

## 平成 27 年度（第 60 回）第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例（1）

（試験年月日 平成 27 年 8 月 19 日，20 日）

### 法 令

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（以下「放射線障害防止法」という。）及び関係法令について解答せよ。

次の各問について，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 放射性同位元素に関する次の文章の  ～  に該当する語句について，放射線障害防止法上定められているものの組合せは，下記の選択肢のうちどれか。

「第 1 条 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第 2 条第 2 項の放射性同位元素は，放射線を放出する同位元素及びその  並びにこれらの （機器に装備されているこれらのもの 。）で，放射線を放出する同位元素の数量及び濃度がその  ごとに原子力規制委員会が定める数量及び濃度を超えるものとする。」

	<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>	<input type="text" value="D"/>
1	化合物	認証機器	を含む	区分
2	放射化物	含有物	に限る	区分
3	化合物	含有物	を含む	種類
4	放射化物	認証機器	に限る	種類
5	化合物	認証機器	を含む	種類

〔解答〕

3

注) 令第 1 条（放射性同位元素）

問 2 次のうち，人の疾病の治療に使用することを目的として，人体内から再び取り出す意図をもたずに挿入された場合に，放射線障害防止法の適用から除かれる密封された放射性同位元素として，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 金 198
- B ラジウム 226

---

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。

C よう素 125

D イリジウム 192

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

〔解答〕

2

注) 令第1条(放射性同位元素)第5号,平成17年6月1日文科科学省告示第76号(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施行令第1条第5号の医療機器を指定する告示)

問3 使用の許可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。なお,コバルト60の下限数量は100キロベクレル,セシウム137の下限数量は10キロベクレルであり,かつ,それぞれの濃度は,原子力規制委員会の定める濃度を超えるものとする。

- A 1個当たりの数量が,100メガベクレルの密封されたコバルト60を装備した密度計を1台及び1個当たりの数量が,10メガベクレルの密封されたセシウム137を装備したレベル計を1台使用しようとする者は,原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
- B 1個当たりの数量が,10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を1台及び放射線発生装置を使用しようとする者は,原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
- C 1個当たりの数量が,100メガベクレルの密封されたコバルト60を3個で1組として装備し,その1組をもって照射する機構を有するレベル計1台のみを使用しようとする者は,原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
- D 1個当たりの数量が,100メガベクレルの密封されたセシウム137を装備した照射装置を1台のみ使用しようとする者は,原子力規制委員会の許可を受けなければならない。

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

〔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

- A: 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。
- B: 正    法第3条第1項    放射線発生装置の使用は許可を受けなければならない。
- C: 正    法第3条第1項,令第3条第1項    1個当たりの数量は下限数量の1,000倍であるが,3個を1組として装備しているので下限数量の1,000倍を超える。
- D: 正    法第3条第1項,令第3条第1項

問4 使用の許可に係る欠格条項及び取扱いの制限のいずれにも該当する者として,放射線障害防止法上定められているものは,次のうちどれか。

- 1 18歳未満の者
- 2 心身の障害により放射線障害の防止のために必要な措置を適切に講ずることができない者として原子力規制委員会規則で定めるもの
- 3 許可を取り消され,取消しの日から2年を経過していない者
- 4 この法律又はこの法律に基づく命令の規定に違反し,罰金以上の刑に処せられ,その執行を終わ

## 主任者 コーナー

り、又は執行を受けることのなくなった後、2年を経過していない者

5 成年被後見人

〔解答〕

2

注) 法第5条(欠格条項), 法第31条(取扱いの制限)

1: 誤 法第31条第1項第1号

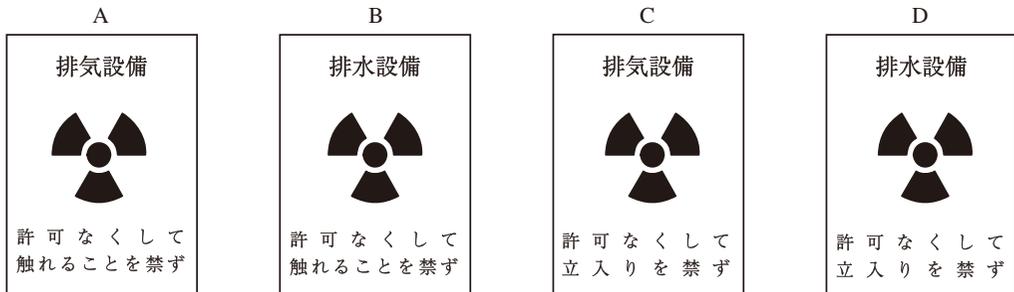
2: 正 法第5条第2項第1号, 法第31条第1項第2号

3: 誤 法第5条第1項第1号

4: 誤 法第5条第1項第2号

5: 誤 法第5条第1項第3号

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〕

2

注) 則第14条の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11第1項第10号, 施行規則別表

B: 正 則第14条の11第1項第10号, 施行規則別表

C: 誤 排気設備の標識では「許可なくして立入りを禁ず」は規定されていない。

D: 正 則第14条の11第1項第10号, 施行規則別表

問6 保管廃棄設備に備えるべき容器の技術上の基準として放射線障害防止法上定められているものであって、貯蔵施設に備える放射性同位元素を入れる容器の技術上の基準としても定められているものの組合せはどれか。

A 容器の外における空気を汚染するおそれのある放射性同位元素を入れる容器は、気密な構造とすること。

B 容器の表面における1センチメートル線量当量率は、2ミリシーベルト毎時以下とすること。

- C 不燃性の構造とすること。  
 D 液体状の放射性同位元素を入れる容器は、液体がこぼれにくい構造とし、かつ、液体が浸透しにくい材料を用いること。
- 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14条の9(貯蔵施設の基準)

- A: 正    則第14条の9第4号イ  
 B: 誤    定められていない。  
 C: 誤    定められていない。  
 D: 正    則第14条の9第4号ロ

問7 許可の条件に関する次の文章の〔A〕～〔C〕に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

〔第8条第3条第1項本文又は第4条の2第1項の許可には、条件を付することができる。〕

- 2 前項の条件は、〔A〕を防止するため必要な〔B〕に限り、かつ、許可を受ける者に〔C〕を課することとならないものでなければならない。〕

	〔A〕	〔B〕	〔C〕
1	放射線障害	最小限度のもの	不当な義務
2	放射線影響	最小限度のもの	不当な義務
3	放射線障害	防護方法	不当な義務
4	放射線影響	防護方法	制限
5	放射線影響	最小限度のもの	制限

〔解答〕

1

注) 法第8条(許可の条件)

問8 次のうち、許可使用者に交付される許可証に記載される事項について、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 許可の年月日及び許可の番号  
 B 使用の方法  
 C 使用の目的  
 D 使用の場所
- 1 ABCのみ    2 ABDのみ    3 ACDのみ    4 BCDのみ    5 ABCDすべて

〔解答〕

3

注) 法第9条(許可証)第2項

- A: 正    法第9条第2項第1号  
 B: 誤    定められていない。

## 主任者 コーナー

- C：正 法第9条第2項第3号  
D：正 法第9条第2項第5号

問9 1個当たりの数量が370ギガベクレルの密封されたイリジウム192を装備した非破壊検査装置のみ1台を使用している者が、非破壊検査の目的のため、事業所の外において一時的に使用の場所を変更して当該装置を使用する場合に、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、イリジウム192の特別形放射性同位元素等である場合の数量( $A_1$ 値)は、1テラベクレルである。また、その下限数量は、10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 届出使用に係る変更の届出をしなければならない。
- 2 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。
- 3 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。
- 4 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。
- 5 許可使用に係る一時的変更の認可を受けなければならない。

〔解答〕

4

注) 法第10条(使用施設等の変更)第6項

問10 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 密封されていないカルシウム45及び鉄55について、それぞれ下限数量の4万倍の貯蔵能力の貯蔵施設を有する者
- B 密封されていないトリチウムについて、下限数量の10万倍の貯蔵能力の貯蔵施設を有する者
- C 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
- D 1個当たりの数量が4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台及び1個当たりの数量が4テラベクレルの密封されたイリジウム192を装備した照射装置2台を使用する者
- 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：誤 法第12条の8第1項、令第13条 密封されていない放射性同位元素の貯蔵能力がその種類ごとに下限数量の10万倍未満のものは施設検査を要しない。
- B：正 法第12条の8第1項、令第13条
- C：正 法第12条の8第1項、令第13条
- D：誤 法第12条の8第1項、令第13条 放射性同位元素装備機器に装備されている密封された放射性同位元素にあつては1台ごとの総量が10テラベクレル未満のものは施設検査を要しない。

問 11 密封されていない放射性同位元素の使用の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものはどれか。

- 1 作業室から放射性同位元素を持ち出すときは、容易に開封できない構造の容器に入れること。
- 2 放射性同位元素によって汚染された物で、その表面の放射性同位元素の密度が表面密度限度の10分の1を超えているものは、作業室から持ち出さないこと。
- 3 放射性汚染物で、当該物に含まれる放射性同位元素の濃度が原子力規制委員会の定める濃度を超えているものは、作業室から持ち出さないこと。
- 4 作業室から退出するときは、人体及び作業衣、履物、保護具等人体に着用している物の表面の放射性同位元素による汚染を検査し、かつ、その汚染を除去すること。
- 5 放射性同位元素の使用は、廃棄作業室において行うこと。

〔解答〕

4

注) 則第15条(使用の基準)第1項

- 1 : 誤 定められていない。
- 2 : 誤 則第15条第1項第9号 表面密度限度を超えているものは、みだりに作業室から持ち出さないこと。
- 3 : 誤 定められていない。
- 4 : 正 則第15条第1項第8号
- 5 : 誤 則第15条第1項第1号の2 密封されていない放射性同位元素の使用は、作業室において行うこと。

問 12 保管の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 貯蔵施設においては、放射線業務従事者が立ち入る場合は、放射線取扱主任者が同行すること。
- B 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すること。
- C 貯蔵施設においては、作業衣、保護具等を着用して作業し、これらを着用してみだりに貯蔵施設から退出しないこと。
- D 貯蔵施設には、その貯蔵能力を超えて放射性同位元素を貯蔵しないこと。

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

〔解答〕

4

注) 則第17条(保管の基準)

- A : 誤 定められていない。
- B : 正 則第17条第4号
- C : 誤 定められていない。
- D : 正 則第17条第2号

問 13 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はどれか。

## 主任者 コーナー

- 1 開封されたときに見やすい位置（当該位置に表示を有することが困難である場合は、放射性輸送物の表面）に「放射性」又は「RADIOACTIVE」の表示を有していること。
- 2 表面における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。
- 3 表面から1メートル離れた位置における1センチメートル線量当量率の最大値が10ミリシーベルト毎時を超えないこと。
- 4 表面の放射性同位元素の密度が輸送物表面密度を超えないこと。
- 5 周囲の圧力を30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。

〔解答〕

4

注) 則第18条の4(L型輸送物に係る技術上の基準)、則第18条の5(A型輸送物に係る技術上の基準)

- 1 : 誤 L型輸送物に係る基準。則第18条の4第6号
- 2 : 誤 L型輸送物に係る基準。則第18条の4第7号
- 3 : 誤 則第18条の5第8号 10ミリシーベルト毎時ではなく100マイクロシーベルト毎時。
- 4 : 正 則第18条の4第8号、則第18条の5第1号 L型及びA型輸送物に共通の規定。
- 5 : 誤 則第18条の5第5号 30キロパスカルではなく60キロパスカル。

問14 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 下限数量に1,000を乗じて得た数量以下の密封された放射性同位元素のみを取り扱うときの放射線の量の測定は、作業を開始した後にあっては、6月を超えない期間ごとに1回行うこと。
- B 密封された放射性同位元素のみを固定して取り扱う場所であって、取扱いの方法及び遮蔽壁その他の遮蔽物の位置が一定しているときの放射線の量の測定は、作業を開始した後にあっては、6月を超えない期間ごとに1回行うこと。
- C 排気設備の排気口及び排気監視設備のある場所における放射性同位元素による汚染の状況の測定は、作業を開始した後にあっては、6月を超えない期間ごとに1回行うこと。
- D 作業室及び管理区域の境界における放射性同位元素による汚染の状況の測定は、作業を開始した後にあっては、6月を超えない期間ごとに1回行うこと。

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

〔解答〕

1

注) 法第20条(測定)、則第20条(測定)第1項

- A : 正 法第20条、則第20条第1項第4号ハ
- B : 正 法第20条、則第20条第1項第4号ロ
- C : 誤 法第20条、則第20条第1項第4号ニ 排気し、又は排水する都度行うこと。
- D : 誤 法第20条、則第20条第1項第4号イ 6月ではなく1月

問15 放射線障害予防規程（以下「予防規程」という。）に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 許可使用者は、放射性同位元素の使用を開始する前に、予防規程を作成し、原子力規制委員会に届け出なければならない。

- B 届出賃貸業者は、放射性同位元素の賃貸の業を開始する前に、予防規程を作成し、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- C 表示付認証機器のみを販売する届出販売業者は、販売の業を開始する前に、予防規程を作成し、販売の業の開始の日から30日以内に、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- D 届出使用者は、放射性同位元素の使用を開始する前に、予防規程を作成し、使用の開始の日から30日以内に、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- 1 ABCのみ    2 ABのみ    3 ADのみ    4 CDのみ    5 BCDのみ

〔解答〕

2

注) 法第21条(放射線障害予防規程)第1項

A: 正    法第21条第1項

B: 正    法第21条第1項

C: 誤    法第21条第1項    表示付認証機器のみを販売する届出販売業者は予防規程の作成を要しない。

D: 誤    法第21条第1項    使用を開始する前に届け出なければならない。

問16 初めて管理区域に立ち入る前の放射線業務従事者に対して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について十分な知識及び技能を有していると認められる者は、含まれていないものとする。

項目	時間数
A 放射性同位元素等の管理測定技術	— 30分以上
B 放射線の人体に与える影響	— 30分以上
C 放射線障害予防規程	— 30分以上
D 放射線障害防止法	— 30分以上

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

〔解答〕

3

注) 則第21条の2(教育訓練)第1項第2号及び第4号、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    放射性同位元素等又は放射線発生装置の安全取扱い 4時間

B: 正

C: 正

D: 誤    30分ではなく1時間

問17 次のうち、放射線業務従事者に対し、遅滞なく、健康診断を行うこととされているものとして、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 放射性同位元素により皮膚の創傷面が汚染され、又は汚染されたおそれのあるとき。
- B 等価線量限度を超えて放射線に被ばくし、又は被ばくしたおそれのあるとき。
- C 放射性同位元素により表面密度限度を超えて皮膚が汚染され、その汚染を容易に除去することがで

## 主任者 コーナー

きないとき。

D 放射性同位元素を誤って吸入摂取し、又は経口摂取したとき。

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

〔解答〕

5

注) 則第22条(健康診断)第1項

A:正    則第22条第1項第3号ハ

B:正    則第22条第1項第3号ニ

C:正    則第22条第1項第3号ロ

D:正    則第22条第1項第3号イ

問18 放射線障害を受けた者又は受けたおそれのある者に対する措置に関する次の文章の  ~  に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

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

- (1) 放射線業務従事者が放射線障害を受け、又は受けたおそれのある場合には、放射線障害又は放射線障害を受けたおそれの程度に応じ、への立入時間の短縮、立入りの禁止、放射線に被ばくする業務への配置転換等の措置を講じ、必要なを行うこと。
- (2) 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、、医師による診断、必要な等の適切な措置を講ずること。〕

	<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>	<input type="text" value="D"/>
1	管理区域	おそれの少ない	健康診断	放射線障害を受けたおそれの程度に応じ
2	管理区域	おそれのない	保健指導	放射線障害を受けたおそれの程度に応じ
3	管理区域	おそれの少ない	保健指導	遅滞なく
4	放射線施設	おそれのない	保健指導	放射線障害を受けたおそれの程度に応じ
5	放射線施設	おそれの少ない	健康診断	遅滞なく

〔解答〕

3

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)

問19 線量、濃度等の算定に関する次の文章の  ~  に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

〔第24条 第4条から第7条まで、第10条、第14条、第14条の2、第17条から第20条まで及び第22条の規定については、線量、実効線量又は等価線量を算定する場合には、1メガ電子ボルト未満のエネルギーを有する電子線及びエックス線による被ばくを、かつ、診療を受けるための被ばく及び自然放射線による被ばくをものとし、空气中又は水中の放射性同位元素の濃度を算定する場合には、空气中又は水中に自然に含まれている放射性同位元素をで算出するものとする。〕

	A	B	C
1	除き	含む	除い
2	除き	除く	含め
3	含め	除く	含め
4	含め	除く	除い
5	除き	含む	含め

〔解答〕

4

注) 平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号 (放射線を放出する同位元素の数量を定める件) 第 24 条 (診療上の被ばくの除外等)

問 20 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、帳簿を備え、記載しなければならぬ事項の細目として、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 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
  - B 使用 (詰替えを除く。)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 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
- 1 ABC のみ    2 ABD のみ    3 ACD のみ    4 BCD のみ    5 ABCD すべて

〔解答〕

2

注) 則第 24 条 (記帳) 第 1 項

- A : 正    則第 24 条第 1 項第 1 号タ
- B : 正    則第 24 条第 1 項第 1 号ハ
- C : 誤    則第 24 条第 1 項第 2 号ホ 届出販売業者及び届出賃貸業者についての規定
- D : 正    則第 24 条第 1 項第 1 号ヌ

問 21 合併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。

「第 26 条の 2 許可使用者である法人の合併の場合 (許可使用者である法人と  A とが合併する場合において、許可使用者である法人が  B )。又は分割の場合 (当該許可に係るすべての放射性同位元素又は放射線発生装置及び放射性汚染物並びに  C を一体として承継させる場合に限る。)において、当該合併又は分割について原子力規制委員会の認可を受けたときは、合併後存続する法人若しくは合併により設立された法人又は分割により当該放射性同位元素若しくは放射線発生装置及び放射性汚染物並びに  C を一体として承継した法人は、許可使用者の地位を承継する。」

	A	B	C
1	許可使用者でない法人	存続する場合に限る	管理組織
2	届出使用者である法人	存続する場合に限る	管理組織

## 主任者 コーナー

- |              |           |       |
|--------------|-----------|-------|
| 3 許可使用者でない法人 | 存続するときを除く | 使用施設等 |
| 4 届出使用者である法人 | 存続するときを除く | 使用施設等 |
| 5 許可使用者でない法人 | 存続する場合に限る | 使用施設等 |

〔解答〕

3

注) 法第 26 条の 2 (合併等) 第 1 項

問 22 密封されていない放射性同位元素のみを使用していた許可使用者の廃止措置計画及び廃止措置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 廃止措置を講じようとするときは、原子力規制委員会規則で定めるところにより、あらかじめ、廃止措置計画を定め、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- B 原子力規制委員会に届け出た廃止措置計画を変更したときは、原子力規制委員会規則で定めるところにより、変更の日から 30 日以内に、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- C 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、原子力規制委員会規則で定めるところにより、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。
- D 原子力規制委員会は、許可取消使用者等の講じた措置が適切でないと認めるときは、許可取消使用者等に対し、放射線障害を防止するために必要な措置を講ずることを命ずることができる。

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

〔解答〕

1

注) 法第 28 条 (許可の取消し、使用の廃止等に伴う措置等)

- A : 正    法第 28 条第 2 項
- B : 誤    法第 28 条第 3 項    あらかじめ、届け出なければならない。
- C : 正    法第 28 条第 5 項
- D : 正    法第 28 条第 6 項

問 23 次のうち、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に、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者として、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 届出賃貸業者
- B 表示付認証機器使用者
- C 届出使用者
- D 許可使用者から運搬を委託された者

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) 法第 32 条 (事故届)

問 24 危険時の措置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 放射線施設に火災が起きたため、消火及び延焼の防止に努めるとともに直ちにその旨を消防署に通報した。
  - B 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。
  - C 放射線障害を防止するため、放射線施設の内部及び付近にいる者に避難するよう警告した。
  - D 放射性同位元素による汚染が生じたため、速やかに、その広がり防止及び除去を行った。
- 1 ACDのみ    2 ABのみ    3 BCのみ    4 Dのみ    5 ABCDすべて

〔解答〕

- 5  
注) 法第33条(危険時の措置)、則第29条(危険時の措置)
- A: 正    法第33条、則第29条第1項第1号
  - B: 正    法第33条、則第29条第2項
  - C: 正    法第33条、則第29条第1項第2号
  - D: 正    法第33条、則第29条第1項第4号

- 問25 放射線取扱主任者の選任に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
- A 下限数量を超える密封されていない放射性同位元素のみを診療のために使用しようとするときは、放射性同位元素を使用施設若しくは貯蔵施設に運び入れた後、10日後までに、放射線取扱主任者として放射線取扱主任者免状を有していない診療放射線技師を選任することができる。
  - B 表示付特定認証機器のみを業として販売しようとするときは、販売の業の開始後、10日以内に、放射線取扱主任者を選任しなければならない。
  - C 放射線発生装置のみを研究のために使用しようとするときは、放射線発生装置を使用施設に設置するまでに、放射線取扱主任者として第1種放射線取扱主任者免状を有している者を選任しなければならない。
  - D 20テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを使用しようとするときは、放射性同位元素を使用施設若しくは貯蔵施設に運び入れるまでに、放射線取扱主任者として第1種放射線取扱主任者免状を有している者を選任しなければならない。
- 1 ABCのみ    2 ABのみ    3 ADのみ    4 CDのみ    5 BCDのみ

〔解答〕

- 4  
注) 法第34条(放射線取扱主任者)第1項、則第30条(放射線取扱主任者の選任)第2項
- A: 誤    診療のために使用する場合であっても、放射線取扱主任者免状を有していない診療放射線技師は選任できない。また、選任は業を開始する前に行う必要がある。
  - B: 誤    選任は業を開始する前に行う必要がある。
  - C: 正
  - D: 正

- 問26 放射線取扱主任者の義務等に関する次の文章の  ～  に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

## 主任者 コーナー

〔第 36 条 放射線取扱主任者は、誠実にその  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立ち入る者は、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  又は  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、 に関し、放射線取扱主任者の  を尊重しなければならない。〕

	<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>	<input type="text" value="D"/>	<input type="text" value="E"/>
1	職務	命令	放射線障害予防規程	放射線障害の防止	意見
2	義務	指導	放射線安全管理	放射線安全文化の醸成	助言
3	職務	指導	放射線安全管理	放射性同位元素の使用等	助言
4	義務	命令	放射線安全管理	放射線障害の防止	助言
5	職務	指導	放射線障害予防規程	放射線安全文化の醸成	意見

〔解答〕

1

注) 法第 36 条 (放射線取扱主任者の義務等)

問 27 定期講習に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 届出使用者は、定期講習を受けたことのない者を放射線取扱主任者に選任した場合は、選任した日から 1 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賃貸する届出賃貸業者は、放射線取扱主任者に定期講習を受けさせることを要しない。
- C 届出販売業者は、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 3 年以内に定期講習を受けさせなければならない。
- D 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。

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

〔解答〕

2

注) 法第 36 条の 2 (定期講習) 第 1 項, 則第 32 条 (定期講習)

A : 正    法第 36 条の 2 第 1 項, 則第 32 条第 2 項第 1 号

B : 正    法第 36 条の 2 第 1 項, 則第 32 条第 1 項第 2 号

C : 誤    法第 36 条の 2 第 1 項, 則第 32 条第 2 項第 1 号    3 年ではなく 1 年以内

D : 誤    法第 36 条の 2 第 1 項, 則第 32 条第 2 項第 2 号    5 年ではなく 3 年以内

問 28 次のうち、放射線発生装置のみを使用する許可使用者が選任した放射線取扱主任者が受講する定期講習の課目として、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 法に関する課目
- B 放射線発生装置及び放射化物の取扱いに関する課目
- C 使用施設等の安全管理に関する課目

- D 放射性同位元素若しくは放射線発生装置又は放射性汚染物の取扱いの事故の事例に関する課目  
 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) 法第 36 条の 2 (定期講習), 法律別表 (法第 36 条の 2, 第 41 条の 36 関係), 則第 32 条 (定期講習) 第 4 項, 平成 17 年 7 月 4 日文科科学省告示第 95 号 (講習の時間数等を定める告示)

- A : 正  
 B : 正  
 C : 正  
 D : 正

問 29 放射線取扱主任者又は代理者の選任等の届出に関する次の記述のうち, 放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 放射線取扱主任者が転勤することになり, その職務を行うことができなくなるため, 転勤の日の 5 日前に放射線取扱主任者の選任及び解任を行い, その旨の届出を転勤の日の 5 日後に行った。  
 B 放射線取扱主任者が, その職務を行うことができない期間中に放射性同位元素を使用することとなったが, その期間が 5 日間以下のため, 放射線取扱主任者の代理者を選任しなかった。  
 C 放射線取扱主任者が海外出張により 20 日間その職務を行うことができなくなるため, その期間, 放射線取扱主任者の代理者を選任したが, その旨の届出は行わなかった。  
 D 放射線取扱主任者が海外出張により 3 日間その職務を行うことができなくなるため, その期間, 放射線取扱主任者の代理者を選任し, 選任した日にその旨の届出を行った。帰国後, その者を放射線取扱主任者としての職務に復帰させるため, 代理者を解任し, その旨の届出を解任の日の 10 日後に行った。

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

〔解答〕

1

注) 法第 34 条 (放射線取扱主任者), 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 34 条第 2 項  
 B : 誤 法第 37 条第 1 項 職務を行うことができない期間にかかわらず代理者の選任は行わなければならない。  
 C : 正 法第 37 条第 1 項及び第 3 項, 則第 33 条第 3 項 職務を行うことができない期間が 30 日未満の場合は選任の届出は不要。  
 D : 正 法第 37 条第 1 項及び第 3 項 選任届及び解任届はいずれの場合にも 30 日以内。

問 30 報告の徴収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。

「放射性同位元素等の使用, 販売, 賃貸, 廃棄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, 当該被ばくに係る実効線量が放射線業務従事者 (  A ) に従事する者を含む。以下この項にお

## 主任者 コーナー

いて同じ。) にあつては  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。』

	<input type="text" value="A"/>	<input type="text" value="B"/>	<input type="text" value="C"/>
1	運搬	5	0.5
2	廃棄	10	1.5
3	運搬	10	1
4	廃棄	5	1
5	廃棄	5	0.5

〔解答〕

5

注) 則第 39 条 (報告の徴収) 第 1 項第 7 号

## 管 理 測 定 技 術

問1 シンチレーション検出器に関する次のⅠ～Ⅲの文章の□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。

放射線と物質の相互作用により蛍光を発する現象は、放射線検出の有効な手段の一つであり、シンチレーション検出器として利用されている。このシンチレーション検出器は、蛍光を発するシンチレータとその蛍光を電気信号に変換する光センサなどから構成されている。

Ⅰ シンチレータは、NaI(Tl)、BGOなどの無機シンチレータと、プラスチックシンチレータ、液体シンチレータなどの有機シンチレータに大別されるが、シンチレータの種類により発光メカニズムは同一ではない。

NaI(Tl)シンチレータの場合は、ヨウ化ナトリウム結晶に少量のタリウムが添加されている。放射線による電離で生じた自由電子、□A□、及びこれらの方である□B□がこの結晶中を移動する。タリウムの添加により結晶の□C□領域に生成されたエネルギー準位に、移動中の電子等が捕獲され、タリウム原子が励起される。この励起状態が再び基底状態に戻るとき、主として□D□に相当する波長域の蛍光が放出される。この不純物として添加されたタリウムは□E□物質と呼ばれ、シンチレータ中に分布して□F□を形成する。

<A～Fの解答群>

- 1 電子    2 陽電子    3 陽イオン    4 紫外線    5 可視光    6 赤外線  
7 正孔    8 励起子    9 活性化    10 クエンチャー    11 発光中心    12 禁止帯  
13 伝導帯    14 価電子帯    15 光電変換

Ⅱ 無機シンチレータの多くは、シンチレータの□G□が比較的高く、また密度も高いことから、 $\gamma$ 線の線量測定やエネルギー測定に使用する検出器に適している。無機シンチレータに分類されるZnS(Ag)シンチレータは、通常□H□の検出に用いられるが、□I□のためエネルギースペクトルの測定には適さない。

有機シンチレータのうち、プラスチックシンチレータは、主として $\beta$ 線、中性子などの測定に用いられる。また、□G□が低く光電ピークの検出には適さないが、大容積のシンチレータが作製可能なため、 $\gamma$ 線ゲートモニタなどにも用いられている。

液体シンチレータは、放射性物質をシンチレータに直接混合して測定できるため、その放射性物質からの放射線について□J□が高い。また、放射線の□K□を小さくできることから、トリチウムのような低エネルギー純 $\beta$ 線放出核種や $\alpha$ 線放出核種の放射線管理測定に極めて有効である。

さらに、液体シンチレータやプラスチックシンチレータは、□L□原子を多く含むことから、その原子核の反跳により生じる□M□に着目して□N□の測定に用いられる。

<G～Nの解答群>

- 1  $\alpha$ 線    2  $\beta$ 線    3 陽子    4 熱中性子    5 速中性子    6 原子番号

## 主任者 コーナー

- 7 イオン価    8 水素    9 炭素    10 検出効率    11 量子効率    12 多結晶  
13 自己吸収    14 クエンチング

Ⅲ 放射線によりシンチレータで生じた蛍光は、光電子増倍管や **○** のような光センサを用い電気信号に変換して計測される。この発光量は極めて微弱であるが、光電子増倍管では、シンチレーション発光を光電陰極において光電子に変え、これを多段の **□ P** で増幅することにより、光電子の数を  $10^4 \sim 10^7$  倍に増すことができる。

NaI(Tl)シンチレーション発光の平均波長は約 **□ Q** m であり、プランク定数を  $6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 、電気素量を  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、光速度を  $3.0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  とすると、このシンチレーション光のエネルギーは約 3 eV である。このため、1 MeV の光子がシンチレータに全エネルギーを与える場合、集光過程における光の損失を無視し、またシンチレータの発光効率を 12%、光電陰極の量子効率を 10%、電子増倍度を  $10^4$  とすると、陽極における総電荷量は約 **□ R** C となる。さらに、光電子増倍管の陽極の静電容量を 10 pF とすると、陽極に生じるパルスの最大電圧は **□ S** V となり、信号処理に十分な出力電圧が得られる。

<O, P の解答群>

- 1 電子増倍管    2 光電陰極    3 ダイノード    4 アノード    5 整流子  
6 発光ダイオード    7 光触媒    8 光ダイオード    9 ホール素子

<Q~S の解答群>

- 1  $1.2 \times 10^{-12}$     2  $4.1 \times 10^{-12}$     3  $6.4 \times 10^{-12}$     4  $1.2 \times 10^{-9}$     5  $4.1 \times 10^{-9}$   
6  $6.4 \times 10^{-9}$     7  $1.2 \times 10^{-7}$     8  $3.2 \times 10^{-7}$     9  $4.1 \times 10^{-7}$     10  $5.8 \times 10^{-7}$   
11  $6.4 \times 10^{-7}$     12  $1.2 \times 10^{-1}$     13  $4.1 \times 10^{-1}$     14  $6.4 \times 10^{-1}$     15  $1.2 \times 10^0$

[解答]

- I **□ A**-7    **□ B**-8    **□ C**-12    **□ D**-5    **□ E**-9    **□ F**-11

注) A~F: 無機結晶では、電子は価電子帯にあり、伝導帯は自由電子が存在できない禁止帯(エネルギー・ギャップ)をはさんで価電子帯の上にある。放射線によって結晶内の原子がエネルギーを受け取ると、電離が起こって電子は伝導帯へと励起され、価電子帯には正孔が残り、電子-正孔の対(励起子, エキシトン)も形成される。これら電子や正孔, 励起子は結晶内を移動する。純粋な無機シンチレータの場合、発する蛍光の波長が短くて検出されにくく、発光効率も悪い。そこで結晶内に極少量の不純物を入れると、電子が存在できない禁止帯の中に不純物のエネルギー準位(励起準位と基底準位)が形成される。伝導帯にある電子や励起子は、その禁止帯に作られた不純物の準位に捕獲され、不純物の原子が励起される。励起状態の不純物原子はすぐに基底状態へ遷移するが、その際に両状態のエネルギー差に相当する波長の蛍光が発せられる(純粋な無機シンチレータよりも長い波長の蛍光が放出され、検出されやすくなる)。このとき添加される不純物は活性化物質と呼ばれ、無機結晶中に分布して発光中心を形成する。つまり、結晶に少量の不純物を加えることは、発光中心を作ることとなる。

D: NaI(Tl)シンチレータから発せられる蛍光は約 415 nm で、可視光の領域となる。一般に、無機シンチレータからの蛍光は可視光の領域である。

E: アクチベーターとも言う。ZnS(Ag)における Ag も同様。

- II **□ G**-6    **□ H**-1    **□ I**-12    **□ J**-10    **□ K**-13    **□ L**-8  
**□ M**-3    **□ N**-5

注) G :  $\gamma$ 線は, 結晶の原子番号が高いほど相互作用 (特に光電効果) の確率が高くなり, その結果として  $\gamma$ 線の検出効率が高くなる。

H, I : ZnS(Ag)は粉末結晶で発光効率は高いが透明度が低いため, 放射線のエネルギーを光に変換する効率が落ちる。このため薄膜状にして飛程の短い  $\alpha$ 線や荷電粒子の測定に使用する。厚い結晶を作りにくいいため, 透過力のある  $\gamma$ 線の測定や, 放射線のエネルギー測定には適さない。

J, K : 液体シンチレータに放射性物質を直接混合することで, 放出される放射線の  $4\pi$  (全方位) 測定が可能となり, 検出効率は高くなる。また放射性物質中での放射線の自己吸収や, シンチレータ中における吸収も無視できる。

L, M, N : 中性子は電荷を持たず, 物質中で直接的には電離を起こさない。そのため中性子の測定では核反応によって生じる二次粒子などを利用する。そのうち速中性子の測定では, 水素原子を多く含む物質中における, 中性子と陽子との弾性散乱により出てくる反跳陽子を測定し, 中性子のエネルギーを求める手法が用いられる。

Ⅲ O-8    P-3    Q-9    R-3    S-14

注) O : フォトダイオードとも言う。光電子増倍管と比べ, 小型で高電圧が不要などの長所があるが, 感度が低く増倍度が小さいなどの短所もある。

P : 光電子増倍管 (Photomultiplier : PMT, フォトマル) は, 光電陰極から出た光電子を電場により加速し, 10~13 段のダイノードに衝突するごとに電子を増倍する。最終的には  $10^7 \sim 10^9$  倍となり, 陽極から電気パルスとして取り出される。

Q : 主なシンチレータ結晶の発光波長は概ね, NaI(Tl) ; 415 nm, CsI(Tl) ; 550 nm, BGO ; 480 nm, ZnS(Ag) ; 450 nm である。

また, プランク定数を  $h$ , 光速度を  $c$ , 波長を  $\lambda$  とすると,  $E = hc/\lambda$

よって, NaI(Tl) シンチレーション光のエネルギーは,

$$E = (3.0 \times 10^8 \text{ [m/s]}) \times (6.6 \times 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s]}) / (4.1 \times 10^{-7} \text{ [m]}) \doteq 4.83 \times 10^{-19} \text{ [J]}$$

1 [eV] =  $1.6 \times 10^{-19}$  [J] なので, 約 3 eV となる。

R : 量子効率とは, 光電陰極から放出される光電子数と入射する光子数との比 (%) で, 入射する光子の波長に依存する (波長感度特性)。

1 MeV の光子のうち発光に寄与するのは, 発光効率が 12% なので,

$$(1 \times 10^6 \text{ [eV]}) \times 0.12 = 1.2 \times 10^5 \text{ [eV]}$$

NaI(Tl) シンチレーション光のエネルギーは 3 eV なので, 生成される光電子数は,

$$(1.2 \times 10^5 \text{ [eV]}) / 3 \text{ [eV]} = 4 \times 10^4 \text{ [個]}$$

したがって, 量子効率が 10% より,  $(4 \times 10^4 \text{ [個]}) \times 0.1 = 4 \times 10^3 \text{ [個]}$  の光電子が光電陰極から放出される。

さらに電子増倍度が  $10^4$  なので, 陽極の総電荷量は,

$$(4 \times 10^3 \text{ [個]}) \times 10^4 \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}) = 6.4 \times 10^{-12} \text{ [C]}$$

S : 陽極の最大パルス電圧 [V] = 陽極の総電荷量 [C] / 静電容量 [F]

したがって, 陽極からのパルス電圧は,

$$(6.4 \times 10^{-12} \text{ [C]}) / (10 \times 10^{-12} \text{ [F]}) = 6.4 \times 10^{-1} \text{ [V]}$$

## 主任者 コーナー

問2 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。なお、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

Ⅰ 放射線エネルギースペクトルの測定手法として、半導体検出器やシンチレーション検出器などからのパルス信号の波高分布を測定する手法が一般的である。特に、半導体検出器を用いた方式は、格段に優れたエネルギー分解能を持つため、放射線のエネルギースペクトル測定の本命とも言うべきものである。半導体検出器においては、電離作用に基づいて生じた電子と正孔が、電場中でドリフトする際に電極に誘起される微小な電荷をパルス信号として取り出す。一般に、半導体検出器自体は□A□をしないので、出力信号は微弱であり、これを利用するためには、エレクトロニクス技術の活用が不可欠である。

半導体検出器からの微弱な□B□信号は、通常、□C□有感型の前置増幅器により、□D□パルスに変換される。□C□有感型とは、高いゲインを持つ増幅器のフィードバック回路に静電容量の小さなキャパシタを接続したもので、入力端からの電荷は、フィードバック回路に接続されたキャパシタに全部送り込まれ、このキャパシタ両端の電圧が出力として現れる。半導体検出器自体の静電容量は数十 pF から数百 pF にも達するのに対して、この方式ではフィードバック回路に接続された 1 pF から数 pF のキャパシタに検出器からの電荷が送り込まれることとなり、感度は著しく改善される。このようにして得られた□D□パルスを、出力ケーブルの特性インピーダンスにみあった□E□インピーダンス状態で信号として取り出す。半導体検出器の□F□の厚さは、印加電圧によって変わるので、それに伴って検出器自体の静電容量も印加電圧に依存するが、□C□有感型の前置増幅器を用いると、パルス信号は検出器自体の静電容量や入力部の浮遊容量の影響をほとんど受けない。ただし、検出器部の静電容量の増加とともにノイズは増加する傾向にある。

Ge 半導体検出器に 1 MeV の  $\gamma$  線が入射し、ここで全エネルギーが吸収された場合、 $\epsilon$  値を 3 eV とすると、約□ア□×□イ□Cの電荷が発生し、これが 1 pF のキャパシタに送り込まれた場合、キャパシタ両端の電圧は□ア□×□ウ□mV となり、これとほぼ同じパルス波高をもつパルスが出力から取り出される。

<A～Fの解答群>

- 1 高
- 2 低
- 3 光
- 4 電圧
- 5 電荷
- 6 電子増倍
- 7 電子加速
- 8 発光
- 9 不感層
- 10 空乏層
- 11 グリッドの利用
- 12 静電容量
- 13 正孔移動による信号の利用

<アの解答群>

- 1 1.6
- 2 3.3
- 3 4.8
- 4 5.3
- 5 6.1
- 6 8.0
- 7 9.6

<イの解答群>

- 1  $10^{-10}$
- 2  $10^{-11}$
- 3  $10^{-12}$
- 4  $10^{-13}$
- 5  $10^{-14}$
- 6  $10^{-15}$

<ウの解答群>

- 1  $10^{-3}$
- 2  $10^{-2}$
- 3  $10^{-1}$
- 4 1
- 5 10
- 6  $10^2$

Ⅱ 前置増幅器からの出力信号は、増幅度可変の主増幅器に送られる。また、主増幅器には積分回路と微分回路とからなるパルス整形回路が組み込まれ、多くの場合、□G□の短縮、パルス波形の適正化、積分作用による□H□成分の軽減化がはかられる。ここで、□G□、特にテールの部分が長いと、後続パルスが重畳する確率が大きくなり、□I□が生じやすくなる。一方、パルス整形回路の時定数が短いと検出器からの□J□が不完全となり、エネルギー分解能が悪くなる。特に、大型

の Ge 検出器を用いたシステムの場合、時間は長くなり、そのため時定数は長めに設定せざるを得ないが、そうするとの影響を受けやすくなり、高計数率測定に際して不利となる。また、主増幅器には、パルスのあるいはオーバーシュートを軽減、消滅するための回路や直流分の変動を補償するためのなどが組み込まれている場合が多い。

<G~Mの解答群>

- 1 エッジ    2 パルス幅    3 電荷の収集    4 正孔の寿命    5 ノイズ  
6 アンダーシュート    7 立ち上がり時間    8 バイルアップ  
9 ベースラインレストアラ    10 ゼロクロス    11 ポールゼロ補償  
12 ゲーテッド積分器    13 ピックオフ    14 コンスタントフラクシオン

Ⅲ この主増幅器の出力をマルチチャンネル波高分析器により、波高分析する。これは、ADC（アナログ-デジタル変換器）によりパルスの波高値を最大 1 K から 16 K チャンネルのデジタル量に変換したのち、分類、蓄積するもので、測定時間内に到来したパルスの波高値のヒストグラムが得られる。ADC の方式によっては、処理に時間がかかり、しかも、それはパルス波高に依存するのでによる計数損失を補正するのは面倒である。この難点を改善するため、装置が生きている時間だけクロックタイマを動作させ、装置が生きている時間だけを測って、これを計測時間とし、による計数損失を実質的に補償できるようにもなっている。これを方式と言う。

なお、最近では前置増幅器からの出力波形の全部分を超高速 ADC を用いて直ちにデジタル量に変換したのち、信号プロセッサにより、自動的に最適条件を見出しつつすべての信号処理を行う方式も用いられるようになってきた。

以上述べた波高分布スペクトルは、検出器の有効体積中で放射線のエネルギーのスペクトルであって、必ずしも放射線のエネルギースペクトルそのものを示すものではない。したがって、放射線が検出器に入射して、検出器の有効領域の中で相互作用を起こして放射線のエネルギーが検出器物質で過程を理解して、もとの放射線のエネルギー分布を読み取ることが大切である。

<N~Qの解答群>

- 1 タイマ    2 リアルタイム    3 デッドタイム    4 ライブタイム  
5 サンプリング    6 アナログ    7 デジタル    8 ハイブリッド    9 発生した  
10 荷電粒子に転移された    11 吸収された    12 相互作用を起こした

[解答]

- I -6    -5    -5    -4    -2    -10  
-4    -5    -5

注) ア, イ, ウ: 半導体検出器における 1 個の電子-正孔対生成に必要なエネルギーはゲルマニウム (Ge) の場合には約 3.0 eV である ( $\epsilon=3 \text{ eV}$ )。

したがって、1 MeV の  $\gamma$  線の全てが吸収されると  $(1 \times 10^6)/3 \approx 3.3 \times 10^5$  個の電子が生成される。

電子 1 個が持つ電気量は  $1.6 \times 10^{-19}$  [C] (これは暗記しておく) であるから、

$3.3 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19} \approx 5.3 \times 10^{-14}$  [C] となる。

続いて、コンデンサの電荷に関しては、

電荷の大きさ [C] = キャパシタ [F] × 電圧 [V] で表すことができるので、

$5.3 \times 10^{-14}$  [C] =  $1 \times 10^{-12}$  [F] × 電圧 [V] が成り立ち、

電圧 =  $5.3 \times 10$  [mV] となる。

## 主任者 コーナー

II -2    -5    -8    -3    -6    -11  
-9

注) I：2本以上の放射線が同時に入力して来た場合には検出器はそれを分離できず1本の放射線として計測する。これをサムピークあるいはパイルアップと呼ぶ。

K：パルス計測において、パルスは矩形が望ましいが、立ち上がり時の振動（乱れ）をオーバーシュートと呼び、立下りの振動（乱れ）をアンダーシュートと呼ぶ。

L：ポールゼロ補償回路とは増幅器の伝達関数のポール（極）をキャンセルする回路で、放射線計測の場合には、前のパルスの減衰時間内に後ろのパルスが乗ることによる見掛けの波高値が小さくなることを防ぐことができる。

M：ベースラインレストアラ回路とは、増幅器の調整不良やスタンバイ不良の場合にベースライン（直流分）が変動（シフト）する場合があるが、これを防ぐための回路である。

III -3    -4    -7    -11

注) P：デジタル信号プロセッサは、デジタル信号処理に特化したマイクロプロセッサである。

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

I 放射性同位元素を取り扱う際の安全管理では、作業者の被ばくを低減させることが重要である。作業者の外部被ばくを低減するには、(1)線源からの距離、(2)遮蔽及び(3)作業時間の三原則を検討する必要がある。今、800 MBqの $^{60}\text{Co}$ 線源を取り扱う場合について検討してみることにする。 $^{60}\text{Co}$ の実効線量率定数は0.30 とする。このことから、線源から50 cmでの線量率は  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ となる。この線源が作業員側に対し厚さ5.3 cmの鉛で囲まれている場合には、線量率は  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ となる。ただし、鉛の半価層は1.06 cmであり、ビルドアップ効果は無視する。その状態で8時間作業すると、作業員が受ける実効線量は  $\mu\text{Sv}$ となると予想される。このことから、作業員と線源の距離を変えて100 cmにすると線量は  $\mu\text{Sv}$ となる。距離を変えずに50 cmのまま同じ線量にするには遮蔽体の厚みを cm追加する。

<Aの解答群>

1  $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$     2  $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$     3  $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$   
 4  $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}\cdot\text{h}^{-1}$     5  $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

<B～Fの解答群>

1 1.1    2 2.1    3 3.2    4 20    5 30    6 60    7 90    8 120  
 9 240    10 480    11 960    12 1,200

II 非密封の放射性同位元素を取り扱う場合には、内部被ばくをしないようにすること、さらには汚染を起こさないように心がける必要がある。使用に当たっては、化学的・物理的性質を十分理解しておくことが大切である。トリチウムで標識した水を取り扱う際には、蒸発などによる汚染のおそれがある。 $^{14}\text{C}$ で標識された炭酸バリウムの場合には、化合物の分解によって発生する $^{14}\text{CO}_2$ による汚染のおそれがある。これら放射性同位元素が飛散する可能性がある場合にはフード又はグローブボックスを使用する。また、グローブボックスから排気設備に連結する際には、その間にそれぞれに適した捕集用のトラップをつけることにする。捕集剤としては、トリチウム水の取扱いでは、炭酸バリウムの取扱いではがそれぞれ用いられる。

次に、作業中の万一の事故を想定して、排風機の故障によりフードから室内に 100 MBq の  $^{14}\text{CO}_2$  が逆流し、室内全体に均一に拡散した場合の空气中濃度を計算してみる。作業室の大きさは 5 m×4 m×2.5 m である。空气中濃度は  Bq/cm<sup>3</sup> となる。告示別表第 2 の第 4 欄に定められた空气中濃度限度は 3 Bq/cm<sup>3</sup> であるから、空气中濃度限度を 。この状況で作業を 30 分間行った場合、作業者の吸入摂取量は最大で  MBq と見積もられ、預託実効線量は  mSv となる。ただし、成人の呼吸量を毎分 20 リットルとする。告示別表第 2 の第 2 欄に定められた  $^{14}\text{CO}_2$  の吸入摂取の場合の実効線量係数は  $6.5 \times 10^{-9}$  mSv/Bq である。実効線量係数は飛散する核種毎に異なるとともに、核種の  によって異なることも知っておく必要がある。

作業中の室内の  $^{14}\text{CO}_2$  濃度をモニタリングするには室内空気を吸引し、トラップで捕集し、液体シンチレーションカウンタで測定する方法がとられている。HTO の空气中放射能濃度をモニタリングするには、同様のサンプリング装置を用いてトラップで捕集することになる。

<G の解答群>

- 1 活性炭    2 シリカゲル    3 ろ紙    4 水銀

<H の解答群>

- 1 希塩酸    2 過酸化水素水    3 水酸化ナトリウム水溶液    4 エタノール

<I の解答群>

- 1 1.0    2 2.0    3 3.0    4 4.0

<J の解答群>

- 1 超える    2 超えない

<K の解答群>

- 1 0.6    2 0.9    3 1.2    4 1.8

<L の解答群>

- 1 0.00012    2 0.0078    3 0.012    4 0.078

<M の解答群>

- 1 酸化数    2 昇華性    3 沸点    4 化学形

<N, O の解答群>

- 1 活性炭    2 モノエタノールアミン水溶液    3 EDTA-2 ナトリウム塩水溶液  
4 コールド    5 酸化マンガン

Ⅲ 放射線発生装置を使用する室には、人が通常出入りする出入口に、原則として室内に人がみだりに入ることを防止する  の設置および、使用する旨を示す  の設置が義務づけられている。当該発生装置の運転を停止して室内に入る際に室内の空間線量率が下がっていることを確認するための放射線モニタも重要な安全管理設備である。

サイクロトロンで放射性同位元素を製造した場合には、特にターゲット周辺は非常に高い線量率となっている。このため、冷却時間を十分にとるとともに、入室にあたってはサーベイメータを携帯する。中性子が発生する室内では空気放射化によって  が生成することが知られている。高エネルギーの電子加速器では加速された電子ビームが物質に当たると制動放射線が発生する。この制動放射線により光核反応で生成する空気放射化も考慮する必要がある。主に酸素から 、窒素から  が生成することが知られている。このため、空気放射化で生成する核種の生成量を推定しておくことが放射線管理上求められる。

## 主任者 コーナー

<P, Qの解答群>

- 1 非常停止装置    2 入退管理システム    3 インターロック    4 個人キー  
5 自動表示装置    6 ハンドフットクロスモニタ

<R~Tの解答群>

- 1  $^3\text{H}$     2  $^{11}\text{C}$     3  $^{13}\text{N}$     4  $^{15}\text{O}$     5  $^{16}\text{N}$     6  $^{18}\text{F}$     7  $^{19}\text{O}$     8  $^{41}\text{Ar}$

[解答]

- I  A - 3     B - 11     C - 5     D - 9     E - 6     F - 2

注) A, B:  $^{60}\text{Co}$  による実効線量率を求めると,

$$800 [\text{MBq}] \times 0.30 [\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}] / (0.5 [\text{m}])^2 = 960 [\mu\text{Sv/h}]$$

C: 5.3 cm は鉛の半価層の 5 倍のため B の解答より,

$$960 [\mu\text{Sv/h}] \times \left(\frac{1}{2}\right)^5 = 30 [\mu\text{Sv/h}]$$

D: 同様に C の解答より,  $30 [\mu\text{Sv/h}] \times 8 [\text{h}] = 240 [\mu\text{Sv/h}]$

E: 距離が 2 倍になると, 実効線量率は 1/4 になるので D の解答より,

$$240 [\mu\text{Sv/h}] \times \frac{1}{4} = 60 [\mu\text{Sv/h}]$$

F: 実効線量率を 1/4 にするには, 半価層の 2 倍の鉛厚が必要なので

$$1.06 [\text{cm}] \times 2 \div 2.1 [\text{cm}]$$

- II  G - 2     H - 3     I - 2     J - 2     K - 3     L - 2  
 M - 4     N - 2     O - 4

注) G, H: 水蒸気状トリチウムは吸湿材としてシリカゲルを用いて, また, 炭酸バリウムの分解により発生する二酸化炭素は, 水酸化ナトリウム水溶液にて捕集をする。

I, J:  $^{14}\text{CO}_2$  による空気中の放射能濃度は

$$100 [\text{MBq}] / (5 [\text{m}] \times 4 [\text{m}] \times 2.5 [\text{m}]) = 2.0 [\text{MBq/m}^3] = 2.0 [\text{Bq/cm}^3]$$

であり, 二酸化物の空気中濃度限度  $3.0 [\text{Bq/cm}^3]$  を超えない。

K:  $20 [\text{L}] = 20,000 [\text{cm}^3]$  なので吸入摂取量は,

$$2.0 [\text{Bq/cm}^3] \times 20,000 [\text{cm}^3/\text{min}] \times 30 [\text{min}] = 1.2 \times 10^6 [\text{Bq}] = 1.2 [\text{MBq}]$$

L: 預託実効線量は,

$$1.2 \times 10^6 [\text{Bq}] \times 6.5 \times 10^{-9} [\text{mSv/Bq}] = 7.8 \times 10^{-3} [\text{mSv}] = 0.0078 [\text{mSv}]$$

M: 吸入した場合の実効線量係数は, 告示別表第 2 にて化学形等ごとに与えられている。

N, O:  $^{14}\text{CO}_2$  はモノエタノールアミン水溶液にて捕集をし, HTO はドライアイス等によるコールドトラップにて捕集を行う。

- III  P - 3     Q - 5     R - 8     S - 4     T - 3

注) P, Q: 放射線発生装置を使用する室には, インターロック, 自動表示装置の設置が義務付けられている。

R: 空気中のアルゴンが放射化し  $^{41}\text{Ar}$  となる。

S, T: 高エネルギーの電子加速器から発生する電子線がターゲットに当たると制動放射線を発生させるが, これによる光核反応で空気中の酸素から  $^{15}\text{O}$  が, 窒素から  $^{13}\text{N}$  が生成する。

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

非密封放射性同位元素の $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ を取り扱っている施設がある。これらの放射性同位元素を用いた実験を行うためには、あらかじめ使用する核種や化合物の物理的・化学的性質を考慮した実験計画を立て、被ばくや汚染防止対策を講じて実験を行い、廃棄物にも注意を払う必要がある。

I 実験室のフード1で $^{32}\text{P}$ を使用した実験が行われている。 $^{32}\text{P}$ は半減期□A□日で $\beta^-$ 壊変する核種で、最大エネルギー□B□keVの $\beta^-$ 線を放出する。エネルギーの高い $\beta^-$ 線は原子核の近傍を通過するときに□C□線を発生し、その確率は原子番号の□D□乗に比例する。このため作業中の視認性を確保しつつ□C□線の発生を抑え、 $^{32}\text{P}$ の $\beta^-$ 線を有効に遮蔽するために、厚さ□E□mm程度の□F□板が一般に遮蔽材として用いられる。

フード1の隣のフード2で使用されている $^{35}\text{S}$ は、最大エネルギー□G□keVの $\beta^-$ 線放出核種であり、その測定には□H□検出装置が有効である。一方、 $^{32}\text{P}$ の $\beta^-$ 線は高速で物質中を運動して□I□光を発生するので、シンチレータを用いずに水溶液のまま□H□検出装置で測定することもよく行われている。これらのフードの汚染検査には、使用核種から□J□式サーベイメータが使用できる。

フード2の実験終了後に直接法で一部に汚染が認められたので、間接法により表面汚染密度を測定した。□J□式サーベイメータをスミアろ紙に密着して測定したところ、380 cpmであった。バックグラウンドを80 cpm、機器効率を0.4、線源効率を0.25、ふき取り面積を100 cm<sup>2</sup>、ふき取り効率を0.5とすると、この汚染の表面汚染密度は□ア□Bq·cm<sup>-2</sup>と見積もられた。

<A, Bの解答群>

- 1 5.27    2 8.02    3 14.3    4 18.6    5 27.7    6 87.5    7 167    8 514  
9 606    10 1,711    11 3,541

<Cの解答群>

- 1 陽子    2  $\beta^+$     3  $\gamma$     4  $\alpha$     5 中性子    6 制動放射    7 消滅放射

<Dの解答群>

- 1 1    2 2    3 3.5    4 5

<Eの解答群>

- 1 0.1    2 1.0    3 10    4 30

<Fの解答群>

- 1 アクリル    2 アルミニウム    3 鉛ガラス    4 鉄

<Gの解答群>

- 1 5.27    2 8.02    3 14.3    4 18.6    5 27.7    6 87.5    7 167    8 514  
9 606    10 1,711    11 3,541

<Hの解答群>

- 1 液体シンチレーション    2 NaI(Tl)シンチレーション    3 ZnS(Ag)シンチレーション  
4 BGOシンチレーション    5 Ge半導体    6 表面障壁型Si半導体  
7 端窓型GM管    8 電離箱    9 BF<sub>3</sub>計数管

## 主任者 コーナー

<Iの解答群>

- 1 蛍 2 チェレンコフ 3 熱ルミネセンス 4 レーザー 5 りん

<Jの解答群>

- 1 液体シンチレーション 2 NaI(Tl)シンチレーション 3 ZnS(Ag)シンチレーション  
4 BGOシンチレーション 5 Ge半導体 6 表面障壁型Si半導体  
7 端窓型GM管 8 電離箱 9 BF<sub>3</sub>計数管

<アの解答群>

- 1 0.5 2 1.0 3 30 4 60 5 300

- II 実験室の反対側にあるフード3では、<sup>51</sup>Crと<sup>60</sup>Coを用いた実験を行っている。<sup>51</sup>Crは□K□壊変するのに対し、<sup>60</sup>Coはβ<sup>-</sup>壊変するが、これらはともに□L□を放出する。これらの核種からの放射線を効率よく測定するには□M□検出器が有効である。これらの核種による汚染の除去には状況に応じて種々の方法が用いられるが、EDTAのように多くの金属イオンと水溶性の□N□を形成する除染剤を用いることが有効である。

フード3に隣り合うフード4は<sup>131</sup>I取扱い専用としている。ヨウ素は揮散しやすく、ヨウ素を含む水溶液は、特に□O□にするとヨウ素が気体として拡散するおそれがある。<sup>131</sup>Iを使用する実験はヨウ素を有効に吸着する□P□トラップを装着したグローブボックス内で行う。

<Kの解答群>

- 1 β<sup>-</sup> 2 β<sup>+</sup> 3 EC 4 α 5 γ

<Lの解答群>

- 1 β線 2 陽電子 3 γ線 4 α線 5 中性子線 6 制動放射線

<M, Nの解答群>

- 1 液体シンチレーション 2 NaI(Tl)シンチレーション 3 ガスフロー型GM管式  
4 Si半導体 5 キレート 6 イオン会合体 7 コロイド 8 ポリマー

<O, Pの解答群>

- 1 酸性 2 アルカリ性 3 中性 4 有機アミン付着活性炭 5 シリカゲル  
6 ドライアイス 7 アルミナ

- III フード3と4だけを使った実験の廃液がたまった貯留槽中の放射能を測定したところ、1L中に<sup>60</sup>Coが1.0×10<sup>2</sup> Bq、<sup>131</sup>Iが4.0×10<sup>1</sup> Bqの2核種のみが入っていることがわかった。これを排水するためには、□イ□倍以上に希釈しなければならない。希釈せずに排水するには、最低□ウ□週間以上放射能の減衰を待つ必要がある。ただしこの事業所では曜日を決めて排水を行っているため、減衰を待つ時間は1週間単位とし、<sup>60</sup>Coと<sup>131</sup>Iの告示別表第2第6欄の排水中の濃度限度はそれぞれ2×10<sup>-1</sup> Bq/cm<sup>3</sup>、4×10<sup>-2</sup> Bq/cm<sup>3</sup>である。いずれの方法においても排水が濃度限度以下であることを確認してから排水する。

<イの解答群>

- 1 1.2 2 1.5 3 2.0 4 3.0 5 4.0

<ウの解答群>

- 1 1 2 2 3 4 4 8

[解答]

- I □A□-3 □B□-10 □C□-6 □D□-2 □E□-3 □F□-1

□G-7 □H-1 □I-2 □J-7 □ア-2

注) A, B, C: 参考図書参照; アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会)

E: 遮蔽体の厚さは, 物質中の  $\beta$  線の最大飛程より厚くする必要がある。

$\beta$  線の飛程は,  $R=0.542E-0.133$ ,  $E>0.8$  MeV の式で求められる。

$^{32}\text{P}$  の最大エネルギーは, 1.711 MeV であるから

$R=0.542 \times 1.711 - 0.133 \approx 0.794$  [g/cm<sup>2</sup>] である。

1) アクリル板の場合

アクリルの比重は, 約 1.2 g/cm<sup>3</sup>

遮蔽に必要な厚さは,  $0.794 \div 1.2 \approx 0.662$  [cm] = 6.62 [mm]

2) アルミニウムの場合

アルミニウムの比重は, 2.7 g/cm<sup>3</sup>

遮蔽に必要な厚さは,  $0.794 \div 2.7 \approx 0.294$  [cm] = 2.94 [mm]

3) 鉛ガラスと鉄は, 原子番号が大きいため除く。

F: 高エネルギー  $\beta$  線の遮蔽には, 制動放射線を低く抑えるため原子番号の小さい物質で構成されたアクリル板などで遮蔽する。

I:  $^{32}\text{P}$  などの高エネルギーの  $\beta$  線を放出する液体状の放射性同位元素は, 液体シンチレータを使わず, チェレンコフ光を測定することにより放射能量を定量できる。

J:  $^{35}\text{S}$  などの中エネルギー  $\beta$  線を測定する場合は, 一般的に, 端窓型 GM 管式サーベイメータが用いられる。

ア: スミアろ紙の正味の汚染

測定値が 380 cpm, バックグラウンドが 80 cpm より,

汚染は,  $380$  [cpm] -  $80$  [cpm] =  $300$  [cpm] であり,

単位を cps へ変換すると  $5$  [cps] となる。

表面汚染密度は, 機器効率が 0.4, 線源効率が 0.25, ふき取り面積が  $100$  cm<sup>2</sup>, ふき取り効率が 0.5 より,

$5 \div 0.4 \div 0.25 \div 100 \div 0.5 = 1.0$  [Bq·cm<sup>-2</sup>]

II □K-3 □L-3 □M-2 □N-5 □O-1 □P-4

注) K, L: 参考図書参照; アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会)

M: 一般的に,  $\gamma$  線放出核種には, 検出感度等を考慮し NaI(Tl) シンチレーション検出器が用いられる。

P:  $^{131}\text{I}$  に限らず, 放射性ヨウ素を有効的に吸着させる場合, 有機アミン付着活性炭もしくは活性炭が用いられる。

III □イ-2 □ウ-2

注) イ:  $^{60}\text{Co}$  及び  $^{131}\text{I}$  の排水中濃度限度比の合計

$^{60}\text{Co}$  の排水中濃度限度比

濃度を cm<sup>3</sup> 単位へ変換すると,

$1.0 \times 10^2$  [Bq/L] =  $1.0 \times 10^{-1}$  [Bq/cm<sup>3</sup>]

排水中濃度限度が  $2.0 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup> なので,

限度比は,  $1.0 \times 10^{-1}$  [Bq/cm<sup>3</sup>]  $\div$  ( $2.0 \times 10^{-1}$ ) [Bq/cm<sup>3</sup>] = 0.5

## 主任者 コーナー

$^{131}\text{I}$ の排水中濃度限度比

濃度を  $\text{cm}^3$  単位へ変換すると、

$$4.0 \times 10^1 [\text{Bq/L}] = 4.0 \times 10^{-2} [\text{Bq/cm}^3]$$

排水中濃度限度が  $4.0 \times 10^{-2} \text{Bq/cm}^3$  なので、

$$\text{限度比は、} 4.0 \times 10^{-2} [\text{Bq/cm}^3] \div (4.0 \times 10^{-2}) [\text{Bq/cm}^3] = 1.0$$

$^{60}\text{Co}$  と  $^{131}\text{I}$  の排水中濃度限度比の合計は、 $0.5 + 1.0 = 1.5$

ウ： $^{60}\text{Co}$  の半減期は 5.27 年、 $^{131}\text{I}$  の半減期は 8.02 日

$^{60}\text{Co}$  の半減期は、5.27 年と長いので、減衰は無視できる。

排水中濃度限度比の合計を 1 以下にするには、 $^{131}\text{I}$  の排水中濃度限度を 0.5 以下にする必要がある。0.5 以下にするには、1 半減期以上の減衰が必要となるので、2 週間以上となる。

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

I 放射線防護の目的は、有害な [A] 影響を防止し、[B] 影響を容認できるレベルまで制限することである。

[A] 影響にはしきい線量がある。しきい線量は、概念として、それ以下の線量の被ばくでは症状や影響が検出されないというものである。しきい線量を超えて被ばくと線量の増加につれて症状の発生確率が上昇し、重篤度が高くなる。しきい線量は、被ばくの形式や器官・組織に依存して様々な値をとる。一般に、分割して被ばくした場合、同一線量を 1 回で被ばくした場合と比べてしきい線量は [C]。ICRP2007 年勧告では、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しきい線量を推定し、一時的脱毛については約 [ア] Gy、造血機能低下については約 [イ] Gy としている。

[B] 影響にはしきい線量はないと仮定されている。[B] 影響には発がん [D] 影響の 2 つがある。[B] 影響を評価するための指標の 1 つとして、1 Sv 当たりの [B] 影響の発生頻度の推定値を与える [E] がある。

<A~E の解答群>

- 1 確定的
- 2 確率的
- 3 身体的
- 4 遺伝性(的)
- 5 低い
- 6 変わらない
- 7 高い
- 8 名目リスク係数
- 9 線量係数
- 10 倍加線量
- 11 線量・線量率効果係数

<ア、イの解答群>

- 1 0.1
- 2 0.5
- 3 1
- 4 4
- 5 6
- 6 6
- 10 10
- 7 15

II 放射線防護のためには被ばく線量を知る必要がある。被ばく線量の限度は防護量で指定される。防護量には、吸収線量に [F] を乗じた等価線量や、それにさらに [G] を乗じて全身にわたって総和をとった実効線量がある。しかし、一般的な放射線管理で組織・臓器の線量を実測することは実質的には不可能である。そこで、実際の被ばく線量の管理においては、防護量と対応づけられた実用量が定められている。外部被ばくに関する実用量として、周辺線量当量、方向性線量当量、および個人線量当量がある。実用量の値は防護量の値と比べて [H] ように定められている。

放射線防護の目標が達成されているか否かを判断するために行われる放射線の測定・結果の解釈・評価を含む一連の行為をモニタリングという。モニタリングは、[I] モニタリングと個人モニタ

リングに大別できる。

□I □モニタリングにおいて、 $\gamma$ 線や中性子線等の強透過性放射線を測定する場合、実用量としては□Jが用いられる。

個人モニタリングにおいて、□K線量と対応づけられた実用量は□ウ cm 線量当量である。日常のモニタリングで□K線量を評価する場合で、体幹部が前面からほぼ均等に外部被ばくすることが予想される場合は、□L (妊娠可能な女子においては□M) において□ウ cm 線量当量を測定・評価する。この□ウ cm 線量当量の基準は、組織等価物質でできたICRU □Nファントムの入射表面から□ウ cm の深さの線量から定められる。一方、個人モニタリングにおいて皮膚の防護量として□O線量を考える場合、防護量と対応づけられた実用量は□エ  $\mu\text{m}$  線量当量である。

<F~Jの解答群>

- 1 放射線減弱係数    2 放射線加重係数    3 放射線吸収係数    4 実効線量係数  
 5 組織加重係数    6 放射能移行係数    7 下回らない    8 等しくなる  
 9 上回らない    10 集団    11 環境    12 宇宙    13 周辺線量当量  
 14 方向性線量当量    15 個人線量当量

<K~Oの解答群>

- 1 等価    2 吸収    3 実効    4 照射    5 胸部    6 腹部    7 頭部  
 8 背部    9 球    10 楕円体    11 立方体    12 スラブ

<ウ, エの解答群>

- 1 1    2 3    3 7    4 10    5 30    6 70    7 100    8 300

[解答]

- I □A-1    □B-2    □C-7    □D-4    □E-8  
 □ア-4    □イ-2

注) C:分割照射や遷延照射の場合、生体の回復効果により確定的影響のしきい線量は高くなる。

E:男女の区別なく広い範囲の年齢層を含んだ集団に適用できるように導入された発がんのリスク係数。

ア, イ:それ以外のしきい値としては、白内障 (1.5 Gy), 卵巣の永久不妊 (3 Gy) 等がある。

- II □F-2    □G-5    □H-7    □I-11    □J-13    □K-3  
 □L-5    □M-6    □N-12    □O-1  
 □ウ-1    □エ-6

注) F:放射線の生物学的効果の違いを考慮するための係数。

光子 (ガンマ線, エックス線)	1
電子 (ベータ線)	1
陽子	2
アルファ粒子等	20
中性子線	2.5~20

G:確率的影響のリスクに対する各臓器の影響を示す係数。

J:空間線量 (率) を測定するサーベイメータは周辺線量当量を測定するように設計・校正されている。

## 主任者 コーナー

L, M, U: 施行規則第 20 条第 2 項第 1 号イ

「胸部（女子（妊娠不能と診断された者及び妊娠の意思のない旨を許可届出使用者又は許可廃棄業者に書面で申し出た者を除く。ただし、合理的な理由があるときは、この限りでない。）にあっては腹部）について 1 センチメートル線量当量及び 70 マイクロメートル線量当量（中性子線については、1 センチメートル線量当量）を測定すること。」

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

I 内部被ばくは放射性核種が体内に取り込まれた場合に生じる。放射性核種が体内に取り込まれる経路としては、経口摂取、吸入摂取、皮膚からの吸収、創傷からの吸収がある。一般に、これら 4 つの経路の中では、[ A ] が最も体内に取り込まれにくい。内部被ばくの評価には、体内にある放射性核種の同定と放射能を測定・評価する必要がある。内部被ばくによる放射能の評価は体外計測法と [ B ] 法によって行われる。

体外計測法は、体内に存在する放射性核種の定性・定量を目的として、体外においた放射線測定装置により放射線を測定するもので、 $\gamma$ 線や [ C ] を体外から測定する。全身を測定する装置は一般にホールボディカウンタ（WBC）と呼ばれる。WBC はバックグラウンド放射線による計数を少なくするための遮蔽と検出器および放射線計測部からなっており、検出器を遮蔽室内に設置する [ D ] WBC と検出器周囲を遮蔽した [ E ] WBC に分類することができる。

<A の解答群>

- 1 経口摂取    2 吸入摂取    3 皮膚からの吸収    4 創傷からの吸収

<B の解答群>

- 1 イムノアッセイ    2 バイオアッセイ    3 パーソナルアッセイ  
4 プロテインアッセイ    5 ルシフェラーゼアッセイ

<C の解答群>

- 1  $\alpha$ 線    2  $\beta$ 線    3 X線    4 中性子線    5 陽子線

<D, E の解答群>

- 1 室内型    2 精密型    3 移動型    4 簡易型    5 中間型

II WBC に用いる遮蔽室は宇宙線や遮蔽室の外部にある放射性核種からの放射線を遮蔽するためのもので、基本遮蔽材料としては主に鉛または鉄が用いられる。遮蔽材料の厚さは、一般に鉛で [ F ] cm、鉄で [ G ] cm 程度であり、これ以上厚さを増してもあまり効果はない。

遮蔽材料としては原子番号が大きく比重の大きな鉛が最も適している。しかし、通常の鉛には鉛の化学的な純度とは無関係に半減期 22 年の [ H ] がかなり含まれているので注意しなければならない。[ H ] の娘核種 [ I ] から放出される最大エネルギー 1.16 MeV の  $\beta$ 線に起因する [ J ] により約 0.5 MeV 以下の自然計数が増加する。鉛は鉄に比べ高価なため、WBC 用の遮蔽室の主な遮蔽材としては鉄が用いられる事が多い。

遮蔽室は主に外部にある放射性核種からの放射線を遮蔽するためのものであるが、測定時に、人体に取り込まれた放射性核種から放出される  $\gamma$ 線が遮蔽室の壁に入射し、 $\gamma$ 線のエネルギーが大きい場合には主に [ K ] による散乱線が検出器に入射することがあるため、低エネルギー部の計数率が増加することがある。この影響は遮蔽材料の原子番号が [ L ] 程少ないので、主な遮蔽材料が鉄の場

合には、その内面に3 mm程度の□M□を内張りすると軽減する。

遮蔽の最も内側の物質が□M□のように原子番号が□L□ものを使用した場合には、内側の物質とγ線との相互作用によって放出される特性X線が検出器に入射するため、低エネルギー部にピークを生ずることがある。これを除去するには□M□の内面にさらに0.5~3 mm程度の□N□を内張りするのがよい。無酸素□N□は放射性不純物をほとんど含まない遮蔽材として広く用いられている。しかし、鉛や鉄に比べ高価なので、鉛あるいは鉄材による基本遮蔽の内側に使われていることが多い。

<F, Gの解答群>

1 1~5    2 5~10    3 10~20    4 20~30    5 30~40    6 40~50

<H, Iの解答群>

1 <sup>60</sup>Co    2 <sup>210</sup>Bi    3 <sup>214</sup>Bi    4 <sup>210</sup>Pb    5 <sup>214</sup>Pb

<Jの解答群>

1 消滅放射線    2 光核反応    3 散乱γ線    4 制動放射線    5 δ線

<Kの解答群>

1 光電効果    2 トムソン散乱    3 コンプトン効果    4 電子対生成    5 光核反応

<Lの解答群>

1 大きい    2 小さい

<Mの解答群>

1 アルミニウム    2 クロム    3 鉛    4 バナジウム    5 アクリル板

<Nの解答群>

1 チタン    2 マンガン    3 バナジウム    4 銅    5 ジルコニウム

Ⅲ 遮蔽室を有するWBCで体内の放射能を測定する場合であっても、被検者を測定する前にバックグラウンドを測定し、その値を差し引く必要がある。バックグラウンドとして、宇宙線に由来する□O□ MeVの□P□がある。この他には、ラドンの影響がある。大地を構成する土壌・岩石から空気中に放出されたラドンは、地表面から大気中に散逸するか、または建物の床を通して屋内大気に侵入する。遮蔽室を有するWBCは、重量が大きいため、1階や地下に設置されることが多い。このため室内ラドン濃度は高くなる傾向がある。バックグラウンドに対する寄与としては、□Q□とその娘核種である□R□が重要である。これらの核種の多くは大気浮遊塵に付着して存在しているので、□ア□によりバックグラウンドを低下させることができる。この他、光電子増倍管のガラス窓などに含まれる□S□もバックグラウンドの原因となるので注意が必要である。

<Oの解答群>

1 0.51    2 0.61    3 1.13    4 1.43    5 1.76

<Pの解答群>

1 制動放射線    2 特性X線    3 蛍光X線    4 散乱γ線    5 消滅放射線

<Q~Sの解答群>

1 <sup>22</sup>Na    2 <sup>40</sup>K    3 <sup>60</sup>Co    4 <sup>131</sup>I    5 <sup>137</sup>Cs    6 <sup>210</sup>Bi    7 <sup>214</sup>Bi    8 <sup>210</sup>Pb  
9 <sup>214</sup>Pb

<アの解答群>

1 加湿器    2 イオン発生機    3 空気清浄機

## 主任者 コーナー

〔解答〕

I **A** - 3      **B** - 2      **C** - 3      **D** - 2      **E** - 4

注) **B** : バイオアッセイ法は、被検者から採取された生体試料（主に尿や便といった排泄物）中に含まれる放射性核種を定量する方法である。最大の利点は体外計測法では原理的に計測が困難な  $\alpha$  線や  $\beta$  線のみを放出する核種に適用できることである。

**C** : 体内にある放射性核種から放出される放射線は組織に吸収され、透過性の高い  $\gamma$  線や X 線のみが身体外に出てくるので測定可能な核種は、 $\gamma$  線や X 線を放出する核種に限られる。

**D, E** : 簡易型 WBC は、原子力施設等における日常モニタリングや緊急時の内部被ばくスクリーニングに用いられる。精密型 WBC は、体内放射能をできるだけ正確に精度よく測定することを目的としている。

II **F** - 2      **G** - 3      **H** - 4      **I** - 2      **J** - 4      **K** - 3  
**L** - 1      **M** - 3      **N** - 4

注) **F, G** : 解答の厚さで十分な遮蔽効果がある。参考までに、鉄の原子番号は 26、鉛は 82 である。

**H, I** :  $^{210}\text{Pb}$  は  $\alpha$  壊変して  $^{210}\text{Bi}$  になる。この  $^{210}\text{Bi}$  は、ほぼ 100% が最大 1.162 MeV の  $\beta^-$  線を放出して  $^{210}\text{Po}$  となる。

**J** : 鉛との相互作用による  $\beta$  線の減速により、その失ったエネルギーを電磁波の形で放出したものである。

**L** : 原子番号が高くなると光電効果が起こりやすくなるため、コンプトン効果による散乱線が減少する。

**N** :  $\gamma$  線と鉛との相互作用により、たたき出された電子の軌道に生じた空席は、上のエネルギー準位の軌道電子が移ってきて埋められる。この転移に伴って軌道準位の差のエネルギーが特性 X 線として放出される。ターゲット物質の原子番号が高いほど特性 X 線の振動数は高くなり、そのエネルギーも高くなる。このような特性 X 線を防ぐには、外側から内側に向かって原子番号が小さくなる順で遮蔽材を用いるとよく、銅は鉛の特性 X 線を遮蔽する。

III **O** - 1      **P** - 5      **Q** - 9      **R** - 7      **S** - 2  
**ア** - 3

注) **O, P** : 宇宙線に由来することと解答欄のエネルギーが単一であることから解答にたどりつける。

**Q, R** : 天然放射性核種であるウラン系列に属しており、半減期は、 $^{214}\text{Pb}$  が 26.8 分、 $^{214}\text{Bi}$  が 19.9 分で、測定に影響を与える核種として知っておきたい。

**S** : 天然放射性核種のうち  $^{40}\text{K}$  は、半減期が  $1.25 \times 10^9$  年、天然の **K** に 0.012% の割合で含まれる。この  $^{40}\text{K}$  からの 1.46 MeV の  $\gamma$  線は、測定に顕著な影響を及ぼす。

## 物 理 学

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 ブラッグ・グレイの原理に基づいて  $\alpha$  線の飛程を推定する。
- B フェルミの理論に基づいて  $\beta$  線のエネルギースペクトルを説明する。
- C ラザフォード散乱の理論に基づいて  $\gamma$  線の散乱角を求める。
- D マクスウェル分布に基づいて熱中性子の平均エネルギーを推定する。

- 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    ブラッグ・グレイの原理 (ブラッグ・グレイの空洞原理とも呼ぶ) は空洞中の気体の電離と吸収線量の関係を表した原理。
- B : 正    フェルミの理論とは 1934 年にフェルミによって提唱された  $\beta$  壊変の理論。  $\beta$  壊変により、壊変エネルギーが娘核種と  $\beta$  線、ニュートリノの 3 体により分配されるため  $\beta$  線のエネルギーが連続スペクトルとなる。
- C : 誤    ラザフォード散乱は荷電粒子同士の衝突の際に発生する、原子核のクーロン力による弾性散乱。
- D : 正    熱中性子は熱平衡にある中性子で、そのエネルギー分布は気体分子同様マクスウェル分布 (マクスウェル・ボルツマン分布とも呼ぶ) に従う。

問 2  $^{60}\text{Co}$  から放出される 1.33 MeV  $\gamma$  線の運動量 [ $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] として、最も近いものは、次のうちどれか。

- 1 0 (運動量を持たない)
- 2  $4.4 \times 10^{-23}$
- 3  $2.2 \times 10^{-22}$
- 4  $7.1 \times 10^{-22}$
- 5  $8.9 \times 10^{-22}$

〔解答〕

4

注)  $\gamma$  線のエネルギー  $E$  と運動量  $p$  との間には、光速度を  $c$  とすると次の関係が成り立つ。

$$E = p \cdot c$$

1.33 MeV の  $\gamma$  線のエネルギーを J の単位で表すと

## 主任者 コーナー

$$E=1.33\times 10^6\times 1.60\times 10^{-19}=2.13\times 10^{-13} \text{ [J]}$$

$c=3.00\times 10^8 \text{ [m/s]}$  より、運動量  $p$  は

$$p=E/c=2.13\times 10^{-13}/3.00\times 10^8=7.1\times 10^{-22} \text{ [kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

問3 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 内部転換が起きると中性子数が1つ減少する。
- B 軌道電子捕獲が起きると質量数が1つ減少する。
- C  $\beta^-$  壊変が起きると原子番号が1つ増加する。
- D  $\beta^+$  壊変が起きると中性子数が1つ増加する。

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 内部転換とは励起状態にある原子核が  $\gamma$  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軌道電子を放出する現象で、陽子・中性子の数は変化しない。
- B：誤 軌道電子捕獲とは、原子核内の陽子が、軌道電子を捕獲し中性子に壊変する現象であり、質量数は変化せず原子番号が1つ減少する。軌道電子捕獲と  $\beta^+$  壊変とは競合過程である。
- C：正  $\beta^-$  壊変により、原子核内の中性子が陽子に壊変するため、質量数は変わらないが、原子番号が1つ増加する。
- D：正  $\beta^+$  壊変により、原子核内の陽子が中性子に壊変するため、質量数は変わらないが、陽子の数が1つ減り、中性子の数が1つ増加する。

問4 次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 原子核の半径は原子番号の1/3乗にほぼ比例している。
- 2 原子核の半径は質量数の1/3乗にほぼ比例している。
- 3 原子核の体積は反応断面積の3/2乗にほぼ比例している。
- 4 原子核の半径は、原子の半径の  $10^{-3}$  倍程度である。
- 5 鉛 ( $^{208}\text{Pb}$ ) の原子核の半径は10 fmを超える。

〔解答〕

2

注) 原子核の体積は核子の数、すなわち質量数にほぼ比例し、原子核の半径  $R$  [fm] と質量数  $A$  との間におおよそ以下の関係が成り立つことが知られている (1が誤りで2が正解)。

$$R \sim r_0 A^{1/3} \text{ [fm]} \quad (r_0 \text{ は } 1.2 \sim 1.4 \text{ [fm]})$$

原子の半径はおおよそ  $10^{-10}$  [m] なので、原子核の半径と原子の半径の比は1万分の1以下である (4は誤り)。鉛 ( $^{208}\text{Pb}$ ) の半径は5.5 [fm] (Atomic Data and Nuclear Data Tables 99 (2013) p69-95) で10 [fm] 以下である (5は誤り)。反応断面積のふるまいは、入射粒子の種類やエネルギーなどに大きく依存する (3は誤り)。

問5 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 原子番号 50 以上の安定な原子核では陽子数が中性子数より少ない。  
 B  $^{14}\text{C}$  と  $^{18}\text{O}$  は同中性子体である。  
 C 同重体は互いに原子核の質量が等しい。  
 D 同位体は互いに陽子の数が等しい。

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    安定な原子核の陽子数  $Z$  と中性子数  $N$  の比  $N/Z$  は  $Z=20$  まではおおよそ 1~1.1 であるが、 $Z$  が大きくなるほど陽子数が中性子数よりも少なくなり、 $^{208}\text{Pb}$  では  $Z=82$ ,  $N=126$  で、 $N/Z$  は約 1.54 ある ( $^{209}\text{Bi}$  は長い間、最も重い安定な原子核と考えられてきたが、実際は非常に長い半減期を持つ放射性同位体であることが 2003 年に分かった。現在は  $^{208}\text{Pb}$  が最も重い安定な原子核と考えられている)。  
 B : 誤    同中性子体とは同じ中性子数を持つ原子核同士をいうが、 $^{14}\text{C}$  は陽子数 6, 中性子数 8 であり、 $^{18}\text{O}$  は陽子数 8, 中性子数 10 であり、同中性子体ではない。  
 C : 誤    互いに原子核内の陽子数と中性子数が異なるが陽子数と中性子数の和、つまり質量数が等しい原子核同士を同重体 (isobar) と呼ぶ。質量欠損が各核種で異なり、また陽子と中性子は質量が異なるため (問 6 注) C 解説参照), 同重体は質量数が等しいが質量が等しいとは限らない。  
 D : 正    同じ陽子数を持ち、異なる中性子数を持つ核種同士を同位体 (isotope) と呼ぶ。

問 6 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 陽子と中性子の間で核力が作用する。  
 B 核子当たりの平均結合エネルギーが最大となるのは  $^4\text{He}$  である。  
 C 中性子は、電荷を持たないため、陽子よりも質量が小さい。  
 D 中性子と陽子のスピンはともに  $1/2$  である。

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

〔解答〕

3

- 注) A : 正    原子核がクローン力に抗して核子を閉じ込めるために、陽子同士、中性子同士、陽子と中性子間で力が働く。これを核力と呼ぶ。  
 B : 誤    一般に軽い原子核の核子当たりの平均結合エネルギーは小さく、質量数が大きくなるにつれ結合エネルギーも大きくなり、鉄で最大となる (正確には  $^{62}\text{Ni}$  が 8.7945 MeV で最大、 $^{56}\text{Fe}$  は 8.7902 MeV,  $^{58}\text{Fe}$  は 8.7921 MeV である)。その後、質量数の増加に合わせて平均結合エネルギーは小さくなっていくが、その変化は大きくなくほぼ 8 MeV である。  
 C : 誤    陽子の質量が  $1.6726 \times 10^{-27}$  kg に対して、中性子の質量が  $1.6749 \times 10^{-27}$  kg であり、わずかに中性子の質量の方が大きい。  
 D : 正    電子などの素粒子や、素粒子から構成される陽子、中性子、原子核などの複合粒子は、それぞれ固有の量子力学的な自由度であるスピンという物理量を持つ。陽子や中性子、電子のスピンは  $1/2$  である。

## 主任者 コーナー

問7 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 核異性体の半減期は数分以内である。
- B 核異性体でも  $\beta^-$  壊変する場合がある。
- C 核異性体でも EC 壊変をする場合がある。
- D 核異性体が遷移した結果生じた核種は安定である。

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

〔解答〕

3

注) 励起状態の原子核の寿命は通常は非常に短く、瞬間的に  $\gamma$  線が放出されるが、励起状態によっては寿命が長い場合があり、この状態の原子核を核異性体 (isomer) と呼び、 $^{99m}\text{Tc}$  のように質量数の後に m を付ける。

- A : 誤    通常、核異性体の半減期は長くとも数秒であるが、まれに  $^{99m}\text{Tc}$  (半減期 6 時間) などの核異性体も存在する。
- B : 正    核異性体でも  $\beta^-$  壊変する場合がある (例:  $^{68m}\text{Cu}$ ,  $^{177m}\text{Lu}$ )。
- C : 正    核異性体でも EC 壊変する場合がある (例:  $^{34m}\text{Cl}$ ,  $^{44m}\text{Sc}$ )。
- D : 誤    遷移後さらに不安定な核種となる場合がある (例:  $^{99m}\text{Tc}$ )。

問8 放射能 10,000 Bq の  $^{13}\text{N}$  (半減期 10 分) を NaI(Tl) シンチレーション計数装置で 2 時間計数した。この場合、計数装置の指示値 (積算カウント) として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 $^{13}\text{N}$  に対する計数効率 (計数率/壊変率) は 5% であり、バックグラウンドは 5 cps である。

1  $9.5 \times 10^4$     2  $2.4 \times 10^5$     3  $4.7 \times 10^5$     4  $5.7 \times 10^5$     5  $9.3 \times 10^5$

〔解答〕

3

注) 時刻 0 における放射能を  $A_0$  (10,000 Bq) とすると 2 時間 (7,200 秒) における総壊変数  $D$  は

$$D = \int_0^{7,200} A_0 \exp(-\lambda t) dt = A_0 \frac{1 - \exp(-7,200\lambda)}{\lambda}$$

ここで、 $\lambda$  は壊変定数で半減期  $T$  [s] とは  $\lambda = \log(2)/T = 0.693/T$  の関係がある。

$^{13}\text{N}$  の場合、半減期が 5 分なので  $\lambda = 0.693/10/60 = 0.001155$

$\exp(-7,200\lambda) = 0.0002446$  (2 時間が半減期 10 分の 12 倍であることから  $1/2^{12}$ ) なので、

$$D = 10,000 \times (1 - 0.0002446) / 0.001155 \approx 8.656 \times 10^6$$

計数効率が 5% で、またバックグラウンドカウントが毎秒 5 カウントあるので 2 時間の測定では  $5 \times 7,200$  カウントとなり、計数装置の指示値は

$$8.656 \times 10^6 \times 0.05 + 5 \times 7,200 = 4.688 \times 10^5 \approx 4.7 \times 10^5$$

問9 放射性核種のみからなる物質 A と B がある。それぞれの単位質量当たりの放射能を  $S_A$  及び  $S_B$ 、それぞれの核種の質量 (原子質量単位) を  $M_A$  及び  $M_B$ 、半減期を  $T_A$  及び  $T_B$  とする。これらの間に  $S_B = 2S_A$ 、 $T_B = 5T_A$  の関係があるとき、 $M_A/M_B$  の値として正しいものは次のうちどれか。

1 0.1    2 0.4    3 1    4 2.5    5 10

〔解答〕

5

注) 単位質量当たりの放射能  $S$  と壊変定数  $\lambda$ , 核種の質量  $M$  との間には  $S = \lambda/M$  の関係がある。

また, 半減期  $T$  と壊変定数  $\lambda$  の間には

$\lambda = \log(2)/T$  の関係があるので

$M_A = \log(2)/T_A S_A$ ,  $M_B = \log(2)/T_B S_B$  となる。

$M_A$  と  $M_B$  との比は

$M_A/M_B = T_B S_B / T_A S_A$  と表せる。

したがって, 問題に与えられた条件を代入すると

$M_A/M_B = 2 \times 5 = 10$

問 10 シンクロトロンに用いられる構成要素として, 正しい組合せはどれか。

- A 高周波加速空洞
- B 収束電磁石
- C 偏向電磁石
- D ディー電極

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) シンクロトロンは高エネルギー領域による相対論的効果のため, サイクロトロンで高いエネルギーの粒子加速ができなくなる問題を解決するために, 加速とともに磁場を変化させて同一軌道を周回させる加速器である。シンクロトロンの構成要素として, 加速電場を作り出す高周波加速空洞 (A), ビームを発散させないための収束電磁石 (四極電磁石とも呼ばれる) (B), 円形軌道を保つための偏向電磁石 (C), ビームの入射する入射部, ビームを取り出す出射部などがある。ディール電極 (D) はサイクロトロンで利用される。

問 11 加速器に関する次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。

- A サイクロトロンでは, 荷電粒子を角速度一定の条件で円軌道運動させ, 軌道半径を大きくしながら加速する。
- B シンクロトロンでは, 磁場を変化させて, 荷電粒子を一定の軌道で周回させて加速する。
- C 直線加速装置では, 直線軸上に電極を並べ, 荷電粒子が電極を通過する間に電圧を反転させ電極間で加速電場を生じるような高周波電場を用いる。
- D コッククロフト・ワルトン型加速装置では, 直流高電圧を多段の整流器とコンデンサを結合した回路で発生させ, これによる電場により, 荷電粒子を加速する。

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

〔解答〕

5

注) A, B, C, D のいずれも正しい。主な放射線発生装置の概要は次のとおりである。

主な放射線発生装置	概 要
コッククロフト・ワルトン型加速装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>●多段の整流器とコンデンサを結合した回路で直流高電圧を発生させ、これによる電場により、荷電粒子を加速する。</li> <li>●静電加速方式であり、電子もイオンも加速できる。</li> <li>●複合加速器の初段の加速器としても用いられる。</li> </ul>
ファン・デ・グラーフ型加速装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>●絶縁ベルトを回転させて高い静電圧を作り、その電位差を利用して加速する。</li> <li>●静電加速方式であり、電子もイオンも加速できる。</li> <li>●電場の安定性を上げてエネルギーを精密に変化させることができるため、核反応の精密実験などに用いられる。</li> <li>●タンデム型ファン・デ・グラーフ（負イオンを生成して高電圧に向かって加速し、高電圧部分の荷電変換部で電子をはぎ取り正イオンに変換し、再び加速する）は、ファン・デ・グラーフと比べて高いエネルギーを得ることができ、また、種々のイオンを用いるときに利用しやすく、加速器質量分析として用いられている。</li> </ul>
直線加速装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>●直線軸上に円筒状の電極を並べ、荷電粒子が電極を通過する間に電圧を反転させ電極間で加速電場を生じるような高周波電場を用いて加速する。</li> <li>●電子の場合には、加速軸上に進行波電場を発生させ、電子を波乗りのように電場に乘せて加速する。</li> </ul>
サイクロトロン	<ul style="list-style-type: none"> <li>●半円型（D型）をした2つのディー電極を向かい合わせ、加速粒子が電極間を通過するたびに加速電場が生じるよう高周波電場をかけて加速する。</li> <li>●荷電粒子は、ディー電極間で加速されるたびに軌道半径が大きくなり、最外周で偏向電極などを用いて加速粒子を取り出す。</li> <li>●サイクロトロンの原理で電子を加速するのは、高周波電圧の周波数が大きくなり過ぎて困難であり、また、質量の軽い電子は相対論的質量変化が比較的早い段階で見られ、加速されるよりも質量の変化の方が大きくなるため、原理的に電子の加速に適していない。</li> <li>●医療用短半減期核種の製造などにも用いられている。</li> </ul>
シンクロトロン	<ul style="list-style-type: none"> <li>●磁場を変化させて、荷電粒子を同一の軌道で周回させて加速する。</li> <li>●荷電粒子のエネルギーが上がると周回時間が短くなるので、それに応じて高周波の周波数を変化させ、高いエネルギーまで加速できる。</li> <li>●エネルギーの高い粒子の反応を必要とする素粒子実験などに用いられる。</li> <li>●陽子や重粒子を用いた治療にも用いられている。</li> </ul>
ベータトロン	<ul style="list-style-type: none"> <li>●磁場の時間的変化に伴い、磁場を取り巻く軌道に沿って発生する誘導起電力で加速する。</li> <li>●加速のための電極はない。</li> <li>●電子の加速に用いられる。</li> <li>●電磁誘導の原理を利用して加速電圧を発生させるため、質量が重いイオンの場合、電磁石のサイズや電流が莫大になり現実的ではなく、原理的にイオンの加速に適していない。</li> </ul>

問 12 次の核反応の式のうち、誤っているものはどれか。

- 1  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \text{p}$
- 2  $\text{d} + \text{d} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n}$
- 3  $\text{d} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \text{p}$
- 4  $\text{d} + \text{d} \rightarrow \text{p} + \text{t}$
- 5  $\text{d} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2\alpha$

〔解答〕

1

注) 核反応においては、核反応前後の陽子数（原子番号）の合計と質量数の合計が保存される。各核反応の式の入射粒子等を原子核で表し、核反応前後の原子番号の合計と質量数の合計を比べると次のとおりとなる。

- 1 : 誤  ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$   
核反応前：原子番号の合計 4，質量数の合計 6  
核反応後：原子番号の合計 3，質量数の合計 5  
となり一致しないので誤りである。
- 2 : 正  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$   
核反応前：原子番号の合計 2，質量数の合計 4  
核反応後：原子番号の合計 2，質量数の合計 4
- 3 : 正  ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$   
核反応前：原子番号の合計 3，質量数の合計 5  
核反応後：原子番号の合計 3，質量数の合計 5
- 4 : 正  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^3_2\text{H}$   
核反応前：原子番号の合計 2，質量数の合計 4  
核反応後：原子番号の合計 2，質量数の合計 4
- 5 : 正  ${}^2_1\text{H} + {}^6_3\text{Li} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$   
核反応前：原子番号の合計 4，質量数の合計 8  
核反応後：原子番号の合計 4，質量数の合計 8

問 13 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A W 値は気体の密度の増加とともに大きくなる。
- B W 値はイオン化ポテンシャルと等しい。
- C W 値は荷電粒子の電荷の平方根に比例して増加する。
- D ヘリウムの W 値はアルゴンの W 値より大きい。
- E 電子に対する空気の W 値は約 34 eV である。

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

〔解答〕

5

注) A : 誤 気体が荷電粒子により電離されるとき、イオン対（イオンと自由電子の対）が作られる。このイオン対を作る平均エネルギーを W 値という。荷電粒子が気体中でエネルギー

## 主任者 コーナー

ギー  $E$  を失ったときに作られるイオン対の数を  $N$  とすると、 $W$  値は、

$$W = \frac{E}{N}$$

で表される。 $W$  値は、気体の密度とは関係しない。

- B : 誤 イオン化ポテンシャルは原子などから電子を1つ取り去ってイオン化するのに必要なエネルギー。 $W$  値の場合、それに加え電子励起などにも使われるため  $W$  値はイオン化ポテンシャルよりも大きくなる。 $W$  値はイオン化ポテンシャルの2倍程度である。
- C : 誤  $W$  値は気体の種類に依存するが、放射線の種類やエネルギーにあまり依存しない。
- D : 正 一般に原子番号の大きい気体ほど  $W$  値は小さい傾向がある。電子に対するヘリウム及びアルゴンの  $W$  値はそれぞれ 41.3 eV 及び 26.4 eV、 $\alpha$  線に対するヘリウム及びアルゴンの  $W$  値はそれぞれ 42.7 eV 及び 26.4 eV である（アイソトープ手帳 11 版（日本アイソトープ協会）参照）。
- E : 正 電子に対する空気の  $W$  値は約 34 eV である。

問 14 水中における飛程が  $35 \mu\text{m}$  である  $\alpha$  線の空気中での飛程 [cm] に最も近い値は、次のうちどれか。ただし、空気の密度は  $0.0013 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  とする。

- 1 0.27    2 0.51    3 1.2    4 2.7    5 5.1

〔解答〕

4

注) 飛程を  $\text{g}/\text{cm}^2$  (物質の密度×距離) の単位で表すと、飛程は物質によらずほぼ同じ値となる。水中における飛程が  $35 \mu\text{m}$  であるので、水の密度を  $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$  とすると、空気中での飛程  $R$  [cm] は、空気の密度が  $1.3 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$  であることから

$$R = \frac{35 \times 10^{-4} [\text{cm}] \times 1.0 [\text{g}/\text{cm}^3]}{1.3 \times 10^{-3} [\text{g}/\text{cm}^3]} \doteq 2.7 [\text{cm}]$$

問 15  $5.3 \text{ MeV}$  の  $\alpha$  粒子が 2 気圧の空気中で停止するまでに生成するイオン対数として、正しい値は次のうちどれか。ただし、標準状態の空気の密度を  $0.0013 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  とする。

- 1  $3.0 \times 10^4$     2  $7.5 \times 10^4$     3  $1.5 \times 10^5$     4  $3.0 \times 10^5$     5  $7.5 \times 10^5$

〔解答〕

3

注) エネルギー  $E$  の荷電粒子が気体中でそのエネルギー  $E$  を失って止まったとき生じるイオン対の数を  $N$  とすると、 $W$  値 (イオン対 1 個を作る平均のエネルギー) は、

$$W = \frac{E}{N} \text{ より, } N = \frac{E}{W}$$

荷電粒子に対する空気の  $W$  値は約 34 eV なので (注:  $\alpha$  線に対する空気の  $W$  値は 35 eV である (アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会) 参照)),

$$\text{イオン対の数 } N = \frac{5.3 \times 10^6 [\text{eV}]}{34 [\text{eV}]} \doteq 1.5 \times 10^5$$

問 16 光子に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 線エネルギー転移係数は、二次電子の制動放射によるエネルギー損失に影響されない。
- B 線エネルギー転移係数は、線減弱係数より小さい。
- C 線エネルギー吸収係数は、線エネルギー転移係数より大きい。
- D 質量減弱係数は、線減弱係数と密度の積で表される。

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

〔解答〕

1

注) A：正 光子が物質との相互作用でエネルギーを電子に転移し、光子のエネルギーフルエンス  $\phi$  が減衰するとき、

$$-\frac{d\phi}{dx} = \mu_{\text{TR}}\phi$$

と表され、 $\mu_{\text{TR}}$  を線エネルギー転移係数という。

線エネルギー転移係数は、二次電子に転移されるエネルギーの割合を表す係数であり、二次電子がどのような過程でエネルギーを失うかについては無関係である。

B：正 線減弱係数は光子が何らかの相互作用を生じる割合であるのに対し、線エネルギー転移係数は線減弱係数に光子が電子に与えるエネルギーの割合を乗じた値である。なお、線エネルギー吸収係数は、線エネルギー転移係数から電子に与えられたエネルギーのうち制動放射で逃れる割合を減じた値である。

すなわち、

$$\text{線減弱係数} > \text{線エネルギー転移係数} > \text{線エネルギー吸収係数}$$

C：誤 光子は、物質との相互作用でエネルギーを電子に転移するが、その電子が物質中を走るとき物質中で制動放射を発生する。制動放射によりそのエネルギーは物質より逃げるので、これを差し引いたエネルギーが物質に吸収される。

線エネルギー吸収係数を  $\mu_{\text{en}}$ 、線エネルギー転移係数を  $\mu_{\text{TR}}$ 、制動放射で逃げる割合を  $G$  とすると、 $\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{TR}} \times (1 - G)$  と表せる。したがって、線エネルギー吸収係数が線エネルギー転移係数より大きくなることはない。

なお、光子のエネルギーが低い場合は制動放射で逃げるエネルギーは小さいので、 $\mu_{\text{en}}$  と  $\mu_{\text{TR}}$  はほぼ等しくなる。

D：誤 質量減弱係数（または質量減衰係数）は、線減弱係数（または線減衰係数）を密度で割った係数をいう。

すなわち、質量減弱係数を  $\mu_{\text{m}}$ 、線減弱係数  $\mu$ 、物質の密度を  $\rho$  とすると、

$$\mu_{\text{m}} = \frac{\mu}{\rho}$$

問 17 NaI(Tl)  $\gamma$  線スペクトロメータにより、エネルギー未知の  $\gamma$  線の波高分布スペクトルを測定したところ、全吸収ピークが 600 チャネルに、コンプトンエッジが 400 チャネルに観測された。この場合の  $\gamma$  線エネルギー [keV] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、このスペクトロメータの零点調整はなされている。

## 主任者 コーナー

1 320    2 511    3 662    4 835    5 1,170

〔解答〕

2

注) コンプトンエッジは、コンプトン電子の最大エネルギーに相当する。

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

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

コンプトン電子のエネルギー  $E_e$  は、

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

で与えられる。

ここで、 $m$  は電子の質量、 $c$  は光の速度、 $\theta$  は散乱された  $\gamma$  線の散乱方向の角度である。

コンプトン電子のエネルギー  $E_e$  が最大となるのは、 $\gamma$  線の散乱角  $\theta = 180^\circ$  ( $\cos\theta = -1$ ) のときであり、

$$\begin{aligned} E_{e\max} &= E_\gamma \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{2E_\gamma}{mc^2}} \right) \\ &= E_\gamma \left( 1 - \frac{mc^2}{mc^2 + 2E_\gamma} \right) \\ &= E_\gamma \left( \frac{2E_\gamma}{mc^2 + 2E_\gamma} \right) \\ &= \frac{2E_\gamma^2}{mc^2 + 2E_\gamma} \end{aligned}$$

全吸収ピークとコンプトンエッジのチャネルの比は、 $600 : 400 = 3 : 2$  であるので、

$$\text{全吸収ピークのエネルギー} (=E_\gamma) : E_{e\max} = E_\gamma : \frac{2E_\gamma^2}{mc^2 + 2E_\gamma} = 3 : 2$$

$$2 \times E_\gamma = \frac{3 \times 2E_\gamma^2}{mc^2 + 2E_\gamma}$$

$$mc^2 + 2E_\gamma = 3E_\gamma$$

$$E_\gamma = mc^2 = 511 \text{ [keV]}$$

問 18 コンプトン散乱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 断面積は原子番号にほぼ比例する。
- B 反跳電子のエネルギーは入射光子のエネルギーに等しくなることがある。
- C 散乱光子のエネルギーは入射光子のエネルギーに等しくなることがある。
- D 散乱光子と入射光子の波長の差は、入射光子の波長に逆比例する。

E 散乱光子と入射光子の波長の差は、散乱角によって定まる。

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

〔解答〕

3

注) A：正 コンプトン散乱は、光子と電子の散乱なので、その断面積は電子数に比例する。このため、コンプトン散乱の断面積は原子番号にほぼ比例する。

B：誤 入射光子のエネルギー  $E_\gamma$  に対するコンプトン散乱後の散乱光子のエネルギー  $E'_\gamma$ 、反跳電子（コンプトン電子）のエネルギー  $E_e$  は次式で表され、

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma$$

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

反跳電子のエネルギー  $E_e$  が最大となるのは、 $\gamma$ 線の散乱角  $\theta = 180^\circ$  ( $\cos\theta = -1$ ) のときであるが、このときにおいても散乱光子のエネルギー  $E'_\gamma$  分、反跳電子のエネルギーは入射光子のエネルギーよりも小さい。

C：正 入射光子のエネルギー  $E_\gamma$  に対するコンプトン散乱後の散乱光子のエネルギー  $E'_\gamma$  は、

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

であり、 $\theta = 0^\circ$  ( $\cos\theta = 1$ ) のとき  $E'_\gamma$  は最大で、 $E'_\gamma = E_\gamma$  となり、入射光子のエネルギーと等しくなる。

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

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

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

したがって、散乱光子と入射光子の波長の差は、入射光子の波長にはよらない。

E：正 注) D解説より、散乱光子と入射光子の波長の差は、散乱光子の散乱角  $\theta$  に依存する。

問 19 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 光電効果は、光子と束縛電子との相互作用により起こる。  
 B 光電効果は、光子と軌道電子との弾性衝突である。  
 C 光電効果に伴って、オージェ電子が放出されることがある。  
 D 光電効果の原子当たりの断面積は、原子番号の2乗に比例する。  
 E 光電効果の原子当たりの断面積は、光子エネルギーの増加とともに増加する。

- 1 AとB 2 AとC 3 BとD 4 CとE 5 DとE

〔解答〕

2

## 主任者 コーナー

- 注) A : 正 光電効果は、軌道電子が光子のエネルギーを吸収して飛び出す現象のことである。  
 B : 誤 光電効果は、光子が吸収される現象であり弾性衝突ではない。(2013年度問15と同じ)  
 C : 正 光電効果では、軌道電子が光子のエネルギーを吸収して飛び出すので、電子軌道に空席が生じ、特性X線と競合してオージェ電子が放出されることがある。  
 D : 誤 光電効果の原子断面積  $\tau$  は原子番号  $Z$  と入射光子のエネルギー  $E_\gamma$  に依存し、およそ  $\tau \propto Z^5 E_\gamma^{-3.5}$  という関係がある。  
 E : 誤 注) D解説より、原子断面積  $\tau$  は、およそ  $\tau \propto Z^5 E_\gamma^{-3.5}$  という関係があり、入射光子のエネルギーの増加とともに増加することはない。  
 なお、入射光子のエネルギーが軌道電子の結合エネルギーよりも低いと軌道電子を飛び出させることができないため、K軌道、L軌道などの軌道電子の結合エネルギーのところ光電効果の原子断面積がジャンプする(K吸収端、L吸収端など)。

問20 単位面積あたりの質量(面密度)の単位で与えられた半価層と等価なものは次のうちどれか。  
 ただし、質量減弱係数を  $\mu_m$  とする。

- 1  $0.368 \mu_m$
- 2  $\frac{0.368}{\mu_m}$
- 3  $0.693 \mu_m$
- 4  $\frac{0.693}{\mu_m}$
- 5  $2.718 \mu_m$

[解答]

4

注) 光子束密度  $\phi_0$  の減弱(減衰)は、単位面積あたりの質量(面密度)で与えられた物質の厚さを  $x$ 、入射光子束密度を  $\phi_0$ 、線減弱係数(または線減衰係数)を  $\mu_m$  とすると、次式で表される。

$$\phi = \phi_0 e^{-\mu_m x}$$

半価層  $X_{1/2}$  のとき、 $\phi = \frac{1}{2} \phi_0$  であるから

$$\phi = \phi_0 e^{-\mu_m X_{1/2}} = \frac{1}{2} \phi_0$$

$$\mu_m X_{1/2} = \ln 2$$

$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu_m} = \frac{0.693}{\mu_m}$$

問21 熱中性子の有効な検出法として正しいものの組合せは、次のうちどれか。

- A  $^{197}\text{Au}$  の放射化で生じた核種からの  $\gamma$  線を測定する。
- B  $^1\text{H}_2$  を計数ガスとして反跳で生じた陽子を測定する。
- C  $^3\text{He}$  との核反応で生じた陽子とトリトン ( $^3\text{H}$  原子核) を測定する。
- D  $^{10}\text{B}$  との核反応で生じた  $\alpha$  粒子と  $^7\text{Li}$  を測定する。

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

〔解答〕

1

注) 熱中性子に対する捕獲断面積が大きい反応が検出に利用される。

A：正  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$  反応により生成する  $^{198}\text{Au}(T_{1/2}=2.69 \text{ d})$  の  $\gamma$  線を検出する。

B：誤 熱中性子の平均エネルギーは室温で 0.025 eV であり、水素分子の結合解離エネルギー (4.5 eV) に比べ十分小さいため、反跳陽子を生じない。

C, D：正 それぞれの反応で生じた荷電粒子を比例計数管等で検出する。

問 22 中性子線に対して定義されるものとして、正しい組合せはどれか。

- A 飛程  
B カーマ  
C 照射線量  
D 吸収線量  
E 線エネルギー付与

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

〔解答〕

3

注) 飛程 (A) と線エネルギー付与 (E) は荷電粒子、照射線量 (C) は光子に対して定義されるため中性子線に対しては定義されない。一方、カーマ (B) は電荷を持たない放射線、吸収線量 (D) は任意の放射線に対して定義される。

問 23 中性子に関する次の記述のうち正しいものの組合せはどれか。

- A 原子核が光子を吸収すると中性子が放出されることがある。  
B  $^{252}\text{Cf}$  の自発核分裂により中性子が放出される。  
C DT 反応により放出される中性子の平均エネルギーは、 $^{241}\text{Am-Be}$  線源から放出される中性子の平均エネルギーよりも低い。  
D  $^{241}\text{Am-Be}$  線源から (p, n) 反応により中性子が放出される。

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

〔解答〕

1

注) A：正 高エネルギーの光子を吸収することにより光核反応が引き起こされ、中性子を放出する場合がある。

B：正  $^{252}\text{Cf}$  が自発核分裂することにより 2~3 個の中性子が放出される。

C：誤 DT 反応により放出される中性子の平均エネルギーは約 14 MeV であり、 $^{241}\text{Am-Be}$  線源では約 4 MeV である。

D：誤  $^{241}\text{Am-Be}$  線源では  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$  反応により中性子が放出される。

問 24 次のうち、エネルギーに換算して最も小さいものはどれか。

## 主任者 コーナー

- 1  $1 \times 10^{-10}$  g
- 2  $1 \times 10^{-4}$  W·h
- 3 1 cal
- 4  $1 \times 10^{10}$  u
- 5  $1 \times 10^{22}$  eV

〔解答〕

2

注) 全ての単位を J [ $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ ] に換算すると

$$1 \times 10^{-10} [\text{g}] = 1 \times 10^{-13} [\text{kg}] \times (3.0 \times 10^8 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}])^2 = 9,000 [\text{J}]$$

$$1 \times 10^{-4} [\text{W} \cdot \text{h}] = 1 \times 10^{-4} [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{h}] \times 3,600 [\text{s} \cdot \text{h}^{-1}] = 0.36 [\text{J}]$$

$$1 [\text{cal}] = 4.186 [\text{J}]$$

$$1 \times 10^{10} [\text{u}] = 1 \times 10^{10} [\text{u}] \times 1.661 \times 10^{-27} [\text{kg} \cdot \text{u}^{-1}] \times (3.0 \times 10^8 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}])^2 \div 1.49 [\text{J}]$$

$$1 \times 10^{22} [\text{eV}] = 1 \times 10^{22} [\text{eV}] \times 1.602 \times 10^{-19} [\text{J} \cdot \text{eV}^{-1}] = 1,602 [\text{J}]$$

ただし、光の速度を  $3.0 \times 10^8 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  として換算した。

よって、正解は「2」となる。

問 25 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 W 値 —  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
- 2 カーマ —  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- 3 質量阻止能 —  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}$
- 4 反応断面積 —  $\text{m}^{-2}$
- 5 質量エネルギー吸収係数 —  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

〔解答〕

5

注) 1 : 誤 W 値 — [J]

2 : 誤 カーマ — [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

3 : 誤 質量阻止能 — [ $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

4 : 誤 反応断面積 — [ $\text{m}^2$ ]

5 : 正

問 26  $\beta$ 壊変後 100%カスケードに  $\gamma$ 線を放出する核種の点線源がある。この点線源の放射能測定に、 $\beta$ 線検出器と  $\gamma$ 線検出器を用いた  $\beta\gamma$ 同時計数法を適用した。 $\beta$ 線検出器の計数率、 $\gamma$ 線検出器の計数率及び同時計数率の正味値が、それぞれ、60,000 cpm, 5,000 cpm, 3,000 cpm であるとき、この点線源に対する  $\beta$ 線検出器の計数効率として最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.005
- 2 0.04
- 3 0.08
- 4 0.4
- 5 0.6

〔解答〕

5

注) 点線源の放射能を A,  $\beta$ 線検出器及び  $\gamma$ 線検出器の計数効率をそれぞれ  $\epsilon_\beta$ ,  $\epsilon_\gamma$ ,  $\beta$ 線検出器,  $\gamma$ 線検出器及び同時計数の計数率をそれぞれ  $C_\beta$ ,  $C_\gamma$ ,  $C_c$  とすると

$$C_{\beta} = \varepsilon_{\beta} \times A \quad (1)$$

$$C_{\gamma} = \varepsilon_{\gamma} \times A \quad (2)$$

$$C_c = \varepsilon_{\beta} \times \varepsilon_{\gamma} \times A \quad (3)$$

式(1)×式(2)より

$$C_{\beta} \times C_{\gamma} = (\varepsilon_{\beta} \times \varepsilon_{\gamma} \times A) \times A \quad (4)$$

式(3)を式(4)に代入してAについて解くと

$$A = \frac{C_{\beta} \times C_{\gamma}}{C_c} \quad (5)$$

式(5)を式(1)に代入して $\varepsilon_{\beta}$ について解くと

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{C_c}{C_{\gamma}} = \frac{3,000}{5,000} = 0.6$$

問 27 直径 127 mm, 高さ 127 mm の NaI(Tl) 井戸型シンチレーション計数管の井戸中に測定試料を入れた場合, 511 keV の光子に対する計数効率率は 80% であった。ここに  $^{18}\text{F}$  線源を入れた場合,  $^{18}\text{F}$  の放射能に対する計数効率率 ( $\text{s}^{-1}/\text{Bq}$ ) の値 [%] はいくらか。次のうちから最も近いものを選び。なお,  $^{18}\text{F}$  は 3% が EC, 残りが  $\beta^+$  壊変をする。

- 1 77    2 80    3 86    4 93    5 96

〔解答〕

4

注)  $\beta^+$  壊変によって放出される陽電子が対消滅するとき, 反対方向に 2 本の 511 keV 光子を放出する。比較的大きな NaI(Tl) 井戸型シンチレーション計数管の井戸中に試料を入れた場合, 立体角  $4\pi$  ステラジアンに近い条件で測定できる。そのため 2 本の 511 keV 光子の少なくとも一方が計数される確率は, 全確率から 2 本とも計数されない確率を引いたものなので

$$1 - (0.2 \times 0.2) = 0.96 \text{ となる。}$$

$^{18}\text{F}$  の放射能に対する計数効率率 ( $\text{s}^{-1}/\text{Bq}$ ) は,  $^{18}\text{F}$  の 97% が  $\beta^+$  壊変を経由することを考慮して,  $0.97 \times 0.96 \doteq 0.93 \Rightarrow 93\%$  となる。

問 28 10 kBq の線源を, 分解時間  $200 \mu\text{s}$  の GM 計数管で測定すると, 計数率は 12 kcpm であった。この測定条件における数え落としの割合 [%] として最も近い値は, 次のうちどれか。

- 1 1    2 2    3 3    4 4    5 5

〔解答〕

4

注) 分解時間  $\tau$  の放射線計測器で得られた計数率を  $n$  とすると,  $n\tau$  の間, 放射線を計数しなかったことになり, 真の計数率  $n_0$  は

$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau} \text{ で表される。}$$

したがって, 数え落としの割合は

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = n\tau \text{ となる。}$$

## 主任者 コーナー

分解時間が  $200 \mu\text{s}$  の GM 計数管で、 $200 \text{ cps}$  ( $=12 \text{ kcpm}$ ) の計数率が得られているとき、検出器が計測しない (数え落とす) 割合 [%] は  
(計数率)  $\times$  (分解時間)  $\times 100 = 200 [\text{counts/s}] \times 200 \times 10^{-6} [\text{s}] \times 100$   
 $= 4 [\%]$

問 29 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A シンチレーション検出器の出力パルス波高は、光電子増倍管の印加電圧に大きく依存する。
- B イオン再結合が無視できるとき、電離箱の出力電流は印加電圧にほとんど依存しない。
- C 比例計数管の出力パルス波高は、印加電圧にほとんど依存しない。
- D Ge 検出器の出力パルス波高は、印加電圧に大きく依存する。
- E 比例計数管のプラトー中央付近では、計数率は印加電圧にほとんど依存しない。

- 1 ABC のみ    2 ABE のみ    3 ADE のみ    4 BCD のみ    5 CDE のみ

〔解答〕

2

注) A, B, E : 正

C : 誤    比例計数管は電子なだれによるガス増幅作用が、印加電圧に比例する領域で動作させる。

D : 誤    Ge 検出器は電離箱と同様に一次電離イオンを電極に集めるため、その出力パルス波高は電圧にほとんど依存しない。

問 30  $1 \text{ Gy}$  の吸収線量に対し、最も高い等価線量を与える放射線は次のうちどれか。

- 1  $\alpha$  線
- 2  $\beta$  線
- 3  $\gamma$  線
- 4  $\mu$  粒子
- 5 熱中性子

〔解答〕

1

注) 等価線量は、吸収線量に放射線加重係数を乗じたものである。各放射線に対する放射線加重係数は次のとおりである (放射線加重係数は従来放射線荷重係数と呼ばれていたが、ICRP 2007 年勧告より放射線加重係数と訳されるようになった)。

$\alpha$  線 : 20

熱中性子 : 5 (ICRP 1990 年勧告, ICRP 2007 年勧告では中性子の放射線加重係数は連続関数を用いられているが熱中性子の領域は 3 以下である。)

$\beta$  線,  $\gamma$  線,  $\mu$  粒子 : 1

よって、正解は「1」の  $\alpha$  線である。

## 平成 27 年度 (第 60 回) 第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例 (2)

(試験年月日 平成 27 年 8 月 19 日, 20 日)

## 化 学

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 次のうち、放射性元素 (安定同位体のない元素) のみの組合せはどれか。

- A Ac, Am, Co  
 B Cs, Np, Pa  
 C Pm, Po, Pu  
 D Ra, Rn, Sr  
 E Tc, Th, U

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

[解答]

4

注) ・放射線核種のみ (安定同位体のない) 元素 (人工放射性元素)

原子番号  $Z$  が 43 番の Tc, 61 番の Pm 及び 93 番以降の超ウラン元素

・  $Z > 84$  (Po) 以上の原子核はすべて不安定な核種

- A : 誤    Co の安定同位体は  $^{59}\text{Co}$   
 B : 誤    Cs の安定同位体は  $^{133}\text{Cs}$   
 C : 正  
 D : 誤    Sr の安定同位体は  $^{88}\text{Sr}$  (ほかにも複数あり)  
 E : 正

問 2 放射能で等量の  $^{137}\text{Cs}$  (半減期 30 年) と  $^{134}\text{Cs}$  (半減期 2.0 年) がある。15 年後の  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  の放射能比として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 64 : 1    2 91 : 1    3 128 : 1    4 181 : 1    5 256 : 1

[解答]

3

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。

## 主任者 コーナー

注)  $N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$  の式を使用する。

$^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  について、 $N_0$  が等しいので

$$^{137}\text{Cs} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{15/30} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{0.5}$$

$$^{134}\text{Cs} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{15/2} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{7.5}$$

$$\frac{^{137}\text{Cs}}{^{134}\text{Cs}} = \frac{N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{0.5}}{N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{7.5}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{(0.5-7.5)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{-7} = 2^7 = 128$$

∴ 128 : 1

問3 熱中性子による  $^{235}\text{U}$  の核分裂で、累積収率が1%以上で生成する核種の組合せは次のうちどれか。

A  $^{77}\text{As}$

B  $^{90}\text{Sr}$

C  $^{111}\text{Ag}$

D  $^{133}\text{Xe}$

E  $^{153}\text{Eu}$

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

〔解答〕

3

注) 熱中性子による  $^{235}\text{U}$  の核分裂で生成する核種の核分裂収率は、質量数 95 と 138 にピークがあり、118 に谷間のあるかたちとなる。

それぞれの核種の収率は、

A :  $^{77}\text{As}$  (0.00796%) , B :  $^{90}\text{Sr}$  (5.78%) , C :  $^{111}\text{Ag}$  (0.0174%) , D :  $^{133}\text{Xe}$  (6.70%) ,

E :  $^{153}\text{Eu}$  (0.0149%)

問4 次の放射性核種のうち、 $\beta^-$  壊変しない核種はどれか。

1  $^{22}\text{Na}$     2  $^{60}\text{Co}$     3  $^{99}\text{Mo}$     4  $^{137}\text{Cs}$     5  $^{192}\text{Ir}$

〔解答〕

1

注) 1 :  $^{22}\text{Na}$  は  $\beta^+$  壊変と EC ( $^{24}\text{Na}$  は  $\beta^-$  壊変)

2~5 :  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  は  $\beta^-$  壊変

(アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))

問5 以下の核反応のうち、PET (陽電子放射断層撮影) 用核種の製造に用いられるものはどれか。

A  $^{14}\text{N}(d, n)$

B  $^{14}\text{N}(p, \alpha)$

C  $^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha)$

D  $^{18}\text{O}(\text{d}, \text{n})$

- 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:  $^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{15}\text{O}$      $^{15}\text{O}$  は陽電子放出核種

B:  $^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{11}\text{C}$      $^{11}\text{C}$  は陽電子放出核種

C:  $^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{13}\text{N}$      $^{13}\text{N}$  は陽電子放出核種

D: 陽電子放出核種  $^{18}\text{F}$  の製造は,  $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$

問6 無担体の  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{45}\text{Ca}$  について 1 モル当たりの放射能 [ $\text{Bq}\cdot\text{mol}^{-1}$ ] の低い順に正しく並んでいるのはどれか。

1  $^{35}\text{S} < ^{32}\text{P} < ^{45}\text{Ca} < ^{14}\text{C} < ^3\text{H}$

2  $^3\text{H} < ^{35}\text{S} < ^{14}\text{C} < ^{45}\text{Ca} < ^{32}\text{P}$

3  $^{14}\text{C} < ^{35}\text{S} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H} < ^{32}\text{P}$

4  $^{14}\text{C} < ^3\text{H} < ^{35}\text{S} < ^{45}\text{Ca} < ^{32}\text{P}$

5  $^{14}\text{C} < ^3\text{H} < ^{45}\text{Ca} < ^{35}\text{S} < ^{32}\text{P}$

〔解答〕

5

注) 放射能:  $A$ , 原子数:  $N$ , 壊変定数:  $\lambda$  とすると

$$A = \lambda N = (0.693/\text{半減期}) \times N \text{ より}$$

$$1 \text{ モル当たりの放射能は, } A = (0.693/\text{半減期}) \times 6.02 \times 10^{23}$$

∴ 半減期が長い ⇒ 放射能が低い となる

それぞれの核種の半減期は,

$^3\text{H}$ : 12.32 年,  $^{14}\text{C}$ :  $5.70 \times 10^3$  年,  $^{32}\text{P}$ : 14.263 日,  $^{35}\text{S}$ : 87.51 日,  $^{45}\text{Ca}$ : 162.67 日

(アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))

問7 1.0 Bq の  $^{90}\text{Sr}$  (半減期 28.8 年:  $9.1 \times 10^8$  秒) を含むストロンチウム水溶液 100 mL (ストロンチウム濃度  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) がある。全ストロンチウムに対する  $^{90}\text{Sr}$  の原子数比として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、ストロンチウムの原子量は 87.6 とする。

- 1  $1.1 \times 10^{-11}$     2  $2.1 \times 10^{-11}$     3  $2.0 \times 10^{-10}$     4  $1.1 \times 10^{-9}$     5  $1.9 \times 10^{-9}$

〔解答〕

5

注) 放射能:  $A$ , 原子数:  $N$ , 壊変定数:  $\lambda$  とすると

$$A = \lambda N = (0.693/\text{半減期}) \times N \text{ より}$$

$$1.0 = (0.693/(9.1 \times 10^8)) \times N$$

$$N = ((9.1 \times 10^8)/0.693) \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$^{90}\text{Sr}$  の質量は①をアボガドロ数で除し, 原子量を乗じて得られる。

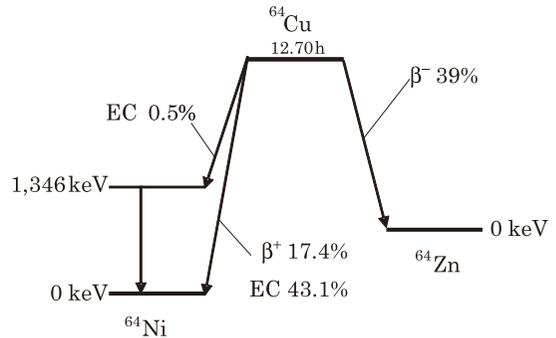
$$((9.1 \times 10^8)/0.693) \div (6.02 \times 10^{23}) \times 87.6 \div 191 \times 10^{-15} [\text{g}]$$

## 主任者 コーナー

Sr 水溶液 100 mL (濃度 1.0 mg/L) に存在する全 Sr の質量は  
 $1.0 \text{ [mg/L]} \times (100 \text{ [mL]} / 1,000 \text{ [mL]}) = 0.1 \text{ [mg]} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ [g]}$   
 前 Sr に対する  $^{90}\text{Sr}$  の原子数比は,  
 $(191 \times 10^{-15}) / (1.0 \times 10^{-4}) = 191 \times 10^{-11} \approx 1.9 \times 10^{-9}$

問 8  $^{64}\text{Cu}$  の壊変図式を示す。次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A  $\beta^-$  壊変に伴って 1,346 keV の  $\gamma$  線が放出される。
- B EC 壊変に伴って Ni の特性 X 線が放出される。
- C 単位時間に生成する原子核の数は、 $^{64}\text{Ni}$  に比べて  $^{64}\text{Zn}$  のほうが少ない。
- D  $\gamma$  線スペクトルに 511 keV のピークは現れない。



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

〔解答〕

3

- 注) A : 誤  $\beta^-$  壊変では、 $\gamma$  線を放出しない。  
 B : 正 EC 壊変に伴い 7.43 keV の特性 X 線が放出される。  
 C : 正 生成する原子核の割合は、 $^{64}\text{Ni} : ^{64}\text{Zn} = 61 : 39$   
 D : 誤 陽電子 ( $\beta^+$ ) 放出により消滅放射線 (511 keV) が生成され、 $\gamma$  線スペクトルに 511 keV のピークが現れる。

問 9  $\gamma$  線の校正用線源として用いられる次の放射性同位元素のうち、放出される  $\gamma$  線のエネルギーの低い順に正しく並んでいるものはどれか。

- 1  $^{51}\text{Cr} < ^{54}\text{Mn} < ^{137}\text{Cs} < ^{241}\text{Am}$
- 2  $^{54}\text{Mn} < ^{137}\text{Cs} < ^{241}\text{Am} < ^{51}\text{Cr}$
- 3  $^{137}\text{Cs} < ^{51}\text{Cr} < ^{54}\text{Mn} < ^{241}\text{Am}$
- 4  $^{51}\text{Cr} < ^{241}\text{Am} < ^{54}\text{Mn} < ^{137}\text{Cs}$
- 5  $^{241}\text{Am} < ^{51}\text{Cr} < ^{137}\text{Cs} < ^{54}\text{Mn}$

〔解答〕

5

- 注) それぞれの主な  $\gamma$  線のエネルギーは次のとおりである。  
 $^{51}\text{Cr} : 320 \text{ keV}$ ,  $^{54}\text{Mn} : 835 \text{ keV}$ ,  $^{137}\text{Cs} : 662 \text{ keV}$ ,  $^{241}\text{Am} : 59.5 \text{ keV}$   
 (アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))

問 10 NaI(Tl) シンチレーション検出器で測定することが適切な核種の組合せはどれか。

- A  $^{24}\text{Na}$

- B  $^{45}\text{Ca}$   
 C  $^{65}\text{Zn}$   
 D  $^{133}\text{Ba}$

- 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) NaI(Tl)シンチレーション検出器は、 $\gamma$ 線の検出に適用される ( $\beta^-$ 線は検出しない)。

- A : 正     $^{24}\text{Na}$  は  $\gamma$  線を放出する ( $\beta^-$  線も放出する)。  
 B : 誤     $^{45}\text{Ca}$  は  $\beta^-$  線のみを放出する (純  $\beta$  線放出核種)。  
 C : 正     $^{65}\text{Zn}$  は  $\gamma$  線を放出する ( $\beta^+$  線も放出する)。  
 D : 正     $^{133}\text{Ba}$  は  $\gamma$  線を放出する。  
 (アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))

問 11 ある短寿命核種 (半減期  $T$  分) を加速器で製造するのに、 $3T$  分間照射して  $2T$  分間冷却したときの放射能は、 $2T$  分間照射して  $T$  分間冷却したときの放射能の何倍か。

- 1 0.44    2 0.50    3 0.58    4 0.85    5 1.17

〔解答〕

3

注) 加速器によって放射化した場合に生成する放射能  $A$  は、次式で表される。

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

$f$  : 照射粒子フルエンス率

$\sigma$  : 放射化断面積

$\lambda$  : 生成核の壊変定数

$T$  : 生成核の半減期

$t$  : 照射時間

$S$  : 飽和係数

照射停止後、時間  $d$  が経過した後の放射能  $A_d$  は、

$$A_d = A \times e^{-\lambda d} = A \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{T}}$$

よって、

$$\frac{A}{A_d} = \frac{\left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{3T}{T}}\right) \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2T}{T}}}{\left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2T}{T}}\right) \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T}{T}}} = \frac{\left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^3\right) \times \left(\frac{1}{2}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2\right) \times \left(\frac{1}{2}\right)^1} = \frac{7}{12} \approx 0.58$$

問 12  $^{252}\text{Cf}$  は  $\alpha$  壊変と自発核分裂する。自発核分裂の部分半減期は 86 年 ( $2.7 \times 10^9$  秒) であり、1 核分裂当たり平均 3.8 個の中性子が放出される。1.0 g の  $^{252}\text{Cf}$  から毎秒放出される中性子数として、最も近い値はどれか。

## 主任者 コーナー

- 1  $1.2 \times 10^{11}$     2  $2.3 \times 10^{12}$     3  $1.2 \times 10^{13}$     4  $3.6 \times 10^{13}$     5  $3.6 \times 10^{14}$

〔解答〕

2

注) 1 核分裂当たり 3.8 個の中性子が放出されるので、

$A = N\lambda$  から

$$\text{中性子数} = 3.8 \times \frac{1.0}{252} \times 6.02 \times 10^{23} \times \frac{\ln 2}{2.7 \times 10^9} \doteq 2.3 \times 10^{12}$$

問 13 以下の放射性同位体とその同位体担体  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  を含む硝酸酸性水溶液 A~E がある。アンモニア水を加えると沈殿が生じ、さらにアンモニア水を加えるとその沈殿が溶解するものはどれか。

- A  $[^{26}\text{Al}]$  硝酸アルミニウム水溶液  
 B  $[^{59}\text{Fe}]$  硝酸鉄(Ⅲ)水溶液  
 C  $[^{64}\text{Cu}]$  硝酸銅(Ⅱ)水溶液  
 D  $[^{65}\text{Zn}]$  硝酸亜鉛水溶液  
 E  $[^{110\text{m}}\text{Ag}]$  硝酸銀水溶液

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

〔解答〕

5

注) 水酸化物イオンによる沈殿生成の問題である。

基本的には、塩基性になれば、アルカリ金属とアルカリ土類金属以外の金属イオンは水酸化物沈殿となる。また、アンモニア水を過剰に加えるとアンモニア分子が配位結合して錯イオンとなり沈殿が溶ける。

	少量	過剰
A : Al	$\text{Al}(\text{OH})_3$	←
B : Fe	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	←
C : Cu	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$
D : Zn	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	$[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$
E : Ag	$\text{Ag}_2\text{O}$	$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ <u><math>\text{AgOH}</math> の沈殿ではない</u>

問 14 200 kBq の  $^{133}\text{Ba}$  を含む  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  塩化バリウム水溶液 100 mL から  $^{133}\text{Ba}$  を除去するために、希硫酸を加えてバリウムイオンを硫酸バリウム ( $\text{BaSO}_4$ ) として沈殿させた。これをろ別乾燥して得られる  $[^{133}\text{Ba}]$  硫酸バリウムの比放射能  $[\text{kBq} \cdot \text{g}^{-1}]$  に最も近い値は、次のうちどれか。ただし  $\text{BaSO}_4$  の式量を 233 とする。

- 1 51    2 86    3 170    4 200    5 420

〔解答〕

2

注)  $\text{BaCl}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{BaSO}_4 + 2\text{HCl}$

$\text{BaCl}_2$  と  $\text{BaSO}_4$  は同モル数なので、

硫酸バリウム沈殿の重さは、 $0.1 [\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}] \times 100/1,000 [\text{L}] \times 233 = 2.33 [\text{g}]$

比放射能は、 $200/2.33 \doteq 85.84 [\text{kBq} \cdot \text{g}^{-1}] \doteq 86 [\text{kBq} \cdot \text{g}^{-1}]$

問 15  $[^{110m}\text{Ag}]$ 硝酸銀水溶液がある。これに次の溶液を加えると放射性の沈殿が生成するのはどれか。ただし、溶液の濃度はすべて  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  とする。

- A 塩酸
- B 塩化ナトリウム水溶液
- C 硫化ナトリウム水溶液
- 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

- 注) A :  $\text{HCl} + \text{AgNO}_3 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{AgCl} \downarrow$   
 B :  $\text{NaCl} + \text{AgNO}_3 \rightarrow \text{NaNO}_3 + \text{AgCl} \downarrow$   
 C :  $\text{Na}_2\text{S} + 2\text{AgNO}_3 \rightarrow 2\text{NaNO}_3 + \text{Ag}_2\text{S} \downarrow$   
 D :  $2\text{NaOH} + 2\text{AgNO}_3 \rightarrow 2\text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{Ag}_2\text{O} \downarrow$

問 16 次の物質に希硫酸を加えたときに放射性の気体が発生するのはどれか。

- A  $\text{K}_2^{35}\text{SO}_4$
- B  $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$
- C  $\text{K}^{36}\text{Cl}$
- D  $\text{Fe}^{35}\text{S}$

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

〔解答〕

5

- 注) A :  $\text{K}_2^{35}\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{KH}^{35}\text{SO}_4$   
 B :  $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \downarrow + ^{14}\text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$   
 最初は、 $\text{CO}_2$  が発生するが、水に不溶の  $\text{CaSO}_4$  が炭酸カルシウムを被うので反応がおさまる。  
 C :  $\text{K}^{36}\text{Cl} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{KHSO}_4 + \text{H}^{36}\text{Cl}$     加熱が必要  
 D :  $\text{Fe}^{35}\text{S} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2^{35}\text{S} \uparrow$

問 17  $^{36}\text{Cl}$  で標識された塩化ナトリウムを、 $^3\text{H}$  (トリチウム) を含む蒸留水に溶解し、図のような装置で、白金電極を用いて電気分解を行った。各電極で主に起こる現象として、正しいものの組合せはどれか。

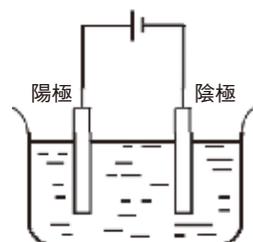
- A 陽極で  $^{36}\text{Cl}$  を含む塩化水素が発生した。
- B 陽極で  $^{36}\text{Cl}$  を含む塩素が発生した。
- C 陰極付近の液が強い酸性になった。
- D 陰極で  $^3\text{H}$  を含む水素が発生した。

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

〔解答〕

5

- 注) 陽極での反応



## 主任者 コーナー



塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) は、酸化されて塩素ガスになる (B)。

陰極での反応



$\text{Na}^+$  は還元されて金属 Na になる (D)。

問 18 イオン交換樹脂の利用に関する正しい記述は次のうちどれか。

- A 強塩基性陰イオン交換樹脂では、 $^{36}\text{Cl}^-$  が  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  より先に溶離する。
- B 弱酸性陽イオン交換樹脂では、樹脂の  $-\text{SO}_3^-$  基に陽イオンが吸着する。
- C 強塩基性陰イオン交換樹脂により、塩酸濃度を  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  から  $0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  まで変化させながら  $^{59}\text{Fe}(\text{III})$  と  $^{65}\text{Zn}(\text{II})$  のクロロ錯体を分離する場合、 $^{59}\text{Fe}(\text{III})$  の方が  $^{65}\text{Zn}(\text{II})$  より先に溶離する。
- D 強酸性陽イオン交換樹脂では、 $^{45}\text{Ca}^{2+}$  が  $^{42}\text{K}^+$  より先に溶離する。

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

〔解答〕

2

注) 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 ( $-\text{SO}_3\text{H}$ )  
 $\text{H}^+ < \text{Na}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}^+ \ll \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$   
 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。  
 (D: 誤)
2. 弱酸性陽イオン交換樹脂    官能基は、カルボキシル基 ( $-\text{COOH}$ )  
 $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{H}^+$   
 (B: スルホン酸基なので誤)
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 ( $-\text{NR}_3$ )  
 $\text{OH}^- < \text{HSiO}_3^- < \text{HCO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{PO}_4^{3-}$   
 (A: 正)
4. 弱塩基性陰イオン交換樹脂    官能基は、アミノ基 ( $-\text{NH}_2$ )  
 $\text{HCO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{OH}^-$   
 クロロ錯体形成の順位  
 $\text{Ni}^{2+} < \text{Mn}^{2+} < \text{Co}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Zn}^{2+}$   
 (C: 正)

問 19 ある有機化合物を溶媒抽出する場合、放射性化合物の有機相中の濃度が水相の濃度の 10 倍であった。

この化合物の放射能が 100 MBq であるとき、その 95 MBq が有機相に抽出された。このとき、有機相 (o) と水相 (w) の容積比 ( $V_o/V_w$ ) として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 0.5    2 0.8    3 1.5    4 1.9    5 2.5

〔解答〕

4

注) 有機相と水相の濃度と容積を、それぞれ  $C_o$ ,  $V_o$ ,  $C_w$ ,  $V_w$  とする。

$$C_o = 10 \times C_w$$

$$C_o \times V_o = 95 \text{ [MBq]}$$

$$C_w \times V_w = 100 - 95 = 5 \text{ [MBq]} \text{ となるので,}$$

$$V_o/V_w = (95/C_o)/(5/C_w) = (95/5) \times (C_w/C_o) = (95/5) \times (1/10) = 1.9$$

問 20  $^{35}\text{S}$  標識メチオニンを含むアミノ酸混合溶液試料がある。この溶液を二等分して、それぞれ試料 A, B とする。

非標識メチオニンを試料 A に 25 mg, 試料 B に 50 mg をそれぞれ加え、十分に混合した。その後、それらからメチオニンの一部を取り出し、比放射能を測定したところ、試料 A では  $120 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ , 試料 B では  $80 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$  であった。最初のアミノ酸混合溶液試料中に含まれていた  $^{35}\text{S}$  標識メチオニンの量 [mg] として最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 10    2 20    3 30    4 40    5 50

〔解答〕

5

注) 2 等分した試料 A, B それぞれに含まれる  $^{35}\text{S}$  標識メチオニンの放射能と重量を  $x, y$  とする。

非標識メチオニンを混合した後の比放射能は、それぞれ次式で表される。

$$\text{試料 A : } x/(y+25) = 120$$

$$\text{試料 B : } x/(y+50) = 80$$

両式から、 $y=25 \text{ [mg]}$  が求まるので、最初の量は  $50 \text{ [mg]}$  となる。

問 21 中性子放射化分析法に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 アクチバブルトレーサーの検出にも用いられる。
- 2 試料をポリ塩化ビニル製容器に入れて中性子照射する。
- 3 熱中性子による放射化では、試料をカドミウム箔に包んで照射する。
- 4 機器中性子放射化分析 INAA では、中性子フルエンス率を一定に保つ必要がある。
- 5 放射化学的中性子放射化分析 RNAA では、照射後の化学分離における回収率は 100% である必要がある。

〔解答〕

1

注) 1 : 正    アクチバブルトレーサーとは放射化することが可能なトレーサーのことであり、①放射化されやすいこと、②それが利用圏内に存在しないこと、③追跡したい対象物と挙動が類似していることなどの条件を備えた非放射性同位元素のことである。この条件を満たす元素として、La, In, Eu, Dy, Ho 及び Ir などがある。

2 : 誤    照射時間が短い場合はポリエチレン袋やポリエチレン管に封入する。長時間照射の場合は石英製アンプルに封入する。ハロゲン元素は照射中に揮散しやすく試料を汚染する可能性がある。

3 : 誤    カドミウムの熱中性子吸収断面積は非常に大きいため、熱中性子による放射化を相対的に抑制する。熱外中性子による放射化にはこれを利用する場合がある。

4 : 誤

## 主任者 コーナー

- 5 : 誤 RNAA 法では、照射後、化学分離前に一定量の担体を加えることにより目的元素の回収率を把握することができる。そのため、回収率は必ずしも 100% である必要はない。回収率を求める方法として、重量法が一般的であるが、その他再放射化法や放射性トレーサー法もある。

問 22 [ $^{110m}\text{Ag}$ ]硝酸銀水溶液を用いた水溶液中の塩化物イオンの放射滴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 無担体  $^{110m}\text{Ag}$  が必要である。  
B 塩化銀沈殿の生成反応を利用する。  
C 滴定の終点以降は、滴定液の滴下に伴って、溶液中の放射能濃度が上昇する。  
D  $\text{ClO}_4^-$  として存在している塩素は、化学形を変えない限り、定量できない。  
E  $\text{Br}^-$  が含まれていても塩素の分析値にはまったく影響しない。
- 1 ABE のみ    2 ACD のみ    3 ADE のみ    4 BCD のみ    5 BCE のみ

〔解答〕

4

- 注) A : 誤  $^{110m}\text{Ag}$  の放射能 (Bq) から計算される重量 (g) は極めて微量である。そのため、 $^{110m}\text{Ag}$  は必ずしも無担体である必要はない。
- B : 正 塩化物イオンは硝酸銀と反応して塩化銀の沈殿物を生成する。  
$$\text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl} \downarrow$$
- C : 正 塩化物イオンが塩化銀として沈殿しつくと、溶液中に  $^{110m}\text{Ag}$  が残留するため放射能濃度は上昇する。
- D : 正
- E : 誤 本滴定法は臭素イオンやヨウ素イオンなどの妨害イオンが無視できる場合に適用できる。無視できない場合は、正の誤差を与える要因となる。

問 23 放射性同位元素 (RI) と担体に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 (n,  $\gamma$ ) 反応は無担体 RI の製造に適した核反応である。  
2 ラジオコロイドは無担体 RI の溶液中には生成しない。  
3 同位体担体を加えることで比放射能を上げることができる。  
4 放射性核種を担体として利用することは不可能である。  
5 スカベンジャーは目的としない RI を沈殿として除去するために加える。

〔解答〕

5

- 注) 1 : 誤 無担体 RI の製造には、(n, p), (p, n) 及び (d, 2n) のように、核反応の標的と異なる原子番号の RI を生成する反応を利用する。
- 2 : 誤 ラジオコロイドとは、溶液中のコロイド状物質に RI が付着したものである。コロイド状物質は液性が中性若しくはアルカリ性で形成されやすく、それに伴い共存する放射性物質がこれに吸着する。ラジオコロイドは放射性廃液の処理のときに特に問題となる。
- 3 : 誤 ある元素又はその化合物の単位重量あたりに含まれる放射性同位元素の濃度 (放射能)

が比放射能である。単位は Bq/g などで示される。放射性同位元素を含まない同位体担体を加えると比放射能は下がることになる。

4：誤

5：正 スカベンジャーとは溶液中から不必要な元素を除去するために加える担体のことである。一方、目的元素が除かれるのを防ぐために加える担体を保持担体という。

問 24 次の記述のうち、 $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  の両方に正しいものの組合せはどれか。

A 高層大気中で宇宙線によって生成している。

B 化石燃料の年代測定に用いられる。

C 熱中性子を利用して製造される。

D 有機化合物の標識に用いられる。

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

〔解答〕

3

注) A：正  $^3\text{H}$  は高層大気中で次のような核反応により生成している。



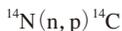
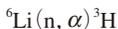
n, p は一次宇宙線から生成した二次宇宙線であり、窒素や酸素は大気構成成分である。このほかに大地に含まれる U や Li からの生成も考えられるが、その量は宇宙線生成物に比較すると無視できる。

一方、 $^{14}\text{C}$  は二次宇宙線と窒素との核反応により生成している。



B：誤  $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  の半減期は、それぞれ 12.3 年と  $5.7 \times 10^3$  年である。化石燃料はこれらの半減期に比較し非常に長い年月を経て形成されることから、 $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  は化石燃料中には含まれていない。そのため、化石燃料の年代測定には用いられない。

C：正  $^3\text{H}$  と  $^{14}\text{C}$  は、熱中性子領域中で例えば次のような反応を利用して製造される。



D：正

問 25 140 万年前に生成したトリウム鉱物（トリウムとして 1.00 mol）中のヘリウムの総量 [mol] 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  $1.40 \times 10^{10}$  年であり、系列核種については永続平衡が成立し、生成したヘリウムはすべて鉱物中に捕捉されているものとする。

1  $6.9 \times 10^{-7}$     2  $2.5 \times 10^{-6}$     3  $6.9 \times 10^{-5}$     4  $4.2 \times 10^{-4}$     5  $2.5 \times 10^{-3}$

〔解答〕

4

注) ヘリウムの総量 (mol) を  $[^4\text{He}]$ 、トリウムの総量 (mol) とその壊変定数をそれぞれ  $[^{232}\text{Th}]$  と  $\lambda_{232}$ 、経過時間 (年) を  $t$  とする。トリウムの系列核種に永続平衡が成立し、かつ生成したヘリウムは全て鉱物中に捕捉されている場合、 $[^4\text{He}]$  と  $[^{232}\text{Th}]$  は次のような関係にある。

## 主任者 コーナー

$$[{}^4\text{He}] = 6 \times [{}^{232}\text{Th}] \times \{\exp(\lambda_{232} \times t) - 1\}$$

これに、 $[{}^{232}\text{Th}] = 1.00 \text{ mol}$  と、 $\lambda_{232} = \ln 2 / (1.4 \times 10^{10})$ 、 $t = 1.4 \times 10^6$  を代入して計算すると、

$$[{}^4\text{He}] = 4.159 \times 10^{-4} \doteq 4.2 \times 10^{-4} \text{ となる。}$$

ちなみに、U と Th の壊変系列において生じる  $\alpha$  粒子 ( ${}^4\text{He}$ ) を利用する年代測定法として (U, Th)/He 法が知られている。(U, Th)/He 年代  $t$  は次式により求められる。

$$[{}^4\text{He}] = 8 \times [{}^{238}\text{U}] \times \{\exp(\lambda_{238} \times t) - 1\} + 7 \times [{}^{235}\text{U}] \times \{\exp(\lambda_{235} \times t) - 1\} + 6 \times [{}^{232}\text{Th}] \times \{\exp(\lambda_{232} \times t) - 1\}$$

$[{}^{238}\text{U}]$  と  $[{}^{235}\text{U}]$ 、及び  $\lambda_{238}$  と  $\lambda_{235}$  は、それぞれ  ${}^{238}\text{U}$  と  ${}^{235}\text{U}$  の総量と壊変定数である。

${}^4\text{He}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$  及び  ${}^{232}\text{Th}$  を定量することにより  $t$  を算出する。

問 26 環境中の放射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 トリチウム (T) の雨水中での主な存在形態は  $\text{T}_2\text{O}$  である。
- B  ${}^{14}\text{C}$  は宇宙線が地表に到達することで生成する。
- C  ${}^{85}\text{Kr}$  の主な発生源はウランの核分裂である。
- D  ${}^{99}\text{Tc}$  は環境水中では主に  $\text{TcO}_4^-$  として存在する。

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    主な存在形態は HTO である。ちなみに、大気中の T の存在形態には、HTO のほかに HT や  $\text{CH}_3\text{T}$  などがある。

B : 誤     ${}^{14}\text{C}$  は大気圏内で  ${}^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p}){}^{14}\text{C}$  反応により定常的に生成されている。誘導放射性核種の 1 つである。なお、 ${}^{14}\text{C}$  は人為的にも生成され環境中に放出されていることから、環境中での  ${}^{14}\text{C}$  の起源には天然起源と人為起源がある。T も同様に 2 つの起源がある。

C : 正

D : 正

問 27  ${}^{237}\text{Np}$  に始まる壊変系列に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A Np は、アクチノイドに属する。
- B 壊変系列に属する核種は、質量数を 4 で除した際には余りが 1 となる。
- C 壊変系列には、 ${}^{233}\text{U}$  が含まれる。
- D 最終壊変生成物は、鉛の同位体である。

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

〔解答〕

1

注) A : 正    アクチノイドは原子番号 89 のアクチニウム (Ac) から 103 のローレンシウム (Lr) に至る 15 元素の総称で、Np はそのうちの 1 つ。いずれも放射性元素である。

B : 正     ${}^{237}\text{Np}$  から始まるネプツニウム系列に属する核種の質量数は、 $4n+1$  になる。

C : 正

D : 誤    ネプツニウム系列の最終壊変生成物はタリウムの同位体 ( ${}^{205}\text{Tl}$ ) である。ちなみに、トリウム系列、ウラン系列及びアクチニウム系列の最終壊変生成物は全て鉛の同位体で、

それぞれ  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  及び  $^{207}\text{Pb}$  である。

問 28 放射線化学に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 水和電子は還元力を持つ。
- B ヒドロキシルラジカルは、陰イオンである。
- C 放射線によって金属中にラジカルが生成する。
- D シクロヘキサンに比べてベンゼンの方が  $\gamma$  線に対して安定である。
- E LET が大きいほどスパー間隔は短い。

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

〔解答〕

3

注) A : 正

B : 誤    ヒドロキシルラジカルは、オクテット則を満たしている水酸化物イオンに対して、電子が 1 個少ない。そのため、負電荷が解消された状態にあり、また不対電子が存在するために反応性が高く酸化剤として働く。

C : 誤    ラジカルとは不対電子を持つ化学種のことであり、遊離基ともいう。金属結晶中の原子は金属結合によって結ばれ、電子の一部は自由電子として存在する。そのため、金属中でラジカルが生成することはない。

D : 正

E : 正

問 29 化学線量計による放射線量測定に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A フリッケ線量計の G 値は約 34 eV である。
- B フリッケ線量計は  $\text{Fe}^{2+}$  イオンの酸化反応を利用する。
- C セリウム線量計は  $\text{Ce}^{4+}$  イオンの還元反応を利用する。
- D アラニン線量計は放射線重合反応を利用する。

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

〔解答〕

3

注) A : 誤    フリッケ線量計は  $\text{Fe}^{2+}$  から  $\text{Fe}^{3+}$  への酸化反応を利用した化学線量計である。吸収エネルギー 100 eV 当たりに分解若しくは生成する分子数を表す G 値は 15.5 である。

B : 正

C : 正

D : 誤    アラニン線量計は、吸収線量に比例してラジカルが生成・蓄積することを利用した線量計。アミノ酸の一種であるアラニンを主成分とした固形素子が用いられる。測定には電子スピン共鳴 (ESR) が用いられる。線量測定範囲は  $1 \sim 10^5$  Gy と高くかつ広く、また高い精度と安定性を持つのが特徴である。

問 30 次の放射性同位元素と用いられる分析・計測装置、及び利用される放射線の組合せが正しいものはどれ

## 主任者 コーナー

か。

	放射性同位元素		分析・計測装置		放射線
1	$^{55}\text{Fe}$	—	硫黄計	—	$\beta$ 線
2	$^{57}\text{Co}$	—	メスバウアー分光装置	—	$\gamma$ 線
3	$^{63}\text{Ni}$	—	ECD ガスクロマトグラフ	—	X線
4	$^{137}\text{Cs}$	—	レベル計	—	$\alpha$ 線
5	$^{241}\text{Am}$	—	蛍光 X 線分析装置	—	中性子線

〔解答〕

2

- 注) 1 : 誤 硫黄計には透過式と励起式がある。励起式は硫黄の特性 X 線から硫黄分を求める。その励起エネルギーとして X 線管又は  $^{55}\text{Fe}$  (EC 壊変に伴う 5.86 keV の Mn-K $_{\alpha}$  線) が利用されている。JIS K 2541-4 参照。
- 2 : 正
- 3 : 誤 ECD は塩素系農薬, PCB, 有機水銀, トリハロメタンなど親電子性化合物の分析に適している。通常, キャリアーガスのイオン化のために  $\beta$  線放出核種である  $^{63}\text{Ni}$  が利用されている。
- 4 : 誤 レベル計に利用される  $^{137}\text{Cs}$  は  $\gamma$  線放出核種である。 $\alpha$  線の電離作用は非常に大きいものの, 透過力は比較的小さく空気中でも数 cm 程度である。
- 5 : 誤 X 線照射された物質が放出する特性 X 線 (蛍光 X 線) を利用した分析法が蛍光 X 線分析法である。分析装置には波長分散型とエネルギー分散型の 2 種類がある。 $^{241}\text{Am}$  は  $\gamma$  線源として蛍光 X 線源や厚さ計のほか,  $\alpha$  線源として煙探知器に, また  $^{241}\text{Am-Be}$  混合物は中性子源として利用される。

## 生 物 学

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 次の標識化合物のうち、核医学画像診断に用いられるものの組合せはどれか。

- A  $[^{18}\text{F}]2\text{-フルオロ-2-デオキシグルコース}$
- B  $[^{35}\text{S}]$ メチオニン
- C  $[^{89}\text{Sr}]$ 塩化ストロンチウム
- D  $[^{99\text{m}}\text{Tc}]$ 過テクネチウム酸ナトリウム

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

〔解答〕

3

注) 核医学診断は、 $\gamma$ 線放出核種又はポジトロン放出核種で標識した化合物(放射性医薬品)を体内に投与し、それらの放射性核種から放出された放射線を体外から検出することにより画像化する診断技術である。前記核種が放出する主な放射線は、 $^{18}\text{F}$ : ポジトロン ( $\beta^+$ 線),  $^{35}\text{S}$ :  $\beta^-$ 線,  $^{89}\text{Sr}$ :  $\beta^-$ 線,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ :  $\gamma$ 線であり、核医学画像診断に用いられる核種は、 $^{18}\text{F}$ と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ である。実際、 $[^{18}\text{F}]2\text{-フルオロ-2-デオキシグルコース}$ は悪性腫瘍、虚血性心疾患、難治性部分てんかん、 $[^{99\text{m}}\text{Tc}]$ 過テクネチウム酸ナトリウムは脳腫瘍、脳血管障害、甲状腺疾患、唾液腺疾患、異所性胃粘膜疾患の診断に用いられる。なお、 $[^{89}\text{Sr}]$ 塩化ストロンチウムは、診断ではなく骨転移の疼痛緩和に用いられる放射性医薬品である。

問 2 輸血用血液の放射線照射に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 血液成分のうち最も放射線致死感受性が高いのは赤血球である。
- B 放射線照射により移植片対宿主病 (GVHD) を予防できる。
- C 吸収線量が  $100\sim 200\text{ Gy}$  となるように照射する。
- D 新鮮凍結血漿しょうじょう以外のすべての輸血用血液が照射対象となる。

- 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    血球成分のうち、放射線に感受性の高いのは白血球である。  
 B : 正    リンパ球を不活化し、移植片対宿主病 (GVHD) を予防するため、新鮮凍結血漿を除く輸血用血液製剤には  $15\sim 50\text{ Gy}$  の放射線照射が行われている。  
 C : 誤    吸収線量が  $15\sim 50\text{ Gy}$  となるように照射されている。

## 主任者 コーナー

- D：正 血液照射の目的がリンパ球の不活性化であることから、血漿への照射は基本的に意味を持たない。また新鮮凍結血漿の製造工程において、凍結する際にリンパ球は壊れてしまう。これらのことから、新鮮凍結血漿は照射対象とはされていない。

問3 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、相同染色体を用いて行われる。
- B 非相同末端結合による修復は、姉妹染色分体を用いて行われる。
- C 非相同末端結合による修復は、相同組換えによる修復に比べて誤りを起こしやすい。
- D  $G_1$  期においては、相同組換えによる修復は行われない。
- E  $G_2$  期においては、非相同末端結合による修復は行われない。

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 相同組換えによる修復では、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配列を利用して正確な修復を行う。
- B：誤 非相同末端結合による修復では、DNAの相同性とは無関係に切断された末端同士を直接連結する。
- C：正 非相同末端結合による修復では、再連結に伴ってヌクレオチド数の増減を伴うことがあるため、修復の正確性は低い。
- D：正 相同組換えは姉妹染色分体の存在するS期から $G_2$ 期にしか起こらない。
- E：誤 非相同末端結合による修復は細胞周期を通して可能である。

問4 生体へのX線照射で生じるラジカル生成物に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ヒドロキシルラジカルはDNAに作用して損傷を与える。
  - B 水和電子は強い酸化剤である。
  - C 過酸化水素を分解する酵素が生体内に存在する。
  - D ヒドロキシルラジカル濃度はpHを決める要因である。
- 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：正 放射線の照射によって反応性の高いヒドロキシルラジカルをはじめとする幾つかの活性酸素種が生成し、これらの活性酸素種がDNAと化学反応を起こして損傷を引き起こす（間接作用）。
- B：誤 水和電子は還元剤である。
- C：正 生体内には、カタラーゼ（catalase）など、過酸化水素を分解・除去反応を触媒する酵素が存在する。
- D：誤 ヒドロキシルラジカルは、pH（水素イオン濃度）との直接の関係はない。

問5 放射線による細胞の増殖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 増殖死の状態では細胞の代謝が継続していることはない。
- B リンパ球は主に増殖死で死ぬ。
- C 線維芽細胞は主に増殖死で死ぬ。
- D 増殖死はコロニー形成法で検出できる。

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

〔解答〕

5

- 注) A：誤 増殖死では、細胞は1回ないしは数回分裂した後、分裂を止めてしまうが、核酸・蛋白合成などの活動は継続している。すなわち、細胞の代謝は継続しつつも、分裂する能力を失っている状態が増殖死である。
- B：誤 リンパ球は比較的低線量で間期死（高感受性間期死）を起こす。このときリンパ球はアポトーシスを起こしている。
- C：正 線維芽細胞では増殖死による細胞死が主であることが知られている。
- D：正 コロニー形成の有無は細胞の増殖死の指標となる。すなわち、細胞が増殖を繰り返せば、コロニーの形成・拡大が見られる。また、コロニー内を観察すると、分裂中の細胞が見られる。一方、増殖死の状態では、コロニーの形成・拡大は認められず、細胞には複数核の細胞や巨細胞などが見られる。

問6 放射線による細胞のアポトーシスに見られる特徴的な現象として、正しいものの組合せはどれか。

- A 細胞の膨化
- B 細胞内容物の流出
- C 核の断片化
- D 核内クロマチンの凝縮

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

〔解答〕

5

- 注) アポトーシスに見られる特徴的な現象としては、細胞縮小、核内クロマチンの凝縮 (D)、核の断片化 (C)、DNAの断片化、アポトーシス小体の形成などがある。細胞の膨化 (A)、細胞内容物の流出 (B) は、ネクローシスに見られる現象である。

問7 X線による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線に特有な突然変異型がある。
- B 一般に線量率を下げると単位吸収線量あたりの突然変異頻度が低下する。
- C 単位吸収線量あたりの突然変異頻度は中性子線よりも低い。
- D 自然突然変異に比べて欠失型が少ない。

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

〔解答〕

3

## 主任者 コーナー

- 注) A : 誤 X線に特有な突然変異型はなく、X線以外の放射線や化学物質、活性酸素等によっても同様の突然変異型を示す場合がある。
- B : 正 誘発される突然変異の頻度は、放射線の種類や照射条件により異なる。同一線量であっても低線量率下では高線量率下よりも突然変異の頻度は低い。これは照射中にも回復が起こるためと考えられる（線量率効果）。
- C : 正 一般に、低LET放射線の単位吸収線量あたりの突然変異誘発率は、高LET放射線に比べて小さい。X線のLETは中性子線のLETより小さく、突然変異に対するX線のRBEは中性子線より小さい。
- D : 誤 放射線による突然変異には、自然突然変異に比べて欠失型が多い。

問8 放射線による染色体異常に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 環状染色体は安定型異常である。  
B 二動原体染色体は不安定型異常である。  
C 不安定型異常は発がんの原因になる。  
D 末梢リンパ球<sup>しょうりんぱく</sup>における出現頻度から被ばく線量推定が可能である。

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

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 環状染色体は不安定型異常であり、この異常を持つ細胞は細胞分裂に伴い細胞死する。
- B : 正 二動原体染色体、環状染色体などは、細胞分裂に伴い細胞死する不安定型異常である。
- C : 誤 不安定型異常を持つ細胞は細胞分裂に伴い細胞死するので、発がんの原因にはならない。
- D : 正 末梢リンパ球における染色体異常の出現頻度から被ばく線量推定が可能である。これは末梢リンパ球における、被ばく線量と染色体異常の出現頻度の関係が分かっているからである。

問9 放射線の細胞への作用と細胞周期の関係についての次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A  $G_1$ 期前半が最も致死感受性が高い。  
B 高LET放射線に比べて、X線では致死感受性の細胞周期依存性が大きい。  
C 放射線照射後の分裂遅延は主にM期にとどまることによる。  
D M期の細胞の生存率曲線の傾きはS期後半の細胞よりも急である。

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

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 M期及び $G_1$ 期後半からS期初期は放射線感受性が高く、S期後半から $G_2$ 期初期及び $G_0$ 期は放射線感受性が低い。
- B : 正 高LET放射線の場合、非修復性損傷が多く生成され、細胞の生死が修復能に依存する程度が少ないため、細胞周期依存性が小さいと考えられる。
- C : 誤 放射線照射後の分裂遅延は主に $G_2$ 期にとどまることによる。

D：正 M期は放射線感受性が高く，S期後半は放射線感受性が低い。したがって，M期の細胞の生存率曲線の傾きはS期後半の細胞よりも急である。

問10 X線照射した培養細胞の生存率曲線に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

- A 通常，グラフの横軸は吸収線量で縦軸は対数で表示した生存率である。
  - B ラジカルスカベンジャーの存在は傾きに影響しない。
  - C 一般に線量率を下げると傾きが緩やかになる。
  - D 高LET放射線照射に比べて肩が小さい。
- 1 AとB    2 AとC    3 BとC    4 BとD    5 CとD

〔解答〕

2

注) 生産率曲線は横軸が吸収線量で縦軸は生存率の対数である(A)。曲線の2つの特徴は肩と直線部の傾きであるが，肩は標的理論では標的数に対応し，高LET放射線では小さくなる(Dは誤り)。直線部は線量あたりの修復後のDNA損傷量に比例する。ラジカルスカベンジャーは線量あたりの初期DNA損傷量を低下させるため傾きを緩やかにさせる効果がある(Bは誤り)。線量率が下がった場合には，DNAの修復率が高まるため，修復後のDNA損傷量が低下し，傾きは緩やかになる(C)。

問11 X線を急性全身被ばくした場合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 哺乳類の半致死線量は種によらず3~5 Gyの範囲内にある。
  - B ヒトの場合には半致死線量は60日以内に半数の個体が死亡する線量をいう。
  - C 30 Gy全身被ばくした場合には中枢神経の変化が死の原因として重要である。
  - D 骨髄死では感染症と出血傾向が死の原因として重要である。
- 1 AとB    2 AとC    3 BとC    4 BとD    5 CとD

〔解答〕

4

注) 急性全身被ばくした場合の半致死線量は，60日以内の生存率で決定され(B)，哺乳動物の種によって異なる(Aは誤り)。ヒトの場合，骨髄死にあたるのは， $LD_{50(60)}=3\sim 5$  Gy。マウスの半致死線量 $LD_{50(60)}=5.6\sim 7$  Gyである。骨髄死の直接の原因は，造血臓器が原因による白血球低下による抵抗力の低下と血小板低下による出血性傾向の増大による(D)。造血死死因と死のピークは線量によって異なる。15 Gy以上：中枢神経死(Cは誤り)，1~5日で死亡。5~15 Gy：腸死(腸管死)。

問12 次の細胞のうち放射線致死感受性が最も高いものはどれか。

- 1 NK細胞
- 2 好中球
- 3 T細胞
- 4 B細胞
- 5 マクロファージ

〔解答〕

4

## 主任者 コーナー

注) リンパ系細胞は分化の初期段階でリンパ系幹細胞と骨髄系幹細胞に別れるが、そのうちリンパ系幹細胞から分化するリンパ細胞の放射線感受性が最も高いことが知られている。リンパ細胞はT細胞とB細胞及びNK細胞に分けられるが、このうちB細胞の感受性がT細胞及びNK細胞に比べ高いことが知られている。近年の研究結果でも、T細胞、マクロファージ、樹状細胞及びNK細胞は比較的放射線感受性であり、ヘルパーT細胞、細胞傷害性T細胞、単球、好中球及びB細胞が放射線高感受性であること、このうちB細胞が特に高感受性であることが報告されている (Heylmann et al., BBA, **1846**, 121-129 (2014))。好塩基球及び好酸球については結論が得られていない。

問 13 成人の卵巣が放射線被ばくした場合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 黄体ホルモンの一過性の上昇がみられることがある。
- B 年齢が高いほどより低い線量で永久不妊となる。
- C 一般に第一次卵母細胞は第二次卵母細胞に比べ放射線感受性が高い。
- D 第二次卵母細胞は増殖死で死ぬ。

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

〔解答〕

1

注) 卵母細胞は、放射線を受けた後アポトーシスによる細胞死を呈することが報告されている (Dは誤り)。卵胞については未成熟卵胞に比べ成熟卵胞の方が放射線感受性である (Cは誤り)。卵子の感受性は年齢に支配される場合も多く、一般的に若い女性の卵子の方が放射線抵抗性である。そのため、年齢が高いほどより低い線量で永久不妊となる (B)。ホルモンの誘導については、放射線照射による黄体ホルモンの上昇は実験的に確認されている (A)。

問 14 皮膚の10 Gy  $\gamma$ 線急性被ばくによる影響に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 被ばく中に軽度の熱感を感じる。
- 2 被ばく中に痛みを感じる。
- 3 被ばく後2日以内に一過性の紅斑を認める。
- 4 被ばく後3日以内に脱毛が起こる。
- 5 被ばく後に色素沈着が起こることはない。

〔解答〕

3

注) 皮膚は大別して表皮、真皮、皮下の3組織から成り、これらは上皮、毛嚢、皮脂腺、汗腺、血管、及び支持組織などで構成される。10 Gyによる $\gamma$ 線急性被ばくの影響は、これらの組織への総合的効果として現れる。ただし、基本的には、幹細胞の細胞増殖が停止することが効果の基本となるため、照射中に変化が起きることはない。

- 1, 2: 誤    被ばく中には細胞が死ぬことはないため、熱感、痛み等を感じることはない。
- 3: 正    急性照射によって障害を受けた上皮細胞がヒスタミン様物質を放出するため毛細血管が拡張する。この現象は、数時間内に一過性の紅斑として現れる。
- 4: 誤    皮膚の脱毛は、毛嚢の基底細胞の増殖停止に伴い約3週間から現れる。3日目にはまだ生じていない。

5：誤 10 Gy の急性照射では皮膚の炎症が誘発される。一般的に、何らかの原因により皮膚が炎症を起こし、治まった後、色素が残り、沈着する場合がある。

問 15 次の放射線障害のうち、主に毛細血管の閉塞によるものの組合せはどれか。

- A 放射線脊髄症（脊髄神経麻痺）
- B 脱毛
- C 消化管の穿孔<sup>せん</sup>
- D 放射線肺炎
- E 心筋症

1 ABDのみ 2 ABEのみ 3 ACEのみ 4 BCDのみ 5 CDEのみ

〔解答〕

3

注) 体の組織の放射線感受性については、①細胞再生系で幹細胞の分裂頻度が高い組織、②細胞再生系で幹細胞の分裂がそれほど著しくない組織、③細胞が規則的には分裂しない組織、④高度に分化して分裂しない組織の順に感受性が高い。脳・神経系は④、体毛、頭髮が含まれる皮膚は②、消化管壁は③又は④、肺は②、心筋は④である。毛細血管細胞は①か②であるため、組織自体の感受性が③か④の場合（A、C、E）には毛細血管による組織細胞死が組織変化の原因となる。

問 16 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 頭部白癬<sup>せん</sup>X線治療患者 — 皮膚がん
- B ウラン鉱夫 — 肺がん
- C 放射線高バックグラウンド地域住民 — 直腸がん
- D 原爆被爆者 — 胆嚢<sup>のう</sup>がん
- E ラジウム時計文字盤工 — 胃がん

1 AとB 2 AとE 3 BとC 4 CとD 5 DとE

〔解答〕

1

注) 放射線による発がんは、組織を構成する細胞の変異によって起きる。発がんには、線量率が影響し、線量率が低い場合には発がん率は低くなる。

- A：正 頭部白癬<sup>せん</sup>X線治療患者では、皮膚が放射線を受け、がん化する。
- B：正 ウラン鉱夫の場合には放射性同位元素を含む粉塵を肺に吸い込み肺がんが誘発される。
- C：誤 放射線高バックグラウンド地域住民については、線量率が低いことと関係し、バックグラウンド放射線による発がんの誘発は報告されていない。
- D：誤 原爆被爆者については、悪性腫瘍の調査が継続されているが、胆嚢<sup>のう</sup>がんは増加が認められていない。
- E：誤 ラジウム時計文字盤工は、ラジウムの付いた筆を舐めながら作業をしたため舌がんの増加が知られている。

問 17 原爆被爆者における放射線発がんに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

## 主任者 コーナー

- A 被ばく線量と固形がんの過剰相対リスクの関係は、直線-2次曲線 (LQ) モデルによくあてはまる。  
B 被ばく線量とがんの悪性度には相関関係が認められる。  
C 一般に、急性骨髄性白血病の潜伏期間は被ばく線量が高いほど短い。  
D 固形がんの過剰相対リスクは、被爆時年齢が若年の方が高齢の場合よりも高い。
- 1 AとB    2 AとC    3 BとC    4 BとD    5 CとD

〔解答〕

- 5  
注) 放射線による発がんは、確率的影響であるため、基本的には放射線被ばく量は重篤度に影響しない。このことを基本とした上で選択肢を選ぶことが求められる。
- A：誤 「電離放射線の影響に関する委員会：Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR)」の1990年報告では、がん死亡率の線量-効果関係は、固形腫瘍では4 Sv以下で直線モデルが、白血病では直線-2次曲線モデルが妥当であるとしている。
- B：誤 確率的影響である発がんについては、悪性度と被ばく線量には相関関係が認められない。
- C：正 白血病の潜伏期間は、固形がんに比べて最小2年と最も短い。また、潜伏期間は被ばく線量が大きいほど短い。
- D：正 被爆者に固形がんを生じる確率（過剰生涯リスク）は、受けた線量、被爆時年齢及び性に依存する。過剰相対リスクと過剰絶対リスクのいずれについても、同一線量であれば、被爆時年齢が低いほどリスクが高い。また、女性は男性より放射線被ばくによる発がんリスクが若干高い。

問 18 次のX線被ばく部位とその障害の組合せのうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 眼 — 緑内障  
B 肺 — 肺線維症  
C 脊髄 — 動静脈奇形  
D 胆嚢<sup>のう</sup> — 胆石
- 1 AとB    2 AとC    3 BとC    4 BとD    5 CとD

〔解答〕

- 1  
注) 放射線による発がん以外の障害としては、急性骨髄症候群、消化管症候群、放射線神経障害、放射線障害性心膜炎、放射線肺炎 (B)、皮膚障害、白内障、再生不良性貧血、骨壊疽、骨粗鬆症及びその他身体局所に生じた線維症が知られている。緑内障については、2013年に日本の研究グループが原爆被爆者に緑内障が増加していることを報告している (A)。なお、脊髄被ばくでは奇形は生じず、胆石は放射線によっては誘発されない (C、Dは誤り)。

問 19 放射線の確定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 吸収線量が10 mGyでも発生する。  
B 線量が増加すると重篤度が増す。  
C 被ばく線量をしきい線量以下に制限することで発生を防止できる。  
D 甲状腺機能低下症は確定的影響ではない。

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

〔解答〕

3

- 注) A：誤    放射線の種類によらず吸収線量が10 mGyで起きる確定的影響はない。  
 B：正    確定的影響は被ばくした細胞が細胞死を起こすことに基づく影響であるから、しきい線量以上であれば線量が増加するほど死細胞が増えて重篤度が増す。  
 C：正    被ばくにより細胞が傷害を受けても、残った細胞が傷を修復したり機能を代償したりするので一定の線量（しきい線量）までは症状が現れないのが確定的影響である。すなわち、しきい線量以下の被ばくでは確定的影響の発生を防止できる。  
 D：誤    甲状腺機能低下症は甲状腺の細胞が傷害を受けて減少し、十分に機能しなくなる疾患である。甲状腺機能低下症のしきい線量は5 Gy程度とされており、確定的影響である。

問20 放射線の確率的影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 急性障害は確率的影響ではない。  
 B 内部被ばくでは確率的影響は起こらない。  
 C 遺伝性(的)影響は確率的影響である。  
 D 胎内被ばくでは確率的影響は起こらない。

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

〔解答〕

2

- 注) A：正    急性障害は確定的影響である。  
 B：誤    確率的影響は外部被ばくでも内部被ばくでも起こる。  
 C：正    確率的影響には遺伝性(的)影響と発がんがある。  
 D：誤    胎内被ばくでも確率的影響は起こり得る。

問21 ラドン ( $^{222}\text{Rn}$ )、トロン ( $^{220}\text{Rn}$ ) 及びこれらの子孫核種の吸入による自然放射線内部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 ラドン及びその子孫核種による内部被ばく線量は、トロン及びその子孫核種による内部被ばく線量に比べて高い。  
 B ラドン原子あるいはトロン原子が放出する放射線による被ばく線量は、それぞれのすべての子孫核種が放出する放射線による被ばく線量に比べて低い。  
 C 日本において、屋内のラドン及びトロンの平均濃度は、屋外のラドン及びトロンの平均濃度に比べて高い。  
 D 日本におけるラドン、トロン及びこれらの子孫核種の吸入による内部被ばく線量の平均は、世界全体におけるラドン、トロン及びこれらの子孫核種の吸入による内部被ばく線量の平均に比べて高い。

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

〔解答〕

1

- 注) A, B：正    ラドンは天然放射性壊変系列であるウラン系列の一員で、安定な $^{206}\text{Pb}$ になるまで $\alpha$

## 主任者 コーナー

壊変を8回、 $\beta$ 壊変を8回起こす。一方、トロンはトリウム系列に属していて安定な $^{208}\text{Pb}$ になるまで $\alpha$ 壊変を4回、 $\beta$ 壊変を3回起こす。ラドンもトロンも親核種より子孫核種による内部被ばくへの寄与の方が大きい。また、ウラン系列には半減期が22.2年の $^{210}\text{Pb}$ があり、肺に沈着すると大きな内部被ばくをもたらす。

- C : 正 日本では木造家屋が多いため、建築材料から発生するラドンやトロンは世界平均より少ないが、岩石や土壌から発生したラドンやトロンが屋内に侵入すると屋外における濃度より高くなる傾向がある。
- D : 誤 ラドン、トロン及びこれらの子孫核種の吸入摂取による内部被ばく線量は、日本で0.48 mSv、世界平均が1.3 mSvと報告されている。日本での被ばく線量の方が低い。

問22  $^{131}\text{I}$ ヨウ化ナトリウムの体内動態に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 経口摂取により80%以上が体内に吸収される。  
B  $^{131}\text{I}$ の体内からの排泄の80%以上は尿中への排泄である。  
C 体内に摂取された $^{131}\text{I}$ の90%以上が甲状腺に蓄積する。  
D 母体から胎児に移行することはない。

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

〔解答〕

2

- 注) A : 正 経口摂取した $\text{Na}^{131}\text{I}$ は、ほぼ全てが消化管から吸収されて血中に移行する。  
B : 正 胎内に吸収された $\text{Na}^{131}\text{I}$ は、摂取後約8時間で80%以上が尿中へ排泄される。  
C : 誤 尿中に排泄されなかった10~20%が甲状腺に蓄積するといわれている。非放射性のヨウ素を同時に摂取すると甲状腺のヨウ素の取り込みにおいて放射性ヨウ素と非放射性ヨウ素の間で競合が起こるので、放射性ヨウ素の蓄積量を更に低下させることができる。  
D : 誤 血中に入ったヨウ化物イオンは胎盤を通じて胎児に移行する。

問23 体内に取り込まれたある放射性核種の放射能が1年でちょうど16分の1に減少した。この放射性核種の物理的半減期が2年であるとき、生物学的半減期〔日〕として最も近い値は次のうちどれか。

1 23    2 81    3 91    4 104    5 639

〔解答〕

4

- 注) 体内に取り込まれた放射性物質が壊変や排泄等によって減少する半減期を実効半減期( $T_{\text{eff}}$ )という。実効半減期( $T_{\text{eff}}$ )は物理的半減期( $T_p$ )や生物学的半減期( $T_b$ )との間に次のような関係がある。

$$1/T_{\text{eff}} = 1/T_p + 1/T_b$$

$T_b$ について整理すると、

$$T_b = T_p \cdot T_{\text{eff}} / (T_p - T_{\text{eff}})$$

設問では体内に取り込まれた放射能が1年で16分の1になったことから実効半減期は3か月(=4分の1年)、物理的半減期が2年である。前式にこれらを代入して計算すると生物学的半減期( $T_b$ )は

$$T_b = 2 \times (1/4) / \{2 - (1/4)\} = 2/7 \div 0.286 \text{ [年]} \div 104 \text{ [日]}$$

問 24 吸入摂取あるいは経口摂取による放射性核種 1 Bq 当たりの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 成人の  $^{137}\text{Cs}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量は、成人の  $^{134}\text{Cs}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量より小さい。
- B 成人の  $^{137}\text{Cs}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量は、成人の  $^{137}\text{Cs}$  吸入摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量より小さい。
- C 5 歳児の  $^{137}\text{Cs}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量は、成人の  $^{137}\text{Cs}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量より小さい。
- D 5 歳児の  $^{131}\text{I}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量は、成人の  $^{131}\text{I}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量より小さい。
- E 5 歳児の  $^{131}\text{I}$  経口摂取 1 Bq 当たりの預託実効線量は、5 歳児の  $^{131}\text{I}$  経口摂取 1 Bq 当たりの甲状腺における預託等価線量より小さい。

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

〔解答〕

3

注) 内部被ばくは放射性物質が体内に存在する間継続するため、線量の評価においては長期にわたる内部被ばくを摂取時に被ばくしたものと扱う。これが預託である。特に指定がなければ成人では放射性物質の摂取から 50 年間、18 歳未満の子供では摂取から 70 歳までの期間について受ける被ばくを積算する。

実際に内部被ばくを見積もる際は、摂取した放射性物質の量に実効線量係数又は等価線量係数を掛けた量を用いる。これらの係数は放射性物質の性質を考慮し、体内に取り込んだ量と組織や臓器が受ける線量との関係をあらかじめ求めたもので、1 Bq を摂取した場合の預託実効線量若しくは預託等価線量に相当する。よって、係数の大小を比較することで預託実効線量や預託等価線量の大小が推測できる。なお、実効線量係数及び等価線量係数の値は ICRP Publication 72 (1996) による。

- A：正 成人の経口摂取に係る実効線量係数は  $^{137}\text{Cs}$  が  $1.3 \times 10^{-8}$  Sv/Bq、 $^{134}\text{Cs}$  が  $1.9 \times 10^{-8}$  Sv/Bq なので  $^{137}\text{Cs}$  の方が小さい。
- B：誤 ICRP Publication 72 では  $^{137}\text{Cs}$  の吸入摂取については化学形をエアロゾルとし、体液への取り込み速度の緩急別 (3 段階) それぞれで粒子の大きさごと (8 段階) の実効線量係数が掲載されている。一例を挙げると、1 ミクロンの  $^{137}\text{Cs}$  エアロゾルが呼吸器から体液中に速く取り込まれた場合の成人の実効線量係数は  $4.6 \times 10^{-9}$  Sv/Bq で、経口摂取の場合の方が大きい。ただし、ゆっくり取り込まれると吸入摂取に係る実効線量係数の方が経口摂取のそれより大きくなる場合もある。
- C：正 5 歳児の  $^{137}\text{Cs}$  の経口摂取に係る実効線量係数は  $9.6 \times 10^{-9}$  Sv/Bq で成人の場合より小さい。 $^{137}\text{Cs}$  の生物学的半減期が成人と異なるためである。
- D：誤  $^{131}\text{I}$  の経口摂取に係る実効線量係数は、5 歳児で  $1.0 \times 10^{-7}$  Sv/Bq、成人で  $2.2 \times 10^{-8}$  Sv/Bq である。5 歳児の方が大きい。
- E：正 5 歳児が  $^{131}\text{I}$  を経口摂取した場合の甲状腺における等価線量係数は  $2.1 \times 10^{-6}$  Sv/Bq で実効線量係数より大きい。

## 主任者 コーナー

問 25 次の核種のうち、サブマージョンの核種でないものはどれか。

- 1  $^3\text{H}$
- 2  $^{10}\text{C}$
- 3  $^{13}\text{N}$
- 4  $^{15}\text{O}$
- 5  $^{136}\text{Xe}$

〔解答〕

1

注) サブマージョン (水面下という意味) 核種とは、ヒトが気体状の放射性核種に囲まれた際にこれを吸入することで身体組織に集積する放射性物質が出す線量よりも、体外又は肺の中から受ける線量の方がはるかに大きいものをいう。選択肢のうち  $^3\text{H}$  は水の水素と容易に交換して全身に取り込まれる。 $^3\text{H}$  の  $\beta$  線エネルギーは小さいので体外からの被ばくよりも内部被ばくの影響が大きく、サブマージョン核種ではない。

問 26 ヒトの胎内被ばくによる放射線影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 奇形が最も起こりやすいのは、受精後 8 日までの時期に被ばくした場合である。
- B 精神発達遅滞が最も起こりやすいのは、受精後 8 週から 25 週の間の時期に被ばくした場合である。
- C 小頭症が最も起こりやすいのは、受精後 25 週から 40 週の間の時期に被ばくした場合である。
- D 受精から出生までのいずれの時期の被ばくでも、遺伝性(的)影響が発生する可能性がある。
- E 原爆被爆者の調査では、胎内被ばくの発がんの過剰絶対リスクは、小児期 (0 歳~5 歳) の被ばくよりも大きい。

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

〔解答〕

3

注) A : 誤    着床前期で、この時期に 0.1 Gy 被ばくすると胚が死亡してしまう。  
B : 正    しきい線量は 0.2~0.4 Gy とされている。  
C : 誤    器官形成期である受精後 9 日から 8 週頃の期間に 0.15 Gy 以上被ばくした場合に起こりやすい。  
D : 正    胎児期においても生殖腺に被ばくを受ければ遺伝性(的)影響が発生し得る。  
E : 誤    胎児期の被ばくによる発がんの過剰絶対リスクは小児期と同等か、小さいと考えられている。小児の発達期の組織の方が放射線による発がん感受性が高いためである。

問 27 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 マウス実験において、遺伝性(的)影響の線量率効果は認められていない。
- B マウス実験で見られた遺伝性(的)影響は、劣性に比べ優性の突然変異が多い。
- C 倍加線量は、小さいほど遺伝性(的)影響が起こりやすいことを意味する。
- D 原爆被爆者の調査において、遺伝性(的)影響の有意な増加は確認されていない。

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

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 線量率効果は、放射線による生物学的効果を見ているので、遺伝的影響も含まれることになる。
- B : 誤 劣性遺伝子に比べて優性遺伝子が傷害を受けやすいという報告はない。
- C : 正 倍加線量は自然突然変異発生率を2倍にする放射線量のことである。倍加線量が小さいということは、少ない線量で影響を与えることができることを意味する。
- D : 正 原爆被爆者を対象とした疫学調査では、放射線被ばくによって遺伝的影響が有意に増大したというデータはない。

問 28 低 LET 放射線と比較した高 LET 放射線の特徴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 LET が大きくなればなるほど、RBE は大きくなる。
- B OER が小さい。
- C 直接作用の寄与が大きい。
- D 一般に、同一吸収線量では放射線発がんのリスクが低い。
- 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 RBE は LET が  $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$  付近まで増加するが、この付近を頂点として LET が増加しても低下する。これは生物学的効果に必要なエネルギー以上のエネルギーが無駄になるためである。一般的に、この現象をオーバーキルという。
- B : 正 高 LET 放射線の方が低 LET 放射線より OER が小さい。
- C : 正 高 LET 放射線の方が低 LET 放射線より直接作用の寄与が大きい。
- D : 誤 一般的に、高 LET 放射線の方が低 LET 放射線より発がんリスクは高くなる。

問 29 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 基準放射線としては一般に管電圧  $200\sim 250 \text{ kV}$  X 線が用いられる。
- B 線量分割法による影響を受ける。
- C 線量率による影響を受ける。
- D 指標とする生物効果による影響を受けない。
- 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 RBE 等のための標準となる放射線には、一般的に、 $200\sim 250 \text{ kV}$  の X 線か、 $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線が用いられる。
- B, C : 正 分割照射や線量率が変わると、放射線損傷の修復の時間的余裕ができるので、RBE に影響する。
- D : 誤 急性障害、発がん、遺伝的影響、細胞死など、生物学的指標で RBE は違う。

## 主任者 コーナー

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 最も一般的な分割照射法での1回線量は2 Gyである。
  - B 悪性リンパ腫の細胞は主にアポトーシスにより死ぬ。
  - C 腫瘍の種類・照射法が同じ場合には、腫瘍の大きさによらず根治的な治療に必要な総線量は等しい。
  - D 直線-2次曲線 (LQ) モデルにおける  $\alpha/\beta$  比 (値) は、一般に晩期障害に比べ急性障害で小さい。
- 1 AとB    2 AとC    3 AとD    4 BとC    5 BとD

〔解答〕

1

- 注) A：正 一般的な分割照射法での1回線量は2 Gyであり、照射するがんの種類によっては、その放射線感受性考慮して、1回線量を変える場合もある。
- B：正 リンパ腫はアポトーシスを原因とする細胞死が多い。
- C：誤 腫瘍の種類により放射線感受性が異なり、また、1回線量と分割照射回数によって修復の程度が異なるため、根治的治療のための総線量は異なる。
- D：誤 急性障害を起こす細胞の線量効果曲線は晩期障害を起こす細胞に比べて、直線成分が大きく、2次曲線の成分は小さい。したがって、 $\alpha/\beta$  比 (値) は大きくなる。

物 化 生

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

Ⅰ 原子番号  $z$ 、電荷  $ze$  の高速荷電粒子が物質中を進むとき、物質中の電子は荷電粒子による□A□を受ける。このとき電子の運動量の変化  $\Delta p$  は、□A□を  $f$ 、それを受ける時間を  $dt$  とすると  $\Delta p =$  □ア□で与えられる。 $f$  は荷電粒子の電荷  $ze$  と電子の電荷  $e$  の積に□B□し、 $f$  を受ける時間は荷電粒子の速度  $v$  に□C□すること、また電子の質量を  $m$  とすると運動量  $p$  とエネルギー  $E$  の間には□イ□の関係があることから、電子の受けるエネルギーは□ウ□に比例する。

このように入射荷電粒子は物質中の電子にエネルギーを与え、励起や□D□を起こす。また入射荷電粒子が電子の場合、物質中の原子核近傍の電場の影響で大きく軌道が変化することにより□E□を起こし、これによってもエネルギーを失う。荷電粒子が物質の単位長さあたりに失うエネルギー  $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$  は阻止能と呼ばれ、前者によるものを□F□阻止能、後者によるものを□G□阻止能と呼ぶ。□F□阻止能は物質の原子番号を  $Z$ 、原子密度を  $n$  とすると、 $nZ$  と□ウ□の積に比例する。また□F□阻止能を物質の密度  $\rho$  で割った量は質量□F□阻止能と呼ばれ、物質の質量数を  $A$ 、アボガドロ数を  $N_A$  とすると、 $nZ = \rho N_A \times$  □エ□より、□エ□と□ウ□の積に比例する。

<A~Gの解答群>

- 1 ローレンツ力    2 クーロン力    3 コリオリ力    4 遠心力    5 核力  
6 比例    7 反比例    8 指数関数的に増加    9 指数関数的に減少    10 衝突  
11 放射    12 電離    13 電子平衡    14 制動放射    15 放射平衡

<ア~エの解答群>

- 1  $\int f dt$     2  $\frac{df}{dt}$     3  $\frac{d^2 f}{dt^2}$     4  $E = \frac{p}{m}$     5  $E = \frac{p}{2m}$     6  $E = \frac{p^2}{m}$     7  $E = \frac{p^2}{2m}$   
8  $\frac{ze^4}{v}$     9  $\frac{ve^4}{z}$     10  $vze^4$     11  $v^2 z^2 e^4$     12  $\frac{v^2 e^4}{z^2}$     13  $\frac{z^2 e^4}{v^2}$     14  $\frac{Z}{A}$     15  $\frac{A}{Z}$

Ⅱ エネルギー  $T$  [MeV] の電子について□G□阻止能 ( $S_A$ ) の□F□阻止能 ( $S_B$ ) に対する比  $\left(\frac{S_A}{S_B}\right)$  は、おおよそ□オ□で表される。このことから電子加速器を用いて X 線を発生させるには、原子番号の□H□物質がターゲットとして用いられる。また電子の遮蔽厚を見積もる場合、その単位として  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  を用いるとき、おおよそ□I□  $T$  と考えてよい。

一方、陽子の質量は電子のそれより約□J□倍ほど大きく、物質中をほぼ直進する。その飛程  $R$  は、次の式により与えられる。

## 主任者 コーナー

$$R = \boxed{\text{カ}}$$

質量  $M$  の入射粒子のエネルギーが  $E$  のとき、阻止能は  $\boxed{\text{キ}}$  に比例することから、 $R$  は  $\boxed{\text{ク}}$  に比例する。したがって陽子の飛程を  $R_p$  とすると、同じ速度を持つ  $\alpha$  粒子の飛程は  $\boxed{\text{ケ}}$  とほぼ等しい。

<オ、カの解答群>

$$1 \quad \frac{TZ}{800} \quad 2 \quad \frac{T}{800Z} \quad 3 \quad \frac{Z}{800T} \quad 4 \quad \frac{800}{TZ} \quad 5 \quad \frac{dE}{dx} \quad 6 \quad \frac{dx}{dE} \quad 7 \quad \int \left( \frac{dE}{dx} \right) dE$$

$$8 \quad \int \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

<H~Jの解答群>

$$1 \quad \text{低い} \quad 2 \quad \text{高い} \quad 3 \quad 0.1 \quad 4 \quad 0.5 \quad 5 \quad 1 \quad 6 \quad 2 \quad 7 \quad 3 \quad 8 \quad 5 \quad 9 \quad 10$$

$$10 \quad 511 \quad 11 \quad 800 \quad 12 \quad 1,800 \quad 13 \quad 5,000 \quad 14 \quad 10,000$$

<キの解答群>

$$1 \quad \frac{zM}{E} \quad 2 \quad \frac{z^2M}{E} \quad 3 \quad \frac{zE}{M} \quad 4 \quad \frac{z^2E}{M} \quad 5 \quad \frac{M}{zE} \quad 6 \quad \frac{M}{z^2E} \quad 7 \quad \frac{E}{zM} \quad 8 \quad \frac{E}{z^2M}$$

<ク、ケの解答群>

$$1 \quad \frac{Mv^4}{z^2} \quad 2 \quad \frac{z^2v^4}{M} \quad 3 \quad \frac{M^2v^4}{z^4} \quad 4 \quad \frac{z^4v^4}{M^2} \quad 5 \quad R_p \quad 6 \quad \frac{R_p}{2} \quad 7 \quad \frac{R_p}{4} \quad 8 \quad 2R_p$$

$$9 \quad 4R_p$$

[解答]

$$\text{I} \quad \boxed{\text{A}} - 2 \quad \boxed{\text{B}} - 6 \quad \boxed{\text{C}} - 7 \quad \boxed{\text{D}} - 12 \quad \boxed{\text{E}} - 14 \quad \boxed{\text{F}} - 10$$

$$\boxed{\text{G}} - 11 \quad \boxed{\text{ア}} - 1 \quad \boxed{\text{イ}} - 7 \quad \boxed{\text{ウ}} - 13 \quad \boxed{\text{エ}} - 14$$

注) ウ: 電子の受けるエネルギーを  $\Delta\varepsilon$  とすると、

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\Delta p)^2}{2m} = \frac{(\int f dt)^2}{2m} \text{であるから, } \Delta\varepsilon \propto (\int f dt)^2 \text{となる。}$$

$$\text{ここで, } f \propto ze^2 \text{ 及び } dt \propto \frac{1}{v} \text{ であるから, } \int f dt \propto \frac{ze^2}{v}$$

$$\text{したがって, } \Delta\varepsilon \propto \left( \frac{ze^2}{v} \right)^2 = \frac{z^2 e^4}{v^2}$$

$$\text{エ: } n = \frac{\rho N_A}{A} \text{ が成り立つから, } nZ = \rho N_A \frac{Z}{A}$$

$$\text{II} \quad \boxed{\text{オ}} - 1 \quad \boxed{\text{カ}} - 8 \quad \boxed{\text{H}} - 2 \quad \boxed{\text{I}} - 4 \quad \boxed{\text{J}} - 12 \quad \boxed{\text{キ}} - 2$$

$$\boxed{\text{ク}} - 1 \quad \boxed{\text{ケ}} - 5$$

注) オ: 電子は質量が小さいので、原子核の電場により制動を受けると大きな加速度による制動放射でエネルギーを失う。エネルギーの高い電子ほど制動放射によるエネルギーの損失の割合は大きくなる。電子の質量を  $m$ 、光速を  $c$  とすると、放射阻止能  $S_{\text{rad}}$  と衝突阻止能  $S_{\text{col}}$  の比はおおよそ

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} = \frac{(T+mc^2)Z}{1,600mc^2} \approx \frac{TZ}{800}$$

で表される。

H：電子加速器を用いての X 線発生は主に、加速された電子がターゲット中で制動を受けた際の制動放射を利用している。このため、オより、原子番号  $Z$  の大きい物質では放射阻止能  $S_{\text{rad}}$  の割合が大きくなり、ターゲットとして用いられる。

I：電子の飛程を  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  の単位で表した場合、飛程  $R$  は物質にあまり依存せず、次式で表される。

$$R=0.542T-0.133 \quad 0.8 [\text{MeV}] < T$$

$$R=0.407T^{1.38} \quad 0.15 [\text{MeV}] < T < 0.8 [\text{MeV}]$$

遮蔽を見積もる場合には、より粗い近似式

$$R=0.5T$$

として良い。

J：陽子及び電子の質量を静止エネルギーで表すと、それぞれ 938.3 MeV 及び 0.511 MeV であるから、約 1,800 倍となる。

キ：問 1 I で示されたように、 $dE \propto \frac{z^2}{v^2}$  で、 $E = \frac{Mv^2}{2}$  だから、

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{z^2 M}{E}$$

ク： $R = \int \left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE \propto \int \left(\frac{z^2 M}{E}\right)^{-1} dE \propto \frac{E^2}{z^2 M}$  で、 $E = \frac{Mv^2}{2}$  だから、

$$R \propto \frac{(Mv^2)^2}{z^2 M} = \frac{Mv^4}{z^2}$$

ケ： $\alpha$  粒子の電荷は 2、陽子の電荷は 1 であり、また  $\alpha$  粒子の質量は陽子の質量のほぼ 4 倍であることによる。

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

I 原子番号  $Z$ 、質量数  $A$  の原子核を構成する核子の質量の総和  $M_s$  は、陽子の質量を  $m_p$ 、中性子の質量を  $m_n$  とすると、

$$M_s = \text{[A]} m_p + \text{[B]} m_n \dots\dots\dots (1)$$

と表される。実際の原子核の質量  $M_0$  はこの値よりわずかに小さく、その差  $\Delta M (=M_s - M_0)$  は [C] と呼ばれる。これをエネルギーに換算したものを原子核の結合エネルギー  $E_B$  という。例えば、 ${}^4\text{He}$  原子核の結合エネルギーを求めると、[ア] MeV となる。ただし、陽子、中性子、電子、並びに  ${}^4\text{He}$  原子の質量を原子質量単位で表し、それぞれ 1.007276 u、1.008665 u、0.000549 u、4.002603 u とした。

結合エネルギー  $E_B$  を核子数で割った核子あたりの平均結合エネルギー  $B$  は、核子が原子核とどのくらい強く結びつけられているかを表す。 $B$  を質量数  $A$  の関数としてプロットすると、 $A$  の小さいところでは、 $A$  の増加とともに  $B$  は急激に増大し、 $A$  が [D] 付近で最大 (約 [E] MeV) となり、 $A$  がさらに大きくなると徐々に小さくなる。

<A, B の解答群>

- 1 Z    2 A    3 (A+Z)    4 (Z-A)    5 (A-Z)    6  $Z^2$     7  $A^2$

## 主任者 コーナー

8  $(Z^2+A^2)$     9  $(Z^2-A^2)$     10  $\frac{Z}{A}$     11  $\frac{A}{Z}$

<Cの解答群>

- 1 質量超過    2 質量過多    3 減少質量    4 超過質量    5 質量欠損  
6 余剰質量    7 原子量    8 分子量    9 質量数

<アの解答群>

- 1 16    2 18    3 20    4 22    5 24    6 26    7 28    8 30

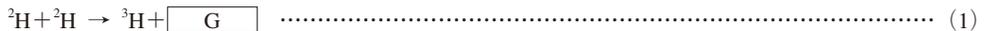
<Dの解答群>

- 1 4    2 20    3 40    4 60    5 80

<Eの解答群>

- 1 7.4    2 8.2    3 8.8    4 9.4    5 10.0    6 100

II 平均結合エネルギーの傾向から、軽い原子核同士が結合して質量数の大きいより安定な原子核が生成され、 $\Delta M$ に相当するエネルギーが放出される反応が起こりうる。これを  反応といい、例えば、以下の反応



では、 $\Delta M$ に相当する4.0 MeVのエネルギーが放出される。これより、重水素核 ${}^2\text{H}$ の結合エネルギーを2.2 MeVとして、三重水素核 ${}^3\text{H}$ の核子当たりの平均結合エネルギーを求めると、 MeVとなる。同様に、



の反応では、余分なエネルギーとして MeVが放出される。

<Fの解答群>

- 1 核破砕    2 核分裂    3 核合成    4 核融合    5 衝突    6 光核    7 捕獲

<G, Hの解答群>

- 1 n    2  ${}^1\text{H}$     3  ${}^2\text{H}$     4  ${}^3\text{H}$     5  ${}^3\text{He}$     6  ${}^4\text{He}$     7  ${}^6\text{Li}$     8  ${}^7\text{Li}$

<イの解答群>

- 1 2.2    2 2.4    3 2.8    4 3.2    5 3.6    6 4.0    7 4.4

<ウの解答群>

- 1 10    2 12    3 14    4 16    5 18    6 20    7 22

III 物質中に入射した光子は、光子エネルギーが高い場合に起こる光核反応を除くと、主として , ,  の3つの過程により減弱する。ここで、 の原子断面積  $\sigma_a$  は、物質の原子番号  $Z$  と光子エネルギー  $E_\gamma$  に依存し、おおよそ  $\sigma_a \propto \text{$   $\cdot E_\gamma^{-3.5}$  である。 はエネルギーの低い光子が原子番号の大きい物質に入射したときに寄与が大きい。一方、 は電子との散乱過程であるので、その原子断面積  $\sigma_b$  は1原子あたりの電子数に比例する。また、 は光子エネルギーに対してしきい値を持ち、その原子断面積  $\sigma_c$  は に比例し、エネルギーが高くなるほど大きくなる。

光子による物質へのエネルギー伝達を扱う場合に便利な量がエネルギー転移係数である。特性X線として放射される平均エネルギーを  $\delta$ ,  において放出される二次電子の平均エネルギーを  $\bar{E}$ , 電子の静止エネルギーを  $m_0c^2$  とすると、線エネルギー転移係数  $\mu$  は、先に述べた3つの過程の断面積を用いて、

$$\mu = \boxed{N} \sigma_a + \boxed{O} \sigma_b + \boxed{P} \sigma_c \} N$$

と表すことができる。ここで、 $N$ は物質の単位体積あたりの原子数である。

<I~Kの解答群>

- 1 ラザフォード散乱    2 レイリー散乱    3 トムソン散乱    4 光電効果  
 5 チェレンコフ効果    6 コンプトン効果    7 オージェ効果    8 弾性散乱  
 9 電離    10 励起    11 電子対生成    12 イオン対生成

<L, Mの解答群>

- 1  $Z^{-2}$     2  $Z^{-1}$     3  $Z^{-\frac{1}{2}}$     4  $Z^{\frac{1}{2}}$     5  $Z$     6  $Z^2$     7  $Z^3$     8  $Z^5$   
 9  $Z^7$     10  $Z^9$

<N~Pの解答群>

- 1  $\frac{\bar{E}}{E_\gamma}$     2  $\frac{\delta}{E_\gamma}$     3  $\frac{m_0 c^2}{E_\gamma}$     4  $\left(1 - \frac{\bar{E}}{E_\gamma}\right)$     5  $\left(1 - \frac{\delta}{E_\gamma}\right)$     6  $\left(1 - \frac{2\delta}{E_\gamma}\right)$   
 7  $\left(1 - \frac{m_0 c^2}{E_\gamma}\right)$     8  $\left(1 - \frac{2m_0 c^2}{E_\gamma}\right)$     9  $\left(1 - \frac{\bar{E}}{E_\gamma} - \frac{m_0 c^2}{E_\gamma}\right)$     10  $\left(1 - \frac{\delta}{E_\gamma} - \frac{m_0 c^2}{E_\gamma}\right)$

[解答]

I **A**-1    **B**-5    **C**-5    **D**-4    **E**-3    **ア**-7

注) ア： ${}^4\text{He}$ 原子は2個の陽子，2個の中性子及び2個の軌道電子で構成されている。 ${}^4\text{He}$ 原子核とのクーロン力による軌道電子の束縛は原子核の核子（陽子及び中性子）の核力による束縛と比較して無視できるほど小さいことから， ${}^4\text{He}$ 原子核の結合エネルギーは前記の核子の構成粒子の質量の和と ${}^4\text{He}$ 原子の質量の差として求められる。

1 u = 931.5 MeV であるから，

$$(1.007276 \text{ u} \times 2 + 1.008665 \text{ u} \times 2 + 0.000549 \text{ u} \times 2) - 4.002603 \text{ u}$$

$$= 0.030377 \text{ [u]}$$

$$= 28.2961755 \text{ [MeV]}$$

$$\approx 28 \text{ [MeV]}$$

D, E: 図参照

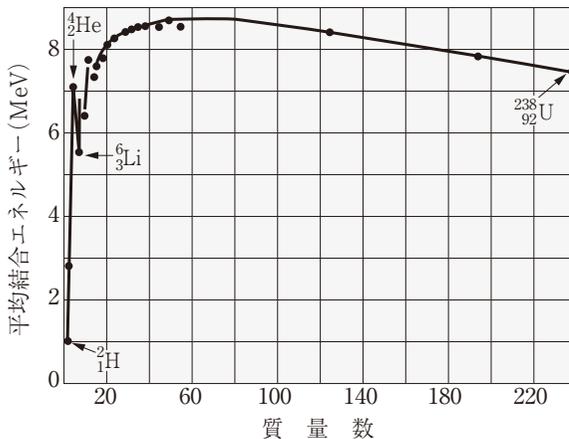


図 平均結合エネルギーの質量数依存性 (7版増補版 放射線取扱の基礎 (日本アイソトープ協会) より)

## 主任者 コーナー

II  F - 4       G - 2       H - 6       イ - 3       ウ - 5

注) イ：反応前の原子核の結合エネルギーの和と反応後の原子核の結合エネルギーの和の差が、反応により放出されるエネルギーとなるので、反応後の原子核である三重水素核  ${}^3\text{H}$  の結合エネルギーは、

$$(2.2+2.2)+4.0=8.4 \text{ [MeV]}$$

したがって、三重水素核  ${}^3\text{H}$  の平均結合エネルギーは、質量数が3であるから、

$$\frac{8.4}{3}=2.8 \text{ [MeV]}$$

ウ：重水素核  ${}^2\text{He}$  の結合エネルギーが 2.2 MeV、三重水素核  ${}^3\text{H}$  の結合エネルギーが 8.4 MeV、また、問2 I より  ${}^4\text{He}$  原子核の結合エネルギーが 28.3 MeV であるから、放出されるエネルギーは、 $28.3-(2.2+8.4) \approx 18 \text{ [MeV]}$

III  I - 4       J - 6       K - 11       L - 8       M - 6       N - 5  
 O - 1       P - 8

注) N：光電効果で電子に与えられるエネルギーは電子の束縛エネルギー（その平均値は放出される特性 X 線の平均エネルギー  $\delta$  に等しい）を差し引いた量であるので、光電子の平均のエネルギーは

$$E_\gamma - \delta = E_\gamma \left(1 - \frac{\delta}{E_\gamma}\right)$$

である。

P：電子対生成において生成される電子と陽電子のエネルギーの和は、光子エネルギーから電子の静止エネルギー  $m_0c^2$  の2倍を差し引いたものであるから、

$$E_\gamma - 2m_0c^2 = E_\gamma \left(1 - \frac{2m_0c^2}{E_\gamma}\right)$$

である。

問3 次の放射平衡に関する I～III の文章の  の部分に入る最も適切な語句、記号、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。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 半減期  $T_1$  (壊変定数  $\lambda_1$ ) の放射性核種 1 が放射壊変して生成する核種 2 が放射性で、さらに半減期  $T_2$  (壊変定数  $\lambda_2$ ) で壊変して核種 3 となると、



核種 1 から核種 2 を分離除去してからの時間  $t$  により、核種 1 の原子数  $N_1$  と核種 2 の原子数  $N_2$  は、それぞれ以下のように変化する。

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \text{A} - \lambda_2 N_2 \dots\dots\dots (2)$$

分離時  $t=0$  において  $N_1=N_1^0$ ,  $N_2=0$  とすると、その後の各原子数は、

$$N_1 = N_1^0 \exp(-\lambda_1 t) \dots\dots\dots (3)$$

$$N_2 = \boxed{\text{B}} N_1^0 \{\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)\} \dots\dots\dots (4)$$

となり、それぞれの放射能  $A_1$  と  $A_2$  は、 $\lambda_1 N_1^0 = A_1^0$  として

$$A_1 = A_1^0 \exp(-\boxed{\text{C}}) \dots\dots\dots (5)$$

$$A_2 = \boxed{\text{D}} A_1^0 \{\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)\} \dots\dots\dots (6)$$

と示される。

核種 2 と核種 1 の放射能の比  $A_2/A_1$  は、 $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  により

$$\begin{aligned} A_2/A_1 &= \boxed{\text{E}} \frac{\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)}{\exp(-\lambda_1 t)} \\ &= \boxed{\text{E}} \{1 - \exp(\lambda_1 t - \lambda_2 t)\} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

と表される。

<A~E の解答群>

- 1  $\lambda_1 N_1$     2  $-\lambda_1 N_1$     3  $\lambda_2 N_2$     4  $-\lambda_2 N_2$     5  $\lambda_1 t$     6  $\lambda_2 t$     7  $\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}$   
 8  $\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}$     9  $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}$     10  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$     11  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$     12  $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$

II I において  $T_1 > T_2$  (すなわち  $\lambda_1 < \lambda_2$ ) の場合には、十分に時間が経過すると (おおよそ  $t > 10T_2$ )、核種 2 と核種 1 の放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\boxed{\text{F}}}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots\dots\dots (8)$$

のように一定となる。このような放射平衡状態を過渡平衡という。

途中、核種 2 の放射能  $A_2$  が最大となる時間  $t_{\max}$  は、(6)式で  $\frac{dA_2}{dt} = 0$  から

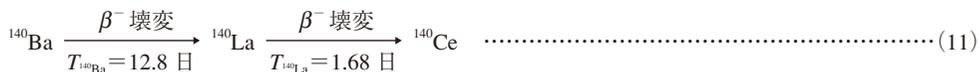
$$t_{\max} = \frac{\boxed{\text{G}}}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \dots\dots\dots (9)$$

$$= \frac{\boxed{\text{H}}}{(\ln 2)(T_1 - T_2)} \ln \frac{T_1}{T_2} \dots\dots\dots (10)$$

であり、そのとき、(2)式における  $\frac{dN_2}{dt} = 0$  から、核種 2 の放射能  $A_2 (= \lambda_2 N_2)$  は核種 1 の放射能  $A_1$

( $= \lambda_1 N_1$ ) と比較して、 $\boxed{\text{ア}}$  である。

過渡平衡の一例として、 $^{140}\text{Ba}$  の壊変系列を見てみる。



$^{140}\text{Ba}$  中に生じている  $^{140}\text{La}$  を分離除去した後、純粋な  $^{140}\text{Ba}$  を保存すると、半減期 12.8 日で  $^{140}\text{Ba}$  が  $\beta^-$  壊変し、次第に  $^{140}\text{La}$  の量 (放射能) が増加する。その結果、 $\boxed{\text{I}}$  日後に  $^{140}\text{La}$  の放射能が最大となる (ただし  $\ln 7.6 = 2.03$ )。その後、 $^{140}\text{La}$  の放射能は、親核種  $^{140}\text{Ba}$  の放射能を  $\boxed{\text{イ}}$ 、次第に半減期  $\boxed{\text{J}}$  日で減衰するようになる。

生成する  $^{140}\text{La}$  を無担体で分離するには、 $^{140}\text{Ba}$  と  $^{140}\text{La}$  を含む溶液に、 $\boxed{\text{K}}$  及び  $\text{Fe}^{3+}$  を加え、

## 主任者 コーナー

アンモニアアルカリ性にすることによって  $\text{Fe}^{3+}$  を  として沈殿させる。水溶液中で生成した  $^{140}\text{La}$  は  価であり、 $\text{Fe}^{3+}$  と共沈する。沈殿をろ別したのち、塩酸に溶かし、ジイソプロピルエーテルを用いた溶媒抽出により  $\text{Fe}^{3+}$  を除くと  $^{140}\text{La}$  が得られる。この場合、 は保持担体であり、 $\text{Fe}^{3+}$  は  $^{140}\text{La}$  を無担体で取り出すための非同位体担体である。

<F~Hの解答群>

- 1  $\lambda_1$     2  $\lambda_2$     3  $T_1$     4  $T_2$     5  $\lambda_1 t$     6  $\lambda_2 t$     7  $\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}$     8  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$   
 9  $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$     10 1    11  $\ln 2$     12  $T_1 T_2$

<Aの解答群>

- 1  $A_2 > A_1$     2  $A_2 = A_1$     3  $A_2 < A_1$

<I, Jの解答群>

- 1 1.7    2 2.7    3 5.7    4 12.8    5 25.6

<Iの解答群>

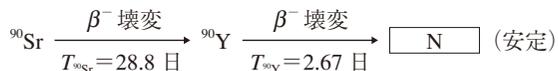
- 1 常に上回り    2 常に下回り    3 始めは上回りがやがて下回り  
 4 始めは下回りがやがて上回り

<K~Mの解答群>

- 1  $^{140}\text{Ba}$     2  $^{140}\text{La}$     3  $^{140}\text{Ce}$     4  $\text{Ba}^{2+}$     5  $\text{La}^{3+}$     6  $\text{Fe}^{3+}$     7  $\text{Fe}(\text{OH})_2$   
 8  $\text{Fe}(\text{OH})_3$     9  $\text{La}(\text{OH})_3$     10 -3    11 -2    12 -1    13 +1    14 +2  
 15 +3

III Iにおいて、 $T_1 \gg T_2$  (すなわち  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ) の場合には、十分に時間  $t$  が経過すると (おおよそ  $t > 10T_2$ )、核種2と核種1の放射能は  $A_2/A_1 \div 1$  でほぼ等しくなる。このような放射平衡状態を永続平衡という。

しかし  $t < 10T_2$  で、永続平衡が成立する前であっても、(6)式を利用することがができる。例えば、 $^{90}\text{Sr}$  は次のように壊変するが、



娘核種  $^{90}\text{Y}$  の  $\beta$  線エネルギーが 2.28 MeV と非常に高く測定しやすいことから、環境試料中の  $^{90}\text{Sr}$  の定量には、娘核種の  $\beta$  線測定が利用されている。試料からストロンチウムを分離回収して精製したのち、2週間以上保存する。その塩酸溶液に  の捕集剤として  $\text{Fe}^{3+}$  を、 の保持担体として  $\text{Sr}^{2+}$  を、それぞれ塩化物の形で加えた後、加熱しながらアンモニア水を加えて  の沈殿をつくり、この沈殿中に娘核種  $^{90}\text{Y}$  を共沈させて親核種から分離する。沈殿中の  $^{90}\text{Y}$  放射能測定により、まず半減期の測定から  が含まれていないことを確認し、次いで共沈させた時刻における  $^{90}\text{Y}$  の放射能を算出し、(6)式により  $^{90}\text{Sr}$  の放射能を求めることができる。

<N~Rの解答群>

- 1  $^{90}\text{Sr}$     2  $^{90}\text{Y}$     3  $^{90}\text{Zr}$     4  $^{91}\text{Zr}$     5  $^{92}\text{Zr}$     6  $\text{Ba}(\text{OH})_2$     7  $\text{Fe}(\text{OH})_3$   
 8  $\text{La}(\text{OH})_3$

〔解答〕

I A - 1      B - 10      C - 5      D - 12      E - 12

注) 題意より, 次の式が成立する。

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

これより, A の解答は 1 の “ $\lambda_1 N_1$ ” である。

(1) 式を積分すると,

$$\int \frac{dN_1}{N_1} = -\lambda_1 \int dt$$

これより,  $\ln N_1 = -\lambda_1 t + C_1$     ただし  $C_1$  は積分定数

となる。両辺の指数関数を取ると,

$$\exp(\ln N_1) = \exp(-\lambda_1 t + C_1)$$

$$N_1 = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(C_1)$$

となる。

境界条件として  $t=0$  の時  $N_1 = N_1^0$  が与えられているから, これらを用いて式を整理すると,

$$N_1(t=0) = N_1^0 = \exp C_1, \quad \therefore N_1 = N_1^0 \cdot \exp(-\lambda_1 t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

が求められる。一方, (2) 式の右辺第 2 項が (1) 式の定まった関数になるので, その形から解は

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2$$

の解  $N_2 = \exp(-\lambda_2 t)$  と, ある関数  $f(t)$  の積  $N_2 = f(t) \cdot \exp(-\lambda_2 t)$  となることが予想される。

$f(t)$  の形を求めるためにこの式を (2) 式に代入して整理すると,

$$\frac{df(t)}{dt} \cdot \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 f(t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1^0 \cdot \exp(-\lambda_1 t)$$

$$\frac{df(t)}{dt} \cdot \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 N_2 = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1^0 \cdot \exp(-\lambda_1 t)$$

となる。左辺第 2 項と右辺第 1 項が互いに打ち消し合うことから,

$$\frac{df(t)}{dt} \cdot \exp(-\lambda_2 t) = \lambda_1 N_1^0 \cdot \exp(-\lambda_1 t)$$

$$\frac{df(t)}{dt} = \lambda_1 N_1^0 \cdot \exp(\lambda_2 t - \lambda_1 t)$$

となる。両辺を  $t$  で積分し, 式を整理する。

$$\int \frac{df(t)}{dt} dt = \lambda_1 N_1^0 \cdot \int \exp(\lambda_2 t - \lambda_1 t) dt$$

$$f(t) = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \exp(\lambda_2 t - \lambda_1 t) + C_2$$

よって

**主任者** コーナー

$$N_2 = \left\{ \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \exp(\lambda_2 t - \lambda_1 t) + C_2 \right\} \cdot \exp(\lambda_2 t)$$

と求められる。

境界条件として与えられているのは  $t=0$  のとき  $N_2^0=0$  なので

$$N_2(t=0) = N_2^0 = \left( \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} + C_2 \right) = 0$$

$$\therefore C_2 = -\frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

よって  $N_2$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} N_2 = f(t) (-\lambda_2 t) &= \left\{ \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \exp(\lambda_2 t - \lambda_1 t) - \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \right\} \cdot \exp(-\lambda_2 t) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \{ \exp(\lambda_2 t - \lambda_1 t - \lambda_2 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

これより、B の解答は 10 の “ $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ ” である。

(3)式の両辺に  $\lambda_1$  を掛けると  $\lambda_1 N_1 = \lambda_1 N_1 \exp(-\lambda_1 t)$  となり、 $\lambda_1 N_1^0 = A_1^0$  だから、  
 $A_1 = A_1^0 \exp(-\lambda_1 t) \quad \dots\dots\dots (5)$

が求められる。これより、C の解答は 5 の “ $\lambda_1 t$ ” である。

また、(4)式の両辺に  $\lambda_2$  を掛けて式を整理すると、

$$\begin{aligned} \lambda_2 N_2 &= \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \\ \therefore A_2 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

が求まる。これより、D の解答は 12 の “ $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ ” である。

(5)式と(6)式から、 $A_2/A_1$  を計算し式を整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{A_2}{A_1} &= \frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \}}{A_1^0 \exp(-\lambda_1 t)} \\ &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)}{\exp(-\lambda_1 t)} \\ &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{ 1 - \exp(\lambda_1 t - \lambda_2 t) \} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となる。これらより E の解答は 12 の “ $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ ” である。

- II F - 2    G - 10    H - 12    ア - 2    I - 3    J - 4  
イ - 1    K - 4    L - 8    M - 15

注) 過渡平衡に関する問題である。

(7)式より、核種2と核種1の放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{1 - \exp(\lambda_1 t - \lambda_2 t)\} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{1 - \exp(\lambda_1 - \lambda_2)t\}$$

と与えられている。 $T_1 > T_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) の場合、 $\lambda_1 < \lambda_2$  は負の値を取ることから、十分な時間が経過すると  $\exp(\lambda_1 - \lambda_2)t$  の項は“0”に近づく。

よって核種2と核種1の放射能の比は

$$\frac{A_2}{A_1} \approx \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots\dots\dots (8)$$

となる。これよりFの解答は2の“ $\lambda_2$ ”である。

題意より、(6)式を時間  $t$  で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{dA_2}{dt} &= \frac{d}{dt} \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \right] \\ &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 \{ -\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t) \} \end{aligned}$$

となる。

$$\frac{dA_2}{dt} = 0 \text{ となるためには, } -\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t) = 0 \text{ である必要がある。}$$

式を整理すると、 $\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) = \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t)$  となり、

この式を満たす時間を  $t = t_{\max}$  とし、両辺の自然対数をとると、

$$\ln \{ \lambda_1 \exp(-\lambda_1 t_{\max}) \} = \ln \{ \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t_{\max}) \} \text{ となる。}$$

式を整理し  $t_{\max}$  を求めると、

$$\ln \lambda_1 + \ln \exp(-\lambda_1 t_{\max}) = \ln \lambda_2 + \ln \exp(-\lambda_2 t_{\max})$$

$$\ln \lambda_1 - \lambda_1 t_{\max} = \ln \lambda_2 - \lambda_2 t_{\max}$$

$$-\lambda_1 t_{\max} + \lambda_2 t_{\max} = \ln \lambda_2 - \ln \lambda_1$$

$$(\lambda_2 - \lambda_1) t_{\max} = \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

$$\therefore t_{\max} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。これよりGの解答は10の“1”である。

半減期と壊変定数の関係はそれぞれ  $T_1 = \ln 2 / \lambda_1$ ,  $T_2 = \ln 2 / \lambda_2$  であるから、

この関係を(9)式に代入して式を整理すると、

$$\begin{aligned} t_{\max} &= \frac{1}{\frac{\ln 2}{T_2} - \frac{\ln 2}{T_1}} \ln \frac{\frac{\ln 2}{T_2}}{\frac{\ln 2}{T_1}} = \frac{1}{\ln 2 \cdot \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \ln \frac{T_1}{T_2} \\ &= \frac{T_1 T_2}{\ln 2 \cdot (T_1 - T_2)} \ln \frac{T_1}{T_2} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

となる。これよりHの解答は12の“ $T_1 T_2$ ”である。

## 主任者 コーナー

(2)式において、 $\frac{dN_2}{dt}=0$  とすると

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = 0$$

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

$$\therefore A_1 = A_2$$

であるから、アの解答は2の“ $A_2=A_1$ ”である。

(10)式に親核種  $^{140}\text{Ba}$  の半減期  $T_{140\text{Ba}}=T_1=12.8$  [日] と、娘核種  $^{140}\text{La}$  の半減期  $T_{140\text{La}}=T_2=1.68$  [日] を代入して計算すると、

$$\begin{aligned} t_{\max} &= \frac{12.8 \times 1.68}{\ln 2 \cdot (12.8 - 1.68)} \cdot \ln \frac{12.8}{1.68} \\ &= \frac{12.8 \times 1.68}{0.693 \times (12.8 - 1.68)} \cdot \ln 7.6 \\ &= 5.66 \div 5.7 \end{aligned}$$

である。これよりIの解答は3の“5.7”である。

過渡平衡では、娘核種の放射能が最大となった後は、娘核種  $^{140}\text{La}$  の放射能は親核種  $^{140}\text{Ba}$  の放射能を常に上回り、親核種の半減期で減衰するようになる。このことからイの解答は1の“常に上回り”、Jの解答は4の“12.8”である。

Ⅲ N - 3    O - 2    P - 1    Q - 7    R - 1

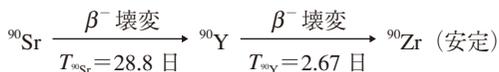
注) 永続平衡 ( $T_1 \gg T_2$  ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ )) に関する問題である。

$T_1 \gg T_2$  ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ) の条件が成り立つ時、(7)式は次のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \frac{A_2}{A_1} &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{1 - \exp(\lambda_1 t - \lambda_2 t)\} \\ &\approx \frac{\lambda_2}{\lambda_2} \cdot \{1 - \exp(-\lambda_2 t)\} \end{aligned}$$

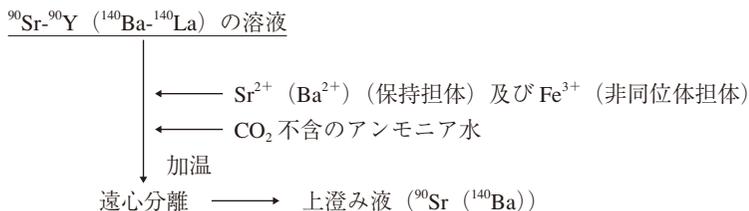
十分な時間が経つと、 $\exp(-\lambda_2 t) \rightarrow 0$  となるから、 $A_1/A_2 \approx 1$  となる。

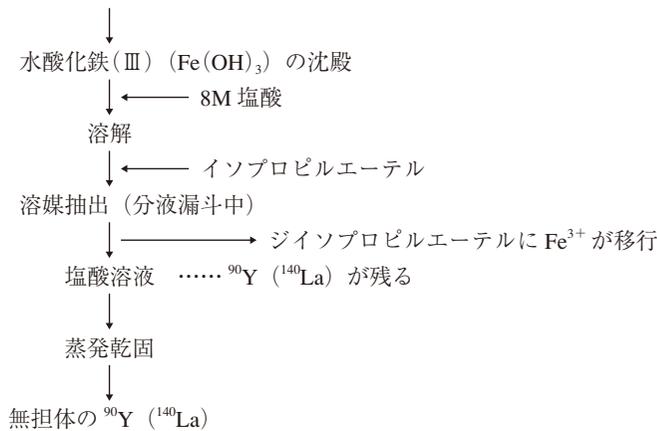
$^{90}\text{Sr}$  の壊変様式は次のとおりである (アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会), p103)。



これより、Nの解答は3の“ $^{90}\text{Zr}$ ”となる。

$^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  からの  $^{90}\text{Y}$  ( $^{140}\text{Ba}$ - $^{140}\text{La}$  からの  $^{140}\text{La}$ ) の分離手順の例は次のとおりである。





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

Ⅰ ヨウ素には安定同位体  $^{127}\text{I}$  と、いくつかの放射性同位体がある。 $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$  反応について、その化学効果を見る。

中性子照射したヨウ化エチル ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ , 水に不溶) を水と振とうすると,  $(n, \gamma)$  反応により生成した  $^{128}\text{I}$  の大部分は, ヨウ化エチルとは異なる化学形で水相に抽出される。これは, 1934年に Szilard と Chalmers により高比放射能の放射性同位体の製造法として発表された。

$(n, \gamma)$  反応に伴い即発  $\gamma$  線が放出され, 生成核はその□A□を受ける。即発  $\gamma$  線を単一光子として, そのエネルギーを  $E_\gamma$  [MeV] とすると, □A□エネルギー  $E_R$  [eV] は, □A□原子の質量を  $M$  [原子質量単位] として,  $E_R = 537 E_\gamma^2 / M$  で表される。 $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$  における  $E_\gamma$  は約 6.8 MeV なので,  $^{128}\text{I}$  の  $E_R$  は約□ア□ eV となる。ヨウ化エチル分子中の炭素とヨウ素の□B□エネルギーは数 eV であり, これに比べて□A□エネルギーは極めて大きいために□B□が切断され, 水溶性のヨウ素が生成する。また, □A□原子は, 媒質との衝突により減速し, その一部が再結合や□C□により元の化学形になる。

一般に,  $(n, \gamma)$  反応で生成する放射性核種は標的核種と□D□が同じであるため, □E□の状態を得ることは難しい。しかし, □C□反応が遅い場合には,  $(n, \gamma)$  反応による高比放射能の放射性核種を効率良く得ることができる。

<A~Eの解答群>

- 1 励起    2 反跳    3 結合    4 活性化    5 中性子数    6 質量数  
 7 原子番号    8 スピン交換    9 同位体交換    10 イオン交換    11 無担体  
 12 同位体担体    13 非同位体担体    14 保持担体

<アの解答群>

- 1 117    2 194    3 288    4 342    5 420

Ⅱ ヨウ素の放射性同位体のうち  $^{123}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  が, 医療分野で広く利用されている。

放射性核種を被検者に投与して体内分布や経時変化を体外から測定するインビボ検査には, 高い画像解像度が得られる比較的低エネルギー (100~200 keV 程度) の  $\gamma$  線を放出し,  $\beta^-$  線の放出がなく

## 主任者 コーナー

体内被ばくの少ない短半減期の核種が適している。 $^{123}\text{I}$ は、半減期[イ]時間でEC壊変し、[F] keVの $\gamma$ 線を放出するため、シンチグラフィや[G]に用いられる。

ホルモンやビタミンなどの生理活性微量物質を体外で測定するインビトロ検査には、半減期が比較的長く、測定のしやすい $\gamma$ 線放出核種が適している。 $^{125}\text{I}$ は、半減期[ウ]日でEC壊変し、35.5 keVの $\gamma$ 線及び[H]の特性X線を放出するため、抗原抗体反応を利用した[I]に用いられる。

放射性核種の内用療法には、 $\beta^-$ 線を放出する核種が適している。 $^{131}\text{I}$ は、半減期[エ]日で $\beta^-$ 壊変( $E_{\beta_{\text{max}}}=606$  keV)し、 $\gamma$ 線(主に[J] keV)を放出するため、甲状腺疾患の内用療法やインビトロ検査にも用いられる。なお、1 GBqの $^{131}\text{I}$ の原子数は約[K]個である。

<イ~エの解答群>

1 1.83    2 5.25    3 6.01    4 8.02    5 13.2    6 44.5    7 59.4    8 284

<Fの解答群>

1 122    2 141    3 159    4 188    5 239    6 365    7 511    8 1,170

<G~Iの解答群>

1 SPECT (シングルフォトン断層撮影法)    2 PET (陽電子放射断層撮影法)

3 X線CT (X線コンピュータ断層撮影法)    4 プロテインアッセイ

5 ラジオイムノアッセイ    6 エンザイムイムノアッセイ

7 ミクロオートラジオグラフィ    8 Te    9 I    10 Xe

<Jの解答群>

1 122    2 141    3 159    4 188    5 239    6 365    7 511    8 1,170

<Kの解答群>

1  $2.7 \times 10^{11}$     2  $1.0 \times 10^{12}$     3  $5.4 \times 10^{12}$     4  $1.0 \times 10^{13}$     5  $5.4 \times 10^{13}$

6  $1.0 \times 10^{14}$     7  $1.0 \times 10^{15}$     8  $1.6 \times 10^{15}$

III ヨウ素は周期表で17族元素のハロゲンに属する。ハロゲンの原子は7個の価電子をもち、[L]になりやすい。一般に中性子過剰核種は原子炉による中性子照射で製造され、中性子不足核種は加速器による荷電粒子照射で製造される。 $^{123}\text{I}$ 、 $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ は、いくつかの反応により製造されるが、医療に用いられる場合に比較的好く利用される反応を表に示す。

	標的核種	核反応	生成核種	生成核種の壊変	目的核種
(1)	$^{124}\text{Xe}$	(p, 2n) (p, pn) (p, 2p)	[M] [N] $^{123}\text{I}$	2回の $\beta^+$ 又はEC $\beta^+$ 又はEC	$^{123}\text{I}$
(2)	$^{124}\text{Xe}$	(n, $\gamma$ )	[O]	$\beta^+$ 又はEC	$^{125}\text{I}$
(3)	$^{130}\text{Te}$	(n, $\gamma$ )	$^{131}\text{Te}$	[P]	$^{131}\text{I}$

$^{123}\text{I}$ の製造には、サイクロトロンによる数多くの核反応が利用できるが、放射性核種純度や $^{123}\text{I}$ の分離の容易さの点で、 $^{124}\text{Xe}$ ガスターゲットを陽子線で照射し、 $^{124}\text{Xe}(p, 2n)$ 反応で生成する[M]を経由する(1)の方法が優れている。なお、この反応に付随する $^{124}\text{Xe}(p, pn)$ [N]反応と $^{124}\text{Xe}(p, 2p)$  $^{123}\text{I}$ 反応も利用される。前者は生成核種[N]の $\beta^+$ 又はEC壊変により、後者は核反応により直接 $^{123}\text{I}$ が得られる。

$^{125}\text{I}$ の製造には、(1)と同じ $^{124}\text{Xe}$ ガスターゲットを原子炉で中性子照射し、 $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)$ 反応により生成する  の  $\beta^+$  又は EC 壊変を経る (2) の方法が用いられる。

$^{124}\text{Xe}$ は天然同位体組成が0.1%に満たないため、(1)、(2)ともに濃縮同位体をターゲットに用いる方法が主流になっている。生成した $^{123}\text{I}$ や $^{125}\text{I}$ は、冷却した照射容器内壁に付着するのでこれを分離する。濃縮同位体 $^{124}\text{Xe}$ は回収して再利用する。

$^{131}\text{I}$ は、 $^{235}\text{U}$ などの核分裂反応により生成するが、医療用には天然同位体組成のTeを中性子照射し、 $^{130}\text{Te}(n, \gamma)$ 反応で生成する $^{131}\text{Te}$ の壊変を経る(3)の方法が用いられる。生成した $^{131}\text{I}$ は、ヨウ素の揮発性を利用してターゲットから加熱により分離する。

<Lの解答群>

1 1価の陽イオン    2 1価の陰イオン    3 2価の陽イオン    4 2価の陰イオン

<M~Pの解答群>

1  $^{123}\text{Te}$     2  $^{124}\text{Te}$     3  $^{125}\text{Te}$     4  $^{123}\text{Xe}$     5  $^{125}\text{Xe}$     6  $^{127}\text{Xe}$     7  $^{123}\text{Cs}$   
8  $^{124}\text{Cs}$     9  $^{125}\text{Cs}$     10  $\alpha$     11  $\beta^-$     12 EC    13  $\gamma$

[解答]

I -2    -3    -9    -7    -11    -2

注) (n,  $\gamma$ )反応により生じた $^{128}\text{I}$ はエネルギーの高い励起状態(ホットアトム)にあり、すぐに(即発) $\gamma$ 線を放出する。大砲から弾丸が発射されると大砲が後退(反跳)するように、この即発 $\gamma$ 線のエネルギーに応じて $^{128}\text{I}$ に反跳エネルギーが与えられ、 $\text{C}_2\text{H}_5$ と $^{128}\text{I}$ の結合が切断され水相に抽出される。このような通常とは異なる化学的挙動や反応を示すホットアトム効果を利用すれば放射性同位体と安定同位体を分離することが可能であり、様々な比放射能の高いRIの製造に応用されている。

II -5    -7    -4    -3    -1    -8  
-5    -6    -7

注) 放射性医薬品を用いた診療分野は「核医学」と呼ばれ、放射性医薬品は診断(検査)用、治療(内用療法)用に大別される。また、検査用の放射性医薬品にも体内に(インビボ)直接投与して画像診断を行うシンチグラフィ用と、体内投与を行わない体外(インビトロ)検査用のものがある。これら様々な用途の医薬品にヨウ素の放射性同位体が利用されており、それぞれの核種の特徴と適した用途の関係を理解しておくが良い。

シンチグラフィの断層撮影はSPECT(Single Photon Emission Computed Tomography)と呼ばれ、光子を1本だけ出す単光子放出核種(single photon emitter)である $^{123}\text{I}$ や $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等が用いられる。なお、PET(Positron Emission Tomography)には $^{18}\text{F}$ 等の陽電子放出核種(positron emitter)が用いられる。代表的なインビトロ検査法であるラジオイムノアッセイは、主に $^{125}\text{I}$ で標識した抗体を用いて得られる抗原抗体反応物の放射能から抗原濃度を測定する方法であり、同位体希釈分析法の一種である。1 GBqの $^{131}\text{I}$ の原子数は、原子数 $N$ 、放射能 $A$ 、半減期 $T$ の関係から導かれる。

$^{131}\text{I}$ の半減期は $8.02[\text{日}] \div 7 \times 10^5[\text{秒}]$ なので、  
$$N = A / (0.693 / T) = 1 \times 10^9 / (0.693 / (7 \times 10^5)) \div 1.0 \times 10^{15}$$
  
(アイソトープ手帳 11版(日本アイソトープ協会))

III -2    -7    -4    -5    -11

注) サイクロトロンは加速器の一種で、陽子(proton)、重陽子(deuteron)等を加速させ、様々なターゲットに照射することで非常に多くの種類の核種を生成することができる。生成核種は半減期が短

## 主任者 コーナー

いものが多く、かつ化学分離することで無担体 RI の製造も可能なことから、 $^{123}\text{I}$ に限らず、インビボ核医学検査用 RI の製造によく利用される。

極めて短半減期の PET 検査用核種を製造し診療に用いるために小型サイクロトロンを設置する病院も多い。

(アイソトープ手帳 11 版 (日本アイソトープ協会))

問 5 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。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 高線量放射線を一度に全身被ばくした場合、被ばく直後から数か月の間に現れる障害を急性障害という。線量によって症状は異なるが、典型的な経過は以下の 4 つの病期に分けられる。被ばく直後から数時間以内に悪心、嘔吐、食欲不振、めまいなどいわゆる [ A ] と呼ばれる非特異的な症状が現れる [ B ] 期、これらの症状が一時的に消失する [ C ] 期、骨髄や消化管の障害、脱水など多彩な症状が現れる発症期、及びその後の回復期あるいは死亡である。

障害の現れ方やその時期は、線量及び臓器・組織によって異なる。例えば、ヒトが高線量の  $\gamma$  線を全身被ばくした場合に医療処置がなされないと、5～10 Gy では 3～4 週間程度で [ D ] の障害により、10～20 Gy では 10～14 日程度で [ E ] の障害により死亡する危険性が高い。

<A～E の解答群>

- 1 自律神経失調症
- 2 放射線宿酔
- 3 遅延型過敏症
- 4 早
- 5 前駆
- 6 晩発
- 7 潜伏
- 8 皮膚
- 9 心臓
- 10 骨髄
- 11 中枢神経
- 12 腸管
- 13 急性
- 14 間
- 15 休止

II 臓器・組織の急性障害は、主に臓器・組織の実質細胞の [ F ] によって起こると考えられる。臓器・組織によって実質細胞の放射線致死感受性が違うために、障害を認めるようになる [ G ] も臓器・組織によって異なる。一般に、現れる障害の重篤度は、被ばくした線量が大きいと [ H ] く、同じ被ばく線量でも線量率が高いと [ I ] い。1 回の  $\gamma$  線による被ばくでは、男性の一時的不妊の [ G ] は [ ア ] Gy である。また男性の永久不妊の [ G ] は [ イ ] Gy である。もし皮膚が [ イ ] Gy 程度の  $\gamma$  線を外部被ばくした場合には、被ばくした皮膚において [ J ] が、被ばく後 [ K ] で認められる。

<F～J の解答群>

- 1 増殖
- 2 分化
- 3 死
- 4 しきい線量
- 5 照射線量
- 6 実効線量
- 7 低
- 8 等し
- 9 高
- 10 潰瘍
- 11 脱毛
- 12 萎縮

<ア、イの解答群>

- 1 0.15
- 2 0.5
- 3 1～3
- 4 3.5～6
- 5 6.5～9
- 6 9.5～12

<K の解答群>

- 1 2～3 日
- 2 2～3 週
- 3 2～3 か月

III 晩発影響としては、白内障、発がん、遺伝性(的)影響などが挙げられる。このうち、発がんや遺伝性(的)影響は、[ L ] 影響であり、遺伝性(的)影響は主に放射線に被ばくした生殖細胞に遺伝子の突然変異や染色体異常が起こることによる。

放射線による生殖細胞の突然変異誘発率に関しては、生殖細胞の発育段階により差があることがマウスやショウジョウバエを用いた検討からわかっている。ラッセルらによるマウスを用いた検討の結

果では、精子は精原細胞より突然変異誘発率が **M** 高く、成熟した卵母細胞は未熟な卵母細胞と比べて突然変異誘発率が **N** 低いことがわかっている。

遺伝性(的)影響のリスクの推定には倍加線量法と、線量効果関係を動物実験によって求め、これをヒトに適用して行う **O** 法とがある。遺伝性(的)影響のリスクは、倍加線量が大きいほど **P** 高く、同一線量の場合には一般的に線量率が低いほど **Q** 低い。

UNSCEAR (原子放射線の影響に関する国連科学委員会) 2001 年報告ではヒトにおける倍加線量として **ウ** Gy を使ってリスク推定を行っている。

<L~Qの解答群>

- 1 確定的    2 身体的    3 確率的    4 高    5 等し    6 低    7 直接  
8 スミア    9 間接

<ウの解答群>

- 1 0.1    2 0.5    3 1    4 2

[解答]

- I **A**-2    **B**-5    **C**-7    **D**-10    **E**-12

注) 被ばく後、直ぐに現れる前駆期 (B) では放射線宿酔 (A) が起きる。この「宿酔」とは「二日酔い」という意味があり、照射後に二日酔いに似た倦怠感や、食欲不振、吐き気やめまいがするなどの症状が現れる。その原因は、はっきりとは解明されていないが、照射により、正常細胞がダメージを受け、そのときに細胞から放出される老廃物やアレルギー反応による影響ではないかと考えられている。この症状は一旦消失する潜伏期 (C) を経て、その後、線量に応じて、発症期として 5~10 Gy の被ばくで骨髄障害 (D) や 10~20 Gy では小腸の絨毛上皮細胞の死に伴う消化管障害 (E) を起こし、死亡に至る。それぞれ骨髄死と腸死と呼ばれている。

- II **F**-3    **G**-4    **H**-9    **I**-9    **J**-11    **ア**-1  
**イ**-4    **ク**-2

注) 急性障害は実質細胞の細胞死 (F) に起因しており、臓器・組織としての機能を失うまで細胞死が多くなると、急性障害として症状が現れてくる。したがって、しきい値が存在する。重篤度は線量に比例し (H)、線量率が低いと細胞には修復能があるので、時間的余裕が与えられるので、重篤度は低くなる (I)。また、臓器・組織の種類で感受性が違うため、急性障害の種類ごとにしきい値 (G) も異なる。例えば、精巣は 0.15 Gy で一時的不妊 (ア)、3.5~6 Gy で永久的精子欠損 (永久不妊) になる (イ)。皮膚の急性障害では 10 Gy 程度の 1 回照射で、被ばく後数時間以内に現れる一過性の紅斑である。線量が更に高くなると、一過性の紅斑に続き、2~4 週間後に再び紅斑が強く現れて一層長く続き、その後も繰り返して紅斑が現れる。もっと線量が大きくなると、乾性表皮炎、皮膚の壊死が生ずる。また、脱毛 (J) は一過性のもので 3.5~6 Gy 以上で 2~3 週間後 (K) に起こり、永久脱毛の場合、14 Gy 以上の 1 回照射で起こる。

- III **L**-3    **M**-4    **N**-4    **O**-7    **P**-6    **Q**-6  
**ウ**-3

注) 確率的影響には発がんや遺伝性(的)影響があり (L)、時間的に被ばく後から数年以上の時間を経て症状が現れることから、これら確率的影響と白内障を併せて晩発影響という。発がんは例えば放射線の粒子が体細胞の遺伝子にたまたま発がん性あるいは損傷を起こしても、発がんのリスクを発症する可能性があるし、遺伝性影響も生殖細胞の遺伝子に突然変異を起こしても発症のリスクが

## 主任者 コーナー

あることから、しきい値が存在しない。精巢の細胞死の放射線感受性は、精原細胞（幹細胞）>精母細胞>精細胞（精子細胞）>精子の順に高くなるが、突然変異は、精細胞（精子細胞）>精子=精母細胞>精原細胞の順に高くなる（M）。同様に成熟した卵母細胞は未熟な卵母細胞より突然変異のリスクは高い（N）。この理由は精原細胞や未熟な卵母細胞は代謝が盛んなため、突然変異に至る損傷からの回復を起こしやすいためと考えられている。

遺伝的リスクの推定は直接法と倍加線量法が用いられている。直説法は照射実験のできるマウスなどでの特定の遺伝子についての単位線量当たりの放射線誘導突然変異率を推定する。このような実験動物で得られた突然変異率を線量率降下、表現型の差異、マウスとヒトの違いなどの要因を考慮して、ヒトの遺伝的疾患の誘発率を推定する方法である（O）。倍加線量が大きいほど、リスクは低い（P）。一般的に、線量率が低いほどリスクも低いといえる（Q）。マウスでの高線量率と低線量率での照射の場合の倍加線量は0.3と1.0とされており、ヒトの場合は自然突然変異発生率が平均  $2.95 \times 10^{-6}$ /座位/世代で、低線量率の倍加線量は1.0 Gyとしてリスク推定されている（ウ）。

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。なお、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

I 放射線の生物作用を理解する上で、遺伝情報を担うDNAの構造や機能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、塩基から構成される。塩基にはアデニン（A）、シトシン（C）、グアニン（G）、チミン（T）の4種類があり、向かい合った鎖の□A□が対をなす。これを塩基の相補性という。

細胞が増殖する際、S期において、DNAの2本鎖がほどけて1本鎖となり、塩基の相補性に基づいて、それぞれの1本鎖と対をなすもう1本の鎖が合成される。結果として、元々存在していたDNAと同じ塩基配列を持つDNAが2分子合成される。この過程をDNAの□B□という。

細胞骨格や酵素などとして働くタンパク質は、グリシン、アラニンなど□ア□種類のアミノ酸から構成される。タンパク質を合成する際、まず、DNAをもとに、塩基の相補性に基づいてRNAが合成される。この過程を□C□といい、合成されたRNAをメッセンジャーRNA（mRNA）という。なお、mRNAにはTが含まれず、代わりにウラシル（U）が含まれる。mRNAの塩基□イ□個を1組として、1個のアミノ酸を対応させることにより、タンパク質の合成が行われる。この過程を□D□といい、mRNAの塩基□イ□個の組をコドンという。

<Aの解答群>

- 1 同じ塩基同士    2 AとC、GとT    3 AとG、CとT    4 AとT、GとC

<B～Dの解答群>

- 1 転写    2 転換    3 複写    4 複製    5 変換    6 翻訳

<ア、イの解答群>

- 1 2    2 3    3 4    4 5    5 10    6 20    7 24    8 32    9 36  
10 48    11 60    12 64

II DNA損傷により、遺伝情報が変化することを変異という。変異には、染色体の構造変化を伴わないものと、染色体の構造変化を伴うものがある。染色体の構造変化を伴わないものとして、1個又は複数の塩基が、別のものに置換される変異、欠失する変異、挿入される変異がある。

塩基の置換があっても、タンパク質のアミノ酸配列が変わらない場合がある。一方、別のアミノ酸を指定するコドンに変化し、それによってタンパク質の機能に影響が出る場合がある。このような変異を **E** 変異という。また、停止コドンに変化するような変異を **F** 変異という。

塩基の欠失又は挿入が起こる場合、欠失する又は挿入される塩基の数が **ウ**，コドンの組合せが変わり、変異が起こった位置以降でのタンパク質アミノ酸配列が大きく変化する。このような変異を **G** 変異という。

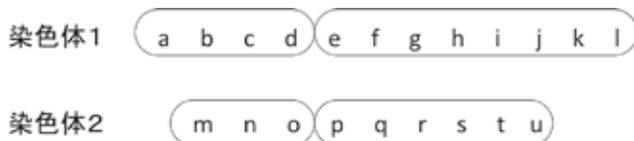
<E~G 解答群>

- 1 サイレンス    2 トランジション    3 トランスバージョン    4 ナンセンス  
5 フレームシフト    6 ミスセンス

<ウの解答群>

- 1 偶数であれば    2 奇数であれば    3 3の倍数であれば    4 3の倍数でなければ  
5 5の倍数であれば    6 5の倍数でなければ

Ⅲ 染色体の数又は構造の変化を伴う遺伝情報の変化を染色体異常という。染色体異常にはさまざまな種類のものがある。下の図の2本の染色体のさまざまな位置でDNA 2本鎖切断が生じて、誤った修復が起こった場合、どのような染色体異常が起きるか考えてみよう。ただし、図において、染色体1のd-e間、染色体2のo-p間においてくびれた部分は動原体である。



- (1) 染色体1のa-b間とk-l間でDNA 2本鎖切断が生じ、誤って前者のb側の末端と後者のk側の末端が結合されると **H** が生じる。  
 (2) 染色体1のh-i間と染色体2のs-t間でDNA 2本鎖切断が生じ、誤って前者のh側の末端と後者のs側の末端が結合されると **I** が生じる。  
 (3) 染色体1のh-i間と染色体2のs-t間でDNA 2本鎖切断が生じ、誤って前者のh側の末端と後者のt側の末端が結合され、同時に前者のi側の末端と後者のs側の末端が結合されると、**J** が生じる。

<H~Jの解答群>

- 1 環状染色体    2 姉妹染色分体    3 二動原体染色体    4 逆位    5 欠失  
6 転座

Ⅳ 染色体異常は不安定型染色体異常と安定型染色体異常に分類できる。正常細胞の場合、不安定型染色体異常は、細胞分裂の際に正しく分配できない可能性が高く、細胞は分裂を続けることができない。一方、安定型染色体異常は、照射後長期にわたって存在し続ける。例えば、環状染色体や **K** は **L** 染色体異常に分類される。安定型染色体異常と不安定型染色体異常のうち、がん化に関係するのは **M** 染色体異常であると考えられている。また、放射線被ばく線量の生物学的推定は **N** 染色体異常を指標として行う場合が多い。低LET放射線の場合、被ばく線量と **N** 染色体異常の頻度の関係は、**O** にあてはまる。

また、染色体異常は染色体型異常と染色分体型異常に分類することができる。1対の染色分体の同

## 主任者 コーナー

じ位置に異常が認められるものを **P** 異常という。もう一方の異常は、1本の染色分体のみに異常が認められるもの、あるいは1対の染色分体の異なる位置に異常が認められるものである。細胞を  $G_1$  期に照射した場合に現れる染色体異常は **Q** 異常である。

<Kの解答群>

- 1 欠失    2 姉妹染色分体交換    3 転座    4 二動原体染色体

<L~Nの解答群>

- 1 安定型    2 不安定型

<Oの解答群>

- 1 1標的1ヒットモデル    2 多標的1ヒットモデル    3 直線しきい値なしモデル  
4 直線-2次曲線モデル

<P, Qの解答群>

- 1 染色体型    2 染色分体型

〔解答〕

- I **A**-4    **B**-4    **C**-1    **D**-6    **ア**-6    **イ**-2

注) DNAはAとT, GとCが水素結合で結合し、2本鎖を形成している(A)。増殖細胞では細胞周期のS期でDNA合成を行い、DNAを複製する。結果として同じ塩基配列を持つ2本鎖DNAが2分子形成される(B)。2本鎖DNAを鋳型としてRNAを相補的に合成することを転写という(C)。合成されたRNAはメッセンジャーRNA(mRNA)であり、RNAではTの代わりにウラシル(U)が用いられる。タンパク質を構成するアミノ酸は20種類ある(ア)。タンパク質をmRNAから合成することを翻訳というが(D)、mRNAの特定の3つの組み合わせ塩基が、特定のアミノ酸に対応し、3つの塩基の組み合わせをコドンという(イ)。

- II **E**-6    **F**-4    **G**-5    **ウ**-4

注) 突然変異には幾つかの種類がある。

その中でも塩基対が1個変化した変異を点変異という。点変異には「プリン塩基 → プリン塩基 or ピリミジン塩基 → ピリミジン塩基」の変化と「プリン塩基 → ピリミジン塩基 or ピリミジン塩基 → プリン塩基」の2種類の変化がある。前者をトランジションといい、後者をトランスバージョンという。

ミスセンス変異とは、DNA配列が変化することによって、アミノ酸が置き換わることである。例えば、「TTA」はLeuのコードを意味するが、A→Tに変化すると「TTT」となりPheをコードすることになる。変異した場所のアミノ酸がタンパク質にとって重要でない部分ならばほど問題とならないが、変異した部分が重要な場所であればかなり問題である(E)。

ナンセンス変異とは、アミノ酸のコードが終止コドンに変化する変異のことである。例えば、「TTA」とコードしている配列があるとする。「TTA」はLeuのコードであるが、T→Gに変異すると「TGA」となり終止コドンへと変化する。終止コドンに変化するとタンパク質の合成は途中でストップしてしまう。この場合、途中で途切れた短いタンパク質が合成されることになる。なお、このタンパク質のほとんどの場合で活性を持たない(F)。

フレームシフトとは、塩基の挿入や欠損によって塩基の数が3の倍数でなくなってしまう結果として起こる変異で、この場合はアミノをコードする配列がすべて変化する(ウ, G)。

- III **H**-1    **I**-3    **J**-6

注) 染色体異常の原因は、DNA 損傷（2本鎖切断）による染色体の切断が原因である。切断の大部分は修復されるが、修復されずにそのままである場合や、誤って再結合した場合に染色体異常を形成する。細胞周期のM期中期に染色体異常として観察される。

安定型異常には次の3つがある。

欠失：1か所切断により末端部が欠失した末端欠失と2か所切断により中央部の欠失した中間欠失。X線などの電離放射線で多い。

逆位：2か所切断により中央部が180°回転して再結合したもの。

転座：2か所の染色体間で部分的に交換が起こったもの（J）。

また、不安定型染色体異常には次の2つがある。

環状染色体（リング）：両腕で切断が起こり、動原体を含む中央部の両端が再結合しリング状になったもの（H）。

二動原体染色体：動原体を2個持ったもの（I）。

IV K - 4    L - 2    M - 1    N - 2    O - 4    P - 1  
Q - 1

注) IIIの注で述べたように、不安定型染色体異常には環状染色体と二動原体染色体がある（K, L）。

がん化に関連するのは安定型染色体異常で（M）、不安定型染色体異常の細胞は細胞分裂ができずに早期に消失する。

また、放射線の被ばく線量の評価には線量と発現頻度との相関が高い不安定型染色体異常を指標として用いられる場合が多い（N）。低LET放射線による染色体異常誘発の線量効果関係は、 $E$ （誘発頻度） $=\alpha D + D^2$ の直線-2次曲線モデルで表すことができる（O）。

染色体異常には染色体型異常と染色分体型異常があり、 $G_1$ 又はS期に被ばくを受けた細胞では染色体型異常が見られ（Q）、末端欠失、逆位、転座、環状染色体、二動原体などの染色体内交換や二動原体染色体などの異常で、1対の同じ位置に以上が認められる（P）。また、染色分体型は $G_2$ 期に被ばくを受けた細胞で見られ、1本の染色体のみに異常が認められる。末端欠失がよく観察される。