

第 58 回

原子炉主任技術者試験（筆記試験）

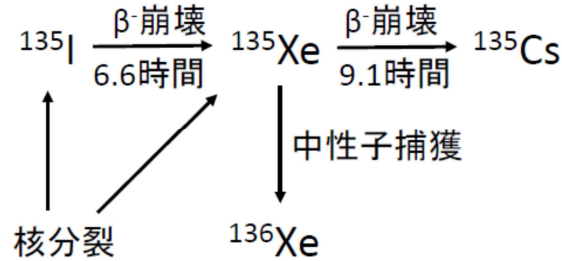
原 子 炉 理 論

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5問については、7項目中5項目の選択問題です。

平成 28 年 3 月 16 日

第1問 核分裂生成物の中には熱中性子反応断面積が非常に大きい核種がある。これらの核種を中性子毒物と言う。その中でも原子炉に顕著な影響を与えるものとして ^{135}Xe が挙げられる。原子炉内で ^{135}Xe は下図のチェーンに従って生成・消滅するものと近似できる。



以下の問いに答えよ。

- (1) 時刻 t における ^{135}I の濃度を $I(t)$ 、 ^{135}I の核分裂収率を $\gamma^{(I)}$ 、 ^{135}I の崩壊定数を $\lambda^{(I)}$ 、体系の巨視的核分裂断面積を Σ_f 、中性子束を $\phi(t)$ とする。このとき、 ^{135}I の生成・消滅を表す微分方程式を記せ。ただし ^{135}I の中性子捕獲は無視できるものとする。
- (2) 時刻 t における ^{135}Xe の濃度を $X(t)$ 、 ^{135}Xe の核分裂収率を $\gamma^{(X)}$ 、崩壊定数を $\lambda^{(X)}$ 、中性子捕獲断面積を $\sigma_c^{(X)}$ として、 ^{135}Xe の生成・消滅を表す方程式を記せ。必要に応じて (1) で定義した変数も用いよ。
- (3) ^{135}I 、 ^{135}Xe の濃度が 0 の状態から原子炉を起動し、急激に出力上昇して定出力運転に入ったとする。この時の中性子束を ϕ_0 として、 ^{135}I の飽和濃度 I_∞ を与える式を求めよ。
- (4) (3) と同じ条件の場合の ^{135}Xe の飽和濃度 X_∞ を与える式を求めよ。
- (5) 原子炉を長時間定出力運転し ^{135}I 、 ^{135}Xe が飽和濃度に達した後、急激に停止した場合、停止後の時間 t の関数としての ^{135}I の濃度の時間変化を表す式を求めよ。必要に応じて下のラプラス変換表を用いよ。

ラプラス変換表

$f(t)$	$F(s)$
1	$1/s$
e^{at}	$1/(s-a)$
$f'(t)$	$sF(s) - f(0)$

- (6) (5)と同様の条件において、停止後の時間 t の関数としての ^{135}Xe の濃度の時間変化を表す式を求め、運転中から炉停止後の時間変化の概略を図示せよ。また、その際、定出力時の出力の大小による違いを説明せよ。必要であれば $\gamma^{(0)} \gg \gamma^{(\infty)}$ を用いよ。

第2問 半径 R の裸で球形かつ一様な非増倍物質の中心に単位時間あたり S 個の中性子を放出する点状の熱中性子源が置かれて定常状態になっているものとする。1群拡散理論を用いて次の問いに答えよ。

ただし、物質のマクロ吸収断面積を Σ_a 、拡散係数を D とし、 $\kappa = \sqrt{\Sigma_a / D}$ を用いて良い。

- (1) 外挿距離を d とし、球の中心からの距離 r の関数として中性子束を求めよ。

ただし、球対称な系におけるラプラス演算子が

$$\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr}$$

と与えられることを用いよ。

- (2) 熱中性子の平均速度を v とし、球内に存在する全中性子数を求めよ。

- (3) [中性子源から発生した中性子が球内に存在する平均時間 τ] を、[球内に存在する中性子数] を [単位時間に漏れや吸収によって消滅する中性子数] で割ったものと定義する。 τ を与える式を求めよ。

- (4) $R \rightarrow \infty$ の時、 $\tau \rightarrow 1/(v \Sigma_a)$ となることを示せ。

第3問 時刻を t 、反応度を $\rho(t)$ 、中性子密度を $n(t)$ 、中性子世代時間を Λ 、遅発中性子先行核の崩壊定数を λ 、遅発中性子先行核濃度を $C(t)$ 、遅発中性子割合を β とする。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 遅発中性子1組近似の一点炉動特性方程式を記述し、各項が表わす量について簡潔に説明せよ。

- (2) 中性子密度 n_0 で臨界状態にある時、正の反応度 $\rho_0 (< \beta)$ を加えると即発跳躍により中性子密度が n_1 になったとする。 n_1 と n_0 の関係式を求めよ。

- (3) (2) で時間が経過したとき、中性子密度が安定ペリオド T で増加したとする。 T と ρ_0 の関係式を導出せよ。
- (4) どれだけ大きな負の反応度を加えても、中性子密度の安定ペリオドの絶対値は“ある値”より小さくなる事は無く中性子密度の減衰速度には上限がある。ここで“ある値”とはどのように表わされるかを説明とともに示せ。

第4問 中性子の減速について、以下の問いに答えよ。

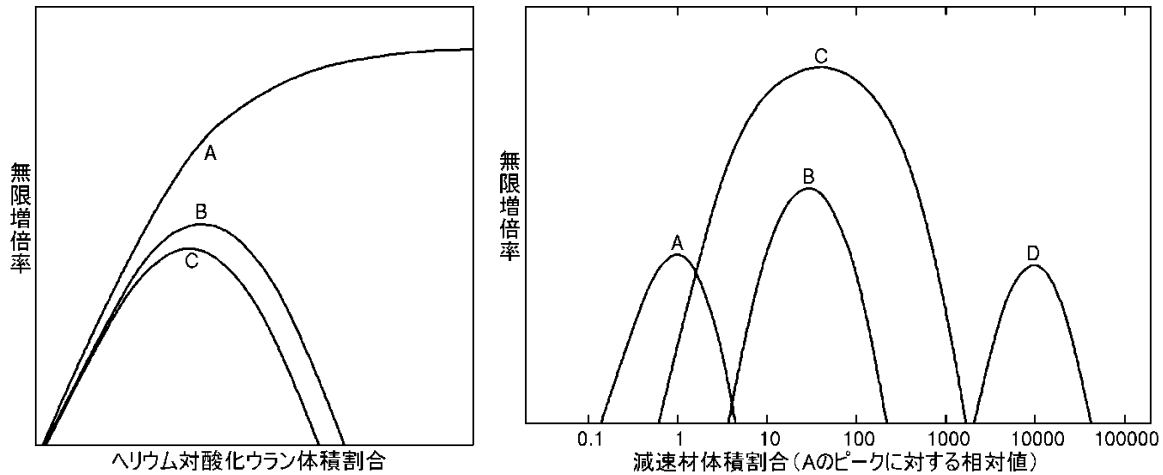
- (1) 次の用語を説明せよ。
- 減速比
 - 減速能
- (2) 物質の中性子減速について考察するため、 ^3He と ^4He からなる気体状態のヘリウムについて以下のような検討を行った。次の表の数値を用いて a)、b)、c) の諸量を有効数字2桁で計算し、さらに d)、e) に答えよ。ヘリウムの原子数密度は 3.0×10^{20} [個/cm³] とする。

	^3He	^4He
天然同位体比[原子数%]	1.37×10^{-4}	99.999863
散乱断面積[barn]	3.10	0.759
吸収断面積[barn]	5.33×10^3	0
平均レサジー増加	0.538	0.425

- 天然同位体組成のヘリウムの減速比。
- 天然同位体組成のヘリウムの減速能。
- ヘリウムが以下の表の軽水と同じ減速比を持つための、 ^3He の同位体比[原子数%]。

	軽水	重水	黒鉛
減速比	62	4200	190
減速能[1/cm]	0.96	0.18	0.066

- d) 同一組成同一幾何形状の酸化ウラン燃料を①「天然組成」、②「c)の組成」、あるいは③「 ^4He 100%」のヘリウム中にそれぞれ分散させた無限大体系について、ヘリウムの原子数密度を保ったまま燃料に対するヘリウムの体積割合を変化させて無限増倍率を計算すると、以下の左図のように変化した。図中 A、B、C の増倍率変化は、それぞれ①、②、③のいずれの場合に対応するか。また、a)、b)、c)の結果および上表に示すデータからその理由を説明せよ。
- e) d)と同じ酸化ウラン燃料を、上表のような①「軽水」、②「重水」、あるいは③「黒鉛」減速材中にそれぞれ分散させた無限大体系について燃料と減速材の体積割合を変化させて増倍率を求め、④「d) B の組成のヘリウム」の場合と同時に図示し、以下の右図を得た。a)、b)、c)、d)の結果および上表に示すデータから判断して、図中 A、B、C、D の増倍率変化と①、②、③、④との対応を、その判断理由とともに示せ。



- (3) (2)の検討結果に基づき、気体状態のヘリウムの減速比と減速能の特徴から、平均レサジー増加の大きなヘリウムが現実には中性子減速材として利用されない理由について説明せよ。

第5問 以下(1)～(7)について、5項目を選択して、それぞれ簡潔に説明せよ。ただし、5項目を超えて解答した場合は全て無効とする。

- (1) 幾何学的バックリングと材料バックリング
- (2) 微視的断面積と巨視的断面積

- (3) 転換比
- (4) 最適減速
- (5) 実効断面積
- (6) 自己遮蔽効果
- (7) 即発中性子寿命

第6問 以下の問いに答えよ。

- (1) 臨界性を表わすパラメータとして中性子の増倍率が良く使われるが、増倍率には実効増倍率と無限増倍率の2種類がある。この2つの増倍率の違いを簡潔に説明せよ。
- (2) 熱中性子炉における無限増倍率は4因子公式（4つの因子の積）で表わすことができる。4つの因子はそれぞれどのようなものかを説明せよ。
- (3) 未臨界状態にある熱中性子炉に対して何らかの操作を行い臨界にすることを考える。臨界にするための操作を1つ挙げ、それらの操作が4因子公式におけるどの因子を主に変化させることによる増倍率の変化であるかを説明せよ。また、燃料温度変化による増倍率変化（ドップラー反応度）は4因子公式におけるどの因子が主に変化することによる増倍率変化であるかを説明せよ。
- (4) 軽水炉において、 UO_2 燃料の燃焼に伴い燃料組成は変化し反応度が変化する。このとき燃焼に伴う正の反応度効果および負の反応度効果を示す核種を1つずつ挙げ、反応度変化を与える理由とともに述べよ。

【メモ】

【メモ】

【メモ】

【メモ】

【メモ】