

第 62 回

第 1 種放射線取扱主任者試験 問題と解答例

第 62 回 平成 29 年 8 月 23 日, 24 日実施

第 62 回

第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例

目 次

法 令	
第 62 回 (平成 29 年)	1
管理測定技術	
第 62 回 (平成 29 年)	15
物 理 学	
第 62 回 (平成 29 年)	33
化 学	
第 62 回 (平成 29 年)	49
生 物 学	
第 62 回 (平成 29 年)	62
物 化 生	
第 62 回 (平成 29 年)	73

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。

法 令

第 62 回 (平成 29 年)

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。ただし、問題文の「 」内の文章は、放射線障害防止法又は関係法令の条文を示し、項数は算用数字、号数は（ ）つきの算用数字で表す。また、条文は問に応じて一部を省略して示す。

次の各問について、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 定義に関する次の文章の ～ 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 2 条 この法律において「放射線」とは、原子力基本法第 3 条第 5 号に規定する放射線をいう。

2 この法律において「放射性同位元素」とは、りん 32, コバルト 60 等放射線を放出する同位元素及びその化合物並びにこれらの含有物（ されているこれらのものを含む。）で で定めるものをいう。

3 この法律において「」とは、硫黄計その他の放射性同位元素を装備している機器をいう。

4 この法律において「放射線発生装置」とは、サイクロトロン、シンクロトロン等荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置で で定めるものをいう。」

<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>
1 機器に装備	政令	放射性同位元素装備機器
2 密封	政令	表示付認証機器
3 密封	政令	放射性同位元素装備機器
4 機器に装備	原子力規制委員会規則	放射性同位元素装備機器
5 密封	原子力規制委員会規則	表示付認証機器

〔解答〕

1

注) 法第 2 条 (定義)

問 2 用語の定義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 排気設備とは、「排気浄化装置、排風機、排気管、排気口等気体状の放射性同位元素等を浄化し、又は排気する設備」をいう。

B 排水設備とは、「排液処理装置（濃縮機、分離機、イオン交換装置等の機械又は装置をいう。）、排水浄化槽（貯留槽、希釈槽、沈殿槽、ろ過槽等の構築物をいう。）、排水管、排水口等液体状の放射性同位元素等を浄化し、又は排水する設備」をいう。

C 固型化処理設備とは、「粉碎装置、圧縮装置、混合装置、詰込装置等放射性同位元素等をコンクリートその他の固型化材料により固型化する設備」をいう。

D 廃棄作業室とは、「放射性同位元素等を焼却した後その残渣を焼却炉から搬出し、又は放射性同位元素若しくは放射線発生装置から発生した放射線により生じた放射線を放出する同位元素によって汚染された物で密封されていないものの詰替えをする作業を行う室」をいう。

- 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(用語の定義)

- A: 正 則第1条第5号
 B: 正 則第1条第6号
 C: 正 則第1条第7号
 D: 誤 定められていない。

問3 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個当たりの数量が下限数量の1,000倍を超える特定放射性同位元素であって機器に装備されていないもののみを使用しようとする者は、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。
- B 表示付特定認証機器のみを認証条件に従って使用しようとする者は、工場又は事業所ごとに、かつ、認証番号が同じ表示付特定認証機器ごとに、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 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賃貸しようとする者は、賃貸事業所ごとに、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
- D 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。

- 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 令第3条第1項、第2項、第3項
 B: 誤 法第3条第1項、第3条の2 あらかじめ届出は不要。
 C: 誤 法第4条 賃貸の業は届出。
 D: 正 法第4条の2

問4 表示付認証機器の使用をする者の届出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3条の3 第3条第1項ただし書及び前条第1項ただし書に規定する表示付認証機器の使用をする者(以下「表示付認証機器 A 」という。)は、政令で定めるところにより、当該表示付認証機器の B に、次の事項を原子力規制委員会に届け出なければならない。

- (1) 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
 (2) 表示付認証機器の第12条の6に規定する認証番号及び台数
 (3) 使用の C

2 前項の届出をした者は、同項各号に掲げる事項を変更したときは、原子力規制委員会規則で定めるところにより、 D , その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。」

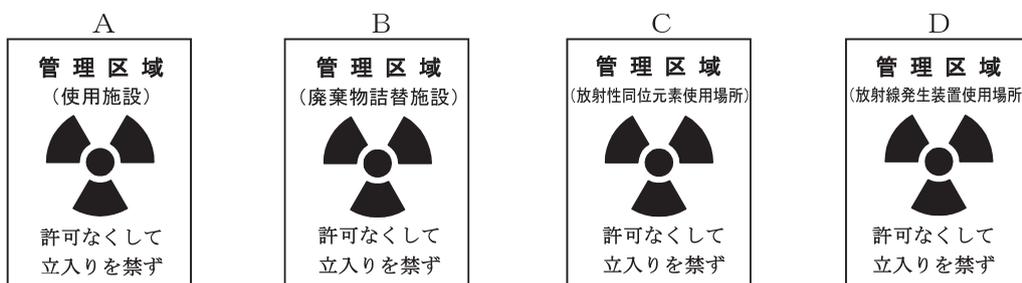
	A	B	C	D
1 使用者	使用を開始する前	使用を開始する前	場所	変更の日から 30 日以内に
2 届出使用者	使用の開始の日から 30 日以内	使用の開始の日から 30 日以内	場所	遅滞なく
3 届出使用者	使用の開始の日から 30 日以内	使用を開始する前	目的及び方法	変更の日から 30 日以内に
4 届出使用者	使用を開始する前	使用を開始する前	目的及び方法	遅滞なく
5 使用者	使用の開始の日から 30 日以内	使用の開始の日から 30 日以内	目的及び方法	変更の日から 30 日以内に

〔解答〕

5

注) 法第 3 条の 3 (表示付認証機器の使用をする者の届出)

問 5 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 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕

5

注) 則第 14 条の 7 (使用施設の基準), 8 (廃棄物詰替施設の基準), 則第 15 条 (使用の基準), 施行規則別表 (第 14 条の 7~第 14 条の 11, 第 15 条, 第 19 条関係)

A: 正 則第 14 条の 7 第 1 項第 9 号, 施行規則別表

B: 正 則第 14 条の 8

C: 正 則第 15 条第 1 項第 13 号, 施行規則別表

D: 正 則第 15 条第 1 項第 13 号, 施行規則別表

問 6 放射化物保管設備の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 放射化物保管設備の扉、ふた等外部に通ずる部分には、かぎその他の閉鎖のための設備又は器具を設けること。
- B 放射化物保管設備は、外部と区画された構造とすること。
- C 放射化物保管設備に備える容器は、破損しにくい構造とし、かつ、不燃材料で造ること。
- D 放射化物保管設備は、その主要構造部等を耐火構造とし、その開口部には、建築基準法施行令第 112 条第 1 項に規定する特定防火設備に該当する防火戸を設けること。

- 1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

2

注) 則第14条の7(使用施設の基準)

- A: 正 第1項第7号の2ロ
- B: 正 第1項第7号の2イ
- C: 誤 定められていない。
- D: 誤 定められていない。

問7 密封されていない放射性同位元素であるフッ素18のみを研究に使用するために事業所内でサイクロトロンにより製造している許可使用者が、原子力規制委員会規則で定める技術上の基準に適合させなければならない放射線施設の位置、構造及び設備として放射線障害防止法上正しいものの組合せは、次のうちどれか。

- A 汚染検査室
- B 廃棄作業室
- C 保管廃棄設備
- D 放射線発生装置の使用をする室

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) 則第14条の7(使用施設の基準)、則第14条の11(廃棄施設の基準)

- A: 正 則第14条の7第1項第5号
- B: 誤 定められていない。
- C: 正 則第14条の11第1項第8号
- D: 正 則第14条の7第1項第6号、7号

問8 使用施設の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正しいものの組合せはどれか。

- A 使用施設内の人が常時立ち入る場所において人が被ばくするおそれのある線量は、実効線量で1週間につき1ミリシーベルト以下としなければならない。
- B 病院又は診療所(介護保険法第8条第27項の介護老人保健施設を除く。)の病室における線量は、実効線量で3月間につき1.3ミリシーベルト以下としなければならない。
- C 工場又は事業所内の人が居住する区域における線量は、実効線量で1月間につき250マイクロシーベルト以下としなければならない。
- D 工場又は事業所の境界における線量は、実効線量で3月間につき500マイクロシーベルト以下としなければならない。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

2

注) 平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量告示)第10条(遮蔽物に係る線量限度)

問9 許可の条件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8条 第3条第1項本文又は第4条の2第1項の許可には、条件を付することができる。」

2 前項の条件は、 するため に限り、かつ、許可を受ける者に こととならないものでなければならない。」

	A	B	C
1	公共の安全を確保	必要な最小限度のもの	不利な規制をする
2	公共の安全を確保	必要な最小限度のもの	不当な義務を課する
3	放射線障害を防止	放射線防護に必要なもの	不利な規制をする
4	公共の安全を確保	放射線防護に必要なもの	不当な義務を課する
5	放射線障害を防止	必要な最小限度のもの	不当な義務を課する

〔解答〕

5

注) 法第 8 条（許可の条件）

問 10 許可使用者の変更の手続きと許可証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 氏名若しくは名称又は住所の変更をしたときは、許可使用に係る氏名等の変更の届出の際に、許可証を原子力規制委員会に提出し、訂正を受けなければならない。
- B 許可使用に係る変更の許可の申請により、使用の目的及び方法の変更をしようとするときは、その変更の許可の申請の際に、許可証を原子力規制委員会に提出しなければならない。
- C 法人の代表者の氏名を変更したときは、許可使用に係る氏名等の変更の届出の際に、許可証を原子力規制委員会に提出し、訂正を受けなければならない。
- D 許可使用に係る使用の場所の一時的変更の届出により、密封された放射性同位元素を、機械、装置等の非破壊検査のため一時的に事業所外で使用するため、使用の場所を変更しようとするときは、その変更の届出の際に、許可証を原子力規制委員会に提出し、訂正を受けなければならない。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

2

注) 法第 10 条（使用施設等の変更）

- A：正 第 1 項
- B：正 第 2 項，第 4 項
- C：誤 定められていない。法人の代表者の氏名は許可証の記載事項ではない。
- D：誤 第 6 項 使用の場所の一時的変更は届出。

問 11 使用の場所の変更の都度許可を要しない数量等に関する次の文章の ～ 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 3 条 令第 9 条第 1 項の原子力規制委員会が定める数量は、放射性同位元素等の における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（平成 2 年科学技術庁告示第 7 号）別表第 1 から別表第 4 まで及び別表第 6 の第 1 欄に掲げる放射性同位元素の に応じ、それぞれこれらの表の第 2 欄に掲げる数量とする。ただし、これらの数量が ベクレルを超える場合又はこれらの数量に制限のないものにあつては、 ベクレルとする。」

	A	B	C
1	工場又は事業所の外	種類又は化学形等	3 テラ
2	工場又は事業所の外	種類又は区分	370 ギガ

- | | | | |
|---|-----------|----------|--------|
| 3 | 工場又は事業所 | 種類又は化学形等 | 370 ギガ |
| 4 | 工場又は事業所の外 | 種類又は区分 | 3 テラ |
| 5 | 工場又は事業所 | 種類又は区分 | 370 ギガ |

【解答】

4

注)平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量告示)第3条(使用の場所の変更の都度許可を要しない数量等)

問12 許可廃棄業者が、許可証を紛失したため許可証再交付申請書を原子力規制委員会に提出して許可証の再交付を受けた。その後、紛失した許可証を発見したときの措置として、放射線障害防止法上正しいものは、次のうちどれか。

- 1 発見した許可証を速やかに、破棄した。
- 2 発見した許可証を速やかに、原子力規制委員会に返納した。
- 3 再交付を受けた許可証を速やかに、破棄した。
- 4 再交付を受けた許可証を速やかに、原子力規制委員会に返納した。
- 5 特別な措置は講じなかった。

【解答】

2

注)則第14条(許可証の再交付)

問13 施設検査等を要しない放射性同位元素等に関する次の文章の ~ に該当する数量について、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13条 法第12条の8第1項に規定する政令で定める放射性同位元素は、放射性同位元素を密封した物1個当たりの数量が ベクレル未満のものとする。ただし、放射性同位元素装備機器に装備されているものにあつては1台に装備されている放射性同位元素の総量が ベクレル未満のものとする。

2 法第12条の8第1項に規定する政令で定める貯蔵能力は、密封されていない放射性同位元素にあつてはその種類ごとに下限数量に を乗じて得た数量とし、密封された放射性同位元素にあつては ベクレルとする。」

	<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>	<input type="text" value="D"/>
1	400 ギガ	400 ギガ	10 万	400 ギガ
2	3 テラ	400 ギガ	1,000	3 テラ
3	3 テラ	3 テラ	1,000	3 テラ
4	10 テラ	10 テラ	10 万	10 テラ
5	10 テラ	400 ギガ	1,000	10 テラ

【解答】

4

注)令第13条(施設検査を要しない放射性同位元素等)

問14 次の記述のうち、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次の定期確認を受けなければならない期間について、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 放射線発生装置のみを使用する特定許可使用者は、3年以内に定期確認を受けなければならない。

- B 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、3年以内に定期確認を受けなければならない。
- C 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、5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、5年以内に定期確認を受けなければならない。
- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

3

注) 令第15条(定期確認の期間)

- A : 誤 3年以内ではなく5年以内。
- B : 正
- C : 正
- D : 誤 5年以内ではなく3年以内。

問 15 密封されていない放射性同位元素の使用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 放射化物は、その数量が下限数量を下回ることが確実な期間を超えて使用施設内において保管した後でなければ、みだりに使用施設から持ち出さないこと。
- B 放射性汚染物で、その表面の放射性同位元素の密度が表面密度限度を超えているものは、みだりに管理区域から持ち出さないこと。
- C 陽電子断層撮影用放射性同位元素を人以外の生物に投与した場合においては、当該生物及びその排泄物については、投与された陽電子断層撮影用放射性同位元素の下限数量を下回ることが確実な期間を超えて管理区域内において保管した後でなければ、みだりに管理区域から持ち出さないこと。
- D 放射性同位元素によって汚染された物で、その表面の放射性同位元素の密度が表面密度限度を超えているものは、みだりに作業室から持ち出さないこと。
- 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 定められていない。

- B : 誤 平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量表示)第16条, 表面密度限度の10分の1。
- C : 誤 則第15条第1項第10号の2 下限数量ではなく, 原子の数が1を下回ることが確実な期間。
- D : 正 則第15条第1項第9号

問 16 表面密度限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。

放射性同位元素	表面密度限度[Bq/cm ²]
A トリチウム	400
B ユウロピウム 152	40
C ポロニウム 210	4
D アメリカシウム 241	40

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

3

注) 則第1条第13号, 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(表面密度限度)

- A: 誤 アルファ線放出核種でないため 40 Bq/cm^2
- B: 正
- C: 正
- D: 誤 アルファ線放出核種のため 4 Bq/cm^2

問17 事業所等における運搬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。ただし, 事業所内の使用施設 a の管理区域から離れた使用施設 b の管理区域へ放射性同位元素を封入した容器(運搬物)を運搬する場合とする。

- A 運搬物の表面における1センチメートル線量当量率が2ミリシーベルト毎時を超えないようにすること。
- B 運搬物の表面から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が100マイクロシーベルト毎時を超えないようにすること。
- C 運搬物を積載した車両の表面(開放型の車両にあつては, その外輪郭に接する垂直面及び車体の底面)における1センチメートル線量当量率が5ミリシーベルト毎時を超えないようにすること。
- D 運搬物の表面の放射性同位元素の密度が表面密度限度を超えないようにすること。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

1

注) 則第18条(事業所等における運搬の基準), 昭和56年科学技術庁告示第10号第4条

- A: 正
- B: 正
- C: 誤 5ミリシーベルトではなく2ミリシーベルト。
- D: 誤 則第18条第3号, 表面密度限度の10分の1。

問18 実効線量及び等価線量の算定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 4月1日を始期とする1年間についての実効線量は, 外部被ばくによる実効線量と内部被ばくによる実効線量との和とする。
- B 妊娠中である女子の腹部表面の等価線量は, 70マイクロメートル線量当量とする。
- C 眼の水晶体の等価線量は, 1センチメートル線量当量又は70マイクロメートル線量当量のうち, 適切な方とする。
- D 2種類以上の放射性同位元素を吸入摂取又は経口摂取したときは, それぞれの種類につき算出した実効線量の和を内部被ばくによる実効線量とする。

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

【解答】

1

注) 平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量表示)

- A: 正 第20条第1項
- B: 誤 第20条第2項第3号, 70マイクロメートルではなく1センチメートル。
- C: 正 第20条第2項第2号
- D: 正 第19条第2項

問 19 放射線障害予防規程に記載すべき事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、次のうちどれか。

- A 放射線管理の状況の報告に関すること。
- B 放射線障害を防止するために必要な教育及び訓練に関すること。
- C 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保健上必要な措置に関すること。
- D 放射線測定器の校正に関すること。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

1

注) 則第 21 条 (放射線障害予防規程)

- A : 正
- B : 正
- C : 正
- D : 誤 定められていない。

問 20 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又は事項の全部又は一部に関し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の時間数は定められている。
- B 放射線業務従事者が初めて管理区域に立ち入る前に行わなければならない教育及び訓練の時間数は定められている。
- C 放射線業務従事者が管理区域に立ち入った後、1年を超えない期間ごとに行わなければならない教育及び訓練の時間数は定められている。
- D 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が取扱等業務を開始する前に行わなければならない教育及び訓練の時間数は定められている。

1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

4

注) 平成 3 年 11 月 15 日科学技術庁告示第 10 号 (教育及び訓練の時間数を定める告示)

- A : 誤 定められていない。
- B : 正
- C : 誤 定められていない。
- D : 正

問 21 使用の廃止等の届出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 放射線発生装置のみを使用する特定許可使用者が、その許可に係る放射線発生装置のすべての使用を廃止するときは、あらかじめ、その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。
- 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は、遅滞なく、その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。
- C 届出版売業者が、その業を廃止したときは、遅滞なく、その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。
- D 表示付認証機器届出使用者が、その届出に係るすべての表示付認証機器の使用を廃止したときは、

遅滞なく、その旨を原子力規制委員会が指定する機関に届け出なければならない。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

3

注) 法第27条(使用の廃止等の届出), 則第25条(使用の廃止等の届出)

- A: 誤 「あらかじめ」ではなく「遅滞なく」。
 B: 正
 C: 正
 D: 誤 原子力規制委員会に届け出なければならない。

問22 所持の制限に関する次の記述のうち、放射性同位元素を所持することができる場合として、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 許使用者が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遮蔽能力の範囲内で所持する場合
 B 届出使用者の従業者がその職務上放射性同位元素を所持する場合
 C 表示付認証機器について認証条件に従った使用, 保管又は運搬をする場合
 D 届出販売業者が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場合
 1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

【解答】

5

注) 法第30条(所持の制限)

- A: 誤 法第30条第1号「遮蔽能力」ではなく「貯蔵施設の貯蔵能力」
 B: 正 法第30条第12号
 C: 正 法第30条第5号
 D: 正 法第30条第3号

問23 事故届に関する次の文章の ~ 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32条 許可届出使用者等(表示付認証機器使用者及び表示付認証機器使用者から を委託された者を含む。)は、その所持する放射性同位元素について その他の事故が生じたときは、, その旨を警察官又は海上保安官に届け出なければならない。」

- | | <input type="text" value="A"/> | <input type="text" value="B"/> | <input type="text" value="C"/> |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 保管 | 破損, 汚染 | 10日以内に |
| 2 | 運搬 | 盗取, 所在不明 | 遅滞なく |
| 3 | 保管 | 盗取, 所在不明 | 遅滞なく |
| 4 | 運搬 | 盗取, 所在不明 | 10日以内に |
| 5 | 運搬 | 破損, 汚染 | 10日以内に |

【解答】

2

注) 法第32条(事故届)

問 24 危険時の措置における緊急作業に係る線量限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 内部被ばくによる預託実効線量について 150 ミリシーベルトである。
- B 実効線量について 100 ミリシーベルトである。
- C 眼の水晶体の等価線量について 500 ミリシーベルトである。
- D 皮膚の等価線量について 1 シーベルトである。

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

〔解答〕

4

注) 平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号 (数量告示) 第 22 条 (緊急作業に係る線量限度)

- A : 誤 定められていない。
- B : 正
- C : 誤 500 ミリシーベルトではなく 300 ミリシーベルト。
- D : 正

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 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研究目的で使用するため、第 2 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任した。
- B 10 テラベクレルの密封されていない放射性同位元素のみを研究目的で使用するため、第 2 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任した。
- C 密封されていない放射性同位元素のみを販売するため、第 2 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任した。
- D 密封された放射性同位元素のみを賃貸するため、第 3 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任した。

1 ABD のみ 2 AB のみ 3 AC のみ 4 CD のみ 5 BCD のみ

〔解答〕

4

注) 法第 34 条 (放射線取扱主任者)

- A : 誤 10 テラベクレル以上は特定許可使用者となるため、第 1 種放射線取扱主任者免状を有する者の選任が必要。
- B : 誤 密封されていない放射性同位元素の使用は、第 1 種放射線取扱主任者免状を有する者の選任が必要。
- C : 正
- D : 正

問 26 放射線取扱主任者の義務等に関する次の文章の ~ 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 36 条 放射線取扱主任者は、 にその職務を遂行しなければならない。

- 2 使用施設、廃棄物詰替施設、貯蔵施設、廃棄物貯蔵施設又は廃棄施設に は、放射線取扱主任者がこの法律若しくはこの法律に基づく命令又は放射線障害予防規程の実施を確保するためにする指示に従わなければならない。
- 3 前項に定めるもののほか、許可届出使用者、届出販売業者、届出賃貸業者及び許可廃棄業者は、放射

線障害の防止に関し、放射線取扱主任者の C ならない。」

A	B	C
1 確実	立ち入る者及び使用者等から運搬を委託された者	指示に従わなければ
2 誠実	立ち入る者	意見を尊重しなければ
3 正確	立ち入る放射線業務従事者	指示に従わなければ
4 確実	立ち入る者	意見を尊重しなければ
5 誠実	立ち入る者及び使用者等から運搬を委託された者	意見を尊重しなければ

〔解答〕

2

注) 法第36条(放射線取扱主任者の義務等)

問27 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、選任された後に定期講習を受けた放射線取扱主任者に対し、前回の定期講習を受けた日から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 放射性同位元素のみを業として賃貸する届出賃貸業者は、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1年以内に定期講習を受けさせなければならない。
- D 届出使用者は、選任された後に定期講習を受けた放射線取扱主任者に対し、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 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

1

注) 法第36条の2(定期講習)、則第32条(定期講習)

A: 正 則第32条第2項第2号

B: 正 則第32条第1項

C: 正 則第32条第2項第1号

D: 誤 則第32条第2項第2号 5年以内ではなく3年以内。

問28 1個当たりの数量が4テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを研究目的で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行うことができないが、この間も放射性同位元素を継続して使用することとした。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。
- C 出張の期間が45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、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。
- D 出張の期間が45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。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

3

注) 法第37条(放射線取扱主任者の代理者)、則第33条(放射線取扱主任者の代理者の選任等)

A: 正 則第33条第3項

B: 誤 法第37条第1項 職務を行うことができない期間の日数にかかわらず代理者の選任は必要。

C: 誤 則第33条第1項 研究目的での使用のため医師は専任できない。第1種あるいは第2種放射線取扱主任者免状を有している者が必要。

D: 正 法第37条第3項

問29 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 許可使用者は、放射線業務従事者について放射性同位元素の使用における計画外の被ばくがあつて、当該被ばくに係る実効線量が5ミリシーベルトを超え、又は超えるおそれがあるときは、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(法第28条第7項の規定により許可使用者とみなされる者を除く。)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、特定放射性同位元素の所持に係る報告書により、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。

C 許可使用者は、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つたときは、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 許可使用者から運搬を委託された者は、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。

1 ABDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

4

注) 則第39条(報告の徴収)

A: 誤 則第39条第1項 30日以内ではなく10日以内。

B: 誤 則第39条第6項 6月以内ではなく3月以内。

C: 正 則第39条第1項第8号

D: 正 則第39条第1項第1号

問30 実効線量限度に関する次の文章の ~ に該当する数値について、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 規則第1条第10号に規定する放射線業務従事者の一定期間内における線量限度は、次のとおりとする。

(1) 平成13年4月1日以後5年ごとに区分した各期間につき ミリシーベルト(2) 4月1日を始期とする1年間ににつき ミリシーベルト(3) 女子(妊娠不能と診断された者、妊娠の意思のない旨を許可届出使用者又は許可廃棄業者に書面で申し出た者及び次号に規定する者を除く。)については、前2号に規定するほか、4月1日、7月1日、10月1日及び1月1日を始期とする各3月間ににつき ミリシーベルト

(4) 妊娠中である女子については、第1号及び第2号に規定するほか、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ににつき、人体内部に摂取した放射

性同位元素からの放射線に被ばくすることについて ミリシーベルト」

	A	B	C	D
1	250	50	5	2
2	250	100	10	2
3	100	20	10	1
4	50	10	5	2
5	100	50	5	1

〔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 5 条 (実効線量限度)

管理測定技術

第 62 回（平成 29 年）

問 1 次の I、II の文章の の部分に入る最も適切な語句、数式又は最も近い数値を、それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。

I 環境試料のような低レベル放射能の Ge 検出器を用いた測定においては、 γ 線エネルギースペクトル上のバックグラウンドを低減するため、Ge 検出器を適切に遮蔽することが必要となる。 γ 線の遮蔽材には、原子番号、密度などを考慮して、鉄や鉛を用いることが多い。 ^{137}Cs γ 線 (0.66 MeV) について見ると、鉛 (密度: $11.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) の全質量減弱係数は約 $0.11 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ であるため、5 cm 厚の鉛板で遮蔽すると、遮蔽しない場合に比べて 0.66 MeV γ 線に対する全吸収ピーク強度は約 A 分の 1 になる。また、全質量減弱係数が約 $0.074 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ の鉄 (密度: $7.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) で同じ遮蔽効果を得るためには、約 B 倍の厚さが必要となる。一方、 ^{40}K γ 線 (1.46 MeV) では鉛の全質量減弱係数が約 $0.053 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ であるため、5 cm 厚の鉛板で遮蔽すると、遮蔽しない場合に比べて 1.46 MeV γ 線に対する全吸収ピーク強度は C 分の 1 程度になる。

γ 線放出核種を含む試料を測定するとき、試料自体から放出された γ 線が遮蔽体などで D を起こしたのち再び検出器に入射すると、結果として γ 線エネルギースペクトル上で連続的に広がるバックグラウンドが増加する。この増加が顕著に現れるスペクトル部分のエネルギー [MeV] は、試料から放出された γ 線のエネルギー E_γ を MeV 単位で与えると、 ア 式を用いてほぼ推定できる。鉄製遮蔽体の場合、この増加を抑えるために E の内張りが有効であるが、その一方で、 F により E 原子の G が原子の外に放出されることにもない、75 keV 近傍に H のピークが生じる。この H の影響を効果的に低減するためには、遮蔽体内面から検出器側に向け、さらに I 、銅の薄い板を順に重ね張りすると良い。

<A~C の解答群>

- 1 2 2 5 3 10 4 20 5 50 6 100
7 200 8 500 9 1,000 10 2,000

<D~F の解答群>

- 1 アルミニウム 2 鉄 3 銅 4 カドミウム 5 鉛
6 光電効果 7 コンプトン散乱 8 電子対生成 9 弾性散乱 10 ビルドアップ
11 放射損失 12 壁効果 13 励起

<アの解答群>

- 1 $\frac{E_\gamma}{E_\gamma+1}$ 2 $\frac{E_\gamma}{4E_\gamma+1}$ 3 $\frac{E_\gamma}{2E_\gamma+1}$ 4 $\frac{E_\gamma}{2(E_\gamma+1)}$ 5 $\frac{2E_\gamma}{E_\gamma+1}$ 6 $\frac{E_\gamma}{4(E_\gamma+1)}$

<G~I の解答群>

- 1 アルミニウム 2 チタン 3 鉄 4 カドミウム 5 鉛 6 制動 X 線
7 特性 X 線 8 消滅光子 9 コンプトン電子 10 軌道電子 11 内部転換電子

II γ 線エネルギースペクトルの連続スペクトル部分は、これと重なる他の全吸収ピークの正味計数率を求める際にバックグラウンドとなる。この連続スペクトル部分を低減するためには、Ge検出器とその周りを取り囲む形に配置した検出器(ガード検出器)で構成される検出器システムの使用が有効である。

この検出器システムにおいて、Ge検出器またはガード検出器のいずれか一方で **J** を起こした γ 線が他方で検出された場合、両者の検出信号は **K** 事象であるため、それらの信号を **L** 計数回路を用いて除去することができる。この方法により、Ge検出器の検出部において **J** で生じた **M** の信号を取り除き、 γ 線スペクトロメータの性能指標の一つである **N** を効果的に改善することができる。一般に、ガード検出器には、検出部の実効原子番号が高い NaI(Tl)シンチレーション検出器、**O** 検出器が適しているが、低い実効原子番号でも検出部の容積が大きい検出器の作製が可能な **P** 検出器なども用いられている。

ガード検出器と Ge 検出器で構成される検出器システムにより、 ^{60}Co 線源試料(壊変率: N_0)を測定する場合を考える。 ^{60}Co の2本の γ 線(γ_1, γ_2)について、この検出器システムにより得られる全吸収ピークの計数率 $N_{G\gamma_1}, N_{G\gamma_2}$ は、Ge 検出器単体としての全吸収ピーク効率をそれぞれ $\epsilon_{G1}, \epsilon_{G2}$ とし、ガード検出器の全計数効率を $\epsilon_{T1}, \epsilon_{T2}$ とすると、

$$N_{G\gamma_1} = N_0 \text{ **イ** }$$

$$N_{G\gamma_2} = N_0 \text{ **ウ** }$$

となる。したがって、この検出器システムを、複数の γ 線放出が **K** 事象と見なし得る ^{60}Co のような放射性核種に適用する場合には、全吸収ピークの計数効率も低下することに注意する必要がある。

<J~Nの解答群>

- | | | | |
|---------|-----------|--------------|-------------|
| 1 光電効果 | 2 コンプトン散乱 | 3 電子対生成 | 4 消滅光子 |
| 5 光電子 | 6 反跳電子 | 7 ピーク対コンプトン比 | 8 半値幅(FWHM) |
| 9 増倍度 | 10 サム | 11 同時 | 12 反同時 |
| 13 波高弁別 | 14 遅延 | | |

<O, Pの解答群>

- | | | |
|-------------------|---------------|------------------|
| 1 ZnS(Ag)シンチレーション | 2 BGOシンチレーション | 3 プラスチックシンチレーション |
| 4 空気電離箱 | 5 表面障壁型Si半導体 | 6 CdTe半導体 |

<イ, ウの解答群>

- | | | | |
|------------------------------------|---|------------------------------------|---|
| 1 $\epsilon_{G1}(1-\epsilon_{T1})$ | 2 $(1-\epsilon_{G1}\cdot\epsilon_{T1})$ | 3 $\epsilon_{G1}(1-\epsilon_{T2})$ | 4 $(1-\epsilon_{G1}\cdot\epsilon_{T2})$ |
| 5 $\epsilon_{G2}(1-\epsilon_{T1})$ | 6 $(1-\epsilon_{G2}\cdot\epsilon_{T1})$ | 7 $\epsilon_{G2}(1-\epsilon_{T2})$ | 8 $(1-\epsilon_{G2}\cdot\epsilon_{T2})$ |

【解答】

- I A-8 B-1 C-4 D-7 E-5 F-6 ア-2 G-10 H-7
I-4

注) A: 全線減弱係数 $\mu =$ 全質量減弱係数 \times 物質の密度。この場合、 $\mu = 0.11 \times 11.3 = 1.24 [\text{cm}^{-1}]$ である。遮蔽体による光子線束の減衰は、物質の厚さを $d [\text{cm}]$ とすると、 $I = I_0 \exp(-\mu d)$ 。また光子線束が元の半分が減衰する厚さ = 半価層 D は、 $D [\text{cm}] = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu$ 。これらより、 $I = I_0 \exp(-\mu d) = I_0 (1/2) \cdot (d/D)$ と表せる。よって、 $(1/2) \cdot (d/D) = (1/2) \cdot \{5 / (0.693 / 1.24)\} \doteq 0.002$ 。ゆえに約500分の1となる。

B: 上記Aと同様に計算すると、この場合、 $\mu = 0.074 \times 7.9 = 0.585 [\text{cm}^{-1}]$ 。「同じ遮蔽効果を得る」とあるので、鉛と鉄の全線減弱係数 μ を比較すればよい。よって $\mu [\text{鉛}] / \mu [\text{鉄}] = 1.24 / 0.585 \doteq 2.12$ 。よって、鉛と同じ遮蔽効果を得るには約2.12倍の鉄の厚さが必要。

C: ^{40}K γ 線での鉛の全線減弱係数は、 $\mu = 0.053 \times 11.3 = 0.599 [\text{cm}^{-1}]$ 。上記Aと同様に計算すると、

$(1/2) \cdot (d/D) = (1/2) \cdot \{5 / (0.693 / 0.599)\} \doteq 0.05$ 。よって、約 20 分の 1 となる。

ア：コンプトン散乱では、エネルギー保存則と運動量保存則から、散乱 γ 線と反跳電子のエネルギーが求められる。入射 γ 線、散乱 γ 線のエネルギーを E_γ 、 E とし、散乱 γ 線の入射方向に対する散乱角を θ とすると、 $E = E_\gamma / \{1 + (E_\gamma / mc^2)(1 - \cos \theta)\}$ 。 m は電子の静止質量、 c は光速で、 $mc^2 = 0.511$ [MeV] である。スペクトル上に現れるコンプトンエッジは、反跳電子の最大エネルギーに対応し、それは $\theta = 180^\circ$ のとき。つまり散乱 γ 線が入射方向と真逆の 180 度に散乱した場合となる。よって、 $E = E_\gamma / \{1 + (E_\gamma / 0.511)(1 - \cos 180^\circ)\} = E_\gamma / \{1 + 1.96 E_\gamma(1 + 1)\} \doteq E_\gamma / (4 E_\gamma + 1)$ 。

E, F, G: γ 線が遮蔽体など物質と光電効果を起こすと、特性 X 線が放出される。遮蔽体を使う物質の原子番号が大きいと、特性 X 線のエネルギーも大きくなるため、検出器に入ってスペクトル中に特性 X 線のピークを形成することがある。

H: 検出器の遮蔽体として鉛をそのまま使うと、鉛の特性 X 線である 75 keV K-X 線のピークが見られる。

I: 鉛や鉄など原子番号の大きな遮蔽体の内側に、カドミウムやアルミニウムなど原子番号の小さい物質を内張りすることで、外側の遮蔽体で発生する特性 X 線を内側の遮蔽体で吸収させる。

II J-2 K-11 L-12 M-6 N-7 O-2 P-3 イ-3 ウ-5

注) J, K, L: 反同時 (逆同時、とも言う) 計数回路とは、主検出器の周りを別の検出器 (ガード検出器) で取り囲み、そのガード検出器と主検出器に同時に信号が到達した場合を除外する計数方式。コンプトン散乱による連続スペクトル部分を低減する (アンチコンプトン技術)、宇宙線等を除去して低バックグラウンド測定を行う、などに効果的な測定手法である。

N: γ 線スペクトルにおいて、全吸収ピークの高さを、コンプトン散乱による連続スペクトル部分の高さで割ったものをピーク対コンプトン比といい、 γ 線用検出器の性能を示す指標のひとつ。

O, P: ZnS(Ag) シンチレーションと表面障壁型 Si 半導体は、主に α 線や重荷電粒子の計測で使用される。CdTe 半導体はエネルギーバンドギャップが比較的大きく、室温でも使用できるが、均一で大型の結晶が困難なため、ガード検出器には不向き。

イ, ウ: Ge 検出器単体で γ_1 を全吸収ピークとして検出する場合、次の 2 つのケースが考えられる。

① ガード検出器で γ_2 を同時に検出する。この場合、反同時計数回路なので信号は出力されないが、システムでの γ_1 の計数率は、 $N_{Gr1} = N_0 \epsilon_{G1} \epsilon_{T2}$ となる。

② ガード検出器で γ_2 を同時に検出しない。この場合、信号は出力され、システムでの γ_1 の計数率は、 $N_{Gr1} = N_0 \epsilon_{G1}$ となる。

したがって、この検出器システムで信号が出力される γ_1 のピーク計数率は、② から ① を引いたものとなる。よって、 $N_{Gr1} = N_0 \epsilon_{G1} - N_0 \epsilon_{G1} \epsilon_{T2} = N_0 \epsilon_{G1} (1 - \epsilon_{T2})$ 。

N_{Gr2} についても同様に考えて、 $N_{Gr2} = N_0 \epsilon_{G2} (1 - \epsilon_{T1})$ 。

問 2 次の I, II の文章の の部分に入る最も適切な語句、数値又は数式を、それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。なお、解答群の選択肢は必要に応じて 2 回以上使ってもよい。

I 放射線計測に際して重要な検出器の一つに電離箱がある。これは、基本的には二つの電極の間に空気等の気体を充填したもので、電極構造として、同軸状、平行平板状のものが一般的である。

これらの電離箱を電流モード、または電荷モードで動作させる場合の基本を理解するために、最初、図 1 に示すような平行平板電離箱の電極間に、アルゴンガスのような 係数の小さい気体が充填され、電圧印加電極にプラスの高電圧 V_B (数百 V 程度) が印加されている場合を考えよう。この場合、電離で生じた電子はほぼ消失することなく電極間を移動し続ける。極板間距離を d とすると、電極の端の部分を除いて電極間空間の電界の強さ E は、ほぼ一様に $E =$ となる。電極

間に入射した荷電粒子は電極間空間に充填された気体を電離し、その飛跡に沿って多数の電子・陽イオン対を生成する。電圧印加電極にプラス電圧を印加した場合、熱運動による **□ B □** を伴いながらも、生成した電子は **□ C □** に逆行して全体として電圧印加電極の方へ、陽イオンは **□ C □** に沿って集電極の方向に移動していく。その際、電子が電圧印加電極に向かって移動しても、陽イオンが集電極に向かって移動しても、いずれも集電極に **□ D □** の電荷が誘起される。こうした電荷の誘起は、電子が電圧印加電極に、陽イオンが集電極に到達するまで続く。誘起された電荷は直ちに高抵抗 R を通じて大地（アース）に流れ、電離電流として観測される。しかし、電子の移動速度と陽イオンの移動速度とは、おおよそ千倍の違いがあり、陽イオンは電子に比べて大幅に遅い。そのため、電子の移動による電流がマイクロ秒のオーダーで流れ、その後も陽イオンの移動による弱い電流がミリ秒のオーダーで持続する。この時、電子が電圧印加電極到達までに誘起された電荷 q_1 と陽イオンが集電極到着までに誘起された電荷 q_2 との比 q_1/q_2 はイオン対の発生位置に **□ E □** が、それぞれの寄与の和 (q_1+q_2) は電離位置に **□ F □**。ここでは、説明を簡易化するために、平行平板電極の場合について述べたが、同軸状電離箱の場合でも、上記と同じ結論が得られる。

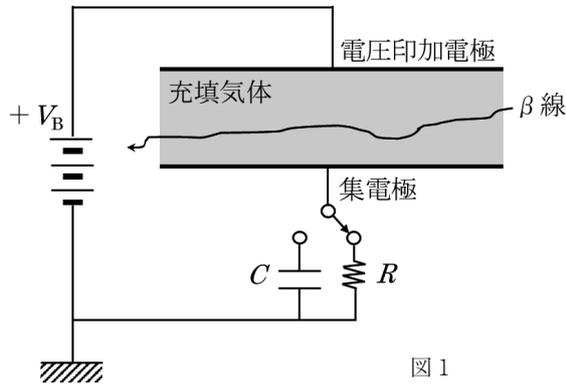


図1

以上は、**□ A □** 係数の小さいアルゴンガスを例にとって説明したが、空気の場合、**□ A □** 係数の大きい酸素が主要構成成分の一つとなっている。この場合、電離直後の初期の段階で、電子は酸素分子と結合し、陰イオンを生成する。陰イオンは電子と同じく電圧印加電極に向かって移動するが、この陰イオンの **□ G □** は電子の場合と比較してはるかに小さいので、アルゴンガスの場合でみられた速い電流成分の形成はほとんど見られなくなるが、この陰イオンもミリ秒オーダーの時間で電圧印加電極に到達し、この時点までの誘導電荷を積算すれば、これは電子の移動による誘導電荷の積算値と同じになる。したがって、**□ A □** によって中性分子が陰イオンになっても、電離箱を電流モード又は電荷モードで使用する限り、誘導電荷量や電離電流にほとんど影響を与えない。

一方、例えば電界が弱い場合、電離によって生成された電子（又は陰イオン）と陽イオンとが、結合して中性の分子になると、その分だけ誘導電荷や電流が減少する。これを **□ H □** 損失と言う。この現象を軽減、回避するためには、電極に十分な電圧をかけ、電極間の電界の強さを充分大きくすることが必要である。なお、 α 線の場合のように飛跡に沿って **□ I □** が部分的に高い場合や大強度の放射線を測定する場合にこの現象は顕著となる。

電離箱はいろいろな用途に用いられるが、重要な用途の一つは、 $X \cdot \gamma$ 線による、周辺線量当量の測定である。この目的のためには、もっぱら同軸状の電極構造が採用されるが、この場合、電極間空間の気体（主に空気）を電離させるのは、 $X \cdot \gamma$ 線との相互作用によって主に **□ J □** から放出される **□ K □** である。したがって、この種の測定器のエネルギー特性は **□ J □** の材料によって変わ

るが、1 cm 線量当量のサーベイには、その材料として、アルミニウムやグラファイトのような低原子番号の材料を用いると、 の主な成分は となり、 特性の比較的平坦な特性が得られる。

<A~G の解答群>

- | | | | | |
|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1 ドリフト | 2 拡散 | 3 発散 | 4 依存する | 5 依存しない |
| 6 阻止能 | 7 等電位線 | 8 電界 | 9 移動度 | 10 電位 |
| 11 正 | 12 負 | 13 再結合 | 14 電子付着 | 15 イオン化 |

<A の解答群>

- | | | | | |
|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|
| 1 $\frac{V_B}{4\pi d}$ | 2 $4\pi \frac{V_B}{d}$ | 3 $\frac{V_B}{\ln d}$ | 4 $\frac{V_B}{d}$ | 5 $\frac{V_B}{4\pi d^2}$ |
|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|

<H~M の解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|----------|-----------|---------|
| 1 線量 | 2 方向 | 3 阻止能 | 4 電離密度 | 5 エネルギー |
| 6 再結合 | 7 電流欠損 | 8 光電子 | 9 コンプトン電子 | 10 陽電子 |
| 11 二次電子 | 12 中心電極 | 13 外側の電極 | 14 陰イオン | |

II I で述べたように、集電極で生じた誘導電荷は、集電極とアースの間に接続された高抵抗 R を通じてアース側に電離電流として流れる。高抵抗 R の両端に現れる電圧を入力抵抗の極めて高い電位計で読みとり、これを R で除すれば、電離電流が決定できる。例えば、 β 線の連続照射により、 1.0×10^7 個/s のイオン対が電離箱の電極間空气中で生成されると、 pA の電流が高抵抗 R を通じて流れ、 R が $1 T\Omega$ の場合、その両端に V 程度の電圧が発生することとなる。

また、高抵抗の代わりにキャパシタ（コンデンサ）を取り付け、ここに誘導電荷をため込み、この際のキャパシタの電極間の電位を電位計で読み取る方式もよく用いられる。測定時間を T [s]、電気容量 C [F] のキャパシタの電極間の電位が測定開始時に V_1 [V]、測定終了時に V_2 [V] であるとする、この間の平均電離電流 \bar{i} は、 $\bar{i} =$ A として与えられる。上述と同じイオン対発生率（ 1.0×10^7 個/s）の場合、キャパシタの容量を 50 pF（浮遊容量を含む）とし、キャパシタ両端の電位の上昇を観測すると、100 秒間におおよそ V の電位上昇が認められることとなる。高抵抗を用いる方式に比べ、キャパシタ充電法は測定時間の平均値を読み取るので精度が高い。また抵抗に比べてキャパシタの安定度も良好である。

なお、空気中の β 線に対する W 値を 34 eV とすると、 1.0×10^7 個のイオン対を生成させるためには、この空間中で約 pJ のエネルギーが吸収される必要がある。電極間空間の体積を 100 cm^3 、気体密度を $1.3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ とすると、この場合、充填気体における β 線による吸収線量は、ほぼ μGy に相当する。

<I~キの解答群>

- | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------|------|------|
| 1 0.34 | 2 0.42 | 3 1.6 | 4 3.2 | 5 12 | 6 54 | 7 83 | 8 98 |
| 9 $\frac{V_2 - V_1}{CT}$ | 10 $\frac{C(V_2 - V_1)}{T}$ | 11 $\frac{T(V_2 - V_1)}{C}$ | 12 $\frac{2C(V_2 - V_1)}{T}$ | 13 $\frac{2T(V_2 - V_1)}{C}$ | | | |

〔解答〕

I A-14 B-2 C-8 D-11 E-4 F-5 G-9 ア-4 H-6

I-4 J-13 K-11 L-9 M-5

注) 電離箱の測定原理に関する問題である。紛らわしい用語が少なく、図まで示されているので理解は容易である。落ち着いて確実に加点したい。

A：ガス成分に対する電子の結合し易さを表す指標である。

C以降：電圧印可電極が「陽極」となり、集電極が「陰極」になっていることが示されているため、これに従って、解答すればよい。

A：電界(電場)において、電位を ϕ 、電界の大きさを E とすると、電界の大きさは $E = -\text{grad}(\phi)$ で表すことができる。ここで、 $-\text{grad}(\phi)$ はこの系では電場が一様に電位差を有していることから「 V_B/d 」と表すことができる。なお、 d は題意のように電極間の距離である。

H：印可電圧が低い場合には、電離した電子(または陰イオン)と陽イオンが電極に到達する前に再結合する。その分の電流が減少することを再結合損失という。

J, K： γ 線の測定に関しては、それ自身に電離作用が弱いため二次電子を利用する。この二次電子は電極間の気体よりも質量密度がはるかに高い電離箱の壁面との相互作用で発生する。なお、同軸状とした場合に外側の電極から二次電子が発生するのは形状を簡素にかつ効率的にするために中心電極を射し込むためである。

II イ-3 ウ-3 エ-10 オ-4 カ-6 キ-2

注) イ：電子1個は、「 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 」であり、1Aは1秒間に1Cの電荷が移動することである。

ウ： $V = IR$ であるから、 $1.6 \times 10^{-12} \times 1 \times 10^{12}$ である。接頭辞に注意。

エ：キャパシタについて考えると、電流 I はキャパシタの電荷 Q と時間 t との間に、 $I = \Delta Q / \Delta t$ で表される。 $\Delta Q = \Delta CV$ である。

オ：上記エの式に代入すると、 $V_2 - V_1 = (1.6 \times 10^{-12} \times 100) / (50 \times 10^{-12}) = 3.2$ となる。

カ：荷電粒子が気体中で1イオン対を生成するのに必要なエネルギーがW値である。 $34 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^7 = 54.4 \times 10^{-12} [\text{J}]$ となる。

キ：吸収線量Gyは物理量J/kgと等価であるから、吸収線量 $= (54.4 \times 10^{-12}) / (1.3 \times 100 \times 10^{-6}) = 0.418 (\mu\text{Gy})$ 。

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 放射性同位元素の管理は受け入れに始まる。放射性同位元素はその種類や数量に対応した形態で事業所外から搬入される。 ^{134}Cs γ 線源(点線源)を収納した容器(20cm×20cm×20cm)がL型輸送物として運び込まれた。線源は輸送物の中心に位置している。L型輸送物表面の1cm線量当量率は $5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下であった。この場合、輸送物表面から1mの位置での線量当量率は最大□A $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ である。

受け入れた放射性同位元素は事業所内でさらに運搬されて、使用・貯蔵される。一般的には、事業所外から搬入された輸送物はそのまま事業所内を運搬することとなるが、事業所内では不特定の一般公衆や一般車両が存在しないため事業所外を運搬する場合と比べ、その基準が緩和されている。

事業所内の運搬の際の1cm線量当量率の基準を運搬物の表面から1mで $100 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下とする。例えば、貯蔵されている別の ^{134}Cs γ 線源(点線源)を容器に封入し、立方体(20cm×20cm×20cm)の中心に収納した運搬物の表面から1mで $100 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ とした場合、前述のL型輸送物として受け入れた線源のおおよそ□B倍の数量までこの運搬物で1cm線量当量率の基準を満たすことが出来る。さらに遮蔽体を用いることで線量当量率を下げる事が出来る。

遮蔽材料の選択の際には、放射線と物質との相互作用を考慮して、線質・エネルギーに注意する。使用時にも遮蔽体の適切な使用は外部被ばく線量の低減に効果がある。例えば、100keV以下の低エネルギー γ 線源として使用される□Cの γ 線遮蔽では薄い鉛板が用いられる。しかし、エネルギーの高い β 線源の□Dの遮蔽に鉛板を用いると□Eが発生する。鉛板の代わりに、実効原子番号が小さくて加工も容易な□F板を用いると、大幅に□Eの発生を抑止出来る。

<A の解答群>

1 0.01 2 0.04 3 0.05 4 0.10 5 0.40 6 0.50 7 1.0

<B の解答群>

1 20 2 50 3 120 4 200 5 960 6 2,000 7 2,400
8 3,500 9 5,600 10 12,000

<C, D の解答群>

1 ^3H 2 ^{11}C 3 ^{14}C 4 ^{18}F 5 ^{32}P 6 ^{35}S 7 ^{109}Cd 8 ^{131}I
9 ^{137}Cs 10 ^{210}Po

<E, F の解答群>

1 オージェ電子 2 内部転換電子 3 消滅放射線 4 δ 線 5 制動放射線
6 スズ 7 真ちゅう 8 ステンレス 9 アクリル 10 ベリリウム

- II 放射性同位元素の使用の際には、その挙動に注意を払うことで、作業リスクの低減を図ることが出来る。放射性核種の空気中への揮散は作業者の内部被ばくを招く可能性があるため、特に注意する。揮散の可能性は放射性核種を含む化合物の化学的性質に依存する。 などのハロゲンや $^3\text{H}(\text{T})$ には揮発しやすい化合物が数多く知られているので、これらの核種を取り扱う際にはその化学形に注意する。

有機標識化合物の は揮散のリスクの指標であり、分子構造からもある程度予測が可能である。例えば、同程度の分子量であるカルボン酸、アルコール、アルデヒド、エーテルでは の が最も高い。揮散が避けられない場合には、発生する放射性気体を吸収して固定化する。気体状の $\text{CH}_3^{131}\text{I}$ が発生する場合の吸収材としては が有効である。また、 $^{14}\text{CO}_2$ が発生する場合には が用いられる。

この他に非密封の などの α 放射体を使用する場合には、内部被ばくの防止が特に重要である。密封線源の場合も、密封状態に影響するような変化が発生しないように注意する。 ^{241}Am 密封線源は低エネルギー γ 線源として に用いられているが、 α 放射体でもある。 α 線源としての利用では が窓材によく用いられるが、非常に薄いので破損しないように注意する。

<G の解答群>

1 ^{14}C 2 ^{32}P 3 ^{99}Tc 4 ^{131}I 5 ^{137}Cs

<H の解答群>

1 融点 2 凝固点 3 沸点 4 屈折率 5 誘電率

<I の解答群>

1 カルボン酸 2 アルコール 3 アルデヒド 4 エーテル

<J, K の解答群>

1 シリカゲル 2 希硫酸 3 有機アミン添着活性炭 4 石英砂
5 水酸化ナトリウム水溶液

<L の解答群>

1 ^{203}Hg 2 ^{208}Tl 3 ^{210}Po 4 ^{228}Ra 5 ^{239}Np

<M の解答群>

1 蛍光 X 線分析 2 ^{57}Fe メスbauer分光法 3 陽電子消滅寿命測定
4 中性子放射化分析 5 ラザフォード散乱

<N の解答群>

1 ステンレス 2 雲母 3 ベリリウム 4 テフロン 5 金

Ⅲ 放射性同位元素の使用の際には作業室の実験台や床面の汚染に注意する。汚染が発生した場合には、汚染核種の特定、汚染範囲の確認、汚染の拡大の可能性の予測などが必要となる。サーベイメータを利用しての汚染状況の把握は対策の第一歩である。スミア法による汚染検査を併用することで、汚染核種の特定や の状況についての基礎データを得る。

汚染状況に基づいて除染計画が立案される。短半減期核種による汚染では、汚染が広がらないような措置等を講じて、除染せずに による放射能の減少を待つ場合もある。例えば、 ^3H , ^{18}F , ^{57}Co , ^{131}I , ^{134}Cs を使用する施設の場合には、最も半減期の短い使用核種である による単独の汚染などで、こうした対処もあり得る。

複数の核種を使用している施設での汚染では汚染核種の特定が必要である。 放出核種の同定には、Ge 検出器によるエネルギースペクトル測定が有効である。ただし、 ^{134}Cs などの定量の際には の寄与の補正を要する場合もある。

除染作業では、まず吸湿紙でふき取ることがよく行われる。水溶性の汚染に対しては、水、中性洗剤の他、 などのキレート性除染剤を脱脂綿にしみこませてふき取ることもよく行われる。

<Oの解答群>

- 1 反応性 2 酸化性 3 固着性 4 潮解性 5 光分解性

<Pの解答群>

- 1 化学反応 2 揮発 3 浸透 4 壊変 5 核反応

<Qの解答群>

- 1 ^3H 2 ^{18}F 3 ^{57}Co 4 ^{131}I 5 ^{134}Cs

<Rの解答群>

- 1 α 線 2 β 線 3 γ 線 4 X線 5 中性子線

<Sの解答群>

- 1 全吸収ピーク 2 コンプトンエッジ 3 サムピーク 4 エスケープピーク
5 自己吸収

<Tの解答群>

- 1 EDTA水溶液 2 希塩酸 3 アセトン 4 エチルエーテル 5 キシレン

【解答】

I A-2 B-7 C-7 D-5 E-5 F-9

注) A: 線源は輸送物中央(点線源)に存在しており、線源からL型輸送物表面までは10cm(r_1)で、この時の1cm線量当量率は $5[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}](D_1)$ である。輸送物表面から1mの位置(線源から110cm: r_2)における1cm線量当量率(D_2)は、距離の逆2乗則に従い $D_2 = D_1(r_1/r_2)^2$ で求められる。よって $D_2[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] = 5[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] \cdot (0.1[\text{m}] / 1.1[\text{m}])^2 = 0.041\dots\dots$ 。ゆえに0.04となる。

B: 運搬物表面から1[m]で $100[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]$ とした場合、前述の結果から $100[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] / 0.041[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] = 2,439$ であり、おおよそ2,400倍となる。

C: γ 線放出核種は ^{109}Cd , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{210}Po である。このうち100keV以下の γ 線を放出する核種は ^{109}Cd であり、その γ 線(特性X線を含む)のエネルギーと放出率は、0.0880MeVが3.6%、0.0221MeVが84.2%、0.0250MeVが17.1%である。

D: β 線放出核種で最も高いエネルギーを出す核種は ^{32}P であり、その β 線エネルギーと放出率は1.711MeVで100%である。

E: 強度の大きな高エネルギー β 線を遮蔽するには、遮蔽材と β 線の相互作用により生じる制動放射線に注意する必要がある。制動放射線の発生効率は遮蔽材の原子番号の2乗にほぼ比例することから、線源の周囲をプラスチックなどの小さい原子番号の物質で β 線を遮蔽して制動放射線の発生を抑制

し、その外側を鉄や鉛などの大きな原子番号の物質で制動放射線を遮蔽する。

F： β 線の遮蔽には原子番号が低く、安価で加工のしやすいアクリルがよく用いられる。 ^{32}P が放出する β 線におけるアクリル（密度：1.18 [g/cm³]）内の最大飛程はおよそ7 [mm]であり、1 [cm]厚のアクリルで十分遮蔽できる。

一般に $E_{\beta} > 0.8 \text{ MeV}$ のとき、 $R [\text{g}/\text{cm}^2] = 0.542 E_{\beta} - 0.133$ であるから、 ^{32}P の E_{β} ：1.711 MeVとして $R = 0.794 \text{ (g}/\text{cm}^2)$ となる。アクリルの密度を1.18 (g/cm³)とすると $0.794 / 1.18 = 0.673 \text{ cm}$ となって、最大飛程はほぼ7 mmである。

II G-4 H-3 I-1 J-3 K-5 L-3 M-1 N-5

注) G：ハロゲン（周期表第 17 族）に属する放射性同位元素は ^{131}I である。この他の元素として F, Cl, Br, I, At がある。

H：揮散のリスクは沸点が指標となる。例えば I_2 （ヨウ素分子）は固体であるが、煮沸により蒸気となる。また他のイオン状のものは揮発性が低くないが、ヨウ素も含め溶液が酸性化すると揮発しやすくなる。

I：各化合物の沸点の大きさはそれぞれ、カルボン酸 > アルコール > エーテル > アルデヒドの順であり、低いものほど揮発しやすい。カルボン酸の沸点は、例えばギ酸で 100.5℃、酢酸で 118℃であり、アルコールではエタノールで 78.32℃、アルデヒドではアセトアルデヒドで 20.2℃、エーテルではエチルエーテルで 34.48℃である。

J：気体状の放射性ヨウ素捕集には活性炭を用いる。また有機アミン（トリエチレンジアミン：TEDA）を添着した活性炭を用いることで、より高収率で有機状のヨウ素を捕集できる。

K：二酸化炭素はアルカリ性の溶液に通し捕集する。水酸化ナトリウムに通すと、 $\text{NaOH} + ^{14}\text{CO}_2 \rightarrow \text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ の反応により炭酸水素ナトリウムとなり、溶液中に捕集できる。

L： ^{210}Po のみが α 放射体である。 ^{210}Po はウラン系列で α 壊変し、半減期は 138.376 d、 α 線のエネルギーは 5.304 MeV である。

M：蛍光X線分析は、低エネルギー γ 線源の電子捕獲壊変に伴う特性X線（蛍光X線）を利用することが多く ^{241}Am や ^{109}Cd が用いられる。放出される蛍光X線は核種毎に固有のエネルギーを持つので、そのエネルギーを利用し元素の定性分析をする。

N： α 線源としての ^{241}Am は、主にアルミケース内に収納され、このケースには窓がついており、窓材には金などの薄膜が用いられる。

III O-3 P-4 Q-2 R-3 S-3 T-1

注) O：汚染の測定は、サーベイメータで直接表面を測定する直接測定法とスミア法（ふき取り試験）を用いた間接測定法を併用する。直接測定法では固着性汚染と遊離性汚染の両方が測定され、間接測定法では遊離性の汚染が測定される。この汚染検査では汚染核種の特定、汚染の範囲や汚染の程度などを確認することが重要である。

P：放射性核種による汚染は種々の状況があり、その状況に応じて最も適切な除染方法を選択する必要がある。この方法の一つに壊変による核種の減衰を待つという選択があり、半減期が短い核種の汚染に対して有効である。この方法を選択した場合には、汚染箇所の明示、汚染拡大の防止措置を施し、関係者への周知などを行う。

Q： ^{18}F の半減期が最も短い。半減期はそれぞれ ^3H (12.32 y)、 ^{18}F (109.771 m)、 ^{57}Co (271.74 d)、 ^{131}I (8.02 d)、 ^{134}Cs (2.0648 y)である。

R： γ 線放出核種の同定にはGe半導体検出器が用いられ、エネルギー分解能はNaI検出器など他の検出器に比べ非常に優れている。得られる全吸収ピークはほとんど線のように見られ、放射能が小さくともはっきりとしたピークを形成する。

S：複数の γ 線をほぼ同時に放出する核種では、2本以上の γ 線が検出器内で相互作用すると、そのエネルギーの合計に相当する高さのピークとなり、サムピークとなって現れる。この場合、元のピークが減少するため、複数の γ 線を同時に放出する核種の定量には、サムピークの寄与の補正を必要とする。

T：キレート形成材としては、EDTA(エチレンジアミン四酢酸)、クエン酸、クエン酸ナトリウム、酒石酸ナトリウム、リン酸ナトリウムなどがある。

問4 密封されていない ^3H (T)、 ^{45}Ca 、 ^{51}Cr を使用する実験施設がある。各使用核種の安全取扱いに関する次のI~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。

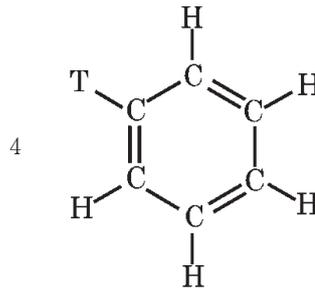
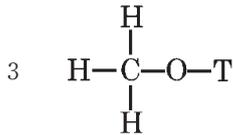
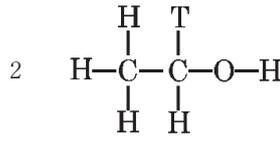
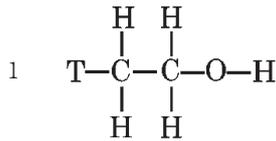
I 使用室のフード1では、Tの標識化合物を取り扱っている。Tは、半減期[A]年で最大エネルギー[B]keVの β^- 線を放出する核種である。Tの標識化合物を取扱う時には、同位体交換反応によるT化合物の生成に注意する必要がある。取扱う物質からTを含む気体が発生する可能性がある場合には、適切なトラップを装備したガスハンドリングシステムを用いる。例えば、[C]は揮発性であるとともに水と混合するとHTOが生成する。また使用室全体は、一般に1時間に10回程度の換気を行う。

実験室のTによる汚染検査には、スミア法を用い[D]計数装置で測定する。[D]計数装置は、測定試料をシンチレーションカクテルとともに[E]ガラスバイアルや、プラスチックバイアルに入れて測定する。シンチレーション光を複数の[F]を用いて[G]することにより、低バックグラウンドで計測ができる。

<A, Bの解答群>

- 1 8.02 2 12.3 3 14.3 4 18.6 5 28 6 163 7 257
8 1,711 9 5,700

<Cの解答群>



<D, Eの解答群>

- 1 NaI(Tl)シンチレーション 2 BGOシンチレーション 3 ZnS(Ag)シンチレーション
4 液体シンチレーション 5 端窓型GM管 6 褐色 7 低カリウム 8 カリ石灰
9 鉛 10 コバルト

<F, G の解答群>

- 1 光電子増倍管 2 CCD カメラ 3 蛍光板 4 フォトダイオード
5 パイルアップ 6 エネルギー選別 7 ガス増幅 8 同時計数

II フード 2 では、 $^{45}\text{CaCl}_2$ 水溶液から ^{45}Ca を線源とする β^- 線測定用の試料を作成している。 ^{45}Ca は 日の半減期で、最大エネルギー keV の β^- 線を放出する。液体の放射性物質を使う実験では、 を敷いたバット上で行う。水溶液を減容する操作では、溶液の攪拌や沸騰石の使用により、溶液の を防ぐ。 ^{45}Ca による汚染の直接法による検出には サーベイメータが適している。 ^{45}Ca を水溶液から沈殿として除去するには、シュウ酸塩や 物とする操作が効果的である。

<H, I の解答群>

- 1 8.02 2 12.3 3 14.3 4 18.6 5 28 6 163 7 257
8 1,711 9 5,700

<J~L の解答群>

- 1 フッ素樹脂シート 2 アルミニウム箔 3 ポリエチレンろ紙 4 HEPA フィルター
5 ビニールシート 6 NaI(Tl) シンチレーション 7 BGO シンチレーション
8 ZnS(Ag) シンチレーション 9 液体シンチレーション 10 GM 管式 11 乾固
12 突沸 13 発泡 14 過飽和

<M の解答群>

- 1 フッ化 2 塩化 3 臭化 4 ヨウ化 5 アジ化 6 シアン化

III フード 3 では、 ^{51}Cr が使用されている。 ^{51}Cr は半減期 27.7 日の 壊変核種であり、 keV の γ 線を放出する。少量の ^{51}Cr による汚染の検出には γ 線に感度の高い 式サーベイメータが有効である。

ガラスバイアルに入っている 10 GBq の ^{51}Cr から 50 cm 離れたところで行う分取作業を考える。何も遮蔽をしなないとすると、5 時間の作業で $900\mu\text{Sv}$ 被ばくする。同じ作業で被ばく線量を $15\mu\text{Sv}$ 以下にするためには、バイアルを最低 mm の鉛を用いて遮蔽する。ただし ^{51}Cr の γ 線に対する鉛の半価層を 2 mm とし、遮蔽厚みは 1 mm 単位で設定できるものとする。

<N, O の解答群>

- 1 β^- 2 β^+ 3 α 4 EC 5 IT 6 クラスタ 7 14.4
8 122 9 320 10 662 11 1,173 12 1,275 13 1,461

<P の解答群>

- 1 NaI(Tl) シンチレーション 2 電離箱 3 ZnS(Ag) シンチレーション
4 プラスチックシンチレーション 5 GM 管 6 ^3He 比例計数管

<アの解答群>

- 1 2 2 4 3 8 4 12 5 16 6 24

IV フード 2 の ^{45}Ca の実験とフード 3 の ^{51}Cr の実験のみの廃水が貯留槽に溜まっている。放射能濃度を測定したところ、 ^{45}Ca と ^{51}Cr の放射能はそれぞれ、 $3.5\text{kBq}\cdot\text{L}^{-1}$ と $10\text{kBq}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。この廃水はそのままでは排水濃度限度以上である。排水濃度限度以下にするためには、少なくとも 倍以上に希釈する必要がある。ただし、告示別表第 2 の第 6 欄に示されている排液中又は排水中の濃度限度は、これらの実験に使用した化学形では、 ^{45}Ca について $1\times 10^0\text{Bq}/\text{cm}^3$ 、 ^{51}Cr について $2\times 10^1\text{Bq}/\text{cm}^3$ である。

<イの解答群>

- 1 2 2 3 3 4 4 6 5 10

〔解答〕

I A-2 B-4 C-3 D-4 E-7 F-1 G-8

注) C: Cの解答群の構造式は、1と2がエタノール、3がメタノール、4がベンゼンである。この中で揮発性なのは、1と2のエタノールと3のメタノールである。また、エタノールとメタノールのヒドロキシ基は親和性があり、ヒドロキシ基のHがTに置き換わったものがHTOとなる。

D: 低エネルギー β -線を測定する場合は、基本的に、液体シンチレーション測定装置を使用する。

E: 天然カリウム内に含まれる ^{40}K の放射線の影響を抑えるため、低カリウムガラスを使用する。

F: シンチレーション光を電気信号に変換するため、光電子増倍管が用いられる。

II H-6 I-7 J-3 K-12 L-10 M-1

注) J: 液体の放射性物質を取り扱う場合、汚染拡大防止の観点から、液体を吸収し、吸収した液体が裏面に拡散しない加工が施されたポリエチレンろ紙を使用する。

L: 直接法で用いられるサーベイメータは、一般的に α 線: ZnS(Ag)シンチレーションサーベイメータ、 β 線: GM管式サーベイメータ、 γ 線: NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータに用いられる。

M: ^{45}Ca を水溶液から沈殿除去するには、Mの解答群のものと反応させるが、そのうち最も溶解度が低いものが有用である。

20℃の水における各化合物の溶解度は、以下のとおりである。

シュウ酸カルシウム: 0.0000067 g/mL	ヨウ化カルシウム: 0.66 g/mL
フッ化カルシウム: 0.000016 g/mL	アジ化カルシウム: 0.508 g/mL
塩化カルシウム: 0.745 g/mL	シアン化カルシウム: 0.45 g/mL
臭化カルシウム: 1.43 g/mL	

III N-4 O-9 P-1 ア-4

注) P: 上記IIのL参照。

ア: 同じ作業工程で $900\mu\text{Sv}$ の被ばくを $15\mu\text{Sv}$ の被ばくに抑えるには、 $15 \div 900 = 1/60$ となり、被ばく線量を $1/60$ 以下にする必要がある。 $1/60$ 以下で最も近い $1/2^n$ の指数は、 $n=6$ で $1/2^6 = 1/64$ 半価層が 2mm なので、 $2\text{mm} \times 6 = 12\text{mm}$ となる。

IV イ-3

注) イ: ^{45}Ca の放射能濃度は、 $3.5\text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1} \Rightarrow 3.5\text{ Bq/cm}^3$

^{51}Cr の放射能濃度は、 $10\text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1} \Rightarrow 10\text{ Bq/cm}^3$

^{45}Ca に対する排水中濃度限度比は、 $3.5\text{ Bq/cm}^3 \div (1 \times 10^0\text{ Bq/cm}^3) = 3.5$

^{51}Cr に対する排水中濃度限度比は、 $10\text{ Bq/cm}^3 \div (2 \times 10^1\text{ Bq/cm}^3) = 0.5$

したがって、 ^{45}Ca と ^{51}Cr の排水中濃度限度比の和は、 $3.5 + 0.5 = 4$

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。なお、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

I ICRP 2007年勧告では、放射線防護体系の目的を、放射線被ばくの有害な影響から人の健康と環境を適切なレベルで防護することとし、人の健康に対しては、□A□を防止し、□B□のリスクを合理的に達成できる程度に減少させることとしている。

□A□は、しきい線量を下回るように被ばくを抑えることで、その発生を防止できる。一方、□B□には発がん□C□が含まれ、線量の増加とともにリスクが増加する直線しきい値なしモデルに従うと考えて□B□に対する防護体系が構築されている。

ICRP 2007年勧告では、□B□に対する放射線防護の目的においては、代表的□D□における□E□で平均化された生涯リスク推定値を用いることが適切であるとの判断をしている。その

計算方法は、まず、疫学研究によるがんの $\square F$ 率及び生殖腺に対する遺伝的リスクデータから、各臓器・組織の生涯リスク推定値を求めた。次いで、骨髄以外の臓器・組織について $\square A$ を考慮して生涯リスク推定値を2分の1に調整した。さらに各臓器・組織について集団間で疾患の自然発生率が異なっても適用可能な生涯リスク推定値から症例数を計算する方法を定めた上で、アジアの4集団と欧米の3集団に対して適用し、これを平均して各臓器・組織の1万人当たり1Sv当りに増加する症例数を求めた。これを $\square I$ と呼ぶ。さらに、致死率、非致死疾患における苦痛等による生活の質の低下、寿命損失を考慮したものを $\square G$ として評価し、各臓器・組織の1万人当たり1Sv当たりの $\square G$ を計算した。全臓器・組織の $\square G$ の合計値に基づき、がんについて全集団で5.5%/Sv、成人では4.1%/Svという $\square G$ で調整された $\square I$ が推定された。

また、 $\square G$ に基づいて、以下のように $\square U$ が定められた。まず、 $\square G$ の合計値に対する各臓器・組織の $\square G$ の寄与割合(相対 $\square G$) を計算した。この値に基づいて各臓器・組織を大まかに4つにグループ分けし、全臓器・組織の合計が1となるように、各グループに1つの丸めた値を割り振った。 $\square U$ の値は、ICRP 2007年勧告では、ICRP 1990年勧告に比べ、乳房では $\square E$ 、生殖腺では $\square O$ 、データが不十分で個々に放射線リスクの大きさを判断できない複数の臓器・組織をまとめてひとつのカテゴリとした「残りの組織」では $\square K$ になっている。

ICRP 2007年勧告では、これらのリスク推定値は放射線防護の目的には適切であるが、被ばくした特定の個人や集団における起こり得る影響の推定には適用されないことを強調している。

<A~Cの解答群>

- 1 確率的影響 2 晩発影響 3 確定的影響 4 遺伝性(的)影響 5 急性影響

<D, Eの解答群>

- 1 国および地域 2 社会のおよび経済的状况 3 性別および年齢 4 個人
5 集団 6 国 7 地域

<F, Gの解答群>

- 1 疾病 2 有病 3 罹患 4 生存 5 損失 6 損害 7 死亡

<ア~ウの解答群>

- 1 放射線加重係数 2 組織加重係数 3 名目リスク係数
4 線量・線量率効果係数 5 生物学的効果比 6 過剰相対リスク 7 過剰絶対リスク

<エ~カの解答群>

- 1 小さく 2 同じ値に 3 大きく

II 外部被ばくの個人モニタリングは、身体に着用した個人線量計を用いて行われ、その実用量である個人 $\square H$ は、人体上の指定された点の適切な深さ d における $\square H$ である。ICRP 2007年勧告では、 $\square I$ の評価には深さ $d = \square K$ mm、皮膚及び手足の $\square J$ の評価には深さ $d = \square K$ mm が勧告された。眼の水晶体の $\square J$ については、評価が必要な特別な場合には深さ $d = \square K$ mm が適切と提案しながらも、測定機器が非常に少なく、實際上ほとんど使用されておらず、他の実用量を用いてモニタリングの目的である線量限度の担保を達成できるとしていた。しかし、ICRP Publ. 118 (2012) に掲載された組織反応に関するICRP声明(ソウル声明)において、眼の水晶体の職業被ばくの $\square J$ 限度を、ICRP 2007年勧告で用いられていた1年間につき $\square C$ mSv から5年間の年間平均で年20 mSv(年最大50 mSv)へ変更する勧告がなされ、他の実用量で線量限度を担保することが難しくなった。そのため、国際的に深さ $d = \square K$ mm における $\square H$ の測定手法や機器の検討が進められている。

<H~Jの解答群>

- 1 吸収線量 2 実効線量 3 預託線量 4 等価線量 5 線量当量

<キ～コの解答群>

1 0.07 2 0.1 3 0.3 4 0.7 5 1 6 3 7 7 8 10
9 30 10 70 11 150 12 500

[解答]

I A-3 B-1 C-4 D-5 E-3 F-3 G-6 ア-4 イ-3
ウ-2 エ-3 オ-1 カ-3

注) A: 確定的影響にはしきい値, すなわち影響の発生する最低の線量が存在する。

B, C: 確率的影響(がん及び遺伝性影響)は, 線量にしきい値が存在せず, 線量の増加に伴って影響の発生頻度(発生率)が増加する形の影響である。

G: 損害(デトリメント)で調整とは, 放射線により, 誘発された健康損害を重篤度で重み付けすることである。損害(デトリメント)として, ① 致死がんの発生率, ② 非致死がんの発生率, ③ 重篤な遺伝性影響の発生確率, ④ 余命損失の相対的な大きさを考慮し, それらのリスクへの重み付けを定量的に定め, 調整している。

ア: 原爆被爆者の疫学データの使用に際しては, 線量・線量率効果(DDREF: 同じ線量であっても線量率が異なると生物学的な影響が異なる)を2として, 低線量・低線量率のリスクを半分と補正して評価している。

イ: 損害(デトリメント)で調整された名目リスク係数(detriment-adjusted nominal risk coefficient)とは, 低線量・線量率でばく露の際の損害で調整した単位あたりのリスクの大きさをいう。nominalとは「名目上」の意味で, 集団全体の平均値を用いて標準的なヒトを仮定していることを意味している。性および被ばく時年齢ごとに異なる生涯リスク推定値を全体で平均化してnominalとしている。

ウ, エ: 組織加重係数は, 全身のリスクの総和を1として, 各臓器・組織の相対的な影響の寄与割合を表している。この係数は最新の科学的な知見に基づき見直される。

オ: これは主に, 遺伝性影響の評価の対象を, 従来は将来世代のすべてとしていたが, 被ばくした本人からみてはじめての2世代に限ったことと, 突然変異からの回復があることを考慮に入れたことによる。

II H-5 I-2 J-4 キ-8 ク-1 ケ-6 コ-11

注) H, I: 実効線量の同定には, 人体の各組織・臓器における等価線量を知る必要があるが, これを実測することは事実上不可能である。そのため, 外部被ばくに係る実測が可能な量(実用量)として個人線量当量が用いられている。

キ, ク, ケ: ICRU(国際放射線単位測定委員会)は, 個人被ばく線量測定において測定すべき個人線量当量(personal dose equivalent) $H_p(d)$ を人体上のある特定の点における軟組織の深さ d における線量当量と定義している。深さ d の値として深部組織に対する線量には10 mm, 眼の水晶体には3 mm, 表層部組織には70 μ m が推奨されている。

コ: ICRP, IAEA等における水晶体の等価線量限度の変更に伴い, 我が国の国家標準施設である産業技術総合研究所においても3 mm線量当量の標準開発が進められている。

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

I 作業等者に内部被ばくまたは外部被ばくの可能性がある被ばく事故があり, しかも被ばくの状況が不明の場合には, 内部被ばくや外部被ばくの有無やそれらの線量評価を行い, 適切な治療を行う必要がある。体表面に汚染があるかどうかを調べるためのサーベイメータとして, β 線や γ 線を検出する

ためには GM 管式サーベイメータを用い、 α 線を検出するためには [A] を用いる。GM 管式サーベイメータにより汚染が見つかった部位では、計数率から表面汚染密度を以下のように計算する。

$$\text{表面汚染密度 [Bq/cm}^2\text{]} = \frac{\text{対象物の測定値 [s}^{-1}\text{]} - \text{[B] [s}^{-1}\text{]}}{\epsilon_i \times W [\text{cm}^2] \times \epsilon_s}$$

ただし、 ϵ_i は β 粒子又は α 粒子に対する [C] 効率、 W は放射線測定器の有効窓面積 [cm^2]、 ϵ_s は放射性表面汚染の [D] 効率とする。

[C] 効率は、標準線源に対して一定の幾何学的条件で測定したときの α 線または β 線表面放出率に対するサーベイメータの正味の計数率の比と定義される。JIS Z 4329:2004 では、200 keV を超える β 線を対象とする測定器の場合には標準線源として [E] 又は ^{204}Tl を用いることが決められており、特に指定のない限り標準線源から [F] の位置に検出器表面を置いて正味計数率を測定し、その値から [C] 効率が決める。また、GM 管式サーベイメータの [C] 効率は β 線のエネルギーによって異なるため、サーベイメータの取扱説明書には、横軸を β 線最大エネルギー、縦軸を [C] 効率とした図を添付することが JIS Z 4329:2004 で定められている。

[D] 効率とは、[D] の中で単位時間当たり放出される放射線粒子数に対する同じ放射線の表面放出率の比と定義される。[D] 効率に関しては、JIS Z 4504:2008 では最大エネルギーが 0.4 MeV 以上の β 線の場合は 0.5、 α 線又は最大エネルギーが 0.15 MeV 以上 0.4 MeV 未満の β 線の場合は 0.25 とすることが推奨されている。

JIS Z 4334:2005 で規定されるクラス 1 及びクラス 2 参照標準線源の放射能面積は [G] cm^2 以上の平面状線源であるため、汚染が局所的な場合や不均一の場合には [C] 効率は正確ではなくなる。従って、GM 管式サーベイメータの計数率から表面汚染密度を計算する場合には、使用条件に即した条件で新たに校正を行うなど、十分な注意が必要となる。

<A の解答群>

- 1 ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータ
- 2 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ
- 3 電離箱式サーベイメータ 4 ^3He 比例計数管 5 Ge 検出器

<B~D の解答群>

- 1 変換 2 検出率 3 線源 4 修正 5 バックグラウンド 6 機器
- 7 線量率 8 印加 9 緩和 10 計数

<E の解答群>

- 1 ^{36}Cl 2 ^{51}Cr 3 ^{54}Mn 4 ^{60}Co 5 ^{137}Cs 6 ^{241}Am

<F の解答群>

- 1 1 mm 2 3 mm 3 5 mm 4 1 cm 5 2 cm 6 5 cm

<G の解答群>

- 1 50 2 100 3 150 4 200 5 250 6 300

II 内部被ばくの線量評価は、体表面汚染の程度と部位、[H]などを参考として、ホールボディカウンタ (WBC) などの体外計測法や、尿や便を採取して行う [I] 法によって行う。尿や便の採取は 1 日に排泄された全量を 3~7 日間程度採取し、計測に用いる。

外部被ばくの有無や被ばく線量を初期に判断するためには、臨床症状、末梢血中の [J]、[K]、[L]、末梢血リンパ球中の染色体異常 (主に [M]) などから総合的に判断する。[N] は 1 Gy 以上の被ばくで 2 時間以内に生じ、線量が高くなるほど発現頻度は高くなり、被ばくから発症までの時間は短くなる。[J] は 24 時間以内に線量依存的に減少し、[K] は 24

時間以内に線量依存的に増加する。□L□は唾液腺が被ばくした場合における唾液腺からの逸脱酵素で、唾液腺被ばくにより24時間以内に線量依存的に増加する。

<Hの解答群>

- 1 口腔スミア 2 頸管スミア^{けい} 3 鼻スミア 4 耳スミア 5 PCRスミア

<Iの解答群>

- 1 バイオアッセイ 2 イムノアッセイ 3 レポーターアッセイ
4 プロテインアッセイ 5 コメットアッセイ

<J~Lの解答群>

- 1 赤血球数 2 血糖値 3 アミラーゼ 4 リンパ球数
5 HDLコレステロール 6 中性脂肪 7 尿酸 8 好中球数
9 ミオグロビン 10 血小板数 11 シトルリン

<Mの解答群>

- 1 転座 2 染色体橋 3 逆位 4 二動原体染色体 5 染色体断片

<Nの解答群>

- 1 嘔吐^{おう} 2 意識障害 3 脱毛 4 出血傾向 5 痙攣^{けいれん}

Ⅲ 内部汚染の治療では、一般に、経口摂取の場合には胃洗浄、催吐剤・緩下剤の投与を行い、吸入摂取の場合には去痰剤や喀痰への排出を促進するための薬剤の吸入を行う。セシウムによる内部汚染の治療では□O□が経口薬として用いられる。□O□は□P□による内部汚染の治療にも用いる。プルトニウムやアメリカシウムなどの除去には、□Q□が点滴で用いられる。プルトニウムやアメリカシウムの体内汚染が吸入によって起こった場合には、ネブライザーを用いて□Q□を吸入投与することもある。

外部被ばくの治療としては、全身被ばく線量が概ね3 Gy以上では感染症対策として無菌室での治療、抗生剤・造血サイトカインの投与、成分輸血などが行われる。8 Gy以上の線量では造血幹細胞移植を考慮する。造血幹細胞移植には、□R□移植、□S□移植、□T□移植の3種類がある。□R□移植はドナーから□R□を採取し移植に用いるものである。□S□移植はG-CSFを4~6日間連日投与した上で末梢血から造血幹細胞を採取し移植に用いるものである。□T□移植は□T□に含まれる幹細胞を移植に用いるものである。□T□移植は他の移植法に比べ、移植片対宿主病(GVHD)が起こりにくい利点があり6個のヒト白血球抗原(HLA)のうち2個が不適合であっても移植が可能であり、しかも移植までの時間が短くて済むことから、外部被ばくでの造血幹細胞移植には最も利用しやすい。

<Oの解答群>

- 1 フェノールレッド 2 プルシアンブルー 3 ディスパースイエロー
4 プロモクレゾールパープル 5 メチルグリーン

<Pの解答群>

- 1 放射性ポロニウム 2 放射性ヨウ素 3 放射性ストロンチウム
4 放射性タリウム 5 放射性カリウム

<Qの解答群>

- 1 水酸化アルミニウムゲル 2 アルギン酸ナトリウム 3 硫酸バリウム
4 グルコン酸カルシウム 5 ジエチレントリアミン五酢酸(DTPA)

<R~Tの解答群>

- 1 臍帯血幹細胞^{さい} 2 骨髄 3 末梢血幹細胞^{しょう} 4 胚細胞 5 ハプロ

〔解答〕

I A-1 B-5 C-6 D-3 E-1 F-3 G-2

注) 表面汚染測定に関連する JIS に関する問題である。

A: 解答群の中で α 線の表面汚染測定に適したものは α 線に感度を有する無機シンチレータを用いた Zn(Ag)シンチレーション式サーベイメータとなる。

B: 表面汚染密度は対象物の測定値からバックグラウンドを引いた正味計数率の値から算出する。

C: 標準線源に対して一定の幾何学的条件で測定した時の線源に対する放射線測定器の正味計数率の比が機器効率であり、サーベイメータの取扱説明書には β 線の最大エネルギーに対する機器効率についてエネルギー特性として図示することが JIS Z 4329:2004 で規定されている。

D: 表面放出率線源の中で単位時間に放出される同じ種類の放射線粒子数に対する比が線源効率であり、その推奨値として問題中に記載されているが JIS Z 4504:2008 に記載されている。

E: β 線を対象とした測定器の試験に使用する線源に関しては ^{36}Cl または ^{204}Tl と JIS Z 4329:2004 で規定されている (ただし、200 keV 以下の β 線が対象の場合は ^{14}C)。

F: 機器効率試験では特に指定がない限り検出器表面から 5 mm の位置に、その表面と並行になるよう線源を置き測定を行うことが JIS Z 4329:2004 で規定されている。

G: JIS Z 4334:2005 においてクラス 1 及びクラス 2 参照標準線源の放射能面積はその一般要求事項の中で 100 cm^2 以上でなければならないと規定されている。

II H-3 I-1 J-4 K-8 L-3 M-4 N-1

注) H: 内部被ばくの評価にあたり体表面汚染の程度と部位、作業環境における空気汚染からの吸入摂取の判断材料として鼻スミアなどを参考とすることができる。

I: α 線や β 線のみしか放出しない核種などは γ 線のように体外計測法で外部からの測定、評価ができないため、尿や便を採取し、放射化学分析によるバイオアッセイ法により内部被ばくを評価する。

J~N: バイオドジメトリーに関する問題である。バイオドジメトリーは外部被ばく線量を推定するうえで有効な手段である。

1 Gy 以上の急性被ばくによる障害として、

- 末梢血中のリンパ球数が被ばく後、24 時間以内に急激に減少した後、2~3 日で最低値となる。
- 好中球数は被ばく後 24 時間以内に増加し、その後 1~2 日で元の数まで戻る。
- 末梢血リンパ球中の染色体異常として、2 つの動原体を持った異常な染色体である二動原体染色体が出現する。
- 酵素異常として血中のアミラーゼが唾液腺部の被ばくで増加する。
- 2 時間以内に発症頻度 10~50% で嘔吐が生じる。

これらの症状は被ばくした線量に依存するため、その症状の度合いから外部被ばく線量を推定できる。上記に示した以外にもバイオドジメトリーに関する指標はある。

III O-2 P-4 Q-5 R-2 S-3 T-1

注) O, P: 放射性セシウムの体内除去剤としてプルシアンブルーのカプセル剤が広く知られている。プルシアンブルーは放射性セシウムと結合し、体外へ排出される。同様の効果がタリウムに対してもあり、放射性タリウム内部被ばくの治療にも用いられる。

Q: プルトニウムやアメリシウムなどの体内除去剤としてはキレート剤であるジエチレントリアミン五酢酸 (DTPA) が有効であると言われており、点滴投与 (静脈注射) することで体内のプルトニウムやアメリシウムなどを体外に排出させる。吸入摂取の場合は医薬品吸入用ネブライザーによる吸入投与を実施することもある。

R~T: 造血幹細胞移植としては骨髄移植、末梢血幹細胞移植、臍帯血幹細胞移植がある。

以下が各移植に関する特徴である。

- 骨髄移植 — ドナーから骨髄を採取し移植。
- 末梢血幹細胞移植 — ドナーに白血球を増やす薬 (G-CSF) を 4~6 日間連日投与し、末梢血から造血幹細胞を採取し移植。
- 臍帯血幹細胞移植 — 臍帯と胎盤の中に含まれる臍帯血を採取し移植。上記移植に比べて GVHD が起こりにくく、6 個の HLA のうち 2 個が不適合であっても移植が可能というメリットがある。

物 理 学

第 62 回 (平成 29 年)

次の各問について、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 0.021 eV の中性子の速度 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、中性子の質量は $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ とする。

- 1 2.0×10^3 2 2.0×10^5 3 2.0×10^7 4 2.0×10^9 5 2.0×10^{11}

〔解答〕

1

注) E , m , v を運動エネルギー, 質量, 速度とすると, $E = \frac{1}{2} mv^2$ より, $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$

$E = 0.021 \text{ eV}$, $m = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ と $1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}$ を使って,

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.021 \times (1.6 \times 10^{-19})}{1.7 \times 10^{-27}}} = 2.0 \times 10^3$$

問 2 2 g の重水素と 3 g の三重水素のすべてが D-T 核融合を起こしたとする。発生する 14 MeV の中性子の運動エネルギーの総和を原油の量 [kL] に換算した場合、最も近い値は次のうちどれか。ただし、原油の標準発熱量を $38 \text{ MJ}\cdot\text{L}^{-1}$ とする。

- 1 2.2 2 3.5 3 22 4 35 5 133

〔解答〕

4

注) D-T 核融合では, $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$ の反応が起こる。重水素 (D_2) と三重水素 (T_2) の分子量は 4 と 6 なので, 2 g と 3 g の重水素と三重水素中の D および T は, それぞれ 1 mol。したがって, 核融合反応が 6×10^{23} 回起こる。中性子の運動エネルギーの総和は,

$$(6 \times 10^{23}) \times (14 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19}) = 1.344 \times 10^{10} \text{ J} = 1.344 \times 10^4 \text{ MJ}$$

これを原油量に換算すると,

$$\frac{1.344 \times 10^4 \text{ MJ}}{38 \text{ MJ}\cdot\text{L}^{-1}} = 35.4$$

問 3 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 内部転換電子の運動エネルギーは, L 殻転換より K 殻転換の方が低い。
 B 内部転換係数は, 内部転換電子の放出率をそれと競合する γ 線の放出率で割った値で与えられる。
 C 内部転換電子の運動エネルギーは, 内部転換が起きた原子核の励起レベルのエネルギーに等しい。
 D 内部転換が起きる割合は, 内殻軌道より外殻軌道の電子の方が大きい。
 E 内部転換電子とオーグメント電子の放出は競合する。

- 1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕

1

注) 内部転換は、原子核内に存在確率をもつ軌道電子が、励起した原子核と相互作用し、原子核から脱励起の際のエネルギーを受け取り、軌道電子が原子から放出される過程である。

- A：正 電子の運動エネルギーは、原子核の励起エネルギーから軌道電子の束縛エネルギーを引いたものとなるため、L殻より束縛エネルギーの大きいK殻からの内部転換電子運動エネルギーは、L殻転換より低い。
- B：正 内部転換係数は、内部転換電子の放出率を競合する γ 線の放出率で割った値である。
- C：誤 内部転換電子の運動エネルギーは、軌道電子の束縛エネルギーの分だけ原子核の励起エネルギーより小さい。
- D：誤 原子核内の存在確率が大きいのはs軌道電子であり、内殻軌道の電子の方が軌道半径が外殻軌道の電子より小さいため、内殻軌道の電子の方が原子核内での存在確率が高い。したがって、内殻軌道の電子の方が内部転換が起きる確率が高い。なお、原子核の励起エネルギーが、内殻軌道の電子の束縛エネルギーより小さい場合は、外殻軌道の電子のみ内部転換がおこる。
- E：誤 内部転換電子の放出により内側の軌道の1つが空になる。一方、オージェ電子の放出は、内側の軌道に空がある場合、これを埋めるために起こる。したがって、2つの放出過程は競合しない。

問4 2つの核種間の関係について、正しい記述の組合せは次のうちどれか。ただし、X及びYは元素記号、p及びqは整数とする(表記例、 ${}^{60}_{27}\text{Co}$)。

- A ${}^{p+q+1}_q\text{X}$ は、 ${}^{p+q}_{q-1}\text{Y}$ の同中性子体である。
- B ${}^{p+q}_q\text{X}$ は、 ${}^{p+q-1}_{q-1}\text{Y}$ の同重体である。
- C ${}^{p+q}_q\text{X}$ は、 ${}^{p+q}_{q-1}\text{Y}$ の同位体である。
- D ${}^{2q-1}_q\text{X}$ と ${}^{2q-1}_{q-1}\text{Y}$ の原子核は、互いに鏡像核である。
- E ${}^p_q\text{X}$ は、 ${}^p_{q-1}\text{Y}$ の核異性体である。

- 1 AとC 2 AとD 3 BとC 4 BとE 5 DとE

〔解答〕

2

注) 核種の特徴を以下の表にまとめた。

		質量数	陽子数	中性子数	正誤
A	${}^{p+q+1}_q\text{X}$ ${}^{p+q}_{q-1}\text{Y}$	$p+q+1$ $p+q$	q $q-1$	$p+1$ $p+1$	中性子数が同じなので同中性子体である(正)
B	${}^{p+q}_q\text{X}$ ${}^{p+q-1}_{q-1}\text{Y}$	$p+q$ $p+q-1$	q $q-1$	p p	質量数が異なるので同重体でない(誤)
C	${}^{p+q}_q\text{X}$ ${}^{p+q}_{q-1}\text{Y}$	$p+q$ $p+q$	q $q-1$	p $p+1$	陽子数が違い、元素記号も違うので同位体でない(誤)

		質量数	陽子数	中性子数	正誤
D	${}^{2q-1}_q\text{X}$	$2q-1$	q	$q-1$	陽子数と中性子数がお互いに入れ替わっているので鏡映核である（正）
	${}^{2q-1}_{q-1}\text{Y}$	$2q-1$	$q-1$	q	
E	${}^p_q\text{X}$	p	q	$p-q$	陽子数が違い、元素記号も違うので核異性体でない（誤）
	${}^p_{q-1}\text{Y}$	p	$q-1$	$p-q+1$	

問 5 次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 原子の角運動量は不連続な値をとる。
- 2 原子の電子軌道のうち、最も内側の軌道は J 軌道である。
- 3 水素原子の電子の結合エネルギーは 13.6 keV である。
- 4 特性 X 線が発生するかわりに原子から放出される軌道電子を内部転換電子という。
- 5 特性 X 線の振動数と原子番号とが直線関係にある。

〔解答〕

1

- 注) 1 : 正 原子の角運動量は \hbar を単位として飛び飛びの値をとる。
 2 : 誤 原子の電子軌道は、内側から K, L, M 軌道である。
 3 : 誤 水素原子の電子の結合エネルギーは 13.6 eV である。
 4 : 誤 特性 X 線が発生する代わりに原子から放出されるのは、オージェ電子である。
 5 : 誤 特性 X 線の振動数の平方根と原子番号とが直線関係にある（モーズリーの法則）。

問 6 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A EC 壊変が起きる核種では必ず β^+ 壊変が起きる。
 B EC 壊変が起きると必ず特性 X 線またはオージェ電子が放出される。
 C 核異性体は必ずその原子核の基底状態を経て壊変する。
 D α 壊変で放出される α 線のエネルギー分布は線スペクトルである。
 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 親と娘の原子質量の差が 2 倍の電子質量エネルギー (1022 keV) を下回れば、 β^+ 壊変が起きない。
 B : 正 EC 壊変が起きると、内殻電子軌道に空ができるので、特性 X 線またはオージェ電子が放出される。
 C : 誤 核異性体は、その原子核の基底状態への核異性体転移の他に、ベータ壊変、EC 壊変、アルファ壊変により別の原子番号をもつ核種に壊変する。
 D : 正 アルファ壊変で放出されるエネルギーは、エネルギーと運動量保存則により、 α 粒子と娘核に決まった量が分配される。このため、 α 線のエネルギー分布は線スペクトルになる。

問 7 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子捕獲においては核内の陽子 1 個が中性子に変わる。
 B α 壊変する核種で β 線が放出されることはない。

- C β^- 壊変が起きると必ず γ 線が放出される。
 D β^- 壊変と電子捕獲の両者が起きる核種も存在する。
 1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕

3

- 注) A：正 電子捕獲(EC)が起こると、核内の陽子が中性子に変わる。
 B：誤 α 壊変する核種でも β 壊変、EC壊変、自発核分裂が競合する核種がある。
 C：誤 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y など γ 線を放出しない核種(純ベータ核種)がある。
 D：正 ^{36}Cl 、 ^{40}K など、 β^- 壊変と電子捕獲の両者が起こる核種もある。

問8 次の核種のうち、一壊変当たりのオージェ電子の放出確率が最も大きいものはどれか。

- 1 ^{51}Cr
 2 ^{54}Mn
 3 ^{55}Fe
 4 ^{64}Cu
 5 ^{65}Zn

〔解答〕

1

注) オージェ電子は、X線放出と競合する。蛍光収率は原子番号が大きくなるに従い大きくなる(X線を出しやすくなる)ので、原子番号の小さな原子の方がオージェ電子放出確率が高い。また、壊変様式のなかでオージェ電子放出確率が高いのはEC壊変である。1から5の核種は、EC壊変核種であり、特に1から3の核種はEC壊変の確率が100%である。以上のことから、原子番号が一番小さく、EC壊変の確率が100%である ^{51}Cr のオージェ電子放出確率が最も大きい。

問9 次の組合せのうち、正しいものはどれか。

- 1 ファン・デ・グラーフ型加速装置 — 誘導電場
 2 サイクロトロン — 交流磁場
 3 シンクロトロン — ディー電極
 4 直線加速装置 — 高周波電場
 5 コッククロフト・ワルトン型加速装置 — 絶縁ベルト

〔解答〕

4

注) ファン・デ・グラーフ型加速装置は電荷を絶縁ベルトに乗せて電極に運び高電圧を得て、静電場により加速するため、1は不適。サイクロトロンは静磁場によって荷電粒子の軌道を円形に制御し、ディー電極で加速するため、2は不適。シンクロトロンは、粒子の速度に合わせて磁場と加速周波数を変化させ軌道半径を一定に保つので、ディー電極は使用しない。3は不適。直線加速器は、高周波電場で加速するので、4が正解。コッククロフト・ワルトン型加速装置は、倍電圧整流回路を用いて高電圧を得るため、5は不適。

問 10 100 keV の重陽子ビームで三重水素ターゲットを衝撃したとき、重陽子ビームの方向に対して 90 度方向に放出された中性子の運動エネルギーは 14.1 MeV であった。この反応において発生したエネルギー [MeV] として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 14.1 2 15.6 3 17.6 4 18.5 5 20.4

〔解答〕

3

注) 100 keV の重陽子ビームで三重水素ターゲットを衝撃すると、 $d + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ の核反応が起こる。

解答例 1 重心系で考える。

d と T の質量比は 2 : 3 なので、d と T 間の衝突エネルギーは、

$$100 \text{ keV} \times \frac{\text{三重水素の質量}}{\text{全質量}} = 100 \text{ keV} \times \frac{3}{2+3} = 60 \text{ keV}$$

となる。この衝突エネルギーと生成エネルギーの和を、 ${}^4\text{He}$ と n で分け合うが、衝突エネルギーは、n の運動エネルギーよりはるかに小さいので無視して良い。 ${}^4\text{He}$ に与えられる運動エネルギーを E とすると、 $E : 14.1 = (\text{n の質量}) : ({}^4\text{He の質量})$ より、

$E = 14.1 / 4 = 3.5 \text{ MeV}$ 。したがって生成エネルギーは、 $3.5 + 14.1 = 17.6 \text{ MeV}$ 。

解答例 2 実験室系で考える。

d, ${}^4\text{He}$, n の質量 [MeV/c²] を $2m$, $4m$, m , ${}^4\text{He}$ の速度 [c] のビームと並行方向と垂直方向の成分 u_1 , u_2 , さらに d と n の速さ [c] を v , w とする。単位中の C は光速を示す。 v と w は、

$$\frac{1}{2} 2mv^2 = 0.1, \quad \frac{1}{2} mw^2 = 14.1。$$

また、それぞれの方向について運動量が保存するので、

$$\begin{cases} 2mv = 4mu_1 \\ 0 = mw - 4mu_2。 \end{cases}$$

${}^4\text{He}$ の運動エネルギーは、

$$\frac{1}{2} 4m(u_1^2 + u_2^2) = \frac{1}{2} 4m \left\{ \left(\frac{v}{2}\right)^2 + \left(\frac{w}{4}\right)^2 \right\} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{8} mw^2 = \frac{0.1}{2} + \frac{14.1}{4} = 3.575$$

(発生したエネルギー) = (n と ${}^4\text{He}$ の運動エネルギーの和) - (d の運動エネルギー) なので、

(発生したエネルギー) = $14.1 + 3.575 - 0.1 = 17.575 \approx 17.6 \text{ MeV}$

問 11 5 MeV の α 粒子との衝突により反跳される原子核のうち、最大反跳エネルギーが大きい順に並んでいるものは、次のうちどれか。

- 1 ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$
 2 ${}^9\text{Be}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^1\text{H}$
 3 ${}^6\text{Li}$, ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^1\text{H}$
 4 ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^1\text{H}$
 5 ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^2\text{H}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^1\text{H}$

〔解答〕

5

注) 衝突される原子核の反跳エネルギーが最も大きくなるのは、衝突する粒子 (設問では α 粒子) の失うエネルギーが最大となる場合で、正面衝突で弾性散乱の時である。よって、衝突する粒子の質量を m 、衝突前の速度を v 、衝突後の速度を v_1 、衝突される原子核の質量を M 、衝突後の速度を V 、反跳エネ

ルギーを E' とすると、運動量保存則とエネルギー保存則より、

$$mv = mv_1 + MV \quad \dots\dots\dots (11-1)$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}MV^2 \quad \dots\dots\dots (11-2)$$

(11-1) 式から $v_1 = \frac{mv - MV}{m}$

これを (11-2) 式に代入すると $V = \frac{2mv}{m+M}$ となる。

したがって、反跳エネルギー E' は、衝突前の α 粒子のエネルギーを E とすると、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}mv^2 \cdot \frac{4mM}{(m+M)^2} \\ &= E \cdot \frac{4mM}{(m+M)^2} \end{aligned}$$

衝突前の α 粒子のエネルギーは 5[MeV] で共通なので、各選択肢における $\frac{M}{(m+M)^2}$ について比較すると、

$${}^1\text{H} : 0.04 \quad {}^2\text{H} : 0.056 \quad {}^4\text{He} : 0.0625 \quad {}^6\text{Li} : 0.06 \quad {}^9\text{Be} : 0.0533$$

よって、反跳エネルギーは ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^2\text{H}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^1\text{H}$ で大きくなる。

問 12 5 MeV の α 線が透過するものは、次のうちどれか。

- A 4.8 cm の空気層 (0 °C, 1 気圧)
- B 12 mg·cm⁻² のアルミニウム箔
- C 12 mg·cm⁻² の銅箔
- D 12 mg·cm⁻² の金箔

- 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) α 線の空気中の飛程を R とすると、

$$R = 0.318 E^{\frac{3}{2}} [\text{cm}] \quad (E \text{ は MeV 単位の } \alpha \text{ 線エネルギー})$$

の近似式があり、この近似式に α 線のエネルギー 5[MeV] を代入すると約 3.56 cm となり、選択肢 A の 4.8 cm の空気層は透過しない。

空気以外の他の物質については、ブラッグ・クレーマン則により求めることができる。ブラッグ・クレーマン則は、重荷電粒子の飛程は物質の密度に反比例し、原子量の平方根に比例する、という経験則であり、 R , R_0 を 2 種類の物質中の飛程、 ρ , ρ_0 を密度、 A , A_0 を原子量とすると、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{R}{R_0} &= \frac{\rho_0}{\rho} \times \sqrt{\left(\frac{A}{A_0}\right)} \\ (R \times \rho) &= (R_0 \times \rho_0) \times \sqrt{\left(\frac{A}{A_0}\right)} \end{aligned}$$

空気の密度は約 $1.3 \times 10^{-3} [\text{g/cm}^3]$ であるから、3.56[cm] の空気層は $4.6 [\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}]$ である。空気の質量数は約 14.4 であるから、

$$\text{アルミニウム中の飛程} = 4.6 \times \sqrt{27/14.4} = 6.3 [\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

であり、選択肢 B のアルミニウム箔は透過しない。

$$\text{銅中の飛程} = 4.6 \times \sqrt{63.5/14.4} = 9.7 [\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

であり、選択肢 C の銅箔は透過しない。

$$\text{金中の飛程} = 4.6 \times \sqrt{197/14.4} = 17 [\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

であり、選択肢 D の金箔は透過する。

問 13 次のうち、制動放射と関係のないものの組合せはどれか。

- A シンクロトロン放射光
- B チェレンコフ光
- C X線管 (クーリッジ管) からの X線
- D 特性 X線
- E 電子線の放射損失

1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕

3

注) 制動放射とは、電子が散乱されてその方向を変えたり、減速されたりする時に光子が発生することをいう。発生する光子を制動放射線または制動 X線という。一般に荷電粒子が加速度運動をする時には制動放射線が生じる。

なお、重荷電粒子の場合、電子と異なり散乱で方向が変わることは無く、物質中を直線的に進む。また、質量が電子に比較して非常に重いので、制動放射で失うエネルギーは通常無視できる。

A : 誤 電子を加速し、偏向磁石で方向を変えると、電子の加速度運動に伴う制動放射線が発生する。これを放射光という。シンクロトロンにおいて電子を加速し、シンクロトロンリングへ電子ビームを蓄積して周囲させると、偏向電磁石の部分で加速度運動をし、制動 X線であるシンクロトロン放射光が発生する。したがって、制動放射と関係している。

B : 正 真空中では、質量がある粒子は、光の速度より大きな速度を持つことはできないが、媒質中では媒質中の光の速度より大きな速度を持つことができる。荷電粒子が媒質中で光の速度より大きな速度を持つと、光を発生する。これをチェレンコフ効果といい、その光をチェレンコフ光という。したがって、制動放射とは関係ない。

C : 誤 X線は、原子を励起や電離をさせたり、高速の電子が物質に衝突し電子が制動を受けたりしたときに発生する。

X線管では、電子を高電圧で加速し、高速の電子をターゲットに当てて X線を発生させる。加速された電子がターゲットの物質内に打ち込まれると、ターゲット原子からの特性 X線のほか、電子がターゲット内で減速や散乱される時の加速度運動で制動放射線が生じる。この場合の加速度の大きさは様々であるので発生する光子のエネルギーも様々で連続スペクトルを示す。したがって、制動放射と関係している。

なお、クーリッジ管はフィラメント加熱による熱電子を電子源とした X線管であり、1913 (大正 2) 年、GE 社の技師 W. D. Coolidge によって開発されたものである。

D : 正 軌道にある電子がエネルギーを得て電離が起るとその場所が空席となり、この場所へは、エネルギーの高い軌道にある電子が転移してその空席を埋める。その際に光子が放出され、このような過程で放出される光子を特性 X線という。したがって、制動放射とは関係ない。

E : 誤 電子が物質中で制動放射により単位長さ当たりに失うエネルギーを放射損失 (放射阻止能) という。

問 14 次の 4 つの気体に対し、電子線が気体中で 1 個の電子-イオン対を生成するのに要する平均エネルギーを、小さいものから順に正しく並べたものはどれか。

- A He
- B O₂
- C Ar

D 乾燥空気

1 ABCD 2 ABDC 3 CBDA 4 CDBA 5 DCBA

〔解答〕

3

注) 気体が荷電粒子により電離されるとき、イオン対(イオンと自由電子の対)が作られる。このイオン対を作る平均エネルギーをW値という。荷電粒子が気体中でエネルギーEを失ったときに作られるイオン対の数をNとすると、W値は、

$$W = E/N$$

で表される。W値は、気体の密度とは関係しない。

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。電子に対するアルゴン、酸素、乾燥空気、ヘリウムのW値はそれぞれ26 eV, 31 eV, 34 eV, 41 eVである。

問15 40 MeV α 粒子及び10 MeV 陽子に対する水中での衝突阻止能をそれぞれ S_α 及び S_p とするとき、その比 (S_α/S_p) として正しいものはどれか。

1 0.2 2 0.5 3 2 4 4 5 8

〔解答〕

4

注) 物質中の電子にエネルギーを与え、励起や電離作用で単位長さ当たり失うエネルギーを衝突阻止能という。重荷電粒子の衝突阻止能 S は、荷電粒子の原子番号(陽子数)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。

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

設問の40 MeV α 粒子と10 MeV 陽子の M/E (質量/エネルギー) の値の比は1であることから、

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

問16 次のうち水中でチェレンコフ光を放出する核種として正しいものの組合せはどれか。

A ${}^3\text{H}$ B ${}^{32}\text{P}$ C ${}^{90}\text{Y}$ D ${}^{210}\text{Po}$

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

3

注) 光の速度を c 、 n を媒質の屈折率とすると、荷電粒子の速度 v が媒質中の光の速度 ($=c/n$) より速いときにチェレンコフ光が発生する。チェレンコフ効果では、 $\cos \theta = c/vn$ の関係で決まる θ 方向でチェレンコフ光が観測される。したがって、チェレンコフ光が放出されるための必要条件は、 $1 \geq \cos \theta = c/vn$ より $v \geq c/n$ である。この条件と荷電粒子(静止質量 m) の運動エネルギー E を表わす式

$$E = mc^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1 \right\}$$

から、

$$E \geq mc^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-(1/n^2)}} - 1 \right\}$$

となる。荷電粒子が β 線（電子）の場合、 $mc^2 = 511[\text{keV}]$ であり、また媒質である水の屈折率は 1.33 であることから、

$$E \geq 511 \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-(1/1.33^2)}} - 1 \right\} = 264 [\text{keV}]$$

荷電粒子が α 線の場合、 $mc^2 = 3.8 \times 10^6[\text{keV}]$ であり、また媒質である水の屈折率は 1.33 であることから、

$$E \geq 3.8 \times 10^6 \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-(1/1.33^2)}} - 1 \right\} = 1.9 \times 10^6 [\text{keV}]$$

${}^3\text{H}$ 、 ${}^{32}\text{P}$ 、 ${}^{90}\text{Y}$ から放出される β 線の最大エネルギーは、それぞれ 18.6[keV]、1,711[keV]、2,280[keV] であり、また、 ${}^{210}\text{Po}$ から放出される α 線のエネルギーは 5,304[keV] であることから、水中でチェレンコフ光を放出する核種は選択肢 B の ${}^{32}\text{P}$ 及び選択肢 C の ${}^{90}\text{Y}$ である。

問 17 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子対生成には、電子の静止質量の 2 倍以上に相当する光子エネルギーが必要である。
- B 電子対生成で生じた電子と陽電子は、互いに 180 度方向に放出される。
- C 電子対生成で生じた陽電子は、3 つの光子を放出して消滅することがある。
- D 電子対生成の断面積は、物質の原子番号の 3 乗に比例して大きくなる。

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

〔解答〕

2

- 注) A : 正 光子のエネルギーが、電子の質量の 2 倍のエネルギーに相当する 1.022 MeV を超えると電子対生成が起こる。
- B : 誤 正反対に放出されるのは陽電子が停止した際に放出される 2 本の 511 keV の消滅ガンマ線である。
- C : 正 電子と光子のスピンと呼ばれる性質のため、陽電子の状態によっては 3 個あるいはそれ以上の光子が消滅によって放出されることがある。
- D : 誤 電子対生成の原子断面積 x は原子番号の 2 乗に比例し ($x \propto Z^2$)、エネルギーが高くなるほど増加する。

問18 光子と物質との相互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。

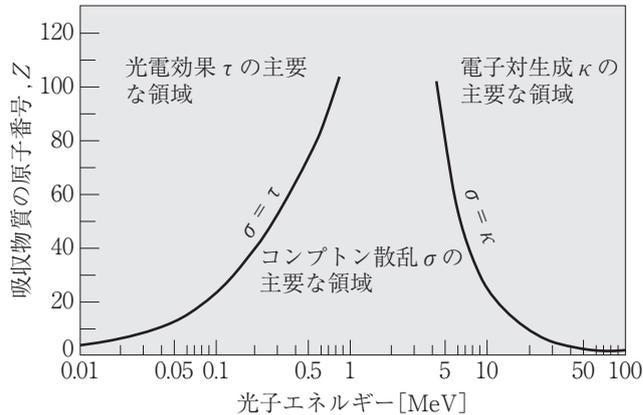
- A 0.2 MeV の光子と水との相互作用は主に光電効果である。
- B 1.0 MeV の光子と鉛との相互作用は主に光電効果である。
- C 2.0 MeV の光子と水との相互作用は主にコンプトン効果である。
- D 10 MeV の光子と鉛との相互作用は主に電子対生成である。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

5

- 注) A：誤 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、0.2 MeV の光子に対する相互作用はいずれも主にコンプトン効果である。
 B：誤 鉛の原子番号は82であり、1.0 MeV の光子に対する相互作用は主にコンプトン効果である。
 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、2.0 MeV の光子に対する相互作用はいずれも主にコンプトン効果である。
 D：正 鉛の原子番号は82であり、10 MeV の光子に対する相互作用は主に電子対生成である。



光子と物質との相互作用

(『放射線・アイソトープ 講義と実習』(日本アイソトープ協会編, 丸善))

問19 ^{137}Cs 線源から放出される 662 keV γ 線が物質と1回のコンプトン散乱を起こした場合、正しい記述の組合せは次のうちどれか。

- A 散乱光子が入射方向と反対の方向に出ることがある。
- B 600 keV の反跳電子が出ることがある。
- C 600 keV の散乱光子が出ることがある。
- D 散乱光子のエネルギーがゼロとなることがある。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

2

注) 入射 γ 線のエネルギー E_γ に対するコンプトン散乱後の γ 線 (散乱光子) のエネルギー E'_γ は次式で表され,

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad \dots\dots\dots (19-1)$$

コンプトン電子 (反跳電子) のエネルギー E_e は,

$$\begin{aligned} E_e &= E_\gamma - E'_\gamma \\ &= E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad \dots\dots\dots (19-2) \end{aligned}$$

で与えられる。

ここで, m は電子の質量, c は光の速度, θ は散乱された γ 線 (散乱光子) の散乱方向の角度である。

A : 正 散乱光子が入射方向と反対の方向に出るのは $\theta = 0^\circ$, すなわち $\cos \theta = 1$ のときであり, (19-1) 式より

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

のエネルギーで入射方向と反対の方向に散乱光子が出る。

B : 誤 反跳電子のエネルギーが 600 [keV] のとき, 散乱光子のエネルギー E'_γ は,

$$\begin{aligned} E_e &= E_\gamma - E'_\gamma \\ &= 662 [\text{keV}] - E'_\gamma = 600 [\text{keV}] \end{aligned}$$

より, $E'_\gamma = 62 [\text{keV}]$ となる。また, (19-1) 式より

$$\begin{aligned} E'_\gamma &= \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \\ &= \frac{662 [\text{keV}]}{1 + \frac{662 [\text{keV}]}{511 [\text{keV}]}(1 - \cos \theta)} \\ &= \frac{662 \times 511}{511 + 662 \times (1 - \cos \theta)} = 62 [\text{keV}] \end{aligned}$$

よって

$$\cos \theta = 1 - \frac{600 \times 511}{662 \times 62} = -6.5$$

となり, このような反跳電子が出ることはない。

C : 正 散乱光子のエネルギーが 600 [keV] のとき, (19-2) 式より

$$\begin{aligned} E'_\gamma &= \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \\ &= \frac{662 [\text{keV}]}{1 + \frac{662 [\text{keV}]}{511 [\text{keV}]}(1 - \cos \theta)} \\ &= \frac{662 \times 511}{511 + 662 \times (1 - \cos \theta)} = 600 [\text{keV}] \end{aligned}$$

よって

$$\cos \theta = 1 - \frac{62 \times 511}{662 \times 600} = 0.92$$

となり, 約 23° の散乱角で散乱光子が出ることがある。

D : 誤 散乱光子のエネルギーがゼロということは, 散乱光子が発生せず, 入射 γ 線のエネルギーが全て反跳電子に与えられるということであり, これは光電効果である。

問20 662 keVの γ 線が物質中で2回のコンプトン散乱を起こした場合、散乱 γ 線の最小エネルギー[keV]として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 0 2 54 3 107 4 128 5 184

〔解答〕

3

注) 問19の(19-1)式より、1回目のコンプトン散乱の散乱 γ 線のエネルギー E'_γ は

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

E_γ が最小になるのは $\cos\theta = -1$ ($\theta = 180^\circ$)のときであり、

$$E'_\gamma = \frac{662}{1 + \frac{662}{511} \times 2} = \frac{662 \times 511}{511 + 662 \times 2} = 184[\text{keV}]$$

同様に、2回目のコンプトン散乱の散乱 γ 線のエネルギーを E''_γ とすると、 E''_γ が最小になるのは $\cos\theta = -1$ ($\theta = 180^\circ$)のときであり、

$$E''_\gamma = \frac{E'_\gamma}{1 + \frac{E'_\gamma}{511} \times 2} = \frac{E'_\gamma \times 511}{511 + E'_\gamma \times 2} = 107[\text{keV}]$$

問21 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 光電効果によって放出される光電子は、全ての方向に均等に放出される。
 B 光電効果は光子の粒子性を示す現象である。
 C 光電効果に対する線減弱係数は、物質の原子番号を Z とすると、 $Z(Z+1)$ に比例する。
 D 光電効果に伴ってオージェ電子が放出されることがある。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

4

注) A: 誤 光子が軌道電子にエネルギーを与え、軌道電子(光電子)が原子から飛び出す現象を光電効果という。光電子の角度分布は元の電子状態に関する情報を持っており、全ての方向に均等に放出されるわけではない。そのため角度情報は光電子分光分析等に利用されることがある。

B: 正 光電効果は光の粒子性を示す代表的な現象であり、干渉や屈折は波動性を表す現象である。

C: 誤 線減弱係数は光電効果の断面積に比例する。光電効果の断面積は Z^5 に比例する。

D: 正 光電効果によって電子軌道には空席が生じる。そこにエネルギーの高い軌道の電子が転移する際に特性X線、またはオージェ電子が競合的に放出される。

問22 中性子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 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ の反応は中性子源として利用される。
 B 中性子の質量は陽子と電子の質量の和より大きい。
 C 中性子の数が等しい核種どうしを同位体という。
 D 中性子が衝突を繰り返して、単位長さ当たり失うエネルギーを阻止能という。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

1

注) A : 正 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反応は ${}^{226}\text{Ra-Be}$ または ${}^{241}\text{Am-Be}$ 中性子線源としてしばしば利用される。

B : 正 中性子はそれ単体では半減期 10 分程度で次のように崩壊する。



これより、中性子は陽子と電子の質量の和よりも $\bar{\nu}_e + 0.78 \text{ MeV}$ の分だけ重いことが分かる。

C : 誤 同位体は陽子の個数 (原子番号) が等しい核種どうしをいう。中性子の数が等しい核種どうしは同中性子体であり、質量数が等しい核種どうしは同重体という。

D : 誤 阻止能は荷電粒子が単位長さあたりに失うエネルギーをいう。

問 23 エネルギー E_0 の中性子の弾性散乱により反跳される ${}^{16}\text{O}$ 原子核の最大エネルギーは E_0 の何倍となるか、最も近い値を選べ。

- 1 0.89 2 0.75 3 0.64 4 0.36 5 0.22

〔解答〕

5

注) 中性子の質量を m , ${}^{16}\text{O}$ 原子核の質量を M , 重心系での中性子の散乱角を ϕ とすると, ${}^{16}\text{O}$ 原子核が受ける反跳エネルギー E_n は

$$E_n = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \phi) E_0$$

と表せる。反跳エネルギーが最大になるときは正面衝突, すなわち $\phi = 180^\circ$ の時である。 $m=1$, $M=16$ と近似して解くと,

$$E_n = \frac{2 \cdot 1 \cdot 16}{(1+16)^2} (1+1) E_0 \approx 0.22 E_0$$

となる。

問 24 次の量のうち、エネルギーの次元と異なるものはどれか。

- 1 吸収線量 \times 質量
- 2 カーマ \times 質量
- 3 阻止能 \times 時間
- 4 電流 \times 電圧 \times 時間
- 5 加速度 \times 質量 \times 距離

〔解答〕

3

注) エネルギーの単位はジュール [J], 電子ボルト [eV], ワット秒 [W \cdot s] 等であり, 次元は質量を M , 長さを L , 時間を T とすると, $M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$ である。

- 1 : 等しい。吸収線量は単位質量の物質に放射線を照射して吸収されるエネルギーであり, 単位は Gy (J/kg) 等である。質量を乗じるとエネルギーの次元になる。
- 2 : 等しい。カーマは光子や中性子などの非荷電粒子が, 単位質量物質中で二次荷電粒子に与えた運動エネルギーの総和である。単位は Gy (J/kg) 等であり, 質量を乗じるとエネルギーの次元になる。
- 3 : 異なる。阻止能は荷電粒子が単位長さあたりに失うエネルギーであり, 単位は eV/cm 等で表される。次元は $M \cdot L \cdot T^{-2}$ であり, 時間を乗じてもエネルギーの次元にはならない。
- 4 : 等しい。電流 [A] \times 電圧 [V] は電力 [W] の次元であり, 時間を乗じるとエネルギーの次元になる。
- 5 : 等しい。加速度の次元は $L \cdot T^{-2}$ であり, 質量と長さを乗じるとエネルギーの次元 ($M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$) になる。

問25 次の①～③は、単位の換算関係、または定数の値の概数を表したものである。正の整数A, B, Cを加算したものは次のうちどれか。

- ① 1 eV (電子ボルト) は、 1.6×10^{-A} J である。
- ② 1 b (バーン) は、 1×10^{-B} m² である。
- ③ 陽子の静止質量は、 1.7×10^{-C} kg である。

1 62 2 66 3 70 4 74 5 78

〔解答〕

4

注) 1 eV は 1.6×10^{-19} J, 1 b は 10^{-28} m², 陽子の静止質量は 1.7×10^{-27} kg である。

問26 減速材を用いずに速中性子のエネルギースペクトルを測定するのに最も適した検出器は、次のうちどれか。

- 1 イメージングプレート
- 2 平行平板型空気電離箱
- 3 ゲルマニウム検出器
- 4 BF₃ 計数管
- 5 液体シンチレーション検出器

〔解答〕

5

注) 中性子のエネルギースペクトルを測定するためには、中性子の弾性散乱で生じる荷電粒子のエネルギーや運動量を測定する必要がある。液体シンチレーション検出器で用いられる有機シンチレーターは多量の水素が含まれており、反跳陽子によるシンチレーションを観測することによって中性子のエネルギースペクトルを効率良く測定できる。

問27 分解時間 $150 \mu\text{s}$ の GM 計数管を用いて β 線を計数するとき、数え落としが 6.0% を超えない最大の計数率 [cps] に最も近い値は、次のうちどれか。

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

〔解答〕

1

注) 検出器に放射線が入射した直後は、次の放射線を検出できない時間がある。これを分解時間といい、この時間に次の放射線が入射すると数え落としことになる。計数率が増えるほど数え落としの確率は増えるため、6.0% の数え落としを与える計数率が求める解である。

真の計数率 (数え落としがなかった場合の計数率) を n_0 [cps], 実際の計数率を n [cps], 分解時間を τ [s] とすると、

$$n = n_0(1 - n\tau)$$

と表せる。数え落とし 6.0% とすると $(n_0 - n)/n_0 = 0.06$, $\tau = 0.00015$ [s] なので、これらより n を求めると 400 [cps] となる。

問28 GM 計数管の入射窓の前方に線源 A を置いて 1,000 秒間計数したところ、100,000 カウントであった。次に線源 A の横に線源 B を置き計数したところ、1,000 秒間で 197,000 カウントを得た。最後に、線源 A を取り去り、同じく 1,000 秒間計数したところ、計数値は 100,000 カウントであった。バックグラウンド計数率は 0.5 cps である。この GM 計数装置の分解時間 [μs] として最も近い値は、次のうちどれか。

1 100 2 130 3 160 4 190 5 220

〔解答〕

2

注) 真の計数率 (数え落とさなかった場合の計数率) を n_0 [cps], 実際の計数率を n [cps], 分解時間を τ [s] とすると,

$$n = n_0(1 - n\tau)$$

と表せる。

線源 A と線源 B は同じ計数値なので, 線源の放射能も等しいと考えられる。そこで線源 A, 線源 B の真の計数率を n_{AB} [cps] とすると, 片方の線源を GM 計数管の入射窓の前方に置いたとき, 両方の線源を置いたときでそれぞれ

$$99.5 = n_{AB}(1 - 99.5\tau)$$

$$196.5 = 2n_{AB}(1 - 196.5\tau)$$

の関係が得られる (カウントは全て計数率に直してバックグラウンド計数率を引いてある)。この 2 式より n_{AB} を消去して τ について求めると $\tau \approx 0.00013$ [s] となり, 2 の $130 \mu\text{s}$ が最も近い。

問 29 小型の空洞電離箱に γ 線を照射した場合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 電離電流は充填気体の W 値に比例する。
- B 電離電流は充填気体の密度に比例する。
- C 電離電流は二次電子に対する充填気体の阻止能に比例する。
- D 電離電流は空洞の体積に比例する。
- E 電離電流は電離箱壁からの二次電子の飛程に比例する。

1 ABE のみ 2 ACD のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ 5 BCE のみ

〔解答〕

4

注) 電離箱をある時間 γ 線で照射したとき流れる電気量を Q , 電子 1 個が持つ電荷 (素電荷) を q , 1 つの電子-イオン対を生成するのに要する平均エネルギー (W 値) を W , 電離箱内の気体の質量を m , 電離箱内の気体の吸収線量を D とすると以下の関係がある。

$$D = \frac{W \cdot Q}{m \cdot q}, \text{ または } Q = \frac{D \cdot m \cdot q}{W}$$

- A : 誤 W 値が大きくなると電離電流は少なくなる。
- B : 正 密度が大きくなると電離箱内の気体の質量が増えるので電離電流と比例する。
- C : 正 二次電子に対する充填気体の阻止能が大きくなると吸収線量が増えるので電離電流と比例する。
- D : 正 空洞の体積が大きくなると電離箱内の気体の質量が増えるので電離電流と比例する。
- E : 誤 二次電子の飛程が大きい場合はエネルギー付与が小さくなるため電離電流と比例しない。

問 30 次のシンチレータのうち, 発光減衰時間の短いものから順に並べたものはどれか。

- A NaI(Tl)
- B CsI(Tl)
- C LaBr₃(Ce)
- D プラスチックシンチレータ

1 CDBA 2 CDAB 3 DABC 4 DCAB 5 DCBA

【解答】

4

注) 多くの無機シンチレータの発光減衰時間が $\sim\mu\text{s}$ 程度であるのに比べ、有機シンチレータの発光減衰時間は数 ns 程度と極めて短い。無機シンチレータの中でも $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ や $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$ などは減衰が早いシンチレータとして知られている。 $\text{CsI}(\text{Tl})$ は $\text{NaI}(\text{Tl})$ と比べ、発光量が多く、発光減衰時間は長い。各シンチレータの発光減衰時間は以下の通りである。

- A $\text{NaI}(\text{Tl})$: 230 ns
- B $\text{CsI}(\text{Tl})$: 680 ns および 3340 ns
- C $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$: 26 ns
- D プラスチックシンチレータ : 2~5 ns

化 学

第62回(平成29年)

次の各問について、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 次の同位体のうち、安定同位体のみのはどれか。

A ^{11}C ^{12}C ^{13}C

B ^{15}O ^{16}O ^{18}O

C ^{32}S ^{33}S ^{34}S

D ^{40}Ca ^{42}Ca ^{44}Ca

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

5

注) A: 誤 ^{11}C は半減期 20.39 分 (β^+ および EC 壊変) の放射性同位体。 ^{12}C , ^{13}C は安定同位体。

B: 誤 ^{15}O は半減期 2.037 分 (β^+ および EC 壊変) の放射性同位体。 ^{16}O , ^{18}O は安定同位体。

C: 正

D: 正

問2 無担体の ^{54}Mn (半減期: 312 d), ^{60}Co (半減期: 5.27 y), ^{131}I (半減期: 8.02 d) があるとき、比放射能 [$\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$] が大きいものから順に正しく並んでいるものは、次のうちどれか。

1 ^{131}I > ^{54}Mn > ^{60}Co

2 ^{54}Mn > ^{131}I > ^{60}Co

3 ^{131}I > ^{60}Co > ^{54}Mn

4 ^{54}Mn > ^{60}Co > ^{131}I

5 ^{60}Co > ^{54}Mn > ^{131}I

【解答】

1

注) 放射能 A は、壊変定数を λ , 半減期を T , 原子数を N , $t=0$ の時の原子数を N_0 とすると次のように表される

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} \times N = \frac{\ln 2}{T} \times N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$$

$t=0$ で比較すると

$$A = \frac{\ln 2}{T} \times N_0$$

$\ln 2$ は共通であるため、 N_0/T だけ比較すればよい。

原子数はモル数に比例するから、1gをモル数にすると N_0/T は

$${}^{54}\text{Mn} \quad \frac{1}{54} \times \frac{1}{312}$$

$${}^{60}\text{Co} \quad \frac{1}{60} \times \frac{1}{5.27 \times 365}$$

$${}^{131}\text{I} \quad \frac{1}{131} \times \frac{1}{8.02}$$

以上から、 ${}^{131}\text{I}$, ${}^{54}\text{Mn}$, ${}^{60}\text{Co}$ の順である。

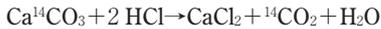
問3 ${}^{14}\text{C}$ を $4.5 \times 10^3 \text{Bq}$ 含む CaCO_3 が 2g ある。これを塩酸ですべて溶解したときに発生する気体 1 mL (標準状態) 中に含まれる ${}^{14}\text{C}$ の放射能 [Bq] として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、 CaCO_3 の式量は 100 とする。

- 1 1 2 2 3 5 4 10 5 20

【解答】

4

注) 反応式は



これより、 $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ のモル数と ${}^{14}\text{CO}_2$ のモル数は同じである。

CaCO_3 は、すべて塩酸で溶解されるので、

CaCO_3 2g は、 $2/100 = 0.02$ (モル)。発生する CO_2 も、0.02 (モル)

発生する気体は CO_2 のみであり

標準状態で $0.02 \times 22.4 \times 10^3 = 448 \text{ (mL)}$ の気体が発生する

炭素はすべて CO_2 になるので

発生する気体 1 mL 中の放射能は

$$4.5 \times 10^3 \times (1/448) = 10.0446 \dots \approx 10$$

問4 10 mg の ${}^{226}\text{Ra}$ (半減期 1,600 年) を密閉容器に 40 日間保管した時、容器内に存在する ${}^{222}\text{Rn}$ (半減期 3.8 日) の原子数として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 7.3×10^7 2 2.0×10^9 3 1.8×10^{11} 4 7.3×10^{12} 5 1.8×10^{14}

【解答】

5

注) 永続平衡が成り立つ (親核種の半減期が娘核種に対して非常に長い場合)

娘核種の半減期の 10 倍程度の時間経過後は永続平衡が成立することより、 ${}^{222}\text{Rn}$ (半減期: 3.8 日) で 40 日間経過しているので永続平衡が成立。

${}^{226}\text{Ra}$ の崩壊定数: λ_1 , 原子数: N_1 , 質量: W , 質量数: A

${}^{222}\text{Rn}$ の崩壊定数: λ_2 , 原子数: N_2 とすると、

$$\begin{aligned} \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad \text{より} \quad N_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \times \frac{W}{A} \times 6.0 \times 10^{23} \\ &= \left(\frac{3.8}{1600 \times 365} \right) \times \left(\frac{10 \times 10^{-3}}{226} \right) \times 6.0 \times 10^{23} \\ &= 1.727 \times 10^{14} \approx 1.8 \times 10^{14} \end{aligned}$$

問 5 逐次壊変する親核種 X (壊変定数 λ_X) とその娘核種 Y (壊変定数 λ_Y) 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 λ_Y が λ_X に比べて小さいとき、過渡平衡が成り立つ。
- B 過渡平衡では、親核種の原子数は娘核種の半減期で減少する。
- C 永続平衡では、親核種と娘核種の放射能は等しくなる。
- D λ_X が λ_Y に比べて無視できるほど小さいとき、永続平衡が成り立つ。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 親核種の半減期が娘核種の半減期に比べて長い時、過渡平衡が成り立つ。
($\lambda_X < \lambda_Y$ の時に過渡平衡が成り立つ)
- B : 誤 親核種の原子数は親核種の半減期で減少する。
(娘核種の原子数は親核種の半減期で減少する)
- C : 正
- D : 正

問 6 ^{235}U の熱中性子核分裂により生成しやすい (累積核分裂収率の大きい) 核種の組合せは次のうちどれか。

- 1 ^7Be ^{131}I
- 2 ^{75}As ^{137}Cs
- 3 ^{90}Sr ^{160}Gd
- 4 ^{99}Mo ^{140}Ba
- 5 ^{104}Ru ^{114}Cd

〔解答〕

4

- 注) ^{235}U の熱中性子核分裂で生成する核分裂片の質量数は同じではなく、軽い核分裂片は質量数 86~106 に、重い核分裂片は質量数 130~150 に核分裂収率のピークがある。これに近いのは、 ^{99}Mo と ^{140}Ba である。

問 7 200 mg の岩石試料を 1.0 mg の純鉄とともに原子炉で 1 時間中性子照射した。岩石試料と純鉄の γ 線スペクトロメトリを行ったところ、それぞれに照射終了直後で 50 Bq と 10 Bq の ^{59}Fe が含まれていたことがわかった。岩石試料中の鉄の濃度 [重量%] として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 0.10 2 0.50 3 1.3 4 2.5 5 5.0

〔解答〕

4

- 注) 照射粒子束密度 : f , 放射化断面積 : σ , 生成核種 (^{59}Fe) の壊変定数 : λ
試料とする元素の原子数 : N , 岩石試料の質量 : W ,
 t 時間照射して終了直後に得られる放射能 : A は

$$A = f\sigma N (1 - e^{-\lambda t})$$

1.0 mg の純鉄から 10 Bq の ^{59}Fe が生成されるので

$$10 = f\sigma N_{\text{純鉄}} (1 - e^{-\lambda t}) \quad \dots \text{①}$$

岩石試料のから 50 Bq の ^{59}Fe が生成されるので

$$50 = f\sigma N_{\text{岩石}} (1 - e^{-\lambda t}) \quad \dots \text{②}$$

①, ②より

$$N_{\text{岩石}} = 5 \times N_{\text{純鉄}}$$

岩石試料中には、純鉄 (1 mg) の5倍の鉄 (5 mg) が含まれている。

$$(5/200) \times 100 = 2.5 (\%)$$

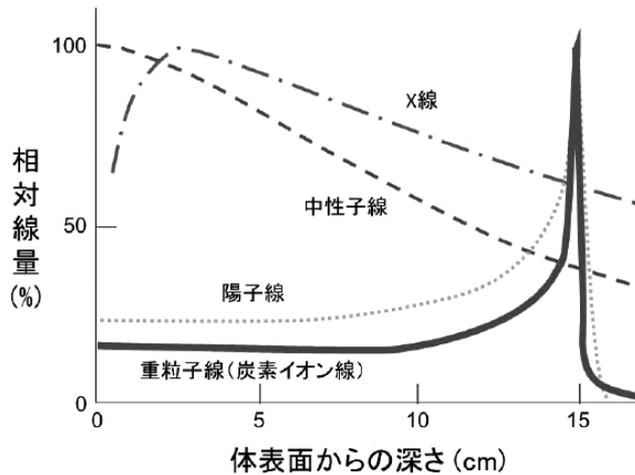
問8 サイクロトロンを用いて、10 MeVの陽子線をビーム電流 $10 \mu\text{A}$ で10分間ターゲットに照射し、半減期10分の放射性同位体を製造している。その際、ターゲットは照射面積よりも十分大きく、ターゲットの厚みは飛程と同じにしている。以上の照射条件のうち一つだけ条件を変えることにより製造量を2倍にするために、最も適切な方法は、次のうちどれか。

- 1 ビーム電流のみ $20 \mu\text{A}$ にする。
- 2 照射エネルギーのみ 20 MeV にする。
- 3 ターゲットの厚さのみ2倍にする。
- 4 照射面積のみ2倍にする。
- 5 照射時間のみ20分にする。

〔解答〕

1

注) 各種放射線の深さ方向への線量分布曲線



(高橋, 吉田; RADIOISOTOPES, vol.64, p.377 (2015))

- 1: 正 製造量は、照射電流に正比例する。
- 2: 誤 照射エネルギーを10 MeVから20 MeVにするとブラッグピークが深くなる。ターゲット厚みは10 MeVの飛程と同じなので、陽子とターゲットが反応する量が少なくなり、製造量は減る。
- 3: 誤 ターゲット厚のみ厚くしても、陽子線10 MeVの飛程は不変で、陽子線とターゲットが反応する量は変わらない、製造量は不変。
- 4: 誤 照射面積のみ2倍にしても、ビーム電流が同じであればターゲットと反応する陽子の数は変化しないので、製造量は不変。
- 5: 誤 製造量は、照射時間に比例しない。

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

10 分照射 (半減期 10 分) の場合

$$A_{10分} = f_{\sigma} N \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{10/10} \right] = f_{\sigma} N \times 0.5$$

20 分照射 (半減期 10 分) の場合

$$A_{20分} = f_{\sigma} N \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{20/10} \right] = f_{\sigma} N \times 0.75$$

以上より照射時間を 20 分にしても 2 倍にはならない。

問 9 $1 \mu\text{g}$ の ^{55}Mn を 2.58 時間中性子照射して ^{56}Mn (半減期:2.58 時間) を製造した。照射終了時の ^{56}Mn の放射能 [Bq] として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、 ^{56}Mn の中性子捕獲断面積は 13.3 b (バーン)、中性子フルエンス率は $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とする。

- 1 8.0×10^4 2 7.3×10^5 3 1.5×10^6 4 2.8×10^7 5 4.5×10^8

【解答】

2

注) 中性子フルエンス率: f , 中性子捕獲断面積: σ ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$), 試料の原子数: N , 生成核種の半減期: T , 照射時間: t , 試料の質量: W , 試料の質量数: M , 生成核種の放射能: A とすると

$$\begin{aligned} A &= f_{\sigma} N (1 - e^{-\lambda t}) = f_{\sigma} N \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T} \right] \\ &= f_{\sigma} \times W/M \times 6.0 \times 10^{23} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{2.58/2.58} \right] \\ &= 1 \times 10^{13} \times 13.3 \times 10^{-24} \times (1 \times 10^{-6}/55) \times 6.0 \times 10^{23} \times 0.5 \\ &= 7.25 \times 10^5 \div 7.3 \times 10^5 \end{aligned}$$

問 10 ヨウ素の同位体について、正しいものの組合せはどれか。

- A ^{123}I は、最大エネルギー 159 keV の β 線を放出する核種である。
 B ^{125}I は、ラジオイムノアッセイに用いられる。
 C ^{127}I は、唯一の安定同位体である。
 D ^{129}I は、ウランの核分裂により生成する放射性核種である。
 E ^{131}I は、アクチバブルトレーサーに用いられる。

- 1 ABE のみ 2 ACD のみ 3 ADE のみ 4 BCD のみ 5 BCE のみ

【解答】

4

- 注) A : 誤 半減期 13.22 時間 (EC 壊変)。 β 線は放出しない。159 keV と 529 keV の γ 線を放出。27.4 keV の特性 X 線 (Te) を放出。
 B : 正 半減期 59.4 日 (EC 壊変)。ラジオイムノアッセイに用いられる。
 C : 正 ^{127}I は、ヨウ素で唯一の安定同位体である。
 D : 正 ^{129}I は、ウランの核分裂生成物である。
 E : 誤 アクチバブルトレーサーは安定同位体である。使用する元素としては ^{139}La , ^{55}Mn , ^{79}Br , ^{151}Eu などがある。

問11 トリチウムに関する次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1 上層大気中では窒素や酸素と一次宇宙線との反応で生成する。
- 2 ウィルツバッハ法ではトリチウム水で有機化合物を標識する。
- 3 β 線の最大エネルギーは ^{14}C のそれよりも低い。
- 4 人工的には ^6Li の中性子捕獲反応で製造する。
- 5 NaI(Tl) シンチレーションカウンタよりも液体シンチレーションカウンタの方が測定に適している。

【解答】

2

注) 1: 正 ^3H は大気圏上層で次のような核反応により生成している。



2: 誤 ウィルツバッハ法は同位体交換を利用した標識化合物の合成法の1つである。トリチウムガス($^3\text{H}_2$)と有機化合物とを密封して一定期間放置すると、同位体交換により ^3H 標識化合物を得ることができる。合成法が簡単で様々な化合物に適用できるなどの利点がある一方で、特定の位置に ^3H を標識することが困難で、また一度標識された ^3H が外れやすいなどの欠点がある。

3: 正 ^3H と ^{14}C の β 線の最大エネルギーは、それぞれ0.0186 MeVと0.157 MeVである。

4: 正

5: 正

問12 次の4つの γ 線源について、主な γ 線のエネルギーの高い順に正しく並んでいるものはどれか。

- 1 $^{137}\text{Cs} > ^{60}\text{Co} > ^{192}\text{Ir} > ^{241}\text{Am}$
- 2 $^{137}\text{Cs} > ^{60}\text{Co} > ^{241}\text{Am} > ^{192}\text{Ir}$
- 3 $^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs} > ^{192}\text{Ir} > ^{241}\text{Am}$
- 4 $^{60}\text{Co} > ^{192}\text{Ir} > ^{137}\text{Cs} > ^{241}\text{Am}$
- 5 $^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs} > ^{241}\text{Am} > ^{192}\text{Ir}$

【解答】

3

注) 4つの γ 線源の主な γ 線のエネルギー(MeV)と放出割合は次のとおりである。

核種	主な γ 線のエネルギー(MeV)と放出割合		核種	主な γ 線のエネルギー(MeV)と放出割合	
^{60}Co	1.173	99.9%	^{192}Ir	0.269	28.7%
	1.333	100%		0.308	29.7%
^{137}Cs	0.662	85.1%		0.317	82.7%
^{241}Am	0.0595	35.9%		0.468	47.8%

よって、 $^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs} > ^{192}\text{Ir} > ^{241}\text{Am}$ となる。

問13 天然放射性核種に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 トリチウムTは、海水中では T_2O の形で存在する。
- 2 化石燃料の使用により大気中の ^{14}C 濃度が増加している。
- 3 地球生成時に存在した ^{87}Rb は、消滅している。
- 4 ^{222}Rn は、水温が上がると大気から水に移行する。

- 5 地球生成以来, ^{235}U の同位体存在度は徐々に低下している。

【解答】

5

- 注) 1 : 誤 トリチウムは海水中では主に HTO として存在している。また, 大気中では主に水蒸気 (HTO), 分子状水素 (HT) および炭化水素 (CH_3T) として存在している。生物 (有機物) 中では自由水中トリチウム (FWT : free water tritium) もしくは有機結合型トリチウム (OBT : organically bound tritium) として存在している。
- 2 : 誤 ^{14}C の半減期は 5730 年である。化石燃料は ^{14}C の半減期に比較し非常に永い年月を経て形成されることから, ^{14}C は化石燃料中に含まれていない。化石燃料が大量消費されると, ^{14}C を含んでいない二酸化炭素が大気中に大量に放出されることになる。その結果, 大気中の二酸化炭素に含まれる ^{14}C の濃度は希釈されて減少することになる。
- 3 : 誤 ^{87}Rb は最大エネルギーが 0.283 MeV (100%), 半減期が 490 億年の β 線放出核種である。天然存在度は 27.83% で, 壊変後は安定な ^{87}Sr になる。ルビジウム-ストロンチウム法 (Rb-Sr 法) は年代測定に利用されている。 ^{87}Rb は, その半減期が地球生成後の経過年数 (約 45 億年) に比較して十分に大きいため, 消滅していない。
- 4 : 誤 ^{222}Rn は常温では気体である。その溶解度は温度に依存し, 水温が上がると水から大気に移行する。
- 5 : 正 ^{235}U (半減期 7.0 億年) の同位体存在度は, 地球生成時は約 23% とされているが, 現在は約 0.72% にまで低下している。

問 14 液体シンチレーション測定およびその関連事項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 乳化シンチレータは, 水溶液試料の測定に用いられる。
 B α 線と β 線に対する発光効率, はほぼ同じである。
 C ^{14}C と ^{35}S の分別定量は, 容易にできる。
 D チェレンコフ光による測定では, 色クエンチングを受けやすい。

- 1 A と C 2 A と D 3 B と C 4 B と D 5 C と D

【解答】

2

- 注) A : 正
 B : 誤 α 線と β 線に対する発光効率はそれらのエネルギーに依存しているため, 同じではない。 β 線放出核種であっても, 例えば ^3H と ^{32}P の場合, β 線の最大エネルギーはそれぞれ 0.0186 MeV と 1.711 MeV で大きく異なるため, 発光効率も同じではない。
 C : 誤 ^{14}C と ^{35}S はいずれも純 β 線放出核種である。 β 線の最大エネルギーはそれぞれ 0.157 MeV (100%) と 0.167 MeV (100%) であり, 近接している (それらの連続スペクトルは大部分の範囲で重複している) ことから, 分別定量は容易ではない。
 D : 正

問 15 次の操作のうち, 化学反応生成物として放射性の気体が発生するものはどれか。ただし, $1\text{ M} = 1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ である。

- 1 $[\text{S}^{35}]\text{FeS}$ 固体に 1.0 M HCl を加える。
 2 $1.0\text{ M}[\text{C}^{14}]\text{K}_2\text{CO}_3$ 水溶液に 0.5 M NaCl 水溶液を加える。
 3 MnO_2 粉末に $20\% [\text{H}^3]\text{H}_2\text{O}_2$ 水溶液を加える。

- 4 1.0 M $[^{22}\text{Na}]\text{Na}_2\text{SO}_4$ 水溶液に金属アルミニウムを入れる。
 5 1.0 M $[^{18}\text{F}]\text{NaF}$ 水溶液に 1.0 M NaOH 水溶液を加える。

〔解答〕

1

注) 1 : 正 $[^{35}\text{S}]\text{FeS} + 2\text{HCl} \longrightarrow \text{FeCl}_2 + [^{35}\text{S}]\text{H}_2\text{S} \uparrow$ 硫化水素が発生する。

2 : 誤

3 : 誤 $[^3\text{H}]\text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow [^3\text{H}]\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ MnO_2 は触媒の働きをするだけである。

4 : 誤

5 : 誤

問 16 次の操作のうち、化学反応によって放射性の沈殿が生成しないものはどれか。ただし、溶液の濃度はすべて $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ とする。

- 1 $[^{59}\text{Fe}]\text{FeCl}_3$ 水溶液に NaOH 水溶液を加える。
 2 $[^{64}\text{Cu}]\text{CuSO}_4$ 水溶液に Na_2S 水溶液を加える。
 3 $[^{65}\text{Zn}]\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液に酢酸を加える。
 4 $[^{110\text{m}}\text{Ag}]\text{AgNO}_3$ 水溶液に NaCl 水溶液を加える。
 5 $[^{133}\text{Ba}]\text{BaCl}_2$ 水溶液に Na_2CO_3 水溶液を加える。

〔解答〕

3

注) 1 : 誤 $[^{59}\text{Fe}]\text{FeCl}_3 + 3\text{NaOH} \rightarrow 3\text{NaCl} + [^{59}\text{Fe}]\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$

2 : 誤 $[^{64}\text{Cu}]\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + [^{64}\text{Cu}]\text{CuS} \downarrow$

3 : 正

4 : 誤 $[^{110\text{m}}\text{Ag}]\text{AgNO}_3 + \text{NaCl} \rightarrow \text{NaNO}_3 + [^{110\text{m}}\text{Ag}]\text{AgCl} \downarrow$

5 : 誤 $[^{133}\text{Ba}]\text{BaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NaCl} + [^{133}\text{Ba}]\text{BaCO}_3 \downarrow$

問 17 ^{131}I で標識されたヨウ化ナトリウム 1.2 g を含む水溶液から、ヨウ化物イオンの全量を沈殿させるのに加える $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸銀水溶液の最小限必要量 [mL] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、ナトリウムとヨウ素の原子量はそれぞれ 23 と 127, 硝酸銀 AgNO_3 の式量は 170 とする。

- 1 13 2 20 3 32 4 38 5 52

〔解答〕

3

注) 水溶液中でヨウ化ナトリウムと硝酸銀は反応してヨウ化銀の沈殿を生じる。



$0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸銀溶液の最小必要量 [mL] (X) は、次式により 32 mL とする。

$$X = \{1.2 / (23 + 127)\} / (0.25 / 1000)$$

問 18 100 kBq の ^{35}S を含む廃液 1 L がある。 ^{35}S の化学形は硫酸イオンおよびメチオニで、廃液中の硫酸イオン濃度は $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ である。塩化バリウム 40 g (式量 208) を廃液に加えたところ、硫酸バリウム (式量 233) の沈殿が生じた。沈殿の放射能は 90 kBq で廃液中に残留した放射能は 10 kBq であった。この結果に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

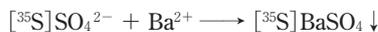
- 1 生成した沈殿は約 23 g で、さらに塩化バリウムを加えることにより、残留した ^{35}S は除去できる。
 2 生成した沈殿は約 23 g で、廃液中にはメチオニとして ^{35}S が残留している。

- 3 生成した沈殿は約 36 g で, ^{35}S を含む沈殿は二酸化炭素を吹き込むことで再溶解する。
- 4 生成した沈殿は約 36 g で, さらに塩化バリウムを加えると, 沈殿から ^{35}S が溶出する。
- 5 生成した沈殿は約 36 g で, さらに塩化バリウムを加えても, 廃液中の ^{35}S の全放射能に変化はない。

〔解答〕

2

注) 水溶液中で硫酸イオンはバリウムイオンと反応して硫酸バリウムの沈殿を生じる。



硫酸イオンとバリウムイオンのモル数は, それぞれ 0.1 mol (0.1×1) と 0.19 mol ($40/208$) であり, バリウムイオンが過剰に存在している。そのため, 廃液中で硫酸イオンとして存在する ^{35}S は硫酸バリウムとして沈殿する。その結果, 廃液中にはメチオンンとして ^{35}S が残留する。生成した硫酸バリウム沈殿量は約 23 g (0.1×233) となる。

問 19 次の溶液を強塩基性陰イオン交換樹脂カラムに通したとき, 放射性核種が樹脂に最も吸着しやすいのはどれか。

- 1 $[^{26}\text{Al}]\text{Al}$ を $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸に溶解した溶液
- 2 $[^{24}\text{Na}]\text{Na}_2\text{CO}_3$ を $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸に溶解した溶液
- 3 $[^{59}\text{Fe}]\text{Fe}(\text{OH})_3$ を $8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸に溶解した溶液
- 4 $[^{59}\text{Fe}]\text{Fe}(\text{OH})_3$ を $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸に溶解した溶液
- 5 $[^{64}\text{Cu}]\text{Cu}$ を $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸に溶解した溶液

〔解答〕

3

注) 鉄イオンはもともとクロロ錯体を形成しやすく, また塩酸濃度がおよそ $8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上の場合, 陰イオンの価数が比較的大きい $[\text{FeCl}_6]^{3-}$ のクロロ錯体を形成する。強塩基性陰イオン交換樹脂カラムで容易にイオン交換されることから, ^{59}Fe は樹脂に吸着しやすい。

問 20 ある化学種に対する有機溶媒 (O) と水 (W) の間の分配比 (O/W) は 4 である。その化学種 (100 MBq) を含む水溶液に同体積の有機溶媒を加えて抽出した。有機溶媒を取り除き, 残った水溶液に同体積の新たな有機溶媒を加えて再び抽出した。2 回の操作で有機溶媒に抽出された化学種の放射能の総量 $[\text{MBq}]$ として, 最も近い値は次のうちどれか。

- 1 4 2 20 3 80 4 90 5 96

〔解答〕

5

注) $\text{O}/\text{W}=4$ なので 1 回目の抽出で有機溶媒 (O) に 80 MBq , 水 (W) に 20 MBq が分配される。化学種 (20 MBq) を含んだ水を用いた 2 回目の抽出では有機溶媒に 16 MBq , 水に 4 MBq が分配される。よって有機溶媒によって抽出された化学種は $80+16=96 \text{ MBq}$ となる。

問 21 放射線を利用した分析方法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 陽電子は, 結晶格子中の欠陥に捕捉されると消滅寿命が変化する。
- B 溶液試料に含まれる鉄の原子価を液体の状態でもスバウアー分光法により調べることができる。
- C タングステンの K-X 線を鉄に照射すると, 鉄の特性 X 線が発生する。
- D 中性子線でたんぱく質などの水素原子の位置を調べることが出来る。

- 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：正 陽電子は電子と対消滅するため、消滅寿命は捕捉サイトの電子密度に依存する。
 B：誤 一般にメスバウアー分光法の対象は固体試料に限定される。
 C：正 鉄のK吸収端は7.1 keVであるので、タングステンのK-X線(59 keV)以上を鉄に照射すると鉄のK殻の電子が励起されて特性X線が発生する。
 D：正 中性子線は水素原子によって散乱されやすい。中性子回折等によって水素原子の位置を調べることができる。

問22 放射性標識化合物の純度と標識位置に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 放射性核種の化学形が指定されて、その放射能が物質の全放射能に占める割合を放射性核種純度という。
- 2 放射性核種の化学形とは関係なく、放射性核種の放射能が物質の全放射能に占める割合を放射化学的純度という。
- 3 すべての位置の原子が均一にその放射性同位体で標識されているものを均一標識化合物という。
- 4 特定の位置の原子の大部分がその放射性同位体で標識されているが、その他の位置における同じ原子も標識されているものを全般標識化合物という。
- 5 位置にかかわらず目的原子の大部分が標識されているが、その分布比が明確でないものを一般標識化合物という。

〔解答〕

3

- 注) 1：誤 放射化学的純度
 2：誤 放射性核種純度
 3：正
 4：誤 名目標識化合物
 5：誤 該当する名称はない

問23 標識化合物の分解抑制と保管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 放射能濃度を低くして保管する。
 B 比放射能を低くして保管する。
 C ^3H 標識化合物の水溶液は凍結させずに2℃付近で保管する。
 D ラジカルスカベンジャーを添加して保管する。
- 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 溶液状態ではできるだけ濃度を低くしておく。
 B：正 一般に比放射能と自己分解は比例するので担体を加えて比放射能を低くする。
 C：正 0～100℃ではラジカルの反応性が大きくなること、凍結すると分解が促進することがある。
 D：正 ラジカルスカベンジャー(遊離基捕獲剤)としてベンゼン、エタノール、ベンジルアルコールなどを添加すると、放射線による分解が防止できることがある。

問 24 中性子放射化分析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 カドミウム箔で試料を包んで照射すると、熱中性子のみで放射化することができる。
 B 分析の妨害となる核反応を起こす元素を照射前に除去することで、その影響を抑えることができる。
 C 照射後に収率トレーサーを加えてから目的元素を分離することで、分離率を実測できる。
 D 測定に Ge 検出器を用いる場合には、化学分離によって 1 種類の放射性核種を単離する必要がある。

- 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

〔解答〕

4

注) A : 誤 カドミウムは中性子捕獲反応をしやすい原子である。

B : 正

C : 正

D : 誤 Ge 検出器はエネルギー分解能が優れているため、放射性核種を単離する必要はない。

問 25 化合物 X を含む試料 A 中の X を定量するために、放射性同位体で標識した X (20 mg で 50 kBq) を試料と十分に混合したのち試料から X を抽出した。抽出された X は 5.0 mg で 2.0 kBq であった。試料 A 中に含まれていた X の質量 [mg] として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 25 2 40 3 80 4 105 5 180

〔解答〕

4

注) 化合物 X (x mg, 0 kBq) を含む試料 A と標識した化合物 X (20 mg, 50 kBq) を混合した。この混合試料において抽出前の X の比放射能と抽出後の X (5 mg, 2.0 kBq) の比放射能は等しいので、試料 A 中に含まれていた X の質量 x [mg] は

$$(50 \times 10^3) / [(20 + x) \times 10^{-3}] = (2.0 \times 10^3) / (5 \times 10^{-3})$$

$$x = (5/2.0) \times 50 - 20 = 105$$

問 26 1,000 mg のヒ素を含むヒ酸二水素カリウム (KH_2AsO_4) を中性子照射し、 $1.0 \times 10^7 \text{Bq}$ の ^{76}As を得た。照射後の ^{76}As の放射能は、As(III) が 70%、As(V) が 30% であり、As(III) は 0.5 mg であった。 ^{76}As (III) の濃縮係数として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、分離された化学種の比放射能を $A [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}]$ 、試料全体の比放射能を $B [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}]$ として、濃縮係数は A/B で与えられる。

- 1 3.0×10^1 2 1.0×10^2 3 1.4×10^3 4 4.7×10^5 5 3.0×10^6

〔解答〕

3

注) 濃縮係数は [分離された化学種の比放射能] / [試料全体の比放射能] で求められる。分離された ^{76}As (III) の濃縮係数は

$$\begin{aligned} A / B &= [(1.0 \times 10^7) \times 0.7 / (0.5 \times 10^{-3})] / [(1.0 \times 10^7) / (1000 \times 10^{-3})] \\ &= 1.4 \times 10^3 \end{aligned}$$

問 27 ホットアトム等に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 ^3He の中性子照射で生成するトリチウム原子の運動エネルギーは 1 keV 弱である。
 2 ホウ素化合物をがん組織に取り込ませた後、熱中性子照射で腫瘍を治療する。
 3 ^3HBr の紫外光照射で生成するトリチウム原子は有機化合物と反応しない。
 4 ヨウ化エチルの中性子照射で生成した放射性ヨウ素は水に不溶である。

- 5 核異性体転移で生成するホットアトムの電子配置は、元のままである。

〔解答〕

2

- 注) 1 : 誤 ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$ で生成するトリチウム原子の運動エネルギーは 0.2 MeV 弱である。
 2 : 正 ホウ素中性子捕捉療法という。
 3 : 誤 トリチウム原子は有機化合物と反応する。
 4 : 誤 ${}^{127}\text{I}(n, \gamma){}^{128}\text{I}$ 反応の際の反跳エネルギーにより化学結合が切断され、 ${}^{128}\text{I}$ の大部分は水相に移る。ホットアトム効果と呼ばれる。
 5 : 誤

問 28 放射性同位元素装置機器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 厚さ計は、 β -線の散乱や吸収を利用している。
 B 中性子水分計は、速中性子と水素原子核の弾性衝突を利用している。
 C 硫黄計は、 α 線で硫黄原子を励起することを利用している。
 D 密度計は、 α 線の質量減弱係数が物質によらず一定であることを利用している。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

1

- 注) A : 正 厚さ計は、 β 線の他に γ 線を利用しているものもある。
 B : 正 中性子水分計は、速中性子が水素との弾性衝突によって減速した熱中性子を利用している。
 C : 誤 硫黄計は、10~60 keV の γ 線や X 線の吸収を利用している。
 D : 誤 密度計は、1~2 MeV の γ 線の質量減衰係数が物質によってほとんど変わらないことを利用している。

問 29 フリッケ線量計を ${}^{60}\text{Co}$ の γ 線で 30 分照射したところ、Fe(II) が溶液 1 g 当たり 1.6×10^{-5} g 生じた。 γ 線の線量率 [$\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$] に最も近い値は次のうちどれか。ただし、Fe(II) 生成の G 値を 15.6、鉄の原子量を 56、アボガドロ定数を $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 、1 eV を $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ とする。

- 1 35 2 70 3 170 4 350 5 700

〔解答〕

解答不能*

- 注) * フリッケ線量計は、放射線の吸収によりその吸収線量に比例して硫酸溶液中に生じる鉄イオンの酸化 (Fe(II) から Fe(III) への変化) を測定することを利用した液体化学線量計のひとつである。よって、問題文にある γ 線を照射して、Fe(II) が生じたという記述は間違いである。また、G 値は Fe(III) の値である。以下は、Fe(III) が生じたとして解説を行った。

生成した Fe(III) イオンの個数は、Fe の原子量が 56 であることから

$$(1.6 \times 10^{-5} / 56) \times 6.0 \times 10^{23} = 1.7 \times 10^{17} [\text{g}^{-1}], \text{ となる。}$$

G 値が 15.6 とは、Fe(III) イオン 15.6 個の生成に 100 eV が必要であるから、

$$(1.7 \times 10^{17} \times 100) / 15.6 = 1.1 \times 10^{18} [\text{eV} \cdot \text{g}^{-1}]$$

これは 1 g あたり 30 分の照射であるから、kg, 1 時間に換算すると、

$$1.1 \times 10^{18} \times 10^3 \times (60/30) = 2.2 \times 10^{21} [\text{eV} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}],$$

eV を J に換算すると、

$$2.2 \times 10^{21} \times 1.6 \times 10^{-19} = 352 [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}] \doteq 350 [\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}], \text{ となる。}$$

問 30 有機化合物への放射線照射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 ポリテトラフルオロエチレン (テフロン) に照射すると、化学結合の切断が起こり、もろくなる。
- B モノマーに照射すると重合開始剤を含まない高分子を得ることができる。
- C 高分子物質を適当なモノマーに浸して照射すると、元の高分子に別の高分子を結合することができる。
- D ポリエチレンに照射すると、この高分子間に新しい結合が形成する。

- 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 テフロンに γ 線を照射すると、分子鎖が切断され機械強度が低下する。
 B : 正 モノマーに放射線を照射すると、重合反応が起こり高分子が生成される。
 C : 正 高分子を適当なモノマーと混合して放射線を照射すると、高分子の結合が切断されてモノマーが枝状にグラフト重合される。
 D : 正 ポリエチレンに照射すると、分子鎖が切断されるが分子鎖間が架橋して新しい結合が形成される。

生 物 学

第62回(平成29年)

次の各問について、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 DNA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 DNAの2本の鎖の向かい合う塩基は、配位結合により結合している。
- B DNAを構成する塩基はアデニン、チミン、グアニン、シチジンの4種類である。
- C DNA複製においては、半保存的複製が行われる。
- D 8-オキソグアニンはアデニンと対合することにより突然変異の原因となる。
- E 照射されたDNAから塩基の遊離が生じた時、その原因は塩基の損傷である。

- 1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕

4

- 注) A: 誤 DNA2本鎖の向かい合う塩基は水素結合している。
 B: 誤 シチジンではなく、シトシンが正しい。シチジンはシトシンに糖残基(DNAでは β -D-2-デオキシリボース)が結合したヌクレオシドである。
 C: 正 DNAの複製は2本の鎖がそれぞれ鋳型になり、鋳型に相補的な塩基配列の鎖が新たに作られる。これを半保存的複製という。
 D: 正 8-オキソグアニンはその構造からシトシンのみならずアデニンとも対合が可能である。そのため、8-オキソグアニンが存在するとグアニン-シトシン対がチミン-アデニン対に変化したり、アデニン-チミン対がシトシン-グアニン対に変化する点突然変異が起り得る。
 E: 誤 塩基の遊離はDNAの切断を伴わない塩基の損傷による場合と、DNAの切断に伴って生じる場合がある。

問2 次の標識化合物とそれを利用して標識される生体高分子として、正しいものの組合せはどれか。

- A [^3H]チミジン — DNA
- B [^{125}I]5-ヨード-2'-デオキシウリジン — RNA
- C [^{35}S]メチオニン — タンパク質
- D [α - ^{32}P]デオキシシチジン三リン酸 — DNA

- 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) A: 正 DNAの取り込みや細胞増殖能の測定に用いられる。
 B: 誤 DNA複製の阻害剤である。
 C: 正 アミノ酸の一種。タンパクの合成や挙動の追跡に用いられる。

D: 正 DNA 合成能の測定などに用いられる。

問3 放射線の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 溶液を照射した場合、全溶質分子に対する損傷を受けた溶質分子の割合は濃度によらず一定である。
- B 照射後に酸素分圧を高めると、細胞致死作用が増強される。
- C 低 LET 放射線の酸素増感比は正常線維芽細胞では 2.5~3 程度の値を示す。
- D グルタチオンにより間接作用は低減する。
- E 温度が低下すると、間接作用は低減する。

1 ABD のみ 2 ABE のみ 3 ACD のみ 4 BCE のみ 5 CDE のみ

〔解答〕

5

- 注) A: 誤 濃度によらず一定なのは、照射により損傷を受けた溶質分子数である。
 B: 誤 細胞致死効果が増強されるのは、照射中に酸素が存在するときである (酸素効果)。
 C: 正 酸素増感比とは、低酸素条件においてある生物効果を得るのに必要な線量を酸素存在下で同じ生物効果を得るのに必要な線量で割った値で、低 LET 放射線では約 2.5~3 となる。
 D: 正 グルタチオンはグルタミン酸-システイン-グリシンが結合したトリペプチドで、システインのチオール基がラジカルと反応して (水素をラジカルに与えて) ラジカルを不活性化する。
 E: 正 ラジカルの拡散が低温で妨げられるからとされている。

問4 ヒト体細胞の DNA 損傷とその修復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 塩基遊離はプリン塩基に生じやすい。
- B 相同組換え修復は非相同末端結合より不正確である。
- C 相同組換え修復は細胞周期の G₁ 期には行われない。
- D 塩基除去修復には相同な 2 本鎖 DNA を必要とする。

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

〔解答〕

2

- 注) A: 正 塩基と糖の結合 (N-グリコシド結合) は、プリン塩基と糖の結合の方がピリミジン塩基と糖の結合より弱いのでプリン塩基の方が遊離しやすい。
 B: 誤 相同組換え修復は姉妹染色体の無傷の DNA 鎖を鋳型にして行うため、鋳型のない状態で修復を行う非相同末端結合修復より正確である。
 C: 正 G₁ 期には姉妹染色体は存在しないので相同組換え修復は行われない。
 D: 誤 DNA 2 本鎖のうち、損傷していない側を鋳型にして修復できる。

問5 ヒドロキシルラジカル ($\cdot\text{OH}$) 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 2 分子が結合して過酸化水素を生成する。
- B 求電子反応により酸化を受ける。
- C グルタチオンペルオキシダーゼにより特異的に不活性化される。
- D 有機分子からの水素引き抜き反応を起こす。

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

〔解答〕

3

- 注) A: 正 ヒドロキシルラジカル2分子が結合すると過酸化水素になる。
 B: 誤 求電子反応により相手を酸化し、ヒドロキシルラジカル自身は電子を得て還元される。
 C: 誤 グルタチオンペルオキシダーゼはグルタチオンを補酵素として過酸化水素や過酸化脂質を不活性化する酵素で、ヒドロキシルラジカルには直接作用しない。
 D: 正 ヒドロキシルラジカルに水素を奪われた有機分子はラジカルとなり、水素引抜き反応や求電子反応が連鎖する。

問6 細胞生存率曲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 1 標的1ヒットモデルでは片対数グラフ上で直線となる。
 B D_0 とは生存率が0.1になる線量である。
 C D_0 が大きいほど、放射線致死感受性が低い。
 D α/β 比(値)が大きいほど、亜致死損傷回復の程度が小さい。
 1 ABCのみ 2 ABDのみ 3 ACDのみ 4 BCDのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕

3

- 注) A: 正 1 標的1ヒットモデルとは、細胞に標的は1つあって、それが1ヒットを受けると細胞死するというモデルである。このモデルでは生存率 S は $S = \exp(-KD)$ と表される(ただし D は線量, K は不活性化係数:放射線感受性を意味する定数)。よって縦軸を生存率の対数, 横軸を吸収線量としてグラフを描くと右下がりの直線になる。
 B: 誤 D_0 は平均して標的の中で1個のヒットを生じるのに必要な線量で, Aの解説で示した生存率の式において $KD = 1$ となる線量である。この場合, $S = 1/e \approx 0.37$ であるから, 生存率を37%に減少させるのに必要な線量になる。多重ヒットモデルの場合は生存率グラフが指数関数で変化する部分において, 生存率が63%減少するのに要する線量となる。
 C: 正 Bの解説からも分かるように, D_0 が大きい方が生存率曲線の傾きが緩やかになる。すなわち致死感受性が低い。
 D: 正 α は直線-2次曲線モデルにおける放射線1粒子によるDNA2本鎖切断の発生率, β はその平方根が2粒子による2本鎖切断の発生率である。このモデルで生存率 S は, $S = \exp(-\alpha D - \beta D^2)$ と表される(D は線量)。 α/β が大きいほど直線に近づき, 亜致死損傷回復の程度が小さい。

問7 染色体DNA上のタンパク質をコードする領域で次の変異が起こった場合、フレームシフトが起こるものの組合せはどれか。

- A 1個のアデニンがチミンによって置換された場合
 B 1個のアデニンがグアニンによって置換された場合
 C 1個のアデニンが挿入された場合
 D 連続する2個のアデニンが欠失した場合
 E 連続して3個のアデニンが挿入された場合
 1 AとB 2 AとE 3 BとD 4 CとD 5 CとE

〔解答〕

4

- 注) フレームシフトとは、遺伝情報をアミノ酸配列に翻訳する際の読み枠がずれることである。塩基3個の配列がアミノ酸1個に対応しているので、塩基1個が置換された場合(AとB)および連続する塩基3

個が挿入された場合 (E) ではフレームシフトは起こらず、元のタンパクに対してアミノ酸 1 残基の変異 (A と B ではアミノ酸の置換, E の場合はリジンの挿入) で済むが、塩基 1 個あるいは 2 個が挿入 (C) もしくは欠失 (D) した場合は変異した箇所から下流の読み枠がずれてしまい、大きな変異をもたらす。

問 8 放射線によ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 二動原体染色体は不安定型異常である。
- B 二動原体染色体の出現頻度から被ばく線量を推定することができる。
- C 安定型異常は発がんの原因になる。
- D 染色体型異常は細胞が G_1 期に被ばくした場合に生じる。

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) A : 正 二動原体染色体は正常な細胞分裂ができないので、細胞が寿命を迎えると消失する不安定型異常である。
- B : 正 二動原体染色体などの不安定型異常は出現頻度と被ばく線量の関係が知られていて、これを利用した被ばく線量の推定ができる。二動原体染色体の場合、推定可能範囲は 0.2~5 Gy とされている。
- C : 正 安定型異常には転位・逆位・欠失がある。安定型異常を持つ細胞は細胞分裂によって淘汰されないため異常は新生細胞に引き継がれ、発がんの原因になり得るとされている。
- D : 誤 染色体型異常は DNA の複製後に被ばくを受けた場合に起こる。設問にある G_1 期は細胞周期で合成期 (S 期) の前にあるので誤りである。

問 9 輸血用血液の放射線照射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 血液成分のうち最も放射線の影響を受けるのは血小板である。
- B 放射線照射により移植片対宿主病 (GVHD) を防ぐことが目的である。
- C 吸収線量は 15~50 Gy である。
- D 新鮮凍結血漿^{しょうじょう}に行く。

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

〔解答〕

3

- 注) A : 誤 最も放射線の影響を受けるのはリンパ球である。
- B : 正 GVHD は輸血提供者由来リンパ球が輸血を受けた患者に生着・増殖して患者の体組織を異物とみなし、これを攻撃することによって起こる。供給血中のリンパ球を失活させることで予防できる。
- C : 正 リンパ球のみを破壊し、他の血球成分に影響が出ない線量が照射される。
- D : 誤 新鮮凍結血漿は製造する際に全血から血漿のみを分画して GVHD の原因となるリンパ球はほとんど含まれていない。もし僅かに残っていても、凍結することでリンパ球は失活するので放射線照射する必要はない。

問 10 放射線照射によって誘発されるアポトーシス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 染色体 DNA の断片化が起こる。
- B ミトコンドリアの膜電位が低下する。

C ホスファチジルセリンが細胞膜の外側に露出する。

D 正常 p53 タンパク質によって抑制される。

- 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) D: 誤 p53 タンパク質は DNA 損傷を受けた細胞で活性化し, DNA 損傷修復の促進や細胞周期の停止, アポトーシスの誘導に寄与することが知られ, がん抑制に重要な役割を持つと考えられている。

問 11 γ 線による急性全身被ばくの放射線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 好中球は被ばく直後に一過性に増加することがある。

B ヒトの半致死線量はマウスの半致死線量より大きい。

C 治療しない場合, ヒトの半致死線量は 3.5~4.5 Gy 程度である。

D 好中球はリンパ球よりも放射線致死感受性が高い。

E 末梢血リンパ球は放射線被ばく後に主として増殖死を起こす。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとD 4 CとE 5 DとE

〔解答〕

2

注) B: 誤 ヒトの半致死線量は 3.5~4.5 Gy, マウスの半致死線量は 5.6~7 Gy である。

D: 誤 末梢血のうち, 最も感受性が高いのはリンパ球で, 0.25 Gy から減少がみられる。

E: 誤 放射線による細胞死は細胞周期の観点から増殖死と間期死がある。増殖能がない末梢血リンパ球は, 間期死に分けられる。

問 12 γ 線急性被ばくによる次の障害のうち, しきい値が最も大きいものはどれか。

1 湿性落屑

2 白内障による視力障害

3 造血機能低下

4 一時的脱毛

5 女性の永久不妊

〔解答〕

1

注) γ 線急性被ばくによる障害のしきい値は, 湿性落屑が 18 Gy, 白内障による視力障害が 0.5 Gy, 造血機能低下が 0.5 Gy, 一時的脱毛が 4 Gy, 女性の永久不妊が 3 Gy である (ICRP Pub.118)。

問 13 自然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 宇宙線は高度が同じなら緯度にかかわらずほぼ均一に降り注ぐ。

B 日本人の食品による内部被ばくの実効線量に最も大きく寄与する放射性核種は ^{14}C である。

C 日本人の体内に存在する放射性核種のうち, 最も放射能が高いものは ^{40}K である。

D 世界全体の年平均の実効線量で, 大地からの放射線による外部被ばくの実効線量は, ラドン及びその子孫核種の吸入による内部被ばくの実効線量より大きい。

E 自然放射線による 1 年当たりの被ばくの実効線量の世界平均は約 2.4 mSv である。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとD 4 CとE 5 DとE

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 宇宙線は地球磁場の影響を受けるため赤道に近づくほど減少する。
 B : 誤 日本人は欧米諸国の人と比べて魚介類を多く摂取するため、経口摂取による内部被ばくは ^{210}Pb や ^{210}Po の寄与の割合が多い。経口摂取による内部被ばく線量 0.99 mSv のうち、0.80 mSv が ^{210}Pb や ^{210}Po である。
 D : 誤 世界の自然放射線は平均 2.4 mSv であり、そのうち大地放射線は 0.48 mSv、ラドン・トロンは 1.26 mSv である。

問 14 γ 線による皮膚障害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 同程度の障害を起こすのに必要なエネルギーは熱傷の場合よりも大きい。
 B 4 Gy 急性被ばくすると、2~3 週間程度後に一時的脱毛が生じる。
 C 総線量が同一であれば 1 回で被ばくした場合の方が分割して被ばくした場合よりも障害が小さい。
 D 3 Gy 急性被ばくすると、数時間から 24 時間後に紅斑が生じる。
 E 4 Gy 急性被ばくすると、6 ヶ月以内に皮膚の萎縮が生じる。

1 A と B 2 A と C 3 B と D 4 C と E 5 D と E

〔解答〕

3

- 注) A : 誤 生体組織を水と仮定した場合、1 [Gy] (=1 [J/kg] =0.24 [cal/kg]) は、生体 1 kg を 0.0024°C 上昇させるエネルギーである。 γ 線による皮膚障害のしきい値は 2~24 Gy 程度であり、これに伴う温度上昇は、温熱による熱傷と比べて小さい。
 C : 誤 ①亜致死損傷の修復と、②再増殖による致死的障害細胞の代替の寄与により、分割照射は 1 回照射より生物学的効果が減少する (ICRP Pub.118)。
 E : 誤 皮膚萎縮のしきい値は 10 Gy で、出現時間は 14 週以降である (ICRP Pub.118)。

問 15 γ 線 2 Gy の急性全身被ばくの数時間後に生じる可能性のある症状として、正しいものの組合せはどれか。

- A 下痢
 B 意識障害
 C 嘔吐
 D 下血
 E 軽い頭痛

1 A と B 2 A と C 3 B と D 4 C と E 5 D と E

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 4~6 Gy 以上の急性全身被ばくにより生じる (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。
 B : 誤 6~8 Gy 以上の急性全身被ばくにより生じる (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。
 C : 正 1~2 Gy の急性全身被ばくの 2 時間以後に 10~50% の人に嘔吐がみられる (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。
 D : 誤 4~6 Gy 以上の急性全身被ばくにより生じる (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。
 E : 正 1~2 Gy の急性全身被ばくにより、非常に軽い頭痛がみられる (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。

問16 毛細血管拡張性運動失調症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 常染色体優性遺伝様式を示す。
- B 免疫不全を呈することが多い。
- C 患者由来の線維芽細胞は放射線致死高感受性を示す。
- D 患者由来の線維芽細胞は細胞周期チェックポイントに異常を示す。

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) 毛細血管拡張性運動失調症とは、DNA修復機構の異常により生じる神経系、免疫系などの多系統の障害を呈する疾患であり、常染色体“劣性”遺伝形式をとる。したがって、Aは誤り。B～Dは正しい。

問17 原爆被爆者の疫学調査において、次の部位のうち最も発がんの過剰相対リスクが高いものはどれか。

- 1 胆嚢
- 2 女性乳房
- 3 胃
- 4 直腸
- 5 子宮

〔解答〕

2

注) 1958年から1998年までの疫学調査の結果より、過剰相対リスクは女性乳房、胃で有意に高く、直腸、子宮、胆嚢は有意なリスク上昇を示さない。女性乳房と胃を比べると、女性乳房の方が、過剰相対リスクは高い (Preston DL, et. al *Radiat. Res.* 2007; 168: 1-64)。

問18 放射線発がんの交絡因子として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A 年齢
- B 喫煙
- C 性別
- D 飲酒

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) ある要因Aによりある結果Xが起こるというデータが得られるとき、他の要因Bが以下の3条件を満たすならば要因Bを交絡因子という。①要因Bは結果Xに影響を与える。②要因Bは要因Aに関係がある。③要因Bは要因A-結果Xの中間因子ではない。

年齢、性別、飲酒、喫煙は放射線発がんの交絡因子として知られており、原爆被爆などの疫学調査で考慮されている。

問19 臓器・組織と放射線による晩期障害の組合せとして、誤っているものはどれか。

- 1 膀胱 — 頻尿
- 2 脳 — 脳動脈瘤^{りゅう}
- 3 心臓 — 心筋症
- 4 大腸 — 穿孔^{せん}

5 脊髄神経 — 脊髄神経麻痺

〔解答〕

2

注) 放射線による晩期障害として、膀胱萎縮による頻尿や、主に毛細血管の障害に起因する心筋症、消化管の穿孔、脊髄神経麻痺などが知られている。一般的に、脳動脈瘤の形成は放射線による晩期障害とは考えられていない。

問 20 次の放射性核種と内部被ばくの影響の組合せとして、誤っているものはどれか。

- 1 プルトニウム 239 — 肝がん
- 2 コバルト 60 — 肝がん
- 3 ラジウム 226 — 肝がん
- 4 鉄 59 — 白血病
- 5 ラドン 222 — 肺がん

〔解答〕

3

注) プルトニウム 239, コバルト 60 は肝臓に高く集積することから、これらの内部被ばくにより肝がんのリスクを上げる可能性がある。鉄 59 は骨髄に集積し、白血病の要因となる可能性がある。ラドン 222 は気体状であり、吸入により肺に集積・沈着することにより肺がんの原因になる。ラジウム 226 は骨に集積し、骨腫瘍や白血病の原因となる可能性があるが、肝がん発生の原因となる可能性は低い。

問 21 核実験により大気中に放出された放射性核種のフォールアウト放射能で集団実効線量預託に最も大きく寄与する核種は次のうちどれか。

- 1 ^3H
- 2 ^{14}C
- 3 ^{90}Sr
- 4 ^{137}Cs
- 5 ^{239}Pu

〔解答〕

2

注) 集団実効線量預託への寄与の大きさは、 $^{14}\text{C} > ^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^3\text{H} > ^{239}\text{Pu}$ である。 ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{144}Ce なども集団実効線量預託への寄与の大きい核種として重要である。

問 22 胎内被ばくによる精神遅滞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 受精後 0~7 週の被ばくで精神遅滞が観察される。
- B 受精後 8~15 週の被ばくで精神遅滞が観察される。
- C 受精後 16~25 週の被ばくで精神遅滞が最も顕著に観察される。
- D 受精後 26 週以降の被ばくでは精神遅滞が観察されない。

- 1 A と B
- 2 A と C
- 3 B と C
- 4 B と D
- 5 C と D

〔解答〕

4

注) 胎内被ばくによる精神遅滞の誘発は、受精後 8~15 週で感受性が最も高く、受精後 15~25 週の被ばくでも誘発される。受精後 8 週以前あるいは 25 週以降の被ばくではほとんどみとめられない。胎内被ば

くにより精神遅滞が誘発される時期は、大脳が形成される時期(胎児期の初期)とよく一致している。

問23 次のうち放射線による身体的影響に分類されるものの組合せはどれか。

- A 白内障
- B 白血病
- C 小頭症
- D 再生不良性貧血

- 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)放射線の人体への影響は、被ばくした人に影響が出る「身体的影響」と、被ばくした人の子孫に影響が現れる「遺伝的影響」とに分けられる。また身体的影響は、急性障害と晩発性障害、あるいは胎児発生の障害などに分類される。白内障、白血病、再生不良性貧血は晩発性の障害であり、小頭症は胎児発生の障害である。

問24 放射線による遺伝性(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 重篤度は吸収線量が高いほど大きくなる。
- B 原爆被爆者の疫学調査では、有意な増加は認められていない。
- C 倍加線量が大きいほど遺伝性(的)影響が起りやすい。
- D 生殖細胞以外への被ばくは考慮する必要がない。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

4

注)遺伝性(的)影響は確率的影響に分類される。確率的影響にはしきい値がなく、被ばく線量が大きくなるにつれて影響の発生確率は大きくなるが、重症度は被ばく線量(吸収線量)に関係しない。倍加線量が「大きい」ということは、倍の数の突然変異を生じさせるために、より多くの線量を必要とすることであり、感受性が低い(遺伝性影響が起りにくい)ということである。B、Dは正しい。

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どれか。

- A 線量率効果が小さい。
- B 生存率曲線の傾きが小さい。
- C ラジカルスカベンジャーによる防護効果が小さい。
- D 間接作用の寄与が大きい。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

2

注)高LET放射線による傷害では、DNA2本鎖切断が多いため傷害からの回復が比較的少ない。このため、低LET放射線による傷害に比べ、線量率効果が小さく、生存率曲線の傾きは大きくなる。また高LET放射線では、ラジカルを介した間接的な作用(間接作用)よりも細胞に直接的に傷害を与える直接作用の寄与が大きい。したがって、ラジカルを消去するラジカルスカベンジャーによる防護効果は比較的小さい。

問 26 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 放射線の質の違いによる生物効果の違いを表すものである。
- B 細胞致死効果や突然変異などの効果の指標によって値が異なる。
- C 線量率を変化させても値は変わらない。
- D 基準の放射線として一般に β 線が用いられる。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

1

注) RBE は、放射線の質の違いによる生物効果の違いを量的に示すものであり、「ある生物学的効果を得るのに必要な基準放射線の吸収線量」を「同じ生物学的効果を得るのに必要な試験放射線の吸収線量」で割った値である。したがって、何を生物学的効果の指標とするかにより、また LET、線量、線量率などの違いにより値が変わる。基準の放射線としては一般に X 線や γ 線が用いられる。

問 27 放射線治療でブラッグピークを利用するものの組合せはどれか。

- A 電子線
- B 陽子線
- C 速中性子線
- D 炭素イオン線

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

4

注) 物質内を進む荷電粒子のエネルギー損失は、停止する直前に最大になり、その後急激に低下する。この極大部分をブラッグピークと呼ぶ。荷電粒子である陽子線、炭素イオン線、重イオン線はブラッグピークを形成するので、この特長を利用してがん（腫瘍組織）に集中して線量を与えられる。したがって、副作用の少ない治療が可能である。X 線、 γ 線、電子線、中性子線はブラッグピークを形成しない。

問 28 放射線加重係数（ICRP 2007 年勧告）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 確定的影響をもとにして定められている。
- B 電子とミュー粒子で値は同じである。
- C 中性子ではエネルギーが大きくなると値が大きくなる。
- D 放射線の線量率にかかわらず同一の値が与えられている。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

4

注) A：誤 放射線加重係数は確率的影響を評価することを目的とする。
 B：正 光子、電子とミュー粒子の放射線加重係数は 1 で、同じ値である。
 C：誤 中性子の放射線加重係数は、1 MeV 近傍で最大となる連続関数で与えられている。
 D：正 放射線加重係数については放射線の線量率にかかわらず同一の値が与えられている。

問 29 4 Gy の γ 線照射を行った正常ヒト線維芽細胞の生存率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 10 mGy/min の線量率で照射した場合、1 Gy/min の線量率で照射した場合に比べて生存率が高い。

- B 1回で4 Gy 急性照射した場合、2時間の間隔を開けて2 Gy ずつ急性照射した場合に比べて生存率が高い。
- C S期の細胞に照射した場合、M期の細胞に照射した場合に比べて生存率が高い。
- D 通常酸素濃度下で照射した場合、無酸素下で照射した場合に比べて生存率が高い。
- 1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

【解答】

2

- A：正 線量率が低い場合には高い場合よりも放射線の致死効果は下がる。
- B：誤 2時間の間隔をあけて2 Gy ずつ分割照射した場合は、1回で4 Gy 急性照射した場合よりも生存率が高い。
- C：正 S期後期は感受性が低くなるため、平均するとM期の細胞に照射した場合に比べて感受性は低い。つまり生存率が高い。
- D：誤 通常酸素濃度下で照射した場合、無酸素下で照射した場合に比べて感受性が高い。つまり、生存率が低い。

問30 陽電子放射断層撮影 (PET) 診断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 陽電子の対消滅で生じる662 keVの放射線を検出する。
- B ^{14}C メチオニンは脳腫瘍の診断に用いられる。
- C ^{18}F フッ化ナトリウムは脳機能の診断に用いられる。
- D ^{13}N アンモニアは虚血性心疾患の診断に用いられる。
- E ^{15}O 標識ガスは脳血管障害の診断に用いられる。
- 1 AとB 2 AとC 3 BとD 4 CとE 5 DとE

【解答】

5

- 注) A：誤 陽電子消滅線のエネルギーは電子の静止質量分のエネルギー(511 keV)に相当する。
- B：誤 ^{14}C は陽電子を放出しない。PETに用いられるのは ^{11}C メチオニンである。
- C：誤 ^{18}F は陽電子を放出するが、 ^{18}F フッ化ナトリウムは脳機能の診断には用いられない。 ^{18}F フッ化ナトリウムは、骨イメージングにおける利用が期待されている。
- D：正 ^{13}N アンモニアは、静脈内に投与されると毛細血管から抹消組織に拡散移行し、心臓の心筋細胞に良く取り込まれる。そのため虚血性心疾患の診断に用いられる。
- E：正 ^{15}O 標識ガスは、血液量、血流量、酸素摂取率、および酸素代謝率の定量的な測定に用いられる。

物 化 生

第 62 回 (平成 29 年)

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 α 壊変や β 壊変で生じた原子核は, 励起状態にある場合がある。この励起状態の原子核がより低い準位に遷移する際に γ 線が放出される。例えば ^{137}Cs は γ 線源として知られるが, γ 線自体は [A] して生じる [B] の励起状態が基底状態に遷移する際に放出されるものである。 ^{137}Cs は壊変割合 5.4% で [B] の基底状態へ壊変し, 残りが [B] の励起状態へ壊変する。[B] の励起状態の半減期はおおよそ [C] 秒で, このような寿命の長い励起状態の原子核を [D] と呼び, その遷移を [D] 転移と呼ぶ。

励起状態にある原子核が γ 線を放出するかわりに, そのエネルギーを軌道電子に与えてこれを放出する現象を [E] といい, 放出される電子のエネルギー分布は, [F] となる。放出された電子の準位に空席が生じるので, これを外側の軌道電子が埋めるときにその準位間のエネルギー差は X 線として放出されるか, あるいは電子に与えられ原子を電離するのに費やされる。[B] の励起状態から基底状態への遷移における K 軌道電子に対する [E] 係数を a_K , 全ての電子に対する [E] 係数を a_T , K-X 線に対する蛍光収率を ω_K とするとき, 1 回の遷移によって放出される γ 線の放出割合 Γ_g は [G] であり, そのとき K-X 線が放出される確率 Γ_X は [H] となる。[E] 係数は [I] や遷移のタイプによって異なるが, 蛍光収率 ω_K は [I] にも依存する。

次に, 空気中に置かれた ^{137}Cs 点線源 (放射能 5 GBq) について考える。この線源からは, エネルギーが [ア] $\times 10^{-13}$ J の γ 線が毎秒 [イ] $\times 10^9$ 本放出される。線源から 1 m 離れた点におけるこの γ 線の光子束密度 (フルエンス率) は [ウ] $\times 10^8$ $\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ となる。空気の質量エネルギー吸収係数を $2.93 \times 10^{-3} \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ とし, a_T 及び a_K をそれぞれ 0.11, 0.09 とすると, この点におけるエネルギーフルエンス率は [エ] $\times 10^{-5}$ $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ となり, 電子平衡が成立するとき, 同点での γ 線による空気の吸収線量率は [オ] $\times 10^{-4}$ $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ となる。

<A, B の解答群>

- | | | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 α 壊変 | 2 β^- 壊変 | 3 β^+ 壊変 | 4 EC 壊変 | 5 IT | 6 内部転換 |
| 7 ^{136}Ba | 8 ^{137}Ba | 9 ^{138}Ba | 10 ^{136}Xe | 11 ^{137}Xe | 12 ^{138}Xe |
| 13 ^{133}I | 14 制動放射 | | | | |

<C の解答群>

- | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 2.55×10^{-3} | 2 15.3×10^{-3} | 3 25.5×10^{-3} | 4 153×10^{-3} | 5 255×10^{-3} |
| 6 1.53 | 7 2.55 | 8 15.3 | 9 25.5 | 10 153 |
| 11 255 | 12 352 | 13 478 | | |

<D~F の解答群>

- | | | | |
|----------|---------|--------|--------|
| 1 安定同位体 | 2 準安定原子 | 3 核異性体 | 4 同重体 |
| 5 オージェ効果 | 6 電子捕獲 | 7 脱励起 | 8 内部転換 |

- 9 トンネル効果 10 電子付着 11 線スペクトル 12 一様分布
 13 連続分布 14 ガウス分布 15 ボルツマン分布

<Gの解答群>

- 1 a_T 2 $\frac{1}{a_T}$ 3 $\frac{1}{1+a_T}$ 4 $\frac{a_T}{1+a_T}$ 5 $\frac{1-a_T}{1+a_T}$ 6 $1-a_T$
 7 $\frac{1}{1-a_T}$ 8 $\frac{a_T}{1-a_T}$ 9 $\frac{1+a_T}{1-a_T}$ 10 $\frac{a_K}{1+a_T}$ 11 $\frac{1-a_K}{1+a_T}$ 12 $1-a_K$
 13 $\frac{1}{1-a_K}$ 14 $\frac{a_T}{1-a_K}$ 15 $\frac{1+a_T}{1-a_K}$

<Hの解答群>

- 1 $\frac{\omega_K}{1+a_T}$ 2 $\frac{\omega_K a_T}{1+a_T}$ 3 $\omega_K \frac{1-a_T}{1+a_T}$ 4 $\omega_K(1-a_T)$ 5 $\frac{\omega_K}{1-a_T}$
 6 $\frac{\omega_K a_T}{1-a_T}$ 7 $\omega_K \frac{1+a_T}{1-a_T}$ 8 $\frac{\omega_K a_K}{1+a_T}$ 9 $\omega_K \frac{1-a_K}{1+a_T}$ 10 $\frac{1-a_K}{\omega_K}$
 11 $\frac{\omega_K}{1-a_K}$ 12 $\frac{\omega_K a_T}{1-a_K}$ 13 $\frac{1+a_K}{(1-a_T)\omega_K}$

<Iの解答群>

- 1 発光 2 結合エネルギー 3 放出エネルギー
 4 質量数 5 質量欠損 6 原子番号
 7 核子数 8 半減期 9 イオン化ポテンシャル
 10 励起ポテンシャル 11 中性子数 12 衝突阻止能

<アの解答群>

- 1 0.76 2 0.83 3 1.06 4 1.29 5 1.52 6 1.76
 7 2.00 8 2.24 9 2.48 10 2.72 11 3.01 12 3.59
 13 3.79 14 4.20 15 4.62

<イ, ウの解答群>

- 1 $3.40 \times \Gamma_g^{-1}$ 2 $3.53 \times \Gamma_g^{-1}$ 3 $3.77 \times \Gamma_g^{-1}$ 4 $4.00 \times \Gamma_g^{-1}$
 5 $4.20 \times \Gamma_g^{-1}$ 6 $3.53 \times \Gamma_g$ 7 $3.77 \times \Gamma_g$ 8 $3.98 \times \Gamma_g$
 9 $4.20 \times \Gamma_g$ 10 $4.48 \times \Gamma_g$ 11 $4.73 \times \Gamma_g$ 12 $3.98 \times \Gamma_K$
 13 $4.20 \times \Gamma_K$ 14 $4.48 \times \Gamma_K$ 15 $4.73 \times \Gamma_K$

<エ, オの解答群>

- 1 0.76 2 0.83 3 1.06 4 1.29 5 1.52 6 1.76
 7 2.00 8 2.24 9 2.48 10 2.72 11 3.01 12 3.59
 13 3.79 14 4.20 15 4.62

II 原子番号が 以上の原子核では、外からの刺激なしに核分裂が起こることがあり、これを自発核分裂という。この過程は α 壊変と競合して起こり、一般に α 壊変の確率のほうが高い。自発核分裂の部分半減期は が増すとともに急激に減少する。中性子線源として利用される ^{252}Cf は、半減期が2.65年であり、自発核分裂の割合が3.1%で核分裂に伴い高速中性子を放出する。核分裂当たりの中性子放出数は平均で3.76個である。従って、1gの ^{252}Cf から毎秒放出される中性子数は $\times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ となる。ただし、1年 $=3.16 \times 10^7 \text{ s}$ とする。

このような中性子線源から放出された高速中性子は原子核と衝突し運動エネルギーの一部を与えて散乱する。原子核との衝突が弾性衝突である場合は、原子核内部のエネルギーに変化は起こらず、入

射中性子と原子核の間にはエネルギー並びに運動量の保存則が成り立つ。原子核の質量数を A 、衝突の前後における中性子のエネルギーをそれぞれ E_1 及び E_2 とすると、衝突後の中性子の取りうるエネルギー範囲は、

$$\boxed{L} \leq E_2 \leq \boxed{M}$$

となり、このエネルギー範囲で一様な頻度分布となる。ただし、

$$A = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

である。標的となる原子核が三重水素 (^3H) の場合には、衝突後の三重水素の平均エネルギー \bar{E}_R は、

$$\bar{E}_R = \boxed{\text{キ}} E_1$$

となる。

<J, K の解答群>

1 84	2 88	3 92	4 96	5 質量
6 原子番号	7 核子数	8 中性子数	9 半減期	10 核力

<カ, キの解答群>

1 0.14	2 0.26	3 0.38	4 0.50	5 0.62	6 0.74
7 0.86	8 0.98	9 1.6	10 1.9	11 2.1	12 2.3
13 3.7	14 4.1	15 4.5			

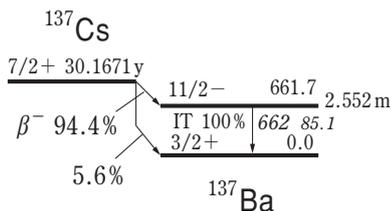
<L, M の解答群>

1 0	2 $0.5 E_1$	3 E_1	4 $A E_1$	5 $A^{-1} E_1$
6 $(1+A) E_1$	7 $(1+A^{-1}) E_1$	8 $(1-A) E_1$	9 $(1-A^{-1}) E_1$	

[解答]

- I A-2 B-8 C-10 D-3 E-8 F-11 G-3 H-8 I-6
 ア-3 イ-11 ウ-7 エ-12 オ-13

注) ^{137}Cs は下図のような壊変をする。



(「11 版アイソトープ手帳」日本アイソトープ協会より)

F：内部転換電子のエネルギーは、 γ 線のエネルギーより内部転換電子となる軌道電子の結合エネルギーの分だけ低くなる。

G：1 回の遷移で内部転換が起こる割合を Γ_e とすると、

$$\Gamma_g + \Gamma_e = 1 \quad \text{および} \quad a_T = \Gamma_e / \Gamma_g$$

であるから、

$$\Gamma_g + a_T \Gamma_g = 1$$

$$\therefore \Gamma_g = \frac{1}{1+a_T}$$

H: Gの解答より,

$$\Gamma_X = \omega_K \alpha_K \Gamma_g = \frac{\omega_K \alpha_K}{1 + \alpha_T}$$

I: K軌道に対する蛍光収率は, 原子番号の大きい原子ほど大きい。

ア: ^{137}Cs から放出される γ 線のエネルギーは 662 keV であるから,

$$\begin{aligned} 662[\text{keV}] &= (662 \times 10^3) \times (1.6 \times 10^{-19}) [\text{J}] \\ &= 1.06 \times 10^{-13} [\text{J}] \end{aligned}$$

イ: ^{137}Cs は壊変割合 $1 - 0.054 = 0.946$ で ^{137}Ba の励起状態へ壊変する。

いま ^{137}Cs 点線源の放射能は $5 \times 10^9 \text{ Bq}$ であるから, γ 線の放出割合は,

$$0.946 \times (5 \times 10^9) \times \Gamma_g = 4.73 \times 10^9 \times \Gamma_g [\text{s}^{-1}]$$

ウ: 半径 1 m の球の表面積は $4 \times 3.14 \text{ m}^2$ であるから, 点線源から 1 m 離れた点における γ 線のフルエンス率は, イの解答より,

$$\frac{4.73 \times 10^9 \times \Gamma_g}{4 \times 3.14} = 3.77 \times 10^8 \times \Gamma_g [\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$$

エ: Gの解答より,

$$\Gamma_g = \frac{1}{1 + \alpha_T} = \frac{1}{1 + 0.11} = 0.90$$

γ 線のエネルギーフルエンス率は, γ 線のエネルギーとフルエンス率の積であるから, アとウの解答より,

$$(1.06 \times 10^{-13}) \times (3.77 \times 10^8 \times 0.90) = 3.59 \times 10^{-5} [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$$

オ: 電子平衡が成立するとき, 空気の吸収線量率は, 空気の質量エネルギー吸収係数と γ 線のエネルギーフルエンス率の積となるから, エの解答より,

$$\begin{aligned} (2.93 \times 10^{-3}) \times (3.59 \times 10^{-5}) & [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \\ &= 1.05 \times 10^{-7} [\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}] \\ &= (1.05 \times 10^{-7}) \times (60 \times 60) [\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}] \\ &= 3.79 \times 10^{-4} [\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}] \end{aligned}$$

II J-3 K-6 カ-12 キ-3 L-4 M-3

注) J: 自然界に存在する核種では, 原子番号が 92 であるウランの自発核分裂が観測される。

K: 原子核の陽子数が大きくなると, クーロン力による反発エネルギーが大きくなる。この反発エネルギーのために自発核分裂が起こる。 ^{238}U の自発核分裂の部分半減期は 8×10^{15} 年, ^{244}Cm の部分半減期は 1.4×10^7 年, ^{254}Fm の部分半減期は 200 日で, 原子番号が大きくなると急激に部分半減期が短くなる。

カ: 1 g の ^{252}Cf の原子数を N とすると,

$$N = \frac{1 \times 6.02 \times 10^{23}}{252} = 2.39 \times 10^{21}$$

であるから, 1 g の ^{252}Cf の壊変率 $-dN/dt$ は,

$$-\frac{dN}{dt} = \frac{0.693}{2.65 \times (3.16 \times 10^7)} N = 1.98 \times 10^{13} [\text{s}^{-1}]$$

よって, 1 g の ^{252}Cf から毎秒放出される中性子数は,

$$(1.98 \times 10^{13}) \times 0.031 \times 3.76 = 2.3 \times 10^{12} [\text{s}^{-1}]$$

L: 原子核の質量を M , 中性子の質量を m , 重心系での中性子の散乱角を ϕ とすると, 弾性衝突によ

り原子核の受ける反跳エネルギーは

$$E_1 - E_2 = \frac{2mM}{(m+M)^2} (1 - \cos \phi) E_1$$

と表せる。 E_2 が最小となるのは、反跳エネルギーが最大するとき、すなわち正面衝突のときであるから、 $\phi = \pi$ である。また、 $M/m = A$ であるから、

$$E_1 - E_2 = \frac{2A}{(A+1)^2} \times 2E_1$$

$$\therefore E_2 = \frac{(A+1)^2 - 4A}{(A+1)^2} E_1 = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} E_1 = \Lambda E_1$$

M: E_2 が最大となるのは、弾性衝突により原子核の受ける反跳エネルギーが最小のとき、すなわち反跳エネルギー $E_1 - E_2 = 0$ のときである (このとき、重心系での中性子の散乱角 $\phi = 0$)。したがって、 $E_2 = E_1$

キ: L と M の解答より E_R は、 $\Lambda E_1 \leq E_2 \leq E_1$ という E_2 のエネルギー範囲における原子核の反跳エネルギー $E_1 - E_2$ の平均値であるから、

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{\int_{E_2=\Lambda E_1}^{E_2=E_1} (E_1 - E_2) dE_2}{E_1 - \Lambda E_1} = \frac{[E_1 E_2 - E_2^2/2]_{E_2=\Lambda E_1}^{E_2=E_1}}{E_1 - \Lambda E_1} \\ &= \frac{(E_1^2 - E_1^2/2) - (\Lambda E_1^2 - \Lambda^2 E_1^2/2)}{E_1 - \Lambda E_1} \\ &= \frac{1 - 2\Lambda + \Lambda^2}{2(1 - \Lambda)} E_1 \\ &= \frac{1 - \Lambda}{2} E_1 \end{aligned}$$

ここで、三重水素の場合 $A = 3$ であるから、

$$\Lambda = \left(\frac{3-1}{3+1} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

したがって、 $E_R = 0.38 E_1$

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

I 荷電粒子線の発生には加速器が利用される。加速器は直流電場を用いるものと高周波電場を用いるものに大別できる。

直流電場を用いるものは A と呼ばれる。加速電極の両端の電圧を V とし、荷電粒子の質量を M 、電荷を ze とすると、真空中で荷電粒子の得るエネルギー E は、

$$E = \text{ア}$$

で与えられる。すなわち、2 MV の電圧の A で重陽子および 2 価のヘリウムイオン (${}^4\text{He}^{2+}$) を加速すると、それぞれのエネルギー E は イ および ウ MeV であり、またこのとき重陽子の速度 v_d のヘリウムイオンの速度 v_{He} に対する比 (v_d/v_{He}) は エ である。

一方、高周波電場を用いる加速器には、荷電粒子を一对の電極で何度も加速するタイプと、複数の電極を通過させ加速するタイプがある。前者、後者の代表例として、それぞれ B および C がある。いずれのタイプでも、正イオンを加速するには、正イオンの進行方向と電場の向

きを一致させる必要があることから、これを満たす周波数の高周波電場が用いられる。では、一定で一様な磁場 B により荷電粒子は力を受け円運動をする。このときの粒子(質量 M , 電荷 ze)の角速度を ω とし、円の半径を r とすると、非相対論的速度の範囲では、力はであり、これが円運動の向心力に等しいことから、 $\omega =$ を得る。したがって加速粒子の角速度は一定であり、加速に用いられる高周波電場の周波数はとなる。

<A~Dの解答群>

- | | | | |
|---------|-----------|-----------|--------------|
| 1 レーザー | 2 シンクロトロン | 3 サイクロトロン | 4 ベータトロン |
| 5 クーロン | 6 ローレンツ | 7 フレミング | 8 ファンデルワールス |
| 9 線形加速器 | 10 円型加速器 | 11 静電型加速器 | 12 タンDEM型加速器 |

<アの解答群>

- | | | | | |
|---------|------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 zeV | 2 $\frac{ze}{V}$ | 3 $\frac{zeV}{M}$ | 4 $\frac{ze}{MV}$ | 5 $zeMV$ |
|---------|------------------|-------------------|-------------------|----------|

<イ~エの解答群>

- | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|
| 1 0.1 | 2 0.2 | 3 0.5 | 4 0.6 | 5 0.8 | 6 1 | 7 2 | 8 3 |
| 9 4 | 10 5 | 11 6 | 12 7 | 13 8 | 14 9 | 15 10 | |

<オ~クの解答群>

- | | | | | | | |
|------------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|
| 1 zeV | 2 $\frac{ze}{V}$ | 3 $\frac{zeV}{M}$ | 4 $\frac{ze}{MV}$ | 5 $zeMV$ | 6 $\frac{zeB}{M}$ | 7 $\frac{zeB}{\pi M}$ |
| 8 $\frac{zeB}{2\pi M}$ | 9 $zeBr\omega$ | 10 $\frac{zeBr}{\omega}$ | 11 $\frac{zeBr\omega}{M}$ | 12 $\frac{zeBr}{M\omega}$ | 13 $Mr\omega^2$ | 14 $\frac{Mr}{\omega^2}$ |
| 15 $\pi Mr\omega^2$ | | | | | | |

II 加速器で得られた荷電粒子線を物質に照射した際の吸収線量評価は次のようになされる。

単色の荷電粒子線の場合、吸収線量は荷電粒子線のと物質のの積によって得ることができる。

次に物質中に小さな空洞を作りガスが封入された場合を考える。荷電粒子線のに比べ空洞が十分小さい場合、荷電粒子線のは不変と考えられ、物質と空洞ガスの吸収線量の比は、の比と等しくなる。これをという。この関係を用いると空洞中のガスの電離量から物質中での吸収線量が求まる。

例えば、物質が組織等価物質、空洞が 1 cm^3 の空気(20℃, 1気圧)とし、の成立する条件下で、空洞に 300 MeV の陽子線を照射した際に、空洞空気より 26 nC の電荷を得たとする。0℃, 1気圧の空気の密度を $1.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, W 値を 34 eV とすると、20℃, 1気圧の空気の吸収線量は Gy である。は概ね物質の平均の質量数に対する原子番号の比($\langle Z/A \rangle$)に比例する。空気および組織等価物質の $\langle Z/A \rangle$ をそれぞれ 0.50 および 0.55 とすると、空洞を組織等価物質に置き換えた場合の吸収線量は Gy となる。

<E~Hの解答群>

- | | | | |
|------------------|------------------|----------|---------|
| 1 飛程 | 2 阻止能 | 3 壁効果 | 4 カーマ |
| 5 空洞原理 | 6 カーマ係数 | 7 ビルドアップ | 8 フルエンス |
| 9 平均質量阻止能 | 10 エネルギーフルエンス | | |
| 11 平均質量エネルギー吸収係数 | 12 平均質量エネルギー転移係数 | | |
| 13 過渡平衡 | | | |

<ケ, コの解答群>

- | | | | | | | |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 1 0.33 | 2 0.36 | 3 0.40 | 4 0.57 | 5 0.63 | 6 0.66 | 7 0.69 |
| 8 0.73 | 9 0.80 | 10 0.88 | | | | |

〔解答〕

I A-11 B-3 C-9 D-6 ア-1 イ-7 ウ-9 エ-6 オ-9
カ-13 キ-6 ク-8

注) イ: 重陽子は $z = 1$ であり, また $V = 2[\text{MV}]$ であるから, アの解答より,

$$E = zeV = 1 \times 2[\text{MeV}] = 2[\text{MeV}]$$

ウ: 2 価のヘリウムイオンは $z = 2$ であり, また $V = 2[\text{MV}]$ であるから, アの解答より,

$$E = zeV = 2 \times 2[\text{MeV}] = 4[\text{MeV}]$$

エ: 重陽子の質量を m_a , ヘリウムイオンの質量を m_{He} とすると, それぞれのエネルギーは, イとウの解答より, 次のように表せる。

$$\frac{1}{2} m_a v_a^2 = 2[\text{MeV}], \quad \frac{1}{2} m_{\text{He}} v_{\text{He}}^2 = 4[\text{MeV}]$$

$$\therefore \frac{m_a v_a^2}{m_{\text{He}} v_{\text{He}}^2} = \frac{1}{2}$$

ここで, $m_a/m_{\text{He}} = 2/4 = 1/2$ であるから, $v_a/v_{\text{He}} = 1$ となる。

B: サイクロトロンでは, 一様磁場中にディー電極とよばれる D 型の電極を対向させ電極間で荷電粒子の加速が行われる。加速されるたびに荷電粒子の軌道半径は大きくなるが, 荷電粒子の回転周波数は一定に保つことができ, ディー電極に一定周波数の高周波を加え定常的に加速することが可能である。

C: 線形加速器では, 荷電粒子を加速するための複数の円筒状の電極が直線状に並べられている。電極に交互に正負の一定周波数の高周波電圧をかけたり, 加速軸上に高周波の電波を進行させるなどして, 荷電粒子の加速を行う。

オ: 電荷 ze の荷電粒子の速度を v とおくと, 磁場 B の中で受けるローレンツ力 F は $F = zeBv$ で与えられる。円運動において $v = r\omega$ であるから,

$$F = zeBv$$

カ: 質量 M の粒子の円運動の向心力 F は $F = Mr\omega^2$ で与えられる。

キ: オとカの解答より, $zeBv = Mr\omega^2$

$$\therefore \omega = zeB / M$$

ク: 周波数 f は $f = \omega/2\pi$ で与えられるから, キの解答より,

$$f = zeB / 2\pi M$$

II E-8 F-9 G-1 H-5 ケ-8 コ-9

注) ケ: 放射線を照射した際に空洞ガス中に生成する電子-イオン対数を N , ガスの質量を m [kg], W 値を W [J] とすると, ガスの吸収線量 D_g [Gy] は $D_g = WN/m$ で与えられる。いま, 空洞ガスが問題文にある空洞空気の場合,

$$W = 34[\text{eV}] = 34 \times (1.6 \times 10^{-19}) [\text{J}]$$

$$N = \frac{26 \times 10^{-9}}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$m = \frac{1.3}{10^{2 \times 3}} \times \frac{273}{273 + 20} = 1.2 \times 10^{-6} [\text{kg}]$$

したがって, 空洞空気の吸収線量は $D_g = 0.73[\text{Gy}]$ となる。

コ：組織等価物質の吸収線量を D_m [Gy] とすると、Fの解答より、空洞空気の吸収線量 D_g [Gy] との比は

$$\frac{D_m}{D_g} = \frac{0.55}{0.5}$$

となる。したがって、ケの解答より

$$D_m = \frac{0.55}{0.5} D_g = 0.80 \text{ [Gy]}$$

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、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。

I 地球形成時から現在も存在している天然放射性同位体からなる壊変系列は3つあり、これらは放射壊変を繰り返して、最終的には鉛の安定同位体になる。各系列のうち最初の同位体から最後の安定同位体に至るまでの α 壊変の回数が最も多いのは、□A□系列の8回であり、最も少ないのは□B□系列である。また、鉛の安定同位体のうち、質量数□C□の同位体は天然の放射壊変系列とは無関係である。

ウラン鉱物中で ^{238}U と、それと永続平衡にある ^{230}Th の質量をそれぞれ M_U 、 M_{Th} 、放射能を A_U 、 A_{Th} 、半減期を $T_U=4.5 \times 10^9$ 年、 $T_{Th}=7.5 \times 10^4$ 年とすると、 ^{238}U と ^{230}Th の放射能比 $\frac{A_{Th}}{A_U}$ は次のように表せる。

$$\frac{A_{Th}}{A_U} = \square D \square$$

したがって、その鉱物に含まれている1.0gの ^{238}U と永続平衡にある ^{230}Th の質量はおおよそ□E□ μg となる。

<A, Bの解答群>

- 1 アクチニウム 2 トリウム 3 プロトアクチニウム 4 ウラン
5 ネプツニウム

<Cの解答群>

- 1 201 2 202 3 203 4 204 5 205 6 206 7 207 8 208
9 210 10 212

<Dの解答群>

- 1 $\frac{230}{238} \cdot \frac{M_{Th}}{M_U} \cdot \frac{T_U}{T_{Th}}$ 2 $\frac{230}{238} \cdot \frac{M_{Th}}{M_U} \cdot \frac{T_{Th}}{T_U}$ 3 $\frac{230}{238} \cdot \frac{M_U}{M_{Th}} \cdot \frac{T_U}{T_{Th}}$ 4 $\frac{230}{238} \cdot \frac{M_U}{M_{Th}} \cdot \frac{T_{Th}}{T_U}$
5 $\frac{238}{230} \cdot \frac{M_{Th}}{M_U} \cdot \frac{T_U}{T_{Th}}$ 6 $\frac{238}{230} \cdot \frac{M_{Th}}{M_U} \cdot \frac{T_{Th}}{T_U}$ 7 $\frac{238}{230} \cdot \frac{M_U}{M_{Th}} \cdot \frac{T_U}{T_{Th}}$ 8 $\frac{238}{230} \cdot \frac{M_U}{M_{Th}} \cdot \frac{T_{Th}}{T_U}$

<Eの解答群>

- 1 1.2 2 1.4 3 1.6 4 1.8 5 10 6 12 7 14 8 16
9 18 10 20

II 壊変系列をつくらぬ天然放射性同位体の ^{40}K の半減期は、 1.25×10^9 年 (3.94×10^{16} 秒)である。カリウム1g当たりの ^{40}K の放射能は、おおよそ□ア□Bqとなる。ただし、カリウムの原子量は39.1、 ^{40}K の同位体存在度は0.0117%とする。

^{40}K は、89.1%の分岐比で□F□して安定同位体 ^{40}Ca になり、この部分半減期は、□イ□年である。一方、10.8%の分岐比で□G□し、安定同位体 ^{40}Ar になる。この部分半減期は 1.2×10^{10} 年である。この際、□H□MeVの γ 線を放出する。

岩石が固化した時点では ^{40}Ar を含まず、固化してからの ^{40}K の壊変で生成した ^{40}Ar がすべて岩石中に留まり、しかも岩石が閉じた系を保持できれば ^{40}K と ^{40}Ar の原子数比から岩石の固化年代が決定できる。固化時と現在の ^{40}K の原子数をそれぞれ N_{10} と N_1 、その間の経過時間を t 、 ^{40}K の壊変定数を λ とすると、 $N_1 = N_{10} e^{-\lambda t}$ の関係から固化時の原子数 N_{10} は $N_1 e^{\lambda t}$ となる。したがって、 ^{40}K から生成した ^{40}Ar の原子数、すなわち現在の ^{40}Ar の原子数 N_2 は $\square \text{ I}$ と表され、 N_1 と N_2 が分かれば固化年代が求まる。分析には試料を二分し、一方は質量分析から N_2 を求め、他方は全カリウム量の化学分析から N_1 を求める方法が利用される。また、試料を中性子照射し、 ^{39}K (存在度 93.3%) の $\square \text{ J}$ 反応で ^{39}Ar (半減期 269 年) に変換した後、試料を加熱融解し、 ^{39}Ar と ^{40}Ar の原子数比を質量分析計により測定する方法もある。

<アの解答群>

1 3 2 10 3 30 4 100 5 300 6 1,000

<F, G の解答群>

1 α 壊変 2 β^- 壊変 3 β^+ 壊変 4 EC 壊変 5 核異性体転移

<イの解答群>

1 1.4×10^8 2 2.8×10^8 3 4.2×10^8 4 1.4×10^9 5 2.8×10^9
6 4.2×10^9 7 1.4×10^{10} 8 2.8×10^{10} 9 4.2×10^{10}

<H の解答群>

1 1.10 2 1.33 3 1.46 4 1.53 5 1.64

<I, J の解答群>

1 $0.891 N_1 (e^{\lambda t} - 1)$ 2 $0.891 N_1 (e^{\lambda t} + 1)$ 3 $0.108 N_1 (e^{\lambda t} - 1)$
4 $0.108 N_1 (e^{\lambda t} + 1)$ 5 $N_1 (e^{\lambda t} - 1)$ 6 $N_1 (e^{\lambda t} + 1)$
7 (n, γ) 8 (n, p) 9 (n, 2n) 10 (n, α)

- Ⅲ 上層大気中の ^{14}N と二次宇宙線との核反応で生成する ^{14}C は、半減期 5,700 年 (1.8×10^{11} 秒) であり、考古学的試料などの年代決定に利用されている。その年代決定では、年代未知の試料と標準試料 (基準となる現代炭素) 中の ^{14}C と ^{13}C の炭素同位体原子数比 $\frac{N^{14}\text{C}}{N^{13}\text{C}}$ の比較が行われる。標準試料中の炭素 1 g 当たりの放射能は 0.23 Bq であり、原子数比 $\frac{N^{14}\text{C}}{N^{12}\text{C} + N^{13}\text{C}}$ は 1.2×10^{-12} である。 $\frac{N^{13}\text{C}}{N^{12}\text{C}}$ を 0.011 とすると、標準試料の $\frac{N^{14}\text{C}}{N^{13}\text{C}}$ は $\square \text{ ウ}$ となる。このように同位体比が非常に小さく、また、 ^{14}N のような $\square \text{ K}$ が共存する ^{14}C の測定には、通常の質量分析計の利用は難しい。このため、 ^{14}C と ^{14}N を十分に識別し分離できる加速器質量分析法が開発され、試料炭素 1 mg 程度でその中の ^{14}C 原子数が $10^5 \sim 10^6$ 個程度であれば分析が可能になっている。例えば、ある試料の $\frac{N^{14}\text{C}}{N^{13}\text{C}}$ が 1.38×10^{-11} とすると、その試料の年代はおおよそ $\square \text{ エ}$ 年前となる。

なお、人体には平均して 18 重量%の炭素が含まれている。体重を 70 kg とすると、体内にある ^{14}C の放射能はおおよそ $\square \text{ オ}$ Bq となる。 ^{14}C の他にも、宇宙線による誘導放射性核種には、主に窒素、酸素及び $\square \text{ L}$ の核破砕反応で生成する ^3H 、 ^7Be 、 ^{36}Cl 等も含まれる。

<ウの解答群>

1 1.1×10^{-11} 2 2.4×10^{-11} 3 2.8×10^{-11} 4 3.1×10^{-11} 5 1.1×10^{-10}
6 2.4×10^{-10} 7 2.8×10^{-10} 8 1.1×10^{-9} 9 2.4×10^{-9} 10 3.1×10^{-9}

<K, L の解答群>

1 同重体 2 同素体 3 同中性子体 4 ネオン 5 アルゴン
6 クリプトン

<エ, オの解答群>

1	1,000	2	2,000	3	3,000	4	4,000	5	5,000	6	11,000
7	17,000	8	23,000	9	29,000	10	34,000				

[解答]

I A-4 B-2 C-4 D-5 E-8

注) 親核種の半減期が最も長く、それに続く娘核種以下の半減期がそれよりはるかに短い場合、娘核種のどの半減期よりも十分長い時間経過した後では、永続平衡が成立する。

地球形成時から現在も存在している天然放射性同位体からなる壊変系列は、トリウム系列 ($4n$ 系列), アクチニウム系列 ($4n+3$ 系列), ウラン系列 ($4n+2$ 系列) があり, 同じ系列に属する核種は 4 の整数倍異なる。親核種と最後の鉛の安定同位体は, それぞれ ^{232}Th , ^{208}Pb , ^{235}U , ^{207}Pb , ^{238}U , ^{206}Pb である。各系列の主壊変経路 (分岐比の大きい経路) で見ると, α 壊変の回数はそれぞれ 6 回, 7 回, 8 回となる (壊変系列図参照)。

人工放射性核種が合成されるようになり ($4n+1$ 系列) の存在が確認され, ^{237}Np (半減期 2.14×10^6 年) を親核種とするネプツニウム系列と呼ばれる。最後の安定同位体は鉛ではなく, ^{209}Bi である。鉛の安定同位体の質量数は, 204 (1.4%), 206 (24.1%, U 系列), 207 (22.1%, アクチニウム系列), 208 (32.4%, トリウム系列) の 4 種類があり, 質量数 204 は, 天然の放射壊変系列とは無関係である。

原子数 N の放射性核種の放射能 A とその崩壊定数 (λ), 半減期 (T) の関係式は, 以下のとおりである。

$$A = \lambda N \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$A_{\text{Th}} = N_{\text{Th}} \cdot \frac{\ln 2}{T_{\text{Th}}} \quad \text{であり,} \quad A_{\text{U}} = N_{\text{U}} \cdot \frac{\ln 2}{T_{\text{U}}}$$

$$\frac{A_{\text{Th}}}{A_{\text{U}}} = \frac{N_{\text{Th}} \cdot T_{\text{U}}}{N_{\text{U}} \cdot T_{\text{Th}}}$$

また, 質量: M [g], 質量数: M_A とすると, 原子数 N との関係は, 以下のとおり。

$$N = \frac{M}{M_A} \times 6.02 \times 10^{23} \quad \dots\dots\dots(3)$$

物質質量 [mol] は質量 M [g] を質量数 M_A で除することで求められ, 物質質量にアボカドロ数を乗じたものが原子数となる。

$$\frac{A_{\text{Th}}}{A_{\text{U}}} = \frac{N_{\text{Th}} \cdot T_{\text{U}}}{N_{\text{U}} \cdot T_{\text{Th}}} = \frac{\frac{M_{\text{Th}}}{230} \cdot T_{\text{U}}}{\frac{M_{\text{U}}}{238} \cdot T_{\text{Th}}} = \frac{238 \cdot M_{\text{Th}} \cdot T_{\text{U}}}{230 \cdot M_{\text{U}} \cdot T_{\text{Th}}}$$

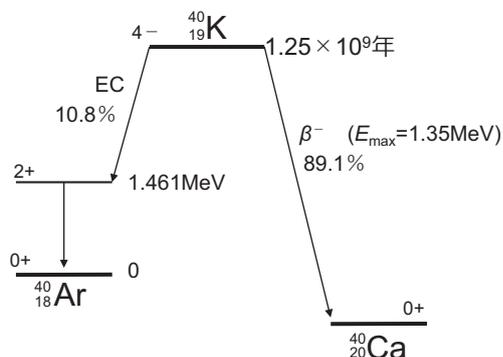
永続平衡にあるので, 各核種の放射能は等しい。

$$\frac{A_{\text{Th}}}{A_{\text{U}}} = 1$$

$$M_{\text{Th}} = \frac{230 \cdot M_{\text{U}} \cdot T_{\text{Th}}}{238 \cdot T_{\text{U}}} = \frac{230 \cdot 1.7.5 \times 10^4}{238 \cdot 4.5 \times 10^9} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ [g]}$$

Ⅱ ア-3 F-2 G-4 イ-4 H-3 I-3 J-8

注) ^{40}K の壊変図式を右に示す。



カリウム 1 g 当たりの ^{40}K 放射能は、I の (1) 式から、

$$A = \frac{1 \times 0.0117 \times 10^{-2}}{39.1} \times 6.02 \times 10^{23} \times \frac{\ln 2}{3.94 \times 10^{16}} = 31.7$$

分岐壊変の際の、全半減期 T と部分半減期 T_1 , T_2 の関係は、次式である。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}$$

$$\frac{1}{1.25 \times 10^9} = \frac{1}{1.2 \times 10^{10}} + \frac{1}{T_2}$$

$$T_2 = 1.395 \times 10^9$$

^{40}K の 1 回の壊変で 10.8% が ^{40}Ar になるので、 ^{40}Ar の原子数は、固化時と現在の ^{40}K 原子数の差に、0.108 をかけたものになる。

$$N_2 = 0.108(N_{10} - N_1) = 0.108 N_1 (e^{\lambda t} - 1)$$

中性子照射による反応は、 $^{39}\text{K}(n, p)^{39}\text{Ar}$ であり、原子番号 (p の数) と質量数 ($p+n$) の数から考察する。質量数は変わらないが、原子番号が 1 減っている。

Ⅲ ウ-5 K-1 L-5 エ-7 オ-3

注) 炭素と窒素の安定同位体の存在量は以下のとおり。

^{12}C	98.93%	^{14}N	99.632%
^{13}C	1.07%	^{15}N	0.368%

上層大気中では、 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 核反応によって、 ^{14}C が生成している。 ^{14}C は、大気中の O と結合して $^{14}\text{CO}_2$ となり、地表に降下し、海水に溶解して炭酸塩になったり、植物によって生物中に取り込まれる。生物が生存中は代謝によって常に環境の ^{14}C 濃度と平衡状態であるが、生物が死ぬと、半減期に従って減少する。

^{14}C は、1940 年後半に Libby らによってその存在が確認され、その後 ^{14}C 利用の年代測定が開発された。 ^{14}C 年代測定法は、5 万年前程度の年代測定によく利用される。

$$\frac{N^{14}\text{C}}{N^{12}\text{C}} = 0.011 \text{ なので、}$$

$$\frac{N^{14}\text{C}}{N^{12}\text{C} + N^{13}\text{C}} = \frac{N^{14}\text{C}}{\frac{N^{13}\text{C}}{0.011} + N^{13}\text{C}} = \frac{N^{14}\text{C}}{\left(\frac{1}{0.011} + 1\right) N^{13}\text{C}} = 1.2 \times 10^{-12}$$

$$\frac{N^{14}\text{C}}{N^{13}\text{C}} = 1.1 \times 10^{-10}$$

試料の年代は、 ^{14}C の原子数がどの程度減っているかを知ればよいので、標準試料との比をとる。

$$\frac{N^{14}\text{C}(\text{試料})}{N^{13}\text{C}(\text{標準})} = \frac{1.38 \times 10^{-11}}{1.1 \times 10^{-10}} = 0.125 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5700}}$$

$$t = 17100$$

人体 70 kg には、平均して $70 \times 0.18 = 12.6 \text{ kg}$ の炭素がある。標準試料の炭素 1 g 当たりの放射能は 0.23 Bq であるので、 $12.6 \times 1000 \times 0.23 = 2898 \text{ Bq}$ となる。宇宙線は主に成層圏で大気成分と核破砕反応を起こす。乾燥大気的主要成分は、窒素 (78.084%)、酸素 (20.9476%)、アルゴン (0.934%)、 CO_2 (0.032%)、 H_2O (変動する) である。

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 現在、118 種類の元素が発見されている。天然に存在する元素のうち、最も大きい原子番号は ア であるが、原子番号 43 の A と原子番号 61 の B は天然には存在しない。原子番号が ア を超える元素は C 元素と呼ばれ、すべて人工放射性元素である。原子番号が 104 以上の元素は D 元素と呼ばれ、重イオン核融合反応によって合成されることが多い。例えば、113 番元素ニホニウム (Nh) は、加速器で加速した ^{70}Zn イオンを ^{209}Bi に照射して、 $^{209}\text{Bi} (^{70}\text{Zn}, n)$ ^{278}Nh 反応により初めて直接合成された。 ^{278}Nh の半減期は 1.4 ミリ秒、また、この反応の核反応断面積は $2.2 \times 10^{-14} \text{ b}$ (バーン) と見積もられており、例えば、 $209 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ の ^{209}Bi 標的に $2 \times 10^{13} \text{ 個 s}^{-1}$ で ^{70}Zn を照射すると、 イ 日間当たり 1 個の割合で ^{278}Nh が合成されることになる。

<ア, イの解答群>

1 10 2 44 3 65 4 73 5 87 6 92 7 101 8 110

<A, B の解答群>

1 Ac 2 At 3 Fr 4 Pm 5 Rn 6 Tc 7 U

<C, D の解答群>

1 超アクチノイド 2 超ウラン 3 超ネプツニウム 4 超プルトニウム
5 超ランタノイド 6 アクチニウム系列 7 ウラン系列

II 図 1 に示す核図表は、陽子数を縦軸に中性子数を横軸に並べた核種の表で、壊変様式やその娘核種を調べたり、天然に存在しない核種をどのような核反応で製造するかを計画するとき、便利な表である。例えば、 ^{72}Ga の E による娘核種は、左上に位置する ^{72}Ge である。また、酸化ガリウムを標的とした場合、 ^{72}Ga は左に位置する ^{71}Ga の F 反応で製造することができる。

半減期が 244 日 (2.11×10^7 秒) の ^{65}Zn は ^{64}Zn の F 反応、または ^{65}Cu の G 反応で製造することができる。 G 反応による製造では、 ^{65}Zn を標的から化学分離することで ^{65}Zn は無担体の状態となり、その比放射能 (亜鉛の単位質量当たりの放射能) は F 反応による製造の場合と比べて大きくなる。例えば、2 g の亜鉛金属と 0.2 g の銅金属を用いてそれぞれ 10 MBq の ^{65}Zn を製造した場合、後者の ^{65}Zn の比放射能は前者の約 ウ 倍となる。また、 F 反応により生じた ^{65}Zn の比放射能は H するが、 G 反応による ^{65}Zn の比放射能は I となる。

^{65}Zn を銅金属標的から化学分離するにはイオン交換樹脂の利用が便利である。イオン交換樹脂への吸着のしやすさは分配係数を用いて表される。分配係数は、対象元素の交換平衡時の樹脂相での濃度と溶液相での濃度の比として定義される。例として、 $\text{Cu}(\text{II})$ と $\text{Zn}(\text{II})$ の陰イオン交換樹脂への分配

係数の塩酸濃度に対する変化を図 2 に示す。これを参考にすると、次の化学操作で銅と亜鉛を分離することができる。

銅金属標的を で溶解後、 を加えると銅と亜鉛はともに水酸化物として沈殿する。このとき を過剰に加えすぎると生成した沈殿は溶解してしまうので、注意が必要である。この沈殿を mol・L⁻¹ の塩酸溶液にして、陰イオン交換樹脂カラムに通すと Zn(II) は最も樹脂に吸着し、Cu(II) は吸着せずカラムから流出するので、亜鉛と銅が分離できる。0.01 mol・L⁻¹ の塩酸を流すと亜鉛は樹脂から溶離する。

⁶⁵ Ge 31 s	⁶⁶ Ge 2.3 h	⁶⁷ Ge 19 m	⁶⁸ Ge 271 d	⁶⁹ Ge 1.6 d	⁷⁰ Ge 20.8%	⁷¹ Ge 11.4 d	⁷² Ge 27.5%	⁷³ Ge 7.7%	⁷⁴ Ge 36.3%
⁶⁴ Ga 2.3 m	⁶⁵ Ga 15 m	⁶⁶ Ga 9.5 h	⁶⁷ Ga 3.3 d	⁶⁸ Ga 1.1 h	⁶⁹ Ga 60.1%	⁷⁰ Ga 21 m	⁷¹ Ga 39.9%	⁷² Ga 14 h	⁷³ Ga 4.9 h
⁶³ Zn 39 m	⁶⁴ Zn 48.6%	⁶⁵ Zn 244 d	⁶⁶ Zn 27.9%	⁶⁷ Zn 4.1%	⁶⁸ Zn 18.8%	⁶⁹ Zn 56 m	⁷⁰ Zn 0.6%	⁷¹ Zn 2.4 m	⁷² Zn 47 h
⁶² Cu 9.7 m	⁶³ Cu 69.2%	⁶⁴ Cu 13 h	⁶⁵ Cu 30.8%	⁶⁶ Cu 5.1 m	⁶⁷ Cu 2.6 d	⁶⁸ Cu 31 s	⁶⁹ Cu 2.9 m	⁷⁰ Cu 5 s	⁷¹ Cu 20 s

※灰色は安定核種、白色は放射性核種を表す。

※安定核種には同位体存在度、放射性核種には半減期 (s : 秒, m : 分, h : 時, d : 日) を添えた。

図 1 陽子数 29~32, 中性子数 33~42 の核図表

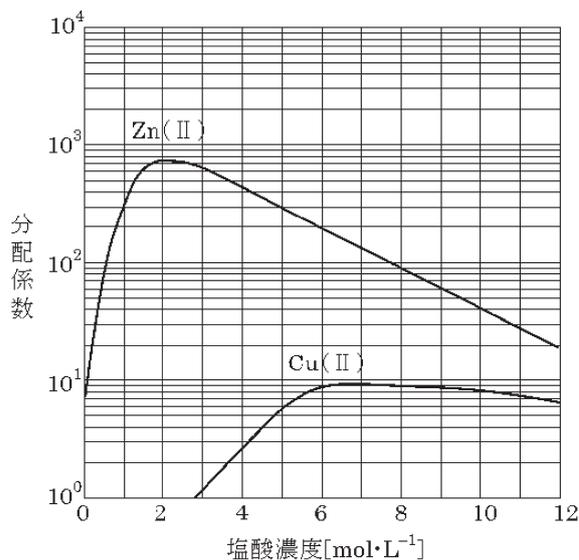


図 2 塩酸溶液における Zn(II) と Cu(II) の陰イオン交換樹脂への分配係数

<E の解答群>

- 1 α 壊変 2 β^- 壊変 3 β^+ 壊変 4 EC 壊変 5 核異性体転移

<F, G の解答群>

- 1 (n, γ) 2 (n, p) 3 (n, 2n) 4 (p, n) 5 (p, α) 6 (γ , n)
7 (γ , p)

<ウ の解答群>

- 1 1×10^1 2 2×10^3 3 6×10^7 4 4×10^8 5 2×10^9

<H, I の解答群>

- 1 時間に反比例して減少 2 時間とともに指数関数的に減少
3 時間に比例して増加 4 時間とともに指数関数的に増加
5 時間に依存せず一定

<J, K の解答群>

- 1 アンモニア水 2 塩化アンモニウム水溶液 3 希塩酸 4 希硝酸
5 水酸化ナトリウム水溶液

<エ の解答群>

- 1 1 2 2 3 4 4 6 5 8 6 10 7 12

Ⅲ 半減期が短い核種を長期間に何度も使用したい場合、その都度製造するのは不便である。そこで、長半減期の核種を製造し、これの娘核種として入手する方法がある。例えば、半減期が 1.1 時間の ^{68}Ga が必要なときは、半減期 271 日の ^{68}Ge を製造し、カラムに吸着させる。 ^{68}Ge の半減期は娘核種の半減期の 1,000 倍以上長いので、十分な時間が経過すると、この 2 つの核種は放射平衡状態に達する。 ^{68}Ge と ^{68}Ga の壊変定数をそれぞれ λ_1 と λ_2 、最初の時刻では ^{68}Ge のみ存在しその原子数を N_{10} とすると、時間 t 経過した時刻での ^{68}Ga の原子数 N_2 は次式で与えられる。

$$N_2 = \boxed{\text{L}} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

^{68}Ge の壊変により時間とともに生成する ^{68}Ga のみをカラムから繰り返し溶離することをミルクィングといい、 ^{68}Ga の半減期よりも長期間にわたって ^{68}Ga を手軽に入手することができる。 ^{68}Ge の放射能が 20 MBq であるとき、 ^{68}Ga を溶離後約 14 時間経つとカラム中の ^{68}Ga の放射能は極大に達し、この ^{68}Ga の放射能は、 $\boxed{\text{M}}$ MBq となる。 ^{68}Ga は β^+ 壊変する核種で、特に陽電子放射断層撮影 (PET) による診断での利用が期待されている。PET は、互いに $\boxed{\text{N}}$ 度方向に $\boxed{\text{O}}$ 本放出される $\boxed{\text{P}}$ keV の γ 線を測定することで、 β^+ 壊変する核種の分布を断層撮影する核医学診断の方法である。

<L の解答群>

- 1 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ 2 $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ 3 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ 4 $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ 5 $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1}$ 6 $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1}$

<M~P の解答群>

- 1 0.003 2 0.1 3 2 4 10 5 20 6 25 7 30 8 40
9 45 10 90 11 180 12 270 13 511 14 1,022 15 1,333

[解答]

- I ア-6 イ-2 A-6 B-4 C-2 D-1

注) ア, A~D: 周期表の発表以来、原子番号 43 の Tc と原子番号 61 の Pm は、長らく安定同位体が発見されず「欠員元素」と呼ばれていたが、人工的に生成されるようになった現在、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は医療に、 ^{147}Pm は β 線厚さ計等の線源に利用されている。

アクチノイドは、原子番号 89 の Ac から 103 の Lr までの 15 元素の総称であり、その 1 つである原子番号 92 の U は、天然に存在する元素としては最も原子番号が大きい。したがって、原子番号 93 の Np 以降の超ウラン元素は、すべて人工放射性核種である。原子番号 104 以降の超アクチノイド元素は、すべて半減期が短い放射性元素であり、より大きな原子番号の元素を合成する研究が現在も進められている。

イ：毎秒 n 個の入射粒子と 1 cm^2 あたり N 個の標的核のある場合の核反応生成率 Y は

$$Y = \sigma n N$$

で与えられ、 σ は核反応断面積、単位は b (バーン) で $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ である。 ^{209}Bi 標的 1 cm^2 あたりの原子数 N は

$$N = \frac{209 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{23}}{209} = 6 \times 10^{17} \text{ [個]}$$

したがって、 ^{209}Bi に ^{70}Zn イオンを照射し ^{278}Nh が合成される確率は

$$Y = 2.2 \times 10^{-14} \times 10^{-24} \times 2 \times 10^{13} \times 6 \times 10^{17} = 2.64 \times 10^{-7} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

となり、 Y の逆数より、 ^{278}Nh が 1 個合成されることが期待される時間は

$$1/2.64 \times 10^{-7} \approx 3.79 \times 10^6 \text{ [s]}$$

すなわち約 44 (日) となる。

II E-2 F-1 G-4 ウ-3 H-2 I-5 J-4 K-1 エ-2

注) E ~ G: ^{72}Ga の娘核種 ^{72}Ge は、 ^{72}Ga の原子番号が 1 増加し、質量数は変わらないことから、 ^{72}Ga は β^- 壊変核種であることがわかる。同様に、 ^{71}Ga との核反応で ^{72}Ga を製造するには、原子番号が変化せず質量数が 1 増加する (n, γ) 反応を用いることになる。

^{65}Zn は ^{64}Zn との (n, γ) 反応の他、 ^{65}Cu との (p, n) 反応により生成する。

ウ: 1 Bq の放射性核種の質量 m は、次式で表される (参考図書: 「アイソトープ手帳 11 版」日本アイソトープ協会)。

$$m = 8.62 \times 10^{-21} M T$$

$$m: 1 \text{ Bq の質量 [g]} \quad T: \text{半減期 [時間]} \quad M: \text{原子質量 (質量数で代用できる)}$$

したがって、 10 MBq の ^{65}Zn の質量 m は

$$m = 10 \times 10^6 \times 8.62 \times 10^{-21} \times 65 \times 24 \times 24 \approx 3.28 \times 10^{-8} \text{ [g]}$$

^{64}Zn との (n, γ) 反応で製造した ^{65}Zn の比放射能は

$$\frac{10 \times 10^6}{2 + 3.28 \times 10^{-8}} \approx 5 \times 10^6 \text{ [Bq / g]}$$

これに対し、 ^{65}Cu との (p, n) 反応により製造した ^{65}Zn は無担体の状態であるため、比放射能は

$$\frac{10 \times 10^6}{3.28 \times 10^{-8}} \approx 3 \times 10^{14} \text{ [Bq / g]}$$

よって、 ^{64}Zn との (n, γ) 反応で製造した ^{65}Zn の約 6×10^7 倍の比放射能となる。

J, K: 水素よりイオン化傾向の小さい金属である Cu は、酸化力を持たない塩酸とは反応せず、酸化力のある希硝酸に溶解する。これに少量のアンモニア水を加えると、Cu(II) と Zn(II) の水酸化物沈殿が生じる。



III L-3 M-5 N-11 O-3 P-13

注) 時間 t が経過した時刻での ^{68}Ga の原子数 N_2 は次式で与えられる。

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

^{68}Ge と ^{68}Ga のように、親核種の半減期 T_1 が娘核種の半減期 T_2 より極めて長い場合には、 $(\lambda_2 - \lambda_1) = \lambda_2$ すなわち $(T_1 - T_2) = T_1$ とみなせるので、親核種の放射能 A_1 、娘核種の放射能 A_2 とすると

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{T_2}{T_1} \longrightarrow N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 \longrightarrow A_1 = A_2$$

の永続平衡が成立する。

放射能 A_1 の親核種の壊変による娘核種の放射能 A_2 は次式で与えられる。

$$A_2 = A_1 (1 - e^{-\lambda_2 t}) = A_1 \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_2}} \right]$$

(参考図書：「アイソトープ手帳 11 版」日本アイソトープ協会)

経過時間とともに A_2 は A_1 に近づき、娘核種の半減期 T_2 の 10 倍程度の時間経過時には、ほぼ $A_2 = A_1$ となる。

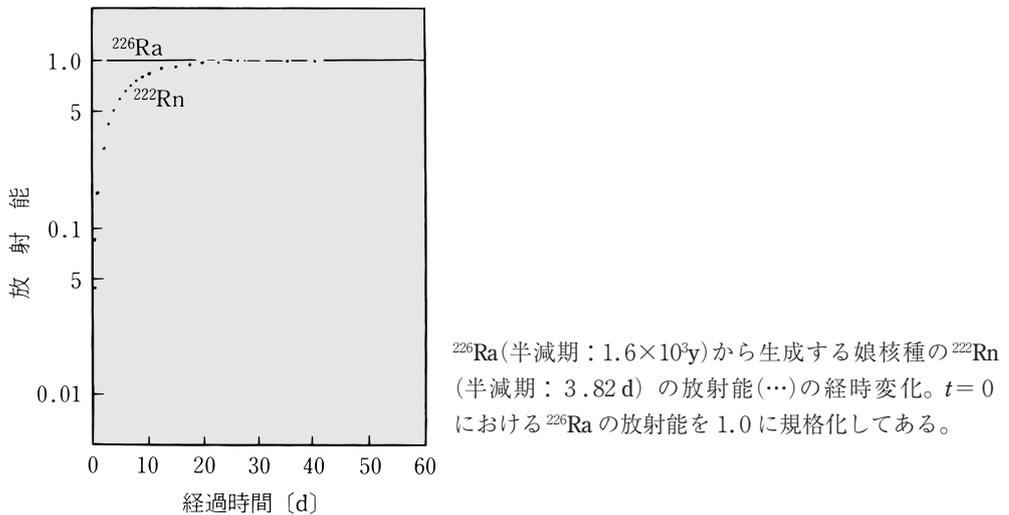


図 永続平衡の例

(「7 版増補版・放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) より)

PET は Positron Emission Tomography (陽電子放射断層撮影) の略語で、診断薬として極めて短半減期の陽電子放出核種が使用される。

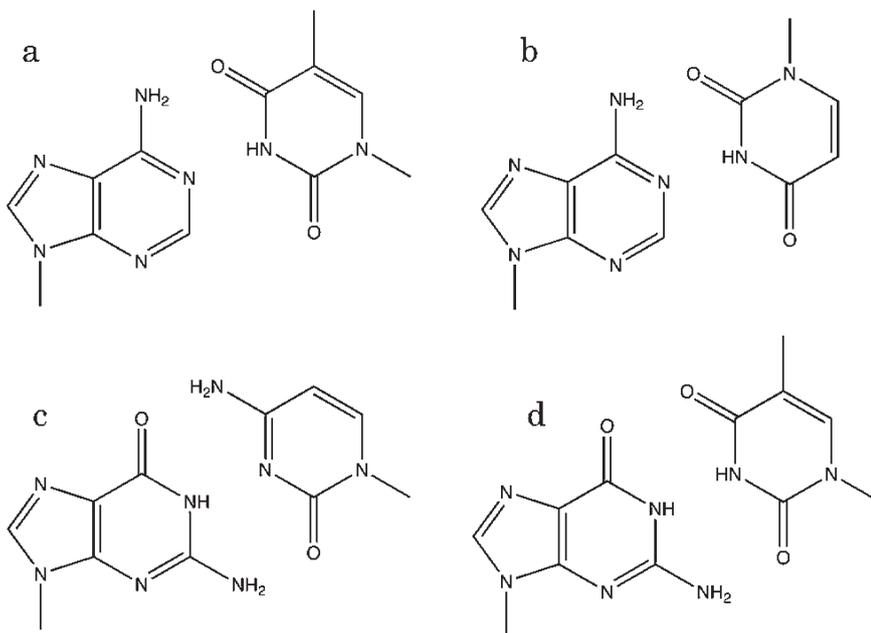
問 5 次の I ~ III の文章の の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。

I 細胞は分裂を繰り返すことによって増殖する。細胞が分裂を終えてから次の分裂を終えるまでを細胞周期といい、4 つの時期に分けられる。この中で、DNA 複製が行われる時期を A 期、細胞分裂が行われる時期を B 期という。

A 期における DNA 複製は次のようにして行われる。まず、DNA の 2 本鎖がほどけて 1 本鎖となり、これを鋳型として、塩基の相補性に基づいて、もう 1 本の鎖が合成される。そのとき、新し

い DNA 鎖は必ず **C** の方向に合成される。鋳型となる 1 本鎖のある位置にグアニンがあったとすると、もう 1 本の鎖の向かい合った位置には **D** が入る。下の図の a~d のうち、グアニンと **D** の塩基対を正しく表しているのは **E** である。

B 期には、まず、**F** が消失し、中心体を極として微小管が伸びて **G** が形成され、また、染色体が凝縮する。次に、この **G** に凝縮した染色体が結合し、中央に整列する。続いて、姉妹染色分体が 1 本ずつ反対側の中心体に向かって移動する。さらに **F** が再び形成され、最後に細胞質分裂が起こって、細胞分裂が完了する。



<A, B の解答群>

- 1 G₀ 2 G₁ 3 G₂ 4 M 5 S

<C の解答群>

- 1 3' 末端から 5' 末端 2 5' 末端から 3' 末端 3 N 末端から C 末端
4 C 末端から N 末端

<D の解答群>

- 1 アデニン 2 イノシン 3 ウラシル 4 シトシン 5 チミン

<E の解答群>

- 1 a 2 b 3 c 4 d

<F, G の解答群>

- 1 核小体 2 核膜 3 ゴルジ体 4 小胞体 5 細胞膜 6 紡錘体
7 ミトコンドリア

II 正常ヒト二倍体細胞 1 個当たり **H** 本の染色体があり、合計で約 **I** 個の塩基対がある。この細胞に 1 Gy の γ 線を照射すると、細胞 1 個当たり、約 **J** 個の DNA 2 本鎖切断を生じる。ヒト体細胞において、DNA 2 本鎖切断は主として、非相同末端結合と相同組換えの 2 つの機構で修復される。相同組換えは **K** を必要とするため、細胞周期の **L** 期の後半から **M**

期に限定される。相同組換えが行われる期間では、その他の時期と比べ、放射線致死感受性は 。

<H の解答群>

1 21 2 22 3 23 4 42 5 44 6 46

<I の解答群>

1 6×10^7 2 6×10^8 3 6×10^9 4 6×10^{10} 5 6×10^{11}

<J の解答群>

1 4 2 40 3 400 4 4,000

<K の解答群>

1 姉妹染色分体 2 相同染色体 3 常染色体 4 性染色体

<L, M の解答群>

1 G₀ 2 G₁ 3 G₂ 4 M 5 S

<N の解答群>

1 高い 2 低い

- Ⅲ 培養細胞に放射線を照射すると、細胞周期の進行が一時停止する。これを細胞周期チェックポイント機構という。細胞周期チェックポイント機構は細胞の放射線致死感受性に深く関わっている。

細胞周期チェックポイント機構において重要な役割を担う分子の 1 つに ATM がある。ATM は の原因遺伝子から作られるタンパク質で、p53 をはじめ多くのタンパク質を する活性を持っており、 を通じてこれらのタンパク質の機能を制御すると考えられている。p53 は特定の DNA 配列に結合し、その近傍にある遺伝子の を促進する。p53 によって制御を受ける遺伝子群の中には、p21 など細胞周期の進行を抑制する働きを持つタンパク質の遺伝子がいくつか知られている。p21 は細胞周期進行を制御するサイクリン依存性キナーゼに結合し、その活性を阻害する。この他にも、ATM がさまざまなタンパク質を介してサイクリン依存性キナーゼの活性を阻害する経路が明らかにされている。

DNA の合成量は を用いて調べることができる。健常者由来の培養線維芽細胞では非照射時に比べ、放射線照射後に の取り込みが する。 患者由来の培養線維芽細胞では、健常者由来の培養線維芽細胞の場合に比べて、放射線照射による DNA 合成量の の程度が 。このことが、 患者由来の培養線維芽細胞が健常者由来の培養線維芽細胞の場合に比べて高い放射線致死感受性を示すことの一因であると考えられている。

<O の解答群>

1 色素性乾皮症 2 重症複合免疫不全症 3 ナイミーヘン染色体不安定性症候群
4 ファンconi 貧血 5 毛細血管拡張性運動失調症

<P の解答群>

1 アセチル化 2 ユビキチン化 3 リン酸化 4 合成 5 分解

<Q の解答群>

1 組換え 2 修復 3 転写 4 複製 5 翻訳

<R の解答群>

1 [³H]チミジン 2 [¹⁴C]ロイシン
3 [¹⁸F]フルオロデオキシグルコース 4 [γ -³²P]アデノシン三リン酸
5 [³⁵S]メチオニン

<S の解答群>

1 増加 2 減少

<Tの解答群>

1 大きい 2 小さい

[解答]

I A-5 B-4 C-2 D-4 E-3 F-2 G-6

注) A, B: 細胞周期は4つの時期に分けられる。DNA複製が行われる時期をS期, 細胞分裂が行われる時期をM期という。

C: DNA複製において新しいDNA鎖は必ず5'末端から3'末端の方向に合成される。

D, E: 合成されるDNA鎖の相補性は, Gの反対鎖にはCが取り込まれ, Aの反対鎖にはTが取り込まれる。G-Cペアには, 双方にケト基とアミノ基がある。

F, G: 分裂期には核膜が消失して染色分体が紡錘体にゆっくり引張り張られる。終期には, 2組の娘染色体がそれぞれ紡錘対極に到達する。それぞれの周囲に新たな核膜が形成され, 2個の核の完成が完了して有糸分裂が終了する。

II H-6 I-3 J-2 K-1 L-5 M-3 N-2

注) H: 正常ヒト細胞の染色体数46。

I: 染色体全てを足すと30億塩基(ゲノムサイズ)の倍, すなわち約60億個の塩基対となる。

J: 1Gyのγ線で生成する2本鎖切断数は40個。

K: DNA2本鎖切断は主として, 非同末端結合と相同組換えの2つの機構で修復される。相同組換えは相互にほぼ同じ塩基配列を持つ姉妹染色分体が必要になる。

L, M: 姉妹染色分体が存在するのは, DNA合成から細胞分裂までの間(S期からG₂期)である。

N: 相同組換えが起きる時期の放射線感受性は低い。

III O-5 P-3 Q-3 R-1 S-2 T-2

注) O: ATMは毛細血管拡張性運動失調症(Ataxia telangiectasia)での変異をいう。

P: ATMは多くのタンパク質をリン酸化する。

Q: p53は特定のDNA配列に結合し, その近傍にある遺伝子の転写を促進する。

R: DNAの合成量は標識されたヌクレオチドを用いて調べることができる。チミジンなどがこれにあたる。

S: 健常者由来の培養線維芽細胞では細胞周期が停止する。結果的に非照射時に比べ, 放射線照射後に正常なDNA合成の際に起きるヌクレオチドの取り込みが減少する。

T: 毛細血管拡張性運動失調症(Ataxia telangiectasia)患者由来の培養線維芽細胞では, p53をリン酸化するATMタンパク質の機能が欠損している。結果的に, p53がリン酸化することによって引き起こされる細胞周期の停止があまり起きない。そのためヌクレオチドの取り込みが減少する程度は小さくなる。

問6 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。なお, 解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

I 放射線の飛跡の単位□ア□当たりのエネルギー付与をLETという。細胞の吸収線量が同じでも, 照射する放射線のLETが異なると, 生物効果が大きく異なる場合がある。ある生物効果を起こすのに必要な基準となる放射線の吸収線量と, 同じ効果を起こすのに必要な, 対象となる放射線の吸収線量との比をRBEという。RBEは, 指標とする事象によって値が異なる。例えば, ヒト正常線維芽細胞の細胞致死に着目した場合, 200kVのX線を基準放射線としたときの高LET放射線のRBEは, 生存率が50%のときのほうが10%のときより□イ□なる。これは横軸に吸収線量を線形目盛りで, 縦軸に生存率を対数目盛でプロットした線量-生存率曲線が, X線では□ウ□曲線になるの

に対し、LET の高い放射線ではほぼ直線となるためである。また一般に放射線の LET が高くなるにつれ、致死効果に関する RBE は大きくなるが、 keV $\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 程度で最大値となり、それ以上では LET の増加とともに小さくなる。 keV $\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 程度まで RBE が増加するのは、X 線などに比べて修復しにくい DNA 損傷の収率が高くなるためと考えられている。これを示す実験の根拠として、一般に DNA 2 本鎖切断の非相同末端結合による修復機構を欠く細胞では、致死効果の RBE が正常細胞より ことがあげられる。

一方、ICRP 2007 年勧告では放射線防護で用いられる 係数は RBE に基づいてはいるが、致死効果を指標とした研究では RBE は 1 から 3 までの値が多いのに対し、 係数は を評価することを目的とし、さらに安全を見込んでいるために、例えばアルファ粒子に対しては と、大きな値に決められている。

<ア～エの解答群>

- | | | | | | |
|---------|---------|-------|--------|------|------|
| 1 長さ | 2 質量 | 3 面積 | 4 体積 | 5 線量 | 6 時間 |
| 7 大きく | 8 小さく | 9 大きい | 10 小さい | 11 低 | 12 高 |
| 13 上に凸の | 14 下に凸の | | | | |

<Aの解答群>

- | | | | | | |
|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 20～60 | 2 60～80 | 3 80～100 | 4 100～200 | 5 200～300 | 6 300～500 |
|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|

<オの解答群>

- | | | | | |
|---------|--------|------|--------|--------|
| 1 放射線加重 | 2 組織加重 | 3 線質 | 4 実効線量 | 5 線量当量 |
| 6 組織線量 | 7 等価線量 | | | |

<カの解答群>

- | | |
|---------|---------|
| 1 確率的影響 | 2 確定的影響 |
|---------|---------|

<Bの解答群>

- | | | | | | |
|-----|-----|------|------|------|------|
| 1 2 | 2 5 | 3 10 | 4 15 | 5 20 | 6 30 |
|-----|-----|------|------|------|------|

II γ 線ではその生物効果の %が の放射線分解の結果生じるラジカルによる の寄与によるものであるとされている。 の大きさに影響する因子はいくつか存在し、酸素もそのひとつである。すなわち の放射線分解では生体分子と反応する様々なラジカルが生じるが、そのうちの は、 の電離で生じた電子に水分子が配位した水和電子により酸素が 1 電子還元されて生じる。また、酸素には生体分子に生じた損傷が化学的修復をされる前に損傷として固定する働きがあるといわれている。したがって酸素の有無は放射線により引き起こされる生体反応の大きさに影響する。

酸素が存在しない条件で、ある効果を起こす吸収線量と酸素が存在する条件で同じ効果を起こす吸収線量の比を酸素効果比という。生体内での酸素効果比は最大 程度までの値となる。酸素効果比が 2 となるのは酸素分圧が mmHg 程度のときである。正常組織では、酸素分圧はおおよそ mmHg である。LET の高い放射線による致死効果では、酸素効果は γ 線に比べて なる。LET が 200 keV $\cdot\mu\text{m}^{-1}$ を超えると酸素効果比はほぼ になることが知られている。また、LET の高い放射線では の寄与が γ 線より なる。

<Cの解答群>

- | | | | |
|---------|---------|---------|---------|
| 1 10～30 | 2 30～50 | 3 50～80 | 4 80～95 |
|---------|---------|---------|---------|

<キ～サの解答群>

- | | | |
|----------|----------------|---------|
| 1 RNA | 2 水 | 3 タンパク質 |
| 4 脂質 | 5 直接作用 | 6 間接作用 |
| 7 水素ラジカル | 8 スーパーオキシドラジカル | |

