

令和5年度の核医学概論講義は、**Web**で実施します。

オンデマンド講義です。ライブ授業ではありませんが、毎週ホームページに掲載されたスライドを見て自習して下さい。

毎週受講票を下記アドレスに添付し送って下さい。

hokudaikatoh@gmail.com

期末試験も、リモートで実施する予定です。

教科書を購入して下さい。(北大生協北部書店で)
「フルカラーCGで学ぶ 核医学検査のテクニック」

1

2

先週の放射線更新講習の問題Cの解答は、1です。

汚染した傷口は温水で洗うのが鉄則です。汚染した血液を洗い出すために、温水が効果的です。冷水だと血管が収縮して、出血量が少なくなります。一般的に献血は400mlの採血を実施することから、400ml以下の出血量では健康を害することはありません。動脈が切れていても10分押さえていけば止血されます。

汚染したガーゼは、保管してから廃棄します。

皮膚に汚染物がある状態でアルコールを使うと汚染物が溶けて皮膚に浸透する危険があります。

同じ理由で除染材は化学的活性の低いものから使います。一般的に、水。次に普通の石鹼(中性石鹼)。

汚染は汚染レベルの低いほうから高いほうへ拭いていきます。一般的な汚物の清掃と同じ考え方です。

3

放射線
物質を電離するエネルギーを持つ微粒子または電磁波

放射能
放射線を出す能力

放射性物質
放射線を出す物質

4

放射線は2種類ある。

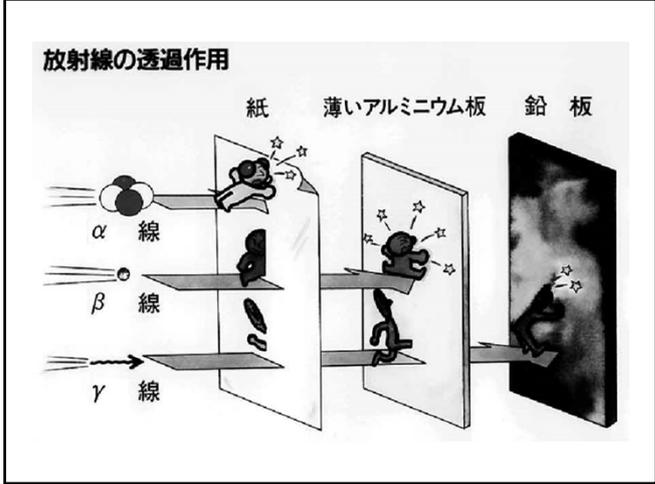
電磁波 = 空間の振動エネルギー

 エックス線(原子核外軌道電子から発生)
 ガンマ線(原子核内から発生)

粒子線 = 物質、質量

 電子線、ベータ線、中性子線
 アルファ線、陽子線、など

5



6

原子 原子核と軌道電子で構成される

原子核 2種類の核子で構成される。核力で結合している。
 陽子(proton) 正の電荷 e を持つ。
 陽子数は Z と表現する(=原子番号)
 中性子(neutron) 電荷を持たない。
 中性子数は N と表現する
 陽子と中性子の質量はほぼ同一

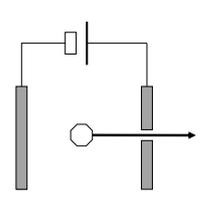
軌道電子(electron) 負の電荷 $-e$ を持つ。
 陽子の1840分の1の質量(m_e)。
 原子の質量数 $A = Z+N$

7

原子核、電子のエネルギーの単位

エレクトロンボルト eV
 1ボルトの電位差で加速された電子の運動エネルギー
 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (ジュール)

$1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$ $1 \text{ MeV} = 1000 \text{ keV}$



8

光子(photon)電磁波を、エネルギーのかたまりとして解釈した表現。
 電磁波の質量は 0 だが、エネルギー E 、運動量 P を持つ粒子と解釈できる。電磁波の振動数を ν 、波長を λ とすると、
 h は プランク定数 ($6.62 \times 10^{-34} \text{ J sec}$)
 $E = h\nu$ 、 $P = dE / dt = h\lambda$

質量(m) と エネルギー
 $E = mc^2$ (c は光速度 $3 \times 10^8 \text{ m/sec}$) Einsteinの式
 電子の質量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}$

光の速さ $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \text{秒速}30\text{万km}$ Maxwellの式
 (μ_0 : 真空の透磁率 ϵ_0 : 真空の誘電率)
 真空(=空間)は、透磁率や誘電率を持つ構造物である。
 = 空間は物理的構造物である。空間構造の振動が電磁波。

9

同位元素 (アイソトープ isotope)
 同じ原子番号(Z)の元素
 化学的性質は同じ。質量数(A)が異なる。

例 ^1H と ^3H 、 ^{12}C と ^{11}C と ^{14}C 、
 ^{123}I と ^{125}I と ^{131}I

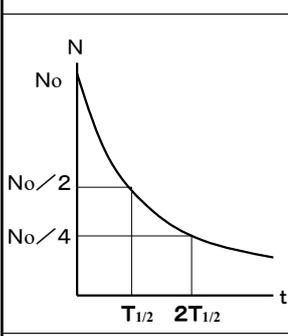
放射性同位元素 (RI : ラジオアイソトープ radioisotope)
 放射能をもつアイソトープ。
 自然界にも多数ある。
 人工的に作られるもの(超ウラン元素など)もある。
 ^3H 、 ^{11}C 、 ^{14}C 、 ^{123}I 、 ^{125}I 、 ^{131}I など

10

半減期 Half life $T_{1/2}$

$$N = N_0 \times (1/2)^{(t / T_{1/2})}$$

崩壊定数 λ
 1秒間に原子核が崩壊する割合
 $dN/dt = -\lambda N$
 $N = N_0 e^{-\lambda t}$
 $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$
 $1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}$
 $\text{Log}(1/2) = \text{Log}(e^{-\lambda T_{1/2}})$
 $\text{Log}2 = 0.693 = \lambda T_{1/2}$



11

原子核の崩壊 放射性同位元素が安定元素に壊変する現象

1. α 崩壊 原子核が α 線(ヘリウム原子核 ^4_2He)を放出して崩壊

$$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X = \begin{matrix} A-4 \\ Z-2 \end{matrix} Y + \begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix} \alpha$$

例 $^{226}_{88}\text{Ra} = ^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$
 ラジウム ラドン 半減期1600年

その他の α 線放出核種 $^{235}_{92}\text{U}$ $^{238}_{92}\text{U}$ (ウラン)

各々の核種が出す α 線のエネルギーは一定。
 (単一スペクトル、線スペクトルを示す。)

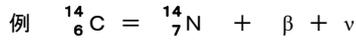
12

2. β⁻崩壊 原子核が電子(陰電子electron)を放出して崩壊



ニュートリノ(中性微子)

核内の変化は、 $n \rightarrow p + \beta + \nu$



半減期5730年

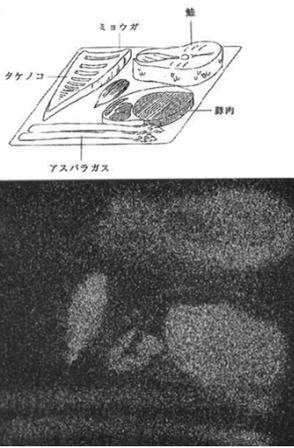
その他のβ線放出核種 3H ${}^{32}P$ ${}^{40}K$ ${}^{131}I$

各々の核種が出すβ線のエネルギーは一定ではない。

(最大エネルギーは一定。)(連続スペクトルを示す。)

${}^{131}I$ は 甲状腺癌の治療に利用されている。

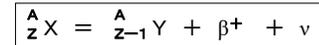
13



食品中の放射能
主に ${}^{40}K$ のガンマ線。
 ${}^{40}K$ の存在比は0.012%、
半減期は 1.26×10^{10} 年

14

2+. β⁺崩壊 原子核が陽電子(positron)を放出して崩壊



ニュートリノ(中性微子)

核内の変化は、 $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$



その他の陽電子放出核種

${}^{13}N$ (半減期10分) ${}^{15}O$ (2分) ${}^{18}F$ (110分)

各々の核種が出すβ⁺線のエネルギーも一定ではない。

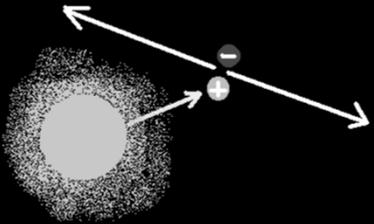
陽電子放出各種の半減期は短い。

ポジトロンCT(PET)に利用されている。

15

陽電子消滅 (annihilation)

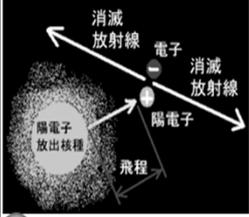
陽電子を放出する核種の近傍において、陽電子と電子が結合し、1対の0.51 MeVのガンマ線を互いに反対方向に放出すること。



エネルギー保存則
電子質量は
 $E = m_e c^2$
 $= 0.51 \text{ MeV}$
のガンマ線になる

運動量保存則
2本のガンマ線は
反対方向に放出

16



電子対消滅 (annihilation)

陽電子放出核種から陽電子が出ると、数mmの行程を経て電子と衝突して消滅し、1対の511 keVの消滅放射線が反対方向に放出される。陽電子と電子は同じ質量で、それが消滅する際に $E=mc^2$ の式に電子質量を代入すると得られる値 511 keVの光子(消滅放射線)を出す。

原子核内から生じる電磁波をγ線、原子核外軌道電子の遷移で生じる電磁波をX線というが、消滅放射線はどちらにも該当しない電磁波である。

陽電子は電子の反粒子で、正電荷とマイナスのエネルギーを持つ。エネルギーと電荷が正反対の電子と陽電子が出会うと消滅し、消えた質量と等価の電磁波エネルギーに換わる。電磁波に質量はないがエネルギーを持つので運動量を持つ。運動量保存則から、発生した電磁波は反対方向に飛ぶ。この現象の正確な理解には量子力学と相対性理論の知識が必要である。

17

放射線(Radiation)は、2種類ある。

1. 電磁波(X線、ガンマ線)
= 空間の振動エネルギー
2. 粒子線(電子線、陽電子線 など)
= 高速に飛ぶ粒子(質量をもつ)
X線、ガンマ線より人体への影響が大きい

放射能(Radio-activity)とは、
1秒間に放出される放射線の数。
放射能の単位は ベクレル (Bq)。

18

電磁波(X線、ガンマ線、光線、電波など)は、空間の振動エネルギー。

空間 (Universe) とは何もない所ではない。

空間とは、物理的実在物(構造物)である。

空間構造の振動が、X線、ガンマ線、可視光線、電波 などの電磁波になる。
電磁波の名称と波長

X線、ガンマ線: 10 ピコ~10ナノメートル

可視光線 : 400~800 ナノメートル

マイクロ波: 100 マイクロ~1 メートル

19

電磁波とは電場と磁場の相互振動と説明されるが、空間の振動エネルギーである。マクスウェルは電磁波の真空中での速度 c を $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ と導いた。この値は秒速約30万kmとなる。
 μ_0 は真空の透磁率(磁場の生じやすさ)、 ϵ_0 は真空の誘電率(電場の生じやすさ)である。真空つまり空間に何らかの物理的構造が無ければ μ_0 や ϵ_0 は0のはずであり、マクスウェルの式にその値を入れると電磁波速度 c は無限大になり、事実と矛盾する。

空間には誘電率と透磁率をもつ何らかの物理的構造があり、その構造の振動が電磁波と考える。空間の存在するところを宇宙、宇宙空間という。近年では、空間は10次元以上の構造であるとも報告されており、今後の物理学者や天文学者の研究に期待したい。

20

光子 photon とは、質量が0の空間中のエネルギーの塊と解釈される。光などの電磁波エネルギーの粒子性は、アインシュタインやコンプトンらによって確かめられた。日常的にも、何万光年も離れた星が夜空で見える現象は、光の粒子性つまり光子の存在を認めなければ説明ができない。光が単なる波動であれば、星から出た光の波動は何万年も宇宙空間で広がりながら進み、地球に届く光のエネルギーは著しく弱くなり、我々には遠くの星は見えないはずである。

光などの電磁エネルギーが、波と粒子の両方の性質を持つという二重性を理解することは非常に困難です。

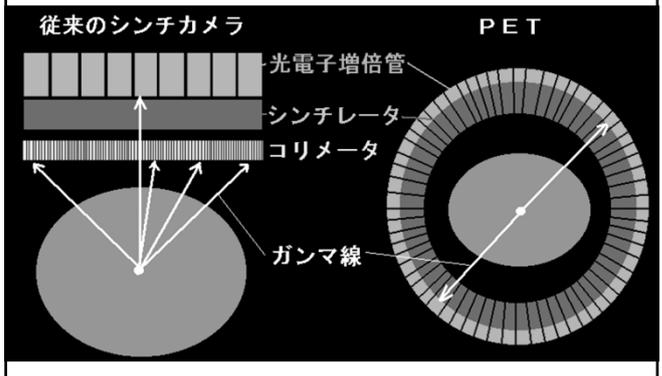
その理由は、我々が、空間を4次元以上の構造として認識することが難しいからです。

空間が3次元構造しかない場合では、その二重性は発生しません。(その二重性は説明できません。)

21

PETカメラは、コリメータがないので高感度。

コリメータは小さい孔を多数あけた鉛板。検出感度を下げる

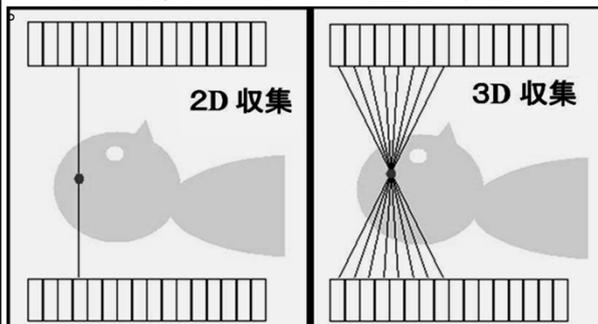


22

現在のPETはほとんど3次元(3D)収集

2次元(2D)収集と比べ、短時間で良好な画像を収集できる(全身(頭部~大腿部)を15~20分程度で収集)。

コンプトン散乱線を収集しやすく、定量性の精度が低下する



23

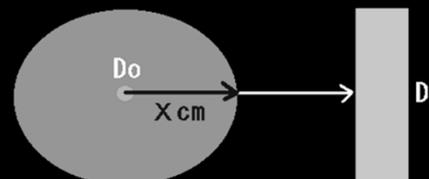
従来のカメラでは体内の放射能分布の定量が困難。

体内の放射能 D_0 は算出できない。測定できるのは D だけ。

放射能の体内での減弱

$$D = D_0 \exp(-\mu x)$$

シンチカメラ



D_0 : 真の放射能 (Bq)

D : 放射能測定値 (Bq)

μ : 線減弱係数 (/cm)

24

PETは、CT画像で吸収補正を行うので、定量性が良い。
体内の放射能 D_0 が、測定値 D_1 、 D_2 から計算できる。

$D_1 = D_0 \exp(-\mu X_1)$
 $D_2 = D_0 \exp(-\mu X_2)$
 $D_1 D_2 = D_0 D_0 \exp(-\mu (X_1 + X_2))$
 $D_0 = \sqrt{D_1 D_2} \exp(\mu Y)$

実際は、体内の μ 値 (CT値) は一定ではないので、PET画像 (D_0) を求める式はもう少し複雑である。

25

PET/CT画像 Lung ca.

26

CT値 (HU : Hounsfield Unit)
組織の密度に比例する値

CT断層像の画素値の基になる値は体内の各組織の線減弱係数 μ_t だが、臨床的な理解度を容易にするために μ_t に比例した値がCTの画素値に使われる。

$$CT \text{ 値} = 1000 \times (\mu_t - \mu_w) / \mu_w$$

μ_w : 水のX線吸収係数 (線減弱係数)
 μ_t : 組織のX線吸収係数 (線減弱係数)

27

空気のCT値は -1000 $1000 \times (\mu_{\text{air}} - \mu_w) / \mu_w = -1000 \text{ (HU)}$
 厳密には空気の線減弱係数 μ_{air} は0ではないが人体組織と比べると極めて小さいので、CT値を計算する場合は $\mu_{\text{air}} = 0$ とする。

水のCT値は 0 (比重1の密度が0 HU)
 $1000 \times (\mu_w - \mu_w) / \mu_w = 0 \text{ (HU)}$

水の2倍の線減弱係数の物質のCT値は 1000 (水の2倍の密度が 1000 HU)
 $1000 \times (2 \mu_w - \mu_w) / \mu_w = 1000 \text{ (HU)}$

CT値 (HU) と密度の関係

CT値は体内の密度(比重)を表す数値である。
 肺野のCT値が約-800で、密度(0.2)の肺気腫の症例では、肺野が黒く見えるが、CT値が約-900で、密度が0.1程度に低下していることを示す。
 血液のCT値は約60だが、これは密度(比重)が1.06であることを示す。造影剤で白く見える血液のCT値は、約100から200を示すが、造影剤によって血液の密度が1.1から1.2程度に重くなっていることを示す。

28

PETで使用する陽電子放出核種
 病院内のサイクロトロンで産生する

	半減期(分)	合成放射性薬剤
酸素15	15-O 2分	O2, CO, CO2, H2O
窒素13	13-N 10分	NH3
炭素11	11-C 20分	11C-酢酸, 11C-メチオニン
フッ素18	18-F 110分	FDG, FDOPA

従来の検査で使用する放射性同位元素の半減時間

99m-Tc	6.01 時間
67Ga	78.2 時間 (3.2日)
201Tl	72.9 時間 (3.0日)

29

^{18}F	110 min	$^{18}\text{O}(p,n)$ ^{18}F
^{15}O	2.04 min	$^{14}\text{N}(d,n)$ ^{15}O , $^{15}\text{N}(p,n)$ ^{15}O
^{11}C	20.4 min	$^{14}\text{N}(p,\alpha)$ ^{11}C
^{13}N	9.97 min	$^{12}\text{C}(d,n)$ ^{13}N , $^{16}\text{O}(p,\alpha)$ ^{13}N

Cyclotron 北大病院内のサイクロトロン

巨大な電磁石
 水素または重水素原子核を加速して元素に衝突させ、
 陽電子を出すRIを作っている。

30

被曝 Exposure をあらわす単位

吸収線量: 1kgの物体が1Jの放射線エネルギーを吸収した被曝は、1Gy(グレイ)。

線量等量: 人体が、体重1kgあたりに1Jのエネルギーを受ける被曝量は、1Sv。

1Sv(シーベルト)= 吸収線量 x 線質係数

線質係数Q: 線質の違いによる人体へのエネルギー付与(電離を起こす程度)を表す指標。

Q=1 : X線、γ線、β線、

Q=10 : 陽子線、中性子線 Q=20 多重荷電粒子

31

陽電子放出核種の半減期(half-life)は短いのでPET検査の被曝(exposure)は少ない。

被曝の単位はシーベルト(Sv) (mSv = 0.001Sv) 体重1kgに1Jのエネルギーを受ける被曝が1Sv。(1Sv = 1J/kg) 一般的に、100mSv以下は、無害。

18F-FDG (185MBq) 4 mSv (膀胱 20 心臓 10 胎児 3)

11C-Methionine (370MBq) 2 mSv (脾、肝 7)

15-O-CO2 (3000MBq) 2 mSv (肺 11)

CT 7mSv ~ 10 ~

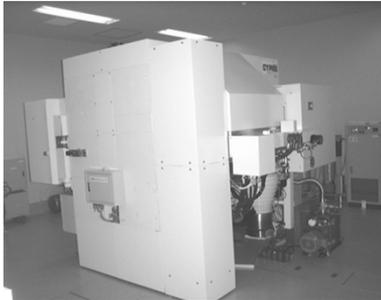
血管造影 7 mSv ~ 10 (1分で皮膚0.5)

胃、消化管造影 3 mSv

単純X線撮影 0.1 mSv (胸部) 0.2 mSv (骨盤)

32

^{18}F 110 min ^{18}O (p,n) ^{18}F
 ^{15}O 2.04 min ^{14}N (d,n) ^{15}O , ^{15}N (p,n) ^{15}O
 ^{11}C 20.4 min ^{14}N (p, α) ^{11}C
 ^{13}N 9.97 min ^{12}C (d,n) ^{13}N , ^{16}O (p, α) ^{13}N



サイクロトロン
(CYPRIS HM-18)

33

令和4年 国家試験 解答 5

ポジトロン放射性薬剤の ^{18}F で正しいのはどれか。

1. 半減期は20分である。
2. ジェネレータで製造する。
3. 159 keVのγ線を放出する。
4. ^{18}F -FDGはガス状で吸入させる。
5. サイクロトロンで製造する場合は ^{18}O をターゲットとすることができる。

34



35



36

平成17年 国家試験

問題 52 院内製造の ^{18}F -FDG合成に必要な装置・設備はどれか。

- a. 自動注入装置
- b. 自動合成装置
- c. ホットラボ室
- d. サイクロトロン

e. ^{68}Ge - ^{68}Ga ジェネレータ

- a, b, c a, b, e 3. a, d, e
 b, c, d 5. c, d, e

37

【問題 4-8】 (平成9)

^{15}O について誤っているのはどれか。

1. 物理的半減期が21分である。
2. 核反応は $^{14}\text{N} (d, n)^{15}\text{O}$ である。
3. 放出線のエネルギーは511 keVである。
4. 脳酸素代謝の測定に用いる。
5. サイクロトロンで製造する。

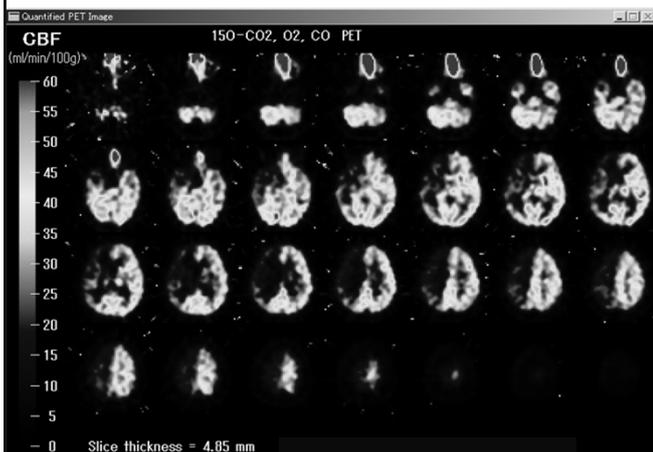
〔注解〕 1. ^{15}O の物理的半減期は123秒である。

2, 3, 4, 5の ^{15}O に関する記述はいずれも正しい。

1

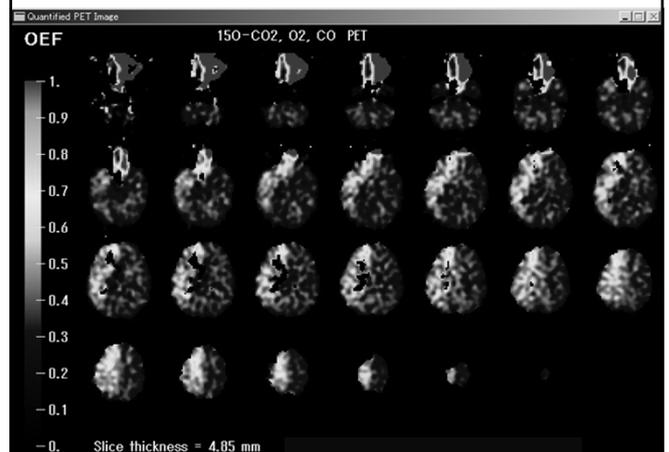
38

15O-CO, CO2, O2 脳血流(CBF)PET



39

15O-CO, CO2, O2 脳酸素代謝率(OEF)PET



40

【問題 4-6】 (平成9)

ガスとして使用する核種はどれか。

- a. ^{15}O
- b. ^{131}I
- c. ^{201}Tl
- d. ^{133}Xe
- e. $^{81\text{m}}\text{Kr}$

1. a, b, c 2. a, b, e
 3. a, d, e 4. b, c, d
 5. c, d, e

〔注解〕 b. ^{131}I , c. ^{201}Tl は液体として用いる。

^{15}O , ^{133}Xe , $^{81\text{m}}\text{Kr}$ は常温では気体なので、ガスとして用いる。

3

41

【問題 4-2】 (平成11)

物理的半減期の最も長いのはどれか。

1. ^{111}In
2. ^{123}I
3. ^{125}I
4. ^{131}I
5. ^{133}Xe

〔注解〕 3. ^{125}I の物理的半減期は60日で最も長い。

物理的半減期は、 ^{111}In は2.8日、 ^{123}I は13時間、 ^{131}I は8日、 ^{133}Xe は5.3日である。

3

42

【問題 4-3】(平成 13)

放射性核種と物理的半減期との組合せで正しいのはどれか。

1. ^{67}Ga ——— 66 時間
2. $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ——— 6 時間
3. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ——— 3 日
4. ^{123}I ——— 13 時間
5. ^{133}Xe ——— 8 日

【注解】 物理的半減期は、 ^{67}Ga は 78 時間、 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ は 13 秒、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は 6 時間、 ^{133}Xe は 5.3 日、である。

4. ^{123}I の物理的半減期は 13 時間で正しい。

4

43

【問題 4-4】(平成 14)

放射性同位元素と物理的半減期との組合せで正しいのはどれか。

1. ^{67}Ga ——— 78 時間
2. $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ——— 13 分
3. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ——— 9 時間
4. ^{123}I ——— 8 日
5. ^{133}Xe ——— 3 時間

【注解】 1. ^{67}Ga の物理的半減期は 78 時間で正しい。

設問の物理的半減期は、 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 13 秒、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 6 時間、 ^{123}I 13 時間、 ^{133}Xe 5.3 日である。

1

44

【問題 4-5】(平成 15)

生物学的半減期が同じである場合、有効半減期の最も短いのはどれか。

1. ^{67}Ga
2. ^{123}I
3. ^{125}I
4. ^{131}I
5. ^{201}Tl

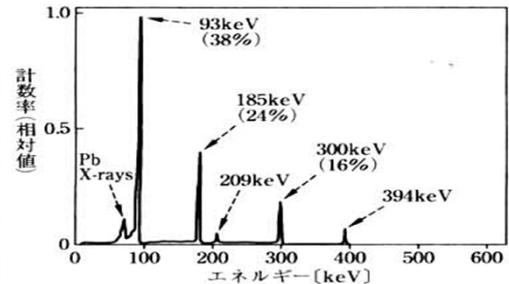
【注解】 生物学的半減期が同じである場合、有効半減期が最も短くなるのは物理的半減期が最も短い場合である。2. ^{123}I の物理的半減期は、13時間と最も短い。

2

45

【問題 4-7】(平成 13)

図のエネルギースペクトルを持つ核種はどれか。



1. ^{67}Ga
2. $^{99\text{m}}\text{Tc}$
3. ^{123}I
4. ^{125}I
5. ^{131}I

46

【注解】 γ 線エネルギーは、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は 140 keV、 ^{123}I は 159 keV、 ^{125}I は 35.5 keV、 ^{131}I は 365 keV、である。

1. ^{67}Ga の γ 線エネルギーは 93 keV その他をもつ図のエネルギースペクトルである。

1

核医学検査で使用する RI の γ 線または特性 X 線のエネルギー	^{125}I	27 keV(EC)
	^{67}Ga	93,185,300 keV
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	140 keV
	^{123}I	159 keV
	^{131}I	365 keV

47

■ 3106 ☆ (既出問題)	α 線	^{226}Ra	1600年
半減期の最も短い核種はどれか。	β 線	^3H	12年
1. ^3H		^{14}C	5700年
2. ^{131}I		^{40}K	13億年
3. $^{99\text{m}}\text{Tc}$		^{59}Fe	45日
4. ^{197}Hg	γ 線(IT)	^{131}I	8日
5. ^{51}Cr		X線(EC)	^{51}Cr 28日
【注解】 ^3H : 12.3年、 ^{131}I : 8日、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$: 6時間、 ^{197}Hg : 64時間、 ^{51}Cr : 27.7日。 ■ 3		^{67}Ga	3.2日
		^{123}I	13時間
	陽電子線	^{11}C	20分
	(β^+)	^{15}O	2分
		^{18}F	110分
		^{201}Tl	3日 (73時間)

48

放射性ヨード				
核種	半減期	壊変形式	おもなβ線(またはα線)のエネルギーと放出割合	おもな光子のエネルギーと放出割合
¹²³ I	13.27 h	EC	100%	0.159- 83.3% 0.529- 1.4% 他 0.0275- 70.7% Te-K _α 0.0310- 16.0% Te-K _β
娘 ^{123m} Te				
¹²⁵ I	59.40 d	EC	100%	0.0355- 6.7% 0.0275-114% Te-K _α 0.0310- 25.9% Te-K _β
¹³¹ I	8.021 d	β ⁻	0.248- 2.1% 0.334- 7.3% 0.606- 89.9% 他	0.0802- 2.6% 0.284- 6.1% 0.364- 81.7% 0.637- 7.2% 0.723- 1.8%
娘 ^{131m} Xe				

49

3. 軌道電子捕獲 EC (electron capture)

原子核がK殻(原子核に最も近い電子軌道)の電子を取り込んで崩壊。

$${}^A_Z X = {}^A_{Z-1} Y + \nu$$

核内の変化は、 $p + e \rightarrow n + \nu$

空いたK殻に外側(L殻)の電子が落ちる。K核電子の方がエネルギーが低いので、L殻電子が移動の際にX線(特性X線、K-X線)を放出する。エネルギーが一定の特殊なX線である。

例 ${}^{125}\text{I} = {}^{125}\text{Te} + \nu + \text{KX}$ (半減期60日)

その他のEC核種

${}^{123}\text{I}$ (半減期13時間) ${}^{67}\text{Ga}$ (3.2日) ${}^{51}\text{Cr}$ (28日)

核医学検査、RIAに利用されている。

50

4. γ線の放出

原子核が崩壊した際、まだ不安定な状態(励起状態、準安定状態)になっている場合、原子核内部から電磁波(エネルギー)を放出して安定状態(基底状態)になる。

原子核内部から出る電磁波を、γ線という。
(原子核外から出る電磁波を、X線という。)

γ線のエネルギーは核種によって一定。線スペクトル。
特性X線以外のX線エネルギーは一定ではない。連続スペクトル。

51

【問題 4-9】(平成9)

¹²⁵I について正しいのはどれか。

- 半減期が60日である。
 - β線を放出する。
 - SPECTに用いられる。
 - ラジオイムノアッセイに用いられる。
 - 蛋白質の標識に用いられる。
1. a, b, c 2. a, b, e
3. a, d, e 4. b, c, d
5. c, d, e

【注解】 b. ¹²⁵I は EC 崩壊である。
c. ¹²⁵I の EC 崩壊による X 線は 27 keV とエネルギーが弱いので SPECT には用いられない。

a, d, e の記述はいずれも正しい。

3

52

【問題 4-11】(平成13)

原子炉で産生するのはどれか。

- a. ¹¹¹In b. ¹²³I
c. ¹³¹I d. ¹³³Xe
e. ²⁰¹Tl
1. a, b 2. a, e 3. b, c
4. c, d 5. d, e

【注解】 a. ¹¹¹In はサイクロトロンで¹⁰⁹Ag (α, 2n)¹¹¹In 反応で産生する。

b. ¹²³I はサイクロトロンで¹²¹Sb(α, 2n)¹²³I 反応で産生する。

e. ²⁰¹Tl はサイクロトロンで²⁰³Tl (p, 3n)²⁰¹Pb EC ²⁰¹Tl で産生する。

¹³¹I, ¹³³Xe はいずれも原子炉で産生する。

4

53

【問題 4-10】(平成12)

⁹⁹Mo-^{99m}Tc ジェネレータについて正しいのはどれか。

- 娘核種は蒸留水で溶出する。
 - 親核種はカラムに吸着している。
 - 溶出操作をミルクングという。
 - 溶出約24時間後に再び平衡に達する。
 - 24時間ごとに溶出される^{99m}Tcの放射能は同量である。
1. a, b, c 2. a, b, e
3. a, d, e 4. b, c, d
5. c, d, e

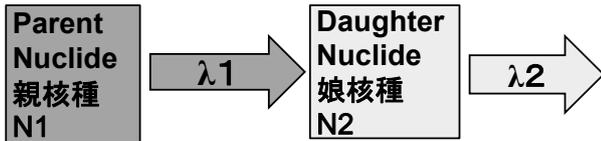
【注解】 a. ⁹⁹Mo-^{99m}Tc ジェネレータの娘核種の^{99m}Tc は生理食塩水で溶出する。

e. 24時間ごとに溶出される^{99m}Tcの放射能は⁹⁹Moの放射能の壊変につれて、減少する。
b. c. d の記述はいずれも正しい。

4

54

放射平衡 Radiative Equilibrium



$$N1 = N0 e^{-\lambda 1 t}$$

$$d N1/dt = - \lambda 1 N1$$

$$d N2/dt = \lambda 1 N1 - \lambda 2 N2$$

$$d N2/dt + \lambda 2 N2 = \lambda 1 N0 e^{-\lambda 1 t}$$

55

定数係数1階線形微分方程式

$$dy /dx + a y = F(x)$$

の解は、

$$y = e^{-ax} (\int e^{ax} F(x) dx + C)$$

工学の分野でよく利用される便利な公式

56

$$dy /dx + a y = F(x)$$

$$e^{ax} dy /dx + a e^{ax} y = e^{ax} F(x)$$

$$e^{ax} (dy/dx) + (d e^{ax} /dx) y = e^{ax} F(x)$$

$$d (e^{ax} y) /dx = e^{ax} F(x)$$

$$e^{ax} y = \int e^{ax} F(x) dx + C$$

$$y = e^{-ax} (\int e^{ax} F(x) dx + C)$$

57

Y に N2、 x に t、 a に $\lambda 2$ を代入し、

F(t) を $\lambda 1 N0 e^{-\lambda 1 t}$ とすると、

$dy /dx + a y = F(x)$ は、

$$dN2/dt + \lambda 2 N2 = \lambda 1 N0 e^{-\lambda 1 t}$$

$y = e^{-at} (\int e^{at} F(x) dt + C)$ は、

$$N2 = e^{-\lambda 2 t} \int e^{\lambda 2 t} \lambda 1 N0 e^{-\lambda 1 t} dt$$

$$N2 = e^{-\lambda 2 t} \int \lambda 1 N0 e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t} dt$$

$$N2 = e^{-\lambda 2 t} [\lambda 1 N0 e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t}]_0^t$$

$$= e^{-\lambda 2 t} [N0 \lambda 1 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t}]_0^t$$

58

$$= e^{-\lambda 2 t} [N0 \lambda 1 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t}]_0^t$$

$$= e^{-\lambda 2 t} (N0 \lambda 1 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t})$$

$$- e^{-\lambda 2 t} (N0 \lambda 1 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^0)$$

$$= (N0 \lambda 1 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^{-\lambda 1 t})$$

$$- e^{-\lambda 2 t} (N0 \lambda 1 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^0)$$

$$N2 = \lambda 1 N0 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^{-\lambda 1 t}$$

$$- \lambda 1 N0 / (\lambda 2 - \lambda 1) e^{-\lambda 2 t}$$

$$N2 = \lambda 1 N0 / (\lambda 2 - \lambda 1) (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t})$$

積分定数 C を $N2_0$ とすると $N2_0 e^{-\lambda 2 t}$ が加わる。

59

$^{99}\text{Mo} - ^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射平衡

N1 : Moの原子核数 (初期値 $N1_0$)
N2 : Tcの原子核数 (初期値 $N2_0 = 0$)

$\lambda 1$: Moの崩壊定数 = $\log 2 / 66$ 時間
 $\lambda 2$: Tcの崩壊定数 = $\log 2 / 6$ 時間

A1 : Moの放射能 = $\lambda 1 N1$
A2 : Tcの放射能 = $\lambda 2 N2$

$$\frac{dN1}{dt} = - \lambda 1 N1 \quad \frac{dN2}{dt} = \lambda 1 N1 - \lambda 2 N2$$

$$N1 = N1_0 e^{-\lambda 1 t}$$

$$N2 = \frac{\lambda 1}{\lambda 2 - \lambda 1} N1_0 (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t})$$

$$\lambda 2 > \lambda 1 \rightarrow N2 = \frac{\lambda 1}{\lambda 2 - \lambda 1} N1 \quad \frac{A2}{A1} = \frac{N1 + N2}{N1}$$

60

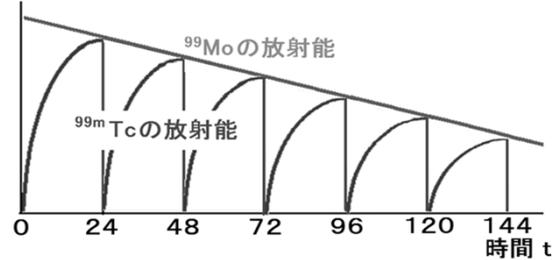
空バイアルを挿入するとミルクィングが始まる。バイアルの目盛り3mLまで生理的食塩水が満たされたら、バイアルをシールドごと抜く。



61

^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 過渡平衡状態のカラムは、24時間後に $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射能が最大になるので毎日(24時間おきに) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を抽出できる。これを乳牛の搾乳に例えてミルクィングという。

放射能 A (対数目盛)



62

令和4年 国家試験 解答 1, 3

^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータについて正しいのはどれか。2つ選べ。

1. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は生理食塩水で抽出する。
2. コレクティングバイアルは陽圧である。
3. ^{99}Mo はアルミナカラムに吸着している。
4. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の半減期は ^{99}Mo の半減期よりも長い。
5. ミルクィング後約66時間で $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の生成曲線が極大となる。

令和4年 国家試験 解答 1

ジェネレータシステムから娘核種を抽出する操作はどれか。

- | | |
|-----------|------------|
| 1. ミルクィング | 4. チューニング |
| 2. ラベリング | 5. カウンティング |
| 3. クエンチング | |

63

問 3104 ☆☆☆ (注) 1, 2. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は ^{99}Mo が、64時間の半減期で崩壊したもので、これはさらにγ線を放出して $^{99\text{m}}\text{Tc}$ となる。この時のγ線のエネルギーは約140 keV で、検出効率が良い。

1. 半減期は6.03時間である。
2. 測定される放射線はγ線である。
3. 親核種は ^{99}Tc である。
4. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の核異性体である。
5. シンチグラフィに広く用いられる。

4, 5. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -酸化コロイドや $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -アルブミンなどの形で標識が容易であるためシンチグラフィなどに用いられる。 図 3

テクネシウム $^{99\text{m}}\text{Tc}$
半減期6時間、140keV γ線(核異性体転移)

手頃な半減期とγ線エネルギーを持つので核医学検査に適する。

放射平衡 ^{99}Mo (モリブデン)(66時間) → $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6時間) + β
親核種 娘核種

核医学検査室には、半減期の長い ^{99}Mo が常備されており、 ^{99}Mo から半減期の短い $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を搾り出す(ミルクィング)。

64

例 $^{99\text{m}}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc} + \gamma$ テクネシウム 半減期6時間

核異性体(isomer)

質量数、原子番号が同じで、状態が異なる核種

核異性体転移(IT : isometric transition)

核異性体からγ線が出る現象。

準安定状態の核種には、質量数に m を付けて表示する。

例 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6時間) $^{81\text{m}}\text{Kr}$ (13秒)

核医学検査に利用されている。

特に $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は 最も多く利用されている。

(^{99}Tc も微弱な(崩壊定数が極めて小さい)放射性同位元素。

半減期21万年、β線放出核種)

65

【問題 4-1】(平成9)

ポジトロン放出核種はどれか。

- | | |
|---------------------|---------------------|
| a. ^3H | b. ^{11}C |
| c. ^{18}F | d. ^{51}Cr |
| e. ^{59}Fe | |
1. a, b
 2. a, e
 3. b, c
 4. c, d
 5. d, e

【注解】 a. ^3H は β⁻ 放射核種である。

d. ^{51}Cr は EC 壊変核種である。

e. ^{59}Fe は β⁻ 放射核種である。

b. ^{11}C と c. ^{18}F はポジトロン放出核種である。

3

66

5. 内部転換 (IC : internal conversion)

励起状態の原子核が準安定状態、基底状態に移行する際にエネルギーを γ 線として放出せず、K殻の軌道電子に与え、原子外へ電子を放出する(β 線を出す)こと。

放出された電子(β 線)を内部転換電子という。
一般の β 線は連続スペクトルを持つが、
内部転換電子のエネルギーは一定。(線スペクトルを持つ。)

K殻の軌道が空くので、電子捕獲(EC)と類似の
L殻電子の移動と、特性X線(KX線)の放出を伴う。

この特性X線が、さらに他の軌道電子を原子外に放出することがある。(オージェ電子 Auger)