

第 55 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5年3月1日

第1問 表1は、種々の原子炉を一覧にまとめたものである。これに関して以下の問いに答えよ。

表1 原子炉の用途、中性子、減速材、冷却材、燃料形態等の一覧

用途	中性子	減速材	冷却材	燃料形態	原子炉の例
試験 研究用 原子炉	熱中性子	軽水		(A)	JRR-3M、JMTR、オランダ HFR、豪 OPAL 等
		(B)	He ガス	濃縮 UO ₂ 被覆粒子燃料	HTTR (高温ガス炉)
	高速中性子	なし	液体 Na	(U, Pu)O ₂	常陽、もんじゅ、 仏 Phénix
				U-Pu-Zr 合金	米 EBR-II
発電用 原子炉	熱中性子	軽水		濃縮 UO ₂ (U, Pu)O ₂	BWR、PWR、露 VVER 等
		(C)		天然 ^{*1} UO ₂	カナダ CANDU 炉
		(B)	(D)	天然 ^{*1} U、Mg 合金被覆	英マグノックス炉

*1濃縮していない天然同位体組成のウラン

- (1) 表中の空欄 (A) に関して、以下の文章中の に入る適切な語句、元素記号、組成式又は核種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〕 ⑨—東京

材料・燃料の照射試験や中性子ビーム利用に供される試験研究用原子炉の燃料には、ウラン金属間化合物を板状に加工した燃料が広く利用されてきた。古くは高濃縮ウランの U-系合金が用いられていたが、ウラン濃縮度を 20%以下に下げつつ高い中性子束を確保するため、現在では主に U-系の金属間化合物（化合物名称：ウラン・）が用いられている。それ以外では、U-Mo 系や高濃縮の U₃O₈ を分散させた燃料もある。

U-系の金属間化合物には種々の原子比のものがあるが、燃料として使用される主要なもの組成式は である。この金属間化合物を金属 中に分散させて薄い板状の芯材とし、さらに表面を 合金で被覆して燃料板とする。

試験研究用原子炉の他の用途として、PET 診断用の ⑥ に代表される医療用 RI (放射性同位元素) 製造の需要も高く、欧米では ⑥ を定常的に製造している原子炉がある。

- (2) 表中の空欄 (B)、(C)、(D) に入る適切な語句を記号とともに記せ。
- (3) 表中の HTTR (高温ガス炉) の燃料では、粒子状に焼結した UO_2 燃料核の表面に 2 種類の物質で多重の被覆層を形成して被覆粒子燃料とする。これら 2 種類の物質名を記せ。
- (4) $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ 混合酸化物燃料 (MOX 燃料) に関して、⑦軽水炉 UO_2 燃料と MOX 燃料用 UO_2 原料の最大の相違点は何か、⑧軽水炉 MOX 燃料は再処理を何回も繰り返して利用 (マルチリサイクル) できない理由は何故か、それぞれ番号とともに簡潔に説明せよ。
- (5) 表中の CANDU 炉やマグノックス炉が、同位体濃縮していない天然ウランの燃料で臨界を維持できる理由を簡潔に説明せよ。

第2問 核燃料の加工について、以下の問いに答えよ。

- (1) ウランの粗製錬、転換、濃縮について述べた以下の文章中の□に入る適切な語句又は化学式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〕 ⑬－東京

天然のウラン鉱石の代表的なものとして、燐灰ウラン鉱 ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{-}12\text{H}_2\text{O}$) や閃ウラン鉱 (□①) がある。ウラン鉱石からウランを浸出させるには、アルカリ (□② + NaHCO_3) を用いる方法と、酸 (□③) を用いる方法に大別され、鉱石の性状に合わせて選択される。

UO_2 から UF_6 への転換においては、まず UO_2 と □④ ガスを反応させて UF_4 とした後、これをさらに □⑤ ガスと反応させて UF_6 とする。固体の UF_4 と UF_6 の外観色は、それぞれ □⑥ 色、□⑦ 色で、価数の変化により大きく異なる。

商業規模での経験を有するウラン同位体濃縮の原理は、□⑧ 法と、これより高い分離係数が得られる遠心分離法があるが、いずれの方法でも同位体間の □⑨ 差を利用して同位体分離する。遠心分離機の分離能力は、理論的には □⑨ 差の2乗に比例し、□⑩ の4乗に比例する。

- (2) 加圧水型軽水炉 (PWR) の UO_2 燃料ペレットに関して、直径の調整だけでなく、被覆管との機械的相互作用による燃料破損低減を目的として、ペレット焼結後に2種類の研削加工が行われる。加工後のペレット軸方向断面の形状を解答用紙に図示し、どのような加工を施したかわかるように図に適切な補足説明を記せ。
- (3) 燃料ペレットと被覆管の機械的相互作用緩和のために、沸騰水型軽水炉 (BWR) では、燃料ペレットだけでなくジルカロイ被覆管内面にも加工を施す。どのような加工をするか簡潔に記せ。
- (4) 軽水炉 UO_2 燃料には、部分的に酸化ガドリニウム (Gd_2O_3) を添加したペレットが装荷される。これに関して、⑪添加の目的、⑫ペレット中の Gd の化学的存在状態を、それぞれ番号とともに簡潔に記せ。

第3問 核燃料物質の化学反応について、以下の問いに答えよ。ただし、錯形成や水和水、結晶水、不定比性は考慮しなくてよい。

〔解答例〕 ⑨－東京

- (1) 金属 U を硝酸に溶解した際の、①溶解液の外観色、②液中のウランのイオンの化学式と③イオンの名称をそれぞれ番号とともに記せ。
- (2) 上記(1)の溶解液にアンモニア水を添加した際に生じるウラン化合物の沈殿について、④化学式と⑤化合物名(日本語)をそれぞれ番号とともに記せ。
- (3) 上記(2)の沈殿物を洗浄・回収し、空气中 800 °C で加熱して得られる粉末化合物について、⑥化学式を番号とともに記せ。
- (4) 金属 U の小片を水素気流中 300 °C 弱で長時間加熱して得られる粉末化合物について、⑦化学式を番号とともに記せ。また、この粉末を窒素気流中 1,000 °C で加熱して得られる粉末化合物について、⑧化学式を番号とともに記せ。
- (5) 上記⑦の粉末化合物を安全に取扱う上で、最大の注意事項を理由とともに簡潔に記せ。

第4問 二酸化ウラン (UO_2) と一窒化ウラン (UN) では、熱伝導率の温度依存性が異なる。
これに関して、以下の問いに答えよ。

- (1) UO_2 と UN の室温ならびに $1,000\text{ }^\circ\text{C}$ における熱伝導率のおおよその値を単位とともに答えよ。
- (2) UO_2 と UN で熱伝導率の温度依存性が異なる理由を 150 字程度で答えよ。回答に要した文字数も記載すること。
- (3) 核燃料に求められる性質の一つに高い熱伝導率があげられる。この理由を 100 字程度で答えよ。回答に要した文字数も記載すること。

第5問 次の文章中の【 】に入る適切な元素の元素名と元素記号をアルファベットとともに記せ。なお、同じアルファベットの【 】には同じ元素が入る。また、《 》に入る適切な数字を以下の選択肢から選び、記号で回答せよ。なお、同じ番号の《 》には、同じ数字が入る。

[解答例] 元素の場合：e－水銀、Hg

数字の場合：⑬－ス

運転中の加圧水型軽水炉（PWR）の一次冷却水の圧力と温度は、それぞれ、約《①》MPaと約《②》℃となる。一方、運転中の沸騰水型軽水炉（BWR）の場合、冷却水の圧力と温度は、それぞれ、約《③》MPaと約《④》℃となる。

このような高温・高圧の水に対する耐食性を確保するために、燃料被覆管には原子番号《⑤》番のジルコニウムに微量の元素を添加したジルコニウム合金が用いられている。PWRとBWRでは添加元素の種類と量が若干異なる。PWRでは、主にジルカロイ《⑥》と称されるジルコニウム合金が用いられる。ジルカロイ《⑥》への主要な添加元素は、原子番号順に【a】、【b】、【c】の三種類となる。一方、BWRでは、主にジルカロイ《⑦》と称されるジルコニウム合金が用いられる。ジルカロイ《⑦》への主要な添加元素は、原子番号順に【a】、【b】、【d】、【c】の四種類となる。

ジルカロイ《⑥》とジルカロイ《⑦》中の添加元素のおおよその量は、以下の通りである。

ジルカロイ《⑥》中の添加元素のおおよその量：

【a】の濃度：《⑧》重量%

【b】の濃度：《⑨》重量%

【c】の濃度：《⑩》重量%

ジルカロイ《⑦》中の添加元素のおおよその量：

【a】の濃度：《⑧》重量%

【b】の濃度：《⑪》重量%

【d】の濃度：《⑫》重量%

【c】の濃度：《⑩》重量%

【選択肢】

ア：0.05

イ：0.1

ウ：0.13

エ：0.2

オ：1.45

カ：2

キ：4

ク：7

ケ：15

コ：40

サ：280

シ：320

第6問 二酸化ウランペレットの密度を寸法と質量をもとに算出したところ、 $10.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ であった。このペレットの気孔率を、以下の情報を使って求めよ。なお、答えを導いた計算式も示せ。

ウランの原子量：238

酸素の原子量：16.0

アボガドロ数： 6.00×10^{23}

二酸化ウラン結晶単位格子（螢石型構造）の格子体積： 165 \AA^3

(\AA ：オングストローム、 $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$)

【メモ】

【メモ】