

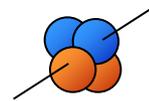
放射線を理解するために

東京工業大学
理工学研究科基礎物理学専攻
中村隆司
2011年3月23日

放射線って何？

- アルファ線(α線)

高エネルギーのヘリウム原子核(^4He)



中性子2個

- ベータ線(β線)

α粒子ともいう

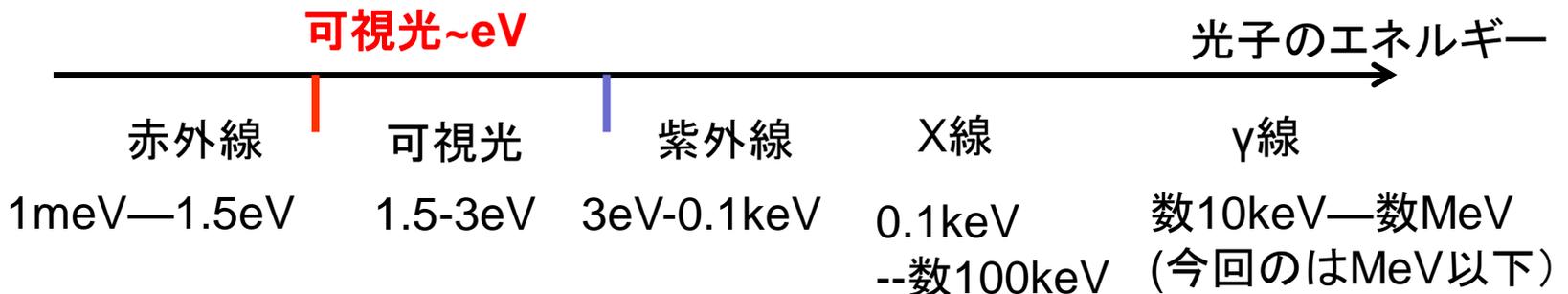
陽子2個

高エネルギーの電子

- ガンマ線(γ線)

高エネルギーの光(光子)

(本日の話: X線もγ線と同等と思ってよい)



学部学生向け問題 200nmの波長→何eV？

eV(エレクトロンボルト:電子ボルト)= 1.6×10^{19} ジュール

補足：数量で使われる補助単位

M メガ $10^6 = 1,000,000 = 100$ 万

k キロ $10^3 = 1,000 = 千$

m ミリ $10^{-3} = 0.001 = 1$ 千分の1

μ マイクロ $10^{-6} = 0.000001 = 100$ 万分の1

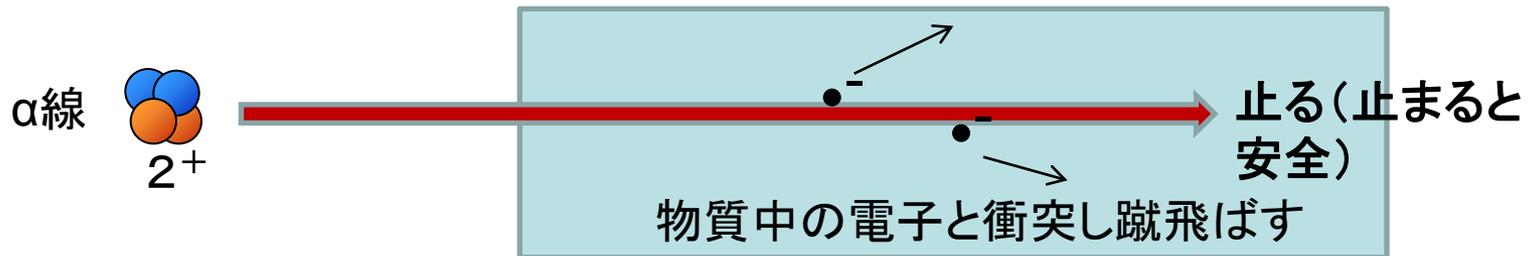
n ナノ $10^{-9} = 0.000000001 = 10$ 億分の1

欧米では1000毎に言葉を変える

東アジアでは10000毎に言葉を変える

放射線はどのような影響を与える？

- 物質(人体)中の原子を電離(イオン化)する
 - 直接DNAを損傷→細胞を損傷
 - フリーラジカル($\cdot\text{OH}$ など)→DNAを損傷→細胞を損傷



大多数のDNA,細胞は修復機能により回復する

→少量の放射線量は問題にならない

→ではどのくらいなら問題にならないか？これはあとで

Q.放射線はどこから出てくるのか？

A. 放射性同位元素(RI)から

- その前に

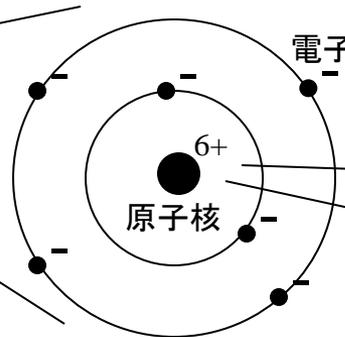
物質の構成要素(原子・原子核)の簡単な復習

原子と原子核—物質の基本要素



ヒト $\sim 10^2$ cm
(1-2メートル)

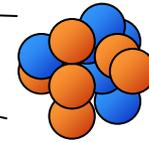
炭素原子(C)



原子 $\sim 10^{-8}$ cm (1億分の1cm)
原子核と電子より成る。
6個の電子が電気力により
炭素原子核と結びついている

炭素原子核 ^{12}C

陽子(1+) 6個
中性子(中性) 6個



クォーク

原子核 $\sim 10^{-13}$ cm
(10兆分の1cm、
原子の大きさの10万分の1)
6個の陽子と6個の中性子が
核力により密に結びついている
(おしくらまんじゅう状態)

元素の周期律表

元素 (陽子数の違いによる分類:
化学的性質を決める)

不活性ガス
(希ガス)

H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F		Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I		Xe	
Cs	Ba	☆	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At		Rn	
Fr	Ra	☆☆	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt											

ハロゲン

アルカリ
金属

☆

☆☆

☆	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
☆☆	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

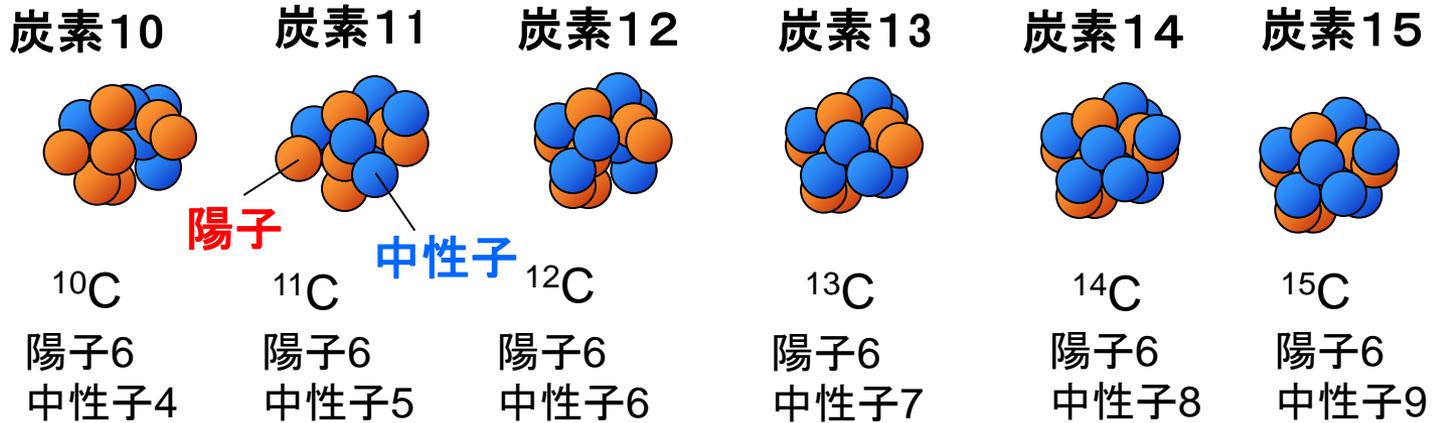
ランタノイド

アクチノイド

同位体 (原子番号 (=陽子数) は同じで中性子数が異なる **原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ

例: 炭素同位体



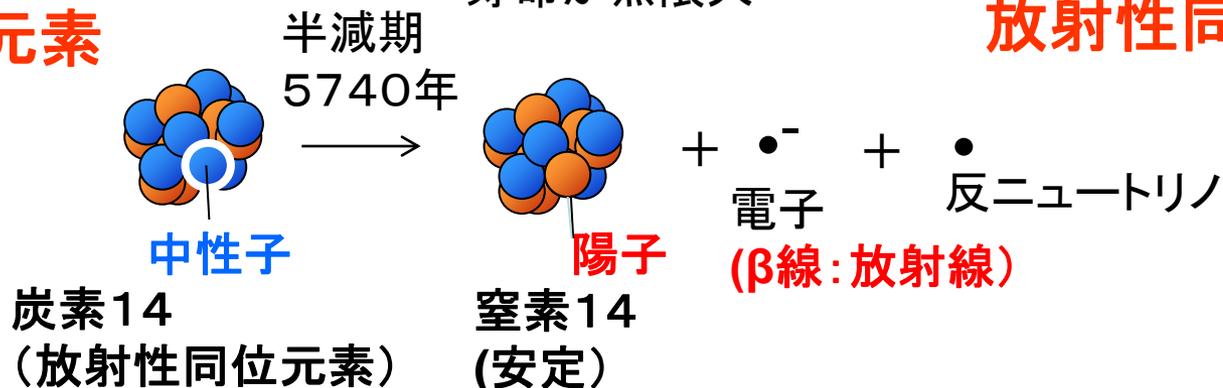
← 陽子過剰になると?
(寿命がある: β崩壊、
電子捕獲)

天然に存在 = **安定同位体**
寿命が無限大

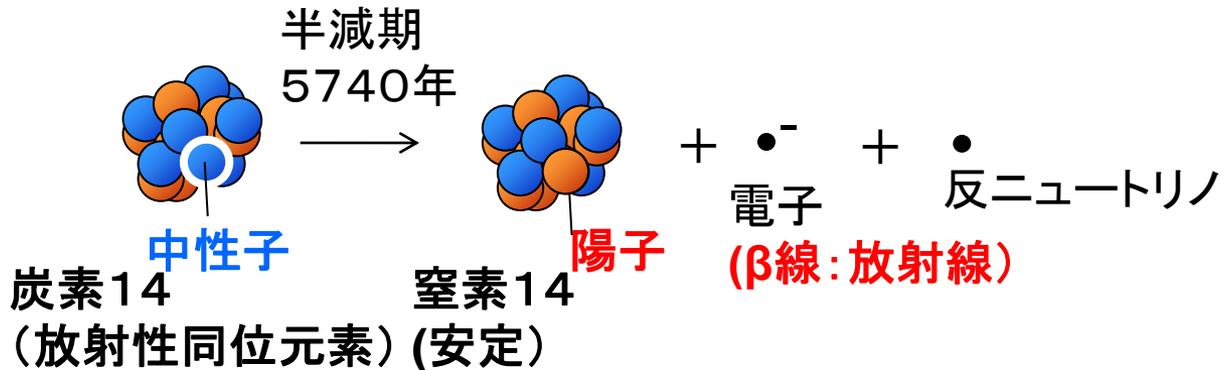
→ 中性子過剰になると、
(寿命がある: β崩壊)

放射性同位元素

放射性同位元素



半減期って何？



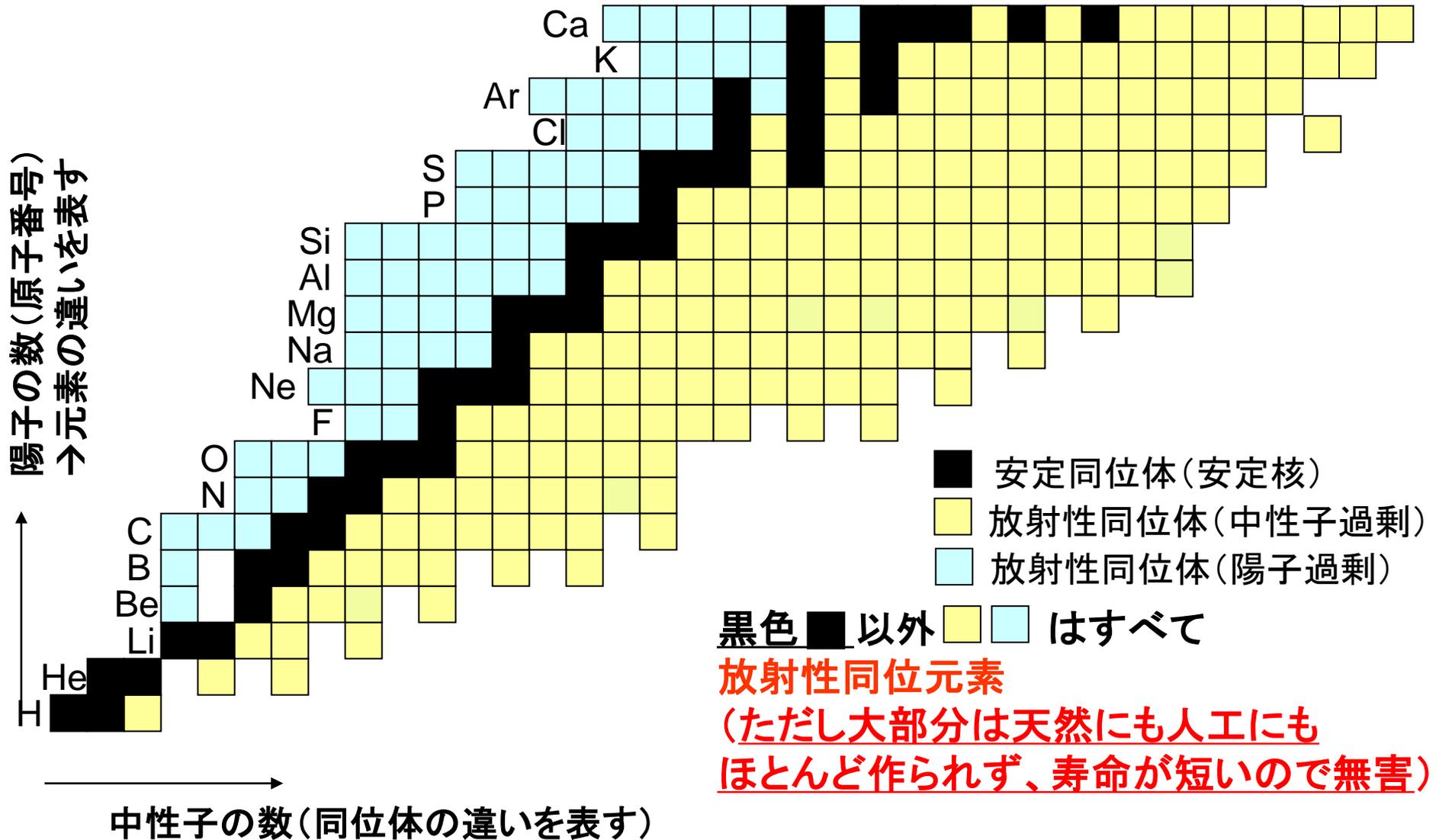
Q. 10000個の炭素14があったとする。5740年後には何個の炭素14が残っているか？

半減期:崩壊によって元の個数が半分になる時間のこと
原子核の微視的構造とベータ崩壊の法則によって決まる

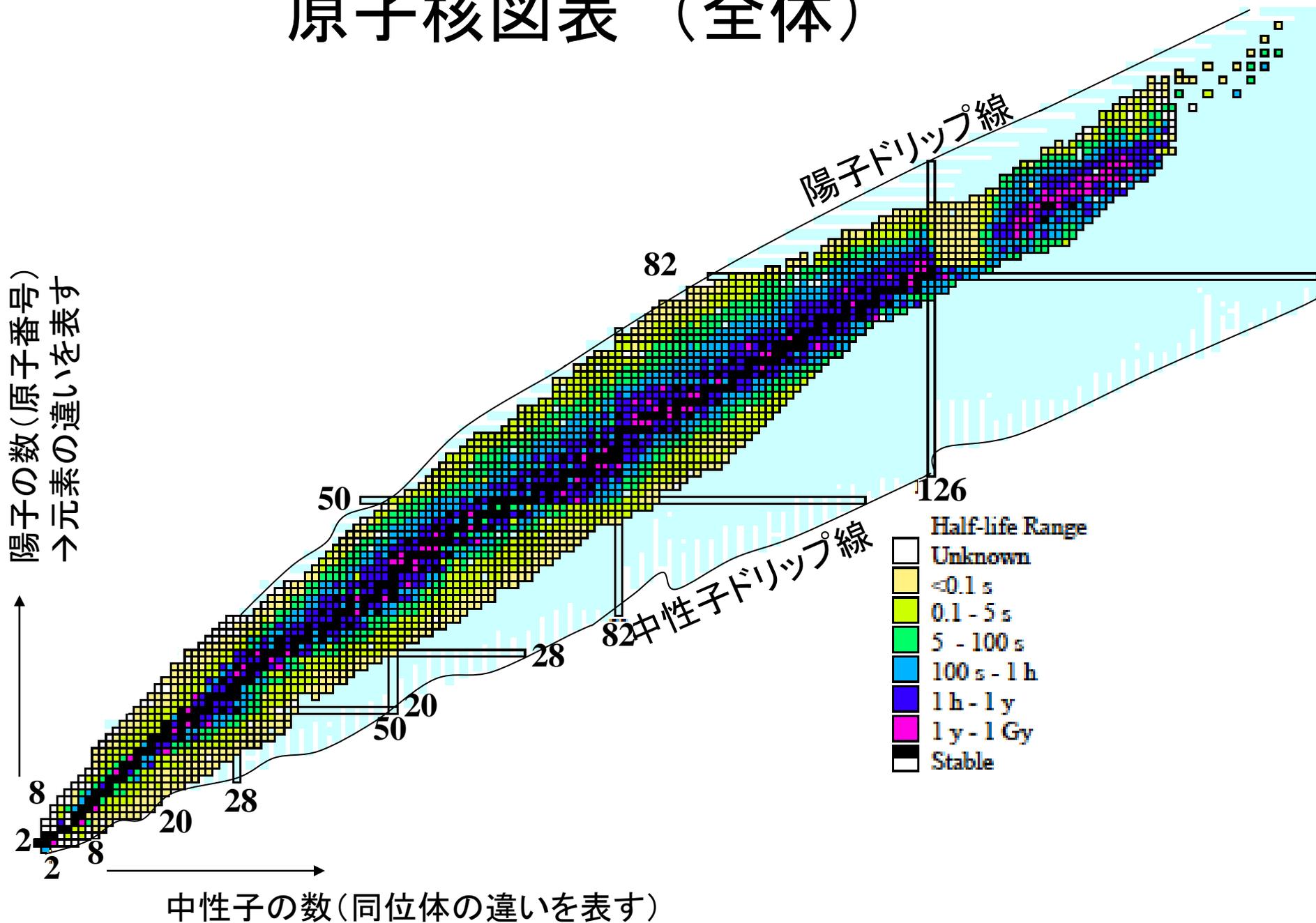
炭素14による年代測定法:

- 炭素14(^{14}C)は宇宙線によって生成される(例えば $^{14}\text{N}+n\rightarrow^{14}\text{C}+p$ 反応など)
- 空気中には絶えず ^{14}C が存在する。(その割合はほぼ一定)
- 炭素14は植物が活着している間 CO_2 として摂取される
- 植物が枯れて炭素を取り込まなくなる
- 時間が経つにつれ ^{14}C が ^{12}C , ^{13}C に比べて少なくなる
- 何年前に枯れたかわかる(植物の生きていた年代がわかる)

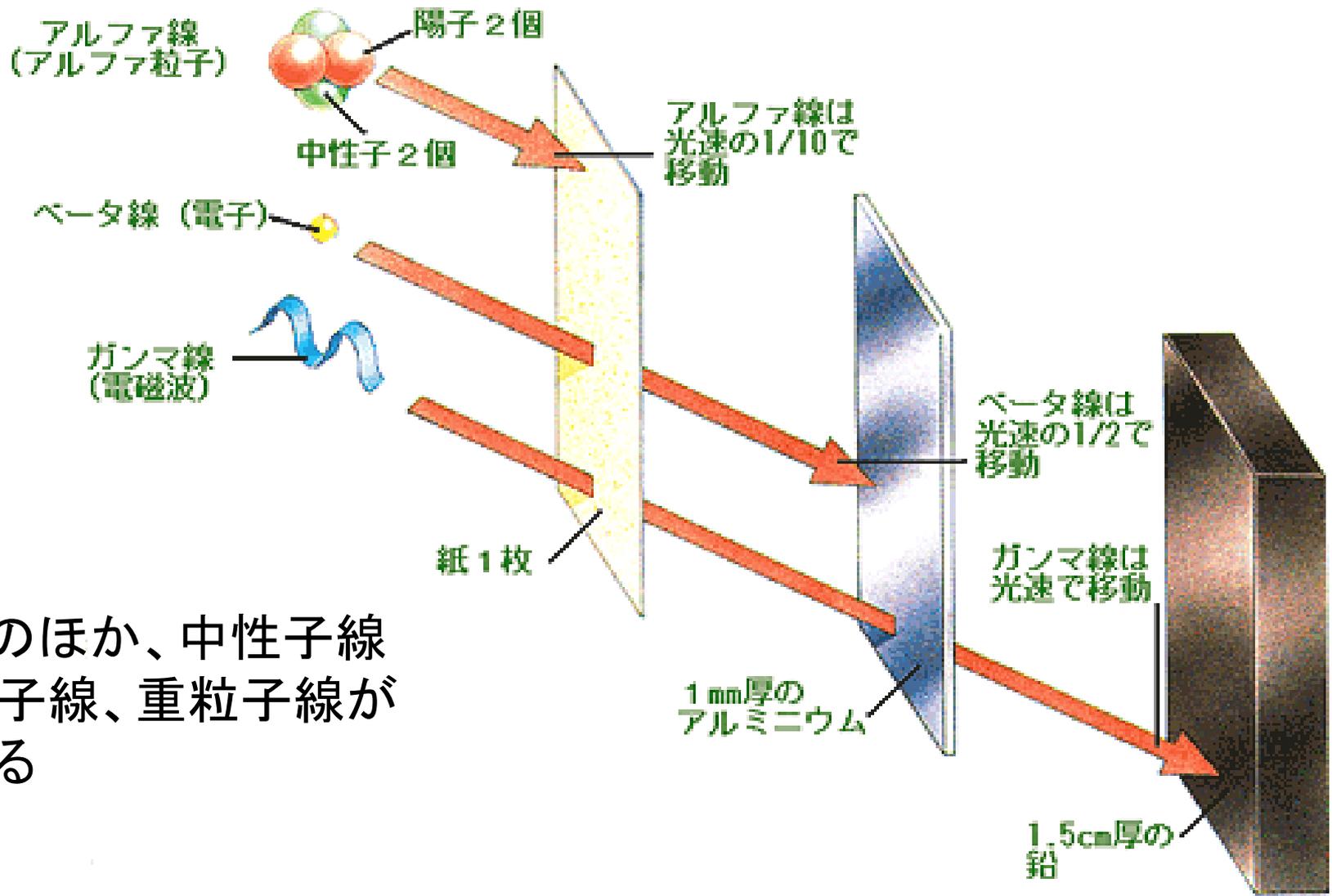
原子核図表 (H—Ca)



原子核図表 (全体)



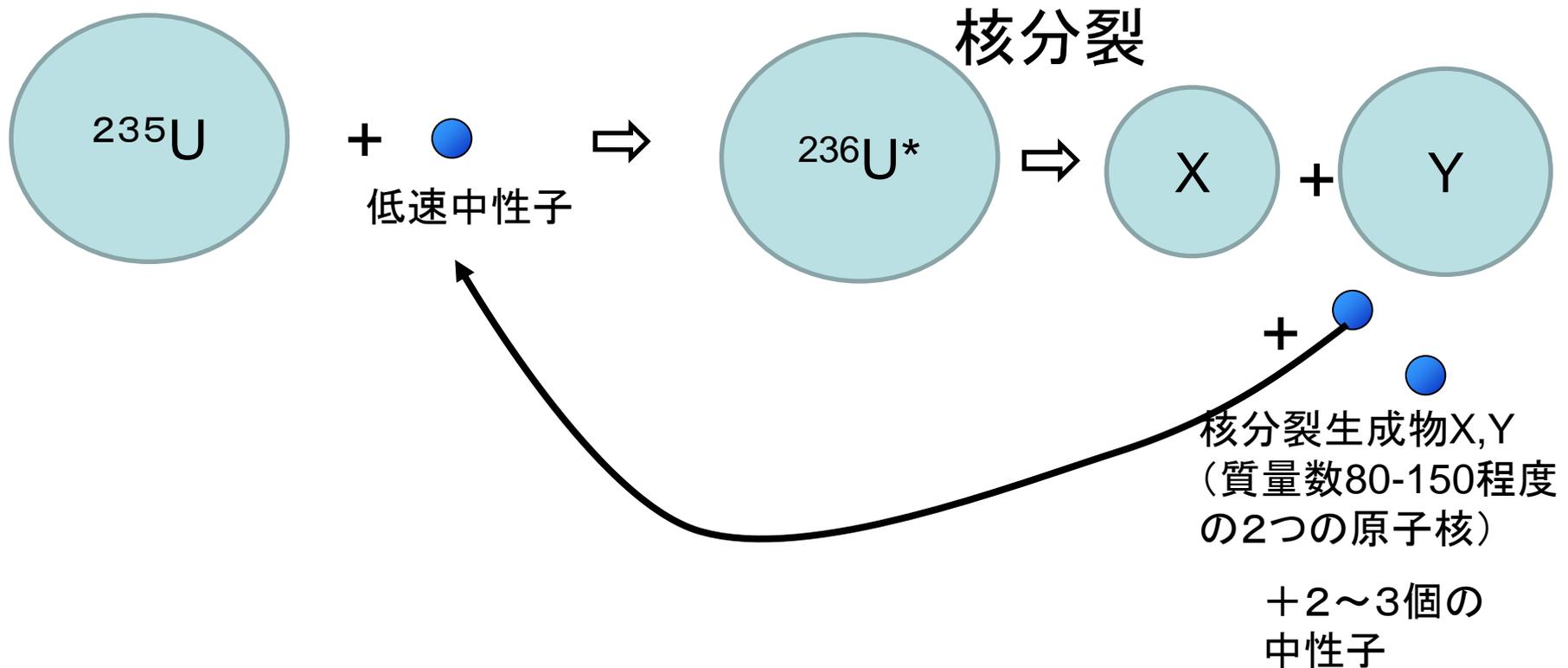
放射線のまとめ: 放射性同位元素(RI)から放出される 高エネルギーの荷電粒子、電磁波(主としてα線、β線、γ線)



このほか、中性子線
陽子線、重粒子線が
ある

(1MeV γ線の吸収長)

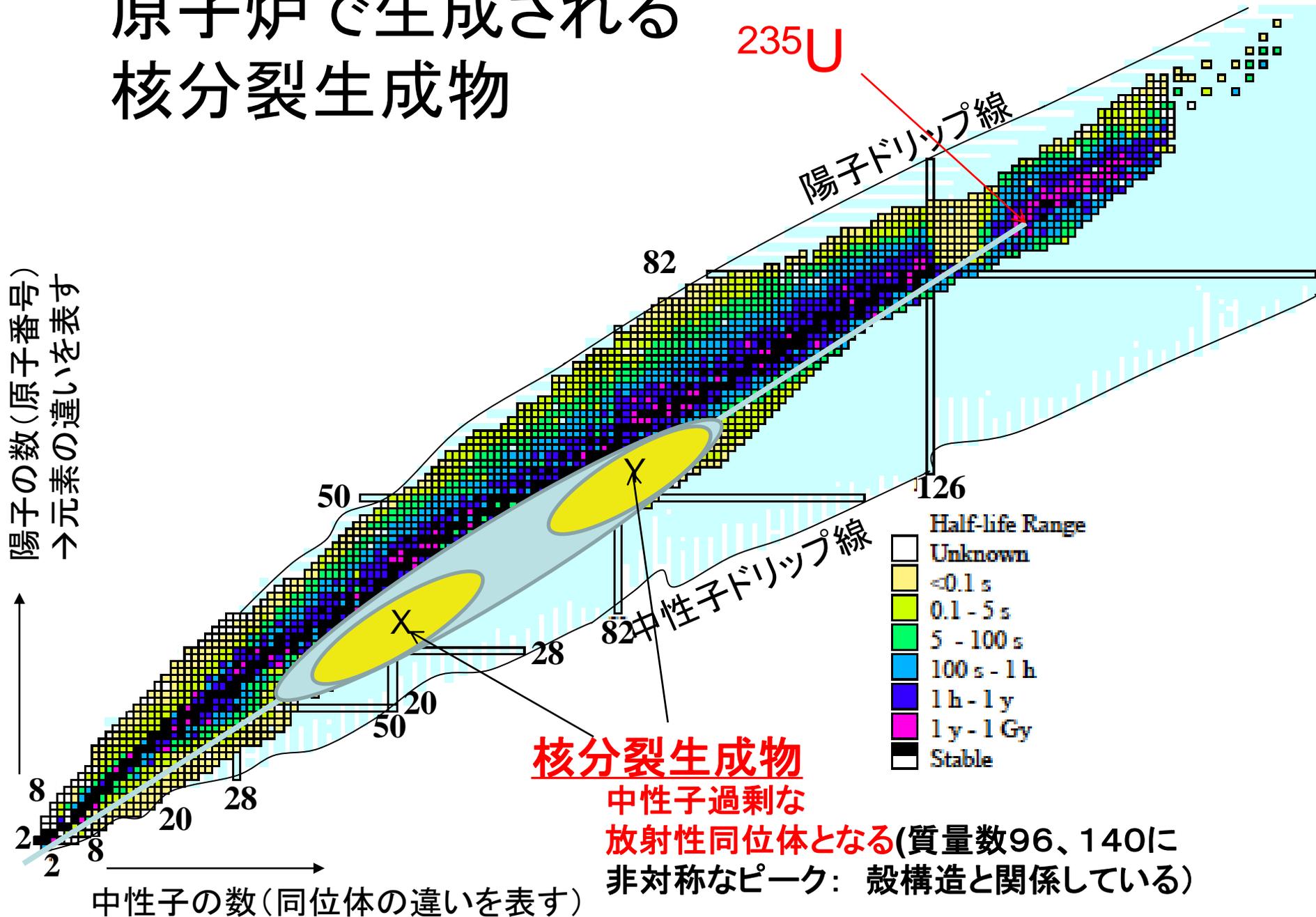
核分裂 (^{235}U)



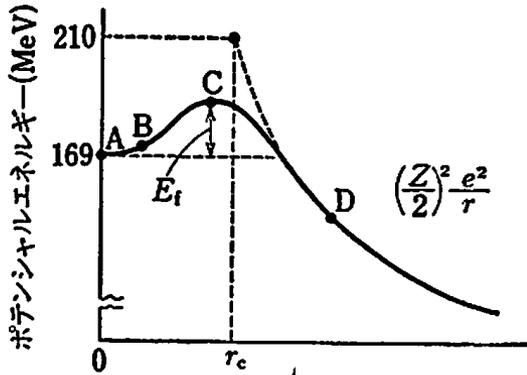
原子炉: ^{235}U を濃縮した燃料(適切な質量、配置)
減速材(軽水炉では水)
制御棒(炭素など、中性子の数をコントロール)

臨界: 上のサイクルが定常的に回ること。エネルギーの連続生成が可能

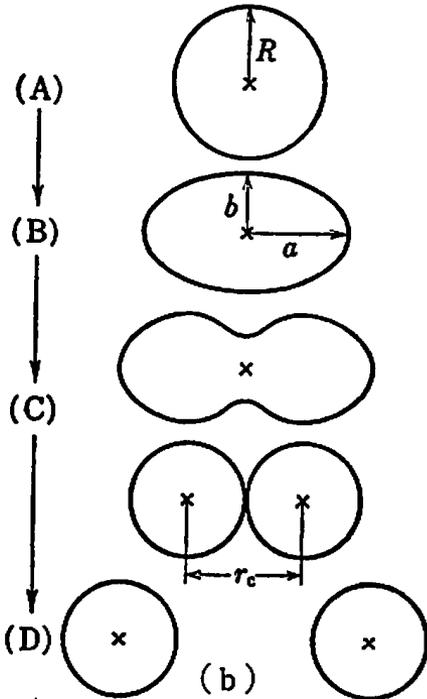
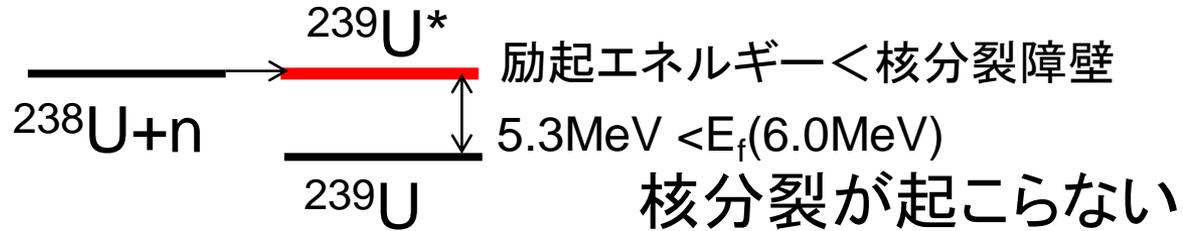
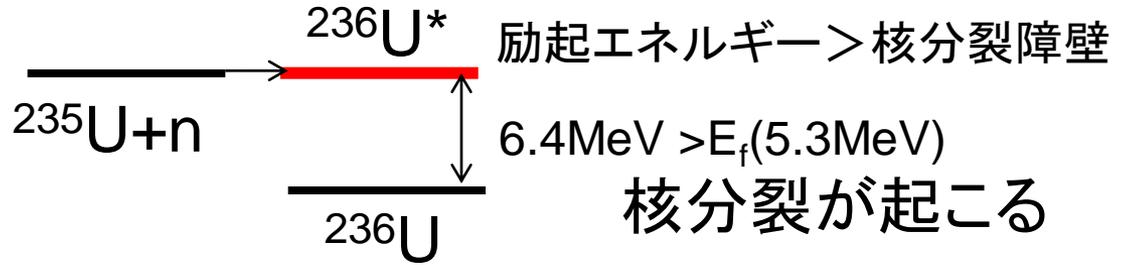
原子炉で生成される核分裂生成物



核分裂モデル



(a) 2重心間の距離



安定性の差: 偶数の陽子、偶数の中性子 (^{238}U など)
 偶数の陽子、奇数の中性子 (^{235}U など)
対相関エネルギーの分、 ^{238}U の方が安定

メモ:

^{235}U : 0.72% 半減期7億3百万年

^{238}U : 99.3% 半減期44億6千万年

遅い中性子による ^{235}U の核分裂エネルギーの平均的な配分

核分裂破片の運動エネルギー	~165 MeV
核分裂中性子の運動エネルギー(2-3個)	~5 MeV
即発の γ 線エネルギー(~5本)	~6MeV
分裂生成物からの β 線のエネルギー(~7本)	~8MeV
分裂生成物からの γ 線のエネルギー(~7本)	~6MeV
ニュートリノの持ち出すエネルギー	~12MeV
核分裂の全エネルギー	~ 202MeV

福島第一原発では地震発生時(3月11日時点)に原子炉は完全停止(すなわち**核分裂は停止**)している
原子炉からのエネルギー(ニュートリノを除く)190MeVのうち、14MeV(7%)が問題になっている。大多数は短い半減期のため崩壊済、現在は1%未満(それでも発熱量は大きい)

少量の放射線量は問題にならない
と言った
→ではどのくらいは許容できる？

放射線の単位

- 放射能(単位時間の崩壊数)

Bq (=1/s) ベクレル

(昔は。。。Ci(キュリー): 3.7×10^{10} Bq =ラジウム(Ra) 1gの放射能)

- 吸収線量 kgあたりの放射線の吸収エネルギー

Gy (=J/kg) グレイ

(昔はrad=0.01Gy)

- 線量当量(生物学的影響の強さを加味した吸収線量)

等価線量、実効線量

Sv シーベルト

$$Sv = Gy \times Q$$

Q:生物学的影響を加味した係数
x線γ線β線:x1, α線:x20

1人が通常受けている放射線

世界平均： 2.4mSv/年=2400 μ Sv/年

人が受ける放射線の影響：積算量で考えてください
年何mSvか？を計算

線源	外部被曝 (mSv/y)	内部被曝 (mSv/y)	合計 (mSv/y)
宇宙線電離成分	0.30		0.30
中性子成分	0.055		0.055
宇宙線生成核種		0.015	0.015
原始放射性核種			
^{40}K	0.15	0.18	0.33
^{87}Rb		0.006	0.006
^{238}U 系列	0.1	1.24	1.34
^{232}Th 系列	0.16	0.18	0.34
合計	0.8	1.6	2.4

UNSCEAR1988

これに加えて医療被曝(X線検診等)がある 0.6mSv/回(胃X線)6.9mSv/回(CT)

《 日常生活と放射線 》

放射線の量 (マイクロシーベルト) $\mu\text{Sv}/\text{年}$ (または $\mu\text{Sv}/\text{回}$)

引き上げ後の上限
[250,000マイクロシーベルト/年]

緊急作業従事の場合に認められている上限

[100,000マイクロシーベルト/年]

放射線業務従事者及び防災に係る警察・消防従事者に認められている上限

[50,000マイクロシーベルト/年]

胸部X線コンピュータ断層撮影検査 (CTスキャン) (1回)

[6,900マイクロシーベルト/回]

[10,000マイクロシーベルト/年]

ブラジル・ガラバリの放射線 (年間、大地などから)

10,000



一般公衆の線量限度 (年間) (医療は除く)

[1,000マイクロシーベルト/年]

1,000



胃のX線集団検診 (1回)

[600マイクロシーベルト/回]

[2,400マイクロシーベルト/年]



1人当たりの自然放射線 (年間) (世界平均)

結果 神奈川

国内自然放射線の差 (年間) (県別平均値の差の最大)

[400マイクロシーベルト/年]



東京 - ニューヨーク航空機旅行 (往復) (高度による宇宙線の増加)

[200マイクロシーベルト/往復]



100



[50マイクロシーベルト/回]

胸のX線集団検診 (1回)

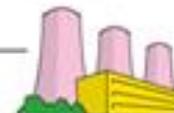
[22マイクロシーベルト/年]

再処理工場からの放射線物質の放出による評価値 (年間)

[10マイクロシーベルト/年]

クリアランスレベル導出の線量目安値 (年間)

10



[50マイクロシーベルト/年]

原子力発電所 (軽水炉) 周辺の線量目安値 (年間)

(実績ではこの目安値を大幅に下回っています)

※ Sv【シーベルト】=放射線の種類による生物効果の定数(※) × Gy【グレイ】

※ X線、γ線では 1

被曝の種類

外部被曝 体外からの放射線によるもの
 γ 線が主にきく

α 粒子の空気中の飛程: 5MeVで3.5cm
→紙1枚で十分止まる

β 線: Al中での飛程: 0.5MeV(^{90}Sr)で1.5mm ($\sim 1\text{g/cm}^2$)

内部被曝 体内からの放射線によるもの
 α 線、 β 線がきく

内部被曝

1. 経口摂取(飲食)
2. 吸入 (呼吸から、放射線作業の事故で最も多い)
3. 経皮侵入(傷口から)

臓器親和性	核種	臓器親和性
	トリチウム(HTO)	全身
	^{55}Fe	造血器、肝臓、脾臓
	^{60}Co	肝臓、脾臓
	^{90}Sr	骨
	$^{125},^{131}\text{I}$	甲状腺
	^{137}Cs	全身(筋肉)
	^{222}Rn	肺
	^{226}Ra	骨
	^{232}Th	骨、肝臓
	^{238}U	骨、肝臓

放射性物質の体内からの排泄促進:

安定ヨウ素剤(KIヨウ化カリウム): 放射性ヨウ素が甲状腺に集積する前に安定核のヨウ素で甲状腺を充たし、放射性同位元素の沈着を防ぐ。

→医師の指示に従う、処方箋(現在の量ではありえないが)!

ちまたのヨウ素は有害なものも混じっている

補足 確定的影響と確率的影響

一度に0.1Sv以上の放射線を被ばくすると“**確定的影響**”が出る。
(原爆被害のような特殊な場合)

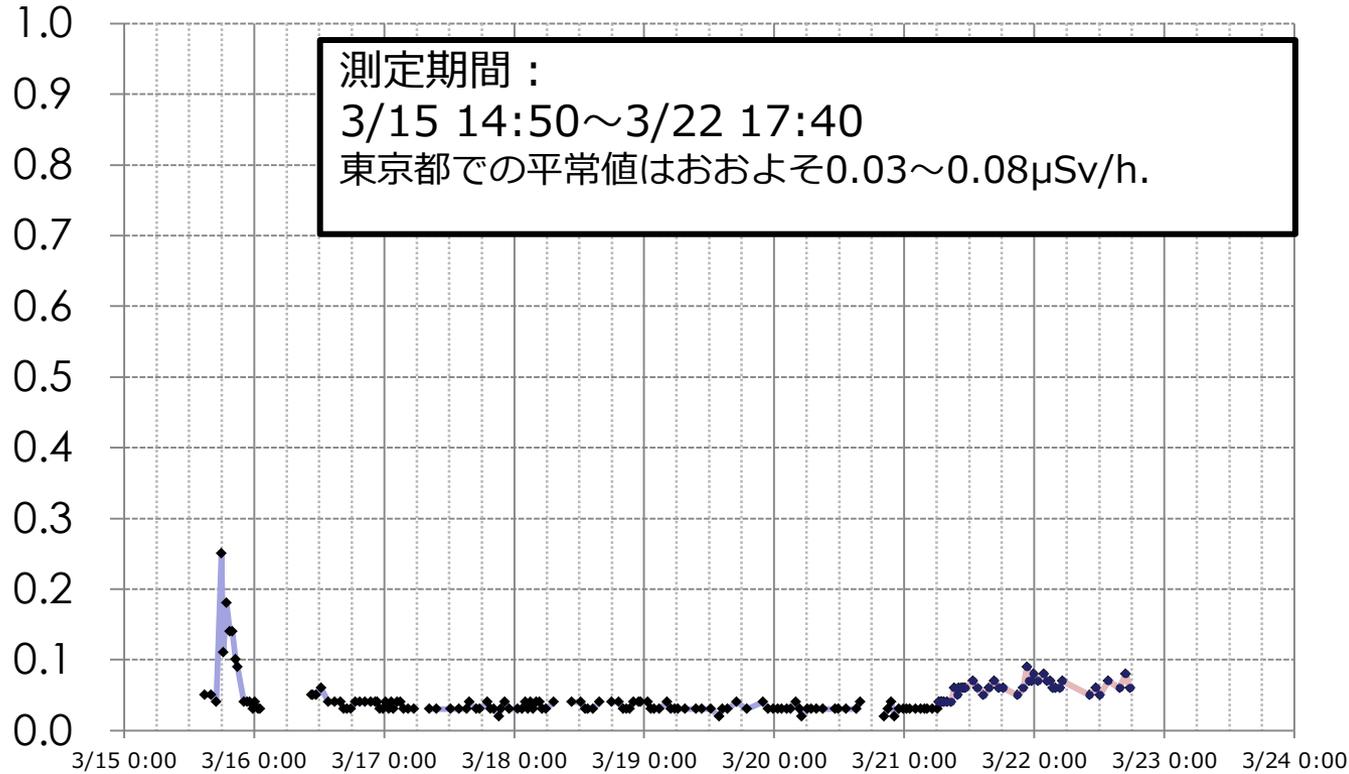
今回のような100 μ Sv/h 以下 (東京では1 μ Sv/h以下)
の場合は“**確率的影響**”のみ考えればよい

致死ガンの確率	1mSv→ 0.005%の増加
遺伝的影響の確率	1mSv→0.002%の増加

国際放射線防護委員会 (ICRP) 1990年勧告

μSv/h

γ線量@東工大南5号館屋上



by 河田
2011/3/15—22

参考数値

自然界から人ひとりが受ける放射線量 2400μSv/年

(つまり、通常1日あたり平均約6.6μSv、1時間あたり平均約0.27μSvの線量を受けている*)

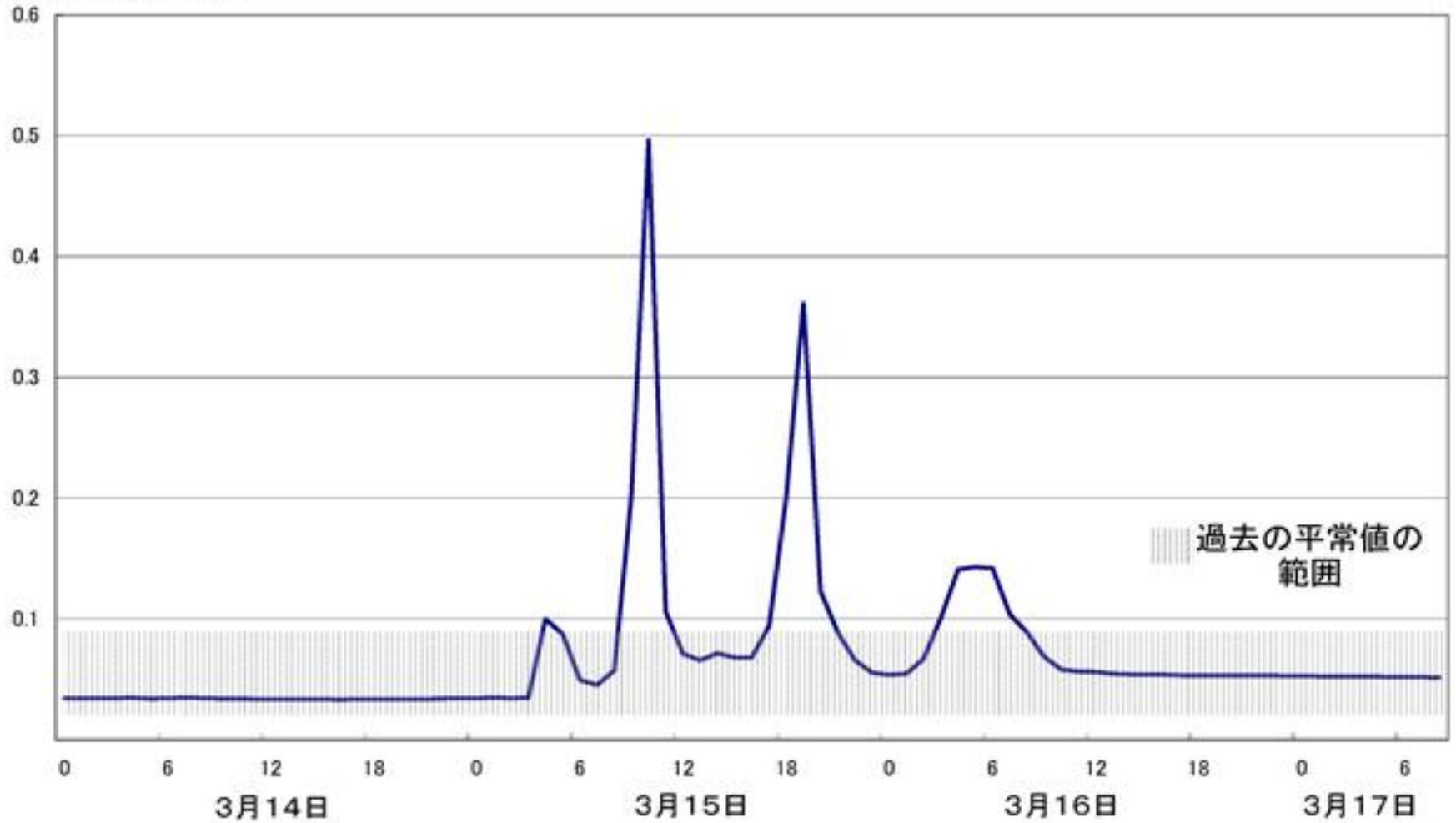
ひとりが産業活動によって受ける放射線量限度 1000μSv/年

CTスキャン 6900μSv/1回

*もともと体内にはカリウム40などの放射性同位元素が含まれていることなどにより、空間線量より大きくなる

東京都の環境放射能水準

マイクロシーベルト毎時



自分の受けた放射線量を計算してみる

仮に1 μ Sv/h を3時間受けたとする(外部被ばく)

$$1\mu\text{Sv}/\text{時} \times 3\text{時間} = \underline{3\mu\text{Sv}}$$

年間の線量が2400 μ SV なので1000分の1程度増えるだけ。

内部ひばくを考える際の例

4100 Bq/Kg > 2000 Bq/Kg 暫定基準値 (茨城県産検体の一つ、厚労省)

成人1日あたりの平均20gのホウレンソウ:

$$4100\text{Bq} \times 20\text{g}/1000\text{g} \times 1.6 \times 10^{-5}\text{mSv}/\text{Bq} (\text{換算係数}) = 1.3\mu\text{Sv}$$

(甲状腺の場合: 26 μ Sv) → 問題なし

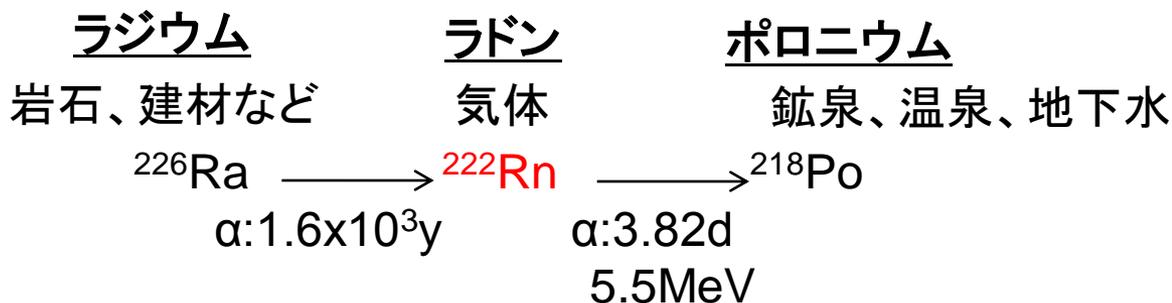
換算係数, 暫定基準値 → 厚生労働省のホームページ

<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf>

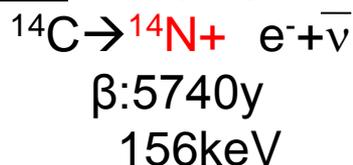
一つの目安: 年間で余分に数mSv程度増えても
健康に影響がないと思ってよい。

(世界: 場所による変動: 1mSv—10mSvあるが、ガン発生率に
差があるという報告はない)

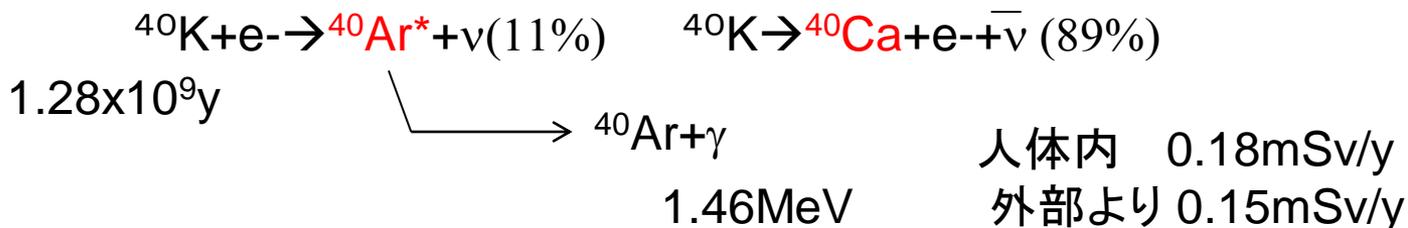
主な放射性同位元素:(天然に存在するもの)



炭素14: 宇宙線により生成され空気中に存在(年代測定に使用)

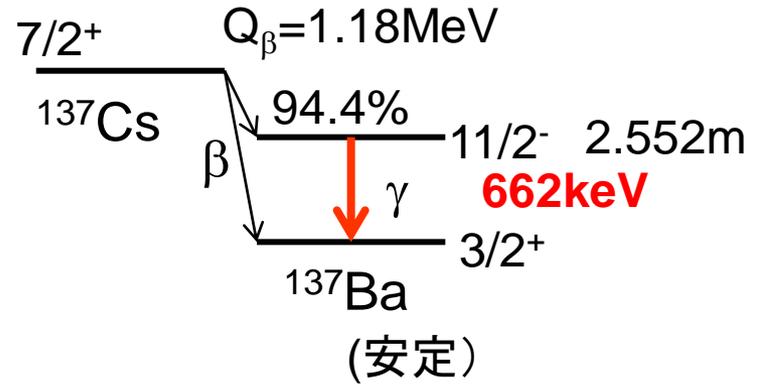


カリウム40: 太陽系の開始時点より存在(天然存在比0.0117%)

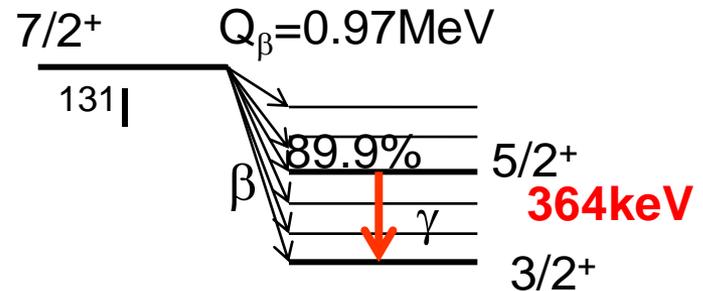


主な放射性同位元素(核分裂生成物:福島原発から来る可能性有)

^{137}Cs (セシウム137: $Z=55, A/Z=2.49$)
半減期**30.17年**



^{131}I (ヨウ素131: $Z=53, A/Z=2.47$)
半減期**8.02日 (揮発性)**



Q. 同じ個数のヨウ素131とセシウム137がある。
Bq数の比は？

A. 時間あたり崩壊確率 $\propto 1/(\text{半減期})$
なので $30.17 \times 365 / 8.02 = 1370$ 倍
 ^{131}I が大きい

その他

^{90}Sr (ストロンチウム90) 半減期28.8年 β 線0.54MeV, 2.28MeV

^{133}Xe (キセノン133, $Z=54$, 5.24d, 80.997 keV 希ガス)

^{85}Kr (クリプトン85) 半減期10.7年 (希ガス)

^{89}Sr ($Z=38$; 50.5d), ^{140}Ba ($Z=56$; 12.8d), ^{106}Ru (44; 367d), ^{95}Zr ($Z=40$; 64d)

まとめ

- 放射線： α 線、 β 線、 γ 線、その他宇宙線など
放射性同位元素：天然 ^{14}C 、 ^{40}K 、 ^{222}Rn など、核分裂 ^{131}I 、 ^{137}Cs など
- 放射線は天然にも存在する身近なもの。
年に2.4mSV(ミリシーベルト) (=2400 μ SV)
これに年数mSV程度加算されても気にしなくてもよい。
(世界的には1mSv—10mSvくらいの範囲である)
- 受けた放射線の量は自分で計算できる。(時間あたりの放射線量は
文部科学省のホームページからチェックできる。
radmonitor311(<http://sites.google.com/site/radmonitor311>)も有用
- 体内ひばくと体外ひばくがある。
- スリーマイルの事故、チェルノブイリの事故：
精神的ストレスの問題が最も深刻であった
→ 知識をもち自分で判断する。うわさ(過剰報道)には耳をかさない
→ 適切な情報発信・教育の必要性
- 科学者の貢献が求められている。(放射線の調査、放射線分布の予測、原子炉の状況の科学的な分析、科学的な分析に基づく情報の発信)

別表4 経口摂取による実効線量及び甲状腺等価線量への換算係数
(線量係数) (mSv/Bq).

線 量 係 数					
核 種	乳 児	幼 児	少 年	青 年	成 人
Sr-89	3.6×10^{-5}	8.9×10^{-6}	5.8×10^{-6}	4.0×10^{-6}	2.6×10^{-6}
Sr-90	2.3×10^{-4}	4.7×10^{-5}	6.0×10^{-5}	8.0×10^{-5}	2.8×10^{-5}
I-131	1.4×10^{-4}	7.5×10^{-5}	(3.8×10^{-5})	(2.5×10^{-5})	1.6×10^{-5}
I-133	3.8×10^{-5}	1.7×10^{-5}	(7.2×10^{-6})	(4.9×10^{-6})	3.1×10^{-6}
Cs-134	2.6×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-5}
Cs-137	2.1×10^{-5}	9.7×10^{-6}	1.0×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-4}
U-234	3.7×10^{-4}	8.8×10^{-5}	7.4×10^{-5}	7.4×10^{-5}	4.9×10^{-5}
U-235	3.5×10^{-4}	8.5×10^{-5}	7.1×10^{-5}	7.0×10^{-5}	4.7×10^{-5}
U-238	3.4×10^{-4}	8.0×10^{-5}	6.8×10^{-5}	6.7×10^{-5}	4.5×10^{-5}
Pu-238	4.0×10^{-3}	3.1×10^{-4}	2.4×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.3×10^{-4}
Pu-239	4.2×10^{-3}	3.3×10^{-4}	2.7×10^{-4}	2.4×10^{-4}	2.5×10^{-4}
Pu-240	4.2×10^{-3}	3.3×10^{-4}	2.7×10^{-4}	2.4×10^{-4}	2.5×10^{-4}
Pu-241	5.6×10^{-5}	5.5×10^{-6}	5.1×10^{-6}	4.8×10^{-6}	4.8×10^{-6}
Pu-242	4.0×10^{-3}	3.2×10^{-4}	2.6×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.4×10^{-4}
等 価 線 量 (甲 状 腺)					
核 種	乳 児	幼 児	少 年	青 年	成 人
I-131	2.8×10^{-3}	1.5×10^{-3}	(7.6×10^{-4})	(5.0×10^{-4})	3.2×10^{-4}
I-133	7.3×10^{-4}	3.3×10^{-4}	(1.4×10^{-4})	(9.3×10^{-5})	5.9×10^{-5}

ICRP-56(1989),- 67(1993),-69(1995),- 72(1996)より引用。()内の数値はICRP-72(1996)及び「環境放射線モニタリングに関する指針」(平成12年8月一部改訂2000)を基に年齢補正を行った試算値。

(出典：平成12年度厚生科学特別研究「原子力施設の事故等緊急時における食品中の放射能の測定と安全性評価に関する研究」)

「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」より

(致命的)甲状腺がんの確率:0.08%/Sv 20g 4000Bq/kg→26μSv

<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf>

補足メモ ヨウ素の同位体： 日～年の半減期の同位体に注意

ヨウ素($Z=53$)の半減期 (A:偶数:奇奇核 質量重い
→ Q_{β} 大→崩壊確率大(短寿命))

^{128}I : 24.99m

^{129}I : $1.57 \times 10^7 \text{y}$ ($E_{\gamma}=40\text{keV}$)

^{130}I : 12.36h

^{131}I : 8.03d,

^{132}I : 2.295 h,

^{133}I : 20.8h,

^{134}I : 52.6m