

事件番号 平成28年(行ウ)第49号, 同第134号, 同第157号
高浜原子力発電所1号機及び2号機運転期間延長認可処分等取消請求事件
原告 河田昌東外110名
被告 国

準備書面(44)

(PTS評価計算の不合理性)

2019(令和元年)年7月4日

名古屋地方裁判所 民事9部A2係 御中

原告ら訴訟代理人弁護士 北村 栄 ほか

本書面は、JEAC4206-2007 は不合理な基準であること(基準の不合理性)、このような不合理な基準に基づいてなされた審査は、その審査過程には過誤欠落があり違法であることを指摘するとともに(主として甲高E4号証の高島武雄氏の意見書に基づき主張する。)、関西電力がいかなる熱伝達率を用いてPTS評価をしたのか、その根拠を明らかにするよう釈明を求めるものである。

第1 PTS状態遷移曲線の評価が不合理であること

1 PTS状態遷移曲線とは

- (1) 配管が破断したりポンプが故障したりして原子炉に水が循環しなくなったとき、緊急炉心冷却装置(ECCS)が働き、予備の冷却水が送り込まれる。その時、圧力容器の内面は冷却水によって一気に冷やされ収縮し、外面のとの温度差によって強い引張り応力生じる。加圧状態のまま内壁

が急冷される事象を「加圧熱衝撃」PTS (Pressurized Thermal Shock) という。このとき内面にき裂があれば、き裂を広げようとする力を受ける。

(2) このき裂にかかる力に対応する応力拡大係数 K_I の時間変化を温度軸上にプロットすると、図1 (甲高E4、3頁の図2) の右下の山形の曲線となり、これをPTS状態遷移曲線 (K_I) という。PTS状態遷移曲線が山形になるのは、材料が冷やされる途中で内面と外面の温度差が拡大し、き裂に働く熱応力が大きくなるが、時間が経つにつれ、温度が下がるとともに内面と外面の温度差が減少し、熱応力が小さくなるからである。なお、熱応力とは、同じ物体内の温度分布が不均一な時に生じるひずみに対応する応力であり、温度差が大きければ大きいほど強い応力が生じることとなる。

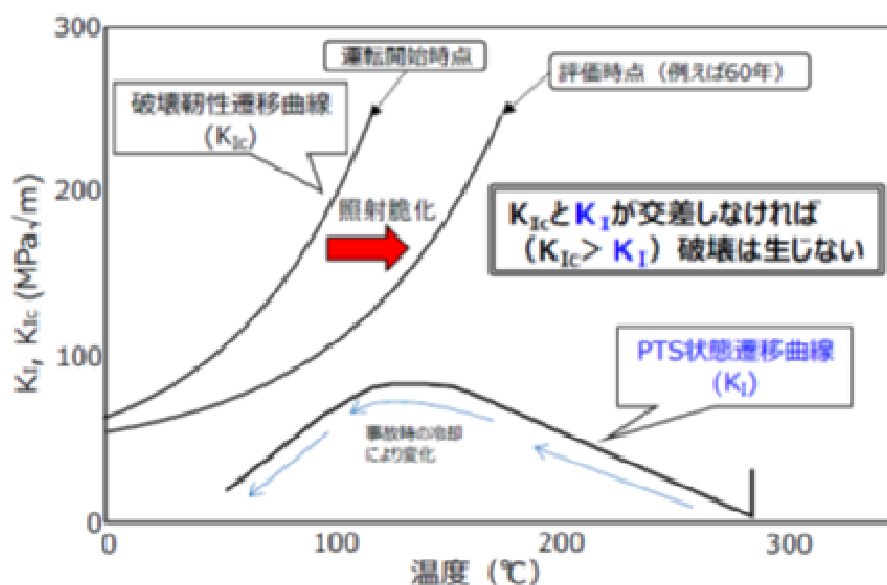


図 3.2.2 (2)-9 PTS 事象に対する健全性評価の模式図

図1 (甲高E4、3頁の図2)

(3) 応力拡大係数 K_I の求め方

応力拡大係数 K_I の計算式は、図2のとおりである。き裂部分に加わる力の大きさ、すなわち、応力拡大係数 (K_I) は、熱応力 σ に比例し、き裂深

さ a の 1/2 乗に比例する。

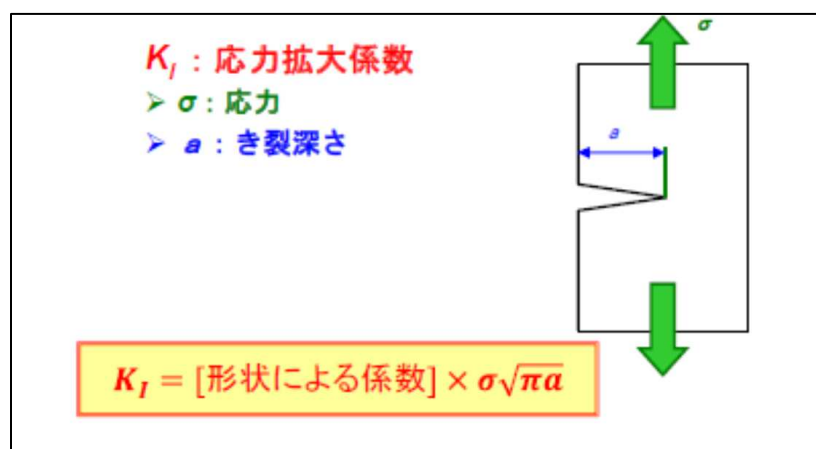


図 2

(4) そして、熱応力の大きさは、圧力容器の内面と外面の温度分布（内外の表面の温度差）に依存し、この温度分布は、熱伝達率の大きさによって変化する。すなわち、PTS 状態遷移曲線を求める際には、熱伝達率の値が必要になる。熱伝達率は、流動様式や流体の種類、速度、伝熱面の形状などによって変わる。その値は、無次元数の相関式として一般化された形で整理されており、必要に応じて実験することなく計算のみで求めることができる。

2 補助参加人（関西電力株式会社）の PTS 評価

(1) 補助参加人が作成した高浜原発 1 号炉の PTS 評価（図 3 の右下の山形）は図 3（甲高 E4、12 頁の図 10 と元の図は同じ）のとおりであり、破壊靱性曲線 (K_{Ic}) とデッドクロスを起こしていないこととなっている。

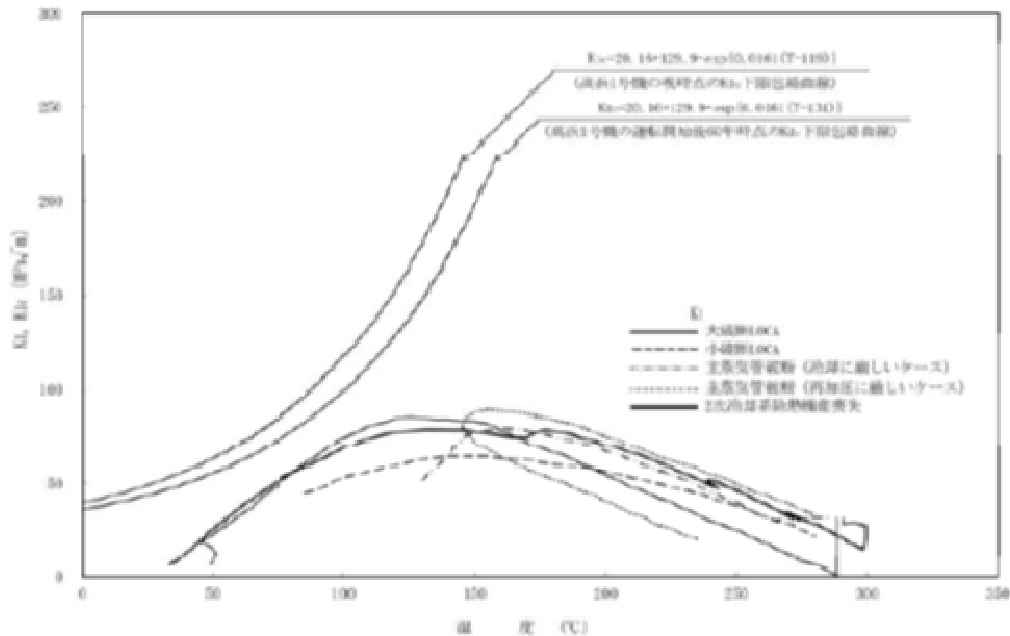


図4 高浜1号炉 PTS評価結果【添さ10mmの想定き裂を用いた評価】

図3 (甲高E4、12頁の図10と元の図は同じ)

(2) しかし、補助参加人はどのような熱伝達率を用いて PTS 評価をしたか明らかにしていない。そこで、原告はこれまで公開されている他の電力会社の数値及び関西電力が高浜1号機、2号機の PTS 評価に用いたであろう JEAC4206-2007 の不合理な点を指摘する。

3 JEAC4206-2007 の PTS 評価が不合理であること (基準の不合理性)

(1) PTS 状態遷移曲線を求める際には、熱伝達率の値が必要になることを上述したが、この熱伝達率の評価計算において JEAC4206-2007 には不合理な点が大きく分けて4つ存在する。

すなわち、①JEAC4206-2007 の熱伝達率の評価式そのものが不合理であること、②九州電力及び JEAC が想定している過渡条件では、冷却初期段階で核沸騰 (液体を加熱して沸点に達したときに起こる沸騰現象のこと。ガスコンロを利用してやかんでお湯を沸かす行為もこれにあたる。) が生じはざであるが、これが想定されておらず熱伝達率の値が低すぎるものになっていること、③JEAC4206-2007 は熱伝達率が冷却開始から時間の経過に

よっても一定値であることを前提に計算しているものと思われるが、その実、熱伝達率とは冷却期間中に激しく変動しているのであり、このこと考慮されていないこと、及び④熱伝達率はプルームの考慮の有無によりその値が異なるが、JEAC4206-2007は熱伝達率の評価において、プルームを考慮していないことである。

(2) JEAC4206-2007の熱伝達率の評価式そのものが不合理であること

ア JEAC4206-2007の規定

原子炉圧力容器のPTS状態遷移曲線計算に用いる熱伝達率の求め方はJEAC4206に定められている。九州電力の回答では「応力拡大係数の算出に関しては、JEAC4206 附属書Cに基づき実施しています」とある(甲高E4、3頁脚注4)。そして、JEAC4206-2007の附属書(乙E25 附C-3)に熱伝達率に関する以下の記述がある。

「…上向き自然対流と下向き強制対流が共存するケースの熱伝達率は、以下に示す Jackson-Fewster 式で評価する

$$Nu / \left[\left[Nu \right]_{0} = \left[1 + (4500 (Gr)^{-1/4}) / \left(\left[Re \right]^{2.625} \left[Pr \right]^{0.5} \right) \right]^{0.31} \dots\dots\dots (3) \right]$$

このように JEAC4206-2007 においては、「上向き自然対流と下向き強制対流が共存するケース」しか設定されていない。

イ JEAC4206-2007の規定の不合理性

(ア) 伝熱工学においては、自然対流と強制対流が共存する場合、自然対流の影響を考慮しなければいけないのは、下降流あるいは上向きの強制対流に対して浮力による上昇流が無視できなくなる範囲においてであるのが通常である。現に、JEAC4206-2007において、冷却水の温度

の時間変化を求める式に関してはリチャードソン数¹Ri が 100 以下か 100 超かによって使い分けるように指示がなされている(乙 E 2 5 附 C-3)。

しかし、Jackson-Fewster 式の使用に関しては、JEAC4206-2007 はリチャードソン数による場合分けが一切行われていない。通常であれば、自然対流と強制対流が共存する場合に加えて、強制対流だけの場合の計算式(強制対流伝熱率)も設定しなければ、適切な熱伝達率の評価をすることができない。そうであるにもかかわらず、JEAC4206-2007 は自然対流が共存するケースの熱伝達率を設定しているのみであり、明らかに不十分なものになっている点で不合理である。

(イ) さらに、上記の式(3)の式中の記号については、JEAC4206-2007 では同付属書の附 C-1 に定義されているが、その定義において「代表長さ」が設定されていない点にも大きな問題点がある。

ヌセルト数(Nu)とは、自然対流による熱移動を考慮した無次元数であり、平均グラスホフ数(Gr)とは、自然対流の激しさを表す無次元数であり、レイノルズ数(Re)とは、流動の激しさを表す無次元数であるが、付属書にはこれらの無次元数について、代表長さが設定されていない。

設定される代表長さによって、熱伝達率を導く式も異なることとなるのであり、適切な熱伝達率を導くためには代表長さの設定が必要不可欠であるが、この設定がなされていない点で不合理である。

(ウ) これらの点で、上記の JEAC4206-2007 の規定は不合理である。

ウ 原子力圧力容器に対して Jackson-Fewster 式を適用することは不合理であること

¹ 伝熱工学では、強制対流熱伝達において浮力による上昇流の影響が無視できなくなる範囲を浮力と慣性力の比を表す無次元数であるリチャードソン数 $Ri(=Gr/ReL^2)$ が1程度の場合と定めている。

Jackson-Fewster 式(上記の式(3))は、内径 98.4mm および全長 7000mm の細長い垂直加熱円管を用いて、水を下向流として行った熱伝達実験の結果に基づき、共存対流領域の熱伝達相関式として提案されたものである。

一方、圧力容器のダウンカマ²の円環部分の環状流路における圧力容器内径(4メートル程度)と下方に流れ下る流路長さ(7メートル程度)は同じオーダー(桁数)であり、Jackson-Fewster 式が想定している流動状態と全く異なる。すなわち、現実の圧力容器の形状と計算式が想定している形状とがまるで異なるのであり、Jackson-Fewster 式で熱伝達率を評価する JEAC4206-2007 は不合理である。

(3) 過渡条件において核沸騰が想定されていないこと

ア 九州電力の想定した過渡条件九州電力は、緊急炉心冷却装置(ECCS)が作動し、圧力容器内に冷却水が注入された場合の圧力容器内面の境界条件(過渡条件)を図4のように示した(甲高E4、2頁脚注1)。

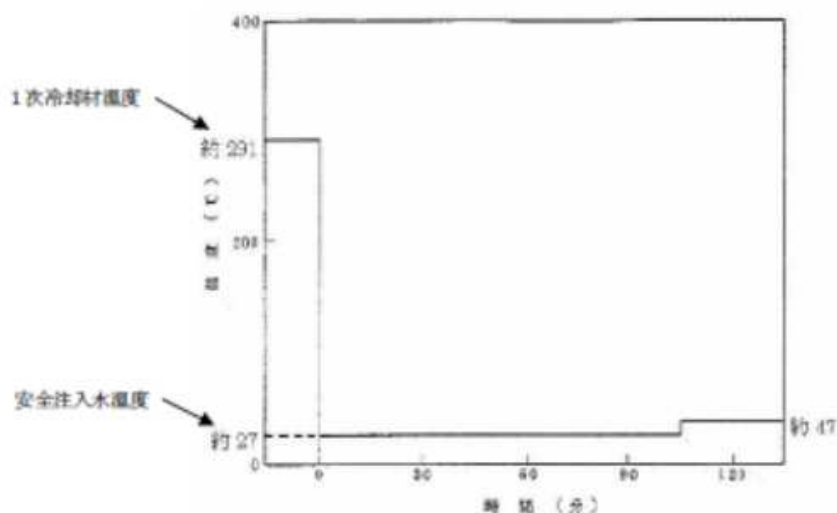


図4 過渡条件

² 一般に下降流の生じる流路・配管部のことである。特に、加圧水型原子炉(PWR)や沸騰水型原子炉(BWR)で、炉容器内壁と炉心槽(炉心シュラウド)間の円環上の空間をいう。

図4（甲高E4、1頁の図1）

すなわち、圧力容器内の温度は、冷却水が注入されると時間ゼロで29.1℃から約27℃にステップ状に下がり、105分後に47℃となるというものであり、圧力容器内にかかる圧力は、時間ゼロで大気圧になるというものである。このような過渡条件の下では、冷却の初期の段階で必ず核沸騰が生じる。

核沸騰の際の圧力容器の内側表面の熱伝達率は、過熱度によるが図5の「Kutateladzeの式」（甲高E4、7頁、脚注16）によれば、2.5～10² kW/m²K以上となる。

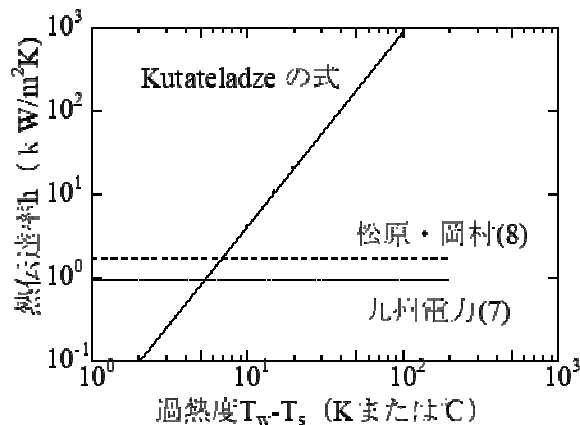


図5（甲高E4、7頁の図3）

しかし、九州電力は玄海原発において、核沸騰が生じることを想定していないことから、このような熱伝達率についてなんら想定しておらず、九州電力の評価では0.92 kW/m²K という一定値のみ用いられた（図5の九州電力（7）に図示）。

九州電力の想定している熱伝達率に対し、核沸騰時の熱伝達率は一桁から二桁以上も大きくなる。

イ JEAC4206-2007 及び 2016 の想定

JEAC4206-2007 の解 30 においては、「(2) 包絡過渡条件 (1)

に代わり、…供用状態 C 及び D（一次冷却喪失事故）に対しては、各供用状態の最大圧力と 100%定常時の温度から各供用状態の過渡条件における最低温度へのステップ温度変化の過渡としてよい。」と過渡条件は定められ、これと表現は異なるが、JEAC4206-2016 の 11 頁（甲高 E4、3 頁脚注 3）では「評価対象事象の想定する温度過渡は、非常用炉心冷却システムの作動による安全注水を想定し、原子炉圧力容器炉心領域の接液水の温度が 1 次冷却材の通常運転温度から安全注入水の水温まで瞬時に変化する過渡とする。なお、想定する圧力過渡は事象発生直後に大気圧に変化するとしてもよい」としている。これらの記載は、九州電力の想定している過渡条件とまさに同じものであるが、JEAC4201-2007 及び 2016 においても核沸騰現象が起きることは想定されていない。したがって、核沸騰が生じた場合の熱伝達率は JEAC4201-2007 及び 2016 においては想定されていないこととなる。

ウ 以上のように、九州電力が玄海原発において想定している過渡条件、JEAC4201-2007 及び 2016 が想定している過渡条件においては、核沸騰が生じることは想定されていないが、核沸騰が生じた場合の熱伝達率は九州電力の評価する熱伝達率である $0.92 \text{ kW/m}^2\text{K}$ という一定値を一桁から二桁以上も大きいものとなる。これだけ大きい熱伝達率が生じるとなれば、圧力容器の内表面温度は冷却水により大きく低下し、大きい熱応力を生じさせ、応力拡大係数も大きくなる結果、PTS 状態遷移曲線がより上方へ突き出す形状となることから、同曲線が破壊靱性遷移曲線と重なる可能性を否定することができなくなる。

エ そうであるにもかかわらず、JEAC4206-2007 は核沸騰が生じることによる熱伝達率の値を考慮していない。このような JEAC4206-2007 は基準として不合理である。

(4) 冷却期間中における熱伝達率の変動が考慮されていないこと

ア 時間の経過により圧力容器の熱伝達率は変動すること

NUREG（米国原子力規制委員会の規制）は、どのような条件で、どの程度の応力拡大係数が生じるかについて、いくつかのケースでシュミレートした報告を1999年にしている（甲高E4、13頁脚注27）。この報告の中に、図6（甲高E4、14頁の図13）の解析例がある。なお、この解析例は、T2の破損面積が50cm²でき裂形状はa/w=0.07、圧力容器厚さw=243mm、き裂深さa=17mm、き裂長さ2c=48mmと設定されたものであり、縦軸が応力拡大係数、横軸がき裂先端温度を示す。

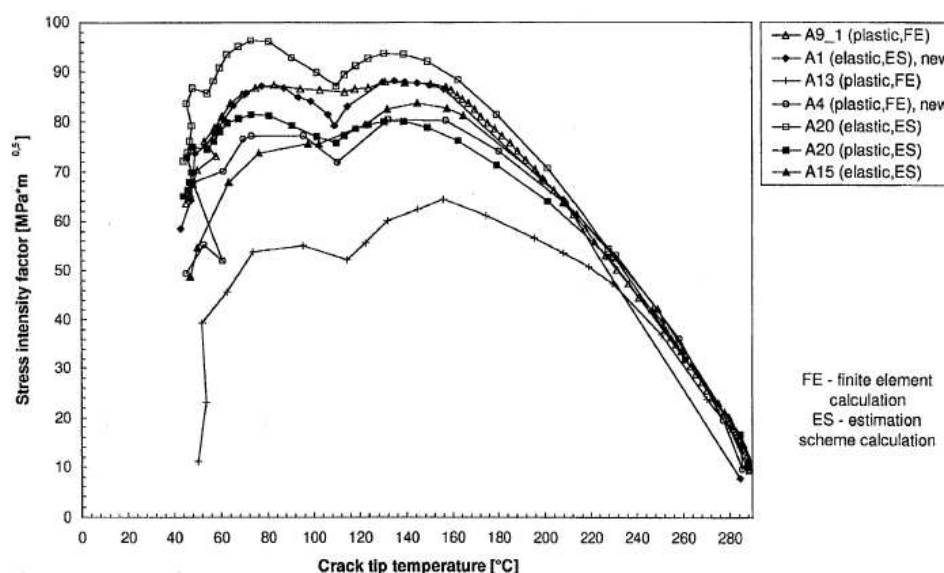


図6（甲高E4、14頁の図13）

図6中の「A20 (erastic, ES)」（白抜きの四角）の熱伝達率を示したのが図7（甲高E4、14頁図15）ある。なお、縦軸が熱伝達率、横軸が時間（秒）を示す。

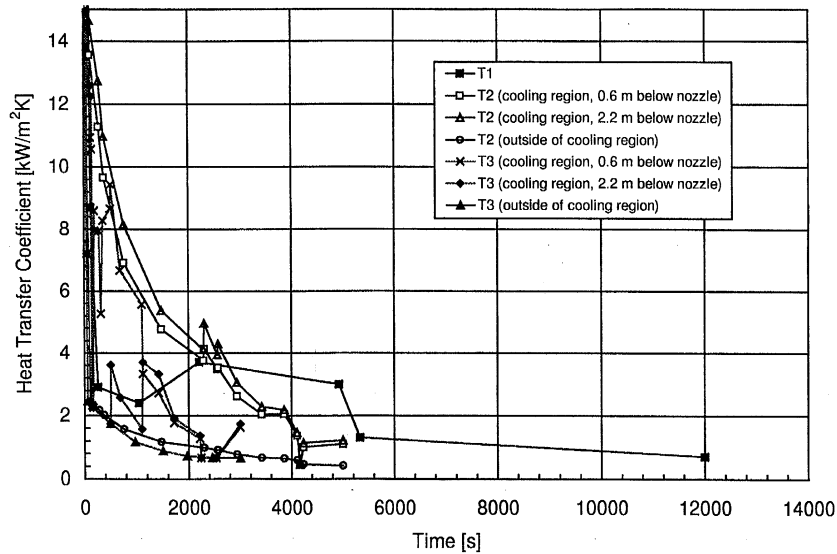


Figure 5.1.3 Time history of heat transfer coefficients for LOCA transients T1, T2, and T3

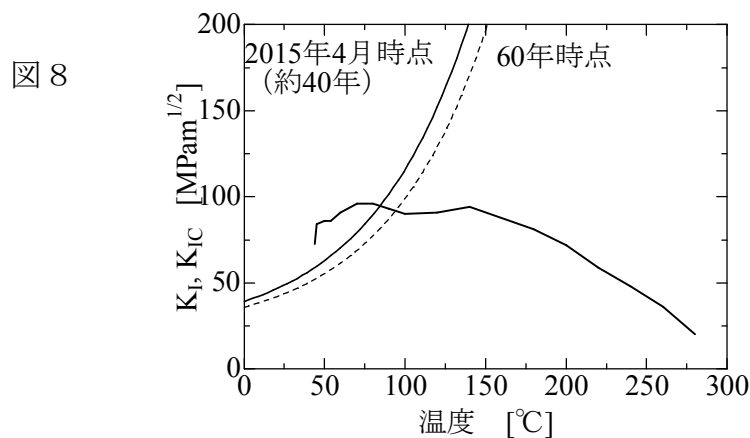
図7 (甲高E4、14頁図15)

図7のT1は破損面積が 20 cm^2 のとき、T2は図6の解析と同じ 50 cm^2 、T3は 200 cm^2 を示す。図7が示すとおり、熱伝達率は時間の経過により激しく変化するものであり、常に一定値と評価できるものではない。特に、T2（白抜四角、白抜三角、白抜丸の3つ）は、 $0\sim 1600$ 秒（約27分）までの長時間にわたって $5\text{ kW/m}^2\text{K}$ 以上、 2500 秒（約42分）までの間では $4\text{ kW/m}^2\text{K}$ 程度の大きい値になっていることが分かる（甲高E4、14頁）。

イ このように熱伝達率は、実際には、常に一定値をとるものではなく、時間の経過とともに激しく変動するものであるが、JEAC4206-2007における熱伝達率の評価においては、このような時間経過に伴う熱伝達率の変動について一切考慮していない。

ウ 参考までに、上記の第1の3項（4）アで述べた設定を前提にしたものであるが、図6の「A20 (erastic, ES)」を高浜原発1・2号機の破壊靱性遷移曲線 (K_{IC}) に重ねてプロットした結果を図8（甲高E4、14頁図14）に示す。この解析はDFM（決定論的破壊力学）によるもの

であるが、100℃以下の部分で完全にクロスオーバーしており、安全性が保証されていない状態になっている。



このように、時間経過に伴う熱伝達率の変動も考慮した上で PTS の評価した場合、PTS 状態遷移曲線がより上方へ突き出す形状となることになり、同曲線が破壊靱性遷移曲線と重なる可能性を否定することができなくなる。そうであるにもかかわらず、JEAC4206-2007 は時間経過に伴う熱伝達率の変動を考慮していない。このような JEAC4206-2007 は基準として不合理である。

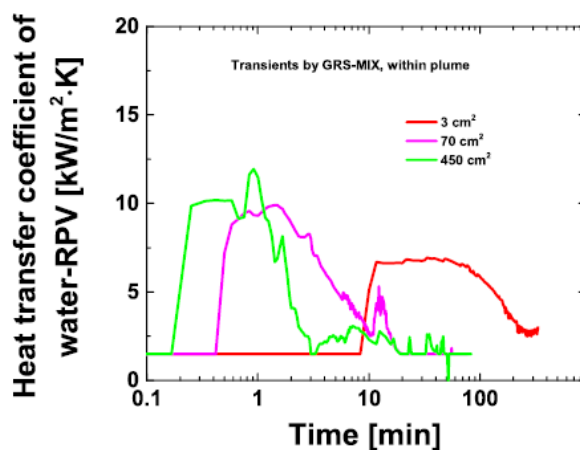
(5) 熱伝達率の評価において、プルームを考慮していないこと

ア プルームの考慮の有無により熱伝達率の値が異なること

2018年に報告された Qian et al の論文（甲高 E4、14頁脚注28）では、プルームを考慮しない解析とプルームを考慮した熱伝達率の時間による推移の解析を示している。なお、プルームとは、冷却時に生じる冷却温度の不均一さのことである。

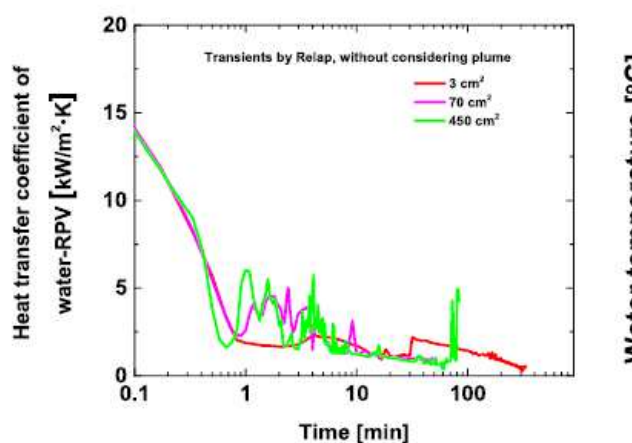
図9がプルームを考慮した場合の時間の推移に伴う熱伝達率の変化であり、図10がプルームを考慮していない場合の時間に伴う熱伝達率の変化である（甲高 E4、17頁脚注33）。なお、縦軸が熱伝達率であ

り、横軸が時間（分）であり、破断面積が SBLOCA（小規模冷却喪失事故）の 3 cm^2 、MBLCA（中規模冷却喪失事故）の 70 cm^2 、LBLOCA（大規模冷却喪失事故）の 450 cm^2 の 3 つ場合を示している。



(E) Heat transfer coefficient history of the studied transients calculated with GRS-MIX.

ブルームを考慮した CFD³による GRS-MIX⁴コードによる熱伝達率（図 9）



(C) HTC in the downcomer for various hot leg break sizes (cm^2) calculated with RELAP5.

ブルームを考慮しない RELAP 5⁵コードによる熱伝達率（図 10）

³ 計算流体力学

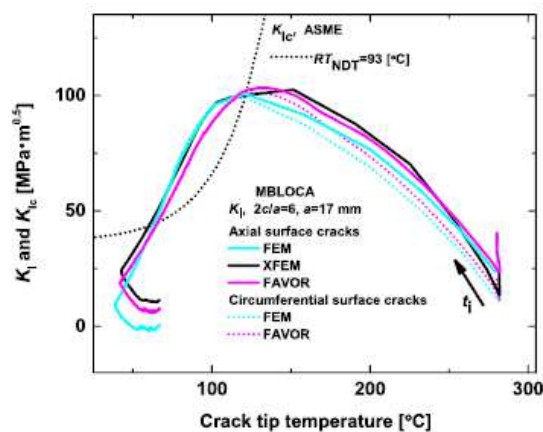
⁴ ドイツの Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit（GRS 原子炉安全協会）によって開発されたソフトウェア

⁵ スイス連邦工科大学のポールシェラー研究所（Paul Scherrer Institute）で開発され

図9及び10（甲高E4、17頁図19（a）（b））において、それぞれLOCAの程度にもよるが、図9では、5～10kW/m²K程度の高い値が一定の時間持続することが分かり、図10においても、時間が1分を経過するまでは非常に高い値となっており、その後も5kW/m²K程度の値をとることが示されている。

このようにプルームの考慮の有無により、時間経過による熱伝達率の値の推移は大きく異なることが、Qian et al の計算例から分かる。
 イ Qian et al の計算のプルームを考慮しない場合とプルームを考慮した場合のPTS評価の解析結果は図11及び12のとおりである（甲高E4、15頁脚注28）。なお、図11及び12（甲高E4、15頁の図16、図17）は、中規模冷却材喪失事故MBLOCA（MBLOCA：Medium break loss-of-coolant accident）を想定した時（破断面積70cm²）のもので、圧力容器厚さ（w）は、w=170mm、軸方向のき裂の場合で、クラック深さa=17mm、a/w=0.10、アスペクト比2c/a=6の時（き裂長さc=51mm）の解析結果である。

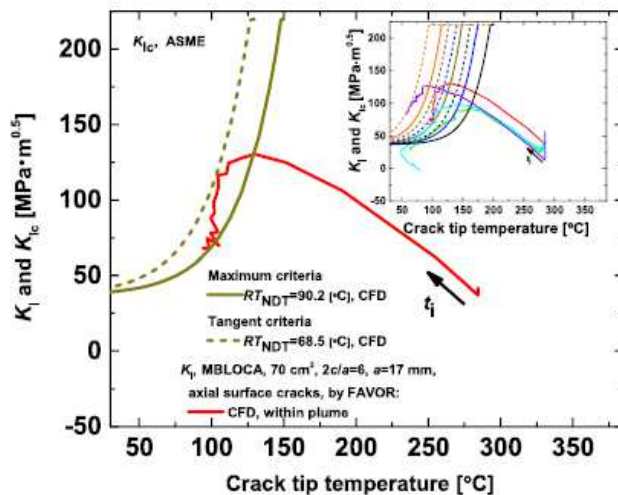
ここで描かれている破壊靱性遷移曲線（K_{IC}）はASME（米国開会学会の原子炉容器の規格）のものであるが、PTS曲線と完全にデッドクロスしている。



た解析コード

(A) Comparison of K_I calculated by FAVOR, FEM and XFEM for surface crack 2c/a=6, a=17 mm and the MBLOCA.

中規
PTS評価結果（プ
ルームを考慮し
ない解析） 図 1



模LOCA時の
ルームを考慮
1

中規模LOCA時のPTS評価結果（プルームを考慮した解析） 図 1 2

ウ 参考までに上記の第1の3項（5）イで述べた設定を前提にしたものであるがQian et alの解析結果を高浜原発1号機の破壊靱性遷移曲線（K_{IC}）重ね合わせてプロットした結果を図13に示す（甲高E4、15頁から16頁、図18）。なお、実線①は高浜原発1号機の2015年4月時点（運転開始から約40年）のK_{IC}の下限包絡線。破線②は60年時点の包絡線である。

注入された冷水と一次冷却水が混合することで、発生するプルームを考慮したFAVORコードによる解析（実線で示した）及びプルームを考慮していないABAQUSコードによる解析（破線で示した）の2つの結果が示されている。このようなプルームによる冷却効果を考慮すると、プルームを考慮した場合はプルームを考慮していない場合に比べて、K_Iが30

%以上増加することが明らかになった。

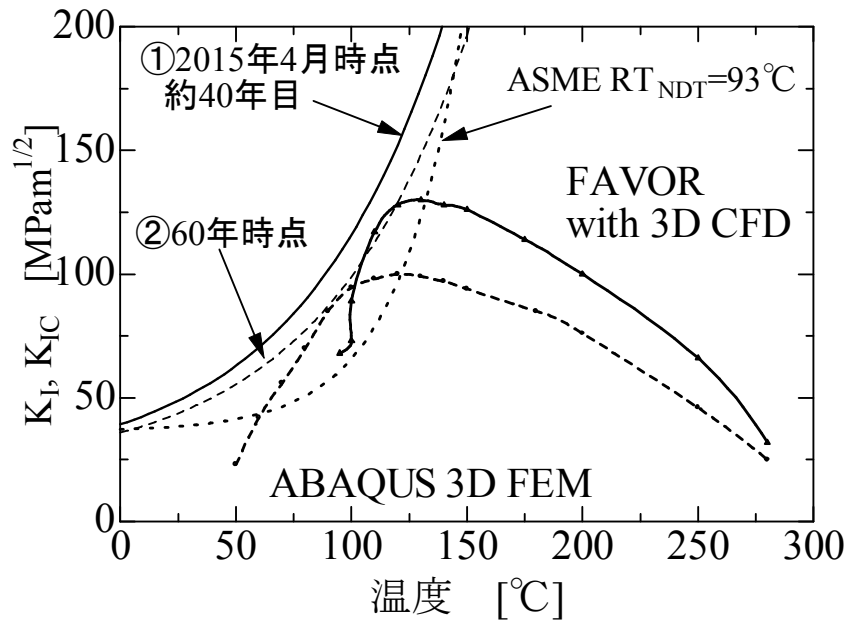


図 1 3 (甲高E 4、1 6 頁図 1 8)

このように、中規模のLOCAの解析において、FAVORコード（プルームを考慮した分析）による解析によれば、 K_{IC} 曲線とも重なり合いデッドクロスしているため圧力容器は非常に危険な状態にある。また、ABAQUSコード（プルームを考慮しない分析）による解析でも余裕はなく極めて危険であるといえる。

すなわち、プルームを考慮した場合は考慮しない場合と比べ、熱伝達率の値が高くなり、その結果応力拡大係数は大きくなることが明らかになるとともに、PTS状態遷移曲線がより上方へ突き出す形状となることになり、同曲線が破壊靱性遷移曲線と重なる可能性が否定できないことが分かる。

エ そうであるにもかかわらず、JEAC4206-2007は熱伝達率の評価にあたってプルームを一切考慮していない。これでは本件審査基準を満たさないこととなるのであるから、JEAC4206-2007は基準として不合理である。

4 小括

(1) これまで、JEAC4206-2007が基準として不合理であることを述べてきた。

具体的には、①JEAC4206-2007の熱伝達率の評価式そのものが不合理であること、②九州電力及びJEACが想定している過渡条件では、冷却初期段階で核沸騰が生じはざであるが、これが想定されておらず熱伝達率の値が低すぎるものになっていること、及び③JEAC4206-2007と-2016は熱伝達率が時間の冷却開始から時間の経過によつても一定値であることを前提に計算しているものと思われるが、実際には、熱伝達率は冷却期間中激しく変動しているものであり、このことが一切考慮されていないこと、④熱伝達率はプルームの考慮の有無によりその値が異なるが、JEAC4206-2007はプルームによる熱伝達率の値の変化を考慮していないことである。熱伝達率の評価は、PTS状態遷移曲線 (K_I) の評価に大きく影響を与え、同曲線が破壊靱性遷移曲線と重なる可能性が否定できないことを述べた。

このようなJEAC4206-2007は不合理な基準であることが明らかである（基準の不合理性）。

(2) また、このような不合理な基準では「加圧熱衝撃評価の結果、原子炉压力容器の評価対象部位において静的平面ひずみ破壊靱性値が応力拡大係数を上回る」（原子炉等規制法43条の3の32第5項・実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第114条・実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準）か否かを適切に判断することができない。

さらには、本書面において主張するとおり、熱伝達率が適切に評価されていない結果、破壊靱性遷移曲線とPTS状態遷移曲線 (K_I : 応力拡大係数) が重なる、すなわち破壊靱性値が応力拡大係数を上回る可能性があり得ることから、原子炉等規制法43条の3の32第5項・実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第114条の審査基準を満たしているとはいえず、適合性

判断の過程に過誤・欠落があるといわざるを得ない。

第2 求釈明

1 熱伝達率は、その評価のいかんによって、PTS状態遷移曲線の評価に大きく影響を与え、ひいては破壊靱性遷移曲線とPTS状態遷移曲線とが重なる結果になる可能性がある。そうであるとすれば、当然、被告は補助参加人の用いた熱伝達率を把握した上で、その熱伝達率の評価が適正か審査しなければならない。

(1) そこで、被告に対し、①被告は、PTS評価において、補助参加人がどのような熱伝達率を用いたのかを把握していたのか、②その熱伝達率の評価が適切かどうか審査したのか、③審査をしたのであれば、いかなる審査をしたのか。この3点について、釈明を求める。

(2) 上記のような釈明を求めるのは、仮に被告が熱伝達率に把握していない場合、把握していたとしてもその熱伝達率が適正なものか審査をしていなかった場合、及び審査していたとしても審査が不十分なものであった場合には、その審査過程には看過しがたい重大な過誤欠落があったといえ、運転延長許可処分は違法となるからである。

2 仮に、被告がPTS評価において補助参加人がどのような熱伝達率を用いたのか把握していなかった場合、補助参加人に対し、補助参加人がどのような熱伝達率を用いたのか釈明を求める。

補助参加人の用いた熱伝達率が不合理な基準であるJEAC4206-2007に基づくものであった場合には、これを見落とした被告の審査過程には看過しがたい重大な過誤欠落があったといえ、違法となる。この違法性の有無の判断のためには、補助参加人はPTS評価の際に、いかなる熱伝達率を用いたのかについて、明らかにすることが必要不可欠である。

したがって、原告は上記の釈明を補助参加人に求める。

以 上