

## 原発の老朽化を問う 第3回 高浜1、2号機&美浜3号機延長認可等取消訴訟

# 高浜原発1号機のPTS解析の問題点

原子力市民委員会 原子力技術・規制部会メンバー 高島 武雄

## 1. はじめに

2025年3月14日、名古屋地裁で、高浜原発1、2号機運転期間延長認可等取消請求訴訟（通称、老朽原発廃炉訴訟）で原告敗訴の判決が言い渡された。争点の一つに、事故時に水による急冷が压力容器に与えるPTS（加圧熱衝撃）現象<sup>\*1</sup>の評価の適否があった。本稿では、1審のPTS現象の評価の誤りを指摘し、控訴審での主張について述べる。

## 2. 証人尋問

2024年5月10日、標記載判の第32回口頭弁論で、PTSについての証人尋問が行われ、原告側証人として証言を行った。以下に主尋問の内容を記す。

主尋問では、「PTS現象と熱伝達率<sup>\*2</sup>について」、「規程の熱伝達率の求め方の妥当性」、「破壊靱性値とPTS曲線<sup>\*3</sup>の証人の計算について」、「クラッドとPTS曲線の関係」などを訊かれて答えた。

これらの証言を通して主張した点の一つは、PTS現象を評価する規程<sup>\*4</sup>（JEAC<sup>\*5</sup> 4206-2007）にはクラッド<sup>\*6</sup>の記述がないにもかかわらず、事業者側が恣意的に扱い、規制側がこのことを認めている（おそらく、見過ごしている）点の違法性だ。後ほど計算結果を示すが、急冷時の応力拡大係数<sup>\*7</sup>  $K_I$ は原子炉压力容器材料の破壊靱性値<sup>\*8</sup>  $K_{Ic}$ を上回る危険性があるので、運転を継続してはいけない、ことを特に証言した。

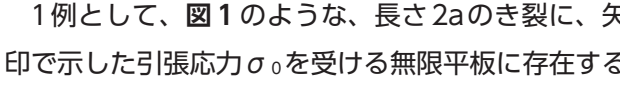
規制する側（原子力規制庁）が規制の根拠とするという規程文書に、必要なことが定められていないなど、いかにもいい加減かを証言できた。規制する側

がクラッドの扱いを、規程を定めた側（日本電気協会）に、解釈の仕方を問い合わせるといふ、いわば司法が法律の解釈を立法府（国会）に問い合わせるのと同じようなことを、行っていたのである。このことは、東電福島事故の国会事故調の報告書の中で指摘した、「規制の虞」の実例と言える。

## 3. 破壊力学と応力拡大係数

ここで、標題の関係について解説しておく。

き裂の存在などに起因する構造物の破壊現象を評価する破壊力学では、想定したき裂の先端部の応力<sup>\*9</sup>を評価することが重要となる。

1例として、のような、長さ2aのき裂に、矢印で示した引張応力 $\sigma_0$ を受ける無限平板に存在する貫通直線き裂を考える。応力は、応力が無限となるき裂先端部ではなく、き裂先端付近の応力分布<sup>\*10</sup>によって評価する。板内の応力分布 $\sigma_y(x)$ は、き裂先端からの距離xの2分の1乗に反比例することが知られている。比例係数Kを使って表わすと

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (1)$$

となる。この時の比例係数Kを応力拡大係数と呼ぶ。

Kは、き裂の大きさや形状、方向、さらに部材に加わる応力によって異なってくる。き裂先端における変形には、独立な三つのモードがある。このうち、き裂が引っ張られて開くモードIについての応力拡大係数を $K_I$ （ケーワン）とする。単位は $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ となる。

結局、構造物のき裂の進展に対する抵抗値を示す破壊靱性値 $K_{Ic}$ と、構造物に生じる応力に起因する応

\*1：Pressurized Thermal Shock: PTS現象は、加圧下の原子炉压力容器で、緊急炉心冷却系(ECCS)の作動に伴う安全注入水の注入等により容器内の急冷却が起こると、内圧による応力と重畳して衝撃的な高い引張応力が容器内面に発生する現象。長年の運転で核分裂によって生成される中性子を浴び続けた鋼鉄製の容器が脆性破壊する可能性がある。

\*2：熱伝達率hは、冷却水と压力容器表面の間の熱の伝わりやすさの係数。流体の種類、流速によって変わるが、両者の温度差にはよらない。

\*3：発生応力によって想定されるき裂を進展させようとする値を時間や温度、あるいは厚さ方向の分布として示した曲線。

\*4：日本電気協会が定めて国（規制庁）が認めた（エンドース）した規程。日本電気協会は発電機器の検査規程等を定める産官学団体で、実態は原発関係事業者による、事業者都合のよい規程を定めるための機関と言えるだろう。

\*5：JEAC (Japan Electric Association Code)は、日本電気協会が発行する技術規格を表わす。JEAC4206-2007は「原子力発電用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」という規程である。

力拡大係数 $K_I$ を手掛かりに破壊の有無を解明するのが、破壊力学と言える。原子炉压力容器では事故時の急冷時に大きな熱応力を生じるが、 $K_I > K_{Ic}$ となる時、構造物は破壊に至ることになる。 $K_{Ic}$ が老

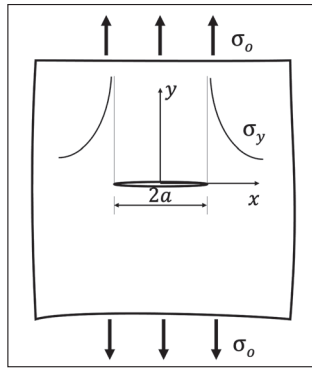


図1 一様引張応力 $\sigma_0$ を受ける無限板

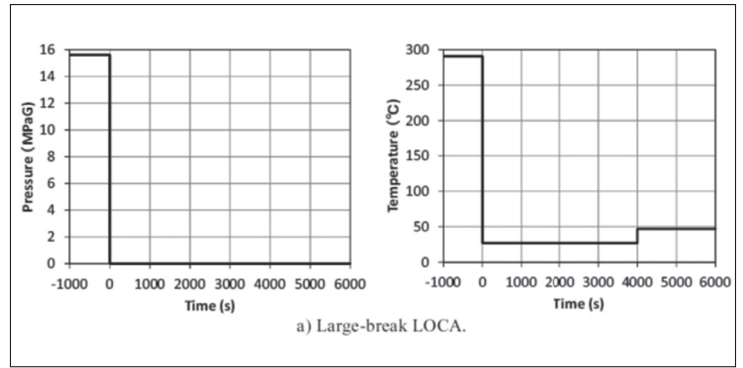


図2 大規模LOCA時の容器内圧力条件と容器内の温度条件

朽化とともに低下するのに対し、老朽化しても、 $K_I$ 値が変わるわけではない。

#### 4. 加圧熱衝撃評価の手順

##### (1)事故時のLOCA<sup>\*11</sup>の程度を設定

様々なケースがあるが、応力拡大係数 $K_I$ が最も大きくなるとされる大破断LOCAを選ぶとする。

##### (2)压力容器内圧力と温度の境界条件の設定

境界条件はLOCAの程度によって決まる。大破断LOCA時の境界条件は図2とする。ここで、温度は冷却材（水）の主流の温度であり、压力容器表面温度を表すものではないことに注意されたい。

##### (3)压力容器母材の温度分布の計算

緊急炉心冷却装置による冷却水によって、压力容器内側が冷却される際の母材の温度分布を、円筒座標系の一次元の非定常熱伝導方程式<sup>\*12</sup>を差分化して、数値解析によって計算する<sup>\*13</sup>。

温度分布は時間と位置（半径）の関数となる。

図4に示したように、母材に比べて熱伝導率が小さいクラッドは、断熱材の働きをして母材の温度分布を緩和する。一方、熱応力は母材より大きくなる。これらのことから、実際の原子炉にはクラッドが存在するが、JEAC4206-2007にはクラッドに関する記述がまったくない以上、保守的に評価するためクラッドは考慮すべきではない。しかし、電力事業者

の計算ではクラッドを考慮して行われている。

クラッドを考慮しない場合で、熱伝達率 $h$ が一定値として与えられる場合のみ、解析的に解くことができるので計算することができる。一方、クラッドを考慮する場合は、クラッドと母材それぞれについて方程式を立てる必要があるため、数値解析によって計算される。

また、熱伝達率が定数でない場合（時間や温度の関数として与えられる）は、非線形の計算となるため、クラッドの有無にかかわらず解析的に計算することはできず数値的に計算することになる。

##### (4)母材の熱応力分布を計算

PTSで問題となるのは周方向の熱応力分布 $\sigma_{\theta}(r)$ になる。熱応力の基礎式と温度分布を用いて、熱応力分布を計算する<sup>\*14</sup>。熱応力も時間 $t$ と位置 $r$ の関数となる。プラスの時は引張応力、マイナスの値は圧縮応力とする。

応力分布についてもJEAC4206-2007ではクラッドの記述がないためか、そもそもクラッドの熱応力も存在しない。しかし、温度分布の計算でクラッドを考慮している事業者の計算では、「クラッド部は、強度部材として考慮しないこと」という設計・建設規格（PVB-3420）の規定を理由にクラッドの応力分布は計算していないようだ。また、規程では、板材溶接時とクラッド施工時に生じる母材の残留応力も

\* 6：压力容器内面に肉盛溶接で張り付けたステンレス製の厚さが5～10mm程度の内張。

\* 7：き裂先端における応力やひずみの厳しさ度合いを示す量。

\* 8：想定されるき裂に対する部材の強度を表す値。

\* 9：圧力によって構造物内部に生じる面積あたりの力。

\* 10：場所による応力の相違を示したもの。

\* 11：Loss of Coolant Accidentの略である。日本語の「冷却材喪失事故」に相当とする。

\* 12：フーリエの法則と物体内の微小部分のエネルギー保存則から容易に導出できる。

\* 13：九州電力株式会社、原子炉压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（九州電力）、第12回高経年化技術評価に関する意見聴取会 資料2、p.4

\* 14：同上p.5

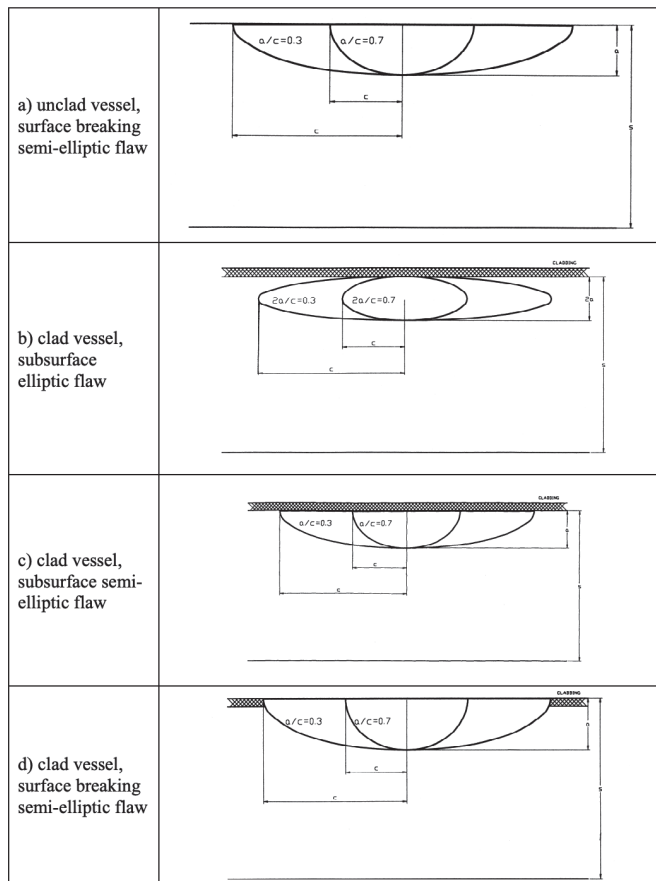


図3 各種き裂モデル

考慮していない。

### (5) 仮想き裂の形状、位置、向きを指定

図3に各種き裂モデル\*15を示す。き裂の形状は楕円または半楕円形で、JEAC4206-2007では、長さ60mm、深さ10mmの半楕円形と指定されている。き裂の向きはz軸に平行で圧力容器の胴部分とする。

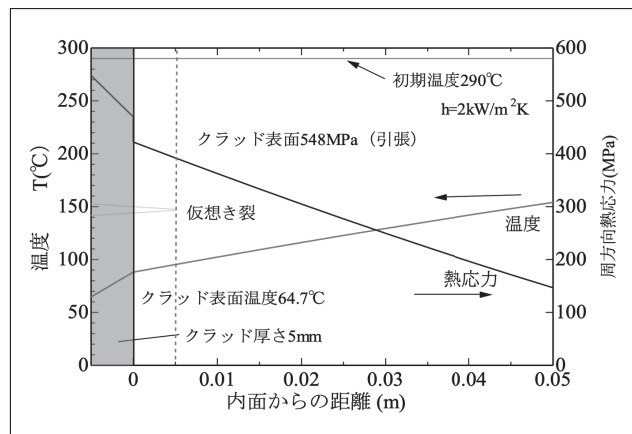
クラッドがあるときは、2種類のき裂が定められる。図3c)はき裂がクラッド下にあるとした場合、図3d)は、表面にき裂がある場合である。規程では「表面き裂」と指定されている(図3a)とd)に相当)。

### (6) 応力拡大係数 $K_I$ 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。クラッドが存在する場合のクラッド部分の応力、応力拡大係数の計算はIAEAの技術文書\*16のAPPENDIX Dに従って行った。

### (7) $K_I$ と破壊靱性値 $K_{Ic}$ の比較

応力拡大係数 $K_I$ の冷却開始からの時間変化を、縦

図4 クラッドと母材の5cmまでの温度分布と応力分布の計算結果 ( $t=600s$ )

軸 $K_I$ 、横軸がき裂先端位置温度のグラフにプロットして、PTS曲線を描き、温度に対する破壊靱性値 $K_{Ic}$ の曲線と比較評価する。

図4に、冷却開始から600秒時点のクラッドと母材の表面から5cmまでの温度分布と応力分布の計算結果を、図5は、クラッドを考慮した場合と、クラッドを考慮しない場合の応力拡大係数の違いを計算で示したものである。①クラッドがない場合と、クラッドがある場合のうち、破線は②温度分布の計算時に、クラッドを考慮するもののクラッド部の応力を無視した場合と、③クラッド部の熱応力を考慮した場合の計算結果を示す。

図5の①の $K_I$ は、熱伝達率 $h$ が $1kW/m^2K \sim$ 無限大について行った飯井の結果\*17とよく一致することをあらかじめ確認した。

①のクラッドをないとしたとき(実線)は、60年時点の破壊靱性値曲線とデッドクロスしているが、②はデッドクロスしていないことから、 $K_I$ が小さくなるのがわかる。温度分布が、応力分布と $K_I$ を決めると言っても過言ではない。従って、温度分布を計算するときにクラッドを考慮することで、温度変化を緩和させ、強いては応力分布、 $K_I$ を小さくなるように計算した事業者側らの方法は、極めて悪質なものと看做されるを得ない。

クラッドに関しては、事業者側は冷却時の圧力容器の温度変化を計算する際には、断熱材の働きをす

\* 15 : IAEA-TECDOC-1627、(2010)p.31

\* 16 : 同上p.172

\* 17 : 飯井俊行、玄海1号機PTS解析試算、第14回高経年化技術評価に関する意見聴取会(2012/05/09)資料8。

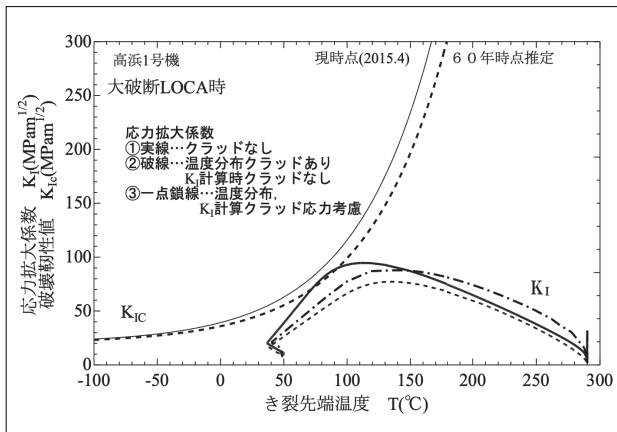


図5  $K_I$ に及ぼすクラッドの影響 ( $h=2\text{kW/m}^2\text{K}$ 表面、半楕円き裂)

るクラッドを考えるが、一方、発生する応力拡大係数を計算する際には、クラッドそのものを取り除いて計算するという、驚くべき扱いをしているのである。どう考えても合理的とは言えない。

表1にクラッドを、どこまで考慮するかによって $K_I$ の結果が異なることを定性的にまとめた。

## 5. PTSに関する控訴理由をふたつ

### 5.1 JEAC4206-2007にはクラッドの記述なし

1番の基準適合性判断の不合理性を指摘する。原判決は「クラッドに関する規定がないことをもってJEAC4206-2007が熱伝導解析でクラッドを考慮することを禁止しているとは認められず、現に本件各原子炉圧力容器表面にクラッドが存在する以上、熱伝導解析においてクラッドを考慮することは不合理であるとは言えない」としている\*18。その根拠の一つは、その前段で「JEAC4206-2007を策定した日本電気協会も、JEAC4206-2007においてクラッドに対する要求を規定しないが、クラッドを考慮した解析を禁止はしていない旨の回答（日本電気協会回答）をしている\*19」からだとしている。しかし「日本電気協会の回答は訴訟継続中に、控訴人側がJEAC4206-2007にはクラッドの記載がないにもかかわらず温度分布の解析にクラッドを考慮して、温度分布を意図的に緩和している点を指摘したのに対して、規制委がはじめて確認しているのである。行

	JEAC4206-2007	1 筆者ら	2 PTS評価	3 電中研解析	4 Jangら,Fekete
温度分布計算	クラッドの記述なし	考慮せず	クラッド考慮	クラッド考慮	クラッド考慮
応力分布計算	クラッドの記述なし	考慮せず	考慮せず	クラッド考慮	クラッド考慮
応力拡大係数計算	クラッドの記述なし	考慮せず	考慮せず	考慮せず	クラッド考慮
仮想き裂 (図3参照)	表面き裂	a	c	c	d
高浜1号機への適用		デットクロスする	デットクロスしない	デットクロスしない	1に次いで保守的な結果

表1 クラッドの扱いと、き裂条件によるPTS解析の結果

政処分時のものでないことはもちろんのこと、形式的なものにすぎず保守的でない解釈を許す根拠にはなりえない。むしろ、審査段階でクラッドの応力拡大係数に及ぼす影響について、まったく考慮しなかったという審査過程の手抜きあるいは欠落をみずから吐露するものである」\*20と言えるのである。

### 5.2 温度分布、応力分布計算で異なるモデル

原判決が述べるように、クラッドが現にあったとしても審査基準であるJEAC4206-2007においては、仮想欠陥として「表面き裂」の設定がなされている以上は、き裂を図3c)のように「内部き裂」としてしまうクラッドを考慮することは、規程に反しており許されない。さらに、現にクラッドが存在することを熱伝導解析でクラッドを考慮してもよいという根拠とするのであれば、現に存在するクラッドを応力解析で考慮しないのは不合理ということになってしまう。だからこそ、一貫してクラッドなしによる解析をしなければならないのである。クラッドを考慮するのであれば、クラッドの応力を含めた解析を行うべきである。

## 6. 終わりに

JEAC4206-2007の記述に従って応力拡大係数を計算して、他の研究者との計算結果とも、原告が主張していた条件での参加人（三菱重工）の計算結果とも、よく一致していたこと改めて主張したい。さらに、クラッドの熱応力が応力拡大係数を増加させる方向に作用するという報告書や論文も示して、控訴審では「クラッドを考慮して応力拡大係数を算出することが危険であることは定性的に明らかである」ことなどを主張する予定である。

\* 18 : 高浜原発1、2号機運転期間延長認可等取消請求訴訟判決文 p.327  
<https://drive.google.com/file/d/1FHtn-Ftlimh2Fiugjhv15Zlv4p6BF5yf/view>

\* 19 : 同上、p.327

\* 20 : 高浜原発1、2号機運転期間延長認可等取消請求訴訟控訴理由書(5) 中性子照射脆化について p.85  
<https://drive.google.com/file/d/1WaPE89sZhfhaNbqaAcvelp-uNuZ1Ou5Vt/view>