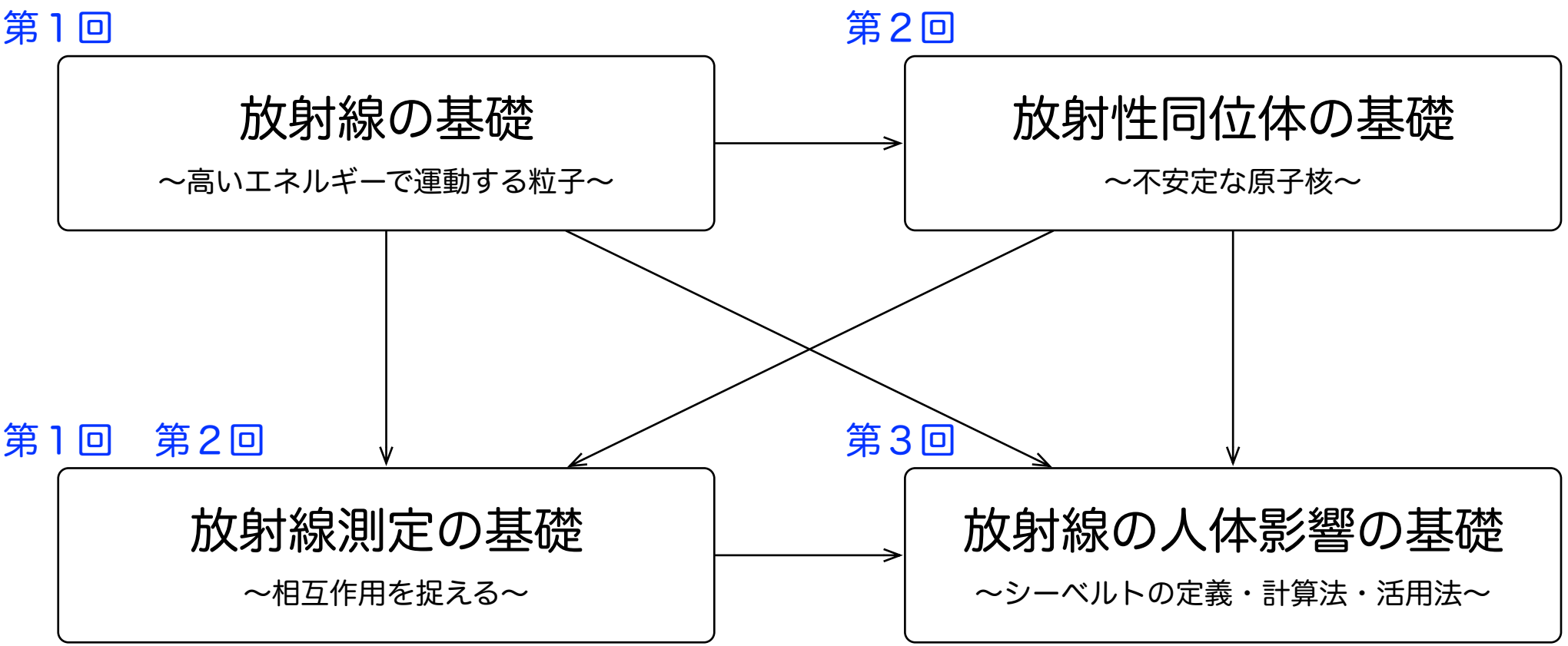
放射性同位体の基礎

東京大学大学院 農学生命科学研究科
アイソトープ農学教育研究施設/生産・環境生物学専攻
農地環境放射線学研究室
特任講師　廣瀬 農

講義の流れ


第１回
放射線の基礎
～高いエネルギーで運動する粒子～
第２回
放射性同位体の基礎
～不安定な原子核～
第１回　第２回
放射線測定の基礎
～相互作用を捉える～
第３回
放射線の人体影響の基礎
～シーベルトの定義・計算法・活用法～

今日の講義の概要

1）ウォーミングアップ

前回要点確認

Q&Aについて

用語の整理

原子の構造と周期表と同位体

2）放射性同位体の特徴
→　不安定な原子核

放射性同位体の安定化（壊変）

半減期

壊変法則と「核図表」

3）放射性同位体の測定

放射性同位体量の単位（Bq）

壊変で放出されるエネルギーの分配

Ge半導体検出器によるγ線スペクトル解析

4）放射性同位体の生成

壊変、核融合、中性子吸収、
核分裂、粒子間の衝突

5）原子力発電と核燃料サイクル

※ 時間が足りなければ次回に回します

放射線とはどんなもの？

1）　原子よりも小さい何らかの粒子が、

2）　通常の数千倍以上のエネルギーを持って
運動している場合、

3）　放射線としての性質、すなわち、物質と
相互作用して電離を起こす性質を示す。

放射線と物質の相互作用

～まとめ～

粒子に電荷が有る場合は、経路に沿って直接的に電離を起こす。
制動放射で光子線を発生することもある。

粒子に電荷が無い場合、物質中で電荷を持つ粒子（電子や陽子）をはじき飛ばし、はじき飛ばされた粒子が間接的に電離を起こす。

あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

直接・間接的に電離を起こすことで放射線の運動エネルギーが消費され、最終的には放射線としての性質を失う。

Q&Aについて

ショートレポート用紙に記入されていた質問に、私に可能な範囲で回答しています。私の説明能力を超える内容については、有用と思われる参考文献を紹介してあります。

今日の講義を聞いた後の方が理解できる項目も多いと思いますので、講義後に読み直してみて下さい。

用語の整理

放射性同位体

ある元素の同位体のうち、放射性、つまり放射線を出すものを示す。英語でRadioIsotopeなので、日本ではRIと略すことが多い（例：RI施設）。放射性同位元素と呼ばれることもある。

放射性核種

放射性同位体とほぼ同義で使われることが多いが、原子全体よりも原子核に着目した用語。これは、ある原子が放射性か否かは原子核の性質で決定されるため。

放射性物質

かなり意味があいまいで、放射線同位体を含む物質全般を表す。放射性同位体で表面が汚染されたものなどを含む場合がある。

用語の整理

放射能

そのまま読むと「放射線を出す能力」であるが、実際には「放射線を出す能力があるもの＝放射性同位体」（および、その濃度や量）という意味で使われることが多い。

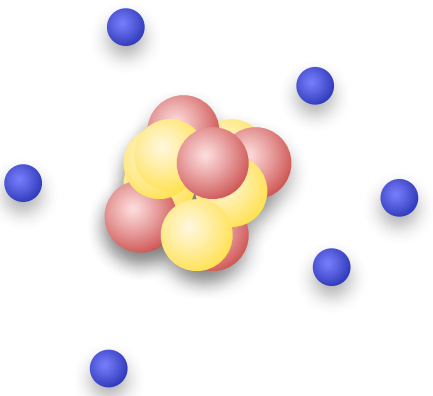
例えば、ある試料に含まれる放射性同位体の種類や濃度を測定することを「放射能測定」と呼ぶことがある。同様に、放射性同位体による汚染を「放射能汚染」と表現することがある。

個人的には、明確に意味が伝わると判断できる状況以外では、使用を避けるべき用語であると考えている。

原発事故直後の"AERA"の表紙
(2011.3.28 朝日新聞出版)

放射性同位体の特徴

…の前に、原子の構造について



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）　※ 陽子数＝電子数

放射性同位体の特徴

…の前に、周期表について

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	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

話を単純にするため、中央の遷移元素を省略

放射性同位体の特徴

…の前に、周期表について

H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra						

放射性同位体の特徴

…の前に、周期表について

電子数（＝陽子数）が右方向に増加

1 H							2 He
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra						

放射性同位体の特徴

…の前に、周期表について

電子数（＝陽子数）が右方向に増加

縦のグループが
化学的に類似

1 H							2 He
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr						
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra						

電子（特に最外殻電子）の配置と化学的性質の法則性を表すのが周期表

放射性同位体の特徴

…の前に、同位体について

電子配置と化学的性質の法則を表すのが周期表

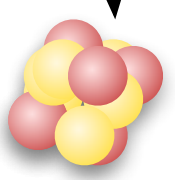
電子数＝陽子数なので、中性子の数は周期表に無関係

この2種類の原子核は、陽子の数が同じなので、周期表では同じ位置

これを「同位体」と呼ぶ

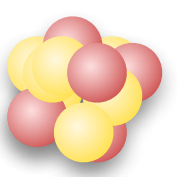
陽子6個なので…

C



陽子6個なので…

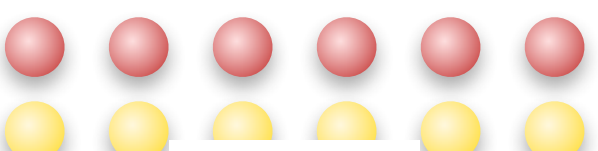
C



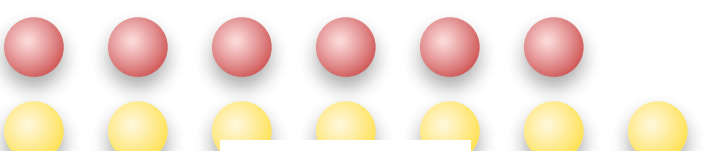
陽子

中性子

※電子省略



中性子6個



中性子7個

放射性同位体の特徴

…の前に、同位体について

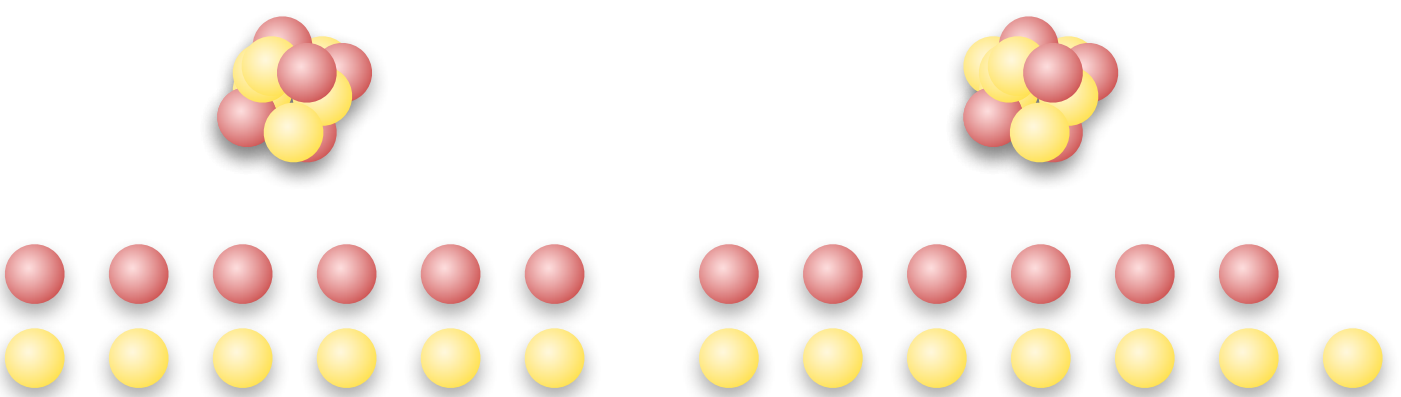
同位体を区別するために、元素記号の左肩に
陽子数＋中性子数（＝質量数）を書く

今日の話では、
この数が重要！

^{12}C

^{13}C

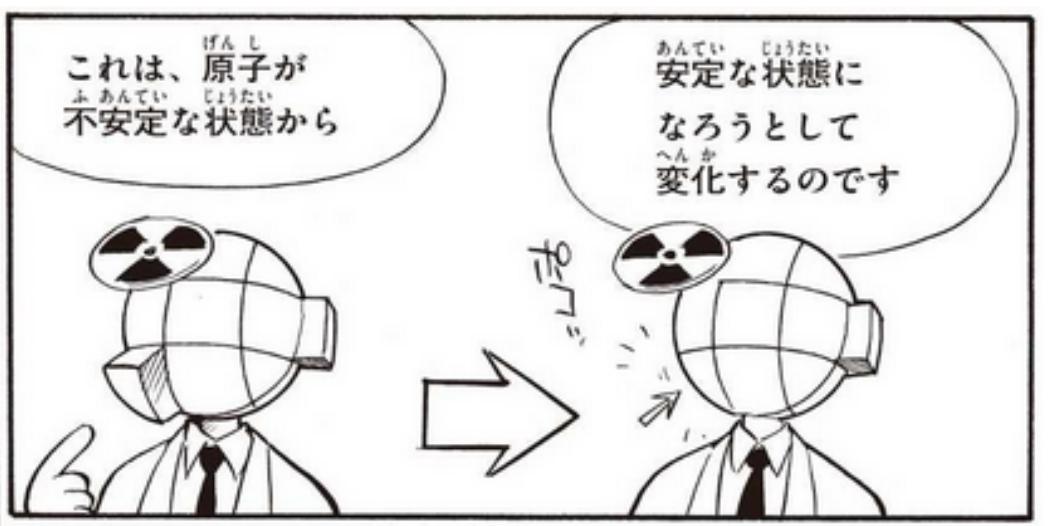
"じゅうさんしー"
"たんそじゅうさん"
"カーボンサーティーン"
などと発音する。
上付き文字が使えない時は
C-13と表記する。



放射性同位体の特徴

～不安定な原子核～

ある原子の原子核が不安定な場合、時間経過にともなって一定の確率で、余分なエネルギーを何らかの粒子に与えて放出し、より安定な状態に変化する。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

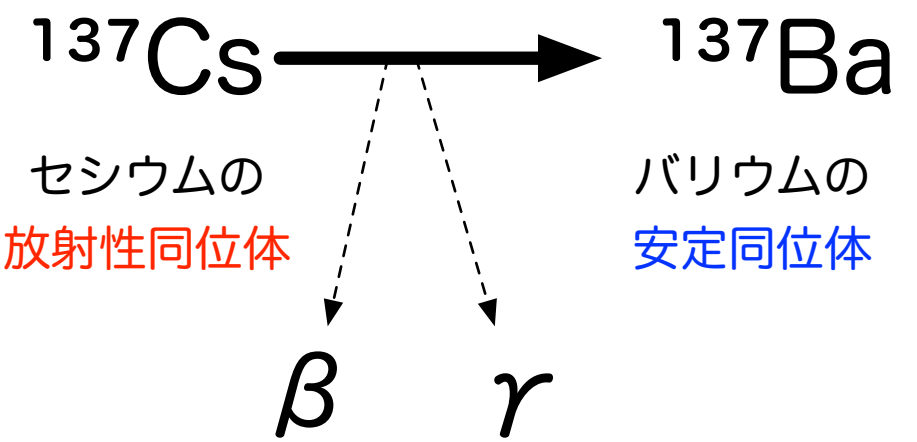
放射性同位体の特徴

～不安定な原子核～

ある原子の原子核が不安定な場合、時間経過にともなって一定の確率で、余分なエネルギーを何らかの粒子に与えて放出し、より安定な状態に変化する。

この変化を壊変（崩壊）と呼び、壊変する原子核を放射性同位体（放射性核種）という。エネルギーを与えられた粒子が放射線となる。

あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」



^{137}Csの場合、余分なエネルギーはβ線やγ線として放出される（厳密にはX線なども出るが詳細は後述）。

放射性同位体の特徴

～不安定な原子核～

１回の壊変では完全に安定化しないこともある。

^{90}Sr → ^{90}Y → ^{90}Zr

ストロンチウムの
放射性同位体

余分なエネルギー
（＝放射線）

イットリウムの
放射性同位体

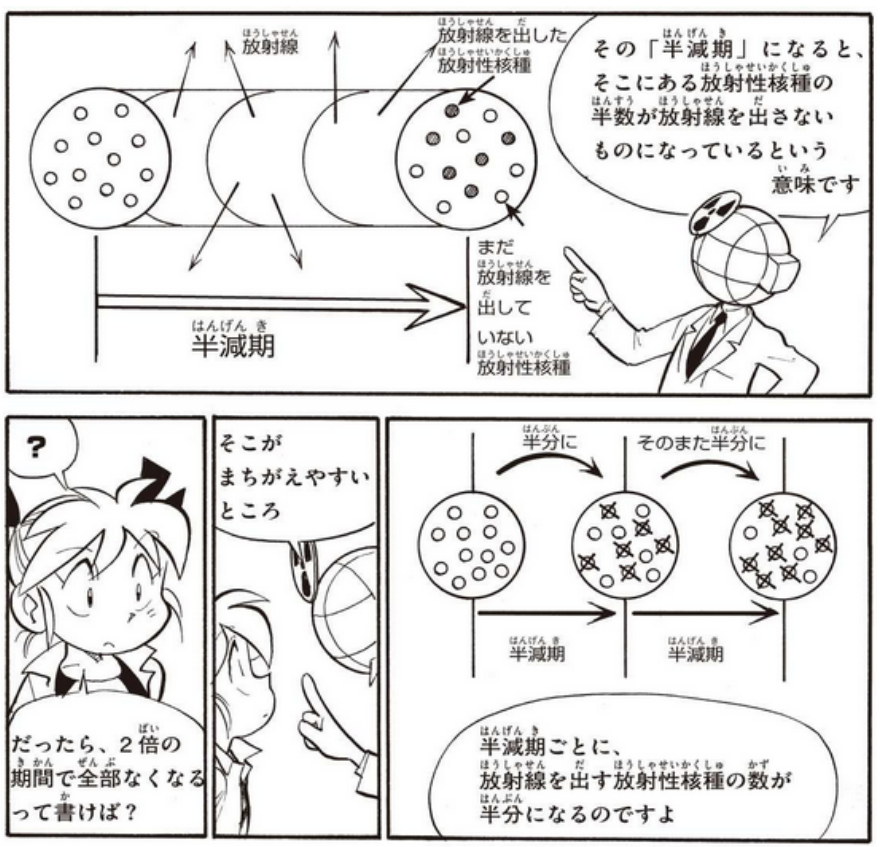
余分なエネルギー
（＝放射線）

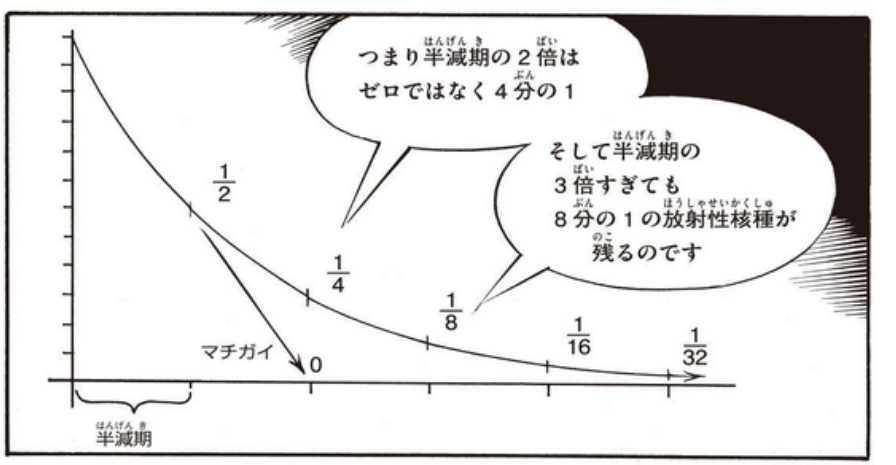
ジルコニウムの
安定同位体

半減期という単位

～核種の不安定さを表す単位～

個々の放射性核種がいつ壊変するかは分からないが、集団で見た場合の減少速度は測定できる。放射性核種の数が半分に減るのに要する時間を半減期と呼ぶ。不安定な核種は時間あたりの壊変確率が高く、半減期が短い。



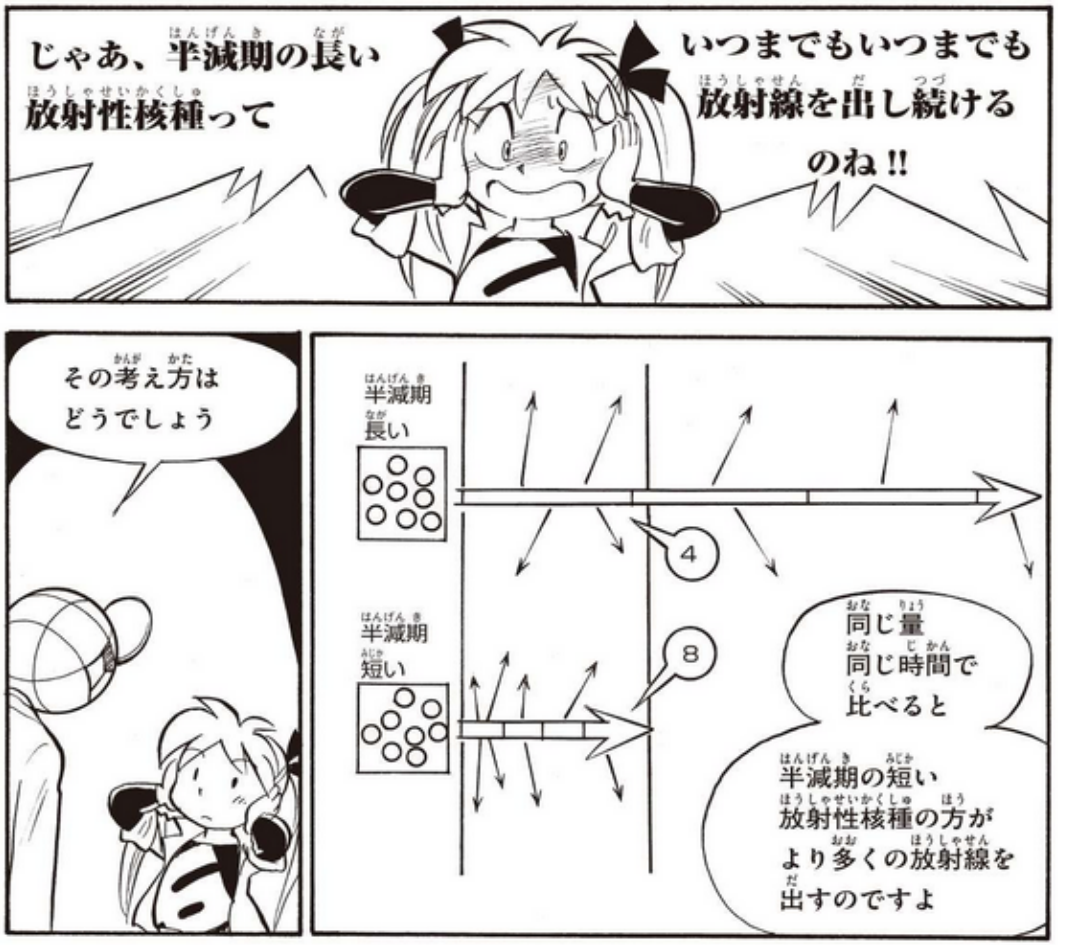


あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

$(1/2)^{10} = 1/1024$なので、
10半減期で約1/1000と覚えておくと実用的。
例：半減期2年の^{134}Csは、20年間で約1/1000に減少する。

半減期という単位

～核種の不安定さを表す単位～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

半減期約2週間の^{32}Pは、約178万個の原子が存在すると1秒間に1回壊変が起こる。

半減期約30年の^{137}Csは、約13億7千万個の原子が存在すると1秒間に1回壊変が起こる。

放射性同位体の原子核はなぜ不安定？

～核図表とα壊変・β壊変～

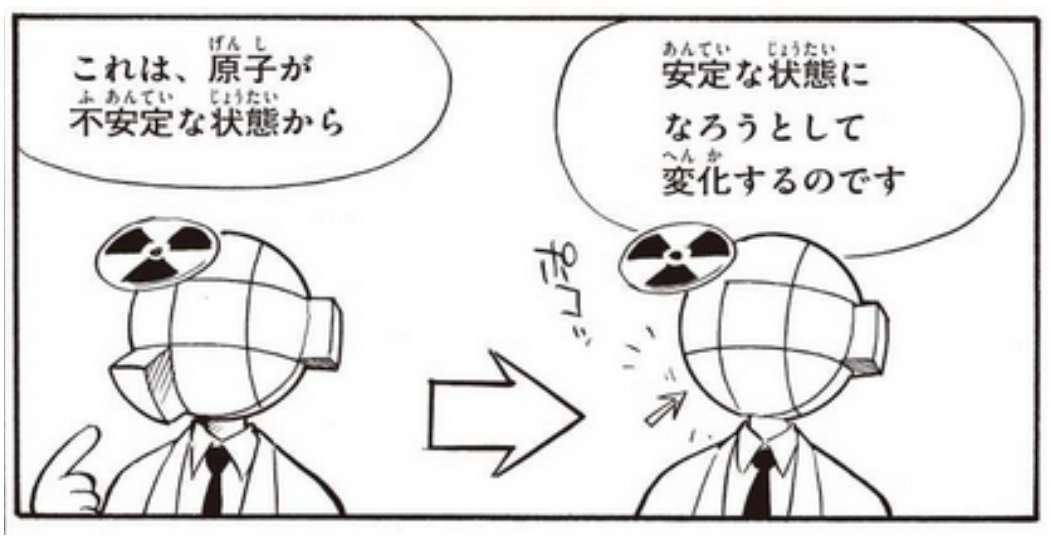
原子核が安定であるには、

・陽子と中性子の比が適正である、

・陽子と中性子の合計（＝質量数）が大きすぎない、

という２つの条件が必要と考えられている。

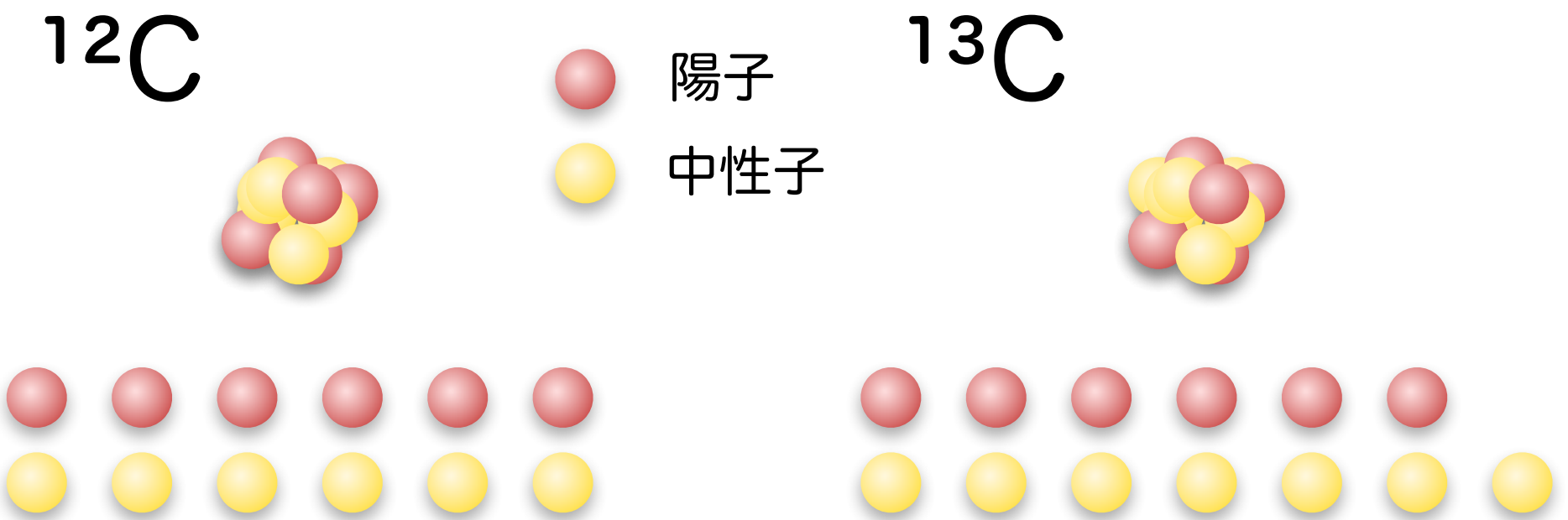
これらの条件を満たさないと「壊変」して安定化する。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

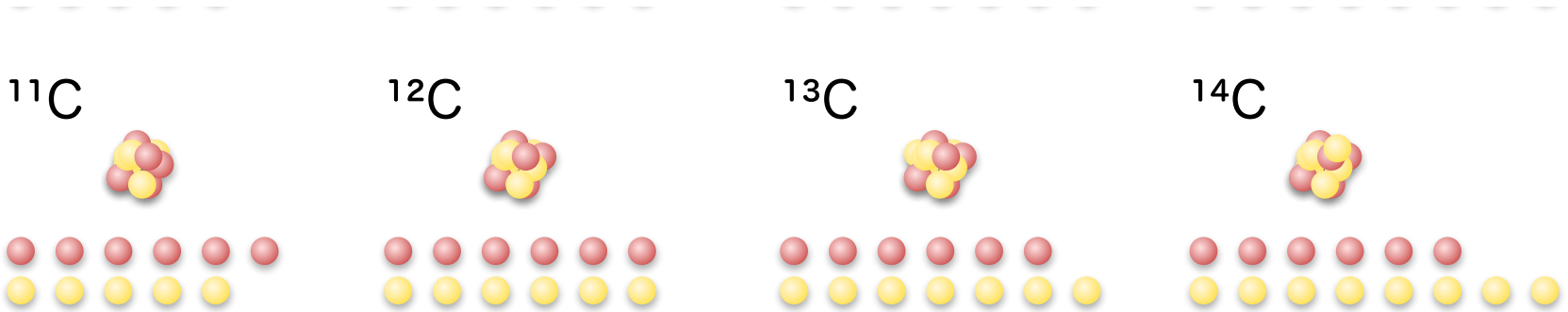
放射性同位体の原子核はなぜ不安定？

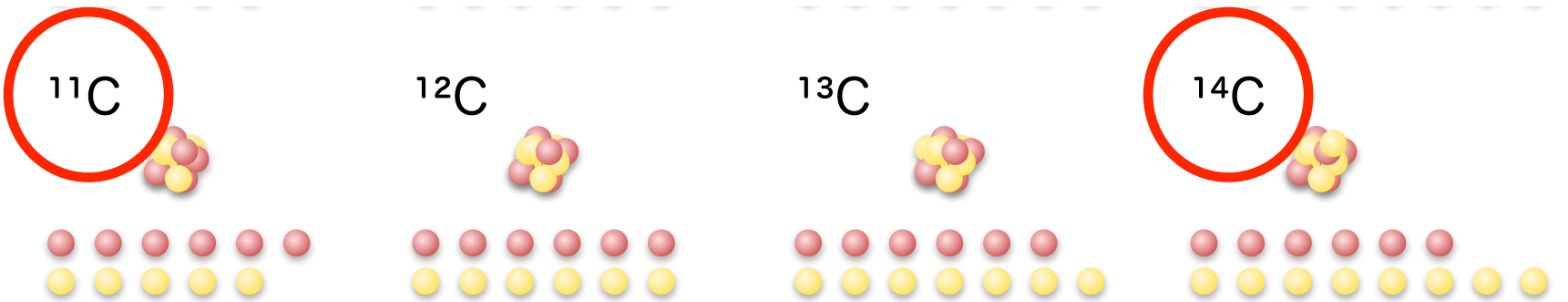
～法則性を探してみる～



両方とも炭素なので、周期表では同じ位置

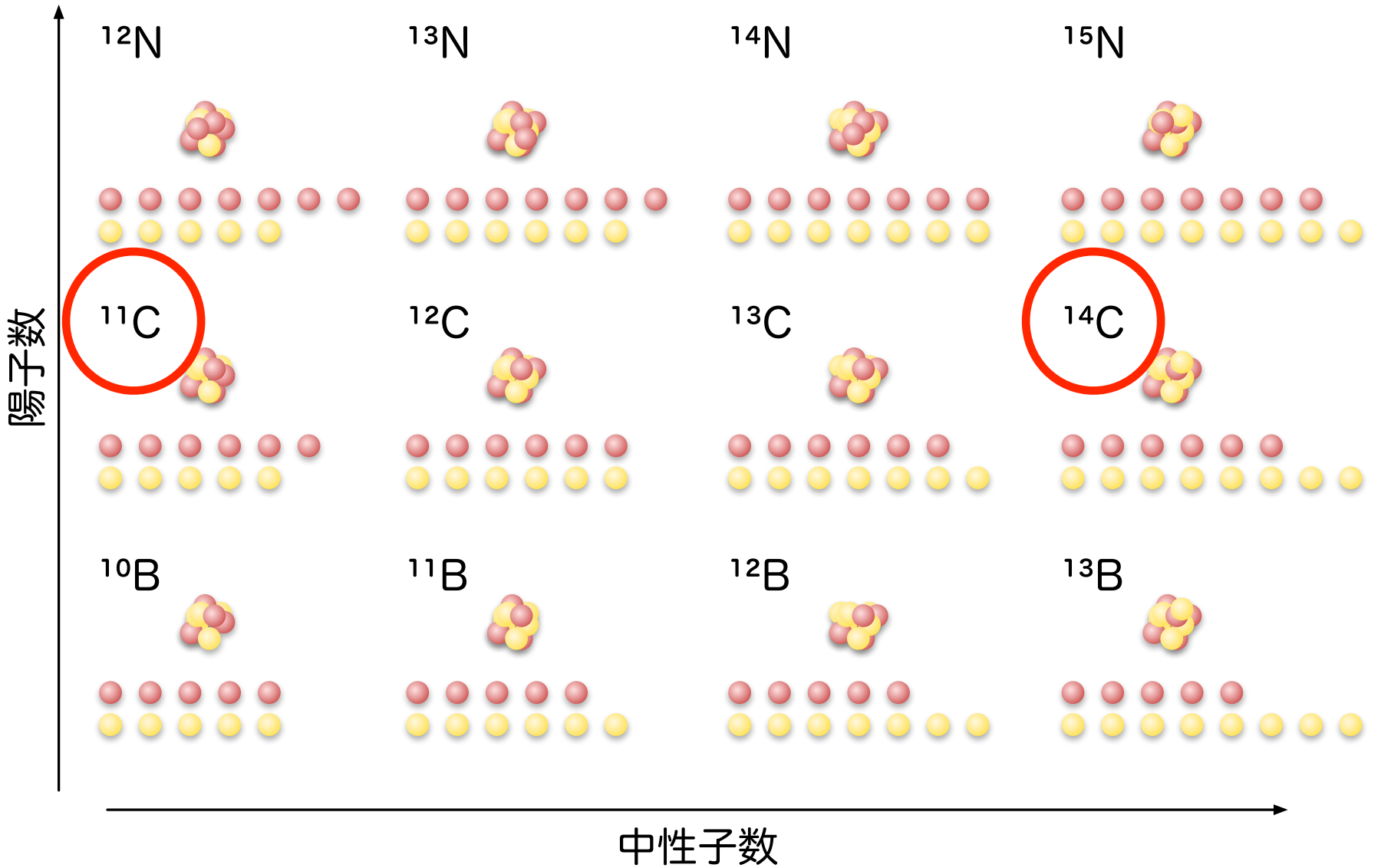
もう少し広範囲の中性子数で並べてみる


^{11}C
^{12}C
^{13}C
^{14}C

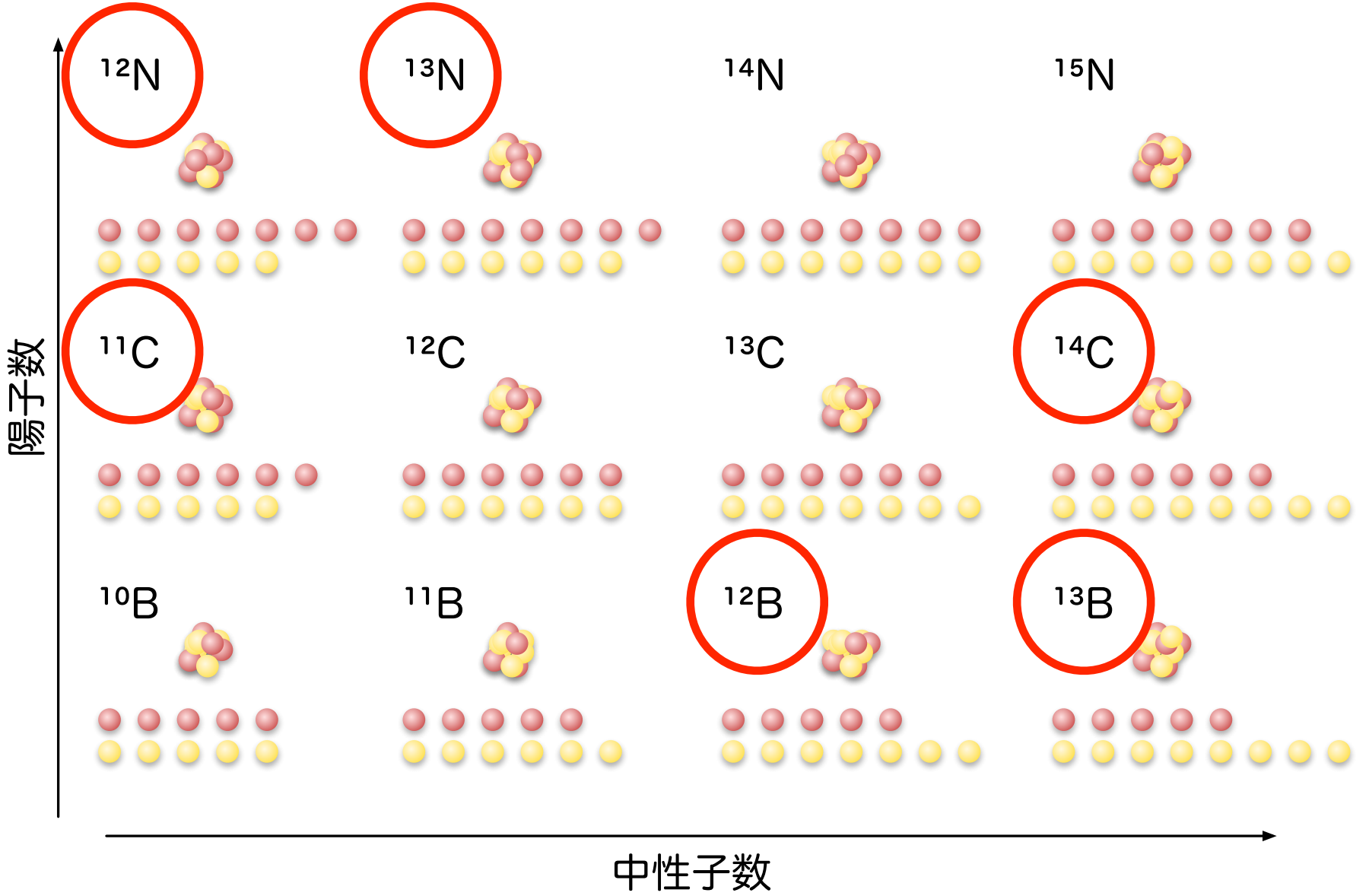


◯で囲んだ核種（同位体）が不安定＝放射性

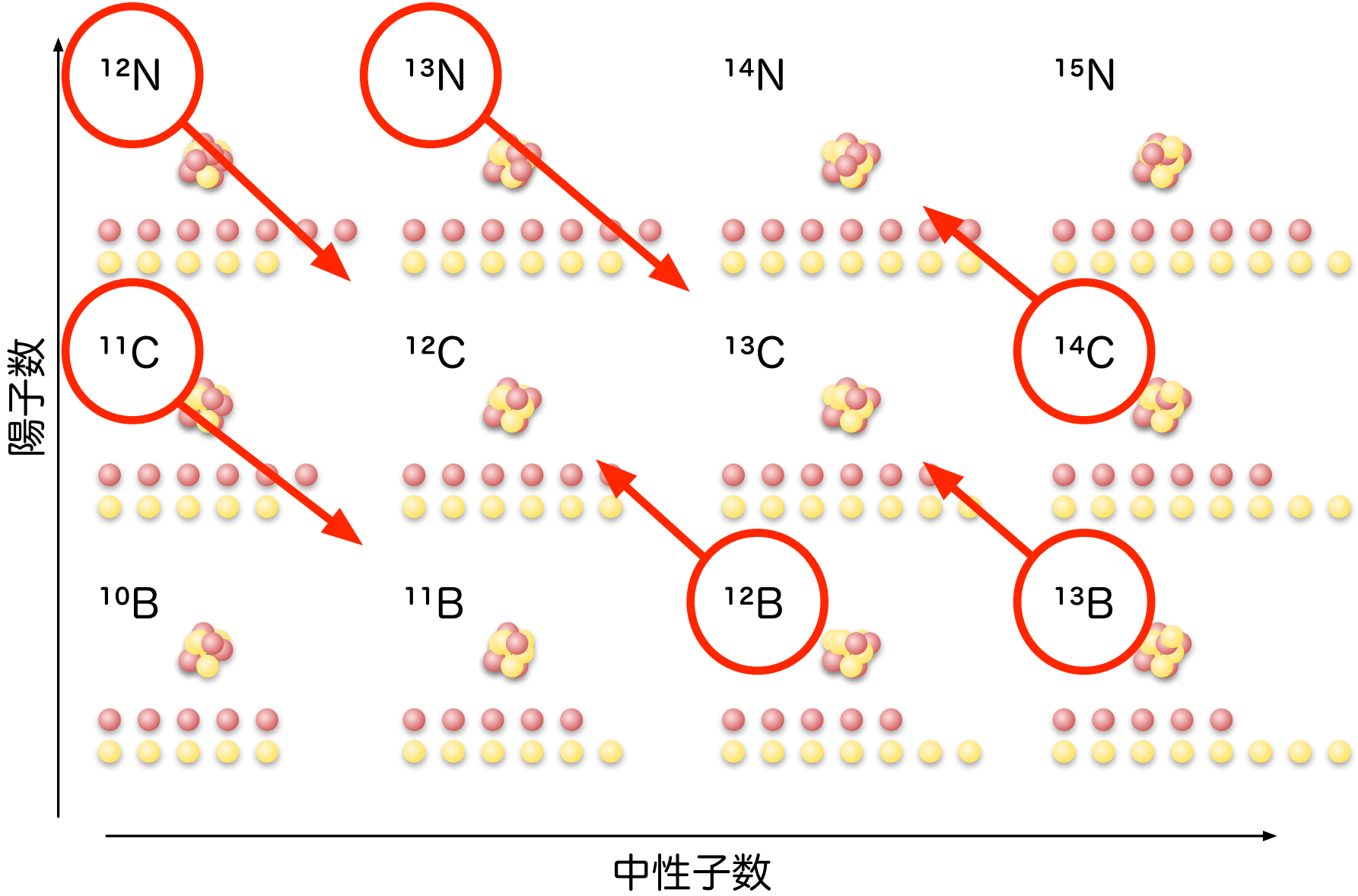
さらに、陽子数と中性子数で表にしてみると…



炭素よりも陽子が少ないB（ホウ素）と多いN（窒素）を加えた表



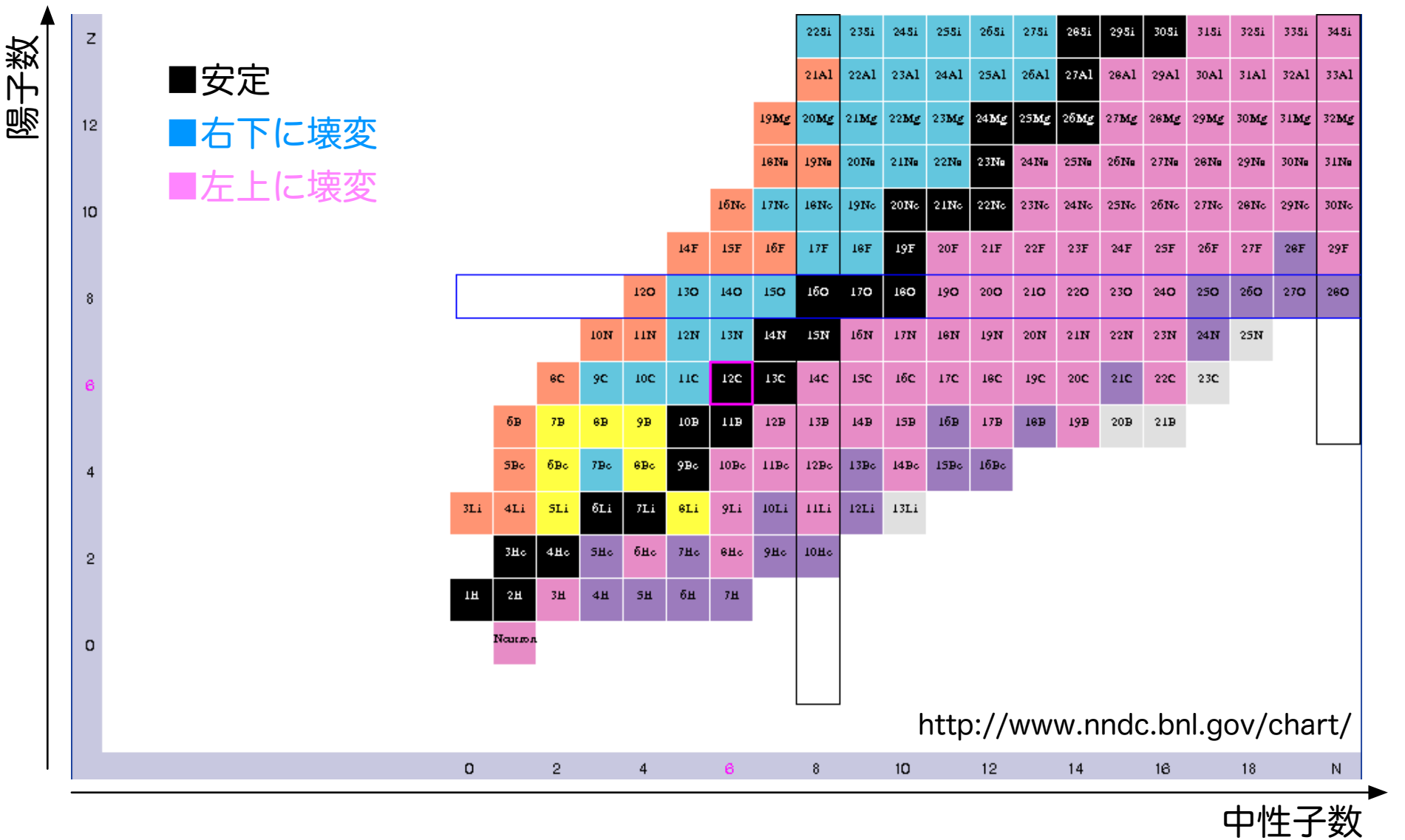
◯で囲んだ核種（同位体）が不安定＝放射性



矢印の方向に壊変する　…　法則性が見えてきた？

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。

※ 核図表には多くの種類がある。下記の図の場合は壊変の種類で色分けしている。

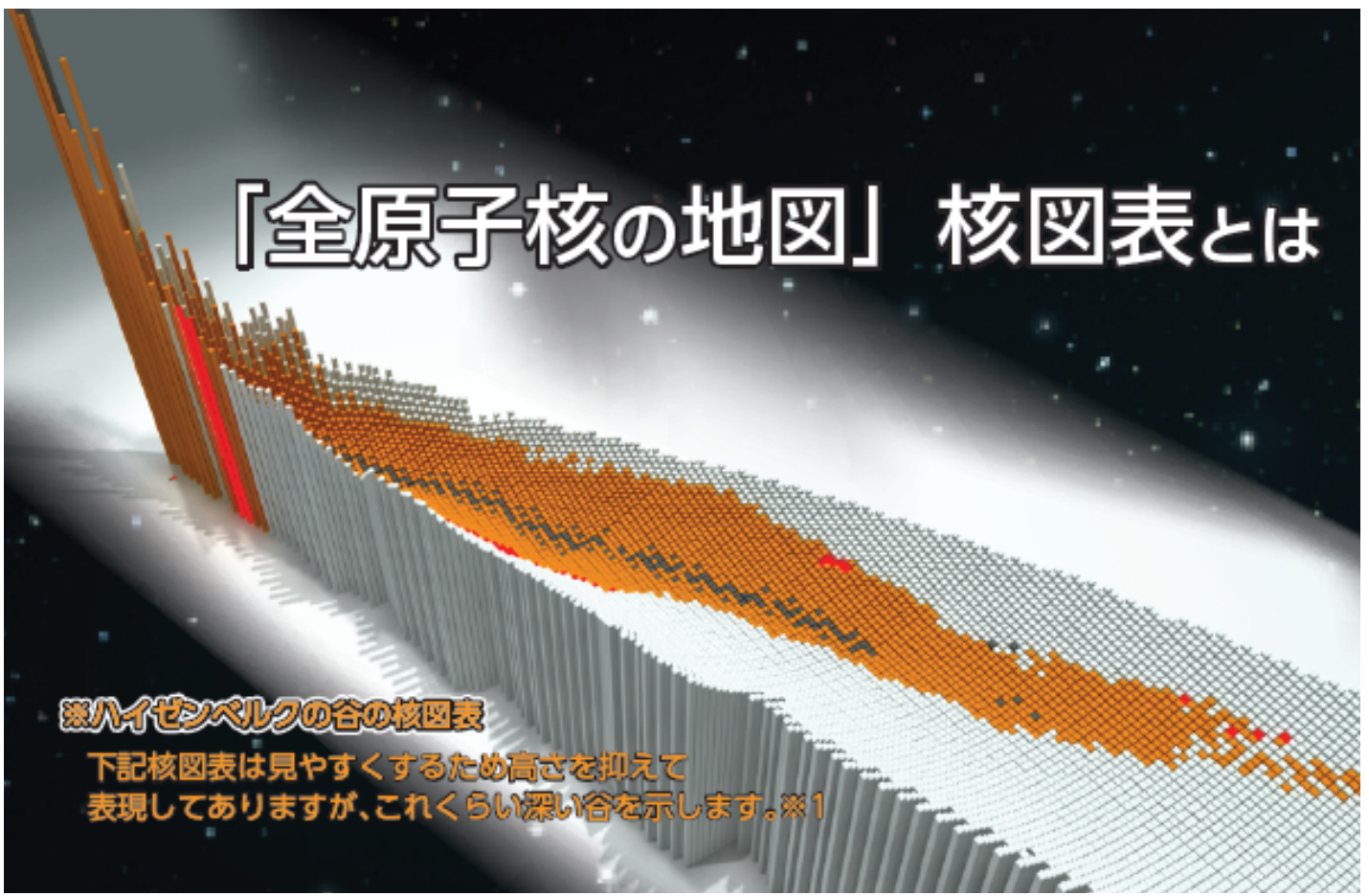


余談：様々な核図表

下図は理化学研究所仁科加速器研究センターで公開しているポスターから引用した立体核図表。

高さが不安定さを示し、中央に安定同位体の谷（ハイゼンベルクの谷）が存在する。

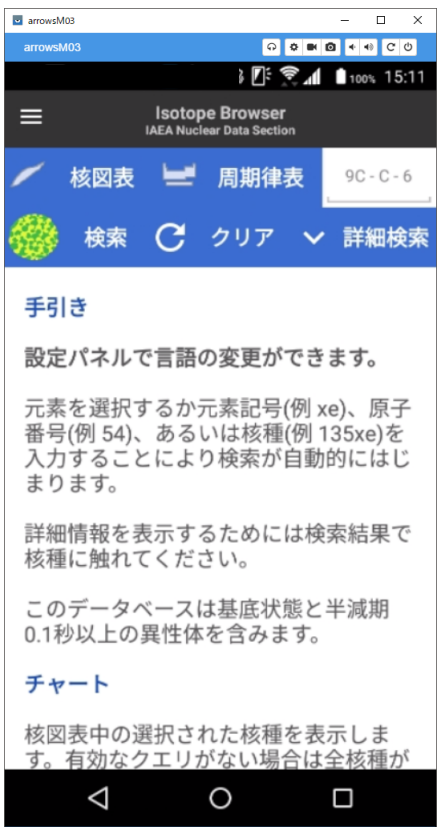
また、谷から遠ざかるほど、つまり安定同位体よりも陽子・中性子比がずれるほど、不安定なことが分かる。



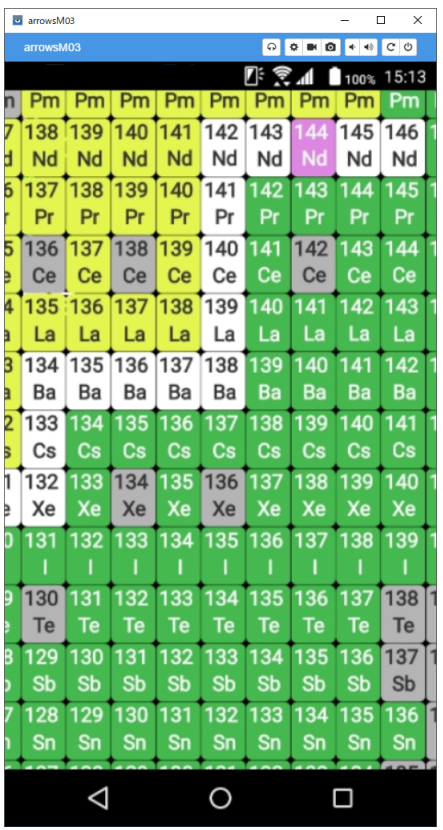
https://www.nishina.riken.jp/enjoy/kakuzu/index.html

余談：様々な核図表

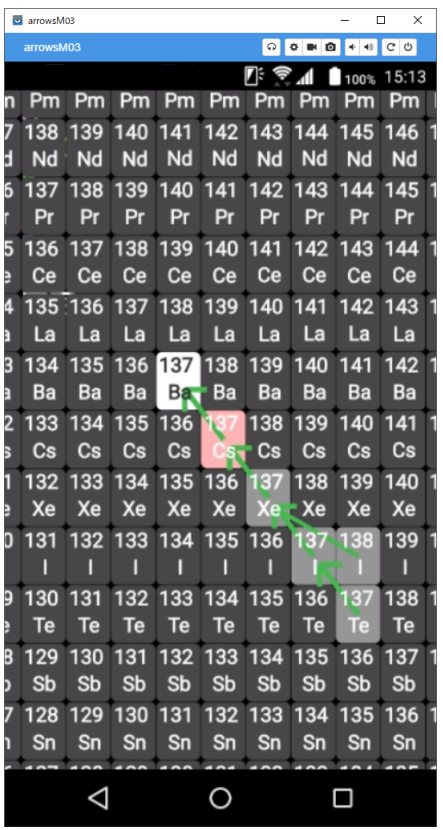
下図はスマートフォン（Android, iOS）で使える核図表アプリ"Isotope Browser"。
IAEA（国際原子力機関）が開発しており、無料で利用できる（※）。



メインメニュー



壊変を色分け



壊変系列表示

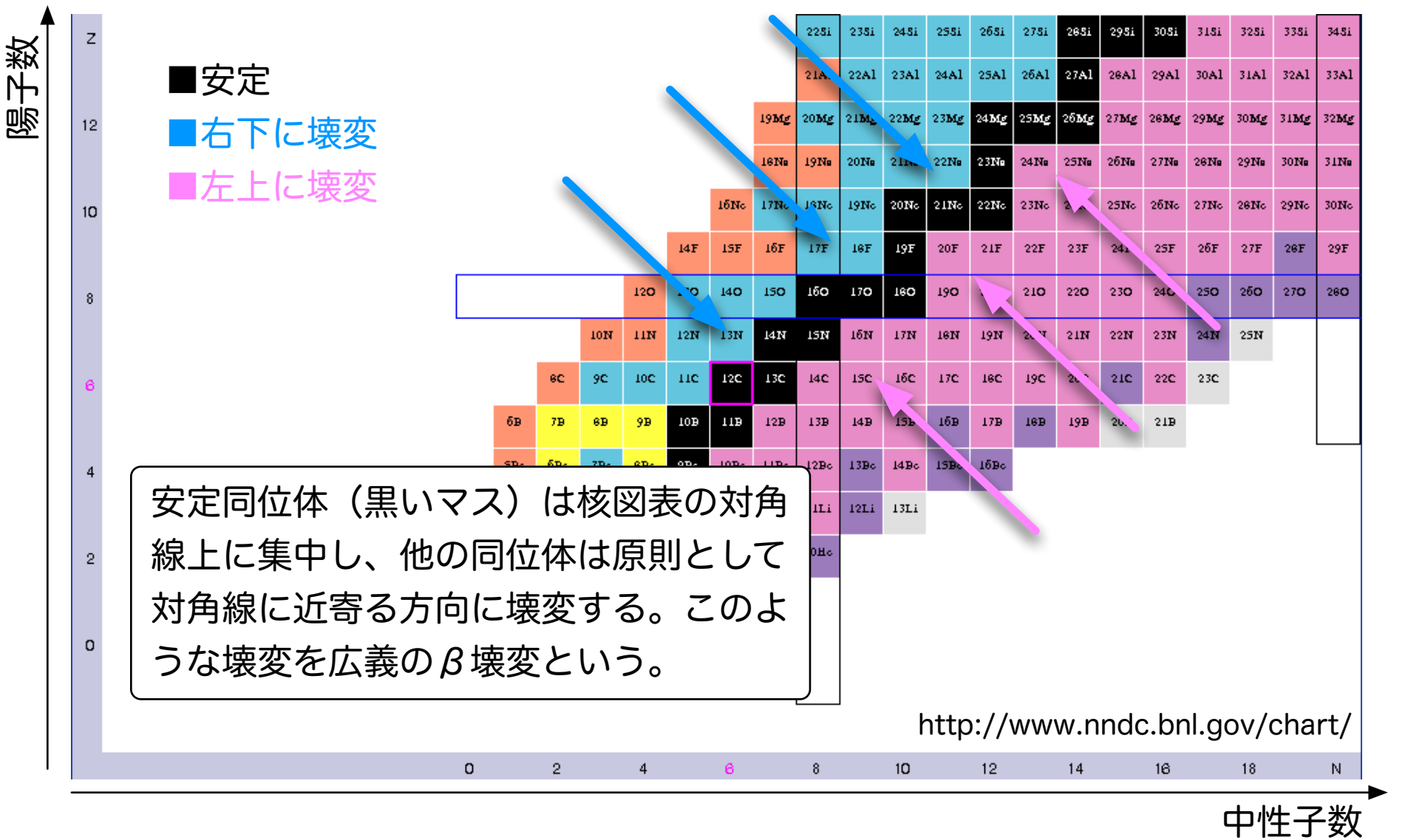
拡大表示

"Isotope Browser"
https://www-nds.iaea.org/

※ 電波状態が良ければ実演します。

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。

※ 核図表には多くの種類がある。下記の図の場合は壊変の種類で色分けしている。



安定同位体（黒いマス）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。このような壊変を広義のβ壊変という。

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

■左上に壊変 ＝ 原子核の中性子が１個減り、陽子が１個増える

β壊変
（β－壊変）

$$\underbrace{\begin{array}{ccccc} \text{中性子} & \rightarrow & \text{陽子} & + & \text{電子} \\ 0 & & +1 & & -1 \end{array}}_{\text{各粒子の電荷}}$$

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

■左上に壊変 ＝ 原子核の中性子が１個減り、陽子が１個増える

β壊変

（β－壊変）

中性子 → 陽子 ＋ 電子

0　　+1　　-1

壊変前後で電荷の総和は等しい

この電子がβ線になる

－電荷の電子を放出するため

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

■左上に壊変 ＝ 原子核の中性子が１個減り、陽子が１個増える

β壊変
（β－壊変）

中性子 → 陽子 ＋ 電子 ＋ 反電子ニュートリノ

0　　+1　　-1

壊変前後で電荷の総和は等しい

－電荷の電子を放出するため

この電子がβ線になる

ニュートリノは物質との相互作用が弱く、地球すら容易に通過するため、測定は極めて難しい（普通の検出器ではβ線だけが出ているように見える）。

このことがどんな面倒を引き起こすのか？ということについては今日の講義の後半、測定の話の際に…

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

■左上に壊変 ＝ 原子核の中性子が１個減り、陽子が１個増える

β壊変
（β－壊変）

中性子	→	陽子	＋	電子
0		+1		-1

■右下に壊変 ＝ 原子核の陽子が１個減り、中性子が１個増える

β＋壊変

＋電荷の陽電子（ポジトロン）を放出

陽子	→	中性子	＋	陽電子
+1		0		+1

EC壊変

軌道電子を原子核が捕獲
（Electron Capture）

陽子	＋	電子	→	中性子
+1		-1		0

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

■左上に壊変 ＝ 原子核の中性子が１個減り、陽子が１個増える

β壊変
（β－壊変）

中性子 → 陽子 ＋ 電子 ＋ 反電子ニュートリノ
0　　+1　　-1

■右下に壊変 ＝ 原子核の陽子が１個減り、中性子が１個増える

β＋壊変

＋電荷の陽電子（ポジトロン）を放出

陽子 → 中性子 ＋ 陽電子 ＋ 電子ニュートリノ
+1　　0　　+1

EC壊変

軌道電子を原子核が捕獲
（Electron Capture）

陽子 ＋ 電子 → 中性子 ＋ 電子ニュートリノ
+1　　-1　　0

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

陽電子（ポジトロン）は運動エネルギーを使い果たすと周囲の電子と対消滅を起こし、1対の511keVのγ線を放出する。この現象を応用したものが、がんの診断等に用いられるPET（Positron Emission Tomography）。

■右下に壊変 ＝ 原子核の陽子が１個減り、中性子が１個増える

β＋壊変　　陽子 → 中性子 ＋ 陽電子

+1　　0　　+1

＋電荷の陽電子（ポジトロン）を放出

EC壊変　　陽子 ＋ 電子 → 中性子

+1　　-1　　0

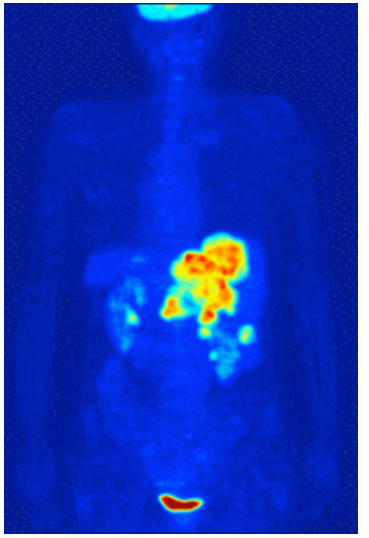
軌道電子を原子核が捕獲
（Electron Capture）

広義のβ壊変には、以下の壊変が含まれる

陽電子（ポジトロン）は運動エネルギーを使い果たすと周囲の電子と対消滅を起こし、1対の511keVのγ線を放出する。この現象を応用したものが、がんの診断等に用いられるPET（Positron Emission Tomography）。

■右下に壊変 ＝ 原子核

PETの一種であるFDG-PETでは、グルコースを^{18}Fで標識して患者に投与する。がん細胞は一般にブドウ糖代謝が活発なので、^{18}Fはがん細胞に集積される。この集積位置を^{18}Fのβ＋壊変で生じる対消滅γ線をもとに特定する。



https://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography

β＋壊変

＋電荷の陽電子（ポジトロン）を放出

EC壊変

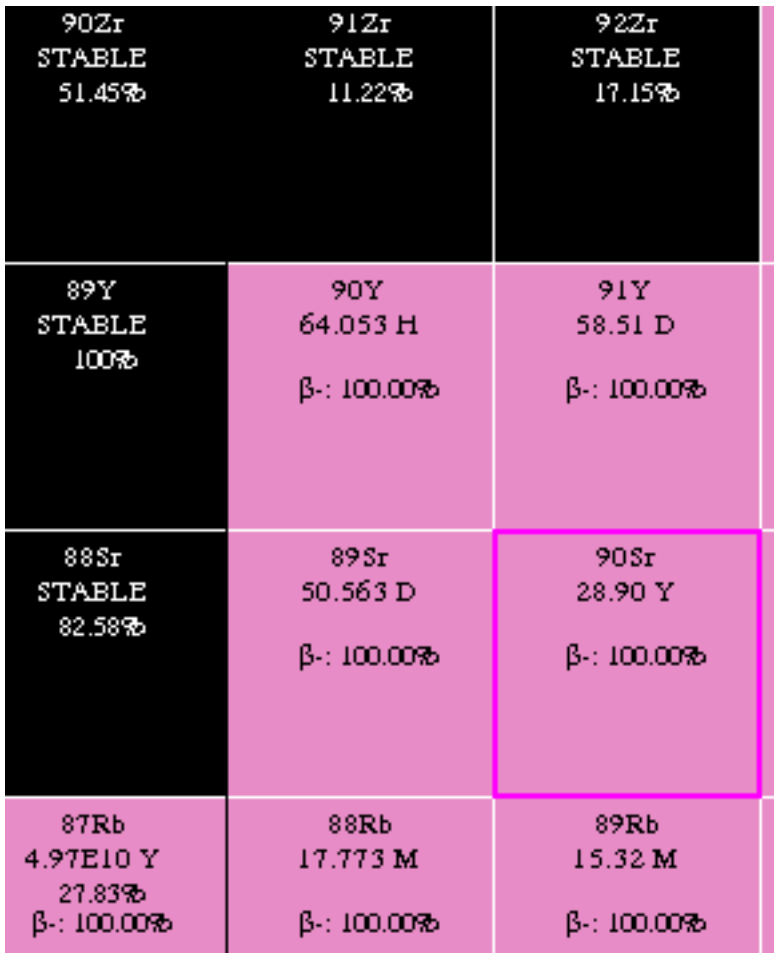
軌道電子を原子核が捕獲
（Electron Capture）

陽子 ＋ 電子 → 中性子 ＋ 電子ニュートリノ

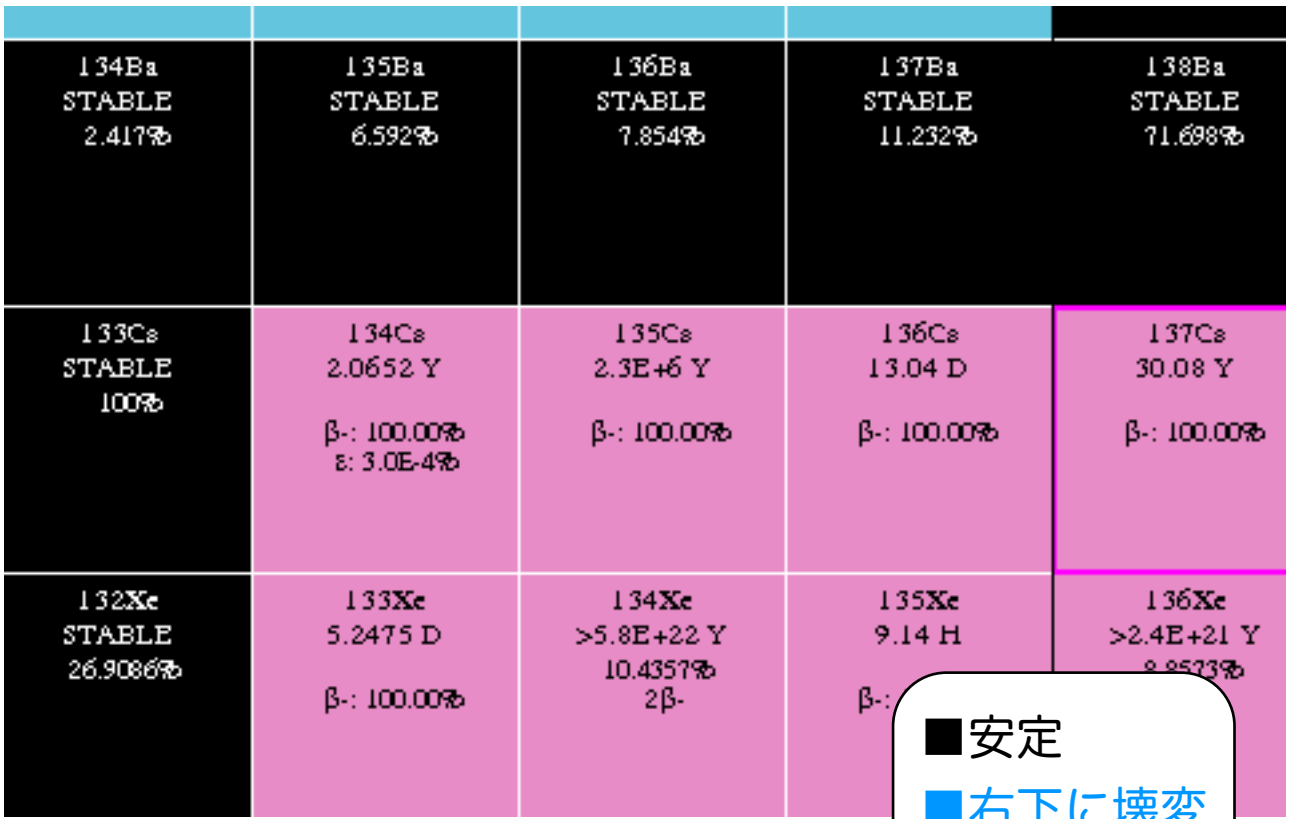
+1　　-1　　0

具体例：原発事故放出核種のβ壊変

^{90}Sr周辺の核図表



^{134}Cs・^{137}Cs周辺の核図表



http://www.nndc.bnl.gov/chart/

■安定
■右下に壊変
■左上に壊変

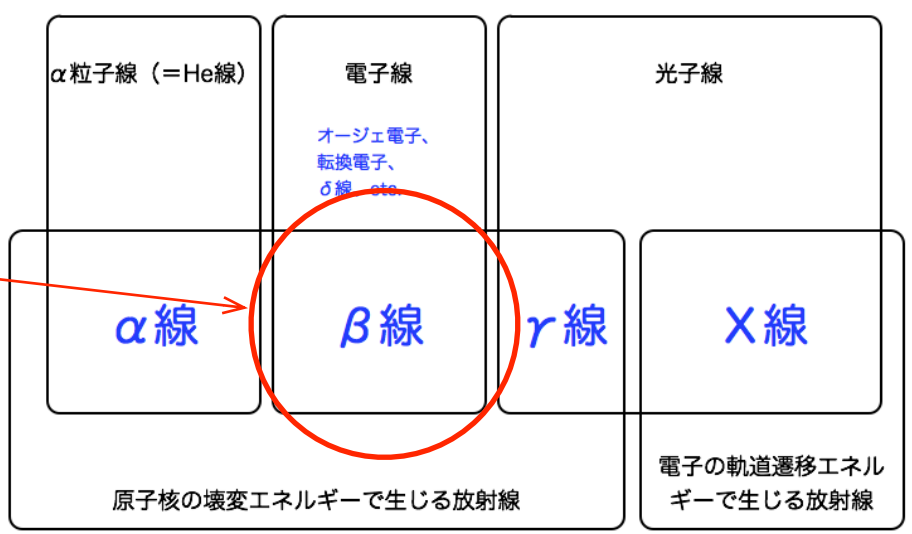
※ 全てβ壊変（β－壊変）である理由は後ほど…

β壊変まとめ

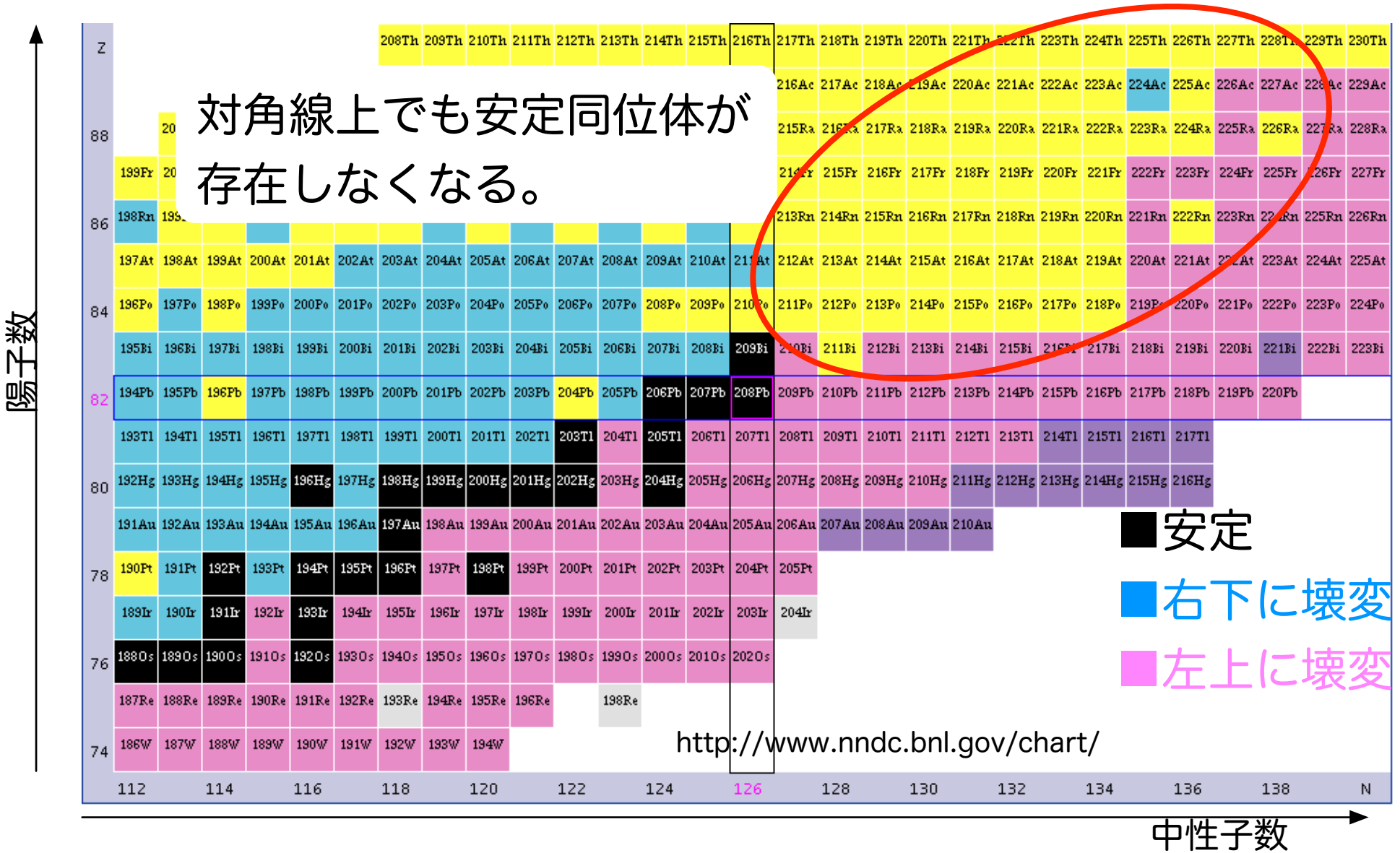
原子核には安定となる陽子：中性子比が存在し、そこから外れると不安定（＝放射性）になる。

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。

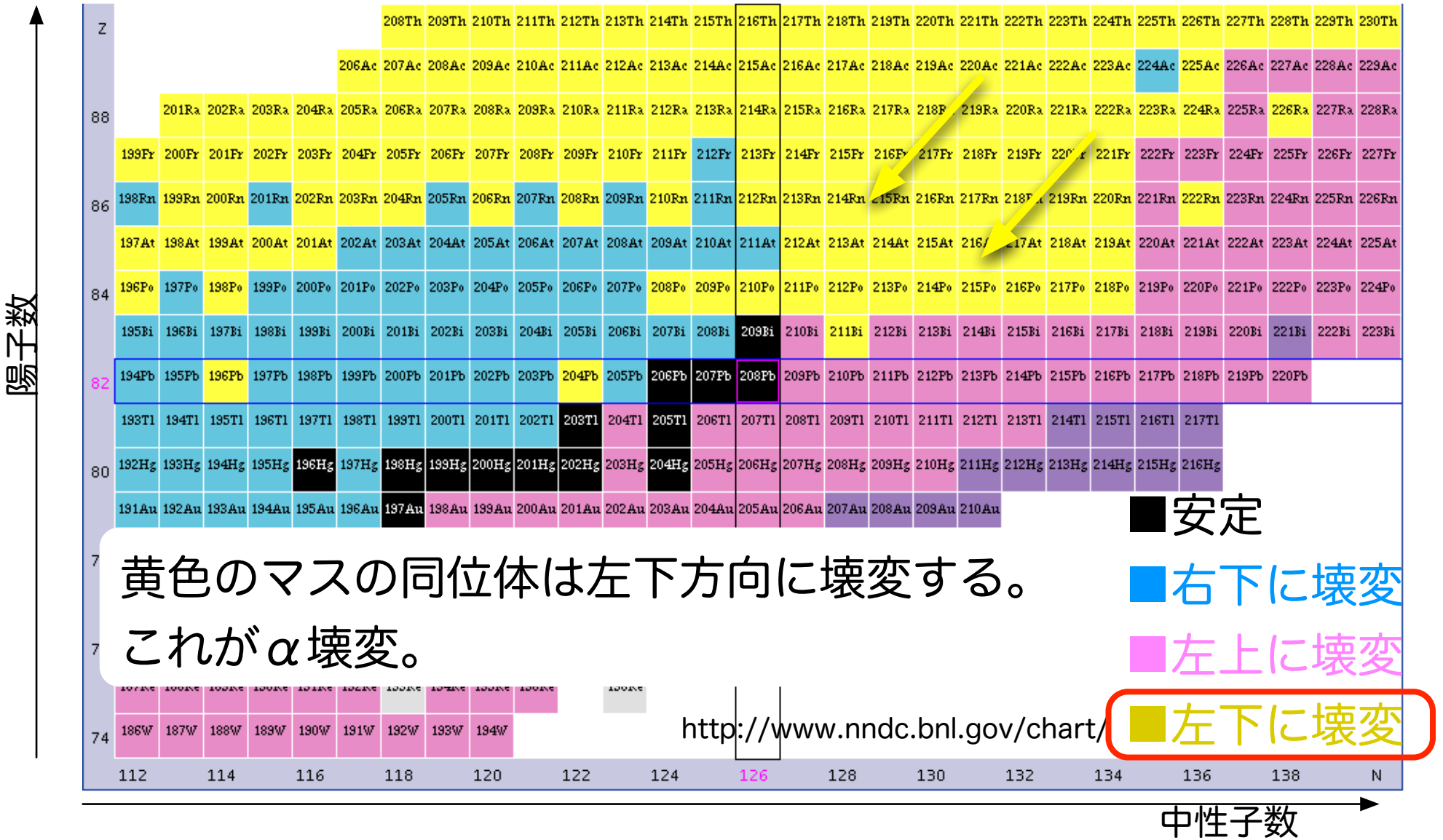
β壊変で生じる電子が壊変のエネルギーを受け取って放出される放射線がβ線。



ところで、核図表の右上を見ると…



ところで、核図表の右上を見ると…



黄色のマスの同位体は左下方向に壊変する。
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（※）。

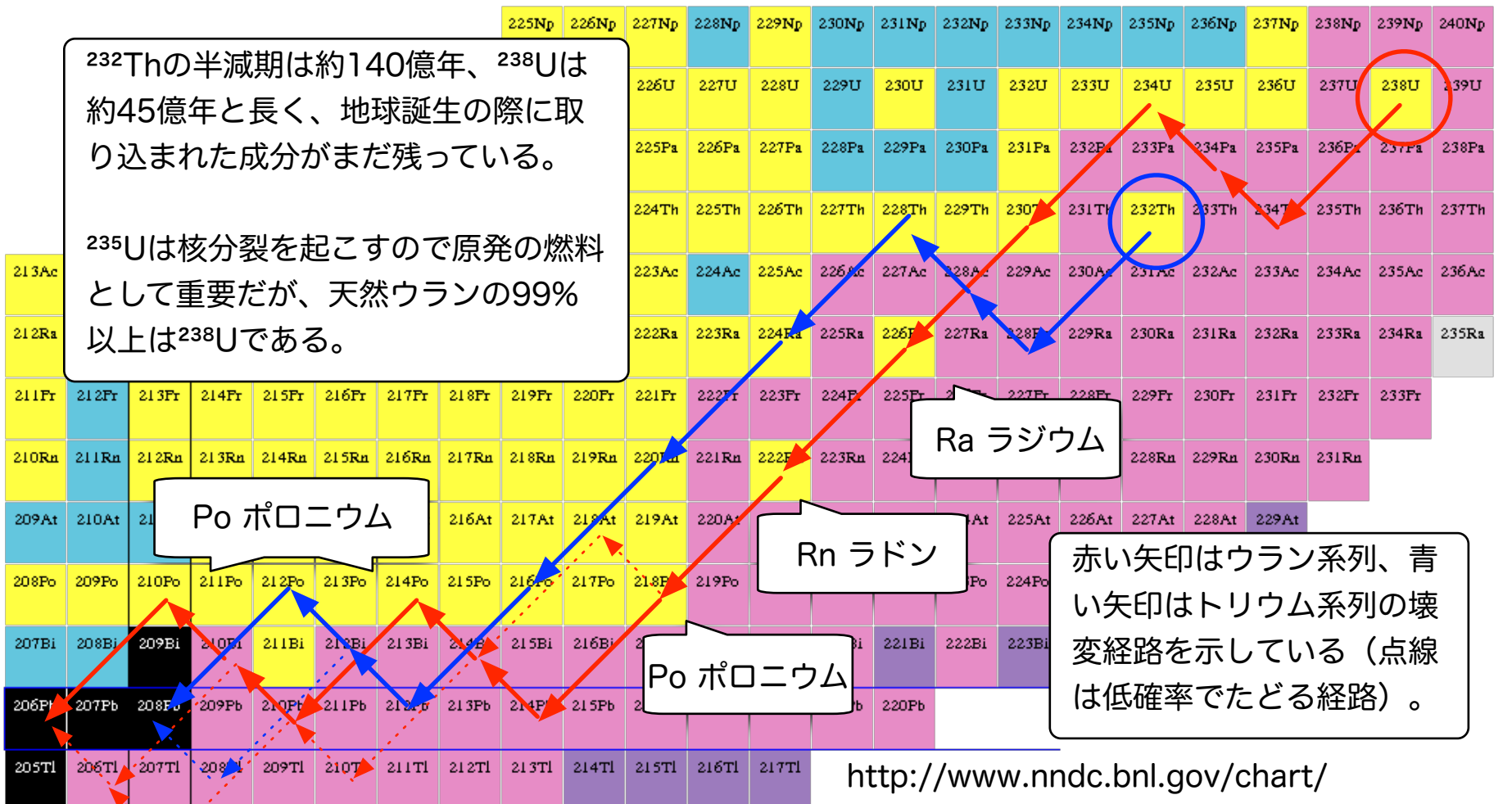
※核図表によっては^{209}Bi。

^{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（β壊変も挟みつつ）何度もα壊変する。

演習：配布した核図表で、^{238}U、^{232}Thから壊変をたどってみて下さい。
うまくたどれると安定核種（^{206}Pb, ^{208}Pb）に到達します。
答えは次のスライドで。

天然放射性同位体の壊変系列

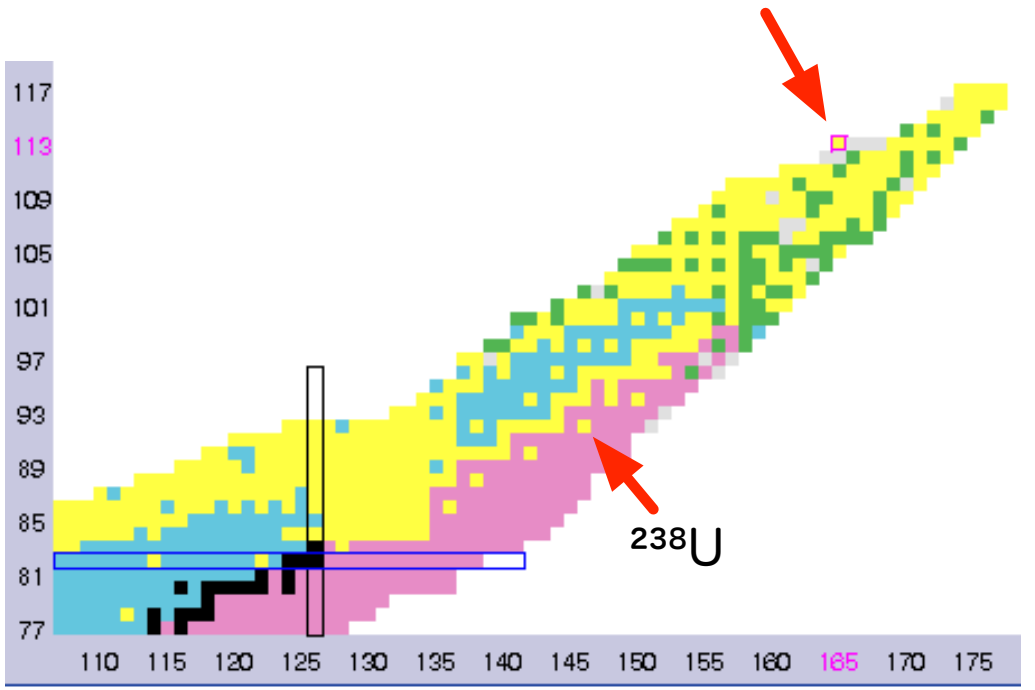
天然に存在するα壊変核種の多くは^{232}Th、^{238}Uを起源とする子孫核種。
^{232}Th、^{238}Uが環境中に広く分布しているため、その子孫核種も環境中に遍在している。



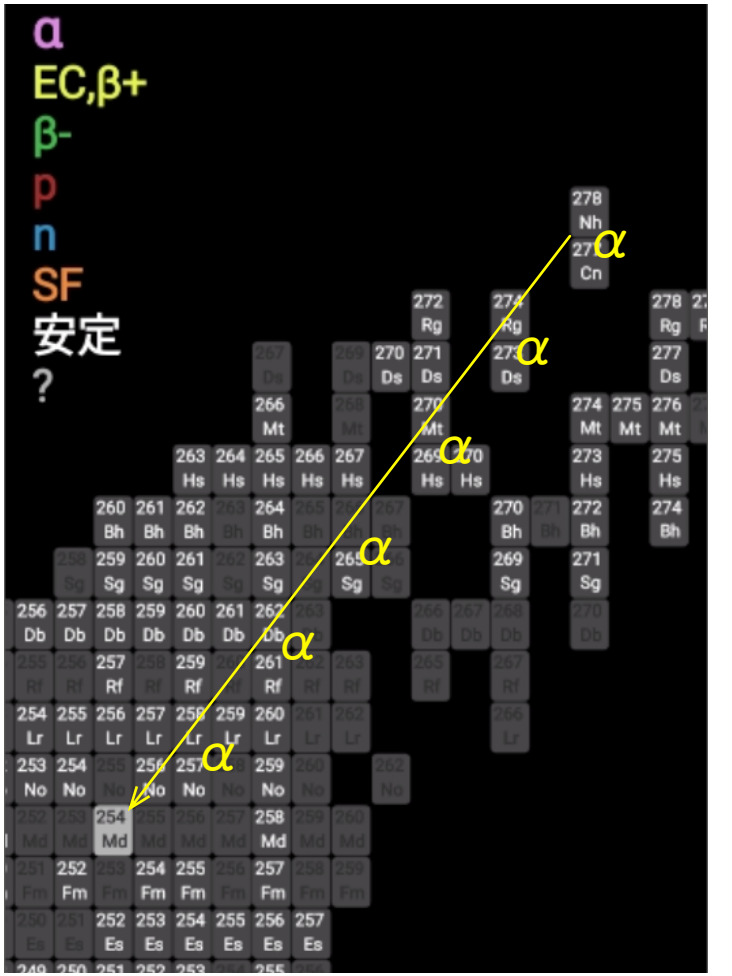
^{232}Thの子孫（トリウム系列）、^{238}Uの子孫（ウラン系列）、^{235}Uの子孫（アクチニウム系列）以外では、同じく地球誕生から残存している^{40}K（半減期約12.5億年）や、大気と宇宙線の反応で生成する^{14}C、^{3}H等も遍在している。

余談：113番元素

理研が合成したニホニウムの原子核（^{278}Nh）はこの位置。既知のNhの中で最も中性子が少ないため、自発核分裂の確率が相対的に少ない。



http://www.nndc.bnl.gov/chart/



"Isotope Browser"
https://www-nds.iaea.org/

3個目に合成した核は核分裂せずに6回のα壊変を繰返し、既知の核種（^{254}Md）に到達することを観測できた。

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線の放出

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。

α壊変やβ壊変の際にα線、β線と共にγ線が放出されることが多い。例えば、^{134}Csと^{137}Csは共にβ線とγ線を出す。

γ線の放出

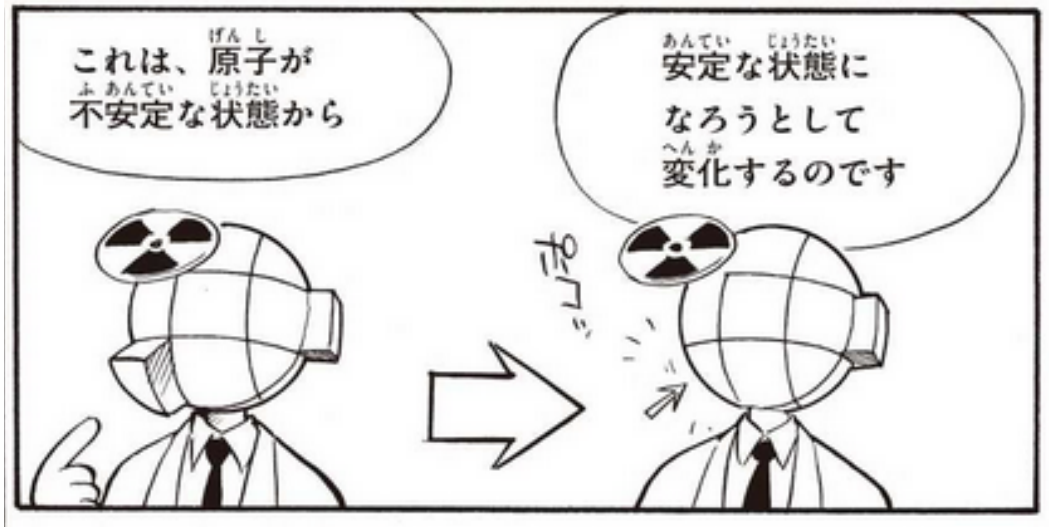
壊変の際の余剰エネルギーの一部（あるいは全て）がα粒子（α線）や電子（β線）ではなく、電磁波（光子）で放出されることがある。この電磁波がγ線。

α壊変やβ壊変の際にα線、β線と共にγ線が放出されることが多い。例えば、^{134}Csと^{137}Csは共にβ線とγ線を出す。

余剰エネルギーがγ線として放出されて原子核が安定化する現象をγ壊変（γ崩壊）と表現することもあるが、独立した壊変と見なさず、α／β壊変に付随する現象と見なすことも多い（※）。

※ 例えば^{137}Csはβ壊変後に一旦^{137m}Baという励起状態のBaに変化する。この^{137m}Baが約2.55分の半減期で^{137}Baに変化する際に662keVのγ線が放出されるが、このγ線は^{137}Csのβ壊変に付随するものと見なされる場合が多い（この講義でもそう見なして説明している）。

まとめ：壊変＝原子核の安定化



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

- α壊変：大きすぎる原子核が少し小さくなって安定化
  ※ 核分裂とは異なる
- β壊変：陽子/中性子比を調整することで安定化
- γ壊変：余剰エネルギーを電磁波として放出して安定化
  ※α/β壊変過程の一部と見なす場合もある

今日の講義の概要

1）ウォーミングアップ

前回要点確認

Q&Aについて

用語の整理

原子の構造と周期表と同位体

2）放射性同位体の特徴
→　不安定な原子核

放射性同位体の安定化（壊変）

半減期

壊変法則と「核図表」

↑ここまで終了

3）放射性同位体の測定

放射性同位体量の単位（Bq）

壊変で放出されるエネルギーの分配

Ge半導体検出器によるγ線スペクトル解析

4）放射性同位体の生成

壊変、核融合、中性子吸収、
核分裂、粒子間の衝突

5）原子力発電と核燃料サイクル

放射性同位体の量の単位：Bq

～放射性同位体の量を壊変回数で表す～

Bq（ベクレル）とは、放射性核種の量を
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

放射性同位体の量の単位：Bq

～放射性同位体の量を壊変回数で表す～

Bq（ベクレル）とは、放射性核種の量を
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

余談：Bqについて補足

Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの壊変回数で表す単位。
SI組立単位として表現すると（1/s）。

1970年代のSI単位系導入以前はCi（キュリー）という単位が使われていた。初期のCiは1gのラジウムの持つ放射能、後に3.7×10^{10}壊変毎秒（=37GBq）と再定義された。

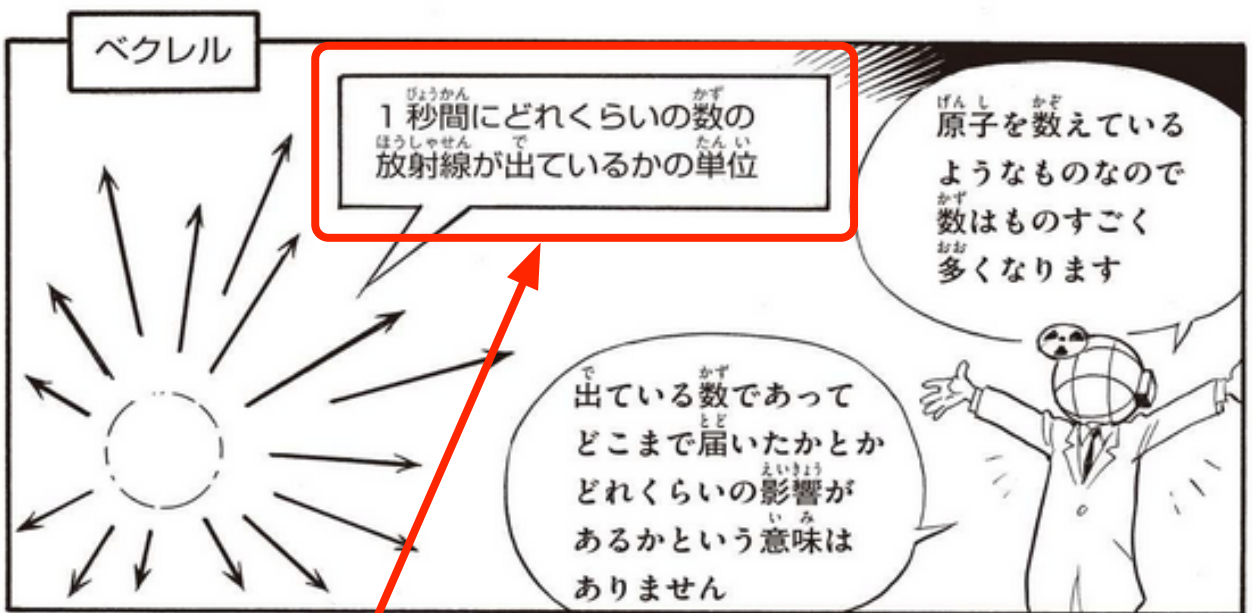
今でも各国の規制値や試薬の販売単位に37の倍数が多く残っているのはこのため。

製品コード Catalog Number	核種/製品名 (製品略称名) Nuclide/Product	国内代理店/製造元 Maker	製品内容 Contents	規格 Package Size	納品予定日 (締切時刻) Delivery Date	注文/見積り 候補追加 Estimation
6137	Cs-137 Cesium-137 Nominal Solution (Cs-137 Nominal Solution) 精製アイソトープ製品	第一クラリティ IPL	液体 Cesium chloride in 0.1 M HCl 測定なし	37kBq	納期お問合せください (J-RAMからはご注文できません)	価格お問合せください
				185kBq	納期お問合せください (J-RAMからはご注文できません)	価格お問合せください
				370kBq	納期お問合せください (J-RAMからはご注文できません)	価格お問合せください
				3.7MBq	納期お問合せください (J-RAMからはご注文できません)	価格お問合せください
				18.5MBq	納期お問合せください (J-RAMからはご注文できません)	価格お問合せください
				37MBq	納期お問合せください (J-RAMからはご注文できません)	価格お問合せください

37kBq		1μCi
185kBq	=	5μCi
370kBq		10μCi
…		…

余談：Bqについて補足

Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの壊変回数で表す単位。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

１壊変あたり１本の放射線が出る核種ではこの記述で良いが、そうでは無い核種もあることに注意。例えば^{137}Csの662keVのγ線は１壊変あたり85%の確率（＝0.85本/壊変）で発生。

※ なぜこうなるかは、この後説明します

壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

ある放射性核種が壊変する際に放出される総エネルギーは一定だが、このエネルギーは様々な放射線に分配される。

α壊変
- α線のみ
- α線＋γ線
- α線＋γ線＋γ線
- …

β壊変
- β線のみ
- β線＋γ線
- β線＋γ線＋γ線
- …

α、β、γ線だけでも様々なパターンがあり得る。
細かく見ると、さらに多様なパターンがある。

※ この後数枚細かい説明がありますが、詳細を記憶する必要はないです。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

ある放射性核種が壊変する際に放出される総エネルギーは一定だが、このエネルギーは様々な放射線に分配される。

前のスライドで「γ線」と表示した部分を細かく見ると…

前のスライドの「γ線」

- γ線
- γ線＋内部転換電子＋X線

  原子核の余剰エネルギーが軌道電子の一つに与えられ、電磁波（γ線）の代わりに電子線が放出される現象。

  ^{137}Csの662keVのγ線に相当するエネルギーは、約15%の確率で内部転換電子として放出される。このため、662keVのγ線は1壊変当たり85%の確率でしか観測されない。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

ある放射性核種が壊変する際に放出される総エネルギーは一定だが、このエネルギーは様々な放射線に分配される。

前のスライドで「γ線」と表示した部分を細かく見ると…

前のスライドの「γ線」

- γ線
- γ線＋内部転換電子＋X線

  放出された内殻の電子軌道が空くため、より不安定な外殻の電子が内殻に移動して安定化し、差分のエネルギーが電磁波（X線）として放出される。

  EC壊変で軌道電子が原子核に捕獲された場合も、同様のメカニズムでX線の発生が起こる。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

ある放射性核種が壊変する際に放出される総エネルギーは一定だが、このエネルギーは様々な放射線に分配される。

前のスライドで「γ線」と表示した部分を細かく見ると…

前のスライドの「γ線」

- γ線
- γ線＋内部転換電子＋X線
- γ線＋内部転換電子＋X線＋オージェ電子

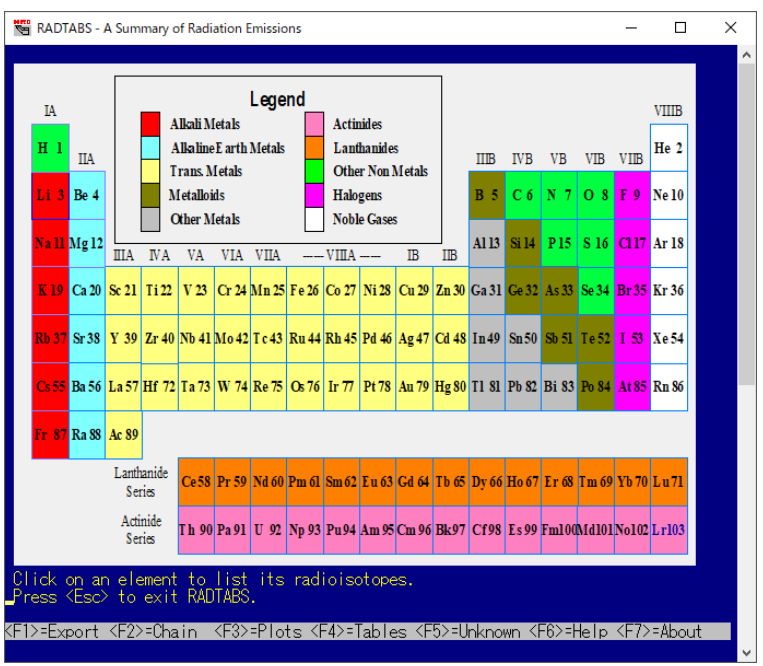
X線（電磁波）の代わりに軌道電子が運動エネルギーを受け取って放出される現象。

壊変で放出されるエネルギーの分配

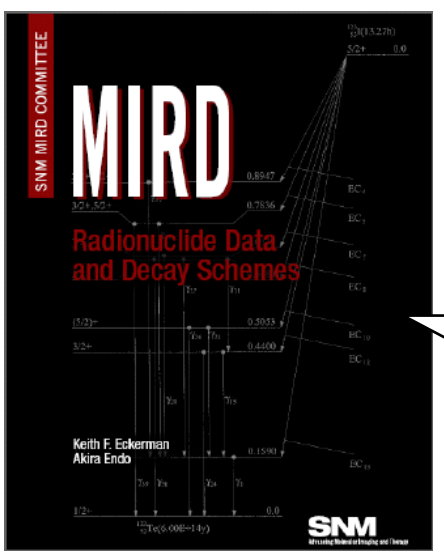
～α、β、γ、X、etc. への分配～

ここまで見てきたように、壊変に伴って様々な放射線が放出され得るが、それらの**エネルギーの総和、および各放射線の発生確率は核種ごとに一定**で、既知の知見についてはデータベースが構築されている。

データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）



※ 時間があれば^{32}P、^{134}Csなどのデータを RadTabsでお見せします。



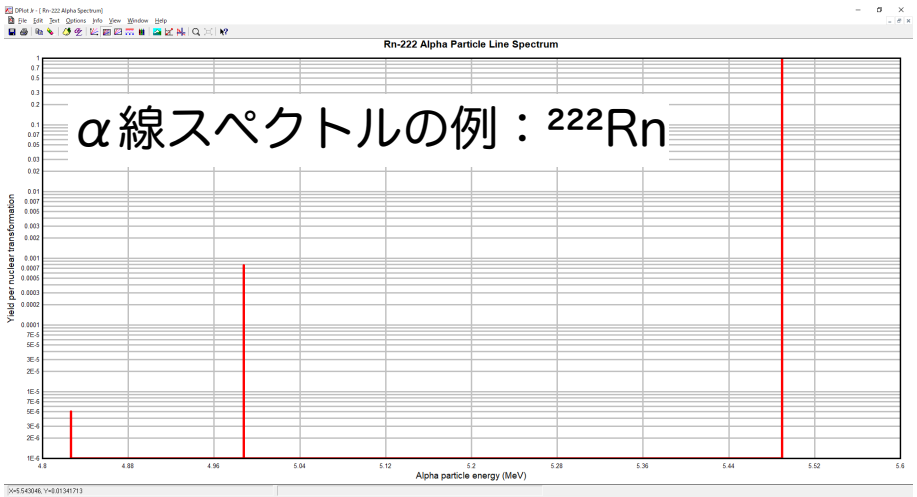
この本は農学部図書館に所蔵されています。

Eckerman, Endo, et al. (2007)
MIRD : radionuclide data and decay schemes 2nd ed.

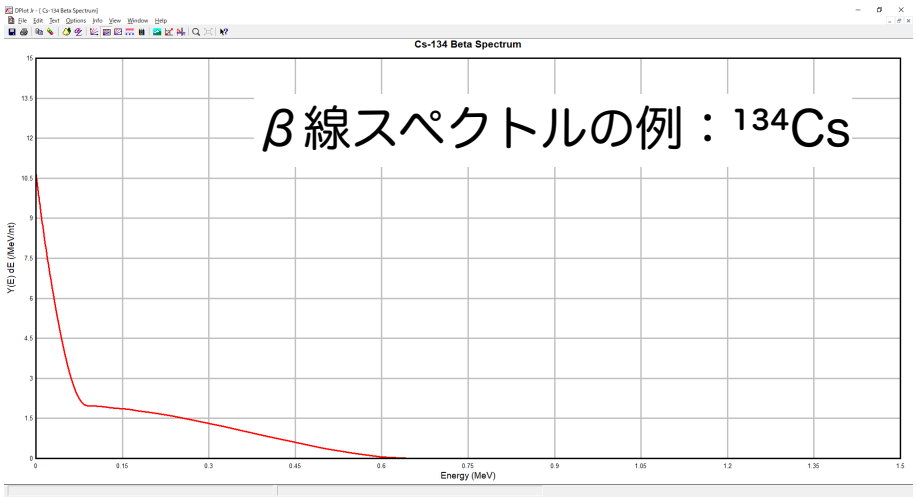
壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

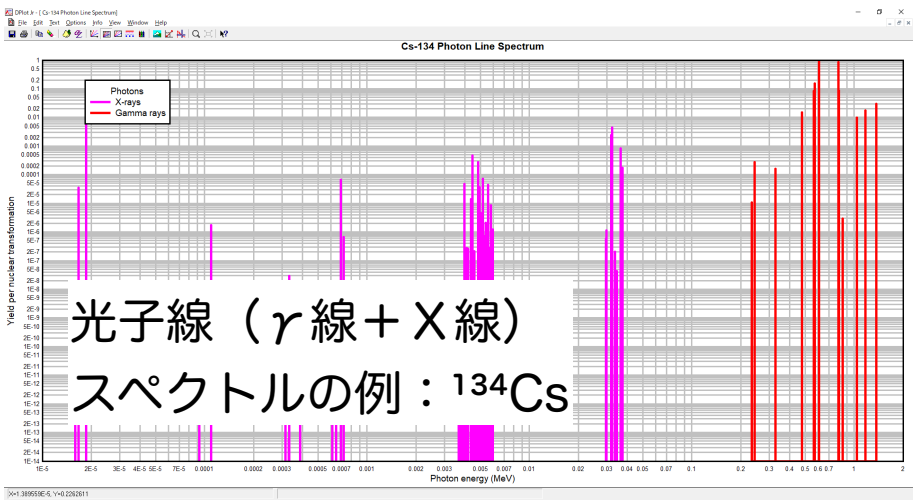
データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）



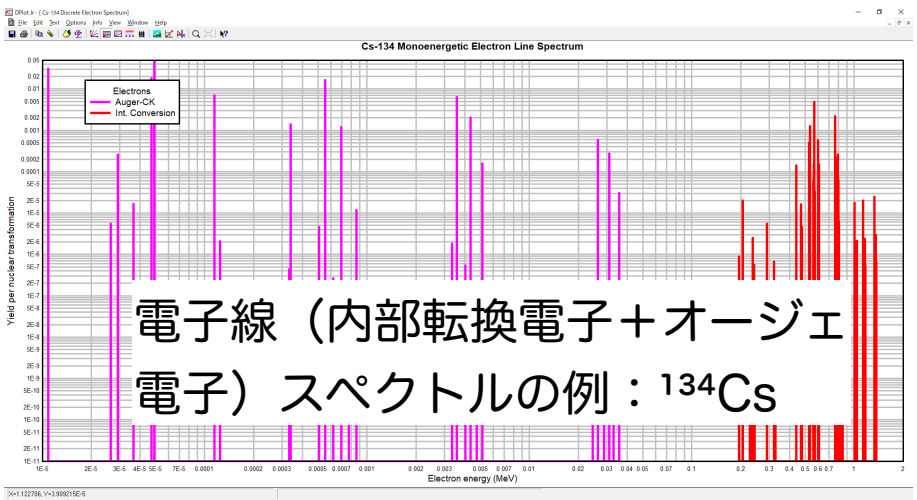
α線スペクトルの例：^{222}Rn



β線スペクトルの例：^{134}Cs



光子線（γ線＋X線）スペクトルの例：^{134}Cs

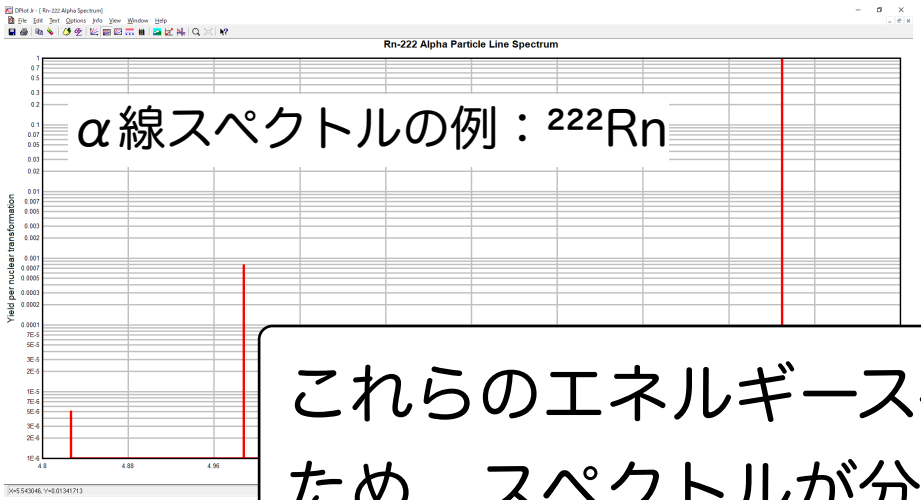


電子線（内部転換電子＋オージェ電子）スペクトルの例：^{134}Cs

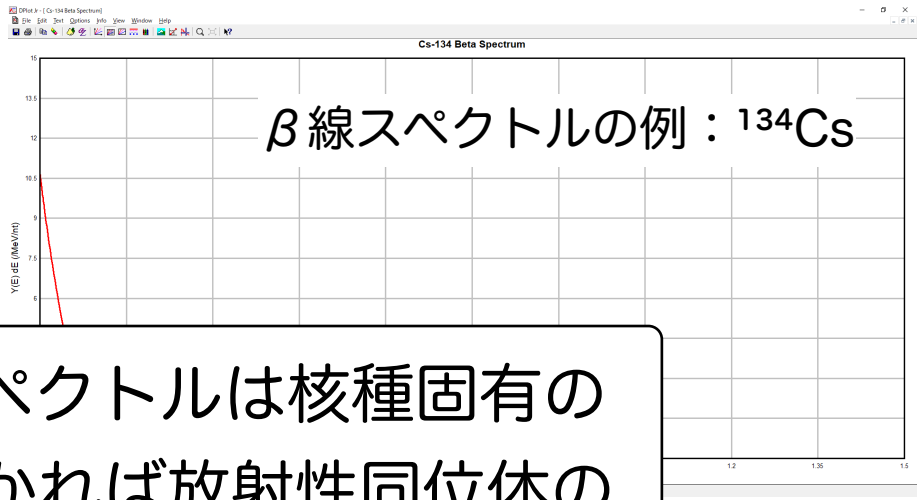
壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）

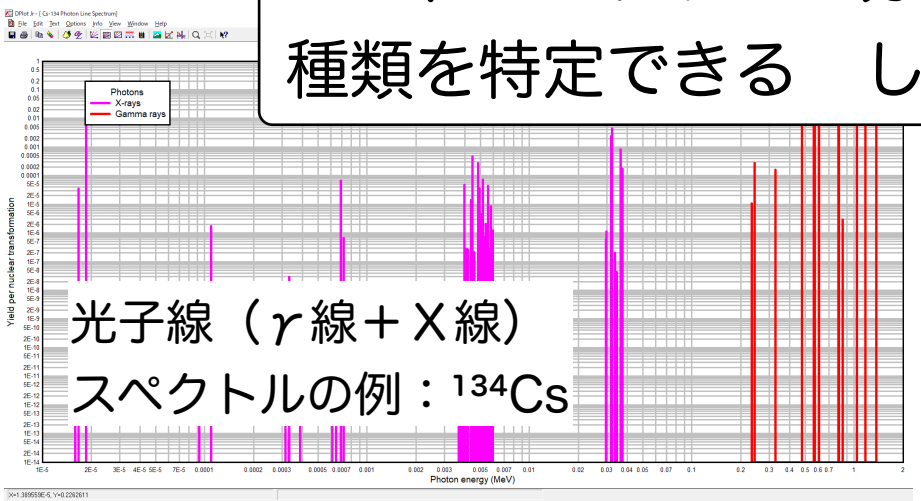


α線スペクトルの例：^{222}Rn

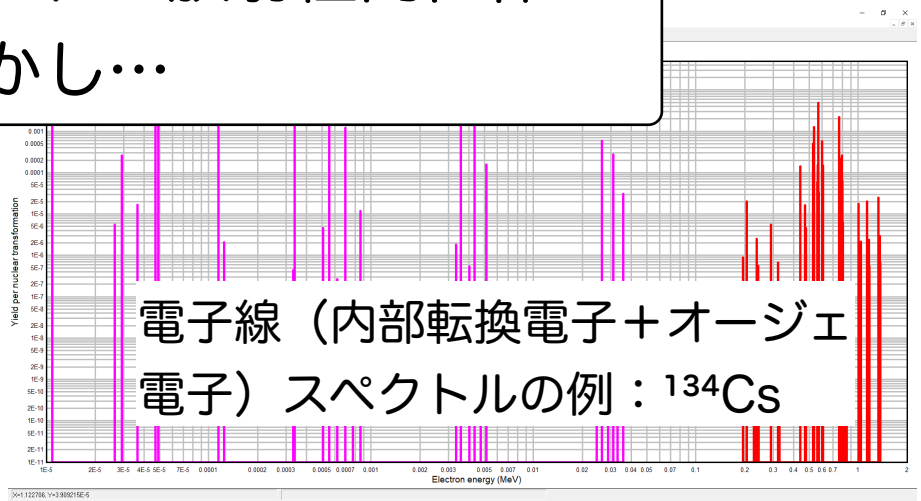


β線スペクトルの例：^{134}Cs

これらのエネルギースペクトルは核種固有のため、スペクトルが分かれば放射性同位体の種類を特定できる　しかし…



光子線（γ線＋X線）スペクトルの例：^{134}Cs

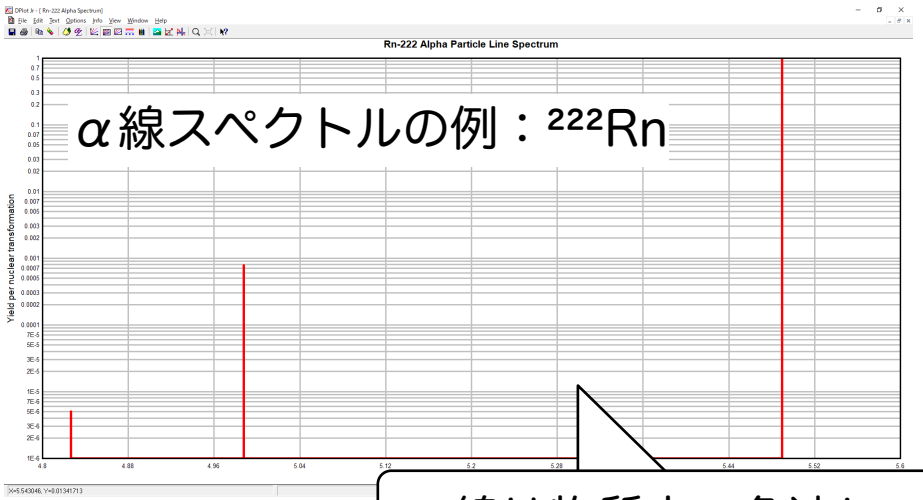


電子線（内部転換電子＋オージェ電子）スペクトルの例：^{134}Cs

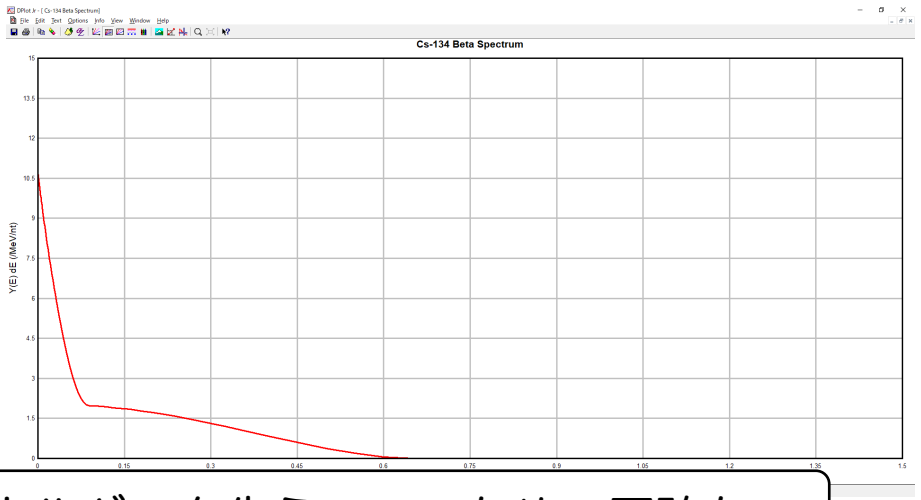
壊変で放出されるエネルギーの分配

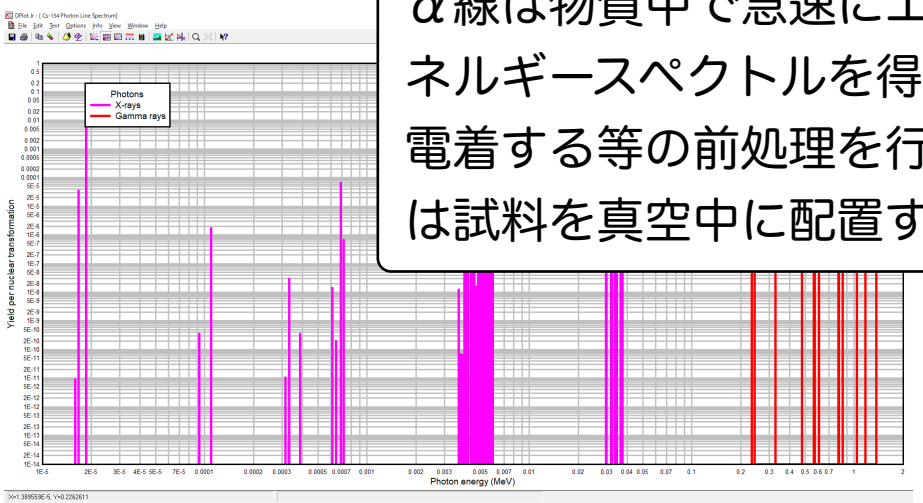
～α、β、γ、X、etc. への分配～

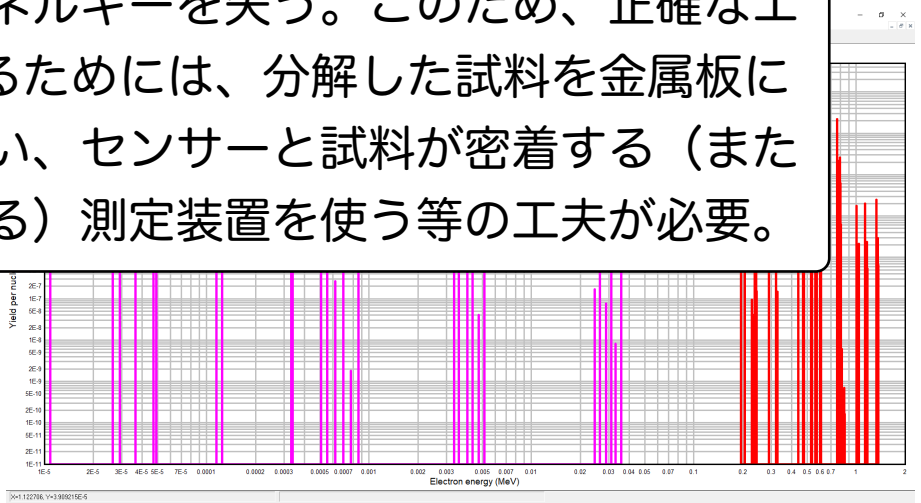
データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）



α線スペクトルの例：^{222}Rn





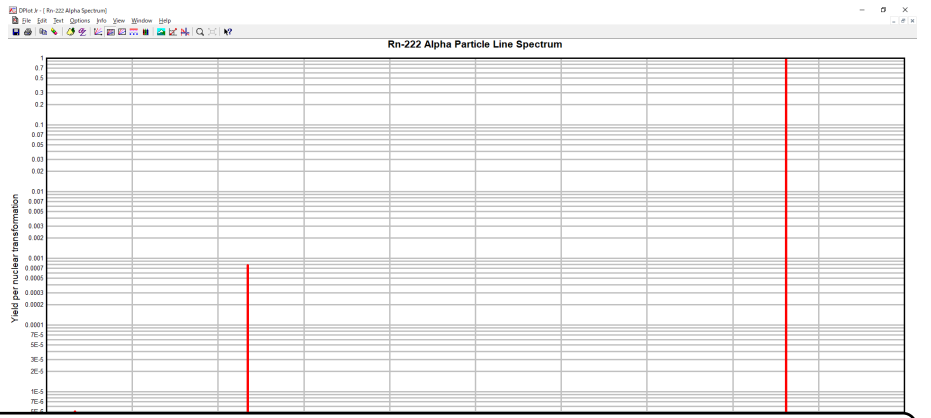


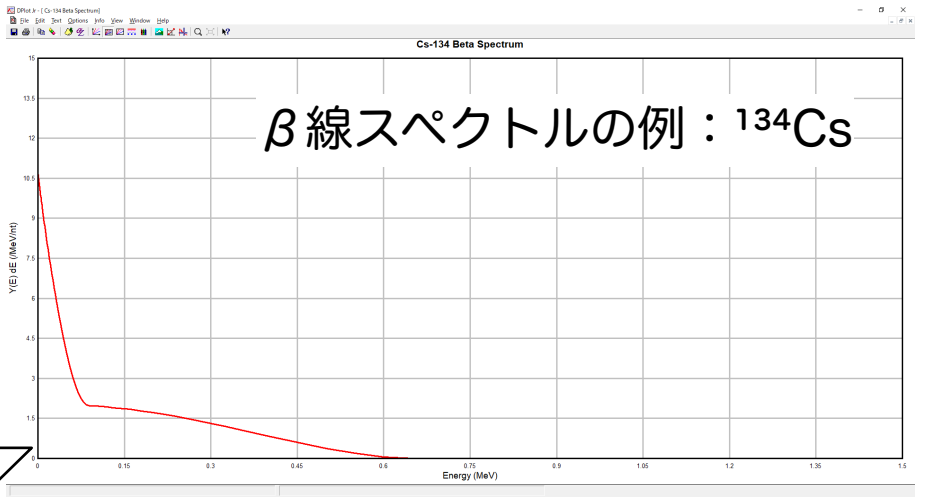
α線は物質中で急速にエネルギーを失う。このため、正確なエネルギースペクトルを得るためには、分解した試料を金属板に電着する等の前処理を行い、センサーと試料が密着する（または試料を真空中に配置する）測定装置を使う等の工夫が必要。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

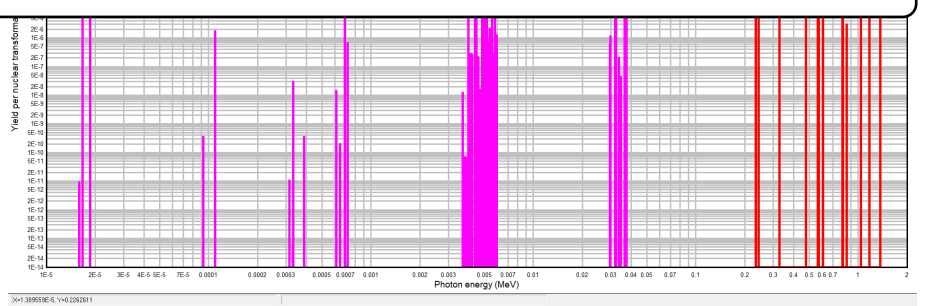
データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）

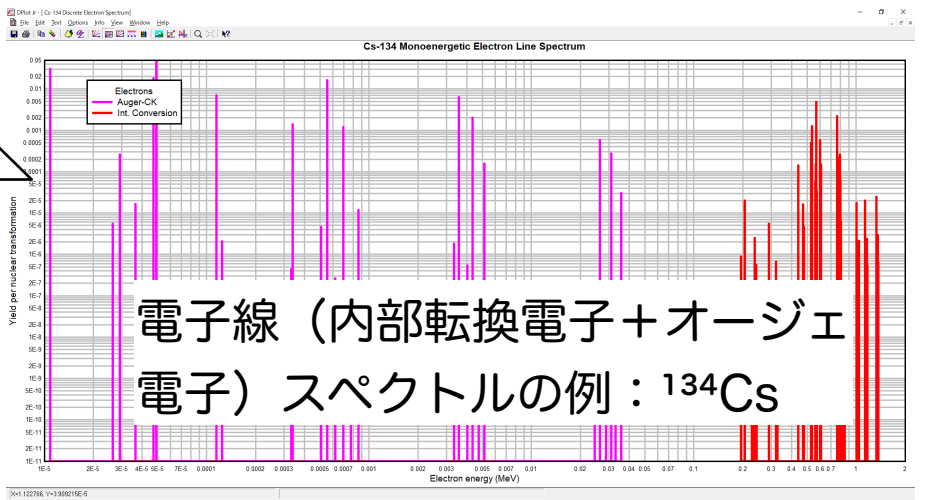




β線スペクトルの例：^{134}Cs

電子線（β、内部転換、オージェ）もα線ほどではないが試料中でエネルギーを失うため、前処理で試料を分解しないと正確なスペクトルは得られない。



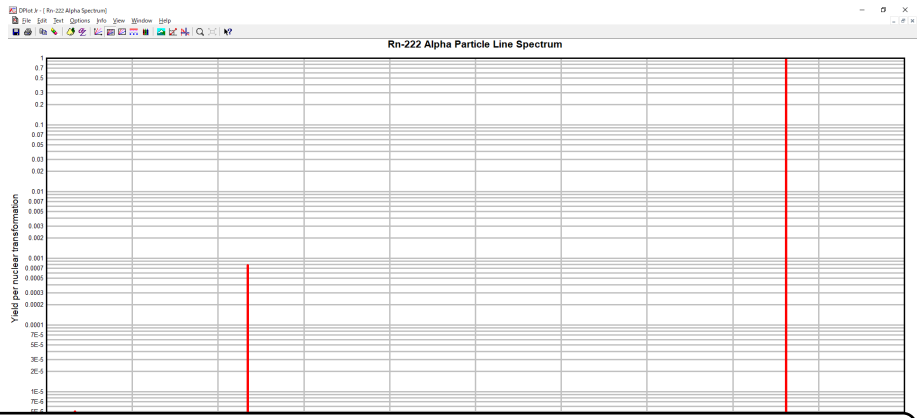


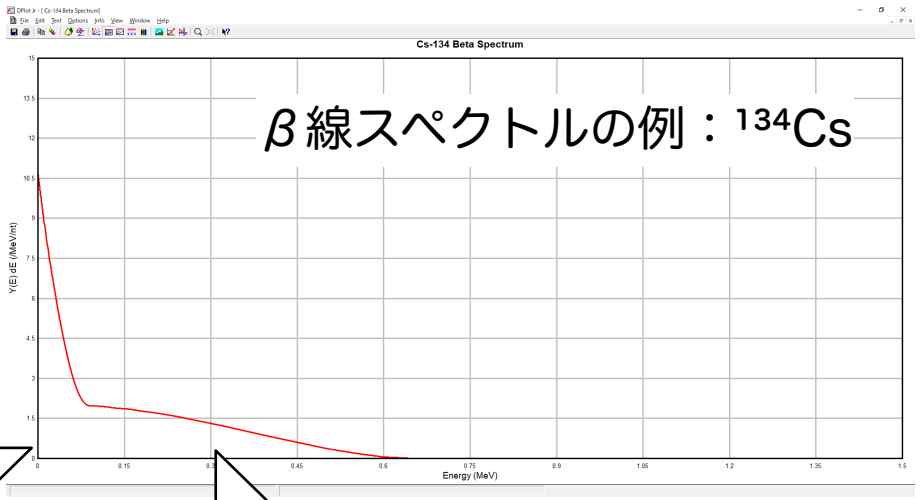
電子線（内部転換電子＋オージェ電子）スペクトルの例：^{134}Cs

壊変で放出されるエネルギーの分配

～α、β、γ、X、etc. への分配～

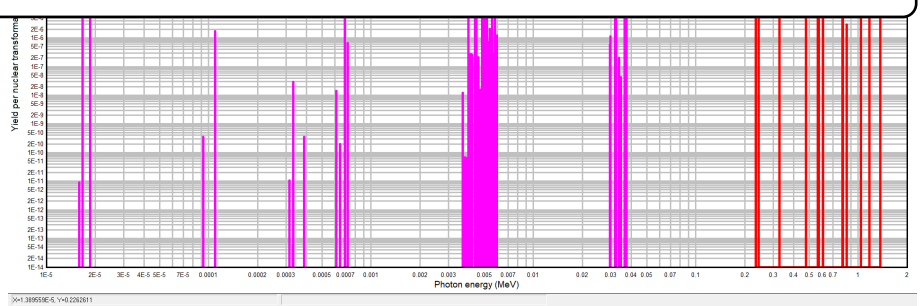
データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）

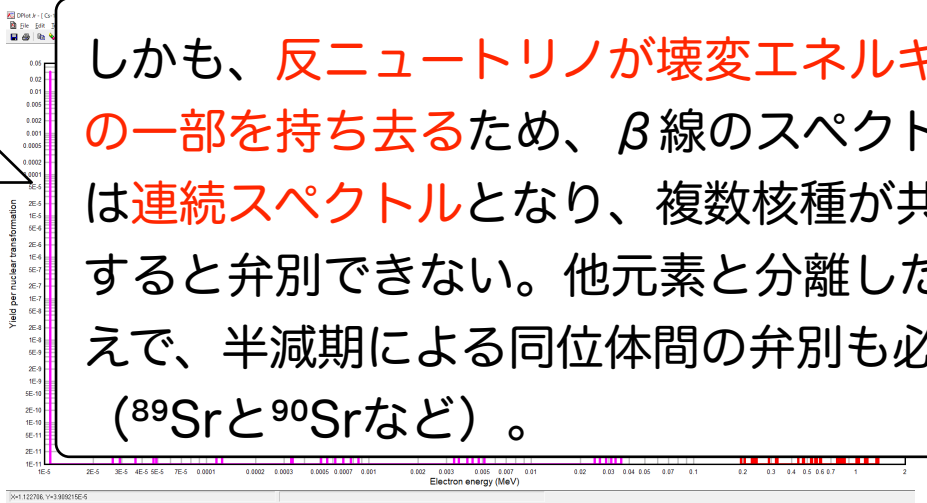




β線スペクトルの例：^{134}Cs

電子線（β、内部転換、オージェ）もα線ほどではないが試料中でエネルギーを失うため、前処理で試料を分解しないと正確なスペクトルは得られない。



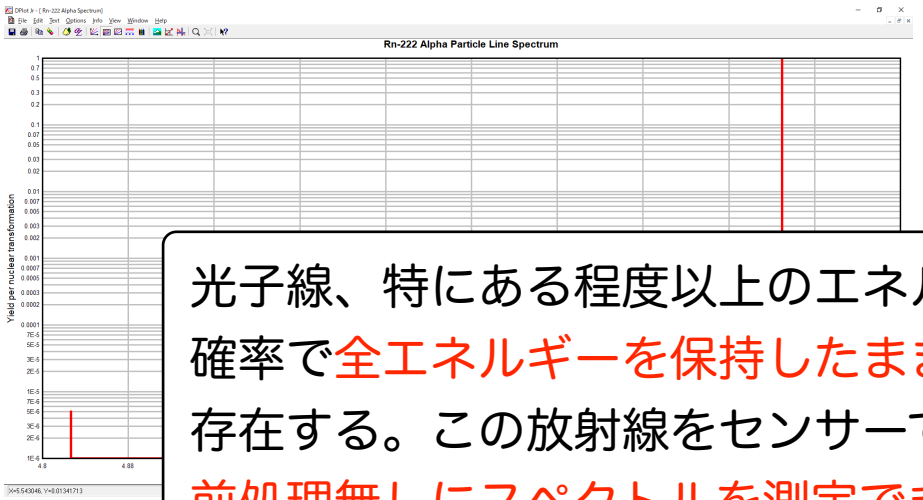


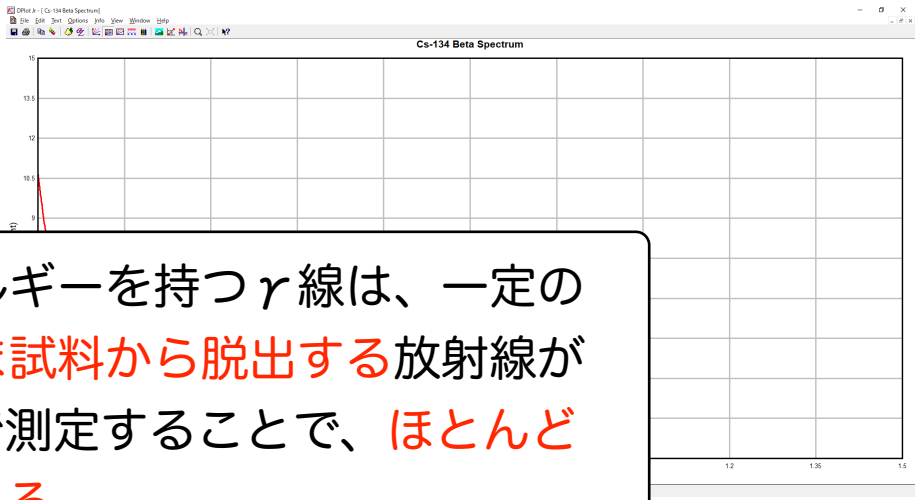
しかも、反ニュートリノが壊変エネルギーの一部を持ち去るため、β線のスペクトルは連続スペクトルとなり、複数核種が共存すると弁別できない。他元素と分離したうえで、半減期による同位体間の弁別も必要（^{89}Srと^{90}Srなど）。

壊変で放出されるエネルギーの分配

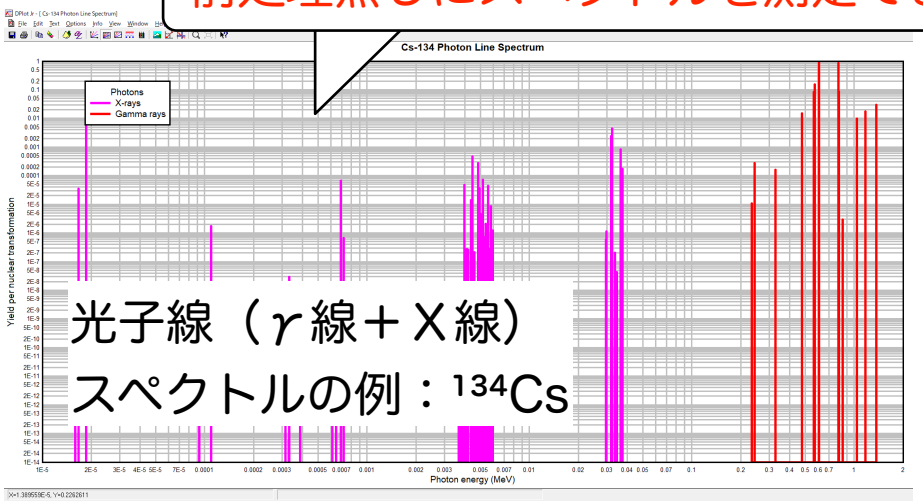
～α、β、γ、X、etc. への分配～

データベースの例（MIRD 2nd ed. に収録されているRadTabs）

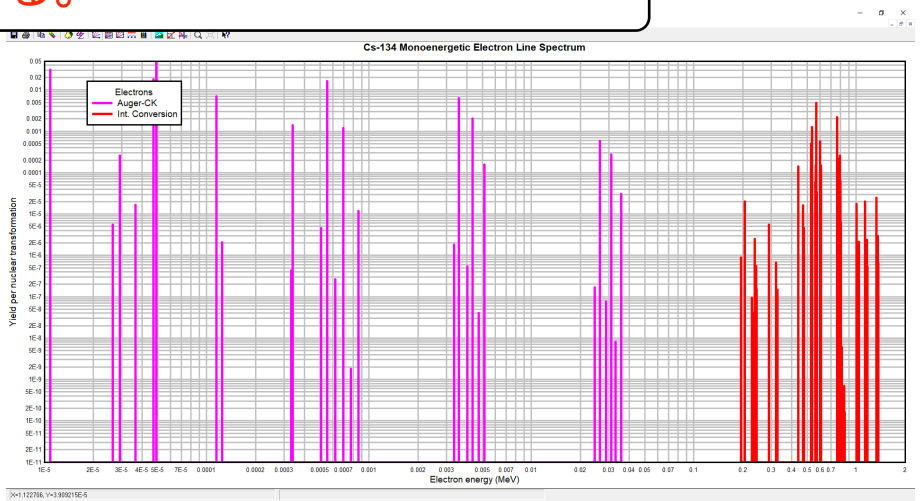




光子線、特にある程度以上のエネルギーを持つγ線は、一定の確率で全エネルギーを保持したまま試料から脱出する放射線が存在する。この放射線をセンサーで測定することで、ほとんど前処理無しにスペクトルを測定できる。



光子線（γ線＋X線）
スペクトルの例：^{134}Cs



γ線スペクトロメトリー

～Ge半導体検出器～

光子線、特にある程度以上のエネルギーを持つγ線は、一定の確率で全エネルギーを保持したまま試料から脱出する。つまり、ほとんど前処理無しにスペクトルを測定できる。

γ線放出核種
→　化学的な前処理不要
→　容器に詰めてγ線測定

^{131}I、^{134}Cs、^{137}Csなど

γ線を放出しない核種
→　（煩雑な）前処理
→　α線 or β線を測定

^{238}Pu、^{89}Sr、^{90}Srなど

γ線スペクトロメトリー

～Ge半導体検出器～

光子線、特にある程度以上のエネルギーを持つγ線は、一定の確率で全エネルギーを保持したまま試料から脱出する。つまり、ほとんど前処理無しにスペクトルを測定できる。

測定にかかるコスト（費用・時間）は…

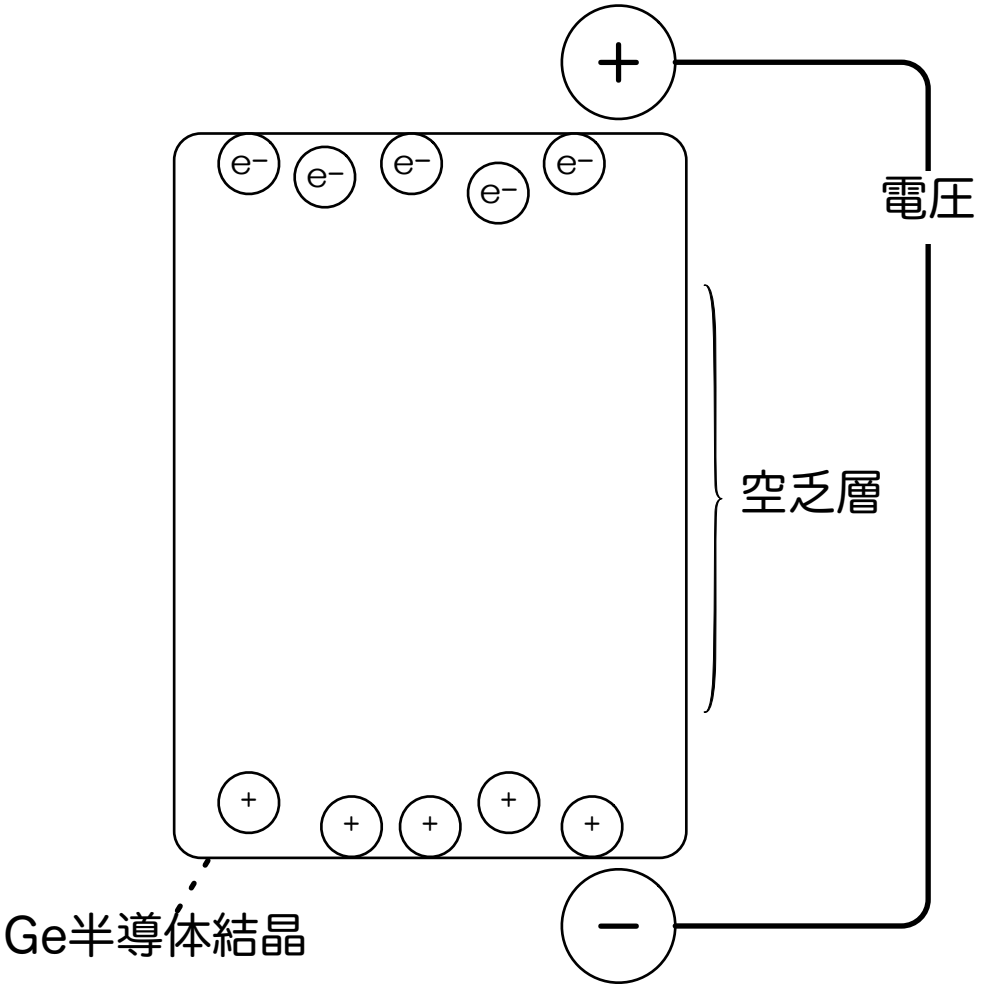
γ線 << 越えられない壁 << β線 < α線

※^{134}Cs、^{137}Csに比べて^{90}Srのデータが圧倒的に少ないのはこれが理由。

γ線スペクトロメトリー

～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。



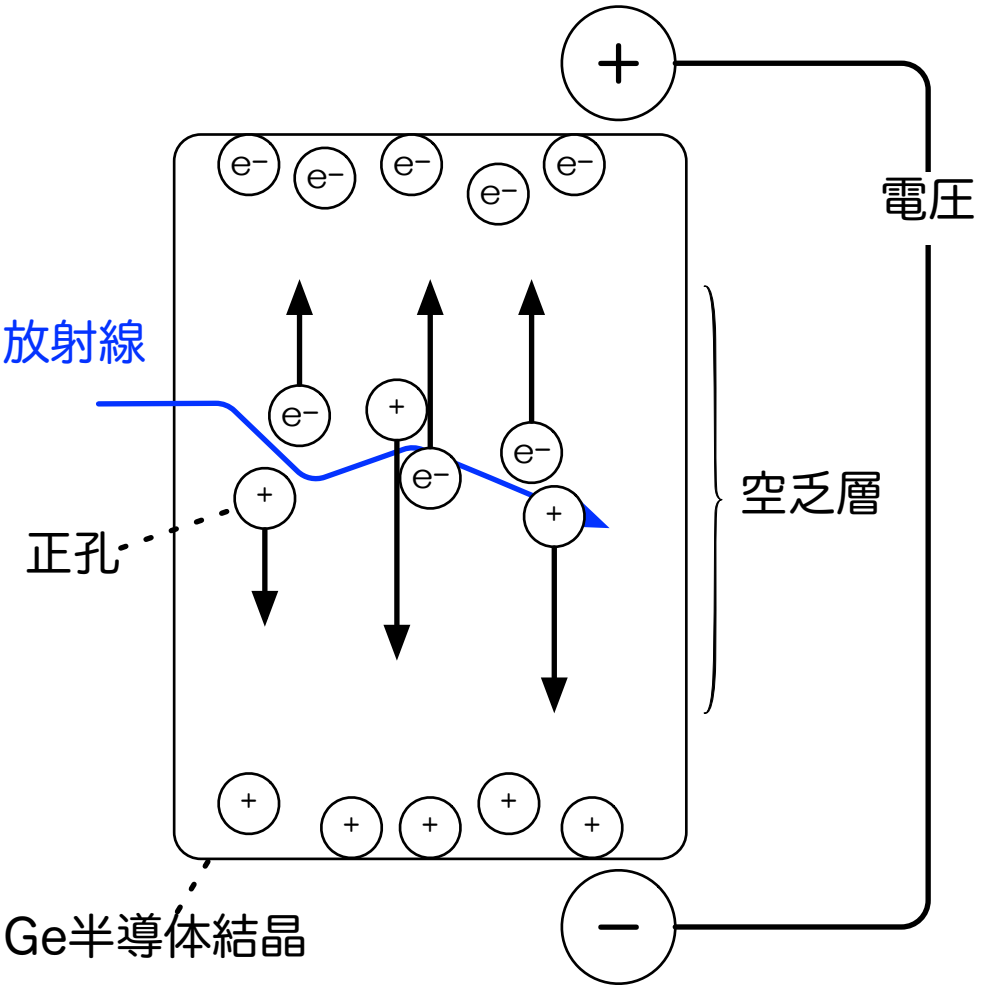
γ線スペクトロメトリー

～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。

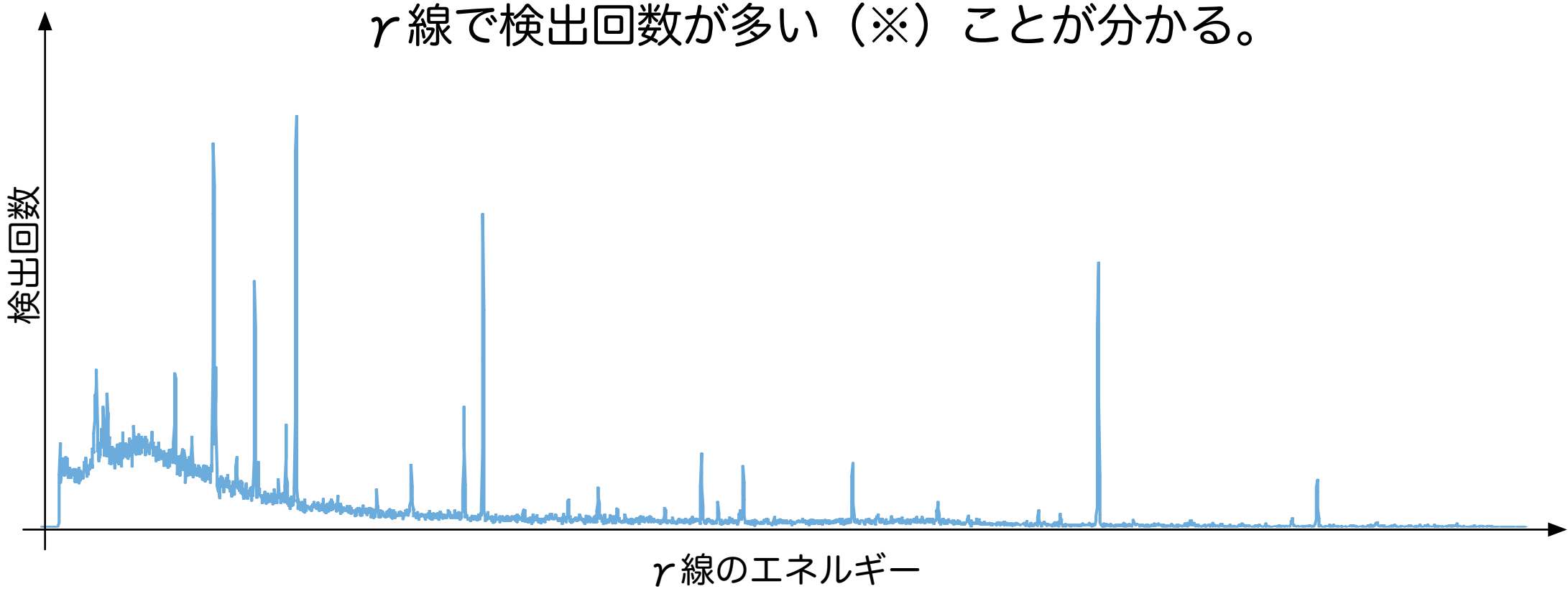
Ge半導体検出器は、放射線のエネルギーを正確に測定できる。このため核種弁別能力が高いことが最大の利点。ただし、高価であるため台数を揃えることが難しい。



γ線スペクトロメトリー

～Ge半導体検出器～

御影石（花崗岩）から出るγ線を測定すると、特定のエネルギーのγ線で検出回数が多い（※）ことが分かる。

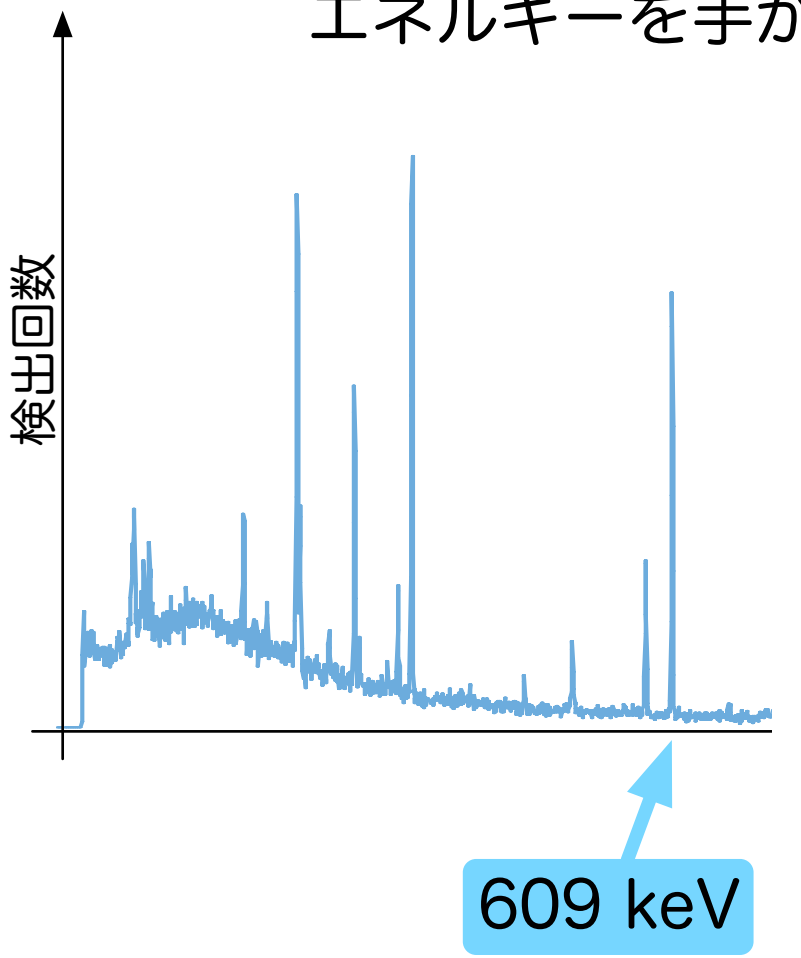


※このような図を「スペクトル」と言い、検出回数の多い場所を「ピーク」という

γ線スペクトロメトリー

～Ge半導体検出器～

核種ごとのγ線のエネルギーはデータベース化されているため、
エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。

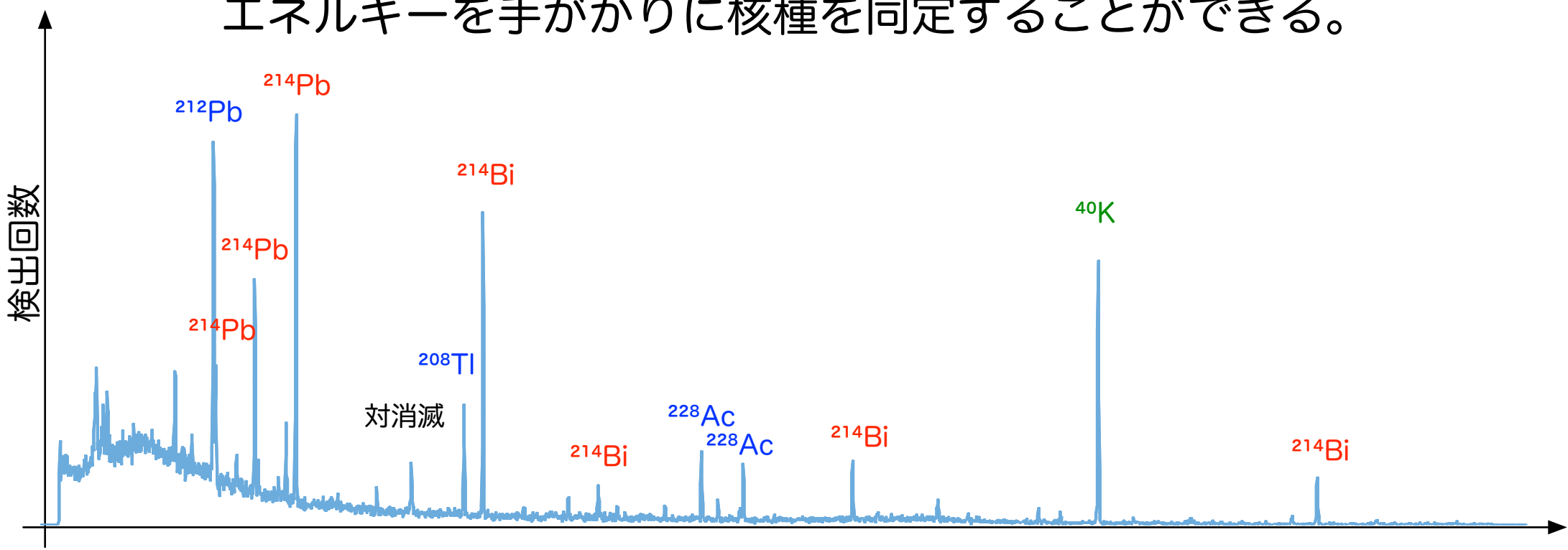


	核種名	半減期	エネルギー(keV)		放出比
	^{214}Bi	19.7m	主要	609.312$_{10}$	46.1
人工	^{103}Ru		主要	610.33$_{2}$	5.4
人工	^{108m}Ag		主要	614.37$_{10}$	89.7
人工	^{106}Ru			616.33$_{17}$ D	0.8
人工	^{110m}Ag	252.2$_{3}$d		620.346$_{11}$	2.78
人工	^{132}I			621.0$_{2}$	2.0
人工	^{106}Ru		主要	622.2$_{3}$ D	9.8
人工	^{132}I			630.22$_{9}$	13.7
人工	^{125}Sb			636.15$_{4}$	12.1
人工	^{131}I			636.973$_{2}$	7.2
人工	^{124}Sb	60.20$_{3}$d		645.82$_{4}$	7.2
人工	^{132}I			650.6$_{2}$	2.7

γ線スペクトロメトリー

～Ge半導体検出器～

核種ごとのγ線のエネルギーはデータベース化されているため、
エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。



^{214}Pb　^{214}Bi　……▶ ^{238}Uの子孫核種

^{228}Ac　^{212}Pb　^{208}Tl　…▶ ^{232}Thの子孫核種

^{40}K

^{214}Biや^{214}Pbは半減期が数十分しかない。これらが存在するということは、もっと半減期が長く、^{214}Biのもとになっている先祖核種（^{238}U）が存在することを示している。つまりこのスペクトルから、御影石には^{238}U、^{232}Th、^{40}Kが含まれていることが推定される。

γ線スペクトロメトリー

～Ge半導体検出器～

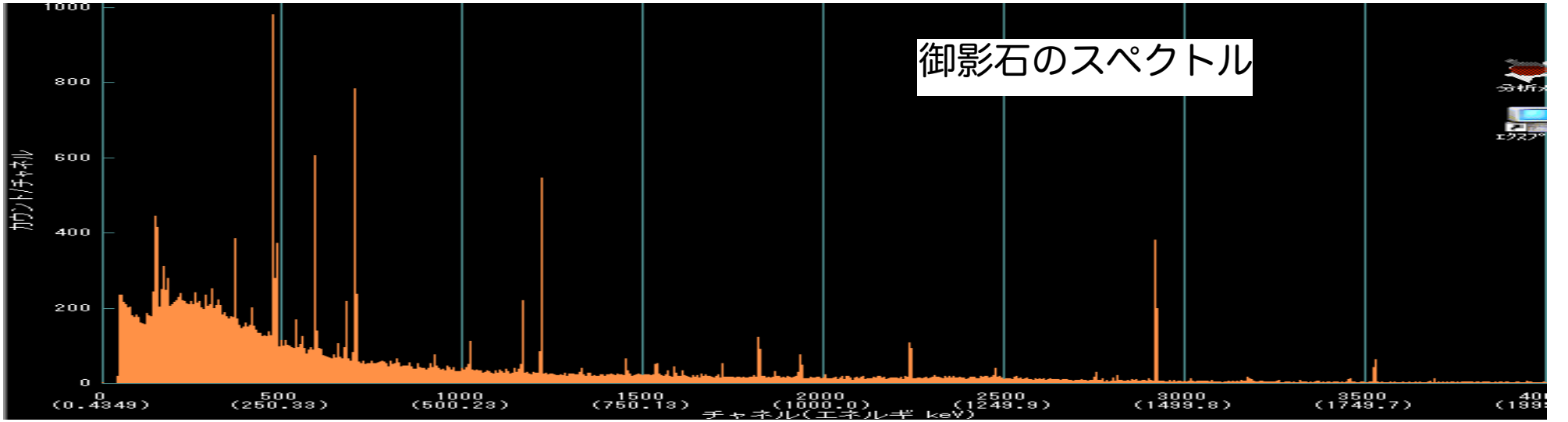
核種ごとのγ線のエネルギーはデータベース化されているため、エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。

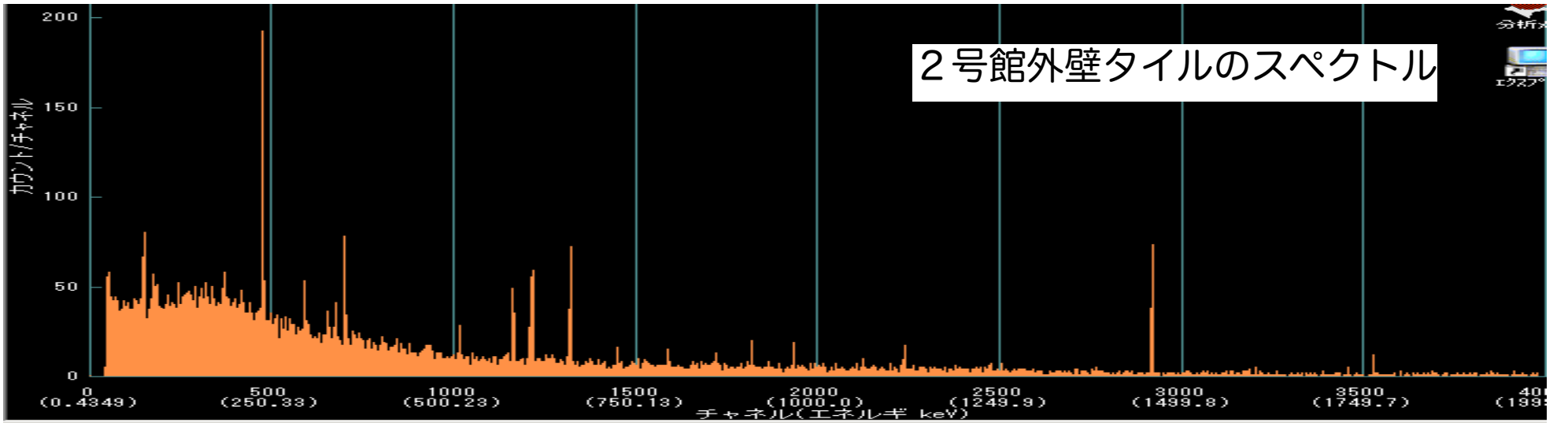
右の映像は映画「シン・ゴジラ」の劇中で、ある理由で放射性同位体の核種同定を行っているシーン。

許諾が無いため画像不掲載

Ge半導体検出器測定例

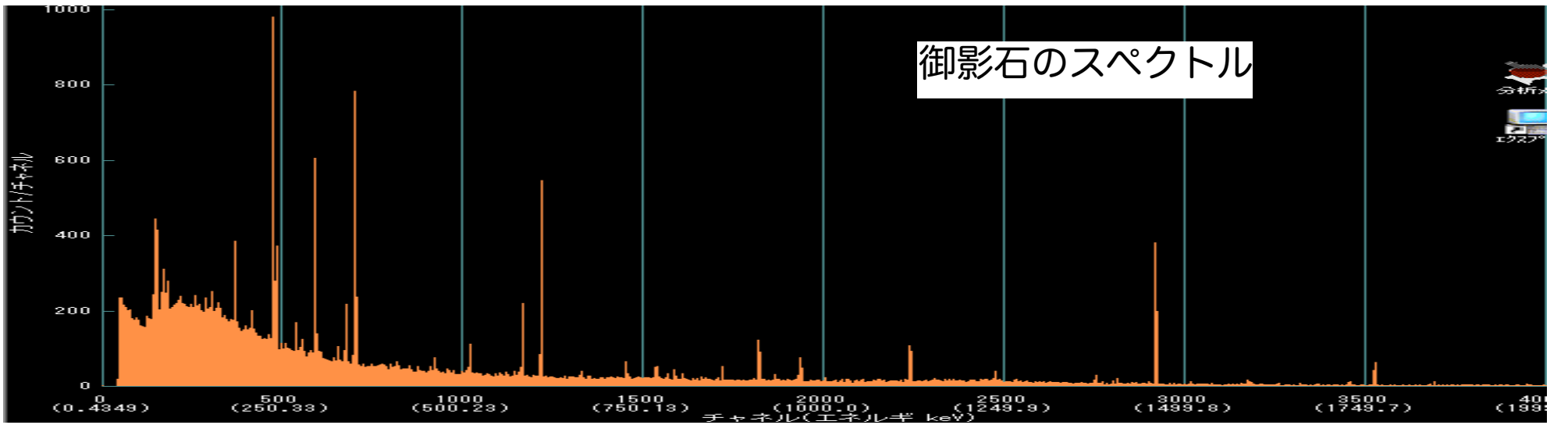
～御影石と２号館外壁のタイルの比較～

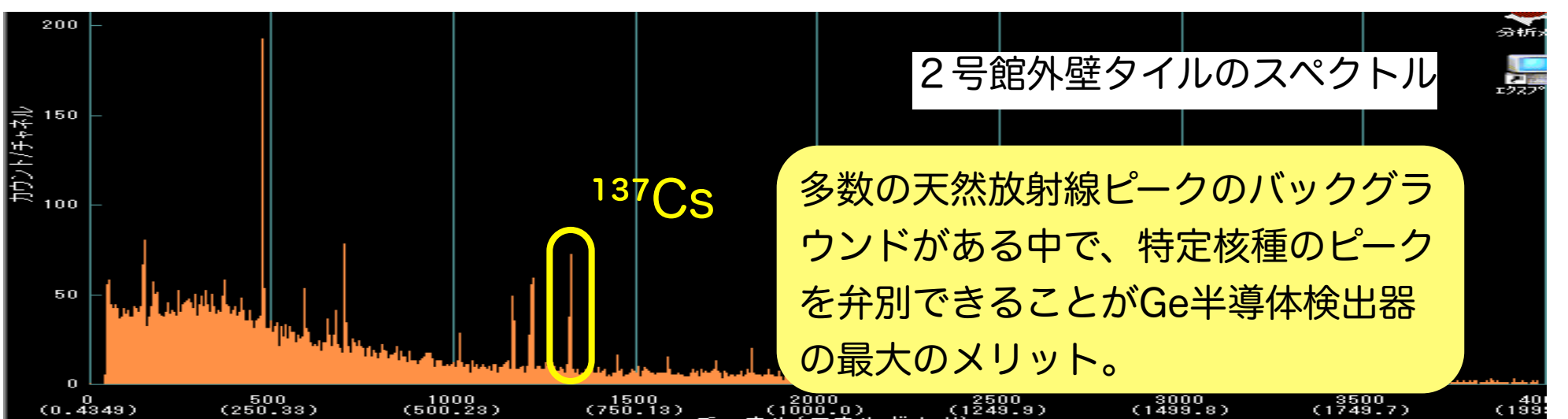




Ge半導体検出器測定例

～御影石と２号館外壁のタイルの比較～





γ線スペクトロメトリー

～シンチレーション検出器～

ここまで見てきたようにGe半導体検出器は有用な放射線測定装置だが、初期費用・維持費ともに高額で、自動化も難しい（※）。

そこで、多くの現場では「シンチレーション検出器」が併用されている。アイソトープ農学教育研究施設では、オートサンプラーを装備したNaIシンチレーション検出器を併用している。

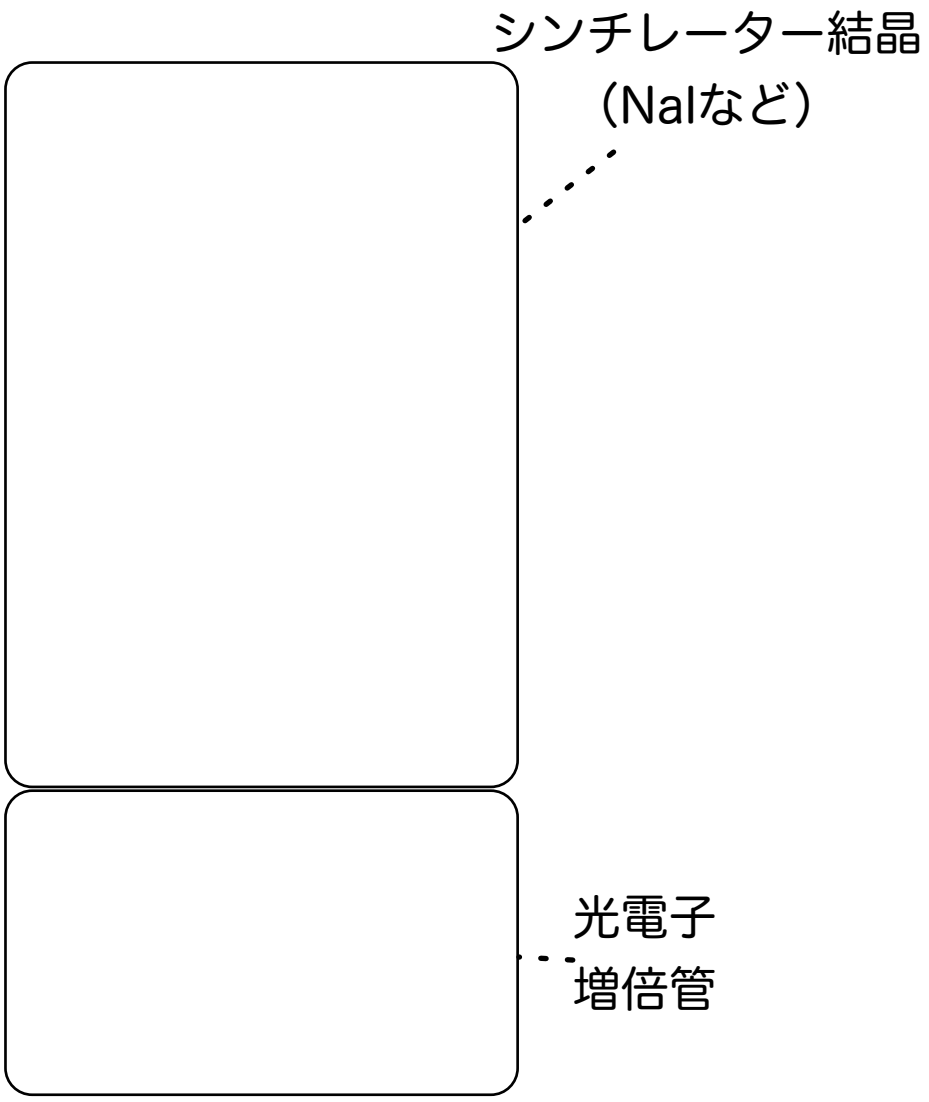
※ 不可能ではないが、費用が膨大で感度も下がる

γ線スペクトロメトリー

～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。



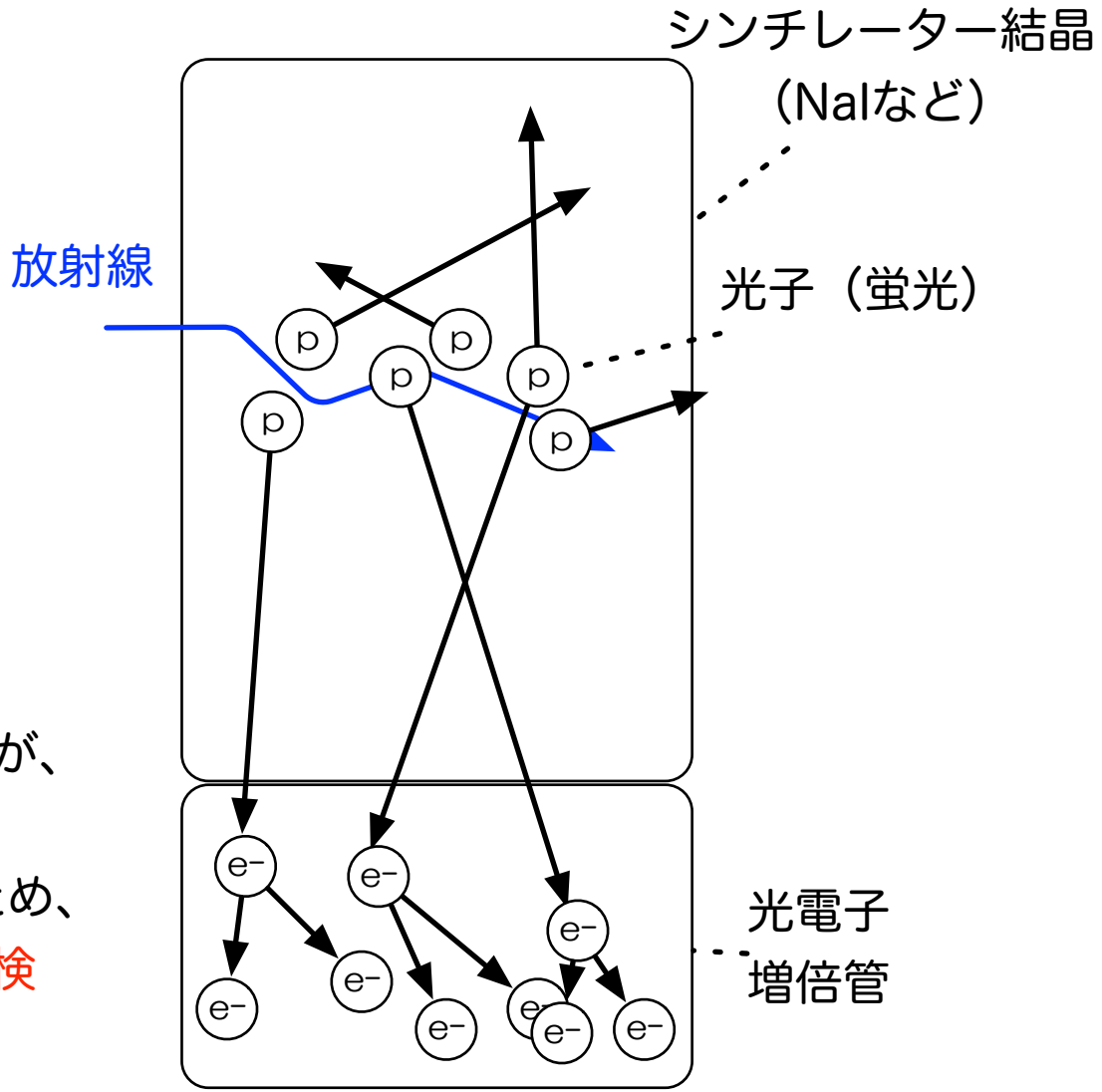
γ線スペクトロメトリー

～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。しかし、Ge半導体検出器よりは安価であるため、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。



γ線スペクトロメトリー

～シンチレーション検出器～

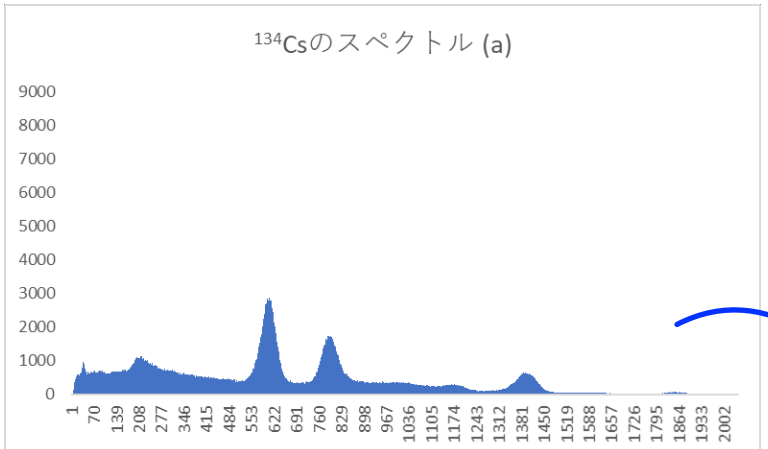
福島県は、玄米の全量全袋検査を実施

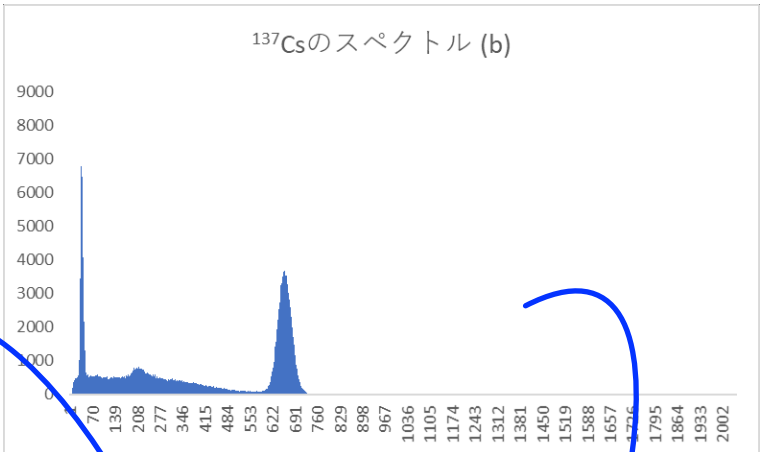
1000万袋以上の玄米全てを検査！

許諾が無いため画像不掲載

γ線スペクトロメトリー

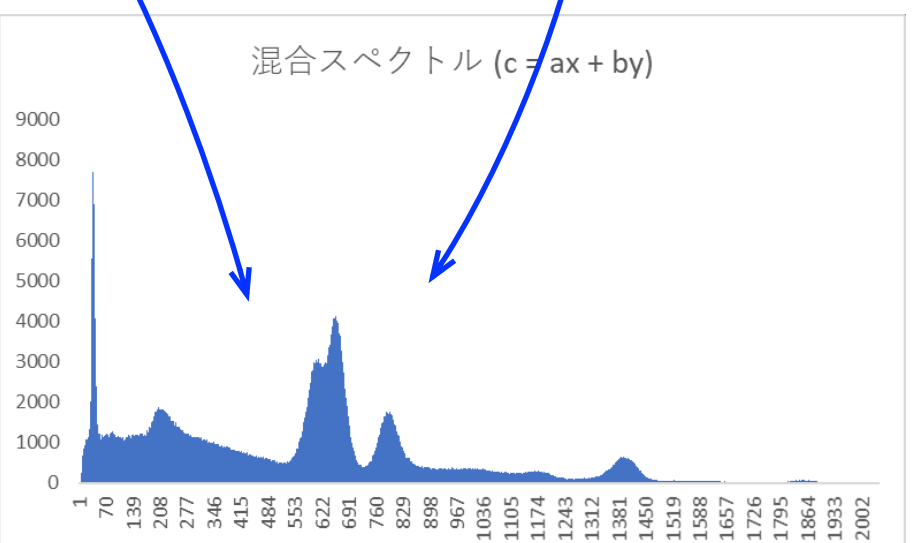
～シンチレーション検出器詳細～





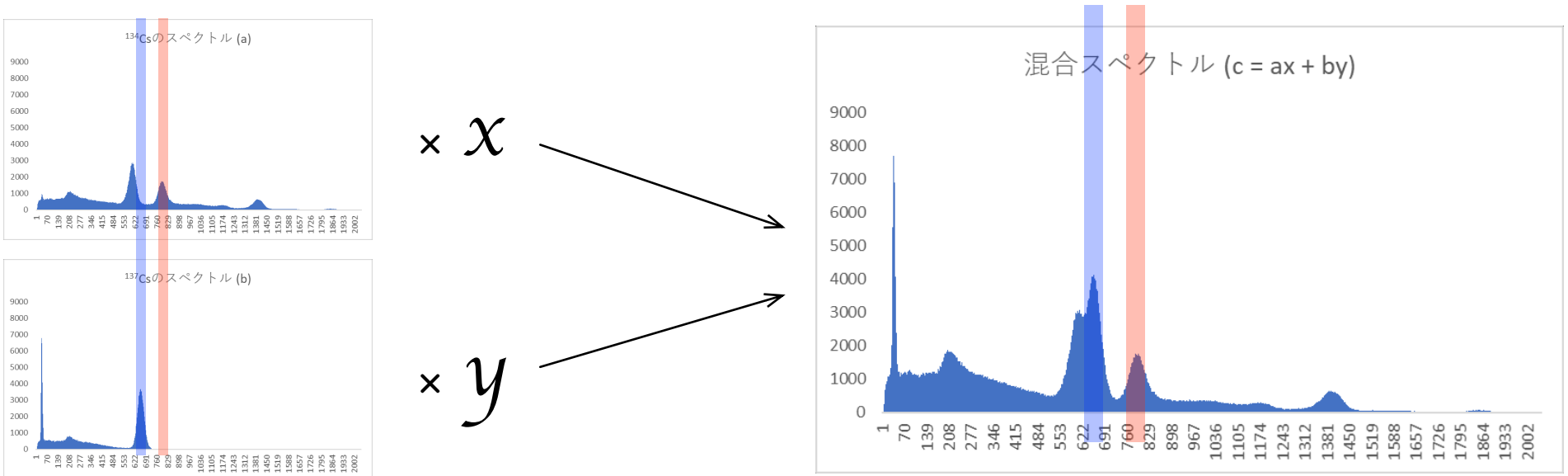
シンチレーション検出器のエネルギー弁別能はGe半導体検出器に劣る。例えば^{134}Csと^{137}Csは主要なピークが重なってしまう。

ただし、存在している核種が限定できる場合、実用レベルで複数核種を同時定量することは可能である。例えば^{134}Cs（スペクトルa）と^{137}Cs（スペクトルb）のみが存在する場合、aとbがある比率で混合すると混合スペクトル（スペクトルc）になることは自明である。



γ線スペクトロメトリー

～シンチレーション検出器詳細～

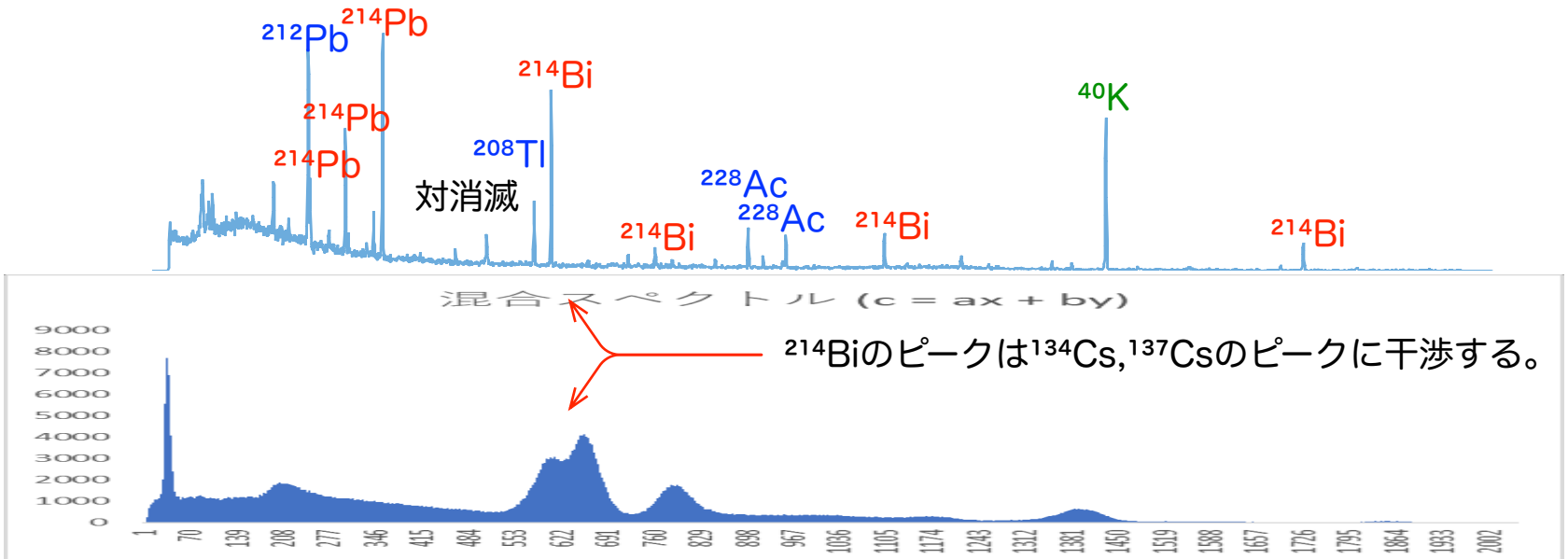


この場合、未知変数がx,yの2つなので、スペクトルの混合比を求めるには2つの連立方程式を立てれば良い。この時、a,b,cの代表値としてピーク頂点のみの数値や、ピークの無い領域の値を使うと誤差が大きいため、ピークを含む一定領域（ウィンドウ）の数値を合計して使用するのが一般的である。

例えば796±10keV（^{134}Csのピーク領域）と662±10keV（^{137}Csのピーク領域）の2か所にエネルギーウィンドウを設定し、この2つのウィンドウの測定値を使って立てた連立方程式を解けばx,yが求められる。

γ線スペクトロメトリー

～シンチレーション検出器詳細～



農学部のアイソトープ施設で使用しているNaIシンチレーション検出器では、^{134}Cs, ^{137}Csに加え、^{131}Iと^{40}Kが混合していると仮定し、連立方程式を解いている。

したがって、これら4核種の濃度が低く、相対的に他の核種（例えば^{238}Uから生成する^{214}Bi）の寄与が大きい場合、計算結果の誤差が大きくなる。このため、施設の受託分析では0.5 Bq/Vial未満の試料は不検出（N.D.）と見なしている。

今日の講義の概要

1）ウォーミングアップ

前回要点確認

Q&Aについて

用語の整理

原子の構造と周期表と同位体

2）放射性同位体の特徴
→　不安定な原子核

放射性同位体の安定化（壊変）

半減期

壊変法則と「核図表」

3）放射性同位体の測定

放射性同位体量の単位（Bq）

壊変で放出されるエネルギーの分配

Ge半導体検出器によるγ線スペクトル解析

↑ここまで終了

4）放射性同位体の生成

壊変、核融合、中性子吸収、
核分裂、粒子間の衝突

5）原子力発電と核燃料サイクル

放射性核種の生成

放射性核種は壊変によって安定化する。

では、不安定なはずの放射性核種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

中性子の吸収（赤色巨星内部・超新星爆発・原子炉内）

^{110m}Ag、^{134}Csなど

^{235}U、^{239}Puなどの核分裂

^{137}Cs、^{90}Srなど

^{238}U、^{232}Thなどの壊変

今日の前半で紹介済なので、説明割愛

^{14}Cなど

太陽・銀河からの宇宙線と地球大気の衝突

各種の核反応

高エネルギーで加速した粒子と原子核の衝突

^{18}Fなど

放射性同位体の生成

恒星内部の核融合

中性子の吸収（赤色巨星内部・超新星爆発・原子炉内）

宇宙での生成

^{235}U、^{239}Puなどの核分裂

原子力発電による生成

^{238}U、^{232}Thなどの壊変

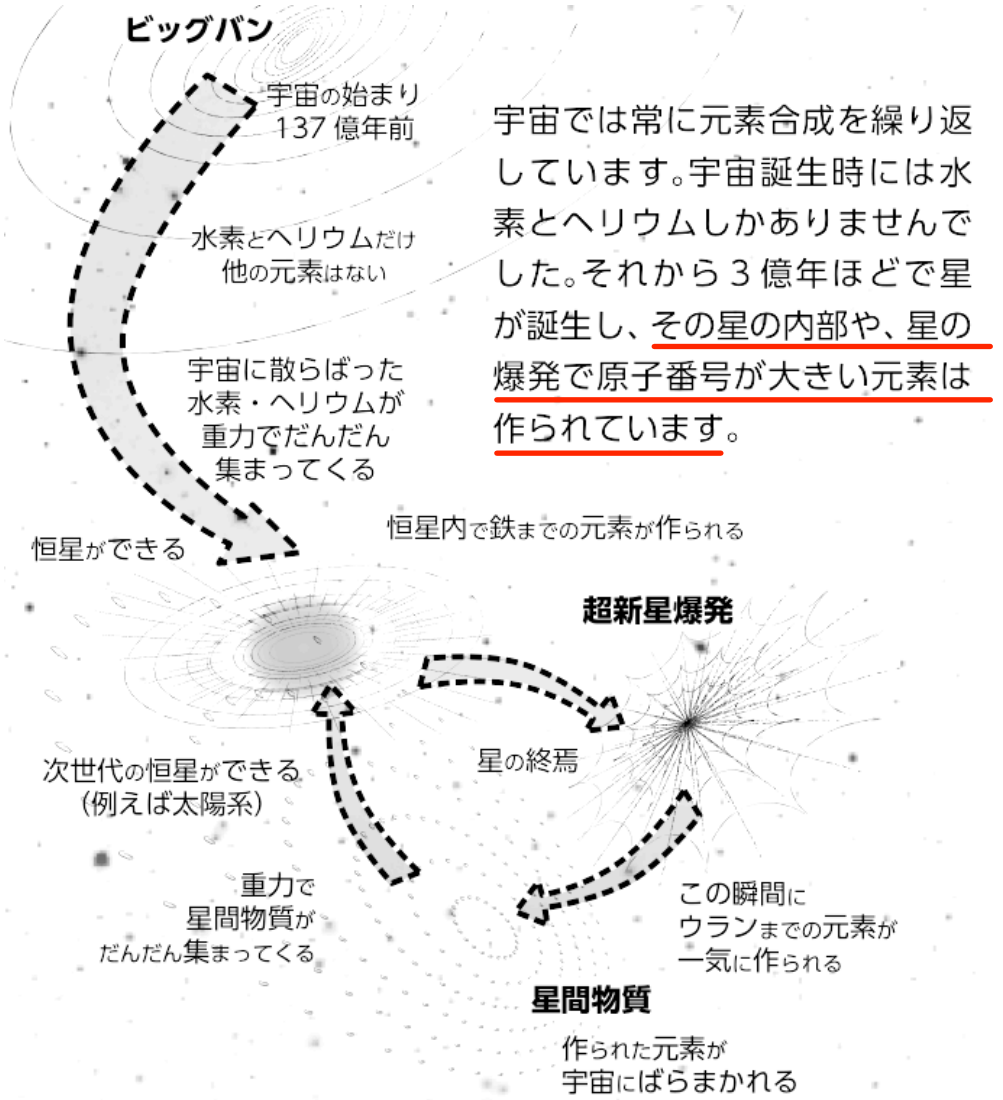
太陽・銀河からの宇宙線と地球大気の衝突

高エネルギーで加速した粒子と原子核の衝突

各種の核反応

宇宙での放射性同位体の生成

～核融合・中性子吸収～

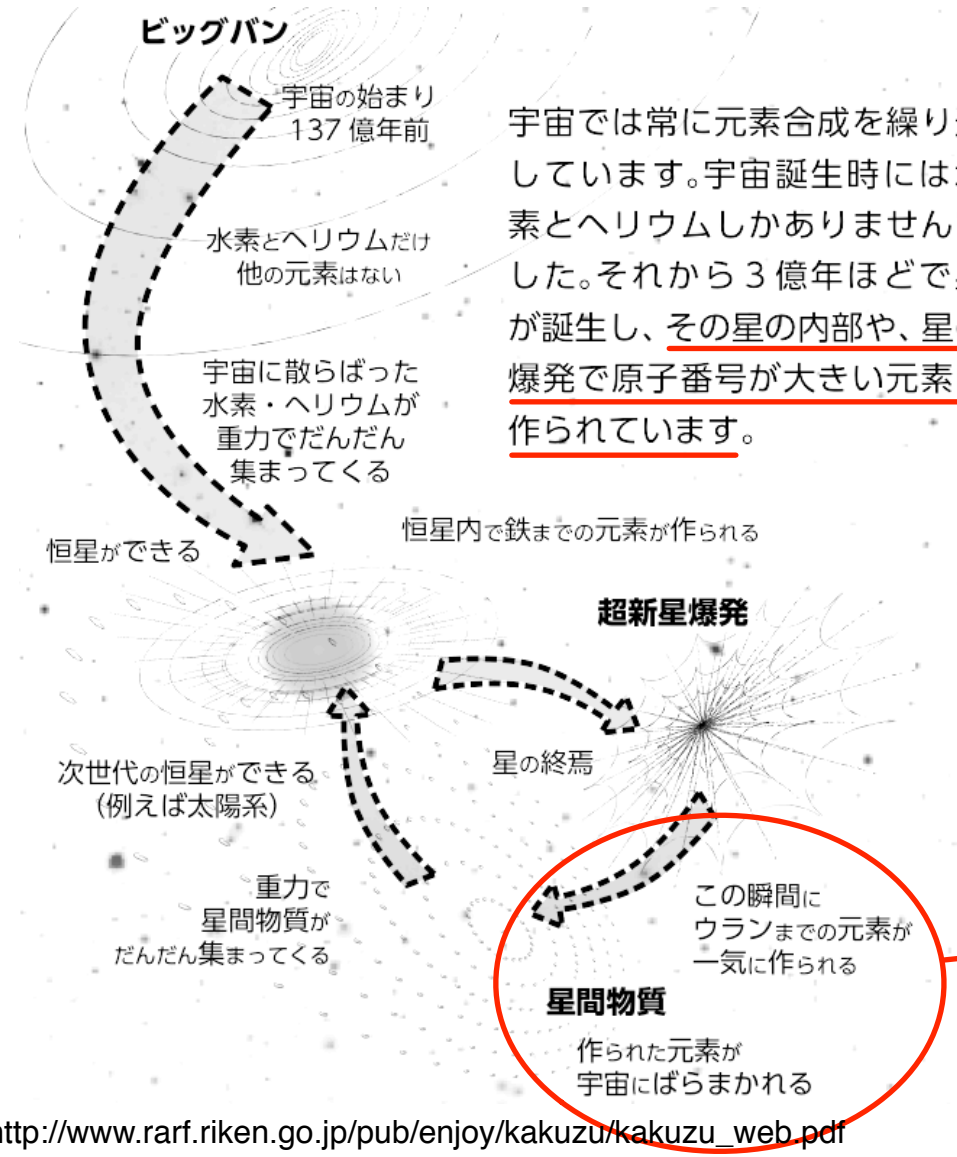


宇宙では常に元素合成を繰り返しています。宇宙誕生時には水素とヘリウムしかありませんでした。それから３億年ほどで星が誕生し、その星の内部や、星の爆発で原子番号が大きい元素は作られています。

http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu_web.pdf

宇宙での放射性同位体の生成

～核融合・中性子吸収～



宇宙では常に元素合成を繰り返しています。宇宙誕生時には水素とヘリウムしかありませんでした。それから３億年ほどで星が誕生し、その星の内部や、星の爆発で原子番号が大きい元素は作られています。

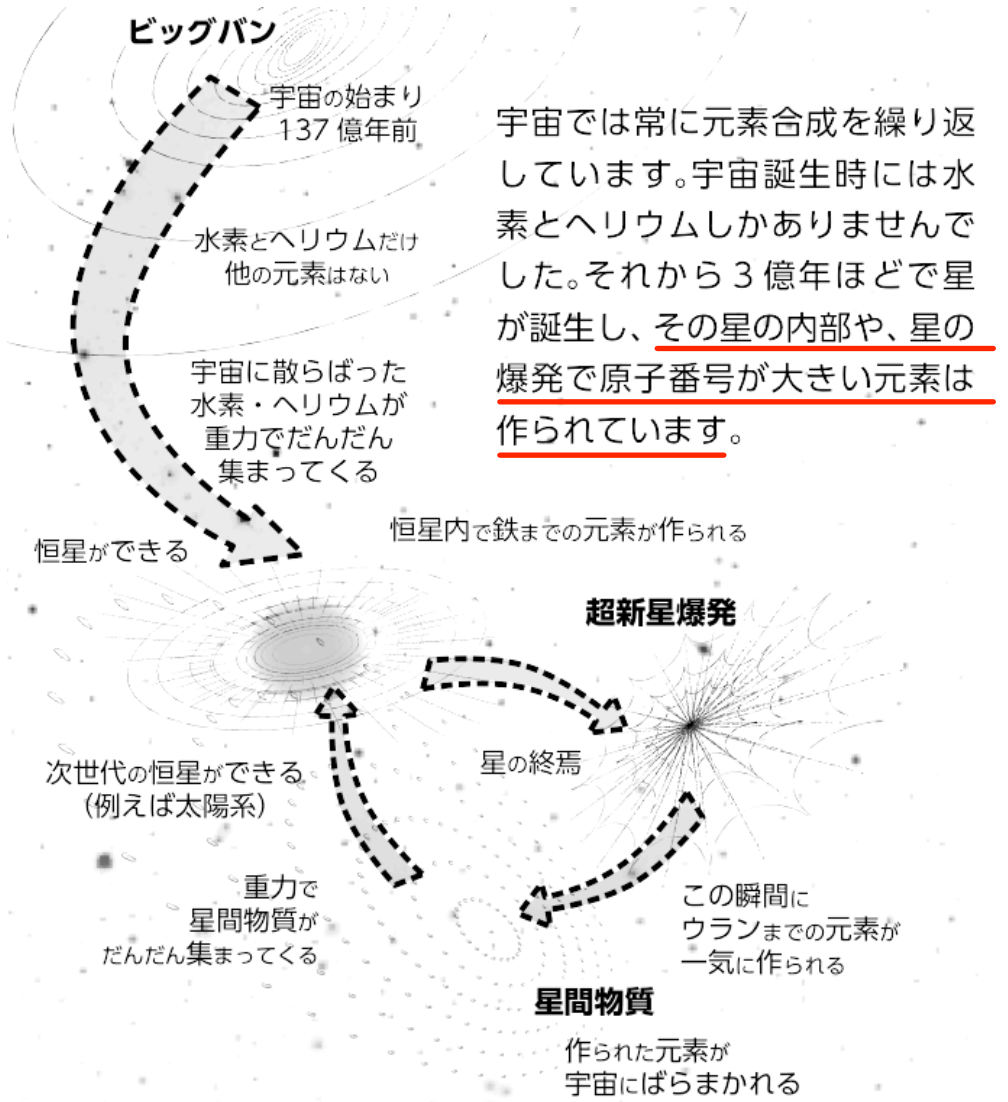
地球誕生時に取り込まれ、
まだ残っている天然核種

→ ^{40}K、^{232}Th、^{238}Uなど

http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu_web.pdf

宇宙での放射性同位体の生成

～核融合・中性子吸収～



宇宙では常に元素合成を繰り返しています。宇宙誕生時には水素とヘリウムしかありませんでした。それから３億年ほどで星が誕生し、その星の内部や、星の爆発で原子番号が大きい元素は作られています。

ビッグバン直後～Fe生成まで

→　核融合

Fe生成～Bi生成まで

→　赤色巨星内の中性子吸収

Biより重い原子の生成

→　超新星爆発での中性子吸収

http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu_web.pdf

宇宙での放射性同位体の生成

～核融合・中性子吸収～

望月優子・理化学研究所（2006）
元素合成の謎にせまる

ビッグバン直後～Fe生成まで
→　核融合

Slow-Process
Fe生成～Bi生成まで
→　赤色巨星内の中性子吸収

Rapid-Process
Biより重い原子の生成
→　超新星爆発での中性子吸収

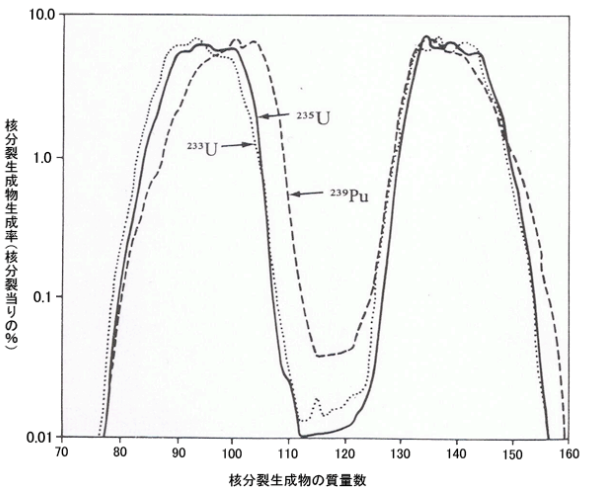
※ ビデオ全編の閲覧を希望する方はショートレポートに記載して下さい。

原子炉内での放射性同位体の生成

～核分裂・中性子吸収～

^{90}Sr、^{131}I、^{137}Cs

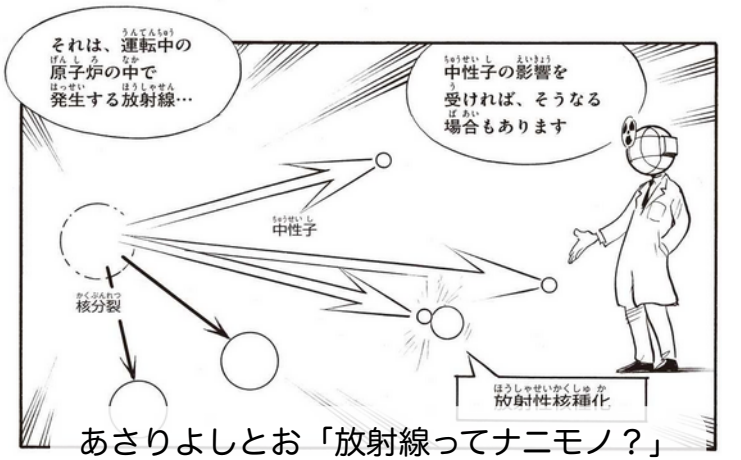
原子爆弾・原子力発電



http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/03/03060304/03.gif

核分裂で^{235}Uや^{239}Puの原子核が二つに割れると、中性子過剰なβ壊変核種となる。

原子力発電所では中性子吸収によってβ壊変核種が生じる場合もある。



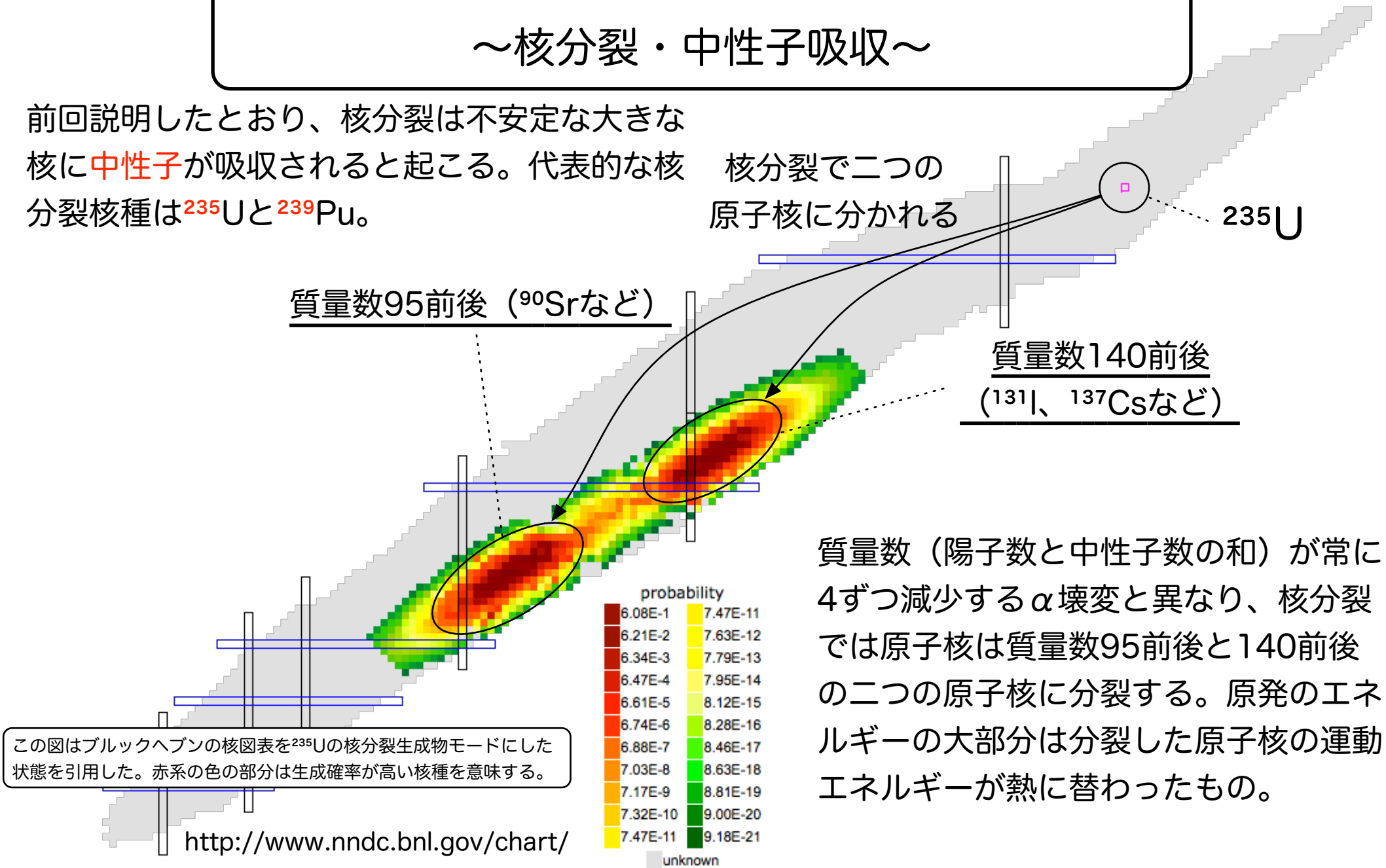
あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

^{134}Cs

原子炉内での放射性同位体の生成

～核分裂・中性子吸収～

前回説明したとおり、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。

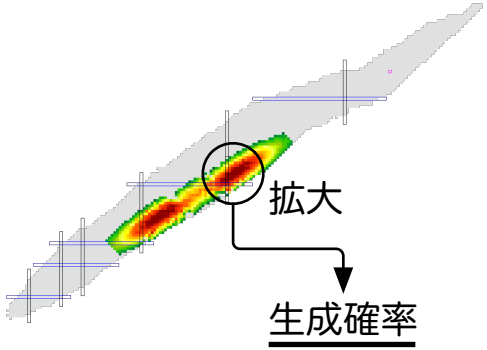


この図はブルックヘブンの核図表を^{235}Uの核分裂生成物モードにした状態を引用した。赤系の色の部分は生成確率が高い核種を意味する。

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。

原子炉内での放射性同位体の生成

～核分裂・中性子吸収～



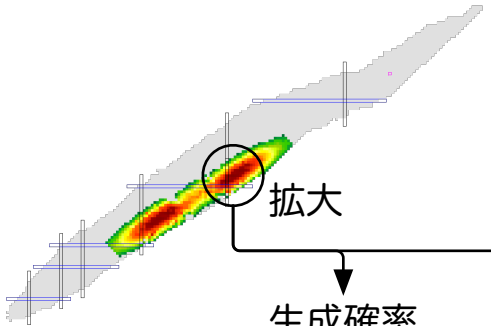
http://www.nndc.bnl.gov/chart/

赤系が高確率

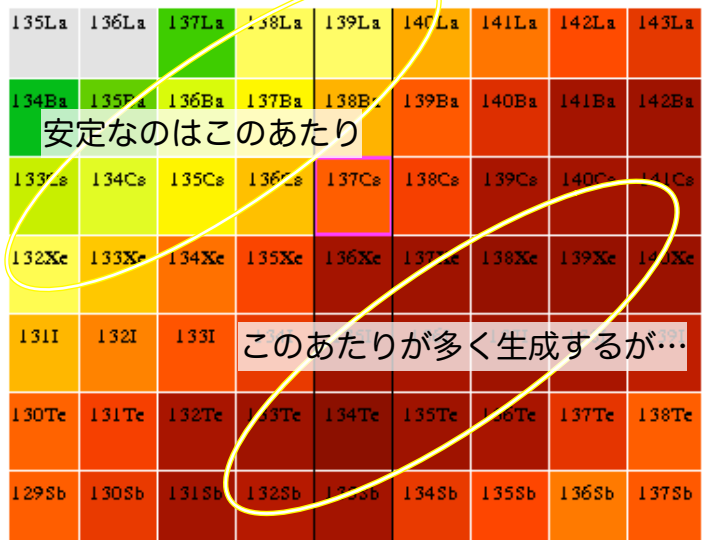
^{235}Uや^{239}Puの陽子：中性子比は約1:1.6なので、核分裂で生成した二つの原子核も陽子：中性子比は約1:1.6である。

原子炉内での放射性同位体の生成

～核分裂・中性子吸収～



生成確率



http://www.nndc.bnl.gov/chart/

赤系が高確率

壊変モード

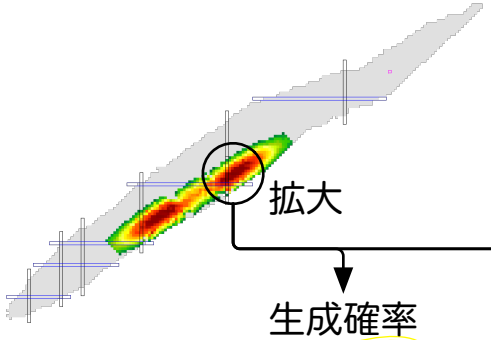
赤がβ、青がβ＋、黒が安定

^{235}Uや^{239}Pu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。

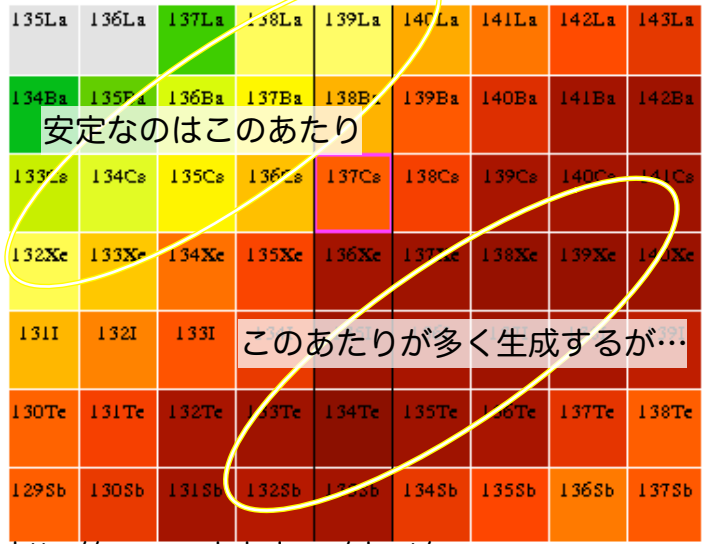
しかし質量数95～140程度の原子核にとって、安定な陽子：中性子比は1:1.3～1:1.4程度である。したがって、分裂で生じた核種は中性子過剰な不安定な状態であり、安定な陽子：中性子比を目指してβ壊変を繰り返す。

原子炉内での放射性同位体の生成

～核分裂・中性子吸収～



生成確率



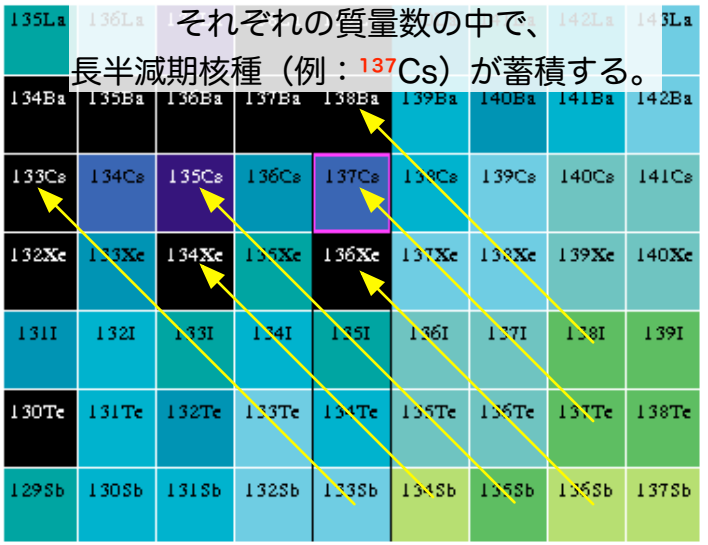
http://www.nndc.bnl.gov/chart/

赤系が高確率

壊変モード

赤がβ、青がβ＋、黒が安定

半減期

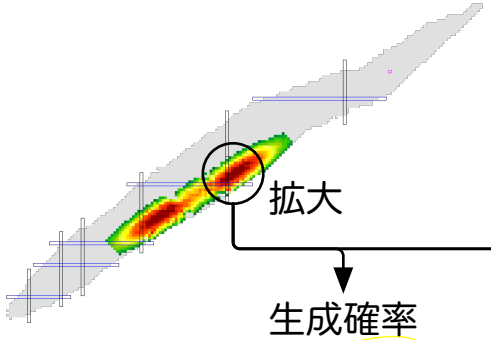


明色が短半減期、暗色が長半減期

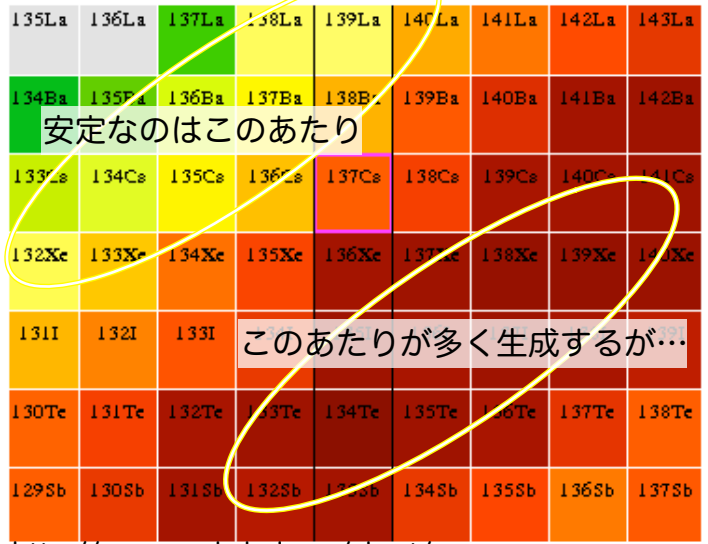
原子炉内には最終的に^{90}Srや^{137}Csのような比較的半減期の長い核種（または安定核種）が蓄積する。長半減期核種は事故で問題になるだけでなく、核廃棄物処理においても障害となっている。

原子炉内での放射性同位体の生成

～核分裂・中性子吸収～



生成確率



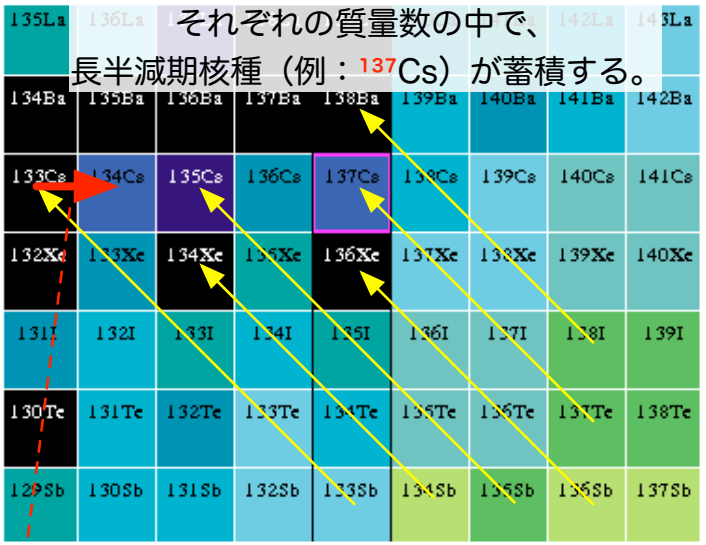
http://www.nndc.bnl.gov/chart/

赤系が高確率

壊変モード

赤がβ、青がβ＋、黒が安定

半減期



明色が短半減期、暗色が長半減期

中性子吸収によって右側（中性子＋１）に変化することもある（例：^{133}Cs→^{134}Cs）。

原爆では中性子吸収によって生成する同位体（例えば^{134}Cs）が少ないため、原発事故と核実験の影響を切り分ける際に利用されることもある。

福島第１原発事故原因の概要

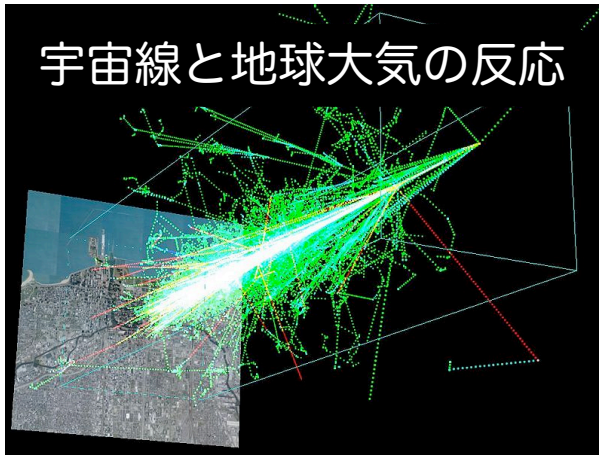
分裂で生じた核種は中性子過剰な不安定な状態であり、安定な陽子：中性子比を目指してβ壊変を繰り返す。この壊変で発生するエネルギーは原発全体のエネルギーからすると小さいものの、無視できない量の熱（崩壊熱）に変換される。

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。

福島第１原発事故では核分裂の停止には成功したが、燃料棒の冷却機能が失われたため、崩壊熱でメルトダウンが起き、炉内に蓄積されていた放射性核種が大気中に漏出してしまった（核分裂収率が近い^{137}Csと^{90}Srで放出量に差が有るのは、両者の揮発性の差を反映している）。

衝突による放射性同位体の生成

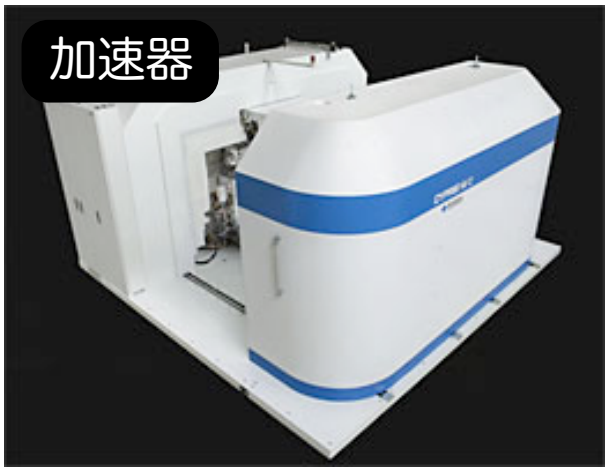
～原子核の衝突～



https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_%28physics%29

宇宙線と大気原子の衝突により、
大気中で放射性同位体が生成している。

→ ^{3}H, ^{10}Be, ^{14}Cなど



http://www.shi.co.jp/products/medical/cyclotron/

高速に加速した荷電粒子を原子核に衝突させ、核反応を起こすこともできる。医療用、研究用などの核種製造に使われている（癌の検査に使われる^{18}Fなどが有名）。

※ 左の写真はPET検査用の核種を製造する加速器。病院に設置できるサイズ。