

第 61 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。

（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、3問中2問を選択して解答すること。

平成 31 年 3 月 15 日

第1問 核燃料物質や核燃料サイクルに関する以下の記述について、下線部が正しいものには○印を、間違っているものには×印を、番号とともに記せ。また、×印を記したものについては、適切な語句を記せ。

〔解答例〕 ① ○ 、 ② × 核燃料

- (1) 天然ウランを原子炉内で燃焼させた場合、燃焼につれて① ウラン 233、② ウラン 237等のウラン同位体核種が生成されるとともに、天然ウランに含まれる③ ウラン 238の含有量が増加する。① ウラン 233は半減期が約 69 年であり、娘核種による線量率の上昇が起こる。また、② ウラン 237の中性子吸収断面積は、ウラン 235 よりも④ 小さい。
- (2) プルトニウム同位体（プルトニウム 238～プルトニウム 242）のうち、⑤ プルトニウム 239は、熱中性子に対する核分裂断面積がプルトニウム同位体の中で最も大きく、崩壊生成物の中には、ガンマ（ γ ）線の主な放出源となる⑥ ネプツニウム 237及び⑦ アクチニウム 227がある。また、プルトニウム 238、プルトニウム 240、プルトニウム 242 の⑧ 核破砕によって、中性子線が放出される。なお、プルトニウムが酸素やフッ素などの軽元素と共存した場合には、⑨ (n, γ)反応によって中性子線が放出される。
- (3) ウラン粗精錬における鉱石からのウラン浸出工程では、主な浸出液として⑩ 酢酸エチル又は⑪ キシレンと重曹の混合溶液が用いられる。ウランを含む浸出液から沈殿剤を加えてウランの沈殿物を生成させる工程では、⑫ 硝酸銀を加えて⑬ SDUを生成させる方法又は⑭ ヘキサンを加えて⑮ HEUを生成させる方法等が用いられる。
- (4) 使用済燃料の湿式再処理法には、沈殿（分離）法と溶媒抽出法がある。沈殿（分離）法の⑯ 重クロム酸ナトリウム法では、⑯ 重クロム酸ナトリウムに⑰ Pu (III)が共沈することを利用する。また、現行の商業規模の我が国の再処理施設で用いられている溶媒抽出法である⑱ 有機相固化法では、溶媒としてリン酸トリブチルを⑲ エタノールで希釈したものをを用いて、使用済燃料の硝酸溶解液から、⑳ U (IV)及び㉑ Pu (III)が溶媒に抽出できることを利用する。

第2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以下の問いに答えよ。

- (1) 軽水炉用の MOX 燃料加工の粉末調製工程において、原料粉末をアトリターミルで粉碎混合する製造法を 1 つ記せ。また、原料粉末をボールミルで粉碎混合し、所定のプルトニウム濃度になるように二段混合する製造法を 1 つ記せ。
- (2) ウラン濃縮法のうち原料ウランとして六フッ化ウランガスを用いるものを 4 つ記せ。
- (3) 再処理工場で使用済燃料を処理して回収するプルトニウムをウランとプルトニウムの混合酸化物として転換する混合転換法について 4 つ記せ。
- (4) 使用済燃料の湿式再処理の溶解工程において、核分裂生成物のうち不溶解残渣となる金属の主な元素名を 5 つ記せ。
- (5) 軽水炉用制御棒の中性子吸収材として用いられる主な元素名を 5 つ記せ。

第3問 発電用軽水炉にて使用中の燃料棒内部で生じる化学的な変化に関する以下の問いに答えよ。

(1) 固体の金属 $M(s)$ が気体状の酸素 $O_2(g)$ と反応し、固体の酸化物 $MO_2(s)$ を形成する反応を考える。ある絶対温度 T におけるこの反応の平衡定数 K を M 及び MO_2 の活量 (a_M 及び a_{MO_2})、及び平衡酸素分圧 P_{O_2} を用いて式で表せ。

(2) 固体の酸化物 MO_2 について、ある絶対温度 T における酸素ポテンシャル（固相酸化物の酸素の部分モルギブスエネルギー） $\Delta \bar{G}_{O_2}$ を表す式を記せ。

(3) 以下の核分裂生成物 (FP) 4 元素が別々に燃料棒内の UO_2 ペレット内で存在するとした場合、酸化物、金属のいずれの化学形態になると推定されるか、それぞれ示せ。

Pd, Sr, Nd, Ru

(4) UO_2 ペレット及び不活性ガスが被覆管の中に封入され製造された燃料棒を考える。この燃料棒内は閉じた系として扱えるものとし、燃料棒の使用時、次を仮定した場合、すなわち

- (a) 被覆管内面は製造時の状態から変化しない、
- (b) ペレットの(O/U)比は変化しない、
- (c) ペレットからの FP の放出は無視する、

とした場合、燃料棒内で UO_2 ペレットの燃焼が進むにつれて、燃料棒内ガスの酸素分圧は製造時に比べて変化するかしないかを理由とともに述べよ。

第4問 発電用軽水炉で使用中の燃料棒に生じる破損形態の1つとして、PCI破損がある。これに関する以下の問いに答えよ。

- (1) この破損においては、燃料被覆管の内面側、外面側のどちらが破損の起点となるかを示せ。また、上で示した面の側から燃料被覆管が最終的に破損するに至るメカニズムを簡潔に説明せよ。

- (2) 発電用軽水炉で使用される燃料棒の設計の面から、この破損の発生防止目的で考えられた対策を3つ挙げよ（それぞれ対策1～対策3とする）。また、これらの対策1～対策3が、この破損の発生防止につながる主たる理由について、それぞれ簡潔に説明せよ。

第5問 軽水炉において多く用いられているステンレス鋼に関する以下の文章中の□に入る適切な語句等を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□には、同じ語句等が入る。

〔解答例〕 ⑪—原子炉

- (1) 鉄を主成分とし、□①を 1.2%以下、クロムを 10.5%以上含有させることで耐腐食性を高めた合金をステンレス鋼と呼ぶ。ステンレス鋼は成分的には Cr 系と Cr-Ni 系に大別され、金属組織の観点からは Cr 系はさらにマルテンサイト系とフェライト系に、Cr-Ni 系はオーステナイト系、□②系、析出硬化系に分類される。
- (2) ステンレス鋼の耐腐食性はステンレスの表面においてクロムに酸素や水酸基等が結合することで形成される不動態被膜に起因する。しかしながら、□③イオンはこの不動態被膜中の酸素や水酸基と置き換わることで、特定の臨界電位よりも高い電位では不動態被膜を破壊し、ステンレス鋼の局所的な溶解を引き起こすことが知られている。フランジ接手部のような隙間において不動態被膜が破壊された場合、隙間の内外における□④の差により隙間が選択的に□⑤となることで、著しい局部腐食（隙間腐食）を発生させることがある。
- (3) 完全にオーステナイト組織である溶接金属は溶接割れを起こしやすいため、通常オーステナイト系ステンレス鋼の溶接においては溶接金属組織が多少の□⑥を含有するように溶接条件が設定される。溶接金属に含まれる□⑥量の評価は、簡易的には、対象の化学成分から、オーステナイト生成元素である□⑦の指数を□⑧当量、□⑥生成元素である Cr、Mo、Si、Nb の指数を Cr 当量として計算し、シェフラーの組織図やディロングの組織図から金属組織を評価することで行われる。
- (4) 一般的にステンレス鋼の降伏点は不明瞭であるために□⑨で降伏応力を定義することが多い。しかしながら、ステンレス鋼が中性子照射を受けた場合、降伏応力と引っ張り強さの増加、□⑩の大幅な減少と共に、明瞭な降伏点を示すようになる。

第6問 以下の(1)～(3)に示す劣化事象から2項目を選択し、当該劣化事象に対して、超音波探傷試験、渦電流探傷試験、放射線透過試験、磁粉探傷試験を適用した場合に生じ得る技術的な課題又は原理的に適用ができない理由について、試験毎に簡潔(各試験につき100文字程度、劣化事象1項目につき計400文字程度)に説明せよ。また、3項目解答した場合はすべて無効とする。

- (1) ニッケル基合金製の蒸気発生器伝熱管の外面に発生した減肉
- (2) 炉心シュラウドに発生した応力腐食割れ
- (3) 炭素鋼製配管のオリフィス下流にて発生した流れ加速型腐食