

研究目的と内容

- 安全上最も重要かつ交換できない原子炉压力容器(RPV)の健全性評価においては、欠陥があることを想定した上で加圧熱衝(PTS)撃事象においても容器が破壊しないことが求められる。原子炉の高経年化に伴い原子炉压力容器鋼の照射脆化が進んでおり、健全性評価手法の妥当性確認が必要である。
- 照射脆化により低下する原子炉压力容器鋼の破壊靱性をより適切に評価するための手法を整備する。

原子炉压力容器の健全性評価

<加圧熱衝撃事象(PTS)>

原子炉压力容器内面の母材表面にき裂を想定。評価の精緻化のため、ステンレスオーバーレイクラッドの取り扱いが議論されている。

き裂発生に対する抵抗力

供用前破壊靱性 照射後破壊靱性 評価時期破壊靱性 (監視試験時) (脆化予測)

照射脆化 PTS時の応力拡大係数

監視試験

- 引張試験片
- シャルピー試験片
- 破壊靱性試験片

シャルピーシフトと破壊靱性シフトが同等と仮定。少数の破壊靱性試験との組み合わせにより、照射後の破壊靱性遷移曲線を破壊靱性データの下限包絡線として評価する。

脆化予測式により、評価時期の破壊靱性を評価する。

- ばらつきを考慮したより直接的な破壊靱性評価手法の整備が必要
- 現行の監視試験プログラムと共存できる手法でなければならない → 試験済みの監視試験片を利用した破壊靱性試験

破壊靱性マスターカーブ(MC)法

MC: 破壊靱性中央値の温度依存性の曲線

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

試験前に疲労予き裂を導入
試験後に破面からき裂長さを測定

準静的な単調引張荷重

恒温槽による試験温度制御

クリップゲージによる開口変位測定

へき開破壊が生じるまでの荷重と荷重線変位を計測し、破壊靱性値を算出

1T-C(T)相当の破壊靱性値

破壊確率95%

破壊確率5%

$T_0 = -82^\circ\text{C}$

試験温度、°C

1T-C(T) (25.4mm厚)

0.4T-C(T) (10mm厚)

Mini-C(T) (4mm厚)

シャルピー破断片から採取

有効な K_{Jc} 値が得られる温度範囲

有効な K_{Jc} 値の上限

マスターカーブ

1T-C(T)

0.4T-C(T)

Mini-C(T)

試験温度-参照温度($T-T_0$), °C

小型になるほどき裂先端での拘束が弱くなり塑性変形が生じやすくなるため、有効となる K_{Jc} 値の上限が低下する。

試験前には未知の参照温度 T_0 に対し、Mini-C(T)の場合は $T_0 - 50 \sim T_0 - 30^\circ\text{C}$ の狭い温度域を狙って試験を行う必要がある。

- マスターカーブ法に試験片サイズの制限は設けられていないが、試験例の少ない非常に小型のMini-C(T)試験片についてはき裂先端の拘束効果について標準型試験片(1T-C(T))との違いを確認する必要がある。

<き裂先端における拘束効果の評価式>

弾性解析: T-stress

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_{xx}(\theta) & f_{xy}(\theta) \\ f_{yx}(\theta) & f_{yy}(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

き裂先端

弾塑性解析: Q-parameter (小規模降伏状態からの逸脱を意味するパラメータ)

$$Q = \frac{\sigma_a - (\sigma_a)_{HRR}}{\sigma_0}$$

$\theta = 0, \frac{r\sigma_0}{J} = 2$

$$u_x = \frac{(1+\nu)K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) (3-4\nu-\cos\theta)$$

$$u_y = \frac{(1+\nu)K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) (3-4\nu-\cos\theta)$$

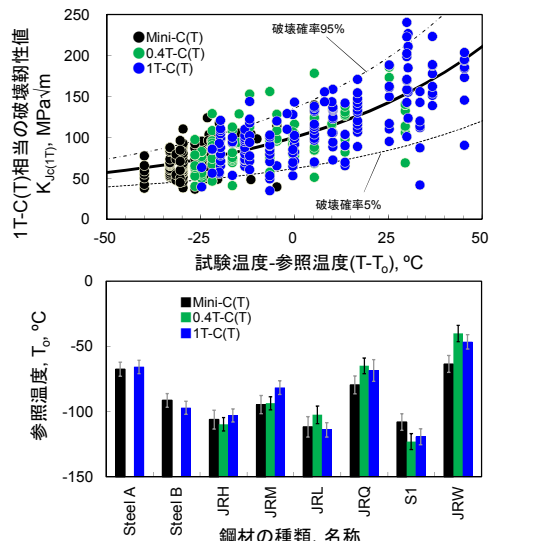
き裂先端中央部

FEM解析モデル

修正バンダリレイヤー解析
層方向の単層厚さ(ここでは1mm)上に σ_{xx} , σ_{yy} を負荷することでき裂先端を小規模降伏状態にしている。
*©K.M. T., Doodds Jr R.H., and Anderson T. L., 1999, Fracture Mechanics Vol. 24 ASTM STP 1207 pp. 62-68.

有効範囲

破壊靱性値が有効範囲を超えなければ、試験片サイズにかかわらずき裂先端の拘束効果に大きな差が無いことを確認¹⁾。



- 低温で試験を行うことにより、最も小型のMini-C(T)においても有効な破壊靱性値を得られることを確認。
- 破壊靱性のばらつきや破壊靱性特性の指標である参照温度 T_0 が標準型試験片と同等に評価できることを複数の鋼材で確認。

まとめ

- 試験済み監視試験片から採取可能な小型試験片を用いて、ばらつきを考慮した直接的な破壊靱性評価が可能であることを示した。
- 今後は既存照射材の利用及びJMTRを利用した材料照射試験により照射材に関する本手法の適用性について検討を行う予定である。また、健全性評価手法の保守性確認のため高温予荷重(WPS)効果の確認及びき裂伝播停止破壊靱性の評価法の整備を進めている。
- これらの研究成果は、原子炉压力容器の健全性評価に関する学協会規格の技術評価において、妥当性確認に係る技術的知見を提供するものである。

1) Hisashi TAKAMIZAWA, Tohru TOBITA, Takuyo OHTSU, Jinya KATSUYAMA, Yutaka NISHIYAMA, and Kunio ONIZAWA, Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conf., PVP2015-45412(2015).
原子力規制庁からの委託事業「軽水炉燃料詳細健全性調査」の成果を含む

原子炉压力容器鋼の破壊靱性評価手法の高度化に関する研究

独立行政法人日本原子力研究開発機構 安全研究センター

材料・構造安全研究ユニット 材料・水化学研究グループ

1. 概要

原子炉压力容器鋼の破壊靱性評価手法の高度化を目的に、試験済みの監視試験片から採取可能な小型試験片を用いた破壊靱性評価に関する研究を行っています。

2. 背景

安全上最も重要で交換できない機器である原子炉压力容器 (RPV) の健全性を評価する際には、最も厳しい条件として加圧熱衝撃 (PTS) 事象を想定しています。PTS 事象とは、冷却材喪失事故等の際に非常用炉心冷却水が注入され、RPV の内面が急冷されて引張応力が発生する過渡事象です。健全性評価においては RPV の内面に欠陥があることを想定した上で、PTS 事象が生じても破壊しないことを確認します。ここで、RPV の破壊 (想定欠陥からのき裂の発生) に対する抵抗力、すなわち破壊靱性は、低温では低く遷移温度域で上昇する温度依存性を示します。この破壊靱性遷移曲線が中性子照射により高温側へ移動 (シフト) する現象を照射脆化といいます。原子炉の高経年化に伴い原子炉压力容器鋼の照射脆化が進んでおり、健全性評価手法の妥当性を確認する必要があります。

照射脆化を把握するため、プラントの供用開始前にあらかじめ監視試験カプセルを原子炉内に装荷しておき、計画的に取り出して監視試験を行っています。ここではシャルピー試験により脆化予測法の妥当性を確認した上で、破壊靱性データのシフトを予測し、全破壊靱性データの下限を包絡するように評価時期の破壊靱性遷移曲線を設定しています。しかし、データの下限包絡による設定法では、破壊靱性遷移曲線の形状が試験数や破壊靱性のばらつきに影響されると考えられます。また、シャルピー遷移温度と破壊靱性遷移温度とのシフトの相関にもばらつきがあります。

3. 研究成果

破壊靱性評価手法の高度化のためには、ばらつきを考慮できるより直接的な破壊靱性評価法が必要です。そこで、マスターカーブ (MC) 法の利用が有効と考えられます。MC 法は、1 インチ厚コンパクト (1T-C(T)) 試験片の破壊靱性分布の中央値の温度依存性を一本の指数型曲線で表現する手法であり、破壊靱性下限を破壊確率として設定することができます。また MC 法では試験片寸法に制限は設けられておらず、1 インチよりも小型の試験片を用いることが可能です。そこで本研究では、試験済みシャルピー衝撃監視試験片を再利用して製作可能な小型破壊靱性試験片 (4mm 厚、Mini-C(T)) を用いて、MC 法による破壊靱性評価を試みました。

試験片が小型になるほどき裂先端での塑性拘束が弱くなり塑性変形が生じ易くなることから、有効となる破壊靱性値の上限が低下します。有効な破壊靱性値を得るためには、試験片が小型になるほど低温で試験を行う必要があります。その一方で、MC 法の適用範囲は参照温度 T_0 (MC 上の $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対応する温度) に対し $\pm 50^\circ\text{C}$ の範囲という制限もあります。Mini-C(T) の場合には、限られた試験片を無駄にしないために、試験前には未知の T_0 に対し $-50\sim-30^\circ\text{C}$ の非常に狭い温度域を狙う必要があります。また、MC 法が整備された時には Mini-C(T) のような非常に小型の試験片は想定されていなかったため、き裂先端の拘束効果について MC 法の標準型試験片 (1T-C(T)) との違いを調べ、MC 法が適用できるか確認しておく必要があります。

本研究では寸法の異なる試験片 (1T-C(T)、0.4T-C(T)、及び Mini-C(T)) に対して FEM 解析を行い、き裂先端拘束パラメータとして知られるき裂面に平行な一様応力に対応する T 応力と 2 軸比 β 、及び小規模降伏状態を基準としたき裂先端の塑性拘束の程度を示す Q パラメータを用いて、拘束効果の違いを調べました。弾性解析による 2 軸比 β に関しては試験片寸法にかかわらず 0.5 弱を示し、拘束効果に寸法依存性が無いことが分かりました。弾塑性解析においては、Mini-C(T) の場合には Q パラメータが減少に転じる点が低い J 積分値で現れるものの、破壊靱性値が有効範囲を超えない範囲であれば大きな差は生じないことが分かりました。さらに、注意深く試験温度を設定して低温で試験を行うことにより、最も小型の Mini-C(T) においても有効な破壊靱性値を得られることを確認するとともに、破壊靱性のばらつきや破壊靱性の参照温度 T_0 が標準型試験片と同等に評価できることを複数の鋼材で確認しました。

これらの研究成果は、RPV の健全性評価に関する学協会規格の技術評価において、妥当性確認に係る技術的知見を提供するものです。今後は照射材に対する本手法の適用性について検討を進めていきます。