

第 64 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4年3月17日

第1問 核燃料サイクルにおける燃料製造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。⑧と⑨には元素名を記せ。なお、同じ番号の□には、同じ語句が入る。

〔解答例〕 ㉑－東京

- (1) 我が国で現行の軽水炉で用いる MOX 燃料ペレットも UO_2 燃料ペレットと同様に原料粉末を□①後に焼結して製作され、燃料棒、集合体に組み立てられるが、□②工程が追加される。この工程では、プルトニウムの□③及び同位体比が異なる原料粉末から仕様に合った□③が均一の大きなバッチに作り上げられる。この工程は、MOX 燃料ペレット製作時の□④性、□⑤性、□⑥性等に大きく影響するため重要である。
- (2) 軽水炉用ジルカロイ被覆管の製造に用いる金属ジルコニウムの原料は、□⑦と呼ばれるジルコニウム鉱石である。この原料を還元するとともに不純物元素である多量の□⑧と中性子吸収断面積の大きい□⑨を除去する□⑩工程で□⑪と呼ばれる金属ジルコニウムを製造する。
- (3) 軽水炉用ウラン燃料製造のために濃縮された□⑫を UO_2 粉末にする再転換方法の一つに、ADU 湿式法がある。この方法では、□⑫を加熱して気化させた後、□⑬反応によって□⑭水溶液とする。この水溶液を□⑮と反応させると黄橙色の ADU 沈殿が得られる。この沈殿をろ過、乾燥させて□⑯雰囲気中で焙焼すると UO_2 粉末が得られる。
- (4) 軽水炉から取り出された使用済ウラン燃料のピューレックス法再処理において、燃料の溶液は□⑰工程を経た後、分離分配工程に送られ、溶液中のウランとプルトニウムは、□⑱をドデカンと混合した有機溶媒により抽出する。分離分配工程では、ウランやプルトニウムを含む溶液の硝酸濃度と□⑲条件の違いによってウランと、プルトニウムの□⑲への分配係数が異なる現象を利用して抽出している。また、溶液中に残された核分裂生成物や□⑳は、高レベル廃棄物として処理する。

第2問 核燃料サイクルにおける核燃料や炉心材料などに関する以下の問いに答えよ。

- (1) イエローケーキから脱硝し水素で還元した二酸化ウランから四フッ化ウランを生成し、さらに四フッ化ウランから六フッ化ウランを生成する際に用いる刺激臭のガスをそれぞれ記せ。また、四フッ化ウラン粉末の色、六フッ化ウランの三重点および大気圧下での昇華点を記せ。さらに、六フッ化ウランが水分と接触すると生成するウラン化合物の化学式を記せ。
- (2) 軽水炉で使用中の燃料棒に水蒸気が接触するとき、ジルカロイ被覆管表面に生じる現象を反応式で記せ。また、軽水炉の炉心構成材料であるジルカロイ、ステンレス鋼、インコネル、 B_4C および $Ag-In-Cd$ 合金について、融点が高いものから順に記せ。
- (3) 高濃度のアクチノイドイオンを含む酸性水溶液は、酸化数に応じて種々の色を呈する。6価のウラン、4価のウラン、3価のプルトニウム、4価のプルトニウムのイオンの酸性水溶液が呈する色をそれぞれ記せ。また、ピューレックス法再処理の抽出工程において利用される6価の硝酸溶液に溶解しているウラン化合物の化学式を記せ。
- (4) 軽水炉で使用されたウラン燃料を再処理工場でせん断及び溶解する工程を経ると、使用済燃料中に蓄積されたトリチウムは大別して3つの形態で存在する。それぞれの形態について説明せよ。

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) 被覆管材料として用いられる Zircaloy-2 と Zircaloy-4 で共通に含まれる合金元素を3つ挙げよ（母相である Zr を除く）。また、PWR 用改良ジルコニウム基合金被覆管の多くで採用されている代表的な添加元素を1つと、その主な効果（性能向上）を挙げよ。
- (2) 図1は、燃料棒に封入された燃料ペレットが照射開始後、燃焼度ゼロ～約30 GWd/t の区間に示す見かけ上の外径増を模式的に示している。ただし、同図において、外径増に対する熱膨張の寄与は除かれている。また、燃料棒の線出力密度は燃焼度ゼロの時点で初めて有意な大きさとなり、それ以降は一定とする。このとき、図中 A、B、C のような挙動の原因となる現象についてそれぞれ簡潔に述べよ。

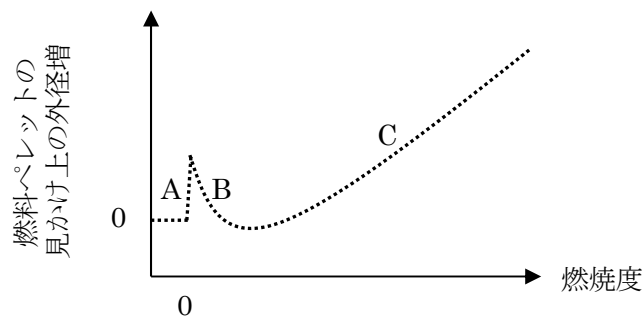


図1 燃料ペレットの見かけ上の外径増と燃焼度の関係

- (3) UO_2 燃料ペレット中で生じる核分裂反応により、核分裂生成物（FP）が生じる。FPの内、(イ) 燃料ペレット中で移行しやすいものを元素名で4つ挙げよ。また、このうち(ロ) Puの核分裂では大幅に収率が小さくなるものを1つ挙げよ。
 [解答例] (イ) H、He、Li、Be (ロ) H
- (4) 高燃焼度まで照射した燃料ペレットを対象とした照射後試験において、主にペレット結晶粒内に保持された希ガス FP 元素の径方向分布を調べたところ、中央部と最外周部で保持量の減少が観察された。それぞれの領域で照射中に生じた現象に関して、簡潔に述べよ。

第4問 発電用軽水炉で使用される燃料棒が、水蒸気雰囲気下で図2に示すような温度履歴を経験したケースを想定する。このときの燃料挙動に関して、以下の問いに答えよ。ただし、他の条件は次のとおりである。

- ・被覆管はジルコニウム基合金製である。
- ・被覆管内の温度分布は一様である。

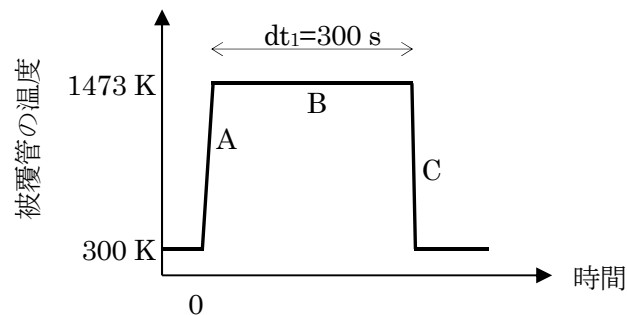


図2 燃料棒の温度履歴

- (1) Aの温度域で被覆管の金属組織に生じる変化について、結晶構造の観点から簡潔に述べよ。
- (2) Aの温度域で被覆管が示す可能性のある力学的な挙動とその機構について簡潔に述べよ。
- (3) Bの時間帯（時間区間 dt_1 ）で被覆管の金属組織に生じる変化について簡潔に述べよ。
- (4) 時間区間 dt_1 で被覆管の単位軸方向長さあたりに生じる重量変化を模式的に記し、そのような時間推移となる理由を述べよ。横軸を時間、縦軸を単位軸方向長さあたりの重量変化とする。
- (5) 時間区間 dt_1 で被覆管の金属組織に生じた変化がCの時間帯以降の燃料挙動に及ぼす可能性のある影響について、事故時の安全評価の観点から簡潔に述べよ。
- (6) 上記(2)の力学的な挙動が、上記(3)の金属組織に生じる変化に及ぼす影響について簡潔に述べよ。

第5問 軽水炉材料に関する以下の文章中の□に入る適切な語句又は数値を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□には、同じ語句又は数値が入る。

〔解答例〕 ①—東京

(1) 鉄（純鉄）の結晶構造は、常温においては□①□であるが、温度を上昇させてゆくと約911°Cにおいて□②□に変化するという特徴がある。□②□となることで原子間隔が広がるため、例えば鉄と炭素を混ぜ合わせた状態で高温に保持することで、鉄に炭素を固溶させることが可能となる。この状態でゆっくりと冷却させると、□①□の鉄原子に、炭素原子が3:1で結合した□③□と呼ばれる固い化合物が析出する。そのため、炭素の添加量と共に鉄の硬さや引っ張り強さは増すことになる。尚、上記□②□状態の鉄は最大で□④□%までしか炭素を固溶することができないため、炭素量□④□%を境に機械的特性に顕著な変化が生じ、炭素量□④□%以下のものが炭素鋼と呼ばれている。

(2) 図3はFe-Fe₃C系における平衡状態図を簡略化して示したものである。この図に基づくと、炭素を0.35%含む鋼を1000°Cから冷却していった場合、A₃変態線においてフェライトが析出し、A₁変態温度まではフェライトとオーステナイトの比はおおよそ□⑤□である。オーステナイトはA₁変態温度においてフェライトと□③□からなる層状の□⑥□へ変態するため、A₁変態温度以下ではフェライトと□⑥□の組織となる。一方で炭素を1%含む鋼を同様に1000°Cから冷却していった場合、約□⑦□°Cにおいてオーステナイト相の粒界から□③□が析出し、A₁変態点温度以下では□③□と□⑥□の組織になる。

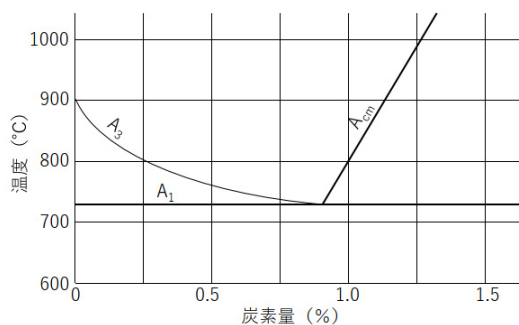


図3 Fe-Fe₃C系における平衡状態図

- (3) ステンレス鋼とは鉄に 10.5%以上のクロムを含ませ、かつ炭素の含有量を⑧%以下とした合金をいう。ステンレス鋼は、この Cr 系と、耐食性、加工性を向上することを目的にさらに Ni を添加した Fe-Cr-Ni 系に大別され、原子力設備でも多く用いられる SUS304、SUS316 は後者に属する。SUS304 に比べると SUS316 は Ni の含有量がより高く、さらに⑨を添加することで耐腐食性を高めているという特徴がある。ただし、いずれも高温に保持されると材料中の炭素が⑩のクロムと炭化物を形成するため、⑩において局所的に耐腐食性が低下し、応力腐食割れの発生につながる可能性があることが知られている。

第6問 材料劣化及び検査、補修技術に関する以下の(1)～(6)の問いについて、4問を選択し、それぞれ簡潔に回答せよ。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) 非磁性材料の表面に発生した割れを、割れ発生面からの渦電流探傷法により評価することを想定する。得られる信号から、割れの長さ、深さを評価する方法について、その原理と共に説明せよ。
- (2) 応力腐食割れが発生した炉内構造物の補修方法である封止溶接とはどのようなものかを、応力腐食割れの発生メカニズムと共に説明せよ。
- (3) 一般的な金属材料のS-N曲線の概略図を示し、高サイクル疲労とはどのような劣化現象であるかを説明せよ。加えて、原子力発電所において高サイクル疲労が発生しうる部位を挙げよ。
- (4) 漏えい磁束探傷法と磁粉探傷法の差異及び類似性について説明せよ。
- (5) VT-1、VT-2、VT-3とはどのような試験かを説明せよ。
- (6) 斜角超音波を用いて割れの深さ評価を行う際に、しばしばモード変換という現象が問題となる。このモード変換の発生原理及び測定信号に及ぼす影響を説明せよ。