

第 61 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 31 年 3 月 14 日

第1問 図1に示されるように、長さ L [m]、直径 D [m]の円柱形状の燃料棒が正方格子状に並んだ沸騰水型原子炉の炉心内を、冷却材が z 方向に流れている。単位流路（断面積 A [m²]のサブチャンネル）あたりの冷却材流量を G [kg/s]とし、各燃料棒は一樣な発熱密度 q''' [W/m³]で発熱しているとする。ただし、液相の密度を ρ_l [kg/m³]、比熱を C_l [J/kgK]、気相の密度を ρ_g [kg/m³]、比熱を C_g [J/kgK]とし、沸騰の潜熱を H_b [J/kg]とする。また、単位流路の入口 ($z=0$ [m]) におけるサブクール度は ΔT_{sc} [K]であり、単位流路断面内において冷却材温度は一樣であるとする。このとき、以下の問いに答えよ。

- (1) 燃料棒表面における熱流束 q'' [W/m²]及び線出力密度 q' [W/m]を q''' を使って表せ。
- (2) 沸騰開始点の z 座標 z_b [m]を求めよ。また、 $z \geq z_b$ の領域における蒸気クオリティ x を z の関数で表せ。ただし、気相と液相は常に熱的平衡状態にあり、サブクール沸騰は生じないものとする。
- (3) 気相と液相の速度をそれぞれ u_g [m/s]及び u_l [m/s]とし、速度比（スリップ比） u_g/u_l を s （一定）とするとき、 $z \geq z_b$ の領域におけるボイド率 α と蒸気クオリティ x の関係式を求めよ。
- (4) スリップ比 s が $s = (\rho_l/\rho_g)^n$ と表されるとする。気相と液相の運動量フラックスをそれぞれ $M_g = Gx u_g$ [kgm/s²]及び $M_l = G(1-x)u_l$ [kgm/s²]とするとき、運動量フラックスの総和 $M = M_g + M_l$ を最小化するようにスリップ比が決定される場合の n の値を求めよ。
- (5) 上記(2)の条件下において、蒸気クオリティ x が 0.5 となる位置における燃料棒表面の過熱度 ΔT_{sh} [K]を求めよ。ただし、燃料棒表面における熱流束を $q'' = 525,000$ [W/m²]とし、燃料棒表面における強制対流蒸発の熱伝達率 h_{TP} [W/m²K]は、以下の式で表されるとする。

$$\frac{h_{TP}}{h_{L0}} = 3.5 \left(\frac{1}{X_u} \right)^{0.5}$$

ただし、 h_{L0} は液相単相が流量 G で流れている場合の強制対流熱伝達率であり、ここでは一定値 (5,000 [W/m²K]) とする。また、 X_u は Lockhart-Martinelli のパラメータであり、以下の式で表される。

$$X_u = \beta \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9}$$

β は流体物性によって決まる無次元パラメータであり、ここでは、 $\beta = 1/36$ とする。

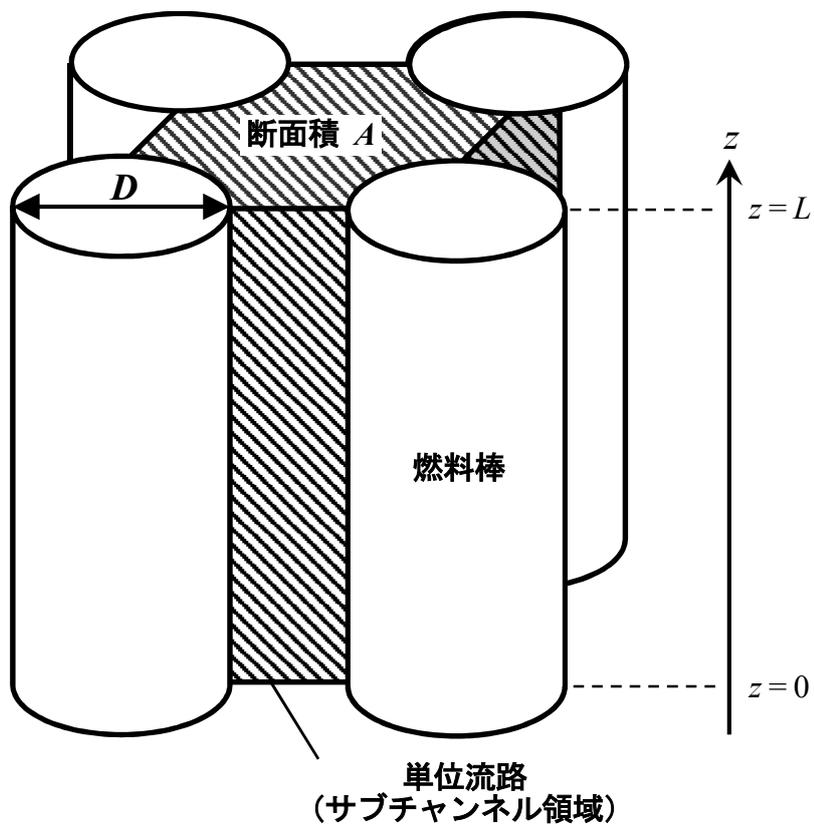


図 1

第2問 図2の、圧力 $P_0 = \text{約 } 7 \text{ MPa}$ で運転される自然循環型炉の原子炉容器下端部より、一定の微小流量 $G \text{ (kg/s)}$ で冷却水が漏れ始めた。このとき、以下の問いに答えよ。ただし、圧力と水位の変化は準静的で、水蒸気は理想気体と見なすことができ、断熱膨張や断熱圧縮による温度変化、及び凝縮は考えない。また、原子炉の各機器は断熱で熱容量は無視でき、炉心で沸騰は生じないものとする。

- (1) 全高 $H \text{ (m)}$ 、容積 $V \text{ (m}^3\text{)}$ 、一様な断面積 $A \text{ (m}^2\text{)}$ を有する加圧器は、時刻 $t=0 \text{ (s)}$ に水位 $z=L_0 \text{ (m)}$ の飽和水と体積分率 α_0 の飽和蒸気で満たされていた。このときの、飽和水と飽和蒸気の質量 $M_{LS} \text{ (kg)}$ 、 $M_{GS} \text{ (kg)}$ とエンタルピー $H_{LS} \text{ (J)}$ 、 $H_{GS} \text{ (J)}$ を求めよ。ただし、飽和水と飽和蒸気の密度、比エンタルピーを各々 $\rho_{LS} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、 $\rho_{GS} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、 $h_{LS} \text{ (J/kg)}$ 、 $h_{GS} \text{ (J/kg)}$ とする。
- (2) 冷却水の流出によって原子炉は徐々に減圧し、加圧器では減圧沸騰を生じた。液相の相変化率を $\Gamma \text{ (kg/s)}$ とするとき、液相と蒸気相の各々の質量保存の式を、左辺を各相の質量の時間微分、右辺に G と Γ を用いて示せ。
- (3) 液相と蒸気相の各々のエネルギー保存の式を、左辺をエンタルピーの時間微分、右辺に G 、 Γ 、気液各相の比エンタルピーを用い、かつ液相の相変化に伴う熱移動を考慮して示せ。ただし、流体の運動エネルギーは無視できるものとする。
- (4) 時刻 $t=t_E$ より ECCS が一定の流量 $G_{ECCS} (> G)$ で注水を開始した。水位と圧力は各々、 $z(t_E) = L_E$ 、 $P(t_E) = P_E$ より上昇に転じ、水位は時刻 $t = t_f$ に L_0 へ回復した。このときの蒸気相の圧力 $P(t_f) = P_f$ を、 L_E 、 P_E を含む式で示せ。
- (5) もし、冷却水の漏れが原子炉容器の頂部に生じた場合、炉容器底部からの漏れとの違いについて 200 字以内で述べよ。ただし、漏れを生じた流路の形状とサイズは同一とする。

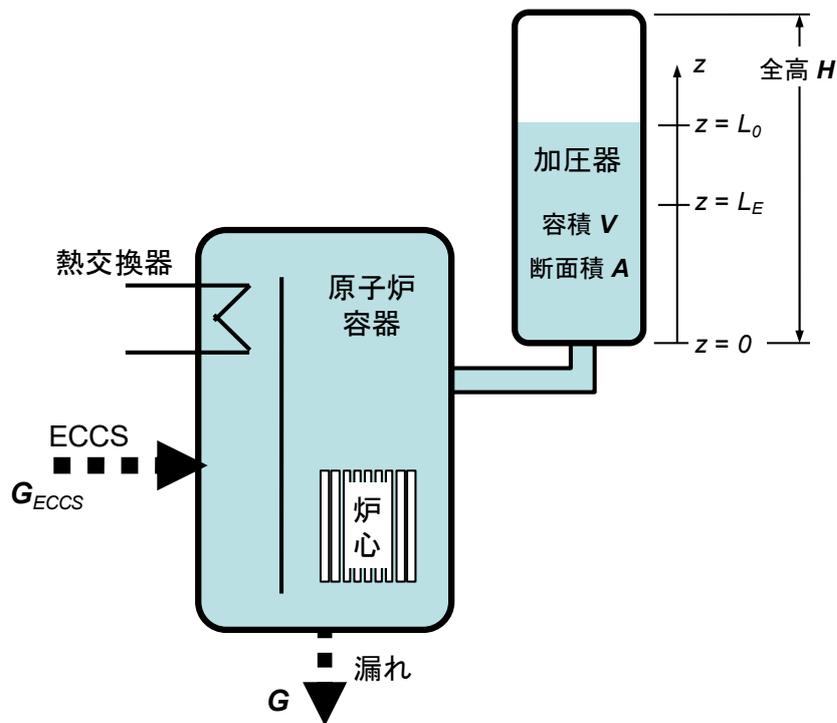


図2

第3問 軽水炉でのシビアアクシデント（重大事故）を考える。

- (1) 東京電力福島第一原子力発電所の事故の教訓に基づいた、非常用ディーゼル発電機が利用できない全交流電源喪失（SBO）の事態に利用される代替電源設備について、設計基準事故対処設備との関係を含め、200字程度で説明せよ。
- (2) (1)と異なる機能の電源設備である直流電源設備について、所内常設型及び可搬型の各々に求められる性能及びその理由について、300字程度で説明せよ。
- (3) 東京電力福島第一原子力発電所の事故では、非常用ディーゼル発電機のみならず、メタクラ等の所内電気設備も水没して電源の利用が困難になった。これに対する対策について、200字以内で説明せよ。ただし、非常用電源等を高台設置した上での更なる対策について述べよ。
- (4) 原子力規制委員会による新規制基準では、炉心損傷を生じる可能性のある要因として発電所の大規模損壊が想定されているが、その主要な原因を2つ挙げよ。さらに、大まかに6つの備えが考えられているが、そのうちの3つを挙げよ。
- (5) (4)と関連して、発電所の大規模損壊への対策の基本的な考え方について、150字以内で述べよ。

第4問 図3-1のように初期断面積 A 、初期長さ L の丸棒を想定する。この丸棒に荷重が負荷されたときの応力や変形について、以下の問いに答えよ。材料は線形弾性体とし、温度によらず、その縦弾性係数は E 、線膨張係数は α で一定とする。また、微小変形理論が成立するものとし、丸棒の径方向変形に対する端部の拘束は無視できるものとする。

- (1) 図3-1のように棒の一端が拘束されて、もう一方の端部に引張荷重 P が負荷されたときに丸棒に発生する軸方向応力 σ と棒の伸び δ を A 、 L 、 E を使って表せ。
- (2) (1)において、軸方向応力が材料の降伏応力を超えて塑性変形が生じるとしたとき、軸方向応力と棒の伸びはどのように変化するか。
- (3) 図3-2のように両端が拘束された状態で、丸棒の温度が一樣に ΔT 上昇したときに発生する軸方向応力 σ と両端に発生する反力の絶対値 R を A 、 E 、 α 、 ΔT を使って表せ。
- (4) (3)において、軸方向応力が材料の降伏応力を超えて塑性変形が生じるとしたとき、軸方向応力と両端に発生する反力の絶対値はどのように変化するか。
- (5) 図3-3のように丸棒の温度が一樣に ΔT 上昇するとともに、端部間の距離が ΔL 減少したときに発生する軸方向応力 σ と棒の両端に発生する反力の絶対値 R を A 、 L 、 E 、 α 、 ΔL 、 ΔT を使って表せ。

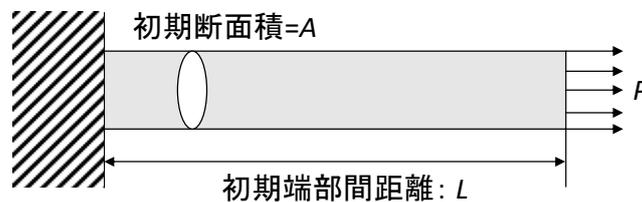


図3-1

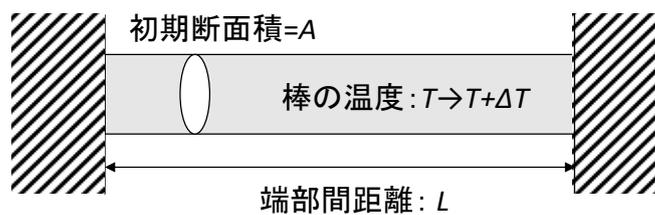


図3-2

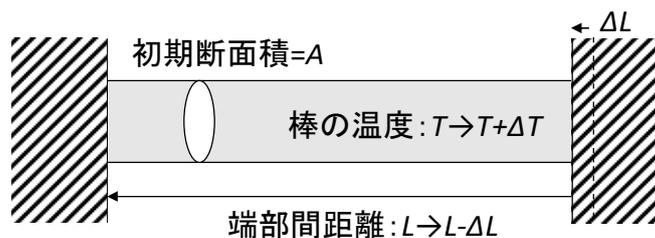


図3-3

第5問 軽水炉压力容器の中性子照射脆化とその評価に関する以下の記述において、内に入る適切な用語を答えよ。ただし、同じ番号のには同じ用語が入るものとする。

〔解答例〕 21－東京

軽水炉压力容器は、炉心にある核燃料が核反応に伴い発生した熱を炉外に取り出すために冷却材である水を循環させる役割を担っている鋼鉄製の構造物である。わが国の軽水炉压力容器は、合金元素としてマンガン (Mn)、ニッケル (Ni)、モリブデン (Mo) をそれぞれ1%前後含む、いわゆる1に分類される鉄鋼材料で造られている。

中性子照射による脆化には、鋼中に不純物として存在する2やリン (P) が大きな影響を及ぼすが、合金元素の中にも Ni のように脆化に影響するものもあることがわかっている。压力容器の材料である1は体心立方晶の金属である。この結晶系の金属は、通常の使用温度では構造材料として十分な粘りを有しているが、低温になると3的に破壊する性質を持っている。この4から3に変わることを5といい、压力容器は1であるため5挙動を示す。この挙動は、6により明白に確認できる。压力容器鋼が中性子照射を受けた場合には、4から3へ遷移する5温度（一般に吸収エネルギーが41Jとなる温度を用いる）が高温側に移行するとともに、7と呼ばれる高温域での吸収エネルギーも低下する。中性子照射に伴うこれらの変化を照射脆化と呼んでいる。これらの変化が生じる原因は、中性子照射によって形成される8集合体や2析出物が結晶粒内の9の障害物として作用し、材料の硬化が生ずるためである。軽水炉压力容器の健全性を確保する上では、3破壊を防止することに嚴重な注意が払われており、5挙動を把握しつつ供用することになる。具体的には、压力容器内に6片等の10片を装荷しておき、定期的に取り出して試験を行い、これに基づいて压力容器材の健全性を確認しながらプラントの運転が行われている。

照射脆化の進行については、10に対する試験結果や材料試験炉による鋼材の加速照射試験データをもとに予測式が作られている。予測式は化学成分項と照射量項の積という関数型が一般的で、例えば1991年に定められた国内の脆化予測式では中性子照射に伴う遷移温度の変化 ΔT_{41J} が、11及び12について、それぞれ定められていた。これらの式は、データの統計処理より得られた経験式であるが、米国では脆化機構に関する最近の知見を取り入れ、予測式の改良が進められている。わが国においても、照射脆化メカニズムに関する最近の研究成果を集約する形で、照射脆化予測モデルが提案された。さらにこのモデルを出発点として、国内にある軽水炉压力容器の10データ並びに加速照射試験データを活用するとともに、係数の設定に際しては確率論的手法を用いる等の手順を経て、新しい規定が制定された。この新しい規定では、照射量、化学成分のほか、13、14を入力変数とすることで、単一の予測法によって炉型や部位（11、12）によらずに十分に高い精度で照射脆化を予測することが可能となっている。

炉型依存性に関しては、15の方が16よりも压力容器の受ける照射量がほぼ1桁高いことか

ら (15) で供用末期に 10^{19} (n/cm²) 台の後半)、安全性の観点からの照射脆化の検討対象はまず (15) となる。(15) の圧力容器の健全性に影響する最も厳しい想定事象は、(17) である。(17) 事象とは、原子炉の運転中に発生した異常に対して (18) が作動し、低温の冷却水が注入されることにより生じる過渡事象であり、圧力容器内面には運転時の圧力による引張応力に加えて、容器表面付近の熱収縮による大きな引張応力が加わる。健全性の評価では、圧力容器の内面にき裂が存在していると想定し、鋼材については中性子照射脆化を考慮して、(17) 事象時に発生する応力に対し破壊力学的な検討が行われる。

この破壊力学評価を行う上で最も重要な材料特性のひとつが (5) 領域での (19) 値 (K_{IC}) である。このため、 K_{IC} は運転期間を通して、即ち中性子照射の効果を考慮して適切に把握しておく必要がある。多くの場合、照射後の K_{IC} は、(10) 片に対する (6) で測られる (5) 温度より間接的に求められている。これは、原子炉内に装荷できる試験片の寸法や数量の制約から、規格に定められている (19) 試験片により K_{IC} を直接求めることが難しかったためであるが、最近では小型でかつ比較的少数の試験片で照射後の (19) 遷移曲線を求める手法が開発、提案され、規格化が進められている。最終的には、ある大きさの半楕円型表面き裂を圧力容器の内表面に仮定した上で (17) 事象時に発生する (20) を算出し、その値を (19) 値と比較することで中性子照射脆化に対する圧力容器の健全性が評価される。

第6問 次の用語について、それぞれ200字以内で簡潔に説明せよ。

- (1) ミクロ液膜
- (2) トリチウム（東京電力福島第一原子力発電所の汚染水対策に関する記述は必須）
- (3) 遷移沸騰領域
- (4) 溶接残留応力
- (5) 流れ加速型腐食（FAC）