

第61回

# 第1種放射線取扱主任者試験 問題と解答例

第61回 平成28年8月24日, 25日実施

## 第 61 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 61 回（平成 28 年） .....	1
-----------------------	---

##### 管理測定技術

第 61 回（平成 28 年） .....	14
-----------------------	----

##### 物 理 学

第 61 回（平成 28 年） .....	30
-----------------------	----

##### 化 学

第 61 回（平成 28 年） .....	45
-----------------------	----

##### 生 物 学

第 61 回（平成 28 年） .....	58
-----------------------	----

##### 物 化 生

第 61 回（平成 28 年） .....	71
-----------------------	----

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 61 回 (平成 28 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。

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 使用の許可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。

「放射性同位元素であってその種類若しくは密封の有無に応じて政令で定める数量を超えるもの又は放射線発生装置の使用 ( (放射性同位元素を  する場合に限る。),  (放射性同位元素の  をする場合に限り、廃棄のための  を除く。) 及び  (放射性同位元素装備機器に放射性同位元素を  する場合に限る。) を含む。) をしようとする者は、政令で定めるところにより、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。」

	<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>
1	輸入	運搬	貯蔵
2	輸入	詰替え	装備
3	製造	運搬	貯蔵
4	製造	詰替え	装備
5	製造	運搬	装備

〔解答〕

4

注) 法第 3 条 (使用の許可) 第 1 項

問 2 放射線発生装置のみの使用の許可を受けようとする者が、原子力規制委員会に提出しなければならない申請書に記載する事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、次のうちどれか。

- A 放射線発生装置の種類、台数及び性能
- B 使用施設の位置、構造及び設備
- C 貯蔵施設の位置、構造及び設備
- D 廃棄施設の位置、構造及び設備

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

〔解答〕

1

注) A : 正 法第 3 条第 2 項第 2 号

B : 正 法第 3 条第 2 項第 5 号

- C：誤 定められていない。貯蔵施設は、「放射性同位元素を貯蔵する施設」(法第3条第2項第6号)と定められており、「放射線発生装置のみの使用」の場合は貯蔵室を持たないために不要である。
- D：正 法第3条第2項第7号

問3 放射線測定器の校正検査を使用の目的として、100メガベクレルの密封されたコバルト60を装備した照射装置のみ1台を使用している者が、事業所内において使用の場所を追加し、同じ使用の目的で100メガベクレルの密封されたコバルト60を装備した照射装置1台をあらたに使用することとなった。ただし、当該照射装置の種類、型式及び性能は、同一のものとする。この場合、あらかじめ、原子力規制委員会に対してとるべき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はどれか。なお、コバルト60の下限数量は、100キロベクレルであり、かつ、その濃度は、原子力規制委員会の定める濃度を超えるものとする。

- 1 許可使用に係る変更の許可の申請をしなければならない。
- 2 許可使用に係る軽微な変更の届出をしなければならない。
- 3 許可使用に係る使用の場所の一時的変更の届出をしなければならない。
- 4 届出使用に係る変更の届出をしなければならない。
- 5 届出使用に係る使用の場所の一時的変更の報告をしなければならない。

〔解答〕

4

注) 法第3条(使用の許可)第1項, 令第3条(使用の許可の申請)第1項

- 1：誤 法第3条第1項, 令第3条第1項 いずれも下限数量の1,000倍を超えないので、使用の許可ではなく届出でよい。
- 2：誤 法第3条第1項 軽微な変更には当たらない。
- 3：誤 法第3条第1項, 令第3条第1項 使用の場所の一時的変更には当たらない。
- 4：正 法第3条第1項, 令第3条第1項
- 5：誤 定められていない。

問4 次のうち、放射性同位元素を業として賃貸しようとする者(表示付特定認証機器を業として賃貸する者を除く。)が、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出なければならない事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 放射性同位元素の種類
- B 賃貸事業所の所在地
- C 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
- D 貯蔵施設の位置、構造、設備及び貯蔵能力

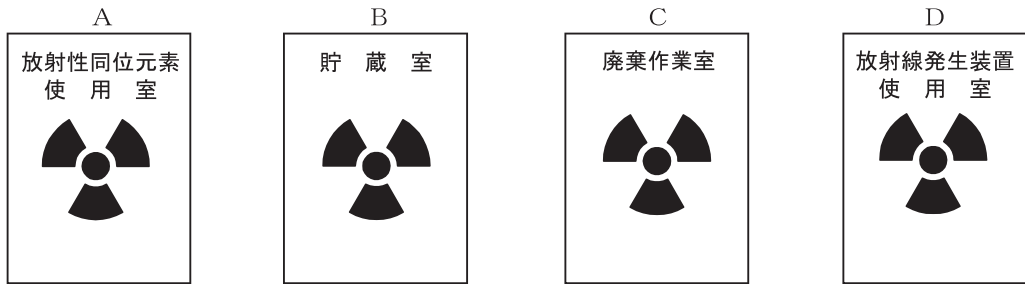
- 1 ABCのみ    2 ABのみ    3 ADのみ    4 CDのみ    5 BCDのみ

〔解答〕

1

注) 法第4条(販売及び賃貸の業の届出)第1項

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〕

3

注) 則第 14 条の 7 (使用施設の基準), 9 (貯蔵施設の基準), 11 (廃棄施設の基準), 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: 誤 則第 14 条の 9 第 7 号 下部に「許可なくして立入りを禁ず」が定められている。

C: 正 則第 14 条の 11 第 1 項第 10 号, 施行規則別表

D: 正 則第 14 条の 7 第 1 項第 9 号, 施行規則別表

問 6 使用施設の技術上の基準に関して、密封された放射性同位元素を使用する場合に、その旨を自動的に表示する装置及びその室に人がみだりに入ることを防止するインターロックを設けなければならない放射性同位元素の数量を示す記述として、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、次のうちどれか。

- |   | 自動的に表示する装置     | インターロック        |
|---|----------------|----------------|
| 1 | 100 ギガベクレル以上   | 400 テラベクレル以上   |
| 2 | 100 ギガベクレルを超える | 400 テラベクレルを超える |
| 3 | 400 ギガベクレル以上   | 400 テラベクレル以上   |
| 4 | 400 ギガベクレルを超える | 100 テラベクレルを超える |
| 5 | 400 ギガベクレル以上   | 100 テラベクレル以上   |

〔解答〕

5

注) 自動表示装置については則第 14 条の 7 (使用施設の基準) 第 1 項第 6 号, 平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号 (数量表示) 第 11 条に規定されている。インターロックについては則第 14 条の 7 第 1 項第 7 号, 同告示第 12 条に規定されている。

問 7 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。
- 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液体状の放射化物を入れる容器は、破損しにくい構造とし、かつ、液体が浸透しにくい材料を用いること。

D 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。

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

[解答]

4

注) 則第14条の7(使用施設の基準)第1項7の2

- A: 誤 定められていない。  
 B: 正 則第14条の7第1項7の2イ  
 C: 誤 定められていない。  
 D: 正 則第14条の7第1項7の2ロ

問8 廃棄施設の基準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。

「放射線発生装置の使用に係る[A]は、当該放射線発生装置の[B]期間(当該放射線発生装置の使用をする室内に人がみだりに入ることを防止する[C]を設ける場合にあつては、当該[C]により人を立ち入らせないこととしている期間を除く。)における当該放射線発生装置の使用をする[D]において、当該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の濃度を原子力規制委員会が定める濃度限度以下とする能力を有すること。」

	A	B	C	D
1	排気監視設備	運転を停止している	インターロック	施設の排気口
2	排気設備	運転中の	自動表示灯	室内の空気中
3	排気監視設備	運転中の	インターロック	室内の空気中
4	排気設備	運転を停止している	自動表示灯	施設の排気口
5	排気設備	運転を停止している	インターロック	室内の空気中

[解答]

5

注) 則第14条の11(廃棄施設の基準)第1項第4号ロ

問9 次のうち、許可使用者が変更の許可を受けようとするときに、申請書の正本に添えなければならない書類として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 変更の予定時期を記載した書面  
 B 工事を伴うときは、その予定工事期間及びその工事期間中放射線障害の防止に関し講ずる措置を記載した書面  
 C 変更に係る使用の場所及び廃棄の場所の状況、管理区域、標識を付ける箇所並びに縮尺及び方位を付けた平面図  
 D 放射線障害予防規程の変更の内容を記載した書面

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

[解答]

1

注) 則第9条(許可使用に係る変更の許可の申請)

- A: 正 則第9条第2項第1号  
 B: 正 則第9条第2項第3号

C: 誤 定められていない。

D: 誤 定められていない。

問10 許可使用者が行う使用施設等の変更に關する次の記述のうち、必ず、放射線障害防止法上使用の変更の許可を受けなければならないものの組合せはどれか。

A 貯蔵施設に設置している貯蔵箱を、構造及び材料は異なるが貯蔵能力の変わらない貯蔵箱に更新しようとする場合

B 事業所内にある独立した2つの管理区域のうち、一方の管理区域で使用している密封された放射性同位元素の使用施設と貯蔵施設を廃止し、管理区域を解除しようとする場合

C 廃棄施設に設置している排気能力30立方メートル毎分の排風機を、排気能力25立方メートル毎分の排風機に更新しようとする場合

D 密封されていない放射性同位元素であるマンガン54の使用の目的を変更しようとする場合

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) 法第10条(使用施設等の変更)第2項 許可使用者は法第3条第2項第2号から第7号までに掲げる事項の変更をしようとする場合は原子力規制委員会の許可を受けなければならない。

A: 正 法第3条(使用の許可)第2項第6号

B: 誤 定められていない。「変更の許可を要しない軽微な変更」に該当する。

C: 正 法第3条第2項第7号

D: 正 法第3条第2項第3号

問11 新たに許可使用者となった者のうち、放射線障害防止法上、施設検査の対象となる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セシウム137を装備した照射装置1台を使用する者

B 密封されていないセシウム137について、下限数量に10万を乗じて得た数量を貯蔵能力とする貯蔵施設に貯蔵する者

C 5テラベクレルの密封されたコバルト60を装備した照射装置1台、5テラベクレルの密封されたセシウム137を装備した照射装置2台を使用する者

D 密封されていないコバルト60(下限数量に1万倍を乗じて得た数量を貯蔵能力とする。)及びセシウム137(下限数量に1万倍を乗じて得た数量を貯蔵能力とする。)を同じ貯蔵施設に貯蔵する者

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕

1

注) 法第12条の8(施設検査)第1項、令第13条(施設検査等を要しない放射性同位元素等)

A: 正 令第13条 10テラベクレル以上の密封放射性同位元素使用者は施設検査の対象となる。

B: 正 令第13条 下限数量10万倍以上の非密封放射性同位元素使用者は施設検査の対象となる。

C: 誤 該当しない。

D: 誤 該当しない。

問12 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 作業室においては、作業衣、保護具等を着用して作業し、これらを着用してみだりに作業室から退出しないこと。
- B 使用施設又は管理区域の目につきやすい場所に、汚染の広がりの防止に必要な注意事項を掲示すること。
- C 管理区域に放射線業務従事者以外の者が立ち入るときには、放射線取扱主任者の指示に従わせること。
- D 作業室での飲食及び喫煙を禁止すること。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

3

注) 則第15条(使用の基準)

- A: 正 則第15条第1項第7号
- B: 誤 定められていない。
- C: 誤 定められていない。
- D: 正 則第15条第1項第5号

問13 保管の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 空気を汚染するおそれのある放射性同位元素を保管する場合には、貯蔵施設内の人が呼吸する空気中の放射性同位元素の濃度は、空气中濃度限度を超えないようにしなければならない。
- B 密封されていない放射性同位元素は、容器に入れ、かつ、貯蔵室又は貯蔵箱で保管しなければならない。
- C 貯蔵施設へ放射線業務従事者を立ち入らせる場合は、施設管理者が立ち会わなければならない。
- D 貯蔵施設においては、作業衣、保護具等を着用して作業し、これらを着用してみだりに貯蔵施設から退出してはならない。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

2

注) 則第17条(保管の基準)

- A: 正 則第17条第1項第4号
- B: 正 則第17条第1項第1号
- C: 誤 定められていない。
- D: 誤 定められていない。

問14 A型輸送物に係る技術上の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 周囲の圧力を60キロパスカルとした場合に、放射性同位元素の漏えいがないこと。
- B 外接する直方体の各辺が10センチメートル以上であること。
- C 表面における1センチメートル線量当量率の最大値が1ミリシーベルト毎時を超えないこと。
- D 表面から1メートル離れた位置における1センチメートル線量当量率の最大値が5マイクロシーベルト毎時を超えないこと。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ



〔解答〕

2

注) 則第 18 条の 5 (A 型輸送物に係る技術上の基準)

A: 正 則第 18 条の 5 第 5 号

B: 正 則第 18 条の 5 第 2 号

C: 誤 則第 18 条の 5 第 7 号 1 ミリシーベルト毎時ではなく 2 ミリシーベルト毎時。

D: 誤 則第 18 条の 5 第 8 号 5 マイクロシーベルト毎時ではなく 100 マイクロシーベルト毎時。

問 15 放射線業務従事者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 放射線業務従事者とは、放射性同位元素等又は放射線発生装置の取扱い、管理又はこれに付随する業務に従事する者であって、管理区域に立ち入るものをいう。

B 男子の放射線業務従事者の一定期間内における実効線量限度は、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 100 ミリシーベルト、4 月 1 日を始期とする 1 年間に 50 ミリシーベルトである。

C 放射線業務従事者の外部被ばくによる線量の測定は、管理区域に立ち入っている間継続して行うこと。ただし、管理区域内における外部被ばくによる線量が 100 マイクロシーベルトを超えるおそれのないときはこの限りでない。

D 放射線業務従事者の実効線量及び等価線量の記録の保存期間は、20 年間である。

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

〔解答〕

2

注) 則第 1 条 (用語の定義)、則第 20 条 (測定)、平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号 (数量表示)

A: 正 則第 1 条第 8 号

B: 正 上記告示第 5 号第 5 条

C: 誤 則第 20 条第 2 項第 1 号ホ 「管理区域に一時的に立ち入る者であって放射線業務従事者でないもの」についての記述。

D: 誤 則第 20 条第 4 項第 7 号

問 16 内部被ばくによる線量の測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 自然放射線による被ばくを含めること。

B 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計算すること。

C 空気中の放射性同位元素濃度と実効線量係数の積を計算すること。

D 吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の摂取量を計算すること。

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

〔解答〕

5

注) 則第 20 条 (測定)、平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号 (数量表示)

A: 誤 定められていない。

B: 正 則第 20 条第 2 項第 2 号、上記告示第 5 号第 19 条第 2 項

C：誤 定められていない。

D：正 則第20条第2項第2号，上記告示第5号第19条第1項

問17 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 代表者の氏名及び経歴に関すること。
- B 放射性同位元素等又は放射線発生装置の取扱いに従事する者に関する職務及び組織に関すること。
- C 放射線取扱主任者の代理者の選任に関すること。
- D 使用施設等の変更の手続きに関すること。

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

〔解答〕

3

注) 則第21条（放射線障害予防規程）

A：誤 定められていない。

B：正 則第21条第1項第1号の1

C：正 則第21条第1項第1号の3

D：誤 定められていない。

問18 取扱等業務に従事する者であって，管理区域に立ち入らないものに対して，取扱等業務を開始する前に行う教育及び訓練として，放射線障害防止法上定められている項目と時間数の組合せは，次のうちどれか。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。

項 目	時間数
A 放射性同位元素の管理測定技術	30分以上
B 放射線の人体に与える影響	30分以上
C 放射性同位元素及び放射線発生装置による放射線障害の防止に関する法令	30分以上
D 放射線障害予防規程	30分以上

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

〔解答〕

5

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 放射性同位元素又は放射線発生装置の安全取扱い 1時間30分

B：正

C：正

D：正

問19 放射線業務従事者の健康診断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 健康診断を受けた者に対し，健康診断の結果の記録を，医師が必要と認める場合に限り交付すること。
- B 問診は，医師が必要と認める場合に限り行うこと。
- C 管理区域に立ち入った後の眼の検査又は検診は，医師が必要と認める場合に限り行うこと。
- D 管理区域に立ち入った後の皮膚の検査又は検診は，医師が必要と認める場合に限り行うこと。

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

[解答]

4

注) 則第22条(健康診断)

- A: 誤 定められていない。  
 B: 誤 定められていない。  
 C: 正 則第22条第1項第6号ハ  
 D: 正 則第22条第1項第6号ロ

問20 次の記述のうち、許可使用者が放射線障害を受けた者又は受けたおそれのある者に対し、講じなければならない措置として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 放射線業務従事者が放射線障害を受け、又は受けたおそれのある場合には、放射線障害又は放射線障害を受けたおそれの程度に応じ、管理区域への立入時間の短縮、立入りの禁止、放射線に被ばくするおそれの少ない業務への配置転換等の措置を講じ、必要な保健指導を行うこと。  
 B 放射線業務従事者以外の者が放射線障害を受け、又は受けたおそれのある場合には、遅滞なく、医師による診断、必要な保健指導等の適切な措置を講ずること。  
 C 管理区域に一時的に立ち入る者であって放射線業務従事者でないものが放射線障害を受け、又は受けたおそれのある場合には、遅滞なく、眼の水晶体の等価線量について300ミリシーベルト及び皮膚の等価線量について1シーベルトを超えないことを確認すること。  
 D 放射線業務従事者以外の者が放射線障害を受け、又は受けたおそれのある場合には、当該1年間の翌年から起算して5年間の累積実効線量を集計し、記録すること。

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

[解答]

2

注) 則第23条(放射線障害を受けた者又は受けたおそれのある者に対する措置)

- A: 正 則第23条第1号  
 B: 正 則第23条第2号  
 C: 誤 定められていない。  
 D: 誤 定められていない。

問21 次のうち、密封されていない放射性同位元素のみを使用する許可使用者が備えるべき帳簿に記載しなければならない事項の細目として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 工場又は事業所の外における放射性同位元素等の運搬の年月日、方法及び荷受人又は荷送人の氏名又は名称並びに運搬に従事する者の氏名又は運搬の委託先の氏名若しくは名称  
 B 貯蔵施設における保管に係る放射性同位元素の種類及び数量  
 C 放射性同位元素の保管の委託の年月日、期間及び委託先の氏名又は名称  
 D 放射線施設に立ち入る者に対する教育及び訓練の実施年月日、項目並びに当該教育及び訓練を受けた者の氏名

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

[解答]

2

注) 法第25条(記帳義務)、則第24条(記帳)

- A: 正 法第25条第1項, 則第24条第1項第1号ヌ  
 B: 正 法第25条第1項, 則第24条第1項第1号ト  
 C: 誤 定められていない。  
 D: 正 法第25条第1項, 則第24条第1項第1号タ

問22 許可取消使用者等に関する次の記述のうち, 放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 許可取消使用者等は, 廃止措置計画の計画期間内であれば, 廃止の日に所持していた放射性同位元素を所持することができる。  
 B 許可取消使用者等は, 廃止日等において選任していた放射線取扱主任者に, 廃止措置の監督をさせなければならない。  
 C 許可取消使用者等は, その所持する放射性同位元素について盗取, 所在不明その他の事故が生じたときは, 遅滞なく, 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。  
 D 許可取消使用者等は, 廃止措置計画に記載した措置が終了したときは, 遅滞なく, その旨及びその講じた措置の内容を原子力規制委員会に報告しなければならない。  
 1 AとB    2 AとC    3 BとC    4 BとD    5 CとD

[解答]

5

注) 法第28条(許可の取消し, 使用の廃止等に伴う措置等), 法第32条(事故届), 則第26条(許可の取消し, 使用の廃止等に伴う措置), 則第28条(所持の制限)

- A: 誤 則第28条 使用の業の取消日又は廃止の日から30日。  
 B: 誤 則第26条第1項第8号ロ 同等以上の知識及び経験を有する者も可。  
 C: 正 法第32条  
 D: 正 法第28条第5項

問23 許可使用者が, その許可に係る放射性同位元素のすべての使用を廃止し, 廃止の届出をした後, 廃止の日に保存していた記録のうち, 原子力規制委員会が指定する機関に引き渡さなければならない記録として, 放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。ただし, この届出に係る法人が, 引き続き許可届出使用者又は許可廃棄業者として当該記録を保存しないものとする。

- A 廃止日が属する年度の放射性同位元素等の保管(保管廃棄を含む。)に係る記録  
 B 放射線施設の放射性同位元素による汚染の状況の測定結果の記録  
 C 教育訓練の結果の記録  
 D 健康診断の結果の記録

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

[解答]

4

注) 則第22条(健康診断)

- A: 誤 定められていない。  
 B: 誤 定められていない。  
 C: 誤 定められていない。  
 D: 正 則第22条第2項第3号

問 24 所持の制限に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 許可使用者は、その許可証に記載された種類の放射性同位元素をその許可証に記載された貯蔵施設の貯蔵能力の範囲内で所持することができる。
- B 届出使用者から放射性同位元素の運搬を委託された者は、その委託を受けた放射性同位元素を所持することができる。
- C 届出販売業者は、その届け出た種類の放射性同位元素を運搬のために所持することができる。
- D 許可廃棄業者は、その許可証に記載された種類の放射性同位元素をその許可証に記載された廃棄物貯蔵施設の貯蔵能力の範囲を超えて所持することができる。

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 30 条 (所持の制限)

- A : 正 法第 30 条第 1 項第 1 号
- B : 正 法第 30 条第 1 項第 11 号
- C : 正 法第 30 条第 1 項第 3 号
- D : 誤 定められていない。

問 25 危険時の措置等に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 放射性同位元素による汚染が生じたので、速やかに、その広がり防止及び除去を行った。
- B 所持する放射性同位元素に所在が不明となっているものがあることに気づき 20 日間探したが、発見できなかったので、その旨を原子力規制委員会に報告した。
- C 緊急作業に従事する者の線量をできる限り少なくするため、保護具を用意し、緊急作業に従事する者にこれを用いさせた。
- D 放射線障害を防止するために、放射線施設の内部にいる者及び放射線施設の付近にいる者に避難するよう警告した。

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) 法第 32 条 (事故届), 則第 29 条 (危険時の措置)

- A : 正 則第 29 条第 1 項第 4 号
- B : 誤 法第 32 条 「遅滞なく」届け出なければならない。
- C : 正 則第 29 条第 2 項
- D : 正 則第 29 条第 1 項第 2 号

問 26 次の許可届出使用者のうち、第 1 種放射線取扱主任者免状を有する放射線取扱主任者を必ず選任しなければならないものとして、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 研究のために放射線発生装置のみの使用をする者
- B 研究のために下限数量の 100 倍の密封されていない放射性同位元素のみの使用をする者
- C 研究のために 1 個当たりの数量が下限数量を超え、10 テラベクレル未満の密封された放射性同位元素のみの使用をする者
- D 診療のために放射性医薬品及び放射線発生装置のみの使用をする者

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12条の8 (施設検査), 法第34条 (放射線取扱主任者)

A: 正 法第34条第1項第1号, 法第12条の8第1項 特定許可使用者に該当する。

B: 正 法第34条第1項第1号

C: 誤 特定許可使用者ではないため第2種放射線取扱主任者免状を有する者でも可。

D: 誤 法第34条第1項 医師又は歯科医師を放射線取扱主任者として選任できる。

問27 放射線取扱主任者の義務等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。

「放射線取扱主任者は, [A] 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 [B] 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 正確 | 立ち入る放射線業務従事者           | 意見を尊重しなければ |
| 3 誠実 | 立ち入る者                  | 意見を尊重しなければ |
| 4 確実 | 立ち入る者                  | 指示に従わなければ  |
| 5 誠実 | 立ち入る放射線業務従事者           | 意見を尊重しなければ |

〔解答〕

3

注) 法第36条 (放射線取扱主任者の義務等)

問28 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5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販売する届出販売業者は, 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 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36条の2 (定期講習), 則第32条 (定期講習)

A: 誤 則第32条第2項第2号 5年以内ではなく3年以内。

B: 正 則第32条第1項第2号

C: 正 則第32条第2項第1号

D：正 則第 32 条第 2 項第 2 号 5 年以内ではなく 3 年以内。

問 29 5 テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを研究のために使用している許可使用者において、放射線取扱主任者が海外出張をすることになった。当該放射線取扱主任者がその職務を遂行することはできないが、放射性同位元素の使用を継続することとした。この出張期間中における放射線取扱主任者の代理者の選任に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 出張の期間が 40 日であったので、第 1 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。
- B 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。
- C 出張の期間が 40 日であったので、第 3 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。
- D 出張の期間が 10 日であったので、放射線取扱主任者の代理者の選任は行わなかった。

- 1 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 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 法第 37 条第 3 項

B：正 則第 33 条第 3 項

C：誤 則第 33 条第 1 項 第 2 種放射線取扱主任者免状を有している者が必要。

D：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関わらず代理者の選任は必要。

問 30 報告の徴収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。

「放射性同位元素等の使用、販売、賃貸、 その他の取扱いにおける計画外の被ばくがあったときであって、当該被ばくに係る  が放射線業務従事者 (廃棄に従事する者を含む。) にあっては  ミリシーベルト、放射線業務従事者以外の者にあつては  ミリシーベルトを超え、又は超えるおそれがあるとき。」

	A	B	C	D
1 運搬		実効線量	5	0.5
2 廃棄		等価線量	10	1
3 廃棄		実効線量	5	0.5
4 運搬		実効線量及び等価線量	5	1
5 運搬		等価線量	10	0.5

〔解答〕

3

注) 則第 39 条 (報告の徴収) 第 1 項第 7 号

## 管 理 測 定 技 術

## 第61回(平成28年)

問1 次のⅠ～Ⅲ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。

外部被ばく管理における $\gamma$ 線の線量測定は、作業環境の線量測定と作業員自身の個人線量測定に大別される。これらの測定で対象とする実用量はそれぞれ異なり、放射線測定器も使い分けられている。また、測定器の指示値の校正についても異なる方法がとられている。

Ⅰ 作業環境の線量測定に用いるサーベイメータには、電離箱、GM計数管、シンチレーション検出器などの放射線検出器が利用される。サーベイメータの使用にあたっては、これらの特徴を十分に把握しておくことが重要である。

電離箱では、 $\gamma$ 線と電離箱内部の空気やそれを取り囲む壁材などとの相互作用の結果生じた電子による□A電流を測定することにより、空気カーマ(率)にほぼ相当する量が得られる。このため、電離箱は線量当量へ換算するのに適しているが、GM計数管やシンチレーション検出器に比べて□Bが低く、測定対象とする線量率に応じた適切な使用が必要である。

GM計数管では、ガイガー□Cを利用したパルス計測のため、電子回路が比較的簡単ではあるが、そのパルスは放射線のエネルギー情報を持たない。また不感時間が長いので、高線量率では□D現象による指示値の低下に注意することも必要である。

シンチレーション検出器では、NaI(Tl)、CsI(Tl)、LaBr<sub>3</sub>(Ce)など、密度や□Eが高いシンチレータを選択することにより高い□Bが得られ、低い線量率の場合での使用にも適している。

GM計数管式やシンチレーション検出器式のサーベイメータは、電離箱式サーベイメータに比べて□Fが良くない。しかしながら、NaI(Tl)シンチレーション検出器式サーベイメータでは、パルスの□Gを利用して、□Fを補償する機能を付加することが可能である。

< A～Gの解答群 >

- |       |         |            |           |           |      |       |
|-------|---------|------------|-----------|-----------|------|-------|
| 1 放電  | 2 発光    | 3 窒息       | 4 再結合     | 5 電離      | 6 励起 | 7 時定数 |
| 8 波高  | 9 方向特性  | 10 エネルギー特性 | 11 発光減衰時間 | 12 実効原子番号 |      |       |
| 13 感度 | 14 校正定数 |            |           |           |      |       |

Ⅱ 個人線量測定に用いる線量計には、受動型線量計と能動型線量計があり、いずれも体表面に密着させて測定できるよう工夫されている。

受動型線量計では、一定期間を経て検出素子に蓄積された線量情報を読み取り、積算線量を測定する。かつては□Hが主流であったが、近年は発光現象に基づいた線量計に代わっている。

□I線量計では、 $\gamma$ 線照射により形成された蛍光中心をパルス紫外線で励起することで生じる発光を利用している。同様に発光現象に基づくが、光刺激による発光(輝尽発光)を利用する□J線量計、また熱を外部刺激とした発光を利用する線量計もある。

その他には、原理的に空気の電離量の測定に基づくが、低い線量まで使用できる□K線量計などもある。

能動型線量計には、□L半導体検出器を用いた電子式線量計が多く、測定中においても積算線



量や線量率を読み取ることができ、としても使用できる。

< H～M の解答群 >

- 1 シリコン    2 ゲルマニウム    3 OSL    4 DIS    5 TLD    6 蛍光ガラス  
7 アラニン    8 エッチビット    9 フィルムバッジ    10 スペクトロメータ  
11 警報付線量計    12 絶対測定器    13 表面汚染検査計

Ⅲ  $\gamma$ 線の線量測定に使用する放射線測定器は、指示値が目的の実用量を示すように、とのトレーサビリティが明確な  $\gamma$ 線場において校正されていることが必要である。 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源を使用する作業場での実用量に関する校正において、作業環境の測定に用いるサーベイメータは、 $\gamma$ 線場の特定の位置に線量計をそのまま置いて行う。一方、個人線量計の校正では、アクリル樹脂などで作られたに線量計を取り付けて  $\gamma$ 線場に置く必要がある。

作業環境の線量測定を行うに際して、 $^{137}\text{Cs}$ の標準点線源（1 m の距離における線量率： $36 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 、不確かさ： $2.2 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ）を用いてサーベイメータを校正し、校正定数を求めることとした。散乱線及びバックグラウンドの影響が無視できる条件下で、線源から 0.80 m（距離の不確かさ： $0.01 \text{ m}$ ）の位置にサーベイメータを置き、指示値を繰り返し読み取った。その結果、指示値の平均値は  $62 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 、その不確かさは  $5.0 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。線源からの距離の則に従い、この校正作業の結果求められる校正定数の値は約、また、各パラメータの不確かさが標準偏差で与えられているとすると、校正定数の合成された相対標準不確かさは約%になる。

< N～P の解答群 >

- 1 遮蔽板    2 ICRU 球    3 ファントム    4 吸収板    5 国家標準  
6 エンドユーザ    7 日本工業規格    8 指数関数    9 逆 2 乗    10 比例  
11 反比例

< ア、イの解答群 >

- 1 0.58    2 0.73    3 0.91    4 1.1    5 1.4    6 1.7    7 8.5  
8 10    9 12    10 15

【解答】

I -5    -13    -1    -3    -12    -10    -8

注) A, B : 電離箱内部では電離することで生じた電子と陽イオンが、高電圧がかけられている電極に向かって移動することで電流が流れる。これが電離電流である。この電離電流は非常に微弱で、電離箱はガス増幅も無く、その内部は空気などの気体であるため、一般的に GM 計数管やシンチレーション検出器よりも感度は低い。

C, D : GM 計数管の電極には電離箱よりも更に高い電圧がかけられており、電離されて生じた電子が電極に移動する際に加速し、更に他のガスを電離することでガイガー放電（電子なだれ）が生じる。この現象の中で電極を包むように陽イオンの鞘ができ、これが消えるまで次の計数（放電）ができない不感時間が生じる。そのため高線量率になるにつれ、数え落としが顕著となり、最終的に計数ができない窒息現象が生じる。

E : シンチレーション検出器において密度や実効原子番号の高いシンチレータであれば、光電吸収が高くなり、高い検出効率が得られる。そのため、感度が高い。線量率の低い場でも検出器に入射する放射線を効率良く測定できる。

F, G : 測定原理の関係から GM 計数管式やシンチレーション検出器式のサーベイメータは電離箱式サーベイメータよりもエネルギー特性が良好ではない。ただし、NaI(Tl) シンチレーション検出器式サーベイメータでは入射エネルギーに比例した波高のパルスが得られるため、エネルギー情報の取得も可能である。このパルス波高（エネルギー情報）を利用し、エネルギー特

性を補償する機能を付加した NaI(Tl)シンチレーション検出器式サーベイメータも市販されている。

II H-9      I-6      J-3      K-4      L-1      M-11

- 注) H：個人線量測定に用いる受動型線量計として、感光作用を利用した、フィルムバッジが古くから利用されてきた。フィルムバッジは発光現象を用いた線量計ではない。
- I：蛍光ガラス線量計は特殊なガラス(銀活性リン酸塩ガラス)が用いられ、線量の読み取りにあたっては紫外線を照射することによる発光を利用している。
- J：OSL線量計は酸化アルミニウムが用いられ、線量の読み取りにあたっては強い光(レーザー光)を照射し、刺激することによる輝尽発光を利用している。なお、熱を外部から加え、その発光を利用した線量計はTLDである。
- K：DIS線量計は不揮発性メモリを応用した線量計で、空気を電離した電子を電極に相当する不揮発性メモリに集め、その電離量から線量を測定する。低い線量(1 μSv)から測定できるものが市販されている。
- L：個人線量測定に用いる能動型線量計として、シリコン半導体検出器を用いた電子式線量計が広く利用されている。
- M：電子式線量計は測定した積算線量や線量率をその場で読み取ることができるため、その測定値に対して警報判定する機能を付けたものもある。

III N-5      O-3      P-9      ア-3      イ-8

- 注) N：放射線測定器は目的とする実用量を正しく示すための精度管理が重要である。そのため、JIS Z 4511にも示されているとおり、基準γ線源での校正が必要である。
- O：個人線量計は測定時に人体に装着して使用するため、校正の際には人体に見立てたアクリル樹脂などで作られたファントムに線量計を取り付けて校正を行う。
- P：線源の線量率が値付けされている距離と、校正時における線源と放射線測定器との距離が異なる場合は、線源からの距離の逆2乗則に従い、照射されている線量率を求める。
- ア：線源から0.80 mにおける線量率は  $36[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]/(0.80[\text{m}])^2 = 56.25[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]$   
指示値の平均値が  $62[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]$  なので  $56.25[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]/62[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] = 0.907 \dots$   
よって校正定数は約0.91となる。
- イ：各パラメータの相対標準不確かさは以下のとおりとなる。

$$\text{標準点線源 (a)} : 2.2[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]/36[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] = 0.061 \dots \approx 0.06$$

$$\text{距離 (b)} : 0.01[\text{m}]/0.80[\text{m}] = 0.0125$$

$$\text{指示値 (c)} : 5.0[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]/62[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}] = 0.080 \dots \approx 0.08$$

これらより、合成された相対標準不確かさは

$$\sqrt{a^2+b^2+c^2} = \sqrt{(0.06)^2+(0.0125)^2+(0.08)^2} = 0.10 \dots$$

約10 [%]となる。

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

- I 放射線のエネルギースペクトルを測定することは、核種の同定や複数核種の放射能の分離測定等にとって重要であり、放射線計測において基本の一つである。通常は、この目的のために、マルチチャンネル分析器(MCA)を用いて、NaI(Tl)シンチレーション検出器やGe半導体検出器など、検出器からのA分布を測定する。しかしながら、これは、必ずしも放射線のエネルギースペクトルそのものではないため、得られたスペクトルから真の放射線のエネルギースペクトルを読み取ることが大

切である。

X,  $\gamma$ 線（光子）は間接電離性放射線に属し、これを検出器によって検出、測定するためには、これらが検出器あるいはその周囲の物質と相互作用を起こして、光子エネルギーが電子や  の運動エネルギーに転移する必要がある。このようにして運動エネルギーを獲得した電子や  が検出器部の物質を電離・励起し、それにより、電気的信号や光信号等をもたらす。相互作用には、光电効果、コンプトン効果、電子対生成があり、どの相互作用を経由したかにより、 分布は大きく異なる。光子のエネルギー分布を知るためには、全吸収ピークの解析が、特に重要である。これは、もとの光子エネルギーが検出器において全て吸収された場合に生じ、その形成には、主に光电効果が寄与する。この場合、 のエネルギーは入射光子エネルギーより軌道電子の結合エネルギー分だけ低いが、その際、同時に放出される  や  も検出器中で吸収され、結果として、全吸収ピークを形成する。なお、 が検出器有感部から逃れ去った場合には、全吸収ピークより低いエネルギーの位置に  ピークが生じる可能性があり、エネルギーの低い光子のスペクトル測定において問題となることがある。

光子エネルギー  $E_\gamma$  が 1.02 MeV 以上の場合、電子対生成が起こり得る。この場合、電子対の生成に 1.02 MeV のエネルギーを必要とする。電子対生成が検出器有感部で生じた場合、生じた電子・ はともに電離・励起に関与するが、 は、消滅するときには 2 本の 0.51 MeV 光子を放出する。この 2 本の 0.51 MeV 光子がさらに光电効果等により検出器内で吸収された場合には全吸収ピークを形成する。これら 2 本の光子の一方または両方が検出器から逃れ去った場合には、 $(E_\gamma - 0.51 \text{ MeV})$  位置あるいは  $(E_\gamma - 1.02 \text{ MeV})$  位置に 1 光子あるいは 2 光子  ピークが形成される。電子対生成が検出器・線源の間の物質中で生じた場合、全吸収ピークの形成に関与しない。

線源と検出器の間に物質が介在する場合、この介在物質中で何らの相互作用を起こさずに通過する割合は、 $\exp(-\mu x)$  である。ここで、 $\mu$  は介在物質の線  係数 [ $\text{cm}^{-1}$ ]、 $x$  は介在物質の厚さ [ $\text{cm}$ ] である。したがって、その全吸収ピークの  は、 $\exp(-\mu x)$  に従って減少するが、MCA のピークチャンネル  は、検出器前面に存在する物質の有無に関係しない。光子が介在物質中でコンプトン効果を起こした場合には、散乱光子が検出器によって検出される可能性があるが、その  は全吸収ピークよりも低いチャンネル  に連続分布し、これによる計数は、全吸収ピークに関与しない。したがって、線源が大量の水や土壌等の試料物質に分散している場合でも、全吸収ピークに着目すれば、 $\gamma$ 線のエネルギー測定やいくつかの核種の放射能の分離測定が可能となる。ただし、この場合、試料中での  $\gamma$ 線の  について、評価し、これを補正する必要がある。

< A~I の解答群 >

- 1 電子    2 陽電子    3 光子    4 オージェ電子    5 特性 X 線    6 光電子  
7 陽イオン    8 電子対生成    9 エスケープ    10 サム    11 位置    12 面積  
13 パルス波高    14 減弱    15 吸収

II  $\alpha$ 線や  $\beta$ 線のような荷電粒子線の場合には、線源と検出器との間に物質が介在すると必ず  が生じ、そのためスペクトルは低エネルギー側にシフトする。 $\alpha$ 線のような重い荷電粒子のエネルギー測定に際してはこの現象は特に顕著である。 $\alpha$ 線スペクトル測定におけるこうした影響を最小限に抑制するためには、検出器窓や不感層が出来るだけ薄いものを用いるとともに、検出器と線源を真空槽に入れて、線源と検出器の間の空気を排気する。検出器には、不感層が薄く、かつ分解能が優れている  が通常用いられている。

5.0 MeV  $\alpha$ 線に対する空気中の  は  $0.76 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$  であるから、線源・検出器間距離が 1 cm の場合でも、この間に 1 気圧、20℃の空気層（密度： $1.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）が介在すると、電着線源から放出された 5.5 MeV  $\alpha$ 線のピークの位置は  MeV 相当の位置付近にまでシフトすると予想さ

れる。この際、エネルギー損失のゆらぎ(ストラグリング)や斜め入射の影響等が重なり、ピークの幅も増加する。ピーク幅の増加に伴って、ピークチャンネルにおける計数値は減少するが、これは主にピーク幅が広がったことによるものであって、この程度のエネルギーであれば、 $\alpha$ 線ピーク領域の **L** はあまり変わらない。これは、大きな角度で散乱する **M** の確率が小さいことによる。

また、試料物質(線源物質)自体の自己吸収によっても、**J** を受けるので、分解能の優れたスペクトルを得るためには、線源部がきわめて薄い電着線源の使用が必要となることもある。線源が厚くなると、スペクトルの分解能は劣化する。さらに、試料物質が $\alpha$ 線の **N** 以上に厚い場合、エネルギー端が $\alpha$ 線エネルギーに相当する **O** スペクトルとなる。

$\beta$ 線はもともと連続スペクトルであるが、スペクトルの形やエネルギー端の値から、核種の推定や分離測定に活用することは、放射能の管理測定や環境試料の測定にとって有用である。 $\beta$ 線のエネルギースペクトル測定についても、線源・検出器間の物質により、**J** がもたらされ、スペクトル全体が低エネルギー側にシフトする事情は変わらない。この場合、 $\beta$ 線に対する **K** は $\alpha$ 線の場合に比べて小さいため、真空槽の使用は通常求められないが、試料調製により、出来るだけ薄い測定試料を準備する努力は必要である。 $[\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}]$  単位で表した $\beta$ 線の **N** は $\alpha$ 線の場合に比較して格段に大きく、エネルギーの高い $\beta$ 線の全エネルギーを検出器有感部で吸収させるためには、有感部が厚い検出器を使用する必要がある。検出器の厚さが不十分であると、スペクトルの形にゆがみを生じる。また、 $\beta$ 線は検出器の表面付近で **P** されて、検出器の外に逃れ、 $\beta$ 線のエネルギーの一部が検出器に付与されなくなる。この現象を軽減するために、**Q** 原子番号の材料で作られた検出器を用いるのが望ましい。**ウ** も $\beta$ 線スペクトル測定に有用である。この場合、自己吸収の問題や **N** , **P** の問題から逃れることが出来る。

< J~Q の解答群 >

- 1 計数損失    2 エネルギー損失    3 位置    4 面積    5 飛程    6 高い  
7 低い    8 指数減衰型    9 片側ガウス状    10 台形状    11 コンプトン散乱  
12 ラザフォード散乱    13 後方散乱    14 質量阻止能    15 質量減弱係数

< ア~ウの解答群 >

- 1 比例計数管    2 グリッド付パルス電離箱    3 表面障壁型シリコン半導体検出器  
4 リチウムドリフト型シリコン半導体検出器    5 液体シンチレーション計数装置  
6 CsI(Tl)シンチレーション検出器    7 4.0    8 4.3    9 4.6    10 5.0    11 5.2

[解答]

- I **A**-13    **B**-2    **C**-6    **D**-5    **E**-4    **F**-9    **G**-14  
**H**-12    **I**-11

注) 光子と物質との相互作用に関する問題である。

A : 1本の放射線によって生じる電荷を測定するのがNaI(Tl)シンチレーション検出器やGe半導体検出器などである。パルス波高は生じた電荷の総和に比例する。この時、検出器の印加電圧によってパルス波高が異なることに注意を要する。

D, E : いずれも光電子のエネルギーが生じさせた励起状態に関係する。光電子によって物質の軌道電子が散逸し、軌道に空席ができる。この空席に外殻の電子が遷移する場合、外殻の電子の方が、エネルギーが大きいため、遷移先のエネルギーとの差分がX線として発生する。これを特性X線という。また、このエネルギーを用いて物質の別の軌道電子を放出させることがあるが、これをオージェ電子という。

F : 電子対生成では陽電子と陰電子が結合し、2本の0.51 MeVの消滅放射線が生じる。このうち1本が検出部から逃れると  $(E_{\gamma}-0.51)$  MeVの位置にシングル・エスケープピークが生じ、2

本が逃れると ( $E_{\gamma}-1.02$ ) MeV の位置にダブル・エスケープピークが生じる。

G, H：一般的な Lambert-Beer（ランベルト・ベール）の法則のことを示している。物質透過に対する光子強度 ( $I$ ) は、微小距離の変化に対し、以下の微分で表すことができる。

$$-dI/dt = \mu I$$

この偏微分方程式を解くと  $I = I_0 \exp(-\mu x)$  となる。

- II  J -2       K -14       L -4       M -12       N -5       O -10  
 P -13       Q -7       ア -3       イ -9       ウ -5

注) ア：半導体検出器のうち、 $\alpha$ 線や重荷電粒子の測定に用いられるのが「表面障壁型半導体検出器」。 $\gamma$ 線や X 線の測定には「リチウムドリフト型」や「高純度ゲルマニウム型」が用いられる。

K：質量阻止能についての問題は頻出される。荷電粒子は物質との相互作用を起こして、エネルギー損失を生じるが、これを単位長さ当たりで表したものである。

イ： $5.5 - (0.76 \times 1.2 \times 1) \approx 4.9$

M：この場合は荷電粒子と物質の原子核（正電荷）との衝突を指す。

P： $\beta$ 線は、物質の中を直進することはほとんどの場合できない。電子、あるいは原子核との衝突は後方散乱を起こす場合もある。

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

I 密封されていない放射性同位元素を使用するにあたっては、放射性同位元素の核的性質、化学的性質とともに、外部被ばくに関わる線量限度、内部被ばくに関わる濃度限度等を知っておくことが重要である。ここでは、ある施設で使用の許可を受ける際の評価計算を一例として、その施設で使用する核種毎に使用数量がどのように定められたのか、どのように実際の管理が行われているかについてまとめてみることにする。

使用施設内の、人が常時立ち入る場所では、1 週間の被ばく線量を  ア mSv 以下にする必要がある。その際の、計算条件としては、使用の許可を得ようとしている全ての核種の  A 使用数量を使用頻度が高く作業室の中の最も外部被ばく線量が高くなると想定される場所で使用したとして、1 時間あたりの被ばく線量を計算する。さらに、1 週間の予定作業時間を乗じる。外部被ばくの計算は線源からの距離を 50 cm と想定し、 $\gamma$ 線や制動放射線による  B を評価する。その際、 $\gamma$ 線源の場合には、必要に応じ線源との間に鉛等の遮蔽体を設置することにする。

また、貯蔵施設や廃棄施設の作業中の被ばく線量も考慮する。貯蔵施設での計算では、施設の貯蔵能力で評価することになるが、使用核種が短寿命核種でない場合は、一般に  C 使用数量を貯蔵能力としていることが多い。計算に際しては貯蔵室に備えている保管容器や貯蔵箱の遮蔽厚さ等を確認する必要がある。廃棄施設では、 C 使用数量が全て保管廃棄されるものとする。短寿命核種では減衰も考慮できる。作業中に使用施設、貯蔵施設および廃棄施設に存在する線源から受ける  B を合算し、法令限度を超えないように、核種毎の数量を決めることになる。

さらに、管理区域に係わる外部放射線の線量は 3 月間で  B が  イ mSv を超えないようにしなければならない。その際、使用施設のみならず、貯蔵施設や保管廃棄施設から管理区域境界への線量の寄与も考慮する必要がある。その際の評価時間は管理区域境界で作業する人の実労働時間を考慮して 500 時間とする。

また、事業所境界や事業所内の居住区域では、最大となる  B が最大で 3 月間あたり  ウ  $\mu$ Sv を超えないようにしなければならない。その際、評価時間は  エ 時間とする。

上記の条件を満たすようにするためには、核種の  B 率定数の大きさを考慮して使用数量を検

討することも必要になる。例えば、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ の3核種を使用する場合  率定数は  が最も大きくなることを理解しておく必要がある。

実際に放射線の量の測定を行う際には、使用施設、管理区域境界、事業所境界等について  期間毎に1回測定することになる。その際、サーバイメータの指示値は  で得られることから、 に読みかえて評価する。同時に、作業室等の汚染検査を実施し、測定結果を記録する。

<ア～エの解答群>

- 1 0.1    2 1    3 1.3    4 5    5 10    6 13    7 24    8 50    9 100  
10 250    11 500    12 2,184    13 8,736

<A～Cの解答群>

- 1 1日最大    2 1週間    3 3月間    4 6月間    5 年間    6 実効線量  
7 等価線量    8 1cm線量当量率    9 3mm線量当量率    10 70 $\mu\text{m}$ 線量当量率

<Dの解答群>

- 1  $^{51}\text{Cr}$     2  $^{60}\text{Co}$     3  $^{137}\text{Cs}$

<Eの解答群>

- 1 1週間を超えない    2 1月を超えない    3 3月を超えない    4 6月を超えない

<Fの解答群>

- 1 実効線量    2 等価線量    3 1cm線量当量率    4 3mm線量当量率  
5 70 $\mu\text{m}$ 線量当量率

II 密封されていない放射性同位元素を使用するにあたっては、内部被ばくに関わる評価も行う必要がある。その際には、告示別表第2を参照することが必要となってくる。告示別表第2は以下に示すように、核種毎に第一欄から第六欄までの構成となっている。告示別表第2の第二欄，第三欄に示された係数を用いて、吸入および経口摂取した場合の  を求めることができる。

別表第2（第7条，第14条及び第19条関係）放射性同位元素の種類が明らかで，かつ，一種類である場合の空气中濃度限度等

第一欄		第二欄	第三欄	第四欄	第五欄	第六欄
放射性同位元素の種類		吸入摂取した場合の <input type="text" value="オ"/> 係数	経口摂取した場合の <input type="text" value="オ"/> 係数	空气中濃度限度	排気中又は空气中の濃度限度	排液中又は排水中の濃度限度
核種	化学形等	(mSv/Bq)	(mSv/Bq)	(Bq/cm <sup>3</sup> )	(Bq/cm <sup>3</sup> )	(Bq/cm <sup>3</sup> )
$^3\text{H}$	元素状水素	$1.8 \times 10^{-12}$		$1 \times 10^4$	$7 \times 10^1$	

[以下省略]

人が常時立ち入る場所での空气中の放射性同位元素の濃度は、核種毎に  使用数量に1週間あたりの使用日数と  を掛け、使用室の1週間あたりの総換気量で除して求める。作業室への  はフード内でのみ取り扱う場合、気体は0.1，液体や固体は  が示されている。総換気量を求めるには、作業室毎の容積と換気回数を知っておく必要がある。次に、告示別表第2の第四欄の核種毎にその濃度限度で除して比を求め、合算し、その和が1を超えないようにする。さらに、外部被ばく線量に対する比の和と上記の比の和を合算し、1を超えないようにする。

排気中の放射性同位元素の排気口での濃度は、核種毎に  使用数量に  を乗じ、排気浄化設備の  を乗じたものを、 の総排気量で除して求め、告示別表第2の第五欄の核種毎の濃度限度で除してその比を求め、合算し、その和が1を超えないようにする。  フィルタの場合、固体状のものでは99%が捕集され、気体状のものは捕集されないとして計算する。

排水中の放射性同位元素の濃度は、排水設備から排水する際の条件で評価することになる。このためには、核種毎に〔カ〕使用数量に排水への〔J〕および、1日あたりの貯留量を考慮して貯留槽が満水になる日数を掛けて、貯留槽に排水された放射能を求めたうえで、貯留槽の容積で除して求める。核種毎に求めた濃度を告示別表第2の第六欄の核種毎の濃度限度で除してその比を求め、合算する。この比の和が1を超える場合には、希釈槽の希釈能力を考慮して最終的な比の和が1を超えないようにする。

施設の排気、排水設備の能力をもとに上記の計算を行うにあたっては、核種や化学形によって排気や排水の際の濃度限度が異なるので、比の和が1を超えないように使用数量を検討することになる。

排気監視はガスモニタ、ダストモニタを用いて行われるが、核種の同定が困難な場合には、上記と同様の使用数量をもとに計算によって排気記録を作成することができる。また、排水する際には、排水中の放射能を測定し記録をとり、濃度限度以下であることを確認することが必要になる。複数の揮発性の低いベータ線放出核種のみを同時使用している施設では、排水を蒸発乾固して、その残渣を試料皿に集め、GM管式計数装置や〔K〕で全ベータ放射能測定をし、使用核種の中で最も厳しい濃度限度との比を求め、評価することも行われている。

最後に、実際の使用にあたっては、使用記録簿から核種毎の使用数量が許可数量以下になっていることを確認しておくことが大切である。

<オ～クの解答群>

- 1 1日最大    2 1週間    3 3月間    4 6月間    5 年間    6 0    7 0.001  
 8 0.1    9 0.2    10 1    11 等価線量    12 1センチメートル線量当量  
 13 実効線量    14 被ばく線量

<G～Kの解答群>

- 1 飛散率    2 拡散率    3 汚染率    4 混入率    5 透過率    6 プレ  
 7 チャコール    8 HEPA    9 Ge 検出器    10 Si 検出器  
 11 NaI(Tl)シンチレーションカウンタ    12 ガスフローカウンタ  
 13 液体シンチレーションカウンタ

[解答]

- I    〔ア〕-2    〔イ〕-3    〔ウ〕-10    〔エ〕-12    〔A〕-1    〔B〕-6    〔C〕-5  
      〔D〕-2    〔E〕-2    〔F〕-3

注) ア：放射線障害防止法施行規則第14条の7第1項第3号イ、平成24年3月28日文科科学省告示第59号第10条第1項に基づく。

B：(実効線量) 同施行規則第2条第2項第6号に基づく。

イ：同施行規則第1条第1項1号、上記告示第4条第1項第1号に基づく。

ウ：同施行規則第14条の7第1項第3号ロ、上記告示第10条第2項第1号に基づく。

エ：事業所境界や事業所内の居住区域は24時間滞在すると仮定し、3月間は91日で計算するので  
 $24 \text{ h/d} \times 91 \text{ d} / 3 \text{ 月} = 2184 \text{ h} / 3 \text{ 月}$

D：実効線量率常数は、 $^{51}\text{Cr} : 0.00457 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $^{60}\text{Co} : 0.305 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $^{137}\text{Cs} : 0.0779 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (アイソトープ手帳11版(日本アイソトープ協会)より)

E：同施行規則第20条第1項第4号イ。

- II    〔オ〕-13    〔カ〕-1    〔キ〕-7    〔ク〕-3    〔G〕-1    〔H〕-5    〔I〕-8  
      〔J〕-4    〔K〕-12

注) オ、カ、G、キ、ク、H：「平成12年10月23日 国際放射線防護委員会の勧告(ICRP Pub.60)の取り入れ等による放射線障害防止法関係法令の改正について(通知)」(別添2)より「改正に

関する留意点等」の「IV改正法令に基づく評価に当たっての考え方」

- I：プレフィルタは粗塵用フィルタであり、HEPAフィルタの前段で用いる。チャコールフィルタはヨウ素の捕集を目的としたフィルタ。HEPAフィルタは定格風量で粒径が $0.3\ \mu\text{m}$ の粒子に対して99.97%以上の粒子捕集率を持ち、かつ初期圧力損失が $245\text{Pa}$ 以下の性能を持つ。エアフィルタはJIS Z 8122を参照。
- J, K：Ge検出器は $\gamma$ 線測定、Si検出器は低エネルギー $\gamma$ 線およびX線測定、NaI(Tl)シンチレーションカウンタは $\gamma$ 線測定に使用する。ガスフローカウンタは使用するガスによって測定対象が異なる。PRガスは、 $\alpha$ 線および $\beta$ 線測定、 $\text{BF}_3$ は中性子線測定に使用される。液体シンチレーションカウンタは $\alpha$ 線および $\beta$ 線測定に使用され、測定試料を液体シンチレータに溶解させて測定を行う。

問4 非密封放射性同位元素の $^3\text{H}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ を取り扱う施設がある。各使用核種の取扱いに関する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 トリチウム水は、蒸発や飛散などにより周囲を汚染しやすいので、トリチウム水を取扱う作業はフードまたはグローブボックス内で行う。空気中の放射性物質の濃度を測定するには、いったん捕集して行う方法がとられる場合が多い。トリチウム水には、□Aまたはモレキュラーシーブを用いた固体捕集法や、ドライアイスなどを用いたコールドトラップによる冷却凝縮法などを利用する。気体トリチウムには、パラジウム触媒を用いてトリチウム水に変換したのち、上記の固体捕集法や冷却凝縮法を適用する。トリチウムの $\beta$ 線最大エネルギーは□アkeVであり、その放射能測定には□Bが用いられる。また、試料水は、□C濃度の低いガラスバイアル又はポリエチレンバイアル等に入れ、水と□Dを形成する乳化シンチレータと混和して測定する。

<A～Dの解答群>

- 1 アルミナ    2 シリカゲル    3 酸化鉄(Ⅲ)    4 酸化銅(Ⅱ)  
5 GM管式計数装置    6 液体シンチレーション計数装置    7 Ge検出器  
8 ナトリウム    9 マグネシウム    10 カリウム    11 気泡    12 白色沈殿  
13 エマルジョン

<アの解答群>

- 1 18.6    2 157    3 249    4 257

II  $^{137}\text{Cs}$ は半減期約30年で□イ壊変して、その94%は $^{137\text{m}}\text{Ba}$ になり、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ は核異性体転移により $\gamma$ 線(□ウkeV)を放出する。

非密封の $^{137}\text{Cs}$ を使用する際には作業室のフードの中で取り扱い、線源バイアルはピンセットやトングなどを使い、直接手では扱わないようにする。 $^{137}\text{Cs}$ (塩化物)の $50\text{MBq}$ が入ったガラスバイアルを鉛の外容器から取り出してバット内に置き、バイアルから $50\text{cm}$ の距離で5時間作業を行った。バイアルの遮蔽効果を無視すると作業者の実効線量は□エ $\mu\text{Sv}$ となる。

遮蔽用の衝立には鉛板を用いる。 $^{137}\text{Cs}$ の $\gamma$ 線に対する鉛の半価層の最も近い値は□オcmである。また、線源バイアルと作業者の距離を変えずに線量率を10分の1にするために線源の入ったガラスバイアルを鉛板で遮蔽するには、その厚さ $1\text{cm}$ の板が少なくとも□カ枚必要である。

ただし、 $^{137}\text{Cs}$ の実効線量率定数は $0.078\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}$ 、 $\gamma$ 線に対する鉛の質量減弱係数は $0.11\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 、鉛の密度を $11.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とし、ビルドアップの影響は無視した。

<イの解答群>

- 1  $\alpha$     2  $\beta^-$     3  $\beta^+$     4 EC



<ウの解答群>

1 159 2 514 3 662 4 835 5 1,369

<エの解答群>

1 16 2 24 3 37 4 78 5 87

<オの解答群>

1 0.1 2 0.6 3 2.8 4 5.6 5 7.3

<カの解答群>

1 1 2 2 3 3 4 4 5 5

- Ⅲ ヨウ素のトレーサー実験には  $^{125}\text{I}$ （半減期 59.4 日）や  $^{131}\text{I}$ （半減期 8.02 日）が多く利用される。ヨウ素の化合物には揮発性のものが多い。例えば、ヨウ化カリウム（KI）を含む水溶液を  にすると揮発性の  が生成する。このため、放射性ヨウ素標識 KI を取扱う作業は、フードやグローブボックス内で行い、 を含むマスクを着用する。放射性ヨウ素標識ヨウ化メチルの取扱いは、 よりも  を含むマスクの着用が有効である。

$^{125}\text{I}$  は EC 壊変して、 の励起準位から  $\gamma$  線（35.5 keV）を放出する。また、 $\gamma$  線放射と競合する内部転換により、特性 X 線（27.4 keV 及び 31.1 keV）を放出する。実験テーブルや床面の直接法による表面汚染検査には、低エネルギー光子専用の  式サーベイメータの利用が適している。実験テーブルや床面の除染作業は、ペーパータオルなどに、中性洗剤、あるいは還元性の  を浸み込ませて拭き取り、その後、再度サーベイメータで測定して汚染のないことを確認する。

<E~Hの解答群>

1 酸性 2 中性 3 アルカリ性 4  $\text{IO}_3^-$  5  $\text{I}_3^-$  6  $\text{I}^-$  7  $\text{I}_2$   
 8 無添着活性炭 9 有機アミン添着活性炭 10 シリカゲル添着活性炭  
 11 アルミナ添着活性炭

<Iの解答群>

1  $^{125}\text{Sn}$  2  $^{125}\text{Sb}$  3  $^{125}\text{Te}$  4  $^{125}\text{Xe}$

<J, Kの解答群>

1 比例計数管 2 ZnS(Ag)シンチレーション 3 薄型 NaI(Tl)シンチレーション  
 4 井戸型 NaI(Tl)シンチレーション 5 希塩酸 6 過酸化水素水  
 7 亜硫酸ナトリウム水溶液

- Ⅳ 実験室からの排水は、一旦、排水設備の貯留槽に溜め置かれる。貯留槽内の排水を排水するには、含まれる放射性同位元素の濃度・化学形、排水中の濃度限度を考慮する必要がある。

貯留槽にトリチウム水  $30 \text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1}$  と無機  $^{131}\text{I}$   $120 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$  を含む廃液があり、その水量は  $1 \text{ m}^3$  である。これをただちに排水するには、少なくとも   $\text{m}^3$  の水で希釈しなければならない。一方、新たな流入がない状態で 24 日間減衰を待つと、それぞれの濃度と排水中の濃度限度との比の和は  となり、24 日後に放射能が排水中の濃度限度以下であることを測定により確認した上で排水できる。

ただし、告示別表第 2 第六欄に定める  $^3\text{H}$ （水）及び  $^{131}\text{I}$ （ヨウ化メチル以外の化合物）の排水中の濃度限度はそれぞれ  $6 \times 10^1 \text{ Bq/cm}^3$ 、及び  $4 \times 10^{-2} \text{ Bq/cm}^3$  である。 $^3\text{H}$  及び  $^{131}\text{I}$  の半減期は、それぞれ 12 年及び 8 日とする。

<Lの解答群>

1 1.3 2 2.5 3 3.5 4 5.4 5 6.4

<Mの解答群>

1 0.1 2 0.3 3 0.5 4 0.7 5 0.9

〔解答〕

I [A]-2 [B]-6 [B]-10 [B]-13 [ア]-1

注) B:  ${}^3\text{H}$  や  ${}^{14}\text{C}$  等の低エネルギー  $\beta$  線核種の測定には, 検出効率の高さなどから液体シンチレーションカウンタがよく使われる。

C: ガラスに含まれる  ${}^{40}\text{K}$  からのバックグラウンド低減のため, カリウム含有量の少ないホウ珪酸ガラスのバイアルが使われる。またポリエチレンはカリウムや  $\text{U}\cdot\text{Th}$  系列核種をほとんど含まず, バイアルとしても使われる。

D: エマルジョンとは, 互いに溶け合わない液体で, 一方が他の液体中に微粒子状で分散しているもの。乳化シンチレータは, 水との親和性を高めるために界面活性剤等を加えた各種のシンチレータが市販されている。

II [イ]-2 [ウ]-3 [エ]-4 [オ]-2 [カ]-2

注) エ:  ${}^{137}\text{Cs}$  の実効線量率定数が単位とともに与えられているので, 距離, 作業時間, 放射能を当てはめて計算する。

オ:  $\gamma$  線の透過率計算で使う減弱係数は, 遮蔽物質の厚さを  $\text{cm}$  で示すと線減弱係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) となり,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  で示す場合は質量減弱係数 ( $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ) となる。その関係は, 線減弱係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) = 遮蔽物質の密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )  $\times$  質量減弱係数 ( $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )。文中の数値より,  $\gamma$  線に対する鉛の線減弱係数  $\mu$  を求めると,  $\mu = 1.25$  ( $\text{cm}^{-1}$ )。半価層は,  $\ln 2/\mu$ 。よって鉛の半価層は,  $\ln 2/\mu = 0.693/1.25 = 0.55$  ( $\text{cm}$ )。

カ:  $1/10$  価層は,  $\ln 10/\mu$ 。よって,  $2.303/1.25 = 1.84$  ( $\text{cm}$ )。したがって  $1\text{cm}$  厚の鉛板が少なくとも2枚は必要となる。

(参考:  $1/10$  価層の厚さ  $\approx 3.3 \times$  半価層の厚さ)

III [E]-1 [F]-7 [G]-8 [H]-9 [I]-3 [J]-3 [K]-7

注) E, F: 放射性ヨウ素を含む水溶液は, 酸性になると  $\text{I}_2$  として揮発しやすいため, 廃液等の保管ではアルカリ性に保つようにする。

G, H: 放射性ヨウ素の取扱いでは, 内部被ばく防止のため, 活性炭マスクの着用が望ましい。活性炭には無添加の無添着活性炭と有機アミン類を添加した添着活性炭がある。無添着活性炭は無機性ヨウ素を吸着し, 添着活性炭はそのほかに有機性ヨウ素も吸着する。

J: 通常のシンチレーション式サーベイメータでは, エネルギーカットオフレベルが設定され,  $50\text{keV}$  程度以下の  $\gamma$  線は測定できない。そこで, 低エネルギー  $\gamma$  (X) 線を選択的に測定できるよう, 薄い  $\text{NaI}(\text{Tl})$  シンチレータとベリリウム薄窓を組み合わせ, 低エネルギー光子まで測定可能なサーベイメータがある。

K: 除染剤には酸を含む物もある。それらを使うと, 酸の作用により放射性ヨウ素 ( $\text{I}_2$ ) を発生させることもあり, 除染剤の選択には注意が必要。

IV [L]-2 [M]-5

注) L: 槽内の  ${}^3\text{H}$  の総量は,  $30(\text{kBq}\cdot\text{L}^{-1}) \times 1(\text{m}^3) = 30(\text{kBq}\cdot\text{L}^{-1}) \times 1000(\text{L}) = 30(\text{MBq})$ 。

同様に無機  ${}^{131}\text{I}$  の総量は,  $120(\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}) \times 1000(\text{L}) = 120(\text{kBq})$ 。

排水するには, 各 RI の濃度限度との比の和を1以下にする必要がある。比の和が1となる貯留槽の水量を  $X(\text{m}^3)$  とすると,

$$\left\{ \frac{30 \times 10^6 (\text{Bq})}{X \times 10^6 (\text{cm}^3)} \right\} / \{6 \times 10 (\text{Bq}/\text{cm}^3)\} + \left\{ \frac{120 \times 10^3 (\text{Bq})}{X \times 10^6 (\text{cm}^3)} \right\} / \{4 \times 10^{-2} (\text{Bq}/\text{cm}^3)\} = 1$$

これを解くと  $X = 3.5$ 。よって, 少なくともあと  $2.5\text{m}^3$  の水を加える必要がある。

M：当初の  $^3\text{H}$ 、および無機  $^{131}\text{I}$  の濃度は、それぞれ  $30(\text{Bq}/\text{cm}^3)$ 、 $0.12(\text{Bq}/\text{cm}^3)$ 。

24 日間は  $^{131}\text{I}$  の半減期（8 日）の 3 半減期分にあたる。よって、24 日後の  $^{131}\text{I}$  の濃度は、 $0.12(\text{Bq}/\text{cm}^3) \times (1/2)^3 = 0.015(\text{Bq}/\text{cm}^3)$ 。

$^{131}\text{I}$  の半減期のみを考慮した場合でも、24 日後の濃度限度との比の和は、

$[30(\text{Bq}/\text{cm}^3)/60(\text{Bq}/\text{cm}^3)] + [0.015(\text{Bq}/\text{cm}^3)/0.04(\text{Bq}/\text{cm}^3)] = 0.875 \div 0.9$  となり、1 以下となる。したがって、そのまま排水が可能。

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

I 放射線防護の目的を達成するためには、 A  影響のしきい線量、 B  影響の発生頻度および容認できるリスクレベルをよく理解しておくことが重要である。ICRP2007 年勧告ではこれらについて推定された数値が報告されている。

A  影響は、しきい線量のある組織障害反応であり、被ばく線量が大きくなると障害も重篤になる。一般に、骨髄のように常に分裂する幹細胞が存在し細胞交替率が C  臓器・組織では障害が D  現れ、肝臓のように細胞交替率が E  臓器・組織では障害が F  現れる。組織障害のしきい線量は臓器・組織により異なるが、その値は全身  $\gamma$  線被ばくした成人集団の 1% に症状が現れる吸収線量として推定されており、造血機能低下ではおよそ ア  Gy、一時的脱毛ではおよそ 4 Gy、男性の一時的不妊ではおよそ イ  Gy である。また、骨髄死のしきい線量は、治療しない場合はおよそ ウ  Gy である。

B  影響に属するものには、発がん遺伝性（的）影響がある。 B  影響を評価するために、 G  で調整した単位放射線量当たりのリスクの大きさが推定されており、これは G  で調整された H  と呼ばれる。がんについてのこの値は全集団で エ   $\times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 、成人では  $4.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  と推定されている。

< A, B の解答群 >

1 確率的 2 晩発 3 遺伝性（的） 4 確定的 5 急性

< C~F の解答群 >

1 遅く 2 早く 3 低い 4 高い

< ア, イの解答群 >

1 0.1 2 0.5 3 1.5 4 6.5

< ウの解答群 >

1 1 2 3 3 5 4 8 5 10

< G の解答群 >

1 線質係数 2 損害 3 相対生存率 4 組織加重係数

< H の解答群 >

1 過剰相対リスク 2 過剰絶対リスク 3 名目リスク係数 4 預託実効線量係数  
5 線量・線量率効果係数 6 生物学的効果比

< エの解答群 >

1 1.1 2 2.2 3 3.3 4 4.4 5 5.5

II 放射線防護に用いる量（防護量）である等価線量と実効線量は、臓器・組織の平均吸収線量と放射線の人体影響リスクを関連づけた線量概念である。被ばくした各臓器・組織の防護量が等価線量である。同一の吸収線量でも、放射線の種類やエネルギーにより人体影響リスクは異なるため、臓器・組織の平均吸収線量に オ  を乗じることにより等価線量を算出する。高 LET 放射線の オ  は、

□I□における□J□影響に対して導出されており、ICRP2007年勧告におけるその値は、アルファ粒子に対しては□K□、中性子に対しては□L□となっている。

全身の防護量である実効線量を算出するには、等価線量に各臓器・組織の放射線影響の感受性を勘案した□カ□を乗じて合計する。□カ□は全身が均等被ばくした時の全身の障害に対する各臓器・組織の障害の寄与を表し、全臓器・組織について足し合わせると1となるように設定されている。□カ□として、ICRP2007年勧告では、□M□それぞれに対しては0.12、□N□それぞれに対しては0.01が勧告されている。

<オ、カの解答群>

- 1 線質係数    2 線量・線量率効果係数    3 生物学的効果比    4 放射線加重係数  
5 質量エネルギー吸収係数    6 組織加重係数

<Iの解答群>

- 1 高線量    2 低線量    3 1 Gy    4 0.1 Gy

<Jの解答群>

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

<K, Lの解答群>

- 1 1    2 2    3 5    4 10    5 20    6 エネルギーのステップ関数  
7 エネルギーの連続関数

<M, Nの解答群>

- 1 骨髄(赤色), 結腸, 肺, 胃, 乳房    2 膀胱, 食道, 肝臓, 甲状腺  
3 骨表面, 脳, 唾液腺, 皮膚    4 生殖腺, 睪<sup>すい</sup>臓, 胆嚢, 前立腺

[解答]

- I □A□-4    □B□-1    □C□-4    □D□-2    □E□-3    □F□-1    □ア□-2  
□イ□-1    □ウ□-1    □G□-2    □H□-3    □エ□-5

注) 平成27年度に引き続き、ICRP 2007年勧告からの出題である。ちなみに、国際放射線防護委員会(ICRP)による放射線防護の考え方と関連データはICRP Publicationsのシリーズとして刊行されており、1990年勧告はPublicaiton 60、2007年勧告はPublicaiton 103に当たる。

ア～ウ: 組織障害のしきい線量は、ICRP Publication 103表A.3.4に記載。

骨髄死のしきい線量について、1.5 Gyや2.5 Gyと書かれている参考書があるが、ここで、注意しなければならないのは、ウで「治療しない場合」と限定している点である。表A.3.4では、「手厚い治療を行った場合」のしきい線量は、2～3 Gyとなっている。

G: 損害 [Detriment] とは、あるグループが放射線源に被ばくした結果、被ばくグループとその子孫が受ける健康上の害の全体。損害は、多次元の概念であり、その主な構成要素は、次の確率量である。致死がんの寄与確率、非致死がんの加重された寄与確率、重篤な遺伝性影響の加重された寄与確率、及び、害が発生した場合の寿命短縮年数。損害で調整されたリスク [Detriment-adjusted risk] とは、結果の重篤度を表現するため、損害の様々な構成要素を考慮に入れるように修正された確率的影響の発生確率。

H: 名目リスク係数 [Nominal risk coefficient] とは、代表的集団における性および被ばく時の年齢で平均化された生涯リスク推定値。

エ: ICRP Publication 103「3.2 確率的影響の誘発」表1に記載。ICRPの1990年勧告に比べ、リスク係数が低くなっていることが分かる。

- II □オ□-4    □カ□-6    □I□-2    □J□-3    □K□-5    □L□-7    □M□-1  
□N□-3

注) K, L : 放射線加重係数の勧告値は, ICRP Publication103「4. 放射線防護に用いられる諸量」表 2 に記載。

L : ICRP 1990 年勧告では, 中性子の放射線加重係数をステップ関数で定義していたが, 2007 年勧告では, 連続関数で定義している。ICRP Publication 103「4.3 様々な線量」図 1 に記載。

M, N : ICRP Publication 103「4.3 様々な線量」表 3 に記載。

【参照】 日本アイソトープ協会ホームページ (<http://www.jrias.or.jp>) より

ICRP 勧告 日本語版シリーズ (PDF ダウンロード)

⇒ <http://www.jrias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html>

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 ICRP は 2007 年勧告で放射線防護にあたって個人の被ばく状況を,  A  被ばく状況,  B  被ばく状況,  C  被ばく状況の 3 つに分類している。 A  被ばく状況とは, “被ばくが生じる前に放射線防護を前もって計画することができる状況, 及び被ばくの大きさや範囲を合理的に予測できるような状況” のことで, 原子力発電の定常運転, 放射性同位元素の産業利用, 医療での利用などが含まれる。 B  被ばく状況とは, “急を要する防護対策と, おそらく長期的な防護対策の履行が要求されるかもしれない不測の状況” のことで, 原子力発電所の大規模な事故やテロなどが含まれる。 C  被ばく状況とは, “管理についての決定がなされる時点で既に存在している状況” で, 高自然放射線地域での居住や原子力発電所の大規模な事故後の汚染地域に居住することなどがこの状況に含まれる。

なお, ICRP では, 被ばくを, 職業被ばく, 公衆被ばく, 患者の医療被ばくの 3 つのカテゴリーに分類している。職業被ばくにおいて, 防護の対象として一般の作業者と区別すべきものとして, 妊娠中又は母乳授乳中の作業者と商用ジェット機及び宇宙飛行の運行中における宇宙線の被ばくをあげている。妊娠している作業者の胚と胎児の被ばくについては  D  被ばくと考えて規制されるべきと勧告している。商業用ジェット機の運行中における搭乗員の宇宙線の被ばくは  E  被ばくとして取り扱う必要があること, 搭乗回数が多い旅客の被ばくは  F  被ばくとして取り扱う必要がないことを述べている。

ICRP2007 年勧告では, 放射線防護のための個人線量のレベルは線量限度,  G  H  により制限されるとしている。線量限度は  A  被ばく状況における  I  被ばく以外に適用され, 全ての規制された線源からの被ばくに対して用いられる。 G  は,  A  被ばく状況 (患者の医療被ばくを除く) におけるある線源からの被ばくに対して用いられ, その線源に対する防護の最適化における予測線量の上限值である。 H  は  B  被ばく状況と  C  被ばく状況における線量又はリスクのレベルを示しており, これを上回る被ばくの発生を許す計画の策定は不適切であると判断され, このレベルに対して防護対策が計画され最適化されるべきであるとしている。

< A~C の解答群 >

1 平時 2 緊急時 3 計画 4 現存 5 現実 6 予想 7 予定

< D~F の解答群 >

1 職業 2 公衆 3 医療

< G, H の解答群 >

1 線量上限値 2 線量規制値 3 線量拘束値 4 予防レベル 5 参考レベル  
6 規制レベル

< I の解答群 >

- 1 職業    2 公衆    3 医療

II 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律では ICRP の 1990 年勧告に基づき放射線業務従事者の放射線防護がなされている。放射線業務従事者の被ばくの線量限度は実効線量限度と眼の水晶体及び皮膚の等価線量限度で規定されている。これらの線量は、直接測定することが困難であるため、外部被ばく線量の測定には実用量が用いられる。この実用量は [ J ] によって定められたもので、実効線量として [ ア ] 線量当量、眼の水晶体の等価線量として [ ア ] 線量当量と [ イ ] 線量当量のうち適切な方、皮膚の等価線量として [ ウ ] 線量当量を用いている。

内部被ばくに関しては、放射性物質を吸入摂取または経口摂取した場合にはすみやかに、放射性物質を吸入摂取または経口摂取するおそれのある場所に立ち入る者の場合には [ K ] に、さらに、放射性物質を吸入摂取または経口摂取するおそれのある場所に立ち入る者の場合で、妊娠中の女性の場合には [ L ] に内部被ばくによる線量を算定することとされている。

放射線業務従事者のうち女子について、線量限度が以下のように定められている。妊娠不能と診断された者、妊娠の意思のない旨を使用者等に書面で申し出た者を除く女子に対して、実効線量限度として [ M ] mSv/3月と定められている。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ついて、外部被ばくに関しては [ N ] の等価線量限度として [ O ] mSv と定められ、 [ エ ] 線量当量で評価し、内部被ばくに関しては預託実効線量で評価されることになっており [ P ] mSv と定められている。

< J の解答群 >

- 1 WHO    2 UNSCEAR    3 IAEA    4 ICRU    5 ICRR

< ア～エの解答群 >

- 1 1マイクロメートル    2 3マイクロメートル    3 10マイクロメートル  
 4 70マイクロメートル    5 1ミリメートル    6 3ミリメートル    7 7ミリメートル  
 8 1センチメートル    9 3センチメートル    10 10センチメートル

< K, L の解答群 >

- 1 すみやか    2 24時間以内    3 48時間以内    4 1月を超えない期間ごと  
 5 3月を超えない期間ごと    6 6月を超えない期間ごと    7 1年を超えない期間ごと

< M の解答群 >

- 1 1    2 2    3 3    4 5    5 10    6 20

< N の解答群 >

- 1 胸部表面    2 腹部表面    3 子宮    4 胎児    5 直腸

< O, P の解答群 >

- 1 1    2 2    3 3    4 5    5 10    6 20

[解答]

- I [ A ] -3    [ B ] -2    [ C ] -4    [ D ] -2    [ E ] -1    [ F ] -1    [ G ] -3  
 [ H ] -5    [ I ] -3

注) 放射線防護体系における被ばくの様態は、被ばくの状況からみると「計画被ばく」、「緊急時被ばく」、「現存被ばく」に区分でき、人の面から見ると「職業被ばく」、「公衆被ばく」、「医療被ばく」に区分できる。

A : 被ばくが計画された状況をいう。事前に必要な防護評価を行うことができる状況をいい、放射線防護の適用対象である。

B : 予期せぬ事故等により一次的、突発的に被ばくがもたらされる状況をいう。主に緊急事態発生

当初に限られ、ある程度状況が落ち着いた後は、放射線防護にかかわる評価に基づく現存被ばく状況、計画被ばく状況に順次移行すべきである。

- C：ほとんどの自然放射線源、あるいは過去の人間活動による残渣など、現世代の意図にかかわらず被ばく源がすでに存在している状況をいう。放射線防護体系からの除外の対象となる場合が多いが、介入を要する場合もある。
- D：職業被ばくと医療被ばくを除いたすべての被ばくを公衆被ばくという。体内に宿った胚、胎児は、放射線業務で利益が得られる職業人ではないという考え方をとする。妊娠したことが明らかになった時点で、女性の作業者は体内の胚、胎児の立場を考慮して胚、胎児の被ばくが一般公衆の線量限度下となる条件にて作業することとなる。
- E, F：主に仕事の結果として生じる被ばくを職業被ばくという。一般の仕事の中で生じる自然放射線源による被ばくは職業被ばくに含めないが、職務上必然的に発生する自然放射線源による被ばくの増加分は、職業被ばくに含めるべきであるとされている。
- G, H：防護の最適化を進めるために利用されるのが、線量拘束値や参考レベルである。線量拘束値や参考レベルは特定の線源からの個人に対する線量を制限するために用いられる。一方、線量限度は、規制された線源からの被ばく量の総和を制限するためのものである。線量拘束値は計画された被ばく状況に適用し、緊急時被ばく状況と現存被ばく状況においては、線量拘束値に代えて参考レベルを適用する。
- I：患者の医療被ばくについては、線量制限によって診断・検査・治療などの医療行為で患者が受ける便益を損ねてはいけないとの考えから、患者個人に対する線量限度や線量拘束値は定められていない。

II J-4      ア-8      イ-4      ウ-4      エ-8      K-5      L-4  
M-4      N-2      O-2      P-1

注) J：ICRUとは国際放射線単位測定委員会のことである。国際放射線防護委員会（ICRP）等と緊密に協力し研究活動を行っている。

ア, イ, ウ, エ：ICRUは、人体個人の線量測定に対応する測定量として、人体表面の着目点からの深さ  $d$ mm の位置での線量値、「個人線量」 $H_p(d)$  を定義している。対象組織毎に深さに対応して  $H_p(10)$  および  $H_p(0.07)$  と表され、それぞれ「1cm 線量当量」および「70  $\mu$ m 線量当量」と呼んでいる。

L, N, O, P：胎児の防護に配慮した方針をとるためにこのように定められている。

M：妊娠に気づかない時期の胎児に対する放射線防護に留意し、短期間（3月間）での管理を行っている。

## 物 理 学

## 第 61 回 (平成 28 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 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子の質量は、陽電子の質量より小さい。
- B 陽電子の質量は、消滅光子のエネルギーの総和を質量に換算したものに等しい。
- C 中性子の質量は、陽子と電子の質量の和より大きい。
- D ミュー粒子の質量は、陽子の質量より小さい。

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

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 陽電子は電子の反粒子であり、電荷の符号以外は電子と同じ特徴を持つ。  
 B : 誤 消滅光子の総エネルギーは 1.022 MeV であり、電子と陽電子の質量の和をエネルギーに換算したものに等しい。  
 C : 正 中性子 (静止エネルギー : 939.6 MeV) は、陽子 (静止エネルギー : 938.3 MeV) よりもわずかに質量が大きい。静止エネルギーの差は 1.3 MeV で電子の静止エネルギー (0.511 MeV) よりも大きい。  
 D : 正 ミュー粒子の静止エネルギーは 105.6 MeV で、陽子の静止エネルギー 938.3 MeV よりも小さい。

問 2 次の記述のうち、起こりうるものの組合せはどれか。

- A 光核反応により中性子が発生する。
- B 光電効果に伴いオージェ電子が発生する。
- C 陽電子消滅によりニュートリノが発生する。
- D 中性子の散乱により制動 X 線が発生する。
- E  $\alpha$  線の減速に伴い  $\delta$  線が発生する。

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

〔解答〕

2

- 注) A : 正 光核反応とは原子核に高エネルギーの光子が入射した際に起こる核反応で、中性子、陽子、重陽子、 $\alpha$  粒子などが発生しうる。光核反応が起こるためのしきい値があり、 ${}^7\text{Li}$  で 7.3 MeV、 ${}^{12}\text{C}$  では 18.7 MeV、重元素で 6.5 MeV 以上のエネルギーが必要である。  
 B : 正 光電効果は光子が軌道電子にエネルギーを与え、軌道電子が原子から飛び出す現象である。空席となった軌道にエネルギーの高い軌道の電子が転移する際に、特性 X 線を放出



する代わりにオージェ電子を放出する場合がある。

- C : 誤 陽電子消滅は、陽電子が電子と結合して消滅し 511 keV の光子を 2 本放出する現象である。
- D : 誤 制動 X 線は電子が方向を変えたり、減速されたりした時に放出される光子である。電荷を持たない中性子の散乱は原子核との反応であり、電子とは起こらない。
- E : 正  $\alpha$  線などの荷電粒子が物質中を通ると、物質中原子内の軌道電子にエネルギーを付与するが、一部の電子は高いエネルギーを与えられ、二次的に原子を電離しうる。この電子を  $\delta$  線と呼ぶ。

問 3 電子をコッククロフト・ワルトン型加速器で加速するとき、電子速度が光速の半分になる様に加速するために必要な印加電圧 [kV] はいくらか。次のうちから最も近いものを選べ。

- 1 80    2 130    3 250    4 510    5 590

[解答]

1

注) 電子の速度が光速に近い場合は相対論を用いる必要がある。質量  $m$  の電子が光速  $c$  の  $1/2$  の速度で運動している時の全エネルギーは相対論より

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2}} = \frac{2mc^2}{\sqrt{3}}$$

で表せる。したがって、電子の運動エネルギーは

$$\frac{2mc^2}{\sqrt{3}} - mc^2$$

となる。電子の場合、静止エネルギー  $mc^2 = 511 \text{ keV}$  なので、上式は

$$\left(\frac{2}{1.73} - 1\right) \cdot 511 = 76.6 \text{ kV}$$

したがって、印加電圧は約 80 kV で選択肢 1 となる。

問 4 原子核の平均の密度 [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] として最も近いものはどれか。

- 1  $1.5 \times 10^{12}$     2  $7.5 \times 10^{12}$     3  $3.0 \times 10^{13}$     4  $1.5 \times 10^{14}$     5  $6.5 \times 10^{14}$

[解答]

4

注) 原子核の体積  $V$  は質量数  $A$  に比例し、原子核の半径  $R$  は

$$R = r_0 A^{1/3}$$

と表せる。ここで  $r_0 = 1.2 \sim 1.4 \times 10^{-13} \text{ m}$  である。

原子核の密度  $\rho$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] は  $1\text{u} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$  なので以下で表せる。

$$\rho = \frac{1.66 \times 10^{-24} A}{\frac{4}{3} \pi \times R^3} = \frac{1.66 \times 10^{-24} A}{\frac{4}{3} \pi \times r_0^3 A} = \frac{1.66 \times 10^{-24}}{\frac{4}{3} \pi \times r_0^3}$$

$r_0 = 1.4 \times 10^{-13}$  を上式に代入すると  $\rho = 1.45 \times 10^{14} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  となり、選択肢 4 が最も近い。

問 5 Ni, Ba, U について、核子当たりの平均結合エネルギーが小さい順に並んでいるものは次のうちどれか。

- 1 U<Ni<Ba    2 Ba<U<Ni    3 Ni<Ba<U    4 Ni<U<Ba    5 U<Ba<Ni

[解答]

5

注) 核子当たりの平均結合エネルギーは質量数60付近 (Fe, Co, Ni等) が最大となり, それよりも質量数が大きくなると質量数に従って小さくなっていく。質量数はNi < Ba < Uであるため, 核子当たりの平均結合エネルギーを小さい順に並べるとU < Ba < Niとなり, 選択肢5が正しい。

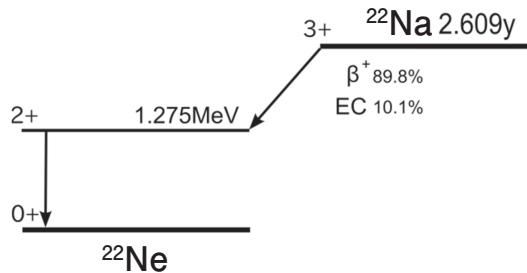
問6  $^{22}\text{Na}$  は電子捕獲又は最大エネルギー 0.545 MeV の陽電子を放出して壊変したのち, 1.275 MeV 励起準位を経て  $^{22}\text{Ne}$  の基底状態となる。 $^{22}\text{Na}$  の壊変エネルギー [MeV] はいくらか。次のうちから, 最も近いものを選べ。

- 1 1.06    2 1.57    3 1.82    4 2.33    5 2.84

[解答]

5

注)  $^{22}\text{Na}$  の壊変図を右に示す。



$^{22}\text{Na}$  から  $^{22}\text{Ne}$  への  $\beta^+$  壊変が起こった場合, 原子番号が1減るため, 軌道電子の1個の電子が不要になり, 放出された陽電子と合わせて, 2つの電子の静止エネルギー分が壊変エネルギーに含まれる。

$$0.545 \text{ MeV (陽電子の最大エネルギー)} + 1.275 \text{ MeV} + 0.511 \text{ MeV} \times 2 = 2.84 \text{ MeV}$$

つまり選択肢5が正しい。

問7 次の過程のうち, ニュートリノが放出されるものの組合せはどれか。

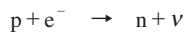
- A 軌道電子捕獲  
B 核異性体転移  
C  $\beta^+$  壊変  
D 電子対生成

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

[解答]

2

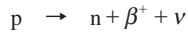
注) A : 正 軌道電子捕獲は陽子が軌道電子を捕獲して中性子に壊変し, ニュートリノを放出する。



B : 誤  $\alpha$  壊変や  $\beta$  壊変が発生した後の娘核種は基底状態になるとは限らず, 励起状態になる場合もあり, 比較的寿命の長い励起状態にいる核種を核異性体と呼び, その転移を核異性体転移という。低いエネルギー準位に転移する時に,  $\gamma$  線あるいは内部転換電子が放出されるが, ニュートリノは放出しない。

C : 正  $\beta^+$  壊変とは, 原子核内の陽子が中性子と陽電子に崩壊する現象であるが, その際にニュ

ートリノを放出する。



D : 誤 電子対生成は 1.022 MeV のエネルギーを持つ光子が原子核の強い電場に吸収され、電子と陽電子を生み出す反応である。この際、ニュートリノは放出されない。

問 8 内部転換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 軽い原子核よりも重い原子核で起こりやすい。
- B 内部転換によって原子番号は変わらない。
- C ニュートリノが放出される。
- D 核内の中性子が陽子に転換することにより起こる。
- E 内部転換電子は線スペクトルを示す。

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

〔解答〕

2

注) 内部転換とは、励起状態にある原子核が低いエネルギー準位に転移する際に、 $\gamma$ 線を放出する代わりに、そのエネルギーを軌道電子に与えて電子（これを内部転換電子という）を放出する現象をいう。

- A : 正 原子核の電荷が大きいほど、内殻電子の軌道が原子核に引き寄せられ、内部転換が起こりやすい。内部転換電子と  $\gamma$ 線の放出との比を内部転換係数と呼ぶが、これは原子番号の 3 乗にほぼ比例する。
- B : 正 内部転換は原子核のエネルギー準位が変わるのみで原子番号は変わらない。
- C : 誤 ニュートリノは放出されず、内部転換電子や、電子軌道が空席となることから特性 X 線あるいはオージェ電子が放出される。
- D : 誤 内部転換により核子の壊変はない。
- E : 正 軌道電子は原子核のクーロン場に束縛されているため、内部転換電子のエネルギーは  $\gamma$ 線のエネルギーから束縛エネルギーを引いたエネルギーとなる。

問 9 サイクロトロンにおいて、磁束密度  $B$  の磁場のもとで加速される荷電粒子（電荷  $Ze$ 、質量  $m$ ）の角速度を表す正しいものは、次のうちどれか。

1  $\frac{ZeB}{m}$     2  $\frac{\pi ZeB}{m}$     3  $\frac{2\pi ZeB}{m}$     4  $\frac{ZeB}{\pi m}$     5  $\frac{ZeB}{2\pi m}$

〔解答〕

1

注) 一様な磁場（磁束密度  $B$ ）に垂直な面内では質量  $m$ 、電荷  $Ze$ 、速度  $v$  の荷電粒子には  $ZeBv$  のローレンツ力が進行方向に対して直角方向に働き、円運動をする。その円軌道の半径を  $r$  とすると

$$ZeBv = \frac{mv^2}{r}$$

が成り立つ。角速度を  $\omega$  とすると、 $v = r\omega$  が成り立つので

$$\omega = v/r = ZeB/m \quad \text{となる。}$$

問 10 荷電粒子が静電場で加速されたとき、その速度が最も大きいものは次のうちどれか。

- 1 電位差 2.0 MV で加速された陽子

- 2 電位差 3.0 MV で加速された重陽子
- 3 電位差 5.0 MV で加速された三重水素の原子核
- 4 電位差 6.0 MV で加速された  ${}^4\text{He}$  の原子核
- 5 電位差 9.0 MV で加速された  ${}^{12}\text{C}^{2+}$  イオン

〔解答〕

4

注) 質量  $m$  の荷電粒子の電荷を  $e$  とし、電位差  $V$  で加速される速度  $v$  との間に以下の関係式が成り立つ。

$$eV = \frac{1}{2}mv^2$$

1. の場合、陽子の質量を  $m_p$ 、 $V_1 = 2.0 \text{ MV}$  とすると、速度は  $v_1 = \sqrt{\frac{2eV_1}{m_p}}$

2. の場合、1. に比べ、電荷  $e$  は等しく、電位差は  $3/2V_1$ 、質量は  $2m_p$  なので速度は  $\frac{\sqrt{3}}{2}v_1$

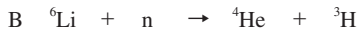
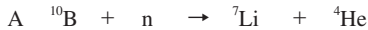
3. の場合、1. に比べ、電荷  $e$  は等しく、電位差は  $5/2V_1$ 、質量は  $3m_p$  なので速度は  $\sqrt{\frac{5}{6}}v_1$

4. の場合、1. に比べ、電荷は  $2e$ 、電位差は  $3V_1$ 、質量は  $4m_p$  なので速度は  $\sqrt{\frac{3}{2}}v_1$

5. の場合、1. に比べ、電荷は  $2e$ 、電位差は  $9/2V_1$ 、質量は  $12m_p$  なので速度は  $\frac{\sqrt{3}}{2}v_1$

したがって、4 が最も速度が大きい。

問 11 次の核反応のうち、発熱反応の組合せはどれか。

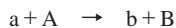


- 1 ABC のみ    2 ABD のみ    3 ACD のみ    4 BCD のみ    5 ABCD すべて

〔解答〕

5

注) 入射粒子 a、標的核 A、放出される粒子 b、生成核 B の核反応



において、核反応前後の原子核の質量差に相当するエネルギーを核反応の Q 値といい、Q 値が正の場合を発熱反応、Q 値が負の場合を吸熱反応という。

A : 正  ${}^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He} + 2.3 \text{ MeV}$  であり、 $Q > 0$  であるので発熱反応である。天然のホウ素には質量数 10 のホウ素 ( ${}^{10}\text{B}$ ) が約 20% 含まれている。 ${}^{10}\text{B}$  の熱中性子吸収断面積は大きいので Cd や Hf とともに原子炉の反応度制御材として用いられる。また、 ${}^{10}\text{B}$  の (n,  $\alpha$ ) 反応 (本問題の核反応) によって生じた  $\alpha$  線を利用して中性子を計測する  $\text{BF}_3$  放射線計数管がある。放射線治療では、ホウ素の化合物を脳腫瘍などの病巣内に注入して、原子炉から放出する熱中性子線を照射し、病巣内で  ${}^{10}\text{B}$  の (n,  $\alpha$ ) 反応により発生した  $\alpha$  線を病巣部に当てることにより、腫瘍を破壊し治療する方法 (BNCT) がある。

B : 正  ${}^6\text{Li} + \text{n} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.8 \text{ MeV}$  であり、 $Q > 0$  であるので発熱反応である。天然のリチウムには  ${}^6\text{Li}$  が約 7.5% 含まれており、濃縮された  ${}^6\text{Li}$  が核融合炉のブランケット (炉の構造

物の 1 つ) に用いられる設計が多い。

C : 正  ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n} + 3.27 \text{ MeV}$  であり,  $Q > 0$  であるので発熱反応である。この核反応は核融合反応の 1 つであり, D-D 反応と呼ばれる。D-D 反応には  ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 4.03 \text{ MeV}$  の反応もあり, これら 2 つの反応はほぼ同じ確率で起こる。

D : 正  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + 17.6 \text{ MeV}$  であり,  $Q > 0$  であるので発熱反応である。この核反応も核融合反応の 1 つであり, D-T 反応と呼ばれる。

問 12 熱中性子が  ${}^3\text{He}$  と (n, p) 反応を起こした際に放出される陽子の運動エネルギー [MeV] はいくらか。次のうちから最も近いものを選び。ただし, この反応の発熱エネルギーは 0.765 MeV である。

- 1 0.153    2 0.383    3 0.574    4 0.612    5 0.765

[解答]

3

注) この核反応は,  ${}^3\text{He} + \text{n} \rightarrow {}^3\text{H} + \text{p}$  であり, この核反応の発熱エネルギーが核反応後の粒子の運動エネルギーとなる。

${}^3\text{H}$  粒子の質量を  $M$ , 速度を  $V$ , 運動エネルギーを  $E_T$ , 陽子の質量を  $m$ , 速度を  $v$ , 運動エネルギーを  $E_p$  とすると,

$$\frac{m}{M} = \frac{1}{3}$$

であり, 運動量保存則より  $mv = MV$  であることから,

$$\frac{v}{V} = \frac{M}{m} = 3$$

となる。質量及び速度の比より, 運動エネルギーの比は

$$\frac{E_p}{E_T} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\frac{1}{2}MV^2} = \frac{m}{M} \times \left(\frac{v}{V}\right)^2 = \frac{1}{3} \times 3^2 = 3$$

となり, 運動エネルギーは質量に反比例して配分される。したがって,

$$E_p = 0.765 \text{ [MeV]} \times \frac{3}{3+1} = 0.574 \text{ [MeV]}$$

$$E_T = 0.765 \text{ [MeV]} \times \frac{1}{3+1} = 0.191 \text{ [MeV]}$$

問 13 阻止能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 全阻止能に対する放射阻止能の割合は入射荷電粒子の運動エネルギーによらない。  
 B 放射阻止能は荷電粒子が入射する物質の原子番号によらない。  
 C 衝突阻止能を運動エネルギーに関して積分すると飛程となる。  
 D 衝突阻止能は入射荷電粒子の電荷の 2 乗に比例して大きくなる。

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

[解答]

4

注) A : 誤 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 ( $S_{\text{col}}$ ), 制動放射によるものを放射阻止能 ( $S_{\text{rad}}$ ) という。衝突阻止能と放射阻止能の和を全阻止能 ( $S$ ) という。すなわち,  $S = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}}$   
 入射荷電粒子が電子の場合, 放射阻止能と衝突阻止能の比はおよそ

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} = \frac{(E + M_e c^2) Z}{1600 M_e c^2} \approx \frac{EZ}{800}$$

で表される。ここで、 $E$ は入射電子のエネルギー、 $M_e$ は電子の質量、 $c$ は光の速度、 $Z$ は物質の原子番号である。

衝突阻止能と放射阻止能の比は、入射電子のエネルギー $E$ に比例するので、全阻止能に対する放射阻止能の割合は入射電子の運動エネルギーに依存する。

なお、制動放射が起こる確率は入射粒子の質量の2乗に反比例するため、電子以外の重荷電粒子での放出確率は小さい。

- B : 誤 質量  $m$ 、電荷  $ze$  の荷電粒子が原子番号  $Z$  の物質中に入射し、電荷  $Ze$  の原子核の近くを通ると、入射荷電粒子には  $ze \cdot Ze$  に比例したクーロン力が働くので、入射荷電粒子には  $ze \cdot Ze/m$  に比例した加速度を受ける。これに伴って、荷電粒子は  $(zZ/m)^2$  に比例したエネルギーの電磁波を放射する。したがって、放射阻止能は荷電粒子が入射する物質の原子番号  $Z$  の2乗に比例する。

- C : 誤 荷電粒子の飛程  $R$  は

$$R = \int \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)}$$

で与えられる。すなわち、飛程  $R$  は阻止能の逆数を運動エネルギーに関して積分したものである。

- D : 正 衝突阻止能  $S_{\text{col}}$  は、荷電粒子の原子番号を  $z$ 、荷電粒子の速度を  $v$  とすると、次式の関係で表され、

$$S_{\text{col}} \propto \frac{z^2}{v^2}$$

入射荷電粒子の電荷の2乗に比例する。

問14 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 阻止能は光子に対して適用できない。  
 B 照射線量は  $X \cdot \gamma$  線に対してのみ適用できる。  
 C 飛程は中性子に対して適用できる。  
 D 質量エネルギー転移係数は  $\beta$  線に対して適用できる。

- 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 阻止能は、荷電粒子が物質中で単位長さ当たり失うエネルギーである。  
 B : 正 照射線量は、単位質量の空気に  $X$  線や  $\gamma$  線が照射されたときに、電離により発生した電子のエネルギーがすべて空気で吸収されたときに生成される正または負の電荷量の和であり、単位は  $[\text{C}/\text{kg}]$  で表される。  
 C : 誤 飛程は、あるエネルギーの荷電粒子が物質中では電離・励起・制動放射によりエネルギーを失い、物質中で止まるまでの距離をいい、荷電粒子だけに用いられる。  
 D : 誤 質量エネルギー転移係数は、放射線が物質中を通過する際に電子に運動エネルギーを与えて放射線のエネルギーが失われる割合を示す量で、線エネルギー転移係数を物質の密度で割ったもの。 $\gamma$  線のように物質との相互作用で2次電子を生成する間接電離放射線に適用

され、 $\beta$ 線に対しては適用されない。

問 15 水中でチェレンコフ光が発生する電子の最小運動エネルギー [keV] はいくらか。次のうちから最も近いものを選べ。なお、水の屈折率は 1.33 とする。

- 1 186    2 264    3 320    4 511    5 775

〔解答〕

2

注) 光の速度を  $c$ 、媒質の屈折率を  $n$  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  $\theta$  方向でチェレンコフ光が観測される。したがって、チェレンコフ光が発生するための必要条件は  $1 \geq \cos\theta=c/vn$  より  $v \geq c/n$  である。この式と荷電粒子の相対論的な運動エネルギー  $E$  を表わす式

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

から、

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

となる。設問の荷電粒子は電子であるので、 $mc^2=511$  [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、

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

問 16 次の線エネルギー付与 (LET) に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 全ての物質に対して適用される。  
 B 荷電粒子にのみ適用される。  
 C 線質係数は放射線の生体軟組織中における LET の関数である。  
 D 同じ種類の放射線の場合、エネルギーの小さい方が LET は小さくなる。

- 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 線エネルギー付与 (LET : Linear Energy Transfer) は阻止能と同じような意味で、荷電粒子が物質中を通過する際、単位長さあたりに平均して失うエネルギーであり、すべての物質に対して適用される。

B : 正 線エネルギー付与は荷電粒子に対して適用される。

C : 誤 線質係数  $Q$  は水中における放射線の LET ( $L_{\infty}$ ) の関数として一義的に決まった無次元の値である。 $L_{\infty}$  は、荷電粒子 ( $\gamma$ 線の場合は 2 次電子、中性子線では反跳陽子) によって単位長さあたりに付与されたエネルギーであり、線衝突阻止能と同じものである。

なお、人体への影響を表す等価線量や実効線量には、線質係数  $Q$  に代わる放射線加重係数  $w_R$  が用いられている。

D : 誤 同じ種類の放射線の場合、エネルギーが低くなるほどエネルギー損失が大きくなり、LET

は大きくなる。

問17 細い線束で $\gamma$ 線が厚さの異なる鉛板(線減弱係数 $\mu$ )に垂直に入射したとき、それぞれの透過後の $\gamma$ 線の強度を比較する。厚さ $y$ の場合の強度を $I_1$ 、厚さ $(x-y)$ の場合の強度を $I_2$ とすると、比 $(I_2/I_1)$ として、正しいものは次のうちどれか。ただし、ビルドアップはないものとし、 $x>y$ とする。

- 1  $e^{-\mu(x+2y)}$     2  $e^{-\mu(x-2y)}$     3  $e^{-\mu x}$     4  $e^{\mu(x-2y)}$     5  $e^{\mu(x+2y)}$

[解答]

2

注) 鉛板に入射する $\gamma$ 線の強度を $I$ とすると、厚さ $y$ 及び厚さ $(x-y)$ の鉛板透過後の $\gamma$ 線の強度(ビルドアップなし)はそれぞれ以下のとおりである。

$$I_1 = I \cdot e^{-\mu y}$$

$$I_2 = I \cdot e^{-\mu(x-y)}$$

したがって

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I \cdot e^{-\mu(x-y)}}{I \cdot e^{-\mu y}} = e^{-\mu(x-y)} \cdot e^{\mu y} = e^{-\mu(x-2y)}$$

問18 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A K吸収端のエネルギーは、金より鉛の方が高い。  
 B 100 keVの光子と空気との相互作用において、コンプトン散乱の断面積よりレイリー散乱の断面積の方が大きい。  
 C 1 MeVの光子に対するコンプトン散乱の断面積は、鉄よりアルミニウムの方が大きい。  
 D 5 MeVの光子と水との相互作用において、電子対生成の断面積よりコンプトン散乱の断面積の方が大きい。

- 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 K吸収端のエネルギーはK軌道電子の結合エネルギーに等しく、原子番号が大きくなると吸収端のエネルギーは高くなる。金および鉛の原子番号はそれぞれ79、82であるので鉛のK吸収端のエネルギーの方が高い。

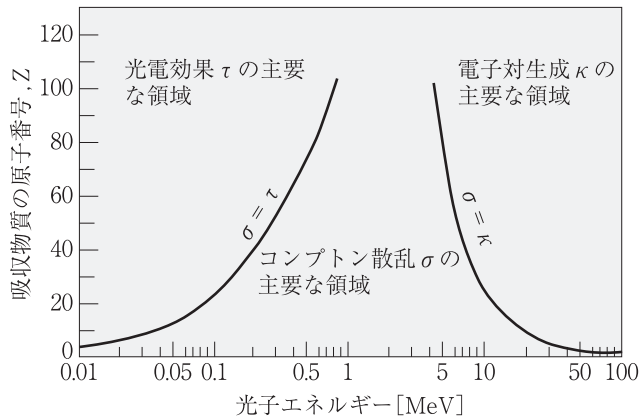
B: 誤 レイリー散乱は、光子がそのエネルギーを失うことなく散乱する弾性散乱であり、光子のエネルギーが高くなると非弾性散乱のコンプトン散乱が起こりやすくなる。100 keVの光子と空気ではコンプトン散乱の断面積が優勢になる。

C: 誤 コンプトン散乱は電子との散乱であり、コンプトン散乱の原子断面積 $\sigma$ は1原子当たりの電子数に比例するので、物質の原子番号を $Z$ とすると $\sigma \propto Z$ である。鉄およびアルミニウムの原子番号 $Z$ はそれぞれ26、13であるので、鉄の断面積の方が大きい。

D: 正 水を構成する水素および酸素は原子番号がそれぞれ1および8であり、5 MeVの光子に対してはいずれもコンプトン効果が大きく寄与する。

※ Bの正誤については判断が難しいが、A、C、Dの正誤から3を選択することができる。





光子と物質との相互作用

(7 版増補版 放射線取扱の基礎 (日本アイソトープ協会))

問 19 コンプトン散乱において、光子入射方向に対して前方方向 ( $0^\circ$ ) に放出された電子のエネルギーが 1.00 MeV であった。この時の入射光子のエネルギー [MeV] はいくらか。次のうちから最も近いものを選ぶ。

- 1 1.12    2 1.21    3 1.37    4 1.43    5 1.50

〔解答〕

2

注) コンプトン散乱は光子と電子との散乱であり、エネルギー保存則と運動量保存則が成り立つ。光子入射方向及び光子入射方向に垂直な方向の運動量は、それぞれ

$$\frac{E_r}{c} = \frac{E_r'}{c} \cos\theta + \frac{mv}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cos\varphi$$

$$0 = \frac{E_r'}{c} \sin\theta - \frac{mv}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \sin\varphi$$

ここで、 $m$  は電子の質量、 $v$  はコンプトン電子の速度、 $c$  は光の速度、 $\theta$  は散乱された  $\gamma$  線の散乱方向の角度、 $\varphi$  はコンプトン電子が放出された角度である。

コンプトン電子は、光子入射方向に対して前方方向 ( $0^\circ$ ) に放出されたので、 $\sin\varphi=0$  であり、 $\sin\theta=0$  となる。したがって、 $\cos\theta=1$  又は  $-1$  ( $\theta=0^\circ$  又は  $180^\circ$ ) となる。

一方、入射  $\gamma$  線のエネルギー  $E_r$  に対するコンプトン散乱後の  $\gamma$  線のエネルギー  $E_r'$  は次式で表され、

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

コンプトン電子のエネルギー  $E_e$  は、

$$E_e = E_r - E_r'$$

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

で与えられる。

$\gamma$ 線の散乱角  $\cos\theta=1$  ( $\theta=0^\circ$ ) の場合  $E_e=0$  となるので、 $\cos\theta=-1$  ( $\theta=180^\circ$ ) である。  
 $\cos\theta=-1$  のとき、

$$\begin{aligned} E_e &= E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{2E_\gamma}{mc^2}} \\ &= E_\gamma - \frac{E_\gamma mc^2}{mc^2 + 2E_\gamma} \\ &= \frac{2E_\gamma^2}{mc^2 + 2E_\gamma} \\ &= \frac{2E_\gamma^2}{0.511 \text{ [MeV]} + 2E_\gamma} \\ &= 1.00 \text{ [MeV]} \end{aligned}$$

したがって、

$$2E_\gamma^2 - 2E_\gamma - 0.511 = 0$$

$E_\gamma > 0$  [MeV] であることから、 $E_\gamma = 1.21$  [MeV]

問20 2つの放射線の発生が互いに競合する関係にあるものの組合せは、次のうちどれか。

- A コンプトン電子と散乱光子
- B 特性X線とオージェ電子
- C 制動X線と特性X線
- D 内部転換電子と $\gamma$ 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) A：誤 コンプトン散乱は、光子と軌道電子の衝突でコンプトン電子と散乱光子が生じる現象であり、コンプトン電子と散乱光子は競合する関係にはない。
- B：正 軌道にある電子がエネルギーを得て電離が起こ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。また、光子として放出される過程のほかに、光子を放出せずに同じあるいは外側の軌道にある電子を放出する過程(オージェ効果)があり、この時に放出される電子をオージェ電子という。特性X線とオージェ電子は競合関係にある。
- C：誤 制動X線は、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発生する光子である。一方、特性X線は、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際に放出される光子である。これらは、独立した過程であり、競合関係にはない。
- D：正 励起状態がエネルギーの低い状態へ転移するとき、 $\gamma$ 線を放出する代わりに軌道電子を放出する場合がある。この転移を内部転換といい、このとき放出される電子を内部転換電子という。内部転換電子と $\gamma$ 線は競合関係にある。

問21 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 核分裂における即発中性子の平均エネルギーは、約2 MeVである。
- B 熱中性子の真空中での平均寿命は、10分を超える。
- C 0.4 eV以下の中性子に対して、カドミウムの吸収断面積は極めて大きい。

- D 中性子の静止質量は、電子の静止質量の 1,000 倍を超えない。  
 E 1 MeV の中性子が水中で熱中性子になるまでの水素原子核との平均衝突回数は 20 回である。  
 1 ABC のみ    2 ACE のみ    3 ADE のみ    4 BCD のみ    5 BDE のみ

〔解答〕

1

- 注) A : 正  $^{235}\text{U}$  や  $^{239}\text{Pu}$  の核分裂では約 200 MeV のエネルギーが放出され、そのうち約 5 MeV が中性子に与えられる。核分裂に伴い、2 ~ 3 個の中性子が放出されるので平均エネルギーは約 2 MeV となる。  
 B : 正 熱中性子の真空中での平均寿命は 14.8 分である。  
 C : 正 カドミウム、特に天然同位体存在比 12.2% の  $^{113}\text{Cd}$  の (熱) 中性子吸収断面積は 20600 b (バーン) と極めて大きく、熱中性子遮蔽材として良く用いられる。  
 D : 誤 中性子の静止エネルギーは 939.6 MeV であり、電子の静止エネルギー 0.511 MeV の 1000 倍を超える。  
 E : 誤 中性子がエネルギー  $E_0$  から  $E$  に減速されるために必要な平均衝突回数  $n$  は  

$$n = \ln(E_0/E) / \xi$$
 で表せる (水素原子核の時は  $\xi = 1$ )。  
 熱中性子のエネルギーは 0.025 eV のため、  

$$n = \ln(10^6/0.025) = \ln(4 \times 10^7) = (\log 4 + \log 10^7) / \log e \approx 17.5$$
 となり、必要な平均衝突回数は 20 回を下回る。  
 ※ E の正誤については判断が難しいが、他の選択肢から 1 を選択することができる。

問 22 エネルギー  $E_n$  の中性子が陽子によって弾性散乱される場合、反跳陽子の最大エネルギーとして正しいものは次のうちどれか。

- 1  $\frac{E_n}{4}$     2  $\frac{E_n}{2}$     3  $E_n$     4  $2E_n$     5  $4E_n$

〔解答〕

3

- 注) エネルギー  $E_n$  の中性子が陽子によって弾性散乱される場合、反跳陽子のエネルギー  $E_p$  は

$$E_p = \frac{2M_n M_p}{(M_n + M_p)^2} (1 - \cos \theta) E_n$$

で表せる。ここで

$M_n$  : 中性子の質量

$\theta$  : 重心系での中性子の散乱角

陽子の最大エネルギーが最大になるのは  $\cos \theta = -1$  のとき (中性子が 180 度方向に跳ね返るとき) である。 $M_n \approx M_p$  として式を解くと  $E_p = E_n$  となる。

問 23 量と単位に関する次の組合せのうち、正しいものはどれか。

- 1 等価線量 —  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$   
 2 線減弱係数 — m  
 3 衝突断面積 —  $\text{m}^{-2}$   
 4 粒子フルエンス —  $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$   
 5 質量エネルギー吸収係数 —  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

〔解答〕

5

- 注) A: 誤 等価線量 —  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  (他にも  $\text{Sv}$ ,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
 B: 誤 線減弱係数 —  $\text{m}^{-1}$   
 C: 誤 衝突断面積 —  $\text{m}^2$   
 D: 誤 粒子フルエンス —  $\text{m}^{-2}$  ( $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  は粒子フルエンス率)  
 E: 正 質量エネルギー吸収係数 —  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

問24 次の量のうち、正しく換算されたものの組合せはどれか。

- A  $6 \times 10^4 \text{ dpm}$  —  $1 \times 10^{-4} \text{ MBq}$   
 B  $0.1 \text{ mJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  —  $10 \mu\text{Gy}$   
 C  $20 \text{ fBq}$  —  $0.02 \text{ pBq}$   
 D  $3 \text{ eV}$  —  $4.8 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 E  $10 \text{ u}$  —  $9.32 \times 10^2 \text{ MeV}$

- 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 dpm は1分当たりの壊変数なので  $6 \times 10^4 \text{ dpm} = 1000 \text{ Bq} = 1 \times 10^{-3} \text{ MBq}$   
 B: 誤  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{Gy}$  なので,  $0.1 \text{ mJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 100 \mu\text{Gy}$   
 C: 正 接頭語の f (フェムト) は  $10^{-15}$ , p (ピコ) は  $10^{-12}$  なので  $20 \text{ fBq} = 0.02 \text{ pBq}$   
 D: 正 1V の電位差の中で 1C の電荷を動かすのに必要な仕事が 1J であり, 1V の電位差の中で素電荷 ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) を動かすのに必要な仕事が 1eV である。よって,  $3 \text{ eV} = 3 \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 4.8 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 E: 誤 1u (原子質量単位,  $^{12}\text{C}$  原子の 1/12 の質量) は 932 MeV であるため,  $10 \text{ u} = 9.32 \times 10^3 \text{ MeV}$ 。

問25 シンチレーション検出器で試料を 30 秒間測定して 600 カウントを得た。次に試料を除いて 4 分間バックグラウンドを測定したところ、1,600 カウントを得た。この場合の試料の正味計数率に対する標準偏差 [cpm] に最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 10    2 20    3 30    4 40    5 50

〔解答〕

5

- 注) 単位時間  $t$  当たりの測定で計数値  $N$  が得られた場合の計数率  $n$  と標準偏差  $\sigma$  は

$$n \pm \sigma = \frac{N}{t} \pm \frac{\sqrt{N}}{t}$$

で表せる。

試料は 30 秒間測定で 600 カウント得られたので  $1200 \pm (\sqrt{600}/0.5) \text{ cpm}$ 。バックグラウンドは 4 分間で 1600 カウント得られたので  $400 \pm (\sqrt{1600}/4) \text{ cpm}$ 。試料の正味計数率は誤差伝搬を考慮すると  $(1200 - 400) \pm \sqrt{600/0.5^2 + 1600/4^2} = 800 \pm 50 \text{ cpm}$  となるため、選択肢 5 が正しい。

問26 鉄製の遮蔽箱内で Ge 検出器を使用して  $^{137}\text{Cs}$  線源 ( $\gamma$ 線エネルギー: 662 keV) を測定した。遮蔽箱による散乱  $\gamma$ 線の影響が、エネルギースペクトル上で最も顕著に現れるエネルギー [keV] の範囲は次のう

ちどれか。

- 1 50~100    2 120~170    3 180~230    4 440~490    5 610~660

[解答]

3

注) 散乱  $\gamma$  線がエネルギースペクトル上で最も顕著に表れるのは後方散乱ピークの領域である。後方散乱ピークは  $\gamma$  線が遮蔽箱など周辺物質とコンプトン散乱を起こし、一部のエネルギーを失った散乱  $\gamma$  線の全吸収ピークである。コンプトン散乱後の  $\gamma$  線のエネルギー  $E'_\gamma$  は

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

と表せる。ここで

$E_\gamma$ : 入射  $\gamma$  線のエネルギー

$m_e$ : 電子の静止質量

$\theta$ : 光子の散乱角

である。後方散乱ピークは入射  $\gamma$  線エネルギーと、コンプトン散乱による反跳電子の最大エネルギーの差に等しいので、 $\theta = 180^\circ$  のときの  $E'_\gamma$  付近に観測される。よって、

$$E'_\gamma = \frac{662}{1 + \frac{662}{511} (1 - \cos \pi)} \approx 184 \text{ keV}$$

となり、選択肢 3 が正しい。

問 27 直径 6.0 cm の薄い入射窓を持つ GM 計数管を用いて、窓面と 4.0 cm 離れた位置に置かれた点状  $\beta$  線源を測定する。この測定における GM 計数管の幾何学的効率として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.10    2 0.12    3 0.14    4 0.16    5 0.18

[解答]

1

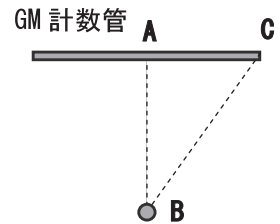
注) 右図のように GM 計数管窓の中央を A、点状  $\beta$  線源を B、GM 計数管窓の縁の 1 点を C とする。問題文より  $AC = 3 \text{ cm}$ 、 $AB = 4 \text{ cm}$  である。点 B から GM 計数管窓を見込む立体角  $\Omega$  は

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos(\angle ABC))$$

と表せる。

$\cos(\angle ABC)$  は三平方の定理より  $4/5$  なので、 $\Omega = 2\pi/5$  となる。

全立体角  $4\pi$  で除算して  $\Omega/4\pi = 1/10$  となり、選択肢 1 が正しい。



問 28 エネルギー分解能は、気体検出器よりも半導体検出器の方が優れているが、この理由として電離効率の違いがあげられる。ゲルマニウムの 1 個の電子・正孔対を作るのに必要な平均エネルギー ( $\epsilon$ ) に対するアルゴン気体の W 値 ( $W$ ) の比 ( $W/\epsilon$ ) として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 3    2 6    3 9    4 12    5 15

[解答]

3

注) ゲルマニウムの 1 個の電子・正孔対を作るのに必要な平均エネルギーは約 3 eV であり、アルゴン気体の W 値は約 26 eV であるため、選択肢 3 が最も近い。

問29 314 MBqの $\beta$ 線点線源を40秒間取り扱うとき、指先の皮膚の吸収線量[mGy]の値として最も近いものは、次のうちどれか。ただし、線源と指先の距離は10 cmで、この $\beta$ 線の皮膚での平均質量阻止能は、 $2.0 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ とする。また、線源の半減期の影響は無視できるものとする。

- 1 0.8    2 1.6    3 3.2    4 6.4    5 12.8

〔解答〕

3

注) 線源を中心とした半径10 cmの球の表面積は $400\pi \text{ cm}^2$ である。よって314 MBqの $\beta$ 線点線源から10 cm離れた位置では $\beta$ 線が $314 \times 10^6 / 400\pi \text{ [cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$ の粒子フルエンス率で入射する。よって、指先の皮膚の吸収線量は、

$$\begin{aligned} & 314 \times 10^6 / 400\pi \text{ [cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{]} \times 2.0 \times 10^3 \text{ [MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{kg}^{-1}\text{]} \times 40 \text{ [s]} \approx 2 \times 10^{10} \text{ [MeV}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]} \\ & 2 \times 10^{10} \text{ [MeV}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ [J}\cdot\text{MeV}\text{]} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ [J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]} \\ & = 3.2 \times 10^{-3} \text{ [Gy]} = 3.20 \text{ [mGy]} \end{aligned}$$

となり、選択肢3が正しい。

問30 次のAからDのサーベイメータのうち、 $\gamma$ 線エネルギーが50 keV ~ 2 MeVの範囲で、エネルギー特性(入射するエネルギーによらず1 cm線量当量を正確に測定可能かを表す特性)が良好な順に並んでいるものはどれか。

- A GM計数管式  
B 空気電離箱式  
C NaI(Tl)シンチレーション式(エネルギー補償機能付き)  
D NaI(Tl)シンチレーション式(エネルギー補償機能なし)

- 1 ABCD    2 BCAD    3 BCDA    4 CBDA    5 CDBA

〔解答〕

2

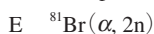
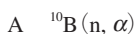
注) 一般に、エネルギー補償機能がなければ、空気電離箱式サーベイメータが入射するエネルギーに対する依存性が最も小さく(エネルギーによらず応答が一定)、GM計数管式、NaI(Tl)シンチレーション式の順にエネルギー特性は悪くなる。この順に並んでいるのは選択肢2のみである。

## 化 学

## 第 61 回 (平成 28 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 次の核反応のうち、アルカリ金属元素が生成する反応の組合せとして、正しいものはどれか。



- 1 ABC のみ    2 ACE のみ    3 ADE のみ    4 BCD のみ    5 BDE のみ

[解答]

2

注) A :  $\circ$   $^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow \text{X} + \alpha$  X は  $^7\text{Li}$  となり、アルカリ金属元素である。

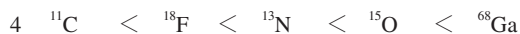
B :  $\times$   $^{20}\text{Ne} + \text{d} \rightarrow \text{X} + \alpha$  X は  $^{18}\text{F}$  となり、アルカリ金属元素ではない。

C :  $\circ$   $^{40}\text{Ar} + \alpha \rightarrow \text{X} + \text{p}$  X は  $^{43}\text{K}$  となり、アルカリ金属元素である。

D :  $\times$   $^{44}\text{Ca} + \text{p} \rightarrow \text{X} + \text{n}$  X は  $^{44}\text{Sc}$  となり、アルカリ金属元素ではない。

E :  $\circ$   $^{81}\text{Br} + \alpha \rightarrow \text{X} + 2\text{n}$  X は  $^{83}\text{Rb}$  となり、アルカリ金属元素である。

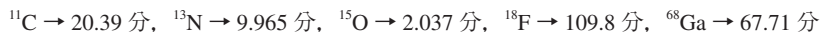
問 2 次の放射性同位体の組合せのうち、半減期が短いものから長いものの順に並んでいるものはどれか。



[解答]

1

注) 各核種の半減期は次のとおりである。



問 3 半減期が 1 時間の核種 A から半減期 10 時間の核種 B が生成する。1 GBq の核種 A のみがあったとき、10 時間後の核種 B の放射能 [MBq] として、最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 25            2 39            3 56            4 78            5 111

[解答]

3

注) はじめの親核種 A の原子数を  $N_0$ ,  $t$  時間経過した時点での核種 A, B の残存原子数を  $N_1, N_2$ , 核種 A, B の壊変定数を  $\lambda_1, \lambda_2$ , 半減期を  $T_1=1, T_2=10$  とすると,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad \text{より}$$

娘核種の放射能 ( $\lambda_2 N_2$ ) は

$$\lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda_2 N_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

ここで,

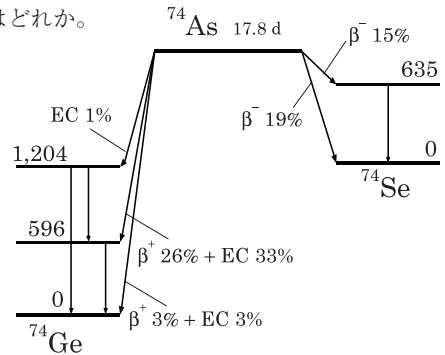
$$\lambda_1 N_0 = 10^9 \quad \lambda_1 = \frac{0.693}{T_1} \times 10^9 \quad \text{なので,} \quad N_0 = \frac{1}{0.693} \times 10^9$$

よって,

$$\begin{aligned} \lambda_2 N_2 &= \frac{0.693}{(0.0693 - 0.693)} \times \frac{0.693}{10} \times \frac{1}{0.693} \times 10^9 \times \left( \left( \frac{1}{2} \right)^{10} - \left( \frac{1}{2} \right) \right) \\ &= 55.4444 \times 10^6 \approx 55.4 \text{ [MBq]} \end{aligned}$$

問4  $^{74}\text{As}$  の壊変図式を図に示す。次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1  $^{74}\text{Se}$  の生成速度は  $^{74}\text{Ge}$  の生成速度よりも大きい。
- 2  $\beta^-$  壊変に伴って Ge の特性 X 線が放出される。
- 3  $\beta^+$  壊変に伴って 1,204 keV の  $\gamma$  線が放出される。
- 4 EC 壊変に伴って 635 keV の  $\gamma$  線が放出される。
- 5 596 keV の  $\gamma$  線の放出確率は 635 keV の  $\gamma$  線の放出確率より高い。



[解答]

5

- 注) 1 : × 一定時間経過した時に  $^{74}\text{As}$  は 34% が  $^{74}\text{Se}$  に, 66% が  $^{74}\text{Ge}$  に壊変する。(質量数が同じなので,)  $^{74}\text{Se}$  の生成速度は  $^{74}\text{Ge}$  の生成速度より小さい。
- 2 : ×  $^{74}\text{Ge}$  の特性 X 線は  $\beta^+$  壊変に伴う。
- 3 : × 1,204 keV は EC 壊変 (1%) による特性 X 線。
- 4 : × EC 壊変に伴って  $^{74}\text{Ge}$  の特性 X 線が放出される。
- 5 : ○ 596 keV の  $\gamma$  線の放出確率は 59% ( $\beta^+ : 26\% + \text{EC} : 33\%$ ), さらに EC 壊変に伴う 1,204 keV から 596 keV の励起状態を経由したものが加わる。635 keV の  $\gamma$  線の放出確率は 15% ( $\beta^- : 15\%$ )。

問5 1年間で放射能が1,000分の1に減衰する核種がある。4,000分の1に減衰するのは、おおよそ何年後か。

- 1 1.1      2 1.2      3 1.5      4 2.0      5 3.0

[解答]

2

注) もとの放射能を  $A_0$ ,  $t$  時間後の放射能を  $A$  とすると (半減期は  $T$  とする)

$$A = A_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{t/T} \quad \frac{A}{A_0} = \left( \frac{1}{2} \right)^{t/T}$$



1 年間で  $\frac{1}{1000}$  に減衰するので  $\frac{1}{1000} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1/T}$  .....①

X 年後に  $\frac{1}{4000}$  に減衰するので  $\frac{1}{4000} = \left(\frac{1}{2}\right)^{X/T}$

①より,  $\frac{1}{4000} = \left(\frac{1}{1000}\right)^X$

$\therefore \frac{1}{4} \times 10^{-3} = 10^{-3X} \quad X \doteq 1.2$

問 6  $^{232}\text{Th}$  900 g の放射能 [MBq] として最も近い値は, 次のうちどれか。ただし,  $^{232}\text{Th}$  の半減期は  $1.4 \times 10^{10}$  年 ( $4.4 \times 10^{17}$  秒) とする。

- 1 0.4          2 1.2          3 2.4          4 3.7          5 18

[解答]

4

注)  $\lambda = \frac{0.693}{T} = 0.693 / (4.4 \times 10^{17}) \quad N = \frac{900}{232} \times 6.02 \times 10^{23}$

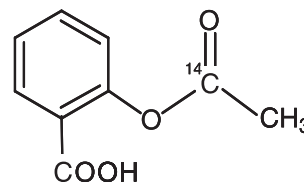
$-\left(\frac{dN}{dt}\right) = \lambda N$  より

$\doteq 3.678 \times 10^6$  [Bq]

問 7  $^{14}\text{C}$  で標識した比放射能  $100 \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$  の [ $^{14}\text{C}$ ] アセチルサリチル酸がある。このエステルを希硫酸で加水分解してできる生成物のうち  $^{14}\text{C}$  を含むものの比放射能 [ $\text{kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ ] として, 最も近い値は次のうちどれか。必要であれば, 分子量は以下の値を用いること。

メタノール: 34, 二酸化炭素: 44, エタノール: 46, 酢酸: 60, サリチル酸: 138, アセチルサリチル酸: 180。

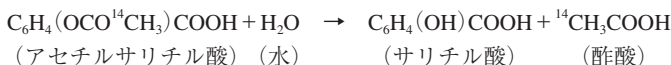
- 1 19          2 34          3 100          4 300          5 530



[解答]

4

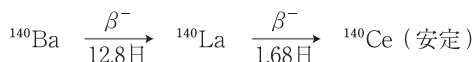
注) [ $^{14}\text{C}$ ] アセチルサリチル酸 ( $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OCO}^{14}\text{CH}_3)\text{COOH}$ ) の希硫酸による加水分解は以下のとおり。



アセチルサリチル酸の分子量は 180, 酢酸の分子量は 60, 質量が減少するため比放射能 ( $\text{kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ ) は大きくなる。

$$100 \times \frac{180}{60} = 300 \text{ [kBq} \cdot \text{g}^{-1}]$$

問 8  $^{140}\text{Ba}$  は以下のように 2 回  $\beta^-$  壊変して  $^{140}\text{Ce}$  になる。分離精製した  $^{140}\text{Ba}$  試料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  $^{140}\text{La}$  の放射能が最大となる前に,  $^{140}\text{La}$  と  $^{140}\text{Ba}$  の放射能の和に極大があらわれる。  
 B  $^{140}\text{La}$  の放射能が最大となるとき,  $^{140}\text{La}$  と  $^{140}\text{Ba}$  の放射能の和は, その時点における  $^{140}\text{Ba}$  の放射能

の2倍に等しい。

C  $^{140}\text{La}$  の放射能が最大となった後,  $^{140}\text{La}$  の放射能と  $^{140}\text{Ba}$  の放射能の比は, 次第に一定になる。

D  $^{140}\text{La}$  の放射能が最大となった後,  $^{140}\text{La}$  の原子数と  $^{140}\text{Ba}$  の原子数の比は, 次第に一定になる。

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

[解答]

5

注)  $T_1$  (12.8日)  $>$   $T_2$  (1.68日) であるので, 過渡平衡状態にある。

A : ○ 娘核種 ( $^{140}\text{La}$ ) の放射能が最大になる前に, 全体の放射能の極大がある。

B : ○ 娘核種 ( $^{140}\text{La}$ ) の放射能が最大になるときは, 親核種 ( $^{140}\text{Ba}$ ) と放射能は等しい。  
よって, 全体の放射能はその時点における,  $^{140}\text{Ba}$  の放射能の2倍に等しい。

C : ○ 十分時間が経過すると放射能は半減期  $T_1$  で一定に減少するようになるため, 親核種と娘核種の放射能の比は次第に一定になる。

D : ○ 十分時間が経過すると原子数は半減期  $T_1$  で一定に減少するようになるため, 親核種と娘核種の原子数の比は次第に一定になる。

問9 熱中性子による  $^{235}\text{U}$  の核分裂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 分裂に際して中性子が平均して2.5個放出される。

B 放出される中性子の運動エネルギーは平均で0.1 MeV程度である。

C 分裂片の質量分布は質量数95付近と140付近にピークを持つ。

D 生成する核種は中性子不足核である。

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

[解答]

2

注) A : ○ 2~3個放出される (平均2.5個)。

B : × 放出される中性子の運動エネルギーは約200 MeV。

C : ○  $^{235}\text{U}$  の核分裂収率は質量数95付近と140付近にピークを持つ。

D : × 生成する核種は核分裂片と呼ばれ, 中性子過剰である ( $\beta^-$ 崩壊がつづく)。

問10 次の材料1gを  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  の熱中性子で1時間照射した時, 照射直後の  $\gamma$ 線線量率が最も小さいものはどれか。ただし, 不純物の寄与は無視できるものとする。

- 1 ポリエチレン樹脂
- 2 ポリ塩化ビニル樹脂
- 3 ホウケイ酸ガラス
- 4 アルミニウム
- 5 銅

[解答]

1

注) 試料を  $t$  時間照射して照射直後に得られる生成核種の放射能  $A$  は

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

$f$  は照射粒子束密度,  $\sigma$  は核反応断面積,  $N$  は試料元素の原子数,  $\lambda$  は生成核種の壊変定数。

材料は1g ( $W=1$ ), 照射時間は1時間,  $N = (W/M) \times 6.02 \times 10^{23}$  により ( $W$  は質量,  $M$  は原子量)

$$A = f\sigma\left(\frac{1}{M}\right) \times 6.02 \times 10^{23} \times (1 - e^{-\lambda t})$$

となり、 $M$  (原子量) が最も大きいものが、 $A$  ( $\gamma$ 線線量率) が最も小さくなる。

また、 $\sigma$  も元素によって数桁異なるが、下記によりその寄与は小さい。

試料の原子量は

ポリエチレン (数百万) :  $(\text{CH}_2\text{CH}_2)_n$ , エチレンの重合体 (ポリマー), 高分子化合物\*

ポリ塩化ビニル (60,000 ~ 150,000) :  $(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$ , 塩化ビニルモノマーの重合体, 高分子化合物\*

ホウケイ酸ガラス (188) :  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$

アルミ (26.9)

銅 (63.5)

\*高分子化合物 : 一般に分子量が 1 万以上の線状化合物

問 11 原子炉での中性子照射により、無担体の放射性同位元素として製造されるものの組合せは次のうちどれか。

- A  $^3\text{H}$
- B  $^{11}\text{C}$
- C  $^{32}\text{P}$
- D  $^{35}\text{S}$

- 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) 陽電子放出核種はサイクロトロン (粒子加速器) で製造されている。PET で利用される陽電子放出核種には  $^{11}\text{C}$  の他に  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  及び  $^{18}\text{F}$  などがあり、次の生成反応式により製造されている。

製造核種	生成反応式
$^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{11}\text{C}$
$^{13}\text{N}$	$^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{13}\text{N}$
$^{15}\text{O}$	$^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{15}\text{O}$ $^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})^{15}\text{O}$
$^{18}\text{F}$	$^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha)^{18}\text{F}$

なお、 $^3\text{H}$ ,  $^{32}\text{P}$  及び  $^{35}\text{S}$  の主な生成反応式は次のとおりである。

製造核種	生成反応式
$^3\text{H}$	$^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$ *
$^{32}\text{P}$	$^{31}\text{P}(\text{n}, \gamma)^{32}\text{P}$ $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})^{32}\text{P}$ *
$^{35}\text{S}$	$^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})^{35}\text{S}$ * $^{34}\text{S}(\text{n}, \gamma)^{35}\text{S}$

\* 無担体として製造される反応である。

問 12 Tc 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 放射性元素 (安定同位体を持たない元素) である。

- B  $^{235}\text{U}$  の核分裂で生成する。  
 C Mn と同族元素である。  
 D 核医学診断用に  $^{99}\text{Tc}$  が利用される。

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) A : 正

B : 正

C : 正

D : 誤 核医学診断用に利用される放射性元素は半減期が短く、診断終了後、体内から速やかになくなってしまふ特徴を持つ。Tcについては $^{99}\text{Tc}$ (半減期:21万年)ではなく、半減期が短い $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (同:6時間)が用いられる。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ のりん酸化合物は骨に集積する性質があり、がんの骨転移の診断に利用されている。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は $^{99}\text{Mo}$ を親核種とするミルキングにより製造される。核医学診断用には $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 以外にも $^{131}\text{I}$ (同:8日)、 $^{201}\text{Tl}$ (同:72時間)、 $^{67}\text{Ga}$ (同:77.9時間)などがある。

問13 内容積2.24 Lの密封容器に1.0モルのトリチウムガス( $^3\text{H}_2$ )を入れると0℃で10気圧となった。これを12.3年間保管した。(A)12.3年後の容器内圧は0℃で何気圧になるか。また(B)生成するヘリウム-3( $^3\text{He}$ )は何モルか。適切な組合せを選べ。ただし、トリチウムは全てトリチウムガス( $^3\text{H}_2$ )の化学形にあるものとする。

(A)            (B)

- |   |      |       |
|---|------|-------|
| 1 | 5気圧  | 0.5モル |
| 2 | 10気圧 | 0.5モル |
| 3 | 10気圧 | 1.0モル |
| 4 | 10気圧 | 1.5モル |
| 5 | 15気圧 | 1.0モル |

〔解答〕

5

注) トリチウムは半減期12.3年でヘリウム3に壊変する。12.3年間保管後、トリチウムガスは1.0モルから0.5モルに減少する一方で、ヘリウムは1原子単独で存在するため、1.0モル(0.5×2)が生成する。また、内容積と温度が一定であれば、気圧は全モル数に比例するため、保管後は15気圧(10×1.5/1.0)になる。

問14  $^{210}\text{Po}$ に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 酸素や硫黄と同じく16族元素である。  
 B ウラン系列に属する。  
 C  $^{210}\text{Bi}$ の娘核種である。  
 D  $\alpha$ 壊変して $^{206}\text{Pb}$ になる。

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

〔解答〕

5

- 注) A : 正  
 B : 正  
 C : 正  
 D : 正

$^{210}\text{Po}$  は半減期 138 日の  $\alpha$  線放出核種である。ウラン系列に属し気体のラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) を經由後、 $^{210}\text{Bi}$  の  $\beta$  壊変で生成し、 $\alpha$  壊変して安定同位体である  $^{206}\text{Pb}$  になる。酸素や硫黄と同じく 16 族元素である。天然放射性核種の 1 つであり、自然放射線からの被ばく線量のうち、内部被ばくへの寄与が比較的大きいとされている。

問 15 天然放射性元素 (安定同位体を持たない元素) 又は天然放射性核種に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 最も原子番号の小さい天然放射性元素はウランである。  
 B 天然放射性核種の半減期は 100 万年以上である。  
 C 大気圏上層で常に生成している天然放射性核種がある。  
 D 常温常圧で気体の天然放射性元素が存在する。

- 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 安定同位体を持たない元素であって、最も原子番号が小さい天然放射性元素は、テクネチウム (Tc 原子番号 43) である。  
 B : 誤 例えば、天然放射性核種の 1 つである  $^3\text{H}$  の半減期は 12.3 年である。  
 C : 正 例えば、 $^3\text{H}$  は大気圏上層で次のような核反応により生成している。  

$$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^3\text{H} + ^{12}\text{C} \qquad ^{16}\text{O} + n \rightarrow ^3\text{H} + ^{14}\text{N}$$

$$^{14}\text{N} + p \rightarrow ^3\text{H} + \text{Products} \qquad ^{16}\text{O} + p \rightarrow ^3\text{H} + \text{Products}$$
  
 D : 正 安定同位体を持たない元素である原子番号 86 のラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) やトロン ( $^{220}\text{Rn}$ ) は、常温常圧で気体として存在する。

問 16 環境中の  $^{14}\text{C}$  に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1  $^{14}\text{C}$  は主に  $^{40}\text{Ar}$  の核破砕反応で生成する。  
 2 大気中の二酸化炭素に含まれる  $^{14}\text{C}$  の濃度は 19 世紀末から上昇を続けている。  
 3 天然繊維に比べて合成繊維中の  $^{14}\text{C}$  は低濃度である。  
 4  $^{14}\text{C}$  の加速器質量分析では半導体検出器により  $\beta$  線を計数する。  
 5  $^{14}\text{C}$  を含む考古遺物が埋蔵されてからの年代を求めることが出来る。

[解答]

3

- 注) 1 : 誤 環境中で  $^{14}\text{C}$  は主に二次宇宙線と窒素との核反応により生成している。  

$$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$$
  
 2 : 誤  $^{14}\text{C}$  の半減期は 5730 年である。化石燃料は  $^{14}\text{C}$  の半減期に比較して非常に永い年月を経て形成されることから、 $^{14}\text{C}$  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、 $^{14}\text{C}$  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  $^{14}\text{C}$  の濃度は希釈されて減少することになる。  
 3 : 正 石油など化石燃料を原料の一部にした合成繊維の  $^{14}\text{C}$  の濃度は、天然繊維に比較して低濃

度になる。

- 4 : 誤 加速器質量分析法では、 $^{14}\text{C}$ が放出する $\beta$ 線(放射線)を測定するのではなく、 $^{14}\text{C}$ そのものの個数を計測する。
- 5 : 誤 放射性炭素年代は、動植物が死んだ( $^{14}\text{C}$ の取込みを止めた)時点からの年代を表している。その年代は埋蔵された年代とは異なっている。

問17 ある放射性核種Xは2種類の壊変形式( $\beta^-$ 壊変と $\beta^+$ 壊変)をもつ。 $\beta^-$ 壊変と $\beta^+$ 壊変の部分半減期がそれぞれ10分と40分のとき、全半減期[分]として正しい値は次のうちどれか。

- 1 4            2 8            3 16            4 30            5 50

[解答]

2

注) 部分半減期を $a$ 、 $b$ とすると、全半減期 $X$ は次のように表される。

$$1/X = 1/a + 1/b$$

$a=10$ 分、 $b=40$ 分を代入して $X$ を求めると8分になる。

問18 放出される放射線をパラフィンやポリエチレンで遮蔽して保管することが適当な核種はどれか。

- 1  $^{226}\text{Ra}$             2  $^{234}\text{U}$             3  $^{239}\text{Pu}$             4  $^{241}\text{Am}$             5  $^{252}\text{Cf}$

[解答]

5

注) パラフィンやポリエチレンは中性子線の遮蔽材として用いられている。 $^{252}\text{Cf}$ は自発核分裂により中性子を発生させる。水分計の中性子源などとして利用されている。その他は $\alpha$ 線放出核種である。

問19 液体シンチレーションカウンタによる測定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  $^3\text{H}$ と $^{32}\text{P}$ の計数効率、ほぼ等しい。
- B  $\alpha$ 線放出核種の定量には適さない。
- C 着色試料ではクエンチングが起こる。
- D 幾何学的計数効率は100%である。
- E 同時計数法によりS/N比を向上させている。

- 1 ABCのみ    2 ABDのみ    3 ACEのみ    4 BDEのみ    5 CDEのみ

[解答]

5

注) A : 誤 計数効率は $\beta$ 線の最大エネルギーに依存している。 $^3\text{H}$ と $^{32}\text{P}$ の $\beta$ 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、計数効率は等しくない。

B : 誤 液体シンチレーションカウンタは $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 及び $^{32}\text{P}$ など $\beta$ 線放出核種に加え、 $^{222}\text{Rn}$ や $^{241}\text{Am}$ など $\alpha$ 線放出核種の定量に適している。

C : 正

D : 正

E : 正

問20  $^{14}\text{C}$ で標識された $\text{NaHCO}_3$ の固体を試験管に入れ、これに以下のような操作をした時に、放射性の $^{14}\text{C}$   $\text{CO}_2$ が発生するのはどれか。

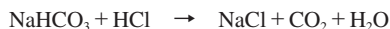
- A 300℃に加熱する。
- B 希塩酸を加える。
- C 酢酸を加える。
- D 水酸化ナトリウム水溶液を加える。

- 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)  $\text{NaHCO}_3$  (炭酸水素ナトリウム, または重炭酸ナトリウム, 重曹) は加熱すると 50℃付近から  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CO}_2$  を失いはじめ, 100℃付近で  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  に変化する。酸類の中和剤としても利用され, 希塩酸や酢酸とは次のような化学反応により  $\text{CO}_2$  が発生する。



問 21 イオン交換樹脂の性質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 Na 型の陽イオン交換樹脂に  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  を含む水溶液を流すと,  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  が吸着する。
- B H 型の陽イオン交換樹脂に  $^{40}\text{K}^+$  を含む水溶液を流すと,  $^{40}\text{K}^+$  は吸着しない。
- C OH 型の陰イオン交換樹脂に  $^{57}\text{Ni}^{2+}$  を含む 9M 塩酸酸性溶液を流すと,  $^{57}\text{Ni}^{2+}$  は吸着しない。
- D OH 型の陰イオン交換樹脂に  $^{14}\text{CO}_3^{2-}$  を含む水溶液を流すと,  $^{14}\text{CO}_3^{2-}$  は吸着しない。

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

〔解答〕

2

注) 1 : 正

2 : 誤  $^{40}\text{K}^+$  は吸着する。

3 : 正

4 : 誤  $^{14}\text{CO}_3^{2-}$  は吸着する。

イオン交換樹脂には, 次の 4 種類がある。

1. 強酸性陽イオン交換樹脂官能基は, スルホン酸基 ( $-\text{SO}_3\text{H}$ )



価数が高いイオン, 原子番号が大きいものほど選択性が大きい。

2. 弱酸性陽イオン交換樹脂官能基は, カルボキシル基 ( $-\text{COOH}$ )



3. 強塩基性陰イオン交換樹脂官能基は, 第 4 級アンモニウム基 ( $-\text{NR}_3$ )



4. 弱塩基性陰イオン交換樹脂官能基は, アミノ基 ( $-\text{NH}_2$ )



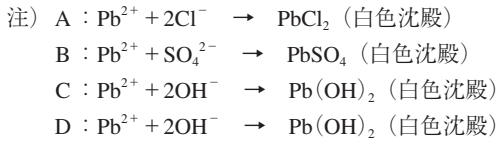
問 22 放射性鉛を含む  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  硝酸鉛水溶液が 4 本の試験管に入っている。これら試験管に以下の試薬を滴下すると放射性鉛の沈殿が生成するものはどれか。

- A 希塩酸
- B 希硫酸
- C アンモニア水
- D 水酸化ナトリウム水溶液

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

[解答]

5



問23 次の記述のうち、有機標識化合物の分解を低減するための保管方法として正しいものの組合せはどれか。

- A 低温で保管する。  
 B 比放射能を低くして保管する。  
 C 放射能濃度を高くして保管する。  
 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]

2

- 注) A : 正  
 B : 正  
 C : 誤 放射能濃度を高くすると一次(外的)分解、二次分解が多くなる。  
 D : 正

RI 標識化合物の分解とその抑制法は次のとおりである。

区分	原因	抑制法
一次(内部)分解	放射性核種の壊変, 自己分解	なし
一次(外部)分解	化合物分子への放射線の直接作用	RI 標識化合物分子の分散
二次分解	ラジカルなどとの相互作用	RI 標識化合物分子の分散 低温保存 ラジカルスカベンジャーの添加
化学的・微生物による分解	熱力学的不安定性 保存環境の不適正	低温保存 環境の適正化

問24 有機化合物の標識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 化学的な精製を繰り返すことにより比放射能が一定になる。  
 B ウイルツバッハ(Wilzbach)法では、有機化合物をトリチウムガス( $^3\text{H}_2$ )と密封しておき、 $^3\text{H}$ 標識化合物を得る。  
 C  $[6-^3\text{H}]$ ウラシルは、ウラシル分子中の特定の位置の水素原子だけが標識されている。  
 D  $[G-^3\text{H}]$ トリプトファンは、トリプトファン分子中の全ての位置の水素原子が均一に $^3\text{H}$ 標識されている。

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

[解答]

1



- 注) A : 正 化学反応を繰り返して精製すると比放射能は一定になる。  
 B : 正 ウィルツバッハ (Wilzbach) 法は,  ${}^3\text{H}_2 \rightarrow {}^3\text{He}^3\text{H}^+ + \beta^- + \nu$  などの反応性の高い  ${}^3\text{He}^3\text{H}^+$  が生成する系に利用する。トリチウムガスと有機化合物を容器中に密封し, 数日間放置しておくで標識有機化合物が合成できる。標識位置は特定できない。  
 C : 正 6 番目の位置を標識している。  
 D : 誤 G はすべての位置の原子が標識されているが, 分布は均一ではない。
- 特定位標識化合物  
 特定の位置の原子だけに 95% 以上の RI が標識されているもの。標識位置を番号で示す。  
 [例]  $[1-{}^{14}\text{C}]$  グルコース,  $[6-{}^3\text{H}]$  ウラシル
  - 名目標識化合物  
 特定の位置の大部分の原子が標識されているが, その他の位置の原子も標識され分布が不明確なもの。核種記号の次に N (nominal) を記す。  
 [例]  $[9,10-{}^3\text{H}(\text{N})]$  オレイン酸
  - 均一標識化合物  
 すべての位置の原子が均一に標識されているもの。核種記号の次に U (uniform) を記す。  
 [例]  $[L-{}^{14}\text{C}(\text{U})]$  L グルタミン酸
  - 全般標識化合物  
 すべての位置の原子が標識されているが, 分布は均一でなく, 各位置の RI の分布比が不明確であるもの。核種記号の次に G (general) を記す。  
 [例]  $[{}^3\text{H}(\text{G})]$ -ウリジン

問 25 試料中の成分 A を定量するために, 標識した成分 A (比放射能  $480 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ ) 20 mg を試料に添加し, よく混合し均一にした。その後, 成分 A の一部を純粋に分離したところ, 比放射能は  $120 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$  となった。試料中の成分 A の量 [mg] として正しい値は, 次のうちどれか。

- 1 40          2 50          3 60          4 70          5 80

[解答]

3

- 注) 試料中の成分 A の量を  $x \text{ mg}$  とする。添加した標識成分 A の放射能は,  $480 \times 20 = 9600 \text{ Bq}$  である。混合後の比放射能は  $120 = 9600 / (x + 20)$   
 $x = 60$

問 26 荷電粒子とその性質を利用した分析手法に関する次の記述のうち, 正しいものはどれか。

- 1 PIXE 法では生成した放射性核種の EC 壊変による特性 X 線を検出する。
- 2 荷電粒子放射化分析による酸素の定量は放射化による中性子過剰核の生成を利用している。
- 3 ラザフォード散乱分析は材料深部の損傷を外部から非破壊的に知る手法である。
- 4 陽電子消滅法は高分子材料中の空孔 (ポイド) のサイズを知る手法として利用される。
- 5 フィッシュントラック法により核分裂片が静止するまでの時間を測定できる。

[解答]

4

- 注) 1 : 誤 PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 法は, 加速器で加速した数 MeV のエネルギーのイオンビーム (陽子など) を試料に照射し, 試料から発生する特性 X 線を測定する。EC 壊変による特性 X 線ではない。



- B : 誤 イオウ計には,  $^{55}\text{Fe}$ -X 線,  $^{241}\text{Am}$ - $\gamma$ 線が使用される。  
 C : 正  
 D : 誤 レベル計には,  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線,  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ 線が使用される。 $^{35}\text{S}$  は  $\beta$ 線である。  
 E : 誤 水分計には,  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  からの中性子が使用される。

問 29 LET (線エネルギー付与) 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 放射線が物質に入射すると, その LET が大きいほどスプール (スパー) がより密に生成する。  
 B 電子は  $\alpha$ 線よりもはるかに質量が小さいが, LET は  $\alpha$ 線よりもはるかに大きい。  
 C 同一荷電粒子では, エネルギーが小さいほど LET は大きい。  
 D LET は中性子と物質の一次相互作用に対しても用いられる。

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

[解答]

2

注) A : 正

B : 誤 X 線,  $\gamma$ 線,  $\beta$ 線 (電子線) は低 LET 放射線であり, 中性子線,  $\alpha$ 線, 重粒子線などは高 LET 放射線である。

C : 正

D : 誤 LET は荷電粒子に適用される量であり, 光子線や中性子線のような間接電離放射線に対しては, それらが作る 2 次荷電粒子を対象とする。

問 30 放射線照射によって水溶液中で生じる化学変化や生成する化学種に関する次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。

- A 酸素を飽和した硫酸酸性水溶液中で  $\text{Fe}^{3+}$  イオンが還元される。  
 B 硫酸セリウム水溶液中で  $\text{Ce}^{4+}$  イオンが還元される。  
 C 水和電子は強い還元力を持つ。  
 D ヒドロキシルラジカルは強い還元力を持つ。

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

[解答]

3

注) 1 : 誤 フリック線量計 (鉄線量計) の原理である。硫酸鉄 (II) を主成分とする水溶液に放射線を照射すると, 水分子が分解され, 遊離基 (ラジカル)  $\text{H}\cdot$ ,  $\cdot\text{OH}$  が作られる。これらの遊離基及びその反応物が鉄 (II) イオン ( $\text{Fe}^{2+}$ ) を酸化し, 鉄 (III) イオン ( $\text{Fe}^{3+}$ ) に変える。

2 : 正 セリウム線量計の原理である。硫酸セリウム (IV) を主成分とする水溶液に放射線を照射すると還元反応 ( $\text{Ce}^{4+} \rightarrow \text{Ce}^{3+}$ ) が起こる。

3 : 正 水への放射線照射によりできた電子は, 周りの水分子によって溶媒和されて水和電子となり比較的長い時間存在する。水和電子は強い還元剤として作用する。

4 : 誤 ヒドロキシルラジカルは, 水酸基 ( $\text{OH}$ ) のラジカルであり, 酸化力が強い。活性酸素の一種である。

## 生 物 学

## 第61回(平成28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 標識化合物の利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  $[^3\text{H}]$ ウリジンを用いて、DNAの合成量を調べる。
- B  $[^{14}\text{C}]$ ヒスチジンを用いて、タンパク質の合成量を調べる。
- C  $[^{35}\text{S}]$ メチオニンを用いて、タンパク質の寿命を調べる。
- D  $[^{51}\text{Cr}]$ クロム酸ナトリウムを用いて、赤血球の寿命を調べる。

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

〔解答〕

5

- 注) A : × ウリジンはRNAにのみ含まれるヌクレオシドである。DNA合成量を調べるのには向いていない。
- B, C : ○ ヒスチジンもメチオニンもタンパクを構成するアミノ酸の一種である。標識アミノ酸の存在下でタンパク合成を行うと標識されたタンパクが得られるので、これを用いてタンパクの動態を追跡したり寿命を調べたりすることができる。
- D : ○ クロム酸ナトリウムの $\text{Cr}^{6+}$ は赤血球の細胞膜を透過し、 $\text{Cr}^{3+}$ に還元されて血球内のヘモグロビンA3の $\beta$ 鎖と結合する。 $\text{Cr}^{3+}$ になってしまうと赤血球膜の透過性は失われるため、赤血球に取り込まれた $\text{Cr}^{3+}$ は赤血球が壊れるまで赤血球の中にとどまる。このことを利用して赤血球の寿命測定ができる。

問2 次の標識化合物のうち、陽電子放射断層撮影(PET)診断に用いられるものの組合せはどれか。

- A  $[^{14}\text{C}]$ L-メチオニン
- B  $[^{13}\text{N}]$ アンモニア
- C  $[^{15}\text{O}]$ 水
- D  $[^{18}\text{F}]$ 2-フルオロ-2-デオキシグルコース

- 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) 陽電子放射断層撮影は、陽電子放出核種から出た陽電子が周囲の電子と結合して消滅する際に511 keVの光子2本を正反対方向に放出する現象を利用した核医学検査の一手法である。
- A : ×  $^{14}\text{C}$ は100%  $\beta^-$ 線放出核種である。PET診断には利用できない。
- B : ○  $^{13}\text{N}$ は $\beta^+$ 線放出核種でその半減期は約10分である。 $[^{13}\text{N}]$ アンモニアは心筋血流量の診断等に用いられる。

- C : ○  $^{15}\text{O}$  も  $\beta^+$  線放出核種でその半減期は約 2 分である。 $[^{15}\text{O}]$  水は脳血流量を調べるのに用いられる。
- D : ○  $^{18}\text{F}$  は半減期約 110 分の  $\beta^+$  線放出核種で、グルコースの類似物質である  $[^{18}\text{F}]2$ -フルオロ-2-デオキシグルコースの形で腫瘍、活動性の炎症などの診断に頻用される。

問 3 直接作用と間接作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A X 線の細胞致死作用においては、直接作用に比べて間接作用の寄与が大きい。
- B 低酸素濃度では、通常の酸素濃度に比べて、細胞致死作用における直接作用の寄与が大きい。
- C 直接作用は間接作用に比べて温度の影響を受けやすい。
- D 直接作用は間接作用に比べてジメチルスルホキシドの影響を受けやすい。

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

〔解答〕

2

- 注) A : ○ X 線は低 LET 放射線なので直接 DNA を切断することよりも、細胞周囲の水に作用してラジカルを発生させ、これにより細胞にダメージを与える。すなわち間接作用の寄与が大きい。
- B : ○ 低酸素濃度下では、放射線によって生成される活性酸素も少なくなる。活性酸素による細胞致死作用も間接作用の 1 つであるから、活性酸素が少ない状況では直接作用の寄与が大きい。
- C : × 放射線による分子レベルの影響は温度が高いと大きく、低いと小さくなる。これは温度効果と呼ばれていて、低温下では発生したラジカルが拡散しにくくなるためと考えられている。ラジカルが関与しない直接作用は間接作用に比べ温度の影響を受けにくい。
- D : × ジメチルスルホキシドは  $\bullet\text{OH}$  ラジカル除去剤である。C の解説と同様に、直接作用はラジカルと関わりが少ないのでジメチルスルホキシドの影響は受けにくい。

問 4 ラジカルと活性酸素に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 基底状態の酸素分子 (三重項酸素) はラジカルである。
- B 一重項酸素は活性酸素である。
- C 過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) はラジカルである。
- D ヒドロキシルラジカルは DNA に対して還元剤として作用する。

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

〔解答〕

2

- 注) ラジカルは不対電子を持つ原子や分子、イオンである。一方、活性酸素は酸素の励起で生じる不安定で化学反応性の高い物質である。活性酸素にはスーパーオキシドアニオンラジカル ( $\bullet\text{O}_2^-$ )、ヒドロキシルラジカル ( $\bullet\text{OH}$ )、一重項酸素、過酸化水素がある。
- A : ○ 酸素分子がつくる分子軌道のうち、電子が入る最もエネルギーの高い軌道 (最高被占軌道) は 2 重に縮退している (同じエネルギー準位の軌道が 2 つある)。この 2 つの軌道に電子は 2 個入るのであるが、Hund の規則により同じエネルギー準位の軌道に電子が入る時は、異なる軌道に 1 個ずつスピンの向きを平行にして入るのがエネルギー的に安定である。2 個の電子が平行なスピンを持って異なる軌道に入った状態を「三重項状態」という。酸素の基底状態は不対電子が 2 個あるピラジカルである。

- B : ○ 酸素分子が励起されると、最高被占軌道の2個の電子が反平行のスピンを持つ状態になる。これが「一重項状態」である。一重項状態では、2個の電子はエネルギー準位の同じ軌道が2つあっても対になって同じ軌道に入ろうとする。空になった方の軌道が電子を求めるので、強い酸化力を持つ。一重項酸素は三重項酸素より約93.9 kJ/mol エネルギーが高い活性酸素である。
- C : × 過酸化水素に不対電子はなく、ラジカルには当てはまらない。ただし、ヒドロキシルラジカルを生じやすい。
- D : × ヒドロキシルラジカルは外殻電子が7個であるため、相手から電子を奪って閉殻構造になろうとする。電子を奪うものであるから酸化剤である。

問5 ヒト体細胞における放射線によるDNA 2本鎖切断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 相同組換えによる修復は、一般に姉妹染色分体を必要とする。
- B 非相同末端結合による修復は、相同染色体、姉妹染色分体のいずれも必要としない。
- C 相同組換えによる修復は、S期後半からG<sub>2</sub>期にのみ機能する。
- D 非相同末端結合による修復は、G<sub>1</sub>期からS期前半にのみ機能する。
- E 非相同末端結合による修復に関わる遺伝子を欠損する細胞は、S期後半からG<sub>2</sub>期にかけて最も高い放射線致死感受性を示す。

1 ABCのみ    2 ABDのみ    3 ACEのみ    4 BDEのみ    5 CDEのみ

〔解答〕

1

- 注) A : ○ 相同組換え修復は姉妹染色分体(DNA複製によって生じた同じ配列を持つ染色体)のDNA配列を利用した修復である。
- B : ○ 非相同末端結合による修復はDNAの相同性と無関係に切れた末端同士をつなぐ。
- C : ○ Aの項にも書いたように、相同組換え修復は姉妹染色分体を必要とするため、姉妹染色分体が存在するS期後半～G<sub>2</sub>期で機能する。
- D : × 非相同末端結合による修復は細胞周期のどのステージでも機能する。
- E : × S期後半からG<sub>2</sub>期にかけては相同組換え修復が期待できるので、非相同末端結合による修復に関わる遺伝子を欠損しても、放射線致死感受性は最大とならない。

問6 ヒト体細胞における放射線によるDNA損傷に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A γ線を1 Gy照射した場合に生じるDNA 2本鎖切断の数は、チミングリコールの数より少ない。
- B γ線を1 Gy照射した場合に生じるDNA 2本鎖切断の数は、DNA 1本鎖切断の数より多い。
- C γ線を1 Gy照射した場合に生じるDNA-タンパク質間架橋の数は、塩基損傷の数より少ない。
- D 炭素イオン線を1 Gy照射した場合、γ線を1 Gy照射した場合に比べ、24時間後に残存するDNA 2本鎖切断の数が多。

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

〔解答〕

1

- 注) 1 Gyのγ線によるヒト細胞1個あたりのDNA損傷については、2本鎖切断の数は16～40個、1本鎖切断の数は600～1,000個、チミングリコール生成などの塩基損傷は約6,400個、DNAとタンパク質との架橋の数は約150個といわれている。よって、AとCが○、Bは×。

また、炭素イオン線は高 LET 放射線で電離密度が大きいので、低 LET 放射線である  $\gamma$  線よりも DNA 2 本鎖切断の数が多く、しかも修復されづらい損傷を起こすと考えられている。よって、D は○。

問 7  $\gamma$  線による細胞死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A G<sub>2</sub> 期の細胞は M 期の細胞よりも放射線に抵抗性である。
- B 心筋細胞は 1 Gy の照射でアポトーシスを高頻度を起こす。
- C 線維芽細胞では非相同末端結合修復を欠損すると、生存率曲線の肩は小さくなる。
- D 正常線維芽細胞は 5 Gy の照射で主に増殖死で死ぬ。

- 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 : ○ M 期は細胞周期で最も放射線感受性が高い。
- B : × アポトーシスを起こしやすいのは末梢血リンパ球、胸腺細胞などである。心筋は分化した組織で細胞分裂を行わず放射線抵抗性である。1 Gy の照射で高頻度のアポトーシスを起こしたというデータはない。
- C : ○ 生存率曲線は横軸が吸収線量で縦軸は生存率の対数をとったものである。非相同末端結合による修復機能を失った細胞は切断した DNA を修復することが難しいため、生存率が低下し、肩の幅は小さくなる。
- D : ○ 線維芽細胞はコラーゲンを産生する結合組織細胞の 1 つである。幹細胞ではないが、細胞分裂能があり、5 Gy の照射で主に増殖死で細胞死する。

問 8 次の遺伝病のうち、患者由来の細胞が <sup>60</sup>Co  $\gamma$  線に対して致死感受性が高いものの組合せはどれか。

- A 毛細血管拡張性運動失調症
- B ナイミーヘン染色体不安定性症候群
- C 血友病
- D 色素性乾皮症

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

〔解答〕

2

- 注) A : ○ 毛細血管拡張性運動失調症は 11 番染色体上の *ATM* 遺伝子に異常がある疾患である。*ATM* 遺伝子の産物は放射線による DNA 2 本鎖切断の際に活性化し、下流の様々な鍵となる分子をリン酸化することによって DNA 損傷修復を始め、細胞周期制御、アポトーシス等に関与する働きを持つ。この患者の細胞は放射線による致死感受性が高い。
- B : ○ ナイミーヘン染色体不安定性症候群は 8 番染色体上の *NBS1* という遺伝子の異常に起因する。*NBS1* の産物は他の分子と一緒に複合体を形成し、DNA 2 本鎖切断の相同組換え修復を進めることが分かっている。この患者の細胞も放射線による致死感受性が高い。
- C : × 血友病は X 染色体上の血液凝固に関わる第 VIII 因子または第 IX 因子に異常があるものである。第 VIII 因子も第 IX 因子も DNA 損傷修復には関与しないので、この患者の細胞の放射線感受性は高くない。
- D : × 色素性乾皮症は紫外線によって生じる DNA 損傷の修復機構に異常のある疾患である。紫外線は非電離放射線で、DNA を切断することはないが DNA を構成する塩基を励起し、ピ

リミジンダイマーを生成するなどの変化を起こす。この疾患の患者は異常のあるヌクレオチドを切り出し、正常なDNA鎖に戻す過程で働く酵素群が正常に機能しない。この疾患を持つ患者由来の細胞を用いた実験では、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対する致死感受性は見られなかったとの報告がある。

問9 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 同一吸収線量のX線では、一般に低線量率照射のほうが高線量率照射よりも1細胞あたりの染色体異常の数が少ない。  
 B 同一吸収線量では、一般に速中性子線のほうがX線よりも1細胞あたりの染色体異常の数が多。  
 C 末梢血リンパ球1細胞あたりの二動原体染色体の数で個人の被ばく線量を推定できる。  
 D X線照射により、染色体異常を指標としたゲノム不安定性が誘導されることがある。  
 1 ABCのみ    2 ABDのみ    3 ACDのみ    4 BCDのみ    5 ABCDすべて

[解答]

5

- 注) A : ○ 同一吸収線量であっても、一度に高線量率照射するより低線量率で長時間照射もしくは分割して照射する方が生じる異常染色体の数は少ない。損傷したDNAを修復する時間があるからと考えられている。これを線量率効果といい、低LET放射線照射時に見られる。  
 B : ○ 同一吸収線量であっても、放射線の種類によって細胞に与えるダメージの大きさは異なる。速中性子線のRBE(生物学的効果比)は1.2~2.8とされている。X線はRBEの基準放射線でその値は1.0である。速中性子線の方が染色体異常を多く起こす。  
 C : ○ 末梢血リンパ球中の異常染色体(二動原体染色体や環状染色体)の出現頻度は被ばく線量に依存することが知られている。異常染色体の数を数えることで個人の被ばく線量を推定できる。これをバイオドシメトリーという。二動原体染色体を利用する場合の推定可能範囲は0.2~5 Gyとされている。  
 D : ○ ゲノム不安定性とは、染色体に異常があって細胞分裂の際に正確にゲノムを複製できないことである。X線を照射後、何度も細胞分裂を経た後の細胞に自然頻度より高率で二動原体染色体が観察され、しかもその大部分で染色体断片を伴わなかったとの報告がある。二動原体染色体を持つ細胞は正しく細胞分裂ができず致死するので、この観察結果はX線照射により遅延性のゲノム不安定性が誘導されて細胞分裂を繰り返しても異常な染色体が出現したことを示している。

問10 放射線照射によるヒト細胞の突然変異に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A X線による単位吸収線量あたりの突然変異誘発頻度は線量率とは無関係である。  
 B 自然突然変異に比べてX線で誘発される突然変異では欠失突然変異の割合が高い。  
 C 低LET放射線に比べて高LET放射線では単位吸収線量あたりの突然変異誘発が少ない。  
 D 照射した細胞を非照射細胞と混合培養すると非照射細胞に突然変異が生じることがある。  
 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 一般に線量率が増加するほど、突然変異誘発頻度は増加する(線量率効果)。  
 B : 正  
 C : 誤 高LET放射線である $\alpha$ 線は低LET放射線であるX線より突然変異誘発率が3~10倍程



度高いことが報告されている。

D：正 照射細胞から分泌された液性因子が培養液を介して近傍の非照射細胞にシグナルを伝達し、アポトーシス、染色体異常、突然変異などを誘発する（バイスタンダー効果）。

問 11 X線による細胞死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ヒト線維芽細胞を 2 Gy 照射直後に 44℃ で 30 分加温すると、照射単独に比べて生存率が低下する。
- B 神経細胞は 3 Gy 照射により主に間期死で死ぬ。
- C 細胞周期の S 期前半では S 期後半よりも放射線致死感受性が低い。
- D グルタチオンには X 線に対する防護効果がある。

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

〔解答〕

3

注) A：正

B：誤 神経細胞の間期死は数十～数百 Gy で生じる。

C：誤 一般に放射線致死感受性は  $G_1$  後期～S 期初期にかけて高まり、S 期後期に入ると低下する。

D：正 グルタチオンはチオール (S-H) をもつ化合物でラジカルスカベンジャーとして作用する。

問 12  $\gamma$ 線急性全身被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ヒトの半致死線量 ( $LD_{50}$ ) を決めるための観察期間は 60 日である。
- B  $LD_{50}$  に近い線量を被ばくした場合には生存率を改善する治療法はない。
- C 前駆症状の始まる時期は 1～10 Gy の線量域で違いはない。
- D 8 Gy 以上の被ばくにより意識を喪失することがある。

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

〔解答〕

3

注) A：正 急性全身被ばくした場合の半致死線量 ( $LD_{50}$ ) は 60 日以内の生存率から決定する。ヒトの半致死線量は、骨髄死にあたる 3～5 Gy とされる。

B：誤 5 Gy 以下の被ばくでは造血器系障害の治療が重要であり、血球減少に対して易感染性対策・造血性サイトカイン・成分輸血が有効とされる。

C：誤 被ばく線量により観察される症状の種類や重症度、発症時期は異なる (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。

D：正 8 Gy 以上では意識喪失が認められ、50 Gy 以上で 100% が意識喪失する (IAEA Safety Reports Series No.2, 1998)。

問 13 甲状腺の  $\gamma$ 線急性外部被ばくの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 被ばく前の安定ヨウ素剤の内服により影響は軽減する。
- B 10 Gy の被ばくで甲状腺機能低下が生じる。
- C 3 Gy の被ばくで甲状腺良性結節が増加する。
- D 1 Gy の被ばくで急性甲状腺炎が生じる。

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

〔解答〕

3

- 注) A : 誤 放射性ヨウ素が摂取される前 24 時間以内または摂取直後に安定ヨウ素剤を内服することで放射性ヨウ素の甲状腺への集積の 90% 以上を抑制できるが、外部被ばくについては軽減効果の報告はない。
- B : 正 甲状腺機能低下症のしきい線量として 5 Gy が提案されている。
- C : 正 小児期に被ばくした原爆被爆者の甲状腺良性結節のリスク増加について 2015 年に日本の研究チームが報告している。
- D : 誤 急性甲状腺炎のしきい線量は 200 Gy が提案されている。

問 14 生殖腺の被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 精原細胞は精子形成過程で最も放射線致死感受性が高い。
- B 精原細胞は精子形成過程で最も突然変異誘発率が高い。
- C 卵原細胞は卵子形成過程で最も突然変異誘発率が高い。
- D 遺伝的リスクは女性より男性で高いと推定されている。
- 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 精原細胞は精子が形成される初期段階の細胞である。放射線致死感受性は未分化な精原細胞の方が分化の進んだ精子より高い。
- B : 誤 精原細胞は、放射線致死感受性が高いため、突然変異を誘発するまで生存する確率は分化の進んだ精細胞や精子と比べて相対的に低くなると考えられる。
- C : 誤 卵原細胞は、放射線致死感受性が高いため、突然変異を誘発するまで生存する確率は分化の進んだ卵子と比べて相対的に低くなると考えられる。
- D : 正

問 15 生体内に入った場合に主要な集積部位が骨ではない核種は次のうちどれか。

- 1  $^{32}\text{P}$
- 2  $^{90}\text{Sr}$
- 3  $^{210}\text{Po}$
- 4  $^{226}\text{Ra}$
- 5  $^{241}\text{Am}$

〔解答〕

3

- 注) 体内に入った元素のうち P, Ca, Sr, Y, Ba, Ra, U, Pu, Amなどは骨に集積することが知られている。骨の成分は主にリン酸カルシウム的一种であるヒドロキシアパタイトからできているため、P と Ca は骨に集積する。また Ca と同じアルカリ土類金属である Sr や Ra も骨に集積する。

問 16 眼とその付属器の  $\gamma$ 線急性被ばくが直接的原因とならないものは次のうちどれか。

- 1 白内障
- 2 緑内障
- 3 角膜炎

- 4 眼乾燥症候群（ドライアイ）
- 5 眼球突出

〔解答〕

- 5  
 注) 眼の急性放射線障害には結膜炎や角膜炎，晩発性障害には緑内障や白内障，眼球乾燥，角膜潰瘍がある。原爆被爆者の緑内障のリスク増加について 2013 年に日本の研究チームが報告している。

問 17 X 線を急照射した場合に半数の個体が死ぬ線量が最も小さいものは次のうちどれか。

- 1 大腸菌
- 2 酵母
- 3 ヒト
- 4 マウス
- 5 クマムシ

〔解答〕

- 3  
 注) ヒト，マウスの半致死線量はそれぞれ 3～5 Gy，5.6～7 Gy である。大腸菌，酵母，クマムシは放射線抵抗性が高く，大腸菌の半致死線量は 50 Gy，クマムシは 4000 Gy 程度である。

問 18 次の放射線被ばくと発がんの関係のうち，正しいものの組合せはどれか。

- |   |              |   |       |
|---|--------------|---|-------|
| A | ウラン鉱夫        | — | 肺がん   |
| B | ラジウム時計文字盤工   | — | 胃がん   |
| C | 頭部白癬 X 線治療患者 | — | 甲状腺がん |
| D | トロトラスト被注入患者  | — | 大腸がん  |
- 1 A と B    2 A と C    3 B と C    4 B と D    5 C と D

〔解答〕

- 2  
 注) A：正  
 B：誤 ラジウム時計文字盤工に多く見られたのは骨肉腫。ラジウムはカルシウムと同じアルカリ土類金属で化学的性質が似ており，骨に集積する。  
 C：正  
 D：誤 トロトラスト被注入患者に多く見られたのは肝臓がん。トロトラストは二酸化トリウムのコロイド状水溶液で造影剤として広く使われていた。

問 19 原爆被爆者の疫学調査において，統計的に有意ながん死亡リスクの増加がみられたがんの組合せはどれか。

- |   |      |
|---|------|
| A | 胃がん  |
| B | 肺がん  |
| C | 膵臓がん |
| D | 白血病  |
- 1 ABC のみ    2 ABD のみ    3 ACD のみ    4 BCD のみ    5 ABCD すべて

〔解答〕

2

注) 白血病, 胃がん, 肺がん, 結腸がん, 肝臓がん, 乳がん, 卵巣がんなどに, 統計的に有意なリスクの上昇が見られるが, 直腸がん, 膵臓がん, 子宮がん, 前立腺がんなどには, 統計的に有意なリスクの増加は認められていない。

問20 預託実効線量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 単位は Sv・年である。
- B 特に指定しない場合, 子供に対しては摂取時から 50 年間の実効線量を積算する。
- C 長期にわたる内部被ばくを評価するために使用する。
- D すべての臓器・組織の確率的影響のリスクを評価するために使用する。

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

〔解答〕

5

注) 体内に取り込まれた放射性物質による内部被ばくの実効線量を長期(およそ一生分)にわたって評価するための値であり, 単位は Sv である。特に指定しない場合, 子供に対しては摂取時から 70 年間の実効線量を積算する。実効線量であるので D は正しい。

問21 我が国における自然放射線およびそれによる被ばくに関する次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。

- A 外部被ばく線量は内部被ばく線量よりも大きい。
- B 内部被ばくでは,  $^{14}\text{C}$  の摂取によるものが最も寄与が大きい。
- C 一次宇宙線としては銀河からの陽子が大部分を占める。
- D 年間被ばく線量は約 2.1 mSv 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) 我が国における自然放射線による被ばく線量は年間約 2.1 mSv であり,  $^{222}\text{Rn}$  の吸入や  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{40}\text{K}$  などの経口摂取による内部被ばくが, およそ 3 分の 2 を占める。一次宇宙線の主な成分は, 銀河からの陽子である。

問22 世界人口における医療被ばくの年間集団実効線量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 医療被ばくによる年間集団実効線量には放射線治療による患者の被ばくも含まれる。
- B 自然放射線による年間集団実効線量に比べると, 医療被ばくの方が大きい。
- C X線診断と核医学診断を比べると X線診断の方が大きい。
- D X線診断のうちで最も大きいのは CT によるものである。

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

〔解答〕

5

注) 医療被ばくによる年間集団実効線量には放射線治療による患者の被ばくは含まれない。世界的に見ると, 自然放射線による年間集団実効線量は 2.4 mSv, 医療被ばくによる年間集団実効線量は 0.6

mSv 程度で、自然放射線による年間集団実効線量の方が大きい。日本では、自然放射線による年間集団実効線量は 2.1 mSv、医療被ばくによる年間集団実効線量は 3.9 mSv 程度で、医療被ばくによる年間集団実効線量の方が大きい。胸部 X 線撮影（一般撮影）による被ばくは 0.06 mSv 程度であるが、X 線 CT 撮影による被ばくは 5～30 mSv 程度である。一方、核医学診断は 0.5～15 mSv 程度である。

問 23 原爆被爆者における胎内被ばくの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 幼児期被ばくに比べて小児がんのリスクが有意に高い。
- B 発育遅延の有意な増加が観察されている。
- C 小頭症の有意な増加が観察されている。
- D 精神遅滞の有意な増加が観察されている。

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

〔解答〕

4

注) 胎内被爆者の発がんリスクは、10 歳未満までは上昇しないが、成人までのリスクとしては上昇することが示されている。しかし、そのリスクの大きさは、幼児被爆者と同等であるとされている。胎児期の脳は放射線感受性が高く、胎内被ばくによる発育遅延、精神遅滞や小頭症の有意な増加が観察されている。特に受胎後 8～15 週齢に被ばくすると、放射線量に応じて小頭症や知的障害のリスクが高くなるとされている。

問 24  $\gamma$ 線急性全身被ばくによる身体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 1 Gy の被ばくで脱毛が生じる。
- B 2 Gy の被ばくで白血球減少が生じる。
- C 3 Gy の被ばくで消化管の穿孔<sup>せん</sup>が生じる。
- D 8 Gy の被ばくで放射線肺臓炎が生じる。

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

〔解答〕

4

注) 一時的脱毛のしきい値はおよそ 3～4 Gy と考えられている。骨髄が 0.5 Gy 以上の放射線を受けると造血機能が低下し、白血球減少が生じる。また消化管の穿孔などの消化管障害は 5～6 Gy 以上の被ばく、放射線肺臓炎は 8 Gy 以上の被ばくで生じると考えられている。

問 25 放射線による身体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 白血病は早期影響である。
- B 再生不良性貧血は晩発障害である。
- C 固形腫瘍は晩発障害である。
- D 耳下腺炎は晩発障害である。

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

〔解答〕

3

注) 晩発障害の例としては、白血病・固形腫瘍の誘発、遺伝的影響、再生不良性貧血などがある。脱毛、吐き気、食欲不振、白血球の減少等のほか、放射線皮膚炎・粘膜炎（口内炎、咽頭炎、食道炎

など), 舌炎, 耳下腺炎, 外耳炎・中耳炎等の各種急性炎症は早期(急性)障害である。

問26 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 遺伝性(的)影響にはしきい線量は存在しないと評価されている。
- B 高線量急性被ばくした本人に現れる。
- C 原爆被爆者で有意な増加が報告されている。
- D ヒトの遺伝性(的)影響のリスク推定では, 動物実験のデータが利用されている。

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

〔解答〕

3

注) 遺伝性(的)影響は, しきい線量のない確率的影響に分類されている。遺伝性(的)影響は, 放射線を受けた人の子どもや孫に現れる影響をいう。人間では, 親の被ばくが子孫の遺伝病を増加させるという証拠は見つかっていない。動物実験のデータから, ヒトの遺伝性(的)影響のリスク(子と孫の世代まで)は約0.2%/Gyと推定されている(ICRP 2007年勧告)。

問27 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 線量率効果が大きい。
- B 酸素効果が小さい。
- C 直接作用の寄与が大きい。
- D 細胞周期依存性が小さい。

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

〔解答〕

5

注) 同じ線量を与える場合に, 線量率を低くすると細胞致死作用は小さくなる。これを線量率効果という。高LET放射線の場合, 非修復性損傷が多く生成され, 照射中に起こる回復が少ないため, 線量率効果は小さい。同様に, 細胞の生死が修復能に依存する程度が少ないため, 高LET放射線では細胞周期依存性が小さいと考えられる。また高LET放射線の細胞致死作用は, 直接生体高分子を電離・励起し, その高分子に障害を及ぼす直接作用が主体であり, そのため酸素効果は小さい。

問28 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 RBEの単位はGyである。
- B 基準放射線としては, 一般に管電圧200~250kVのX線が用いられる。
- C 生物効果の指標によらず放射線の種類ごとに値が定められている。
- D 低線量域における確率的影響のRBEを参考に放射線加重係数が定められている。

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

〔解答〕

4

注) 生物学的効果比(RBE)とは, 対象とする放射線と基準放射線とが生体に等しい変化を与えるときに, 前者の吸収線量を後者の吸収線量で割って得られる値であらわす。生物学的効果ごと, 放射線の種類ごとに定められる。基準の放射線としては, 放射線医学においては250keVのX線を用いるが, 通常は普通のX線または<sup>60</sup>Co γ線が用いられる。

- A : 誤 RBE は吸収線量を吸収線量で割るため、単位は線量とはならない。  
 B : 正 基準放射線としては、X 線または  $\gamma$  線が用いられるため、管電圧 200 ~ 250 kV の X 線 (最大エネルギー 200 ~ 250 keV) は正しい。  
 C : 誤 RBE は生物学的効果および放射線の種類ごとに値が定められている。  
 D : 正 放射線加重係数は低線量域における確率的影響の RBE を参考に定められている。

問 29 粒子線の細胞致死効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 速中性子線は  $\gamma$  線よりも OER が小さい。  
 B 陽子線の RBE は約 3 であると評価されている。  
 C 炭素イオン線ではプラトー部とブラッグピーク部で、単位吸収線量あたりの細胞致死効果に差がある。  
 D LET が大きくなればなるほど、RBE が大きくなる。  
 1 ACD のみ    2 AB のみ    3 AC のみ    4 BD のみ    5 BCD のみ

〔解答〕

3

注) 粒子線の細胞致死効果については、各種放射線の生物学的効果比 (RBE)、放射線加重係数および酸素増感比 (OER) が問題となる。

- A : 正 OER は酸素効果の指標で、間接効果をその主たる効果とする X 線や  $\gamma$  線などの低 LET 放射線において顕著であり、このとき OER は 2 ~ 3 である。逆に、直接効果をその主たる効果とする速中性子線をはじめとする粒子線など高 LET 放射線については、損傷の固定に酸素の存在を必要としないので、OER は 1 に近くなる。  
 B : 誤 放射線加重係数が与えられている場合、基本的に RBE と放射線加重係数は等しいと考えてよい。ICRP 2007 年勧告での放射線加重係数は、電子が 1、陽子は 2、 $\alpha$  線は 20 となっている。  
 C : 正 炭素イオン線はエネルギーの吸収が極大となるブラッグピークを持ち、ブラッグピーク部で線エネルギー付与 (LET) が最大となる。プラトー部では LET は十分低いいため、RBE はブラッグピーク部よりも低くなる。  
 D : 誤 基本的に線エネルギー付与 LET が大きいほど RBE は大きい値となるが、LET が 100 keV/ $\mu$ m 付近を最大としてそれ以上では減少する。

問 30 放射線治療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 陽子線はビルドアップ効果により、X 線よりも深部線量分布に優れる。  
 B 電子線は表在性腫瘍の治療に用いられる。  
 C  $^{125}\text{I}$  は密封小線源として用いられる。  
 D ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) では低エネルギー中性子が主に用いられる。  
 1 ACD のみ    2 AB のみ    3 AC のみ    4 BD のみ    5 BCD のみ

〔解答〕

5

注) 粒子線による治療では、X 線・ $\gamma$  線、電子線と陽子線の特徴を把握する必要がある。

X 線・ $\gamma$  線の特徴は、深部量百分率 (PDD) が大きく、深部の腫瘍に対して十分な線量を与えることができるが、電子線では、エネルギーにより到達できる一定の距離 (飛程) が決まっており、それ以上の深部領域には到達することができない特徴がある。陽子線ではブラッグピークが形成され

るため、陽子線のエネルギーを調節することにより到達とともに吸収が集中する領域を調節できる。

- A：誤 ビルドアップ（build-up）効果とは、光子線束が体内に入射したときに、1次線より2次散乱線の増加が多く徐々に線量を増すこと。表面から徐々に線量を増し、最大線量となるまでの領域をビルドアップ領域という。陽子線では、吸収ピークはブラッグピークにより形成されるうえ、光子線束で定義されるビルドアップ効果はない。
- B：正 電子線はエネルギーにより到達できる一定の距離（飛程）が決まっており、それ以上の深部領域には到達することができないため、表在性腫瘍の治療に用いられる。
- C：正  $^{125}\text{I}$ は低エネルギー X 線を放出するため密封小線源として用いられる。
- D：正 ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）では、 $^{10}\text{B}$ と低エネルギー中性子が反応することによる  $\alpha$ 線を利用する。



## 物 化 生

## 第 61 回 (平成 28 年)

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

I  $\alpha$  壊変は, 原子核 (親核) が  $\alpha$  粒子を放出してより小さい原子核 (娘核) に壊変する現象で, まれな例外を除いて, 質量数が 200 以上の重い原子核で起こる。 $\alpha$  粒子は [A] により原子核内に束縛されており, 放出は [B] 効果によって起こる。壊変エネルギー (Q 値) は壊変前後の [C] から求められる。 $^{226}\text{Ra}$  を例にとると,  $^{226}\text{Ra}$  は  $\alpha$  粒子を放出して  $^{222}\text{Rn}$  に壊変し,  $^{222}\text{Rn}$  は 5.5% の確率で 0.186 MeV の励起状態か, 94.5% の確率で基底状態となる。この壊変エネルギーを計算すると [ア] MeV となる。基底状態へ壊変した場合の  $\alpha$  粒子の運動エネルギーは [イ] MeV となる。ただし,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\alpha$  粒子の結合エネルギーを, それぞれ 1731.60, 1708.18, 28.29 MeV とした。

$\beta$  壊変には,  $\beta^-$  壊変,  $\beta^+$  壊変, 及び軌道電子捕獲 (EC) 壊変があり, いずれも弱い相互作用によって起こる。 $\beta^-$  壊変に伴い電子と [D] が放出され, 娘核の原子番号は 1 増加するが質量数は変わらない。壊変エネルギーは, 娘核, 電子及び [D] の運動エネルギーに分配され, その割合は壊変毎に異なるため, 電子のエネルギー分布は連続分布となる。 $\beta^+$  壊変では陽電子と [E] が放出される。陽電子のエネルギーも連続分布を示すが, 原子核との [F] によって  $\beta$  壊変における分布とは異なる形状となる。 $^{22}\text{Na}$  (中性原子質量 21.99444 u) は, 90.4% の確率で  $^{22}\text{Ne}$  (同 21.99139 u) の 1.2746 MeV の励起状態へ  $\beta^+$  壊変する。このときの  $\beta^+$  線の最大エネルギーは, [ウ] MeV である。ただし, 電子の質量を 0.00055 u とし, 質量は原子質量単位で表した。軌道電子捕獲壊変は, 原子核内の [G] が軌道電子と結合して, [E] を放出する現象である。これにより電子軌道に空孔が生じ, そこへ外側の軌道にある電子が遷移した場合には, 特性 X 線または [H] が放出される。

< A~C の解答群 >

- 1 ローレンツ力    2 クーロン力    3 遠心力    4 核力    5 阻止能  
6 トンネル    7 メスバウアー    8 ラムザウアー    9 ドップラー  
10 チェレンコフ    11 オージェ    12 質量超過    13 質量欠損    14 運動量  
15 ポテンシャルエネルギー

< ア, イの解答群 >

- 1 4.72    2 4.75    3 4.78    4 4.81    5 4.84    6 4.87    7 4.90  
8 4.93    9 4.96    10 4.99    11 5.02    12 5.05    13 5.08    14 5.11

< D~H の解答群 >

- 1 ローレンツ力    2 クーロン力    3 遠心力    4 核力    5 阻止能  
6 陽子    7 中性子    8 ニュートリノ    9 反ニュートリノ    10 光電子  
11 陽電子    12 オージェ電子    13 ヘリウム原子核    14 X 線

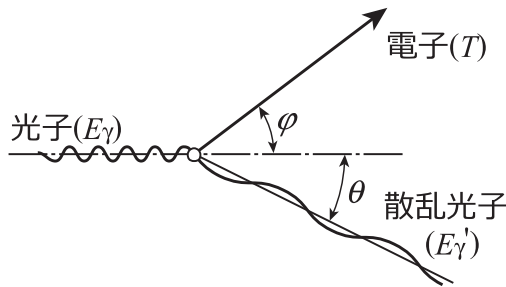
< ウの解答群 >

- 1 0.12    2 0.37    3 0.55    4 0.83    5 1.16    6 1.57    7 1.90  
8 2.23    9 2.61    10 2.84    11 3.04    12 3.38

II  $\alpha$ 壊変あるいは $\beta$ 壊変が起きた後に励起状態にある原子核は、 $\gamma$ 線を放出してより安定な状態へ移行する。放出 $\gamma$ 線のスペクトルは線スペクトルで、その原子核特有のものとなる。励起状態がやや安定で、数ミリ秒から数日以上の寿命で $\gamma$ 線を放出して基底状態になる過程があり、これを **I** と呼ぶ。また、励起状態の原子核が $\gamma$ 線を放出せずに、エネルギーを軌道電子に直接与えて、その電子を放出する過程を **J** という。

$\gamma$ 線は、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線のように直接物質を電離あるいは励起することなく、主として光電効果、コンプトン効果、及び電子対生成の3つの過程を通してエネルギーを失う。ここで、コンプトン効果によるエネルギー減弱の様子は以下のようなものである。

下図のように、静止している電子（質量  $m$ ）にエネルギー  $E_\gamma$  の光子があたり、光子の入射方向に対して角度  $\theta$  の方向に光子が散乱された。このときの散乱光子のエネルギーは  $E'_\gamma$  であった。これと同時に、電子は光子の入射方向に対して角度  $\varphi$  の方向にはね飛ばされた。ただし、角度  $\theta$  及び  $\varphi$  は正の値とする。



この過程において、エネルギー保存則は電子の運動エネルギーを  $T$  として

$$E_\gamma = E'_\gamma + T \dots\dots\dots (1)$$

である。一方、運動量の保存則は、 $c$  を光速、 $p$  を電子の運動量とすると、入射方向に対して

$$E_\gamma / c = \text{K} \dots\dots\dots (2)$$

入射と垂直な方向に対しては

$$0 = \text{L} \dots\dots\dots (3)$$

と書くことができる。

相対論を考慮すると、 $pc$  と  $T$  の関係は

$$(pc)^2 = \text{M} \dots\dots\dots (4)$$

であるから、以上の式を用い、 $\varphi$ 、 $p$  及び  $T$  を消去して、散乱後の光子エネルギー

$$E'_\gamma = \text{N} \dots\dots\dots (5)$$

を求めることができる。ここで、散乱前後の光子の波長を  $\lambda$ 、 $\lambda'$  として、 $E_\gamma = h(c/\lambda)$  の関係から、波長変化  $\Delta\lambda$  を求めると

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \text{O} \cdot (1 - \cos\theta) \dots\dots\dots (6)$$

を得る。ただし  $h$  はプランク定数 ( $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ) である。ここで、**O** はコンプトン波長と呼ばれ  $2.43 \text{ pm}$  の定数値を取り、波長変化の最大値の  $1/2$  である。このことより、コンプトン散乱における波長変化は、入射光子のエネルギーには依存しない。 $1 \text{ MeV}$  のエネルギーを持つ  $\gamma$ 線が角度  $\theta = 60^\circ$  で散乱されるときコンプトン電子の運動エネルギーを計算すると、**エ**  $\text{MeV}$  となる。

光子が物質中に入ると、先に述べた3つの過程により減弱する。物質中での光子の減弱は減弱係数を用いて表されることが多い。 $1 \text{ MeV}$  の入射  $\gamma$ 線に対するコンプトン散乱断面積を電子あたり  $0.20 \text{ barn}$  ( $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ) として、アルミニウムのコンプトン散乱による線減弱係数を求めると、

オ cm<sup>-1</sup>となる。ただし、アルミニウムの原子番号は 13, 質量数 27, 密度 2.7 g・cm<sup>-3</sup>とし、アボガドロ定数を 6.02×10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup>とした。

< I, J の解答群 >

- 1 制動放射    2 黒体輻射    3 内部転換    4 ホットアトム    5 自発核分裂  
6 核異性体転移    7 電子捕獲    8 核変換    9 オージェ放出

< K, L の解答群 >

- 1  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\sin\theta - p\cdot\sin\theta$     2  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\sin\theta - p\cdot\sin\phi$     3  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\cos\theta - p\cdot\sin\theta$   
4  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\cos\theta - p\cdot\sin\phi$     5  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\sin\theta + p\cdot\cos\phi$     6  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\sin\theta + p\cdot\cos\theta$   
7  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\cos\theta + p\cdot\cos\phi$     8  $\left(\frac{E_r'}{c}\right)\cos\theta + p\cdot\cos\theta$

< M の解答群 >

- 1  $T+mc$     2  $T-mc^2$     3  $T^2+mc$     4  $T^2-mc^2$     5  $(T+mc)^2 - (mc)^2$   
6  $(T-mc)^2 - (mc)^2$     7  $(T+mc^2)^2 - (mc^2)^2$     8  $(T-mc^2)^2 - (mc^2)^2$

< N の解答群 >

- 1  $\frac{1}{1 + \left(\frac{E_r}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$     2  $\frac{1}{1 - \left(\frac{E_r}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$     3  $\frac{E_r}{1 + \left(\frac{1}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$   
4  $\frac{E_r}{1 - \left(\frac{1}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$     5  $\frac{E_r}{1 + \left(\frac{E_r}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$     6  $\frac{E_r}{1 - \left(\frac{E_r}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)}$

< O の解答群 >

- 1  $\frac{h}{m}$     2  $\frac{hc}{m}$     3  $\frac{h}{mc}$     4  $\frac{h}{mc^2}$     5  $\frac{hc^2}{m}$     6  $\frac{h}{(mc)^2}$     7  $\frac{1}{mc}$   
8  $\frac{1}{mc^2}$     9  $\frac{c^2}{m}$     10  $\frac{1}{(mc)^2}$

< エ, オ の解答群 >

- 1 0.06    2 0.11    3 0.16    4 0.23    5 0.29    6 0.33    7 0.39    8 0.44  
9 0.49    10 0.55    11 0.61    12 0.67    13 0.73    14 0.84    15 0.90

[解答]

- I A-4    B-6    C-13    ア-6    イ-3    D-9    E-8  
F-2    G-6    H-12    ウ-3

注) ア: 壊変前後の質量欠損は, 壊変前の結合エネルギーと  $\alpha$ 壊変後の生成核の結合エネルギーの和との差に等しいから,

$$(1708.18 + 28.29) - 1731.60 = 4.87 \text{ [MeV]}$$

イ:  $\alpha$ 壊変後の  $\alpha$ 粒子の質量を  $m$ , 速度を  $v$ , <sup>222</sup>Rn の質量を  $M$ , 速度を  $V$  とおくと, 運動量保存則より,

$$mv = MV \dots\dots\dots \text{①}$$

また, アの解答とエネルギー保存則より,

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{MV^2}{2} = 4.87 \text{ [MeV]} \dots\dots\dots \text{②}$$

ここで、ほぼ  $\frac{m}{M} = \frac{4}{222}$  であるから  $M = \frac{222}{4}m$ 、また①式より  $V = \frac{4}{222}v$  となるため、これらを②式に代入して、

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{\left(\frac{222}{4}m\right)\left(\frac{4}{222}v\right)^2}{2} = 4.87$$

$$\frac{mv^2}{2} \left(1 + \frac{4}{222}\right) = 4.87$$

よって、 $\alpha$  粒子の運動エネルギーは、 $\frac{mv^2}{2} = 4.78$  [MeV] と見積もられる。

ウ： $\beta^+$  線のエネルギーが最大となるのは、壊変エネルギー (Q 値) がすべて  $\beta^+$  線のエネルギーとなった場合である。 $\beta$  壊変の壊変エネルギーも  $\alpha$  壊変と同様に、壊変前後の全粒子の質量差で決まる。 $1u = 931.5$  MeV であり、また  $^{22}\text{Na}$  の中性原子は  $^{22}\text{Ne}$  の中性原子よりも軌道電子が1つ多いこと、および壊変後の  $^{22}\text{Ne}$  原子核が 1.2746 MeV の励起状態にあるためにそのぶん壊変エネルギーの値は小さくなることを考慮すると、壊変前の  $^{22}\text{Na}$  原子核と壊変後の  $^{22}\text{Ne}$  原子核および陽電子との質量の差から壊変エネルギーは、

$$\{(21.99444 - 0.00055) - (21.99139 + 0.00055)\} \times 931.5 - 1.2746 \approx 0.55 \text{ [MeV]}$$

と見積もられる。

- II I-6    J-3    K-7    L-2    M-7    N-5    O-3  
エ-9    オ-3

注) M：相対論より、静止エネルギーと運動エネルギーを加えた全エネルギーは

$$T + mc^2 = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

で与えられるため、

$$(T + mc^2)^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

$$(pc)^2 = (T + mc^2)^2 - (mc^2)^2$$

となる。

N：(2)式より、

$$(p \cos \varphi)^2 = \left(\frac{E_r}{c} - \frac{E'_r}{c} \cos \theta\right)^2$$

(3)式より、

$$(p \sin \varphi)^2 = \left(\frac{E'_r}{c} \sin \theta\right)^2$$

よって、

$$p^2 = (p \cos \varphi)^2 + (p \sin \varphi)^2 = \left(\frac{E_r}{c} - \frac{E'_r}{c} \cos \theta\right)^2 + \left(\frac{E'_r}{c} \sin \theta\right)^2$$

$$(pc)^2 = (E_r - E'_r \cos \theta)^2 + (E'_r \sin \theta)^2 \dots\dots\dots \text{①}$$

また、(1)式より  $T = E_r - E'_r$  を(4)式に代入して、

$$(pc)^2 = (E_r - E'_r + mc^2)^2 - (mc^2)^2 \dots\dots\dots \text{②}$$

①式と②式より、

$$(E_r - E'_r \cos \theta)^2 + (E'_r \sin \theta)^2 = (E_r - E'_r + mc^2)^2 - (mc^2)^2$$

$$2E_r E'_r \cos \theta = 2E_r E'_r - 2mc^2(E_r - E'_r)$$

$$E'_r \{mc^2 + E_r(1 - \cos \theta)\} = mc^2 E_r$$

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

○:  $\lambda = hc/E_\gamma$  の関係から,

$$\lambda' - \lambda = hc \left( \frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right)$$

ここで,  $E'_\gamma$  に (5) 式を代入すると,

$$\lambda' - \lambda = hc \left[ \frac{1 + \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right)(1 - \cos \theta)}{E_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right] = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

エ: (1) 式よりコンプトン電子の運動エネルギーは  $T = E_\gamma - E'_\gamma$  で表される。ここで,  $E'_\gamma$  に (5) 式を代入すると,

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

$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$  であるから,

$$T = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0.511}\right)(1 - \cos 60^\circ)} = 0.49 \text{ [MeV]}$$

オ: コンプトン散乱による線減弱係数を  $\mu$ , コンプトン散乱の原子断面積を  $\sigma$ , 物質の原子数密度を  $N$  とすると,

$$\mu = \sigma N$$

である。ここで, 1 電子あたりのコンプトン散乱の断面積が  $0.20 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$  であるから, アルミニウムのコンプトン散乱の原子断面積は

$$\sigma = (0.20 \times 10^{-24}) \times 13 \text{ [cm}^2\text{]}$$

また, アルミニウムの原子数密度は

$$N = \frac{2.7 \times (6.02 \times 10^{23})}{27} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

となるので,

$$\mu = 0.16 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

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 電離放射線を大別すると, 自身が  A  を持つ直接電離性放射線と, 自身は  A  を持たず, 物質との相互作用の結果, 二次的に発生した直接電離性放射線が電離を引き起こす間接電離性放射線の二種類に分けられる。

直接電離性放射線の一つである  $\alpha$  線は, 物質中で  B  を受けながら連続的に減速し, やがて停止する。例えば標準状態の空気中においてその飛程  $R$  [cm] は,  $\alpha$  線の初期エネルギーが  $E$  [MeV] のとき,

$$R = 0.318E^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

と表せる。したがって 4 MeV の  $\alpha$  線の空気中の飛程は (1) 式により約  ア  cm と計算できる。

また、このときの空気の密度を  $1.3 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$  とすると、水中の飛程は  $\boxed{\text{イ}}$   $\mu\text{m}$  ほどしかないことがわかる。

一方、間接電離性放射線の一つである  $\gamma$  線は、物質中で吸収・散乱されることもあれば、全く相互作用を起こさず透過することもある。 $\gamma$  線が物質中で相互作用するかどうかは確率の問題であり、 $\alpha$  線のように飛程を定義することはできない。 $N_0$  個の細い線束の単色  $\gamma$  線が、線束と垂直に置かれた厚さ  $dx$  の薄い板に入射し、これを透過する  $\gamma$  線の数  $N$  であるとする。このとき  $dN$  個の  $\gamma$  線が吸収・散乱によって失われたとすると、次の関係がある。

$$\frac{dN}{dx} = \boxed{\text{C}} \dots\dots\dots (2)$$

これを積分し、初期条件を考慮すると

$$N = \boxed{\text{D}} \dots\dots\dots (3)$$

と表される。ここで、 $\mu$  は線減弱係数と呼ばれ、吸収・散乱の  $\boxed{\text{E}}$  の総和と単位  $\boxed{\text{F}}$  あたりの  $\boxed{\text{G}}$  数の積である。4 MeV の  $\gamma$  線の水に対する  $\mu$  の値は約  $0.034 \text{ cm}^{-1}$  なので、 $N_0$  から半減する水の厚さは約  $\boxed{\text{ウ}}$  cm となる。このようにエネルギーが同じであっても放射線の種類や物質との相互作用の違いにより、その取扱いは大きく異なることに注意が必要である。

< A, B の解答群 >

- 1 質量    2 磁気モーメント    3 電荷    4 スピン    5 反粒子    6 制動放射
- 7 核反応    8 ローレンツ力    9 クーロン力    10 振動

< ア～ウの解答群 >

- 1 0.51    2 1.5    3 2.5    4 5.0    5 12    6 15    7 20    8 24
- 9 33    10 48

< C, D の解答群 >

- 1  $-\mu x$     2  $\mu x$     3  $-\mu N$     4  $\mu N$     5  $\frac{1}{x}$     6  $-\frac{1}{x}$     7  $e^{-\mu x}$     8  $e^{\mu x}$
- 9  $N_0 e^{-\mu x}$     10  $N_0 e^{\mu x}$

< E～G の解答群 >

- 1 質量減弱係数    2 質量エネルギー吸収係数    3 阻止能    4 半価層
- 5 原子断面積    6 面積    7 体積    8 質量    9 原子    10 電子

II 直接電離性放射線と間接電離性放射線における水の吸収線量評価法は以下のとおりである。

前者の一つである 200 MeV の陽子線を水に照射したとき、水中のある深さにおける吸収線量は、そこでの陽子線の  $\boxed{\text{H}}$  と水の  $\boxed{\text{I}}$  の積で与えられる。また、そこに空気の空洞を導入し、空洞のサイズが陽子線の場合を乱さないほど十分小さい場合、 $\boxed{\text{J}}$  によって水と空気の吸収線量の比はそれらの  $\boxed{\text{I}}$  の比で与えられる。このことを利用し、空気の空洞電離箱は物質中での吸収線量の評価に用いられる。例えば、陽子線を水中に設置された水等価壁を有する容積  $0.5 \text{ cm}^3$  の空気の空洞電離箱に照射した際に、13 nC の電離電荷が得られたとする。このときの空気の密度を  $1.3 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$  とし W 値を 34 eV とすると、空気の吸収線量は  $\boxed{\text{エ}}$  Gy となる。ここで、空気の  $\boxed{\text{I}}$  が  $4.82 \text{ MeV}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 、水の  $\boxed{\text{I}}$  が  $5.44 \text{ MeV}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$  であるとする、そこでの水の吸収線量は  $\boxed{\text{オ}}$  Gy となる。

間接電離性放射線の一つである光子を照射したときの水の吸収線量は、空気の空洞電離箱により次のように評価される。

1) 水中に空洞電離箱を挿入する場合

空洞のサイズが二次電子の  $\boxed{\text{K}}$  に比べて十分小さいときには、水中で発生した二次電子のフルエ

ンスは空洞中で変化せず一様であり、また、空洞中での光子の相互作用は無視でき、光子束は変化しない。よってこうした条件下では、に基づき、水の吸収線量は、水の空気に対する二次電子の平均のの比を空気の吸収線量に乗ずることにより得ることができる。

2) 空気中に空洞電離箱を置き、その吸収線量から水の吸収線量に換算する場合

空洞空気の吸収線量は、光子が空気との相互作用によって生じた二次電子により主としてもたらされるため、の条件下において光子のとその光子に対する空気のの積で表すことができる。この空洞を、同じ場所で、半径が二次電子の程度の球形の水に置換する場合、光子のを大きく乱さないと仮定すると、水の吸収線量は、水の空気に対するの比を空気の吸収線量に乗ずることにより得ることができる。

< H~O の解答群 >

- 1 線減弱係数    2 質量エネルギー吸収係数    3 フルエンス  
 4 エネルギーフルエンス    5 空洞理論    6 ブラッグ・クレーマン則    7 質量阻止能  
 8 線阻止能    9 LET    10 W 値    11 密度    12 荷電粒子平衡    13 ビルドアップ  
 14 飛程    15 散乱

< エ, オの解答群 >

- 1 0.60    2 0.68    3 0.77    4 0.86    5 0.98    6 1.20    7 1.36  
 8 1.53    9 1.76    10 1.92

[解答]

- I -3    -9    -3    -9    -7    -3    -9  
-5    -7    -9

注) ア: (1)式より

$$R = 0.318 \times 4^{\frac{3}{2}} = 0.318 \times 2^3 = 2.5 \text{ [cm]}$$

イ: 飛程に密度を掛けた値は物質の種類にあまり依存しないことから、空気と水の密度の比と空気中の飛程により、水中の飛程は

$$2.5 \times \frac{1.3}{1000} = 3.3 \times 10^{-3} \text{ [cm]} = 33 \text{ [\mu m]}$$

である。

ウ: 半減するとは、(3)式において  $N = N_0/2$  の場合であるから

$$e^{-\mu x} = \frac{1}{2}$$

$$\mu x = \ln 2 = 0.693$$

ここで、 $\mu = 0.034 \text{ [cm}^{-1}]$  なので

$$x = \frac{0.693}{0.034} = 20 \text{ [cm]}$$

- II -3    -7    -5    -14    -7    -12    -4  
-2    -2    -3

注) エ: 空洞内の気体中に生成する電子-イオン対数を  $N$ 、気体の質量を  $m \text{ [kg]}$ 、W 値を  $W \text{ [J]}$  とおくと、気体の吸収線量  $D_0 \text{ [Gy]}$  は

$$D_0 = \frac{WN}{m}$$

で与えられる。ここで、 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$  であるから、気体が空気の場合は

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

また、素電荷の値は  $1.6 \times 10^{-19}$  C であるから

$$N = \frac{13 \times 10^{-9}}{1.6 \times 10^{-19}}$$

更に、 $m = 0.5 \times 1.3 \times 10^{-6}$  [kg] であるから

$$D_g = \frac{34 \times 13 \times 10^{-9}}{0.5 \times 1.3 \times 10^{-6}} = 0.68 \text{ [Gy]}$$

オ：物質中での吸収線量  $D_m$  と気体中での吸収線量  $D_g$  の比は、物質と気体の二次電子に対する質量阻止能の比  $S_m/S_g$  に等しいから、気体が空気、物質が水の場合、

$$D_m = D_g \left( \frac{S_m}{S_g} \right) = 0.68 \times \frac{5.44}{4.82} = 0.77 \text{ [Gy]}$$

である。

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

I 放射化学分離は、一般の化学分離と比較して、幾つかの特徴がある。まず、取り扱う放射性核種の量が極めて微量な点である。例えば、半減期 14.26 日の  $^{32}\text{P}$  の 1.0 MBq の質量は  A g であり、その物質量 (モル) は  A g を  B で除することで求められる。

短半減期の放射性核種の分離では操作時間の短縮が求められる場合がある。例えば、半減期 25 分の  $^{128}\text{I}$  の分離について考える。分離法 1 では化学収率が 80% で 50 分を要する。これに対して分離法 2 の化学収率が 40% とする。分離法 2 の所要時間が  C 分だとすると、化学分離後の放射能は分離法 1 と等しくなる。

放射化学分離では、放射性核種の化学的状態を変化させて別の相とし、相分離で目的成分を得ることがしばしば行われる。沈殿分離法はその典型である。この場合、目的核種と沈殿を形成する試薬を添加することで水に難溶な固体沈殿を形成し、これをろ過や  D などで固体と溶液に分離して放射性核種を回収する。沈殿剤としては、 $^{111}\text{Ag}^+$  や  $^{210}\text{Pb}^{2+}$  に対する  E、 $^{45}\text{Ca}^{2+}$  や  $^{133}\text{Ba}^{2+}$  に対する  F などが知られている。また、溶液に気体を通じて沈殿を生成する例として、弱酸性水溶液中の  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  や  $^{111m}\text{Cd}^{2+}$  に対する  G が知られている。

沈殿分離法と類似した方法に共沈分離法がある。沈殿生成に伴って溶液中の放射性核種を沈殿に取り込み、水溶液から分離する。鉛、スズ及びアンチモンの放射性核種を塩酸性溶液から同時に共沈する  H がある。また、 $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  と  $^{35}\text{SO}_4^{2-}$  の共存する水溶液から  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  のみが共沈する  I も知られている。

< A, B の解答群 >

- 1  $9.5 \times 10^{-11}$     2  $4.7 \times 10^{-10}$     3  $9.5 \times 10^{-9}$     4  $4.7 \times 10^{-9}$     5 15    6 17  
7 32    8 64

< C, D の解答群 >

- 1 12.5    2 25    3 37.5    4 50    5 蒸留    6 抽出    7 沸騰    8 遠心分離

< E の解答群 >

- 1  $\text{ClO}_4^-$     2  $\text{NO}_3^-$     3  $\text{Cl}^-$     4  $\text{ClO}_3^-$

< F の解答群 >

- 1  $\text{SO}_4^{2-}$     2  $\text{SO}_3^{2-}$     2  $\text{NO}_3^-$     3  $\text{NO}_2^-$

< G の解答群 >

- 1  $\text{H}_2\text{S}$     2  $\text{O}_2$     3  $\text{Cl}_2$     4 Ar



< H, I の解答群 >

- 1 CuS    2 SrCO<sub>3</sub>    3 AgBr    4 NaI    5 Fe(OH)<sub>3</sub>

II 液体-液体間の放射性核種の分配平衡を利用した分離法として溶媒抽出法がある。水溶液中に電気的に中性の分子を形成させ、これが有機溶媒中に移動することで抽出が進行する。キレート抽出とイオン会合体抽出に大別される。キレート抽出試薬には  や β-ジケトンのトリフルオロアセチルアセトンなどがある。特定の金属イオンと錯イオンを形成しやすい  や CN<sup>-</sup>などを  として添加することにより、水相に特定の成分を保持することもしばしば行われる。イオン会合体抽出の例としては、濃塩酸溶液からの Fe<sup>3+</sup>の  による抽出が知られている。

イオン交換法も放射化学分離法としてしばしば利用される。イオン交換樹脂を用いる方法が一般的である。この場合、固体-溶液間のイオン性化学種の分配平衡を利用している。陽イオン交換樹脂ではスルホン酸基を持つ強酸性イオン交換樹脂と  を持つ弱酸性イオン交換樹脂がある。陰イオン交換樹脂では  を持つ強塩基性イオン交換樹脂と、弱塩基性イオン交換樹脂がある。対象とする放射性核種の溶存状態や pH などから適切なイオン交換樹脂を選んで使用する。

以上は、相間での化学種の分配を利用した分離手法であり、非放射性の物質の分離にも用いられている。これに対して、放射性核種の分離に特異的に利用される方法もある。

<sup>90</sup>Sr の塩酸溶液をアンモニア水で中和して過すると、見かけ上沈殿が生じていなくても娘核種の <sup>90</sup>Y がろ紙に捕集される。この現象は  の生成によるものと考えられ、無担体 RI の分離に利用される。

硝酸トリウムを入れた容器内に金属板を吊るしておくと、表面に  の壊変生成物が沈着する。この壊変生成物は主に <sup>212</sup>Pb であるが、その娘核種  の α 壊変による反跳を利用することで  を単離できる。すなわち、<sup>212</sup>Pb が沈着した金属板を別の容器に移し、新しい金属板を 1 mm 程度の間隔に置いて 15 分ほど真空に保つと、新しい金属板上に  が単離される。放射壊変を利用した特徴ある放射性核種の分離法である。

< J~M の解答群 >

- 1 エタノール    2 アセトアルデヒド    3 ジチゾン    4 グリセリン    5 EDTA  
 6 アセトン    7 n-ヘキサン    8 ベンゼン    9 中和剤    10 酸化剤  
 11 還元剤    12 マスキング剤    13 ジイソプロピルエーテル    14 メタノール  
 15 クロロホルム

< N, O の解答群 >

- 1 カルボキシル基    2 アミド基    3 第 4 級アンモニウム基    4 アミノ基

< P の解答群 >

- 1 ラジオコロイド    2 反跳核    3 OH ラジカル    4 水素ガス    5 キレート

< Q~S の解答群 >

- 1 <sup>222</sup>Rn    2 <sup>220</sup>Rn    3 <sup>212</sup>Bi    4 <sup>208</sup>Tl    5 <sup>208</sup>Pb

[解答]

- I  -1     -7     -2     -8     -3     -1     -1  
 -1     -5

注) A, B : 原子数 N の放射性核種の壊変率  $\left(-\frac{dN}{dt}\right)$  とその壊変定数 (λ), 半減期 (T) の関係式は、

以下のとおりである。

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T} \dots\dots\dots (2)$$

また、質量：W(グラム)、質量数：A とすると、原子数 N との関係式は以下のとおりである。

$$N = \frac{W}{A} \times 6.02 \times 10^{23} \dots\dots\dots (3)$$

物質質量 (モル) は質量 W を質量数 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。

(2), (3) の式を (1) に代入すると、

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{W \times 4.17 \times 10^{23}}{AT} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、半減期 T の単位が秒のとき、壊変率 (放射能) の単位は Bq となる。

したがって、<sup>32</sup>P の 1 MBq の質量は (4) 式より以下のとおり求められる。

$$W = \frac{\lambda NAT}{4.17 \times 10^{23}} = \frac{1.0 \times 10^6 \times 32 \times 14.26 \times 24 \times 60 \times 60}{4.17 \times 10^{23}} \approx 9.5 \times 10^{-11}$$

なお、次式の 1 Bq の放射性核種の質量 m から求めても良い (参考図書：アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))。

$$m = 8.62 \times 10^{-21} MT$$

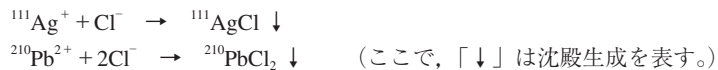
m : 1 Bq の質量 (グラム)      T : 半減期 (時間)  
M : 原子質量 (質量数 A で代用できる)

C : 分離法 1 と同じ放射能を分離法 2 で得るための所要時間 t は、最初の放射能 A<sub>0</sub>、半減期 T としたとき

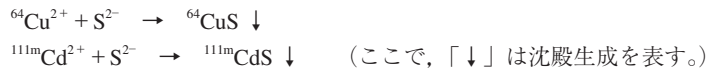
$$0.8 \times A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{50}{25}} = 0.4 \times A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{25}}$$

したがって、 $\frac{50}{0.8} = \frac{t}{0.4}$     なので    t = 25 分

D ~ G : 放射化学分離では、陽イオンの定性分析で用いられる沈殿分離法がよく利用される。まず、何種類かの陽イオンが含まれている混合物に希塩酸 HCl を加えると、塩化物イオン Cl<sup>-</sup> によって沈殿が生じる。

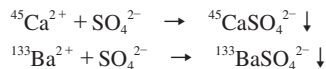


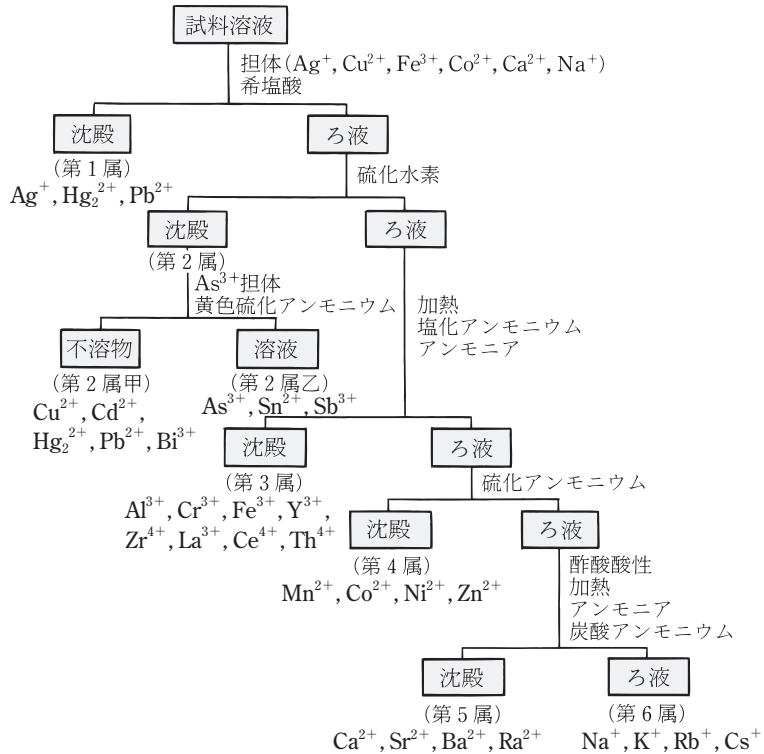
次に、上記の操作で酸性状態であるろ液に硫化水素 H<sub>2</sub>S を通じると、硫化物イオン S<sup>2-</sup> によって沈殿が生じる。



なお、上記の操作 (酸性下) では、比較的イオン化傾向の小さい金属イオンのみ沈殿を生じ、Mn<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup> 等は酸性下では硫化物が沈殿しない (中性 ~ 塩基性溶液で沈殿生成)。

また、イオン化傾向の大きい Ca<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 等は、H<sub>2</sub>S では沈殿生成せず、硫酸イオン SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> により硫酸塩沈殿を生じる。





沈殿法による系統的分離

(7 版増補版・放射線取扱の基礎 (日本アイソトープ協会))

H, I : 沈殿するとき、溶液中の微量のイオンや放射性核種をも吸着する現象を「共沈」という。多種類のイオンや放射性核種が溶液中に存在していても、化学的に性質の似た 1 種類の共沈剤を加えるだけでよい場合もあり、金属水酸化物や金属硫化物は共沈剤としてよく用いられる。塩酸溶液から鉛、スズ及びアンチモンの放射性核種を共沈するには  $\text{CuS}$  を共沈剤に用いる。 $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  と  $^{35}\text{SO}_4^{2-}$  が共存する溶液に  $\text{Fe}^{3+}$  を担体として加え、アンモニア水を滴下すると、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$  の沈殿とともに  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  は共沈するが、 $^{35}\text{SO}_4^{2-}$  は共沈しない。

- II    **J** - 3      **K** - 5      **L** - 12      **M** - 13      **N** - 1      **O** - 3  
      **P** - 1      **Q** - 2      **R** - 3      **S** - 4

注) J ~ M : 放射性核種 (溶質) を含む水溶液 (塩酸, 硝酸, 硫酸, 緩衝液等) と、水溶液と混合しない有機溶媒 (ベンゼン, トルエン, 四塩化炭素, ジイソプロピルエーテル等) を分液漏斗で振り混ぜたのちに静置すると、一定の比で溶質が水相と有機相に分配される。水相と有機相への放射性核種の分配比  $D$  は、放射性核種の有機相中の全濃度を  $C_o$ 、水相中の全濃度を  $C_w$  とすると、

$$D = \frac{C_o}{C_w}$$

すなわち、 $D$  が大きいほど有機相に多く抽出され、一般に、生成した錯体が安定で、かつ親有機性であるほど  $D$  は大きくなる。

キレート抽出は、金属イオン  $M^{n+}$  を含む水溶液をキレート試薬 HA を含む有機溶媒と振り混ぜ、金属キレート  $MA_n$  を生成させ、有機溶媒中に抽出する。ジチゾン（ジフェニルチオカルバゾン）は多数の金属と安定なキレートを生成するため、よく利用される。なお、マスキング剤は、複数の金属イオンが共存する溶液中から特定の（抽出目的でない）イオンとキレート試薬が反応しないように加えるものである。

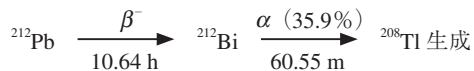
$Fe^{3+}$  は塩酸溶液中でクロロ錯体  $HFeCl_4$  を作り、同容量のジイソプロピルエーテルを加えて振り混ぜると、イオン会合しジイソプロピルエーテルに抽出される。

N, O：強酸性イオン交換樹脂はスルホン酸基  $-SO_3H$  を持ち、あらゆる pH で  $-SO_3H \rightarrow SO_3^- + H^+$  と解離し、pH の低い溶液中でも陽イオン交換能力がある。弱酸性イオン交換樹脂はカルボキシル基  $-COOH$  を持ち、pH の高い溶液だけで  $COOH \rightarrow COO^- + H^+$  と解離し、陽イオン交換能力を示す。 $Na^+ < Mg^{2+} < Al^{3+}$  の順に交換能力が高い。

強塩基性イオン交換樹脂は、交換基に第4級アンモニウム基を持ち、あらゆる pH で陰イオン交換能力を有する。弱塩基性イオン交換樹脂は、交換基にアミノ基を持ち pH の低い溶液だけで解離し、陰イオン交換能力を示す。 $Cl^- < SO_4^{2-} < PO_4^{3-}$  の順に陰イオン交換能力が高い。

P：放射性核種は、きわめて低濃度で溶液中に含まれていてもコロイド状の特徴を示すことがある（ラジオコロイド）。 $^{90}Sr - ^{90}Y$  の塩酸溶液をアンモニアで中和すると、ラジオコロイドである  $^{90}Y(OH)_3$  が生じ、 $^{90}Y$  のみ、ろ紙に捕集される。

Q～S：トリウム系列（4n 系列）の  $^{212}Pb$  より、



(参考図書：アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))

問4 放射線や放射能を利用した、物質の元素組成分析法に関する次の I～IV の文章の [ ] の部分に入る最も適切な語句、記号、数値又は数式を、それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。

I 物質中の原子を励起して、その原子が放出する光子を元素分析法に用いることができる。例えば、X線発生装置からの X 線や、数十 [A] に加速した電子線を試料に照射すると、励起原子から [B] スペクトルとして元素に固有な特性 X 線が放出される。これを測定する [C] 分析法は、試料中の多種類の元素を非破壊的に同時に定量することができる。特性 X 線は  $K_\alpha$  線や  $L_\beta$  線などと呼ばれるが、この K や L は、励起原子の [D] 電子の軌道を表している。また、[C] 分析法では電子線の代わりに放射性核種からの X 線や  $\gamma$  線を利用することもできる。さらに放射光施設では、シンクロトロンで加速した電子を利用して [E] のビームを発生させ、そのビームを用いて微小部分の分析が行われる。これらいずれの場合でも試料は放射化されない。

< A, B の解答群 >

- 1 eV    2 keV    3 MeV    4 J    5 kJ    6 MJ    7 ラマン    8 連続  
9 反射    10 励起    11 線

< C の解答群 >

- 1 蛍光 X 線    2 高速電子線    3 コンプトン散乱    4 X 線吸収    5 PIXE  
6 低速電子線

< D の解答群 >

- 1 内殻空孔に落ちる    2 結合を生じた    3 内殻空孔を生じた    4 最外殻の  
5 結合が切れた

< E の解答群 >

- 1 後方散乱    2 特性 X 線    3 制動放射線    4 ストークス線    5 反ストークス線
- II 一方、試料中の原子核を反応させ、生成する原子核からの放射線を測定する方法が放射化分析法である。試料に中性子や荷電粒子、高エネルギー光子などを照射して放射化する。照射する粒子の  $\boxed{\text{F}}$  を  $f$ 、標的核種の核反応断面積を  $\sigma$ 、標的核種の数  $n$  とし、生成核の数を  $N$ 、その壊変定数を  $\lambda$  とすると、生成核の生成速度、 $dN/dt$  は以下の式で表される。

$$\frac{dN}{dt} = \boxed{\text{G}} \dots\dots\dots (1)$$

この式から、照射時間を  $T_1$  とすると、照射終了直後の生成核の放射能  $A$  は

$$A = \lambda N = nf\sigma \cdot \boxed{\text{H}} \dots\dots\dots (2)$$

となる。式(2)の括弧内を  $\boxed{\text{I}}$  と呼び、照射時間が長くなるとともに 1 に近づく。例えば、照射時間が生成核の半減期の 2 倍の時には  $\boxed{\text{I}}$  は  $\boxed{\text{J}}$  となる。半減期に比べて照射時間が非常に短いときには、 $\boxed{\text{I}}$  は  $\boxed{\text{K}}$  で近似することができ、生成核の放射能は照射時間に比例するとしてよい。実際の放射化分析では、照射終了後  $T_2$  経過した後、放射能測定を開始する。 $T_2$  を  $\boxed{\text{L}}$  時間と言う。生成核が多種類あるときには、それらの半減期を考慮して、目的とする核種の測定のための最適な  $\boxed{\text{L}}$  時間や測定時間を設定する。生成核の放射能から目的核の数を求めることができる。

< F の解答群 >

- 1 フルエンス    2 フルエンス率    3 エネルギー    4 エネルギー密度  
5 カーマ    6 LET

< G の解答群 >

- 1  $\lambda N - nf\sigma$     2  $nf\sigma\lambda N$     3  $nf\sigma + \lambda N$     4  $nf\sigma - \lambda N$     5  $\frac{nf\sigma}{\lambda N}$

< H の解答群 >

- 1  $1 - e^{-\lambda T_1}$     2  $1 + e^{-\lambda T_1}$     3  $1 - e^{\lambda T_1}$     4  $1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_1}{T_{1/2}}}$     5  $1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{\lambda}{T_1}}$

< I の解答群 >

- 1 吸収係数    2 生成率    3 ファノ係数    4 収率    5 飽和係数

< J, K の解答群 >

- 1  $\frac{1}{4}$     2  $\frac{1}{2}$     3  $\frac{1}{\sqrt{3}}$     4  $\frac{1}{\sqrt{2}}$     5  $\frac{3}{4}$     6  $\frac{7}{8}$     7  $\lambda T_1$   
8  $\sqrt{2}\lambda T_1$     9  $\frac{1}{\sqrt{2}}\lambda T_1$     10  $\frac{T_1}{\lambda}$     11  $\frac{1}{\sqrt{2}\lambda} T_1$

< L の解答群 >

- 1 冷却    2 不感    3 緩和    4 保持    5 分解    6 誘導

- III 中性子放射化分析では、生成核種からの  $\gamma$  線を  $\boxed{\text{M}}$  検出器を用いて測定することにより、非破壊的に多元素を同時分析することができる。平均エネルギーが  $\boxed{\text{N}}$  eV の熱中性子を用いる場合と、さらにエネルギーが高い熱外中性子の共鳴核反応を用いる場合がある。熱外中性子の反応だけを選択的に利用する時には、試料を  $\boxed{\text{O}}$  箔で包む。

原子炉から中性子を引き出して中性子ビームとし、中性子を照射しながら測定する  $\boxed{\text{P}}$  分析法もある。この方法では、生成核が安定同位体であっても、その短寿命の励起状態からの放射線を測定して元素分析を行うことができる。

< M の解答群 >

- 1 プラスチックシンチレーション    2 GM 管式    3 Si 表面障壁型    4 Ge 半導体  
5 液体シンチレーション    6 電離箱式    7 比例計数管式

< N の解答群 >

- 1  $2.5 \times 10^{-6}$     2  $2.5 \times 10^{-4}$     3  $2.5 \times 10^{-2}$     4 2.5    5  $2.5 \times 10^2$     6  $2.5 \times 10^4$

< O の解答群 >

- 1 アルミニウム    2 鉄    3 銅    4 銀    5 カドミウム    6 金

< P の解答群 >

- 1 即発中性子    2 遅発中性子    3 即発  $\gamma$  線    4 弾性散乱中性子  
5 非弾性散乱中性子    6 中性子小角散乱

IV 加速器からの荷電粒子を照射する放射化分析は、標的核と異なる原子番号の放射性核種が生成することを利用する。生成した放射性核種を化学分離して低バックグラウンドの放射線測定を行うことにより、高純度物質中の極微量の軽元素の分析ができる。例えば、高純度シリコン中の超微量不純物窒素の放射化分析では、陽子を照射して窒素から生成する  $\square$  Q  $\square$  を用いる。照射終了後、試料に  $\square$  R  $\square$  を加えてシリコンや他の放射性核種から  $\square$  Q  $\square$  を化学分離して精製する。陽電子が電子と対消滅するときに出る2本の放射線を  $\square$  S  $\square$  計数することによって高感度の分析を行う。

荷電粒子放射化分析では、照射粒子が試料中で停止して、試料が発熱するため、試料の冷却が必要となることが多い。例えば、10 MeV の陽子ビームを  $5 \mu\text{A}$  で試料に照射すると、その発熱量は  $\square$  T  $\square$  W となる。

< Q の解答群 >

- 1  $^{11}\text{C}$     2  $^{14}\text{C}$     3  $^{13}\text{N}$     4  $^{14}\text{N}$     5  $^{15}\text{O}$     6  $^{16}\text{O}$     7  $^{18}\text{F}$     8  $^{19}\text{F}$

< R, S の解答群 >

- 1 ラジオコロイド    2 キレート化剤    3 イオン交換樹脂    4 マスキング剤  
5 担体    6 反同時    7 同時    8 波高分別    9 波形分別

< T の解答群 >

- 1 5    2 25    3 50    4  $2.5 \times 10^3$     5  $5.0 \times 10^3$

[解答]

- I  $\square$  A  $\square$  -2     $\square$  B  $\square$  -11     $\square$  C  $\square$  -1     $\square$  D  $\square$  -3     $\square$  E  $\square$  -3  
II  $\square$  F  $\square$  -2     $\square$  G  $\square$  -4     $\square$  H  $\square$  -1     $\square$  I  $\square$  -5     $\square$  J  $\square$  -5     $\square$  K  $\square$  -7     $\square$  L  $\square$  -1

注) 単位時間に生成される核の数は、生成された核が壊変定数  $\lambda$  で壊変するので

$$\frac{dN}{dt} = nf\sigma - \lambda N \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。この微分方程式を解くと、 $t=0$  で  $N=0$  として

$$N = \frac{1}{\lambda} nf\sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

を得る。したがって照射時間  $T_1$  後の、生成核の放射能  $A$  は

$$A = \lambda N = Nf\sigma \cdot (1 - e^{-\lambda T_1}) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。この時、括弧内を飽和係数と呼ぶ。式 (2) は生成核の半減期を  $T$  とすると

$$A = nf\sigma \cdot (1 - e^{-\lambda T_1}) = nf\sigma \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{T_1}{T}} \right\}$$

と変形できる。照射時間が生成核の半減期の 2 倍のときの飽和係数は、 $T_1 = 2T$  を飽和係数の式に代入すると、

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

が得られる。半減期に比べて照射時間が非常に短い場合のとき

$$e^{-\lambda T_1} = 1 - \lambda T_1$$

と近似できる。よって、飽和係数は  $\lambda T_1$  で近似することができ、生成核の放射能は照射時間に比例するとしてよい。

- III  M -4       N -3       O -5       P -3  
 IV  Q -1       R -5       S -7       T -3

注) Q:  $^{14}\text{N} (\text{p}, \alpha) ^{11}\text{C}$  反応

T: ビーム電流  $5 \times 10^6$  [A] なので、照射される 1 秒あたりの陽子数は  
 $(5 \times 10^6) / (1.6 \times 10^{-19})$ 。

照射粒子が試料中ですべて停止することから、試料中で失ったエネルギーは 10 [MeV]。J [ジュール] に換算すると

$$(10 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19})。$$

したがって発熱量は

$$\begin{aligned} & \{(10 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19})\} \times \{(5 \times 10^6) / (1.6 \times 10^{-19})\} \\ & = (10 \times 10^6) \times (5 \times 10^{-6}) \\ & = 50 \text{ [W]} \end{aligned}$$

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。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。

放射線が生体に及ぼす影響は、放射線の強度や線質だけでなく、被ばくする生体側の様々な要因によって変化する。ここでは、培養細胞を  $^{60}\text{Co}$  からの  $\gamma$  線で照射する場合を考えてみよう。

I 細胞の構成成分の中で水の割合が最も大きい。したがって、細胞への  $\gamma$  線の作用で重要なのは、 $\gamma$  線が水に作用した時に起こる現象である。 $\gamma$  線が水に作用すると、マイクロ秒以下の非常に速い物理的・化学的過程を経て、数種類のラジカルが生じる。例えば、 $\gamma$  線のエネルギーを吸収して水が励起されると、その結果として  A と  B が生じる。一方、水が電離されると、電子と非常に不安定な  $\text{H}_2\text{O}^+$  ラジカルを生じ、前者は水分子が配位することにより  C を生じ、後者は分解すると、水素イオンと  B を生じる。 C は強い  D であり、溶存酸素と反応すると  E を生じ、水分子や水素イオンと反応すると  A を生じる。このようにして生じた短寿命のラジカルは、DNA、タンパク質、脂質といった細胞構成成分と反応し、様々な影響を与える。このように、放射線が水分子に作用して、その結果生じたラジカルが生体成分に作用することを間接作用と呼び、ここで仮定した条件では間接作用の寄与は  F % と考えられている。

上記のように間接作用の過程で  E が生じるが、その量は酸素濃度に依存する。 E は活性酸素種の一つであり、生体に毒性を示す。生体内で生じた  E を消去する酵素として最も重要なのは  G である。一方、 B などによる水素引き抜き反応で生じた有機ラジカルと酸素分子が反応すると、有毒な過酸化物を生じる。このように、間接作用は酸素濃度の影響を受け、酸素濃度が高いと放射線の生体有害作用が強くなる。これを酸素効果と呼ぶ。酸素効果の指標として  H があり、次式のように定義される。

$\boxed{H} = (\text{酸素が}\boxed{I}\text{条件で, ある生物効果を生じるのに要する吸収線量}) \div (\text{酸素が}\boxed{J}\text{条件で, 同じ生物効果を生じるのに要する吸収線量})$

数 Gy の  $\gamma$ 線による細胞致死の  $\boxed{H}$  は  $\boxed{K}$  の値をとる。

< A~E の解答群 >

- 1 水素ラジカル    2 窒素ラジカル    3 ヒドロキシルラジカル  
4 スーパーオキシドラジカル    5 水素イオン    6 窒素イオン    7 水酸化物イオン  
8 水和電子    9 還元剤    10 酸化剤    11 中和剤

< F の解答群 >

- 1 0~20    2 20~50    3 50~80    4 80~100

< G, H の解答群 >

- 1 カタラーゼ    2 スーパーオキシドジスムターゼ    3 グルタチオンペルオキシダーゼ  
4 ホスホリパーゼ    5 プロテアーゼ    6 ATP アーゼ  
7 チロシンヒドロキシラーゼ    8 DNA ポリメラーゼ    9 LET    10 PCR  
11 CSF    12 OER    13 RBE    14 DRF    15 PLD

< I, J の解答群 >

- 1 無い    2 有る

< K の解答群 >

- 1 0.5~1    2 1.5~2    3 2.5~3    4 3.5~4    5 4.5~5

- II 培養細胞は細胞分裂を繰り返して増殖する。分裂から次の分裂までの1周期を細胞周期と呼び、4つの時期が区別できる。DNA複製を行う  $\boxed{L}$  期と細胞が分裂する  $\boxed{M}$  期の間には、 $G_1$  期と  $G_2$  期がある。分裂を一時的にやめた細胞や分裂を終えた細胞は  $\boxed{N}$  期のある時期に止まっていると考えられる。これを  $G_0$  期と呼ぶことがある。細胞がどの時期で放射線を被ばくするかによって細胞の放射線感受性が異なる。増殖している細胞は、 $\boxed{O}$  期の後半から  $G_2$  期前半にかけて放射線抵抗性になる。また、ある種の細胞では  $\boxed{P}$  期の前半で放射線抵抗性になる場合がある。

< L~P の解答群 >

- 1  $G_1$     2  $G_2$     3 M    4 S

- III 培養細胞を  $\gamma$ 線で照射すると、吸収線量に応じて細胞は死ぬ。大線量を浴びた場合は、細胞の機能が失われ、細胞が壊れてそのまま死に至る。このような細胞死を  $\boxed{Q}$  と呼び、細胞および核の膨潤や膜の損傷による内容物の漏出などが観察される。一方、細胞が生理的な死のシグナルに反応して死に至る細胞死を  $\boxed{R}$  と呼び、DNAの断片化、クロマチンの凝縮、細胞の分断化などが観察される。

数 Gy の  $\gamma$ 線を被ばくした培養細胞は、数回の分裂を経てから死に至る。このような細胞死を  $\boxed{S}$  と呼ぶ。骨髄幹細胞や腫瘍細胞など、培養細胞以外でも  $\gamma$ 線被ばくによる  $\boxed{S}$  が起こる。 $\boxed{S}$  を定量するために、通常、コロニー形成法が用いられる。この方法で得られた細胞生存率の対数を縦軸に、吸収線量を横軸にとってグラフを描くと、低線量の部分に肩を持つ右下がりの曲線が得られる。これを生存率曲線と呼ぶ。一般に、細胞を放射線防護剤で処理してから  $\gamma$ 線照射すると、この生存率曲線の傾きは  $\boxed{T}$ 。

< Q~S の解答群 >

- 1 ネクロシス    2 アポトーシス    3 オートファジー    4 間期死    5 増殖死

< T の解答群 >

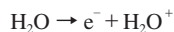
- 1 急になる    2 変わらない    3 緩やかになる



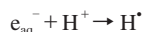
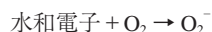
〔解答〕

I A-1    B-3    C-8    D-9    E-4    F-3    G-2  
H-12    I-1    J-2    K-3

注) A～E：水ラジカルの生成過程を解答する設問である。



$\text{e}^-$ →水和電子



という水ラジカル生成過程の全体を把握することにより、設問に解答することができる。

AとB：水素ラジカルとヒドロキシルラジカル，Cの回答欄に続く文でBはヒドロキシルラジカルであることが確定する。

C：水和電子

D：還元剤

E：スーパーオキシドラジカル

F：間接作用の寄与の割合は，50～80%である。

G：スーパーオキシドラジカルを分解するのに最も重要なのは，スーパーオキシドジスムターゼである。

H, I, J：酸素効果の定義に関する問題である。

酸素増感比 OER は下式で定義される。すなわち，酸素の無いときに一定効果が得られる線量を酸素下で同等の効果が得られる線量で割る。

$$OER = \frac{D_{\text{hypoxia}}}{D_{\text{hyperoxia}}}$$

H：酸素増感比 OER

I：酸素の無いときが分子

J：酸素の有るときが分母

II L-4    M-3    N-1    O-4    P-1

注) 細胞周期に関する設問である。

● 細胞周期は，分裂する M 期→G<sub>1</sub> 期→DNA 合成を行う S 期→G<sub>2</sub> 期→分裂する M 期の順に進む。G<sub>2</sub> 期には DNA 合成の結果，倍数性は 4n となっている。一般の細胞は 2n であることから，停止期の細胞は G<sub>1</sub> 期に留まることが理解される。

● DNA に損傷が有ることを検知して細胞周期を停止して修復時間を作るチェックポイントが G<sub>1</sub> 期の後半，G<sub>2</sub> 期の後半と M 期に存在する。これらのチェックポイントの前に放射線を受けた場合には修復が効果的に働くが，これらの時期を過ぎてから DNA 合成や分裂というイベントを迎えると修復が進まないままイベントに突入するため，放射線に感受性となる。

L：DNA 複製または合成を行う時期。

M：分裂する時期を M 期という。

N：停止中の G<sub>0</sub> 期は G<sub>1</sub> 期に当たる。

P：G<sub>1</sub> 期チェックポイントの前には放射線抵抗性になる。

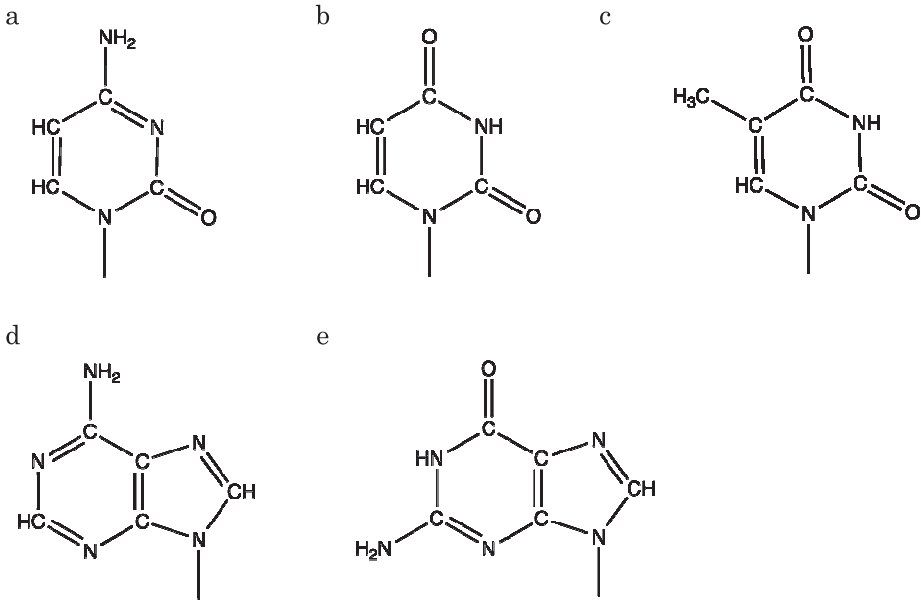
Ⅲ Q-1    R-2    S-5    T-3

注) 細胞死に関する問題である。

- 増殖死と間期死：放射線による細胞死は基本的には、分裂・増殖が停止することにより死に至る「増殖死」によるが、大線量を浴びた場合には、細胞周期中にそのまま死に至る「間期死」による場合がある。
  - 形態学的細胞死の分類
    - ネクロシス：細胞膜の破壊や細胞内容物の漏出を伴う細胞死。
    - アポトーシス：放射線照射後の早期に細胞核が凝縮する細胞死。生理的に死のシグナルを受けて死に至る場合にも起きる。
    - オートファジー：細胞内でタンパク質を分解するファゴゾームが細胞自身の成分を分解して自身の栄養として使用する現象であるが、過度の進行により細胞死に至る場合もある。
  - 放射線誘発死に対しては、小線量で適応現象が見られ、その後の放射線に対して抵抗性となる。
- Q：この場合間期死という回答も考えられるが、分注で内容物の漏出を記載しているため、ネクロシスが正しい選択となる。
- T：放射線に抵抗性になると生存率曲線の傾きは緩やかになる。

問6 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 放射線の生物作用を理解する上で、遺伝情報を担うDNAの構造を理解することが重要である。DNAはデオキシリボース、リン酸、塩基から構成され、塩基にはアデニン、グアニン、シトシン、チミンの4種類がある。このうち、アデニンの構造式は下の図の ア である。アデニンは向かい合った鎖の A と対をなし、A の構造式は下の図の イ である。アデニンと A は B 個の C 結合で結ばれている。



<ア, イの解答群>

1 a    2 b    3 c    4 d    5 e

<Aの解答群>

1 シトシン    2 グアニン    3 チミン

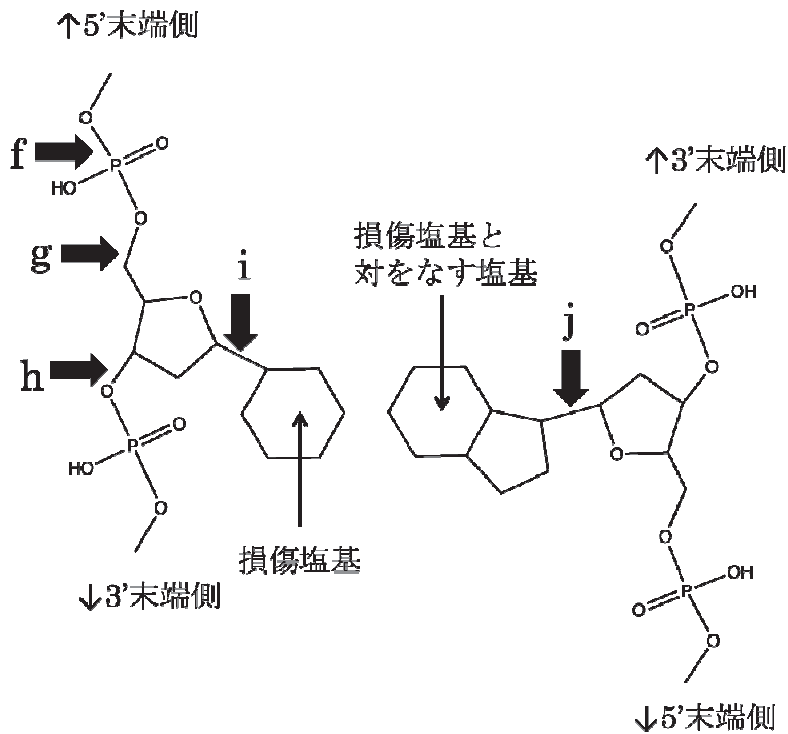
<Bの解答群>

1 1    2 2    3 3    4 4    5 5

<Cの解答群>

1 アミド    2 グリコシル    3 高エネルギーリン酸    4 水素    5 疎水  
6 リン酸ジエステル

II 放射線, 紫外線, 活性酸素などの影響や DNA 複製過程でのエラーによって, 異常な塩基や塩基対が形成される。細胞にはこのような異常な塩基や塩基対を修復する機構が備わっている。たとえば, シトシンが脱アミノ化されると **D** が生じる。**D** は RNA には含まれるものの, 本来 DNA に含まれない塩基であるため, 細胞はこれを異常と察知し, 修復を行う。この場合の修復は **E** によって行われる。**E** においては, まず, DNA グリコシラーゼによって下図の **F** の位置で切断が起こり, 塩基のない部位 (AP 部位) が生じる。次に, AP エンドヌクレアーゼによって下図の **G** の位置で切断が起こる。さらにホスホジエステラーゼによってもう一方のリン酸ジエステル結合が切断され, 損傷塩基が取り除かれると, DNA の 2 本の鎖のうち, 一方の鎖が切れた構造が残ることになる。この構造は DNA 1 本鎖切断の修復機構を使って修復することが可能である。



<Dの解答群>

1 アラニン    2 イノシン    3 ウラシル    4 グリシン

< E の解答群 >

- 1 塩基除去修復    2 相同組換え    3 ヌクレオチド除去修復    4 光回復  
5 非相同末端結合    6 ミスマッチ修復

< F, G の解答群 >

- 1 f    2 g    3 h    4 i    5 j

III 放射線によって生じる DNA 損傷には、塩基損傷や架橋に加え、鎖切断がある。鎖切断には大きく分けて1本鎖切断と2本鎖切断がある。正常ヒト2倍体細胞に1 Gy のγ線を照射した場合、細胞1個あたり、1本鎖切断は約  個、2本鎖切断は約  個生成する。1本鎖切断と2本鎖切断は最終的に  によって結合されるが、結合の際には、5'末端に  基、3'末端に水酸基が必要である。末端の形状がこれと異なる場合には、ポリヌクレオチドキナーゼ/ホスファターゼなどによる整形を必要とする。

< H の解答群 >

- 1 10    2 100    3 1,000    4 10,000

< I の解答群 >

- 1 4    2 40    3 400    4 4,000

< J の解答群 >

- 1 DNA トポイソメラーゼ    2 DNA ヘリカーゼ    3 DNA ポリメラーゼ  
4 DNA リガーゼ

< K の解答群 >

- 1 アミノ    2 カルボキシル    3 メチル    4 水酸    5 リン酸

IV ヒトやマウスの体細胞において、DNA 2本鎖切断は主として、 と  の二つの機構で修復される。 は鋳型として  を必要とするため、細胞周期の  期の後半から  期に限定される。

に関わる DNA 依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニット (DNA-PKcs) 遺伝子に変異を有する scid (スキッド) マウスは放射線致死高感受性に加え、 機能の異常を呈する。また、近年ヒトでも DNA-PKcs の遺伝子に変異を有する患者が報告され、 機能の異常が認められている。これは、V(D)J 組換えと呼ばれる  遺伝子の再編成過程において  が関わるためである。

< L, M の解答群 >

- 1 塩基除去修復    2 相同組換え    3 ヌクレオチド除去修復    4 光回復  
5 非相同末端結合    6 ミスマッチ修復

< N の解答群 >

- 1 cDNA    2 mRNA    3 姉妹染色分体    4 相同染色体

< O, P の解答群 >

- 1 G<sub>0</sub>    2 G<sub>1</sub>    3 G<sub>2</sub>    4 M    5 S

< Q の解答群 >

- 1 肝    2 心    3 腎    4 生殖    5 肺    6 免疫

< R の解答群 >

- 1 抗体    2 サイトカイン    3 神経伝達物質受容体    4 ステロイドホルモン受容体  
5 増殖因子    6 ヒストン

[解答]

- I -4    -3    -3    -2    -4

注) 問 6 は, 核酸, 細胞および体組織の修復および回復に関する問題である。

核酸の分子構造に関する問題

- DNA を構成する塩基は 4 種あり, ピリミジン環を持つのがシトシンとチミン, プリン環を持つのがアデニンとグアニンである。化学構造で記憶すべきなのが, アミノ基, ケト基およびメチル基である。その他に, RNA のみに存在するウラシルがある。

- ▶ アデニン: プリン環にアミノ基が付いている
- ▶ グアニン: プリン環にアミノ基が付き, ケト基を持つ
- ▶ シトシン: ピリミジン環にアミノ基が付き, ケト基を持つ
- ▶ チミン: ピリミジン環にケト基を 2 つ持ち, メチル基が付いている
- ▶ ウラシル: ピリミジン環にケト基を 2 つ持つ

- DNA 中では 2 つの塩基が水素結合で結ばれており, アデニンとチミンは 2 つの水素結合で, シトシンとグアニンは 3 つの水素結合で結ばれる。

ア: 上記参照。

イ, A, B: アデニンとチミンが水素結合を持ち, チミンがピリミジン環にケト基を 2 つ持ち, メチル基が付いていることから判断する。

C: 水素結合で塩基間が結合していることが DNA の化学構造上重要。

II D-3 E-1 F-4 G-1

注) DNA の塩基損傷と修復に関する問題である。

- 放射線による塩基損傷は多様に存在するが, スーパーオキシドラジカルやヒドロキシルラジカルがピリミジン環やプリン環に結合して, OH 基が増える場合やアミノ基が失われる場合が多い。
- 塩基損傷の修復には塩基除去修復が行われる。塩基除去修復では, まずグリコシラーゼによって損傷ヌクレオチドが切り取られ, ポリメラーゼにより, 新たなヌクレオチドに置き換えられる。

D: シトシンはピリミジン環にアミノ基が付きケト基を持つため, 脱アミノ化されると, ケト基が 2 つになり, ウラシルとなる。

E: 本来 DNA に含まれないウラシルが存在すると, 塩基除去修復が行われる。

F: DNA グリコシラーゼは, 糖から塩基を切り離す。この問題では, 塩基がピリミジン環を持つため, i の位置での切断が正解となる。

G: AP エンドヌクレアーゼは, DNA 鎖の中間を 5' 末端側にリン酸基を残す形で切断する。

III H-3 I-2 J-4 K-5

注) DNA の 1 本鎖切断修復に関する問題である。

- $\gamma$ 線による鎖切断の発生頻度: 1 Gy あたり 1 本鎖切断が 1,000 個, 2 本鎖切断が 40 個発生する。
- DNA の結合過程: 様々な酵素が関与するが, 最終的に切断している DNA 鎖を結合するのは DNA リガーゼである。結合の際には, 5' 末端にリン酸基, 3' 末端に水酸基が必要となる。

H, I: 上記参照。

J: DNA 鎖を結合するのは DNA リガーゼである。

K: 結合の際には, 5' 末端にリン酸基, 3' 末端に水酸基が必要となる。

IV L-2 M-5 N-3 O-5 P-3 Q-6 R-1

注) DNA の 2 本鎖切断修復に関する問題である。

- 2 本鎖切断修復機構には, 相同組換え修復と非同源末端結合がある。
- 相同組換え修復は姉妹染色分体の DNA で 2 本鎖切断を持つ染色体の DNA を部分的に置き換えることによって修復するため, DNA のセットが  $4n$  である  $G_2$  期でのみ実現可能である。

- 非相同末端結合では、DNA-PKcs や Ku70/80 などのタンパク質が DNA の断端に結合し、切断端を直接結合させる。
- L, M : 2種の2本鎖切断修復のうち、MはDNA依存性プロテインキナーゼ触媒サブユニットが関与することから非相同末端結合であることがわかり、2本鎖切断修復が非相同末端結合と相同組換えの2種であることからLは相同組換えである。
- N : 相同組換え修復には姉妹染色分体が必要となる。
- O, P : Lが相同組換えであり、姉妹染色分体が必要であることを考えると、OP双方の時期は、細胞内のDNA量が分裂に備えてそれまでに時期の2倍に増えていることがわかる。細胞内のDNAが複製されるのがS期で、S期の後半にDNA量は倍増し、分裂で2つの細胞にDNAがわかれるまでの時期がG<sub>2</sub>期である。そのため、OがS期、PがG<sub>2</sub>期となる。
- Q, R : Mが非相同末端結合であるに加えて、非相同末端結合が免疫細胞の成熟過程で抗体遺伝子の組換えにも利用されることを考えると、DNA-PKcsが変異をしている scid マウスでは、非相同末端結合が機能しないため、抗体遺伝子の適切な組換えが行われないことと、その結果としての免疫異常が予想される。