

第6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の
技術評価に関する検討チーム 資料6-4に対するコメント

令和2年8月7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6回検討チーム会合資料6-4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

104, 105 ページ : 5.まとめ

(技術評価書案記載事項)

【破壊靱性確認試験方法 2016, 参照温度試験方法の規制における適用性についての課題等を記載】

(コメント No.1)

JEAC4206-2016 の供用状態 C, D の PTS 評価(クラッド下亀裂, 破壊靱性遷移曲線, 高温予荷重効果, 亀裂伝播停止評価含む)に関して適用性を判断することは時期尚早であるという判断は理解いたしました。他の部分に関しては、概ね妥当と評価されているようですので、供用状態 C, D の評価は 2007 年版によるという要件を付け、それ以外の部分はエンドースし、併せて、JEAC4216-2015 を要件付きでエンドースする方向で検討して頂くことを要望いたします。

23 ページ : 4.1.9 (3) ①

(技術評価書案記載事項)

破壊靱性確認方法 2016 は、一般評価の場合の欠陥の方向について母材及び溶接金属とも軸方向としている。変更理由に記載する「(解説-RF-4221-4)一般評価に用いる最大仮想欠陥」には「溶接金属の最大仮想欠陥の方向については、軸方向継手及び周方向継手ともに溶接欠陥の K_I 値が若干高めとなるため、内面近傍に想定した最大仮想欠陥の非延性破壊を評価する一般評価では、母材と同様に軸方向欠陥を想定することとした。」としているが、「溶接継手の周方向の残留応力が軸方向よりも内面近傍で若干高めとなる技術

根拠は示されていない。欠陥の方向を軸方向としたことについては、技術的妥当性の説明が必要である。

(コメント No.2)

「溶接継手の周方向の残留応力が軸方向よりも内面近傍で若干高め」となる傾向は、図 4-9-1(正しくは図 4.1.9-1 と付番すべきと思われます)に示されていますので、ご参照願います。

31 ページ : 4.1.11 (3) ② 1) (a)

(技術評価書案記載事項)

日本電気協会は、 T_0 式の信頼下限を 5%としていることに関し、 K_{Ic} 式から T_0 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 $K_{Ic} = 70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 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 T_0 式による 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)

図 4.1.11-1 は、 T_0 式に対する検討結果ではなく、 T_{30} 式に対する検討結果であり、記載すべき場所が異なります。なお、 T_0 式ならび、 T_{30} 式に関わらず、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 で説明していますので、ご参照願います。

52 ページ : 4.1.11 (3) ② 1) (c)

(技術評価書案記載事項)

正規分布とした場合、 2σ に相当する $T - T_0 > \text{約 } 40^\circ\text{C}$ の裾の範囲でマスターカーブ法に比べて確率密度が下回っており、・・・(中略)・・・。 ΔRT_{NDT} 予測値は脆性遷移曲線を右移動するときを使うものであり、ベースになる考え方が異なっているといえる。正規分布の 2σ と同程度のマージンを確保するには、マスターカーブ法の累積確率を 0.05 より小さな値とする必要がある。

(コメント No.4)

各パラメータのばらつきに対する信頼下限は、必ずしも同等に設定する必要はないと考えます。したがって、破壊靱性データのばらつきに対して、異なるパラメータである脆化予測における ΔRT_{NDT} に対するばらつきの 2 σ に合わせる必要はないと考えます。

53 ページ : 4.1.11 (3) ② 1) (c)

(技術評価書案記載事項)

中性子照射後の破壊靱性データを使用した Wallin の評価方法を用いた評価結果では、 K_{Ic} 式の圧延材の破損確率(下回る確率)は 2.7%であるのに対し、 T_0 式は 4.1%と高くなっている。また、圧延材は、鍛鋼品及び溶接金属と傾向が異なる(表 4.1.11-4 参照)。

(コメント No.5)

表 4.1.11-4 は、 T_0 式ではなく、 T_{30} 式に対する結果であり、記載すべき場所が異なります。

53 ページ : 4.1.11 (3) ② 1) (d)

(技術評価書案記載事項)

「RF-4222 破壊靱性遷移曲線の設定」の T_0 に基づく破壊靱性遷移曲線の設定において・・・(中略)・・・(c)で述べたように温度軸についてマスターカーブ法の信頼下限 5%と置き換えた正規分布での片側 45%信頼幅は同じではないので、係数 1.65 の採用については更なる妥当性の説明が必要である。また、 σ_M の値は、 T_{30} 式で用いる M_p の算出において用いる 24°C であり、係数 1.65 を含めて今後の検討が望まれる。

(コメント No.6)

図 4.1.11-4 では、マスターカーブ法の温度方向の平均値と分散を同じとした正規分布に置き換えた場合のグラフが示されていますが、両者の確率分布には必ず差が生じますので、4.1.11(3)②1)(c)で記載されたことは、このような正規分布に置き換えた場合の一例に過ぎません。このような状況から、JEAC4206-2016 で設定した M_k については、メジアンから評価上重要となる 5%信頼下限までの温度差が一致するような正規分布に置き換えるとともに、モンテカルロ計算等により妥当性を確認しています。

54 ページ : 4.1.11 (3) ② 1) (d)

(技術評価書案記載事項)

M_k の算出式 ($M_k = 1.65 \times \{(\sigma_M^2 + \sigma_o^2 + \sigma^2)^{1/2} - \sigma_M\}$ ・(12)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、 $\sigma_o^2 + \sigma^2 < 3\sigma_M^2$ の範囲では{ }内の値が σ_M よりも小さくなる。数値を代入すると、 $\sigma_{T_o} > 40.5^\circ\text{C}$ の場合にのみ σ_M より大きなマージン M_k となるので誤差の算出方法としては妥当とはいえず、 σ_o の値によっては算出式を変えるなど、今後の検討が望まれる。

(コメント No.7)

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、その付加するマージンとして M_o を設定しています(図 7-1 参照)。また、マスターカーブの T_o 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_o 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実さ(σ)及び T_o の誤差(σ_o)が付加された場合の破壊靱性のばらつきは、 $\sqrt{(\sigma_M^2 + \sigma_o^2 + \sigma^2)}$ 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 $1.65 \times \{\sqrt{(\sigma_M^2 + \sigma_o^2 + \sigma^2)} - \sigma_M\}$ 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_o 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。(添付資料-1)

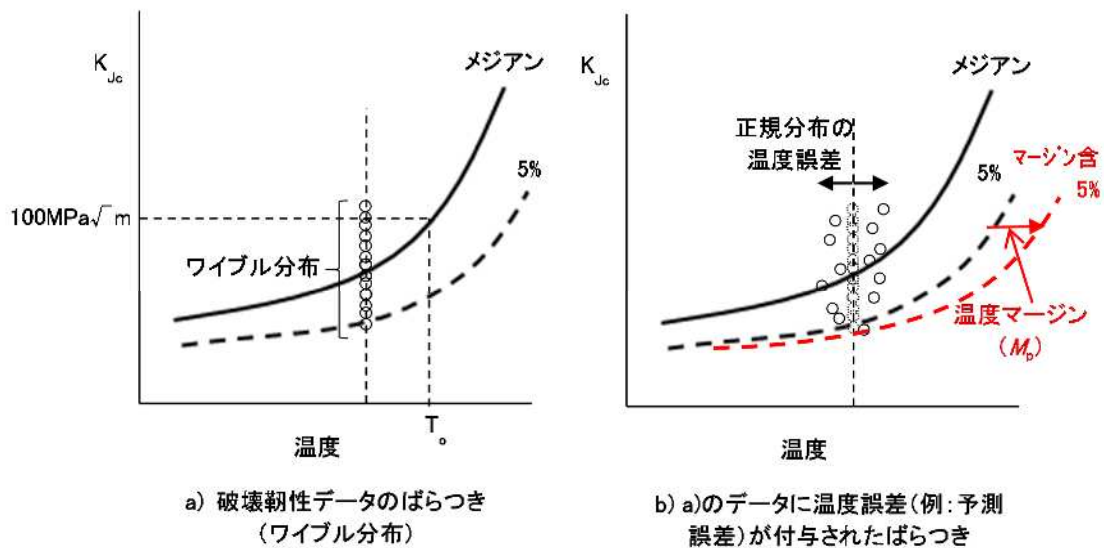


図 7-1 脆化予測による予測誤差を考慮したマージン (M_p)

56, 57 ページ : 4.1.11 (3) ② 2) (a)

(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。

(コメント No.8)

T_{r30} 式は、マスターカーブそのものではなく、 T_{r30} で規格化するとともに、高照射領域のデータで ΔT_e を設定していますので、 T_{r30} 式に対する破壊靱性データの比率により示した図 4.1.11-6 では形状母数4のワイブル分布に従うとは限りません。しかしながら、評価に使用する5%信頼下限では、データに対して保守的であることから、 T_{r30} 式を評価に使用できるものと判断しています。

60 ページ : 4.1.11 (3) ② 2) (b)

(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圧延材以外の 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り、また、圧延材とそれ以外との間で傾向が異なるということであり、照射量が $5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える将来予測に用いるのは適切とはいえず、今後の検討が必要である。

(コメント No.9)

ΔT_t に照射量依存性があることから、60 年運転時の照射量も踏まえて、 $5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 以上の照射量のデータで ΔT_t を設定したものであり、今後検討すべき課題はあるものの、評価には使用できるものと考えます。また、圧延材とそれ以外との間で傾向が異なることから、それぞれに対して ΔT_t を設定することで、精度よく評価が行えるものと考えます。

60 ページ : 4.1.11 (3) ② 2) (b)

(技術評価書案記載事項)

なお、図 4.1.11-6 に示す横軸 $T-T_{30}$ の T_{30} には未照射データ及び照射データの実測値が使用され(9)式に示す M_c 補正はされていないが、 M_c はプラント毎の初期値補正項であるので、 M_c 補正ありの図を参考として示し ΔT_t の妥当性を確認することが望まれる。また、図 4.1.11-5 に示す破壊靱性データワイブルプロットは図 4.1.11-6 を元に行っているため、規格改定の際には同様に M_c 補正ありの図を参考として示すことが望まれる。

(コメント No.10)

冒頭の“図 4.1.11-6”の記載は、正しくは“図 4.1.11-7”と思われます。

M_c 補正を行った T_{30} 予測値を使用したグラフは、照射後データを対象に第2回検討チーム会合資料 2-1 の P.13 に示すとともに、同資料 P.14 に示すように、照射後データに対する包絡性等を確認することにより、破壊靱性遷移曲線の妥当性を確認しています。コメント No.8 で説明いたしました通り、 T_{30} 式は必ずしも形状母数 4 のワイブル分布に従うとは限りませんので、ワイブルプロットではなく、上記のように包絡性等により保守性や妥当性を確認することとしています。

62 ページ : 4.1.11 (3) ② 2) (c)

(技術評価書案記載事項)

ただし、図 4.1.11-4 に示すように、 $T-T_0$ についてのマスターカーブ法の確率密度分布は

正側の裾の厚みが正規分布のものよりも大きい特徴があるので、正規分布の片側 5%信頼下限である 1.65 σ を適用することの妥当性については検討が望まれる。

(コメント No.11)

コメント No.6 をご参照願います。

62 ページ : 4.1.11 (3) ② 3)

(技術評価書案記載事項)

T_0 式及び T_{30} 式は、マスターカーブ法をベースに策定された式であるが、確率分布の 5%信頼下限を採用しており、正規分布に換算した場合 2σ より低い信頼下限となっている。

(コメント No.12)

コメント No.6 をご参照願います。

62 ページ : 4.1.11 (3) ② 3)

(技術評価書案記載事項)

日本電気協会は、ASME K_{lc} カーブとの比較や海外での適用状況を踏まえて 5%信頼下限に設定したとしているが、…(中略)…ASME K_{lc} カーブと異なる。データの 5%信頼下限に対する包絡率だけでなく、破壊靱性確認方法 2007 と同等あるいはそれ以上の安全レベルを有しているかという観点も重要であり、 ΔT_t の設定に検討の余地がある。破壊靱性遷移曲線の形状として、なぜ 5%信頼下限曲線の形状を選定したかについては、技術的根拠が示される必要がある。また、 ΔT_t の設定には…(中略)…5%信頼下限を用いて評価することの妥当性について丁寧な説明が必要である。

(コメント No.13)

破壊靱性確認方法 2007 との比較は、図 4.1.11-1 に示しているとおり、大部分のプラントで T_{30} 式がより保守的であることを確認しています。

また、破壊靱性の 5%信頼下限で評価するには、5%信頼下限の曲線を使うのが適切と考えています。

62 ページ : 4.1.12

(技術評価書案記載事項)

健全性評価の許容基準について、一般評価は「RF-4223 許容基準」に、詳細評価は「RF-4233 許容基準」に規定している。

(コメント No.14)

4.1.12 節の冒頭で示されている RF-4223, RF-4233 は供用状態 C 及び D に対する許容基準であり、それに限定した記載のように受け取れますが、4.1.12 (1)①には供用状態 A 及び B の健全性評価に係る規定について記載されているため、修正が必要と思われます。

64 ページ : 4.1.12 (3) ①

(技術評価書案記載事項)

また、(2)式に示す T_o 決定の際の有効な試験片の個数 r については、参照温度試験方法において「有効な K_{Jc} の必要個数」が試験温度の範囲により異なることから、「有効な K_{Jc} の必要個数」との関係により補正する等の検討が必要である。

(コメント No.15)

RF-2100 の(2)式の係数 $(K_{Jc(med)}-20) / (K_{Jc(med)}-30)$ と、温度範囲に応じた有効試験片数の規定は同一の根拠に基づいています。有効試験片の必要数 r は、低温域(本来は低靱性域)でマスターカーブの破壊靱性の温度依存性が小さくなるので、同等の精度となるよう、増える(6→7→8)わけですが、(2)式の右辺にある係数 $(K_{Jc(med)}-20) / (K_{Jc(med)}-30)$ が同じ機能を持っております。従いまして更なる補正は必要ありません。

73 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 $K_{Jc(med)}$ 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、「いずれのケースにおいても二つの母集団分布が同一であるとする帰無仮説は採択された」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.16)

ここで記載されている検定は日本電気協会が自発的に行ったものではなく、原子力規制庁からの強い要望に従い実施した検定ですので、そのことが分かるよう、「これに関し、日本電気協会は、原子力規制庁の要請に応じ、各試験片で得られた・・・」などと明示願います。

75 ページ : 4.2.2 (2) (b)

(技術評価書案記載事項)

しかし、同文献によれば、SQV2A(Heat 2)の試験温度 -80°C におけるデータは 12 個あり、Invalid データは 1 個である。試験温度別にサンプル分けした -80°C のデータセットにたまたま低い破壊靱性のものが集中したとすると、4.2.9 項の(1)式に示すサンプル数に依存するばらつき σ_0 のみで 20°C の差を説明するのは困難なので、同程度のばらつきは発生しうるものとして補正をする方法もある。

(コメント No.17)

この段落は、この前の段落と全く別のことを取り扱っているため、冒頭の「しかし、」は不要ですので削除願います。

また、後半の「補正をする」との表現は、旧来の下限包絡の考え方であってマスターカーブ法による確率論的な定量評価にそぐわないものですので、文末を「・・・同程度のばらつきは発生しうることを認識する必要がある」などと変更いただきたいと思えます。

76 ページ : 4.2.2 (2) (b)

(技術評価書案記載事項)

ばらつきの小さい SFVQ1A 鋼のみでほぼ同等の T_0 とみなすことについては、更なる調査が必要と考えられる。

(コメント No.18)

「ばらつきの小さい SFVQ1A 鋼のみでほぼ同等の T_0 とみなす」との認識は誤りですので、削除願います。マスターカーブ法においては、破壊靱性のばらつきは材料によらず一定です

ので、鋼種によってばらつきが異なると考えることは適切ではありません。SQV2A においてイレギュラーなデータがあったことに対するコメントであれば「図 4.2.2-4 の 0.4T-C(T)で外れ値が観測された SQV2A については、追加の検証が必要と考えられる。」などと変更いただきたいと思います。

94 ページ : 4.2.9 (2)

(技術評価書案記載事項)

これに関し、日本電気協会は、ASTM E1921 と同じ技術根拠に基づいて求めたものであり、…(中略)…。また、 $(T-T_0)$ の範囲が $-14\sim+50^{\circ}\text{C}$ での有効な K_{Jc} の必要個数 6 個と $-50\sim-36^{\circ}\text{C}$ での同 8 個は必要最低数での重み係数の点から信頼性(ばらつき)は同等とみなすことが適当と考えられるので、(1)式中の有効試験片数 r は試験温度による違いを考慮する必要がある。

(コメント No.19)

コメント No.15 と同様の理由で、試験温度による r の要求個数の違いは P.94 の(1)式に織り込まれており、更なる考慮は必要ありません。当該部分については、例えば次のように修正をご検討願います。

「 $(T-T_0)$ の範囲が $-14\sim+50^{\circ}\text{C}$ での有効な K_{Jc} の必要個数 6 個と $-50\sim-36^{\circ}\text{C}$ での同 8 個は、必要最低数における重みを考慮したものであり、式(1)では右辺の $(K_{Jc,med}-20) / (K_{Jc,med}-30)$ が相当する。」

96 ページ : 4.2.10 (2)

(技術評価書案記載事項)

複数試験温度法は重み係数を用いて計算するため、温度の実測値を用いて計算することも可能である。測定温度を試験温度とすると参照温度の精度が最大 6°C 改善するが、複数試験温度法で参照温度を求める場合は繰り返し計算する必要があるものの、パソコン等で容易に計算できることから測定温度を試験温度とし、複数試験温度法で参照温度を算出する等方法について、今後検討することが望まれる。

(コメント No.20)

下線部の根拠が示されていません。またこの部分は日本電気協会の示したデータではありませんが、日本電気協会が最大 6°Cの差が生ずることを示したようにも取れる表現となっています。原子力規制庁による見解であることを明示願います。

100 ページ : 4.2.12 (2) (b)

(技術評価書案記載事項)

また、国内 PWR プラント監視試験で取得した中性子照射後の破壊靱性データを用いてワイブルプロットした結果を図 4.2.12-3 及び図 4.2.12-4 に示す。鍛鋼品の材料毎のプロットは、直線ではないものの、概ね形状母数 4 の直線に乗っている。また、全材料のプロットも同様に概ね形状母数 4 の直線に乗っている。なお、圧延材と溶接金属については、データが提示されなかった。

(コメント No.21)

マスターカーブ法においては、破壊靱性のばらつきは材料によらず一定ですので、鋼種によってばらつきが異なると考えることは適切ではありません。ここでは、鋼種毎の検証は不要ですので、下線部の削除をご検討願います。

104 ページ : 5.1 (1) ③

(技術評価書案記載事項)

K_{Jc} 式と T_0 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 K_{Jc} 式の方が低くなっていたが、圧延材については高くなっており傾向が異なる。しかし、その理由については検討されていない。

(コメント No.22)

技術評価書案の表 4.1.11-4 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。

傾向が異なるので、圧延材、鍛鋼品、溶接金属と分けて ΔT_t を設定して、より精度よく評価できるようにしたものです。今後データを拡充し、傾向が異なる理由を検討する等、より精度

よく評価できるように検討を行いますが、傾向が異なる理由が明確でないことは、破壊靱性遷移曲線の適用性に疑義を与えるものではないと考えています。

104 ページ : 5.1 (1) ④

(技術評価書案記載事項)

T_{r30} 式に使用する補正温度 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鍛鋼品および溶接金属については ΔT_t が高くなり定数にならないが、その理由については検討されていない。

(コメント No.23)

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考えます。

また、 ΔT_t の照射量の依存性が認められる理由が明確でないことは、破壊靱性遷移曲線の適用性に疑義を与えるものではないと考えています。

106 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)

これまでも説明している通り、限定で公開されている論文は技術根拠となっております。下線部は削除願います。

175 ページ : 添付資料-4 4.

(技術評価書案記載事項)

それぞれで異なる結果が出るのは標本数が少ないことが関係していると思われるので、今後データの拡充を促進することが望まれる。

(コメント No.25)

本記載は「マスターカーブ法に従う分布の確認」ではなく「統計的検定を満足させること」が目的となっており、適切ではないと考えられます。「標本数が少ないことが関係していると思われる、本データセットに対して統計的検定を適用するのは適切ではない。」などと変更いただきたいと思います。

以上

PTS 評価用破壊靱性遷移曲線のマージン M_p と M_{kte}

	①破壊靱性データのばらつきのみの場合	② T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線	③ T_0 に基づく破壊靱性遷移曲線
マージン設定のイメージ図	<p>温度 70MPa√m で 40.2°C ⇒ $\sigma_M = 24^\circ\text{C}$ に設定</p>	<p>マージン含 5%</p>	<p>マージン含 5%</p>
破壊靱性データのばらつき (σ_M)	<p>マスターカーブの 5%信頼下限の式を使用することにより考慮 (注: M_p と M_k の設定にあたっては、他のばらつきと組み合わせるため、PTS 事象の k_I と接する 70MPa√m のメジアンカーブと 5%カーブの温度差 (40.2°C) が $1.65\sigma_M$ であると仮定し (正規分布の 5%信頼下限はメジアン + 1.65σ (図 1 参照)), 破壊靱性データの温度方向のばらつきの標準偏差 σ_M を 24°C に設定)</p>		
脆化予測における不確かさ (σ)	—	<p>JEAC4201-2007(2013 年追補版)の国内脆化予測法の監視試験データに対する予測誤差 (補正無し)の標準偏差 $\sigma(9.5^\circ\text{C})$ を使用</p>	
T_0 の設定における不確かさ (σ_{T_0})	—	—	<p>破壊靱性データ数及び $K_{Jc(\text{med})}$ に基づく σ_{T_0} の式で計算</p> $\sigma_{T_0} = \frac{(K_{Jc(\text{med})} - 20)}{(K_{Jc(\text{med})} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}}$
5%信頼下限の式を使用する場合の追加のマージン (M_p 及び M_k)	—	<p>正規分布の 5%信頼下限はメジアン + 1.65σであり (図 1 参照), 誤差伝播の法則に基づく σ_M 及び σ を考慮したばらつきから, 5%信頼下限を使用することによる破壊靱性データのばらつき (σ_M) を差し引き設定</p> $M_p = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma^2} - \sigma_M) \cong 3.0 (^\circ\text{C})$	<p>正規分布の 5%信頼下限はメジアン + 1.65σであり (図 1 参照), 誤差伝播の法則に基づく σ_M, σ 及び σ_{T_0} を考慮したばらつきから, 5%信頼下限を使用することによる破壊靱性データのばらつき (σ_M) を差し引き設定</p> $M_k = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2} - \sigma_M)$

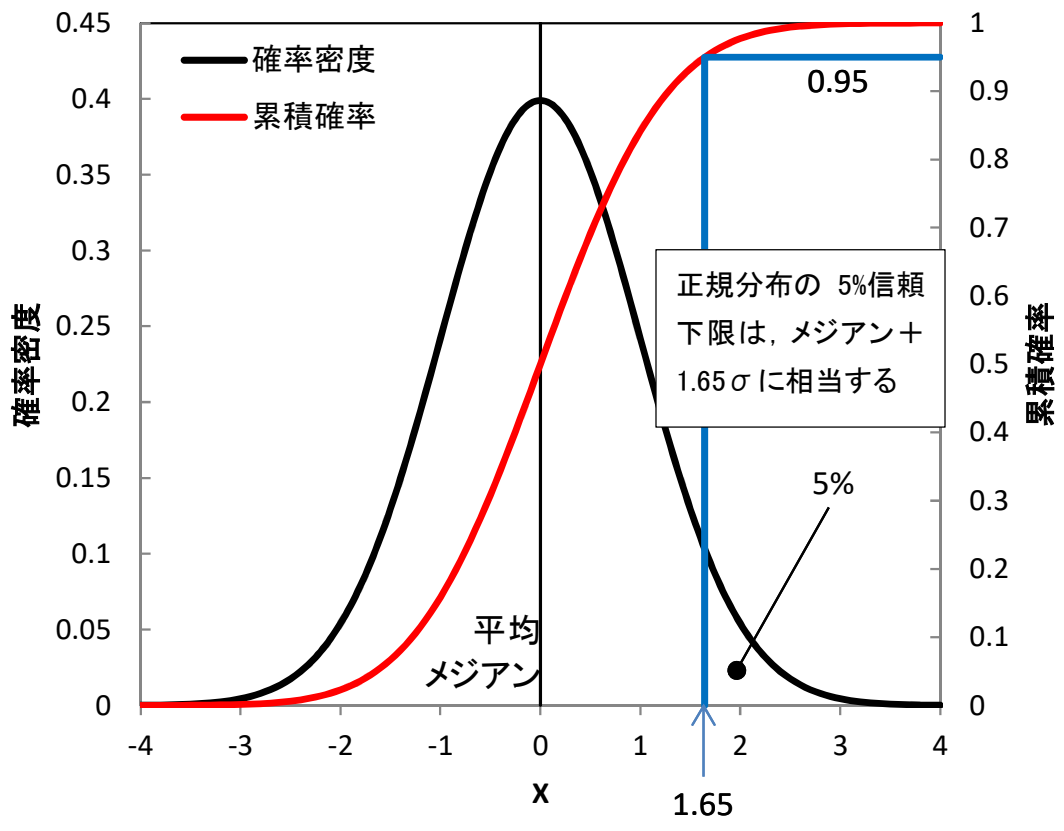


図 1 標準正規分布

(2) (8)式における ΔT_t 及び M_p 並びに(10)式における M_k を算出したプロセスについて、詳細が分かるような資料を提示して下さい。説明には、(10)式でマージンを 2 乗和平方根で表せるとした技術的根拠、 σ_k 、 σ 、 σ_o の設定根拠と計算プロセスが分かる資料を含んで下さい。

回答(2)

a. ΔT_t を算出したプロセス

第2回検討チーム会合資料 2-1「PTS 評価用破壊靱性遷移曲線について」の P7 に示した通り、 T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線の評価式((8)式)は 5%信頼下限のマスターカーブの式において、 T_o を $T_{r30} + \Delta T_t$ に置き換えて設定したものです。 ΔT_t については、同資料の P9 に示したとおり、高照射領域($5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 以上)の破壊靱性データに対して、圧延材、鍛鋼品、溶接金属のそれぞれについてメジアンカーブにフィットするように最尤推定法により求めました。 ΔT_t の具体的な算出手順については同資料の添付 5 に示したとおりです。

b. M_p を算出したプロセス

PTS 評価用破壊靱性遷移曲線は、 T_{r30} 実測値をベースに設定したものであり、 T_{r30} の値として評価時期の照射量を考慮して算出した T_{r30} 予測値を用いる場合には、予測に伴う不確かさ(予測誤差)を考慮して適切な温度マージン(M_p と呼称)を付加する必要があります(図 2-1)。

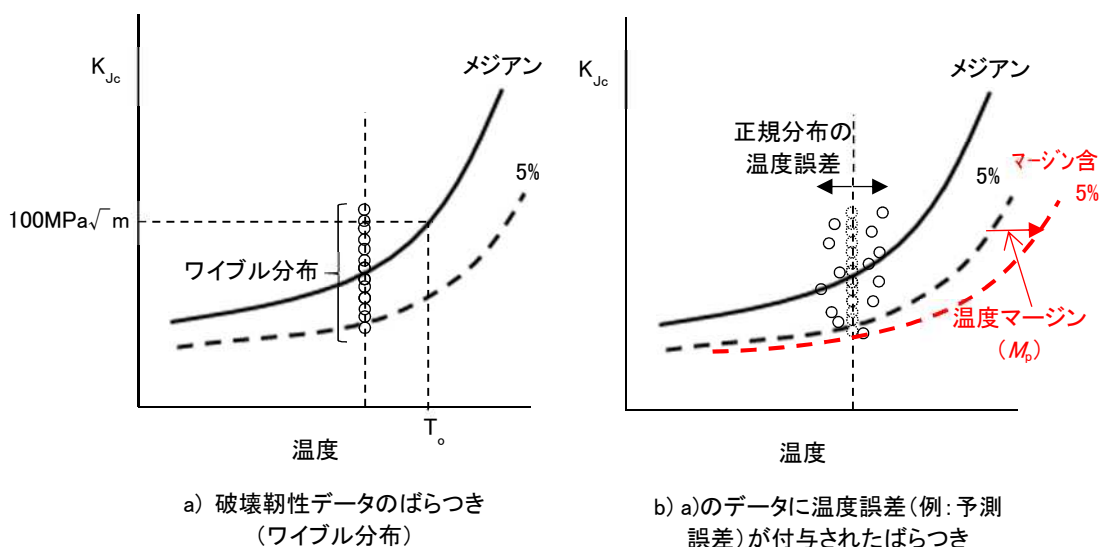


図 2-1 脆化予測による予測誤差を考慮したマージン (M_p)

M_p の値については、1)に示す誤差伝播の法則から設定した M_p の妥当性を、2)に示すモンテカルロ計算及び 3)に示す脆化予測法により予測した T_{r30} 予測値で整理した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と Wallin の評価法による破損確率を確認することにより、3°Cと設定しました。

1) 誤差伝播の法則による M_p の設定

- a) マスターカーブのワイブル分布に従う破壊靱性のばらつきを他のばらつきと同列に扱えるように温度軸方向の正規分布(標準偏差: σ_M)に置き換えました。図 2-2 より、PTS 評価の K_{Ic} と接する付近の $K_{Jc}=70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ での $K_{Jc(\text{med})}$ と 5%信頼下限の $K_{Jc(0.05)}$ の温度差は 40.2°Cであり、正規分布の 5%信頼下限はメジアン+1.65 σ であることから、破壊靱性のばらつきの温度軸方向の標準偏差 σ_M を 24°C(40.2÷1.65=24.4を切り捨て)に設定しました。

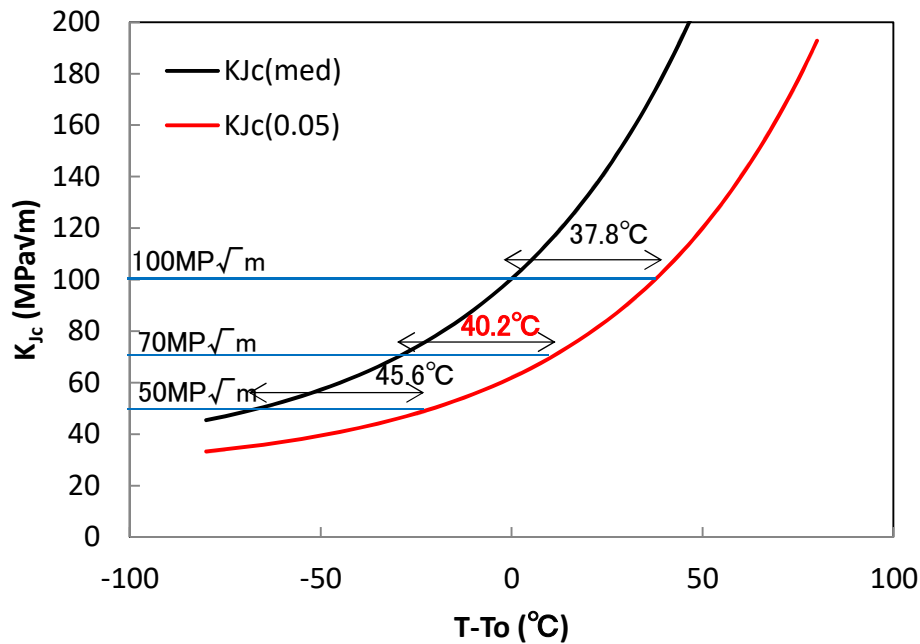


図 2-2 マスターカーブの $K_{Jc(\text{med})}$ と $K_{Jc(0.05)}$ の温度差

- b) a)により温度軸方向の正規分布に置き換えた破壊靱性のばらつき(標準偏差: σ_M)に脆化予測による予測誤差(標準偏差: σ)が加わることによる 5%信頼下限カーブ(メジアン+1.65 σ 相当)に対する追加のマージン M_p として、誤差伝播の法則から以下の式で設定しました。ここで、 σ については、JEAC4201-2007 [2013 年追補版]の脆化予測法による予測残差の標準偏差から 9.5°Cとしました。

$$M_p = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma^2} - \sigma_M) = 1.65 \times (\sqrt{24^2 + 9.5^2} - 24) = 2.99 \approx 3.0 (\text{°C})$$

2) モンテカルロ計算による M_b の妥当性の確認

第 2 回検討チーム会合資料 2-1「PTS 評価用破壊靱性遷移曲線について」の P10,11 に示した通り、破壊靱性のばらつきと脆化予測による予測誤差を与えた 100 万回のモンテカルロ計算を行った結果、設定した $M_b: 3^\circ\text{C}$ を考慮することにより 5%信頼下限を下回る確率が概ね 5%となり、適切に評価できることを確認しました(表 2-1)。

表 2-1 モンテカルロ計算による破壊靱性データが 5%信頼下限カーブを下回る確率

T-T ₀ (°C)	5%信頼下限カーブを下回る確率		
	予測誤差が無い場合	予測誤差がある場合	予測誤差がある場合にマージン 3°Cを考慮した場合
-50	5.00	5.79	4.90
0	5.00	6.04	4.98
+50	5.02	6.19	5.05

3) 照射後破壊靱性データによる M_b の妥当性の確認

第 2 回検討チーム会合資料 2-1「PTS 評価用破壊靱性遷移曲線について」の P12 ~ 14 に示した通り、脆化予測法により予測した T_{r30} 予測値で整理した照射後破壊靱性データの破壊靱性遷移曲線を上回る確率及び Wallin の評価方法による破損確率を求めた結果、設定した $M_b: 3^\circ\text{C}$ を考慮した T_{r30} 予測値を用いれば、PTS 評価用破壊靱性遷移曲線が 5%信頼下限として適切に設定できることを確認しました(表 2-2)。

表 2-2 照射後破壊靱性データによる信頼性評価結果

破壊靱性遷移曲線		対象データ		遷移曲線を上回る確率 (%)	Wallin の評価方法
材料	ΔT_t (°C)	全データ	遷移曲線を上回るデータ数		破損確率(%)
母材(圧延材)	-15	230	223	97.0	4.1
母材(鍛鋼品)	8	259	257	99.2	0.9
溶接金属	14	117	116	99.1	0.9

c. M_k を算出したプロセス

(10)式における M_k についても, b. 1) a)と同様の考え方で誤差伝播の法則により以下の式で設定しました。

$$M_p = 1.65 \times (\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{T_0}^2 + \sigma^2} - \sigma_M) = 1.65 \times (\sqrt{24^2 + \sigma_{T_0}^2 + 9.5^2} - 24) (\text{°C})$$

ただし, ここでは b. 1) a)とは異なり, 破壊靱性試験により直接 T_0 を設定していることから, T_0 決定に用いた有効な試験片個数を踏まえて RF-2100 の(2)式により σ_{T_0} を計算することとしています。