

第 58 回

原子炉主任技術者試験（筆記試験）

原 子 炉 の 設 計

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。

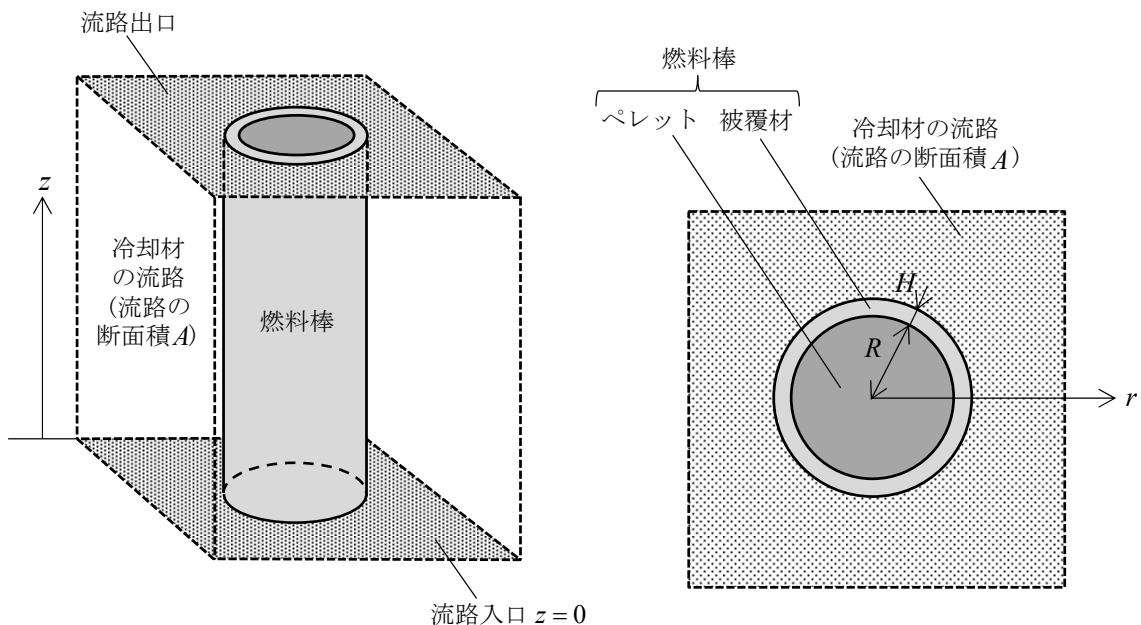
平成 28 年 3 月 17 日

第1問 下図に示されるように、定常状態で沸騰水型炉が運転している。流路の断面積は A [m^2] であり、流路には円柱形状の燃料棒がある。燃料棒の軸方向を z [m] とし、軸方向の出力分布は一定であるとする。流路入口での冷却水の流量は $Q_{L,\text{in}}$ [m^3/s]、入口サブクール度は ΔT_s [K] である。流路出口でのクォリティは x_{out} 、ボイド率は α_{out} である。水の密度は ρ_L [kg/m^3]、水の比熱は c_L [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]、蒸気の密度は ρ_G [kg/m^3]、蒸発潜熱は Δh_{LG} [J/kg] であり、流路内で一定とする。燃料棒のペレットの半径は R [m]、被覆の厚さは H [m] である。ペレット表面と被覆材内面の間にはギャップがなく、ペレット表面と被覆材内面の温度は T_p [K] で等しいとする。被覆材の熱伝導率は k_c [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]、被覆材外面の温度は T_c [K] である。被覆材での温度 T [K] は r [m] のみの関数であり、定常熱伝導方程式

$$\frac{k_c}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

によって支配されている。以下の問いに答えよ。

- (1) 被覆材での温度 T の分布を求めよ。また、被覆材外面での熱流束 q_c'' [W/m^2] および線出力密度 q_c' [W/m] を求めよ。
- (2) 水力学等価直径 D_e [m] および流路入口でのレイノルズ数 Re を求めよ。また、流路の臨界レイノルズ数を Re_c とすると、流路入口での流れが乱流となる $Q_{L,\text{in}}$ の条件を示せ。
- (3) 流路出口での蒸気の流速 $v_{G,\text{out}}$ [m/s] と水の流速 $v_{L,\text{out}}$ [m/s] を求めよ。
- (4) 冷却水が飽和温度となる沸騰開始点 z_b [m] を求めよ。また、沸騰開始点 z_b から流路出口の点 z_{out} [m] までの距離 $z_{\text{out}} - z_b$ を求めよ。



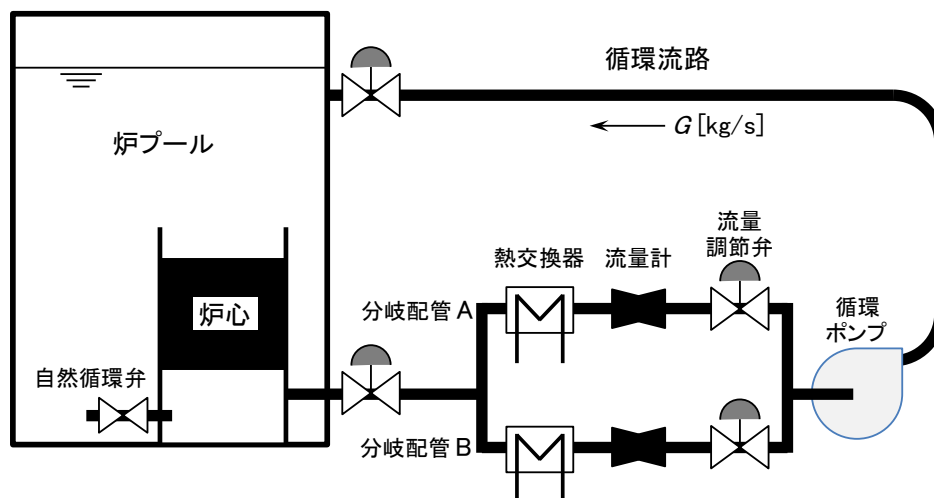
第2問 大気圧下で定格出力運転される下図のプール型研究炉について、次の問いに答えよ。ただし、密度 ρ_L [kg/m³]の冷却水が熱交換器などを含む2本の分岐配管や循環ポンプを経て流量 G [kg/s]で炉プールに還流し、冷却水密度の温度変化は無視できるとする。

- (1) 分岐配管A、Bについて、各々の流量を G_A 、 G_B [kg/s]としたとき、分岐点から合流点までの各々の圧力損失 H_A 、 H_B [m]を求めよ。ただし、分岐配管A、Bの抵抗係数（熱交換器、流量計、流量調節弁などの寄与を含む）を K_A 、 K_B とし、配管の断面積 A_p [m²]は循環流路にて一様で、抵抗係数は A_p に対する規格値とする。また、重力加速度を g [m/s²]とする。
- (2) 分岐配管A、Bの流量 G_A 、 G_B [kg/s]の相互関係を、配管の抵抗係数 K_A 、 K_B を用いた式で示せ。
- (3) ポンプ水頭を H_p [m]、分岐配管A、B以外の流路の抵抗係数の和（配管や炉心部の寄与を含む）を K_c とすると、分岐配管A、Bの流量 G_A 、 G_B [kg/s]の各々について、 H_p と K_c を含む式で表せ。
- (4) 分岐配管Bの流量調節弁が誤って閉止した。循環流路では流量が変化するが、縦軸を揚程、横軸を流量とするグラフに、弁閉止前後の循環流路の圧力損失特性をポンプの揚程曲線と比較して示すとともに、生じる事態を300字以内で説明せよ。ただし、循環ポンプの揚程曲線は、次の簡略表現で現されるとする。

$$H_p = H_0 - aG^n$$

ここで、 H_0 ：締切り水頭 [m]、 a ：抵抗係数、 n ：流量指数とする。

- (5) 運転員はこのとき、炉心に制御棒を全挿入するとともに循環ポンプの回転数を徐々に下げて停止し、炉心を自然循環冷却モードとした。循環流路の流量変化をポンプの特性変化とともに(4)と同様のグラフに示し、生じる事態を200字以内で説明せよ。



第3問 軽水炉のシビアアクシデント（重大事故）について、次の問いに答えよ。

- (1) 何らかの原因で ECCS をはじめ外部注水も含む炉心への注水手段が全て利用できなくなった場合、炉心の上端にある水位が低下して炉心が水面上に露出し、過熱する過程を手計算にて評価したい。どのような条件を考慮して検討を進めれば良いか、その理由が明確になる様に 300 字程度で説明せよ。
- (2) 原子力規制委員会による新規制基準では、シビアアクシデント時の格納容器の損傷防止策の有効性評価に際して「原子炉圧力容器の破損までに原子炉冷却材圧力は 2.0 MPa 以下に低減されていること」が判断項目の 1 つに挙げられている。この理由と具体的な対処法の例について、300 字以内で説明せよ。
- (3) (1) の結果として炉心の燃料が溶融し、(2) の手順によって原子炉冷却材圧力の減圧には成功したが、燃料溶融物が格納容器の床に落下した。新規制基準で必ず想定すべきとされる格納容器破損モードのうち主に関連する 2 つを挙げ、それらが格納容器の健全性及び及ぼす影響を各々 200 字以内で説明せよ。ただし、落下時に、格納容器床に水プールは形成されていないとする。
- (4) 水素の急速な燃焼形態には主に爆燃（デフラグレーション）と爆ごう（デトネーション）があるが、この様な水素燃焼について 400 字以内で説明せよ。なお、説明には、水素燃焼の防止に必要とされる条件のほか、格納容器ないし原子炉建屋に生じうる現象、さらにその空間サイズの影響を含めよ。

第4問 以下の文章は、日本機械学会発電用原子力設備規格などにしたがって軽水炉クラス 1 容器の構造設計を行う一般的な手順を述べたものである。文章中の□に入る適切な語句又は数値を番号とともに答えよ。なお、同じ番号の□には、同じ語句又は数値が入る。

〔解答例〕 ㉑ 東京

まず最初に通常運転時の□①や外荷重などによって発生し、塑性変形によっても緩和しない□②に対する評価が実施される。設計条件下で構造不連続部から離れた部位で発生する□②各成分の肉厚平均値から□③説に基づいて求められる□④は、各材料に対して決められた設計□④以下に抑えられる。設計□④は設計降伏点の□⑤倍（□⑥の大きなオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル合金などは 0.9 倍）と設計引張強さの□⑦倍のうちのいずれか小さい方の値として決められている。さらに曲げ応力下では降伏を開始する荷重よりも□⑧が高いことを考慮して、肉厚内の応力分布を線形化して求めた□④に対して設計□④の定数（中実矩形断面の場合□⑨）倍以下であることを確認する。

次に熱応力によって代表される□⑩に対する評価が実施される。□⑩は塑性変形とともに

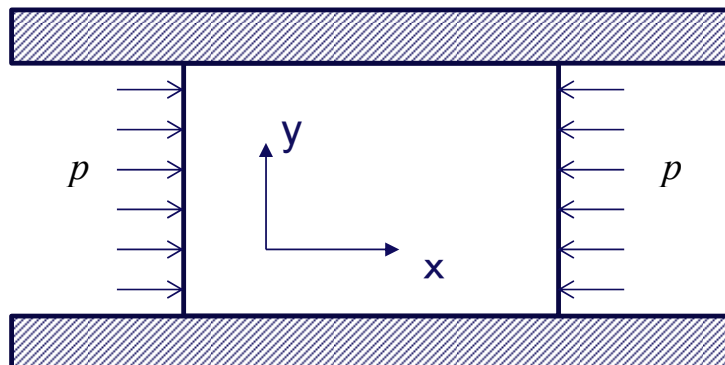
緩和する変位制御型の特性を持ち、単独で破壊を引き起こす可能性が小さいことから、②よりも高い値まで許容される。特に②と熱応力の組み合わせで発生する可能性のある⑪を防止するため、②の大きさに応じて熱応力の変動値が制限される。

さらに応力分布の非線形成分である⑫も加えた⑫強さに対して⑬の評価が行われる。⑬の評価では、⑫強さの振幅に対して塑性変形によるひずみの割増を考慮して修正した応力振幅を⑭にあてはめて得られる⑮が実機で想定される繰返し数を下回らないことを確認する。複数の負荷条件に対して評価するときには、各負荷条件について⑮に対する想定繰返し数の割合を求めた後、全負荷条件についてこれを足して求められる⑯が1以下になることを確認する。

以上に加えて、原子炉压力容器に対しては、⑰作動時の熱衝撃下でも⑱が生じないことを確認するため、⑲を想定したうえで⑳に基づく評価を行う。

第5問 下図のように上下からy方向の変形を拘束された状態(y方向のひずみ： $\varepsilon_y=0$)でx方向に一樣な圧力 p [MPa]を受ける平板がある。これについて以下の問いに答えよ。なお、材料は等方線形弾性体とし、その縦弾性係数(ヤング率)を E [MPa]、ポアソン比を ν 、線膨張係数を α [K^{-1}]とする。また、平板の上下面では摩擦がなく、x方向への変位は拘束されないものとする。

- (1) z方向(紙面に直交する方向)に拘束が無い状態(z方向の応力： $\sigma_z=0$)で、圧力 p (応力としては $\sigma_x=-p$)を与えたとき、y方向にはどれだけの垂直応力 σ_y が発生するか。また、このときのx方向の垂直ひずみ ε_x はいくらか。 E 、 ν 及び p を使って表せ。
- (2) z方向の変形も完全に拘束された状態(z方向のひずみ： $\varepsilon_z=0$)で、(1)と同様な負荷が与えられたときの σ_y と ε_x はいくらか。 E 、 ν 及び p を使って表せ。
- (3) $p=0$ でz方向にも拘束が無い状態($\sigma_z=0$)で平板全体の温度が ΔT [K]だけ上昇したときに、 σ_y と ε_x はいくらになるか。 E 、 ν 、 α 及び ΔT を使って表せ。
- (4) z方向の変形も完全に拘束された状態($\varepsilon_z=0$)で、(3)と同様に平板全体の温度が ΔT [K]だけ上昇したときに、 σ_y と ε_x はいくらになるか。 E 、 ν 、 α 及び ΔT を使って表せ。



第6問 次の用語について簡潔に説明せよ。

- (1) プラントル数とヌッセルト数
- (2) ドリフトフラックスモデル
- (3) モックアップ試験
- (4) 応力拡大係数
- (5) 弾完全塑性近似

【メモ】

【メモ】

【メモ】

【メモ】

【メモ】