

第 59 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。

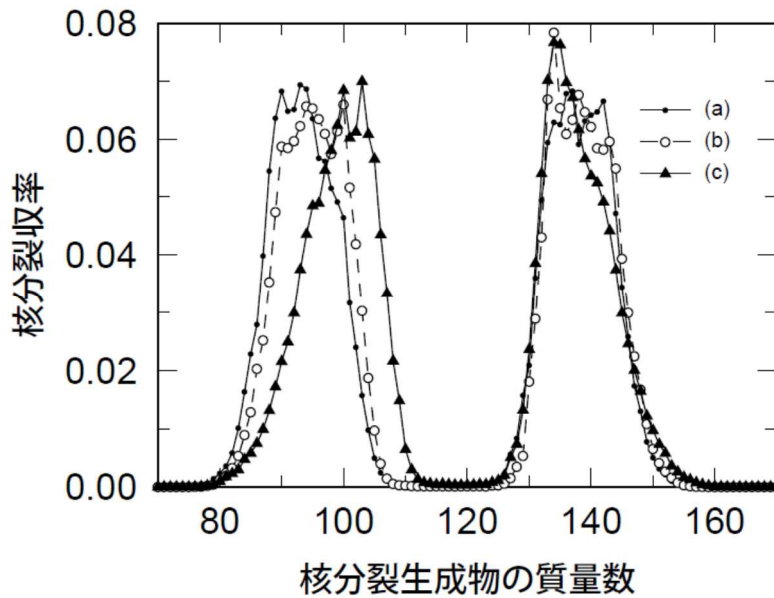
（問題を写し取る必要はない。）

（ロ）1問題ごとに1枚の解答用紙を使用すること。

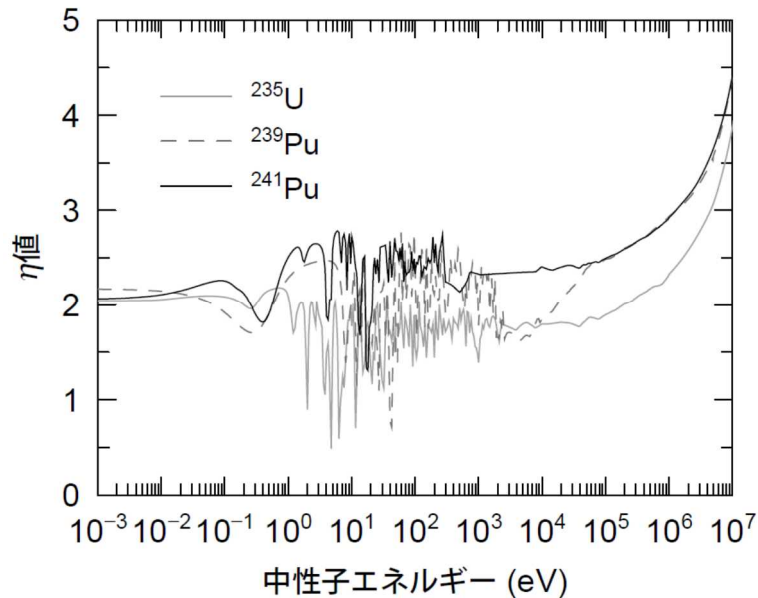
平成 29 年 3 月 15 日

第1問 核燃料となるアクチノイド領域における原子核の性質に関する以下の問いに答えよ。

- (1) 熱中性子核分裂性核種(fissile)と核燃料親物質(fertile)の違いと、これらの低エネルギー（熱中性子領域）核分裂断面積にはどんな特徴があるか説明せよ。また、 ^{232}Th 、 ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu がそれぞれどちらであるかを述べよ。
- (2) 下図に問(1)で示した核種の中の fissile の熱中性子による核分裂生成物の質量数分布を示す。これらの分布が図のように二山になる理由、特に重いピークの位置がほとんど変化しない理由を説明せよ。また、図中(a)、(b)、(c)はそれぞれ問(1)のどの fissile に対応するか述べよ。



- (3) 単体核種の中性子再生率(η 値)とは何かを説明せよ。また、下図に、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu それぞれの単体における η 値を示す。この図より、これらの核種の核燃料としての性質の違いを述べよ。



- (4) 原子炉停止後に発生する崩壊熱の起源を説明せよ。また、原子炉運転中、崩壊熱は原子炉全出力のうち何%程度であるかを述べよ。
- (5) 核分裂における即発中性子と遅発中性子それぞれの放出メカニズムを説明せよ。

第2問 無限に広い一様な非増倍体系での中性子の拡散を考える。この系の中に、無限に広く厚さがゼロで、等方的に単位面積あたり毎秒 S 個の中性子を放出する平板状中性子源が $x=0$ を通り yz 平面に平行に置かれているとする。この時以下の問いに答えよ。

- (1) 1群拡散理論を用いてこの体系内における中性子束分布を求めよ。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。
- (2) (1)で求めた中性子束分布を用いて、体系内での全中性子吸収量(x についての積分量)を求めよ。

第3問 減速材と中性子吸収物質からなる無限均質媒質中で中性子が減速中に吸収されない割合について考える。

- (1) 毎秒 1cm^3 あたり、あるレサジー u を通過して減速してゆく中性子の減速密度を $q(u)$ 、減速材原子核に散乱された中性子の平均レサジー増加を ξ とする。レサジー u から $u+du$ の範囲 du において中性子の吸収がなく減速材原子核との散乱反応のみを考えた場合の、毎秒 1cm^3 あたりの中性子和減速材原子核との散乱反応の回数を $q(u)$ 、 ξ と du で表わせ。
- (2) レサジー u における単位レサジー幅あたりの中性子和媒質原子核との衝突密度 $F(u)$ を媒質の吸収断面積 $\Sigma_a(u)$ 、散乱断面積 $\Sigma_s(u)$ 、中性子束 $\varphi(u)$ を用いて表わし、 u から $u+du$ の範囲 du において(1)で示した散乱反応数が毎秒 1cm^3 あたりの全衝突数に等しいと近似した関係式を示せ。
- (3) レサジー u と $u+du$ における中性子の減速密度をそれぞれ $q(u)$ 、 $q(u+du)$ とすると、このレサジー区間 du における減速密度の変化 $q(u) - q(u+du) = -dq(u)$ は中性子吸収反応率 $\Sigma_a(u)\varphi(u)du$ に等しい。この関係と(2)の関係より推定した $\varphi(u)$ を用いて、減速密度の微分 $-dq(u)/du$ が満たす微分方程式をたてよ。
- (4) (3)の微分方程式を解いて、 $q(u)/q(0)$ 、すなわちレサジー 0 から u まで減速される間に中性子が吸収されない割合が

$$\exp\left[-\int_0^u \frac{\Sigma_a(u)}{\xi\{\Sigma_a(u) + \Sigma_s(u)\}} du\right]$$

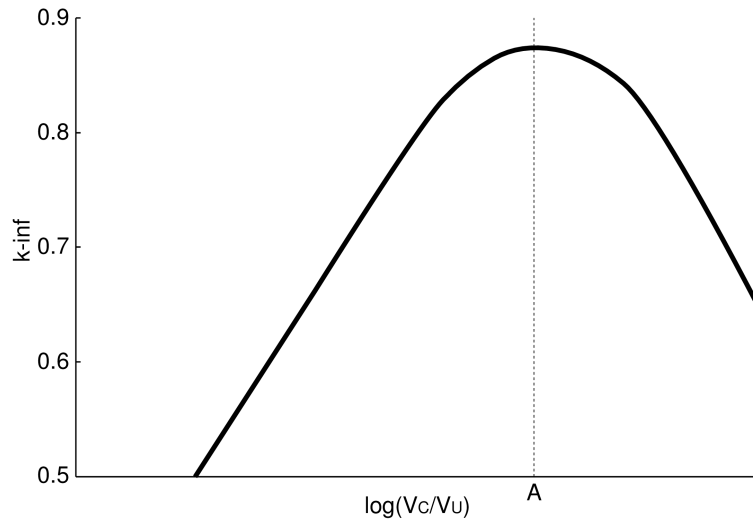
さらにこの吸収されない割合を、レサジー 0 に対応するエネルギーを E_0 、 u に対応するエネルギーを E としてエネルギー変数に書き換え、

$$\exp\left[-\int_E^{E_0} \frac{\Sigma_a(E)}{\xi\{\Sigma_a(E) + \Sigma_s(E)\}} \frac{dE}{E}\right]$$

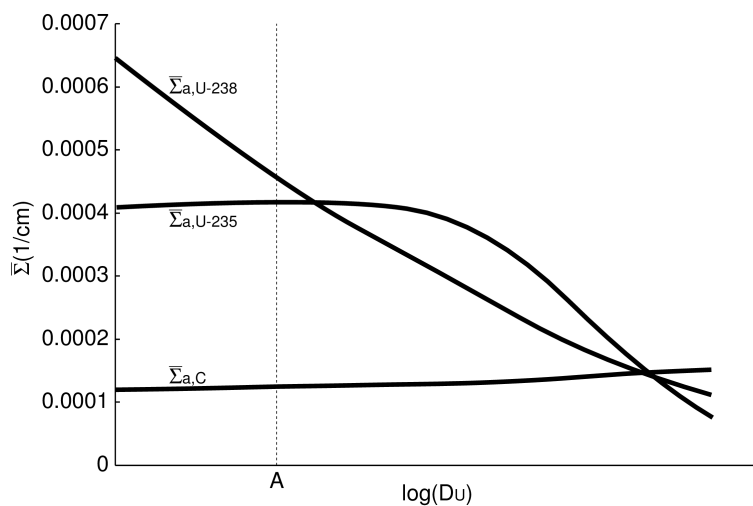
で表わされることを示せ。

第4問 金属天然ウランの粒子が黒鉛中に分散した非均質体系について以下の問いに答えよ。ウラン金属は ^{235}U と ^{238}U 、黒鉛は ^{12}C からなるとする。

- (1) 天然ウランの粒子径を保ったまま、ウラン体積 V_U と黒鉛体積 V_C の割合を変化させて無限増倍率を求め、下記の図を得た。増倍率がピークを持つ理由について説明せよ。



- (2) 次に、黒鉛／ウラン体積割合を(1)の図中 A で示される条件に保ったままウラン粒子径 D_U を変化したところ、体系全体で平均した各原子核のエネルギー1群吸収断面積は下図のように変化した。ウラン同位体の断面積が D_U の増加に強く依存して減少する理由を説明せよ。



(3) (2)の図に示す断面積変化から考えて、(1)の図中 A で示される条件から黒鉛／ウラン体積割合を保ったままウラン粒子径 D_U を増加させて行くと、この体系の無限増倍率は次に示すどのような変化をすると予想されるか、下記の a) ~ d)より選べ。また、その判断理由を説明せよ。なお、(1)のウラン粒子径は(2)の図において A で示される。

- a) 単調に減少する
- b) 減少後増加に転じる
- c) 増加後減少に転じる
- d) 単調に増加する

(4) (1)の図中 A で示される条件の黒鉛／ウランからなる有限大きさの体系を臨界にするために以下のどの操作が有効と予想されるか。あてはまるものをすべて選べ。b)、 e) を選んだ場合は、①と②についてもあてはまるものをすべて選べ。

- a) ウランの濃縮度を増加させる。
- b) 黒鉛に対するウランの体積割合を、①増加、②減少、させる。
- c) 原子炉体積を十分大きくする。
- d) 十分厚い反射体を設置する。
- e) ウラン粒子の径を、①増加、②減少、させる。

第5問 下記の問いに解答せよ。

- (1) ゼロ出力の原子炉動特性方程式では遅発中性子を6群程度の群に分けて扱われる。遅発中性子を群に分けて扱う理由を説明せよ。

- (2) 遅発中性子を6群で表した一点炉近似動特性方程式、および第*i*群の遅発中性子先行核濃度 $C_i(t)$ が従う方程式を記述せよ。但し、強度 S の外部中性子源があるとし、中性子密度を $n(t)$ 、反応度を $\rho(t)$ 、第*i*群の遅発中性子割合を β_i とする。その他の必要な記号はその記号があらわす量の説明とあわせて示せ。

- (3) 時間 $t < 0$ において反応度 $\rho_0 < 0$ で中性子密度 n_0 、第*i*群の遅発中性子先行核濃度 C_{i0} で一定であったとする。(2)で記述した方程式をもとに、 n_0 を S を用いて示せ。その他の必要な記号はその記号があらわす量の説明とあわせて示せ。

- (4) (3)の状態から $t \geq 0$ で正の反応度を添加し、反応度が $\rho_1 < 0$ となった後、時間が経過し中性子密度 n_1 で一定となったとする。 n_1 と n_0 の関係を表す式を示せ。その他の必要な記号はその記号があらわす量の説明とあわせて示せ。

- (5) 未臨界の体系に正の反応度を添加し臨界に近づける場合、臨界に近くなるほど中性子密度が安定するまでに要する時間が長くなる。その理由を説明せよ。

第6問 微濃縮ウラン燃料で構成された軽水炉を考える。このとき下記の問いに解答せよ。

- (1) 原子炉内の下記の領域の温度上昇により引き起こされる反応度変化について、どのような現象が反応度変化を引き起こすかを反応度変化の正負とともに説明せよ。
 - (a) 燃料(ただし溶融しない程度の温度上昇とする)
 - (b) 減速材(ただし沸騰しない程度の温度上昇とする)

- (2) 原子炉は臨界状態で運転されるが、1年ほどの長期にわたる運転に伴う燃料組成の変化により反応度を正側および負側に变化させる要因がある。この反応度を正側に变化させる要因および負側に变化させる要因をそれぞれ2つ挙げ、その要因となる核種とともに示せ。

- (3) 原子炉の燃焼期間の初期において、余剰反応度を抑えるために用いられる方法について2つ挙げ、燃焼に伴う余剰反応度の変化にどのように対応しているかとあわせて説明せよ。

- (4) 高出力運転している原子炉をスクラムにより停止した場合、原子炉停止後しばらくは再起動することができない理由について、原子炉停止後の反応度変化とあわせて説明せよ。