

## 第 68 回

原子炉主任技術者試験（筆記試験）

### 原子炉燃料及び原子炉材料

6 問中 5 問を選択して解答すること。（各問 20 点：100 点満点）

（注意）（イ） 解答用紙には、問題番号のみを付して解答すること。

（指示がない限り問題を写し取る必要はない。）

（ロ） 1 問題ごとに 1 枚の解答用紙を使用すること。

（ハ） 第 6 問については、6 問中 4 問を選択して解答すること。

令和 8 年 3 月 18 日

第1問 我が国の核燃料サイクルにおける軽水炉の使用済燃料の貯蔵や再処理などに関する次の文章中の□に入る適切な語句を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□には、同じ語句が入るが、(1)から(4)では異なる番号の□に同じ語句を使ってもよい。また、⑧については具体的な名称を、⑮及び⑯については該当する物質名を、⑰については燃料の種類の名を、⑱についてはガラスの種類の名を記すこと。

[解答例] ㉑-原子炉

- (1) 軽水炉の使用済燃料は、まず原子炉施設内の□①で数年間冷却される。この方式での冷却は、使用済燃料を水中で貯蔵するため、□②の除去と放射線の□③を同時に行うことができる。十分冷却された使用済燃料は、必要に応じて□④貯蔵に移される。□④貯蔵では、使用済燃料を金属製の□⑤に□⑥とともに封入し、□⑥雰囲気中で再処理まで保管する。国外の例であるが、コンクリート製の□⑤を用いる場合には、金属製の□⑦に使用済燃料を□⑥とともに封入して保管する。
- (2) 使用済燃料の再処理には□⑧法が用いられる。この方法ではまず燃料棒を□⑨した後、それらを□⑩に溶解させる。□⑩の溶解液に□⑪を加えるとウランとプルトニウムは各々□⑫を形成して□⑬相へ移るが、核分裂生成物は□⑫を形成し難いため□⑭相に残る。その後、還元剤の硝酸ウラナスと還元反応を安定化させる□⑮を加えてプルトニウムを□⑭相に分離する。
- (3) 再処理施設において、ウランは溶液として回収され、この溶液の熱処理等を行ってウラン酸化物とする。ここで、回収されるウランの溶液中では、ウランは□⑯の形態で存在する。プルトニウムは回収された溶液と□⑯溶液とを混合して□⑰した後、熱処理等を行って□⑱燃料の原料とする。
- (4) 再処理で発生した高レベル放射性廃液は□⑲ガラスを用いてガラス固化体として安定化された後、最終的には□⑳が想定されている。

第2問 軽水炉用制御棒に関する次の文章中の□に入る適切な語句を番号とともに記せ。

なお、同じ番号の□には、同じ語句が入るが、(1)と(2)では異なる番号の□に同じ語句を使ってもよい。

[解答例] ㉑-原子炉

- (1) PWR の制御棒は□①側から挿入され、□②構造で□③内を上下動する。被覆管には□④が使用される。主制御材は□⑤合金であり、これは□⑥性に優れ、照射による□⑤合金の体積変化は□⑦い。□⑤合金の構成元素のうち中性子吸収断面積が最も大きいのは、□⑧である。長期使用では、□⑤合金の構成元素のうち□⑨が被覆管へ□⑩して脆化が生じる。また、冷却材には□⑪を溶解した水が使用されている。
- (2) BWR の制御棒は□⑫形状をしており、炉心の□⑬側から挿入され、炉心内の出力分布を□⑭に制御する。BWR 制御棒の主構造材は□⑮が使用される。制御材には、主に粉末の□⑯と金属の□⑰の2種類がある。□⑯は中性子吸収断面積が大きい、照射により□⑱ガスが発生して膨張する。□⑰は、水および高温水蒸気中で□⑲性を示し、照射による寸法変化が□⑳い。

第3問 発電用軽水炉にて使用される燃料材料とその使用中の挙動に関する以下の問いに答えよ。

- (1) 以下の文中における□に入る適切な語句を番号とともに記せ。また、このような傾向が見られる原因について簡潔に述べよ。

[解答例] ㉑-原子炉 原因は、・・・

ジルコニウム基合金製燃料被覆管と高温の冷却水の反応のうち、特に PWR の一様腐食に関して、腐食層の厚みが増大した条件では、腐食層の熱的な特性に起因して腐食速度が□①なりやすい傾向にある。

- (2) 以下の文中における□に入る適切な語句を番号とともに記せ。また、文中の挙動に寄与する主要な「核的な特性」について答えよ。なお、同じ番号の□には同じ語句が入る。

[解答例] ㉑-原子炉 核的な特性は、・・・

MOX 燃料の設計に際して考慮すべき事項のうち、□②ガスの生成量及び□③量が  $\text{UO}_2$  燃料に比べて□④する傾向にあることはその核的な特性に由来しており、燃料棒内圧を□④させる形で燃料挙動に影響を及ぼす。

- (3) 以下の文中における□に入る適切な語句を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□には同じ語句が入る。

[解答例] ㉑-原子炉

燃料ペレット径は同一で、燃料被覆管径の相違によりギャップサイズのみが異なる2本の燃料棒が同じ線出力条件の下で照射されたとき、最終的に FP ガスの放出量が大きくなるのはギャップサイズの□⑤燃料棒である。このような違いが生じる原因として、ギャップサイズの□⑤条件では、□⑥が小さく、したがって同じ線出力でも□⑦が高くなるため、FP ガスの□⑧機構による□⑨から□⑩への移行が加速されること、さらに□⑩においても□⑪の移動性が高く、粗大な□⑫の成長、この結果

としての⑬の形成が生じやすいことが挙げられる。更に⑦がある水準を超えると、⑭の粗大化、すなわち⑩の再構成も生じる。これは⑩が保持しうる FP ガスインベントリを小さくする効果を有することから、一般には FP ガスの放出を促進する機構として知られる。なお⑦上昇による⑪の移動性増大は粒内でも生じ、焼き締め挙動にも影響を及ぼす。

第4問 発電用軽水炉で想定される事故条件下の燃料挙動に関して、以下の問いに答えよ。

(1) 1200℃の温度条件下で高温水蒸気中にしばらく置かれた後、冷却水によって急冷されたジルコニウム基合金製燃料被覆管の水平断面を観察したところ、肉厚中央から被覆管外面側に向けて、3種類の相が層状構造を示していることを確認できた。

① 各層を構成する物質・組織名を選択肢から選び、層の位置関係とともに答えよ。

【選択肢】

δ相ジルコニウム水素化物、安定化α相ジルカロイ、ジルコニア（単斜晶）、prior-β相ジルカロイ、γ相ジルコニウム水素化物、ジルコニア（立方晶）

〔解答例〕 肉厚中央側から順に、・・・・・・、・・・・・・、・・・・・・

② 各層の形成の過程を簡潔に述べよ。各層が①で回答した位置関係となっている理由に言及すること。

③ 3層のうち、最も延性の大きな層はどれか答えよ。

④ 同じ温度条件でより長い時間、高温水蒸気中に置かれた場合、観察される組織の様子はどのように変化するか答えよ。

(2) 通常運転時の高温水中における被覆管外面腐食は、その程度によっては事故条件下の燃料破損挙動に影響を及ぼす場合がある。このような影響について記述した以下の文中の□□に入る適切な語句を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□□には同じ語句が入る。

〔解答例〕 ⑩-原子炉

外面腐食に伴って金属層中への□①□の吸収が進むと、被覆管の延性が□②□する。反応度事故時の□③□負荷のように、被覆管温度が比較的□④□状態で機械的な負荷が生じた場合、破損限界は□①□吸収量の増加とともに低下する傾向を示す。また同じく□①□吸収量の増加により、冷却材喪失事故時に□⑤□の発生温度が低下する影響、破断強度が低下する影響(被覆管金属層の延性に影響を及ぼすことが知られる□⑥□の濃度が同じ条件で比較した場合)が知られている。

第5問 軽水炉材料の検査技術に関する以下の文章中の□に入る適切な語句を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□には、同じ語句が入る。

〔解答例〕⑪-原子炉

- (1) 目視試験は、きずの検出のための最も基本的な検査技術の一つである。日本機械学会の「発電用原子力設備規格 維持規格」では、試験対象の表面に近接可能な場合に適用される□①においては、視角や欠陥識別度を改善するために□②を用いてもよいとされている。また、機器表面の異常を直接検出する試験のみならず、漏えい試験の場合に漏えいを検出する試験が□③試験、機器の変形や支持構造物の取り付け状態等を確認する試験が□④試験として規定されている。
- (2) 微細な異常を目視で検出することは必ずしも容易ではないため、目視試験ではなく□⑤や□⑥が用いられることも多い。□⑤は、毛細管現象を利用した検査技術であり、きず内部に浸透性の高い液体(□⑦)をしみ込ませたのち、表面の□⑦の除去ときず内部の□⑦の吸出しを行うというものである。□⑥はきず部から漏えいする磁束を□⑧を用いて検出する技術である。原理的に□⑥の検査対象は□⑨である必要があるため、例えばオーステナイト系ステンレス鋼には適用できない。なお、きず部から漏えいした磁束を□⑧ではなくホール素子等の磁気センサーを用いて検査する手法は□⑩と呼ばれている。
- (3) SOAP法とは、□⑪中の微細な摩耗粉の種類と□⑫を□⑬により測定することで、特に軸受や歯車等の機器の劣化状態を評価する手法である。一方で、SOAP法では摩耗粉の□⑭を評価することはできないため、摩耗粉の□⑭の確認及びそれに基づく摩耗の発生源や摩耗の様式の推定には、□⑮が用いられることが多い。
- (4) 渦電流探傷試験は、□⑯により対象に誘導された渦電流が対象外部に作り出す磁場を測定することで、きずを検出及び評価する検査技術である。表面割れに対して高感度である一方、対象表面の凹凸や□⑰の不均一性、プローブと対象との距離の変化が大きな雑音源となるという特徴がある。誘導された渦電流は対象の表面に集中し、その度合いは対象の□⑰に加えて□⑱にも大きく依存する。原理的に渦電流の流れを妨げ

ないきずは検出できないため、渦電流探傷法で管の検査を行う場合、管と同軸であるポ  
ビン型のプローブを用いた場合は、⑱方向を向いた割れの検出は困難となること  
には注意を要する。なお、渦電流探傷試験で測定される信号は交流信号だが、通常は、  
㉔により正弦波ではなく 2次元平面上の 1点として信号を表示する。

第6問 材料及び材料劣化に係る事項に関する以下の(1)～(6)の問いについて、4問を選択し回答せよ。なお、5問以上を解答した場合は、全ての解答を無効とする。

- (1) 応力腐食割れの3つの要因とは何かを挙げよ。続いて封止溶接とはどのような溶接かを説明し、なぜ封止溶接によって応力腐食割れの進展を止めることができるのかを説明せよ。
- (2) ステンレス鋼とはどのような材料か説明し、オーステナイト系ステンレス鋼の公称応力-公称歪み曲線の概形を図示せよ。
- (3) 純鉄を常温から1500℃まで加熱していった場合、温度とともに結晶構造はどのように変化するかを説明し、温度と体積の関係を示すグラフの概形を図示せよ。
- (4) 日本機械学会の「発電用原子力設備規格 維持規格」において規定されている第一段階の欠陥評価と第二段階の欠陥評価の概要を説明せよ。
- (5) TIG溶接とMIG溶接の違いを、溶接材料供給方法と電極の観点から説明せよ。
- (6) 二相ステンレス鋳鋼の熱時効の主たるメカニズムと、熱時効による二相ステンレス鋳鋼の機械的特性の変化を説明せよ。

【メモ】

【メモ】