

参考資料 5 - 1

「フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法に関する 日本電気協会への説明依頼事項(その1)」に対する回答

令和2年1月10日
(一社)日本電気協会
原子力規格委員会

標記につきましては、以下の通り回答いたします。

○説明依頼事項

資料4-3に関し、次の(1)～(7)について、説明してください。

- (1) 室温の降伏強さが 275MPa 以上 825MPa 以下とされていますが、この数値は未照射材の値か照射材の値か説明して下さい。
- (2) 「MCT-1100 適用範囲」には「原子力発電所に使用するフェライト鋼」とされています。原子炉压力容器鋼以外にも適用できることを検討した内容を説明して下さい。
- (3) 「MCT-3220 疲労予亀裂の導入手順」において、最終段階で試験片に負荷する応力拡大係数の値 $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を ASTM E1921 と同様の $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ としなかった理由について説明して下さい。
- (4) 「MCT-3300 サイドグループ」において、Mini-C(T)に対してサイドグループを付与しないことを推奨していますが、付与した場合の影響について、検討した内容を説明して下さい。
- (5) 「MCT-4100 試験の準備」において、Mini-C(T)の寸法許容差 $\pm 0.1\text{mm}$ に対して測定精度 $\pm 0.05\text{mm}$ を妥当と判断した根拠について説明して下さい。寸法 W はピン穴の中心軸から試験片背面(基準面 C)までの距離ですが、厳密にはノッチの中心線上での荷重線交差点と試験片背面交差点との距離のことです。試験片の両面で測定すると思われますが、直接測定することは困難なため、W の求め方について説明してください。また、MCT-4100 は予亀裂導入後の試験片についての規定ですが、初期亀裂長さ a_0 の測定を要求しない理由について説明してください。
- (6) 「附属書 F(参考)複数試験温度法による T_0 の算出例」には、試験温度 $-60, -80, -100^\circ\text{C}$ でそれぞれ3個ずつ試験を行った場合の T_0 の算出例が示されています。試験温度は $\pm 3^\circ\text{C}$ の範囲があることから、試験体の温度は、 $-57 \sim -63, -77 \sim 83, -97 \sim 103^\circ\text{C}$ のばらつきがある可能性があります。しかし、 $-60, -80, -100^\circ\text{C}$ として計算することになります。複数試験温

度は、重み係数を用いて計算するため、温度の実測値を用いて計算することも可能ですが、実測値ではなく試験温度を用いる理由を説明して下さい。

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

○回答

(1) 室温の降伏強さが 275MPa 以上 825MPa 以下とされていますが、この数値は未照射材の値か照射材の値か説明して下さい。

回答(1)

275MPa, 825MPa は、それぞれ米国慣用単位系の 40ksi, 120ksi です。JEAC4216 の基となった ASTM E1921 において、照射・非照射のみならず原子力・非原子力の別なく、適用範囲の上限と下限を、切りの良い数字で大まかに定めるべく採用された値です。従って、照射の有無によらず満たす必要があります。

JEAC4216-2015 解説 MCT-1110 には、240MPa から 800MPa までの降伏応力範囲においてマスターカーブ法が有効であること[1]、照射量 $13 \times 10^{19} \text{n/cm}^2 (E > 1 \text{MeV})$ まで照射された国産圧力容器鋼の降伏点の最大値が 728MPa(母材)または 767MPa(溶接金属)[2]であり、いずれも本規程を満たすことを記載しています。

(2) 「MCT-1100 適用範囲」には「原子力発電所に使用するフェライト鋼」とされています。原子炉圧力容器鋼以外にも適用できることを検討した内容を説明して下さい。

回答(2)

現状、原子炉圧力容器以外の原子力発電所の機器に JEAC4216-2015 を用いる予定はありません。JEAC4216-2015 は電気技術規程の原子力編であることから、「原子力発電所に使用するフェライト鋼」を適用範囲としました。今後、フェライト鋼の配管等でニーズが出てきた場合にも試験法として使用できるようにしておきたいという意図です。

JEAC4216-2015 の基礎となっているマスターカーブ法は広くフェライト鋼に対して適用できるものであり、JEAC4216 の基となっている ASTM E1921 における適用範囲も原子力用途に限らないフェライト鋼となっています。

以下に例示する通り、原子炉圧力容器鋼以外にもマスターカーブ法を適用できる規格や適用した事例がございます。

- ✓ 米国石油連盟(API)はその健全性評価規格 API-579[3]の Annex 9F でマスターカーブ法による評価を記載しています。
- ✓ 英国規格 BS-7910[4] ではその Annex J と L でマスターカーブ法を引きこんでいます。BS-7910 は原子力利用や照射の有無によらず広く適用されるものです。
- ✓ 欧州の健全性評価手法 SINTAP[5]は広く原子力以外の構造に適用されますが、マスターカーブ法が用いられます。
- ✓ 米国 NASA では航空宇宙用途の多層圧力容器に対してマスターカーブ法を適用しています[6]。
- ✓ Norton らは原子力船の亀裂に対してマスターカーブ法を適用した評価を行なっています[7]。

(3) 「MCT-3220 疲労予亀裂の導入手順」において、最終段階で試験片に負荷する応力拡大係数の値 $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を ASTM E1921 と同様の $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ としなかった理由について説明して下さい。

回答(3)

JEAC4216-2015 では最終段階の K_{MAX} として $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と試験で得られた破壊靱性値を当該温度の強度で補正した値の 0.6 倍の値の小さい方とすることを規定しています。ASTM E1921 制定以前から破壊靱性試験の規定として使用されていた ASTM E399(K_{Ic} 規定)及び ASTM E1820(J_{Ic} 規定)では、疲労予亀裂の最終段階の K_{MAX} は、試験で得られた破壊靱性値を当該温度の強度で補正した値の 0.6 倍以下と規定されており、JEAC4216 制定時に最終段階の K_{MAX} は、試験で得られた破壊靱性値を当該温度の強度で補正した値の 0.6 倍以下とすることで技術的に妥当と判断しました。但し、初期の K_{MAX} が $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であることから K_{MAX} の上限として $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を規定しています。ASTM E1921-08 では、最終段階の K_{MAX} を $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ としていることから、最終段階の K_{MAX} を $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ とすることで、JEAC4216-2015 の要求はほとんどの場合で満足しますが、疲労予亀裂導入で最終的な K_{MAX} が $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を若干超えたとしても、試験で得られた破壊靱性値が高ければ試験としては妥当であること、逆に K_{MAX} が $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ でも、試験で得られた破壊靱性値が極端に低ければ、試験として妥当でない可能性も考えられることから、JEAC4216-2015 本文では最終段階の K_{MAX} を $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ とは規定しませんでした。なお、解説において、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を満足することを記載しています。(解説 MCT-3220 を参照下さい)

また、JEAC4216 制定時の第 27 回構造分科会(同分科会資料 27-3-3)においても、以下のコメントが出され、回答を議論した上で MCT-3220 の通り規定しています。

○第 27 回構造分科会 資料 27-3-3

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 構造分科会コメント集約表
(抜粋)

【コメント】

疲労予き裂の最終段階の K_{max} 制限を ASTM E1921 から ASTM E399 及び E1820 同様のやや大きめな値に見直しているが、①E1921 で敢えて低くした理由は何か、②また、国内外で実施された破壊靱性試験の評価結果等で、本変更が参照温度 T_0 の決定に影響しないことが確認されているか、について教えてください。

【回答】

E1921 の理由は、明確ではありませんが、低い温度で試験しても、問題が生じないように規定したものと考えます。この方法は、 K_{Jc} がわからない場合には合理的な方法かもしれませんが、本規格では、E399 や E1820 に準じた規定としています。この場合、低温で試験を実施した場合には、E1921 と比べて緩やかになっているとは限りません。(E1921 の制定に用いられた)E1921 発行前の試験は、国内外とも、E399 または E1820 に準じており、E1921 の規定に従っているものではありません。従って、 T_0 の決定に影響のないものと考えております。疲労予き裂の最終段階の K_{max} 制限が破壊靱性値の 0.6 倍の K 値以下であれば破壊靱性値に影響を与えないことは、E399 や E1820 に従った試験で確認されています。

(4) 「MCT-3300 サイドグループ」において、Mini-C(T)に対してサイドグループを付与しないことを推奨していますが、付与した場合の影響について、検討した内容を説明して下さい。

回答(4)

国産圧力容器鋼の溶接金属に対して Mini-C(T)試験片にサイドグループを導入した場合と導入しない場合の比較結果が報告されており、両者の破壊靱性分布に顕著な差異が見られないこと(図 4-1)が示されています[8]。

サイドグループ底の曲率半径は絶対値の $0.5\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ として定められています。曲率の中央値(0.5mm)および加工精度に起因する誤差(0.2mm)ともに、Mini-C(T)試験片については大きな値です。前者により、ノッチによる試験片側面近傍での拘束向上の効果のみならず、実質的に板厚が減少することによる拘束低下の効果が大きくなる可能性が否定できません。また後者により、個別の加工に伴う影響が顕在化する可能性があります。(解説 MCT-3300)

このような懸念事項を避けるため、Mini-C(T)試験片についてはサイドグループ加工を推奨しないこととなっています。

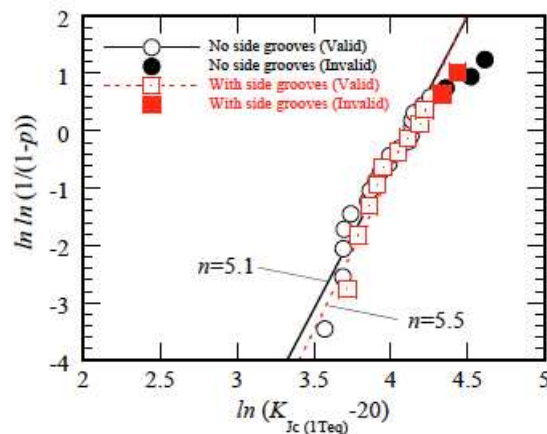


図 4-1 サイドグループ付き試験片(□■)とサイドグループのない試験片(○●)による破壊靱性分布(ワイブルプロット)の比較

(5) 「MCT-4100 試験の準備」において、Mini-C(T)の寸法許容差 $\pm 0.1\text{mm}$ に対して測定精度 $\pm 0.05\text{mm}$ を妥当と判断した根拠について説明して下さい。寸法 W はピン穴の中心軸から試験片背面(基準面 C)までの距離ですが、厳密にはノッチの中心線上での荷重線交差点と試験片背面交差点との距離のことです。試験片の両面で測定すると思われそうですが、直接測定することは困難なため、 W の求め方について説明してください。また、MCT-4100 は予亀裂導入後の試験片についての規定ですが、初期亀裂長さ a_0 の測定を要求しない理由について説明してください。

回答(5)

(1) 寸法許容差 $\pm 0.1\text{mm}$ に対して測定精度 $\pm 0.05\text{mm}$ の理由

寸法許容差については第3回検討チーム会合資料 3-3 回答(5)で示した検討を踏まえて設定し、また測定精度については通常用いられる測定手法(ノギス)の測定誤差から、それぞれ独立に設定しています。前者は、試験片の加工に関して寸法のばらつきを小さくするための要求であり、後者は試験および評価において実際に用いる試験片寸法の実測値に対する信頼性要求であり、独立した観点となっています。したがって、それらの関係については検討をしておりません。

評価では実測値が用いられることから、前者による寸法誤差は補正され影響が残りませんが、後者による誤差は評価結果に残存します。

(2) W の測定方法

W の測定方法は指定していません。 W の測定に際しては、ノギスやマイクロメータだけではなく、投影機、顕微鏡、レーザ測定など、要求を満たすための様々な測定装置、測定手法がありますので、これらを適切に用いることとなります。

(3) a_0 の測定を要求しない理由

a_0 は試験終了後に破断面から詳細に測定しますので、試験前に測定する必要がありません。

(6)「附属書 F(参考)複数試験温度法による T_0 の算出例」には、試験温度 $-60, -80, -100^{\circ}\text{C}$ でそれぞれ3個ずつ試験を行った場合の T_0 の算出例が示されています。試験温度は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ の範囲があることから、試験体の温度は、 $-57\sim-63, -77\sim-83, -97\sim-103^{\circ}\text{C}$ のばらつきがある可能性があります、 $-60, -80, -100^{\circ}\text{C}$ として計算することになります。複数試験温度は、重み係数を用いて計算するため、温度の実測値を用いて計算することも可能ですが、実測値ではなく試験温度を用いる理由を説明して下さい。

回答(6)

ご指摘の通り、実測値を用いることで精度が向上する可能性があります。現在は、単一試験温度法と複数試験温度法の整合性を保つこと、また同様の誤差を許容してなお、これまでに蓄積された T_0 の設定に明確な問題点が生じていないことから、手法の過度な複雑化を排除できる同手法が採用されています。

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

回答(7)

まず人為的に K_{Jc} の値を変化させることは、マスターカーブの破壊靱性分布に従うデータセットで無くすることを意味しますので、適切な取り扱いではありません。

マスターカーブ法における $K_{Jc(\text{limit})}$ に係る無効データの検閲方法の定義によれば、有効データは K_{Jc} データがその値であることを意味しますが、無効データはその値が $K_{Jc(\text{limit})}$ であることを意味しません。従って、 $K_{Jc(\text{limit})}$ を僅かに下回る有効データによる計算と $K_{Jc(\text{limit})}$ を僅かに上回る無効データによる計算では、 T_{oQ} が不連続になります。

【文献】

- [1] Kirk, M. et al., "Bias and Precision of T_0 Values Determined using ASTM Standard E 1921-97 for Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels," Effects of Radiation on Materials;19th International Symposium, ASTM STP 1366, pp.143-161, (2000)
- [2] 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)
- [3] API, API 579-1/ASME FFS-1, (2016)
- [4] The British Standard Institution, BS7910:2013+A1:2015, (2015)
- [5] SINTAP, "Determination of Fracture Toughness from Charpy Impact Energy: Procedure and Validation," SINTAP/BS/17, (1998)
- [6] Joyce, J. A., Wells, D., Stoltz, B., Shelton, L., Jacobs, P., Link, R. E., "Evaluating the fracture toughness of layered pressure vessel steels," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 207, 15 pp. 149-164, (2019)
- [7] Norton, F., Pisarski, H., "Demonstration of freedom from brittle fracture – Validation of the Master Curve Methodology for Deriving Material Fracture Toughness," 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2004), Berlin, Germany, (2004)
- [8] Yamamoto, M., Miura N., "Applicability of Miniature C(T) Specimens for the Master Curve Evaluation of RPV Weld Metal," Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2015-45545, Boston, Massachusetts, USA, (2015)