

第 57 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。

平成 27 年 3 月 18 日

第1問 次の問いに答えよ。

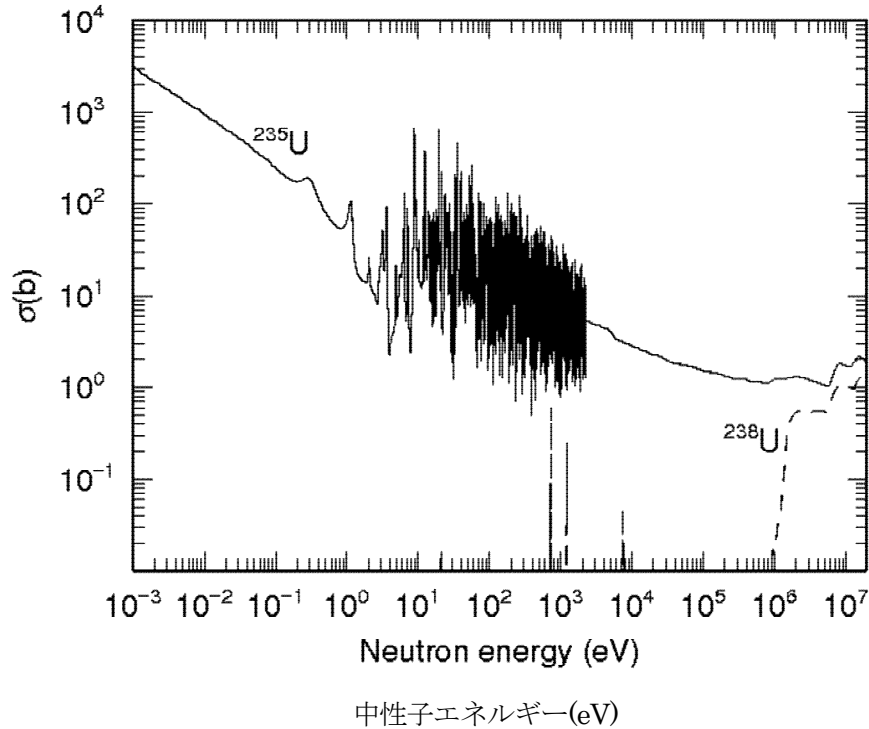
- (1) 中性原子の質量から、その原子に含まれる原子核の質量数の統一原子質量単位倍を引いた量を質量偏差と言い、エネルギーの単位で表されることが多い。下表の数値を用いて、 ^{235}U と ^{238}U が中性子を捕獲する反応の Q 値を MeV 単位で小数点2桁まで求めよ。

原子核	質量偏差(MeV)
中性子	8.07
^{235}U	40.92
^{236}U	42.45
^{238}U	47.31
^{239}U	50.57

- (2) 質量数 $A=137$ における質量偏差は下表の通りである。 ^{137}I が ^{137}Xe に崩壊する現象を何と呼ぶか。また、その Q 値を MeV 単位で小数点3桁まで求めよ。

原子核	質量偏差(MeV)
^{137}I ($Z=53$)	-76.356
^{137}Xe ($Z=54$)	-82.383

- (3) ^{137}Xe の中性子分離エネルギーは 4.026MeV である。この時、 ^{137}I の崩壊により遅発中性子が発生しえるかどうかを5行以内で簡潔に述べよ。
- (4) 図は ^{235}U (実線) と ^{238}U (破線) の中性子誘起核分裂断面積の入射中性子エネルギー依存性をプロットしたものである。 ^{235}U の核分裂断面積は低エネルギーで大きく、一方 ^{238}U ではほぼゼロである。このふたつの核種の核分裂断面積のこのような違いがどうして生じるかを5行以内で簡潔に述べよ。ただし、 ^{236}U と ^{239}U の核分裂障壁はそれぞれ 5.7MeV 及び 6.0MeV である。また、 ^{239}Pu と ^{232}Th の中性子誘起核分裂断面積がそれぞれこれらのどちらに近いかを述べよ。



第2問 マクロ吸収断面積 Σ_a [cm^{-1}]、拡散係数 D [cm] の無限媒質中に、単位面積当たりの強度が S_1 [$cm^{-2} \cdot s^{-1}$]である平面中性子源が $x = -a$ [cm] 面に、単位面積当たりの強度が S_2 [$cm^{-2} \cdot s^{-1}$]である平面中性子源が $x = a$ [cm] 面にそれぞれ置かれて定常状態になっている。1群中性子拡散理論を用いて次の問いに答えよ。ただし、平面中性子源は中性子輸送に影響を与えないものとする。

- (1) $-a < x < a$ における中性子束 $\phi_{in}(x)$ を求めよ。
- (2) 中性子源での全発生中性子に対して $-a < x < a$ で吸収される中性子の割合を求めよ。
- (3) $a < x$ での中性子束 $\phi_{out}(x)$ を求めよ。
- (4) 中性子源での全発生中性子に対して $x = 3a$ の面から外側(x 軸の正の方向) に向かって流れ出す中性子の割合を求めよ。

第3問 質量数 A の単一の原子核からなる無限均質媒質において、中性子源が空間的にも時間的にも一様な定常状態における弾性散乱のみによる中性子の減速を考える。ただし、原子核は中性子

との衝突前には実験室系で静止しているものとする。また、中性子の質量を 1、原子核の質量を A とし、散乱は重心系で等方的であるものとする。次の問いに答えよ。

- (1) 実験室系で E_0 の運動エネルギーを持った中性子が重心系で θ の角度に散乱され、実験室系の運動エネルギーが E_1 になるものとする。以下の関係が成り立つ事が知られている。

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{1}{2} [(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \cos \theta], \quad \text{ただし} \quad \alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

これに基づいて E_1 の最大値、最小値、平均値を求めよ。また E_1 の分布の概略形をプロットせよ。

- (2) E_1 の確率分布を (1) のパラメータを用いて式で示せ。
- (3) 原子核の質量数の違いによる減速効果の違いを 5 行以内で簡潔に述べよ。
- (4) エネルギー E_0 の中性子が単位体積、単位時間に S 個の割合で生まれて水素による減速を受けて中性子エネルギーの定常的な分布ができているものとする。この時、エネルギー $E (< E_0)$ における衝突密度 $F(E)$ のつりあいの方程式を示し、その解が $F(E) = S/E$ となることを示せ。
- (5) レサジーとはなにか簡潔に述べよ。また、レサジーを変数とする衝突密度とエネルギー $E (< E_0)$ における衝突密度 $F(E)$ の関係を求めよ。

第 4 問 フェルミ年齢拡散理論により裸の均質な熱中性子炉の臨界方程式を導くと、

$$\frac{k_{\infty} e^{-B^2 \tau}}{1 + L^2 B^2} = 1$$

となる。次の問いに答えよ。

- (1) k_{∞} は、通常、4 種の因子の積として表現される。これら 4 種の因子の定義を述べよ。
- (2) B^2 の物理的意味を 5 行以内で述べよ。また、当該炉が直方体である場合、

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{X}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z}\right)^2$$

となることを示せ。ただし、 X 、 Y 、および Z は、外挿距離を含む原子炉の各辺の長さであると仮定せよ。

- (3) τ の物理的意味を 5 行以内で述べよ。また、 $e^{-B^2\tau}$ の意味を 5 行以内で説明せよ。
- (4) L の物理的意味を 5 行以内で述べよ。また、 $\frac{1}{1+L^2B^2}$ の意味を 5 行以内で説明せよ。

第5問 遅発中性子を 1 組とした場合の 1 点炉動特性方程式を導くと、

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda c(t)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = -\lambda c(t) + \frac{\beta}{\Lambda} n(t)$$

となる。ここで、時刻 t における中性子密度、遅発中性子先行核密度、および反応度をそれぞれ、 $n(t)$ 、 $c(t)$ 、および $\rho(t)$ とし、平均中性子世代時間、遅発中性子割合、および遅発中性子先行核の崩壊定数をそれぞれ Λ 、 β 、および λ とした。次の問いに答えよ。

- (1) 原子炉が臨界状態に到達した後、十分に時間が経過し、原子炉内の中性子密度が一定で n_0 であるとき、遅発中性子先行核密度も一定値 c_0 となる。その場合の c_0 を求めよ。
- (2) ある時刻 ($t = 0$) に、負の階段状の反応度 ρ_1 が印加されたとする。そのとき、 $n(t)$ のラプラス変換 $\bar{n}(s)$ を求めよ。
- (3) $n(t)$ を 0 から ∞ まで積分し、

$$\int_0^{\infty} n(t) dt$$

を求めよ。

- (4) 上の結果を利用し、ドル単位の反応度 $-\rho_1/\beta$ が、

$$-\frac{\rho_1}{\beta} = \frac{1}{\lambda} \frac{n_0}{\int_0^\infty n(t) dt}$$

と表すことができることを示せ。

第6問 原子炉の反応度変化に関する次の文章の①～⑩にあてはまる語句として最も妥当なものを下欄から選び、対応する記号を番号とともに記せ。なお、同じ番号の□には同じ語句が入る。〔解答例〕 ⑪ーヤ

温度変化が反応度に及ぼす影響は反応度の温度係数によって表される。以下、反応度の温度係数のことを単に温度係数と言うことにし、議論を熱中性子炉に限ることにする。通常、原子炉の炉心の温度変化は均一ではない。原子炉の出力が変化すると、まず①の温度が変化する。その後、②と③の温度が、熱がそれらに伝達されることによって変化する。このため、温度係数を考える場合は、炉心内のどの成分の温度の変化に対する係数であるかを考える必要がある。①の温度係数に大きく影響を与える現象にドップラー効果がある。この現象により、①の温度の上昇とともに④は増加し、結果的に温度係数は⑤となる。②の温度が上昇した場合は、熱中性子の⑥が変化し、また、物質の密度が⑦するという効果が生じる。軽水炉では、②は③を兼ねているため、この場合、②と③の密度が同時に⑦することになる。これによって⑧と⑨の減少、⑩の増大等が生じる。軽水炉での②(③)の温度係数を議論する場合は、これらの効果を考慮する必要がある。

- | | | | |
|---------------|---------|----------|-----------|
| イ. 燃料 | ロ. 冷却材 | ハ. 減速材 | ニ. 構造材 |
| ホ. 炉容器 | ヘ. 正 | ト. 負 | チ. 増加 |
| リ. 減少 | ヌ. スピン | ル. スペクトル | ヲ. 中性子の吸収 |
| ワ. 中性子の漏れ | カ. 共鳴吸収 | ヨ. 高速核分裂 | |
| タ. 高速中性子の減速効果 | | | |