

内部事象を考慮した原子炉構造機器の健全性評価手法の高度化

材料・構造安全研究ディビジョン
構造健全性評価研究グループ

研究の全体概要

● 安全上重要な原子炉圧力容器 (RPV) や一次系配管等の原子炉機器を対象に、中性子照射脆化や応力腐食割れ等による構造材料の経年劣化を考慮した健全性評価手法について、その基盤となる溶接残留応力や欠陥評価技術等の研究開発成果を踏まえつつ、その実用に向けた安全研究を推進。

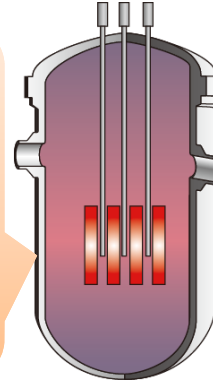
- 確率論的健全性評価手法の実用化を念頭に、基盤研究を通じて得られた最新知見も踏まえ、確率論的破壊力学 (PFM) 解析コードPASCALシリーズの評価対象及び経年事象の拡充を図るとともに、国内外におけるベンチマーク解析等を通じてPFM解析コードの信頼性向上を実施。
- RPVの破損頻度を求めるための標準的な解析手順や解析に必要なデータなどを取りまとめた標準的解析要領を世界に先駆けて整備。
- PASCALシリーズを用いて、リスク情報を活用した検査や原子炉施設の安全性向上のための評価に対するPFM解析の活用方策の検討を実施。
- 福島第一原子力発電所事故を踏まえ、THALES2等のシビアアクシデントコードの高度化に貢献するため、その評価に必要な融点付近の高温下におけるクリープデータを取得するとともに、重大事故時等における構造物の損傷評価手法を整備。大型試験の実測値との比較を通じて、整備した評価手法の検証を実施。

経年事象 (中性子照射脆化、応力腐食割れ、減肉等)

対象：圧力バウンダリ機器 (原子炉圧力容器、一次系配管)

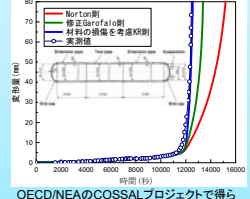
確率論的健全性評価手法の実用化

- 原子炉圧力容器及び1次系配管を対象とした確率論的破壊力学 (PFM) 解析コードPASCALシリーズ (PASCAL4, PASCAL-SP, PASCAL-NP, PASCAL-EC)
- 解析コードの信頼性向上
- 標準的解析要領の整備
- 活用事例の整備



重大事故時等における構造物の損傷評価手法の整備

原子力基礎工学研究センターや OECD/NEAとの連携の下、重大事故時に考慮すべき高温下のクリープ変形に伴う損傷評価手法を整備し、大型試験との比較による検証を実施



↑ 実用化に向けた知見 ニーズ ↓

基盤研究

- 亀裂進展、破壊評価、溶接残留応力等の評価手法
- 設計上の想定を超える破壊評価手法
- 破壊試験、強度試験
- 確率論的解析技術 等

※ 1 この成果は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託として、原子力機構が実施した平成27年度高経年化技術評価高度化事業 (原子炉一次系機器の健全性評価法の高度化) の成果です。

原子炉圧力容器の健全性評価法の高度化

研究背景

- 高経年化軽水炉において、安全上最も重要な機器の一つであるRPVでは、中性子照射脆化が進んでいることから、その健全性の確保が重要な課題である。欧米では、様々な影響因子の不確実さを考慮して合理的に確率論的数値指標 (例えば、炉心損傷に繋がるRPVの破損頻度) を評価できるPFMIに基づく健全性評価の高度化が進められている。
- 例えば米国では、加圧水型原子炉圧力容器の健全性評価上最も厳しい事象である加圧熱衝撃 (PTS) 事象に対する評価において、PFM解析により導出された関連温度に関するスクリーニング基準が規定されている。また、そのスクリーニング基準を満足しない場合には、PFM解析を用いた亀裂貫通頻度による評価が認められている。

研究内容

- PFMIに基づく確率論的健全性評価の実用化に向けて、最新知見等を踏まえたPFM解析コードPASCAL4及び標準的解析要領の整備を行う。また、国内外のベンチマーク解析等を通じてPASCAL4の信頼性向上を図る。さらに、PFM解析の活用方策を検討する。

PFM解析コードPASCAL4を整備※2

国内RPVに対する破損頻度の定量評価が可能な唯一のPFM解析コードPASCAL4を整備。

- ✓ 国内データに基づく破壊靱性評価モデルや、複雑な溶接残留応力分布に対応した高精度な応力拡大係数評価手法を実装
- ✓ 数値積分法やラテン超方格法等の効率的な計算手法を導入し、これまでの1万分の1以下の計算時間を実現

PFM解析に関する標準的解析要領を整備※2

PFM解析を実施することにより、確率論的数値指標であるRPVの破損頻度を算出できるようにするため、解析手法やデータ、その技術的根拠を取りまとめたガイドラインを整備。

- ✓ 個々の評価項目の技術的根拠を明確にし、国内RPVに対するPFM解析のための解析手法及びデータを精緻化

PASCAL4のV&Vを実施

PFM解析の実用化において不可欠なコードの検証を系統的に実施。

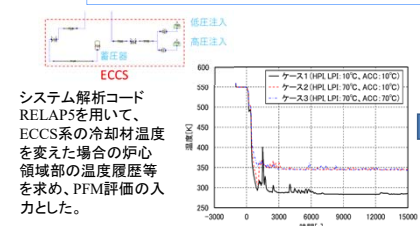
- ✓ 国内のPFMやRPVの健全性評価に関する専門家と構成された専門部会を開催し、国内のRPVを対象とした評価手法や入力データの妥当性を系統的に確認
- ✓ 国際ベンチマーク解析への参加や、国内他機関との共同研究、米国PFM解析コードとの比較解析※2を通じてPASCAL4の信頼性を確認

PFM解析の活用方策を検討※2

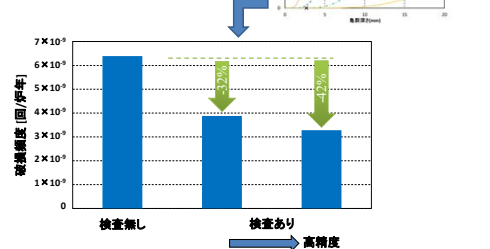
上述の標準的解析要領を踏まえ、PASCAL4を用いて、安全性向上に係る評価事例等を整備し、審査や評価等におけるPFM評価手法の有用性を示した。

- ✓ 国内の検査データを踏まえ、非破壊検査の精度の影響について感度解析を実施し、破損頻度を指標としてその影響を定量的に示した (右上図)。
- ✓ 大口径断熱材喪失事故 (LOCA) を対象に、非常用炉心冷却 (ECCS) 系の冷却材の温度を上げる対策を施す場合、高压・低压注入 (HPI/LPI) 系の温度だけを上げて効果はなく、蓄圧系の温度も上げなければ効果がないことを示した (右下図)。

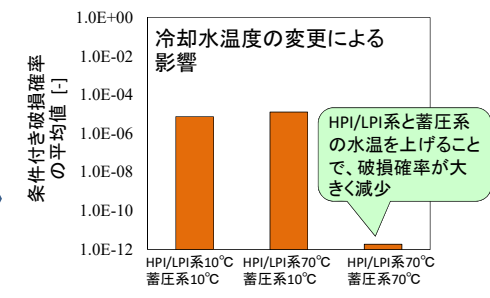
大破断断熱材喪失事故を対象に、ECCSのHPI/LPI系と蓄圧系の温度を変更した熱水力解析を行い、その結果を踏まえてPFM評価を行った。



国内の検査データを表現できると判断された米国モデルにおける「very good」と「advanced」の検査精度を想定



非破壊検査の精度の影響に関する感度解析の結果



非破壊検査の精度の影響に関する感度解析の結果

※ 2 この成果は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託として、原子力機構が実施した平成27、28、29年度高経年化技術評価高度化事業 (原子炉一次系機器の健全性評価法の高度化) の成果です。

まとめ

- PFM解析コードPASCAL4やPFM解析に関する標準的解析要領を整備し、PFMIに基づく健全性評価の活用方策の検討を通じて、安全性向上に係る評価事例等を整備し、審査や評価等におけるPFM解析の有用性を示した。