

**「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等に関する質問」
に対する回答**

令和2年7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、以下の通り回答いたします。

○説明依頼事項

1. JEAC4206-2016「原子炉压力容器に対する供用期間中の破壊靱性確認方法」に関する質問

「RF-2100 関連温度(RT_{NDT})」に規定する(2)式の σ_o 算出式について、分子側の20は定義値なので有効桁数は関係ないが、14.7は3桁です。分母側の30は2桁ですが算出値であり(JEAC4216-2015の附属書D、Eでは K_{Jc} の計算値は小数点以下1桁で表示されているので)小数点以下第1位表示とした方が適切ではないでしょうか。(参考:電気協会は資料4-3(4)において電力中央研究所が検討した式¹を採用したとしている。検算した結果、分子の値「14.7」については「14.8」、分母の「 $K_{Jc(med)}-30$ 」については「 $K_{Jc(med)}-30.1$ 」が得られる。)

$$\sigma_o = \frac{(K_{Jc(med)} - 20)}{(K_{Jc(med)} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

1 検討チーム会合資料4-3(4)及び同添付「参照温度のばらつきに関する検討」

2. JEAC4216-2015「フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_o 決定のための試験方法」に関する質問

(1) Mini-C(T)試験片と4T-C(T)、2T-C(T)、1T-C(T)、0.4T-C(T)試験片から得られる T_o の同等性について、2標本のコルモゴロフ-スミルノフ検定 (K-S 検定)以外に行った検定があれば、その内容を説明してください。

(2) 検討チーム会合資料5-2、85頁の「図4.2.10-2 複数試験温度法(mlt.)と単一試験温度法(sgl.)の参照温度評価結果比較」は同会合資料4-3の図6-2から転載したのですが、出典の文献によると材料は鍛鋼品 SFVQ1A 鋼のものです。鋼板材 SQV2A についてのデータがあれば提示してください。

(3) ワイブル分布の位置母数 K_{min} の根拠について、検討チーム会合資料4-2、12頁「位置母数(固定:最小破壊靱性)の根拠」の左の図で、実験事実の積み上げに基づき 20MPa

\sqrt{m} としています。Mini-C(T)試験片を用いた破壊靱性評価ラウンドロビン試験のデータを使った場合の傾向を示してください。

3. その他(第5回会合における宿題事項)

(1) DC(T)試験片でマスターカーブ法により T_0 評価を行った事例があれば示してください。

○回答

1. JEAC4206-2016「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性確認方法」に関する質問

「RF-2100 関連温度(RT_{NDT})」に規定する(2)式の σ_o 算出式について、分子側の20は定義値なので有効桁数は関係ないが、14.7は3桁です。分母側の30は2桁ですが算出値であり(JEAC4216-2015の附属書D、Eでは K_{Jc} の計算値は小数点以下1桁で表示されているので)小数点以下第1位表示とした方が適切ではないでしょうか。(参考:電気協会は資料4-3(4)において電力中央研究所が検討した式¹を採用したとしている。検算した結果、分子の値「14.7」については「14.8」、分母の「 $K_{Jc(med)}-30$ 」については「 $K_{Jc(med)}-30.1$ 」が得られる。)

$$\sigma_o = \frac{(K_{Jc(med)} - 20)}{(K_{Jc(med)} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

1 検討チーム会合資料4-3(4)及び同添付「参照温度のばらつきに関する検討」

回答1.

第4回検討チーム会合資料4-3回答(4)では、JEAC4206-2016に採用した当該式の考え方はASTM E1921と同様であることを示しました。ASTM E1921の技術根拠資料[1]のAppendix B.5 Margin Adjustmentに関連する記載があり、これによれば、分子の20は破壊靱性の下限値 K_{min} として定義されている $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、また、分母の30はマスターカーブの温度依存性曲線、

$$K_{Jc(med)} = 30 + 70 \exp [0.019 (T - T_o)]$$

の切片として定義されている $30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であることがわかります。従いまして、分母、分子ともに整数で問題ございません。ただし、ここでは式(2)の導出過程において

$$\Gamma(1/b + 1) / \{\ln(2)\}^{1/b} \cong 1 \quad (b \text{ はワイブル指数であり } 4)$$

と置く近似がなされております。この近似の有無による σ_o の算出結果は図1-1に示す通りであり、差はほとんど認められません。

また、分子の値「14.7」は、次式であり「14.7」で問題ありません。

$$\{\Gamma(2/b + 1) - \Gamma^2(1/b + 1)\} / [0.019\{\ln(2)\}^{1/b}] \cong 14.7 \quad (b \text{ はワイブル指数であり } 4)$$

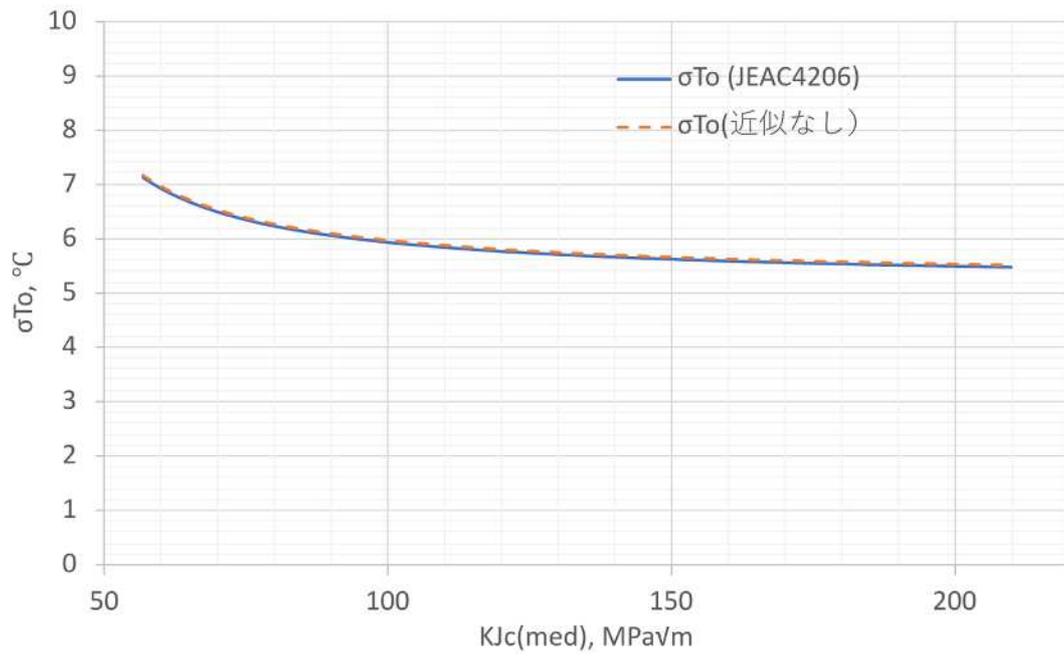


図 1-1 近似 $(\Gamma(1/b + 1)/\{\ln(2)\}^{1/b} \cong 1)$ の有無による σ_o の比較

2. JEAC4216-2015「フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法」に関する質問

- (1) Mini-C(T)試験片と 4T-C(T)、2T-C(T)、1T-C(T)、0.4T-C(T)試験片から得られる T_0 の同等性について、2標本のコルモゴロフ-スミルノフ検定 (K-S 検定)以外に行った検定があれば、その内容を説明してください。

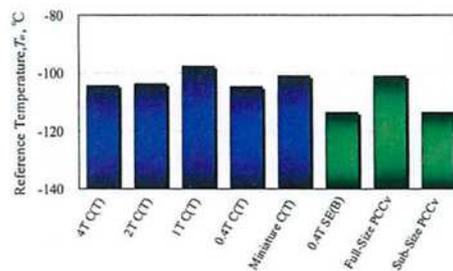
回答2. (1)

特にございません。

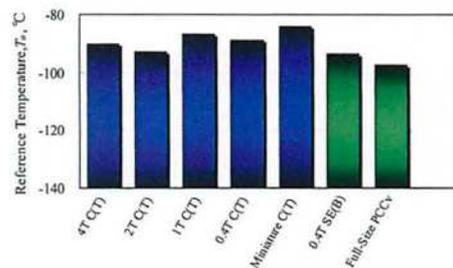
(2) 検討チーム会合資料 5-2、85 頁の「図 4.2.10-2 複数試験温度法(mlt.)と単一試験温度法(sgl.)の参照温度評価結果比較」は同会合資料 4-3 の図 6-2 から転載したのですが、出典の文献によると材料は鍛鋼品 SFVQ1A 鋼のものです。鋼板材 SQV2A についてのデータがあれば提示してください。

回答2. (2)

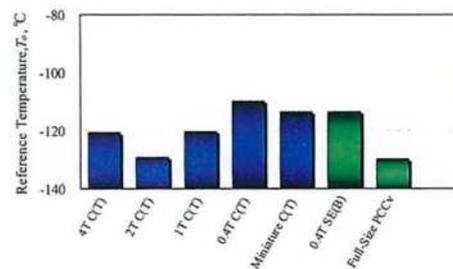
JEAC4216-2015 から技術根拠論文として引用されている公開文献[2]には、SFVQ1A とともに 2 ヒートの SQV2A のデータも記載されています。(図 2.2-1)



(a) SFVQ1A forging



(b) SQV2A (Heat 1) plate

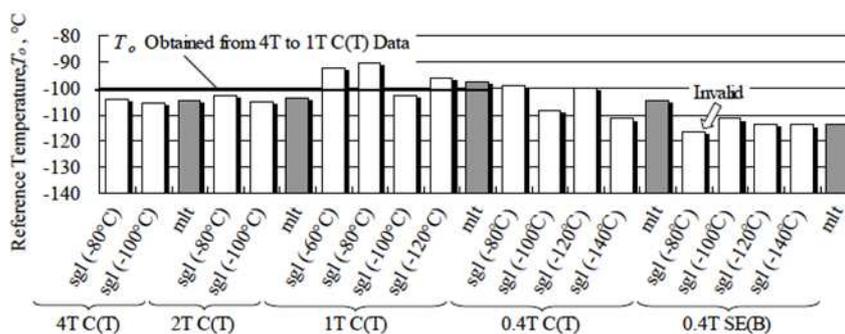


(c) SQV2A (Heat 2) plate

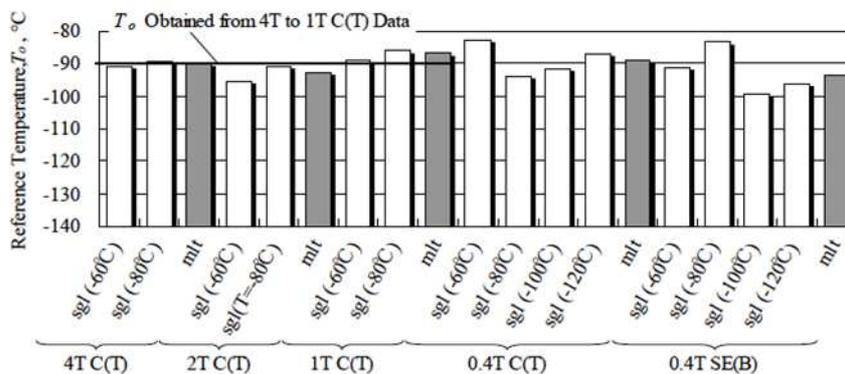
Fig. 13 Effect of specimen type and size on reference temperature: (a) SFVQ1A forging; (b) SQV2A (Heat 1) plate; and (c) SQV2A (Heat 2) plate

図 2.2-1 様々な寸法の非照射材試験片による破壊靱性データ[2]

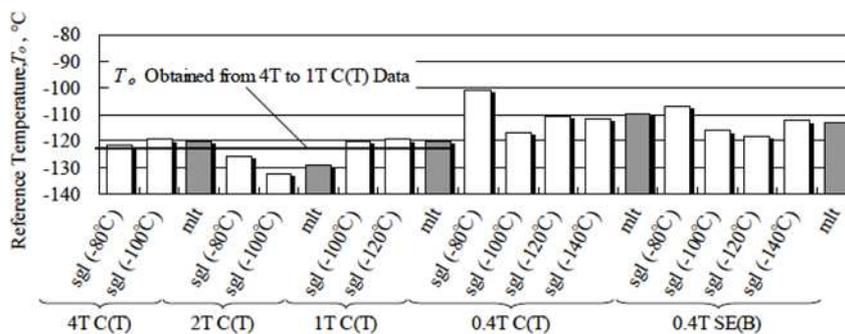
上記の 3 材料について個々の試験温度別に T_0 を評価した結果は文献[3]に示されています(図 2.2-2)。SQV2A の Heat 2 では、0.4T-C(T)試験片で試験温度(-80°C)の単一試験温度法による評価の結果が平均的な値より 20°C程度、また 0.4T-C(T)試験片の複数試験温度法の結果より 9°C高い値となっています。0.4T-C(T)試験片について、単一試験温度法の結果(試験温度:-80°C, -100°C, -120°C, -140°C)を比較すると、温度の変化に対して系統的な T_0 の変化はなく、データセットごとの評価結果の分布において、試験温度が-80°Cのデータセットでは破壊靱性の低い試験結果が得られたものと推察されます。



(a) SFVQ1A



(b) SQV2A Heat 1



(c) SQV2A Heat 2

図 2.2-2 単一試験温度法および複数試験温度法による T_0 の推定結果[3]

なお、マスターカーブ法における一般的な傾向として、 $T-T_0$ が高く、 $K_{Jc(limit)}$ を上回る無効データが多い場合、(1)少ないデータ点で T_0 の推定を行う、(2)ワイブル分布の中央から離れた裾野のデータからカーブ全体の推定を行う、こととなりますので、より低温で試験する場合と比べて個々のデータ点の影響を受けて評価値が揺らぐ可能性があります。図 2.2-3 は一例としてある圧力容器鋼(非照射)のマスターカーブと0.4T-C(T)試験片に対する $K_{Jc(limit)}$ を示します。 $T-T_0$ が高い場合には得られた破壊靱性データの多くが無効データとなるものと推測されます。文献[3]の著者は広い温度範囲におけるマスターカーブ法の成立性を評価するために広い温度範囲でデータを取得したものと思われるが、実際の評価では、より精度の高い評価結果を得るために、無効データが大きな割合を占めないよう比較的低温側の試験温度を選ぶと思われる。

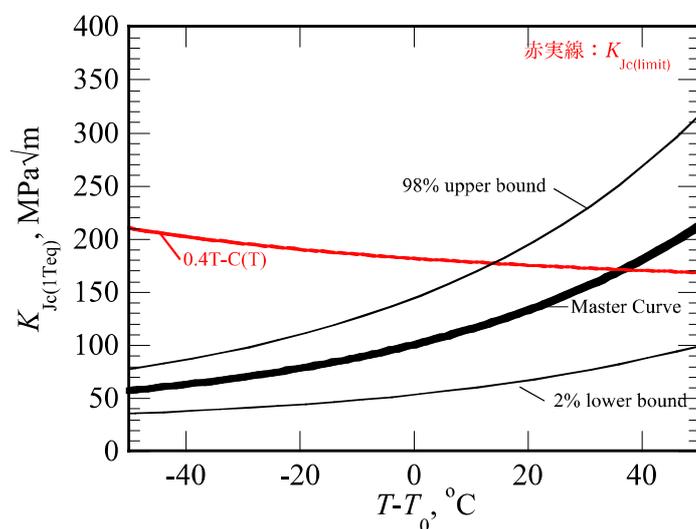


図 2.2-3 0.4T-C(T)試験片における $K_{Jc(limit)}$ とマスターカーブの関係の一例

(3) ワイブル分布の位置母数 K_{min} の根拠について、検討チーム会合資料4-2、12 頁「位置母数(固定:最小破壊靱性)の根拠」の左の図で、実験事実の積み上げに基づき $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ としています。Mini-C(T)試験片を用いた破壊靱性評価ラウンドロビン試験のデータを使った場合の傾向を示してください。

回答2. (3)

Mini-C(T)試験片によるラウンドロビン試験[4]では、単一の試験温度、同一の材料(SFVQ1A)で多くの試験データが取得されていますが、同文献中には K_{min} の傾向を示した結果は報告されておられません。図 2.3-1 は文献[4]の主著者による参考図であり、試験で得られた破壊靱性(横軸)とワイブル指数 4 を仮定した場合の破壊靱性の分布(縦軸)の関係を示します。同図中で有効データ(○印)が直線上に並ぶことは、ワイブル指数=4 の仮定にデータセットが従っていることを、また、座標(20, 0)を通過する直線に有効データが従うことは、 $K_{min} = 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の仮定にデータセットが従っていることを意味します。図 2.3-1 より、有効データ(○印)は座標(20,0)を通過する直線に沿う傾向を示しており、Mini-C(T)試験片によるデータセットについても $K_{min} = 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の仮定が良好な近似を与えられます。

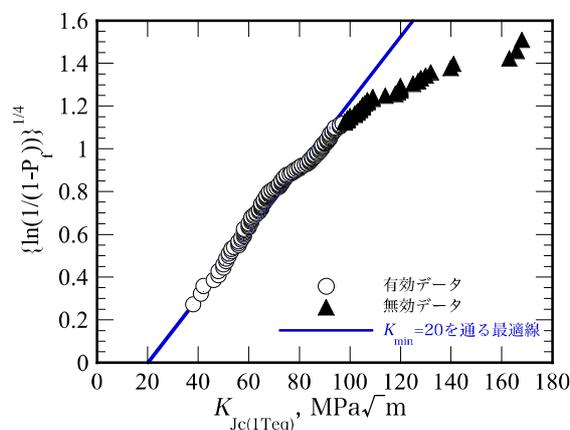


図 2.3-1 文献[4]のラウンドロビンデータに基づく K_{min} の傾向確認のための参考図

なお、本回答の内容は JEAC4216-2015 の技術根拠資料ではなく、また、本回答2. (3)の有無が JEAC4216-2015 の信頼性に影響を及ぼすことはありません。

3. その他(第5回会合における宿題事項)

(1) DC(T)試験片でマスターカーブ法により T_0 評価を行った事例があれば示してください。

回答3. (1)

米国 B&W 社が J-R 特性を取得するための監視試験片として DC(T)試験片を採用しています。同試験片によるマスターカーブ法評価結果は文献[5]にあります。ここでは照射された溶接金属(表 3.1-1)についてマスターカーブ法評価がなされています。文献[5]では DC(T)試験片は特段のバイアスの考慮なく扱われているようです(図 3.1-1)。

表 3.1-1 DC(T)試験片を含むマスターカーブ法試験マトリックス
(ハイライトが DC(T)試験片)[5]

| Heat | Weld | Source | Fluence (n/cm ² , E > 1 MeV) | Specimen Type | Test Temp (°F) | T ₀ (°F) | PCCS Adj. T ₀ (°F) | Number of Valid Tests |
|--------|----------|-----------|---|------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 406L44 | WF-193 | ANO1 RVSP | 1.46E+19 | RPCCS | 10 | 22 | 40 | 8 |
| 71249 | SA-1094 | TP4 RVSP | 1.60E+19 | PCCS | 20 | 117 | 135 | 7* |
| | SA-1101 | TP3 RVSP | 1.38E+19 | PCCS | 20 | 119 | 137 | 7* |
| 72105 | WF-70(N) | MD1 ND | 1.19E+19 | RPCCS | 40 | 60 | 78 | 6 |
| | WF-70(N) | MD1 ND | 1.59E+19 | 1/2TCT | 0 | 88 | 88 | 4* |
| | WF-209-1 | Z1 RVSP | 1.90E+19 | PCCS | 45 | 89 | 107 | 7 |
| 821T44 | WF-182-1 | DB1 RVSP | 1.18E+19 | PCCS&DCT | 20 to 110 | 82 | 89 | 8 |
| 299L44 | WF-25 | OC3 ND | 7.79E+18 | RPCCS | 40 | 62 | 80 | 8 |
| | SA-1526 | S1 RVSP | 1.60E+19 | RPCCS | 60 | 72 | 90 | 8 |
| 72442 | SA-1484 | CR3 ND | 1.25E+19 | PCCS&DCT | 10 to 120 | 113 | 125 | 17 |
| | WF-67 | MD1 ND | 1.26E+19 | PCCS&DCT | -30 to 30 | 38 | 49 | 13 |
| | WF-67 | MD1 ND | 1.66E+19 | Var. CTs | 0 to 90 | 61 | 61 | 8 |
| 72445 | SA-1585 | ANO1 ND | 1.59E+19 | 1/2TCT | 0 | 47 | 47 | 3* |

RVSP = Reactor Vessel Surveillance Program Weld
 ND = Nozzle Drop-Out
 PCCS = Pre-Cracked Charpy Size Specimen
 TCT = Compact Fracture Toughness Specimen
 DCT = 0.936" Thick Disk Shaped Compact Specimen
 *Insufficient data for a valid reference temperature.

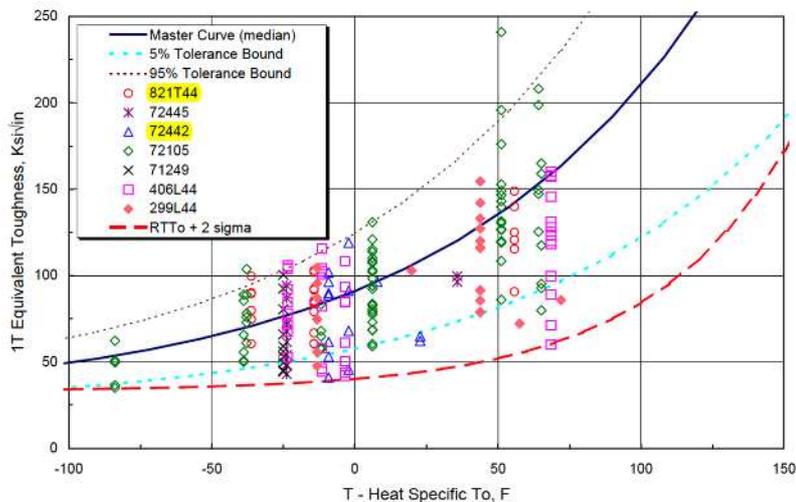


図 3.1-1 DC(T)試験片を含む破壊靱性分布(ハイライトが DC(T)試験片)[5]

【文献】

- [1] Merkle, J. G., Wallin, K. and McCabe, D. E., "Technical Basis for an ASTM Standard on Determining the Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range," NUREG/CR-5504 ORNL/TM-13631, (1998)
- [2] Miura, Soneda, "Evaluation of Fracture Toughness by Master Curve Approach Using Miniature C(T) Specimens," ASME J. of PVT 134-021402, DOI: 10.1115/1.4005390, (2012).
- [3] Miura, Soneda, Sawai and Sakai, "Proposal of Rational Determination of Fracture Toughness Lower-bound Curves by Master Curve Approach," Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77360, (2009).
- [4] Yamamoto, M., et al, "International Round Robin Test on Master Curve Reference Temperature Evaluation Utilizing Miniature C(T) Specimen," ASTM STP 1576, STP157620140020, (2014)
- [5] BAW-2308, Rev. 1, "Initial RT_{NDT} of Linde 80 Weld Materials," B&W Owners Group, (2003).