

平成 27 年度技術士試験「原子力・放射線部門」対策講座

平成 26 年度技術士第一次試験「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

1. はじめに

平成 26 年 10 月 13 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 115 名が受験し、71 名が合格している（合格率 61.7%）。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、「専門科目」の 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

専門科目は、「当該技術部門に係る基礎知識及び専門知識を問う問題」とされている[1]。また、技術士法施行規則に基づく告示によれば、当該専門科目の出題範囲は、「原子力、放射線、エネルギー」の 3 つの分野と規定されている[2]。なお、第一次試験の過去問は技術士会ホームページの試験・登録情報に掲載されている[3]

平成 22 年度から平成 26 年度の専門科目の設問について、分野別設問数を表 1 に、平成 26 年度の専門科目の設問分野と概要を表 2 に示す。なお、表 1 のうち平成 22 年度から 25 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平成 26 年度の第一次試験対策講座を参照した[4]。

まず、表 1 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 問である。従って、平成 27 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ことから、原子力・放射線に関する広い知識が必要である。なお、第一次試験の「専門科目」の試験時間は 2 時間で、出題された 35 問のうちから 25 問を選択して解答することが求められる。合否判定基準についても平成 25 年度から変更されており、「基礎、適性、専門の 3 科目の各々の得点が 50%以上あること」とされている。

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の出題傾向を分析する。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 1 に示すように、平成 22 年度は 14 問、平成 23 年度は 12 問、平成 24 年度は 14 問、平成 25 年度は 10 問、平成 26 年度は 13 問であり、大きな変化はなく、今後もこの傾向が続くものと思われる。従来、解答に時間のかかる計算問題は敬遠されがちであるが、全体に占める割合から避けて通れるものではない。また、簡易な電卓の持込が許されており、計算問題には、基礎的な公式を単純に当てはめるだけのものや、専門的な知識が無くとも工

学的な常識や単位の整合性から解けるものもあり、正解できたことが計算結果の数値から確認し易いというメリットもあるので、積極的に取り組んでいくべきであろう。以下に、専門科目の 3 分野における出題傾向と対策を示す。

なお、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 2 に示すように、平成 26 年度は、炉物理(5 問)、工学的安全性・設計(5 問)、核燃料サイクル(3 問)、材料(1 問)、法令(1 問)及び世界の原子力情勢(2 問)の合計 17 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、15～17 問とほぼ同数である。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き、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 2 に示すように、平成 26 年度は、放射線の基礎(9 問)、放射線防護(4 問)及び放射線利用(1 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 2 に示すように、平成 26 年度は合計 4 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。主要国の各電源割合、1 人当たりの CO₂ 排出量の推移、地球環境問題への取り組み、CO₂ クレジット購入費用の算出問題など、我が国や世界のエネルギー事情に関する広い範囲から出題されている。この分野の対策としては、原子力分野で述べたように、社会的関心の高いキーワードを抽出しておき、ATOMICA 等で知識を整理しておく事が望ましい。キーワード抽出には、「原子力がひらく世紀」や白書類等の文献、関連学協会誌や関連雑誌の特集記事を用いるとともに、経産省や環境省などのホームページ、新聞・TV のニュースなどにも広く目を通しておくことが望ましい。

【参考】

- [1] 「平成27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
https://www.engineer.or.jp/c_topics/003/003674.html
- [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 平成22年度から平成26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			平成25年度			平成26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	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	13	3	16	11	6	17
放射線	7	7	14	8	6	14	7	7	14	9	5	14	9	5	14
エネルギー	4	2	6	4	1	5	3	2	5	3	2	5	2	2	4
合計	21	14	35	23	12	35	21	14	35	25	10	35	22	13	35

表2 平成26年度「専門科目」の設問分野と概要

設問	分野	概要	計算問題	
Ⅲ-1	原子力	炉物理	ウラン中の熱中性子の平均自由行程	○
Ⅲ-2		工学的安全性、設計	軽水炉の臨界制御	
Ⅲ-3		炉物理	ウランの核分裂生成物	
Ⅲ-4		材料	原子炉容器材料の中性子照射影響	
Ⅲ-5		炉物理	核分裂性物質の中性子再生率	
Ⅲ-6		工学的安全性、設計	BWR冷却材の炉心出口クオリティ評価	○
Ⅲ-7		炉物理	核分裂生成物の毒性(反応度への影響)	
Ⅲ-8		工学的安全性、設計	軽水炉のシビアアクシデント時の放射性物質挙動	
Ⅲ-9		工学的安全性、設計	PWR冷却材の炉心出口温度評価	○
Ⅲ-10		工学的安全性、設計	非常用設備の起動失敗確率評価	○
Ⅲ-11		核燃料サイクル	再処理工場の処理能力と原子力発電所基数の関係	○
Ⅲ-12		核燃料サイクル	放射性廃棄物の処理・処分	
Ⅲ-13		核燃料サイクル	再処理施設に採用されている技術	
Ⅲ-14		炉物理	化石エネルギーと核分裂エネルギーの比率	○
Ⅲ-15	放射線	放射線の基礎	電子の運動エネルギーと質量の関係	○
Ⅲ-16		放射線の基礎	人体が保有する放射能	○
Ⅲ-17		放射線の基礎	放射性物質のエネルギースペクトル	
Ⅲ-18		放射線の基礎	放射能の減衰評価	○
Ⅲ-19		放射線の基礎	放射性物質の崩壊系列	
Ⅲ-20		放射線の基礎	γ線と物質の相互作用	
Ⅲ-21		放射線の基礎	原子核から電磁波が放出される原理	
Ⅲ-22		放射線の基礎	用語の定義	
Ⅲ-23		放射線の基礎	放射能過渡平衡の評価	○
Ⅲ-24		放射線防護	放射線測定器と対象元素の関係	
Ⅲ-25		放射線防護	GM計数管の測定原理	
Ⅲ-26		放射線防護	放射線の遮蔽と被ばく評価	○
Ⅲ-27	放射線防護	放射線の人体への影響		
Ⅲ-28	放射線利用	放射線によるガン治療の原理		
Ⅲ-29	エネルギー	エネルギー	発電所の設備稼働率と総費用の評価	○
Ⅲ-30		エネルギー	コンバインドサイクルシステムの熱効率評価	○
Ⅲ-31		エネルギー	各電源設備の特性	
Ⅲ-32		エネルギー	我が国のエネルギーを取り巻く情勢	
Ⅲ-33	原子力	法令	原子炉等規制法	
Ⅲ-34		世界の原子力情勢	世界各国の核燃料サイクルへの取り組み	
Ⅲ-35		世界の原子力情勢	世界の原子力事情	

4. 第一次試験【専門科目】の解説記事

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 次の35問題のうち25問題を選択し解答せよ。(解答欄に1つだけマークすること。)

Ⅲ-1 ウラン中の熱中性子の平均自由行程[cm]に最も近いものはどれか。ただし、ウランの微視的散乱断面積は8.30barn、微視的吸収断面積は7.60barnとする。また、ウランの原子量は238、密度は19.1g/cm³、アボガドロ数を6.02×10²³ mol⁻¹とする。

- ① 0.77 ② 1.30 ③ 2.49 ④ 2.72 ⑤ 4.90

【解答と解説】

正解は②

ウランの微視的散乱断面積を σ_s 、微視的吸収断面積を σ_a とすると、全微視的断面積 $\sigma = \sigma_s + \sigma_a = 15.90\text{barn} = 15.90 \times 10^{-24}\text{cm}^2$ となる。

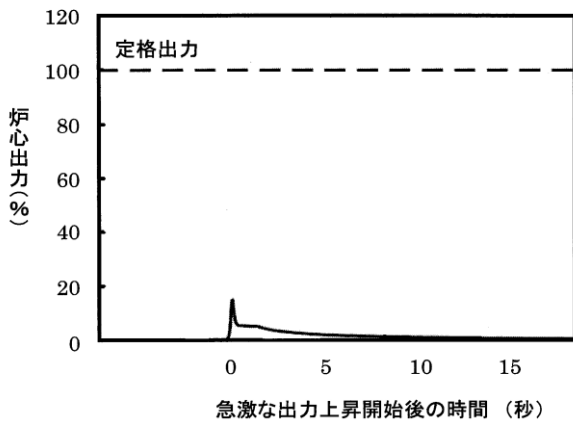
$$\text{平均自由行程 } \lambda [\text{cm}] = 1 / \Sigma \quad (\Sigma : \text{巨視的断面積} [\text{cm}^{-1}])$$

$$\text{巨視的断面積 } \Sigma = N\sigma \quad (N : \text{原子数密度} [\text{n/cm}^3])$$

原子数密度 $N = (\text{アボガドロ数}) \times \text{密度} / \text{原子量}$ であるので、

$$\begin{aligned} \lambda &= 1 / (N\sigma) \\ &= (\text{原子量}) / ((\text{アボガドロ数}) \times (\text{密度}) \times \sigma) \\ &= 1.30 [\text{cm}] \end{aligned}$$

Ⅲ-2 下図は、停止中の沸騰水型軽水炉において突然の制御棒引抜により臨界を超過し、自動停止信号が発信したにもかかわらず、その後数分間にわたり制御棒が挿入されなかった事象について、事象発生直後の炉心出力の時間変化を解析により求めたものである。炉心の実効遅発中性子発生割合は0.64%、制御棒引抜による印加反応度(臨界超過反応度)は0.79%Δkがほぼステップ上に入ったものとしている。この臨界超過に関する記述のうち、最も適切なものはどれか。



- ① 臨界を超過したが、即発臨界には至っていない。もし即発臨界になると、核分裂連鎖反応の急激な増加を制御できず、出力暴走を止めることはできない。
 ② 一次的に即発臨界を超えたが、燃料温度上昇などによる自己制御性が働き、出力上昇が抑えられている。
 ③ 一時的に即発臨界となって急激な出力上昇が起きたが、初めから冷却水中に含まれているホウ酸の中性子吸収が効き始めると、出力上昇が抑えられて未臨界に戻っている。

- ④ 遅発中性子の存在により、印加された外部反応度で即発臨界に至ることはなく出力上昇が抑えられている。
 ⑤ 制御棒による負の反応度が働き、即発臨界に至る前に出力上昇が抑えられている。

【解答と解説】

正解は②

原子炉の反応度は、制御棒による反応度制御だけでなく、炉心の温度変化、冷却材中のボイド(気泡)の割合等により変化する。沸騰水型を含め軽水炉は、臨界によって燃料の温度が上昇すればドブプラー効果によって反応度が低下する設計である。

- ① 不適切。制御棒引き抜きによる印加反応度0.79%は、遅発中性子発生割合0.64%より大きく、即発臨界に至っている。また、臨界直後の急激な炉心出力上昇は即発臨界に至った証左である。
 ② 適切。
 ③ 不適切。沸騰水型軽水炉では、停止系としてのホウ酸水注入系は存在するが、通常は一次冷却水中にホウ酸を混入していない。従って、「初めから(冷却水中に含まれているホウ酸)」は誤り。また、ホウ酸の吸収効果は途中から効き始めるものではないため、初めから存在するホウ酸により途中から出力上昇が抑えられるという点でも誤り。
 ④ 不適切。①参照
 ⑤ 不適切。問題文において、「数分間にわたり制御棒が挿入されなかった」と記載されている。炉心出力の低下は事象発生後数秒から発生しており、この出力低下の理由は制御棒挿入によるものではない。

Ⅲ-3 熱中性子により核分裂したウラン235から生まれる核分裂生成物に関する次の記述のうち、もっとも不適切なものはどれか。

- ① 質量数が110から120の間の核分裂生成物の発生割合が最も多い。
 ② 核分裂生成物のうちの大部分が放射性核種である。
 ③ 核分裂で放出される中性子には、即発中性子と遅発中性子がある。
 ④ 核分裂生成物の主要な希ガスには、クリプトンとキセノンがある。
 ⑤ 核分裂の結果として発生するエネルギーの大半は、核分裂生成物の運動エネルギーとなる。

【解答と解説】

正解(不適切なもの)は①

- ① 不適切。ウラン235の核分裂生成物は非対称分裂であり、ウラン235の質量数の2/5と3/5、即ち質量数が95付近と140付近にピークがある。対称分裂の起こる頻度は低い。
 ② 正しい。
 ③ 正しい。ウラン235の核分裂の際に発生する中性子は、核分裂と同時に発生する即発中性子と、遅れて放出される遅発中性子に分けられる。遅発中性子は、特定の核分裂生成物から放出されるものであり、その割合は発生する中性子全体の0.65%程度である。
 ④ 正しい。
 ⑤ 正しい。ウランの核分裂で発生するエネルギー202MeVのうち、核分裂生成物の運動エネルギーは168MeVであり、8割以上を占める。

III-4 次の記述の□に入る用語の組合せとして最も適切なものはどれか。

原子炉圧力容器の材料として使用される低合金鋼は、炉心からの中性子照射を受けると、□aが上昇するとともに、□bが低下する。これらは□cと言われる。□cが進行し、温度、き裂寸法、荷重で決まる条件がそろると圧力容器は脆性破壊を起こす可能性がある。これを確実に防止するため、設計段階において、供用期間中の材料の破壊靱性を予測するとともに、定期的に監視試験を実施し、主にシャルピー衝撃試験から□cの程度を調べ、さらに、その結果をもとに構造健全性を確認して原子炉の運転がおこなわれる。また、き裂が存在しないことを確認するため、供用期間中には超音波探傷法等により定期的に検査が行われている。構造健全性を確認する上で、最も厳しい想定事象は、PWRの圧力容器では□dである。これは事故時の安全対策として炉心への大量の冷却水が注入されることにより生じる過渡事象であり、圧力容器内面には過大な引張り応力が生じる。健全性評価として、圧力容器内面にき裂の存在を仮定し、□d時に発生する応力を考慮し、破壊力学解析がおこなわれる。

	a	b	c
①	延性脆性遷移温度 加圧熱衝撃	上部棚吸収エネルギー	中性子照射脆化
②	き裂進展速度 溶融貫通	応力拡大係数	エネルギー解放
③	き裂進展速度 溶融貫通	上部棚吸収エネルギー	エネルギー解放
④	き裂進展速度 加圧熱衝撃	応力拡大係数	中性子照射脆化
⑤	延性脆性遷移温度 加圧熱衝撃	上部棚吸収エネルギー	エネルギー解放

【解答と解説】

正解は①

材料は中性子の照射を受けると非常に微小な欠陥が生じ、破壊に対する抵抗の低下が生じる。これを中性子照射脆化(c)という。

原子炉圧力容器の胴部(炉心領域部)においては、中性子照射脆化によって、「延性脆性遷移温度(関連温度)(a)」の上昇と、「上部棚吸収エネルギー(b)」が低下することが知られている。

「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」に引用されているJEAC4206においては、「加圧熱衝撃(d)」の評価として、非常用炉心冷却装置が作動した場合に原子炉圧力容器が健全かどうかを評価することを求めている。

【参考文献】

「原子炉圧力容器の中性子照射脆化について」(平成24年1月23日 原子力安全・保安院)

<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/30/005/5-2.pdf>

III-5 中性子再生率 η は、核分裂性の物質が中性子を1個吸収した場合に平均何個の中性子を核分裂で放出するのかを表す。 ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu について、 η のエネルギー依存性を下図に示す。次の記述のうち最も不適切なものはどれか。

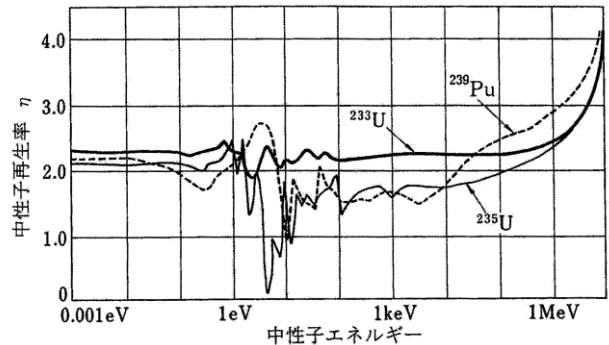


図 中性子再生率 η のエネルギー依存性

- ① ^{233}U を燃料とする原子炉は、熱中性子炉で増殖が可能である。
- ② ^{239}Pu を燃料とする原子炉は、高速炉で増殖が可能である。
- ③ ^{239}Pu を燃料とする原子炉は、高速炉で核変換が可能である。
- ④ ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu を燃料とする熱中性子炉は、どれも転換炉にできる。
- ⑤ ^{235}U を燃料とする原子炉は、中速中性子炉で増殖が可能である。

【解答と解説】

正解(不適切なもの)は⑤

η が1より小さい場合は、核分裂は継続しない。

η が1~2の範囲では、核分裂は継続可能であるが、消費された燃料以上の燃料の生産は出来ないため、増殖は出来ない(但し、新たな燃料の生産は行われるので、これを転換という)。

従って、増殖は η が2以上の場合に可能である。

- ① 熱中性子領域(1eV以下)で $\eta > 2$ であり、正しい。
- ② 高速中性子領域(10keV~10MeV)で $\eta > 2$ であり、正しい。
- ③ 正しい(②参照)
- ④ 熱中性子領域(1eV以下)で $\eta > 1$ であり、正しい。
- ⑤ 中速中性子領域(1eV~10keV)では $\eta < 2$ であり、不適切。

III-6 沸騰水型軽水炉について、定格運転時の炉心出口クオリティに最も近いものはどれか。ただし、原子炉熱出力を3,300 MW、炉心冷却材全流量を 1.35×10^4 kg/s、炉心冷却材温度を548 K、サブクール度を11 K、低圧比熱を $4,500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、蒸発潜熱を $1.50 \times 10^6 \text{ J/kg}$ とする。

- ① 0.09
- ② 0.11
- ③ 0.13
- ④ 0.15
- ⑤ 0.17

【解答と解説】

正解は③

クオリティは、冷却材における蒸気の質量割合、サブクール度は冷却材温度と沸点の差である。BWRの場合、冷却材は原子炉熱出力により沸点まで加熱され、さらにクオリティ相当分の蒸気発生に利用されることから、以下の式が成立する。

$$P = F \times C_p \times \Delta T_s + F \times Q \times H_v$$

ここで、P: 原子炉熱出力 (W)

F: 冷却材全流量 (kg/s)

Cp : 低圧比熱 (J・kg⁻¹・K⁻¹)
 ΔT_s : サブクール度 (K)
 Q : 炉心出口クオリティ (-)
 Hv : 蒸発潜熱 (J/kg)

この式をQについて解くと、

$$Q = (P-F \cdot C_p \cdot \Delta T_s) / (F \cdot \Delta H_v)$$

$$= (3300 \times 10^6 - 1.35 \times 10^4 \times 4500 \times 11) / (1.35 \times 10^4 \times 1.50 \times 10^6)$$

$$= 0.13$$

III-7 次の記述の、に入る核種、数値又は語句の組合せとして最も適切なものはどれか。

核分裂生成物のうち、大きい熱中性子吸収断面積を持つものは原子炉の運転に重要な影響を与え、毒物(核分裂生成妨害物)と呼ばれる。代表的なものはaとbである。原子炉が停止するとaの原子数は増加するが、やがて減少する。aの熱中性子吸収断面積は非常に大きいため、原子炉に与える負の反応度の絶対値は大きく、その値が最大になるのにc時間程度かかることがある。一方、aと異なりbの原子数は原子炉が停止するとd。

	a	b	c	d
①	¹⁴⁹ Sm	¹³⁵ I	5	減少していく
②	¹³⁵ I	¹³⁵ Xe	20	増加していく
③	¹³⁵ Xe	¹⁴⁹ Sm	10	増加していく
④	¹³⁵ Xe	¹⁴⁹ Sm	5	減少したあと増加する
⑤	¹³⁵ I	¹³⁵ Xe	20	減少したあと増加する

【解答と解説】

正解は③

²³⁵Uの核分裂生成物のうち、¹³⁵Xeと¹⁴⁹Smは、熱中性子を非常に強く吸収するため毒物と呼ばれる。

¹³⁵Xeは、²³⁵Uの核分裂から0.3%の割合で直接生成されるほか、5.6%の割合で発生する¹³⁵Teがβ崩壊を繰り返すことにより発生する。なお、¹³⁵Xe自身もβ崩壊し、最終的には¹³⁵Baとなる。(下記参照)

¹³⁵Te → (β⁻, T_{1/2} < 0.5m) → ¹³⁵I → (β⁻, T_{1/2} = 6.7h) → ¹³⁵Xe → (β⁻, T_{1/2} = 9.2h) ¹³⁵Cs → (β⁻, T_{1/2} = 2.6 × 10⁶ y) → ¹³⁵Ba (安定)
 従って、¹³⁵Xeは、原子炉運転停止後も10時間程度までは増加するが、その後は減少していく。

一方、¹⁴⁹Smは、核分裂では直接生成されず、1.4%の割合で発生する¹⁴⁹Ndのβ崩壊から¹⁴⁹Pmを経て生成される。¹³⁵Xeと異なる点は、¹⁴⁹Smが安定核種ということである。

¹⁴⁹Nd → (β⁻, T_{1/2} = 2.0h) → ¹⁴⁹Pm → (β⁻, T_{1/2} = 54h) → ¹⁴⁹Sm (安定)
 従って、¹⁴⁹Smは、原子炉運転停止後増加していく。

【参考文献】

「原子炉工学大要」第4版(昭和57年9月20日 長谷川 修他)

III-8 軽水炉のシビアアクシデント時の放射性物質挙動に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 燃料から放出された放射性物質は、原子炉冷却系、格納容器内へと移行する。格納容器内は原子炉冷却系と比べて低温なので、希ガスは構造物表面や床面への沈着が加速される。
- ② ヨウ化セシウムは水溶性であり、水中に移行するとヨウ化物イオンとして存在するが、単体のヨウ素は揮発性で気液分配により気相中に放出される。
- ③ 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。
- ④ PWRの蒸気発生器伝熱管破損時には、炉心部から放出された放射性物質が直接大気中に放出される状況が発生しうる。
- ⑤ 炉心で発生する放射性物質が原子炉冷却系へ輸送される過程で、蒸気圧の低い化合物は温度や分圧の条件に応じて、気体や種々の化合物を含む多成分エアロゾル状態に変化する。

【解答と解説】

正解(不適切なもの)は①

格納容器内へ移行した、キセノン等の希ガスは構造物表面や床面へ沈着することはなく、格納容器内の気相中に存在する。

III-9 原子炉熱出力が3.4 × 10⁹Wの加圧水型原子炉において、燃料集合体数を193体、燃料集合体あたりの燃料本数を264本、炉心の有効高さを3.6mとすれば、平均線出力密度は18kW/mとなる。燃料要素の単位長さ当たりの発熱量が熱中性子束に比例すると、軸方向の出力分布をコサイン分布、炉心入口冷却材温度を562Kとする時、炉心出口冷却材温度[K]に最も近いのはどれか。なお、燃料棒一本当たりの冷却材流量を0.33kg/s、冷却材の定圧比熱を5,500J・kg⁻¹・K⁻¹とする。

- ① 583 ② 588 ③ 593 ④ 598 ⑤ 603

【解答と解説】

正解は④

冷却材の温度上昇 ΔT [K]は、

$$\Delta T = (\text{平均線出力}) \times (\text{炉心の有効高さ}) / \{ (\text{冷却材流量}) \times (\text{冷却材の定圧比熱}) \}$$

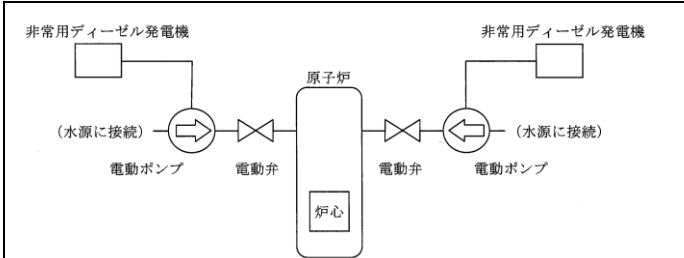
$$= 18 \times 10^3 [\text{W/m}] \times 3.6 [\text{m}] / \{ 0.33 [\text{kg/s}] / 5500 [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \}$$

$$= 36 [\text{K}]$$

従って、冷却材出口温度は562 + 36 = 598[K]

なお、問題文中に「軸方向の出力分布をコサイン分布」との記載があるが、本設問の回答には必要のない情報である。問題文の情報が必要ではない場合があることは留意しておくべきである。

III-10 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できる非常用炉心冷却系が2系統用意されている原子炉を想定する(下図参照)。非常用炉心冷却系の信頼度を支配する要素としては、非常用ディーゼル発電機、電動ポンプ、電動弁のみを考え、これらのいずれか1つでも作動に失敗すれば、当該非常用炉心冷却系は原子炉への注水機能を達成できないものとする。



ここで、事故の発生や機器の作動失敗は全て互いに独立した事象とし、その発生頻度や作動失敗の確率を以下のように仮定する。

- ・冷却材喪失事故の発生頻度 1×10^{-4} 回/年
- ・非常用ディーゼル発電機の起動失敗の確率 1×10^{-3}
- ・電動ポンプの起動失敗の確率 4×10^{-3}
- ・電動弁の開動作失敗の確率 4×10^{-3}

また、2系統の非常用炉心冷却系は分離独立し、共通原因故障は無いものとする。冷却材喪失事故が発生し、非常用炉心冷却系が2系統とも原子炉の注水に失敗する事態の発生頻度[回/年]に最も近いものはどれか。

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

【解答と解説】

正解は④

各々の非常用炉心冷却系が動作する確率は、

$$(1 - 1 \times 10^{-3}) \times (1 - 4 \times 10^{-3}) \times (1 - 4 \times 10^{-3}) = 0.991$$

従って、2系統ある非常用炉心冷却系がどちらも作動しない確率は、

$$(1 - 0.991) \times (1 - 0.991) = 8 \times 10^{-5}$$

冷却材喪失事故が発生する確率は 1×10^{-4} 回/年であるから、求める確率は、

$$(1 \times 10^{-4} \text{回/年}) \times (8 \times 10^{-5}) = 0.8 \times 10^{-8} \text{[回/年]}$$

III-11 処理能力が毎年800トンの再処理工場で再処理できる使用済燃料は、発電出力が100万KWの原子力発電所のおおよそ何基分に相当するか。なお、使用済燃料の平均燃焼度を45,000MW日/トン、原子力発電所の熱効率と設備利用率を、それぞれ34%、82%と仮定する。

- ① 20 ② 25 ③ 30 ④ 35 ⑤ 40

【解答と解説】

正解は⑤

題意から、100万KWの発電を行う原子力発電所における1年間の発生エネルギー[KWh]は、熱効率34%、設備利用率82%より、

$$100 \text{万KW} \times (1/0.34) \times 24 \times 365 \times 0.82$$

$$= 2.1 \times 10^{10} \text{[KWh]}$$

上記エネルギーに相当する燃料量[トン]は、平均燃焼度45,000MW日/トンを用いて

$$= 2.1 \times 10^{10} / 10^3 / (45000 \times 24)$$

$$= \text{約} 20 \text{[トン]}$$

従って、100万KWの原子力発電所で1年間に発生する使用済燃料の量は約20トンとなる。

よって、年間800トンの使用済燃料は100万KWの原子力発電所約40基分に相当する。

III-12 我が国の放射性廃棄物の処理・処分にに関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 処分とは、放射性廃棄物管理の最終的措置として、放射性廃棄物を人間の生活環境に影響の及ぶおそれのないようにすることである。
- ② 原子力発電所の運転や点検に伴い発生する、洗浄水や古くなった作業着などのわずかに放射能を帯びた廃棄物は、低レベル放射性廃棄物として処分される。
- ③ TRU廃棄物は浅地中処分を行うこととされており、これは、地表付近(深さ数十mまで)で行われる処分である。
- ④ 高レベル放射性廃棄物は、濃縮して体積を減らし化学的に安定したガラス素材と混ぜて、ステンレス鋼の丈夫な容器に注入・固化する。
- ⑤ 多重バリアシステムは、工学的技術により設けられる人工バリアと、天然の地層である天然バリアの多層の防護系から構成される。

【解答と解説】

正解(不適切なもの)は③

TRU(超ウラン元素)含有廃棄物は殆どが使用済み燃料の再処理、MOX燃料の加工の過程で発生する低レベル放射性廃棄物に含まれているものである。これらの廃棄物は一般的に半減期が長く、アルファ線を放出する等の特徴を有するので、特にTRU核種を含む放射性廃棄物として区分されている。

これらの安全対策については、全アルファ核種の放射能濃度の区分目安値以下、かつベータ・ガンマ核種の放射能濃度の比較的低いものについては浅地中処分が可能等と考えられているが、これより高いものについては地下埋設処分が適当と考えられ、高レベル放射性廃棄物の処分方策との整合性をはかりつつ技術開発を進められている。[1]

<参考 放射性廃棄物の種類 [2]>

放射性廃棄物の種類				
廃棄物の種類	廃棄物の例	発生場所	処分の方法(例)	
低レベル放射性廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等	原子力発電所	トレンチ処分
	放射能レベルの比較的低い廃棄物	廃液、フィルタ、廢器材、消耗品等を固形化		ピット処分
	放射能レベルの比較的高い廃棄物	制御棒、炉内構造物		余裕深度処分
	ウラン廃棄物	消耗品、スラッジ、廢器材	ウラン濃縮、燃料加工施設	余裕深度処分、ピット処分、トレンチ処分、場合によっては地層処分
超ウラン核種を含む放射性廃棄物(TRU廃棄物)	燃料棒の部品、廃液、フィルタ	再処理施設、MOX燃料加工施設	地層処分、余裕深度処分、ピット処分	
高レベル放射性廃棄物	ガラス固化体	再処理施設	地層処分	
クリアランスレベル以下の廃棄物	原子力発電所解体廢棄物の大部分	上に示した全ての発生場所	再利用/一般の物品としての処分	

B-1-4

原子力・エネルギー概説2015

図説「原子力」

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典(ATOMICA) (05-01-01-09)
- TRU(超ウラン元素)含有廃棄物の発生源と安全対策
- [2] 「原子力・エネルギー」図面集2015(日本原子力文化振興財団)

- III-13 我が国初の商業用再処理施設において採用されている技術に関する次の技術のうち、最も不適切なものはどれか。
- ① 溶媒抽出法としてピューレックス法が採用されている。
 - ② 使用済燃料の燃料部分は、苛性ソーダを入れた溶解槽で溶かされる。
 - ③ 燃料を溶かした溶液を溶媒（油性の溶液）と接触させることにより、ウラン・プルトニウム混合酸化物と核分裂生成物が分離される。
 - ④ ウラン、プルトニウム、核分裂生成物を分離するための溶媒として、TBP（リン酸トリブチル）とドデカンの混合物が用いられる。
 - ⑤ ウランとプルトニウムを溶液の段階で混ぜて、ウラン酸化物とプルトニウム酸化物の混合物が製品として回収・保管される。

【解答と解説】

正解（不適切なもの）は②

青森県六ヶ所村において、我が国初の商業用再処理施設（六ヶ所再処理工場）の建設が進められている。六ヶ所再処理工場はピューレックス法が採用されており、使用済燃料は、溶解槽において、高温の硝酸により溶解される。

ピューレックス法においては、TBP（リン酸トリブチル）を用いて、使用済燃料が溶解した硝酸溶液（溶解液）からウラン・プルトニウムを抽出する。なお、TBPはドデカンによって希釈されて用いられる。

六ヶ所再処理工場においては、プルトニウムの核兵器への転用を防止するために、ウラン溶液から分離されたプルトニウム溶液はウラン溶液と混合した溶液で脱硝され、ウラン酸化物とプルトニウム酸化物の混合物として回収・保管される。

- III-14 原子炉への燃料装荷から燃料取出しまで、1kgの濃縮ウラン燃料から発生するエネルギーを E_u とする。また、1kgの石炭の燃焼により発生するエネルギーを E_c とする。 E_u/E_c に最も近い値はどれか。濃縮ウラン燃料の形態を二酸化ウラン（ UO_2 ）、燃料取出しまでに核分裂するウランの量の平均割合を4%、ウランの核分裂によって発生するエネルギーを200MeV、石炭の発熱量を3,500kJ/kgとする。また、二酸化ウランの分子量を270、アボガドロ数を $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 、 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ とする。

- ① 1×10^3
- ② 1×10^4
- ③ 1×10^5
- ④ 1×10^6
- ⑤ 1×10^7

【解答と解説】

正解は④

1kgのウラン燃料のうち、核分裂するウラン原子の個数は、

$$(1 \times 10^3 / 270) \times (6.02 \times 10^{23}) \times 0.04 = 8.92 \times 10^{22} [\text{個/kg}]$$

従って、1kgのウラン燃料から発生するエネルギー E_u は、

$$E_u = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 8.92 \times 10^{22} = 2.9 \times 10^{12} [\text{J/kg}]$$

一方、1kgの石炭の燃焼により発生するエネルギー E_c は、題意より

$$E_c = 3,500 \text{ kJ}$$

従って、

$$E_u / E_c = (2.9 \times 10^{12}) / (3500 \times 10^3) = 8 \times 10^5 \approx 1 \times 10^6$$

なお、問題文中に「二酸化ウランの分子量」という記載があるが、二酸化ウランは面心立方格子（萤石型）の結晶構造をとることから、「 UO_2 の（化学）式量」とすべきである点を指摘しておく。

- III-15 運動エネルギーが2.5MeVの電子の質量[kg]に最も近いものはどれか。ただし、電子の静止質量及び静止エネルギーをそれぞれ $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 、 0.51 MeV とする。

- ① 1.8×10^{-31}
- ② 9.1×10^{-31}
- ③ 9.6×10^{-31}
- ④ 4.7×10^{-30}
- ⑤ 5.4×10^{-30}

【解答と解説】

正解は⑤

粒子の速度が光速に比べて無視できない領域になると、古典力学に代わり、相対論的評価が必要となる。相対論では、質量 m の粒子の全エネルギー E は、その粒子の静止質量 m_0 と速度 v を用いて、下記①、②で与えられる（ c は光速）。

$$E = mc^2 \quad \dots \text{①}$$

$$m = m_0 / \{(1 - v^2/c^2)^{0.5}\} \quad \dots \text{②}$$

これらの式より、高速で運動する粒子の質量は静止質量に比べて大きくなるのがわかる。

また、運動エネルギーを E_k 、静止エネルギーを E_0 とすると

$E = E_k + E_0$ となることから、求める電子（運動している電子）の全エネルギーは、

$$E = 2.5 (\text{MeV}) + 0.51 (\text{MeV}) = 3.01 (\text{MeV})$$

①式より $m = m_0 \cdot E/E_0$ の関係があることから

$$m = (9.1 \times 10^{-31}) \times (3.01 / 0.51) = 5.4 \times 10^{-30} [\text{kg}]$$

- III-16 人体には約23%（重量比）の炭素が含まれている。体重60kgの人の体内にある ^{14}C の放射能（Bq）に最も近い値はどれか。ただし、炭素中に含まれる ^{14}C の存在割合を $1.2 \times 10^{-10} \%$ 、 ^{14}C の半減期を5,700年、 ^{14}C の原子量を14、アボガドロ数を $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 、 $\ln 2 = 0.69$ とする。

- ① 1,000
- ② 3,000
- ③ 5,000
- ④ 7,000
- ⑤ 9,000

【解答と解説】

正解は②

半減期 $T_{1/2}$ (s)の放射性原子が N (個)あるとき、その放射能 A (Bq)は次式で与えられる。

$$A = (\ln 2 / T_{1/2}) \times N$$

体重60kgの人の体内にある ^{14}C の個数は、

$$N = ((60 \times 10^3 \times 0.23) / 12) \times 6.0 \times 10^{23} \times 1.2 \times 10^{-12} = 8.28 \times 10^{14}$$

したがって、放射能は、半減期を秒単位に変換して以下となる。

$$A = 0.69 \times 8.28 \times 10^{14} / (5700 \times 365 \times 24 \times 3600) = 3.2 \times 10^3 \approx 3,000$$

- III-17 次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① α 壊変により放出される α 粒子のエネルギースペクトルは、線スペクトルを示す。
- ② β^- 壊変により放出される電子のエネルギースペクトルは、連続スペクトルを示す。
- ③ オーージェ電子のエネルギースペクトルは、線スペクトルを示す。
- ④ 内部転換電子のエネルギースペクトルは、線スペクトルを示す。
- ⑤ 核異性体転移で放出される γ 線のエネルギースペクトルは、連続スペクトルを示す。

【解答と解説】

正解（不適切なもの）は⑤

- ① 正しい。α粒子のエネルギーは線スペクトルを示す。
- ② 正しい。β壊変では、壊変のエネルギーがβ線とニュートリノに分配されるので、連続スペクトルを示す。
- ③ 正しい。励起状態の原子は励起エネルギーをX線として放出するが、そのエネルギーを軌道電子に与えて、軌道電子が放出される場合がある。この際放出された電子をオージェ電子という。オージェ電子は固有のエネルギーを持つため、線スペクトルとなる。
- ④ 正しい。励起状態にある原子核が準移するとき、γ線を放出せずにそのエネルギーを軌道電子に与えて転移する場合がある。これを内部転換といい、放出される電子を内部転換電子という。内部転換電子のエネルギーは、放出エネルギーから軌道電子の束縛エネルギーを引いたエネルギーとなるため、線スペクトルとなる。
- ⑤ 不適切。核異性体転移時に放出されるγ線のエネルギーは、エネルギー準位の差で与えられ、線スペクトルを示す。

III-18 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能が現在等しい。5年後の放射能を、 A_{134} 及び A_{137} とすると、両者の比、 A_{134}/A_{137} に最も近いものはどれか。ただし、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の半減期を、それぞれ2年及び30年とする。また、 $\sqrt[3]{2} = 1.26$ である。

- ① 0.20 ② 0.22 ③ 0.24 ④ 0.28 ⑤ 0.32

【解答と解説】

正解は①

現在の放射能を A_0 とすると、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の5年後の放射能は以下の通り与えられる。

$$A_{134} = A_0 \exp(-\ln 2/2 \times 5) = A_0 \times (1/2)^{(5/2)}$$

$$A_{137} = A_0 \exp(-\ln 2/30 \times 5) = A_0 \times (1/2)^{(5/30)}$$

したがって、両者の比は以下となる。

$$\begin{aligned} A_{134}/A_{137} &= (1/2)^{((5/2) - (5/30))} \\ &= (1/2)^{(7/3)} = 1 / (1.26)^7 \\ &\approx 0.20 \end{aligned}$$

III-19 天然に存在する壊変系列に含まれる核種に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① ^{234}U と ^{238}U は、ともにウラン系列の核種である。
- ② アクチニウム系列は、 ^{235}U に始まり ^{207}Pb で終わる。
- ③ トリウム系列は、 ^{232}Th に始まり ^{208}Pb で終わる。
- ④ ウラン系列、アクチニウム系列、トリウム系列は、それぞれの壊変系列中に Rn を含む。
- ⑤ ^{210}Po 、 ^{214}Po 及び ^{218}Po は、すべてウラン系列の核種である。

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は③

原子番号82の鉛 (Pb) 以上の元素は、総て天然の放射性核種をもち、特に原子番号84のポロニウム (Po) 以上の元素は、安定核種がなくすべて放射性である。これらの重い元素の放射性核種は「ウラン系列 [(4n+2) 系列]」、「トリウム系列 [(4n) 系列]」、「アクチニウム系列 [(4n+3) 系列]」のいずれかに属する。(注: 「ネプツニウム系列 [(4n+1) 系列]」は、地球生成時には存在していたが、46億年を経た現在では存在しない。)

選択肢③のトリウム系列は (4n) 系列であり、 ^{232}Th に始まり、 ^{208}Pb で終わる。

III-20 γ線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 光電効果では、入射γ線のエネルギーを吸収して原子内の軌道電子が放出される。
- ② 光電効果では、外殻電子より内殻電子の方が光電子として放出されやすい。
- ③ コンプトン効果により散乱されたγ線の波長は、散乱前の波長より長くなる。
- ④ コンプトン効果により散乱されたγ線が、さらにコンプトン効果を起こすことがある。
- ⑤ 電子対生成は、γ線のエネルギーが 1.02 MeV より小さい場合にも起こることがある。

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は⑤

γ線と物質との相互作用には、光電効果、コンプトン効果、電子対生成の3つがある。電子対生成にはγ線が電子と陽電子の静止質量の和 1.02 MeV を超えるエネルギーを持つことが必要。

【参考文献】

[1] 原子力百科事典 ATOMICA, 原子核物理の基礎 (6) 放射線と物質の相互作用 (03-06-03-06)

III-21 次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 高速電子が原子核の強いクーロン場によって軌道を大きく曲げられ、このとき電磁波が放出された。
- ② 陽電子が物質中で軌道電子と合体・消滅し、このとき電磁波が放出された。
- ③ 軌道電子捕獲が起こった後、生じた内殻の空位を外殻電子が埋め、このとき電磁波が放出された。
- ④ 水素原子が中性子を捕獲し、このとき電磁波が放出された。
- ⑤ 中性子と水素原子核が弾性散乱を行い、このとき電磁波が放出された。

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は⑤

弾性散乱では運動エネルギーの和が保存され、電磁波の放出はない。

III-22 次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① ^{90}Sr と共存する無担体の ^{90}Y の溶液の pH を7以上にし、ろ紙でろ過すると ^{90}Y がろ紙上に捕集される。 ^{90}Y のこのような化学的挙動をラジオコロイドという。
- ② 非常に低い濃度の放射性核種に対しても、通常の化学操作が有効に適用できるようにするために加える物質をキャリアーという。
- ③ 親核種と娘核種が放射平衡で共存している系から娘核種を化学的に分離し、再び放射平衡成立後繰り返し娘核種を分離する方法をミルクングという。
- ④ 放射線照射によって生じたフリーラジカルの反応性を高めるために加える物質をラジカルスカベンジャーという。
- ⑤ 核反応や核変換に伴って化学結合のエネルギーを上回る反跳エネルギーが原子に与えられることがある。このような原子をホットアトムという。

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は④

ラジカルスカベンジャーは放射線により生じたラジカルと反応しやすい物質であり、照射によりラジカルが生じた場合にそのラジカルを捕捉し、生体分子の損傷を軽減する働きをするものである。したがって、フリーラジカルの反応性を高めるために加えるという説明は誤り。

III-23 1MBq の ^{140}Ba と過渡平衡にある ^{140}La の放射能 [MBq] に最も近い値はどれか。ただし、 ^{140}Ba と ^{140}La の半減期を、それぞれ 12.8 日、40.3 時間とする。

- ① 0.70 ② 0.85 ③ 1.00 ④ 1.15 ⑤ 1.30

【解答と解説】

正解は④

過渡平衡の関係が成立している時、親核種の放射能を A_1 、原子数を N_1 、崩壊定数を λ_1 、半減期を T_1 、娘核種の放射能を A_2 、原子数を N_2 、崩壊定数を λ_2 、半減期を T_2 とすれば、以下の関係式が成立する [1]。

$$N_2/N_1 = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \dots (1)$$

$$A_2/A_1 = 1 + (N_2/N_1) = 1 + \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \dots (2)$$

(2)において、

$$A_1 = 1 [\text{MBq}],$$

$$\lambda_1 = \ln 2 / T_1 = 0.693 / (12.8 \times 24 \times 3600),$$

$$\lambda_2 = 0.693 / (40.3 \times 3600)$$

を代入すると

$$A_2 = A_1 \times [1 + \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] = 1.15 [\text{MBq}]$$

【参考文献】

- [1] 例えば 柴田徳思編 放射線概論 (第一種放射線試験受験用テキスト) 通商産業研究社 第7版
(化学: 河野正一 荒野 泰 第2章「放射平衡」)

III-24 次の放射性同位元素とそれを検出する測定器の組合せのうち、最も不適切なものはどれか。

放射性同位元素 測定器

- ① ^3H NaI (Tl) シンチレーション検出器
 ② ^{22}Na BGO シンチレーション検出器
 ③ ^{55}Fe Si (Li) 半導体検出器
 ④ ^{59}Fe Ge 半導体検出器
 ⑤ ^{210}Po ZnS (Ag) シンチレーション検出器

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は①

① 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ない。その代表的な方法としては、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、液体シンチレータに溶かし込んで測定する液体シンチレーション法がある。一方、NaI (Tl) シンチレーション検出器は、ヨウ化ナトリウム (NaI) の結晶と入射 γ 線との相互作用によって生じる光 (シンチレーション) を利用して γ 線を

測定するものがある。ヨウ化ナトリウムは潮解性があるためアルミ容器等で保護されており、 β 線の計測には適しない。 [1], [2]

- ② ^{22}Na は陽電子放出同位体で、ポジトロン断層法 (PET) において陽電子を生み出すのに用いられる。また、PET 装置の検出器として用いられる BGO シンチレーション検出器は、陽電子が対消滅する際に発生する γ 線を検出する。
 ③ 正しい。 ^{55}Fe は半減期 2.73 年で軌道電子捕獲により壊変し 5.9keV の特性 X 線を発生することから、蛍光 X 線分析装置の励起 X 線源として用いられる。また、Si (Li) 半導体検出器は 50keV 以下の X 線領域の測定に用いられる。 [3], [4]
 ④ 正しい。 ^{59}Fe は半減期 44.5 日で β 壊変し γ 線を発生する放射性物質で、医療や農業分野においてトレーサーとして使用される。Ge 半導体検出器は、 γ 線エネルギー分析及び放射性核種毎の線量率等を測定するために広く使用される検出器である。 [2], [5]
 ⑤ 正しい。 ^{210}Po は、138 日の半減期で α 粒子を放出する。その際に発生する熱を利用して宇宙衛星のエネルギー源として使用された。ZnS (Ag) シンチレーション検出器はウランやプルトニウムなどの α 線のサーベイメータとして利用されており、 ^{210}Po の α 線の検出も可能である。

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典 ATOMICA, トリチウムの液体シンチレーション法による測定 (09-04-03-25)
 [2] 原子力百科事典 ATOMICA, 環境放射線の測定法 (09-01-05-03)
 [3] 原子力百科事典 ATOMICA, 蛍光 X 線分析の原理と応用 (08-04-01-26)
 [4] 原子力百科事典 ATOMICA, スペクトロメトリ (α 線, β 線, γ 線, 中性子) (09-04-03-19)
 [5] 原子力百科事典 ATOMICA, 栄養素や肥料の挙動の研究におけるトレーサ利用 (08-03-02-02)

III-25 β 放出体を含む試料の放射能を求めるため、分解時間が $200 \mu\text{s}$ の GM 計数管を用いて 1 分間測定したところ、計数値は 30,000 カウントであった。1 分間の測定で数え落された計数値に最も近いものはどれか。

- ① 6 ② 60 ③ 600 ④ 3,000 ⑤ 3,300

【解答と解説】

正解は⑤

GM 計数管の分解時間による数え落しの補正に関する問題である。1 秒間に検出器に入射した放射線の数を n_0 、その時の計数を n とする。また、検出器の分解時間を τ 秒とする。検出器は 1 秒間のうち、 $n \tau$ 秒は計測ができないため、計測は $(1 - n \tau)$ 秒間で行われたこととなる。

よって、

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

$$n_0 = n / (1 - n \tau) = (30000/60) / \{1 - (30000/60) \times 200 \times 10^{-6}\} = 556$$

1 分間に換算すれば、 $556 \times 60 = 33,333$ [カウント毎秒]

従って、数え落しは、

$$33,333 - 30,000 = 3,333 \quad \text{最も近いものは⑤となる。}$$

III-26 厚さ 3.6 cm の鉛で作られたしゃへい容器の中心に、37GBq の⁶⁰Co 密封線源が収納されている。この容器の中心から 2m の位置で 30 分間作業する場合、予想される被ばく線量 (μSv) に最も近い数値はどれか。

ただし、⁶⁰Co の実効線量率定数は $0.31 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 、鉛の⁶⁰Co に対する半価層は 1.2 cm とする。

- ① 0.18 ② 180 ③ 350 ④ 710 ⑤ 1,400

【解答と解説】

正解は②

被ばく量は、線源からの距離の 2 乗に反比例し、作業時間 (被ばく環境にいる時間) に比例する。また、遮蔽体の半価層は透過する線量が半分になる厚さである。したがって、問題文での被ばく線量は、以下で計算される。

$$D = R \times (1/2)^{(3.6/1.2)} \times 1/L^2 \times F \times t$$

ここで、D: 被ばく線量 (μSv)

R: ⁶⁰Co の放射能 (MBq)

L: 線源からの距離 (m)

F: 実効線量率定数 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$)

t: 作業時間 (h)

$$= 37 \times 10^3 \times (1/2)^3 \times 1/2^2 \times 0.31 \times 0.5$$

$$\approx 180$$

III-27 放射線の人体影響には確率的影響と確定的影響があるが、これらに関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 確率的影響は、放射線防護上は線量のしきい値がないとされている。
 ② 造血障害と奇形は、確率的影響に分類される。
 ③ 脱毛と不妊症は、確定的影響に分類される。
 ④ 確定的影響では、被曝線量が増加すると一般的に症状が重くなる。
 ⑤ 遺伝的な影響は、確率的影響に分類される。

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は②

造血障害は確定的影響に分類される。

参考に、確率的影響と確定的影響の分類と特徴^[1]を下表に示す。

種類	しきい線量	線量の増加により変化するもの	例
確率的影響	存在しない	発生頻度	がん、遺伝的影響
確定的影響	存在する	症状の重篤度	白内障、脱毛、不妊など、確率的影響以外のすべての影響

【参考文献】

- [1] 柴田徳思編 放射線概論 (第一種放射線試験受験用テキスト) 通商産業研究社 第7版 (生物学: 杉浦神之 第2章「放射線影響の分類」)

III-28 ガン治療法に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① PET 療法では、¹⁸F で標識されたグルコースを投与し、腫瘍細胞

に選択的に取り込まれた¹⁸F の壊変に伴って放出される β^+ 線によってガンを治療する。

- ② RI 内用療法では、¹³¹I を含むヨウ化ナトリウムを投与し、甲状腺組織に選択的に取り込まれた¹³¹I の壊変に伴って放出される β^- 線によってガンを治療する。
 ③ BNCT では、あらかじめホウ素化合物を投与し、腫瘍細胞内に選択的に取り込まれたホウ素と体外から照射した中性子との核反応で発生する α 粒子と反跳リチウム原子核によってガンを治療する。
 ④ ガンマナイフでは、100 個以上の線源からの γ 線が体深部の病巣に焦点を結ぶように設計されており、病巣に多くのエネルギーを与えてガンを治療する。
 ⑤ 粒子線治療法では、陽子線や炭素線の物質中でのエネルギー分布がブラッグ曲線となることを利用し、体深部の病巣に多くのエネルギーを与えてガンを治療する。

【解答と解説】

正解 (不適切なもの) は①

PET (Positron Emission Tomography, 陽電子断層撮像法) は、核医学検査法の一つであり、ガン治療に用いられるものではない。

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典 ATOMICA, PET の原理と応用 (08-02-01-04)

III-29 設備容量 A [kW], 年間発電電力量 B [kWh] の発電所の償却、維持、運転までにかかる年間総費用が、 $(A \times f + B \times v)$ [円]

で表されるものとする。ここで、f は減価償却や設備維持のための固定費単価 [円/kW], v は燃料費などの変動費単価 [円/kWh] である。また、各種発電所の固定費単価と変動費単価の組合せを、(f : v) と表すこととする。

さて、原子力発電所 (25,000 : 2) と天然ガス火力発電所 (10,000 : 5) があり、その設備容量、年間発電電力量が、両発電所ともに A [kW], B [kWh] であるとする。このとき、両発電所の年間総費用が同じ値となる年間設備利用率として、最も適切な値はどれか。

- ① 0.2 ② 0.4 ③ 0.6 ④ 0.8 ⑤ 1.0

【解答と解説】

正解は③

年間費用総額が等しいことから、

$$A \times 25000 + B \times 2 = A \times 10000 + B \times 5$$

$$15000 \times A = 3 \times B$$

$$B = 5000 \times A \quad \dots \text{①}$$

一方、年間設備利用率は、設備容量の出力を 1 年間継続した時の年間発電電力量が $(A \times 24 \times 365)$ [kWh] であることから、

$$(\text{年間設備利用率}) = B / (A \times 24 \times 365)$$

①の関係より

$$(\text{年間設備利用率}) = 0.57 \approx 0.6$$

III-30 タービンなどの熱機関を直列につないで熱効率を向上させる手段があり、これを活用したものがガス火力発電などのコンバインドサイクルシステムである。 η_1 及び η_2 の熱効率を持つ熱機関を 2 台直列につないだ場合の総合熱効率 η_t を表す式として、最も適切なものはどれか。なお、熱効率 η は、注入された熱量を Q、出

力をWとしたとき、 $\eta = W \div Q$ で定義される。

- ① $\eta_t = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \times \eta_2$
- ② $\eta_t = \eta_1 + \eta_2$
- ③ $\eta_t = 1 - \eta_1 \times \eta_2$
- ④ $\eta_t = \eta_1^2 + \eta_2^2 - \eta_1 \times \eta_2$
- ⑤ $\eta_t = \sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}$

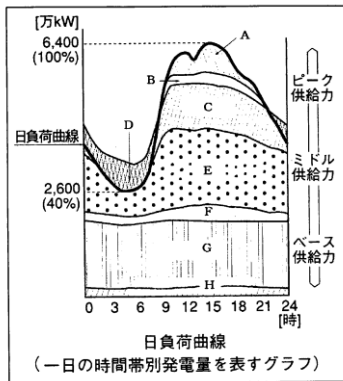
【解答と解説】

正解は①

熱機関を直列につなぐことから、1 段目の機関から得られる出力 W_1 は、 $W_1 = Q \times \eta_1$ となる。2 段目の機関に注入される熱量 Q_2 は、1 段目の排熱分に相当し $Q_2 = Q \times (1 - \eta_1)$ となり、得られる出力 W_2 は、 $W_2 = Q \times (1 - \eta_1) \times \eta_2$ となる。したがって、総合熱効率は以下となる。

$$\begin{aligned} \eta_t &= (W_1 + W_2) \div Q \\ &= (Q \times \eta_1 + Q \times (1 - \eta_1) \times \eta_2) \div Q \\ &= \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \times \eta_2 \end{aligned}$$

III-3 1 我が国の電源開発にあたっては地球温暖化問題への対応、安定供給やコスト、性能の観点からバランスのとれた電源構成を築く必要があり、電源設備の多様化が進められている。下図は、ある年の夏季の典型的な一日の電力需要に対応した発電設備の利用状況を示したものである。この電源多様化に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。ただし、A~Hは各種の電源設備名称を表している。



参考図：2007年頃の夏季の典型的な一日の電力需要に対応した電源多様化の例（「図説電力システム工学」（丸善株式会社）p.6より転載）

- ① 揚水式水力 (A)、調整池式/貯水池式水力 (B) は、資本費は高いが、需要の変動への対応が極めて容易であることからピーク供給力として活用される。
- ② 石油火力 (C) は、燃料費がガス火力や石炭火力に比べて相対的に高く、かつ原油価格などの変動に左右されるが、資本費は安く、需要変動への対応に優れていることなどからピーク供給力として活用される。
- ③ LNG, LPG, その他ガス火力 (E) は、燃料費は石油火力より安く、資本費は石炭火力より安い、需要変動への対応も優れていることなどからミドル供給力として活用される。
- ④ 石炭火力 (F) は、原子力と比べ資本費も燃料費も安く、需要変動への対応も容易であり、運転中の二酸化炭素の単位発電量に対する排出量が他の火力発電に比べて少ないことなどから、ベース供給力として活用される。
- ⑤ 原子力 (G) は、ガス火力と比べ資本費は高いが燃料費が安い、運転中の二酸化炭素などの単位発電量に対する排出量が非常に少な

いことなどから、ベース供給力として活用される。

【解答と解説】

正解（不適切なもの）は④

石炭火力は原子力と比べ「燃料費は高く」、二酸化炭素の単位発電量に対する排出量が他の火力発電に比べて「多い」。

なお、問題文に無い記号は「D：揚水用動力」「H：流込式水力発電」を示している。

III-3 2 我が国のエネルギーを取り巻く情勢に関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。

- ① 我が国の一次エネルギーの国内供給に占める石油の割合は、1973年度第一次オイルショック時には8割程度あったが、その後依存度を低下させる政策が導入された結果、2011年度には4割程度まで改善した。
- ② 2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所の重大事故の教訓を踏まえ、独立して原子力安全規制に関する業務を担う原子力規制委員会が、経済産業省の外局として発足した。
- ③ 水力・地熱・太陽光・バイオマス等によるエネルギー自給率は2010年度で5%程度であるが、資源依存度が低く準国産エネルギーと位置づけられる原子力を含めると、約20%となる。
- ④ 化石燃料への依存低下、並びに低炭素社会の実現に向け、石油代替策の見直しが行われ、2012年から、再生可能エネルギー導入拡大が進んだ国で採用されている固定価格買取制度が導入された。
- ⑤ 最終エネルギー需要は、大きく産業部門、民生部門、運輸部門に大別される。過去40年の間に民生部門と運輸部門の占める割合が増加している。

【解答と解説】

正解（不適切なもの）は②

「原子力規制委員会設置法案」が、2012年6月20日に参議院本会議において可決され成立され、その第二条に「環境省の外局として、原子力規制委員会を設置する。」と規定されている。（原子力規制委員会は、原子力推進側の官庁である経済産業省からの独立性を高めるために、環境省の外局として設置された。）

したがって、経済産業省の外局との記述は誤り。

【参考文献】

- [1] 原子力規制委員会ホームページ <https://www.nsr.go.jp/>

III-3 3 次の記述のうち、原子力発電所の安全を規制する法律である原子炉等規制法（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律）に定められていないものはどれか。

- ① 原子力発電所を設置しようとする者は、原子力規制委員会の許可を受けなければならない。
- ② 原子力発電所の設置又は変更の工事を行うときは、当該工事に着手する前に、その工事の計画について原子力規制委員会の認可を受けなければならない。
- ③ 原子力発電所で使用する放射性同位元素で、政令で定める数量を超えるものは、原子力規制委員会の認可を受けなければ、これを使用することはできない。
- ④ 原子力発電所で燃料として使用する核燃料物質は、法に基づいた検査を受け、これに合格した後でなければ使用できない。

⑤ 原子力発電所の設置者は、保安規定を定め、原子力規制委員会の認可を受けなければならない。

【解答と解説】

正解（不適切なもの）は③

原子炉等規制法においては、原子力発電所の設置から運転に至る各段階において「設置の許可」、「設計及び工事の方法の認可」「使用前検査」「保安規定の認可」を受けなければならない。

なお、放射性同位元素に関しては、「放射線同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」に基づき規制が行われている。

Ⅲ-34 世界各国の核燃料サイクルへの取組みに関する次の記述のうち、最も不適切なものはどれか。なお、ここでは、軍用でない再処理工場を商業用再処理工場としている。

- ① 我が国は、これまで使用済燃料をリサイクルする政策を採っており、青森県六ヶ所村に商業用再処理工場を建設中である。
- ② イギリスは、これまで使用済燃料をリサイクルする政策を採っており、商業用再処理工場を有している。
- ③ フランスは、これまで使用済燃料をリサイクルする政策を採っており、商業用再処理工場を有している。
- ④ スウェーデンとフィンランドは、使用済燃料を直接処分する政策を採っており、商業用再処理工場を有していない。
- ⑤ アメリカは使用済燃料を直接処分する政策を採っているが、商業用再処理工場を有している。

【解答と解説】

正解（不適切なもの）は⑤

米国では1977年のカーター政権時代に、核不拡散上の懸念から商業的再処理を禁止する政策が決定された。

【参考文献】

[1] 原子力百科事典 ATOMICA, アメリカの核燃料サイクル (14-04-01-05)

Ⅲ-35 世界の原子力事情に関する次の記述の、に入る国名の組合せとして最も適切なものはどれか。

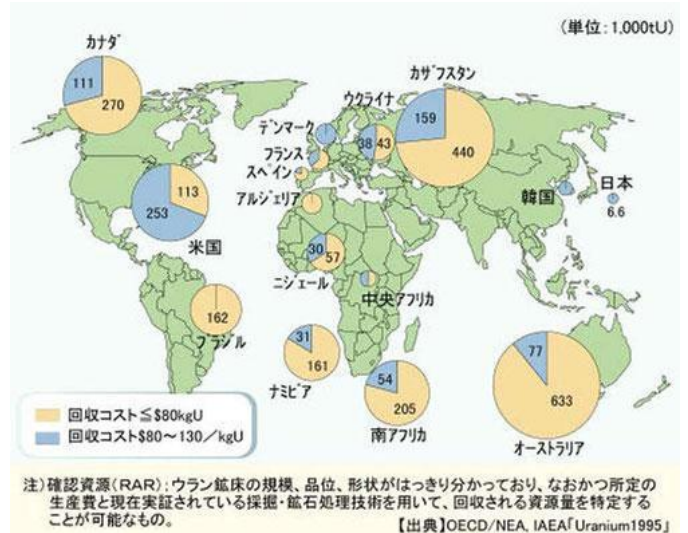
2013年時点で我が国の原子力発電所設備容量は、アメリカ、 a について3番目の設備能力を有している。世界のウラン資源は広く分布しており、2011年時点では b 、オーストラリア、カザフスタンが生産量の上位を占めている。世界のウラン濃縮事業は、ロシアのTENEX、フランスのAREVA、イギリス・ c ・ドイツ3か国の共同事業体URENCO、アメリカのUSECの4社で90%以上のシェアを占めている。我が国の再処理事業を含むプルトニウム利用計画は、 d の原子力協定包括同意条項に基づく承認を受けている。

- | | a | b | c | d |
|---|------|-----|------|------|
| ① | フランス | カナダ | イタリア | アメリカ |
| ② | フランス | カナダ | オランダ | アメリカ |
| ③ | フランス | ロシア | イタリア | フランス |
| ④ | ロシア | ロシア | オランダ | アメリカ |
| ⑤ | ロシア | カナダ | イタリア | フランス |

【解答と解説】

正解は②

参考として、ウラン資源量及び世界のウラン濃縮工場の分布を以下に示す。（日本原燃HPより）



世界のウラン濃縮工場

(2012年12月現在)

国名	事業者	所在地	濃縮法	規模 (tSWU [※] /年)
アメリカ	合衆国濃縮公社 (USEC)	パデューカ	ガス拡散法	11,300
フランス	Eurodif	トリカスタン	ガス拡散法	10,800
イギリス	URENCO	カーベンハースト	遠心分離法	5,000
オランダ	URENCO	アルメロ	遠心分離法	4,600
ドイツ	URENCO	グロナウ	遠心分離法	3,250
ロシア	Shiberia Chemical & Complex (JSC SCC)	トムスク	遠心分離法	4,000
	Angarsk Electrolysis Chemical Combine (JSC AECC)	アングルスク	遠心分離法	1,000
中国	中国核工業集团公司 (CNNC)	陝西省漢中	遠心分離法	1,000
		甘粛省蘭州	遠心分離法	500
日本	日本原燃株式会社 (JNFL)	青森県六ヶ所村	遠心分離法	最終的には1,500
パキスタン	パキスタン原子力委員会 (PAEC)	カフタ	遠心分離法	5

※SWU:天然ウランから濃縮ウランを分離する際の作業量単位