

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原子炉圧力容器 (RPV) の炉心領域部では中性子照射脆化が進んでいることを踏まえ、その健全性確保のための確率的な手法に基づく合理的な健全性評価法の整備が重要な課題である。

研究内容

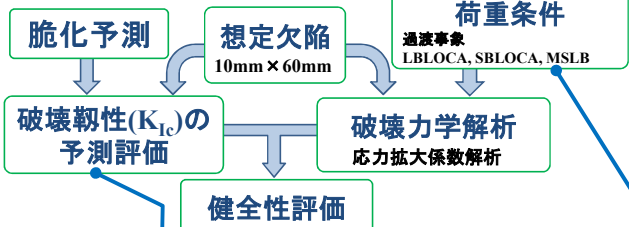
- 現行のRPVの健全性評価法の精度向上及び合理化を目的に、破壊靱性評価モデルの整備や3次元解析技術に基づく荷重条件の検討を行う。
- 合理的な評価指標値 (炉心損傷に繋がるRPVの亀裂貫通頻度等) を評価できる確率的な手法の適用性評価及び標準化の検討を行う。

現行の健全性評価法の高度化

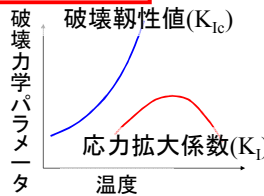
★現行のRPVの健全性評価

- 加圧水型原子炉におけるRPVの脆性破壊防止に関する健全性評価は、主として加圧熱衝撃の発生を想定して実施。
- 容器内面に欠陥を想定し、加圧熱衝撃時の応力分布及び温度分布を基に、脆性亀裂が発生するかどうかを決定論的手法により判定。

＜現行の健全性評価の流れ＞

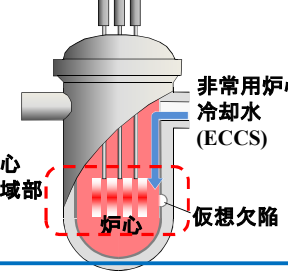


決定論的手法



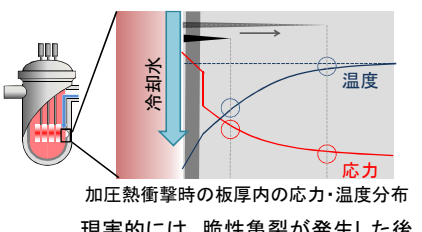
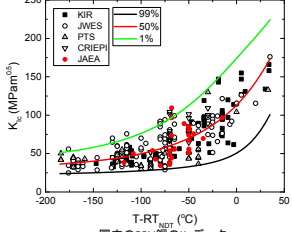
(簡易評価)

加圧熱衝撃事象の発生時、 K_1 が K_{1c} を超えると、RPVが非延性破壊すると判定



■破壊靱性評価モデルの整備

現行の健全性評価(簡易評価)では、脆性亀裂の発生のみを考慮。破壊靱性(K_{1c})及び亀裂伝播停止靱性(K_{1a})は健全性評価において重要な影響因子の一つであり、現実的な評価のためにはそのばらつきを含む評価モデルの整備が重要。



加圧熱衝撃時の板厚内の応力・温度分布

現実的には、脆性亀裂が発生した後、応力が低く温度が高い領域で亀裂の伝播が停止する可能性がある。

- 国内RPV鋼に対する破壊靱性データを基に、 K_{1c} 及び K_{1a} の評価モデルを提案。
- ⇒ 確率的破壊力学解析コードPASCAL3*に評価モデルを導入。

■3次元解析技術に基づく荷重条件の評価・検討

現行の荷重条件の評価は1次元熱水力解析の結果を用いて行われている。

熱水力解析

ECCS水注入後の挙動を、3次元熱流動解析により評価するモデルを整備

溶接残留応力解析

原子炉圧力容器クラッド部の溶接残留応力を評価する手法を整備

加圧熱衝撃時の熱応力解析

ECCS水の注入とクラッド部の残留応力を考慮した詳細解析により、加圧熱衝撃時のRPVにおける応力分布を評価

- 詳細な3次元熱水力・熱応力解析を実施し、応力の時間的・空間的分布を評価。
- ⇒ 現行の健全性評価法の保守性を検討。
- ・ 確率的破壊力学解析コードPASCAL3*への適用を検討。

*PASCAL3 (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR ver. 3) RPV炉心領域部を対象とした確率的破壊力学解析コード

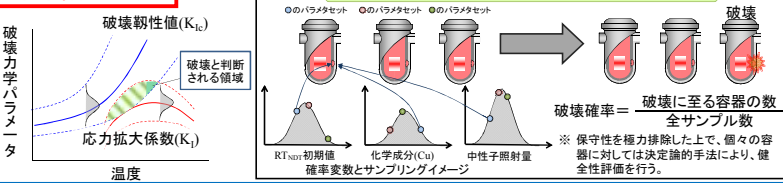
確率的な手法の適用性評価及び標準化の検討

★確率的な手法による健全性評価

- 確率的破壊力学(PFM)に基づき、中性子照射脆化や破壊靱性等のばらつきを考慮して合理的に評価指標値 (炉心損傷に繋がるRPVの亀裂貫通頻度等) を評価。

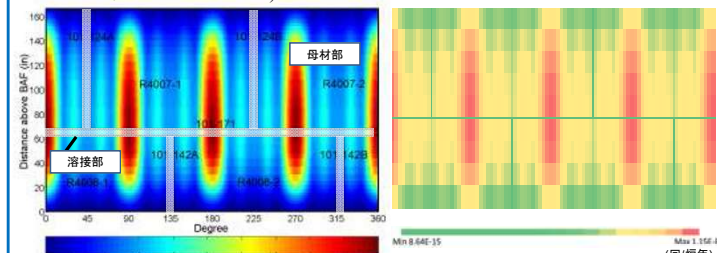
確率的な手法

モンテカルロ法による確率的破壊力学の計算方法のイメージ



■確率的な手法の適用性に関する調査

PASCAL3を用いてRPVの亀裂貫通頻度(RPVの破壊確率に加圧熱衝撃事象の発生頻度を乗じたもの)を評価するための適用事例の整備を進めた。



原子炉圧力容器内表面の相対的な中性子照射量分布
原子炉圧力容器の領域毎の亀裂貫通頻度分布

- 母材部・溶接部の違い、中性子照射量分布を考慮したPASCAL3による解析を通じて、炉心領域部の亀裂貫通頻度分布を評価。
- ⇒ 母材部において中性子照射量の高い領域の亀裂貫通頻度が高くなる傾向を確認。

■確率的な手法の標準化に関する調査

本文	解説
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 一般事項 ➢ PTS状態遷移曲線の設定 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 想定欠陥 種類、方向、寸法、密度、位置を考慮 ➢ 破壊靱性遷移曲線等の設定 ➢ 破壊頻度の計算 ➢ 解析手法 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 解析コードの信頼性確認方法を附属書に示す。 ➢ 参考文献 ➢ 附属書「解析コードの信頼性確認方法」 ➢ 【添付資料】標準的解析手法及び国内モデルデータを用いたPASCALによる解析事例 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 一般事項 ➢ PTS状態遷移曲線の設定 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 想定欠陥 米国欠陥分布の説明 ➢ 破壊靱性遷移曲線等の設定 ➢ 破壊頻度の計算 <ul style="list-style-type: none"> ➢ PASCALを用いてTWCFを計算した事例を添付資料に示す。 ➢ 解析手法 ➢ 附属書解説 <ul style="list-style-type: none"> (PASCALの信頼性確認事例を含む)

- 確率的な手法の標準化を実現するために、RPVを対象としたPFM評価に係る標準的解析要領(ガイドライン)を整備
- PASCAL3の信頼性確認や、PFM評価に用いる手法・データの整備を実施。

まとめ

- 現行のRPVに対する健全性評価法の高度化に向けて破壊靱性評価モデルの整備及び現実的な荷重条件の検討等を進めた。
- 確率的な手法の適用性評価及び標準化の検討を進めた。

※ 本報告は、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26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)の成果の一部を含みます。

原子炉压力容器の健全性評価法の高度化

安全研究・防災支援部門
安全研究センター 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

1. 研究背景と概要

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原子炉压力容器（RPV）の炉心領域部では中性子照射脆化が進んでいることから、その健全性確保のための確率論的手法に基づく合理的な健全性評価法の整備が重要な課題である。そこで、現行の RPV の健全性評価法の精度向上及び合理化を目的に、破壊靱性評価モデルの整備や 3 次元解析技術に基づく荷重条件の検討を行う。また、合理的な評価指標値（炉心損傷に繋がる RPV の亀裂貫通頻度等）を評価できる確率論的手法の適用性評価と標準化の検討を行う。

2. 研究内容

現行規格における RPV に対する健全性評価法では、決定論的手法に基づき、脆性亀裂の発生が生じないことが評価されるが、現実的には、仮に脆性亀裂が発生したとしても、亀裂伝播が停止する可能性がある。このことを踏まえ、合理的な健全性評価を行うため、国内 RPV 鋼に対する破壊靱性及び亀裂伝播停止靱性データを用いて、破壊靱性評価モデルを整備し、JAEA で開発を進めている確率論的破壊力学解析コード PASCAL3 に導入した。また、現行の荷重条件の評価では約 20 年前に策定された 1 次元熱水力学解析による温度や圧力履歴が用いられていることから、解析技術の進歩や計算機性能の向上を踏まえて、冷却水の 3 次元温度分布や RPV クラッド部の溶接残留応力を考慮した荷重条件の詳細解析を行い、応力の時間的・空間的分布を評価し、現行の健全性評価法の保守性等を検討した。

確率論的手法の適用性評価及び標準化の検討においては、確率論的手法の標準化を実現するために、RPV を対象とした PFM 評価に係る標準的解析要領（ガイドライン）等を整備するとともに、PASCAL3 の信頼性確認や PFM 評価に用いる手法・データの整備を進めた。また、PASCAL3 を用いて RPV の亀裂貫通頻度を評価するための適用事例の整備を進めた。

3. まとめ

現行の RPV 健全性評価法の高度化のため、破壊靱性評価モデル（破壊靱性及び亀裂伝播停止靱性）を整備するとともに、3 次元解析技術に基づき詳細な荷重条件の評価等を行った。また、確率論的手法の適用性評価及び標準化の検討に関して、炉心損傷に繋がる RPV の亀裂貫通頻度を評価するための適用事例の整備を進めるとともに、PFM 評価に係る標準的解析要領（ガイドライン）等を整備した。