

沸騰時の PTS 状態遷移曲線の計算過程と結果

2021.07.13

高島武雄

1. 応力拡大係数の計算結果

図1は、計算の過程においてクラッドの存在を考慮しないで、沸騰熱伝達を考慮した場合と熱伝達率を一定としたときを比較したものである。

縦軸は破壊靱性値 K_{IC} および応力拡大係数 K_I 、横軸はき裂先端位置の温度である。

沸騰を伴う場合は、 100°C 付近で K_{IC} （高浜 60 年時予測）に対して $K_I > K_{IC}$ の温度領域が見られる。

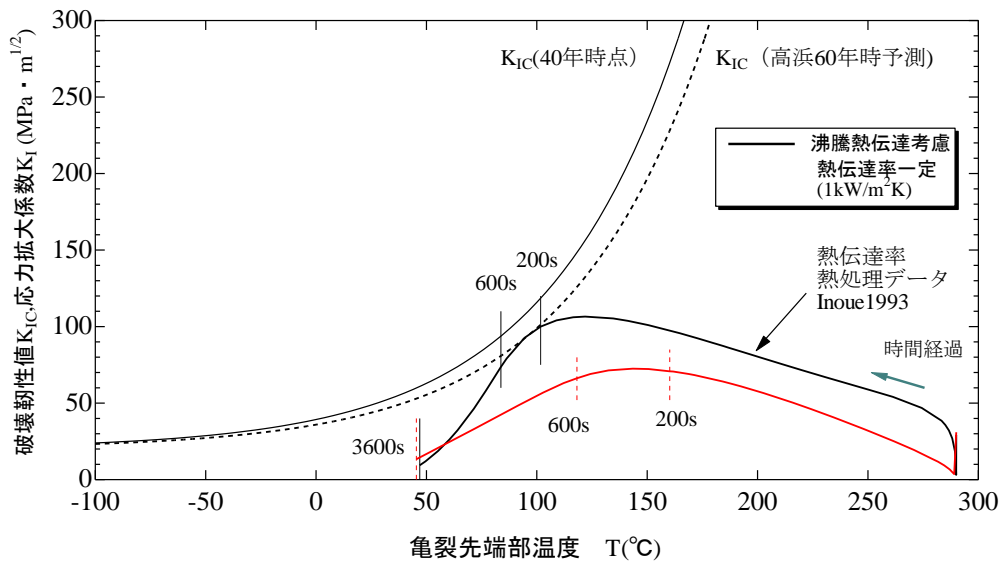


図1 沸騰を考慮した場合の応力拡大係数の計算結果

破壊靱性値 K_{IC} は、実線が高浜 1 号機の運転開始後 40 年時点の K_{IC} 下限包絡曲線、破線は 60 年時点の K_{IC} 下限包絡曲線で、それぞれ以下の式となる。

$$K_{IC} = 20.16 + 129.9 \exp\{0.0161(T-119)\} \quad (1)$$

$$K_{IC} = 20.16 + 129.9 \exp\{0.0161(T-131)\} \quad (2)$$

2. 計算方法

事故時に緊急炉心冷却水によって、压力容器内側が冷却される際の容器壁の温度分布を計算して、その時の熱応力分布を求める。さらに、応力分布から応力拡大係数を計算する。

(1) 温度分布の計算

温度分布は压力容器を中空円筒として、温度は時間と半径方向位置によって変わるとした場合の熱伝導基礎方程式から求める。方程式を差分化し、数値解析によって計算する。

(2) 熱応力分布の計算

熱応力は、圧力容器壁の半径方向温度分布に対応して壁内に周方向熱応力、半径方向熱応力、軸方向熱応力が生ずるが、周方向熱応力のみを計算した。周方向熱応力は時間によって変わる容器壁の温度と位置によって変わり、容器材料の熱膨張率などの物性値を含む熱応力の基礎式を差分法で数値計算によって求める。

(3) 応力拡大係数の計算

応力拡大係数は JEAC4206-2007 の「附属書 F 応力拡大係数」の F-3200 に示されている式に従って計算する。

3. 計算過程の検証

温度分布、熱応力分布計算結果の 1 例を図 2 に示した。大破断 LOCA における、冷却開始から 600 秒時点での圧力容器壁内温度分布（赤実線）および周方向熱応力分布を応力分布（黒実線）である。内表面の熱応力は 405MPa（引張）、外表面の熱応力は 197MPa（圧縮）となる。圧力容器厚さは 200mm、初期温度は 290°C である。熱伝達率は $1\text{kW/m}^2\text{K}$ とした。

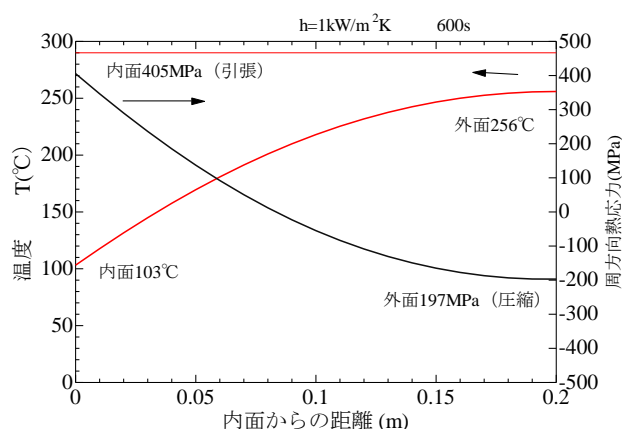


図 2 大破断LOCAにおける600秒時の温度と周方向応力分布

妥当性を確認するため、九州電力の「原子炉圧力容器の中性子照射脆化に係る委員コメントに対する回答」中の解析結果(図 3)と比較した。両者はよく一致しており、本計算の温度分布、圧力分布の計算が妥当であることを示している。

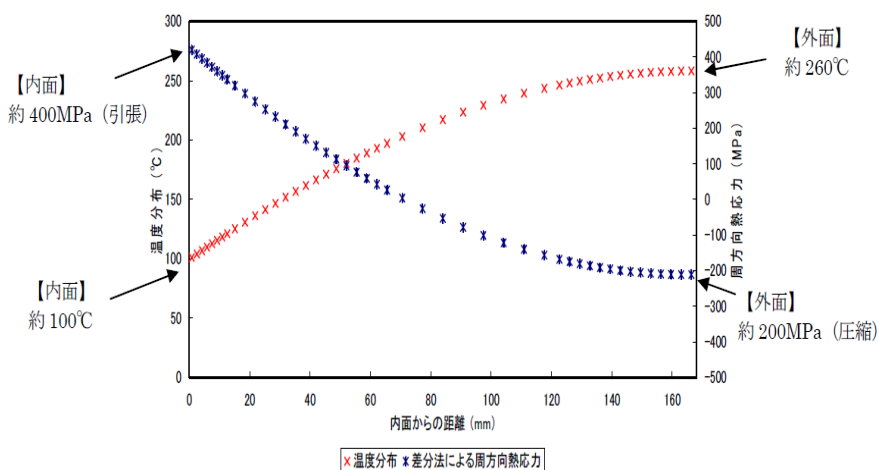


図 3 九州電力の計算結果

4. 熱水力解析

JEAC4206 では、「熱水力解析」で、炉内の温水と冷却水の混合水の温度の時間変化を式で与えている。熱伝達率は、自然対流を考慮することを求めている。しかし、沸騰が生じる時

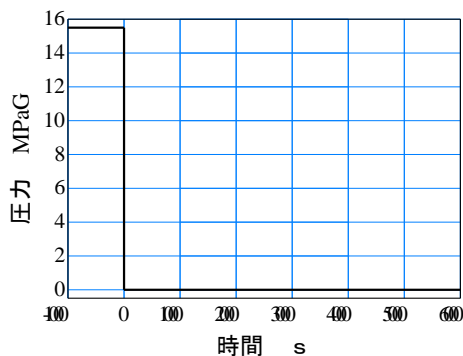


図4 大破断LOCA時の圧力条件

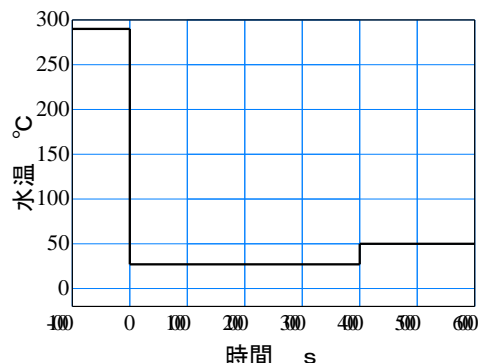


図5 大破断LOCA時の温度条件

には、図4のように原子炉内の圧力（1次系圧力）が大気圧となる圧力条件を、温度条件は図5のように、圧力容器表面が冷却水にさらされる条件とする。注意する点は、これらの境界条件は、表面温度によって沸騰熱伝達率または対流熱伝達率があたえられることを想定するもので、圧力容器表面温度が冷却水温度と等しくなる等温条件とは異なるということである。

流体と固体表面の熱移動では、流動様式が変わらなければ、温度差が変わっても熱伝達率は変わらないとするのが一般的である。

しかし、焼き入れや焼き戻しなどの金属の熱処理では、金属表面が高温のときは冷却初期の段階で沸騰が生じて、熱伝達率が大きくなる。沸騰が終了したのちは、対流熱伝達となり、熱伝達率も低下する。このような系では、熱伝達率を金属表面温度とともに変化する値としてシミュレーションを行う。

沸騰を伴う熱処理時の熱伝達率の測定は古くから多数行われている。本計算に使用した熱伝達率は、図6（上）破

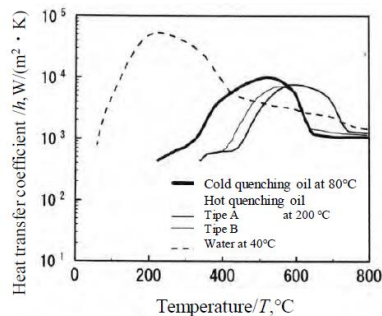


Fig. 3.6 Relationship of heat transfer coefficient, h and surface temperature, T_s

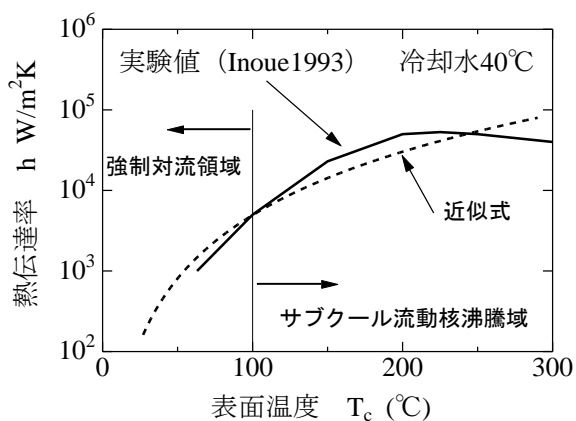


図6 熱伝達率の実験値と近似曲線

線に示された Inoue¹の 40°Cの水道水による冷却実験の冷却曲線データをべき関数に近似したものを用いた。図6（下）実験値と近似式（式(3)；27°C>T_c>290°C）を示した。

$$h = 0.165T_c^{2.02} \quad (3)$$

5. 電気事業連合会の計算（乙B第113号証）との相違点

(1) 本計算では、温度分布、熱応力、応力拡大係数を計算する一連の過程でクラッドの存在を考慮していない。これはJEAC4206-2007の規定に忠実に従うものである。

電気事業連合会は、温度分布をクラッドを含めて計算しながら、熱応力と応力拡大係数の計算時にはクラッドを含めていない。これはJEAC4206-2007の規定を曲解するものと言える。

(2) 事故時に圧力容器内圧力が瞬時に大気圧になるという設定から、冷却水注入の際に沸騰を生じる。その際の沸騰熱伝達率は、サブクール水（飽和温度以下の水）による熱処理の実験値をべき関数に近似した値を用いた。

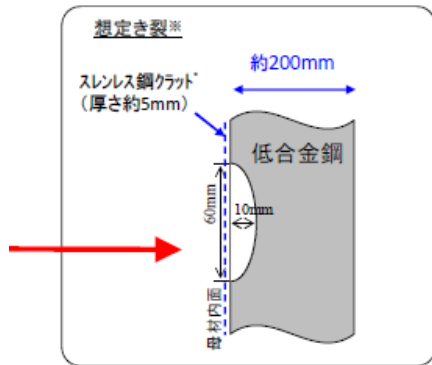
電気事業連合会は、乙B第113号証にあるように、沸騰熱伝達率をプール核沸騰の Kutateladze（クタテラーゼ）の式と Zuber（ズーバー）の限界熱流束の式から算出しているが、これらの式は飽和温度（大気圧では100°C）の静止水（プール水）の沸騰の場合に適用されるもので、本現象時のような、27°Cのサブクール水（飽和温度以下の冷却水）による流動沸騰時には適用できない。流動を伴うサブクール沸騰では熱伝達率も限界熱流束もはるかに大きくなるからである。

(3) 仮想欠陥には、冷却水が接触する固体表面に深さ10mmの半楕円表面き裂を想定した。応力拡大係数はき裂先端の位置で計算した。

電気事業連合会は、冷却水が接触する表面（クラッド表面）から5mmの圧力容器内部の位置に深さ10mmの半楕円き裂の欠陥を想定している。これは「内部き裂」であり、JEAC4206-2007で定めている「表面き裂」とは言えない。き裂先端の位置も固体表面(クラッド表面)からは15mmとなり、温度変化と熱応力が緩和されることになる。なお、関西電力はクラッドの厚さを約5mmとしている（図7²）。

¹ T. Inoue. : International Seminar on Microstructures and Mechanical Properties of New Engineering Materials, Tsu, Aug., 3-5, p. 515 (1993) . (金森英夫, 博士学位論文, (2020)p.68.から)

² 平成28年8月23日付 関西電力株式会社「高浜1, 2号機原子炉容器に対する劣化状況評価について」4頁



※：炉心領域全域に対する特別点検により、原子炉容器内面から深さ5mm以上の欠陥がないことを確認済

図 7

以上