

参考資料 3 - 3

「原子炉压力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法に関する
日本電気協会への説明依頼事項(その1)」に対する回答

令和元年10月18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、以下の通り回答いたします。

○説明依頼事項

1. PTS 評価に用いる破壊靱性評価遷移曲線に関する質問

次の(1)～(3)について、できるだけデータやグラフを用いて説明してください。

- (1) (8)式(「マスターカーブ法」をもとに、国内プラント用に策定した $[T_{r,30}]$ を用いた式)と(10)式(「マスターカーブ法」をもとに、国内プラント用に策定した式)を PTS 評価に適用できるかについて検討した内容を説明してください。
- (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_M 、 σ 、 σ_{T_0} 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。
- (3) (10)式に未照射材の T_0 を適用できるかについて検討した内容を説明してください。(10)式に未照射材の T_0 を用いる場合、(8)式の ΔT_t のような鋼種毎の補正值の必要性について検討した内容を説明してください。また、(8)式と、(10)式に未照射材の T_0 を用いた場合との間にどのような差異があるのか実例で示してください。

○回答

(1) (8)式(「マスターカーブ法」をもとに、国内プラント用に策定した $[T_{r30}]$ を用いた式)と(10)式(「マスターカーブ法」をもとに、国内プラント用に策定した式)を PTS 評価に適用できるかについて検討した内容を説明してください。

回答(1)

国内 PWR プラントの監視試験で取得した照射後破壊靱性データの内、表 1-1 に示す T_0 が設定可能な鍛鋼品について、(8)式の T_{r30} 予測値 (T_{r30} 初期値 + ΔRT_{NDT} 計算値 + M_c) + M_p + ΔT_t の値と、(10)式の $T_0 + M_k$ の値の差の照射量依存性を図 1-1 に示します。図 1-1 より、照射量が小さい場合には、(10)式に対して(8)式が保守的となりますが、照射量が大きい場合には、(8)式と(10)式でほぼ同等となる傾向があります。これは、 T_{r30} で規格化した時の破壊靱性データに対する照射量の依存性(第 2 回検討チーム会合資料 2-1 の P8)を踏まえて、(8)式の ΔT_t を高照射領域の破壊靱性データで設定したことと対応するものと考えられます。

(8)式の適用性等を検討した結果は第 2 回検討チーム会合資料 2-1 を参照ください。(10)式の適用性については、回答(3)を参照ください。

表 1-1 検討に使用した鍛鋼品の照射後破壊靱性データの詳細

鋼種	破壊靱性データの総数	材料数 (T_0 を設定した数)	1 材料あたりの T_0 設定に使用したデータ点数	照射量 ($\times 10^{19}$ n/cm ²)	Cu (wt.%)	T_0 (°C)	T_{r30} 予測値 (°C)
SA508 Cl.3 SFVQ1A (鍛鋼品)	220	11	16~26	2.3 ~7.2	0.02 ~0.04	-71 ~14	-48 ~-4

注) 2016 年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会にて分析

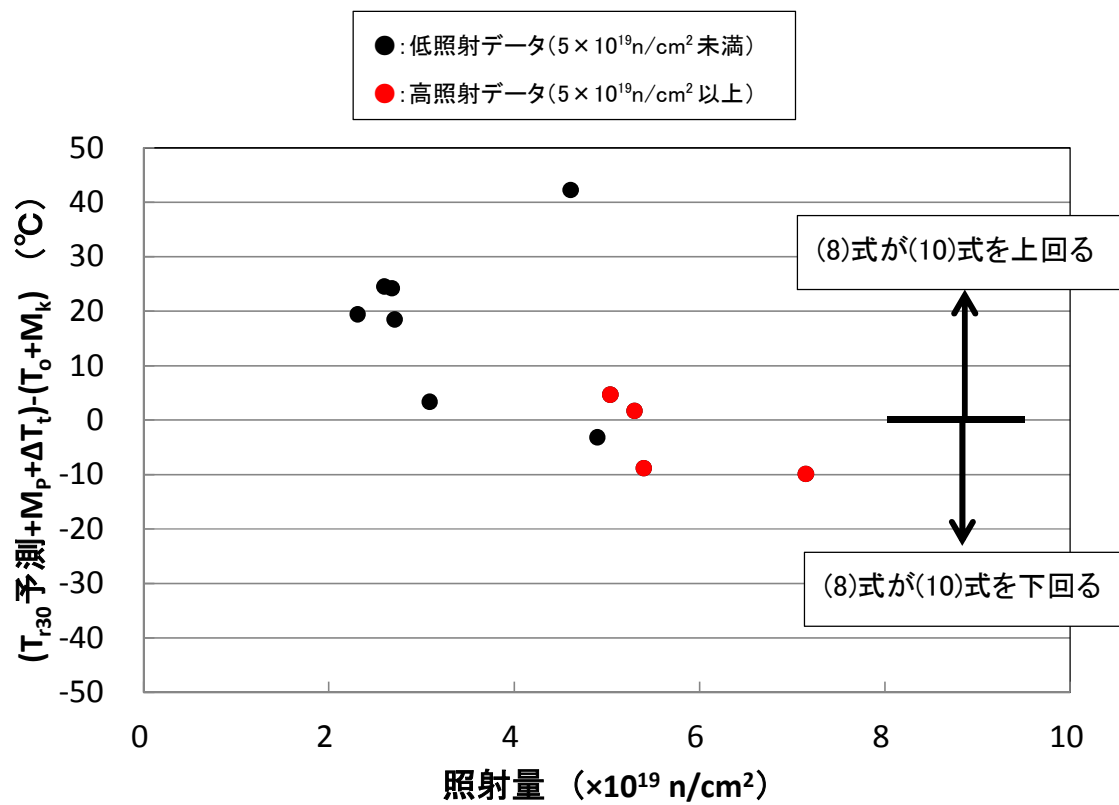


図 1-1 (8)式と(10)式の破壊靱性遷移曲線の温度差の照射量依存性

注) 2016年版の破壊靱性遷移曲線の検討の際のデータベースを用いて電気協会では分析

(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_M 、 σ 、 σ_{T_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)。

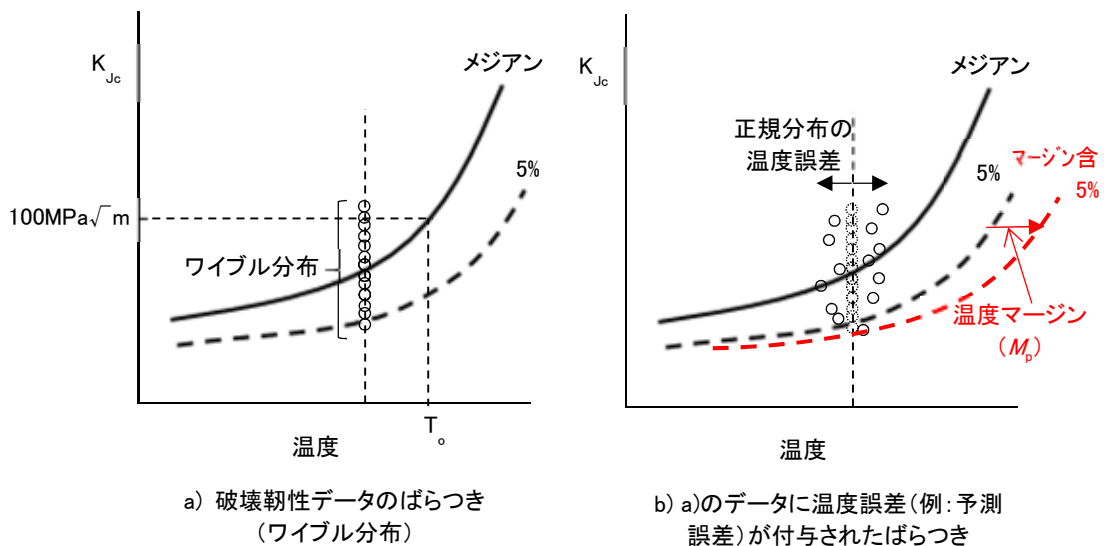


図 2-1 脆化予測による予測誤差を考慮したマージン (M_p)

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 $T_{r,30}$ 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_I 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。

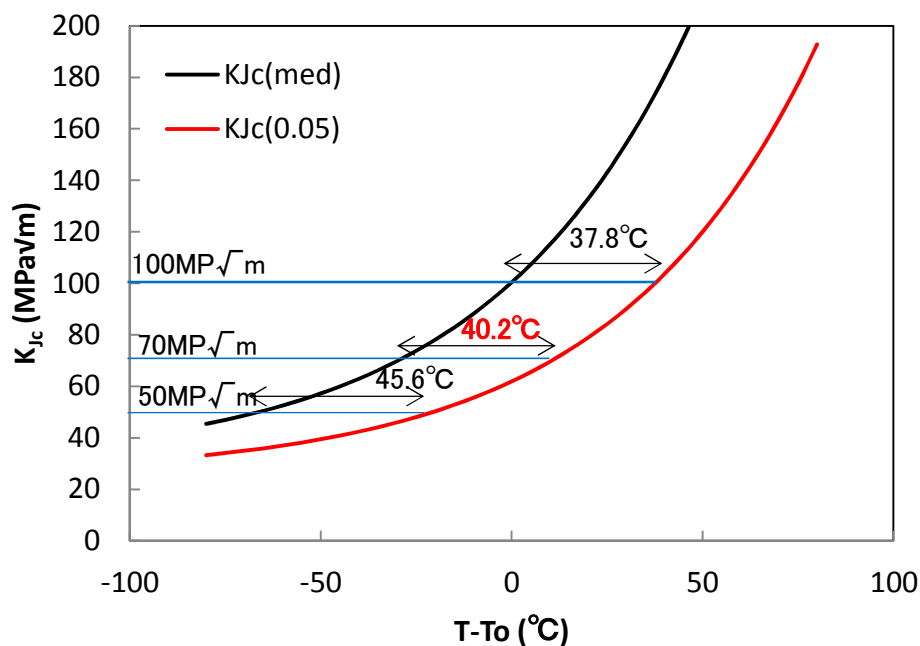


図 2-2 マスターカーブの $K_{Jc(\text{med})}$ と $K_{Jc(0.05)}$ の温度差

- 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_p 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 $M_p: 3^{\circ}\text{C}$ 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

$T - T_0$ ($^{\circ}\text{C}$)	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_p 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 $M_p: 3^{\circ}\text{C}$ 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 ($^{\circ}\text{C}$)	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。

(3) (10)式に未照射材の T_0 を適用できるかについて検討した内容を説明してください。
(10)式に未照射材の T_0 を用いる場合、(8)式の ΔT_t のような鋼種毎の補正値の必要性について検討した内容を説明してください。また、(8)式と、(10)式に未照射材の T_0 を用いた場合との間にどのような差異があるのか実例で示してください。

回答(3)

回答(1)の図 1-1 に示したように、鍛鋼品については照射量が小さい場合には(10)式による破壊靱性の参照温度は(8)式よりも低い傾向が認められ、これは未照射材でも同様と考えられます。第2回検討チーム会合資料 2-1 の P8 に示した破壊靱性データに対する照射量の依存性を踏まえると、未照射材を含む照射量が小さい材料を用いて設定した(10)式による破壊靱性遷移曲線を使用して、より照射量が大きい領域の評価に適用する場合は、非保守的な評価となる可能性があり、JEAC4206-2016 の解説-RF-4222-2 では、評価時点の照射量に近い照射量を受けた試験片から取得した T_0 を使用することを推奨事項として記載しています。ただし、現時点では T_0 が設定可能な材料は限られており、補正値を設定できるだけのデータベースが存在しないことから、JEAC4206-2016 中には鋼種毎の補正値を規定しておりません。