

資料 4.2. 短寿命放射性核種の安全取り扱いに関する教育資料

短寿命放射性核種の 安全取扱に関する教育資料



日本放射線安全管理学会

1. はじめに

本教育資料は、放射線安全規制研究戦略の推進事業「JPJ007057」（短寿命アルファ線放出核種等の合理的な安全規制のためのガイドライン等の作成：代表・大阪大学放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センター・吉村 崇）より、一般社団法人日本放射線安全管理学会（会長・中島 寛）が「短寿命放射性核種の安全取扱に関する教育資料作成」事業を受託し、作成したものです。

日本放射線安全管理学会は、本教育資料作成のため「短寿命放射性核種の安全取扱のための教育資料作成アドホック委員会」を設け、本委員会を中心に資料作成を行いました。

なお、本教育資料は、以下の各点に留意して作成しました。

- ① α線放出核種を中心に医療利用を目的とする短寿命核種の利用者を対象とした教育資料を作成すること。また、適宜、放射線管理担当者等に有用な情報も加えること。
- ② 上記短寿命核種の利用者だけでなく、多くの非密封放射性核種の利用者にも有用な資料とすること。
- ③ 基本的な項目に加えて、既存の資料にはない細かな取り扱い方法や防護の具体的方法などを充実させること。
- ④ ヒヤリ・ハット事例などを含めること。
- ⑤ 講義・プレゼンテーションに活用しやすい資料を作成すること。

日本放射線安全管理学会

2. 用語の説明

番号	語句	説明
1	放射性物質	放射性同位体を含む物質
2	同位体	原子番号が等しく、質量数が異なる原子、すなわち、原子核の陽子数が同じで、中性子数が異なる原子を互いに同位体という。原子と元素の関係と同様、同位体を粒子、同位元素を種類として区別されることもある。
3	放射性同位体	同位体のうち、放射線を放出する同位体を放射性同位体いう。英名(Radioisotope)から、RIと略される。
4	放射性同位元素	放射性同位体と同義で使用される。また法令、放射線管理などで使用される。法令では、放射線を放出する同位元素及びその化合物並びに含有物であって、定められた半減期を超えるものとされる。 * その濃度および数量が核種ごとに放射性同位元素等の規制に関する法律施行令及び放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の規定に基づき、放射線を放出する同位元素の数量等を定める件（平成12年10月23日科学技術庁告示第5号）で定められた値。
5	核異形体	同一の原子番号および質量数を持つが、エネルギー状態が異なる原子核をいう。

日本放射線安全管理学会

目次

1. はじめに
2. 用語の説明
3. 放射能・放射線の基礎に関する項目
4. 防護に関する項目
5. 取り扱いに関する項目（一般的事項）
6. 取り扱いに関する項目（動物）
7. 測定に関する項目
8. 廃棄物の取り扱い
9. 汚染と除染に関する項目
10. 法令・予防規程
11. 核医学診療の概要

日本放射線安全管理学会



本教育資料が、短寿命放射性核種の安全取扱のための教育、短寿命放射性核種を用いる研究や医療の発展に貢献できれば幸いです。

当資料をご利用いただく際には、下記のとおり出典の記載をお願いいたします。

出典：「短寿命放射性核種の安全取扱に関する教育資料 令和2年度版
（日本放射線安全管理学会）」

なお、日本放射線安全管理学会以外の出典元が明記されている図表等の著作権は出典元に帰属しますので、出典元を明記の上、使用してください。

一般社団法人日本放射線安全管理学会

「短寿命放射性核種の安全取扱のための教育資料作成アドホック委員会」

委員長：久下裕司（北海道大学アイソトープ総合センター）

委員：右近直之（福島県立医科大学 先端臨床研究センター）

大江一弘（大阪大学大学院医学系研究科）

柴 和弘（金沢大学学際科学実験センター）

西 弘大（長崎大学原爆後障害医療研究所）

松田正吾（東京大学アイソトープ総合センター）

古澤 哲（東京ニュークリア・サービス株式会社）

渡辺茂樹（量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所）

渡部浩司（東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター）

日本放射線安全管理学会



番号	語句	説明
6	放射性核種	核種は、陽子数（原子番号）・質量数・エネルギー状態によって特徴づけられる原子核あるいは原子の種類をいう。放射線を放出する核種を放射性核種という。
7	RI規制法	放射性同位元素等の規制に関する法律（令和元年9月1日施行）。RI規制法あるいはRI法などと略される。旧名称は放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(放射線障害防止法、障防法)。
8	放射線防護	一般的には、被ばくの防止・放射線の安全取扱（Safety）を意味するが、RI規制法では放射線に関する犯罪の防止（Security）を意味する。
9	加重係数	従来、加重係数と表記していたが、ICRP2007年勧告の翻訳より表記が変更された。
10	確定的影響（組織反応）	ICRP2007年勧告において、「確定的影響」に代わる用語として（または同意語として）「組織反応（tissue reactions）」が採用された。
11	放射線被曝、放射線被曝、放射線被ばくの違い	「放射線被曝」は、放射線に曝（さら）されることを意味する。一方、「放射線被曝」は、爆発・爆撃によって放射線被曝を受けることを意味する。したがって、実験研究等の通常の放射線取扱で放射線を受ける（浴びる場合は放射線被曝である。ただし、「曝」という漢字が常用漢字ではないため、「放射線被ばく」と表記されることが多い。
12	核医学治療	アイソトープ(R)内照射療法、アイソトープ(R)内用療法、アイソトープ治療などとも呼ばれる。

日本放射線安全管理学会

3. 放射能・放射線の基礎

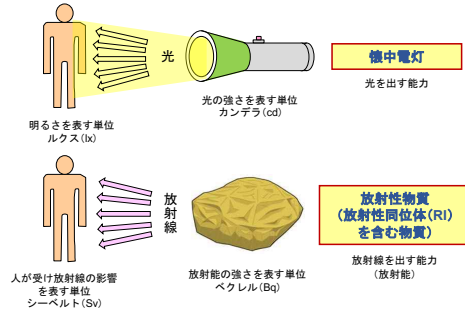
目次

- 1) 放射線と放射能の発見
- 2) 放射線の種類
- 3) 放射性同位体と放射性壊変
- 4) 放射性同位体の性質
- 5) 放射線と物質との相互作用
- 6) 放射性同位体（放射性核種）の種類

1) 放射線と放射能の発見

放射線 (エックス線)  <small>1895年 ウィルヘルム・レントゲン エックス線の発見</small>	放射能 (放射性物質¹⁾)  <small>1896年 アンリ・ベクレル ウラン鉱石から放射能を発見</small>	放射性同位体²⁾ (放射性同位元素³⁾・放射性核種⁴⁾)  <small>1898年 マリー・キュリー・ピエール・キュリー 放射線を出すウランウ、 トリウム、ポロニウムの発見</small>
---	---	--

放射線と放射能の違い



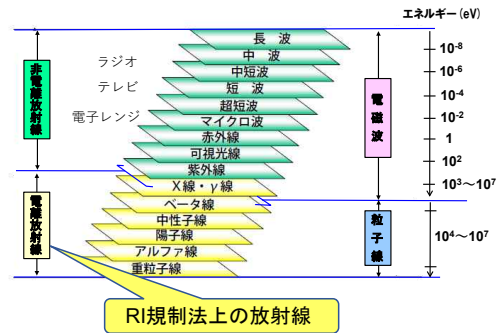
2) 放射線の種類

発見

- 1899 α線(2+)、β線(1-)の発見
- アーネスト・ラザフォード
- 1900 γ線の発見
- ポール・ヴィラール
- ただし、正体が電磁波ということに気がついたのはラザフォード

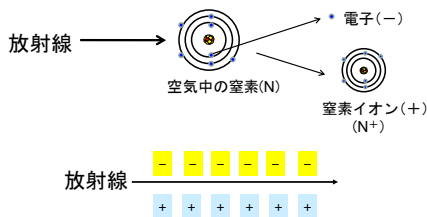


放射線の仲間



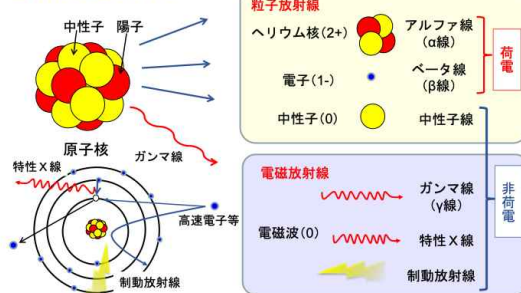
電離放射線

空気中の窒素などの安定同位体を電離する能力(イオン化作用)を持つもの。



電離放射線

放射性同位元素(RI)





法令における放射線の定義

RI規制法で規制される「放射線」とは、電磁波又は粒子線のうち、直接又は間接に空気を電離する能力をもつもので、下に掲げるものをいう。

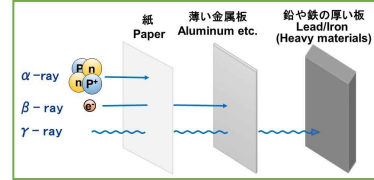
- 1) 原子核又は原子近傍から放出される粒子又は電磁放射線
α線、β線、中性子線、γ線、特性X線等
- 2) 発生装置や加速器等で人工的に作られる
重粒子線
- 3) 発生装置や加速器等で人工的に作られる
1MeV以上の電子線とX線

日本放射線安全管理学



放射線の特徴（透過力）

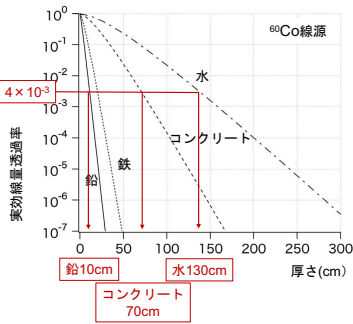
	電荷	届く距離	遮へい	注意すべき被ばく	組織への影響 (放射能当たり)
α線	2+	<10cm	紙	内部被ばく	大
β線	1-	10cm - 数 m	アクリル・アルミニウム	内部被ばく	中
γ線 (X線)	0	>10m	鉄・鉛	外部被ばく	小



日本放射線安全管理学



γ線の遮へい

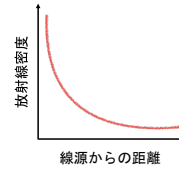
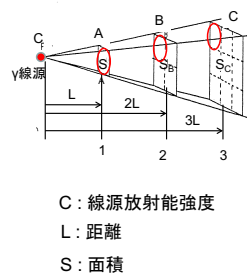


日本放射線安全管理学



放射線密度と距離

γ線の逆二乗則



日本放射線安全管理学



3) 放射性同位体と放射性壊変

同位体

質量数 (陽子+中性子)
A
Z
C
原子番号 (陽子数)

炭素(C)-11 陽子数 6 中性子数 5	炭素(C)-12 陽子数 6 中性子数 6	炭素(C)-13 陽子数 6 中性子数 7	炭素(C)-14 陽子数 6 中性子数 8
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

放射性同位体 (不安定) 安定同位体 (寿命が無尽大) 放射性同位体 (不安定)

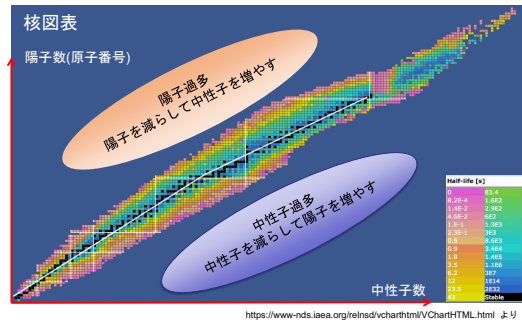
安定同位体に対して中性子が不足 → β⁺壊変やEC壊変を起こして安定な同位体を目指す

安定同位体に対して中性子が過剰 → β⁻壊変を起こして安定な同位体を目指す

日本放射線安全管理学



放射性壊変の原因



日本放射線安全管理学



放射性壊変の種類

アルファ (α) 壊変

α線 (ヘリウム原子核)
陽子数 2
中性子数 2

Ra-226 (ラジウム)
陽子数 88
中性子数 138

Rn-222 (ラドン)
陽子数 86
中性子数 136

日本放射線安全管理学



ベータ (β-) 壊変

β線(電子)

H-3 (トリチウム)
陽子数 1
中性子数 2

He (ヘリウム)
陽子数 2
中性子数 1

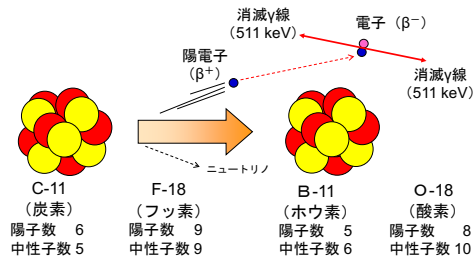
β線(電子)

P-32
陽子数 15
中性子数 17

S-32
陽子数 16
中性子数 16

日本放射線安全管理学

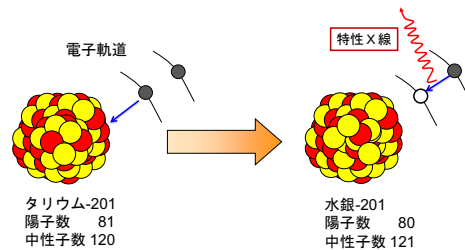
ベータ (β+) 壊変



β⁺壊変に伴って放出される陽電子は物質中の電子と衝突して消滅
消滅放射線 (511keVの電磁波2本) を放出する

日本放射線安全管理学会

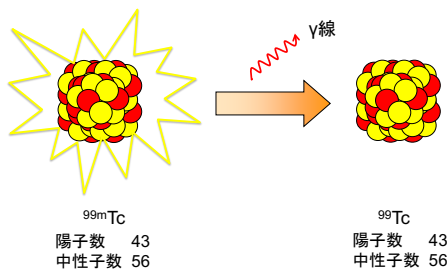
軌道電子捕獲 (EC) 壊変



EC壊変に伴ってγ線や生成核の特性X線が放出されることがある

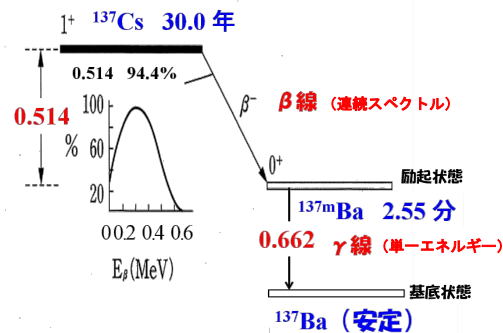
日本放射線安全管理学会

核異性体転移 (γ線放出)



日本放射線安全管理学会

放射性同位体の壊変図式



日本放射線安全管理学会

人工的に作られる放射線

X線 X線は、放射性同位体が壊変する過程で発生する。γ線と同様に波長の短い電磁波 (光子) であるが、その発生機構が異なる。
→X線とγ線の違いは波長ではない

主なX線の発生機構

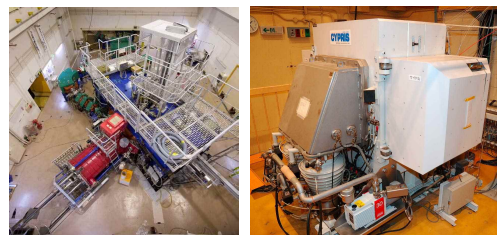
- ① 電子の励起準位の差 (特性X線)
X線発生装置、蛍光X線分析装置、クルックス管 etc.
- ② 荷電粒子の加速度変化 (制動X線)
加速器、X線発生装置 etc.
- ③ 熱による発生
プラズマX線源 etc.



日本放射線安全管理学会

加速器 (放射線発生装置)

加速器: 電子、陽子、重粒子などの荷電粒子を加速させて、大きな運動エネルギーを持った放射線束を作り出す装置

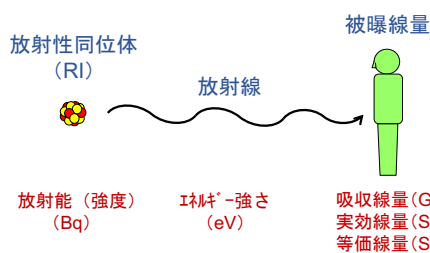


東北大学 サイクロトロンラジオアイソトープセンター AVサイクロトロン(左)と小型サイクロトロン(右)

日本放射線安全管理学会

4) 放射性同位体の性質

放射能・放射線の単位 ①



日本放射線安全管理学会

放射性同位体の性質

放射能・放射線の単位 ②

放射性同位体 (RI) 放射能 電離放射線

α線、β線、γ線

○ 放射能の量 (ベクレル (Bq))
1 kBq = 1,000 Bq
1 MBq = 1,000,000 Bq
1 GBq = 1,000,000,000 Bq
1 TBq = 1,000,000,000,000 Bq

○ エネルギーの強さ (エレクトロボルト (eV))
放射線エネルギー
10⁴~10⁸ eV 程度 (10 keV~100 MeV)

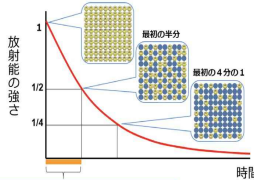
可視光線のエネルギー
1~数十 eV 程度

・ [Bq]は放射能のSI単位で1秒あたりの放射性壊変数を表す。

日本放射線安全管理学会

RIの放射能の減り方 (半減期)

- 放射能が半分になる時間のこと
- 核種ごとに固有の半減期を持つ



放射性物質の量が半分になる時間
= (物理学的) 半減期

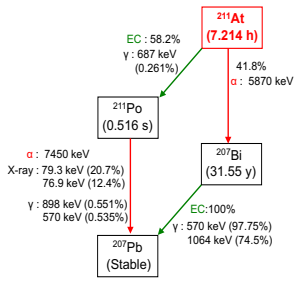
$A_t = A_0 (1/2)^{t/T}$

A_0 : 最初の時刻における放射能
 A_t : 経過時間(t)における放射能
 T : 半減期
 t : 最初の時刻からの経過時間

核種	エネルギー(種類)	半減期
^3H	18.6 keV(β)	12.3年
^{14}C	156 keV(β)	5,730年
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	141 keV(γ)	6.0時間
^{125}I	27.4 keV(X) 31.1 keV(X)	59.4日
^{223}Ra	5.72 MeV(α) 269 keV(γ)	11.4日
^{235}U	4.37 MeV(α) 4.40 MeV(α)	7億年

日本放射線安全管理学会

アスタチン-211 (^{211}At)



- 半減期7.214 hの α 線核種
- α 壊変を1回、EC壊変を1回経て ^{207}Pb (stable)に壊変。
- 丸一日で放射能がおおよそ1/10となるが、長半減期の ^{207}Bi が微量残ることに注意。
- ハロゲン族元素であり、ヨウ素に類似した性質を持つが、化学挙動が非常に複雑。

核データ出典: NuDat 2.8, National Nuclear Data Center (https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/)

日本放射線安全管理学会

5) 放射線と物質との相互作用

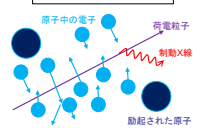
電子と物質の相互作用

放射線は当たった物質中で様々な物理現象を引き起こす

衝突損失

電離: 物質の軌道電子を弾き飛ばす
 励起: 物質の軌道電子を遷移させる

荷電粒子のエネルギー損失過程



放射損失

制動放射: 入射電子がクーロン場で曲がりエネルギーを失う

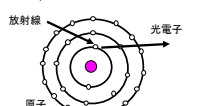
放射線は物質と相互作用することでエネルギーを損失する
 物質との相互作用が多くなれば放射線は止まる!

放射線が物質に当たって止まる → 放射線の持つエネルギーがすべて物質に移動した

日本放射線安全管理学会

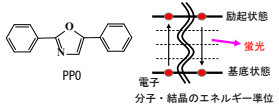
放射線の作用を利用した放射能測定原理

電離作用(イオン化)



放射線が物質を通る時
 ↓ 電気的的反発や衝突等
 物質中の原子や分子にエネルギーを与える。
 ↓
 原子や分子から電子(電気の素)が放出する...
 ↓
 放出された電子(電気の素)を電気信号として捕らえ、測定する。

励起作用



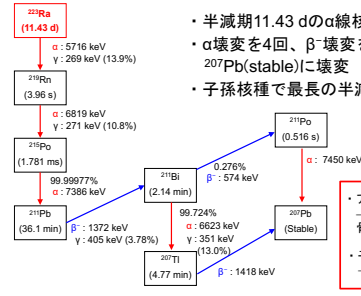
放射線が物質を通る時
 ↓ 電気的的反発や衝突等
 物質中の原子や分子にエネルギーを与える。
 ↓
 原子や分子の状態が不安定な(励起)状態になる。
 ↓
 不安定な状態の原子や分子はやがて、安定な状態に戻る。その時に、蛍光を放出する。
 ↓
 蛍光エネルギーを電気エネルギーに変換、増幅することにより、測定する。

日本放射線安全管理学会

短寿命 α 核種の特徴

ラジウム-223 (^{223}Ra)

- 半減期11.43 dの α 線核種
- α 壊変を4回、 β 壊変を2回経て ^{207}Pb (stable)に壊変
- 子孫核種で最長の半減期は ^{211}Pb の36.1 min

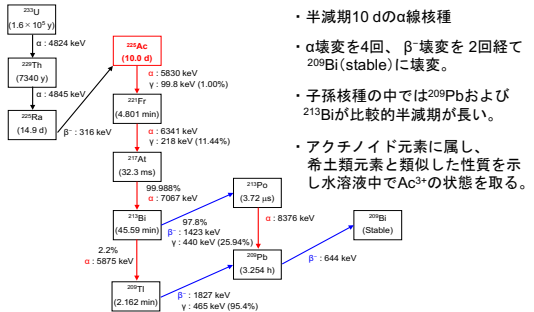


・アルカリ土類金属
 →水溶液中で Ra^{2+} の状態をとり骨に集まりやすい
 ・子孫核種に希ガス元素の ^{219}Rn →固体試料等では飛散に注意

核データ出典: NuDat 2.8, National Nuclear Data Center (https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/)

日本放射線安全管理学会

アクチニウム-225 (^{225}Ac)



- 半減期10 dの α 線核種
- α 壊変を4回、 β 壊変を2回経て ^{209}Bi (stable)に壊変。
- 子孫核種の中では ^{209}Pb および ^{213}Bi が比較的半減期が長い。
- アクチノイド元素に属し、希土類元素と類似した性質を示し水溶液中で Ac^{3+} の状態を取る。

核データ出典: NuDat 2.8, National Nuclear Data Center (https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/)

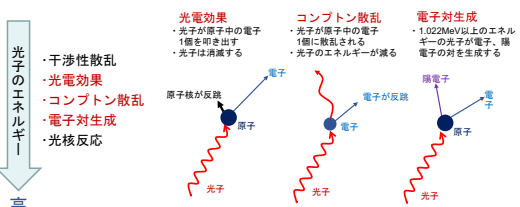
日本放射線安全管理学会

光子と物質との相互作用

反応断面積: m^2

- 放射線と物質の「相互作用の起きやすさ」は面積で表される
- 相互作用の反応断面積は物質の原子番号に依存する

光子のエネルギー
 ↓
 高

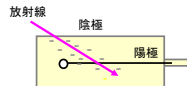


原子番号が大きい物質ほど光子と相互作用する確率が高い。
 すなわち、重い物質ほどX線、 γ 線をよく止める=遮蔽する。

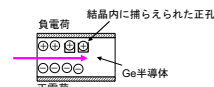
日本放射線安全管理学会

電離作用を利用した測定器

GM(ガイガー・ミュラー)サーベイメータ



Ge半導体検出器



日本放射線安全管理学会

励起作用を利用した測定器 ①

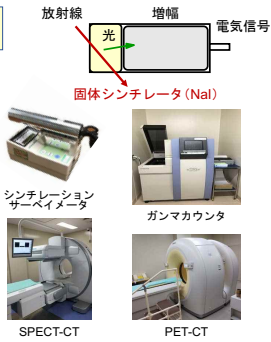
ガンマ(γ線)の測定

研究用

- シンチレーションサーベイメータ
- ガンマカウンタ

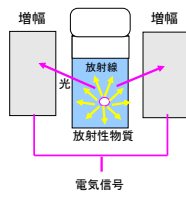
臨床用

- SPECT-CT
- PET-CT



励起作用を利用した測定器 ②

液体シンチレーションカウンタ (ベータ(β)線の測定)

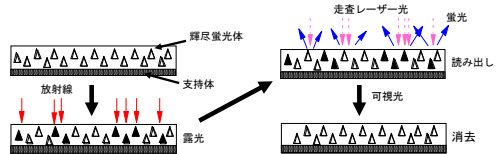


液体シンチレーションカウンタ

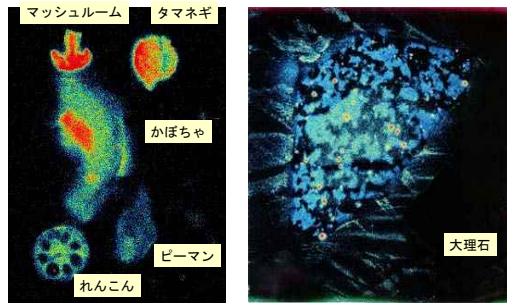
励起作用を利用した測定器 ③

イメージングアナライザの原理

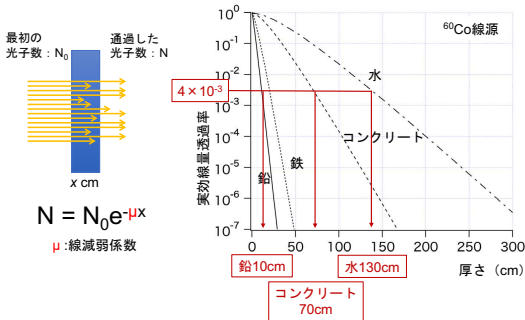
- 輝尽蛍光体 (BaFX(X:Cl,Br,I;Eu²⁺) の粉末を塗布したイメージングプレートを利用。
- 輝尽蛍光体は放射線エネルギーにより励起(一次励起)し、これを一度記憶する。
- 可視光により再度励起(二次励起)すると一次励起の強さに応じた発光(蛍光)を生じる。
- 写真フィルムの数十倍~百倍以上の感度がえられること、定量性に優れていることです。また、IPは何度でも繰り返し使用することが可能で、通常1,000回は使えます。



イメージングアナライザによる画像



γ線の遮へい



線エネルギー付与 (LET: Line Energy Transfer)

放射線が単位長さあたりに損失するエネルギー: J/m

LET	放射線の種類
高LET	中性子線・α線・陽子線・重粒子線
低LET	ガンマ線・X線・β線

- LETが高い → エネルギーを失うのが早い
- 物質に与える影響が大きい

6) 放射性同位体 (放射性核種) の種類

In Vitro RI実験で利用される主な放射性核種

核種	半減期	エネルギー (keV)	測定機器		
			汚染検査	研究	
β線放出核種	³ H	12.3 y	18.6	液体シンチレーションカウンタ (濃シ)	液体シンチレーションカウンタ (濃シ)
	¹⁴ C	5700 y	156	GMサーベイメータ (2%) ¹⁴ Cサーベイメータ (20%)	
	³² P	14.2 d	1710	GMサーベイメータ (20%)	
	³³ P	25.3 d	248	GMサーベイメータ (4%)	
	³⁵ S	87.4 d	167	¹⁴ Cと同じ	
γ線放出核種	⁵¹ Cr	27.7 d	320	¹⁰² 専用NaIシンチレーションサーベイメータ	NaIシンチレーションカウンタ (ガンマカウンタ)
	¹²⁵ I	59.4 d	35.5, 27.5, 27.2	¹²⁵ 専用NaIシンチレーションサーベイメータ (20%) GMサーベイメータ	
	¹³¹ I	8 d	364, 637	シンチレーションサーベイメータ GMサーベイメータ	

*:計数効率

RI動物実験で利用される主な放射性核種

核種	半減期	エネルギー (keV)	測定方法	
			前処置	測定
β線放出核種	³ H	12.3 y	18.6	液シ
	¹⁴ C	5700 y	156	オートラジオグラム
γ線放出核種	^{99m} Tc	6 h	141	組織取出 組織切片作製
	¹²⁵ I	13 h	159	
	¹²⁵ I	59.4 d	35.5, 27.5,	
	¹³¹ I	8 d	365 (γ), 606 (β)	
ポジトロン放出核種	¹¹ C	20 m	511	組織取出 組織切片作製
	¹⁸ F	110 m	511	
α線放出核種	²¹¹ At	7.2 h	5870	組織取出 組織切片作製
	²²³ Ra	11.4 d	5716	
	²²⁵ Ac	10. d	5830	