

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」
議論内容に関する回答

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. 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 (JEAC 4216-2015) に係る説明事項 (第1回検討チーム会合資料 資料1-3 2. 2(2)①~③の事項)

- (1) 試験片の寸法効果等について検討した技術的内容 (照射材についての検討を含む。)
- (2) 参照温度 [T_0] の決定における必要サンプル数について検討した技術的内容
- (3) 複数試験温度による方法の場合の [K_{J0}] 及び [K_{Jc}] の算出方法について検討した技術的内容

○第1回検討チーム質疑事項

第1回検討チーム会合で質疑のあった以下の事項について、添付の通り回答いたします。

2. 第1回検討チーム会合における質疑事項

- (4) Mini-C(T)試験片で、ナイフエッジの切り込み部分とピン穴の間 (リガメントの薄い部分) で変形が大きく問題にならないか。
- (5) Mini-C(T)試験片の寸法公差について、シャルピー試験片 (サブサイズ含む) の加工精度より大きいのが、厳しい方に合わせて良いのではないか。
- (6) T_0 のばらつき、エラーバー ($\pm 2\sigma$) について説明が必要。

○回答

(1) 試験片の寸法効果等について検討した技術的内容(照射材についての検討を含む。)

回答(1)

オークリッジ国立研究所は、疲労予亀裂入りシャルピー(PCVN)試験片から4T-C(T)試験片までの様々な寸法の照射材試験片に対しマスターカーブ法が適用できる[1]ことを示しています(図 1-1)。

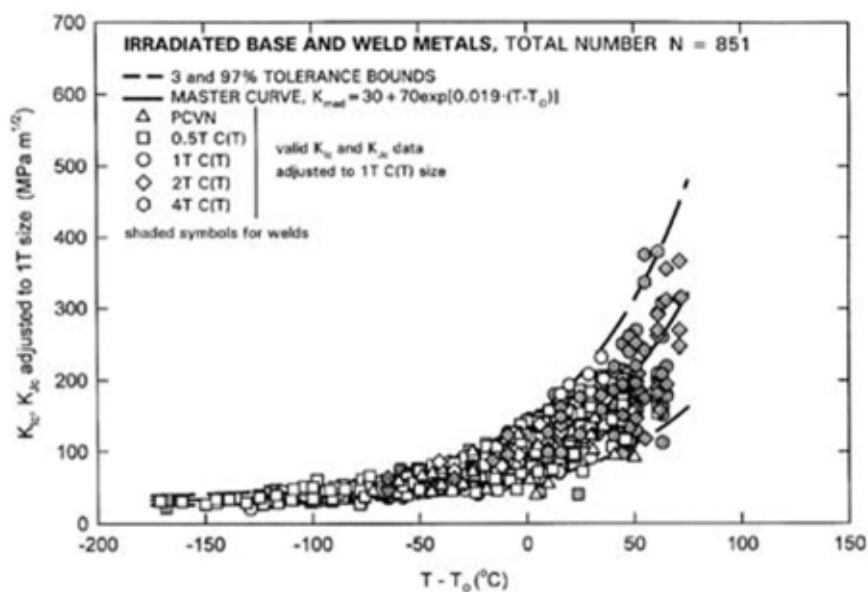


図 1-1 様々な寸法の照射材試験片による破壊靱性データ分布[1]

また、国内の検討結果においても、Mini-C(T)~4T-C(T)において、ほぼ同等の T_0 が得られています(図 1-2)。但し、曲げ試験片では C(T)試験片に比べて T_0 に差異があります。従って、曲げ試験片の試験結果を圧力容器の健全性評価に用いる場合の扱いに関しては今後検討が必要です。

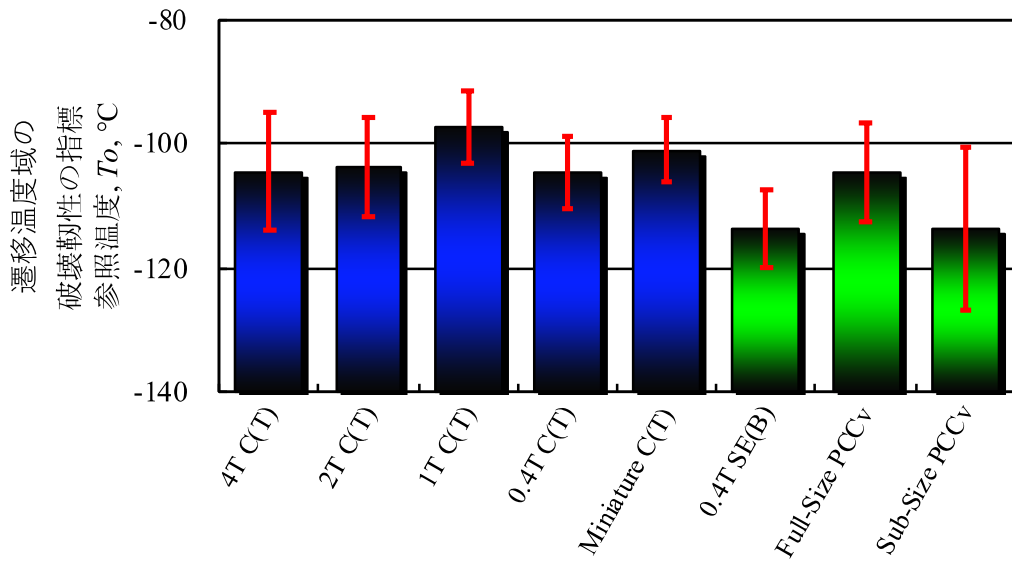


図 1-2 様々な寸法の非照射材試験片による破壊靱性データ
(文献[2]の図に電気協会で $\pm 2\sigma T_o$ のエラーバーを計算して追記)

表 1-1 図 1-2 のエラーバー計算に使用した試験片数 N および有効試験片数 r

試験片の種類	N	r
4T C(T)	12	12
2T C(T)	16	16
1T C(T)	32	32
0.4T C(T)	36	34
Miniature C(T)	55	49
0.4T SE(B)	36	29
Full-Size PCCv	24	20
Sub-Size PCCv	33	7

国内の鍛造材に対する破壊靱性分布(ワイブルプロット)は, Mini-C(T)試験片について多くのデータが得られており, Mini-C(T)試験片と 1T-C(T)試験片で同等の分布であること, またマスターカーブ法の仮定に沿っている(傾きが 4 に近い)ことが示されています[3]。

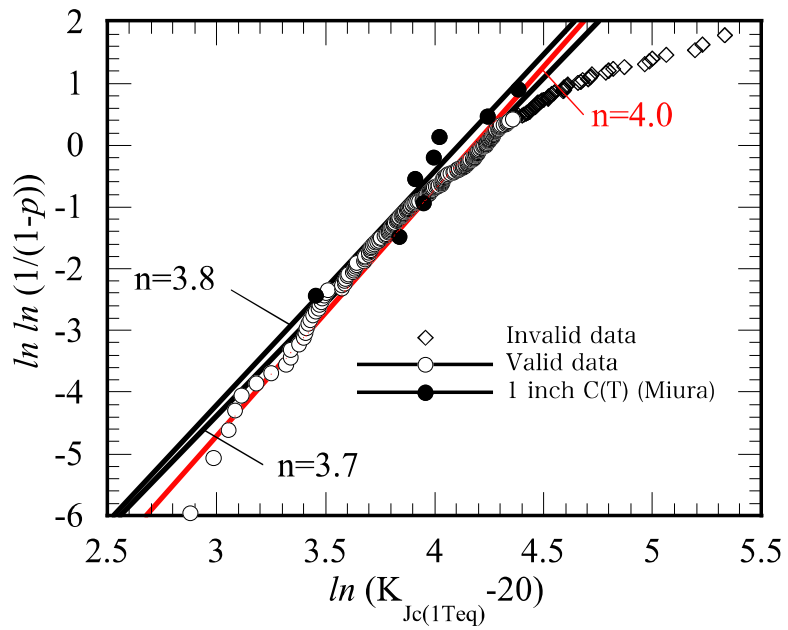


図 1-3 Mini-C(T)試験片(○)と1T-C(T)試験片(●)のワイブルプロットの比較
(文献[3]の図に電気協会で $n=4.0$ の近似線を追記)

(2) 参照温度[T_0]の決定における必要サンプル数について検討した技術的内容

回答(2)

マスターカーブ法は、有効試験数が最少でも6~8個得られることを、参照温度 T_0 が有効であるための要求としています。試験温度 T と T_0 が近ければ6個、遠くなると8個が必要です。Mini-C(T)試験片を用いる場合、試験片の板厚が薄く、 $K_{Jc(limit)}$ が小さいため、 T_0 より低温側に離れた T を選択するため、多くの場合8個以上の有効試験片が必要です。

JEAC4216 に規定されている必要データ数は、参照している ASTM E1921 に従って規定しています。JEAC4216 制定時に T_0 のばらつきに着目した検討を実施しており、ASTM E1921 と同じ必要データ数で妥当であると判断しています。

有効試験片数が増えれば T_0 の推定精度が向上します。マスターカーブ法では T_0 の標準偏差を有効試験片数に依存する(1)式で与え、サンプル数に依存する評価結果の分布を考慮できるようにしています。

$$\sigma_{T_0} = \frac{(K_{Jc(med)} - 20)}{(K_{Jc(med)} - 30)} \times \frac{14.7}{\sqrt{r}} \quad (1)$$

Tomimatsu ら[4]は同一温度で26個の破壊靱性の実験を行ったデータを用いて、モンテカルロシミュレーションによる T_0 の算出を行い、同式と実験結果を比較しました。試験データをランダムに抽出した分布から標準偏差を算出した結果、ワイブル分布でランダムにデータを抽出した結果及び正規分布で T_0 がばらつきと仮定して算出した標準偏差を比較した結果を図2-1に示します。算出された標準偏差はほぼ一致しており、(1)式で算出された標準偏差を用いることの妥当性が確認されました。

図2-2は、試験片本数毎のモンテカルロシミュレーションの結果を示します。試験片本数をそれぞれ3, 6, 9本とすると試験片本数の増大とともに T_0 のばらつきが小さくなっており、標準偏差が小さくなることがわかります。参照温度 T_0 を決定する場合の試験片本数は多い方が良いものの、試験片本数に応じた標準偏差 (σ_{T_0}) を考慮することで、妥当な評価は可能と考えられます。

なお、JEAC4206-2016では、 RT_{T_0} 算出の際、 T_0 に $\pm 2\sigma_{T_0}$ を加えること(RF-2100)、また、供用状態CおよびDに対する破壊靱性遷移曲線設定の際に σ_{T_0} の影響を考慮した M_k 項を加えること(RF-4222)を規定しています。

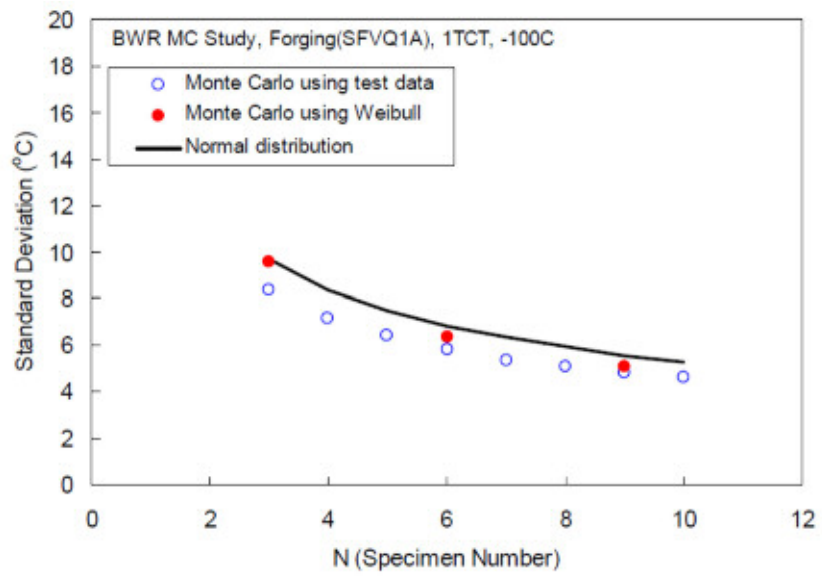


図 2-1 各種検討による T_0 の標準偏差の比較[4]

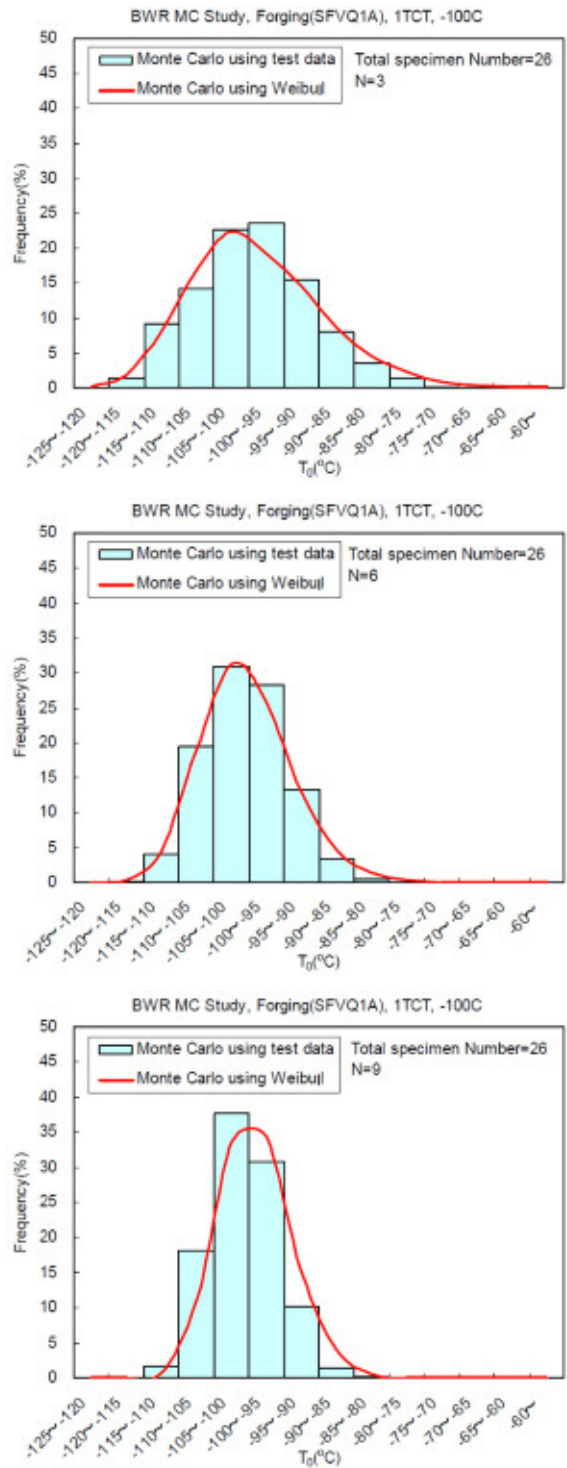


図 2-2 試験片本数毎の試験データのモンテカルロシミュレーションとワイブル分布のモンテカルロシミュレーションの結果[4]

破壊靱性が高い場合、試験片の塑性変形が大きくなり拘束が低下します。マスターカーブ法ではこのようなデータが評価結果に及ぼす影響を排除するため、以下の式で $K_{Jc(limit)}$ を与え、これを超えるデータは無効データとします。

$$K_{Jc(limit)} = \sqrt{\frac{Eb_0\sigma_{ys}}{30(1-\nu^2)}}$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 b_0 は初期リガメント長さ、 σ_{ys} は試験温度における材料の降伏強さです。試験温度が高いと無効データが増加し、 T_0 決定に必要なサンプル数が増えるので試験温度の選択が重要です。Miura ら[2]は国産圧力容器鋼(鍛造, 圧延)の Mini-C(T)試験片について温度と有効試験片数の関係を示し、Mini-C(T)試験片の場合 $T-T_0$ が -30°C 以下を選択することが適切であるとしています(図 2-3)。

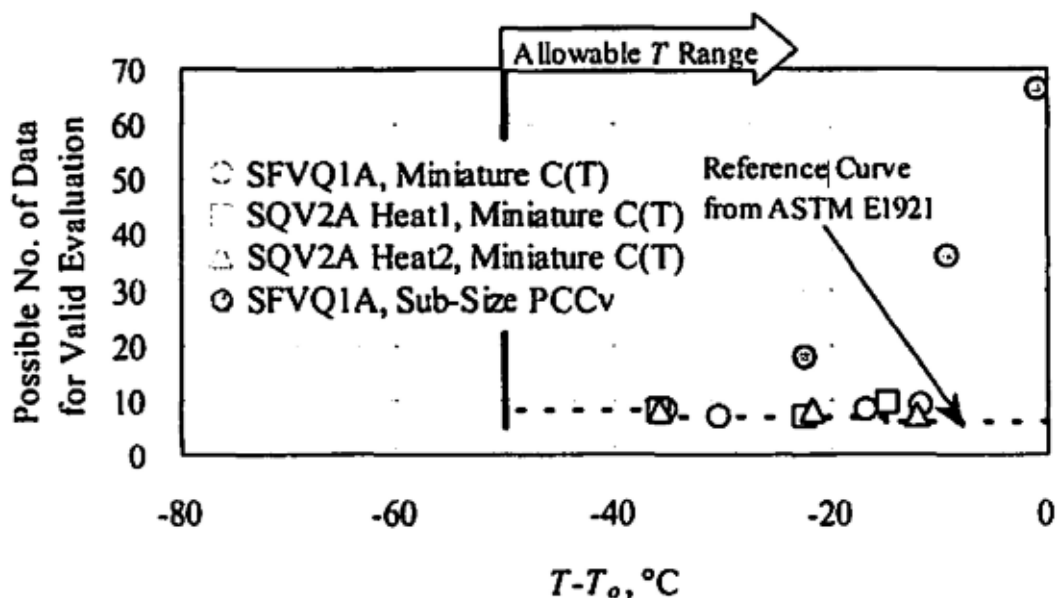


図 2-3 有効な T_0 評価のための必要試験片数[2]

(3) 複数試験温度による方法の場合の $[K_o]$ 及び $[K_{Jc}]$ の算出方法について検討した技術的内容

回答(3)

JEAC4216に規定されている複数試験温度による方法は、参照しているASTM E1921に従って規定しています。JEAC4216制定時に以下のような検討を行い、ASTM E1921と同じ方法で妥当であると判断しています。

マスターカーブ法は、各温度における破壊靱性の中央値 K_o で正規化したとき破壊靱性の分布が温度によらず同一の統計分布特性を示すことを前提としています。どの温度においても K_o の算出方法は同一です。複数試験温度法においても、各データ(各温度)に対し、 K_o の算出方法は単一温度法と同一です。また、 K_{Jc} は単一試験温度法・複数試験温度法の別に依らず、試験片毎に導出されます。

複数試験温度法は、 K_o の温度依存性(マスターカーブそのもの)を考慮して単一温度の評価法を算術的に展開したもの[5]です。いずれの単一試験温度を選んでも、またそれらを統合した複数試験温度法においても、理論的には同一の T_o が得られますが、実際は、各温度のサンプル数に応じて評価結果が異なります。そこで、複数の温度で評価されたデータセット全体に対して誤差が最も少なくなるよう、最尤推定法により暫定的な評価値 T_{oQ} を求めることになっています。算出式はJEAC4216-2015 MCT-5220に式(23)として与えられています。

$$\sum_{i=1}^N \delta_i \frac{\exp[0.019(T_i - T_{oQ})]}{11.0 + 76.7 \exp[0.019(T_i - T_{oQ})]} \quad \text{MCT-5220}$$

$$- \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - 20)^4 \exp[0.019(T_i - T_{oQ})]}{\{11.0 + 76.7 \exp[0.019(T_i - T_{oQ})]\}^5} = 0 \quad \text{の式(23)}$$

今、試験片それぞれの温度である T_i に固定値 T_{sgf} を与え、複数試験温度法の式から単一試験温度法の間係を導きます。ここでは、次の関係式を用いて式変形をします。

$$K_o = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - K_{min})^4}{r} \right]^{1/4} + K_{min} \quad \text{MCT-5122}$$

の式(18)

$$K_{Jc(\text{med})} = K_{min} + 0.9124(K_o - K_{min}) \quad \text{MCT-5123}$$

の式(19)

その結果、次式が得られます。

$$T_{oQ} = T_{sgl} - \left(\frac{1}{0.019} \right) \ln \left[\frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right]$$

これは以下に示す単一試験温度法における T_{oQ} を算出する式(MCT-3130 の式(21)で T に T_{sgl} を代入したもの)に他なりません。

$$T_{oQ} = T - \left(\frac{1}{0.019} \right) \ln \left[\frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right] \quad \text{MCT-3130} \\ \text{の式(21)}$$

以上より、単一試験温度法は、複数試験温度法で T_{oQ} を算出する式(MCT-5220 の式(23))において試験温度が単一である特別なケースであることがわかります。

Wallin は多くの実験データに対して単一試験温度法と複数試験温度法の評価を比較[6]し、試験温度が $T_o \pm 50^\circ\text{C}$ の範囲では、原子炉圧力容器鋼について両者が同等の T_o 推定結果を与える、との結論を導いています。

(4) Mini-C(T)試験片で、ナイフエッジの切り込み部分とピン穴の間(リガメントの薄い部分)で変形が大きく問題にならないか。

回答(4)

C(T)試験片では、破壊の生ずる亀裂先端近傍に大きな応力集中が生じますが、それ以外の部分では試験片が破壊に至る時点においても応力およびひずみが低く保たれます。特に荷重ピンと荷重ピンの間の領域(今回ご質問にあったナイフエッジ切り込み部分とピン穴のリガメント部分を含む)では、試験中に荷重がほとんど加わらないため、開口変位計を取り付けるための大きな切り込み(機械加工ノッチ)がなされる場合も多くあります。

Chaouadiら[7]はMini-C(T)試験片に関し、JEAC4216-2015で規定する試験片前面のクリップゲージに加え、荷重線上の試験片上下面間で測定するクリップゲージを取り付けて試験を行い、二つのクリップゲージで測定された変位に基づく破壊靭性がよく一致することを確認しています(図 4-1)。同試験を含め、国内外で実績のあるMini-C(T)試験片形状を、その切り欠き部形状の詳細とともに図 4-2 に示します。

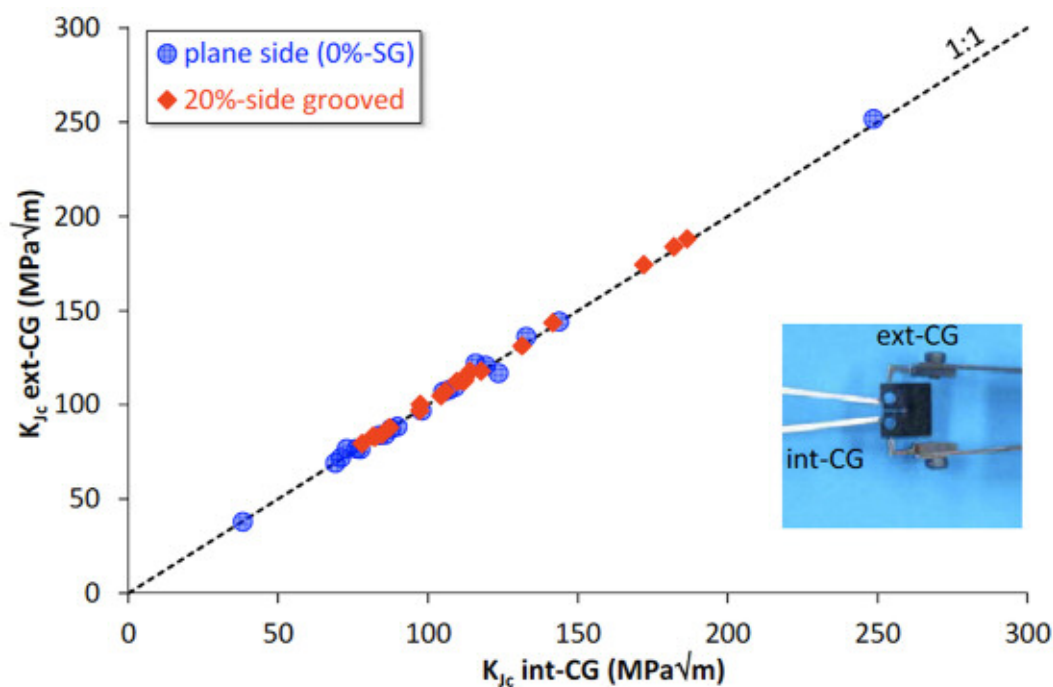


図 4-1 試験片前面クリップゲージおよび荷重線上クリップゲージによる破壊靭性(K_{Jc})の比較[7]

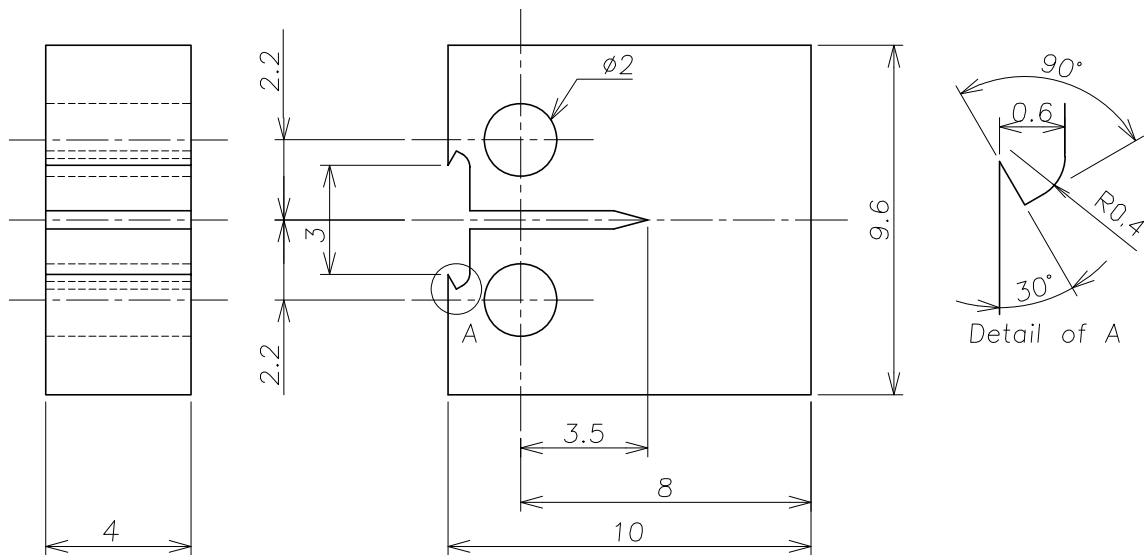


図 4-2 クリップゲージ取り付け用切り欠き部の詳細を記載した Mini-C(T)試験片形状

(5) Mini-C(T)試験片の寸法公差について、シャルピー試験片(サブサイズ含む)の加工精度より大きい方が、厳しい方に合わせて良いのではないか。

回答(5)

JEAC4216-2015 図MCT-3100-1に示すC(T)試験片の寸法及び形状では、寸法公差は相対値で与えられるため、Mini-C(T)試験片のように $W=8$ の試験片では、 $0.005W=0.04\text{mm}$ 、 $0.01W=0.08\text{mm}$ となり、寸法要求が厳しくなります。そこで、試験片加工の利便性を考慮し、公差の拡大が評価結果に及ぼす影響が十分小さいことを検証(表 5-1)した[8]上で、図 5-1 に示す通り、赤枠部の寸法公差を 0.1mm としました。

表 5-1 Mini-C(T)試験片の寸法公差緩和に伴う参照温度の標準偏差の変化
(電気協会で文献[8]のデータから表を再作成)

	試験温度	寸法公差緩和前	寸法公差緩和後
寸法要求	厚さ	$4 \pm 0.08\text{mm}$	$4 \pm 0.1\text{mm}$
	幅	$8 \pm 0.04\text{mm}$	$8 \pm 0.1\text{mm}$
	長さ	$10 \pm 0.08\text{mm}$	$10 \pm 0.1\text{mm}$
	高さ	$9.6 \pm 0.08\text{mm}$	$9.6 \pm 0.1\text{mm}$
	ノッチ幅	$\leq 0.08\text{mm}$	$\leq 0.25\text{mm}$
参照温度の標準偏差	$T_o-50^\circ\text{C}$	2.00°C	2.12°C
	T_o	1.41°C	1.50°C
	$T_o+50^\circ\text{C}$	1.21°C	1.28°C

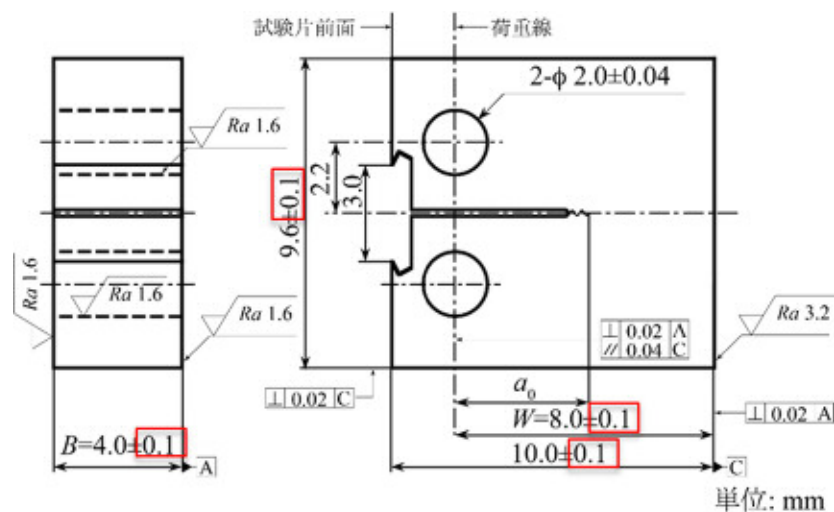
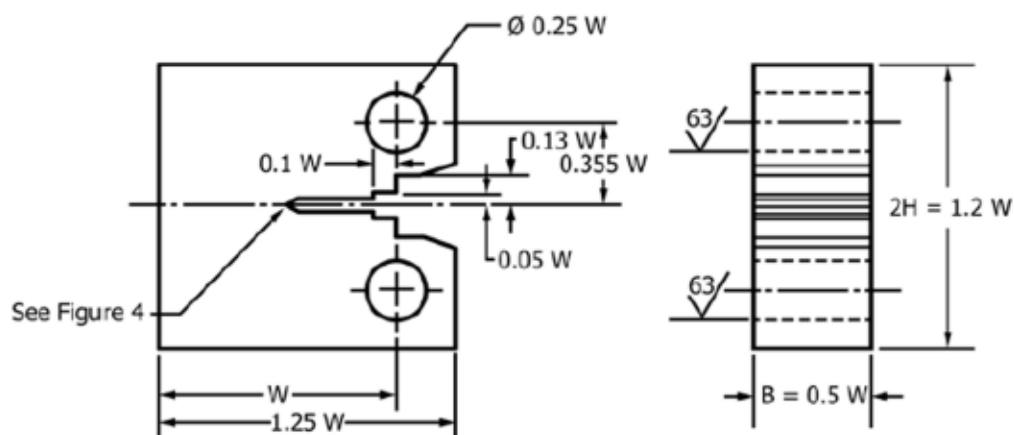


図 5-1 Mini-C(T)試験片の寸法及び形状

なお、米国 ASTM E1921 においても試験片寸法の公差が緩和されています。ASTM E1921-17 では、Mini-C(T)試験片のみならず、全ての寸法の C(T)試験片について公差が $0.010W$ から $0.013W$ (Mini-C(T)試験片では 0.104mm) に緩和されました(図 5-2) [9]。



Notes:

1. Tolerance on all dimensions $\pm 0.013W$
2. Pin shall be sized so that maximum clearance with hole is $0.02W$

図 5-2 ASTM E1921-17 で緩和された寸法公差[9]

(6) T_0 のばらつき、エラーバー($\pm 2\sigma$)について説明が必要。

回答(6)

第1回検討チーム会合資料 1-2-1 の P26 で示した「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」(図 6-1)では、どの程度のばらつきであれば良いのか明示されていませんでした。

図 6-2 に各データに T_0 の標準偏差の2倍($\pm 2\sigma_{T_0}$)のエラーバーを加えたプロットを示します。各データのばらつきは、エラーバーの範囲内にあることがわかります。

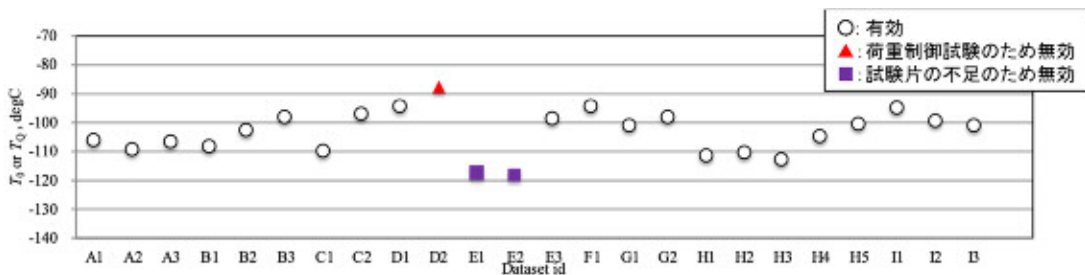


図 6-1 Mini-C(T)試験片を用いた破壊靱性評価ラウンドロビン試験結果(T_0 の結果)
(第1回検討チーム会合資料 1-2-1 の再掲)

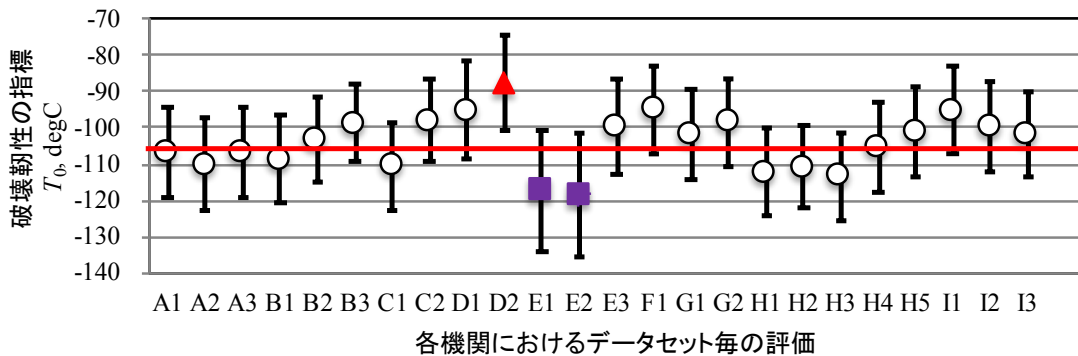


図 6-2 Mini-C(T)試験片を用いた破壊靱性評価ラウンドロビン試験結果
(図 6-1 に示した各試験機関の T_0 の結果に、電気協会で $\pm 2\sigma_{T_0}$ のエラーバーを追記したもの。赤線は全データに対する T_0)

表 6-1 各データセットにおける試験片個数(N)と有効試験片数(r)の関係

Dataset	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	E1	E2	E3	F1	G1	G2	H1	H2	H3	H4	H5	I1	I2	I3
N	11	11	12	11	10	11	12	10	8	8	8	8	8	10	10	10	13	14	14	11	8	10	10	10
r	8	7	8	8	9	11	8	10	7	8	4	4	7	9	8	9	8	9	8	8	8	9	8	9

N : 試験片本数, r : 有効試験片本数

【文献】

- [1] Sokolov, M.A., Nanstad, R.K., “Comparison of irradiation-induced shifts of K_{Jc} and Charpy impact toughness for reactor pressure vessel steels”, Effects of Radiation on Materials (18th Int. Symp.), ASTM STP 1325, West Conshohocken, PA (1999) 167–190.
- [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] Yamamoto, M., et al, “International Round Robin Test on Master Curve Reference Temperature Evaluation Utilizing Miniature C(T) Specimen,” ASTM STP 1576, STP157620140020, (2014)
- [4] Tomimatsu, et al., “Master Curve Approach for Some Japanese Reactor Pressure Vessel Steels,” Proceedings of 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008–61494, (2008)
- [5] Wallin, K, “Validity of small specimen fracture toughness estimates neglecting constraint corrections,” ASTM STP1244, p.19, (1995)
- [6] Wallin, K, “Master curve analysis of ductile to brittle transition region fracture toughness round robin data,” VTT Publications 367, (1998),
- [7] Chaouadi, R., “On the use of miniaturized CT specimens for fracture toughness characterization of RPV materials,” Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016–63607, (2016)
- [8] 三浦, 桃井, 山本, “ミニチュア C(T)試験片破壊靱性試験を用いたマスターカーブ破壊靱性評価の規格化に関する解析的検討,” 電中研報告, Q15001, ISBN978-4-7983-1428-0, (2015)
- [9] ASTM E1921–17, “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_o , for Ferritic Steels in the Transition Range,” ASTM, (2017)