

資料5 - 1

「原子炉压力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する 検討チーム 第五回会合における日本電気協会への説明依頼事項」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

1. JEAC4216-2015「フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法」に関する追加質問

資料4-3に関し、次の(1)～(4)について、説明してください。

- (1) DC(T)と SE(B)の技術的妥当性を確認したとしてあげている文献¹以外に、 T_0 決定の技術的妥当性を確認できる根拠資料があれば提示してください。DC(T)と SE(B)については、根拠資料があれば提示してください²。
- (2) 高温では試験個数を6個とし、低温では8個としたことについてどの程度の信頼度で T_0 が評価されているのかについて、実験的に確認した結果があれば提示して下さい。資料4-3のp7の資料個数6～8個の検討資料があれば提示してください。
- (3) 原子炉压力容器のような厚板材の参照温度 T_0 を評価するにあたって、試験片板厚と鋼材の均一性(非均一性)との関係について検討した資料があれば提示してください。また、説明には厚板材における T_0 評価の代表性、試験片の採取位置についても含んでください。
- (4) 「MCT-4340 データの棄却または無効とされる判定基準」の(1)には、両側面を端部とする破面上の初期亀裂を等間隔に8分割した位置9点の各々の亀裂長さの測定値と初期亀裂長さの平均値との差が、板厚Bの5%か0.5mmのいずれか大きい方を超える場合に、データは棄却されるとしている。Mini-C(T)の場合、B=4mmに対してBの5%は0.2mmであることから、亀裂長さの各測定値と平均値との間に許容される差は0.5mmとなる。0.5mmの差を許容することを妥当と判断した技術的根拠を説明して下さい。

1 Underwood, J. H., Newman, J. C., Jr., and Seeley, R. R., "A Proposed Standard Round Compact Specimen for Plane Strain Fracture Toughness Testing," Journal of Testing and Evaluation, Vol.8, No. 6, November 1980, p. 308-313.

Freese, C. E. and Baratta, F. I., "Single Edge-Crack Stress Intensity Factor Solutions," Engineering Fracture Mechanics, Vol 73, 2006, pp. 616-625.

2 これらの文献は、K値を評価している。JEAC4216はJ積分でKJcを求めるので、文献として妥当か。

○回答

(1) DC(T)と SE(B)の技術的妥当性を確認したとしてあげている文献¹以外に、 T_0 決定の技術的妥当性を確認できる根拠資料があれば提示してください。DC(T)と SE(B)については、根拠資料があれば提示してください²。

1 Underwood, J. H., Newman, J. C., Jr., and Seeley, R. R., "A Proposed Standard Round Compact Specimen for Plane Strain Fracture Toughness Testing," Journal of Testing and Evaluation, Vol.8, No. 6, November 1980, p. 308-313.

Freese, C. E. and Baratta, F. I., "Single Edge-Crack Stress Intensity Factor Solutions," Engineering Fracture Mechanics, Vol 73, 2006, pp. 616-625.

2 これらの文献は、K 値を評価している。JEAC4216 は J 積分で K_{Jc} を求めるので、文献として妥当か。

回答(1)

Yoon ら[1]は、DC(T)試験片の適用性について、弾性変形のみならず塑性変形が大きい延性亀裂進展の領域まで検討し、通常の C(T)試験片と同等の J-R 曲線が得られることを示し、「試験片形状に関する明確な相違はほとんどない」と結論づけています。(図 1-1)

SE(B)試験片については J 積分まで展開した技術根拠論文が見当たりませんでした。同試験片では C(T)試験片との相違(バイアス)が見られる可能性があることはこれまでの議論においても説明しており、塑性変形に伴う影響も含め、今後の技術課題と考えられます。

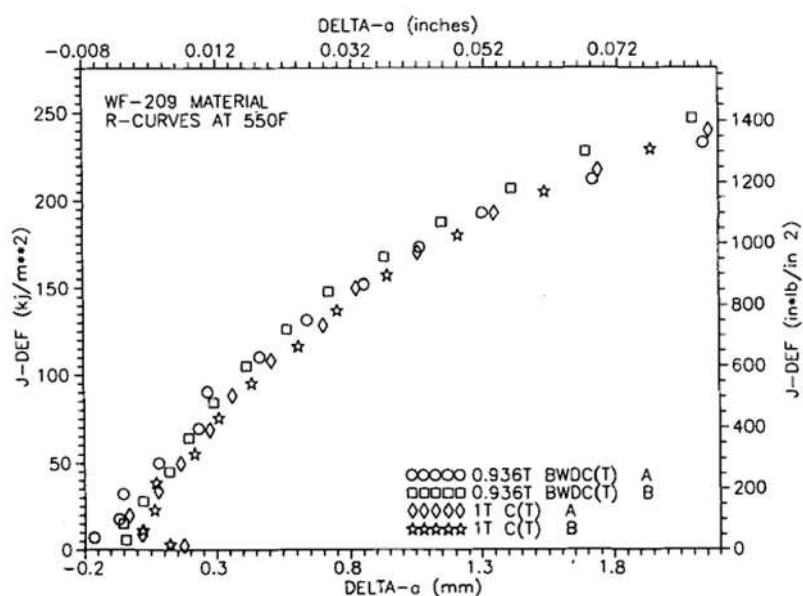


図 1-1 C(T)試験片と DC(T)試験片による J-R 曲線の比較[1]

(2) 高温では試験個数を 6 個とし、低温では 8 個としたことについてどの程度の信頼度で T_0 が評価されているのかについて、実験的に確認した結果があれば提示して下さい。資料 4-3 の p7 の資料個数 6~8 個の検討資料があれば提示してください。

回答(2)

第4回検討チーム会合資料 4-3 回答(5)では、ASTM E1921 における試験片必要数の規定について、マスターカーブの傾きが小さくなる低温域でも高温域と同等の信頼性を保つよう導出されたものであろうことを説明致しました。その後、ASTM における検討の詳細が文献[2]の付録 B.5 "Margin Adjustment"および付録 B.6 "Maintaining Equivalent Accuracy in T_0 Determinations as Lower-Bound Temperatures are Approached"に示されていることがわかりました。ASTM E1921 においては試験片の必要最低数を 6 と決めた上で、これに伴うマージンを標準偏差で与える形となっていること、また温度の低い下部棚にあつては同等の信頼性(同等の標準偏差)となるように試験片の要求数が増やされています。このように、 $T-T_0$ によって 6~8 個の試験片を要求する規定は、マスターカーブの形状と破壊靱性分布から数学的に導かれたものです。これに特化した実験的な検証結果は見当たりませんでした。

(3) 原子炉圧力容器のような厚板材の参照温度 T_0 を評価するにあたって、試験片板厚と鋼材の均一性(非均一性)との関係について検討した資料があれば提示してください。また、説明には厚板材における T_0 評価の代表性、試験片の採取位置についても含んでください。

回答(3)

JEAC4216 は ASTM E1921 を参考として「破壊靱性参照温度 T_0 の決定方法を規定するもの」です。その対象は巨視的に均質な引張特性、破壊靱性特性を有している原子力発電所に使用するフェライト鋼の材料を適用範囲としており、厚板のような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、このような変化域をまたぐ様々な位置から採取された試験片を混在させて評価に用いないようにすることが肝要です。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とを解説に記載しています(解説 MCT-1100 適用範囲)。

国内の原子炉圧力容器鋼材の採取位置については、解説(MCT-3170 試験片の採取)に記載しているとおり、JEAC4201-2007 原子炉構造材の監視試験方法(SA-2220 監視試験片の採取)に供試材の種類ごとに規定しています。具体的には、板厚の 1/4 の位置に限る(母材、溶接熱影響部)こと、溶接ルート部及び表面より 13mm 以上離れた位置(溶接金属)より試験片を採取することを規定しています。厚板の鋼板では、板厚の 1/4~3/4 の靱性が低く、表面に近い程靱性が高くなる傾向があり[3, 4, 5]、例えば、PTS 評価で想定する母材表面から深さ 10mm の亀裂を想定する場合には、板厚の 1/4 位置(例えば、厚さ 200mm ならば表面から深さ 50mm)から採取した試験片から得られる破壊靱性で評価することは、評価上保守的に取り扱っていることとなります。

(4) 「MCT-4340 データの棄却または無効とされる判定基準」の(1)には、両側面を端部とする破面上の初期亀裂を等間隔に 8 分割した位置 9 点の各々の亀裂長さの測定値と初期亀裂長さの平均値との差が、板厚 B の 5%か 0.5 mm のいずれか大きい方を超える場合に、データは棄却されるとしている。Mini-C(T)の場合、 $B=4$ mm に対して B の 5%は 0.2 mm であることから、亀裂長さの各測定値と平均値との間に許容される差は 0.5 mm となる。0.5 mm の差を許容することを妥当と判断した技術的根拠を説明して下さい。

回答(4)

該当箇所の規定は、JEAC4216 が基にした ASTM E1921 の 2008 年版と同一の規定を、特段の追加検討なく JEAC4216 に取り込んだものです。ASTM E1921 の同規定について技術根拠書類は見当たりませんが、ASTM E1921 改定を議論する E08.07 Subcommittee の議長によれば、0.5mm の規定は、現実的に加工可能なクライテリア(workmanship criteria)として導入されたもの、とのことです。平面ひずみ条件を仮定して算出される K や J の条件を実際の試験片に厳格に適用するのが困難であることは古くから知られており[6]、工学的判断により適用がなされてきたものです。

なお、ASTM E1921 においては、2018 年の改定において試験片厚さのみならずリガメント長さも考慮する新基準 $0.1(b_0 B_N)^{1/2}$ が採用され、0.5mm の絶対値による規定は削除されました。これによれば板厚 4mm の Mini-C(T)試験片については 0.4mm の許容誤差となります。現在、新たに基準を緩和する提案が試験データとともに示され、E08.07 において改定の議論が進められています。

【文献】

- [1] Yoon, K. K., Gross, L. B., Wade, C. S., and VanDerSluys, W. A., "Evaluation of Disk-Shaped Specimen for Determining J-R Curves," Fracture Mechanics: 26th Volume, ASTM STP 1256, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, (1995).
- [2] Merkle, J. G., Wallin, K. and McCabe, D. E., "Technical Basis for an ASTM Standard on Determining the Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range," NUREG/CR-5504 ORNL/TM-13631, (1998)
- [3] 薄田, 砂本, 佐藤, 船田, "原子炉压力容器極厚鋼材の破壊じん性に関する研究," 三菱重工技報, Vol.13 No.1, pp. 21-31, (1976)
- [4] 酒井, 菊竹, 小崎, 高橋, 宮, 安藤, "国産原子炉用超厚鋼材の破壊じん性に関する研究 その1 供試材とその基礎的性質," 圧力技術, Vol22 No.4, pp. 210-220, (1984)
- [5] International Atomic Energy Agency, "Reference manual on the IAEA JRQ correlation monitor steel for irradiation damage studies," IAEA-TECDOC-1230, (2001)
- [6] Kaufman, J. G., "Experience in Plane-Strain Fracture Toughness Testing Per ASTM Method E 399," Developments in Fracture Mechanics Test Methods Standardization, ASTM STP 632, W. F. Brown, Jr., and J. G. Kaufman, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 3-24, (1977).