

**「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関する質問」  
に対する回答**

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、以下の通り回答いたします。

**○説明依頼事項**

**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  $\sigma_{T_0}$  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<sup>1</sup>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。)

$$\sigma_{T_0} = \frac{(K_{Jc(med)} - 20)}{(K_{Jc(med)} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

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  $T_0$  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。

(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、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  $\sigma_{T_0}$  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<sup>1</sup>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。)

$$\sigma_{T_0} = \frac{(K_{Jc(med)} - 20)}{(K_{Jc(med)} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

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、

$$K_{Jc(med)} = 30 + 70 \exp [0.019 (T - T_0)]$$

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。

**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。

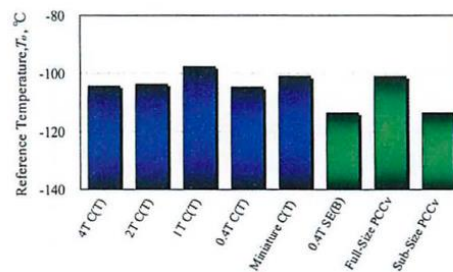
回答2. (1)

特にございません。

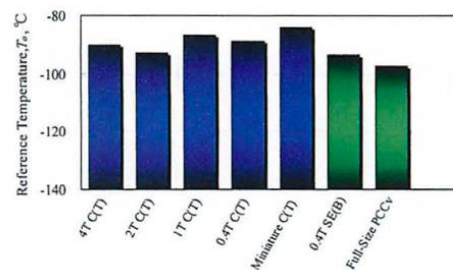
(2) 検討チーム会合資料 5-2、85 頁の「図 4.2.10-2 複数試験温度法(mlt.)と単一試験温度法(sgl.)の参照温度評価結果比較」は同会合資料 4-3 の図 6-2 から転載したのですが、出典の文献によると材料は鍛鋼品 SFVQ1A 鋼のものです。鋼板材 SQV2A についてのデータがあれば提示してください。

回答2. (2)

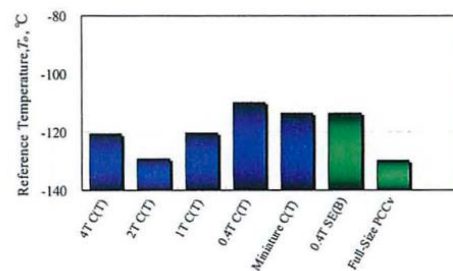
JEAC4216-2015 から技術根拠論文として引用されている公開文献[2]には、SFVQ1A とともに 2 ヒートの SQV2A のデータも記載されています。(図 2.2-1)



(a) SFVQ1A forging



(b) SQV2A (Heat 1) plate



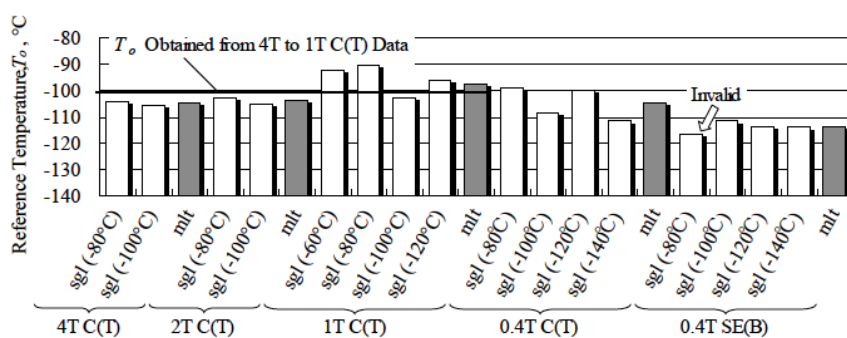
(c) SQV2A (Heat 2) plate

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

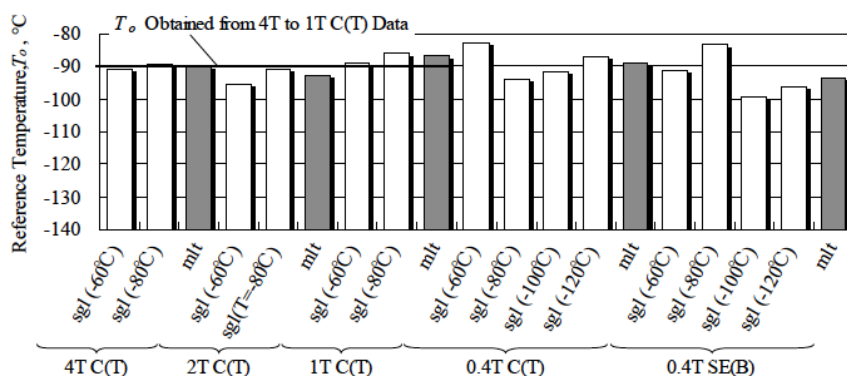
図 2.2-1 様々な寸法の非照射材試験片による破壊靱性データ[2]

上記の3材料について個々の試験温度別に  $T_o$  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 は試験温度  $-80^{\circ}\text{C}$  の単一試験温度法評価において平均的な値より  $20^{\circ}\text{C}$  程度高い値となっており、同論文中で以下のような考察がなされています。

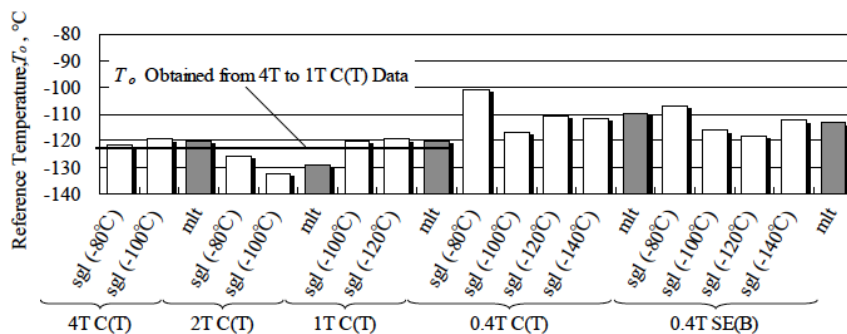
“Some  $T_o$ s obtained from 0.4T specimens at relatively higher temperatures are higher than others. This is because fracture toughness,  $K_{Jc}$ , in such condition often exceeds its upper limit,  $K_{Jc(limit)}$ , then  $K_{Jc}$  is replaced with  $K_{Jc(limit)}$  as a censored data, which leads to underestimate of the “real” fracture toughness.



(a) SFVQ1A



(b) SQV2A Heat 1



(c) SQV2A Heat 2

図 2.2-2 単一温度法および複数温度法による  $T_o$  の推定結果[3]

$T-T_0$ 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より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。図 2.2-2 を見ると、データ点数の多い多数温度法の  $T_0$ が  $-120^{\circ}\text{C}$ であり、これから判断すると  $T = -80^{\circ}\text{C}$ の試験温度は  $T_0$ より  $40^{\circ}\text{C}$ 高温側に相当すると考えられます。図 2.2-3 から、 $T-T_0 = 40^{\circ}\text{C}$ においては破壊靱性データの半数以上が無効データとなるものと推測されます。文献[3]の著者はマスターカーブ法の成立性を広い範囲で捉え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ませんが、実際の評価では、より良い評価精度を得るために、無効データが大きな割合を占めないような試験温度を選ぶこととなると思われます。

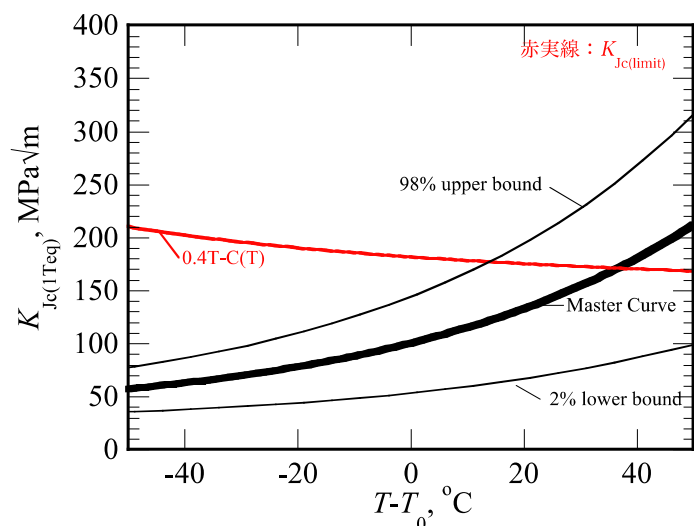


図 2.2-3 0.4T-C(T)試験片における  $K_{Jc(limit)}$ とマスターカーブの関係の一例

(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。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)試験片による大きなデータセットでも  $K_{min} = 20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  の仮定が良好な近似を与えられます。

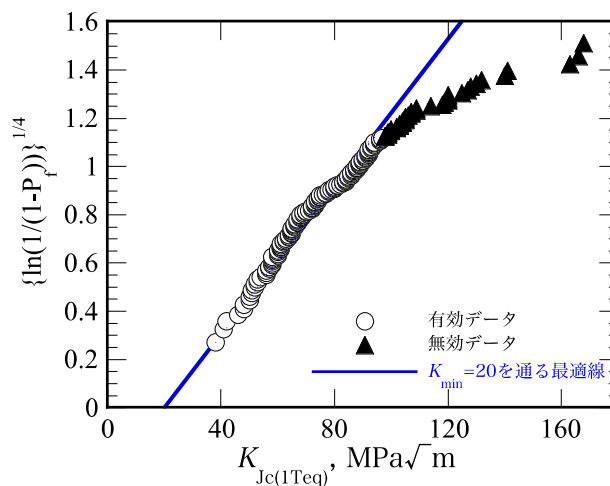


図 2.3-1 文献[4]のラウンドロビンデータに基づく  $K_{min}$  の傾向確認のための参考図

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。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 <sup>2</sup> , E > 1 MeV)	Specimen Type	Test Temp (°F)	T <sub>0</sub> (°F)	PCCS Adj. T <sub>0</sub> (°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*
821T44	WF-209-1	Z1 RVSP	1.90E+19	PCCS	45	89	107	7
	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.

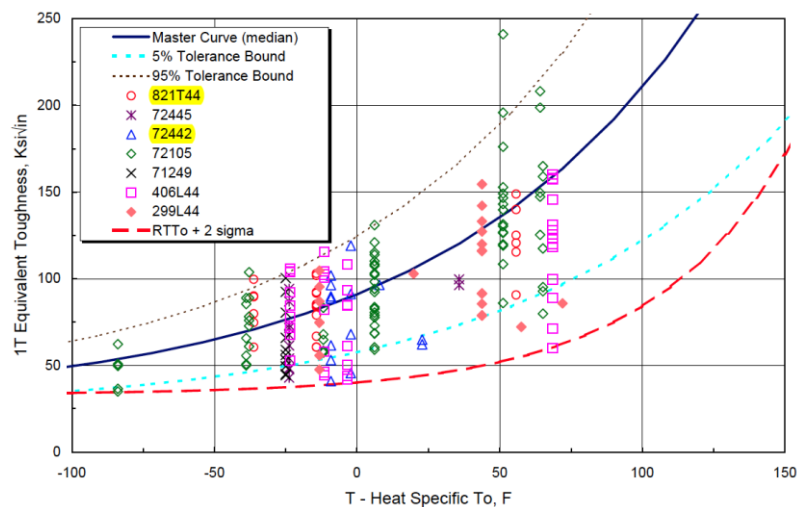


図 3.1-1 DC(T)試験片を含む破壊靱性分布(ハイライトが DC(T)試験片)[5]

**【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 RTNDT of Linde 80 Weld Materials," B&W Owners Group, (2003).