

第 54 回

核燃料取扱主任者試験

核燃料物質の化学的性質
及び物理的性質

- (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) 問題は全部で6問。1問題ごとに1枚の解答用紙を使用すること。

令和4年3月2日

第1問 核燃料物質の放射性崩壊と核反応に関して、以下の問いに答えよ。

- (1) 天然に存在するウランとトリウム崩壊系列に関して、下表のネプツニウム系列を参考に、空欄に入る適切な核種(①~③)、数式(④~⑥)、元素記号(⑦、⑧)を番号とともに記せ。ただし、表中のNは正の整数とする。

〔解答例〕 ⑰—東京

表1 ウランとトリウムの崩壊系列

崩壊系列の呼称	出発核種	系列核種の 質量数	終端の安定核種の 元素記号
ウラン系列	①	④	⑦
アクチニウム系列	②	⑤	
トリウム系列	③	⑥	
ネプツニウム系列	^{237}Np	$4N+1$	⑧

- (2) ウラン系列、アクチニウム系列、トリウム系列に含まれる共通の放射性気体元素の名称と元素記号を記せ。
- (3) 軽水炉における UO_2 燃料の核反応について述べた以下の文章中の に入る適切な語句、数字または核種を番号とともに記せ。なお、 ⑬ は4つの数値のうちから最も近いものを選んで記せ。

〔解答例〕 ⑰—東京

核分裂で生じた中性子は MeV 域の高いエネルギーを持つが、主に減速材中の ⑨ 原子核と衝突して ⑩ 散乱を繰り返すことで徐々にエネルギーを失い、 ^{235}U の核分裂断面積が大きい熱中性子領域まで減速される。熱中性子の常温での平均エネルギーは ⑪ eV であり、速度に換算すると ⑫ m/s となる。また、熱中性子に対する ^{235}U の核分裂断面積は約 ⑬ (200/400/600/800) barn である。一方、減速の過程で一部の中性子は ^{238}U に捕獲され、超ウラン元素が生成する。燃料中に生成する質量数 238 から 242 までの Pu 同位体のうち、熱中性子に対する核分裂断面積が最も大きいのは ⑭ である。

定常的な臨界状態において、大きな反応度が挿入されて燃料温度が上昇すると、 ^{238}U

の熱振動増加により 領域での中性子吸収が増え、反応度が低下する側に作用する。
これを 効果と呼ぶ。

- (4) 上記(3)の文章中の下線部について、 ^{238}U から ^{237}Np が生じる最も主要な一連の核反応を反応式または文章で簡潔に説明せよ。

第2問 図1は、xyz直交座標系に UO_2 結晶の単位格子（U原子のみ）を模式的に示したものである。これについて以下の問いに答えよ。

- (1) UO_2 の結晶構造の名称を、「○○型××××晶」の形式で記せ。
- (2) 単位格子中に酸素（O）原子は何個含まれるか記せ。
- (3) 図1中の原点に最も近いO原子の(x,y,z)座標を、格子定数aを用いて記せ。
- (4) 図1中に灰色で示した断面A上に存在するU原子の位置（中心点）を●印で、O原子の位置（中心点）を○印で、回答用紙に図示せよ。なお、格子定数aを用いて各辺の長さを示すとともに、適切な補助線を用いて各原子の相対位置関係がわかるように図示すること。
- (5) イオン結合性の化合物であるため、 U^{4+} のイオン半径を R_U 、 O^{2-} のイオン半径を R_O としたとき、剛体球モデルが成り立つと仮定し、 UO_2 の格子定数aを R_U と R_O を用いて式で表せ。
- (6) UO_2 には、 UO_{2+x} ($x \geq 0$) で表される酸素の不定比組成領域がある。x値が0.20で平衡になっているとき、単位格子中に過剰のO原子（格子間酸素原子）が平均何個含まれるか、小数点以下1桁まで記せ。
- (7) 一定温度において UO_{2+x} のx値が大きくなると格子定数は大きくなるか、小さくなるか、または変わらないか、イオン半径の観点から簡潔な理由とともに記せ。
- (8) Uの原子量を M_U 、Oの原子量を M_O 、アボガドロ数をNとする。不定比組成の UO_{2+x} （格子定数a）の理論密度を、これら記号を用いて式で表せ。

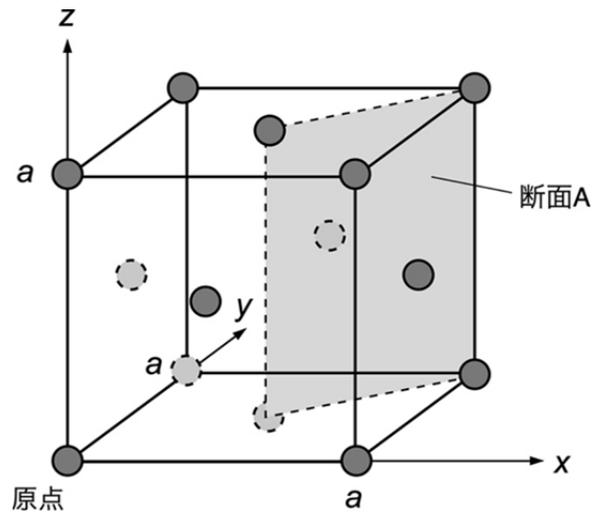


図1 xyz 直交座標系に示す UO_2 結晶の単位格子 (U 原子のみ) の模式図

第3問 核燃料物質の性質に関して、以下の問いに答えよ。

- (1) 図2は、横軸を温度、縦軸を圧力として六フッ化ウラン (UF_6) の状態図を模式的に示したものである。図中の領域 A、B、C は、それぞれ気体、液体、固体のどれに相当するか記せ。

〔解答例〕 A : ○○、B : ○○、C : ○○

- (2) 図2中の3領域の境界点 a の名称を記せ。

- (3) 1気圧における UF_6 の昇華温度 ($^{\circ}\text{C}$) を有効数字2桁で記せ。

- (4) 金属 Th、U、Pu の室温で安定な結晶構造を、以下の選択肢からそれぞれ選んで記せ。

〔解答例〕 Th : ○○、U : ○○、Pu : ○○

選択肢：立方晶、正方晶、斜方晶、六方晶、単斜晶、三斜晶

- (5) UO_2 を金属 U に還元可能な還元剤として適切な物質を、以下の選択肢から2つ選んで記せ。

選択肢： H_2 F_2 Cl_2 Li Al Si Ca Cr Pd

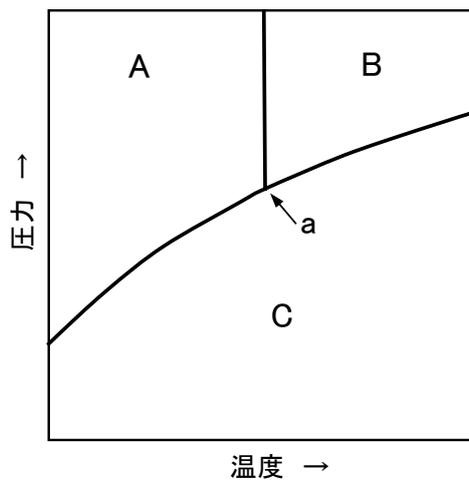


図2 UF_6 の模式的な状態図

第4問 核燃料の基礎物性に関して、以下の問いに答えよ。

- (1) 図3は、金属ウラン (U)、二酸化ウラン (UO₂)、一窒化ウラン (UN)、一炭化ウラン (UC) の各種性質を、数字の大きい順に左から並べたものである。空欄に入る物質を化学式で答えよ。ただし、1つの性質において物質を重複して記載しないこと。すなわち、(ア)、(イ)、(ウ)、(エ)には別々の物質を記載すること。(オ)、(カ)、(キ)、(ク)や(ケ)、(コ)、(サ)、(シ)でも同様である。また、≒で繋がれている物質の順序は問わない。

[解答例] (ス) -H₂O

室温における熱伝導率:	(ア)	≒	(イ)	>	(ウ)	>	(エ)
融点:	(オ)	≒	(カ)	>	(キ)	>	(ク)
重金属密度:	(ケ)	>	(コ)	≒	(サ)	>	(シ)

図3 ウランといくつかのウラン化合物の各種性質の大小関係

- (2) 二酸化ウランに二酸化プルトニウムが固溶すると、二酸化ウランの室温付近の熱伝導率は通常減少する。この理由を100字程度で答えよ。

第5問 以下の情報をもとに、ジルコニウムペレットの室温における熱伝導率を算出せよ。有効数字3桁、円周率は3.14、ジルコニウムの原子量は91.0とすること。熱伝導率の単位も明記すること。なお、答えを導いた計算式も示せ。

以下は全て室温における情報とする。

ジルコニウムペレットの形状：完全な円板状

ジルコニウムペレットの大きさ：直径 1.00 cm、厚さ 2.00 mm

ジルコニウムペレットの質量：0.942 g

ジルコニウムペレットの熱拡散率： $1.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

ジルコニウムの定圧モル熱容量： $27.3 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

第6問 ジルコニウム合金燃料被覆管の照射挙動に関する以下の語句について、それぞれ 50 字程度で説明せよ。

(1) ノジュラー腐食

(2) 水素脆化