

電気技術規程

原子力編

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（案）

JEAC 4216-202X

一般社団法人 日本電気協会

原子力規格委員会

# フェライト鋼の破壊靱性試験参照温度 $T_0$ 決定のため試験方法

## 目次

MCT-1000	適用	1
MCT-1100	適用範囲	1
MCT-1110	適用材料	1
MCT-1120	適用試験片	1
MCT-1200	参照規格	1
MCT-1210	JIS規格	1
MCT-1300	記号及び用語の定義	1
MCT-2000	試験装置	4
MCT-2100	試験機	4
MCT-2200	C(T)試験片, DC(T)試験片, 及び Mini-C(T)試験片用治具	4
MCT-2300	SE(B)試験片用治具	4
MCT-2400	変位計	4
MCT-2500	温度制御	4
MCT-3000	試験片の寸法・形状と試験準備	4
MCT-3100	試験片	4
MCT-3110	標準コンパクト試験片	4
MCT-3120	円盤状コンパクト試験片	5
MCT-3130	ミニチュアコンパクト試験片	5
MCT-3140	曲げ試験片	5
MCT-3150	ノッチの形状	5
MCT-3160	塑性変形に対する $K_{Jc}$ の制限値	9
MCT-3170	試験片の採取方向	10
MCT-3200	予亀裂	11
MCT-3210	疲労荷重の条件	11
MCT-3220	疲労予亀裂の導入手順	11
MCT-3300	サイドグループ	13
MCT-4000	破壊靱性試験の試験手順及び評価手順	14
MCT-4100	試験の準備	14
MCT-4200	試験温度及び試験片個数	14
MCT-4210	試験温度	14
MCT-4220	試験片個数	14
MCT-4230	試験温度の制御と測定	14
MCT-4300	試験及び試験後の測定	14

MCT-4310	荷重線変位速度 .....	15
MCT-4320	試験終了後の亀裂長さの測定 .....	15
MCT-4321	疲労予亀裂導入条件の再評価 .....	15
MCT-4330	ポップインの評価 .....	15
MCT-4340	$K_{Jc}$ の棄却又は要検閲とされる判定基準 .....	16
MCT-4341	棄却の判定基準 .....	17
MCT-4342	要検閲の判定基準 .....	17
MCT-4343	疲労予亀裂導入時の最終段階の $K_{MAX}$ の再評価 .....	17
MCT-4400	$K_{Jc}$ の算出方法 .....	18
MCT-4410	破壊開始点の $J_c$ の算出方法 .....	18
MCT-4420	$J_c$ の弾性成分の算出方法 .....	18
MCT-4421	C(T)試験片及び Mini-C(T)試験片 .....	18
MCT-4422	DC(T)試験片 .....	18
MCT-4423	SE(B)試験片 .....	18
MCT-4430	$J_c$ の塑性成分の算出方法 .....	19
MCT-4431	C(T)試験片, DC(T)試験片及び Mini-C(T)試験片の $\eta$ .....	19
MCT-4432	SE(B)試験片の $\eta$ .....	19
MCT-4440	$J_c$ から $K_{Jc}$ への変換方法 .....	19
MCT-5000	$T_0$ の決定 .....	20
MCT-5010	データセットのワイブル分布への当てはめ .....	20
MCT-5011	必要データ数 .....	20
MCT-5012	ワイブル分布モデル .....	20
MCT-5013	ワイブル分布の $K_{min}$ 及び $b$ .....	21
MCT-5014	試験片寸法の補正 .....	21
MCT-5020	$T_{0Q}$ の算出 .....	21
MCT-5021	検閲値への置き換え .....	21
MCT-5022	1T相当の $K_{Jc}$ への変換 .....	21
MCT-5023	$T_{0Q}$ の算出 .....	21
MCT-5030	$T_0$ としての有効性 .....	22
MCT-5100	$T_0$ に対する不確かさを考慮した補正 .....	22
MCT-5110	$T_0$ の標準偏差 .....	22
MCT-5120	$T_0$ に対する不確かさの補正 .....	23
MCT-6000	記録 .....	23
MCT-6100	必要な記録 .....	23
MCT-6200	補足情報 .....	23

## 付属書目次

付属書 A(参考):推奨される試験片用治具, 変位計, 及びナイフエッジ .....	24
付属書 B(参考):試験温度を設定する方法.....	26
付属書 C(参考):荷重線変位速度の設定例 .....	28
付属書 D(参考):単一の試験温度で得られた $K_{Jc}$ による $T_0$ の算出例 (要検閲 $K_{Jc}$ を含む場合).....	29
付属書 E(参考):延性亀裂進展長さの制限値を上回る試験片を含むデータセットによる $T_0$ の算出例.....	31

## 解説目次

(解説 MCT-1100)適用範囲.....	1
(解説 MCT-1110)フェライト鋼の適用範囲.....	4
(解説 MCT-1120)マスターカーブが測定されている材料の降伏強さの実績範囲 .....	4
(解説 MCT-1300)試験温度における材料の縦弾性係数, ポアソン比及び降伏強さ .....	5
(解説 MCT-2100)試験機 .....	7
(解説 MCT-2400)変位計 .....	7
(解説 MCT-2500)Mini-C(T)試験片の温度計測.....	7
(解説 MCT-3100)適用試験片 .....	8
(解説 MCT-3110-1)C(T)試験片前面で変位を測定する場合の定数.....	8
(解説 MCT-3110-2)試験片前面からわずかに離れた位置で測定した変位の換算方法 .....	8
(解説 MCT-3130)ミニチュアコンパクト試験片の寸法公差 .....	10
(解説 MCT-3150)ノッチの形状 .....	11
(解説 MCT-3160) $K_{Jc}$ の制限値 .....	11
(解説 MCT-3210)疲労荷重の条件.....	12
(解説 MCT-3220)疲労予亀裂の導入手順.....	12
(解説 MCT-3300)サイドグループ .....	17
(解説 MCT-4000)試験手順及び評価手順の概要.....	17
(解説 MCT-4100)試験の準備.....	17

(解説 MCT-4210) 試験温度 .....	18
(解説 MCT-4220) 試験片個数 .....	18
(解説 MCT-4230) 試験温度の制御と測定 .....	19
(解説 MCT-4300) 試験及び試験後の測定 .....	20
(解説 MCT-4310) 荷重線変位速度 .....	20
(解説 MCT-4320) 試験終了後の亀裂長さの測定 .....	20
(解説 MCT-4330) ポップインの評価 .....	22
(解説 MCT-4340) $K_{Jc}$ の棄却又は要検閲とされる判定基準 .....	22
(解説 MCT-4341) 亀裂の湾曲程度における棄却の判定基準 .....	24
(解説 MCT-4343) 疲労予亀裂導入時の最終段階の $K_{MAX}$ の再評価 .....	25
(解説 MCT-5000-1) $T_0$ の算出における結果の解釈について .....	27
(解説 MCT-5000-2) 複数の温度で試験した $K_{Jc}$ による $T_0$ の算出方法について .....	28
(解説 MCT-5012) ワイブル分布モデルにおける式の表記について .....	28
(解説 MCT-5014) 重み係数と試験温度の関係について .....	28
(解説 MCT-5023) $T_{0Q}$ の算出 .....	28
(解説 MCT-5100) $T_0$ に対する不確実さの補正 .....	29
(解説 MCT-5110) マスターカーブの信頼下限 .....	30
(解説 MCT-6000) 記録 .....	31
(解説 附属書 A) .....	31
(解説 附属書 B) .....	31
(解説 附属書 D~E) .....	32
(解説 附属書 E.1) .....	32
(解説 附属書 E.2) .....	32
(解説 附属書 E.3) .....	32
参考文献 .....	33

## MCT-1000 適用

### MCT-1100 適用範囲

本規程は、原子力発電所に使用するフェライト鋼の延性脆性遷移温度域における破壊靱性参照温度  $T_0$  の決定方法を規定するものである。

### 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。

### 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。

### MCT-1200 参照規格

#### MCT-1210 JIS 規格

- (1) JIS Z 2241-2023<sup>[1]</sup> 金属材料引張試験方法
- (2) JIS Z 2242-2023<sup>[2]</sup> 金属材料のシャルピー衝撃試験方法
- (3) JIS Z 2245-2021<sup>[3]</sup> ロックウェル硬さ試験—試験方法
- (4) JIS B 7721-2018<sup>[4]</sup> 引張試験機・圧縮試験機—力計測系の校正方法及び検証方法

### MCT-1300 記号及び用語の定義

- (1)  $a_0$  : 初期亀裂長さ [m]—ノッチ長さに疲労予亀裂長さを加えた長さ
- (2)  $b$  : ワイブル分布の形状母数—本規程を含むマスターカーブ法では、理論的<sup>[5]</sup>にこの母数を 4 とする。
- (3)  $b_0$  : 初期リガメント長さ [m]—初期亀裂 (長さ  $a_0$ ) の先端から試験片背面までの距離であり、次式で表される。

$$b_0 = W - a_0$$

- (4)  $B$  : 試験片厚さ [m]—試験片両側面間の距離
- (5)  $B_N$  : 正味試験片厚さ [m]—サイドグループ付き試験片における両サイドグループの谷底間の距離。サイドグループを設けない場合は、 $B_N=B$  とする。
- (6)  $C_0$  : 初期弾性コンプライアンス [m/MN]—初期亀裂長さ  $a_0$  に対する弾性コンプライアンス
- (7)  $E$  : 縦弾性係数 [MPa]
- (8)  $J$  : J 積分 [MN/m]
- (9)  $J_c$  : 破壊の開始点の J 積分 [MN/m]
- (10)  $K$  : 応力拡大係数 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]
- (11)  $K_f$  : 疲労予亀裂導入の最終段階における応力拡大係数の最大値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]

- (12)  $K_J$  : J 積分より導かれる弾塑性等価応力拡大係数 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]— $K_J$  は  $K_{Jc}$  と同様の方法で算出する。
- (13)  $K_{Jc}$  :  $J_c$  より導かれる弾塑性等価応力拡大係数 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]
- (14)  $K_{Jc(\text{limit})}$  : 塑性変形に対する  $K_{Jc}$  の制限値かつ検閲値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]
- (15)  $K_{Jc(\text{med})}$  :  $K_{Jc}$  の中央値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]—ある試験温度における  $K_{Jc}$  のデータセットに対する累積破損確率  $p_f$  が 0.5 に対応する値
- (16)  $K_{Jc \Delta a}$  : 延性亀裂進展に対する検閲値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]—有効な  $K_{Jc}$  の最大値
- (17)  $K_{MAX}$  : 疲労予亀裂導入時の疲労負荷の各サイクルにおける応力拡大係数の最大値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]
- (18)  $K_{min}$  : ワイブル分布の位置母数 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]—本規程を含むマスターカーブ法では、多くの試験結果に基づき経験的にこの値を  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  とする。
- (19)  $K_0$  :  $K_{Jc}$  の正規化パラメータ [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]— $K_0 - K_{min}$  で定義されるワイブル分布の尺度母数に  $K_{min}$  を足したもの。ある試験温度における  $K_{Jc}$  のデータセットに対する累積破損確率  $p_f$  が  $1 - e^{-1}$  に対応する  $K_{Jc}$  が  $K_0$  となる。
- (20)  $\dot{K}$  : 応力拡大係数速度 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ ]—応力拡大係数の増加率
- (21)  $N$  :  $T_0$  の評価に用いる  $K_{Jc}$  の総数
- (22)  $n_i$  : 重み係数
- (23)  $nT$  : 試験片寸法— $n$  は試験片厚さ  $B$  が  $25.4 \text{ mm}$  の何倍となるかを表す値。標準コンパクト試験片、円盤状コンパクト試験片及び曲げ試験片では、試験片厚さが  $B = n \times 25.4 \text{ mm}$  となる。
- (24)  $p_f$  :  $K_{Jc}$  に対する累積破損確率
- (25)  $P_c$  : 破壊開始点における荷重 [ $\text{MN}$ ]— $J_c$  の算出に用いる荷重（図 MCT-4400-1 参照）
- (26)  $P_m$  : 制御荷重 [ $\text{MN}$ ]—疲労予亀裂導入時の最大荷重の許容値
- (27)  $P_{MIN}$  : 疲労予亀裂導入時の疲労サイクルの最小荷重 [ $\text{MN}$ ]
- (28)  $P_{MAX}$  : 疲労予亀裂導入時の疲労サイクルの最大荷重 [ $\text{MN}$ ]
- (29)  $r$  :  $T_0$  の評価に用いる  $K_{Jc}$  のうち有効なもの数
- (30)  $S$  : SE(B)試験片におけるスパン—試験片支持部間の距離 [ $\text{m}$ ]
- (31)  $t_m$  : 制御荷重到達時間 [ $\text{s}$ ]— $P_m$  に到達するまでの時間
- (32)  $T_0$  : 破壊靱性参照温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]—IT 試験片の  $K_{Jc(\text{med})}$  が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  に等しくなる温度である。マスターカーブを定義するパラメータとなる。
- (33)  $T_{0Q}$  : 破壊靱性参照温度の暫定値 [ $^{\circ}\text{C}$ ]—本規程により算出される仮の  $T_0$  であり、すべての有効性条件を満たせば  $T_{0Q}$  は  $T_0$  となる。
- (34)  $T_{0mar}$  :  $T_0$  の算出における不確かさを考慮した  $T_0$  の補正值 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- (35)  $W$  : 試験片幅 [ $\text{m}$ ]
- (36)  $\nu$  : ポアソン比
- (37)  $\sigma_{YS}$  : 降伏強さ [ $\text{MPa}$ ]—引張試験により得られる、0.2%の塑性ひずみに対応する材料の強度

- (38)  $\sigma_{TS}$  : 引張強さ [MPa]  
 (39)  $\sigma_{flow}$  : 流動応力 [MPa]—本規程では、降伏強さ  $\sigma_{YS}$  と引張強さ  $\sigma_{TS}$  の平均として以下の式で算出される。

$$\sigma_{flow} = \frac{\sigma_{YS} + \sigma_{TS}}{2}$$

- (40)  $\sigma_{YS}^f$  : 疲労予亀裂導入時の温度における降伏強さ [MPa]  
 (41)  $\sigma_{T0}$  :  $T_0$  の算出における不確かさに伴う  $T_0$  の標準偏差  
 (42) C(T)試験片 : 標準コンパクト試験片  
 (43) DC(T)試験片 : 円盤状コンパクト試験片  
 (44) Mini-C(T)試験片 : ミニチュアコンパクト試験片  
 (45) SE(B)試験片 : 曲げ試験片 (片側亀裂付き曲げ試験片)  
 (46) ナイフエッジ : 変位計を取り付けるため、先端をナイフのように鋭利にした部分—ナイフエッジが試験片と一体に加工される場合と、独立した部品として準備され試験片に取付けられる場合がある。  
 (47) 荷重線変位 : 荷重線上で測定される試験片の変位—C(T)試験片, DC(T)試験片, 及び Mini-C(T)試験片では、試験片の二つの穴の中心を結ぶ方向の変位であり、通常は二つの穴の中心を結ぶ直線 (荷重線) 上にある、亀裂をまたぐ2点間で測定する。SE(B)試験片では負荷ローラが試験片と接触する位置における、負荷ローラが移動する荷重線方向での変位である。  
 (48) ポップイン : 荷重—変位関係の試験記録の不連続を伴う微小な亀裂の進展及び停止  
 (49) マスターカーブ : MCT-5110 で定義される延性脆性遷移温度域の 1T 試験片に対する  $K_{Jc(\text{med})}$  の温度依存性曲線—マスターカーブは 1T 試験片に相当する曲線であり、本規程では試験で得られた  $K_{Jc}$  を式(24)で 1T 試験片に相当する  $K_{Jc}$  に変換した上で評価に用いる。 $T_0$  はマスターカーブに当てはめて求めるため、本試験方法をマスターカーブ法と称する場合もある。  
 (50) 予亀裂入りシャルピー試験片 :  $W = B = 10 \text{ mm}$  であるような SE(B)試験片  
 (51) ノッチ : 疲労予亀裂の導入に先立って試験片の中心線に沿って機械加工等により導入するスリット  
 (52) 検閲 : 塑性変形又は延性亀裂進展に関する制限値を上回った  $K_{Jc}$  に対して実施する措置—制限値を上回った  $K_{Jc}$  を定められた検閲値  $K_{Jc(\text{limit})}$  又は  $K_{Jc \Delta a}$  で置き換え、 $T_0$  や  $T_{0Q}$  の評価に用いる。  
 (53) 要検閲 :  $K_{Jc}$  が塑性変形又は延性亀裂進展に関する制限値を上回っており、検閲が必要な状態  
 (54) 検閲値 : 検閲において  $K_{Jc}$  を置き換え、 $T_0$  や  $T_{0Q}$  の評価に用いる値

## MCT-2000 試験装置

### MCT-2100 試験機

試験機は、試験片に3点曲げあるいは引張の負荷を加える装置とし、その荷重計はJIS B 7721によって校正・検証し、1級以上でなければならない。変位計は、MCT-2400に従う。試験機は、試験中の荷重及び変位計により測定される変位を連続的に記録する装置、又はコンピュータに取り込む装置を有しなければならない。

コンピュータを用いる場合、デジタル信号の分解能は、荷重計の測定範囲に対して $1/4,000$ 以下、変位計の測定レンジに対して $1/32,000$ 以下が望ましい。

### MCT-2200 C(T)試験片、DC(T)試験片、及び Mini-C(T)試験片用治具

推奨されるC(T)試験片、DC(T)試験片、及びMini-C(T)試験片用治具を附属書Aに示す。治具の材料は、塑性変形を生じないようにJIS Z 2245によるロックウェルCスケール硬さ40以上の鋼を用いることが望ましい。

### MCT-2300 SE(B)試験片用治具

推奨されるSE(B)試験片用治具を附属書Aに示す。試験片支持部間のスパン $S$ は $4W$ とする。治具の材料は、塑性変形を生じないようにJIS Z 2245によるロックウェルCスケール硬さ40以上の鋼を用いることが望ましい。

### MCT-2400 変位計

変位計は、C(T)試験片、DC(T)試験片及びMini-C(T)試験片の荷重線変位又は試験片前面変位の測定、並びにSE(B)試験片の荷重線変位又は亀裂開口変位の測定に用いる。変位計の測定精度は、校正範囲の1%を超えてはならない。なお、変位計の校正器は、 $0.005\text{ mm}$ 以下の間隔で校正ができるものとする。

変位計は、温度に対し補償されなければならない。

### MCT-2500 温度制御

試験中の試験片の温度は、試験片表面を熱電対によって測定する。試験片の温度は、試験温度目標値の $\pm 3^{\circ}\text{C}$ の範囲内に制御する。また、温度制御の再現性は $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内、測定精度は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内にする。Mini-C(T)試験片の場合、試験片近傍の治具の温度から試験片の温度を決定してもよい。ただし、治具の温度と試験片の温度は、予め温度校正を行う。

## MCT-3000 試験片の寸法・形状と試験準備

### MCT-3100 試験片

#### MCT-3110 標準コンパクト試験片

C(T)試験片の寸法及び形状を図MCT-3100-1(1)~(3)に示す。変位計を取り付けるための切欠きを有する図MCT-3100-1(2)~(3)の試験片を用いる場合、試験片の一部として加

工または独立した部品として準備したナイフエッジの先端を、荷重線上に配置し、試験片前面から見て相対するナイフエッジが互いに平行になるようにする。図 MCT-3100-1(1)の試験片を用いる場合、荷重線から  $0.25W$  離れた試験片前面の近傍に、試験片の一部として加工または独立した部品として準備したナイフエッジの先端を配置し、試験片前面から見て相対するナイフエッジが平行になるようにする。この場合、荷重線変位は試験片前面で測定した変位に定数  $0.73$  を乗じて求める。ナイフエッジの先端が試験片前面から離れている場合には、適切な方法で変位を換算する。いずれの試験片においても、初期亀裂長さ  $a_0$  は  $0.5W \pm 0.05W$  とする。

#### MCT-3120 円盤状コンパクト試験片

DC(T)試験片の寸法及び形状を図 MCT-3100-2 に示す。荷重線上にナイフエッジの先端を配置し、試験片前面から見て相対するナイフエッジが平行になるようにする。初期亀裂長さ  $a_0$  は  $0.5W \pm 0.05W$  とする。

#### 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、試験片前面から見て相対するナイフエッジが平行になるようにする。この場合、荷重線変位は試験片前面で測定した変位を  $0.73$  倍して求める。試験中に切欠き部とピン穴の間に塑性変形が生じないように、両者の距離を適切に設定する。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。

#### MCT-3140 曲げ試験片

SE(B)試験片の寸法及び形状を図 MCT-3100-4 に示す。亀裂開口変位の測定に当たっては、試験片前面の近傍にナイフエッジの先端を配置し、試験片前面から見て相対するナイフエッジが平行になるようにする。ナイフエッジの先端が試験片前面からわずかに離れている場合には、適切な方法で変位を換算する。初期亀裂長さ  $a_0$  は  $0.5W \pm 0.05W$  とする。

#### MCT-3150 ノッチの形状

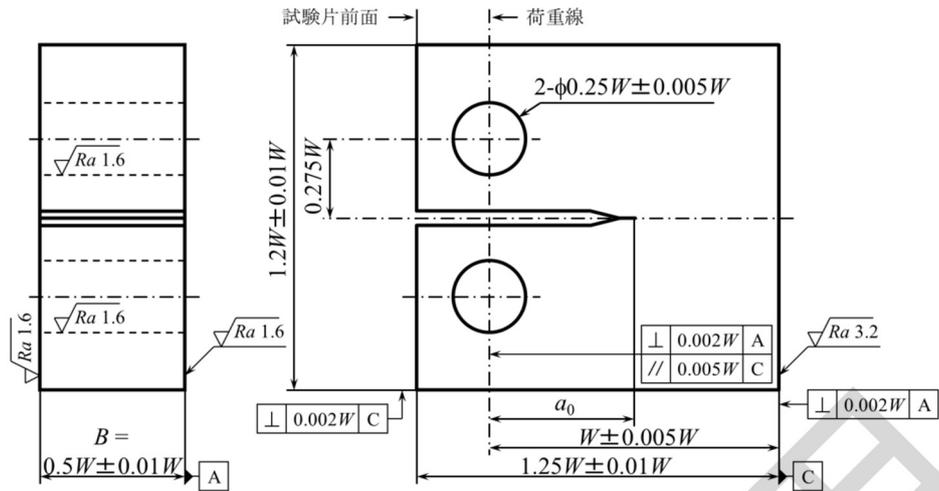
C(T)試験片、DC(T)試験片及び SE(B)試験片について、ノッチは図 MCT-3100-5(1)に示す、機械加工等で導入する直線状ノッチ、又は図 MCT-3100-5(2)に示す、ワイヤ加工等で導入する狭隘ノッチにする。ただし、図 MCT-3100-5(3)に示すシェブロンノッチを用いてもよい。ノッチ先端の曲率半径は、疲労予亀裂の導入が容易となるよう小さいことが望ましい。

Mini-C(T)試験片の場合、ノッチは図 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する。

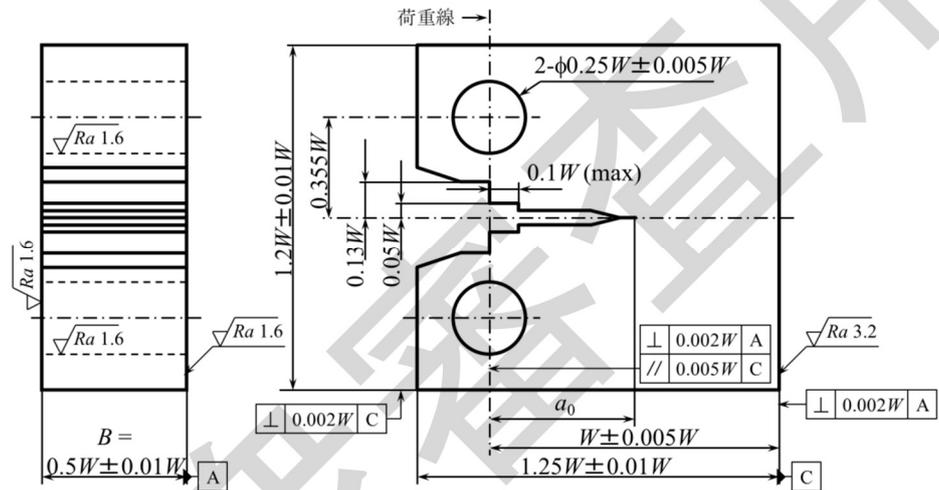
なお、MCT-3220 に記載のとおり、いずれのノッチ形状にあっても疲労予亀裂の先端

を基準とした最大外形寸法の中に納まらなければならない。このことを踏まえてノッチ形状を決定する。

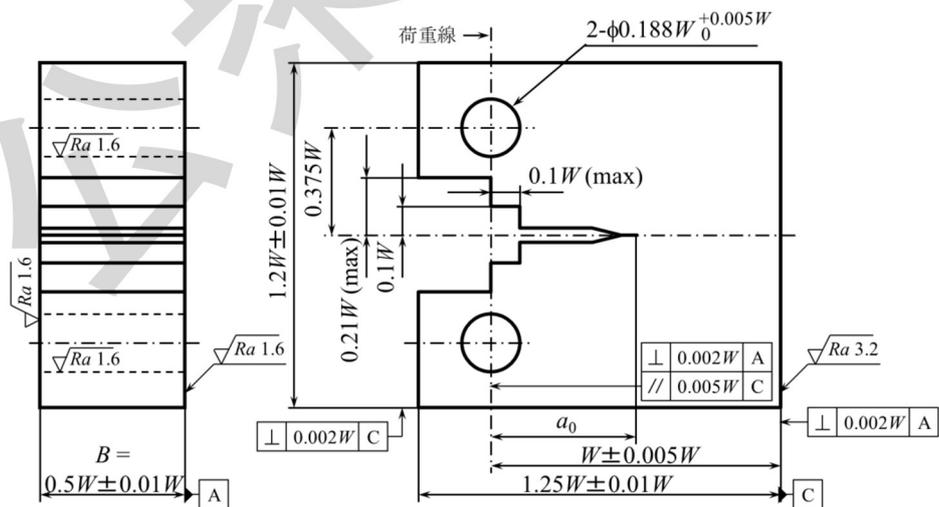
全線審査専用



(1) タイプ I 試験片 (ピンの外径は $0.24W_{-0.005W}^0$ とする。)



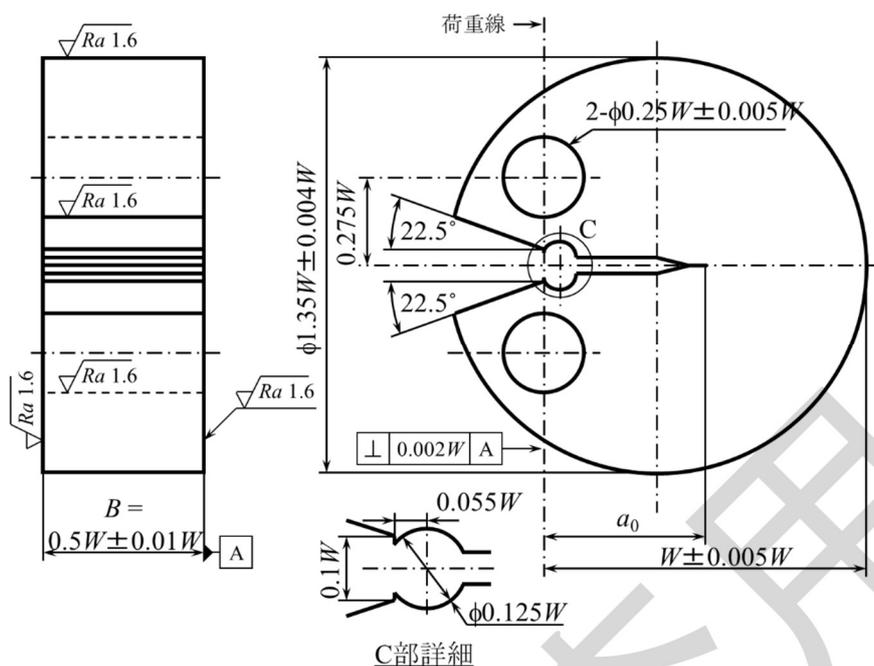
(2) タイプ II 試験片 (ピンの外径は $0.24W_{-0.005W}^0$ とする。)



(3) タイプ III 試験片 (ピンの外径は $0.1875W_{-0.001W}^0$ とする。)

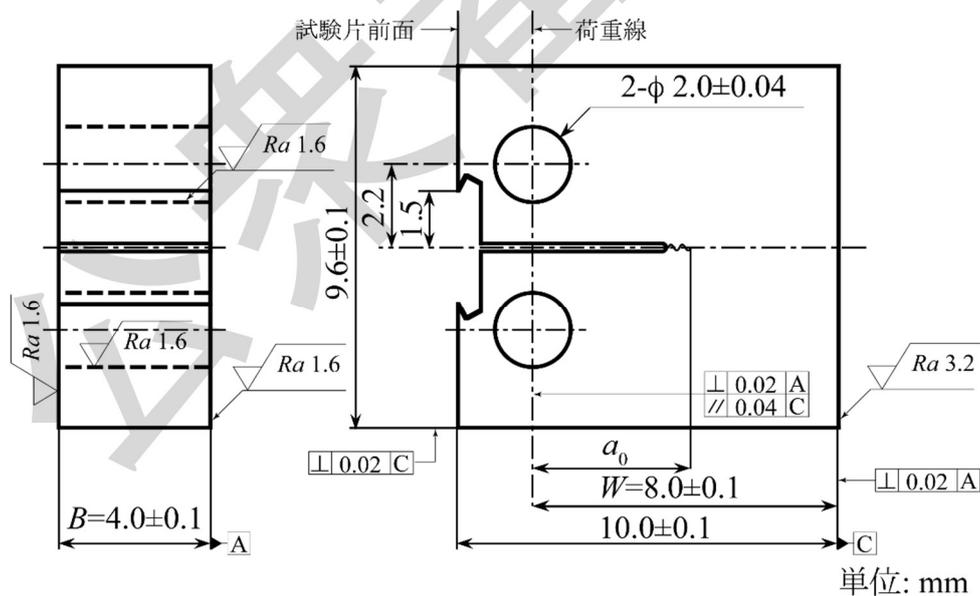
注：ノッチ先端の表面での試験片上下端からの位置の差は $0.005W$ 以内とする。

図 MCT-3100-1 C(T)試験片の寸法及び形状



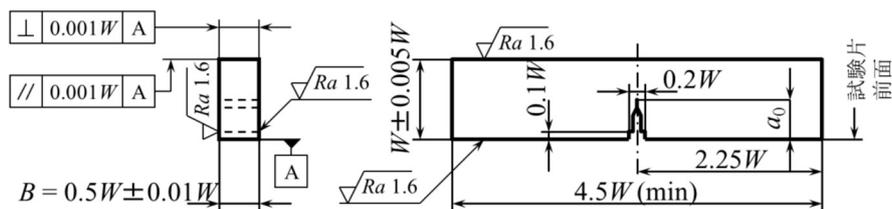
注：ノッチ先端の表面での試験片上下端からの位置の差は  $0.005W$  以内とする。  
 ピンの外径は  $0.24W_{-0.005W}^0$  とする。

図 MCT-3100-2 DC(T)試験片の寸法及び形状

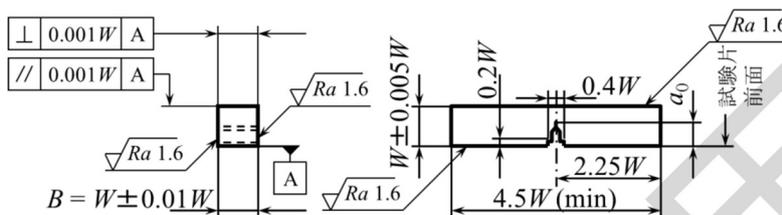


注：ノッチ先端の表面での試験片上下端からの位置の差は 0.1 mm 以内とする。  
 ピンの外径は  $1.92_{-0.04}^0$  mm とする。

図 MCT-3100-3 Mini-C(T)試験片の寸法及び形状



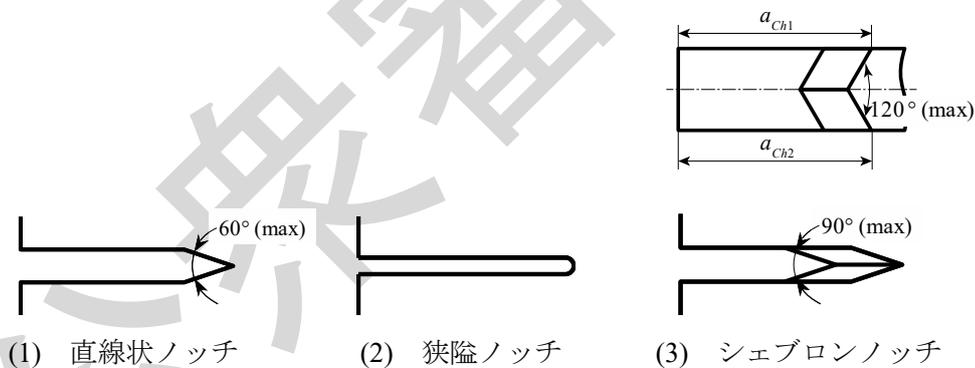
(1) 試験片幅  $W$  と試験片厚さ  $B$  の比が 2 の試験片 ( $W/B = 2$ )



(2) 試験片幅  $W$  と試験片厚さ  $B$  の比が 1 の試験片 ( $W/B = 1$ )

注：ノッチ先端の試験片表面に対する垂直度は  $\pm 2^\circ$  以内とする。

図 MCT-3100-4 SE(B)試験片の寸法及び形状



注 1：シェブロンノッチにおける  $a_{ch1}$  と  $a_{ch2}$  の差は  $0.01W$  以内とする。

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  $90^\circ$  とする。

注 3：シェブロンノッチ先端の曲率半径は  $0.25 \text{ mm}$  以下とする。

図 MCT-3100-5 ノッチの寸法及び形状

### MCT-3160 塑性変形に対する $K_{Jc}$ の制限値

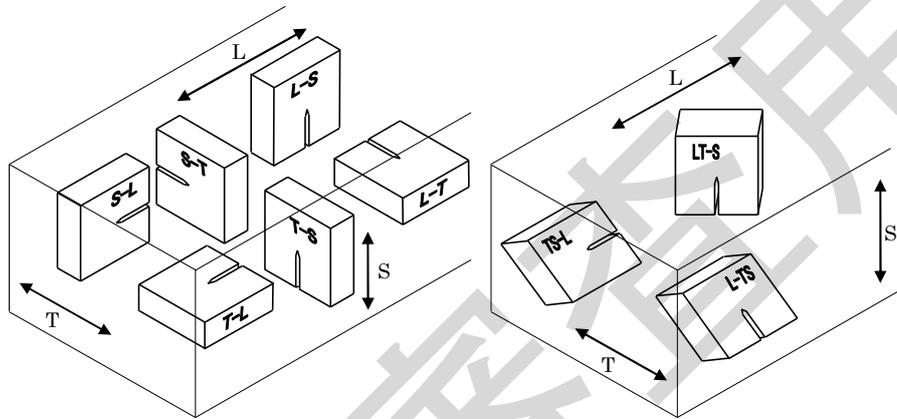
塑性変形に対する  $K_{Jc}$  の制限値を(1)式に定義する。

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

ただし、 $E$  及び  $\sigma_{YS}$  は試験温度における値である。

### MCT-3170 試験片の採取方向

試験片の採取方向の定義は図 MCT-3100-6 による。ただし、 $T_0$  を決定するデータセットの試験片の採取方向は同一とする。ここで、採取方向を示す T-L, T-S などの表記のうち、最初の記号は亀裂面に垂直な方向、二つ目の記号は亀裂の進展方向を意味する。なお、原子炉压力容器の場合、JEAC4201<sup>[6]</sup> SA-2220 の衝撃試験片と同じ T-L 方向とすることが望ましい。



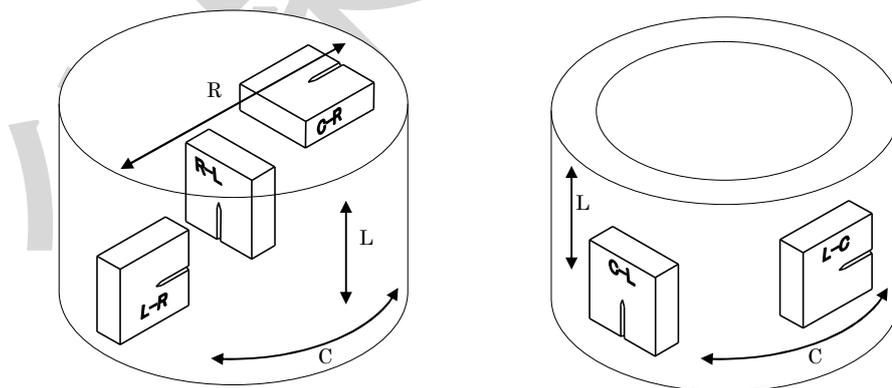
(a) 板材における採取方向

(b) 板材（傾斜方向）における採取方向

L: 主加工方向

T: 板幅方向

S: 板厚方向



(c) 丸棒における採取方向

(d) 中空円筒における採取方向

L: 主加工方向

R: 径方向

C: 円周方向

図 MCT-3100-6 試験片の採取方向

## MCT-3200 予亀裂

### MCT-3210 疲労荷重の条件

試験片の熱処理を行う場合、熱処理は、疲労予亀裂導入前に行う。疲労予亀裂は荷重制御、変位制御、あるいは  $K$  値制御条件下で導入する。疲労予亀裂導入時の最大荷重は以下に示す制御荷重  $P_m$  を超えてはならない。

(1) C(T)試験片、DC(T)試験片及び Mini-C(T)試験片

$$P_m = \frac{0.4 B b_0^2 \sigma_{flow}}{2W + a_0} \quad (2)$$

(2) SE(B)試験片

$$P_m = \frac{0.5 B b_0^2 \sigma_{flow}}{S} \quad (3)$$

(2)式及び(3)式で用いる $\sigma_{flow}$ は、疲労予亀裂導入時の温度における値とする。疲労予亀裂の効率的な導入のために、亀裂面に直交する方向にノッチ先端が圧縮となるような静的な予荷重を付与するか、あるいは疲労荷重の応力比を負とし、繰返し圧縮荷重を付与してもよい。このとき、圧縮荷重のピーク値は(2)式又は(3)式に示す制御荷重  $P_m$  を超えてはならない。

### MCT-3220 疲労予亀裂の導入手順

疲労予亀裂は、連続的又は段階的に疲労予亀裂導入時の応力拡大係数の最大値  $K_{MAX}$  を低下させて導入しなければならない。段階的に低下させる場合、 $K_{MAX}$  低下後の亀裂進展速度の過度な低下を抑制するために、段階ごとの  $K_{MAX}$  の低下率を 20%以下に抑えることが望ましい。 $K_{MAX}$  は図 MCT-3200-1 に示す許容範囲に収まるようにする。

一般的に応力比  $P_{MIN}/P_{MAX}$  を 0.1 以下とするとよい。最大荷重は目標値に対し $\pm 5\%$ 以内としなくてはならない。

図 MCT-3200-1 中の各区間の疲労亀裂進展量に関するパラメータの規定を表 MCT-3200-1 に示す。ここで、ノッチ先端に向けてノッチ幅が減少する部分の長さはノッチ先端長さと呼び、直線状ノッチ、狭隘ノッチ（いずれも Mini-C(T)試験片を含む）のそれぞれについて図 MCT-3200-2 のように定義する。

疲労予亀裂導入時は常に  $K_{MAX}$  が  $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  を下回らなくてはならない。亀裂進展の最後の 0.2 mm の区間 ( $\Delta a_f$ ) では、 $K_{MAX}$  が  $K_f$  を下回らなくてはならない。 $K_f$  は次の(1)及び(2)の小さい方以下とする。

(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

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

なお、 $K_{MAX}$  が  $K_f$  を下回ることの判定は、試験後に MCT-4343 に従って行う。MCT-4343

では、 $K_{MAX}$ が $K_f$ を下回らなかったデータを単に棄却することは認めず、満足しないデータ個数が全データ個数の30%未満であれば満足しないデータを含んで $T_{0Q}$ を算出する。

いずれのノッチ形状にあっても、ノッチの外形は、疲労予亀裂の先端（試験片の両側面で測定したもの）を基準として図 MCT-3200-4 に示される最大外形寸法の中に納まるようにする。ただし、開口変位計の取付けのために荷重線より亀裂先端側に切り込みを導入する場合、その部分の寸法は図 MCT-3100-1(2) , 図 MCT-3100-1(3)又は図 MCT-3100-2 の試験片形状に従い、図 MCT-3200-4 に定められたノッチ及び疲労予亀裂の最大外形寸法(0.063*W*)を上回ってもよい。

疲労予亀裂導入時点では正確な亀裂長さや試験で得られる $K_{Ic}$ は不明である。そのため、MCT-4321 に記載のとおり、試験後に MCT-3220 の規定についての再評価を行う。なお、 $\Delta a_f$ や $\Delta a_{sh}$ 等の疲労予亀裂導入の途中段階の評価にあたっては、両側面から計測した亀裂長さの平均値を用いてもよい。

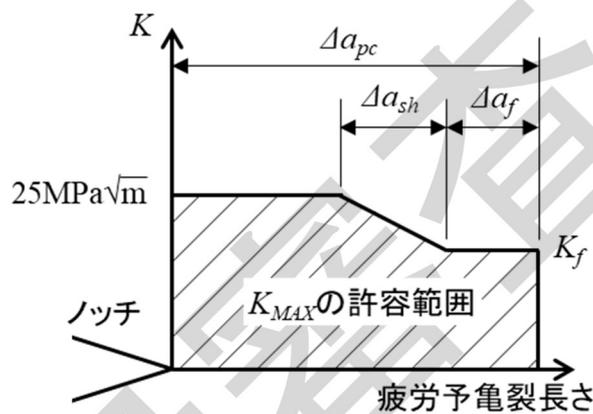


図 MCT-3200-1 疲労予亀裂導入時の $K_{MAX}$ の許容範囲

表 MCT-3200-1 疲労予亀裂導入時の疲労亀裂進展量に関するパラメータの規定

パラメータ	規定
$\Delta a_{pc}$	ノッチ幅の0.5倍, $\Delta a_{sh} + \Delta a_f$ , 0.25 mmをいずれも下回ってはならない。 ノッチ先端長さと $\Delta a_{pc}$ の和はノッチ幅の2.0倍以上とする。(図 MCT-3200-3 参照)
$\Delta a_{sh}$	$r_{p1} - r_{p2}$ 以上とする。 $r_{p1} = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{K_{MAX}}{\sigma_{ys}} \right)^2, r_{p2} = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{K_f}{\sigma_{ys}} \right)^2$ (注1) $K_{MAX}$ は予亀裂導入中の $K_{MAX}$ の最大値 (注2) $\sigma_{ys}$ は疲労予亀裂導入時の温度での降伏強さ。未知の場合は、 $\Delta a_{sh}$ が大きくなるように十分に低い $\sigma_{ys}$ を仮定して $\Delta a_{sh}$ を算出してもよい。
$\Delta a_f$	0.2 mm以上とする。

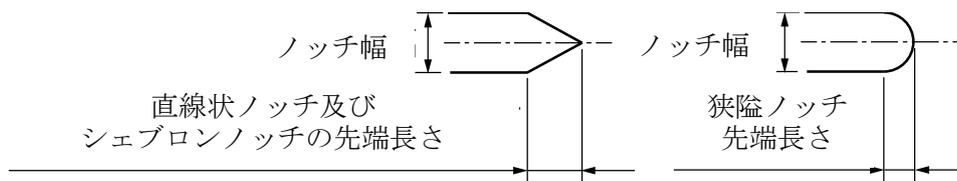


図 MCT-3200-2 ノッチ先端長さの定義

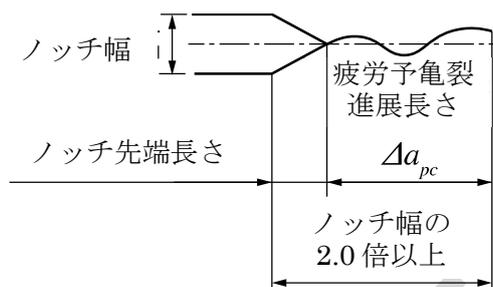


図 MCT-3200-3 ノッチと疲労予亀裂の寸法要求

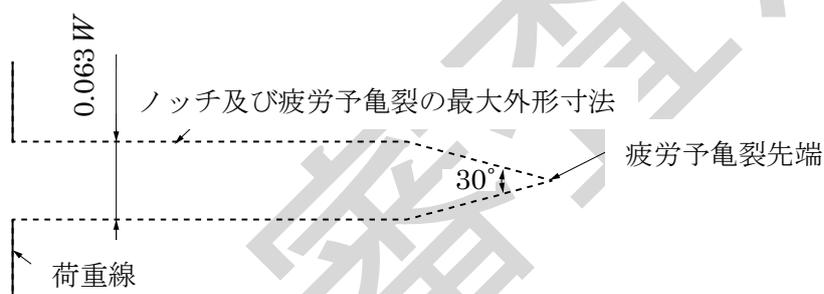


図 MCT-3200-4 ノッチの最大寸法

### 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、疲労予亀裂の導入後に加工する。サイドグループの深さの和は  $0.25B$  を超えてはならない。サイドグループの角度は  $90^\circ$  以下、底部の半径は  $0.5 \pm 0.2 \text{ mm}$  とする。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。なお、SE(B)試験片ではサイドグループを導入することを、Mini-C(T)試験片ではサイドグループを付与しないことを、それぞれ推奨する。

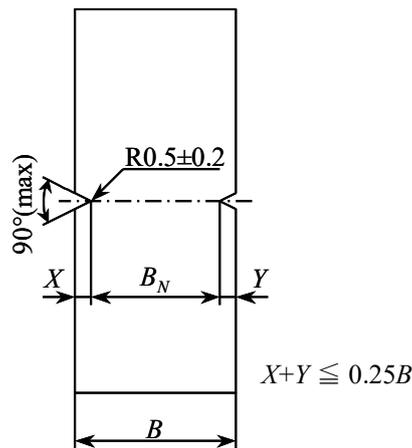


図 MCT-3300-1 サイドグループの形状

#### MCT-4000 破壊靱性試験の試験手順及び評価手順

本節に示す試験手順及び評価手順は、破壊開始点又は  $K_{Jc(\text{limit})}$  を超えて破壊せずに試験終了した時点における J 積分  $J_c$  から  $K_{Jc}$  を決定するためのものである。

#### 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。測定精度は寸法の  $\pm 0.5\%$  以下とする。
- (2) 試験開始前に変位計の動作チェックを行う。

#### MCT-4200 試験温度及び試験片个数

##### MCT-4210 試験温度

試験温度は  $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  の範囲となるように選択する。試験温度を設定する方法の例を附属書 B に示す。なお、 $T_0$  の決定は MCT-5000 に従って行う。

##### MCT-4220 試験片个数

本規程に従い  $T_0$  を決定する際に必要とされる個数の試験片を準備する。必要となる有効な  $K_{Jc}$  のデータ数を MCT-5011 に示す。

##### MCT-4230 試験温度の制御と測定

MCT-2500 に従って、試験中にわたり亀裂先端近傍の温度を測定する。MCT-2500 に定義される試験片の温度の  $\pm 3^\circ\text{C}$  の変動範囲内に維持されるように制御する。試験片の温度が、ある値の  $\pm 3^\circ\text{C}$  に入る場合、その値を試験温度としてよい。

#### MCT-4300 試験及び試験後の測定

試験は、すべて変位制御下で行うこととし、試験片が破断するか  $K_{Jc(\text{limit})}$  を超えるまで引張負荷を増大させた後、試験を終了する。試験中の荷重－荷重線変位関係又は荷重－

亀裂開口変位関係を記録する。

#### MCT-4310 荷重線変位速度

試験片に対する荷重線変位速度は、初期弾性域での $K$ が  $0.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ から  $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ の範囲内になるように設定する。荷重線変位速度の設定例を附属書 C に示す。

#### MCT-4320 試験終了後の亀裂長さの測定

試験終了後、初期亀裂長さを測定するとともに、延性亀裂進展量又はポップインによる亀裂進展量、必要であればその両者を測定する。

初期亀裂長さ  $a_0$  は次のように定義する。試験片の両側面あるいはサイドグループ付き試験片のグループ底から  $0.01B$  内側に入った位置を両端部として初期亀裂を等間隔に 8 分割した位置 9 点で亀裂長さを測定する。両端部の 2 点の平均値と内部の 7 点の測定値の計 8 つの値の平均をもって初期亀裂長さとする。測定精度は  $0.025 \text{ mm}$  以内とする。延性亀裂進展量に対しても同様の手順で測定する。また、ポップインによる明瞭な亀裂進展が観察可能であれば、これも同様の手順で測定してよい。

#### MCT-4321 疲労予亀裂導入条件の再評価

MCT-4320 で測定した初期亀裂長さを用いて、MCT-3220 の(2)を除く疲労予亀裂導入条件を再評価し、MCT-3220 の要求を満足することを確認する。このとき、疲労予亀裂の進展長さ  $\Delta a_{pc}$  は、試験片の形状に依らず、MCT-4320 で定義される 9 点全ての亀裂寸法測定点においてそれぞれノッチ幅の 0.5 倍、 $\Delta a_{sh} + \Delta a_f$ 、 $0.25 \text{ mm}$  以上とする。

#### MCT-4330 ポップインの評価

$K_{Jc}$  の評価に使用される試験結果として、へき開破壊による試験片分離の結果、又はポップインが破壊と判定された場合の結果を使用する。試験中に荷重が増加する過程で、荷重-変位関係に小さいが検知可能な不連続を伴う場合、ポップインが発生した可能性がある。図 MCT-4300-1 に示すように、 $n$  回目のポップイン発生後の弾性コンプライアンス  $C_n$  は(4)式で推定することができる。

$$C_n = \left( \frac{v_n + x_n}{P_n - y_n} \right) \quad (4)$$

ここで、 $n$  は評価対象の一連のポップインの  $n$  回目であることを表し、 $P_n$  は  $n$  回目のポップイン発生時の荷重、 $v_n$  は  $n$  回目のポップイン発生時の弾性変位 ( $v_n$  はグラフで決定する。)、 $y_n$  は  $n$  回目のポップインでの荷重の低下量、 $x_n$  は  $n$  回目のポップインでの変位の増加量である。1 回目のポップインに相当する  $v_1$  は、初期弾性コンプライアンス  $C_0$  を用いて  $v_1 = C_0 \cdot P_1$  とする。

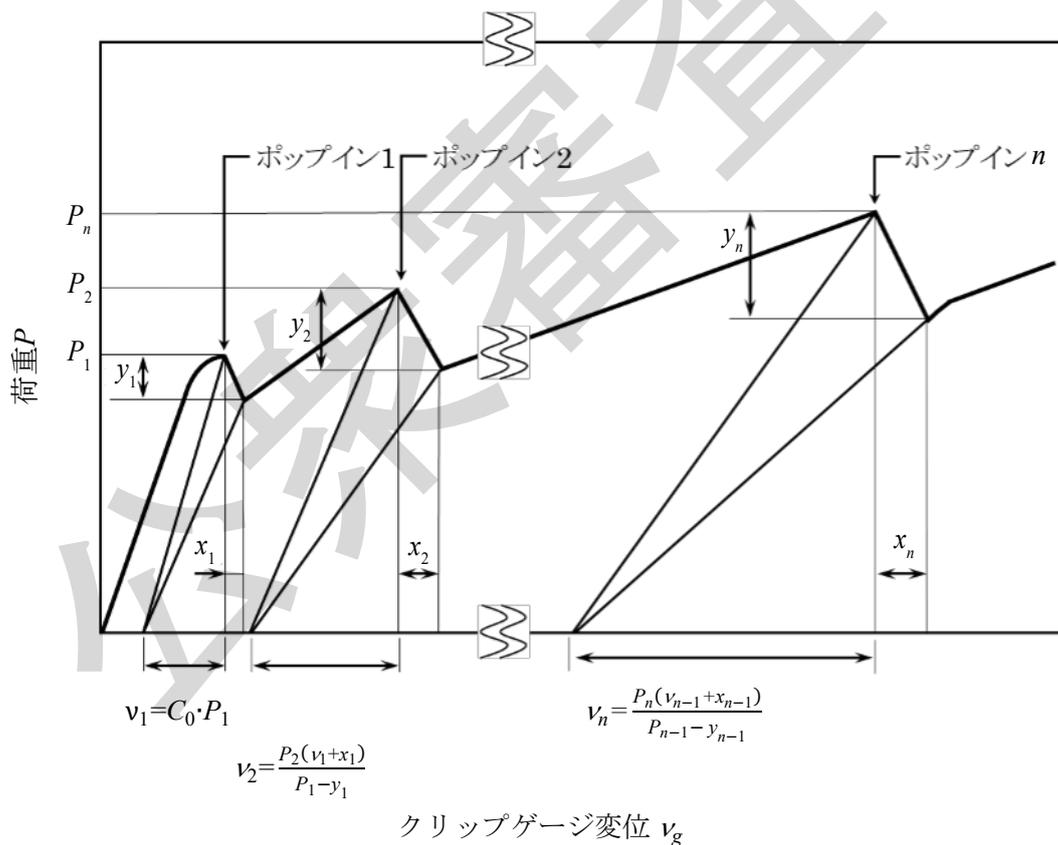
単一のポップインに対して、弾性コンプライアンスの変化が(5)式を満足する場合、ポ

ポップインが生じた時点を破壊と判定し、ポップインに対応する  $K_J$  を試験結果  $K_{Jc}$  として取り扱う。

$$\frac{C_1 - C_0}{C_1} = 1 - C_0 \cdot \left( \frac{P_1 - y_1}{v_1 + x_1} \right) \geq 0.02 \quad (5)$$

複数のポップインに対しては、(6)式によりポップインごとに順番に弾性コンプライアンスの変化を評価する。(6)式の関係が成り立つ場合、ポップイン時点では破壊が発生しなかったものとしへき開破壊による試験片分離の結果から得られる  $K_{Jc}$  を試験結果として取り扱う。(6)式が成り立たない、すなわち弾性コンプライアンスの変化が 0.02 以上の場合、破壊が生じたと判定し、ポップインに対応する  $K_J$  を試験結果  $K_{Jc}$  として取り扱う。

$$\frac{C_n - C_0}{C_n} = 1 - C_0 \cdot \left( \frac{P_n - y_n}{v_n + x_n} \right) < 0.02 \quad (6)$$



(注記：ポップインはわかりやすいように強調して表示している)

図 MCT-4300-1 ポップイン評価の概念図

#### MCT-4340 $K_{Jc}$ の棄却又は要検閲とされる判定基準

得られた  $K_{Jc}$  は、以下に従い棄却及び要検閲の判定を行い、いずれにも分類されなかつ

た  $K_{Jc}$  は有効なものと分類する。また、MCT-4343 に従い、疲労予亀裂導入時の最終段階の  $K_{MAX}$  の再評価を行う。

#### MCT-4341 棄却の判定基準

下記(1)~(4)の判定基準に該当した場合は  $K_{Jc}$  を棄却する。棄却した  $K_{Jc}$  は、 $T_0$  の算出に使用してはならない。また、それ以外の場合は、 $K_{Jc}$  を棄却してはならない。

- (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
- (2) 疲労予亀裂導入条件が MCT-4321 を満足しない場合
- (3) 破壊を生じることなく終了し、終了時の  $K_J$  の値が MCT-3160 の  $K_{Jc(\text{limit})}$  を超えない場合
- (4) MCT-4330 に示すポップインが現れた後、 $K_{Jc(\text{limit})}$  を越えず、かつ試験片の分離前に試験を終了した場合で、ポップインの判定において不連続が試験装置によるものであった場合、又はポップイン時点で破壊が生じたと判定されなかった場合

#### MCT-4342 要検閲の判定基準

下記(1)~(3)の判定基準に該当した場合は要検閲の  $K_{Jc}$  とする。要検閲の  $K_{Jc}$  は棄却せず、MCT-5021 に従って検閲値に置き換えた上で  $T_{0Q}$  を算出するために使用する。

- (1) 試験片の  $K_{Jc}$  が MCT-3160 に記した  $K_{Jc(\text{limit})}$  を超える場合
- (2) MCT-4400 に従い算出される  $K_J$  が MCT-3160 の  $K_{Jc(\text{limit})}$  を超えても破壊に至らずに終了した場合
- (3) MCT-4320 に従い測定された 9 点の延性亀裂進展量のうちの最大値が  $0.05(W - a_0)$  あるいは 1 mm のいずれか小さい方を超える場合

#### MCT-4343 疲労予亀裂導入時の最終段階の $K_{MAX}$ の再評価

全ての有効な  $K_{Jc}$  と要検閲の  $K_{Jc}$  に対し、MCT-4320 で測定した初期亀裂長さと  $K_{Jc}$  を用いて、MCT-3220 における最終段階の  $K_{MAX}$  に対する条件を満足するか（ $K_{MAX}$  が  $K_f$  を下回るか）を判定し、以下(1)~(3)の場合に応じて  $T_{0Q}$  を算出する、又は算出不可の判断をする。ここで、満足しないデータを単に棄却することは認めない。

- (1) 全ての  $K_{Jc}$  が満足する場合  
棄却した  $K_{Jc}$  を除く全ての  $K_{Jc}$  が疲労予亀裂導入条件を満たしたものとみなし、MCT-5220 に従って  $T_{0Q}$  を算出する。
- (2) 満足しない  $K_{Jc}$  の個数が 30% 以下の場合  
棄却された  $K_{Jc}$  を除く全ての  $K_{Jc}$  が疲労予亀裂導入条件を満たしたと仮定し、MCT-5220 に従って  $T_{0Q}'$  を算出する。 $T_{0Q}'$  に 1°C のマージンを加えて  $T_{0Q}$  とする ( $T_{0Q} = T_{0Q}' + 1^\circ\text{C}$ )。
- (3) 満足しない  $K_{Jc}$  の個数が 30% を超える場合  
 $T_{0Q}$  は算出不可とする。

#### MCT-4400 $K_{Jc}$ の算出方法

$K_{Jc}$ は破壊開始点又は $K_{Jc(\text{limit})}$ を超えて破壊せずに試験終了した時点でのJ積分 $J_c$ を算出し、これを変換して算出する。

#### MCT-4410 破壊開始点の $J_c$ の算出方法

破壊開始点の $J_c$ はその弾性成分 $J_e$ と塑性成分 $J_p$ の和として決定する。

$$J_c = J_e + J_p \quad (7)$$

#### MCT-4420 $J_c$ の弾性成分の算出方法

##### MCT-4421 C(T)試験片及びMini-C(T)試験片

C(T)試験片及びMini-C(T)試験片に対しては、 $J_c$ の弾性成分 $J_e$ は次式により算出される。

$$J_e = \frac{(1 - \nu^2)K_e^2}{E} \quad (8)$$

ここで、

$$K_e = \left[ \frac{P_c}{(BB_N W)^{1/2}} \right] f(a_0/W),$$
$$f(a_0/W) = \frac{(2 + a_0/W)}{(1 - a_0/W)^{3/2}} \times [0.886 + 4.64(a_0/W) - 13.32(a_0/W)^2 + 14.72(a_0/W)^3 - 5.6(a_0/W)^4] \quad (9)$$

##### MCT-4422 DC(T)試験片

DC(T)試験片に対しては、 $J_c$ の弾性成分 $J_e$ は次式により算出される。

$$J_e = \frac{(1 - \nu^2)K_e^2}{E} \quad (10)$$

ここで、

$$K_e = \left[ \frac{P_c}{(BB_N W)^{1/2}} \right] f(a_0/W),$$
$$f(a_0/W) = \frac{(2 + a_0/W)}{(1 - a_0/W)^{3/2}} \times [0.76 + 4.8(a_0/W) - 11.58(a_0/W)^2 + 11.43(a_0/W)^3 - 4.08(a_0/W)^4] \quad (11)$$

##### MCT-4423 SE(B)試験片

SE(B)試験片に対しては、 $J_c$ の弾性成分 $J_e$ は次式により算出される。

$$J_e = \frac{(1 - \nu^2)K_e^2}{E} \quad (12)$$

ここで、

$$K_e = \left[ \frac{P_c S}{(BB_N)^{1/2} W^{3/2}} \right] f(a_0/W),$$
$$f(a_0/W) = \frac{3(a_0/W)^{1/2}}{2[1 + 2(a_0/W)]} \times \frac{1.99 - (a_0/W)(1 - a_0/W)[2.15 - 3.93(a_0/W) + 2.7(a_0/W)^2]}{(1 - a_0/W)^{3/2}} \quad (13)$$

### MCT-4430 $J_c$ の塑性成分の算出方法

$J_c$ の塑性成分  $J_p$ は次式により算出される。

$$J_p = \frac{\eta A_p}{B_N b_0} \quad (14)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A_p &= A - 0.5C_0 P_c^2 \\ A &= A_e + A_p \end{aligned} \quad (15)$$

である (図 MCT-4400-1)。 $\eta$ は MCT-4431 及び MCT-4432 による。

### MCT-4431 C(T)試験片, DC(T)試験片及び Mini-C(T)試験片の $\eta$

C(T)試験片, DC(T)試験片及び Mini-C(T)試験片に対しては,  $A_p$ は荷重線変位に基づき次式により算出する。

$$\eta = 2 + 0.522 b_0 / W \quad (16)$$

### MCT-4432 SE(B)試験片の $\eta$

SE(B)試験片に対しては,  $A_p$ は荷重線変位あるいは亀裂開口変位に基づき, 荷重線変位による場合は $\eta = 1.9$ とし, 亀裂開口変位による場合は次式により算出する。

$$\eta = 3.667 - 2.199(a_0/W) + 0.4376(a_0/W)^2 \quad (17)$$

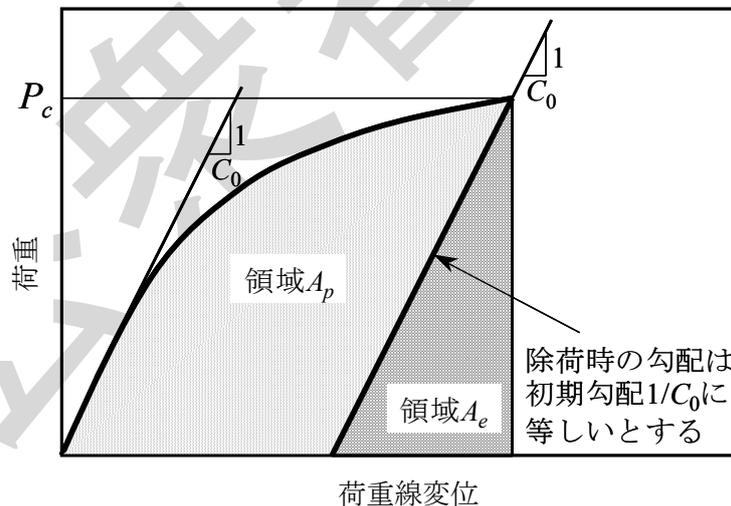


図 MCT-4400-1  $J_c$ の塑性成分の算出に用いる領域  $A_p$ の定義

### MCT-4440 $J_c$ から $K_{Jc}$ への変換方法

$K_{Jc}$ は破壊開始点における  $J_c$ から(18)式により算出する。

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{EJ_c}{1-\nu^2}} \quad (18)$$

### MCT-5000 $T_0$ の決定

MCT-4341(1)～(4)により棄却された  $K_{Jc}$  を除き、以下の手順に従い  $T_0$  を決定する。 $T_0$  は、次式で定義される  $K_{Jc(\text{med})}$  の温度依存性曲線（マスターカーブ）において  $K_{Jc(\text{med})} = 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となるときの温度であり、マスターカーブの温度軸方向の位置を決めるパラメータである。

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp\{0.019(T-T_0)\} \quad (19)$$

### MCT-5010 データセットのワイブル分布への当てはめ

#### MCT-5011 必要データ数

$T_0$  の評価に用いるデータセットは、(20)式を満足する必要がある。

$$\sum_{i=1}^3 r_i n_i \geq 1 \quad (20)$$

ここで、 $r_i$  は表 MCT-5000-1 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-5000-1 に示す各温度領域における重み係数である。

表 MCT-5000-1 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、 $(T-T_0)$  は四捨五入して整数に丸める。

### MCT-5012 ワイブル分布モデル

ある  $T$  における  $K_{Jc}$  と  $p_f$  の間の関係として次式に示す 3 母数のワイブル分布モデルを用いる。

$$p_f = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{K_{Jc} - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)^b \right] \quad (21)$$

$T$  における  $N$  個のデータセット（有効な  $K_{Jc}$  の数  $r$ ）がある時、そのデータセットから求まる  $K_0$  は次式となる。

$$K_0 = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - K_{min})^4}{r} \right]^{1/4} + K_{min} \quad (22)$$

また、 $K_{Jc(\text{med})}$  は  $K_0$  から(23)式によって算出される。

$$K_{Jc(\text{med})} = K_{min} + (\ln 2)^{1/4} (K_0 - K_{min}) \quad (23)$$

本規程では(22)及び(23)式は  $-50^\circ\text{C} \leq (T-T_0) \leq 50^\circ\text{C}$  のいずれの  $T$  においても成り立つものとする。

### MCT-5013 ワイブル分布の $K_{min}$ 及び $b$

本規程では、 $K_{min}$  は  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $b$  は 4 とする。

### MCT-5014 試験片寸法の補正

試験片の寸法効果として、(24)式により  $K_{Jc}$  を補正する。

$$K_{Jc,x} = K_{min} + [K_{Jc(0)} - K_{min}] \left(\frac{B_0}{B_x}\right)^{1/4} \quad (24)$$

ここで、 $B_0$  は補正前の試験片厚さ、 $B_x$  は補正後の試験片厚さである。本規程では、 $B_0$  は試験に用いた試験片の実測値、 $B_x$  は  $25.4 \text{ mm}$  (1 インチ) とする。 $K_{Jc(0)}$ 、 $K_{Jc,x}$  はそれぞれ試験片寸法  $B_0$  及び  $B_x$  に対する  $K_{Jc}$  である。

### MCT-5020 $T_{0Q}$ の算出

$T_{0Q}$  は、 $T_{0Q} \pm 50^\circ\text{C}$  の範囲にある有効な  $K_{Jc}$  及び MCT-4340 による要検閲の  $K_{Jc}$  のすべてを使用して以下の手順で算出する。 $T_{0Q} \pm 50^\circ\text{C}$  の範囲外の  $K_{Jc}$  は  $T_{0Q}$  の算出には使用しない。

### MCT-5021 検閲値への置き換え

要検閲の  $K_{Jc}$  は以下の検閲値に置き換える。

- (1) 要検閲が MCT-4342(1)又は(2)の  $K_{Jc(\text{limit})}$  の制限によるものであるときは、試験により得られた  $K_{Jc}$  又は  $K_J$  を  $K_{Jc(\text{limit})}$  に検閲値として置き換える。
- (2) 要検閲が MCT-4342(3)に示す延性亀裂進展量の制限によるものであるときは、試験により得られた  $K_J$  を、試験温度に依らずすべての有効な  $K_{Jc}$  の最大値である  $K_{Jc\Delta a}$  に検閲値として置き換える。またデータセット内に複数の試験片寸法による  $K_{Jc}$  が含まれる場合にあっても、試験片寸法によらず、同じ検閲値に置き換えてよい。
- (3) MCT-4342(1)又は(2)の  $K_{Jc(\text{limit})}$  に依る有効性判定と MCT-4342(3)の延性亀裂進展量に関する有効性判定の両方を満足しない場合は、試験により得られた  $K_{Jc}$  を  $K_{Jc(\text{limit})}$  と  $K_{Jc\Delta a}$  のいずれか低い方に検閲値として置き換える。

### MCT-5022 1T 相当の $K_{Jc}$ への変換

有効な  $K_{Jc}$  と検閲値のすべてについて、(24)式により 1T 相当の  $K_{Jc}$  に変換する。

### MCT-5023 $T_{0Q}$ の算出

(25)式を用いて暫定的な  $T_{0Q}$  を決定する。

$$\sum_{i=1}^N \delta_i \frac{\exp[0.019(T_i - T_{0Q})]}{10/(\ln 2)^{1/4} + 70/(\ln 2)^{1/4} \exp[0.019(T_i - T_{0Q})]} - \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - 20)^4 \exp[0.019(T_i - T_{0Q})]}{\{10/(\ln 2)^{1/4} + 70/(\ln 2)^{1/4} \exp[0.019(T_i - T_{0Q})]\}^5} = 0 \quad (25)$$

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。 $T_i$ として試験開始時点の温度測定値を使用してもよい。 $T_i$ は評価者が試験片ごとに選択して差し支えない。全ての試験片を単一の温度で試験してもよい。 $\delta_i$ は有効な $K_{Jc}$ について1、検閲値について0とする。(25)式を反復計算によって解いて $T_{0Q}$ が得られる。単一の温度で全ての試験を実施した場合の評価例については**附属書 D**を、複数の温度で試験を実施した場合の評価例については**附属書 E**に示す。

MCT-4343(2)の場合分けに分類された場合、MCT-4343(2)に従い、(25)式で算出された値に1°Cのマーヅンを加えて $T_{0Q}$ とする。

### MCT-5030 $T_0$ としての有効性

以下の要求をすべて満たす場合に $T_{0Q}$ はを $T_0$ とする。

- (1) MCT-2000 の試験装置に関する要求
- (2) MCT-3100 の試験片の形状及び寸法に関する要求
- (3) MCT-4321 の試験片への疲労予亀裂導入条件
- (4) MCT-4000 に従う試験の実施と、MCT-4340 の判定条件
- (5) MCT-5011 の許容温度範囲 $T_{0Q} \pm 50^\circ\text{C}$ にある試験片の個数の要求

### MCT-5100 $T_0$ に対する不確実さを考慮した補正

$T_0$ に対する不確実さを考慮した評価が必要な場合には、以下のとおり $T_0$ を補正して $T_{0mar}$ を求める。 $T_0$ の不確実さとは、有効な $K_{Jc}$ の数及び試験や測定における誤差等に起因した不確実さのことである。

### MCT-5110 $T_0$ の標準偏差

$T_0$ の標準偏差は、(26)式により求める。

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\frac{(K_{Jc(\text{med})}^{eq} - 20)^2 \times 14.7^2}{(K_{Jc(\text{med})}^{eq} - 30)^2 r} + \sigma_{exp}^2} \quad (26)$$

$r$ は $T_0$ 決定の際の有効な試験片の個数である。

$K_{Jc(\text{med})}^{eq}$ は(27)式による。

$$K_{Jc(\text{med})}^{eq} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r [30 + 70 \exp\{0.019(T_i - T_0)\}] \quad (27)$$

ここで、 $\sigma_{exp}$ は、試験や測定における誤差による $T_0$ の標準偏差であり、本規程では、4°Cとしてもよい。

### MCT-5120 $T_0$ に対する不確かさの補正

$T_0$ の算出における不確かさを考慮した  $T_{0mar}$ は、(28)式により求める。

$$T_{0mar}=T_0+\sigma_{T0}\times Z \quad (28)$$

ここで、 $Z$ は信頼度に対応する標準化確率変数 ( $Z$ 値) であり、標準正規分布表等から設定する。例えば、95%信頼下限であれば、 $Z$ は 1.65 に設定する。

### MCT-6000 記録

#### MCT-6100 必要な記録

個々の試験片に対し、以下の情報について記録する。

- (1) 試験片種別、試験片厚さ  $B$ 、正味試験片厚さ  $B_N$ 、試験片幅  $W$
- (2) 試験片の亀裂面方位
- (3) 初期亀裂長さ  $a_0$
- (4) 延性亀裂進展量 (必要に応じて)
- (5) 試験温度
- (6) 試験片数  $N$ 、単一の試験温度で試験した場合には有効データの個数  $r$
- (7) ポップイン時の  $1 - C_0 \cdot \left( \frac{P_n - v_n}{v_n + x_n} \right)$  (必要に応じて)
- (8) 試験温度での材料の降伏強さと引張強さ
- (9)  $J$  の塑性成分を求めるのに用いた変位の測定位置 (荷重線、試験片前面あるいは亀裂開口)
- (10) 個々の  $K_{Jc}$  の値及びそのデータセットから得られた  $K_{Jc(\text{med})}$  [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]
- (11)  $T_0$  [°C]
- (12) 最終段階の疲労予亀裂導入の際の  $K_{MAX}$  (MCT-4321 による再評価後の値)
- (13) 亀裂長さ測定値の最大値と最小値の差の試験片厚さ  $B$  に対する比

#### MCT-6200 補足情報

補足情報として MCT-6100 以外の情報を記録してもよい。代表的な補足情報を以下に示す。

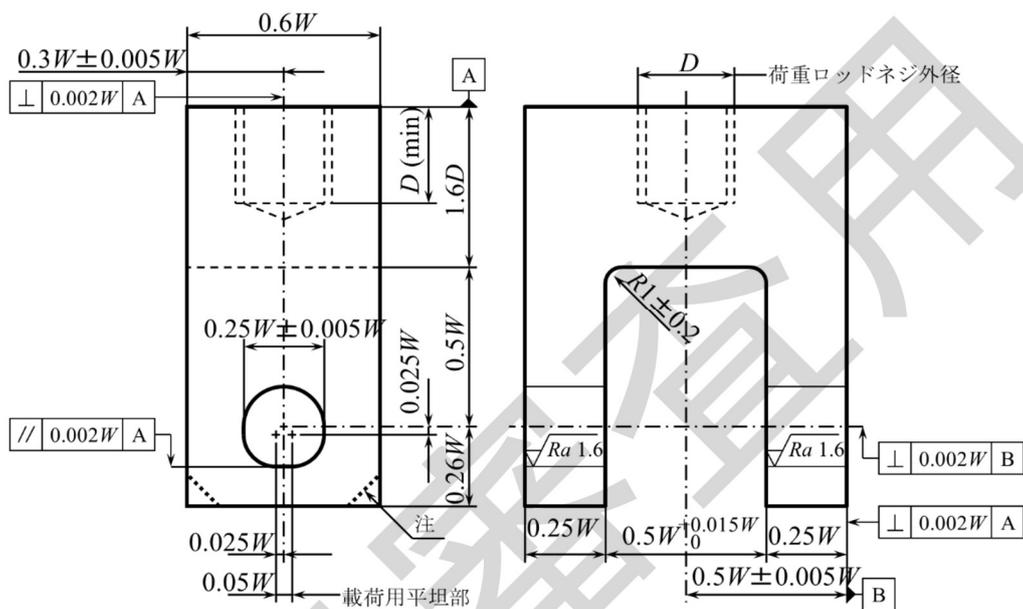
- (1) 試験片の識別番号
- (2) ポップインによる亀裂進展の測定値
- (3)  $T_0$ の暫定値  $T_{0Q}$ と (必要に応じて) 無効と判定された理由
- (4) 荷重-変位記録
- (5) Mini-C(T)試験片で、治具で温度測定した場合の温度校正記録
- (6) Mini-C(T)試験片で、変位を試験片前面以外で計測した場合の妥当性を示す記録

## 附属書 A (参考)

### 附属書 A: 推奨される試験片用治具, 変位計, 及びナイフエッジ

#### A.1 推奨される C(T)試験片, DC(T)試験片, 及び Mini-C(T)試験片用治具

推奨される C(T) 試験片, DC(T)試験片, 及び Mini-C(T)試験片用治具を図 A.1 に示す。



注：治具のコーナー部は除去してもよい。

図 A.1 推奨される C(T)試験片, DC(T)試験片, 及び Mini-C(T)試験片用治具

## A.2 推奨される SE(B)試験片用治具

推奨される SE(B)試験片用治具を図 A.2 に示す。

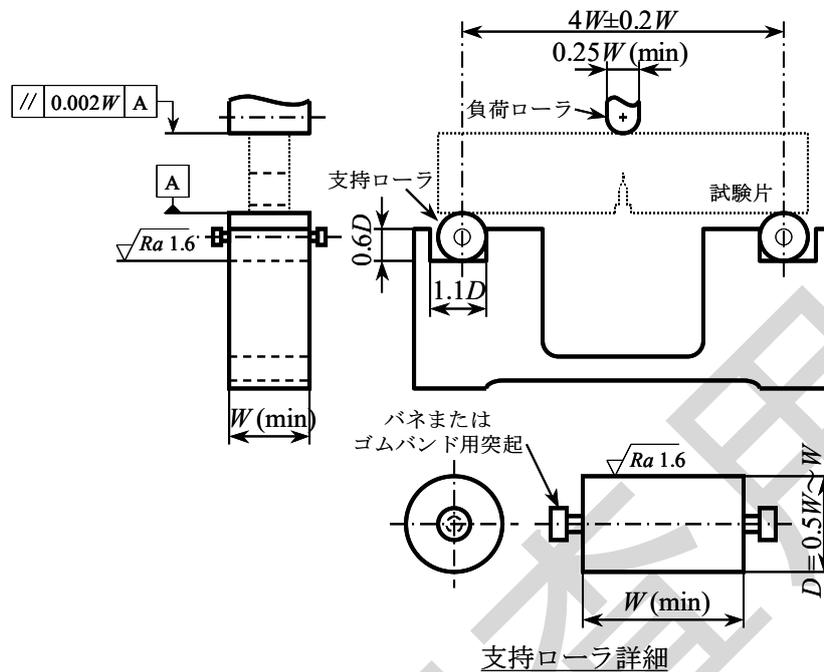


図 A.2 推奨される SE(B)試験片用治具

## A.3 推奨される変位計及びナイフエッジ

推奨される変位計を図 A.3 に示す。

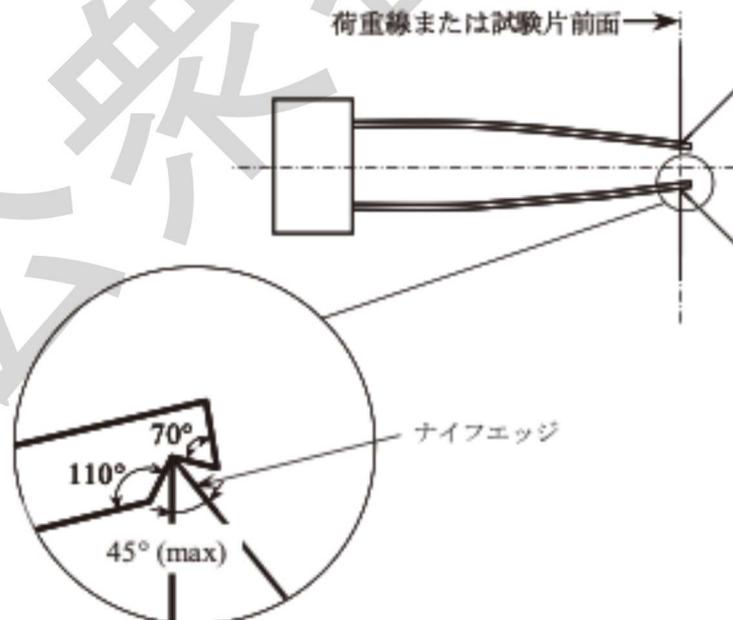


図 A.3 推奨される変位計

## 附属書 B(参考)

### 附属書 B: 試験温度を設定する方法

#### (1) 最初の試験片に対して試験温度を設定する方法

シャルピー衝撃試験（V ノッチ試験片）の吸収エネルギー 28 J あるいは 41 J に対応するシャルピー遷移温度  $T_{CVN}$  が既知であれば、試験片寸法に応じて表 B.1 より定数  $C$  を選択し、試験温度範囲 ( $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$ ) の中央値近傍の試験温度  $T$  を次式により決定する方法もある。

$$T = T_{CVN} + C \quad (\text{B.1})$$

表 B.1 シャルピー衝撃試験(V ノッチ試験片)データで試験温度を設定する場合の定数  $C$

試験片寸法 ( $nT$ )	定数 $C [^\circ\text{C}]$	
	28 J	41 J
0.16T <sup>注1</sup>	-50	-56
0.4T <sup>注2</sup>	-50	-56
0.4T	-32	-38
0.5T	-28	-34
1T	-18	-24
2T	-8	-14
3T	-1	-7
4T	2	-4

注 1 : Mini-C(T)試験片の場合<sup>[7]</sup>

注 2 : 予亀裂入りシャルピー試験片の場合

#### (2) 一連の試験実施中に試験温度を設定する方法

推定された  $T_0$  に基づく 98% 許容限界の温度依存性曲線と試験片寸法に応じた  $K_{Jc(\text{limit})}$  の温度依存性曲線の交点の試験温度 ((B.2) 式の  $T$ ) を設定することで  $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  の試験温度範囲内に  $T$  が含まれる可能性を高め、かつ  $K_{Jc(\text{limit})}$  に伴う検閲の可能性を減ずることができる<sup>[8]</sup>。

$$T = T_0 + \frac{1}{0.019} \ln \left\{ \frac{\left[ \frac{\sqrt{Eb_0 \sigma_{YS}}}{\sqrt{30(1-\nu^2)}} - 20 \right] \left( \frac{B}{25.4} \right)^{1/4}}{108.3} - \frac{1}{7} \right\} \quad (\text{B.2})$$

$\sigma_{YS}$  は  $T$  における降伏応力 ( $T$  の関数) であることから (B.2) 式による  $T$  の算出には繰返し計算が必要である。一連の試験中に MCT-5023 に従って都度得られる  $T_{0Q}$  を (B.2) 式にお

ける  $T_0$  に代入することで、都度の試験温度設定の参考にすることができる。

表 B.2 は  $T_0=0^\circ\text{C}$ 、室温で  $\sigma_{YS(RT)}=500\text{ MPa}$  の材料を仮定し、最初の試験温度を任意に選んで  $-45^\circ\text{C}$  として順次試験を進めた時の、逐次の  $T_{0Q}$  ( $T_0$ ) 推定(詳細は附属書 E 参照)結果と、(B.2)式に従い推定した試験温度の履歴を示す。本例では要求される計測及び制御精度を考慮し、逐次の計算において、温度、縦弾性係数、降伏応力は整数、破壊靱性は小数点第一位までとした。また試験温度の選択は  $5^\circ\text{C}$  刻みとした。

表 B.2 (B.2)式による試験温度推定例  
( $K_{Jc(\text{limit})}$ は Mini-C(T)試験片を想定した換算値)

試験片番号	試験温度 [°C] (5°C刻み)	破壊靱性の 実験値 [MPa√m]	$E$ [GPa]	$\sigma_{YS}$ [MPa]	$K_{Jc(\text{limit})}$ [MPa√m]	$K_{Jc(\text{limit})}$ に よる検閲 判定	$T_{0Q}$ 又は $T_0$ [°C]	(B.2)式 [°C] <sup>(注)</sup>	(18)式
1	-45	62.1	207	555	89.1	有効	3	-35	0.13
2	-35	57.4	206	545	88.2	有効	21	-18	0.00
3	-20	55.1	205	531	87.0	有効	41	1	0.00
4	0	105.0	204	515	85.5	要検閲	13	-25	0.14
5	-25	57.7	206	535	87.4	有効	19	-20	0.25
6	-20	61.9	205	531	87.0	有効	22	-18	0.38
7	-20	143.6	205	531	87.0	要検閲	9	-30	0.55
8	-30	47.5	206	540	87.8	有効	12	-27	0.66
9	-25	46.9	206	535	87.4	有効	15	-24	0.79
10	-25	67.7	206	535	87.4	有効	15	-24	0.91
11	-25	114.3	206	535	87.4	要検閲	7	-31	0.96
12	-30	72.5	206	540	87.8	有効	6	—	1.09

$$E = 204 - T/16, \text{ GPa}$$

$$\sigma_{YS} = \sigma_{YS(RT)} + 10^5 / (491 + 1.8T) - 189, \text{ MPa}$$

(注) この例では、(B.2)式により各試験後に算出された試験温度を  $5^\circ\text{C}$  刻みに丸め、次の試験における試験温度とした。

## 附属書 C(参考)

### 附属書 C: 荷重線変位速度の設定例

応力拡大係数速度 $\dot{K}$ が0.1から2 MPa $\sqrt{\text{m}}$ /sの許容範囲に入るように、試験機の荷重線変位速度を設定する。荷重線変位速度は、試験荷重が $P_m$ に到達する時間 $t_m$ に基づいて $P_m/t_m$ と定義する。あるいは試験片に取り付けたクリップゲージで逐次測定する荷重線変位速度 $\dot{\Delta}$ を用いてもよい。試験片形状に対する $t_m$ 及び $\dot{\Delta}$ を、 $W$ 、 $E$ 、及び $\sigma_{flow}$ の関数として表 C.1 に示す。 $P_m$ は MCT-3210 の(2)式及び(3)式に与えられている。試験機の荷重線変位速度を用いる場合、実際のクロスヘッド速度は試験機のコンプライアンスを考慮して補正されなければならない。

表 C.1 C(T)試験片, DC(T)試験片, Mini-C(T)試験片及び SE(B)試験片の  
試験機の変位速度または荷重線変位速度の推定に用いる式と値

C(T)試験片, DC(T)試験片, Mini-C(T)試験片			SE(B)試験片		
$a_0/W$	$\frac{t_m \dot{K}}{\sigma_{flow} \sqrt{W}}$	$\frac{E \dot{\Delta}}{\dot{K} \sqrt{W}}$	$a_0/W$	$\frac{t_m \dot{K}}{\sigma_{flow} \sqrt{W}}$	$\frac{E \dot{\Delta}}{\dot{K} \sqrt{W}}$
0.45	0.412	3.475	0.45	0.346	5.064
0.50	0.386	3.829	0.50	0.333	5.263
0.55	0.361	4.212	0.55	0.318	5.522

## 附属書 D(参考)

### 附属書 D: 単一の試験温度で得られた $K_{Jc}$ による $T_0$ の算出例 (要検閲 $K_{Jc}$ を含む場合)

要検閲  $K_{Jc}$  を含む場合の  $T_0$  の算出例を以下に示す。

#### D.1 $K_{Jc(\text{limit})}$ 制限を超えた場合の算出例

MCT-5000 の手順による算出例を示す。試験片寸法は 0.5T-C(T) 及び 1T-C(T) の 2 種類とし、それぞれ 7 個の試験データが用意されている。要検閲  $K_{Jc}$ 、及びそれらを  $K_{Jc(\text{limit})}$  の検閲値に置き換えられたものを表 D.2 に括弧付きで示す。ただし、MCT-4340(6) に合致する要検閲  $K_{Jc}$  が存在しない場合の例である。

##### (1) 仮定する条件

材料の降伏強さ = 530 MPa

縦弾性係数 = 213,000 MPa

試験温度 =  $-50^{\circ}\text{C}$

$a_0/W = 0.55$

##### (2) $K_{Jc(\text{limit})}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ] の値は表 D.1 のとおりである。

表 D.1  $K_{Jc(\text{limit})}$  [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ] の値

	0.5T	1T
試験片寸法別の値	217.4	307.5
1T 換算	186.0	307.5

##### (3) データセット

表 D.2 データセット

$K_{Jc}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]		$K_{Jc(1T)}$ への換算 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	
0.5T	1T	0.5T	1T
135	120	116.7	120
150	140	129.3	140
180	160	154.5	160
200	190	171.4	190
210	230	179.8	230
(225)	250	(186.0)	250
(250)	260	(186.0)	260

注：( ) は  $K_{Jc(\text{limit})}$  の制限による要検閲  $K_{Jc}$  (第 1 カラム) 及び検閲値 (第 3 カラム)

##### (4) 算出結果

$$K_{0(1T)} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - 20)^4}{r} \right]^{1/4} + 20 \quad (\text{D.1})$$

ここで、

$$N = 14$$

$$r = 12$$

$$K_{0(1T)} = 200.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad ((22)\text{式により算出})$$

$$K_{Jc(\text{med})} = 185.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (K_{\text{min}}=20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}\text{として}(23)\text{式により算出})$$

$$T_0 = T_{0Q} = -91.8^\circ\text{C} \quad ((25)\text{式により算出})$$

## D.2 延性亀裂進展量が制限値を超えた場合の算出例

MCT-5000 に記した手順による算出例を示す。

### (1) $K_{Jc}$ の仮定及びデータセット

材料特性は D.1(1), 破壊靱性データは表 D.3 に示す。

延性亀裂進展量の限界 (MCT-4340(6)参照) は 0.5T 及び 1T でそれぞれ 0.57 mm, 1.0 mm となる。延性亀裂進展量の限界を超える  $K_{Jc}$  は, MCT-5020(2)により検閲値 (有効な  $K_{Jc}$  の最大値) に置き換える。

表 D.3 データセット

0.5T		1T		$K_{Jc(1T)}$ への換算[MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	
延性亀裂進展量[mm]	$K_{Jc}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	延性亀裂進展量[mm]	$K_{Jc}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	0.5T	1T
0.00	135	0.12	120	116.7	120
0.15	150	0.41	140	129.3	140
0.32	180	0.65	160	154.5	160
0.43	200	0.82	190	171.4	190
0.61	(210)	1.02	(230)	(171.4)	(190)
0.72	(225)	1.05	(250)	(171.4)	(190)
0.79	(250)	1.13	(260)	(171.4)	(190)

注: ( )は延性亀裂進展量の制限による要検閲  $K_{Jc}$  (第2, 第4カラム) 及び検閲値 (第5, 第6カラム)

### (2) 算出結果

$$K_{0(1T)} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(i)} - 20)^4}{r} \right]^{1/4} + 20 \quad (D.2)$$

ここで,

$$N = 14$$

$$r = 8$$

$$K_{0(1T)} = 190.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$K_{Jc(\text{med})} = 175.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$T_0 = T_{0Q} = -88.4^\circ\text{C}$$

## 附属書 E(参考)

### 附属書 E: 延性亀裂進展長さの制限値を上回る試験片を含むデータセットによる $T_0$ の算出例

複数の試験温度で取得された  $K_{Jc}$  のデータセットに  $K_{Jc(\text{limit})}$  を上回る  $K_{Jc}$  と制限値を上回る長さの延性亀裂進展が観察された  $K_{Jc}$  の双方を含む場合の  $T_0$  の評価例を、検閲手順の場合分けごとに示す。

#### E.1 検閲の場合分け

表 E.1 に示す、 $-120^\circ\text{C}$  又は  $-80^\circ\text{C}$  で試験された合計 12 個の  $K_{Jc}$  を用いる。うち 4 点は  $K_{Jc(\text{limit})}$  を上回っており、そのうち 3 点では試験終了後の破面に制限値を上回る延性亀裂進展が観察された。有効な  $K_{Jc}$  の最大値は  $110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  であったため、 $K_{Jc\Delta a} = 110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。それぞれの要検閲データは以下のように場合分けし検閲を行う。 $K_{Jc}$  の分布と評価後のマスターカーブをあわせて図 E.1 に示す。

- (1) 検閲パターン①:  $K_{Jc(\text{limit})}$  及び延性亀裂進展の双方の要件で要検閲と判定され、  
 $K_{Jc(\text{limit})} > K_{Jc\Delta a}$  である場合 (試験片 ID5 及び 9) →  $K_{Jc\Delta a}$  を用いて検閲
- (2) 検閲パターン②: 延性亀裂進展の要件のみで要検閲と判定される場合 →  $K_{Jc\Delta a}$  を用いて検閲
- (3) 検閲パターン③:  $K_{Jc(\text{limit})}$  の要件のみで要検閲と判定される場合 →  $K_{Jc(\text{limit})}$  を用いて検閲

$K_{Jc}$  の分布と評価後のマスターカーブをあわせて図 E.1 に示す。本データセットから算出される  $T_0$  は  $-104^\circ\text{C}$  となる。

#### E.2 より高い有効データが追加で得られた場合の例

表 E.1 に加え、 $-120^\circ\text{C}$  で  $K_{Jc} = 116 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  のデータが一点追加された場合を考える (表 E.2)。追加された  $K_{Jc}$  は  $K_{Jc(\text{limit})}$  を下回るとともに延性亀裂進展が観察されなかったため有効データであり、かつ全データセット内で最大の有効な  $K_{Jc}$  であることから表 E.2 において  $K_{Jc\Delta a} = 116 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となる。これに伴い、 $-80^\circ\text{C}$  では  $K_{Jc(\text{limit})} < K_{Jc\Delta a}$  となることから、試験片 ID 9 は附属書 E.1 と異なるパターンで検閲がなされる。

- (4) 検閲パターン④:  $K_{Jc(\text{limit})}$  及び延性亀裂進展の双方の要件で要検閲と判定され、  
 $K_{Jc(\text{limit})} < K_{Jc\Delta a}$  である場合 →  $K_{Jc(\text{limit})}$  を用いて検閲

$K_{Jc}$  の分布と評価後のマスターカーブをあわせて図 E.2 に示す。本データセットから算出される  $T_0$  は  $-110^\circ\text{C}$  となる。

#### E.3 $K_{Jc(\text{limit})}$ 到達時点で破断を待たずに試験を終了した場合の例

表 E.1 のデータセットにおいて、試験中に  $K_{Jc}$  を監視し、 $K_{Jc(\text{limit})}$  に到達した時点で破断を待たずに試験を終了した場合を考える (表 E.3)。この場合、中断される試験片は ID 5, 9,

10の3個であり、うちID9の試験片では延性亀裂進展が観察されないことから $K_{Jc(limit)}$ による検閲となる。本データセットから算出される $T_0$ は $-104^{\circ}\text{C}$ となる。

表 E.1 初期のデータセット

試験片 ID	試験温度 $^{\circ}\text{C}$	$K_{Jc(1Teq)}$ 1T相当 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$K_{Jc(limit)}$ 1T相当 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$K_{Jc(limit)}$ に 関する有効性	制限値を上回る延性亀裂進展の有無	$K_{Jc\Delta a}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	検閲値 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	備考
1	-120	80	119	有効	無し	-	-	-
2	-120	70	119	有効	無し	-	-	-
3	-120	40	119	有効	無し	-	-	-
4	-120	30	119	有効	無し	-	-	-
5	-120	130	119	要検閲	有り(要検閲)	110	110	検閲パターン①
6	-120	117	119	有効	有り(要検閲)	110	110	検閲パターン②
7	-80	110 (有効な $K_{Jc}$ の最大値)	114	有効	無し	-	-	-
8	-80	80	114	有効	無し	-	-	-
9	-80	130	114	要検閲	有り(要検閲)	110	110	検閲パターン①
10	-80	115	114	要検閲	無し	-	114	検閲パターン③
11	-80	90	114	有効	無し	-	-	-
12	-80	95	114	有効	無し	-	-	-

表 E.2 追加データを含むデータセット

試験片 ID	試験温度 $^{\circ}\text{C}$	$K_{Jc(1Teq)}$ 1T相当 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$K_{Jc(limit)}$ 1T相当 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$K_{Jc(limit)}$ に 関する有効性	制限値を上回る延性亀裂進展の有無	$K_{Jc\Delta a}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	検閲値 [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	備考
1	-120	80	119	有効	無し	-	-	-
2	-120	70	119	有効	無し	-	-	-
3	-120	40	119	有効	無し	-	-	-
4	-120	30	119	有効	無し	-	-	-
5	-120	130	119	要検閲	有り(要検閲)	116	116	検閲パターン①
6	-120	117	119	有効	有り(要検閲)	116	116	検閲パターン②
7	-80	110	114	有効	無し	-	-	-
8	-80	80	114	有効	無し	-	-	-
9	-80	130	114	要検閲	有り(要検閲)	116	114	検閲パターン④
10	-80	115	114	要検閲	無し	-	114	検閲パターン③
11	-80	90	114	有効	無し	-	-	-
12	-80	95	114	有効	無し	-	-	-
13	-120	116 (有効な $K_{Jc}$ の最大値)	119	有効	無し			追加データ

表 E.3  $K_{Jc(limit)}$ 到達時点で試験終了した場合のデータセット

試験片 ID	試験温度 °C	$K_{Jc(1Teq)}$ 1T相当 [MPa√m]	$K_{Jc(limit)}$ 1T相当 [MPa√m]	$K_{Jc(limit)}$ に関する有効性	制限値を上回る延性亀裂進展の有無	$K_{Jc\Delta a}$ [MPa√m]	検閲値 [MPa√m]	備考
1	-120	80	119	有効	無し	-	-	-
2	-120	70	119	有効	無し	-	-	-
3	-120	40	119	有効	無し	-	-	-
4	-120	30	119	有効	無し	-	-	-
5	-120	119	119	要検閲	有り(要検閲)	110	110	検閲パターン①
6	-120	117	119	有効	有り(要検閲)	110	110	検閲パターン②
7	-80	110 (有効な $K_{Jc}$ の最大値)	114	有効	無し	-	-	-
8	-80	80	114	有効	無し	-	-	-
9	-80	114	114	要検閲	無し	-	114	検閲パターン③
10	-80	114	114	要検閲	無し	-	114	検閲パターン③
11	-80	90	114	有効	無し	-	-	-
12	-80	95	114	有効	無し	-	-	-

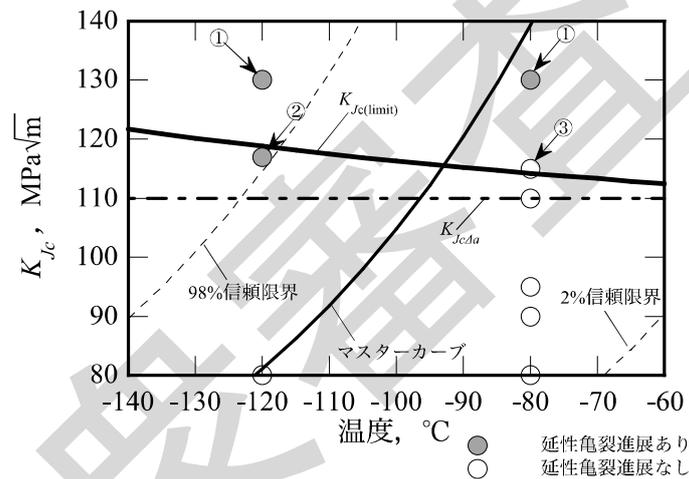


図 E.1 データセット群(表 E.1)の破壊靱性分布

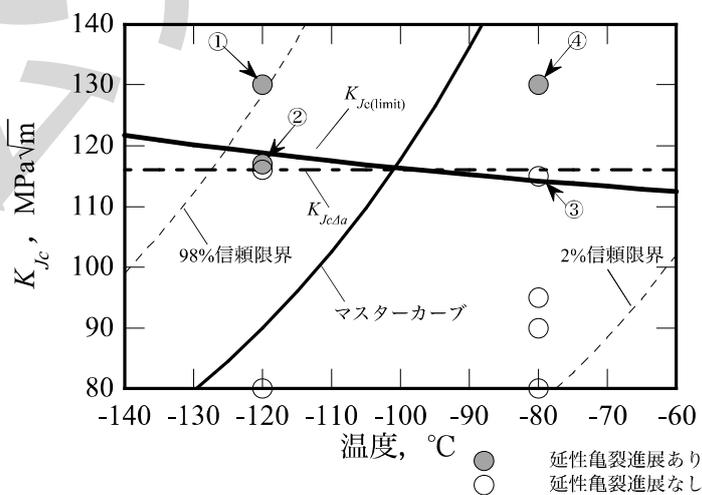


図 E.2 追加データを含むデータセット群(表 E.2)の破壊靱性分布

# 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

## 解説

### (解説 MCT-1100)適用範囲

本規程は、ASTM E1921<sup>[9]</sup>を参考にして規格を作成した。本規程は、弾性域におけるへき開、延性脆性遷移温度域における延性亀裂進展後のへき開、あるいはその両者が想定されるフェライト鋼の破壊靱性を特徴付ける破壊靱性参照温度  $T_0$  の決定方法を規定するものである。初年版（2011年）規程作成にあたり、以下の規格を参考とした。なお、これらの年版は2011年版作成当時に参考としたものであり、巻末の引用文献の年版とは異なっている。JSME S 001 及び JIS G 0564 については廃版となっていることから巻末の参考文献には記載していない。

- a. JEAC4201-2007 原子炉構造材の監視試験方法
- b. JEAC4202-2004 フェライト鋼の落重試験方法
- c. JEAC4206-2007 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法
- d. ASTM E399-09 “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials”
- e. ASTM E1820-08 “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”
- f. JSME S 001-1992 弾塑性破壊靱性  $J_{Ic}$  試験方法増補第1版
- g. JIS G 0564-1999 金属材料—平面ひずみ破壊じん(靱)性試験方法

本規程では、国内で実施された破壊靱性試験の評価結果<sup>[10, 11, 12, 13, 14, 15]</sup>から、ASTM E1921 の  $T_0$  の決定方法（マスターカーブ法）の適用が有効であると考えられたことから、JEAC として規定することとした。ASTM E1921 を直接用いるのではなく、新規に JEAC として規定するのは以下の理由による。

- a. ASTM E1921 は近年も頻繁に改定されており、年度版の指定も難しいことから、国内で統一した規格が必要と考えられること
- b. ASTM E1921 では解説がないが、規程中に解説に相当する内容も含まれており、要求事項と参考となる項目を明確に分けたほうが国内の運用として有用であること
- c. 国内で適用する際に、国内規格との整合性をとる必要があること

本規程は試験方法の規程であり、破壊靱性評価の規程ではない。破壊靱性評価の規程は JEAC4206 に示される。

2015年の改定では、Mini-C(T)試験片を追加するための改定を行うとともに、ASTM E1921-13a<sup>[6]</sup>の SE(B)試験片の  $\eta$  (MCT-4432) 及び複数の試験温度で得られた破壊靱性で  $T_{0Q}$  を決定する式 (MCT-5023) を反映した。

202X年の改定では、原子炉圧力容器の監視試験での活用を念頭に置き、結果の不確実性を評価できるよう  $T_0$  の標準偏差  $\sigma_{T0mar}$  を規定した。また評価者が任意に選べるような

選択肢を排除した。また、ASTM E1921-13a での改定を参考に、並列されていた「単一試験温度法」と「複数試験温度法」を一本化した。これらにより、一意の解が得られるよう評価手順を見直した。また、マスターカーブ法に関する最新知見(ASTM E1921-23<sup>[17]</sup>など)を盛り込むとともに、解説の充実も図った。

#### (1) 試験片バイアス

$K_{Ic}$ の中央値は試験片形状によって異なる傾向があり、これは拘束が異なることが理由と言われている。このような依存性は、同じ材料であっても $T_0$ が試験片形状によって異なるといった不都合を生じることになる。C(T)試験片から得られる $T_0$ はSE(B)試験片から得られるものよりも高いと報告があり、いくつかの材料における最良推定値の比較によれば、C(T)及びSE(B)から得られた $T_0$ の平均的な差が10°Cから15°Cに達するという報告もある<sup>[18,19]</sup>。ただし、少数のデータによる個別の比較からではこのような傾向を明らかにすることはできない。また、C(T)及びSE(B)試験片の両者を含むデータセットから得られる $T_0$ は、これら試験片を単独で用いて算出される $T_0$ の中間に位置すると考えられる。次に、有限要素法による解析及び妥当性確認試験の結果、DC(T)試験片とC(T)試験片は同等のJ-R曲線が得られることが示されている<sup>[10]</sup>。ただし、SE(B)及びDC(T)試験片による $K_{Ic}$ の数はいずれもC(T)試験片により取得された $K_{Ic}$ の数と比較して少なく、少数の $K_{Ic}$ による個別の比較からではこのような傾向を明らかにすることはできない。結果の報告において、算出された $T_0$ とともに試験片形状を明記することとなっている。

#### (2) 非均質材の扱い

非均質材の破壊靱性評価は本規程に定める統計解析手法の範囲外としている。本規程の対象とする材料は巨視的に均質な引張特性、破壊靱性特性を有していることを前提としている。局所的に脆化領域のあるような熱影響部は、母材とも溶接金属とも全く異なる特性を呈する場合がある。ただし、通常原子炉圧力容器に用いられているような多層溶接では、顕著な局所脆化領域は存在しないので、本規程を準用しても問題はないと考えられる。また、厚板の鋼板では表面付近で特性の変化が見られることがあるため、材料のこのような部位に対する適用性の可否の判定には、組織観察等の調査による材料の規格適用の判断が必要となる。このように、評価対象の鋼材中で $T_0$ の分布が予め想定でき、評価対象のデータセットが非均質とならないように配慮できる場合を材料の多様性 (Material variability) と言う。Material variability の例としては、上述の厚板の鋼板の表面付近の特性変化以外にも、ヒートの異なる鋼材間の破壊靱性の相違、鍛造材の加工度に応じた破壊靱性の相違等が挙げられる。Material variability は規定通りの試験片の採取 (例えば、JEAC4201 SA-2220) により考慮される。なお、累積損傷確率の 2~98%の範囲から外れるデータが存在する場合には非均質材である可能性があるため、注意が必要である。

ASTM E1921 では、その 2019 年版で、非均質である可能性のある材料を均質材と区別するためにスクリーニングを実施することが強制的な要求として追加された。しかし、ス

クリーニングで非均質の可能性があると判断された場合に、その評価結果をどのように取扱うかについて規定が無い。同規格の非強制の附則として①二つ以上の材料特性が混在する非均質材料で最も低い破壊靱性のグループにおける  $T_0$  を推定する方法、②二つの材料特性の混在する非均質材料でそれぞれのグループの  $T_0$  を推定する方法、及び③連続的に破壊靱性が変化するような非均質材料で平均的な  $T_0$  を推定する方法がそれぞれ記載されている。しかし、これらの評価を行うためには「材料がどのような非均質性を有しどのような方法が相応しいか」を予め評価者が判断する必要があり、その判断の拠り所となる基準は与えられていない。②と③の双方の評価を同一のデータセットに対して実施した場合、片方で均質、もう片方で非均質と、背反する判定となる可能性も否定できない。また②及び③の実施にはそれぞれ試験で得られた 20 個以上の  $K_{Ic}$  が必要とされていることから、より現実的かつ適用性の広い規定になるよう ASTM で更なる改訂の議論が続けられている(2022 年 11 月現在)。このような状況に鑑み、202X 年度版においては ASTM E1921 に記載された非均質材のスクリーニング基準及びこれに引き続く詳細評価については JEAC4216 に取り込まないこととした。ASTM E1921 の更なる改訂や関連研究の進捗を注視し、将来的に客観的な非均質性の評価基準を JEAC4216 にも取り込む検討を継続することが重要である。

上記(1)及び(2)に関して、国際原子力機関(IAEA)においてラウンドロビン試験を含む検討が行われ、報告書<sup>[20]</sup>が発行されているので参考とされたい。

### (3)Mini-C(T)試験片の適用

本規程には、2015 年の改定で Mini-C(T)試験片の適用を規定した。Mini-C(T)試験片は ASTM E1921 を準用した試験片であるが、当時の ASTM E1921 の要求と合致していない部分があるため、独自に規定したものである。Mini-C(T)試験片は試験後のシャルピー衝撃試験片の変形していない箇所からノッチの方位を一致させて採取することが可能である。本試験片を用いる監視試験では、物量の限られた試験材料を効率的に利用できるものと期待される。国産の原子炉圧力容器鋼材（圧延材及び鍛造材）を対象とした体系的な破壊靱性試験により、Mini-C(T)試験片を用いて決定される  $T_0$  は、標準的な寸法の C(T)試験片を用いて決定されるそれと同等であることが確認されている<sup>[21, 22, 23, 24]</sup>。さらに、試験方法を適切に標準化することにより、試験機関によらず概ね同等の  $T_0$  が決定可能であつて、かつそのばらつきは想定される程度であることがラウンドロビン試験によって実証されている<sup>[25, 26, 27, 28]</sup>。

ただし、Mini-C(T)試験片を用いた破壊靱性試験を行うにあたっては、試験片が小さいということに起因していくつかの要求に応えることが求められる。本規程では、Mini-C(T)試験片に対する試験中の温度制御方法、試験片形状、ノッチの寸法及び形状、試験片の寸法公差、最小疲労予亀裂長さ及び試験片前面変位の荷重線変位への換算の各項目について、適正と考えられる取扱いの方法を明確化している。

また、(2)に述べた非均質材の扱いに関して、Mini-C(T)試験片のように 1 セットの破壊

靱性試験片に用いる鋼材の総体積を小さく、かつ、近接した部位から採取することは Material variability の影響の除去に有効である。

### (解説 MCT-1110)フェライト鋼の適用範囲

#### (1) 降伏強さの適用範囲

ASTM E1921 ではフェライト鋼の降伏強さの適用範囲を 275 MPa 以上 825 MPa 以下と規定している。本規程では、マスターカーブが測定されている材料の降伏強さの実績範囲、及び原子炉圧力容器鋼の照射材への適用を考慮した降伏強さの想定範囲を調査した結果、ASTM E1921 の適用範囲が適切であると判断し、その降伏強さの範囲を準用することとした。

#### (2) 照射材料の降伏強さを考慮した検討

原子炉圧力容器鋼の降伏強さは中性子照射を受けることにより上昇する。Matsuzawa らは、独立行政法人 原子力安全基盤機構で実施した PLIM プロジェクトの成果として、原子炉圧力容器鋼の照射脆化に影響を及ぼす銅含有量を変えた 9 種類の母材と 4 種類の溶接金属を対象に PWR 原子炉圧力容器の 32EFPY を超える期間に対応する約  $13 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) までの中性子を照射した材料の引張試験結果を報告している<sup>[29]</sup>。母材では最高 728 MPa、溶接金属では最高 767 MPa の引張試験結果が得られている。国内の原子炉圧力容器鋼の照射後の降伏強さは、これらの値よりも低いことが予想されることから、国内の原子炉圧力容器鋼の照射材料については、本規程での降伏強さの適用範囲が 275 MPa 以上 825 MPa 以下であれば、適用可能となる。

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 mismatches の場合に対して、溶接金属と母材との引張強さの差を 10%以内と規定されている。一方、溶接金属を対象とした破壊靱性規格である BS 7448-2-1997<sup>[30]</sup>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 積分の式を適用してもよいものとされており、ASTM E1921 の規定に記載されている 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（母材と溶接部が元々同等の材料）で溶接されており、溶接金属と母材との引張強さに大きな差がつくことはない。

### (解説 MCT-1120)マスターカーブが測定されている材料の降伏強さの実績範囲

Kirk らは、原子炉圧力容器鋼材へのマスターカーブ法の適用を検討するため、文献より多くの破壊靱性の実験値を収集している<sup>[31]</sup>。マスターカーブが測定されている材料は、SA-533B, SA-508 及びその溶接金属である合計 37 種類の原子炉圧力容器鋼材(照射されていない材料 27 種類,照射された材料 10 種類)、並びに 2 種類の原子炉圧力容器鋼以外の材料 (A470, A36) であり、合計 2043 個の破壊靱性の実験値を調査している。これらの材料の室温の降伏強さは、約 35 ksi(約 240 MPa)から約 115 ksi(約 800 MPa)であり、この降伏強さの範囲にほぼ対応する本規程の降伏強さの適用範囲において、マスターカーブ

法が有効であることを示唆しているものと考えられる。

### (解説 MCT-1300)試験温度における材料の縦弾性係数, ポアソン比及び降伏強さ

本規程では,  $K_{Jc}$  の制限値や  $J_c$  等の算出に試験温度における材料の縦弾性係数, ポアソン比及び降伏強さが使用されている。試験対象の材料について, これらの材料定数を試験温度に対して測定していることは多くはないことから, ここでは試験温度における材料の縦弾性係数, ポアソン比及び降伏強さについて実測値に代えて使用してもよい推奨値の例を挙げることにする。

#### (1) 縦弾性係数

ASME B&PV Code 2023 Section II Part D Table TM-1<sup>[32]</sup>には, 各種材料の縦弾性係数の温度依存を表すデータが記載されている。同表から, 炭素鋼 (炭素量が 0.30 mass.%以下), 材料グループ A (C-Mo-Mn 鋼 : C-1/4Mo 鋼, Mn-1/2Mo-1/2Ni 鋼を含む 8 種類) 及び材料グループ B (Ni 鋼 : 3/4Cr-1/2Ni-Cu 鋼, 3/4Ni-1/2Mo-Cr-V 鋼を含む 19 種類) の 3 種類のグループの材料を対象に, 温度の一次関数に近似した縦弾性係数の式を作成し以下に示す。原子炉圧力容器鋼材である SQV2A(SA-533 Gr.B Cl.1)と SFVQ1A(SA-508 Gr.3 Cl.1)は, それぞれ材料グループ A の Mn-1/2Mo-1/2Ni 鋼及び材料グループ B の 3/4Ni-1/2Mo-Cr-V 鋼に該当している。

炭素鋼 (C ≤ 0.30 mass.%)	$E = 204,300 - 63.4 T$
材料グループ A	$E = 203,631.3 - 104.3 T$
材料グループ B	$E = 193525.9 - 74.8 T$

ここで, 縦弾性係数  $E$  と温度  $T$  の単位は, それぞれ MPa と °C である。ASME B&PV Code Section II Part D Table TM-1 の  $-325^{\circ}\text{F}(-198^{\circ}\text{C})$  から  $600^{\circ}\text{F}(316^{\circ}\text{C})$  までのデータを用いて近似式が作成されており, 温度の適用範囲は  $-200^{\circ}\text{C}$  から  $320^{\circ}\text{C}$  と規定されている。なお, 上述の材料グループ以外の材料, あるいは, この適用温度範囲以外の場合には, ASME B&PV Code Section II Part D Table TM-1, あるいは, (社)日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S NJ1-2020<sup>[33]</sup>) Part 3 第 2 章表 1 も参照の対象となりうる。

#### (2) ポアソン比

ポアソン比  $\nu$  については, 原子炉圧力容器鋼材を対象に破壊靱性を測定している多くの論文で, 試験温度に依らず 0.3 が使用されている。本規程に従う評価においても炭素鋼も含めこの値を使用することは適切である。

#### (3) 降伏強さ

降伏強さの温度依存性に関しては, 様々な式が提案されており, 参考になる。ここでは幾つかの式について列挙し, 比較する。(一社)日本溶接協会の WES 1108「き裂先端開口変位(CTOD)試験方法」では, その 1995 年版<sup>[34]</sup>に以下の式が規定されている。

$$\sigma_{YS(T)} = \sigma_{YS(RT)} \exp \left\{ [481.4 - 66.5 \ln(\sigma_{YS(RT)})] \left[ \frac{1}{T+273} - \frac{1}{293} \right] \right\}$$

ここで、 $\sigma_{YS(T)}$ は温度  $T^{\circ}\text{C}$  における降伏強さ(MPa)、 $\sigma_{YS(RT)}$ は室温の降伏強さである。本式を用いることで、室温の降伏強さから、試験温度における材料の降伏強さを算出することができる。

(一社) 日本溶接協会の WES 1108 の 2016 年版<sup>[35]</sup>では、引張強さの範囲に応じて以下の 2 式が規定されている。

引張強さ 400～590 MPa 級鋼の場合 (適用範囲： $-100^{\circ}\text{C}$ ～室温)

$$\sigma_{YS(T)} = \sigma_{YS(RT)} \exp \left[ 0.234 \left( \frac{\sigma_{YS(RT)}}{E} \right)^{-1.5} \left\{ \frac{1}{27.6(T+273)} - \frac{1}{27.6 \times 293} \right\} \right]$$

引張強さ 780MPa 級鋼の場合 (適用範囲： $-100^{\circ}\text{C}$ ～室温)

$$\sigma_{YS(T)} = \sigma_{YS(RT)} \exp \left[ 2.93 \left( \frac{\sigma_{YS(RT)}}{E} \right)^{-1.1} \left\{ \frac{1}{27.6(T+273)} - \frac{1}{27.6 \times 293} \right\} \right]$$

ASTM E1921 では、その 2019 年版で以下の式が規定されている。  
(適用範囲： $-200^{\circ}\text{C}$ ～ $300^{\circ}\text{C}$ )

$$\sigma_{YS(T)} = \sigma_{YS(RT)} + \left( \frac{10^5}{(491 + 1.8T)} \right) - 189$$

電力中央研究所は国産の圧力容器鋼 SFVQ1A 及び SQV2A の照射されていない材料に対する試験結果に基づき以下の式を提案<sup>[20]</sup>している。

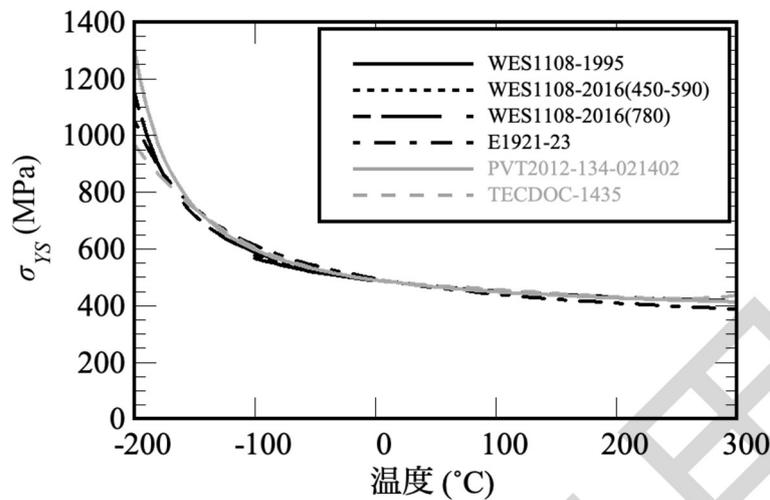
$$\sigma_{YS(T)} = 84 + 271 \exp \left\{ \frac{110}{T+273.15} \right\}$$

IAEA は欧州プロジェクトで使用された SA-533B (鋼材名:JRQ) の照射されていない材料に対する試験結果に基づき、その技術報告書 TECDOC-1435<sup>[36]</sup>で次の式を提案している。

$$\sigma_{YS(T)} = 4 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0.543 \cdot T + 490$$

以上の各式について、室温を  $20^{\circ}\text{C}$ 、 $\sigma_{YS(RT)}=479.4$  MPa、 $E=210,000$  MPa と仮定した時の温度依存性を解説図 MCT-1300-1 に示す。いずれの評価式でも  $-150^{\circ}\text{C}$  を下回る温度域では温度依存性の勾配が急峻となり評価式ごとの差異が大きくなるが、この領域では降伏点は高く、また圧力容器鋼は破壊靱性が低いと考えられるため本規程の評価に大きな影響はないものと考えられる。 $-150^{\circ}\text{C}$  から  $100^{\circ}\text{C}$  の範囲ではいずれの評価式もこの条件では大きな差異はない。なお、電力中央研究所の式及び TECDOC-1435 の式は中性子照射を受けていない圧力容器鋼を対象に定式化がなされており、評価者が室温における降伏応力を陽に与えない形となっている。解説図 MCT-1300-1 における  $\sigma_{YS(RT)}$  は電力中央研究所の式と TECDOC-1435 の式における室温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) の  $\sigma_{YS(T)}$  の平均値を  $\sigma_{YS(RT)}$  として与えたため各評価式の室温における値がほぼ一致しているが、中性子照射に伴い降伏応力が増大するような場合には乖離が大きくなる。電力中央

研究所の式や TECDOC-1435 の式を用いる場合には中性子照射に伴う降伏点の変動の効果を別途考えることが必要となる。



解説図 MCT-1300-1 降伏応力の温度依存性

なお、溶接金属の試験温度における材料の縦弾性係数、ポアソン比及び降伏強さは、母材に準じて設定される場合もある。

#### (4) $K_{Jc}$ の正規化パラメータ

JEAC4216 の 2015 年版では「 $p_f$  が 63.2% に対応する  $K_{Jc}$ 」と定義していたが、この 63.2% は  $1 - e^{-1}$  の近似値である。特段の計算実施上の困難はないと考えられることから、202X 年版で数式のまま用いることとした。

#### (解説 MCT-2100) 試験機

Mini-C(T)試験片を用いる場合、試験荷重が小さいため、試験機の荷重計の容量及び測定レンジに留意することが肝要である。

#### (解説 MCT-2400) 変位計

変位計として通常クリップゲージが用いられる。しかし、MCT-2400 で規定する測定精度を満足できることが確認されたら、クリップゲージ以外の変位計測方法を用いることも可能である。

#### (解説 MCT-2500) Mini-C(T)試験片の温度計測

Mini-C(T)試験片では、熱電対を直接試験片に取り付ける場合は、取り付け施工に伴う試験片の損傷など、小さな試験片への加工の困難さによる悪影響が懸念される。一方、温度制御に通常使用される恒温槽は、槽内に試験片用治具や変位計を含めて納める構造である。試験片及びこれを保持する試験片用治具に比べ内寸法が大きいため、槽内の環境温度分布が試験片に与える影響は小さい。また小さい試験片は熱容量が小さく周囲と

の温度差がつきにくい。これらのため、Mini-C(T)試験片と近接する試験片用治具の間の温度差は小さく、かつばらつきも小さい。以上より、Mini-C(T)試験片においては、予め試験片及び近接する治具の温度差を計測、校正したうえで、近接する治具に取付けた熱電対で温度測定及び制御してもよいことを規定した。この場合の試験温度の再現性については、原子炉圧力容器鋼を対象としたラウンドロビン試験<sup>[25, 26]</sup>において国内外の 8 機関で温度校正を実施し、いずれの機関においても試験片と近接する試験片用治具の温度差が±3°Cの範囲内に収まることが確認されている。

### (解説 MCT-3100)適用試験片

本規程に適用する試験片は標準コンパクト試験片 (C(T)試験片)、円盤状コンパクト試験片 (DC(T)試験片)、ミニチュアコンパクト試験片 (Mini-C(T)試験片) 及び曲げ試験片 (SE(B)試験片) となっている。その寸法は試験片厚さ  $B$  を基準として相対的に規定されており、様々な大きさの試験片に対応する。本規程は、負荷中にへき開破壊あるいはポップインが生じるような温度領域において、ノッチ及び疲労予亀裂を入れた C(T)試験片、DC(T)試験片、Mini-C(T)試験片及び SE(B)試験片を用いた試験に関するものである。亀裂長さ比  $a_0/W$  は 0.45~0.55 と規定されている。C(T)試験片、DC(T)試験片、Mini-C(T)試験片の幅は厚さの 2 倍である。SE(B)試験片の幅は厚さと同一か 2 倍である。なお、C(T)試験片のタイプ III 試験片を用いる場合、ピンの変形や破壊が生じる可能性があるので注意が必要であろう。Mini-C(T)試験片は、基本的に C(T)試験片の相似形であるが、板厚が 4 mm(0.16T)と薄く、C(T)試験片の機械加工公差を用いることは難しいことから、C(T)試験片とは別に規定されている。

### (解説 MCT-3110-1)C(T)試験片前面で変位を測定する場合の定数

ASTM E1921 において、ASTM E399<sup>[37]</sup>タイプの C(T)試験片を用いて(荷重線から 0.25 $W$ 離れた)試験片前面で変位を測定する場合、当該位置の測定値に定数 0.73 を乗じて荷重線変位を推定してもよいものと規定されている。一方、ASTM E1820<sup>[38]</sup>の付録 A.2 には、開口量の増大に伴う荷重線の回転の影響を補正するための方法が規定されており、0.75 と算出される。ASTM E1820 では大規模降伏及び延性亀裂進展を伴う変形までが想定されているのに対し、マスターカーブ評価のための破壊靱性試験では延性亀裂進展が制限されていることから ASTM E1921 に定める 0.73 の方がより妥当であると考えられること及び ASTM E1820 との差も 2.7%と小さいことから、本規程においては、ASTM E1921 と同様に 0.73 を採用することとした。

Mini-C(T)試験片は試験片前面で変位を測定するため 0.73、0.74、0.75 で  $J_c$  及び  $T_0$  に与える影響を比較検討した結果、0.73 の方が若干高い  $T_0$  が得られることから、C(T)試験片と同様に 0.73 を用いることとした<sup>[39]</sup>。

### (解説 MCT-3110-2)試験片前面からわずかに離れた位置で測定した変位の換算方法

本規程では、破壊靱性を求めるため、荷重線変位を測定する以外に、C(T)試験片の一部及び SE(B)試験片では試験片前面での亀裂開口変位を測定することを認めている。ただ

し、試験片の寸法が小さい場合や照射材料を使用した試験片等では、試験片前面での変位を測定することが難しいことがあり、当該位置にナイフエッジを取り付け、当該位置からわずかに離れた位置での変位を測定し試験することが想定される。

ここでは、このような試験片前面からわずかに離れた位置で変位を測定する場合において、他の破壊靱性試験方法の規格を参考に、亀裂開口変位を推定する方法について記載する。

(一社)日本溶接協会の WES 1108-1995「き裂先端開口変位(CTOD)試験方法」<sup>[32]</sup> 及び英国 BS 7448-1-1991<sup>[40]</sup> は、ともに亀裂先端開口変位(CTOD)が測定できる試験方法である。これらの試験方法では、試験片前面にナイフエッジを取り付け、当該位置よりわずかに離れた位置で変位を測定する場合での CTOD の測定法が記載されている。これらの試験方法では、いずれも試験片内部に回転の中心を考え、試験片の幾何学的形状から CTOD が算出されている。この回転中心の考えを利用すると、亀裂開口変位を推定することが可能となる。WES 1108 と BS 7448 では回転中心による換算がほぼ同等であることから、WES 1108 で用いられている換算法に基づき、亀裂開口変位への換算率を求めると、次式で与えられる。

(C(T)試験片及び Mini-C(T)試験片)

$$R_a = \frac{\gamma_p (W - a_0) + a_0 + 0.25W}{\gamma_p (W - a_0) + a_0 + 0.25W + z}$$

$$\gamma_p = 0.4(1 + \alpha)$$

$$\alpha = 2\sqrt{(a_0/b_0)^2 + (a_0/b_0) + 1/2} - 2(a_0/b_0 + 1/2)$$

(SE(B)試験片)

$$R_a = \frac{\gamma_p (W - a_0) + a_0}{\gamma_p (W - a_0) + a_0 + z}$$

$$\gamma_p = 0.4$$

ここで、 $z$  は端部又は表面に取付けるナイフエッジの厚さである。 $R_a$  は亀裂開口変位への換算率である。ただし、 $a_0/W$  は 0.45 から 0.55 の範囲である。

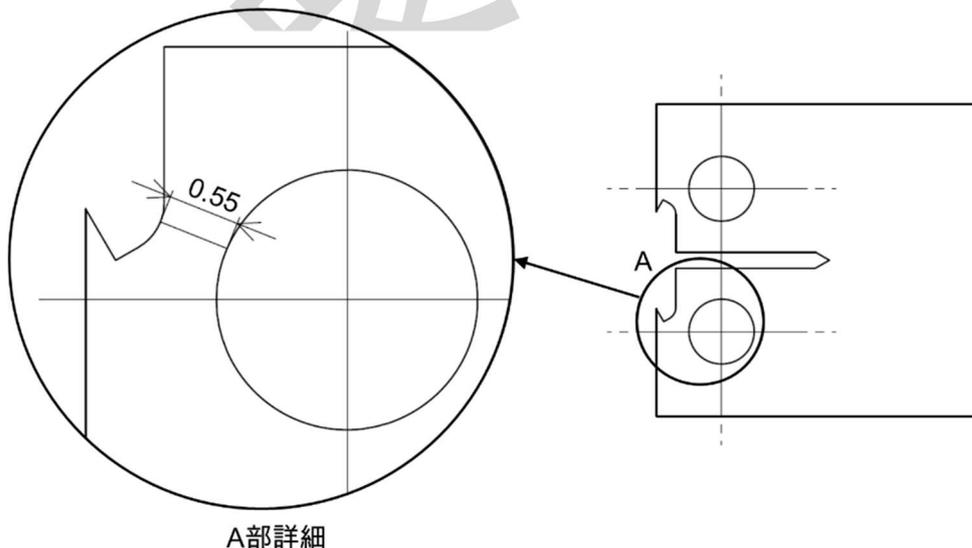
この換算率を用いることにより、試験片前面からわずかに離れた位置で測定した変位から、亀裂開口変位を換算することが可能である。

### (解説 MCT-3130)ミニチュアコンパクト試験片の寸法公差

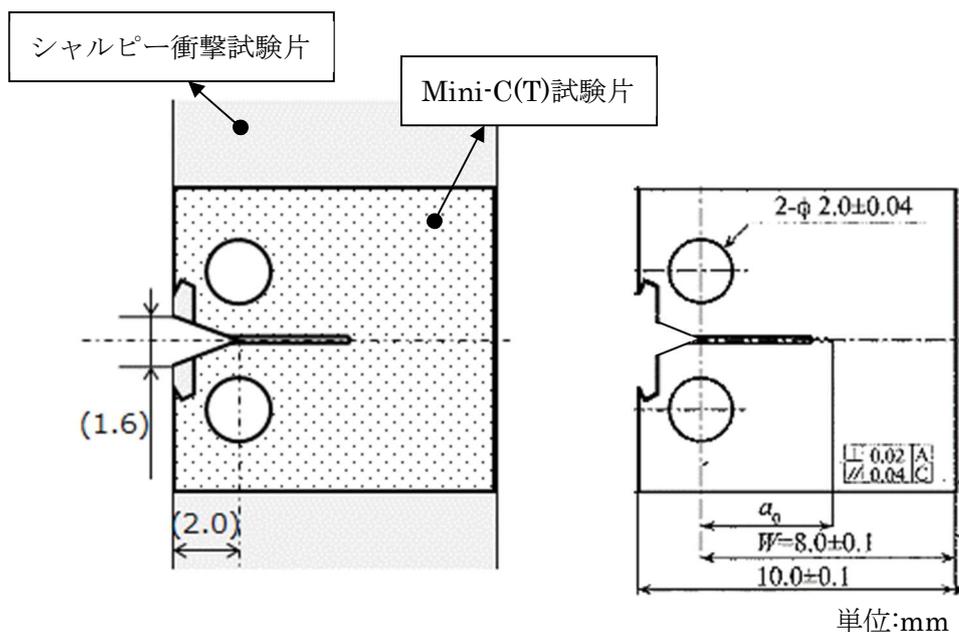
Mini-C(T)試験片の寸法及び形状は図 MCT-3100-3 に示したとおりである。図 MCT-3100-1 に示す C(T)試験片においては主要部位の寸法公差が試験片幅( $W$ )の相対値として与えられているが、Mini-C(T)では試験片寸法が小さく、 $W$ の相対値で公差を要求すると寸法公差の絶対値が厳しくなり、試験片の製作加工に現実的でない精度を求めることになる。そこで、Mini-C(T)試験片に対して、主要部位の寸法公差を個別に絶対値として規定した。主要寸法のうち初期亀裂長さ、試験片厚さ及び試験片幅については、応力拡大係数の算出にあたりそれらの影響が考慮されており、寸法公差が大きくても寸法の実測値を用いることとすれば評価の精度は保証される。主要寸法のうち試験片長さ、試験片高さ及びゲージ長さ（変位計の取付け位置間の距離）については、応力拡大係数に及ぼす影響が評価式で考慮されていないが、これら因子の影響については有限要素解析に基づく検討がなされており、寸法公差を一律 $\pm 0.1$  mmとしても破壊靭性及び $T_0$ の評価結果に及ぼす影響が実用上問題とならないことが確認されている<sup>[41,42]</sup>。

切欠き部とピン穴の間において塑性変形が生じた場合、実験で得られる破壊靭性値が本来の値よりも高くなり、 $T_0$ が低く評価される一方、解説図 MCT-3130-1 のように切欠き部とピン穴の間を $0.55$  mm にすれば、 $\sigma_{YS(RT)}=275$  MPa の材料であっても切欠き部とピン穴の間に塑性変形は生じないことが確認されている<sup>[43]</sup>。

また、シャルピー衝撃試験片から Mini-C(T)試験片を採取する際、解説図 MCT-3130-2 のようにシャルピー衝撃試験片の V ノッチが Mini-C(T)試験片に含まれる場合がある。この場合においても、試験中に試験片の塑性変形が生じず、 $T_0$ が取得できることが確認されている<sup>[44]</sup>。



解説図 MCT-3130-1 切欠き部とピン穴の間の寸法



解説図 MCT-3130-2 シャルピー衝撃試験片のVノッチが残存したMini-C(T)試験片

#### (解説 MCT-3150)ノッチの形状

ASTM E1921 では、コンパクト試験片で基本的な形状である直線状のノッチ形状（直線状ノッチ，狭隘ノッチ）の他にシェブロンノッチや穴付きノッチなどが規定されている。本規程においては，大型試験片や疲労予亀裂導入が難しい材料に対して有効なシェブロンノッチは本規程に残すこととし，使用実績がない穴付きノッチは含めないこととした。なお，シェブロンノッチは直線状ノッチ，狭隘ノッチと同格にあるものではなく，ノッチ先端形状をどうするかを選択であるため，ノッチの先端形状は直線状ノッチと狭隘ノッチを基本とし，オプションとしてシェブロンノッチを規定した。

Mini-C(T)試験片は，機械加工で導入するノッチの先端の曲率半径が大型の試験片より相対的に大きくなることが想定され，疲労予亀裂の導入が難しくなる可能性があることから，先端の曲率半径が小さいこと（先端半径 0.125 mm 以下）を推奨した。

#### (解説 MCT-3160) $K_{Jc}$ の制限値

MCT-3160 は  $K_{Jc}$  の制限値を示すものである。試験片寸法の選定は，試験結果を予測して，可能な限り(1)式に示す  $K_{Jc}$  の制限値を満足するように決めることが効率的な試験実施に役立つ。例えば， $\sigma_{YS(RT)}=530$  MPa， $E=213,000$  MPa， $\nu=0.3$ ， $b_0=0.9B$ （ただし，Mini-C(T)試験片の場合は  $b_0=4$  mm）とすると，試験片寸法と  $K_{Jc(\text{limit})}$  の関係は解説表 MCT-3160-1 のように算出される。試験片寸法が小さいと  $K_{Jc(\text{limit})}$  が小さくなることから，より多くの有効なデータを採取するためには，可能な限り，大きな試験片を用いることが解決策となる。なお，十分な試験片厚さがとれない場合には，試験温度を下げるとともに試験片の数を多く準備すると，有効な評価に繋がりがやすくなる。

解説表 MCT-3160-1 試験片寸法と  $K_{Jc(limit)}$  の関係

試験片寸法 ( $nT$ )	$K_{Jc(limit)}$ 算出例 <sup>注</sup> [MPa $\sqrt{m}$ ]
0.16T (Mini-C(T)試験片)	128.6
0.4T	194.5
0.5T	217.4
1T	307.5
2T	434.8

注： $\sigma_{YS(RT)}=530$  MPa,  $E=213,000$  MPa,  $\nu=0.3$ ,  $b_0=0.9B$  (ただし, Mini-C(T)試験片の場合には  $b_0=4$  mm) とした場合の算出例

#### (解説 MCT-3210) 疲労荷重の条件

疲労予亀裂の効率的な導入のためには、以下の方法がある。

- (1) ノッチ先端を鋭くする。
- (2) シェブロンノッチとする。
- (3) 亀裂面に直交する方向にノッチ先端が圧縮となるような静的な予荷重をかける ( $P_m$  を超えない範囲で)。
- (4) 疲労荷重の応力比を負とし、所与の最大疲労荷重に対しより大きな圧縮荷重を負荷することで亀裂の発生を促進する。

疲労荷重は、予亀裂導入時の最大応力拡大係数  $K_{MAX}$  が後に実施される破壊靱性試験から得られる材料の破壊靱性よりも十分小さいように制限されることが一般的に求められる。疲労予亀裂導入時には、破壊靱性試験の結果は出ていないため、試験結果を予測し、十分に小さい荷重で疲労予亀裂を導入することが肝要となる。

疲労予亀裂の導入時、試験片は負荷装置の所定の位置に正確に取り付けられていることが重要となる。疲労サイクルには通常正弦波が用いられる。

#### (解説 MCT-3220) 疲労予亀裂の導入手順

疲労予亀裂導入時の疲労サイクルの周波数は、大きい方が早期に疲労予亀裂を導入できるが、大きすぎると試験片が発熱する可能性があるため、注意が必要となる。一般的に、20 Hz 程度の周波数の疲労サイクルであれば、試験片の発熱の問題は生じない。

疲労予亀裂導入時は、試験片の一方の表面で亀裂が発生するまで注意して観察することが重要となる。一方の表面で目にみえるほどの進展が観察されながら、他方の表面で亀裂が発生していなければ、疲労サイクルを中断してその原因を究明し、非対称な挙動を是正することで、規程を満たす疲労予亀裂の導入につなげることができる。試験片を取付ける向きを変えるだけで問題を解決できることもある。

疲労予亀裂導入時には、試験片表面の長さしか測定できないことから、両側面の亀裂長さを目視で測定した際の平均値や、除荷コンプライアンス法 (ASTM E1820 参照) による

推定値等を用いて疲労予亀裂長さを評価することとなる。実際の疲労予亀裂の長さは破壊靱性試験終了後の亀裂寸法（MCT-4320 参照）により測定されるため、疲労予亀裂導入時の測定値は暫定的な値であるが、側面の疲労予亀裂よりも、板厚内部の疲労予亀裂の方が一般的に長いことから、側面の測定値（両側面の平均値）が必要な疲労予亀裂長さを満足していれば問題にならない。ただし、Mini-C(T)については MCT-3100 に示されている初期亀裂長さ  $a_0$  が  $0.5W \pm 0.05W$  を満足することの確認が重要となる。例えば、 $a_0/W = 0.5$  を目標として側面の測定値で 0.6 mm の疲労予亀裂を導入しようとしたとき、0.8 mm まで疲労予亀裂を導入してしまうと、実際の亀裂平均長さは 0.2 mm 程度長いから、 $a_0/W = 0.55$  を超えてしまう可能性がある。

疲労予亀裂は最低でも二段階で導入するよう規定されている。ASTM E1921 では最終段階の  $K_{MAX}$  を  $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ （破壊靱性試験温度が疲労亀裂導入時の温度以上の場合は  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）とすることが規定されている。一方、ASTM E399 及び ASTM E1820 の最終段階では、得られた破壊靱性値 ( $K$  値) を破壊靱性試験温度と疲労亀裂導入時の温度の降伏強さにより補正した値の 60% を  $K_{MAX}$  とすることが規定されている。本来、 $K$  値（破壊靱性試験結果）に疲労予亀裂導入時に生成された塑性ひずみ（塑性範囲）の影響がないようにすることが、疲労予亀裂導入条件における  $K_{MAX}$  制限の目的であることから、本規程では、ASTM E399 及び ASTM E1820 と同様の  $K_{MAX}$  制限を設けることとした。ただし、疲労予亀裂の応力拡大係数の最大値  $K_{MAX}$  をいたずらに大きくする必要は低いことから、最終段階の  $K_{MAX}$  は第一段階の  $K_{MAX}$  と  $0.6 \times \frac{f_{YS}}{\sigma_{YS}} K_{Jc}$  の小さい方の値以下と制限することとした。

なお、ASTM E1921 のように、最終段階の  $K_{MAX}$  を  $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  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は満足される。

疲労予亀裂長さ  $\Delta a_{pc}$  の最小値は、破断面上で疲労予亀裂寸法を測定するのに通常用いられる光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡において疲労亀裂が進展していることを明瞭に判断できる長さとして、工学判断により 0.25 mm を求めることを規定とした。

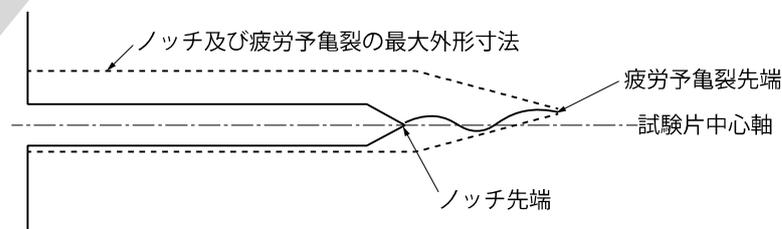
JEAC4216-202X においては、ASTM E1921 の最新の規定に合わせ、直線状ノッチと狭隘ノッチに対する詳細な寸法要求を削除する一方で、ノッチと疲労予亀裂を併せた外形の最大寸法を規定した。この変更は、ASTM E1921 の旧来の規定や JEAC4216-2015 におけるノッチの詳細寸法要求を規定したもとの技術根拠論文<sup>[45]</sup>に立ち返り、ノッチ形状が亀裂先端における応力拡大係数に影響を及ぼさない範囲で規定を整理しなおし、ノッチと疲労予亀裂の外形寸法が定められた範囲に入ることを求めた（解説図 MCT-3220-1）ものである。同変更によっても直線状ノッチに対する寸法要求は変化しないが、狭隘ノッチについては JEAC4216-2015 の規定よりノッチ幅の要求が緩められた。有限要素解析に基づく検討から、これらのノッチ寸法を用いても破壊靱性試験結果に及ぼす影響は問題とならないことが確認されている<sup>[39, 40]</sup>。ただし、疲労予亀裂が大きく曲がる場合や、狭隘ノッチにおいて大きなノッチ幅を選んだ場合は、ノッチ先端からの亀裂発生が試験片中央線（ノッチ幅の中央線と一致）から試験片上下方向に外れる場合が考えうる。結果として解説図 MCT-3220-2 のように要求を満たさないことにならぬよう、適切なノッチ寸法、特にノッチ先端の曲率半径を評価者が設定す

ることが肝要である。JEAC4216-2015 においては狭隘ノッチの最大寸法は  $0.01W$ (図 MCT-3100-1 の C(T)試験片の場合)又は  $0.25 \text{ mm}$  (図 MCT-3100-3 の Mini-C(T)試験片の場合)とされていた。これに基づくノッチ先端の曲率半径の推定値はそれぞれ  $0.005W$  及び  $0.125 \text{ mm}$  であり、ノッチ先端の曲率半径の設定の参考になる。

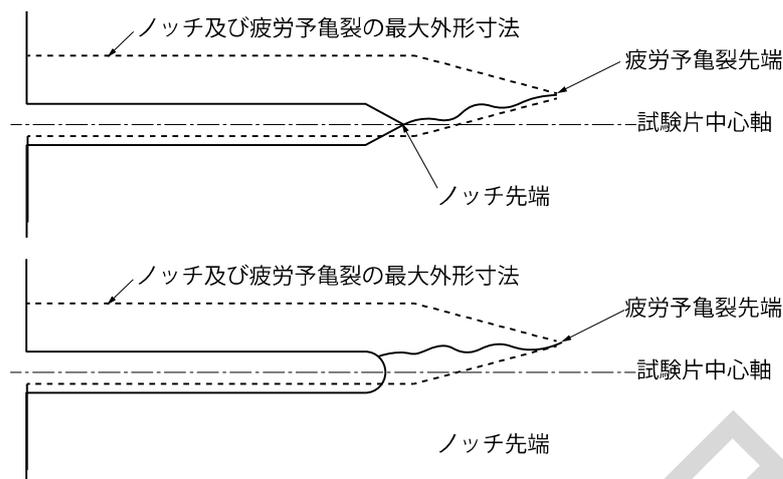
規定を満足して疲労予亀裂導入を行うための予亀裂導入条件の設定における考え方の例を以下に示す。条件設定の例における前提条件は解説表 MCT-3220-1 のとおりとした。これらの前提の下、規定を満足するような条件設定とするために想定した試験温度や試験時の  $K_{Jc}$  を解説表 MCT-3220-2 に示す。多くの場合、最低試験温度は試験前には不明であるため、規定を満足するためには十分低い想定とすることとなる。そこで、ここでは、例として  $-100^\circ\text{C}$  とした。また、破壊靱性試験の  $K_{Jc}$  は試験前には不明であるため、 $K_{MAX}$  の規定を満足するためには十分低い想定とすることとなる。そこで、ここでは、例として  $T-T_0=-50^\circ\text{C}$  の  $K_{Jc(0.01)}$  に相当する値である  $32.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  とした。これらの前提条件と想定に基づいて、疲労予亀裂導入条件を設定した例を解説表 MCT-3220-3 に示す。予亀裂導入時の初期段階に想定される  $K_{MAX}$  は  $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  を下回るように  $24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  とした。この場合、予亀裂導入時は以下を満足するように注意することとなる。

- ・予亀裂導入時の最終段階の  $K_{MAX}$  は、 $K_f=15.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  を下回ること
- ・予亀裂導入時の最終段階の亀裂進展量  $\Delta a_f$  は、 $0.2 \text{ mm}$  以上となること
- ・予亀裂導入時の最終段階に遷移する際の亀裂進展量  $\Delta a_{sh}$  は、 $0.14 \text{ mm}$  以上となること
- ・予亀裂長さが  $2.83 \text{ mm}$  以上となること

この条件の下で、4段階で荷重を下げて疲労予亀裂を導入した場合の例を解説図 MCT-3220-3 に示す。図中には  $K_{MAX}$  の許容値及び実際の  $K_{MAX}$  と疲労予亀裂長さの関係をそれぞれ示した。いずれの亀裂長さにおいても実際の  $K_{MAX}$  は許容値を下回り、規定を満足することを確認した。予亀裂導入後に解説図 MCT-3220-3 のような整理を行えば、疲労予亀裂導入時の規定を満足していたかを確認することが可能となる。



解説図 MCT-3220-1 許容されるノッチ及び疲労予亀裂の例



解説図 MCT-3220-2 許容されないノッチ及び疲労予亀裂の例

解説表 MCT-3220-1 疲労予亀裂導入条件設定の例における前提条件

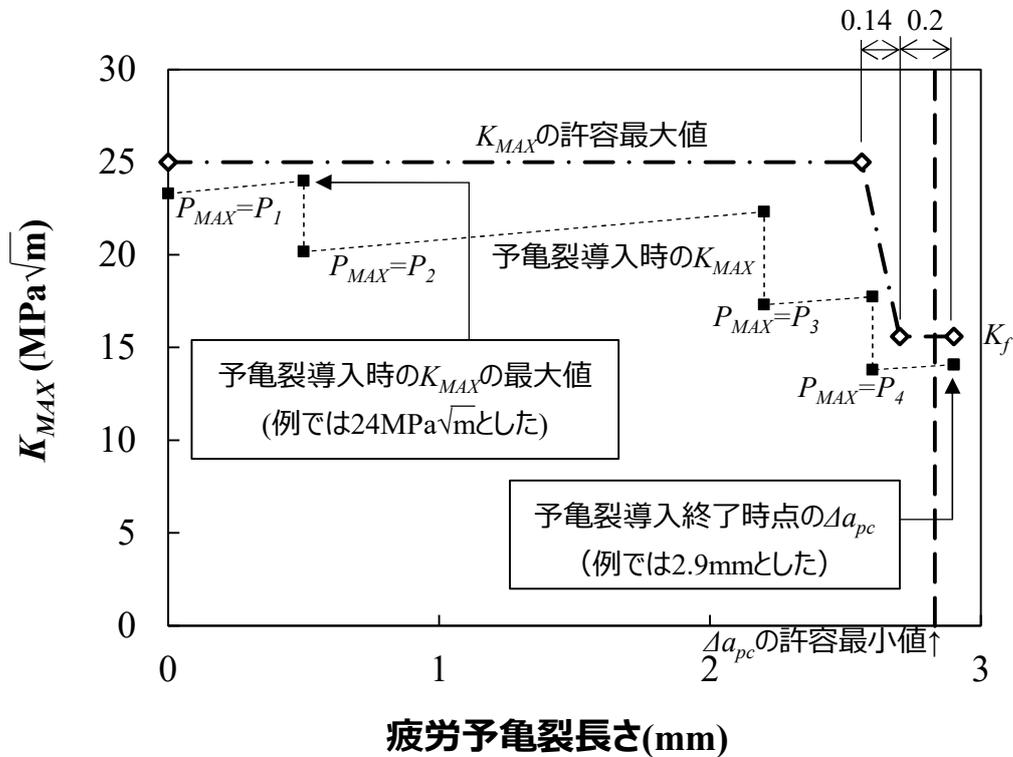
項目	条件
対象試験片形状	1T-CT 試験片
ノッチ形状	直線状ノッチ
ノッチ幅	2.5 mm
ノッチ先端長さ	2.17 mm
疲労予亀裂導入温度	23°C
23°Cにおける降伏応力 $\sigma_{YS}^f$	500 MPa

解説表 MCT-3220-2 疲労予亀裂導入条件検討時の試験温度や試験時の $K_{Jc}$ の想定

項目	想定	考え方
最低試験温度	-100°C	十分低い温度を想定する
-100°Cの破壊靱性試験で想定される $K_{Jc}$	32.9 MPa $\sqrt{m}$	$K_{Jc}$ のばらつきを踏まえ、 $T-T_0=-50^\circ\text{C}$ の $K_{Jc(0.01)}$ を想定。

解説表 MCT-3220-3 想定に基づく疲労予亀裂導入条件の設定

項目	条件設定	考え方
予亀裂導入時の初期段階に想定される $K_{MAX}$	$24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$	制約条件 $K_{MAX} < 25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を下回る条件に設定
$-100^\circ\text{C}$ における降伏応力 $\sigma_{YS(RT)}$	633 MPa	引張試験データがないため、例として ASTM E1921 の降伏応力の温度依存性の式に基づき算出。
想定される $K_{Jc}$ から暫定的に算出した $K_f$	$15.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$	$0.6 \times \frac{\sigma_f}{\sigma_{YS}} K_{Jc}$ により算出。
$r_{p1}$	0.24 mm	$r_{p1} = 1/(3\pi) \cdot (K_{MAX}/\sigma_{YS})^2$ より算出
$r_{p2}$	0.10 mm	$r_{p1} = 1/(3\pi) \cdot (K_f/\sigma_{YS})^2$ より算出
$r_{p1}-r_{p1}$	0.14 mm	—
$\Delta a_{sh}$	$\geq 0.14 \text{ mm}$	制約条件は $r_{p1} - r_{p2}$ 以上
$\Delta a_f$	$\geq 0.2 \text{ mm}$	制約条件は 0.2 mm 以上
ノッチ先端長さ $\Delta a_{pc}$ の和	$\geq 5.0 \text{ mm}$ ( $\Delta a_{pc} \geq 2.83 \text{ mm}$ )	制約条件はノッチ先端長さ $\Delta a_{pc}$ の和はノッチ幅の 2.0 倍を下回ってはならない。
$\Delta a_{pc}$	$\geq 1.25 \text{ mm}$	制約条件はノッチ幅の 0.5 倍、 $\Delta a_{sh} + \Delta a_f$ 、0.25 mm をいずれも下回ってはならない。



解説図 MCT-3220-3 疲労予亀裂導入時の疲労予亀裂長さと  $K_{MAX}$  の関係の例

### (解説 MCT-3300) サイドグループ

規程上、サイドグループの導入は任意であるが、以下の理由により SE(B)試験片ではサイドグループを付与することを、Mini-C(T)試験片ではサイドグループを付与しないことを、それぞれ推奨事項とした。

- ・ C(T)試験片と比べ、 $B/b_0$ が大きい SE(B)試験片では、試験片板厚の中央近傍と表面近傍での亀裂長さの差異による影響が C(T)試験片より大きくなる可能性が考えられる。サイドグループを付与すれば、表面近傍の亀裂長さの短い部分が取り除かれ、板厚方向の亀裂長さ分布の範囲を小さくすることができること。
- ・ Mini-C(T)試験片のラウンドロビン<sup>[26]</sup>ではサイドグループを付与していないこと。
- ・ Mini-C(T)に図 MCT-3300-1 に示されるサイドグループ底部の半径  $0.5 \pm 0.2$  mm を適用した場合の、亀裂先端への影響について確認が必要であること。

### (解説 MCT-4000) 試験手順及び評価手順の概要

マスターカーブ法における試験手順及び評価手順の概要を以下に例示する。

- 1) 荷重、及びノッチをまたぐある位置における変位を自動記録計又はコンピュータのデータ収集システム、あるいはその両者により測定する。破壊靱性は破壊開始点で評価される。破壊開始点での J 積分  $J_c$  を算出し、これを等価な応力拡大係数  $K_{Jc}$  に変換する。後の統計解析のため、データの有効性の条件が設定されている。
- 2) データの母集団からワイブル分布に従う  $K_{Jc}$  の中央値を得るため、試験は最低でも 6 体の試験片で繰り返すこととなる。繰り返した試験データにはある程度のばらつきが想定される。これらデータの試験片寸法の変化に伴うデータの補正及びこれらのデータのばらつきの分布を予測するために統計的手法が用いられる。
- 3) 試験片寸法と破壊靱性  $K_{Jc}$  との間の統計的関係は最弱リンク理論によりモデル化される。このモデルの適用可能範囲は別途指定される。
- 4) 破壊靱性遷移曲線の決定にはマスターカーブの考え方が用いられる。温度軸上の曲線の位置は、1T 試験片に対する  $K_{Jc}$  の中央値が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となるような温度  $T_0$  を実験的に求めることで定まる。試験温度は  $K_{Jc}$  の中央値が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  に近くなるよう選択するのが好ましいとされており、そのような温度設定方法が提案されている。予亀裂入りシャルピーや Mini-C(T)などの小型試験片に対しては、 $K_{Jc(\text{med})}$  が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  を下回るような、 $T_0$  より低い温度で試験をせざるを得ないことがある。このような場合、追加の試験片が必要となる。

### (解説 MCT-4100) 試験の準備

試験片寸法の測定精度は、JEAC4216-2015 では試験片の大きさによる誤差（試験片公称寸法の  $\pm 0.5\%$ ）及び使用する測定器による誤差（ $\pm 0.05$  mm）を勘案し、それらのうちより大きな誤差を想定することとなっていた。0.05 mm は、JIS B7507<sup>[46]</sup>におけるノギスの読み取り精度（測定長が 50 mm 以下）に相当するがこれに伴う誤差は小さな試験片、とりわけ Mini-C(T)試験片では測定長に対して大きな値となる。このため、

JEAC4216-202X では絶対値による規定 ( $\pm 0.05$  mm) を削除し、相対値による規定のみとした。より測定精度の高い機器 (例えばマイクロメーター) を用いれば、Mini-C(T) 試験片においても相対値による寸法制度要求を満たすことが可能である。

### (解説 MCT-4210) 試験温度

マスターカーブ法は 1T 試験片に対する  $K_{Jc}$  の中央値が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となる温度  $T_0$  を実験的に求めるため、試験温度は  $K_{Jc(\text{med})}$  が  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  に近くなるように選択する場合が多い。

シャルピーV ノッチ試験データを用いて試験温度の設定を行う例が ASTM E1921 に示されていることから、本規程では参考として附属書 B に記載した。また小型試験片では有効データが高確率で得られるように試験温度を都度設定することが重要であるため、その参考例を附属書 B に記載した。

### (解説 MCT-4220) 試験片個数

ここでは、 $T_0$  を決定する際に必要とされる試験片個数を十分に準備することを記載している。ASTM E1921 では、予亀裂入りシャルピー試験片を用いた場合の要検閲となる個数予測の目安が解説表 MCT-4220-1 のように示されているが、 $(T-T_0)$  の範囲が  $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  では要検閲となる個数が更に多くなることから、実際に試験を行う場合には ASTM E1921 の  $(T-T_0)$  の範囲  $-14^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  ( $K_{Jc(\text{med})}$  の範囲で  $84 \sim 212 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) を  $-14^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$  ( $K_{Jc(\text{med})}$  の範囲で  $84 \sim 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) とするのが妥当と考えられる。

解説表 MCT-4220-1 ASTM E1921 に記載されている予亀裂入りシャルピー試験片を用いた場合の要検閲となる個数の目安

$(T-T_0)$ の範囲 [ $^\circ\text{C}$ ]	$K_{Jc(\text{med})}$ 範囲 (参考) 注1 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]	有効な $K_{Jc}$ の 必要個数	(1)式で要検閲となる $K_{Jc}$ データ個数予測注2
$-14 \leq (T-T_0) \leq 50$	$(84 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 212)$	6	3
$-35 \leq (T-T_0) \leq -15$	$(66 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 83)$	7	1
$-50 \leq (T-T_0) \leq -36$	$(58 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 65)$	8	0

注1: 1T に換算した  $K_{Jc(\text{med})}$  値である。

注2: 予亀裂入りシャルピー試験片を用いた場合の値であり、これに有効な  $K_{Jc}$  の必要個数を加えた試験片個数を試験片総数の目安とすることができる。

一方、Mini-C(T)試験片は予亀裂入りシャルピー試験片よりも板厚が薄くなるため、要検閲となる  $K_{Jc}$  の数は多くなる。Mini-C(T)試験片に対して要検閲となる個数予測の目安を検討した結果を解説表 MCT-4220-2 に示す。同一の  $(T-T_0)$  の範囲においても、より高い温度では要検閲となる  $K_{Jc}$  の数が多くなることから、適切な試験温度を設定することが重要であり、例えば  $K_{Jc(\text{limit})}$  と破壊靱性分布の 98% 許容限界の温度依存性曲線同士が交差する温度を上限として都度試験温度の探索が可能である<sup>[8]</sup>。なお、附属書 B に示す試験温度(吸収エネルギーが 41 J に対応する遷移温度  $T_{CVN} - 56^\circ\text{C}$ )は  $T_0 - 32^\circ\text{C}$  に相当し、必要数

7個+要検閲1個となる。

**解説表 MCT-4220-2 Mini-C(T)試験片を用いた場合の要検閲となる個数の目安**

$(T-T_0)$ の範囲 [°C]	$K_{Jc(\text{med})}$ 範囲 (参考) 注1 [MPa√m]	有効な $K_{Jc}$ の 必要個数	(1)式で要検閲となる $K_{Jc}$ データ個数予測注2
$-14 \leq (T-T_0) \leq 0$	$(84 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 100)$	6	6~20
$-35 \leq (T-T_0) \leq -15$	$(66 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 83)$	7	1~6
$-50 \leq (T-T_0) \leq -36$	$(58 \leq K_{Jc(\text{med})} \leq 65)$	8	0~1

注1：1Tに換算した  $K_{Jc(\text{med})}$  値である。

注2： $T_0 = -57^\circ\text{C}$ ， $\sigma_{YS(RT)} = 441 \text{ MPa}$  とした場合の例。Mini-C(T)試験片を用いた場合の値であり、これに有効な  $K_{Jc}$  の必要個数を加えた試験片個数を試験片総数の目安とすることができる。

解説表 MCT-4220-1 及び 2 の要検閲となる個数予測は、あくまでも予亀裂入りシャルピー試験片又はMini-C(T)試験片を用いた場合の目安であり、 $(T-T_0)$ が大きくなれば要検閲となる  $K_{Jc}$  は増えることから、試験温度によっては、本表の要検閲となる個数予測よりも多くの  $K_{Jc}$  が要検閲になることが考えられるため、試験片個数は十分な数を準備するとともに、試験温度の選定には注意が必要となってくる。また、本表は、要検閲な  $K_{Jc}$  の総数を制限するものではない。なお、すべての要検閲な  $K_{Jc}$  は統計的に意味があることから、評価に用いなければならないと規定されている。すなわち、 $K_{Jc}$  の棄却は、本規程の MCT-4340 に従って行うこととなっている。個々の判断によって勝手に棄却することは本規程では許容されていない。

### (解説 MCT-4230)試験温度の制御と測定

室温以外の温度で試験を行う場合、亀裂先端近傍が試験中にわたり試験温度 $\pm 3^\circ\text{C}$ に維持されるよう、試験片の冷却あるいは加熱は、液体の蒸発、輻射加熱等の適切な方法で行うことを要求事項とした。MCT-2500 に記載の「温度制御の再現性は $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内」とは、同じ試験片及び同じ試験温度で繰り返し試験を実施する場合の試験温度を $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内に制御することを意味している。また、ASTM E1820 では目標温度に到達してから試験開始まで保持時間を、30分/25 mm(試験片厚さ25 mmごとに30分の保持)としている。

ASTM E1921 では、信頼できる試験温度の測定方法として、熱電対の素線が亀裂面を横切るようにスポット溶接等で取り付けする方法が推奨されている。この場合、試験片は熱電対間で導電性を有し、かつ亀裂先端の変形により干渉の影響を受けることのないようにすることが求められている。それ以外の取り付け方法としては、測温接点に直接スポット溶接する方法、ドリルで開けた穴に挿入する方法、機械的に固定する方法などがあるが、亀裂先端の温度が適切に測定できる範囲で亀裂先端から離すと同時に、負荷の途中で試験片の亀裂先端の応力場に影響を与えず、かつ正確な測定ができることを検証しておくことが重要となる。

「試験片の温度が、ある値の $\pm 3^\circ\text{C}$ に入る場合、その値を試験温度としてよい。」とは、

例えば、試験温度 $-70^{\circ}\text{C}$ を設定して試験した結果、温度測定範囲が $-68^{\circ}\text{C}\sim-74^{\circ}\text{C}$ となった場合、試験温度を $-70^{\circ}\text{C}$ ではなく、実際の分布範囲を代表しうる値をとって $-71^{\circ}\text{C}$ にしてよいことを示している。

#### (解説 MCT-4300)試験及び試験後の測定

ASTM E1921 では、試験片用治具や変位計が適切に取り付けられていることの確認を目的とした線形弾性範囲内での負荷と除荷の繰り返しによる縦弾性係数の確認や再現性の確認についての記載がある。しかし、マスターカーブ法における $K_{Ic}$ 試験は「荷重/変位の単調増加により破壊すること」を基本としていることから、J-R 曲線を測定するような延性破壊領域の破壊靱性試験のように、除荷コンプライアンス法を用いる必要はない。従って、本規程においては、ASTM E399 の $K_{Ic}$ 試験と同様に上記の記載は含めなかった。従って、変位計の取り付け及び試験治具の取り付けは準備段階で確認しておくことが重要となる。

なお、脆性破壊か、延性破壊か判断が難しい温度域においては、脆性破壊が生じなかった場合でも J-R 曲線を取得できるように、除荷コンプライアンス法の適用を念頭に、ASTM E1921 や ASTM E1820 に従って負荷と部分除荷を繰り返して試験を実施することも可能となっている。この場合、変位計の取り付け及び試験治具の取り付けは規格の要求にしたがって確認することとなる。

#### (解説 MCT-4310)荷重線変位速度

$T_0$  は応力拡大係数速度に依存する。 $T_0$  は  $0.1 \leq \dot{K} \leq 2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$  の範囲にある準静的応力拡大係数速度の条件で評価される。この範囲内での応力拡大係数速度の違いであれば  $T_0$  に及ぼす影響は  $10^{\circ}\text{C}$  以内と小さい。より速い応力拡大係数速度 ( $\dot{K} \geq 2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ ) による試験を行う必要がある場合には、強制の附則 (ASTM E1921 Annex A1) として高負荷速度における破壊靱性評価が規定されている ASTM E1921 が参考になる。また、より遅い応力拡大係数速度 ( $\dot{K} < 0.1 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ ) で試験を行う必要がある場合にも、ASTM E1921 が参考になる。

#### (解説 MCT-4320)試験終了後の亀裂長さの測定

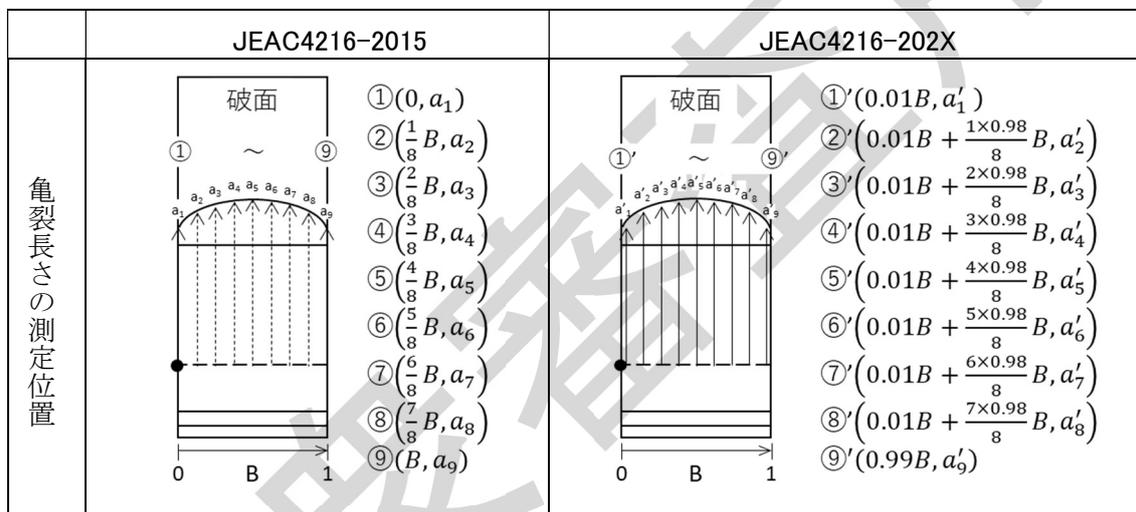
JEAC4216-2015 では試験終了後の亀裂長さの測定位置を、「両側面を端部とする破面上の初期亀裂を等間隔に 8 分割した位置 9 点で亀裂長さを、あるいはサイドグループ付き試験片のグループ底から  $0.01B$  内側に入った位置を両端部として初期亀裂を等間隔に 8 分割した位置 9 点で亀裂長さを測定する。」と規定していた。

一方、ASTM E1921 では、「サイドグループ無し試験片の場合は試験片の両側面から  $0.01B$  内側に入った位置を、サイドグループ付き試験片の場合はグループ底から  $0.01B$  内側に入った位置を、それぞれ両端部として初期亀裂を等間隔に 8 等分した位置 9 点で亀裂長さを測定する」と規定されており、サイドグループを付与しない場合の亀裂長さの測定位置が JEAC4216-2015 の規定と異なっている。JEAC4216-202X の改定にあたり、亀

亀裂長さの測定手法については ASTM E1921 と同じ手法を採用するとし、当該変更が破壊靱性評価に及ぼす影響を調べた。

国内の複数の機関で実施された破壊靱性試験後の Mini-C(T)試験片を対象に、解説図 MCT-4320-1 に示すように試験片の両側面から  $0.01B$  内側に入った位置を両端部とした場合と、JEAC4216-2015 により試験片の両側面を両端部とした場合の初期亀裂長さを比較した。その結果の一例では、解説表 MCT-4320-1 に示すように、後者の場合の初期亀裂長さ  $a_0$  が約  $0.03\text{ mm}$  まで増加し、 $K_{Jc}$  は約  $0.6\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  増加した。同材料の一つのデータセットを用いて、亀裂長さの測定位置の変更に伴う  $T_0$  の変化を評価したところ、その値は約  $0.1^\circ\text{C}$  程度と僅かであることを確認した。

この知見を踏まえ、サイドグループがない試験片に対しても  $0.01B$  内側に入った位置を両端部とする手法を採用することとした。



解説図 MCT-4320-1 亀裂長さの測定手法

解説表 MCT-4320-1 測定位置による亀裂長さおよび破壊靱性の例

試験片	測定位置	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_0$	$K_{Jc}$ MPa $\sqrt{\text{m}}$
		mm										
X	I	3.93	4.12	4.16	4.16	4.16	4.12	3.99	3.96	3.84	4.07	97.23
	II	3.95	4.14	4.19	4.17	4.17	4.14	4.01	3.97	3.87	4.09	97.59
	差	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	-
Y	I	3.77	3.91	4.07	4.10	4.26	4.25	4.20	4.10	3.92	4.09	96.14
	II	3.77	3.92	4.08	4.27	4.29	4.26	4.21	4.11	3.92	4.12	96.76
	差	0.00	0.01	0.01	0.17	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	-

I 両側面から  $0.01B$  内側に入った位置を両端部とした場合

II 側面を両端部とした場合

**(解説 MCT-4330)ポップインの評価**

試験荷重が最大値に達する前に、亀裂の微小な進展が突然起こり、直後に進展が停止し荷重—変位曲線に微小な荷重の減少と微小な変位の増加による、不連続が生じることがあり、これをポップインの発生と見なすこととした。ポップインを脆性破壊の発生と見なすか否かは各種試験規格で基準が設けられている。JEAC4216-2015 では、各種試験規格を比較し、判定基準の最も厳しい ASTM E1921-13a に従い弾性コンプライアンスの初期弾性コンプライアンスに対する比を基に判定を行うものであった。ASTM E1921-22a では、ポップインの評価方法が変更されており、弾性コンプライアンスの累積変化を基に判定する手法となった。本規程では、ASTM E1921-22a に従い、ポップインの判定を行い、最大荷重を超えた後に、荷重—変位曲線に不連続が生じてても、ポップインとは見なさないこととした。

**(解説 MCT-4340)  $K_{Jc}$  の棄却又は要検閲とされる判定基準**

(1)  $K_{Jc}$  の有効性判定基準について

$K_{Jc}$  の棄却又は要検閲とされる判定基準について、解説表 MCT-4340-1 にまとめる。要検閲と区分された  $K_{Jc}$  は検閲値に置き換えて  $T_0$  の算出に使用し、棄却と区分された  $K_{Jc}$  は  $T_0$  の算出に使用しない。

**解説表 MCT-4340-1  $K_{Jc}$  の棄却又は要検閲とされる判定基準**

規定項目	条件	棄却又は要検閲とされる判定基準	データ区分
MCT-4341	(1) 均一な疲労亀裂	$\max( a_i - a_0 ) > \max(0.05B, 0.5 \text{ mm})$ 注	棄却
	(2) 疲労予亀裂条件	MCT-4321 を満足しない場合	棄却
	(3) 破壊に至らず試験が終了した場合	終了時の $K_J$ が $K_{Jc(\text{limit})}$ を超えない場合	棄却
	(4) ポップインの判定	亀裂進展が破壊によるとの確証のない場合	棄却
MCT-4342	(1) $K_{Jc(\text{limit})}$ (試験片寸法)	$K_{Jc}$ が $K_{Jc(\text{limit})}$ を超える場合	要検閲
	(2) 延性亀裂進展量 $\Delta a$	$\Delta a > \min(0.05(W - a_0), 1 \text{ mm})$	要検閲
	(3) 破壊に至らず試験が終了した場合	終了時の $K_J$ が $K_{Jc(\text{limit})}$ を超える場合	要検閲

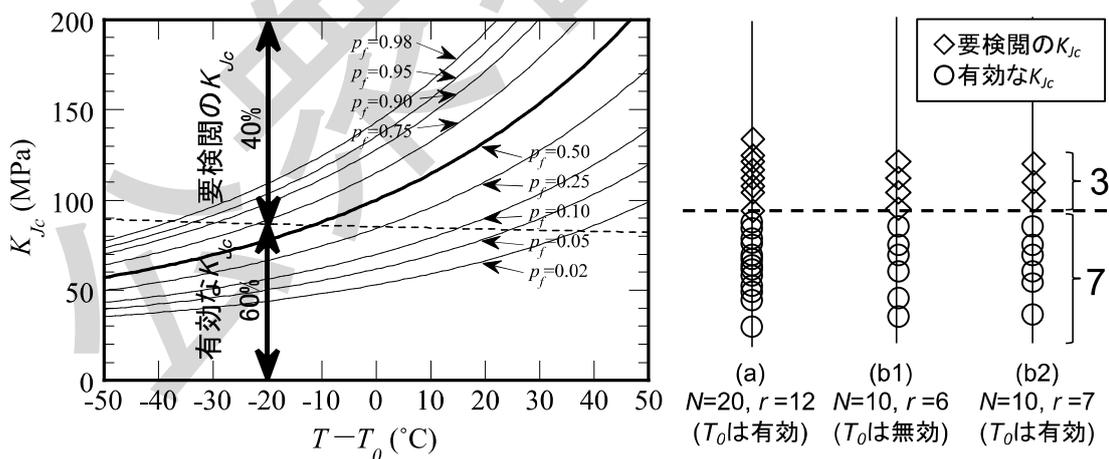
注  $a_i$  : 個々 (9点) の亀裂長さ

$a_0$  : 平均して求めた初期亀裂長さ (MCT-4320)

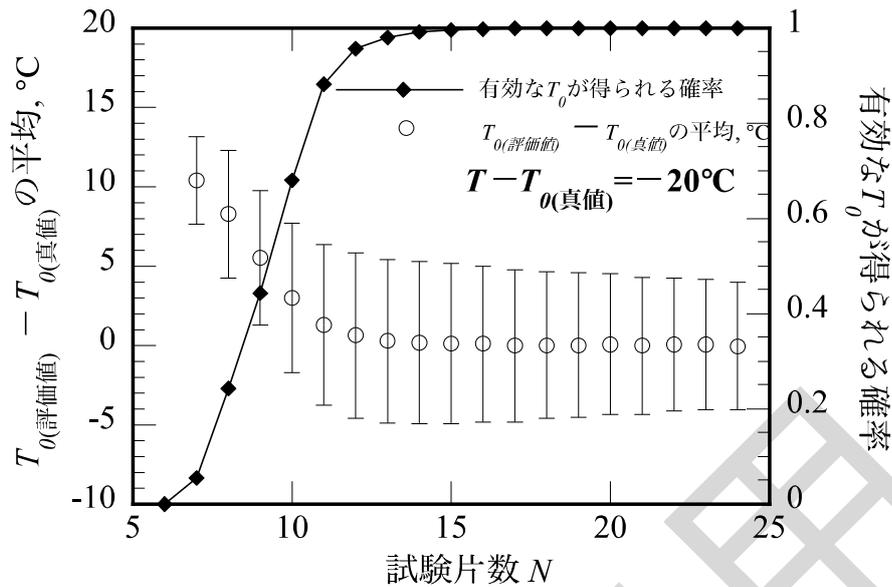
(2) 試験片数が少なく、かつ要検閲の  $K_{Jc}$  が多い標本で評価した  $T_0$  が、その真値に対して系統的に誤差を生ずる傾向について

解説図 MCT-4340-1 は破壊靱性分布の 2% から 98% の許容限界を実線で、 $K_{Jc(\text{limit})}$  の一

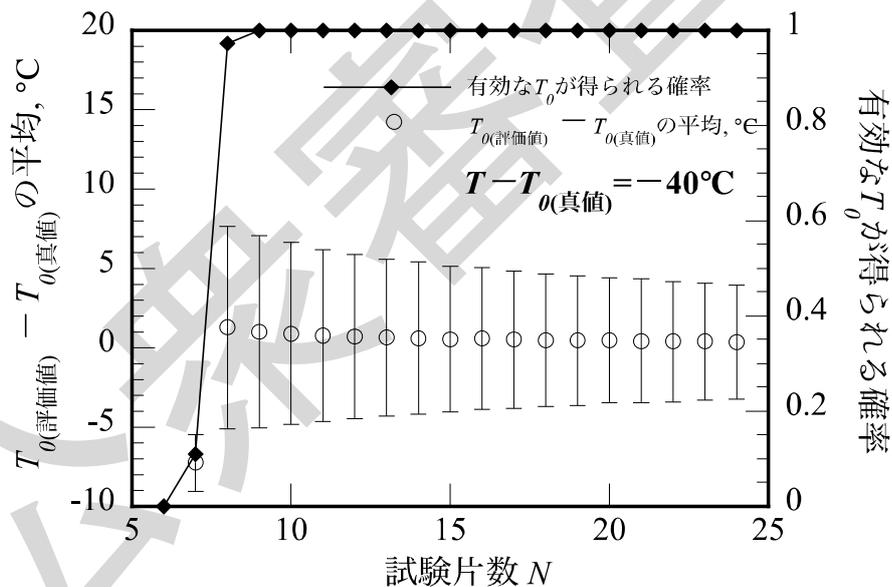
例(室温の降伏応力が 478 MPa の場合)を破線で示す。実線と破線の交点からその温度で有効な  $K_{Jc}$  が得られる割合 ( $T-T_0=-20^{\circ}\text{C}$  では 60%) を推定できる。 $N$  にこの割合を掛け合わせた値が MCT-5011 の要求を満たす最低限の有効な  $K_{Jc}$  の数を上回る時 (図中(a),  $N=20$ ) 有効な  $T_0$  が得られるケースが多いが, 下回る時 (図中(b1),  $N=10$ ) には  $T_0$  が要検閲となるケースが増大する。仮に少ない試験片で有効な  $T_0$  が得られても (図中(b2),  $N=10$ ), それはそのデータセットにマスターカーブ法で想定されるより多くの低い  $K_{Jc}$  が含まれるためであり, 評価される  $T_0$  は本来の値より高くなる。このような温度域での単純な例として  $T-T_0=-20^{\circ}\text{C}$  の単一の試験温度で解説図 MCT-4340-1 の  $K_{Jc(\text{limit})}$  について, モンテカルロ法で求めた  $T_0$  の平均値と  $N$  の関係を解説図 MCT-4340-2 に示す。この例では  $N \geq 12$  の試験片数があれば, 真値に近い  $T_0$  が評価された。それ以下の試験片数では有効な  $K_{Jc}$  が得られる確率が低下する上, たとえ有効な  $T_0$  と評価されても真値に対して系統的に差が生ずることがわかる。また, 高温側に偏在する要検閲な  $T_{0Q}$  が分布から選択的に取り除かれることによりエラーバーも小さくなっている。MCT-4340-3 は, このような温度域より低温側で, より多くの  $K_{Jc}$  が有効と判断される条件の単純な例として  $T-T_0=-20^{\circ}\text{C}$  の単一の試験温度で同様に求めた  $T_0$  の平均値と  $N$  の関係を示す。この温度では殆どの  $K_{Jc}$  が有効な  $K_{Jc}$  であることから, 試験片数が少ない場合においても  $T_0$  の真値から系統的な差が生ずることはない。小型の試験片の場合など, 想定される  $K_{Jc(\text{limit})}$  が低く, かつ試験片数が限られる場合にこのような影響を避けるためには, MCT-4210 における推奨に拘らず,  $T_0$  より低い試験温度を選択して要検閲となる  $K_{Jc}$  の数を減らすことが肝要である。



解説図 MCT-4340-1  $K_{Jc}$  の分布と  $K_{Jc(\text{limit})}$  の関係



解説図 MCT-4340-2  $K_{Jc(limit)}$ を上回る要検閲の  $K_{Jc}$ が40%あるデータセット( $T - T_0 = -20^\circ\text{C}$ )における試験片数  $N$ と  $T_0$ の関係



解説図 MCT-4340-3  $K_{Jc(limit)}$ 以下の有効な  $K_{Jc}$ で大部分が占められるデータセット ( $T - T_0 = -40^\circ\text{C}$ )における試験片数  $N$ と  $T_0$ の関係

(解説 MCT-4341) 亀裂の湾曲程度における棄却の判定基準

試験により得られた  $K_{Jc}$ は MCT-4341 の(1)から(4)に従って棄却の有無を判断することとなっている。(1)について、板厚 10 mm 以上の試験片では板厚  $B$  の 5%を棄却の判定基準とする一方、板厚 10 mm 以下の試験片では 0.5 mm の絶対値を棄却の判定基準となっている。例えば、板厚 4 mm の Mini-C(T)に対しては 0.5 mm の判定基準により、板厚  $B$  の 12.5%までが許容される。Shimodaira らは、本規程で許容される初期亀裂の最大湾曲

の場合を想定して、 $T_0$ に及ぼす影響について解析を行った。この解析では、サイドグループがない Mini-C(T)を対象として、試験片の両側面から  $0.01B$  内側の 2 点を板厚方向に 8 等分し、亀裂前縁の形状が 2 次関数に従うとしたときに 9 点の亀裂長さ  $a_i$  と初期亀裂長さの最大の差が  $0.5 \text{ mm}$  となるようにしている。 $T_0$ に関する評価では、有限要素法とワイブル応力が用いられた。その結果によると、許容する最大湾曲の亀裂形状を有する Mini-C(T)の場合の  $T_0$  と理想的な亀裂形状である直線亀裂を有する Mini-C(T)の場合の  $T_0$  との差は、Mini-C(T)を用いた破壊靱性試験から得られた実測値の  $\sigma$  (ASTM E1921 に従って求めた標準偏差) の範囲内の  $T_0$  となった<sup>[47]</sup>。なお、破壊靱性試験で得られた実測値を用いて本規程での標準偏差  $\sigma_{T0}$  を求めた場合においても、 $T_0$  の差は  $\sigma_{T0}$  の範囲内であり、同等な  $T_0$  となる。

ASTM E1921-22 (検討日基準,最新版) では、当該判定基準を試験片の大きさに関わらず、試験片の両側面から  $0.01B$  内側の 2 点を板厚方向に 8 等分し、両端の測定点を除いた 7 点の亀裂長さ  $a_i$  と初期亀裂長さの差が  $0.1\sqrt{b_0B_N}$  を超える場合に棄却と規定されている。この基準に関して Shimodaira らは、亀裂前縁の形状が 2 次関数に従うとしたときに許容される最大湾曲した亀裂では、板厚表面近傍の 2 点と初期亀裂長さの差が板厚  $B$  の約 20% となり、本規程の Mini-C(T)における判定基準である  $0.5 \text{ mm}$  (板厚  $B$  の 12.5%) より大きくなることに着目して有限要素法に基づく解析を実施した。その結果によると、理想的な直線亀裂を有する Mini-C(T)の  $T_0$  と ASTM E1921-22 で許容される最大に湾曲した亀裂を有する Mini-C(T)の  $T_0$  との差は、Mini-C(T)を用いた実測値から ASTM E1921 により求めた  $\sigma$  より大きくなった。

以上を踏まえ、亀裂の湾曲程度における棄却の判定基準は JEAC4216-2015 の規定から変更しないこととした。

#### (解説 MCT-4343)疲労予亀裂導入時の最終段階の $K_{MAX}$ の再評価

MCT-4343 では、疲労予亀裂導入時の最終段階の  $K_{MAX}$  に対し、試験によって得られた  $K_{Jc}$  を用いて、次式に示す MCT-3220 の(2)の再評価を行うことを規定した。MCT-3220 の(2)は次式で表される。

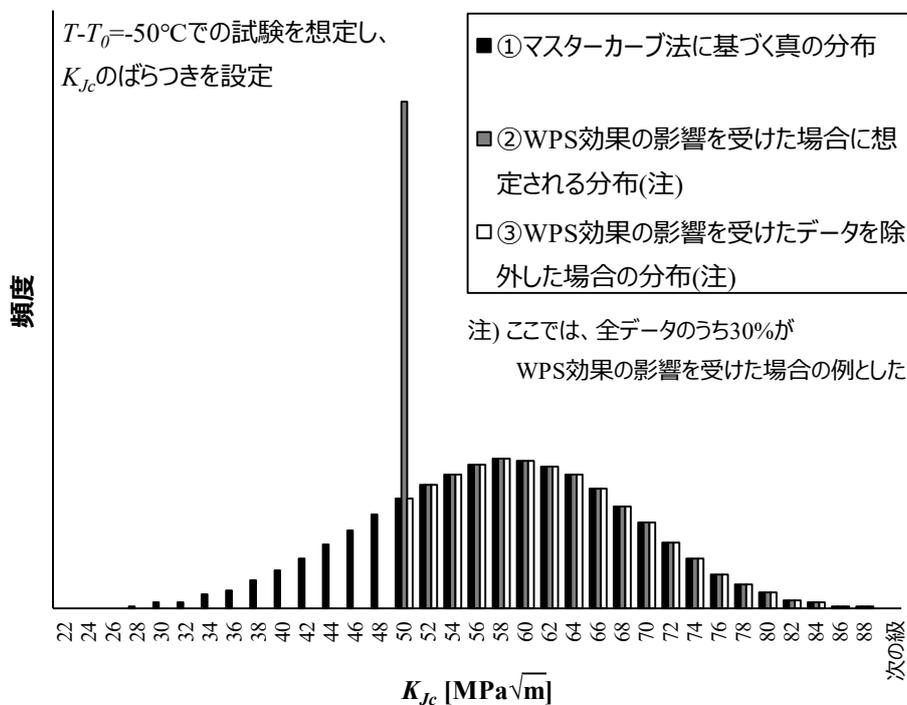
$$K_{MAX} < 0.6(\sigma_{YS}' / \sigma_{YS})K_{Jc} \quad (\text{A})$$

再評価では、(A)式を満たさないデータを単に棄却することは認めていない。また、これらのデータを含んで  $T_{0Q}'$  を算出し、これに  $1^\circ\text{C}$  のマージンを加えることで保守的に  $T_{0Q}$  を求める方法を規定した。これらの根拠を以下に示す。

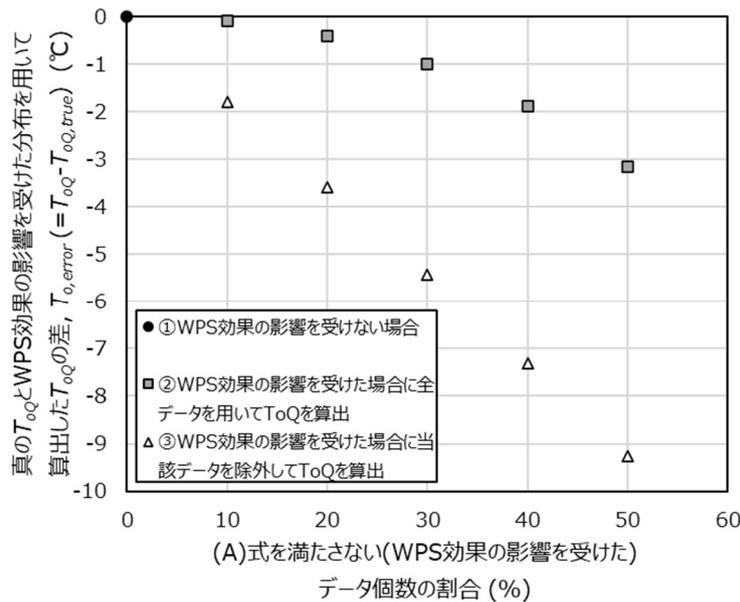
(A)式は、疲労予亀裂導入時の負荷が高温予荷重効果(WPS 効果)として試験時の  $K_{Jc}$  に影響しないようにする規定であり、これを満足しない試験データは WPS 効果の影響により実態とは異なる高めの  $K_{Jc}$  となっている可能性がある。解説図 MCT-4343-1 に、 $T-T_0 = -50^\circ\text{C}$  における  $K_{Jc}$  のばらつきについて、①マスターカーブ法に基づく真の分布、②WPS 効果の影響を受けた場合に想定される分布、③WPS 効果の影響を受けたデータ((A)式を満たさないデータを除外した場合の分布を示す。②では、WPS 効果の影

響による  $K_{Jc}$  の変化を最大限大きく見積もるため、(A)式を満たさないデータは  $K_{Jc}=K_{MAX} / 0.6(\sigma_{YS}' / \sigma_{YS})$  となることを仮定した。なお、実際の  $T_{0Q}'$  の算出では、(A)式を満たさないデータについても試験で得られた  $K_{Jc}$  をそのまま使用することとなる。一例として、(A)式を満たさないデータ個数が全体の 30% となるように、 $K_{MAX} / 0.6(\sigma_{YS}' / \sigma_{YS})$  の値を設定した。分布①～③それぞれに対し  $T_{0Q}$  を算出し、①で得られた真の  $T_{0Q}$  ( $T_{0Q,true}$  とする) との差である  $T_{0,error}$  ( $=T_{0Q} - T_{0Q,true}$ ) を求めた結果、②では  $-1^{\circ}\text{C}$ 、③では  $-5.5^{\circ}\text{C}$  となった。このように、②③では、①よりも低めの  $T_{0Q}$  が求まり、非保守側の評価となる。特に③の場合は、差の絶対値が大きくなるため  $K_{MAX}$  の規定を満たさないデータを単に棄却することは認めないことを規定した。

(A)式を満たさないデータ個数の割合を変えた際の①～③の分布に対し、 $T_{0,error}$  をそれぞれ算出した。解説図 MCT-4343-2 に(A)式を満たさないデータ個数の割合と  $T_{0,error}$  の関係を示す。(A)式を満たさないデータ個数の割合の増加に伴い  $T_{0,error}$  の絶対値は増加し、②の分布では 30% を超えると  $T_{0,error}$  の絶対値は  $1^{\circ}\text{C}$  を上回った。そこで、 $T_{0Q,true}$  と規格に従って得られる  $T_{0Q}$  の差の絶対値が十分小さくなるように、(A)式を満たさないデータ個数が 30% 未満であれば、これらを含んで  $T_{0Q}'$  を算出することを許容した。ただし、 $T_{0Q}'$  は、 $T_{0Q,true}$  よりも最大で  $1^{\circ}\text{C}$  低いと想定されるため、保守的に評価するためのマージンとして  $T_{0Q} = T_{0Q}' + 1^{\circ}\text{C}$  とした。なお、③の分布では、(A)式を満たさないデータ個数が 10% であっても、 $T_{0,error}$  の絶対値は 1 を上回り、無視できない誤差が生じた。



解説図 MCT-4343-1  $T-T_0=-50^{\circ}\text{C}$ における  $K_{Jc}$  の分布(データ個数:1000 個)



解説図 MCT-4343-2 各分布を用いて算出した  $T_{0,error}$  と  
(A)式を満たさないデータ個数の割合の関係

(解説 MCT-5000-1)  $T_0$ の算出における結果の解釈について

結果の解釈を以下に示す。

- 1) 破壊靱性は破壊時の J 積分から導かれる弾塑性等価応力拡大係数  $K_{Jc}$  を用いて表される。(MCT-4400 参照)
- 2) フェライト鋼では炭化物や非金属介在物を含んでおり、それらが微小亀裂のへき開破壊の起点となる可能性がある。このような起点が亀裂前縁にランダムに分布していることにより、破壊靱性のばらつきが生じるため、破壊靱性を統計的手法により評価する。
- 3) 複数の試験片により得られた  $K_{Jc}$  の分布を用いて、異なる寸法に対する  $K_{Jc}$  の補正を行う。破壊靱性試験データを形状母数が 4 の一定値をとるワイブル分布に従うと仮定して算出する。データの分布及び試験片寸法依存性は最弱リンク理論に従うワイブル分布により表すことができる。拘束が失われる上限及び試験温度の下限が定義され、その中間では最弱リンク理論を適用することができる。
- 4) 試験結果をもとに、1T 試験片に対する延性脆性遷移温度域での  $K_{Jc}$  の中央値の分布形状と位置を求め、マスターカーブが決定される。マスターカーブは横軸(温度座標)上に実験的に定めた  $T_0$  を基準として破壊靱性特性が表される。 $T_0$  のシフトは、例えば、照射脆化等の金属学的な損傷メカニズムに起因する遷移温度の変化に対応している。

マスターカーブは、ワイブル形状母数と  $K_{Jc}$  の中央値を固定することでデータのばらつきを表現できる。この情報はある特定の寸法の試験片に対する破壊靱性の許容限界を定めるのに使用することができる。ここでモデル化されたデータの分布特性は又、マスタ

一カーブが 1T 試験片に対応するものであることを念頭に置きつつ、確率論的破壊力学解析に利用することも可能である<sup>[48]</sup>。本規程で規定されるマスターカーブは、フェライト鋼のへき開破壊に対するものであり、有効性の限界を超えたときには温度が上部棚領域に達しており、へき開破壊に先行して顕著な延性亀裂進展が起これると考えられることから、このようなデータは別の方法（例えば、ASTM E1820）で取り扱うこととなる。

#### **(解説 MCT-5000-2) 複数の温度で試験した $K_{Jc}$ による $T_0$ の算出方法について**

有効な試験温度領域は  $T_0$  が決定されてはじめて確定するため、適切な試験温度を定めるには次のような手順を繰り返すことが有効である。

- (1) 附属書 B に示す試験片寸法に応じた "C" の値から初期試験温度を選定する。
- (2) 3 ないし 4 体の試験片を用いてこの温度条件下で行い、MCT-5000 の手順に従い  $T_0$  の推定値を評価する。
- (3) 以降の試験温度を  $T_0$  の推定値に基づいて定める。

複数の試験温度で得られたデータセットは、MCT-5020 に示す  $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  の制限を満たしながらも、2 つ(あるいはそれ以上)の異なる  $T_0$  の値を揺れ動くことがある。このような場合にはそれらの算出された複数の値の平均をもって  $T_0$  とすべきである。例えば、最初の  $T_0$  の評価の結果、ある温度で得られた  $K_{Jc}$  を評価に使用しなかったにもかかわらず、二度目の繰り返しではその  $K_{Jc}$  が有効となり、以降の  $T_0$  の評価において第一と第二の  $T_0$  の評価値が交互に現れるといった状況が起こる可能性がある。このような現象は試験で得られる  $K_{Jc}$  が  $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  の境界付近に存在するとき起こると考えられることから、このような場合、 $T_0$  の平均に近い温度で追加試験を行うことで問題を解決できる。

#### **(解説 MCT-5012) ワイブル分布モデルにおける式の表記について**

(23)式における  $(\ln 2)^{1/4}$  は JEAC4216 の 2015 年版では近似値である 0.9124 を用いていたが、特段の計算実施上の困難はないと考えられることから、202X 年版では式のまま用いることとした。

#### **(解説 MCT-5014) 重み係数と試験温度の関係について**

(19)式で表されるマスターカーブの勾配は、低温側で低く、温度の上昇とともに高くなる。 $K_{Jc}$  の分布から  $T_0$  を推定する精度は勾配が高くなるにつれ上昇することから、試験温度によらず同程度の  $T_0$  の推定精度を担保<sup>[49]</sup>するために、重み係数は温度の上昇とともに大きくなるように設定している。

#### **(解説 MCT-5023) $T_{0Q}$ の算出**

- (1)  $T_{0Q}$  の算出における式の表記について

(23)式における  $10/(\ln 2)^{1/4}$  及び  $70/(\ln 2)^{1/4}$  は JEAC4216 の 2015 年版では近似値である 11.0 及び 76.7 をそれぞれ用いていたが、特段の計算実施上の困難はないと考えられることから、202X 年版では式のまま用いることとした。

## (2) 評価に用いる試験温度について

202X年に本規程を改定する際、 $K_{Jc}$ から $T_{0Q}$ を求めるにあたり、使用する温度を設定温度だけでなく測定値がある場合は使用してもよいこととした。この理由は、シャルピー衝撃試験と異なり破壊靱性試験の場合は試験片の温度が測定可能であること、及び、実測温度による評価を行う場合はより精度よい評価結果が利用可能になるためである。なお、試験中において試験温度が変動する可能性があることや、試験片が破断に至らない可能性もあること等を踏まえ、評価に用いる実測温度は試験開始時点における温度とした。

## (3) 複数の試験温度の場合と単一の試験温度の場合の特徴

試験温度 $T_i$ は、試験片ごとに選択することも、単一の温度で全ての試験を実施することも可能である。先行する結果を踏まえて複数の温度で試験すれば、一連のデータセットにおいて有効な $K_{Jc}$ の割合を高くすることが期待できる。一方、単一の試験温度を選択すれば、一連の試験を迅速に実施できるほか、その試験温度における破壊靱性分布の統計的な分布を実測できる。評価の目的にあわせて試験温度を選ぶことが肝要である。

## (4) 最尤推定法による $T_{0Q}$ の算出式について

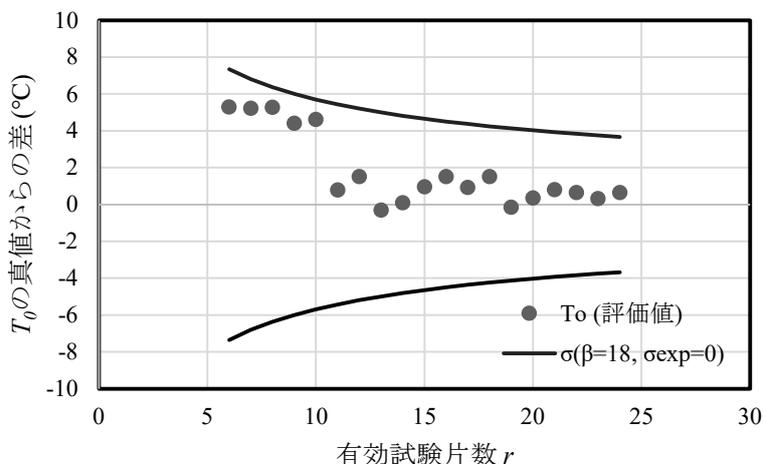
(25)式は最尤推定法による $T_{0Q}$ の算出式であり、ある温度における $K_{Jc}$ の分布が(21)式に従い、その中央値 $K_{Jc(\text{med})}$ の温度依存性が(19)式で表されるときに、統計的に $T_{0Q}$ の尤もらしい値が得られる。

### (解説 MCT-5100) $T_0$ に対する不確かさの補正

MCT-5000に従って求められた $T_0$ は、有効な $K_{Jc}$ の数及び試験や測定における誤差等に起因した不確かさを伴うことから、 $T_0$ に基づいて不確かさを考慮した評価が必要な場合には、これらの不確かさを考慮して $T_0$ を補正することが必要となる。

有効な $K_{Jc}$ の数に起因した不確かさ( $T_0$ の標準偏差)については、ASTM E1921において、 $K_{Jc(\text{med})}$ の大きさに応じ3段階で変化(18, 18.8,又は20.1)する係数 $\beta$ が与えられ、その係数と有効な $K_{Jc}$ の数より求まる標準偏差が規定されている。しかしながら我が国では、より精度よく標準偏差を算出するための定式化が検討され、国内材料の試験で得られた $K_{Jc}$ を使用したモンテカルロ計算によりその妥当性が確認されている<sup>[10, 50]</sup>ことから、文献[50]の算出式を採用した。この式は、有限のサンプルサイズの $K_{Jc}$ のデータセットによって評価された $T_0$ ( $T_{0Q}$ )は、母集団のそれとは異なり、そこに含まれる有効な $K_{Jc}$ の数及び各試験片の試験温度と $T_0$ ( $T_{0Q}$ )の関係に応じて分布を持つことにもとづいて構成されている。この分布の標準偏差は(25)式において $\sigma_{\text{exp}}=0$ とおいた際の $\sigma_{T0\text{mar}}$ に相当する。マスターカーブ法に従う破壊靱性分布からサンプリングされた、ある24個の $K_{Jc}$ ( $T$ と母集団の $T_0$ の差は0°C)を一例に、このデータセットのうち $K_{Jc}$ が大きい方から $N-r$ 個が要検閲の $K_{Jc}$ であり、小さい方から $r$ 個目の $K_{Jc}$ が検閲値であると考えた時、 $T_0$ と $r$ の関係は解説図-MCT-5100-1に示すように変動する。この例では、変動幅は実線で示される $\sigma_{T0\text{mar}}$ ( $\beta=18, \sigma_{\text{exp}}=0$ )の範囲内に

あることが確認できる。



解説図 MCT-5100-1  $N=24$  のデータセットにおける  $r$  と  $T_0$  の関係

試験や測定における誤差に起因した不確かさについては、考え得る誤差の要因が複雑であり定量化が困難であるが、ASTM E1921 では標準的な検定が行われた場合の標準偏差が規定されており、測定機器に対する要求精度は本規程と ASTM E1921 とで同等であることから、ASTM E1921 の標準偏差を規定することとした。

有効な  $K_{Jc}$  の数に起因した不確かさ、及び、試験や測定における誤差等に起因した不確かさの両者を考慮した不確かさ ( $\sigma_{T0mar}$ ) は、誤差の伝播法則に従う算出式を規定した。なお、JEA4206-2016 の RF-2100 において規定した  $\sigma_{T0mar}$  は、試験や測定における誤差等に起因した不確かさは考慮していないが、本規程ではより不確かさを大きく評価できるように考慮したものである。

健全性評価等に使用する  $T_{0mar}$  は、MCT-5000 に従って求められた  $T_0$  に有効な  $K_{Jc}$  の数、及び、試験や測定における誤差等に起因した不確かさを考慮して補正することとした。ここで、考慮する不確かさは、健全性評価等に使用する破壊靱性遷移曲線の信頼度に応じて設定する必要があるが、本規格では使用する破壊靱性遷移曲線を規定していないことから、信頼度に対応する標準化確率変数 ( $Z$  値) の関数として示している。

#### (解説 MCT-5110) マスターカーブの信頼下限

マスターカーブの信頼下限は、以下の式により求めることができる。

$$K_{Jc}(p_f) = 20 + \left[ \ln \left( \frac{1}{1-p_f} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \{ 10 / (\ln 2)^{1/4} + 70 / (\ln 2)^{1/4} \exp[0.019(T - T_0)] \}$$

$K_{Jc}(p_f)$  は、累積損傷確率  $p_f$  に相当する  $K_{Jc}$  である。例えば、 $p_f$  に 0.02 を入力すると、解説

MCT-1100 (2)において非均質材の可能性が示唆される基準である累積損傷確率 2% に対す

る値を求めることができる。

#### (解説 MCT-6000)記録

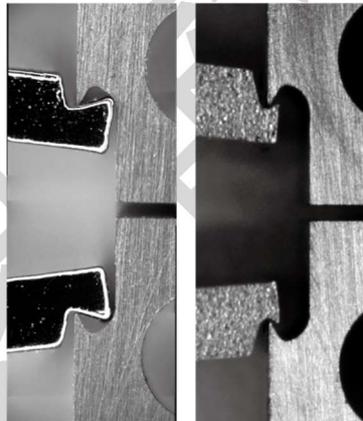
記録には、 $T_0$ を算出に必要な試験条件、有効/要検閲の評価のためのデータ、評価に用いた物性値（降伏強さ、縦弾性係数等）を含める必要がある。これは、データを再評価するために必要である。

#### (解説 附属書 A)

附属書 A では推奨される試験片用治具を参考に規定している。同等の評価が得られれば、他の規格に記載される試験片用治具を用いることは妨げられない。

Mini-C(T)試験片を用いる場合、以下の注意が重要となる。

- Mini-C(T)試験片のサイズは小さいため、相対的に試験片に比して変位計が大きくなることから、その自重が計測結果に影響を及ぼさないように、必要に応じてクリップゲージを保持する機構を採用することが試験の助けとなる。
- Mini-C(T)試験片のクリップゲージの取り付く試験片前面の溝が浅いため、試験片前面と変位計の先端部分が干渉することのないように、変位計先端部の形状及び寸法に留意することが重要となる。(解説図 附属書 A-1 参照)



(a) 干渉有り (b) 干渉無し

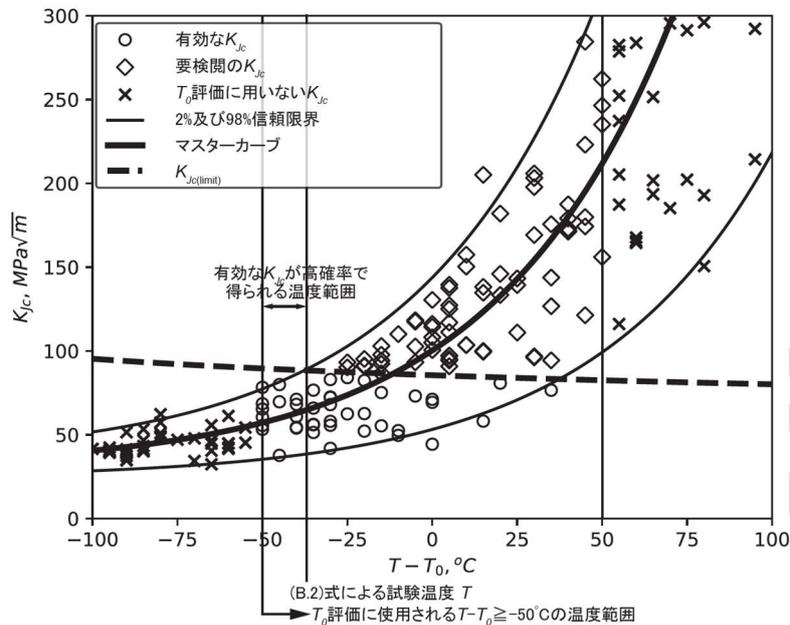
解説図 附属書 A-1 Mini-C(T)試験片前面と変位計との干渉

#### (解説 附属書 B)

附属書 B では、参考として、シャルピーV ノッチ試験データを用いた試験温度の設定例を示している。試験温度は $K_{Jc(\text{med})}$ が $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に近くなることを目標として、別の方法を用いて設定することを妨げるものではない。

解説図 附属書 B-1 は、(B.2)式で求められる試験温度 $T$ と有効、要検閲、又は $T_0$ の評価に用いられない $K_{Jc}$ の分布の関係を例示する。 $T-T_0 < -50^\circ\text{C}$ における $K_{Jc}$ は評価に用いられないのでこれより高い温度を選ぶことが必要となるが、試験温度が高くなると要検閲データの割合が増大する。(B.2)式は、有効な $K_{Jc}$ が高確率で得られる範囲で可能な限り高い試験温度を与える式であり、一連の試験を実施中に次の試験温度を決定する指標と

なる。



解説図 附属書 B-1 有効, 要検閲, 又は  $T_0$  評価に用いられない  $K_{Jc}$  の分布と(B.2)式で求められる試験温度  $T$  の関係の例

(解説 附属書 D~E)

具体的な  $T_0$  の算出方法の確認に活用するため, 例題を参考として附属書としている。

(解説 附属書 E.1)

附属書 E.1 における試験片 ID 9 及び 10 は, 同一の試験温度であることから, 本来は同一の検閲値が適用されるべきものである。しかし, ID 9 のように高い  $K_{Jc}$  まで試験が継続される場合, どちらの検閲要件が先に侵されるかは試験後に判断できないことから, より低い検閲値(附属書 E.1 では  $K_{Jc\Delta a}$ ) を適用せざるを得ない。

(解説 附属書 E.2)

附属書 E.1 及び E.2 を比較すると, 延性亀裂進展に対する検閲値  $K_{Jc\Delta a}$  は現実的な試験片数のデータセットでは, 個別の値に依存し, 他のデータの検閲方法も含めて影響を及ぼすことがわかる。影響を軽減するためには,  $K_{Jc\Delta a}$  で検閲されるような場合を避け, 可能な限り  $K_{Jc(limit)}$  で検閲がなされるようにすることが肝要である。前項で述べたように  $K_{Jc(limit)}$  を上回った確信が持てる段階で, 破断を待たずに試験を終了することはその助けとなる。

(解説 附属書 E.3)

附属書 E.3 のように  $K_{Jc(limit)}$  を超えた時点で試験を終了すると, 延性亀裂進展に伴う不必要な検閲を行うことなく, より適切な  $K_{Jc(limit)}$  で検閲できる場合 (本データセットでは ID 9) がある。原子炉圧力容器鋼のように破壊靱性の高い鉄鋼ではこのような場合に該当する試

験片がより多くなる可能性がある。

## 参考文献

- [1] 日本産業規格 JIS Z 2241:2023, "金属材料引張試験方法," 2023
- [2] 日本産業規格 JIS Z 2242:2023, "金属材料のシャルピー衝撃試験方法," 2023
- [3] 日本産業規格 JIS Z 2245:2021, "ロックウェル硬さ試験-試験方法," 2021
- [4] 日本産業規格 JIS B 7721:2018, "引張試験機・圧縮試験機-力計測系の校正方法及び検証方法," 2018
- [5] Wallin K, "The Scatter in KIC Results," *Engineering Fracture Mechanics*, 19, pp.1085-1093, 1984.
- [6] JEAC4201 日本電気協会規程, "原子炉構造材の監視試験方法," JEAC4201-2007[2013年追補版], 2013
- [7] Tobita, et al., "Fracture Toughness Evaluation of Reactor Pressure Vessel Steels by Master Curve Method Using Miniature Compact Tension Specimens," *Journal of Pressure Vessels Technology*, Vol. 137, 051405, 2015.
- [8] Yamamoto, M., Sakuraya, S., Kitsunai, Y., and Kirk, M., "Practical Procedure of Test Temperature Selection for Mini-C(T) Master Curve Evaluation," *Proceedings of the ASME 2022 Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2022-82754, 2022.
- [9] ASTM E1921-08, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range," 2008.
- [10] Tomimatsu, M., Hirano, T., Asada, S., Saeki, R., Miura, N., Yamashita, N., Yonehara, A., Saito, I., "Master Curve Approach for Some Japanese Reactor Pressure Vessel Steels," *ASME PVP2008-61494*, 2008.
- [11] Miura, N., Soneda, N., Arai, T., Dohi K., "Applicability of Master Curve Method to Japanese Reactor Pressure Vessel Steels," *PVP2006-ICPVT-11-93792*, 2006.
- [12] 三浦, 曾根田, "マスターカーブ法による国産原子炉圧力容器鋼の破壊靱性評価," *日本機械学会論文集 B 編*, 75 巻 751 号, 2009, pp. 436-438.
- [13] Onizawa, K. and Suzuki, M., "Comparison of Transition Temperature Shifts Between Static Fracture Toughness and Charpy-v Impact Properties Due To Irradiation and Post-Irradiation Annealing for Japanese A533B-1 Steels," *Effects of Radiation on Materials; 20th International Symposium*, ASTM STP 1405, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, pp.79-96.
- [14] Onizawa, K. and Suzuki, M., "Correlation Between Cleavage Fracture Toughness and Charpy Impact Properties in the Transition Range of Reactor Pressure Vessel Steels," *JSME Int. J., Ser. A*, Vol. 47, No. 3, 2004, pp. 479-485.
- [15] Nishiyama, Y., Onizawa, K. and Suzuki, M., "Phosphorus Segregation and Intergranular Embrittlement in Thermally Aged and Neutron Irradiated Reactor Pressure Vessel Steels," *Journal of ASTM International*, Vol. 4, No. 8 Paper ID JAI100690, 2007.
- [16] ASTM Standard E1921-13a, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range," 2013.

- [17] ASTM Standard E1921-23, “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range,” 2023.
- [18] Wallin, K., Planman, T., Valo, M., and Rintamaa, R., “Applicability of Miniature Size Bend Specimens to Determine the Master Curve Reference Temperature  $T_0$ ,” Engineering Fracture Mechanics, Vol 68, 2001, pp. 1265-1296.
- [19] Joyce, J. A., and Tregoning, R. L., “Investigation of Specimen Geometry Effects and Material Inhomogeneity Effects in A533B Steel,” ECF 14—Fracture Mechanics Beyond 2000, Proceedings of the 14th European Conference on Fracture, Cracow, September 2002.
- [20] IAEA-TECDOC-1631, "Master Curve Approach To Monitor Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants," Vienna, 2009.
- [21] 三浦, 曾根田, “超小型試験片を用いたマスターカーブ破壊靱性評価,” 日本機械学会論文集 (A 編) , 77 卷 777 号, 2011, pp. 680-684.
- [22] Miura, N., and Soneda, N., “Evaluation of Fracture Toughness by Master Curve Approach Using Miniature C(T) Specimens,” Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 134, 2012, pp. 021402-1–021402-9.
- [23] Yoshimoto, K., Hirota, T., Sakamoto, H., Sugihara, T., Sakaguchi, S., and Oumaya, T., “Applicability of Miniature C(T) Specimen To Evaluation of Fracture Toughness for Reactor Pressure Vessel Steel,” Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2013-97840, 2013.
- [24] Tobita, T., Nishiyama, Y., Ohtsu, T., Udagawa, M., Katsuyama, J., and Onizawa, K., “Fracture Toughness Evaluation of Reactor Pressure Vessel Steels by Master Curve Method Using Mini-CT Specimens,” Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2013-97897, 2013.
- [25] Yamamoto, M., Kimura, A., Onizawa, K., Yoshimoto, K., Ogawa, T., Chiba, A., Hirano, T., Sugihara, T., Sugiyama, M., Miura, N., and Soneda, N., “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,” Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2012-78661, 2012.
- [26] Yamamoto, M., Onizawa, K., Yoshimoto, K., Ogawa, T., Mabuchi, Y., and Miura, N., “A Round Robin Program of Master Curve Evaluation Using Miniature C(T) Specimens -2nd Report: Fracture Toughness Comparison in Specified Loading Rate Condition-,” Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2013-97936, 2013.
- [27] Yamamoto, M., Kimura, K., Onizawa, K., Yoshimoto, K., Ogawa, T., Mabuchi, Y., Viehrig, H. W., Miura, N., and Soneda, N., “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-,” Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2014-28898, 2014.
- [28] Yamamoto, M., Onizawa, K., Yoshimoto, K., Ogawa, T., Mabuchi, Y., Valo, M., Lambrecht, M.,

- Viehrig, H-W, Miura, N., and Soneda, N., "International Round Robin Test on Master Curve Reference Temperature Evaluation Utilizing Miniature C(T) Specimen," ASTM International STP 1576, 2014, doi: 10.1520/STP157620140020.
- [29] Matsuzawa, H. and Osaki, T., "Fracture Toughness of Highly Irradiated Pressure Vessel Steels in the Upper Shelf Temperature," *2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2006-ICPVT-11-93032*, 2006.
- [30] BS 7448-2, Fracture mechanics Toughness tests Part 2 "Method for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical  $J$  values of welds in metallic materials," British Standards Institution, London, 1997.
- [31] Kirk, M, Lott, R, Server, W, Hardies, R, and Rosinski, S., "Bias and Precision of  $T_0$  Values Determined using ASTM Standard E1921-97 for Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels," *Effects of Radiation on Materials; 19th International Symposium*, ASTM STP 1366, 2000, pp.143-161.
- [32] ASME B&PV Code Section II Part D Table TM-1, 2023
- [33] (一社) 日本機械学会 「発電用原子力設備規格 材料規格 2020年版」(JSME S NJ1-2020) , 2020
- [34] (社) 日本溶接協会 WES 1108-1995 「き裂先端開口変位(CTOD)試験方法」, 1995
- [35] (社) 日本溶接協会 WES 1108-2016 「き裂先端開口変位(CTOD)試験方法」, 2016
- [36] IAEA-TECDOC-1435, "Application of surveillance programme results to reactor pressure vessel integrity assessment," Vienna, 2005
- [37] ASTM Standard E399-2023, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," 2023
- [38] ASTM Standard E1820-23b, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," 2023
- [39] Miura, N., Momoi, Y., and Yamamoto, M., "Relation between Front-Face and Load-Line Displacements on a C(T) Specimen by Elastic-Plastic Analysis," *2015 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45499*, 2015.
- [40] BS 7448-1, Fracture mechanics Toughness tests Part 1 "Method for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical  $J$  value of metallic materials," British Standards Institution, London, 1991.
- [41] 桃井, 三浦, 山本, "破壊靱性試験に用いるミニチュア C(T)試験片に対する寸法要求の検討," M&M2014 材料力学カンファレンス, OS0818, 2014.
- [42] Miura, N., Momoi, Y., and Yamamoto, M., "Study on Dimensional Tolerances Required for Miniature C(T) Specimens," *2015 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45503*, 2015.
- [43] 原規技発第 2009099 号 日本電気協会 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 (JEAC4206-2016) 及び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) に関する技術評価書 添付資料-5 「Mini-C(T)のクリップゲージ取付け部の形状・寸法に関する解析的検討」
- [44] 石寄貴大, 小島亨司, DoVan Lam, 廣川文仁, 高本真一, 門間健介, 神長貴幸, "Mini-

- C(T)試験片を用いた原子炉圧力容器溶接金属脆化評価手法における試験片形状の影響,” 日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス, U00056, 2021.
- [45] Newman, J. Jr., Schnieider, J., Daniel, A., and McKnight, D., "Compression pre-cracking to generate near threshold fatigue-crack-growth rates in two aluminum alloys," *International Journal of Fatigue*, 27, pp.1432-1440, 2005.
- [46] 日本産業規格 JIS B 7507:2016, "ノギス," 2016
- [47] Shimodaira, M., Ha, Y., Takamizawa, H., Katsuyama, J. and Onizawa, K., "Analysis of the Effect of pre-crack Curvature in Mini-C(T) Specimen on Fracture Toughness Evaluation," ASME Paper No.PVP2023-102699, 2023.
- [48] IAEA-TECDOC-429, "Guidelines for Application of the Master Curve Approach To Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants," International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005.
- [49] 三浦直樹, "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," 東京大学大学院工学研究科博士論文, pp.94-99, 2014
- [50] 三浦直樹, 曾根田直樹, "超小型試験片を用いたマスターカーブ破壊靱性評価," 電力中央研究所報告 Q08025, 2009.