

第 58 回 第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例 (1)

(試験年月日 平成 25 年 8 月 21 日, 22 日)

法 令

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

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

問 1 放射線障害防止法の目的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。

「この法律は、原子力基本法の精神にのっとり、放射性同位元素の使用、、廃棄その他の取扱い、放射線発生装置の使用及び放射性同位元素又は放射線発生装置から発生した放射線によって汚染された物（以下「」という。）のその他の取扱いをすることにより、これらによる放射線障害を防止し、公共の安全を確保することを目的とする。」

A	B	C	D
1 販売、賃貸	放射性廃棄物	処理	制限
2 保管、運搬	放射化物	廃棄	制限
3 販売、賃貸	放射性汚染物	廃棄	規制
4 保管、運搬	放射性汚染物	廃棄	規制
5 販売、賃貸	放射化物	処理	規制

〔解答〕

3

注) 法第 1 条

問 2 用語の定義に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 放射線施設とは、「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」をいう。
 B 作業室とは、「密封されていない放射性同位元素の使用若しくは詰替えをし、又は放射性同位元素若しくは放射線発生装置から発生した放射線により生じた放射線を放出する同位元素によって汚染された物で密封されていないものの詰替えをする室」をいう。

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

主任者 コーナー

- C 汚染検査室とは、「人体又は作業衣、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の検査を行う室」をいう。
- D 廃棄作業室とは、「放射性同位元素等を焼却した後その残渣を焼却炉から搬出し、又はコンクリートその他の固型化材料により固型化（固型化するための処理を含む。）する作業を行う室」をいう。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

5

- 注) A：定められている 則第1条第9号
B：定められている 則第1条第2号
C：定められている 則第1条第4号
D：定められている 則第1条第3号

問3 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。ただし、コバルト60の下限数量は100キロボケレルであり、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、密封されたコバルト60が製造されたのは、平成25年4月1日とする。

- A 1個当たりの数量が、100メガベケレルの密封されたコバルト60を3個で1組として装備し、その1組をもって照射する機構を有するレベル計1台のみを使用しようとする者は、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
- B 1個当たりの数量が、10メガベケレルの密封されたコバルト60を装備したレベル計のみ10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、1メガベケレルの密封されたコバルト60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、100キロボケレルの密封されたコバルト60を装備した校正用線源のみ1個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。
- 1 ABC のみ 2 AB のみ 3 AD のみ 4 CD のみ 5 BCD のみ

〔解答〕

2

- 注) A：正 法第3条第1項、令第3条第1項 3個を1組とするので下限数量の1,000倍を超えるため、許可を受けなければならない。
- B：正 法第3条の2第1項 それぞれの線源は下限数量を超えるが、下限数量の1,000倍は超えないので、届け出なければならない。
- C：誤 法第3条の3第1項 あらかじめではなく、使用の開始の日から30日以内に届け出なければならない。(参考：平成19年4月1日前に製造され、又は輸入された1メガベケレルの機器は届け出なくてよいが、設問の線源は平成25年4月1日に製造されているので届け出なければならない。)
- D：誤 令第1条 下限数量を超えないので、法第2条第2項の放射性同位元素ではない。

問4 表示付認証機器の使用の届出に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。ただし、表示付認証機器について認証条件に従った使用、保管及び運搬をする場合とする。

- A 許可使用者は、新たに表示付認証機器の使用をするときは、あらかじめ、その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。
- B 表示付認証機器使用者は、当該表示付認証機器の使用をするときは、使用の開始の日から30日以内に、原子力規制委員会に届け出なければならない。
- C 表示付認証機器届出使用者は、表示付認証機器に係る届け出た事項を変更したときは、変更の日から30日以内に、その旨を原子力規制委員会に届け出なければならない。
- D 表示付認証機器使用者は、当該表示付認証機器の使用をするときは、原子力規制委員会への届出を要しない。

1 AとB 2 AとC 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

3

- 注) A：誤 法第3条の3第1項 使用の開始の日から30日以内に届け出なければならない。
 B：正 法第3条の3第1項
 C：正 法第3条の3第2項
 D：誤 法第3条の3第1項 使用の開始の日から30日以内に届け出なければならない。

問5 次のうち、届出販売業者が、あらかじめ、原子力規制委員会に届け出なければならない変更事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

- A 販売所の所在地
- B 放射性同位元素の種類
- C 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
- D 貯蔵施設の位置、構造、設備及び貯蔵能力

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

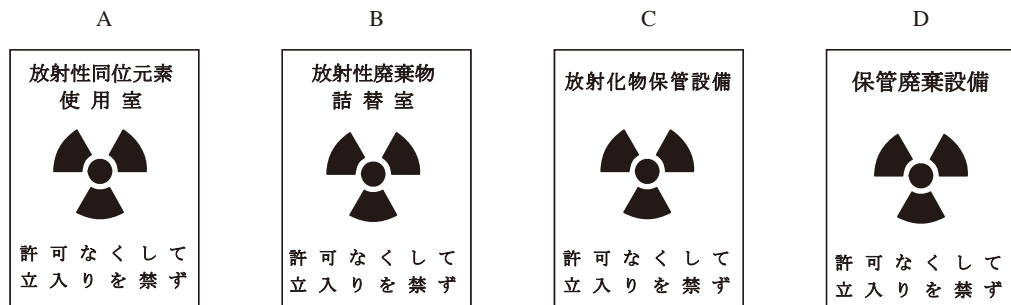
〔解答〕

2

- 注) A：定められている 法第4条第2項には、前項第3号は含まれる。
 B：定められている 法第4条第2項には、前項第2号は含まれる。
 C：定められていない 法第4条第2項には、前項第1号は含まれない。
 D：定められていない 法第4条第1項には貯蔵施設は含まれていない（貯蔵施設は持てない）。

問6 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。

主任者 コーナー



- 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：定められていない 則第14条の7第1項第9号，施行規則別表 下部の「許可なくして立入りを禁ず」は不要
- B：定められていない 則第14条の8において準用する第14条の7第1項第9号 下部の「許可なくして立入りを禁ず」は不要
- C：定められている 則第14条の7第1項第9号，施行規則別表
- D：定められている 則第14条の11第1項第10号，施行規則別表

問7 許可使用者が行う使用施設等の変更にに関する次の記述のうち，変更の許可を要しない軽微な変更として，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 密封された放射性同位元素の1週間における使用時間数を30時間から20時間に変更する。
- B 使用施設の管理区域の一部を縮小する。(ただし，工事を伴わないものに限る。)
- C 同一事業所内にある独立した2つの保管廃棄設備のうち，1つを廃止する。
- D 同一管理区域内に設置された370ギガベクレルの密封されたイリジウム192を装備した近接照射治療装置1台と370メガベクレルの密封されたニッケル63を装備したガスクロマトグラフ用エレクトロン・キャプチャ・ディテクタ（以下「ディテクタ」という。）1台のうちディテクタ1台を廃止する。(ただし，管理区域は変更しないものとし，それぞれの線源は耐火性の構造の容器に入れて保管されているものとする。)

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

〔解答〕

1

- 注) A：正 平成17年6月1日文部科学省告示第81号第1条第1号
- B：誤 則第9条の2の中には記されていない。工事を伴わない管理区域の拡大は，変更の許可を要しない軽微な変更となる（平成17年6月1日文部科学省告示第81号第1条第3号）。
- C：正 則第9条の2第4号
- D：正 則第9条の2第2号

問 8 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 2 台を使用している者が、装置の経年劣化により、その 2 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 2 台に同時更新し、使用することになった。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 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。
- 2 許可使用に係る軽微な変更の届出をしなければならない。
- 3 許可使用に係る変更許可申請をしなければならない。
- 4 許可使用に係る申請をしなければならない。
- 5 届出使用に係る変更の届出をしなければならない。

〔解答〕

4

注) 更新前は下限数量以下であったので許可も届出も必要なかった(法第 3 条, 法第 3 条の 2)。更新後は下限数量の 1,000 倍を超えるので許可が必要(令第 3 条)。2 台使用するが、数量は 1 台ごとで判断する。

問 9 放射線障害防止法の放射性同位元素装備機器の設計認証に関する次の文章の [A] ～ [D] に該当する語句について、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、下記の選択肢のうちどれか。

「放射性同位元素装備機器を [A] し、又は [B] しようとする者は、当該放射性同位元素装備機器の放射線障害防止のための機能を有する部分の設計並びに当該放射性同位元素装備機器の [C] その他の [D] に関する条件について、原子力規制委員会の認証を受けることができる。」

[A]	[B]	[C]	[D]
1 製造	輸入	年間使用時間	使用、保管及び運搬
2 生産	販売	使用時間	使用、貯蔵及び廃棄
3 設計	販売	年間使用時間	使用、保管及び運搬
4 生産	輸入	使用時間	使用、貯蔵及び運搬
5 製造	販売	使用時間	使用、保管及び廃棄

〔解答〕

1

注) 法第 12 条の 2 第 1 項

問 10 密封された放射性同位元素について、数量が 100 テラベクレルの貯蔵能力の貯蔵施設を有する特定許可使用者が、新たに密封された放射性同位元素 1 個を貯蔵する貯蔵施設を増設するとき、施設検査を要しない軽微な変更となる放射性同位元素の数量として放射線障害防止法上正しいものはどれか。

- 1 37 ペタベクレル
- 2 10 ペタベクレル
- 3 1 ペタベクレル
- 4 10 テラベクレル

主任者 コーナー

5 1 テラベクレル

〔解答〕

5

注) 令第13条第1項

問11 廃棄施設の技術上の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 固型化处理設備は、放射性同位元素等が漏れ又はこぼれにくく、かつ、粉じんが飛散しにくい構造としなければならない。
- B 廃棄施設は、その主要構造部等を耐火構造としなければならない。
- C 排水設備は、排液が漏れにくい構造とし、排液が浸透しにくく、かつ、腐食しにくい材料を用いなければならない。
- D 焼却炉は、排気設備に連結された構造としなければならない。

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

〔解答〕

3

- 注) A：正 則第14条の11第1項第7号イ
B：誤 則第14条の11第1項第2号 不燃材料で造ることができる。
C：正 則第14条の11第1項第5号ロ
D：正 則第14条の11第1項第6号ロ

問12 放射化物保管設備の技術上の基準に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

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

1 ABCのみ 2 ADのみ 3 BCのみ 4 Dのみ 5 ABCDすべて

〔解答〕

3

- 注) A：誤 則第14条の7第1項第7号の2に規定されていない。
B：正 則第14条の7第1項第7号の2ロ
C：正 則第14条の7第1項第7号の2イ
D：誤 則第14条の7第1項第7号の2に規定されていない。

問 13 表面密度限度に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

放射性同位元素

表面密度限度

[ベクレル毎平方センチメートル]

A 炭素 14	40
B セシウム 137	4
C ポロニウム 210	4
D アメリシウム 241	0.4

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

〔解答〕

2

注) 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 8 条、別表第 4

問 14 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 密封されていない放射性同位元素の使用は、作業室において行うこと。
- B 作業室での飲食及び喫煙を禁止すること。
- C 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。
- D 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。

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：定められている 則第 15 条第 1 項第 1 号の 2

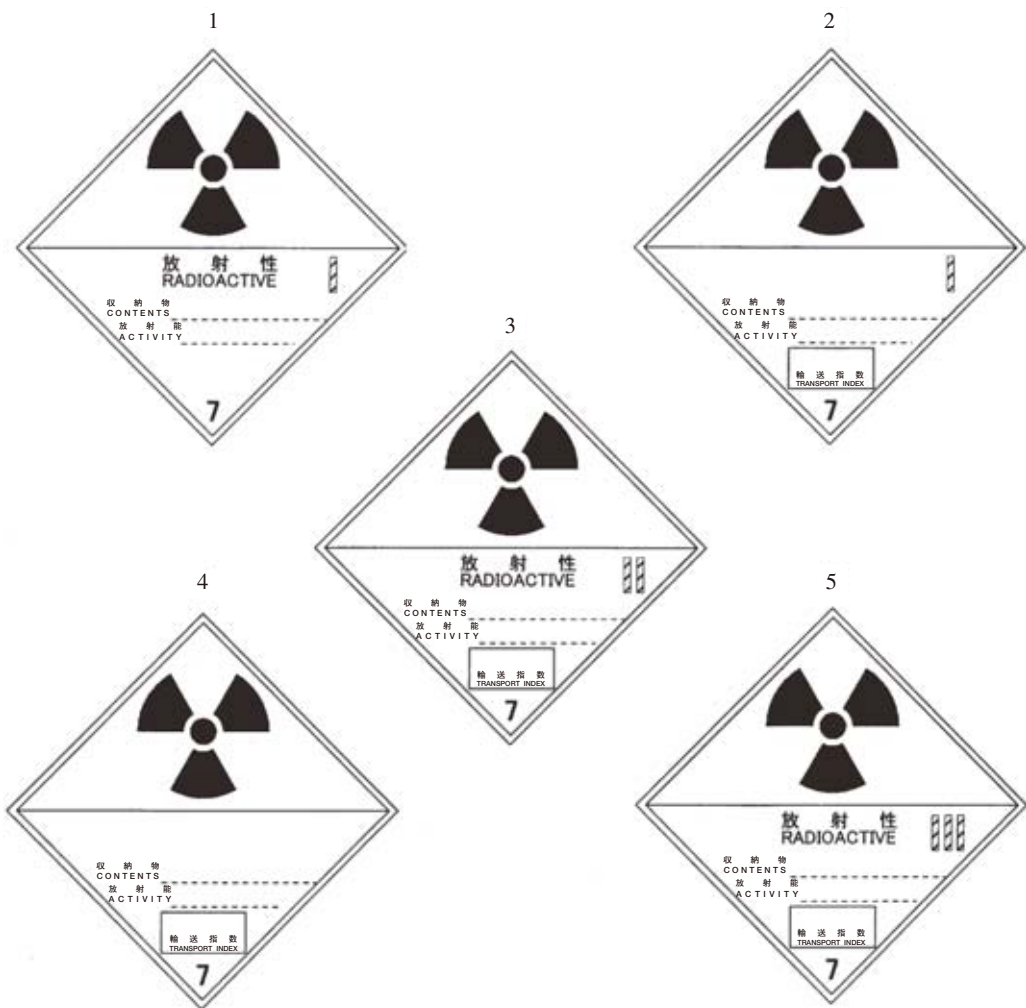
B：定められている 則第 15 条第 1 項第 5 号

C：定められている 則第 15 条第 1 項第 7 号

D：定められている 則第 15 条第 1 項第 8 号

問 15 次の標識のうち、放射性同位元素等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準により、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放射性輸送物に取り付けるものとして、放射線障害防止法上定められているものはどれか。ただし、この場合、標識の大きさと色彩は放射線障害防止法によるものとし、放射性輸送物は L 型輸送物でないものとする。

主任者 コーナー



〔解答〕

1

注) 平成2年11月28日 科学技術庁告示7号第24条第1号 第1類白標識(別記第10に掲げるもの)

問16 次の記述のうち、液体状の放射性同位元素等の廃棄の方法として、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 焼却炉において焼却すること。
- B 排水設備において、浄化し、又は排水すること。
- C 容器に封入し、又は固化処理設備においてコンクリートその他の固化材料により容器に固化して貯蔵施設において保管廃棄すること。

D 固型化処理設備においてコンクリートその他の固型化材料により固型化すること。

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

〔解答〕

2

注) A：正 則第 19 条第 1 項第 4 号ハ

B：正 則第 19 条第 1 項第 4 号イ

C：誤 則第 19 条第 1 項第 4 号ロ 保管廃棄設備において保管廃棄する。

D：正 則第 19 条第 1 項第 4 号ニ

問 17 妊娠中である女子の放射線の量の測定及び線量限度に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 本人の申出等により許可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おける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。
- B 腹部表面の等価線量限度は、本人の申出等により許可使用者又は許可廃棄業者が妊娠の事実を知ったときから出産までの間につき 2 ミリシーベルトである。
- C 内部被ばくによる線量の測定は、原子力規制委員会の定めるところにより、放射性同位元素を誤って吸入摂取し、又は経口摂取したとき及び作業室その他放射性同位元素を吸入摂取し、又は経口摂取するおそれのある場所に立ち入る者にあつては、本人の申出等により許可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 3 月を超えない期間ごとに 1 回行う。
- D 内部被ばくの実効線量限度は、本人の申出等により許可使用者又は許可廃棄業者が妊娠の事実を知ったときから出産までの間につき 1 ミリシーベルトである。

- 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) A：正 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 20 条第 2 項第 3 号

B：正 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 6 条第 3 号

C：誤 則第 20 条第 2 項第 2 号 出産までの間 1 月を超えない期間ごとに 1 回行う。

D：正 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 5 条第 4 号

問 18 1 種類の放射性同位元素を吸入摂取又は経口摂取したときの内部被ばくによる実効線量の算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はどれか。ただし、実効線量の算出に用いる実効線量係数は、告示（放射線を放出する同位元素の数量等を定める件）別表第 2 の第 1 欄に掲げる放射性同位元素の種類に応じて、それぞれ吸入摂取した場合にあつては同表の第 2 欄、経口摂取した場合にあつては同表の第 3 欄に掲げる値とする。

- 1 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商
- 2 吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の摂取量と実効線量係数の積
- 3 吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の全身残留量と実効線量係数の積
- 4 吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の摂取量と実効線量係数の商
- 5 吸入摂取又は経口摂取した放射性同位元素の全身残留量と実効線量係数の商

主任者 コーナー

〔解答〕

2

注) 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 19 条第 2 項

問 19 放射線業務従事者の受けた外部被ばくによる実効線量を算定する場合に含まれる被ばくとして、放射線障害防止法上正しいものの組合せは、次のうちどれか。

- A 診療を受けるための被ばく
- B 1 メガ電子ボルト未満のエネルギーを有する電子線による被ばく
- C 自然放射線による被ばく
- D 1 メガ電子ボルト未満のエネルギーを有するエックス線による被ばく

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

〔解答〕

4

注) A：誤 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 24 条

B：正 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 24 条

C：誤 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 24 条

D：正 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 24 条

問 20 放射線障害予防規程に記載すべき事項として、放射線障害防止法上定められているものの組合せは、次のうちどれか。

- A 放射性同位元素等又は放射線発生装置の取扱いに従事する者に関する職務及び組織に関すること。
- B 放射線取扱主任者その他の放射性同位元素等又は放射線発生装置の取扱いの安全管理に従事する者に関する職務及び組織に関すること。
- C 放射線障害を受けた者又は受けたおそれのある者に対する保健上必要な措置に関すること。
- D 代表者の氏名及び経歴に関すること。

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

〔解答〕

1

注) A：正 則第 21 条第 1 項第 1 号

B：正 則第 21 条第 1 項第 1 号の 2

C：正 則第 21 条第 1 項第 7 号

D：誤 則第 21 条第 1 項にこのような定めはない。

問 21 教育訓練に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。ただし、対象者には、教育及び訓練の項目について十分な知識及び技能を有していると認められる者は、含まれていないものとする。

- A 取扱等業務に従事する者であって、管理区域に立ち入らないものに対する教育及び訓練は、取扱等業務を開始する前に行わなければならないが、時間数は定められていない。
- B 放射線業務従事者に対する教育及び訓練で定める項目は、「放射線の人体に与える影響」、「放射性

同位元素等又は放射線発生装置の安全取扱い」,「放射性同位元素及び放射線発生装置による放射線障害の防止に関する法令」及び「放射線障害予防規程」の4項目である。

- C 放射線発生装置に係る管理区域に立ち入る者の特例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に対する教育及び訓練は,当該者が立ち入る放射線施設において放射線障害が発生することを防止するために必要な事項について施すこと。
- D 放射線業務従事者に対する教育及び訓練は,初めて管理区域に立ち入る前及び管理区域に立ち入った後にあっては1年を超えない期間ごとに行わなければならない。

1 ACDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 BDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

5

注) A:誤 平成3年11月15日 科学技術庁告示第10号に,則第21条の2第1項第3号の規定により行わなければならない項目と時間が定められており,3時間以上とする。

B:正 則第21条の2第1項第4号

C:正 則第21条の2第1項第5号

D:正 則第21条の2第1項第2号

問22 健康診断に関する次の記述のうち,放射線業務従事者に対し,遅滞なく,健康診断を行わ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 皮膚の等価線量について,4月1日を始期とする1年間につき,300ミリシーベルト被ばくし,又は被ばくしたおそれがあるとき。
- B 実効線量について,4月1日を始期とする1年間につき,100ミリシーベルト被ばくし,又は被ばくしたおそれがあるとき。
- C 眼の水晶体の等価線量について,4月1日を始期とする1年間につき,300ミリシーベルト被ばくし,又は被ばくしたおそれがあるとき。
- D アルファ線を放出する放射性同位元素によって汚染された皮膚の表面の放射性同位元素の密度が20ベクレル毎平方センチメートルであり,その汚染を容易に除去することができないとき。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

5

注) A:誤 平成12年10月23日 科学技術庁告示第5号第6条第2号と則第22条第1項第3号ニ皮膚の等価線量限度は500ミリシーベルトである。

B:正 平成12年10月23日 科学技術庁告示第5号第5条第2号と則第22条第1項第3号ニ

C:正 平成12年10月23日 科学技術庁告示第5号第6条第1号と則第22条第1項第3号ニ

D:正 平成12年10月23日 科学技術庁告示第5号第8条,別表第4と則第22条第1項第3号ロ

問23 次のうち,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 保管を委託した放射性同位元素の種類及び数量

主任者 コーナー

- B 放射性同位元素等の廃棄の年月日，方法及び場所
 C 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
 D 放射線施設に立ち入る者に対する教育及び訓練の実施年月日，項目並びに当該教育及び訓練を受けた者の氏名
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

4

- 注) A：誤 則第 24 条第 1 項第 1 号ト 保管に係る放射性同位元素の種類及び数量を記載するが、保管を委託することはできない。なお、払い出した先で保管は可能である。
 B：正 則第 24 条第 1 項第 1 号ヲ
 C：正 則第 24 条第 1 項第 1 号ヌ
 D：正 則第 24 条第 1 項第 1 号タ

問 24 許可の取消し，使用の廃止等に伴う措置等に関する次の文章の A ～ C に該当する語句について，放射線障害防止法上定められているものの組合せは，下記の選択肢のうちどれか。

「第 28 条 許可取消使用者等は，原子力規制委員会規則で定めるところにより，放射性同位元素の譲渡し，放射性同位元素等による汚染の A ， B の廃棄その他の原子力規制委員会規則で定める措置を講じなければならない。

2 許可取消使用者等は，前項の措置を講じようとするときは，原子力規制委員会規則で定めるところにより，あらかじめ， C を定め，原子力規制委員会に届け出なければならない。」

- | | <input type="text"/> A <input type="text"/> | <input type="text"/> B <input type="text"/> | <input type="text"/> C <input type="text"/> |
|---------|---|---|---|
| 1 除去 | | 放射化物 | 危険時の措置に関する事項 |
| 2 状況の測定 | | 放射性汚染物 | 危険時の措置に関する事項 |
| 3 除去 | | 放射性汚染物 | 廃止措置計画 |
| 4 状況の測定 | | 放射化物 | 廃止措置計画 |
| 5 除去 | | 放射性廃棄物 | 廃止措置計画 |

〔解答〕

3

注) 法第 28 条

問 25 事故届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。

「許可届出使用者等（表示付認証機器使用者及び表示付認証機器使用者から運搬を委託された者を A ）は，その所持する放射性同位元素について B その他の事故が生じたときは，遅滞なく，その旨を警察官又は C に届け出なければならない。」

- | | <input type="text"/> A <input type="text"/> | <input type="text"/> B <input type="text"/> | <input type="text"/> C <input type="text"/> |
|------|---|---|---|
| 1 含む | | 破損，放射線障害の発生 | 海上保安官 |
| 2 除く | | 破損，放射線障害の発生 | 自衛官 |

- | | | |
|------|----------|-------|
| 3 除く | 盗取, 所在不明 | 海上保安官 |
| 4 含む | 盗取, 所在不明 | 海上保安官 |
| 5 除く | 盗取, 所在不明 | 自衛官 |

〔解答〕

4

注) 法第 32 条

問 26 危険時の措置における緊急作業に係る線量限度に関する次の文章の 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。

「緊急作業に係る線量限度は、実効線量について A ミリシーベルト、眼の水晶体の等価線量について B ミリシーベルト及び皮膚の等価線量について C シーベルトとする。」

	A	B	C
1	100	300	1
2	100	500	2
3	150	300	1.5
4	150	500	1
5	150	500	2

〔解答〕

1

注) 平成 12 年 10 月 23 日 科学技術庁告示第 5 号第 22 条

問 27 濃度確認を受けようとする者が、あらかじめ行う放射能濃度の測定及び評価の方法の認可の申請に関する次の記述のうち、許可使用者が原子力規制委員会に提出しなければならない申請書に添える書類において説明する事項として、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 放射能濃度の測定及び評価に係る施設に関すること。
- B 放射能濃度を決定する方法に関すること。
- C 放射線測定装置の選択及び測定条件等の設定に関すること。
- D 放射能濃度の測定及び評価の信頼性を確保するための措置に関すること。

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

〔解答〕

5

- 注) A : 正 則第 29 条の 6 第 1 項第 1 号
 B : 正 則第 29 条の 6 第 1 項第 5 号
 C : 正 則第 29 条の 6 第 1 項第 6 号
 D : 正 則第 29 条の 6 第 1 項第 7 号

問 28 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 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。
- B 下限数量を超える密封された放射性同位元素のみを診療のために使用するときは、放射線取扱主任

主任者 コーナー

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。

- C 10 テラベクレルの密封された放射性同位元素のみを業として賃貸するときは、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) A：誤 法第34条第1項第3号
- B：誤 法第34条第1項 医師又は歯科医師を選任することはできるという規定はあるが、診療放射線技師を選任できるという規定はない。
- C：正 法第34条第1項第3号
- D：正 法第34条第1項第1号

問29 放射線取扱主任者に定期講習を受講させなければならない事業者として、放射線障害防止法上正しいものの組合せは、次のうちどれか。

- A 許可使用者
- B 表示付認証機器のみを賃貸する届出賃貸業者
- C 許可廃棄業者
- D 届出使用者

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

〔解答〕

3

- 注) A：正 則第32条第1項第1号
- B：誤 則第32条第1項第2号に、表示付認証機器のみを賃貸する届出賃貸業者は除く、とある。
- C：正 則第32条第1項第3号
- D：正 則第32条第1項第1号

問30 密封された放射性同位元素を診療のためのみに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遂行することはできないが、放射性同位元素の使用を継続することとした。この出張期間中における放射線取扱主任者の代理者の選任に関する次の記述のうち、放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

- A 出張の期間が30日であったので、放射線取扱主任者免状を有していない医師を、放射線取扱主任者の代理者として選任し、選任した日から10日後、原子力規制委員会にその旨の届出を行った。
- B 出張の期間が10日であったので、第3種放射線取扱主任者免状を有している者を、放射線取扱主任者の代理者として選任したが、原子力規制委員会にその旨の届出は行わなかった。
- C 出張の期間が30日であったので、第2種放射線取扱主任者免状を有している者を、放射線取扱主任者の代理者として選任し、選任した日から10日後、原子力規制委員会にその旨の届出を行った。
- D 出張の期間が3日であったので、放射線取扱主任者の代理者の選任は行わなかった。

- 1 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 法第 37 条第 3 項
B：正 則第 33 条第 4 項
C：正 法第 37 条第 3 項
D：誤 法第 37 条第 1 項 放射線取扱主任者が職務を行うことができない期間中，代理者を選任しなければならない。なお，その期間が 30 日に満たない場合には，法第 37 条第 3 項の規定による届出を要しない（則第 33 条第 4 項）。

管 理 測 定 技 術

問 1 γ 線スペクトロメトリに関する次の I、II の文章の [] 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。

I γ 線スペクトロメトリにおいては、スペクトロメータの γ 線検出部の物質と γ 線がどのような相互作用をするかによって、いろいろなパルス波高スペクトルが得られる。 γ 線が検出部に入射すると、電子、陽電子、コンプトン散乱 γ 線、あるいは [A] に伴う光子などが放出される。 γ 線の全エネルギーが検出部に付与されると、パルス波高スペクトル上に [B] ピークとして計数される。生成された高エネルギーの荷電粒子や、その [C] で生じた光子が検出部外に逃れた場合には、コンプトン効果の場合に限らず、[B] ピークから低いエネルギー側にずれて計数されることがある。

光電効果が起きると原子の [D] に空席が生じるが、この空席が電子で埋められる際に [E] 又は [F] が放出される。これらのうち、前者は直接電離により検出部にエネルギーを付与する。一方、後者は前者に比べて検出部の外に逃れやすいため、スペクトル上に [G] ピークが生じる場合がある。この現象は、検出部の物質の [H] が高く、検出部の厚みが薄い場合に生じやすい。

コンプトン効果では、パルス波高スペクトルは連続分布となる。しかし、[I] が検出部内で再度 [J] を起こした後、[K] により検出部にエネルギーを与えると [L] ピークが形成される。

電子対生成では、この相互作用が起きるために必要なしきいエネルギーを差し引いた残りのエネルギーを電子と陽電子が分け合う。この際、[A] が要因となり放出される光子の検出過程により、2つの [M] ピークが生じる。

以上の要因の他、核種の壊変において複数の γ 線が短時間に引き続いて放出される場合には、それら γ 線の相互の組合せに対応した [N] ピークが形成されることがある。

<A～H の解答群>

- | | | | | |
|-----------|-----------------------|----------|----------|--------|
| 1 電子軌道 | 2 全吸収 | 3 サム | 4 エスケープ | 5 制動放射 |
| 6 内部転換電子 | 7 特性 X 線 | 8 オージェ電子 | 9 原子番号 | 10 密度 |
| 11 コンプトン端 | 12 コンプトン散乱 γ 線 | 13 励起レベル | 14 陽電子消滅 | |

<I～N の解答群>

- | | | | | |
|----------------------|----------|-----------|-----------|---------|
| 1 全吸収 | 2 光電効果 | 3 コンプトン効果 | 4 電子対生成 | 5 エスケープ |
| 6 コンプトン散乱 γ 線 | 7 コンプトン端 | 8 サム | 9 コンプトン電子 | |
| 10 吸収端 | 11 カスケード | | | |

II 放射性核種 ^{46}Sc の点線源（壊変率： n_0 ）を Ge 検出器の近傍に置き、 γ 線のパルス波高スペクトルを測定した。この ^{46}Sc は下図に示すように壊変する。0.889 MeV のエネルギー準位の半減期は 4 ps であり十分に短く、放出される 2 つの γ 線（ γ_1 線と γ_2 線）の放出は [O] 事象とみなすことができる。

このため、 γ_1 線と γ_2 線について、

γ_1 線のピーク効率を ε_1 ,

γ_2 線のピーク効率を ε_2 ,

γ_1 線の全計数効率を ε_{T1} ,

γ_2 線の全計数効率を ε_{T2} ,

また、 γ_1 線の正味のピーク計数率を n_1 ,

γ_2 線の正味のピーク計数率を n_2 ,

サムピークの正味の計数率を n_{12}

で表すと、次の (1) から (3) の 3 つの関係式が得られる。

$$n_1 = n_0 (\text{ア}) \varepsilon_1 \quad (1)$$

$$n_2 = n_0 (\text{イ}) \varepsilon_2 \quad (2)$$

$$n_{12} = n_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (3)$$

さらに、 γ_1 線と γ_2 線を合わせた全スペクトルの正味の計数率 (n_T) は、 $n_T = n_0 (\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} - \text{ウ})$ で与えられるので、この線源の壊変率 (n_0) は、 $n_0 = n_T + \text{エ}$ で求めることができる。この方法は、 γ 線のパルス波高スペクトルに着目した比較的簡便な放射能測定法であり、 P 法と呼ばれる。

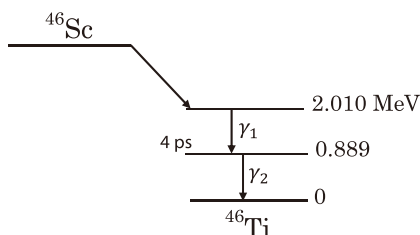


図 ^{46}Sc の壊変図式

<O, P の解答群>

- 1 ピーク弁別 2 スペクトル分析 3 全吸収ピーク 4 サムピーク
5 定立体角 6 同時 7 競合 8 背反

<ア～エの解答群>

- 1 ε_1 2 ε_2 3 $\varepsilon_{T1} \varepsilon_{T2}$ 4 $\varepsilon_1 \varepsilon_2$ 5 $\frac{n_1 n_2}{n_{12}}$ 6 $\frac{n_1 n_2}{n_T}$ 7 $\frac{n_T n_2}{n_1}$
8 $\frac{n_T n_1}{n_2}$ 9 $1 - \varepsilon_1$ 10 $1 - \varepsilon_2$ 11 $1 - \varepsilon_{T1}$ 12 $1 - \varepsilon_{T2}$

〔解答〕

- I $\text{A} - 14$ $\text{B} - 2$ $\text{C} - 5$ $\text{D} - 1$ $\text{E} - 8$ $\text{F} - 7$
 $\text{G} - 4$ $\text{H} - 9$ $\text{I} - 6$ $\text{J} - 3$ $\text{K} - 2$ $\text{L} - 1$
 $\text{M} - 5$ $\text{N} - 8$

注) A：陽電子は、物質中で止まるまでは電子と同じと考えてよいが、止まると電子と結合して消滅する。これを陽電子消滅といい、このとき消滅放射線と呼ばれる 0.511 MeV の光子を互いに反対方向に 2 本放出する。

E, F:「前者は直接電離により」という直後の文章から E の解答には直接電離作用を有する荷電粒子である「オージェ電子」が該当し, F には「特性 X 線」が該当する。

G: $\gamma(X)$ 線のエネルギーから特性 X 線のエネルギーを差し引いた位置に特性 X 線エスケープ・ピークと呼ばれるピークが現れる。Ge 検出器で低エネルギー $\gamma(X)$ 線を測定するときに観察され, NaI(Tl) シンチレータなどでは分解能が低いので全吸収ピークと特性 X 線エスケープ・ピークは分離できない。

H: 光電効果は, エネルギーの低い光子が原子番号の大きい物質に入射したときに寄与が大きい。

J, K, L: 2 回コンプトン効果を起こした場合が問題文では記されているが, 1 回目のコンプトン効果による散乱 γ 線が外に逃げ出さずに検出器の中で光電効果を起こせば, 全吸収ピークを形成する。

M: 2 本の消滅放射線のうち, 1 本又は 2 本が検出器と相互作用することなく外に逃げると全吸収ピークから 0.511 MeV, 1.022 MeV 低い位置に「シングルエスケープ・ピーク」, 「ダブルエスケープ・ピーク」と呼ばれるピークが現れる。

N: ^{60}Co など複数の γ 線をカスケードに放出する核種の場合, 2 本の γ 線が同時 (測定系の分解時間内) に検出器に入射し, 全吸収を起こすと 2 本の γ 線エネルギーの和の位置にサム・ピークが生じる。

II O - 6 P - 4 ア - 12 イ - 11 ウ - 3 エ - 5

注) O, P: サムピーク法は, 2 本以上の放射線をほぼ同時に放出する核種に適用できる放射能の絶対測定法である。各 γ 線のフォトピーク, サムピーク及び全スペクトルの面積 (又は計数率など) により放射能を算出するため, ピーク効率や全効率, すなわち線源と検出器の間の位置関係からくる幾何学的効率の影響を受けることがない。サムピーク法を適用するためには, γ 線のスペクトルが得られること, そのスペクトルからフォトピーク面積やサムピーク面積, スペクトル全体の面積 (又は計数率など) が得られる必要がある。

ア, イ: γ_1 線的全吸収ピーク (ピーク効率 ε_1) に γ_2 線の計数が入り込まない必要がある。今, γ_2 線的全計数効率 ε_{T2} だから, γ_2 線が計数されない確率は $(1 - \varepsilon_{T2})$ となる。一方, γ_2 線の計数に γ_1 線の計数が入り込まない確率は $(1 - \varepsilon_{T1})$ となる。

ウ: スペクトルにおいて, γ_1 線と γ_2 線が互いに重なり合う部分, すなわち γ_1 線と γ_2 線がともに検出される確率 (サムピーク形成) は, $\varepsilon_{T1} \times \varepsilon_{T2}$ である。 γ_1 線及び γ_2 線を合わせた計数には, 同時に計数された部分が重なっているため, これを差し引く必要がある。したがって, その全計数効率は $(\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1} \times \varepsilon_{T2})$ となる。

エ: 式 (1) を ε_1 について解くと,

$$\varepsilon_1 = \frac{n_1}{n_0(1 - \varepsilon_{T2})} \dots\dots\dots (1)'$$

式 (2) を ε_2 について解くと,

$$\varepsilon_2 = \frac{n_2}{n_0(1 - \varepsilon_{T1})} \dots\dots\dots (2)'$$

(1)' 及び (2)' を (3) に代入する。

$$n_{12} = n_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 = n_0 \left[\frac{n_1}{n_0(1 - \varepsilon_{T2})} \right] \left[\frac{n_2}{n_0(1 - \varepsilon_{T1})} \right] = \frac{n_1 n_2}{n_0(1 - \varepsilon_{T2})(1 - \varepsilon_{T1})}$$

$$= \frac{n_1 n_2}{n_0 (1 - \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T1} \varepsilon_{T2})}$$

$$1 - \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T1} \varepsilon_{T2} = \frac{n_1 n_2}{n_0 n_{12}}$$

$$\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1} \varepsilon_{T2} = 1 - \frac{n_1 n_2}{n_0 n_{12}}$$

$$\text{設問ウの入っている式より, } \varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1} \varepsilon_{T2} = \frac{n_T}{n_0}$$

したがって,

$$\frac{n_T}{n_0} = 1 - \frac{n_1 n_2}{n_0 n_{12}}$$

$$n_T = n_0 \left(1 - \frac{n_1 n_2}{n_0 n_{12}} \right) = n_0 - \frac{n_1 n_2}{n_{12}}$$

$$n_0 = n_T + \frac{n_1 n_2}{n_{12}}$$

このように、計数効率を表す ε の項が消去され、壊変率の計算が効率に影響されなくなることが分かる。

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

Ⅰ 中性子は電荷を有しない粒子であるので、中性子が直接検出されるのではなく、中性子による核反応や軽い原子核との衝突によって生じた荷電粒子を検出することによって間接的に検出される。

低速の中性子の検出には、主に (n, α) 反応、 (n, p) 反応などが用いられるが、この際、反応の Q 値が[A]、すなわち[B]反応であることが必要である。このうち、最もよく用いられるのは $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応であるが、熱中性子の場合、生成する ^7Li の約 94% が 0.48 MeV の励起状態に、残りの約 6% が直接基底状態になる。直接基底状態になる場合の Q 値は 2.79 MeV である。このエネルギーが運動量保存則にしたがって α 粒子と基底状態の ^7Li 核とに分配され、 α 粒子の運動エネルギー E_α は[ア] MeV、 ^7Li 核の運動エネルギー E_{Li} は[イ] MeV となる。 ^7Li 励起状態を経由する場合には、 α 粒子の運動エネルギーと ^7Li 励起核の運動エネルギーの和は[ウ] MeV であり、これが α 粒子と ^7Li 励起核とに分配され、 α 粒子の運動エネルギー E'_α は[エ] MeV、 ^7Li 励起核の運動エネルギー E'_{Li} は[オ] MeV となる。なお、 ^7Li 励起状態を経由する場合は、さらに 0.48 MeV の γ 線が放出され、基底状態になる。

高濃縮 ^{10}B を気体状の BF_3 とし、比例計数管の計数ガスとしたものを BF_3 比例計数管といい、中性子の計測にしばしば用いられる。この場合、計数ガス中で熱中性子との核反応が起きると、計数ガスに 2.79 MeV もしくは[ウ] MeV のエネルギーが与えられる。いずれの場合でも計数管への印加電圧をプラトー領域に設定すれば、これらの反応をほぼ 100% の効率で計数することが可能である。0.48 MeV γ 線はガス中で相互作用をする確率は少ない。仮に相互作用を起こしたときでも、このときは α 粒子と Li 反跳核とによって、[ウ] MeV に相当するパルス信号も同時に検出されるので、パルス数の計測にとって、その影響はほとんどない。ただし、中性子との反応が計数管内壁に近い場

主任者 コーナー

所で生じたとき、計数ガスに必ずしも全エネルギーが付与されず、パルス波高が減少する場合がある。これを 効果といっている。

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応の断面積は非常に大きく、特に熱中性子に対して感度の高い測定ができる。断面積は中性子の速度を v とすると、 に比例する。これは、中性子束の解析にとって都合のよい特性である。

<A~Dの解答群>

- 1 正 2 負 3 吸熱 4 発熱 5 共鳴 6 弾性 7 励起 8 壁
9 反跳 10 クエンチング 11 v 12 $\frac{1}{\sqrt{v}}$ 13 $\frac{1}{v}$

<ア~オの解答群>

- 1 0.48 2 0.51 3 0.67 4 0.75 5 0.84 6 1.01 7 1.16 8 1.47
9 1.53 10 1.78 11 2.31 12 2.79

II BF₃ 比例計数管は特に熱中性子に対して高い感度を有するが、この計数管の周りをポリエチレン、パラフィンなどの を多く含む物質でとり囲み、中性子を効率的に させれば、高速の中性子の測定もできる。これを、一般に 型中性子検出器といい、そのエネルギー特性は 材の厚さや形状、種類によって調節することができる。例えば、このような利用として、エネルギー特性を 換算係数曲線に するようにすると、中性子についてのエネルギー情報なしに、中性子による を広いエネルギー範囲にわたって直読することができる。このような中性子測定器を歴史的経過から と呼ぶこともある。また、エネルギー特性をほぼ平坦にしたものがあり、これを と呼んでいる。そのほか、厚さの異なるいくつかの検出器の応答の差から、中性子エネルギー分布に関する情報を得る手法も用いられている。

<E~Jの解答群>

- 1 重水素 2 水素 3 炭素 4 カドミウム 5 レムカウンタ
6 カウンタテレスコープ 7 ロングカウンタ 8 吸収線量 9 1 cm 線量当量
10 組織加重係数 11 逆比例 12 適合 13 反跳 14 減速 15 吸収

III 核反応を利用した中性子検出器として $^3\text{He}(\text{n}, \text{p})$ 反応を利用した ^3He 比例計数管もよく用いられる。この反応の Q 値は 0.765 MeV である。この場合、単に中性子の検出にとどまらず、高速中性子のスペクトロメータとしても用いることができる。このときのパルス波高は中性子のエネルギーに を加えたものとなる。

の場合には、軽い原子核、特に水素核との衝突による反跳陽子の検出を介して中性子を計測することもできる。例えば CH₄ や水素を充填した比例計数管、液体シンチレーションカウンタなどである。ただし、この場合、入射中性子のエネルギー E_n が線スペクトルであっても、反跳陽子のエネルギー分布が 0 から までの 連続分布となるので、中性子のエネルギー解析が複雑となる。

<K~Oの解答群>

- 1 ^2H 2 ^3H 3 ^2He 4 ^3He 5 γ 線エネルギー 6 反跳エネルギー
7 Q 値 8 He の励起エネルギー 9 高速中性子 10 熱外中性子 11 E_n
12 $\frac{1}{2}E_n$ 13 ボルツマン分布に従う 14 一様の 15 ガウス分布に従う

〔解答〕

- I A - 1 B - 4 C - 8 D - 13 ア - 10 イ - 6
ウ - 11 エ - 8 オ - 5

注) ア, イ: α 粒子の質量は 4 であるから, Q 値 $= E_\alpha + E_{\text{Li}}$, 分配される運動エネルギーと粒子の質量の積は互いに等しいため, α 粒子に分配される運動エネルギー E_α は

$$E_\alpha = 2.79 \times 7 / (4 + 7) = 1.78 \text{ [MeV]}$$

Li 核の運動エネルギー E_{Li} は,

$$E_{\text{Li}} = 2.79 \times 4 / (4 + 7) = 1.01 \text{ [MeV]} \quad \text{又は, } 2.79 - 1.78 = 1.01 \text{ [MeV]}$$

ウ: ^7Li 励起状態を経由する場合には,

$$2.79 - 0.48 = 2.31 \text{ [MeV]} \text{ のエネルギーが } \alpha \text{ 粒子と Li 粒子に分配される。}$$

エ, オ: ウのエネルギーを, ア, イと同じ計算によって算出する。

C: イオンの一方が壁に吸収されてエネルギーの一部しか計数管に付与しなくなる現象を壁効果という。

D: $1/v$ 法則 熱中性子の反応断面積は中性子の速度が大きくなるにつれて小さくなり, 速度 v の逆数に比例 (反比例) する。これは中性子が相手核の近くを通過する時間が $1/v$ に比例して短くなるためである。

- II E - 2 F - 14 G - 9 H - 12 I - 5 J - 7

注) J: ロングカウンタ 10 keV ~ 数 MeV 程度の広い中性子エネルギーにわたってエネルギー依存性の小さい, 検出感度がほぼ一定の中性子検出器。主に中性子フルエンス率の測定に使用される。

- III K - 2 L - 7 M - 9 N - 11 O - 14

注) K, L: 単一エネルギーの中性子線は, $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反応 ($Q = 0.765 \text{ MeV}$) により, 中性子エネルギーと Q 値の和に相当する位置にピークを形成するので, ピーク位置から中性子エネルギーが求められる。 ^3He 比例計数管のほか, $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反応 ($Q = 4.8 \text{ MeV}$) を利用した検出器 (LiI (Eu) シンチレータ, Li ガラスシンチレータ, Li サンドイッチ・スペクトロメータ) がある。

M, N, O: エネルギー E_n の中性子による反跳陽子のパルス波高分布は, 0 から E_n までの単純な長方形となる。そこで, 逆にエネルギー未知の中性子について測定した波高分布から中性子エネルギーを推定することができる。アンフォールディング法 (検出器で得られるパルス波高分布を, 検出器の中性子に対する応答関数を用いて, 中性子エネルギースペクトルに変換する方法) と呼ばれる方法である。中性子と陽子の弾性散乱 (反跳陽子反応) を利用するので水素を多く含む, 液体シンチレータ, プラスチックシンチレータ, H_2 ガス比例計数管などが用いられる。

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

I 現在, 数多くの放射線発生装置が様々な目的で使用されている。放射線発生装置の管理においては, 放射化するメカニズムについて理解しておくことが必要である。

我が国では, 放射線発生装置の種類では電子加速器が最も多く設置されている。電子加速器の利用としては高エネルギーの電子を加速して直接対象物に照射する場合と, 電子をターゲット (金属な

ど)に照射して発生する **A** を対象物に照射する場合とがある。後者の場合、10 MeV 以上の電子線をターゲットに照射すると **B** が起こり、ターゲットやその近傍が放射化することがある。**B** は重金属では 10 MeV 程度でも起こるが、酸素などの軽元素では 20 MeV 程度にならないと起きない。**B** によって二次的に発生する **C** は周辺部に広がり、微弱ではあるが放射化する可能性がある。例えば加速器の構造材の鉄やステンレス中に ^{60}Co が検出されることがあるのは、わずかに含まれているコバルトの **D** による。

サイクロトロンは **E** を加速するのに適しており、放射性同位元素を製造するのに使用されることが多い。加速エネルギーが 10 MeV 程度では重金属元素の核反応は起きないが、軽元素では起こる。**E** が標的物質中で停止するまでの距離を **F** という。加速エネルギーが数十 MeV 程度では標的中で停止するため、狭い領域に強い放射能が生じることになる。このため、ターゲット近傍は局所的に高い線量率となっている可能性があることから、サイクロトロン室内で作業する場合には、線量の減衰を待つなど被ばくの低減に努める必要がある。また、標的物質中で二次的に発生する **C** によって周辺部も放射化するところから、加速器室内に持ち込む物品に注意する。

＜A～Fの解答群＞

- | | | | | |
|----------|-----------------|---------|-----------|--------|
| 1 励起 X 線 | 2 即発 γ 線 | 3 制動放射線 | 4 中性子捕獲反応 | 5 光核反応 |
| 6 核破碎反応 | 7 中性子 | 8 電子 | 9 荷電粒子 | 10 中間子 |
| 12 阻止能 | 13 平均自由行程 | | | 11 飛程 |

II 軽元素では、サイクロトロンを用いて製造できる放射性核種は、その安定同位体比べて G の数が少なく、H する性質をもつものが多い。次の表は核医学診断の手法の一つである I での診断薬調製にしばしば用いられる放射性同位元素を製造する際に利用される反応を示したものである。表中の (1) から (4) で製造される放射性同位元素は、順に J、K、L 及び M である。

	標の核	入射粒子	放出粒子	生成核	半減期 (分)
(1)	^{14}N	d	n	J	2.04
(2)	^{14}N	p	α	K	20.4
(3)	^{16}O	p	α	L	9.97
(4)	^{18}O	p	n	M	109.8

また、を標的核 ^{12}C から製造するには 反応を利用することができ、を標的核 ^{20}Ne から製造するには 反応を利用することができる。

表中の放射性同位元素はいずれも半減期が短い。それらのうち、1 GBq の放射能が約 400 分経過後に 1 kBq にまで減衰するのは

P

 である。

＜G～I の解答群＞

- | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---|----|---|----------------------|---|--------------|---|--------------|---|--------|
| 1 | 中性子 | 2 | 陽子 | 3 | 電子 | 4 | β^- 壊変 | 5 | β^+ 壊変 | 6 | 核異性体転移 |
| 7 | PET (陽電子放射断層撮影) | | | 8 | SPECT (シングルフォトン断層撮影) | | | | | | |

＜J～M の解答群＞

- | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|----|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|
| 1 | ¹¹ C | 2 | ¹² C | 3 | ¹³ N | 4 | ¹⁵ N | 5 | ¹⁴ O | 6 | ¹⁵ O | 7 | ¹⁷ O | 8 | ¹⁷ F |
| 9 | ¹⁸ F | 10 | ¹⁹ F | | | | | | | | | | | | |

<N, O の解答群>

1 (p, n) 2 (d, p) 3 (d, n) 4 (d, α) 5 (α, n) 6 (α, p)

<P の解答群>

1 ^{11}C 2 ^{12}C 3 ^{13}N 4 ^{15}N 5 ^{14}O 6 ^{15}O 7 ^{17}O 8 ^{17}F
9 ^{18}F 10 ^{19}F

Ⅲ 1 GBq の ^{18}F 標識化合物 (1 cm 線量当量率定数: $0.165 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) がガラスバイアル中に 1 cm^3 の液体として入っている。

線源とみなし、バイアルの遮蔽効果を見做できるとした場合に 50 cm の距離での 1 cm 線量当量率は $\boxed{\text{Q}}$ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ となる。そこで、鉛で遮蔽を行うことにし、線源の出し入れにはトンクを使用することにした。鉛の密度は $11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、質量減弱係数は $0.13 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ とする。半価層及び 1/10 価層はそれぞれ $\boxed{\text{R}}$ cm 及び $\boxed{\text{S}}$ cm となる。したがって、バイアルが厚さ 5 cm の鉛遮蔽体で囲まれている状態での線量はおおよそ $\boxed{\text{T}}$ 分の 1 に減衰することになる。

<Q の解答群>

1 16.5 2 82.5 3 165 4 660 5 1,650

<R, S の解答群>

1 0.2 2 0.5 3 1.0 4 1.6 5 2.0 6 3.2

<T の解答群>

1 10 2 50 3 100 4 500 5 1,000 6 2,000

〔解答〕

Ⅰ $\boxed{\text{A}}$ - 3 $\boxed{\text{B}}$ - 5 $\boxed{\text{C}}$ - 7 $\boxed{\text{D}}$ - 4 $\boxed{\text{E}}$ - 9 $\boxed{\text{F}}$ - 11

注) 光核反応は高エネルギー光子により、原子核のエネルギー準位が励起されて生じる核反応。各原子に固有の光子エネルギー (しきい値) 以上で (γ, γ') , (γ, n) , (γ, p) などの核反応が起こる。これらの核反応により粒子が放出されると原子核は放射性核種となる。また、放出された中性子により周辺物質が中性子捕獲反応を起こして放射化する。

Ⅱ $\boxed{\text{G}}$ - 1 $\boxed{\text{H}}$ - 5 $\boxed{\text{I}}$ - 7 $\boxed{\text{J}}$ - 6 $\boxed{\text{K}}$ - 1 $\boxed{\text{L}}$ - 3
 $\boxed{\text{M}}$ - 9 $\boxed{\text{N}}$ - 3 $\boxed{\text{O}}$ - 4 $\boxed{\text{P}}$ - 1

注) L ~ O: ^{13}N の製造は, $^{12}\text{C} + ^2\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + n - 0.2811 \text{ MeV}$, ^{18}F の製造は,
 $^{20}\text{Ne} + ^2\text{H} \rightarrow ^{18}\text{F} + ^4\text{He} + 2.7958 \text{ MeV}$ の反応を利用する。

P: 半減期を次により計算し、表中の半減期に最も近い核種の ^{11}C となる。

$$\text{半減期} = \frac{\text{経過時間} \times \log 2}{\log \left(\frac{\text{初めの数量}}{\text{減衰後の数量}} \right)} = \frac{400 \times 0.301}{\log \left(\frac{1 \times 10^9}{1 \times 10^3} \right)} = \frac{120.4}{6} = 20.1$$

(別解) 400 分経過すると 10^6 分の 1 に減衰する。10 半減期経つと放射能は約 1000 分の 1 になる (正確には 1024 分の 1) ことから、そのまた 1000 分の 1 である 10^6 分の 1 になるためには 20 半減期だけ経過したと考えられる。したがって、400 分が約 20 半減期であれば、1 半減期は 20 分くらいと考えることができる。

Ⅲ $\boxed{\text{Q}}$ - 4 $\boxed{\text{R}}$ - 2 $\boxed{\text{S}}$ - 4 $\boxed{\text{T}}$ - 5

注) Q: 点線源とみなすと, 1 cm 線量当量率定数 Γ の核種 A Bq の距離 L における線量等量率 R は,

主 任 者 コーナー

$$R = I \times A \times \left(\frac{L}{1}\right)^{-2} = 0.165 \times 1 \times \frac{10^9}{10^6} \times \left(\frac{0.5}{1}\right)^{-2} = 660 \mu\text{Sv/h}$$

$$R, S: \text{質量減弱係数 } \mu/\rho (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) = \frac{\text{線源弱係数 } \mu (\text{cm}^{-1})}{\text{密度 } \rho (\text{g cm}^{-3})}, \text{線量減弱係数 } \mu (\text{cm}^{-1}) = \frac{\ln(2)}{\text{半価層 } HVL (\text{cm})}$$

$$\text{半価層 } HVL (\text{cm}) = \frac{\ln(2)}{\mu (\text{cm}^{-1})} = \frac{0.693}{0.13 \times 11} = 0.485 \text{ cm},$$

$$1/10 \text{ 価層 } TVL (\text{cm}) = \frac{\ln(10)}{\mu (\text{cm}^{-1})} = \frac{2.30}{0.13 \times 11} = 1.61 \text{ cm}$$

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

I GM 計数管は A , B を放出する核種による表面汚染測定にしばしば用いられる。しかし、C のような数十 keV 以下の A のみを放出する核種については、検出は困難である。試料-検出器間に厚みの異なるアルミニウム吸収体を配置して計数することで得られる A の D は、核種の同定に有用な情報である。

バックグラウンドの低減には空間線量率を低く保つことが有効である。換気による室内空気の交換は、天然放射性核種 E に起因するバックグラウンドを低く保つのに効果がある。

<A～D の解答群>

- 1 α 線 2 β 線 3 γ 線 4 中性子線 5 ^3H 6 ^{32}P 7 ^{35}S
 8 ^{90}Sr 9 飛程 10 飛跡数 11 熱量 12 蛍光

<E の解答群>

- 1 ^{14}C 2 ^{40}K 3 ^{226}Ra の子孫核種

II 液体シンチレーション計数装置は排水の放射能濃度の測定にも利用される。一定量の試料をバイアル中でシンチレーションカクテルと混合して測定する。バックグラウンドを低く保つ必要がある場合には、プラスチックバイアルも用いられるが、ガラスバイアルでは F 含有量が低い素材が利用される。シンチレーションカクテルには G を含むものが用いられる。一方、対象核種が ^{32}P の場合には、シンチレーションカクテルを使わないで、H を検出する方法もある。試料が着色している場合には、シンチレーションカクテルと混合した後、I を起こすことがあるので、あらかじめ着色成分を除去することがある。有機物が原因の場合には J への吸着、鉄分が原因の場合には K などが着色成分の除去に有効である。いずれの場合も、測定対象の放射性核種の挙動には注意を要する。

<F～J の解答群>

- 1 ナトリウム 2 マグネシウム 3 カリウム 4 酸化剤 5 乾燥剤
 6 乳化剤 7 中性子 8 チェレンコフ光 9 δ 線 10 放射線分解
 11 色クエンチング 12 気体発生 13 シリカゲル 14 活性炭 15 塩化カルシウム

<K の解答群>

- 1 沈殿生成 2 煮沸 3 凍結 4 超音波洗浄

III 液体シンチレーション計数装置は α 線放出核種の測定にも利用できる。L 元素では α 線放出核種が各元素に知られており、その捕集にはイオン交換樹脂による分離の他に M によるイオ

ン対抽出などが適用されてきた。これ以外に、壊変系列をつくる天然の放射性核種にも α 線放出核種が多く知られている。 α 線検出器としては がよく知られているが、厚みの小さい試料を調製して測定する必要がある。

廃液の測定の際には、化学分離による捕集の効率も測定効率とともに考慮する必要がある。廃液 20 L から 1 L を分取して、濃縮・化学分離により、10 mL の分析検体を得た。この検体中には元の廃液 1 L 中の ^{210}Po の 90% が捕集されたと見積もられた。この検体から 1 mL を分取して、10 mL ミニバイアル中でシンチレーションカクテルと混合した。液体シンチレーション計数装置で計測したところ、60 cpm であった（検出効率：90%）。元の廃液中の ^{210}Po の濃度は $\text{Bq}\cdot\text{mL}^{-1}$ となる。

<L~N の解答群>

- 1 アルカリ金属 2 アルカリ土類金属 3 ランタノイド 4 アクチノイド
5 β -ジケトン 6 オキシシ 7 リン酸トリブチル (TBP) 8 Si 表面障壁型検出器
9 Ge(Li) 検出器 10 Si(Li) 検出器

<アの解答群>

- 1 1.2×10^{-3} 2 6.0×10^{-3} 3 8.4×10^{-3} 4 1.2×10^{-2} 5 6.0×10^{-2}

IV Ge 検出器は 放出核種の分析に用いられる。検出器は、バックグラウンド低減のために、鉛などの遮蔽体中に設置される。バックグラウンド は ^{40}K 、 などの天然放射性核種による。核種別の定量には に着目し、その強度から各核種の濃度を算出する。NaI(Tl) シンチレーション検出器に比べると、 が著しく高く、核種分析に化学分離を要しない場合も多々見受けられるようになった。

<O, P の解答群>

- 1 α 線 2 β 線 3 γ 線 4 中性子線 5 ^{134}Cs 6 ^{206}Pb 7 ^{208}Tl
8 ^{234}U

<Q, R の解答群>

- 1 全エネルギーピーク 2 コンプトン端 3 エスケープピーク 4 オージェ効果
5 エネルギー分解能 6 パルス高 7 検出効率

〔解答〕

I -2 -3 -5 -9 -3

注) A, B : GM 計数管は、計数管内に入射した放射線が、GM 管内の気体を電離し、電子などを発生させて計測を行う。また、入射窓には、雲母などが用いられているので、 α 線やトリチウムの弱い β 線は雲母で遮蔽されるため、GM 管内に入射できない。中性子線は、GM 計数管内の気体を電離させる作用がない。

D : アルミニウム吸収体による遮蔽効果を利用することにより、 β 線の飛程が分かる。

E : ^{226}Ra の子孫核種である ^{222}Rn は不活性ガスのため、換気の悪い室内に留まりやすい。

II -3 -6 -8 -11 -14 -1

注) F : 通常のガラスバイアルの成分にはカリウムが含まれており、このカリウム中に放射性核種である ^{40}K が含まれている。

G : 乳化剤を入れることにより、含水量の多い試料でも高い計数効率で測定ができる。

H : ^{32}P など、高エネルギーの β 線を放出する液体状の放射性同位元素は液体シンチレータを使わず、チェレンコフ光により測定し、放射エネルギーの測定ができる。

主任者 コーナー

相対論によると、真空中では光速よりも速い速度の粒子は存在しないと説明されているが、媒体中では必ずしもそうではない。チェレンコフ光は、荷電粒子が媒体中で同じ媒体中における光速よりも早く運動する際に生ずる光である。実用上、 ^{32}P ($\beta_{\text{max}}: 1.71 \text{ MeV}$), ^{90}Y (2.3 MeV) などのエネルギーの高い β 線放出核種が液体シンチレーション測定装置を用いて測定されている。

I：試料が着色している場合、シンチレータと混合すると測定試料全体が着色し、シンチレータから発生した蛍光が吸収され、計数効率が低下する。この現象を色クエンチングと呼ぶ。

Ⅲ L - 4 M - 7 N - 8 ア - 4

注) N: Si 表面障壁型検出器: α 線 Ge(Li) 検出器: γ 線 Si(Li) 検出器: 低エネルギー γ 線

ア: 液体シンチレーション計数装置測定時における検体 1 mL 中の ^{210}Po 放射エネルギーは、60 cpm を cps 表示に変換すると 1 cps。また、検出効率: 90%なので、 $1 \text{ cps} / (90\% / 100\%) = 1.1 \text{ Bq/mL}$ となる。1 L の廃液を分取し、濃縮・化学分離により 10 mL の分析検体となった。

この時の ^{210}Po の捕集効率が 90%であるので

$1.1 \text{ Bq/mL} / (90\% / 100\%) / (1000 \text{ mL} / 10 \text{ mL}) = 1.2 \times 10^{-2} [\text{Bq/mL}]$ となる。

Ⅳ O - 3 P - 7 Q - 1 R - 5

注) P: ^{134}Cs : 人工放射性核種 ^{206}Pb : ウラン系列の安定同位体

^{208}Tl : トリウム系列の γ 線放出核種 ^{234}U : ウラン系列の α 線放出核種

Q: スペクトル分析による核種別定量には、放射エネルギーに比例する全エネルギーピーク (全吸収ピーク) を用いる。

問 5 次の I ~ III の文章の の部分に入る最も適切な語句又は記号を、それぞれの解答群から 1 つだけ選ぶ。

I 内部被ばくは、放射性物質が経口、吸入、経皮 (創傷を含む) により体内に取り込まれることにより起こる。経口摂取された放射性物質が消化管から吸収されると、血液中に移行し、それぞれの化学的性質や物理的性状に応じて特定の臓器・組織に分布する。例えば、 A やセシウムは全身にほぼ均等に分布するが、 B, C 及びラジウムは骨に、 D は甲状腺に集積する。また C は腎臓にも沈着しやすく、金属毒性のため腎障害の原因物質として知られている。物理的性状により臓器親和性が決まるものとしてはコロイドがあげられる。コロイド状の鉄や金が E 系の細胞に取り込まれることが知られている。

粒子状の放射性物質を吸入した場合、 F により沈着する呼吸器系の部位が異なる。 F が大きい場合、主に鼻粘膜に沈着するが、不溶性の放射性物質の場合は粘膜上皮細胞による繊毛運動などによって、その多くが排除される。不溶性のプルトニウム化合物を吸入した場合、肺胞壁から体内に吸収されにくく肺に長期に残留し、肺がんの原因になるとともに、少しずつ血中に移行し、 G や骨に集積し、がんの原因になると考えられている。

<A~D の解答群>

- 1 トリチウム 2 コバルト 3 ヨウ素 4 鉄 5 ストロニウム
6 ウラン

<E の解答群>

- 1 神経 2 細網内皮 3 循環器 4 生殖器 5 内分泌

<Fの解答群>

- 1 分子量 2 原子番号 3 粒径 4 物理的半減期

<Gの解答群>

- 1 心臓 2 精巣 3 肝臓 4 大脳 5 甲状腺

II 体内に摂取された放射性物質による内部被ばく線量を評価する主な方法として、空气中濃度計算法、体外計測法、バイオアッセイ法等がある。

□Hは、体内の放射性物質から放出される放射線を測定することにより、体内に残留している放射性物質を定性・定量分析する方法で、透過性の高い γ 線、X線を放出する核種に対して用いられるが、 α 線のみ、あるいは□Iのような β 線のみを放出する核種には用いることはできない。全身を測定する装置は、□Jと呼ばれ、体内汚染の有無のスクリーニングや核種の定量分析等の目的に応じた検出器が用いられている。吸入摂取により肺に沈着した ^{239}Pu からL殻電子の放出に伴って発生するエネルギーが13~20 keVの□Kや ^{241}Am から放出されるエネルギーが60 keVの□Lを測定する装置は肺モニタと呼ばれている。

□Mは、内部被ばくした人の生体試料中の放射性物質の量を定性・定量分析し、体内の放射能量を評価する方法である。対象試料として通常よく用いられるものとしては鼻スミアや□Nがある。□Nの分析により得られた測定結果から国際放射線防護委員会(ICRP)により示されている代謝モデルを用いて摂取量を評価するのが一般的である。測定装置としては、□OやICP質量分析計が主として用いられる。□Oによる測定に際しては、試料の着色による測定妨害を防ぐために、試料の前処理として過酸化水素添加による脱色操作を施すことがある。

内部被ばく線量評価にあたっては、測定された放射能から体内摂取量を推定し、これに定められた線量係数を乗じて□Pを算出する。

<Hの解答群>

- 1 空气中濃度計算法 2 体外計測法 3 バイオアッセイ法 4 ろ過捕集法
5 モンテカルロ法

<Iの解答群>

- 1 ^{60}Co 2 ^{90}Sr 3 ^{125}I 4 ^{137}Cs 5 ^{192}Ir

<Jの解答群>

- 1 液体シンチレーションカウンタ 2 GM計数管 3 ホールボディカウンタ
4 キュリーメータ 5 電離箱

<K, Lの解答群>

- 1 特性X線 2 オージェ電子 3 制動X線 4 γ 線 5 α 線

<Mの解答群>

- 1 空气中濃度計算法 2 体外計測法 3 バイオアッセイ法 4 ろ過捕集法
5 モンテカルロ法

<Nの解答群>

- 1 血液 2 尿・糞 3 染色体 4 歯のエナメル質 5 毛髪

<Oの解答群>

- 1 α 線スペクトロメータ 2 液体クロマトグラフィー
3 液体シンチレーションカウンタ 4 Ge半導体検出器

主任者 コーナー

5 ホスウィッチ形シンチレーション検出器

<Pの解答群>

1 預託実効線量 2 吸収線量 3 集団実効線量 4 照射線量

5 1 cm 線量当量

Ⅲ 放射性物質を体内摂取した場合、医師の判断に基づき、生物学的影響を低減するための除染治療を行う。除染治療においては、摂取した放射性物質の種類や摂取経路等を踏まえ、適切な方法を選択する。消化管での吸収を低減するためには、胃洗浄や下剤の投与、プルシアンブルーなどの[Q]投与などが行われる。主に腎臓から排泄される核種については[R]の投与が、そして、安定同位体投与により内部被ばくを低減する方法の例としては、トリチウム摂取の際の[S]があげられる。キレート剤による体外排泄促進法では、コバルトや銅などの重金属についてはペニシラミンが、プルトニウムやアメリシウムなどの超ウラン元素については[T]がそれぞれ用いられる。これらの処置は、体外排泄効果をモニタリングしながらその継続の可否を判断する。

<Q~Tの解答群>

1 胆汁排泄促進剤 2 制酸剤 3 制吐剤 4 イオン交換剤 5 利尿剤
6 抗利尿剤 7 水分摂取 8 塩分摂取 9 重炭酸ナトリウム 10 活性炭
11 ジメルカプロール 12 DTPA 13 DHA 14 カリウム

〔解答〕

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

注) E：細網内皮系とは、リンパ管のリンパ洞、脾の静脈洞、肝臓の類洞、骨髓、副腎皮質などの細管の内腔面を覆う細胞よりなる組織でそれらの細胞は異物貪食作用を有している。

F：吸入による放射性物質の沈着には吸収された物質の粒子の大きさが関係する。

極めて小さいものは、肺末端まで到達し得るが、10 μm 以上の粒子は肺胞に到達しないで上部気道に貯留し、すみやかに排出される。粒子が更に大きくなると鼻腔で止まる。

G：吸入によって気道や肺に取り込まれた放射性物質は、粒子の大きさや化学形によって体内移行が若干異なるが、最終的には親和性のある臓器に沈着する。吸入により肺に沈着したプルトニウム化合物は、年の単位で肺に残留し、その間にごくわずかの量が体内に吸収され、その最終の落ち着き先は主として肝臓と骨である。それぞれの臓器・組織は長い期間にわたって α 線照射を受けることになる。

II [H] - 2 [I] - 2 [J] - 3 [K] - 1 [L] - 4 [M] - 3
[N] - 2 [O] - 3 [P] - 1

注) K, L：肺モニタは、肺に吸入沈着した ^{239}Pu 等の放射性物質を計測するための装置である。肺モニタによる肺沈着プルトニウムの定量は、このプルトニウムから放出される特性X線とプルトニウムと類似した体内挙動を示す ^{241}Am の γ 線を身体外部から検出することにより行われている。

O：液体シンチレーション測定の際に最も考慮を要するのはクエンチング（消光作用）現象である。例えば黄色、赤色を呈する物質が存在すると溶質の発光スペクトルと重複するため、発光した光を吸収してしまう色クエンチング現象が起こる。この現象を防ぐために脱色操作をすることがある。

P：内部被ばくの線量評価においては放射性物質の摂取後の線量率の時間積分を行い、摂取時点（放射線管理上は摂取した年）に被ばくしたものとして取り扱う。これを預託線量という。個々の臓器・組織について見た場合は預託等価線量といい、全身については預託実効線量という。積分期間は、成人で摂取後 50 年間、乳幼児や子供の場合は摂取から 70 歳までの期間である。

Ⅲ Q - 4 R - 5 S - 7 T - 12

注) Q, R, S, T：体内汚染が分かったとき、最初にとられる処置は一般的には胃洗浄、嘔吐剤、瀉下剤、利尿剤などの投与である。場合によっては肺洗浄も考えられる。その後、体内に取り込まれた放射性物質を除去するため、(1) 吸着（イオン交換体などの吸着剤を投与することで放射性核種の排泄を促進）、(2) 希釈（安定同位体などを投与することで放射性核種の排泄を促進）、(3) 錯体形成（DTPA [ジエチレントリアミンペンタ酢酸]、EDTA [エチレンジアミン四酢酸]、ペニシラミンなどのキレート剤を投与することで放射性核種の排泄を促進）などの方法がとられる。どの方法を選択するかは、当該の放射性核種の性質による。

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。

Ⅰ 原子力施設や放射線利用施設等において、業務を遂行する上で放射線に被ばくすることを職業被ばくといい、その限度が定められている。また、放射線業務に従事する者（放射線作業員）に対しては、放射線による障害の発生を防止するために、被ばく線量を把握するための測定を行うことが法令で義務づけられている。

放射線作業員の被ばく形態の大半は A 被ばくであり、積算型個人被ばく線量計を用いた被ばく線量測定が基本となる。現在、我が国で普及している積算型個人被ばく線量計には、素子に対して紫外線による刺激を与えることで発生する蛍光を利用して放射線量を読み出す B や、可視光による刺激を与えることで発生する蛍光を利用して放射線量を読み出す C などがある。

我が国の放射線作業員数は近年増加傾向を示していて、主に D 分野の放射線作業員数の増加による。 D 分野における放射線作業員数は全放射線作業員数の約 50% を占めている。

< A の解答群 >

- 1 内部 2 外部

< B, C の解答群 >

- 1 フィルムバッジ 2 蛍光ガラス線量計 3 電子式個人被ばく線量計
4 光刺激ルミネセンス線量計 5 熱ルミネセンス線量計

< D の解答群 >

- 1 原子力 2 医療 3 教育研究 4 鉱工業

Ⅱ ICRP 1990 年勧告において、航空機の乗務員の宇宙線による被ばくや、一部の高ラドン濃度中での作業など、自然放射線による被ばくも職業被ばくとして取り扱われるようになった。

国内では、放射線審議会において職務として航空機に頻繁に搭乗する乗務員の被ばくに関して、年間 5 mSv を管理目標値とするガイドラインが策定され、各航空会社はこのガイドラインに沿った対応が求められている。

民間航空機が飛ぶ地上 11 km 程度の高さにおける乗務員の被ばくは主に宇宙から飛来する宇宙線による。宇宙線の源は、太陽から放出される粒子と太陽系以外から飛来する E 宇宙線とに大別

主任者 コーナー

される。大気圏内での被ばくの大部分は太陽粒子に比べエネルギーの高い [E] 宇宙線起源のものによる。[E] 宇宙線の組成は 98% が原子核で残り 2% のほとんどが [F] である。原子核のうち 87% が [G]，12% が [H]，残りの 1% がさらに重いもので構成される。

地球の磁気圏に入ってくる [E] 宇宙線の粒子数は太陽活動の影響を受ける。約 11 年の太陽活動周期に合わせ太陽磁場が [I] 場合には地球大気圏まで到達できる [E] 宇宙線の粒子数が増加し、地上や航空機内で受ける宇宙線による被ばく線量は増加する。また、まれではあるが太陽の黒点付近で突然激しい活動が起こり、高エネルギーのプラズマ粒子が大量に放出されることがある。この現象は [J] と呼ばれ、航空機の乗務員が上空で受ける被ばく線量を増加させる原因となり得る。

宇宙線による線量率は高度によって異なり、高々度で高くなる。地上 11 km 程度の高さでは、宇宙線は地表に比べ約 100 倍程となる。地表ではミュー粒子の実効線量への寄与が相対的に大きいのに対し、[K] の寄与は高度とともに急激に増加し、地上 11 km 程度の高さの被ばくでは [K] による被ばくが最も大きな割合を占める。また、宇宙線による線量率は [L] の影響を受けるため、同様な高度を飛行し飛行時間が同程度の場合でも、成田ーシドニー便と成田ーサンフランシスコ便を比較すると [M] の方が被ばく線量は高くなる。成田ーニューヨーク便の往復により乗務員や乗客は約 [N] mSv の被ばくをする。

<E の解答群>

- 1 ブラックホール 2 超新星 3 星雲 4 銀河

<F~H の解答群>

- 1 中性子 2 陽子（水素原子核） 3 パイ粒子 4 電子 5 光子
6 ヘリウム原子核 7 炭素原子核 8 鉄原子核

<I の解答群>

- 1 強い 2 弱い

<J の解答群>

- 1 ゴースト 2 フレア 3 コロナ

<K の解答群>

- 1 中性子 2 陽子 3 パイ粒子 4 電子 5 光子

<L の解答群>

- 1 湿度 2 気圧 3 地磁気 4 気温

<M の解答群>

- 1 前者 2 後者

<N の解答群>

- 1 0.001~0.002 2 0.01~0.02 3 0.1~0.2 4 1~2 5 10~20

Ⅲ ラドンの影響としては、ウラン鉱山などその濃度が非常に高い場所での疫学調査で肺がんの過剰発生が認められている。

被ばくによる健康影響を考える上で重要なラドンには、天然に存在する放射性壊変系列であるウラン系列の途中にあるラジウム [O] が壊変して生成されるラドン [P] と、トリウム系列ラジウム [Q] が壊変して生成されるラドン [R] とがある。通常、ウラン系列のラドン [P] をラドンと呼び、トリウム系列のラドン [R] をトロンと呼ぶ。

岩石や土壤に含まれるラジウム $\boxed{\text{O}}$ が壊変して希ガスであるラドンとなり空气中に散逸する。ラドン自体の被ばく線量に対する寄与は希ガスであるために小さく、ほとんどが子孫核種の吸入による。ラドンの子孫核種は気管や肺胞に付着し、それらから放出される $\boxed{\text{S}}$ が、発がんに関して重要となる。

<O～Rの解答群>

1 216 2 218 3 220 4 222 5 224 6 226 7 228

<Sの解答群>

1 α 線 2 β 線 3 γ 線 4 電子線 5 中性子線 6 陽子線 7 X線

〔解答〕

I $\boxed{\text{A}}$ - 2 $\boxed{\text{B}}$ - 2 $\boxed{\text{C}}$ - 4 $\boxed{\text{D}}$ - 2

注) A：積算型個人被ばく線量計を用いる線量測定は、外部被ばくの測定である。内部被ばくの場合は、ホールボディカウンターや、バイオアッセイ法を用いるため、その時点での内部被ばく線量を測定、又は推定することになり、積算情報を得ることはできない。

B, C：現在、よく用いられている積算型個人線量計は、蛍光ガラス線量計と光刺激ルミネセンス(OSL)線量計である。蛍光ガラス線量計では銀活性リン酸塩ガラスを、また、OSL線量計では酸化アルミニウムが素子として使用される。

D：近年、病院など医療機関におけるPET、CTなどの放射線診断装置の普及により、医療機関における放射線業務従事者数が増加している。

II $\boxed{\text{E}}$ - 4 $\boxed{\text{F}}$ - 4 $\boxed{\text{G}}$ - 2 $\boxed{\text{H}}$ - 6 $\boxed{\text{I}}$ - 2 $\boxed{\text{J}}$ - 2
 $\boxed{\text{K}}$ - 1 $\boxed{\text{L}}$ - 3 $\boxed{\text{M}}$ - 2 $\boxed{\text{N}}$ - 3

注) E：宇宙線の源として、太陽以外から飛来するものを銀河宇宙線と呼ぶ。

F：銀河宇宙線の組成は、98%が原子核で、残りはほとんどが電子である。原子核としては、割合の多い順に、陽子(水素原子核)、ヘリウム原子核、及び、更に重い原子核から成る。

I：太陽の磁場が弱い場合には、銀河宇宙線が太陽に補足される割合が少なくなるため、地球の磁気圏に入ってくる銀河宇宙線は多くなる。

K：高度約3,000 m以上における宇宙線による実効線量は中性子による割合が最も大きい。

L, M, N：宇宙線による線量は地磁気の影響を受けるため、赤道付近では小さく、極付近では大きくなる。したがって、極付近を通過する航空機内では実効線量が若干大きくなる。宇宙線による年間の実効線量は0.1～0.2 mSvほどである。

III $\boxed{\text{O}}$ - 6 $\boxed{\text{P}}$ - 4 $\boxed{\text{Q}}$ - 5 $\boxed{\text{R}}$ - 3 $\boxed{\text{S}}$ - 1

注) 放射性壊変系列には、 ^{238}U から始まるウラン系列、 ^{232}Th から始まるトリウム系列、 ^{235}U から始まるアクチニウム系列、及び ^{237}Np から始まるネプツニウム系列がある。

O, P：ウラン系列に属する元素の質量は4で割ると2余ることから、 $(4n+2)$ 系列とも呼ばれる。したがって、ウラン系列に属するラジウムは ^{226}Ra であり、その娘核種となるラドンは ^{222}Rn である。

Q, R：トリウム系列に属する元素の質量は4で割り切れることから $(4n)$ 系列とも呼ばれ、これに属するラジウムは ^{224}Ra 、ラドンは ^{220}Rn である。

S：希ガスであるラドンが肺に付着し、そこで壊変して生じる子孫核種が出す α 線が、肺がん発生に関与すると考えられている。

物 理 学

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

問 1 1.3 MeV γ 線の運動量 $[\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ はいくらか。次のうちから最も近いものを選べ。

- 1 3.1×10^{-23} 2 6.9×10^{-22} 3 3.9×10^{-21} 4 5.1×10^{-21} 5 3.0×10^{-20}

〔解答〕

2

注) $1\text{ eV}=1.6\times 10^{-19}\text{ J}$ また、 $1\text{ J}=1\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$

γ 線 1 MeV の運動量は 1 MeV/c であるので

$$1.3\text{ [MeV/c]}=\frac{1.3\times 1.6\times 10^{-13}\text{ [J]}}{3.0\times 10^8\text{ [m/s]}}=6.9\times 10^{-22}\text{ [kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

問 2 シンクロトロン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 磁場を用いて粒子を周回させる。
B 高周波電場を用いて粒子を加速する。
C 電子や陽子の高エネルギー加速器として用いられる。
D 粒子をあらかじめ加速する前段の加速器が用いられる。

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

〔解答〕

5

注) シンクロトロンは円形加速器の一種。粒子の加速にあわせて、磁場と高周波電場をコントロールすることによって電子や陽子などの荷電粒子の軌道半径を一定に保ちながら加速を行う。入射器が必要である。

- A：正
B：正
C：正
D：正

問 3 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A μ 粒子は電荷を持った粒子である。
B 安定な原子核のうち、陽子数と中性子数が共に偶数であるものの数は、そのどちらか一方が奇数であるものの数より大きい。

C 電子は陽電子よりも質量が大きい。

D 陽子は中性子よりも質量が大きい。

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

〔解答〕

1

注) A : 正

B : 正

C : 誤 電子と陽電子は質量が同じ。

D : 誤 中性子は陽子よりも質量が大きい。

問 4 特性 X 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 エネルギーは原子核のエネルギー準位の差で決まる。

B エネルギー分布は線スペクトルを示す。

C オージェ電子と競合して放出される。

D 電子が原子核のクーロン場により減速される過程において発生する。

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 エネルギーは軌道電子のエネルギー準位の差で決まる。

B : 正

C : 正

D : 誤 制動 X 線である。

問 5 質量数 20 以上の安定な原子核の核子 1 個当たりの結合エネルギー [MeV] は、次のどの範囲にあるか。

1 0.5~1.0 2 1.0~2.0 3 2.0~5.0 4 5.0~10 5 10~20

〔解答〕

4

注) 質量数 20 以上では原子核の 1 核子当たりの結合エネルギーはほぼ一定で約 8 MeV の値を持つ。

問 6 アルミニウム原子核 ($^{27}_{13}\text{Al}$) の半径は水素原子核 (^1_1H) の半径のおおよそ何倍か。次のうちから最も近い値を選べ。

1 2 2 3 3 4 4 5 5 13

〔解答〕

2

注) 原子核の半径は質量数の $1/3$ 乗に比例する。

問 7 放射性壊変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 α 壊変ではニュートリノが放出されない。

B α 壊変と β^- 壊変は同一核種では起きない。

主任者 コーナー

C β^+ 壊変が起きる核種では競合して EC 壊変が起きる。

D EC 壊変ではニュートリノが放出されない。

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

〔解答〕

2

注) A : 正

B : 誤 例: ^{210}Bi は α 壊変と β^- 壊変をする。

C : 正

D : 誤 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

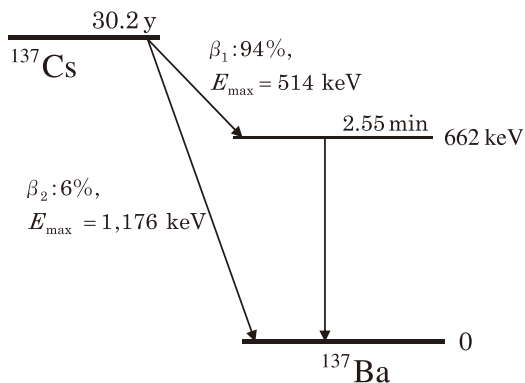
問 8 ^{137}Cs の壊変に際して放出される種々の放射線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A γ 線と内部転換電子とは同時に放出される。

B $E_{\max}=514\text{ keV}$ の β 線 (β_1) と γ 線とは同時に放出される。

C K-X 線と K 殻オージェ電子とは同時に放出される。

D 特性 X 線は内部転換に伴い放出される。



- 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 γ 線と内部転換電子は競合過程である。

B : 誤 662 keV の励起状態は 2.55 min の半減期を持つ。

C : 誤 K-X 線とオージェ電子放出は競合過程である。

D : 正

問 9 サイクロトロンにおいて、磁束密度 B の磁場に垂直な平面内を非相対論的速度 v で運動する粒子 (質量 M , 電荷 ze) が円軌道を 1 周するのにかかる時間は次のうちどれか。

- 1 $\frac{zeM}{2\pi B}$ 2 $\frac{2\pi B}{zeM}$ 3 $\frac{2\pi M}{zeB}$ 4 $\frac{2\pi(ze)^2M}{Bv}$ 5 $\frac{zeB}{2\pi M}$

〔解答〕

3

注) 円軌道の半径を r とおくと, ローレンツ力と円運動の向心力のつり合いから, $zevB = Mv^2/r$ 。したがって, 円軌道を 1 周するのにかかる時間 T は,

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \times \frac{Mv^2}{zevB} = \frac{2\pi M}{zeB}$$

問 10 熱中性子の検出に適した核反応の組合せは, 次のうちどれか。

A ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p}){}^3\text{H}$

B ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$

C ${}^{16}\text{O}(\text{n}, \text{n}'){}^{16}\text{O}^*$

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

E ${}^{197}\text{Au}(\text{n}, \gamma){}^{198}\text{Au}$

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

〔解答〕

2

注) A : 中性子の検出に用いられる。

B : 中性子の検出に用いられる。

C : 非弾性散乱 (n, n') の閾値は高い。

D : ${}^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p}){}^{32}\text{P}$ の閾値は 1 MeV を超える。

E : ${}^{197}\text{Au}$ の (n, γ) の反応断面積は約 100 バーンである。

問 11 次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。

A 2 MeV の α 線の飛程と 1 MeV の陽子線の飛程はほぼ同じである。

B 5 MeV の α 線と 1 MeV の電子線の空気に対する W 値は, α 線の方が電子線より 2 倍大きい。

C 炭素の原子核を 5 MV の電圧で加速すると, 得られる運動エネルギーは 30 MeV である。

D 3 MeV の電子線 2 μA の全エネルギーが 100 g の水に吸収されたとき, 平均の吸収線量率は 60 $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

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

〔解答〕

5

注) A : 誤 飛程は $(E/Z)^2/M$ に比例。したがって, α 線 $M=4$, 陽子線 $M=1$ なので, 飛程は α 線が $1/4$ 。

B : 誤 空気に対する W 値は約 34 eV で, 電子線と α 線で大きく変わらない。

C : 正

D : 正

問 12 原子番号 Z , 質量 M の荷電粒子 (速度 v) が物質中で停止する際の粒子飛程 R と, Z 及び M の関係として正しいものはどれか。

主任者 コーナー

- 1 $R \propto Z^2 \cdot M \cdot v^4$
- 2 $R \propto Z^{-2} \cdot M \cdot v^4$
- 3 $R \propto Z \cdot M \cdot v^4$
- 4 $R \propto Z^{-1} \cdot M \cdot v^4$
- 5 $R \propto Z \cdot M^{-1} \cdot v^4$

〔解答〕

2

注) 粒子飛程 R は以下のように、エネルギー E 、原子番号 Z 、質量 M 、速度 v との間に以下の関係を持つ。

$$R \propto \frac{(E/Z)^2}{M} = \frac{(Mv^2/Z)^2}{M} = Z^{-2} \cdot M \cdot v^4$$

問 13 次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 電子対生成により生じた電子と陽電子は光子の入射方向に対して 90° の角度で放出される。
- B 電子対生成では光子の全エネルギーが電子及び陽電子の運動エネルギーに転移する。
- C 電子対生成が起きると特性 X 線又はオージェ電子が放出される。
- D 電子対生成が起きる確率は物質の原子番号のほぼ 2 乗に比例して増加する。

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

〔解答〕

4

- 注) A：誤 重心系で一様に放出される。
 B：誤 光子のエネルギー 1.022 MeV が、電子と陽電子の質量と運動エネルギーに与えられる。
 C：誤 電子対生成と特性 X 線、オージェ電子放出は無関係である。
 D：正

問 14 500 keV 光子が物質に入射してコンプトン効果を起こした場合、次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 散乱光子のエネルギーは 332 keV を超えない。
- B 反跳電子の最小エネルギーは約 170 keV である。
- C 180° 方向に散乱される光子のエネルギーは約 170 keV である。
- D 反跳電子のエネルギーは 332 keV を超えない。

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

〔解答〕

4

- 注) エネルギー E_0 で入射した光子がコンプトン散乱で θ 方向に散乱されたときの光子のエネルギー E は $E = E_0 / (1 + E_0/mc^2(1 - \cos\theta))$ で表される (ここで mc^2 は 511 keV)。
 A：誤 散乱光子のエネルギーが最大になるのは $\theta = 0$ のときで、入射エネルギーと同じ 500 keV である。
 B：誤 その際の反跳電子のエネルギーは 0 となる。

- C：正 180° 方向に光子が散乱されたときは上式より $500/(1+500/511 \times 2) = 169$
 D：正 その際の反跳電子のエネルギーは最大となり、 $500 - 169 = 331$ [keV] となる。

問 15 50～200 keV 程度の光子の光電効果に関する次の記述のうち、正しいものはどれか。

- 1 光電効果に対する線減弱係数は、光子エネルギーに逆比例する。
- 2 光電効果に対する線減弱係数は、物質の原子番号の 2 乗に比例する。
- 3 光電効果は、光子と軌道電子との弾性衝突である。
- 4 光電効果に伴って、オージェ電子が放出されることがある。
- 5 光電子の運動エネルギーは、入射光子のエネルギーに比例する。

〔解答〕

4

- 注) 1：誤 光子エネルギーの 3.5 乗に反比例する。
 2：誤 物質の原子番号の 5 乗に比例する。
 3：誤 弾性衝突の現象はレイリー散乱と呼ぶ。
 4：正
 5：誤 光電子の運動エネルギーは、入射光子のエネルギーから軌道電子の束縛エネルギーを引いた値となる。

問 16 図に示されたヨウ化ナトリウム (NaI) の質量減弱係数における①～④の相互作用及び⑤の吸収端に関し、正しい組合せは次のうちどれか。

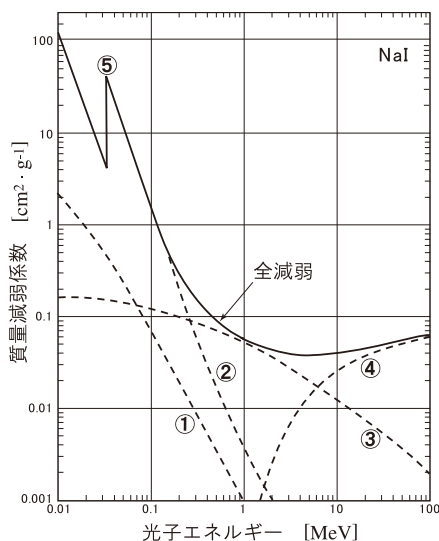


図 ヨウ化ナトリウムにおける質量減弱係数

主任者 コーナー

①	②	③	④	⑤
1 光電効果	レイリー散乱	電子対生成	コンプトン効果	L 吸収端
2 光電効果	レイリー散乱	コンプトン効果	電子対生成	L 吸収端
3 レイリー散乱	コンプトン効果	光電効果	電子対生成	K 吸収端
4 レイリー散乱	光電効果	コンプトン効果	電子対生成	K 吸収端
5 光電効果	レイリー散乱	コンプトン効果	電子対生成	K 吸収端

〔解答〕

4

- 注) ① レイリー散乱 (レイリー散乱は低エネルギー領域のみ)
 ② 光電効果 (光電効果は吸収端を持つ)
 ③ コンプトン散乱 (コンプトン散乱は光電効果よりも高いエネルギーで発生する確率が高い)
 ④ 電子対生成 (電子対生成は 1.022 MeV 以上から)
 ⑤ K 吸収端 (吸収端のうち K 吸収端が最も高いエネルギーとなる)

問 17 ある遮蔽材に対して、半価層が 1 cm である細い線束の γ 線の強度を 1/100 に減ずるのに要する遮蔽材厚さ [cm] として、最も近いものは次のうちどれか。ただし、ビルドアップ効果は考慮しないものとする。

1 2 2 5 3 7 4 9 5 10

〔解答〕

3

- 注) 1/100 になる厚さを x [cm] とすると $0.5^x = 0.01$ が成り立つ。 $2^6 = 64$, $2^7 = 128$ なので、6 cm と 7 cm の間にあることが分かる。

問 18 2 MeV の中性子が水素核 (^1H) との弾性衝突で失う平均エネルギーを A, 酸素核 (^{16}O) との衝突で失う平均エネルギーを B としたとき、A/B の値として最も近いものは次のうちどれか。

1 0.11 2 0.39 3 4.5 4 9.0 5 20.0

〔解答〕

3

- 注) 中性子が原子核との弾性衝突で失うエネルギー E は原子核の受ける反跳エネルギーと等しく、中性子のエネルギーを E_n , 質量を m , 重心系での中性子の散乱角を ϕ , 原子核の質量を M とすると、 $E = \frac{2mM}{(m+M)^2}(1-\cos\phi)E_n$ と与えられる。この式において原子核が水素核の場合でも酸素核の場合でも $(1-\cos\phi)E_n$ の項は共通であるから、中性子が失う平均エネルギーの比は $\frac{2mM}{(m+M)^2}$ の値の比となる。したがって、

$$A/B \div \frac{(2 \times 1 \times 1)}{(1+1)^2} \bigg/ \frac{(2 \times 1 \times 16)}{(1+16)^2} \div 4.5$$

問 19 物理量と単位の次の対応のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 照射線量率 — $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$
 B 質量阻止能 — $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
 C 空気カーマ — $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
 D エネルギーフルエンス率 — $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 E 線エネルギー付与 — $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$

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

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
 B : 誤 $\text{J} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
 C : 正
 D : 正
 E : 正

問 20 厚さ 0.1 mm, 一辺の長さ 10 mm の正方形のアルミニウム板 2 枚で ^{210}Po (α 線のエネルギーは 5.3 MeV) 10 MBq の線源をサンドイッチ状に挟みこんだ後, 熱的に外界から遮断した。10 分間放置した場合, 上昇温度 [K] として最も近い値は次のうちどれか。ただし, アルミニウムの密度は $2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比熱は $0.90 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ とする。

1 0.05 2 0.11 3 0.21 4 0.49 5 0.77

〔解答〕

2

- 注) アルミニウム板 2 枚の重さは $0.1 [\text{mm}] \times 10 [\text{mm}] \times 10 [\text{mm}] \times 2 [\text{枚}] / 1000 \times 2.7 [\text{g} \cdot \text{cm}^3] = 0.054 [\text{g}]$ である。10 [MBq] の ^{210}Po から出る 5.3 [MeV] が 10 分間で放出されるエネルギーは $1 \times 10^6 [\text{Bq}] \times 5.3 \times 10^6 [\text{eV}] \times 600 [\text{秒}] \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{J/eV}] = 0.00509 [\text{J}]$ となる。
 したがって, 上昇する温度を T とすると $0.90 [\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \times 0.054 [\text{g}] \times T = 0.00509 [\text{J}]$ となるので, $T = 0.105 [\text{K}]$

問 21 放射線検出器として利用される半導体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 価電子帯と伝導帯との間のバンドギャップエネルギーが絶縁体より大きい。
 B ϵ 値はシリコンよりゲルマニウムのほうが小さい。
 C ゲルマニウム中において電子と正孔の移動度は等しい。
 D シリコン中に微量のガリウムが不純物として存在すると p 型半導体となる。

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 バンドギャップエネルギーは, 半導体より絶縁体のほうが大きい。
 B : 正
 C : 誤 移動度は, 正孔より電子のほうが大きい。
 D : 正

主任者 コーナー

問 22 空気を充填した空洞電離箱に ^{60}Co γ 線を照射して電離電流を測定したところ I_{air} を得た。この充填気体をアルゴンに置き換えた場合、電離電流は I_{air} の何倍となるか。次のうちから最も近いものを選び、ただし、気温、圧力は同一とする。なお、アルゴンの電子に対する W 値は 26.4 eV であり、二次電子に対して (アルゴンの質量阻止能)/(空気の質量阻止能) $= 0.82$ とする。

- 1 0.9 2 1.2 3 1.5 4 1.8 5 2.0

〔解答〕

3

注) 空洞電離箱の電離電流 I は電離箱内に生成される電子-イオン対の数 N に比例し、この N は電離箱内の気体の吸収線量 D と電離箱内の気体の質量 m を用いて $N = Dm/W$ と表すことができ、さらに D は電離箱内の気体の二次電子に対する質量阻止能に比例する。したがって、電離箱内の気体がアルゴン及び空気の場合のそれぞれについて、電離電流を I_{Ar} 及び I_{air} 、二次電子に対する質量阻止能を D_{Ar} 及び D_{air} 、質量を m_{Ar} 及び m_{air} 、 W 値を W_{Ar} 及び W_{air} とおくと、 $W_{\text{air}} = 34 \text{ eV}$ 、 $m_{\text{Ar}}/m_{\text{air}} \div 39.95 / ((14.01 \times 2 \times 4 + 16.0 \times 2) / 5) \div 1.37$ であるから、 $I_{\text{Ar}}/I_{\text{air}} = (D_{\text{Ar}}/D_{\text{air}}) \times (m_{\text{Ar}}/m_{\text{air}}) \times (W_{\text{air}}/W_{\text{Ar}}) \div 0.82 \times 1.37 \times (34/26.4) \div 1.45$ となる。

問 23 次のシンチレータのうち、それ自体の放射能によるバックグラウンドが測定上問題になるものの組合せはどれか。

- A CsI(Tl)
B $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$
C $\text{Lu}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$
D $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$
E CdWO_4

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

〔解答〕

4

注) C：天然放射性核種 ^{176}Lu が含まれる。
D：天然放射性核種 ^{138}La が含まれる。

問 24 電離箱からの電離電流を電気容量 100 pF のコンデンサ (キャパシタ) に送りこみ、その両端の電位差を電位計で測定したところ、10 分後の電位差上昇が 3.0 V であった。平均の電離電流 $[\text{pA}]$ として最も近い値は次のうちどれか。

- 1 0.15 2 0.5 3 1.0 4 1.5 5 5.0

〔解答〕

2

注) 両端の電位差が V のとき、電気容量 C のコンデンサに蓄えられた電気量 Q は $Q = CV$ で表され、時間 t の間に電荷 Q が通過する際の平均の電流値 I は $I = Q/t$ と表される。したがって、平均の電離電流値は、

$$I = \frac{CV}{t} = \frac{100 [\text{pF}] \times 3.0 [\text{V}]}{10 \times 60 [\text{秒}]} = 0.5 [\text{pA}]$$

問 25 1 MeV 程度の β 線の最大エネルギーを知る方法として、最適なものは次のうちどれか。

- 1 2π ガスフロー型比例計数管により波高分布を求める。
- 2 端窓型 GM 計数管でアルミニウム板による吸収曲線を求める。
- 3 TLD を用いてグロー曲線を求める。
- 4 NaI(Tl) シンチレーション検出器により波高分布を求める。
- 5 Ge 検出器により波高分布を求める。

〔解答〕

2

注) アルミニウム板による吸収曲線から β 線の最大飛程 R [g/cm^2] が分かるので、 β 線の最大エネルギー E [MeV] をフェザーの式： $R=0.542 E-0.133$ から見積もることができる。

問 26 同一の条件で試料と標準線源からの放射線をそれぞれ測定した。バックグラウンドを差し引いて求めた計数率は、試料では $6,300 \pm 63$ cpm で標準線源は $2,100 \pm 21$ cpm であった。試料と標準線源の計数率の比に対して誤差が正しく表されているものは、次のうちどれか。

- 1 3.000 ± 0.006
- 2 3.000 ± 0.015
- 3 3.000 ± 0.024
- 4 3.000 ± 0.033
- 5 3.000 ± 0.042

〔解答〕

5

注) 一般的な誤差伝播の法則により、

$$(6300/2100) \times \sqrt{(63/6300)^2 + (21/2100)^2} = 3 \times \sqrt{2/10000} \doteq 0.042$$

となる。

問 27 ブラッグ・グレイの空洞原理が成り立つための条件として、正しいものの組合せはどれか。

- A 荷電粒子平衡が成立していなければならない。
- B 空洞内ガスは固体壁と等価な物質でなければならない。
- C 空洞内ガスと固体壁の質量阻止能比はエネルギーによって大きく変化しない。
- D 空洞の存在はそこを通過する荷電粒子のエネルギー分布に影響を与えない。

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

〔解答〕

1

注) A：正

B：誤 空洞内ガスと固体壁の物質の組合せは何でも良い。

C：正

D：正

問 28 水中の一点に空洞体積 1 cm^3 で水等価壁の空気電離箱を設置し ^{60}Co γ 線を照射したとき収集電荷 20 nC

主任者 コーナー

を得た。この点での水吸収線量 [Gy] の値として最も近いのはどれか。ただし、空気の密度及び W 値をそれぞれ $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 34 eV とし、この点における二次電子に対する水と空気の平均質量阻止能比（水/空気）を 1.1 とする。

1 0.1 2 0.3 3 0.6 4 0.9 5 1.2

〔解答〕

3

注) 水中での吸収線量 D_w と空気中での吸収線量 D_a の比は、水と空気の二次電子に対する質量阻止能の比 S_w/S_a に等しいから、電離箱内の空気に生成する電荷を Q 、素電荷を q 、電離箱内の空気の質量を m とおくと、

$$D_w = \frac{S_w}{S_a} \times D_a = \frac{S_w}{S_a} \times \frac{WQ}{mq} = \frac{S_w}{S_a} \times \frac{W}{q} \times \frac{Q}{m}$$

$$= 1.1 \times 34 [\text{J/C}] \times \frac{20 \times 10^{-9} [\text{C}]}{1.2 \times 10^{-6} [\text{kg}]} \div 0.62 [\text{Gy}]$$

となる。

問 29 GM 管式表面汚染検査計を用いて、純 β 線放出核種が均一に分布した面線源（放射能：1,500 Bq、大きさ：縦 100 mm×横 150 mm）を測定したところ、正味の計数率が 2,400 cpm あった。表面汚染検査計の入射窓面積が 20 cm²、面線源との距離が 5 mm、面線源の線源効率を 0.54 とすると、この表面汚染検査計の機器効率として最も近い値は次のうちどれか。

1 0.17 2 0.37 3 0.48 4 0.57 5 0.63

〔解答〕

2

注) 面線源の表面放射能密度 A は、汚染検査計の正味計数率を N 、機器効率を ϵ_1 、有効面積を W 、また面線源の線源効率を ϵ_s とすると、 $A = N / (\epsilon_1 W \epsilon_s)$ と表される。したがって、

$$\frac{1500 [\text{Bq}]}{100 \times 0.1 [\text{cm}] \times 150 \times 0.1 [\text{cm}]} = \frac{2400 [\text{cpm}] / 60 [\text{秒}]}{\epsilon_1 \times 20 [\text{cm}^2] \times 0.54}$$

であることから、 $\epsilon_1 \div 0.37$

問 30 次の表中に示された A から C までの空間線量率を測定する一般のサーベイメータの方式として、最も適切な組合せはどれか。また、B.G. はバックグラウンド放射線による線量率を表す。

特性 \ 方式	A	B	C
エネルギー特性	エネルギー補償も可能	C より劣る	良好
測定範囲	B.G. $\sim 30 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	B.G. $\sim 300 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	$1 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \sim 1 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$
方向特性	C より劣る	C より劣る	良好
感度	非常に高い	A より劣る	B より劣る

A	B	C
1 シンチレーション式	GM 管式	電離箱式
2 シンチレーション式	電離箱式	GM 管式
3 GM 管式	シンチレーション式	電離箱式
4 GM 管式	電離箱式	シンチレーション式
5 電離箱式	GM 管式	シンチレーション式

〔解答〕

1

注) サーベイメータの方式の優劣は、優れている方から順番に

エネルギー特性：電離箱式 GM 管式 シンチレーション式

感度：シンチレーション式 GM 管式 電離箱式

である。ただし、シンチレーション式では、エネルギー依存性を補償した型がある。

第 58 回 第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例 (2)

(試験年月日 平成 25 年 8 月 21 日, 22 日)

化 学

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

問 1 ある放射性同位元素 3.7 GBq は 5 年後に 37 MBq に減衰した。この 37 MBq が 3.7 kBq に減衰するのは、おおよそ何年後か。最も近い値は、次のうちどれか。

1 5 2 10 3 20 4 40 5 50

〔解答〕

2

注) 問の核種は 5 年間で 3.7 GBq から 37 MBq へ $1/100$ に減衰することが分かる。37 MBq から 3.7 kBq になるということは、初期の $1/10000$ に減衰した状態である。5 年間で $1/100$ となるので、更にその $1/100$ となる $1/10000$ に減衰するのは 10 年後である。

問 2 純度 100% のトリチウムガス ($^3\text{H}_2$) が、アンプルの中に 1.00 気圧で封入されている。これが 24.6 年間経過すると、内部の圧力は何気圧になるか。ただし、トリチウムは半減期 12.3 年で β^- 壊変し、アンプル中のトリチウムの化学形は常に $^3\text{H}_2$ とする。

1 0.75 2 1.00 3 1.25 4 1.50 5 1.75

〔解答〕

5

注) トリチウム壊変後のヘリウムは単原子ガスとして存在するので壊変後のヘリウムのモル数は 2 倍、すなわち 1 気圧換算での体積が 2 倍になる



初期のトリチウムガス存在量 (A_0) を 1 とすると 24.6 年間経過したときのトリチウムガス存在量 (A) は

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{(1/2)^{t/T}} = 1 \times (1/2)^{24.6/12.3} = 0.25$$

これより、ヘリウムの存在量は $1 - 0.25 = 0.75$

したがって、アンプル中の圧力は $0.25 + 0.75 \times 2 = 1.75$ となる。

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

主任者 コーナー

問3 70 MBq の ^{201}Tl (半減期 73 時間 $= 2.6 \times 10^5$ 秒) の質量 [g] に最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 4.4×10^{-9} 2 8.7×10^{-9} 3 1.3×10^{-8} 4 2.7×10^{-8} 5 5.2×10^{-8}

〔解答〕

2

注) ^{201}Tl の原子数は $A = \lambda N$ より

$$N = A / \lambda = A (\ln 2 / T) = 70 \times 10^6 \times 2.6 \times 10^5 / 0.693 = 2.6 \times 10^{13}$$

^{201}Tl の質量は、アボガドロ数 6.02×10^{23} より

$$201 \times 2.6 \times 10^{13} / 6.02 \times 10^{23} = 8.77 \times 10^{-9} \text{ [g]}$$

問4 比放射能が $50 \text{ kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$ の ^{14}C フェノール ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, 分子量 94) を臭素化して, ^{14}C トリブロモフェノール ($\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})\text{Br}_3$, 分子量 331) を得た。この ^{14}C トリブロモフェノールの比放射能 [$\text{kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$] に最も近い値は、次のうちどれか。

- 1 14 2 23 3 50 4 120 5 170

〔解答〕

1

注) フェノールの臭素化反応は $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} + 3\text{Br}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})\text{Br}_3 + 3\text{HBr}$

^{14}C トリブロモフェノールと, ^{14}C フェノールに含まれる炭素原子数は 6 で変わらないので,

^{14}C トリブロモフェノールの比放射能 [$\text{kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$] は、分子量に比例する。

$$50 \times 94 / 331 = 14.199 \div 14 \text{ [kBq} \cdot \text{mg}^{-1}\text{]}$$

問5 次の逐次壊変にある核種の組合せのうち、放射平衡となり得るのはどれか。なお、括弧内に半減期を示す。

親核種	娘核種
A ^{57}Ni (1.5 日)	^{57}Co (272 日)
B ^{68}Ge (271 日)	^{68}Ga (68 分)
C ^{87}Y (79.8 時間)	$^{87\text{m}}\text{Sr}$ (2.8 時間)
D ^{140}Ba (12.8 日)	^{140}La (1.7 日)

- 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) 放射平衡となるのは, “親核種 1 (λ_1, T_1) $\rightarrow$ 娘核種 2 (λ_2, T_2) $\rightarrow$ 孫核種 3” の壊変系列としたとき, $\lambda_1 < \lambda_2$ のとき, すなわち親核種 1 の半減期が娘核種 2 の半減期に比べて長いとき ($T_1 > T_2$) である。

A, B, C, D のうち, 親核種 1 の半減期が娘核種 2 の半減期に比べて長い組合せは, B, C, D である。

問6 次の核反応のうち、アルカリ金属元素の同位体を生成するのはどれか。

- A $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$
B $^{23}\text{Na}(\text{p}, \text{pn})$

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

D $^{84}\text{Kr}(d, 2n)$

- 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) 核反応の生成物は以下のとおり。

A : $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$

B : $^{23}\text{Na}(p, pn)^{22}\text{Na}$

C : $^{40}\text{Ar}(\alpha, p)^{43}\text{K}$

D : $^{84}\text{Kr}(d, 2n)^{85}\text{Rb}$

よって, A, B, C, D のすべてで, アルカリ金属元素の同位体を生成する。

問7 ^{23}Na を 1.0×10^{-6} mol 含む試料を, 原子炉で熱中性子フルエンス率 $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で照射したとき, 生成する ^{24}Na の飽和放射能 [Bq] に最も近い値は, 次のうちどれか。ただし, ^{23}Na の熱中性子捕獲断面積は 0.53 b (バーン) とする。

- 1 3.2×10^5 2 5.3×10^6 3 3.2×10^7 4 5.3×10^8 5 3.2×10^9

〔解答〕

1

注) 核反応による放射性核種の生成は以下の式で表される。

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

A : 照射終了時における放射能

N : ターゲット中に存在する放射化対象核種の原子数

f : 熱中性子フルエンス率

σ : 核反応断面積 ($1 \text{ b} = 1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$)

$$A = 1.0 \times 10^{-6} \times 6.02 \times 10^{23} \times 1.0 \times 10^{12} \times 0.53 \times 10^{-24} (1 - e^{-\lambda t})$$

飽和放射能の条件では $t \gg 1/\lambda$ であるので $1 - e^{-\lambda t} = 1$ とすると

$$A = 3.2 \times 10^5$$

問8 ある短寿命核種 (半減期 T 分) を加速器で製造するのに, $2T$ 分間照射して $2T$ 分間冷却したときの放射能は, T 分間照射して T 分間冷却したときの放射能の何倍か。

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

〔解答〕

1

注) 照射によって生成する放射能は

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

A : 照射終了時における放射能

N : ターゲット中に存在する放射化対象核種の原子数

f : 熱中性子フルエンス率

主任者 コーナー

σ : 核反応断面積

t : 照射時間

T : 半減期

$2T$ 分照射によって生成した (半減期 T 分) を $2T$ 分冷却したときの放射能 A_1 は

$$\begin{aligned} A_1 &= Nf\sigma \{1 - (1/2)^{t/T}\} \times (1/2)^{t/T} = Nf\sigma \{1 - (1/2)^{2T/T}\} \times (1/2)^{2T/T} \\ &= Nf\sigma \{1 - (1/4)\} \times (1/4) = (3/16)Nf\sigma \end{aligned}$$

T 分照射によって生成した (半減期 T 分) を T 分冷却したときの放射能 A_2 は

$$\begin{aligned} A_2 &= Nf\sigma \{1 - (1/2)^{t/T}\} \times (1/2)^{t/T} = Nf\sigma \{1 - (1/2)^{T/T}\} \times (1/2)^{T/T} \\ &= Nf\sigma \{1 - (1/2)\} \times (1/2) = (1/4)Nf\sigma \end{aligned}$$

$$A_1/A_2 = (3/16)Nf\sigma / (1/4)Nf\sigma = 3/4$$

問 9 ある物質 A を 40 分間中性子照射したところ、半減期 40 分の放射性核種 B が 5.0 MBq 生成した。照射条件を変えずに同じ量の A を 20 分間又は 120 分間中性子照射したときに生成する B の放射能の値 [MBq] として正しいものの組合せは、次のうちどれか。

	20 分間	120 分間
1	1.8	6.1
2	2.5	7.5
3	2.5	8.8
4	2.9	8.8
5	3.8	15

〔解答〕

4

注) 照射によって生成する放射能は

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

40 分間中性子照射 (t) したところ、半減期 (T) 40 分の放射性核種 B が 5.0 MBq 生成した (A)。

$$A = 5.0 \times 10^6 = Nf\sigma \{1 - (1/2)^{40/40}\} = 1/2 Nf\sigma$$

$$Nf\sigma = 10 \times 10^6 \text{ となる。}$$

20 分照射したときの放射能 B_1 は

$$\begin{aligned} B_1 &= 10 \times 10^6 \times \{1 - (1/2)^{20/40}\} = 10 \times 10^6 \times \{1 - (1/2)^{1/2}\} \\ &= 10 \times 10^6 \times \{1 - (1/\sqrt{2})\} = 2.9 \times 10^6 [\text{Bq}] = 2.9 [\text{MBq}] \end{aligned}$$

120 分照射したときの放射能 B_2 は

$$\begin{aligned} B_2 &= 10 \times 10^6 \times \{1 - (1/2)^{120/40}\} = 10 \times 10^6 \times \{1 - (1/2)^3\} \\ &= 10 \times 10^6 \times \{1 - (1/8)\} = 8.75 \times 10^6 [\text{Bq}] = 8.8 [\text{MBq}] \end{aligned}$$

問 10 $[^{133}\text{Ba}]\text{BaCl}_2$ の $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水溶液がある。これに次の溶液を加えると放射性の沈殿が生成するのはどれか。

- A $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸
- B $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 炭酸ナトリウム水溶液
- C $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫化ナトリウム水溶液

D $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水酸化ナトリウム水溶液

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

〔解答〕

1

注) 陽イオンの沈殿生成と分離に関する問題。Ba イオンは、硫酸イオン、炭酸イオンと反応して、難水溶性の BaSO_4 (白色沈殿)、 BaCO_3 (白色沈殿) を生成する。

C の場合、Ba は酸性、アルカリ性のいずれでも硫化物沈殿は生じない。また、D の場合生成する $\text{Ba}(\text{OH})_2$ は水に対する溶解度が大きく沈殿を生じない。

問 11 放射性ヨウ素に関する次の記述のうち、適切なものの組合せはどれか。

- A ^{123}I は核医学診断に用いられている。
 B ^{125}I の測定に $\text{NaI}(\text{Tl})$ シンチレーション検出器が用いられている。
 C ^{128}I はラジオイムノアッセイに用いられている。
 D ^{129}I の定量に加速器質量分析法 (AMS) が用いられている。
 E ^{131}I はポジトロン線源に用いられている。

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

〔解答〕

2

注) 正しい記述は、

A の ^{123}I は核医学診断に用いられている。

B の ^{125}I の測定に $\text{NaI}(\text{Tl})$ シンチレーション検出器が用いられている。

D の ^{129}I の定量に加速器分析法 (AMS) が用いられている。

問 12 次の放射性核種のうち、半減期が 3 倍以上異なるものはどれか。

- A ^{11}C と ^{13}N B ^{99}Mo と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ C ^{60}Co と ^{137}Cs D ^{125}I と ^{131}I

- 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) 各放射性核種の半減期は、 ^{11}C : 20.39 m, ^{13}N : 9.965 m, ^{99}Mo : 65.94 h, $^{99\text{m}}\text{Tc}$: 6.015 h, ^{60}Co : 5.27 y, ^{137}Cs : 30.17 y, ^{125}I : 59.40 d, ^{131}I : 8.02 d である。

問 13 次のうち、放射性核種のための組合せはどれか。

- 1 ^{11}C , ^{12}C , ^{14}C
 2 ^{13}N , ^{14}N , ^{15}N
 3 ^{30}P , ^{32}P , ^{33}P
 4 ^{35}Cl , ^{36}Cl , ^{37}Cl
 5 ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{45}Ca

〔解答〕

3

主任者 コーナー

注) 放射性核種は ^{11}C , ^{14}C , ^{13}N , ^{30}P , ^{32}P , ^{33}P , ^{36}Cl , ^{45}Ca であるので、放射性核種のための組合せは 3 である。

問 14 ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca について半減期の短い順に正しく並んでいるものは、次のうちどれか。

- 1 $^{35}\text{S} < ^{32}\text{P} < ^{14}\text{C} < ^3\text{H} < ^{45}\text{Ca}$
- 2 $^{35}\text{S} < ^{32}\text{P} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H} < ^{14}\text{C}$
- 3 $^{32}\text{P} < ^{35}\text{S} < ^{14}\text{C} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H}$
- 4 $^{45}\text{Ca} < ^{32}\text{P} < ^{35}\text{S} < ^3\text{H} < ^{14}\text{C}$
- 5 $^{32}\text{P} < ^{35}\text{S} < ^{45}\text{Ca} < ^3\text{H} < ^{14}\text{C}$

〔解答〕

5

注) 各放射性核種の半減期は、 ^3H : 12.32 y, ^{14}C : 5700 y, ^{32}P : 14.26 d, ^{35}S : 87.51 d, ^{45}Ca : 162.67 d である。

問 15 それぞれの放射性核種と壊変系列の組合せのうち、誤っているものはどれか。

- 1 ^{232}Th — トリウム系列
- 2 ^{224}Ra — ウラン系列
- 3 ^{208}Tl — トリウム系列
- 4 ^{234}U — ウラン系列
- 5 ^{235}U — アクチニウム系列

〔解答〕

2

注) ^{224}Ra はトリウム系列である。

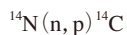
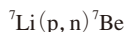
問 16 次のうち、宇宙線により生成し、地上でも観測される放射性核種のための組合せはどれか。

- 1 ^3H , ^7Be , ^{14}C
- 2 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O
- 3 ^{19}F , ^{23}Na , ^{59}Co
- 4 ^{40}K , ^{87}Rb , ^{137}Cs
- 5 ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{238}U

〔解答〕

1

注) 宇宙線により生成し、地上でも観測される放射性核種は



問 17 次の放射性核種の壊変形式と壊変で放出される γ 線の有無について、正しいものの組合せはどれか。

	核種	壊変形式	γ 線放出の有無
A	^{13}N	β^+	無
B	^{32}P	β^-	有
C	^{63}Ni	EC	無
D	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	IT	有

1 AとC 2 AとD 3 BとC 4 BとD 5 CとD

〔解答〕

2

注) A：正

B： γ 線を放出しない。

C： β^- 壊変である。

D：正

問 18 次の操作のうち、放射性気体が発生するのはどれか。

A $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$ に塩酸を加える。

B Fe^{35}S に塩酸を加える。

C $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ に水酸化カリウム水溶液を加える。

D $\text{Cu}^{36}\text{Cl}_2$ にアンモニア水を加える。

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： $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{BaCl}_2 + ^{14}\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 放射性の二酸化炭素が発生する。

B： $\text{Fe}^{35}\text{S} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2^{35}\text{S}$ 放射性の硫化水素が発生する。

C：気体は発生しない。

D： $\text{Cu}^{36}\text{Cl}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+} + 2^{36}\text{Cl}^-$ 気体は発生しない。

問 19 ビーカーに入った各 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水溶液に、よく磨いた金属板を浸して静置したときに、金属板に放射性物質が析出するのはどれか。

A $^{65}\text{Zn}[\text{ZnSO}_4] + \text{Cu板}$

B $^{64}\text{Cu}[\text{CuSO}_4] + \text{Fe板}$

C $^{110\text{m}}\text{Ag}[\text{AgNO}_3] + \text{Cu板}$

D $^{210}\text{Pb}[\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2] + \text{Zn板}$

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) イオン化傾向の大きさは K, Ca, Na, Mg, Al, Zn, Fe, Ni, Sn, Pb, (H), Cu, Hg, Ag, Pt, Au の順である。

問 20 次の実験操作のうち、空気中の放射能濃度の上昇を招くおそれがあるものの組合せはどれか。

主任者 コーナー

- A OH 基が ^3H で標識されたエタノールに米粒大のナトリウムを入れた。
 B ^{14}C で標識された炭酸カルシウム粒に濃水酸化ナトリウム水溶液を滴下した。
 C 放射性粉末試料を実験用容器に分取した。
 D $^{144}\text{Ce}^{4+}$ の水溶液に ^{60}Co 密封線源からの γ 線を照射した。
 E $^{125}\text{I}^-$ の弱アルカリ性水溶液に塩酸を加えて酸性とした。

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

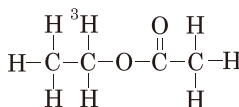
〔解答〕

2

注) A は $2\text{EtO}^3\text{H} + 2\text{Na} \rightarrow \text{EtONa} + ^3\text{H}_2$ で水素ガスが発生し, C は粉末が空气中に飛散し, E はヨウ素が酸化されてヨウ素ガスが発生する。

問 21 図のトリチウム標識酢酸エチルの希硫酸による加水分解での生成物に関する次の記述のうち, 正しいものの組合せはどれか。

- A 放射性的酢酸が生成する。
 B 放射性的エタノールが生成する。
 C 非放射性的酢酸が生成する。
 D 非放射性的エタノールが生成する。
 E 放射性的の水が生成する。



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

〔解答〕

3

注) $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
 トリチウム標識はエタノール部分に残る。

問 22 放射性核種とその利用に関する次の組合せのうち, 正しいものはどれか。

- 1 ^{14}C — 石炭の生成年代の測定
 2 ^{18}F — 人体の陽電子放射断層撮影 (PET)
 3 ^{57}Co — 岩石中のコバルトの中性子放射化分析
 4 ^{90}Sr — ジャガイモの発芽防止
 5 ^{99}Tc — 人体のシングルフォトン断層撮影 (SPECT)

〔解答〕

2

- 注) 1 ^{14}C の年代測定は, 樹木等の生成年代を測定することは可能であるが数万年までが限度であり, 石炭の生成年代は分からない。
 2 正
 3 中性子放射化分析では, ^{60}Co を測定する。
 4 ジャガイモの発芽防止には, ^{60}Co の γ 線が利用されている。
 5 SPECT には, ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I , ^{201}Tl が利用される。

問 23 次のような $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の比がすべて等しい炭化水素があるとき、各化合物 1 グラム中の ^{14}C 放射能も、各化合物 1 モル中の ^{14}C 放射能も、ともに最大である化合物はどれか。

- 1 エタン (C_2H_6)
- 2 エチレン (C_2H_4)
- 3 アセチレン (C_2H_2)
- 4 ベンゼン (C_6H_6)
- 5 シクロヘキサン (C_6H_{12})

〔解答〕

4

注) $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ が等しいため、各化合物 1 グラム中の ^{14}C 放射能が大きいものは、分子量に占める炭素の比率が大きいものであり、各化合物 1 モル中の ^{14}C 放射能は炭素数で比較できる。

エタン = $24/30 = 0.8$ エチレン = $24/28 = 0.867$ アセチレン = $24/26 = 0.923$

ベンゼン = $72/78 = 0.923$ シクロヘキサン = $72/84 = 0.857$

問 24 次のトリチウム標識有機化合物に関する記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 有機化合物中の特定位置の標識にはウィルツバッハ法が用いられる。
- B 化学純度を上げるために精製を繰り返すと比放射能は一定となる。
- C 放射化学純度は非放射性の不純物の量とは無関係である。
- D 保管時にはできるだけ放射能濃度の高い状態とする。

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

〔解答〕

3

注) A ウィルツバッハ法は、標識したい化合物とトリチウムガスを密閉容器に入れて反応させるが、標識位置を特定できない。

B 正

C 正

D 実用上差し支えない程度に比放射能を下げると、トリチウムが希釈され分散する。低温効果もある。

問 25 中性子放射化分析の特徴として、正しいものの組合せは次のうちどれか。

- A 多元素同時分析ができる。
- B 非破壊分析ができる。
- C 中性子捕獲断面積の大きい元素が共存すると、定量誤差の原因となる。
- D 照射後の化学分離の際の目的元素の混入は、定量に影響しない。

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

〔解答〕

5

注) 中性子放射化分析は、非破壊、多元素同時分析が可能であるが、試料が放射化する。

主任者 コーナー

問 26 荷電粒子励起 X 線 (PIXE) 分析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 生体試料中の重金属元素分析に適している。
- B 多元素同時分析ができる。
- C 微小領域の分析が可能である。
- D 分析試料が放射化される。

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) PIXE 分析法は、陽子などを数 MeV のエネルギーに加速して試料に照射し、その結果発生する特性 X 線を測定して元素分析する方法であり、分析試料は放射化されない。高感度、多元素同時、少量の試料分析可能、ビームをしぼることにより微小領域の元素の測定が可能である。

問 27 ^{210}Po は 5.304 MeV の α 線を放出し、安定な ^{206}Pb になる。 α 線による ^{206}Pb の反跳エネルギー [keV] に最も近いものはどれか。

1 83 2 96 3 103 4 110 5 122

〔解答〕

3

注) α 壊変によって放出されるエネルギー E を α 壊変の Q 値と言い、質量欠損から求められる。このエネルギー E を α 粒子と生成核種に分配し、生成核種のエネルギーを生成核の反跳エネルギーと言う。 M を質量数とする。

$$E_{\alpha} = M(^{206}\text{Pb}) / (M(^{206}\text{Pb}) + M(\alpha)) \times E = 5.304 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{Pb}} = M(\alpha) / (M(^{206}\text{Pb}) + M(\alpha)) \times E$$

問 28 ホットアトム化学に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 中性子照射したヨウ化エチル $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ を水と振り混ぜると放射性の ^{128}I が水に溶け出す。
- B 有機化合物を炭酸リチウムと混合して中性子照射すると、 ^{14}C の標識化合物が得られる。
- C 中性子照射したクロム酸カリウム K_2CrO_4 を水に溶かすと陽イオンの ^{51}Cr も観測される。
- D $^{37}\text{Cl}(n, \gamma)^{38}\text{Cl}$ で ^{38}Cl が得る反跳エネルギーは 1 eV 程度である。

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

〔解答〕

2

注) A 正

B トリチウムの標識化合物が得られる。

C 正

D (n, γ) 反応の反跳エネルギー (E_R) は、反跳原子の質量数を A , γ 線のエネルギーを E_0 (MeV) で表すと

$$E_R = 537 E_0^2 / A \text{ [eV]} \text{ で表される。}$$

即発 γ 線のエネルギーが 2 MeV であれば、 $A=38$ のとき $E_R=56 \text{ eV}$ である。

問 29 次の放射性同位元素と用いられる分析・計測装置で、利用される放射線が正しいものはどれか。

- | | | | |
|---|-------------------|-----------------|--------------|
| 1 | ^{55}Fe | — 硫黄計 | — β 線 |
| 2 | ^{63}Ni | — ECD ガスクロマトグラフ | — X 線 |
| 3 | ^{90}Sr | — 透過型厚さ計 | — γ 線 |
| 4 | ^{147}Pm | — 散乱型厚さ計 | — α 線 |
| 5 | ^{252}Cf | — 水分計 | — 中性子線 |

〔解答〕

5

- 注) 1 励起型の硫黄分析計は、 ^{55}Fe から放射される 5.9 keV の Mn の KX 線を利用して硫黄を励起し、放射する S の蛍光 X 線の強度から S を定量する。
- 2 ECD ガスクロマトグラフは、低エネルギーの β 線により発生した電子が電子親和性の気体分子に捕獲されることを利用
- 3, 4 ^{90}Sr と ^{147}Pm はどちらも β 線源である。

問 30 線量計に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A フリッケ線量計は、 Fe^{2+} の酸化反応を利用する。
- B フリッケ線量計の G 値は、 ^{60}Co の γ 線に対して約 15.5 である。
- C セリウム線量計は、感度は低いが大線量の測定に適している。
- D アラニン線量計はラジカル生成を利用する。

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

〔解答〕

5

- 注) 1 Fe^{2+} 溶液に γ 線を照射すると、鉄(Ⅱ)イオンが鉄(Ⅲ)に酸化される。
- 2 G 値は酸濃度とともに増加するが、15.6 で一定になる。
- 3 セリウム(Ⅳ)からセリウム(Ⅲ)への還元を利用している。フリッケ線量計より感度は低いが大線量の測定に適している。
- 4 アラニン ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$) に生成するフリーラジカルを、ESR 測定装置で検出する。

生 物 学

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

問 1 増殖中の細胞の生体高分子を標識する場合、次の標識化合物と生体高分子の組合せのうち、最も適切なものはどれか。

- | | | |
|---|--|---------|
| 1 | [³ H] ウリジン | — DNA |
| 2 | [³⁵ S] メチオニン | — RNA |
| 3 | [¹²⁵ I] 5-ヨード-2'-デオキシウリジン | — RNA |
| 4 | [α - ³² P] デオキシシチジン三リン酸 | — DNA |
| 5 | [³ H] チミジン | — タンパク質 |

〔解答〕

4

- 注) 1 : 誤 ウリジンは RNA 構成成分の 1 つであり、その標識体は RNA 合成量の測定に用いられる。
 2 : 誤 メチオニンはアミノ酸の 1 つであり、標識体はタンパク質の合成、挙動の追跡に用いられる。
 3 : 誤 5-ヨード-2'-デオキシウリジンは DNA 複製阻害剤であり、標識体は DNA 複製（細胞増殖能）のアッセイに用いられる。
 4 : 正 デオキシシチジン三リン酸（dCTP）は、ポリメラーゼ連鎖反応等の DNA 複製の際に用いられ、標識体は DNA 合成量の測定等に用いられる。
 5 : 誤 チミジンは DNA ヌクレオシドの 1 つであり、標識体は DNA への取込みや細胞増殖量の測定等に用いられる。

問 2 治療や診断に利用される次の標識化合物と疾患又は検査項目の組合せのうち、適切なものはどれか。

- | | | |
|---|-------------------------------|----------|
| A | [⁹⁰ Y] 抗 CD20 抗体 | — 悪性リンパ腫 |
| B | [⁵¹ Cr] クロム酸ナトリウム | — 赤血球寿命 |
| C | [⁶⁷ Ga] クエン酸ガリウム | — 心筋梗塞 |
| D | [^{99m} Tc] ピロリン酸 | — 糖尿病 |

- 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 CD20 抗原は B 細胞性の悪性リンパ腫の大多数に存在しており、この抗原に結合することで、⁹⁰Y の β 線のがん細胞を攻撃する。

- B：正 ^{51}Cr イオンは細胞膜を透過して、赤血球に入り、主としてヘモグロビン A3 の β -polypeptide chain 結合する。この放射能を追跡することにより赤血球寿命や循環血流量の測定が可能である。
- C：誤 悪性腫瘍組織、特に乳がん、肺がん、悪性リンパ腫などへの高い集積を示すため、悪性腫瘍診断薬として広く使用されている。
- D：誤 急性期の心筋梗塞巣に集積し、その存在及び部位、範囲の診断に用いられる。

問3 放射線による DNA 鎖切断に関する次の記述のうち、誤っているものの組合せはどれか。

- A 低 LET 放射線の場合、1 本鎖切断よりも 2 本鎖切断の方が起こりやすい。
 B 低酸素下では通常酸素下よりも 2 本鎖切断が増える。
 C 細胞周期の G_0 期では G_2 期よりも細胞当たりの 1 本鎖切断数は多い。
 D ラジカルスカベンジャーは 1 本鎖切断の数を増加させる。
- 1 ABC のみ 2 ABD のみ 3 ACD のみ 4 BCD のみ 5 ABCD すべて

〔解答〕

5

- 注) A：誤 1 本鎖切断は 2 本鎖切断より高頻度で起こる。特に低 LET 放射線ではその差は顕著である。
- B：誤 低酸素下では放射線感受性は低下し、通常酸素下に比較して 2 本鎖切断の頻度は減少する。
- C：誤 一般に放射線感受性は G_1 初期～中期にかけて低下し、 G_1 後期から S 期にかけて高まり、S 期に入ると再び低下、 G_2 期～M 期にかけて高くなる。 G_2 期と G_1 期の比較では G_2 期の方が放射線感受性は高く、1 本鎖切断も生じやすい。
- D：誤 放射線の電離又は励起作用の結果生じたフリーラジカルを補足する化合物（ラジカルスカベンジャー）の存在によって、生体高分子への損傷を防止、軽減することができる。

問4 放射線における希釈効果についての次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 間接作用を特徴付けるものである。
 B 希釈効果とは生成されたラジカルが水分子で希釈されることである。
 C 溶質として存在する酵素などの生体高分子の不活性化を指標とした場合、吸収線量が一定であれば不活性化した分子数は濃度によらず一定である。
 D 溶質として存在する酵素などの生体高分子の不活性化を指標とした場合、吸収線量が一定であれば不活性化率は濃度によらず一定である。
- 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

〔解答〕

2

- 注) A：正 直接作用は溶質分子に対し直接に作用するので、濃度が低いほど不活性化される分子数は少なくなる（不活性化される溶質の割合は一定）。一方、間接作用では不活性化される溶質分子数は濃度に関係なく一定になる（溶質濃度が低いほど不活性化される溶質の割合は増加）。このため、希釈効果は間接作用の特徴とされる。

主任者 コーナー

- B：誤 希釈効果とは溶質の濃度が低くなるほど、不活性化される溶質の割合が増加する効果をいう。
- C：正 一定線量であれば水の電離や励起の数は一定であり、生成するラジカルの数も一定になる。このため、間接作用では不活性化される溶質分子数は濃度に関係なく一定になる。
- D：誤 C 欄参照

問5 放射線被ばくと染色体異常に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 二動原体染色体は被ばく線量評価に用いられる。
- B 誘発される染色体異常の頻度は、線量率により異なる。
- C 小核の形成は放射線に特有な異常である。
- D 安定型の染色体異常が観察されることがある。

1 ABDのみ 2 ABのみ 3 ACのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

1

- 注) A：正 二動原体染色体は被ばくによって生じやすい染色体の構造異常であり、被ばく線量評価に用いられる。
- B：正 誘発される染色体異常の頻度は、放射線の種類や照射条件により異なる。同一線量であっても高線量率下では低線量率下よりも染色体異常の頻度は高い。
- C：誤 小核は、細胞分裂の際に一部の染色体が正常に分配されず、本来の核に取り込まれずに残ることで生じる。放射線のみならず様々な要因によって誘発、形成される。
- D：正 被ばくによって生ずる染色体の構造異常は、細胞分裂により消失する不安定型異常と新生細胞に受け継がれてゆく安定型異常に分類される。

問6 放射線による細胞死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 増殖死は照射された後に分裂を経て起こる細胞死である。
- B 小核形成は増殖死の原因となる。
- C 照射された細胞では分裂停止とともに代謝も停止する。
- D 増殖死を定量するにはコロニー形成法を用いる。

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

〔解答〕

2

- 注) A：正 増殖死は、照射を受けてから何回かの細胞分裂をした後に、増殖能を失って生じる。
- B：正 小核形成は染色体異常が原因となることが知られており、増殖死の誘因の1つである。
- C：誤 照射された細胞がすべて分裂を停止するわけではない。また、分裂を停止した細胞も核酸やタンパク質合成といった代謝を継続していることが多い。
- D：正 コロニー形成の有無は細胞の増殖能の指標となる。

問7 放射線による突然変異に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A DNA 2 本鎖切断は染色体異常の原因となる。

- B 放射線に特有な突然変異がある。
 C G_2 期に被ばくを受けると染色体型異常が生じる。
 D 同一吸収線量で比較した場合、 γ 線の方が中性子線より誘発率は高い。
 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

〔解答〕

2

- 注) A：正 DNA の切断は 1 本鎖と 2 本鎖があるが、2 本鎖切断の方が修復は難しく染色体異常発生の確率が高い。
 B：誤 突然変異の要因には放射線のほか、活性酸素や紫外線等もあり、放射線だけに特有の突然変異はない。
 C：正 染色体型異常（両方の染色分体の同じ位置に異常部を持つ）は、 G_1 期～S 期にかけて、染色体型異常（片方の染色分体のみに異常部を持つ）は S 期～ G_2 期～M 期にかけて発生する。
 D：誤 一般に高 LET 放射線の突然変異誘発率は低 LET 放射線に比して大きく、中性子線の突然変異に対する RBE は X 線より大きい。

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

- A 環状染色体をもつ細胞は正常に分裂する。
 B 転座は安定型異常である。
 C 二動原体をもつ細胞は細胞分裂により増殖する。
 D 相互転座は染色体型異常である。
 1 A と B 2 A と C 3 A と D 4 B と C 5 B と D

〔解答〕

5

- 注) A：誤 環状染色体は細胞分裂によって消失する不安定型異常である。
 B：正 染色体転座は、細胞分裂によって消失することがない安定型異常である。
 C：誤 二動原体は細胞分裂により消失する不安定型異常である。
 D：正 相互転座は染色体型異常であり、遺伝子の情報量に変化はないが、染色体の位置が変わる。

問 9 放射線による染色体異常に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 染色体異常は分裂期に照射された細胞だけに生じる。
 B 間期染色体を薬剤で凝集させることで、分裂期を経なくても染色体異常を観察できる。
 C 不安定型異常は発がんの原因となる。
 D 末梢血中のリンパ球の染色体異常の出現頻度から被ばく線量の推定が可能である。
 1 A と B 2 A と C 3 B と C 4 B と D 5 C と D

〔解答〕

4

- 注) A：誤 放射線による染色体異常への影響は、分裂期に対する効果ばかりでなく、休止期におけ

主任者 コーナー

る照射によっても発生する。

- B：正 カリクリン A 等の薬剤を用いた染色体凝縮法によって、間期染色体の直接観察が可能である。
- C：誤 環状染色体や二動原体等の不安定型異常が発がんに関与するとは認められていない。
- D：正 末梢血のリンパ球の染色体異常のうち、染色体断片、二動原体、環状染色体等は、出現頻度が線量に依存し、識別が比較的容易であるため、放射線被ばく線量推定のための生物学的指標として使われている。

問 10 細胞周期と放射線に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A S 期後半は放射線抵抗性である。
- B どの細胞周期でも細胞致死感受性に関する OER に大きな変化はない。
- C 高 LET 放射線では、X 線に比べて放射線致死感受性の細胞周期依存性が大きい。
- D 放射線照射によって細胞周期は M 期と G₁ 期で停止する。

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 放射線抵抗性は S 期後半と G₁ 期初期に高い。
- B：正 細胞周期による細胞致死感受性の変化は主に修復能の変化によるので OER（酸素増感比）の影響はほとんどない。
- C：誤 高 LET 放射線では修飾因子による効果が小さくなる。したがって、放射線致死感受性の細胞周期依存性は小さい。
- D：誤 放射線照射によって細胞分裂は遅延し、G₂ 期に留まる。G₂ ブロックと呼ばれる。

問 11 γ 線急性全身被ばくによる骨髄死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 白血球の異常増殖による。
- B 晩発障害である。
- C 治療方法として骨髄移植がある。
- D 治療しなければ、4 Gy の被ばくで約半数のヒトが骨髄死で死亡する。

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

〔解答〕

5

- 注) A：誤 骨髄死では白血球や血小板が減少する。
- B：誤 被ばくから 2～3 時間で発症し始める。
- C：正 治療方法にはほかに無菌下での管理がある。
- D：正 全身に 3～5 Gy の被ばくを受けると 60 日頃までに約半数が死に至る。

問 12 γ 線急性全身被ばくによる腸管への影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 腺窩細胞（クリプト細胞）は絨毛上皮細胞よりも放射線感受性が高い。
- B 腺窩細胞（クリプト細胞）がすべて死に至っても、絨毛上皮細胞が生き残れば腸死に至ることはな

い。

C 一般に腸死は被ばく後2日以内に起こる。

D 脱水は腸死の直接の原因の一つである。

1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕

3

注) A：正 腺窩細胞（クリプト細胞）は小腸絨毛の付け根にあり、分裂を盛んに行っているので放射線感受性が高い。絨毛上皮細胞は腺窩細胞から分化したもので順次絨毛の先端に押し上げられていく。

B：誤 腺窩細胞（クリプト細胞）が死ぬと絨毛上皮細胞の供給が途絶えてしまう。絨毛上皮細胞には寿命があるので新しい細胞が補充されない結果、腸死に至る。

C：誤 絨毛上皮細胞の寿命が尽きるまでの期間で、10～20日ほどである。

D：正 絨毛上皮細胞の供給が絶たれて腸粘膜の剥離が起こり、脱水が起こったり腸内細菌へ感染したりすることが腸死の原因である。

問13 放射性核種と体内での集積部位の関係として、正しいものの組合せは、次のうちどれか。

A ^{32}P — 肝臓

B ^{60}Co — 肺

C ^{90}Sr — 骨

D ^{137}Cs — 全身

E ^{226}Ra — 骨

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

〔解答〕

5

注) A：誤 ^{32}P はリン酸カルシウムの形で骨に集積する。

B：誤 肝臓や脾臓に集積する。

C, E：正 ^{90}Sr と ^{226}Ra はCaと同じアルカリ土類元素であるため、Caと同様骨に集まる。

D：正 ^{137}Cs はアルカリ金属元素なのでKに似た挙動を示す。

問14 γ 線急性全身被ばくによる中枢神経死に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

A 中枢神経死は腸死よりも小さい線量で起こる。

B 被ばく線量が大きくなると中枢神経死に至るまでの期間は短くなる。

C 血管障害は中枢神経死の直接の原因の一つである。

D 血液脳関門の障害は中枢神経死では起きない。

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 腸死（5～15 Gy）よりも大きい線量を短時間に被ばくした場合に起こる。

B：正 被ばく線量が高いほど生存期間は短くなる。

主任者 コーナー

- C：正 血管や細胞膜が障害されることが中枢神経死の主因である。
D：誤 血液脳関門は血管内皮細胞が隙間なく結合した構造であるが、中枢神経死をもたらす放射線量を被ばくすると構造が破綻したり脆弱血管の新生が誘導されたりする。その結果血漿成分が血管の外にしみだし、脳浮腫が起きる。

問 15 ベルゴニー・トリボンドーの法則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 形態及び機能において未分化な細胞ほど放射線感受性は高い。
B 将来の分裂回数が少ない細胞ほど放射線感受性は高い。
C 細胞分裂頻度の高い細胞ほど放射線感受性は低い。
D ベルゴニー・トリボンドーの法則はリンパ球には当てはまらない。
1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕

3

注) ベルゴニー・トリボンドーの法則とは、放射線感受性は形態や機能が未分化なもののほど、将来行う細胞分裂の数が多きものほど、細胞分裂の頻度が高いものほど高いというものである。ただし、リンパ球に関しては、リンパ芽球 → 幼若リンパ球 → リンパ球と分化するが、分化した後も放射線感受性は高い。

問 16 2 Gy の γ 線急性全身被ばく後の末梢血^{しょうけつ}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 赤血球の減少率は血小板に比べ小さい。
B 赤血球の減少は顆粒球の減少よりも早く認められる。
C リンパ球の減少は血球の中で最も遅く起こる。
D 顆粒球は被ばく後数日の間に一過性に増加する。
1 AとB 2 AとC 3 AとD 4 BとC 5 BとD

〔解答〕

3

- 注) A：正 赤血球の寿命は約 120 日、血小板の寿命は約 10 日であるので、被ばくにより造血器官からの供給が途絶えても赤血球の減少率は血小板のそれより小さい。
B：誤 赤血球は他の血球よりも寿命が長いので、最もゆっくり減少する。
C：誤 リンパ球は被ばく後 1 時間でアポトーシスを起こすが、他の血球はそれぞれの寿命に従って死を迎える。よって、リンパ球が血球の中で最も早く減少する。
D：正 顆粒球は脾臓などの貯蔵プールから放出され、一時的に増加することがある。

問 17 原爆被爆者の疫学調査において、放射線発がんの過剰絶対リスクが最も大きいものは、次のうちどれか。

- 1 白血病
2 食道がん
3 胃がん
4 肝がん
5 甲状腺がん

〔解答〕

3

注) 過剰絶対リスクとは、被ばく集団の絶対リスクから被ばくしなかった集団における自然リスクを差し引いたもので、絶対リスクは被ばくにより影響を受けた総例数又は割合である。

放射線影響研究所が出している報告によると、被ばく者の1958～1998年における胃がんの発生の例のうち被ばくにより過剰に生じたと考えられる例は150例となっている。選択肢の中で次に大きいのは白血病で92例（1950～2000年での数字）である。相対リスク（被ばく者集団の発生率÷コントロール集団の発生率）で比較した場合は、日本人は胃がんの発生率が高いので白血病が圧倒的に大きくなる。

問18 原爆被爆者における発がんの潜伏期間に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 白血病では被ばく時の年齢が若いほど短い。
- B 白血病では被ばく線量が大きいほど短い。
- C 肺がんでは被ばく時の年齢が若いほど短い。
- D 肺がんでは被ばく線量が大きいほど短い。

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

2

注) A：正 潜伏期間は、被ばく時年齢が若いほど短く、被ばく後約2年で発症が見られ、7年後にピークとなり、その後は減少傾向にある。

B：正 被ばく線量が高いと潜伏期間が短くなる傾向が見られる。

C：誤 肺がんも含め固形がんは、成人になってから発症する例が多く、若年被ばくの方が潜伏期間は長くなる。

D：誤 被ばく線量の大きさと潜伏期間の間にはっきりした相関は見つかっていない。

問19 次の放射線による影響のうち、確定的影響として正しいものの組合せはどれか。

- A 胎児被ばくによる発がん
- B 胎児被ばくによる奇形
- C 白内障
- D 皮膚潰瘍

1 ABCのみ 2 ABのみ 3 ADのみ 4 CDのみ 5 BCDのみ

〔解答〕

5

注) 放射線防護の視点から放射線による影響を、確率的影响と確定的影響に分けている。確率的影响は、しきい値がなく線量の増加とともに影響の発生頻度が増加するもので、発がんや遺伝的影響が該当する。確定的影響は、確率的影响以外のものがすべて含まれ、白内障、皮膚障害、脱毛、不妊、血液失調症などがある。また、確定的影響にはしきい値がある。設問A（胎児被ばくによる発がん）以外は全て確定的影響である。

主任者 コーナー

問 20 我が国における自然放射線による年間実効線量の最近の評価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 年間実効線量は約 2.1 mSv と推定されている。
- B 世界平均に比べ我が国ではラドン・トロンによる内部被ばく線量が多い。
- C 内部被ばくは主に鉛 210, ポロニウム 210 によるとされている。
- D 大地からの放射線による被ばく線量は宇宙線による被ばく線量の約 3 倍である。

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

〔解答〕

1

- 注) A：正 最近の再評価により、日本における自然放射線による年間実効線量は 2.09 mSv とされている。その内訳は、宇宙線による線量が 0.3 mSv、大地・大気からの線量が 0.33 mSv、食物からの線量が 0.98 mSv、吸入摂取による線量が 0.48 mSv である。
- B：誤 大気中のラドン・トロン濃度は地質や地域により大きく異なる。ラドン・トロンによる内部被ばく線量の世界平均は 1.3 mSv とされているので、我が国の方が小さい (A の解説参照)。
- C：正 食物摂取による内部被ばく線量 0.98 mSv のうち、0.73 mSv がポロニウム 210 である。また、吸入摂取による線量が 0.48 mSv であるが、そのうちラドンによる影響が大きく、吸入摂取後は長寿命子孫核種の鉛 210 となり体内に蓄積する。
- D：誤 大地からの放射線による被ばく線量は宇宙線による被ばく線量とほぼ同じである (A の解説参照)。

問 21 X 線による胎内被ばくの影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 小頭症のしきい線量は 10 mGy 程度である。
- B 精神遅滞が生じやすいのは妊娠 25 週目以降である。
- C 精神遅滞のしきい線量は 10 mGy 程度である。
- D 致死感受性が最も高いのは着床前期である。

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

〔解答〕

4

- 注) A：誤 奇形発生のしきい線量は 100～200 mGy 程度である。
- B：誤 精神遅滞が生じやすいのは、8～15 週の時期である。
- C：誤 精神遅滞のしきい線量は 120 mGy 程度である。
- D：正 しきい値は 100 mGy 以上である。

問 22 X 線による胎内被ばくの影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 奇形が生じやすい時期は、受精後 1 週間までの期間である。
- B 発がんリスクは、小児と比較して非常に高い。
- C 器官形成期に胎児が 0.5 Gy 被ばくすると奇形発生のリスクが増す。
- D 遺伝性 (的) 影響も想定されている。

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

〔解答〕

5

- 注) A : 誤 器官形成期は2～15週で、そのうち奇形が大きく生じやすい時期は2～8週である。受精後1週間までの期間は着床前期で流産が起きやすい時期である。
- B : 誤 胎児と小児間での発がんリスクは同様とする考えや、固形がんでは小児の方が高いとする考えがある。小児の発達期の組織の方が放射線による発がん感受性が高いためである。
- C : 正 奇形発生のしきい線量が0.1～0.2 Gy 程度なので、0.5 Gy 被ばくするとリスクは上昇する。
- D : 正 胎児被ばくによる遺伝的影響についてはヒトでのデータはないが、ICRP ではしきい線量がないものとして取り扱っている。

問 23 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 倍加線量の逆数は単位線量当たりの突然変異の過剰相対リスクを表す。
- B 遺伝性（的）影響のしきい線量は1 Gy 程度とされている。
- C 放射線被ばくとは無関係に生じることがある。
- D 遺伝性（的）影響には線量率効果が見られない。

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

〔解答〕

2

- 注) A : 正 倍加線量とは、自然突然変異率を2倍に増加させるのに必要な放射線量である。したがって、倍加線量の逆数は単位線量当たりの突然変異の過剰相対リスクを表すことになる。
- B : 誤 遺伝的影響は確率的影響なので、しきい値はない。
- C : 正 遺伝的影響は突然変異が引き金となり起こる。その突然変異には、自然突然変異と放射線誘発突然変異とがあるが、自然突然変異には原因が不明なものや天然放射線によるものもある。したがって、放射線被ばくとは無関係に遺伝的影響が起きる場合があることになる。
- D : 誤 線量率効果は、放射線による生物学的効果を見ているので、遺伝的影響も含まれることになる。

問 24 放射線による遺伝性（的）影響に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 遺伝性（的）影響の重篤度は線量に依存しない。
- B 原爆被爆者の調査では見つかっていない。
- C 遺伝性（的）影響のリスク推定では、動物実験のデータも利用されている。
- D 遺伝性（的）影響は倍加線量が大きいほど、起こりやすい。

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

〔解答〕

1

主任者 コーナー

- 注) A：正 遺伝的影響は確率的影響なのでしきい値が存在せず、線量の増加とともに影響の発生頻度が増加する。
- B：正 原爆被爆者を対象とした疫学調査では、放射線被ばくによって遺伝的影響が増大したというデータはない。
- C：正 動物実験では受けた線量に比例して遺伝的影響の発生する確率が増大するというデータがあるので、リスク推定に利用されている。
- D：誤 倍加線量とは、自然突然変異率を2倍に増加させるのに必要な放射線量である。したがって、遺伝的影響も2倍に増加すると考えて良いので、倍加線量の大きさにより変動することはない。

問 25 低 LET 放射線と比較した高 LET 放射線の細胞致死作用に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

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

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

〔解答〕

2

- 注) A：正 高 LET 放射線の生体内分子への作用は、標的分子を直接的に電離、励起する直接作用が主である。ラジカルスカベンジャーによる防護効果が大きいのは、放射線による水分子の電離と励起を経て生じる活性酸素種が、標的分子に作用する間接作用の場合である。低 LET 放射線はこの間接作用が主である。
- B：誤 直接作用の寄与が大きい (A の解説参照)。
- C：正 直接作用の比率が高い高 LET 放射線は比電離度が大きいので、それだけ生体内標的に対しダメージを与えやすい。したがって、生物学的効果比 (RBE) も大きくなる。
- D：誤 線量率効果とは、同じ線質の放射線を照射する場合、線量率を低くするほど生体に対する作用は小さくなる効果をいう。これは、主に間接作用によるダメージを受けた細胞の回復反応が働く結果と考えられ、低 LET 線では顕著に現れる。一方、直接作用が主である高 LET 線ではあまり見られない。

問 26 次の放射線のうち、高 LET 放射線に分類されるものの組合せはどれか。

- A γ 線
- B β 線
- C 中性子線
- D 炭素イオン線

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

〔解答〕

5

注) 低 LET 線は、電磁波である X 線や γ 線であり、高 LET 線は、粒子線である α 線、陽子線、中性子線、炭素イオン線などである。

問 27 培養細胞の致死効果を指標とした RBE に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 細胞の種類により値が異なる。
- B 線量率によって値が変化する。
- C 酸素濃度の違いによる効果の違いを表す。
- D LET の増加とともに増加し続ける。

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 細胞の種類により、放射線に対する感受性が異なるので RBE の値も異なる。
 B：正 線量率効果により値が変化する（問 25 設問 D の解説参照）。
 C：誤 生物学的効果の違いを表している。酸素濃度の違いによる効果の違いを表しているのは酸素増感比（OER）である。
 D：誤 LET が大きくなるにつれて RBE は大きくなるが、 $10^2 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 付近で最大となり、その後は減少する。これは、高 LET による殺しすぎであり、必要以上のエネルギーを与えるので線量当たりの致死効果が小さくなる。

問 28 炭素イオン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 γ 線よりも細胞致死効果を指標とした RBE が大きい。
- B 停止する付近で LET が最大となる。
- C 治療に利用する場合、体内よりも体表面のがんに有効である。
- D γ 線よりも細胞致死効果の OER 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〕

1

- 注) A：正 炭素イオン線は γ 線よりも細胞致死効果を指標とした RBE が大きい。
 B：正 炭素イオン線は停止する付近で LET が最大となり、ブラッグピークを形成する。
 C：誤 炭素イオン線はブラッグピークを持ち、治療に利用する場合、体内面の深部のがんに有効である。
 D：誤 炭素イオン線などの重粒子線や α 線は γ 線よりも細胞致死効果の OER が小さい。

問 29 各種放射線による外部被ばくに関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A α 線は身体の深部まで到達する。
- B β 線は骨髄障害に比べ皮膚障害を起こしやすい。
- C γ 線は体内でブラッグピークを形成する。
- D 熱中性子は骨髄障害に比べ皮膚障害を起こしやすい。

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

主任者 コーナー

〔解答〕

4

- 注) A : 誤 α 線は粒子として大きく、体表の表面でとどまり、身体の深部には到達しない。したがって、内部被ばくで問題となる放射線である。
- B : 正 β 線の外部被ばくでの飛程は γ 線と比較して短いので表層にある皮膚障害の方が体の深部にある骨髄の障害に比べ起こしやすい。
- C : 誤 ブラッグピークは重粒子線、陽子線や α 線で形成され、 γ 線では形成しない。
- D : 正 熱中性子の飛程は深部には到達せず、体の表層で核反応により吸収されたり、 β 線を出して陽子に変換され、障害が表面で起きやすいため、体表にある皮膚障害の方が体の深部にある骨髄の障害に比べ起こしやすい。

問 30 放射線加重係数（ICRP 2007 年勧告）に関する次の記述のうち、正しいものの組合せはどれか。

- A 光子では 1 である。
- B α 粒子と重イオンでは 20 である。
- C 陽子では 5 である。
- D 中性子では 25 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〕

1

- 注) A : 正 光子では 1 であり、正しい。
- B : 正 α 粒子と重イオンでは 20 であり、正しい。
- C : 誤 陽子では 2 であり、5 は誤り。
- D : 誤 中性子はエネルギーに依存した連続的な関数で表され、25 という一定の値をとらない。

物 化 生

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

Ⅰ X線及び γ 線並びに中性子は□A□放射線と呼ばれ、それぞれ物質と特徴的な相互作用を起こす。X線及び γ 線は波長の短い光子であり、赤外線、可視光などの電磁波と区別して電磁放射線と呼ばれる。一方、中性子は原子核を構成する核子の一つであるが、核外で単独に存在するときは約□ア□分の平均寿命で□B□に壊変する。中性子は電荷を持たないため、中性子の物質との相互作用は主として原子核との相互作用であるといえることができる。

<Aの解答群>

- 1 二次電離 2 非電離 3 非粒子 4 無電荷 5 直接電離 6 間接電離

<Bの解答群>

- 1 電子 2 陽電子 3 陽子 4 重陽子 5 三重陽子（トリトン）
6 中間子

<アの解答群>

- 1 0.3 2 0.4 3 0.5 4 1.0 5 1.5 6 2.0 7 3.0 8 4.0
9 5.0 10 10 11 15 12 20 13 30 14 40 15 50

Ⅱ 光子の物質との相互作用は、レイリー散乱、コンプトン効果、光電効果、電子対生成、光核反応など複数存在し、その断面積は光子のエネルギーや物質の原子番号に依存する。たとえば、光子エネルギーが16 keVで物質が水の場合には□C□が主たる相互作用であるが、光子エネルギーが400 keVのとき、物質が水の場合には□D□が、鉛の場合では□E□が主たる相互作用となる。

これらのうち、コンプトン効果は光子（波長 λ ）が軌道電子と衝突して散乱される現象をいい、光子の重要な相互作用の一つである。コンプトン効果では光電効果と同様に軌道電子が放出されるが、光電効果の場合には入射光子が消滅するのに対して、コンプトン効果では波長の長くなった光子が散乱される。この散乱光子の波長を λ' とすると、波長の差（ $\lambda' - \lambda$ ）の値は□イ□となる。ただし、電子の質量を m 、プランク定数を h 、光速を c 、入射光子の進行方向に対する散乱光子の散乱角を ϕ とする。

<Cの解答群>

- 1 レイリー散乱 2 コンプトン効果 3 光電効果 4 電子対生成 5 光核反応

<Dの解答群>

- 1 レイリー散乱 2 コンプトン効果 3 光電効果 4 電子対生成 5 光核反応

<Eの解答群>

- 1 レイリー散乱 2 コンプトン効果 3 光電効果 4 電子対生成 5 光核反応

主任者 コーナー

<イの解答群>

$$\begin{array}{lllll}
 1 & \frac{h}{mc} \cos \phi & 2 & \frac{h}{mc} \sin \phi & 3 & \frac{mc}{h} \cos \phi & 4 & \frac{mc}{h} \sin \phi & 5 & \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) \\
 6 & \frac{h}{mc} (1 - \sin \phi) & 7 & \frac{mc}{h} (1 - \cos \phi) & 8 & \frac{mc}{h} (1 - \sin \phi) & 9 & \frac{h}{mc} \cdot \frac{1}{(1 - \cos \phi)} \\
 10 & \frac{h}{mc} \cdot \frac{1}{(1 - \sin \phi)} & 11 & \frac{mc}{h} \cdot \frac{1}{(1 - \cos \phi)} & 12 & \frac{mc}{h} \cdot \frac{1}{(1 - \sin \phi)}
 \end{array}$$

Ⅲ 中性子はそのエネルギーにより熱中性子、熱外中性子、速中性子等に分類される。熱中性子は周囲媒体と熱平衡にある中性子をいい、その速度分布は 分布を示し、平均のエネルギーは常温で eV 程度である。熱中性子よりもややエネルギーの高いものを熱外中性子といい、さらにエネルギーが十分高いものを速中性子と呼ぶ。

原子核に中性子が捕獲される捕獲反応は熱中性子や熱外中性子等の「遅い中性子」で主として起こり、質量数が1増加した原子核が生成される。核内の中性子の結合エネルギーがおおよそ8 MeVであるので、この反応は 反応であり、エネルギーの低い中性子によってエネルギーの高い励起状態の核が形成される。この励起状態から γ 線が放出される。 は熱中性子に対する捕獲断面積が2,520 b (バーン) と大きいことで知られ、熱中性子の遮蔽や発生する γ 線を利用して熱中性子の検出に用いられる。このほかに、 ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p}){}^3\text{H}$ 、 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \alpha){}^3\text{H}$ 、 ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$ 等の核変換を起こす反応があり、比較的大きなQ値をもつため熱中性子の検出に利用される。これらは 反応と呼ばれ、通例は高エネルギー中性子の 反応として起こるが、エネルギーの低い中性子でも の小さい軽い核に対して起こり得る。捕獲反応及び 反応は吸収反応と総称され、これには 反応や中性子放出反応も含まれる。

さらに中性子のエネルギーが大きくなるに従い、反応の断面積は中性子の速度に逆比例する振る舞いを見せる。また中性子のある特定のエネルギーで捕獲反応が強く起こることがあり、これを という。

<Fの解答群>

- 1 一様 2 二項 3 ランダウ 4 ポアソン 5 マクスウェル・ボルツマン
6 ローレンツ 7 ウィグナー

<ウの解答群>

- 1 0.010 2 0.025 3 0.034 4 0.050 5 0.10 6 0.25 7 0.34
8 0.50 9 1.0 10 2.5 11 3.4 12 5.0

<Gの解答群>

- 1 発熱 2 吸熱 3 化学 4 可逆 5 荷電変換 6 電子入射
7 イオン入射

<Hの解答群>

- 1 コバルト 2 マンガン 3 カドミウム 4 インジウム 5 金 6 水銀
7 鉛

<Iの解答群>

- 1 核分裂 2 核融合 3 荷電変換 4 荷電粒子放出 5 熱中性子検出
6 中性子捕獲 7 核転換

<Jの解答群>

- 1 発熱 2 吸熱 3 化学 4 可逆 5 荷電変換 6 電子入射
7 イオン入射

<Kの解答群>

- 1 核力 2 遠心力 3 クーロン障壁 4 結合エネルギー 5 質量欠損
6 表面張力 7 束縛エネルギー

<Lの解答群>

- 1 核転換 2 核融合 3 荷電変換 4 核破碎 5 熱中性子検出
6 中性子捕獲 7 核分裂

<Mの解答群>

- 1 自己吸収 2 吸収端 3 ブライト・ウィグナー共鳴 4 共鳴吸収 5 全吸収
6 共鳴散乱 7 ラザフォード散乱

IV 10 keV～500 keV 程度のエネルギーをもつ速中性子は物質中では主として原子核との弾性散乱によりエネルギーを失う。エネルギー E_n の速中性子が質量 M の原子核と弾性散乱したとき、原子核に与える最大エネルギー E は次式で表される。ただし、中性子の質量を n とする。

$$E = \boxed{\text{エ}} E_n$$

反跳核のエネルギーは、 $0 \sim E$ に渡って $\boxed{\text{N}}$ 分布する。このようにして中性子のエネルギーを効率よく低下させる物質を減速材といい、水、パラフィン、黒鉛などがある。黒鉛 (^{12}C) の場合、反跳原子核の最大エネルギー E は $\boxed{\text{オ}}$ E_n である。これにより、衝突後の中性子の平均エネルギーは $\boxed{\text{カ}}$ E_n となる。

500 keV を超えるエネルギーの速中性子では、弾性散乱のほか非弾性散乱が起こり、また種々の荷電粒子放出反応も起こる。

<Nの解答群>

- 1 一様 2 二項 3 ランダウ 4 ポアソン 5 マクスウェル・ボルツマン
6 ローレンツ 7 ウィグナー

<エの解答群>

- 1 $\frac{nM}{(n+M)}$ 2 $\frac{2nM}{(n+M)}$ 3 $\frac{4nM}{(n+M)}$ 4 $\frac{nM}{(n+M)^2}$ 5 $\frac{2nM}{(n+M)^2}$ 6 $\frac{4nM}{(n+M)^2}$
7 $\frac{n^2M^2}{(n+M)}$ 8 $\frac{2n^2M^2}{(n+M)}$ 9 $\frac{4n^2M^2}{(n+M)}$ 10 $\frac{n^2M^2}{(n+M)^2}$ 11 $\frac{2n^2M^2}{(n+M)^2}$ 12 $\frac{4n^2M^2}{(n+M)^2}$
13 $\frac{8n^2M^2}{(n+M)^2}$ 14 $\frac{n^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}}{(n+M)}$ 15 $\frac{2n^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}}{(n+M)}$

<オ、カの解答群>

- 1 0.12 2 0.20 3 0.28 4 0.36 5 0.44 6 0.52 7 0.60
8 0.68 9 0.72 10 0.80 11 0.86 12 0.92 13 0.98

〔解答〕

- I $\boxed{\text{A}}$ - 6 $\boxed{\text{B}}$ - 3
 $\boxed{\text{ア}}$ - 11

注) 電荷を持たない放射線についての問題である。

主任者 コーナー

B：原子核外の中性子は弱い力により， $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ の崩壊をする。

A：核外中性子の平均寿命は 880.1 ± 1.1 秒

II C－3 D－2 E－3

イ－5

注) 光子と物質の相互作用についての問題である。

イ，D，E：光電効果の断面積はおよそ原子番号の 5 乗に比例する。

コンプトン効果において入射光子，散乱光子のエネルギーを， E_γ ， $E_{\gamma'}$ 電子の質量を m とすると，入射光子と散乱光子のエネルギー差は，

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

と表すことができる。光子のエネルギー E_γ と波長 λ には， $E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$ の関係があるので

$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\phi)$ となる。また，その断面積は原子番号に比例する。

III F－5 G－1 H－3 I－4 J－2 K－3

L－7 M－4

ウ－2

注) 中性子と物質との相互作用についての問題である。

F，ウ：熱中性子は，周囲の媒質の温度が室温のとき熱平衡にある中性子で，エネルギー分布はマクスウェル・ボルツマン分布をし，運動エネルギーの分布の最大値に対応するエネルギーは 0.025 eV である。

H：インジウム 193 b，コバルト 37 b など。

IV N－1

エ－6 オ－3 カ－11

注) 速中性子と物質との相互作用についての問題である。

エ：実験室系での中性子の速度を u とすると，重心系での中性子の速度は $\frac{M}{n+M}u$ ，原子核の重心

系での速度は $\frac{n}{n+M}u$ である。重心系における中性子の散乱角を ϕ とすると，実験室系での原子核の運動エネルギー E は，

$$E = \frac{2nM}{(n+M)^2}(1 - \cos\phi)E_n$$

と書ける。したがって，原子核の持つ最大エネルギーは $\frac{4nM}{(n+M)^2}E_n$ となる。

オ：エの式， M に $12n$ を代入して 0.28 を得る。

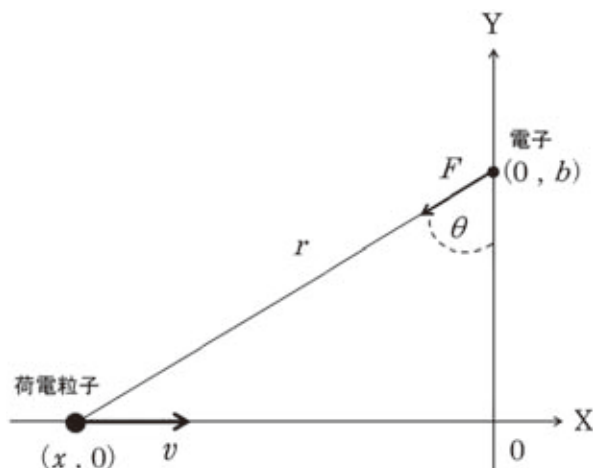
カ：反跳核のエネルギーは最高 $0.28 E_n$ の一様分布となるため，平均エネルギーは $0.14 E_n$ である。エネルギー保存より中性子の平均エネルギーが求められる。

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。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 荷電粒子と物質の相互作用について

考えよう。真空中において時刻 t のとき、図に示すとおり電子（質量 m 、電荷 $-e$ ）が Y 軸上の点 $(0, b)$ にあり、質量 M （ただし $M \gg m$ ）、電荷 $+ze$ の荷電粒子が X 軸上の点 $(x, 0)$ を速さ v で X 軸上の正の方向に通過する場合を考える。このとき電子は Y 軸に対し図中の θ の方向で荷電粒子より



ア 力 F を受ける。両者の間隔が r であるとする、 $F = k$ ア (ただし k は比例定数) である。電子の得る運動量 P は イ に等しく、荷電粒子の速さ v が電子のそれより

$$P_x = \text{B} \quad (1)$$

$$P_y = \int_{-\infty}^{\infty} \{k \text{ A} \cdot \text{C}\} dt \quad (2)$$

よって P を r の代わりに b と θ を用いて表すと

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \int_{-\infty}^{\infty} k \text{ D} \cdot (\text{C})^3 dt \quad (3)$$

となる。

ここで、

$$\frac{d(\tan \theta)}{dt} = \frac{1}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\left(\frac{x}{b}\right)}{dt} = \frac{1}{b} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{v}{b}$$

これより、 $dt = \frac{b}{v} \cos^{-2} \theta d\theta$ の関係を用いると、

$$P = k \text{ E} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta = 2k \text{ E} \quad (4)$$

が得られる。

また電子の得る運動エネルギー T は P を用いて表すと

$$T = \text{F} \quad (5)$$

なので、(4) 式及び (5) 式より

$$T = 2k^2 \text{ G} \quad (6)$$

主任者 コーナー

である。これは [ウ] により、荷電粒子が失うエネルギーに等しい。

<ア～ウの解答群>

- 1 ローレンツ 2 ファンデルワールス 3 クーロン 4 ブラッグ
5 モーメント 6 角速度 7 速度 8 力積 9 ポテンシャル
10 運動エネルギー 11 運動量保存則 12 質量保存則 13 空洞原理
14 エネルギー保存則

<Aの解答群>

- 1 $\frac{ze^2}{r^2}$ 2 $\frac{ze^2}{b^2}$ 3 $\frac{ze^2}{bv}$ 4 $\frac{ze^2}{r}$ 5 $\frac{z^2e^4}{mb^2v^2}$

<B, Cの解答群>

- 1 θ 2 $\sin\theta$ 3 $\cos\theta$ 4 $\tan\theta$ 5 $\sin^{-1}\theta$ 6 $\cos^{-1}\theta$ 7 $\tan^{-1}\theta$
8 -1 9 0 10 1

<D～Gの解答群>

- 1 $\frac{ze^2}{r^2}$ 2 $\frac{ze^2}{b^2}$ 3 $\frac{ze^2}{bv}$ 4 $\frac{ze^2}{mbv}$ 5 $\frac{z^2e^4}{mb^2v^2}$ 6 $\frac{P}{m}$ 7 $\frac{P}{2m}$ 8 $\frac{P^2}{2m}$
9 $\frac{P^2}{m}$ 10 $\frac{P^2}{m^2}$

II Iの(6)式より高速(速度 v)の荷電粒子(質量 M , 電荷 ze)は、電子との相互作用において [H] に比例してエネルギーを失う。荷電粒子が物質内を通過する際に単位長さ当たり失うエネルギー

$-\frac{dE}{dx}$ は阻止能と呼ばれ、次のような [エ] の式で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4}{4\pi\epsilon_0 m} [\text{I}] \times N_A \rho \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2mv^2}{I \left\{ 1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right\}} - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right] \quad (7)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 N_A はアボガドロ数、 ρ , Z , A 及び I はそれぞれ物質の密度、平均の原子番号、質量数及びイオン化ポテンシャルであり、 c は光速である。これを ρ で除した $-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}$ は [オ] と呼ばれる。

荷電粒子が物質中で止まるまでに進んだ距離を飛程 R といい、飛程 R は

$$R = \int_E^0 \frac{dE}{[\text{J}]} \quad (8)$$

と表せる。(7)式、(8)式及び $E = Mv^2/2$ の関係を用いると、ある物質に対する速度の等しい2種類の荷電粒子の飛程は次のように表される(添字の1, 2はそれぞれ粒子の種類を表す)。

$$R_2 = \frac{M_2}{M_1} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2 R_1 \quad (9)$$

例えば200 MeV 陽子の水中飛程が26 cmであるとすると(9)式から核子当たり200 MeVの炭素イオン($^{12}\text{C}^{6+}$)の水中飛程は [K] cmと計算できる。

200 MeV 陽子の水中での [オ] が $4.5 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ であるとすると、 $1.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のフルエンス率でこれが垂直入射した場合、表面付近における水吸収線量率は [L] $\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ となる。

また核子当たり 200 MeV の炭素イオン ($^{12}\text{C}^{6+}$) の場合は同じフルエンス率に対し $\boxed{\text{M}}$ $\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ となる。

<H~J の解答群>

$$1 \quad \frac{z}{v} \quad 2 \quad \frac{v}{z} \quad 3 \quad \frac{z^2}{v^2} \quad 4 \quad \frac{v^2}{z^2} \quad 5 \quad -\frac{dE}{dx} \quad 6 \quad \frac{dv}{dx} \quad 7 \quad \frac{dx}{d\theta}$$

<エ, オの解答群>

1 質量エネルギー吸収係数 2 線減弱係数 3 放射長 4 質量阻止能
5 W 値 6 ブラッグ 7 グレイ 8 ベーテ 9 プランク

<K~M の解答群>

1 2.2 2 4.3 3 8.7 4 13 5 52 6 78 7 156 8 312

〔解答〕

I $\boxed{\text{A}}$ - 1 $\boxed{\text{B}}$ - 9 $\boxed{\text{C}}$ - 3 $\boxed{\text{D}}$ - 2 $\boxed{\text{E}}$ - 3 $\boxed{\text{F}}$ - 8
 $\boxed{\text{G}}$ - 5
 $\boxed{\text{ア}}$ - 3 $\boxed{\text{イ}}$ - 8 $\boxed{\text{ウ}}$ - 14

注) 荷電粒子と物質の相互作用を考える際に用いられる, ボーア (Bohr) の古典的阻止能の計算についての問題である。 b は衝突パラメタと呼ばれ, 適当な b の領域に含まれる電子の個数を乗ずることにより, α 粒子や重荷電粒子の阻止能を求めることができる。

B : X 座標の正負で対称なので全領域を考えると 0 になる。

II $\boxed{\text{H}}$ - 3 $\boxed{\text{I}}$ - 3 $\boxed{\text{J}}$ - 5 $\boxed{\text{K}}$ - 3 $\boxed{\text{L}}$ - 2 $\boxed{\text{M}}$ - 7
 $\boxed{\text{エ}}$ - 8 $\boxed{\text{オ}}$ - 4

注) 重荷電粒子と物質の相互作用についての問題である。

エ : ベーテ (Bethe) の式は, $\ln$ 以下の項は変化が鈍く, $\frac{z^2}{v^2}$ に比例することが重要である。

K : 炭素イオンのエネルギーが核子当たりで陽子と等しく 200 MeV なので, 両者は同じ速さである。そこで添字の 1 を陽子, 2 を炭素イオンとして (9) 式は,

$$R_2 = \frac{12}{1} \left(\frac{1}{6} \right)^2 \times 26 [\text{cm}] = 8.7 [\text{cm}]$$

となる。

L, M : $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ であることから, 陽子の水吸収線量率は,

$$4.5 \times 10^6 \times 10^3 [\text{eV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}] \times 1.0 \times 10^8 [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{J} \cdot \text{eV}^{-1}] \times 60 [\text{s}] \\ = 4.32 [\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1}]$$

となる。陽子と同じ速さを持つ炭素イオンは電荷の違いから 6^2 倍の質量阻止能を持つため, 水吸収線量率は $4.32 \times 6^2 = 156 [\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1}]$ となる。

問 3 次の I ~ III の文章の $\boxed{}$ 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 難溶性塩 CuS の溶解度積 $K_{\text{sp}}(\text{CuS})$ は, 飽和水溶液における固-液平衡 $\text{CuS} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + \text{S}^{2-}$ のイオン濃度の積 $K_{\text{sp}}(\text{CuS}) = [\text{Cu}^{2+}][\text{S}^{2-}]$ で表される。溶液中のイオン濃度の積が $K_{\text{sp}}(\text{CuS})$ よりも大きくなると溶液から固体が析出する。 S^{2-} は水溶液中で $\boxed{\text{A}}$ である H_2S の解離により生成するため, $[\text{S}^{2-}]$ は溶液

主任者 コーナー

の pH に強く依存し、pH が になると増加する。

$^{64}\text{Cu}^{2+}$ を 1.0 kBq ($1.1 \times 10^{-16} \text{ mol}$) と $^{65}\text{Zn}^{2+}$ を 1.0 kBq ($5.1 \times 10^{-14} \text{ mol}$) 含む Cu^{2+} と Zn^{2+} の各濃度 $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸溶液 1 L がある。これに H_2S を吹き込んで飽和させる (この条件では $[\text{S}^{2-}] = 7.6 \times 10^{-23} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ となる)。ただし、 $K_{\text{sp}}(\text{CuS}) = [\text{Cu}^{2+}][\text{S}^{2-}] = 6.5 \times 10^{-30} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^2$, $K_{\text{sp}}(\text{ZnS}) = [\text{Zn}^{2+}][\text{S}^{2-}] = 2.2 \times 10^{-18} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^2$ とする。

この操作により硫化銅(Ⅱ)が沈殿し、溶液中に残る銅イオン濃度は $^{64}\text{Cu}^{2+}$ と非放射性 Cu^{2+} も含めて $K_{\text{sp}}(\text{CuS})/[\text{S}^{2-}]$ で表され、 $8.6 \times \text{} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ となる。なお、 $1.0 \text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1}$ の $^{64}\text{Cu}^{2+}$ のみで硫化物は 。一方、 $[\text{Zn}^{2+}]$ と $[\text{S}^{2-}]$ との積は $7.6 \times \text{} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^2$ であり、この値は $K_{\text{sp}}(\text{ZnS})$ より小さいので $^{65}\text{Zn}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$ は沈殿しないで溶液中に残り、 $\text{Cu}^{2+} + ^{64}\text{Cu}^{2+}$ と $\text{Zn}^{2+} + ^{65}\text{Zn}^{2+}$ の相互分離が可能になる。

このような難溶性塩の生成を利用して、各種の放射性核種を相互に分離することができる。例えば、 $^{26}\text{Al}^{3+}$, $^{64}\text{Cu}^{2+}$, $^{65}\text{Zn}^{2+}$, $^{137}\text{Cs}^{+}$ とそれぞれの担体を含む $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸溶液に、 H_2S を通すと $^{64}\text{Cu}^{2+}$ が硫化物として沈殿する。沈殿をろ別後、ろ液を沸騰させて H_2S を追い出した後に、アンモニア水を過剰に加えると のみを水酸化物として沈殿分離することができる。次いで、そのろ液に H_2S を通じると が硫化物として沈殿し、 が溶液中に残る。

<A, B の解答群>

1 強酸 2 弱酸 3 強塩基 4 弱塩基 5 大きく 6 小さく

<C の解答群>

1 10^{-10} 2 10^{-8} 3 10^{-6} 4 10^{-4} 5 10^{-2}

<D の解答群>

1 沈殿する 2 沈殿しない

<E の解答群>

1 10^{-28} 2 10^{-26} 3 10^{-24} 4 10^{-22} 5 10^{-20}

<F~H の解答群>

1 $^{26}\text{Al}^{3+}$ 2 $^{64}\text{Cu}^{2+}$ 3 $^{65}\text{Zn}^{2+}$ 4 $^{137}\text{Cs}^{+}$

Ⅱ 試料中のある成分(化合物)を定量するとき、その成分を完全に分離して定量することは容易ではない。同位体希釈分析法は、目的成分の全量を分離する必要がなく、その一部を純粋に取り出すことができれば定量ができる特徴をもつ。

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て定量する方法は直接希釈法と呼ばれる。この方法では、試料中の化合物の質量 X を定量するために、標識化合物の一定量(質量 a , 比放射能 S_0)を加えて十分に混合する。その後、混合物から定量すべき化合物の一部を分離して精製し、その質量と放射能を測定して比放射能 S を求める。表を参考にして、混合前の標識化合物の全放射能 S_0a は、混合後の全放射能 に等しい。この関係から $X = \text{}$ が得られる。

		質量	比放射能	全放射能
添加前	定量すべき化合物	X	0	0
	添加する標識化合物	a	S_0	S_0a
添加後	混合物	$X+a$	S	I

一例として、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、及び Zn^{2+} を含む $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸溶液試料中の Zn^{2+} を直接希釈法で定量する。この試料溶液に、 10 mg の $^{65}\text{Zn}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$ (比放射能 $15.0 \text{ kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$) を加え、十分混合して均一にした。この溶液の一部をとり、 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸で前処理した カラムに通す。これらの金属イオンは塩化物イオンとクロロ錯体を生成すると カラムに吸着される。 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸を流し続けると、 Ni^{2+} はいずれの塩酸濃度でも陽イオンのままなので、まず が溶出し、次いで $2.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸で が、最後に $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸を流すと最もクロロ錯体を作りやすい が溶出する。溶出した の一部をとり、質量と放射能の測定から比放射能 $2.0 \text{ kBq} \cdot \text{mg}^{-1}$ を得た。したがって、試料溶液中の Zn^{2+} の質量は mg であった。

<I, J の解答群>

$$\begin{array}{lllll} 1 & S_0(X+a) & 2 & S(X+a) & 3 & a\left(\frac{S_0}{S}-1\right) & 4 & a\left(\frac{S}{S_0}-1\right) & 5 & a\left(\frac{S_0}{S}+1\right) \\ 6 & a\left(\frac{S}{S_0}+1\right) & 7 & \frac{aS}{S_0-S} & 8 & \frac{aS_0}{S_0-S} & 9 & \frac{aS}{S_0+S} & 10 & \frac{aS_0}{S_0+S} \end{array}$$

<K の解答群>

- 1 セファデックス 2 シリカゲル 3 陽イオン交換樹脂 4 陰イオン交換樹脂

<L~N の解答群>

- 1 Ni^{2+} 2 Cu^{2+} 3 Ni^{2+} と Cu^{2+} 4 $\text{Zn}^{2+} + ^{65}\text{Zn}^{2+}$

<O の解答群>

- 1 20 2 35 3 50 4 65 5 80

Ⅲ 試料中の成分で放射能はあるが、比放射能が分からない、あるいは求めることが難しい試料がある。この場合には二重希釈法が用いられる。試料中の放射性化合物を定量するために、試料から等しい量を取り、試料 A と試料 B とする。A、B の各試料中に含まれる放射性化合物の質量 X 、比放射能 S_0 を以下のように求める。

まず、試料 A、試料 B 各々に同じ化学形の非放射性化合物を異なる量 (質量 a 、 b) 加えて十分に混合した後、A、B 各々から同化合物の一部を分離して精製し、その質量と放射能を測定して、それぞれの比放射能 S_a 及び S_b を求める。

試料 A		質量	比放射能	全放射能
添加前	定量すべき放射性化合物	X	S_0	S_0X
	添加する非放射性化合物	a	0	0
添加後	混合物	$X+a$	S_a	P

各々の試料において混合前の全放射能は混合後の全放射能に等しいので、表に示す試料 A では $S_0X = \text{P}$ となる。試料 B についても同様な式が成り立つので、 $X = \text{Q}$ となる。また、放射性化合物の比放射能は $S_0 = \text{R}$ として求められる。

一例として、二重希釈法で $^{65}\text{Zn}^{2+}$ を含む試料中の Zn^{2+} を定量する。

100 mL の溶液試料から 40 mL ずつ分取し、一方の試料 A には非放射性の Zn^{2+} 化合物を 5 mg 加えて十分に混合した後、一部を純粋に分離したところ、その比放射能は $600 \text{ Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ であった。他方の試料 B には非放射性の Zn^{2+} 化合物 15 mg を加えて同様に処理したところ、その比放射能は 500

主任者 コーナー

$\text{Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ であった。試料 A に含まれる Zn^{2+} 化合物の質量は、S mg であり、また、元の溶液試料 100 mL 中の質量はT mg である。

<P~R の解答群>

- 1 $S_0(X+a)$ 2 $S_0(X+b)$ 3 $S_a(X+a)$ 4 $S_b(X+b)$ 5 $\frac{S_a a - S_b b}{S_a - S_b}$
 6 $\frac{S_b b - S_a a}{S_a - S_b}$ 7 $\frac{S_a a - S_b b}{a-b}$ 8 $\frac{S_b b - S_a a}{a-b}$ 9 $\frac{S_a S_b (a-b)}{S_b b - S_a a}$ 10 $\frac{S_a S_b (b-a)}{S_b b - S_a a}$

<S, T の解答群>

- 1 30 2 45 3 60 4 75 5 98 6 113 7 145 8 158

[解答]

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

注) B: H_2S の電離は $\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{S}^{2-}$ である。解離定数を K_s とすると

$$K_s = \frac{[\text{H}^+]^2 [\text{S}^{2-}]}{[\text{H}_2\text{S}]} \text{ より } [\text{S}^{2-}] = K_s [\text{H}_2\text{S}] / [\text{H}^+]^2 \text{ となる。}$$

温度・圧力が一定であるとき、ある化学組成の水に溶解する硫化水素は一定とみなせるのでアルカリ性になるほど $[\text{S}^{2-}]$ は大きくなる。

$$\text{C: } K_{\text{sp}}(\text{CuS}) / [\text{S}^{2-}] = 6.5 \times 10^{-30} / 7.6 \times 10^{-23} \div 8.6 \times 10^{-8}$$

$$\text{D: } [\text{Zn}^{2+}] [\text{S}^{2-}] = 1 \times 10^{-16} \times 7.6 \times 10^{-23} = 8.4 \times 10^{-39} < K_{\text{sp}}(\text{CuS})$$

$$\text{E: } 1.0 \times 10^{-3} \times 7.6 \times 10^{-23} = 7.6 \times 10^{-26} < K_{\text{sp}}(\text{ZnS})$$

F: Al^{3+} は強塩基 (水酸化ナトリウムなど) では錯イオン $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ を形成して溶ける。アンモニア水は弱塩基のため錯イオンを形成しない。

- II I - 2 J - 3 K - 4 L - 1 M - 2 N - 4
O - 4

注) K: $\text{M}^{2+} + n\text{Cl}^- \rightleftharpoons [\text{MCl}]^{n+2}$, 錯体の電荷が負の場合、錯体は陰イオン交換樹脂に吸着する。

$$\text{O: } X = 10 \times (15/2 - 1) = 65$$

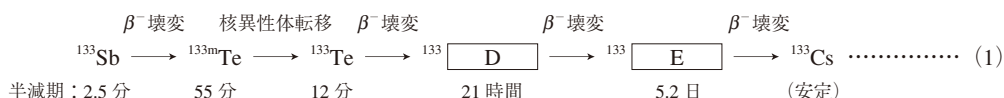
- III P - 3 Q - 6 R - 10 S - 2 T - 6

注) S: $X = (500 \times 15 - 600 \times 5) / (600 - 500) = 45$

$$\text{T: } 100/40 \times 45 = 112.5$$

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

I ^{235}U は、熱中性子により核分裂すると、2~3 個の中性子と、二つの質量の異なる核分裂片を生成 (非対称核分裂) するとともに、約 A MeV のエネルギーを発生する。したがって、1 g の ^{235}U がすべて核分裂すると、約 B J のエネルギーを発生する。二つの核分裂片は、質量数が C 及び 133~144 で大きな生成収率を示す。これらの核分裂生成核種はいずれも中性子過剰であり、ほとんどが β^- 壊変する。例えば次のように、質量数 133 の生成核種は、壊変していずれも安定核種の ^{133}Cs になる。



核分裂生成核種は、事故等で外部に放出されると大きな環境汚染問題となるが⁸、一方では、核分裂を利用して有用な医療用アイソトープも製造されている。

<A の解答群>

1 1 2 2 3 5 4 10 5 20 6 50 7 100 8 200

<B の解答群>

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

<C の解答群>

1 79~89 2 90~100 3 101~111 4 112~132 5 145~156
 6 157~163

<D, E の解答群>

1 Ar 2 Br 3 Ca 4 Cl 5 S 6 Se 7 I 8 K 9 Kr
 10 Mg 11 Na 12 Rb 13 Sr 14 Te 15 Xe

- II 原子力発電所の事故による環境の放射能汚染において、主要な γ 線放出核種として ^{137}Cs (半減期: 30 年; 1 cm 線量当量率定数: $0.093 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) と ^{134}Cs (半減期: 2 年; 1 cm 線量当量率定数: $0.25 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) が⁸ある。 ^{137}Cs は ^{235}U の熱中性子核分裂で高い収率で生成する一方、 ^{134}Cs の核分裂生成収率は極めて小さい。この ^{134}Cs は、I の (1) 式で示した数種類の核分裂生成物から生じた安定核種 ^{133}Cs が原子炉の核燃料中に蓄積し、さらに (2) 式のように、その $\boxed{\text{F}}$ 反応で生成したものであり、長時間使用した核燃料中に多く含まれる。



したがって ^{134}Cs は、過去の核爆発実験のフォールアウトでは、ほとんど検出されていない。

^{137}Cs と ^{134}Cs が放射能 [Bq] で等量 (1:1) あるとき、 ^{137}Cs と ^{134}Cs の原子数比は $\boxed{\text{G}}$ であり、また ^{137}Cs と ^{134}Cs による 1 cm 線量当量率の比は $\boxed{\text{H}}$ である。これが 15 年後においては、 ^{137}Cs と ^{134}Cs の放射能の比は $\boxed{\text{I}}$ となり、1 cm 線量当量率の比は $\boxed{\text{J}}$ となる。

<F の解答群>

1 (n, p) 2 (n, γ) 3 (n, 2n) 4 (γ , n) 5 (d, p)

<G~J の解答群>

1 128:1 2 64:1 3 47:1 4 30:1 5 24:1 6 15:1
 7 0.84:1 8 0.37:1 9 0.06:1 10 0.02:1 11 0.008:1

- III 核分裂生成物に含まれている長寿命核種のうち、体内に摂取された場合、問題になるのが ^{90}Sr (半減期: 29 年) である。 ^{90}Sr は $\boxed{\text{K}}$ であり、人体内に入ると骨に沈着し長期間にわたる内部被ばくが問題になる。 ^{90}Sr は (3) 式のように β^- 壊変により逐次壊変する。単離した ^{90}Sr は 18 日間以上経過すると、生成する ^{90}Y (半減期: 2.7 日) の放射能がほぼ一定な値となり、 ^{90}Sr の放射能と 1% 以内で等しくなる。このような放射平衡状態を $\boxed{\text{L}}$ という。

主任者 コーナー



環境試料中の ${}^{90}\text{Sr}$ の分析では、 ${}^{90}\text{Sr}$ の β^- 線の最大エネルギーが 0.54 MeV と低く、 ${}^{90}\text{Y}$ が共存すると定量困難である。一方、娘核種 ${}^{90}\text{Y}$ の β^- 線の最大エネルギーが M ことから、 ${}^{90}\text{Sr}$ の定量にはこれを利用する。試料からストロンチウムを分離回収して精製した後、2 週間以上待つ。その塩酸溶液に N の捕集剤として Fe^{3+} を、O の保持担体として Sr^{2+} を、それぞれ塩化物の形で加えた後、加熱しながらアンモニア水を加えて水酸化鉄（Ⅲ）の沈殿をつくり、この沈殿中に娘核種 ${}^{90}\text{Y}$ を共沈させて親核種 ${}^{90}\text{Sr}$ から分離する。 ${}^{90}\text{Y}$ の放射能測定から共沈させた時刻における ${}^{90}\text{Y}$ の放射能を算出し、放射平衡にあった ${}^{90}\text{Sr}$ の放射能を求めることができる。

<K の解答群>

- 1 アルカリ金属 2 アルカリ土類金属 3 ハロゲン 4 遷移元素

<L の解答群>

- 1 溶解平衡 2 永続平衡 3 過渡平衡

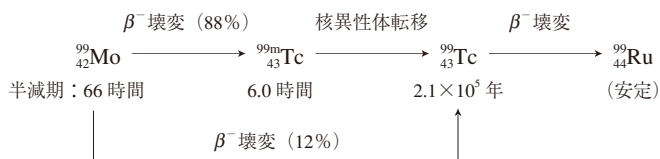
<M の解答群>

- 1 0.0186 MeV と低い 2 1.71 MeV と高い 3 2.28 MeV と高い

<N, O の解答群>

- 1 ${}^{89}\text{Rb}$ 2 ${}^{89}\text{Sr}$ 3 ${}^{90}\text{Sr}$ 4 ${}^{89}\text{Y}$ 5 ${}^{90}\text{Y}$ 6 ${}^{89}\text{Zr}$ 7 ${}^{90}\text{Zr}$ 8 ${}^{89}\text{Nb}$
9 ${}^{90}\text{Nb}$

IV 核医学診断で最も多く用いられている ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ （半減期：6.0 時間）の製造には、 ${}^{99}\text{Mo}$ （半減期：66 時間）による ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータが利用できる。それに使用する ${}^{99}\text{Mo}$ は、 ${}^{235}\text{U}$ の熱中性子核分裂反応で製造され、無担体に近いものが得られる。 ${}^{99}\text{Mo}$ は β^- 壊変し、その 88% は ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ に、残りの 12% は直接 ${}^{99}\text{Tc}$ （半減期： 2.1×10^5 年）になる。生成した ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ は核異性体転移して ${}^{99}\text{Tc}$ になる。



分離精製した ${}^{99}\text{Mo}$ 中では、 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能が増加し、約 23 時間後に最大となるとき、 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能は、その時点での ${}^{99}\text{Mo}$ の放射能の約 P % になる。その後、 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能は次第に半減期 Q 時間で減衰するようになる。約 60 時間以上で ${}^{99}\text{Mo}$ と ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ は放射平衡状態になり、これを R という。このとき、 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能と ${}^{99}\text{Mo}$ の放射能の比は、 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ と ${}^{99}\text{Mo}$ の壊変定数をそれぞれ λ_{Tc} 及び λ_{Mo} とすると、S で表され、 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能は ${}^{99}\text{Mo}$ の放射能を T。

<P, Q の解答群>

- 1 6 2 11 3 55 4 60 5 66 6 77 7 80 8 88 9 97
10 100 11 106

<R の解答群>

- 1 溶解平衡 2 永続平衡 3 過渡平衡

<S の解答群>

$$1 \quad \frac{\lambda_{\text{Mo}}}{\lambda_{\text{Tc}} - \lambda_{\text{Mo}}} \quad 2 \quad \frac{\lambda_{\text{Tc}}}{\lambda_{\text{Tc}} - \lambda_{\text{Mo}}} \quad 3 \quad \frac{0.88\lambda_{\text{Mo}}}{\lambda_{\text{Tc}} - \lambda_{\text{Mo}}} \quad 4 \quad \frac{0.88\lambda_{\text{Tc}}}{\lambda_{\text{Tc}} - \lambda_{\text{Mo}}}$$

<T の解答群>

- 1 常に上回る 2 始めは上回るが次第に下回るようになる
3 始めは下回るが次第に上回るようになる 4 上回ることはない

〔解答〕

I $\boxed{\text{A}} - 8$ $\boxed{\text{B}} - 9$ $\boxed{\text{C}} - 2$ $\boxed{\text{D}} - 7$ $\boxed{\text{E}} - 15$

注) $\text{B} : 6.02 \times 10^{23} \times (1/235) \times (200 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19}) = 8.2 \times 10^{10}$

$\text{C} : 235 - 144 = 91, 235 - 133 = 102$, 中性子が 2~3 個放出される。

II $\boxed{\text{F}} - 2$ $\boxed{\text{G}} - 6$ $\boxed{\text{H}} - 8$ $\boxed{\text{I}} - 1$ $\boxed{\text{J}} - 3$

注) $\text{G} : A = -dN/dt = N\lambda, \lambda = \ln(2)/T, A_{^{137}\text{Cs}} = A_{^{134}\text{Cs}} = N_{^{137}\text{Cs}}/30 = N_{^{134}\text{Cs}}/2, N_{^{137}\text{Cs}} : N_{^{134}\text{Cs}} = 30 : 2$

$\text{H} : \text{放射能が等しいので, } 1 \text{ cm 線量当量率の比は } 1 \text{ cm 線量当量率定数の比になる。}$

$$0.093 : 0.25 = 0.37 : 1$$

$\text{I} : A/A_0 = (1/2)^{t/T}, 15 \text{ 年後 } ^{137}\text{Cs} \text{ の放射能は } (1/2)^{1/2}, ^{134}\text{Cs} \text{ は } (1/2)^{7.5} = (1/2)^7 (1/2)^{1/2}, \text{したがって放射能比は } (1/2)^{1/2} : (1/2)^{7.5} = 1 : (1/2)^7 = 1 : (1/128) = 128 : 1$

$\text{J} : 0.37 \times 128 : 1 \times 1 = 47.4 : 1$

III $\boxed{\text{K}} - 2$ $\boxed{\text{L}} - 2$ $\boxed{\text{M}} - 3$ $\boxed{\text{N}} - 5$ $\boxed{\text{O}} - 3$

注) $\text{K} : \text{Sr}$ はアルカリ土類元素である。

$\text{L} : ^{90}\text{Sr}$ の半減期は ^{90}Y より非常に長く $T_1 \gg T_2$ であることから, 永続平衡となる。

N と $\text{O} : ^{90}\text{Y}$ は水酸化鉄と共沈するが, アルカリ土類元素である Sr は基本的には水酸化鉄には取り込まれず溶液に残る。しかし, 微量の Sr は取り込まれる可能性があるので, 安定 Sr を溶液に加えることで ^{90}Sr が取り込まれる可能性を低くすることができる。

IV $\boxed{\text{P}} - 8$ $\boxed{\text{Q}} - 5$ $\boxed{\text{R}} - 3$ $\boxed{\text{S}} - 4$ $\boxed{\text{T}} - 4$

注) $\text{P} : \text{親核種と娘核種の原子数を } N_1 \text{ と } N_2, \text{そして親核種の壊変において, その } \alpha \% \text{ のみが娘核種になる場合は, 原子数の変化は次式で示される。}$

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \dots\dots (1), N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\alpha/100) N_{10} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \dots\dots (2)$$

分離精製した ^{99}Mo 中に $t=0$ で $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は含まれていないので $N_{20}=0$, (1)式を (2)式に代入する

と $N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\alpha/100) N_1 e^{\lambda_1 t} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$ が得られる。放射能比に直すと以下の式になる。

$$N_2 \lambda_2 / N_1 \lambda_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\alpha/100) [1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}] = \frac{T_1}{T_1 - T_2} (\alpha/100) \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{(T_1 - T_2)/(T_1 T_2) t} \right] \dots\dots (3)$$

経過時間 23 時間, ^{99}Mo の半減期 66 時間, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の半減期 6 時間, $\alpha=88\%$ を入れると

$$\frac{A_{^{99\text{m}}\text{Tc}}}{A_{^{99}\text{Mo}}} = \frac{66}{66-6} (88/100) \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{(66-6)/(66 \times 6) \times 23} \right] = \frac{66}{60} (88/100) \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{3.48} \right] = 1.1 \times 0.88 \times 0.91 \\ \doteq 0.881$$

主任者 コーナー

Q：親核種の半減期で減衰する。

R : $T_1 > T_2$ なので過渡平衡である。 $T_1 \gg T_2$ の場合は永続平衡になる。

S : 十分に時間が経過すると (3)式は $N_2\lambda_2/N_1\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\alpha/100)$ となる。

T : (3)式より $\frac{T_1}{T_1 - T_2} (\alpha/100) = 66/(66-6) \times 0.88 = 0.968$ となり上回ることはない。

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、数値又は数式を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。なお、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

I 放射線の単位飛跡当たりのエネルギー付与は LET で表される。細胞の高 LET 放射線に対する致死感受性は、一般に低 LET 放射線に比べて A。また、高 LET 放射線を照射した細胞の生存率曲線の肩は B。同一吸収線量の場合、1 回照射に比べ分割照射した場合には細胞の致死率が低下するが、低下の程度は高 LET 放射線に比べ低 LET 放射線で C。さらに、培養細胞の致死感受性に関する OER は、高 LET 放射線に比べ低 LET 放射線で D。低 LET 放射線では、培養液中の酸素分圧が 50 mmHg の場合、OER は約 E である。このように、細胞の放射線感受性は、吸収線量が等しくても放射線の LET によって異なる。放射線の種類（線質）やエネルギーによって生物効果の大きさに違いがあるため、放射線防護では吸収線量に F 加重係数を乗じた G 線量が用いられる。G 線量の単位は H で表される。

原爆被爆者における疫学調査から、Iがんの発がんリスクは有意に増加しているがJがんの発がんリスクの有意な増加は認められていない。このようにG線量が同一でも、身体の組織や臓器によってK影響のリスクが異なる。また、全身が均等に被ばくする場合と身体の一部が部分的に被ばくする場合でもリスクは異なる。どの臓器が被ばくするかなど、被ばくの様式によって異なるリスクを比較するために、放射線防護では、各組織・臓器のG線量に各組織・臓器によって異なるL加重係数を乗じたものの総和である実効線量が用いられる。

＜A の解答群＞

1 高い 2 低い 3 変わらない

<B～H の解答群>

1	大きい	2	小さい	3	変わらない	4	0.3	5	1	6	3	7	等価
8	実効	9	放射線	10	組織	11	実質	12	Sv	13	Gy	14	Bq

<I~Lの解答群>

1 確率的 2 確定的 3 乳 4 子宮 5 組織 6 臟器

Ⅱ 体内に取り込まれた放射性物質は、主に肝臓や腎臓で代謝された後に体外に排泄される。排泄など生物学的要因により体内量が半分になる時間を生物学的半減期 T_b という。放射性物質は物理的半減期 T_p により壊変するため、体内に残留している放射性物質の放射能が取り込み時の半分になる時間は、式 $\boxed{\text{M}}$ により与えられる有効半減期で表される。摂取された放射性物質は血中に入ると全身性に循環し、物質によっては特定の臓器に集積してその臓器の障害を起こすこともある。内部被ばくでは飛程の短い放射線の影響も問題となる。ヒトにおける内部被ばくによる誘発腫瘍として、トロントラスト注入患者における $\boxed{\text{N}}$ 腫瘍や、時計のラジウム夜光塗料文字盤工に起こった $\boxed{\text{O}}$ 腫瘍が歴史的に知られており、いずれの発がんも $\boxed{\text{P}}$ 線の寄与が大きいと考えられている。放射性物

質の種類によって、特定の臓器・細胞に集積する性質を利用して様々な放射性医薬品が臨床応用されている。カルシウムと化学的性質が似ているために「ア」は「Q」に集積するので、悪性腫瘍の「Q」転移によって起こる疼痛緩和に有効である。また、「R」が甲状腺ホルモンの成分であることを利用して、甲状腺機能亢進症の治療に「イ」が経口剤として用いられる。

<Mの解答群>

$$1 \quad \frac{T_b \times T_p}{\sqrt{T_b^2 + T_p^2}} \quad 2 \quad \frac{T_b \times T_p}{T_b + T_p} \quad 3 \quad \sqrt{T_b^2 + T_p^2} \quad 4 \quad T_b + T_p$$

<N~Rの解答群>

1 肝臓 2 大腸 3 ^{すい}膵臓 4 骨 5 α 6 β 7 γ 8 カリウム
9 ヨウ素 10 マグネシウム

<ア, イの解答群>

1 ²⁷Mg 2 ⁴⁰K 3 ⁸⁹Sr 4 ⁹⁰Y 5 ^{99m}Tc 6 ¹³¹I 7 ¹³⁷Cs

〔解答〕

I 「A」-1 「B」-2 「C」-1 「D」-1 「E」-6 「F」-9
 「G」-7 「H」-12 「I」-3 「J」-4 「K」-1 「L」-5

注) 線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer, LET) とは放射線の粒子の飛跡に沿って単位長さ当たりに局所的に与えられるエネルギー量をいい、これによって線質の違いを評価する。生体内の損傷を考えると微視的なミクロな電離の空間的分布の違いが、放射線の生体影響の違いを生む。同一線量であっても単位長さ当たりで密に電離する α 線、重粒子線や中性子と粗に電離する X 線・ γ 線や β 線とは生物学的効果は違うのはこのためである。同じ線量であっても放射線の種類、エネルギーの違いにより生体に及ぼす効果の量的な違いの比を生物学的効果比 (Relative Biological effectiveness, RBE) という。

放射線加重係数と組織加重係数は放射線防護のための防護量を評価するために用いられる。等価線量は放射線の種類に関係なく、人体への影響を同じ尺度で比較するために「吸収線量×放射線加重係数」の式で計算される。実効線量は確率の影響の評価に用いられ、「(等価線量×ある組織の加重係数)+(等価線量×別の組織の加重係数)+・・・」の式で計算され、一部に受けた放射線を足し合わせ、全身で受けたらどのくらいになるか換算したものになる。

II 「M」-2 「N」-1 「O」-4 「P」-5 「Q」-4 「R」-9
 「ア」-3 「イ」-6

注) 有効半減期 T_e は生物学的半減期を T_b と物理的半減期を T_p とすると次の式となる。

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_p} \text{ であり、右辺は}$$

$$\frac{T_p + T_b}{T_b \times T_p} \text{ となり、書き換えると } T_e = \frac{T_p \times T_b}{T_p + T_b} \text{ となる。}$$

体内に取り込まれた放射性物質は、種々の臓器・組織に分布し、その後、尿、糞便、呼吸、汗などの排泄機構によって排出される。この生物学的排泄により体内量が半分になるまでの時間を生物学的半減期といい、一方、放射性壊変により放射能が半分になることを物理的半減期と呼ぶ。放射性物質の体内での減少はこの生物学的減少と物理的減少の両方が関与する。この両者により放射性物質が体内で半分になるまでの時間を有効半減期と呼び、上記の計算式で算出する。

主任者 コーナー

体内に取り込まれた放射性物質は核種により集積する臓器が異なる。また、化学的な形状によっても臓器親和性が異なるので、同じ核種でも化学的性状によっては集積する臓器が異なる場合がある。代表的な核種について例を挙げると、 ^3H は全身、 ^{32}P は骨、 ^{60}Co は肝臓、脾臓、 ^{90}Sr は骨、 ^{131}I は甲状腺、 ^{137}Cs は全身、 ^{222}Rn は肺、 ^{232}Th 、 ^{238}U や ^{239}Pu は骨と肝臓である。骨に集積しやすい核種が多く、このような核種を「骨親和性核種」という。

問6 次のⅠ、Ⅱの文章の□の部分に入る最も適切な語句又は数値を、それぞれの解答群から1つだけ選べ。なお、解答群の選択肢は必要に応じて2回以上使ってもよい。

Ⅰ 細胞に放射線を照射した場合、酸素濃度によって放射線感受性が異なることが知られている。放射線照射時に酸素があると、酸素がない場合に比べて細胞の放射線感受性が□Aなる。この現象を酸素効果という。酸素効果の大きさはOERで表される。酸素の有無に関わらず生物学的効果が等しい場合はOERの値は□Bである。

酸素効果の機序の一つとして以下のようなものが考えられている。放射線が細胞に照射されると、細胞内の□C分子に作用して化学的に不安定で反応性に富む物質をいくつか生成する。その中で□Dは生物影響が最も大きい。□DはDNAなどの生体高分子と反応して□Eを引き抜いたり、付加反応を起こす。その結果、□Fが生じる。□Fは酸素と反応して損傷が固定される。その結果として□Gに2本鎖切断などの損傷が増加すると考えられている。

酸素効果以外にも細胞の放射線感受性は次のような機序によって変化することもある。一つは損傷の発生自体を減らす機序によるものである。放射線によって生じるラジカルを減少させる物質としてラジカルスカベンジャーがある。ラジカルスカベンジャーは、□Dと反応して□Dの作用を減弱する。また、□Fは、ラジカルスカベンジャーの一種である□Hの□Iから□Jを受け取り、その結果、放射線による□Gの損傷の発生は減少する。

さらに、細胞の放射線感受性に影響を及ぼす別の機序として、放射線によって発生した□Gの損傷を修復する機序が存在する。2本鎖切断が修復される場合には、主に□Kと□Lが働く。□Kは細胞周期全般に見られ、誤りが多い修復といわれている。これに対し、□Lは細胞周期の□Mに限られるが、誤りが少ない修復といわれている。このように、細胞の放射線感受性は、様々な機序の働きによって修飾される。

<A～Fの解答群>

- 1 低く 2 高く 3 0 4 1 5 10 6 水 7 酸素 8 水素
9 酸素ラジカル 10 OHラジカル 11 生体高分子ラジカル 12 有機過酸化ラジカル

<Gの解答群>

- 1 RNA 2 DNA 3 タンパク質

<Hの解答群>

- 1 アラニン 2 グルタチオン 3 グルタミン酸

<Iの解答群>

- 1 OH基 2 SH基 3 NH_2 基

<Jの解答群>

- 1 水 2 酸素 3 水素

<K~Mの解答群>

- 1 塩基除去修復 2 スクレオチド除去修復 3 相同組換え修復
4 非相同末端結合修復 5 G₁期~S期前半 6 S期後半~G₂期 7 M期

II 酸素効果は、放射線治療の効果を左右する重要な因子である。がん細胞は増殖が速いため、腫瘍には、酸素濃度が周囲の領域と異なっている領域がある。そのため、腫瘍内には、正常組織の酸素分圧 mmHg と異なる酸素分圧に慢性的におかれている細胞が存在する。この細胞は正常組織に比べ放射線 で、放射線治療効果が 要因の一つと考えられている。このことから放射線治療においては、酸素分圧の 環境下の細胞に対し放射線増感効果を示し、酸素分圧の 環境下の細胞には放射線増感効果を示さない薬剤が求められている。

<N~Rの解答群>

- 1 5~10 2 10~20 3 20~100 4 100~150 5 低感受性 6 高感受性
7 高い 8 低い

〔解答〕

- I - 2 - 4 - 6 - 10 - 8 - 11
 - 2 - 2 - 2 - 3 - 4 - 3
 - 6

注) 酸素効果のメカニズムの1つは、放射線によって生体中の水が電離・励起を経て反応性に富む OH ラジカルと DNA が水素引き抜き反応や付加反応により生体高分子ラジカルを生じるが、酸素が近傍に存在すると、この生体高分子ラジカルと反応して致死的な DNA の二本鎖切断などの損傷を増強するためであると考えられている。一方、この酸素との反応と拮抗する生体内に存在する分子としてグルタチオンが知られている。グルタチオンの -SH 基の水素を生体高分子ラジカルに供与することで化学修復する。

DNA 二本鎖切断の修復は2種類あることが知られている。1つは非相同末端結合であり、切断端を KU70 と KU80 からなる KU 複合体が切断端に結合し、さらに DNA-PK, XRCC4 や DNA リガーゼⅣが集合し、DNA ポリメラーゼ μ も関わることで再結合される。この修復は DNA を鋳型に使うことがないので、もう1つの修復である相同組換え修復と比較して細胞周期全般で起きるが、再結合の際に誤りがちである。相同組換え修復は切断を持たない相同な配列を鋳型に用いて損傷部位の修復を行う。相同な DNA を鋳型とするため S 期~G₂ 期に局限して起きると考えられており、非相同末端結合より正確な修復である。

- II - 3 - 5 - 8 - 8 - 7

注) 固形腫瘍ではがん細胞としての性質である高い代謝とがん組織特有の血管構築から、血管から少し離れた領域で 3 mmHg 以下の低酸素性がん細胞が 10~15% 程度存在する。この領域は酸素効果が期待できないことや低酸素特異的に発現する HIF-1 α などのがん細胞の放射線抵抗性に寄与するタンパク質が存在し、放射線や制がん剤に対して抵抗性を示す。これが、放射線治療の場合に感受性を低くする1つの原因となっている。

放射線治療ではこのような低酸素性がん細胞の放射線低感受性を克服するために放射線増感剤の開発が進められている。特にニトロイミダゾール化合物が酸素と類似の働きで DNA 損傷を増大させることから、様々なニトロイミダゾール誘導体が放射線増感剤として用いるために研究が進められている。