

第 49 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。

(問題を書き取る必要はない。)

(ロ) 問題は全部で5問。1問題ごとに1枚の解答用紙を使用すること。

平成 29 年 3 月 13 日

第1問 以下の図1は、ホウ素(B)–ジルコニウム(Zr)二元系平衡状態図である。以下の問いに答えよ。

(1) 図中の(ア)~(エ)の領域に存在する相を答えよ。ただし、(ウ)は矢印の先の領域を示している。

[解答例] (ア)–東京

(2) 二ホウ化ジルコニウム(ZrB_2)中に含まれる Zr の量を重量パーセントで答えよ。ただし、Zr と B の原子量は、それぞれ、91 と 11 とする。

(3) 図中の X 点の名称を答えよ。

(4) 図中の X 点の自由度を答えよ。また、その根拠を示せ。

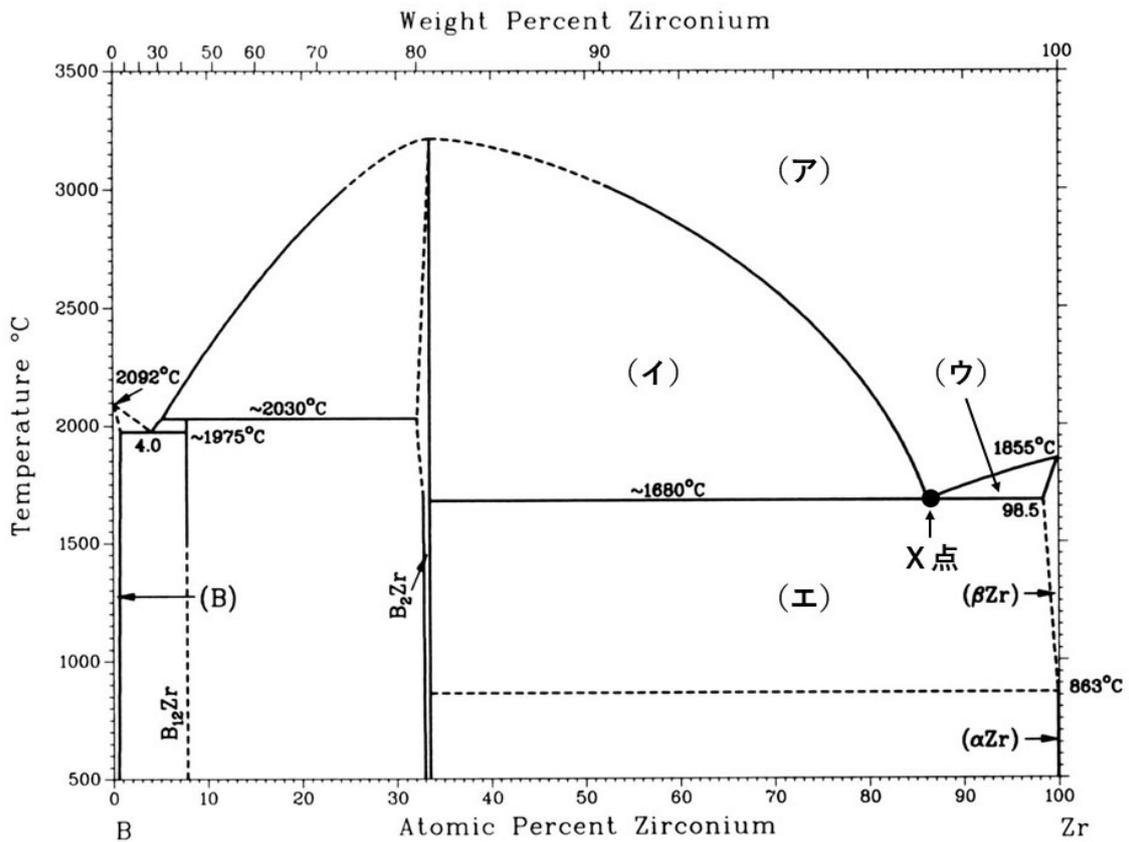


図1 B–Zr 二元系平衡状態図

第2問 軽水炉燃料被覆管の主成分であるジルコニウム(Zr)に関して、以下の問いに答えよ。

- (1) Zrの原子番号を答えよ。
- (2) 室温におけるZrの結晶構造を答えよ。
- (3) PWR(加圧水型原子炉)とBWR(沸騰水型原子炉)の燃料被覆管材料として用いられているZr合金の名称ならびに合金中に添加されている元素とそのおおよその量を重量パーセントで答えよ。ただし、添加元素は元素記号で答えること。
例：PWR … 合金の名称：コンスタantan
 添加元素：H(1.0wt.%)、He(2.0 wt.%)
 BWR … 合金の名称：インコネル
 添加元素：Li(0.5wt.%)、Be(1.5wt.%)
- (4) 原子炉材料としてZrを用いる際に注意すべき点を、ハフニウム(Hf)の含有量の観点から論じよ。

第3問 核燃料中に生成する核分裂生成物(FP)及び超ウラン元素に関して、以下の問いに答えよ。

- (1) 図2は、熱中性子による ^{235}U 核分裂のFP収率を表したグラフである。2つのピーク部分に相当する収率の大きい代表的なFP元素を、それぞれ3つずつ元素記号で記せ。
- (2) 熱中性子による ^{239}Pu 核分裂のFP収率を図2と比較した際に、最も特徴的な相違点を簡潔に記せ。
- (3) UO_2 燃料中で超ウラン元素が生成する原因となる、主要な2つの核反応又は壊変の名称を記せ。
- (4) ^{238}U から ^{241}Am が生成するまでの核種の変化について、以下の□に入る適切な核種を番号とともに記せ。

〔解答例〕 ⑤- ^{232}Th



- (5) 取出し燃焼度45 GWd/tの軽水炉使用済み UO_2 燃料中には、金属元素1tあたりPuはどのくらい含まれているか、およその重量で記せ。
- (6) 表1は、沸騰水型軽水炉(BWR)の UO_2 燃料中に生成する、質量数238から242までのPu同位体の組成例を示したものである。表中の空欄に入る適切な同位体を番号とともに記せ。また、表中の同位体⑥が冷却期間中に顕著に減少する理由を簡潔に記せ。

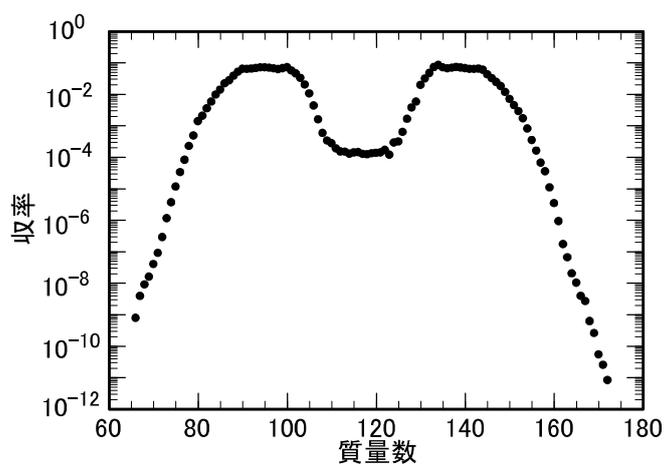


図2 熱中性子による²³⁵U核分裂のFP収率
(数値データ出典：JENDL FP Fission Yields Data File 2011)

表1 BWR-UO₂燃料中に生成するPu同位体組成の例(重量%)

	²³⁹ Pu	⑤	⑥	⑦	⑧
取出し時(45 GWd/t)	50.0	25.3	13.8	8.2	2.6
10年冷却後	53.0	26.7	8.9	8.6	2.8

第4問 以下の(1)から(6)までの文章は、軽水炉冷却水喪失事故時の炉心材料間の諸反応と炉心溶融固化物について述べたものである。文章中の□に入る適切な語句、化学式、数値等を番号とともに記せ。同じ番号の□には、同じ語句等が入る。なお、□14から□16には、結晶構造の名称が入る。

〔解答例〕 ②—東京

- (1) 原子炉スクラムにより制御棒が挿入され、核分裂連鎖反応が停止した後も、燃料ペレット内では□①熱が生じているため、冷却が必要である。炉心水位が低下し燃料集合体が露出すると、燃料被覆管外面は高温の□②により酸化され、この反応熱が燃料棒温度の□③に寄与する。また、この反応の際には□④ガスが発生する。
- (2) 高温になった燃料被覆管内面では、ジルカロイの主成分である Zr が UO_2 を□⑤することで液相が生じる。この反応は Zr の融点以下でも進行するので、 UO_2 の融点である□⑥ $^{\circ}\text{C}$ よりも 1000°C 以上低い温度で燃料棒内に液相が生じることになる。
- (3) 沸騰水型軽水炉(BWR)では、制御棒の中性子吸収材として主に□⑦が使用されている。□⑦と制御棒被覆材のステンレス鋼の間では、 1200°C 程度で□⑧反応により液相が生じる。加圧水型軽水炉(PWR)では、制御棒の中性子吸収材として、主に□⑨—□⑩—Cd 三元系合金が使用されている。この合金の液相生成温度は 800°C 程度と低いが、被覆材のステンレス鋼の融点以下では、被覆材とは直接反応しない。
- (4) Zr とステンレス鋼成分の間では、約 930°C から□⑧反応による液相生成がある。制御棒の溶融物が最初にジルカロイに触れて侵食する部位は、その構造から、BWR では□⑪の表面で、PWR では□⑫管の内面である。ジルカロイ表面に□⑬膜が生成している場合は、その厚さの程度によって、この侵食を抑制又は遅延する効果がある。
- (5) 燃料成分を含んだ炉心溶融物が冷えて固まったものを広義に燃料デブリと呼び、そのうちセラミック質部分の主要構成成分は、 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ で表される二酸化物固溶体である。図3に示す UO_2 — ZrO_2 擬二元系状態図において、固相線直下の超高温では全率固溶して□⑭晶単相となるが、温度が下がるにつれて相互の固溶度が低下し、U含有率の高い□⑭晶と Zr含有率の高い□⑮晶に二相分離する。□⑮晶の一部は、さらに温度が下がる際に□⑯晶に相変態する。したがって、短時間で急冷された部位では□⑭晶単相組織が保持

されやすいが、長時間をかけて徐冷された部位では ⑭ 晶と ⑮ 晶が微細に入り混じった組織ができやすい。

- (6) 燃料デブリの取出しに使用される機械工具類選定の指標として、微小硬さ、ヤング率、破壊靱性等の機械特性がある。未照射 UO_2 燃料ペレットの室温での微小硬さは約 6GPa、ヤング率は約 ⑰ GPa であるが、これらに比べて $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ 固溶体では、微小硬さは ⑱ し、弾性率は ⑲ する傾向がある。ヤング率が ⑲ することと、破壊靱性が增大することから、気孔率が同じ場合、 UO_2 に比べて $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ は打撃系の工具で破壊し ⑳ いことを意味している。

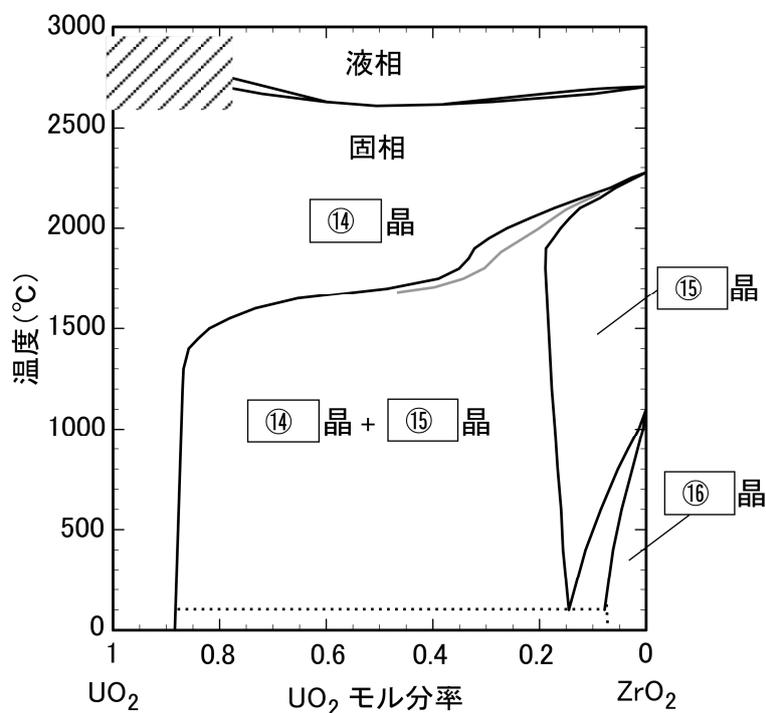


図3 $\text{UO}_2 - \text{ZrO}_2$ 擬二元系状態図の例
(一部は斜線で隠してある)

(データ出典 : I. Cohen, B.E. Schaner, A metallographic and X-ray study of the $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ system, Journal of Nuclear Materials, 9 (1963) 18-52.)

第5問 核燃料やアクチノイド元素に関する次の問いに対して回答せよ。

- (1) 自発核分裂について、①どのような核種において見られるどのような現象か。②通常の原子核分裂反応とどう違うか。③その応用例を2つあげよ。

- (2) アクチノイド元素に関する下記の問いに答えよ。
 - (ア) アクチノイド原子の電子配置において、原子番号が増えたときに、電子軌道がどのように満たされてゆくか説明せよ。
 - (イ) アクチノイド収縮とは何か。
 - (ウ) アクチノイド元素の酸化状態は、原子番号の小さなグループと大きなグループとでは、どのように違うか。
 - (エ) 再処理においてアクチノイド元素の抽出に用いられる TBP の化学式を書け。

- (3) オクロ天然原子炉について、①それが存在した場所の現在の国名、②核分裂が起こった時期、③核分裂が起こったと考えられる根拠、④天然原子炉が臨界に達することができた理由、⑤その原子力研究開発上の意義、について述べよ。

- (4) 核燃料のリム組織について、①どのような場合に、どのような部分で見られるか。②その特有な組織の特徴を2つあげよ。③その燃料照射挙動への影響を3つあげよ。