

2. 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対する 技術評価書（案）の主な論点

目次

2. 1	適用材料	2
2. 2	適用試験片	4
2. 3	Mini-C(T)の寸法及び形状	8
2. 4	機械切欠きの形状及び寸法並びに疲労予亀裂の寸法	11
2. 5	疲労予亀裂の導入における応力拡大係数の最大値	13
2. 6	サイドグループ	15
2. 7	寸法測定精度	17
2. 8	Mini-C(T)の変位測定における換算定数	18
2. 9	試験片個数・データ個数について	22
2. 10	試験温度の制御と測定	24
2. 11	データ有効性の判断基準について	26
2. 12	試験片寸法の補正	27
2. 13	暫定参照温度 T_{00} の算出	28
	参考	30

2. 1 適用材料

(1) 規定の内容

MCT-1110 適用材料

本規程は、室温の降伏強さが 275 MPa 以上 825 MPa 以下となるフェライト鋼の母材及び溶接金属に適用する。ただし、溶接金属は溶接後熱処理を施工したものを対象とする。

(2) 技術評価の結果

規定内容は、ASTM E1921¹の適用範囲と一致しており、関連する破壊靱性試験方法に係る国際的規格と同じ範囲である。これに関し、解説に以下の記載がある。

解説 MCT-1110 フェライト鋼の適用範囲

(2) 照射材料の降伏強さを考慮した検討（抜粋）

溶接金属については溶接後熱処理を施工したフェライト鋼の溶接金属を対象としている。ASTM E1921 では、試験片内に溶接金属と母材の 2 種類の材料が存在するミスマッチの場合に対して、溶接金属と母材との引張強さの差を 10%以内と規定している。溶接金属を対象とした破壊靱性規格である BS 7448-2²-1997 では、溶接金属と母材の降伏強さの比が 0.5 から 1.25 の範囲であれば、J 積分の式が適用できるとしており、ASTM E1921 に記載されている 10%以内の強度差の条件でなくても、試験は成立すると考えられることから、ASTM E1921 で規定されている強度差の条件は除外した。なお、原子炉圧力容器鋼では共材で溶接されており、溶接金属と母材の引張り強さに大きな差が生じることはない。

解説によれば、ASTM E1921 では、試験片内に溶接金属と母材の 2 種類の材料が存在する場合には、溶接金属と母材との引張強さの差を 10%以内と規定しているが、BS 7448-2-1997 には、溶接金属と母材の降伏強さの比が 0.5 から 1.25 の範囲であれば引張強さの差の条件は除外したとしている。また、原子炉圧力容器鋼では共材で溶接されており、溶接金属と母材の引張り強さに大きな差が生じることはないとしている。なお、本規格の適用範囲は「MCT-1100 適用範囲」において「原子力発電所に使用するフェライト鋼」とされている。

- 室温の降伏強さが 275 MPa 以上 825 MPa 以下とされているが、未照射材か照射材かを規定する必要があるのではないか。

¹ Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range

² Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials

- JEAC4206-2016³に用いることを考慮し、適用範囲を原子炉圧力容器鋼に限定する必要があるのではないか。
- なお、日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2012年版の技術評価において、室温での規定最小降伏点（規格値）が 620 MPa を超える材料については、クラス 1 容器の破壊靱性評価に K_{Ic} 曲線を用いることを認めないものとする旨の条件が付されている。

³ JEAC4206-2016 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

2. 2 適用試験片

(1) 規定の内容

MCT-1120 適用試験片

本規程は、疲労予亀裂を導入した標準コンパクト試験片 C(T)、円盤状コンパクト試験片 DC(T)、ミニチュアコンパクト試験片 Mini-C(T) 及び曲げ試験片 SE(B) に適用する。

(2) 技術評価の結果

(a) 標準コンパクト試験片

- ASTM E1921 において規定された標準コンパクト試験片（以下「C(T)」という。）は、広く国際的に使用されているものであり、その形状と比較し、同等であれば妥当としてはどうか。

(b) ミニチュアコンパクト試験片

従来から標準的にマスターカーブ法が適用されてきた C(T) から得られる T_0 と 2015 年版で追加されたミニチュアコンパクト試験片（以下「Mini-C(T)」という。）から得られる T_0 は同等であるかという点について、日本電気協会は、様々な寸法の非照射材試験片による破壊靭性データから、ほぼ同等の T_0 が得られているとしている（図 2-1 参照）。

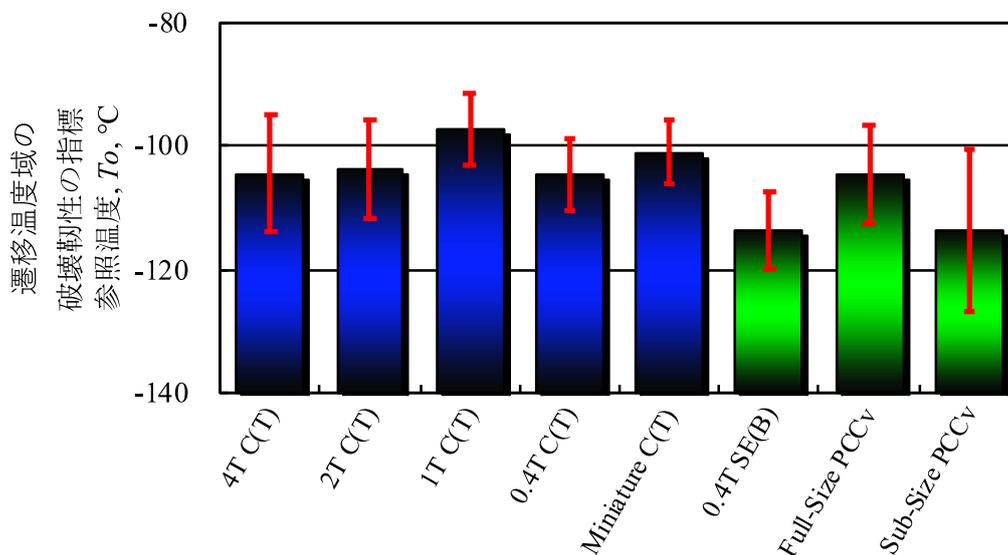
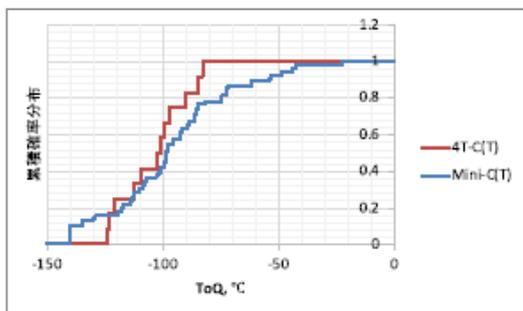


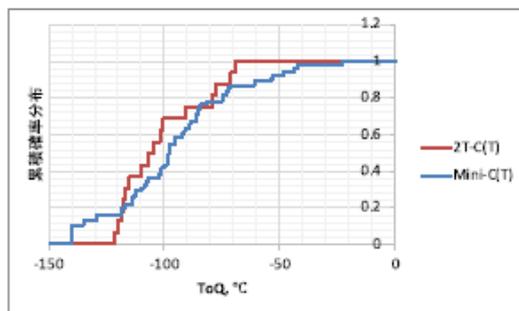
図 2-1 様々な寸法の非照射材試験片で取得した破壊靭性データ（文献[2]の図に電気協会が $2\sigma T_0$ のエラーバーを計算して追記）⁴

⁴ 資料 3-3 図 1-2

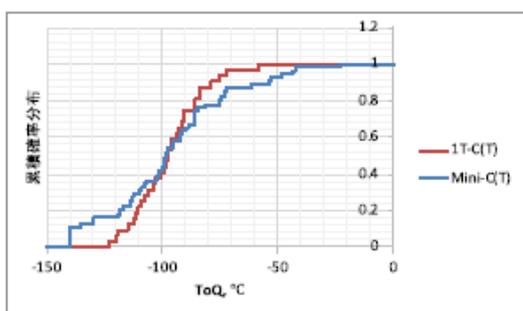
これに関し、日本電気協会は、各試験片で得られた 1T-C(T) 相当の破壊靱性 K_{Jc} が $K_{Jc(\text{med})}$ であるとみなし、 T_o の暫定値 T_{o0} を求め、Mini-C(T) で求めた T_o と他の大きさの C(T) から求めた T_o を、有意水準 0.05 で有意差があるか、2 標本のコルモゴロフスミルノフ検定 (K-S 検定) を行い、データには有意な差はないことを確認したとしている⁵。K-S 検定の結果は、データには有意な差はないという仮説が棄却できないということであり、両者が同一であるというものではない。



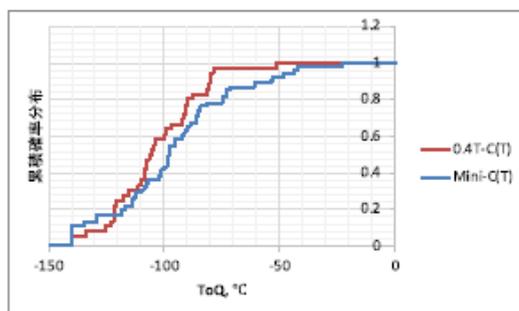
(1) Mini-C(T)と 4T-C(T)試験片の比較



(2) Mini-C(T)と 2T-C(T)試験片の比較



(3) Mini-C(T)と 1T-C(T)試験片の比較



(4) Mini-C(T)と 0.4T-C(T)試験片の比較

図 2-2 T_{o0} と累積分布関数の関係⁶

表 2-1 K-S 検定結果⁷

データセット 1	データセット 2	D	p	有意水準	帰無仮説の採否
4T-C(T)	Mini-C(T)	0.236	0.641	0.05	採択
2T-C(T)	Mini-C(T)	0.269	0.330	0.05	採択
1T-C(T)	Mini-C(T)	0.166	0.634	0.05	採択
0.4T-C(T)	Mini-C(T)	0.220	0.244	0.05	採択

また、Mini-C(T)については、国際ラウンドロビン試験によってその適用性が実証されたとしている (図 2-3 及び表 2-2 参照)⁸。

⁵ 資料 4-3 4 p

⁶ 資料 4-3 図 3-1

⁷ 資料 4-3 表 3-1

⁸ Yamamoto M., et al, "A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens:

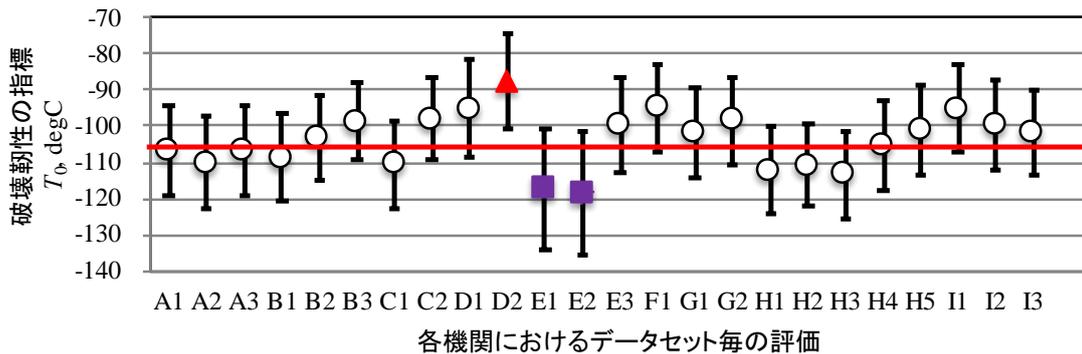


図 2-3 Mini-C(T) 試験片を用いた破壊靱性評価ラウンドロビン試験結果
 (資料 3-3 図 6-1 に示した各試験機関の T_o の結果に、電気協会で $2\sigma_{T_o}$ の
 エラーバーを追記したもの。赤線は全データに対する T_o)⁹

表 2-2 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¹⁰

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

図 2-3 の試験は、試験片の加工を 1 つの機関が行い、これを各機関で評価したものである¹¹。したがって、試験を実施する者の技量によるばらつきや試験装置によるばらつきは含まれているが、試験体の加工を複数の機関が行った場合のばらつきは含んでいない。

これに関し、日本電気協会は、試験体の加工を複数の機関が行った場合、使用する加工機や加工者の技量などによって (1) 微小な寸法の差、(2) 加工面の仕上げ状態の差、が生じ、亀裂先端における応力拡大係数に差が生ずる可能性があるため、寸法公差および表面仕上げを要求することにより、品質を保つとしている。

なお、JAEA における Mini-C(T) に対する FEM 解析の結果¹²では、有限要素解析で得られる J 積分値と弾塑性の破壊力学パラメータである Q パラメータの関係を評価しており、試験片の寸法が小さいほど、低い J 積分値で Q パラメータの値が減少に転

First Round Robin Test on Uniform Specimens of Reactor Pressure Vessel Material”, PVP2012-78661,
 Yamamoto M., et al, “A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens -2nd Report: Fracture Toughness Comparison in Specified Loading Rate Condition-”, PVP2013-97936,
 Yamamoto M., et al, “A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens -3rd Report: Comparison of T_o under Various Selections of Temperature Conditions-”, PVP2014-28898,
 Yamamoto M., et al, “International Round Robin Test on Master Curve Reference Temperature Evaluation Utilizing Miniature C(T) Specimen”, ASTM STP 1576, (2014).

⁹ 資料 3-3 図 6-2

¹⁰ 資料 3-3 表 6-1

¹¹ Yamamoto M., et al, “International Round Robin Test on Master Curve Reference Temperature Evaluation Utilizing Miniature C(T) Specimen”, ASTM STP1576, pp. 53-69, 2015

¹² Takamizawa. H., et al, “On the Application of Mini-CT Test Specimens for Fracture Toughness Evaluation”, PVP2015-45412.

じ、拘束が低下することが示されているが、 $K_{Jc(limit)}$ に相当するJ積分の値が80 kJ/m²以下の範囲(図2-4中の白抜きは $K_{Jc(limit)}$ を超えたデータ)においては、Mini-C(T)のQパラメータの値は0.4T-C(T)から4T-C(T)試験片と同等であることが示されている。このことから K_{Jc} の許容最大値 $K_{Jc(limit)}$ 以下で破壊が発生する場合には予亀裂前縁は強く拘束された状態が維持されることが確認されている。

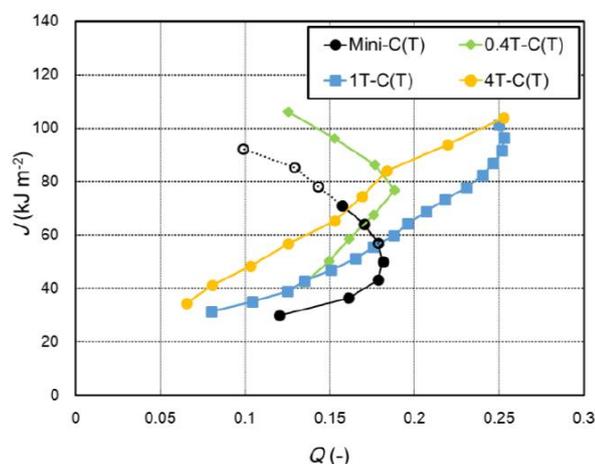


図2-4 寸法の異なるC(T)試験片におけるJ積分値とQパラメータの関係

(c) 曲げ試験片及び円盤状コンパクト試験片

日本電気協会によれば、曲げ試験片(以下「SE(B)」という。)及び円盤状コンパクト試験片(以下「DC(T)」という。)は、ASTM E399¹³に採用された試験片であり、その妥当性については根拠となる文献¹⁴が示されているとのことである。しかし、「解説MCT-1100 フェライト鋼の適用範囲」には、C(T)とSE(B)から得られる参照温度 T_0 の平均的な差は、10°Cから15°Cに達する報告もあるとしている。また、DC(T)については、実際に適用された事例が示されていない。

- Mini-C(T)で求めた T_0 と他の大きさのC(T)から求めた T_0 の間に有意な差がないことを、K-S検定では示されていないため、他の方法で評価する必要があるのではないか。
- C(T)及びMini-C(T)を対象として技術評価することとしてはどうか。
- Mini-C(T)については、試験を実施する者の技量によるばらつき及び試験装置によるばらつきを考慮する必要があるのではないか。

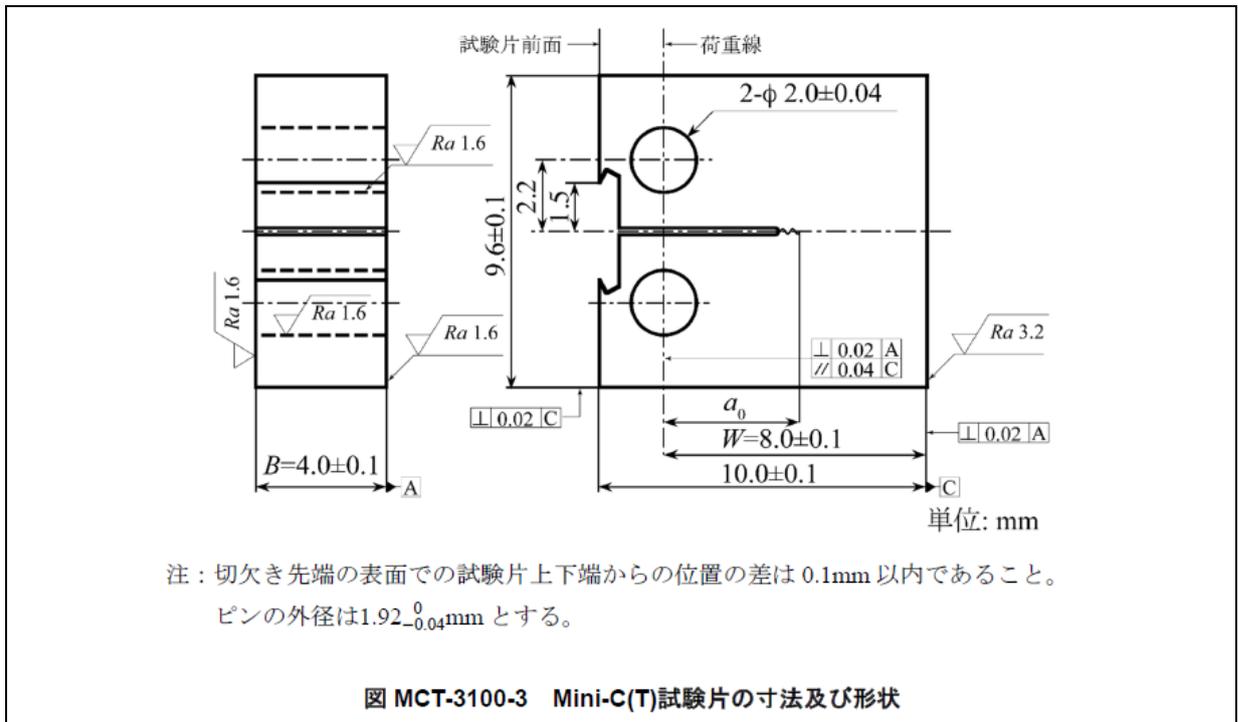
¹³ Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials

¹⁴ Underwood, J. H., Newman, J. C., Jr., and Seeley, R. R., "A Proposed Standard Round Compact Specimen for Plane Strain Fracture Toughness Testing", Journal of Testing and Evaluation, Vo 1.8, No. 6, November 1980, p. 308-313.

Freese, C. E. and Baratta, F. L. "Single Edge-Crack Stress Intensity Factor Solutions", Engineering Fracture Mechanics, Vo 1 73, 2 006, pp. 616-625.

2. 3 Mini-C(T)の寸法及び形状

(1) 規定の内容



(2) 技術評価の結果

(a) 試験片の寸法許容差について

Mini-C(T)は、主要寸法の許容差が緩和されている（表 2-3 及び図 2-5 参照）。

「(解説 MCT-3130) ミニチュアコンパクト試験片の寸法公差」によれば、Mini-C(T)に対する寸法許容差を標準コンパクト試験片に対する相対値で設定することは、製作上の寸法要求としては厳しいことから、加工上の利便性を考慮して、寸法許容差を緩和したとしている。

表 2-3 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)¹⁵

	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 ± 0.08 mm	4 ± 0.1 mm
	幅	8 ± 0.04 mm	8 ± 0.1 mm
	長さ	10 ± 0.08 mm	10 ± 0.1 mm
	高さ	9.6 ± 0.08 mm	9.6 ± 0.1 mm
	ノッチ幅	≤ 0.08 mm	≤ 0.25 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

¹⁵ 資料 3-3 表 5-1

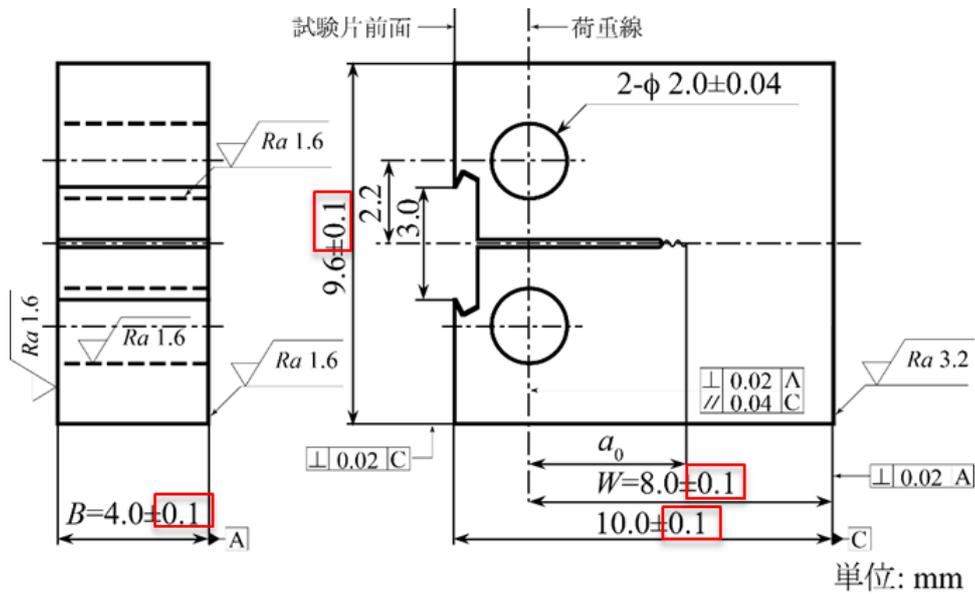


図 2-5 Mini-C(T) 試験片の寸法及び形状¹⁶

これに関し、文献¹⁷には、有限要素解析によりそれぞれの許容差を緩和しても破壊靱性値に影響が小さいことが示されている。

この際、各試験片の許容差が重畳して破壊靱性値のばらつきが最も大きくなる条件においても、許容差の緩和による破壊靱性への影響は 5%程度であり、実験的に得られる標準偏差は 10°C~20°Cの範囲にあることが知られていることから寸法公差に由来する標準偏差はそれよりもはるかに小さいことが示されている（表 2-4 参照）。また、ワーストケースにおける変動を考慮しても寸法公差の緩和による影響は 1%に満たないことが示されている（表 2-5 参照）

表 2-4 寸法公差に起因する T_o の標準偏差¹⁸

$T - T_o$, °C	$K_{J0(1Teq)}$, MPa·m ^{1/2}	Standard deviation of T_o , °C			
		Case 1p	Case 1a	Case 2p	Case 2a
-50	58	2.00	2.12	2.08	2.17
0	100	1.41	1.50	1.47	1.54
50	212	1.21	1.28	1.26	1.31

¹⁶ 資料 3-3 図 5-1

¹⁷ 電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T) 試験片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

¹⁸ (注)

Case-1p: JEAC4216-2011 の寸法公差にしたがう狭隘ノッチ付きミニチュア C(T) 試験片

Case-1a: 寸法公差を緩和した狭隘ノッチ付きミニチュア C(T) 試験片

Case-2p: JEAC4216-2011 の寸法公差にしたがう直線状ノッチ付きミニチュア C(T) 試験片

Case-2a: 寸法公差を緩和した直線状ノッチ付きミニチュア C(T) 試験片

表 2-5 寸法公差に起因する T_o の最大偏差

$T - T_o$, °C	$K_{J0(1Teq)}$, MPa·m ^{1/2}	Standard deviation of T_o , °C			
		Case 1p	Case 1a	Case 2p	Case 2a
-50	58	3.87	4.81	4.49	5.17
0	100	2.58	3.20	3.00	3.45
50	212	2.12	2.63	2.46	2.83

○ Mini-C(T)に対して緩和された寸法許容差は妥当なのではないか。

(b) クリップゲージ取り付け用切欠き部の形状について

Mini-C(T)は、試験片前面での変位測定を行う必要があることから、変位測定を行う部分にクリップゲージ取り付け用切欠き部（以下「切欠き部」という。）を機械加工することが必要となる。しかしながら、図 MCT-3100-3 では、その部分の寸法が示されていない¹⁹。

日本電気協会によれば、切欠き部の詳細寸法（図 2-6 参照）には、切欠き部の深さは 0.6 mm（寸法許容差不明）となっている。ピン穴と切欠き部の間の寸法は、 0.4 ± 0.22 mm にさらに切欠き部の寸法許容差分を減じた値になる。寸法許容差の上限を考慮すると、切欠き部はピン穴に接近しすぎており、変位の測定に支障を及ぼす可能性がある。

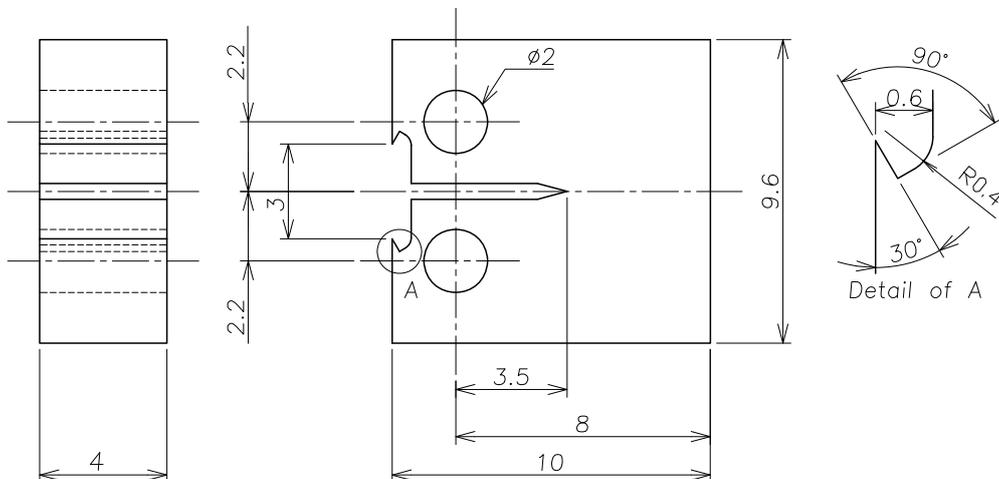


図 2-6 クリップゲージ取り付け用切欠き部の詳細を記載した Mini-C(T) 試験片形状²⁰

- 切欠き部の形状及び寸法について規定する必要があるのではないか。
- ASTM E1921-08 及び 13a では標準コンパクト試験片においてピン穴表面の平行度を規定している。全ての CT 試験片について、ピン穴表面の平行度を規定する必要があるのではないか。

¹⁹ 変位測定部の開口幅が片側 1.5 mm であることが示されているのみである。

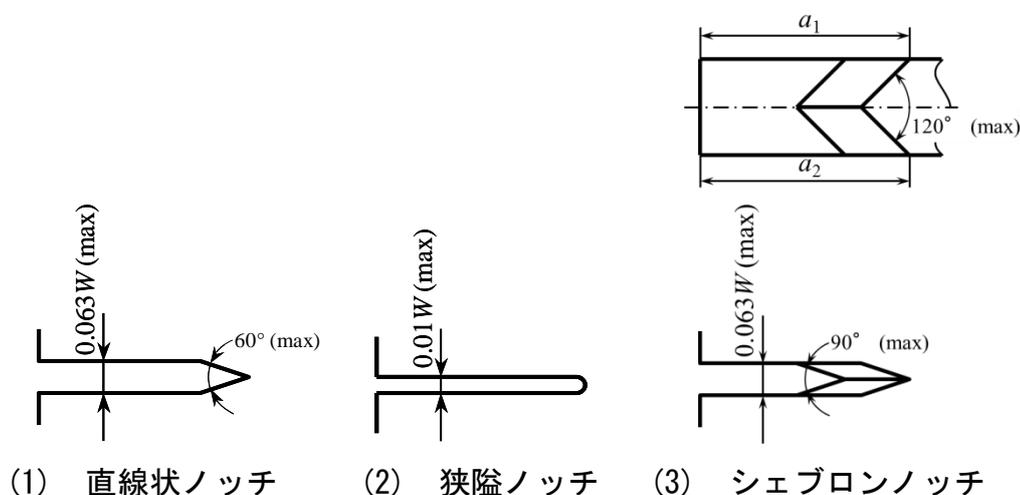
²⁰ 資料 3-3 図 4-2

2. 4 機械切欠きの形状及び寸法並びに疲労予亀裂の寸法

(1) 規定の内容

MCT-3150 機械切欠きの形状

C(T)試験片, DC(T)試験片及び SE(B)試験片について, 機械切欠きは図 MCT-3100-5(1)に示す直線状ノッチ又は図 MCT-3100-5(2)に示す狭隘ノッチによらなければならない。ただし, 図 MCT-3100-5(3)に示すシェブロンノッチを用いてもよい。Mini-C(T)試験片の場合, 機械切欠きは図 MCT-3100-5(1)に示す直線状ノッチ又は図 MCT-3100-5(2)に示す狭隘ノッチによらなければならない。Mini-C(T)試験片の直線状ノッチのノッチ先端半径は0.125mm以下とする。Mini-C(T)試験片の狭隘ノッチのノッチ幅は0.01W(max)ではなく, 0.25mm以下とする。



注1: シェブロンノッチにおける a_1 と a_2 の差は0.01W以内であること。

注2: シェブロンノッチの加工に用いる切削刃先角は最大90°であること。

注3: シェブロンノッチ先端半径は0.25 mm以下であること。

注4: Mini-C(T)試験片の直線状ノッチのノッチ先端半径は0.125mm以下であること。

注5: Mini-C(T)試験片の狭隘ノッチのノッチ幅は0.25mm以下であること。

図 MCT-3100-5 機械切欠きの寸法及び形状

(2) 技術評価の結果

機械切欠きの寸法及び形状は, 図 MCT-3100-5 において, 直線状ノッチ, 狭隘ノッチ及びシェブロンノッチの3種類が示されており, Mini-C(T)については, 直線状ノッチ及び狭隘ノッチについて, それぞれ注4及び注5に条件が記されている。

また, 疲労予亀裂の寸法も含めて, 図 MCT-3200-1 には, Mini-C(T)に対する条件が, 他の試験片と比較されている。Mini-C(T)に対して寸法が緩和されるのは, 次のとおりである。

- 狭隘ノッチの最大ノッチ幅が、 $0.01W=0.08$ mm から、 0.25 mm に緩和されている。
- 最小疲労予亀裂長さが、直線状ノッチの場合に 1.3 mm から 0.6 mm に短くなっている。

Mini-C(T)に対する機械切欠きのノッチ幅の緩和については、文献²¹において、有限要素解析の結果から、Mini-C(T)試験片に規定される最大ノッチ幅、 0.08 mm (PZ1a)、 0.25 mm (PZ2a) 及び 0.5 mm (PZ3a) の形状について、降伏点 (σ_0) を 400 MPa、ヤング率を 200 GPa として弾塑性応力解析を行い、ノッチ先端に生じる塑性域寸法の大きさを求め、その結果が示されている (図 2-7 参照)。塑性域は荷重が付加されると大きくなるが、規定されている疲労予亀裂を負荷する際の応力拡大係数 (25 MPa \sqrt{m}) より小さい範囲では、 0.2 mm 程度以下であり、疲労亀裂が 0.6 mm 以上あれば、その亀裂先端はノッチに荷重をかける時に生じる塑性領域をこえて弾性範囲内にあり、切欠きの幅の違いが破壊靱性試験に影響を及ぼすことはないと考えられるとしている。

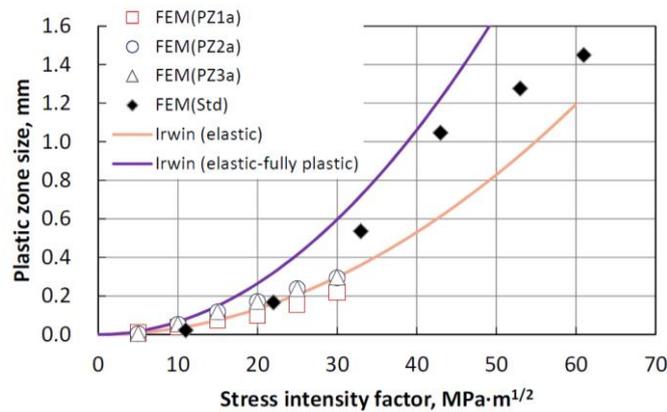


図 2-7 塑性域寸法の推移の比較²²

- Mini-C(T)に対するノッチ幅及び疲労予亀裂の長さの要求の緩和は、技術的に妥当なのではないか。

²¹ 電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T)試験片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

²² 電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T)試験片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
図 5-11

2. 5 疲労予亀裂の導入における応力拡大係数の最大値

(1) 規定の内容

MCT-3220 疲労予亀裂の導入手順

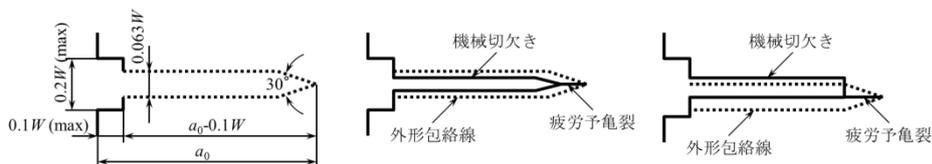
最終段階の疲労予亀裂導入は、疲労予亀裂の最後の 50%の進展、直線状ノッチに対し 1.3 mm、狭隘ノッチに対し 0.6 mm、Mini-C(T) 試験片に対し 0.6 mm のいずれか小さい方の範囲に対し適用する。最終段階で試験片に負荷する応力拡大係数の最大値 K_{MAX} は次の (1) 及び (2) の小さい方以下とすること。

(1) $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

(2) 試験結果 (K_{Jc}) を破壊靱性試験の試験温度と疲労予亀裂導入時の温度の

降伏強さの比で補正した値の 0.6 倍 ($0.6 \times \frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}} K_{Jc}$)

ただし、予亀裂導入時に K_{MAX} を単調減少させるときは、疲労予亀裂の最後の 0.2 mm の進展に対してのみ、 K_{MAX} が最終段階の要求を満足していればよい。



(1) 外形包絡線

(2) 許容される機械切欠きと

(3) 許容されない機械切欠きと

疲労予亀裂の例

疲労予亀裂の例

試験片タイプ	C(T) 試験片, DC(T) 試験片, SE(B) 試験片		Mini-C(T) 試験片	
	直線状ノッチ	狭隘ノッチ	直線状ノッチ	狭隘ノッチ
最大ノッチ幅	0.063W	0.01W	0.5mm	0.25mm
最大ノッチ角 度	60°	機械加工のま ま	60°	機械加工のま ま
最小疲労予亀 裂長さ	1.3mm と 0.05B の いずれか大き い方	0.6mm と 0.025B の いずれか大き い方	0.6mm	0.6mm

図 MCT-3200-1 機械切欠き形状及び疲労予亀裂形状

(2) 技術評価の結果

C(T) の直線状ノッチの最小疲労予亀裂長さは、最小で 1.3 mm であるが、Mini-C(T) では 0.6 mm とされている。図 2-7 に示すように、規定されている疲労予亀裂を導入する際の最大応力拡大係数 ($25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) より小さい範囲では、塑性域はノッチ先端から 0.2 mm 程度以下の範囲であり、疲労予亀裂が 0.6 mm 以上あれば、機械切欠きに

より生じる塑性域の範囲は、いずれの切欠きにおいても疲労亀裂長さよりも十分小さいと説明されている。

疲労予亀裂導入の最終段階で試験片に負荷する応力拡大係数の値については、25 MPa√m 又は $0.6 \times \frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}} K_{Jc}$ のうち小さい方とされているが、「(解説 MCT-3220) 疲労予亀裂の導入手順」において、「ASTM E1921 のように、最終段階の K_{MAX} を 15 MPa√m とすれば、ほとんどのケースにおいて、疲労予亀裂の制限条件を満足する。」と記載している。

- 疲労予亀裂導入後の亀裂先端は疲労予亀裂導入開始時の最大応力拡大係数荷重による塑性領域をこえて、弾性範囲内にあることとなり、破壊靱性試験に与える影響はほとんどないと考えられることから、技術的に妥当なのではないか。
- 最終段階で試験片に負荷する応力拡大係数の値 25 MPa√m を 15 MPa√m としなかった理由について確認する必要があるのではないか。

2. 6 サイドグループ

(1) 規定の内容

MCT-3300 サイドグループ

サイドグループの導入は任意である。サイドグループは、予亀裂の導入後に加工すること。なお、断面が正方形であるような SE(B) 試験片では、亀裂の前縁を一樣にするため、サイドグループを導入することが望ましい。サイドグループの深さの和は $0.25B$ を超えないこと。サイドグループの角度は 90° 以下、底部の半径は 0.5 ± 0.2 mm とすること。サイドグループの形状を図 MCT-3300-1 に示す。サイドグループの深さ X , Y は同じ深さとすること。但し、Mini-C(T) 試験片ではサイドグループを付与しないことを推奨する。

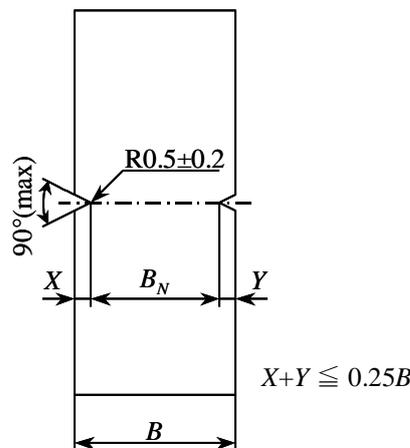


図 MCT-3300-1 サイドグループの形状

(2) 技術評価の結果

MCT-3300 においては、サイドグループの導入は任意であるとし、Mini-C(T) ではサイドグループを付与しないことを推奨するとしている。

国内材を用いて実施された Mini-C(T) のラウンドロビン試験²³では、サイドグループを付与しないで試験が行われ、他の必要条件をすべて満たしていれば寸法の異なる C(T) と同等の T_0 を取得できるとしている。

図 MCT-3300-1 に従ってサイドグループを設ける場合、グループの底部に半径 0.5 mm ± 0.2 mm の R を加工し、角度 90° の V 字型の溝を形成するが、サイドグループの深さの和は $0.25B$ とされているため、Mini-C(T) の場合、サイドグループの深さは最大で 0.5

²³ Yamamoto M., et al, "A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens: First Round Robin Test on Uniform Specimens of Reactor Pressure Vessel Material", PVP2012-78661, Yamamoto M., et al, "A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens -2nd Report: Fracture Toughness Comparison in Specified Loading Rate Condition-", PVP2013-97936, Yamamoto M., et al, "A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens -3rd Report: Comparison of T_0 under Various Selections of Temperature Conditions-", PVP2014-28898, Yamamoto M., et al, "International Round Robin Test on Master Curve Reference Temperature Evaluation Utilizing Miniature C(T) Specimen", ASTM STP 1576, (2014).

mm となり、角度 90° の V 字型の溝を形成することができない。このため、C(T)試験片のサイドグループと相似形にならない。

- Mini-C(T)に対してサイドグループを付与した場合の影響について、確認する必要があるのではないか。

2. 7 寸法測定精度

(1) 規定の内容

MCT-4100 試験の準備

試験前に試験片の寸法測定、変位計の確認を行う。

- (1) B, B_N , 及び W の値を測定する。測定精度は ± 0.05 mm あるいは寸法の $\pm 0.5\%$ のいずれか大きい方以下とすること。
- (2) 試験開始の前に変位計の動作チェックを行うこと。

(2) 技術評価の結果

MCT-4100 試験の準備(1)項において、測定精度を ± 0.05 mm あるいは寸法の $\pm 0.5\%$ のいずれか大きい方以下とすることが規定されている。Mini-C(T)の場合、例えば試験片板厚寸法の 0.5% は 0.02 mm となるが、規定により ± 0.05 mm の精度で測定すればよいこととなる。板厚は 4 mm であるため、測定精度 ± 0.05 mm は板厚の $\pm 1.25\%$ である。また、Mini-C(T)の寸法許容差は ± 0.1 mm である。

- Mini-C(T)に対しては、測定精度 ± 0.05 mm は大きすぎるのではないか。

2. 8 Mini-C(T)の変位測定における換算定数

(1) 規定の内容

MCT-3130 ミニチュアコンパクト試験片

Mini-C(T)試験片の寸法及び形状を図 MCT-3100-3 に示す。試験片前面にナイフエッジの先端を配置し、相対するナイフエッジが平行になるようにすること。この場合、荷重線変位は試験片前面で測定した変位に 0.73 倍して求める。なお、妥当性が確認された場合は、試験片前面以外で変位を測定して荷重線変位に変換するか、あるいは直接荷重点変位を測定してもよい。初期亀裂長さ a_0 は $0.5W \pm 0.05W$ とすること。この場合、 W は実測値を用いる。

(2) 技術評価の結果

Mini-C(T)は、クリップゲージ等の変位測定器具の荷重線内側への装着は困難なことから、試験片前面での変位測定が必要となる。このため、試験片前面で測定された変位から荷重線変位を求める方法を規定しており、試験片前面で測定した変位を荷重線変位に換算する定数（換算定数）を 0.73 としている。これに関し、文献²⁴には、以下のとおり説明されている。

Mini-C(T)の各部の寸法を図 2-8 のようにしたとき、荷重線変位 V と試験片前面変位 V' との関係は幾何学的な関係から、

$$V = \frac{R}{R'} V', \quad R = \frac{1}{2}(W + a), \quad R' = \frac{1}{2}(W + a) + e \quad (4.5)$$

により与えられる。

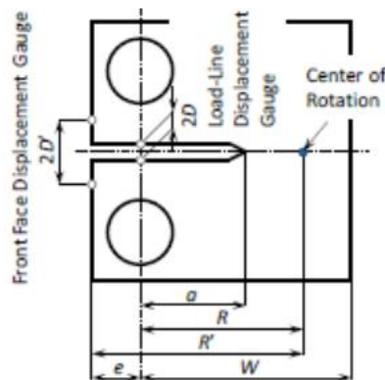


図 2-8 Mini-C(T)の寸法²⁵

²⁴ 三浦直樹 博士論文「統計的手法を導入したマスターカーブ法による原子炉圧力容器の破壊靱性評価に関する研究」、東京大学

²⁵ 三浦直樹 博士論文「統計的手法を導入したマスターカーブ法による原子炉圧力容器の破壊靱性評価に関する研究」、東京大学、図 4. 5

$e = W/4$ であるから、上式はき裂長さ比 a/W のみの関数として与えられる。

$$V = \frac{1+a/W}{1.5+a/W} V' \quad (4.6)$$

a/W と V/V' の関係を図 2-9 に示す。

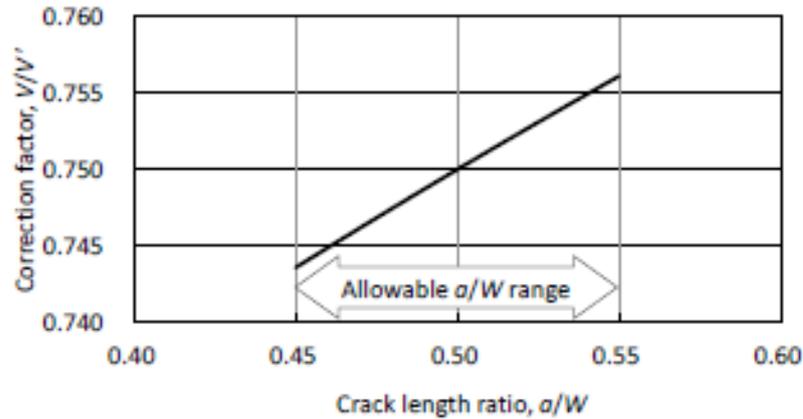


図 2-9 a/W と V/V' の関係²⁶

a/W が下限値 0.45、標準値 0.50、および上限値 0.55 のときの V の V' に対する比（換算定数）はそれぞれ 0.744、0.750、および 0.756 となり、その差は $\pm 0.8\%$ の範囲に収まっており、 a/W が標準値 0.50 の場合換算定数は 0.750 となる。

負荷に伴う変形がリガメント中心を中心とする剛体の回転により表されるものと仮定したときの変形は図 2-10 の模式図のようになり、回転角 θ と荷重線変位 V の関係、および θ と試験片前面変位 V' の関係は図に示す幾何学的関係からそれぞれ次式で与えられる。

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{V/2 + D}{(D^2 + R^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{D}{R} \right) \quad (4.7)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{V'/2 + D'}{(D'^2 + R'^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{D'}{R'} \right) \quad (4.8)$$

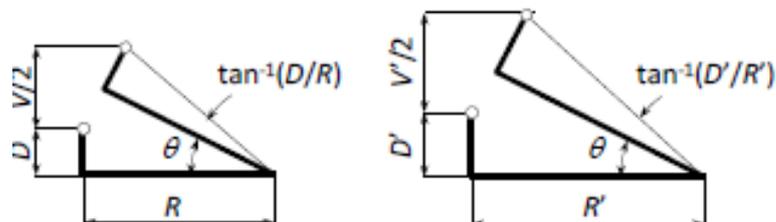


図 2-10 試験体寸法の変形概要²⁷

²⁶ 三浦直樹 博士論文「統計的手法を導入したマスターカーブ法による原子炉圧力容器の破壊靱性評価に関する研究」、東京大学、図 4. 6

²⁷ 三浦直樹 博士論文「統計的手法を導入したマスターカーブ法による原子炉圧力容器の破壊靱性評価に関する研究」東

両式を等値して、 V と V' との関係は、

$$\sin^{-1} \left[\frac{V/2+D}{(D^2+R^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{D}{R} \right) = \sin^{-1} \left[\frac{V'/2+D'}{(D'^2+R'^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{D'}{R'} \right) \quad (4.9)$$

を解くことによって求められる。標準寸法以上の試験片で満足されるであろう $D/R \ll 1, D'/R' \ll 1$ 、および微小変形に関する $V/R \ll 1, V'/R' \ll 1$ なる条件を導入すると、上式は、

$$\frac{V/2+D}{R} - \frac{D}{R} = \frac{V'/2+D'}{R'} - \frac{D'}{R'} \quad (4.7)$$

と簡略化され、式(4.5)が得られる。

他の文献²⁸では、弾塑性有限要素解析により換算に関する検討を行っており、図2-11に示す通り、加工硬化指数の違いや荷重線変位の大きさによって換算定数が変わっているものの、換算定数は0.73~0.74となっており、前述の0.75よりも小さい値となることが示されている。

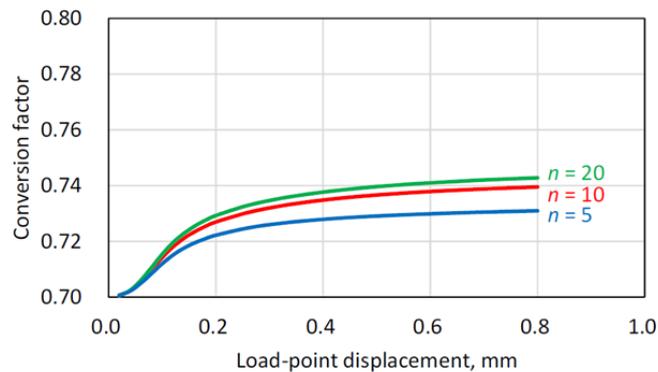


図 2-11 解析的に得られた換算定数の推移²⁹

ASTM E1921 や ASTM E399³⁰では、換算定数を0.73としているが、ASTM E1820³¹は0.75としている。これは、ASTM E1820が小規模降伏状態を超えた延性亀裂進展を伴う変形までを含んでいるためと考えられる。

また、これらの換算定数を比較した場合、換算定数を小さな値とすることにより、 K_{Jc} は小さくなることから、参照温度 T_0 も高めの値となり、保守的な評価につながると思われる。さらに、文献³²は、換算定数を0.73から0.75まで変化させた場合の T_0 への影響を検討しており、その差は小さいことを示している。(表2-6参照)

京大学、図4. 7

²⁸電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T) 試験片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

²⁹ 電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T) 試験片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 図3-9

³⁰ Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials

³¹ Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness

³² 電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T) 試験片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

表 2-6 換算定数が J 積分、破壊靱性、参照温度に及ぼす影響³³

Conversion Factor	Average of J_e , kN/m	Average of J_p , kN/m	Average of J_c , kN/m	$K_{Jc (med)}$, MPa·m ^{1/2}	T_o , °C
0.73	16.3	47.6	63.9	80.6	-103.0
0.74		48.2	64.6	80.8	-103.2
0.75		48.9	65.2	81.0	-103.4

- 上記を踏まえれば、換算定数 0.73 とすることは妥当なのではないか。

³³ 電力中央研報告書 Q15001 ミニチュア C(T) 試験片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
図 3-1

2. 9 試験片個数・データ個数について

(1) 規定の内容

MCT-4220 試験片個数

本規程に従い T_0 を決定する際に必要とされる試験片個数を準備する必要がある。単一試験温度法において必要となる有効な K_{Jc} のデータ数を MCT-5111、複数試験温度法において必要となる有効な K_{Jc} のデータ数を MCT-5211 に示す。

MCT-5111 必要なデータ数

データセットは表 MCT-5100-1 の要求を満足すること。

表 MCT-5100-1 単一試験温度法による T_0 決定のための試験片個数の要求

$(T-T_0)$ の範囲 [°C]	$K_{Jc(\text{med})}$ 範囲 (参考) [MPa $\sqrt{\text{m}}$]	有効な K_{Jc} の必要個 数
$-14 \leq (T-T_0) \leq 50$	$(84 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 212)$	6
$-35 \leq (T-T_0) \leq -15$	$(66 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 83)$	7
$-50 \leq (T-T_0) \leq -36$	$(58 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 65)$	8

注：この表においては、 $(T-T_0)$ 及び $K_{Jc(\text{med})}$ は四捨五入して最も近い整数に丸める。

MCT-5211 必要データ数

以下に示す重み付けの考え方により必要なデータの個数を規定する。(22)式を満足するデータセットは必要なデータ個数を有するデータセットとすることができる。

$$\sum_{i=1}^3 r_i n_i \geq 1 \quad (22)$$

ここで、 r_i は表 MCT-5200-1 に示す区分 i の温度領域 $(T-T_0)$ にある有効データの個数、 n_i は表 MCT-5200-1 に示す各温度領域における重み係数である。

表 MCT-5200-1 複数試験温度法における重み係数

区分 i	$(T-T_0)$ の範囲 [°C]	重み係数 n_i
1	$-14 \leq (T-T_0) \leq 50$	1/6
2	$-35 \leq (T-T_0) \leq -15$	1/7
3	$-50 \leq (T-T_0) \leq -36$	1/8

注：この表においては、 $(T-T_0)$ は四捨五入して最も近い整数に丸める。

(2) 技術評価の結果

MCT-4220 において、単一試験温度法について MCT-5111、複数試験温度法について MCT-5211 にそれぞれ必要となる有効な K_{Jc} データ数を規定しているとしている。

単一試験温度法については、表 MCT-5100-1 において、 $(T-T_0)$ の範囲に応じて 6 個～

8個と規定されている。複数試験温度法については、表 MGT-5200-1 において、 $(T - T_0)$ の範囲に応じて重み係数が 1/6 から 1/8 と規定されている。

これに関し、日本電気協会は、ASTM E1921 の規程を採択したもので、JEAC4216³⁴の制定時に追加の技術検証は行っていないとしている。また、ASTM E1921 の改定を議論する規格会議において、この必要な試験片数に従えば、 T_0 の信頼性 87.5%以上を満たす評価となるという報告がなされているとし³⁵、 T_0 の信頼性は試験片寸法に寄らないことから、Mini-C(T) 試験片に対して適用できない理由はないとしている。

JEAC4206-2016 では、文献³⁶をもとに、 T_0 の標準偏差を有効試験片数に依存する(1)式³⁷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る。

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

JEAC4216 は、ASTM E1921 を参考に作成したとのことであるが、標準偏差の式は ASTM E1921 で与えられる以下のマージンの式とは異なる³⁸。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\beta^2}{r} + \sigma_{exp}^2}$$

$\beta = K_{Jc(med)}$ に依存する定数

$r = T_0$ 導出に用いた有効な試験数、

σ_{exp} = 試験に依存する不確かさの定数、4°C

$K_{Jc(med)}^{eq}$ IT equivalent ^A (MPa√m)	β (°C)
83 to 66	18.8
65 to 58	20.1

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、ASTM E1921 の式は、より簡易的な評価を目指したものと思われるとしている。

- 技術根拠とされる文献を確認し、判断することとしたい。

³⁴ 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

³⁵ 資料 4-3 p 7

³⁶ 電力中央研究所報告 Q07305 「マスターカーブ法による破壊靱性値曲線の合理的設定方法の提案」

³⁷ JEAC4206-2016 (2)式

³⁸ JEAC4206 の式には、 σ_{exp} の項は含まれていない。

2. 10 試験温度の制御と測定

(1) 規定の内容

MCT-4230 試験温度の制御と測定

試験中にわたり試験温度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ に亀裂先端近傍で維持されるように制御し、試験片の温度を測定する。試験温度の計測の結果、試験温度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ に入る試験温度を試験結果としてよい。

(2) 技術評価の結果

MCT-4230 において、試験温度の計測の結果、試験温度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ に入る試験温度を試験結果としてよいと規定し、「(解説 MCT-4230) 試験温度の制御と測定」において、例として、目標試験温度が -70°C に対して計測範囲が -68°C から -74°C となった場合、試験温度を -71°C とすることが記載されている。これは、参照温度 T_0 の決定に際して、試験体間では最大 6°C の差を許容していることとなる。

日本電気協会は、文献³⁹をもとに、複数試験温度法と単一試験温度法の参照温度評価結果を比較したとしている。

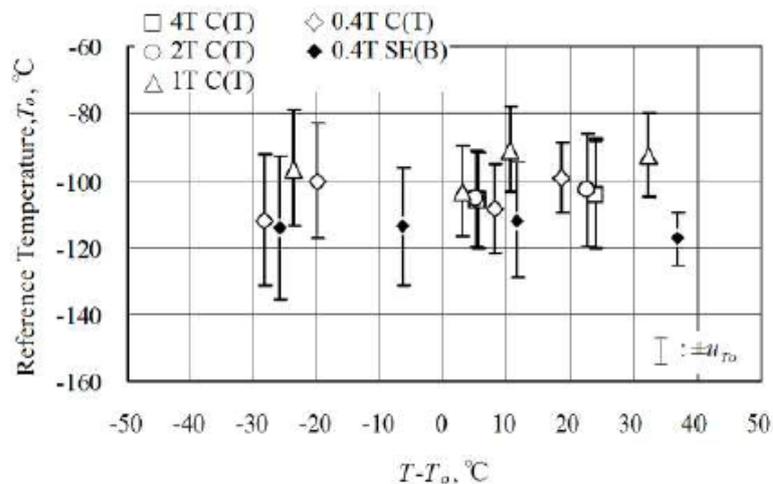


図 2-12 国産圧力容器鋼に対するマスターカーブ評価の試験温度依存性⁴⁰

³⁹ 三浦, 曾根田, “マスターカーブ法による破壊靱性値曲線の合理的設定法の提案” 電力中央研究所研究報告, Q07305, (2008)

⁴⁰ 資料 4-3 図 6-1

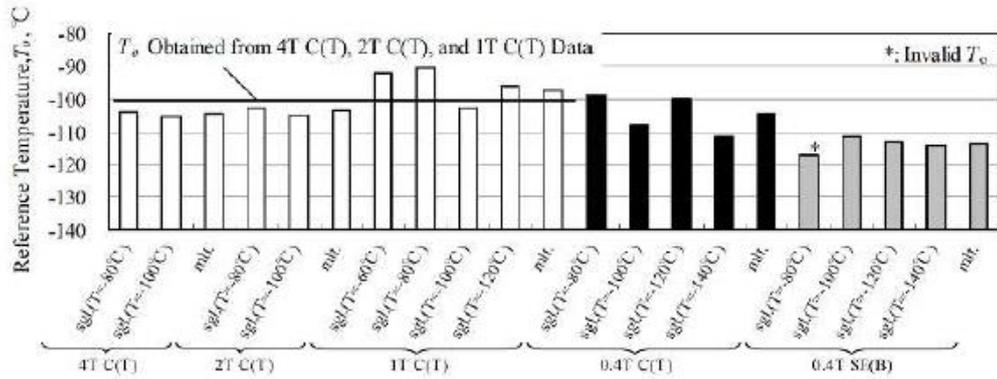


図 2-13 複数試験温度法(mlt.)と単一試験温度法(sgl.)の参照温度評価結果比較⁴¹

また、文献⁴²において3温度以上の複数試験温度法で評価することを推奨しているが、これはより良い評価のために推奨しているとしている。

- 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ればよいのではないか。

なお、ASTM E1921 では、複数試験温度法を規定した上で、単一試験温度での試験について、その一例として示している。

⁴¹ 資料4-3 図6-2

⁴² Wallin, Kim, "Master Curve analysis of ductile to brittle transition region fracture toughness round robin data," VTT Publications 367, (1998)

2. 1 1 データ有効性の判断基準について

(1) 規定の内容

MCT-4340 データの棄却または無効とされる判定基準

得られた K_{Jc} データの内、以下に該当するデータは棄却又は無効に分類する。残りのデータは有効とする。

(1) MCT-4320 の 9 点の各々の亀裂長さの測定値と MCT-4320 で定義される平均値（初期亀裂長さ）との差が、板厚 B の 5%か 0.5 mm のいずれか大きい方を超える場合、当該試験から得られた K_{Jc} のデータは棄却する。

(2) ~ (7) : 略

(2) 技術評価の結果

MCT-4340 において、データの棄却または無効とされる判定基準 7 項目が規定されている。このうち、(1)では「両側面を端部とする破面上の初期亀裂を等間隔に 8 分割した位置 9 点」の各々の亀裂長さの測定値と初期亀裂長さの平均値との差が、板厚 B の 5%か 0.5 mm のいずれか大きい方を超える場合に、データは棄却されるとしている。その他の判定基準については、ASTM E1921 と同じである。

この判定基準(1)の場合、相対的に寸法の小さな試験片、特に Mini-C(T)の場合、 $B=4$ mm に対して B の 5%は 0.2 mm であることから、亀裂長さの各測定値と平均値との間に差は 0.5 mm、1T-C(T)の場合は、1.27 mm である（図 2-14 参照）。

○ この判断基準に関する技術的根拠を確認する必要があるのではないか。

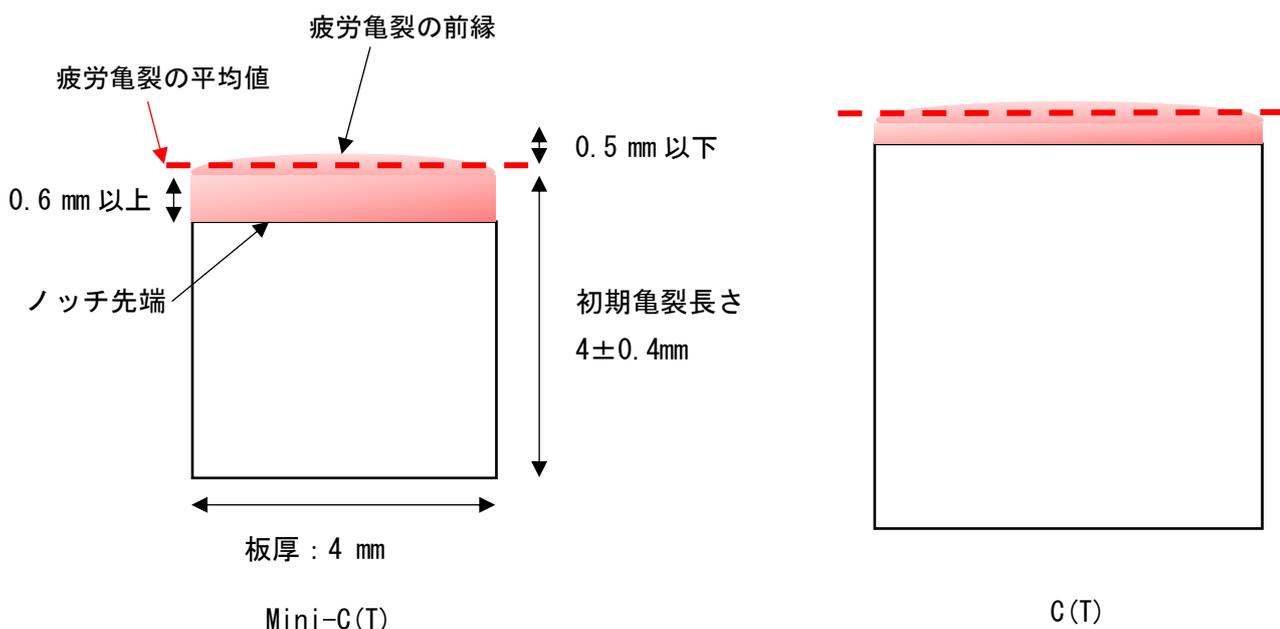


図 2-14 Mini-C(T)と 1T-C(T)の寸法の比（直線上ノッチの場合）

2. 1 2 試験片寸法の補正

(1) 規定内容

MCT-5114 試験片寸法の補正

試験片の寸法効果は、(16)式により補正する。

$$K_{Jc(x)} = K_{min} + [K_{Jc(o)} - K_{min}] \left(\frac{B_o}{B_x} \right)^{1/4} \quad (16)$$

ここで、 B_o は試験片厚さ、 B_x は補正対象の試験片厚さ、 $K_{Jc(o)}$ 、 $K_{Jc(x)}$ は試験片寸法 B_o 及び B_x に対する K_{Jc} である。

(2) 技術評価の結果

MCT-5114において、試験片寸法の補正が(16)式として規定されている。この式を用いて、MCT-5121に規定されているように、試験片厚さを1T (B=25.4 mm)に等価なデータに変換する必要がある。

Mini-C(T)試験片の場合、初期亀裂長さ(約4 mm)に対して最大0.5 mmのばらつき(初期亀裂長さの12.5%)が許容されている。一方、1T-C(T)の場合には、初期亀裂長さ(約25 mm)に対して最大で1.27 mm(初期亀裂長さの5%)のばらつきとなる。したがって、予亀裂前縁の形状を考えると、Mini-C(T)と1T-C(T)では、湾曲が異なると考えられる(図2-14参照)。

- (16)式による補正を行う場合、Mini-C(T)に対して亀裂前縁の湾曲を考慮せず、試験片寸法 B_o を使用してもよいことについて、検討した内容を提示してもらう必要があるのではないか。

2. 1.3 暫定参照温度 T_{o0} の算出

(1) 規定の内容

MCT-5130 暫定参照温度 T_{o0} の算出

(19)式により求めた $K_{Jc(\text{med})}$ を用いて、(21)式で算出する。

$$T_{o0} = T - \left(\frac{1}{0.019} \right) \ln \left[\frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right] \quad (21)$$

$K_{Jc(\text{med})}$ の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 T_{o0} の単位は $^{\circ}\text{C}$ である。MCT-5300 に示す有効性に関する要求が満たされるとき、 T_{o0} は T_o となる。

MCT-5220 暫定参照温度 T_{o0} の算出

暫定参照温度 T_{o0} の算出には K_{Jc} の有効データ、及び MCT-4340 による無効データのすべてを含めること。ただし、複数試験温度法における無効データの扱いは以下のとおりとする。

(1)～(4)：略

K_{Jc} の有効データ及び無効データのすべてについて、(16)式により 1T 相当データに変換する。複数温度下の試験から暫定的な T_{o0} を決定するには次式による。

$$\sum_{i=1}^N \delta_i \frac{\exp[0.019(T_i - T_{o0})]}{11.0 + 76.7 \exp[0.019(T_i - T_{o0})]} - \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - 20)^4 \exp[0.019(T_i - T_{o0})]}{\{11.0 + 76.7 \exp[0.019(T_i - T_{o0})]\}^5} = 0 \quad (23)$$

ここで、 N は試験片の個数、 T_i は $K_{Jc(i)}$ に対応する試験温度である。 $K_{Jc(i)}$ は K_{Jc} の有効データ、あるいは無効なデータを置換したダミーデータであり、いずれについても予め 1T 相当のデータに変換しておく。また、 δ_i はデータが有効な場合に 1、無効なデータに対し 0 とする。(23)式を反復計算によって解いて T_{o0} が得られる。評価例については附属書 F を参照のこと。

(2) 技術評価の結果

「附属書 E(参考) T_o の算出例(無効な K_{Jc} データを含む場合)」において、「表 E.2 データセット」に基づく暫定参照温度は -91.8°C としている。同表に示す無効データ 2 個 ($K_{Jc} = 225, 250 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) の値を $K_{Jc(\text{limit})}$ ($= 217.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) の前後で変化させた場合の暫定参照温度の変化を図 2-15 に示す。 K_{Jc} 値が有効データの範囲では暫定参照温度 T_{o0} は K_{Jc} 値の上昇に対して徐々に低下しているが、無効データに移行すると不連続に約 2°C 低下している。

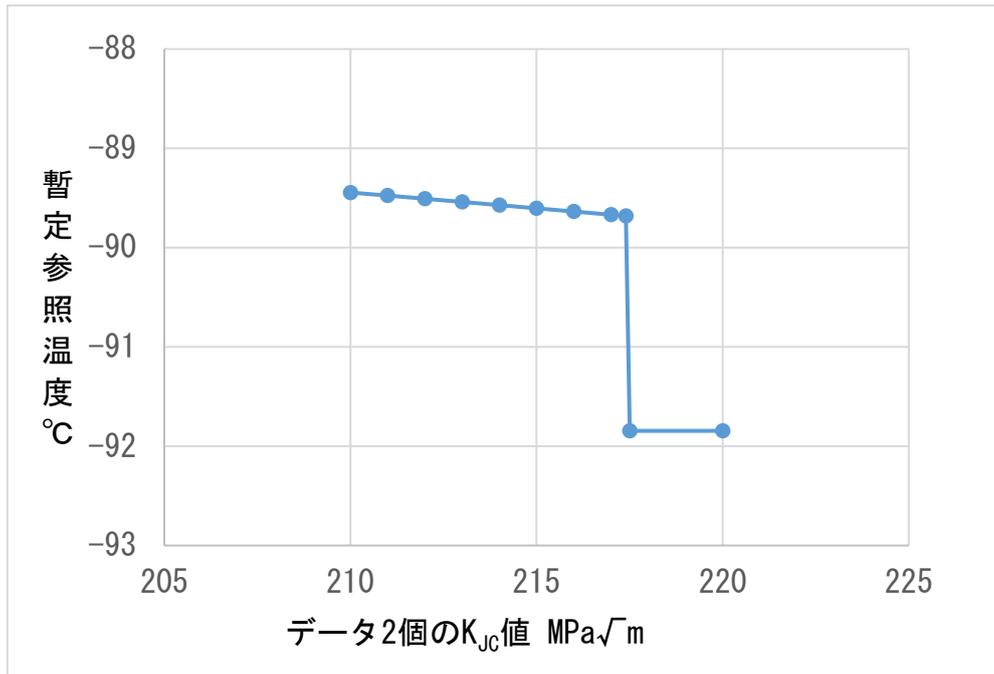


図 2-15 データ 2 個の値を変化させた場合の暫定参照温度計算値の変化
($K_{Jc}=225, 250 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

- 暫定参照温度の急激な低下は、算出式に検討の余地があるということではないか。

参考

<1>ノッチの形状について

ASTM E1921 の条件と比較すると、Mini-C(T)の直線状ノッチの先端半径は0.125 mm以下、狭隘ノッチではノッチ幅が0.25 mm以下であることが追加されている。また、ASTM E1921 ではすべての試験片に対して、最短の疲労予亀裂長さは直線状ノッチでノッチ幅の1/2 または1.3 mmの長い方、狭隘ノッチではノッチ幅の1/2 または0.6 mmの長い方としており、それぞれのノッチで試験片板厚の5%、2.5%と比較している JEAC4216 とは異なる。ここで、直線状ノッチと狭隘ノッチという定義は、ASTM E1921 における Wide Notch ($N \geq 0.01W$) と Narrow Notch ($N < 0.01W$) とは異なる。疲労予亀裂長さに係る評価において、ASTM E1921 では亀裂先端の塑性域寸法を計算する点も、JEAC4216 では考慮しておらず、異なる点である。

さらに、ASTM E1921-19b では狭隘ノッチに対して、最短疲労予亀裂長さがノッチ幅の1/2 または0.25 mm 以上、予亀裂長さ+ノッチ先端長さがノッチ幅の2倍以上と規定されている。

これらを踏まえ、今後の検討が望まれる。

<2>材料の非均質性の確認について

ASTM E1921-19b では、非均質性に関して、スクリーニング基準が規定されており、データセットが巨視的に不均質なものであるかどうかを判断した上で、詳細な分析を実施することができるとされている。試験片数20未満では簡素化された手法を用いて、20以上のデータがある場合においては、バイモーダルやマルチモーダルを評価し、低靱性側の材料を評価することで、保守的な参照温度を設定できるとされている。

これらを踏まえ、非均質な材料であるかどうかを判断する基準や非均質な材料を評価する方法について今後の検討が望まれる。