第59回 第1種放射線取扱主任者試験問題と解答例(1)

(試験年月日 平成 26 年 8 月 20 日, 21 日)

法 令

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(以下「放射線障害防止法」という。)及び関係法 令について解答せよ。

次の各間について、1から5までの5つの選択肢のうち、適切な答えを1つだけ、選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

- 問1 許可又は届出の手続きに関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 1個当たりの数量が10テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを業として販売しようとする者は、販売所ごとに、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
 - B 表示付特定認証機器のみを業として賃貸しようとする者は、賃貸事業所ごとに、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出なければならない。
 - C 放射性同位元素又は放射性汚染物を業として廃棄しようとする者は、廃棄事業所ごとに、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
 - D 陽電子放射断層撮影装置による画像診断に用いるための放射性同位元素を製造しようとする者は、 工場又は事業所ごとに、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 CD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

「解答〕

4

- 注) A:誤 法第4条 販売は許可ではなく届出。
 - B:誤 法第4条 表示付特定認証機器を業として販売し、又は賃貸する者については不要。
 - C:正 法第4条の2
 - D:正 法第3条
- 問2 許可使用に係る使用の場所の一時的変更の届出に関する次の文章の A ~ C に該当する語句 について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

「法第10条第6項に規定する政令で定める放射線発生装置は、次の各号に掲げるものとし、同項に規定する政令で定める放射線発生装置の使用の目的は、それぞれ当該各号に定めるものとする。

解答例は(公社)日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会が解答の一案として作成したものです。

(1) A (原子力規制 ものに限る。) 橋梁又は		ーを超えるエネルギーを有する放射線を発生した	ない
(2) B (原子力規制	委員会が定めるエネルギ	ーを超えるエネルギーを有する放射線を発生した	ない
	ものに限る。) 非破壊検	査のうち原子力規制委員	会が定めるもの	
(3) C (原子力規制	委員会が定めるエネルギ	ーを超えるエネルギーを有する放射線を発生した	ない
	ものに限る。) 地下検層			
	A	В	С	
1	変圧器型加速装置	ベータトロン	ファン・デ・グラーフ型加速装置	
2	2 直線加速装置	シンクロトロン	ファン・デ・グラーフ型加速装置	

プラズマ発生装置

コッククロフト・ワルトン型加速装置 コッククロフト・ワルトン型加速装置

〔解答〕

5

注) 令第9条第2項

3 変圧器型加速装置

4 直線加速装置

5 直線加速装置

- 問3 次のうち、密封されていない放射性同位元素の使用の許可のみを受けようとする者が、原子力規制委員会に提出する放射性同位元素の使用許可申請書に添えなければならない書類として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 予定使用開始時期及び予定使用期間を記載した書面
 - B 使用施設、貯蔵施設及び廃棄施設の主要部分の縮尺を付けた断面詳細図

マイクロトロン

マイクロトロン

ベータトロン

- C 予定工事期間及びその工事期間中放射線障害の防止に関し講ずる措置を記載した書面
- D 使用施設、貯蔵施設及び廃棄施設を中心とし、縮尺及び方位を付けた工場又は事業所内外の平面図
- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

2.

- 注) 則第2条第2項
 - A:E
 - B:正
 - C:誤 規定されていない。ただし、変更の許可の申請は則第9条による。
 - $D:\mathbb{E}$
- 問4 次のうち、届出賃貸業者が、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出なければならない変更事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 賃貸事業所の所在地
 - B 放射性同位元素の種類
 - C 貯蔵施設の位置,構造,設備及び貯蔵能力
 - D 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 CD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

〔解答〕

2.

注) A:正 法第4条第2項

B:正 法第4条第2項

C:誤 規定されていない。

D:誤 則第4条第3項 変更の日から30日以内に届出。

- 問5 次のうち、放射性同位元素を業として販売しようとする者(表示付特定認証機器を業として販売する者を除く。)が、原子力規制委員会への届書に添えなければならない書類として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 法人にあっては、登記事項証明書
 - B 放射線障害を防止するために講ずる措置を記載した書面
 - C 販売の業を適確に遂行するに足りる経理的基礎を有することを明らかにする書面
 - D 予定事業開始時期,予定事業期間及び放射性同位元素の種類ごとの年間販売予定数量(予定事業期間が1年に満たない場合にあっては、その期間の販売予定数量)を記載した書面
 - 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

[解答]

4

注) 則第6条第2項

問6 使用の許可又は廃棄の業の許可を与えられない者に関する次の文章の A ~ D に該当する語 句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

「第5条 次の各号のいずれかに該当する者には、第3条第1項本文又は前条第1項の許可を与えない。

- (1) 第26条第1項の規定により許可を取り消され、取消しの日から A 年を経過していない者
- (2) この法律又はこの法律に基づく命令の規定に違反し、 B 以上の刑に処せられ、その執行を終わり、又は執行を受けることのなくなった後、 A 年を経過していない者
- (3) C
- (4) 法人であって、その業務を行う D のうちに前3号のいずれかに該当する者のあるもの」

	A	В	С	D
1	1	懲役	未成年被後見人	代表者
2	5	懲役	未成年被後見人	役 員
3	3	罰金	被保佐人	取締役
4	2	罰金	成年被後見人	役 員
5	3	禁錮	被保佐人	取締役

〔解答〕

4

注) 法第5条

問7 次の標識のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。ただし、この場合、放射 能標識は工業標準化法の日本工業規格によるものとし、その大きさは放射線障害防止法上で定めるものと する。









1 ABCのみ

2 AB のみ

3 AD のみ

4 CD のみ

5 BCD のみ

[解答]

2

注)A:正 則第14条の9第7号,施行規則別表

B:正 則第14条の11第10号,施行規則別表

C:誤 則第14条の7第1項第9号,施行規則別表 放射能標識下部の文字は規定されていない。

D:誤 則第14条の10において準用する則第14条の9第7号,施行規則別表 放射能標識下部の文字は規定されていない。

問8 使用施設の技術上の基準に関して、密封された放射性同位元素を使用する場合に、その旨を自動的に表示する装置及びその室に人がみだりに入ることを防止するインターロックを設けなければならない放射性同位元素の数量を示す記述として、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、次のうちどれか。

<自動表示装置>

<インターロック>

1 100 ギガベクレル以上

400 テラベクレル以上

2 100 ギガベクレルを超える

400 テラベクレルを超える

3 400 ギガベクレル以上

100 テラベクレル以上

4 400 ギガベクレルを超える

100 テラベクレルを超える

5 400 ギガベクレル以上

400 テラベクレル以上

[解答]

- 注)自動表示装置については、則第14条の7第1項第6号、平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量告示)第11条に規定されている。インターロックについては、則第14条の7第1項第7号、同告示第12条に規定されている。
- 問9 許可証の再交付に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 再交付を受けようとする者は、許可証再交付申請書を原子力規制委員会に提出しなければならない。
 - B 許可証を汚した者が許可証再交付申請書を提出する場合には、その許可証をこれに添えなければならない。

- C 許可証を失った者で許可証の再交付を受けたものは、失った許可証を発見したときは、速やかに、 再交付された許可証を原子力規制委員会に返納しなければならない。
- D 許可証を失ったときは、30 日以内に、その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。

1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 CD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

「解答〕

2

注) A:正 則第14条第1項

B:正 則第14条第2項

C:誤 則第14条第3項 失った許可証を返納しなければならない。

D:誤 規定されていない。

- 間10次のうち、放射性同位元素装備機器を製造し、設計認証を受けようとする者が、原子力規制委員会又は 登録認証機関に提出しなければならない申請書に記載する事項として、放射線障害防止法上定められてい るものの組合せはどれか。
 - A 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
 - B 放射性同位元素装備機器の使用の方法の説明書
 - C 放射性同位元素装備機器の名称及び用途
 - D 放射性同位元素装備機器に装備する放射性同位元素の種類及び数量
 - E 放射性同位元素装備機器の保管を委託する者の氏名又は名称
 - 1 ABDのみ 2 ABEのみ 3 ACDのみ 4 BCEのみ 5 CDEのみ

[解答]

3

- 注) 法第12条の2第3項
- 問 11 次のうち、施設検査を受けようとする者が原子力規制委員会又は登録検査機関に提出しなければならな い書類として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 使用施設等の位置を明示した工場又は事業所の平面図
 - B 使用施設等の実測平面図
 - C 使用施設等の実測断面詳細図
 - D 法人にあっては、登記事項証明書
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

- 注) 則第14条の14第1項
- 問12 定期確認に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 密封された放射性同位元素のみを使用する特定許可使用者は、設置時施設検査に合格した日又は前 回の定期確認を受けた目から5年以内に定期確認を受けなければならない。
 - B 放射線発生装置のみを使用する特定許可使用者は、定期確認を受けることを要しない。

- C 密封されていない放射性同位元素のみを使用する特定許可使用者は、設置時施設検査に合格した日 又は前回の定期確認を受けた日から3年以内に定期確認を受けなければならない。
- D 許可廃棄業者は、設置時施設検査に合格した日又は前回の定期確認を受けた日から5年以内に定期確認を受けなければならない。

1 ACD OA 2 AB OA 3 AC OA 4 BD OA 5 BCD OA

〔解答〕

3

注) A:正 令第15条第2号

B:誤 令第15条第2号 設置時施設検査に合格した日又は前回の定期確認を受けた日から5年以内に定期確認を受けなければならない。

C:正 令第15条第1号

D: 誤 今第15条第1号 3年以内。

- 問 13 管理区域から持ち出す放射性汚染物に係る表面の放射性同位元素の密度に関する次の記述のうち、放射 線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 塩素 36 の密度は、4 ベクレル毎平方センチメートルを超えない。
 - B セシウム 137 の密度は、4 ベクレル毎平方センチメートルを超えない。
 - C アメリシウム 241 の密度は、4 ベクレル毎平方センチメートルを超えない。
 - D キュリウム 244 の密度は、4 ベクレル毎平方センチメートルを超えない。
 - 1 $A \succeq B$ 2 $A \succeq C$ 3 $B \succeq C$ 4 $B \succeq D$ 5 $C \succeq D$

[解答]

1

- 注)平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号 (数量告示) 第 8 条, 同告示第 16 条, 同告示別表第 4 アメリシウム 241 及びキュリウム 244 はアルファ線放出核種であり, 0.4 ベクレル毎平方センチメートルを超えてはならない。
- 問 14 保管の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 貯蔵施設においては、作業衣、保護具等を着用して作業し、これらを着用してみだりに貯蔵施設から退出しないこと。
 - B 貯蔵施設のうち放射性同位元素を経口摂取するおそれのある場所での飲食及び喫煙を禁止すること。
 - C 貯蔵施設には、その貯蔵能力を超えて放射性同位元素を貯蔵しないこと。
 - D 貯蔵施設の目につきやすい場所に、放射線障害の防止に必要な注意事項を掲示すること。
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕

4

注) A:誤 規定されていない。

B:正 則第17条第1項第5号

C:正 則第17条第1項第2号

D:正 則第17条第1項第8号

- 問 15 A 型輸送物に係る技術上の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 開封されたときに見やすい位置に「放射性」又は「RADIOACTIVE」の表示を有していること。
 - B 表面から1メートル離れた位置における1センチメートル線量当量率の最大値が10ミリシーベルト毎時を超えないこと。
 - C 周囲の圧力を60キロパスカルとした場合に、放射性同位元素の漏えいがないこと。
 - D 放射性同位元素の使用等に必要な書類その他の物品(放射性輸送物の安全性を損なうおそれのないものに限る。)以外のものが収納され、又は包装されていないこと。
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

〔解答〕

5

- 注) A:誤 則第18条の4第6号 L型輸送物について定められている。
 - B:誤 則第18条の5第8号 10ミリシーベルト毎時ではなく、100マイクロシーベルト毎時。
 - C:正 則第18条の5第5号
 - D:正 則第18条の5第9号
- 問 16 放射線障害予防規程(以下「予防規程」という。)に関する次の記述のうち,放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 届出使用者は、放射性同位元素の使用を開始する前に、予防規程を作成し、原子力規制委員会に届け出なければならない。
 - B 許可廃棄業者は、予防規程を変更しようとするときは、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出な ければならない。
 - C 表示付認証機器のみを販売する届出販売業者は,販売の業を開始する前に,予防規程を作成し,原 子力規制委員会に届け出なければならない。
 - D 許可使用者は、予防規程を変更したときは、変更の日から 30 日以内に、原子力規制委員会に届け出なければならない。
 - 1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

[解答]

- 注) A:正 法第21条第1項
 - B:誤 法第21条第3項 変更の日から30日以内に届け出る。
 - C:誤 法第21条第1項 表示付認証機器のみを販売する届出販売業者は除く。
 - D:正 法第21条第3項
- 問 17 教育訓練に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。ただし、対象者には、教育及び訓練の項目について十分な知識及び技能を有していると認められる者は、含まれていないものとする。

- A 見学のため管理区域に一時的に立ち入る者に対する教育及び訓練は、当該者が立ち入る放射線施設において放射線障害が発生することを防止するために必要な事項について施さなければならないが、時間数は定められていない。
- B 取扱等業務に従事する者であって、管理区域に立ち入らないものに対する教育及び訓練は、取扱等業務を開始する前に行わなければならないが、時間数は定められていない。
- C 放射線業務従事者に対する教育及び訓練は、初めて管理区域に立ち入る前及び管理区域に立ち入った後にあっては1年を超えない期間ごとに行わなければならない。
- D ガスクロマトグラフ用エレクトロン・キャプチャ・ディテクタ (表示付認証機器であるものは除く。) のみを使用する届出使用者が行う取扱等業務に従事する者に対する教育及び訓練は、取扱等業務を開始する前及び取扱等業務を開始した後にあっては1年を超えない期間ごとに行わなければならない。
 - 1 ACD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

〔解答〕

1

- 注) A:正 則第21条の2第1項第5号
 - B:誤 則第21条の2第1項第3号,同第4号,平成3年11月15日科学技術庁告示第10号 時間数は定められている。
 - C:正 則第21条の2第1項第2号
 - D:正 則第21条の2第1項第3号
- 問 18 放射線業務従事者の健康診断の検査又は検診に関する次の記述のうち、医師が必要と認める場合に限り 行わなければならないものとして、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 初めて管理区域に立ち入る前の検査又は検診のうちの皮膚
 - B 初めて管理区域に立ち入る前の検査又は検診のうちの眼
 - C 管理区域に立ち入った後、1年を超えない期間ごとに行う検査又は検診のうちの皮膚
 - D 管理区域に立ち入った後、1年を超えない期間ごとに行う検査又は検診のうちの眼
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 CD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

[解答]

5

- 注)則第22条第1項第1号,同第2号,同第6号 初めて管理区域に立ち入る前の検査又は検診については,限と原子力規制委員会が定める部位及び項目について,医師が必要と認める場合に限られている。皮膚については除外できない。
- 問 19 放射線障害を受けた者又は受けたおそれのある者に対する措置に関する次の文章の A ~ C に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

「第23条 許可届出使用者,表示付認証機器使用者,届出販売業者,届出賃貸業者及び許可廃棄業者が法第24条の規定により講じなければならない措置は、次の各号に定めるところによる。

(1) 放射線業務従事者が放射線障害を受け、又は受けたおそれのある場合には、放射線障害又は放射線

障害を受けたおそれの程度に応じ、 A への立入時間の短縮、 B の禁止、 C 業務への配置転換等の措置を講じ、必要な保健指導を行うこと。

В Α C 1 放射線施設 取扱等業務 放射線に被ばくするおそれの少ない 立入り 放射線に被ばくするおそれの少ない 2 管理区域 3 放射線施設 立入り 取扱等業務以外の 4 管理区域 立入り 取扱等業務以外の 5 管理区域 取扱等業務 取扱等業務以外の

[解答]

2

注) 則第23条第1号

- 問 20 次のうち、密封されていない放射性同位元素及び放射線発生装置の使用をする許可使用者が、放射化物保管設備及び保管廃棄設備を設置した場合、備えるべき帳簿に記載しなければならない事項の細目として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
 - A 受入れ又は払出しに係る放射性同位元素等の種類及び数量
 - B 貯蔵施設における保管に係る放射性同位元素及び放射化物保管設備における保管に係る放射化物の 種類及び数量
 - C 保管を委託した放射性同位元素の種類及び数量
 - D 廃棄に係る放射性同位元素等の種類及び数量
 - 1 ABD のみ 2 AB のみ 3 AC のみ 4 CD のみ 5 BCD のみ

[解答]

- 注) A:正 則第24条第1項第1号イ
 - B:正 則第24条第1項第1号ト
 - C:誤 規定されていない。
 - D:正 則第24条第1項第1号ル
- 問21 許可使用者等の合併等に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 許可使用者である法人の分割の場合(当該許可に係るすべての放射性同位元素又は放射線発生装置及び放射性汚染物並びに使用施設等を一体として承継させる場合に限る。)において、当該分割について原子力規制委員会の認可を受けたときは、分割により当該放射性同位元素若しくは放射線発生装置及び放射性汚染物並びに使用施設等を一体として承継した法人は、許可使用者の地位を承継することができる。
 - B 届出販売業者である法人の分割の場合(当該届出に係る一部の販売所を承継させる場合に限る。) において、分割により当該販売所を承継した法人は、届出販売業者の地位を承継することができる。
 - C 届出使用者である法人の合併の場合(届出使用者である法人と届出使用者でない法人とが合併する場合において、届出使用者である法人が存続するときを除く。)において、合併後存続する法人又は合併により設立された法人は、届出使用者の地位を承継することができる。

D 届出賃貸業者である法人の合併の場合(届出賃貸業者である法人と届出賃貸業者でない法人とが合 併する場合において、届出賃貸業者である法人が存続するときを除く。)において、合併後存続する 法人又は合併により設立された法人は、届出賃貸業者の地位を承継することができる。

1 ACD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

「解答〕

1

注) A:正 法第26条の2第1項

B:誤 法第26条の2第6項 分割の場合は当該届出に係る一部の販売所ではなく、すべてに ついて承継させる場合に限る。

C: IE. 法第26条の2第4項

D:正 法第26条の2第7項

問22 許可の取消し、使用の廃止等に伴う措置に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められている ものの組合せはどれか。

- A その所有する放射性同位元素を輸出し、許可届出使用者、届出販売業者、届出賃貸業者若しくは許 可廃棄業者に譲り渡し、又は廃棄すること。
- B その借り受けている放射性同位元素を輸出し、又は許可届出使用者、届出販売業者、届出賃貸業者 若しくは許可廃棄業者に返還すること。
- C 放射性同位元素による汚染を除去すること。ただし、廃止措置に係る事業所等を許可使用者又は許 可廃棄業者に譲り渡す場合(当該廃止措置に係るすべての放射性同位元素等又は放射線発生装置及び 放射線施設を一体として譲り渡す場合に限る。)は、この限りでない。
- D 放射性汚染物を許可届出使用者,届出販売業者,届出賃貸業者若しくは許可廃棄業者に譲り渡し, 又は廃棄すること。
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

[解答]

- 注) A:正 則第26条第1項第1号
 - B:正 則第26条第1項第2号
 - $C: \mathbb{E}$ 則第26条第1項第3号
 - 則第26条第1項第5号 許可使用者(ただし、当該廃止措置に係るすべての放射性同 D:誤 位元素等又は放射線発生装置及び放射線施設を一体として譲り渡す場合に事業所等を譲 り受ける者に限る。)若しくは許可廃棄業者に。
- 問23 所持の制限に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 許可使用者は、その許可証に記載された種類の放射性同位元素をその許可証に記載された貯蔵施設 の貯蔵能力の範囲内で所持することができる。
 - B 届出使用者が、その届出に係る放射性同位元素のすべての使用を廃止したとき、使用を廃止した日 に所持していた放射性同位元素を、使用の廃止の日から3月間所持することができる。
 - C 届出賃貸業者から放射性同位元素の運搬を委託された者は、その委託を受けた放射性同位元素を所

持することができる。

D 届出販売業者は、その届け出た種類の放射性同位元素を運搬のために所持することができる。

1 ACD $O\lambda$ 2 AB $O\lambda$ 3 AC $O\lambda$ 4 BD $O\lambda$ 5 BCD $O\lambda$

[解答]

1

注) A:正 法第30条第1号

B:誤 則第28条 30日間。 C:正 法第30条第11号

D:正 法第30条第3号

問 24 危険時の措置に関する次の文章の A ~ C に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

「第33条 許可届出使用者等は、その所持する放射性同位元素若しくは A 又は放射性汚染物に関し、地震、火災その他の災害が起こったことにより、放射線障害のおそれがある場合又は放射線障害が発生した場合においては、直ちに、原子力規制委員会規則で定めるところにより、 B なければならない

2 前項の事態を発見した者は、直ちに、その旨を C に通報しなければならない。」

A 1 放射線施設 B 応急の措置を講じ

原子力規制委員会又は都道府県知事

С

2 放射線施設 応急の措置を講じ

警察官又は海上保安官

3 放射線発生装置 応急の措置を講じ

警察官又は海上保安官

4 放射線施設 健康診断を実施し

原子力規制委員会又は都道府県知事

5 放射線発生装置 健康診断を実施し 警察官又は海上保安官

〔解答〕

3

注) 法第33条第1項, 同第2項

問25 放射線取扱主任者の選任に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 下限数量を超える密封された放射性同位元素のみを診療のために使用するときは、放射線取扱主任者として放射線取扱主任者免状を有していない診療放射線技師を選任することができる。
- B 表示付認証機器のみを業として賃貸するときは、放射線取扱主任者の選任を要さない。
- C 放射線発生装置のみを研究のために使用するときは、放射線取扱主任者として第1種放射線取扱主任者免状を有している者を選任しなければならない。
- D 10 テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを販売するときは、放射線取扱主任者として第 2 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任することができる。
- 1 A & C 2 A & D 3 B & C 4 B & D 5 C & D

〔解答〕

5

注) 法第34条

- 間26 定期講習に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 許可使用者は、定期講習を受けたことのない者を放射線取扱主任者に選任した場合は、選任した日から3年以内に定期講習を受けさせなければならない。
 - B 表示付認証機器のみを業として販売する届出販売業者は、放射線取扱主任者に定期講習を受けさせることを要しない。
 - C 届出使用者は、選任された後定期講習を受けた放射線取扱主任者に前回の定期講習を受けた日から 5年以内に定期講習を受けさせなければならない。
 - D 届出販売業者は、選任された後定期講習を受けた放射線取扱主任者に前回の定期講習を受けた日から5年以内に定期講習を受けさせなければならない。
 - 1 ACD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

[解答]

4

- 注) A:誤 則第32条第2項第1号 1年以内。
 - B:正 則第32条第1項第2号
 - C:誤 則第32条第2項第2号 3年以内。
 - D:正 則第32条第2項第2号
- 問 27 5 テラベクレルの密封された放射性同位元素を研究のためのみに使用している許可使用者において、放射線取扱主任者が海外出張をすることになった。当該放射線取扱主任者がその職務を遂行することはできないが、放射性同位元素の使用を継続することとした。この出張期間中における放射線取扱主任者の代理者の選任に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 出張の期間が10日であったので,第2種放射線取扱主任者免状を有している者を,放射線取扱主任者の代理者として選任したが、原子力規制委員会にその旨の届出は行わなかった。
 - B 出張の期間が30日であったので,第2種放射線取扱主任者免状を有している者を,放射線取扱主任者の代理者として選任し、選任した日から10日後、原子力規制委員会にその旨の届出を行った。
 - C 出張の期間が30日であったので、放射線取扱主任者免状を有していない医師を、放射線取扱主任者の代理者として選任したが、原子力規制委員会にその旨の届出は行わなかった。
 - D 出張の期間が3日であったので、放射線取扱主任者の代理者の選任は行わなかった。
 - 1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

- 注) 法第37条, 則第33条
 - A:正 5 テラベクレルの密封された放射性同位元素を研究のために使用している許可使用者は 第2種放射線取扱主任者の選任が必要であり、その代理者も同様。放射線取扱主任者が 職務を行うことができない期間が30日に満たない場合には届出を要しない。
 - B:正 出張の期間が30日なので、代理者を選任した日から30日以内に届け出る。
 - C:誤 法第34条 放射線取扱主任者免状を有しない医師は、放射性同位元素又は放射線発生 装置を診療のために用いる場合に限られる。
 - D:誤 出張の期間が30日に満たない場合でも、代理者の選任は必要。ただし、届出は要しない。

- 間28 報告の徴収に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 許可取消使用者等は、放射性同位元素の盗取又は所在不明が生じたときは、その旨を直ちに、その 状況及びそれに対する処置を 30 日以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。
 - B 許可使用者は、放射性同位元素の使用における計画外の被ばくがあったときであって、当該被ばく に係る実効線量が放射線業務従事者にあっては5ミリシーベルトを超え、又は超えるおそれのあると きは、その旨を直ちに、その状況及びそれに対する処置を10日以内に原子力規制委員会に報告しな ければならない。
 - C 届出使用者は、放射線業務従事者について実効線量限度若しくは等価線量限度を超え、又は超える おそれのある被ばくがあったときは、その旨を直ちに、その状況及びそれに対する処置を 10 日以内 に原子力規制委員会に報告しなければならない。
 - D 特定放射性同位元素を使用している許可使用者は、毎年3月31日に所持している特定放射性同位元素について、同日の翌日から起算して6月以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。

1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

3

- 注) A:誤 則第39条第1項 10日以内。
 - B:正 則第39条第1項第7号
 - C:正 則第39条第1項第8号
 - D:誤 則第39条第6項 3月以内。
- 間29 管理区域の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
 - A 外部放射線に係る線量については、実効線量が3月間につき1.3ミリシーベルトを超えるおそれのある場所
 - B 空気中の放射性同位元素の濃度については、3月間についての平均濃度が空気中濃度限度の10分の1を超えるおそれのある場所
 - C 放射性同位元素によって汚染される物の表面の放射性同位元素の密度については、表面密度限度の 10 分の 1 を超えるおそれのある場所
 - D 内部被ばくに係る線量については、実効線量が3月間につき0.25ミリシーベルトを超えるおそれ のある場所
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕

1

- 注) 則第1条第1号, 平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量告示)第4条
- 問30 等価線量限度に関する次の文章の A ~ E に該当する語句について,放射線障害防止法上定められているものの組合せは,下記の選択肢のうちどれか。ただし,次の文章中,「前条第4号に規定する期間」は「本人の申出等により許可届出使用者又は許可廃棄業者が妊娠の事実を知ったときから出産までの間」とする。

「第6条 規則第1条第11号に規定する放射線業務従事者の各組織の一定期間内における線量限度は、

次のとおりとする。

- (1) 眼の水晶体については、 A を始期とする1年間につき B ミリシーベルト
- (2) 皮膚については、 A を始期とする1年間につき C ミリシーベルト
- (3) 妊娠中である女子の D については、前条第4号に規定する期間につき E ミリシーベルト」

	A	В	С	D	Е
1	4月1日	150	500	腹部表面	5
2	1月1日	100	200	腹部表面から1センチメートル深部	2
3	4月1日	100	300	腹部表面から1センチメートル深部	1
4	1月1日	200	500	腹部表面から1センチメートル深部	5
5	4月1日	150	500	腹部表面	2

〔解答〕

5

注) 平成 12年 10月 23日科学技術庁告示第 5号(数量告示)第6条

管 理 測 定 技 術

引1 半導体検出器に関する次のⅠ, Ⅱの文章の に入る最も適切な語句, 記号, 数値又は数式を, そ
れぞれの解答群から1つだけ選べ。
I 半導体を用いた放射線検出器は、種々の放射線のエネルギー測定や放射能測定に広く使用されてい
る極めて重要な検出器の一つである。この検出器に使用される半導体物質では、絶縁物に比べて、そ
のエネルギーバンド構造におけるA一帯の幅が狭く、代表的な半導体物質のシリコンやゲルマニ
ウムでは約 $oxed{B}$ eV である。また,電子 $oxed{C}$ 対の形成に必要な平均エネルギー($arepsilon$ 値)はゲ
ルマニウムで約 D eV である。この結果、同じ放射線が入射しても気体より電荷キャリヤが多
く生成されることから、気体検出器に比べてエネルギー分解能に優れた検出器となる。
純度が極めて高い半導体物質に微量の不純物原子を添加して、電荷キャリヤに寄与する新たなエネ
ルギー準位を与えることができる。この添加した原子がホウ素、 E などの場合、電子の
F として働き、p型半導体となる。また、リン、ヒ素などの場合には、電子の G となり、
n 型半導体となる。この n 型と p 型の半導体を用いて H 構造を形成し, I 方向に電圧を
印加すると、電荷キャリヤが存在しない Jが生じ、この部分に放射線が入射すると電荷が生成
し電離電流を取り出すことができる。
<a∼dの解答群></a∼dの解答群>
1 価電子 2 許容 3 禁止 4 正孔 5 陽電子 6 イオン 7 励起子
8 原子核 9 0.05 10 0.1 11 1 12 2 13 3 14 6 15 30
<e~j の解答群=""></e~j>
1 炭素 2 アルミニウム 3 ケイ素 4 タリウム 5 アクセプタ
6 アクチベータ 7 ドナー 8 クエンチャー 9 ダイオード 10 キャパシタ
11 空乏層 12 不感層 13 双 14 逆 15 順
■ γ線スペクトロメトリに用いられる半導体検出器は、半導体物質の原子番号や密度が高いことに加
え,その有感領域が十分に大きいことが必要である。このため, K型型のゲルマニウムにリチウ
ムを拡散させ有感領域を大きくした検出器や、LLのゲルマニウムを用いた検出器が使用されて
きた。しかし,前者は,リチウムが常温において拡散するため M 温度に常時冷却する必要があ
り、維持管理の観点から近年はほとんど使用されなくなっている。いずれの Ge 検出器においても、
γ 線により生じる電荷の検出に際して $lacksymbol{N}$ が大きく影響するため、測定時には $lacksymbol{M}$ 温度に冷
却する必要がある。
Ge 検出器のエネルギー分解能は,一般的に全吸収ピークの O で与えられる。一方,全吸収
ピークの形状をガウス分布とすると,このピークの <mark>O</mark> は, Pの 2√2ln2 倍で与えられる。
このため,エネルギー $E\left[\mathrm{eV}\right]$ の γ 線に対するエネルギー分解能 $\left[\mathrm{eV}\right]$ は,電荷キャリヤ数の統
計的変動のみに起因すると仮定すると、ゲルマニウムの $arepsilon$ 値を $arepsilon$ [eV]、ファノ因子を F として、

 $2\sqrt{2\ln 2}$ × O と表すことができる。

Ge 検出器の検出効率は,使用されるゲルマニウム結晶の大きさや測定対象 γ 線のエネルギーにより変化する。このため,Ge 検出器の検出性能を比較する指標としては, 60 Co の 1.333 MeV γ 線に対して,直径及び高さがそれぞれ R インチの S シンチレータを用いたシンチレーション検出器の検出効率と比較した相対値で示すのが一般的である。

<K~Pの解答群>

- 1 最大値 2 中央値 3 極大値 4 標準偏差 5 半値幅 (FWHM)
- 6 高純度 7 多結晶 8 酸化物 9 n 10 p 11 熱雑音
- 12 電磁誘導雑音 13 液体ヘリウム 14 液体窒素 15 ドライアイス

<O~S の解答群>

$$1 \quad \sqrt{F \cdot \varepsilon \cdot E} \qquad 2 \quad \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot E}{F}} \qquad 3 \quad \sqrt{\frac{F \cdot E}{\varepsilon}} \qquad 4 \quad F \sqrt{\varepsilon \cdot E} \qquad 5 \quad \operatorname{ZnS}\left(\operatorname{Ag}\right) \qquad 6 \quad \operatorname{CsI}\left(\operatorname{Tl}\right)$$

7 NaI(Tl) 8 BGO 9 1 10 2 11 3 12 4

[解答]

I
$$A - 3$$
 $B - 11$ $C - 4$ $D - 13$ $E - 2$ $F - 5$ $G - 7$ $H - 9$ $I - 14$ $J - 11$

- 注)A:結晶格子の周期性により結晶内の電子がとり得るエネルギー準位は帯状になる。エネルギーバンド構造と呼ばれ、結晶格子の特定位置に束縛されている外殻電子のエネルギー準位に対応する価電子帯と、結晶中を移動する自由電子のエネルギー準位に対応する伝導帯、及びその間のエネルギー準位幅(バンドギャップ)に対応する禁止帯に規定される。
 - B:真性半導体のバンドギャップエネルギーは、300 K でシリコンは 1.115 eV, ゲルマニウムは $0.665 \, \mathrm{eV}_{\circ}$
 - C: 荷電粒子が検出器中を通過する際に半導体にエネルギーを与え、荷電粒子の飛跡に沿って電離 生成された電子(伝導電子)により価電子帯中に正孔を生じる。
 - D: ε 値は 1 対の電子-正孔対を生成する際に消費される 1 次荷電粒子の平均エネルギーで、気体中で 1 イオン対を生成する際に消費されるエネルギー W値の 1/10 程度である。
 - E, F: 半導体中にホウ素, アルミニウム, インジウム, ガリウムなどの3 価の不純物が存在し, 不純物原子が半導体原子の格子中の置換位置を占める場合, 共有結合が形成された後に不足する価電子1個分が空席となり電子を受け取るアクセプタとなる。アクセプタは, 禁止されているエネルギーギャップ内に電子の場所を作る。
 - G:半導体中にリン、ヒ素などの5価の不純物が存在する場合、不純物原子が半導体原子の格子中の置換位置を占める。共有結合が形成された後に残った1個の価電子は、不純物原子にゆるく束縛されており、わずかなエネルギーで伝導電子になる。
 - H, I, J:n型とp型の半導体接合部では、一方の電荷キャリアが他方へ拡散して流れ、電荷キャリアが存在しない領域が生じる。この領域は空乏層と呼ばれ、電位差を逆(逆バイアス)に与えると空乏層が厚くなり、放射線により生成された電荷キャリアを収集する有感領域となる。

II
$$K-10$$
 $L-6$ $M-14$ $N-11$ $O-5$ $P-4$ $Q-1$ $R-11$ $S-7$

注) K:空乏層を厚くするには半導体中の不純物濃度を小さくする必要がある。半導体中の不純物濃度

を反対の型の添加不純物により補償させて正味の不純物濃度を小さくするために、p型のゲルマニウムにリチウムイオンをドナー原子として添加して拡散生成する。Ge(Li)検出器は、拡散したリチウムが再分布を起こすのを防ぐために常時冷却が必要となる。

- L:高純度ゲルマニウムは不純物濃度を 10^{10} 原子/ cm^3 程度以下までに低減して高精製したゲルマニウムで、放射線検出器としては高純度ゲルマニウム (HpGe) 検出器と呼ばれる。
- M, N: ゲルマニウムのバンドギャップエネルギーは約0.7 eV であり、HpGe 検出器は熱で誘起される漏れ電流が大きいため冷却して使用する。冷却の規格温度は77 K であり液体窒素を用いるが、最近では60 K 程度の冷却装置も用いられている。
- O:放射線検出器のエネルギー分解能は、単一エネルギーの γ 線を測定したスペクトルの全吸収ピークの半値幅で定義され、Ge 検出器の場合は 60 Co 点状線源からの 1,333 keV の γ 線を測定して決定する。
- P, Q:単一エネルギーの γ 線に対する測定スペクトルのエネルギー分解能は、検出器内部で生ずる電子—正孔対(電荷キャリア)数の統計的ゆらぎ、電荷収集効率の変動、電子回路の雑音寄与などの要因が総合されたものである。電荷キャリアの数の統計的変動はポアソン分布に従わず標準偏差の $2\sqrt{2\ln 2} = 2.355$ 倍となり、半値幅は $2.355 \times \sqrt{F \cdot \epsilon \cdot E}$ と表せる。
- R, S:一般的に γ 線検出器の検出効率は、検出器の原子番号と密度、有感領域の体積と形状により決まる。Ge 検出器の検出効率は、検出器中心軸上の距離 25 cm に 60 Co 点状線源を配置して測定した 1,333 keV の全吸収ピークに対する検出効率を求め、3 インチの NaI (TI) シンチレーション検出器の検出効率に対する相対効率で表す。

問 2	次のⅠ~Ⅳの文章の	の部分に入る最も適切な語句を,	それぞれの解答群から1	つだけ選べ。
-----	-----------	-----------------	-------------	--------

放射線防護計測に際して、サーベイメータがしばしば用いられる。サーベイメータは、放射性同位元素又は放射線に関する情報を簡便に得ることを目的とした、小型で可搬型の放射線測定器のことを総括的に言う。サーベイメータの使用や購入にあたっては、その測定対象放射線や目的などを良く理解した上で、それに則した機能や性能を持つものを選択することが重要である。

I この種の測定器の使用目的は,二つに大別される。第一は,周辺の場における線量率の測定を目的とするもので,多くの場合,A 率(μ Sv/h)で目盛がつけられているが,B 率(μ Gy/h)で目盛られたものもある。また,スイッチ切換えによりこれらの積算値を知ることができる様にしたものもある。第二は,放射性同位元素による表面汚染の測定を意識したもので,この場合,目盛はC 率(cps,cpm 又は min D)とした場合が多く,窓面を測定対象に D 所 程度近づけた状態で測定を行い,この測定値から,検出器のD ,機器効率,線源効率を用いて,使用者が D を算出する。また,検出器の窓に着脱可能なキャップをつけ,双方の目的を兼ね備えた形式のものもある。なお,中性子の測定については,専用のサーベイメータが必要である。

<A~Eの解答群>

- 1 照射線量 2 空気吸収線量 3 1 cm 線量当量 4 70 μm 線量当量
- 5 実効線量 6 放射能表面密度 7 フルエンス 8 計数 9 窓面積
- 10 窓の厚さ
- Ⅱ サーベイメータは、使われる検出器の種類により分類されることが多い。電離箱式、GM 管式、シンチレーション式が主なものであるが、そのほか、検出器として、比例計数管、Si 半導体検出器な

ども用いられることがある。 電離箱式サーベイメータは、γ線などの光子が主に電離箱の F でコンプトン効果などの相互 作用を起こし、その結果生じた高速電子の一部が電離箱の G を電離させ、その際の電流を読み 出すもので、主に周辺の場の線量(率)の測定に用いられる。感度はそれほど良くないものの、 H 特性が優れている。また、線量率依存性が少なく、加速器からの放射線のように極短時間に 放射線がバースト状に到来する場合にも対応できる。 電離箱は壁材における吸収線量率の測定に基づいているが、壁材がプラスチック(内面に薄い炭素 膜を塗布)のような低原子番号物質で作られている電離箱は、ほぼ I 率を与える。この値から 丁率を直読できる様にするには、この値に光子エネルギーの関数として与えられている換算係 数を乗じて、 J 率に換算した目盛とする必要がある。ICRP による換算係数は、 K から ■ への換算係数を光子エネルギーの関数として与えたものであるが、入射光子のエネルギーが 1.5 MeV 程度以下の場合には, K と I との差違は少ないから, K を I に読 み替えても、実用上は差し支えない。しかしながら、この換算係数は光子エネルギーに依存するの で、光子エネルギーによらず J 率を直読できる様にするには、測定器の I 率に対するレ スポンスを換算係数曲線の形に L 必要がある。この目的のために電離箱壁の材料や中心電極の <F~Lの解答群> 2 空気吸収線量 3 1 cm 線量当量 4 70 μm 線量当量 1 照射線量 5 エネルギーフルエンス 6 空気カーマ 7 実効線量 8 充填気体 9 壁 10 中心電極 11 エネルギー 12 感度 13 線量率 14 適合させる 15 逆比例の関係を持たせる Ⅲ GM 管式サーベイメータで光子を測定する場合,主に計数管の M における光子の相互作用の 結果生じる高速電子による放電パルスを測定している。この放電パルスは波高がほぼ一定で、エネル ギー情報を持たないため、放射線の入射に関する個数情報しか得られない。レスポンスは主に計数管 の M における光子との相互作用確率と発生した電子の飛程によって決定される。 N 率測 定を目的とする場合、その O 特性は、電離箱式サーベイメータの場合と比較するとかなり悪 い。通常、校正は¹³⁷Cs 線源からの 662 keV γ線によって行われるが、これ以外のエネルギー、とく に低エネルギー光子の測定や散乱光子を多く含む場の測定に関しては誤差が大きくなるので、注意が 必要である。また、検出器の P によって指示値も変化する。すなわち、 P 特性はあまり 良くない。さらに、分解時間が長いために、 \bigcirc 特性も悪い。このように、 $X \cdot \gamma$ 線用線量率測定 器として GM 管式サーベイメータは性能に限界があるが、端窓型 GM 管を用いた場合、パルス数は 入射窓から入射した β 線の個数を反映するため、表面汚染の測定には都合が良い。 シンチレーション式サーベイメータは、シンチレータとして NaI(TI) や CsI(TI) が使われるのが一 般的であるが、これらは密度が高く、シンチレータ全体が光子の有感領域となっているので、感度は 良い。シンチレーション計数管の場合も、パルスの計数率の測定が基本であるので、そのまま計数率

を取り入れた製品が多くなった。

を測定する方式では、O 特性は著しく悪い。しかしながら、R は入射光子のエネルギー情報を有するので、これを利用してO 特性を補償することは可能であり、最近はこうした技術

<M~Rの解答群>

1 1	cm 線量当量	2	70 μm 線量当量	3	実効線量	4	計数率	5	パル	ス	幅
-----	---------	---	------------	---	------	---	-----	---	----	---	---

6 パルス波高 7 発光スペクトル 8 エネルギー 9 方向 10 管壁

11 中心電極 12 充填気体

IV α 線源, β 線源の探査や表面汚染の測定を目的とするサーベイメータは,入射窓の面積が広く,かつ入射窓の窓厚が薄いことが望まれる。この目的のために,端窓型 GM 計数管を用いたサーベイメータが主に用いられるが,プラスチックシンチレーション式サーベイメータも用いられる。また, α 線専用の測定には S シンチレーション式サーベイメータがある。また,トリチウム測定の場合のように極端にエネルギーの低い β 線の測定には,薄窓型の T を用いたサーベイメータも開発されている。

<S, Tの解答群>

1 Si 半導体検出器 2 薄い NaI(Tl) 3 CsI(Tl) 4 ZnS(Ag) 5 BGO

6 ガスフロー式計数管 7 パルス電離箱 8 空気比例計数管

[解答]

I A - 3 B - 2 C - 8 D - 9 E - 6

注)A、B:サーベイメータは 2 種類に大別される。空間線量率を測るものの多くは、1 cm 線量当量率 $[\mu Sv/h]$ や、空気吸収線量率 $[\mu Gv/h]$ にて測定をする。

C, D, E:表面汚染を測るものは、計数率 [cpm, min⁻¹] にて測定をし、検出器の窓面積や計数 効率、線源効率を使って放射能表面密度 [Bg/cm²] を算出する。

II F - 9 G - 8 H - 11 I - 2 J - 3 K - 6
L - 14

注)F, G:電離箱式サーベイメータに入射した γ 線は主に壁面との相互作用による2次電子により充填する気体を電離する。

I:市販の電離箱式サーベイメータは壁面がプラスチック等の空気等価物質でできており、壁面との相互作用により空気吸収線量率を求めることができる。

J:法令上は実効線量が導入されているが直接測ることができないため, 1 cm 線量当量を直読し, 評価に用いる必要がある。

K:ICRP Publication 74 により、空気カーマから 1 cm 線量当量への換算係数が与えられている。

注)M: GM 管式サーベイメータについても、入射した γ 線は主に壁面との相互作用による 2 次電子にて充填する気体を電離(放電)する。

N, O, P:GM 管式サーベイメータは, 電離箱式と比べエネルギー特性, 方向特性が悪いため, 校正されたエネルギー以外の核種や方向から空間線量率を測る場合には, 機器の特性グラフを確認する等注意が必要である。

Q:出力パルスが計数可能となる分解時間が他の検出器と比べ長く、高計数になると数え落としが 起こるため、計数率特性も悪い。

R:シンチレーション式サーベイメータは高感度だが、エネルギー特性はよくない。ただし、 γ 線のエネルギー情報はシンチレータの発光量から電気パルスの波高値に変換され伝えられるため、エネルギー特性が補償されているものが市販されている。

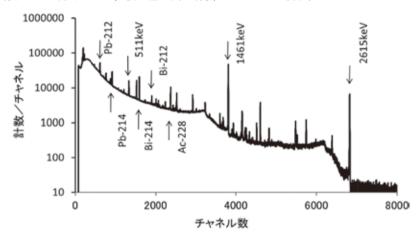
IV S - 4 T - 6

注)S: ZnS(Ag) は α 線に感度を有する代表的なシンチレータである。

T:トリチウムのような低エネルギーの β 線を測る場合には薄窓型で、電子を取り込んで効率を悪くする酸素などの不純物の混入を避けるため、ガスフロー式にした比例計数管の検出器が市販されている。

問3 次の I ~Ⅲの文章の の部分に入る最も適切な語句,記号又は数値を,それぞれの解答群から1 つだけ選べ。

I 鉄筋コンクリート建物の室内において、遮蔽体のない Ge 検出器で長時間測定したときの γ 線スペクトルの例を図に示す。スペクトルはいくつかのピークと、ピーク以外の連続部分からなる。ピーク部分で顕著なものは、壊変系列をつくらない $_{\rm C}$ の 1,461 keV と、 $_{\rm C}$ 232 Th の $_{\rm C}$ 不 の 2,615 keV の $_{\rm C}$ B ピークである。その他にウラン系列の $_{\rm C}$ $_{\rm C}$



<ア, イの解答群>

1 ⁷Be 2 ¹⁰Be 3 ³⁶Cl 4 ⁴⁰K 5 ⁸⁷Rb 6 ²⁰⁶Tl 7 ²⁰⁸Tl 8 ²⁰⁸Pb

9 ²⁰⁸Bi

<A, Bの解答群>

1 消滅核種 2 子孫核種 3 安定核種 4 全吸収 5 サム 6 エスケープ

7 コインシデンス 8 コンプトン

<	<cの解答群></cの解答群>
	1 ²⁰⁷ Tl 2 ²¹⁰ Tl 3 ²¹⁰ Bi 4 ²¹⁰ Po 5 ²¹⁵ Bi
<	〈D~G の解答群>
	1 レイリー散乱線 2 消滅放射線 3 特性 X 線 4 制動放射線
	5 内部転換電子 6 中性子線 7 ベリリウム 8 アルミニウム 9 銅
	10 カドミウム
Π	非密封放射性同位元素の使用施設には、排気設備が設置されている。実験室内の空気中の放射性同
ſ	立元素の付着したダストや,フード内で飛散した放射性同位元素を含む粒子状の物質はプレフィルタ
	 である。放射性ヨウ素を扱う施設では, □ フィルタも装備する。ヨウ素を用いる実験は
_	——— 一方,施設内でアイソトープの取扱いがなくても,空気中のダストを吸引してろ紙に捕集し,その
,	っ ら紙を Ge 検出器で測定するとラドン由来の核種が観測される。ラドンは放射性で,ウラン系列に履
-	トる半減期 ウ 日の J , トリウム系列に属する半減期 エ 秒の K がある。室内
(
	<u></u>
<	- CH, Iの解答群>
	1 アルミナ 2 メンブラン 3 シリカゲル 4 活性炭 5 HEPA
	6 グラスファイバー
<	6 グラスファイバー (ウ, エの解答群>
<	
	(ウ, 工の解答群>
	(ウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6
<	(ウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 <j, kの解答群=""></j,>
· III	くウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 <j, kの解答群=""> 1 ²¹⁰Rn 2 ²¹¹Rn 3 ²²⁰Rn 4 ²²²Rn 5 ²²⁴Rn</j,>
III	くウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 〈J, K の解答群> 1 ²¹⁰ Rn 2 ²¹¹ Rn 3 ²²⁰ Rn 4 ²²² Rn 5 ²²⁴ Rn 10 MBq の ⁶⁰ Co(塩化物)が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず終
III	 Cウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 SJ, Kの解答群> 1 2¹⁰Rn 2 ²¹¹Rn 3 ²²⁰Rn 4 ²²²Rn 5 ²²⁴Rn 10 MBqの ⁶⁰Co(塩化物)が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし、バイアルの遮蔽効果は無視すると、1 cm 線量
Ⅲ 注 注	 Cウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 CJ, Kの解答群> 1 2¹⁰Rn 2 ²¹¹Rn 3 ²²⁰Rn 4 ²²²Rn 5 ²²⁴Rn 10 MBq の ⁶⁰Co (塩化物) が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし、バイアルの遮蔽効果は無視すると、1 cm 線量 当量率は、
III 注 注	 Cウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 K の解答群> 1 2¹⁰Rn 2 2¹¹Rn 3 2²⁰Rn 4 2²²Rn 5 2²⁴Rn 10 MBq の 60Co (塩化物) が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし、バイアルの遮蔽効果は無視すると、1 cm 線量率は、 μSv·h⁻¹となる。線源と実験者の距離を変えずに、線量率を 1/10 にするために線源の入ったガラスバイアルを鉛で遮蔽するには、その厚さはおおよそ M cm が必要である。
III 注 注	Cウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 CJ, Kの解答群> 1 1 2 10 Rn 2 2 11 Rn 3 2 2 0 Rn 4 2 2 2 2 Rn 5 2 2 4 Rn 10 MBqの 6 0 Co (塩化物) が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし、バイアルの遮蔽効果は無視すると、1 cm 線量率は、 L μSv·h 2 となる。線源と実験者の距離を変えずに、線量率を 1/10 にするために線源の入ったガラスバイアルを鉛で遮蔽するには、その厚さはおおよそ M cm が必要であるにだし、6 0 Co の 1 cm 線量当量率定数は 0.35 μSv·m 2 MBq 1 · h 1, 6 0 Co の γ線に対する鉛の半価層に
III 注 并 7	 Cウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 CJ, Kの解答群> 1 2¹⁰Rn 2 ²¹¹Rn 3 ²²⁰Rn 4 ²²²Rn 5 ²²⁴Rn 10 MBq の ⁶⁰Co (塩化物) が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし、バイアルの遮蔽効果は無視すると、1 cm 線量当量率は、
III 注 并 力	 Cウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 CJ, K の解答群> 1 2¹⁰Rn 2 2¹¹Rn 3 2²⁰Rn 4 2²²²Rn 5 2²⁴Rn 10 MBq の 60Co (塩化物) が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし、バイアルの遮蔽効果は無視すると、1 cm 線量当量率は、 L μSv·h⁻¹となる。線源と実験者の距離を変えずに、線量率を 1/10 にするためは線源の入ったガラスバイアルを鉛で遮蔽するには、その厚さはおおよそ M cm が必要であるこだし、60Co の 1 cm 線量当量率定数は 0.35 μSv·m²·MBq⁻¹·h⁻¹、60Co の γ線に対する鉛の半価層に5 cm とし、ビルドアップ効果は考慮しない。 実験終了後、実験室の汚染検査と除染方法を、汚染核種、場所、及び汚染の形態などに応じて適り
III 注 并 7	C ウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 CJ, K の解答群> 1 2 ¹⁰ Rn 2 2 ¹¹ Rn 3 2 ²⁰ Rn 4 2 ²²² Rn 5 2 ²⁴ Rn 10 MBq の ⁶⁰ Co(塩化物)が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず終原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし,バイアルの遮蔽効果は無視すると,1 cm 線量量率は, L μSv·h ⁻¹ となる。線源と実験者の距離を変えずに,線量率を 1/10 にするために線源の入ったガラスバイアルを鉛で遮蔽するには,その厚さはおおよそ M cm が必要であるこだし, ⁶⁰ Co の 1 cm 線量当量率定数は 0.35 μSv·m²·MBq ⁻¹ ·h ⁻¹ , ⁶⁰ Co の γ線に対する鉛の半価層に5 cm とし,ビルドアップ効果は考慮しない。 実験終了後,実験室の汚染検査と除染方法を,汚染核種,場所,及び汚染の形態などに応じて適切に選択する。まず,ガラスバイアルの外側に汚染のないことを N 法などの間接法で確認した
III 注	C ウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 KJ, K の解答群> 1 2 ¹⁰ Rn 2 2 ¹¹ Rn 3 2 ²⁰ Rn 4 2 ²²² Rn 5 2 ²⁴ Rn 10 MBq の ⁶⁰ Co(塩化物)が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし,バイアルの遮蔽効果は無視すると,1 cm 線量 当量率は, L μSv·h ⁻¹ となる。線源と実験者の距離を変えずに,線量率を 1/10 にするために線源の入ったガラスバイアルを鉛で遮蔽するには,その厚さはおおよそ M cm が必要であるこだし, ⁶⁰ Co の 1 cm 線量当量率定数は 0.35 μSv·m ² ·MBq ⁻¹ ·h ⁻¹ , ⁶⁰ Co の γ線に対する鉛の半価層に5 cm とし,ビルドアップ効果は考慮しない。 実験終了後,実験室の汚染検査と除染方法を,汚染核種,場所,及び汚染の形態などに応じて適切に選択する。まず,ガラスバイアルの外側に汚染のないことを N 法などの間接法で確認した後,線源を貯蔵庫に収納する。次に,実験テーブルや床面全体の表面汚染を GM 管式サーベイメー
III 注 注	C ウ, エの解答群> 1 1.8 2 2.4 3 3.8 4 14.6 5 55.6 (J, K の解答群> 1 2 ¹⁰ Rn 2 2 ¹¹ Rn 3 2 ²⁰ Rn 4 2 ²² Rn 5 2 ²⁴ Rn 10 MBq の 6 ⁰ Co (塩化物) が水溶液としてガラスバイアルに入っている。実験者は遮蔽を行わず線原から 50 cm の距離で実験をした。点線源とみなし,バイアルの遮蔽効果は無視すると,1 cm 線量 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

<Lの解答群>

1 7 2 14 3 18 4 24 5 30

<Mの解答群>

1 0.5 2 1.0 3 2.5 4 5.0 5 8.7

<N. Oの解答群>

1 直接 2 スミア 3 絶対 4 接触

<Pの解答群>

シリコングリース
 クロロホルム
 ヘキサン
 4 EDTAナトリウム塩水溶液

[解答]

I
$$7 - 4$$
 $7 - 7$
A - 2 B - 4 C - 3 D - 3 E - 10 F - 9
G - 4

- 注)ア、イ:図のピークは、主に土、岩石、建築資材に含まれる自然放射線に起因する。これらのうちで特に顕著なのは、半減期約 13 億年の 40 K からの 1,461 keV γ 線と、 208 Tl からの 2,615 keV γ 線である(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。
 - B:核種を同定する場合、 γ 線の全エネルギー損失(光電効果)により生じる全吸収ピークに着目する。また、 γ 線の全エネルギーが、1,022~keV以上の場合、([全吸収ピーク]-511~keV)と([全吸収ピーク]-1,022~keV)の位置に電子対生成による消滅放射線の逃避に伴うシングルエスケープピークとダブルエスケープピークが観測されている。
 - C: 210 Pb からの β 線 16.6 keV に対し、 210 Bi からの β 線は 1,162 keV と大きなエネルギーを持つ(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。
 - D:特性 X線の発生防止策として原子番号の低い遮蔽体を用いる。
 - E, F:検出器を遮蔽体に納めてバックグラウンド係数を下げるためには, 厚さ 10 cm 程度の鉛で 覆うだけでも効果はあるが, 内側に 1 mm 程度のカドミウム, あるいは, その内側にさらに 1 mm 程度の銅で覆うのが良いとされている。

鉛に含まれる自然放射能や測定資料からの γ 線によって発生する鉛の特性 X線(80 keV)は、1 mm のカドミウムによって遮蔽され、カドミウムの特性 X線(23 keV)は、銅により遮蔽される。銅だけで覆う場合は、 $5 \text{ mm} \sim 1 \text{ cm}$ の厚さが必要となる。

- G:大きなエネルギーの β 線が、大きい原子核との相互作用で急激に減速されると制動放射線が発生するため、遮蔽体は原子番号が低くなければならない。
- Ⅱ H-5 I-4 ウ-3 エ-5 J-4 K-3
- 注) ${\bf H}$:高性能エアフィルタのことで, ${\bf HEPA}$ は,high efficiency particulate air の略である。

現在,一般に用いられている HEPA フィルタは,定格処理風量 $28\,\mathrm{m}^3/\mathrm{min}$, $0.3\,\mu\mathrm{m}$ の粉塵に対するろ過効率 99.99%以上である。ただし,放射線取扱事業所が許可を受ける際,排気口においてフィルタを用いるときの申請時の計算に用いる透過率は,気体の場合(ヨウ素を含む),100%,液体・固体の場合は,1%である*。

- I:同様に,活性炭フィルタ(チャコールフィルタ)に関するヨウ素の透過率は、厚さ 5 cm では 10%、厚さ 2.5 cm では 20%で計算する * 。
 - ※) 平成 12年 10月 23日科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知
- J, K: 自然放射線の源は、宇宙線、大地からの放射線、体内の放射能及びラドンガスである。自 然放射線による被ばくの世界の平均は、年間約2.4 mSv で、宇宙線や大地からの放射線による

体外被ばく、空気中のラドン及び体内に取り込まれたカリウム等の放射性核種の内部被ばくによる。壊変系列を作る天然の放射性核種として、トリウム系列、ウラン系列の代表的なものを記憶しておくことが大切である(参考図書:アイソトープ手帳 11版(日本アイソトープ協会))。

注) L: 60 Co の 1 cm 線量当量率定数は $0.35~\mu$ Sv· m^2 ·MBq $^{-1}$ · h^{-1} , 実験者の位置での 1 cm 線量当量率定数は,数量に比例し,距離の 2 乗に反比例するので,

0.35 [
$$\mu$$
Sv·m²·MBq⁻¹·h⁻¹]×(10 [MBq]/0.5² [m²])=14 [μ Sv·h⁻¹] となる。

計算問題は単位を合わせるようにして解くと簡単である。

 $M: {}^{60}Co$ の γ 線に対する鉛の半価層は 1.5 cm なので、鉛の厚さを整数倍すると、次のように線量率が減少する。

1.5×2=3 cm の時
$$\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$$
, 1.5×3=4.5 cm の時 $\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$, 1.5×4=6 cm の時 $\left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{1}{16}$ となる。

1/10 の線量率は、 $4.5 \text{ cm} \sim 6.0 \text{ cm}$ の間の厚さの鉛で遮蔽したときに得られるので、解答は 5.0 cm となる。

P: EDTA ナトリウム水溶液は、キレート剤であり、金属イオンとキレート錯体を形成する。 特に、カルシウム、銅、鉄(3 価)、コバルト(3 価)とは強く結合する。 微生物には分解できないため、ヨーロッパでは使用が規制されている。

- 間 4 次の $I \sim IV$ の文章の の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。
 - I 非密封放射性同位元素の使用施設では、放射性同位元素、使用者の被ばく状況及び使用施設の管理 を適正に行う必要がある。

放射性同位元素については、その数量だけではなく、化学形や純度にも注目する必要がある。例えば、有機標識化合物は、購入後、長期間経過すると、核種純度は変わらなくても A で化学的な不純物を含むことがある。この不純物が揮発性の場合には、室内空気の汚染の可能性を増大させることになる。

通常の有機化合物では化学的純度は融点や沸点を測定することで求められる。しかし、微量の標識化合物では、融点や沸点の測定が困難なため、Bが一定になるまで精製を繰り返す方法がとられる。放射化学的純度は、Cにより、比放射能測定から放射性化合物を定量することで求めることも可能である。なお、化学形とは関係がなく、着目する放射性核種の放射能が、その物質の全放射能に占める割合をDという。

有機標識化合物については、保管方法に注意することで、不純物の生成を抑制することができる。放射線化学反応の初期過程で生成するラジカルを捕えて反応に関与しないようにするためのスカベンジャーの添加が有効である。水溶液については E などが用いられる。低温で保管するのは化学純度を維持する上で有効であり、トリチウム化合物の水溶液では約 F ℃で保管する。

<A. Bの解答群>

- 1 核反応 2 自己放射線分解 3 ホットアトムとの反応 4 比放射能
- 5 昇華点 6 重量

<C. Dの解答群>

- 1 放射滴定法 2 同位体希釈分析法 3 質量分析法 4 同位体純度
- 5 同位体存在度 6 放射性核種純度

< E. Fの解答群>

- 1 ベンゼン 2 エタノール 3 重水 4 -196 5 -80 6 2

内部被ばくの防止には,放射性同位元素の物質としての化学的性質の把握は重要である。例えば,元素の酸化状態は化学的性質を特徴づける要因の一つである。取り扱っている放射性同位元素の酸化状態に注意することで,実験系でのふるまいを適切に予測することができる。遷移金属元素などは多様な酸化還元状態をとる場合があるので,実験系での酸化状態の変化の可能性には注意する。例えば,放射性クロムについてみると,水溶液中で,クロム(\square) は陽イオンとして存在するが, \square はクロム酸イオン(\square などの陰イオンとなり,化学的挙動は全く異なる。モリブデンはクロムの同族元素で, \square などの陰イオンとなり,化学的挙動は全く異なる。モリブデンはクロムの同族元素で, \square などの陰イオンとなり,化学的挙動は全く異なる。 \square 族元素の放射性テクネチウムでは, \square は水溶液中では酸素原子と結合して安定な陰イオン(\square な場合に生成するテクネチウム(\square) は加水分解しやすく,化学的挙動は異なる。

放射性の揮発性物質は内部被ばくの可能性が高くなるため、体内への取込みについて格別の注意が必要である。 $\boxed{\mathbf{M}}$ は揮発性の指標であり、これが高い物質については揮発性に特に注意する必要がある。

<G~Jの解答群>

- $1^{3}H$ $2^{14}C$ $3^{32}P$ 4 黒い紙 5 不透明なプラスチック 6 鉛
- 7 0 0 = 0 8 0 0 = 0 9 0 0 = 0 10 0 0 = 0 11 1 12 2
- 13 7 14 18

<K~Mの解答群>

- 1 テクネチウム(VI) 2 テクネチウム(VI) 3 テクネチウム(VII) 4 還元的
- 5 ほぼ中間的 6 酸化的 7 沸点 8 キュリー点 9 蒸気圧 10 昇華点 場所の管理では、空間線量率、空気中濃度及び汚染密度の測定が重要である。電離箱や GM 測定器が用いられるが、これらは放射線による N に基づく計測法である。放射線による発光を計測に利用する NaI(TI)シンチレーション測定器や液体シンチレーション測定装置も用いられる。この他、放射線による固体の電離を利用した検出器である O や放射線により誘発される化学反応を利用した化学線量計なども利用される。対象とする放射性同位元素からの放射線の線質、強度、測定目的に応じて、測定手法を選択する。

管理区域からの排気や排水も重要な管理対象である。複数の核種が使用されている場合には,各核種についての放射能濃度を求めて排気,排水の方法を立案する。例えば,貯留槽中の 3 H と 32 P を含む廃水 1 m³ の排水計画を立案する。告示別表第 2 第 6 欄に定める 3 H (化学形が水の場合) の濃度限度は 6×10 1 Bq/cm³, 32 P (化学形が Sn のリン酸塩以外の場合) の濃度限度は 3×10 $^{-1}$ Bq/cm³ である。まず,化学形を考慮して適用される値を確認する。 3 H 及び 32 P の化学形がそれぞれ水及びリン酸ナトリウムであるとする。例えば, 3 H と 32 P の放射能濃度がそれぞれ 30,000 Bq·L $^{-1}$, 450 Bq·L $^{-1}$ の廃水 1 m³ を直ちに排水するには,少なくとも \boxed{P} m³ の水で希釈する必要がある。同様のケースで, 3 H の放射能濃度が 60,000 Bq·L $^{-1}$ で 32 P の放射能濃度が 540 Bq·L $^{-1}$ の場合,1 m³ の水で希釈して排水するには,少なくともおおよそ \boxed{Q} 待つ必要がある。このように,排気中や排水中の放射能濃度や化学形は排気,排水のプランニングにも深く関係している。

<N~Oの解答群>

- 1 気体の電離 2 溶液の電離 3 固体の電離 4 ZnS(Ag)検出器
- 5 Ge 検出器 6 固体飛跡検出器 7 0.25 8 0.50 9 0.75 10 1.00
- 11 1.25 12 2日間 13 1週間 14 2週間 15 1月間
- IV 日常の放射線管理に加えて、火災などの緊急時に備えた予防措置を講じる必要がある。緊急措置にあっては、安全の保持、 R 、 汚染拡大の防止の三原則に従う。人命救助がすべてに優先する。火災の場合には、遮蔽によく用いられる鉛の融点が S ℃であることから、溶けて遮蔽の有効性が失われ、周辺の汚染や放射線被ばく量の増加を招く可能性がある。

万一, 汚染した空気を吸入したおそれのある場合には、内部被ばく線量を算定する必要がある。対象とする放射性同位元素がすべて飛散して、ある体積の空間に均一に拡散したとして、その濃度を算出するのも一つの方法である。これに T をかけて吸入したおそれのある放射性同位元素の総量として、内部被ばく線量を推定することができる。

<R~Tの解答群>

- 1 損壊の防止 2 原因の調査 3 通報 4 92 5 328 6 836
- 7 空気の吸入量 8 換気量 9 吸入した人数の逆数

[解答]

- 注) A:放射性核種の壊変により化学結合が変化したり、壊変で放出された放射線のエネルギーにより 分子が分解することを「自己放射線分解(一次分解)|という。
 - C:同位体希釈分析は、化学的性質がよく似た物質の混合物中における特定物質を定量するときに 用いられる。また、(放射化学純度)={(着目する放射性核種の特定の化学形での放射能)/(そ の放射性核種の全放射能)}×100 [%]
 - E: エタノールは室温でラジカルを捕捉するので、エタノール溶液を少量添加すると自己分解が防止される。
 - F: 一般に有機化合物は低温の方が安定である。しかし、トリチウム化合物など β 線のエネルギーが低い場合、凍結保存では逆に放射線分解が促進されてしまう。なお、標識化合物の保管には次のことに気をつける。
 - 1) 放射能濃度, 比放射能を低くする。
 - 2) 放射線による相互の影響を避けるため少量ずつ分ける。

- 3) 希釈には放射線分解が起こりにくい溶媒を用いる(ベンゼン.トルエンなど)。
- 4) 不純物の影響を受けやすいので、純粋な状態で保管する。
- $II \quad G 3$

H - 6 I - 9 J - 13 K - 3

M - 9

- 注) $G: ^{32}P$ では遮蔽体としてアクリル板がよく用いられる。 ^{32}P の β 線(1.71 MeV)の最大飛程(R:g/cm²) は、R=0.5E [MeV] と近似できるので、アクリルの密度 (1.18 g/cm³) から、遮蔽に 必要なアクリル板の厚さは約0.73 cm となる。よって、飛程より少し厚い 1 cm のアクリル板 が用いられる。
 - H:高エネルギーの β 線放出核種を大量に扱う場合、まずアクリル板等の低原子番号の物質で β 線 を遮蔽し、さらに外側を鉛等の高原子番号の物質で覆い、制動放射線を遮蔽する。
 - I:クロム、モリブデンは6族元素。

例えば、K₂CrO₄ (クロム酸カリウム) に熱中性子を照射すると、⁵⁰Cr(n, γ)⁵¹Cr で ⁵¹Cr が生成

このとき、⁵¹Cr の EC (軌道電子捕獲) 壊変による反跳により、K₂CrO₄ から ⁵¹Cr³⁺ が離脱する が、 51 Cr $^{3+}$ は陰イオン交換樹脂から溶離するので、 CrO_4^{2-} と分離できる。

- $L: frac{1}{frac{1}$
- M:ちなみに、「キュリー点」は強磁性体が常磁性体に変化する転移温度。「昇華点」は物質が固体 から気体, または気体から固体に変わる温度。
- O 5 P 10O -14
- 注) N:気体の電離に基づく放射線検出器は他に、比例計数管などがある。
 - O:固体の電離を利用した放射線検出器は他に、表面障壁型半導体検出器(SSD)、リチウムドリ フト型 Si 検出器 (Si(Li)) などがある。
 - P: ³Hと ³²Pの放射能濃度は、それぞれ

 $3 \times 10^{1} [Bq/cm^{3}], 4.5 \times 10^{-1} [Bq/cm^{3}]$

排出可能となるには、それぞれの核種の濃度限度との比の和が1以下でなければならない。よ って、少なくとも X 倍に希釈するとすれば、

 $\{(3\times10^{1})/X\}/(6\times10^{1}) + \{(4.5\times10^{-1})/X\}/(3\times10^{-1}) = 1$

これを解くと、X=2[倍]となる。

もとの廃水は1m3なので、少なくとも、あと1m3の水で2倍の2m3に希釈する必要がある。

O:もとの廃水 1 m³ に、1 m³ の水で希釈するので、各核種の放射能濃度はもとの半分になる。し たがって、3H、32Pの放射能濃度は、それぞれ

 $3 \times 10^{1} [Ba/cm^{3}], 2.7 \times 10^{-1} [Ba/cm^{3}]$

各核種の濃度限度に対する比の和は,

 $(3\times10^{1})/(6\times10^{1})+(2.7\times10^{-1})/(3\times10^{-1})=0.5+0.9=1.4$

1を超えるので、このままでは排水不可。

³²P の半減期は14.263「日」なので、2週間待てば³²P の放射能濃度はほぼ半分になる。濃度限 度の比の和は,

0.5 + 0.45 = 0.95 < 1

したがって、およそ2週間待てば排水可能となる。

IV $\boxed{R} - 3$ $\boxed{S} - 5$ $\boxed{T} - 7$
注) T : この場合における個々の放射性同位元素の摂取量 [Bq] は、次式で求められる。
摂取量 $[Bq]$ = (単位時間当たりの吸入量:大人の平均で $1.2 \times 10^6 [cm^3/h]$)
×(各放射性同位元素の空気中濃度 [Bq/cm³])×(滞在時間 [h])
こうして求めた摂取量 [Bq] に,各放射性同位元素の実効線量係数 [Sv/Bq] を掛ければ,そ
の放射性同位元素における内部被ばく線量「Sv]を推定できる。
間 5 次の I 、 II の文章の の部分に入る最も適切な語句又は数値を、それぞれの解答群から 1 つだけ
選べ。
I 放射線を取り扱う施設においては、放射線業務従事者と一般公衆の放射線防護を目的とし、放射線
モニタリングを行う。放射線モニタリングは,放射性同位元素を取り扱う施設内の A モニタリ
ングと放射線業務従事者自身の被ばく管理を行う個人モニタリング,そして一般公衆の防護のための
B モニタリングの3つに大別される。
公共の安全を確保することを目的に制定された放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する
法律では、管理区域の設定基準として、 C の線量、放射性同位元素の D 、物の表面の放
射性同位元素の密度等について規定している。
<a, bの解答群=""></a,>
1 作業環境 2 施設周辺環境 3 緊急時 4 ダスト 5 特殊
<c, dの解答群=""></c,>
1 外部放射線 2 自然放射線 3 宇宙放射線 4 空気中濃度 5 排水中濃度
Ⅱ 個人モニタリングでは、放射線障害を防止するとともに放射線防護の最適化を目的とし、放射線業
務従事者の外部被ばく、内部被ばく、表面汚染について測定・評価が行われる。
外部被ばくのモニタリングには、主に個人被ばく線量計やサーベイメータなどの放射線測定装置が
用いられる。個人被ばく線量計には様々なものがある。 E F G はいずれも、
線量を求める際に発光量を測定するが、
G では加熱処理を施す。 H は半導体検出器を使用した線量計で、被ばく線量が直読可能
であることなどから利用が広がっている。
管理区域に立ち入る放射線業務従事者は、入域中の外部被ばく線量測定のために個人被ばく線量計
を着用 I 。放射線業務従事者の場合、装着した線量計により定期的に線量を評価し、実効線量
を有用 <u>1</u> 」。放射線来療促事者の場合,表有した線重計により定期的に線重を計画し、美効線重限度及び等価線量限度に照らした個人管理がなされるが、この場合、自然放射線による外部被ばくの
寄与は「J」評価する。
高放射能の放射性標識化合物を直接取り扱う作業では、放射性標識化合物と作業者の間に遮蔽衝立
を置くことにより体幹部への外部被ばくを低減できるものの、手指は体幹部よりも多く被ばくする可能ははない。
能性がある。このような場合、リングバッジを用いることで手指の被ばく線量を評価できる。リング
バッジで測定される線量はKのLであり、Mという実用量として評価される。そ
して, K の L 限度である年間 N mSv を超えないように被ばく管理を行う。
内部被ばくモニタリングには、体外計測法やバイオアッセイ法などがある。体外計測法ではホール
ボディカウンタがよく利用される。ホールボディカウンタは、ヒトの体内に沈着した放射性物質から
放出される O を体外で計測する装置で, O の検出には,検出感度の高い P 検出器

や Q 検出器,又はエネルギー分解能の高い R 検出器が用いられる。 Q 検出器は,
汚染核種が想定されるなど核種同定の必要がない内部被ばくモニタリングに用いられる。核種分析が
必要な内部被ばくモニタリングでは P 検出器又は R 検出器が用いられる。
ホールボディカウンタでは, 54Mn, 60Co などの放射化生成核種や 131I, 137Cs などの核分裂生成核種
を主な測定対象とするので、その測定エネルギー範囲は概ねSである。ホールボディカウンタ
の維持管理においては測定エネルギー範囲に応じた適切な核種を複数種類用いて校正が行われる。
なお、管理区域を退出する際には、 T で表面汚染の有無を確認する。
<e~h の解答群=""></e~h>
1 蛍光ガラス線量計 2 OSL線量計 3 熱ルミネセンス線量計 4 電子式線量計
5 固体飛跡検出器 6 フィルムバッジ
<iの解答群></iの解答群>
1 しなければならない 2 しなくてもよい
<j の解答群=""></j>
1 含めて 2 含めないで
< K の解答群>
1 骨髄 2 皮膚 3 眼の水晶体 4 腹部表面 5 肺
<l, m="" の解答群=""></l,>
1 吸収線量 2 実効線量 3 等価線量 4 1センチメートル線量当量
5 70 マイクロメートル線量当量
< N の解答群>
1 20 2 100 3 150 4 500
< O の解答群>
1 α 線 2 β 線 3 γ 線
<p~r の解答群=""></p~r>
1 NaI (Tl) シンチレーション 2 ZnS (Ag) シンチレーション 3 Ge 半導体
4 プラスチックシンチレーション 5 光ルミネセンス
<s< b="">の解答群></s<>
1 $2 \text{ keV} \sim 100 \text{ keV}$ 2 $100 \text{ keV} \sim 2 \text{ MeV}$ 3 $2 \text{ MeV} \sim 100 \text{ MeV}$
<t の解答群=""></t>
1 イメージングプレート 2 ダストモニタ 3 肺モニタ
4 ハンドフットクロスモニタ
I $A-1$ $B-2$ $C-1$ $D-4$
注)A~D:管理区域の設定基準として、放射線障害防止法施行規則第1条第1号、及び平成12年10
月23日科学技術庁告示(数量告示)第4条に規定されている。管理区域設定には、外部放射
線に係る線量、放射性同位元素の空気中濃度、物の表面の放射性同位元素の密度が示されてい
る。なお管理区域設定には、放射性同位元素の排水中濃度は規定されていないことに注意が必
要である。
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

〔解答〕

K - 2	L - 3	M - 5	N - 4	O – 3	P - 1
0-4	R - 3	$\lceil S \rceil - 2$	T - 4		

- 注)E~G:個人被ばく線量計は、直読式である半導体検出器と読み取り機器を必要とするその他の方式のものに分けられる。蛍光ガラス線量計、OSL(光刺激ルミネセンス)線量計、及び熱ルミネセンス線量計は放射線によって励起されたエネルギーを、それぞれ紫外線、可視光線、及び加熱処理して発光させ、発光量で放射線を測定する。
 - $I\sim J$:個人被ばく管理は、安全な作業環境を維持すること、及び当該作業環境での各個人の被ばくが限度値を超えていないことを確認するために行う。そのため、個人被ばく管理に自然放射線は含めない。
 - K~N:等価線量は, 臓器・組織の平均吸収線量に, 放射線の種類(放射線加重係数)を乗じた評価値である。一方で, 実効線量は, 等価線量にさらに組織・臓器の重み付け(組織加重係数)をした評価値である。外部被ばくについて, 等価線量は皮膚では 70 μm線量当量, 眼の水晶体では 1 cm線量当量または 70 μm線量当量のうち妥当なもの, 妊娠中女性の腹部表面では 1 cm線量当量が実用量として使用される。
 - O~R:NaI(TI) などの無機シンチレータは、発光減衰が長いため計数効率は悪いがエネルギー測定ができる(つまり、核種同定が可能)。一方、プラスチックなどの有機シンチレータは、高い計数率を有するが、エネルギー測定はできない。
 - $S\sim T$:ホールボディカウンタには上記の NaI(TI)シンチレーション検出器やプラスチックシンチレーション検出器などが使用されているので、これらの検出器のエネルギー特性を知っていれば、100 keV ~ 2 MeV と分かる。

問6 次のI~Ⅲの文章の の部分に入る最も適切な語句,記号,数値又は数式を,それぞれの解答群から1つだけ選べ。

I 放射性物質が体内に取り込まれる経路には、吸入、経口、経皮の三つがある。吸入摂取は、気体状や粒子状の放射性物質を呼吸によって吸い込むことによる。経口摂取は、主に放射性核種を含む飲食物を摂取することにより体内に取り込むことによる。健康な皮膚にはバリア能があるため、皮膚からの体内への取り込みにおいて実際上で最も注意すべきは、A からの取込みである。内部被ばくの場合、透過力が低い α 線や β 線のみを放出する放射性物質にも注意する必要がある。

放射性物質の放射能は、それぞれの核種で物理的に決まっている物理的半減期 (T_1) で減少していく。内部被ばくを考える場合は、体内に取り込まれた放射性物質の物理的半減期だけではなく、その物質が体内にどの程度の時間とどまっているかも重要な因子となる。体内に取り込まれた放射性物質は排泄などで体外へ排出されるが、体内の物質量が半分になるまでの時間を生物学的半減期 (T_2) という。そして、取り込まれた放射性物質による内部被ばくの評価には、物理的半減期と生物学的半減期から式 B を用いて計算される有効半減期 (T) を用いる。

例えば、¹³⁷Cs の場合、物理的半減期は約 C であるが生物学的半減期は約 100 日であるので、有効半減期は約 D となる。このように、物理的半減期が長い核種による内部被ばくでは、有効半減期への生物学的半減期の影響が E 。

<A の解答群>

1 毛囊 2 汗腺 3 創傷 4 皮脂腺 5 爪

<Bの解答群>

1
$$T = T_1 + T_2$$
 2 $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ 3 $T = \sqrt{T_1 \cdot T_2}$ 4 $T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$ 5 $T = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}$

<C. Dの解答群>

- 1 8日 2 14日 3 30日 4 100日 5 5年 6 12年 7 30年
- 8 5.700年

<Eの解答群>

- 1 ない 2 小さい 3 大きい
- Ⅱ 被ばくによる確率的影響のリスクを考える上では、まず正しい被ばく線量を知る必要がある。放射 線管理の立場からは、放射線の線質や被ばくする部位にかかわらず、統一的な尺度で被ばく線量を議 論できると便利である。

放射線の被ばくを考える場合の物理的な線量として単位質量当たりに吸収されたエネルギーを表す F(D) がある。同じ F でも,放射線の線質によって人体に与える生物影響は異なる。そこで、それを補正した G(H) が次のように定義されている。

$$H = W_R \cdot D$$

ここで、 w_R は H と呼ばれるもので、放射線 R の線質によって値が異なる。ICRP 2007 年勧告では、 α 線の H は r である。一般に、何種類かの放射線に被ばくする場合に、ある臓器・組織 T における放射線の線質による違いを補正した線量 H_T は次式で表される。

$$H_{\mathrm{T}} = \sum_{\mathrm{R}} w_{\mathrm{R}} \cdot D_{\mathrm{T,R}}$$

ここで、 D_{T} は臓器・組織 T における放射線 R による F である。

放射線による発がんのような確率的影響を評価する場合,同じ G の被ばくでも,被ばくする臓器・組織の違いによって確率的影響は異なる。そこで,このような臓器・組織ごとの確率的影響を考慮した個人の確率的影響を評価するための線量として, I E が次のように定義されている。

$$E = \sum_{\mathbf{T}} w_{\mathbf{T}} \cdot H_{\mathbf{T}}$$

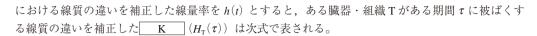
ここで、 w_T は $_{\bf J}$ と呼ばれるもので、臓器・組織ごとに定められている。 w_T のすべての臓器・組織にわたる総和は $_{\bf J}$ になる。

<F~Jの解答群>

- 1 照射線量 2 実効線量 3 吸収線量 4 等価線量 5 預託実効線量
- 6 預託等価線量 7 質量吸収係数 8 線吸収係数 9 放射線加重係数
- 10 組織加重係数 11 実効線量係数

<ア、イの解答群>

- 1 1 2 2 3 5 4 10 5 20 6 100
- Ⅲ 内部被ばくの線量評価は次のように行われる。体内に取り込まれた放射性物質の放射能は、有効半減期によって減少していく。取り込まれた放射性物質の代謝や排泄の速度は決まっていると考えると、放射性物質を取り込んだ時点で、その後の被ばく線量(摂取後の線量率の時間積分値)は決まってしまうと考えられる。ある核種について、摂取時刻を0とした時刻tにおける、ある臓器・組織T



$$H_{\mathrm{T}}(\tau) = \int_{0}^{\tau} h(t) \,\mathrm{d}t$$

 τ は,成人では ウ 年であるが,子供では摂取時から エ 歳までの年数である。この積分した線量を,摂取時に一度に被ばくしたと考えるのが K である。 $H_T(\tau)$ の単位は オ である。上記 $H_T(\tau)$ に,臓器・組織ごとに定められている定数 w_T を乗じて,すべての組織について総和を求めたものが、 L であり,内部被ばくの確率的影響のリスク評価に用いられる。

内部被ばくの評価のためには,摂取した放射性核種の放射能 [Bq] を測定あるいは計算によって求め,それに M を乗ずることにより L を求めることが行われる。放射性核種に汚染された飲食物の摂取による内部被ばくの評価においても,摂取された放射性核種の放射能を知る必要がある。例えば, 137 Cs で汚染された放射能濃度が 50 Bq·kg $^{-1}$ の肉を,成人が 1 日 100 g ずつ毎日食べ続けたことを想定しよう。このときの経口摂取量は 1 日当たり 5 Bq であり, M である 1.3×10^{-5} mSv·Bq $^{-1}$ の値を用いると,この放射能濃度の肉 100 g を 1 年間毎日食べ続けたときの L は D mSv になる。

<K~Mの解答群>

- 1 照射線量 2 吸収線量 3 預託実効線量 4 預託等価線量 5 質量吸収係数
- 6 線吸収係数 7 放射線加重係数 8 組織加重係数 9 実効線量係数

<ウ~カの解答群>

1 10 2 30 3 50 4 70 5 80 6 90 7 Bq 8 Sv 9 Gy

10 1.3×10^{-4} 11 6.5×10^{-4} 12 6.5×10^{-3} 13 2.4×10^{-2} 14 4.7×10^{-2}

 $15 \quad 2.4 \times 10^{-1}$

[解答]

I A - 3 B - 5 C - 7 D - 4 E - 3

- 注) A:皮膚に傷があると、放射性物質が血液などの体液に吸収されやすく、体内に侵入しやすくなる。放射性物質が傷に付着した場合は、できるだけ早くに除染操作を開始する必要がある。
 - B: 放射性核種の物理的壊変は指数関数的に表される。また体内から排泄される物質の速さもほぼ 指数関数的であることが知られている。このことから、体内から除かれる放射性物質の速さは 実効壊変定数 (λ_c) で表すことができる。

 $λ_e = λ_1 + λ_2$ ($λ_1$:物理的壞変定数, $λ_2$:生物学的壞変定数)

壊変定数 $\lambda=0.693/T_{1/2}$ (半減期) の関係より

 $1/T=1/T_1+1/T_2$ $(T:有効(実効)半減期, <math>T_1$:物理的半減期, T_2 :生物学的半減期) 式を変形すると,

 $1/T = (T_1 + T_2)/T_1 \cdot T_2$

 $T = T_1 \cdot T_2 / (T_1 + T_2)$

D:Bの式に代入し、計算する。1年を365日とすると、

 $(30 \!\times\! 365) \!\times\! 100/\left\{(30 \!\times\! 365) + 100\right\} = \!1.095 \!\times\! 10^6/1.105 \!\times\! 10^4$

≒99.095 [日]

≒100 [目]

Π	F - 3	G - 4	H - 9	☐ — 2	J - 10
	アー5	1 − 1			

- 注)F, G, I:線量評価の体系については、基本的な物理量として「吸収線量」を用い、放射線の線質を考慮して各臓器・組織の「等価線量」を求め、放射線の確率的影響に係る各部位の感受性の違いを考慮して「実効線量」を算定する。
 - H:放射線加重係数の値は、LETと関連付けられた線質係数の値と概ね一致し、低線量における 確率的影響の誘発に関する放射線の生物効果比を代表するように ICRP によって勧告されてい る。
 - J:組織加重係数の値は、各臓器・組織の確率的影響(がんおよび遺伝性影響)に対する損害の相対値を表している。損害の算定にあたっては、致死性のがんと重篤な遺伝性影響のみならず非致死性のがんも考慮に入れ重み付けされている。
 - ア:ICRP 2007 年勧告では、 α 粒子、核分裂片、重い原子核(重イオン)が 20 の値を与えられている。他、光子と電子は 1、陽子は 2、中性子についてはエネルギーの連続関数として与えられている。
 - イ:組織加重係数の和は1であり、各臓器・組織に割り当てられた組織加重係数の値は全体に対する割合を表している。

- 注)K, L, ウ, エ:内部被ばくの線量評価においては放射性物質の摂取後の線量率の時間積分を行い, 摂取時点(放射線管理上は摂取した年)に被ばくしたものとして取り扱う。これを預託線量と いう。積分の期間は職業被ばく及び公衆の成人に対して摂取後の50年間,子供や乳幼児に対 しては摂取時から70歳までとする。預託等価線量は,体内の臓器または組織が摂取後同様の 期間に受ける等価線量をいう。預託実効線量は,放射性物質の体内摂取から受ける臓器または 組織の等価線量のおのおのにその臓器または組織の組織加重係数を乗じて加え合わせたもので ある。
 - M: 実効線量係数は、放射能 1 Bq 摂取当たりの実効線量を表しており、経口摂取および吸入摂取 について求められている。この値は適切な代謝モデルを用い、核種及び化学形ごとに計算され、法令に示されている。
 - $\text{$\rlap/$$ $\rlap/$ $\rlap/$: 5 $[Bq] \times 1.3 \times 10^{-5} $[mSv \cdot Bq^{-1}] \times 365 \stackrel{..}{=} 2.37 \times 10^{-2}$}$

物 理 学

次の各間について、1から5までの5つの選択肢のうち、適切な答えを1つだけ、選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

問1 4.0 pg の質量に相当するエネルギー [J] として最も近い値は、次のうちどれか。

1 1.5×10^{1} 2 3.6×10^{1} 3 1.5×10^{2} 4 3.6×10^{2} 5 1.5×10^{3}

〔解答〕

4

注) $E=mc^2$ より、

質量 $m=4.0\times10^{-15}$ [kg](1 $pg=1\times10^{-15}$ kg),光の速度 $c=3.0\times10^8$ [$m\cdot s^{-1}$] なので

 $E=4.0\times10^{-15}\times(3.0\times10^8)^2=360 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2]}=3.6\times10^2 \text{ [J]}$

ここで、 $[kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}] = [J]$ である。

- 間2 次の現象のうち、ニュートリノが放出されるものの組合せはどれか。
 - A α壊変
 - B β⁺壊変
 - C 電子捕獲壊変
 - D 内部転換
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

3

注)ニュートリノ ν は陽子が β +壊変した際に陽電子と伴に放出される。

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$$

電子捕獲は β^+ 壊変の競合過程で、陽電子を放出するかわりに、軌道電子を捕獲してニュートリノのみを放出する。

$$p+e^- \rightarrow n+v$$

- 問3 次の現象のうち、軌道電子が関係しないものはどれか。
 - 1 ラザフォード散乱
 - 2 電子捕獲壊変
 - 3 内部転換
 - 4 オージェ効果

5 光電効果

[解答]

1

- 注)ラザフォード散乱は、原子核と入射粒子との相互作用である。ラザフォード散乱とは原子核のクーロン場により入射粒子の軌道が変化する現象であり、放射線の放出や核の励起が起こらない弾性散乱である。他の現象は軌道電子を介する。
- 問4 KX線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A K 殻の内部転換が KX 線の放出原因となり得る。
 - B KX線の放出はLX線の放出に関係しない。
 - C KX線のエネルギーは原子番号が大きいほど高くなる。
 - D 同じ原子番号の場合、KX線のエネルギーはLX線のエネルギーより高い。
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

3

- 問5 ⁵⁶Fe 原子核の核子1 個当たりの結合エネルギーは、水素原子における電子の結合エネルギーの何倍か。 次のうち、最も近い値はどれか。
 - $1 \quad 10^2 \quad 2 \quad 10^4 \quad 3 \quad 10^6 \quad 4 \quad 10^8 \quad 5 \quad 10^{12}$

[解答]

3

注)核子1個当たりの結合エネルギーはおよそ8 MeV である。水素原子中の電子の結合エネルギーは 基底状態で13.6 eV なので、

8×10⁶/13.6 ⇒ 5.88×10⁵ ⇒ 10⁶ 「倍]

問 6 質量m,電荷qの重荷電粒子が、磁束密度Bの一様な磁場中を速度vで磁場に垂直な面内を円運動している。このとき粒子が円軌道を一周するのに要する時間は、次のうちどれか。

$$1 \quad \frac{2\pi m}{qB} \quad 2 \quad \frac{2\pi B}{qm} \quad 3 \quad \frac{2\pi mB}{q} \quad 4 \quad \frac{2\pi qm}{B} \quad 5 \quad \frac{2\pi mB}{qv}$$

〔解答〕

1

注)磁束密度 B の一様な磁場に垂直な面内では、質量 m,電荷 q,速度 v の重荷電粒子の進行方向に対してローレンツ力 Bqv が直角方向に働く。円軌道の半径を r とすると、円運動の遠心力 mv^2/r とローレンツ力が釣り合っているので、

$$Bqv = mv^2/r$$

が成り立つ。

 $r=mv^2/Bqv=mv/qB$ となるので、一周するのに要する時間 T は、

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

問7 次の加速器のうち、電子並びにイオンのいずれの加速にも適用できるものの組合せはどれか。

- A コッククロフト・ワルトン型加速装置
- B ファン・デ・グラーフ型加速装置
- C サイクロトロン
- D ベータトロン
- E シンクロトロン
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 ABE $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 ADE $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 CDE $\mathcal{O}\mathcal{A}$

[解答]

2

注)コッククロフト・ワルトン型加速装置やファン・デ・グラーフ型加速装置は静電加速方式であり、電子もイオンも加速できる。サイクロトロンでは電子加速は行わない。サイクロトロンの原理で電子を加速するのは、高周波電圧の周波数が大きくなり過ぎて困難である(問6[解答]注)の式参照)。また、質量の軽い電子は相対論的質量変化が比較的早い段階で見られ、加速されるよりも質量の変化の方が大きくなる。ベータトロンはイオンの加速は行わない。ベータトロンは電磁誘導の原理を利用して加速電圧を発生させるが質量が重いイオンの場合、電磁石のサイズや電流が莫大になってしまい現実的でない。シンクロトロンはサイクロトロンとベータトロンの原理を併用したもので、互いの欠点を補っており、電子もイオンも加速可能である。

問8 中性子を発生させる手法として、正しいものの組合せはどれか。

- A Be に 2.8 MeV の γ 線を照射する。
- B Be に 5.3 MeV の α線を照射する。
- C ³H ターゲットに 200 keV の ²H ビームを照射する。
- D ${}^{2}H$ ターゲットに 2 MeV の ${}^{2}H$ ビームを照射する。
- 1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

- 注)A:⁹Be(γ, n)⁸Be 反応で中性子を発生する。²⁴Na は 2.754 MeV の γ 線を放出し, ²⁴Na-Be 中性子源 として利用される。
 - B: 9 Be (α, n) 12 C 反応で中性子を発生する。 210 Po は 5.304 MeV の α 線を放出し、 210 Po-Be 中性子源として利用される。
 - C:主にコッククロフト・ワルトン型加速装置を用いて $100\sim200~{\rm keV}$ に加速した $^2{\rm H}$ ビームを用いて以下の反応で中性子を発生する。

 $^{3}H+^{2}H \rightarrow ^{4}He+n$

D: 主にファン・デ・グラーフ型加速装置を用いて 2 MeV 付近に加速した 2 H ビームを用いて以下の反応で中性子を発生する。

 $^{2}H+^{2}H \rightarrow ^{3}He+n$

問9 235 U が熱中性子を吸収して、 95 Sr、 139 Xe 及び中性子に分裂する反応において、 $1.0 \,\mathrm{g}$ の 235 U がすべてこの 反応を起こすと、この反応により発生するエネルギー [kWh] はいくらか。最も近いものを選べ。ただし、 95 Sr、 139 Xe、 235 U の各原子核 1 個の質量 [kg] を、それぞれ、 157.61×10^{-27} 、 230.67×10^{-27} 、 390.29×10^{-27} とする。また、中性子 1 個の質量 [kg] は 1.67×10^{-27} とする。

1 2.2×10^4 2 4.2×10^4 3 6.4×10^4 4 9.2×10^4 5 1.2×10^5

〔解答〕

1

注) 反応は以下となる。

 $^{235}U+n \rightarrow ^{95}Sr+^{139}Xe+2n$

この反応によって原子核 1 個当たり発生するエネルギーは、光速を $c=3.0\times10^8$ $[m\cdot s^{-1}]$ とすると (間 1 [解答] [注) 参照]]

 $(390.29\times 10^{-27} + 1.67\times 10^{-27} - 157.61\times 10^{-27} - 230.67\times 10^{-27} - 2\times 1.67\times 10^{-27}) \text{ [kg]}$

 $\times (3.0 \times 10^8 \, [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}])^2$

= $(0.34 \times 10^{-27}) \times (9 \times 10^{16}) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$

 $=3.06\times10^{-11}$ [J]

 $1.0 g O^{235} U は、アボガドロ 定数を <math>6.02 \times 10^{23} [mol^{-1}]$ とすると、

 $6.02 \times 10^{23} \times (1.0/235) = 2.56 \times 10^{21}$ [個]

に相当する。

1.0gの²³⁵Uで発生するエネルギーは、

 $3.06 \times 10^{-11} \times 2.56 \times 10^{21} = 7.83 \times 10^{10} \text{ [J]}$

 $1 [kWh] = 1 \times 10^3 \times 3.600 = 3.6 \times 10^6 [J] なので.$

 $7.83 \times 10^{10}/3.6 \times 10^{6} = 2.18 \times 10^{4} = 2.2 \times 10^{4} \text{ [kWh]}$

- 問10 制動放射線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 荷電粒子と軌道電子との弾性散乱に起因する。
 - B オージェ電子と競合して放出される。
 - C エネルギー分布は線スペクトルとなる。
 - D 制動放射線の強度は標的物質の原子番号が大きいほど高い。

1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ 5 ABCD すべて

[解答]

4

注) A:誤 制動放射線は、荷電粒子が原子核の近くを通過するとき、核のクーロン力によって進路 を曲げられた際に発生する X 線である。

B:誤 特性 X 線とオージェ電子は競合過程である。

C:誤 荷電粒子の全運動エネルギーを放出する場合から0まで連続的なエネルギー分布となる。

 $\mathtt{D}:\mathbb{E}$

問11 電子線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 線衝突阻止能は入射した物質の原子番号に比例して大きくなる。

B 強度は、透過する物質の厚さに関して指数関数的に減弱する。

C 同じエネルギーの陽子線に比べて制動放射によるエネルギー損失が大きい。

D 同じエネルギーの陽子線に比べて後方散乱の割合が大きい。

1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ 5 ABCD すべて

[解答]

1

注)電子の物質中の線衝突阻止能はベーテの式で表され、物質の原子番号に比例する(A は正解)。電子が物質中で多数の散乱を繰り返してエネルギーを失い止まるまでの飛程は、 $[g \cdot cm^{-2}]$ の単位で表した際には、物質の種類にはあまり依存せず入射エネルギーでほぼ決まり、これにより完全な遮蔽の厚さを見積もることができる(B は不正解)。

また、物質中での散乱については、陽子の場合は散乱により方向はほぼ変わらないのに対して、電子の場合はその質量が軽いために、後方散乱など散乱により大きく方向を変える散乱がある(Dは正解)。制動放射の確率は入射粒子の質量の二乗に反比例するので、陽子線よりは電子線で多く発生する(Cは正解)。

問 12 α 粒子と重陽子が同じ速度の場合に、 α 粒子の阻止能(S_{α})と重陽子の阻止能(S_{d})の比(S_{α}/S_{d})として最も近い値は、次のうちどれか。

1 1 2 2 3 4 4 8 5 16

[解答]

3

注)重荷電粒子の衝突阻止能 S は、荷電粒子の原子番号を z、荷電粒子の速度を v、荷電粒子の質量を M、荷電粒子のエネルギーを E とすると、次式の関係で表される。

$$S \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 M}{E}$$

題意より速度が同じである (v^2) が等しい)ことから,阻止能の比は z^2 の比となる。したがって,

$$\frac{S_{\alpha}}{S_{1}} = \frac{2^{2}}{1^{2}} = 4$$

- 問 13 W 値に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 入射放射線のエネルギーにほとんど依存しない。
 - B 気体の電離エネルギーの2倍程度である。
 - C ヘリウムと、ヘリウム-アルゴン(0.13%)混合気体のW値を比較すると、ヘリウムの方が大きい。
 - D アルゴンと空気のW値を比較すると、アルゴンの方が大きい。
 - E 二次電子によって生じたイオン対は含めない。
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 ABE $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 ADE $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 CDE $\mathcal{O}\mathcal{A}$

[解答]

1

- 注) A:正 W値は気体の種類に依存するが、放射線の種類やエネルギーにあまり依存しない。
 - B:正 W値は気体の電離エネルギーの2倍程度である。
 - C:正 電子に対する気体の W 値は $W_{He}(=43 \text{ eV}) > W_{Air}(=34 \text{ eV}) > W_{Ar}(=26 \text{ eV})$ であり $(\alpha$ 線に対する気体の W 値は $W_{He}(=42.7 \text{ eV}) > W_{Air}(=35.1 \text{ eV}) > W_{Ar}(=26.4 \text{ eV}))$, 純粋な He に比べてヘリウムーアルゴン混合気体の方が W 値は小さい。一般に原子番号 の大きい気体ほど W 値は小さい傾向がある。
 - D:誤 C注)参照。空気のW値の方がアルゴンのW値よりも大きい。
 - E:誤 間接電離放射線は二次電子を生成することで気体にエネルギーを与える。W値は「イオン対を1つ生成するために必要なエネルギー」なので、エネルギーを与える過程は問わない。
- 間14 光電効果に関連する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 光電子のエネルギーは入射光子のエネルギーに比例する。
 - B 光電効果に伴って必ず特性 X 線が放出される。
 - C 光電効果の起こる確率(断面積)は入射光子のエネルギーとともに単調に変化する。
 - D 蛍光収率は物質の原子番号によって決まる。
 - 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

[解答]

4

注)A:誤 光電子のエネルギーE。は次式で表される。

 $E_e = E_{\gamma} - E_b$

ここで E_r は入射光子のエネルギー, E_b は軌道電子の結合エネルギーである。 光電子のエネルギーは,入射光子のエネルギーと軌道電子の結合エネルギーの差である。

- B:誤 特性 X 線はオージェ電子の放出と競合する。
- C:誤 光電効果の原子断面積 τ は,原子番号 z 及び入射光子のエネルギー E_{γ} と次式の関係で表される。

 $au \propto Z^5 E_{\nu}^{-3.5}$

すなわち、光電効果の起こる確率は入射光子のエネルギーの3.5乗に反比例する。

D:正 蛍光収率とは、電子軌道の空孔当たりに放射される特性 X 線の割合であり、原子番号が大きいほど蛍光収率は大きい。

問15 コンプトン効果に関連する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 入射光子の波長と90度方向に散乱された光子の波長との差は、入射光子エネルギーや散乱物質によらず一定である。
- B 物質の単位体積あたりに起こる確率は物質の電子密度に比例する。
- C 入射光子エネルギーが高いほど後方散乱の割合が多くなる。
- D コンプトン効果は軌道電子に対しては起こらない。
- 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

1

注) A : 正 入射光子の波長 λ とコンプトン効果で散乱された光子の波長 λ' の差 $\Delta\lambda$ は次式で表される。

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

ここで、m は電子の質量、c は光の速度、h はプランク定数、 θ は散乱された光子の散乱方向の角度である。

したがって、90度方向に散乱された光子の波長の差は、入射光子エネルギーや散乱物質によらず一定である。

B:正 コンプトン効果は光子と電子の相互作用なので、断面積は電子数に比例する。単位体積で見た場合は電子密度に比例する。

C:誤 入射光子のエネルギーが高くなると前方散乱が多くなる。

D:誤 自由電子、軌道電子にかかわらずコンプトン効果が発生する。

問 16 コンプトン散乱において、散乱角 90 度における散乱光子の波長が入射光子の波長の 2 倍となる場合の入射光子のエネルギー [MeV] として最も近い値は、次のうちどれか。

1 0.26 2 0.51 3 0.76 4 1.01 5 1.51

[解答]

2

注)入射光子のエネルギー E_{γ} に対するコンプトン散乱後の光子のエネルギー E'_{γ} は次式で表される(記号は問 15 「解答〕注)の式と同じ)。

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}(1 - \cos\theta)}$$

題意より $\lambda' = 2\lambda$ なので

$$E_{\gamma}' \left(= hv' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{hc}{2\lambda} = 0.5hv \right) = 0.5E_{\gamma}$$

 $\cos\theta = \cos 90^{\circ} = 0$

また、 $mc^2=0.511$ [MeV] より、これらを代入して計算すると

$$E'_{\gamma} = 0.5E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}(1 - \cos\theta)} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}} = \frac{mc^2E_{\gamma}}{mc^2 + E_{\gamma}}$$

$$0.5E_{\gamma} = \frac{mc^2E_{\gamma}}{mc^2 + E_{\gamma}}$$

$$mc^2 + E_{\gamma} = 2mc^2$$

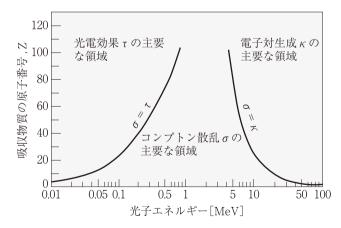
よって, $E_{\gamma}=mc^2=0.511$ [MeV] となる。

問 17 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 0.1 MeV の光子による鉛の吸収線量においては、光電効果が最も大きく寄与する。
- B ¹³⁷Cs γ線による鉄の吸収線量においては、光電効果が最も大きく寄与する。
- C ⁶⁰Co γ線による水の吸収線量においては、コンプトン効果が最も大きく寄与する。
- D 3 MeV の光子による鉄の吸収線量においては、電子対生成が最も大きく寄与する。
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

〔解答〕

- 注) A:正 鉛は原子番号82であり、0.1 MeVの光子に対しては光電効果が最も大きく寄与する。
 - B:誤 鉄は原子番号 26 であり、¹³⁷Cs (の娘核種の ^{137m}Ba) からの 0.662 MeV の光子に対して はコンプトン効果が最も大きく寄与する。
 - C:正 水を構成する水素及び酸素は原子番号がそれぞれ1及び8であり、⁶⁰Coからの光子 1.173 MeV 及び1.332 MeV の光子に対してはいずれもコンプトン効果が最も大きく寄与 する。
 - D:誤 鉄は原子番号 26 であり、3 MeV の光子に対してはコンプトン効果が最も大きく寄与する。



光子と物質との相互作用 (7版 放射線取扱の基礎 (日本アイソトープ協会))

問 18 3.2 g の ^{32}S がフルエンス率 $200 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の速中性子に照射されている。誘導される ^{32}P の飽和放射能 [Bq] として,最も近い値は,次のうちどれか。ただし $^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})^{32}\text{P}$ 反応の断面積が 0.07 b (バーン)とする。

1 0.42 2 0.70 3 0.84 4 0.98 5 1.3

[解答]

3

注)中性子照射により生成される放射能 A は次式で表される。

$$A = f\sigma N(1 - e^{-\lambda t}) = f\sigma N\left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}\right)$$

ここで f は中性子束密度, σ は放射化断面積,N は原子核数,t は照射時間,T は生成核種の半減期である。

中性子を照射して十分時間が経った後 $t \gg T$ では生成核の放射能 A は飽和し、

$$A = f \sigma N$$

で表される。

 32 S が 3.2 g 存在するとき,アボガドロ定数を 6.02×10^{23} [mol $^{-1}$] とすると,その原子核数は,

$$N = 6.02 \times 10^{23} \times (3.2/32)$$

である。

また、
$$f=200 \text{ [cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$
、 $\sigma=0.07 \text{ [b]}=0.07 \times 10^{-24} \text{ [cm}^{2}]$ なので $A=200 \times (0.07 \times 10^{-24}) \times (6.02 \times 10^{22})$ $= 0.84 \text{ [Bg]}$

問19次の核種のうち、自発核分裂による中性子源として用いられるのはどれか。

[解答]

5

注) 252 Cf は自発核分裂の割合が約3%と大きく、中性子源として利用されている。 その他の中性子源としては、 241 Am-Be 線源や問8に書かれた手法も使われる。

問 20 10 MeV の中性子が三重水素原子核 (3 H) との弾性衝突によって 0.1 MeV 以下のエネルギーになるため の最少の衝突回数として、正しい値は次のうちどれか。

1 2 2 3 3 4 4 5 5 6

〔解答〕

3

注)中性子と原子核の弾性散乱により原子核の受ける反跳エネルギー E は次式で与えられる。

$$E = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos\theta) E_n$$

ここでm, M はそれぞれ中性子,原子核の質量である。 E_n は中性子のエネルギー, θ は重心系での中性子の散乱角である。

衝突回数が最小となるのは、中性子が衝突した原子核に最大の反跳エネルギーを与える散乱角 $\theta=180^{\circ}(\cos\theta=-1)$ のときである。

三重水素の原子核の質量M=3m であるから、

$$E = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos\theta) E_n$$

$$= \frac{2m \cdot 3m}{(m+3m)^2} \cdot 2E_n$$

$$= \frac{3}{4} E_n$$

三重水素原子核の反跳エネルギーE は弾性衝突により $\frac{3}{4}E_n$ となるので、中性子のエネルギーは衝突の都度 1/4 になる。

したがって、10 MeV のエネルギーが0.1 MeV 以下(1/100 以下)となるために必要な衝突回数は4 回となる。

問 21 吸収線量の単位を SI 基本単位で表記した場合,正しいものは次のうちどれか。

$$1 \quad m^2 \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1} \qquad 2 \quad m \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1} \qquad 3 \quad m^2 \cdot s^{-1} \qquad 4 \quad m^2 \cdot s^{-2} \qquad 5 \quad A \cdot s \cdot kg^{-1}$$

〔解答〕

4

注)吸収線量は、単位質量の物質に放射線を照射した際に吸収されるエネルギー(単位:[Gy])である。したがって、SI 基本単位で表記すると、

$$[Gy] = [J \cdot kg^{-1}] = [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1}] = [m^2 \cdot s^{-2}]$$

問22次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 放射能は単位時間当たりに放出される放射線の数をいう。
- B 吸収線量は任意の電離放射線に用いられる。
- C カーマは任意の電離放射線に用いられる。
- D 照射線量は空気に対してのみ定義される。
- 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

- 注) A:誤 放射能は単位時間当たりの原子核の壊変数である。
 - B:正 吸収線量は任意の物質、任意の放射線が相互作用した際に、単位質量の物質に与えられるエネルギーである。
 - C:誤 カーマは光子や非荷電粒子(中性子)が任意の物質と相互作用した際に、単位質量の物質中に発生する荷電粒子の運動エネルギーの総和である。
 - D:正 照射線量は光子と空気が相互作用した際に、単位質量の空気中に生じる電気量である。

問 23 次の検出器のうち、 α 線の測定に用いられないものの組合せはどれか。

- Α ガスフロー式 2π比例計数管
- B NaI(Tl)シンチレーション検出器
- C Ge 半導体検出器
- D プラスチックシンチレーション検出器
- E 表面障壁型 Si 半導体検出器
- 1 A & D 2 A & E 3 B & C 4 B & E 5 C & D

[解答]

3

- 注)B:NaI(TI) シンチレーション検出器では、NaI は潮解性があるためケースに密封されている。そのため α 線がケースを通過することができないので、測定できない。
 - C:Ge 半導体検出器では、Ge を液体窒素温度まで冷却する必要があるために、検出器の内部を真空にして十分に断熱する必要がある。その真空容器を α 線が通過することができないので、測定できない。
- 問 24 容積 1 L, 圧力 5 気圧の空気充填電離箱に $10\,k$ Bq のトリチウムガス(β 線平均エネルギー: $5.7\,k$ eV)を注入したとき,得られる飽和電流 [pA] として,最も近い値は次のうちどれか。ただし, β 線に対する空気の W 値は $34\,e$ V で,この値はトリチウムガスの注入により変わらないとする。また,壁効果は無視する。
 - 1 0.13 2 0.27 3 0.52 4 2.6 5 5.7

[解答]

2

注)電離箱中のトリチウム 1 個が壊変する際に生成される電子-イオン対の平均的な数 n は, β 線平均 エネルギーを \mathbf{W} 値で割った数となるので,

$$n = \frac{5.7 \times 10^3 \text{ [eV]}}{34 \text{ [eV]}} \doteq 168$$

電離箱中のトリチウムの放射能は 10 kBq なので、1 秒間当たりに生成される電子-イオン対の平均的な数 N は、

 $N=10\times10^{3} [s^{-1}]\times n=1.68\times10^{6} [s^{-1}]$

したがって、飽和電流 I[A] の値は、素電荷を $q[C(=s\cdot A)]$ とすると、

 $I=Nq=1.68\times10^{6} [s^{-1}]\times1.60\times10^{-19} [C] = 0.27\times10^{-12} [A] = 0.27 [pA]$

問 25 ダイノード 10 段の光電子増倍管の利得が 1.0×10⁶ である場合,各ダイノードの平均の電子増倍率はいくらか。次のうちから最も近いものを選べ。

1 3.0 2 3.5 3 4.0 4 4.5 5 5.0

[解答]

3

注)各ダイノードの平均の電子増倍率が 3.5, 4.0 及び 4.5 の場合の, ダイノード 10 段の利得はそれぞれ, $3.5^{10} = 275,855$, $4.0^{10} = 1,048,576$, 及び $4.5^{10} = 3,405,063$

である。

選択肢の中でダイノード 10 段の利得が最も 1.0×10^6 に近いのは,各ダイノードの平均の電子増倍率が 4.0 の場合である。

問 26 目的とする量 P は、それぞれ独立の測定値 X、Y により、 $P=\frac{X}{Y}$ の関係で与えられる。X、Y の標準偏

差をそれぞれ σ_{x} , σ_{y} とすると, P の標準偏差として正しいものは, 次のうちどれか。

$$1 \sqrt{\left(\frac{1}{Y}\right)^{2} \sigma_{X}^{2} + \left(\frac{X}{Y^{2}}\right)^{2} \sigma_{Y}^{2}} \qquad 2 \sqrt{\left(X^{4}Y^{2}\right) \sigma_{X}^{2} + \left(X^{2}Y^{4}\right) \sigma_{Y}^{2}} \qquad 3 \sqrt{\left(\frac{X}{Y}\right)^{2} \sigma_{X}^{2} + \left(\frac{X}{Y}\right)^{2} \sigma_{Y}^{2}}$$

$$4 \sqrt{\left(X^{2}Y^{4}\right) \sigma_{X}^{2} + \left(X^{4}Y^{2}\right) \sigma_{Y}^{2}} \qquad 5 \sqrt{\left(\frac{X}{Y^{2}}\right)^{2} \sigma_{X}^{2} + \left(\frac{1}{Y}\right)^{2} \sigma_{Y}^{2}}$$

[解答]

1

注)それぞれの値の標準偏差の間には、それぞれの値の誤差の場合と同様の関係式が成り立つ。 したがって、Pの標準偏差を σ_P とすると、一般的な誤差伝播の法則から、

$$\sigma_{P} = \frac{X}{Y} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{X}}{X}\right)^{2} + \left(\frac{\sigma_{Y}}{Y}\right)^{2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{Y}\right)^{2} \sigma_{X}^{2} + \left(\frac{X}{Y^{2}}\right)^{2} \sigma_{Y}^{2}}$$

問 27 γ 線スペクトロメトリによる放射能測定において、次の光子の対のうち、サム効果を考慮する必要があるものの正しい組合せはどれか。

- A ²⁴Na 線源からの 1.369 MeV の γ 線と 2.754 MeV の γ 線
- B ⁵⁷Co 線源からの 0.122 MeV の γ 線と 0.136 MeV の γ 線
- C ⁶⁰Co 線源からの 1.173 MeV の γ 線と 1.333 MeV の γ 線
- D ¹³⁴Cs 線源からの 0.605 MeV の γ 線と 0.796 MeV の γ 線
- E ¹³⁷Cs 線源からの 0.662 MeV の γ線と 0.032 MeV の KX(Ba)線
- 1 ABEのみ 2 ACDのみ 3 ADEのみ 4 BCDのみ 5 BCEのみ

「解答〕

2

注)サム効果を考慮する必要があるのは、2つの γ 線がほぼ同時に放出される事象(原子核のカスケード γ 遷移により連続して2つの γ 線が放出される事象)の場合である。

2つの γ 線がカスケード γ 遷移によりほぼ同時に放出されるものか否かについては、各原子核の壊変図で確認できる。Bの場合、 57 Coからの0.122 MeVの γ 線放出と0.136 MeVの γ 線放出は、競合過程であり、ほぼ同時に放出される事象ではない。Eの場合、 137 Csからの0.662 MeVの γ 線放出と0.032 MeVの KX(Ba)線放出は、独立事象であり、ほぼ同時に放出される事象ではない。

問 28 放射線源を用いて得た比例計数管の出力パルス信号を分解時間 50 μ s の電気回路を通して計数したところ, 計数率は 60 kcpm であった。次に, この回路の分解時間を 150 μ s に変えたとき, 計数率 [kcpm] として最も近い値は, 次のうちどれか。

1 45 2 48 3 50 4 55 5 58

[解答]

4

注)分解時間を τ , 1 秒間に比例計数管に入射する放射線の数を n_0 , $\tau=50\times10^{-6}$ [s] の場合の計数率 を n_{50} 及び $\tau=150\times10^{-6}$ [s] の場合の計数率を n_{150} とすると, $n_{50}=60$ [kcpm]=1,000 [cps] である から, $\tau=50\times10^{-6}$ [s] の場合の計数率から,

$$n_0 = \frac{n_{50}}{(1 - n_{50}\tau)} = \frac{1,000}{(1 - 1,000 \times 50 \times 10^{-6})} = 1,053 \text{ [s}^{-1}$$

したがって、 $\tau = 150 \times 10^{-6} [s]$ の場合は、

$$n_{150} = \frac{n_0}{(1 - n_0 \tau)} = \frac{1,053}{(1 + 1,053 \times 150 \times 10^{-6})} = 909 \text{ [cps]} = 55 \text{ [kcpm]}$$

問29 GM 計数管の計数値の相対標準偏差が5%になる計数に最も近い値は、次のうちどれか。

1 200 2 400 3 600 4 800 5 1,000

[解答]

2

注) 求める計数値をnとすると、標準偏差は \sqrt{n} であるから.

$$\frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} = 0.05$$

したがって.

$$n = \left(\frac{1}{0.05}\right)^2 = 400$$

問 30 1 mg の 137 Cs を含む点状線源がある。この点状線源から 2 m 離れた位置における 1 cm 線量当量率 [μ Sv·h $^{-1}$] として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、 137 Cs 線源に対する 1 cm 線量当量率定数を 0.093 μ Sv·m 2 ·MBq $^{-1}$ ·h $^{-1}$ とする。

1 11 2 23 3 64 4 74 5 83

「解答〕

4

注) ¹³⁷Cs の半減期は約30年であるから、壊変定数 λは、

$$\lambda = \frac{0.693}{30 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 7.32 \times 10^{-10}$$

 $1 \text{ mg} = 10^{-3} \text{ g}$ の ^{137}Cs の原子数 N は,アボガドロ定数を $6.02 \times 10^{23} \text{ [mol}^{-1]}$ とすると,

$$N=6.02\times10^{23}\times\frac{10^{-3}}{137}$$
 = 4.39×10¹⁸ [個]

137Cs 点状線源の放射能 A は、

 $A = \lambda N = 7.32 \times 10^{-10} \times 4.39 \times 10^{18} = 3.21 \times 10^{9} \text{ [Bq]} = 3.21 \times 10^{3} \text{ [MBq]}$

したがって,この線源から2m離れた位置における1cm線量当量率は,

$$0.093 \times \frac{3.21 \times 10^3}{2^2} = 74 \ [\mu \text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}]$$

第59回 第1種放射線取扱主任者試験問題と解答例(2)

(試験年月日 平成 26 年 8 月 20 日, 21 日)

化 学

次の各間について、1 から 5 までの 5 つの選択肢のうち、適切な答えを 1 つだけ、選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

問1 次の核種について、半減期の短い順に正しく並んでいるものはどれか。

- $1^{-131}I < {}^{33}P < {}^{35}S < {}^{45}Ca < {}^{3}H$
- $2^{-131}I < {}^{35}S < {}^{45}Ca < {}^{33}P < {}^{3}H$
- $3^{33}P < {}^{131}I < {}^{35}S < {}^{45}Ca < {}^{3}H$
- $4 \, ^{3}\text{H} \, < \, ^{131}\text{I} \, < \, ^{33}\text{P} \, < \, ^{35}\text{S} \, < \, ^{45}\text{Ca}$
- $5^{33}P < ^{35}S < ^{45}Ca < ^{3}H < ^{131}$

[解答]

- 注)それぞれの核種の半減期は、 13 I:8.02 日、 45 Ca:162.67 日、 35 S:87.51 日、 33 P:25.34 日、 3 H:12.32 年である(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。
- 問2 次の質量数順に並べられた核種のうち、放射性核種、安定核種、放射性核種の順に並んでいるものの組合せはどれか。

$$\begin{array}{cccccc} A & ^{22}Na & ^{23}Na & ^{24}Na \\ B & ^{26}Al & ^{27}Al & ^{28}Al \\ C & ^{35}Cl & ^{36}Cl & ^{37}Cl \end{array}$$

⁵¹Cr

52Cr

1 ABC のみ 2 AB のみ 3 AD のみ 4 CD のみ 5 BCD のみ

〔解答〕

2

D 50Cr

注)放射性核種は、 22 Na(半減期 2.60 年)、 24 Na(半減期 14.9 時間)、 26 AI(半減期 7.17×10 5 年)、 28 AI(半減期 2.24 分)、 36 CI(半減期 3.01×10 5 年)、 51 Cr(半減期 27.7 日)である。題意のとおり並んでいるのは A と B のみである(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。

解答例は(公社)日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会が解答の一案として作成したものです。

	0-1++1-4+	14 + 11.11 1. 2 H-151 1	エン・ファック / コンソップ と 131-7
間 3	B	γ線を放出する核種として.	.正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A ^{32}P
- B 60Co
- C 90Y
- $D^{-131}I$
- E 192Ir
- 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACEのみ 4 BDEのみ 5 CDEのみ

[解答]

4

- 注) 32 P は半減期 14.26 日で 100%の割合で β^- 壊変する。 60 Co は半減期 5.27 年で β^- 壊変し,その後, 1.173 MeV と 1.332 MeV の γ 線を放出する。 90 Y は半減期 64 時間で 100%の割合で β^- 壊変する。 131 I は半減期 8.02 日で β^- 壊変し,その後,0.365 MeV,0.637 MeV,0.284 MeV の γ 線を放出する。 192 Ir は半減期 73.8 日で β^- 壊変,EC(軌道電子捕獲)壊変をし,その後, γ 線を放出する。以上のことより,B,D,E のみが β^- 壊変に続いて γ 線を放出する(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。
- **問4** ある核種の放射能が,4時間後に30,000 dpm,6時間後に7,500 dpm であった。初めにあった放射能 [Bq] として,最も近い値は次のうちどれか。
 - 1 8.0×10^3 2 1.6×10^4 3 4.8×10^4 4 8.0×10^4 5 4.8×10^5

[解答]

1

注) dpm (decays per minute) は1分間当たりの壊変数を表す。

それぞれ毎秒当たりの壊変数 dps (decays per second) に直すと,

30,000 dpm = 500 dps, 7,500 dpm = 125 dps

まず半減期 T を求める。初めにあった放射能を A_0 とし、4 時間後の放射能を A_{4h} 、6 時間後の放射能を A_{5h} とすると、それぞれ以下の式が成り立つ。

$$A_{4h} = 500 = A_0 \times (1/2)^{4/T} \quad \cdots \qquad (1)$$

 $A_{6h} = 125 = A_0 \times (1/2)^{6/T}$

両辺をそれぞれ割り, 式を変形すると,

$$500/125 = (1/2)^{4/T-6/T} = (1/2)^{-2/T} = 2^{2/T}$$

 $4=2^2=2^{2/T}$

T=1

半減期 T を(1)式に代入、変形すると、初めにあった放射能 A_0 は、

$$A_0 = 500 \div (1/2)^{4/1} = 500 \times 16 = 8,000 \text{ [Bq]}$$

- 問 5 ³²P, ¹⁷⁷Lu をそれぞれ 1 kBq を含む 10 mL の水溶液がある。2 週間後の ³²P/¹⁷⁷Lu の原子数比として、最 も適切なものは次のうちどれか。ただし、³²P, ¹⁷⁷Lu の半減期をそれぞれ 14 日、7 日とする。
 - $1 \quad \frac{1}{4} \quad 2 \quad \frac{1}{2} \quad 3 \quad 1 \quad 4 \quad 2 \quad 5 \quad 4$

[解答]

5

注) 32 P の半減期は 14 日だから 1 kBq の放射能は 14 日後には 500 Bq に, 177 Lu の半減期は 7 日だから 1 kBq の放射能は 14 日後には 250 Bq になる。

 32 P の原子数 N_n は、 $A = \lambda N = \ln 2/T \times N$ より、

$$N_n = (14/\ln 2) \times 500$$

同様に ¹⁷⁷Lu の原子数 N_{Lu} は,

$$N_{1n} = (7/\ln 2) \times 250$$

問 6 放射能の等しい 55 Fe(半減期 1,000 日)と 106 Ru(半減期 374 日)があるとき,それらの質量の比(55 Fe/ 106 Ru)に最も近いものは,次のうちどれか。

1 0.37 2 0.72 3 1.4 4 2.7 5 5.2

〔解答〕

3

注) $A = \lambda N = (\ln 2/T) \times (\omega / M)$

ここで、 ω :質量、M:モル濃度である。

 55 Fe の質量を ω_{Fe} , 106 Ru の質量を ω_{Ru} とすると,

 $A = (\ln 2/1,000 [\exists]) \times (\omega_{Fe}/55) = (\ln 2/374 [\exists]) \times (\omega_{Ru}/106)$

変形すると.

 $\omega_{\text{Fe}}/\omega_{\text{Ru}} = (1,000/374) \times (55/106) = 55,000/39,644 = 1.39 = 1.4$

- 問 7 140 Ba は半減期 12.8 日で β^- 壊変して 140 La となり、 140 La (半減期 1.68 日) は β^- 壊変して 140 Ce (安定) になる。この逐次壊変で、 140 La を分離除去した 140 Ba から生成する 140 La の放射能が最大となるときを $t_{\rm max}$ とすると、次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A t_{max} では、 140 La の生成速度と壊変速度は等しい。
 - B t_{max} では, ¹⁴⁰La の放射能は ¹⁴⁰Ba の放射能に等しい。
 - C t_{max} の後は, ¹⁴⁰La の放射能は ¹⁴⁰Ba の放射能を常に上回る。
 - D t_{max} の後は、 140 La の放射能は次第に半減期 12.8 日で減衰するようになる。
 - 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

5

注) 親核種 (¹⁴⁰Ba) の半減期が12.8 日,娘核種 (¹⁴⁰La) の半減期が1.68 日であることから,十分な時間(娘核種の半減期の7~10 倍程度)が経過すれば過渡平衡となる。

 $A:t_{max}$ では、娘核種の放射能は最大値を取るため、娘核種の生成速度と壊変速度は等しくなる。

B:t 時間経過後の 140 Ba と 140 La の原子数を N_{Ba} , N_{La} , また崩壊定数を λ_{Ba} , λ_{La} とすると,

 $dN_{\rm La}/dt$ = $\lambda_{\rm Ba}N_{\rm Ba}$ - $\lambda_{\rm La}N_{\rm La}$ (1) かがっ。

 t_{max} では、 $dN_{\text{La}}/dt=0$ が成立するので、(1)式から

 $\lambda_{R_0}N_{R_0}=\lambda_{L_0}N_{L_0}$ の関係が得られる。

すなわち、¹⁴⁰La と ¹⁴⁰Ba の放射能は等しくなる。

 $C: t_{max}$ 後の放射能の関係は, 140 Ba と 140 La の放射能を A_{Ba} , A_{La} ,半減期を T_{Ba} , T_{La} (または崩壊定数を λ_{Ba} , λ_{La})とすると,以下の関係式が成り立つ。

$$A_{La}/A_{Ba} = \lambda_{La}/(\lambda_{La} - \lambda_{Ba}) = T_{Ba}/(T_{Ba} - T_{La}) > 1$$

よって、140Laの放射能は140Baの放射能を常に上回る。

D:過渡平衡の場合, t_{max} 後の ¹⁴⁰Ba の原子数 N_{Ba} は,

$$N_{La} = \{\lambda_{Ba}/(\lambda_{La} - \lambda_{Ba})\} \times N_{Ba}$$

が成り立つ。この式を(1)式に代入すると,

$$dN_{La}/dt = -\lambda_{Ra}N_{La}$$

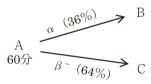
が得られる。両辺に $\lambda_{l,l}$ を掛け、式を変形すると、

$$\lambda_{\rm La}(dN_{\rm La}/dt) = -\lambda_{\rm La}\lambda_{\rm Ba}N_{\rm La}$$

$$dA_{Ia}/dt = -\lambda_{Ra}A_{Ia}$$

すなわち、¹⁴⁰Laの放射能は ¹⁴⁰Ba の半減期 12.8 日で減衰するようになる。

問 8 ある放射性核種 A の半減期は 60 分で, 36%は α 壊変して核種 B になり, 64%は β 壊変して核種 C になる。 α 壊変の部分半減期 T_{α} [分], β 壊変の部分半減期 T_{β} [分] の正しい組合せ (T_{α}, T_{β}) はどれか。



1 (85, 188) 2 (94, 167) 3 (134, 106) 4 (167, 94) 5 (200, 85)

〔解答〕

1

注) Aは2種類の壊変形式を持つ分岐壊変なので、それぞれの壊変定数は、

$$\lambda_{\alpha} = \lambda \times (36/100) = (\ln 2/T) \times (36/100)$$

$$\lambda_{B^-} = \lambda \times (64/100) = (\ln 2/T) \times (64/100)$$

 $T_{\alpha} = \ln 2/\lambda_{\alpha}$ より、上記関係式を代入すると、

$$T_{\alpha} = \ln 2 / \{(\ln 2/T) \times (36/100)\} = T/(36/100) = 60/(36/100) = 167 [\%]$$

同様に.

$$T_{\beta^-} = \ln 2/\lambda_{\beta^-} = 60/(64/100) = 94 [\%]$$

問9 次の核反応式のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ${}^{11}B(n, p){}^{11}C$
- B 20 Ne (d, α) 18 F
- C $^{32}S(p, n)^{32}P$
- D 54 Fe (n, p) 54 Mn
 - 1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

[解答]

5

- 注)それぞれの核反応は A: ${}^{11}_{5}B(n,p){}^{11}_{4}Be, B:{}^{20}_{10}Ne(d,\alpha){}^{18}_{9}F, C:{}^{32}_{16}S(p,n){}^{32}_{17}Cl, D:{}^{54}_{26}Fe(n,p){}^{54}_{25}Mn$ である。これより B と D が正しい。
- 問10次の核反応のうち、17族元素(ハロゲン)の同位体を生成するものの組合せはどれか。
 - A ${}^{18}O(p, n)$
 - B 35 Cl (n, γ)
 - C ⁷⁶Se(d, n)
 - $D \quad ^{124}Xe(n,p)$
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

5

- 注)それぞれの核反応は A: $^{18}_{8}O(p,n)^{18}_{9}F$, B: $^{35}_{17}Cl(n,\gamma)^{36}_{17}Cl$, C: $^{76}_{34}Se(d,n)^{77}_{35}Br$, D: $^{124}_{54}Xe(n,p)^{124}_{53}I$ である。よって A, B, C, Dの全ての核反応でハロゲンの同位体が生成する。
- 問 11 原子炉で Cu を 12.7 時間熱中性子照射した。照射終了直後の ^{64}Cu と ^{66}Cu の放射能比 $A_{^{46}Cu}/A_{^{46}Cu}$ として最も近い値はどれか。ただし、 (n,γ) 反応のみが起こるとする。

標的核	存在度(%)	(n, γ) 反応断面積 (barn)	生成核	半減期
⁶³ Cu	70	4.5	⁶⁴ Cu	12.7 時間
⁶⁵ Cu	30	2.2	⁶⁶ Cu	5.1 分

1 0.1 2 0.4 3 1.2 4 2.4 5 4.3

〔解答〕

1

注)照射粒子東密度をf, 放射化断面積を σ , 生成核種の半減期をTとすると,試料とする元素(原子数N)をt時間照射して照射終了直後得られる放射能Aは,次の式で算出できる。

$$A = Nf\sigma(1 - e^{-\lambda t}) = Nf\sigma[1 - (1/2)^{t/T}]$$

ただし、比率を求めるのでfは相殺され、 $N\sigma[1-(1/2)^{t/T}]$ の比を考慮すればよい。

Nについても比をとるのでアボガドロ定数を省略すると、次のようになる。

$$\begin{split} A_{\omega_{\text{Cu}}} / A_{\omega_{\text{Cu}}} &= \{ (1/63) \times 0.7 \times 4.5 \times [1 - (1/2)^{(12.7 \times 60)/(12.7 \times 60)}] \} / \{ (1/65) \times 0.3 \times 2.2 \times [1 - (1/2)^{(12.7 \times 60)/5.1}] \} \\ &\doteq 2.5 \end{split}$$

- 問 12 核医学診断で用いられる "Ga に関する次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。
 - A ガリウム (Ga) の原子炉中性子照射による (n, γ) 反応で製造される。
 - B β 壊変する。
 - C EC 壊変して、Zn の特性 X 線を放出する。
 - D シンチグラフィに用いられる。
 - 1 A & C 2 A & D 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

5

- 注) 67 Ga はシンチグラフィ(放射性同位元素で標識された薬剤を体内に投与後, 放出される放射線を画像 化することによって薬剤の分布を調べる検査)に用いられる核種。サイクロトロンで 68 Zn(p, 2n) 67 Ga 等の反応によって製造され、EC (軌道電子捕獲) 壊変 (100%) して 67 Zn の特性 X 線を放出する。
- 問13 放射性元素に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A テクネチウム (Tc) は、モリブデン (Mo) と同族元素である。
 - B プロメチウム (Pm) は, ランタノイドに属する。
 - C ラジウム (Ra) は、アクチノイドに属する。
 - D アスタチン(At)は、17族元素(ハロゲン)である。
 - 1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

[解答]

5

- 注) A:誤 Tcは7族元素, Moは6族元素である。
 - B:正
 - C:誤 Raは2族元素,アクチノイドは3族元素である。
 - D:正
- 問 14 次のトリチウム水を含む各水溶液に白金電極を入れて電気分解したとき、陰極(電池の負極を接続した 極)でトリチウムを含む水素ガスが発生するものの組合せはどれか。
 - A 希硫酸
 - B 水酸化ナトリウム水溶液
 - C 硫酸銅(Ⅱ)水溶液
 - D 塩化ナトリウム水溶液
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

2

注)イオン化傾向は Li > K > Ca > Na > Mg > Al > Zn > Fe > Ni > Sn > Pb > (H $_2$) > Cu > Hg > Ag > Pt > Au

 H_2 よりイオン化傾向の小さい金属イオンは陰極で析出し、それ以外は水の電気分解が起こる。ここで、「 \uparrow 」は気体発生を表す。

- $A : \mathbb{E} \quad 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow$
- B: \mathbb{E} 2H₂O+2e⁻ \rightarrow H₂↑+2OH⁻
- C:誤 $Cu^{2+}+2e^{-} \rightarrow Cu$ で Cu が析出する。
- D: \mathbb{E} $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow$
- 問 15 次の核種のうち、Si(Li)検出器により有効に同定されるものはどれか。
 - 1 ³H 2 ³³P 3 ⁵⁵Fe 4 ⁹⁰Sr 5 ²¹⁰Po

[解答]

3

- 問 16 トリウム系列, ウラン系列, アクチニウム系列に関する次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。
 - A 半減期の最も長い Ra の同位体は、ウラン系列に属する。
 - B 半減期の最も長い Rn の同位体は、トリウム系列に属する。
 - C ²³⁵Uは、アクチニウム系列に属する。
 - D 3系列とも最終壊変生成物は、Pbの安定同位体である。
 - 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

[解答]

3

注) 天然放射性核種の壊変系列の問題。

トリウム系列 [(4n)系列]: トリウム (^{232}Th) に始まり ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn 等を経て ^{208}Pb (安定核種) で終わる。

ウラン系列 [(4n+2)系列]: ウラン (^{238}U) に始まり 230 Th, 226 Ra, 222 Rn 等を経て 206 Pb (安定核種) で終わる。

アクチニウム系列 [(4n+3)系列]: 235 U に始まり 231 Pa,アクチニウム(227 Ac), 223 Ra, 219 Rn 等を経て 207 Pb(安定核種)で終わる。

半減期の最も長い Ra, Rn は、それぞれ ²²⁶Ra (1,600 年), ²²²Rn (3.8 日) であり A, C, D のみ正しい (参考図書:アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))。

- 問 17 ⁴⁰K に関する記述として誤っているものは、次のうちどれか。
 - 1 天然のカリウムでは ⁴⁰K の同位体存在度は約 0.01%である。
 - 2 半減期は10億年より長い。
 - 3 β⁻ 壊変して ⁴⁰Ar が生成する。
 - 4 岩石中の 40K と 40Ar の存在量からその岩石の生成年代が推定できる。
 - 5 体重 60 kg の成人男性では ⁴⁰K はおおよそ 4 kBq 含まれている。

〔解答〕

- 注) 1, 2, 4, 5:正
 - 3:誤 40 K は分岐壊変し, β^- 壊変(89%)では 40 Ca,EC(軌道電子捕獲)壊変(11%)で 40 Ar が生成する。

- 問 18 次の物質に希硫酸を加えたときに、放射性の気体が発生するものの組合せはどれか。
 - A Na³⁶Cl
 - B Na₂³⁵S
 - C Na₂¹⁴CO₃
 - D Na₂³⁵SO₄
 - 1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

「解答〕

4

- - B: \mathbb{E} Na₂³⁵S+H₂SO₄ \rightarrow Na₂SO₄+H₂³⁵S \uparrow
 - C: \mathbb{E} Na₂¹⁴CO₃+H₂SO₄ \rightarrow Na₂SO₄+H₂O+¹⁴CO₂ \uparrow

 - ここで、「↑」は気体発生を表す。
- 問 19 担体を含む 4°CaCl, 水溶液に次の水溶液を加えたとき、放射性の沈殿を生じるものの組合せはどれか。
 - A 希硫酸
 - B 水酸化ナトリウム水溶液
 - C アンモニア水
 - D 炭酸ナトリウム水溶液
 - 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

[解答]

2

- 注)A:正 ⁴⁵CaCl₂+H₂SO₄ → ⁴⁵CaSO₄ ↓ +2HCl
 - B: \mathbb{E}^{45} CaCl₂+NaOH $\rightarrow {}^{45}$ Ca(OH)₂ \downarrow +2NaCl
 - C:誤 アンモニアは弱塩基なので、水酸化物イオン濃度は上がらず沈殿を生じない。
 - D: \mathbb{E} ⁴⁵CaCl₂+Na₂CO₃ \rightarrow ⁴⁵CaCO₃ \downarrow +2NaCl
 - ここで、「↓ | は沈殿生成を表す。
- 問 20 [⁶⁴Cu]CuSO₄と [⁶⁵Zn]ZnSO₄を含む水溶液に、表面を研磨した鉄板、銅板、亜鉛板をそれぞれ入れた場合に生じる反応として、正しいものの組合せは次のうちどれか。
 - A 鉄板に ⁶⁵Zn が析出する。
 - B 鉄板に ⁶⁴Cu が析出する。
 - C 銅板に ⁶⁵Zn が析出する。
 - D 亜鉛板に ⁶⁴Cu が析出する。
 - 1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

[解答]

注) イオン化傾向は $Z_n > F_e > C_u$

 $Fe+Cu^{2+} \rightarrow Fe^{2+}+Cu$. よって鉄板に析出するのは ^{64}Cu A:誤

B:正

C:誤 この反応は生じない。

 $D: \mathbb{T}$ $Z_n + Cu^{2+} \rightarrow Z_n^{2+} + Cu$ で亜鉛板に ⁶⁴Cu が析出する。

問 21 50 kBq·mg⁻¹の[¹⁴C]CaCO₁10 mg を酸と反応させて[¹⁴C]CO, を発生させた。この[¹⁴C]CO, の 0℃, 1 気圧での放射能濃度 [Bq·mL-1] に最も近い値は、次のうちどれか。ただし CaCO。の式量は 100、CO。の 分子量は44,0℃,1気圧での気体の体積を22.4 L·mol⁻¹とする。

1 5.0×10^4 2 2.2×10^5 3 5.0×10^5 4 2.2×10^6

[解答]

注) 塩酸との反応を考えると、

 $CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$

CaCO₃ と CO₃ は、同モル数なので、CO₃ 発生量は、

 $\{10\times10^{-3} [g]/100 [CaCO_3 の式量]\}\times22.4\times10^3 [mL\cdot mol^{-1}]=2.24 [mL]$

または、{[(44/100)×10×10⁻³ [g]]/44 [CO,の分子量]{×22.4×10³ [mL·mol⁻¹]=2.24 [mL] となる。 全ての炭素が、CO。になり、放射能は変わらない。放射能は、

 $50 \times 10^{3} \times 10 = 5 \times 10^{5} [Bq]$

したがって、放射能濃度は、

 $5 \times 10^5 \, [Bq]/2.24 \, [mL] \doteq 2.2 \times 10^5 \, [Bq \cdot mL^{-1}]$

問 22 ⁶⁴Cu²⁺, ⁸⁹Sr²⁺, ^{110m}Ag⁺の各金属イオンの担体を含む硝酸酸性溶液に, 希塩酸を加えて生成した沈殿 A をろ別する。残った溶液に硫化水素ガスを通し、生成した沈殿 B をろ別し、ろ液を C とする。A、B、C それぞれに主として含まれる核種の組合せとして、正しいものは次のうちどれか。

	沈殿 A	沈殿 B	ろ液C
1	⁶⁴ Cu	^{110m} Ag	⁸⁹ Sr
2	⁶⁴ Cu	⁸⁹ Sr	110m Ag
3	⁸⁹ Sr	⁶⁴ Cu	110m Ag
4	110m Ag	⁸⁹ Sr	⁶⁴ Cu
5	110mAg	⁶⁴ Cu	⁸⁹ Sr

[解答]

5

注) 沈殿法による系統的分離法について理解しておく。

希塩酸 HCl を加えると塩化物イオン Cl^- により、 Ag^+ 、 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} が沈殿する。

希塩酸を加えた後に H_0S を吹き込むと、硫化物イオン S^{2-} によって、Snよりイオン化傾向の小さ い金属 (Cu²⁺, Cd²⁺, Sn²⁺) が沈殿する。

問23 有機相と水相との分配比が50の放射性の化学種があり、その化学種を含む水溶液の放射能は100 MBq

である。水相と等容積の有機相で溶媒抽出した場合に、水相に残る放射能 [MBq] として最も近い値は、 次のうちどれか。

1 0.1 2 0.2 3 0.5 4 1.0 5 2.0

[解答]

5

注) 各相の放射能は、有機相:水相=50:1となる。

問24 標識化合物に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 均一標識化合物はすべての位置の原子が均一に標識されているものをいう。
- B 特定標識化合物は特定の化合物のみが標識されているものをいう。
- C 放射化学的純度とは標識化合物の全放射能に対して特定の化学種に標識されているものの割合をいう。
- D 放射性核種純度とは着目する放射性核種がある特定の化学種の放射能に占める割合をいう。
 - 1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

〔解答〕

2

注) A:正

B:誤 特定(位)標識化合物は、特定の位置の原子だけに95%以上の放射性核種が標識されているもの。

C:正

D:誤 放射性核種純度とは、標識化合物の全放射能に対して、特定の放射性核種に標識されて いるものの割合をいう。

問25 ¹⁴CH₂COOHとサリチル酸を、硫酸を触媒として反応させたときの記述として正しいものはどれか。

- 1 主として ¹⁴C 標識アセチルサリチル酸が生成する。
- 2 ¹⁴C標識アセチルサリチル酸と ¹⁴C標識サリチル酸メチルが約1:1の割合で生成する。
- 3 主として ¹⁴C 標識サリチル酸メチルが生成する。
- 4 主として ¹⁴C 標識サリチル酸が生成する。
- 5 主として ¹⁴CO₂ が生成する。

[解答]

1

注)サリチル酸と酢酸(無水酢酸)を硫酸触媒下で反応させると,アセチルサリチル酸が,サリチル酸とメタノールを反応させると,アセチル酸メチルが生成する。サリチル酸のヒドロキシ基(-OH)の酸素が酢酸のカルボニル基(C=O)の炭素を攻撃し,酢酸のヒドロキシ基が離脱するため,酢

酸の ¹⁴C 標識メチル基は、アセチルサリチル酸に残る。

問26 標識化合物に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 同位体希釈分析法では、目的成分を完全に分離しなくても、その一部を純粋に取り出せれば定量できる。
- B 標識化合物の放射化学的純度は、同位体希釈分析法のうち直接希釈法により求めることができる。
- C [¹⁴C]エタノールの比放射能 [Bq·mol⁻¹] とそれを酸化して得られる [¹⁴C]酢酸の比放射能 [Bq·mol⁻¹] は、化学収率によらず等しい。
- D ラジオイムノアッセイは, 抗原一抗体反応を利用した分析法である。
 - 1 ACD のみ 2 AB のみ 3 AC のみ 4 BD のみ 5 BCD のみ

[解答]

1

- 注) A, C, D:正
 - B:誤 同位体希釈法のうち、逆同位体希釈法で求める。

問27次の分析法に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 加速器質量分析法は短半減期核種の定量分析に有効である。
- B 中性子放射化分析法では、γ線計測によって定量分析を行う。
- C ³He を入射粒子とする荷電粒子放射化分析法は、半導体中の微量酸素の定量分析に有効である。
- D PIXE 法では、内殻電子の励起後に発生する X 線を利用する。
 - 1 ACD OA 2 AB OA 3 AC OA 4 BD OA 5 BCD OA

〔解答〕

5

- 注)A:誤 加速器質量分析は、質量数によって分別するので、放射能の測定が困難な長半減期核種 の定量分析に利用される。
 - B:正 (n, γ) 反応で生成した放射性核種からのγ線を測定する。
 - C:正 荷電粒子放射化分析は、炭素、窒素、酸素などの分析に利用される。 $^{12}C(^{3}\text{He},\alpha)^{11}C,\ ^{16}O(^{3}\text{He},p)^{18}F$
 - D:正 PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 法, 粒子線励起 X 線法。

問28 次の記述のうち、ホットアトム効果による現象として正しいものの組合せはどれか。

- A ヨウ化エチルを中性子照射したのち、水を加えて振盪すると放射性ヨウ素が水相中に移った。
- B 安息香酸と炭酸リチウムを混合して中性子照射すると、トリチウムで標識された安息香酸が得られた。
- C 90 Sr を含む Sr²⁺ の水溶液をろ過すると、 90 Y がろ紙に捕集された。
- D クロム酸カリウムを中性子照射したのち、水に溶解し陽イオン交換樹脂カラムに流すと ⁵¹Cr³⁺ が樹脂に捕集された。
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

2.

- 注)A:正 $^{127}I(n,\gamma)^{128}I$ 核反応で生成した ^{128}I は反跳により水層に移る。
 - B:正 ${}^{6}Li(n,\alpha){}^{3}H$ ${}^{7}C$ ${}^{3}H$ のホットアトムが生成し、これが反跳して有機化合物を標識する。
 - C:誤 ⁹⁰Y はラジオコロイドとしてろ紙に捕集される。ホットアトム効果ではない。
 - D:正 50 Cr (n,γ) 51 Crによって生成する 51 Crは、反跳により6価から3価に還元される。
- 問29 次の放射性同位元素が用いられている分析・計測装置で、利用される放射線が正しいものはどれか。
 - 1 ⁶⁰Co − レベル計 − X線
 - 2 63 Ni ガスクロマトグラフ γ 線
 - 3 ¹⁴⁷Pm 厚さ計 *β*線
 - 4 ²⁴¹Am 蛍光 X 線分析装置 中性子線
 - 5 ²⁵²Cf 水分計 α線

[解答]

3

- 注) 1:誤 γ線
 - 2:誤 β線
 - 3:正
 - 4:誤 γ線, X線
 - 5 :誤 中性子線
- 問30 線量計に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A フリッケ線量計は、鉄イオンの酸化を利用する。
 - B セリウム線量計は、セリウムイオンの還元を利用する。
 - C フリッケ線量計は、空気を十分に通じてから使用する。
 - D アラニン線量計は、水和電子による還元作用を利用する。
 - E セリウム線量計は、ESR (電子スピン共鳴)装置を定量に用いる。
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACEのみ 4 BDEのみ 5 CDEのみ

[解答]

- 注) A:正
 - в: <u>т</u>
 - C:正 溶存酸素濃度を高めるために空気を吹き込む。
 - D:誤 放射線により生成したフリーラジカルを ESR 測定装置で測定する。
 - E:誤 セリウムイオン (4価 → 3価) の濃度を吸光度法で求める。

生 物 学

次の各間について、1から5までの5つの選択肢のうち、適切な答えを1つだけ、選び、注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

- 問1 次の標識化合物のうち、陽電子放射断層撮影(PET)検査に用いられるものの正しい組合せはどれか。
 - A [13N]アンモニア
 - B [18F]フルオロデオキシグルコース
 - C [67Ga]クエン酸ガリウム
 - D [99mTc]過テクネチウム酸ナトリウム
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

1

注)PET 検査では、放射性同位元素として陽電子を放出する β^+ 壊変核種が用いられる。陽電子と軌道電子との電子対消滅の際に生じる 180 度方向に同時に 2 本放射される消滅放射線により、放射性同位元素によって標識された機能分子の集積量と場所を検出する。それぞれの壊変様式は次のとおりである(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。

A: [¹³N] β^+ 壊変,B: [¹³F] β^+ 壊変,C: [⁶¹Ga] EC (軌道電子捕獲),D: [ჼ⁰™Tc] β^- 壊変 A と B が β^+ 壊変核種であり,それぞれ PET 検査で実際に用いられている化合物である。

間2 次の核種のうち、ミクロオートラジオグラフィーに最も適しているものはどれか。

1 ³H 2 ³²P 3 ³⁵S 4 ⁴⁵Ca 5 ⁹⁰Sr

[解答]

1

注)ミクロオートラジオグラフィーでは、飛程が短い β 線が最も短くシャープな飛跡を残す。エネルギーの小さい β 線ほど飛程が小さいため、最もエネルギーの小さい β 線を放出する放射性同位元素である 3 H がミクロオートラジオグラフィーに適している。

 β 線の最大エネルギーはそれぞれ次のとおりである(参考図書:アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。

1: ³H 0.0186 MeV, 2: ³²P 1.711 MeV, 3: ³⁵S 0.167 MeV, 4: ⁴⁵Ca 0.257 MeV,

5: 90Sr 0.546 MeV

最も低い³Hが正解である。

問3 放射線照射によって生じる活性種に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 水和電子は DNA に対して強い酸化剤として作用する。
- B 水素ラジカルは生体分子からの水素引き抜き反応を起こす。
- C 間接作用による DNA 損傷には、ヒドロキシルラジカルの寄与が最も大きい。
- D スーパーオキシドラジカルの寿命はヒドロキシルラジカルの寿命より短い。
- 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

〔解答〕

3

注)「酸化とは、電子を失うこと」であり、「還元とは、電子を得ること」である。

水溶液では放射線のエネルギーはまず水分子に吸収され、ヒドロキシルラジカル $(\cdot OH)$, 水素ラジカル $(H\cdot)$, 水和電子 (e_{aq}^-) , H_2 , H_2O_2 などのラジカルあるいは分子生成物が生じる。また、水和電子と酸素が反応してスーパーオキシドラジカルが生成する $(e_{aq}^- + O_2 \to O_2^-)$ 。間接作用での DNA 損傷ではヒドロキシルラジカルによる反応によるところが大きい。

A:誤 水和電子は還元的に作用する。

B:正 水素引き抜き反応は一般的に水素ラジカル並びにヒドロキシルラジカルにより引き起こされる。

 $C:\mathbb{T}$

D:誤 ヒドロキシルラジカルは他の物質との反応性が高く、スーパーオキシドラジカルより寿 命が短い。

- 間4 放射線による DNA 損傷に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A X線による DNA 損傷は紫外線による DNA 損傷と変わらない。
 - B γ線による2本鎖切断の収率は1本鎖切断の収率の約2倍である。
 - C 放射線に特異的な DNA 損傷はない。
 - D 塩基損傷は発がんの原因となる。
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

- 注) A:誤 紫外線は主として塩基ダイマーを生成するため、X線とは異なる。
 - B:誤 一定の線量で2本鎖切断ができる頻度は1本鎖切断よりも低いため、収率も低い。
 - C:正 他の DNA を損傷する薬剤や環境変異原でも放射線と同様の DNA 損傷を起こす。
 - D:正 塩基損傷はその損傷が修復されず固定され、突然変異を起こした遺伝子産物ががん抑制 遺伝子やがん遺伝子の場合、発がんの原因になる可能性がある。
- 問5 酸素効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 酸素効果は主に直接作用を修飾する。
 - B 酸素効果の機序の一つに酸素による損傷の固定化がある。
 - C 照射後の酸素濃度上昇により大きな酸素効果が得られる。
 - D グルタチオンは酸素効果に影響を与える。
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

4

- 注)放射線の間接作用では、酸素があると活性の高い酸素ラジカルを作ったり、生体分子に生じたラジカルと酸素分子が反応して損傷を固定したり、また連鎖反応を起こすことにより、結果として放射線の作用を強める。これを酸素効果といい、これは酸素のない時に比べて放射線の効果が2.5~3倍になる。細胞内には還元物質としてグルタチオンが存在し、酸素分子の放射線増感作用を軽減する役割を持っている。
 - A:誤 酸素効果は主に間接作用を修飾する。
 - B:正 酸素ラジカルは損傷を固定化する場合がある。
 - C:誤 酸素は照射時の間接作用を修飾する。
 - D:正 間接作用を修飾するグルタチオンは酸素効果を抑制する。
- 問6 放射線の直接作用と間接作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 低 LET 放射線による DNA 損傷は主に直接作用による。
 - B 試料を凍結すると間接作用の比率が小さくなる。
 - C 直接作用の一つに、DNAの共有結合の解離によるラジカルの発生がある。
 - D 低 LET 放射線によって生じた二次電子が標的分子に与える影響は間接作用である。
 - 1 ACD OA 2 AB OA 3 BC OA 4 D OA 5 ABCD au au au au au au

[解答]

3

注) 間接作用の基礎知識

放射線による水ラジカルによって DNA 損傷が生じる現象が間接作用である。低 LET 放射線では間接作用の寄与の方が直接作用よりも大きい。

- A:誤 低LET放射線では間接作用の寄与が大きい。
- B:正 凍結により水ラジカルの移動が抑えられるため、直接作用の寄与が大きくなる。
- C:正 DNA上でのラジカル形成は直接作用に含まれる。
- D:誤 低LET 放射線によって生じた二次電子が標的分子に与える影響は間接作用の寄与は大きいが全てではない。
- 問7 γ線の細胞致死作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 細胞周期の G₁-S 移行期の方が S 期後半よりも感受性が高い。
 - B 一般に同一の生存率を与える吸収線量は、低線量率の方が高線量率よりも大きい。
 - C リンパ球は好中球に比べて放射線感受性が高い。
 - D コロニー形成法では間期死を定量できる。
 - 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

[解答]

- 注) A:正 細胞周期の G₁-S 移行期は放射線高感受性, S 期後半は放射線抵抗性である。
 - B:正 一般に低線量率の方が同一の効果を与えるためには多くの線量が必要となる。

 $C:\mathbb{E}$

D:誤 コロニー形成法では主として増殖死を定量するため、間期死を定量化するのは難しい。

- 間8 γ線による生殖細胞の致死と突然変異に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 精原細胞は精子より致死感受性が高い。
 - B 精原細胞は間質細胞より致死感受性が高い。
 - C 男性の場合,一時的不妊からの回復には被ばく線量が高いほど時間がかかる。
 - D 突然変異のなかには、受精卵からの発生過程で淘汰されるものがある。
 - 1 ACD のみ 2 AB のみ 3 BC のみ 4 D のみ 5 ABCD すべて

[解答]

5

- 注)一般的に放射線感受性については、次のことがいえる。
 - ①幹細胞は高感受性。成熟度が高ければ高抵抗性
 - ②未分化細胞は高感受性
 - ③若い細胞, 若い組織は高感受性
 - ④代謝性の高いものは高感受性
 - ⑤増殖速度(増殖率)の大きいものは高感受性
 - A:正 精原細胞の方が分化の程度が低いため致死感受性が高い。
 - B:正 幹細胞は高感受性であるため精原細胞は致死感受性が高い。
 - C: 正 一時的不妊からの回復は高線量で幹細胞の致死率が高いほど時間がかかる。
 - D:正 突然変異は発生過程で致死的に影響するものもあり、そのような場合、受精卵からの発生過程で淘汰される。
- 問9 培養細胞における放射線による HPRT 遺伝子突然変異に関する次の記述のうち,正しいものの組合せはどれか。
 - A 突然変異の検出には、突然変異を誘発した細胞のみが選択培地で増殖できるようになることを利用 する。
 - B 高 LET 放射線の場合, γ線に比べて吸収線量当たりの突然変異誘発率が高い。
 - C X線による突然変異頻度と吸収線量の関係は、直線-2次曲線モデルに当てはまる。
 - D 一般に, γ線では高線量率に比べ低線量率の方が突然変異誘発率が高い。
 - 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

2

注)A:正 野生株はヒポキサンチン、アミノプテリン、チミジンを含む HAT 培地を用いてアミノ プテリンによるヌクレオチド合成のデノボ合成経路の阻害がかかる状態で培養しても、ヒポキサンチンを HPRT によってイノシン酸に、チミジンを TMP に変換できるサルベージ回路があるため致死的にならないが、HPRT やチミジンキナーゼの欠損株ではヌクレオチド合成ができずに致死的になる。すなわち、突然変異を誘発した細胞のみが選択培地で増殖できるようにする。

- B:正 高LET 放射線の場合、2本鎖切断の誘発率が高いため、突然変異誘発率が高い。
- C:誤 X線による突然変異頻度は吸収線量に対して指数関数的に増加する。
- D:誤 一般に、γ線では高線量率に比べ低線量率の方が突然変異誘発率は低い。
- 問10 放射線によって誘発される染色体異常に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 血液中のリンパ球を培養して検査することができる。
 - B 構造の異常を分子生物学的手法で検出することができる。
 - C 小核形成細胞の出現頻度からは被ばく線量の推定はできない。
 - D 培養細胞では直接被ばくしていない細胞に観察されることがある。
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

[解答]

2

- 注)A:正 末梢血のリンパ球を培養して染色体の異常を検出する方法では、染色体異常の頻度から 被ばく線量の推定などができる。
 - B:正 蛍光 in situ ハイブリダイゼーション (FISH) 法などの分子生物学的手法で染色体構造の異常を検出することができる。
 - C:誤 小核形成は線量依存性の効果であり、小核形成細胞の出現頻度から被ばく線量を推定で きる。
 - D:正 自然発生の染色体異常や種々の化学物質による染色体異常も観察される。
- 問 11 X線による 4 Gy の急性全身被ばく後の末梢血液に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A リンパ球数は、被ばく後1日以内に一過性に増加する。
 - B 血小板数は、被ばく後20日以降に最低値を示す。
 - C 赤血球数は、被ばく後25日以降に最低値を示す。
 - D 好中球数は、被ばく後1日以内に最低値を示す。
 - 1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

[解答]

- 注) A:誤 被ばくによりリンパ球への分化が途絶えることに加え,リンパ球は放射線感受性が高く 細胞死を起こすため,被ばく直後からその数は減少する。
 - B:正 被ばくにより血小板への分化が途絶えるため、血小板はその寿命(約3~4日)に応じて徐々に減少し、被ばく後20日以降に最低値を示す。
 - C:正 被ばくにより赤血球への分化が途絶えるため、赤血球はその寿命(約120日)に応じて 徐々に減少し、被ばく後25日以降に最低値を示す。
 - D:誤 好中球の数は、4 Gy 程度の急性全身被ばく後 1~2 日以内に一過性に増加する。これは 骨髄・脾臓などの組織にプールされた好中球が末梢血に放出されるためである。
- 問12 γ線による急性全身被ばく後の骨髄死に関する次の記述のうち,正しいものの組合せはどれか。

- A 被ばく後3日以内に起きる。
- B 血小板減少は、骨髄死の原因の一つである。
- C LD_{50/60}の放射線量を被ばくしたときの主な死因である。
- D 5Gy以下の被ばくではサイトカイン治療は必要ない。
- 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

3

- 注) A:誤 骨髄死は血液中の血球数が減少する数週間後に起きる。
 - B:正 白血球の減少による抵抗力の低下,血小板の減少による出血性傾向の増大が主な死因である。
 - C:正 ヒトのLD_{50/60} (60 日以内の半致死線量) は 2~10 Gy の線量域に含まれる。この線量域における主な死因は骨髄死である。
 - D:誤 5 Gy 以下の被ばくでは造血器系障害の治療が重要であり、造血性サイトカイン治療が 有効と考えられる。
- 問13次の放射線障害のうち、幹細胞の障害が関与するものとして正しいものの組合せはどれか。
 - A 中枢神経死
 - B 腸死
 - C 骨髄死
 - D 男性不好
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCD すべて

[解答]

- 注) A:誤 中枢神経系における血管障害とそれに起因する浮腫が主な死因と考えられている。
 - B:正 腸上皮幹細胞の障害により上皮細胞の供給が阻害される結果,粘膜剥離,脱水症状,電 解質平衡の失調,腸内細菌への感染が生じ,死(腸死)に至る。
 - C:正 造血系幹細胞の障害により末梢血への血球の供給が阻害され、白血球の減少による抵抗 力の低下、血小板の減少による出血性傾向の増大等をきたし、死(骨髄死)に至る。
 - D:正 幹細胞 (精原細胞) の障害・死亡により精子への分化・成熟が阻害され, 男性不妊が生じる。
- 問 14 γ 線による急性被ばく後の障害と、障害を受けた臓器・組織におけるしきい線量の関係として、正しいものの組合せは、次のうちどれか。
 - A 白内障 (視力低下) 15~20 Gy (眼)
 - B 女性の永久不妊 2.5~6.0 Gy (卵巣)
 - C 男性の一時的不妊 ─ 1.0~1.5 Gy (精巣)
 - D 男性の永久不妊 3.5~6.0 Gy (精巣)
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

4

- 注)A:誤 水晶体混濁のしきい線量は $0.5\sim2$ Gy 程度, 白内障のしきい線量は $1.5\sim5$ Gy 程度である。
 - B:正 2.5~6.0 Gy の急性被ばくにより、卵巣に蓄えられている未成熟卵母細胞が死滅し永久 不妊となると考えられている。
 - C:誤 後期精原細胞は放射線感受性が高く, 0.15 Gy 程度の急性被ばくにより細胞死が起こり, 一過性の不妊が生じる。
 - D:正 3.5~6.0 Gy を超える線量では幹細胞 (精原細胞) が死滅し、永久不妊が起こる。
- 問 15 臓器全体が X 線に急性被ばくした場合に最も低い線量で起こるものは、次のうちどれか。
 - 1 病的骨折(肋骨)
 - 2 放射線肺炎(肺)
 - 3 脳壊死 (大脳)
 - 4 失明 (網膜)
 - 5 直腸穿孔(直腸)

〔解答〕

2

注)肺は比較的放射線感受性が高く、胸部がんの放射線治療や骨髄移植時の全身照射の際に注意を要する器官である。

通常分割照射における正常組織の耐容線量($TD_{5/5}$:5 年間で 5%に副作用を生ずる線量)は、病的骨折(肋骨)50 Gy,放射線肺炎(肺)17.5 Gy,脳壊死(大脳)45 Gy,失明(網膜)45 Gy,直腸穿孔(直腸)60 Gy 程度である。

- 問16 職業被ばく及び医療被ばくによる発がんに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A ウラン鉱夫において、肺がんの増加が見られた。
 - B 胸部 X 線透視を行った結核患者において、乳がんの増加が見られた。
 - C トロトラストを用いた血管造影を行った患者において、白血病の増加が見られた。
 - D ラジウム時計文字盤工において, 骨腫瘍の増加が見られた。
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕

- 注)A:正 アメリカやカナダのウラン鉱山の鉱夫に対する疫学的調査において、肺がん増加が認められている。これは鉱石から発生するラドンなどの放射性物質を長期にわたって吸入したためと考えられている。
 - B:正 人工気胸術を施された結核患者の効果確認のため反復して胸部透視が行われたアメリカ やカナダの結核患者に乳がんの増加が認められている。
 - C:正 トロトラストを投与された患者において、肝がんや白血病の増加が認められている。こ

れは肝臓や骨髄などに沈着した放射性トリウムから放出される α 線の影響と考えられている。

D:正 放射性ラジウムを含む夜光塗料を文字盤に塗布する際,筆の穂先を尖らすために唇で舐めながら作業をしたため放射性ラジウムを体内に取り込み,この影響で作業員の骨腫瘍が多発したと考えられている。

問 17 原爆被爆者の疫学調査で、統計的に有意なリスクの上昇が認められている疾患の組合せは、次のうちどれか。

- A 急性骨髓性白血病
- B 急性リンパ性白血病
- C 慢性骨髓性白血病
- D 成人T細胞白血病
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

[解答]

1

注)原爆被爆者の疫学調査において、急性及び慢性の骨髄性白血病と急性リンパ球性白血病にリスクの増加が認められている。成人 T 細胞白血病や、慢性リンパ球性白血病には有意なリスクの増加は認められていない。

Dは誤り。

問 18 原爆被爆者におけるがんの相対リスクと絶対リスクに関する次の記述のうち,正しいものの組合せはどれか。

- A 相対リスクと過剰相対リスクの差は常に一定である。
- B 過剰絶対リスクと過剰相対リスクの大小は常に一致する。
- C 白血病の過剰絶対リスクは胃がんの過剰絶対リスクより大きい。
- D 白血病の過剰相対リスクは全固形がんの過剰相対リスクより大きい。
- E 全固形がんの相対リスクは 1 Gy において約 0.5 である。
- 1 A & B 2 A & D 3 B & E 4 C & D 5 C & E

[解答]

- 注) A:正 過剰相対リスクは相対リスクから1を引いたものであり、その差は常に一定である。
 - B:誤 過剰相対リスクは、対照群の罹患率が低い場合には大きくなり、対照群の罹患率が高い場合には小さくなる。したがって、過剰絶対リスクと過剰相対リスクの大小は一致しない場合がある。
 - C:誤 白血病,胃がんの過剰絶対リスクは各々3.08,3.61(10⁴·年·Sv)⁻¹程度であり,白血病 の過剰絶対リスクの方がやや小さい。
 - D:正 白血病,全固形がんの過剰相対リスクは各々 4.84, 0.62 Sv⁻¹ 程度である。
 - E:誤 リスクが増加する場合、相対リスクは 1 より大きくなる。全固形がんの相対リスクは $1.62~{
 m Sv}^{-1}$ 程度である。

- 問19 確率的影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 早期反応に確率的影響はない。
 - B 晩発影響はすべて確率的影響である。
 - C 胎内被ばくでは確率的影響は生じない。
 - D 確率的影響の重篤度は線量には依存しない。
 - 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 BCのみ 5 BCDのみ

「解答〕

3

- 注) A:正 確率的影響に分類されるのは発がんと遺伝的影響であるが、発がんには長い潜伏期があり、遺伝的影響も世代を重ねることで出てくるものである。
 - B:誤 晩発影響の1つである白内障は確定的影響である。
 - C:誤 胎児期の被ばくによる発がんは確率的影響である。
 - D:正 重篤度が線量に依存するのは確定的影響である。
- 問 20 ICRP 2007 年勧告における確率的影響の名目リスク係数に関する次の記述のうち,正しいものの組合せはどれか。
 - A がんの名目リスク係数は、遺伝性(的)影響の名目リスク係数より大きい。
 - B 遺伝性(的)影響の名目リスク係数は、1990年勧告より大きい。
 - C 全年齢集団の名目リスク係数は、就労年齢集団(18-64歳)の名目リスク係数より大きい。
 - D 線量・線量率効果係数 (DDREF) として 1/2 を採用している。
 - 1 ABD OA 2 AC OA 3 BC OA 4 BD OA 5 ACD OA

〔解答〕

- 注)A:正 ICRP 2007 年勧告によると、被ばく者全集団のがんの名目リスク係数は $0.055~\mathrm{Sv}^{-1}$ 、遺 伝性(的)影響の名目リスク係数は $0.002~\mathrm{Sv}^{-1}$ である。
 - B:誤 ICRP 1990 年勧告での遺伝性(的)影響の名目リスク係数は 0.013 Sv⁻¹ であった。
 - C:正 就労年齢集団のがんの名目リスク係数は $0.041~{
 m Sv}^{-1}$,遺伝性(的)影響の名目リスク係数は $0.001~{
 m Sv}^{-1}$ と推定されている。A の注釈で述べた全年齢集団に対する数値の方が大きい。
 - D:誤 線量・線量率効果係数 (DDREF) とは、高線量率照射による被ばくと低線量率照射の 場合とで同じ生物効果が出る線量の逆比。ICRP 1990 年勧告で DDREF=2 が採用され、 ICRP 2007 年勧告においても値の変更はない。DDREF が 2 ということは、低線量率被 ばくのリスク係数を高線量率被ばくのそれの 1/2 として扱うという意味になる。
- 問21 日本における自然放射線による被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 経口摂取による内部被ばくに対する寄与はカリウム 40 が最も大きい。
 - B ラドン、トロン及びその子孫核種による被ばく線量は日本平均より世界平均が高い。
 - C 吸入摂取による内部被ばくに対する寄与はトロン及びその子孫核種が最も大きい。
 - D 年間被ばく線量は約2.1 mSv である。

1 A & B 2 A & C 3 A & D 4 B & C 5 B & D

[解答]

5

注)「新版 生活環境放射線 (国民線量の算定)」(原子力安全研究協会, 2011 年 12 月発行) によると, 日本における自然放射線による年間実効線量は 2.1 mSv と報告された。

その内訳は、宇宙線による線量が 0.3 mSv、大地・大気からの線量が 0.33 mSv、経口摂取による線量が 0.99 mSv、吸入摂取による線量が 0.48 mSv である。

このうち、経口摂取による内部被ばくに大きく寄与するのはポロニウム 210 で 0.73 mSv とされ、日本人は海産物を多く摂取するためとみられている。吸入摂取による内部被ばく線量の世界平均は 1.3 mSv と見積もられており、日本平均よりも高い。また、吸入摂取においては、日本ではトロンやその子孫核種よりもラドンの影響が大きい。

B と D が正解。

問 22 日本における人工放射線による一般公衆の被ばくに関する次の記述のうち,正しいものの組合せはどれか。

- A 原子力発電所による寄与が最も大きい。
- B 核実験における集団実効線量預託への寄与では炭素 14 が最も大きい。
- C CT 検査 1 回当たりの平均実効線量は約 2~13 mSv である。
- D 医療被ばく線量は約0.4 mSv/年である。
- 1 A & C 2 A & D 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

- 注) A:誤 医療被ばくによる寄与が最も大きい。
 - B:正 預託とは、長期にわたる内部被ばくを摂取時に被ばくしたものとして扱うことで、集団 実効線量預託は、ある線源または行為(核実験等)に由来するまとまった人数の実効線 量率を無限時間まで積分することによって得られる。集団実効線量預託に寄与する核種 は炭素 14、セシウム 137、ジルコニウム 95 などがあるが、半減期の長さから炭素 14 の 影響が最も大きい。
 - C:正 検査を受ける部位や内容によって異なり、頭部は比較的低く、腹部では高い。
 - D:誤 2011年のデータでは、日本における平均医療被ばく線量は約3.9 mSv/年と報告されている。
- 問23 原爆被爆者の疫学調査で有意な増加が観察された胎内被ばく影響として,正しいものの組合せは次のうちどれか。
 - A 精神遅滞
 - B 低身長
 - C 小頭症
 - D 四肢の奇形
 - 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

[解答]

1

注)母親の胎内で放射線に被ばくし、原爆被爆時から1946年5月31日までの期間に出生した者を胎内 被ばく者という。胎児期の脳は放射線感受性が高く、原爆放射線と精神遅滞や発育遅延及び小頭症 との関連が明らかにされてきた。

Dは誤り。

- 問24 遺伝性(的)影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 自然発生突然変異率を 2 倍にするのに要する線量を倍加線量とよぶ。
 - B 遺伝的リスクの推定に用いられる倍加線量法は直接法とも呼ばれる。
 - C 2001 年 UNSCEAR 報告では倍加線量を 1 Gy としている。
 - D 原爆被爆者では被ばくによる遺伝性(的)影響が有意に増加した。
 - 1 A & B 2 A & C 3 B & C 4 B & D 5 C & D

[解答]

2

- 注) A:正
 - B:誤 倍加線量法とは、ヒトの遺伝的疾患の自然発生率と動物実験による倍加線量を比較して 間接的に推定するものである。

 $C:\mathbb{E}$

D:誤 そのような報告はない。

- 問25 低 LET 放射線と比較した場合の高 LET 放射線の細胞致死作用の特徴として,正しいものの組合せは次のうちどれか。
 - A ラジカルスカベンジャーによる防護効果が小さい。
 - B 酸素効果が小さい。
 - C 線量率効果が小さい。
 - D 同じ程度の致死作用を得るのに必要な吸収線量が小さい。
 - 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

[解答]

- 注)A:正 ラジカルスカベンジャーは放射線照射によって発生する OH ラジカル等と反応し、これを化学反応性の低い物質に変えるもので、ラジカルによる細胞の傷害を低減させる効果がある。高 LET 放射線による作用はラジカルを介した間接的なものではなく、直接細胞に傷害を与えるものが主でありスカベンジャーの防護効果は小さい。
 - B:正 酸素効果とは、放射線照射時に酸素分圧の高い環境下(~20 mmHg)にあると、低い場合に比べて細胞致死効果が大きくなるというものである。これは標的分子の損傷部位が酸素と反応して修復されにくくなるためと考えられていて、低 LET 放射線を照射された場合の間接効果の1つである。これもラジカルの関与が低い高 LET 放射線では効果が小さい。

C:正 同じ線量の放射線を照射する場合、一度に照射するよりも複数回に分けて照射する方が 生体への影響は小さくなるのが線量率効果である。これは低 LET 放射線で顕著に現れ るもので、主に間接作用によって受けたダメージからの回復反応が働く結果と考えられ ている。

D:正 高LET 放射線は電離密度が密で、修復しにくい DNA の2本鎖切断が低LET 放射線の 照射時より高頻度で起こる。

問26 放射線加重係数に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 放射線の種類によっては、そのエネルギーにより値が異なる場合がある。
- B 確定的影響を評価するための係数である。
- C 線量率が高くなるとその値は大きくなる。
- D 外部被ばく及び内部被ばくいずれの評価にも考慮されている。
- 1 ABC のみ 2 AB のみ 3 AD のみ 4 CD のみ 5 BCD のみ

[解答]

3

- 注) A:正 中性子線が該当する (間 27 の [解答] D の注釈を参照)。
 - B:誤 吸収線量に放射線加重係数を乗じたものが等価線量であり、放射線防護において確率的 影響を評価するために用いられる。
 - C:誤 放射線加重係数は、放射線が人体に与える影響を考慮し、異なる種類及びエネルギーの 放射線を同一尺度で評価できるよう値が設定されており、線量率にはよらない。

D:IE

- 問27 ICRP 2007 年勧告における放射線加重係数に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A すべてのエネルギーの光子に対して1が与えられている。
 - B すべてのエネルギーの電子に対して2が与えられている。
 - C すべてのエネルギーの陽子に対して2が与えられている。
 - D すべてのエネルギーの中性子に対して10が与えられている。
 - E すべてのエネルギーの α粒子に対して 20 が与えられている。
 - 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 ACE $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 ADE $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BDE $\mathcal{O}\mathcal{A}$

[解答]

2.

注) A:正

B:誤 1が与えられている。

 $C: \mathbb{E}$

D:誤 中性子については、人体の吸収線量に対する二次光子の大きな寄与を考慮し、エネルギーに依存する関数で表され、1 MeV 付近で極大(約 20)となる。

E:正

問28 細胞致死作用を指標とした RBE に関する次の記述のうち,正しいものの組合せはどれか。

- A 照射時の酸素分圧の違いによらず一定である。
- B 中性子線ではエネルギーの違いによらず一定である。
- C LET の違いによって異なる。
- D 線量率の違いによって異なる。
- 1 ABC $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 2 AB $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 3 AD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 4 CD $\mathcal{O}\mathcal{A}$ 5 BCD $\mathcal{O}\mathcal{A}$

〔解答〕

4

- 注) A:誤 照射時の酸素分圧が高いと放射線致死作用は高く、低い場合は低い。
 - B:誤 中性子線ではエネルギーの違いに依存し、RBE はエネルギーの高い核分裂中性子では 約4倍、14 MeV 中性子では約2倍という報告がある。
 - C:正 一般的に LET の上昇に伴って RBE は増加するが、マウスの放射線全身照射による致死 効果では、LET が 41 keV/ μ m で RBE は 4 で最大となり、これより LET が大きくても小さくても RBE は 4 より小さくなる。
 - D:正 一般的に線量率が高いと RBE は大きい。
- 問29 悪性腫瘍の放射線治療において、治療成績に影響を与える要因として正しいものの組合せはどれか。
 - A 腫瘍細胞の放射線感受性
 - B 腫瘍周囲の正常細胞の放射線感受性
 - C 腫瘍細胞の増殖速度
 - D 腫瘍細胞の酸素分圧
 - 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCD すべて

[解答]

- 注)A:正 腫瘍細胞の放射線感受性そのものが治療成績に影響を与える最も重要な因子である。例 えば、一般に扁平上皮がんの方が腺がんよりも放射線の治療効果が大きいのは、がん固 有の感受性が治療成績に反映している。
 - B:正 腫瘍周囲の正常細胞の放射線感受性が高いと、腫瘍に大きな線量を照射することが困難 となり、治療成績に影響を与える。
 - C:正 腫瘍細胞の増殖速度が早いほど、放射線に対する感受性が高い。これはベルゴニートリボンドーの法則に当てはまる。
 - D:正 腫瘍細胞に低酸素分圧の領域が多いと、放射線の腫瘍致死効率が低くなり、治療成績も 低下する。
- 問30 組織加重係数に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。
 - A 確率的影響を評価するための係数である。
 - B 臓器・組織の等価線量にこの係数を乗じ、全身にわたって積算することによって実効線量が与えられる。
 - C 線量率の高低によらず、臓器・組織ごとに一定の値が与えられている。
 - D 年齢によらず、臓器・組織ごとに一定の値が与えられている。

1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

5

注)A:正 組織加重係数は、放射線発がん及び遺伝的影響である確率的影響に対する各臓器・組織の相対的な放射線感受性の程度を表す係数である。したがって、実効線量で問題としているリスクとはあくまで確率的影響のリスクのみである。

B:正 実効線量 (effective dose) E は、人体の臓器・組織 T の等価線量を $H_{\rm T}$ 、組織加重係数を $w_{\rm T}$ とするとき、 $E=\sum w_{\rm T}\cdot H_{\rm T}$ で表される。

C:正 臓器・組織の係数の和は1である。

D:正

物 化 生

問1 次のI, IIの文章の の部分に入る最も適切な語句, 記号, 数値又は数式を, それぞれの解答群から1つだけ選べ。

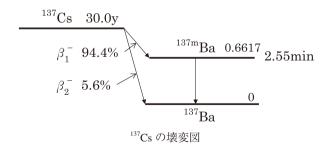
I 励起状態にある原子核が γ 線を放出してエネルギーのより低い状態に変わることを γ 遷移という。励起状態の原子核は, α 壊変や β 壊変などによって生成するものが多く,励起状態の寿命は一般に短い。例えば, 60 Co は 5.27 年の半減期で β 壊変し,99.93%が 60 Ni の 2.506 MeV の励起準位をとるが,その励起準位の寿命は A 秒のオーダーで,直ちに γ 線を放出して次の B MeV の励起準位になる。この準位の寿命も同程度で γ 線を放出して, 60 Ni の安定状態になる。

励起状態が長い原子核も存在する。例としては C の励起状態の半減期は約6時間である。このような状態にある原子核を D と呼び、そのγ遷移過程を E と呼ぶ。

一方,励起状態の原子核が γ 線を放出せずエネルギーを軌道電子に直接与えて,その軌道電子を放出する現象がある。この現象はF とよばれ,放出された電子のエネルギー分布はG である。F の起こる確率は,原子番号のほぼH 乗に比例し,原子核から放出されるエネルギーがI ほど大きい。F にあずかる電子はI 電子が約80%である。遷移の際に電子が放出される確率 I_c と γ 線が放出される確率 I_r の比 α ($=I_c/I_r$) をF 係数といい,軌道電子の種類に応じて α_K , α_L , …のように表す。全F 係数を α_T ($=\alpha_K+\alpha_L+\cdots$),並びに遷移の確率 P ($=I_c+I_r$) とすると,P 線放出の確率 P ($=I_c+I_r$) とすると,P 解放出の確率 P ($=I_c+I_r$) とすると P 解放出の確率 P ($=I_c+I_r$) と P 解放 P を P 解放 P (P) を P 解放 P (P) を P (P)

 $I_{\nu} = K$

となる。下図に示す 137 Cs の場合では, $\alpha_{\rm T}$ =0.110 とすると,1 壊変当たりの γ 線放出の割合は, $\overline{\rm L}$ となる。



<A の解答群>

1 1×10^{-3} 2 1×10^{-6} 3 1×10^{-9} 4 1×10^{-12} 5 1×10^{-15}

<Bの解答群>

1 0.511 2 0.662 3 1.173 4 1.231 5 1.275 6 1.333 7 1.844

8 1.995

<Cの解答群>

1 ⁹⁹Mo 2 ⁹⁹Tc 3 ¹⁰⁹Cd 4 ¹³¹I 5 ¹³¹Xe

<D~Fの解答群>

1 核異性体 2 同重体 3 複合核 4 内部転換 5 電子捕獲 6 電子放射

7 制動放射 8 光核反応 9 核異性体転移 10 蛍光収率 11 オージェ効果

<G の解答群>

1 線スペクトル 2 連続スペクトル 3 光電スペクトル 4 多重スペクトル

5 共鳴スペクトル

<H, Iの解答群>

1 小さい 2 大きい 3 近接する 4 離散している 5 2 6 3

7 4.5 8 6

<Jの解答群>

1 自由 2 光 3 コンプトン 4 K 軌道 5 L 軌道 6 最外殻 < K の解答群>

 $1 \quad \frac{p}{\alpha_{\mathrm{T}}} \qquad 2 \quad p \cdot \frac{\alpha_{\mathrm{K}}}{1 + \alpha_{\mathrm{T}}} \qquad 3 \quad \frac{p}{1 + \alpha_{\mathrm{T}}} \qquad 4 \quad p \cdot \frac{\alpha_{\mathrm{T}}}{1 + \alpha_{\mathrm{K}}} \qquad 5 \quad \frac{1}{p \cdot (1 + \alpha_{\mathrm{T}})} \qquad 6 \quad \frac{\alpha_{\mathrm{T}}}{p}$

 $7 \quad p \cdot \frac{\alpha_{\mathrm{K}}}{1 - \alpha_{\mathrm{T}}} \qquad 8 \quad \frac{p}{1 - \alpha_{\mathrm{T}}} \qquad 9 \quad p \cdot \frac{\alpha_{\mathrm{T}}}{1 - \alpha_{\mathrm{K}}} \qquad 10 \quad \frac{1}{p \cdot (1 - \alpha_{\mathrm{T}})} \qquad 11 \quad p \cdot \frac{1 + \alpha_{\mathrm{K}}}{1 + \alpha_{\mathrm{T}}} \qquad 12 \quad p \cdot \frac{1 - \alpha_{\mathrm{K}}}{1 - \alpha_{\mathrm{T}}}$

<Lの解答群>

1 0.06 2 0.10 3 0.22 4 0.35 5 0.59 6 0.76 7 0.85 8 0.96 II 静止している質量 M の原子核が、 γ 遷移により E だけ低いエネルギーに遷移するとき、原子核自体は反跳される。遷移のエネルギーE の一部は反跳に費やされ、その分だけ放出 γ 線エネルギーは低下するので、この γ 線を同じ原子核に当てても共鳴吸収は起こらない。

遷移において、放出される γ 線のエネルギーが E_{γ} であるとき、光の速さをcとすれば、 γ 線の運動量は Γ となる。一方、反跳原子核の運動エネルギー E_{R} は Γ となる。

先に述べた共鳴吸収が起こらない理由は、 γ 線の放出時と同様に吸収時にも原子核の反跳にエネルギーが消費されるためであるが、原子核が強く束縛されているM 中では共鳴吸収が起こる例が見いだされている。原子核が強く束縛されているために、実効的に原子核のN が大きくなり、 E_R がほとんど0となる場合である。これをO 効果という。原子核の共鳴エネルギーは、原子の化学状態や磁場の有無などによってごくわずかに変化する。O 分光法では、線源となる原子核を運動させO 効果を利用してV線エネルギーを増減させ、共鳴エネルギーを測定する。

<ア, イの解答群>

 $1 \quad \frac{E_{\gamma}}{M} \qquad 2 \quad \frac{E_{\gamma}}{c} \qquad 3 \quad \frac{E_{\gamma}}{Mc} \qquad 4 \quad \frac{E_{\gamma}}{2Mc} \qquad 4 \quad \frac{E_{\gamma}}{Mc^2} \qquad 6 \quad \frac{E_{\gamma}}{2Mc^2} \qquad 7 \quad \frac{E_{\gamma}}{(2Mc)^2}$

$$8 \quad \frac{E_{\gamma}^{2}}{M} \quad 9 \quad \frac{E_{\gamma}^{2}}{c} \quad 10 \quad \frac{E_{\gamma}^{2}}{Mc} \quad 11 \quad \frac{E_{\gamma}^{2}}{Mc^{2}} \quad 12 \quad \frac{E_{\gamma}^{2}}{2Mc^{2}} \quad 13 \quad \frac{E_{\gamma}^{2}}{(2Mc)^{2}}$$

<ウの解答群>

1
$$E - \frac{E}{2Mc}$$
 2 $E - \frac{E}{Mc^2}$ 3 $E - \frac{E}{2Mc^2}$ 4 $\frac{E^2}{(2Mc)^2}$ 5 $E - \frac{E^2}{Mc^2}$ 6 $E - \frac{E^2}{2Mc^2}$

$$7 \quad E - \frac{E^2}{(2Mc)^2}$$

<エの解答群>

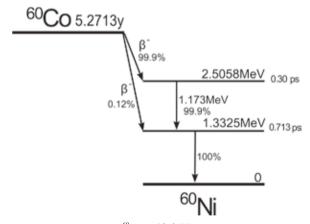
<M~Pの解答群>

1 気体2 液体3 固体4 ラザフォード5 ラムザウアー6 トンネル7 メスバウアー8 オージェ9 ドップラー10 ペニング11 エネルギー

12 質量 13 密度 14 遷移幅

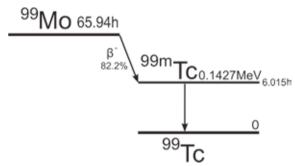
[解答]

注)A,B:以下に 60 Co の壊変図を示す。この図に示す通り, 60 Co は 99.9% β 壊変して 60 Ni の 2.5058 MeV の励起準位をとるが,0.30 ps(\sim 1 \times 10 $^{-12}$ 秒のオーダー)で,1.3325 MeV の励起準位をとる。



⁶⁰Co の壊変図

C, D, E:以下に 99 Mo から 99 Tc の壊変図を示す(なおこの壊変図は分かりやすくするため一部省略してある。詳細な壊変図はアイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会)等を参照のこと)。 半減期 $^{65.94}$ 時間の 99 Mo の多くは 69 Pg変して 99 Tc の核異性体である 99 Tc に遷移し, $^{0.1427}$ MeV の 99 $^{$



99Mo の壊変図

$$K: \alpha_T = I_e/I_v$$
, $p = I_e + I_v$ より, $p = \alpha_T I_v + I_v$ となり,

$$I_{\gamma} = \frac{p}{1 + \alpha_{\mathrm{T}}}$$

L:図より、 137 Cs が壊変して γ 線を放出する際には 137m Ba の状態に遷移するので、p=0.944 であ δ_{\circ} $\pm t$, $\alpha_{\rm T} = 0.110 \pm 0$,

$$I_{\gamma} = \frac{p}{1 + \alpha_{\mathrm{T}}} = \frac{0.944}{1 + 0.110} \stackrel{.}{=} 0.85$$

II
$$7-2$$
 $1-12$ $7-6$ $1-7$ $M-3$ $N-12$ $O-7$ $P-9$

注) イ:運動量保存則より反跳原子核と放出γ線の運動量の大きさは等しい。

反跳原子核の速度をvとすると、 $Mv=E_{\gamma}/c$ となる。したがって、

$$E_{\rm R} = \frac{1}{2}Mv^2 = \frac{1}{2}M\left(\frac{E_{\gamma}}{Mc}\right)^2 = \frac{E_{\gamma}^2}{2Mc^2}$$

ウ:
$$E_{\rm R} = E - E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}^2}{2Mc^2}$$
 より,

$$E = E_{\gamma} + \frac{E_{\gamma}^2}{2Mc^2}$$

$$\frac{E}{Mc^2} = \frac{1}{8} \times \frac{4E_{\gamma}^2}{M^2c^4} + \frac{1}{2} \times \frac{2E_{\gamma}}{Mc^2}$$

ここで、
$$x=-\frac{2E_{\gamma}}{Mc^2}$$
とおくと、

$$\frac{E}{Mc^2} = \frac{x^2}{8} - \frac{x}{2} = 1 - \left(1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8}\right)$$

 $Mc^2 \gg E$ より $Mc^2 \gg E_{\gamma}$ であり、したがって $|x| \ll 1$ が成り立つから、

$$\frac{E}{Mc^2} = 1 - (1+x)^{1/2}$$

$$1 + x = \left(1 - \frac{E}{Mc^2}\right)^2$$

$$x = -\frac{2E_{\gamma}}{Mc^2}$$
 を代入して $E_{\gamma} = E - \frac{E^2}{2Mc^2}$

エ:1原子質量単位 [u] を静止エネルギーに換算すると 931.5 MeV である (参考図書:7版 放射線取扱の基礎 (日本アイソトープ協会))。

質量数 57 の原子核の質量は静止エネルギーに換算すると、

$$Mc^2 = 57 \times 931.5 \text{ [MeV]} = 5.31 \times 10^{10} \text{ [eV]}$$

に近い値となる。

$$E_{\mathrm{R}}\!=\!E\!-\!E_{\gamma}\!\doteq\!E\!-\!\left(E\!-\!rac{E^{2}}{2Mc^{2}}
ight)\!=\!rac{E^{2}}{2Mc^{2}}$$
より, $E\!=\!14.4\! imes\!10^{3}\,[\mathrm{eV}]$ であるから, $E_{\mathrm{R}}\!\doteq\!rac{(14.4\! imes\!10^{3})^{2}}{2\! imes\!5.31\! imes\!10^{10}}\!\doteq\!2.0\! imes\!10^{-3}\,[\mathrm{eV}]$

問2 次のI, IIの文章の の部分に入る最も適切な語句, 記号又は数値を, それぞれの解答群から1 つだけ選べ。

I 放射線に関連する諸量やその単位には様々な概念や種類があり、放射線そのものに関係する知見の取得に着目した radiometric な量(放射線計測量)と被照射物質における放射線による効果や影響の尺度として用いられる dosimetric な量(線量測定量)に大別される。そして両者は互いに物質や線質に依存するパラメータによって関係づけることができる。

まず、間接電離放射線として光子の場合を考える。単色光子の場合の諸量の関係を図1に参考として示す。

大円(球の中心を通る平面が球面と交わってできる円)の面積が da である球に入射する光子数が dN のとき $\boldsymbol{\phi}_1 = dN/da$ を A という。また dN と光子エネルギーの積を dR とすると, $\boldsymbol{\Psi} = dR/da$ を B という。これらの量は,球内の放射線場を表現することから radiometric な量である。

光子は物質との相互作用により物質の電子にエネルギーを与える。質量 dm の物質中で光子との相互作用により電子に与えられた初期エネルギーの総和を dE_{tr} とする。 $K_2=dE_{tr}/dm$ は C であり,その単位は G_{tr} である。 dE_{tr} の一部は物質中で制動放射により系外へ逃れるが,その割合を g とすると, $K_1=g\times K_2$, $K_3=(1-g)\times K_2$ はそれぞれ放射カーマ及び D と呼ばれる。またその物質のある領域に入射する電子のエネルギーとその領域内で生成された電子が持ち出すエネルギーが等しいとき E が成立するといい,この場合 dm に付与される平均エネルギー $d\bar{e}$ は $(1-g)\times dE_{tr}$ に等しいことから D は, $D_1=d\bar{e}/dm$ と定義される E に等しい。なお,物質が乾燥空気である場合,光子の照射により発生した電子が完全に停止するまでに生じたイオン対の正負いずれかの全電荷の絶対値を dq とすると, $X_1=dq/dm$ は E と呼ばれ,その単位は E である。これらの量は被照射物質におけるエネルギーの授受に関する量であることから,dosimetric な量である。

なお、図 1 内の各量を関係づけるパラメータ f_1 、 f_2 及び f_3 はそれぞれ I , I 及び K である。

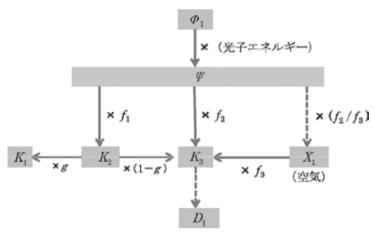


図1 単色光子に係る諸量の関係参考図

<A~Dの解答群>

- 1 フラックス 2 ルミネセンス 3 フルエンス 4 エネルギーフルエンス
- 5 面密度 6 カーマ 7 照射線量 8 吸収線量 9 実効線量
- 10 衝突カーマ 11 線エネルギー付与 12 制動放射 13 電子平衡 14 放射平衡
- 15 ビルドアップ

<E~Gの解答群>

- 1 シーベルト 2 フルエンス 3 エネルギーフルエンス 4 密度 5 面密度
- 6 カーマ 7 照射線量 8 吸収線量 9 実効線量 10 衝突カーマ
- 11 線エネルギー付与 12 制動放射 13 電子平衡 14 放射平衡 15 ビルドアップ <Hの解答群>
- 1 J 2 C 3 $J \cdot kg^{-1}$ 4 $C \cdot kg^{-1}$ 5 $J \cdot kg$ 6 $C \cdot kg$

<I~Kの解答群>

- 1 ε値 2 G値 3 W値 4 阻止能 5 質量阻止能 6 線減弱係数
- 7 質量減弱係数 8 線エネルギー付与 9 質量エネルギー転移係数
- 10 質量エネルギー吸収係数 11 後方散乱 12 放射平衡 13 電子平衡
- 14 ビルドアップ
- Ⅱ 次に、直接電離放射線として荷電粒子を考える。荷電粒子に対する諸量の関係を図 2 に参考として示す。

荷電粒子(二次電子を除く)が質量 dm の物質に単位面積当たり平均 \mathbf{o}_2 個入射した際,軌道電子との相互作用により失うエネルギーを dE_{el} とすると, $C_2=dE_{el}/dm$ をシーマと呼ぶ。このとき $C_2=f_4\times\mathbf{o}_2$ の関係があり,ここで f_4 は し である。また C_2 は м のもとでは C_2 の ほぼ等しい。

物質中に、荷電粒子の場を乱さないような、ガスで満たされた微小体積を導入した場合を考える。物質中及びガス中の吸収線量の比は、上記によりそれぞれのL の比にほぼ等しくなる。この関係はO と呼ばれ、次のとおり、物質への吸収線量の評価に用いられる。

水槽の深さ 10 cm の位置に、水等価壁を持つ内容積 1 cm³ の空気電離箱を挿入する。この電離箱はあらかじめ温度 22 \mathbb{C} , 圧力 1 気圧の空気を密封してある。 200 MeV の陽子線を照射したところ, 12 nC の電荷を得たとする。0 \mathbb{C} , 1 気圧での空気の密度は約 1.3 kg·m³ であるため,電離箱中の空気の質量は P kg である。陽子線が 1 イオン対を生成するのに要する平均エネルギーが 34 eV であるとすると,空気の吸収線量は Q Gy となる。したがって,測定点における陽子線の空気に対する水の平均 L 比の値を 1.14 であるとすると,この点での水の吸収線量は R Gy となる。

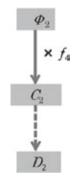


図2 荷電粒子に係る諸量の関係参考図

<L~Oの解答群>

- 1 比電離 2 標準状態 3 電子平衡 4 放射平衡 5 空洞原理
- 6 吸収線量 7 照射線量 8 実効線量 9 質量衝突阻止能 10 線減弱係数
- 11 ブラッグ曲線 12 質量減弱係数 13 線エネルギー付与
- 14 質量エネルギー転移係数 15 質量エネルギー吸収係数

<P~Rの解答群>

- 1 1.2×10^{-9} 2 1.4×10^{-9} 3 4.4×10^{-9} 4 1.2×10^{-6} 5 1.4×10^{-6}
- $6 \quad 4.4 \times 10^{-6} \qquad 7 \quad 3.4 \times 10^{-4} \qquad 8 \quad 4.4 \times 10^{-4} \qquad 9 \quad 4.9 \times 10^{-4} \qquad 10 \quad 3.4 \times 10^{-1}$
- 11 3.9×10^{-1} 12 4.4×10^{-1} 13 4.9×10^{-1}

「解答〕

注) P:空気の密度は空気の絶対温度に反比例する。

温度 22 \mathbb{C} , 圧力 1 気圧の空気の密度は,温度 0 \mathbb{C} , 圧力 1 気圧の空気の密度の $\frac{273}{273+22}$ 倍となる。

したがって、 $1 [cm^3] = 10^{-6} [m^3]$ の内容積の電離箱中の空気の質量は、

$$1.3 \times 10^{-6} \times \frac{273}{273 + 22} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ [kg]}$$

Q:陽子線により12 nCの電荷が電離箱中に得られたので、電離箱中の空気に与えられたエネルギ

 $\frac{_{1.6\times10^{-19}}\,\text{[C]}}{1.6\times10^{-19}\,\text{[C]}}\!\times\!34\,\text{[eV]}\!\times\!1.6\times10^{-19}\,\text{[J/eV]}\!=\!12\times34\times10^{-9}\,\text{[J]}$ 電離箱中の空気の質量は 1.2×10^{-6} [kg] であるから, 吸収線量の値は, $\frac{12\times34\times10^{-9} [J]}{1.2\times10^{-6} [kg]} = 3.4\times10^{-1} [Gy]$ R:陽子線の水の平均質量衝突阻止能は空気に対するそれの1.14倍であるから、水の場合の吸収 線量も空気の場合の1.14倍となる。 $3.4 \times 10^{-1} [Gy] \times 1.14 = 3.9 \times 10^{-1} [Gy]$ 問3 次のI~Ⅲの文章の の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から1 つだけ選べ。 I 原子番号1の水素から原子番号 A のフッ素までの元素のうち、安定同位体が1種類の単核種 元素の数は B である。その他の元素は複数の安定同位体を持ち、その中でリチウムでは、市販 試薬中に同位体組成が大きく変動したものがある。これは質量数 C の Li が、 D 反応に よるトリチウム製造に用いられることから、大量の同位体濃縮が行われ、残りの原子量の大きいリチ ウムが高純度化合物試薬として出回っているので、ラベルに記載されたリチウムの原子量の値を用い ることが必要である。 炭素には、12Cと13Cの安定同位体がある。12C原子は、その質量の12分の1が原子質量の基準と なっている。¹³C (質量 13.00) の同位体存在度は 1.07%であり、炭素の原子量は E となる。 <A~Cの解答群> 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8 10 10 11 11 12 12 13 13 14 14 15 15 <Dの解答群> 3 (n,d) 4 (n,α) 5 (p,n) 6 (p,α) 1 (n, γ) 2 (n, p) $7 \quad (\mathbf{d}, \mathbf{n})$ 8 (d, p) <Eの解答群> 2 12.01 3 12.02 4 12.03 5 12.05 6 12.10 7 12.20 1 12.00 Ⅱ 炭素の安定同位体(¹²C、¹³C)より中性子が過剰の¹⁴Cは、原子炉で¹⁴N F ¹⁴C反応などによ り製造され、半減期 5,700 年 (1.8×10¹¹ 秒) で G 壊変する。¹⁴C 化合物は放射性トレーサーと して古くから利用され、1950年代の H 利用による植物の光合成カルビンサイクルの解明が 1961年のノーベル化学賞受賞に繋がるなど、大きな成果を上げてきた。近年、イメージングプレート を用いたオートラジオグラフィーにも利用される。⁴Cから放出される G 線の最大エネルギー は ア MeV であり、32P から放出される G 線の最大エネルギーのおおよそ 1/11 で、32P よ り画像分解能が良い。 一方,安定同位体より中性子が不足の"Cは,加速器で"N I "C反応により製造され,半 減期 20 分 (1.2×10³ 秒) で J 壊変する。この壊変で放出される陽電子は、周囲の K と 結合して消滅する。その際に2本の消滅放射線(各エネルギーは イ MeV)を 180°方向に出す。

-1, $1 \text{ [e]} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}$, $1 \text{ [eV]} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [J]}$ $\downarrow 0$.

この2本の放射線を一対のシンチレータで検出、同時計数し、コンピュータ処理により陽電子放出核

種の分布を画像化する装置は L 装置と呼ばれる。また、1 TBq の "C の放射能は、10 時間後 にはおおよそ M Bg に減衰する。 <Fの解答群> 1 (n, γ) 2 (n, p) 3 (n, d) 4 (n, α) 5 (p, n) 6 (p, α) $7 \quad (\mathbf{d}, \mathbf{n})$ $8 \quad (d, p)$ <Gの解答群> $1 \quad \alpha \quad 2 \quad \beta^- \quad 3 \quad \beta^+ \quad 4 \quad \gamma$ < H の解答群> 1 ^{14}CO 2 $^{14}CO_2$ 3 $^{14}CH_4$ 4 $[^{14}C]C_2H_2$ 5 $[^{14}C]C_6H_6$ <ア、イの解答群> 1 0.0186 2 0.157 3 0.511 4 1.711 <Iの解答群> 1 (n, γ) 2 (n, p)3 (n,d) 4 (n,α) 5 (p,n) 6 (p,α) $7 \quad (d, n)$ 8 (d, p) <Jの解答群> 1 α 2 β^- 3 β^+ 4 γ 5 EC < K の解答群> 1 電子 2 陽電子 3 中性子 <Lの解答群> 1 陽電子放射断層撮影 (PET) 2 シングルフォトン断層撮影 (SPECT) 3 非破壊検査 4 蛍光 X 線分析 5 メスバウアー分光分析 <M の解答群> 1 1 2 10 3 100 4 1G 5 1k 6 1M 7 10G 8 10k 9 10 M 10 100 G 11 100 k 12 100 M Ⅲ 上空大気中で宇宙線から生じた中性子が空気中窒素の ¹⁴N と反応して ¹⁴C が生成する。したがって、 宇宙線強度が変わらなければ地球大気中の 14 Cの量は一定となり、炭素1g当たり約0.23 Bgとなる。 その炭素同位体の ¹⁴C/(¹²C+¹³C) 原子数比の値は N である。化学形が O となって存在す る大気中の ¹⁴C が、光合成により植物体内に取り込まれ、食物連鎖により動物体内にも入る。生物が 死ぬと ¹C の供給が途絶えるので、その生物体中の ¹C 比放射能は時間とともに減衰する。したがっ て、これら生物試料中の ¹⁴C を測定すれば、その生物の死後の経過時間が求められる(¹⁴C 年代測定)。 ⁴Cは、以前は試料をアセチレンなどの気体にして比例計数管により、あるいはベンゼンなどの有機 液体にして P により、その放射能が測定されてきた。これらの測定には1g以上の試料が用い られる。しかし、試料が限定され、非常に少量のとき、あるいは数万年前の試料では、含まれる ¹⁴C 放射能が mBq 程度となり、その放射能測定は極めて困難あるいは不可能となる。一方、放射能の測 定ではなく、¹⁴C原子の数を直接高感度に測定して同位体原子数比を求める O を用いると、試 料量は 1 mg 程度で十分であり、また、数万年前の試料でも、その年代を決定することが可能になっ

例えば、1 mg の炭素を含む試料を測定して、 $^{13}\text{C}/(^{12}\text{C}+^{13}\text{C})$ 原子数比の値が0.0107、 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 原子数比の値が 7.0×10^{-12} であったとすると、この試料の年代として最も近い値は R 年前である。

てきた。

<Nの解答群>

1 1.2×10^{-13} 2 6.0×10^{-13} 3 1.2×10^{-12} 4 6.0×10^{-12} 5 1.2×10^{-11}

6 6.0×10^{-11} 7 1.2×10^{-10} 8 6.0×10^{-10}

<0の解答群>

1 ¹⁴CO 2 ¹⁴CO₂ 3 ¹⁴CH₄

<P, Qの解答群>

1 Ge 半導体検出器 2 Si 表面障壁型半導体検出器

3 プラスチックシンチレーションカウンタ 4 液体シンチレーションカウンタ

5 電子スピン共鳴法 6 加速器質量分析法

<Rの解答群>

1 20,000 2 23,000 3 26,000 4 29,000 5 34,000 6 40,000

7 60,000

[解答]

I A - 9 B - 2 C - 6 D - 4 E - 2

注)A, B:原子番号,元素及び安定同位体をまとめると次表のようになる(参考図書:アイソトープ 手帳 11版(日本アイソトープ協会))。

原子番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
元素	水素	ヘリウム	リチウム	ベリリウム	ホウ素	炭素	窒素	酸素	フッ素
安定同位体	¹ H	³ He	⁶ Li	⁹ Be	¹⁰ B	¹² C	¹⁴ N ¹⁵ N	¹⁶ O ¹⁷ O	¹⁹ F
	² H	⁴ He	L1		В	C	IN .	18O	

C. D: トリチウムを生成する核反応には様々なものがある(以下は一例)。

⁶Li(n, α)T (反応断面積 9.5×10² [バーン (b)])

²H(n, γ)T (反応断面積 5×10⁻⁴ [b])

³He(n,p)T (反応断面積 5.33×10³ [b])

 6 Li を利用する場合、 6 Li-Al 合金ターゲットを原子炉で照射して 6 Li (n, α) T 反応によりトリチウムを生成させ回収する。なお、天然のリチウムには 6 Li が最大で約7.8% しか存在しないとされ、トリチウム製造には天然レベルを濃縮する必要がある。現在、 6 Li 濃縮技術として水銀を用いたアマルガム法が実用化されている。その他、溶媒抽出法や電気透析法などが検討されている。

E: $12 \times 0.9893 + 13 \times 0.0107 = 12.0107 = 12.01$

- 注) $F: ^{14}C$ は $^{14}N(n,p) ^{14}C$ 反応により原子炉で製造される。また、環境中でも同様な反応により生成される。
 - **G**:1) $\boldsymbol{\beta}^-$ 壊変 電子を放出して中性子が陽子と反ニュートリノに変わる反応。原子番号は 1 増加 する。
 - 2) β^+ 壊変 陽電子を放出して陽子が中性子とニュートリノに変わる反応。原子番号は1 減少する。軌道電子捕獲 (EC) を伴うことが多い。 β^+ 壊変核種は全て人工放射性核種である。

- H: 14CO, の 14C をトレーサーとして用いることにより解明されたのが光合成カルビンサイクルで ある。
- ア: 14 C から放出される β^- 線の最大エネルギーは 0.157 MeV である。ちなみに、 32 P は 1.711 MeV、 また 3 H は 0.0186 MeV である(参考図書: アイソトープ手帳 11 版(日本アイソトープ協会))。
- I. J:陽電子放射断層撮影 (PET) で利用される陽電子放出核種の半減期と生成反応は次のとおり (参考図書:アイソトープ手帳 11版(日本アイソトープ協会))。

陽電子放出核種	半減期	生成反応
¹¹ C	20.39 分	$^{14}N(p, \alpha)^{11}C$
¹³ N	9.965 分	$^{16}{\rm O(p,\alpha)^{13}N}$
¹⁵ O	122.24 秒	¹⁴ N (d, n) ¹⁵ O
¹⁸ F	109.771 分	¹⁸ O(p, n) ¹⁸ F

イ、K、L:陽電子が電子と対消滅するとき、180°方向に511 keV (0.511 MeV) の光子を、同時に 2本放射する。この消滅放射線を図に示した装置、すなわち 180° で平面に対に配置された多数 のシンチレーション検出器の対で、同時計数する。このシグナルをコンピュータで CT 処理し て、陽電子が消滅した位置情報に変換すると、断層画像が得られる。このイメージング技法が 陽電子放射断層撮影(positron emission tomography, PET)である。断層撮影面を身体に沿って ずらしてゆき、組み合わせると全身の PET 像が得られる。

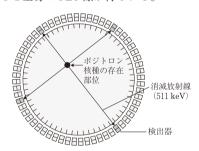


図 PET装置による断層画像撮像法の概念図 (7版 放射線取扱の基礎(日本アイソトープ協会)から引用)

 $M: A = A_0 \times (1/2)^{t/T} = 1 \times 10^{12} \times (1/2)^{|(10 \times 60)/20|} = 931 = 1 \text{ k } \lceil Bq \rceil$

III N - 3

O - 2 P - 4

0-6

注) N: 14C の原子数は次式により求められる。

 $N = A/\lambda = (A \times T)/\ln 2$

そこで、¹⁴C/(¹²C+¹³C) 原子数比は次式により求められる。

 $^{14}C/(^{12}C+^{13}C)$

= $\{(0.23 \times 5,700 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60) / \ln 2\} / \{(1/12.01) \times 6.02 \times 10^{23}\}$

 $= (4.13 \times 10^{10}/0.693)/(5.012 \times 10^{22})$

 $=1.19\times10^{-12}$

 $=1.2\times10^{-12}$

(参考図書:アイソトープ手帳 11版(日本アイソトープ協会))

- O:植物は大気中の炭素を二酸化炭素として取り込み、光合成により有機態炭素に変換・蓄積する。その際、 12 CO₂ や 13 CO₂ と同様に 14 CO₂ も取り込まれる。なお、大気中二酸化炭素と植物の 12 C、 13 C 及び 14 C の同位体組成は、同位体効果のために厳密には異なる。
- P, Q: 14 C 分析法は測定原理の違いにより β 線計数法と加速器質量分析(AMS)法の 2 つに大別される。 β 線計数法には、試料中の炭素からメタンやアセチレンなどを合成・回収して測定する比例計数管法と、メタノールやベンゼンなどを合成・回収して測定する液体シンチレーション計数法がある。 β 線計数法には、液体シンチレーションカウンタなど測定装置が比較的安価で保守管理が容易などの利点がある。しかし、精度を確保するためには多量の供試料量や測定時間を必要とするなどの欠点がある。一方、AMS 法には、供試料量が炭素量として 1 mg 程度でよいことや精度が比較的高いことなどの利点がある。更に、 14 C 以外にも 10 Be、 26 Al、 36 Cl 及び 129 I など長半減期核種の測定を得意としている。しかし、加速器を利用することから、設備投資やランニングコストが高額であることや保守管理が容易ではないなどの欠点もある。
- R:測定試料の ¹⁴C/(¹²C+ ¹³C) は次式により求められる。

$${}^{14}C/({}^{12}C + {}^{13}C) = {}^{13}C/({}^{12}C + {}^{13}C) \times ({}^{14}C/{}^{13}C)$$

$$= 0.0107 \times 7.0 \times 10^{-12}$$

$$= 7.49 \times 10^{-14}$$

地球大気中の 14 C/ $^{(12}$ C+ 13 C) 原子数比の値は、 \boxed{N} より 1.2×10^{-12} 程度である。これらを用いると、試料の年代は次式により求められる。

A= $A_0 \times (1/2)^{t/T}$ 7.49×10⁻¹⁴=1.2×10⁻¹²×(1/2)^{t/5,700} (t/5,700) = 4 ∴ t=23,000 [年]

問4 次のI~Ⅲの文章の の部分に入る最も適切な語句,記号,数値又は数式を,それぞれの解答群から1つだけ選べ。

I 水溶液から目的物質を固体の沈殿として分離する場合、固体の水への溶解度が分離の効率(収率)を決定する。一般に陽イオンAと陰イオンBからできている水への溶解度が小さい難溶性塩 A_mB_n の 沈殿が生成するとき、水溶液中でのイオンと固体はA 平衡になっている。それぞれのイオンの水溶液中の濃度をA 、A 、A とすると、

$$K_{SP} = \boxed{7}$$

という関係が成立つ。 K_{SP} は B と呼ばれる定数である。A を含む水溶液とB を含む水溶液を混合したときに,式(1) の右辺が K_{SP} を上回るときには A_mB_n の沈殿が生成してA やB の濃度が下がり,式(1) が成立したところで平衡になる。

難溶性塩である BaSO₄ の場合には, $K_{\rm SP}=1.0\times10^{-10}~{\rm mol}^2\cdot L^{-2}$ である。 140 Ba(半減期 12.8 日=1.1× 10^6 秒)が 70 MBq あると,その物質量はおおよそ $\boxed{}$ mol である。これが硝酸塩として溶解している 水溶液 X の 500 mL と,濃度 $0.02~{\rm mol}\cdot L^{-1}$ の Na_2SO_4 水溶液 Y を 500 mL 混合しても $[^{140}$ Ba $^{2+}$] $[SO_4^{2-}]$ < $K_{\rm SP}$ であって, 140 Ba $^{2+}$ は沈殿しない。もし $0.02~{\rm mol}$ の非放射性 Ba $(NO_3)_2$ を 500

mL の X に担体として溶解しておくと、500~mL の Y との混合により $^{140}Ba^{2+}$ を沈殿させることができるが、この担体量では $^{140}Ba^{2+}$ のうち ウ %が沈殿せずに溶液中に残る。放射性同位体イオンの 沈殿分離を行う際には十分な量の担体を加えておくことが必要である。

<A. Bの解答群>

1 放射 2 固液 3 溶解 4 気液 5 凝縮 6 溶解度積

7 固液平衡定数 8 蒸気圧定数 9 イオン積

<アの解答群>

1 $[A]^n[B]^m$ 2 $[A]^m[B]^n$ 3 $[A]^{\frac{1}{n}}[B]^{\frac{1}{m}}$ 4 $[A]^{\frac{1}{m}}[B]^{\frac{1}{n}}$

<イ. ウの解答群>

 $1 \quad 1.3 \times 10^{-15} \qquad 2 \quad 1.9 \times 10^{-14} \qquad 3 \quad 1.3 \times 10^{-11} \qquad 4 \quad 1.9 \times 10^{-10} \qquad 5 \quad 1.3 \times 10^{-9}$

 $6 \quad 5.0 \times 10^{-2} \qquad 7 \quad 1.0 \times 10^{-1} \qquad 8 \quad 5.0 \times 10^{-1} \qquad 9 \quad 1.0 \qquad 10 \quad 5.0$

Ⅱ イオン交換樹脂は、イオン交換基をもつ高分子であり、水溶液中のイオンと樹脂自身に吸着しているイオンを交換する。イオン交換樹脂が水溶液中のイオンを吸着する強さがイオンによって異なり、この性質を利用してイオンを分離することができる。

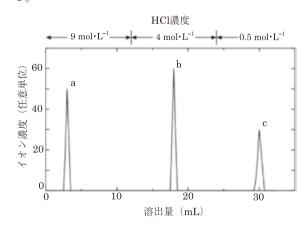
例えばスチレンージビニルベンゼン共重合体を高分子骨格とし、 C 基をイオン交換部位として持つ強酸性陽イオン交換樹脂では、+1 価イオンの樹脂への吸着強度は D であり、水和イオン半径が小さいものほど強い。また、価数が異なるイオンに対しては、-般に E という傾向がある。イオン交換樹脂に吸着しているイオンと水溶液中のイオンは吸着平衡になる。陽イオン交換樹脂に吸着している A^+ イオンの濃度を [A], 水溶液中の A^+ イオンの濃度を [A], 水溶液中の A^+ イオンの濃度を [A], 水溶液中の A^+ イオンの濃度を [A]

$$K_{r} = \frac{\left[\mathbf{B}\right]_{r}/\left[\mathbf{B}\right]_{a}}{\left[\mathbf{A}\right]_{r}/\left[\mathbf{A}\right]_{a}} \tag{2}$$

という平衡定数となる。 $K_r > 1$ のときには、F

イオン交換樹脂の吸着平衡は,溶液と樹脂吸着のイオンの濃度比を決定し,濃度には依存しないので、無担体の放射性同位体の分離に適している。

一方,強塩基性陰イオン交換樹脂を用いて塩化物イオンとの錯形成能の違いを利用して分離することができる。強塩基性陰イオン交換樹脂カラムに, Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} を含む 9 $mol \cdot L^{-1}$ 塩酸溶液を 1.0 mL, その後 9 $mol \cdot L^{-1}$, 4 $mol \cdot L^{-1}$, 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ の濃度の塩酸を順次 12 mL ずつ流して各イオンを分離すると右図のようになった。塩化物イオンとの錯形成能の強さは G の順であり,a, b, c のピークは左から順に, H であった。



<Cの解答群>

 $1 - SO_3H$ 2 - COOH $3 - CH_2N(CH_3)_3OH$ $4 - CH_2NH(CH_3)_2OH$

<Dの選択肢>

- 1 $Rb^+ \le K^+ \le Na^+ \le Li^+$ 2 $Li^+ \le Na^+ \le K^+ \le Rb^+$ 3 $K^+ \le Rb^+ \le Li^+ \le Na^+$
- 4 $Na^+ < Li^+ < Rb^+ < K^+$

<Eの解答群>

- 1 +1 価 < +2 価 < +3 価 2 +1 価 > +2 価 > +3 価 3 +1 価 ≒ +2 価 ≒ +3 価 < F の解答群 >
 - 1 A⁺イオンの方が B⁺イオンより強く吸着する
 - 2 B⁺イオンの方が A⁺イオンより強く吸着する
 - 3 A⁺イオンと B⁺イオンはほぼ同様に吸着する

<Gの解答群>

- 1 $Fe^{3+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$ 2 $Co^{2+} > Ni^{2+} > Fe^{3+}$ 3 $Ni^{2+} > Co^{2+} > Fe^{3+}$
- 4 Fe³⁺ > Ni²⁺ > Co²⁺

< H の解答群>

- 1 Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} 2 Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} 3 Ni^{2+} , Co^{2+} . Fe^{3+}
- 4 Fe³⁺, Ni²⁺, Co²⁺
- 溶媒抽出法も微量の放射性物質を分離するときにしばしば用いられる。溶媒抽出では2種類の互いに溶解しない溶媒に対する溶質の溶解性の違いを利用して分離又は抽出を行う。

実際の分離抽出では、分配比

$$D = C_2/C_1 \tag{3}$$

が重要である。ここで C_1 は注目する核種の溶媒 1 における濃度, C_2 は溶媒 2 における濃度である。 平衡状態に達したときの溶媒 2 への抽出率 E (%) は,使用する溶媒 1,2 の体積をそれぞれ V_1 , V_2 , として,

$$E(\%) = \boxed{I} \times 100 \tag{4}$$

と表せる。例えば $V_1 = V_2$ でD = 20のときE = エ %となる。

一般に目的核種を抽出する場合,使用する溶媒の体積は同じである必要はない。上と同じ抽出を,溶媒 2 を一度に全量使うのではなく,3 回に分けて抽出操作をする場合を考える。つまり溶媒 2 を $V_2/3$ 使って抽出し,溶媒 1、2 を分液ロートで分離する(抽出 1)。次に溶媒 1 に対して新しい $V_2/3$ 量の溶媒 2 を使って再び抽出する(抽出 2)。さらに残りの $V_2/3$ 量の溶媒 2 で抽出をもう一回繰り返す(抽出 3)。この一連の操作での抽出について,抽出 1 での抽出率 E_1 は 一 % である。抽出 まで行うと,溶媒 1 に残っている目的核種は 一 % となる。一般に抽出に用いる溶媒を一度に用いるよりも多数回に分けて用いたほうが,操作全体での抽出率は大きくなる。

<Iの解答群>

$$1 \quad \frac{C_2 V_2}{C_1 V_1 + C_2 V_2} \qquad 2 \quad \frac{C_1 V_1}{C_1 V_1 + C_2 V_2} \qquad 3 \quad \frac{C_1 V_1}{C_2 V_2} \qquad 4 \quad \frac{C_2 V_2}{C_1 V_1}$$

<エ~カの解答群>

 $1 \quad 2.2 \times 10^{-1} \quad 2 \quad 1.3 \quad 3 \quad 2.2 \quad 4 \quad 13 \quad 5 \quad 22 \quad 6 \quad 80 \quad 7 \quad 87 \quad 8 \quad 95$

9 99 10 99.5 11 99.8

<J~Mの解答群>

1 キレート化剤 2 酸化剤 3 マスキング剤 4 沈殿剤 5 還元剤

6 弱酸 7 強酸 8 弱塩基 9 強塩基 10 中性塩 11 pH 12 吸光度

13 酸化還元電位 14 電気伝導度

[解答]

I A - 3 B - 6 7 - 2 1 - 4 7 - 7

注) A, B, ア:難溶性の塩 $A_m B_n$ を水に溶解させたとき微量の $A_m B_n$ は水に溶解し、飽和溶液となる。このとき溶解した $A_m B_n$ は完全に電離して、次のような溶解平衡が成立する。

 $A_{m}B_{m}$ (B) $\rightleftharpoons mA+nB$

このときそれぞれのイオンの水溶液中の濃度を [A], [B] とすると、以下のような関係が成立する。

 $K_{SP} = [A]^m [B]^n$

この Ksp は上記の溶解平衡における平衡定数であり、溶解度積と呼ばれている。

イ: 140 Ba の物質量 n は、 $A=\lambda N=(\ln 2/T_{1/2})\times n\times N_{\Delta}$ を用いて以下のとおり計算される。

 $n = \{T_{1/2}/(\ln 2 \times N_{\Delta})\} \times A$

= $\{1.1 \times 10^6 / (0.693 \times 6.0 \times 10^{23})\} \times 7.0 \times 10^7$

 $= 1.85 \times 10^{-10}$ [mol]

 $\pm 1.9 \times 10^{-10} \lceil \text{mol} \rceil$

ウ:¹⁴⁰Ba²⁺のうち、沈殿せずに溶液中に残る割合を a とすると、

 $[^{140}Ba^{2+}] = 0.02a \times (0.5/1) = 0.01a [mol \cdot L^{-1}]$

 $[SO_4^{2-}] = 0.02a \times (0.5/1) = 0.01a [mol \cdot L^{-1}]$

と表される。

 $K_{SP} = [^{140}Ba^{2+}][SO_4^{2-}] = 1.0 \times 10^{-10}$ より、a は以下のように計算される。

 $(0.01a)^2 = 1.0 \times 10^{-10}$

 $a^2 = 10^{-6}$

 $\therefore a=10^{-3}=1.0\times10^{-1}$ [%]

- II C 1 D 2 E 1 F 2 G 1 H 3
- 注)C:陽イオン交換樹脂は、溶液中の陽イオンを吸着し、樹脂上の陽イオンを放出する性質があり、 スルホ基(-SO₃H)を用いた強酸性陽イオン交換樹脂やカルボキシル基(-COOH)を用い た弱酸性陽イオン交換樹脂などが知られている。
 - D, E:陽イオンの吸着強度は、一般的に陽イオンの価数が高いほど吸着強度が大きくなり、同じ 価数の場合には原子番号が大きいものほど吸着強度が大きくなる。
 - $F: K_r > 1$ であれば、 B^+ イオンの方が A^+ イオンよりもイオン交換樹脂に多く存在しやすい、すなわち吸着強度が強いことを示している。 $K_r < 1$ の場合はその逆である。
 - G, H:重金属イオンは塩酸溶液中ではクロロ錯体を形成するため、この錯形成能によって吸着性が異なる。塩化物イオンとの錯形成能が最も弱い Ni^{2+} は樹脂に吸着せずに $9\ mol\cdot L^{-1}$ の塩酸

溶液で溶出される。次に Co^{2+} が $4 mol \cdot L^{-1}$	の塩酸溶液で溶離し,	最後に錯形成能が最も強い
Fe ³⁺ が 0.5 mol·I ⁻¹ の 塩酸 溶液 で 溶離 する。		

III $\boxed{1-1}$ $\boxed{x-8}$ $\boxed{x}-7$ $\boxed{n}-1$ $\boxed{J-1}$ $\boxed{K-6}$

注) I : 目的核種の総物質量は $C_1V_1+C_2V_2$ で表され,そのうち溶媒 2 に移行した目的核種の物質量は C_2V_2 で表されるため.溶媒 2 への抽出率 E (%) は次式となる。

$$E(\%) = \{C_2V_2/(C_1V_1 + C_2V_2)\} \times 100$$

エ: (4)式に $V_1=V_2$, $D=C_2/C_1=20$ を代入すると,

$$E (\%) = \{C_2 V_2 / (C_1 V_1 + C_2 V_2)\} \times 100$$

$$= \{20 C_1 V_1 / (C_1 V_1 + 20 C_1 V_1)\} \times 100$$

$$= (20/21) \times 100$$

$$= 95.2 [\%]$$

$$= 95 [\%]$$

オ:抽出1における抽出率E(%)は次式で表される。

$$E\left(\%\right) = \left\{C_2(V_2/3)/\left[C_1V_1 + C_2(V_2/3)\right]\right\} \times 100$$

上式に $V_1 = V_2$, $D = C_2/C_1 = 20$ を代入すると、
 $E\left(\%\right) = \left\{(20/3)C_1V_1/\left[C_1V_1 + (20/3)C_1V_1\right]\right\} \times 100$
 $= (20/23) \times 100$
 $= 86.9 \left[\%\right]$
 $= 87 \left[\%\right]$

カ: $(1-0.87)^3 \times 100 = 2.20 \times 10^{-1}$ [%]

J~M:金属イオンはキレート化剤によって複数の配位座に挟み込まれるように結合することで、キレート錯体を形成し、有機溶媒中に抽出される。弱酸性のキレート化剤の吸着能は pH に依存するため、緩衝剤と共に用いられることが多い。マスキング剤は目的イオン以外のイオンの水溶性を高めることで複数のイオンの混合水溶液から特定のイオンを分離するために用いる試薬であり、錯体を形成することで銅イオンをマスキングするチオ硫酸ナトリウムなどがある。

問5 次のI, IIの文章の の部分に入る最も適切な語句又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ 選べ。

I X線や γ 線による高線量急性被ばくでは,全身被ばくする場合と局所被ばくする場合で様相が異なる。全身被ばくでは致死が問題となり,局所被ばくでは高線量を被ばくしても致死とはならず,被ばくした組織や臓器の障害が問題となることが多い。組織や臓器の放射線障害では,被ばくした直後から数週間以内に起こる障害を急性(早期)障害と呼び,数ヶ月から数年後以降に起こる障害を晩期障害と呼ぶ。臓器にはそれぞれ特徴的な晩期障害が存在する。脳では A ,脊髄神経では B ,腸管では C が晩期障害として重要である。これらの晩期障害は主に D が原因であると考えられている。ただし,すべての晩期障害の原因が D によるわけではなく,肺の晩期障害として重要である E では肺胞細胞の障害などが原因として考えられている。皮膚の急性障害としては,紅斑,脱毛などが代表的なもので,脱毛のしきい線量は約 F Gyとされ,被ばくの G 週間後に生じる。皮膚の晩期障害としては, H が重要である。皮膚

134

	は体表面に位置する組織であるために、照射線量が同一であっても、放射線エネルギーの違いによ
	り、急性障害や晩期障害の程度は異なる点に注意を要する。すなわち、 X 線や γ 線のエネルギーが異
	なる場合には、 I による吸収線量のピークの位置(深さ)が異なり、結果として皮膚の基底細
	胞の吸収線量は異なることとなる。例えば,コバルト 60 とイリジウム 192 の密封線源を比較した場
	合, コバルト 60 から放出される γ線の平均エネルギーは約 J keV であるのに対して, イリジ
	ウム 192 から放出される γ線の平均エネルギーは約 K keV であるために,照射線量が同一で
	ある場合には皮膚の急性障害は L の方が重篤となる。皮膚の晩期障害である H の原因は
	主に D であるため、基底細胞よりも M での吸収線量が問題となる。
	< A の解答群 >
	1 脳壊死 2 硬膜外血腫 3 動脈瘤 4 水頭症
	<bの解答群></bの解答群>
	1 脊髄出血 2 脊髄神経麻痺 3 脊髄空洞症 4 脊柱管狭窄症
	< C の解答群 >
	1 穿孔・狭窄 2 憩室症 3 潰瘍性大腸炎 4 クローン病
	< D の解答群>
	1 血管透過性亢進 2 線維芽細胞の増殖 3 神経の脱髄 4 血管の閉塞
	<eの解答群></eの解答群>
	1 放射線肺炎 2 肺気腫 3 放射線肺線維症 4 気胸
	<fの解答群></fの解答群>
	1 0.5 2 3 3 15 4 30
	<gの解答群></gの解答群>
	1 2~3 2 5~6 3 8~9 4 11~12
	<hの解答群></hの解答群>
	1 水疱形成 2 落屑 3 難治性潰瘍 4 紅斑
	<i の解答群=""></i>
	1 放射平衡 2 オージェ電子 3 ビルドアップ 4 非弾性散乱
	<j, kの解答群=""></j,>
	1 50 2 350 3 650 4 950 5 1,250 6 1,550
	<lの解答群></lの解答群>
	1 イリジウム 192 2 コバルト 60
	< M の解答群 >
	1 深部 2 浅部
Π	全身に一定以上の線量を急性被ばくすると、急性障害により個体は死に至る。集団の50%が死亡
	する線量を半致死線量と呼ぶ。ヒトの半致死線量は 60 日以内に 50%が死亡する線量(LD _{50/60})で示
	され、約 $oxed{N}$ G y である。ヒトが $LD_{50/60}$ 程度以上の線量を全身に均等被ばくしたときに生じる急
	性放射線症では、骨髄、消化管、中枢神経、肺などの臓器・組織の放射線障害が死に至る病態に関与
	する。
	LD _{50/60} 前後の線量を被ばくした場合には、骨髄幹細胞の放射線障害により感染症と O が生

じ、それらが死の主な原因となる。この線量域の放射線を被ばくした場合の治療法としては、輸血や

抗生剤の投与の他にサイトカインを投与して骨髄幹細胞の増殖を期待する。被ばく線量がLDso/spよ り高く、事故後骨髄の強い再生不良状態が継続する場合などでは造血幹細胞移植を検討する。造血幹 細胞移植としては骨髄移植が最も一般的で、一卵性双生児又は兄弟間ドナーの骨髄が使用できない場 合には、非血縁者のヒト白血球型抗原(Human Leukocyte Antigen; HLA)適合ドナーからの骨髄移植 を行う。しかし、非血縁者からの移植では HLA が適合する骨髄提供者からの骨髄採取などに時間が かかり、事故時に対応できない可能性が高い。近年ではすべての HLA が一致しなくとも移植が可能 な P が急性放射線症の治療に用いられている。 P では、ほとんどの場合で適合する幹細 胞が存在し、短期間で移植を行うことが可能であるため事故対応として適している。 消化管に関しては、放射線障害による小腸上皮の喪失を原因とする Q や感染が主な死因とな る。中枢神経の障害による死亡は被ばく線量が50~100 Gy を超える場合に起こり、Rによる 頭蓋内圧亢進が主な原因のうちの1つと考えられている。 LD_{50/60}程度以上の線量を全身被ばくした場合には、肺では30日以内に S が生じる。特に、 肺で
T
が高頻度に生じる点に注意が必要である。 <Nの解答群> 1 1.5~2.5 2 3.5~4.5 3 5.5~6.5 4 7.5~8.5 <Oの解答群> 1 出血傾向 2 凝固亢進 3 脂肪塞栓 4 石灰化 <Pの解答群> 1 自己造血幹細胞移植 2 末梢血幹細胞移植 3 臍帯血幹細胞移植 <Oの解答群> 1 腸管の狭窄 2 腸閉塞 3 腸捻転 4 体液漏出 <R の解答群> 1 硬膜外血腫 2 脳浮腫 3 動脈瘤 4 水頭症 <Sの解答群> 1 気胸 2 放射線肺線維症 3 肺気腫 4 放射線肺炎 <Tの解答群> 1 ウイルス感染 2 梗塞 3 壊死 4 サルコイドーシス I A-1B-2C - 1 D - 4E - 3 H - 3J - 5 G - 1I - 3K - 2M-1

- 注)A~E:臓器にはそれぞれ特徴的な晩期障害が存在し、脳、脊椎神経、腸管、肺などではそれぞれ、硬膜外血腫や脳壊死、脊髄出血や脊髄神経麻痺、腸管の穿孔や狭窄、放射線肺線維症などが挙げられる。脳壊死、脊髄神経麻痺、腸管の穿孔・狭窄は血管の閉塞に起因し、放射線肺線維症は20~40 Gy 以上被ばくした肺で起き、肺胞細胞の障害が原因と考えられており、抗がん剤併用時によく見られる。治療法としては最適な治療法はないがステロイド剤が用いられる。
 - F~H:皮膚の紅斑, 脱毛などは急性障害の代表的なものである。脱毛のしきい線量は約3~4~Gyとされ,被ばくの2~3週間後に生じる。また,20~Gy以上になると水疱形成,色素沈着,瘢痕化,更には晩期障害として難治性潰瘍を誘発する。

[解答]

I~M:皮膚の放射線による急性の皮膚障害は皮膚細胞を再生する幹細胞である基底細胞の障害に起因する。したがって、表面の細胞よりも表面から 70 μ m の深さにある皮膚の幹細胞がある場所の線量(皮膚線量)が問題となる。そのため、放射線のエネルギーやビルドアップによる深部線量分布を考慮し、深部線量が重要である。10 MV の高エネルギー X 線やコバルト 60 の 1.25 MeV の γ 線が生体に照射されると、ある深さでピークを持ち、その深度はエネルギーと関連し、例えば X 線で約 2.5 cm、コバルト 60 の γ 線は約 5 mm であることが知られている。一般的にエネルギーが高いほど、このビルドアップによるピークの深度は深くなり、体表面からピークまでの領域をビルドアップ領域というが、エネルギーが高くなるとこの領域も広くなる。したがって、エネルギーが高いほど入射面では表面線量が低下することになる。本設問の例として提示されているコバルト 60 とイリジウム 192 のエネルギーはそれぞれ 1,250 keV と350 keV であり、線量が同じであれば、よりエネルギーの小さいイリジウム 192 の方がより幹細胞が存在する深さの線量(皮膚線量)が大きくなり、症状は重篤になる。また、皮膚の晩期障害である難治性潰瘍は基底細胞の障害というよりも、それより深い場所にある血管の閉塞に起因すると考えられている。

II N-2 Q-4 R-2 S-4 T-1

- 注) N~P: ヒトの半致死線量 LD $_{50/60}$ は 3.5~4.5 Gy であり、これは骨髄幹細胞の放射線による致死に起因している。この場合、白血球の死滅と供給不能による感染症や血液凝固に必須である血小板の供給不能による出血傾向が特に致死の原因となる。治療法は骨髄の再生を目的としたサイトカイン投与や造血幹細胞の移植であるが、特に臍帯血幹細胞は造血幹細胞の供給源として骨髄および G-CSF 投与したドナーから採取した末梢血幹細胞(同種末梢血幹細胞移植の際に用いる)などと同じく移植ソースの1つとされており、細胞提供者(ドナー)の負担がなく、HLA2 座不一致でも移植が可能なことなどから、造血幹細胞の有力な供給源と考えられている。したがって、放射線障害による治療で組織適合ドナーが緊急に見つからない場合に臍帯血幹細胞移植を行うことが推奨されている。
 - Q, R:消化管に関しては、小腸の腸粘膜絨毛上皮細胞を生成する腸陰窩 (クリプト) に存在する 幹細胞の障害が原因で起こる。線量としては5~15 Gy を全身に受けた場合、腸粘膜絨毛上皮 細胞の欠損が生じ、この部位からの出血、体液の喪失が被ばく後3~5 日頃から始まる。粘膜 欠落部位の上皮細胞再生の不全により出血や体液喪失が持続、更に感染症を合併して重症度を 増して被ばく7~10 日後に死亡に至る。中枢神経死は数10 Gy を超える全身被ばくで生じ、被 ばく者は直ちに知覚異常を伴う全身の重篤な灼熱感を訴え、急速に興奮の兆候が現れ、昏睡に 陥り、3 日以内に死亡する。原因は放射線による脳細胞の変性、大脳の浮腫、脳血管の炎症な どが原因と考えられている。
 - S, T: 放射線肺障害は約8 Gy 以上の体幹部を含む外部被ばくで発症し、被ばく後30 日以内の急性障害では放射線肺炎、晩期障害では放射線肺線維症が問題となる。放射線肺炎の重篤度は線量より、被ばくした肺の容積に依存すると考えられている。また、放射線による肺炎や線維症の場合に限ったことではなく間質性肺炎の多くでいえることであるが、感染には注意を要する。特にステロイドによる治療中にはインフルエンザなどのウィルス感染には注意を要する。

(参考図書:放射線治療計画ガイドライン 2012年版 (金原出版)/放射線治療分野の医学物理士の

ための基礎知識 (篠原出版新社)/臨床放射線生物学の基礎 改訂第4版 日本語訳本版 (放射線医療国際協力推進機構))

問 6 次の I ~Ⅲの文章の の部分に入る最も適切な語句,記号又は数値を,それぞれの解答群から 1
つだけ選べ。
I 放射線の生物作用を理解する上で重要な DNA はデオキシ A とリン酸と塩基から構成され
る。デオキシ A とリン酸は交互に並んで結合し、主鎖を形成する。この鎖が2本、互いに逆向
きに並んで二重らせん構造を形成する。塩基にはアデニン(A),シトシン(C),グアニン(G),チ
ミン (T) の4種類があり、向かい合った鎖のAとT、GとCが互いに B で結合している。A
と T の間の $oxed{B}$ の数は $oxed{C}$ 個であり、 $oxed{G}$ と $oxed{C}$ の間の $oxed{B}$ の数は $oxed{D}$ 個である。正
常ヒト2倍体細胞1個のDNAでは、AとTの対、GとCの対が合計で約 E 個並んでいる。
<a, b="" の解答群=""></a,>
1 グルコース 2 ガラクトース 3 フルクトース 4 リボース 5 イオン結合
6 共有結合 7 水素結合 8 疎水結合 9 配位結合
<c∼eの解答群></c∼eの解答群>
$1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 \times 10^{3} 7 6 \times 10^{6} 8 6 \times 10^{9}$
$9 6 \times 10^{12} 10 6 \times 10^{23}$
Ⅱ 電離放射線によって引き起こされる DNA 損傷には,塩基損傷,塩基遊離,架橋形成,1本鎖切断,
2本鎖切断などがある。正常ヒト 2 倍体細胞に 1 Gyの X 線を照射すると、細胞 1 個当たり、 DNA 1
本鎖切断は約 F 個,DNA 2 本鎖切断は約 G 個生成する。DNA 1 本鎖切断や DNA 2 本鎖
切断の生成や修復は電気泳動によって調べることができる。これは、DNA の分子量が小さいほど、
電場をかけたゲル中を H 移動することを利用している。DNA の電気泳動には種々の方法があ
るが、DNA2本鎖切断の生成や修復を調べるのに適した方法として、パルスフィールドゲル電気泳
動法がある。
DNA 2 本鎖切断が起こると、その近傍において、ヒストンを構成する H2A の一種である H2AX が
I を受け, J −H2AX が生成する。そのため, 放射線照射した細胞を J −H2AX に
対する蛍光標識 K を用いて染色し,蛍光顕微鏡で観察すると,ドット状に見える。これを
J-H2AXのフォーカスという。このフォーカスを数えることにより、DNA2本鎖切断の生成
や修復を調べることができる。たとえば、DNA 2 本鎖切断修復酵素の一つである DNA リガーゼⅣを
欠損する細胞に 2 Gy の X 線を照射し, 2 時間後に残っている J ──-H2AX のフォーカスを数える
と、正常細胞に同様の処置を施したときより L 。この方法は生物学的線量評価法としての応用
も考えられている。
<fの解答群></fの解答群>
1 10 2 100 3 1,000 4 10,000
<gの解答群></gの解答群>
1 4 2 40 3 400 4 4,000
<hの解答群></hの解答群>
1 凍く 2 遅く

<i の解答群=""></i>
1 アセチル化 2 メチル化 3 ユビキチン化 4 リン酸化
<jの解答群></jの解答群>
$1 \alpha 2 \beta 3 \gamma 4 \chi$
<k, lの解答群=""></k,>
1 cDNA 2 siRNA 3 抗体 4 特異的阻害剤 5 多い 6 少ない
Ⅲ ヒトやマウスの細胞において、DNA2本鎖切断は主として、非相同末端結合と相同組換えの二つ
の機構で修復される。一般に、非相同末端結合は相同組換えに比べて、誤りを起こしMと考え
られている。相同組換えによる DNA 2 本鎖切断の修復は,鋳型として N 染色分体を必要とす
るため、細胞周期の O 期の後半から P 期に限定される。この期間では、その他の期間と
比べ,放射線致死感受性は Q。また,この期間において,非相同末端結合による DNA 2 本鎖
切断の修復機構はR。
非相同末端結合に関わる DNA 依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニット(DNA-PKcs)の遺伝
子に変異を有する scid(スキッド)マウスは放射線致死高感受性の他に S を呈する。近年、ヒ
トでも DNA-PKcs の遺伝子に変異を有する患者が報告され, Sが認められている。
< M, N の解答群 >
1 やすい 2 にくい 3 合同 4 相同 5 相似 6 姉妹
<o~qの解答群></o~qの解答群>
1 G_1 2 G_2 3 S 4 M 5 高い 6 低い
<r, sの解答群=""></r,>
1 機能する 2 機能しない 3 小脳性運動失調 4 不妊 5 免疫不全
6 紫外線高感受性
〔解答〕
I $A-4$ $B-7$ $C-2$ $D-3$ $E-8$
注)A~D:DNA(デオキシリボ核酸)は化学的にはデオキシリボースと4種類の塩基とリン酸から構成
される。デオキシリボースとリン酸は交互に並んでエステル結合によってポリマーを形成し、
主鎖を形成する。2本の主鎖が塩基同士、水素結合により結合し、二重らせん構造を形成する。
水素結合はA-Tの間では2つの水素結合、G-Cの間では3つの水素結合により結合している。
E:正常ヒト2 倍体細胞 1 個の DNA では、ヒトゲノムの塩基数は約 30 億塩基対 (3×10 ⁹ 塩基対)、
遺伝子数は約2万(2×10 ⁴) 個である。ヒトの細胞1個当たりの DNA の長さは約2 m (200 mm) が 1 mm である だ 1 の で 1 mm で 1 だ 1 mm で 1 が 1 mm で 1 mm
cm),ゲノム中の遺伝子の割合は約5%である。マウスの2倍体細胞でもゲノムの塩基数は26倍には対方なし、場合ア数ではよりと美術ないといわれている。
億塩基対存在し、遺伝子数ではヒトと差がないといわれている。II F - 3 G - 2 H - 1 I - 4 J - 3 K - 3
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
注)F, G:同じ線量の被ばくであれば, DNA 1本鎖切断は DNA 2本鎖切断よりも多く生成される。1
Gy の X 線が照射されると、細胞 1 個当たり、DNA 1 本鎖切断は約 600~1,000 個、DNA 2 本
鎖切断は約 16~40 個生成される。ちなみに塩基損傷は約 6,400 個で DNA-タンパク質架橋体
形成は約150個形成されるといわれている。DNAはリボースとリン酸エステル結合によるポ
リマーであり、リン酸の負の荷電を持っている。

- H:一般に電気泳動はゲル中にある生体分子に電場をかけることにより、生体分子の持つ荷電 (DNA の場合はリン酸基の負の荷電) で反対極の電極側に引っ張られるが、サイズの大きいものはその移動速度は遅く、サイズの小さいものは速くゲル中を移動する。これにより生体分子のサイズによって分離する方法が電気泳動である。しかし、DNA の様な極端に大きな生体分子を分離するには単純に一方向から電場をかけるだけではゲル中で十分移動することができず、DNA のサイズで分離することが難しい。そこで、周期的にゲルにかける電場の方向をパルス状に変えながら、高分子でもゲル中をジグザグに進行させ、単一方向に電場をかける方法より DNA を移動しやすくする方法が考案された。これをパルスフィールド電気泳動法という。この方法を用いることにより放射線や制がん剤をはじめとする DNA 鎖切断を起こす処理をした細胞の DNA 鎖切断を解析することが可能となった。
- I~L:DNA 鎖 2 本鎖切断に応答して ATM をはじめとするリン酸化酵素が活性化し、その基質であるヌクレオソームを構成するヒストンの 1 つである H2AX がリン酸化され γ -H2AX となり、DNA 2 本鎖切断の断端に集積することが知られている。これを利用し、DNA 鎖切断を検出する方法として、 γ -H2AX の抗体を用いて、照射された細胞を免疫染色することにより、フォーカスと呼ばれる γ -H2AX が集積した点が核に観察されるようになる。これは低線量での評価が可能であることから、近年、細胞レベルでの DNA 2 本鎖切断の検出・半定量に頻繁に用いられている。類似の性質を示すタンパク質として 53BP1 なども DNA 2 本鎖切断の検出にマーカーとして用いられている。また、照射した細胞を、修復のための時間を与えるために数時間の間、培養することによってフォーカスの数が減少することが観察される。これは細胞が照射後の培養している時間に起こる修復過程を反映したものであり、修復異常を起こした細胞ではこのフォーカスの消失の速度が遅くなることが知られている。
- M 1 N 6 O 3 P 2 Q 6 R 1 S 5
- 注)哺乳類細胞での DNA 2 本鎖切断の修復は非相同末端結合(non-homologous end joining)と相同組換え(homologous recombination)で行われる。 DNA 末端は単純に直接繋ぎ合わせるため,相同組換えと異なり姉妹染色分体を必要とせず,全ての細胞周期内において機能する一方, DNA 末端の接合部において変異が起こりやすい(M, R)。この修復システムでは DNA 二重鎖切断によって生じた DNA 末端に Ku が結合し, DNA-PKcs が更に DNA 末端に招集され,その後,末端が XRCC4 や様々なヌクレアーゼやポリメラーゼで処理され,最終的にはリガーゼで結合,修復される。この DNA-PKcs を欠損している Scid マウス(Severe combined immunodeficiency)が知られている。この マウスは放射線感受性を示すのと同時に免疫不全の症状を呈する(S)。また,相同組換えの場合は, DNA の切断部の修復の際に用いる鋳型としてまったく同一の相補鎖を利用する。したがって,この機構は細胞周期中では, DNA の複製の後期(S 期後期)か,または複製終了後の間(G_2 期)において主に用いられると考えられている(O, P)。これは損傷を受けた染色体の修復が新しく作成された相同な配列を持つ姉妹染色体を利用することで可能になるからである(N)。この期間では修復能が高いため放射線感受性が低くなる(O)。また,この相同組換えによる修復には O1 に移復的が高いため放射線感受性が低くなる(O2 の。また,この相同組換えによる修復には O3 を O4 を O4 といったタンパク質が関与することが知られている。

(参考図書:放射線基礎医学 第12版(金芳堂))