

第 63 回

第 1 種放射線取扱主任者試験 問 題 と 解 答 例

第 63 回 平成 30 年 8 月 22 日，23 日実施

第 63 回

第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例

目 次

法 令

第 63 回（平成 30 年）	1
-----------------------	---

管理測定技術

第 63 回（平成 30 年）	17
-----------------------	----

物 理 学

第 63 回（平成 30 年）	33
-----------------------	----

化 学

第 63 回（平成 30 年）	49
-----------------------	----

生 物 学

第 63 回（平成 30 年）	62
-----------------------	----

物 化 生

第 63 回（平成 30 年）	73
-----------------------	----

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

法令

第 63 回 (平成 30 年)

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（以下「放射線障害防止法」という。）及び関係法令について解答せよ。ただし、問題文の『 』内の文章は、放射線障害防止法又は関係法令の条文を示し、項数は算用数字、号数は（ ）つきの算用数字で表す。条文は問に応じて上下を左右などにおきかえ、また、一部を省略して示す。

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

問 1 使用の許可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 3 条 放射性同位元素であってその種類若しくは密封の有無に応じて政令で定める数量を超えるもの又は放射線発生装置の使用（ [A] (放射性同位元素を [A] する場合に限る。）、詰替え（放射性同位元素詰替えをする場合に限り、 [B] のための詰替えを除く。）及び装備（ [C] に放射性同位元素を装備する場合に限る。）を含む。）をしようとする者は、政令で定めるところにより、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。』

[A]	[B]	[C]
1) 製造	運搬	放射性同位元素装備機器
2) 製造	廃棄	放射性同位元素装備機器
3) 製造	運搬	表示付認証機器
4) 輸入	廃棄	放射性同位元素装備機器
5) 輸入	運搬	表示付認証機器

〔解答〕

2

注) 法第 3 条第 1 項 (使用の許可)

使用には製造 (A)、詰替え及び装備が含まれる。廃棄 (B) のための詰替えは廃棄の業の許可の必要な事項であるので使用の許可には含まれない。表示付認証機器は届出で利用できる機器なので、許可の必要な使用 (装備) は放射性同位元素装備機器 (C) となる。

問 2 使用の許可又は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。なお、セシウム 137 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。また、密封されたセシウム 137 が製造されたのは、平成 30 年 4 月 1 日とする。

A 1 個当たりの数量が、3.7 メガベクレルの密封されたセシウム 137 を 3 個で 1 組として装備し、通常その 1 組をもって照射する機構を有する照射装置のみ 1 台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。

- B 1個当たりの数量が、370 キロベクレルの密封されたセシウム 137 を装備した照射装置のみ 1 台を使用しようとする者は、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- C 1個当たりの数量が、3.7 メガベクレルの密封されたセシウム 137 を装備した表示付認証機器のみ 10 台を認証条件に従って使用しようとする者は、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- D 1個当たりの数量が、37 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のみ 1 台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。
- 1) ABC のみ 2) ABD のみ 3) ACD のみ 4) BCD のみ 5) ABCD すべて

〔解答〕

2

注) 法第3条第1項(使用の許可)および令第3条第1項(使用の許可の申請)、法第3条の2(使用の届出)

密封線源の場合、線源1個(通常1式または1組で用いるものは1式または1組)当たりの「原子力規制委員会が定める濃度」と「下限数量の1,000倍」の両方を超えると「許可使用者」となる。本設問の場合、10メガベクレルが下限数量の1,000倍となる(法第2条第2項、令第1条、数量告示別表第1)。

- A: 正 法第3条第1項および令第3条第1項。1組が「3.7メガベクレル×3=11.1メガベクレル」と下限数量の1,000倍を超えており、「許可使用者」となる。
- B: 正 法第3条の2。下限数量の1,000倍を超えていないので、届出使用者。
- C: 誤 法第3条の2第1項および法第3条の3。表示付認証機器を使用する場合、使用の開始後30日以内に届け出る。
- D: 正 法第3条第1項。下限数量の1,000倍を超えるため、許可が必要である。

問3 密封された放射性同位元素の使用の届出に関する次の文章の A ~ D に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

『第3条 法第3条の2第1項の規定による使用の届出は、別記様式第2の届書により、しなければならない。

2 前項の届書には、令第4条第2項の規定により、次の各号に掲げる書類を添えなければならない。

- (1) 予定使用開始時期及び予定使用期間を記載した書面
- (2) A の場所及び廃棄の場所の状況、 B 、標識を付する箇所並びに密封された放射性同位元素の使用をしようとする者にあつては C を示し、かつ、 D 平面図
- (3) C の遮蔽壁その他の遮蔽物が第14条の9第3号に規定する能力を有するものであることを示す書面及び図面』

A	B	C	D
1) 使用	管理区域	使用施設	事業所内外の
2) 保管	管理区域	貯蔵施設	事業所内外の
3) 使用	管理区域	貯蔵施設	縮尺及び方位を付けた
4) 保管	居住区域	使用施設	縮尺及び方位を付けた
5) 使用	居住区域	貯蔵施設	事業所内外の

〔解答〕

3

注) 則第3条、法第3条の2第2項(使用の届出)

使用の届出に必要な書類は、下記の通りである。居住区域、事業所内外の用語は法では用いられていな

い。また、届出使用者が有する放射線施設は貯蔵施設のみである。

- (1) 予定使用開始時期及び予定使用期間を記載した書面
- (2) 使用 (A) の場所及び廃棄の場所の状況、管理区域 (B)、標識を付する箇所並びに密封された放射性同位元素の使用をしようとする者にとっては貯蔵施設 (C) を示し、かつ、縮尺及び方位を付けた (D) 平面図
- (3) 貯蔵施設 (C) の遮蔽壁その他の遮蔽物が第 14 条の 9 第三号に規定する能力を有するものであることを示す書面及び図面

問 4 次のうち、放射性同位元素を業として賃貸しようとする者（表示付特定認証機器のみを業として賃貸する者を除く。）が、原子力規制委員会への届書に添えなければならない書類として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 法人にあっては、登記事項証明書
 - B 放射線障害を防止するために講ずる措置を記載した書面
 - C 賃貸の業を適確に遂行するに足る経理的基礎を有することを明らかにする書面
 - D 予定事業開始時期、予定事業期間及び放射性同位元素の種類ごとの最大賃貸予定数量（予定事業期間中の任意の時点において現に賃貸していることが予定される数量のうち最大のもの）を記載した書面
- 1) ACD のみ 2) AB のみ 3) BC のみ 4) D のみ 5) ABCD すべて

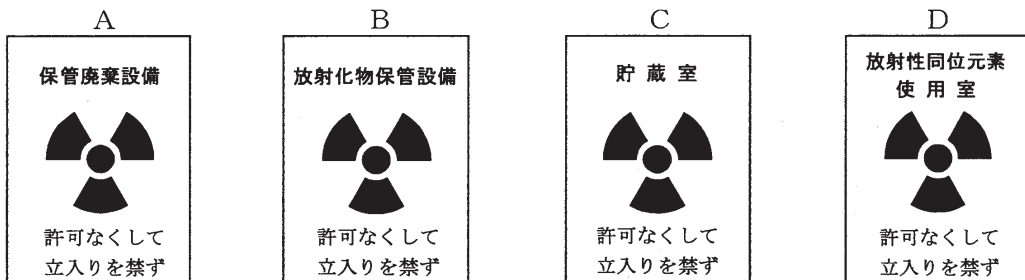
〔解答〕

4

注）法第 4 条第 1 項、則第 6 条、令第 6 条、別紙様式第 5（販売及び賃貸の業の届出）
届出書の申請に添える書類はそれぞれの業により異なっている。

- A：誤 使用の許可の申請に添える書類
- B：誤 使用の許可の申請に添える書類
- C：誤 廃棄物埋設を行う廃棄の業の許可の申請に添える書類の文言を改変したもの
- D：正 則第 6 条第 2 項

問 5 次の標識のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。ただし、この場合、放射能標識は工業標準化法の日本工業規格によるものとし、その大きさは放射線障害防止法上で定めるものとする。



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

〔解答〕

1

注）則第14条の7第1項第9号、施行規則別表第14条の7～14条の11、第15条、第19条関係（標識）使用施設等の基準において付すべき標識についての問題である。定められているのは、A、B、C。

- A：正 則第14条の11第1項第10号。施行規則別表第1（放射能標識の上部に「保管廃棄設備」の文字を、下部に「許可なくして立入りを禁ず」の文字を記入すること。）とある。
- B：正 則第14条の7第1項第9号。施行規則別表第1（放射能標識の上部に「放射化物保管設備」の文字を、下部に「許可なくして立入りを禁ず」の文字を記入すること。）とある。
- C：正 則第14条の9第7号。施行規則別表第1（放射能標識の上部に「貯蔵室」又は「貯蔵箱」の文字を、下部に「許可なくして立入りを禁ず」又は「許可なくして触れることを禁ず」の文字を記入すること。）とある。
- D：誤 則第14条の7第1項第9号。施行規則別表第1（放射能標識の上部に「放射性同位元素使用室」又は「放射線発生装置使用室」の文字を記入すること。）とある。下部の「許可なくして立入りを禁ず」は不要。

問6 使用施設の技術上の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 作業室には、洗浄設備及び更衣設備を設け、汚染の検査のための放射線測定器及び汚染の除去に必要な器材を備えること。
- B 作業室に設けるフード、グローブボックス等の気体状の放射性同位元素又は放射性同位元素によって汚染された物の広がりを防止する装置は、排気設備に連結すること。
- C 作業室の内部の壁、床その他放射性同位元素によって汚染されるおそれのある部分の表面は、平滑であり、気体又は液体が浸透しにくく、かつ、腐食しにくい材料で仕上げること。
- D 作業室の内部の壁、床その他放射性同位元素によって汚染されるおそれのある部分は、突起物、くぼみ及び仕上材の目地等のすきまの少ない構造とすること。
- 1) ABCのみ 2) ABのみ 3) ADのみ 4) CDのみ 5) BCDのみ

〔解答〕

5

注）則第14条の7（使用施設の基準）

密封されていない放射性同位元素の使用をする場合に設ける作業室の基準に関する問題である。定められているのはB、C、D。Aは汚染検査室の基準である（則14条の7第1項第5号ハ：汚染検査室には、洗浄設備及び更衣設備を設け、汚染の検査のための放射線測定器及び汚染の除去に必要な器材を備えること）。

- A：誤 則第14条の7第1項第5号ハ、汚染検査室（及び第4号、作業室の基準）
- B：正 則第14条の7第1項第4号ハ
- C：正 則第14条の7第1項第4号ロ
- D：正 則第14条の7第1項第4号イ

問7 貯蔵施設に備えるべき、放射性同位元素を入れる容器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 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 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。

C 不燃性の構造とすること。

D 容器のふた等には、かぎその他の閉鎖のための器具を設けること。

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

〔解答〕

2

注) 則第 14 条の 9（貯蔵施設の基準）

則第 14 条の 9 第 4 号では A、B のほかハ「液体状又は固体状の放射性同位元素を入れる容器で、亀裂、破損等の事故の生ずるおそれのあるものには、受皿、吸収材その他放射性同位元素による汚染の広がりを防止するための施設又は器具を設けること。」が定められている。

A：正 定められている。則第 14 条の 9 第 4 号イ

B：正 定められている。則第 14 条の 9 第 4 号ロ

C：誤 定められていない

D：誤 定められていない

問 8 廃棄施設の基準に関する次の文章の A ～ D に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

『第 14 条の 11

- (4) ロ 放射線発生装置の使用に係る A は、当該放射線発生装置の B 期間（当該放射線発生装置の使用をする室内に人がみだりに入ることを防止する C を設ける場合にあっては、当該 C により人を立ち入らせないこととしている期間を除く。）における当該放射線発生装置の使用をする D において、当該放射線発生装置から発生した放射線により生じた放射線を放出する同位元素の濃度を原子力規制委員会が定める濃度限度以下とする能力を有すること。』

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

〔解答〕

1

注) 則第 14 条の 11 第 4 号ロ（廃棄施設の基準）

放射線発生装置の使用に係る廃棄設備の基準である。発生装置室の運転を停止している (B) 期間で人が立入可能な場合は、排気設備 (A) により 室内の空气中 (D) の濃度を濃度限度以下としなければならない。よって、インターロック (C) により室内に人が立ち入ることができない場合は除かれる。

問 9 次のうち、放射性同位元素のみを使用する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 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名

B 貯蔵施設の貯蔵能力

C 使用の方法

D 許可の条件

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

〔解答〕

4

注) 法第9条第2項（許可証）

許可証の記載事項は下記の7項目

(1) 許可の年月日及び許可の番号 / (2) 氏名又は名称及び住所 / (3) 使用の目的 / (4) 放射性同位元素の種類、密封の有無及び数量又は放射線発生装置の種類、台数及び性能 / (5) 使用の場所 / (6) 貯蔵施設の貯蔵能力 / (7) 許可の条件

A：誤 定められていない（使用の許可の申請に必要な項目）

B：正 定められている。法第9条第2項第6号

C：誤 定められていない（使用の許可の申請に必要な項目）

D：正 定められている。法第9条第2項第7号

問10 次の密封された放射性同位元素の使用の目的のうち、あらかじめ、その旨を原子力規制委員会に届け出ることにより、許可使用者が一時的に使用の場所を変更して使用できる場合として、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 ガスクロマトグラフによる空気中の有害物質等の質量の調査

B ガンマ線厚さ計による物質の厚さの調査

C 蛍光エックス線分析装置による物質の組成の調査

D 中性子水分計による土壌中の水分の質量の調査

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10条第6項、令第9条第1項第5号、使用の場所の一時的変更の届出に係る使用の目的を指定する告示（平成3年11月15日 科学技術庁告示第9号）

告示では使用の目的として次のものを指定すると記載されている。

1 ガスクロマトグラフによる空気中の有害物質等の質量の調査

2 蛍光エックス線分析装置による物質の組成の調査

3 ガンマ線密度計による物質の密度の調査

4 中性子水分計による土壌中の水分の質量の調査

A：正

B：誤 厚さ計による厚さの調査ではなく、密度計による密度の調査

C：正

D：正

問11 1個当たりの数量が7.4ギガベクレルの密封されたプロメチウム147を装備した厚さ計のみ3台を使用している者が、装置の経年劣化により、その3台を同じ使用の目的で1個当たりの数量が18.5ギガベクレルの密封されたクリプトン85を装備した厚さ計3台に同時更新し、使用することとなった。この場合に、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、プロメチウム147の下限数量は10メガベクレル、クリプトン85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) 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。

- 3) 許可使用に係る変更許可申請をしなければならない。
- 4) 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。
- 5) 許可使用に係る申請をしなければならない。

〔解答〕

5

注) 法第 3 条第 1 項（使用の許可）法第 3 条の 2（使用の届出）

密封された放射性同位元素にあつては下限数量の 1,000 倍（令第 3 条）を超えるとき、使用の許可が必要となる（法第 3 条）。現在は届出使用者である者（選択肢 2, 3, 4 は誤）が、装置の更新後は許可使用者となるため正しいものは 5 となる（選択肢 1 は誤）。

問 12 許可使用者が行う使用施設等の変更に關する次の記述のうち、原子力規制委員会の許可を受けなければならない場合として、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 数量が 3 テラベクレルを超えない密封された放射性同位元素を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使用する場合
 - B 容量が 20 立方メートルの鉄筋コンクリート製の排水浄化槽を、同じ容量のステンレス製の排水浄化槽に変更する場合
 - C 事業所内にある独立した 2 つの廃棄施設のうち、一方の廃棄施設のみを廃止する場合
 - D 放射線発生装置 3 台のうち、1 台の使用の目的を変更する場合
- 1) A と B 2) A と C 3) B と C 4) B と D 5) C と D

〔解答〕

4

注) 法第 10 条（使用施設等の変更）とその関係条項

使用施設等の変更では許可の必要なものと届出で良いものがある。

- A：誤 あらかじめ届け出る。法第 10 条第 6 項、令第 9 条（許可使用に係る使用の場所の一時的変更の届出）第 1 項
- B：正 法第 10 条第 2 項（法第 3 条（使用の許可）第 2 項第 7 号に規定する廃棄施設の位置、構造及び設備の変更に含まれる）
- C：誤 軽微な変更に当たりあらかじめの届出となる。法第 10 条第 2 項ただし書、同第 5 項（「…廃棄施設の廃止」（則第 9 条の 2（変更の許可を要しない軽微な変更）第 4 号）に含まれる）
- D：正 法第 10 条第 2 項（「使用の目的及び方法」（法第 3 条（使用の許可）第 2 項第 3 号）の変更に含まれる）

問 13 許可使用者の変更の手続きと許可証に關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 許可使用に係る変更の許可の申請により、使用の場所の変更をしようとするときは、その変更の許可の申請の際に、許可証を原子力規制委員会に提出しなければならない。
- B 法人の代表者の氏名を変更したときは、許可使用に係る氏名等の変更の届出の際に、許可証を原子力規制委員会に提出し、訂正を受けなければならない。
- C 許可使用に係る使用の場所の一時的変更の届出により、密封された放射性同位元素を、地下検層のため一時的に事業所外で使用するため、使用の場所を変更しようとするときは、その変更の届出の際に、許可証を原子力規制委員会に提出し、訂正を受けなければならない。
- D 氏名若しくは名称又は住所の変更をしたときは、許可使用に係る氏名等の変更の届出の際に、許可

証を原子力規制委員会に提出し、訂正を受けなければならない。

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

〔解答〕

3

注) 法第9条(許可証)、法第10条(使用施設等の変更)

B、Dに関して、法人の代表者の氏名は許可証の記載事項ではないので、法人の代表者の氏名を変更した時は、届出は必要であるが許可証の提出は必要ない。(問9の解説参照)

A：正 法第10条第2項、同第4項

B：誤 許可使用に係る氏名等(法第3条(使用の許可)第2項第1号)の変更の届出の際、許可証を提出し、訂正を受ける必要があるのは、「氏名若しくは名称又は住所の変更をしたとき」(法第10条第1項)に限られる。

C：誤 法第10条第6項により、許可使用に係る使用の場所の一時的変更は届出をあらかじめ要するが、許可証に関する規定はない。

D：正 法第10条第1項

問14 次のうち、放射性同位元素装備機器を製造し、設計認証を受けようとする者が、原子力規制委員会又は登録認証機関に提出しなければならない申請書に記載する事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A 放射性同位元素装備機器の名称及び用途

B 放射性同位元素装備機器の保管を委託する者の氏名又は名称

C 放射性同位元素装備機器に装備する放射性同位元素の種類及び数量

D 放射性同位元素装備機器の廃棄の方法

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

〔解答〕

3

注) 法第12条の2第3項(放射性同位元素装備機器の設計認証等)

A、Cの他、第1号「氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名」が法で定められている。

A：正 法第12条の2第3項第2号

B：誤 定められていない

C：正 法第12条の2第3項第3号

D：誤 定められていない

問15 特定許可使用者又は許可廃棄業者の区分に応じ、設置時施設検査に合格した日から次の定期検査を受けるまでの期間に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A 密封されていない放射性同位元素のみを使用する特定許可使用者は、5年以内に定期検査を受けなければならない。

B 放射性汚染物を取り扱う許可廃棄業者は、5年以内に定期検査を受けなければならない。

C 密封された放射性同位元素のみを使用する特定許可使用者は、5年以内に定期検査を受けなければならない。

D 放射線発生装置のみを使用する特定許可使用者は、5年以内に定期検査を受けなければならない。

- 1) AとB 2) AとC 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

5

注) 法第 12 条の 9 第 1 項（定期検査）、令第 14 条（定期検査の期間）

特定許可使用者について、許可内容に密封されていない放射性同位元素を含むときは 3 年、含まなければ 5 年毎となる。

A：誤 令第 14 条第 1 号

B：誤 令第 14 条第 1 号（許可廃棄業者は 3 年以内）

C：正 令第 14 条第 2 号

D：正 令第 14 条第 2 号

問 16 使用施設等の基準適合義務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 13 条

2 届出使用者は、その A 施設の B ，構造及び設備を原子力規制委員会規則で定める技術上の基準に適合するように C しなければならない。』

A	B	C
1) 使用	場所	使用
2) 廃棄	材料	変更
3) 貯蔵	位置	維持
4) 廃棄物詰替	遮蔽壁	検査
5) 廃棄物貯蔵	柵	設置

〔解答〕

3

注) 法第 13 条第 2 項（使用施設等の基準適合義務）

届出使用に係る規定であり、貯蔵 (A) 施設の位置 (B)、構造、設備は届出の必要な事項（法第 3 条の 2）の一つであるので、基準に適合するよう維持 (C) しなければならない。

届出使用者の有する放射線施設は貯蔵施設のみである。

問 17 密封されていない放射性同位元素の使用の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A 作業室においては、作業衣、保護具等を着用して作業し、これらを着用してみだりに作業室から退出しないこと。

B 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。

C 放射性汚染物で、その表面の放射性同位元素の密度が表面密度限度の 100 分の 1 を超えているものは、みだりに管理区域から持ち出さないこと。

D 放射性同位元素によって汚染された物で、その表面の放射性同位元素の密度が表面密度限度の 10 分の 1 を超えているものは、みだりに作業室から持ち出さないこと。

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

〔解答〕

1

注) 則第 15 条（使用の基準）とその関係条項

作業室から持ち出せないのが表面密度限度のものであり、管理区域から持ち出せないのは、その10分の1であることがポイント。

A：正 則第15条第1項第7号

B：正 則第15条第1項第8号

C：誤 則第15条第1項第10号 平成12年10月23日科学技術庁告示第5号(数量告示)第16条、表面密度限度の100分の1ではなく10分の1。

D：誤 則第15条第1項第9号 表面密度限度の10分の1ではなく、表面密度限度。

問18 陽電子断層撮影用放射性同位元素の種類及び数量に関する次の文章の A ～ C に該当する数字又は語句について、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16条の2 規則第15条第1項第10号の2に規定する陽電子断層撮影用放射性同位元素の種類及び数量は、次の表の左欄に掲げる種類に応じて、それぞれ同表の右欄に掲げる数量とする。』

種 類	数 量
炭素 11	A テラベクレル
B	1 テラベクレル
酸素 15	1 テラベクレル
C	5 テラベクレル

A	B	C
1) 1	ふっ素 18	窒素 13
2) 5	ふっ素 18	窒素 13
3) 5	窒素 13	ふっ素 18
4) 3	窒素 13	ふっ素 18
5) 1	窒素 13	ふっ素 18

〔解答〕

5

注) 平成12年科学技術庁告示第5号 第16条の2(陽電子断層撮影用放射性同位元素の種類及び数量) 投与された陽電子断層撮影用放射性同位元素の数が1を下回ることが確実な期間に係る設問であり、法令で規定されている陽電子断層撮影用放射性同位元素は炭素11、窒素13(B)、酸素15、ふっ素18(C)の4種である。1日の通常の合成量の100倍を目安とした値として、ふっ素18は5テラベクレル、その他のものは1テラベクレル(A)に設定されている。

問19 A型輸送物に係る技術上の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A 周囲の圧力を60キロパスカルとした場合に、放射性同位元素の漏えいがないこと。

B 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。

C 外接する直方体の各辺が10センチメートル以上であること。

D 表面の放射性同位元素の密度が輸送物表面密度の10分の1を超えないこと。

1) AとB 2) AとC 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

2

注）則第 18 条の 5（A 型輸送物に係る技術上の基準）とその関係条項

輸送物毎に基準が異なるので注意を要する。

A：正 則第 18 条の 5 第 5 号

B：誤 5 マイクロシーベルト毎時ではなく 2 ミリシーベルト毎時（則第 18 条の 5 第 7 号を参照）

C：正 則第 18 条の 5 第 2 号

D：誤 輸送物表面密度の 10 分の 1 ではなく、輸送物表面密度を超えない（則第 18 条の 5 第 1 号からの同第 18 条の 4（L 型輸送物に係る技術上の基準）第 8 号を参照）。輸送物表面密度は表面密度限度の 10 分の 1

問 20 実効線量及び等価線量の算定に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。ただし、中性子線による被ばくはないものとする。

A 妊娠中である女子の腹部表面の等価線量は、1 センチメートル線量当量とすること。

B 内部被ばくによる実効線量は、吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の排泄量と実効線量係数の積により算出したものとする。

C 眼の水晶体の等価線量は、1 センチメートル線量当量又は 70 マイクロメートル線量当量のうち、適切な方とすること。

D 皮膚の等価線量は、70 マイクロメートル線量当量とすること。

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

〔解答〕

1

注）平成 12 年科学技術庁告示第 5 号（数量告示）20 条（実効線量及び等価線量の算定）とその関係条項放射線規制についての具体的な数量の多くは、数量告示で規定されている。内部被ばくによる線量の測定は数量告示第 19 条、実効線量及び等価線量の算定については数量告示第 20 条に規定されている。

A：正 数量告示第 20 条第 2 項第 3 号

B：誤 「吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の排泄量」の下線部は「摂取量」が正しい（数量告示第 20 条第 1 項第 2 号からの同第 19 条第 2 項（の式中の項 I）を参照）

C：正 数量告示第 20 条第 2 項第 2 号

D：正 数量告示第 20 条第 2 項第 1 号

問 21 放射線障害予防規程に定める事項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 21 条

(2) の代理者に関すること。

(3) の維持及び管理（第 22 条の 3 第 1 項の規定により管理区域でないものとみなされる区域に立ち入る者の立入りの管理を含む。）並びに （届出使用者が密封された放射性同位元素の使用をし、又は密封された放射性同位元素若しくは放射性同位元素によって汚染された物の廃棄をする場合にあっては、管理区域）の に関すること。』

- | | | |
|-------------|-------|----|
| 1) 放射線取扱主任者 | 放射線施設 | 測定 |
| 2) 放射線管理責任者 | 使用の場所 | 点検 |
| 3) 放射線取扱主任者 | 放射線施設 | 点検 |
| 4) 放射線管理責任者 | 放射線施設 | 測定 |

- 5) 放射線取扱主任者 使用の場所 測定

〔解答〕

3

注) 則第 21 条 (放射線障害予防規程)

予防規程に定める事項として規則にある 18 項目の第 2 項と第 3 項である。放射線取扱主任者 (A) は法定資格だが、放射線管理責任者はそうではない。第 3 項では放射線施設 (B) の維持管理と点検 (C) について規定されている。

問 22 教育及び訓練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 22 条 許可届出使用者及び許可廃棄業者は、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 A 者に対し、原子力規制委員会規則で定めるところにより、B の周知その他を図るほか、C ために必要な教育及び訓練を施さなければならない。』

- | <u>A</u> | <u>B</u> | <u>C</u> |
|----------|--------------|------------|
| 1) に立ち入る | 放射線障害予防規程 | 公共の安全を図る |
| 2) で取り扱う | 放射性同位元素等の取扱い | 放射線障害を防止する |
| 3) に立ち入る | 放射性同位元素等の取扱い | 公共の安全を図る |
| 4) に立ち入る | 放射線障害予防規程 | 放射線障害を防止する |
| 5) で取り扱う | 放射線障害予防規程 | 放射線障害を防止する |

〔解答〕

4

注) 法第 22 条 (教育訓練)

教育訓練を行う対象は立ち入る者 (A)、項目は放射線障害予防規程 (B) の周知その他と規定されている (放射線障害予防規程には放射性同位元素等の取扱いに関することが含まれている)。立ち入る者は取扱の規制に関わる者であるので、目的は放射線障害を防止する (C) となる。

問 23 放射線業務従事者に対し、初めて管理区域に立ち入る前に行う健康診断の方法としての検査又は検診のうち、医師が必要と認める場合に限り行う部位又は項目として、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、次のうちどれか。

- A 皮膚
B 甲状腺
C 末しょう血液中の血色素量又はヘマトクリット値、赤血球数、白血球数及び白血球百分率
D 眼
- 1) ACD のみ 2) AB のみ 3) BC のみ 4) D のみ 5) ABCD すべて

〔解答〕

4

注) 法第 23 条、則第 22 条 (健康診断)

則 22 条第 1 項第 6 号には「検査又は検診は、次の部位及び項目について行うこと。ただし、イからハまでの部位又は項目 (初めて管理区域に立ち入る前に行う健康診断にあつては、イ及びロの部位又は項目を除く。) については、医師が必要と認める場合に限る。イ：末しょう血液中の血色素量又はヘマトクリット値、赤血球数、白血球数及び白血球百分率、ロ：皮膚、ハ：眼、ニ：その他原子力規制委員会が定める部位及び項目」と定められている。初めて管理区域に立ち入る前に行う健康診断で省略できる

のは D のみである。

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

問 24 次のうち、密封されていない放射性同位元素のみを使用する許可使用者が、備えるべき帳簿に記載しなければならない事項の細目として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 受入れ又は払出しに係る放射性同位元素等の種類及び数量
 - B 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) 法第 25 条第 1 項、則第 24 条（記帳）

許可届出使用者については、17 項目について定められている。許可使用者は放射性同位元素の保管を自己の貯蔵施設で行うので、保管の委託は行わない。

- A：正 則第 24 条第 1 項第 1 号イ
- B：正 則第 24 条第 1 項第 1 号ハ
- C：誤 定められていない。届出販売事業者及び届出貨貸事業者にかかる事項である。
- D：正 則第 24 条第 1 項第 1 号ヌ

問 25 所持の制限に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 放射性同位元素のみを使用している許可使用者は、その許可に係る放射性同位元素のすべての使用を廃止する日に所持している放射性同位元素を届け出る廃止措置計画に定める計画期間である 3 月間所持することができる。
 - B 届出貨貸業者から放射性同位元素の運搬を委託された者は、その委託を受けた放射性同位元素を所持することができる。
 - C 届出販売業者は、その届け出た種類の放射性同位元素を販売のために所持することができる。
 - D 届出使用者は、その届け出た種類の放射性同位元素をその届け出た貯蔵施設の貯蔵能力の範囲内で所持することができる。
- 1) ACD のみ 2) AB のみ 3) AC のみ 4) BD のみ 5) BCD のみ

〔解答〕

4

注) 法第 30 条（所持の制限）

届出販売業者及び届出貨貸業者は貯蔵施設を持たない（法第 4 条）ので、放射性同位元素を販売用の在庫として所持（保管）することはできない。

- A：誤 法第 30 条第 7 号、則第 28 条。廃止の日から 30 日以内の所持ができる。
- B：正 法第 30 条第 11 号
- C：誤 法第 30 条第 3 号により運搬のため所持することはできる。

D：正 法第 30 条第 2 号

問 26 事故等の報告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 28 条の 3

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

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

〔解答〕

2

注) 則第 28 条の 3 第 7 号（事故等の報告）

使用、販売、賃貸には許可または届出が必要である。これに並ぶのは同じく許可の必要な廃棄 (A) である。放射線業務従事者の全身の被ばくについての評価は実効線量 (B) で行う。放射線業務従事者の被ばく線量は実効線量で年間 50 mSv を超えないこととされている。計画外被ばくで報告が必要な限度は放射線業務従事者では年間限度の 10 分の 1 の 5 mSv (C)、放射線業務従事者以外の者はその 10 分の 1 の 0.5 mSv (D) と考えると理解しやすい。

問 27 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 10 テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを診療のために使用するときは、放射線取扱主任者として放射線取扱主任者免状を有していない診療放射線技師を選任することができる。
 B 表示付認証機器のみを業として販売するときは、放射線取扱主任者の選任を要しない。
 C 185 ギガベクレルの密封されていない放射性同位元素のみを業として販売するときは、放射線取扱主任者として第 3 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任することができる。
 D 放射線発生装置のみを研究のために使用するときは、放射線取扱主任者として第 1 種放射線取扱主任者免状を有している者を選任しなければならない。
 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）

選任について、第 1 種は非密封放射性同位元素、放射線発生装置、及び 10 テラベクレル以上の密封放射性同位元素の許可使用者、許可廃棄業者、第 2 種は下限数量の 1,000 倍を超え 10 テラベクレル未満の密封放射性同位元素の許可使用者、第 3 種は下限数量の 1,000 倍以下の密封放射性同位元素の届出使用者、届出販売業者、届出賃貸業者に要求される。表示付認証機器の届出使用者や表示付特定認証機器の使用者は必要ない。

A：誤 診療のために使用する際は放射線取扱主任者免状または医師免許か歯科医師免許が必要。

- B：誤 届出販売業者となるため選任が必要。表示付特定認証機器ではないことに注意。
 C：正
 D：正

問 28 放射線取扱主任者の義務等に関する次の文章の ～ に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

『第 36 条 放射線取扱主任者は、 にその職務を遂行しなければならない。

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

- | <input type="text" value="A"/> | <input type="text" value="B"/> | <input type="text" value="C"/> |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1) 確実 | 立ち入る者及び使用者等から運搬を委託された者 | 指示に従わなければならない |
| 2) 正確 | 立ち入る放射線業務従事者 | 指示に従わなければならない |
| 3) 誠実 | 立ち入る者 | 意見を尊重しなければならない |
| 4) 確実 | 立ち入る者 | 意見を尊重しなければならない |
| 5) 誠実 | 立ち入る者及び使用者等から運搬を委託された者 | 意見を尊重しなければならない |

〔解答〕

3

注) 法第 36 条（放射線取扱主任者）

第 1 項は放射線取扱主任者、第 2 項は放射線業務従事者等、主任者が管理する施設に立ち入る者、第 3 項は事業者に対する要請である。

A：正確であり確実であることは望ましいであろうが、法令上は誠実にである。

B：放射線業務従事者は管理区域に立ち入る者である。また運搬を委託された者が管理区域に立ち入る必要はない。このことから「立ち入る者」が相当である。

C：放射線取扱主任者は許可使用者等から任命される者であり、許可使用者等は指揮命令系統での上位者であることを考えれば「主任者の意見を尊重しなければならない」という表現が相当である。

問 29 1 個当たりの数量が 5 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ている届出使用者において、放射線取扱主任者が海外出張をすることになった。当該放射線取扱主任者がその職務を行うことができないが、この間も放射性同位元素を継続して使用することとした。この出張期間中における放射線取扱主任者の代理者の選任に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 出張の期間が 20 日間であったので、放射線取扱主任者の代理者を選任したが、原子力規制委員会にその旨の届出は行わなかった。
- B 出張の期間が 45 日間であったので、放射線取扱主任者の代理者を選任し、選任した日の 20 日後に原子力規制委員会にその旨の届出を行った。
- C 出張の期間が 90 日間であったので、放射線取扱主任者の代理者を選任し、選任した日の 40 日後に原子力規制委員会にその旨の届出を行った。
- D 出張の期間が 5 日間であったので、放射線取扱主任者の代理者の選任は行わなかった。
- 1) ACD のみ 2) AB のみ 3) BC のみ 4) D のみ 5) ABCD すべて

〔解答〕

2

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

法第 37 条において期間に関わらず代理者の選任が必要であること, 法第 37 条 3 項において選任してから 30 日以内に届け出ることが規定されている。また則第 33 条第 3 項により期間が 30 日に満たない場合には届出を要しないことが規定されている。

- A : 正 則第 33 条第 3 項。30 日に満たない場合は届出を要しない
 B : 正 法第 37 条第 3 項。選任した日から 30 日以内に届け出る
 C : 誤 法第 37 条第 3 項。選任した日から 30 日以内に届け出る
 D : 誤 法第 37 条第 1 項。期間に関わらず代理者の選任は必要

問 30 実効線量限度に関する次の文章の ~ に該当する数値について, 放射線障害防止法上定められているものの組合せは, 下記の選択肢のうちどれか。

『第 5 条 規則第 1 条第 10 号に規定する放射線業務従事者の一定期間内における線量限度は, 次のとおりとする。』

- (1) 平成 13 年 4 月 1 日以後 5 年ごとに区分した各期間につき ミリシーベルト
 (2) 4 月 1 日を始期とする 1 年間ににつき ミリシーベルト
 (3) 女子 (妊娠不能と診断された者, 妊娠の意思のない旨を許可届出使用者又は許可廃棄業者に書面で申し出た者及び次号に規定する者を除く。) については, 前 2 号に規定するほか, 4 月 1 日, 7 月 1 日, 10 月 1 日及び 1 月 1 日を始期とする各 3 月間ににつき ミリシーベルト
 (4) 妊娠中である女子については, 第 1 号及び第 2 号に規定するほか, 本人の申出等により許可届出使用者又は許可廃棄業者が妊娠の事実を知ったときから出産までの間ににつき, 人体内部に摂取した放射性同位元素からの放射線に被ばくすることについて ミリシーベルト』

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

〔解答〕

5

注) 数量告示第 5 条 (実効線量限度)

現在有効な数量告示の初版は平成 12 年科学技術庁告示第 5 号であるので, 平成 13 年度初めが区切りとなっている。現行の線量限度値は, 計画被ばく状況における線量限度値についての ICRP 1990 年勧告「放射線業務従事者について, 5 年間の平均で年間 20 mSv (5 年で 100 mSv (A)) かつどの 1 年においても 50 mSv (B) を超えるべきではない」に由来している。女子については妊娠初期からの胎児の保護を念頭に 3 月毎の 5 mSv (C) の基準が設けられている。本人が放射線業務従事者であってもその胎児は公衆であると考えらるべきであるので, 内部被ばくについての限度は 1 mSv (D) と考える。

管 理 測 定 技 術

第 63 回（平成 30 年）

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

I 中性子線は A 放射線で、物質中の B と核反応を起こし、電離作用を持つ C を生成することができる。物質中で核反応を引き起こす確率のことを D と呼び、b（バーン）という特別な単位がよく用いられる。なお、SI 単位とは $1\text{ b} = \text{ア}$ の関係にある。この D は、中性子遮蔽計算、中性子測定器の応答解析等に必要な基礎データであり、様々な核反応について、実験値や理論計算値等を用いて、ENDF B-VII や JENDL-4.0 等の評価済み核データライブラリが整備されている。

E である ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p}){}^3\text{H}$ 反応や F 反応の D は、エネルギーが低い熱中性子に対して大きくなる。このため、中性子線の計測では、熱中性子による ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p}){}^3\text{H}$ 反応や F 反応で生成された C による検出器内での電離作用を利用する方法がよく用いられる。これらの核反応を用いてエネルギーが高い中性子を感度良く測定するためには、 G を用いて熱化させる必要がある。 G としては、 H の原子核との I を利用して最も効率よく中性子を熱化させるために、ポリエチレンなどの H が多く含まれる物質がよく利用される。

<A～D の解答群>

- | | | | |
|-----------|---------|-----------|------------|
| 1) 荷電粒子 | 2) 電子 | 3) 光子 | 4) 電荷を持たない |
| 5) 電荷を持つ | 6) 軌道電子 | 7) オージェ電子 | 8) 原子核 |
| 9) 核反応断面積 | 10) 放射化 | 11) 衝突阻止能 | |

<アの解答群>

- | | | |
|--|---------------------------------------|--|
| 1) $1.6 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ | 2) $1.6 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ | 3) $1.6 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$ |
| 4) $1 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ | 5) $1 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ | 6) $1 \times 10^{-24} \text{ s}^{-1}$ |
| 7) $1 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ | 8) $1 \times 10^{-28} \text{ m}^2$ | 9) $1 \times 10^{-28} \text{ s}^{-1}$ |
| 10) $1.6 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ | 11) $1.6 \times 10^{-31} \text{ m}^2$ | 12) $1.6 \times 10^{-31} \text{ s}^{-1}$ |

<E～I の解答群>

- | | | |
|---|---|---|
| 1) 弾性散乱 | 2) コンプトン散乱 | 3) ラザフォード散乱 |
| 4) ${}^{11}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^8\text{Li}$ | 5) ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \text{d}){}^9\text{Be}$ | 6) ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$ |
| 7) 吸熱反応 | 8) 発熱反応 | 9) 捕獲反応 |
| 10) 水素 | 11) 炭素 | 12) 酸素 |
| 13) 増殖材 | 14) 吸収材 | 15) 減速材 |

II 中性子線が存在する放射線管理の現場では、 BF_3 比例計数管や ${}^3\text{He}$ 比例計数管等の中性子検出器の周りをポリエチレンやパラフィン等で覆った中性子線量当量(率)計が用いられる。この線量当量(率)計は、広いエネルギー範囲において中性子の周辺線量当量に対する測定器のレスポンスが一定に近づくように構造が工夫されており、中性子のエネルギースペクトルによらず周辺線量当量率を直読できるという大きな特徴を有している。この中性子線量当量(率)計に対して、出力される計数と周辺線

量当量を関連付けるために、点状線源とみなせる ^{252}Cf 中性子線源を用いて校正を行った。校正日における線源からの中性子放出率を $4.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 、線源から中性子線量当量(率)計の実効中心までの距離を75 cm とすると、実効中心での1秒当たりの中性子フルエンス率は $\boxed{\text{イ}} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。 ^{252}Cf 線源から放出される中性子の中性子フルエンスを周辺線量当量に換算するための係数を $385 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$ とすると、実効中心での1時間当たりの周辺線量当量率は $\boxed{\text{ウ}} \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ となる。

^{252}Cf 線源を設置する前に中性子線量当量(率)計で得られる計数は、1時間で576カウントであった。このときのバックグラウンド計数率は $\boxed{\text{エ}} \text{ s}^{-1}$ となり、その標準偏差は $\boxed{\text{オ}} \text{ s}^{-1}$ となる。次に、 ^{252}Cf 線源を設置して測定したところ、1分間で2,601カウントが得られた。この時のバックグラウンドを差し引いた正味の計数率は、 $\boxed{\text{カ}} \text{ s}^{-1}$ となり、その標準偏差は $\boxed{\text{キ}} \text{ s}^{-1}$ となる。この結果から、中性子線量当量(率)計で得られる計数を周辺線量当量に換算するための1カウント当たりの換算係数は $\boxed{\text{ク}} \mu\text{Sv}$ となり、その標準偏差は $\boxed{\text{ケ}} \mu\text{Sv}$ となる。

<イ、ウの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1) 2.2×10^{-2} | 2) 7.8×10^{-2} | 3) 7.1×10^{-1} | 4) 2.2×10^0 |
| 5) 5.7×10^1 | 6) 7.8×10^1 | 7) 9.9×10^1 | 8) 5.7×10^2 |
| 9) 7.1×10^2 | 10) 9.9×10^2 | | |

<エの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 1.6×10^{-2} | 2) 5.6×10^{-2} | 3) 9.6×10^{-2} | 4) 1.6×10^{-1} |
| 5) 5.6×10^{-1} | 6) 9.6×10^{-1} | 7) 1.6×10^0 | 8) 5.6×10^0 |
| 9) 9.6×10^0 | | | |

<オの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 4.0×10^{-3} | 2) 6.7×10^{-3} | 3) 8.5×10^{-3} | 4) 4.0×10^{-2} |
| 5) 6.7×10^{-2} | 6) 8.5×10^{-2} | 7) 4.0×10^{-1} | 8) 6.7×10^{-1} |
| 9) 8.5×10^{-1} | | | |

<カの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1) 3.4×10^{-1} | 2) 4.3×10^{-1} | 3) 5.6×10^{-1} | 4) 3.4×10^0 |
| 5) 4.3×10^0 | 6) 5.6×10^0 | 7) 3.4×10^1 | 8) 4.3×10^1 |
| 9) 5.6×10^1 | | | |

<キの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 1.6×10^{-2} | 2) 4.0×10^{-2} | 3) 8.5×10^{-2} | 4) 1.6×10^{-1} |
| 5) 4.0×10^{-1} | 6) 8.5×10^{-1} | 7) 1.6×10^0 | 8) 4.0×10^0 |
| 9) 8.5×10^0 | | | |

<クの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 2.0×10^{-5} | 2) 5.0×10^{-5} | 3) 6.5×10^{-5} | 4) 2.0×10^{-4} |
| 5) 5.0×10^{-4} | 6) 6.5×10^{-4} | 7) 2.0×10^{-3} | 8) 5.0×10^{-3} |
| 9) 6.5×10^{-3} | | | |

<ケの解答群>

- | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 1.5×10^{-8} | 2) 3.9×10^{-8} | 3) 1.0×10^{-7} | 4) 1.5×10^{-7} |
| 5) 3.9×10^{-7} | 6) 1.0×10^{-6} | 7) 1.5×10^{-6} | 8) 3.9×10^{-6} |
| 9) 1.0×10^{-5} | | | |

〔解答〕

I A-4 B-8 C-1 D-9 ア-8 E-8 F-6 G-15 H-10
I-1

注) D：核反応を引き起こす確率のことを核反応断面積と呼ぶ。

ア： $1\text{ b} = 1 \times 10^{-28}\text{ m}^2$ 。

F：中性子測定では、熱中性子による ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p}){}^3\text{H}$ 反応や ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応で生成された荷電粒子による検出器内での電離作用を利用する方法が用いられる。

I：エネルギーが高い中性子を感度良く測定するためには、減速材を用いて熱化する。減速材としては、水素の原子核との弾性散乱を利用して熱化するため、ポリエチレンなどの水素が多く含まれている物質がよく利用される。

Ⅱ イー5 ウー6 エー4 オー2 カー8 キー6 クー5 ケー9

注) イ：中性子フルエンス率 $=\frac{\text{中性子放出率}}{4\pi(\text{線源からの距離})^2}=\frac{4.0\times 10^6}{4\times\pi\times 75^2}=5.7\times 10^1\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

ウ：周辺線量当量率 $=\text{換算係数}\times\text{中性子フルエンス率}=385\times 10^{-6}\times 5.7\times 10^1\times 3600=7.8\times 10^1\mu\text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$

エ：バックグラウンド(BG)計数率 $=\frac{\text{BG 計数}}{\text{計数時間}}=\frac{576}{3600}=1.6\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$

オ：BG 計数率の標準偏差 $=\frac{\sqrt{\text{BG 計数}}}{\text{計数時間}}=\frac{\sqrt{576}}{3600}=6.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$

カ：正味の計数率 $=\text{線源の計数率}-\text{BG 計数率}=\frac{2601}{60}-1.6\times 10^{-1}=4.3\times 10^1\text{ s}^{-1}$

キ：正味の計数率の標準偏差 $=\sqrt{(\text{線源の計数率の標準偏差})^2+(\text{BG 計数率の標準偏差})^2}$
 $=\sqrt{\frac{2601}{60^2}+(6.7\times 10^{-3})^2}=8.5\times 10^{-1}\text{ s}^{-1}$

ク：1 カウント当たりの換算係数 $=\frac{1\text{ 時間当たりの周辺線量当量}}{1\text{ 時間当たりの正味の計数}}=\frac{7.8\times 10^1}{4.3\times 10^1\times 3600}=5.0\times 10^{-4}\mu\text{ Sv}$

ケ：1 カウント当たりの換算係数の標準偏差

$$=\frac{\text{周辺線量当量率}}{\text{正味の計数率}}\times\sqrt{\left(\frac{\text{正味の計数率の標準偏差}}{\text{正味の計数率}}\right)^2+\left(\frac{\text{周辺線量当量率の標準偏差}}{\text{周辺線量当量率}}\right)^2}$$

$$=5.0\times 10^{-4}\times\sqrt{\left(\frac{8.5\times 10^{-1}}{4.3\times 10^1}\right)^2+0}=1.0\times 10^{-5}\mu\text{ Sv}$$

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 Ge 検出器を用いた放射能測定に際しては、観測される γ 線スペクトルは、ピーク部分とその下に横たわる連続部分とからなる。ピーク部分における計数（ピーク計数）を求める手法には、①ピーク部分の形として A 分布を、連続部分の形として多項式を想定して、最小二乗法によって未知パラメータを決定し、これから面積を求める B 法や、②ピーク領域の両裾を直線で結び、連続部分を台形分布で近似して求め、これをピーク領域の全計数から差し引く簡便な方法（これをコベル法という）などがある。ピーク領域の目安は、ピークチャンネルの左右にそれぞれ $1.5\times$ （ピークの C）よりやや広めの領域をとる。実際は、左右の裾の計数として、ピーク領域の左右の外側にそれぞれ数チャンネルの計数値の平均値をとり、それぞれの裾の計数値とすることが多い。

<A～Cの解答群>

- | | | | |
|----------|---------|-------------|--------------|
| 1) ローレンツ | 2) ガウス | 3) 台形 | 4) 関数フィッティング |
| 5) 半値半幅 | 6) 半値全幅 | 7) 1/10 値全幅 | 8) 標準偏差 |

9) マクスウェル 10) ボルツマン

II 単一 γ 線放出核種の場合は、ピーク計数率 n_p と放射能 A との関係は

$$A = \frac{n_p}{\epsilon_p \Gamma} \quad \dots\dots (1)$$

となる。ここで、 ϵ_p はピーク効率、 Γ は1壊変当たりの着目した γ 線の放出割合である。しかし、複数の γ 線(特性X線、陽電子消滅線を含む)が同時に放出される場合には、着目する γ 線が全吸収を起こしても、これと同時に放出された他の γ 線が検出器に同時に入射して信号電荷量が加算され、パルス波高チャネル位置は本来のピーク位置よりも高いチャネルに移動し、その分だけピーク計数率が減少することがある。これを **D** と言い、この効果の影響を補正しなければならない。この場合、補正前のみかけのピーク計数率 n_p^* と放射能 A との関係は

$$A = \frac{n_p^*}{\epsilon_p \Gamma f} \quad \dots\dots (2), \quad \epsilon_p = \frac{n_p^*}{A \Gamma f} \quad \dots\dots (2')$$

となる。ここで、 f は **D** によってピーク計数率が減少する割合である。多くの γ 線を放出する複雑な壊変をする核種について、この項を正確に求めることは容易ではないが、例えば、図1の壊変図に示す様に、核種Xが分岐比 a 及び b で核種Yに壊変し、2つの γ 線 γ_A と γ_B とが **E** に放出される簡単な場合について考えよう。ここで、 γ 線 γ_A 、 γ_B について、それぞれの全効率を ϵ_{TA} 、 ϵ_{TB} 、それぞれのピーク効率を ϵ_{PA} 、 ϵ_{PB} とすると、 γ 線 γ_A のピークに着目した場合、 $f = \text{ア}$ となり、同様に、 γ 線 γ_B に着目した場合、 $f = \text{イ}$ となる。なお、 γ 線 γ_A と γ 線 γ_B とがともに全吸収を起こした場合には、それぞれの γ 線のエネルギーの和に相当する位置にピークが観測される。このピークを **F** と呼び、**E** γ 線による **F** の生成効率は、**ウ** となる。

特に、線源・検出器間距離が近接している場合やウェル型のGe検出器を用いる場合には、**G** は高くなり、 f の値は1からかなり小さくなり、**D** に対する補正はそれだけ大きくなる。一方、線源・検出器間距離が離れている場合、**G** は低くなりその結果 **D** は小さくなるが、**H** も低くなってしまいうので、微弱な放射能の測定には適さない。

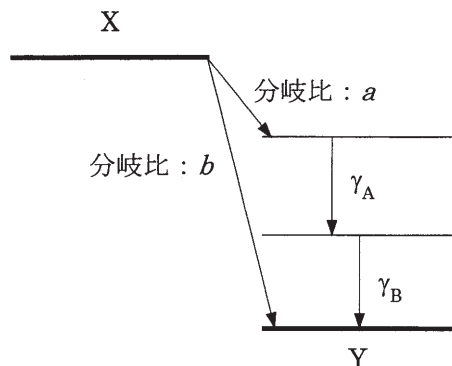


図1

<D~Hの解答群>

- | | | | |
|-------------|----------|---------|----------|
| 1) パラレル | 2) カスケード | 3) サム効果 | 4) サムピーク |
| 5) ランダムサム効果 | 6) 平方根 | 7) 対数 | 8) リニア |

- 9) 計数率効果 10) ピーク効率 11) 全効率 12) パイルアップ
13) シングルエスケープピーク 14) ダブルエスケープピーク

<ア～ウの解答群>

- 1) $(1 - \epsilon_{PA})$ 2) $(1 - \epsilon_{TA})$ 3) $(1 - \epsilon_{PB})$ 4) $(1 - \epsilon_{TB})$
5) $(1 - a\epsilon_{PA})$ 6) $(1 - a\epsilon_{TA})$ 7) $(1 - a\epsilon_{PB})$ 8) $(1 - a\epsilon_{TB})$
9) $(1 - \epsilon_{TA} - \epsilon_{TB} + \epsilon_{TA}\epsilon_{TB})$ 10) $\epsilon_{TA}\epsilon_{TB}$ 11) $\epsilon_{PA}\epsilon_{TB}$
12) $\epsilon_{TA}\epsilon_{PB}$ 13) $\epsilon_{PA}\epsilon_{PB}$

Ⅲ 被測定線源と同じ核種の標準線源（放射能 A_s ）があれば、被測定線源と標準線源とで同じ条件でそれぞれ測定を行って、それぞれのピーク計数率の比に A_s を乗ずることにより、被測定線源の放射能 A_x を簡単に求めることが出来る。

被測定線源と同じ核種の標準線源が得られない時は、(1)式または(2)式により放射能を決定する。そのためには、放射能が既知でいくつかの γ 線エネルギーの異なる標準線源を用いて、定めた条件(検出器・線源間距離、線源状態など)におけるピーク効率 ϵ_p を γ 線エネルギーの関数としてあらかじめ決定しておく必要がある。この際、標準線源として、単一 γ 線放出核種で、放出強度が十分に評価されている核種を用いるのが最適である。この様な線源の核種として、例えば エ γ 線エネルギー：835 keV, γ 線放出率：100%), ^{85}Sr (514 keV, 95.7%), オ (662 keV, 85.1%) などがある。また、複数の γ 線を放出しても、壊変形式が単純な カ (1,173 keV, 99.9% および 1,333 keV, 100%) や キ (898 keV, 93.7% および 1,836 keV, 99.2%) の様な場合には、Ⅱの(2')式の f 項の適切な評価により、効率曲線の決定に用いることが出来る。線源・検出器間距離が大きい場合には、 ^{152}Eu の様に複雑な壊変をして広いエネルギー範囲の多数本の γ 線を放出する核種を用いても、 f 項は 1 に近づき、この種の標準線源 1 個のみで広いエネルギー範囲にわたってピーク効率曲線を策定することができる場合もある。

なお、ピーク効率を図示する場合、エネルギー軸を I スケール、ピーク効率軸を J スケールで表示すると、エネルギーが 200 keV～3 MeV の領域にわたってほぼ直線となるので、データの内挿や解析がしやすくなる。

なお、計数率が極端に高い場合には、たとえ単一 γ 線放出核種の場合であっても、2つのパルスが時間的に近接して到来すると、2つのパルスが K して、本来のピーク領域に入るべきパルスがピーク領域から流出し、みかけのピーク効率が減少することがある。これを L とも言うが、これはⅡで述べた効果とは発生原因が異なり、Ⅱで述べた対応は適用出来ない。テストパルスを用いた方法などでその程度は評価、補正はできるが、K を軽減するには、全体の計数率を抑制することが基本である。また、増幅器の M 回路を適切に調節して、パルスのオーバーシュートやアンダーシュートを最小とすることも大切である。

<エ～キの解答群>

- 1) ^{22}Na 2) ^{24}Na 3) ^{51}Cr 4) ^{54}Mn 5) ^{60}Co
6) ^{65}Zn 7) ^{88}Y 8) ^{134}Cs 9) ^{137}Cs 10) ^{152}Eu
11) ^{198}Au 12) ^{203}Hg 13) ^{241}Am

<I～Mの解答群>

- 1) 弾道欠損 2) カスケード 3) サム効果 4) サムピーク
5) ランダムサム効果 6) 平方根 7) 対数 8) リニア
9) 計数率 10) ポールゼロキャンセル 11) パイルアップ
12) ベースラインレストアラ 13) コインシデンス

〔解答〕

I A-2 B-4 C-6

注) A, B: ピーク計数を求める2つの手法の特性は次のとおり。

関数フィッティング法……ピーク部分の形状をガウス分布, 連続部分の形状を多項式と想定して, 最小二乗法によって未知パラメータを決定し, 面積を求める方法である。独立・複合ピークの解析に適しているが, 解析プログラムが複雑となり計算時間が長くなる。

コベル法……ピーク領域の両裾を直線で結び, 連続部分を台形分布で近似し, ピーク領域の全計数から差し引く方法である。独立ピークの解析は計算が容易で信頼性が高いが, 複合ピークに対しては解析が困難となる。

C: 半値全幅……ピーク高さの半分の高さにおけるピークの幅を指す。半値半幅は半値全幅の半分の値である。ピーク領域の目安はピークの半値全幅の1.5倍程度である。

II D-3 E-2 F-4 G-11 H-10 ア-4 イ-2 ウ-13

注) D, F: サム効果……複数の γ 線を同時に放出する核種の2つ以上の γ 線が同時に検出された場合, 合計エネルギーのピークが計数される現象(サム・コインシデンス効果ともいう)。合計エネルギーのピークをサムピークという。

E: カスケード…… γ 線が検出器の分解時間以内に続いて放出されること。2つの γ 線が同時に検出されやすい。

G, H, ア～ウ: f はサム効果によってピーク計数率が減少する割合である。 γ 線 γ_A のピークでサム効果が起こらない確率は, γ 線 γ_B を検出しない確率であるから, γ 線 γ_A に着目した場合, $f=(1-\epsilon_{TB})$ となる。同様にして, γ 線 γ_B に着目した場合, $f=(1-\epsilon_{TA})$ となる。

サムピークの生成効率 ϵ は, γ 線 γ_A と γ 線 γ_B がどちらもピークとして確認される割合であるため, 2つの γ 線のピーク効率の積 $\epsilon_{PA} \cdot \epsilon_{PB}$ で表される。

線源と検出器の距離が近い場合は, 立体角が大きくなるために γ 線が検出される確率が高くなるため, 全効率が高くなる。一方, 距離が離れると, 立体角が小さくなるために, 全効率が低くなるが, ピーク効率も低くなってしまう。

III エ-4 オ-9 カ-5 キ-7 I-7 J-7 K-11 L-5 M-10

注) エ～キ: 標準線源として用いられる核種をまとめておく。

^{54}Mn (エネルギー: 835 keV, γ 線放出率: 100%)

^{85}Sr (エネルギー: 514 keV, γ 線放出率: 95.7%)

^{134}Cs (エネルギー: 662 keV, γ 線放出率: 85.1%)

^{60}Co (エネルギー: 1173 keV, γ 線放出率: 99.9%) (エネルギー: 1333 keV, γ 線放出率: 100%)

^{88}Y (エネルギー: 898 keV, γ 線放出率: 93.7%) (エネルギー: 1836 keV, γ 線放出率: 99.2%)

I, J: ピーク効率を図示する場合, 両対数グラフを用いるとエネルギーが200 keV～3 MeVの範囲でほぼ直線となる。200 keV以下の範囲では, エンドキャップによる吸収によりピーク効率は減少する。

K, L, M: パイルアップ……計数率が高い場合はテイルやアンダーシュートに次のパルスが入り, ピーク効率に変化する現象を, パイルアップ, またはランダムサム効果ともいう。パイルアップは計数率を抑制することや, パルスのオーバーシュートやアンダーシュートを最小とすることで抑制可能である。回路に抵抗を加えて回路網を変えることで, アンダーシュートのない単純な出力信号を得る技術をポールゼロキャンセルという。

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

Ⅰ ^{51}Cr （半減期 28 日）を用いて Cr のトレーサ実験を行うために、電子線形加速器（電子の直線加速装置）により最大エネルギー 30 MeV の□A□を Cr 標的（Cr 粉末をアルミ箔に包んだもの）に照射し、 $^{52}\text{Cr}(\gamma, n)$ 反応により、 ^{51}Cr を製造する。□A□は、加速した電子をコンバーターと呼ばれるタングステン板または白金板に照射して得ることが多いが、発生する□A□の全強度は、コンバーターの原子番号に□B□。

この加速器を使用する室の人が通常出入りする出入口には、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に基づき、使用中である旨を自動的に表示する装置と、使用中にその室に人がみだりに入ることを防止する□C□が設けられている。加速器の運転中に、室内では□A□による光核反応で放射性核種が生成する。空気中では、酸素から□D□、窒素から ^{13}N が生成する。また、発生した二次中性子により空気中のアルゴンから□E□が生成する。加速器の運転を停止して室内に入る際には、室内の空間線量率が基準以下にまで下がっていることを確認する。ターゲット周辺は非常に高い線量率となっているので、入室にあたっては、感度は低いが数え落としの問題がなく、 $10 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 程度でも測定可能な□F□を携行して測定値を確認しつつ入室し、不用意な被ばくをしないように作業する。

<A～C の解答群>

- | | | |
|---------------|-----------|--------------|
| 1) 制動放射線 | 2) 散乱電子線 | 3) コンプトンガンマ線 |
| 4) 逆コンプトンガンマ線 | 5) 比例する | 6) 反比例する |
| 7) 依存しない | 8) インターホン | 9) インターロック |
| 10) 監視カメラ | 11) 二重錠 | |

<D, E の解答群>

- | | | | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| 1) ^3H | 2) ^7Be | 3) ^{11}C | 4) ^{13}N | 5) ^{15}O |
| 6) ^{16}N | 7) ^{19}O | 8) $^{34\text{m}}\text{Cl}$ | 9) ^{40}Ar | 10) ^{40}K |
| 11) ^{41}Ar | | | | |

<F の解答群>

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1) 蛍光ガラス線量計 | 2) TLD 線量計 |
| 3) OSL 線量計 | 4) BF_3 比例計数管式サーベイメータ |
| 5) NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータ | 6) 電離箱式サーベイメータ |
| 7) ZnS(Ag) シンチレーション式サーベイメータ | |

Ⅱ $^{52}\text{Cr}(\gamma, n)$ 反応により製造した 50 MBq の ^{51}Cr を用いてトレーサ実験を行う。 ^{51}Cr は 100% の割合で EC 壊変し、320 keV のガンマ線（放出率 10%）とバナジウムの□G□を放出する。放射線発生装置を取り扱う際は、主として外部被ばくを考慮すればよいが、製造した非密封の放射性核種を取り扱う場合には、外部被ばくとともに内部被ばくも考慮する必要がある。

外部被ばくを低減するための 3 原則は、距離による防護、遮蔽による防護、並びに、時間による防護である。点線源による線量率は線源からの距離の□H□するので、照射した Cr 標的はピンセットやトンクを用いて取り扱い、指の局所被ばくを低減させる。50 MBq の ^{51}Cr を遮蔽をせずに 4 時間取り扱うとき、 ^{51}Cr の実効線量率定数を、 $0.0046 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ とすると、50 cm 離れた位置では□ア□ μSv の被ばくとなる。 ^{51}Cr を鉛で遮蔽する場合、320 keV のガンマ線の全質量減弱係数は $0.38 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、鉛の密度は $11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であるので、320 keV のガンマ線に対する半価層の厚さは、□イ□ cm である。従って、□ウ□ cm の厚さの鉛を用いれば ^{51}Cr からのガンマ線は 1/128 に減衰する計算となる。実際にはビルドアップにより約 1/100 に減衰する。線量は線量率と時間の積で

あるので、短時間で取り扱えば、被ばく線量は小さくなる。そのためには適切な計画と十分な準備が必要である。

ICRP Publ.5における修正係数によると、非密封RIの取扱操作の危険度は、貯蔵 < I の順で増す。この危険度を考慮し、外部被ばくと内部被ばく、並びに汚染の防止対策を含む実験計画をたてた。外気と遮断された構造であるグローブボックスの中で、照射した標的を開封し、Cr粉末を酸に加熱溶解する。次に、この溶液を、ポリエチレンろ紙で内面を養生した空気の流速が適正に制御されたフード(ドラフト)で、ポリエチレンろ紙を内面に敷いたバットの中で取り扱う。溶液から一定量を分取して、一連の化学操作を行い、化学的挙動を追う。溶液の分取には、内部被ばくを防ぐために、Jを用いて全量ピペットを操作するか、マイクロピペットを使用する。これらの操作は、鉛遮蔽体の後ろから行う。化学操作の各段階での溶液をガンマ線測定する。この測定には、自動試料交換機能のついた井戸型の検出器を利用する。

照射していないCr粉末を用いたKにより実験手順を確認し、あらかじめ、化学操作に習熟しておく。

<G, Hの解答群>

- | | | | |
|----------|-------------|-----------|-----------|
| 1) アルファ線 | 2) ベータ線 | 3) ガンマ線 | 4) 特性X線 |
| 5) 制動X線 | 6) 0.5乗に反比例 | 7) 1乗に反比例 | 8) 2乗に反比例 |
| 9) 1乗に比例 | 10) 2乗に比例 | | |

<ア～ウの解答群>

- | | | | | |
|------------|---------|----------|---------|----------|
| 1) 0.00037 | 2) 0.17 | 3) 0.511 | 4) 0.74 | 5) 1.022 |
| 6) 1.2 | 7) 1.7 | 8) 3.7 | 9) 5.2 | 10) 7.4 |
| 11) 8.2 | 12) 10 | 13) 37 | 14) 100 | |

<Iの解答群>

- | | | |
|----------------------------------|------------------------|--------------|
| 1) 乾式で粉末発生 < 普通の化学操作 | < 粉末の取扱い | ≡ 揮発性化合物の取扱い |
| 2) 乾式で粉末発生 < 粉末の取扱い | ≡ 揮発性化合物の取扱い < 普通の化学操作 | |
| 3) 粉末の取扱い ≡ 揮発性化合物の取扱い < 乾式で粉末発生 | < 普通の化学操作 | |
| 4) 粉末の取扱い ≡ 揮発性化合物の取扱い < 普通の化学操作 | < 乾式で粉末発生 | |
| 5) 普通の化学操作 < 粉末の取扱い | ≡ 揮発性化合物の取扱い < 乾式で粉末発生 | |
| 6) 普通の化学操作 < 乾式で粉末発生 | < 粉末の取扱い | ≡ 揮発性化合物の取扱い |

<J, Kの解答群>

- | | | | |
|-----------|----------|---------|-----------|
| 1) コールドラン | 2) ホットラン | 3) 机上練習 | 4) マウスピース |
| 5) 安全ピペット | 6) 二連球ゴム | | |

Ⅲ トレーサ実験終了後、使用した箇所の表面汚染の有無をサーベイメータを用いて検査する。

^{51}Cr を用いたトレーサ実験が終った後、L式サーベイメータを用いて検査したところ、フード内の一部に面状の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。スミアろ紙をトレーサ実験で使った検出器で測定すると、2,800 cpmであった。バックグラウンドを400 cpm、計数効率を40%、ふき取り面積を100 cm²、ふき取り効率を0.5とし、 ^{51}Cr のガンマ線の放出率(10%)を考慮すると、この汚染の表面汚染密度はエ Bq・cm⁻²と見積もられた。ふき残った ^{51}Cr は湿式除染した。

一般に、直接法による検査は、固着性汚染と遊離性汚染の両者に有効である。しかし、空間線量率が高い場所や、汚染核種が ^3H の場合は汚染を見逃してしまうことがあるので注意が必要である。

<Lの解答群>

- | | |
|--------|--------------------|
| 1) 電離箱 | 2) ZnS(Ag)シンチレーション |
|--------|--------------------|

3) NaI(Tl)シンチレーション 4) BF₃ 比例計数管
 <エの解答群>

1) 10 2) 17 3) 20 4) 23 5) 1,200 6) 2,000

〔解答〕

I A-1 B-5 C-9 D-5 E-11 F-6

注) A, B: 加速した電子が物質に入射すると、原子核の電場によって減速や散乱が起こり、制動放射線(制動 X 線)が発生する。発生する制動放射線のエネルギーは連続スペクトルをとり、入射する電子のエネルギーを超えない。またその全強度は、物質を構成する元素の原子番号に比例する。

C: 放射線障害防止法では、「放射線発生装置を使用する部屋で人が通常出入りする出入口に、使用中であることを自動的に表示する装置とインターロックを設ける」とされている。→則 14 条の 7(6) および (7)

D: 生成反応は、 $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ 参考: $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$

E: 生成反応は、 $^{40}\text{Ar}(n, \gamma)^{41}\text{Ar}$

F: 解答群にある各線量計は、積算の放射線量を測るもので、線量率は測定できない。また BF₃ 比例計数管式サーベイメータは、高線量率で数え落としを生じる可能性があり、各シンチレーション式サーベイメータは、一般に感度は高いが高線量率の測定には向かない。なお、ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータは α 線測定用である。

II G-4 H-8 ア-8 イ-2 ウ-6 I-5 J-5 K-1

注) G: EC 変換が起こると、電子軌道に空席が生じ、その空席を外側の軌道電子が転移して埋める。その時、電子軌道間のエネルギー差が特性 X 線として放出される。

H: 距離の 2 乗に反比例する = 逆 2 乗の法則。

ア: 実効線量率定数が与えられているので、 ^{51}Cr の数量、取扱時間、線源からの距離が分かれば被ばく線量(実効線量)が計算できる。よって、 $0.0046 [\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}]$ だから、 $0.0046 \times (1/0.5[\text{m}])^2 \times 50[\text{MBq}] \times 4[\text{h}] = 3.68 \div 3.7 [\mu\text{Sv}]$ 。

イ: 物質中での光子の減衰では、全線減弱係数 μ = 全質量減弱係数 $\mu_m \times$ 物質の密度 ρ 。よって、 $320 \text{ keV } \gamma$ 線の全線減弱係数 μ は、 $0.38 [\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}] \times 11 [\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}] = 4.18 [\text{cm}^{-1}]$ 。半価層 ($L_{1/2}$) = $\ln 2 / \mu$ で表されるので、 $L_{1/2} = 0.693/4.18 = 0.166 \div 0.17 [\text{cm}]$ 。

ウ: $1/128 = (1/2)^7$ なので、この場合、半価層の 7 倍の厚さがあれば、 γ 線を $1/128$ に減衰できる。よって、 $0.17 \times 7 = 1.19 \div 1.2 [\text{cm}]$ 。

I: ICRP Publ. 5 の修正係数における、非密封 RI の取扱いでの危険度は以下の通り。

単なる貯蔵 < 非常に簡単な湿式操作 < 普通の化学操作 < 複雑な湿式操作

= 簡単な乾式操作 (例えば粉末の取扱い) = 揮発性化合物の取扱い < 乾式で粉末発生 >

J: 経口の RI 摂取による内部被ばくを防ぐため、ピペット操作では安全ピペットを通常のピペットに取り付けて使用する。

K: コールドランとは、RI を用いずにまったく同じ実験操作をすること (一方、RI を使う実験操作はホットラン)。いきなり RI を使う実験はせずに、まずコールドランで手順の確認や操作に習熟する。

III L-3 エ-3

注) L: 電離箱は一般に感度が悪く、汚染検査には不向き。ZnS(Ag)シンチレーションは α 線計測用で、BF₃ 比例計数管は主に熱中性子の測定で使用される。 ^{51}Cr からは $320 \text{ keV } \gamma$ 線が出るので、汚染検査には NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータが適切。

エ: 正味の計数率 cps を求めると、 $(2800 - 400) [\text{cpm}] / 60 [\text{s}] = 40 [\text{cps}]$ 。正味の計数率 cps を、計数効率、ふき取り効率、ガンマ線放出率のそれぞれで割ることにより、 ^{51}Cr の放射能が得られる。よつ

て、 $40[\text{cps}]/(0.4 \times 0.5 \times 0.1) = 2000[\text{Bq}]$ 。これより表面汚染密度は、 $2000[\text{Bq}]/100[\text{cm}^2] = 20[\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}]$ 。

問 4 次の I, II の文章の の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。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 長期間、容器に入れて冷凍保管されてきた有機物試料の中に、 ^3H と ^{14}C が含まれていることが記録されている。この容器内の試料の状態を確認することにした。このような作業では、汚染や内部被ばくに注意する必要があるため、容器をフードの中で開封した。試料の放射能を測定するため、一部を取り出し測定試料とした。

この 2 核種は β^- 壊変核種であり、測定には液体シンチレーションカウンタが適している。 ^3H と ^{14}C の β^- 線の最大エネルギーはそれぞれ A keV と B keV とお互いに離れているので、波高弁別が可能で、同時定量できる。

分取した測定試料そのものを、有機溶剤で溶解させることができれば、その溶液にシンチレーションカクテルを加えて、直接測定する。液体シンチレーション測定では、クエンチング効果を考慮すべき場合がある。クエンチング効果には、共存する化合物によって、発光が抑えられる C と、試料溶液が着色しているためにシンチレータ光が吸収される D が知られている。後者は、 E 色に着色した溶液で強い。また、試料溶液とシンチレータが化学反応を起こし、 F が発生し、過大評価となることがある。この効果は、一定時間経過すると減少する場合が多い。

分取した測定試料は、有機溶剤に容易に溶解できなかったことから、燃焼法により分離し、2 核種を分別捕集することにした。管状電気炉の石英管内に試料を入れ、酸素気流中で燃焼させた。燃焼ガスは加熱した酸化銅の中を通し、 ^3H は G で捕集し、 ^{14}C は H によりトラップさせた。捕集した ^3H は少量の水を加えて溶解して測定バイアルに回収したのち、 I を加えて測定試料とした。

<A, B の解答群>

- 1) 3.4 2) 18.6 3) 157 4) 257 5) 1,711

<C~F の解答群>

- | | | |
|----------------|-------------|--------------|
| 1) 量子クエンチング | 2) 色クエンチング | 3) 化学クエンチング |
| 4) 有機クエンチング | 5) 分子クエンチング | 6) ケミルミネセンス |
| 7) エレクトロルミネセンス | 8) 熱ルミネセンス | 9) フォトルミネセンス |
| 10) 赤や黄 | 11) 緑 | 12) 青 |
| 13) 紫 | 14) 白 | |

<G~I の解答群>

- | | | |
|---------------|-----------|-------------|
| 1) モレキュラーシープ | 2) シリカゲル | 3) 活性炭 |
| 4) コールドトラップ | 5) EDTA | 6) 酸化鉄 |
| 7) モノエタノールアミン | 8) トルエン | 9) 乳化シンチレータ |
| 10) 混合キシレン | 11) エタノール | |

II 放射性物質を含む廃液の処理を検討するには、化学的性質等の理解が不可欠である。液体のまま保管する場合、容器の破損などで、汚染が拡がる可能性がある。そこで、沈殿として回収して、固体廃棄物とすることも検討してみることにした。化学操作をするにあたっては、液性や化学種を事前に調べ、試薬の混合による発熱、気体発生などに注意して行う必要がある。

廃液 A, B には、以下の表に示す化学形をもつ核種が含まれているとして、化学分離に関する基礎的な反応を検討してみる。

廃液 A

番号	化学形	標識核種名
①	CO_3^{2-}	^{14}C
②	SO_4^{2-}	^{35}S
③	PO_4^{3-}	^{32}P

廃液 B

番号	化学形	標識核種名
④	Na^+	^{22}Na
⑤	Ca^{2+}	^{45}Ca
⑥	I^-	^{125}I
⑦	Cs^+	^{137}Cs

廃液 A は、①～③それぞれのイオンが $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の濃度で含まれている中性の水溶液である。塩酸性にすると放射性の気体が発生することに注意する必要があるのは **J** である。廃液 A に、 Fe^{3+} イオンを加え、アンモニア水を滴下していくと、沈殿が生成して **K** が共沈する。この沈殿を分離した後、さらに Ba^{2+} イオンを加えていくと、**L** の沈殿が生成する。

廃液 B は、④～⑦それぞれのイオンが $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の濃度で含まれている中性の水溶液である。水素型にした陽イオン交換樹脂を加えても、**M** は吸着しない。また、吸着するイオンのうち、陽イオン交換樹脂への吸着強度は **N** が最も大きい。廃液 B に、 CO_3^{2-} イオンを加えていくと、**O** が沈殿する。廃液 B に、 Ag^+ イオンを添加した場合には **P** の沈殿が生じる。また、廃液 B に、無機イオン交換体のゼオライト粒子を加えると、**Q** が良く吸着する。

NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータで廃液を測定した場合、検出可能と考えられる核種は①～⑦の核種のうち、**R** である。また、1 年後に 10 半減期を超えるのは **S** である。10 年後でも、半分以上放射能が残っている核種は **T** である。

<J～T の解答群>

- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1) ① | 2) ② | 3) ③ | 4) ④ | 5) ⑤ |
| 6) ⑥ | 7) ⑦ | 8) ①と② | 9) ②と③ | 10) ①と③ |
| 11) ④と⑤ | 12) ④と⑦ | 13) ③と⑥ | 14) ⑤と⑥ | 15) ①と⑦ |

〔解答〕

I A-2 B-3 C-3 D-2 E-10 F-6 G-4 H-7 I-9

注) C, E: シンチレータ光が試料の色素によって吸収され、見かけのカウントが低くなる現象を色クエンチングという。色クエンチングは赤や黄色に着色した試料で顕著である。

F: 化学反応によって生成する物質が励起状態から基底状態に遷移する際、エネルギーを光として放出する場合があります、このとき観察される発光現象をケミルミネセンスという。一度、基底状態となると発光が収束することから、一定時間経過後に計数が減少する。

G, H: 試料の燃焼によって生成する H_2O はドライアイス-メタノール等の冷媒で冷却したコールドトラップで捕集する。 CO_2 はモノエタノールアミンのような沸点の高い塩基性物質でトラップする。

II J-1 K-3 L-8 M-6 N-5 O-5 P-6 Q-7 R-12
S-3 T-15

注) J: 塩酸性条件下で CO_3^{2-} は CO_2 として気化する。

K, L: Fe^{3+} と不溶性の塩を形成するのは、 PO_4^{3-} である。一方、 Fe^{3+} と SO_4^{2-} は可溶性の塩を形成する。また Ba^{2+} は CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} と不溶性の塩を形成する。

M, N: 陽イオン交換樹脂はスルホン基などの酸性官能基を有するポリマーで、 I^- のような陰イオンを吸着しない。 Na^+ のような一価の陽イオンと比べて、 Ca^{2+} のような二価の陽イオンをより強く吸

着する。

- O, P, Q : CaCO_3 は水に不溶である。またハロゲン化銀の多くは水に不溶で、 AgF のみ可溶である。
ゼオライト (沸石) はアルカリ金属とアルカリ土類金属を含有するアルミノケイ酸塩で陽イオン交換作用を示し、Cs イオンに対する選択性が最も高い。

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

I 現在の日本の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は ICRP [ア] 年勧告に述べられた放射線防護の基本を取り入れている。一方、被ばくを伴う事故への対応などについては、ICRP 2007 年勧告などの、より新しい情報が用いられている。ICRP の勧告では放射線防護の基本として「正当化」、「防護の最適化」及び「線量限度の適用」の 3 種の原則が提唱されている。

基本原則のうち個人の線量限度に関して ICRP 2007 年勧告は ICRP [ア] 年勧告を踏襲しており、職業被ばくでは定められた 5 年間の平均で年間 [イ] mSv、ただし、いかなる 1 年においても [ウ] mSv を超えるべきではない、また一般公衆の線量限度では年間 [エ] mSv としている。なお、外部被ばくの実効線量の実務的な測定のために [A] を用いる。 γ 線の個人モニタリングでは、[A] は数十 keV 程度の低エネルギーの場合や背面のみからの被ばくなどの特殊な場合を除き、ほとんどの場合に実効線量を [B] することが無い。

一般には自然放射線による被ばくと医療被ばくは放射線被ばくを管理する上での線量限度に [C]。被ばく線量が無用が増加する恐れがある場合にガイドラインなどにより被ばくを抑えるような対処を求められる場合がある。無用とは防護の 3 原則のうちの行為の正当化における判断で、行為により増加する被ばくによる不利益を上まわる便益が得られないことを指す。自然放射線では、放射線審議会できとりまとめられた「航空機乗務員の宇宙線被ばく管理に関するガイドライン」において [オ] mSv/年の管理目標値が推奨されている。

<アの解答群>

- 1) 1958 2) 1977 3) 1990 4) 1997 5) 2000

<イ～オの解答群>

- 1) 0.5 2) 1 3) 2 4) 5 5) 10
6) 20 7) 50 8) 100

<A～C の解答群>

- 1) 空間線量 2) 吸収線量 3) 等価線量 4) 実効線量
5) 預託実効線量 6) $70 \mu\text{m}$ 線量当量 7) 3 mm 線量当量 8) 1 cm 線量当量
9) 深部線量 10) 直腸線量 11) 過小評価 12) 過大評価
13) 含まれる 14) 含まれない

II 我々は自然界に存在する放射線源から常に被ばくしている。宇宙線や大地からの放射線による外部被ばくと、体内に含まれる放射性物質および空気中のラドンとその子孫核種の吸入による内部被ばくである。自然放射線による一般公衆の被ばくは、世界平均では年間約 2.4 mSv とされており、ラドンとその子孫核種によるものがそのほぼ [カ] % を占める。ラドンは大地に含まれる放射性同位元素のうち壊変系列を作るものに由来し、壊変して気体のラドンとなったときに空气中に拡散する。吸入されたラドンは肺で壊変して沈着、あるいは空气中で壊変して生じた ^{218}Po などの子孫核種が吸入により肺に沈着する。これらの核種には、飛程が短く近隣組織に大きな線量を与える α 線を放出する放射性同位元素が多いために [D] の原因となり得る。 α 線では [E] のデータを反映して決定された放射線加重(荷重)係数が [キ] と大きいことも加わって、ラドンとその子孫核種が

らの被ばくの実効線量が大きくなっている。放射線誘発がんリスクを推定するうえで、タバコは **F** となることが知られている。ラドンに起因する **D** の過剰絶対リスクでは、生涯タバコを吸い続ける人の方が非喫煙者よりも **G** なる。

日本人平均では自然放射線からの被ばくは年間約 2.1 mSv と評価されており、そのうち最も大きいのは食物摂取による内部被ばくの約 **ク** mSv である。日本人で世界平均に比べ食品からの被ばく量が大きいのは、日本人で消費の多い **H** にウラン系列の放射性核種が多く含まれているためである。そのうち、内部被ばくへの寄与が最も大きい核種は **I** である。体内の放射性物質からの被ばくでは **I** に次いで **J** からの被ばくが **ケ** mSv と大きい。食物摂取による内部被ばく量は、内臓ごとの人体試料データが少ないために、食品中の放射性同位元素濃度を調べてその摂取量と実効線量係数などから **K** として推定することが多い。

<カ～ケの解答群>

- | | | | | |
|---------|--------|---------|--------|---------|
| 1) 0.18 | 2) 0.3 | 3) 0.33 | 4) 0.6 | 5) 0.99 |
| 6) 1.5 | 7) 3 | 8) 5 | 9) 10 | 10) 15 |
| 11) 20 | 12) 30 | 13) 50 | 14) 75 | 15) 90 |

<D, E の解答群>

- | | | | |
|--------|---------|--------|--------|
| 1) LET | 2) RBE | 3) OER | 4) 胃がん |
| 5) 肺がん | 6) 喉頭がん | | |

<F～H の解答群>

- | | | | |
|---------|--------|---------|---------|
| 1) 米 | 2) 魚介類 | 3) 納豆 | 4) 味噌 |
| 5) 高く | 6) 低く | 7) 阻害因子 | 8) 交絡因子 |
| 9) 律速因子 | | | |

<I の解答群>

- | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1) ^{226}Rn | 2) ^{222}Rn | 3) ^{220}Rn | 4) ^{210}Po | 5) ^{210}Pb |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|

<J の解答群>

- | | | | | |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 1) ^3H | 2) ^{14}C | 3) ^{32}P | 4) ^{40}K | 5) ^{45}Ca |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|

<K の解答群>

- | | | | |
|------------------|---------|-----------|--------------------|
| 1) 吸収線量 | 2) 等価線量 | 3) 預託実効線量 | 4) 70 マイクロメートル線量当量 |
| 5) 1 センチメートル線量当量 | | | |

【解答】

I アー3 イー6 ウー7 エー2 オー4 Aー8 Bー11 Cー14

注) ア：現行の法律は 2000 年に ICRP 1990 年勧告を取り入れたものである。

イ～エ：ICRP 2007 年勧告における線量限度に関しては ICRP 1990 年勧告が踏襲されており、職業被ばくでは 5 年間の平均で年間 20 mSv、ただし、いかなる 1 年においても 50 mSv を超えるべきではない。また、一般公衆の線量限度は年間 1 mSv とされている。

A, B：外部被ばくの実効線量は各組織、臓器における組織加重* (荷重) 係数を加味する必要がある、測定で得ることはできない。そのため実務的な実用量として測定可能な 1 cm 線量当量を用いる。1 cm 線量当量は ICRU 球（人体組織を模した直径 30 cm の球）においてその表面から 1 cm の深さにおける線量当量であるが、実際の臓器などはそれよりも深い位置にあるため、問題に記載されている特殊な場合を除いては実効線量を過少評価することはない。

* 2007 年勧告から「加重係数」に表記変更。

C：放射線被ばくを管理する上での線量限度には、一般に自然放射線及び医療による被ばくは含まれない。

オ：一般に自然放射線による被ばくは線量限度に含まれないが、航空機乗務員に対しては宇宙線に対する被ばくを考慮し、その管理のためのガイドラインが出ている。その中で管理目標値として年間5 mSv とされている。

Ⅱ カ-13 キ-11 ク-5 ケ-1 D-5 E-2 F-8 G-5 H-2
I-4 J-4 K-3

注) カ：UNSCEAR 2008 年報告書において自然放射線による一般公衆の被ばくの世界平均は年間2.4 mSv であり、その中で最も大きいのは吸入(ラドンガス)によるもので1.26 mSv と報告されている。よって、それは全体のほぼ50% を占める。

D, E, キ：放射線の種類により生物効果は異なるが、 α 線はその効果が大きい。そのため ^{218}Po などの α 核種が肺に沈着すると肺がんの原因となりうる。つまり、 α 線のRBE(生物学的効果比：Relative Biological Effectiveness)が大きい。また、 α 線に関する放射線加重(荷重)係数は20 である。(ICRP Publ. 60, ICRP Publ. 103 参照)

F, G：放射線誘発がんのリスクを考える際に、放射線以外によるがん発生率に影響を与えるリスク因子の1つとして喫煙も挙げられるが、対象とする因子(放射線)以外で影響を与える因子を交絡因子という。ラドンに起因する肺がん考えた場合、その過剰絶対リスクは非喫煙者よりも喫煙者のほうが高くなる。(ICRP Publ. 115 参照)

ク, H, I：(公財)原子力安全研究協会『生活環境放射線』(2011 年)において、日本人の自然放射線による一般公衆の被ばくは年間2.1 mSv と報告されている。その中で最も大きいのは食物摂取による内部被ばくであり、その値は年間0.99 mSv と報告されている。この理由は日本人の食生活に関係しており、ウラン系列の核種が多く含まれている魚介類を多く摂取しているためであり、その中で一番の寄与核種は ^{210}Po と報告されている。

J, ケ：前述のとおり、日本人の食物摂取による内部被ばくの主な寄与核種は ^{210}Po であり年間0.8 mSv, 次いで大きいのが ^{40}K で年間0.18 mSv と報告されている。

K：食品などの経口摂取の場合は、摂取された放射性物質の体内での減衰、体外に排出されるなどして無くなるまでの被ばく線量で考える必要があり、その摂取量や実効線量係数などから推託実効線量として推定することが多い。

問6 次のI, IIの文章の□の部分に入る最も適切な語句、記号又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。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 個人の内部被ばくモニタリングのために行われる吸入摂取したプルトニウムの測定法としては、体外計測法とバイオアッセイ法が用いられる。体外計測法としては□A□が用いられ、 ^{239}Pu を評価する場合には ^{239}Pu の□B□に伴う□C□のLX線を計測するか、プルトニウムと通常共存する ^{241}Am からの□D□keVの γ 線を測定する。□A□による体外計測法では、□E□を区別することができないため、測定する際に注意が必要である。また、検出限界は30~60分の測定で□F□Bq程度であり、さらに体型による補正が必要となる。体外計測法他、プルトニウムを吸入摂取した場合の吸入量の測定法としては、□G□を用いたバイオアッセイ法が有用である。これは、吸入摂取されたプルトニウムの□H□%が吸入摂取後1週間以内に□G□中に移行することを利用するものである。バイオアッセイ法では□I□を除外でき、検出限界は□J□Bq/試料である。また、□K□を用いることにより検出限界は改善させることができる。体外計測法では□E□を区別できないという特徴のため、□E□がある場合には被ばく線量を□L□評価する結果となる。特に事故発生当初に体外計測法を用いる場合には、慎重に評価することが必要である。バイオアッセイ法を用いる場合には、事故発生当初に□G□を採取する時に□M□プ

ルトニウム等が混入しないように注意が必要である。

<A の解答群>

- 1) ホールボディカウンタ 2) 甲状腺モニタ 3) 肺モニタ 4) 体表面汚染検査計

<B の解答群>

- 1) α 壊変 2) β 壊変 3) γ 壊変 4) 核分裂 5) 電子捕獲

<C の解答群>

- 1) ^{234}U 2) ^{235}U 3) ^{239}U 4) ^{228}Pu 5) ^{240}Pu

<D の解答群>

- 1) 17.0 2) 20.3 3) 38.7 4) 51.6 5) 59.5

<E の解答群>

- 1) 骨髄への沈着 2) 肝臓への沈着 3) 血液への移行 4) 心臓への沈着
5) 体表面汚染

<F の解答群>

- 1) 0.001~0.01 2) 5~100 3) 500~10,000 4) 50,000~1,000,000

<G の解答群>

- 1) 便 2) 血液 3) 痰 4) 呼気 5) 鼻汁

<H の解答群>

- 1) 0.05~0.1 2) 1~5 3) 20~40 4) 50~70 5) 80~90

<I の解答群>

- 1) 骨髄への沈着 2) 肝臓への沈着 3) 血液への移行 4) 心臓への沈着
5) 体表面汚染

<J の解答群>

- 1) 0.001~0.01 2) 5~100 3) 500~10,000 4) 50,000~1,000,000

<K の解答群>

- 1) ICP 質量分析計 2) α 線スペクトロメトリ
3) 液体シンチレーションカウンタ 4) ZnS(Ag) サーベイメータ

<L の解答群>

- 1) 過小 2) 過大

<M の解答群>

- 1) 空気中の 2) 手や服についた 3) 食物中の 4) 水道水中の

Ⅱ 一般にバイオアッセイ法の対象となる代表的な核種としては ^3H , N, ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Am 等がある。一般に、バイオアッセイの試料としては、主に尿、便、血液、痰、呼気、鼻汁が用いられる。 ^3H では O, N では P が試料として用いられることが多い。吸入摂取が疑われる場合には Q を行うことが重要であるが、Q で放射性物質が検出されないからといって吸入汚染が否定されることはない点に注意が必要である。

体内汚染が疑われる場合にバイオアッセイで線量評価をするためには、尿のバイオアッセイでは、通常 ア を R 日間分採取する。便のバイオアッセイでは、通常 イ を R 日間分採取する。

<N の解答群>

- 1) ^{11}C 2) ^{13}N 3) ^{15}O 4) ^{90}Sr 5) ^{222}Rn

<O, P の解答群>

- 1) 尿 2) 便 3) 血液 4) 痰 5) 呼気 6) 鼻汁

<Qの解答群>

- 1) 痰のバイオアッセイ 2) 呼気のバイオアッセイ 3) 鼻汁のバイオアッセイ
4) 鼻スミア 5) 口角スミア

<ア, イの解答群>

- 1) 1日につき1回分の排泄量の一部 2) 1日につき1回分の排泄量の全量
3) 1日の排泄量の全量

<Rの解答群>

- 1) 1~2 2) 3~7 3) 14~21 4) 21~28 5) 28~56

〔解答〕

- I A-3 B-1 C-2 D-5 E-5 F-3 G-1 H-3 I-5
J-1 K-1 L-2 M-2

注) A: 肺モニタは肺に沈着したプルトニウムを測定するための装置である。なお、ホールボディカウンタは全身に広く分布した核種の測定に用いられる。

B, C: ^{239}Pu は α 壊変によって ^{235}U になる。その際に生成核である U の特性 X 線を放出するが、そのうち 17 keV の L-X 線を測定する。なお、 α 線は飛程が短く、体外から計測することができない。

D: ^{241}Am は、 ^{239}Pu が中性子捕獲を2回起こした ^{241}Pu が β^- 壊変することで生成する。 ^{241}Am は、59.5 keV の γ 線を 35.9% の割合で放出する。

E: 吸入摂取の場合、多くは肺にとどまるが、体表面(特に上半身)にある汚染と肺に沈着したものを区別できない。

K: ICP 質量分析法は、プラズマによってイオン化して質量数を計る。天然に質量数 239 の元素が他にないため、測定の困難な α 線による放射線計測法よりも検出限界が低く優れている。

G, H: 消化管から吸収されにくく、バイオアッセイ法として測定試料に便が用いられる。

I: バイオアッセイ法は排泄物を試料として測定するため、体表面汚染は無視できる。

M: 体表面汚染が排泄試料に混入しないよう注意する。

- II N-4 O-1 P-1 Q-4 ア-3 イ-3 R-2

注) N: ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O はいずれも半減期が短く、 β^+ 壊変する核種のため、消滅放射線を体外から計測できる。 ^{222}Rn は希ガスなので体内蓄積はしない。

O, P: 体内での動態を考慮すると尿以外の排泄物では試料量が少量であり、検出が困難になる。

Q: 吸入の主な経路になっている鼻腔内を綿棒などで拭き取る。

ア, イ, R: 排泄量から摂取量への換算に用いる排泄率データが1日単位で与えられるため、1日分の全量を採取するのが基本である。

物 理 学

第 63 回（平成 30 年）

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

問 1 5.3 MeV の α 線が真空中を 1 m 飛行するのに要する時間 [ns] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 α 粒子の質量は 6.7×10^{-27} kg とする。

- 1) 28 2) 37 3) 45 4) 63 5) 75

〔解答〕

4

注) α 粒子の速さを v [m/s]、質量を m [kg] とすると、その運動エネルギー E [J] は、

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

と表される。1 eV = 1.6×10^{-19} J より、5.3 MeV の α 線の運動エネルギー E [J] は、

$$E = (5.3 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19}) = 8.48 \times 10^{-13} \text{ J}$$

1 m 飛行するのに要する時間 t [s] は、

$$t = \frac{1 \text{ m}}{v \text{ [m/s]}} = \sqrt{\frac{m}{2E}} = \sqrt{\frac{6.7 \times 10^{-27}}{2 \times 8.48 \times 10^{-13}}} \approx \sqrt{3950} \times 10^{-9} \approx 63 \times 10^{-9} \text{ s} = 63 \text{ ns}$$

問 2 660 keV γ 線の振動数 [s^{-1}] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、プランク定数は $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ とする。

- 1) 6.3×10^{18} 2) 1.6×10^{20} 3) 1.2×10^{28} 4) 1.1×10^{29} 5) 1.0×10^{39}

〔解答〕

2

注) γ 線のエネルギー E [J] と振動数 ν [s^{-1}] の関係は、 $E = h\nu$ と表される。したがって、

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{(660 \times 10^3) \times (1.6 \times 10^{-19})}{6.63 \times 10^{-34}} \approx 1.6 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$$

問 3 次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1) 原子核の半径は、その質量数に比例する。
- 2) 原子の半径は、その原子核内の陽子数に比例する。
- 3) 水素原子の発光スペクトルにみられる輝線のうち、最も短い波長はライマン系列に属している。
- 4) 原子のエネルギー準位は、核子の結合状態によって定まる。
- 5) 原子番号は、原子核内の核子数に等しい。

〔解答〕

3

- 注) 1: 誤 原子核の密度(=質量/体積)はどの原子核もほぼ一定の値をとる(原子核密度の飽和性)。このため、原子核の体積は、質量数に比例する。したがって、体積の1/3乗に比例する原子核の半径は、同じく質量数の1/3乗に比例する。
- 2: 誤 原子の大きさは、その原子が属す元素の化学的性質に依存する。原子の半径は、元素の周期表において、同じ周期(横の列)であれば、原子番号(陽子の数)が大きくなるに従って小さくなり、同じ族(縦の列)であれば原子番号が大きくなるにつれて大きくなる傾向にあるため、その原子核内の陽子数に比例することはない。
- 3: 正 水素原子の発光スペクトルに見られる輝線は、水素原子の主量子数 n の状態から主量子数 n' ($1 \leq n' < n$)の状態に遷移するとき生じる。発光スペクトルの波長 λ は、リュードベリの式
- $$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
- により与えられる。 R はリュードベリ定数を示す。 $n'=1, n=2, 3, 4 \dots$ のときの輝線は「ライマン系列」とよばれる。リュードベリの式で最も波長 λ が短くなるのは、 $n'=1, n=2$ のときで、これはライマン系列に含まれる。
- 4: 誤 原子は、原子核と核外電子によって構成されており、原子の性質は核外電子(特に価電子)の結合状態によって決まる。一方、原子核は原子の中心にあり、その大きさは核外電子の軌道半径より遙かに小さく、原子核内の核子の結合状態が原子の性質に顔を出すことがない。このため、原子のエネルギー準位に核子の結合状態が考慮されることはほとんどない。
- 5: 誤 原子番号は、原子核内の陽子の数であり、核子(陽子および中性子)の数ではない。

問4 次のうち、質量として小さいものから大きいものの順に正しく並んでいるものの組合せはどれか。

- A 陽子
B 中性子
C 1 u (原子質量単位)
D 電子の質量の1,800倍
- 1) ABCD 2) ABDC 3) BCDA 4) DCAB 5) DCBA

〔解答〕

4

注) それぞれの質量を原子質量単位で示すと、

A : 1.0073 u, B : 1.0087 u, C : 1 u, D : $0.00054858 \times 1800 = 0.98744$ u

つまり、小さい順に並べると、「4 DCAB」となる。

【別解】 なお、陽子、中性子の質量[u]を覚えていない場合は、以下のように、これらの物理的な性質から質量の大小関係を推測できる。

中性子は弱い相互作用により、電子と反電子ニュートリノを生成して陽子となるので、 $A < B$ 。

1原子質量単位[u]は ^{12}C の質量の12分の1であるが、 ^{12}C の質量は陽子と中性子と電子の質量 m_p, m_n, m_e をそれぞれ6個足したもののから1核子あたり結合エネルギーに相当する質量 B を差し引いたものである。

$$1 \text{ u} = \frac{m_{^{12}\text{C}}}{12} = \frac{6m_p + 6m_n + 6m_e - 12B}{12} = m_p + \frac{1}{2}(m_n - m_p + m_e) - B$$

ここで、 $m_n - m_p + m_e$ は中性子の β 壊変のエネルギー(0.78 MeV)、 B は約8 MeVなので、

$$1 \text{ u} < m_p$$

つまり、 $C < A < B$ 。

これを満たす選択肢は「4」だけだが、念のため D についても検討する。主任者試験において、電子の質量エネルギー「0.511 MeV」は覚えておく必要があるので、これに 1,800 を掛けると、919 MeV。1 u の質量エネルギーが 931 MeV なので、 $D < C$ 。

または、電子質量が 0.00055 u であることを知っていれば、 $0.00055 \text{ u} \times 1800 = 0.99 \text{ u}$ なので、同じく $D < C$ 。

問 5 次のうち、エネルギーが線スペクトルを示す正しい組合せはどれか。

- A α 線
- B β 線
- C オージェ電子
- D 制動放射線

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

〔解答〕

3

注) A, B, C の放射線は量子状態間の遷移に伴い放出されるので、このときの遷移エネルギーは飛び飛びの値（線スペクトル）になる。この遷移エネルギーは、放射線のエネルギーと放出した原子核または原子の反跳エネルギーに分配される。放射線が α 線またはオージェ電子の場合は、運動量保存則により一定の値が放射線に分配されるため線スペクトルになる。⇔ A, C（線スペクトル）

一方、ベータ線の場合、放射線としてベータ線のほかにニュートリノも放出されるため、ニュートリノにも遷移エネルギーが分配される。結果として、ベータ線がもつエネルギーは遷移エネルギーの 0% から 100% 近くまで連続的に変化する。⇔ B（連続スペクトル）

高速で運動する電子などの軽い荷電粒子が原子核の近傍を通過するとき、その強い電場によって進行方向を変えられ、減速する。このとき、運動量とエネルギーが保存するように、電磁波（X 線）が制動放射線として放出される。制動放射線のエネルギーは、荷電粒子と原子核との接近距離により連続的に変化する（距離が短いほど高いエネルギーになる）。⇔ D（連続スペクトル）

問 6 内部転換に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 内部転換が起こっても原子番号は変わらない。
- B 内部転換は質量数の大きい原子核より小さい原子核で多くみられる。
- C 内部転換電子は線スペクトルを示す。
- D 内部転換とオージェ効果とは互いに競合する過程である。

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

〔解答〕

2

注) 内部転換では、励起状態にある原子核が脱励起の際に余剰のエネルギーを核外電子に渡し、エネルギーを受け取った電子が内部転換電子として原子から飛び出してくる。

A：正 内部転換は γ 壊変と競合する過程であるので、原子番号は変わらない。

B：誤 内部転換は、原子核と軌道電子の波動関数の重なりが大きいと起こりやすくなるため、質量数が大きい原子核で多くみられる。

C：正 内部転換電子のエネルギーは、上述のように原子核の脱励起の余剰のエネルギーであるので、線スペクトルを示す。

D：誤 内部転換が起これば、内殻の電子軌道に空孔が生じ、オージェ効果が起こるが、内部転換とオ

ージェ効果が競合することはない。

問7 次の線源と放射性核種の組合せのうち、適切でないものはどれか。

- 1) γ 線源 — ^{54}Mn
- 2) β^- 線源 — ^{55}Fe
- 3) 内部転換電子線源 — ^{137}Cs
- 4) α 線源 — ^{241}Am
- 5) 中性子線源 — ^{252}Cf

〔解答〕

2

- 注) 1: 適 ^{54}Mn は軌道電子捕獲に伴い 835 keV の γ 線を放出する。
 2: 不適 ^{55}Fe は 100% 軌道電子捕獲で壊変し、安定な ^{55}Mn となる。
 3: 適 ^{137}Cs の 94% は β^- 壊変して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ となり、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ は核異性体転移の際 9.9% の割合で内部転換電子を放出する。
 4: 適 ^{241}Am は α 壊変して、5.486, 5.443, 5.388 MeV の α 線を放出する。
 5: 適 ^{252}Cf の 3.1% は自発核分裂して、1 壊変あたり 3.76 個の中性子を放出する。

問8 半減期 2 分の核種を NaI(Tl) シンチレーション計数管を用いて 30 分間測定したところ、100,000 カウントを得た。バックグラウンド計数率は 3s^{-1} である。この場合、計数開始直後のバックグラウンドを含む計数率 $[\text{s}^{-1}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 123 2) 332 3) 443 4) 550 5) 660

〔解答〕

4

注) 計数開始直後のバックグラウンドを含む計数率を $A[\text{s}^{-1}]$ 、バックグラウンドの計数率を $B[\text{s}^{-1}]$ とすると、 t 秒間のカウント数 $C(t)$ は、

$$C(t) = \int_0^t dt' \{ (A-B)e^{-\lambda t'} + B \} = (A-B) \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + Bt$$

となる。ここで、 $\lambda[\text{s}^{-1}]$ は壊変定数を示す。30 分 (1800 s) 間測定したところ 100,000 カウントを得たので、

$$C(1800) = (A-B) \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-1,800\lambda}) + 1,800B = 100,000$$

ここで、半減期 2 分 (120 s) では、

$$\lambda = \frac{\ln 2}{120}$$

また、

$$1 - e^{-1,800\lambda} = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1,800}{120}} = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{15} \approx 1$$

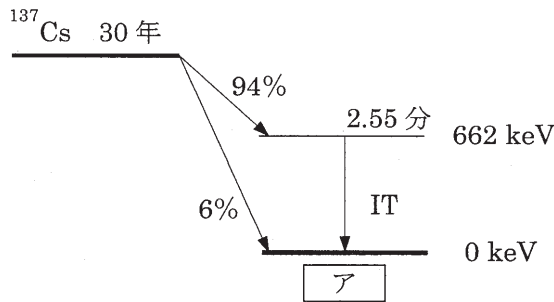
$B = 3\text{s}^{-1}$ 、 $\ln 2 \approx 0.693$ を使うと

$$(A-3) \frac{120}{0.693} + 1,800 \times 3 = 100,000$$

$$A = (100,000 - 1,800 \times 3) \frac{0.693}{120} + 3 \approx 549$$

なお、 $\ln 2 \approx 0.7$ を使うと $A = 555$ となる。

問 9 図には、 ^{137}Cs の壊変図を示す。次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。



- A に相当する核種は ^{137}Ba である。
 B ^{137}Cs は β^+ 壊変する。
 C ^{137}Cs の壊変のうち 94% は の核異性体となる。
 D ^{137}Cs 線源から放出される 662 keV 光子の放出率は 2.55 分ごとに半減する。
 1) ABD のみ 2) AB のみ 3) AC のみ 4) CD のみ 5) BCD のみ

〔解答〕

3

- 注) A : 正 ^{137}Cs は β^- 壊変して ^{137}Ba となる (Cs より原子番号が 1 つ大きい元素は Ba であり, β^- 壊変では質量数は変わらず 137 のままである)。
 B : 誤 安定同位体 (この場合 ^{133}Cs) より中性子が多い核種では β^+ 壊変は起こりにくい。
 C : 正 図より, ^{137}Cs の 94% が壊変する先は, ^{137}Ba の核異性体 ($^{137\text{m}}\text{Ba}$) である ($^{137\text{m}}\text{Ba}$ は核異性体転移 (IT) により ^{137}Ba となる)。
 D : 誤 図中の 2.55 分は $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の半減期を示し, ^{137}Cs 線源から $^{137\text{m}}\text{Ba}$ のみを分離すれば 662 keV 光子の放出率は 2.55 分ごとに半減するが, 通常の ^{137}Cs 線源中では ^{137}Cs と $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の間に永続平衡が達成されているので, 662 keV 光子の放出率は 30 年ごとに半減する。

問 10 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子捕獲ではニュートリノは放出されない。
 B 電子捕獲に引き続いて特性 X 線あるいはオージェ電子が放出される。
 C 電子捕獲を起こす核種は γ 線を放出しない。
 D β^+ 壊変は電子捕獲と競合して起こる。
 1) A と B 2) A と C 3) A と D 4) B と C 5) B と D

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 レプトン数の保存 (電子やニュートリノは「レプトン」と呼ばれる素粒子のグループに分類され, 反応の前後ではレプトンの総数が不変である。) により, 電子捕獲で減少したレプトン数を補うためニュートリノが放出される。
 B : 正 電子捕獲では, 主に原子の内殻電子が原子核に吸収されるため, 内殻の電子軌道に空孔ができる。この空孔に外殻の電子が遷移する際に余剰のエネルギーが, 特性 X 線あるいはオージェ電子のエネルギーとして放出される。

- C：誤 電子捕獲後の原子核は励起状態となることがあり、これが脱励起する際に γ 線が放出される。
 D：正 安定な同位体比べて中性子が少ない不安定な核種では、核内の陽子を中性子に変換して安定な核種になる。 β^+ 壊変または電子捕獲により、陽子を中性子に変換できるため、これら2つの過程は競合する。

問11 次の加速器に関する組合せのうち、静電型と高周波型の組合せになっているものはどれか。

- | | | |
|---------------------|---|----------------|
| 1) コッククロフト・ワルトン型加速器 | — | ライナック(リニアック) |
| 2) ライナック(リニアック) | — | シンクロトロン |
| 3) コッククロフト・ワルトン型加速器 | — | ファン・デ・グラーフ型加速器 |
| 4) サイクロトロン | — | シンクロトロン |
| 5) ベータトロン | — | サイクロトロン |

〔解答〕

1

注) コッククロフト・ワルトン型加速器：静電型——整流器とコンデンサーを多段に組み合わせた電圧増倍回路を利用して高電圧を作り、その電位差を利用して加速する。

ファン・デ・グラーフ型加速装置：静電型——電荷を絶縁ベルトに乗せて電極に運び高電圧を得て、静電場により加速する

シンクロトロン：高周波型——粒子の速度に合わせて磁場と加速周波数を変化させ、軌道半径を一定に保つ。

サイクロトロン：高周波型——半円型をした2つの電極(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瞬間に一定周波数の高周波を加えて加速する

ベータトロン：高周波型——磁場の時間的变化に伴い、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。

直線加速装置(ライナック(リニアック))：高周波型——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。

問12 磁束密度1Tのサイクロトロンで陽子を加速する場合、中心軸から30cmの所からビームを取り出すとして、その陽子エネルギー[MeV]として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、陽子の質量を、 1.67×10^{-27} kg とする。

- 1) 2.5 2) 3.0 3) 3.6 4) 4.3 5) 5.3

〔解答〕

4

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

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

が成り立つので、陽子の速度 v は、

$$v = \frac{zeBr}{m}$$

となる。磁束密度 $B=1[\text{T}]=1[\text{N}/(\text{A}\cdot\text{m})]$ 、 $r=30[\text{cm}]=0.3[\text{m}]$ 、陽子の質量 $m=1.67 \times 10^{-27}[\text{kg}]$ 、陽子の電荷 $ze=1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$ であることから、陽子のエネルギー E は、

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2} m v^2 = \frac{m}{2} \cdot \frac{(ze)^2 B^2 r^2}{m^2} [\text{J}] \\
 &= \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 \times 1^2 \times 0.3^2}{2 \times 1.67 \times 10^{-27}} [\text{J}] \\
 &= \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 \times 1^2 \times 0.3^2}{2 \times 1.67 \times 10^{-27} \times 1.6 \times 10^{-19}} [\text{eV}] \\
 &\cong 4.3 \times 10^6 [\text{eV}] = 4.3 [\text{MeV}]
 \end{aligned}$$

問 13 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 熱中性子と水素との核反応は弾性散乱のみである。
 B 光核反応は吸熱反応である。
 C ^{252}Cf の壊変は自発核分裂のみである。
 D 原子核外の中中性子は β^- 壊変する。

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

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 熱中性子は水素との弾性散乱のほか、 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反応も起こす。
 B : 正 光核反応とは、高エネルギーの光子 (γ 線) によって生じる原子核反応をいう。 γ 線が原子核に当たると、ある確率で吸収され、原子核を励起する。そのエネルギーが原子核内の核子の結合エネルギーを超えると、核子は核外へ飛び出すことができ、 (γ, p) , (γ, n) , (γ, d) , (γ, α) , $(\gamma, \text{fission})$ などの反応が起こる。したがって、光核反応は吸熱反応である。
 C : 誤 ^{252}Cf はその約 97% が α 壊変し (半減期 2.645 年, α 線のエネルギー : 6.076 MeV (15.2%), 6.118 MeV (81.6%)), 約 3% が自発核分裂する。
 D : 正 中性子は単独では不安定で、半減期 615 秒で β^- 壊変する。

問 14 5 MeV の α 線に対するアルミニウムの質量阻止能が $0.61 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ であるとき、1.25 MeV の陽子線に対するアルミニウムの質量阻止能 $[\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。

1) 0.15 2) 0.33 3) 0.51 4) 1.3 5) 2.6

〔解答〕

1

- 注) 荷電粒子が物質中の電子にエネルギーを与え、励起や電離作用で単位長さあたりに失うエネルギーを「衝突阻止能」(S_{col})、制動放射によるものを「放射阻止能」(S_{rad}) といい、衝突阻止能と放射阻止能の和を「全阻止能」(S) という。すなわち、

$$S = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}}$$

であり、単位は通常 MeV/cm が用いられる。またこれらを物質の密度 ρ で除した「質量阻止能」(S_{m})、
 「質量衝突阻止能」($S_{\text{m,col}}$)、
 「質量放射阻止能」($S_{\text{m,rad}}$) は

$$S_{\text{m}} = S_{\text{m,col}} + S_{\text{m,rad}}$$

で与えられ、単位は通常 $\text{MeV}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ が用いられる。

重荷電粒子の場合、電子と異なり散乱で方向が変わることはなく、物質中を直線的に進む。また、質量が電子に比較して非常に重いので、制動放射で失うエネルギーは通常無視できるので、 α 線に対する質量阻止能としては質量衝突阻止能 ($S_{\text{m,col}}$) を考慮すればよい。

重荷電粒子の衝突阻止能 (S_{col}) は、荷電粒子の原子番号 (陽子数) を z 、荷電粒子の速度を v 、荷電粒

子の質量を M ，荷電粒子のエネルギーを E とすると，

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

と表される。質量衝突阻止能 $S_{\text{m,col}}$ は，物質の密度を ρ とすると

$$S_{\text{m,col}} \propto \frac{z^2 M}{E \rho}$$

である。

題意より，5 MeV の α 線と 1.25 MeV の陽子線の陽子数 z ，質量 M ，エネルギー E の比はそれぞれおよそ 1/2, 1/4, 1/4 であるので，1.25 MeV の陽子線に対するアルミニウムの質量阻止能はおおよそ

$$0.61 \times \frac{(1/2)^2 \times 1/4}{1/4} \cong 0.15 \text{ [MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}]$$

問15 光子と物質との相互作用に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

- A 光電効果で生じる光電子のエネルギーは，光子のエネルギーに比例する。
 - B 光電効果に対する原子当たりの断面積は，原子番号の2乗に比例する。
 - C 質量エネルギー吸収係数は，質量減弱係数より小さい。
 - D 線減弱係数は，物質とその密度及び光子のエネルギーによって決まる。
- 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 軌道電子が光子のエネルギーを吸収して飛び出す過程を「光電効果」といい，飛び出す電子を「光電子」(photoelectron)という。光子のエネルギーを E_γ ，軌道電子の結合エネルギーを I とすると，放出される電子のエネルギー E_e は $E_e = E_\gamma - I$ で与えられ，光子のエネルギーに比例はしない。

B：誤 光電効果の原子断面積 τ の原子番号 z とエネルギー E_γ に対する依存性は，およそ $\tau \propto z^5 E_\gamma^{-3.5}$ である。

C：正 質量エネルギー吸収係数及び質量減弱係数(または質量減衰係数)は，それぞれ線エネルギー吸収係数及び線減弱係数(または線減衰係数)を密度で割った係数である。

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。線エネルギー吸収係数は，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。

したがって，

線減弱係数 > 線エネルギー転移係数 > 線エネルギー吸収係数

(質量減弱係数 > 質量エネルギー転移係数 > 質量エネルギー吸収係数)

である。

D：正 光子が物質に照射されると，光電効果，コンプトン散乱，電子対生成の3つの過程を起こす。細い光子束(光子フルエンス，単位面積を通過する光子数) ϕ の減衰は，光電効果，コンプトン散乱，電子対生成の原子断面積をそれぞれ τ, σ, χ とすると， $\mu = \tau + \sigma + \chi$ として

$$-\frac{d\phi}{dx} = (\tau + \sigma + \chi) N \phi = \mu \phi$$

で表される。ここで， N は 1 cm^3 中の原子数で， μ は線減弱係数である。

光電効果の原子断面積 τ は，原子番号 z と光子のエネルギー E_γ に依存し，およそ $\tau \propto z^5 E_\gamma^{-3.5}$

という関係がある。

コンプトン散乱の断面積は、光子と電子の散乱なので電子数に比例する。このため、コンプトン散乱の原子断面積 σ は原子番号 z に比例し、 $\sigma \propto z$ である。

電子対生成の原子断面積 χ は、光子のエネルギーが高くなると増加し、ほぼ z^2 に比例する。

したがって、線減弱係数は、物質の種類（原子番号 z ）、その密度（ 1 cm^3 中の原子数 N ）、光子のエネルギー E_γ によって決まる。

問 16 1.02 MeV の γ 線が物質でコンプトン効果を起こした場合、散乱光子と反跳電子のエネルギーが同じであった。この場合、散乱角として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 30° 2) 45° 3) 60° 4) 75° 5) 90°

〔解答〕

3

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

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad \dots\dots\dots (16-1)$$

コンプトン電子（反跳電子）のエネルギー E_e は、

$$E_e = E_\gamma - E_\gamma' \quad \dots\dots\dots (16-2)$$

で与えられる。

ここで、 m は電子の質量、 c は光の速度、 θ は散乱された γ 線（散乱光子）の散乱方向の角度である。散乱光子のエネルギー E_γ' と反跳電子のエネルギー E_e が同じであるので

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

となり、

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

$E_\gamma = 1.02 [\text{MeV}]$, $mc^2 = 0.511 [\text{MeV}]$ であるので、

$$\frac{1}{2} \cong \frac{1}{1 + 2(1 - \cos \theta)}$$

$$2 \cong 3 - 2 \cos \theta$$

$$\cos \theta \cong \frac{1}{2}$$

よって、光子の散乱角 $\theta \cong 60^\circ$

問 17 ^{137}Cs 線源からの 662 keV γ 線が、物質で入射方向に対して 180 度方向に後方散乱されるとき、この散乱光子のエネルギー $[\text{keV}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 92 2) 184 3) 288 4) 477 5) 662

〔解答〕

2

注) 問 16 解説の (16-1) 式より、散乱光子のエネルギー E_γ' は、

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

$$= \frac{662[\text{keV}]}{1 + \frac{662[\text{keV}]}{511[\text{keV}]}(1 - \cos \theta)}$$

光子の散乱角 $\theta = 180^\circ$ であるから $\cos \theta = -1$ であり、

$$E_{\gamma}' = \frac{662[\text{keV}]}{1 + \frac{662[\text{keV}]}{511[\text{keV}]} \times 2} = \frac{662[\text{keV}] \times 511[\text{keV}]}{511[\text{keV}] + 662[\text{keV}] \times 2} = \frac{338,282[\text{keV}]}{1,835} \cong 184.3[\text{keV}]$$

問 18 コンプトン効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 散乱光子の波長は、入射光子の波長より長い。
- B 入射光子のエネルギーが大きいほど、前方散乱が増大する。
- C 質量数 56 の鉄におけるコンプトン効果の原子当たりの断面積は電子当たりの断面積の 56 倍である。
- D コンプトン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。

- 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 コンプトン効果で発生した散乱光子は、入射光子よりもエネルギーが低下しているので、散乱光子の波長は入射光子の波長よりも長い。
- B : 正 入射光子のエネルギーが高くなると散乱光子は前方へ強く散乱される。
- C : 誤 コンプトン散乱の断面積は光子と電子の散乱なので電子数に比例する。鉄の原子番号は 26 であるので、その電子数も 26 である。
- D : 誤 コンプトン電子のエネルギーが入射光子のエネルギーに等しくなるということは、散乱光子が発生せず、入射 γ 線のエネルギーがすべて反跳電子に与えられるということであり、これは光電効果である。

問 19 熱中性子の遮蔽材として、適したものの組合せは次のうちどれか。

- A カドミウム板
- B ガドリニウム含有ゴムシート
- C ホウ素含有ゴムシート
- D 黒鉛ブロック

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

〔解答〕

1

- 注) A : 正 $^{113}\text{Cd}(\text{n}, \gamma)^{114}\text{Cd}$ 反応は、断面積が 20,000 b と非常に大きく、熱中性子の遮蔽に用いられる。
- B : 正 ガドリニウムは中性子吸収断面積が非常に大きいので、原子炉の制御材料に用いられる。また、原子炉運転サイクル初期の余剰反応度を抑えるため、熱中性子吸収断面積の大きいガドリニウムの酸化物 (ガドリニア : Gd_2O_3) を少量添加したペレットを用いた燃料棒が燃料集合体当たり数本用いられている。
- なお、ガドリニウムは、中性子ラジオグラフィ検査や放射線療法にも用いられている。中性子ラジオグラフィ検査では、検査対象機器の内部にガドリニウム混合液体を塗布し、撮影を行う

が、中性子残留物がある場合はその部分にガドリニウムが付着して残るので、検出可能となる。また、放射線療法としては、ガドリニウム中性子捕捉療法（GdNCT）に用いられている。これは、がん組織内に中性子増感剤としてガドリニウムをあらかじめ取り込ませておき、そこに熱中性子を照射することで生じる γ 線（飛程約 $100\mu\text{m}$ ）や電子線によるがん治療を行う手法である。

- C：正 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ や $^3\text{He}(\text{n}, \text{p})^3\text{H}$ 反応は、核反応断面積も大きく荷電粒子が発生することから中性子検出器に応用されている。
- D：誤 原子炉の中で、中性子をあまり吸収することなく、散乱を通じてエネルギーを減少させ、熱中性子を得るための物質を「減速材」という。黒鉛は中性子の減速能力が高く、熱中性子炉の減速材、反射材として利用されている（マグノックス炉、高温ガス炉など）。

問 20 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 速中性子は主に軌道電子との相互作用によりエネルギーを失う。
 B 中性子は真空中では安定である。
 C D-T 反応により生成する中性子のエネルギーは約 3 MeV である。
 D γ 線を用いて中性子を発生させることができる。
- 1) ACD のみ 2) AB のみ 3) BC のみ 4) D のみ 5) ABCD すべて

〔解答〕

4

- 注) A：誤 速中性子は、物質中では主に原子核と弾性散乱を繰り返してエネルギーを失う。また、物質中の原子核と非弾性散乱やその他の核反応も起こしてエネルギーを失う。
- B：誤 中性子は単独では不安定で、半減期は 615 秒で β^- 壊変する。核の壊変は、核自身の性質であり、核の内部状態にのみ依存し、化学的な結合状態や物理的条件（温度、気圧、磁場など）には依存しない。
- C：誤 $^2\text{H} + ^3\text{H} \longrightarrow ^4\text{He} + \text{n} + 17.6\text{ MeV}$ である。なお、D-D 反応 $^2\text{H} + ^2\text{H} \longrightarrow ^3\text{He} + \text{n} + 3.27\text{ MeV}$ において約 3 MeV のエネルギーが発生する。（D-D 反応には $^2\text{H} + ^2\text{H} \longrightarrow ^3\text{H} + ^1\text{H} + 4.03\text{ MeV}$ の反応もあり、これら 2 つの反応はほぼ同じ確率で起こる。）
- D：正 例えば、重水素 ^2H の結合エネルギーは 2.2 MeV であり、 $^2\text{H}(\gamma, \text{n})^1\text{H}$ 反応により中性子が発生する。この反応のしきい値は 2.226 MeV である。この種の反応を「光核反応」と呼び、放出された中性子を「光中性子」と呼ぶ。 ^{24}Na から放出される γ 線（2.754 MeV）や、50 MeV 以上の電子をタングステン（W）や白金（Pt）に入射した際の多量の高エネルギー制動放射線により、中性子が放出される反応が起こり得る。

問 21 次のうち、誤っているものはどれか。

- 1) $30\text{ nBq} = 3.0 \times 10^7\text{ fBq}$
 2) $100\mu\text{ Sv} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} = 1.0 \times 10^2\text{ pSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
 3) $200\text{ fm}^2 = 2.0 \times 10^{-1}\text{ pm}^2$
 4) $0.1\text{ nJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 1.0 \times 10^{-1}\text{ pJ} \cdot \text{g}^{-1}$
 5) $0.3\text{ m} \cdot \mu\text{ s}^{-2} = 3.0 \times 10^{13}\text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$

〔解答〕

3

- 注) SI 接頭辞は 10^{-15} から 10^{15} を示す次のものがよく使われる。

1 より小さいもの		1 より大きいもの	
f (フェムト)	10^{-15}	k (キロ)	10^3
p (ピコ)	10^{-12}	M (メガ)	10^6
n (ナノ)	10^{-9}	G (ギガ)	10^9
μ (マイクロ)	10^{-6}	T (テラ)	10^{12}
m (ミリ)	10^{-3}	P (ペタ)	10^{15}

- 1 : 正 $30 \text{ nBq} = 3.0 \times 10^7 \text{ fBq} = 3.0 \times 10^{-8} \text{ Bq}$ となり, 正しい。
- 2 : 正 $\text{MBq}^{-1} = (10^6 \text{ Bq})^{-1} = 10^{-6} \text{ Bq}^{-1}$, $\mu \text{ Sv} = 1.0 \times 10^6 \text{ pSv}$ である。
 $100 \mu \text{ Sv} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} = 100 \times 10^{-6} \times 10^6 \text{ pSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
 $= 1.0 \times 10^2 \text{ pSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ となり, 正しい。
- 3 : 誤 $\text{fm}^2 = \text{fm} \cdot \text{fm} = 10^3 \text{ pm} \cdot 10^3 \text{ pm} = 10^6 \text{ pm}^2$ である。
 $200 \text{ fm}^2 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ pm}^2$ となり, 誤り。
- 4 : 正 $\text{nJ} = 10^3 \text{ pJ}$, $\text{kg}^{-1} = 10^{-3} \text{ g}^{-1}$ である。
 $0.1 \text{ nJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 0.1 \times 10^{-3} \times 10^3 \text{ pJ} \cdot \text{g}^{-1} = 1.0 \times 10^{-1} \text{ pJ} \cdot \text{g}^{-1}$ となり, 正しい。
- 5 : 正 $\mu \text{ s}^{-2} = 10^{12} \text{ s}^{-2}$ である。
 $0.3 \text{ m} \cdot \mu \text{ s}^{-2} = 0.3 \times 10^2 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} = 3.0 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ となり, 正しい。

問 22 次の量と SI 単位の組合せのうち, 正しいものはどれか。

- 1) 吸収線量 — $\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$
 2) 照射線量 — $\text{A} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
 3) 線エネルギー吸収係数 — $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
 4) 質量減弱係数 — $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$
 5) 質量阻止能 — $\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-2}$

〔解答〕

5

- 注) 1 : 誤 吸収線量 — $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (Gy または $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
 2 : 誤 照射線量 — $\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$)
 3 : 誤 線エネルギー吸収係数 — m^{-1}
 4 : 誤 質量減弱係数 — $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
 5 : 正 質量阻止能 — $\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-2}$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^2$)

問 23 分解時間 $200 \mu \text{ s}$ の GM 計数管を用いて計数したところ, 計数率 $1,800 \text{ s}^{-1}$ を得た。このとき真の計数率 [s^{-1}] として, 最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 1,900 2) 2,200 3) 2,500 4) 2,800 5) 3,100

〔解答〕

4

注) 検出器に放射線が入射した直後は, 次の放射線を検出できない時間がある。これを「分解時間」といい, この時間に次の放射線が入射すると数え落とすことになる。

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

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

と表せる。 $n=1800[\text{s}]$, $\tau=0.0002[\text{s}]$ なので、これらより n_0 を求めると約 $2800[\text{cps}]$ となる。

問 24 次の検出器のうち, $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ から放出される β 線のエネルギースペクトルの測定に適したものの組合せはどれか。

- A Si(Li) 検出器
 - B NaI(Tl) シンチレーション検出器
 - C 自由空気電離箱
 - D プラスチックシンチレーション検出器
- 1) A と C 2) A と D 3) B と C 4) B と D 5) C と D

〔解答〕

2

注) β 線は検出器やその周辺物質で容易に散乱されるため、できるだけ周辺物質がなく、原子番号も小さいほうが良い。そのため、A の Si(Li) 検出器や D のプラスチックシンチレーション検出器が適している。B の NaI(Tl) シンチレーション検出器は NaI に潮解性があるため保護ケース (Al など) に覆われており、一般に γ 線のエネルギースペクトル測定に用いられる。C の自由空気電離箱は照射線量の測定に用いられるもので、エネルギースペクトル測定には適さない。

問 25 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ^{241}Am による表面汚染密度を ZnS(Ag) シンチレーション式サーベイメータを用いて測定した。
 - B トリチウムによる表面汚染測定のため、スミア試料を液体シンチレーションカウンタを用いて測定した。
 - C 土壌試料中の ^{137}Cs の濃度を Ge 検出器を用いて測定した。
 - D 高速中性子のエネルギースペクトルを有機液体シンチレーション検出器を用いて測定した。
- 1) ABC のみ 2) ABD のみ 3) ACD のみ 4) BCD のみ 5) ABCD すべて

〔解答〕

5

注) A：正 ^{241}Am は代表的な α 線放出核種である。ZnS(Ag) シンチレータは発光強度が大きく、 α 線検出によく用いられる。

B：正 トリチウム (^3H) の β 線は最大 18 keV であるため、液体シンチレーション検出器など低エネルギー β 線を検出できる測定器を用いる必要がある。

C：正 ^{137}Cs は 662 keV の γ 線放出が特徴的な核種である。Ge 検出器は γ 線に対するエネルギー分解能が良く、 γ スペクトロメトリーによく用いられる検出器である。

D：正 高速中性子のエネルギースペクトルを測定するには、高速中性子と水素の弾性散乱により生じる反跳陽子のエネルギースペクトルを測定すればよい。有機液体シンチレーション検出器はシンチレータに水素を多く含み、高速中性子のエネルギースペクトルを測定するのに適している。

問 26 電子平衡条件下で有感体積 1.0 cm^3 の空気空洞電離箱に γ 線を照射したところ 10 nC の電荷を得た。電子の空気に対する W 値を 34 eV 、このときの空気の密度を $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ とすると、空気の吸収線量 $[\text{Gy}]$ として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 0.26 2) 0.38 3) 2.6 4) 3.8 5) 4.4

〔解答〕

1

注) W 値は 1 対のイオン-電子を生成するのに必要なエネルギーである。素電荷を $e[C]$ とすると 10 nC は電子 $1.0 \times 10^{-8} \times e^{-1}$ 個分の電荷であるため、10 nC 生成するのに必要なエネルギーは、

$$34[eV] \times 1.0 \times 10^{-8} \times e^{-1} = 3.4 \times 10^{-7} \times e^{-1}[eV]$$

となる。一方、有感体積の空気の重さは、 $1.3 \times 10^{-6}[\text{kg}]$ であるため、吸収線量は、

$$3.4 \times 10^{-7} \times e^{-1}[eV] / (1.3 \times 10^{-6})[\text{kg}] \doteq 0.26 \times e^{-1}[eV \cdot \text{kg}^{-1}]$$

と求められる。ここで、

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \text{ C} \cdot \text{V} \cdot \text{kg}^{-1} = e^{-1} \text{ eV} \cdot \text{kg}^{-1}$$

なので、求める値は約 0.26 Gy となる。

問 27 気体を用いた放射線検出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 比例領域では、吸収されたエネルギーに比例したパルス波高が得られる。
- B 電離箱領域では、一次電荷を直接収集する。
- C GM 領域では、一次イオン対数に依存しないパルス波高が得られる。
- D 印加電圧の上昇とともに、電離箱領域、制限比例領域、比例領域、GM 領域、放電領域が順に現れる。

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

〔解答〕

1

注) 気体を用いた計数管の電圧特性に関する問題である。次の図に計数管の印加電圧と出力パルス波高の関係を示す。

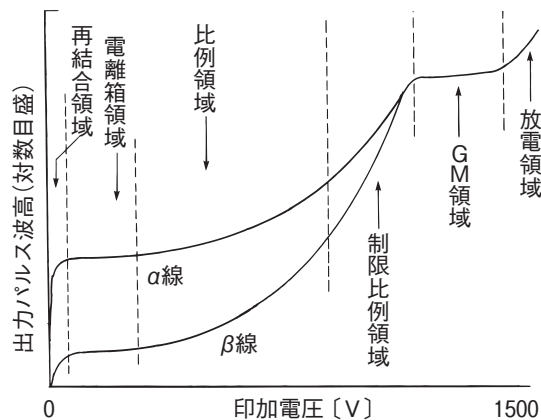


図 計数管の印加電圧と出力パルス波高の関係

(「8 版 2018 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会) より)

- 1) 再結合領域 放射線により生じたイオン対の一部が両極に移動して出力パルスを生じるが、残りは再結合して元に戻る領域。電圧が高くなると再結合する割合が少なくなり、出力パルス波高が大きくなる。
- 2) 電離箱領域 放射線により生じたイオン対のほとんどが再結合することなく、電極に集められる。電子なだれが起こらない領域のため、出力パルス波高は電圧を上げてほぼ一定である。(「一次電荷を直接収集する」と書かれた B は正しい)

- 3) **比例領域** 電極付近での強い電界のため、電子なだれによるガス増幅が起こる。ガス増幅率は一定となるので、吸収されたエネルギーに比例した出力パルス波高が得られる。(A は正しい)
- 4) **制限比例領域** ガス増幅で得られる陽イオンが多くなり、電界分布に大きな影響を与え始める。そのため、吸収されたエネルギーと出力パルス波高は比例しなくなる領域となる。
- 5) **GM 領域** ガス増幅で得られる陽イオンによる電荷効果が支配的となり、一次イオン対数とは無関係にほぼ一定の出力パルス波高となる。(C は正しい)
- 6) **放電領域** 放射線が入射しなくても放電が連続で起こる領域。
D は、印加電圧の上昇とともに現れる領域の順番が異なるため誤り。

問 28 次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- 1) 熱ルミネセンス線量計は、蛍光中心に捕捉された電子を加熱により解放した際に放出される光を利用する。
- 2) 蛍光ガラス線量計は、可視光レーザーを照射して発生する蛍光を利用する。
- 3) OSL 線量計は、炭素を添加した酸化アルミニウムを母材としている。
- 4) 固体飛跡検出器の母材には、ポリカーボネート、CR-39 プラスチック、マイカなどが使われる。
- 5) 一部の熱ルミネセンス線量計は熱中性子の測定に使用できる。

〔解答〕

2

- 注) 1 : 正 熱ルミネセンス線量計は熱で、光刺激ルミネセンス (OSL) 線量計は可視光レーザー (緑色, 532 nm) で、蛍光ガラス線量計は紫外線レーザー (320 nm) で読み取る。
- 2 : 誤 可視光レーザーではなく紫外線レーザーである。
- 3 : 正 熱ルミネセンス線量計は LiF:Mg 等の熱ルミネセンス物質、OSL 線量計は炭素を添加した酸化アルミニウム結晶 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$)、蛍光ガラス線量計は銀活性化リン酸塩ガラスを素子としている。
- 4 : 正 固体飛跡検出器にはポリカーボネート、CR-39、石英、マイカ (雲母) 等が用いられる。
- 5 : 正 中性子吸収断面積が大きい ^6Li を利用した線量計 (TLD アルベド型中性子線量計) が開発されている。

問 29 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A CR-39 は、荷電粒子や核分裂片に感度を有するが、速中性子や光子には感度はない。
- B 蛍光ガラス線量計は、読み取ることにより信号が消えないので、繰り返し測定が可能である。
- C DIS 線量計は不揮発性半導体メモリを用いており、半導体検出器と同様に、空乏層中に生成される電子-正孔対を利用して放射線を測定する。
- D OSL 線量計は、熱ルミネセンス線量計よりもフェーディングの影響が小さい。
- 1) A と B 2) A と C 3) A と D 4) B と C 5) B と D

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 CR-39 は荷電粒子、核分裂片、速中性子などに感度を有し、 β 線や γ 線に感度がない。
- B : 正 熱ルミネセンス線量計は一度読み取ると情報を失うが、OSL 線量計や蛍光ガラス線量計は繰り返し測定が可能である。
- C : 誤 DIS (Direct Ion Storage) 線量計とは、電離箱の中に不揮発性半導体メモリを組み込んだ電子式線量計である。放射線の入射により電離箱内で発生する電荷を不揮発性半導体メモリに集め

て記録する構造であり、Ge 検出器のように半導体中での電子-正孔対を利用するものではない。

- D : 正 フェーディング (潜像退行) とは、照射により蓄積されたエネルギーが時間とともに減衰して蛍光量が減少する現象である。熱ルミネセンス線量計は、OSL 線量計や蛍光ガラス線量計に比べ、フェーディングの影響がやや大きい。

問 30 次の放射性核種が体内に存在する場合、その核種から放出される放射線を体外で直接検出することが著しく困難なものはどれか。

- 1) ^{40}K 2) ^{131}I 3) ^{137}Cs 4) ^{210}Po 5) ^{239}Pu

〔解答〕

4

注) α 線、 β 線は飛程が短く、体外から検出することはできない。一方、 X 線、 γ 線は体外で検出することが可能である。純粋な (γ 線を放出しない) α 、 β 壊変核種であっても、娘核種が X 線、 γ 線を放出する短寿命核種ならば検出は可能である。また、自発的核分裂により壊変する核種では壊変時に発生する速中性子の検出も可能である。

- 1 : ^{40}K 天然に存在する γ 線放出核種で、1461 keV (放出割合 10.7%) の γ 線の検出が容易である。
- 2 : ^{131}I 核分裂によって生成する γ 線放出核種で、364 keV (放出割合 81.5%) の γ 線の検出が容易である。
- 3 : ^{137}Cs 核分裂によって生成する γ 線放出核種で、壊変時に経由する $^{137\text{m}}\text{Ba}$ から放出される 662 keV (放出割合 85.1%) の γ 線の検出が容易である。
- 4 : ^{210}Po α 線放出核種であり、壊変時に γ 線や X 線をほとんど放出しない。また、娘核種は安定な ^{206}Pb である。そのため、体外での検出は著しく困難である。
- 5 : ^{239}Pu α 線放出核種であるが、壊変時にわずかに低エネルギーの X 線 (10-20 keV, 放出割合数 %) を放出する。測定は非常に難しいが、肺に沈着したプルトニウム量を肺モニタで測定する例がある (ただし、その検出下限は高く、プルトニウムを大量に摂取したかどうかを判定できる程度であり、プルトニウムの吸入摂取による内部被ばく線量の評価には、排泄された尿や便中のプルトニウムを分析するバイオアッセイ法が主に用いられる)。

化 学

第 63 回 (平成 30 年)

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

問 1 ウラン系列は ^{238}U (原子番号 92) で始まり ^{206}Pb (原子番号 82) で終わる。この間の α 壊変と β^- 壊変の回数として、正しい組合せは次のうちどれか。

- | | α 壊変 | β^- 壊変 |
|----|-------------|--------------|
| 1) | 6 回 | 8 回 |
| 2) | 6 回 | 10 回 |
| 3) | 8 回 | 6 回 |
| 4) | 8 回 | 8 回 |
| 5) | 8 回 | 10 回 |

〔解答〕

3

注) 質量数の変化 $\Rightarrow \alpha$ 壊変では -4 , β^- 壊変では変化なし

原子番号の変化 $\Rightarrow \alpha$ 壊変では -2 , β^- 壊変では $+1$ である。

上記壊変では、質量数の変化は -32 , 原子番号の変化は -10 である。このため α 壊変は質量数の変化から 8 回となる。原子番号の変化は、以下の式で求められる。

$$\alpha : \alpha \text{ 壊変数}, \beta : \beta \text{ 壊変数とすると} \quad -2\alpha + \beta = -10$$

α は 8 なので、式を解くと β は 6 となる。

問 2 同じ強さの放射能の ^{24}Na (半減期: 15.0 時間) と ^{43}K (半減期: 22.3 時間) がある。それらの原子核の個数の比 ($^{24}\text{Na} / ^{43}\text{K}$) として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 0.15 2) 0.56 3) 0.67 4) 1.00 5) 1.49

〔解答〕

3

注) 放射能 (dN/dt) は以下の式で示される。ここで、 N : 原子数, λ : 壊変定数, とする。

$$dN/dt = -\lambda N,$$

^{24}Na の N を N_n , λ を λ_n , ^{43}K の N を N_k , λ を λ_k とすると、放射能が同じなので

$$-\lambda_n \cdot N_n = -\lambda_k \cdot N_k$$

の式が成り立つ。したがって、原子数の比は、

$$N_n/N_k = -\lambda_k / -\lambda_n$$

$\lambda T = 0.693$ (T は半減期) なので、 ^{24}Na と ^{43}K の半減期をそれぞれ T_n, T_k で表すと、上式の右辺は、

$$(0.693/T_k) / (0.693/T_n)$$

で示されるため、半減期を代入すると、 $15/22.3 \div 0.67$ となる。

問3 環境水中のトリチウム濃度はトリチウム単位(TU)で表すことがある。 ^3H 原子数の水素原子数に対する比($^3\text{H}/\text{H}$)が 10^{-18} のとき、トリチウム濃度を1TUとする。1TUの水1Lあたりに含まれる ^3H の放射能[Bq]として最も近い値は、次のうちどれか。ただし、 ^3H の半減期は12.3年(3.88×10^8 秒)とする。

- 1) 6.0×10^{-3} 2) 1.2×10^{-2} 3) 1.2×10^{-1} 4) 6.0×10^0 5) 1.2×10^1

〔解答〕

3

注) 1Lの水の質量:1000g, 1molの質量:18g, アボガドロ数: 6.02×10^{23}

1TU: 10^{-18} より, 1Lの水の中の ^3H の数は, $(1000/18) \times (6.02 \times 10^{23}) \times 2 \times 10^{-18}$ となる。

$dN/dT = -\lambda N$ および $\lambda T = 0.693$ の式より放射能は

$$\begin{aligned} dN/dt &= -\lambda N = (0.693/T) \times (1000/18) \times (6.02 \times 10^{23}) \times 2 \times 10^{-18} \\ &= 0.12 \text{ (Bq)} \end{aligned}$$

問4 比放射能 $100 \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ の $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ 1g を塩酸ですべて溶かした時に発生する気体の標準状態での放射能濃度 [$\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$] として、最も近い値は次のうちどれか。ただし、 CaCO_3 の式量は100とする。

- 1) 1.0×10^5 2) 2.2×10^5 3) 3.4×10^5 4) 4.0×10^5 5) 4.5×10^5

〔解答〕

5

注) $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3 + 2\text{HCl} \longrightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

$\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ 1g に対し $^{14}\text{CO}_2$ は, 0.46 (46/100)g 生成される。

1molの気体は22.4Lなので, 0.46gの気体の量は, $(0.46/46) \times 22.4 = 0.224 \text{ L}$

^{14}C はすべて $^{14}\text{CO}_2$ になるので, 0.224L中の放射能は100kBq。したがって, 1L当たりの放射能(Bq)は, $10^5 \times 1/0.224 = 4.46 \times 10^5$

問5 次の壊変系列と核種のうち、正しいものの組合せはどれか。

- 1) ウラン系列 — ^{222}Ra
 2) ウラン系列 — ^{226}Ra
 3) アクチニウム系列 — ^{224}Ra
 4) トリウム系列 — ^{225}Ra
 5) トリウム系列 — ^{220}Ra

〔解答〕

2

注) 放射性核種の壊変系列とその質量数について、以下の表にまとめておく。

壊変系列	トリウム系列	ネプツニウム系列	ウラン系列	アクチニウム系列
質量数	$4n$	$4n+1$	$4n+2$	$4n+3$

1) $\times$ ^{222}Ra : $4n+2$ だが、天然には存在しないため、ウラン系列ではない。 ^{222}Rn である。

2) $\circ$ ^{226}Ra : $4n+2$ (ウラン系列)

3) $\times$ ^{224}Ra : $4n$ (トリウム系列)

4) $\times$ ^{225}Ra : $4n+1$ (ネプツニウム系列)

5) $\times$ ^{220}Ra : $4n$ だが、天然には存在しないため、トリウム系列ではない。 ^{220}Rn である。

問 6 ある親核種を単離してから 1 日後の時点で、その親核種と娘核種との間に永続平衡が成立している。この記述について、正しいものの組合せは次のうちどれか。

親核種	娘核種
A ^{42}Ar	^{42}K
B ^{68}Ge	^{68}Ga
C ^{137}Cs	$^{137\text{m}}\text{Ba}$
D ^{140}Ba	^{140}La
E ^{238}U	^{234}U

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

〔解答〕

3

注) 永続平衡が成り立つには、娘核種の半減期が親核種の半減期と比較して、圧倒的に短くなければならぬ。また、平衡が成り立つまでの時間は、娘核種の半減期の 7~10 倍である。なお、親核種の半減期が娘核種の半減期より短い時は、放射平衡は成り立たない。

それぞれの半減期は、以下の通りである。

A ^{42}Ar : 32.9 y	^{42}K : 12.36 h
B ^{68}Ge : 270 d	^{68}Ga : 67.7 m
C ^{137}Cs : 30 y	$^{137\text{m}}\text{Ba}$: 2.5 m
D ^{140}Ba : 12.7 d	^{140}La : 1.67 d
E ^{238}U : $4.47 \times 10^9 \text{y}$	^{234}U : $2.46 \times 10^5 \text{y}$

したがって、上記条件に合うのは、 $^{68}\text{Ge} - ^{68}\text{Ga}$ と $^{137}\text{Cs} - ^{137\text{m}}\text{Ba}$ のみである。

問 7 次のうち、 ^{11}C を直接生成する核反応として、正しいものの組合せはどれか。

- A $^{10}\text{B}(\text{d}, \text{p})$
 B $^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})$
 C $^{12}\text{C}(\gamma, \text{n})$
 D $^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)$

- 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) 核反応に関わる要素ごとに、質量数と原子番号の変化について以下にまとめる。

	d (重陽子線)	p (陽子線)	α (He)	n (中性子線)	γ (γ 線)
質量数	+2	+1	+4	+1	変化なし
原子番号	+1	+1	+2	変化なし	変化なし

- A : $^{10}\text{B}(\text{d}, \text{p})$ 原子番号は変化しない。
 B : $^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})$ 原子番号のみ +1 となり、 ^{11}C となる。
 C : $^{12}\text{C}(\gamma, \text{n})$ 原子番号は変化しなくて、質量数のみ -1 となる。
 D : $^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)$ 原子番号は -1 で ^{11}C となり、質量数は -3 となる。
 BCD の反応が、 ^{11}C を直接生成する。

問8 ハロゲン元素の同位体を生成する核反応として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

A $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \text{p})$

B $^{20}\text{Ne}(\text{p}, \text{n})$

C $^{40}\text{Ar}(\text{d}, \alpha)$

D $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})$

1) AとB 2) AとC 3) AとD 4) BとC 5) BとD

〔解答〕

2

注) ^3He (重陽子線) $\rightarrow$ 質量数+3 原子番号+2。d, p, α , n, γ は問7参照。

A: $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \text{p})$ 原子番号 $8+2 \rightarrow 10$, $10-1=9$: F (ハロゲン元素)

B: $^{20}\text{Ne}(\text{p}, \text{n})$ 原子番号 $10+1 \rightarrow 11$, $11-0=11$: Na

C: $^{40}\text{Ar}(\text{d}, \alpha)$ 原子番号 $18+1 \rightarrow 19$, $19-2=17$: Cl (ハロゲン元素)

D: $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})$ 原子番号 $16+0 \rightarrow 16$, $16-1=15$: P

問9 以下の材料を熱中性子照射した。材料と生成する放射性核種との関係として、正しいものの組合せは次のうちどれか。ただし、中性子フルエンス率は $1.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、照射時間は1時間とする。

材料		放射性核種
A フッ化リチウム	—	^3H
B ステンレス鋼	—	^{51}Cr
C しんちゅう(黄銅)	—	^{64}Cu
D アルミナ	—	^{26}Al
E アクリル樹脂	—	^{11}C

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

〔解答〕

1

注) 熱中性子のエネルギーは0.025 eV, 材料と放射性核種の生成反応を見ると,

A: フッ化リチウム ターゲットがリチウムで, ^3H が生成する熱中性子反応は $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$

B: ステンレス鋼 ターゲットが ^{52}Cr で, ^{51}Cr が生成する反応は $^{50}\text{Cr}(\text{n}, \gamma)^{51}\text{Cr}$

C: しんちゅう(黄銅) ターゲットが ^{63}Cu で, ^{64}Cu が生成する反応は $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{64}\text{Cu}$

D: アルミナ ターゲットが ^{27}Al で, ^{26}Al が生成する反応は $^{27}\text{Al}(\text{n}, 2\text{n})^{26}\text{Al}$

E: アクリル樹脂 ターゲットが ^{12}C で, ^{11}C が生成する反応は $^{12}\text{C}(\text{n}, 2\text{n})^{11}\text{C}$

また, 熱中性子によって起きる反応の特徴は以下のとおり。

(n, γ) 反応——捕獲反応。熱中性子によって起きる。

(n, α) 反応——一般的には, エネルギーの高い中性子によって起きる。しかし, $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$ と $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ は例外で, 熱中性子でも核反応を起こし, 核反応断面積は大きい。そのため, 中性子の検出などに利用される。

(n, 2n) 反応——中性子のエネルギーが高い場合に主に起きる(中性子エネルギーのしきい値: 1.8 MeV)。

D, E は熱中性子では起きない。

問10 無担体の放射性同位体が得られる核反応として、正しいものの組合せは次のうちどれか。ただし、ホットアトム効果は考慮しない。

A (n, p)

B (n, γ)

C (d, α)

D (d, p)

E (γ , n)

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

〔解答〕

2

注) 無担体とは、放射性同位元素が、その安定同位体を含まない状態のこと。したがって、原子番号が変化せずに中性子数が増える反応は除外される。

原子番号と中性子数の変化を見ると、

A (n, p) 原子番号: $+0-1=-1$ 中性子数: $+0-1=-1$

B (n, γ) 原子番号: $+0-0=0$ 中性子数: $+1-0=+1$

C (d, α) 原子番号: $+1-2=-1$ 中性子数: $+1-2=-1$

D (d, p) 原子番号: $+1-1=0$ 中性子数: $+1-0=+1$

E (γ , n) 原子番号: $+0-0=0$ 中性子数: $+0-1=-1$

ただし、式の前の数: 入射粒子による数の変化。式の後の数: 放出粒子による数の変化。

ここで、A と C は異なる元素になるため、生成した放射性同位元素は無担体となる。

「ホットアトム効果」: 核反応によって生成される、高いエネルギーの反応性に富んだ放射性同位元素により化学結合が切れる現象のこと。ホットアトム効果を考慮しないことによって、上記の核反応だけが対象となる。

問 11 放射性元素とその同族元素として正しいものの組合せは、次のうちどれか。

放射性元素 同族元素

A Pm Pb

B At I

C Rn Xe

D Ra Cs

E Pa U

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

〔解答〕

4

注) 同族元素とは、「元素の周期表」で同じ族に属する元素。

A: × Pm (3 族: ランタノイド元素) Pb (14 族)

B: ○ At (17 族: ハロゲン) I (17 族: ハロゲン)

C: ○ Rn (18 族: 希ガス) Xe (18 族: 希ガス)

D: × Ra (2 族: アルカリ土類金属) Cs (アルカリ金属)

E: ○ Pa (3 族: アクチノイド元素) U (3 族: アクチノイド元素)

問 12 ベリリウム Be 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 Be は、2 価の陽イオンになりやすい。

B ^7Be は、 β^+ 壊変して ^7Li になる。

C ${}^7\text{Be}$ と ${}^{10}\text{Be}$ は、ともに宇宙線の核破砕反応により大気中で生成する。

D ${}^9\text{Be}$ は、ベリリウムで唯一の安定同位体である。

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

〔解答〕

3

注) A : ○ 2 族の元素、2 価の陽イオンになりやすい。

B : × ${}^7\text{Be}$ は、EC (電子捕獲) して ${}^7\text{Li}$ になる。

C : ○ ${}^7\text{Be}$ は大気中の炭素が、 ${}^{10}\text{Be}$ は大気中の酸素および窒素が宇宙線による核破砕を受けることで生成される。

D : ○ Be の安定同位体は ${}^9\text{Be}$ のみ (単核種元素)。

問 13 安定同位体の利用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A ${}^7\text{Li}$ は、トリチウム製造の原料に使われる。

B ${}^{11}\text{B}$ は、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) に利用される。

C ${}^{151}\text{Eu}$ は、アクチバブルトレーサとして利用される。

D ${}^{206}\text{Pb}$ は、ウラン-鉛年代測定法に利用される。

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

〔解答〕

5

注) A : × ${}^6\text{Li}$ と中性子の反応でトリチウムが生成する。

B : × ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) に利用されるのは、 ${}^{10}\text{B}$ 。

C : ○ 「アクチバブルトレーサー」：安定同位体トレーサー。「アクチバブルトレーサー法 (後放射化法)」は非放射性元素や化合物をトレーサーとして用い最終試料を中性子などで放射化し、放射能を測定する方法。Eu, Sm, Gd などの非放射性物質が使われる。

D : ○ 「ウラン-鉛年代測定法」は、天然に存在する U が最終的に Pb の原子核に変化することを利用することで、分析対象物がどのくらい昔に形成されたものであるかを調べる方法。 ${}^{238}\text{U}$ (半減期約 45 億年) $\rightarrow$ ${}^{206}\text{Pb}$: ウラン系列と、 ${}^{235}\text{U}$ (半減期約 7 億年) $\rightarrow$ ${}^{207}\text{Pb}$: アクチニウム系列を利用する。

問 14 同位体効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 物理的性質ではなく、化学的性質に差異が見られる。

B 同位体濃縮に利用できる。

C 表層海水の酸素同位体比が温度によって変動する。

D 古代木製遺物の年代測定に利用される。

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

〔解答〕

4

注) A : × 同位体の質量の違いによって生じる物理的、化学的效果をいう。

B : ○ 他の同位体からの分離・濃縮に同位体効果を利用する。

C : ○ ${}^{16}\text{O}$ と ${}^{18}\text{O}$ の同位体効果、軽い海水 ($\text{H}_2{}^{16}\text{O}$) の方が蒸発しやすい。

D : × 同位体効果ではない。安定同位体 (${}^{12}\text{C}$) と放射性同位体 (${}^{14}\text{C}$) との同位体比を測定。

問 15 単核種元素のみの組合せとして、正しいものは次のうちどれか。

- | | | | |
|----|----|----|----|
| 1) | B | F | P |
| 2) | Be | Na | Cl |
| 3) | H | C | O |
| 4) | Mn | Co | I |
| 5) | S | Sc | Au |

〔解答〕

4

注) 単核種元素とは、安定同位体が 1 つである元素。

- 1 : B は×。安定同位体が 2 つ、 ^{10}B と ^{11}B 。 ^{10}B は熱中性子捕獲剤。
 2 : Cl は×。安定同位体が 2 つ、 ^{35}Cl と ^{37}Cl 。
 3 : すべて×。H の安定同位体は ^1H と ^2H 。C の安定同位体は ^{12}C と ^{13}C 。O の安定同位体は ^{16}O 、 ^{17}O と ^{18}O 。
 4 : すべて○
 5 : S は×。安定同位体 4 つ、 ^{32}S 、 ^{33}S 、 ^{34}S 、 ^{36}S 。

問 16 核種に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 質量数が異なり陽子の数が互いに等しい核種を同位体と呼ぶ。
 B 陽子の数と中性子の数の和が互いに等しい核種を同重体と呼ぶ。
 C 中性子の数を原子番号と呼ぶ。
 D 陽子と中性子の数が互いに入れ替わった核種を核異性体と呼ぶ。

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

〔解答〕

2

注) A, B : ○

- C : × 陽子の数を原子番号という。
 D : × 核異性体は、原子核がエネルギー準位の高い励起状態になっているもの。 γ 線を放出しエネルギー準位の低い基底状態になる。

問 17 次のうち、生成核種が同じものの組合せはどれか。

- A ^{59}Fe の β^- 壊変による生成核種
 B ^{59}Ni の EC 壊変による生成核種
 C ^{60}Ni の (γ , p) 反応による生成核種
 D ^{58}Fe の (n, γ) 反応による生成核種

- 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, C は ^{59}Co が生成核種。D は ^{59}Fe が生成核種。

問 18 次の操作を行う際に、化学反応生成物として放射性の気体が発生するものはどれか。ただし、溶液や酸の濃度は $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ とする。

- 1) $[\text{}^3\text{H}]\text{CH}_3\text{COONa}$ 水溶液に NaOH 水溶液を加える。
 2) $[\text{}^{35}\text{S}]\text{FeS}$ に HCl を加える。

- 3) $[^{45}\text{Ca}]\text{CaCl}_2$ 水溶液に HCl を加える。
 4) $[^{60}\text{Co}]\text{CoCl}_2$ 水溶液に NaOH 水溶液を加える。
 5) $[^{110\text{m}}\text{Ag}]\text{AgNO}_3$ 水溶液に HCl を加える。

〔解答〕

2

注) 1 : $\times$ $\text{C}^3\text{H}_3\text{COONa}$ (固体) + NaOH (固体) $\longrightarrow$ C^3H_4 (気体) + Na_2CO_3

固体+固体で強熱すると、メタンが発生する。設問では水溶液+水溶液の場合で加熱もしていないため、発生しないと考える。

2 : $\bigcirc$ $\text{Fe}^{35}\text{S} + 2\text{HCl} \longrightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2^{35}\text{S}$ (気体)

3 : $\times$ $^{45}\text{CaCl}_2 + \text{HCl} \longrightarrow \text{HCl}_2 + ^{45}\text{CaCl}$

4 : $\times$ $^{60}\text{CoCl}_2 + 2\text{NaOH} \longrightarrow ^{60}\text{Co}(\text{OH})_2 + 2\text{NaCl}$

5 : $\times$ $^{110\text{m}}\text{AgNO}_3 + \text{HCl} \longrightarrow ^{110\text{m}}\text{AgCl} + \text{HNO}_3$

問19 同位体のトレーサー利用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 低エネルギー β^- 線のみを放出する放射性同位体も利用できる。
 B 比放射能が高い標識化合物を利用する時には、放射線分解に注意する。
 C 同じ元素の安定同位体と放射性同位体の挙動の違いを利用する。
 D アクチバブルトレーサーは天然同位体存在度が最も大きい安定同位体を放射化して、利用する。

1) AとB 2) BとC 3) CとD 4) AとC 5) BとD

〔解答〕

1

注) A : $\bigcirc$ ^3H (低エネルギー β^- 線のみ放出) はよく利用される核種。

B : $\bigcirc$ 放射線分解とは、放射線が物質に当たり化学結合を破壊したり、予期しない化学反応を起こすこと。比放射能の高いトレーサーを使う場合は注意が必要。

C : $\times$ 同じ挙動を利用している。

D : $\times$ 自然界の存在量が少ない元素がよい。

問20 300 kBq の ^{125}I で標識された 0.5 g のヨウ化カリウムを用いて、 $[^{125}\text{I}]$ ヨードベンゼンを合成した。得られた $[^{125}\text{I}]$ ヨードベンゼンの 1 g 当たりの ^{125}I の放射能 [kBq] として、最も近い値は次のうちどれか。

ただし、ヨウ化カリウムの式量を 166、ヨードベンゼンの分子量を 204 とする。

1) 240 2) 370 3) 490 4) 600 5) 740

〔解答〕

3

注) ヨウ化カリウム 0.5 g は $0.5/166[\text{mol}]$ で、合成されるヨードベンゼンも同じモル数であり、ヨードベンゼンは $(0.5/166) \times 204[\text{g}]$ 合成されることになる。

全放射能は同じなので、ヨードベンゼン 1 g 当たりの ^{125}I の放射能 (Bq) は

$$300 \times 10^3 \times \frac{1}{\frac{0.5}{166} \times 204} = 488.235 \cdots \times 10^3 \div 490 \times 10^3 (\text{Bq}) = 490 (\text{kBq})$$

問21 ^{201}Tl で標識された塩化タリウム TlCl を検定したところ、 $^{201}\text{TlCl}$ の放射能は 270 MBq、他の化学形の ^{201}Tl が 20 MBq 及び $^{202}\text{TlCl}$ が 10 MBq 存在していた。この検定時より 6 日後の ^{201}Tl の放射化学純度と核種純

度として、最も近い値の組合せは次のうちどれか。ただし、 ^{201}Tl と ^{202}Tl の半減期は、それぞれ 73 時間、12 日とする。

	放射化学純度	核種純度
1)	93%	97%
2)	91%	85%
3)	88%	93%
4)	85%	91%
5)	82%	87%

〔解答〕

4

注) ^{201}Tl で標識された TlCl の検定時より 6 日後の放射能は、 $^{201}\text{TlCl}$ は約 67.5 MBq、他の化学形の ^{201}Tl は約 5 MBq、 $^{202}\text{TlCl}$ は約 7 MBq となる。化学形に関係なく着目する核種の放射能の全放射能に対する割合、すなわち $^{201}\text{TlCl}$ の放射能と他の化学形の ^{201}Tl の放射能の和の全放射能に対する割合を核種純度、指定の化学形で存在する着目核種、すなわち $^{201}\text{TlCl}$ の放射能の全放射能に対する割合を放射化学純度として求める。

問 22 ラジオイムノアッセイ (RIA) とアイソトープ誘導体法 (IDM) 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 RIA は、同位体希釈法を応用した分析法である。
- B RIA は、抗原と標識抗原が抗体に対する競合反応を利用した分析法である。
- C IDM は、直接希釈法に分類される。
- D IDM は、アミノ酸混合物中の特定アミノ酸の分析などに有効である。

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

〔解答〕

2

注) C：誤 直接希釈法は定量すべき化合物と同じ化学形の標識化合物を試料に添加し定量する方法であるのに対し、アイソトープ誘導体法 (IDM) は、試料に結合する標識化合物で逆希釈法を行う方法であり、直接希釈に適した同位体がない場合にも適用できる。

問 23 比放射能が不明の ^{60}Co 化合物 X がある。X を 2 等分して、同じ化学形の非放射性 Co 化合物を一方に 25 mg、他方に 50 mg を加え、それぞれを十分に混合し均一にして、試料 A、試料 B とした。その後、それらの試料 A、B 各々から同化合物の一部を取り出し、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 ^{60}Co 化合物 X の量 [mg] として、最も近い値は次のうちどれか。

- 1) 25 2) 50 3) 75 4) 100 5) 125

〔解答〕

2

注) 二等分した試料 A、B それぞれに含まれる ^{60}Co 化合物の放射能を x 、重量を y とする。同じ化学形の非放射性 Co 化合物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、 $y=25$ [mg] が求まるので、最初の量は 50 [mg] となる。

問24 ^{14}C 年代測定法に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A ^{14}C は大気中で主として (n, p) 反応で生成する。
 B 加速器質量分析計では、 ^{14}C 原子核の質量を精密測定する。
 C フッ素樹脂中の ^{14}C の比放射能は天然ゴム中の ^{14}C の比放射能より小さい。
 D 約1万年が測定限界である。
- 1) AとB 2) AとC 3) AとD 4) BとC 5) BとD

〔解答〕

2

注) B：誤 加速器質量分析 (AMS) では、試料炭素に含まれる炭素同位体比 [$^{14}\text{C}/(^{12}\text{C}+^{13}\text{C})$] を測定する。

D：誤 ^{14}C の β 線測定法による測定限界が3~4万年程度、AMSでは5~6万年程度である。

問25 次の放射化分析に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A Ge検出器でガンマ線を測定すると多元素同時分析が可能である。
 B 照射時間に比例して元素の検出感度が向上する。
 C 目的元素の化学形に依存せず、その全量を定量できる。
 D 異なる元素から同じ核種が生成することにより、定量値が過小評価されることがある。
- 1) AとC 2) AとD 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

1

注) B：誤 標的核に時間 t だけ中性子照射したときの生成核の放射能 A [Bq] は、照射粒子のフルエンス率を f 、標的核の核反応断面積を σ 、生成核の原子数を N とすると、以下の式で表される。

$$A = f\sigma NS$$

上式の S は飽和係数と呼ばれ、生成核の半減期を T 、その壊変定数を λ とすると、

$$S = (1 - e^{-\lambda t}) = \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}\right)$$

と表される。半減期と飽和係数 S の関係は図に示すとおり、1~2半減期より長く照射しても、生成する放射能はあまり大きくならない。

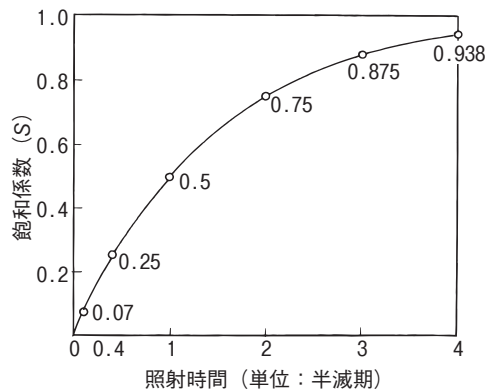


図 照射時間による飽和係数の変化

(「8版2018 放射線取扱の基礎」(日本アイソトープ協会)より)

- D : 誤 中性子放射化分析の欠点としては、分析対象が化合物など元素単体ではない場合、副反応による妨害や中性子が試料中で減衰する自己遮蔽などによる誤差が避けられないことが挙げられる。異なる元素から同じ核種が生成すると、過大評価となる。

問 26 放射性核種とその利用の関係として正しいものの組合せは、次のうちどれか。

	放射性核種	利用
A	^{241}Am	煙感知器
B	^{238}U	水分計
C	^{57}Co	メスbauer分光
D	^{63}Ni	ガスクロマトグラフ
E	^{90}Sr	Rb-Sr 年代測定法

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

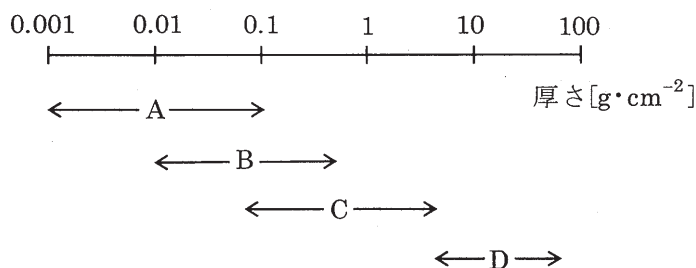
〔解答〕

2

注) B : 誤 水分計の原理は、速中性子が水素に衝突し減速されて生じる熱中性子を測定し、試料中の水素または水分量を求める。中性子源は、 $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ 、 ^{252}Cf が用いられている。

E : 誤 Rb-Sr 年代測定法は、 ^{87}Rb (半減期 488 億年) の β 壊変により生成する ^{87}Sr と岩石中に残存している ^{87}Rb の量から年代を測定する。 ^{90}Sr は、厚さ計などの機器に装備され利用されている。

問 27 透過型厚さ計で用いる線源と下図に示した測定範囲の関係として、正しいものの組合せは次のうちどれか。



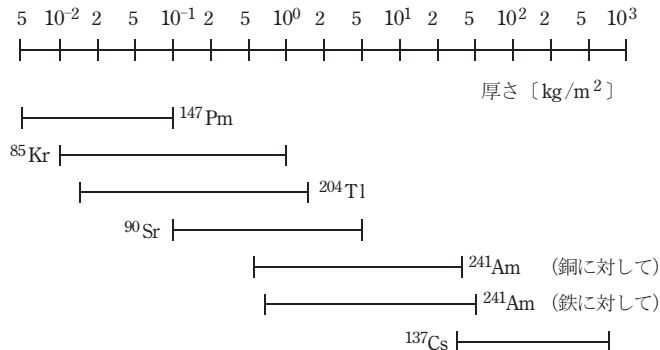
- | | A | B | C | D |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1) | ^{90}Sr | ^{241}Am | ^{137}Cs | ^{85}Kr |
| 2) | ^{241}Am | ^{85}Kr | ^{90}Sr | ^{137}Cs |
| 3) | ^{90}Sr | ^{85}Kr | ^{137}Cs | ^{241}Am |
| 4) | ^{85}Kr | ^{90}Sr | ^{241}Am | ^{137}Cs |
| 5) | ^{85}Kr | ^{90}Sr | ^{137}Cs | ^{241}Am |

〔解答〕

4

注) 厚さ計は、物質による放射線の吸収や散乱が試料の厚さによって決まることを利用した機器で、その線源と測定範囲を次の図に示す。

透過形厚さ計用線源と測定範囲



〔「11版 アイソトープ手帳」(日本アイソトープ協会)より〕

問28 高強度のガンマ線または電子線照射の工業的利用方法に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A グラフト重合反応によるイオン交換膜の製造
 - B 架橋反応によるラジアルタイヤ用ゴムの改質
 - C 包装した医療器具の滅菌
 - D 分解反応によるポリテトラフルオロエチレン（PTFE）の粒子化
- 1) ABCのみ 2) ABDのみ 3) ACDのみ 4) BCDのみ 5) ABCDすべて

〔解答〕

5

- 注) A：正 グラフトは「接ぎ木」を意味し、さまざまな高分子材料に放射線を照射しラジカルを作り、そこを開始点としてイオン交換基をもつビニルモノマーをグラフト重合することでイオン交換膜を製造できる。
- B：正 ラジアルタイヤ用の材料に放射線を照射しラジカルを作り、そこに橋を架けるように別の材料との化学結合をつくることで材料を強化することができる。
- C：正 放射線は透過力が強いので、製品の梱包形状に制限を受けず、梱包した最終工程で処理ができることから、医療器具の滅菌に広く利用されている。
- D：正 ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）は化学的に安定で耐熱性、耐薬品性に優れるが、放射線を照射すると、その鎖状分子が切断され脆弱化する。ただし、微粉末化されても化学的な安定性は維持されたままであることから、その特長をいかし、さまざまな原料に使用されている。

問29 化学線量計に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 鉄線量計は、 Fe^{2+} の酸化反応を利用する。
 - B 鉄線量計は、空気飽和よりも酸素飽和で測定する方が測定可能な線量の範囲が拡大する。
 - C セリウム線量計は、 Ce^{4+} の還元反応を利用する。
 - D セリウム線量計は、空気飽和よりも酸素飽和で測定する方が測定可能な線量の範囲が拡大する。
 - E 大線量の測定には、セリウム線量計よりも鉄線量計の方が適している。
- 1) ABCのみ 2) ABDのみ 3) ACEのみ 4) BDEのみ 5) CDEのみ

〔解答〕

1

- 注) D : 誤 鉄線量計 [フリッケ (Fricke) 線量計ともいう] が使用前に空気を吹き込み溶存酸素濃度を高めることで測定可能な線量の範囲が拡大するのに対し, セリウム線量計は溶存酸素濃度に関わらず一定である。
- E : 誤 セリウム線量計の特徴の 1 つとして, 感度は低いものの, 大線量の測定に適していることが挙げられる。

問 30 次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。

- A 物質が放射線のエネルギーを 100 eV 吸収したときに変化を受ける分子または原子の質量を G 値と呼ぶ。
- B 放射線の種類が同じ場合, G 値は物質の種類に依存する。
- C 気体中で 1 組の電子-陽イオン対をつくるのに必要な平均エネルギーを W 値と呼ぶ。
- D 同じ気体の場合, W 値は放射線の種類やエネルギーにあまり依存しない。

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

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 物質が放射線のエネルギーを 100 eV 吸収したときに変化を受ける分子数または原子数を G 値と呼ぶ。

生 物 学

第63回(平成30年)

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

問1 次の標識化合物のうち、ガンマカメラによる核医学画像診断に用いられるものの組合せはどれか。

- A $[^{35}\text{S}]$ メチオニン
- B $[^{67}\text{Ga}]$ クエン酸ガリウム
- 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) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

4

注) ガンマカメラは放射性医薬品からの γ 線(あるいは特性X線)を検出して画像化する。

- A : 誤 ^{35}S は γ 線を放出せず、低エネルギー β 線のみを放出する。
- B : 正 ^{67}Ga はEC壊変後に γ 線を放出する。 $[^{67}\text{Ga}]$ クエン酸ガリウムは腫瘍、炎症の診断に使用される。
- C : 誤 ^{89}Sr は γ 線を放出せず、 β 線を放出する。 $[^{89}\text{Sr}]$ 塩化ストロンチウムは骨転移疼痛緩和剤として内用療法に使用される。
- D : 正 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は核異性体転移により γ 線を放出する。 $[^{99\text{m}}\text{Tc}]$ 過テクネチウム酸ナトリウムは甲状腺疾患、唾液腺疾患などの診断に使用される。

問2 放射線の生物作用における直接作用と間接作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A X線による細胞致死効果においては、直接作用に比べて間接作用の寄与が小さい。
- B 直接作用は間接作用に比べて、温度の影響を受けにくい。
- C 直接作用は間接作用に比べて、ラジカルスカベンジャーで抑制されやすい。
- D 乾燥した酵素のX線による不活性化は、主に直接作用によるものである。

- 1) AとB 2) AとC 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

4

注) A : 誤 X線のような低LET放射線では間接作用の寄与が大きい。

- B : 正 間接作用のほうが温度の影響を受けやすい。間接作用にはフリーラジカルが関係するが、低温ではこのフリーラジカルの拡散が妨げられ、DNAへ到達せず損傷へ寄与しないラジカルが出てくる。
- C : 誤 ラジカルスカベンジャーで抑制されやすいのは間接作用である。
- D : 正 間接作用は水分子が関係するため、乾燥している場合は直接作用が主となる。

問 3 水への放射線照射で生じる活性種の性質に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 水和電子は生体成分を酸化する。
- B スーパーオキシドラジカルを特異的に消去する酵素がある。
- C ヒドロキシルラジカルは DNA に作用して損傷を与える。
- D 過酸化水素は生体膜を透過しにくい。

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 水和電子は還元的に作用する。

B：正 SOD（スーパーオキシド・ディスムターゼ）によりスーパーオキシドラジカルは不活性化される。

C：正 間接作用における DNA 損傷はヒドロキシルラジカルによる反応に依るところが大きい。

D：誤 生体膜における過酸化水素の透過性は高い。

問 4 放射線の生物影響における酸素効果に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 照射 30 分後に酸素濃度を高くすることにより酸素効果が見られる。
- B OER とは、同一線量における酸素存在下と非存在下での生物効果の比である。
- C 酸素効果は高 LET 放射線では低 LET 放射線に比べて小さくなる。
- D 酸素分圧が 100 mmHg では酸素効果はほぼ飽和している。

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

〔解答〕

5

注) A：誤 照射時の酸素分圧により酸素効果の大きさが決まり、照射後に酸素濃度を高めたとしても、酸素効果は見られない。

B：誤 OER とは、同じ生物学的効果を得るのに必要な「無酸素下での線量」と「酸素存在下での線量」の比である。

問 5 X 線による DNA 損傷に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 無酸素条件下で照射すると、有酸素条件下と比べて単位吸収線量当たりの DNA 鎖切断の数は多くなる。
- B 塩基損傷の生成においては、水素ラジカルと比べてヒドロキシルラジカルの関与が大きい。
- C 単位吸収線量当たりの塩基損傷の数は塩基遊離の数よりも多くなる。
- D 単位吸収線量当たりの 2 本鎖切断の数は 1 本鎖切断の数よりも多くなる。

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

〔解答〕

3

注) A：誤 無酸素条件下では、有酸素条件下と比べて放射線効果は小さくなる。

D：誤 2 本鎖切断は 1 本鎖切断よりも生じにくい。

問 6 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 相同組換え修復は細胞の照射後 1 時間以内に完了する。
- B 非相同末端結合による修復は相同組換え修復よりも正確である。

- C 非相同末端結合による修復は全細胞周期で行われる。
 D 相同組換え修復は細胞周期のG₁期からS期前半において行われる。
 E 2本鎖切断は1本鎖切断よりも修復されにくい。
 1) AとB 2) AとE 3) BとD 4) CとD 5) CとE

〔解答〕

5

- 注) A：誤 相同組換え修復では自己細胞で複製された姉妹染色分体が用いられ、照射後1時間以内では完了しない。
 B：誤 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：誤 相同組換えは姉妹染色分体の存在するS期からG₂期にしか起こらない。

問7 2Gyの急性γ線全身被ばくした場合の末梢血中の血球の変化に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A リンパ球はアポトーシスによって死ぬ。
 B リンパ球の減少は被ばく後1日以内に起こる。
 C 好中球数は被ばく後3日以内に一過性に増加する。
 D 血小板数は被ばく後約10日で最低値となる。
 1) ABCのみ 2) ABDのみ 3) ACDのみ 4) BCDのみ 5) ABCDすべて

〔解答〕

1

- 注) B：正 リンパ球は放射線感受性が高く細胞死を起こすため、被ばく直後からその数は減少する。
 C：正 好中球の数は、数Gy程度の急性全身被ばく後1～2日以内に一過性に増加する。
 D：誤 血小板数は被ばく後20日以降に最低値を示す。

問8 放射線によるアポトーシスに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 核の断片化が観察される。
 B 核の膨潤が観察される。
 C クロマチンの凝縮が観察される。
 D 細胞内容物の流出が観察される。
 1) AとC 2) AとD 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

1

- 注) A：正 核の断片化はアポトーシスに見られる特徴的な現象である。
 C：正 核内クロマチンの凝縮はアポトーシスに見られる特徴的な現象である。
 D：誤 細胞内容物の流出はネクローシスに見られる現象である。

問9 放射線誘発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 染色体異常は、細胞周期のM期に照射を受けた細胞にのみ生じる。
 B G₁期に照射された細胞にDNA2本鎖切断が生じると、染色分体型異常が生じる。
 C G₀期の細胞で、PCC（未成熟染色体凝縮）法で染色体異常を観察することができる。
 D 転座に比べて二動原体染色体の方が放射線による頻度の増加をより低線量で検出できる。

E X線急照射による染色体異常は、線量に比例して直線的に増加する。

- 1) AとB 2) AとE 3) BとD 4) CとD 5) CとE

〔解答〕

4

注) A：誤 細胞周期のいずれの時期の照射でも染色体異常は生じる。

B：誤 G_1 期の照射では染色体型異常が生じる。

C：正 G_0 期では薬剤などを用いて間期染色体を凝縮させて観察する方法がとられる。

D：正 染色体異常は、二動原体染色体や環状染色体のほうが観察しやすい。

E：誤 X線急照射による染色体異常は、線量が増加するとともに増加するが、直線的な正比例というわけではない。

問 10 培養ヒト線維芽細胞の細胞周期による致死感受性の変化に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A G_1 期に比べて M 期は致死感受性が高い。

B S 期前半に比べて S 期後半から G_2 期前半は致死感受性が高い。

C X 線に比べて高 LET 放射線では致死感受性の細胞周期依存性が大きい。

D S 期に比べて M 期の細胞の生存率曲線の肩は小さい。

- 1) AとC 2) AとD 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

2

注) B：誤 放射線による致死感受性は S 期前半が高く、S 期後半が低くなる。

C：誤 高 LET 放射線は間期死（非増殖死）がみられるため、細胞周期の影響を受けにくい。

問 11 細胞が放射線照射により受けた損傷からの回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 PLD 回復は、増殖している細胞で主に観察される。

B SLD 回復が起こる場合、総線量が同じであれば分割照射の方が一回照射より生存率が高くなる。

C SLD 回復と PLD 回復は、低 LET 放射線に比べて高 LET 放射線では小さい。

D PLD 回復による生存率上昇は、照射後 8 時間以降に起こる。

- 1) AとB 2) AとC 3) AとD 4) BとC 5) BとD

〔解答〕

4

注) A：誤 PLD 回復は、プラトー期（培養細胞が増殖して密度が高くなり分裂が停止した状態）で主に観察される。

D：誤 PLD 回復は照射後 1 時間以内に終わるものと、2～6 時間かけて行われるものの 2 種類がある。

問 12 多重標的 1 ヒットモデル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 D_0 は、生存率が 37% となる線量である。

B D_q が大きい場合、放射線影響の分割効果は大きくなる。

C 標的数 n が等しい場合、 D_q が大きい方が D_0 は大きくなる。

D α 線は、X 線よりも D_q が大きい。

- 1) AとB 2) AとC 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

3

- 注) A: 誤 D_0 は生存曲線の直線部分で、生存率を 37% まで減らすのに必要な線量(平均致死線量)である。生存率が 37% となる線量は D_{37} と表すことがある。
- B: 正 D_q は生存率曲線の肩の大きさを表す見かけのしきい線量である。
- D: 誤 高 LET 放射線である α 線は低 LET 放射線である X 線より D_q (肩の大きさ) が小さい。

問 13 急性 γ 線被ばくによる精巣の障害に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 精原細胞はセルトリ細胞より放射線致死感受性が高い。
- B 精原細胞は精(子)細胞より放射線致死感受性が高い。
- C 精巣に 2 Gy を被ばくした場合、被ばく直後から 6 週間程度不妊となる。
- D 精巣に 2 Gy を被ばくした場合、被ばく直後に血中テストステロン濃度の低下が認められる。
- 1) ABC のみ 2) AB のみ 3) AD のみ 4) CD のみ 5) BCD のみ

〔解答〕

2

- 注) A, B: 正 一般的に細胞分裂の頻度が高い組織、将来行う細胞分裂の数が多い組織、未分化な細胞ほど放射線感受性が高い。これをベルゴニー・トリボンドーの法則と呼ぶ。
- C: 誤 成熟期の生殖細胞が生殖管からなくなった後に精子数が減少するため、不妊の状態になるまでには時間がかかる。
- D: 誤 6 Gy 以下の被ばくで血中テストステロンの大きな変動はみられない(UNSCEAR 1988 年報告書)。

問 14 急性 γ 線被ばくによる皮膚の障害に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 皮膚に 3 Gy を被ばくした場合、1 日以内に紅斑が見られる。
- B 皮膚に 3 Gy を被ばくした場合、約 3 週間後に脱毛が見られる。
- C 皮膚に 3 Gy を被ばくした場合、約 3 週間後に水疱が見られる。
- D 乾性落屑のしきい線量は、湿性落屑のしきい線量より高い。
- 1) ABD のみ 2) AB のみ 3) AC のみ 4) CD のみ 5) BCD のみ

〔解答〕

2

- 注) A: 正 初期一時的紅斑のしきい線量は 2 Gy で、数時間後にみられる。
- B: 正 一時的脱毛のしきい値は 3 Gy で、約 3 週間後にみられる。
- C: 誤 水疱形成は皮膚が 15-25 Gy を被ばくした場合、15-25 週間後にみられる。
- D: 誤 乾性落屑のしきい線量は 10 Gy、湿性落屑のしきい線量は 15 Gy である。

問 15 国際放射線防護委員会(ICRP) 2007 年勧告における各臓器・組織の組織加重係数の大小関係について、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A 骨表面 > 生殖腺 > 甲状腺
- B 生殖腺 > 肝臓 > 脳
- C 生殖腺 > 結腸 > 皮膚
- D 乳房 > 生殖腺 > 食道
- 1) ACD のみ 2) AB のみ 3) AC のみ 4) BD のみ 5) BCD のみ

〔解答〕

4

注) ICRP 2007 年勧告の組織加重係数は、骨表面、脳、唾液腺、皮膚が 0.01、膀胱、食道、肝臓、甲状腺が 0.04、生殖腺が 0.08、骨髓（赤色）、結腸、肺、胃、乳房、残りの組織が 0.12 である。

問 16 γ 線全身被ばくによる急性放射線症の前駆期に見られる症状に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 1 Gy 被ばく後 1 時間以内に嘔吐^{おう}が見られる。
- B 2 Gy 被ばく後 3 時間以内に下痢が見られる。
- C 5 Gy 被ばく後 3 時間以内に発熱が見られる。
- D 10 Gy 被ばく後 1 日以内に頭痛が見られる。

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

〔解答〕

4

注) A：誤 1～2 Gy 被ばくでは、2 時間以降に 10～50% の頻度で嘔吐が見られる。

B：誤 4 Gy 以下の被ばくでは下痢の症状は見られない。

問 17 放射線誘発乳がんに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 被ばく線量が増大すると重篤度が増す。
- B 発症リスクは被ばく後約 30 年から増加する。
- C 放射線発がんの過剰相対リスクの大きさは被ばく時年齢に関係がある。
- D アルコール摂取は発症リスクを増加させる。

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

〔解答〕

5

注) A：誤 確率の影響は被ばく線量が増大すると影響が現れる確率が増す。確定的影響は被ばく線量が増大すると放射線障害の重篤度が増す。

B：誤 固形がんは被ばく後 10 年から増加する。

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

問 18 原爆被爆者の疫学調査において、がん死亡の過剰相対リスクに有意な増大が見られる臓器の組合せは次のうちどれか。

- A 肺
- B 直腸
- C 前立腺
- D 乳房
- E 子宮

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

〔解答〕

2

注) 1950 年から 1997 年までの疫学調査の結果より、肺と女性乳房の過剰相対リスクはすべての固形がんを

合わせた場合のリスクより高く、直腸、前立腺、子宮は低い。(Preston DL, et.al *Radiat. Res.* 2003; **160**: 381-407)。

問19 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 晩発性障害は全て確率的影響である。
 - B 肺の線維化は晩発性障害である。
 - C 突然変異発生率を自然突然変異発生率の2倍にする吸収線量を倍加線量という。
 - D ICRP 2007年勧告では遺伝性(的)影響におけるヒトの倍加線量として100 mGy が用いられている。
- 1) AとB 2) AとC 3) BとC 4) BとD 5) CとD

〔解答〕

3

- 注) A：誤 晩発性障害である白内障や再生不良性貧血は、確定的影響である。
- B：正 肺の実質細胞が障害を受け、その後に線維芽細胞が浸潤・増殖し、線維化が起こる。肺線維症は、通常被ばく後、3か月以降に見られる晩発性の影響である。
- C：正 倍加線量とは、生物の1世代の間に自然発生する突然変異と同数の突然変異を起こす吸収線量、すなわち、突然変異発生率を自然突然変異発生率の2倍にする吸収線量である。
- D：誤 ICRP 2007 勧告では遺伝性(的)影響におけるヒトの倍加線量として「1 Gy」が用いられている。

問20 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 内部被ばくで起こる障害は全て確率的影響である。
 - B 急性障害には確率的影響は無い。
 - C 生殖腺への障害は全て確率的影響である。
 - D 確率的影響にはしきい値が無い。
 - E 組織加重(荷重)係数は確率的影響と確定的影響を考慮して決められている。
- 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 放射性ヨウ素の内部被ばくで起こる甲状腺障害や放射性ストロンチウムの内部被ばくで起こる造血障害などは確定的影響である。
- B：正 確率的影響に分類されるのは発がんや遺伝的影響であり、これらは晩発障害である。
- C：誤 不妊、ホルモン分泌異常などの生殖腺の障害は確定的影響である。
- D：正 確率的影響は、放射線防護上しきい値が存在しないものとする。線量の増加とともに影響の発生確率が増加する現象(影響)である。
- E：誤 組織加重(荷重)係数は、確率的影響について、各器官(組織)の相対的感受性を数値で示したものである。

問21 放射線被ばく後の組織の早期反応と晩期反応に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1) 晩期反応に比べ早期反応では α/β 比が小さい。
- 2) 晩期反応に比べ早期反応では分割照射による影響が大きい。
- 3) 晩期反応は照射後3年以上経過してから初めて発生する。
- 4) 晩期反応の α/β 比は1~5程度である。
- 5) 腎不全は早期反応である。

〔解答〕

4

- 注) 1 : 誤 LQ (Linear-quadratic) モデルにおいて、 α/β 比は早期反応では大きく、晩期 (晩発) 反応では小さい。
- 2 : 誤 早期反応では、分割した 1 回線量の高低の影響は比較的小さく、総線量の高低の影響が大きい。晩期 (晩発) 反応では分割した 1 回線量の高低の影響が大きい。
- 3 : 誤 晩期 (晩発) 反応は、照射後数か月から十数年経過して出現するものをいう。
- 4 : 正 LQ (Linear-quadratic) モデルにおいて、 α/β 比は早期反応では 10~20 Gy 程度、晩期 (晩発) 反応では 1~5 Gy 程度である。
- 5 : 誤 急性の腎炎などは数週間であられるが、その後の慢性腎炎などの腎障害、腎不全は晩発障害に分類される。

問 22 我が国における自然放射線の被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 自然放射線源から受ける国民 1 人当たりの年間平均被ばく線量は 4.3 mSv である。
- B 大地からの放射線による被ばく線量は、大地が玄武岩よりも花崗岩で主に構成されている場合の方が大きい。
- C 宇宙線による被ばく線量率は沖縄よりも北海道の方が高い。
- D 内部被ばくに対する寄与は、カリウム 40 が最も大きい。
- E 吸入による内部被ばくに対する寄与は、ラドン 220 とその子孫核種の方がラドン 222 とその子孫核種よりも大きい。

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

〔解答〕

3

- 注) A : 誤 国民 1 人当たりの年間平均被ばく線量は 2.1 mSv 程度である。
- B : 正 大地放射線の線源となるウラン、トリウム、カリウムは花崗岩に多く含まれる。
- C : 正 宇宙線の大部分は荷電粒子であり、地球磁場の影響を受けるため、高緯度地方では低緯度地方に比べて線量が高い。
- D : 誤 体内の存在量はカリウム 40 が多いが、鉛 210 とポロニウム 210 の経口摂取が、日本人の内部被ばくの大きな割合を占める。
- E : 誤 吸入による内部被ばくに対する寄与は、ラドン 220 (約 0.09 mSv/年) とその子孫核種よりも、ラドン 222 とその子孫核種 (約 0.37 mSv/年) の方が大きい。

問 23 ^{211}At (物理学的半減期 7.2 時間) を含む放射性薬剤を投与後、ある腫瘍 (腫瘍細胞) に 100 Bq の集積が認められた。この腫瘍において、物理学的半減期よりも十分長い時間にわたる ^{211}At の集積後からの総壊変数 (累積放射能 [kBq·s]) に最も近い値は、次のうちどれか。ただし、腫瘍の重量は 1 kg とする。また、その間、腫瘍からの ^{211}At の排出は起こらず、新たに集積はなく、腫瘍細胞は増殖もせず排除もされないと仮定する。

- 1) 1,000 2) 1,800 3) 2,600 4) 3,700 5) 5,000

〔解答〕

4

- 注) 放射能 A と放射性核種の原子数 N には、 $A = \lambda N$ (λ は壊変定数) の関係がある。
半減期を T とすると $A = (\ln 2/T) * N$,

すなわち $N = AT / \ln 2 \div 100 \times 7.2 \times 60 \times 60 / 0.693 \div 3.7 \times 10^6$ より

^{211}At の総壊変数はおよそ 3.7×10^6 。よって $3,700 [\text{kBq} \cdot \text{s}]$

問24 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 受精後0～8日の2 Gy 被ばくにより、胚死亡が生じる。
- B 受精後9日～8週の被ばくによる奇形発生のしきい値は0.1 Gyである。
- C 受精後9週～15週の1 Gy 被ばくにより、重度精神遅滞が観察される。
- D 受精後26週～40週の0.15 Gy以上の被ばくにより、小頭症が観察される。

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

〔解答〕

1

- 注) A：正 着床前期(受精後0～8日)には、比較的低線量(>0.1 Gy)で胚死亡が生じる。
 B：正 器官形成期(受精後9日～8週)の被ばくによる器官形成異常(奇形)発生のしきい値は0.1～0.2 Gyと考えられている。
 C：正 精神遅滞の誘発は、受精後8～15週で最も感受性が高く、0.1 Gy以上で精神遅滞を生じ、0.3 Gy以上では重度精神遅滞を引き起こす可能性がある。
 D：誤 広島、長崎原爆の被爆者を対象にした調査では、妊娠8～15週では0.3 Gy以下、妊娠16週以降では0.5～0.7 Gy以下の胎内被ばくでは、小頭症の増加は認められていない。

問25 放射線による身体的影響と遺伝性(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 身体的影響にはしきい線量があるものとなないものがある。
- B 被ばくした場合に生じる体細胞のがん化は身体的影響である。
- C 胎内被ばくによる奇形は遺伝性(的)影響である。
- D 1 Gyの急性全身被ばくにより意識障害が起こる。

- 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 身体的影響である体細胞のがん化はしきい線量のない確率的影響、脱毛、不妊、白内障などはしきい線量のある確定的影響である。
 B：正 放射線が体細胞に影響を及ぼせば、その個体に影響が生じる。これを身体的影響という。すなわち、体細胞のがん化は身体的影響である。
 C：誤 胎児が放射線を受け、その個体に影響が生じるので身体的影響である。
 D：誤 意識障害が生じる急性被ばく線量はおおよそ8 Gy以上と考えられている。

問26 放射線による遺伝性(的)影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 生殖細胞の突然変異は遺伝性(的)影響の原因となる。
- B 精母細胞は精原細胞よりも突然変異が誘発されやすい。
- C 精原細胞では突然変異誘発に関して線量率効果は認められない。
- D 倍加線量が大いほど遺伝性(的)影響が起こりやすいことを意味する。

- 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 生殖細胞の突然変異は、被ばくした人の子孫の身体的形質や機能に影響を及ぼす可能性がある。この子孫への影響が遺伝性(的)影響である。
- B：正 突然変異に関する感受性は、精細胞（精子細胞）＞精子＝精母細胞＞精原細胞の順である。
- C：誤 代謝がさかんな精原細胞では、突然変異に対しても回復が起こるため線量率効果が認められる。
- D：誤 倍加線量とは、生物の 1 世代の間に自然発生する突然変異と同数の突然変異を起こすのに必要な線量である。倍加線量が大きいほど感受性が低い、すなわち、遺伝性(的)影響が小さいことを意味する。

問 27 次のうち、線エネルギー付与（LET）が最も小さいものはどれか。

- 1) 核分裂片
- 2) 炭素イオン線
- 3) α 線
- 4) 高エネルギー電子線（1 MeV）
- 5) 低エネルギー電子線（100 keV）

〔解答〕

4

注) 放射線が物質中を通過する際、単位長さ当りに失うエネルギーを LET という。粒子の質量が大きく、物質との相互作用が大きい α 線、中性子線、その他重荷電粒子、核分裂破片は、LET が大きく、高 LET 放射線と呼ばれる。X 線、 γ 線、電子線などは、物質との相互作用の程度が小さく、低 LET 放射線と呼ばれる。また同じ種類の粒子ならそのエネルギーが低いほど、相互作用を起こしやすく、高い LET 値を示す。

問 28 次のうち、放射線照射後の細胞の生存率に関する RBE に影響を与えるものの組合せはどれか。

- A グルコース濃度
B 酸素分圧
C 温度
D LET
- 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) $RBE = (\text{ある効果を与える基準放射線量}) / (\text{同一効果を与える試験放射線量})$
細胞の生存率に関する RBE が変化する要因としては、第 1 に放射線自体の性質がある。RBE は種々の放射線についてその値が異なり、ほぼ線エネルギー付与（LET）に依存して上昇し、LET がおよそ 100 (keV/ μ m) でピークを示し、非常に高い LET では RBE はかえって低下する。
第 2 に、グルコース、酸素および温度など、細胞内のフリーラジカルの反応に影響する因子は、細胞の反応を変化させる点で、RBE に影響する。A-D はすべてこれらの条件に合致する。

問 29 粒子線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A X 線と比べ炭素イオン線の細胞生存率曲線の方が肩が小さい。
B ブラッグピークの位置で細胞を照射したときの致死感受性に関する RBE は鉄イオン線に比べ炭素イオン線の方が小さい。
C X 線と比べ中性子線は致死感受性の細胞周期依存性が大きい。

D 中性子線はブラッグピークを持たない。

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

〔解答〕

3

注) 粒子線の影響について把握しておくべきなのは、下記の特性である。

- ① 粒子の質量が大きいほど、また、粒子が荷電しているほど、細胞への影響が大きい
- ② 粒子の質量が大きい場合には、生存曲線の肩が小さくなる
- ③ ブラッグピークは荷電を持つ粒子にのみ存在する
- ④ 致死感受性の細胞周期依存性は、修復への影響により生じるため、粒子線の性質にあまり依存しない
- ② から A が正しく、③ から D が正しい。①と④から B と C は正しくない。

問 30 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 血液製剤の移植片対宿主病 (GVHD) を予防できる。
- B 吸収線量が 1～10 Gy の範囲で照射する。
- C 効果を高めるために照射後 1 週間以上経過してから使用する。
- D 新鮮液状血漿^{しょう}は照射対象外である。
- E 血液成分のうち放射線の影響を最も受けるのはリンパ球である。

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

〔解答〕

2

注) 輸血用血液の放射線照射は、血液中に含まれる供与者のリンパ球を死滅させることにより、供与者の免疫が輸血を受けた人の組織を攻撃しないようにする効果を持つ。この点で A と E は正しく、リンパ球が存在する新鮮液状血漿^{しょう}へも効果がある点で D は間違いである。照射の線量は、リンパ球以外の赤血球成分等への影響を考慮して検討されるが、赤血球においては、全血または赤血球濃厚液への 200 Gy までの照射であれば、溶血や酸素運搬機能の変化に影響を及ぼさない。この点で B は間違いである。リンパ球への影響は照射直後から見られるため、C は間違いである。

物 化 生

第 30 回（平成 30 年）

問 1 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 質量数 147 の原子核が α 壊変してエネルギー 2.3 MeV の α 粒子を放出した。このとき，娘核である反跳核の運動エネルギーは MeV である。一方，質量数 210 の原子核が α 壊変するときの壊変エネルギーが 5.4 MeV であれば，放出される α 粒子のエネルギーは MeV である。

質量数 60 の原子核が 1,333 keV の γ 線を放出するとき，原子核が受ける反跳の運動エネルギーは keV である。

質量数 11 の炭素原子核が A 壊変するとき，放出される A 線のエネルギーは最大で MeV である。ただし，親核，娘核，並びに電子の質量を原子質量単位で，それぞれ 11.01143 u，11.00930 u，0.00055 u とする。

<アの解答群>

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1) 1.6×10^{-3} | 2) 3.2×10^{-3} | 3) 5.3×10^{-3} | 4) 7.2×10^{-3} | 5) 1.6×10^{-2} |
| 6) 3.0×10^{-2} | 7) 4.2×10^{-2} | 8) 6.4×10^{-2} | 9) 7.8×10^{-2} | 10) 9.6×10^{-2} |
| 11) 2.6×10^{-1} | 12) 3.8×10^{-1} | 13) 5.3×10^{-1} | 14) 9.6×10^{-1} | 15) 1.2×10^0 |

<イの解答群>

- | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1) 1.0×10^{-1} | 2) 1.2×10^{-1} | 3) 5.2×10^{-1} | 4) 5.3×10^{-1} | 5) 5.4×10^{-1} |
| 6) 1.0×10^0 | 7) 1.2×10^0 | 8) 5.2×10^0 | 9) 5.3×10^0 | 10) 5.4×10^0 |

<ウ，エの解答群>

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1) 1.6×10^{-3} | 2) 3.2×10^{-3} | 3) 5.3×10^{-3} | 4) 7.2×10^{-3} | 5) 1.6×10^{-2} |
| 6) 3.0×10^{-2} | 7) 4.2×10^{-2} | 8) 6.4×10^{-2} | 9) 7.8×10^{-2} | 10) 9.6×10^{-2} |
| 11) 2.6×10^{-1} | 12) 3.8×10^{-1} | 13) 5.3×10^{-1} | 14) 9.6×10^{-1} | 15) 1.2×10^0 |

<A の解答群>

- | | | | | |
|-------------|--------------|--------------|-------|-------------|
| 1) α | 2) β^- | 3) β^+ | 4) EC | 5) γ |
| 6) 自発核分裂 | 7) 内部転換 | 8) IT | | |

Ⅱ エネルギー 2 MeV の光子と物質との相互作用について考える。この場合，ほとんどの物質（原子番号を Z ，質量数を A とする）において主な相互作用は B であり，この相互作用に対する原子断面積は オ に比例し，質量減弱係数は カ に比例する。 B により生じる反跳電子の平均エネルギーを $T[\text{MeV}]$ とすると，この相互作用に対する質量エネルギー転移係数は，その質量減弱係数に キ を乗じたものとなる。

相互作用により生成した二次電子のエネルギーのうち，その一部は C によって遠方へ持ち出される。その割合を g とすると，質量エネルギー吸収係数は質量エネルギー転移係数 μ_{tr} を用いて， $\mu_{\text{tr}} \cdot$ ク と表すことができる。

エネルギー $E[\text{eV}]$ の光子が空気中のある点にフルエンス $\phi[\text{m}^{-2}]$ で入射する場合を考える。空気の質量エネルギー吸収係数を $\mu_{\text{en}}[\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}]$ ，空気に対する W 値を $W_{\text{air}}[\text{eV}]$ とするとき，エネルギーフ

ルエンス Ψ [$\text{eV} \cdot \text{m}^{-2}$] は,

$$\Psi = E \cdot \phi$$

である。その点における照射線量 X [$\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$]、並びに空気の吸収線量 D_{air} [Gy] は、電子平衡が成立する場合、

$$X = e \times \boxed{\text{ケ}}$$

$$D_{\text{air}} = 1.6 \times 10^{-19} \times \boxed{\text{コ}}$$

と表される。ただし、 1.6×10^{-19} は eV を J に変換する係数 [$\text{J} \cdot \text{eV}^{-1}$] であり、 e は素電荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$) である。また、空気吸収線量 D_{air} [Gy] は、照射線量 X を用いて、

$$D_{\text{air}} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{e} \times \boxed{\text{サ}}$$

と表される。

<B, C の解答群>

- | | | | |
|-------------|----------------|------------|-------------|
| 1) 光電効果 | 2) コンプトン効果 | 3) 電子対生成 | 4) トムソン散乱 |
| 5) 光核反応 | 6) 電離 | 7) 励起 | 8) ラムザウアー効果 |
| 9) ラザフォード散乱 | 10) メスバウアー効果 | 11) 蛍光 X 線 | 12) 制動放射 |
| 13) 壁効果 | 14) δ 線 | 15) 電子対消滅 | |

<オ, カの解答群>

- | | | | | | |
|------------------|----------|---------------------------------|----------------------------------|---------------|------------------|
| 1) A | 2) Z | 3) A^2 | 4) A^{-2} | 5) $A-Z$ | 6) $\frac{A}{Z}$ |
| 7) $\frac{Z}{A}$ | 8) Z^2 | 9) $\left(\frac{A}{Z}\right)^2$ | 10) $\left(\frac{Z}{A}\right)^2$ | 11) $Z^{3.5}$ | 12) Z^5 |

<キ, クの解答群>

- | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1) A | 2) T | 3) $\frac{A}{2}$ | 4) $\frac{T}{2}$ | 5) $\left(1 - \frac{T}{A}\right)$ |
| 6) $\left(1 - \frac{T}{2}\right)$ | 7) $\frac{T}{A}$ | 8) g | 9) $(1-g)$ | 10) $(1-g)^{-1}$ |
| 11) $(1-g) \cdot T^{-1}$ | 12) $(1-g \cdot T)$ | 13) $\left(1 - \frac{g}{T}\right)$ | 14) $\left(1 - \frac{g}{T}\right)^{-1}$ | 15) $g \cdot T$ |

<ケ, コの解答群>

- | | | | |
|---|---|--|---|
| 1) $\mu_{\text{en}} \cdot \Psi$ | 2) $\frac{\Psi}{\mu_{\text{en}}}$ | 3) $\frac{\mu_{\text{en}}}{\Psi}$ | 4) $\mu_{\text{en}} \cdot \Psi \cdot W_{\text{air}}$ |
| 5) $\mu_{\text{en}} \cdot \frac{\Psi}{W_{\text{air}}}$ | 6) $\frac{\Psi}{\mu_{\text{en}}} \cdot W_{\text{air}}$ | 7) $\frac{\Psi}{\mu_{\text{en}}} \cdot \frac{1}{W_{\text{air}}}$ | 8) $\mu_{\text{en}} \cdot \phi$ |
| 9) $\frac{\phi}{\mu_{\text{en}}}$ | 10) $\frac{\mu_{\text{en}}}{\phi}$ | 11) $\mu_{\text{en}} \cdot \phi \cdot W_{\text{air}}$ | 12) $\mu_{\text{en}} \cdot \frac{\phi}{W_{\text{air}}}$ |
| 13) $\frac{\phi}{\mu_{\text{en}}} \cdot W_{\text{air}}$ | 14) $\frac{\phi}{\mu_{\text{en}}} \cdot \frac{1}{W_{\text{air}}}$ | | |

<サの解答群>

- | | | | |
|---|---|---|--|
| 1) $X \cdot \phi$ | 2) $\frac{\phi}{\mu_{\text{en}}} \cdot X$ | 3) $X \cdot \mu_{\text{en}} \cdot \phi \cdot W_{\text{air}}$ | 4) $X \cdot \frac{\phi}{\mu_{\text{en}}} \cdot W_{\text{air}}$ |
| 5) $X \cdot W_{\text{air}}$ | 6) $\frac{X}{W_{\text{air}}}$ | 7) $X \cdot \Psi$ | 8) $\frac{\Psi}{\mu_{\text{en}}} \cdot X$ |
| 9) $\frac{\Psi}{\mu_{\text{en}}} \cdot \frac{1}{X}$ | 10) $X \cdot \mu_{\text{en}} \cdot \Psi \cdot W_{\text{air}}$ | 11) $X \cdot \frac{\Psi}{\mu_{\text{en}}} \cdot W_{\text{air}}$ | |

Ⅲ 速中性子と物質との主な相互作用は原子核との D であり、これにより原子核に運動エネルギーが与えられる。生体軟組織においては、速中性子は主として E 原子核との D により F を生成し、F は原子との非弾性衝突により、電離や励起を起こし、物質にエネルギーを与える。1 回の D で速中性子のエネルギーは平均して シ になり、この過程を繰り返すことにより、中性子のエネルギーが $1/1,000$ 以下になるためには、少なくとも ス 回の D が必要である。

速中性子は D を繰り返して熱中性子となり、生体軟組織中の原子核に吸収される。E 原子核の場合には G 反応を起こし、物質にエネルギーを与える。

<D～F の解答群>

- 1) 反跳電子 2) 散乱中性子 3) 散乱光子 4) 反跳陽子 5) 重荷電粒子
6) 水素 7) 炭素 8) 窒素 9) 酸素 10) 水
11) 弾性散乱 12) 非弾性散乱 13) ラザフォード散乱 14) 核反応 15) 放射化

<シ, スの解答群>

- 1) $\frac{1}{40}$ 2) $\frac{1}{20}$ 3) $\frac{1}{10}$ 4) $\frac{1}{5}$ 5) $\frac{1}{3}$ 6) $\frac{1}{2}$ 7) $\frac{2}{3}$
8) 4 9) 6 10) 8 11) 10 12) 16 13) 20 14) 32
15) 64

<G の解答群>

- 1) (n, α) 2) (n, p) 3) (n, n') 4) (n, γ) 5) (n, f)
6) 光核 7) 核融合

〔解答〕

I ア-8 イ-9 ウ-5 エ-14 A-3

注) ア：質量数 147 の原子核が α 壊変した後の α 粒子の質量を m ，速度を v ，また娘核の質量を M ，速度を V とすると，運動量保存則により

$$mv = MV$$

ここで， α 粒子と娘核の質量の比は

$$m/M = 4/(147-4)$$

また， α 粒子の運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2 = 2.3[\text{MeV}]$$

よって，娘核の運動エネルギーは

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}MV^2 &= \frac{1}{2}mv^2 \times \frac{M}{m} \times \left(\frac{V}{v}\right)^2 = \frac{1}{2}mv^2 \times \frac{m}{M} \times \left(\frac{MV}{mv}\right)^2 \\ &= 2.3 \times \frac{4}{147-4} \times 1 = 6.4 \times 10^{-2}[\text{MeV}] \end{aligned}$$

イ：質量数 210 の原子核が α 壊変した後の α 粒子の質量を m ，速度を v ，また娘核の質量を M ，速度を V とすると，運動量保存則により

$$mv = MV$$

ここで， α 粒子と娘核の質量の比は

$$m/M = 4/(210-4)$$

α 壊変の壊変エネルギーが α 粒子と娘核の運動エネルギーとなるから，

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 = 5.4[\text{MeV}]$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 \times \frac{m}{M} \times \left(\frac{MV}{mv}\right)^2 = 5.4$$

$$\frac{1}{2}mv^2 \left(1 + \frac{4}{210-4} \times 1\right) = 5.4$$

よって、 α 粒子の運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2 = 5.3[\text{MeV}]$$

ウ：質量数 60 の原子核の質量を M 、速度を V 、また光速を c 、 γ 線のエネルギーを $E_\gamma = 1333[\text{keV}]$ とおくと、運動量保存則により

$$MV = \frac{E_\gamma}{c}$$

質量数 60 の原子核の質量エネルギーは、 $1\text{u} = 931.5\text{ MeV}$ なので

$$60 \times 931.5[\text{MeV}] = 60 \times 931.5 \times 10^3[\text{keV}]$$

であるから、原子核の受ける反跳の運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{(MV)^2}{2M} = \frac{1}{2M} \left(\frac{E_\gamma}{c}\right)^2 = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$$

$$= \frac{1333^2}{2 \times 60 \times 931.5 \times 10^3} = 1.6 \times 10^{-2}[\text{keV}]$$

エ： β^+ 壊変の際の親核の質量を M_p 、娘核の質量を M_d 、電子の質量を m 、光速を c とおくと、 β 線の最大エネルギー $E_{\beta\text{max}}$ は、

$$\begin{aligned} E_{\beta\text{max}} &= M_p c^2 - M_d c^2 - 2mc^2 \\ &= (11.01143 - 11.00930 - 2 \times 0.00055) \times 931.5[\text{MeV}] \\ &= 0.96[\text{MeV}] \end{aligned}$$

A：炭素 11 は、 β^+ 壊変か電子捕獲 (EC 壊変) を起こす。

Ⅱ B-2 C-12 O-2 Ca-7 K-4 Cr-9 Cu-5 Co-1 S-5

注) B：下図のとおり、エネルギーが 2 MeV の光子と物質との主な相互作用はコンプトン効果である。

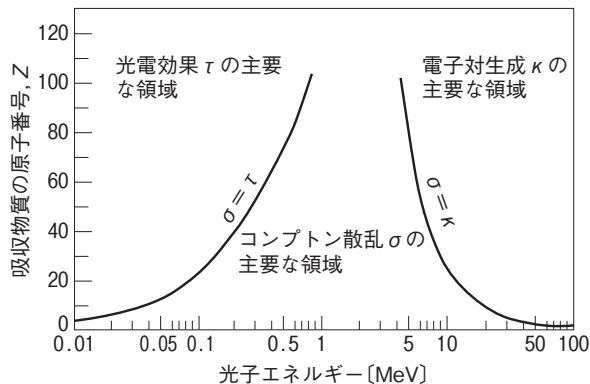


図 光子と物質との相互作用

〔『放射線・アイソトープ 講義と実習』* (JRIA 編, 丸善), p.25〕
〔8 版 2018 放射線取扱の基礎』(JRIA), p.物-47〕

* 絶版

オ：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。

カ：コンプトン散乱による線減弱係数を μ_{σ} ，物質の密度を ρ ，単位体積当たりの原子数を N ，アボガドロ数を N_A とおくと，コンプトン散乱による質量減弱係数 μ_{mo} は，

$$\mu_{\text{mo}} = \frac{\mu_{\sigma}}{\rho} \propto \frac{ZN}{\rho} = \frac{Z \frac{\rho}{A} N_A}{\rho} \propto \frac{Z}{A} N_A$$

キ：光子エネルギーを $h\nu$ とすると，入射光子 1 個について反跳に与えられる運動エネルギーの割合は $T/h\nu$ である。いま，光子エネルギー $h\nu = 2[\text{MeV}]$ であるから $T/2$ となる。

ク：エネルギー転移係数を M_{TR} とおくと，エネルギー吸収係数 M_{en} は，制動放射でエネルギーが逃げる割合 g を用いて，

$$M_{\text{en}} = M_{\text{TR}}(1-g)$$

と表わされる。エネルギー転移係数，エネルギー吸収係数を密度で割った値がそれぞれ，質量エネルギー転移係数，質量エネルギー吸収係数である。

ケ：微小な質量 $dm [\text{kg}]$ の空気から光子によってたたきだされたすべての電子が，空気中で完全に止まるまでに生成する電子-イオン対の全電荷量を $dQ [\text{C}]$ とすると，

$$X = dQ/dm$$

また，電子平衡が成立する場合はカーマと吸収係数は等しいので，光子によってたたきだされたすべての電子の持つ運動エネルギーの合計を $dE [\text{eV}]$ とおくと，

$$D_{\text{air}} = \mu_{\text{en}} \cdot \Psi = dE/dm$$

よって，

$$X = \mu_{\text{en}} \cdot \Psi \cdot dQ/dE$$

空気に対する W 値はその定義から

$$W_{\text{air}} = e \cdot dE/dQ$$

と表わされるので，

$$X = e \cdot \mu_{\text{en}} \cdot \Psi / W_{\text{air}}$$

コ：電子平衡が成立する場合はカーマと吸収係数は等しいので，

$$\begin{aligned} D_{\text{air}} &= \mu_{\text{en}} \cdot \Psi [\text{eV/kg}] \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \times \mu_{\text{en}} \cdot \Psi [\text{J/kg}] \end{aligned}$$

サ：ケ，コの解答より，

$$\begin{aligned} D_{\text{air}} &= 1.6 \times 10^{-19} \times \mu_{\text{en}} \cdot \Psi \\ &= \frac{1.6 \times 10^{-19}}{e} \cdot \frac{e \cdot \mu_{\text{en}} \cdot \Psi}{W_{\text{air}}} \cdot W_{\text{air}} \\ &= \frac{1.6 \times 10^{-19}}{e} \cdot X \cdot W_{\text{air}} \end{aligned}$$

Ⅲ D-11 E-6 F-4 シ-6 ス-11 G-4

注) シ：弾性散乱前の速中性子のエネルギーを E_n ，弾性散乱後に原子核の受ける反跳エネルギーを E ，速中性子および原子核の質量をそれぞれ m および M ，重心系での速中性子の散乱角を φ とすると，

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

衝突する原子核が水素原子核の場合，およそ $M=m$ と置くことができるので，

$$E = \frac{1}{2} (1-\cos\varphi) E_n$$

よって、弾性散乱後の原子核の受ける反跳エネルギーの平均値 ε は

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{1}{\pi-0} \cdot \frac{1}{2} \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} (1-\cos\varphi) E_n d\varphi \\ &= \frac{1}{2\pi} E_n [\varphi - \sin\varphi]_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \\ &= \frac{1}{2} E_n\end{aligned}$$

したがって、弾性散乱後の水素原子核と中性子のエネルギーの平均は、弾性散乱前の速中性子のエネルギーの $1/2$ となる。

ス：シの解答より、 N 回の弾性散乱を繰り返すことにより、速中性子のエネルギーは平均して $(1/2)^N$ となる。

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{10} = 1024 < 1000$$

したがって、少なくとも 10 回の弾性散乱が必要となる。

G：結合エネルギーに相当する 2.2 MeV の γ 線が放出される、 ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$ 反応が起こる。

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

原子番号 z 、質量数 A の原子核（以下、荷電粒子と呼ぶ）が、非相対論的な速さ v で物質に入射した場合の、物質との相互作用について考えよう。

Ⅰ 荷電粒子の相互作用の相手の大部分は物質中の電子（電荷 $-e$ 、質量 m ）であり、両者の間には **A** が働く。図に示すとおり、荷電粒子と電子の間の距離を r とすると、 **A** の大きさ F は $F = k$ **ア** (k は正の比例定数) と表せ、電子の得る運動量はこの **A** に伴う **B** に等しい。荷電粒子の速度が電子の速度に比べ十分大きい場合、運動量の **C** 成分は荷電粒子が近づく間と遠ざかる間で互いに相殺されるため、その **B** の大きさ P の評価においては **D** 成分のみを考慮すればよい。

時刻 t から時刻 $t+dt$ の間に働く **A** の大きさが F であり、また、荷電粒子の進行方向と、荷電粒子から見た電子の方向のなす角を θ とすると、 P は

$$P = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} k \text{ **ア** **イ** } dt \right| \cdots \cdots \cdots (1)$$

と書ける。なお、 $| |$ は絶対値を示す。

ここで、

$$\frac{d(\cot\theta)}{dt} = -\frac{1}{\sin^2\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdots \cdots \cdots (2)$$

また荷電粒子が電子に最接近した際の両者の距離を $r_{\min}$ とすると、

$$\frac{d(\cot\theta)}{dt} = \frac{d\left(\frac{r\cos\theta}{r_{\min}}\right)}{dt} = \frac{1}{r_{\min}} \cdot \frac{d(r\cos\theta)}{dt} = \frac{\text{ウ}}{r_{\min}} \cdots \cdots \cdots (3)$$

の関係があり、よって、(2)および(3)式より $dt = -\frac{r_{\min}}{\text{ウ}} \sin^{-2}\theta d\theta$ を得る。これを(1)式に反映させ、さらに $r = r_{\min} \sin^{-1}\theta$ の関係を用いると

$$P = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} k \text{ **ア** **イ** } dt \right|$$

$$= \boxed{\text{エ}} \int_0^\pi \boxed{\text{イ}} d\theta = 2 \boxed{\text{エ}} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

また電子の得た運動量 P と運動エネルギー E の間には $E = \boxed{\text{オ}}$ の関係があることから、電子の得るエネルギー（＝荷電粒子の失うエネルギー）は荷電粒子の電荷 ze の $\boxed{\text{カ}}$ 乗に、また速さ v の $\boxed{\text{キ}}$ 乗にそれぞれ比例する。

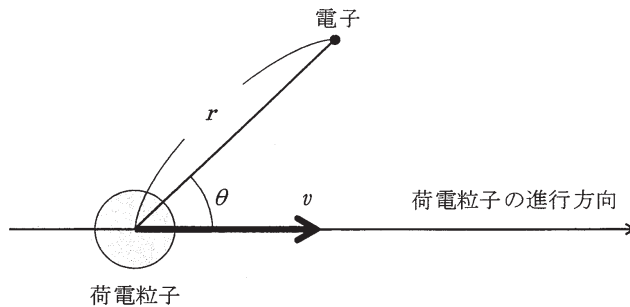


図 荷電粒子と電子の相互作用

<A, B の解答群>

- | | | | |
|------------|----------------|-----------|------------|
| 1) 電界 | 2) 磁力 | 3) 力積 | 4) スピン |
| 5) コリオリ力 | 6) クーロン力 | 7) ローレンツ力 | 8) 慣性モーメント |
| 9) 運動エネルギー | 10) ファンデルワールス力 | | |

<アの解答群>

- | | | | | | |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|
| 1) $\frac{ze}{r}$ | 2) $\frac{ze^2}{r}$ | 3) $\frac{ze}{r^2}$ | 4) $\frac{ze^2}{r^2}$ | 5) $\frac{ze}{v}$ | 6) $\frac{ze^2}{v}$ |
| 7) $\frac{ze}{v^2}$ | 8) $\frac{ze^2}{v^2}$ | 9) $\frac{ze}{Av^2}$ | 10) $\frac{ze^2}{Av^2}$ | | |

<C, D の解答群>

- | | |
|------------------|---------------------|
| 1) 荷電粒子の進行方向の | 2) 荷電粒子の進行方向に垂直な |
| 3) 荷電粒子と電子を結ぶ方向の | 4) 荷電粒子と電子を結ぶ方向に垂直な |

<イ, ウの解答群>

- | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 1) $\sin^{-1} \theta$ | 2) $\cos^{-1} \theta$ | 3) $\tan^{-1} \theta$ | 4) $\sin \theta$ | 5) $\cos \theta$ |
| 6) $\tan \theta$ | 7) θ^{-1} | 8) θ | 9) θ^2 | 10) v^{-1} |
| 11) v | 12) v^2 | 13) $r \sin \theta$ | 14) $r \cos \theta$ | 15) $r \tan \theta$ |

<エの解答群>

- | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1) 0 | 2) $k \frac{ze^2}{vr_{\min}}$ | 3) $k \frac{ze^2}{v^2 r_{\min}}$ | 4) $k \frac{ze^2}{vr_{\min}^2}$ | 5) $k \frac{ze^2}{v^2 r_{\min}^2}$ |
| 6) $k \frac{ze}{vr_{\min}}$ | 7) $k \frac{ze}{v^2 r_{\min}}$ | 8) $k \frac{ze}{vr_{\min}^2}$ | 9) $k \frac{ze}{v^2 r_{\min}^2}$ | |

<オの解答群>

- 1) $\frac{P}{m}$ 2) $\frac{P}{2m}$ 3) $\frac{P^2}{m}$ 4) $\frac{P^2}{2m}$ 5) $\frac{P^2}{mv}$ 6) $\frac{P^2}{2mv}$

<カ、キの解答群>

- 1) -5 2) -4 3) -3 4) -2 5) -1 6) 0
7) 1 8) 2 9) 3 10) 4 11) 5

II これまで1個の電子と荷電粒子が相互作用する場合のエネルギーの授受について述べたが、数多くの電子を含む現実の物質に対しては、相互作用を表す量として、荷電粒子が物質中で単位長さ dx 当たりに失うエネルギーである $\boxed{E}$ が一般に用いられる。 $\boxed{E}$ は前述の荷電粒子の電荷 ze と速さ v に対する依存性に加え、物質の電子密度 n_e にも比例する。

また、 $\boxed{E}$ を物質の密度 ρ で割ったものは $\boxed{F}$ と呼ばれる。単位体積中に含まれる物質のモル数は、その物質の原子番号を Z 、原子量を M とし、アボガドロ数を N_A とすると、密度を用いて $\boxed{ク}$ と表せ、また電子密度を用いて $\boxed{ケ}$ と表せる。したがって電子密度と密度の比は物質の原子番号と原子量の比に比例する。 $\boxed{G}$ を除けば、この比はほぼ $1/3$ から $1/2$ の値を取ることから、 $\boxed{F}$ は物質の種類にはあまり依存しない。

荷電粒子が物質中で運動エネルギーを失い停止するまでに通過した距離を $\boxed{H}$ と呼ぶが、連続減速近似のもとでは、荷電粒子の運動エネルギーを T とすると、 $\boxed{H}$ の大きさ R は次式で表される。

$$R = \int_0^R dx = \int_T^0 \frac{dx}{dT} dT = \int_T^0 \left(\frac{dT}{dx} \right)^{-1} dT \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、 $\boxed{H}$ は $\boxed{E}$ の逆数を T で積分した長さとして表される。

(5)式に従えば、速さの等しい二つの異なる荷電粒子の飛程の比は、両者の運動エネルギーの比が $\boxed{I}$ に比例することとこれまでの結果を利用すれば求めることができる。例えば、150 MeV の陽子の水中飛程 16 cm であったとすると、等速の ^{12}C イオンの運動エネルギーは $\boxed{コ}$ MeV であり、水中飛程は陽子の水中飛程 16 cm の $\boxed{サ}$ 倍となる。

<E~Iの解答群>

- 1) W 値 2) 酸素 3) 水素
4) 飛程 5) 重水素 6) 阻止能
7) 断面積 8) 質量数 9) 原子番号
10) ヘリウム 11) 線減弱係数 12) 質量阻止能
13) 質量減弱係数 14) 平均励起エネルギー 15) エネルギーフルエンス

<ク、ケの解答群>

- 1) $\frac{\rho}{M}$ 2) $\frac{M}{\rho}$ 3) $\frac{\rho}{ZM}$ 4) $\frac{ZM}{\rho}$ 5) $\frac{n_e}{N_A}$ 6) $\frac{N_A}{n_e}$
7) $\frac{n_e}{ZN_A}$ 8) $\frac{ZN_A}{n_e}$ 9) $\frac{n_e}{MN_A}$ 10) $\frac{MN_A}{n_e}$

<コ、サの解答群>

- 1) 150 2) 450 3) 900 4) 1,350 5) 1,800 6) 2,400
7) $\frac{1}{16}$ 8) $\frac{1}{9}$ 9) $\frac{1}{8}$ 10) $\frac{1}{4}$ 11) $\frac{1}{3}$ 12) 4
13) 8 14) 9 15) 16

〔解答〕

I A-6 B-3 ア-4 C-1 D-2 イ-4 ウ-11 エ-2 オ-4
 カ-8 キ-4

注) エ: ア, イの解答より,

$$P = \left| \int_{t=-\infty}^{t=+\infty} k \frac{ze^2}{r^2} \sin \theta dt \right|$$

$T = -\infty$ のとき $\theta = 0$, $t = +\infty$ のとき $\theta = \pi$ であるから, $dt = -\frac{r_{\min}}{v} \sin^{-2} \theta d\theta$, および $r = r_{\min} \sin^{-1} \theta$ を代入すると,

$$\begin{aligned} P &= \left| \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} k \frac{ze^2}{(r_{\min} \sin^{-1} \theta)^2} \cdot \sin \theta \cdot \frac{r_{\min}}{v} \sin^{-2} \theta d\theta \right| \\ &= k \frac{ze^2}{vr_{\min}} \left| \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \sin \theta d\theta \right| \\ &= 2k \frac{ze^2}{vr_{\min}} \end{aligned}$$

カ: $E \propto P^2$ で, さらにエの解答より $P \propto ze$ であるから, $E \propto (ze)^2$

キ: $E \propto P^2$ で, さらにエの解答より $P \propto v^{-1}$ であるから, $E \propto v^{-2}$

II E-6 F-12 G-3 H-4 I-8 ク-1 ケ-7 コ-5 サ-11

注) コ: 陽子の運動エネルギーを T_p , ^{12}C イオンの運動エネルギーを T_c とすると, 両者の運動エネルギーの比が質量数に比例するから,

$$T_c/T_p = 12/1$$

したがって,

$$T_c = 12 T_p = 12 \times 150 = 1800 [\text{MeV}]$$

サ: 荷電粒子の電荷を z , 速度を v , 質量を m とおくと, 問 2 の I のカ, キの解答より,

$$\frac{dT}{dX} \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{mz^2}{T}$$

したがって,

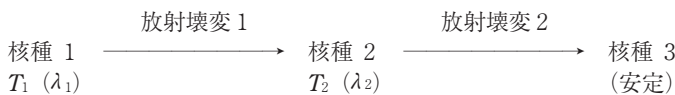
$$R = \int_T^0 \left(\frac{dT}{dx} \right)^{-1} dT \propto \frac{1}{mz^2} \int_T^0 T dT \propto \frac{T^2}{mz^2} \propto \frac{mv^4}{z^2}$$

^{12}C イオンの飛程を R_c , 質量を m_c , 電荷を z_c , また陽子の飛程を R_p , 質量を m_p , 電荷を z_p とおくと, いま両者の速度は等しいので,

$$\frac{R_c}{R_p} = \frac{m_c}{m_p} \cdot \left(\frac{z_p}{z_c} \right)^2 = 12 \times \left(\frac{1}{6} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

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

I 核種 1 が半減期 T_1 (壊変定数 λ_1) で壊変して核種 2 となり, さらにその核種 2 も半減期 T_2 (壊変定数 λ_2) で壊変して安定な核種 3 となる壊変系列がある (下図参照)。



核種 1 と核種 2 の原子数を N_1, N_2 とすると次の (1), (2) 式が成り立つ。

$$\frac{dN_1}{dt} = \boxed{\text{A}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \boxed{\text{B}} \dots\dots\dots (2)$$

時間 $t=0$ において $N_1=N_{10}$ とし、核種 2 は存在しない ($N_{20}=0$) とすると、次の (3), (4) 式が成り立つ。

$$N_1 = N_{10}e^{-\lambda_1 t} \dots\dots\dots (3)$$

$$N_2 = \boxed{\text{C}} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \dots\dots\dots (4)$$

核種 1, 核種 2 の放射能をそれぞれ A_1, A_2 とする。核種 2 の放射能 A_2 は、(4) 式の両辺に λ_2 を乗じて、 $\lambda_1 N_{10} = A_{10}$ とすると (5) 式が得られる。

$$A_2 = \boxed{\text{D}} A_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \dots\dots\dots (5)$$

核種 1 の半減期 T_1 が核種 2 の半減期 T_2 よりも大きい ($T_1 > T_2$, 又は $\lambda_1 < \lambda_2$) 場合、時間 t が十分に経過 ($t > 10 T_2$ 程度) すると、(5) 式の $e^{-\lambda_2 t}$ は $e^{-\lambda_1 t}$ に対して無視できるほど小さくなる。

$A_{10} e^{-\lambda_1 t} = A_1$ として、(5) 式から放射能比 $\frac{A_2}{A_1}$ を T_1, T_2 で表すと (6) 式が得られる。

$$\frac{A_2}{A_1} = \boxed{\text{E}} \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式から、時間 t が十分に経過すると、核種 2 の放射能が核種 1 の放射能よりも大きく、その比は一定になる。このような放射平衡状態は過渡平衡と呼ばれる。

また、核種 2 の放射能が最大となる時間 $t_{\max}$ は (5) 式で $\frac{dA_2}{dt} = 0$ より、(7) 式で求められる。

$$t_{\max} = \boxed{\text{F}} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1}{\ln 2} \times \boxed{\text{G}} \ln \frac{T_1}{T_2} \dots\dots\dots (7)$$

<A, B の解答群>

- | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1) $\lambda_1 N_1$ | 2) $-\lambda_1 N_1$ | 3) $\lambda_1 N_2$ | 4) $-\lambda_1 N_2$ |
| 5) $\lambda_2 N_1$ | 6) $-\lambda_2 N_1$ | 7) $\lambda_2 N_2$ | 8) $-\lambda_2 N_2$ |
| 9) $\lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2$ | 10) $\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$ | 11) $-\lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2$ | 12) $-\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$ |

<C, D の解答群>

- | | | | | |
|--|--|--|--|--|
| 1) $\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ | 2) $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ | 3) $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ | 4) $\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}$ | 5) $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}$ |
| 6) $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ | 7) $\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ | 8) $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ | 9) $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ | |

<E の解答群>

- | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1) $\frac{1}{T_1 - T_2}$ | 2) $\frac{1}{T_2 - T_1}$ | 3) $\frac{T_1}{T_1 - T_2}$ | 4) $\frac{T_2}{T_1 - T_2}$ | 5) $\frac{T_1}{T_2 - T_1}$ |
| 6) $\frac{T_2}{T_2 - T_1}$ | 7) $\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}$ | 8) $\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}$ | 9) $\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}$ | 10) $\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}$ |

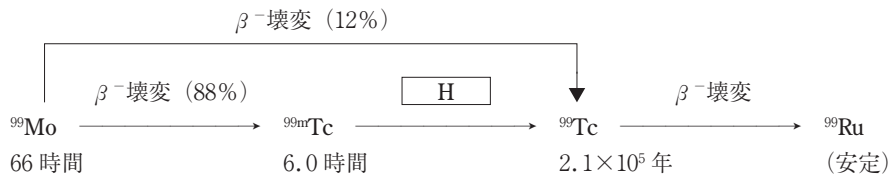
<F の解答群>

- | | | | | |
|--|--|--|--|--|
| 1) $\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ | 2) $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ | 3) $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ | 4) $\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}$ | 5) $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}$ |
| 6) $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ | 7) $\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ | 8) $\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ | 9) $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ | |

<G の解答群>

- 1) $\frac{1}{T_1 - T_2}$ 2) $\frac{1}{T_2 - T_1}$ 3) $\frac{T_1}{T_1 - T_2}$ 4) $\frac{T_2}{T_1 - T_2}$ 5) $\frac{T_1}{T_2 - T_1}$
 6) $\frac{T_2}{T_2 - T_1}$ 7) $\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}$ 8) $\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}$ 9) $\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}$ 10) $\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}$

II ^{99}Mo は半減期 66 時間で β^- 壊変し、その 88% は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ に、残りの 12% は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を経由せず直接 ^{99}Tc になる（下図参照）。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ はさらに半減期 6.0 時間で $\boxed{\text{H}}$ して ^{99}Tc になる。この際、 $\boxed{\text{I}}$ keV の γ 線を放出する。 ^{99}Tc は β^- 壊変して ^{99}Ru （安定）になる。



過渡平衡にある ^{99}Mo や $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の原子数と放射能の関係は、I の (4), (5), (6) 式の右辺に 0.88 を乗ずることにより求められる。したがって、100 MBq の ^{99}Mo と過渡平衡にある $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能は $\boxed{\text{J}}$ MBq となる。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ は、核医学診断に適した核種で最も多く利用されている。その $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を得るには、 ^{235}U の核分裂生成物から単離精製した $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ を $\boxed{\text{K}}$ カラムに吸着させる方法が使われている。 $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ が吸着したカラムに生理食塩水を通すと $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ が溶出される。その後カラム内に新たに生成する $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能が最大になるのは、I の (7) 式よりおよそ $\boxed{\text{L}}$ 時間後となる（ただし、 $\ln 2 = 0.693$, $\ln 11 = 2.4$ とする）。このように放射平衡を利用して短半減期の娘核種を繰り返し取り出す装置をジェネレータといい、その操作は $\boxed{\text{M}}$ と呼ばれる。なお、近年 ^{99}Mo を得るために ^{235}U の核分裂ではなく、 Mo を原料として用いる方法が研究されている。その 1 例として、加速器からの高速中性子を ^{100}Mo に照射して ^{100}Mo $\boxed{\text{N}}$ ^{99}Mo 反応を利用する方法がある。

<H の解答群>

- 1) α 壊変 2) β^- 壊変 3) β^+ 壊変 4) 核異性体転移 5) 電子捕獲

<I の解答群>

- 1) 59.5 2) 141 3) 279 4) 514 5) 1,116 6) 1,333
 7) 1,461

<J の解答群>

- 1) 32 2) 55 3) 63 4) 77 5) 97 6) 110
 7) 125 8) 140 9) 220 10) 320

<K の解答群>

- 1) 陽イオン交換樹脂 2) 陰イオン交換樹脂 3) アルミナ 4) シリカゲル

<L の解答群>

- 1) 6 2) 12 3) 23 4) 36 5) 46
 6) 60 7) 72 8) 84 9) 94 10) 120

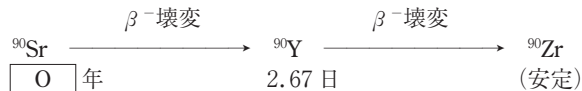
<M の解答群>

- 1) スカベンジング 2) スクラビング 3) ストリッピング 4) ミルキング

<N の解答群>

- 1) (n, γ) 2) (n, 2n) 3) (n, 3n) 4) (n, p) 5) (n, α)

Ⅲ 放射平衡において、 $T_1 \gg T_2$ ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) の場合、十分な時間 t ($t \geq 10 T_2$) が経過すると核種 1 と核種 2 の放射能はほとんど等しくなる。この状態は永続平衡と呼ばれる。 ^{90}Sr は半減期 $\boxed{\text{O}}$ 年で β^- 壊変し ^{90}Y になり、さらに ^{90}Y も半減期 2.67 日で β^- 壊変して ^{90}Zr (安定) になる (下図参照)。



新たに分離精製した ^{90}Sr 試料中には ^{90}Y が生成し、およそ 1 ヶ月で永続平衡に達する。永続平衡にある ^{90}Y の ^{90}Sr に対する原子数比 (N_Y/N_{Sr}) は $\boxed{\text{P}}$ となる。 ^{90}Sr 試料中に生成する ^{90}Y は無担体で取り出すことができる。永続平衡に達するまでの ^{90}Y の原子数は、放射化や RI 製造における飽和係数を使うことにより求めることができる。例えば、一旦 ^{90}Y を分離除去した ^{90}Sr 試料には、2.67 日間経過すると、永続平衡時の $\boxed{\text{Q}}$ % の ^{90}Y が生成する。

^{90}Y は β^- 線 (最大エネルギー $E_{\text{max}} = \boxed{\text{R}}$ MeV) を放出する核種であり、悪性リンパ腫の内用療法に利用されている。この方法では、治療に先だち $\boxed{\text{S}}$ 放出核種である ^{111}In の標識抗体を投与して、腫瘍への集積性をシンチグラフィで確かめ、治療の適切性を確認する。

<O の解答群>

- 1) 2.60 2) 5.27 3) 10.8 4) 12.3 5) 28.8 6) 100

<P の解答群>

- 1) 2.5×10^{-4} 2) 5.0×10^{-4} 3) 7.5×10^{-4} 4) 2.5×10^{-3} 5) 5.0×10^{-3}
 6) 7.5×10^{-3} 7) 2.5×10^{-2} 8) 5.0×10^{-2} 9) 7.5×10^{-2}

<Q の解答群>

- 1) 33 2) 50 3) 75 4) 88 5) 94 6) 97
 7) 98 8) 99

<R の解答群>

- 1) 0.0186 2) 0.257 3) 0.546 4) 1.71 5) 2.28

<S の解答群>

- 1) α 線 2) β^- 線 3) β^+ 線 4) γ 線

〔解答〕

I A-2 B-10 C-8 D-9 E-3 F-7 G-7

注) 核種 1 と核種 2 について、半減期を T_1, T_2 , 壊変定数を λ_1, λ_2 , 原子数を N_1, N_2 , 放射能を A_1, A_2 とおく。

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

これを積分すると,

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{20} e^{-\lambda_2 t}$$

ここで、 $t=0$ のとき、 $N_2 = N_{20} = 0$ より

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

となる。また、このときの放射能は、

$$A_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} = A_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

となる。

求める放射能比 A_2/A_1 は、過渡平衡の条件 ($T_1 > T_2$) で時間 t が十分に経過すると $e^{-\lambda_2 t}$ は $e^{-\lambda_1 t}$ に対して無視できるほど小さくなるので、

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \frac{1}{A_{10} e^{-\lambda_1 t}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

となる。ここで、 T_1, T_2 で表すと $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ より

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{1/T_2}{(1/T_2) - (1/T_1)} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

となる。核種 2 の放射能が最大となるのは、放射能 A_2 の時間変化が 0 となるときであるので、 A_2 を微分すると、

$$\frac{dA_2}{dt} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{10} (-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t})$$

$\frac{dA_2}{dt} = 0$ とおくと、括弧内が 0 となるときに限られる。よって、

$$-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} = 0$$

となる。このとき、放射能が最大となる時間 $t_{\max}$ を $t = t_{\max}$ として解くと、

$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1}{\frac{\ln 2}{T_2} - \frac{\ln 2}{T_1}} \ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\ln 2} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

となる。

II H-4 I-2 J-5 K-3 L-3 M-4 N-2

注) H: ^{99}Mo は分岐壊変する核種で、その 88% が直接準安定な励起状態にある娘核種 ^{99m}Tc になる。 ^{99m}Tc は γ 線を放出してより安定な核種 ^{99}Tc になる。このことを核異性体転移といい、質量数や原子核に変化はなく、そのエネルギー準位が異なる。

I: 核異性体転移のときに放出される γ 線のエネルギー。

J: I の放射能比の式(6)に放射平衡の成立する壊変割合 0.88 を係数として掛けると、次式となる。

$$A_2 = 0.88 \times A_1 \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 0.88 \times 100 \frac{66}{66 - 6} = 96.8 = 97$$

K: 親核種の $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ はアルミナカラムに強く吸着するが、その娘核種 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ は 0.9% 生理食塩水の塩素イオンで追い出され、簡単にカラムから溶出する。

L: I の放射能が最大となる時間の式(7)より、次式となる。

$$t_{\max} = \frac{1}{\ln 2} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{0.693} \times \frac{66 \times 6}{66 - 6} \times \ln \frac{66}{6} = 22.8 = 23$$

M: あたかも乳牛から乳を搾って、ある時間が経つとまた乳が採れる関係に似ていることより、この操作のことをミルクングという。

N: 原子炉での中性子照射で製造される場合の核反応は、 $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ である。

Ⅲ O-5 P-1 Q-2 R-5 S-4

注) O: 永続平衡が成立するには, 親核種と娘核種の半減期の比 T_1/T_2 が 1,000 程度の条件が必要となる。

P: 永続平衡が成立する場合, 親核種とその娘核種の放射能は同じとなることより,

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

となる。よって, その原子数比は,

$$\frac{N_Y}{N_{Sr}} = \frac{\lambda_{Sr}}{\lambda_Y} = \frac{T_Y}{T_{Sr}} = \frac{2.67}{28.8 \times 365} = 2.5 \times 10^{-4}$$

となる。

Q: 永続平衡が成立する場合, 娘核種 ^{90}Y の放射能は

$$A_2 \doteq A_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) = A_{10} \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_2}} \right)$$

より求めることができ, 分離後 2.67 日間経過することは, $t = T_2$ であることより,

$$A_2 \doteq A_{10} \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{T_2}{T_2}} \right) = 0.5 A_{10}$$

となり, 50% の ^{90}Y が生成する。

R: 親核種 ^{90}Sr は β^- 線 (最大エネルギー $E_{\max} = 0.546 \text{ MeV}$) を放出する。

S: α 線, β^- 線では体内の腫瘍シンチグラフィを得ることができない。また, ^{111}In はポジトロン核種ではない。

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

I 安定な核種はおおよそ 280 種類ある。その中でも陽子数 Z , 中性子数 N とともに偶数の核種 (偶偶核) の数が最も多い。質量数 A が奇数のものがそれにつき, Z と N がともに奇数の安定核種は A 等の 4 種類しか存在しない。 Z と N がともに奇数の核種の中には, 壊変系列をつくらず長寿命の B として天然に存在しているものがある。半減期 C 年の ^{40}K や, ^{138}La が代表的である。

Z が偶数の非放射性元素は, D を除いて複数の安定同位体を持つ。偶偶核の中でも, 特に魔法数と呼ばれる数の Z や N をもつ同位体は安定なものが多く, 例えば Z が E であるスズは, 10 種類もの安定同位体をもつ。

天然に存在する A が 205 以上の核種は壊変系列を作っている。このうち $A = 4n + 3$ (n は整数) で表される F 系列は, 半減期が G 年で A が H の核種から始まり, 安定同位体の ^{207}Pb で終わる。半減期 I の ^{222}Rn は, 天然壊変系列核種に属する希ガス同位体の中では最も長寿命で, $A = 4n + 2$ で表わされる J 系列に属し, 大気中に α 線放出核種として存在する。 $A = 4n + 1$ の系列核種の多くは地球年齢に比べて短寿命であり, 地球生成時に存在していた核種は消滅している。ただし, 最終安定核種 K の親核種だけは, L する長半減期の核種であり, 地球生成時から残存している。

<A~C の解答群>

- | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1) ^{10}B | 2) ^{18}F | 3) ^{26}Al |
| 4) ^{38}Cl | 5) ^{68}Ga | 6) 1.25×10^8 |
| 7) 4.47×10^8 | 8) 1.25×10^9 | 9) 4.47×10^9 |
| 10) 1.25×10^{10} | 11) 一次放射性核種 | 12) 二次放射性核種 |
| 13) 宇宙線生成核種 | 14) 誘導放射性核種 | |

<D, E の解答群>

- 1) ヘリウム 2) ベリリウム 3) ネオン 4) マグネシウム 5) アルゴン
6) 28 7) 50 8) 54 9) 64 10) 82

<F~H の解答群>

- 1) アクチニウム 2) ウラン 3) トリウム 4) ネプツニウム 5) プルトニウム
6) 7.04×10^7 7) 1.41×10^8 8) 7.04×10^8 9) 1.41×10^9 10) 7.04×10^9
11) 215 12) 223 13) 231 14) 235 15) 239

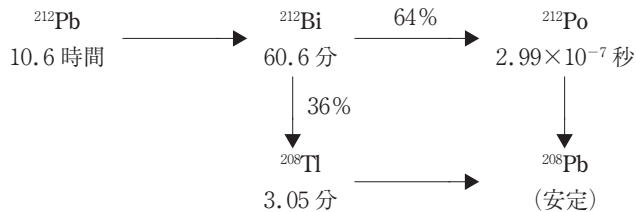
<I, J の解答群>

- 1) アクチニウム 2) ウラン 3) トリウム 4) ネプツニウム 5) プルトニウム
6) 55.6 秒 7) 3.82 日 8) 138 日 9) 22.3 年 10) 1,600 年

<K, L の解答群>

- 1) ^{205}Tl 2) ^{205}Pb 3) ^{205}Hg 4) ^{209}Pb 5) ^{209}Bi 6) ^{209}Ra
7) 電子捕獲 8) 核異性体転移 9) β^+ 壊変 10) α 壊変 11) β^- 壊変

II 下図は、A が $4n$ の系列の一部である。 ^{212}Bi は、64% が ^{212}Po へ、36% が ^{208}Tl に分岐壊変する。 ^{208}Tl への壊変の部分半減期は ア 分である。下図の核種が放射平衡になっているとき、単位時間内に ^{212}Bi と ^{212}Po が放出する α 線の数比 ($^{212}\text{Bi}/^{212}\text{Po}$) は、イ である。このような平衡状態にある核種の混合水溶液から特定の核種を分離する方法の一つに溶媒抽出法がある。この例では、M のようなキレート形成剤を使うことによって、弱酸性水溶液から ^{212}Bi を有機相に選択的に分離抽出することができる。



一般的に抽出効率は抽出剤の選択性や溶媒の使用量に大きく依存する。水相：有機相の体積比が 1 : 1 のときに、放射性核種の水相/有機相の放射能比が 0.10 となるような抽出を考える。水相にある 100 kBq の放射性核種に対して、水相の 4 倍の体積の有機相で 2 回抽出を行うと、水相には、ウ Bq が残る。

^{208}Tl を水相から有機相に選択的に分離するには、Fe(III) に用いられるようなイオン会合体抽出が効果的で、水相を N 溶液として、O を有機相に用いる分離が行われる。

<ア~ウの解答群>

- 1) 0.56 2) 0.78 3) 1.0 4) 1.3 5) 1.8
6) 21.8 7) 38.8 8) 48.4 9) 59.5 10) 94.7
11) 168 12) 250 13) 625 14) 1,000 15) 6,250

<M~O の解答群>

- 1) ジチゾン（ジフェニルチオカルバゾン） 2) エタノール 3) アセトン
4) ジエチルエーテル 5) EDTA（エチレンジアミン四酢酸） 6) クエン酸
7) 塩化アンモニウム 8) $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸 9) $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 酢酸 10) $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸
11) $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸 12) $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ アンモニア水 13) $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水酸化ナトリウム水溶液

〔解答〕

I A-1 B-11 C-8 D-2 E-7 F-1 G-8 H-14 I-7
J-2 K-1 L-10

- 注) A: ^{10}B の他, ^2H , ^6Li 及び ^{14}N の 3 種類である。 ^{18}F , ^{26}Al , ^{38}Cl 及び ^{68}Ga ともに β 線放出核種である。
B: 天然に存在する放射性核種 (天然放射性核種) は, 一次放射性核種, 二次放射性核種, 誘導放射性核種, 消滅放射性核種に分類される。一次放射性核種は地球誕生以来存在している非常に寿命の長い天然放射性核種で, 壊変系列をなす ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th と単独に存在する ^{40}K , ^{138}La などがある。
C: ちなみに, ^{138}La の半減期は 1.12×10^{11} 年である。
D: ベリリウム の安定同位体は ^9Be のみである。
E: 魔法数 (2, 8, 20, 28, 50, 82 および 126) の陽子数 (Z) あるいは中性子数 (N) または両者を示す原子核は, 特に安定であることが知られている。 ^{132}Sn ($Z: 50, N: 82$) 以外に, ^{40}Ca ($Z: 20, N: 20$) 等がある。
F: アクチニウム系列 ($A=4n+3$) の壊変は, ^{235}U (半減期 7.04×10^8 年) から始まり ^{207}Pb (安定同位体) で終わる。
I: ウラン系列 ($A=4n+2$) の壊変は, ^{238}U (半減期 4.468×10^9 年) から始まり ^{206}Pb (安定同位体) で終わる。その系列の途中で, ^{226}Ra から ^{222}Rn (半減期 3.8235 日) が生成する。
K: ネプツニウム系列 ($A=4n+1$) の壊変は, ^{237}Np (半減期 2.144×10^6 年) から始まり ^{205}Tl (安定同位体) で終わる。最終壊変生成物が鉛ではなくタリウムである点で, 他 3 系列とは異なる。
L: ^{205}Tl の親核種は α 壊変する ^{209}Bi で, 半減期は 1.9×10^{19} 年と極めて長い。
- II ア-11 イ-1 ウ-9 M-1 N-8 O-4

- 注) ア: ^{212}Bi から ^{208}Tl への部分壊変定数を λ_α , 部分半減期を T_α とすると, 全壊変定数 (λ) は部分壊変定数の和で表されることから,

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

$$T_\alpha = \ln 2 / \lambda_\alpha \text{ であることから,}$$

$$\begin{aligned} T_\alpha &= \ln 2 / \{ (\ln 2/T) \times (36/100) \} = T / (36/100) \\ &= 60.6 / (36/100) \div 168 \end{aligned}$$

$$\text{イ: } T_\alpha = 168 \text{ より, } \lambda_\alpha = \ln 2 / 168$$

同様に, ^{212}Bi から ^{212}Po への部分壊変定数を λ_β , 部分半減期を T_β とすると,

$$T_\beta = 60.6 / (64/100) \div 94.7, \lambda_\beta = \ln 2 / 94.7$$

(^{212}Bi から ^{212}Po への部分半減期 94.7 日) $\gg$ (^{212}Po の半減期 2.99×10^{-7}) であることから, 永続平衡になっている。 ^{212}Bi から ^{212}Po への部分壊変の際に放出する β 線の数と ^{212}Po が放出する α 線の数 は等しいことから, ^{212}Bi から ^{208}Tl への部分壊変の際に放出する α 線の数と ^{212}Po が放出する α 線 の数の比 ($^{212}\text{Bi}/^{212}\text{Po}$) は次のように計算される。

$$\lambda_\alpha / \lambda_\beta = (\ln 2 / 168) / (\ln 2 / 94.7) \div 0.56$$

$$\text{ウ: } 100,000 \times \{1 / (10 \times 4 + 1)\}^2 \div 59.5$$

M: ジチゾンは多くの金属イオンと反応してそれぞれ特有の色調をもつ錯体を形成する。溶液の pH と マスキング剤を変えて微量金属イオンの分離が出来る。反応の感度はきわめて高い。

N: タリウムは塩酸に不溶である。

問 5 次の I ~ III の文章の の部分に入る最も適切な語句, 数値又は数式を, それぞれの解答群から 1 つだけ選べ。なお, 解答群の選択肢は必要に応じて 2 回以上使ってもよい。

I 細胞は放射線に被ばくすると細胞障害や細胞死などを起こす。その感受性は, 細胞の種類によって

異なり、 A の法則では、細胞分裂の頻度が B 細胞ほど、将来長期にわたり分裂を続ける細胞ほど、また、形態及び機能において C 細胞ほど感受性が高いとしている。

臓器・組織の感受性は、構成する細胞の放射線感受性によって決まる。造血系は最も感受性が高い組織の一つである。成人では通常 D が造血機能を持つ。造血系の障害により血液細胞の供給が止まると、末梢血の血球数の減少となって現れる。ただし、 E については放射線被ばく後、数時間から1日の間に F を起こすことにより、最も早期に細胞数の減少が観察される。一方、 G については、放射線感受性が低く細胞寿命が約 120 日と長いため、出血を伴わない場合には、急速な減少はみられない。また、 H の血液内での通常の寿命は1日以内と短く、被ばく後第1日目に急激に増加するが、その後線量依存的に減少する。

急性障害は、高線量率で高線量の放射線を被ばくした後に、多数の細胞に細胞障害や細胞死が生じることによって起きる障害をいう。全身に被ばくした場合に、数週間以内に生じる一連の症状を急性放射線症と言い、一般に、約 1 Gy 以上の線量を被ばくすると起きる。被ばく後の時間経過は、典型的には、前駆期、潜伏期、発症期、回復期に分けられる。

前駆期は、放射線宿酔と呼ばれる症状などが一過性に現れる 48 時間以内の時期を指す。前駆期に現れる初期症状のうち、IAEA の放射線障害に関するガイドでは、1 Gy の被ばくで 10% 程度の人に 2 時間以降で現れ、線量の増加とともに頻度の上昇と発現時期の早期化がみられる I を、線量推計の参考となる臨床的症状としている。1 時間以内に I がみられる場合、少なくとも J Gy 以上の被ばくと考えられ、専門医療機関での医療処置が必要となる。

その後、潜伏期を経て、発症期に入ると、被ばく線量に応じた放射線障害が現れる。例えば、治療をしない場合、被ばく線量が約 K Gy 以上になると、腸管上皮の再生ができなくなり、腸死が生じ始める。

<A の解答群>

- | | |
|-----------------|----------------|
| 1) キュリー・ワイス | 2) ランベルト・ベール |
| 3) ベルゴニー・トリボンドー | 4) ハーディ・ワインバーク |

<B, C の解答群>

- | | | | |
|-------|-------|--------------|---------------|
| 1) 低い | 2) 高い | 3) 未熟な（未分化の） | 4) 成熟した（分化した） |
|-------|-------|--------------|---------------|

<D の解答群>

- | | | | | | |
|-------|---------------------|-------|-------|---------|---------|
| 1) 脾臓 | 2) ^{すい} 脾臓 | 3) 肝臓 | 4) 腎臓 | 5) 白色骨髄 | 6) 赤色骨髄 |
|-------|---------------------|-------|-------|---------|---------|

<E~H の解答群>

- | | | | |
|------------|---------|-----------|-----------|
| 1) 好中球 | 2) リンパ球 | 3) 血小板 | 4) 赤血球 |
| 5) 細胞分化 | 6) 脱分化 | 7) アポトーシス | 8) ネクローシス |
| 9) オートファジー | | | |

<I の解答群>

- | | | | | | |
|-----------|---------------------|-------|-------|-------|---------|
| 1) 唾液腺の腫脹 | 2) ^{おう} 嘔吐 | 3) 下痢 | 4) 頭痛 | 5) 発熱 | 6) 初期紅斑 |
|-----------|---------------------|-------|-------|-------|---------|

<J, K の解答群>

- | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|
| 1) 1 | 2) 2 | 3) 4 | 4) 10 | 5) 50 |
|------|------|------|-------|-------|

- II 放射線被ばくにより細胞に誘発された DNA の損傷が正しく修復されないまま細胞が増殖した場合、発がんに至ることがある。発がんのリスクは疫学データに基づいて推定されている。1 万人当たりの症例数を、対照群で I_0 、1 Gy 被ばく群で I_r とすると、1 万人、1 Gy 当たりの過剰絶対リスクは L で、1 Gy 当たりの過剰相対リスクは M で表される。広島・長崎の原爆被爆者の死亡率に関する調査結果では、男女平均の 1 Gy 当たりの過剰相対リスクとして、30 歳で被爆した人が 70 歳になった時点で N との結果が得られている。

<L, M の解答群>

- 1) $I_r + I_c$ 2) $I_r - I_c$ 3) $\frac{I_r}{I_c}$ 4) $\frac{I_c}{I_r}$
 5) $\frac{I_r}{I_c} - 1$ 6) $\frac{I_c}{I_r} - 1$ 7) $1 - \frac{I_r}{I_c}$ 8) $1 - \frac{I_c}{I_r}$

<N の解答群>

- 1) 0.042 2) 0.42 3) 1.042 4) 1.42 5) 4.2
 6) 5.2 7) 42 8) 43

Ⅲ 母親の胎内で放射線被ばくを受けた結果、胎児が被ばくすることを胎内被ばくという。放射線影響の観点から、受精から出生までの間は3つに区分されている。

着床前期は、ヒトでは受精後 までの期間である。この時期の主な放射線影響は である。 のしきい線量は、マウスでは であり、被ばくにより に至らなかったものは、成長を正常に続け影響は残らないと考えられている。

器官形成期は、ヒトでは着床後から受精後 までの期間である。この時期の主な放射線影響は である。 のしきい線量は、ヒトでは 程度と考えられている。

器官形成期の後、出生までが胎児期である。この時期では、精神発達遅滞や発育遅延が観察されている。

<ア～エの解答群>

- 1) 1 日 2) 4 日 3) 8 日 4) 4 週 5) 8 週
 6) 13 週 7) 27 週 8) 40 週 9) 0.01 Gy 10) 0.1 Gy
 11) 0.5 Gy 12) 1 Gy 13) 5 Gy 14) 10 Gy 15) 15 Gy

<O, P の解答群>

- 1) 遺伝性(的)影響 2) 発がん 3) 奇形 4) 胚死亡
 5) 骨髄死 6) 腸死 7) 中枢神経死

[解答]

I A-3 B-2 C-3 D-6 E-2 F-7 G-4 H-1 I-2
 J-3 K-4

注) 身体的感受性に関する設問である。

第 1 段落は基本的な法則に関する記述である。

A～C：細胞と組織の放射線に関する基本的な傾向を示した法則としてベルゴニー・トリボンドーの法則は必須事項である。その法則では、細胞分裂の頻度が高い細胞ほど、将来長期にわたり分裂を続ける細胞ほど、また、形態及び機能において未熟な（未分化の）細胞ほど感受性が高い。

第 2 段落は血液の放射線感受性に関する知識である。

D～H：造血は赤色骨髄で起きる。リンパ球については、アポトーシスを起こして早期に減少する。赤血球については、寿命が長く影響が遅いのに対し、好中球については、寿命が短い。

第 4 段落以降は全身および臓器の放射線障害に関する記述である。I～K は急性障害の前駆期、潜伏期、発症期、回復期に関する問題である。

I～K：前駆期の指標としては唾液腺の腫脹があり、4 Gy 以上の被ばくが想定される。発症期においては、高線量で臓器に特異的な反応が見られ、10 Gy 以上であれば、腸上皮の再生ができないことが死の原因になる。

Ⅱ L-2 M-5 N-2

注) リスクの算出方法についての設問である。

L~M: 過剰リスクを算出するためには, 放射線によるリスクから対照群のリスクを引く。過剰相対リスクでは, 対照群のリスクよりも被ばく群がリスクが高くなった分を, 1 を引くことにより明確に示す。なお, 1 Gy 当たりの過剰相対リスクは 0.42 と記憶しておく必要がある。

Ⅲ ア-3 イ-10 ウ-5 エ-10 オ-4 P-3

注) 胎児被ばくについての設問である。

ア, O: 受精後 8 日までの期間を着床前期といい, 主な放射線影響は胚死亡である。そのしきい線量は, 0.1 Gy である。器官形成期には器官の形成異常 (奇形) が問題となり, しきい線量は 0.1 Gy である。下表に重要事項をまとめた。

表 主な先天異常と胎児発育期間およびしきい値

着床前期	器官形成期	胎児期	しきい値 (Gy)
0~8 日	2~8 週	8 週~出産	
流産			0.1
	器官形成異常 (奇形)		0.1
		精神発達遅滞 発育遅滞	0.1

問 6 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 放射線の生物作用に深く関わる DNA は生命の設計図とも言われる。細胞骨格成分や酵素などとして機能するタンパク質は, DNA の塩基の配列をもとに, グリシン, アラニンなどの 20 種類のアミノ酸を決まった配列で重合させることによって作られる。

タンパク質が合成される際, 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 A といい, 合成された RNA を mRNA という。なお, mRNA には DNA に含まれるチミン (T) が含まれず, 代わりにウラシル (U) が含まれる。mRNA は核から運び出されて, タンパク質合成が行われる B に結合する。 B では, mRNA の塩基 3 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 C といい, mRNA の塩基 3 個の組をコドンという。 D はコドンに対応するアミノ酸を B に運ぶ役割を担う。

<A~D の解答群>

- | | | | |
|----------|-----------|------------|-------------|
| 1) 転写 | 2) 転移 | 3) 複写 | 4) 複製 |
| 5) 変換 | 6) 翻訳 | 7) プロテアソーム | 8) ペルオキシソーム |
| 9) リソソーム | 10) リボソーム | 11) gRNA | 12) rRNA |
| 13) tRNA | 14) siRNA | | |

Ⅱ 放射線, 紫外線などによる DNA 損傷や DNA 複製過程でのエラーにより, DNA の塩基の配列に変化が生じることを変異という。DNA に生じた変異はタンパク質のアミノ酸の配列に変化を与える。

細胞周期制御やアポトーシス誘導に関わる p53 タンパク質は, 多くのヒトがんで変異が認められる。下の図 1 に, ヒト p53 タンパク質の mRNA の塩基配列の一部を示す。mRNA の塩基の番号は, タンパク質合成が開始されるコドンの 1 番目の塩基を 1 番とし, 以下, タンパク質合成が進行する方向に向かって増えるように付けることとする。また, タンパク質のアミノ酸の番号は, タンパク質合

成が開始されるコドンに対応するアミノ酸を 1 番とし、以下、タンパク質合成が進行する方向に向かって増えるように付けることとする。

塩基の番号：1 番から 30 番
AUGGAGGAGCCGCAGUCAGAUCCUAGCGUC

塩基の番号：391 番から 420 番
AACAGAUGUUUGCCAACUGGCCAAGACC

図 1

下の表 1 はコドンとアミノ酸の対応を示したもので、遺伝暗号表あるいはコドン表などと呼ばれる。

表 1

1 番目の塩基	3 番目の塩基	2 番目の塩基							
		U		C		A		G	
U	U	UUU	フェニルアラニン	UCU	セリン	UAU	チロシン	UGU	システイン
	C	UUC		UCC		UAC		UGC	
	A	UUA	ロイシン	UCA		UAA	終止コドン	UGA	終止コドン
	G	UUG		UCG		UAG		UGG	
C	U	CUU	ロイシン	CCU	プロリン	CAU	ヒスチジン	CGU	アルギニン
	C	CUC		CCC		CAC		CGC	
	A	CUA		CCA		CAA	グルタミン	CGA	
	G	CUG		CCG		CAG		CGG	
A	U	AUU	イソロイシン	ACU	トレオニン	AAU	アスパラギン	AGU	セリン
	C	AUC		ACC		AAC		AGC	
	A	AUA	メチオニン	ACA		AAA	リシン	AGA	アルギニン
	G	AUG		ACG		AAG		AGG	
G	U	GUU	バリン	GCU	アラニン	GAU	アスパラギン酸	GGU	グリシン
	C	GUC		GCC		GAC		GGC	
	A	GUA		GCA		GAA	グルタミン酸	GGA	
	G	GUG		GCG		GAG		GGG	

表 1 を参照すると、ヒト p53 タンパク質における 1 番のアミノ酸は 、2 番のアミノ酸は であることが分かる。また、ヒト p53 タンパク質は 393 個のアミノ酸から構成される。したがって、ヒト p53 タンパク質の mRNA の終止コドンの 3 番目の塩基の番号は 番となる。

あるヒトがん組織において p53 タンパク質の mRNA の塩基配列を調べたところ、一本下線で示した 404 番の G が U に変化している例が見られた。正常な p53 タンパク質において、この塩基を含むコドンによって指定される 番のアミノ酸は本来 であるが、変異した p53 タンパク質では に置き換わっている。このような変異を 変異という。また、別のヒトがん組織では二本下線で示した 405 番目の C が A に変化していた。この結果、 番のアミノ酸を指定するコドンが終止コドンに変化する。このような変異を 変異という。

また、ヒトがん組織では、p53 タンパク質の mRNA に塩基の欠失や挿入が見られる場合もある。欠失するあるいは挿入される塩基の数が ，コドンの組み合わせが変わり，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 変異という。

<E~H の解答群>

- | | | | |
|-----------|----------|------------|--------------|
| 1) アラニン | 2) グリシン | 3) アスパラギン | 4) アスパラギン酸 |
| 5) アルギニン | 6) グルタミン | 7) グルタミン酸 | 8) システイン |
| 9) セリン | 10) チロシン | 11) トレオニン | 12) フェニルアラニン |
| 13) メチオニン | 14) ロイシン | 15) イソロイシン | |

<ア, イの解答群>

- | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1) 115 | 2) 125 | 3) 131 | 4) 132 | 5) 135 | 6) 145 |
| 7) 393 | 8) 394 | 9) 1,115 | 10) 1,179 | 11) 1,182 | 12) 1,215 |
| 13) 1,315 | 14) 1,415 | | | | |

<I~L の解答群>

- | | | | |
|--------------|----------------|--------------|---------------|
| 1) サイレント | 2) ナンセンス | 3) フレームシフト | 4) ミスセンス |
| 5) 偶数であれば | 6) 奇数であれば | 7) 3 の倍数であれば | 8) 3 の倍数でなければ |
| 9) 5 の倍数であれば | 10) 5 の倍数でなければ | | |

- Ⅲ 染色体の数また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ものがある。下の図 2 の 2 本の染色体で，染色体 1 の a-b 間と染色体 2 の c-d 間で DNA 2 本鎖切断が生じたとする。このとき，誤って染色体 1 の a 側の末端と染色体 2 の c 側の末端が結合されると， が生じる。また，染色体 1 の a 側の末端と染色体 2 の d 側の末端が結合され，同時に染色体 1 の b 側の末端と染色体 2 の c 側の末端が結合されると， が生じる。

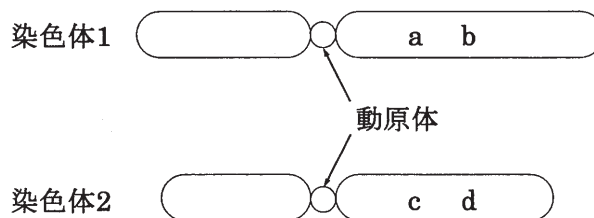


図 2

染色体異常は安定型染色体異常と不安定型染色体異常に分類できる。 や は 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 染色体異常であると考えられている。また，急性期における放射線被ばく線量の生物学的推定は 染色体異常を指標として行う場合が多い。

<M~R の解答群>

- | | | |
|------------|-------------|----------|
| 1) 環状染色体 | 2) 姉妹染色分体交換 | 3) 相同染色体 |
| 4) 二動原体染色体 | 5) 逆位 | 6) 欠失 |
| 7) 転座 | 8) 安定型 | 9) 不安定型 |

〔解答〕

I A-1 B-10 C-6 D-13

注) 放射線の DNA への作用に関する問題である。DNA 上の遺伝情報がタンパク質として作用する過程は：転写 (mRNA) $\rightleftharpoons$ 翻訳 (rRNA, コドン, tRNA, アミノ酸) $\rightleftharpoons$ タンパク質 である。

A, B, D：転写過程で生成された mRNA はリボゾームに結合する。リボゾームでは、コドンに対応するアミノ酸を tRNA が運ぶ。

Ⅱ E-13 F-7 G-8 H-12 ア-11 イ-5 I-4 J-2 K-8
L-3

注) 放射線によって誘発される変異に関する問題である。

E~H：コドンを読み解くことを求めている。表を参照しつつ、塩基が示すコドンを選択する。その際、翻訳の開始が AUG からスタートすることに注意する。

ア, イ：アの回答においては、p53 遺伝子のアミノ酸数が 393 であることからコドンの 394 個目が終止コドンになることを判断し、 3×394 で位置を算出する。イでは逆に 404 番目の塩基が $404 \div 3 = 134.6$ 。切り上げて 135 番目のコドンに含まれることを算出する。

I~L：変異の種類の名称を確認する。コドン 1 つについて発現するアミノ酸が変化することを「ミスセンス変異」、終止コドンに変化してアミノ酸が発現しなくなることを「ナンセンス変異」、挿入や欠失などで、ある位置以降のコドンがすべて変化してしまう変異を「フレームシフト」という。

Ⅲ M-4 N-7 O-1 P-9 Q-8 R-9

注) 染色体異常の問題である。前提として、間期に起きた二重鎖切断が分裂期に染色体異常となることを認識しておく必要がある。染色体異常の形状については、両方の染色分体の同じ位置に異常部を持つ染色体型異常と片方の染色分体のみに異常部を持つ染色体型異常とに分けられる。また、言葉のみではなく、形としての変化を図を見て理解する必要があるため、下記のようなホームページの該当項目を参照することが望ましい。

●「放射線診療技術支援 e-learning system」(要登録)

<http://www.020329.com/x-ray/>

さらに下記のような総説を参照すると、この設問に対する正答が良く理解できる。

●津山尚宏「放射線量を見える化する生物学的分析法」

https://www.jstage.jst.go.jp/article/bunsekikagaku/63/6/63_445/_pdf(最終確認 2018 年 12 月 19 日)

染色体異常のうち、二動原体染色体や環状染色体は細胞分裂に伴って細胞から消失するため、不安定型の染色体異常と言われ、細胞老化や細胞死を引き起こす。一方、転座や逆位などの染色体異常は、細胞分裂でも維持されるため、安定型の染色体異常と言われ、がん化の原因となる。