

- 軽水炉の高経年化に伴い顕在化する劣化事象を詳細に捉え、機器の健全性を精度良く評価することが重要
- 軽水炉の原子炉圧力容器 (RPV) や炉内機器を対象に、放射線の照射に起因した原子炉特有の劣化事象である照射脆化や照射誘起応力腐食割れに関する研究を実施

ナノ～マイクロレベルの微細構造分析、材料の機械特性や水化学評価を通して構造物の健全性を評価

放射線の照射に伴う材料劣化

- 原子炉圧力容器 (RPV) の照射脆化
- 炉心領域部 (照射脆化対象)
- 炉内構造物
- 高温高压水中の応力腐食割れ等
- 冷却水の放射線分解水質評価

照射材の破壊靱性試験

中性子照射による溶質原子クラスター形成の評価

亀裂先端近傍の変形組織

水の放射線分解に伴う腐食環境変化の評価

原子炉圧力容器鋼の破壊靱性評価

加圧熱衝撃 (PTS) 事象の模式図

初期の破壊靱性 vs. 照射後の破壊靱性

関連温度移行量 (ΔRT_{NDT})

脆化予測法に基づいて関連温度移行量を予測し評価時期の破壊靱性値を評価

微小試験片を用いた破壊靱性評価

◆ シャルピー破断片から採取できる微小試験片 (Mini-C(T)) を用いて、破壊靱性値を評価

◆ 評価誤差の範囲内で標準的な寸法の試験片 (1T-C(T)) と等価な破壊靱性評価が可能であることを確認

原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化の評価

ベイズ統計を用いた照射脆化量の解析

$$p(D|\pi, \mu, \sigma) = \sum_{k=1}^K \pi_k N_k(D|\mu_k, \sigma_k)$$

D: 実測データ, k : 正規分布の数, $N(\cdot)$: 正規分布, μ : 平均値, σ : 標準偏差 (多次元: 共分散行列), π : 混合比 (重み)

モンテカルロサンプリングとベイズ推定を用い、統計的類似性に基づいてデータを分類し、正規分布の数、各正規分布のパラメータ、混合比を算出

グループ1, グループ2, ..., グループk

$\sum \pi_k N_k(D|\mu_k, \sigma_k)$

ΔRT_{NDT} の中央値

95% 確信区間

照射量 vs ΔRT_{NDT} (2次元)

ΔRT_{NDT} (計算値) vs ΔRT_{NDT} (実測値)

計算値 - 実測値 (残差) vs 計算値

◆ ベイズ統計を用いて、材料の化学成分、中性子照射条件と関連温度移行量との関係性を評価

◆ 脆化に寄与する入力変数同士の相乗効果、相互作用、データの数やばらつきに応じた脆化予測における不確かさについて検討

評価したい条件に対応する関連温度移行量 (ΔRT_{NDT}) 中央値と確信区間を推定

原子炉圧力容器鋼の材料劣化評価

溶接熱影響部 (HAZ) のイオン照射による硬化

5層溶接材のFEM解析によるHAZ組織分布

イオン照射条件

ナノインデント (NI) 硬さ測定

イオン照射前後の硬さと硬化量

金相観察によるHAZ組織の確認

◆ クラッド下HAZの熱履歴による組織分布を確認

◆ HAZ組織に対して、イオン照射による照射硬化量と微細組織変化の相関を検討

X線吸収を用いたイオン照射材 (母材) の微細構造解析

広域X線吸収微細構造 (EXAFS: Extended X-ray absorption fine structure)

照射したX線のエネルギーにより内殻電子が励起され、放出された電子が周囲の原子によって散乱される電子と干渉することでEXAFS振動が出現する。

Cu原子周辺のEXAFS変化

◆ 圧力容器鋼のイオン照射による微細構造変化 (原子間距離、結晶構造、配位数等) を特定元素について評価

炉内構造物等の照射誘起応力腐食割れ・水化学の評価

既存照射材を用いた亀裂進展試験・微細組織分析

◆ 中性子照射済みの316Lステンレス鋼を用いて、BWR水質環境での亀裂進展速度を評価

◆ 亀裂先端近傍のひずみ量に相当する塑性変形が微細組織に及ぼす影響を評価

亀裂進展速度の中性子照射量依存性

透過型電子顕微鏡による微細組織観察

低照射量領域 vs. 高照射量領域

水の放射線分解 (ラジオリシス) に関する研究

◆ 一次冷却水中のラジオリシス及び腐食電位 (ECP) 評価モデルを整備

◆ 海水成分を含む水のラジオリシスに伴う水質の変化について、実験と計算の両面から予測

BWR環境 (水素注入条件) の結果

モデル計算によりECPを精度良く評価

NaCl, NaBr水溶液へのガンマ線照射による H_2O_2 生成

海水に含まれる微量のBrのラジオリシスへの寄与を予測

ガンマ線照射実験により、計算結果の妥当性を評価