

第 8 回分科会に「PTS の熱伝達考え方」における誤りを指摘した文書を提出する。
 著者：元小山工業高等専門学校、機械工学科、教授。専門は、熱工学、蒸気爆発、
 膜沸騰、蒸気膜、等。

JNES¹の「等価熱伝達係数」の誤りについて

2022.12.20 高島武雄

1. はじめに

「压力容器内面の熱伝達率についての質問に対する回答（JNES）」という文書がある。2012 年 9 月 19 日に開催された第 16 回の高経年化技術評価検討意見聴取会²に資料-9 として提出された文書である。そこには熱伝達率について以下のように記載されている。

「PTS 実証試験報告書によれば、単相強制対流熱伝達の h は $2.6\text{kW/m}^2\text{K} \sim 1.6\text{kW/m}^2\text{K}$ です。ここで、実際に原子炉压力容器壁母材の温度分布を評価するには、ステンレスクラッドの熱抵抗を考慮して等価熱伝達係数 (h') を用い必要があります。 h' は次に示す要領で概略評価することができ、上記の h に対応する h' は $1.4\text{kW/m}^2\text{K} \sim 1.0\text{kW/m}^2\text{K}$ となります。

(h' の評価)

t_c : クラッド厚さ、 λ : クラッドの熱伝導率、 ΔT_1 : , 冷却水温度－クラッド表面温度、
 ΔT_2 : クラッド内温度差とすると、熱流速^マの式は、以下のようになります。

$$h\Delta T_1 = \frac{\lambda}{t_c}\Delta T_2 = h'(\Delta T_1 + \Delta T_2)$$

したがって、 h' は、以下のようになります。

¹ JNES…独立行政法人原子力安全基盤機構(Japan Nuclear Energy Safety Organization)のこと。廃止されて現在は原子力規制委員会に統合された。

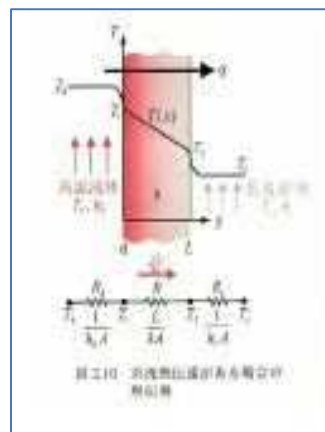
² 高経年化技術評価検討意見聴取会…福島第一原発事故後に原子力安全：保安院（当時）が設置した意見聴取会の一つ。2011 年 11 月に設置され同月に第 1 回から、2012 年 6 月の第 18 回まで開催された。

$h' = \frac{1}{1+ht_c/\lambda}$ 」(下線高島)としている。しかし、以下に示すように、記述されている論理には数学的あるいは物理学的に基本的で重大な誤りがある。以下に指摘する。また同様の説明文書³が、電気事業連合会(電事連)からも出されている。JNESの文書では、平板系としているのに対し、電事連の文書では円筒系で説明している点が相違する。

一方、JEAC4206-2007には「ステンレスクラッドの熱抵抗を考慮して等価熱伝達係数(h')を用いる必要がある」と言う記述はない。そもそも、クラッドの記述がない以上、当然である。

2. JNESと電事連の「等価熱伝達係数」の誤り

上記文書類には基本的でかつ重大な誤りがある。JNES文書で指摘する。この文書の最初の式は成立しないことを示します。当然、そのあとの式も成立しません。そのほか、「等価熱伝達係数」の使い方が不適切なこと(等価になっていない)と、「熱流速」は「熱流束(heat flux)」の誤りであることも指摘しておきます。「等価熱伝達係数」というより、図1



のような熱通過率の考え方とすべきであろう。

図1 熱通過率

便宜上式に番号を付けます。冷却水とクラッド表面界面における熱流束 q_1 は、クラッド表面温度を T_{cs} 、冷却水温度を T_∞ とする。さらに、クラッドの熱伝導率を λ_c とすると、界面の温度勾配を用いて、フーリエの法則から式(1)となります。図2の右図を参照されたい(xが減ずる方向の熱流束をプラスと定義する)。

$$q_1 = h\Delta T_1 = h(T_{cs} - T_\infty) = \lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (1)$$

³ 電気事業連合会，原子炉圧力容器の中性子照射脆化についての委員コメントに対する回答(電事連)，2012年7月27日，p.5.

非定常状態（クラッドの温度が時間とともに変化する場合）では、図2の左図のように、クラッドと母材の界面の位置($x=x_c$)においては、クラッドに流入する熱流束 q_2 と、冷却水とクラッド表面界面($x=0$)における熱流束 q_1 は等しくない。

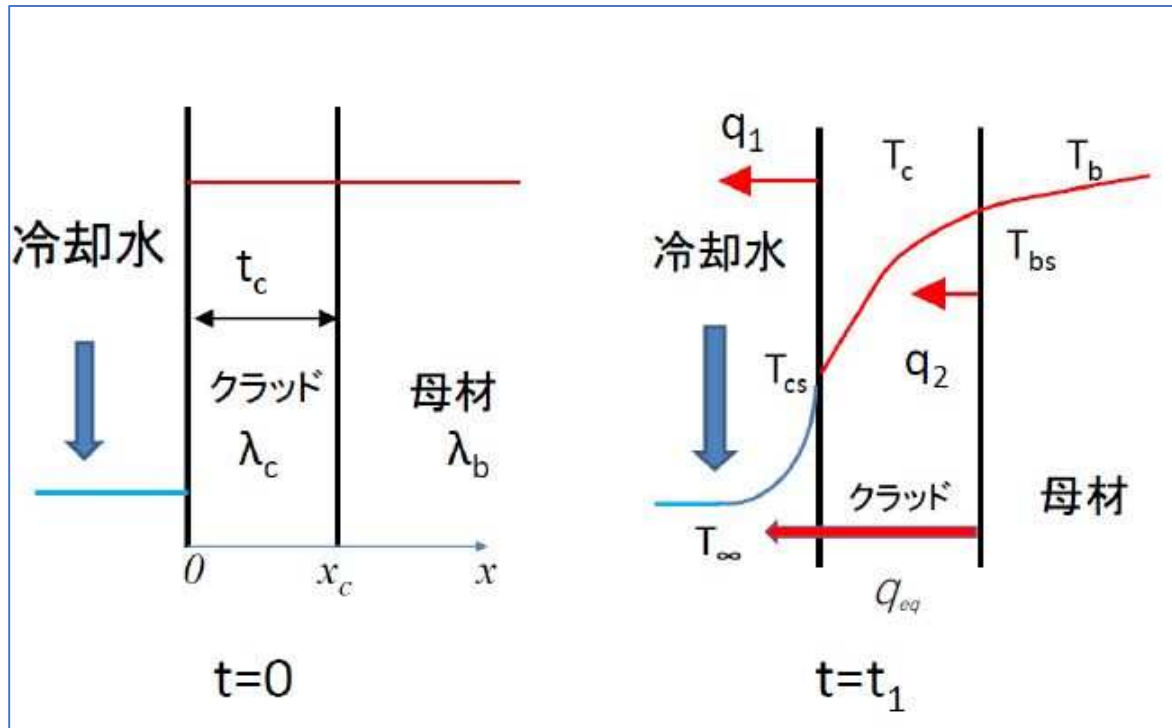


図2 初期の温度分布と任意時間 t_1 の温度分布

母材とクラッドの界面に流入、あるいは界面から流出する熱流束 q_2 は、母材の熱伝導率を λ_b 、母材温度を T_b とすると、式(2)となります。図2参照のこと。

$$q_2 = \lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} \right)_{x=x_c} = \lambda_b \left(\frac{\partial T_b}{\partial x} \right)_{x=x_c} \quad (2)$$

JNES の文書では、誤って、クラッド内の温度分布が直線になるので定常状態とみなせるとして、すなわち $q_2=q_1$ として、 q_2 を式(3)になるとしてしています。

$$q_2 = \frac{\lambda_c}{t_c} \Delta T_2 = \frac{\lambda_c}{t_c} (T_{bs} - T_{cs}) = q_{eq} = h'(T_{bs} - T_\infty) \quad (3)$$

(定常状態でのみ成り立つ関係)

ここで、 T_{bs} は母材とクラッドの界面温度をとする。

すなわち、非定常熱伝導では、固体内を通過する熱流束は、位置と時間によって異なり、通常同一時間においては、各位置によって熱流束が異なるとするのが、大原則です。

「 $h \Delta T_1 = \lambda \Delta T_2 / t_c$ 」という関係は、非定常時には成立しません。したがって、「等価熱伝達係数」と熱伝達率の次の関係「 $h' = h / (1 + h \cdot t_c / \lambda)$ 」も成立しません。

JNES の文書には「実際に原子炉圧力容器壁母材の温度分布を評価するには、ステンレスクラッドの熱抵抗を考慮して等価熱伝達係数 (h') を用い必要があります」ともあるが、「原子炉圧力容器壁母材の温度分布を評価する」ためには、クラッドの温度分布と合わせ

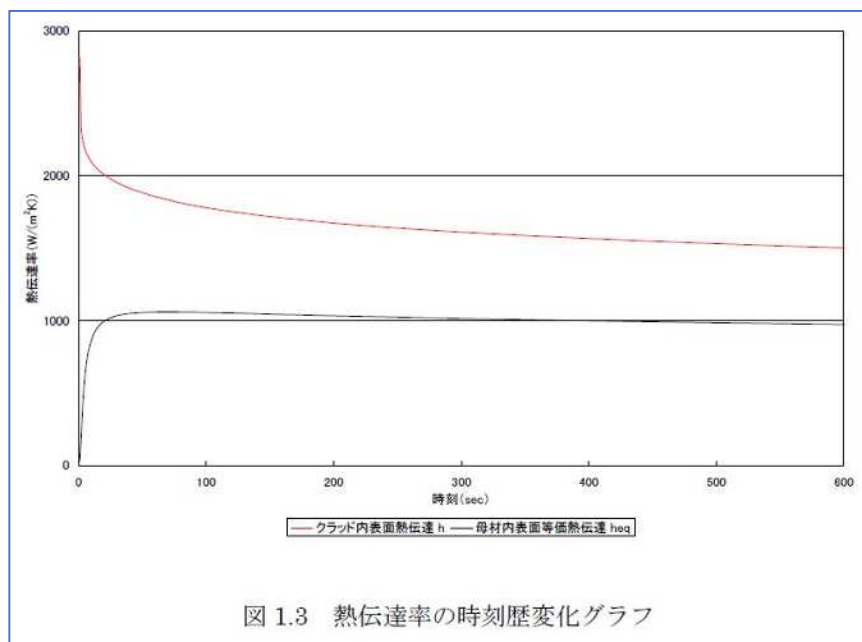


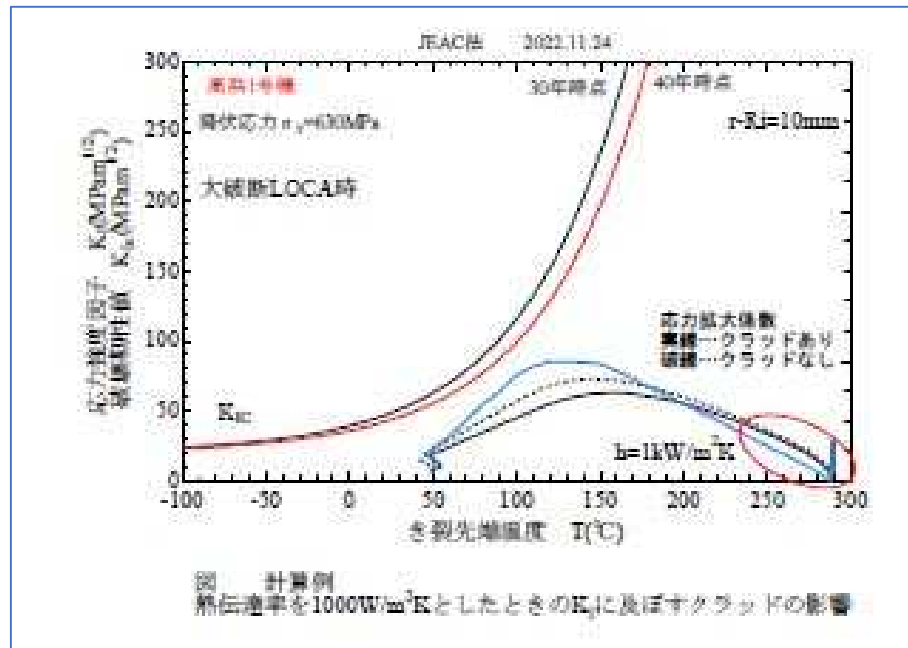
図 1.3 熱伝達率の時刻歴変化グラフ

図 3 九州電力が K_1 の計算に用いた熱伝達率⁴

⁴ 電気事業連合会，原子炉圧力容器の中性子照射脆化についての委員コメントに対する回答（電事連），2012年7月27日，p.5.

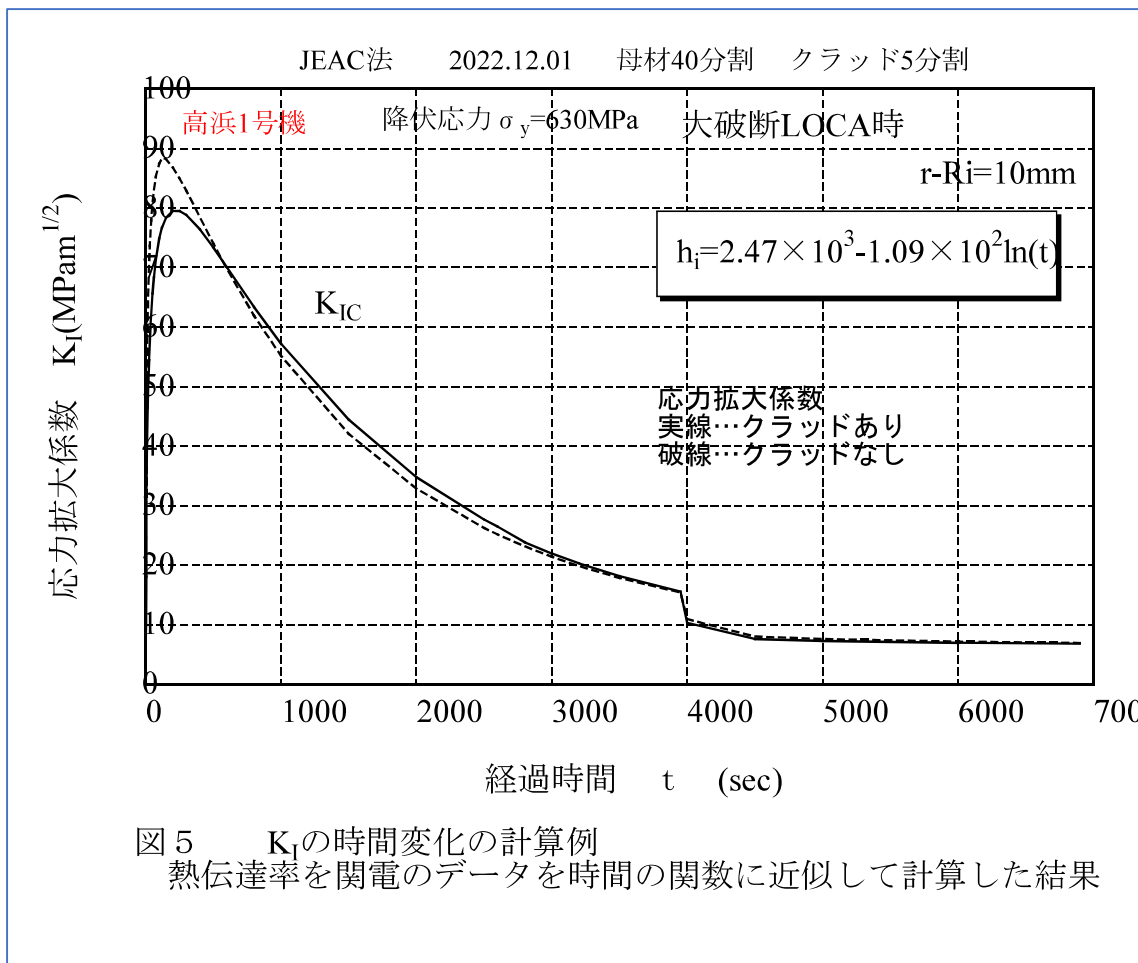
て計算することで、母材の温度分布を評価（計算）することは可能であり、「等価熱伝達係数 (h')」なる数値を算出して用いる必要は全くない。

図4 PTS 曲線の計算例



川内原発の PTS 解析では、熱伝達率として「等価熱伝達係数 (h')」(図3の黒線)を用いている。その結果、冷却開始から約20秒間は、0から約1000W/m²Kまで急激に変化するとしている。この間では、式(3)は成立していないはずである。そのため、計算されるK₁は小さい値となるものと思われる(図4の赤楕円内の青線部分)。

図5に横軸を時間としたときのK₁の結果を示す。冷却開始から200sec以内で極大値を記録している。したがって、初期の段階で熱通過率の考え方が使えるかどうかは重要な問題と思われる。



3. 「等価熱伝達係数」の使い方の不適切

次に「等価熱伝達係数」の使い方の不適切についての指摘を行う。

等価熱伝達係数は、ふく射による熱移動量を対流伝熱に換算する場合に使用されます。

例えば、 T_h (K)と T_c (K)と温度の異なる真空中の黒体平面間の交換熱流束 q_r (W/m²)は、各面の温度(K)の4乗の差となり、式(4)となります。ここで、 σ はステファンボルツマン定数(W/m²K⁴)です。

$$q_r = \sigma(T_h^4 - T_c^4) \quad (4)$$

一方、同じ大きさの熱流束が対流熱伝達によって伝えられたとすると、式(5)になり、この時の熱伝達率 h_e を等価熱伝達率と呼びます。

$$q_r = h_e(T_h - T_c) \quad (5)$$

等価熱伝達率 h_e は式(4), (5)から式(6)とすることがあります.

$$h_e = \frac{\sigma(T_h^4 - T_c^4)}{T_h - T_c} = \sigma(T_h^2 + T_c^2)(T_h + T_c) \quad (6)$$

JNES の文書にあるような

$h' = \frac{1}{1+h\left(\frac{t_c}{\lambda}\right)}$ なる式を使うとすれば, h' は, 熱通過率とすべきものであるが, 熱通過率も定常状態で初めて成り立つ概念である.

4. まとめ

①第 16 回の高経年化技術評価検討意見聴取会に出された JNES の文書などには, 非定常状態を定常状態とみなす誤りがあり, 上記「等価熱伝達率」なるものは存在しえない.

②JEAC4206-2007 には, クラッドを含めた PTS 評価の記述はなく, 当然「等価熱伝達率」なるものの必要性の記述もない.

③電力会社等は真に保守的な PTS 評価を行う意志があるならば, JEAC4206-2007 の規定に従い, クラッドのない状態での温度分布, 応力分布, 応力拡大係数の算出を行うべきである.