第64回

第1種放射線取扱主任者試験
問題と解答例

第64回　令和元年8月21日，22日実施

第 64 回

第 1 種放射線取扱主任者試験問題と解答例

目　　次

法　　令
第 64 回（令和元年）…… 1

実　　務
第 64 回（令和元年）…… 18

物 理 学
第 64 回（令和元年）…… 30

化　　学
第 64 回（令和元年）…… 52

生 物 学
第 64 回（令和元年）…… 73

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

法　　令

第 64 回（令和元年）

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

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

問 1　放射性同位元素に関する次の文章の［ A ］～［ D ］に該当する語句について，放射線障害防止法上定められているものの組合せは，下記の選択肢のうちどれか。

『第 1 条　放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律第 2 条第 2 項の放射性同位元素は，放射線を放出する同位元素及びその［ A ］並びにこれらの含有物（［ B ］されているこれらのものを含む。）で，放射線を放出する同位元素の数量及び濃度がその［ C ］ごとに［ D ］定める数量及び濃度を超えるものとする。』

	A	B	C	D
1）	化合物	機器に装備	区分	政令で
2）	化合物	機器に装備	種類	原子力規制委員会が
3）	生成物	密封	区分	原子力規制委員会が
4）	化合物	密封	区分	原子力規制委員会が
5）	生成物	密封	種類	政令で

〔解答〕

2

注）令第 1 条（放射性同位元素）

放射性同位元素の定義についての問題である。放射性同位元素は，放射線を放出する同位元素及びその化合物（A）並びにこれらの含有物（機器に装備（B）されているこれらのものを含む）で，放射線を放出する同位元素の数量及び濃度がその種類（C）ごとに原子力規制委員会が（D）定める数量及び濃度を超えるものとする（参考　平成 12 年科学技術庁告示第 5 号（数量告示）放射線を放出する同位元素の数量等を定める件）。

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　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。

B　廃棄作業室とは，「放射性同位元素又は放射性汚染物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。

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

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

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

〔解答〕

5

注）則第１条（用語の定義）

放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則における用語の定義に関する問題である。A～D 以外に管理区域や汚染検査室，排水設備等についても定めているので，則第１条にて確認しておくこと。

A：正　則第１条第２号（用語の定義，作業室）

B：正　則第１条第３号（用語の定義，廃棄作業室）

C：正　則第１条第６号（用語の定義，排水設備）

D：正　則第１条第７号（用語の定義，固型化処理装置）

問３　許可又は届出の手続きに関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A　陽電子放射断層撮影装置による画像診断に用いるための放射性同位元素を製造しようとする者は，工場又は事業所ごとに，原子力規制委員会の許可を受けなければならない。

B　放射性同位元素又は放射性汚染物を業として廃棄しようとする者は，廃棄事業所ごとに，原子力規制委員会の許可を受けなければならない。

C　放射線発生装置のみを業として賃貸しようとする者は，賃貸事業所ごとに，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　表示付特定認証機器のみを業として販売しようとする者は，販売所ごとに，かつ，認証番号が同じ表示付特定認証機器ごとに，あらかじめ，原子力規制委員会に届け出なければならない。

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

〔解答〕

2

注）法第３条（使用の許可），法第４条（販売及び賃貸の業の届出），法第４条の２（廃棄の業の許可），令第７条（廃棄の業の許可の申請）等

許可又は届出の手続きに関する問題である。

A：正　法第３条第１項：非密封放射性同位元素及び放射線発生装置の使用は，許可事業者となる。

B：正　法第４条の２第１項，令第３条第２項，令第７条（廃棄の業の許可）

C：誤　法第４条（販売及び賃貸の業の届出）：賃貸の業の届出は放射性同位元素に関するもののみ。放射性発生装置の販売又は賃貸は放射線障害防止法*では規制されていない。

D：誤　法第４条第１項（販売及び賃貸の業の届出），販売の業の届出は放射性同位元素に関するもののみ。表示付特定認証機器のみを業として販売し，又は賃貸する者については届出は不要。

＊編者注）：当該試験時点での本法律名である。2019 年９月１日から“放射性同位元素等の規制に関する法律”と題名が変更（以下同じ）。

問 4　次のうち，密封されていない放射性同位元素の使用の許可のみを受けようとする者が，原子力規制委員会に提出する放射性同位元素の使用許可申請書の正本に添えなければならない書類として，放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A　予定使用開始時期及び予定使用期間を記載した書面
B　予定工事期間及びその工事期間中放射線障害の防止に関し講ずる措置を記載した書面
C　使用施設，貯蔵施設及び廃棄施設を中心とし，縮尺及び方位を付けた工場又は事業所内外の平面図
D　使用施設，貯蔵施設及び廃棄施設の主要部分の縮尺を付けた断面詳細図

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

〔解答〕

3

注）法第 3 条第 2 項，令第 3 条第 3 項（使用の許可の申請），則第 2 条第 2 項（使用の許可の申請），則別記様式第 1（使用許可申請書）

使用の許可の申請に添える書類についての問題である。10 項目以上あるので，則第 2 条第 2 項を確認しておくこと。使用許可申請書については則別記様式第 1 を参考。

A：正　則第 2 条第 2 項第 2 号
B：誤　この文言は，許可使用に係る変更の許可の申請（則第 9 条第 2 項第 3 号）に添える書類についてである。
C：正　則第 2 条第 2 項第 3 号
D：正　則第 2 条第 2 項第 5 号

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　氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては，その代表者の氏名
B　放射性同位元素の保管の委託先の氏名又は名称
C　放射性同位元素の種類
D　販売所の所在地

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

〔解答〕

4

注）法第 4 条（販売及び賃貸の業の届出）

届出販売業者は，法第 4 条第 1 項第 2 号または第 3 号に掲げる事項を変更しようとするときは，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。法第 4 条第 1 項第 1 号に掲げる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（法第 4 条第 3 項）。

A：誤　法第 4 条第 3 項，あらかじめではなく，変更の日から 30 日以内に届け出る。
B：誤　届出販売業者が備えるべき帳簿に記載（則第 24 条第 1 項第 2 号ホ）しなければならない事項であり，届け出る必要はない。
C：正　法第 4 条第 2 項
D：正　法第 4 条第 2 項

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。

A

B

C

D

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

〔解答〕

3

注）則第 14 条の 9 第 7 号（貯蔵施設の基準），則第 14 条の 7（使用施設の基準）第 1 項第 9 号，施行規則別表第 1（第 14 条の 7～14 条の 11，第 15 条，第 19 条関係）

使用施設等の基準において付するべき標識についての問題である。

A：正　則第 14 条の 9 第 7 号，施行規則別表第 1（放射能標識の上部に「貯蔵室」又は「貯蔵箱」の文字を，下部に「許可なくして立入りを禁ず」又は「許可なくして触れることを禁ず」の文字を記入すること。）とある。

B：誤　則第 14 条の 11 第 1 項第 10 号，施行規則別表第 1（放射能標識の上部に「廃棄作業室」の文字を記入すること。）とある。下部の「許可なくして立ち入りを禁ず」は不要。廃棄作業室には放射線業務従事者が作業を行うため立入りする。

C：誤　放射能標識は排気口及び排気浄化装置に付けることとなっており，則第 14 条の 11 第 1 項第 10 号，施行規則別表第 1（放射能標識の上部に「排気設備」の文字を，下部に「許可なくして触れることを禁ず」の文字を記入すること。）とある。「許可なくして立ち入りを禁ず」ではない。

D：正　則第 14 条の 11 第 1 項第 10 号，施行規則別表第 1（放射能標識の上部に「排水設備」の文字を，下部に「許可なくして立入りを禁ず」又は「許可なくして触れることを禁ず」の文字を記入すること。）とある。

問 7　使用施設の技術上の基準に関して，密封された放射性同位元素を使用する場合に，その旨を自動的に表示する装置及びその室に人がみだりに入ることを防止するインターロックを設けなければならない放射性同位元素の数量を示す記述として，放射線障害防止法上定められているものの組合せは，次のうちどれか。

	＜自動表示装置＞	＜インターロック＞
1）	400 ギガベクレルを超える	400 テラベクレルを超える
2）	400 ギガベクレル以上	100 テラベクレル以上
3）	100 ギガベクレルを超える	400 テラベクレルを超える
4）	100 ギガベクレル以上	100 テラベクレル以上
5）	100 ギガベクレルを超える	100 テラベクレルを超える

〔解答〕

2

注）則第 14 条の 7 第 1 項第 6 号（使用施設の基準，自動表示装置）および第 7 号（使用施設の基準，インターロック），数量告示第 11 条（自動表示装置に係る放射性同位元素の数量）および第 12 条（インタ

ーロックに係る放射性同位元素の数量）

問 8　貯蔵施設の技術上の基準に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A　貯蔵施設は，地崩れ及び浸水のおそれの少ない場所に設けること。

B　貯蔵施設の扉，蓋等外部に通ずる部分には，鍵その他の閉鎖のための設備又は器具を設けること。

C　貯蔵施設には，出入りする者を常時監視するための設備を設けること。

D　貯蔵施設は，その主要構造部等を耐火構造とし，又は不燃材料で造ること。

1）AとB　　2）AとC　　3）AとD　　4）BとC　　5）BとD

〔解答〕

1

注）則第 14 条の 9（貯蔵施設の基準）

貯蔵施設の位置，構造及び設備の技術上の基準についての問題である。

A：正　則第 14 条の 9 第 1 号

B：正　則第 14 条の 9 第 5 号

C：誤　このような規定はない。

D：誤　貯蔵施設はそこに設ける貯蔵室又は貯蔵箱が耐火性能を有するため，貯蔵施設の耐火性能は求められていない。則第 14 条の 9 第 2 号イ。（貯蔵室は，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（昭和 25 年政令第 338 号）第 112 号第 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となっている。）

問 9　許可の条件に関する次の文章の［A］～［C］に該当する語句について，放射線障害防止法上定められているものの組合せは，下記の選択肢のうちどれか。

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

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

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

〔解答〕

4

注）法第 8 条（許可の条件）

許可の条件に関する問題である。前項の条件は，放射線障害（A）を防止するため必要な最小限度のもの（B）に限り，かつ，許可を受ける者に不当な義務（C）を課することとならないものでなければならない。

問 10　次のうち，変更の許可を要しない軽微な変更に該当する事項として，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　貯蔵施設の貯蔵能力の減少

B　放射性同位元素の数量の減少
C　放射線発生装置の最大使用出力の減少
D　事業所の境界に設ける柵その他の人がみだりに立ち入らないようにするための施設の位置の変更（工事を伴わないものに限る。）

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）法第 10 条第 2 項（使用施設等の変更），則第 9 条の 2（変更の許可を要しない軽微な変更），平成 17 年 6 月 1 日文部科学省告示第 81 号第 1 条（変更の許可を要しない軽微な変更を定める告示）
変更の許可を要しない軽微な変更に関する問題。
A：正　法第 10 条第 2 項ただし書，則第 9 条の 2 第 1 号
B：正　法第 10 条第 2 項ただし書，則第 9 条の 2 第 2 号
C：正　法第 10 条第 2 項ただし書，則第 9 条の 2 第 5 号，平成 17 年 6 月 1 日文部科学省告示第 81 号第 1 条
D：誤　このような規定はない。事業所ではなく管理区域であれば，管理区域の拡大に伴う措置として軽微な変更に該当する（則第 9 条の 2 第 5 号）。

問 11 次のうち，許可使用者が変更の許可を受けようとするときに，申請書の正本に添えなければならない書類として，放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A　変更の予定時期を記載した書面
B　法人にあっては，登記事項証明書
C　工事を伴うときは，その予定工事期間及びその工事期間中放射線障害の防止に関し講ずる措置を記載した書面
D　放射線障害予防規程の変更の内容を記載した書面

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

〔解答〕
2

注）則第 9 条第 2 項（許可使用に係る変更の許可の申請）
則第 9 条第 2 項に 3 項目が定められている。
A：正　則第 9 条第 2 項第 1 号
B：誤　本肢の記述は，使用の許可の申請をする時に添えなければならない書類の一つを示している（則第 2 条第 2 項第 1 号）。
C：正　則第 9 条第 2 項第 3 号
D：誤　放射線障害予防規程を変更する必要があるときは，変更の日から 30 日以内に，変更後の放射線障害予防規程を添えて届出なければならない（法第 21 条第 3 項，則第 21 条第 3 項）。

問 12 認証の基準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 12 条の 3　原子力規制委員会又は登録認証機関は，設計認証又は特定設計認証の申請があった場合において，当該申請に係る［ A ］並びに使用，保管及び［ B ］に関する条件が，それぞれ原子力規制委員会規則で定める［ C ］に係る安全性の確保のための技術上の基準に適合していると認めるときは，設計認証又は特定設計認証をしなければならない。』

	A	B	C
1）	構造	廃棄	被ばく
2）	構造	運搬	放射線
3）	設計	運搬	放射線
4）	設計	廃棄	被ばく
5）	設計	廃棄	放射線

〔解答〕

3

注）法第 12 条の 3（認証の基準）

設計認証は，「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使用，保管及び運搬に関する条件」（法第 12 条の 2 第 4 項）について，申請し，審査を受けることになる。よって，当該申請に係る設計（A）並びに使用，保管及び運搬（B）に関する条件が，それぞれ原子力規制委員会規則で定める放射線（C）に係る安全性の確保のための技術上の基準に適合していることが必要である。

問 13 新たに許可使用者となった者に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上，施設検査の対象となるものの組合せはどれか。

A　1 個当たりの数量が 10 テラベクレルの密封されたセシウム 137 を装備した照射装置 1 台を使用する者

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

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

D　密封されていないコバルト 60 及びイリジウム 192 のみを貯蔵し，それぞれの下限数量に 1 万を乗じて得た数量を貯蔵能力とする貯蔵施設を有する者

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

〔解答〕

2

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

以下に該当する許可使用者（つまり，特定許可使用者）が使用施設，貯蔵施設または廃棄施設を設置したとき，施設検査の対象となる。

(I)　密封された放射性同位元素の貯蔵能力が 10 テラベクレル以上の者。ただし，1 個または 1 台当たり 10 テラベクレル以上の密封された放射性同位元素を使用している者に限る。

(II)　密封されていない放射性同位元素の貯蔵能力が，その種類ごとに下限数量に 10 万を乗じて得た数量以上である者。なお，複数の核種を使用する場合は，それぞれについて，その貯蔵能力の下限数量に対する割合の和が 10 万以上である者。

(III)　放射線発生装置の使用をする者。

A：正　(I)に該当

B：正　(II)に該当

C：誤　(I)より，1 個または 1 台当たり 10 テラベクレル以上の密封された放射性同位元素を使用している者に限られているため。

D：誤　本肢の場合，密封されていない放射性同位元素それぞれについて，その貯蔵能力の下限数量に対する割合の和は 2 万となり，(II)に該当しないため。

問 14 次の記述のうち，設置時施設検査に合格した日又は前回の定期確認を受けた日から次の定期確認を受けなければならない期間について，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A　放射線発生装置のみを使用する特定許可使用者は，5年以内に定期確認を受けなければならない。

B　密封されていない放射性同位元素のみを使用する特定許可使用者は，3年以内に定期確認を受けなければならない。

C　密封された放射性同位元素のみを使用する特定許可使用者は，3年以内に定期確認を受けなければならない。

D　許可廃棄業者は，5年以内に定期確認を受けなければならない。

1）AとB　　2）AとC　　3）BとC　　4）BとD　　5）CとD

〔解答〕

1

注）法第12条の9　第1項，同第2項（定期検査），令第14条（定期検査の期間）

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

A：正　令第14条第2号

B：正　令第14条第1号

C：誤　令第14条第2号（5年以内である）

D：誤　令第14条第1号（許可廃棄業者は3年以内）

問 15 使用の基準に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A　作業室での飲食及び喫煙を禁止すること。

B　使用施設又は管理区域の目につきやすい場所に，貯蔵の能力超過の防止に必要な注意事項を掲示すること。

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　管理区域には，人がみだりに立ち入らないような措置を講じ，放射線業務従事者以外の者が立ち入るときは，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の指示に従わせること。

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

〔解答〕

3

注）則第15条（使用の基準）

安全取扱の基本的事項が14項目にわたり定められている。

A：正　則第15条第1項第5号

B：誤　則第15条第1項第11号　「貯蔵の能力超過」ではなく，「放射線障害」の防止に必要な注意事項

C：正　則第15条第1項第7号

D：誤　則第15条第1項第12号　「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」ではなく，「放射線業務従事者」の指示

問 16 保管の基準に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。

A　貯蔵施設においては，作業衣，保護具等を着用して作業し，これらを着用してみだりに貯蔵施設から退出しないこと。

B　貯蔵施設のうち放射性同位元素を経口摂取するおそれのある場所での飲食及び喫煙を禁止すること。
C　貯蔵施設には，その貯蔵能力を超えて放射性同位元素を貯蔵しないこと。
D　空気を汚染するおそれのある放射性同位元素を保管する場合には，貯蔵施設内の人が呼吸する空気中の放射性同位元素の濃度は，空気中濃度限度を超えないようにすること。
1）ABC のみ　　2）ABD のみ　　3）ACD のみ　　4）BCD のみ　　5）ABCD すべて

〔解答〕
4
注）則第 17 条（保管の基準）
放射性同位元素又は放射性汚染物の保管に係る技術上の基準に関する問題である。定められているのは B，C，D である。A は使用の基準の項目である（則第 15 条第 1 項第 7 号：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）。
A：誤　則第 15 条第 1 項第 7 号　貯蔵施設ではなく作業室
B：正　則第 17 条第 1 項第 5 号
C：正　則第 17 条第 1 項第 2 号
D：正　則第 17 条第 1 項第 4 号

問 17　A 型輸送物に係る技術上の基準に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上定められているものの組合せはどれか。
A　外接する直方体の各辺が 10 センチメートル以上であること。
B　放射性同位元素の使用等に必要な書類その他の物品（放射性輸送物の安全性を損なうおそれのないものに限る。）以外のものが収納され，又は包装されていないこと。
C　周囲の圧力を 60 キロパスカルとした場合に，放射性同位元素の漏えいがないこと。
D　表面から 1 メートル離れた位置における 1 センチメートル線量当量率の最大値が 10 ミリシーベルト毎時を超えないこと。
1）ABC のみ　　2）ABD のみ　　3）ACD のみ　　4）BCD のみ　　5）ABCD すべて

〔解答〕
1
注）則第 18 条の 5（A 型輸送物に係る技術上の基準）
輸送物ごとに基準が異なるので注意を要する。
A：正　則第 18 条の 5 第 2 号
B：正　則第 18 条の 5 第 1 号（則第 18 条の 4（L 型輸送物に係る技術上の基準）第 9 号の準用）
C：正　則第 18 条の 5 第 5 号
D：誤　則第 18 条の 5 第 8 号　「10 ミリシーベルト毎時」ではなく，「100 マイクロシーベルト毎時」，表面においては「2 ミリシーベルト毎時」である。10 ミリシーベルト毎時は，BM 型輸送物に係る技術上の基準の一つである特別の試験条件の基準である（則第 18 条の 6 第 3 号イ）。

問 18　測定に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。
A　排気設備の排気口及び排気監視設備のある場所における放射性同位元素による汚染の状況の測定は，作業を開始した後にあっては，6 月を超えない期間ごとに 1 回行うこと。
B　管理区域の境界における放射性同位元素による汚染の状況の測定は，作業を開始した後にあっては，6 月を超えない期間ごとに 1 回行うこと。
C　排水設備の排水口及び排水監視設備のある場所における放射性同位元素による汚染の状況の測定は，

作業を開始した後にあっては，排水する都度（連続して排水する場合は，連続して）行うこと。

D　作業室における放射性同位元素による汚染の状況の測定は，作業を開始した後にあっては，1月を超えない期間ごとに1回行うこと。

1）AとB　　2）AとC　　3）BとC　　4）BとD　　5）CとD

〔解答〕

5

注）則第20条（測定）

排気，排水の測定は都度（又は連続して）行う。非密封放射性同位元素による汚染の測定は1月を超えない期間毎に行う。

A：誤　則第20条第1項第4号ニ　「6月を超えない期間ごとに1回行うこと。」ではなく「排気する都度（連続して排気する場合は，連続して）行うこと。」

B：誤　則第20条第1項第4号イ　「6月を超えない期間ごとに1回行うこと。」ではなく「1月を超えない期間ごとに1回行うこと。」

C：正　則第20第1項第4号ニ

D：正　則第20第1項第4号イ

問19　次の記述のうち，外部被ばくによる線量の測定の結果について，集計しなければならない期間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　男子にあっては，毎月1日を始期とする1月間

B　本人の申出等により許可届出使用者が妊娠の事実を知ることとなった女子にあっては，出産までの毎月1日を始期とする3月間

C　4月1日を始期とする1年間

D　4月1日，7月1日，10月1日及び1月1日を始期とする各3月間

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

〔解答〕

4

注）則第20条（測定）第4項

放射線の量及び放射性同位元素等による汚染の状況の記録に関する規定である。なかでも外部被ばくによる線量の測定の結果については，その第2号に記載されている。

A：誤　定められていない。

B：誤　則第20条第4項第2号　「3月間」ではなく，「1月間」

C：正　則第20条第4項第2号

D：正　則第20条第4項第2号

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

A　放射線管理の状況の報告に関すること。

B　放射線障害のおそれがある場合又は放射線障害が発生した場合の情報提供に関すること。

C　放射線障害の防止に関する業務の改善に関すること。

D　放射線取扱主任者の代理者に関すること。

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）則第 21 条（放射線障害予防規程）

放射線障害予防規程に記載すべき事項は，1 職務及び組織，2 主任者の代理者，3 施設の維持及び管理，4 RI 等の利用，5 RI 等の受払，保管等，6 測定，7 教育訓練，8 健康診断，9 保健上必要な措置，10 記帳及び保存，11 災害時の措置，12 危険時の措置，13 情報提供，14 応急の措置，15 業務の改善，16 管理の状況の報告，17 廃棄物埋設，18 その他となる。

A：正　則第 21 条第 1 項第 16 号

B：正　則第 21 条第 1 項第 13 号

C：正　則第 21 条第 1 項第 15 号（特定許可使用者及び許可廃棄業者に限る。）

D：正　則第 21 条第 1 項第 2 号

問 21　放射線障害予防規程に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A　放射線発生装置のみを使用する許可使用者は，放射線発生装置を使用施設に設置する前に，放射線障害予防規程を作成し，原子力規制委員会に届け出なければならない。

B　表示付認証機器のみを販売する届出販売業者は，販売の業を開始する前に，放射線障害予防規程を作成し，原子力規制委員会に届け出なければならない。

C　届出使用者は，放射性同位元素の使用を開始する前に，放射線障害予防規程を作成し，使用の開始の日から 30 日以内に，原子力規制委員会に届け出なければならない。

D　届出賃貸業者は，放射性同位元素の賃貸の業を開始する前に，放射線障害予防規程を作成し，原子力規制委員会に届け出なければならない。

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

〔解答〕

4

注）法第 21 条 （放射線障害予防規程）

予防規程の作成と届出は使用等の開始前に済ませる必要がある。放射線障害を予防し安全に放射線利用を行うための自主基準であることを考えれば，最初の作成と届出は使用・販売・賃貸・廃棄の業の開始前に済ませなくてはならないのは自然である。その後の変更の届出は 30 日以内にしなければならないことが法第 21 条第 3 項で規定されている。ただし表示付認証機器等のみを販売する届出販売・賃貸業者は除かれている。

A：誤　法第 21 条第 1 項。法令上の要求は使用開始前であり，設置前であることまでは要求されていない。

B：誤　法第 21 条第 1 項。表示付認証機器等のみを販売する届出販売業者は，予防規程の作成を要求されていない。

C：誤　法第 21 条第 1 項。業を開始する前に作成し，届け出なければならない。

D：正　法第 21 条第 1 項

問 22　教育訓練に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。ただし，対象者には，教育及び訓練の項目又は事項の全部又は一部に関し十分な知識及び技能を有していると認められる者は，含まれていないものとする。

A　放射線業務従事者が初めて管理区域に立ち入る前に行わなければならない教育及び訓練の時間数は定められている。

B　取扱等業務に従事する者であって，管理区域に立ち入らないものが取扱等業務を開始する前に行わなければならない教育及び訓練の時間数は定められている。

C　見学のため管理区域に一時的に立ち入る者に対する教育及び訓練の時間数は定められている。

D　放射線業務従事者が管理区域に立ち入った後，1年を超えない期間ごとに行わなければならない教育及び訓練の時間数は定められている。

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

〔解答〕

2

注）法第 22 条（教育訓練），則第 21 条の 2，教育及び訓練の時間数を定める告示（平成 3 年科技庁告示第 10 号）

教育訓練の対象，時期，項目については則第 21 条の 2，時間数については告示で定められている。なお，教育及び訓練の時間数を定める告示の一部改正が平成 30 年 4 月 1 日に施行され，項目および時間数が変更された。

A：正　則第 21 条の 2 第 2 項，教育及び訓練の時間数を定める告示

B：正　則第 21 条の 2 第 3 項，教育及び訓練の時間数を定める告示

C：誤　則第 21 条の 2 第 1 項第 5 号。教育訓練を行うことは定められているが，時間数は定められていない。

D：誤　則第 21 条の 2 第 1 項第 2 号。教育及び訓練の時間数を定める告示。再教育訓練については時間数は定められていない。期間についても翌年度の開始の日から 1 年以内である。

問 23　健康診断の結果の記録に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A　健康診断を受けた放射線業務従事者に対し，健康診断の都度，その記録を交付し，その記録の写しを保存した。

B　健康診断を受けた放射線業務従事者が，事業者の従業者でなくなったため，当該従業者の健康診断の結果の記録を破棄した。

C　放射線業務従事者の健康診断の結果の記録を永久に保存することとした。

D　届出使用者が，全ての使用を廃止したため，保存していた放射線業務従事者の健康診断の結果の記録を原子力規制委員会が指定する機関に引き渡すこととした。

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

〔解答〕

4

注）法第 23 条，則第 22 条（健康診断）

健康診断の記録の保存については期限が定められていないため，永久に保存するか，5 年経過した後に指定機関に引き渡す必要がある。使用を廃止する場合は指定機関に引き渡す必要がある。

A：誤　則第 22 条第 2 項第 1 号，2 号　その写しを交付し，その記録を保存する必要がある。（問題として不適。）

B：誤　則第 22 条第 2 項第 3 号　条文は「保存する」であり，期間の定めはない。

C：正　則第 22 条第 2 項第 3 号

D：正　則第 26 条第 1 項第 9 号

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，次の選択肢のうちどれか。

『第 28 条　第 26 条第 1 項の規定により許可を取り消された許可使用者若しくは許可廃棄業者又は前条第 1 項若しくは第 3 項（第 7 項の規定により適用する場合を含む。）の規定により［ A ］ならない者（以下「許可取消使用者等」という。）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［ B ］，放射性汚染物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，［ C ］，当該措置に関する計画（以下「廃止措置計画」という。）を定め，原子力規制委員会に届け出なければならない。』

	A	B	C
1）	届出をしなければ	汚染の除去	あらかじめ
2）	廃止をしなければ	汚染の除去	あらかじめ
3）	廃止をしなければ	汚染拡大の防止	遅滞なく
4）	届出をしなければ	汚染拡大の防止	あらかじめ
5）	廃止をしなければ	汚染の除去	遅滞なく

〔解答〕

1

注）法第 28 条（許可の取消し，使用の廃止等に伴う措置等）

法第 26 条第 1 項では欠格条項に該当したり，許可の条件・申請・届出ほかに違反があるなど，不適切な者に対する許可の取り消しについて，法第 27 条第 1 項は自主的な使用の廃止，法第 27 条第 3 項は許可の承継がなく廃止する場合について規定している。

A：既に廃止は決まっているので，届出

B：廃止するので，拡大防止ではなく，除去

C：計画なので，あらかじめ定めて届け出る

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

A　許可使用者は，その許可証に記載された種類の放射性同位元素等をその許可証に記載された廃棄物貯蔵施設の貯蔵能力の範囲内で所持することができる。

B　放射性同位元素のみを使用している許可使用者は，その許可に係る放射性同位元素の全ての使用を廃止する際に所持している放射性同位元素を，届け出る廃止措置計画に定める計画期間の 3 月間は所持することができる。

C　届出使用者は，その届け出た種類の放射性同位元素をその届け出た貯蔵施設の貯蔵能力の範囲内で所持することができる。

D　届出販売業者から放射性同位元素の運搬を委託された者は，その委託を受けた放射性同位元素を所持することができる。

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

〔解答〕

4

注）法第 30 条，則第 28 条（所持の制限）

放射性同位元素の所持は法により制限されている。また許可の取消し，使用・販売・賃貸・廃棄の業の廃止，死亡・解散・分割があった際の所持の期限も定められている。

A：誤　法第 30 条第 1 号。許可使用者なので廃棄物貯蔵施設ではなく貯蔵施設の貯蔵能力の範囲内が正しい。

B：誤　則第28条。正しくは30日。
C：正　法第30条第2号。
D：正　法第30条第11号。

問26 事故等の報告に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A　届出使用者は，使用施設内の人が常時立ち入る場所において人が被ばくするおそれのある線量が，原子力規制委員会が定める線量限度の10分の1を超え，又は超えるおそれがあるときは，その旨を直ちに，その状況及びそれに対する処置を10日以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。

B　表示付認証機器使用者は，放射性同位元素の盗取又は所在不明が生じたときは，その旨を直ちに，その状況及びそれに対する処置を10日以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。

C　許可使用者は，放射線業務従事者について実効線量限度若しくは等価線量限度を超え，又は超えるおそれのある被ばくがあったときは，その旨を直ちに，その状況及びそれに対する処置を10日以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。

D　特定許可使用者は，使用施設内での放射性同位元素の取扱いにおける計画外の被ばくがあったときであって，当該被ばくに係る実効線量が放射線業務従事者にあっては0.5ミリシーベルトを超え，又は超えるおそれのあるときは，その旨を直ちに，その状況及びそれに対する処置を10日以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。

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

〔解答〕

3

注）法第31条の2（原子力規制委員会等への報告），則第28条の3（事故等の報告）
放射性同位元素の盗取や所在不明があった場合，被ばく線量が線量限度を超えたとき，計画外の被ばくがあった場合などは報告が必要。

A：誤　則第28条の3第6号　線量限度を超え，又は超える恐れがあるときである。
B：正　則第28条の3第1号
C：正　則第28条の3第8号
D：誤　則第28条の3第7号　計画外の被ばくでは実効線量が放射線業務従事者は5ミリシーベルト，放射線業務従事者以外の者は0.5ミリシーベルトを超え，又は超えるおそれがあるとき報告が必要となる。

問27 放射線取扱主任者の選任に関する次の記述のうち，放射線障害防止法上正しいものの組合せはどれか。

A　10テラベクレル以下の密封されていない放射性同位元素を業として販売している届出販売業者は，第2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。

B　1テラベクレル以下の密封された放射性同位元素を診療のために使用している許可使用者は，放射線取扱主任者免状を有していない薬剤師を選任することができる。

C　表示付認証機器のみを業として賃貸している届出賃貸業者は，放射線取扱主任者の選任を要しない。

D　放射線発生装置を研究のために使用している許可使用者は，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〕

3

注）法第34条（放射線取扱主任者）

放射線取扱主任者の選任について，第 1 種は非密封放射性同位元素，放射線発生装置，10 テラベクレル以上の密封放射性同位元素，許可廃棄業者，第 2 種は下限数量の 1,000 倍を超え 10 テラベクレル未満の密封放射性同位元素の許可使用者，第 3 種は下限数量の 1,000 倍以下の密封放射性同位元素の届出使用者，届出販売業者，届出賃貸業者に要求される。表示付認証機器の届出使用者や表示付特定認証機器の使用者は必要ない。診療のためであれば医師または歯科医師，医薬品等の製造所であれば薬剤師を選任することもできる。

A：正　法第 34 条 1 項 3 号　数量にかかわらず届出販売業者は第 2 種（第 3 種でも可）放射線取扱主任者免状を有している者を選任できる。

B：誤　法第 34 条 1 項　薬剤師を選任できるのは医薬品等の製造所であり診療のために使用する事業所ではない。

C：誤　法第 34 条 1 項 3 号届出賃貸業者は第 3 種放射線取扱主任者免状を有している者を少なくとも選任する必要がある。

D：正　法第 34 条 1 項

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

『第 36 条　放射線取扱主任者は，誠実にその［ A ］を遂行しなければならない。

2　使用施設，廃棄物詰替施設，貯蔵施設，廃棄物貯蔵施設又は廃棄施設に立ち入る者は，放射線取扱主任者がこの法律若しくはこの法律に基づく［ B ］又は［ C ］の実施を確保するためにする指示に従わなければならない。

3　前項に定めるもののほか，許可届出使用者，届出販売業者，届出賃貸業者及び許可廃棄業者は，［ D ］に関し，放射線取扱主任者の［ E ］を尊重しなければならない。』

	A	B	C	D	E
1）	職務	指導	放射線障害防止法	放射線安全管理	意見
2）	義務	指導	放射線障害予防規程	放射線安全管理	助言
3）	職務	指導	放射線障害防止法	放射性同位元素の使用等	助言
4）	義務	命令	放射線障害防止法	放射線障害の防止	助言
5）	職務	命令	放射線障害予防規程	放射線障害の防止	意見

〔解答〕

5

注）法第 36 条（放射線取扱主任者）

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

A：職務　主任者という職位に課せられた義務である。

B：命令　法に基づく命令とは政令や府省令等を指す。

C：放射線障害予防規程　この法律というのは放射線障害防止法なので，対となる放射線障害予防規程の実施のために主任者が放射線業務従事者等に指示する。

D：放射線障害の防止　放射線障害の防止は法の目的である。

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

問29 密封された放射性同位元素を研究のため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50日間，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，この間も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　第1種放射線取扱主任者免状を有している者を，放射線取扱主任者の代理者として選任し，選任した日から10日後に，原子力規制委員会にその旨の届出を行った。

B　第2種放射線取扱主任者免状を有している者を，放射線取扱主任者の代理者として選任したが，原子力規制委員会にその旨の届出は行わなかった。

C　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，放射線取扱主任者の代理者として選任し，選任した日の翌日に，原子力規制委員会にその旨の届出を行った。

D　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20日後に，原子力規制委員会にその旨の届出を行った。

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

〔解答〕

3

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

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

A：正

B：誤　法第37条第3項。選任した日から30日以内に届け出る。

C：誤　代理者に要求される免状は主任者と同等であり，この設問の状況（研究を目的とした密封放射性同位元素の届出使用者）では第1種または第2種免状が必要である。

D：正

問30 等価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。ただし，次の文章中，「前条第4号に規定する期間」は，「本人の申出等により許可届出使用者又は許可廃棄業者が妊娠の事実を知ったときから出産までの間」とする。

『第6条　規則第1条第11号に規定する放射線業務従事者の各組織の一定期間内における線量限度は，次のとおりとする。

⑴　眼の水晶体については，4月1日を始期とする1年間につき150ミリシーベルト

⑵　皮膚については，4月1日を始期とする1年間につき［　A　］ミリシーベルト

⑶　妊娠中である女子の［　B　］については，前条第4号に規定する期間につき［　C　］ミリシーベルト』

	A	B	C
1）	500	胸部	5
2）	300	腹部表面	2
3）	300	腹部表面	5
4）	300	胸部	5
5）	500	腹部表面	2

〔解答〕

5

注）数量告示第 6 条（等価線量限度）
現行の線量限度値は，計画被ばく状況における線量限度値についての ICRP 1990 年勧告に由来し，数量告示（平成十二年十月二十三日号外，科学技術庁告示第五号，放射線を放出する同位元素の数量等を定める件）に定められている。皮膚の線量限度は年間 500 mSv である。妊娠中である女子について，その胎児の被ばくを考慮するのであれば，腹部表面が近傍であり測定箇所として適当である。

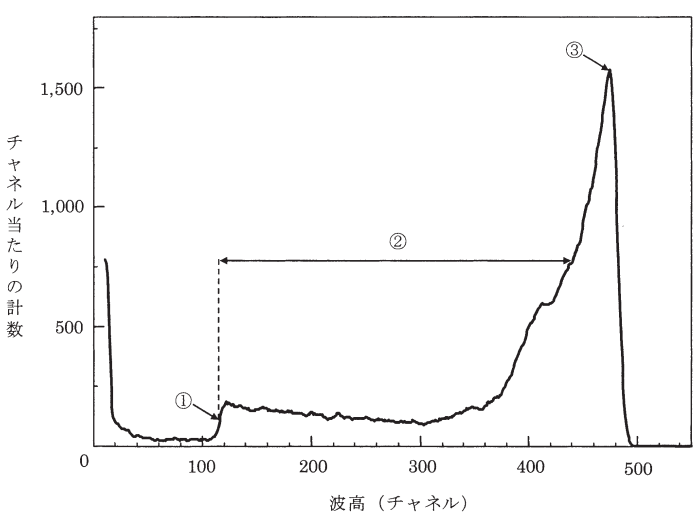
実　　務

第 64 回（令和元年）

問 1　次の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選べ。

一般的に円筒型比例計数管は，［ A ］を封入した円筒型金属製チェンバ（陰極）と高電圧を印加する非常に細い金属線（陽極）で構成される。計数管に入射した荷電粒子が［ A ］の中で電離により電子－イオン対を生成し，［ B ］が陽極近傍で強く加速されることにより［ A ］中の原子・分子をさらに電離する。これを［ C ］と呼び，出力パルス信号の大きさは，［ D ］。

高速中性子を利用する施設の中性子モニタリングでは，熱中性子に対して大きな反応断面積を有する^{3}Heを［ A ］とした円筒型比例計数管とポリエチレンなどの中性子減速材を組合せたモニターを利用することがある。^{3}He は，熱中性子と Q 値が約 764 keV の(n, p)反応を引き起こし，［ E ］の原子核と陽子が荷電粒子として放出される。ポリエチレンで減速された熱中性子が計数管に入射すると図に示すようなパルス波高の分布が観測される。図中の③のピークは，荷電粒子の運動エネルギーの総和の［ F ］%が［ A ］の中で失われた時の信号に対応し，そのエネルギーは約［ ア ］keV に相当する。ピークの低エネルギー側には，荷電粒子が陰極で吸収されてエネルギーを失う［ G ］により図中②のような連続分布が観測される。陰極の内面近傍で核反応が起こり，陽子が［ A ］中でエネルギーを失う前に陰極に到着した場合，［ E ］の原子核の電離作用により生成された電荷のみが信号に寄与することがある。①の端部は，この時の波高に相当し，そのエネルギーは約［ イ ］keV となる。①で示した立ち上がり（100 チャネル）から③のピーク右側（500 チャネル）までの領域にわたって積算した計数は，熱中性子と［ A ］中の^{3}He の(n, p)反応数に対応し，モニタリング対象である中性子強度とこの核反応数の間には相関関係がある。



＜A～C の解答群＞

1） 前置増幅器	2） 光電子増倍管	3） 半導体
4） 計数ガス	5） 金属製チェンバ	6） 電子－イオン対
7） 電子	8） イオン	9） 液体シンチレータ
10） ポリエチレン	11） サム効果	12） 電子なだれ
13） 光電効果	14） コンプトン散乱	15） 自発核分裂

＜D の解答群＞

1） 入射荷電粒子の数の 2 乗に反比例する
2） 初めにできた電子－イオン対の数の 2 乗に反比例する
3） 入射荷電粒子の数に反比例する
4） 初めにできた電子－イオン対の数に反比例する
5） 入射荷電粒子の数に比例する
6） 初めにできた電子－イオン対の数に比例する
7） 入射荷電粒子の数の 2 乗に比例する
8） 初めにできた電子－イオン対の数の 2 乗に比例する

＜E の解答群＞

1） ^{2}H	2） ^{3}H	3） ^{3}He	4） ^{4}He	5） ^{6}Li
6） ^{7}Li	7） ^{10}B	8） ^{11}B		

＜F の解答群＞

1） 10	2） 15	3） 20	4） 25	5） 30
6） 50	7） 75	8） 100	9） 150	10） 200
11） 300				

＜ア，イの解答群＞

1） 0.025	2） 0.4	3） 153	4） 191	5） 255
6） 383	7） 511	8） 698	9） 764	10） 930
11） 1,400	12） 2,790	13） 3,530	14） 7,050	15） 14,100

＜G の解答群＞

1） コンプトン効果	2） サム効果	3） クエンチング	4） 光電効果
5） 壁効果	6） 弾性散乱	7） 自発核分裂	8） オージェ効果

〔解答〕

A－4　　B－7　　C－12　　D－6　　E－2　　F－8　　ア－9　　イ－4　　G－5

注）A，B：比例計数管の計数ガスとしては，アルゴンやキセノンなどの不活性ガスが用いられる。入射した荷電粒子によって発生した電子（一次電子）は印加電圧により加速され，不活性ガスに衝突して二次電子を発生する。

D：比例計数管では，電子なだれとして発生する電子の数は，入射した荷電粒子によって発生した電子数に比例するよう，印加電圧を調整してある。これにより，出力パルスの大きさから入射した荷電粒子のエネルギーを測定できる。

F：壁効果を受けず，荷電粒子の全運動エネルギーが計数ガス中で失われるとき，Q 値に相当するピーク③が検出される。

イ：生成した陽子が全エネルギーを保って陰極に到達するとき，質量数 3 のトリチウムと質量数 1 の陽子は Q 値の 1/4，3/4 のエネルギーをそれぞれ分け合う（エネルギー保存則，運動量保存則）。このため，トリチウムの原子核の電離作用により生成された電荷のエネルギーは 191 keV となる。

問 2　次の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選べ。

非密封線源取扱い施設の放射線管理に際して，放射性物質による汚染の管理測定が重要である。汚染検査の方法には，汚染が疑われる場所の表面を検出器で直接サーベイする方法（直接法）と，ふき取りろ紙で丁寧に汚染箇所をふき取ったのち，ろ紙の放射能測定を別の場所で行い，表面汚染密度を評価するスミア法（間接法）とがある。なお，直接法では，ふき取りが困難な［ A ］の汚染も含めて測定が可能であるのに対して，スミア法では［ B ］の汚染評価しかできない。

直接法の場合，α 線放出核種による汚染や ^{3}H などの極低エネルギー β 線放出核種による汚染の場合を除いて，多くの場合 GM 管式サーベイメータを用いて床面や作業台の表面近傍を走査して汚染を見出す。この種の装置は，状況に応じて指針の振れの安定化をはかるために，通常は，回路の［ C ］が 3 s から 30 s 程度の範囲で切り替えできる様になっている。急激な計数率変化に対して応答がゼロから最終値の 95% まで追随するのに，［ C ］の 3 倍の時間を必要とするので，走査をゆっくりと行わないと，汚染部位を見落とすおそれがある。汚染部位を見出した場合，その位置で検出器窓面を検査対象表面にできるだけ近づけた状態（通常 5 mm）で定置し，ゆっくり時間をかけて指示値を読み取る。なお，この種の装置の目盛りは計数率（cpm など）で目盛られていることが多い。例えば，窓面直径 5 cm の GM 管式サーベイメータで ^{32}P の表面汚染を測定する場合，入射窓キャップを取り外した状態で，指示値が 600 cpm，バックグラウンド計数率が 100 cpm であったとき，［ D ］を 0.6，［ E ］を 0.4 とすれば，汚染放射能の平均表面汚染密度は，［ ア ］Bq·cm^{-2} と評価できる。時定数を 10 s に設定した場合，指示値の標準偏差は［ イ ］cpm と計算できる。なお，［ D ］は大面積の標準線源を用いて校正ができるが，［ E ］は汚染核種や汚染された物質の材質や形状によって大きく異なり，これを正確に求めることは容易ではない。普通は，文献に示された実験値や JIS などに示された参考値を準用する。そのほか，GM 計数管の分解時間に起因する数え落としや γ 線の影響を受けることにも配慮する。

α 線源による汚染を直接測定する場合には，［ ウ ］シンチレーション式サーベイメータを，低エネルギー β 線による汚染検査には薄窓型ガスフロー計数管式サーベイメータを，低エネルギーの γ(X)線を放出する ^{125}I の場合には，薄い［ エ ］シンチレータを用いたサーベイメータを用いるのが有効である。

直接法では，バックグラウンドレベルが高く，測定が難しい場合でも，スミア法では，スミアろ紙の測定をバックグラウンドが低い場所で行い得る上に，GM 計数管などの検出器を鉛で遮蔽することが可能であり，更にスケーラで長時間の積算計数もできるので，検出感度が高い測定が可能となる。また，液体シンチレーションカウンタでスミアろ紙中の放射能を測定すれば，β 線のエネルギーが極端に低く GM 計数管による測定が困難な ^{3}H の場合にも対応できる。スミア法の問題点は，［ B ］の放射能汚染の測定に限られることと，［ F ］の評価が難しいことである。なお，スミア法では，ふき取り面積を 10×10 cm^2 とすることが多く，ろ紙上の放射能測定値を（ふき取り面積×［ F ］）で除して，平均の表面汚染密度を評価する。

＜A～F の解答群＞

1）自己吸収率	2）数え落とし	3）線源効率	4）機器効率
5）幾何効率	6）ふき取り効率	7）β 線放出率	8）後方散乱率
9）窓面積	10）遊離性	11）固着性	12）遅延時間
13）微分時間	14）時定数		

＜ア，イの解答群＞

1）0.7	2）1.2	3）1.8	4）2.5	5）3.6
6）5.9	7）11	8）22	9）30	10）43
11）55	12）60			

＜ウ，エの解答群＞

1）NaI(Tl)　　2）ZnS(Ag)　　3）BGO　　4）CaF_2(Eu)

5）CdTe　　6）液体　　7）プラスチック

〔解答〕

A－11　B－10　C－14　D－4　E－3　F－6　ア－3　イ－10　ウ－2

エ－1

注）A，B：表面汚染には固着性と遊離性のものがある。前者はふき取りが困難であるため，直接法による測定しかできない。一方，後者はスミアろ紙でふき取ることができるため間接法による測定も可能である。つまり，直接法は固着性と遊離性の汚染評価，間接法は遊離性の汚染評価のみ可能である。よって，A は固着性，B は遊離性となる。

C：一般的な GM 管式サーベイメータは測定状況（汚染の検出，指示値の読み取りなど）に応じて，時定数の設定を 3 s～30 s 程度で切り替え可能なものとなっている。時定数 τ と経過時間 t における指示値は $1-e^{-t/\tau}$ で示すことができ，経過時間が時定数の 3 倍となると $1-e^{-3\tau/\tau}=1-e^{-3}\fallingdotseq 0.95$，つまり 95% となる。よって，C は時定数となる。

D，E：直接法にて表面汚染密度を評価する場合は指示値（計数率），バックグラウンド計数率，検出器の窓面積，機器効率，線源効率が必要である。機器効率は大面積の標準線源による校正で求めることができる。一方，線源効率は測定対象（汚染核種や汚染された物質の材料や形状）によって異なるため，正確に求めることは困難である。よって，D は機器効率，E は線源効率となる。

ア：表面汚染密度 A_s（Bq・cm^{-2}）は以下の計算式より求めることができる。

$$A_s=\frac{n-n_B}{\varepsilon_i\times W\times\varepsilon_s}$$

n：指示値（s^{-1}），n_B：バックグラウンド計数率（s^{-1}），W：検出器の窓面積（cm^2），

ε_i：機器効率，ε_s：線源効率　　※計数率が cpm 単位の場合は 60 で除する。

上記計算式に各数値を代入すると

$$\frac{(600-100)/60}{0.6\times 2.5\times 2.5\times 3.14\times 0.4}=1.76\cdots(\mathrm{Bq\cdot cm^{-2}})$$

よって，解答群より 1.8（Bq・cm^{-2}）となる。

イ：指示値の標準偏差 σ（cpm）は以下の計算式より求めることができる。

$$\sigma=\sqrt{\frac{n}{2\tau}}$$　　n：指示値，τ：時定数

ここでは cpm 単位での回答を求められているため，時定数について s 単位ではなく min 単位で考える。

※10(s)⇒10/60(min)で計算する。

$$\sqrt{\frac{600}{2\times 10/60}}=\sqrt{1800}=\sqrt{2\times 30^2}=42.4\cdots(\mathrm{cpm})$$

よって，解答群より 43（cpm）となる。

ウ，エ：α 線に感度がある検出器としては ZnS(Ag)シンチレータが代表的である。一方，低エネルギー γ 線用の検出器としては γ 線に高感度である NaI(Tl)シンチレータを低エネルギー測定向けに薄くしたものが使用されている。よって，ウは ZnS(Ag)，エは NaI(Tl)となる。

F：間接法（スミア法）にて表面汚染密度を評価する場合は，直接法とは異なり検出器の窓面積は使用しない。その代わりにスミアろ紙によるふき取り面積とスミアろ紙に対し遊離性汚染がふき取られる度合い（ふき取り前後の放射能の比）を示すふき取り効率が用いられ，汚染評価指標となる。表面汚染密度 A_{sr}（Bq・cm^{-2}）は以下の計算式となる。

$$A_{sr}=\frac{n-n_B}{\varepsilon_i \times F \times S \times \varepsilon_s}$$

n：指示値（s^{-1}），n_B：バックグラウンド計数率（s^{-1}），S：ふき取り面積（cm^2），F：ふき取り効率，ε_i：機器効率，ε_s：線源効率。

問3　次のⅠ，Ⅱの文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

Ⅰ　非密封放射性同位元素を使用する施設には，排気設備が設置されている。実験室内の空気中の放射性同位元素が付着したダストや粒子状の物質はプレフィルタと［ A ］フィルタにより捕集される。［ A ］フィルタは，定格風量で粒径0.3μmの微粒子を99.97%以上の効率で捕集する。また，放射性ヨウ素を取り扱う施設では［ B ］フィルタを排気設備に設置する。

排気設備のフィルタは性能維持のために定期的に交換し，放射能測定の後，ポリエチレンシートで密封して段ボール箱に入れ廃棄物の集荷まで保管する。GM管式サーベイメータでフィルタを測定すると，フィルタに吸着した空気中の天然ラドンの子孫核種（壊変生成物）の影響でバックグラウンドよりも計数率が高くなることがあることに注意すべきである。天然に存在するラドン同位体には，ウラン系列に属し半減期が［ C ］の［ D ］と，トリウム系列に属し半減期が56秒の［ E ］などがある。［ D ］の壊変生成物には^{214}Pb（半減期27分）と^{214}Bi（半減期20分）が，［ E ］の壊変生成物には［ F ］（半減期10.6時間）と^{212}Bi（半減期61分）があり，これらがフィルタに吸着していることがある。

＜A, Bの解答群＞

1）メンブレン　　2）HEPA　　3）シリカゲル　　4）アルミナ
5）活性炭

＜Cの解答群＞

1）25秒　　2）1.8時間　　3）14.6時間　　4）3.8日

＜D, Eの解答群＞

1）^{208}Rn　　2）^{209}Rn　　3）^{210}Rn　　4）^{211}Rn　　5）^{219}Rn
6）^{220}Rn　　7）^{222}Rn　　8）^{228}Rn

＜Fの解答群＞

1）^{202}Pb　　2）^{204}Pb　　3）^{208}Pb　　4）^{210}Pb　　5）^{212}Pb
6）^{214}Pb

Ⅱ　標識化合物を長期保管する際には自己分解が問題になる。^{3}Hや^{14}Cなどの標識化合物では，自己分解によりラジカルや励起分子などが生成することがある。このため，標識化合物の保管に際して，遊離基捕捉剤を加える。水溶液の場合には遊離基捕捉剤の［ G ］やベンジルアルコールなどを数%程度加える。また，ベンゼン溶液として保管することで自己分解が低減できる。

一般に有機化合物は低い温度で安定である。しかし，凍結によりクラスターが形成されるため，標識有機化合物では自己分解が促進することがある。この影響は^{3}H標識化合物で大きい。このため，^{3}H標識化合物の水溶液は［ H ］℃，ベンゼン溶液は［ I ］℃で保管する。

長期保管した標識化合物の使用に際しては，あらかじめ標識化合物の化学的純度と放射化学的純度を確かめることが必要である。放射化学的純度の検定には各種クロマトグラフィや［ J ］が用いられる。

＜G～Iの解答群＞

1）ヘキサン　　2）エタノール　　3）ジエチルエーテル
4）トルエン　　5）－80～－70　　6）－20～－15

7）　2 ～ 4　　8）　5 ～10　　9）　20～30
10）40～50

＜J の解答群＞

1）　原子吸光分析法　　2）　質量分析法　　3）　加速器質量分析法
4）　放射化分析法　　5）　同位体希釈分析法　　6）　凝固点降下測定法

〔解答〕

Ⅰ　A－2　　B－5　　C－4　　D－7　　E－6　　F－5

注）A, B：HEPA（High Efficiency Particulate Air）フィルターは，0.3 μm 径の微粒子に対して 99.97% 以上の捕集効率を保証する JIS 規格に則って作られている。また，ヨウ素などの吸着にはチャコール（活性炭）フィルターが使われる。

C～F：ウラン系列におけるラドンからの壊変生成物は，^{222}Rn($T_{1/2}$＝3.8 d)α 壊変 → ^{218}Po($T_{1/2}$＝3.1 m)α 壊変 → ^{214}Pb($T_{1/2}$＝27 m)β^-壊変 → ^{214}Bi($T_{1/2}$＝20 m)β^-壊変 → ^{214}Po…と続く。また，トリウム系列でのラドンからの壊変生成物は，^{220}Rn($T_{1/2}$＝56 s)α 壊変 → ^{216}Po($T_{1/2}$＝0.15 s)α 壊変 → ^{212}Pb($T_{1/2}$＝10.6 h)β^-壊変 → ^{212}Bi($T_{1/2}$＝61 m)β^-壊変 → ^{212}Po…と続く。

Ⅱ　G－2　　H－7　　I－8　　J－5

注）G：フリーラジカル（遊離基）や励起分子が生成すると，2 次分解が促進されるため，保管する際にはエタノールやベンゼンなどの遊離基捕捉剤（ラジカルスカベンジャ）を加える。

H：^3H 標識化合物の保管温度には注意が必要。4℃ 程度の低温貯蔵庫，または液体窒素で急冷した後に－80℃ の超低温槽にて保管する。一方，－20℃ 程度のフリーザーでの保管は放射線分解が促進される。

I：ベンゼンの融点は 5.5℃ なので，～10℃ の凍結しない程度の低温で保管する。

J：放射化学的純度とは，注目する RI が数種の化学形で存在するとき，特定の化学形で存在する放射能の，全放射能に占める割合を言う。

$$放射化学的純度＝\frac{[注目\ RI\ の特定化学形での放射能]}{[その\ RI\ の全放射能]}\times 100\ \ （\%）$$

各種クロマトグラフィーの他，同位体希釈法などで検定される。

問 4　次のⅠ～Ⅲの文章は，^3H，^{14}C，^{32}P，^{137}Cs を使用しているある事業所での放射線管理及び測定についての日誌の一部である。このⅠ～Ⅲの文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選べ。

Ⅰ　○月×日　使用核種をそれぞれ 1～10 kBq 含むとみられる廃液（水溶液）について，各核種の濃度を求めた。まず，廃液試料の一定量をプラスチック製容器にとり，そのまま［ A ］によって［ B ］の放射能濃度を求めた。［ B ］を除去した後，蒸発法による前処理後，端窓型 GM 検出器で計数した。さらに，試料と GM 検出器間に適当な厚さのアルミニウム板を置いて計数し，［ C ］以外の 2 核種を定量した。

先月半ばに新規に追加購入した液体シンチレーションカウンタの利用についても分析条件などの検討を継続した。昨日に続いて，［ B ］を除去した廃液試料の一部をとり，チェレンコフ光計測による［ D ］の定量を試みた。その結果は，以前より使用してきた液体シンチレーションカウンタによる測定あるいは端窓型 GM 検出器による測定の結果と，誤差の範囲で一致した。

＜A の解答群＞

1）　液体シンチレーションカウンタ　　2）　Si 半導体検出器
3）　Si(Li)半導体検出器　　4）　Ge 半導体検出器

5)　プラスチックシンチレーション検出器

＜B～Dの解答群＞

1)　^{3}H　　2)　^{14}C　　3)　^{32}P　　4)　^{137}Cs

Ⅱ　△月□日　pHが1の塩酸酸性廃液（水溶液）1Lからの$^{32}PO_4^{3-}$の除去に，［E］水酸化物の中性域での沈殿生成を利用した凝集沈殿法の適用を検討した。塩酸以外の酸性成分の寄与は無視できるとした場合，中和するために必要な1% 水酸化ナトリウム（式量40）水溶液（密度1.0 g·cm^{-3}）は［F］mLとなる。中和に使用する1% 水酸化ナトリウム水溶液のpHは［G］を0.4ほど上回る。このため，1% 水酸化ナトリウム水溶液を過剰に加えてしまった場合，廃液が高pHとなり［E］の水酸化物沈殿の再溶解が起こる可能性がある。再溶解を防ぐためには，撹拌（かくはん）による混合の状況，沈殿の生成の様子，pHの変化などに気を配る必要がある。なお，室温および水温は25℃であった。

＜Eの解答群＞

1)　アルミニウム　　2)　塩素　　3)　カリウム　　4)　カルシウム

5)　セシウム　　6)　ヨウ素

＜Fの解答群＞

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

＜Gの解答群＞

1)　8　　2)　9　　3)　10　　4)　11　　5)　12

6)　13　　7)　14

Ⅲ　▽月●日　作業者Xから液量10 mL程度の^{32}Pを実験室から放流してしまったようだとの緊急の報告があった。状況から，放流された^{32}Pは全て貯留槽A中の廃水に留まっており，その最大量は30 MBqと見積もられた。

当初は，10 m^{3}の貯留槽A内にある廃水1 m^{3}を留め置き，2週間後に排水する計画であった。排水までの2週間は別の貯留槽Bを使用することとしていたが，予想外の^{32}Pの流入のため，排水計画を変更することにした。この計画変更に当たり，流入後の貯留槽A中の廃水の容積は1 m^{3}とみなされ，かつ，他の廃液の流入はないとした。^{32}Pの放流の事態が起こる前の貯留槽A中の廃水中の各核種の放射能濃度，及び告示別表第2に定められた該当する化学形等での排水中の濃度限度は以下の表のとおりである。

表　告示別表第2に示す各核種の排水中の濃度限度，及び廃水中の放射能濃度（試料は▽月●日始業時に採取）

第1欄		第2欄～第5欄	第6欄	
放射性同位元素の種類			排水中の濃度限度（Bq·cm^{-3}）	廃水中の放射能濃度（Bq·cm^{-3}）
核種	化学形等			
^{3}H	有機物（メタンを除く）	［省　略］	2×10^{1}	4
^{14}C	有機物〔経口摂取〕		2×10^{0}	0.4
^{32}P	Snのリン酸塩以外の化合物		3×10^{-1}	［H］
^{137}Cs	すべての化合物		9×10^{-2}	9×10^{-3}

表の測定結果を得た時点では，廃水中の^{32}P の濃度は［　H　］Bq·cm^{-3} であったため，そのままでは排水できないが，2 週間後には特に希釈することなく排水できるはずであった。

^{32}P の予想外の流入のため，この排水計画を修正することとした。まず，実験計画とその進行状況を考慮して，2 通りの方法で排水の可能性について試算した。1 つは，直ちに希釈槽を利用して貯留槽 A 中の廃水を希釈の上，排水する場合である。この場合は，おおよそ［　I　］倍に希釈すると，表に示した各核種の廃水中の放射能濃度を排水中の濃度限度で割った値の合計がほぼ 1 となる。もう 1 つは，希釈しないで排水することとし，それまでは貯留槽 B を使用する計画である。この場合は，おおよそ［　J　］日間，廃水を貯留槽 A 中に留め置くことで，表に示した各核種の廃水中の放射能濃度を排水中の濃度限度で割った値の合計がほぼ 1 となる。以上の希釈または減衰による放射能濃度の低下についての概算に基づいて，両者を組み合わせての具体的な排水計画を立案することとした。さらに，排水前に新たに廃水中の各核種の放射能濃度を測定して，排水可能であることを確かめてから排水することにした。

＜H の解答群＞

1）0.01　　2）0.03　　3）0.1　　4）0.2　　5）0.5

＜I の解答群＞

1）10　　2）50　　3）100　　4）150　　5）200

＜J の解答群＞

1）15　　2）30　　3）40　　4）55　　5）70

6）80　　7）95　　8）110

〔解答〕

Ⅰ　A－4　　B－4　　C－1　　D－3

注）B：^{137}Cs

各検出器の測定放射線は

・液体シンチレーションカウンタ ―α 線，β 線

・Si 半導体検出器 ―α 線，β 線，重荷電粒子

・Si（Li）半導体検出器 ―β 線

・Ge 半導体検出器 ―γ 線

・プラスチックシンチレーション検出器 ―α 線，β 線，高速中性子

4 つの使用核種はいずれも β^- 壊変をするが^{137}Cs は娘核種が γ 線を放出する。

C：^{3}H

端窓型 GM 検出器では^{3}H は測定できない。

D：^{32}P

^{32}P の β 線最大エネルギーは 1.71 MeV でチェレンコフ光による測定が可能。

Ⅱ　E－1　　F－2　　G－6

E：アルミニウム

リン酸イオンの除去には，ポリ塩化アルミニウム（polyaluminum chloride; PAC）を加えると水に溶けにくいリン酸アルミニウムとなり沈殿する。

F：pH＝－log[H$^+$]

塩酸酸性廃液の pH が 1 であるので水素イオンのモル濃度は

$1 = -\log[H^+]$

$[H^+] = 1.0 \times 10^{-1} = 0.1$[mol/L]

1% 水酸化ナトリウム水溶液（密度 1.0 g· cm^{-3}）1 L 中の NaOH は

$0.01\times1\times1000=10$[g]

モル濃度は　$10/40=0.25$[mol/L]

中和するためには「酸の mol×酸の価数＝塩基の mol×塩基の価数」となるので中和に使用する1% 水酸化ナトリウムの量 F(mL)は

$0.1\times1\times1=0.25\times F\times0.001\times1$　　$F=400$(mL)

G：$[H^+][OH^-]=1.0\times10^{-14}$

水酸化ナトリウム水溶液は完全に電離するので$[OH^-]=0.25$

$$[H^+]=\frac{1\times10^{-14}}{0.25}=4\times10^{-14}$$

$$pH=-\log(4\times10^{-14})=14-\log4=13+\log\left(\frac{10}{4}\right)=13+\log2.5>13$$

$(\log2.5=0.40)$

Ⅲ　H－4　　I－3　　J－8

注）H：▽月●日の核種の濃度限度との比は

^{3}H	$4/(2\times10^{1})=0.2$
^{14}C	$0.4/(2\times10^{0})=0.2$
^{137}Cs	$9\times10^{-3}/(9\times10^{-2})=0.1$

^{32}P の濃度限度との比が0.5を超えると排水できない。放射能濃度は $3\times10^{-1}\times0.5=0.15$(Bq·cm^{-3})を超える場合である。また ^{32}P の半減期はほぼ2週間であるので，▽月●日の濃度限度との比が1を超えると2週間は排水できない。2週間後に希釈なしで排水できる放射能濃度は $3\times10^{-1}\times1=0.3$(Bq・cm^{-3}) 以下である。

I：廃液中の放射能濃度は $(30\times10^{6})/100000=30$(Bq・cm^{-3})

濃度限度との比は $30/(3\times10^{-1})=100$ 倍となり100倍の希釈となる。

J：^{32}P 以外の核種は半減期が長いので ^{32}P の半減期のみ考える。放射能濃度が0.15以下の200分の1になるにはおおよそ8半減期なので $8\times14=112$ 日

問5　次のⅠ，Ⅱの文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

Ⅰ　国際放射線防護委員会 ICRP では，放射線防護に用いる量として，複数の種類の線量からなる体系を勧告している。

放射線の影響を考えるための基本的な線量計測量は，吸収線量である。これに対し，放射線防護の目的で確率的影響を評価する量としては，組織・臓器の体積にわたって平均された吸収線量に放射線の線質や組織の感受性によって重みづけがなされた等価線量や実効線量を用いる。これらを［A］と呼ぶ。

［A］は線量計等で直接測定できない量であるため，外部被ばくに係る実測が可能な量として，場のモニタリングに用いる周辺線量当量，方向性線量当量，個人モニタリングに用いる個人線量当量が導入されている。これらの量は，［B］の定義に基づいており，［C］と呼ばれる。［C］に関しての線質による加重として［D］が用いられる。放射線防護の目的を鑑み，ほとんどの場合において，［C］は［A］を［E］値を示すように定められている。

場のモニタリングに用いる線量当量は，単純なファントムである［B］球の深さ d の線量当量の値に基づいて規定されている。実効線量の管理には $d=$［ア］mm が，また，現在の法令には取り入れられていないが，眼の水晶体の被ばくをモニタリングする目的では $d=$［イ］mm が勧告されている。

＜A の解答群＞
1）物理量　2）防護量　3）実用量　4）預託線量
＜B の解答群＞
1）IAEA　2）ICRP　3）ICRU　4）OECD　5）UNSCEAR
＜C の解答群＞
1）物理量　2）防護量　3）実用量　4）預託線量
＜D の解答群＞
1）線エネルギー付与　2）生物学的効果比　3）線量係数
4）線質係数　5）放射線加重（荷重）係数　6）組織加重（荷重）係数
＜E の解答群＞
1）下回らない　2）上回らない
＜ア，イの解答群＞
1）0.07　2）0.1　3）0.3　4）0.7　5）1
6）3　7）7　8）10

Ⅱ　放射線防護の目的における確率的影響の評価はしきい値なし線形モデルに基づいている。このモデルの採用により，実効線量の計算において，外部被ばく・内部被ばく，全身被ばく・部分被ばくに起因する線量の加算が可能となっている。

ここで，特定の複数の組織・臓器に対して限定的に吸収線量が与えられた場合を仮定して，等価線量及び実効線量を計算してみよう。皮膚の平均吸収線量として β 線で 50 mGy，γ 線で 50 mGy，肝臓の平均吸収線量として α 線で 2 mGy，γ 線で 10 mGy の被ばくがあったとする。なお，それ以外の組織・臓器の被ばくは無視できるものとする。このとき，皮膚の等価線量は［　ウ　］mSv，肝臓の等価線量は［　エ　］mSv，実効線量は［　オ　］mSv である。ただし，放射線加重係数及び組織加重係数は ICRP 2007 年勧告の値を用いるものとする。なお，皮膚及び肝臓の組織加重係数は，それぞれ 0.01，0.04 である。

＜ウ，エの解答群＞
1）1　2）2　3）12　4）20　5）30
6）40　7）50　8）100　9）150　10）200
11）500　12）550　13）1,000　14）1,050
＜オの解答群＞
1）1.48　2）1.98　3）2.2　4）3.0　5）3.48
6）3.5　7）3.7　8）4.2　9）5.0

〔解答〕
Ⅰ　A－2　B－3　C－3　D－4　E－1　ア－8　イ－6
注）A：等価線量や実効線量は，放射線防護のために組み立てられた単位で，防護量と呼ばれる。
B：ICRU（国際放射線単位測定委員会）は，場の実用量として周辺線量当量及び方向性線量当量を定義している。これらは，人体組織を模した直径 30 cm の球（ICRU 球）の表面から深さ d において生じる線量当量とされている。また，個人の実用量として個人線量当量を定義している。
C：周辺線量当量，方向性線量当量及び個人線量当量は，サーベイメータや個人線量計などで直接測定可能な量であり，実用量と呼ばれる。
D：線質係数は，放射線の種類とエネルギーによって異なる生物学的影響を補正するための係数であり，水中の線エネルギー付与の関数で定義されている。
E：放射線防護の観点から実効線量を安全側に評価するため，サーベイメータや個人線量計で測定した

線量当量（実用量）は，実効線量（防護量）を下回らない値を示す。

ア：外部被ばくによる実効線量を測定・評価するための量として1 cm線量当量が用いられている。

イ：現在の法令では3 mm線量当量の測定義務は課されてないが，ICRP等は目の水晶体の等価線量限度の変更を勧告しており，国内でも3 mm線量当量の測定について検討されている。

Ⅱ　ウ－8　　エ－7　　オ－4

注）ウ～エ：等価線量 H_T は，放射線加重係数を w_R，組織・臓器 T の放射線 R による平均吸収線量を D_{TR} とすると $H_T=\sum_R w_R D_{T,R}$ である。放射線加重係数は，β 線及び γ 線は1，α 線は20である。

皮膚の等価線量 H_T ＝（50×1）＋（50×1）＝100

肝臓の等価線量 H_T ＝（2×20）＋（10×1）＝50

オ：実効線量 E は，組織・臓器 T の組織荷重係数を w_T，組織・臓器 T の等価線量を H_T とすると $E=\sum_T w_T H_T$ である。皮膚及び肝臓の等価線量は，上式から求めた値をそれぞれ使用する。

実効線量 E ＝（0.01×100）＋（0.04×50）＝3.0

問6　次の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

ヨウ素は，ヒトにとって必須元素である。ヨウ素は，ヨウ素デンプン反応や消毒薬として一般に知られるとともに，原子炉内等で製造した放射性ヨウ素は，医学などの分野で利用されている。単体のヨウ素は，常温，常圧では主に［ A ］であるが，［ B ］性がある。ICRP Publication 30の体内動態モデルでは経口摂取された放射性ヨウ素は，消化管で吸収され血中に取り込まれた後，3割が［ ア ］に，7割が［ イ ］に移行する。

放射性ヨウ素には複数の核種があり，医療で用いられる代表的な核種を半減期の長い順に並べると［ ウ ］となる。放射性ヨウ素で標識されたヨウ化ナトリウム溶液が入ったバイアル瓶を開封する場合には，注射器を用いて［ C ］状のヨウ素を取り除いておくことにより汚染事故防止につながる。^{125}I標識化合物を用いたトレーサ実験を実施する際には，フードやグローブボックス内で取り扱うことに加えて，チャコール入りマスクの着用，鉛ブロック・鉛板の使用などにより被ばくの低減に努める。^{125}I標識化合物15 MBqを，0.02 cmの鉛板で遮蔽し，トレーサ実験を0.5時間行った際の外部被ばくの実効線量は，この標識化合物を点線源とみなし，点線源から作業する人までの距離を50 cmとした場合，［ エ ］μSvと見積もられる。ただし，^{125}Iの実効線量率定数は0.0126 μSv·m^2·MBq^{-1}·h^{-1}，また，^{125}Iの0.02 cmの鉛板に対する実効線量透過率は0.00141とする。

ヨウ素の同位体の中で^{131}Iはβ^-壊変後，大部分は直ちにγ線を放出し，［ オ ］の安定同位体に，また，一部は［ オ ］の準安定状態を経て［ オ ］の安定同位体になる。^{131}Iのβ線はがんの［ カ ］に，^{131}Iのγ線はがんの［ キ ］に利用可能である。このような2つの利用法を同時に行うがん医療は，セラノスティクスと呼ばれ注目されている。

＜A～Cの解答群＞

1）気体　　2）液体　　3）固体　　4）凝縮　　5）昇華

6）気化　　7）凝固

＜ア，イの解答群＞

1）筋肉　　2）心臓　　3）尿　　4）肝臓　　5）バルトリン腺

6）唾液腺　　7）甲状腺　　8）前立腺

＜ウの解答群＞

1）^{123}I ＞ ^{125}I ＞ ^{131}I　　2）^{125}I ＞ ^{123}I ＞ ^{131}I　　3）^{131}I ＞ ^{123}I ＞ ^{125}I　　4）^{125}I ＞ ^{131}I ＞ ^{123}I

5）^{131}I ＞ ^{125}I ＞ ^{123}I　　6）^{123}I ＞ ^{131}I ＞ ^{125}I

＜エの解答群＞

1）　5.3×10^{-8}　　2）　5.3×10^{-4}　　3）　1.7　　4）　3.4

5）　270

＜オの解答群＞

1）　テルル　　2）　ポロニウム　　3）　クリプトン　　4）　キセノン

5）　ビスマス

＜カ，キの解答群＞

1）　問診　　2）　診断　　3）　症状　　4）　治療　　5）　予防

〔解答〕

A－3　　B－5　　C－1　　ア－7　　イ－3　　ウ－4　　エ－2　　オ－4　　カ－4

キ－2

注）A，B：ヨウ素の単体は黒紫色の固体であり，液化を経ずに直接固体が蒸発する昇華性を有する。

C：放射性ヨウ素の標識化合物は，その揮発性の分解物である気体状のヨウ素が容器内の空気層の部分に充満しているので，開封する前にガス抜きの操作を行う。

ア・イ：ICRP Publication 30 の代謝モデルでは，放射性ヨウ素は血中に取り込まれた後，30% が甲状腺に移行し，残りの 70% は尿として直接排泄される。

ウ：放射性ヨウ素の半減期順（括弧内は半減期）

^{125}I（59.4 日）＞^{131}I（8.02 日）＞^{123}I（13.2 時間）

エ：1 時間当たりの実効線量［μSv・h^{-1}］＝（実効線量率定数［μSv・m^2・MBq^{-1}・h^{-1}］×線源の放射能［MBq］）÷（線源からの距離［m］）^{2}　よって，$(0.0126\,\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\times15\,\text{MBq})\div(50\times10^{-2}\,\text{m})^2=0.756\,\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$　作業時間 0.5 h と実効線量透過率を 0.00141 をかけることで，このトレーサー実験における外部被ばくの実効線量が見積もられる。実効線量$=0.756\,\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\times0.5\,\text{h}\times0.00141=0.00053=5.3\times10^{-4}\,\mu\text{Sv}$

オ：^{131}I は β^- 壊変後に，^{131}Xe（安定）になる。一部は放射性希ガスである^{131m}Xe（半減期：11.8 日）を経て^{131}Xe（安定）になる。Xe は「キセノン」。

カ，キ：セラノスティクスは，「治療の」（therapeutic）と「診断の」（diagnostic）を組み合わせた造語。β 線はがんの治療に，γ 線はがんの診断に利用される。

物　理　学

第64回（令和元年）

次の問1から問30について，5つの選択肢のうち適切な答えを1つだけ選び，また，問31，問32の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選び，注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

問1　次の記述のうち，相対論的立場から正しいものの組合せはどれか。

A　質量をもつ粒子の運動量は，速度に比例する。

B　質量をもつ粒子のド・ブロイ波長は，運動量に逆比例する。

C　質量をもつ粒子のエネルギーは運動量に比例する。

D　光子のエネルギーは，波長に逆比例する。

E　光子の運動量は，エネルギーに比例する。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　相対論によると，質量をもつ粒子の速度は光速を超えない。このため速度 v で運動する粒子の質量 m は，静止質量を m_0，光速を c，$\beta=\dfrac{v}{c}$ とすると，$m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ となる。

運動量 p は，$p=mv=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}v=\dfrac{m_0}{\sqrt{v^{-2}-c^{-2}}}$ となり，速度 v に比例しない。

B：正　相対論的立場からも，ド・ブロイ波長 λ は，$\lambda=\dfrac{h}{p}$ となるので（h をプランク定数），運動量 p に逆比例する。

C：誤　相対論によると，エネルギー E は，$E=mc^2$ となるので，エネルギーは運動量 p に比例しない。

D：正　相対論的立場からも，光子のエネルギー E は光子の波長を λ とすると，$E=h\nu=h\dfrac{c}{\lambda}$ となり，波長 λ に逆比例する。

E：正　相対論的立場からも光子の運動量 p は光子のエネルギーを E とすると，$p=\dfrac{h}{\lambda}=\dfrac{E}{c}$ となり，エネルギー E に比例する。

問2　NaI(Tl)結晶から放出されるシンチレーション光のピーク波長（最大発光波長）はほぼ410 nmである。410 nmの光子のエネルギー[eV]として最も近い値は，次のうちどれか。

1）1.0　　2）3.0　　3）6.0　　4）14　　5）34

〔解答〕

2

注）光のエネルギー E と波長 λ の関係は，

$$E=h\frac{c}{\lambda}=\frac{6.63\times10^{-34}[\mathrm{m^2\,kg\,s^{-1}}]\cdot3.00\times10^{8}[\mathrm{m\,s^{-1}}]}{410\times10^{-9}[\mathrm{m}]}\cdot(1.6\times10^{-19}[\mathrm{J\,eV^{-1}}])^{-1}=3.03[\mathrm{eV}]$$

（別解）

原子核物理で概算するときによく使われる$\hbar c \approx 200$[MeV fm]を使って（$\hbar = h/(2\pi)$），

$$E = h\frac{c}{\lambda} = 2\pi\frac{\hbar c}{\lambda} \approx 2 \cdot 3.14\,\frac{200[\text{MeV fm}]}{410\times10^{6}[\text{fm}]} = 3.0[\text{eV}]$$

問 3　次の記述のうち，正しいものはどれか。

1）　同重体は，質量数が互いに等しい。
2）　核異性体は，核内の陽子の数と中性子の数が互いに入れ替わっている。
3）　原子核の半径は，質量数の 2/3 乗に比例する。
4）　原子の半径は，軌道電子数に比例する。
5）　同位体は，核内の中性子数が互いに等しい。

〔解答〕

1

注）1：正
2：誤　核異性体は原子核の励起状態であり，核異性体の関係にある核種は，核内の陽子の数と中性子の数はそれぞれ互いに等しい。
3：誤　原子核の密度は質量数によらずほぼ一定である（密度の飽和性）ので，原子核の体積は質量数に比例し，半径は体積の 1/3 乗に比例するため，半径は質量数の 1/3 乗に比例する。
4：誤　原子の半径は，周期表で周期が増えるほど大きくなるが，同周期の原子同士では軌道電子数が増えるほど小さくなる。このため，軌道電子数には比例しない。
5：誤　同位体は核内の陽子数が互いに等しく，中性子数が互いに等しいのは同調体（または同中性子体ともいう）。

問 4　次の用語のうち，放射性壊変に直接関係のないものはどれか。

1）　半減期
2）　吸収端
3）　トンネル効果
4）　永続平衡
5）　内部転換

〔解答〕

2

注）1：関係あり　半減期は，放射性核種の数が放射性壊変により半分になるまでの時間である。
2：関係なし　吸収端は，X 線の吸収スペクトルにおいて X 線のエネルギーを増加させると X 線の吸収係数が急激に上昇し，崖の縁のように不連続な形状をとる箇所をさすので放射性壊変とは直接関係しない。
3：関係あり　α 壊変により放出される α 粒子のエネルギーと半減期の関係は，トンネル効果により説明できる。
4：関係あり　永続平衡は，壊変系列をつくる核種の中で親核種の半減期が娘核種の半減期より圧倒的に長い場合に現れる現象である。
5：関係あり　内部転換は，励起した原子核が脱励起する際軌道電子と相互作用して，軌道電子エネルギーを受け取って内部転換電子として放出する現象である。

問5　ある短半減期核種の線源をNaI(Tl)シンチレーション計数管を用いた計数装置で2秒間計数したところ，1,000カウントを得た。その後，リセットをかけずに，そのままの状態にして全部で1,500秒間計数を続けた結果，積算計数値は90,000カウントであり，さらに計数を続行しても，計数値は変わらなかった。ただし，計数値はバックグラウンド計数を補正してある。この核種の半減期[s]として最も近い値は，次のうちどれか。

1）75　　2）100　　3）125　　4）150　　5）175

〔解答〕

3

注）線源内の放射性核種の数をN，半減期を$T=\dfrac{\ln 2}{\lambda}$とすると，t秒後の積算計数値Cは，$C=N(1-e^{-\lambda t})$となる。1500秒後までに90,000カウント積算し，それ以降カウント数は一定だったので，$e^{-1500\lambda}\approx 0$，つまり$N=90{,}000$。2秒間で1,000カウントだったので，$1{,}000=90{,}000(1-e^{-2\lambda})$。これを変形すると$e^{-2\lambda}=1-\dfrac{1}{90}$，このとき$2\lambda \ll 1$であるので，$e^{-2\lambda}\approx 1-2\lambda=1-\dfrac{1}{90}$。よって，$\lambda=\dfrac{1}{180}$より，

$T=\dfrac{\ln 2}{\lambda}\approx 0.7\cdot 180=126$

（別解）

同様に，$C=N\left(1-\left(\dfrac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}\right)$として，$N=90{,}000$を使い，$1{,}000=90{,}000\left(1-\left(\dfrac{1}{2}\right)^{\frac{2}{T}}\right)$より，

$\left(\dfrac{1}{2}\right)^{\frac{2}{T}}=1-\dfrac{1}{90}$

両辺lnをとって，$\ln(1-x)\approx -x$を使うと，$\dfrac{2}{T}\ln\dfrac{1}{2}=-\dfrac{1}{90}$，よって$T=2\cdot 90\ln 2\approx 180\cdot 0.7=126$

問6　次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　^{226}Raがα壊変すると^{222}Rnが生成する。

B　^{226}Raの放射能が37 MBqである場合，その質量は約1 μgである。

C　^{252}Cf中性子線源は，^{226}Ra–Be中性子線源より，線源強度[s^{-1}]の減衰が速い。

D　中性子線源として，中性子発生に用いる^{9}Be(γ,n)反応および^{9}Be(α,n)反応はどちらも発熱反応である。

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　^{226}Raがα壊変すると，質量数が4，原子番号が2それぞれ減り，^{222}Rnとなる。

B：誤　1 gの^{226}Raの放射能は1 Ci　＝　3.7×10^{10} Bq　＝　3.7×10^{4} MBqであるので，37 MBqの場合，10^{-3} gつまり，1,000μgとなる。

C：正　^{252}Cfの半減期は2.65年，^{226}Raの半減期は1600年より，線源強度[s^{-1}]の減衰は^{252}Cfが速い。

D：誤　光核反応^{9}Be(γ,n)では，γ線のエネルギーが核内の中性子の束縛エネルギーよりも高くないと起こらないため，吸熱反応である。^{9}Be(α,n)反応のうち，^{9}Be$(\alpha,n)^{12}$Cは5.71 MeVの発熱，^{9}Be$(\alpha,n)3\,^{4}$Heは1.57 MeVの吸熱反応である。

問7　^{40}Kは，半減期1.25×10^{9} yでβ^-壊変またはEC壊変する。これらの壊変の分岐比をそれぞれ0.89，0.11とするとき，EC壊変の部分壊変定数[y^{-1}]として最も近い値は次のうちどれか。

1）　5.4×10^{-11}　　2）　6.1×10^{-11}　　3）　6.7×10^{-11}　　4）　4.8×10^{-10}　　5）　5.4×10^{-10}

〔解答〕

2

注）壊変定数を $\lambda[y^{-1}]$，β^- 壊変の部分壊変定数を $\lambda_\beta[y^{-1}]$，EC 壊変の部分壊変定数を $\lambda_{EC}[y^{-1}]$ とすると，$\lambda=\lambda_\beta+\lambda_{EC}$。壊変の分岐比がそれぞれ 0.89，0.11 のとき，$\frac{\lambda_\beta}{\lambda}=0.89$，$\frac{\lambda_{EC}}{\lambda}=0.11$ なので，

$$\lambda_{EC}=0.11\lambda=0.11\cdot\frac{\ln 2}{1.25\times10^{9}}\approx0.11\cdot\frac{0.7}{1.25\times10^{9}}=6.16\times10^{-11}$$

問 8　2 価のヘリウムイオン He^{2+} と 1 価の水素分子イオン H_2^+ を同じ加速電圧で加速した。加速後の He^{2+} と H_2^+ の運動エネルギーをそれぞれ E_1，E_2 とすると，E_1/E_2 に最も近い値は次のうちどれか。

1）　$\frac{1}{2}$　　2）　1　　3）　$\sqrt{2}$　　4）　2　　5）　4

〔解答〕

4

注）加速電圧で荷電粒子を加速する場合，荷電粒子が得る運動エネルギーは荷電粒子の質量に依存せず，電荷と加速電圧に比例する。ここでは，加速電圧は同じなので，2 価の He^{2+} は，1 価の H_2^+ の 2 倍の運動エネルギーを得る。

問 9　次の加速器，加速粒子，加速電場の組合せのうち，適切でないものはどれか。

	加速器	加速粒子	加速電場
1）	コックロフト・ワルトン型加速装置	電子，イオン	静電場
2）	ファン・デ・グラーフ型加速装置	電子，イオン	静電場
3）	サイクロトロン	電子，イオン	高周波
4）	シンクロトロン	電子，イオン	高周波
5）	リニアック	電子，イオン	高周波

〔解答〕

3

注）サイクロトロンでは，加速粒子の周回周波数は加速粒子の速度によらないので，加速のための交流電場の周波数を一定にして加速粒子を周回させて加速することができる。電子を加速する場合，電子は軽いためすぐに光速に近い速度となり，相対論効果により質量が重くなる。周回周波数は質量に逆比例するため，電子は同じ交流周波数で加速することができない。このため電子を加速する場合は電子の速度に応じて交流周波数が変えられるシンクロトロンを使う。

問 10　次の核反応のうち，発熱反応であるものの組合せはどれか。

A　$^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$

B　$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$

C　$^{12}C(n,\alpha)^{9}Be$

D　$^{14}N(n,p)^{14}C$

E　$^{16}O(n,p)^{16}N$

1）　ABD のみ　　1）　ACE のみ　　3）　ADE のみ　　4）　BCD のみ　　5）　BCE のみ

〔解答〕

1

注）AとBの^{6}Li(n,α)^{3}Hと^{10}B(n,α)^{7}Liは，熱中性子（～0.025 eV）に対して大きな断面積を持ち，中性子検出器に利用されている。(n,α）反応後の2つの放出核種の運動エネルギーを光等に変えて検出している。したがって，これらの反応は発熱反応である必要がある。^{6}Li(n,α)^{3}Hと^{10}B(n,α)^{7}LiのQ値はそれぞれ4.78 MeVと2.79 MeVである。

また，Bの^{10}B(n,α)^{7}Liは，BNCT（ホウ素中性子捕捉治療）に使われる反応で，熱外中性子（0.5～100 eV）と反応し，(n,α)反応後の2つの放出核種の運動エネルギーでがん細胞を攻撃する。したがって発熱反応である必要がある。Dの^{14}N(n,p)^{14}CもBNCTと同じ目的に使われる反応であり，発熱反応である。^{14}N(n,p)^{14}CのQ値は0.625 MeVである。

Cの^{12}C(n,α)^{9}Be反応は5.71 MeVの吸熱反応である。（問6 Dの^{9}Be(α,n)^{12}Cの逆反応）

Eの^{16}O(n, p)^{16}N反応は9.64 MeVの吸熱反応である。

問11 次の記述のうち，誤っているものはどれか。

1） ^{239}Puは，熱中性子照射により核分裂を起こす。
2） ^{238}Uは自発核分裂を起こさない。
3） ^{252}Cfの放射性壊変の大半はα壊変であり，自発核分裂の分岐比は約3% である。
4） 天然に存在するウラン同位体の99% 以上は，^{238}Uである。
5） ^{252}Cfは，人工的に生成される。

〔解答〕

2

注）1：正　^{239}Puは，熱中性子との原子核反応により核分裂を起こす。
2：誤　^{238}Uは，約8.2×10^{15}年の半減期で自発核分裂を起こす。
3：正　^{252}Cfはその約97%がα壊変し（半減期2.645年，α線のエネルギー：6.075MeV（15.2%），6.118 MeV(81.5%)），約3% が自発核分裂する。(12版アイソトープ手帳（日本アイソトープ協会編))
4：正　^{238}Uの天然存在度は99.2742% である。なお，^{235}Uの天然存在度は0.7204%，^{234}Uの天然存在度は00054% である)。(12版アイソトープ手帳（日本アイソトープ協会編))
5：正　^{252}Cfは原子炉の中で，^{238}Uが多数回の中性子捕獲と途中数回のβ^{-}壊変を重ねて生成する。このため，その製造にはきわめて中性子束の高い原子炉が使用される。

問12 軌道電子と直接関係のないものの組合せは，次のうちどれか。

A　内部転換
B　オージェ効果
C　EC壊変
D　β^{-}壊変
E　ラザフォード散乱

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

〔解答〕

5

注）A：関係あり　励起状態の原子核がエネルギーの低い状態へ転移するとき，γ線を放出する代りに軌道電子を放出する場合がある。この転移を内部転換といい，このとき放出される電子を内部転換電子という。
B：関係あり　軌道間の電子の転移に伴いそのエネルギーが光子として放出される過程のほかに，光子

を放出せずに同じあるいは外側の軌道にある電子を放出する過程がある。これをオージェ効果という。この時に放出される電子をオージェ電子（Auger electron）という。

C：関係あり　例えば，^{22}Na は，陽電子を放出せずに原子核が軌道電子を捕獲し，ニュートリノだけを放出して^{22}Ne に変わる。このような壊変を軌道電子捕獲または電子捕獲（electron capture），あるいは EC 壊変という。

EC 壊変（軌道電子捕獲）は β^+壊変と同様に原子番号が 1 小さくなり，質量数は変化しない。軌道電子捕獲が起こると電子軌道に空席が生じ，他の軌道電子がその空席を埋める。この際に特性 X 線又はオージェ電子が発生する。

D：直接の関係なし　単独の中性子は半減期約 10.2 分で壊変して陽子に変わる。このとき電子と反ニュートリノが放出される。原子核の中でも中性子が陽子に変わった方がエネルギー的に安定になる場合がある。この場合，原子核の中の中性子が壊変し陽子に変わり，電子と反ニュートリノが放出される。このような壊変を β^-壊変（β^-decay）という。

E：直接の関係なし　ラザフォード散乱は，原子核のクーロン場により入射粒子の軌道が変化する現象であり，放射線の放出や核の励起が起こらない弾性散乱である。

問 13 同じ速度の陽子，重陽子及び α 粒子の物質中での飛程をそれぞれ R_p，R_d，R_α とするとき，飛程の大小関係として正しいものは，次のうちどれか。

1）$R_\mathrm{d} > R_\mathrm{p} \fallingdotseq R_\alpha$
2）$R_\mathrm{p} > R_\mathrm{d} \fallingdotseq R_\alpha$
3）$R_\alpha > R_\mathrm{p} > R_\mathrm{d}$
4）$R_\mathrm{p} > R_\mathrm{d} > R_\alpha$
5）$R_\mathrm{p} \fallingdotseq R_\mathrm{d} > R_\alpha$

〔解答〕

1

注）荷電粒子が物質中の電子にエネルギーを与え，励起や電離作用で単位長さ当たりに失うエネルギーを衝突阻止能（S_col）という。重荷電粒子の衝突阻止能（S_col）は，荷電粒子の電荷を ze（e は電気素量），荷電粒子の速度を v，荷電粒子の質量を M，荷電粒子のエネルギーを E とすると，

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

より

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} \propto \frac{z^2 M}{E}$$

であるので，これより飛程を求めると，

$$R \propto \int \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}E/\mathrm{d}x} \propto \frac{1}{M}\left(\frac{E}{z}\right)^2 \propto \frac{M}{z^2}v^4$$

となり，同じ速度（v）の粒子の飛程は $\frac{M}{z^2}$ に比例する。

陽子，重陽子及び α 粒子の $\frac{M}{z^2}$ の比は，

（陽子）：（重陽子）：（α 粒子）$\fallingdotseq \frac{1}{1^2} : \frac{2}{1^2} : \frac{4}{2^2} = 1 : 2 : 1$

となることから，$R_\mathrm{d} > R_\mathrm{p} \fallingdotseq R_\alpha$ となる。

問 14　5 MeV の電子線を鉛に入射させたときに直接起こる相互作用として，正しいものの組合せは次のうちどれか。

A　コンプトン散乱
B　制動放射
C　光電効果
D　電離

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　コンプトン散乱（Compton scattering）は，光子が電子に衝突した際に，電子にエネルギーの一部を与えて弾き飛ばし，光子自身はその分だけエネルギーを失って（波長が長くなって）別の方向に散乱される現象である。

B：正　制動放射は，電子が散乱されてその方向を変えたり，減速されたりする時に光子を発生する現象である。このとき発生する光子を制動放射線または制動X線という。発生する光子のエネルギーは連続スペクトルを示す。

C：誤　光電効果（photoelectric effect）は，光子が軌道電子にエネルギーを与え，軌道電子が原子から飛び出す現象であり，飛び出した電子を光電子（photoelectron）という。

D：正　電離（ionization）は，軌道電子が十分高いエネルギーを得て，原子から飛び出す現象である。電子や陽子などの荷電粒子が物質中を進むとき，荷電粒子は物質中の電子とクーロン力によりエネルギーのやり取りが起こり物質中の原子を電離したり励起したりする。

問 15　次の文章の［　ア　］，［　イ　］に入る数値として，最も適切な組合せは次のうちどれか。

ベーテの式によれば，重荷電粒子に対する衝突阻止能は，重荷電粒子の電荷の［　ア　］乗およびその速度の［　イ　］乗に比例する。

	ア	イ
1）	−2	2
2）	−1	1
3）	1	−1
4）	2	2
5）	2	−2

〔解答〕

5

注）荷電粒子が物質中の電子にエネルギーを与え，励起や電離作用で単位長さ当たりに失うエネルギーを衝突阻止能（S_{col}）という。重荷電粒子の衝突阻止能（S_{col}）は，荷電粒子を電荷を ze（e は電気素量），荷電粒子の速度を v，電子の質量を m，1 cm^3 中の原子の数を n，真空の誘電率を ε_0，物質の原子番号を Z，原子の平均励起エネルギーを I，$\beta = v/c$（c は光の速度）とすると，

$$S_{\mathrm{col}} = \frac{z^2e^4}{4\pi\varepsilon_0^2 mv^2} nZ \left\{ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\}$$

となる。この式をベーテの式という。｛　｝の中は変化が少ないので，荷電粒子の速度を v，荷電粒子の質量を M，荷電粒子のエネルギーを E とすると，

$$S_{\mathrm{col}} \propto \frac{(ze)^2}{v^2} \propto \frac{(ze)^2 M}{E}$$

と表せる。この関係より，S_{col} は重荷電粒子の電荷 ze の 2 乗に比例し，速度 v の 2 乗に反比例（−2 乗に比例）することがわかる。

問 16 核子当たり 200 MeV の運動エネルギーを持つ 6 価の炭素イオンがアルミニウムの板に $1.0\times10^{10}\mathrm{cm}^{-2}$ のフルエンスで入射したとき，入射面近傍の平均の吸収線量[Gy]として，最も近い値は次のうちどれか。ただし，200 MeV の陽子線のアルミニウムに対する質量阻止能の値は $3.5\ \mathrm{MeV\cdot cm^2\cdot g^{-1}}$ とする。

1） 2.0　　2） 5.6　　3） 34　　4） 120　　5） 200

〔解答〕

5

注）荷電粒子が物質中の電子にエネルギーを与え，励起や電離作用で単位長さ当たりに失うエネルギーを衝突阻止能（S_{col}）といい，単位は通常 MeV/cm が用いられる。質量阻止能（S_m）は，衝突阻止能（S_{col}）を物質の密度 ρ で除したものであり，単位は通常 $\mathrm{MeV/(g\cdot cm^{-2})}$（$=\mathrm{MeV\cdot cm^2\cdot g^{-1}}$）が用いられる。また，吸収線量は，単位質量の物質に放射線を照射した際に吸収されるエネルギーであり，物質 1[kg] が 1 [J] のエネルギーを吸収したときの吸収線量を 1 グレイ［Gy］という。すなわち，1［Gy］＝1［J・$\mathrm{kg^{-1}}$］である。

重荷電粒子の質量阻止能（S_m）は，荷電粒子の電荷を ze（e は電気素量），荷電粒子の速度を v，荷電粒子の質量を M，荷電粒子のエネルギーを E とすると，

$$S_m=\frac{S_{col}}{\rho}\propto\frac{z^2}{v^2}\propto\frac{z^2M}{E}$$

であることから，200 MeV の陽子線と，核子当たり 200 MeV の運動エネルギーを持つ 6 価の炭素イオンのアルミニウムに対する質量阻止能の比は，

$$\text{（陽子線の質量阻止能）：（炭素イオンの質量阻止能）}\cong\frac{1^2\times1}{200}:\frac{6^2\times12}{200\times12}$$

$$=1:36$$

となり，炭素イオンは陽子線の約 36 倍の質量阻止能を持つ。

ここで，核子当たり 200 MeV の炭素イオンが $1.0\times10^{10}[\mathrm{cm^{-2}}]$のフルエンスでアルミニウムの板に入射したときの入射面近傍の平均の吸収線量を D とすると，

$$D\cong(3.5\times36)[\mathrm{MeV\cdot cm^2\cdot g^{-1}}]\times(1.0\times10^{10})[\mathrm{cm^{-2}}]\times(1.6\times10^{-19}\times10^{6})[\mathrm{J\cdot MeV^{-1}}]$$

$$=201.6\times10^{-3}[\mathrm{J\cdot g^{-1}}]$$

$$=201.6[\mathrm{J\cdot kg^{-1}}]$$

$$=201.6[\mathrm{Gy}]$$

問 17 次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　コンプトン効果による散乱光子の波長は，入射光子の波長より短い。

B　コンプトン効果では，入射光子エネルギーが大きいほど，前方散乱が増大する。

C　質量数 56 の鉄におけるコンプトン効果の原子当たりの断面積は電子当たりの断面積の 26 倍である。

D　コンプトン効果により生じた電子のエネルギーは，入射光子のエネルギーに等しくなることがある。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　コンプトン効果で発生した散乱光子は，入射光子よりもエネルギーが低下しているので，散乱光子の波長は入射光子の波長よりも長い。
B：正　入射光子のエネルギーが高くなると散乱光子は前方へ強く散乱される。
C：正　コンプトン散乱の断面積は光子と電子の散乱なので電子数に比例する。鉄の原子番号は26であるので，その電子数も26であり，電子当たりの断面積の26倍となる。
D：誤　コンプトン効果で発生した電子のエネルギーが入射光子のエネルギーに等しくなるということは，入射光子のエネルギーが全て電子に与えられ，散乱光子は発生しないということである。これは電子が光子を吸収して衝突後に電子だけが存在するということであり，光子を粒子として扱った場合，運動量保存則とエネルギー保存則を満足しないことになり，このような現象は起こらない。

問18 γ線スペクトロスコピーにおいて，コンプトンエッジと全吸収ピークとのエネルギー差は，入射光子のエネルギーが大きくなると，次のどの値[MeV]に近づくか。
1）0.128　　2）0.256　　3）0.511　　4）1.02　　5）2.04

〔解答〕
2

注）コンプトンエッジは，コンプトン電子の最大エネルギーに相当する。
入射光子のエネルギーE_γに対するコンプトン散乱後の光子のエネルギーE'_γは，電子の質量をm，光の速度をc，散乱光子の散乱方向の角度をθとすると，次式で表される。

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

また，コンプトン電子（反跳電子）のエネルギーE_eは，

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

であり，コンプトン電子のエネルギーE_eが最大となるのは，散乱光子の散乱角$\theta = 180^\circ$（$\cos\theta = -1$）のときである。すなわち，コンプトン電子のエネルギーの最大値を$E_{e\,max}$とすると，

$$E_{e\,max} = E_\gamma \left(1 - \frac{1}{1+\dfrac{2E_\gamma}{mc^2}} \right)$$
$$= E_\gamma - \frac{E_\gamma \cdot mc^2}{mc^2+2E_\gamma}$$

となる。
一方，全吸収ピークのエネルギーは，入射光子のエネルギーE_γであるので，
（全吸収ピークのエネルギー）－（コンプトンエッジのエネルギー）
$$= E_\gamma - E_{e\,max}$$
$$= E_\gamma - \left(E_\gamma - \frac{E_\gamma \cdot mc^2}{mc^2+2E_\gamma} \right)$$
$$= \frac{E_\gamma \cdot mc^2}{mc^2+2E_\gamma}$$

となる。
題意より，入射光子のエネルギーE_γが十分大きくなると，

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

$$\cong \frac{E_\gamma \cdot mc^2}{2E_\gamma}$$

$$= \frac{mc^2}{2} = \frac{0.511}{2}\,[\mathrm{MeV}] = 0.256[\mathrm{MeV}]$$

に近づく。

問 19 電子対生成に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　電子対生成によって作られた陽電子は，同時に生成された電子と結合して消滅する。
B　電子対生成によって作られた陽電子のエネルギーと電子のエネルギーは等しい。
C　電子対生成の原子当たりの断面積は物質の原子番号のほぼ 2 乗に比例する。
D　光子と原子核の電場との相互作用により生じる。
E　電子対生成によって作られた陽電子の真空中の寿命は約 15 分である。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　電子対生成で生成された陽電子は，電子の反粒子で，物質中で減速して物質中の電子と結合して 2 本の 0.511 MeV の消滅ガンマ線を反対方向に出して消滅する．

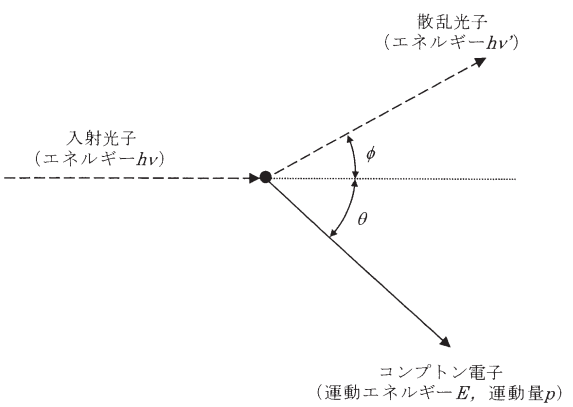
B：誤　電子対生成では，運動量が原子核，電子および陽電子の 3 体で分けられるので，それぞれの粒子のエネルギーは 0 から $h\nu - 2m_0c^2$ まで連続的に分布し，陽電子と電子のエネルギーが等しくなるとは限らない。なお，h はプランク定数，ν は入射光子の波長，m_0 は電子の静止質量，c は光の速度である。

C：正　電子対生成の原子断面積 x は原子番号 z の 2 乗に比例し（$x \propto z^2$），エネルギーが高くなるほど増加する。

D：正　電子対生成は，光子が原子核近傍の電場により吸収され，電子と陽電子を発生する反応である。

E：誤　真空中では，陽電子は壊変することはなく，安定である。

問 20 図に示す通り，エネルギー $h\nu$ の光子がコンプトン効果によりエネルギー $h\nu'$，散乱角 ϕ で散乱され，コンプトン電子が運動エネルギー E，運動量 p，角度 θ で反跳されたとする。電子の質量を m，光速度を c とすると，正しい式の組合せは次のうちどれか。



A　$\frac{h\nu}{c}=\left(\frac{h\nu'}{c}\right)\cos\phi+p\cos\theta$

B　$0=\left(\frac{h\nu'}{c}\right)\sin\phi-p\sin\theta$

C　$h\nu=h\nu'+E$

D　$(pc)^2=E(E+2mc^2)$

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）コンプトン効果では，コンプトン散乱前後で運動量およびエネルギーが保存されるので，

入射光子進行方向の運動量保存則

$$\frac{h\nu}{c}=\left(\frac{h\nu'}{c}\right)\cos\phi+p\cos\theta \qquad \cdots\cdots (20-1)$$

入射光子進行方向に対して垂直方向の運動量保存則

$$0=\left(\frac{h\nu'}{c}\right)\sin\phi-p\sin\theta \qquad \cdots\cdots (20-2)$$

エネルギー保存則

$$h\nu+mc^2=h\nu'+\frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad \cdots\cdots (20-3)$$

が成り立つ。ここで，m，v は電子の静止質量および速度，c は光の速度である。また，

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

であることから，(20－3）式は

$$h\nu=h\nu'+E \qquad \cdots\cdots (20-4)$$

と表される。

特殊相対性理論より，電子の静止エネルギーと運動エネルギーを加えた全エネルギーは

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

で与えられるため，

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

よって，

$$\begin{aligned}(pc)^2&=(mc^2+E)^2-m^2c^4\\&=m^2c^4+2E\cdot mc^2+E^2-m^2c^4\\&=E(E+2mc^2) \qquad \cdots\cdots (20-5)\end{aligned}$$

(20－1)式，(20－2)式，(20－4)式，(20－5)式より ABCD すべての式が正しい。

問 21　運動エネルギー 20 MeV 中性子の速度[m·s^{-1}]として，最も近い値は次のうちどれか。ただし，中性子の質量はエネルギーに換算すると 939.6 MeV である。

1）4.5×10^7　　2）5.1×10^7　　3）5.5×10^7　　4）6.1×10^7　　5）6.6×10^7

〔解答〕

4

注）相対論を考慮した運動エネルギー E_k は以下の式で表せる。

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2, \qquad \beta = \frac{v}{c}$$

ここで c は光速度（3.0×10^8 m/s），mc^2 は静止質量，v は粒子の速度である。問題文より中性子の静止質量は 939.6 MeV，中性子の運動エネルギーは 20 MeV なので，値を代入して，

$$20 = \frac{939.6}{\sqrt{1-\beta^2}} - 939.6$$

$$\sqrt{1-\beta^2} \approx \frac{940}{960}$$

$$\therefore \beta \approx 0.2031\ldots$$

これは運動エネルギー 20 MeV を持つ中性子の速度は光速度の約 20% であることを意味している。v を求めると約 6.1×10^7[m/s]となるため，4 が正しい。

問 22 中性子が静止している標的核に正面衝突して，標的核が入射中性子の進行方向に反跳されるときを考える。標的核が ^{1}H または ^{16}O である場合のそれぞれの反跳エネルギーを E_H，E_O とすると，その比(E_H/E_O)として最も近い値は次のうちどれか。

1） 1.5　　2） 2.5　　3） 3.5　　4） 4.5　　5） 5.5

〔解答〕

4

注）図 1 のような実験室系での弾性散乱を考える。このとき反跳核の運動エネルギー E は以下の式で表せる。

$$E = \frac{2mM}{(m+M)^2}\cos\theta\, E_m$$

ここで，m,M はそれぞれ入射核，標的核の質量，θ は入射粒子と反跳粒子が成す角，E_m は入射粒子の運動エネルギーである。標的核が ^{1}H，^{16}O の時の M をそれぞれ 1，16 とすると，

$$\frac{E_H}{E_O} = \frac{2/(1+1)^2}{2\cdot16/(1+16)^2} = 4.51\ldots$$

となるため，4 が正しい。

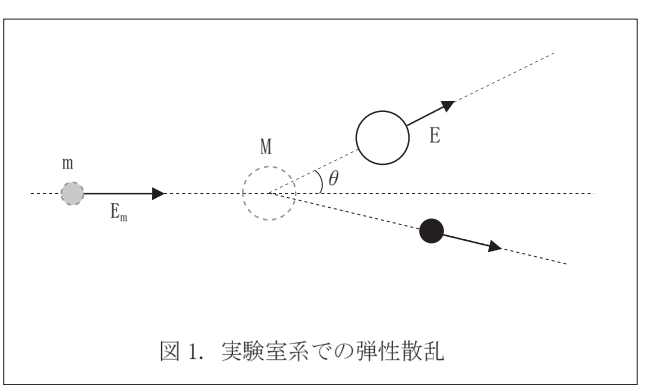


図 1. 実験室系での弾性散乱

問 23 量と単位に関する次の組合せのうち，正しいものはどれか。

A　ε 値　　－　　$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}$

B　照射線量　－　$A \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$
C　質量阻止能　－　$m^4 \cdot s^{-2}$
D　衝突断面積　－　m^{-2}
E　質量エネルギー吸収係数　－　$m^2 \cdot kg^{-1}$

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

〔解答〕

3

注）A：正　ε 値　―　$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$（=J または eV）
B：誤　照射線量　―　$A \cdot s \cdot kg^{-1}$（$=C \cdot kg^{-1}$）
C：正　質量阻止能　―　$m^4 \cdot s^{-2}$（$=J \cdot kg^{-1} \cdot m^2$）
D：誤　衝突断面積　―　m^2
E：正　質量エネルギー吸収係数　―　$m^2 \cdot kg^{-1}$

問 24　試料を1分間測定して4,800カウントを得た。次に試料を除いて3分間バックグラウンドを測定したところ，900カウントであった。この試料の正味計数率の標準偏差[cpm]として最も近い値は，次のうちどれか。

1）40　2）50　3）60　4）70　5）80

〔解答〕

4

注）測定時間 t の間に計数 N が得られたときの計数率 n と標準偏差 σ は以下の式で表せる。

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

この式を用いて試料測定時の計数率 n_S と標準偏差 σ_S，およびバックグラウンド測定時の計数率 n_B と標準偏差 σ_B を計算すると，

$$n_S \pm \sigma_S = 4800 \pm \sqrt{4800}\ [\mathrm{cpm}], \quad n_B \pm \sigma_B = 300 \pm 10[\mathrm{cpm}]$$

となる。誤差伝搬を考慮して正味計数率 n_A と標準偏差 σ_A を計算すると，

$$n_A \pm \sigma_A = (4800 - 300) \pm \sqrt{(\sqrt{4800})^2 + 10^2}$$
$$= 4500 \pm 70[\mathrm{cpm}]$$

となるため，4が正しい。

問 25　イメージングプレート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　ガドリニウム含有蛍光体を用いることにより熱中性子の二次元分布を取得できる。
B　トリチウムの二次元分布は β 線のエネルギーが低いため取得できない。
C　一般にX線フィルムと比べて感度が低い。
D　紫外線照射で初期化が可能である。

1）AとB　2）AとC　3）AとD　4）BとC　5）BとD

〔解答〕

3

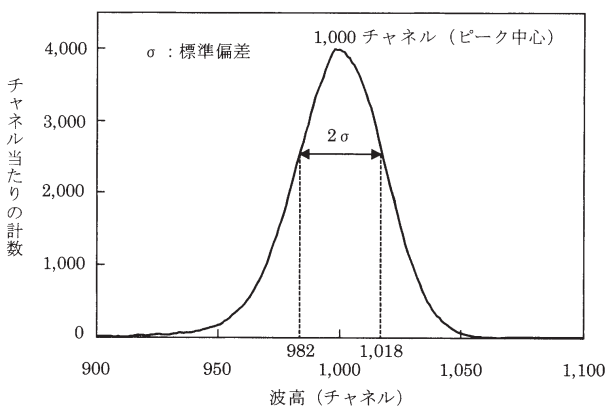
注）A：正　Gd には中性子捕獲反応断面積の大きな同位体（^{155}Gd，^{157}Gd）が含まれており，捕獲反応に伴う内部転換電子などの二次放射線により情報が記録される。
B：誤　トリチウムから放出されるような低エネルギー β 線を検出するために，表面カバーのないイメ

ージングプレートが市販されている。

C：誤　一般にイメージングプレートの感度はX線フィルムと比べて 2 桁ほど高い。

D：正　紫外線照射でも波長次第では初期化が可能である。ただし，エネルギーが高い紫外線では逆に感度を持つ（蛍光体が励起される）場合もある（レーザー研究第 26 巻，812－845，(1998)）。

問 26 あるシンチレーション検出器を用いて^{137}Cs 線源からのγ線による波高分布を測定したところ，図に示すような全吸収ピークが観測された。この場合の相対エネルギー分解能[%]（全吸収ピーク位置に対する半値全幅（FWHM））として最も近い値は次のうちどれか。なお，図中のσは，全吸収ピークの形状をガウス分布としたときの標準偏差を表す。



1）　1.8　　2）　2.1　　3）　3.6　　4）　4.2　　5）　5.4

〔解答〕

4

注）図より，ピーク中心が 1000 ch であるのに対して，標準偏差σは 18 ch(1.8%)である。半値全幅 FWHM とσの関係は，$FWHM \simeq 2.35\sigma$ と表せる。σを代入すると，FWHM は約 42.3 ch（4.2%）となり，4 が正しい。

問 27 中性子の検出に用いる核分裂計数管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　^{235}U を計数管の内面に薄く被覆する。

B　パルス波高を利用して中性子とγ線の信号を弁別できる。

C　計数管内面のウラン等の核分裂反応により放出された核分裂片は信号に寄与しない。

D　出力パルス波高は中性子のエネルギーに比例する。

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

〔解答〕

1

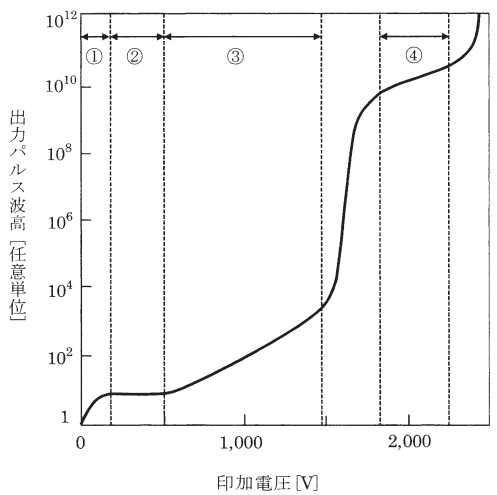
注）核分裂計数管は ^{235}U の中性子誘起核分裂反応を利用した中性子検出器である。

A：正　一般に ^{235}U の酸化物が計数管の内側に薄く塗布されている。

B：正　核分裂片は高いエネルギー（数十 MeV）を持っているためにγ線によるパルスよりも大きな波高が得られ，これらは波高弁別により容易に区別できる。そのため，核分裂計数管は高いγ線量率下でも使用できる。

C：誤　入射した中性子は核分裂片の電離作用によるパルスとして検出される。
D：誤　中性子エネルギーの違いによる核分裂片のエネルギー変化は，核分裂計数管の出力パルス波高にほとんど寄与しない。

問 28 図は気体の電離を利用した検出器の印加電圧と出力パルス波高の関係を概念的に示したものである。次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。



A　①の領域では，生成したイオン対の一部が再結合を起こす。
B　②の領域では，生成イオン対のほとんどは集電極で集められる。
C　③の領域では，ガス増幅により出力パルス波高は一次イオン対の数に比例する。
D　④の領域では，出力パルス波高は一次イオン対の数に比例しない。

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

1）再結合領域

放射線により生じたイオン対の一部が両極に移動して出力パルスを生じるが，残りは再結合して元に戻る領域。電圧が高くなると再結合する割合が少なくなり，出力パルス波高が大きくなる。（A は正しい）

2）電離箱領域

放射線により生じたイオン対のほとんどが再結合することなく，電極に集められる。電子なだれが起こらない領域のため，出力パルス波高は電圧を上げてもほぼ一定である。（B は正しい）

3）比例領域

電極付近での強い電界のため，電子なだれによるガス増幅が起こる。ガス増幅率は一定となるので，吸収されたエネルギーに比例した出力パルス波高が得られる。（C は正しい）

4）制限比例領域

ガス増幅で得られる陽イオンが多くなり電界分布に大きな影響を与え始める。そのため，吸収されたエネルギーと出力パルス波高は比例しなくなる領域となる。

5）GM 領域

ガス増幅で得られる陽イオンによる電荷効果が支配的となり，一次イオン数とは無関係にほぼ一定の出力パルス波高となる。（D は正しい）

6）放電領域

放射線が入射しなくても放電が連続で起こる領域。

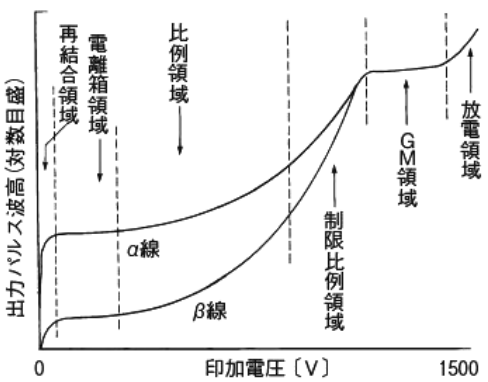


図　計数管の印加電圧と出力パルス波高の関係

（日本アイソトープ協会　8 版増補 2019 放射線取扱の基礎）

問 29　γ 線（60 keV～1.5 MeV）の 1 cm 線量当量の測定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　NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータでの正確な測定に，エネルギー補償機能付を用いる。

B　放射性物質を取扱う指に取り付けたリングバッジで測定した。

C　電離箱式サーベイメータで測定した。

D　ZnS（Ag）シンチレーション式サーベイメータで測定した。

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　エネルギー補償機能とは放射線のエネルギーによる感度の違いや線量率の違いを補正する機能である。NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータは放射線のエネルギーによる感度の違いが大きいために，エネルギー補償機能を付けることにより測定の正確さは向上する。

B：誤　リングバッジは皮膚の被ばく（70 μm 線量当量）を測定するものである。

C：正　電離箱式サーベイメータは γ 線エネルギーや入射方向によらず，1 cm 線量当量を正しく測定することができる（エネルギー特性および方向特性が良い）

D：誤　ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータは α 線放出核種による表面汚染を測定するものである。

問30 次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　1 MeV の中性子と光子を人体に照射したとき，吸収線量が同じであれば実効線量も同じである。

B　外部被ばくによる実効線量を評価するため，放射線管理の測定では 1 cm 線量当量が導入されている。

C　照射線量は空気に対してのみ定義される。

D　レントゲンは，SI 単位系における照射線量の固有な単位名称である。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　（ある臓器に対する）吸収線量[Gy]に放射線加重係数を乗じたものが等価線量[Sv]であり，等価線量に組織加重係数を乗じて体全体で足し合わせたものが，実効線量[Sv]である。中性子と光子では放射線加重係数が異なるため誤り。

B：正　外部被ばくによる実効線量は 1 cm 線量当量から計算されている。

C：正　照射線量は，「光子によって空気中で発生した全ての荷電粒子が空気中で完全に停止するまでに作るイオン対の負又は正電荷の絶対値を空気の質量で除した値」として定義され，単位は C/kg である。よって空気に対してのみの定義である。

D：誤　レントゲン[単位 R]は，かつて使われていた照射線量で SI 単位系には採用されていない。

問31 次の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 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。

線量測定において主に用いられる物理量として，［ A ］と［ B ］がある。前者は電気的に中性な放射線にのみ使用されるのに対し，後者は全ての放射線に対し適用される。単位は $J \cdot kg^{-1}$ であるが，特別な単位として Gy を用いることも多い。

光子の［ A ］は［ C ］と質量エネルギー転移係数の積によって得ることができる。例えば，1.25 MeV の光子が面積 1 cm^2 当たり 1.00×10^{10} 個で一様に空気に入射した場合，このときの質量エネルギー吸収係数および制動放射により失われる電子のエネルギーの割合をそれぞれ 0.0267 $cm^2 \cdot g^{-1}$ および 0.3% とすると，空気［ A ］の値は［ ア ］$J \cdot kg^{-1}$ と計算できる。

実際の空気［ A ］の測定では，［ C ］を直接測定することが困難であることから，通常は空洞電離箱が用いられる。例えば，1 cm^3 の空気が詰められた空洞電離箱を用いて 1.25 MeV の光子を測定したところ，1 nC の収集電荷を得た。このとき，空洞電離箱の存在による放射線場の乱れが無視できる場合，単位質量当たりの空洞空気に転移したエネルギーは，空気の W 値を 34.0 eV，空気の密度を 1.20×10^{-3} $g \cdot cm^{-3}$ とすると［ イ ］$J \cdot kg^{-1}$ と算出される。ただし，この値を直接空気［ A ］の値として採用できない点には注意が必要である。その理由は，収集電荷量は，主に電離箱の［ D ］中で発生した［ E ］による［ F ］における電離に由来するためである。この場合，まずは［ G ］に基づき，空洞電離箱の［ H ］の［ B ］値に［ H ］に対する電離箱の［ D ］の［ I ］を乗じて，電離箱の［ D ］における［ B ］を求める。さらに荷電粒子平衡条件により，電離箱の［ D ］に対する［ H ］の［ J ］を乗じ，さらに制動放射により失われる電子のエネルギーの割合を加味すれば，空気［ A ］が得られる。このような測定では，物質による違いを小さくするため，電離箱の［ D ］として［ K ］を用いることが多い。

荷電粒子平衡が成立し，制動放射により失われる電子のエネルギーの割合が無視できる場合，［ A ］と［ B ］は互いに等しくなる。

＜A～C の解答群＞

1） 照射線量	2） 吸収線量	3） 1 cm 線量当量
4） 70 μm 線量当量	5） 実効線量	6） 等価線量
7） カーマ	8） フルエンス	9） フルエンス率
10） エネルギーフルエンス	11） エネルギーフルエンス率	

＜ア，イの解答群＞

1） 1.60×10^{-5}	2） 2.84×10^{-5}	3） 3.35×10^{-5}	4） 3.55×10^{-5}
5） 4.29×10^{-5}	6） 5.36×10^{-5}	7） 1.60×10^{-2}	8） 2.84×10^{-2}
9） 3.35×10^{-2}	10） 3.55×10^{-2}	11） 4.29×10^{-2}	12） 5.36×10^{-2}

＜D～H の解答群＞

1） 空気	2） 壁物質	3） 制動放射線
4） 散乱光子	5） 二次電子	6） 消滅放射線
7） 電子なだれ	8） 中性子	9） 回折
10） 蛍光	11） ブラッグ・クレーマン則	12） 質量保存則
13） 空洞原理	14） ローレンツ変換	

＜I, J の解答群＞

1） 阻止能	2） 阻止能比	3） 質量阻止能
4） 質量阻止能比	5） 線減弱係数	6） 質量減弱係数
7） 質量エネルギー吸収係数	8） 質量エネルギー吸収係数比	9） W 値
10） イオン再結合係数		

＜K の解答群＞

1） 金	2） 銀	3） 銅	4） ステンレス鋼
5） 鉛	6） プラチナ	7） ジュラルミン	8） アルミニウム
9） グラファイト	10） 真鍮（ちゅう）		

〔解答〕

A－7　B－2　C－10　ア－12　イ－8　D－2　E－5　F－1　G－13
H－1　I－4　J－8　K－9

注）ア：光子のエネルギー吸収係数を μ_{en}，エネルギー転移係数を μ_{TR}，また，制動放射により失われる電子のエネルギーの割合を G とすると，

$$\mu_{en}=\mu_{TR}(1-G)$$

と表される。

空気カーマを K，空気の密度を ρ，光子のエネルギーフルエンスを ψ とすると，

$$K=\frac{\mu_{TR}}{\rho}\psi$$

と表され，また，光子のエネルギーフルエンス ψ は光子のエネルギー E_γ と光子のフルエンス ϕ とから

$$\psi=E_\gamma\phi$$

と表されるから，

$$K=\frac{\mu_{TR}}{\rho}E_\gamma\phi=\frac{\mu_{en}}{\rho(1-G)}E_\gamma\phi$$

ここで，問題の文章より，

$$E_\gamma=1.25[\mathrm{MeV}]=1.25\times1.6\times10^{-19}\times10^{6}[\mathrm{J}]=2.0\times10^{-13}[\mathrm{J}]$$

$\phi = 1.00\times10^{10}[\mathrm{cm^{-2}}] = 1.00\times10^{14}[\mathrm{m^{-2}}]$

$\mu_{en}/\rho = 0.0267[\mathrm{cm^2\cdot g^{-1}}] = 2.67\times10^{-3}[\mathrm{m^2\cdot kg^{-1}}]$

$G = 0.003$

であるから，

$$K = \frac{2.67\times10^{-3}}{(1-0.003)}\times2.0\times10^{-13}\times1.00\times10^{14} = 5.36\times10^{-2}[\mathrm{J\cdot kg^{-1}}]$$

イ：光子により空洞電離箱中に生成される電子－イオン対数を N，空洞電離箱中の空気の質量を m[kg]，空気のW値を W[J]とすると，単位質量当たりの空洞空気に転移したエネルギー，すなわち空洞空気の吸収線量 D_g[J・kg^{-1}]は，

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

ここで，問題の文章より，空洞電離箱で収集された電荷は 1.0×10^{-9}C であるから，

$$N = \frac{1.0\times10^{-9}}{1.6\times10^{-19}}$$

また，同じく問題の文章より，

$W = 34.0\times(1.6\times10^{-19})$[J]

$m = (1.20\times10^{-3})\times1\times10^{-3}$[kg]

となるので，

$$D_g = \frac{34.0\times(1.6\times10^{-19})\times(1.0\times10^{-9})}{(1.20\times10^{-3})\times1\times10^{-3}\times(1.6\times10^{-19})} = 2.84\times10^{-2}[\mathrm{J\cdot kg^{-1}}]$$

問32 次の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

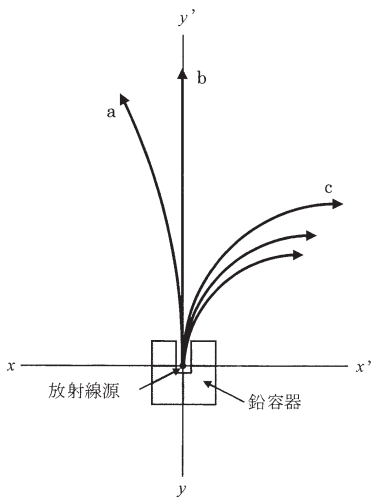
図は，一様な磁場中における放射線の特徴を表すために模式的に描かれた図である。真空中に置かれた鉛容器には放射線源が入っており，放射線は鉛容器の小孔でコリメートされて y－y' 軸上（$y \rightarrow y'$）に向かう向きに放出される。

(1) 放射線として放出される粒子a，b及びcは，それぞれ［ A ］である。磁界の方向は紙面に［ B ］に向かう向きである。

(2) 粒子aは，粒子に働く［ C ］を受けて，一定の軌道（半径 r）をとる。粒子の質量を m_a，電気素量を e，磁束密度を B とすると，粒子aの運動量は［ ア ］であり，運動エネルギーは［ イ ］である。壊変前の原子核を（Z，A）で表すと，壊変エネルギーは，粒子aの運動エネルギーの［ ウ ］倍に等しく，壊変後の原子核は［ D ］となる。ここで，Z は原子番号，A は質量数を表す。

(3) 粒子cは，図に示されているように，壊変ごとに軌道半径が異なる。この理由は壊変エネルギーの一部を［ E ］が持ち去るためであり，粒子cのエネルギーは［ F ］を示す。この壊変を［ G ］といい，壊変前の原子核を（Z，A）と表すと，壊変後の原子核は［ H ］となる。ここで，Z は原子番号，A は質量数を表す。

(4) 粒子bは電磁波の性質を示し，その振動数を ν，プランク定数を h，光速度を c，原子核の質量を M とすると，その運動量は［ エ ］，エネルギーは［ オ ］である。一方，粒子放出後の原子核の運動エネルギーは［ カ ］であり，これを［ I ］エネルギーという。



＜A の解答群＞

1） 電子，光子及び α 粒子　　2） 電子，α 粒子及び光子
3） 光子，電子及び α 粒子　　4） 光子，α 粒子及び電子
5） α 粒子，光子及び電子　　6） α 粒子，電子及び光子
7） 電子，中性子及び α 粒子　　8） 電子，α 粒子及び中性子
9） 中性子，電子及び α 粒子　　10） 中性子，α 粒子及び電子
11） α 粒子，中性子及び電子　　12） α 粒子，電子及び中性子

＜B の解答群＞

1） 平行に左から右（$x \rightarrow x'$）　2） 平行に右から左（$x' \rightarrow x$）　3） 平行に下から上（$y \rightarrow y'$）
4） 平行に上から下（$y' \rightarrow y$）　5） 垂直に表から裏　6） 垂直に裏から表

＜C の解答群＞

1） 引力　　2） クーロン力　　3） 遠心力
4） 表面張力　　5） ローレンツ力　　6） 核力
7） ファンデルワールス力　　8） コリオリ力

＜ア，イの解答群＞

1） erB　　2） $\dfrac{eB}{r}$　　3） $m_a erB$　　4） $m_a \dfrac{eB}{r}$
5） $2\,erB$　　6） $\dfrac{2\,eB}{r}$　　7） $2\,m_a erB$　　8） $2\,m_a \dfrac{eB}{r}$
9） $\dfrac{(erB)^2}{m_a}$　　10） $\left(\dfrac{eB}{r}\right)^2 \dfrac{1}{m_a}$　　11） $\dfrac{2(erB)^2}{m_a}$　　12） $2\left(\dfrac{eB}{r}\right)^2 \dfrac{1}{m_a}$
13） $\dfrac{4(erB)^2}{m_a}$　　14） $4\left(\dfrac{eB}{r}\right)^2 \dfrac{1}{m_a}$

＜ウの解答群＞

1） 1　　2） $\dfrac{A-1}{A-2}$　　3） $\dfrac{A-1}{A-4}$　　4） $\dfrac{A-2}{A-4}$
5） $\dfrac{A}{A-1}$　　6） $\dfrac{A}{A-2}$　　7） $\dfrac{A}{A-4}$　　8） $\dfrac{A-4}{A-2}$

9）$\frac{A-1}{A}$　10）$\frac{A-2}{A}$　11）$\frac{A-4}{A}$

＜D の解答群＞

1）(Z, A)　2）$(Z-1, A)$　3）$(Z+1, A)$　4）$(Z-1, A-2)$
5）$(Z+1, A-2)$　6）$(Z-2, A-2)$　7）$(Z+2, A-2)$　8）$(Z-2, A-4)$
9）$(Z+2, A-4)$

＜E，F の解答群＞

1）中性子　2）γ 線　3）X 線　4）ニュートリノ
5）反ニュートリノ　6）ミュー粒子　7）中間子　8）熱として格子振動
9）マクスウェル・ボルツマン分布　10）ガウス分布
11）連続分布　12）線スペクトル
13）離散的スペクトル　14）矩形分布

＜G の解答群＞

1）β^-壊変　2）β^+壊変　3）軌道電子捕獲　4）内部転換
5）核異性体転移　6）自発核分裂　7）α 壊変

＜H の解答群＞

1）(Z, A)　2）$(Z-1, A)$　3）$(Z+1, A)$　4）$(Z-1, A-2)$
5）$(Z+1, A-2)$　6）$(Z-2, A-2)$　7）$(Z+2, A-2)$　8）$(Z-2, A-4)$
9）$(Z+2, A-4)$

＜エ～カの解答群＞

1）c　2）hc　3）hv　4）$\frac{hv}{c}$
5）$\frac{hc}{v}$　6）hc^2　7）hv^2　8）Mc
9）Mc^2　10）$2Mc^2$　11）$\frac{hv}{Mc}$　12）$\frac{hv}{Mc^2}$
13）$\frac{(hv)^2}{Mc^2}$　14）$\frac{(hv)^2}{2Mc^2}$　15）$\frac{(hv)^2}{4Mc^2}$

＜I の解答群＞

1）阻止　2）散乱　3）しきい　4）転換
5）反跳　6）振動　7）放射　8）壊変

〔解答〕

A－5　B－5　C－5　ア－5　イ－11　ウ－7　D－8　E－5　F－11
G－1　H－3　エ－4　オ－3　カ－14　I－5

注）A：α 粒子，電子，光子および中性子の中で，まず問題の図において磁場中で軌道が曲がっている粒子 a と粒子 c は電荷をもつ α 粒子か電子のどちらかであり，軌道が曲がっていない粒子 b は電荷をもたない光子か中性子のどちらかであることがわかる。

問題の図や文章（2）および（3）において，粒子 a の軌道は一定であるのに対し，粒子 c は磁場が一定であるにもかかわらず軌道が一定でないことが示されている。磁場中で起動が一定であること（あるいは一定でないこと）は，放出される粒子の運動エネルギーが一定であること（あるいは運動エネルギーの分布が連続的であること）を意味している。したがって，粒子 a が α 壊変で放出される α 粒子，粒子 b が β 壊変で放出される電子である。放射性壊変によるエネルギーの領域では，軌道の曲率が，α 壊変で放出される α 粒子は小さく，β 壊変で放出される電子では大きいことからも判断できる（α 粒子のほうが電子と比較して質量が非常に大きいことから，軌道の半径も

α 粒子のほうが大きい傾向にある）。

また，問題の文章（4）の中で，「粒子 b は電磁波の性質を示し」とされていることから，粒子 b は光子である。

ア：粒子 a の電荷を q，速度を v_a とすると，粒子 a に働くローレンツ力 qv_aB が粒子 a の円軌道の向心力 $m_av_a^2/r$ と等しいことから，

$$m_av_a^2/r=qv_aB$$

よって，

$$m_av_a=qrB$$

ここで，粒子 a は α 粒子すなわち $^4\mathrm{He}$ の原子核なので，$q=2e$ である。

したがって，粒子 a の運動量 p_a は，

$$p_a=m_av_a=2erB$$

イ：粒子 a の運動エネルギーを E_a とすると，

$$E_a=\frac{1}{2}m_av_a^2$$

アの回答より，

$$E_a=\frac{p_a^2}{2m_a}=\frac{(2erB)^2}{2m_a}=\frac{2(erB)^2}{m_a}$$

ウ：壊変エネルギーを E，また，壊変後の原子核の運動エネルギーおよび質量をそれぞれ E_d および m_d とすると，運動量保存則により壊変後の原子核の運動量が α 粒子の運動量 p_a と等しいことから，

$$E=E_a+E_d=\frac{p_a^2}{2m_a}+\frac{p_a^2}{2m_d}=\frac{p_a^2}{2}\left(\frac{1}{m_a}+\frac{1}{m_d}\right)$$

したがって，壊変エネルギーを E と粒子 a の運動エネルギー $E_a=\dfrac{p_a^2}{2m_a}$ との比は，

$$\frac{E}{E_a}=\frac{\dfrac{1}{m_a}+\dfrac{1}{m_d}}{\dfrac{1}{m_a}}=1+\frac{m_a}{m_d}=1+\frac{4}{A-4}=\frac{A}{A-4}$$

カ：粒子放出後の原子核の速度を V とすると，運動量保存則により粒子放出後の原子核の運動量 MV と粒子 b すなわち光子の運動量 $\dfrac{h\nu}{c}$ が等しいことから，粒子放出後の原子核の運動エネルギー $\dfrac{1}{2}MV^2$ は，

$$\frac{1}{2}MV^2=\frac{(MV)^2}{2M}=\frac{(h\nu)^2}{2Mc^2}$$

化　　学

第64回（令和元年）

次の問1から問30について，5つの選択肢のうち適切な答えを1つだけ選び，また，問31，問32の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを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　放射能が等しい ^{60}Co（半減期5.27年）と ^{57}Co（半減期272日）が存在するとき，それぞれの原子核の個数の比（^{60}Co/^{57}Co）として，最も近い値は次のうちどれか。

1）0.14　　2）0.71　　3）3.6　　4）7.1　　5）14

〔解答〕

4

注）壊変法則は以下の式で示すことができる。

$A=\lambda N$，　$N=A/\lambda$，　$\lambda T=0.693$

ただし，A：放射能，N：原子数（原子核の個数），λ：壊変定数

$\lambda T=0.693$ より，

^{60}Co の λ は，0.693/5.27（5.27は半減期（年））

^{57}Co の λ は，0.693/0.75（0.75は半減期272日の年換算）

と示される。これを $N=A/\lambda$ に代入すると

^{60}Co の原子核の個数は，$A/(0.693/5.27)$

^{57}Co の原子核の個数は，$A/(0.693/0.75)$

と示される。したがって，両原子核の個数の比（^{60}Co/^{57}Co）は，

5.27/0.75≒7.1　となる。

問2　^{211}At は半減期7.2時間で，42% は α 壊変し，58% はEC壊変する。α 壊変の部分半減期[時間]として，最も近い値は次のうちどれか。

1）10　　2）12　　3）14　　4）17　　5）26

〔解答〕

4

注）半減期 T の核種で，一方の分岐壊変する割合をX%とすると，その部分半減期（T_x）は，$T_x=T/(X/100)$ で示される。

T=7.2時間，α 壊変の分岐壊変する割合は42% なので，その部分半減期（T_x）は，

$T_x=7.2/(42/100)$≒17.1 となる。

問3　^{40}K（同位体存在度0.0117%）の半減期は 1.251×10^9 年である。745.5 g の塩化カリウム（式量74.55）の放射能[Bq]として，最も近い値は次のうちどれか。

1）1.0×10^3　　2）1.2×10^4　　3）3.7×10^4　　4）1.0×10^5　　5）3.7×10^5

〔解答〕

2

注）745.5 g の塩化カリウム(KCl)は，式量 74.55 g なので 10 mol である。

その際の^{40}K 分子数は

モル数×アボガドロ定数×^{40}K の存在比（0.0117%）で求められる。

したがって，$10\times6.02\times10^{23}\times(0.0117/100)=7.04\times10^{20}$　となる。

また，半減期 T は，1.251×10^{9}(y)×365(d)×24(h)×60(m)×60(s)$=3.95\times10^{16}$(秒)となる。

問 1 に示した壊変法則から，放射能(A)$=(0.693/T)\times N$ が成り立つため，

$A=(0.693/3.95\times10^{16})\times7.04\times10^{20}\fallingdotseq1.2\times10^{4}$ となる。

問 4　次のうち，放射能が等しいものの組合せはどれか。

A　半減期 T，原子数 N の核種 A の放射能

B　半減期 $2T$，原子数 $N/2$ の核種 B の放射能

C　半減期 $T/2$，原子数 $N/2$ の核種 C の放射能

D　半減期 T，原子数 N の核種 A と永続平衡にある核種 D の放射能

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

〔解答〕

1

注）問 1 に示した壊変法則から，放射能(A)$=0.693\times(N/T)$が成り立つため，A～D の放射能は以下で示される。

A の放射能：$0.693\times(N/T)$

B の放射能：$0.693\times((N/2)/(2T))=0.693\times(1/4)\times(N/T)$

C の放射能：$0.693\times((N/2)/(T/2))=0.693\times(N/T)$

D の放射能：$0.693\times(N/T)$ ←永続平衡では，娘核種の放射能 D は親核種の放射能と等しいため

問 5　比放射能 200 Bq·mg^{-1} の[^{14}C]トルエン C_6H_5-CH_3 を酸化して得られる[^{14}C]安息香酸 C_6H_5-COOH の比放射能[Bq·mg^{-1}]として，最も近い値は次のうちどれか。ただし，トルエン，安息香酸の分子量はそれぞれ 92,122 とする。

1）50　　2）100　　3）150　　4）220　　5）270

〔解答〕

3

注）トルエン→安息香酸の酸化反応は，$2C_7H_8+3O_2\rightarrow 2C_6H_5COOH+2H_2O$　となる。このため，安息香酸の炭素はすべてトルエン由来であり，その数も変わらないため，反応の前後で放射能量は変わらない。ただし，質量数は 1.32 倍(122/92)になっているため，比放射能は 0.75 倍(92/122)となり，$200\times0.75=150$(Bq·mg^{-1})となる。

問 6　放射平衡に関する次の記述のうち，正しいものはどれか。

1）親核種の壊変定数が娘核種の壊変定数より大きい場合は，放射平衡が成立する。

2）放射平衡が成立しているとき，親核種の放射能は娘核種の放射能より常に大きい。

3）放射平衡が成立すると，娘核種の放射能は親核種の半減期で減衰する。

4）永続平衡が成立すると，親核種と娘核種の原子数の比（$N_{親}/N_{娘}$）は，親核種と娘核種の壊変定数の比（$\lambda_{親}/\lambda_{娘}$）に等しい。

5）　放射平衡が成立すると，親核種と娘核種の原子数の和は常に一定となる。

〔解答〕

3

注）1：誤　放射平衡が成り立つのは，親核種の半減期が娘核種の半減期より大きい時である。また，壊変法則 $\lambda T = 0.693$ の式からも分かるとおり，半減期と壊変定数は反比例する。したがって，親核種の壊変定数が娘核種の壊変定数より小さい時に放射平衡が成り立つ。

2：誤　過渡平衡では，娘核種の放射能量が親核種の放射能量より多くなり，また両者の比率は平衡状態となる。

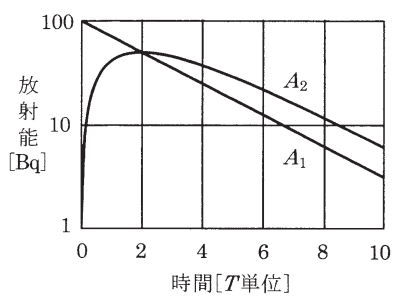
3：正

4：誤　放射能は同じだが，壊変法則 $A = \lambda N$ の式からも分かるとおり，放射能が同じなら，N と λ は反比例する。したがって，原子数の比と壊変定数の比は同じにならない。

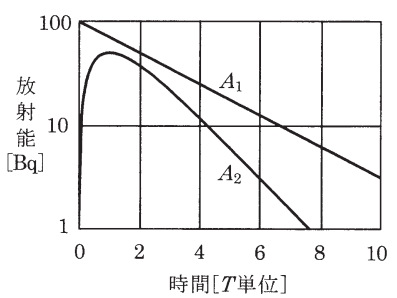
5：誤　壊変により娘核種の原子数も減少する。

問7　半減期 $2T$ の核種Xが，半減期 T の核種Yに壊変するとする。はじめにXのみが存在していて，その放射能が100 Bqだったとき，Xの放射能（A_1）とYの放射能（A_2）の時間変化を表すグラフとして，正しいものは次のうちどれか。

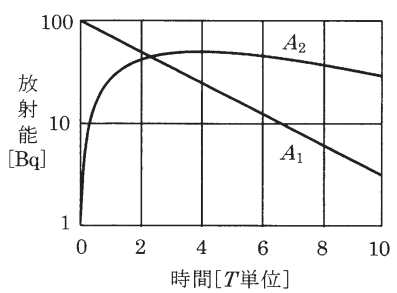
1



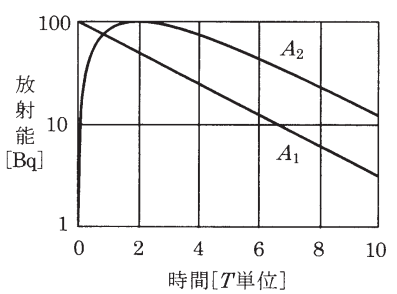
2



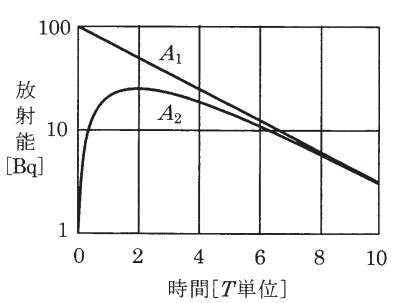
3



4



5



〔解答〕

1

注）親核種より娘核種の半減期が小さいので過渡平衡が成り立っている。過渡平衡では，最初娘核種の放射能量は急激に増加し最大値に達し，親核種の放射能量と同じになる。その後娘核種は親核種と同一の半減期で減衰する。

1：正　娘核種の放射能量が最大の時（2T 時間経過時），親核種の放射能量と同じであり，その後は親核種と同一の半減期で減衰している。

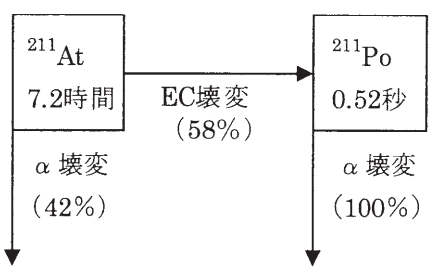
2：誤　親核種と同一の半減期で減衰していない。

3：誤　親核種と同一の半減期で減衰していない。

4：誤　娘核種の放射能量が最大の時（2T 時間経過時），親核種の放射能量より多い。（同じでなければならない。）

5：誤　親核種と同一の半減期で減衰していない。

問8　^{211}At は，42％が α 壊変して ^{207}Bi に，58％は EC 壊変して ^{211}Po になる。^{211}Po は α 壊変する。^{211}At と ^{211}Po の半減期はそれぞれ 7.2 時間と 0.52 秒である。^{211}At と ^{211}Po が放射平衡にあるとき，^{211}At と ^{211}Po が単位時間に放出する α 線の数をそれぞれ N_{At}，N_{Po} とすると，これらの比（N_{At}/N_{Po}）として最も近い値は，次のうちどれか。



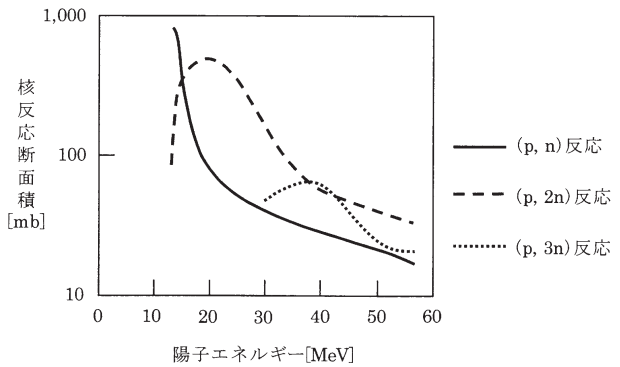
1）0.3　　2）0.7　　3）1.4　　4）2.4　　5）3.6

〔解答〕

2

注）^{211}At と ^{211}Po の間には，永続平衡が成り立っている。また，^{211}Po は 100％ α 壊変するため，EC 壊変の数と ^{211}Po から放出される α 線の数は同じである。したがって，^{211}At の分岐壊変における α 壊変の，^{211}Po の α 壊変に対する割合は 42(％)/58(％)≒0.7 となる。

問9　^{69}Ga への陽子照射による RI の製造に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。図は ^{69}Ga の（p,n），（p,2n），（p,3n）反応の励起関数である。



A　(p, 3n)反応の Q 値は 40 MeV である。

B　いずれの核反応でも生成する核種は無担体となる。

C　十分に厚い Ga 標的に陽子を照射する場合，15 MeV 照射に比べて，25 MeV 照射の方が，^{68}Ge の生成放射能は大きくなる。

D　40 MeV の陽子照射では(p, 2n)反応と(p, 3n)反応の核反応断面積が同程度なので，それぞれの核反応で生成する核種の放射能はほぼ等しくなる。

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

〔解答〕

3

注）A：誤　Q 値とは，核反応または放射性壊変の過程で吸収あるいは放出される全エネルギー値のことで，反応前後の質量差と等しい。陽子のエネルギーとは関係ない。

B：正　無担体とは，ある放射性同位元素が，同じ元素の非放射性の同位体を含まない状態のことである。いずれの反応も，生成される放射性同位元素の原子番号は，ターゲットと異なるので，無担体反応である。

C：正　^{69}Ga から^{68}Ge への反応は，(p, 2n)反応となる。15 MeV と 25 MeV の(p, 2n)反応の核反応断面積は同じだが，(p, n)反応の核反応断面積は 25 MeV の陽子線の方が小さい。このため 25 MeV の陽子線では，(p, n)反応で消費されなかった^{69}Ga が(p, 2n)反応を起こすため，^{68}Ge の生成量が多くなる。

D：誤　核種の数は同程度だが，生成される放射性同位元素が異なるため，半減期も異なる。したがって，放射能は同じではない。

問 10　次の核反応のうち，標的核と生成核の原子番号が等しい核反応の組合せはどれか。

A　(γ, n)

B　(n, γ)

C　(p, n)

D　(d, p)

E　(p, α)

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

〔解答〕

2

注）A：入射粒子中の陽子数：0，放出粒子中の陽子数：0，

＋0－0 で生成核の原子番号に変化なし
B：入射粒子中の陽子数：0，放出粒子中の陽子数：0，
＋0－0 で生成核の原子番号に変化なし
C：入射粒子中の陽子数：1，放出粒子中の陽子数：0，
＋1－0 で生成核の原子番号は＋1
D：入射粒子中の陽子数：1，放出粒子中の陽子数：1
＋1－1 で生成核の原子番号に変化なし
E：入射粒子中の陽子数：1，放出粒子中の陽子数：2，
＋1－2 で生成核の原子番号は－1

問 11 ^{24}Na を生成する反応として，正しいものの組合せは次のうちどれか。

A　^{22}Ne(α, pn)
B　^{23}Na(n, γ)
C　^{24}Mg(p, n)
D　^{27}Al(n, α)

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　^{22}Ne$(\alpha, \mathrm{pn})^{24}$Na
B：正　^{23}Na$(\mathrm{n}, \gamma)^{24}$Na
C：誤　^{24}Mg$(\mathrm{p}, \mathrm{n})^{24}$Al
D：正　^{27}Al$(\mathrm{n}, \alpha)^{24}$Na

問 12 天然の放射性壊変系列に属する放射性同位体がある元素として，正しいものの組合せは次のうちどれか。

A　Am
B　At
C　Fr
D　Pm
E　Tc

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

〔解答〕

3

注）アイソトープ手帳（日本アイソトープ協会）の「放射性壊変系列」を参照
（トリウム系列，ウラン系列，アクチニウム系列，ネプツニウム系列）
A：誤　Am：超ウラン元素，壊変系列には属さない。
B：正　At：ウラン系列，アクチニウム系列，ネプツニウム系列
C：正　Fr：アクチニウム系列，ネプツニウム系列
D：誤　Pm：壊変系列には属さない。
E：誤　Tc：壊変系列には属さない。（人工放射性核種，U の核分裂生成核種）

問 13 リンの同位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　^{30}P は β^- 壊変する。

B　^{31}P は安定同位体である。
C　^{32}P から放射される β 線の最大エネルギーは約 0.8 MeV である。
D　^{33}P の半減期は約 25 日である。
1）A と B　　2）A と C　　3）A と D　　4）B と D　　5）C と D

〔解答〕
4
注）A：誤　β^+ 崩壊する。
B：正　リンの同位体は多数存在するが，そのうち ^{31}P のみが安定同位体である。
C：誤　1.711 MeV
D：正　25.4 日の半減期で β^- 崩壊する。

問 14　陽電子放射断層撮影（PET）で用いられる核種 ^{11}C，^{13}N，^{15}O 及び ^{18}F の 4 核種に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　半減期は $^{11}C < ^{13}N < ^{15}O < ^{18}F$ の順に長くなる。
B　^{13}N は $^{16}O(p,\alpha)$ 反応で製造できる。
C　^{15}O は $^{14}N(p,n)$ 反応で製造できる。
D　^{18}O 濃縮 H_2O を標的として ^{18}F を製造できる。
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　^{11}C：20.39 分，^{13}N：9.965 分，^{15}O：122.24 秒，^{18}F：109.77 分
B：正　$^{16}O(p,\alpha)\ ^{13}N$ 反応で製造する。
C：誤　$^{14}N(d,n)\ ^{15}O$ 反応で製造する。
D：正　$^{18}O(p,n)\ ^{18}F$ 反応で製造する。

問 15　次の放射性同位体の組合せのうち，半減期が短いものから長いものの順に並んでいるものはどれか。
1）$^{3}H < ^{14}C < ^{35}S < ^{45}Ca$
2）$^{35}S < ^{45}Ca < ^{14}C < ^{3}H$
3）$^{35}S < ^{45}Ca < ^{3}H < ^{14}C$
4）$^{45}Ca < ^{35}S < ^{14}C < ^{3}H$
5）$^{35}S < ^{3}H < ^{45}Ca < ^{14}C$

〔解答〕
3
注）放射性同位体の半減期は，それぞれ
^{35}S：87.51 日，^{45}Ca：162.67 日，^{3}H：12.32 年，^{14}C：5700 年，である。

問 16　壊変系列をもつ一次天然放射性核種とその最終壊変生成物として，正しいものの組合せは次のうちどれか。
1）^{238}U — ^{207}Pb
2）^{234}U — ^{206}Pb
3）^{235}U — ^{204}Pb
4）^{232}Th — ^{208}Pb

5）　^{237}Np　—　^{204}Tl

〔解答〕

4

注）アイソトープ手帳（日本アイソトープ協会）の「放射性壊変系列」を参照

1：誤　　ウラン系列（$^{238}U \rightarrow ^{206}Pb$）

2：誤　　^{234}U はウラン系列核種（$^{238}U \rightarrow ^{206}Pb$），一次天然放射性核種は ^{238}U

3：誤　　アクチニウム系列（$^{235}U \rightarrow ^{207}Pb$）

4：正　　トリウム系列（$^{232}Th - ^{208}Pb$）

5：誤　　ネプツニウム系列（$^{237}Np \rightarrow ^{205}Tl$）

問 17　天然放射性核種に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　^{7}Be は宇宙線による核破砕反応で生成する。

B　^{14}C は宇宙線中の陽子と ^{14}N の核反応により生成する。

C　^{40}K の壊変によって大気中の ^{40}Ar が増加した。

D　^{235}U の同位体存在度は，10 億年前に比べて現在の方が小さい。

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

〔解答〕

3

注）A：正　大気上空に存在する酸素および窒素から宇宙線による核破砕反応によって生成される。

B：誤　中性子と ^{14}N の核反応：$^{14}N(n, p)^{14}C$

C：正　^{40}K は EC 又は β^+ 崩壊（極一部）により ^{40}Ar（安定核種）になる。

D：正　U の同位体はすべて放射性核種（安定同位体が存在しない）

半減期はそれぞれ，

^{232}U：68.9 年，^{233}U：15.92 万年，^{234}U：24.55 万年

^{235}U：7.038 億年，^{236}U：0.2342 億年，^{238}U：44.68 億年

10 億年経過後は半減期 10 億年以下の ^{235}U の存在比は小さくなる。

問 18　ガラスビーカーに固着した放射性物質の除去方法に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　[^{45}Ca]炭酸カルシウムにはアンモニア水を用いる。

B　[^{54}Mn]酸化マンガン(Ⅳ)には希硫酸を用いる。

C　[^{59}Fe]水酸化鉄(Ⅲ)には過酸化水素水を用いる。

D　[^{65}Zn]酸化亜鉛には希塩酸を用いる。

E　[^{110m}Ag]塩化銀にはチオ硫酸ナトリウム水溶液を用いる。

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

〔解答〕

5

注）A：誤　高温では溶解するが，常温では除去できない。$^{45}CaCO_3 + 2NH_3 \rightarrow {}^{45}CaCN_2 + 3H_2O$

B：誤　希硫酸と過酸化水素水で除去できる。$^{54}MnO_2 + H_2O_2 + H_2SO_4 \rightarrow {}^{54}MnSO_4 + O_2 + 2H_2O$

C：誤　希塩酸などの酸で除去できる。$^{59}Fe(OH)_3 + 3HCl \rightarrow {}^{59}FeCl_3 + 3H_2O$

D：正　酸化亜鉛は希塩酸で除去できる。$^{65}ZnO + 2HCl \rightarrow {}^{65}ZnCl_2 + H_2O$

E：正　塩化銀はチオ硫酸ナトリウムで除去できる。$^{110m}AgCl + 2Na_2S_2O_3 \rightarrow 3Na^{110m}Ag(S_2O_3)_2 + NaCl$

問 19 環境中の放射性ストロンチウムの分析に関する次の記述のうち，正しいものはどれか。

1）発煙硝酸法は硝酸ストロンチウム沈殿の生成を利用した分離法である。
2）イオン交換樹脂法では陰イオン交換樹脂によるストロンチウム錯体の吸着を利用する。
3）シュウ酸塩沈殿法では ^{90}Sr から生成する ^{90}Y を沈殿分離する。
4）ジ(2－エチルヘキシル)リン酸による溶媒抽出でストロンチウムを選択的に濃縮することができる。
5）イットリウム担体をストロンチウムの分離操作の前に試料溶液に加える必要がある。

〔解答〕

1

注）1：正
2：誤　強酸性陽イオン交換樹脂にストロンチウムを吸着させる。
3：誤　回収したストロンチウムを定量する。
4：誤　Co，Ni の溶媒抽出剤，希土類元素の選択抽出剤
　　ストロンチウム分析法では使用しない。
5：誤　分離後に加える方法（シュウ酸塩法）もある。

問 20 次の操作のうち，化学反応の結果として放射性気体が発生するものの組合せはどれか。ただし，1 M＝1 $mol \cdot L^{-1}$ である。

A　1.0 M $K^{38}Cl$ 水溶液に，臭素水（Br_2 の水溶液）を加える。
B　0.1 M $^{59}FeSO_4$ 水溶液に，8.0 M 塩酸を加える。
C　固体 $Fe^{35}S$ に，1.0 M 塩酸を加える。
D　1.0 M $^{42}K_2SO_4$ 水溶液に，2.0 M 硝酸を加える。
E　1.0 M $Na_2{}^{14}CO_3$ 水溶液に，0.5 M 硫酸を加える。

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

〔解答〕

5

注）A：誤　化学反応は起こらない。
B：誤　化学反応は起こるが，放射性気体は発生しない。$^{59}FeSO_4 + 2HCl \rightarrow {}^{59}FeCl_2 + H_2SO_4$
C：正　^{35}S を含む硫化水素が発生する。$Fe^{35}S + 2HCl \rightarrow FeCl_2 + H_2{}^{35}S$
D：誤　化学反応は起こらない。
E：正　^{14}C を含む二酸化炭素が発生する。$Na_2{}^{14}CO_3 + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + H_2O + {}^{14}CO_2$

問 21 鉛イオンを含む 90 mL の溶液 A がある。^{51}Cr を 100 $kBq \cdot L^{-1}$ 含む ^{51}Cr 標識クロム酸カリウム（K_2CrO_4）水溶液 10 mL を加えたところクロム酸鉛（$PbCrO_4$）が沈殿した。加えたクロム酸カリウム水溶液の濃度は 0.10 $mol \cdot L^{-1}$ であった。沈殿分離後の上澄み液の ^{51}Cr 濃度が 9.1 $kBq \cdot L^{-1}$ であったとき，はじめの溶液 A に含まれていた鉛イオンの濃度[$mol \cdot L^{-1}$]として，最も近い値は次のうちどれか。

1）0.0001　　2）0.001　　3）0.009　　4）0.03　　5）0.09

〔解答〕

2

注）0.1 $mol \cdot L^{-1}$ のクロム酸カリウム溶液 10 mL には，クロムが $0.1 \times 10 \times 10^{-3} = 0.001$ mol 含まれている。
鉛イオンとクロム酸カリウムとの反応でクロム硫酸鉛が生成する化学反応式は以下のとおりである。
$Pb^{2+} + K_2CrO_4 \rightarrow PbCrO_4 \downarrow + 2K^+$

この化学反応式から，0.001 mol のクロムが 0.001 mol の $PbCrO_4$ として沈殿する。このことより全ての鉛イオンが沈殿しすると鉛は 0.001 mol となる。また，溶液 A に加えた ^{51}Cr は，$100\times10\times10^{-3}=1$ kBq である。沈殿後の上澄み液の ^{51}Cr 濃度より，上澄み液に残った ^{51}Cr は 0.91 kBq となり，沈殿の ^{51}Cr は，0.09 kBq である。したがって，初めの溶液 A 90 mL に含まれる鉛イオン濃度は，以下の式より求める。

$$1\times10^{-3}\times\frac{0.09}{0.91}\times\frac{1}{90\times10^{-3}}=0.0011\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$$

問 22　イオン交換分離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　強酸性陽イオン交換樹脂カラムに ^{137}Cs イオンを含む水溶液を流すと，娘核種の ^{137m}Ba が ^{137}Cs よりも先に溶離する。

B　強酸性陽イオン交換樹脂カラムに ^{22}Na イオンと ^{86}Rb イオンを含む水溶液を流すと，^{22}Na が ^{86}Rb よりも先に溶離する。

C　強塩基性陰イオン交換樹脂カラムに ^{57}Ni と ^{65}Zn を含む 6 M 塩酸酸性溶液を流すと，^{65}Zn が ^{57}Ni より先に溶離する。

D　強塩基性陰イオン交換樹脂カラムに $^{38}Cl^-$ イオンを含む水溶液を流すと，$^{38}Cl^-$ イオンが吸着する。

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　陽イオンの吸着強度は，価数が多いほど強くなる。^{137}Cs は 1 価の陽イオン，^{137m}Ba は 2 価の陽イオンである。

B：正　陽イオンの吸着強度は，価数が等しい場合，水和イオン半径が小さいものほど吸着強度は強い。同族元素では，水和イオン半径は原子番号が大きいほど小さい。

C：誤　金属イオンは，陽イオンであるので，陰イオン交換樹脂には吸着しないが，Zn は塩酸溶液中でクロロ錯体を作り吸着する。Ni はクロロ錯体を形成しないので吸着されない。

D：正　強塩基性陰イオン交換樹脂は，あらゆる pH で溶液中の陰イオンを吸着することができる。

問 23　放射性核種を水溶液から取り除く方法として，適切なものの組合せは次のうちどれか。

A　$^{24}Na_2SO_4$ 水溶液に塩化バリウム水溶液を加える。

B　^{42}KBr 水溶液を陽イオン交換樹脂カラムに通す。

C　$^{57}NiCl_2$ 水溶液をジメチルグリオキシムのエーテル溶液と振り混ぜる。

D　$^{65}Zn(NO_3)_2$ 水溶液に銅板を入れる。

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

〔解答〕

3

注）A：誤　塩化バリウムが硫酸イオンと反応して不溶性の硫酸バリウムを生成する。^{24}Na は陽イオンのまま溶液に残る。

B：正　溶液の中で ^{42}K は陽イオンであり，陽イオン交換樹脂に吸着される。

C：正　ジメチルグリオキシムはニッケルと反応して鮮やかな赤色の沈殿を作る。ニッケルの定量分析に利用される。

D：誤　Zn は Cu よりイオン化傾向が大きいので金属イオンのままで溶液に留まる。

問24 トリチウムの標識化合物の生成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　安息香酸と炭酸リチウムの混合物を熱中性子照射すると，安息香酸はトリチウムで標識される。

B　グリニャール試薬（R-MgBr）とトリチウム水（HTO）を反応させると，トリチウムで標識されたR-Tが生成される。

C　トルエンとトリチウムガスを密封容器に入れて数日間放置すると，トルエンはトリチウムで標識される。

D　ウイルツバッハ法は，特定の位置の水素を標識した化合物を作ることができる。

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

〔解答〕

1

注）A：正　核反応の生成核の反跳が結合エネルギーより大きいとホットアトムとなり，近くに存在する化合物と反応して標識化合物をつくる。炭酸リチウムは熱中性子により$^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$で^{3}Hのホットアトムが生成し，安息香酸は標識される。

B：正　グリニャール試薬R－MgXをトリチウム水HTOで分解する反応は以下のとおりである。

$$R-MgX + HTO \rightarrow R-T$$

C：正　トルエンはトリチウムガスにより接触還元されてトリチウム標識される。

D：誤　トリチウムガスと有機化合物を同じ容器に入れて密封し，数日間放置して標識化合物を作成する方法であり，簡便な合成法であるが，標識化合物の標識位置が一定しないという欠点がある。

問25 試料中の成分Xを定量するために，40 mgの標識した成分X（比放射能270 Bq·mg^{-1}）を試料に添加し，よく混合して均一にした。その後，成分Xの一部を純粋に分離したところ，比放射能は90 Bq·mg^{-1}であった。試料中の成分Xの量[mg]として最も近い値は，次のうちどれか。

1）50　　2）60　　3）70　　4）80　　5）90

〔解答〕

4

注）同位体希釈分析法の直接希釈法で求める。

具体的な数値から重量を求めるには，表を書いて求める。

求める試料中の成分Xの重量をx(mg)，加えた標識試料Xの重量は40(mg)，その比放射能は270(Bq・mg^{-1})，混合した試料Xの比放射能は90(Bq・mg^{-1})であるので，

その表は，

		重量	比放射能	全放射能
加える前	求める試料	x	0	0
	加えた標識試料	40	270	40×270＝10800
加えた後	混合した試料	x＋40	90	90（x＋40）

となる。ここで，加える前後の試料の全放射能が等しいことから，以下の式より求める。

10800＝90（x＋40）

x＝80（mg）

問26 ホットアトム効果に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　熱中性子照射したヘキサアンミンコバルト(Ⅲ)硝酸塩$[Co(NH_3)_6](NO_3)_3$を水に溶かすと，$^{60}Co^{2+}$が得られた。

B　熱中性子照射したヘキサシアニド鉄(Ⅱ)酸カリウム三水和物$K_4[Fe(CN)_6]\cdot 3H_2O$を塩酸に溶かし

てエーテルを加えると，^{59}Fe が有機相に抽出された。

C　$^{56}Fe^{2+}$ を含む水溶液に ^{60}Co の γ 線照射をすると，$^{55}Fe^{3+}$ が生成した。

D　熱中性子照射したクロム酸カリウム K_2CrO_4 を水に溶かした後，その水溶液を陽イオン交換樹脂に通すと $^{51}Cr^{3+}$ が樹脂に吸着した。

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　$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$ 核反応により生じる生成核 ^{60}Co の反跳が結合エネルギーより大きいとホットアトムとなり，化学結合を完全に断ち切り陽イオンの形で水溶液に存在することになる。

B：正　$^{58}Fe(n,\gamma)^{59}Fe$ 核反応により生じる生成核 ^{59}Fe の反跳が結合エネルギーより大きいとホットアトムとなり，化学結合を完全に断ち切り陽イオンの形で水溶液に存在することになる。有機溶媒エーテルを加えると金属イオン $^{59}Fe^{2+}$ はエーテル層に移行する。

C：誤　^{60}Co の γ 線エネルギー程度では，いわゆる光核反応は起こらない。^{55}Fe は，中性子による $^{56}Fe(n,2n)^{55}Fe$ 核反応で得られる。

D：正　$^{50}Cr(n,\gamma)^{51}Cr$ 核反応により生じる生成核 ^{51}Cr の反跳が結合エネルギーより大きいとホットアトムとなり，化学結合を完全に断ち切り陽イオンの形で水溶液に存在することになる。^{51}Cr は，陽イオン交換樹脂に吸着する。

問 27　次のうち α 線源を利用している機器はどれか。

1）レベル計
2）ECD ガスクロマトグラフ
3）メスバウアー分光装置
4）散乱型厚さ計
5）煙感知器

〔解答〕

5

注）1：誤　レベル計には，主に ^{137}Cs などの γ 線エネルギーが高い核種が用いられている。

2：誤　ECD ガスクロマトグラフは，^{63}Ni などの β^- 線によるイオン電流の変化によって，電気陰性度の高いハロゲンなどが含まれる気体を高感度に検出することができる。

3：誤　メスバウアー分光装置は，^{57}Co の低エネルギー γ 線のドップラー効果によって鉄の酸化状態を調べることができる。

4：誤　散乱型厚さ計は，^{147}Pm，^{85}Kr，^{90}Sr などの β^- 線や ^{241}Am，^{137}Cs などの γ 線が使用されている。

5：正　煙感知器は，0.2 MBq 程度の ^{241}Am を用い，α 線による電離作用を利用して煙の電離電流の変化により煙を感知する。他の方式もあるが，最も高感度である。ただし，不用になった場合の廃棄に注意が必要となる。

問 28　放射線によって分子性の物質中に生ずる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　放射線が物質に及ぼす効果は，放射線との直接相互作用と，これにより生成したイオンなどとの相互作用により現れる。

B　スパー（スプール）は，放射線の飛跡にそって微小領域に生成するイオンやラジカルなどの集合体である。

C　線エネルギー付与（LET）が大きいほど，単位距離当たりに生成するスパー（スプール）の数は少ない。

D　γ線の場合，物質との相互作用により生成した二次電子がスパー（スプール）を生成する。

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

〔解答〕

2

注）A：正　物質を構成している分子あるいは原子は，放射線との相互作用により電子的励起やイオン化を起こす。

B：正　放射線が物質に入射すると，その飛跡にそって断続的にイオン化を起こして，イオンやラジカルなどの集合体を形成する。

C：誤　単位距離内にできるスプールの数は，1 個のスプールを作るのに要するエネルギーで LET を割って求める。このことは LET が大きいほど単位距離内にできるスプールの数が多くなることを意味する。

D：正　γ線が物質に入射すると，コンプトン効果により数 keV から数 MeV の高エネルギーの二次電子が発生し，その透過性により物質内部にも作用を及ぼし，スプールや二次電子を生成する。

問 29　放射線照射した水溶液中に生成する活性化学種の性質に関する次の記述のうち，正しい組合せはどれか。

A　水和電子は 1 分程度の寿命をもつ。

B　水和電子は水素原子より強力な還元性をもつ。

C　水素ラジカルは強い酸化力をもつ。

D　ヒドロキシルラジカルは電子スピン共鳴吸収装置（ESR）で測定できる。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　イオン化により生じた電子は，水中で水分子数個に緩く束縛され水和電子を形成する。その寿命は約 30 μ 秒程度と非常に短い。

B：正　水和電子は水素原子 H より酸化還元電位が高く，水素原子より強力な還元性を持ち，反応性がある。

C：誤　水素ラジカルは還元性が強く，反応性が高い。酸素と反応し水分子になったり，互いに結合して水素分子となる。

D：正　ヒドロキシラジカルは，不対電子を持っていて常磁性なので，電子スピン共鳴吸収装置（ESR）で測定することができる。ただし，その寿命が短いために，検出時間分解能を上げる方法や反応性を抑える方法などの工夫が必要となる。

問 30　^{51}Cr は EC 壊変して ^{51}V になるときに，320 keV のγ線を放出する。^{51}Cr 線源からの放射線を鉛で遮蔽するとき，次の記述のうち正しいものの組合せはどれか。ただし，鉛の密度は 11 g·cm^{-3}，320 keV のγ線に対する質量減弱係数は 0.35 cm^2·g^{-1} とする。

A　厚さ 3.2 cm の鉛で 320 keV のγ線は約 1/1000 に減弱する。

B　厚さ 1.8 mm の鉛で 320 keV のγ線は約 1/2 に減弱する。

C　^{51}V から放出される特性 X 線は 320 keV のγ線より遮蔽が難しい。

D　制動放射線の遮蔽は考慮する必要がない。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　γ 線の物質による減弱は，$\phi=\phi_0\times e^{-\mu x}$ の式で求める。ϕ_0 が入射前の γ 線，μ が線源弱係数，ちなみに，線源弱係数と質量原弱係数とは $\mu=\rho\times\mu_m$ の関係である。
ここで鉛の密度は 11 g・cm^{-3}，^{51}Cr の 320 keV の γ 線に対する質量原弱係数は 0.35 cm^2・g^{-1} より，線源弱係数は，$11\times0.35=3.85$ cm^{-1} である。
よって，$\phi=\phi_0/1000$ となる鉛の厚さは，
$x_{1/1000}=\ln(1000)/\mu=6.91/3.85=1.79$(cm)
となる。ちなみに $\ln(1000)$ が記憶できていない場合は，$\ln(2)=0.693$ より $x_{1/2}$ を求め，その 10 倍の厚さの鉛で近似することができる。

B：正　A と同様に，$\phi=\phi_0/2$ となる鉛の厚さは，
$x_{1/2}=\ln(2)/\mu=0.693/3.85=0.18$(cm)
となる。

C：誤　^{51}Cr の EC 崩壊に伴い^{51}V から放出される特性 X 線は，V－K$_\alpha$4.91 keV，V－K$_\beta$5.39 keV である。

D：正　^{51}Cr の EC 崩壊により特性 X 線やオージェ電子が発生するが，β^-線の放出は伴わないので制動放射線は発生しない。

問 31　次の文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選べ。

放射線を利用した元素分析法の 1 つに放射化分析法がある。この方法では，核反応を利用して放射性核種を生成し，この核種からの放射線を測定することによって元素を定量する。最もよく利用される核反応は(n,γ)反応で，標的核と生成核の［ A ］は等しい。生成する放射性核種の多くは γ 線を放出するので，エネルギー分解能の良い［ B ］で γ 線スペクトルを得ることにより，多種類の元素を同時に定量することができる。

(n,γ）反応により生成する放射性核種の放射能 A は，次式により計算できる。

$$A=N\phi\sigma\,[\ \text{C}\ ] \qquad \cdots\cdots(1)$$

ここで，N は標的核の数，ϕ は中性子フルエンス率，σ は核反応断面積，λ は生成核種の壊変定数，t は照射時間である。［ C ］は［ D ］と呼ばれ，例えば，t が生成核種の半減期と等しいとき，［ ア ］となる。

また，N は次の式で表される。

$$N=[\ \text{E}\ ] \qquad \cdots\cdots(2)$$

ここで，w は元素の質量，M は原子量，N_A はアボガドロ定数，θ は同位体存在度である。

分析試料と標準試料（既知量の目的元素を含む試料）を同時に中性子照射したとき，それぞれの試料で同じ目的元素から生成する放射性核種の放射能をそれぞれ A と A' とすると，(1)式から

$$\frac{A}{A'}=\frac{N}{N'} \qquad \cdots\cdots(3)$$

が成り立つ。ただし，N と N' をそれぞれ分析試料と標準試料に含まれる標的核の数とする。また，w と w' をそれぞれ分析試料と標準試料に含まれる目的元素の質量とすると，(2)式を用いて，次の関係が成り立ち，分析試料と標準試料の放射能から質量を求めることができる。

$$\frac{A}{A'}=\frac{N}{N'}=\frac{w}{w'} \qquad \cdots\cdots(4)$$

これが放射化分析法の定量原理である。

分析試料に含まれる目的元素が極微量で，その誘導放射能が小さいときは，照射後に目的元素を化学分離することにより，定量下限値を下げることができる。その際，既知量の［　F　］を加えて分離すると，目的元素の回収率を求めることができるので，必ずしも定量的な分離の必要はない。短半減期核種を対象とするときは，回収率を上げるよりも，分離操作時間を短くすることを優先する場合がある。例えば，操作時間が半減期の 3 倍で回収率が 100% である時よりも，操作時間は半減期と同じで回収率は 50% の方が，得られる放射能は［　イ　］倍になる。

化学分離には，沈殿法，溶媒抽出法，イオン交換法などが利用される。沈殿法は，種々のイオンが溶解している溶液から，目的イオンだけを［　G　］の小さい化合物に変え，沈殿させて分離する方法である。この際，本来は沈殿しない目的外の微量なイオンが沈殿に取込まれることがある。この現象を［　H　］という。［　H　］を防ぐには，前もって［　I　］を添加しておくとよい。

例えば，照射後，試料中に 100 Bq あった ^{131}Ba を分離するために，［　F　］として 5.0×10^{-5} mol(10 mg)の塩化バリウム($BaCl_2$)を添加したのち，適切な方法で溶解し，100 mL の溶液とする。この溶液に 5.0×10^{-2} mol·L^{-1} の希硫酸(H_2SO_4)を 1.0 mL 加えると，硫酸バリウム($BaSO_4$)が沈殿する。$BaSO_4$ の溶解度積を 1.6×10^{-9} mol^2·L^{-2} とすると，［　ウ　］Bq の ^{131}Ba が沈殿に含まれる。(なお，^{131}Ba の減衰，溶液の体積の変化，並びに試料中の Ba 以外の元素との化学反応は無視してよい。)

一方，溶媒抽出法とイオン交換法は，2 つの異なる相の間で元素が［　J　］される現象を利用した分離法で，トレーサー量の元素に対しても適用可能である。

＜A の解答群＞

1)　質量数　　2)　中性子数　　3)　原子番号　　4)　エネルギー

5)　壊変様式

＜B の解答群＞

1)　GM 計数管　　2)　比例計算管

3)　NaI(Tl)シンチレーション検出器　　4)　Ge 半導体検出器

5)　Si 半導体検出器

＜C の解答群＞

1)　$e^{-\lambda t}$　　2)　$(1-e^{-\lambda t})$　　3)　$(1+e^{-\lambda t})$　　4)　$(1-e^{\lambda t})$

5)　$(1+e^{\lambda t})$

＜D の解答群＞

1)　壊変係数　　2)　飽和係数　　3)　成長係数　　4)　減衰係数

5)　積分係数

＜ア，イの解答群＞

1)　0.1　　2)　0.5　　3)　1.0　　4)　1.5　　5)　2.0

6)　2.5　　7)　4.0　　8)　5　　9)　10

＜E の解答群＞

1)　$\dfrac{M}{w}\times N_A\times\theta$　　2)　$\dfrac{w}{M\times N_A}\times\theta$　　3)　$\dfrac{w}{M}\times N_A\times\theta$　　4)　$\dfrac{w}{M}\times\dfrac{N_A}{\theta}$

5)　$\dfrac{w}{M\times N_A\times\theta}$

＜F の解答群＞

1)　マスキング剤　　2)　同重体　　3)　担体　　4)　単体

5)　沈殿剤

＜G の解答群＞

1）生成定数　2）純度　3）凝固点　4）溶解度
5）電離度

＜H の解答群＞

1）共通イオン効果　2）共沈　3）塩析　4）分別沈殿
5）緩衝　6）分配　7）溶解　8）吸着

＜I の解答群＞

1）単体　2）スカベンジャー　3）保持担体　4）沈殿剤
5）酸化剤　6）異性体

＜ウの解答群＞

1）4.6　2）9.2　3）46　4）92　5）100

＜J の解答群＞

1）共通イオン効果　2）共沈　3）塩析　4）分別沈殿
5）緩衝　6）分配　7）溶解　8）吸着

〔解答〕

A－3　B－4　C－2　D－2　ア－2　イ－5　E－3　F－3　G－4
H－2　I－3　ウ－4　J－6

注）A：原子番号　原子核 A と粒子 a とが衝突して，原子核 B と粒子 b とが生ずる場合，これを $A(a,b)B$ と表し，(a,b)反応という。例えば，放射線源として利用範囲が広い^{60}Co は，^{59}Co(n,γ)^{60}Co の核反応で作られる。このように(n,γ)反応の場合，標的核に比較し生成核の質量数（中性子数）は 1 増えるが，原子番号は等しい。

B：Ge 半導体検出器　ゲルマニウム(Ge)半導体を用いた γ 線検出器。半導体内部に空乏層と呼ばれる電気的に絶縁された領域を作ると，この空乏層に荷電粒子が入射した際に正負の電荷が生れて電離箱と同じ原理で電流パルスを生じ，γ 線の検出が可能になる。NaI(Tl)シンチレーション検出器に比較し，Ge 半導体検出器は高分解能でエネルギー分析ができ，また，高エネルギーの粒子が検出できるなどの特徴をもつ。

C：$(1-e^{-\lambda t})$　核反応により生成する放射性核種の放射能 A は次のように表される。

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

N：標的核の数　ϕ：中性子フルエンス率
σ：核反応断面積　λ：生成核種の壊変定数
t：照射時間　$(1-e^{-\lambda t})$：飽和係数
T：生成核種の半減期

D：飽和係数

ア：0.5　t が生成核種の半減期と等しい（$t=T$）とき，
$(1-(1/2)^{t/T})=(1-(1/2)^{1})=0.5$ となる。

E：$w/M\times N_A\times\theta$　標的核の数 N は，次の式で表される。

$N=n\times\theta=w/M\times N_A\times\theta$

n：標的核の原子数　w：元素の質量　M：原子量
N_A：アボガドロ定数（6.02×10^{23} mol^{-1}）　θ：同位体存在度

F：担体　極低濃度の元素を分離したり抽出したりする際に，その物質と化学的性質が同じか，または，類似した別の物質を適量加えることにより，化学処理を容易にするだけでなく，回収率の低下を防ぐこともできる。このときに添加する物質を担体（キャリア）という。

イ：2.0　元の放射能を A_0 とすると，操作時間（t）が半減期（T）の3倍（$t=3T$）で回収率が100%の場合の放射能（A_1）と，操作時間が半減期と同じ（$t=T$）で回収率が50% の場合の放射能（A_2）は，

$A_1=A_0\times(1/2)^{3T/T}\times(100/100)=A_0/8$

$A_2=A_0\times(1/2)^{T/T}\times(50/100)=A_0/4$

である。よって，

$A_2/A_1=(A_0/4)/(A_0/8)=2.0$　となる。

G：溶解度　一般にある物質（溶質）が他の物質（溶媒）に溶解する限度をいい，飽和溶液中における溶質の濃度で表わされる。固体の液体に対する溶解度は溶媒100 g に対する溶質の量（グラム数），または溶液100 g 中の溶質の量（グラム数）で表すことが多い。沈殿法はこの溶解度を利用して分離する方法である。一方，溶媒抽出法とイオン交換法は，二つの異なる相の間で元素が分配される現象を利用した分離法である。

H：共沈　化学的性質の似た溶質が共存する溶液から，ある物質を沈殿させるときに，単独にあれば沈殿しないはずの他の物質が同時に主沈殿と共に沈殿する現象のことを共沈という。

Ⅰ：保持担体　目的元素が吸着または共沈法で他の成分に伴って除かれるのを防ぐために加える担体を保持担体という。

ウ：92　100 mL の溶液中に溶解しているバリウムイオン濃度は 5×10^{-5} mol/100 mL である。一方，加えた希硫酸1.0 mL の硫酸イオン濃度は $(5\times10^{-2}\times1/1000)=5\times10^{-5}$ mol/100 mL となり，両イオン濃度は等しい。

混合後，硫酸バリウム沈殿と平衡状態にある溶液中の両イオン濃度は等しく，それを s とすると，溶解度積 K_{sp} との間に次式が成り立つ，したがって，

$K_{sp}=[Ba^{2+}]\,[SO_4{}^{2-}]=s^2$

$K_{sp}=1.6\times10^{-9}\ mol^2\cdot L^{-2}$ の場合，$s=4.0\times10^{-5}mol\cdot L^{-1}$

である。そのため，沈殿中に含まれる $^{131}Ba(x)$ は次のようになる。

$x=100\times\{1-(4.0\times10^{-5}\times100/1000)/(5.0\times10^{-5})\}=92$ Bq

（注：^{131}Ba の減衰，溶液の体積の変化は無視）

J：分配

問32　次のⅠ，Ⅱの文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

Ⅰ　放射性ヨウ素の同位体はトレーサー実験及び核医学診断や放射線治療に用いられており，加速器や原子炉で製造されている。核医学で用いる放射性ヨウ素は無担体で高い比放射能であることが必要である。

下表に，代表的な放射性ヨウ素の核種と半減期，製造方法，壊変様式と主な放射線，適用例をまとめた。^{123}I は加速器を使って ^{124}Xe を標的とした［ア］反応で生成した短寿命の ^{123}Cs が ^{123}Xe に壊変し，さらに ^{123}Xe の壊変によって得られる。^{123}I は半減期13.2時間でEC壊変して，主に［A］keV の γ 線を放出し，［B］に利用される。β 線を放出しないので体内に投与した時の被ばく線量は少ない。^{125}I は，原子炉で $^{124}Xe(n,\gamma)^{125}Xe$ 反応により生成する ^{125}Xe のEC又は β^+ 壊変により得られ，半減期59.4日で［イ］壊変して［C］keV の γ 線を放出する。クロラミンTを用いて［D］残基を ^{125}I で標識したタンパク質は，［E］に利用される。^{131}I は，主に［ウ］により製造され，半減期8.02日で［エ］壊変して主に［F］keV の γ 線を放出する。ヨウ素は加熱などの操作により気体となりやすいために，吸入などしないように取り扱いには注意する必要がある。また，^{131}I の約1% は半減期11.8日の放射性気体の［G］に壊変することも考慮すべき点で

ある。

核種 （半減期）	製造方法	壊変様式と 主な放射線	適用例
^{123}I （13.2時間）	^{124}Xe [ア] ^{123}Cs → ^{123}Xe → ^{123}I	EC壊変 γ線 [A] keV	[B]
^{125}I （59.4日）	$^{124}Xe(n, \gamma)^{125}Xe$ → ^{125}I	[イ] 壊変 γ線 [C] keV	[D] 残基を標識した [E]
^{131}I （8.02日）	[ウ]	[エ] 壊変 γ線 [F] keV	甲状腺機能亢進症の 治療

＜アの解答群＞

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

＜Aの解答群＞

1）35.5　2）143　3）159　4）365　5）514
6）662　7）835　8）1,038　9）1,238

＜Bの解答群＞

1）陽電子放射断層撮影（PET）　2）悪性リンパ腫治療
3）ラジオイムノアッセイ　4）甲状腺シンチグラフィ
5）甲状腺がん内用療法　6）骨密度診断
7）アクチバブルトレーサー　8）ミクロオートラジオグラフィ

＜イ～エの解答群＞

1）α　2）β^+　3）β^-
4）γ　5）EC　6）IT
7）^{238}Uの自発核分裂　8）^{235}Uの熱中性子照射　9）^{131}Teからのミルキング
10）^{131}Teの熱中性子照射　11）^{127}Iのα粒子照射

＜Cの解答群＞

1）35.5　2）143　3）159　4）365　5）514
6）662　7）835　8）1,038　9）1,238

＜Dの解答群＞

1）グリシン　2）メチオニン　3）チロシン　4）システイン
5）ロイシン

＜Eの解答群＞

1）陽電子放射断層撮影（PET）　2）悪性リンパ腫治療
3）ラジオイムノアッセイ　4）甲状腺シンチグラフィ
5）甲状腺がん内用療法　6）骨密度診断
7）アクチバブルトレーサー　8）ミクロオートラジオグラフィ

＜Fの解答群＞

1）35.5　2）143　3）159　4）365　5）514

6）662　　7）835　　8）1,038　　9）1,238

＜Gの解答群＞

1）^{130}Xe　　2）^{131}Xe　　3）^{131m}Xe　　4）^{132}Xe　　5）^{132m}Xe

Ⅱ　熱中性子を吸収した原子核は，γ線を放出すると同時に［　H　］を得る。このエネルギーが化学結合エネルギー以上となると結合を切断して，中性子を捕獲した分子とは異なる化学形となる。1934年にSzilardとChalmersは，この核反応による化学効果を初めて発見した。

^{127}Iの熱中性子捕獲反応で生成する^{128}I（半減期25.0分）を考える。水に不溶な液体であるヨウ化エチルC_2H_5I（分子量156）3.12 gを50分間熱中性子照射した場合，照射終了時の^{128}Iの放射能は［　I　］Bqとなる。ただし，熱中性子の反応断面積は6.2×10^{-24} cm^2，中性子フルエンス率は2.0×10^{6} cm$^{-2}\cdot$s^{-1}，アボガドロ定数は6.0×10^{23} mol^{-1}とする。照射終了後，還元剤を含む水と振とうすると，生成した^{128}Iの大部分は［　オ　］の化学形で水相に抽出されるので，高い比放射能の^{128}Iを得ることができる。

＜Hの解答群＞

1）イオン化エネルギー　　2）生成エネルギー　　3）反跳エネルギー

4）格子振動エネルギー　　5）反応エネルギー

＜Iの解答群＞

1）1.1×10^{4}　　2）5.6×10^{4}　　3）1.1×10^{5}　　4）1.1×10^{6}

5）5.6×10^{6}

＜オの解答群＞

1）I_2　　2）I^-　　3）I^+　　4）IO_3^-　　5）IO_4^-

〔解答〕

Ⅰ　ア－4　　A－3　　B－4　　イ－5　　ウ－8　　エ－3　　C－1　　D－3　　E－3

F－4　　G－3

注）「核医学」は標識化合物である放射性医薬品を用いた診療分野で，放射性医薬品は診断（検査）用，治療（内用療法）用に大別される。また，検査用の放射性医薬品にも体内に直接投与（インビボ，***in vivo***）し，放出されるγ線を体外のシンチカメラで検出し画像診断を行うシンチグラフィー用と，体内投与を行わず生体試料と試験管内（インビトロ，***in vitro***）で反応させ目的物質の測定を行う体外検査用のものがある。放射性医薬品は診断だけでなく治療にも用いられ，甲状腺がヨウ素を取り込む性質を利用した^{131}Iのカプセル剤による甲状腺疾患の内用療法が行われている。服用したカプセル中の^{131}Iが甲状腺に集積してβ線を照射し，甲状腺機能亢進症によって必要以上に作られた甲状腺ホルモンの量を減らすことができる。

ア：(p,2n)　^{123}Iはサイクロトロンで製造され，以下の過程で得られる。

$$^{124}Xe(p,2n)^{123}Cs \xrightarrow[5.87\text{分}]{EC} {}^{123}Xe \xrightarrow[2.08\text{時間}]{EC} {}^{123}I$$

（参考図書：アイソトープ手帳12版（日本アイソトープ協会）以下同）

A：159　　主なγ線エネルギーは159 keV，放出割合は83.3%。

B：甲状腺シンチグラフィ　シンチグラフィ（scintigraphy）は，放射性医薬品を体内に投与後，放出される放射線を体外からシンチカメラで検出し画像化する***in vivo***検査である。半減期13.2時間，EC壊変でα線やβ線等の粒子線を放出せず，放出γ線のエネルギー159 keVの^{123}Iは，検査のための被ばく線量も少なく，かつ良好な画像が得られる等，シンチグラ

フィー用の医薬品に必要な条件を具備している。

イ：EC　^{125}I は半減期 59.4 日で EC 壊変する。

C：35.5　^{125}I の放出 γ 線のエネルギーは 35.5 keV。その他，生成するテルル（Te）から 27.5 keV，31.0 keV 等の特性 X 線が放出される。

D：チロシン　^{125}I は，その半減期の長さ（59.4 日）や放出 γ 線エネルギーの低さ（35.5 keV）から *in vivo* 検査の用途には適さないが，生体試料中のホルモン測定等，*in vitro* 検査のための体外診断薬に用いられる。Na^{125}I とクロラミン T の溶液を混合すると Na^{125}I 溶液が酸化し活性化され，遊離した^{125}I でタンパク質中のチロシンを標識する。

E：ラジオイムノアッセイ　ラジオイムノアッセイ（RIA）は，図に示すとおり，RI で標識された抗原と測定対象の抗原が競合的に抗体と反応する現象を利用し，反応物の放射能から測定対象物質を定量する方法である。

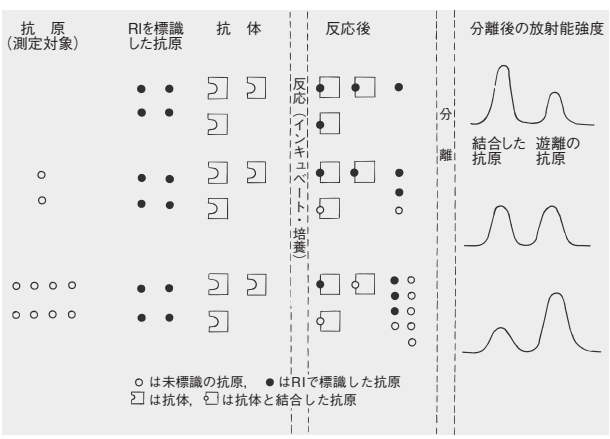


図　ラジオイムノアッセイの原理

（8 版増補 2020 放射線取扱の基礎，日本アイソトープ協会）

ウ：^{235}U の熱中性子照射　^{131}I は原子炉で製造され，次に示すとおりウランに中性子を照射し起こる^{235}U の核分裂の他，テルルの中性子捕獲反応により生成する。

$$^{235}\mathrm{U}(\mathrm{n,f})\ ^{131}\mathrm{I}$$

$$^{130}\mathrm{Te}(\mathrm{n},\gamma)\,^{131}\mathrm{Te} \xrightarrow[25.0\text{ 分}]{\beta^-}\ ^{131}\mathrm{I}$$

エ：β^-　β^- 壊変，最大エネルギー 606 keV の β 線を放出する。

F：365　主な γ 線エネルギーは 365 keV，放出割合は 81.7%。

G：^{131m}Xe　^{131}I の β^- 壊変により一部^{131m}Xe が生成され，最終的に安定同位体^{131}Xe となる。

Ⅱ　H－3　　I－3　　オ－2

注）H：反跳エネルギー　砲弾を撃った大砲が砲弾と逆方向に後退（反跳）するように，中性子捕獲反応による生成核が γ 線を放出する際，運動エネルギー保存のため生成核は反跳エネルギーを与

えられ，γ 線が放出される方向と正反対の方向に反跳する。

Ⅰ：1.1×10^{5}　標的核に時間 t だけ中性子照射したときの生成核の放射能 A[Bq]は，標的核の原子数を N，照射粒子のフルエンス率を f，標的核の核反応断面積を σ，生成核の半減期を T，その壊変定数を λ とすると，以下の式で表される。

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

3.12 g の C_2H_5I 分子の数と，それに含まれる標的核である ^{127}I の原子数は等しく

$$\frac{3.12}{156}\times6.02\times10^{23}=1.2\times10^{22}$$

よって，

$$A=Nf\sigma\left(1-\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}\right)$$

$$=1.2\times10^{22}\times2.0\times10^{6}\times6.2\times10^{-24}\times\left(1-\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{50}{25}}\right)$$

$$=1.1\times10^{5}[\mathrm{Bq}]$$

オ：I^-　中性子捕獲反応の反跳エネルギーにより C_2H_5I の C－I 結合が切断され生成した ^{128}I は，ヨウ化物イオン I^- として水中に抽出される。

生　物　学

第 64 回（令和元年）

次の問 1 から問 30 について，5 つの選択肢のうち適切な答えを 1 つだけ選び，また，問 31，問 32 の文章の［　　］部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを 1 つだけ選び，注意事項に従って解答用紙に記入せよ。

問 1　次の標識化合物のうち，陽電子放射断層撮影(PET)診断に用いられるものの組合せはどれか。

A　[^{13}N]NH_3（アンモニア）
B　[^{15}O]CO_2（二酸化炭素）
C　[^{123}I]MIBG（メタヨードベンジルグアニジン）
D　[^{99m}Tc]MDP（メチレンジホスホン酸テクネチウム）

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

〔解答〕
1

注）^{13}N と ^{15}O が陽電子放出核種である。一方 ^{123}I と ^{99m}Tc は γ 線放出核種である。

問 2　γ 線の生物作用を利用した応用例と照射される γ 線の吸収線量として，正しいものの組合せは次のうちどれか。

	応用例	吸収線量
A	ウリミバエの不妊化	70 Gy
B	じゃがいもの芽止め	100 Gy
C	米の品種改良	300 Gy
D	医療用器具の滅菌	500 Gy

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

〔解答〕
1

注）D：誤　医療用器具の滅菌には数十 kGy が使用されている。

問 3　次の核種のうち体内で主に骨に集積するものの組合せはどれか。

A　^{60}Co
B　^{90}Sr
C　^{137}Cs
D　^{226}Ra

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

〔解答〕
5

注）周期表でカルシウムと同族の^{90}Srや^{226}Raが，骨に集積しやすい核種である。一方，^{60}Coの親和性臓器としては肝臓や脾臓がある。^{137}Csは全身（筋肉）へ集積しやすい。

問4　γ線全身被ばく後の急性放射線障害の初期応答に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　3 Gy被ばく2時間後までに，50% 以上の発生率で嘔吐がみられる。
B　5 Gy被ばく2時間後までに，50% 以上の発生率で発熱がみられる。
C　7 Gy被ばく4時間後までに，50% 以上の発生率で頭痛がみられる。
D　9 Gy被ばく1時間後までに，50% 以上の発生率で下痢がみられる。

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

〔解答〕

5

注）前駆症状として1 Gy以上の被ばくで食欲不振，悪心，嘔吐と言った症状が見られ，4 Gy以上では頭痛などを訴えることがあり，おおよそ6 Gy以上で下痢の症状が現れることがある。発熱は2 Gy以上の被ばくで見られることがある。

問5　γ線を全身急性1回被ばくした場合のヒトの障害に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。ただし，特別な治療を行わない場合とする。

A　15 Gy被ばく後の平均生存期間は3.5日である。
B　100 Gy被ばく後の平均生存期間は2日以下である。
C　60日以内に半数が死亡する線量は約4 Gyである。
D　4 Gy被ばく後3日以内に，末梢血中のリンパ球数が一過性に増加し，その後被ばく前より減少する。

1）AとB　　2）AとC　　3）BとC　　4）BとD　　5）CとD

〔解答〕

3

注）A：誤　10～30 Gyの被ばく線量であれば小腸の症状が主になり，被ばく後10～20日で死亡する。
D：誤　リンパ球は被ばく直後から減少する。

問6　唾液腺への局所γ線急性被ばく後2～3日間にみられる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　6 Gy未満の被ばくでは臨床的に観察される影響は認められない。
B　8 Gyの被ばくにより，血清中の唾液腺型アミラーゼ値が上昇することがある。
C　8 Gyの被ばくにより，唾液腺の腫脹が生じることがある。
D　8 Gyの被ばくにより，唾液腺の痛みが生じることがある。

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

〔解答〕

5

注）唾液腺は8 Gyの急性照射で膨張による痛みが発生し，アミラーゼの血液中への漏出が起こる。

問7　原爆被爆者におけるがんによる死亡の相対リスクおよび過剰相対リスクに関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　被爆時年齢，到達年齢，部位によらず，相対リスクと過剰相対リスクの差は一定である。

B　全固形がんの過剰相対リスクは，到達年齢が同じであれば，被爆時年齢が低いほど大きい。
C　全固形がんの過剰相対リスクは，被爆時年齢が同じであれば，到達年齢が低いほど大きい。
D　30 歳で被爆し，70 歳に到達したときの全固形がんの相対リスクは 1 Gy において 0.4～0.5 である。
1）ABC のみ　2）ABD のみ　3）ACD のみ　4）BCD のみ　5）ABCD すべて

〔解答〕
1
注）D：誤　リスクが増加する場合，相対リスクは 1 より大きくなる。全固形がんの相対リスクは 1 Gy において 1.4～1.5 程度である。

問 8　職業被ばく及び医療被ばくによる発がんに関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　ウラン鉱夫において，肺がんの増加が見られた。
B　ラジウム時計文字盤工において，骨がんの増加が見られた。
C　頭部白癬（せん）の X 線治療を受けた患者において，甲状腺がんの増加が見られた。
D　トリウムを含む造影剤を投与された患者において，肝がんの増加が見られた。
1）ABC のみ　2）ABD のみ　3）ACD のみ　4）BCD のみ　5）ABCD すべて

〔解答〕
5
注）A：正　ウラン鉱夫の場合には放射性同位元素を含む粉塵を肺に吸い込み肺がんが誘発された。
B：正　ラジウム時計文字盤工は，筆を口先で整えながらラジウムが含まれた夜光塗料を文字盤へ塗布していたため内部被ばくを引き起こし，骨がんも増加した。
C：正　頭部への X 線照射は，散乱線などで頚部へも影響を与えることになり甲状腺がんを引き起こした。
D：正　トリウムを主成分とするトロトラストと呼ばれた造影剤は，脾臓，肝臓，骨髄などへ沈着し，ほとんど排出されることがない。そのためトリウムから放出される α 線によって晩発性障害（数十年経過後，肝がん，肝硬変や白血病）が引き起こされた。

問 9　医療診断による被ばくに関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　日本における 1 人当たり，1 年当たりの医療診断による被ばくの実効線量は，平均で約 4 mSv である。
B　体幹部 CT による被ばくの実効線量は，1 検査当たり約 10 mSv である。
C　胸部 X 線（直接）撮影による被ばくの実効線量は，1 検査当たり 0.5～1 mSv である。
D　乳房 X 線撮影（マンモグラフィー）による被ばくの乳腺における吸収線量は，1 検査当たり 2～3 mGy である。
1）ABC のみ　2）ABD のみ　3）ACD のみ　4）BCD のみ　5）ABCD すべて

〔解答〕
2
注）C：誤　胸部 X 線（直接）撮影による被ばくの実効線量は 1 回におおよそ 0.06 mSv であり，また 1 検査当たりの撮影枚数は 1 から 2 枚程度である。

問 10　預託実効線量に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　子供の場合，摂取時から 50 年間を積算期間とする。
B　預託実効線量の単位はシーベルトである。

C　長期にわたる外部被ばくの影響を評価するために用いる。
D　確率的影響のリスクを評価するために用いる。
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　子供や乳幼児に対しては摂取から70歳までの期間である。
C：誤　預託実効線量は，体内に摂取された放射性物質による被ばく（内部被ばく）の影響を評価するための線量指標である。

問11 公衆の1人当たりの年間実効線量に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　宇宙放射線による被ばくは，高度が同じであれば高緯度の地域に比べて低緯度の地域の方が高い。
B　世界平均ではラドンとその子孫核種による内部被ばくが自然放射線による被ばくの中で最も多い。
C　日本平均では医療診断による被ばくが自然放射線による被ばくよりも多い。
D　日本平均では食物からの内部被ばくが自然放射線による被ばくの中で最も多い。
1）ABCのみ　　2）ABDのみ　　3）ACDのみ　　4）BCDのみ　　5）ABCDすべて

〔解答〕
4
注）A：誤　宇宙線は地球磁場の影響を受けるため赤道に近づくほど減少する（緯度効果）。
B：正　世界平均ではラドンとその子孫核種による内部被ばくが最も高く，1.26 mSvである。
C：正　日本平均では医療被ばくは3.87 mSv，自然放射線による被ばくは2.1 mSvである。
D：正　日本平均では食物からの内部被ばくは0.99 mSvである。
（公財）原子力安全研究協会「生活環境放射線」（2011年）より

問12 放射線による直接作用に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　DNAの共有結合の解離によるラジカルの発生がある。
B　乾燥した酵素のX線による不活性化に関与する。
C　ジメチルスルホキシドによって抑制される。
D　フリーラジカルが関与する。
1）ACDのみ　　2）ABのみ　　3）BCのみ　　4）Dのみ　　5）ABCDすべて

〔解答〕
2
注）B：正　ヒドロキシルラジカル（OHラジカル）の発生源となる水分子が減少すると，生体高分子への傷害は直接作用が中心となる。
C：誤　ジメチルスルホキシド（DMSO）はOHラジカルの捕捉剤（ラジカルスカベンジャー）として使用される。
D：誤　生体に照射した放射線は水分子を電離・励起し，ラジカルを生成する。このラジカルが生体高分子に傷害を与えることを間接作用という。

問13 放射線による間接作用に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。
A　ラジカルスカベンジャーにより作用が軽減される。
B　無酸素下よりも酸素存在下で作用は大きくなる。
C　凍結状態にすると作用が軽減される。

D　溶質分子の濃度が変化しても不活性化される溶質分子の割合は変わらない。

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

〔解答〕

1

注）D：誤　溶質分子の濃度を変えたとき，低濃度の方が高濃度より不活性化される物質の割合が増加する（希釈効果）。

問 14 放射線により細胞に生じる DNA 損傷に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　γ 線では単位吸収線量当たりの DNA 2 本鎖切断の数は DNA 1 本鎖切断の数の約 20 倍である。

B　DNA 2 本鎖切断は電離放射線に特有な損傷である。

C　DNA 2 本鎖切断は発がんの原因となる。

D　γ 線では単位吸収線量当たりの塩基損傷の数は DNA 2 本鎖切断の数より多い。

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

〔解答〕

5

注）A：誤　塩基損傷は 1 Gy 当たり数百個程度，DNA 1 本鎖切断は 1 Gy 当たり 1000 個程度，DNA 2 本鎖切断の数は 1 Gy 当たり 30～60 個生成される。

B：誤　DNA 2 本鎖切断は電離放射線だけではなく，紫外線や活性酸素種などにより生成される。

問 15 ヒト体細胞における DNA 2 本鎖切断の修復及び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　相同組換えによる修復は，主として相同染色体を利用して行われる。

B　非相同末端結合による修復は，G_2 期では起こらない。

C　非相同末端結合による修復は，相同組換えによる修復よりも誤りを起こしやすい。

D　放射線で誘発される突然変異の中で欠失の占める割合は，自然に起こる突然変異の場合よりも多い。

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

〔解答〕

5

注）A：誤　相同組換えは姉妹染色分体の DNA 配列を利用して正確な修復を行う。ヒト体細胞は 46 本の染色体のうち 44 本が常染色体と呼ばれ，第 1 番から第 22 番までの染色体が 2 本ずつある。この 2 本は同じ大きさと形をしているので相同染色体であると表現される。姉妹染色分体は，同じ遺伝情報をもつ 2 本の染色分体のことである。一本の染色体が S 期に複製されてできたもののため「姉妹」と呼んでいる。姉妹染色分体と相同染色体の違いに注意が必要である。

B：誤　相同組換えは S 期から G_2 期で起こるのに対し，非相同末端結合は細胞周期を通じて起こる。

問 16 次のうち，単位吸収線量当たり，1 細胞当たりの DNA 1 本鎖切断の生成数に影響を与えるものの組合せはどれか。

A　温度

B　LET

C　ラジカルスカベンジャー

D　酸素分圧

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）温度や酸素分圧の変動，ラジカルスカベンジャーの有無によりラジカルによるDNA損傷の数が変化する。LETが高くなると，DNA2本鎖切断が増加するのに対し，DNA1本鎖切断は低下する。

問17 体内に取り込まれたある放射性核種について，摂取直後にある臓器に100 Bqの集積が認められた。この臓器において，集積後から有効半減期よりも十分長い時間にわたる総壊変数（累積放射能[MBq·s]）に最も近い値は，次のうちどれか。ただし，この放射性核種の物理的半減期を30年，この臓器における生物学的半減期を100日とする。また，その間，臓器への新たな集積はなく，臓器重量の増減もないと仮定する。

1） 0.34　　2） 590　　3） 850　　4） 1,200　　5） 16,000

〔解答〕

4

注）まず，有効半減期Tは$1/T=1/(30\times365)+1/100\fallingdotseq1/100$となり，生物学的半減期に近似される。次に総壊変数について考える。放射能Aと放射性核種の原子数Nには，$A=\lambda N$（λは壊変定数）の関係があるため，λを半減期Tで置き換えると，$A=(\ln 2/T)\times N$となる。摂取直後の放射能が100 Bqならば，臓器内の放射性核種の原子数は$N=AT/\ln 2\fallingdotseq100\times(100\times24\times60\times60)/0.693\fallingdotseq1200\times10^{6}$となる。ただし$\ln 2\fallingdotseq0.693$とする。“集積後から有効半減期より十分に長い時間が経過したとき”が，摂取した放射性核種がすべて壊変した状態と仮定すると，総壊変数は1.2×10^{-9}壊変，つまり累積放射能は1200[MBq·s]となる。

問18 次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　アポトーシスを起こす過程では核の断片化が起こる。
B　末梢血リンパ球は放射線致死抵抗性である。
C　アポトーシスは放射線被ばくによってのみ起こる細胞死である。
D　アポトーシスを起こす過程ではクロマチンの凝縮が起きる。

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

〔解答〕

3

注）A，D：正　細胞体積の縮小，核の断片化，核内クロマチンの凝集，細胞の分断化などは，アポトーシスの形態学的特徴である。
B：誤　リンパ球は比較的低線量でアポトーシスによる間期死を起こす。
C：誤　アポトーシスは個体発生の過程の余分な細胞やがん化した細胞，自己抗原に反応する細胞の除去など形態形成や組織の恒常性維持に関わる生命の基本機構に係わるプログラム細胞死であり，放射線のみで起こる細胞死ではない。

問19 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の推定に使用できる。
B　染色体凝縮を起こしている細胞で観測する。
C　ヒト末梢血赤血球で観測することができる。
D　不安定型染色体異常はがん化の原因となる。

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

〔解答〕

1

注）A：正　放射線による染色体異常の出現頻度は被ばく線量に依存することが知られている。特に，二動原体染色体や環状染色体の出現頻度は，放射線に特異性が高く，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。二動原体染色体の場合の推定可能範囲は 0.2－5 Gy とされている。

B：正　染色体凝縮とは，細胞分裂期にクロマチンが凝縮して染色体が形成される過程をいう。染色体凝縮により光学顕微鏡での観察が可能となり，染色体異常の観察を行える。

C：誤　ヒト体細胞の中で薬剤処理により比較的容易に細胞分裂を誘発し，染色体異常を観察できるのはリンパ球のみである。

D：誤　不安定型異常を持つ細胞は細胞分裂に伴い細胞死するので，発がんの原因にはならない。

問 20 次の照射条件で，正常ヒト線維芽細胞を 2 Gy 照射したときの生存率が高い順に並べられているものはどれか。

A　^{60}Co γ 線

B　がん治療用炭素線ブラッグピーク部

C　がん治療用陽子線ブラッグピーク部

D　低酸素下での ^{60}Co γ 線

1）A ＞ B ＞ C ＞ D

2）A ＞ C ＞ D ＞ B

3）A ＞ D ＞ C ＞ B

4）D ＞ A ＞ C ＞ B

5）D ＞ C ＞ A ＞ B

〔解答〕

4

注）放射線の生物学的効果は，同一の吸収線量であっても放射線の種類や線量率などによって異なる。陽子線，炭素イオン線の相対的生物学的効果比（RBE ： relative biological effectiveness）は，X 線，γ 線に対してそれぞれ 1.1，及び 3 程度と見積もられている。なお，放射線の種類（線質）の違いを表す指標である線エネルギー付与に関して，X 線，γ 線は低 LET 線，炭素線は高 LET 線に分類される。陽子線は低 LET 線に分類されるが，ブラッグピークでの LET は高くなる。また，γ 線を通常酸素濃度下で照射した場合，無酸素下で照射した場合に比べて感受性が高い（酸素効果）。したがって，生物的効果の大きさは B＞C＞A＞D，生存率は D＞A＞C＞B と考えられる。

問 21 ヒトの胎内被ばくにより重度知的障害が最も起こりやすい被ばくの時期は，次のうちどれか。

1）受精後 8 日まで

2）受精後 8 日～8 週

3）受精後 8 週～15 週

4）受精後 15 週～25 週

5）受精後 25 週以降

〔解答〕

3

注）ヒトの胎内被ばくにより重度知的障害は，受精後 8 週～15 週で最も誘発されやすく，受精後 15 週～25

週でも誘発される。受精後8週以前や受精後25週以降の被ばくではほとんどみとめられない。受精後8～25週は大脳が形成される時期であり，受精後8週～15週にはニューロン数の増大と脳内各所への移動，受精後15週～25週にはニューロンの連結と脳構造の完成が行われると考えられている。

問22 γ線被ばくを受けた眼の水晶体の放射線影響に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　線量が大きくなると放射線白内障の平均的な発症までの期間が短縮する。
B　水晶体混濁のしきい線量は0.5 Gyである。
C　放射線白内障は水晶体の後嚢下（目の奥に近い部分）で細胞が被ばくすることによって起こる。
D　線量率が低下すると視力障害性の放射線白内障のしきい線量は低下する。

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

〔解答〕

2

注）A：正　白内障の発症までの期間は，線量が大きくなるほど短くなる。
B：正　水晶体の混濁のしきい線量は約0.5 Gyと考えられている。
C：誤　放射線白内障は，水晶体の縁（赤道部）にある分裂の盛んな水晶体上皮細胞が被ばくすることによって，DNAが損傷され，クリスタリン（水晶体タンパク）の構造変化・水晶体線維の変性等の障害をきたす。次いで，障害を受けた細胞が水晶体の後方（後嚢側）に移動し，集積することにより混濁を生じる。なお，白内障は発症部位により，主に，皮質，核，後嚢下の3つの型に分類され，このうち，加齢白内障は皮質型が最も多く，放射線白内障は後嚢下型が最も多いとされている。
D：誤　最近のICRP勧告（2011～）では，視力障害性の放射線白内障のしきい線量には線量率効果がないとしている。なお，以前のICRP勧告（2011以前）では，線量率効果があるとして，しきい線量を急性被ばくと多分割・遷延被ばくに分けていたが，この場合，線量率が低下するとしきい線量は高くなる。

問23 9.5 Gyのγ線被ばくによる肺の障害に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　肺の一部だけが被ばくした場合でも肺全体に炎症が生じる。
B　被ばく後1週間で肺浮腫が出現する。
C　被ばくにより50％以上の頻度で放射線肺炎が起こる。
D　被ばく後約6か月以降に肺線維症が起こる。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　放射線肺炎では，肺組織，特に肺胞や肺血管の細胞のDNAが損傷を受け，これらの細胞から炎症性サイトカインが放出されることにより，主に肺間質に炎症が起こる。したがって，放射線肺炎は，通常，放射線を受けた部分に一致して生じる。
B：誤　肺浮腫は1～3か月の潜伏期を経た後に生じる。
C：正　致死性の放射線肺炎に対するED_{50}が9.3 Gyであることが報告されていることから，9.5 Gyの被ばくにより50％以上の頻度で放射線肺炎が起こると考えられる。
D：正　肺線維症は肺炎の終末像で，肺の実質細胞が障害を受け，その後に線維芽細胞が浸潤・増殖し，線維化が起こる。被ばく後，3か月以降に見られる影響であり，多くの場合6か月ごろから出現し数年続く。

問 24 ^{137}Cs γ 線局所被ばくによる皮膚障害に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　3 Gy 被ばくの数時間後に，被ばく部位に軽い痛みを生じることがある。

B　被ばく後 48 時間以内に見られる紅斑は，毛細血管の拡張により生じる。

C　被ばく後 2～3 週間後に見られる紅斑は，血管の狭窄により生じる。

D　難治性潰瘍のしきい線量は，1 回で被ばくした場合より同一線量を分割して被ばくした場合の方が小さい。

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

〔解答〕

1

注）A：正　約 2 Gy 以上の局所被ばくでは，被ばく部位に紅斑や軽い痛みが生じることがある。

B：正　放射線の急性被ばく後，最も早く生じる皮膚障害は，数時間内に現れる一過性紅斑であり，障害を受けた上皮細胞がヒスタミン様物質を放出するために起こる毛細血管の拡張に起因すると考えられている。

C：正　被ばく後 2～3 週間後に見られる紅斑は，細動脈が部分的に狭窄することにより生じると考えられている。6～19 Gy の被ばくでは，約 2 週間で紅斑が明らかになり，約 3～4 週間持続する。また乾性皮膚炎が生じ，皮膚は充血，腫張する。

D：誤　線量率効果のため，分割して被ばくした場合の方がしきい線量が高くなる。

問 25 放射線による遺伝性（的）影響に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　マウス実験において，遺伝性（的）影響の線量率効果は認められていない。

B　マウス実験で見られた遺伝性（的）影響は，主に顕性（優性）の突然変異である。

C　遺伝的リスクの推定に用いられる倍加線量法は間接法とも呼ばれる。

D　倍加線量が小さいほど，遺伝性（的）影響が起こりやすいことを意味する。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　マウス実験において，低線量率の照射の方が高線量率照射よりも効果が低い（遺伝性的影響が小さい）という線量率効果が認められている。

B：誤　遺伝性（的）影響を調べる代表的なマウス実験法として，常染色体劣性の突然変異を検出する「特定座位検出法」がある。

C：正　ヒトにおける遺伝性（的）影響の発生率を推定する方法には，動物実験により求めた突然変異率から直接推定する直接法と，総突然変異率を自然突然変異率の 2 倍にするのに必要な線量（倍加線量）を動物実験により求め，ヒトの遺伝性疾患の自然発生率と比較して相対的な発生率を推定する間接法とがある。倍加線量法は間接法である。

D：正　生物の 1 世代の間に自然発生する突然変異と同数の突然変異を起こすのに必要な線量を倍加線量という。倍加線量が小さいほど，より低い線量で同数の突然変異を生じさせること，すなわち，遺伝性（的）影響が起こりやすいことを意味する。

問 26 ICRP 2007 年勧告における確率的影響の名目リスク係数に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。ただし，全集団とは被ばく時年齢が 0～85 歳の集団，成人とは被ばく時年齢が 18～64 歳の集団とする。

A　全集団のがんの名目リスク係数は，1 Sv 当たり 5.5 である。

B　線量・線量率効果係数（DDREF）として$\frac{1}{2}$を採用している。

C　全集団のがんの名目リスク係数は，成人のがんの名目リスク係数より大きい。

D　全集団，成人ともに，遺伝性（的）影響の名目リスク係数は，1990年勧告より小さくなっている。

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

〔解答〕

4

注）A：誤　全集団のがんの名目リスク係数は，1 Sv当たり5.5×10^{-2}である。

B：誤　DDREFとして2を採用している。DDREFが2であるということは，低い線量率での効果が高い線量率の場合の2分の1になるということである。

C：正　がんの名目リスク係数は，全集団では1 Sv当たり5.5×10^{-2}，成人では1 Sv当たりで4.1×10^{-2}である。

D：正　ICRP 2007年勧告の遺伝性（的）影響の名目リスク係数は，全集団で1 Sv当たり0.2×10^{-2}，成人で1 Sv当たり0.1×10^{-2}であり，1990年勧告（全集団で1 Sv当たり1.3×10^{-2}，成人で1 Sv当たり0.8×10^{-2}）より小さくなっている。

問27　生殖腺の局所被ばくによる放射線障害に関する次の記述のうち，正しいものの組合せはどれか。

A　精巣のγ線1回短時間被ばくによる男性の一時的不妊のしきい線量は，0.15 Gyである。

B　精原細胞は精（子）細胞より突然変異誘発率が高い。

C　卵巣が被ばくした後，卵胞刺激ホルモンの一過性の上昇がみられることがある。

D　卵巣が被ばくした場合，成人女性では被ばくした年齢が低いほど少ない線量で永久不妊になる。

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

〔解答〕

3

注）A：正　精巣は0.1～0.15 Gyで一時的不妊，3.5～6 Gyで永久的精子欠損（永久不妊）になる。

B：誤　突然変異に関する感受性は，精細胞（精子細胞）＞精子＝精母細胞＞精原細胞の順である。

C：正　生殖腺（精巣/卵巣）の急性障害は不妊とホルモン分泌異常である。ホルモン分泌異常では5.6～20 Gyで卵胞刺激ホルモンの上昇，また11.3～26 Gyで黄体刺激ホルモンの上昇が報告されている。

D：誤　年齢とともに感受性は高くなる。これは年齢が高くなると卵母細胞プールのサイズが小さくなるためである。

問28　ICRP 2007年勧告における放射線加重係数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　すべてのエネルギーの光子に対して1が与えられている。

B　すべてのエネルギーの陽子に対して2が与えられている。

C　すべてのエネルギーのアルファ粒子に対して20が与えられている。

D　中性子についてはエネルギーが1 MeVのときに最大となる。

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

〔解答〕

5

注）放射線加重係数（ICRP 2007）に関する問題

放射線加重係数（ICRP 2007）

放射線の種類	放射線加重係数
ガンマ線，エックス線，ベータ線	1
陽子線	2
アルファ線，重イオン	20
中性子線	2.5～21

A～C： ICRP 2007 の表から正解が自明

D：放射線加重係数は 1　MeV で最大値となる分布が 1 MeV 未満，1 MeV 以上 50 MeV 以下および 50 MeV を越える範囲それぞれに適用可能な数式として与えられている。数値としては 1 MeV が最大になる。

問 29 ^{99m}Tc の医療応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　^{99m}Tc は^{99}Mo からのミルキングによって製造する。

B　^{99m}Tc の半減期は 21 万年である。

C　^{99m}Tc から放出される 511 keV のエネルギーを持つ γ 線を検出する。

D　[^{99m}Tc]MAA（テクネチウム大凝集人血清アルブミン）は肺シンチグラフィーに用いられる。

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

〔解答〕

3

注）^{99m}Tc に関する設問

A，D：正

テクネチウム 99 m（^{99m}Tc）は，テクネチウム 99（^{99}Tc）（半減期 21 万年）の中で半減期が 6 時間の核異性体で，β（ベータ）線を放出せず 0.143 MeV の γ 線のみを放出する。

B：^{99}Tc の半減期は 21 万年だが，^{99m}Tc の半減期は 6 時間

C：^{99m}Tc の γ 線は 0.143 MeV のエネルギーを持つ。

問 30 ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）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　熱中性子や熱外中性子を照射する。

B　^{11}B と中性子の核反応を利用する。

C　^{4}He と ^{7}Li が生じる。

D　代表的なホウ素薬剤の 1 つにアミノ酸誘導体の BPA（p-boronophenylalanine）がある。

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

〔解答〕

3

注）中性子捕捉療法（BNCT）とは原子炉等から発生する中性子とそれに増感効果のあるホウ素との反応を利用して，正常細胞にあまり損傷を与えず，腫瘍細胞のみを選択的に破壊する治療法。腫瘍細胞に取り込まれたホウ素（^{10}B）と中性子との核反応により発生する^{4}He（原子核は α 線と同一）と^{7}Li 粒子によって治療を行う。用いられる中性子は，ホウ素（^{10}B）との反応断面積が大きな熱中性子および熱外中性子。大きな利点は，α 線も^{7}Li 粒子もおよそ 10 μm しか飛ばないため，正常細胞を傷つけることなく

腫瘍細胞のみが選択的に治療できること。BNCTの臨床研究で主に用いられる2つのホウ素薬剤（BPAとBSH）は，それぞれ細胞質および細胞膜に集積する性質を持っている。この2つの薬剤が同じ濃度でがん細胞に集積された場合，細胞質の方が細胞膜と比べて細胞核に近いため，BPAの方がより高い治療効果が得られる。

A，C，D：正

B：誤　中性子のターゲットは^{10}Bである。

問31 次のⅠ，Ⅱの文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

Ⅰ　放射線生物学では細胞の死を「分裂する能力の喪失」と定義することがある。この定義による細胞の死を［ア］と呼ぶ。放射線照射により「分裂する能力を喪失」すると，細胞は0回から数回の分裂後にその後の分裂を停止するのに対し，分裂能を失わないと細胞が分裂を繰り返して1つの細胞由来の細胞集団（コロニー）を形成する。単独の培養細胞は肉眼では見えないが，コロニーを形成すると肉眼で確認できる大きさになる。このようなコロニーを作るかどうかで細胞の生死を判定する。放射線照射後の細胞生存率を計算してみよう。照射していない100個の細胞を培養して90個のコロニーができたとする。このときのコロニー形成率は［A］%である。同じ細胞1,000個にX線を2 Gy照射した後培養して90個のコロニーができたとすると，2 Gy照射での生存率は［B］である。放射線の吸収線量をD，生存率をSとすると，多くの培養細胞の線量－生存率曲線は$\ln S = -\alpha D - \beta D^2$で近似できる。$\alpha$と$\beta$の値は，照射条件や細胞の性質に大きく左右される。

照射条件として放射線の線質や照射中の溶存酸素濃度は，細胞生存率に大きな影響を与えることが知られている。線質の効果を定量的に表すために［イ］が，酸素の効果を定量的に表すために［ウ］が用いられる。酸素の濃度が0.5% 以下の条件で照射すると大気条件下で照射した場合と比較して生存率は［エ］なる。正常ヒト線維芽細胞に中性子線を照射した場合，^{137}Cs線源のγ線照射時と比べてα/βの値は［オ］。このとき［ウ］は［カ］。

＜アの解答群＞

1）増殖死　2）間期死　3）アポトーシス　4）ネクローシス　5）オートファジー

＜Aの解答群＞

1）8.1　2）9.0　3）10　4）50　5）81　6）90　7）100

＜Bの解答群＞

1）0.081　2）0.090　3）0.10　4）0.50　5）0.81　6）0.90　7）1.0

＜イ～エの解答群＞

1）BER　2）NER　3）OER　4）PLDR　5）RBE　6）SLDR　7）低く　8）高く

＜オの解答群＞

1）大きくなる　2）変わらない　3）小さくなる

＜カの解答群＞

1）大きくなる　2）変わらない　3）小さくなる

Ⅱ　高線量率のX線やγ線による全身被ばくでは，線量に応じて様々な組織で障害が起こる。これらの障害の原因となる細胞の放射線感受性は，いくつかの例外はあるものの［キ］の法則としてま

とめられている。［　キ　］の法則では，細胞分裂の頻度が［　C　］細胞ほど，また，形態及び機能において［　ク　］細胞ほど放射線感受性が高いとしている。

被ばく直後から数週間以内に起きる急性障害について考えてみよう。例えば，上皮組織内部では，上皮としての機能を担っている細胞（機能細胞）は，組織幹細胞と比べて放射線感受性は［　D　］。機能細胞は有限の寿命をもち，それによる減少分を幹細胞の増殖によって補充することができなくなると急性障害が発症する。そのため腸や皮膚の上皮組織での急性障害では，被ばくから一定数の機能細胞が失われて症状が現れるまでに線量に応じた時間差があることが多い。皮膚の上皮（表皮）組織の幹細胞は［　ケ　］に存在し，小腸上皮の幹細胞は［　コ　］に存在する。ヒトの小腸上皮細胞の寿命は約［　E　］日であり，この期間に応じて症状が現れる。

＜キ，クの解答群＞

1）ハーディ・ワインベルグ　　2）ベルゴニー・トリボンドー
3）エントナー・ドゥドロフ　　4）未熟な（未分化の）
5）成熟した（分化した）

＜C の解答群＞

1）高い　　2）低い

＜D の解答群＞

1）高い　　2）低い　　3）変わらない

＜ケ，コの解答群＞

1）基底層　　2）角質層　　3）顆粒層　　4）絨毛（じゅう）先端
5）樹状細胞　　6）クリプト（腺窩（か））　　7）黒色素胞

＜E の解答群＞

1）1 ～ 2　　2）3 ～ 7　　3）14～21　　4）30～60

〔解答〕

Ⅰ　ア－1　　A－6　　B－3　　イ－5　　ウ－3　　エ－8　　オ－1　　カ－3

注）細胞の放射線感受性に関する設問

第 1 段落は増殖死に関する記述

ア：細胞死は，増殖死と間期死に分類される。増殖死は，分裂の停止を指標とする細胞死をいう。間期死は，細胞が分裂することなく不活化し死にいたる現象をいう。

A：コロニー形成率は，コロニー形成数を培養のために播種した細胞数で除した値。パーセントで示す場合が多い。

B：生存率は，コロニー形成数を培養のために播種した細胞数で除した値。一般的に小数で示す。

第 2 段落は増殖死の修飾因子に関する記述

イ：線質による影響は生物効果比（RBE，生物学的効果比ともいわれる）で示される。対象とする放射線と基準放射線とが生体に等しい変化を与えるときに，前者の吸収線量を後者の吸収線量で割って得られる値。基準の放射線としては X 線または γ 線が用いられる。

ウ：放射線の生物作用は，細胞内に酸素が存在すると一般に大きくなる。この現象が酸素効果である。酸素効果の大きさは，酸素のない条件で，ある効果を生じるのに要する線量と，酸素のある条件で同じ効果を生じるのに要する線量の比が酸素増感比（OER）として用いられる。

エ：大気中の酸素濃度は，20.95% であるため，設問の 0.5% は，十分に低い酸素濃度である。酸素濃度が低い時には，酸素効果がなくなるため，生存率は高くなる。

オ：設問中に示された線量－生残率関係式は，直線―二次曲線不活化モデルと呼ばれる。1 粒子による 2 本鎖切断の発生率が α に対応し，2 粒子による 1 本鎖切断が近距離にあって 2 本鎖切断を起こす

率がβに対応する。αは線量Dに比例し，βは線量の2乗（D^2）に比例する。中性子では，γ線に比べて1粒子での2本鎖切断の比率が上がり，αの値が大きくなり，α/βは大きくなる。

カ：酸素効果は2粒子による1本鎖切断が近距離にあって2本鎖切断を起こす率と関係するため，中性子線の場合には酸素効果の寄与が低下する。結果的にOERは，小さくなる。

Ⅱ　キ－2　　ク－4　　C－1　　D－2　　ケ－1　　コ－6　　E－2

注）体組織の感受性に関する設問

第1段落は，一般的な体組織の放射線感受性に関する設問

キ，C，ク：ベルゴニー・トリボンドーの法則（ベルゴニー・トリボンドーの法則ともいう）は，放射線の生体組織への影響に関する法則。この法則によると，放射線の影響は，(1) 細胞分裂頻度が高いほど，(2) 将来行う細胞分裂の数が多いほど，(3) 形態および機能が未分化なほど，強く現れる。例外はあるが，多くの組織の放射線感受性についてこの法則が成立する。

C：放射線の影響は，細胞分裂頻度が高いほど強く現れる。

ク：放射線の影響は，形態および機能が未分化なほど強く現れる。

第2段落は，細胞のターンオーバーと症状の出現時期に関する設問

前提として，放射線の生物影響において動物組織は，細胞再生系と細胞非再生系の二つに大別される。細胞再生系は，細胞分裂能力のある細胞（幹細胞）を含む組織で，造血組織，生殖腺，上皮組織，水晶体などが含まれ放射線感受性が高い。細胞非再生系は，細胞分裂を停止した細胞から構成される組織で，筋組織，神経組織，脂肪組織などが含まれ放射線感受性が低い。

D，ケ：皮膚は細胞再生系組織で，分化の進んだ上皮細胞（顆粒層，角質層）と幹細胞が存在する基底層から構成される。機能細胞である上皮細胞は，放射線感受性は低い。

コ：小腸表面の粘膜には絨毛が無数にあって表面積の増加と養分の吸収に役立っている。この絨毛の全表面を形成している分化した機能細胞は絨毛の根元から順次上方へ移動して毎日多数の細胞が頂上から剥離して失われている。一方，絨毛の根元にあるクリプトと呼ばれる細胞の嚢には幹細胞が存在している。

E：小腸上皮の寿命は3～7日である。

問32　次のⅠ～Ⅲの文章の［　　］の部分について，解答群の選択肢のうち最も適切な答えを1つだけ選べ。

Ⅰ　ヒトの代表的な放射線高感受性遺伝病の1つに［ A ］がある。この遺伝病はATM遺伝子の変異によって生じ，［ B ］遺伝様式を示す。この遺伝病の患者の両親が健康な場合，［ C ］が一対のATMの遺伝子の［ D ］に変異を持つ。また，この遺伝病の患者の兄弟姉妹が健康な場合，その兄弟姉妹は［ E ］の確率で一対のATMの遺伝子の［ D ］に変異を持つ。

＜Aの解答群＞

1）毛細血管拡張性運動失調症　　2）色素性乾皮症
3）コケイン症候群　　4）重症複合免疫不全症
5）ファンコニ貧血　　6）鎌型赤血球貧血症

＜Bの解答群＞

1）常染色体顕性（優性）　　2）常染色体潜性（劣性）　　3）X染色体顕性（優性）
4）X染色体潜性（劣性）

＜Cの解答群＞

1）父親のみ　　2）母親のみ
3）父親と母親のいずれか一方のみ　　4）父親と母親の両方

＜Dの解答群＞

1)　一方　　2)　両方

＜E の解答群＞

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

Ⅱ　次に，［ A ］の患者で ATM 遺伝子にどのような変異があるかを見てみよう。なお，以下において，タンパク質のアミノ酸の数え方は，タンパク質合成が開始されるコドンに対応するアミノ酸を 1 個目とし，以下，タンパク質合成が進行する方向に向かって増えるように数えることとする。また，メッセンジャー RNA(mRNA)の塩基の番号は，タンパク質合成が開始されるコドンの 1 番目の塩基を 1 番とし，以下，タンパク質合成が進行する方向に向かって増えるように付けることとする。下の表 1 はコドンとアミノ酸との対応を示したもので，遺伝暗号表あるいはコドン表などと呼ばれる。

表1

1番目の塩基	3番目の塩基	2番目の塩基							
		U		C		A		G	
U	U	UUU	フェニルアラニン	UCU	セリン	UAU	チロシン	UGU	システイン
	C	UUC		UCC		UAC		UGC	
	A	UUA	ロイシン	UCA		UAA	終止コドン	UGA	終止コドン
	G	UUG		UCG		UAG		UGG	トリプトファン
C	U	CUU	ロイシン	CCU	プロリン	CAU	ヒスチジン	CGU	アルギニン
	C	CUC		CCC		CAC		CGC	
	A	CUA		CCA		CAA	グルタミン	CGA	
	G	CUG		CCG		CAG		CGG	
A	U	AUU	イソロイシン	ACU	トレオニン	AAU	アスパラギン	AGU	セリン
	C	AUC		ACC		AAC		AGC	
	A	AUA		ACA		AAA	リシン	AGA	アルギニン
	G	AUG	メチオニン	ACG		AAG		AGG	
G	U	GUU	バリン	GCU	アラニン	GAU	アスパラギン酸	GGU	グリシン
	C	GUC		GCC		GAC		GGC	
	A	GUA		GCA		GAA	グルタミン酸	GGA	
	G	GUG		GCG		GAG		GGG	

多数の患者で ATM 遺伝子の一部あるいは大部分の欠失が見られるが，1 個から数個の塩基の変化が見られる場合もある。一例として，ATM タンパク質の mRNA の 8,711 番目のアデニンがグアニンに置き換わるような変異がある。図 1 に正常な ATM タンパク質の mRNA の 8,701 番目から 8,720 番目の塩基配列を示す。ATM タンパク質の［ ア ］個目のアミノ酸は，正常な遺伝子から作られると［ F ］であるが，この変異遺伝子から作られると［ G ］となる。

塩基の番号：8,701 番から 8,720 番

CCUACUCCUGAGACAGUUCC

図 1

別の例として，ATM タンパク質の mRNA の 7,517 番目から 7,520 番目までの 4 個の塩基が欠失するような変異がある。図 2 に正常な ATM タンパク質の mRNA の 7,511 番目から 7,530 番目の塩基

配列を示す。このような変異を［　H　］変異といい，この変異遺伝子からは正常なATMタンパク質より小さい［　イ　］個のアミノ酸からなるタンパク質が作られる。

塩基の番号：7,511番から7,530番
UGAAGAGAGACGGAAUGAAG
図2

＜ア，イの解答群＞

1）2,505　2）2,506　3）2,507　4）2,508　5）2,903
6）2,904　7）2,905　8）2,906　9）7,516　10）7,520
11）7,521　12）8,711　13）8,712　14）8,715

＜F，Gの解答群＞

1）アラニン　2）アスパラギン　3）アスパラギン酸
4）イソロイシン　5）グリシン　6）グルタミン
7）グルタミン酸　8）システイン　9）セリン
10）チロシン　11）トレオニン　12）トリプトファン
13）フェニルアラニン　14）リシン　15）ロイシン

＜Hの解答群＞

1）サイレント　2）トランジション　3）トランスバージョン
4）ナンセンス　5）フレームシフト　6）ミスセンス

Ⅲ　放射線によって生じるさまざまなDNA損傷の中で，［　I　］は最も重篤なものと考えられている。正常ヒト二倍体細胞に1 Gyのγ線を照射すると，細胞1個当たり約［　ウ　］個の［　I　］が生じる。ATMタンパク質は，放射線によって生じた［　I　］部位にNBS1タンパク質（ヒト放射線高感受性遺伝病の1つであるナイミーヘン染色体不安定性症候群の原因遺伝子から作られるタンパク質）などを介して結合し，p53タンパク質やヒストンH2AXタンパク質など少なくとも数百種類のタンパク質を［　J　］化する機能を持っている。p53タンパク質は特定のDNA配列に結合し，その近傍にある遺伝子群の［　K　］を促進する。これらの遺伝子群から作られるタンパク質群のなかには，細胞周期チェックポイントやアポトーシスに関わるものがある。また，［　I　］の修復に関わるタンパク質の中には，［　J　］化されたH2AXタンパク質に直接的あるいは間接的に結合することによって損傷部位に集積するものが多数存在する。このように，ATMタンパク質は［　I　］に対するさまざまな応答を制御するのに重要な役割を担っており，このことが［　A　］の患者の細胞が放射線高感受性を示す理由であると考えられている。

＜Iの解答群＞

1）DNA1本鎖切断　2）DNA2本鎖切断　3）ピリミジンダイマー
4）塩基損傷

＜ウの解答群＞

1）5　2）40　3）200　4）1,000　5）3,000

＜Jの解答群＞

1）アセチル　2）メチル　3）ユビキチン　4）リン酸
5）グリコシル　6）SUMO

＜Kの解答群＞

1）組換え　　2）修復　　3）転写　　4）転座
5）複製　　6）翻訳

〔解答〕

Ⅰ　A－1　　B－2　　C－4　　D－1　　E－4

注）放射性感受性に関与する遺伝子の突然変異に関する問題
放射線高感受性を示す遺伝病を下表に示す。

疾病名称	略称	原因遺伝子
毛細血管拡張性運動失調症	AT	ATM
色素性乾皮症	XP	A～G の相補群ごとに異なる
ファンコーニ貧血	－	関与する遺伝子は 16 種類ある。
重症複合免疫不全症	一部が SCID と呼ばれる	IL-2，-4，-7，-9，-15 のレセプターに共通する γc 鎖の遺伝子

A：毛細血管拡張性運動失調症

B： AT は常染色体性劣性遺伝疾患

C，D：劣性遺伝疾患の場合，両親が二人とも一対の遺伝子の一方に変異を持つ場合にのみ患者が生まれる可能性がある。

E：変異 ATM を a，正常 ATM を A で示すと，両親は Aa で，生まれる子供の遺伝子型は母親－父親の順で示すと，A-A，A-a，a-A，a-a の場合がある。健康な場合は，A-A，A-a，a-A の 3 通りで a を持つのはそのうちの 2 つの場合のため，2/3 が正答となる。

Ⅱ　ア－6　　イ－3　　F－7　　G－5　　H－5

注）変異によるタンパク質の変化を予測する設問

F，G，Hはコドンを読み解くことを求めている。表を参照しつつ，塩基が示すコドンを選択する。

ア：8711÷3＝2903.6667 から，8711 番目の塩基は 2904 番目のコドンに含まれることが判断される。

F，G：8709÷3＝2,903 から，2903 番目のコドンは 8,709 番目の塩基で終わり，8710～8712 番目の 3 塩基，GAG が 2,904 番目のコドンである。AT 患者の ATM では 2904 番目のコドン内の 8711 番目の塩基が A から G に置き換わるため，GGG となる。これに伴うアミノ酸の変化は，グルタミン酸からグリシンとなる。

H： 3 で割り切れない数の塩基が欠失または挿入された場合，コドンの読み枠が変化する。このような変異をフレームシフト変異という。

イ：正常 ATM 遺伝子の 7511 番目から 7530 番目の塩基（UGAAGAGAGACGGAAUGAAG）は，AT 患者では（UGAAGACGGAAUGAAG）となる。コドンの区切りは正常 ATM の 7512 番目と 7513 番目に存在するため，正常 ATM のコドン区切りをスペースで示すと（UG AAG AGA GAC GGA AUG AAG）となり，この範囲に終始コドンは存在しない。一方，AT 患者の ATM のコドンの区切りをスペースで示すと，（UG AAG ACG GAA UGA AG）となる。7522 番塩基から始まるコドンは終止コドンとなるため，アミノ酸として翻訳されるのは 7521 塩基までとなり，アミノ酸長は 7521÷3＝2507 となる。

Ⅲ　Ⅰ－2　　ウ－2　　J－4　　K－3

注）DNA 損傷のうち，二重鎖切断の影響に関する設問

Ⅰ：放射線は DNA 主鎖切断や塩基への障害を起こす。鎖切断は一本鎖切断と二本鎖切断に分けられる。前者は正確に修復が可能であるが，後者は修正エラーや修正不能を起こし突然変異や細胞の死に結

びつくため，細胞死に関して最も重要な損傷と考えられる。塩基への障害は直接あるいはDNAの誤修復などを介して，種々の突然変異をひき起こすが，二重鎖切断に比べ高い割合で修復される。

ウ：1 Gyのγ線は，細胞1個当たり約40個のDNA二本鎖切断（DSB）を生じる。

J：ATMはDSBによって引き起こされる損傷応答の制御に関わる。主たる機能はリン酸化であり，キナーゼと呼ばれる一群のリン酸化酵素の一つである。リン酸化されるタンパク質には，p53，Chk1やChk2含む多数のタンパク質が含まれる。

K：p53は放射線などのストレスを受けた細胞においては，そのユビキチン化が抑制されて分解されず核内に蓄積し，またリン酸化やアセチル化などの修飾を受けて安定化し，活性化する。活性化したp53は補助因子の助けを借りて目的の遺伝子の転写を誘導する。