

平成 28 年度技術士試験「原子力・放射線部門」対策講座

平成 27 年度技術士一次試験「原子力・放射線部門」

— 専門科目の解説 —

一般社団法人 日本原子力学会 教育委員会 技術者教育小委員会 監修

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

高橋直樹（とりまとめ、執筆）

鈴木惣十、斎藤拓人、上野隆、阿部定好、山中淳至、谷川聖史、

中村大司、佐々木俊一、峯忠治^{※1}（執筆、順不同）

※1：(株)E&Eテクノサービス(株)（日本原子力研究開発機構出向中）

1. はじめに

平成27年10月12日に、原子力・放射線部門を含む20の技術分野において技術士第一次試験が実施された。原子力・放射線部門では161名が受験し、95名が合格している（合格率59.0%）。平成27年度の技術士第一次試験は、昨年同様、基礎、適性、専門の3科目から構成され、総て択一式問題である。

試験のレベルは、「基礎科目」及び「専門科目」は4年生大学の自然科学系学部の専門教育程度とされている[1]。本稿では、このうち原子力・放射線部門における「専門科目」35問について、問題と解答の解説を示すものである。

2. 専門科目の試験内容

平成28年度 技術士第一次試験実施要領によれば、試験は「**技術士となるのに必要な科学技術全般にわたる基礎的学識**及び技術士法第四章の規定の遵守に関する**適性**並びに**技術士補となるのに必要な技術部門についての専門的学識**を有するか否かを判定し得るよう実施する。」と規定されて規定されており、基礎科目、適性科目及び専門科目の3科目について行われる。このうち、専門科目については、「**技術士補として必要な当該技術部門に係る基礎知識及び専門知識について問うよう配慮する**」とされている[1]。

表-1に技術士一次試験の概要（科目、解答時間、配点）及び合否判定基準を示す。基礎科目、適性科目及び専門科目については、それぞれ50%以上の正解を持って合格とすると規定されており、幅広い知見と技術者倫理及び高い専門性が要求されている。とりわけ、専門科目（原子力・放射線部門）の出題範囲は「原子力、放射線、エネルギー」の3つの分野と規定[2]されており、合計35問の問題のうちから25問を選択して解答を行う。第一次試験の過去問については技術士会ホームページの試験・登録情報[3]に掲載されているので、受験者諸氏においては必ず一度は目を通して頂きたい。

平成22年度から平成27年度の専門科目の設問について、分野別設問数を表-2に、平成27年度の専門科目の設問分野と概要を表-3に示す。なお、表-2のうち平成22年度から26年度までの問題分析については、日本原子力学会ホームページの「原子力・放射線部門」技術士情報ページ 技術士試験対策講座に掲載されている第一次試験対策講

座を参照願いたい[4]。

まず、表-2より、分野毎の設問数は、平成22年度以降ほぼ同じであり、原子力からは15問～17問、放射線からは14問、エネルギーからは4～6問であり、この傾向については平成28年度以降の試験においても分野別出題数は大きく変わらないと予想される。

解答に当たっての注意事項として、全35問から任意の25問を選択してマークシートの番号を塗りつぶして解答することとなるが、26問以上解答した場合には失格となるので十分注意すること。自分に限ってこんなミスはしないと思っけていても、毎年多くの受験者が失格者となっていることから、解答後に回答数が25問であることをしっかり確認すること。また、解答に当たっては一通り問1～35について目を通し、確実に解答できるものについては「◎」、自信はないが解答できそうなものについては「○」、全く手が付けられないものには「×」印を付け、確実に得点を獲得していくことが重要である。時として、問1から順に問題を解き始め、時間オーバーで確実に得点できる問題が解けず不合格になったという事例も多々あることから、戦略的に問題に望む必要がある。解答に当たっては、取捨選択による確実かつ着実な得点獲得がポイントといえる。

3. 専門科目の出題傾向と対策

平成27年度の技術士第一次試験「原子力・放射線部門」の専門科目における出題傾向を以下のとおり分析する。

まず、全体的な出題傾向として、計算問題の占める割合については、表-2に示すように、直近5ヵ年（平成22年～26年度）が10～14問であるのに対して、平成27年度も13問であり、平成28年度においても同様の傾向になると考えられる。具体的に計算問題を見てみると、いずれの問題も一般的な知識や単位を揃える（問題文の条件として与えられている単位と回答として求められている単位を四則計算して合わせる）ことにより、容易に解答できる問題であり、計算問題は難しいという先入観を持つことなく、果敢にチャレンジして欲しい。

以下に、専門科目の3分野（原子力分野、放射線分野、エネルギー分野）における出題傾向と対策を示す。なお、表-3に示すように過去の問題と類似の出題も散見されることから、事前に過去問題（少なくとも直近5年分）をしっかり解いて理解しておくことが望ましい。

(1) 原子力分野

原子力分野においては、表-3に示すように、平成27年度は、炉物理（4問）、工学的安全性・設計（5問）、核燃料サイクル（3問）、運転・制御（1問）、原子炉（1問）、法令（1問）及び保障措置（1問）の合

計16問が出題された。原子力分野からの出題数は、平成22年度以降の出題数とほぼ同数である。例年、多少の変化はあるものの、炉物理、プラント設計、運転制御からの出題が多くを占める傾向は変わらないと考えられるので、これらに関する初等テキストにより、基礎知識と代表的な計算問題をおさえておくとともに、「原子力がひらく世紀」[5]や白書類[6][7][8]で社会的関心の高いキーワードを抽出しておく、ATOMICA[9]等で知識を整理しておくことが望ましい。

(2) 放射線分野

放射線分野では、表-3に示すように、平成27年度は、放射線の基礎(9問)、放射線防護(3問)及び放射線利用(2問)の合計14問の出題となっている。出題範囲及び内容は前年度と比較して大きな変化はなく、放射線に関連した基礎的な理論や現象を問う問題が多く出題されている。これらの出題範囲及び内容は、原子力工学を専攻とする大学専門教育での一般的な教科書のカバーする範囲であるとともに、第1種放射線取扱主任試験と共通する内容を多く含むことから、第1種放射線取扱主任試験問題に向けて市販されている参考書[10][11]や問題集[12]を利用することも効果がある。

(3) エネルギー分野

エネルギー分野では、表-3に示すように、平成27年度は、エネルギー(4問)、世界情勢(1問)の合計5問が出題されている。全体的な出題傾向は前年度から大きく変わっていない。エネルギーに関する問題については、エネルギー資源や地球温暖化に関わる問題が例年出題されていることから、白書や統計等の文献及び関連する情報を新聞やニュース、インターネットを通して幅広く情報収集することが望ましい。

【参考文献】

- [1] 「平成28年度技術士第一次試験実施大綱」, 科学技術・学術審議会技術士分科会
http://www.engineer.or.jp/c_topics/004/attached/attach_4376_1.pdf
- [2] 文部科学省告示第136号「技術士法施行規則の規定に基づき、第1次試験の専門科目の範囲及び第2次試験の選択科目の内容を定める件の全部を改正する件」, 平成15年8月18日
- [3] 公益社団法人日本技術士会ホームページ「過去問題(第一次試験)」, 試験・登録情報
http://www.engineer.or.jp/c_categories/index02021.html
- [4] 一般社団法人日本原子力学会ホームページ「原子力・放射線部門」技術士情報ページ 技術士試験対策講座
http://www.aesj.or.jp/gi_jyutsushi/taisaku_index.html
- [5] 原子力がひらく世紀(改訂3版, 2011年3月)一般社団法人日本原子力学会 原子力教育・研究特別専門委員会編
- [6] 「原子力白書」, 原子力委員会
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index.htm>
- [7] 「原子力安全白書」, 旧原子力安全委員会
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/hakusyo/hakusyo_kensaku.htm
- [8] 「エネルギー白書」, 経済産業省資源エネルギー庁
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>
- [9] 「原子力百科事典」ATOMICA
<http://www.rist.or.jp/atomica/atomica.html>
- [10] 「放射線概論」, 通商産業研究社
- [11] 「放射線取扱の基礎」, 日本アイソトープ協会
- [12] 「放射線取扱主任者試験問題集 第1種」, 通商産業研究社

表-1 一次試験の概要及び合否判定基準

試験科目	解答時間	配点	合否判定基準
基礎科目	1時間	15点満点	50%以上の得点
適性科目	1時間	15点満点	50%以上の得点
専門科目	2時間	50点満点	50%以上の得点

表-2 平成22年度から平成27年度「専門科目」の分野別設問数

分野	平成22年度			平成23年度			平成24年度		
	正誤 空白	計算	合計	正誤 空白	計算	合計	正誤 空白	計算	合計
原子力	10	5	15	11	5	16	11	5	16
放射線	7	7	14	8	6	14	7	7	14
エネルギー	4	2	6	4	1	5	3	2	5
合計	21	14	35	23	12	35	21	14	35

分野	平成25年度			平成26年度			平成27年度		
	正誤 空白	計算	合計	正誤 空白	計算	合計	正誤 空白	計算	合計
原子力	13	3	16	11	6	17	10	6	16
放射線	9	5	14	9	5	14	9	5	14
エネルギー	3	2	5	2	2	4	3	2	5
合計	25	10	35	22	13	35	22	13	35

表-3 平成27年度「専門科目」の設問分野と概要

設問	分野	概要	計算問題	過去5年間の出題 類：類似問題 同：同一問題	
Ⅲ-1	原子力	炉物理			
Ⅲ-2		炉物理	^{135}Xe の毒作用	○	
Ⅲ-3		工学的安全性・設計	機器の故障確率	○	類：H22,25,26
Ⅲ-4		原子炉	様々な原子炉の特徴		
Ⅲ-5		炉物理	中性子と物質の相互作用		
Ⅲ-6		炉物理	ウラン燃料燃焼による ^{239}Pu の生成	○	
Ⅲ-7		工学的安全性・設計	伝熱面から水への熱伝達		
Ⅲ-8		運転・制御	BWR・PWRの運転・制御		
Ⅲ-9		工学的安全性・設計	冷却材喪失に伴う燃料損傷時のFPの挙動		
Ⅲ-10		工学的安全性・設計	経年劣化現象		類：H22
Ⅲ-11		核燃料サイクル	ガラス固化体の発生量	○	
Ⅲ-12		核燃料サイクル	ウラン濃縮	○	
Ⅲ-13		工学的安全性・設計	圧力容器の最少肉厚	○	類：H23
Ⅲ-14		核燃料サイクル	燃料・廃棄物の輸送・貯蔵		類：H24
Ⅲ-15	放射線	放射線の基礎	重水素の結合エネルギー	○	
Ⅲ-16		放射線の基礎	雨水中の ^3H の放射能	○	
Ⅲ-17		放射線の基礎	加速器		
Ⅲ-18		放射線の基礎	放射平衡		
Ⅲ-19		放射線の基礎	光子と物質との相互作用		類：H24,26
Ⅲ-20		放射線の基礎	荷電粒子の衝突阻止能	○	類：H24
Ⅲ-21		放射線の基礎	放射線のエネルギー測定		類：H23,24
Ⅲ-22		放射線の基礎	放射線計数装置の計数率		類：H24,25
Ⅲ-23		放射線の基礎	化学反応を利用した放射性核種の分離		類：H24
Ⅲ-24		放射線防護	ヒトの確定的影響		同：H23
Ⅲ-25		放射線防護	実効半減期		類：H22,23
Ⅲ-26		放射線防護	体内の ^{40}K による被ばく	○	
Ⅲ-27		放射線の基礎	放射性物質の輸送	○	類：H22,24,26
Ⅲ-28		放射線の基礎	放射線の利用		類：H25
Ⅲ-29	エネルギー	エネルギー	日本における電源運用	○	類：H22,23
Ⅲ-30		エネルギー	日本におけるエネルギー政策		
Ⅲ-31		世界情勢	天然ガスの埋蔵量、生産量		
Ⅲ-32		エネルギー	二酸化炭素排出量	○	
Ⅲ-33	エネルギー	地球環境問題		類：H22,25	
Ⅲ-34	原子力	法令	法令（原災法、原賠法）		類：H23
Ⅲ-35		保障措置	保障措置		類：H22,24

4. 第一次試験【専門科目】の解説

以下に平成26年度に出題された原子力・放射線部門【専門科目】の設問と解答のポイントを示す。

Ⅲ-1 発電用原子炉（熱中性子炉）の臨界に関する次の記述のうち、最も適切なものはどれか。

- ① 臨界状態では無限増倍率（ k_{∞} ）は1とならなければならない。
- ② 高速中性子は全て減速されてから核分裂に寄与する。
- ③ 制御棒による中性子の吸収は主として熱化される前の減速途中で起きる。
- ④ 燃料棒の内部では中性子のエネルギーはマクスウェル分布に従う。
- ⑤ 低出力から定格出力までの任意の中性子束（任意の出力）で臨界にすることができる。

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、⑤

- ① 不適切：発電用原子炉（熱中性子炉）では、原子炉という有限な体系からの中性子の**実効増倍率（ k_{eff} ）が1のとき臨界となる。**
- ② 不適切：高速中性子は**全て減速しなくとも核分裂に寄与することが可能**であり、問題文中の「全て減速されてから」という箇所が不適切である。具体的例として、U235やPu239は高速中性子によって核分裂を起こし、その際に軽水炉での核分裂反応に比べてより多くの中性子が放出される。高速炉ではこの時に放出される中性子により増殖を行っている。なお、低濃縮ウラン体系の熱中性子炉ではU-238の高速核分裂の寄与も大きい。
- ③ 不適切：熱中性子炉では熱中性子による核分裂を利用しているため制御棒には熱中性子吸収断面積の大きいカドミウムの合金、炭化ホウ素、ハフニウムなどを使用している。
- ④ 不適切：中性子は水中で減速され原子の熱運動と平衡状態になり、そのエネルギーはマクスウェル分布に従う。また、燃料棒内では低エネルギーの中性子ほど核分裂性核種に多く吸収されるため、熱中性子スペクトルはマクスウェル分布よりも高エネルギー側にシフトする
- ⑤ 正しい：発電用原子炉（熱中性子炉）では、低出力から定格出力までの任意の中性子束（任意の出力）において、臨界にすることができる。

Ⅲ-2 次の記述の、に入る語句の組合せとして最も適切なものはどれか。

核分裂生成物の中には、熱中性子吸収断面積の大きい核種がある。これは熱中性子領域で核分裂をする軽水炉に特有のをもち核種である。 ^{135}Xe はそのような核種の1つであり、主として ^{135}I のにより生成される。原子炉の停止後、直ちに中性子束がゼロになると仮定する。 ^{135}Xe の原子数は、 ^{135}Xe の消滅と ^{135}I の生成とのバランスを表す次式で与えられ、原子炉停止後に増加した後減少する。

$$[Xe] = [Xe]_0 \exp(-\lambda_x t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_x} [I]_0 \{ \exp(-\lambda_x t) - \exp(-\lambda_1 t) \}$$

ここで、 $[Xe]$ と $[I]$ はそれぞれ ^{135}Xe と ^{135}I の原子数、 $[Xe]_0$ と $[I]_0$ はそれぞれ原子炉停止直前における ^{135}Xe と ^{135}I の原子数である。また、 λ_x と λ_1 はそれぞれ ^{135}Xe と ^{135}I の壊変定数である。

いま、 $\lambda_x / \lambda_1 = \alpha$ 、 $[Xe]_0 / [I]_0 = \beta$ とおく。上式から、 $t = -\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_x} \ln \frac{1}{\alpha(1 + \beta - \alpha\beta)}$ のとき $\frac{d[Xe]}{dt} = 0$ となり、 $[Xe]$ は最大値をとる。

さらに、 $\ln \frac{1}{\alpha(1 + \beta - \alpha\beta)} = 0.31$ 、 $\ln 2 = 0.69$ 、 ^{135}Xe と ^{135}I の半減期をそれぞれ9.1時間、6.6時間とすれば、原子炉停止後にて $[Xe]$ が最大になる。

	エ	イ	ウ
① 共鳴吸収	β 壊変	11時間	
② 毒作用	α 壊変	11時間	
③ 毒作用	β 壊変	8時間	
④ 共鳴吸収	α 壊変	8時間	
⑤ 毒作用	β 壊変	11時間	

【解答と解説】

正解（最も適切な組み合わせのもの）は、⑤

問題文より、「熱中性子吸収断面積が大きい核種」、「熱中性子領域で核分裂する軽水炉」といったキーワードより、熱中性子領域で核分裂する軽水炉で熱中性子吸収断面積が大きい核種がどのような影響を及ぼすかを考えれば、空欄に入るべき答えが「**毒作用**」であることが分かる。

^{135}Xe は、 ^{135}I の **β 壊変**により生成する。

※Xeの原子番号は54、Iの原子番号は53であることから、原子番号が1増えて、質量数が135のまま変化がないことから、 **β 壊変**であることが分かる。

^{135}Xe の半減期 $T_{1/2} = 9.1$ 時間、 ^{135}I の半減期 $T_{1/2} = 6.6$ 時間より、 λ_x 及び λ_1 は、それぞれ、以下のように示すことができる。（ $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ より）

$$\lambda_x = 0.69 / 9.1 \quad \dots (1)$$

$$\lambda_1 = 0.69 / 6.6 \quad \dots (2)$$

$$\ln(1 / \alpha(1 + \beta - \alpha\beta)) = 0.31 \quad (\text{問題文より}) \quad \dots (2)$$

以上、(1) ~ (3) を以下の式に代入すると

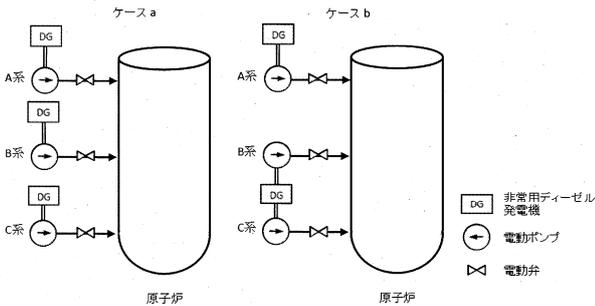
$$t = (1 / \lambda_1 - \lambda_x) \times \ln(1 / \alpha(1 + \beta - \alpha\beta)) = 1 / (0.69 / 6.6 - 0.69 / 9.1) \times 0.31 \approx 10.8 \text{ となり、原子炉停止後 11 時間後に } [Xe] \text{ が最大となる。}$$

以上のことから、正解は⑤となる。

Ⅲ-3 発電用軽水炉の非常用炉心冷却系は、外部電源喪失のもとで、冷却材喪失事故が発生した場合に、非常用ディーゼル発電機を電源として、待機している電動ポンプを起動し、通常時は閉鎖している電動弁を開いて、冷却水を原子炉へ直接注入する。A系とB系の2系統の非常用炉心冷却系を有する原子炉に、同一の機器から構成されるC系を増設して3系統の非常用炉心冷却系を備えることとした。このとき、C系統にも独自のディーゼル発電機を設置する場合（ケース a）とC系統のディーゼル発電機をB系統と共用する場合（ケース b）とを検討した。この変更によって原子炉への注水に失敗する確率の変化として、最も適切な組合せはどれか。

なお、系統の信頼度を決定する要素としては、非常用ディーゼル発電機、電動ポンプ、電動弁のみであるとする。ここで、各機器の作動失敗は全て互いに独立した事象とし、作動失敗の確率を以下のように仮定する。

- ・非常用ディーゼル発電機の起動失敗の確率 2×10^{-3} /要求
- ・電動ポンプの起動失敗の確率 4×10^{-3} /要求
- ・電動弁の開動作失敗の確率 4×10^{-3} /要求



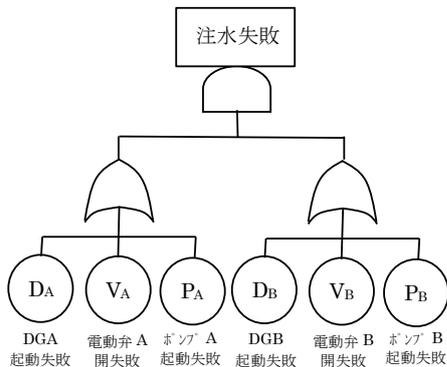
	ケース a	ケース b
①	100分の1	5分の1
②	50分の1	変わらない
③	25分の1	4分の1
④	25分の1	10分の1
⑤	100分の1	25分の1

【解答と解説】

正解（最も近い組み合わせのもの）は、①

注水が失敗することを頂上事象として、増設前、ケース a、ケース b のフォールトツリーを示すと下記ようになる。

増設前



注水失敗事象は、ブール代数では以下のように表現される。

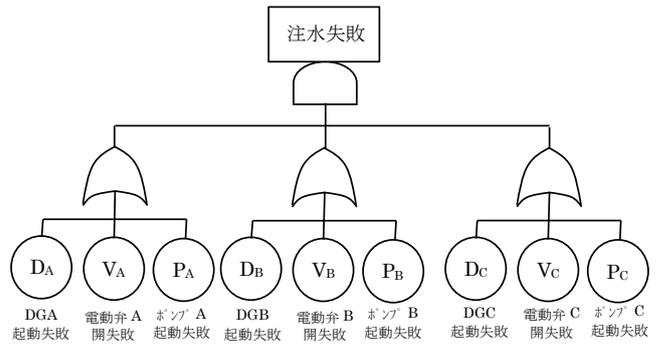
$$(D_A + V_A + P_A) \times (D_B + V_B + P_B)$$

したがって、失敗確率は

$$(2 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3})$$

$$\times (2 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3}) = 1 \times 10^{-4}$$

ケース a



注水失敗事象は、ブール代数では以下のように表現される。

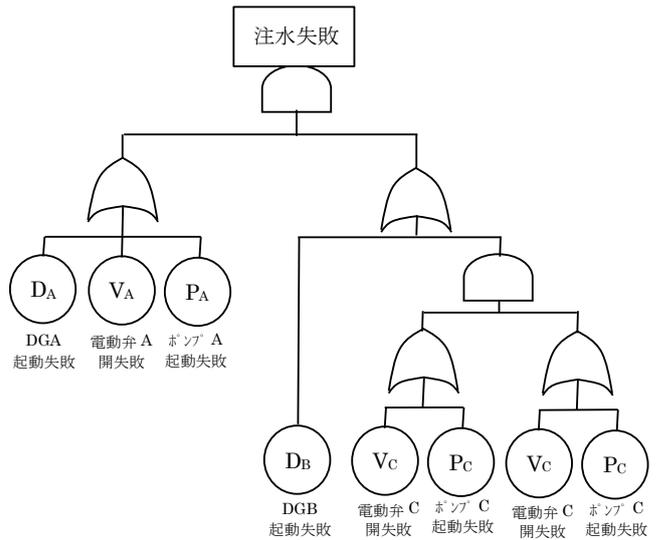
$$(D_A + V_A + P_A) \cdot (D_B + V_B + P_B) \cdot (D_C + V_C + P_C)$$

したがって、失敗確率は

$$(2 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3}) \times (2 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3}) \times (2 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3}) = 1 \times 10^{-6}$$

$$\text{ケース a 失敗確率} / \text{増設前失敗確率} = 1 \times 10^{-6} / 1 \times 10^{-4} = \underline{1/100}$$

ケース b



注水失敗事象は、ブール代数では以下のように表現される。

$$(D_A + V_A + P_A) \cdot [D_B + (V_C + P_C) \cdot (V_C + P_C)]$$

したがって、失敗確率は

$$(2 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3}) \times [2 \times 10^{-3} + (4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3}) \times (4 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-3})] \approx 2 \times 10^{-5}$$

$$\text{ケース b 失敗確率} / \text{増設前失敗確率} = 2 \times 10^{-5} / 1 \times 10^{-4} = \underline{1/5}$$

したがって正解は、①

Ⅲ-4 発電用原子炉としては軽水炉が主流となっているが、そのほかにもさまざまな型式の原子炉が利用又は開発されている。原子炉の特徴に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 低濃縮ウランを燃料とする軽水炉の炉心では、主にウランとプルトニウムの両方が核分裂に寄与している。
- ② 重水減速重水冷却炉では、燃料に天然ウランを使うことができる。
- ③ 黒鉛減速炭酸ガス冷却炉では、燃料に天然ウランを使うことができる。
- ④ 黒鉛減速ヘリウム冷却高温ガス炉では、高温の熱源として利用できる特徴を活かして、化学工業分野等の発電以外の応用が可能である。
- ⑤ ナトリウム冷却高速増殖炉では、炉心燃料としてプルトニウムを、燃料増殖の役割を果たすブランケット燃料として濃縮ウランを用いる。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、⑤

- ① 正しい：低濃縮ウラン（3～5%）を燃料とする軽水炉の炉心では、燃料として装てんされた燃料中の²³⁵Uが中性子（熱中性子）を吸収すると、不安定な状態となり、二つの原子核に分裂するとともに中性子（高速中性子）を放出する。また、炉心では、²³⁸Uが中性子を吸収し、 $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} + e^- \rightarrow ^{239}\text{Np} + e^- \rightarrow ^{239}\text{Pu} + e^-$ の反応により²³⁹Puが新たに生成する。生成した²³⁹Puの一部は原子炉内にて中性子を吸収し、核分裂を起こす。一般に、²³⁵Uの濃縮度3%の低濃縮ウラン燃料を燃焼度3000MWD/tで燃焼させた後の燃料中に²³⁵Uが約1%燃え残り、²³⁸Uの約1.8%が²³⁹Puとなり、さらにそのうち約0.8%が原子炉内にて核分裂し、残りの約1%が使用済み燃料中に存在する。
- ② 正しい：重水減速重水冷却炉の代表例として、「CANDU（Canadian Deuterium and Uranium Reactor）炉」が挙げられる。重水減速重水冷却炉は、現状技術の下で最も中性子経済の良い発電炉であり、その最大の特徴は天然ウラン酸化物を燃料として用いることができる点にある。
- ③ 正しい：黒鉛減速炭酸ガス冷却炉とは、中性子の減速材として黒鉛、冷却材として炭酸ガスを使用する原子炉である。この炉系の代表的なものとして、我が国初の商業用原子力発電所である日本原電株の東海第一発電所（東海第二発電所はBWR）が挙げられる。当該原子炉では、天然ウランが燃料として使用される。我が国において原子力発電を導入するに当たって、天然ウランを燃料とし、安全性が高いこと及び海外において建設・運転経験があったことから、その導入が図られた。なお、当該原子炉は、出力の割には大型であり、経済性が低いといった課題がある。
- ④ 正しい：黒鉛減速ヘリウム冷却炉とは、中性子の減速材として黒鉛、冷却材としてヘリウムガスを使用する原子炉である。この炉系の代表的なものとして、高温工学試験研究炉（HTTR）が挙げられる。HTTRでは、約1000℃という高温でも安定しており、放射化されないという性質を持つヘリウムガスを用いて原子炉から非常に高い熱を取り出し、発電を行うだけでなく、高い熱を利用した水素ガスの製造、排熱を利用した地域暖房や温水を利用した養殖や野菜の栽培、高温蒸気を利用した化学合成や石油精製などへの利用が期待されている。
- ⑤ 不適切：ナトリウム冷却高速増殖炉とは、液体金属ナトリウムを冷却材として使用する原子炉であり、代表例として「もんじゅ」や「常陽」が挙げられる。冷却材として、最も一般的な冷却材である水を使用した場合には、軽元素（水素）を多く含むことから、高速中性子が減速されてしまうため、 η 値が大きく増殖に有利なエネルギー領域での運転が困難となる。そのため、高速増殖炉では中性子減速能力が小さい液体金属ナトリウムが減速材として使用される。炉心中心部には核分裂反応を引き起こすプルトニウムとウランの混合酸化物からなるMOX燃料が装てんされ、その周囲には燃料増殖（新たなPuの生成）を目的としたブランケット燃料が設置される。ブランケット燃料には、中心部に配置されたMOX燃料からの中性子を吸収し²³⁹Puを効率的に生成させるため、劣化ウランが用いられる。

Ⅲ-5 中性子と物質の相互作用に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 中性子が物質中の原子核と反応を起こす確率に物質の原子核数密度を掛け合わせた量を巨視的断面積といい、長さの逆数の次元を持っている。
- ② 全断面積は散乱断面積と吸収断面積の和である。
- ③ 熱核分裂性の物質の核分裂断面積は、熱中性子領域では中性子のエネルギーにほぼ反比例する。
- ④ 共鳴吸収断面積は、中性子のエネルギーと物質の温度に依存する。
- ⑤ ウラン238の核分裂反応にはしきい値がある。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、③

- ① 正しい：中性子の微視的断面積（マイクロ断面積） $[\text{cm}^2]$ とは、（単位時間・原子核1個当たりの反応率）÷（単位時間・単位面積当たりの入射中性子数）で定義され、中性子と当該物質中の原子との反応確率を示すものである。一般的にマイクロ断面積の単位にはb（パーン：1b=10⁻²⁴cm²）が用いられる。これに対して、巨視的断面積（マクロ断面積）とは、前述した微視的断面積 $[\text{cm}^2]$ に物質の原子核密度（単位体積当たりの原子核数 $[/\text{cm}^3]$ ）を掛け合わせたものであり、長さの逆数の次元 $[[\text{cm}^2] \times [/\text{cm}^3] = [/\text{cm}]$ ）を持っている。
- ② 正しい：中性子の反応には、中性子と媒質との関わりとして物質に吸収され新たな核種に変わる吸収反応とエネルギーの授受のみで核種が変化しない反応がある。前者の反応確率は吸収断面積で示され、後者の反応確率は散乱断面積で示される。また、吸収断面積と散乱断面積の和（すなわち、全ての核反応断面積）を全断面積という。
- ③ 不適切：熱中性子領域の中性子と物質との核分裂断面積は、中性子の速度が大きくなるに従って、速度（v）に反比例して小さくなる（1/v法則）。これは、中性子が原子核の近くを通過する時間が1/vに比例して短くなるため捕獲されにくくなるためである。よって、問題文のエネルギー（速度の2乗）にほぼ反比例するという記載は不適切である。
- ④ 正しい：燃料の温度が上昇するとドップラー効果により中性子吸収断面積の共鳴幅が広がり、共鳴のピーク値が低下するため、中性子が吸収されやすくなる。
- ⑤ 正しい：²³⁸Uは、熱中性子領域から広いエネルギー範囲にわたり、核分裂断面積は数mb程度以下であり核分裂反応

を起こしにくい。しかし、MeV 級の高エネルギー領域では、核分裂断面積が数 b 程度の大きさになるため、核分裂を引き起こす。よって、 ^{238}U の核分裂反応にはしきい値がある。

Ⅲ-6 天然ウランを燃料とする原子炉が臨界であるとき、中性子は主としてウラン235とウラン238に吸収される。ウラン235に吸収される中性子数、ウラン238に共鳴吸収領域で吸収される中性子数、ウラン238に熱エネルギー領域で吸収される中性子数の相対割合は、1 : 0.254 : 0.640である。この原子炉で1 kgのウラン235が燃焼するとき、生成されるプルトニウム239の量 [kg] に最も近いものはどれか。ただし、中性子の漏えい及びプルトニウムの核分裂による減少はないものとする。

① 0.879 ② 0.894 ③ 0.909 ④ 0.914 ⑤ 0.919

【解答と解説】

正解（最も近い値のもの）は、③

^{238}U の共鳴吸収領域、熱エネルギー領域における中性子吸収反応は、捕獲反応が支配的であり、本設問では中性子を吸収した ^{238}U はすべて ^{239}Pu になると考えてよい。また、中性子を吸収した ^{238}U は核分裂だけでなく中性子捕獲によって核変換されるものも燃焼とみなして計算する。

^{238}U に吸収される中性子の数[個]は、

$$\frac{1000}{235} \times (\text{アボガドロ数})$$

であるため、 ^{238}U に吸収される中性子の数[個]は、

$$\frac{1000}{235} \times (\text{アボガドロ数}) \times (0.254 + 0.640)$$

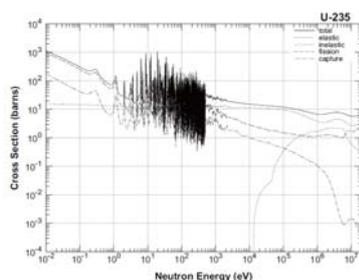
であり、 ^{239}Pu は同数生成される。したがって、 ^{239}Pu 生成量[kg]は、

$$\frac{239}{235} \times (0.254 + 0.640) \approx 0.9092$$

となり、③が最も近い。

なお、問題に与えられている情報からは、 ^{238}U の「燃焼」には核分裂だけでなく中性子捕獲によって ^{239}Pu に転換される分も含められていると考えないと正解が導けない。

実際には熱中性子領域での ^{238}U の中性子捕獲は、核分裂に対して無視できるようなレベルではなく（約 20%程度、右図参照）、正確に核分裂分だけを「燃焼」と考えると、Pu-239 の相対的な生成量はより大きくなる。



また問題文中では、 ^{238}U の熱中性子吸収量が共鳴吸収の約 3 倍ともなっており、極端に中性子スペクトルがソフトな特殊な炉型を想定しているようである。

Ⅲ-7 伝熱面から水への熱伝達に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 伝熱面の温度が水の飽和温度よりも低いとき、自然対流による伝熱が起こる。これを自然対流熱伝達という。
- ② 伝熱面の温度が水の飽和温度を超えると沸騰が生じるが、水の温度が飽和温度よりも低い場合、気泡は伝熱面から離脱すると消滅する。これをバルク沸騰という。
- ③ 沸騰している状態では、伝熱面の温度のわずかな上昇に対して伝熱面表面からの熱流束が大幅に増加する範囲がある。これを核沸騰領域という。
- ④ 熱流束が急激に増加した後さらに伝熱面の温度が上昇し続けると、熱流束が低下する現象が起こる範囲がある。これを遷移沸騰領域という。
- ⑤ 熱流束が低下する現象が起きた後に伝熱面の温度がさらに上昇すると、伝熱面が薄い蒸気膜で覆われ、蒸気膜内の熱伝導で伝わる熱量により気液界面で蒸発が生じる。これを膜沸騰領域という。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、②

- ① 正しい：伝熱面の温度が飽和温度（沸点）よりも低い温度では、流体中に生じた温度差により、密度差が形成される。このために浮力が生じて流動が発生する（対流）。この温度差による浮力のみ起因する対流を自然対流といい、自然対流による熱伝達を自然対流熱伝達という。
- ② 不適切：液体のバルク温度が飽和温度よりも低い温度における沸騰状態をサブクール沸騰という。サブクール沸騰にて発生した気泡は、伝熱面から離脱すると低温液中で冷却されることにより凝縮し、縮小あるいは消滅する。一方、問題文中に記載されているバルク沸騰とは、液体のバルク温度（伝熱面から離れたところの温度）が飽和温度に達している状態における沸騰状態のことをいい、飽和沸騰ともいわれる。
- ③ 正しい：加熱面の発泡点を核として、独立した気泡が発生する沸騰状態を核沸騰という。気泡が発生するとその攪乱効果により熱伝達率は著しく増大し、伝熱面温度のわずかな上昇によっても伝熱面熱流束は急激に増大する。熱伝達が増大すると、気泡発生点となる核が非常におおくなるため、熱伝達は急上昇する。
- ④ 正しい：伝熱面の温度を上昇させてゆくと熱流束（液体への熱の移動）が増加していくが、温度上昇がある範囲に達するとこれまで増加していた熱流束が低下する現象が起こる。この状態を遷移沸騰といい、伝熱面が部分的に沸騰蒸気で覆われ、液体への熱流束が低下するために、伝熱面の温度上昇が促進される。
- ⑤ 正しい：伝熱面の加熱温度がさらに上昇してゆくと、伝熱面の全面を沸騰蒸気が覆い、その蒸気膜と液体との接触面から直接沸騰が起こる。このような状態を膜沸騰といい、膜沸騰領域では熱伝達特性は改善し、熱流束は再び上昇する。

- Ⅲ-8 我が国に導入されている加圧水型原子炉（PWR）と沸騰水型原子炉（BWR）の運転・制御に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。
- ① PWRでは、燃焼に伴う反応度の補償を主に冷却材に混ぜるホウ素濃度を調整するケミカルシムによって行う。
 - ② PWRでは、制御棒クラスタのうち原子炉の緊急停止に使用される制御棒は、プラント運転中は全引き抜き状態にある。
 - ③ BWRでは、冷却材の再循環流量を調整し、冷却材の密度変化に伴う中性子吸収の変化を利用して原子炉の出力を制御する。
 - ④ BWRでは、ウォーターロッドが導入されている燃料集合体があるが、これは、チャンネルボックス内部の沸騰状態にある領域の中性子減速効果を高めるためである。
 - ⑤ 100%容量のタービンバイパス弁を有するBWRでは、タービン蒸気加減弁が全開した場合でも、原子炉を停止することなく所内単独運転に移行できる。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、③

- ① 正しい：ケミカルシム（化学制御）とは、原子炉冷却材に熱中性子吸収の大きなホウ酸を溶解し、ホウ酸の濃度を調節することにより反応度を制御する方法をいう。加圧水型軽水炉（PWR）では、原子炉の出力を制御するため炉心に制御棒を挿入すると出力分布にひずみを生じるため、これを緩和するためにケミカルシムが併用されている。また、燃料の燃焼に伴う時間的に緩やかな反応度低下に対して補償を行う役割を担っている。
- ② 正しい：加圧水型軽水炉（PWR）の制御棒クラスタは、約20本の吸収材棒（ロッドレット）をスパイダ構造によって束ねたものであり、燃料集合体に設けられた制御棒案内シムブルに各ロッドレットが挿入され、一体の制御棒クラスタは燃料集合体一体に対して用いられる。実際の制御では、炉心内の対称位置にある4体ないし8体の制御棒クラスタを「バンク」としてグループ化し、バンクを最小単位として引き抜き挿入が制御される。（個々の制御棒クラスタを個別に制御するシステムは設けられていない。）バンクには、制御バンクと停止バンクがあり、制御バンクの制御棒クラスタは、運転中にはほぼ全引抜ではあるが、一部はわずかに挿入されている（「バイト」と称する）。問題文中の「原子炉の緊急停止に使用される制御棒」とは停止バンクを指し、停止バンクは運転中には常に全引き抜き状態にある。
- ③ 不適切：沸騰水型原子炉（BWR）では、冷却材（水）再循環流量を調節することにより、**冷却材の密度変化に伴う「中性子減速効果の変化」を利用**した原子炉の出力調整が行われる。
- ④ 正しい：BWRの燃料集合体には、中を水が流れる構造にしたジルカロイ製の中空管（ウォーターロッド）を備えたものがある。ウォーターロッドは、チャンネルボックス内の沸騰状態にある領域の出力分布の平坦化及びボイド反応度係数の改善を目的としている。
- ⑤ 正しい：タービンバイパス弁は、原子炉の起動時や停止時等に、原子炉で発生した主蒸気を、直接、復水器へ排気して、原子炉圧力を制御するものである。仮に、タービン蒸気加減弁が全開となった場合でも主蒸気を当該弁を介して復水器へ排気（タービンを迂回）することにより、原子炉を停止させることなく所内単独運転に移行することが可能

である。

- Ⅲ-9 軽水炉の冷却材が失われる事故時には、燃料被覆管の損傷並びに燃料ペレットの溶融などによって核分裂生成物が主冷却系に放出される。その核分裂生成物は主冷却系から格納容器内へと移行し、環境へと放出される可能性がある。この過程について、次のうち最も不適切なものはどれか。
- ① 高温の水蒸気とジルカロイ製燃料被覆管が接触すると、急激なジルコニウム-水反応によって水素が発生する。
 - ② 核分裂生成物の揮発性の高い成分にはセシウム、テルル、ヨウ素が含まれ、これらは燃料から放出されやすい。
 - ③ 核分裂生成物のうちクリプトン、キセノンは希ガスであり、これらが燃料ペレットから燃料棒内に放出されると燃料棒内圧上昇の原因となる。
 - ④ 放射性物質の移行経路の途上に冷却水がある場合、ブルスクラビング効果によってガス及びエアロゾル状の放射性物質の一部が除去される。
 - ⑤ 燃料から放出された放射性物質は、温度が高い構造物表面や床面へ沈着しやすく、放射性物質の一部が除去される。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、⑤

- ① 正しい：高温の水蒸気と燃料被覆管（ジルカロイ）が接触すると、 $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ の反応により水素ガスが発生する。この反応は、被覆管の温度が高温（900℃以上）になると反応割合が大きくなる。
- ② 正しい：原子炉内に装填された核燃料の燃焼に伴い生成する核分裂生成物のうち、セシウム（Cs）、テルル（Te）、ヨウ素（I）は、揮発性の高い成分である。これら揮発性核種は燃料から放出されるものの、通常、これら燃料被覆管内に閉じ込められているため、大量に環境中に放出されることはない。しかし、福島第一原子力発電所における事故では、被覆管が損傷したため、これら揮発性核種が大量に環境中に放出された。
- ③ 正しい：原子炉内に装填された核燃料の燃焼に伴い生成する核分裂生成物のうち、クリプトン（Kr）、キセノン（Xe）は、希ガスに分類される。これら核種は、燃料内で生成した後、ガス気泡を形成しながら移動し、ペレットの体積膨張（スワリング）に寄与する。また、燃料外に放出されると燃料棒内圧を上昇させるとともに、ギャップ熱伝達率を低下させて燃料温度を上昇させるなど、燃料の挙動に大きな影響を与える。
- ④ 正しい：ブルスクラビング効果とは、燃料被覆管の損傷並びに燃料溶融により、格納容器内に放出されたエアロゾル状又はガス状の核分裂生成物を液中に通すことにより、除去されることをいう。具体的には、炉心冷却機能が全て失われ、炉心損傷が発生し、燃料被覆管又は燃料中に閉じ込められていたエアロゾル状又はガス状の核分裂生成物（以下、「エアロゾル・ガス」という）が原子炉圧力容器内へ放出される。炉心損傷により放出されたエアロゾル・ガスは圧力抑制プール内へと導入され、プール水により洗浄されることにより、エアロゾル・ガス中の核分裂生成物が水へ捕獲され、外部への放出抑制効果を得ることができる。
- ⑤ 不適切：燃料から放出された揮発性の高い放射性物質は、原子炉冷却系、格納容器内へと移行するが、**移行した放射性物質**

質は原子炉冷却系と比べて低温な格納容器内にて構造物表面や床面への沈着が加速され、放射性物質の一部が除去される。

Ⅲ-10 長期にわたる原子力発電所の運転において、原子炉、冷却系などを構成する機器や配管、容器等に、磨耗やひび割れが生じるなど、材料の性能は時間と共に劣化するため、これら予見される劣化について計画的な保全対策が施される。経年劣化現象に関する次の説明のうち、最も不適切なものはどれか。

① 応力腐食割れ：金属に腐食環境下で応力が働いている場合、その腐食環境にない場合より低い応力で破壊する現象で、材料因子、環境因子（溶存酸素）、応力因子（引張応力）のいずれかの要因により発生する現象。

② 配管内の減肉：配管の内面で、水流等による機械的作用である浸食や化学的作用である腐食が発生して、配管の肉厚が減少する現象。

③ 中性子照射脆化：金属材料が中性子の照射を受けて結晶構造の中に微小な欠陥等が生じ、靱性（粘り強さ）が低下する現象。

④ 絶縁低下：発電機や変圧器、ケーブルなどで絶縁物として使用されているゴム、プラスチックなどが熱や放射線などの影響を受けて、絶縁性能に低下が生じる現象。

⑤ コンクリート中の中性化：コンクリート中の水酸化カルシウムが二酸化炭素と反応して、強度が低下する現象。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、①

- ① 不適切：応力腐食割れは、材料因子、環境因子（溶存酸素）、応力因子（引張応力）の3因子が重なった際に発生し、これら3因子のうち1因子以上取り除けばその発生を防ぐことが可能である。本問題においては、「いずれかの因子により発生する」という箇所が不適切な記述となっている。
- ② 正しい：配管の内面が減肉する要因として、配管内部を流れる流体（例えば、水や蒸気等）が高速で流れている場合、水や蒸気が配管内面を激しくこすることとなり、機械的な磨耗が生じる。この現象を「エロージョン」という。この他に配管内を流れる流体（例えば、酸等）の化学的な作用により配管表面が腐食・減肉したりすることもある。
- ③ 正しい：鉄を原子レベルで見た場合、粘り強い状態では鉄原子は規則正しく並んでいるのに対して、中性子を受けると、鉄原子がはじき出されて隙間ができたり、不純物の塊ができたりすることにより、規則正しさが乱れ粘り強さが低下する。この現象を「中性子脆化」という。
- ④ 正しい：ケーブルの被覆材として使用されているゴムやプラスチックは、長期間熱や放射線環境下にさらされるとゴムやプラスチックの基本構造である高分子同士の架橋が切れ、柔軟性や強度が低下し、絶縁不良を引き起こす。
- ⑤ 正しい：中性化とは、硬化したコンクリート中の水酸化カルシウム $[Ca(OH)_2]$ が大気中の二酸化炭素 (CO_2) の作用によって、除々に炭酸カルシウム $(CaCO_3)$ になり、コンクリートのアルカリ性が低下（pHが低下）し、強度が低下する現象をいう。

Ⅲ-11 日本において、1人が1年間に消費する電力に伴って発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の量 $[cm^3]$ に最も近い値はどれか。ただし、総発電量に対する原子力発電量の割合を25%、原子燃料の燃焼度を 4.5×10^4 MW・日/MTU、年間の発電量を 9.0×10^8 kWh、日本の人口を1.2億人、発電効率を33%、ガラス固化体の発生量を1.3本/MTU、ガラス固化体の1本の体積を 1.5×10^5 cm^3 とする。

① 1 ② 2 ③ 3 ④ 4 ⑤ 5

【解答と解説】

正解（最も近い値のもの）は、①

問題文の条件から1人が1年間に消費する電力に伴って発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の量（体積）は、以下の式から求められる。

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{9.0 \times 10^8}{24} \right) \times \left(\frac{1}{1.2 \times 10^8} \right) \times (0.25) \\
 & \text{年間発電量[MWd/年]} \quad \text{一人当たり[1/人]} \quad \text{原子力の割合} \\
 & \times (100/33) \quad \times 1/ (4.5 \times 10^4) \quad \times 1.3 \\
 & \text{発電効率} \quad \text{燃焼度[1/MWd/MTU]} \quad \text{ガラス固化体} \\
 & \quad \text{発生量[本/MTU]} \\
 & \times 1.5 \times 10^5 \\
 & \text{ガラス固化体体積} \\
 & \text{[cm}^3\text{/本]} \\
 & \approx 1.0 \text{ cm}^3 \\
 & \text{となり、正解は①となる。}
 \end{aligned}$$

Ⅲ-12 ウラン濃縮工場では、天然ウランを濃縮ウランと劣化ウランに分離する。工場全体の物質収支は、ウランの同位体をウラン235とウラン238の2種類とすると、次の2つの式で表すことができる。

・ウラン全体量の収支平衡 $F = P + W$

・ウラン235の収支平衡 $f \times F = e \times P + d \times W$

ここで、記号の意味は次の通りである。

F：天然ウラン供給量 [トン]

P：濃縮ウラン製品量 [トン]

W：劣化ウラン発生量 [トン]

f：天然ウラン中のウラン235の重量百分率 [%]

e：製品ウラン濃縮度 [%]

d：劣化ウラン中のウラン235の重量百分率 [%]

濃縮度4.5%のウラン製品1トンを得るために必要な天然ウランの重量 [トン] に最も近い値はどれか。ただし、天然ウラン中のウラン235の重量百分率を0.7%、劣化ウラン中のウラン235重量百分率を0.22%とする。

① 5 ② 7 ③ 9 ④ 11 ⑤ 13

【解答と解説】

正解（最も近い値のもの）は、③

問題文より、

F：天然ウランの供給量=Xトン

P：濃縮ウランの製品量=1トン

W：劣化ウランの発生量=X-1トン

※F=P+WよりW=F-P=X-1

f：天然ウラン中のウラン235の重量百分率：0.7%

e：製品ウラン濃縮度：4.5%

d：劣化ウラン中のウラン235の重量百分率：0.22%

となる。

ウラン 235 の収支平衡式 ($f \times F = e \times P + d \times W$) に上記の値を代入すると

$0.7 \times X = 4.5 \times 1 + 0.22 \times (X - 1)$ となり、これを X について解くと、 **$X \approx 8.9$** となることから、正解は③となる。

Ⅲ-13 円筒部を有する鋼製の压力容器において、円筒の内半径を 6 m、最高使用圧力を 10 MPa とするとき、必要な最小限の円筒部の厚さ [mm] に最も近いものはどれか。ただし、2 次元平面応力状態を仮定し、(压力容器は薄肉容器として考えられる。)、鋼の降伏強さを 500 MPa とする。

① 60 ② 120 ③ 180 ④ 240 ⑤ 300

【解答と解説】

正解 (最も近い値のもの) は、②

必要な最小限の円筒部の厚さを t mm、設計圧力 (最高使用圧力) を P MPa (本問題では、10 MPa)、円筒の内径を D mm (本問題では、内半径が 6 m ということなので、内径は $6 \text{ m} \times 2 \times 1000 \text{ mm/m} = 1.2 \times 10^4 \text{ mm}$)、鋼の降伏強さを σ_A MPa (本問題では、500 MPa) とすると、必要な最小限の円筒部の厚さ (t) は、以下に示す式により算出することができる。

$$t = (P \times D) / 2 \sigma_A = (10 \times 1.2 \times 10^4) / (2 \times 500) = \underline{120 \text{ mm}}$$

となることから、正解は②となる。

Ⅲ-14 原子力発電所の燃料や放射性廃棄物の日本国内での輸送、貯蔵に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

① 原子燃料が盗難にあつて悪用されたり、輸送の途中で妨害を受け輸送の安全が損なわれたりすることを未然に防止するための措置として、原子燃料の輸送日時、経路などの情報は、国際間の取決めに基づく国の指導により、事前に公表できない。

② 使用済燃料は放射線量が高くまた発熱をともなうので、通常、発電所内で一定期間冷却したあと、専用の輸送容器に収納し、使用済燃料専用輸送船を使用して再処理工場の至近の港まで海上輸送される。

③ 実用発電用原子炉及び核燃料施設等に係る新規規制基準においては、使用済燃料の貯蔵に対する防護対策の強化が要求されており、PWRでは、大量の使用済燃料ピット水の漏えいに備えて、可搬型ポンプによるスプレー冷却対策を施している例がある。

④ 原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、濃縮廃液や紙・布などの焼却灰はセメントやアスファルトと混ぜて固化し、ドラム缶に詰めて原子力発電所内の放射性固体廃棄物貯蔵庫に保管する。

⑤ 高レベル放射性廃棄物 (ガラス固化体) を封入したステンレス製キャニスターは、貯蔵ピット内の取納管に納められ、水中で保管される。

【解答と解説】

正解 (最も不適切なもの) は、⑤

- ① 正しい：原子燃料の輸送に当たっては、輸送中における燃料の盗取や輸送上の安全性を確保するとの観点から、輸送日時や経路等の情報は機微情報として一般に公開されることはない。
- ② 正しい：原子炉内から取り出された使用済燃料は、崩壊熱による発熱量及び放射線量が高いため、輸送ができるよ

うな発熱量及び線量になるまでの間、原子炉近傍に設置された使用済燃料プール中にて一定期間冷却がなされる。冷却された使用済燃料は使用済燃料専用の輸送容器内へ収納され、安全に輸送を行うために二重船殻構造・耐衝突構造を有する専用の輸送船に輸送容器を積み込み、再処理工場近傍の港まで海上輸送された後、輸送容器専用の車両を用いて再処理工場まで陸上輸送される。

- ③ 正しい：使用済燃料の貯蔵に際しては、使用済燃料貯蔵プールの防護対策の強化が要求されている。具体的には、地震等の発生により使用済燃料プール内の水の大量漏えいした場合であっても、使用済燃料の冷却と放射線の遮蔽を確保するため、大型送水ポンプ等の可搬設備を用いたプールへの水の供給やスプレー冷却設備を用いた使用済燃料の冷却対策について検討がなされている。
- ④ 正しい：原子力発電所の運転に伴って発生する比較的低い放射能レベルの放射性廃棄物のうち、固体廃棄物は、焼却や圧縮を行い容積を減らして (「減容」という) ドラム缶に詰め、その中で、セメントやアスファルトを用いた固化処理される。また、放射能の低い液体廃棄物は、水分を蒸発させて濃縮し、前述した固体廃棄物と同様にドラム缶にセメントやアスファルトとともに供給され固化処理される。このようにして製造された固化体をセメント固化体・アスファルト固化体といい、サイト内の放射性廃棄物貯蔵庫にて保管され、最終的には浅地中処分される。
- ⑤ 不適切：高レベル放射性廃棄物をガラスとともに融解し、ステンレス製のキャニスター (容器) へ注入・固化させたものをガラス固化体という。ガラス固化体は、貯蔵用のピットに収納され、地層処分に適した発熱量に達するまでの間 (概ね 30~50 年間)、**空冷にて冷却・保管される。**

Ⅲ-15 重水素の原子核の結合エネルギー [MeV] に最も近い値はどれか。ただし、重水素、中性子、陽子、電子の質量をそれぞれ、2.014102 u、1.008665 u、1.007276 u、0.000549 u とする。ここで、u は原子質量単位で、1 u = 931.5 MeV である。

① 1.11 ② 2.22 ③ 5.55 ④ 7.77 ⑤ 9.99

【解答と解説】

正解 (最も近い値のもの) は、②

重水素の原子核は、陽子 (Z) 1 個と中性子 (N) 1 個から構成され、原子核の周りを電子 (E) が 1 個回っている。

重水素の質量欠損は、

$$Z (\text{陽子の数}) \times \text{陽子の質量} + N (\text{中性子の数}) \times \text{中性子の質量} + E (\text{電子の数}) \times \text{電子の質量} - \text{重水素の質量}$$

から、以下のとおり算出される。

$$\text{重水素の質量欠損} = 1 \times 1.007276 \text{ u} + 1 \times 1.008665 \text{ u} + 1 \times 0.000549 \text{ u} - 2.014102 \text{ u} = 0.002388 \text{ u}$$

重水素の結合エネルギーは、 $0.002388 \text{ u} \times 931.5 \text{ MeV/u} \approx \underline{2.22 \text{ MeV}}$

Ⅲ-16 地球上では、宇宙線と地球大気との核反応により様々な放射性核種が生成している。その代表的な核種の1つがトリチウム (^3H) である。トリチウムの濃度は、(軽)水素 (^1H) に対するトリチウムの原子数の比 [^3H の原子数/ ^1H の原子数] で表されることがあり、 10^{-18} を1トリチウム単位(記号TU)とする。雨水中の濃度はおよそ10 TUである。これを水1リットル当たりに含まれるトリチウムの放射能 [Bq] にすると、最も近い値はどれか。ただし、トリチウムの半減期を12年、水の分子量を18、アボガドロ定数を $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 、 $\ln 2 = 0.69$ とする。

- ① 0.60 ② 1.2 ③ 1.8 ④ 2.3 ⑤ 4.5

【解答と解説】

正解(最も近い値のもの)は、②

(1) 雨水1リットル中に含まれるトリチウムの個数は、

$$1000/18[\text{mol}] \times 6.0 \times 10^{23}[\text{1/mol}] \times 10\text{TU} \times 10^{-18}[\text{1/TU}]$$

$$\times 2[\text{個}] = 6.7 \times 10^8[\text{個}]$$

(2) トリチウムが1秒当たり1個崩壊する確率[1/s]、すなわち崩壊定数(λ)は、 $\lambda = \ln 2/T$ (半減期)より、

$$\lambda = 0.69 / (12 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60) = 1.8 \times 10^{-9}[\text{1/s}]$$

とそれぞれ算出される。

(1) 及び (2) より、雨水1リットル中に含まれるトリチウムの個数を $6.7 \times 10^8[\text{個}]$ 、1秒あたりトリチウム1個が崩壊する確率を $1.8 \times 10^{-9}[\text{1/s}]$ とすると、雨水1リットル中に含まれるトリチウムが1秒あたり崩壊する個数(すなわち、放射能)は、

$$6.7 \times 10^8 \times 1.8 \times 10^{-9} = \underline{1.2[\text{1/s} = \text{Bq}]}$$
 と算出される。

Ⅲ-17 加速器に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① コッククロフト・ワルトン加速器は、整流器とコンデンサーを多段に組み合わせた電圧増倍回路を利用して高電圧を作り、その電位差を利用してイオンを加速する。
- ② 陽子加速用の直線加速器は、多数の中空円筒型電極を同軸直列に並べ、これらの電極間に発生させた高周波電場によって加速する。
- ③ シンクロトロンでは、加速粒子のエネルギーが大きくなるに従って、磁場の強度を弱くし、加速粒子が常に一定軌道を周回するようにしている。
- ④ サイクロトロンでは、静磁場内で半円形の2つの電極(ディー電極)を向い合せ、加速粒子が電極間を通過するたびに電位差をかけて加速する。
- ⑤ タンデム型ファン・デ・グラーフ加速器では、加速管の中央部に絶縁ベルト又はベレットチェーンを回転させて作った高電位電極を置き、初めに負イオンを加速し、電極を通過後、薄膜などで電子をはぎ取り、正イオンにして再び加速する。

【解答と解説】

正解(最も不適切なもの)は、③

- ① 正しい: コッククロフト・ワルトン加速器は、整流器とコンデンサーを積み重ねて高電圧を発生させ、その電位差を用いてイオンを加速させる加速器である。なお、コンデンサーと整流器の耐電圧の制限から2MV程度までの加速に用いられる。
- ② 正しい: 直線加速装置は、荷電粒子を加速するための円筒状の電極を直線状に並べた形の加速器であり、線形加速器とも呼ばれる。加速原理としては、円筒形の電極に交互に

正負の一定周波数の高電圧を掛けた際に生じる、電場が加速位相となった場合に加速され、逆位相の時には円筒電極中を進むことを繰り返すことにより、電極間の電場を通るたびに加速される。そのため、円筒電極の長さは後段へ行くほど長くなる。

- ③ 不適切: 加速粒子のエネルギーが大きくなると相対的効果で加速粒子の質量が見かけ上大きくなるため、一定の電場で加速されている場合に得られる加速度が小さくなり、電極を通過する周期にずれが生じるため、サイクロトロンでは十分な加速が得られなくなる。これらの問題を解決するため、**加速とともに磁場を変化**させ、同一軌道を周回させるようにしたものがシンクロトロンである。
- ④ 正しい: 荷電粒子が一樣磁場中で運動すると円を描く。サイクロトロンは、この一樣磁場中にD型の電極を対向させ電極間で加速させると、荷電粒子は加速されるたびに軌道半径が大きくなってゆくことを利用した加速器である。ただし、上述したように加速粒子のエネルギーが大きくなるに従い、十分な加速効果が得られなくなるため、加速できるエネルギーは陽子で20MeV程度である。
- ⑤ 正しい: タンデム型ファン・デ・グラーフ加速器は、絶縁ベルトに電荷を載せ高電圧部に電荷を運び高電圧を発生させる装置である。通常、2MV~10MV程度の電圧で使用されるファン・デ・グラーフ加速器に負イオンを高電圧部に向かって加速させ、高電圧部の荷電変換部で電子を剥ぎ取り正イオンに変換し、再び加速させる装置である。ファン・デ・グラーフ加速器に比較して、高いエネルギーを得ることが可能である。

【参考文献】

- [1] 飯田博美編;放射線概論 第1種放射線試験受験用テキスト;通商産業研究社

Ⅲ-18 親核種の半減期 T_1 が、その娘核種の半減期 T_2 に比べて十分に長く ($T_1 \gg T_2$)、娘核種は最初存在しなかったとする。 T_2 より十分に長い時間が経過し永続平衡が成り立っているときの親核種及び娘核種の放射能をそれぞれ A_1 、 A_2 とすると、この場合、近似的に成り立つ式として最も適切なものは、次のうちどれか。

- ① $A_1/A_2 = 1$
- ② $A_1/A_2 = T_1/T_2$
- ③ $A_1/A_2 = T_2/T_1$
- ④ $A_1/A_2 = T_2/(T_1 + T_2)$
- ⑤ $A_1/A_2 = T_2/(T_1 - T_2)$

【解答と解説】

正解(最も適切なもの)は、①

永続平衡の状態とは、大雑把に表現するならば、親核種の崩壊にはほぼ連続して娘核種が崩壊する状態であり、ある時間間隔での親核種の崩壊数と娘核種の崩壊数がほぼ一致する。すなわち、放射能の定義から、親核種の放射能と娘核種の放射能は一致するため、①が正しい。

Ⅲ-19 単色エネルギーの光子と物質との相互作用の結果、放出される放射線（二次過程を含む。）のエネルギースペクトルに関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 光電効果で放出される光電子は、線スペクトルである。
- ② 光電効果の二次過程で放出される特性X線は、線スペクトルである。
- ③ コンプトン効果で放出される反跳電子は、連続スペクトルである。
- ④ 電子対生成で放出される陽電子は、線スペクトルである。
- ⑤ 電子対生成で放出された陽電子が、運動エネルギーをほぼ失って軌道電子と合体・消滅した際に放出される光子は、線スペクトルである。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、④

- ① 正しい：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を光電効果といい、飛び出す電子を光電子という。光電子のエネルギーは入射する光子のエネルギーと軌道電子のエネルギーの差で示される線スペクトルとなる。
- ② 正しい：上述した光電効果により軌道電子が飛び出した結果として内殻に空孔が生じる。ただし、この状態は不安定なため、より安定した状態になろうと外側の殻から電子が移動して空孔を埋めることを「緩和」という。緩和によりエネルギー準位の高い外殻から、よりエネルギー準位の低い内殻へと電子が移動する際、外殻と内殻との差に相当するエネルギーが余分となる。この余分となったエネルギーを特性X線として放出する。なお、この時放出される特性X線は、上述したように外殻と内殻との差に相当するエネルギーの差に相当するものであることから、線スペクトルとなる。
- ③ 正しい：光子が物質中の電子の衝突により、入射した光子はエネルギーの一部を失って進行方向を変えて散乱する。この時失われた光子のエネルギーを電子が受け取りはじき出される。エネルギーの一部を失い散乱した光子を散乱光子といい、エネルギーを受け取りはじき出された電子を反跳電子という。入射した光子から失われるエネルギーは一定ではないため、そのエネルギーを受け取り、飛び出る反跳電子のエネルギーは連続スペクトルとなる。
- ④ 不適切：光子が原子核の強い電場に吸収され、電子と陽電子を生み出す反応を電子対生成という。電子と陽電子の質量を生成するためには、光子のエネルギーは電子の静止エネルギーの2倍の1.022MeV以上が必要である。なお、上記反応で反応する陽電子は連続スペクトルを有する。
- ⑤ 正しい：④の電子対生成にて生成した陽電子は、物質中でエネルギーを失って止まる際、物質中の電子と結合し、ポジトロニウムを形成する。このポジトロニウムは短時間で消滅し、この時、2本の0.511MeV（線スペクトル）のγ線を反対方向に放出して消滅する。これを電子消滅といい、電子消滅により発生するγ線を消滅γ線という。

Ⅲ-20 荷電粒子の衝突阻止能がベーテの式で記述できるエネルギー領域において、運動エネルギーが同じである陽子とα粒子の衝突阻止能の比として最も適切なものはどれか。

- ① 1 : 2
- ② 1 : 4
- ③ 1 : 8
- ④ 1 : 16
- ⑤ 1 : 32

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、④

阻止能とは、標準物質内を通過する際に単位距離あたりに失われるエネルギーであり、その単位はJ/mで示される。

題意より荷電粒子の衝突阻止能 (S_{col}) については、以下に示すBethe（ベーテ）の式にて与えられる。

$$S_{col} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m v^2} n Z \left\{ \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta)} - \beta^2 \right\} \quad (1) \text{ 式}$$

ここで、

- z : 荷電粒子の核電荷数
- e : 電子の素電荷
- ε₀ : 真空中の誘電率
- m : 荷電粒子の質量
- v : 荷電粒子の速度
- m : 荷電粒子の質量
- n : 物質の単位堆積当たりの原子数
- Z : 物質の原子番号
- I : 原子の平均電離エネルギー
- β : v/c (c : 光速)

ここで、荷電粒子の質量をm、運動エネルギーをE (E=1/2mv²) であることから、1/v²=m/2E) とすると、

$$S_{col} = \frac{de}{dx} \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 m}{E} \quad (2) \text{ 式}$$

と表すことができる。

上記(2)式より、衝突阻止能は荷電粒子の電荷(z)の2乗に比例し、荷電粒子の質量(m)に比例し、運動エネルギー(E)に反比例することが分かる。

よって、陽子とα粒子の衝突阻止能の比は以下に示すとおりとなる。**(陽子 : α粒子 = 1 : 16)** よって、正解は④となる。

	荷電粒子の電荷	運動エネルギー	荷電粒子の質量	衝突阻止能の比
	2乗に比例	反比例	比例	
陽子	1	(運動エネルギーが同一との条件)	1	陽子 : α 粒子 = $1^2 \times 1 : 2^2 \times 4$ = 1 : 16
α 粒子	2		4	

III-21 放射線のエネルギー測定における放射線の種類と検出器の組合せについて、次の記述のうち最も適切なものはどれか。

- ^{137}Cs の γ 線のエネルギーをGM計数管で測定する。
- 高速中性子のエネルギーを BF_3 比例計数管で測定する。
- ^3H の β 線のエネルギーをNaI(Tl)シンチレーション検出器で測定する。
- ^{241}Am の α 線のエネルギーをSi表面障壁型半導体検出器で測定する。
- 数十keV程度のX線のエネルギーを空気等価壁電離箱で測定する。

【解答と解説】

正解 (最も適切なもの) は、④

- 不適切： ^{137}Cs の γ 線は主に、662keVが主たる放出 γ 線であり、一般にこのエネルギーを測定するにはNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いる。GM計数管は γ 線のエネルギーは測定できないため、不適切である。
- 不適切： BF_3 比例計数管は、内部のBと熱中性子により $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応が起き、信号を検出する。高速中性子ではないため、不適切である。
- 不適切： ^3H は非常にエネルギーの低い β 線を放出する核種であるため、試料を検出器の内部に入れて測定しなければならぬ。代表的な方法として、試料を気体状にし、電離箱や比例計数管内で測定する方法と、液体シンチレーション法であり、不適切である。
- 正しい： ^{241}Am は α 線を放出する核種であり、Si表面障壁型半導体検出器は α 線や重荷電粒子を測定するため、適切である。
- 不適切：空気等価壁電離箱はX線ではなく、数十keVから2MeV程度のガンマ線場で使用されるため、不適切である。

III-22 放射線計数装置で、ある試料をT分間測定してNカウントの計数値を得た。次に、試料を除いて、バックグラウンドを T_b 分間測定して N_b カウントの計数値を得た。このとき、この試料の1分間当たりのバックグラウンドを差し引いた正味の計数率の統計誤差として最も適切なものはどれか。

- $\frac{\sqrt{N+N_b}}{T+T_b}$
- $\frac{\sqrt{\frac{N}{T^2}-\frac{N_b}{T_b^2}}}{T}$
- $\frac{\sqrt{N}}{T} + \frac{\sqrt{N_b}}{T_b}$
- $\frac{\sqrt{N+N_b}}{\sqrt{T^2+T_b^2}}$
- $\frac{\sqrt{\frac{N}{T^2}+\frac{N_b}{T_b^2}}}{T}$

【解答と解説】

正解 (最も適切なもの) は、⑤

試料測定時とバックグラウンド測定時の係数率と統計誤差は測定時間で割ることで以下のように求まる。

$$\text{試料測定時} \quad : \quad \frac{N}{T} \pm \frac{\sqrt{N}}{T}$$

$$\text{バックグラウンド測定時} \quad : \quad \frac{N_b}{T_b} \pm \frac{\sqrt{N_b}}{T_b}$$

正味の係数率の持つ統計誤差(σ)は、試料測定時とバックグラウンド測定時の統計誤差の2条和の平方根より求められ、以下のようになる。

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N}}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_b}}{T_b}\right)^2} = \sqrt{\frac{N}{T^2} + \frac{N_b}{T_b^2}}$$

III-23 化学反応を利用した放射性核種の分離に関する次の記述のうち、最も不適切なものとはどれか。

- $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ を塩酸で溶解すると、 ^{14}C を含む気体が発生する。
- $^{24}\text{NaOH}$ を溶解した水溶液に硫化水素ガスを吹き込むと、 ^{24}Na を含む沈殿が生成する。
- $^{64}\text{Cu}^{2+}$ を含む水溶液に亜鉛の金属片を入れると、 ^{64}Cu が亜鉛の表面に析出する。
- $^{110m}\text{Ag}^+$ を含む水溶液に塩酸を加えると、 ^{110m}Ag を含む沈殿が生成する。
- $^{133}\text{BaCl}_2$ を溶解した水溶液に硫酸イオンを加えると、 ^{133}Ba を含む沈殿が生成する。

【解答と解説】

正解 (最も不適切なもの) は、②

- 正しい： $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + ^{14}\text{CO}_2$ の反応により、 ^{14}C を含む二酸化炭素(気体)が発生する。
- 不適切： $2^{24}\text{NaOH} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow ^{24}\text{Na}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ の反応により、 ^{24}Na を含む $^{24}\text{Na}_2\text{S}$ が生成するが、 Na_2S は水に対して可溶であるため沈殿は生成しない。(参考： Na_2S の水への溶解度は、18.6 g/100 mL (20 °C))
- 正しい：CuとZnのイオン化傾向を比べると、Znの方がイオン化傾向が大きい(電子を放出し、陽イオンになりやすい)ため、金属Znが $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ の反応により、陽イオンである Zn^{2+} となる。一方、 Cu^{2+} は $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ の反応により放出された電子(2e^-)を受け取り、 $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ の反応により金属Zn表面に ^{64}Cu を含む金属Cuが析出する。
- 正しい： $^{110m}\text{Ag}^+ + \text{HCl} \rightarrow ^{110m}\text{AgCl} + \text{H}^+$ の反応により、 ^{110m}Ag を含む $^{110m}\text{AgCl}$ の白色沈殿が生成する。
- 正しい： $^{133}\text{BaCl}_2 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow ^{133}\text{BaSO}_4 + 2\text{Cl}^-$ の反応により、 ^{133}Ba を含む $^{133}\text{BaSO}_4$ の白色沈殿が生成する。

III-24 短時間(数週間以内)の γ 線による全身被ばくによって生じるヒトの確定的影響について、次のうち最も適切なものはどれか。

- およそ0.05 Gyの被ばくによって、リンパ球が減少する。
- およそ0.1 Gyの被ばくによって、造血機能が低下する。
- およそ0.5 Gyの被ばくによって、皮膚に紅斑が現れる。
- およそ1 Gyの被ばくによって、脱毛が起こる。
- およそ7 Gyの被ばくによって、ほとんどのヒトが死亡する。

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、⑤

- ① 不適切：リンパ球は、放射線感受性が高いのが特徴であり、被ばく直後からリンパ球は減少するが、一般にリンパ球減少のしきい線量は0.25Gyといわれている。
- ② 不適切：造血臓器は、赤血球、白血球などの血液細胞を産生する臓器であり、骨髄やリンパ節がこれに当たる。骨髄のうち造血機能を持つ赤色骨髄は0.5Gy程度被ばくすると、造血機能が低下し、血球の供給が停止する。
- ③ 不適切：皮膚は表面から深部に向かって、表皮、真皮、皮下組織の3層構造となっており、表皮の最下層には細胞分裂が盛んに行われ放射線感受性の高い基底細胞層が存在する。基底細胞層にて細胞分裂した皮膚細胞は表面に向かって供給され、皮膚表面は新しい細胞に置き換わる。皮膚に放射線が照射された場合、3Gy以上で脱毛、3~6Gyで紅斑・色素沈着、7~8Gyで水泡形成、10Gy以上で潰瘍形成、20Gy以上で難治性潰瘍の形成となることが知られている。
- ④ 不適切：上述したように脱毛は3Gy以上で発生する。
- ⑤ 正しい：大量の放射線を全身に被ばくした場合、白血球の減少による抵抗力の低下と血小板の減少による出血傾向の増大により、死に至る。一般的に1.5Gyが死亡のしきい線量といわれており、3~5Gyの被ばくをした場合、半数の人が死亡し、7~10Gyでは被ばくした人のほぼ全数が死亡するといわれている。

Ⅲ-25 物理的半減期60日の放射性核種が体内に取り込まれてから120日後に、体内に残留しているこの放射性核種の放射能を測定したところ、放射能は8分の1に減少していた。この放射性核種の生物学的半減期〔日〕として最も適切なものはどれか。

① 60 ② 90 ③ 120 ④ 180 ⑤ 240

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、③

実効半減期 (Te)、生物学的半減期 (Tb)、物理的半減期 (Tp) の間には、以下に示す関係が成立する。

$$1/Te = 1/Tb + 1/Tp \quad \dots (1) \text{ 式}$$

ここで、問題文に着目すると120日後に体内に残留している放射性核種の放射能を測定すると1/8であったということから、120日後には実効半減期として3半減期 ($1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8$) が経過しているといえる。すなわち、実効半減期は、120日/3半減期 = 40日/半減期と分かる。

実効半減期40日、物理的半減期60日を(1)式に代入し、Tbを求めると **Tb=120日** と求められる。

Ⅲ-26 私たちの身体にはカリウムが含まれており、食物摂取による増加量と代謝及び嬲変による減少量がほぼバランスされ、時間的にほぼ一定に保たれている。簡単のため、体重60kgの人に3,600Bqの⁴⁰Kが身体内に均一に分布しており、1.3MeVのβ⁻線（平均エネルギー0.56MeV）のすべてが吸収されると仮定すると、このβ⁻線による年間の平均被ばく吸収線量〔mGy〕として最も適切なものはどれか。ただし、⁴⁰Kのβ⁻嬲変の分岐比を89%、1eV=1.6×10⁻¹⁹Jとする。

① 0.02 ② 0.08 ③ 0.12 ④ 0.15 ⑤ 0.18

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、④

⁴⁰Kの放射能：3600Bq
β⁻線の平均エネルギー：0.56MeV
⁴⁰Kのβ⁻嬲変の分岐比：89%
1eV=1.6×10⁻¹⁹J
体重：60kg

との条件から、1秒当たりの吸収線量 (Gy=J/kg) を算出すると以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} & 3600\text{Bq} (3600\text{s}^{-1}) \times 89\% \times 0.56\text{MeV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \times 10^6\text{eV/MeV} \div 60 \\ & \text{kg} \\ & = 3600 \times 0.89 \times 0.56 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^6 \div 60 \\ & \approx 4.78 \times 10^{-12} \text{ Gy/s} = 4.78 \times 10^{-9} \text{ mGy/s} \end{aligned}$$

問題では、1年あたりの吸収線量を問うていることから、
 $4.78 \times 10^{-9} \text{ mGy/s} \times 60\text{s/min} \times 60\text{min/hour} \times 24\text{hour/day} \times 365\text{day/year}$
 $= 0.1508 \text{ mGy/year} \approx 0.15 \text{ mGy/year}$

Ⅲ-27 厚さ3cmの鉛容器に入れた¹³⁷Cs線源を輸送容器に梱包してL型輸送物（容器表面線量率が5μSv/hを超えない。）として運搬する場合に、運搬できる最大の放射能〔MBq〕として最も適切なものはどれか。

ただし、¹³⁷Csから輸送容器表面までの最短距離は30cmであり、遮へい効果は鉛容器についてのみ考慮し、輸送容器については無視できるものとする。また、¹³⁷Csの1cm線量当量率定数を0.0927μSv・m²・MBq⁻¹・h⁻¹、¹³⁷Csに対する鉛の半価層は0.75cmとする。

① 0.67 ② 1.2 ③ 20 ④ 39 ⑤ 77

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、⑤

¹³⁷Csに対する鉛の半価層が0.75cmであることから、厚さ3cmの容器に¹³⁷Cs線源を入れた場合、¹³⁷Csからの放射線は1/16 (=1/2⁴) に減衰する。(3cm ÷ 0.75cm = 4) であることから、半価層4つ分に相当。半価層とは放射線を1/2に減衰させるための厚さである。))

運搬できる最大の放射能をXMBqとすると、
 $X\text{MBq} \times 1/16$ (鉛容器による減衰) $\times 0.0927 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \div (0.3\text{m} \times 0.3\text{m}) = 5 \mu\text{Sv/h}$ (L型輸送容器における表面線量率)
上式をXについて解くと、**X=77.6≈77MBq** となることから、**正解**

は⑤である。

Ⅲ-28 放射線の利用に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 日本では、ジャガイモの発芽制御のための食品照射は認可されていない。
- ② γ線照射により突然変異が誘発されることを利用して、茎が倒れにくい稲や黒斑病に耐性を示す梨などの新品種が育成された。
- ③ 人工増殖した害虫のオスのさなぎにγ線を照射して不妊化させたのち、羽化した成虫を野外に放飼することによって害虫を根絶する試みが行われた。
- ④ プラスチックやゴムへの放射線照射による架橋反応を利用して、強化プラスチックの製造やタイヤの強化が行われている。
- ⑤ 人工腎臓、注射針、手術用手袋、メスや縫合糸などの医療用具の滅菌処理に放射線が利用されている。

【解答と解説】

正解（最も不適切なもの）は、①

- ① 不適切：食品への放射線照射は、食品衛生法（昭和22年法律第233号）第11条第1項の規定に基づく食品、添加物等の規格基準（昭和34年厚生省告示第370号）において、原則として禁止されているが、ジャガイモ（ばれいしょ）に対する放射線照射については、食品照射研究開発基本計画（昭和42年9月21日原子力委員会決定）に基づく研究結果を踏まえ、食品衛生調査会（当時）において安全性が確認されたことなどから、昭和47年に、**発芽防止を目的とするものに限り唯一食品への放射線照射（Co-60（γ線）、吸収線量150Gy）が認められている。**
- ② 正しい：放射線の農業分野への利用として、放射線照射により突然変異を起こす確率が高まり、新種ができることを利用した放射線育種（食糧増産、農薬使用量の軽減）を挙げることができる。「レイメイ」と呼ばれるコメの品種は、原品種である「フジミノリ」に放射線照射することにより得られた突然変異種であり、「フジミノリ」のもつ良質、多収性、耐冷性などの長所はそのままとしながら、茎折れにより倒れやすいという欠点を除いた品種であり、品種改良により収穫量の増産が可能となった。また、梨の代表的な品種である「二十世紀」は黒斑病（果実や葉などに発生し、果実に発生すると、のちに表面がくぼみ中央部に黒いかびが発生）にかかりやすい品種であり、栽培農家はその防止のため農薬を散布するなどの対策に苦しんできたが、「二十世紀」の放射線照射による突然変異種である「ゴールド二十世紀」は、黒斑病に対する抵抗性を持つ以外はほとんど「二十世紀」と同じであるという品種であり、これにより収量の増加と農薬の使用量削減といった効果が得られている。
- ③ 正しい：防除の対象となる害虫に放射線（⁶⁰Coや¹³⁷Csを使用）を照射し、交尾はできるが子孫を残すことのできない虫（不妊虫）を生産する。それら不妊虫を防除対象地域にいる同種害虫よりも高い密度で放つと、野生虫の多くは不妊虫と交尾するため野生虫同士の交尾頻度は低下し、次世代の野生虫数が減少する。さらに引続いて不妊虫を高い密度で放ち続けることにより、次世代における野生虫の交尾頻度をさらに激減させることが出来る。それを繰返すことによりついには対象害虫をその地域から根絶させる試みが行われ、効果が得られている。本法は、従来の除虫剤を用いた害虫駆除に比べて自然環境に与える影響（環境汚染等）が小さく、かつ、害虫駆除に要する費用が安いことから世界各国にお

いて、その適用範囲の拡大と研究開発が進められている。放射線を利用した害獣駆除の具体的例として、沖縄県などで実用化されているウリミバエやアリモドキゾウムシの根絶事業を挙げることができる。

- ④ 正しい：プラスチックやゴム等の高分子に放射線を照射すると材料中にラジカルなどの反応活性種が生成する。これが化学反応の起点となって分子同士の架橋、不飽和結合の生成などが起こる（電子線架橋技術）。これらの反応は、強化プラスチックの製造やラジアルタイヤの強度向上に利用されている。
- ⑤ 正しい：放射線滅菌は、温度上昇が非常に小さい、化学変化の少ない、滅菌の信頼性が高い、工程管理が容易であるなどの多くの優れた点をもっているため、材料劣化という問題を抱えながらも普及が増大しつつある。また、問題文中にあるように手術に使用する手袋、メス、縫合糸等や人工腎臓といった医療用具をパックに収納した状態のまま滅菌処理することができるといった利点もある。

【参考文献】

- [1] イオンビーム育種研究会
<http://www.ionbeambreeding.org/index.html>
- [2] 沖縄県病害虫防除技術センター
<http://www.pref.okinawa.jp/mibae/>

Ⅲ-29 日本における電源の運用について、次のうち発電量が最も小さいものはどれか。

- ① 発電効率が40%の石炭火力で発電したとき100万トンの石炭が使われた。ただし、石炭の発熱量は26,000 kJ・kg⁻¹とする。
- ② 発電効率が55%のLNG複合火力で発電したとき50万トンのLNGが使われた。ただし、LNGの発熱量は54,400 kJ・kg⁻¹とする。
- ③ 発電効率が33%の軽水炉で発電したとき1トンのウラン235が核分裂に使われた。ただし、ウラン235の原子1個の核分裂によって有効に取り出せるエネルギーを190 MeVとする。また、1 MeVを1.6×10⁻¹³ J、アボガドロ定数を6.0×10²³ mol⁻¹とする。
- ④ 2 MWの風力発電機1,000基を設置した。1年間の平均設備利用率が18%であった。
- ⑤ 4 kWの太陽光発電設備を20万軒の家庭の屋根に設置した。1年間の平均設備利用率が12%であった。

【解答と解説】

正解（発電量が最も小さいもの）は、⑤

①～⑤の発電量を算出（J単位）すると以下の通りとなる。

- ① 100万トン（10⁹kg）×26000kJ/kg（2.6×10⁷J/kg）×0.4≐1.04×10¹⁶J
- ② 50万トン（5×10⁸kg）×54400kJ/kg（5.44×10⁷J/kg）×0.55≐1.50×10¹⁶J
- ③ 1トン（10⁶g）÷235g/mol×6.0×10²³mol⁻¹×190MeV×1.6×10⁻¹³J/MeV×0.33=2.56×10¹⁷J
- ④ 2MW/基（2×10⁶W/基）×1000基×365day/year×24hour/day×60min/hour×60sec/min×0.18=1.14×10¹⁶J
※J=W・sであることから、1年に相当する秒数を乗じる。

⑤ $4\text{kW/軒} (4 \times 10^3\text{W/軒}) \times 20 \text{ 万軒} (2 \times 10^5 \text{ 軒})$
 $\times 365\text{day/year} \times 24\text{hour/day}$
 $\times 60\text{min/hour} \times 60\text{sec/min} \times 0.12 = 3.03 \times 10^{15}\text{J}$

以上のことから、**最も発電量が小さいのは⑤**となる。

Ⅲ-30 我が国のエネルギー政策の基本的な方向性を示す、エネルギー基本計画における一次エネルギーの特徴に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 再生可能エネルギーは安定供給、コスト面で課題を有するものの、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。
- ② 原子力は燃料投入量に対するエネルギー出力が大きく、数年にわたり国内保有燃料だけで生産が維持できる低炭素の準国産エネルギーで、優れた安定供給性と効率性を有し、運転コストも低廉で、エネルギー需給構造の安定性に寄与する。
- ③ 石炭は温室効果ガスの排出量が多く、熱量当たりの単価が化石燃料の中で高いものの、地政学的リスクが化石燃料の中で最も低く、また資源量も豊富である。
- ④ 天然ガスは電源の4割超を占め、熱源としての効率性は高いことから利用が拡大している。石油と比べ地政学的リスクも低く、化石燃料の中で温室効果ガスの排出が最も少ない。
- ⑤ 石油は一次エネルギーの4割超を占め、幅広い用途がある。電源への利用は少ないが、ピーク電源として一定の機能を担っている。地政学的リスクは大きいものの、可搬性が高く、全国供給網も整い、備蓄も豊富で、他の喪失電源の代替ができる。

【解答と解説】

正解 (最も不適切なもの) は、③

- ① 正しい：エネルギー基本計画中にて再生可能エネルギーの位置づけとして、「現時点では安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と記載されている。
- ② 正しい：エネルギー基本計画中にて原子力の位置づけとして、「燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる低炭素の準国産エネルギー源として、優れた安定供給性と効率性を有しており、運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には温室効果ガスの排出もないことから、安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源である。」と位置付けている。
- ③ 不適切：エネルギー基本計画中にて石炭の位置づけとして、「温室効果ガスの排出量が多いという問題があるが、地政学的リスクが化石燃料の中で最も低く、**熱量当たりの単価も化石燃料の中で最も安いことから**、安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源の燃料として再評価されており、高効率石炭火力発電の有効利用等により環境負荷を低減しつつ活用していくエネルギー源である。」と位置付けている。問題中の「熱量当たりの単価が化石燃料の中で高い」という点が不適切である。
- ④ 正しい：エネルギー基本計画中にて天然ガスの位置づけとして、「現在、電源の4割超を占め、熱源としての効率性が高いことから、利用が拡大している。海外からパイプラインを通じた輸入はないが、石油と比べて地政学的リスクも相対的に低く、化石燃料の中で温室効果ガスの排出も最も少なく、発

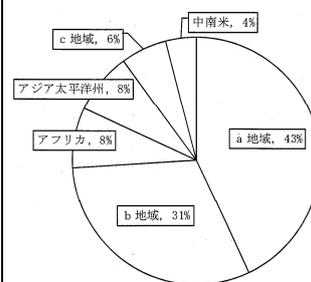
電においてはミドル電源の中心的な役割を果たしている。」と位置付けている。

- ⑤ 正しい：エネルギー基本計画中にて石油の位置づけとして、「国内需要は減少傾向にあるものの、現在、一次エネルギーの4割超を占めており、運輸・民生・電源等の幅広い燃料用途や化学製品など素材用途があるという利点を持っている。特に運輸部門の依存は極めて大きく、製造業における材料としても重要な役割を果たしている。そうした利用用途に比べ、電源としての利用量はそれほど多くはないものの、ピーク電源及び調整電源として一定の機能を担っている。調達に係る地政学的リスクは最も大きいものの、可搬性が高く、全国供給網も整い、備蓄も豊富なことから、他の喪失電源を代替するなどの役割を果たすことができ、今後とも活用していく重要なエネルギー源である。」と位置付けている。

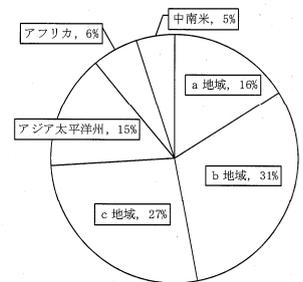
Ⅲ-31 下図は、2012年末の世界の天然ガスの確認埋蔵量約187兆m³と2012年の世界の天然ガス生産量約3.4兆m³の地域別の内訳を示している。a地域、b地域、c地域は、北米、欧州諸国(欧州・ロシア・その他旧ソ連邦諸国)、中東の3つの地域のいずれかであり、次の特徴を有している。a地域は確認埋蔵量が最も多いが生産量はさほど多くない。b地域は確認埋蔵量、生産量ともほぼ同じシェアを有している。c地域は確認埋蔵量が少ないが生産量はトップに迫るシェアを有している。次の組合せのうち、最も適切なものはどれか。

	a地域	b地域	c地域
①	中東	北米	欧州諸国
②	欧州諸国	北米	中東
③	北米	中東	欧州諸国
④	欧州諸国	中東	北米
⑤	中東	欧州諸国	北米

2012年末の地域別天然ガス確認埋蔵量



2012年の地域別天然ガス生産量



【解答と解説】

正解 (最も適切なもの) は、⑤

正解を導くにあたって注目すべきは、a地域が埋蔵量として43%を占めているながら、その生産量が16%に過ぎない点である。この意味するところは、天然ガスの開発及び大消費地への供給するためのインフラ整備が進んでいないという点である。これらの点を踏まえると、ロシア(西欧)は大消費地である西欧諸国とロシア間との間には天然ガスを安定的に供給するためのパイプラインが敷設されていることから、a地域が西欧である可能性は否定される。一方、北米は近年シェールガス革命により天然ガス採掘は急速に進み、世界最大の天然ガス産出国であるロシアに追いつきつつあることを考慮するとa地域が北米であることが否定され、a地域が「中東」と絞られる。世界最大の埋蔵量及び算出国がロ

シアであることを踏まえると、b 地域は「西欧」、残りの a 地域が「北米」と絞られてくる。

【参考文献】

[1] 資源エネルギー庁HPより

http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014html/2-2-2.html

Ⅲ-32 低炭素社会の実現のため、2011年の気候変動枠組条約締約国会議において、2020年より発効する全ての国が参加する新たな法的枠組みへの合意を目指すことが決まった。2050年における世界人口と1人当たりエネルギー消費量が、下表のように、それぞれ1.5倍と3倍にまで増加すると仮定したとき、2050年の二酸化炭素排出量を2000年の値の50%にするためには、単位エネルギー消費量当たりの二酸化炭素排出量をどれだけまで削減しなければならないか。

	世界人口 [億人]	1人当たり エネルギー消費量 [TOE/人]	二酸化炭素排出量 [億トン(炭素)]
2000年	60	1.50	64
2050年	90 (国連人口統計の中間推計では92億人)	4.50 (2000年の先進国OECDの平均値)	32 (目標値：2000年の排出量の1/2)

* TOE：石油換算トン

* 2000年の数値は「エネルギー・経済統計要覧2006、省エネルギーセンター」から引用

① 1/1.5 ② 1/3 ③ 1/6 ④ 1/9 ⑤ 1/12

Ⅲ-33 地球環境問題への取組に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 中国の温室効果ガスの排出量は急激に増加しており、米国を抜いて世界最大の排出国となった。このため原子力発電の増設や省エネルギーを含む各種温暖化対策が講じられている。
- ② 「気候変動に関する政府間パネル」は、定期的に地球温暖化について、人為起源による気候変化、影響及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的見地から包括的に評価している。
- ③ 京都議定書第一約束期間における我が国の年平均温室効果ガス排出量は、東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響で火力発電の利用が多くなったため、議定書に定められた削減目標を達成できなかった。
- ④ クリーン開発メカニズムの実施に課題があるため、日本政府は並行して二国間クレジット制度に関する取組を進めている。
- ⑤ 温室効果ガス削減に向け、1990年代以降欧州各国を中心に環境関連税制の見直し強化が進んでいる。さらに欧州連合では域内における排出量取引制度も始まった。

【解答と解説】

正解(最も不適切なもの)は、③

- ① 正しい：2013年度における統計では、世界の二酸化炭素総排出量のうち、最大の排出国は中国(28.7%)、次いでアメリカ(15.7%)の順となっている。中国では温室効果ガスの排出量を抑制(環境保全)するとともにエネルギー安全保障の2つの観点から、大型水力、天然ガス、再生可能エネルギー、原子力発電などのエネルギー源としての利用が積極的に進められている。
- ② 正しい：「気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)」とは、人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)により設立された組織である。
- ③ 不適切：京都議定書の第一約束期間(2008～2012年)では、温室効果ガス排出量を京都議定書の規定による基準年(CO₂、CH₄、N₂Oについては1990年度、HFCs、PFCs、SF₆については1995年)と比べて6%削減することが求められていた。第一約束期間5カ年の平均排出量は12億7900万トンであり、基準年の総排出量と比べると1.4%増加した。ただし、目標を達成するためには森林吸収量と京都メカニズムのクレジットを加味することができることから、これらを考慮すると2008年度から2011年度までの4カ年平均の森林吸収量の実績は基準年比約3.8%(4、758万トン)、京都メカニズムクレジットについては5カ年平均で、政府取得分は約2000万トン、民間取得分は約5500万トンとなり、5カ年平均で基準年比8.2%減となり、京都議定書の目標(基準年比6%減)を達成することができた。
- ④ 正しい：クリーン開発メカニズム(CDM)は、京都議定書に定められた温室効果ガスの削減目標の課された先進国が、削減目標の課せられていない途上国において持続可能な発展に寄与する温室効果ガス削減プロジェクトを実施し、実施されなかった場合に比べ、追加的な排出削減があった場合、削減量に対し炭素クレジット(Certified Emission Reduction: CER)が発行される制度である。ただし、これらの審査は長期に及ぶ等の課題があることから、我が国で

【解答と解説】

正解は、④

2000年における単位エネルギー消費当たりの二酸化炭素発生量は、

$$64 \text{ 億トン(炭素)} \div (60 \text{ 億人} \times 1.5 \text{ TOE/人}) \\ \approx 7.1 \times 10^{-1} \text{ トン(炭素)/TOE} \dots (1)$$

2050年における単位エネルギー消費当たりの二酸化炭素発生量は、

$$32 \text{ 億トン(炭素)} \div (90 \text{ 億人} \times 4.5 \text{ TOE/人}) \\ \approx 7.9 \times 10^{-2} \text{ トン(炭素)/TOE} \dots (2)$$

2000年における単位エネルギー消費当たりの二酸化炭素発生量に対して2050年における単位エネルギー消費当たりの二酸化炭素発生量は、(2) ÷ (1) $\approx 1.1 \times 10^{-1}$ ($\approx 1/9$) となることから、正解は④。

はこれらの課題を補完する方法として、温室効果ガス削減プロジェクトが実施された結果達成される温室効果ガスの排出削減効果を測定し、それを日本の削減実績として算入しようとする「二国間クレジット制度」を構築すべく取り組んでいる。

- ⑤ 正しい：EUでは、地球環境対策を目的としたエネルギー課税として、1990年1月1日にフィンランドにおいて世界で初めて炭素税が導入されたのを皮切りにスウェーデン、ノルウェー、デンマーク、オランダなどを中心に導入の動きが続いた。2005年1月より、EU域内(25か国)の排出量取引制度が開始された。

【参考文献】

[1] 全国地球温暖化防止活動推進センターHPより
http://www.jccca.org/global_warming/knowledge/kno03.html

[2] 気象庁HPより
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/

[3] 地球環境研究センターニュース
http://www.cger.nies.go.jp/cgernews/201401/278001.html#note_01

[4] 上野 貴弘他；クリーン開発メカニズム（CDM）の現状と課題；日本オペレーションズ・リサーチ学会；2005（7）pp447-452

Ⅲ-34 次の記述の、に入る語句の組合せとして最も適切なものはどれか。

「原子力災害対策特別措置法」（原災法）では、に、原子力事業所ごとに、原子力防災組織の設置や原子力防災管理者の配置を求めている。また、災害が発生した際には、に自らが本部長となる原子力災害対策本部の設置を求めている。

また、「原子力損害の賠償に関する法律」（原賠法）は、と原子力事業の健全な発達を目的として、原子力損害賠償制度の全般的な枠組みを定めたものであり、原子力事業者が無過失・無限の賠償責任を課している。ただし、原子力事業者に対して原子力損害賠償責任保険への加入等の損害賠償措置を講じることを義務づけており、その賠償措置額の上限は。

	a	b	c	d
①	地方自治体	原子力規制委員長	被災地の復旧	1,200億円である
②	原子力事業者	原子力規制委員長	被害者の保護	定められていない
③	地方自治体	内閣総理大臣	被災地の復旧	1,200億円である
④	原子力事業者	内閣総理大臣	被害者の保護	1,200億円である
⑤	原子力事業者	原子力規制委員長	被災地の復旧	定められていない

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、④

原子力災害特別措置法

第八条 **原子力事業者**は、その原子力事業所ごとに、原子力防災組織を設置しなければならない。

第九条 **原子力事業者**は、その原子力事業所ごとに、原子力防災管理者を選任し、原子力防災組織を統括させなければならない。

第十七条 原子力災害対策本部の長は、原子力災害対策本部長とし、**内閣総理大臣**（内閣総理大臣に事故があるときは、そのあらかじめ指定する国務大臣）をもって充てる。

原子力損害の賠償に関する法律

第一条 この法律は、原子炉の運転等により原子力損害が生じた場合における損害賠償に関する基本的制度を定め、もつて**被害者の保護**を図り、及び原子力事業の健全な発達に資することを目的とする。

第七条 損害賠償措置は、次条の規定の適用がある場合を除き、原子力損害賠償責任保険契約及び原子力損害賠償補償契約の締結若しくは供託であつて、その措置により、一工場若しくは一事業所当たり若しくは一原子力船当たり**千二百億円**（政令で定める原子炉の運転等については、千二百億円以内で政令で定める金額とする。以下「賠償措置額」という。）を原子力損害の賠償に充てることのできるものとして文部科学大臣の承認を受けたもの又はこれらに相当する措置であつて文部科学大臣の承認を受けたものとする。

Ⅲ-35 次の記述の、に入る語句の組合せとして最も適切なものはどれか。

我が国は、を昭和52年に締結し、IAEAの保障措置声明において、「申告された核物質の核兵器等への転用はない。」との結論を毎年得ている。

平成11年にはを締結し、IAEA保障措置の強化・効率化に積極的に対応した結果、転用を示す兆候も未申告の核物質及び原子力活動を示す兆候もなく、「すべての核物質がの中にとどまっている。」との結論が平成16年の同声明において初めて得られ、これにより、査察の回数が削減されるが適用されている。

	a	b	c	d
①	日・IAEA保障措置協定	IAEA新保障措置協定	平和的活動	統合保障措置
②	日・IAEA保障措置協定	協定の追加議定書	平和的活動	簡易保障措置
③	日・米原子力協力協定	IAEA新保障措置協定	当該施設	簡易保障措置
④	日・IAEA保障措置協定	協定の追加議定書	平和的活動	統合保障措置
⑤	日・米原子力協力協定	協定の追加議定書	当該施設	簡易保障措置

【解答と解説】

正解（最も適切なもの）は、④

1977年（昭和52年）12月2日に日本国政府及び国際原子力機関（IAEA）は、核兵器の不拡散に関する保障措置協定（**日・IAEA保障措置協定**）を締結し、核物質を使用する施設を対象とするIAEAの実施する保障措置を受け入れ、適切な保障措置活動に努めてきた結果、IAEAの保障措置声明において「申告された核物質の核兵器等への転用はない」との結論を毎年得てきた。平成11年には、**追加議定書**を締結し、核燃料サイクル関連研究開発、原子力関連資機材の製造・組立等に関する情報を、毎年IAEAに提出するとともに、未申告の核物質・原子力活動が存在しないことの確認などのため、IAEA及び国の査察官が直前の通告により原子力事業者等の施設に立ち入る「補完的なアクセス」が実施されている。

上述したようなIAEA保障措置への強化・効率化へ積極的に貢献した結果、我が国における原子力活動について「すべての核物質が**平和的活動**の中にとどまっている」との結論が平成16年にIAEA共同声明においてはじめて得られ、以降も継続して同様の結果が得られている。これらの成果として、我が国は査察を無通告で実施することなどにより査察の回数が削減されることが期待される**統合保障措置**が適用されることとなった。

【参考文献】

[1] 原子力規制庁HP

[https://www.nsr.go.jp/activity/hoshousochi/
iaea/iaea3.html](https://www.nsr.go.jp/activity/hoshousochi/iaea/iaea3.html)