

第 62 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。

令和2年3月18日

第1問 図1に示されるように、長さ L [m]、半径 R [m]の鉛直円管内を冷却材が z 方向 ($0 \leq z \leq L$) に流れている。このとき、円管内の流れ場は充分発達した乱流であり、時間平均 z 方向流速 u [m/s]は半径 r にのみ依存し、次の $1/7$ 乗則で表されるとする。

$$u = u_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}}$$

ここで、 u_{max} [m/s]は最大平均流速（管中心軸上における平均流速）である。円管壁面温度は一定値 T_w [K]であり、円管内で沸騰は生じないものとする。冷却材の密度は ρ [kg/m³]、粘性係数は μ [Pa·s]、熱伝導率は λ [W/(m·K)]、比熱は C [J/(kg·K)]であり、温度・圧力によって変化しないものとする。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 時間平均 z 方向流速の断面平均値 u_{ave} [m/s]を、 u_{max} を用いて表せ。また、 u_{ave} 及び円管直径に基づくレイノルズ数 Re を定義せよ。ただし、 u_{ave} を計算する際には次の関係式を用いてよい。

$$\frac{d \left\{ r(R-r)^{\frac{8}{7}} \right\}}{dr} = (R-r)^{\frac{8}{7}} - \frac{8}{7} r(R-r)^{\frac{1}{7}}$$

- (2) $z=0$ から $z=z_1$ ($<L$) までの区間における、壁面摩擦による圧力損失を計算せよ。ただし、乱流におけるダルシーの管摩擦係数 f は、(1) で求めた Re を用いて、次の式で表される。なお、 k_1 は定数である。

$$f = k_1 Re^{-0.25}$$

- (3) $z=0$ における冷却材の圧力（静圧）を p_0 [Pa]とすると、円管内の z 方向圧力分布 $P(z)$ [Pa]を求めよ。ただし、圧力は z 方向のみに変化するものとする。また、重力は鉛直下向き ($-z$ 方向) に作用し、重力加速度を g [m/s²]とする。

- (4) $z=0$ における冷却材温度を T_0 [K] ($< T_w$) とするとき、 $z=0$ における円管から冷却材への熱流束 q'' [W/m²]を求めよ。ただし、円管内乱流のヌセルト数 Nu は、(1) で求めた Re と冷却材のプラントル数 Pr を用いて次の式で表される。なお、 k_2 は定数である。

$$Nu = k_2 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

- (5) 上記(4)の結果を利用して、円管内の z 方向温度分布 $T(z)$ [K]を求めよ。ただし、温度は z 方向のみに変化するものとする。また、必要に応じて適当な定数を定義して解答してよい。
- (6) $z=L$ における冷却材温度を $(1-k_3)T_w + k_3T_0$ (k_3 は1未満の正の定数) と表すとき、上記(5)の結果を利用して、 k_3 を k_2 の式で表せ。

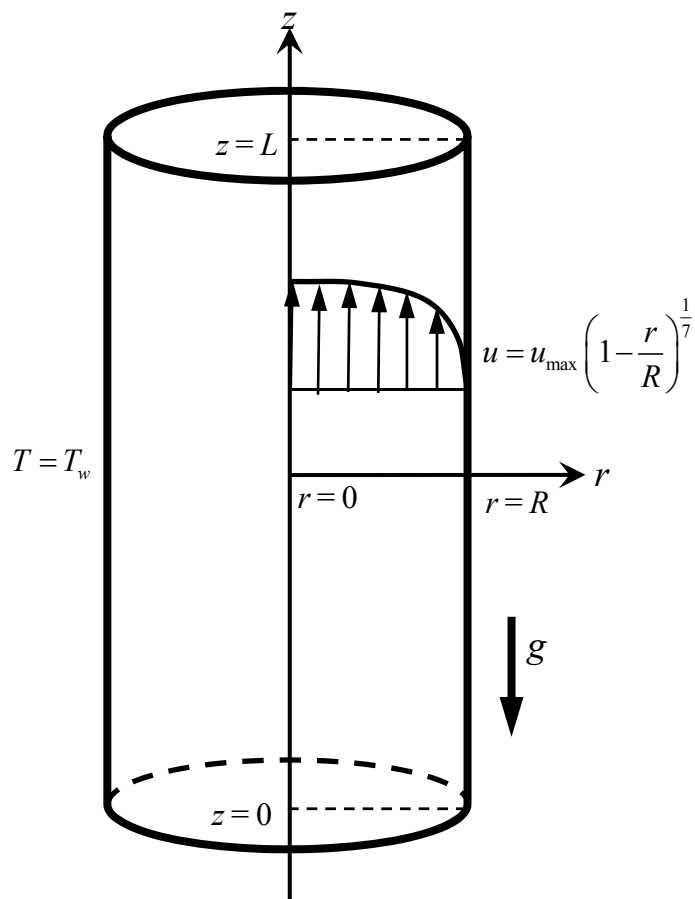


図 1

第2問 自然循環で駆動される図2のような原子炉を考える。以下の問いに答えよ。

- (1) 炉心出口（高温側）の冷却材温度 T_H [K] を求めよ。ただし、冷却材はサブクール水であり、炉心入口（低温側）の温度を T_L [K]、密度を ρ_L [kg/m³]、定圧比熱を C_p [J/(kg·K)] とする。また、原子炉出力を Q [W]、循環流量を W [m³/s] とする。
- (2) 高温側の冷却材密度 ρ_H [kg/m³] 及び発熱中心（炉心）と除熱中心（熱交換器）との高低差 H [m] に生じる水頭差 ΔP_h [Pa] を求めよ。ただし、冷却材の体積膨張係数は β [1/K]、重力加速度を g [m/s²] とする。
- (3) 冷却材が循環流路を一巡した時に生じる圧力損失 ΔP_f [Pa] を求めよ。さらに、 $\Delta P_f = \Delta P_h$ のとき、(1) 及び (2) で求めた関係を用いて、循環流量 W を ρ_L 、 C_p 、 β 、 Q 、 H などの関係式として表せ。ただし、循環流路の代表断面積を A [m²]、流路全体の抵抗係数を K （無次元定数）とし、冷却材の密度は ρ_L で代表させる。
- (4) 循環流路の下部から冷却材が漏れ始め、加圧器の水位が徐々に低下してサージ配管にまで達した。微少な漏洩が継続する場合、炉に生じると思われる現象について、自然循環等による炉心冷却の状態を中心に説明せよ。ただし、 H は約 10 m であり、運転中の圧力は約 60 気圧であった。

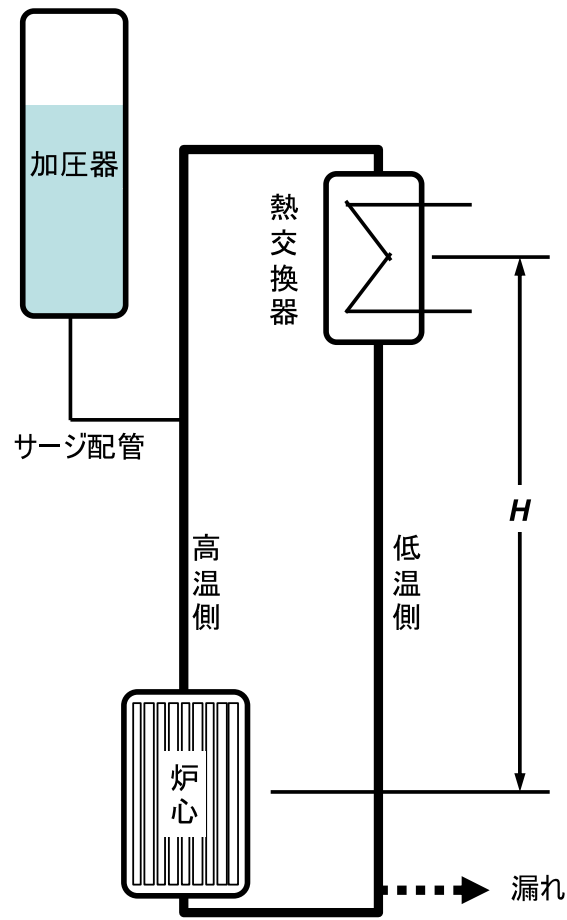


図 2

第3問 図3に示す中実円筒が様々な負荷を受けたときに生じる変形や反力について、以下の問いに答えよ。材料はヤング率 $100,000\text{MPa}$ 、ポアソン比 0.2 の線形弾性体とし、微小変形理論が成立するものとする。また、線膨張係数は温度に依存せず、 $2 \times 10^{-5}/\text{C}$ であるとする。

- (1) 図4のように上下の両端部に 100MPa の表面力が与えられたときの円筒の高さの変化 ΔH と直径の変化 ΔD はそれぞれいくらかと推定されるか。
- (2) 図5のように側面全体に 100MPa の圧力が与えられたときの円筒の高さの変化 ΔH と直径の変化 ΔD はそれぞれいくらかと推定されるか。
- (3) 図6のように円筒全体が 100MPa の圧力を受けた場合に発生する円筒の高さの変化 ΔH と直径の変化 ΔD はそれぞれいくらかと推定されるか。
- (4) 半径方向には自由に膨張できるが、上下方向の変形が完全に拘束された状態で円筒全体の温度が 200C 上昇したとき、円筒上下の端面が受ける単位面積あたりの反力の絶対値 R と直径の変化 ΔD はそれぞれいくらかと推定されるか。
- (5) 上下方向には自由に膨張できるが、半径方向の変形が完全に拘束された状態で円筒全体の温度が 200C 上昇したとき、円筒の側面が受ける単位面積あたりの反力の絶対値 R と円筒の高さの変化 ΔH はそれぞれいくらかと推定されるか。

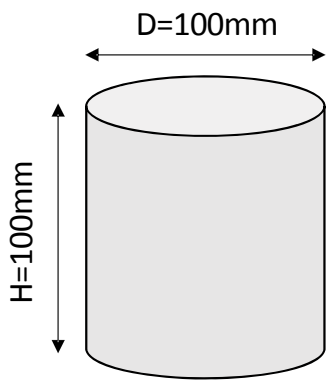


图 3

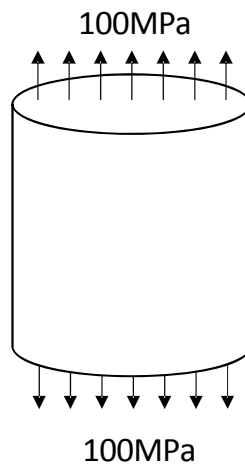


图 4

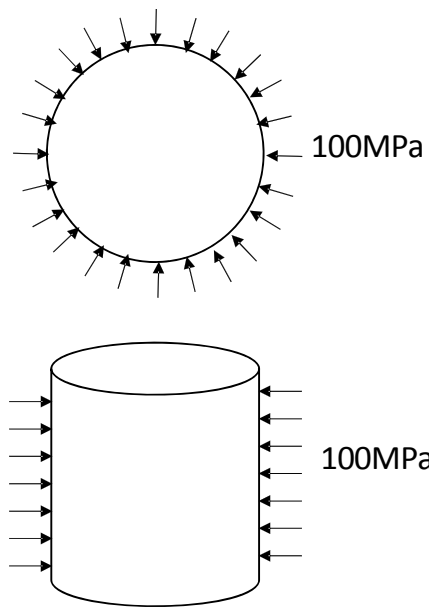


图 5

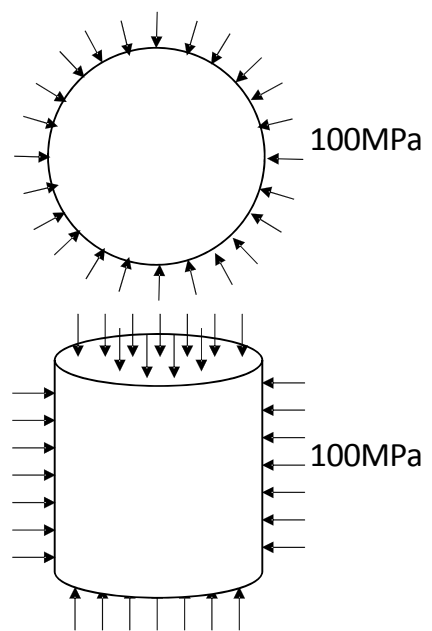


图 6

第4問 軽水炉でのシビアアクシデント（重大事故）を考える。以下の問いに答えよ。

- (1) 重大事故等対処施設を考えると、常設設備と可搬型設備の主な特徴について述べよ。
- (2) 確率論的リスク評価（PRA）を個別プラント評価における事故シーケンスグループの抽出に用いる理由を述べよ。
- (3) 現行の規制基準では、重大事故が発生した時に必ず想定する格納容器破損モードが6種類定められている。そのうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷」以外の任意の3種類を挙げ、その各々についてそれらを防ぐために有効な対策あるいは条件を述べよ。
- (4) (3)に関連して、原子炉格納容器の最高使用圧力及び限界圧力について、それらの関係とその根拠を述べよ。

第5問 熱応力に関する以下の記述について、文章中の□の部分に入る適切な語句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〕 ㉑－東京

熱応力は、物体内に□①が生じて、各部位の自由な熱□②が妨げられるときに発生する。物体内の一部の温度が上昇すると、その部分は□②しようとするが、他の部分からの拘束によってこれが妨げられたとき、□③の応力が発生する。配管や容器の内表面が急冷されたときには、内表面には□④、外表面には□③の応力が発生する。また、熱□②のしやすさを表す□⑤は材料によって異なるため、□⑤が異なった材料を接続した部分では、温度が一樣に変化した場合でも、熱応力が発生する。例えば、□⑥で製造された配管と□⑦で製造された容器を繋ぐ部分に使用される□⑧はその典型例である。

発生する応力は、弾性範囲内では温度差や温度変化量に比例するが、内圧などによる□⑨とは異なる特質として、材料が□⑩に達して□⑪が生じ始めると増加率が低下していくことが挙げられる。したがって、設計上は、大きな□⑪の後に生じるような□⑫には寄与しない□⑬であるとして取り扱われている。ただし、□⑨との組み合わせによっては、これが繰り返されることによって変形が一方に累積していく□⑭を引き起こすことがあるため、設計基準ではこれを防止するための評価が要求されている。さらに配管では温度変動の繰り返しによる□⑮の例があり、□⑯による□⑰発生の防止においても、その考慮は重要である。

熱応力を□⑱させるには、一般部では□⑤が低い材料を使用する他、□⑧などでは□⑤の差が小さい材料を選択することが必要である。また、急速な温度変動があるときには、□⑲が高く、比熱が□⑳材料を用いて物体内の温度差を小さくすることで熱応力を□㉑させることも可能であり、□⑥よりも□⑦の方が有利なことが多い。

第6問 次の用語について、それぞれ簡潔に説明せよ。

- (1) DNBR (Departure from Nucleate Boiling Ratio)
- (2) レイリー数
- (3) 0.2%耐力
- (4) 修正 Goodman 線図
- (5) 混合硬化則