

第5回 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等に
技術評価に関する検討チーム 資料5-2に対するコメント

令和2年4月9日
(一社)日本電気協会
原子力規格委員会

標記につきましては、第5回検討チーム会合資料5-2の技術評価書案に対するコメントを以下の通り取りまとめましたので回答いたします。

○技術評価書案に対するコメント

9 ページ : 3.2.1 (2) 表 3.2.1-2 No.12 主な変更内容

(技術評価書案記載事項)

- ・JEAC4216あるいはそれに準じる方法で破壊靱性参照温度 T_o が得られた場合には、破壊靱性参照温度 T_o から求められる RT_{T_o} を $RT_{NDT}(1)$ 又は $RT_{NDT}(2)$ に置き換えてもよいとする規定を追加

(コメント No.1)

本規定 (RT_{T_o}) は、PTS 評価の健全性評価には直接的には用いられず、供用状態 A、B の評価 (RF-4120) に用いられることから、表 3.2.1-2 の No.12 への記載は適切ではないと思われます。表 3.2.1-2 の No.1 もしくは No.2 に記載すべきと考えます。

29 ページ : 4.1.11 (3) ①

(技術評価書案記載事項)

なお、破壊靱性確認方法 2007 の K_{Ic} 式については、現時点においてこれを否定する技術的根拠は見いだされていないことから、今後引き続き使用することは問題ないといえる。

(コメント No.2)

2007 年版の K_{Ic} 式については、「高経年化技術評価に関する意見聴取会」(平成 23 年 11 月～平成 24 年 7 月)での要望や第4回検討チーム会合資料 4-2 等で説明したような課題を踏まえ、より信頼性の高い評価法に見直すこととして、2016 年版の K_{Ic} 式に改めたものです。

したがって、日本電気協会としては、破壊靱性確認方法 2007 の K_{Ic} 式よりも、2016 年版の K_{Jc} 式を使用するのが適切と判断しています。

30 ページ : 4.1.11 (3) ② (a)

(技術評価書案記載事項)

日本電気協会は、信頼下限を ASTM E1921 と同じ 95%としていることに関し、破壊靱性確認試験方法 2007 の K_{Ic} 式から破壊靱性確認試験方法 2016 の K_{Jc} 式への変更に伴う実プラントでの値の変化を比較するために、破壊靱性遷移曲線のうち、PTS 状態遷移曲線 K_I に接する付近の $K_{Jc} = 70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ での遷移温度 T_{70} を比較した。その結果、大部分のプラントで破壊靱性確認試験方法 2016 による T_{70} の方が高い値となっており、保守的であることを確認している(図 4.1.11-1 参照)。

(コメント No.3)

ASTM E1921 では、信頼下限を規定していませんので、ここでの ASTM E1921 の引用は不適切です。また、信頼下限は 95%でなく、5%が正しいですので修正が必要です。

(他にも同様の記載となっている箇所があります。)

42 ページ : 4.1.11 (3) ② (b)

(技術評価書案記載事項)

これに関し、日本電気協会は、破壊靱性値と累積確率の指数を示し、鋼種毎のワイブルプロットからも、現時点で破壊靱性確認方法 2016 の破壊靱性遷移曲線を下回っているデータは、特段適用性に疑義を呈するようなデータではないと評価している(図 4.1.11-5 参照)。

(コメント No.4)

この記載以前の鍛鋼品の破壊靱性データに基づくマスターカーブの適用性に関する分析と、この記載以降の図 4.1.11-5 に示される T_{r30} に基づく破壊靱性カーブの分析は分けて記載すべきと考えます。

43 ページ : 4.1.11 (3) ② (b)

(技術評価書案記載事項)

母集団がワイブル分布に従う場合、データは直線状に分布するが、図 4.1.11-6 の a) 圧延材のデータは、必ずしも直線上に分布していない。また、データの位置が a) 圧延材と b) 鍛鋼品及び c) 溶接金属では、縦軸で1程度のずれがある。これは、ワイブル分布の位置パラメータ等に補正されるべき値が存在することを示唆していると考えられる。また、日本電気協会が破壊靱性データを用いて検討した対象は、鍛鋼品のみである。

(コメント No.5)

図 4.1.11-5 は、 T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線に対する分析結果であり、本来の破壊靱性データに基づくマスターカーブそのもののワイブルプロットではないため、この図を元に本来のマスターカーブの適用性を確認できるものではありません。本来のマスターカーブの適用性((10)式)と T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線((8)式)の適用性を分けて評価するべきと考えます。

また、検討した対象が鍛鋼品のみというのは、(10)式の T_0 を用いた場合の適用性に関する検討です。

44 ページ : 4.1.11 (3) ② (c)

(技術評価書案記載事項)

上記表 4.1.11-2 は、米国の材料について検討されたデータであるが、5%マスターカーブの安全レベルが ASME K_{Ic} 曲線と同等以上であることを確保するためには、破壊靱性曲線の横軸については「温度裕度の平均」として「 2.2σ 」必要であることを示している。

(コメント No.6)

表 4.1.11-2 の分析は、ASME K_{Ic} 曲線とマスターカーブで異なる破壊靱性遷移曲線を比較するにあたり、評価可能な簡易的な方法として温度余裕に基づいた分析をしたものであり、5%マスターカーブを破壊靱性データが下回る確率は5%です。したがって、このような簡易的な方法による表 4.1.11-2 の結果から 2.2σ (下回る確率 1.5%)が必要と考えるのは適切ではありません。

45 ページ : 4.1.11 (3) ② (c)

(技術評価書案記載事項)

95%信頼下限を採用するという事は、5%は下回るデータがあることを前提としており、その妥当性については、規格策定者による論理的な説明が必要である。

(コメント No.7)

95%信頼下限の記載はコメント No.3 と同様、適切ではありません。

5%信頼下限を採用した理由は、第4回検討チーム会合資料 4-2 で詳細に説明していますので、ご参照下さい。

JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式は、破壊靱性データ数に依存し、ロバスト性が乏しい等の下限包絡に伴う課題の解決を図り、最新の知見を取り込んだより信頼性が高い評価に見直したものです。したがって、JEAC4206-2007 の K_{Jc} 式より、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式を適用する方が、より信頼性の高い評価が行えると判断しています。

ただし、日本電気協会としては、今後も監視試験による破壊靱性データの充実等、新たな知見を反映し、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式の適用性の評価や改定検討を行っていきたいと考えています。

日本電気協会としては上記のように考えますが、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式の今後の改定検討に資するため、「5%は下回るデータがあることを前提としており、その妥当性については、規格策定者による論理的な説明が必要」の記載について、規制当局としてどのような説明が「論理的」と判断されるのか、これまでの日本電気協会からの説明事項を踏まえて具体的に充足すべき事項や観点について補足いただきたいと考えます。一部の破壊靱性データが下回る可能性がある K_{Jc} 式により原子炉圧力容器の健全性評価を行うことは、規制要求に対する容認可能な実施方法として許容できないとお考えということでしょうか？

49 ページ : 4.1.11 (3) ② (d)

(技術評価書案記載事項)

ΔT_t 決定に使用した破壊靱性データの照射量の下限を低くすると ΔT_t が小さくなるということは、 ΔT_t に照射量依存性があるということであり、将来予測に用いるのは適切とはいえず、 T_{r30} の式については、今後の検討が必要である。

(コメント No.8)

圧延材については、 ΔT_t が 5×10^{19} n/cm² よりも高照射量側では ΔT_t が飽和する傾向が認められていますので、その旨を明記すべきと考えます。

また、鍛造材や溶接金属についても、 5×10^{19} n/cm² よりも高照射量側のデータを用いて設定した K_{Jc} 式に対して全照射後データの分析から5%信頼下限を下回ることは確認できており、

ΔT_t の決定に使用したデータの中性子照射量の範囲であれば、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式の適用性は確認されていると考えます。

50 ページ : 4.1.11 (3) ② (e)

(技術評価書案記載事項)

しかし、 $K_{Jc}=70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ における温度と T_{r30} における温度の関係性、 $K_{Jc}=70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ での $K_{Jc(\text{med})}$ と5%信頼下限の $K_{Jc(0.05)}$ の温度差でもって代表値とすることは説明されていない。また、温度裕度の平均が 2.2σ であることを踏まえれば、 1.65σ は検討の余地がある。したがって、 M_p の値は、今後の検討が望まれる。

(コメント No.9)

$K_{Jc}=70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ における $K_{Jc(\text{med})}$ と $K_{Jc(0.05)}$ の温度差である 40.2°C は、マスターカーブにおける破壊靱性のばらつき(1.65σ)を温度に置き換えたものです。 T_{r30} の破壊靱性遷移曲線もマスターカーブのばらつきを使用していますので、 T_{r30} の破壊靱性曲線に対するマーヅンを検討する場合でも、このマスターカーブのばらつき($1.65\sigma=40.2^\circ\text{C}$)を使用することで問題ないと考えています。また、 $K_{Jc}=70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ での温度差を代表値としたのは、第4回検討チーム会合資料4-1の回答(参考2)にも記載しましたように、PTS状態遷移曲線と接するのが破壊靱性遷移曲線の $70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 付近であるためです。なお、 1.65σ は、第3回検討チーム会合参考資料3-3の回答(2)b.にも記載のとおり、正規分布の5%信頼下限がメヅアン+ 1.65σ であることから設定しています。コメントNo.6にも記載のとおり、ここで 2.2σ とするのは適切ではありません。このようなマーヅンの取扱いは、第3回検討チーム会合参考資料3-3の回答(2)b.にも記載のとおり、モンテカルロ計算や照射後破壊靱性データが破壊靱性遷移曲線を上回る確率やWallinの評価方法による破損確率を求めて妥当性を確認しています。

50 ページ : 4.1.11 (3) ② (e)

(技術評価書案記載事項)

M_k の算出式は σ_M を含む二乗和平方根の値から σ_M を引いており、 $\sigma_{T_0}^2 + \sigma^2 < 3\sigma_M^2$ の範囲では[]内の値が $(\sigma_{T_0}^2 + \sigma^2)^{1/2}$ よりも小さくなる。数値を代入すると、 $\sigma > 40.5^\circ\text{C}$ の場合にのみ σ_M より大きなマーヅン M_k となるので、今後の検討が望まれる。

(コメント No.10)

第3回検討チーム会合参考資料3-3の回答(2)b.にも記載のとおり、 T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線を使用する場合、破壊靱性のばらつきに対して5%信頼下限で評価しますが、脆化予測を行う場合には、更に予測に伴う不確実さ(予測誤差)を考慮する必要があり、その付加するマーヅンとして M_p を設定しています(図10-1参照)。また、マスターカーブの T_0 に基づく

破壊靱性遷移曲線を使用する場合には、破壊靱性データ数等に応じた T_0 の誤差が含まれますので、これも考慮したマージンとして M_k を設定しています。誤差伝播の法則から、温度に換算したマスターカーブの破壊靱性のばらつき (σ_M) に、脆化予測に伴う不確かさ (σ) 及び T_0 の誤差 (σ_{T_0}) が付加された場合の破壊靱性のばらつきは、 $\sqrt{(\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2)}$ で表されます。したがって、5%信頼下限(メジアン+1.65 σ)の破壊靱性遷移曲線を使用する際に付加すべきマージン M_k は、5%信頼下限を使用することによるばらつき(1.65 σ_M)を差し引いた $1.65 \times \{\sqrt{(\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2)} - \sigma_M\}$ となります。このように、本来の破壊靱性データのばらつきは 5%信頼下限で評価することとしており、 M_k は、脆化予測と T_0 の誤差を考慮するための追加のマージンとして設定していますので、 M_k は σ_M より大きくする必要はありません。

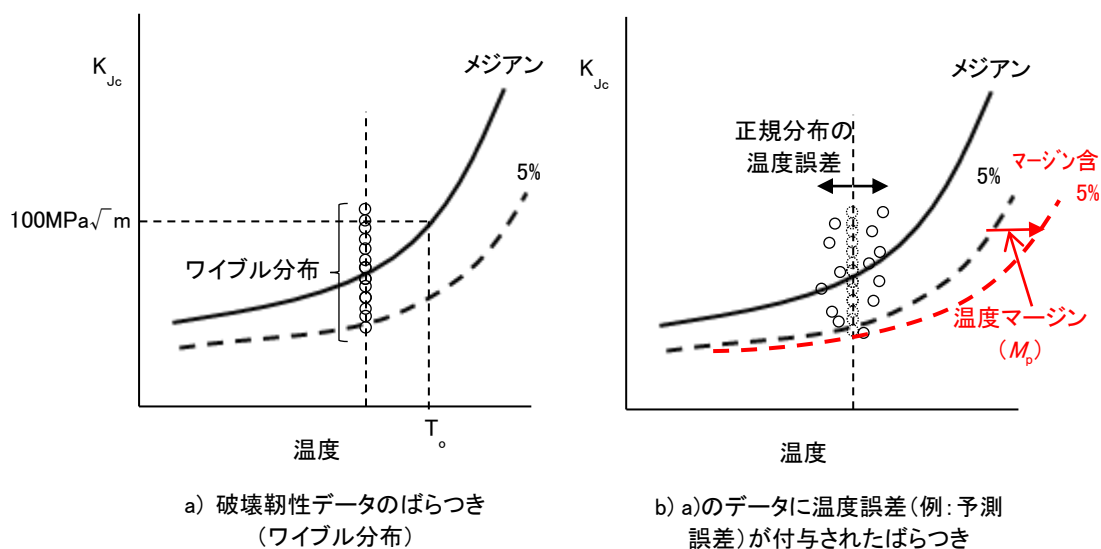


図 10-1 脆化予測による予測誤差を考慮したマージン (M_p)

51～53 ページ : 4.1.12 (1) ③及び関連箇所

(技術評価書案記載事項)

「破壊靱性参照温度 T_0 から求められる RT_{T_0} を $RT_{NDT(1)}$ 又は $RT_{NDT(2)}$ に置き換えてもよいとする規定を追加」に関する内容

(コメント No.11)

4.1.12 は RF-4200 の供用状態 C 及び D に対する健全性評価について記載されていると思われませんが、この③に記載の規定は RF-4200 では使用しませんので、別に記載した方が良

いと思われます。RF-4120 に関連する事項ですので、本記載内容は 4.1.2 項に記載すべきと考えます。

53 ページ : 4.1.12 (3) ③

(技術評価書案記載事項)

T_o 決定に当たっての誤差の標準偏差 σ_{T_o} の算出式は、限られた試験片数では真の平均値を求めることが困難なため、試験片数による平均値のばらつきの標準偏差を求め、その 2 倍の値を加算することとしている。しかし、日本電気協会は、破壊靱性曲線の「温度裕度の平均」として「 2.2σ 」としており(表 4.1.11-2 参照)、これとの関係を検討する必要がある。

(コメント No.12)

コメント No.6 に記載のとおり、 2.2σ とするのは適切ではありません。

61,62 ページ : 4.2.2 (2) (b)

(技術評価書案記載事項)

これに関し、日本電気協会は、各試験片で得られた 1T-C(T)相当の破壊靱性 K_{Jc} が $K_{Jc(\text{med})}$ であるとみなし、 T_o の暫定値 T_{oQ} を求め、Mini-C(T)で求めた T_o と他の大きさの C(T) から求めた T_o を、有意水準 0.05 で有意差があるか、2標本のコルモゴロフ-スミルノフ検定 (K-S 検定)を行い、データには有意な差はないことを確認したとしている。K-S 検定の結果は、データには有意な差は無いという仮説が棄却できないということであり、両者が同一であるというものではない。

(コメント No.13)

日本電気協会は第4回検討チーム会合資料 4-3 回答(3)において、『「二つの母集団の分布が同一である」とする帰無仮説は採択されました』と回答しており、「有意な差はないことを確認した」とはしていません。

66 ページ : 4.2.3

(技術評価書案記載事項)

Mini-C(T)の寸法及び形状

(コメント No.14)

本項では、Mini-C(T)の寸法及び形状について検討の結果が記載されていますが、技術評価書において MCT-3110(C(T)の寸法及び形状)に関する記載が含まれていません。

C(T)の寸法及び形状については 10 ページ 3.2.2 の①に該当するため、技術評価の対象外と整理されたものと考えられますが、その旨を 3.2.2 項または 4.2.3 項に記載した方が良いと考えます。

87 ページ : 4.2.11 (2)

(技術評価書案記載事項)

1T-C(T)及び Mini-C(T)の実際の亀裂形状を比較した結果を「添付資料－5 1T-C(T)と Mini-C(T)の予亀裂形状の比較」に示す。Mini-C(T)の初期亀裂長さの湾曲は 1T-C(T)に比べて大きく、Mini-C(T)に対して緩和された判定基準(12.5%)であれば満足するものの、C(T)の判定基準(5%)は満足していないことが示された。また、初期亀裂の形状は、両試験片で相似形とは言い難いことも示された。Mini-C(T)に対して、判定基準を 12.5%まで緩和することの影響及び 1T-C(T)への板厚寸法補正方法について、今後検討することが望まれる。

(コメント No.15)

本規定は元々二つの基準の大きい方をとるものであり、Mini-C(T)に対して「判定基準を緩和」したものではありません。

91 ページ : 4.2.13 (2)

(技術評価書案記載事項)

Mini-C(T)試験片の場合、初期亀裂長さ(約 4mm)に対して最大 0.5mm のばらつき(初期亀裂長さの 12.5%)が許容されている。一方、1T-C(T)の場合には、初期亀裂長さ(約 25mm)に対して最大で 1.27mm(初期亀裂長さの 5%)のばらつきとなる。したがって、予亀裂前縁の形状を考えると、Mini-C(T)と 1T-C(T)では、湾曲が異なると考えられる(図 2-14 参

照)。(16)式による補正を行う場合、Mini-C(T)に対して亀裂前縁の湾曲を考慮せず、試験片寸法 B_0 を使用してもよいかについては、今後検討することが望まれる。

(コメント No.16)

亀裂前縁の形状は、試験片の寸法のみならず、降伏点、予亀裂導入温度、あるいは予亀裂導入時の僅かな軸芯ずれなどに影響を受けます。これらもたらす亀裂前縁の湾曲が結果に影響を及ぼさないよう MCT-4340 で制限が設けられており、(1)湾曲がある寸法以下に収まること(2)評価には湾曲を考慮した亀裂寸法(破断面から計測した亀裂寸法)を用いること、が決められています。従って、本記載の内容は現行の規定で既に考慮されています。

92 ページ : 4.2.14 (2)

(技術評価書案記載事項)

「付属書 E(参考) T_o の算出例(無効な K_{Jc} データを含む場合)」において、「表 E.2 データセット」に基づく暫定参照温度は -91.8°C としている。同表に示す無効データ 2 個 ($K_{Jc} = 225$ 、 $250\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) の値を $K_{Jc(\text{limit})} (= 217.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ の前後で変化させた場合の暫定参照温度の変化を図 4.2.14-1 に示す。 K_{Jc} 値が有効データの範囲では暫定参照温度 T_{oQ} は K_{Jc} 値の上昇に対して徐々に低下しているが、無効データに移行すると不連続に約 2°C 低下している。

(コメント No.17)

第5回検討チーム会合参考資料 5-1 回答(7)で説明している通り、人為的に K_{Jc} の値を変化させることは、マスターカーブの破壊靱性分布に従うデータセットで無くすることを意味し、適切な取り扱いではありません。また、 $K_{Jc(\text{limit})}$ を僅かに下回る有効データによる計算と $K_{Jc(\text{limit})}$ を僅かに上回る無効データによる計算では、 T_{oQ} が不連続になるのは定義上必然であると考えます。

94 ページ : 5.1 (1) ①

(技術評価書案記載事項)

95%信頼下限を採用するということは、5%は下回るデータがあることを前提としており、その妥当性については、規格策定者による論理的な説明が必要である。

(コメント No.18)

コメント No.7 をご参照願います。

94 ページ : 5.1 (1) ②

(技術評価書案記載事項)

式の検討に用いられたデータは、鍛鋼品については T_o が取得されている材料のデータ総数が 220 個であったが、圧延材及び溶接金属については T_o が取得されている材料のデータ数が少なく検討されていない。

(コメント No.19)

当該の記載は、マスターカーブに関する記載であり、 T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線に関する記載ではないと思われますので、混同しないような記載にすべきと考えます。

また、材料のデータが少なく検討されていないというのは、国内プラントの監視試験で取得された照射材に限られたことですので、その旨を明確にすべきと考えます。

今後の JEAC4206 及び JEAC4216 の改定検討に資するため、国内の原子炉圧力容器鋼材に対してマスターカーブ法を適用する上で、現時点で規制当局として具体的に懸念されている事項やこれら規程において検討が不足していると考えられる事項について具体的に追記いただきたいと考えます。既に照射材を含む国内外の多くの鋼材を対象としてマスターカーブ法の適用性が確認されていますが、国内プラントの監視試験で取得された照射材を対象として鋼種毎に T_o を設定可能な十分な数の破壊靱性データにより適用性を確認することが必要とお考えということでしょうか？

94 ページ : 5.1 (1) ③

(技術評価書案記載事項)

破壊靱性確認方法 2007 の式と破壊靱性確認方法 2016 の式の破損確率を比較すると、鍛鋼品及び溶接金属については破壊靱性確認方法 2016 の方が低くなっていたが、圧延材については高くなっていた。

(コメント No.20)

技術評価書案の表 4.1.11-3 の通り、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式により計算された圧延材の破損確率は 4.1% で、JEAC4206-2007 の K_{Jc} 式の 2.7% よりも高くなっており、当該の記載は事

実ですが、 K_{Jc} 式は 5%信頼下限に相当する破壊靱性遷移曲線として設定したものであり、日本電気協会としては適用性に問題はないと考えています。

日本電気協会としては上記のように考えますが、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式の今後の改定検討に資するため、これまでの日本電気協会からの説明事項を踏まえて具体的に充足すべき事項や観点について補足いただきたいと考えています。JEAC4206-2016 による評価は JEAC4206-2007 による評価よりも全ての側面でもより保守的な結果を与えるべきとお考えということでしょうか？

94 ページ : 5.1 (1) ④

(技術評価書案記載事項)

T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線の設定に使用する補正温度である ΔT_t の決定に用いたデータは、中性子照射量が $5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 以上のデータである。これに関し、日本電気協会が $2.4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 以上 $\sim 7 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 以上のデータ範囲で同様の検討を行ったところ、中性子照射量が高いデータを用いると ΔT_t が高くなり、中性子照射量が高くなるほど補正温度を大きく取る必要がある。

(コメント No.21)

圧延材の ΔT_t については、 10^{20} n/cm^2 程度の照射量までデータが得られており、そのデータの分析から $5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ よりも高照射量側では ΔT_t が飽和する傾向が認められていますので、その旨を明記すべきと考えます。

コメント No.7 に記載のとおり、日本電気協会としては、 ΔT_t の照射量依存性も含めて今後も監視試験による破壊靱性データの充実等、新たな知見を反映し、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式の適用性の評価や改定検討を行なっていきたいと考えています。

第4回検討チーム会合資料 4-2 の 19 ページに示したように、JEAC4206-2007 の K_{Jc} 式は、当該鋼材の全破壊靱性データの下限包絡で設定することから、監視試験でより高照射量側の破壊靱性データが追加されるとともに T_p の値は大きくなる傾向が現れています。このように、JEAC4206-2007 の K_{Jc} 式では、各プラントの破壊靱性データのみで評価することから、当該鋼材の破壊靱性データの照射量に依存して、必ずしも高照射量側の破壊靱性の傾向を反映できないと考えられます。一方、JEAC4206-2016 の K_{Jc} 式は、鋼種毎に照射量に対する破壊靱性データの全体傾向を考慮して設定するため、より信頼性の高い評価が行えると言えるのではないのでしょうか？

96 ページ : 5.2 ②

(技術評価書案記載事項)

1T 換算する際の、予亀裂形状等が C(T)試験片と相似形になっていないことの妥当性

(コメント No.22)

コメント No.16 に記載の通り、相似形である必要はなく予亀裂形状については試験片寸法によらず考慮されています。

96 ページ : 5.2 ②

(技術評価書案記載事項)

無効データを含む暫定参照温度 T_{00} の算出方法における不連続

(コメント No.23)

コメント No.17 に記載の通り、適切な扱いではありません。

97 ページ : 5.3 (2)

(技術評価書案記載事項)

破壊靱性の評価は、脆性破壊の発生を防ぐために行われるものであり、原子力の安全にとって重要な評価である。規格の改訂に当たって用いる技術的根拠には、一定水準の技術的評価が行われたもの(例えば、査読された論文)であることが望ましい。また、本技術評価において、限定で公開されている論文が重要な技術的根拠の一部となっていた。重要な技術的根拠については、誰もが検証できるよう公開性の高い論文を用いられていることが望ましい。今後の技術評価においては、技術的根拠の信頼性及び公開性についても確認することとする。

(コメント No.24)

JEAC4206-2016 および JEAC4216-2015 の技術根拠は、同規格から引用されている公開論文で説明可能です。

以上