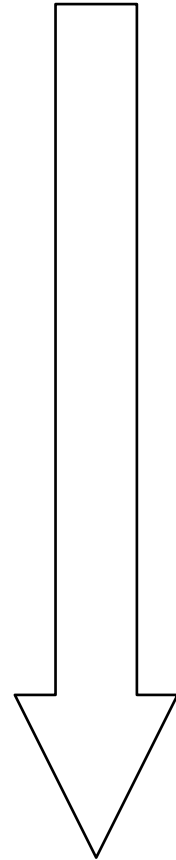


放射線・放射性核種に関する 基礎知識

講義の流れ



放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

放射線測定的基础

～相互作用を捉える～

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～

講義の流れ

放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～

放射線とはどんなもの？

放射線と物質の相互作用：荷電粒子・非荷電粒子

放射線と物質の相互作用の可視化：コンピューターシミュレーション

放射線の発生

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

Bqという単位：核種の量を壊変数で表す

半減期という単位：核種の不安定さの指標

放射性核種の原子核はなぜ不安定？

陽子数と中性子数がアンバランス： β 壊変

陽子数と中性子数の合計が大きすぎる： α 壊変

壊変で放出されるエネルギーの分配

放射性核種の生成：原子核の融合・分裂・衝突

放射線測定の基礎

～相互作用を捉える～

電流を検出する：GM管・Ge半導体検出器

化学反応を検出する：霧箱・シンチレーション検出器
・イメージングプレート・CR-39

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～

放射線の人体影響メカニズム

シーベルト (Sv) という単位：目的と計算法

2種類のシーベルト

シーベルト算出の実際

シーベルトとリスクの目安：相対評価

シーベルトとリスクの目安：絶対評価

リスク評価とトランスサイエンス

放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

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を示す

1) 原子よりも小さい何らかの粒子が…

「原子よりも小さい粒子」の例

原子核

陽子、中性子

電子、陽電子、 μ 粒子

光子

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

	粒子	エネルギー
可視光線	光子	2~3 eV
^{137}Cs の γ 線	光子	662 keV

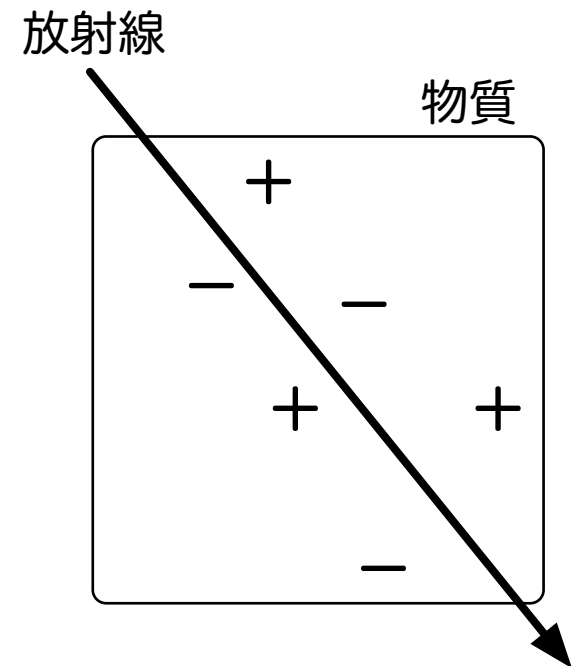
粒子は同じ

エネルギーは20~30万倍

3) 放射線としての性質を示す

放射線が物質を通過すると、物質中の原子を電離する（＝イオン化する）。

この「**電離を起こす性質**」が放射線の特徴で、人体影響を考慮する際、あるいは放射線を測定する際に重要。



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。

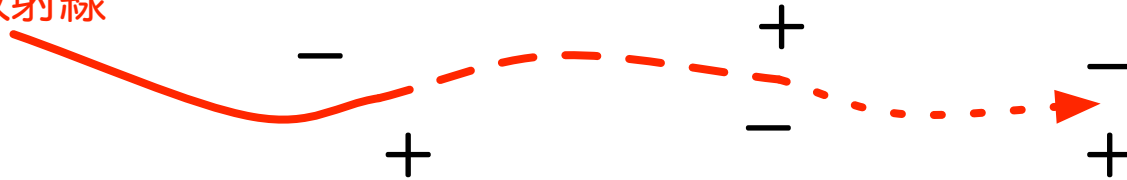
放射線と物質の相互作用

～荷電粒子の場合～

粒子に電荷が有る放射線の場合は、経路
近傍の原子を直接的に電離する。

荷電粒子の例：
Heの原子核、
陽子、電子など

荷電粒子の放射線



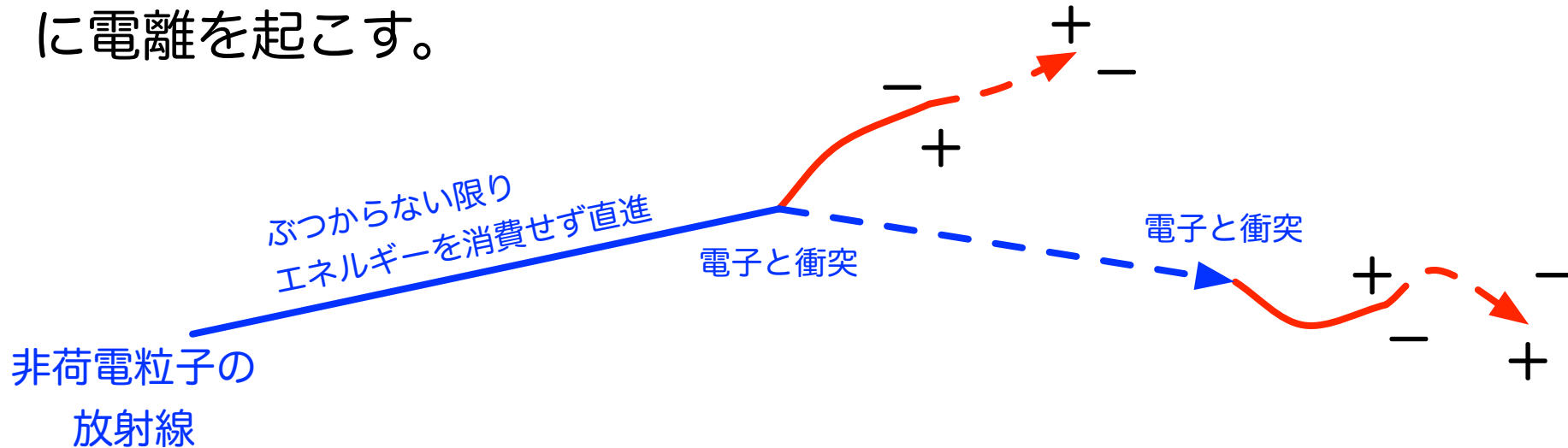
物質を電離することで、放射線の運動エネルギーが
徐々に消費され、最終的には放射線としての性質を
失う。

放射線と物質の相互作用

～非荷電粒子の場合～

粒子に電荷が無い放射線の場合、物質中で電荷を持つ粒子（電子や陽子）に衝突して運動エネルギーを与え、衝突された粒子が間接的に電離を起こす。

非荷電粒子の例：
光子、中性子など



別の粒子との衝突によって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。

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。

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。



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。

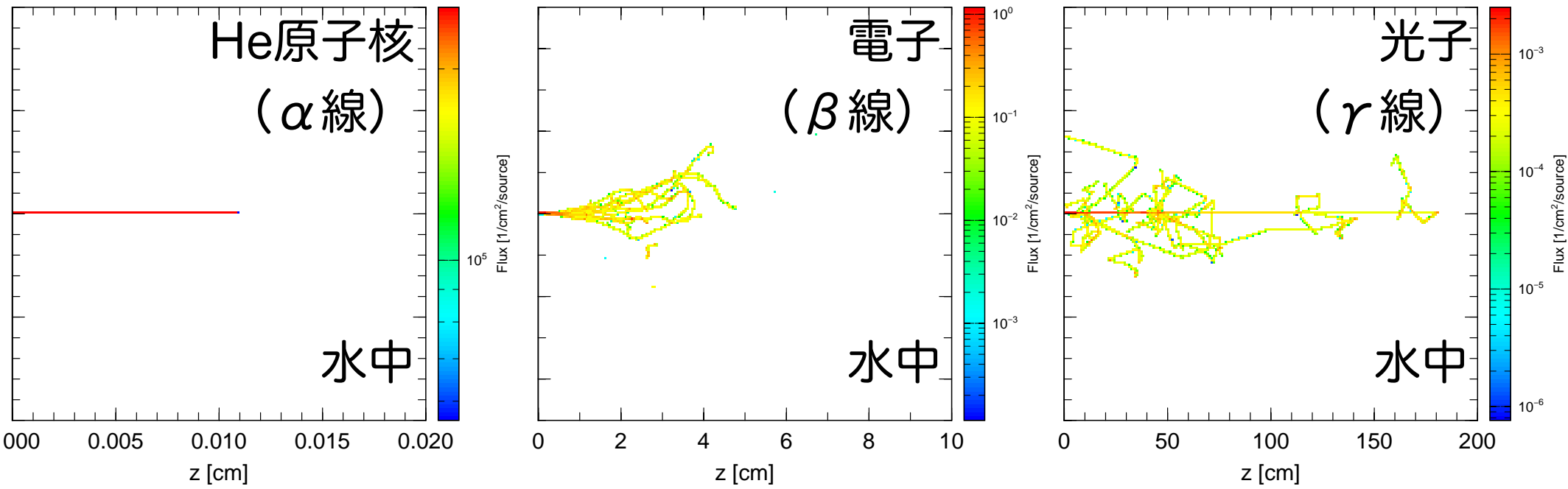
放射線と物質の相互作用の可視化

～コンピューターシミュレーション～

放射線は目に見えないが、放射線の物質中での挙動をコンピューターシミュレーションで可視化することはできる。

ここから3枚のスライドでは、一般的な放射線の挙動をPHITSというソフトウェアで可視化した例を示す。

1) 粒子による飛跡の違い



10MeVの運動エネルギーを持つ放射線の水中での飛跡をコンピュータでシミュレーションした図（10回分の飛跡を重ねて表示）。

同じ運動エネルギーでも、粒子によって飛距離は大きく異なる。Heの原子核（ α 線）は飛跡が短かく、狭い範囲に集中してエネルギーを与える。逆に光子線（ γ 線やX線）は飛跡が長く、広い範囲に少しずつエネルギーを与える。



余談：放射線の名前

He原子核線

電子線

光子線

α 線

β 線

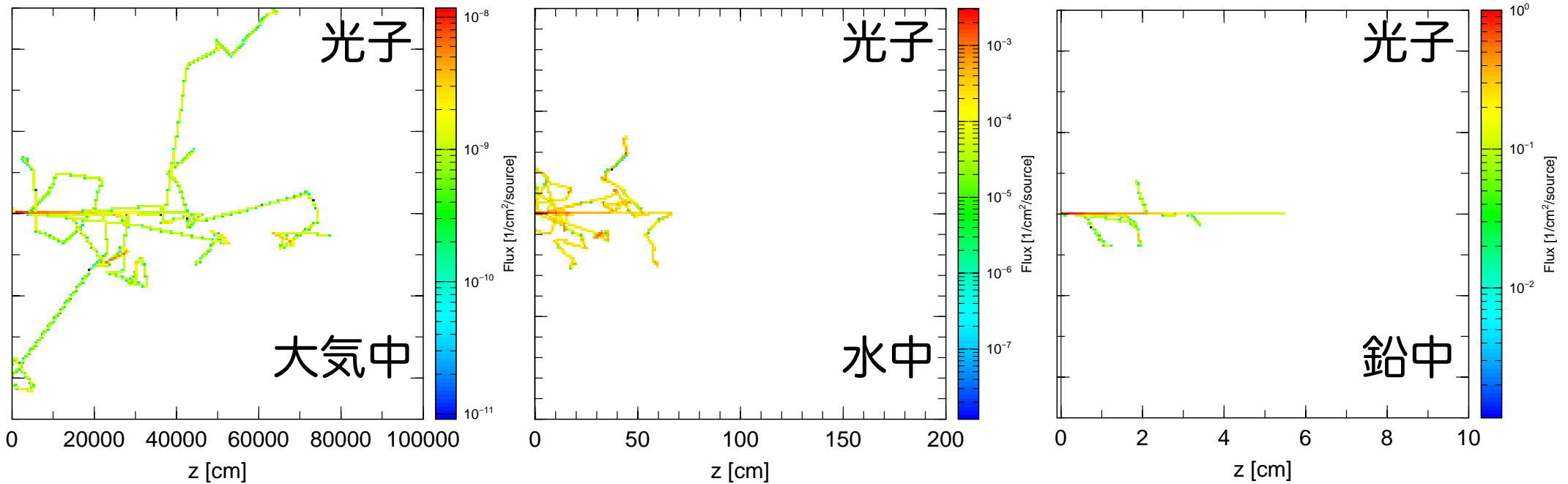
γ 線

X線

原子核の壊変エネルギーで生じる放射線

電子の軌道遷移エネルギーで生じる放射線

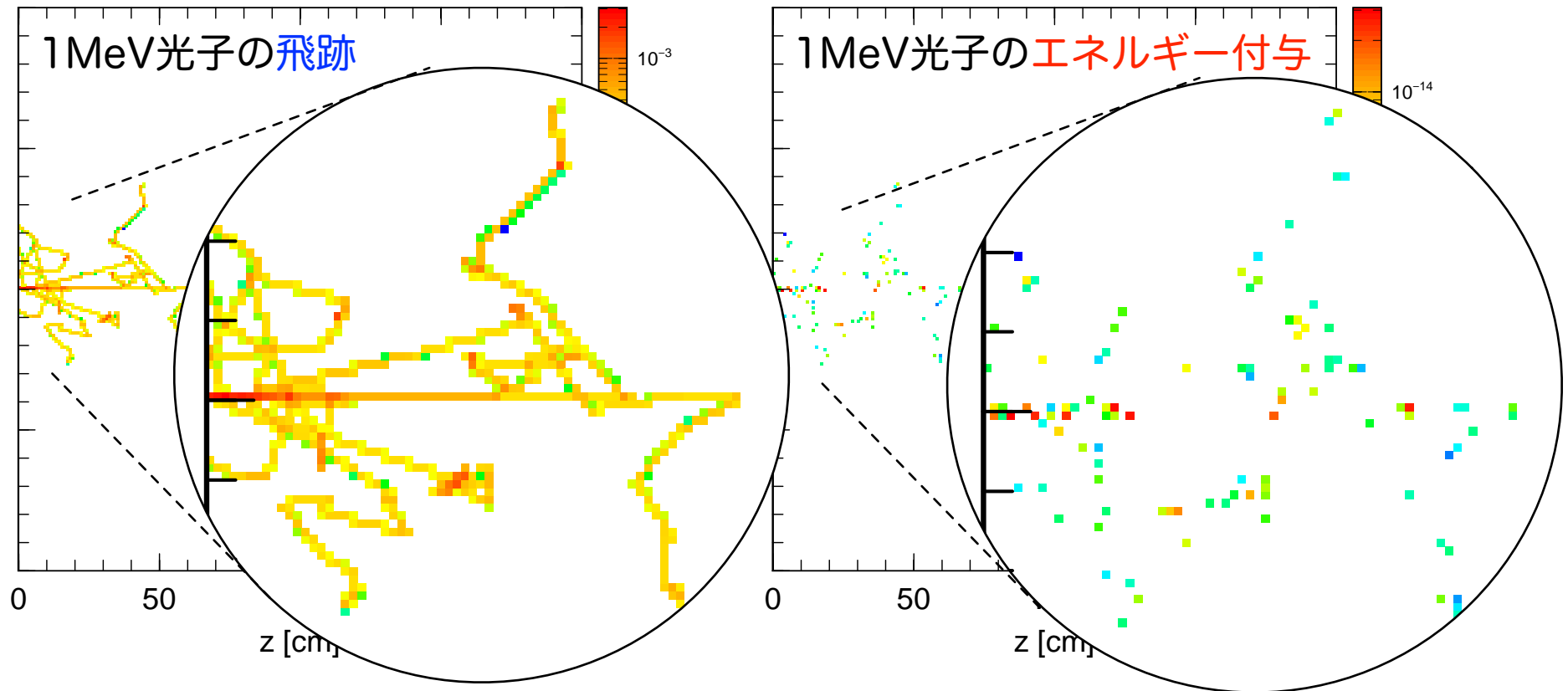
2) 物質による飛跡の違い



異なる物質中での1MeVの光子線の飛跡。

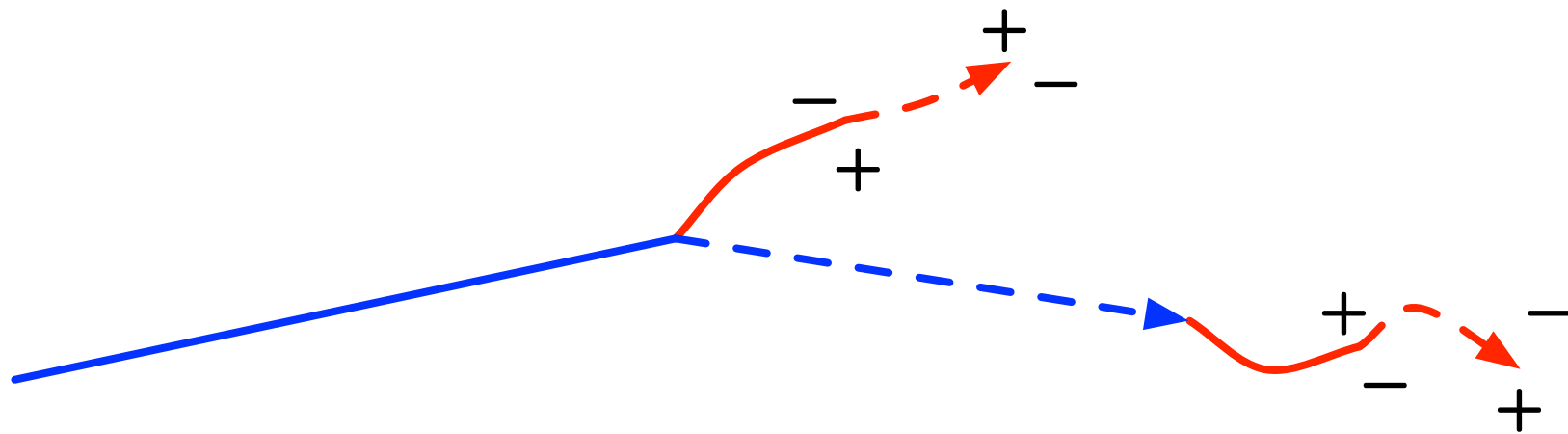
同じ粒子・同じ運動エネルギーの放射線でも、通過する物質によって飛距離は異なる。

3) 光子線の飛跡とエネルギー付与



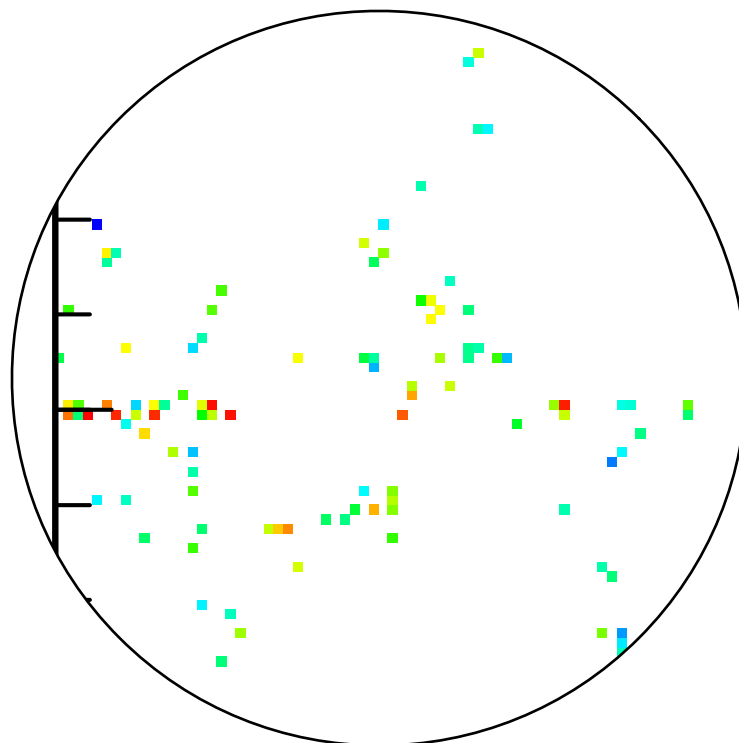
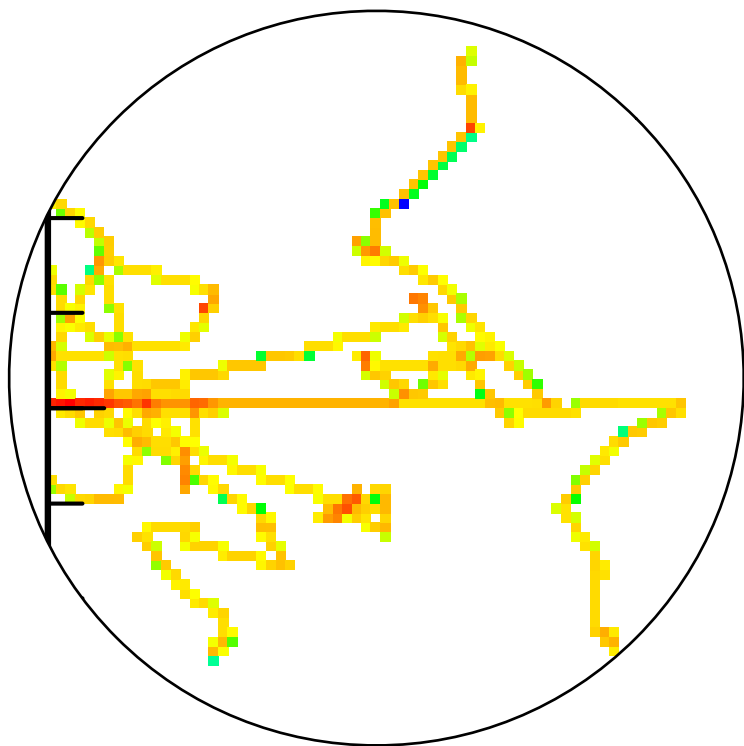
光子線は電荷が無いいため、飛跡そのものには電離を起こさない（エネルギーを付与しない）。

光子線で弾き出された電子が間接的に電離を起こすため、光子によって生じる電離は広範囲に点状（より正確には短い線状）に散らばる。



光子自身の飛跡は青い線

エネルギーが付与されるのは赤い線
(光子線の曲がる位置で生じる)



放射線の発生

～何からエネルギーを得て放射線となるか？～

発生源

エネルギーの由来

放射性核種

放射性核種（放射性同位体）が安定化する際に放出されるエネルギー。

加速器

荷電粒子を電場で加速し、運動エネルギーを与えることで放射線とする。この加速した荷電粒子のエネルギーを使って、光子線を発生させることもできる。

原子炉

核分裂に伴って中性子線が放出される。

宇宙線

一次宇宙線の由来の詳細は未解明。地上まで届くのは、一次宇宙線と大気の相互作用で生じた二次的な線が大部分。

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

ある原子の原子核が**不安定**な場合、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。



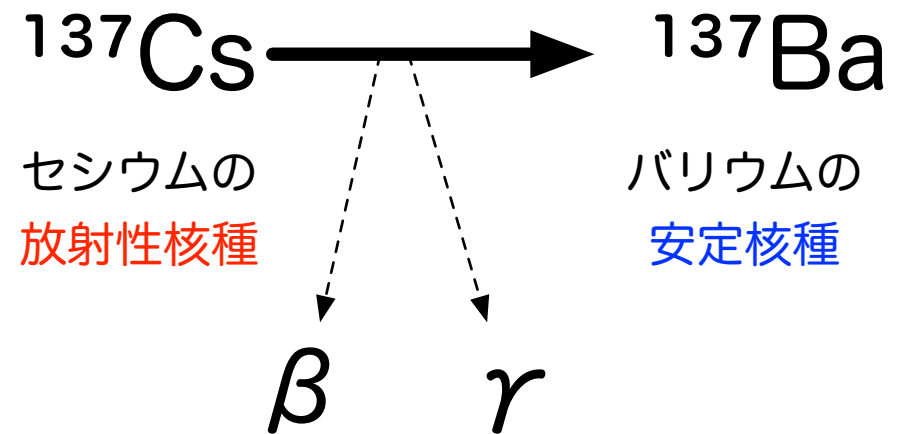
あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

ある原子の原子核が**不安定**な場合、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**と呼び、壊変する原子核を**放射性核種**（**放射性同位体**）という。エネルギーを与えられた粒子が放射線となる。



^{137}Cs の場合、余分なエネルギーは β 線および γ 線として放出される。
 β 線は電子、 γ 線は光子の放射線。

Bqという単位

～核種の量を壊変回数で表す～

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。

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

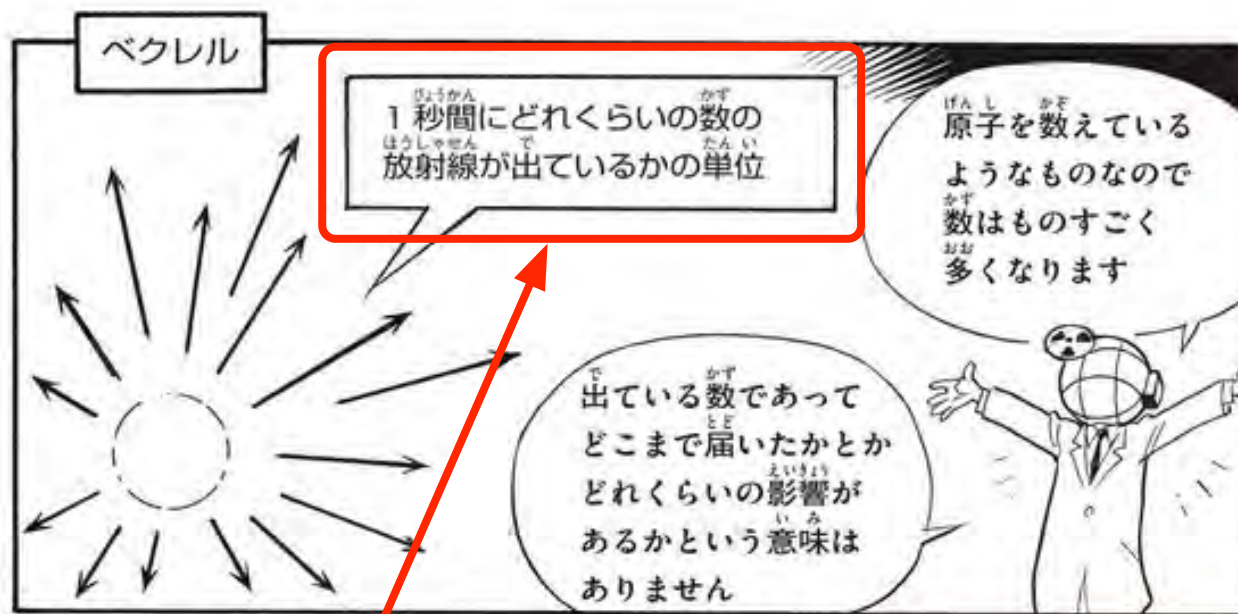
→ 1秒あたり1%の確率で壊変する
放射性同位体が200個ある場合 ----- 2 Bq

→ 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

ちなみに、 ^{137}Cs は約13億7千万個の原子が存在すると1Bq。

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。

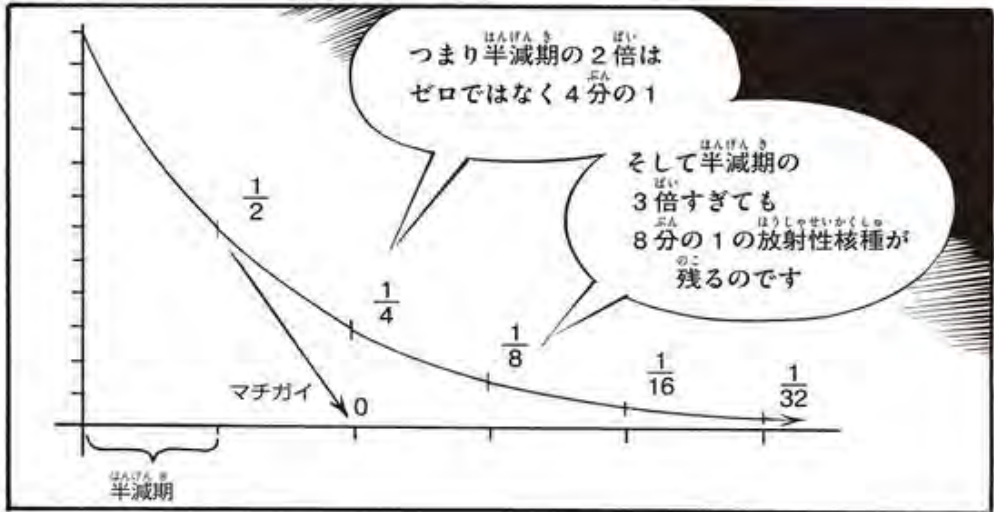
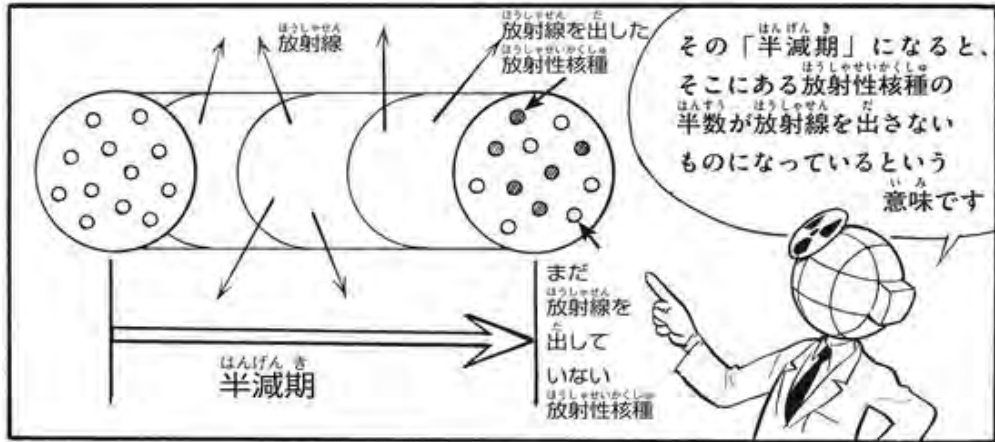


あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

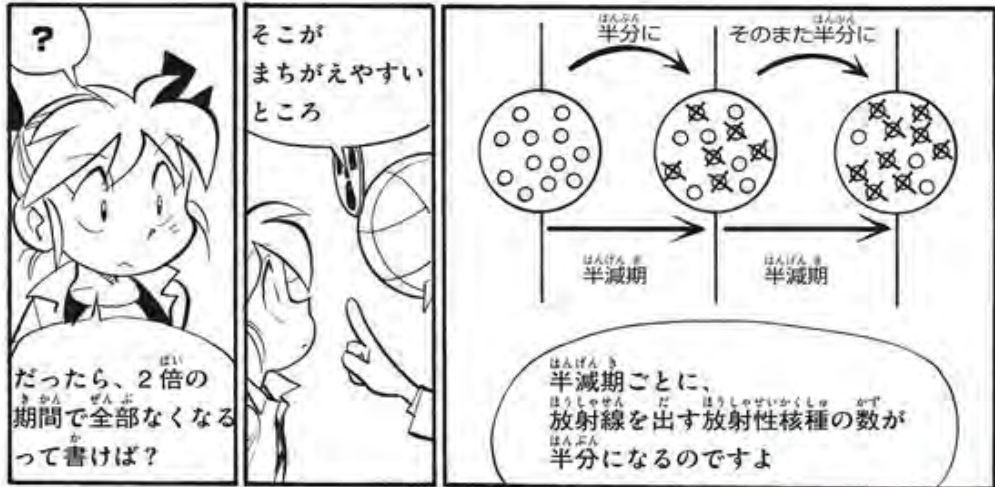
1壊変あたり1本の放射線が出る核種ではこの記述で良いが、そうでは無い核種もあることに注意（例えば ^{137}Cs の662keVの γ 線は1壊変あたり0.85本）。

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？」



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

不安定な原子核は1秒あたりの壊変確率が高く、半減期が短い。

放射性核種の原子核はなぜ不安定？

～ α 壊変と β 壊変～

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、
2) 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。

陽子数と中性子数がアンバランス

～ β 壊変～

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、
2) 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。

原発事故で放出された核種の大部分 (^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs など) は中性子が多すぎる。

このため、中性子が陽子に変わり、余った電子が放出される β 壊変によって安定化する。

β 壊変

中性子 \rightarrow 陽子 + 電子

0

+1

-1

陽子数と中性子数の合計が大きすぎる

～ α 壊変～

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、
2) 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。

例えば、代表的な天然核種である ^{238}U や ^{232}Th は、**質量数が大きすぎる** (質量数が206より大きい原子は不安定)。

このため、陽子2個と中性子2個 (=ヘリウムの原子核) を放出する **α 壊変**を繰り返し、少しずつ小さい原子核となって安定化して行く。

※時間があれば、この法則を「核図表」で説明します。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～ α 、 β 、 γ （複数回）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。

例えば ^{134}Cs の β 壊変に伴って放出される総エネルギーは2.06 MeV。この一部が壊変で生じた電子の運動エネルギー（※）となり、 β 線が発生する。

残りのエネルギーは（複数の） γ 線として放出される。

※正確には電子と同時に生じる反電子ニュートリノとエネルギーを分けあう。

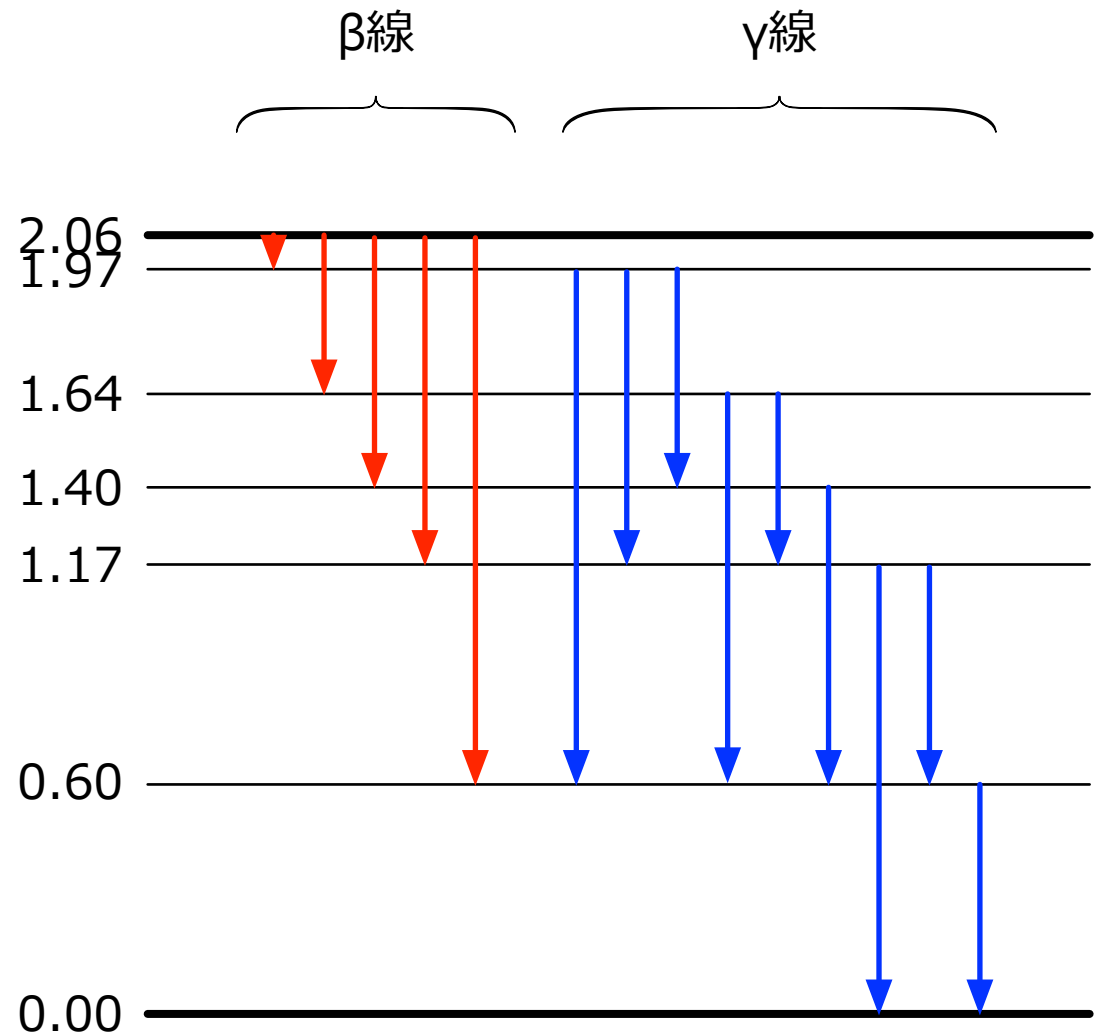
β 線のエネルギーが一定ではなく、核種判別に利用しにくいのはこのためである。

壊変で放出されるエネルギーの分配

～ α 、 β 、 γ (複数回) への分配～

1回の壊変によって、各エネルギーの α 、 β 、 γ 線が放出される確率は一定である。

エネルギー分解能の高いGe半導体検出器等を用いて γ 線スペクトルを解析することで、試料に含まれる γ 線放出核種を特定できる。



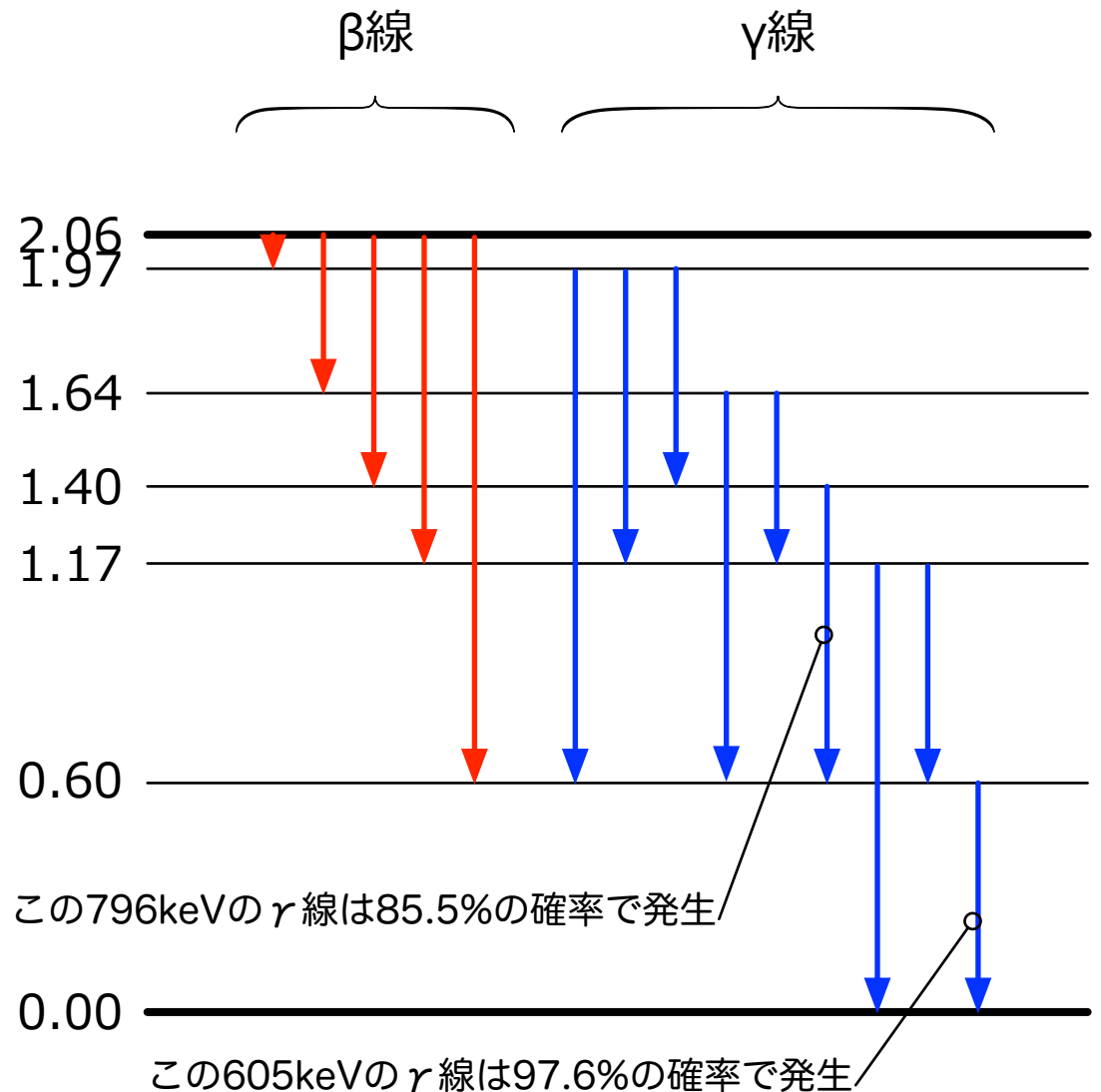
壊変で放出されるエネルギーの分配

～ α 、 β 、 γ (複数回) への分配～

1回の壊変によって、各エネルギーの α 、 β 、 γ 線が放出される確率は**一定**である。

エネルギー分解能の高いGe半導体検出器等を用いて **γ 線スペクトル**を解析することで、試料に含まれる **γ 線放出核種**を**特定**できる。

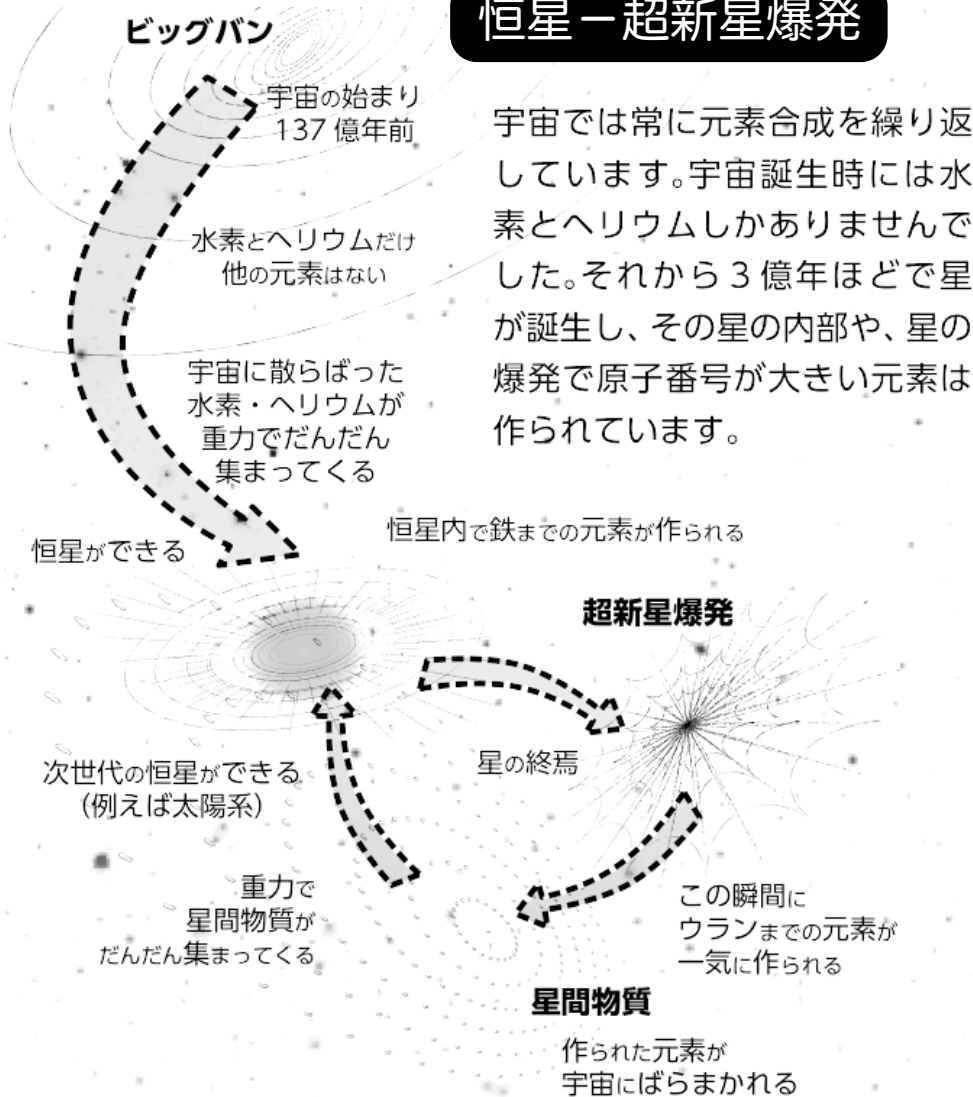
Ge半導体検出器で796keVと605keVの γ 線が85.5:97.6の比で観測された場合、 ^{134}Cs が存在する可能性が高い。



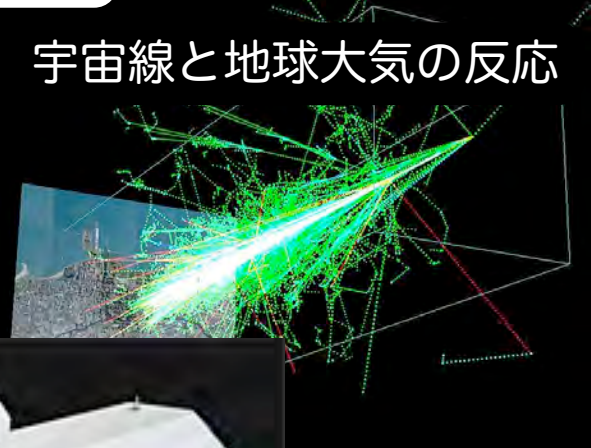
放射性核種の生成

～原子核の融合・分裂・衝突～

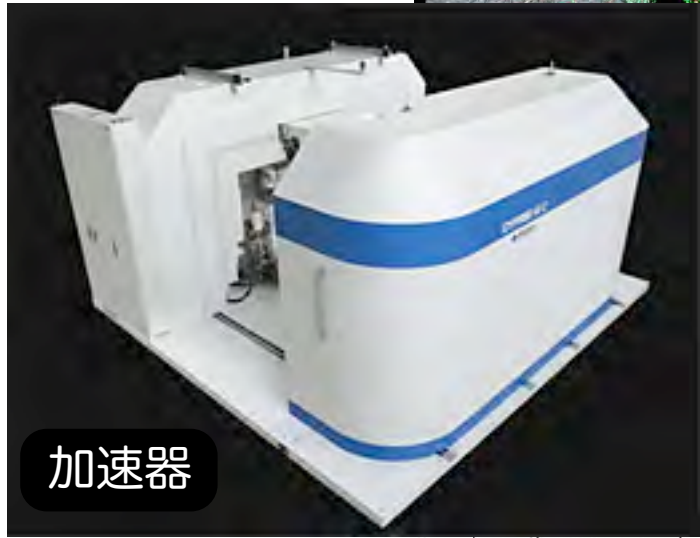
恒星－超新星爆発



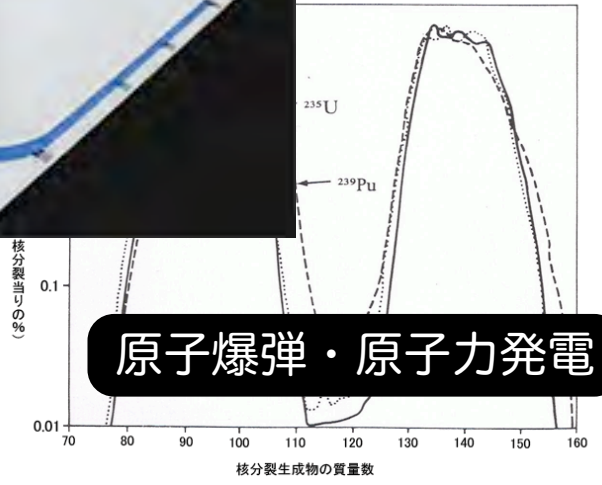
http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu_web.pdf



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



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



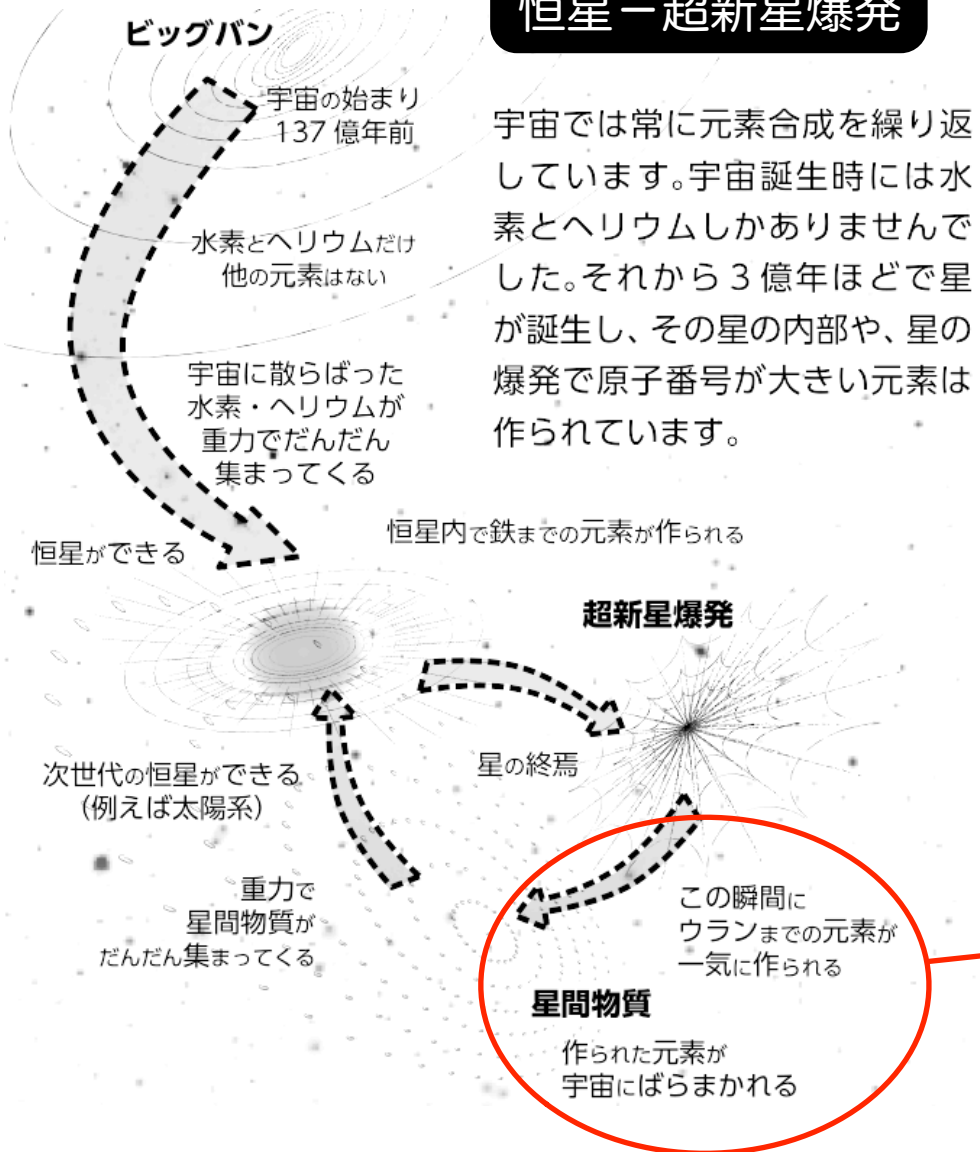
原子爆弾・原子力発電

図1 核分裂生成物の質量数分布
 [出典]W.マーシャル編:原子炉技術の発展(上)、裳華房、p.72

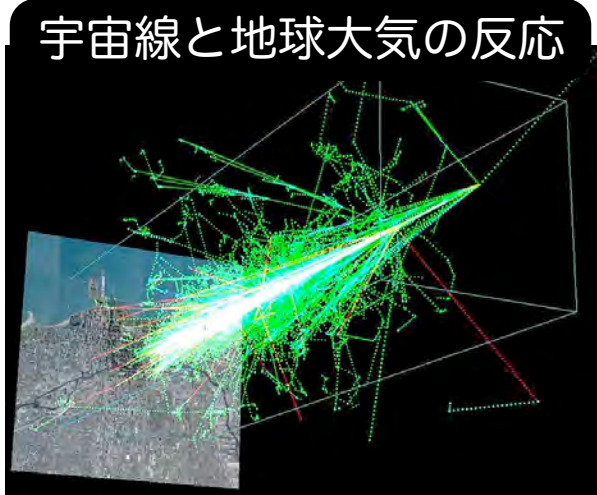
放射性核種の生成

～原子核の融合・分裂・衝突～

恒星－超新星爆発



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。



宇宙線と地球大気への反応

大気中で生成する天然核種

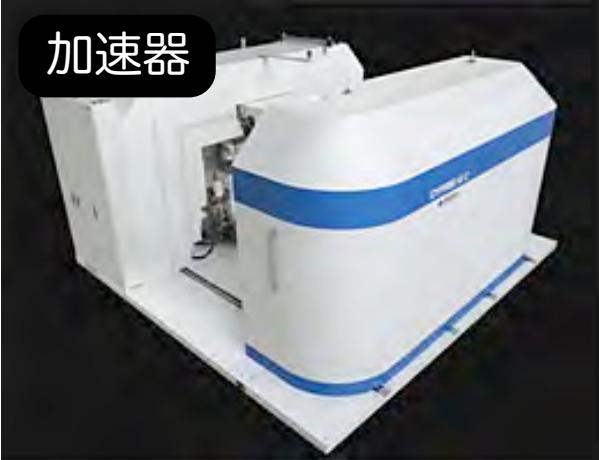
→ ^{14}C など

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

放射性核種の生成

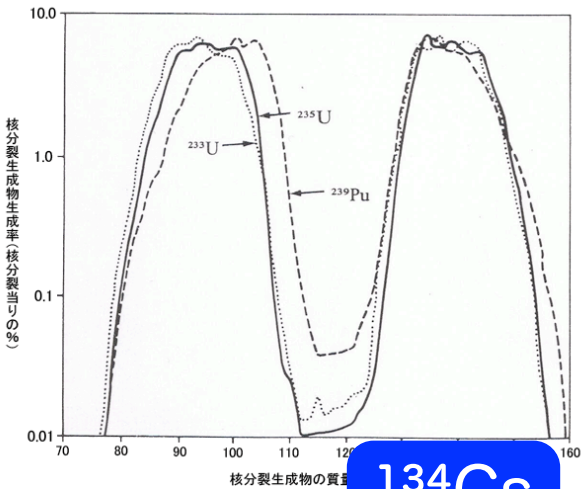
～原子核の融合・分裂・衝突～



高速に加速した何らかの粒子を原子核に衝突させ、核反応を起こすことができる。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）。

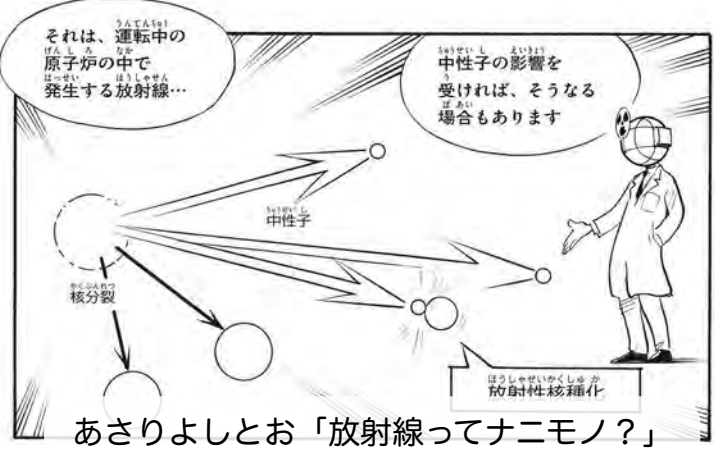
^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs

原子爆弾・原子力発電



核分裂で ^{238}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捕獲によって β 壊変核種が生じる場合もある。



放射線測定の基本

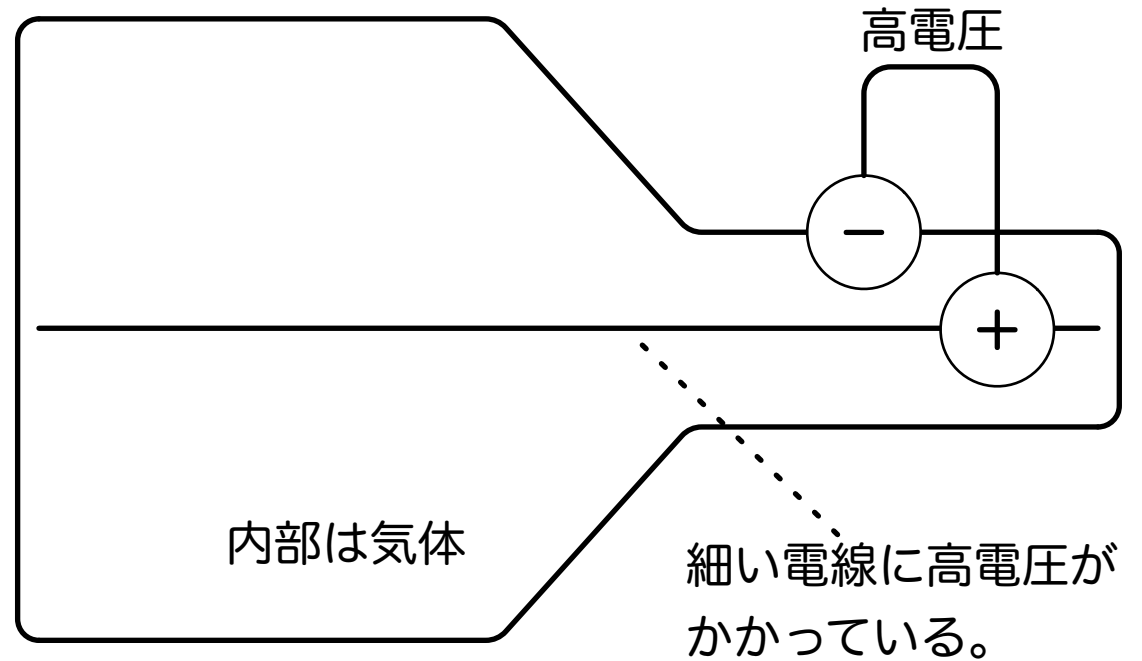
～相互作用を捉える～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

電流を検出する

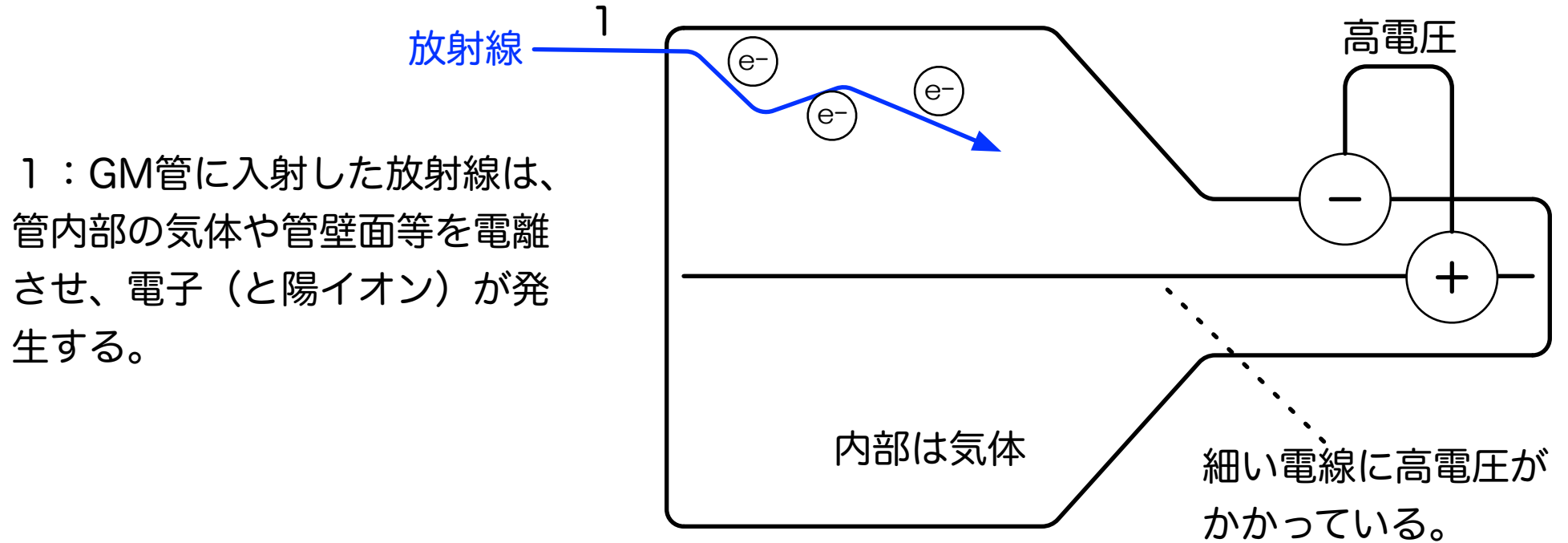
～GM管～



※ GM管（ガイガー・ミュラー管）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。

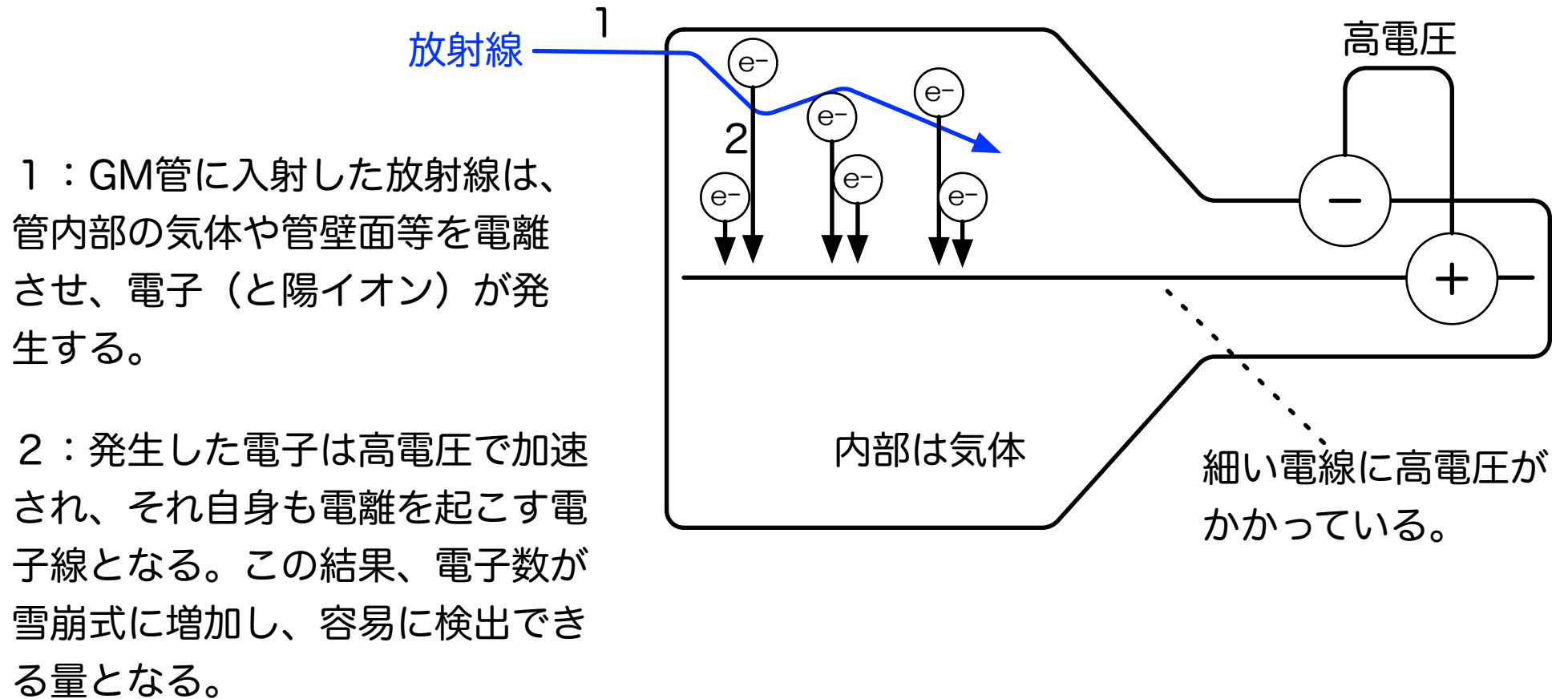
電流を検出する

～GM管～



電流を検出する

～GM管～



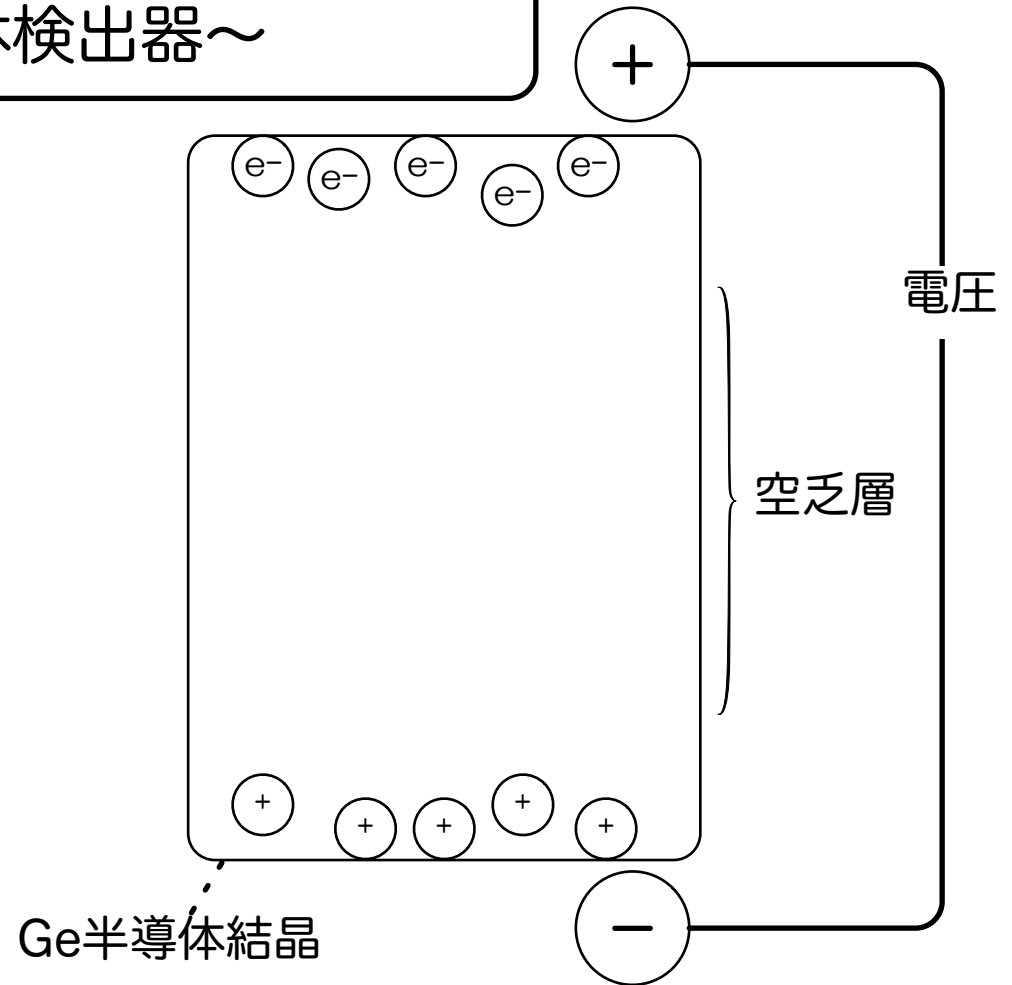
GM管实演



電流を検出する

～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。

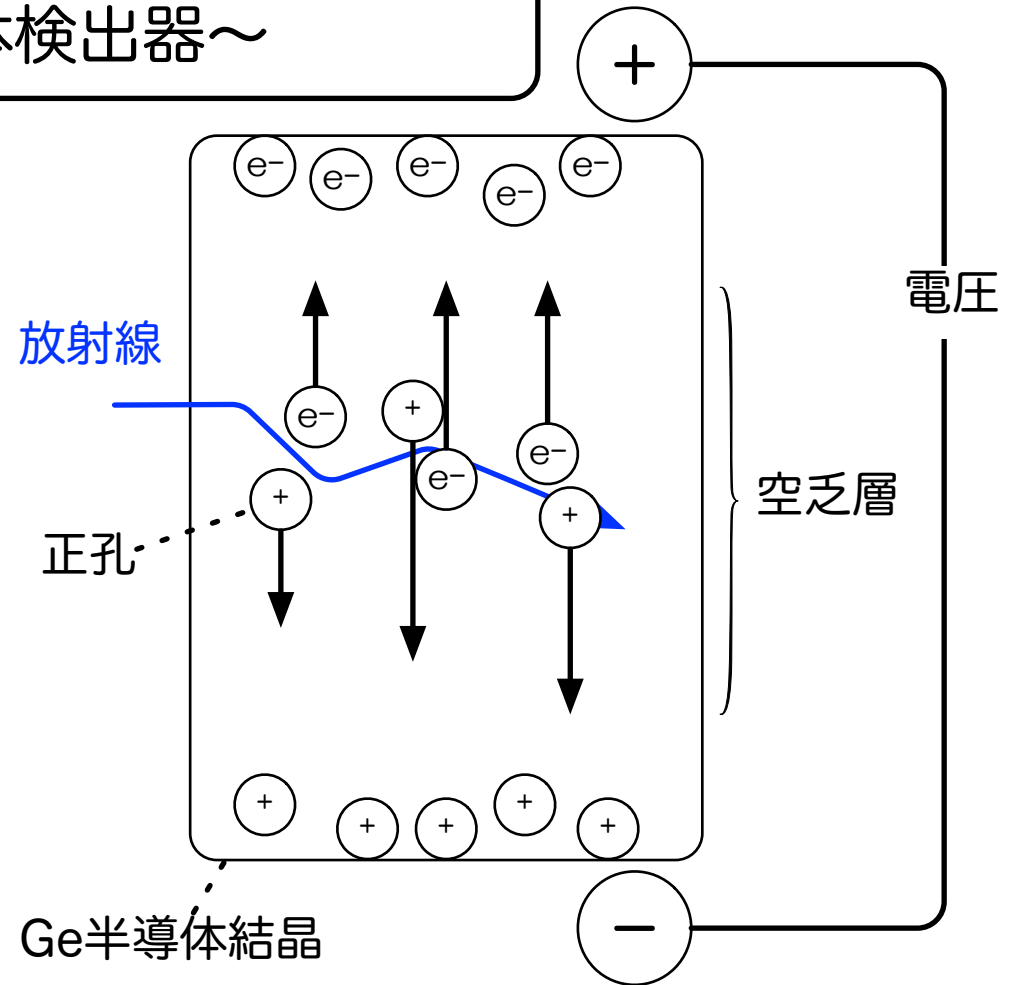


電流を検出する

～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。



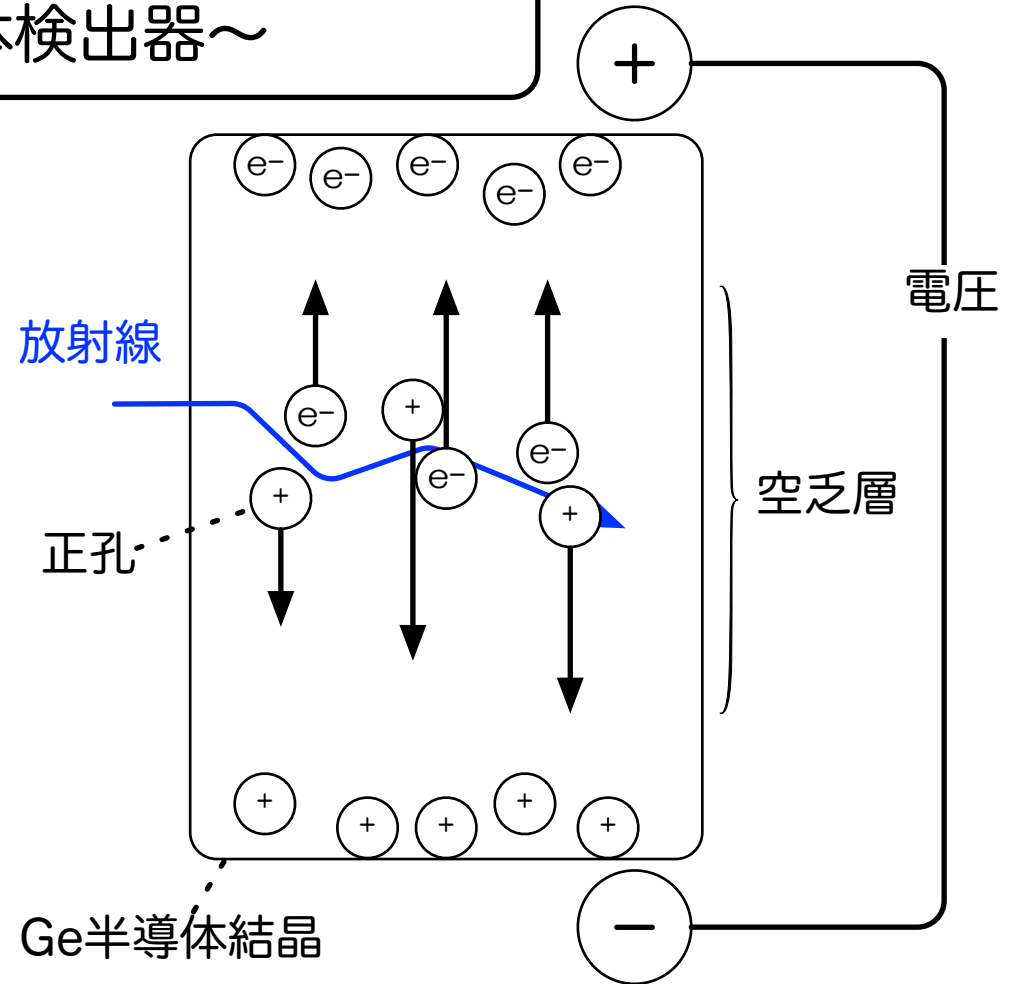
電流を検出する

～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。

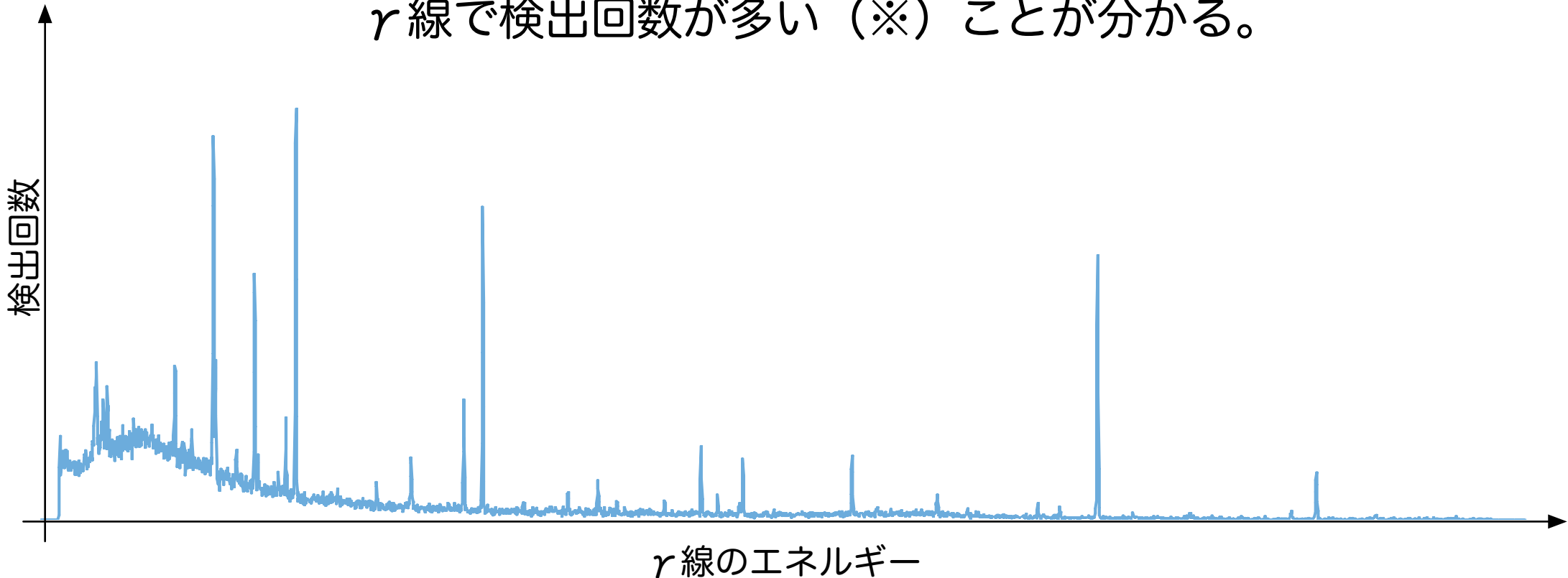
Ge半導体検出器は、**放射線のエネルギー**を正確に測定できる。このため**核種弁別能力**が高いことが最大の利点。ただし、高価であるため台数を揃えることが難しい。



電流を検出する

～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。

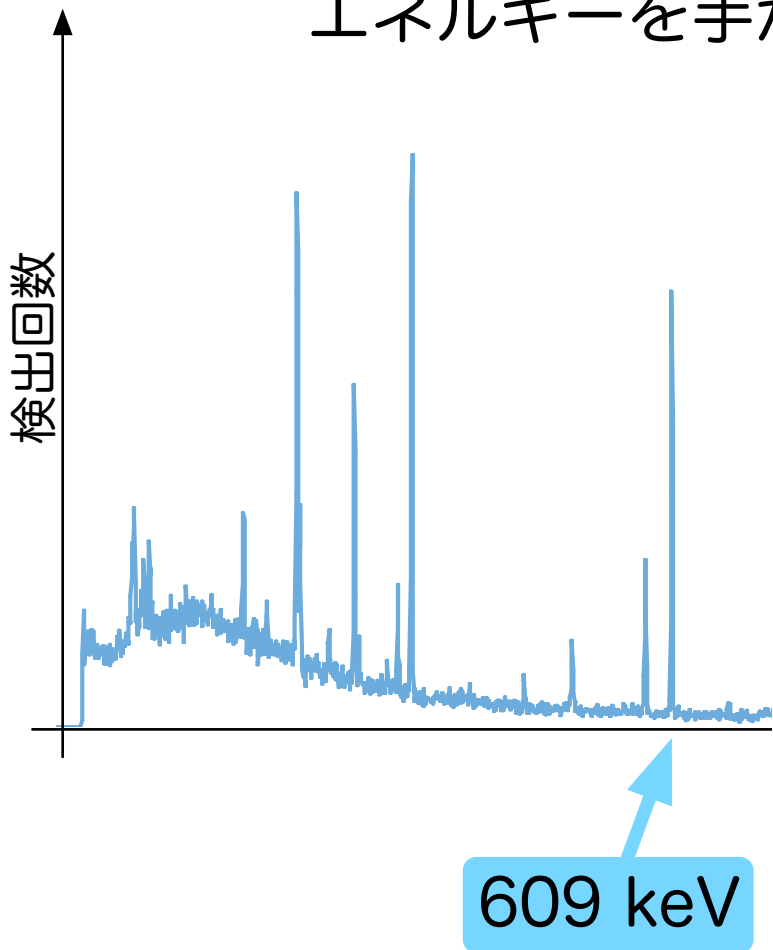


※このような図を「スペクトル」と言い、検出回数の多い場所を「ピーク」という

電流を検出する

～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。

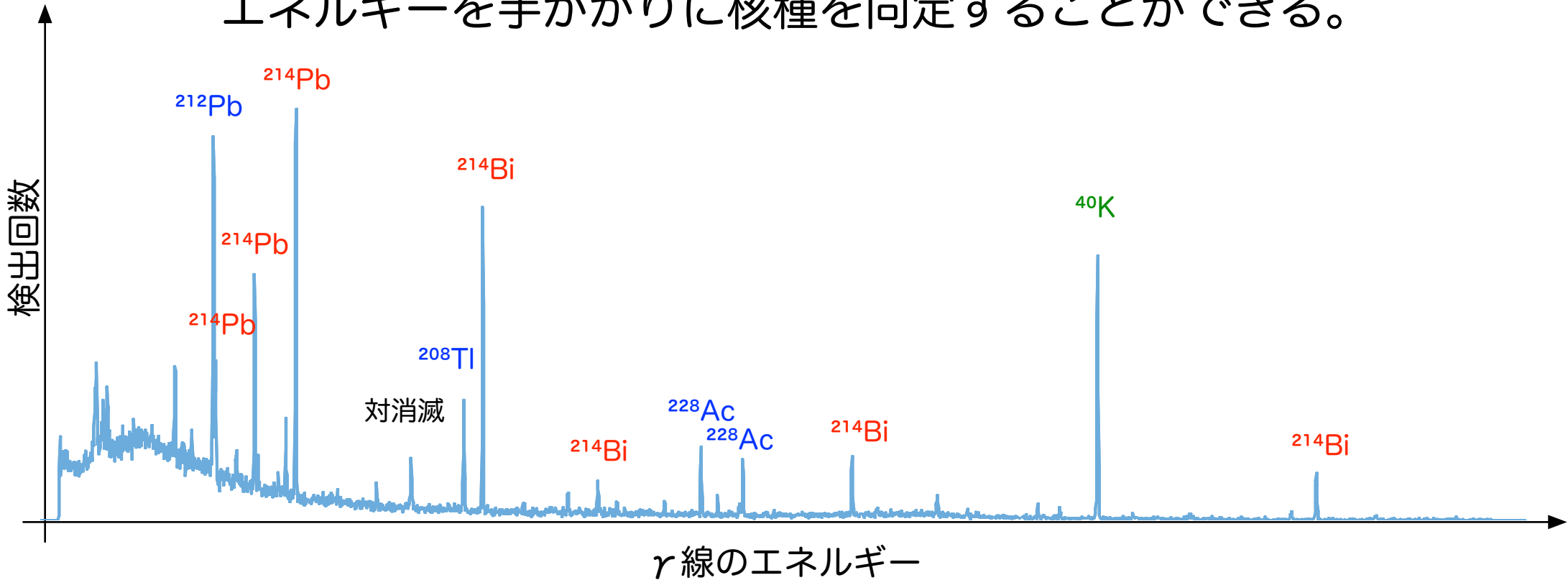


	核種名	半減期	エネルギー (keV)	放出比
	^{214}Bi	19.7m	609.31210	46.1%
人工	^{103}Ru	252.23d	610.332	5.4%
人工	$^{108\text{m}}\text{Ag}$		614.3710	89.7%
人工	^{106}Ru		616.3317	0.8%
人工	$^{110\text{m}}\text{Ag}$		620.3461	2.7%
人工	^{132}I		621.02	2.0%
人工	^{106}Ru		622.23	9.8%
人工	^{132}I		630.229	13.7%
人工	^{125}Sb		636.154	12.1%
人工	^{131}I		636.9732	7.2%
人工	^{124}Sb		60.203d	645.824
人工	^{132}I	650.62		2.7%

電流を検出する

～Ge半導体検出器～

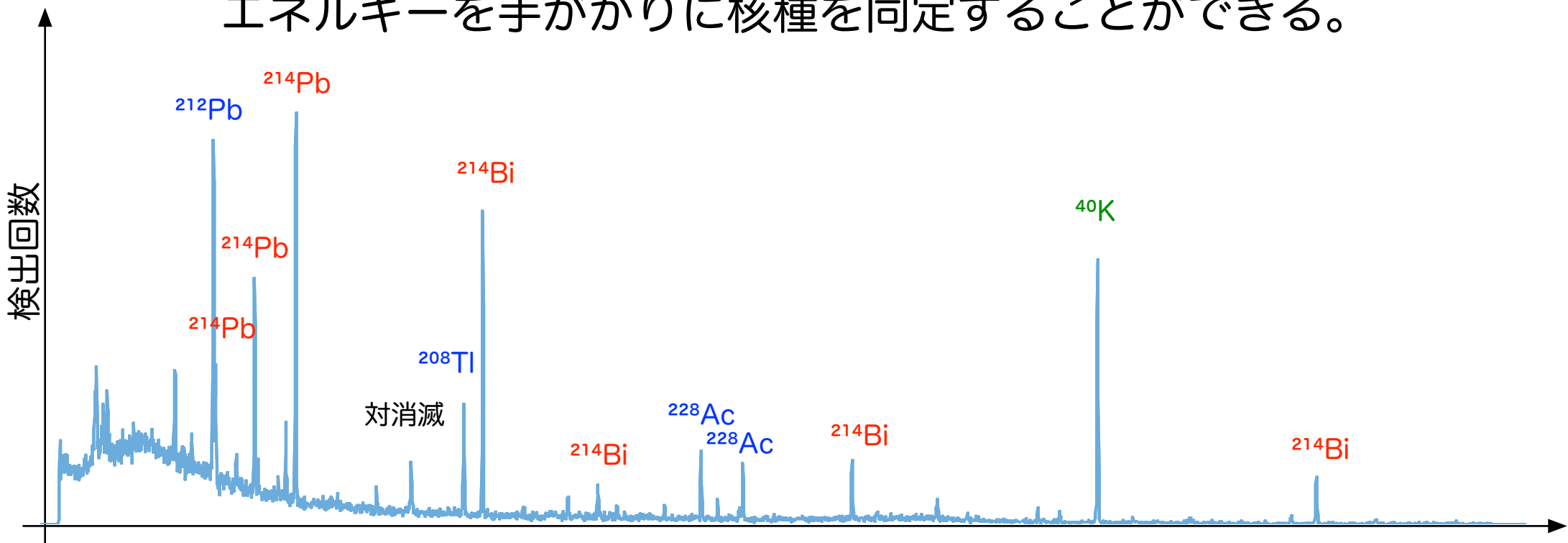
核種ごとの γ 線のエネルギーはデータベース化されているため、エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。



電流を検出する

～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。

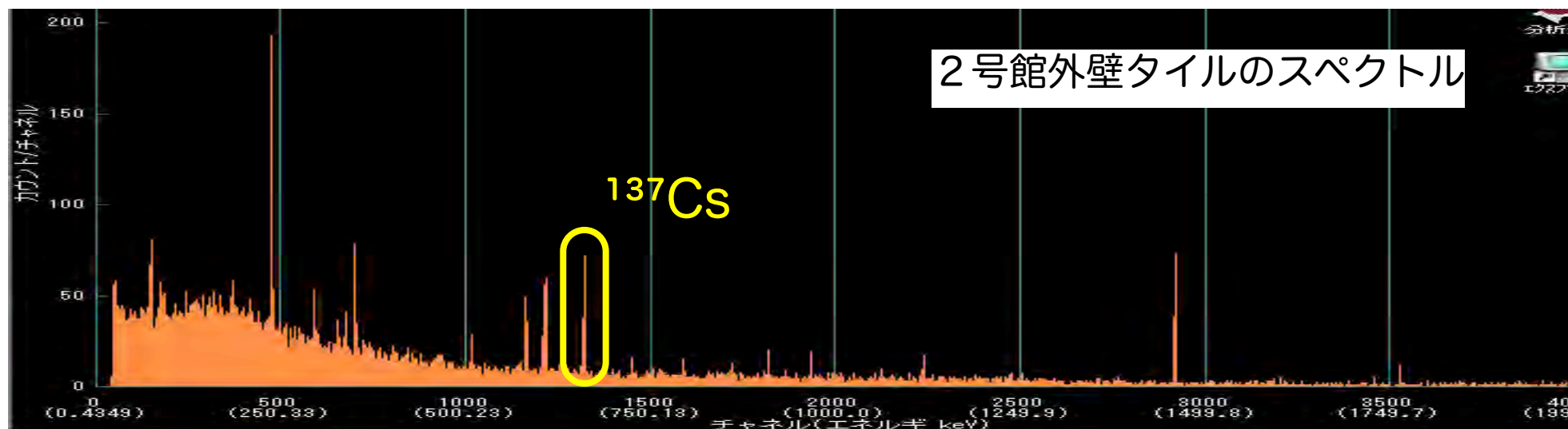
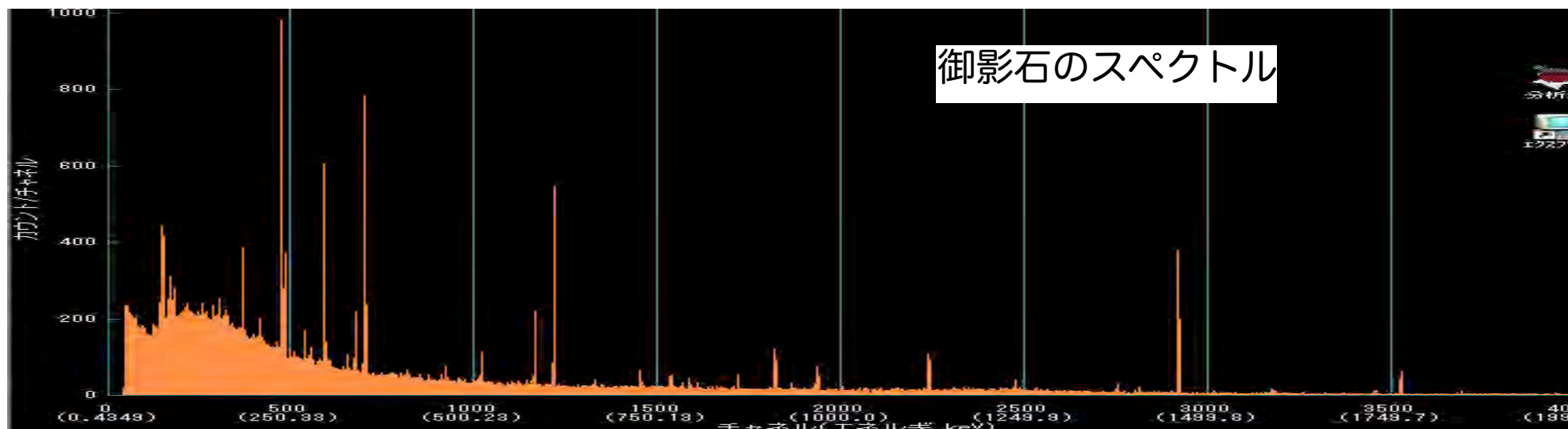


^{214}Pb ^{214}Bi \rightarrow ^{238}U の子孫核種
 ^{228}Ac ^{212}Pb ^{208}Tl .. \rightarrow ^{232}Th の子孫核種
 ^{40}K

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分かる。

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～



化学反応を検出する

～霧箱～

霧箱という装置を用いることで、以下の原理で荷電粒子の飛跡を観察できる。

- 1) エタノールの蒸気が過飽和となっている空間で電離が起きると、電離したイオンを凝結核として霧が発生する。
- 2) 粒子に電荷が有る放射線は、経路に沿って直接的に電離を起こす。
- 3) エタノールの蒸気が過飽和となっている空間を、粒子に電荷が有る放射線が通過すると、放射線の経路に沿って霧が発生する。

化学反応を検出する

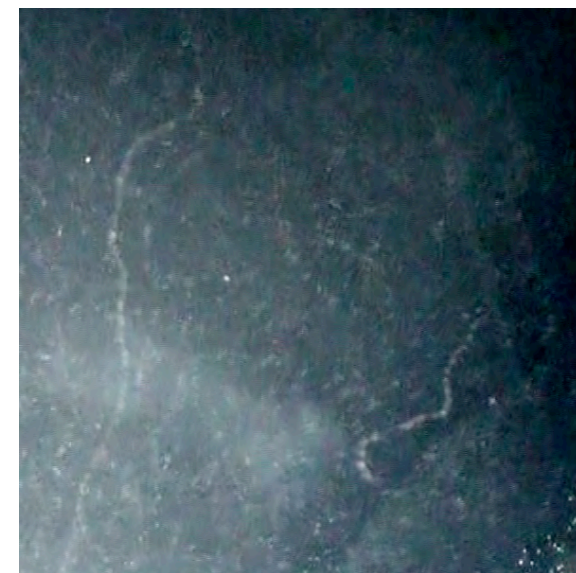
～霧箱～

私たちがいるこの教室にも、宇宙線や大地・建造物からの放射線が飛びかっている。電荷を持つ宇宙線であるミューオン（ μ 粒子）や、大地放射線で弾き出された電子線などを観察できる。

霧箱で自然放射線を観察した際の様子を動画で紹介します。
希望者には講義終了後、実際にこの場で霧箱をお見せします。

化学反応を検出する

～霧箱～



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。

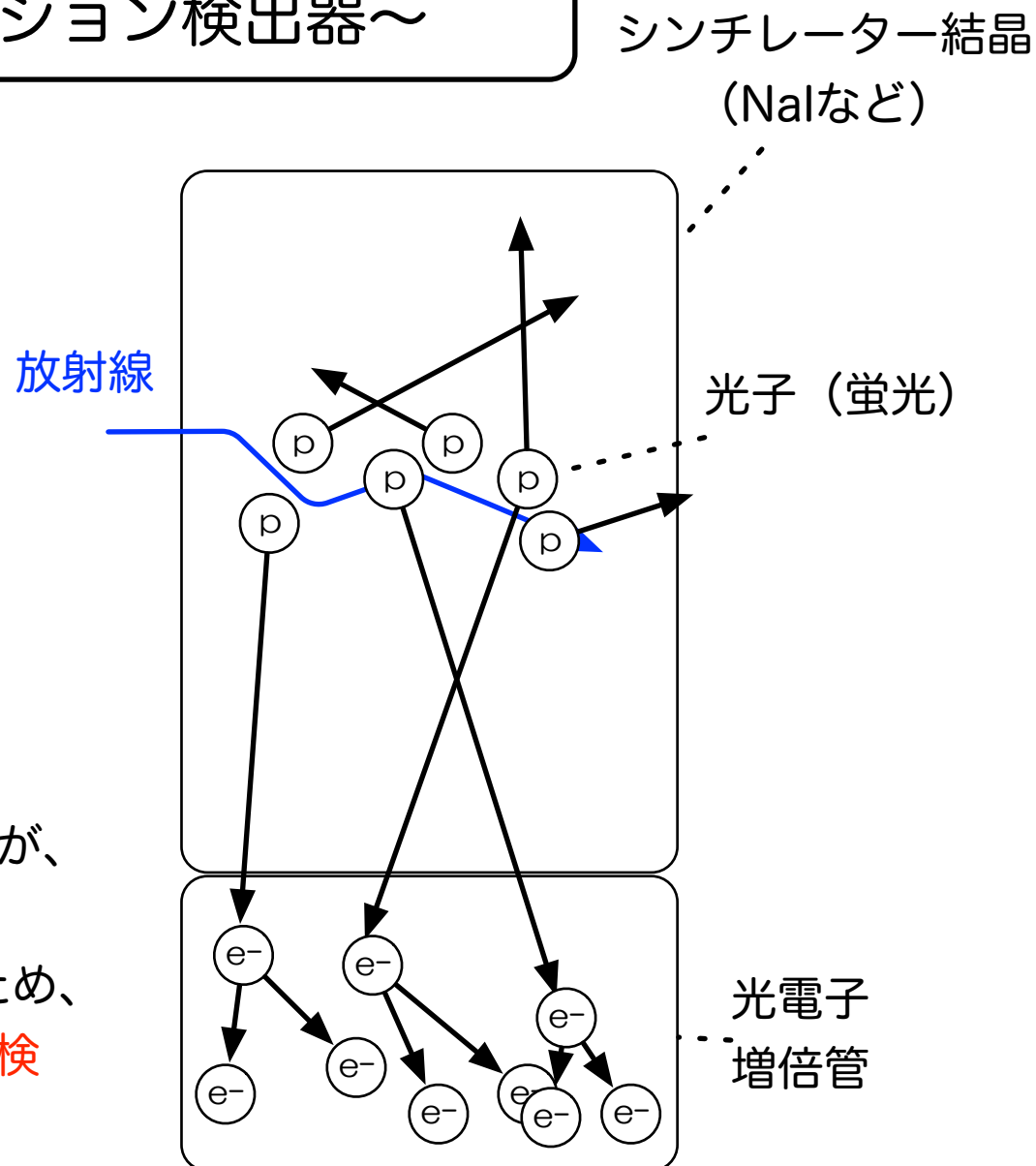
化学反応を検出する

～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。



化学反応を検出する ～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！



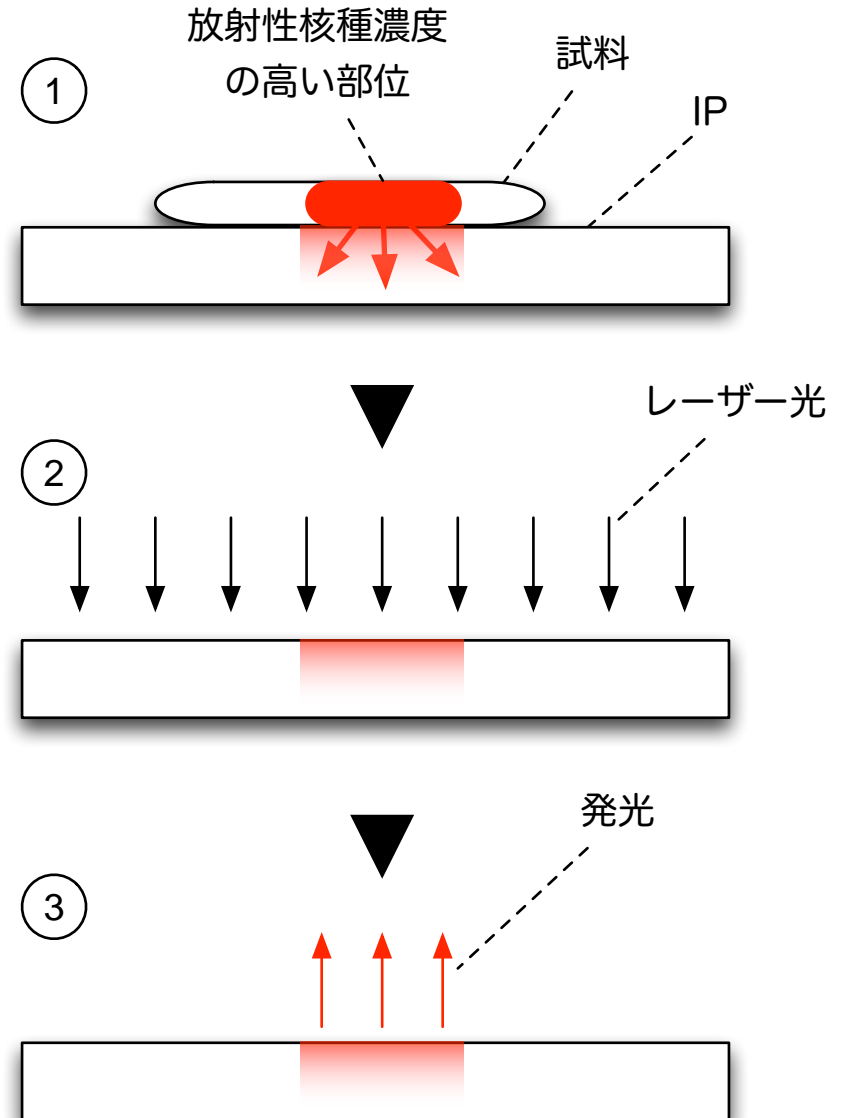
化学反応を検出する ～イメージングプレート～

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。

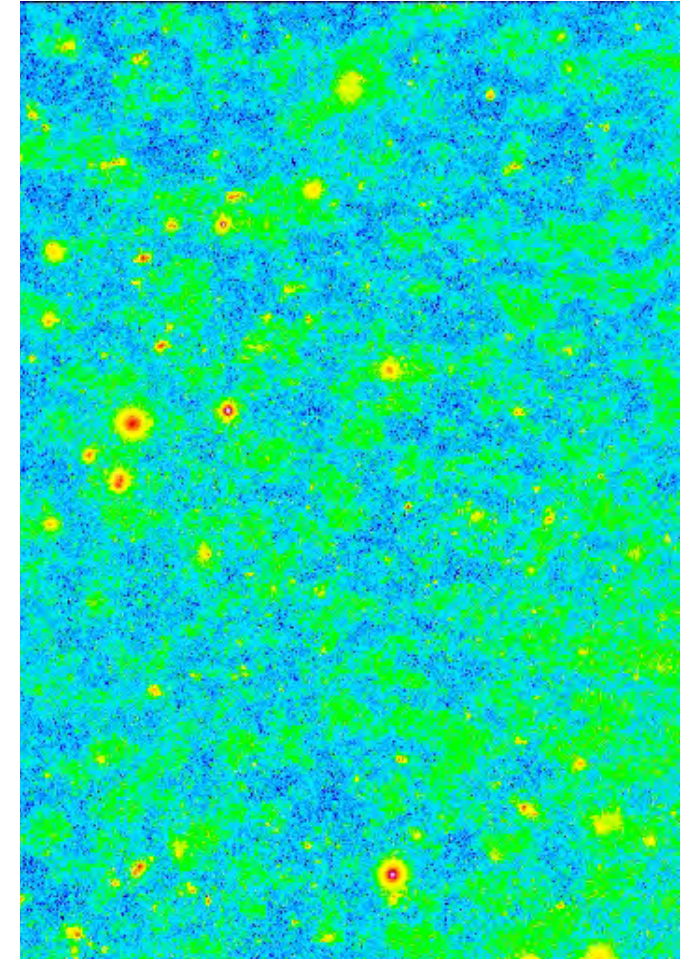


IP測定例：御影石中の放射性核種の分布

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。



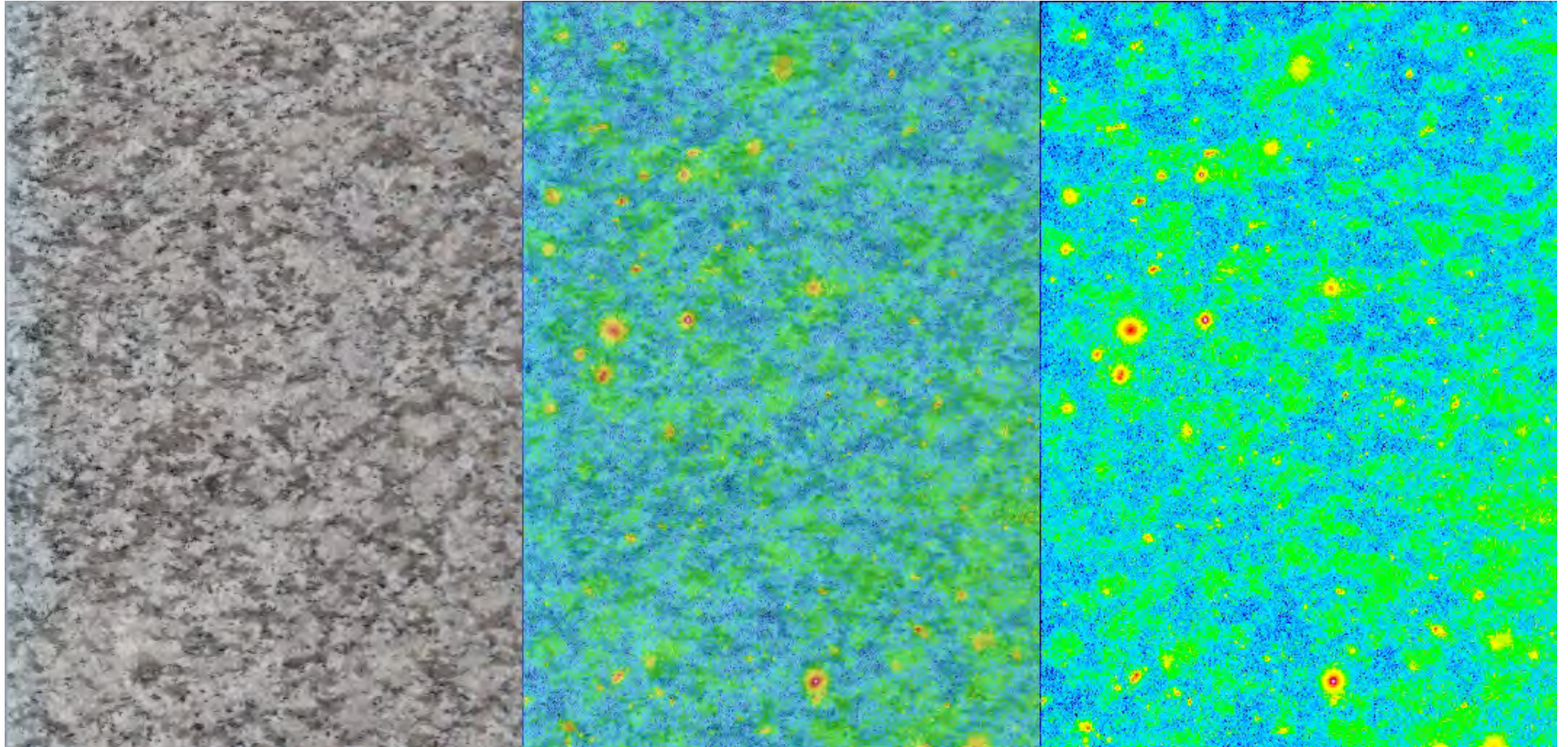
御影石表面の写真



IPで測定した
放射性核種の分布

IP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

化学反応を検出する

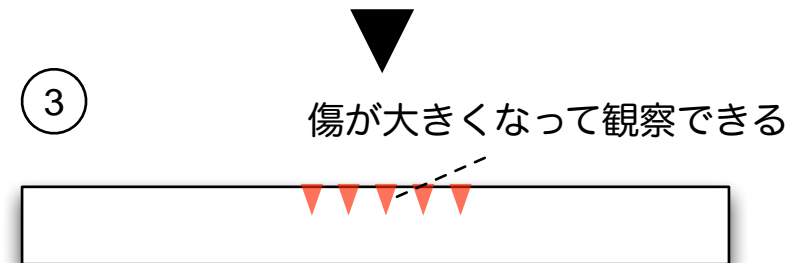
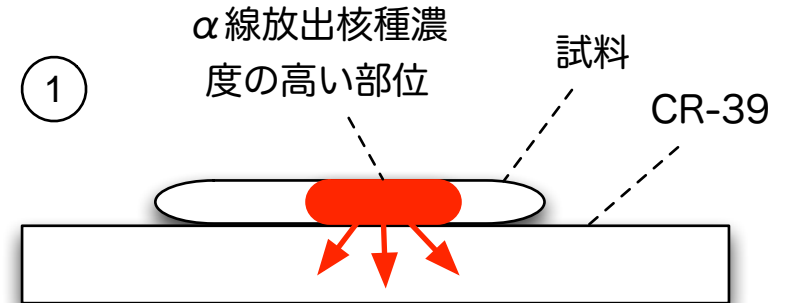
～CR-39～

CR-39は、 α 線等に反応するプラスチック。電子線や光子線には反応しない点が特長。

1) CR-39に試料を密着させると、試料から出た α 線がCR-39に化学反応を起こす。

2) CR-39をアルカリ溶液に浸すと、 α 線が当たったところが選択的に溶けて傷ができる。

3) 顕微鏡で観察したり、側面から光を当てて散乱光を見ることで、 α 線放出核種の分布を2次元的に可視化できる。



CR-39測定例：市販魚類の筋肉と幽門垂

市販されている魚の筋肉と幽門垂をペースト状にしてフリーズドライした試料にCR-39を3ヶ月間コンタクトし、その後エッチング処理を行った。

短冊状のCR-39を被せて3ヶ月間冷凍



CR-39測定例：市販魚類の筋肉と幽門垂

市販されている魚の筋肉と幽門垂をペースト状にしてフリーズドライした試料にCR-39を3ヶ月間コンタクトし、その後エッチング処理を行った。



水酸化ナトリウムでエッチング後、LEDで照らして散乱光を観察すると、傷が見える

CR-39測定例：市販魚類の筋肉と幽門垂



幽門垂に α 線放出核種が存在する（詳細は後述）

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～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

独習のための参考資料

放射線・放射性核種について独習したい方のためにリンク集を作成してあります。よろしければご利用下さい。

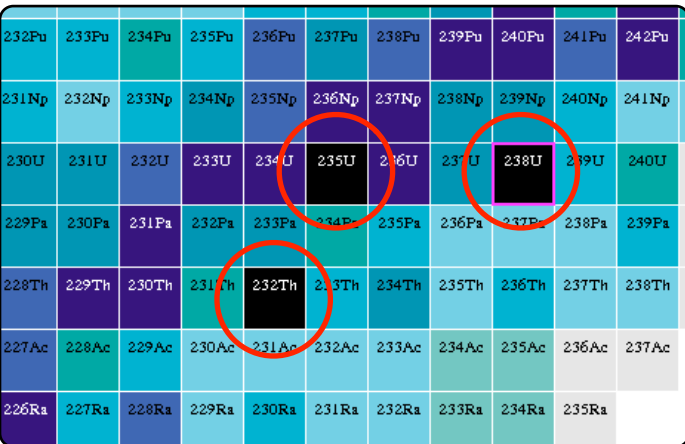
http://www.agc.a.u-tokyo.ac.jp/wp/fg6_150413_learning/

※ アグリコクーン FG6 2015年度のアーカイブからも参照できます。

The image shows a screenshot of the AGRI-COCOON website. On the left, there is a navigation menu with several items, including 'HOME', 'FG1: 食の科学', 'FG2: 国際農業と文化', 'FG3: 農学におけるバイオマス利用研究', 'FG4: 生物多様性・生態系再生', 'FG5: 農学における情報利用研究', and 'FG6: 農における放射線影響'. The 'FG6: 農における放射線影響' item is circled in red. In the top right of the main content area, there is a navigation bar with links for '2015年度のアーカイブ', '2014年度のアーカイブ', and '2013年度のアーカイブ'. The '2015年度のアーカイブ' link is circled in red. Below this, there is a table listing seminars. The table has columns for '回数' (Session), '日程表' (Schedule), '講師' (Instructor), and '資料' (Materials). The second row of the table is circled in red, and the link '独習のための参考資料 (html版)' is highlighted with a red circle and an arrow pointing to it from the top navigation bar.

回数	日程表	講師	資料
第1回 4月6日	●農環境の放射能汚染 田野井慶太郎 准教授 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	PDF	
第2回 4月13日	●放射性物質・放射線の基礎 広瀬 農 特任助教 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設) 独習のための参考資料 (html版)	PDF link report	
第3回 4月20日	●放射線の人体影響 広瀬 農 特任助教 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	PDF report Q&A	
第4回 4月27日	●農学部の放射能汚染に対する取り組み 中西友子 教授 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	report	

補足資料 1 核図表： α 壊変・ β 壊変の規則性



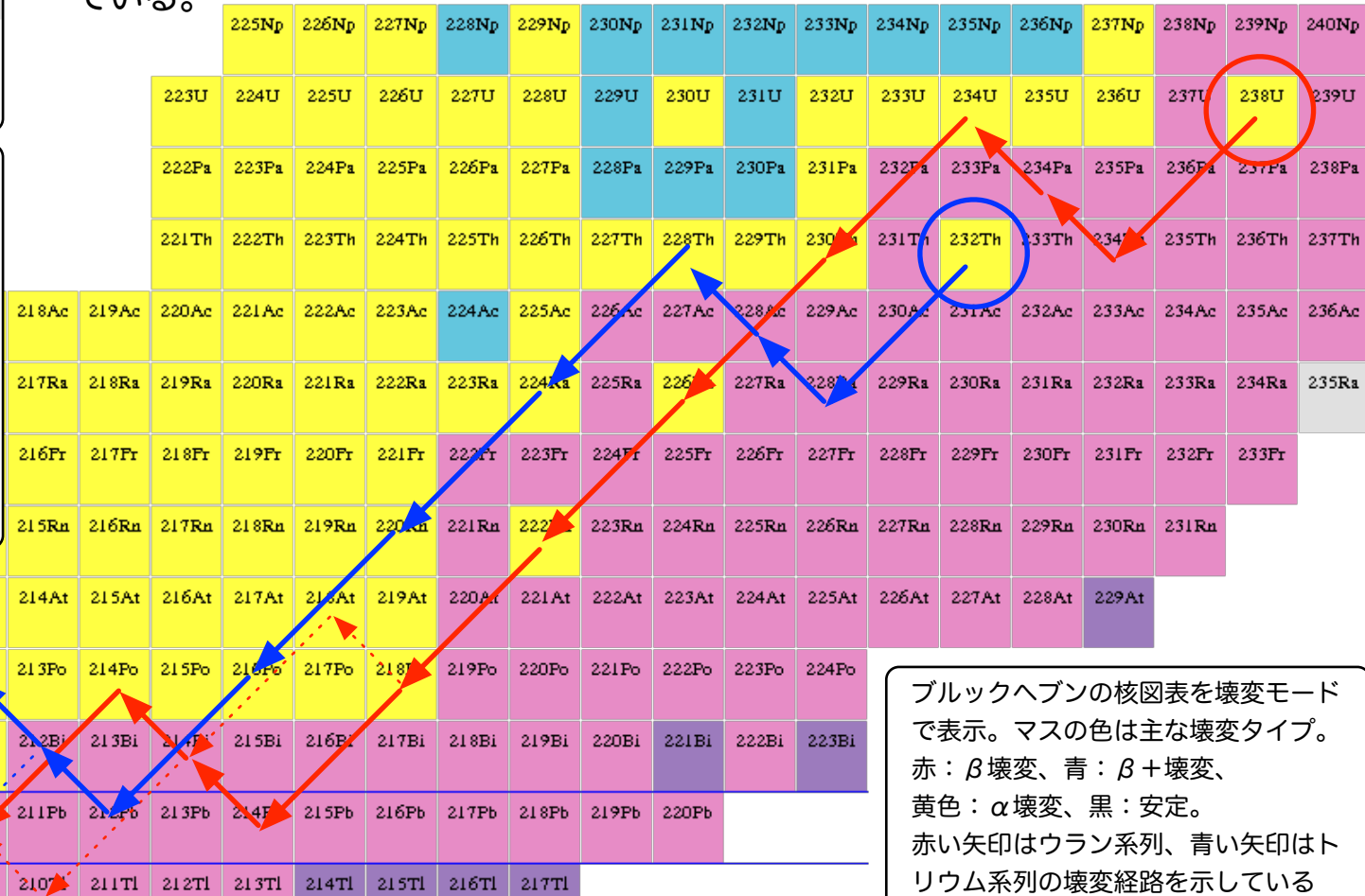
上の図は ^{232}Th 、 ^{238}U 付近のブルックヘブンの核図表を半減期モードで表示したもの。暗色が長半減期を示す。

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。

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。

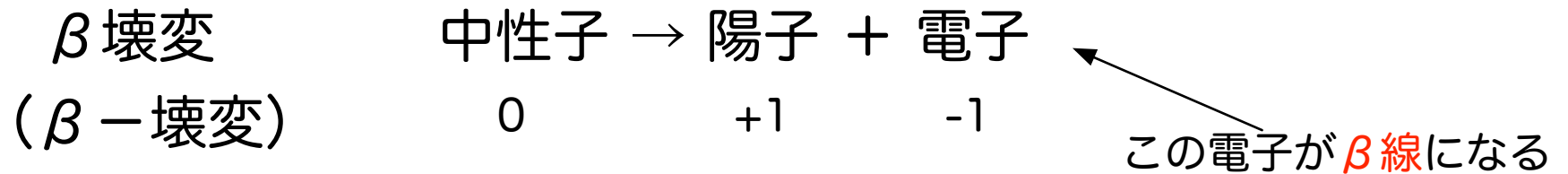
^{232}Th の子孫（トリウム系列）、 ^{238}U の子孫（ウラン系列）以外では、同じく地球誕生から残存している ^{40}K や、大気と宇宙線の反応で生成する ^{14}C 、 ^3H 等も遍在している。



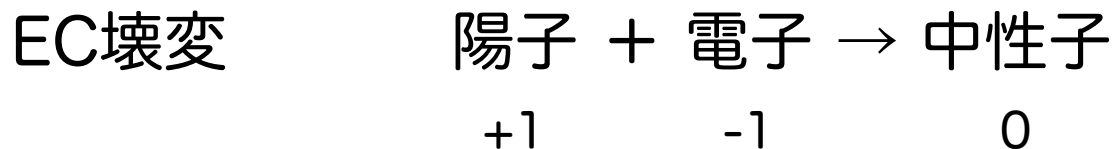
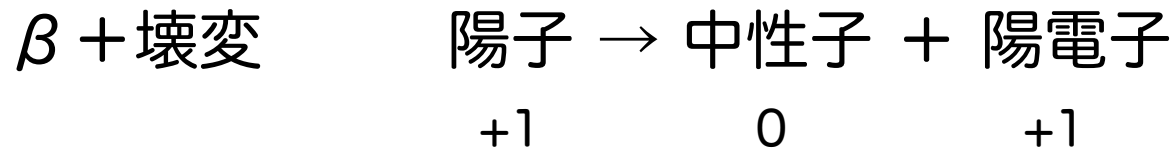
ブルックヘブンの核図表を壊変モードで表示。マスの色は主な壊変タイプ。
 赤： β 壊変、青： β^+ 壊変、
 黄色： α 壊変、黒：安定。
 赤い矢印はウラン系列、青い矢印はトリウム系列の壊変経路を示している（点線はマイナーな経路）。

補足資料 2 広義の β 壊変

■核図表左上に壊変 = 中性子が1個減り、陽子が1個増える



■核図表右下に壊変 = 陽子が1個減り、中性子が1個増える



補足資料 2 広義の β 壊変

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たものが β 線。

