

東京大学アグリコクーン 農における放射線影響フォーラムグループ (FG6)
農業環境における放射線影響ゼミナール／農業環境の放射線影響
講義資料 (150603 増補改訂)

第2回 放射性物質・放射線の基礎

第3回 放射線の人体影響の基礎

東京大学大学院 農学生命科学研究科
放射性同位元素施設/放射線植物生理学研究室
廣瀬 農

放射線の基礎

放射線とは？

原子より小さな何らかの**粒子**が

一般的な状態の数千倍以上の**エネルギー**を持って運動しているもの

物質を通過する際に**電離**を起こす

代表的な放射線の粒子

α 線 \rightarrow 陽子2個 + 中性子2個の塊
(=ヘリウムの原子核)

β 線 \rightarrow 電子

γ 線 \rightarrow 光子 (フォトン)

放射線の運動エネルギーの例

粒子

エネルギー

可視光線

光子

3eV前後

^{137}Cs の γ 線

光子

662keV

粒子は同じだが

可視光線の20万倍のエネルギー

放射線と物質の相互作用

何らかの物質に放射線が入射すると
物質にエネルギーを与え
放射線のエネルギーは低下する

この相互作用のメカニズムと程度が物質の種類と
放射線の粒子およびエネルギーによって異なる

放射線と物質の相互作用

電荷を持つ粒子（原子核、電子、ミューオンなど）

→ 移動経路に沿って周囲の原子を電離（イオン化）する。

電荷を持たない粒子（光子、中性子など）

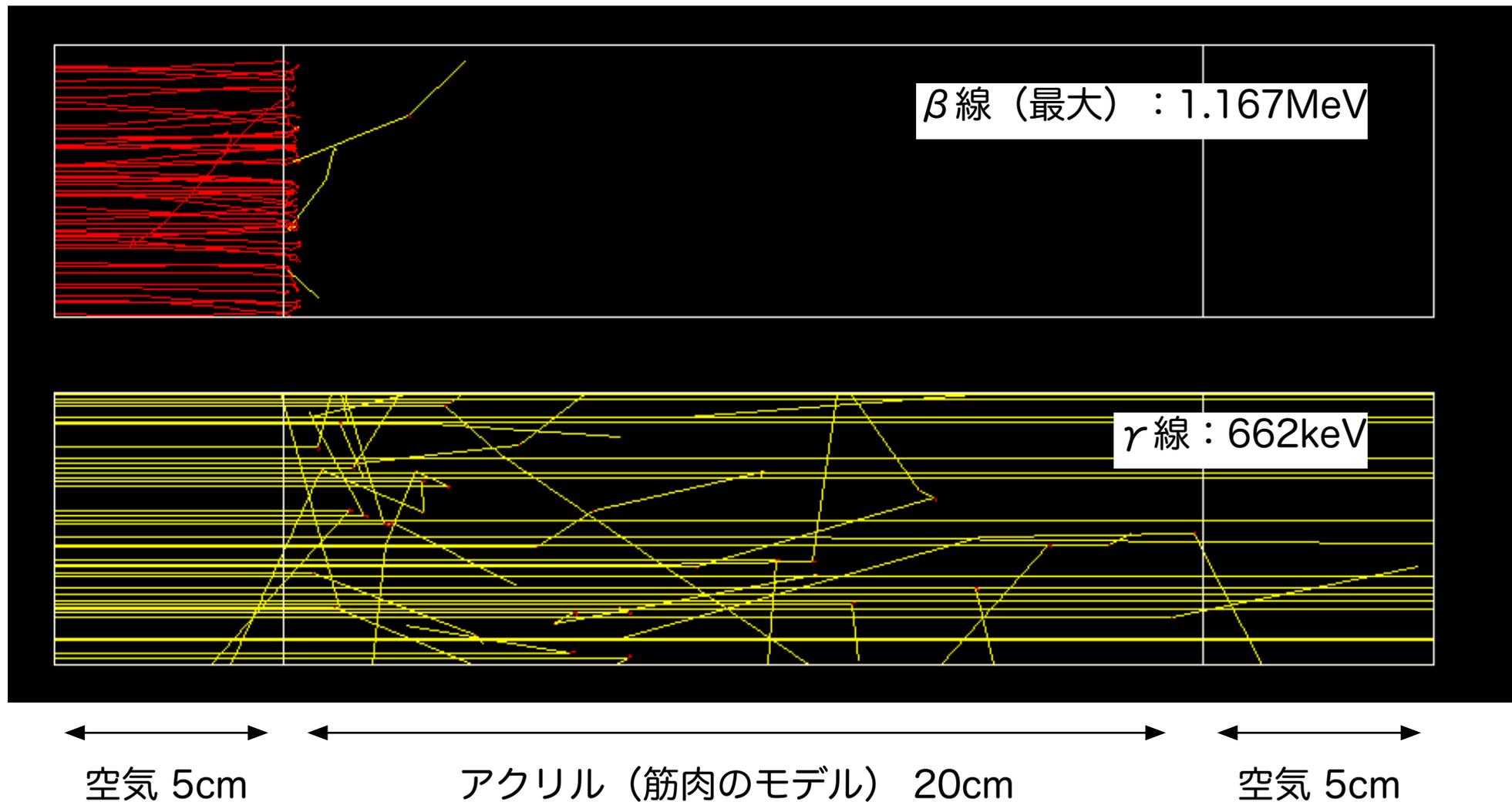
→ 物質を素通りしつつ、ごく稀に物質を構成する粒子と衝突する。

→ 電荷を持つ粒子がはじき飛ばされた場合、この粒子が電離を起こす。

EGSによる ^{137}Cs の放射線シミュレーション

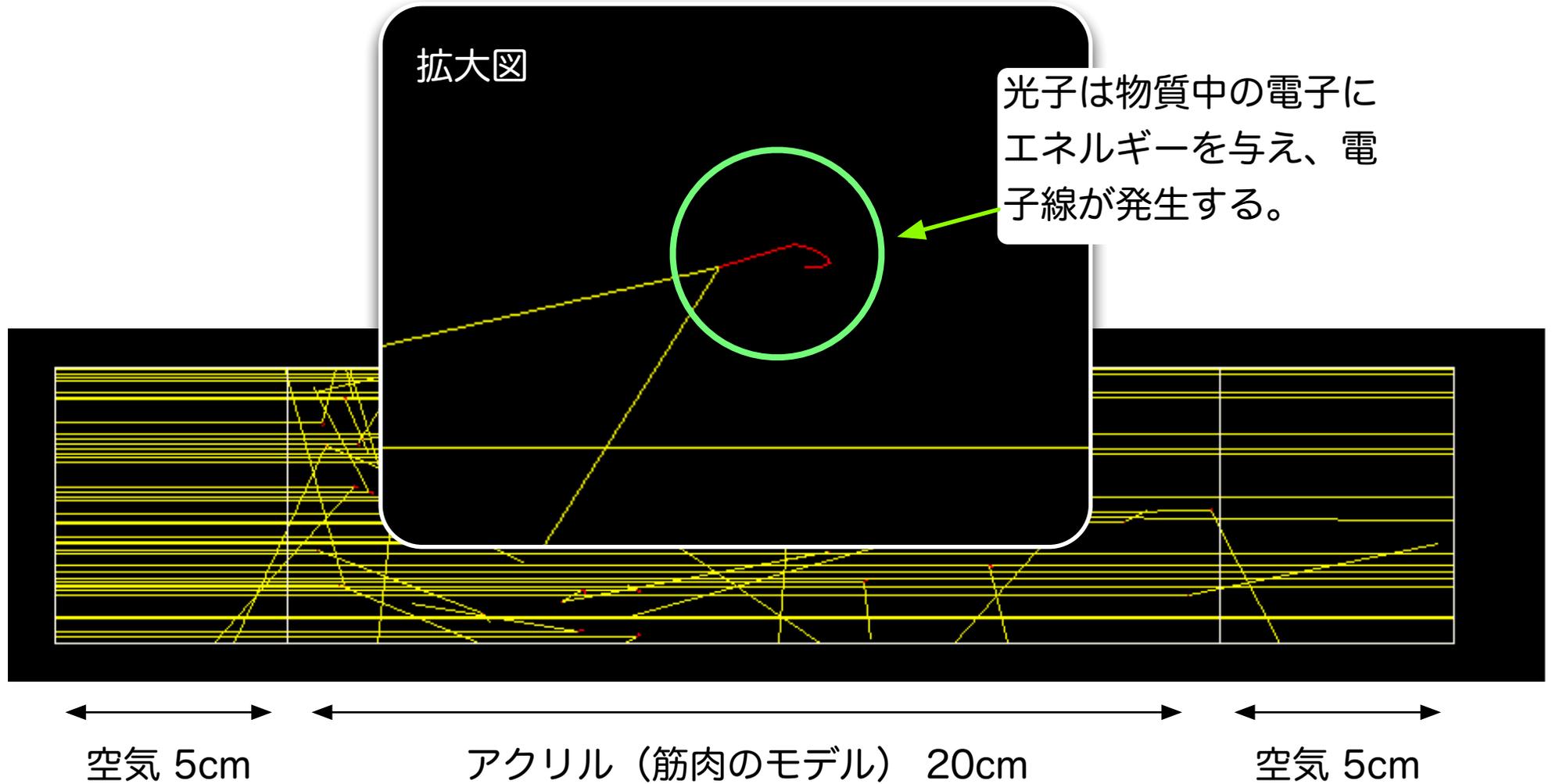
放射線が左から入射 →

赤：電子線 黄：光子線

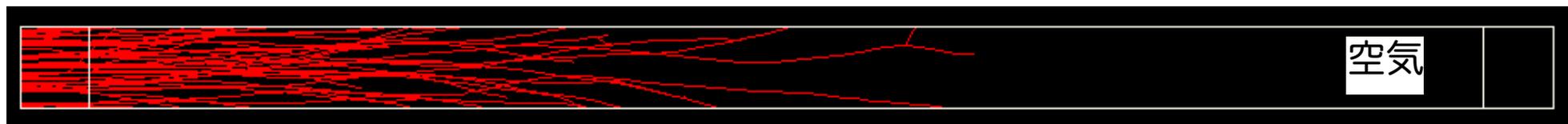


EGSによる ^{137}Cs の放射線シミュレーション

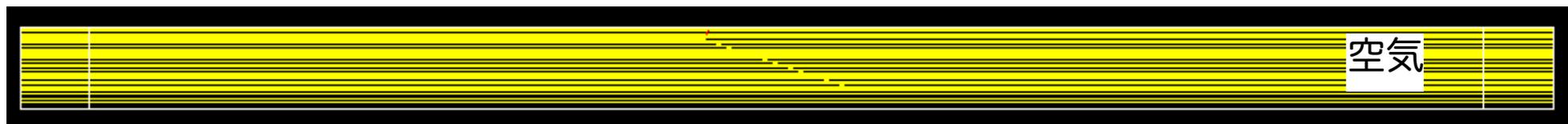
赤：電子線 黄：光子線



EGSによる ^{137}Cs の放射線シミュレーション



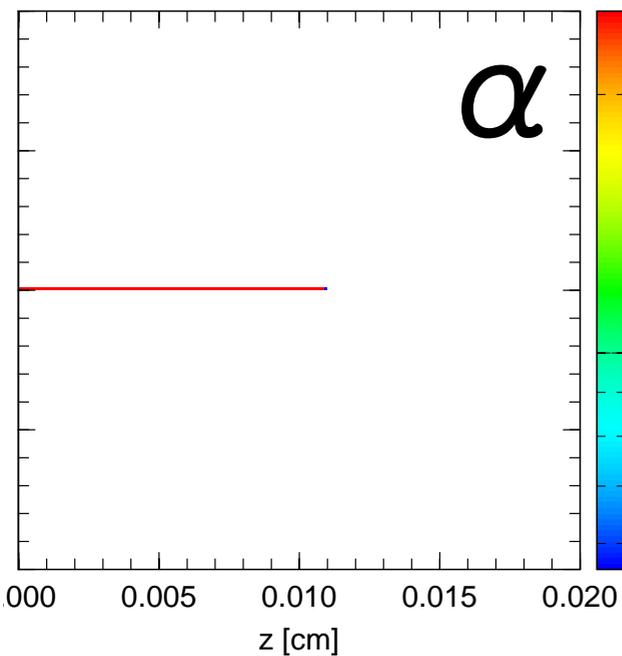
1m



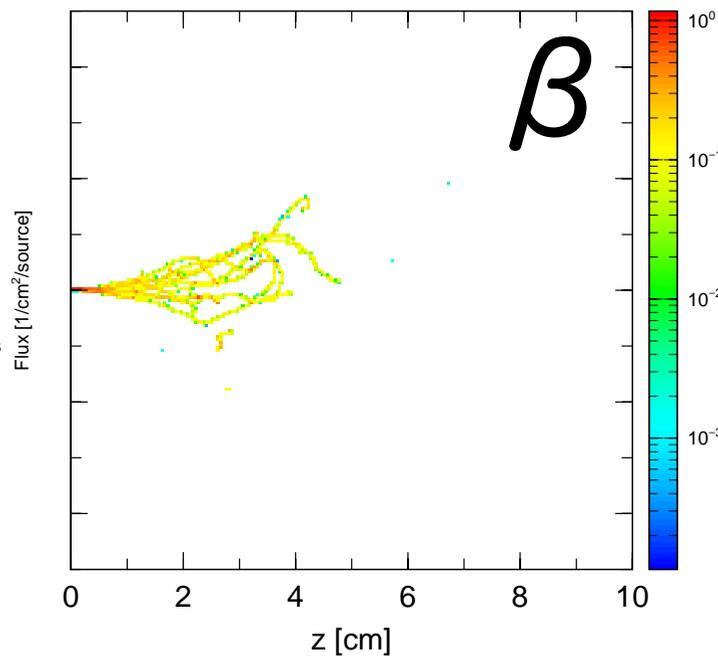
1m

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

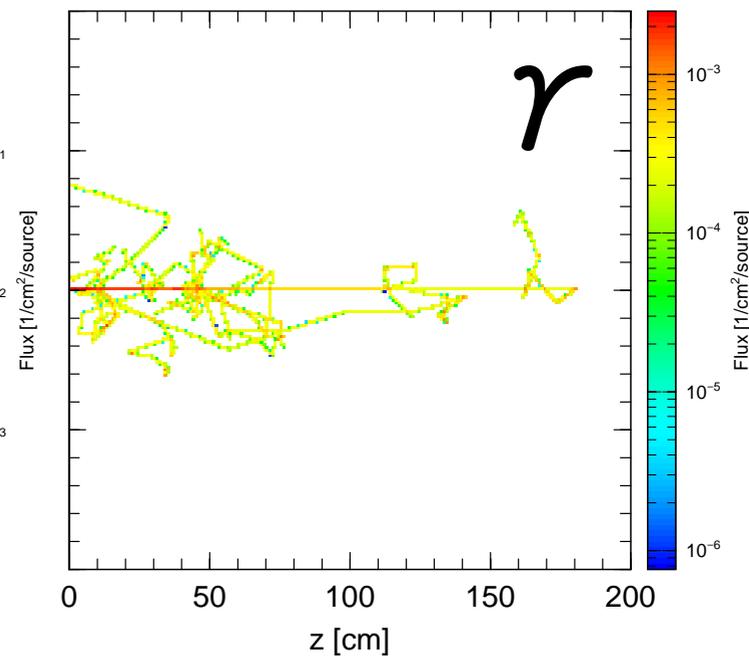
1) 粒子による飛跡の違い



10MeV(10000keV)の α 線の飛跡 (水中)



10MeV(10000keV)の β 線の飛跡 (水中)



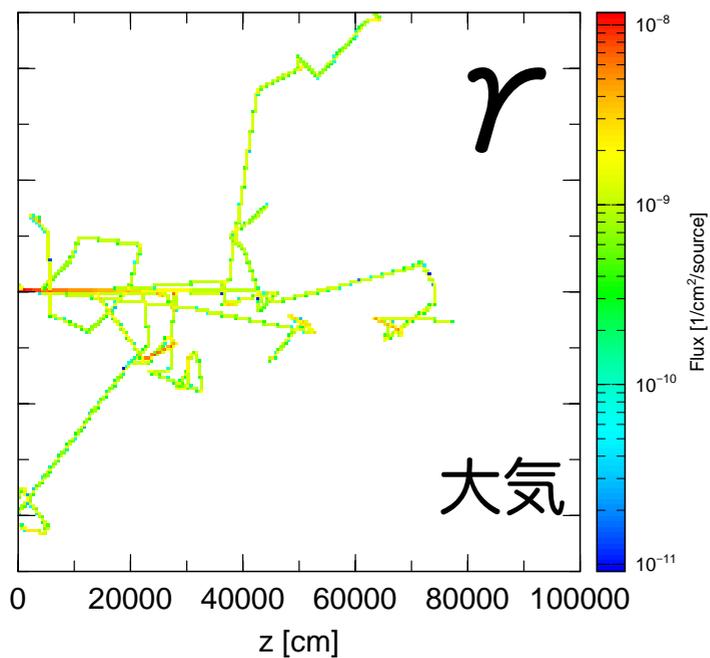
10MeV(10000keV)の γ 線の飛跡 (水中)

各粒子10回試行した際の飛跡を表示。同じ運動エネルギーでも、粒子によって到達距離は大きく異なる。

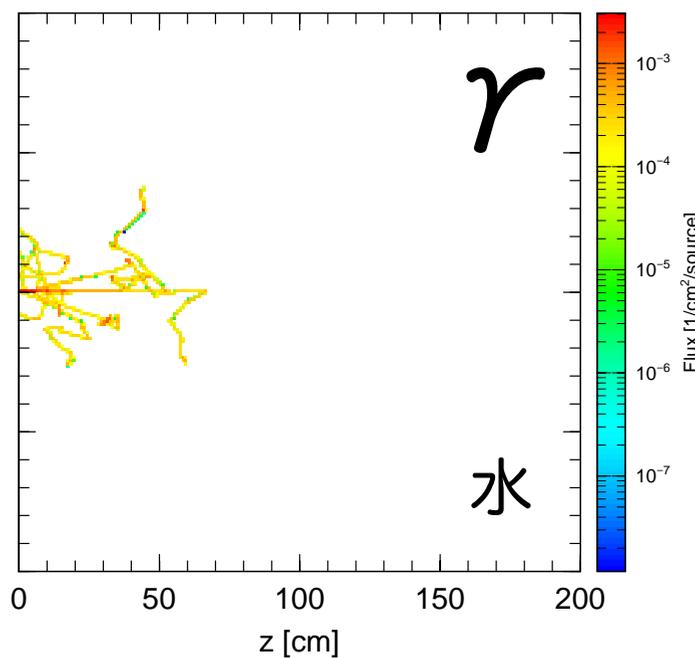
α 線は飛程は短い、狭い範囲に集中してエネルギーを与える。
逆に γ 線は広い範囲に少しずつエネルギーを与える。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

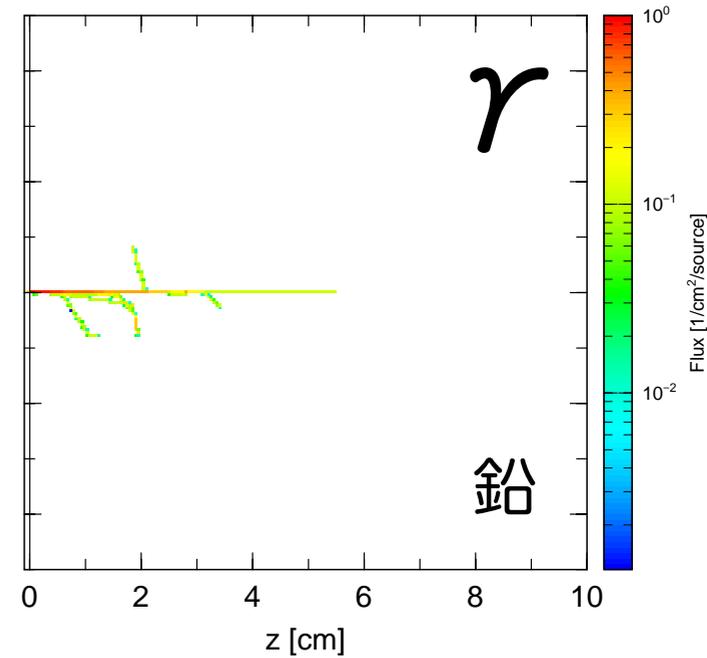
2) 物質による飛跡の違い



1MeV (1000keV) の γ 線の飛跡 (大気中)



1MeV(1000keV)の γ 線の飛跡 (水中)



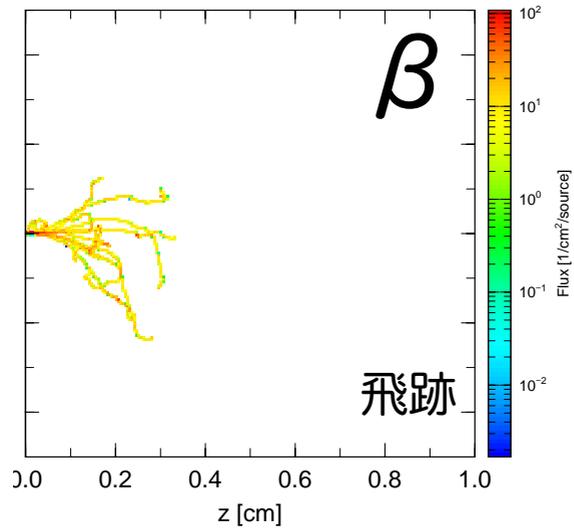
1MeV(1000keV)の γ 線の飛跡 (鉛中)

同じ粒子・同じ運動エネルギーの放射線でも、通過する物質によって到達距離は異なる。

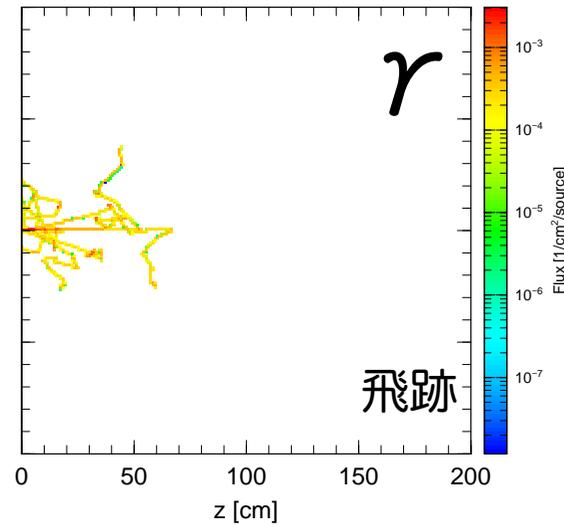
※特に低エネルギー (数keV~数十keV程度) の光子線は原子番号の影響を大きく受ける。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

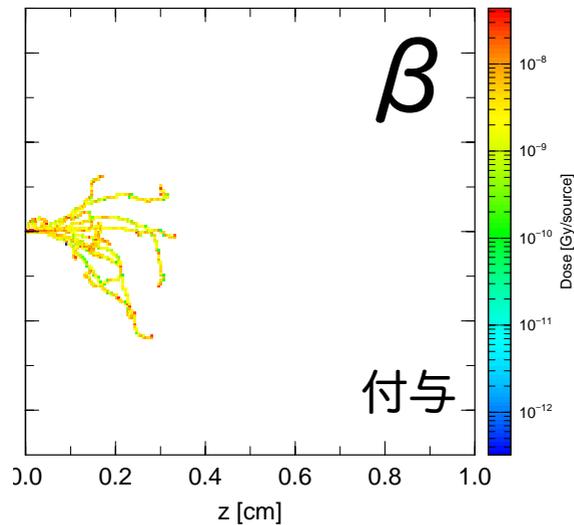
3) 粒子によるエネルギー付与とパターンの違い



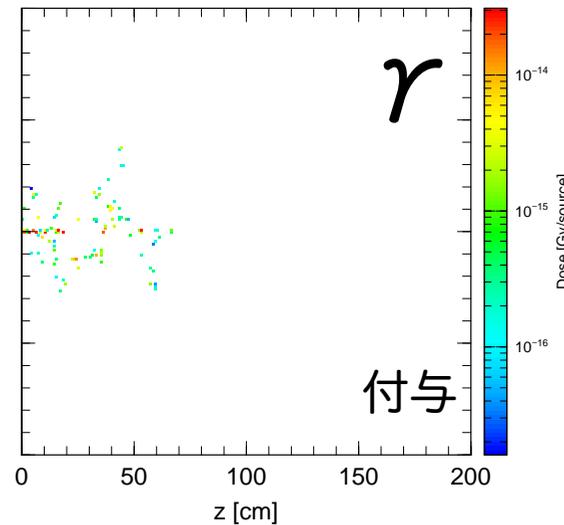
1MeV(1000keV)のβ線の飛跡 (水中)



1MeV(1000keV)のγ線の飛跡 (水中)



1MeV(1000keV)のβ線のエネルギー付与 (水中)



1MeV(1000keV)のγ線のエネルギー付与 (水中)

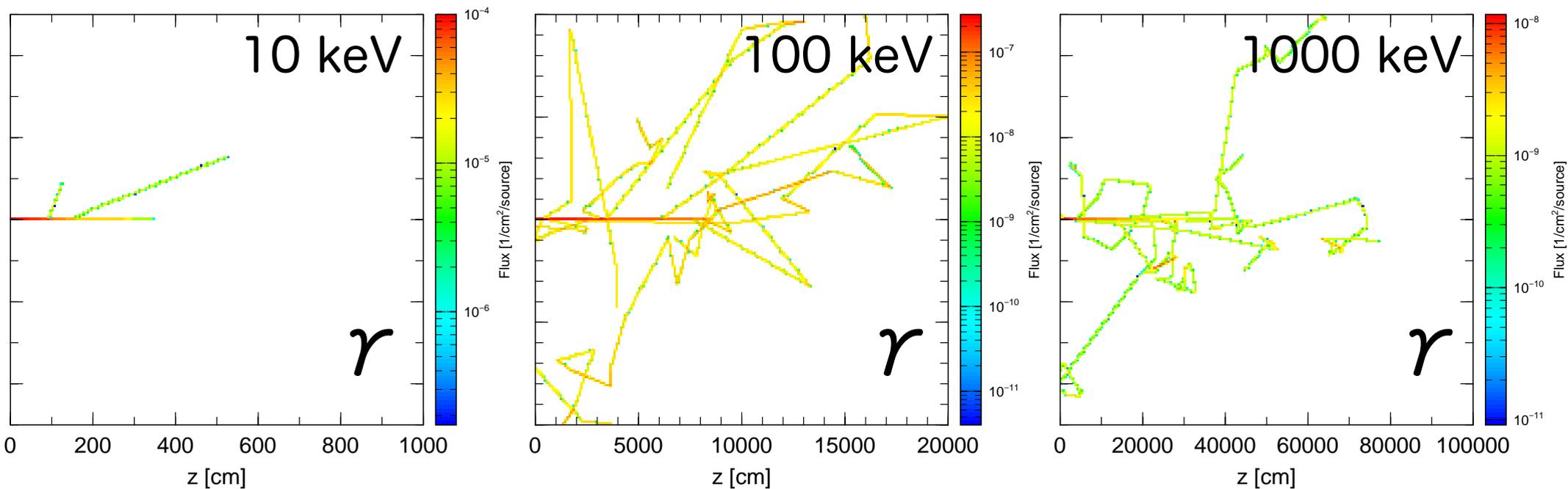
β線（電子）は物質中の飛跡（通過経路）に沿ってエネルギーを付与する。

γ線（光子）は飛跡そのものにはエネルギーを付与せず、弾き出した電子にエネルギーを付与し、弾き出された電子が物質にエネルギーを付与する。

このため、光子のエネルギー付与は広範囲に点状（より正確には短い線状）に散らばる。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

4) 放射線のエネルギーと飛程 (1)



10keVの γ 線の飛跡 (大気中)

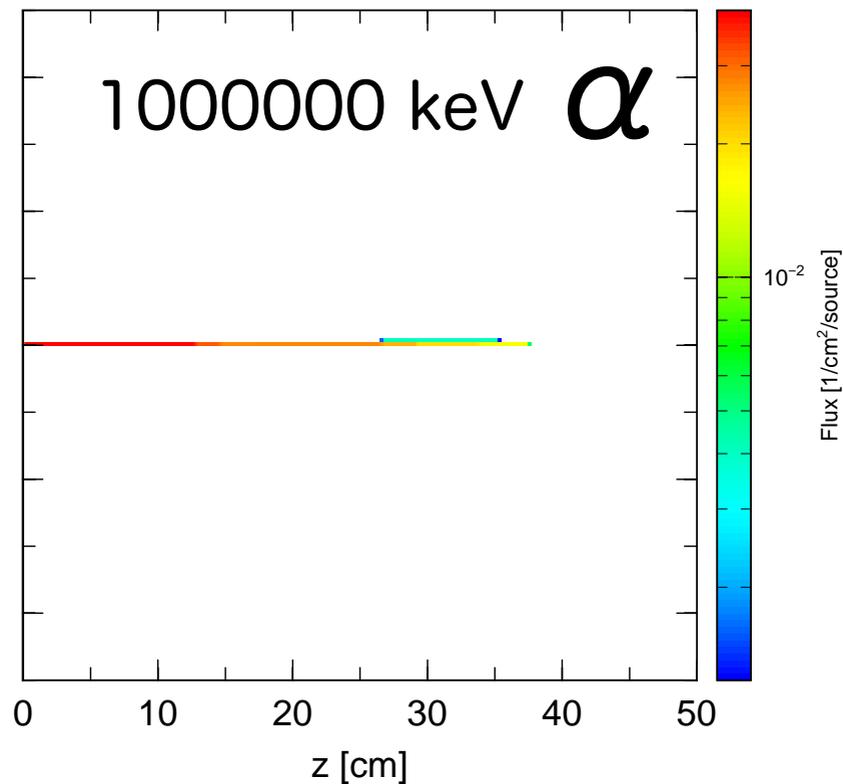
100keVの γ 線の飛跡 (大気中)

1MeV (1000keV) の γ 線の飛跡 (大気中)

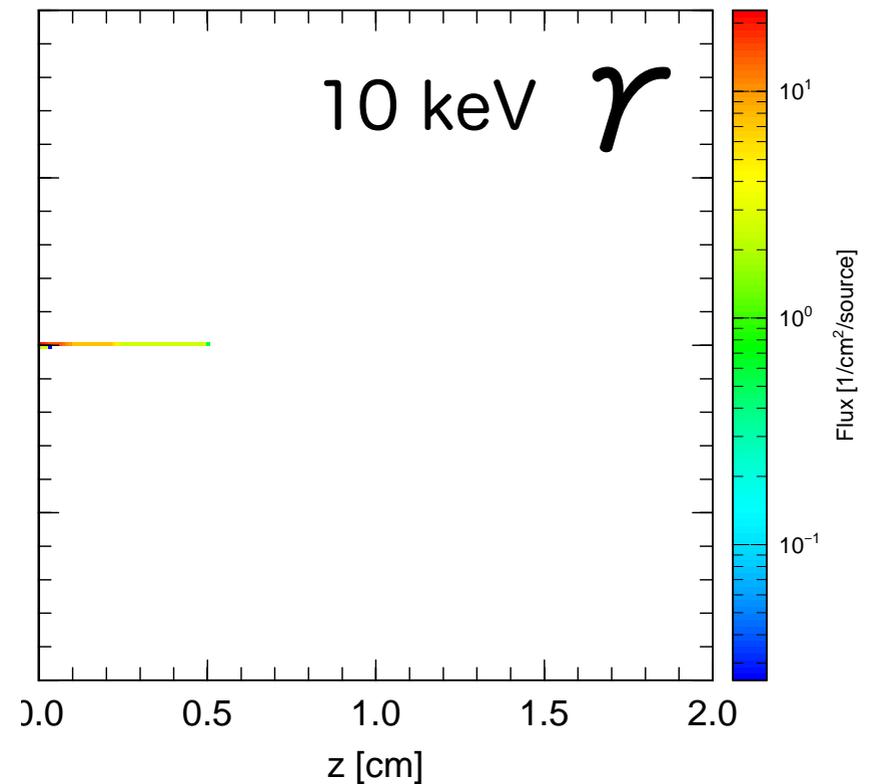
同じ粒子の放射線であっても、エネルギーによって飛程は異なる。

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

5) 放射線のエネルギーと飛程 (2)



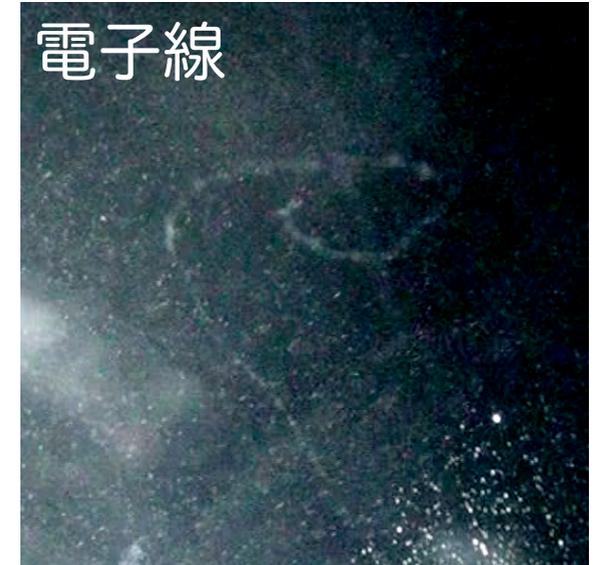
1GeV(10000000keV)の α 線の飛跡 (水中)



10keVの γ 線の飛跡 (水中)

透過性の高い γ 線 (光子) であっても、10keV程度のエネルギーでは水中飛程が1cmに満たない。透過性の低い α 線であっても、1GeV程度のエネルギーがあれば水中を数十cm進むことができる。

霧箱による自然放射線の観察



上図の飛跡は御影石から捕集したラドン（恐らく ^{222}Rn ）のα線によるもの。太く直線的な飛跡を示す。

右図の細く曲がりくねった飛跡は電子線によるもの。大地・宇宙からのγ線によって弾き出された電子線か、何らかの天然核種から出たβ線が見えている。

霧箱の原理

霧箱の中にはエタノールの過飽和領域ができています。放射線によって大気がイオン化されると、イオンを凝結核としてエタノールの霧ができる。

α 線（原子核）、 β 線（電子）のように、粒子が電荷を持つ放射線は直接見える。 γ 線（光子）のように、粒子が電荷を持たない場合、光子がはじき飛ばした電子のように、二次的な放射線が見える。

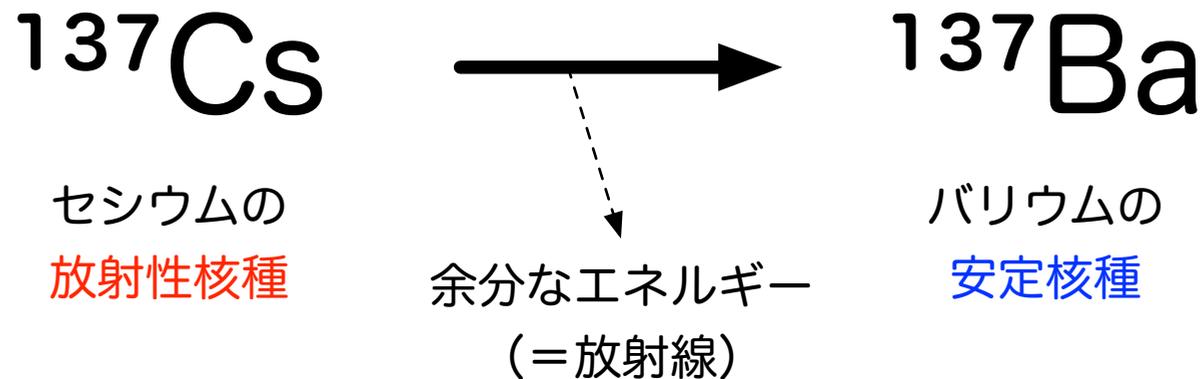
霧箱内に何も入れない場合、主に見えるのは γ 線がはじき飛ばした電子とミュオンの軌跡。

放射性物質の基礎

(放射性同位体・放射性核種)

放射性核種とは？

不安定な原子核は、余分なエネルギーを放射線として放出し、より安定な状態に変化する。この変化を**壊変**と呼び、壊変する原子核を**放射性核種**という。

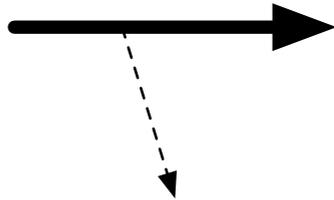


放射性核種とは？

1回の壊変では完全に安定化しないこともある。

^{90}Sr

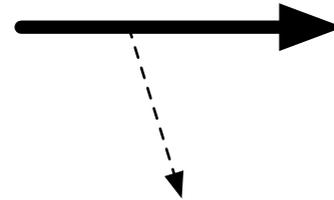
ストロンチウムの
放射性核種



余分なエネルギー
(=放射線)

^{90}Y

イットリウムの
放射性核種



余分なエネルギー
(=放射線)

^{90}Zr

ジルコニウムの
安定核種

壊変の話が出たついでに…

Bq（ベクレル）の定義

放射性同位体の量を、1秒当たりの壊変回数で表す単位。

1秒あたり1%の確率で壊変する 放射性同位体が100個ある場合	-----	1 Bq
1秒あたり1%の確率で壊変する 放射性同位体が200個ある場合	-----	2 Bq
1秒あたり2%の確率で壊変する 放射性同位体が100個ある場合	-----	2 Bq

^{32}P は1秒あたり0.0000562 %の確率で壊変する

→ 約178万個の ^{32}P の原子が存在すると1Bqになる

^{137}Cs は1秒あたり0.0000000728 %の確率で壊変する

→ 約13億7千万個の ^{137}Cs の原子が存在すると1Bqになる

壊変の話が出たついでに…

半減期の話

放射性同位体の不安定さは、**原子数が半減するまでの時間**
(=半減期) で表すことができる。

不安定で壊変確率が高い = 半減期が短い。

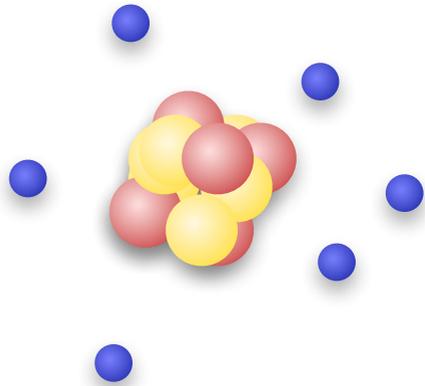
^{32}P は1秒あたり0.0000562 %の確率で壊変する

→ 半減期は14.26日

^{137}Cs は1秒あたり0.0000000728 %の確率で壊変する

→ 半減期は30.1年

原子の構造



原子 = 原子核 + 電子

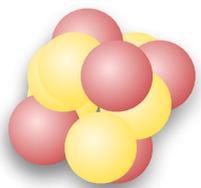
原子核 = 陽子 + 中性子

● 陽子 (電荷 + 1) ● 中性子 (電荷 ± 0)

● 電子 (電荷 - 1)

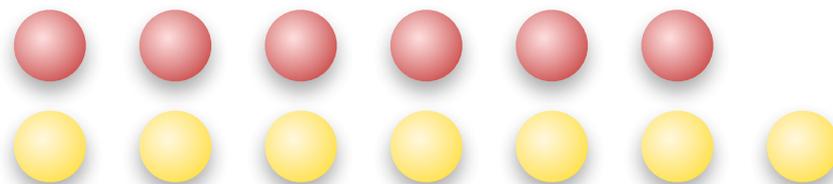
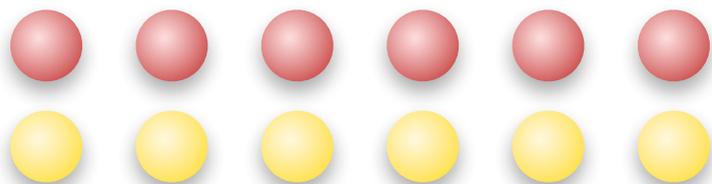
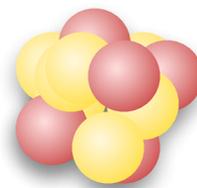
原子核の違いを表現するには？

^{12}C

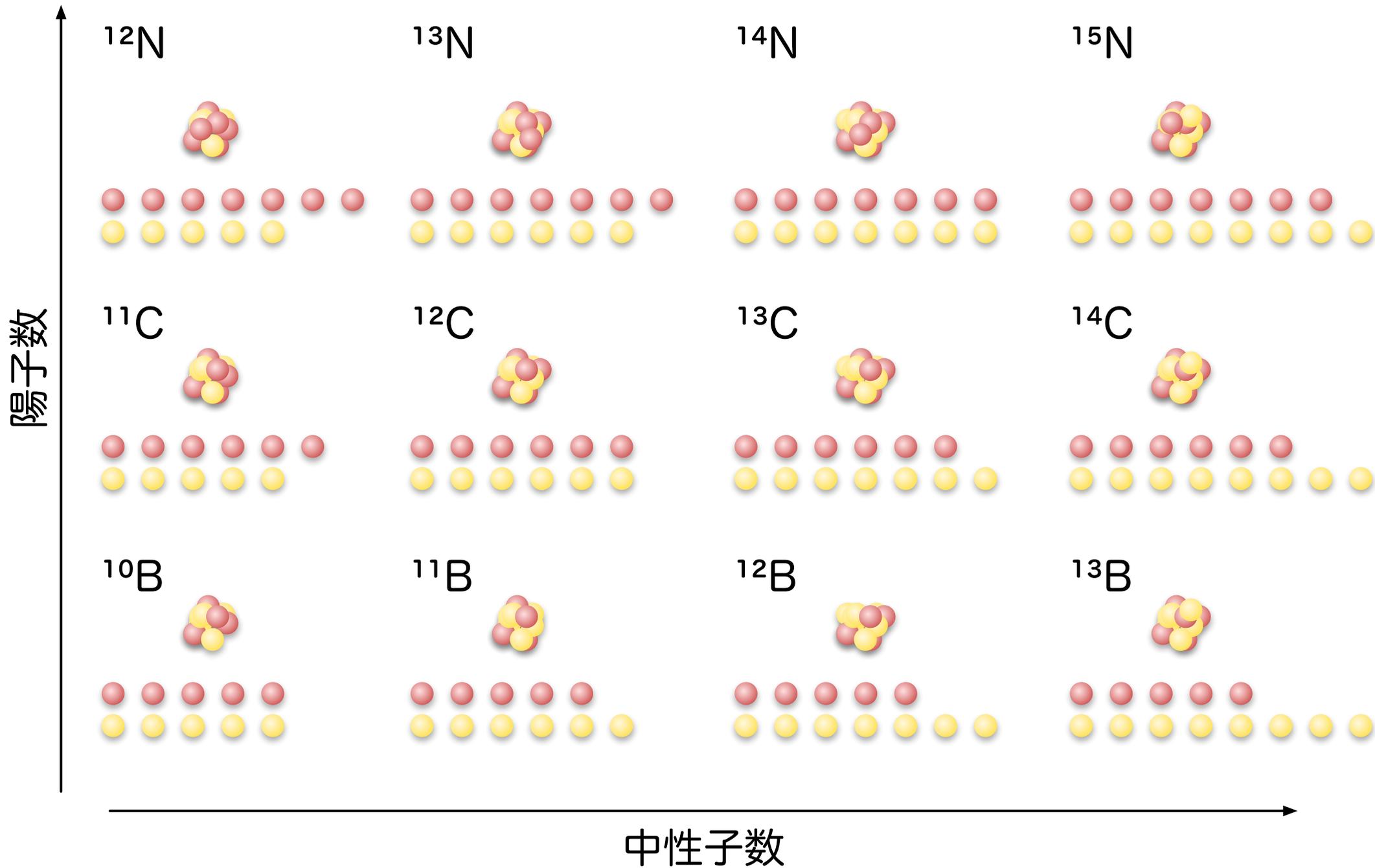


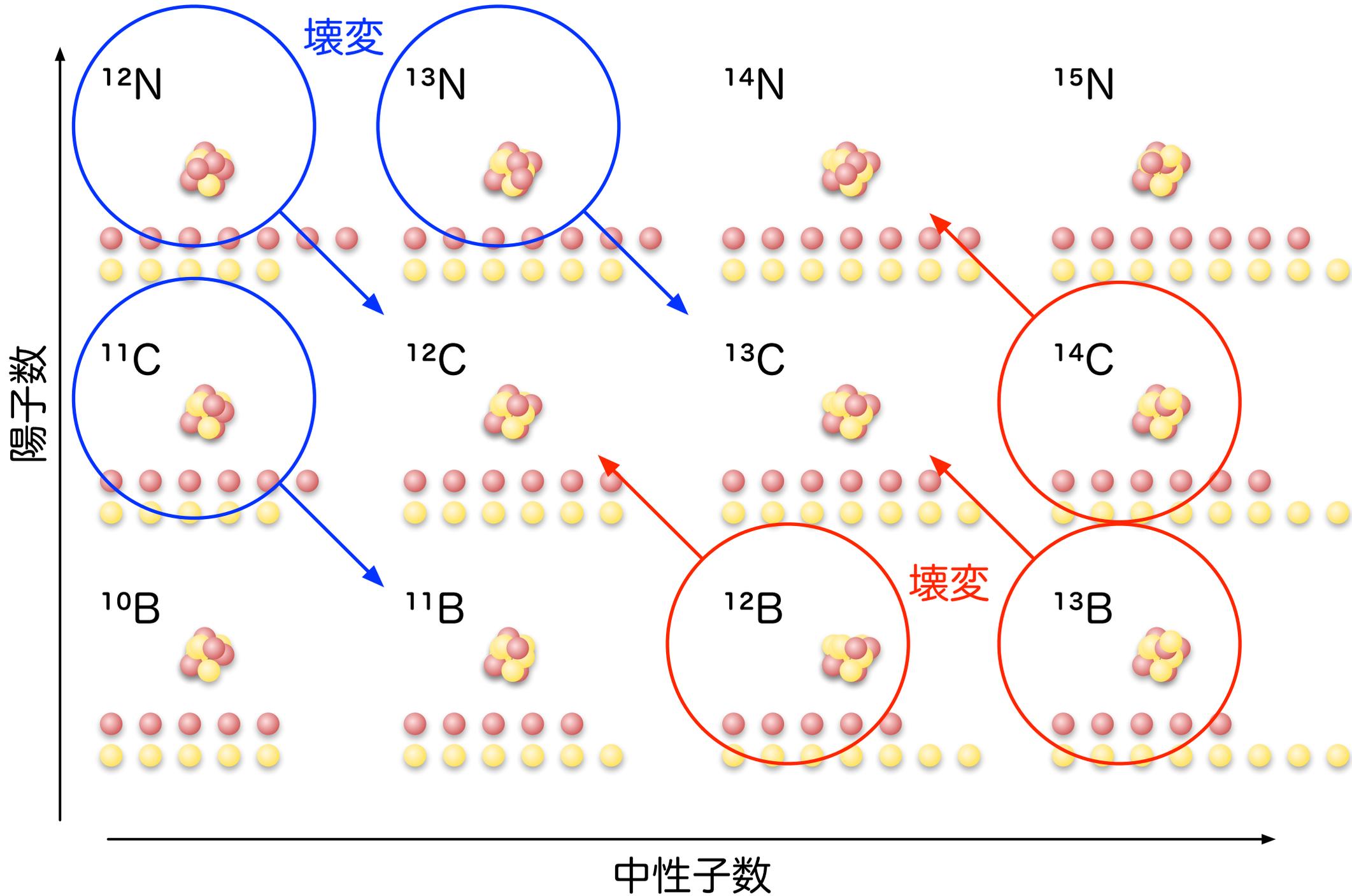
● 陽子
● 中性子

^{13}C

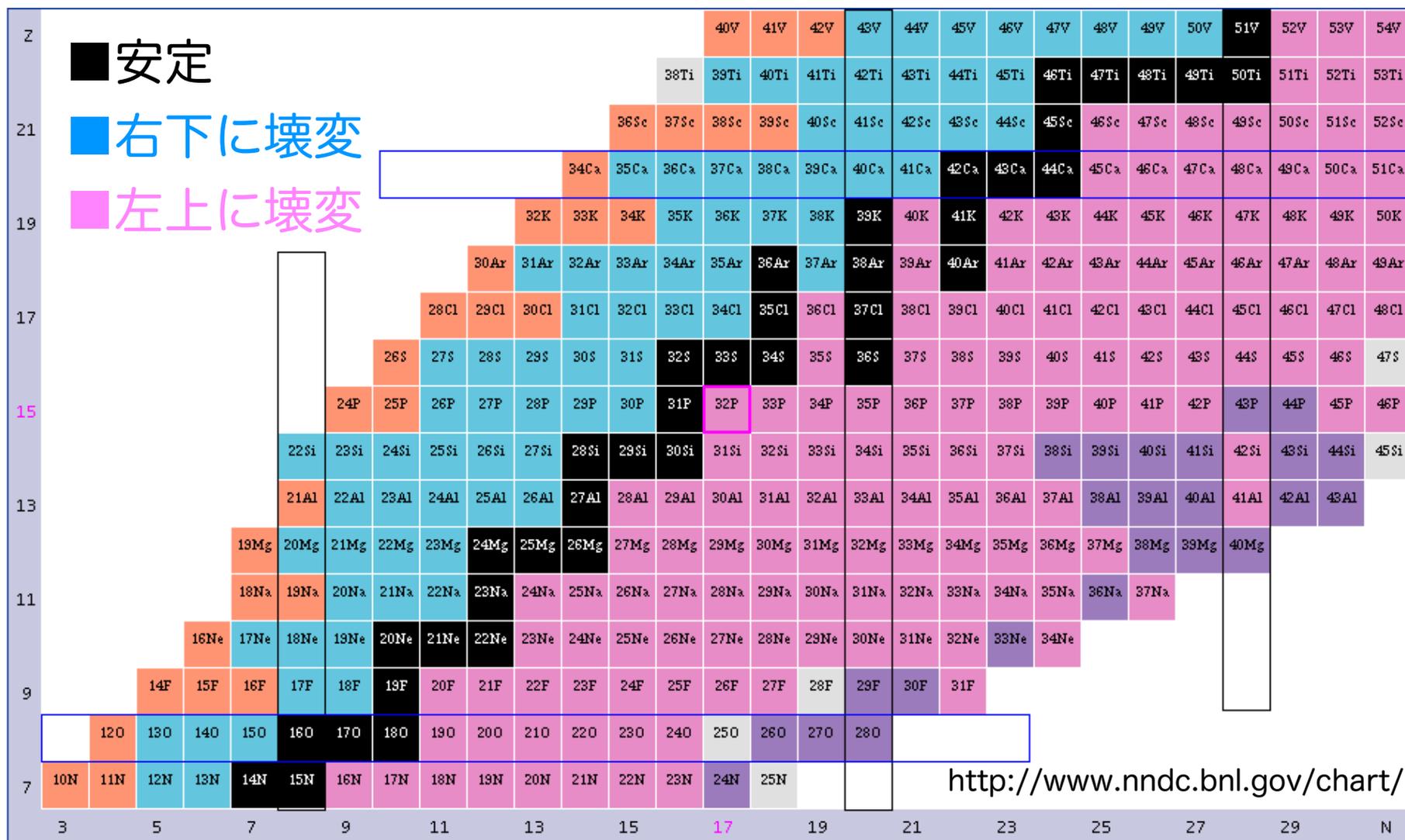


両方とも炭素なので、周期表では同じ位置
陽子数と中性子数で表にしてみる





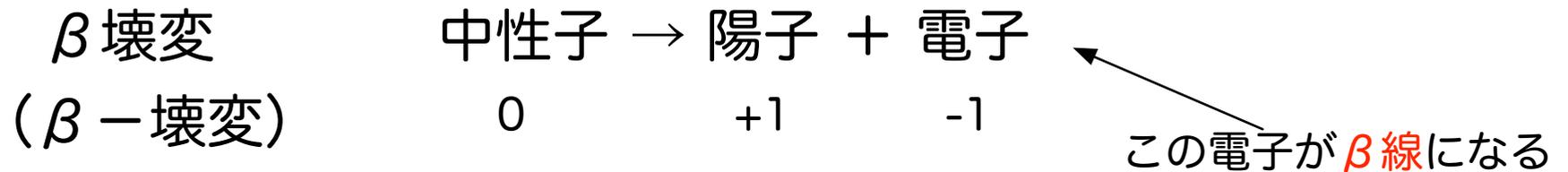
全ての原子核を陽子数と中性子数で並べた表を核図表と呼ぶ。



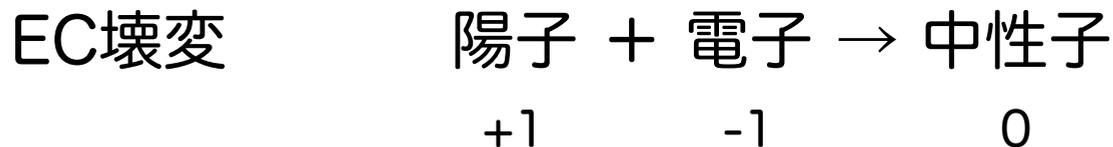
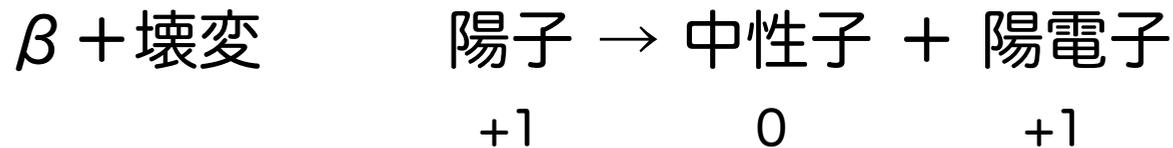
安定同位体は核図表の対角線上に集中し、他の同位体は原則として対角線に近寄る方向に壊変する（広義のβ壊変）。

広義の β 壊変には、以下の壊変が含まれる

■ 左上に壊変 = 中性子が 1 個減り、陽子が 1 個増える



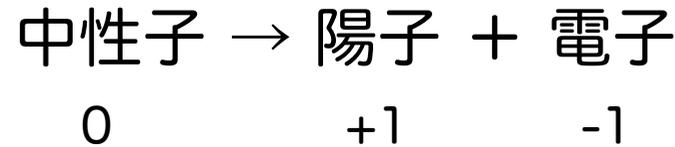
■ 右下に壊変 = 陽子が 1 個減り、中性子が 1 個増える



β 線のエネルギー

■左上に壊変 = 中性子が1個減り、陽子が1個増える

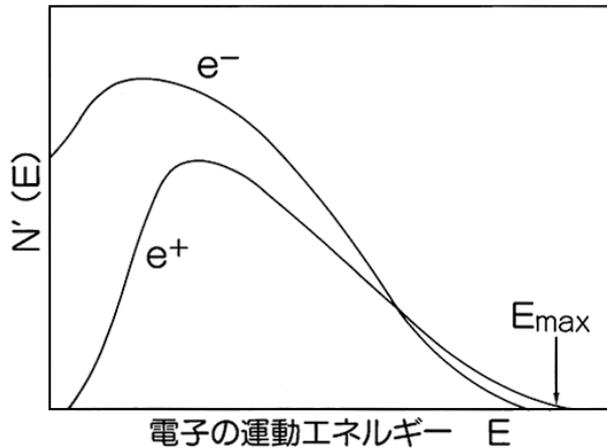
β 壊変
(β^- 壊変)



↓
厳密には…
↓



↑ ↑
運動エネルギーを分けあうので、 β 線
(電子)のエネルギーが一定にならない



β 壊変で放出される電子、陽電子のエネルギー分布

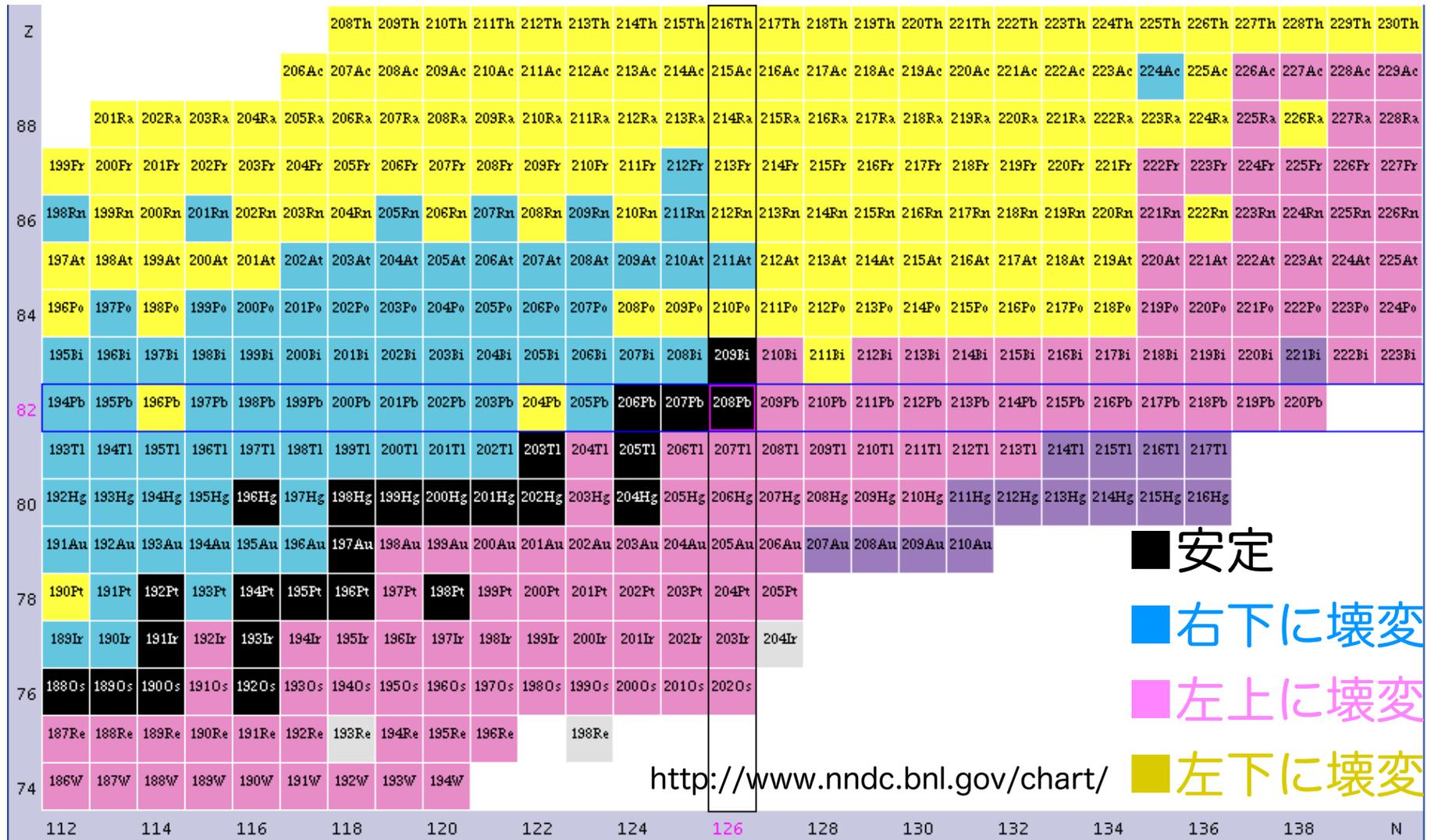
原子力百科事典 ATOMICA より引用

β 壊変まとめ

原子核には安定となる陽子：中性子比が存在し、そこから外れると不安定（＝放射性）になる。

不安定な原子核は、安定な陽子：中性子比を目指して壊変する。これを広義の β 壊変と呼び、 β 壊変、 β^+ 壊変、EC壊変が含まれる。

核図表の右上を見ると…



対角線上でも安定同位体が存在しなくなる。

黄色のマスの同位体は左下方方向に壊変する。これが α 壊変。

α 壊変

- 左下に壊変 = 陽子が2個、中性子が2個減少する。
= Heの原子核が放出され、核が小さくなる。

↑これが α 線になる（質量数4、電荷+2）

1回の α 壊変では質量数は4しか減少しない。

一方で、最も重い安定同位体は ^{208}Pb （※）。

※核図表によっては ^{209}Bi になっている。



^{238}U のように質量数の大きい放射性同位体は、安定化するまでに何度も壊変する。

演習用に配布した核図表で確かめてみると良い。

α 壊変まとめ

原子核には安定でいられる限界の質量数が存在し、そこから外れると不安定（＝放射性）になる。

大きすぎて不安定な原子核は、安定な質量数になるまで α 粒子（Heの原子核）を放出して壊変する。これを α 壊変と呼ぶ。

γ 線は？

壊変の際の余剰エネルギーの一部（あるいは全て）が α 粒子（ α 線）や電子（ β 線）ではなく、電磁波（光子）で放出されることがある。この電磁波が γ 線。

^{90}Sr のように β 線しか放出しない核種も有るが、 α 壊変や β 壊変の際に α 線、 β 線と同時に γ 線が放出されることが多い。

放射性同位体の生成

放射性同位体の生成

放射性同位体は壊変によって安定化する。

では、不安定なはずの放射性同位体はどのようにして生成され、存在しているのか？

放射性核種の生成

恒星内部の核融合

^{235}U 、 ^{239}Pu などの核分裂

^{238}U 、 ^{232}Th などの壊変

太陽・銀河からの宇宙線と地球大気の衝突

高エネルギーで加速した粒子と原子核の衝突

恒星内部・超新星爆発で生じた中性子の吸収

原子炉内等における中性子の吸収

^{137}Cs 、 ^{90}Sr など

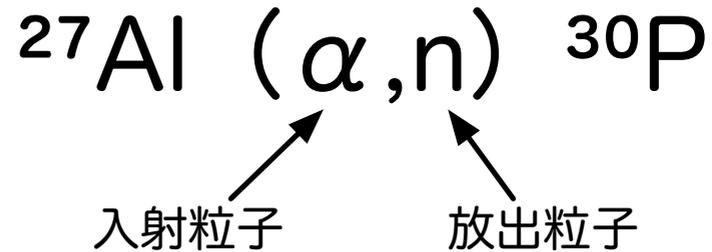
衝突

^{134}Cs など

中性子吸収
(中性子捕獲)

放射性同位体の生成

高エネルギーで加速した粒子と原子核の衝突



世界初の人工放射性
同位体生成反応

原子炉内等の中性子の吸収



${}^{134}\text{Cs}$ の生成原理

天然放射性同位体

天然に存在する α 壊変核種の多くは ^{232}Th 、 ^{238}U を始点とする子孫核種。 ^{232}Th 、 ^{238}U が環境中に広く分布しているため、その子孫核種も環境中に遍在している。

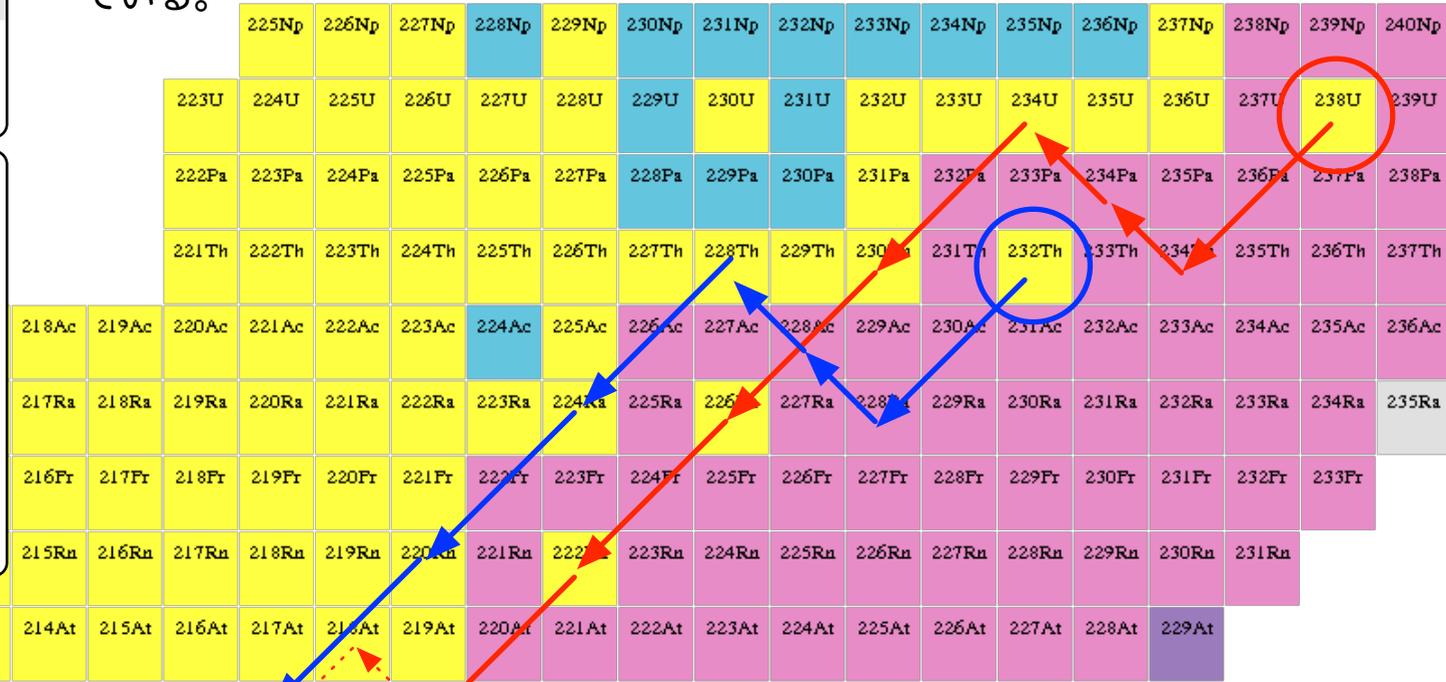
^{232}Th の子孫（トリウム系列）、 ^{238}U の子孫（ウラン系列）以外では、同じく地球誕生から残存している ^{40}K や、大気と宇宙線の反応で生成する ^{14}C 、 ^3H 等も遍在している。



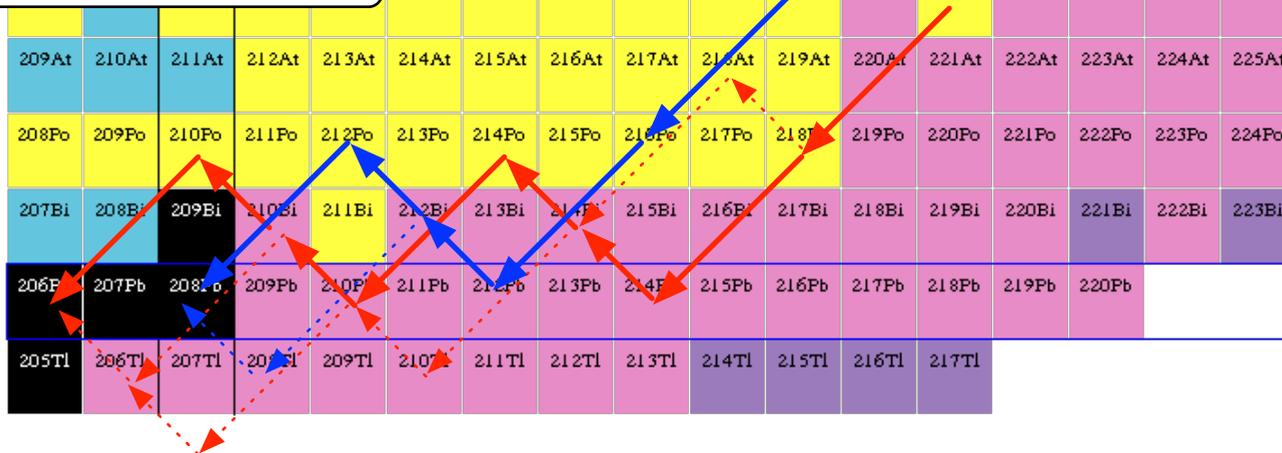
上の図は ^{232}Th 、 ^{238}U 付近のブルックヘブンの核図表を半減期モードで表示したものの。暗色が長半減期を示す。

赤丸で囲んだ3つの核種（特に ^{232}Th 、 ^{238}U ）は半減期が長く、地球誕生の際に取り込まれた成分がまだ残っている。

^{235}U は核分裂を起こすので原発の燃料として重要だが、天然ウランの99%以上は ^{238}U である。



ブルックヘブンの核図表を壊変モードで表示。マスの色は主な壊変タイプ。
 赤： β 壊変、青： β +壊変、
 黄色： α 壊変、黒：安定。
 赤い矢印はウラン系列、青い矢印はトリウム系列の壊変経路を示している（点線はマイナーな経路）。



核分裂と生成核種

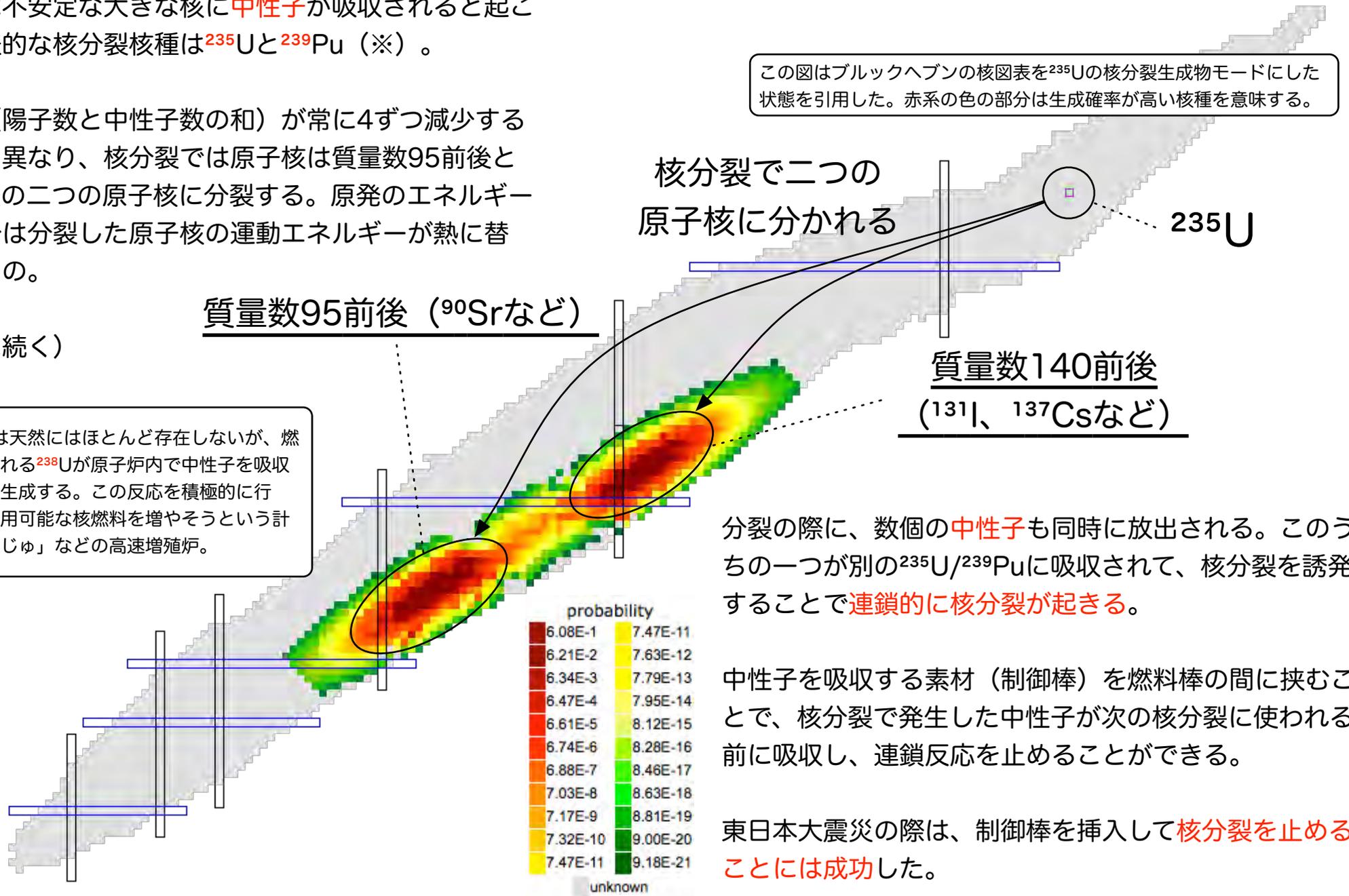
核分裂は不安定な大きな核に中性子が吸収されると起こる。代表的な核分裂核種は ^{235}U と ^{239}Pu (※)。

質量数（陽子数と中性子数の和）が常に4ずつ減少する α 壊変と異なり、核分裂では原子核は質量数95前後と140前後の二つの原子核に分裂する。原発のエネルギーの大部分は分裂した原子核の運動エネルギーが熱に替わったもの。

(右下に続く)

※： ^{239}Pu は天然にはほとんど存在しないが、燃料棒に含まれる ^{238}U が原子炉内で中性子を吸収することで生成する。この反応を積極的に行なって、利用可能な核燃料を増やそうという計画が「もんじゅ」などの高速増殖炉。

この図はブルックヘブンの核図表を ^{235}U の核分裂生成物モードにした状態を引用した。赤系の色の部分は生成確率が高い核種を意味する。



核分裂で二つの原子核に分かれる

質量数95前後 (^{90}Sr など)

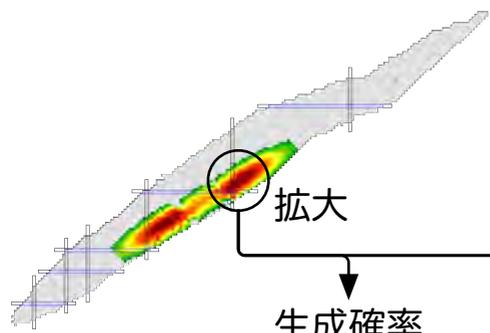
質量数140前後
(^{131}I 、 ^{137}Cs など)

分裂の際に、数個の中性子も同時に放出される。このうちの 하나가別の $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ に吸収されて、核分裂を誘発することで連鎖的に核分裂が起きる。

中性子を吸収する素材（制御棒）を燃料棒の間に挟むことで、核分裂で発生した中性子が次の核分裂に使われる前に吸収し、連鎖反応を止めることができる。

東日本大震災の際は、制御棒を挿入して核分裂を止めることには成功した。

核分裂と生成核種



生成確率

壊変モード

半減期



^{235}U や ^{239}U の陽子：中性子比は約1:1.6なので、核分裂で生成した二つの原子核も陽子：中性子比は約1:1.6である。

しかし質量数95~140程度の原子核にとって、安定な陽子：中性子比は1:1.3~1:1.4程度である。したがって、分裂で生じた核種は**中性子過剰な不安定**な状態であり、安定な陽子：中性子比を目指してβ壊変を繰り返す。この壊変で発生するエネルギーは原発全体のエネルギーからすると小さいものの、無視できない量の熱に変換される。

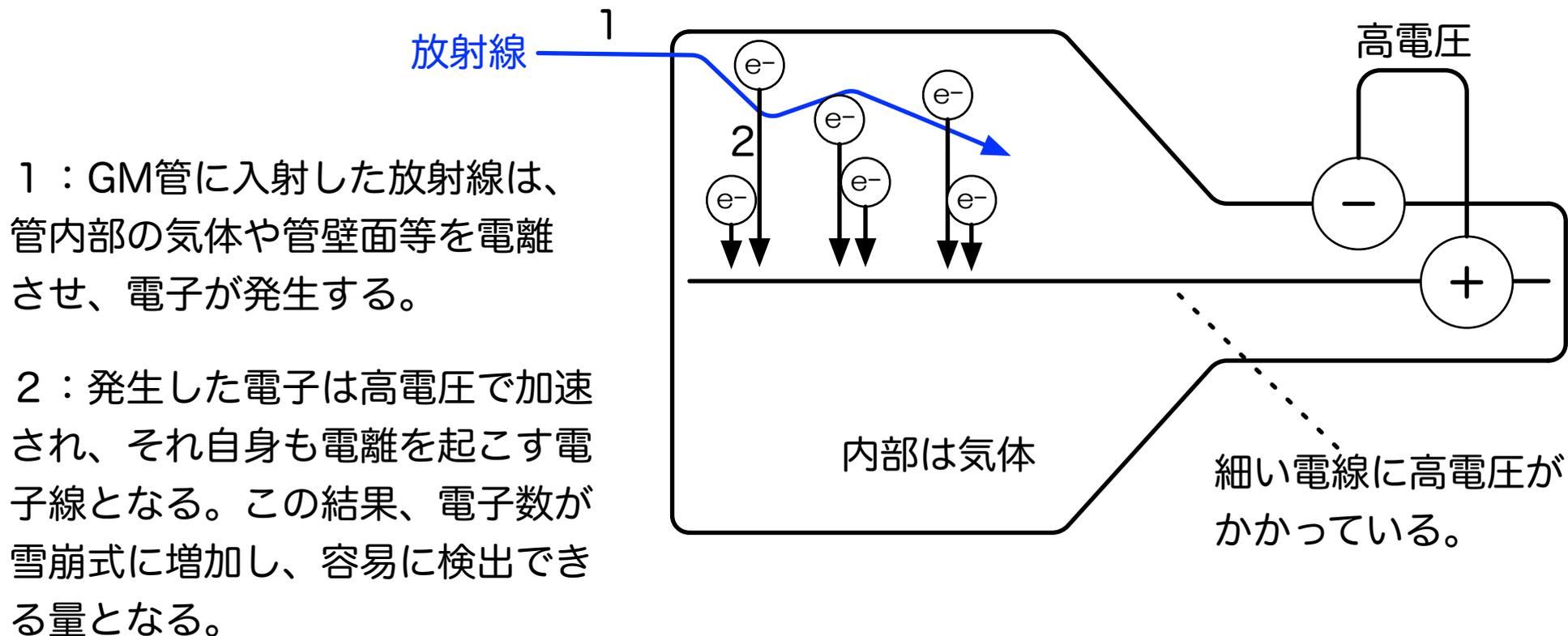
中性子の量を制御して停止できる核分裂と異なり、壊変は**人為的には止められない**ため、燃料棒の過熱を防ぐには壊変が落ち着くまで冷やし続ける必要がある。東日本大震災では燃料棒の冷却機能が失われたため、**壊変による熱 (崩壊熱)** でメルトダウンが起きたと考えられている。

原子炉内には最終的に ^{90}Sr や ^{137}Cs のような比較的半減期の長い核種 (または安定核種) が蓄積する。長半減期核種は核廃棄物処理における障害となっている。

放射線・放射能測定の基本

電氣的な測定の例

ガイガー・ミュラー管 (GM管)



※ GM管を用いていない放射線測定器をガイガーカウンターと呼ぶのは不正確。

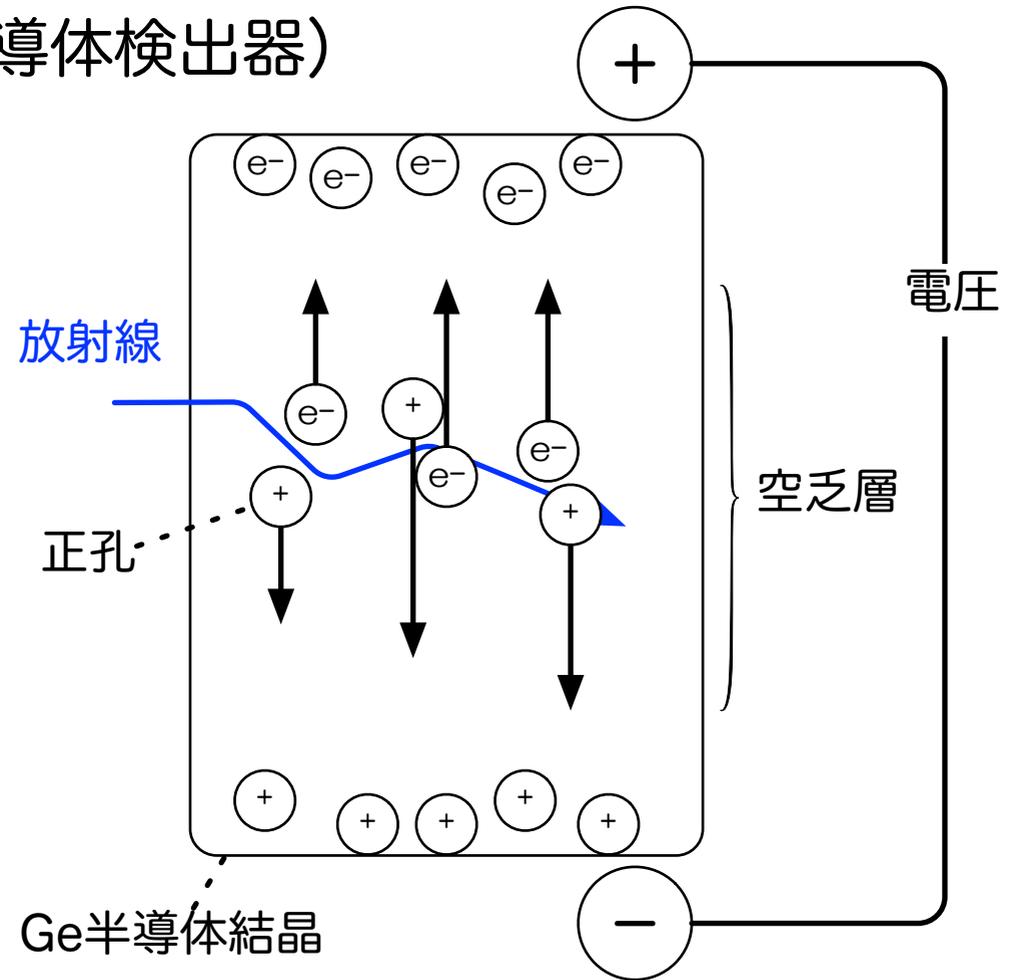
電氣的な測定の例

ゲルマニウム半導体検出器 (Ge半導体検出器)

Ge半導体結晶に逆電圧をかけることで、結晶内に空乏層を形成する。

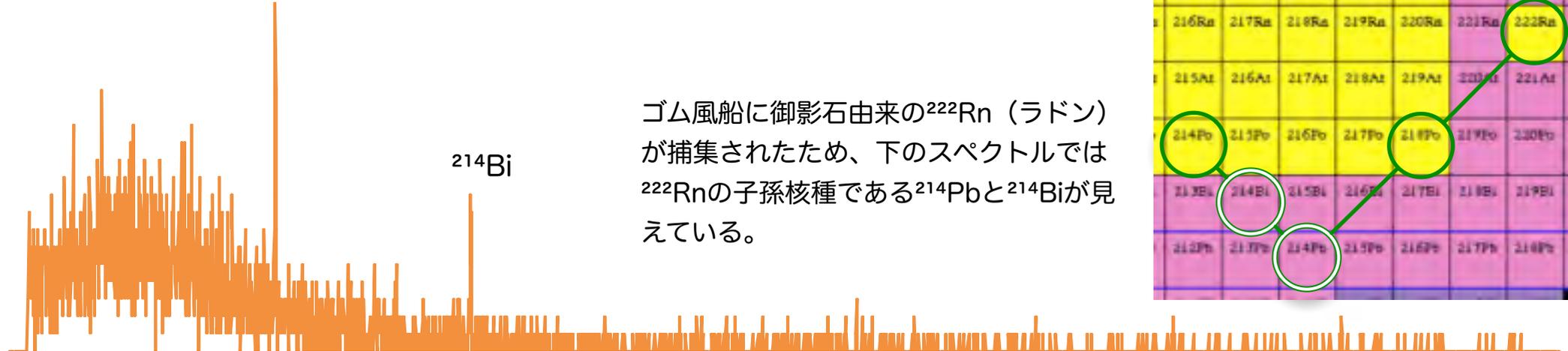
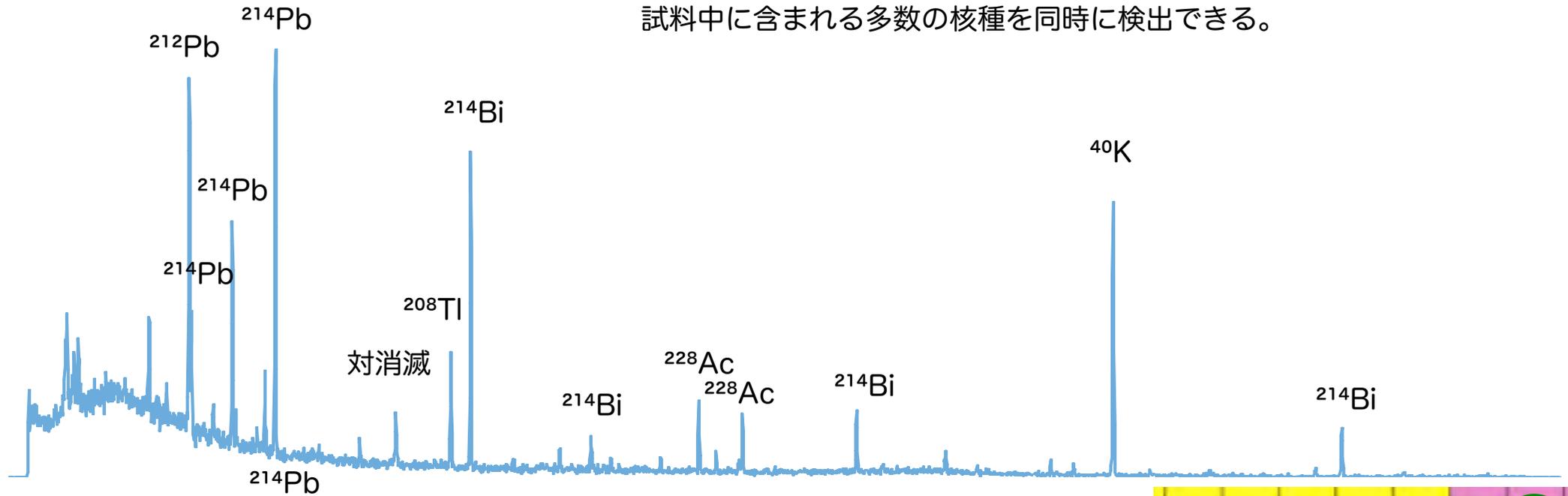
空乏層に入射した放射線は、電離作用によって結晶内部に電子と正孔を発生させるため、パルス電流が生じる。この電流を測定することで放射線のエネルギーを測定できる。

Ge結晶内では電子正孔対を形成するために必要なエネルギーが気体中よりも少ないため、放射線のエネルギーを正確に測定できる。このため核種弁別能力が高いことが最大の利点。ただし、高価であるため台数を揃えることが難しい。



測定例：御影石のGe半導体検出器スペクトル

上：御影石のスペクトル



下：御影石から発生した気体のスペクトル（ゴム風船で捕集）

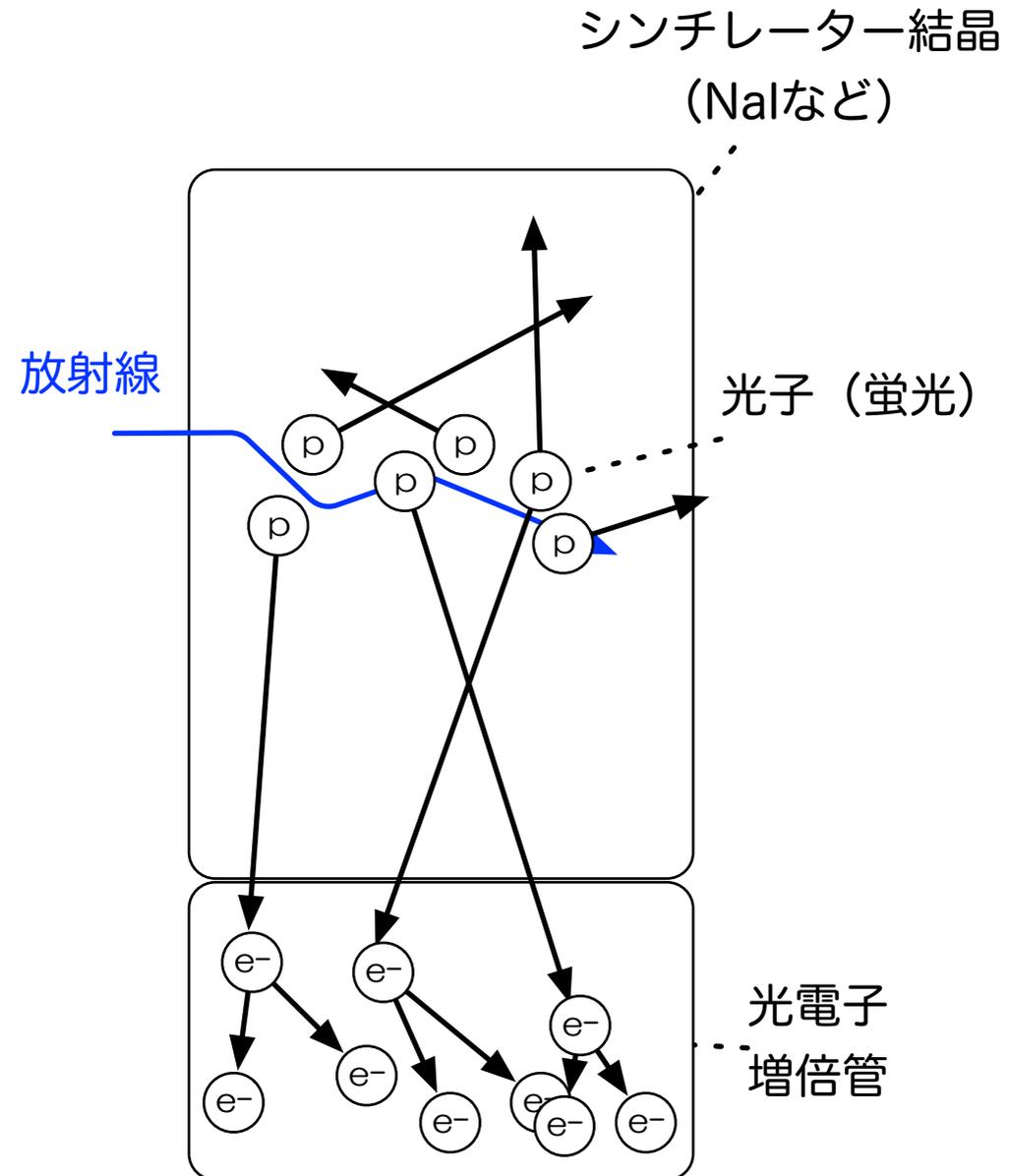
光学的な測定の例

シンチレーション検出器

NaI（ヨウ化ナトリウム）、CsI（ヨウ化セシウム）等の結晶に放射線が入射すると、微弱な蛍光（シンチレーション）が発生する。

結晶に光電子増倍管を接続することで、この微弱な蛍光を電子に変換し、増幅・検出することができる。

光の発生量は放射線のエネルギーに比例するが、エネルギー弁別能はGe半導体検出器に劣る。比較的安価であるため、多検体のスクリーニング（例えば玄米の全袋検査）等に活用されている。

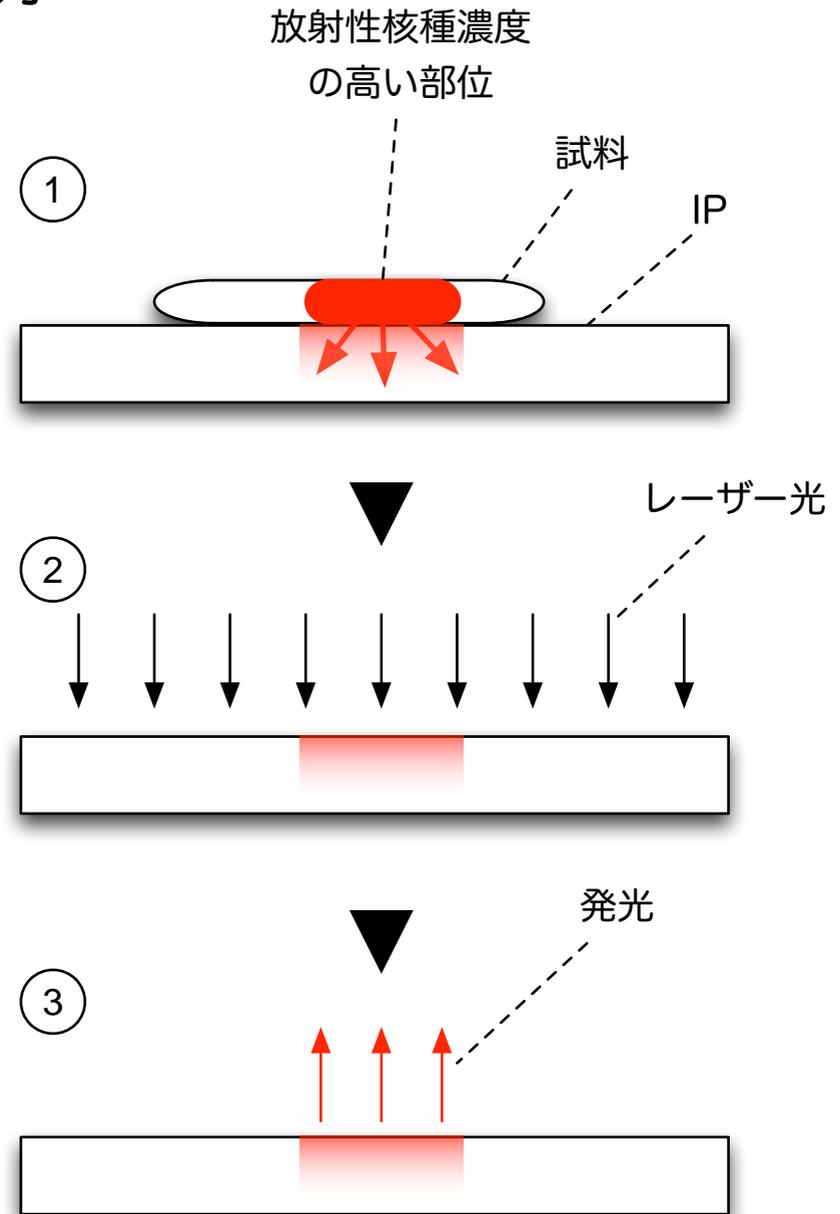


化学的な測定の例

イメージングプレート

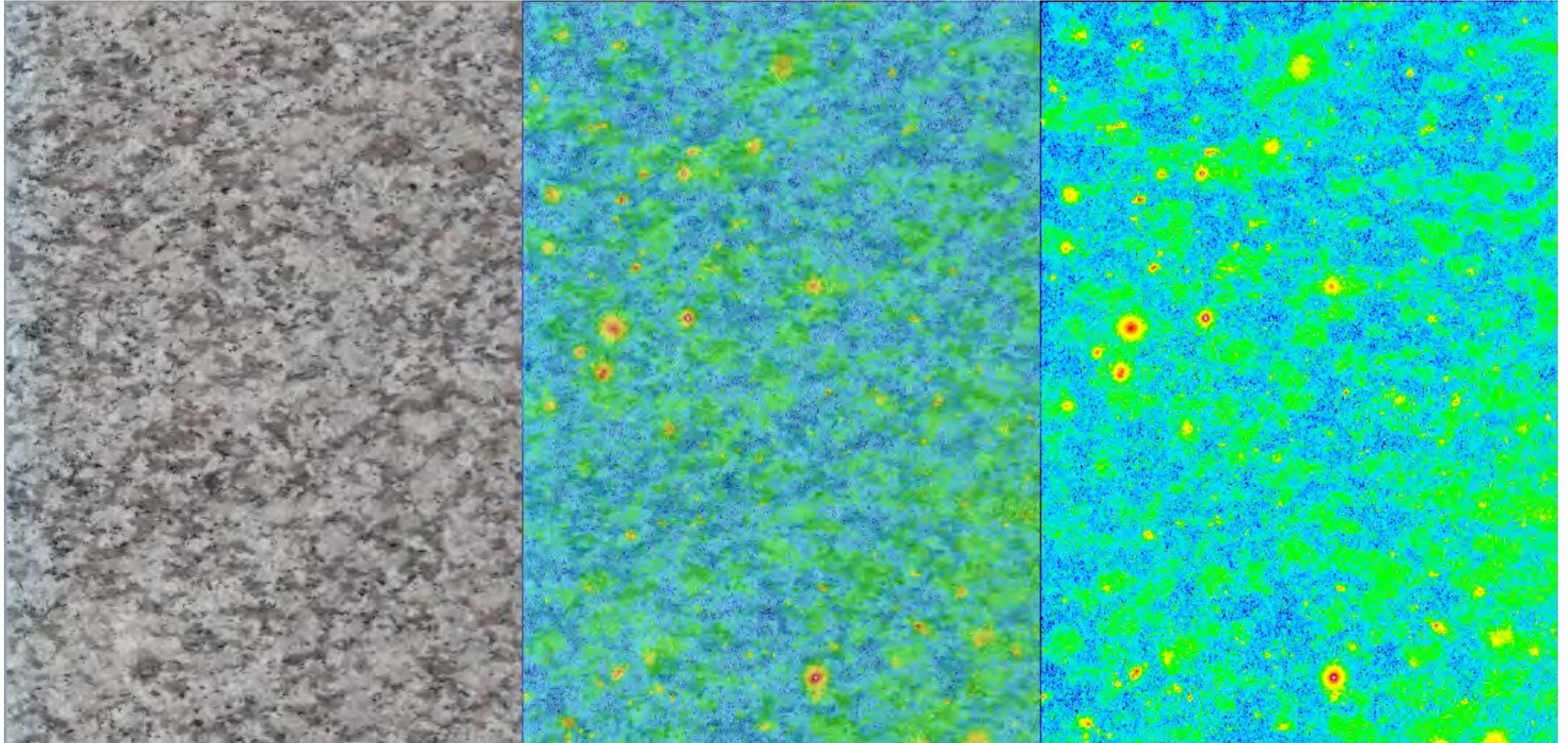
イメージングプレート（IP）とは、特殊な結晶の粉末を塗布したシートである。この結晶は、照射された放射線のエネルギーを蓄えることができるため、試料中の放射性核種の2次元分布を把握するために利用できる。

- 1) IPに試料を密着させると、試料から出た放射線がIPに吸収される。
- 2) 特定の波長のレーザーでIPをスキャンする。
- 3) IPが吸収した放射線のエネルギーが可視光に変換されて放出される。



測定例：御影石中の放射性核種の分布

IPを用いることで、試料中の核種の分布を一目瞭然に把握できる。



御影石表面の写真

重ね合わせ

IPで測定した
放射性核種の分布

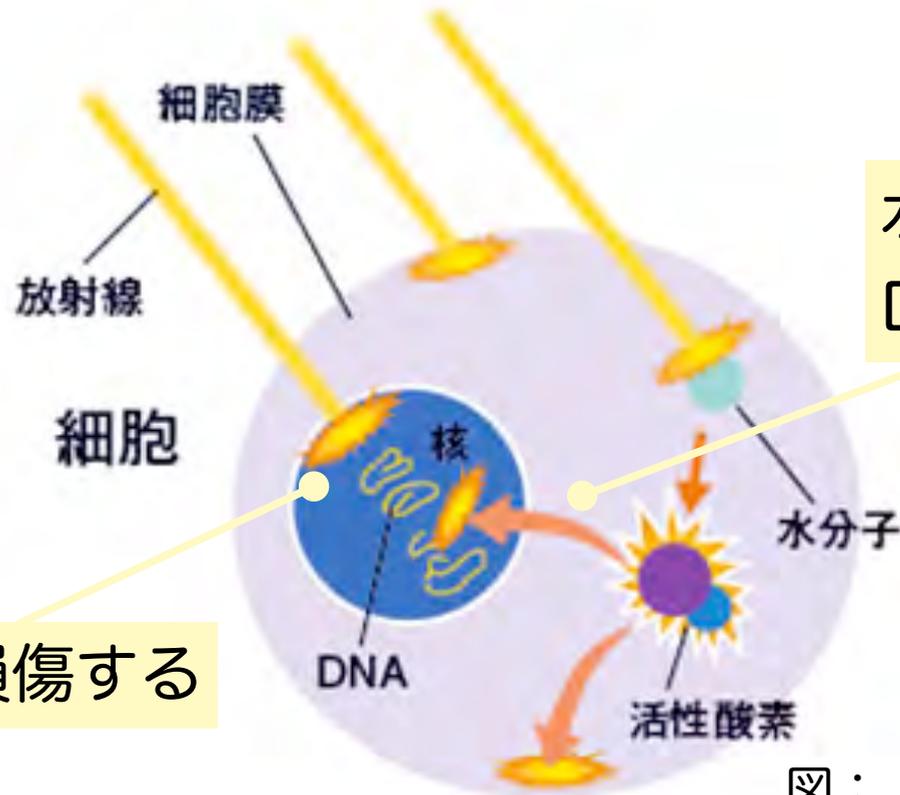
放射線の人体影響の基礎

放射線の生物影響

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



水や酸素が電離され、DNAを損傷する

DNAが直接損傷する

放射線の生物影響

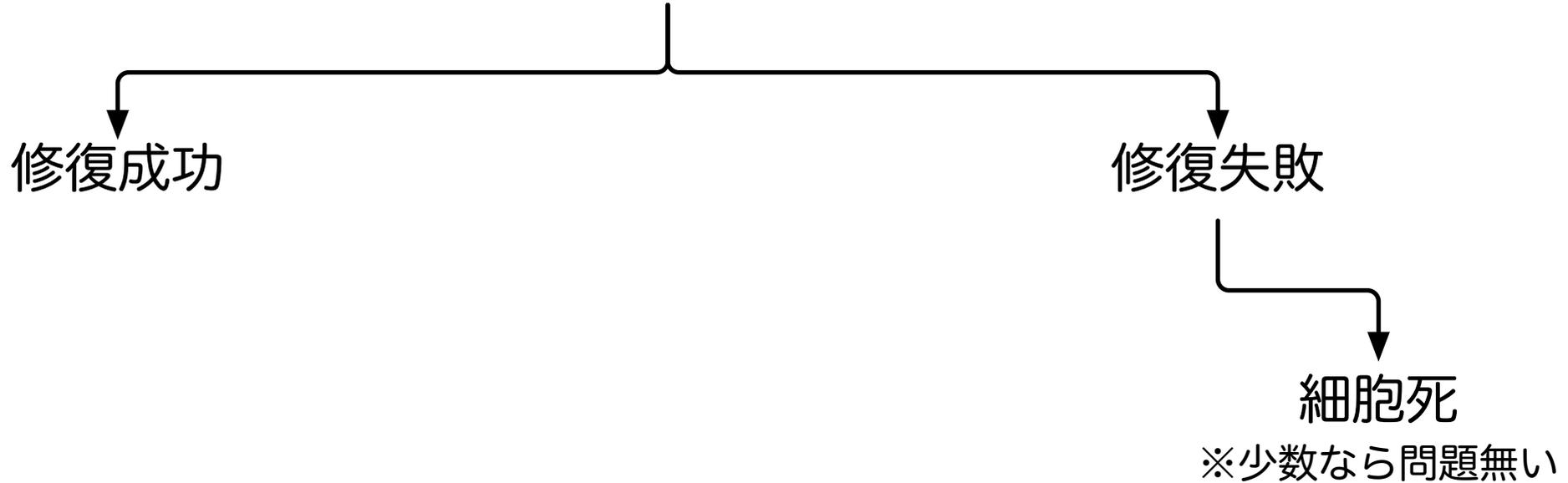
放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



放射線の生物影響

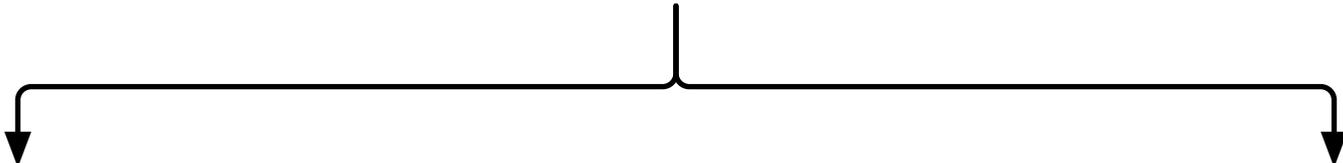
放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



修復成功

修復失敗



細胞死

※少数なら問題無い

主に細胞死によって引き起こされる影響を「確定的影響」と呼ぶ。詳しくは独習用資料を参照のこと。

放射線の生物影響

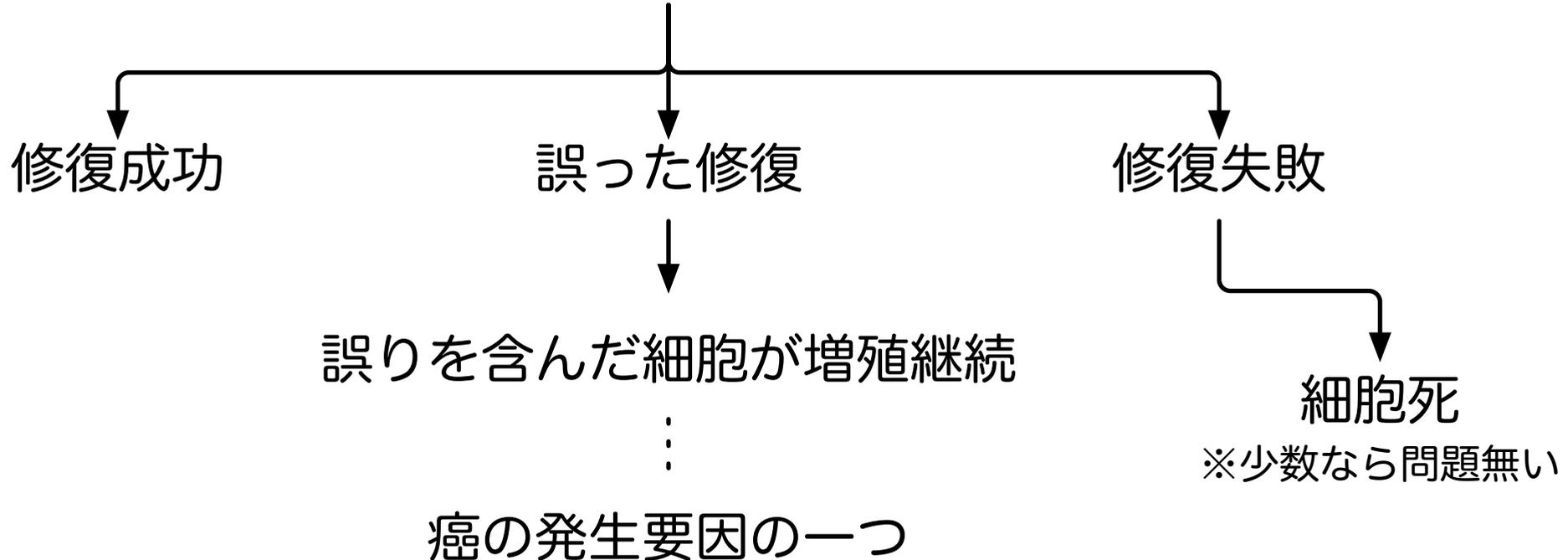
放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



Sv (シーベルト) とは？

被ばくリスク (特に癌と遺伝的影響) を定量的に表す単位



このように長期的、かつ確率で生じる影響を「確率的影響」と呼ぶ。被ばく量は**症状の重さ**ではなく、**発症率**に影響する。

「Sv」は「確率的影響」のリスクを評価するための単位。

Sv（シーベルト）とは？

被ばくリスク（特に癌と遺伝的影響）を定量的に表す単位

人体に吸収された放射線のエネルギー量（J/kg） = Gy（グレイ）

×

放射線の種類に応じた係数 = 放射線荷重係数

×

放射線が当たった場所に応じた係数 = 組織荷重係数



シーベルト（Sv）

Svとは？

被ばくリスク（特に癌と遺伝的影響）を定量的に表す単位

人体に吸収された放射線のエネルギー量 (J/kg)

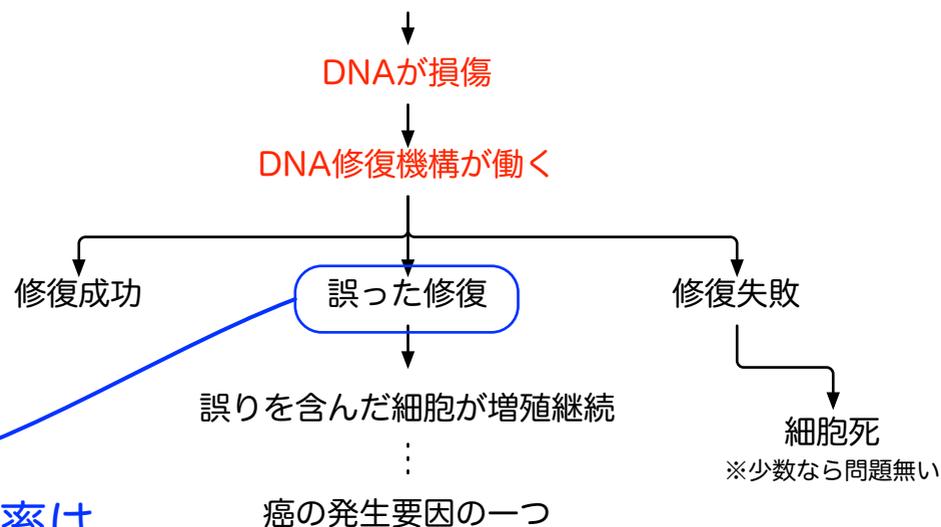
$$\begin{array}{l} \times \\ \text{放射線の種類に応じた係数} \\ \times \\ \text{放射線が当たった場所に応じた係数} \end{array} = \text{放射線荷重係数}$$

シーベルト (Sv)

誤った修復が起こる確率は、
放射線の種類によって違う
(α 線は β 線、 γ 線の20倍)

放射線の生物影響

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



Svとは？

被ばくリスク（特に癌と遺伝的影響）を定量的に表す単位

人体に吸収された放射線のエネルギー量 (J/kg)

×

放射線の種類に応じた係数

×

放射線が当たった場所に応じた係数

= 組織荷重係数

シーベルト (Sv)

放射線の生物影響

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる

DNAが損傷

DNA修復機構が働く

修復成功

誤った修復

修復失敗

誤りを含んだ細胞が増殖継続

癌の発生要因の一つ

細胞死

※少数なら問題無い

臓器・組織によって癌になりやすさ、癌になった場合の致死率・QOLの低下率が異なる
(腸や骨髄はハイリスク、皮膚や脳はローリスク)

Svの算出に用いられる係数

放射線タイプ

放射線荷重係数

光子	1
電子、ミュー粒子 (ミューオン)	1
陽子、荷電パイ中間子	2
α 粒子、重イオン、核分裂片	20
中性子	※

※：エネルギーによって異なり、約2.5~21の値を取る。

^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I は光子と電子のみを放出するので、放射線荷重係数は1、つまり $\text{Gy}=\text{Sv}$ となる。
また、外部被ばくの大部分は光子・電子・ミューオンなので、 $\text{Gy}=\text{Sv}$ と見なせる場合が多い。

^{210}Po 、 ^{220}Rn 、 ^{222}Rn 等による内部被ばくは主に α 線。

臓器・組織名

組織荷重係数

肺、胃、結腸、骨髄、乳房、残りの組織・臓器	0.12
生殖腺	0.08
甲状腺、食道、膀胱、肝臓	0.04
骨表面、皮膚、脳、唾液腺	0.01

※これらの表の値はICRPの2007年勧告から引用していることに注意。1990年勧告とは数値が若干異なる。

2種類のSv

※ 細かく言えばもっと沢山あります。
興味がある方は「実用量と防護量」などをキーワードに調べてみて下さい。

被ばくリスク（特に癌と遺伝的影響）を定量的に表す単位

人体に吸収された放射線のエネルギー量 (J/kg) = Gy (グレイ)

×

放射線の種類に応じた係数 = 放射線荷重係数

×

放射線が当たった場所に応じた係数 = 組織荷重係数

シーベルト (Sv)
(等価線量)

組織別にここまで計算した数値を「**等価線量**」という。単位は実効線量と同じくシーベルトなので注意。

特定組織（例えば甲状腺や皮膚）の被ばくを示す時に等価線量が使用される場合がある。

シーベルト (Sv)
(実効線量)

このシーベルトは厳密には「**実効線量**」という。断り無くシーベルトと言った時は**実効線量**を意味することが多いが、文脈に要注意。

等価線量×組織荷重係数 = 実効線量 という関係になる。

等価線量と実効線量

成人が甲状腺に β 線と γ 線を合計100mGy (=100mJ/kg) 吸収した場合、 β 線（電子）と γ 線（光子）の放射線荷重係数は両方とも1、甲状腺の組織荷重係数は0.04なので…

$$\text{甲状腺の等価線量} = 100 \times 1 = 100 \text{ (mSv)}$$

$$\text{実効線量} = 100 \times 1 \times 0.04 = 4 \text{ (mSv)}$$

となる。

※ PHITSによるシミュレーションで見たとおり、光子によるエネルギー付与は、実際には光子からエネルギーを受け取った電子によるエネルギー付与である。このことを考えると光子と電子の放射線荷重係数が等しいことが理解しやすい。

Svの計算法

外部被ばく + 内部被ばく = 全被ばく量

外部被ばくの場合 → 空間線量率 (Sv/h) × 滞在時間 (h)

各種の測定器で測定可能

測定器は、放射線のエネルギーと入射数から、その場に人体があったらどの程度放射線を吸収するか？を計算してSv/hに換算している。
もしくは特定の放射線（例えば¹³⁷Csのγ線）を想定し、入射数からSv/hを推定している。

内部被ばくの場合 → 摂取量 (Bq) × 実効線量係数 (Sv/Bq)

核種ごとに係数が公表されている

¹³⁴Cs : 0.019 μSv/Bq

¹³⁷Cs : 0.013 μSv/Bq

ICRP Publication 119より引用

実効線量係数とは？

核種、化学形、摂取形態に応じて、1Bqの摂取によって、摂取後50年間（子供は70歳まで）の積算で何Svの被ばくになるのか（※）を示す係数。

- 1) 摂取された放射性核種が、摂取後一定時間経過後に、体内のどこに移動するか？
- 2) 体内のある場所に存在する放射性核種から出た放射線が、どの組織・臓器にどの程度吸収されるか？

50年間分の積算値をシミュレーションして、実効線量係数を算出する。

※：この積算値を預託実効線量という。被ばく総量が等しい場合、短期間にまとめて被ばくした方がリスクが高いと考えられている。したがって最大のリスクを考慮するために、内部被ばくの場合は預託実効線量の全量（実際には摂取直後から最大50年間に渡って被ばくする線量）を、摂取した瞬間に受けたと見なして線量管理を行う。

内部被ばくのSv算出例

毎日米1合を食べ、その全てに現在の基準上限の100Bq/kgの放射性Csが含まれているとして算出してみる。

米1合≒150g≒茶わん軽く2杯 → 約0.5kg/dayとする

放射性Csは、リスクの高い¹³⁴Csと見なして計算する。

¹³⁴Csを経口摂取した時の実効線量係数 1.9×10^{-5} (mSv/Bq)

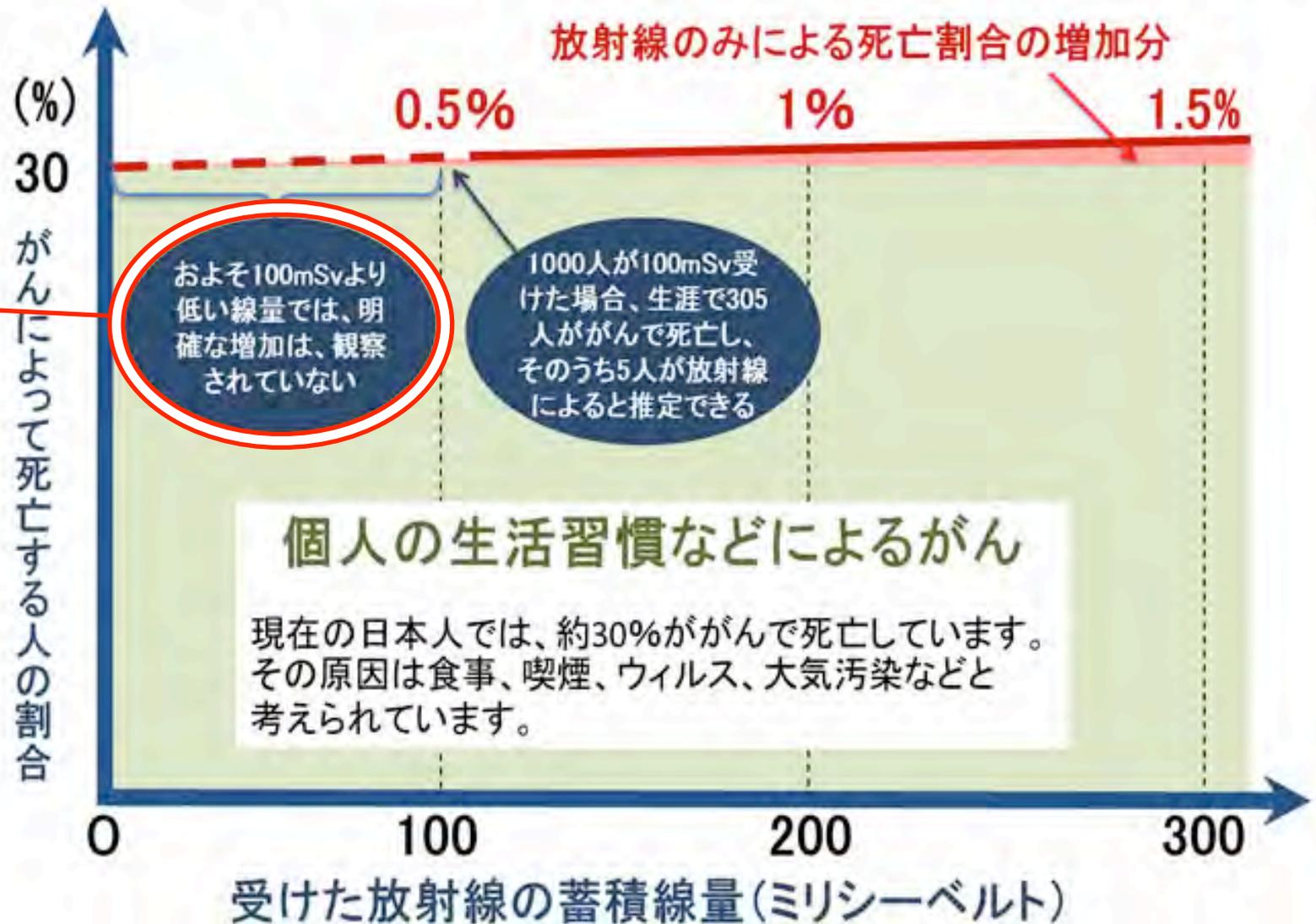
¹³⁷Csを経口摂取した時の実効線量係数 1.3×10^{-5} (mSv/Bq)

$$0.5(\text{kg/day}) \times 365(\text{day}) \times 100(\text{Bq/kg}) \\ \times 1.9 \times 10^{-5} (\text{mSv/Bq}) \doteq 0.35 \text{ mSv}$$

ここでは安全側に立った仮定をしているが、実際には2014年度の福島産玄米で100Bq/kgを越えたものは1000万袋以上測定した中で1袋も無く、平均は明らかに100Bq/kgより低い。また、2015年現在の放射性Csの8割程度が¹³⁷Csと考えられる。

Svとリスクの目安

年間で100ミリシーベルトまでゆっくりと被ばくした場合のがん死亡



都道府県別75歳未満がん年齢調整死亡率 (2009年)

Age-adjusted Cancer Mortality Rate under Age 75 by Prefectures (2009)

(1) 全がん All Cancers

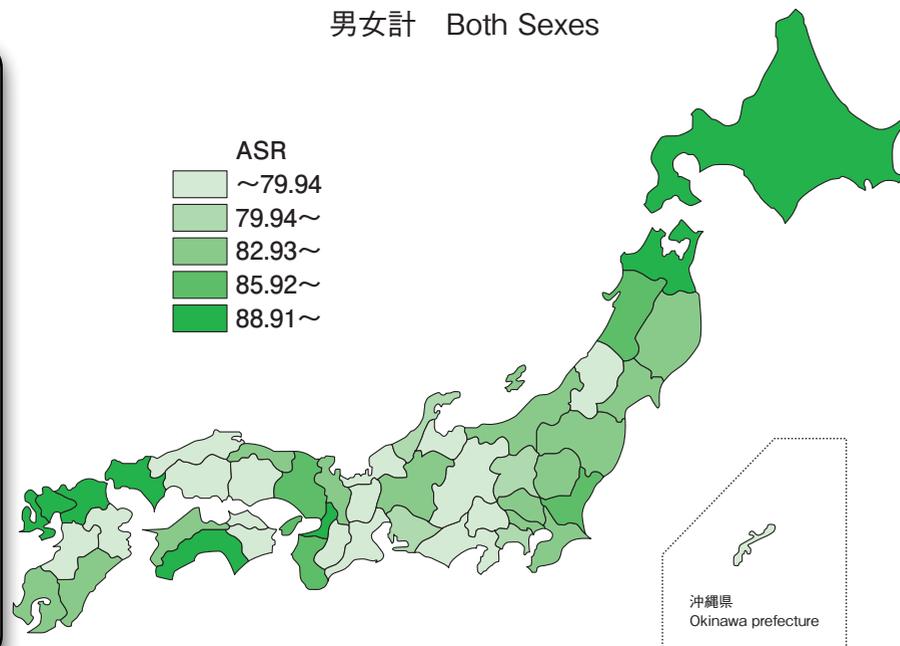
癌の死亡率には様々な変動要因がある。例えば都道府県単位で見ても相対的に10%以上（死亡率30%に対して**3%以上**）異なる。



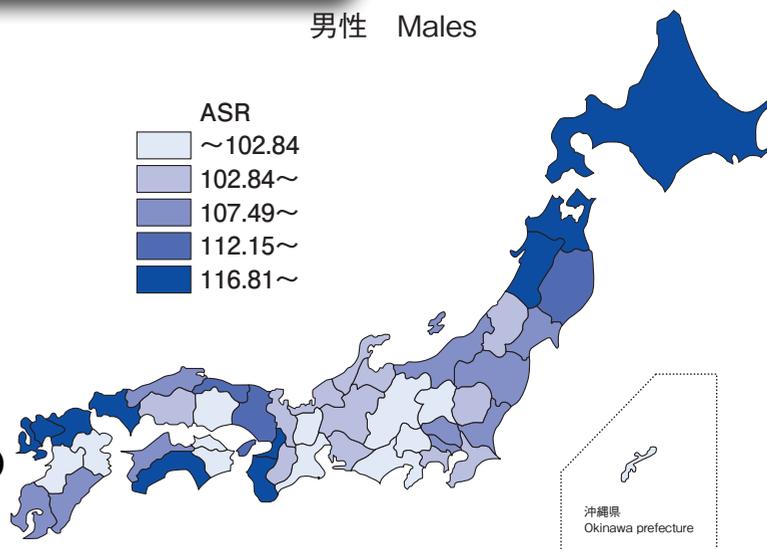
低線量被ばくによる**0.5%未満**の差を検出するのは**統計的に困難**。

75歳未満年齢調整死亡率（人口10万対）
Age-adjusted mortality rate under age 75 (per 100,000)

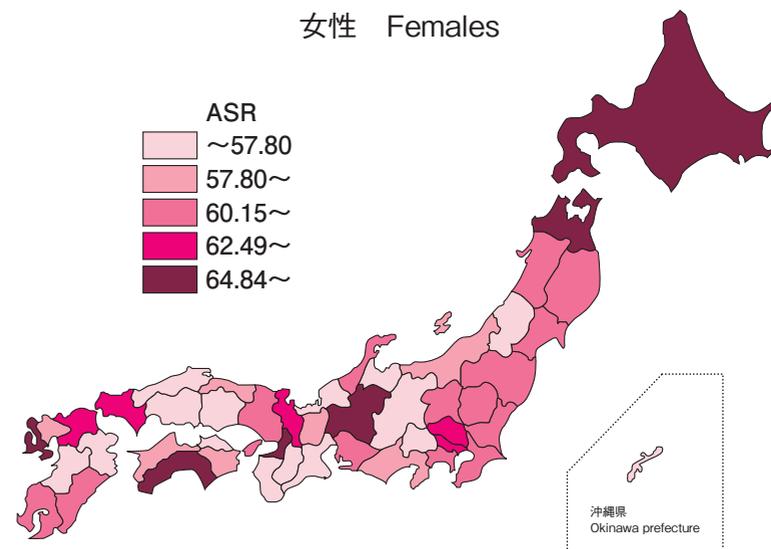
男女計 Both Sexes



男性 Males



女性 Females



図：がん研究振興財団のウェブサイトより引用

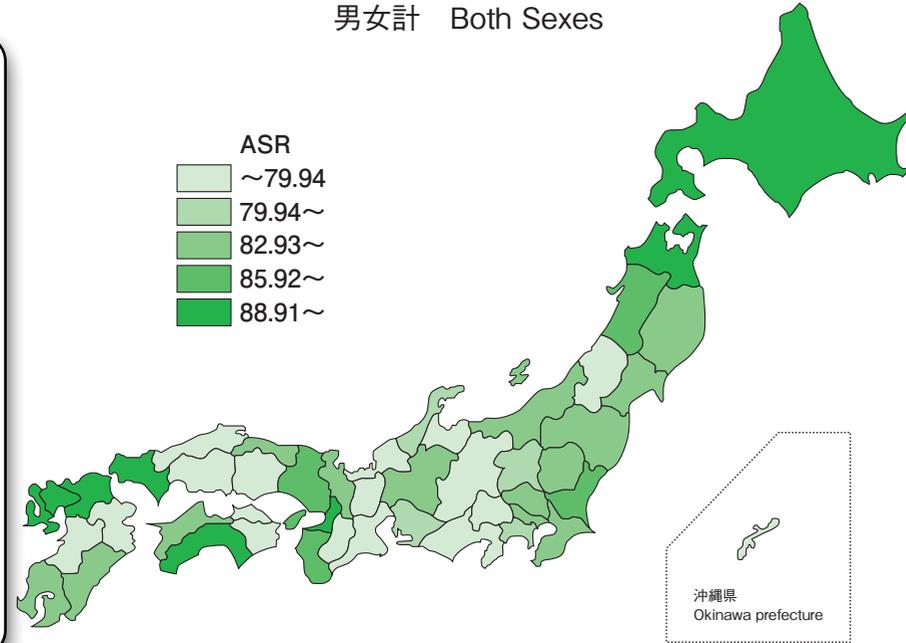
都道府県別75歳未満がん年齢調整死亡率 (2009年)

Age-adjusted Cancer Mortality Rate under Age 75 by Prefectures (2009)

(1) 全がん All Cancers

75歳未満年齢調整死亡率 (人口10万対)
Age-adjusted mortality rate under age 75 (per 100,000)

男女計 Both Sexes

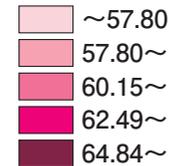


男性 Males

女性 Females

ASR

ASR



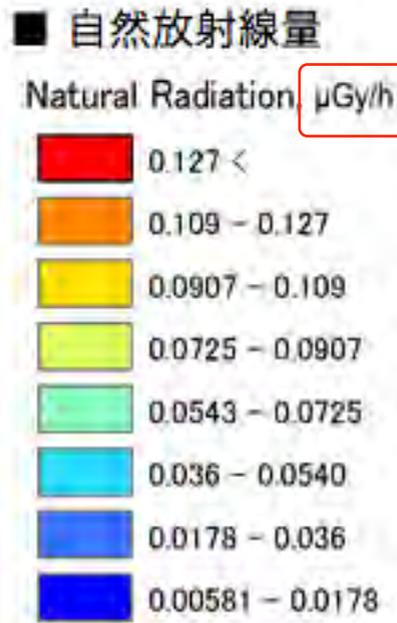
癌の死亡率には様々な変動要因がある。例えば都道府県単位で見ても相対的に10%以上（死亡率30%に対して**3%以上**）異なる。



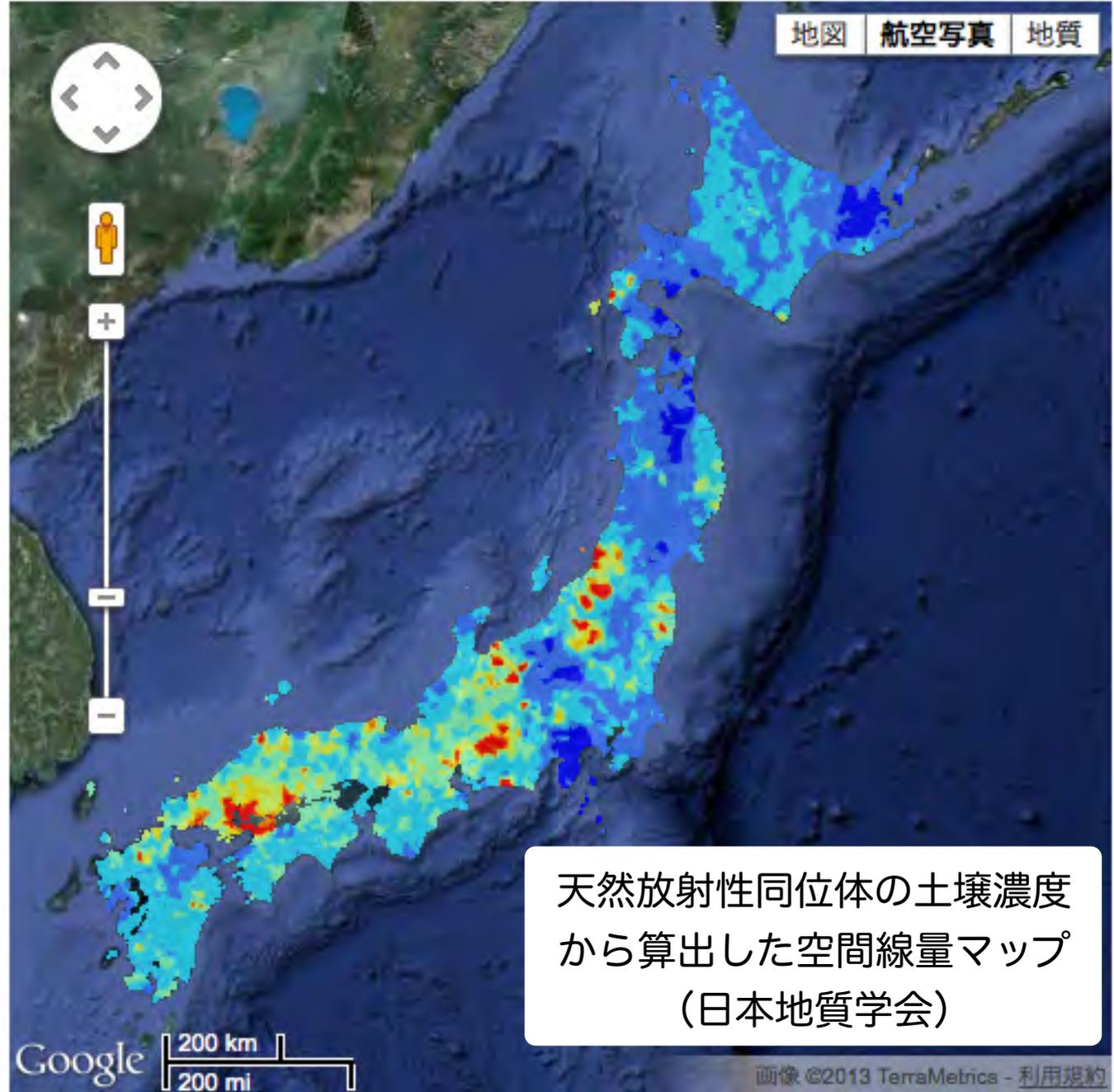
低線量被ばくによる**0.5%未満**の差を検出するのは**統計的に困難**。

現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

天然放射性同位体による外部被ばく量も全国均一ではないため、個人の蓄積線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。



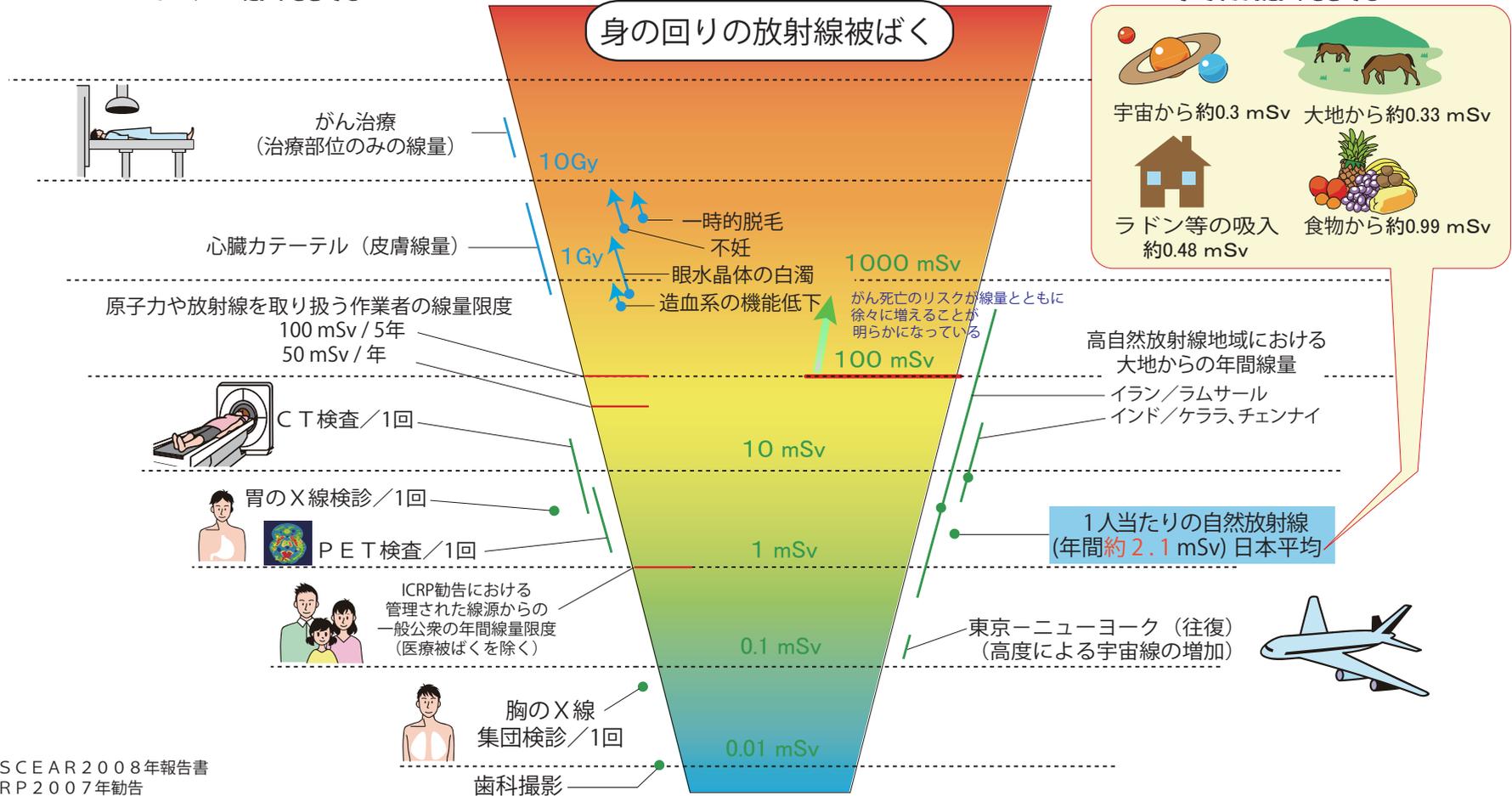
※ r 線による全身均一被ばくの場合
は $\text{Gy}=\text{Sv}$



放射線被ばくの早見図

人工放射線

自然放射線



- ・ UNSCEAR 2008年報告書
 - ・ ICRP 2007年勧告
 - ・ 日本放射線技師会医療被ばくガイドライン
 - ・ 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定)
- などにより、放医研が作成(2013年5月)

【ご注意】

- 1) 数値は有効数字などを考慮した概数です。
- 2) 目盛 (点線) は対数表示になっています。目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
- 3) この図は、引用している情報が更新された場合変更される場合があります。

【線量の単位】

各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)
放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりにどれくらいのエネルギーを受けたのかを表す物理的な量。

実効線量: mSv (ミリシーベルト)
臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。
各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、実効線量で1000 mSv に相当する。