

重点課題 - 設備運用・保全技術の高度化

原子炉压力容器・炉内構造物健全性評価

背景・目的

軽水炉の安定運転を継続するためには、核燃料と冷却水を保持する原子炉压力容器とその内部の重要機器である炉内構造物に欠陥が生じた場合の構造健全性を的確に評価し、安全性を担保できることが必要である。

本課題では、原子炉压力容器・炉内構造物の経年劣化現象のメカニズムの解明、経年劣化事象の予測手法の開発と改良、構造健全性評価といった技術的基盤を拡充することで、軽水炉の安全・安定運転に寄与する。

主な成果

1 マスターカーブ法の実機適用技術の開発

原子炉压力容器の健全性評価に用いる監視試験片の有効活用のため、試験済みのシャルピー衝撃試験片*1から採取可能な平面寸法10ミリメートル角程度の超小型試験片を用いたマスターカーブ法*2による破壊靱性評価について、国内外の多くの機関が参加する試験を主催した。各機関が個別に試験・評価した参照温度(破壊靱性の大小を温度によって示す指標)は、どの実施機関においても同等であった(図1)。また、計272点の超小型

試験片の破壊靱性のばらつきは、マスターカーブ法で仮定するワイブル分布に従い、かつ標準的に用いられる1インチ厚さの試験片を用いた試験結果ともほぼ一致することがわかった^{[1][2]}(図2)。この成果は、超小型試験片を用いたマスターカーブ法の有効性を確認するものであり、日本電気協会の規格*3への反映を通じて、監視試験片の有効活用による安全性向上に貢献する。

2 原子炉压力容器貫通部の高温強度評価法の開発

福島第一原子力発電所事故では、原子炉压力容器下部の貫通部は運転温度を超える高温条件下に曝されていたと考えられる。同様な過酷事故を想定し、压力容器が破損する限界条件を評価する手法を整備しておく必要がある。原子炉压力容器貫通部を構成する材料について、温度とひずみ速度を変え

た高温引張試験を実施し、その結果をもとに材料の非弾性変形挙動を精度良く表現できる非弾性変形解析用の応力とひずみの関係を示す構成式を導いた(図3)^[Q14016]。これにより、過酷事故時の高温強度評価法を構築する目的を得た。

3 压力容器鋼の照射脆化に係わる健全性評価手法の高度化

压力容器鋼の照射脆化に及ぼす熱と中性子照射の影響を解明するため、压力容器鋼を単純化した鉄-銅-ニッケル-マンガン四元系モデル合金を対象に、熱時効*4あるいは中性子照射を行い、原子レベルの組成分析が可能なアトムプローブ観察を行った*5。その結果、照射脆化の原因となる溶質原子クラス

ターのNiとMnの含有量は、中性子照射材よりも熱時効材で高く、時効時間によらずほぼ一定であることが判明した。このことから、熱時効または中性子照射による加速試験では、溶質原子クラスターの形成機構が異なることが示された(図4)。

*1 ハンマーを振り下ろし、材料を衝撃破壊するシャルピー衝撃試験に用いる切欠きを有する角柱状の試験片。

*2 材料の破壊靱性値の分布をワイブル分布と仮定し、分布の中間値の温度依存性を1本の曲線とする方法。

*3 日本電気協会、原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認方法、JEAC4206-2007。

*4 材料を一定温度で保持する熱処理により、材料特性が変化する現象。

*5 東京大学との共同研究により実施した。

[1] M. Yamamoto et al., Procs. ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division conference, PVP2013-97936(2013).

[2] M. Yamamoto et al., Procs. ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division conference, PVP2014-28898(2014).

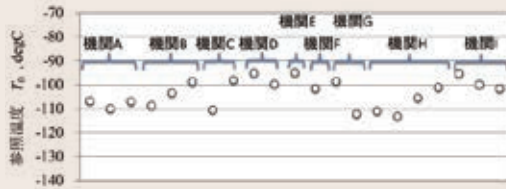


図1 国内外の各機関が試験・評価した参照温度 T_0 の比較

同一の圧力容器鋼鍛造材から製作された複数の試験片を用いた評価では、試験を行った機関によらず同等の参照温度が得られた。各機関が評価した試験片毎の参照温度の差異は、関連規格 (ASTM E1921-10a) に規定されたばらつきの範囲内であった。

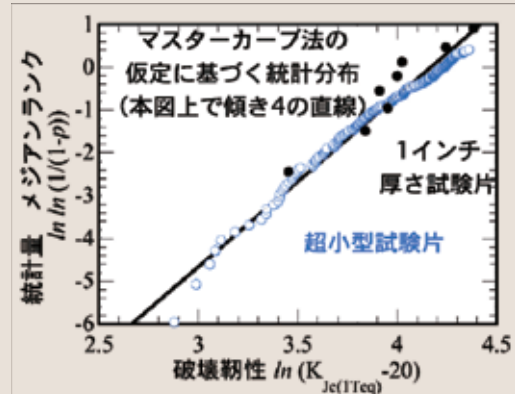


図2 各機関で得られた破壊靱性の全データの統計的プロット

マスターカーブ法は、破壊靱性のばらつきがワイブル分布に従うことを仮定している。各機関から得られた全て (272点) の超小型試験片の破壊靱性のばらつきは、この分布特性 (図2中で傾き4の直線) によく一致し、かつ標準的に用いられる1インチ厚さの試験片の統計分布特性ともよく一致することが確認された。

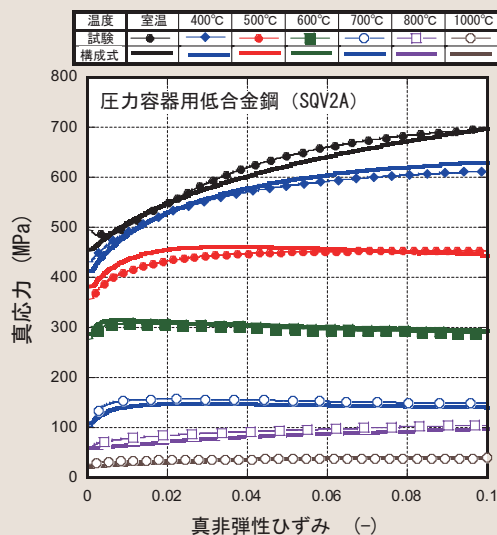


図3 高温引張試験結果と構成式による予測

圧力容器鋼鍛造材に対して室温から1000°Cまでの温度で実施した引張試験結果と構成式による予測を比較した結果を示す。いずれの温度においても、本材料の引張変形挙動を表現できることがわかる。

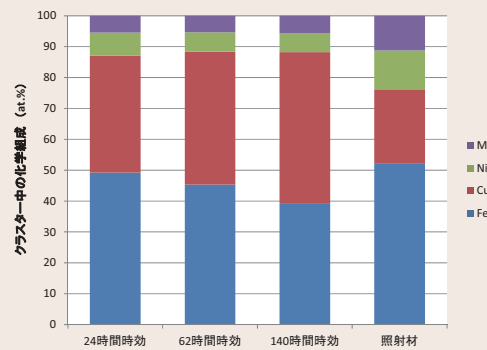


図4 鉄-銅-ニッケル-マンガンモデル合金中に形成した溶質原子クラスター中の化学組成の比較

鉄に銅、ニッケル、マンガンを追加したモデル合金を450°Cで24~140時間熱時効した材料と290°Cで $5.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) まで中性子照射した材料で形成した溶質原子クラスター中の化学組成。熱時効材ではニッケル、マンガンの組成は時効時間によらずほぼ一定の値を示す。中性子照射材ではニッケル、マンガンの組成がより高くなっており、同一材料であっても熱時効と中性子照射では形成されるクラスターの成分が異なる。