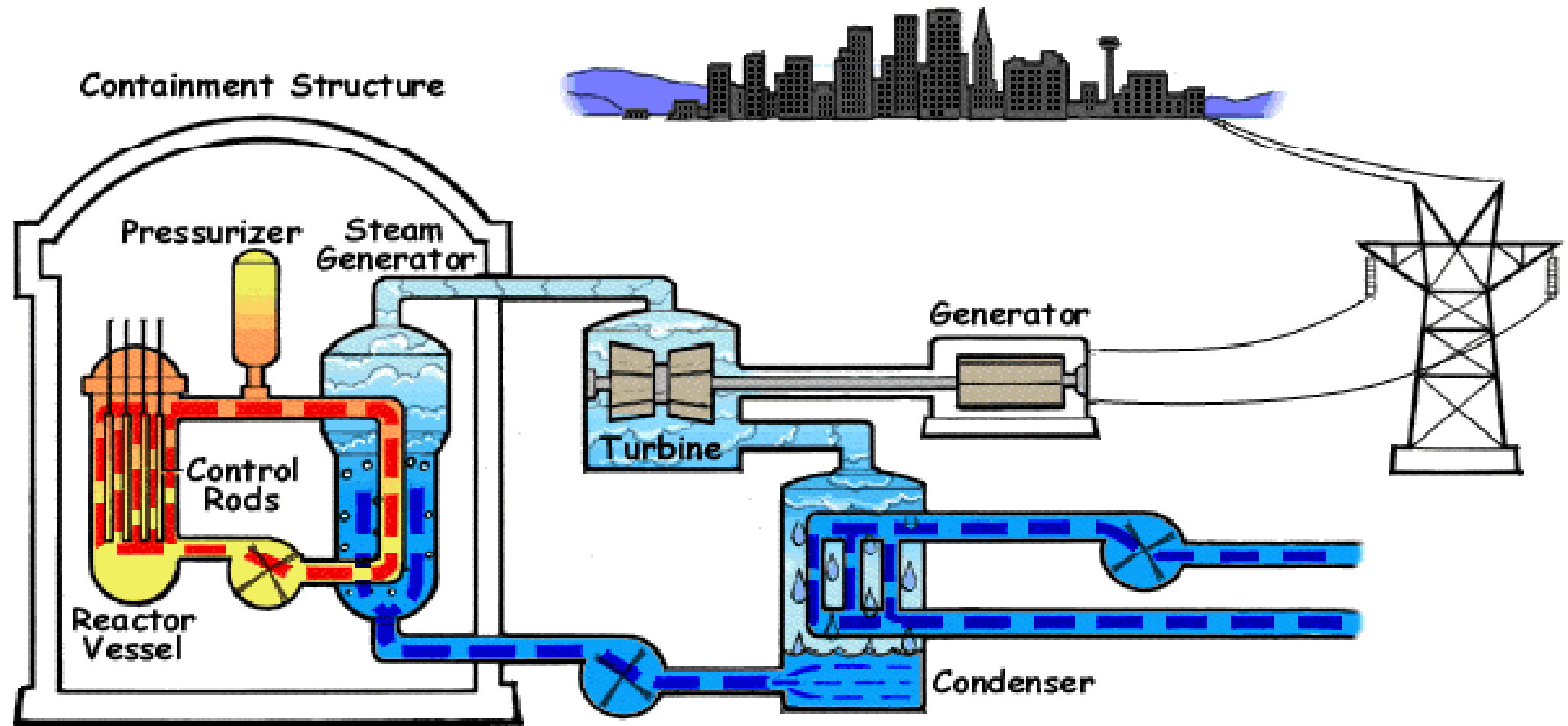
原子炉内で
 ^{235}U に熱中性子
(エネルギーの小さい
中性子)をあてると、
質量数が
90~100 と
130~140 の
元素に核分裂しやすく、
約200MeVの
エネルギーを放出する。

沸騰水型原子炉 Boiling Water Reactor (BWR)



ウラン235の核分裂で生じた熱エネルギーで水を沸騰させ、高温・高圧の蒸気として取り出す原子炉。
単純な構造で、**福島第一原発などの古い原発の構造**。
炉心に接触した水の蒸気を直接タービンに導くため、**放射性物質に汚染された蒸気が原子炉の外にも循環する。**

加圧水型原子炉 Pressurized Water Reactor (PWR)



ウラン235の核分裂反応によって生じた熱エネルギーで、加圧水(圧力の高い水)を 300°C 以上に熱し、二次冷却材の水(放射能を含まない)を沸騰させ、高温高压の蒸気としてタービン発電機を回す。泊原発などの新しい形式の原子炉。

泊原発 加圧水型原子炉 (PWR)

福島第一原発とは異なり、
原子炉外に放射能は出ない構造。



岩内港

原子炉が破壊されると放出される 放射性同位元素 (RI : Radio - Isotope)

ヨード131 (ヨウ素131) (^{131}I)

ベータ線 (電子) とガンマ線を出す。

8日で放射能は半減する (半減期 8日)

人体に摂取すると甲状腺に集積する。

甲状腺以外の内臓はほとんど被曝しないので、
 ^{131}I を内服して、バセドウ病の治療や、
甲状腺癌の転移病変を消滅させる治療が
日常的に行われている。

セシウム137 (^{137}Cs)

ベータ線(電子)とガンマ線を出す。人体に摂取するとカリウムと同じく全ての細胞内に集積する。
30年で放射能は半減する(半減期 30年)

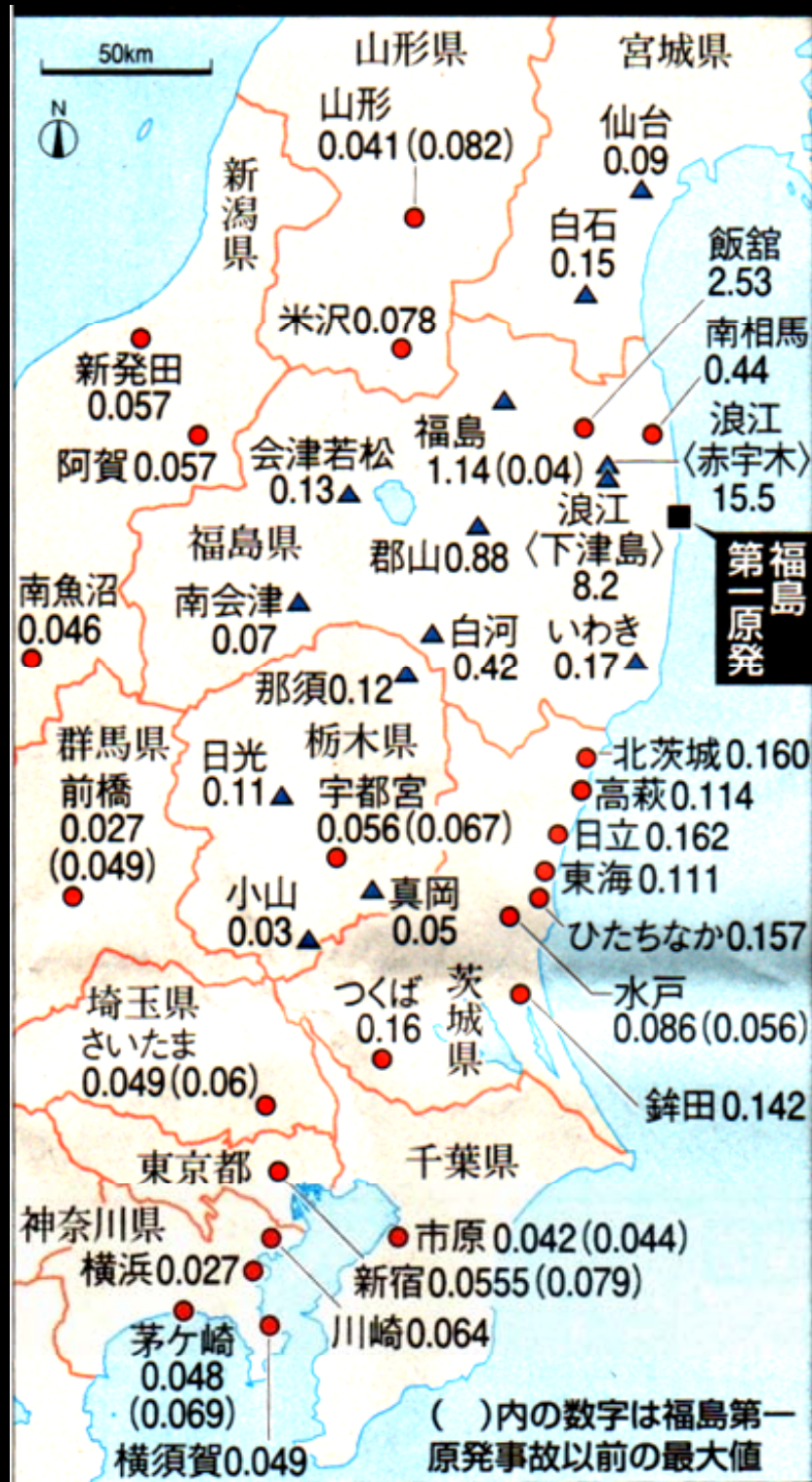
セシウム134 (^{134}Cs)

ベータ線(電子)を出す。ガンマ線は出ない。
摂取するとカリウムと同じく全ての細胞内に集積。
2年で放射能は半減する(半減期 2年)

原発事故時から数日間は、水に溶けやすい放射性同位元素(ヨード131、セシウム137)が雲状に大気中に停滞し(プルームという)、雨に混じって地表に落ちる。

原発事故時、原爆被弾から数日間は、
雨にあたってはいけない。
雨が降った地域には行かない。

雨にあたったら、速やかに着衣の廃棄とシャワー、うがいによる体表、口腔内の洗浄を行う。



各地で観測された大気中の放射線量

● 固定式の観測装置(可搬型も含む)

▲ 携帯型測定器などで計測。装置の違いなどで数値に差が出る場合がある

単位は毎時ミリシーベルト。1ミリシーベルトは1000マイクロシーベルト。1マイクログレイは1ミリシーベルトと換算。31日午後の測定値(仙台、白石、浪江(赤字木、下津島)は午前)

福島県内の積算放射線量

浪江町赤字木	(北西31°)	67.04
飯館村長泥	(同33°)	36.00
福島市杉妻町	(同62°)	2.245
いわき市三和町差塩	(南西39°)	0.535
川内村上川内早渡	(西南西22°)	1.277

単位ミリシーベルト。カッコ内は福島第一原発からの距離。積算線量計を設置した3月23日(福島市は同24日、いわき市は同25日、川内村は4月2日)から8月30日(飯館村は同28日、いわき市と川内村は同29日)まで。文科省調べ

事故時に雨が降っていた場所に大量のRIが分布。

ヨード、セシウムは水に溶けやすい物質。

ストロンチウム 90 (90Sr)

ベータ線 (0.55MeV)を出す。ガンマ線は出ない。
摂取すると骨に集積する(半減期 29年)。
(生物学的半減期も長い)

ストロンチウム89 (89Sr) 医薬品 32万円

ベータ線 (1.49MeV)を出す。ガンマ線は出ない。
摂取すると骨に集積する(半減期 50日)。
癌の骨転移の疼痛を緩和する効果がある。
3か月おきに静脈注射(薬品名メタストロン)。
ガンマ線が出ないので周囲の人は被曝しない。

プルトニウム239 (239Pu)

アルファ線(陽子2個+中性子2個)を出す。

人体に摂取すると肺、骨などに集積し、

高率に肺癌、骨肉腫等の悪性腫瘍を発生。

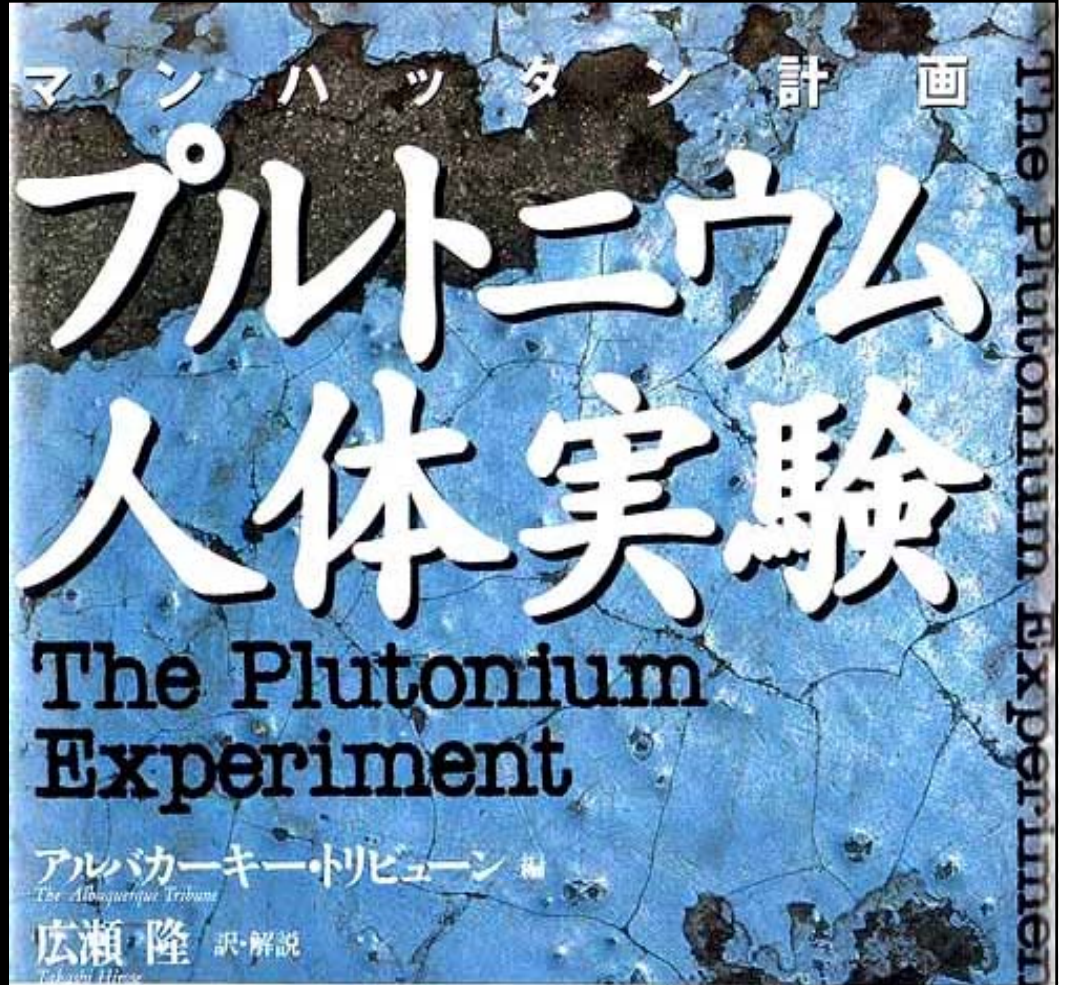
(発病までの潜伏期間20年)。

生物学的半減期は長く、20～50年。

物理的半減期も非常に長く、24000年。

原子炉や原爆において、
ウラン238 が中性子を
捕獲してウラン239 となり、
それが β 崩壊して
ネプツニウム239 になり、
更にそれが β 崩壊して
プルトニウム239 ができる

マンハッタン計画
(米国原爆開発計画)にて
プルトニウム239は非常に
危険な元素と判明した。



94年ピューリッツァー賞受賞

米国地方紙の記者が7年の歳月をかけ
空軍機密文書の「謎の記号」を追跡

「ヒロシマ・ナガサキ」と
「原子力産業」を結ぶ
狂気の実験

小学館

定価1800円(本体1748円)

ウランの埋蔵量は、70年程度。
原発もあと70年で終了する。

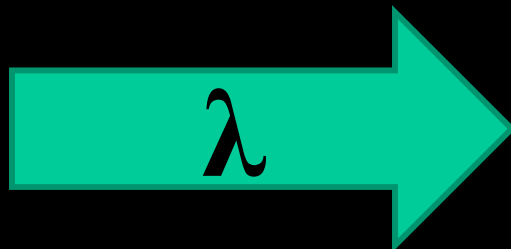
残るのは半減期2万年以上の
猛毒RIのプルトニウム239、
半減期30年程度の、生物体内に取り込まれ
やすいRIのセシウム137、ストロンチウム 90

原発、原爆の存続は、後世の全て生命に
多大な被害を与える。

放射能 Radio-activity

Radio-
Isotope
N

λ : Decay or Disintegration Constant
崩壊定数 (1秒間に崩壊する原子核の割合)



$$dN / dt = -\lambda N$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (N_0 : \text{最初の原子核の個数})$$

$$\text{放射能 } A = \lambda N = -dN / dt$$

(1秒間に崩壊する原子核の個数)

(単位は Bq または dps : decay per second)

ベータ線: 512、1,170keV

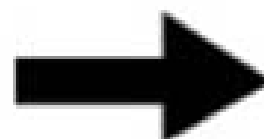
ガンマ線: 662keV

半減期: 約30年

^{137}Cs

セシウム137

陽子55 中性子82



$^{137\text{m}}\text{Ba}$

バリウム137m

陽子56 中性子81



^{137}Ba

バリウム137

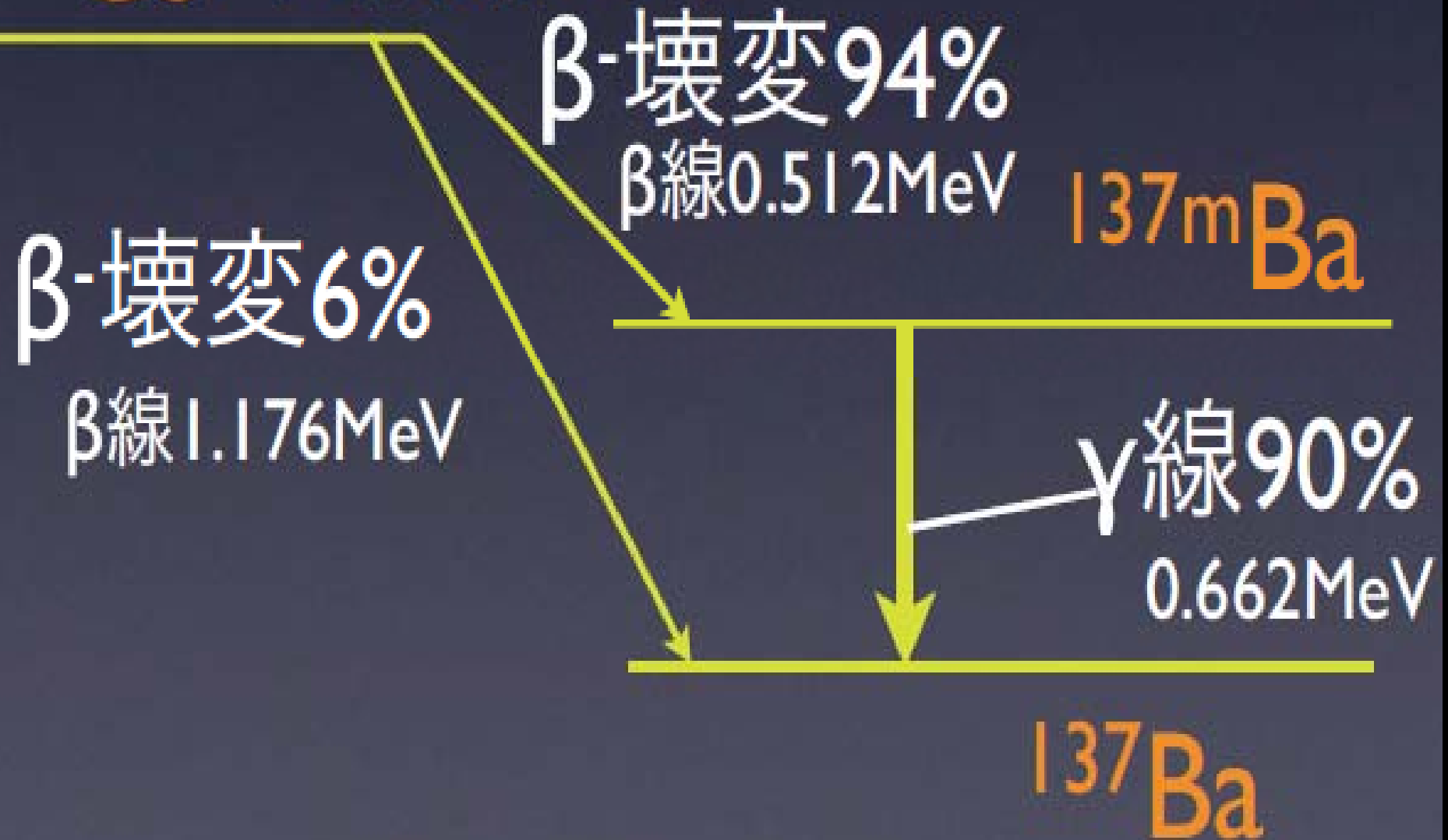
陽子56 中性子81

半減期: 約2.6分

* 6%は1,170keV
のベータ線を放出し
て、直接バリウム
137に変化します。

セシウム137の崩壊図

^{137}Cs 半減期30年



ベータ線: 546keV

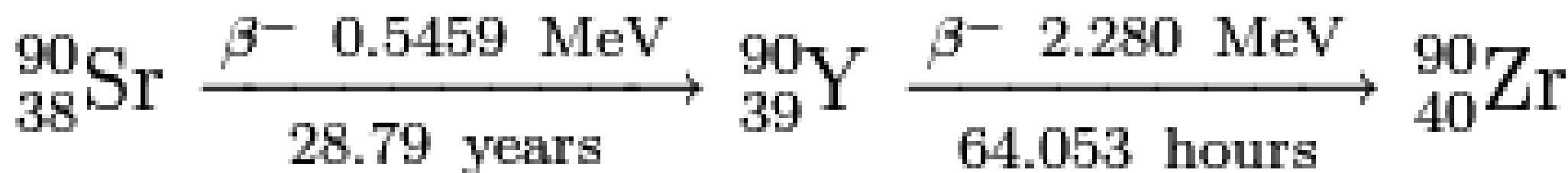
ベータ線: 2,280keV



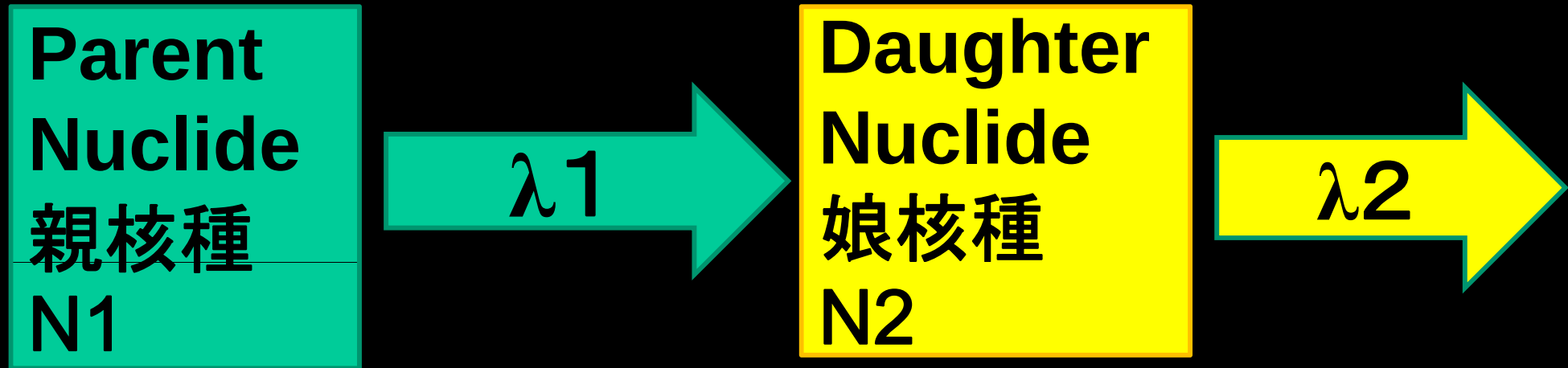
半減期: 約29年



半減期: 約64時間



放射平衡 Radiative Equilibrium



$$N1 = N0 e^{-\lambda 1 t}$$

$$d N1 / dt = - \lambda 1 N1$$

$$d N2 / dt = \lambda 1 N1 - \lambda 2 N2$$

$$d N2 / dt + \lambda 2 N2 = \lambda 1 N0 e^{-\lambda 1 t}$$

定数係数1階線形微分方程式

$$dy/dx + a y = F(x)$$

の解は、

$$y = e^{-ax} \left(\int e^{ax} F(x) dx + C \right)$$

工学の分野でよく利用される便利な公式

$$dy/dx + a y = F(x)$$

$$e^{ax} dy/dx + a e^{ax} y = e^{ax} F(x)$$

$$e^{ax} dy/dx + (e^{ax}/dx) y = e^{ax} F(x)$$

$$d(e^{ax} y)/dx = e^{ax} F(x)$$

$$e^{ax} y = \int e^{ax} F(x) dx + C$$

$$y = e^{-ax} \left(\int e^{ax} F(x) dx + C \right)$$

Y に N_2 、 x に t 、 a に λ_2 を代入し、
F(t) を $\lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t}$ とすると、

$dy/dx + a y = F(x)$ は、

$$dN_2/dt + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$y = e^{-at} \left(\int e^{at} F(x) dt + C \right)$ は、

$$N_2 = e^{-\lambda_2 t} \int e^{\lambda_2 t} \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} dt$$

$$N_2 = e^{-\lambda_2 t} \int \lambda_1 N_0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} dt$$

$$= e^{-\lambda_2 t} \left[N_0 \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \right]_0^t$$

$$= e^{-\lambda_2 t} (N_0 \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}) \\ - e^{-\lambda_2 t} (N_0 \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^0)$$

$$= (N_0 \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^{-\lambda_1 t}) \\ - e^{-\lambda_2 t} (N_0 \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^0)$$

$$N_2 = \lambda_1 N_0 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^{-\lambda_1 t} \\ - \lambda_1 N_0 / (\lambda_2 - \lambda_1) e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_2 = \lambda_1 N_0 / (\lambda_2 - \lambda_1) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

積分定数 C を N_{20} とすると $N_{20} e^{-\lambda_2 t}$ が加わる。

親核種(半減期 T_1 、壊変定数 λ_1 、原子数 N_1)と娘核種(半減期 T_2 、壊変定数 λ_2 、原子数 N_2)が過渡平衡にあるとき、娘核種の原子数 N_2 はどれか。

1. $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$ 2. $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$ 3. $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1$

4. $\frac{T_2}{T_2 - T_1} N_1$ 5. $\frac{T_1}{T_1 - T_2} N_1$

半減期 Half life $T_{1/2}$

$$N = N_0 \times (1/2)^{(t / T_{1/2})}$$

崩壊定数 λ

1秒間に原子核が崩壊する割合

$$dN/dt = -\lambda N$$

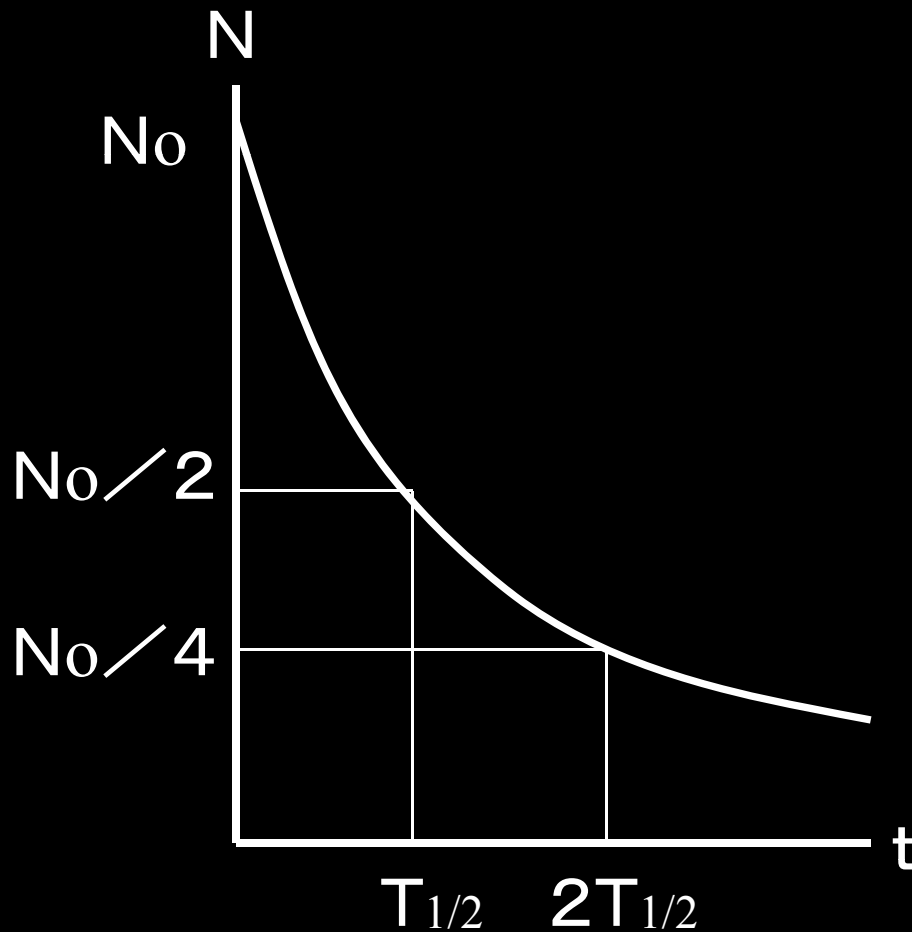
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\text{Log}(1/2) = \text{Log}(e^{-\lambda T_{1/2}})$$

$$\text{Log}2 = 0.693 = \lambda T_{1/2}$$



過渡平衡 Transient Equilibrium

親核種の λ_1 が娘核種の λ_2 より小さい場合。
＝親核種の T_1 が娘核種の T_2 より長い場合。

$e^{-\lambda_2 t}$ は $e^{-\lambda_1 t}$ より十分小さくなるので

$$N_2 = \lambda_1 N_0 / (\lambda_2 - \lambda_1) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$= \lambda_1 N_0 / (\lambda_2 - \lambda_1) (e^{-\lambda_1 t})$$

$$= \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) (N_0 e^{-\lambda_1 t})$$

$$N_2 = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) N_1$$

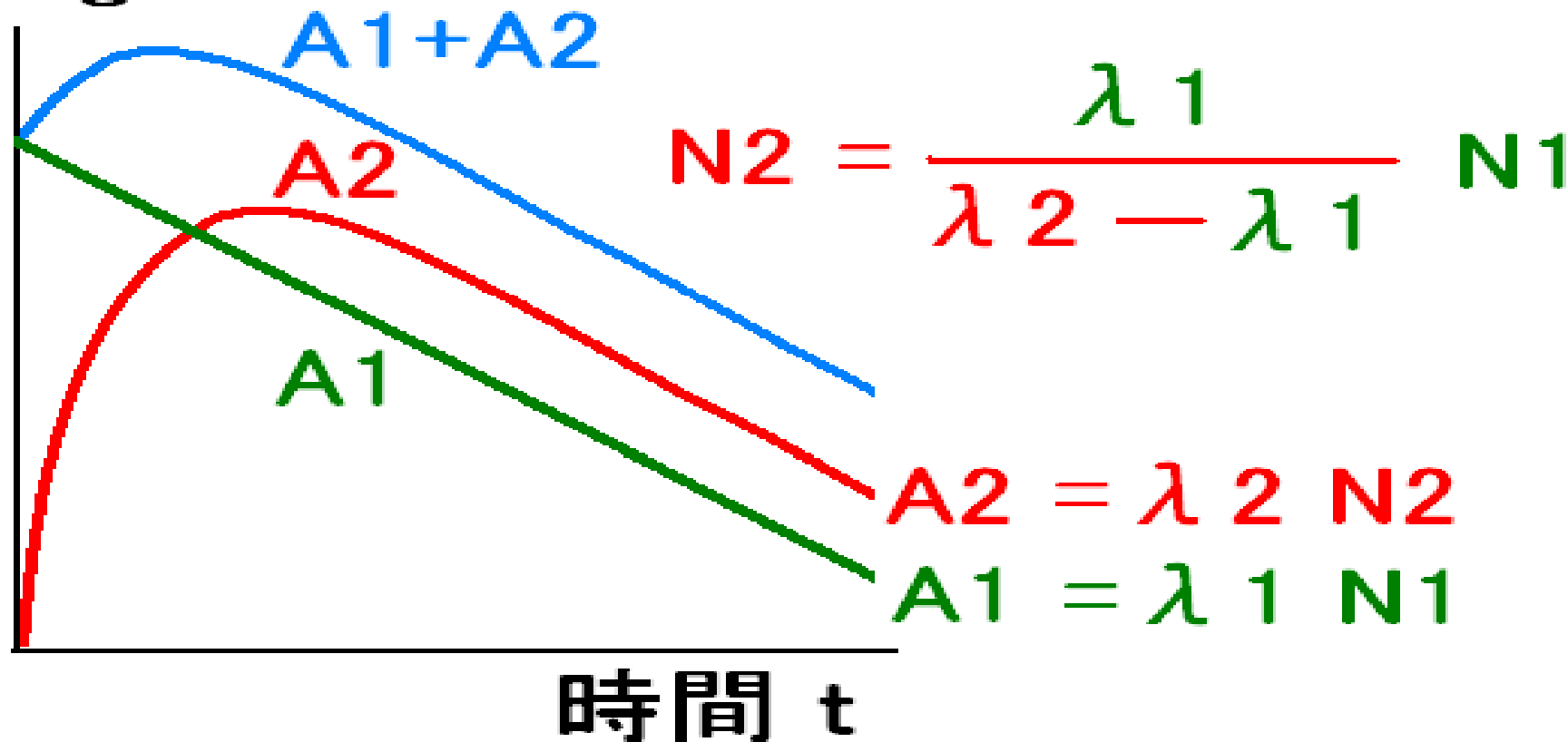
過渡平衡の例 $^{99}\text{Mo} - ^{99\text{m}}\text{Tc} - ^{99}\text{Tc}$

^{99}Mo (モリブデン) の半減期は 66時間。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (テクネチウム) の半減期は 6時間。

放射能 A (対数目盛)

$\log A$



永続(永年)平衡 Secular Equilibrium

親核種の λ_1 が娘核種の λ_2 より極めて小さい場合。
＝親核種の T_1 が娘核種の T_2 より極めて長い場合。

$$N_2 = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) N_1 \quad (\lambda_1 \ll \lambda_2)$$

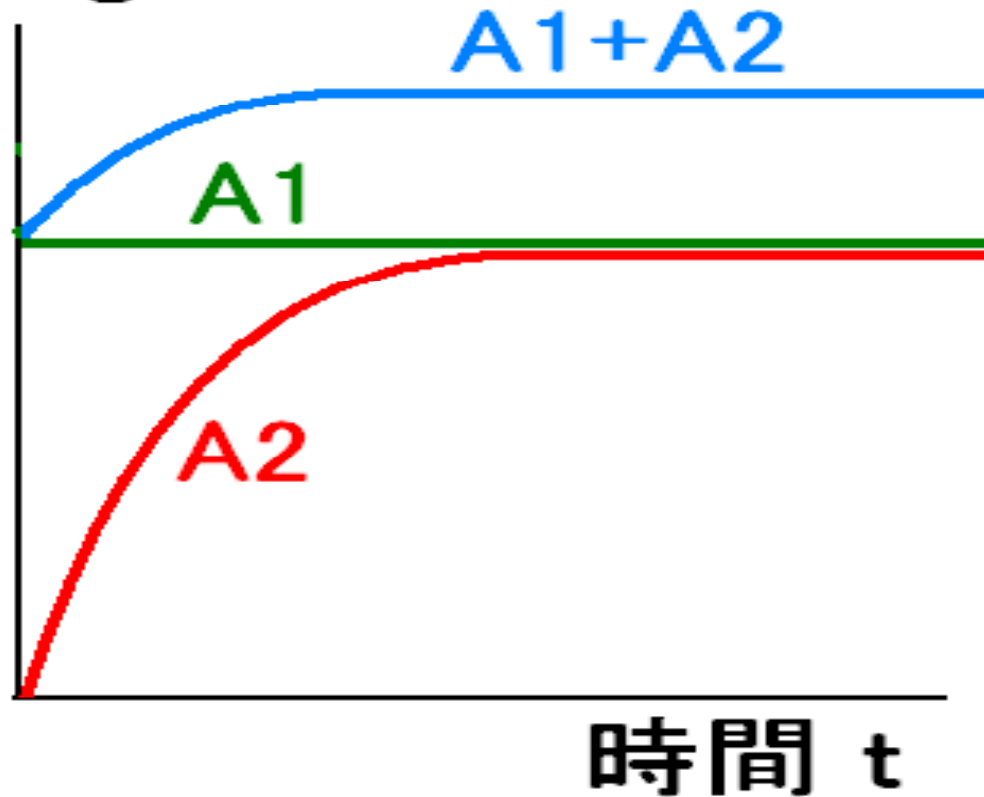
$$N_2 \doteq (\lambda_1 / \lambda_2) N_1$$

永続平衡の例 $^{226}\text{Ra} - ^{222}\text{Rn} - ^{218}\text{Po}$

^{226}Ra (ラジウム) の半減期は 1600年。

^{222}Rn (ラドン) の半減期は 3.8日。

放射能 A (対数目盛)
 $\log A$



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

$$A_1 = \lambda_1 N_1$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2$$

半減期 10 分の核種を製造することとした。

10 分間照射した生成放射能に対する

30 分間照射した生成放射能の比はどれか。

1. 1.25

4. 2.25

2. 1.50

5. 3.00

3. 1.75

^{18}F 110 min

^{15}O 2.04 min

^{11}C 20.4 min

^{13}N 9.97 min

$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})\ ^{18}\text{F}$

$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})\ ^{15}\text{O}$, $^{15}\text{N}(\text{p},\text{n})\ ^{15}\text{O}$

$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)\ ^{11}\text{C}$

$^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})\ ^{13}\text{N}$, $^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)\ ^{13}\text{N}$



北大病院内の
サイクロトロン

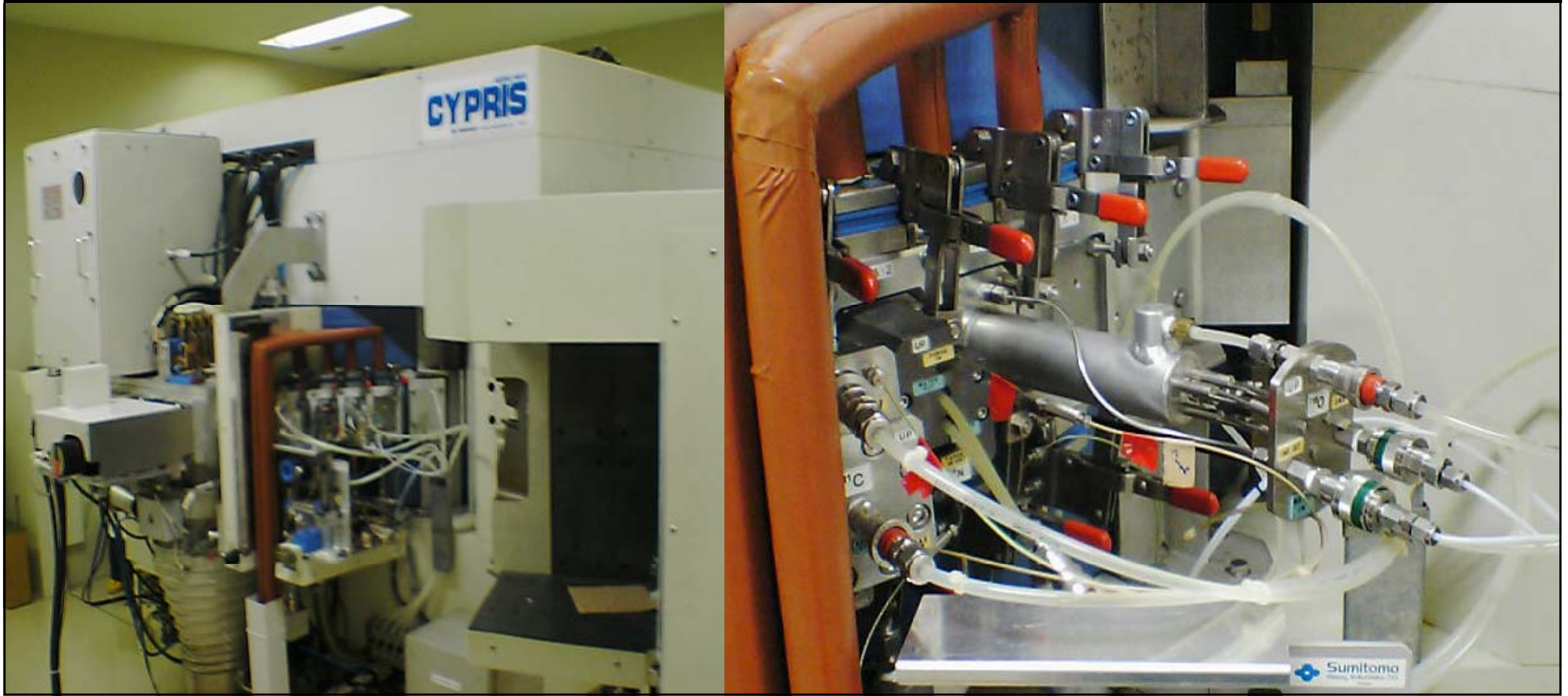
巨大な電磁石

水素または重水素
原子核を加速して
元素に衝突させ、

陽電子を出す
RI を作っている。

サイクロトロン

水素または重水素原子核（proton、deuteron）を加速して、ターゲットに置いた物質に当てて陽電子放出核種を発生させる。



生成放射能

サイクロトロンで陽子p (proton)または重水素原子核d (deuteron)を非放射性元素(ターゲット核種)に照射し、放射性元素を生成する。

病院内サイクロトロンでPET用の陽電子放出RI生成など。

例 : $^{12}\text{C} (d, n) ^{13}\text{N}$

炭素12 に deuteron を照射して
半減期10分の放射性窒素13 を生成。

生成放射能の算出法

N_0 : ターゲット核種の原子数

N : 生成放射性核種の原子数

ϕ : 照射粒子の数 (フルエンス数)

σ : 放射化断面積 (反応の起こりやすさ)

λ : 生成核種の崩壊定数

1秒間に生成する放射性核種の数 $= N_0 \phi \sigma$

1秒間に崩壊する放射性核種の数 $= \lambda N$

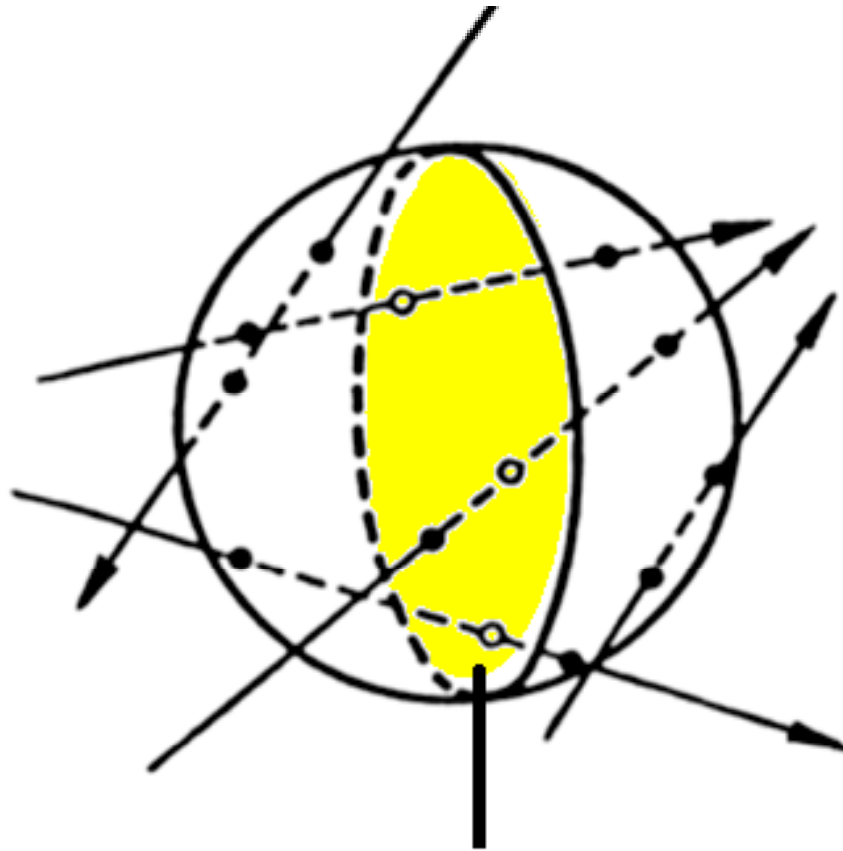
1秒間に増加する放射性核種の数

$$= dN / dt = N_0 \phi \sigma - \lambda N$$

ϕ : 照射粒子の数、流束量（フルエンス数）

大円の面積 da の球に入射する粒子数を dN とすると、

$$\phi = dN / da$$



面積 1m^2 の円（大円）を包む球体内を
1秒間に通過する入射粒子数

$$dN / dt = N_0 \phi \sigma - \lambda N$$

の式を積分すると ($t = 0$ のとき $N = 0$ とする)

$$N = N_0 \phi \sigma / \lambda (1 - e^{-\lambda t})$$

定数係数1階線形微分方程式の公式を使う。

$dy / dx + a y = F(x)$ の解は、

$$y = e^{-ax} (\int e^{ax} F(x) dx + C)$$

y に N 、 x に t 、 a に λ を代入し、

$F(x)$ を $N_0 \phi \sigma$ とすると、

$dy / dx + a y = F(x)$ は、

$$dN / dt + \lambda N = N_0 \phi \sigma$$

$y = e^{-at} (\int e^{at} F(x) dt + C)$ は、

$$N = e^{-\lambda t} \int e^{\lambda t} N_0 \phi \sigma dt$$

$$= e^{-\lambda t} N_0 \phi \sigma \int e^{\lambda t} dt$$

$$= e^{-\lambda t} N_0 \phi \sigma [e^{\lambda t} / \lambda]_0^t$$

$$= e^{-\lambda t} N_0 \phi \sigma / \lambda (e^{\lambda t} - e^0)$$

$$N = N_0 \phi \sigma / \lambda (1 - e^{-\lambda t})$$

生成放射能 A

$$= \lambda N = N_0 \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t})$$

$(1 - e^{-\lambda t})$ を飽和係数 S とすると、

照射時間 t における生成放射能 A は、

$$A = N_0 \phi \sigma S$$

S に $\lambda T = \log 2$ の式を代入すると、

照射時間 t が 半減期 T の場合、

$$S = 1 - e^{-\lambda T} = 1 - e^{-\log 2} = 1 - 1/2 = 1/2$$

照射時間 t が 2半減期 $2T$ の場合、

$$S = 1 - e^{-2\lambda T} = 1 - e^{-2\log 2} = 1 - 1/4 = 3/4$$

照射時間 t が 3半減期 $3T$ の場合、

$$S = 1 - e^{-3\lambda T} = 1 - e^{-3\log 2} = 1 - 1/8 = 7/8$$

3半減期照射と1半減期照射の放射能比は、

$$(7/8) / (1/2) = 7/4 = 1.75$$

照射時間 t が 4半減期 ($4T$) の場合 $S \doteq 0.94$ で、ほぼ飽和状態

飽和係数 $S = 1 - e^{-\lambda t}$

