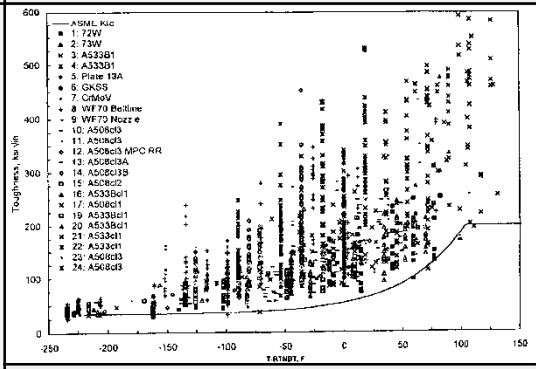
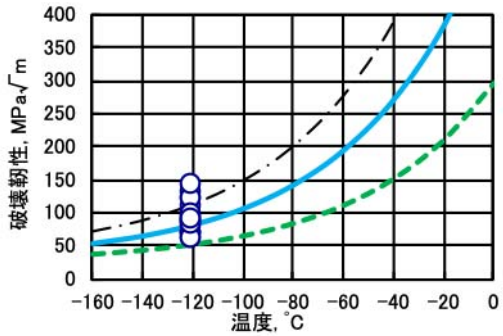
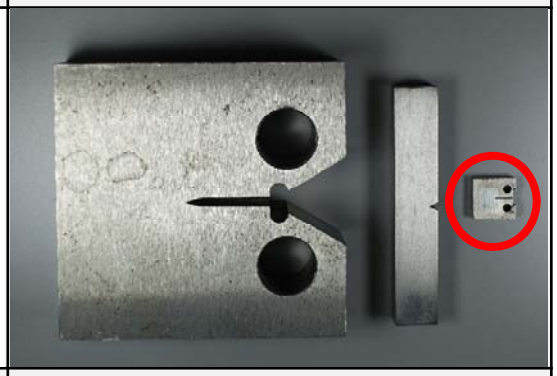
資料１－２－２

１．フェライト鋼の破壊靭性参照温度 T_0 決定のための試験方法 JEAC 4216-2015 の概要

令和元年7月29日

（一社）日本電気協会　原子力規格委員会

JEAC4216による破壊靭性評価とは

	JEAC4216制定以前	JEAC4216-2011	JEAC4216-2015
評価方法	帰納的な評価	マスターカーブ法による破壊靭性評価	超小型の試験片によるマスターカーブ法評価
特徴			
	様々な形状・寸法の破壊靭性試験の膨大なデータから破壊靭性の下限を評価	統計的に破壊靭性分布を取り扱うことで少ない試験片（最少で6～8個）の試験片から破壊靭性の中央値や統計的な信頼下限を評価	破断後の監視試験片から採取できる超小型のミニチュアC(T)試験片を用いてマスターカーブ法により破壊靭性の中央値や下限値を評価

圧力容器鋼などに用いられるフェライト鋼を対象とした、延性一脆性遷移温度域における破壊靭性を評価するための方法。試験データを統計的に取り扱う「マスターカーブ法」を採用し、少数かつ超小型の試験片によって評価を行うことが可能。

目次

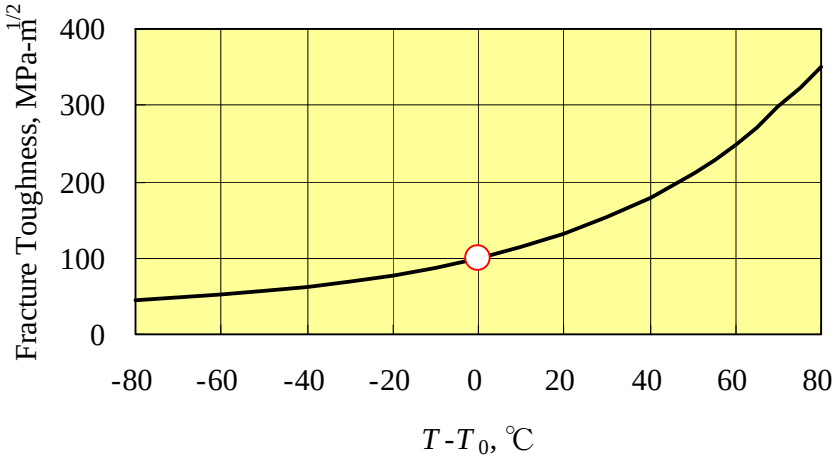
- JEAC4216の概要
  - 規格の概要と経緯
  - マスターカーブ法
  - 章立てと構成
- 2015年版改定項目
- JEAC4216の活用

規格の概要と経緯

JEAC4216の概要

- 日本電気協会 電気技術規程
  フェライト鋼の破壊靭性参照温度 T_o 決定のための試験方法
- 本方法は、マスターカーブ法による破壊靭性評価を取り入れたものである。
  - 遷移温度域での**破壊靭性中央値と温度**の関係
    - 鋼種によらず一定の形状
    - 試験片寸法効果の補正式を規定
    - **参照温度T_o**を唯一の指標として破壊靭性を規定
  - 多くの国内圧力容器鋼に対し適用性実証済み

1T試験片に対するマスターカーブ: $K_{Jc(med)} = 30 + 70\exp[0.019(T - T_o)], \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$



JEAC4216の制定の理由と経緯

- ASTM E1921では、マスターカーブ法による破壊靭性評価手法が規定されている。「参照温度」を求めることにより、フェライト系鋼材の破壊靭性曲線を直接求めることができるとともに、従来の落重試験及びシャルピー衝撃試験による関連温度の決定の代替となりうる、有用な手法であることから、2011年にJEAC4216-2011として制定した。
- ASTM E1921を直接用いるのではなく、新規にJEACとして規定した理由は以下のとおり。
  - ASTM E1921は非常に複雑で、難しい規格であり、使用者がこの規格を的確に適用できない可能性があると考えられること
  - 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
  - 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
- 2015年には超小型のミニチュアC(T)試験片の使用に対応した改定版、JEAC4216-2015を発行した。

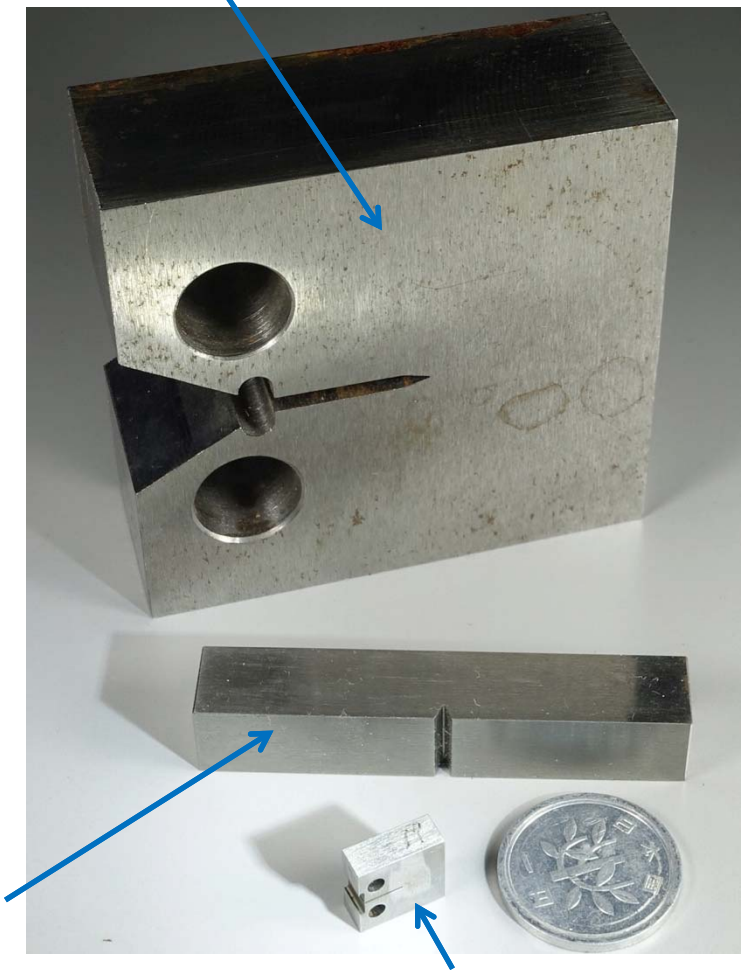
マスターカーブ法

破壊靭性試験片、シャルピー試験片

- 破壊靭性は予亀裂を入れた破壊靭性試験片で評価するが、下限値を知るためには大きな試験片が必要

- JEAC4206で定める監視試験においてはシャルピー試験片で破壊靭性のシフトを推定

1インチ厚さの破壊靭性試験片



シャルピー試験片

超小型のミニチュアC(T)試験片

破壊靭性のばらつきと寸法依存性

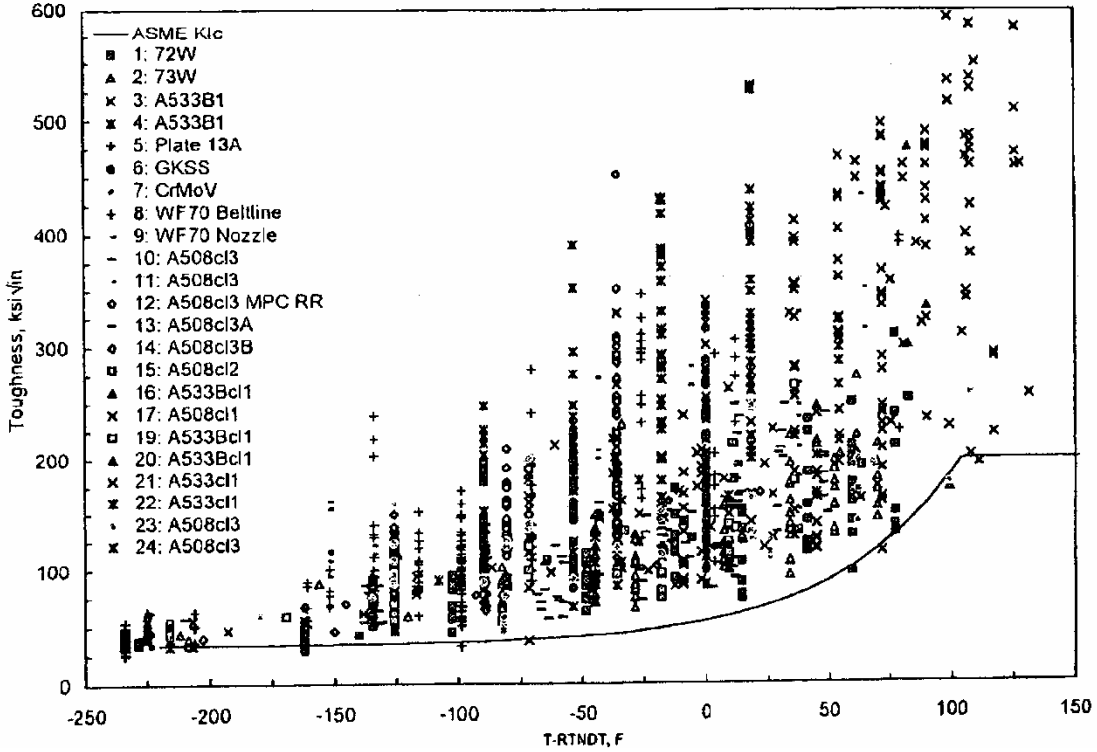
- 最弱リンクモデル
  - 様々な強度のリンクが繋がった鎖のうち、最も弱いものが全体の強度を支配する。
  - 鎖によって強度が異なる→ばらつき
  - 長い鎖のほうが弱いリンクが入る可能性が高い→寸法依存性
- ワイブル分布に従う

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1-B}{A} \right)^{C} \right]$$

A : スケールパラメータ : ばらつきの大きさ
B : 位置パラメータ : 分布の位置（破壊靭性の高さ）
C : 形状パラメータ : 分布の形状

帰納法に基づく破壊靭性曲線

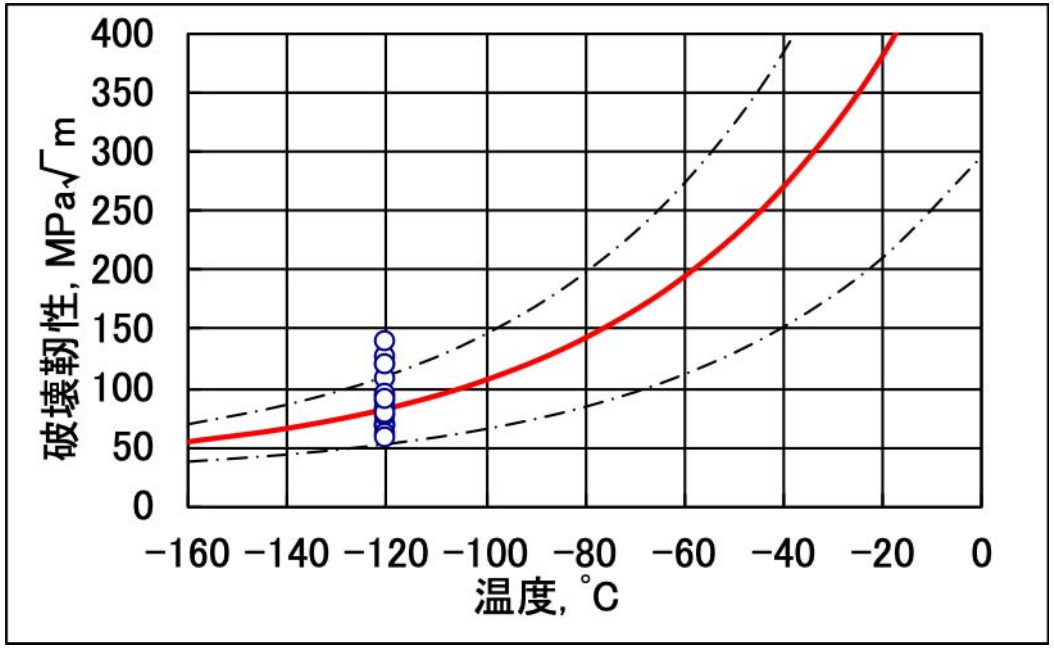
- 破壊靭性値の下限包絡線を利用
  - 大きな試験片、多くの試験片による下限値の推定
    - 材料の違いをRT_{NDT}などの指標を用いて評価する
    - 照射脆化の影響は指標となる温度のシフトで考慮する



VanDerSluys, Hoffmann, Yoon, Killian and Hall, "Fracture Toughness Master Curve Development: Fracture Toughness of Ferritic Steels and ASTM Reference Temperature (T0)," WRC bulletin 457, (2000)

マスターカーブ法の特徴（1）
破壊靭性の分布特性

- 圧力容器鋼などのフェライト鋼のへき開破壊靭性値の分布は3つのパラメータのうち2つを固定した特定のワイブル分布によって記述できる。
- 最少で６～８個の試験を一つの温度で行い、その統計分布特性を評価することで、破壊靭性の中央値や統計的な信頼下限などを推定する。



マスターカーブ法の特徴（2）
破壊靭性の寸法依存性の補正

- ある温度におけるへき開破壊靭性値の分布は、ワイブル分布によって近似できる。

$$P_f = 1 - \exp\left\{ -\frac{B}{B_o}\left(\frac{K_I - 20}{K_o - 20}\right)^4 \right\}$$

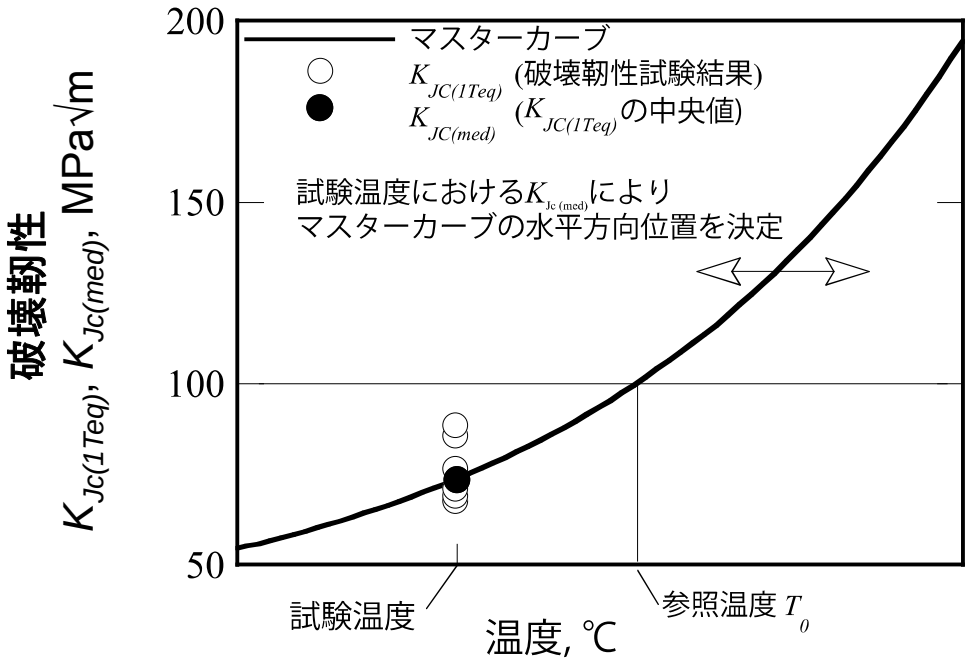
B, K_I ：使用した試験片の厚さと応力拡大係数
B_o, K_o ：標準的な寸法（例えば1インチ厚さ）の試験片の厚さと応力拡大係数

- この統計分布は、最弱リンクモデルが成立するフェライト系材料に対して成り立つ。
- 形状パラメータが4となることから、試験片寸法は板厚の1/4乗によって補正できる。
  - 小型の試験片の使用が可能

マスターカーブ法の特徴（3）
破壊靭性値の温度依存性

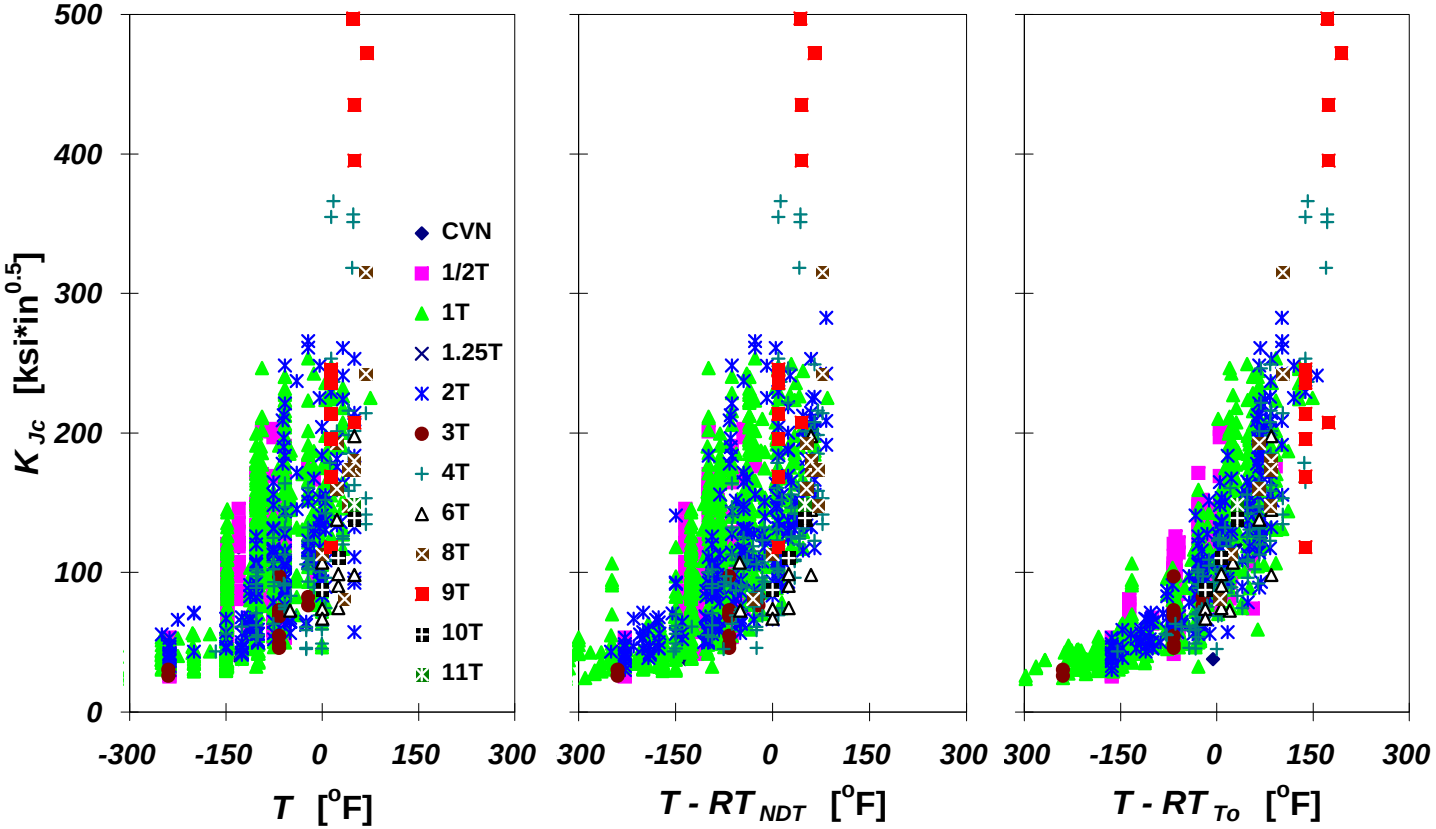
- 参照温度（T_o）を基準とした破壊靭性値の温度依存性は、1つの共通の曲線（マスターカーブ）によって記述される。

$$K_{Jc(med)} = 30 + 70\exp\left[0.019\left(T - T_o\right)\right], \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$$



T_o 参照温度：1インチ厚さ試験片相当に換算した破壊靭性のマスターカーブ上で破壊靭性が100MPa√mとなるときの温度（℃）

従来の手法とマスターカーブ法



様々な試験片による破壊靭性の実験値

帰納法に基づく破壊靭性

マスターカーブ法に基づく破壊靭性

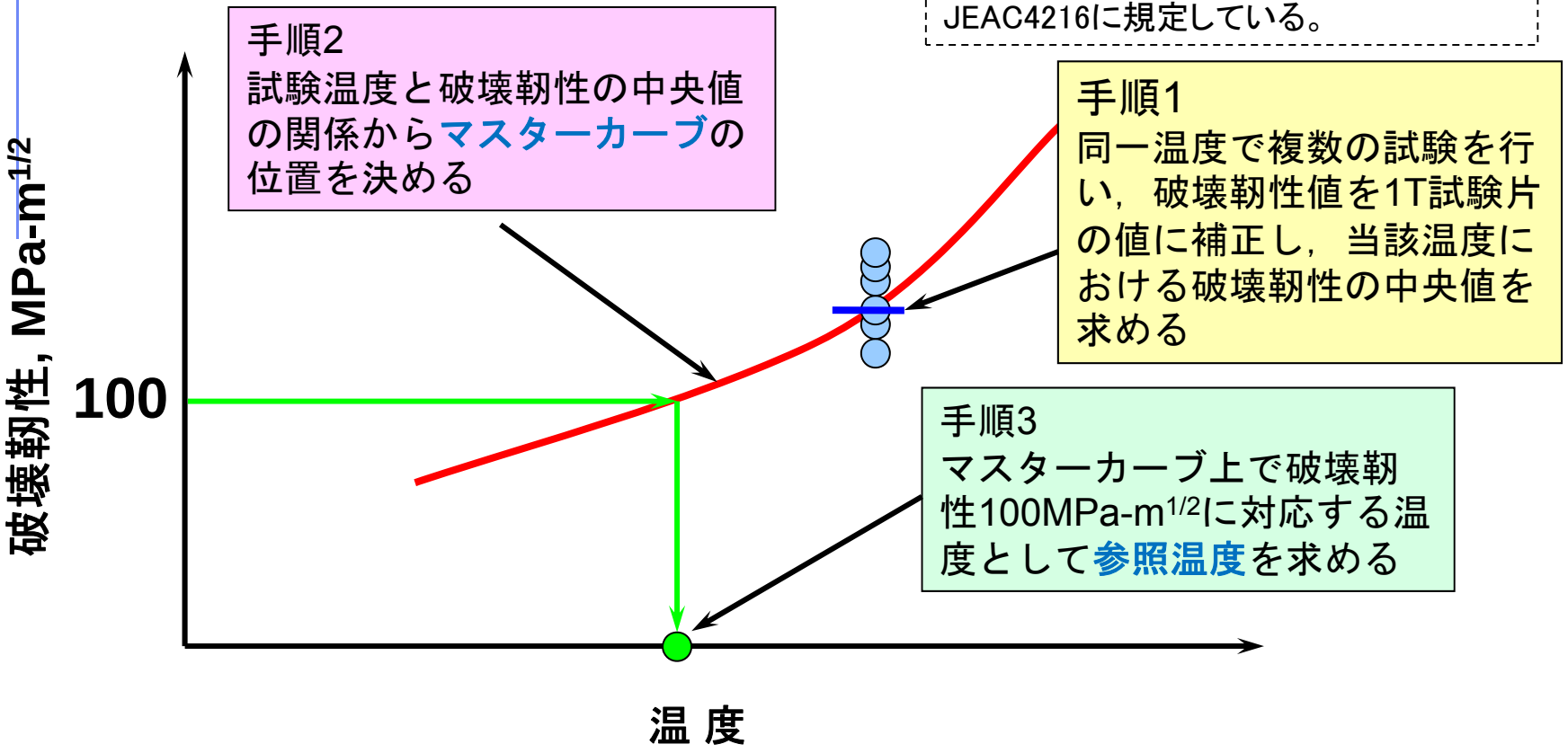
- 従来より少ない試験片数で破壊靭性を推定可能
- 破壊靭性のばらつきを理論的に与えられる。
- 超小型の試験片との組み合わせにより、物量の限られた監視試験でも破壊靭性の直接評価が可能

Kirk, Lott, Server, Hardies and Rosinski, "Bias and Precision of T0 Values Determined Using ASTM Standard E1921-97 for Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels," ASTM STP-1366, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999.

JEAC4216におけるT_oの決定方法

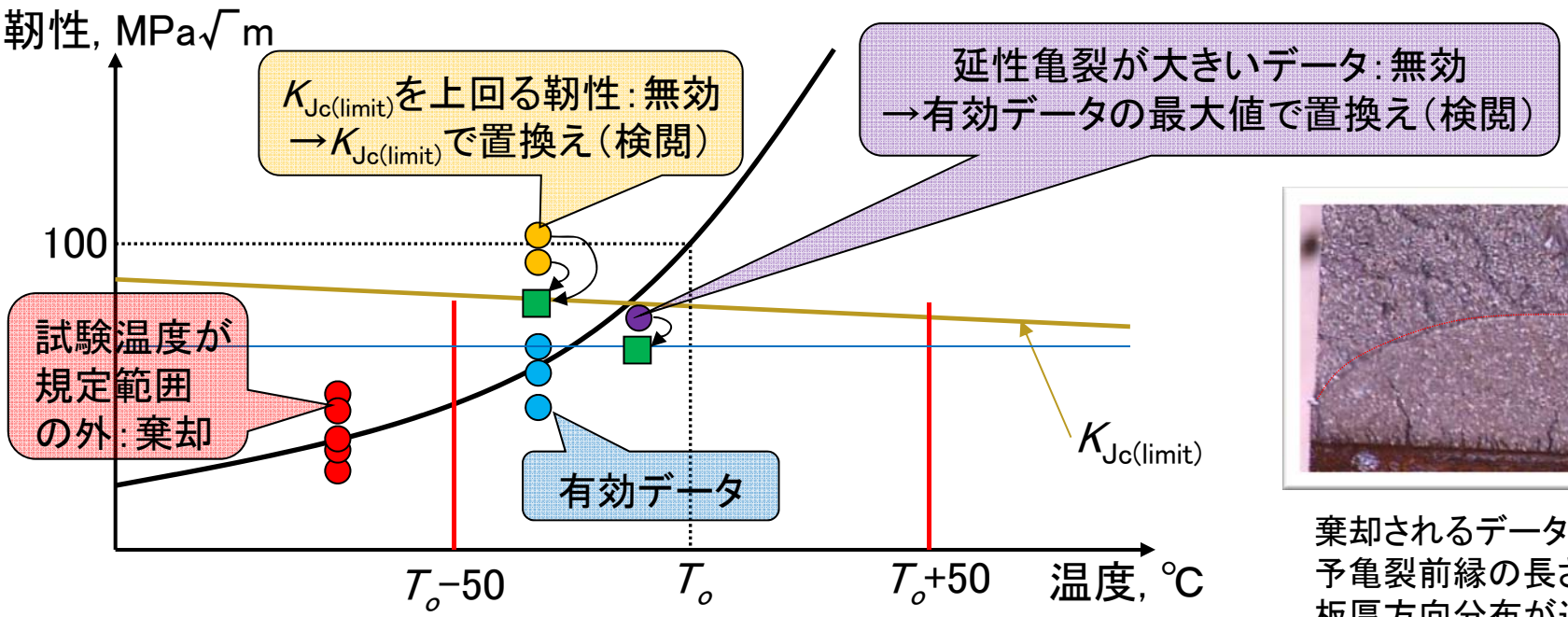
- マスターカーブの決定 = T_oの決定

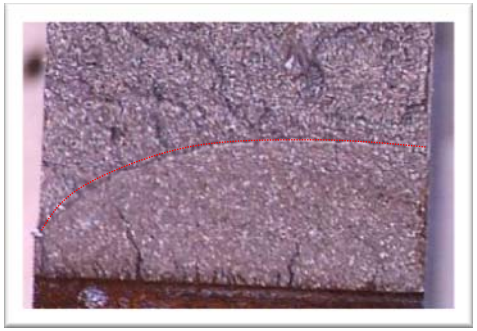
本図は単一温度でのT_oの決定手順だが、複数温度で試験してT_oを求める方法もJEAC4216に規定している。



無効データの検閲とデータの棄却

- 破壊靭性データを「有効データ」「無効データ」「棄却されるデータ」に分類する。
  - 有効データはT_oの評価にそのまま用いる。
  - 無効データは、へき開破壊の発生前に、許容されるK_{Jc}の最大値($K_{Jc(limit)}$)を上回ったデータ、または許容される以上の延性亀裂進展をしたデータである。試験で得られた破壊靭性を「検閲データ」で置き換えた上で、T_oの評価に用いる。
  - 試験片や予亀裂の寸法が規定を逸脱している、試験条件が規定の範囲を逸脱している、など、適切で無いデータは、T_oの評価に用いず棄却される。



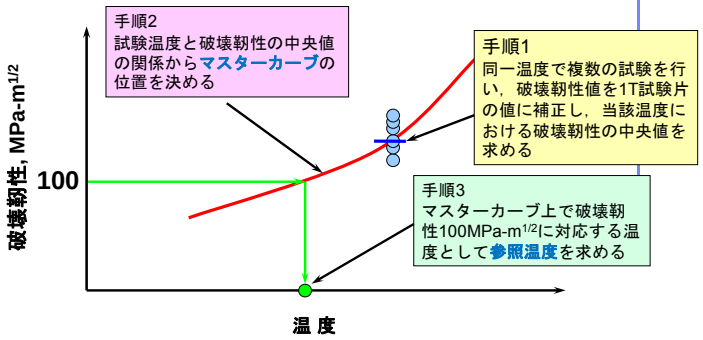


棄却されるデータの例：
予亀裂前縁の長さの
板厚方向分布が過大

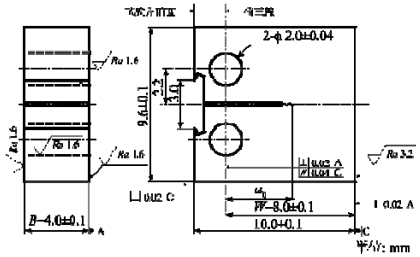
章立てと構成

JEAC4216-2015 本文目次（抜粋）

- MCT-1000　適用
- MCT-2000　試験装置
- MCT-3000　試験片の寸法・形状と試験準備
- MCT-4000　破壊靭性試験の試験手順及び評価手順
  - MCT-4100　試験の準備
  - MCT-4200　試験温度及び試験片個数
  - MCT-4300　試験及び試験後の測定　（手順１）
  - MCT-4400　K_{Jc}の計算方法　（手順１）
- MCT-5000　参照温度T_oの決定
  - MCT-5100　単一試験温度による方法（単一試験温度法）
    - MCT-5120　K_o及び$K_{Jc\,(med)}$の算出方法　（手順１）（手順２）
    - MCT-5130　暫定参照温度T_{oQ}の算出　（手順３）
  - MCT-5200　複数試験温度による方法（複数試験温度法）
    - MCT-5210　データセットのワイブル分布への当てはめ（手順１）（手順２）
    - MCT-5220　暫定参照温度T_{oQ}の算出　（手順３）
  - MCT-5300　T_oとしての有効性　（手順３）
- MCT-6000　記録

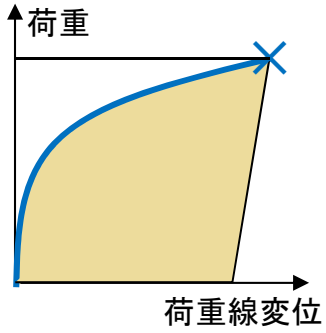


試験と評価の流れ（規格本文参照）

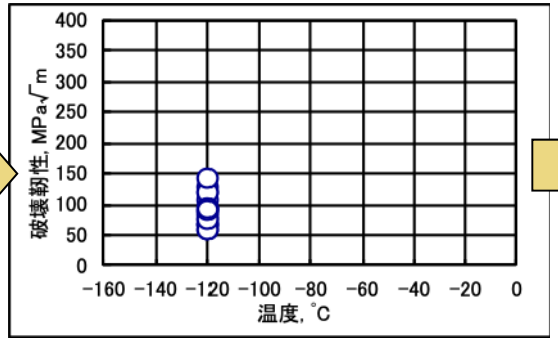


試験片を用意し疲労予亀裂を導入する（MCT-3000）

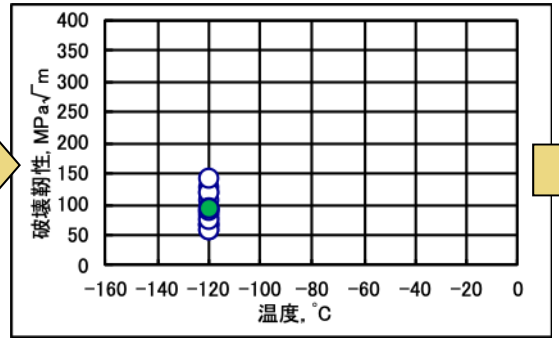
破壊靭性試験を実施する条件：温度，負荷速度（MCT-2000）（MCT-4100～MCT-4300）



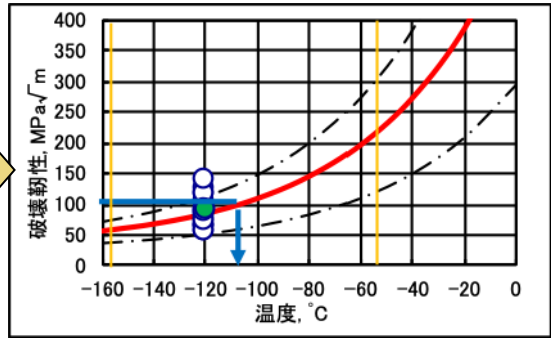
得られた荷重線変位-荷重関係から各試験片の破壊靭性 K_{Jc} を算出する。個々の K_{Jc} データの有効性を判定する。（MCT-4400）



- 定められた個数の破壊靭性データを1インチ厚さ相当に換算する。（MCT-5110～MCT-5114）
  1インチへの換算：（16)式
- 無効な K_{Jc} は「検閲データ」に置き換える。（MCT-5122）



- 有効なデータおよび置換えられた検閲データを用いて、ワイブル分布の尺度母数 K_o を算出する。さらに K_{Jc} の中央値 $K_{Jc\,(med)}$ を算出する。（MCT-5120）
  - K_o の算出：(17)または(18)式
  - K_o から $K_{Jc\,(med)}$ への変換：（19)式



- マスターカーブが $K_{Jc\,(med)}$ を通るよう、参照温度の暫定値 T_{oQ} を算出する。（MCT-5124, MCT-5130）
  - マスターカーブの式：（20)式
  - T_{oQ} の算出式：(21)式
- T_{oQ} が一定の条件をみたす場合、T_{oQ} は T_o になる。

試験温度として複数の温度を選ぶ場合は、MCT-5100の代わりにMCT-5200に従う

附属書目次

- 附属書A（参考）：推奨される試験片用治具
- 附属書B（参考）：シャルピー衝撃試験（Vノッチ試験片）データを用いて試験温度を設定する方法
- 附属書C（参考）：負荷速度の設定例
- 附属書D（参考）：T_oの算出例（全て有効なK_{Jc}データで評価する場合）
- 附属書E（参考）：T_oの算出例（無効なK_{Jc}データを含む場合）
- 附属書F（参考）：複数試験温度法によるT_oの算出例

解説目次

- 適用範囲
- フェライト鋼の適用範囲
- 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
- 試験機
- 変位計
- Mini-C(T)試験片の温度計測
- 適用試験片
- C(T)試験片前面で変位を測定する場合の定数
- 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
- ミニチュアコンパクト試験片の寸法公差
- 機械切欠きの形状
- K_{Jc}の許容最大値
- 試験片の採取
- 疲労荷重の条件
- 疲労予亀裂の導入手順
- サイドグルーブ
- 試験手順及び評価手順の概要
- 試験温度
- 試験片個数
- 試験温度の制御と測定
- 試験及び試験後の測定
- 負荷速度
- ポップインの評価
- データの棄却または無効とされる判定基準
- T_oの算出
- 複数試験温度法によるT_oの算出方法
- 記録
- 附属書A
- 附属書B
- 附属書D～F

ASTM E1921-08からJEAC4216-2011への主な変更点

- (全般)

1. ASTM E1921にある解説的な記載は本文から削除し、必要な部分について、解説に記載した。
2. 他のASTMの引用部分は削除し、JISの引用又は直接規定した。
3. 除荷コンプライアンス法に関する記載は削除した。
4. 評価に関するAnnexは削除した。

- MCT-1110　適用材料

  ASTM E1921-08では、溶接金属は母材との強度の食い違いが10%以内であることが記載されているが、JEAC4216では削除した。(ASTMでの規定理由が不明確であること及び破壊靭性試験に強度の食い違いは大きく影響しないため)

- MCT-3220　疲労予亀裂の導入手順:最終段階のK_{MAX}

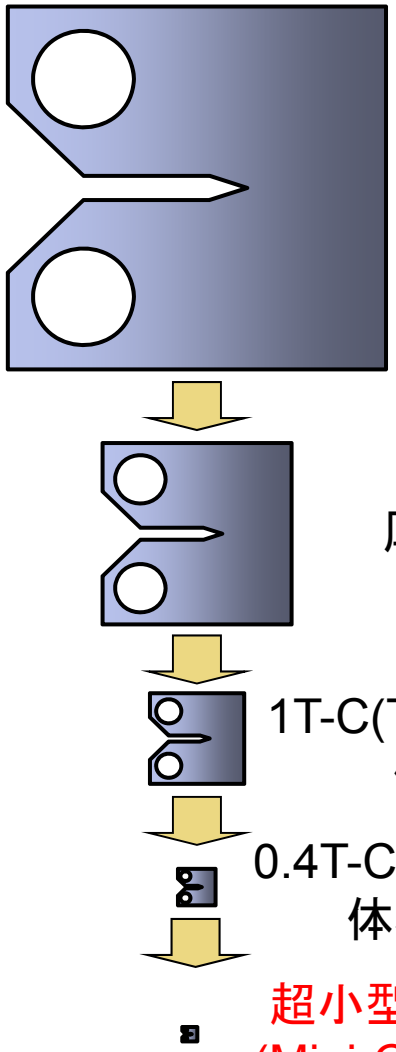
  ASTM E1921-08では、最終段階のK_{MAX}を15MPa√mとしているが、技術的にE399(K_{Ic}規定)及びE1820(J_{Ic}規定)で規定されている通り、疲労予亀裂の最終段階のK_{MAX}は、試験で得られた破壊靭性値を当該温度の強度で補正した値の0.6倍以下でよいと考えられることから、変更した。但し、解説でASTM E1921通りに実施すれば、ほとんどの場合で満足することを記載している。

2015年版改定項目

2011年版から2015年版への改定趣旨

- マスターカーブ法による破壊靭性評価が多くの機器で採用されるためには、破断済みシャルピー試験片などを有効活用し、ここから採取できるような超小型の試験片を採用することが重要。
- 4×10×9.6mmという超小型の試験片、Mini-C(T)を用いてマスターカーブ法による遷移温度域の破壊靭性評価が可能。
  - Miura, Soneda, Journal of Pressure Vessel Technology 2012, Vol.134, 021402
  - Yamamoto, et. al, Procs. ASME PVP 2013, PVP2013-97936
  - Yamamoto, et. al, Procs. ASME PVP 2014, PVP2014-28898
- Mini-C(T)試験片を用いた評価を行えるようJEAC4216を改定した。

小型試験片を用いた破壊靭性評価



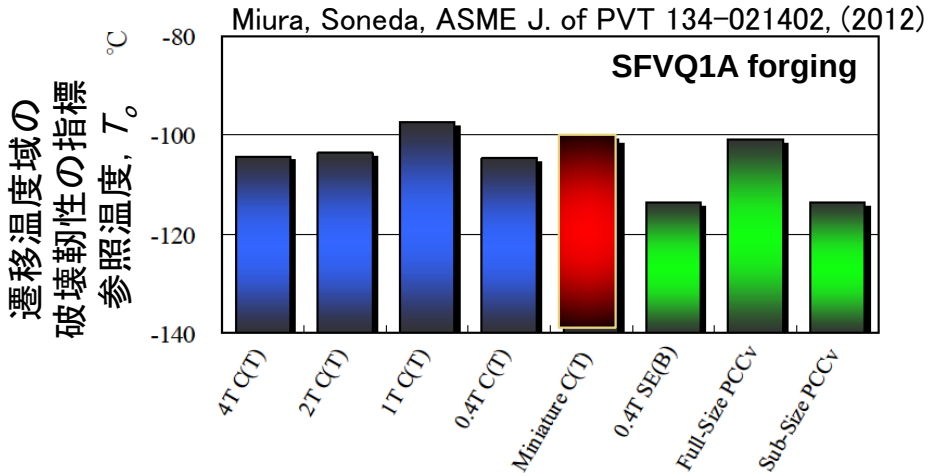
4T-C(T)
厚さ 100 mm
体積比 64

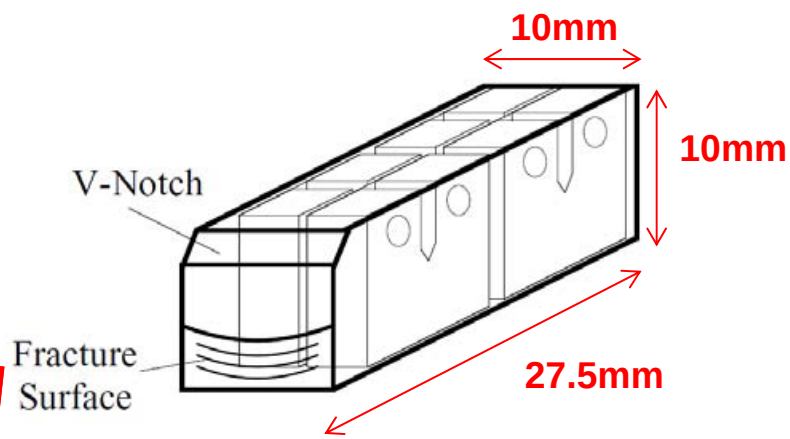
2T-C(T)
厚さ 50 mm
体積比 8

1T-C(T), 厚さ 25 mm
体積比 1

0.4T-C(T), 厚さ10 mm
体積比 0.064

超小型のC(T)試験片
(Mini-C(T)), 厚さ4 mm
体積比 0.004

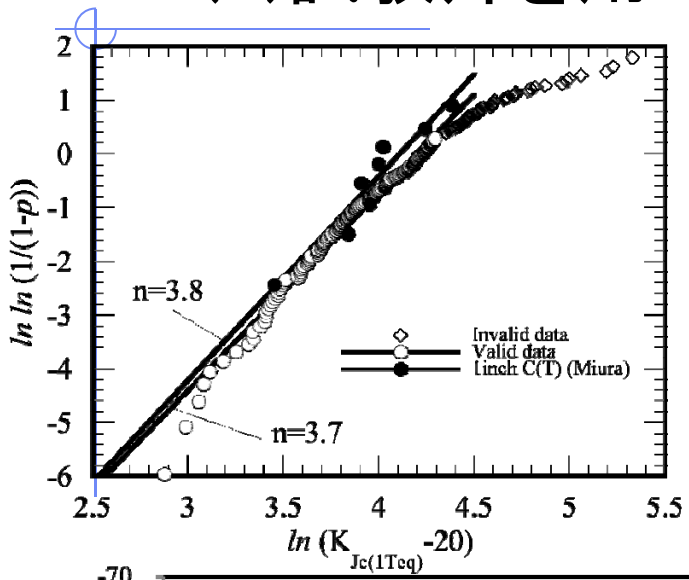




Mini-C(T)試験技術の確証
および試験規格としての体系化

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

Mini-C(T)試験片を用いた破壊靭性評価ラウンドロビン試験

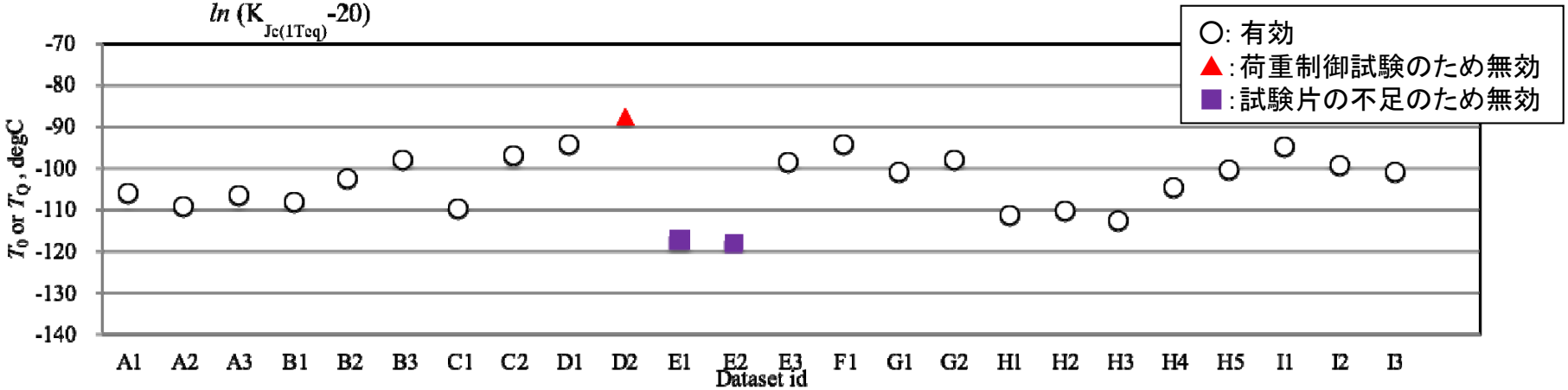


実施内容:

電中研から支給するMini-C(T)試験片(圧力容器鋼母材)に対する試験および評価の実施

参加機関:

京大、JAEA、東芝・日立GE・ NFD、MHI・NDC、電中研(主催)、ORNL(米)、EPRI(米)、Westinghouse(米)、VTT(フィンランド)、UJV(チェコ)、HZDR(ドイツ)、SCK・CEN(ベルギー)



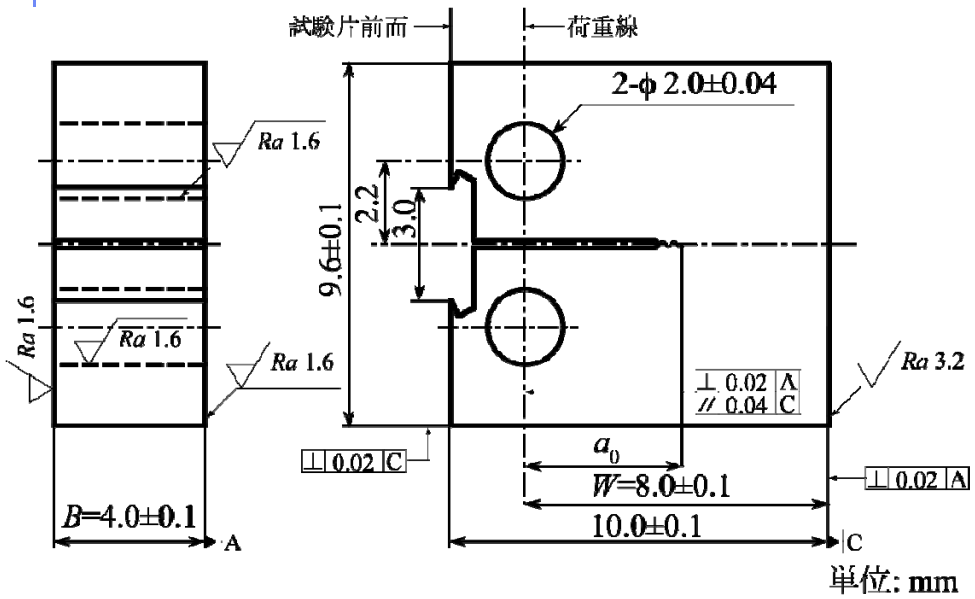
- 1T-C(T)試験片とMini-C(T)試験片で同等の評価結果が得られた。
- 多くの機関で同等の評価を実施可能であった。

JEAC4216-2015改定項目

- JEAC4216-2011, 図MCT-3100-1(1)～(3)に規定されたC(T)試験片（3種）に加え、Mini-C(T)試験片の形状および寸法を規定する。
- 直線状ノッチ試験片における予亀裂導入条件を見直す。
- Mini-C(T)試験片前面で測定する開口変位を荷重線変位に換算する係数を与える。
- 試験片に隣接するクレビスでの試験温度の測定および制御を認める。
- Mini-C(T)試験片を用いることの合理性、およびMini-C(T)試験片を用いる際の留意点について解説に記載する。

Mini-C(T)試験片形状および寸法の規定(1)

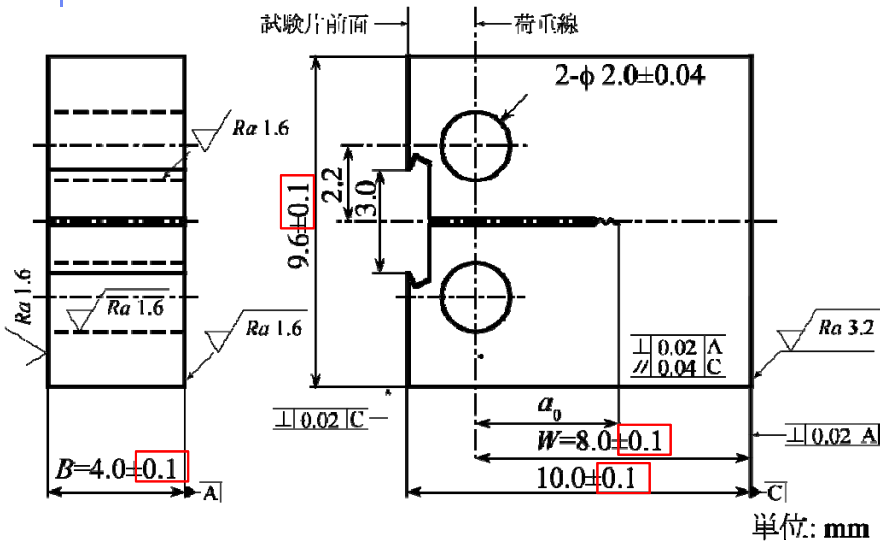
- 試験片形状、寸法を図示し、JEAC4216で使用してよい試験片として規定する。



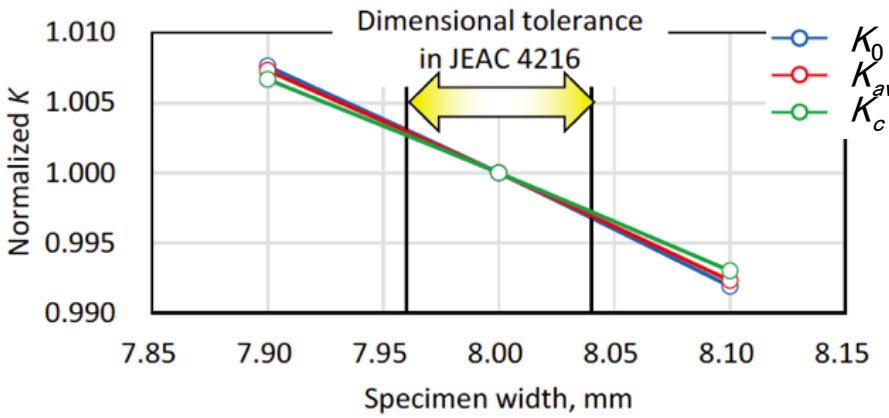
◆ Mini-C(T)試験片はB, W, H, aなどの寸法は図MCT-3100-1(1)および(2)と相似形であるが、クリップゲージ取り付け部の形状が異なる。

Mini-C(T)試験片形状および寸法の規定(2)

- 他の試験片より相対的に大きな寸法公差を許容する。



- ◆ C(T)試験片の寸法公差は相対値で与えられるため、現行の図MCT-3100-1 (2)と同等とすると寸法要求が厳しい。
- ◆ 試験片加工の利便性を考慮し、赤枠部の寸法公差を0.1mmとする。
- ◆ 公差の拡大が評価結果に及ぼす影響が十分小さいことを検証した(＊)。

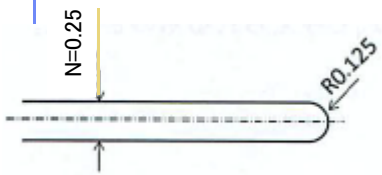


K_0：板厚中央における応力拡大係数
K_{ave}：板厚平均の応力拡大係数
K_c：JEAC4216-2011に従って算出した応力拡大係数

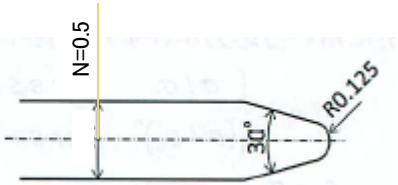
＊：桃井、三浦、山本、“破壊靭性試験に用いるミニチュアC(T)試験片に対する寸法要求の検討”, 日本機械学会M&M2014カンファレンス, OS0818

Mini-C(T)試験片形状および寸法の規定(3)

- Mini-C(T)試験片独自の機械ノッチ形状を規定



狭隘ノッチ



直線状ノッチ

		C(T)試験片	Mini-C(T)
狭隘ノッチ	幅 N (max)	0.01W (=0.08mm)	0.25mm
直線状ノッチ	幅 N (max)	0.063W(=0.5mm)	0.5mm
直線状ノッチ	先端半径	規定なし。ただしシェブロンノッチについて先端半径を0.25mm以下と規定	0.125mm

- **狭隘ノッチの幅Nは直径0.15mmの放電加工ワイヤの使用を想定し最大0.25mmとする。**
- **直線状ノッチはC(T)試験片と同等のN=0.5mmとする。また先端の曲率半径を0.125mmと規定する。**
- **技術根拠のための解析(*)**
  - **ノッチ幅の拡大(0.08→0.25mm)が試験中の亀裂先端の応力拡大係数に与える影響が十分小さいことを確認した。**
  - **予亀裂導入開始時の負荷によるノッチ先端の塑性域寸法が予亀裂寸法より小さいことを確認した。**

＊：桃井、三浦、山本、“破壊靭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”, 日本機械学会M&M2014カンファレンス, OS0818

クレビスにおける試験温度測定、制御

- MCT-2500 温度制御
「試験中の試験片の温度は、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±3℃の範囲内に制御できること。」
- Mini-C(T)試験片では、試験片のハンドリングを簡便にするため、試験片近傍のクレビス部に熱電対を取付け、予め温度校正を行ったうえでクレビス温度を制御する。
- この場合、温度校正結果を記録する。
- 試験温度は±3℃の範囲で再設定できることとする。

JEAC4216-2015の活用

マスターカーブ法の活用に向けた国外の動向

名称		内容
規格・基準等	ASTM E1921	試験法 (JEAC4216に相当)
	ASME Code Case N-629/631	RT_{T0}を介した破壊靭性曲線の設定法 (JEAC4206-2016のRF-2100に相当)
	ASME Code Case N-830	マスターカーブ直接使用による破壊靭性曲線の設定法 (JEAC4206-2016のRF-4222に相当)
	IAEA Guideline (Technical Report Series No.429)	圧力容器健全性評価
産業界	米国PWROG	監視試験材料を対象としたマスターカーブ法による破壊靭性評価研究

ASME Code Case N-830

- Direct Use of Master Fracture Toughness Curve for Pressure-Retaining Materials of Class 1 Vessels
  - 2014年に制定
  - マスターカーブ法によりT_oを算出し、破壊靭性曲線を求める。その5%下限線を、旧来のASME K_{Ic}カーブの代わりに用いて良い。
  - 現行はCC N-830-R0とされ、次期改定CC N-830-R1に向け、ASMEで議論が進行中。T_oを介して、K_{Ic}, K_{Ia}, 上部棚破壊靭性の全てを推定する手法。

日本におけるマスターカーブ法の活用の可能性

- 圧力容器の破壊靭性値の実力値を評価できる。
  - シャルピー衝撃試験による破壊靭性のシフト量の間接評価から、照射後の材料の破壊靭性の直接評価へ

- Mini-C(T)試験片を活用することで、監視試験の際より多くの試験データを採取できる。
  - シャルピー衝撃試験の破断材から試験片の加工が可能

まとめ

- マスターカーブ法は、破壊靭性のばらつきを定量評価できる方法として活用が始まっている。JEAC4216-2015は、マスターカーブを決定するための試験及び評価方法を示した規程として整備されている。

- 2011年版から2015年版への改定ではMini-C(T)試験片が使用可能となり、シャルピー試験片の試験後の破断材から追加の試験片を作成して破壊靭性データを得る道筋が確保された。

- 破壊靭性評価の信頼性向上や、原子炉圧力容器の監視試験への活用が期待される。