



令和4年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

材料・構造安全研究ディビジョンの活動 —経年劣化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—

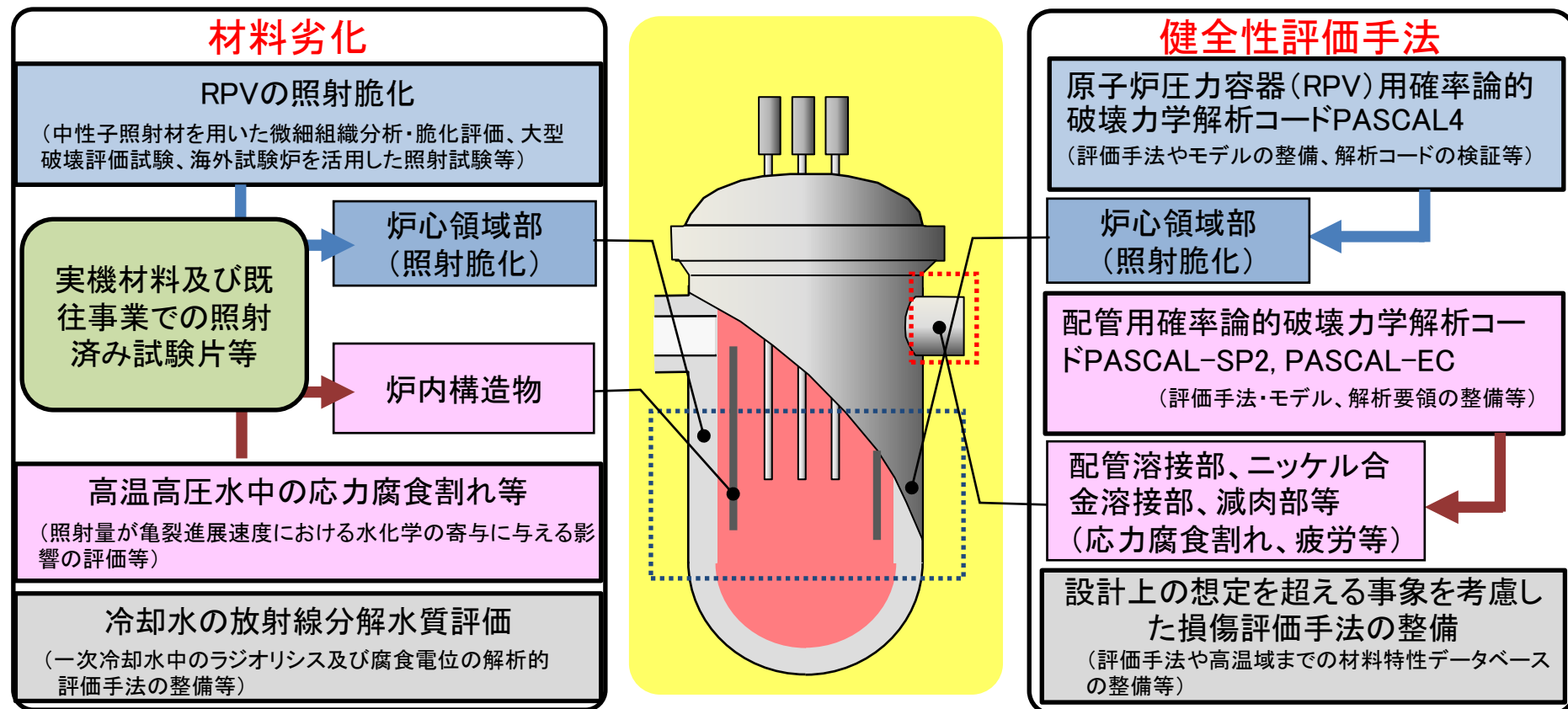
令和4年11月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
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

本研究(の一部)は、原子力規制庁からの受託事業「原子力施設等防災対策等委託費(軽水炉照射材料健全性評価研究)事業」及び「原子力施設等防災対策等委託費(高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全評価手法の高度化)事業」の成果である。

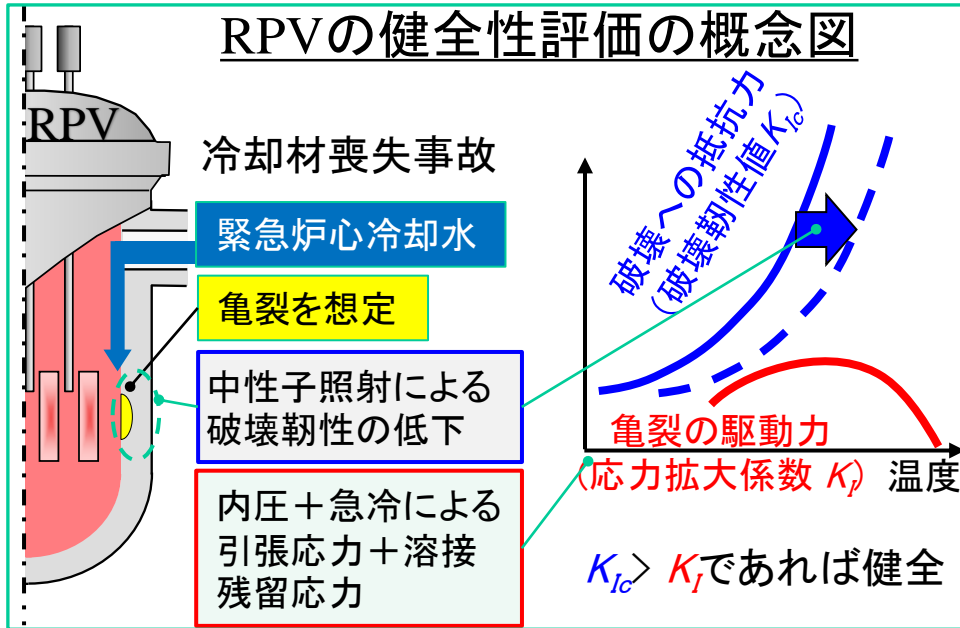
全体像

- 原子炉機器における放射線等の使用環境を踏まえ、実機材料等を活用した材料劣化評価研究を推進
- 確率論的健全性評価手法における評価対象や経年劣化事象の拡充と実用化、リスク情報の活用に資する研究、設計基準を超える事象における構造強度評価手法の高度化



中性子照射脆化

RPVの健全性評価の概念図



近年の代表的な成果とその活用

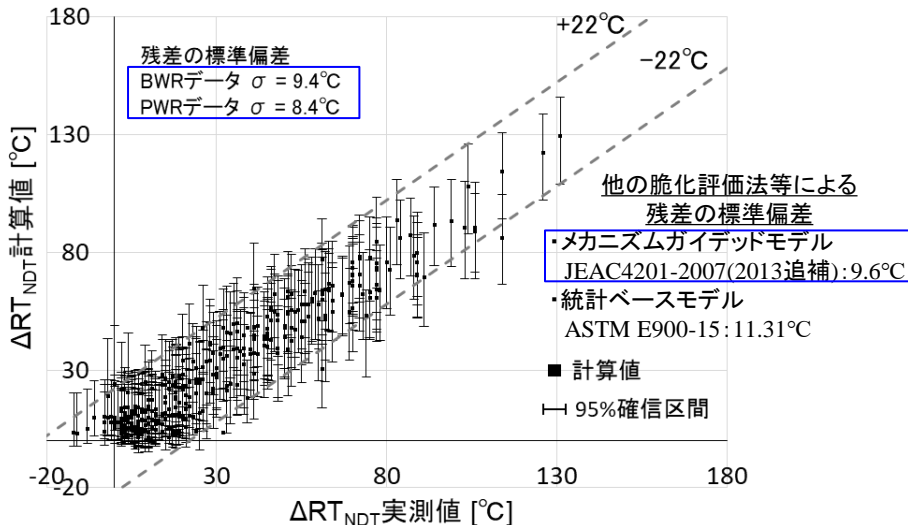
- 高照射量まで照射された監視試験片等を対象に、粒界のリン(P)偏析量を測定し、P偏析量への照射条件等の影響を調査することにより、高照射量領域においても粒界脆化が顕在化する可能性が低いことを明らかにした。

現行の脆化評価法において粒界脆化を考慮していないことの妥当性を示した。
→RPVの脆化評価に関する学協会規格の技術評価に活用できる。

- 脆化評価法の保守性等の確認を目的とし、機械学習に基づき多次元のデータの確率分布の中央値と確信区間を評価可能な手法であるノンパラメトリックベイズ(BNP)法に基づく新たな脆化評価法を整備した。

BNP法による評価は従来の脆化評価法と同等の精度を有すること、また従来評価法のマージンが概ね保守的に設定されていること等を示した(左下図)。

→RPVの脆化評価に関する学協会規格の技術評価に活用される見込み。



BNP法による関連温度移行量(ΔRT_{NDT})計算値と実測値の関係

破壊靱性評価

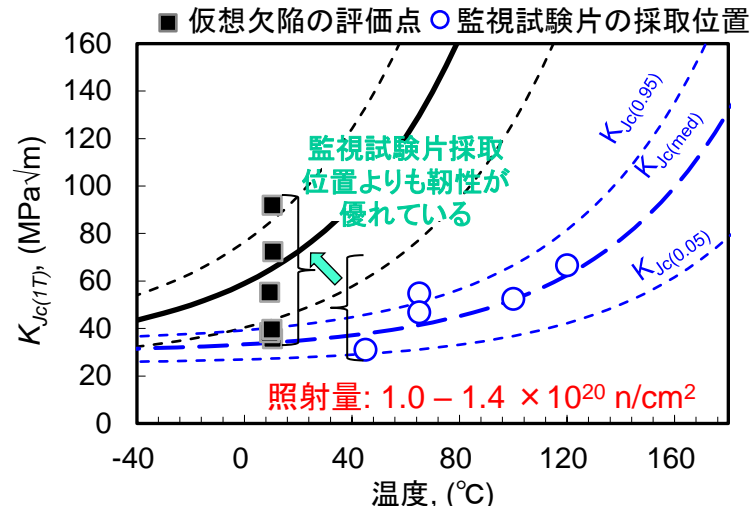
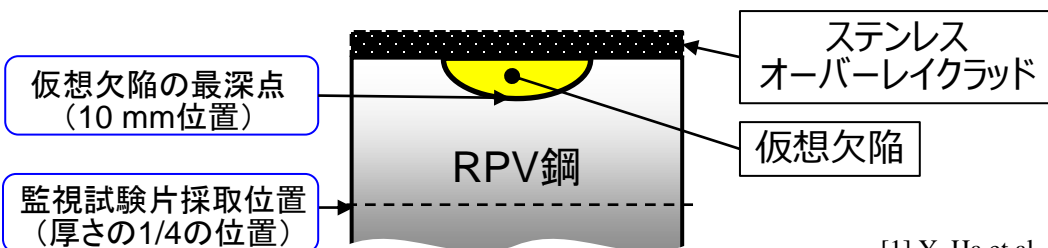
近年の代表的な成果とその活用

- RPV鋼の中性子照射材に対して、監視試験片の採取位置（内表面から厚さの1/4の位置）の破壊靱性値が、仮想欠陥評価点（内表面から10 mm）のそれに比べて低いことを確認した（右上図）。

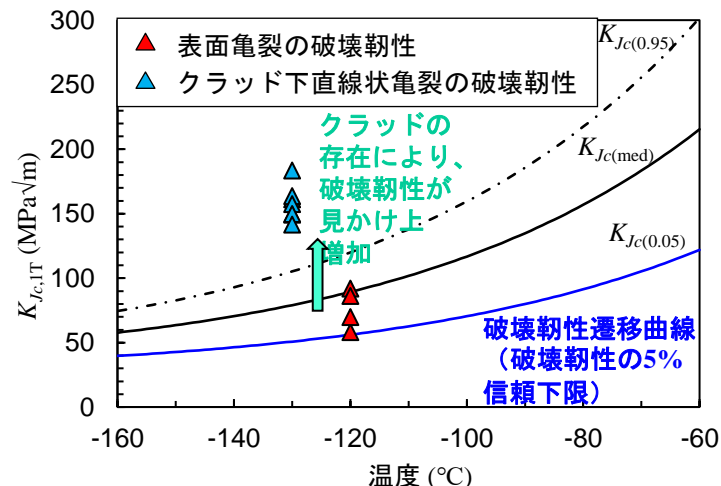
内表面から厚さの1/4の位置から監視試験片を採取する現行手法の保守性を確認した。
→RPVの破壊靱性評価に関する学協会規格の技術評価に活用できる。

- 最新規格で取り入れられたRPVの構造健全性評価において想定されているクラッド下亀裂に対し、その破壊靱性が、従来規格で用いられた表面亀裂のそれに比べて見かけ上高くなることを確認した（右下図）。

破壊靱性遷移曲線がクラッド下亀裂の破壊靱性値に対しても十分保守的であることを確認した。
→RPVの破壊靱性評価に関する学協会規格の技術評価に活用できる。



高照射量領域の中性子照射材における仮想欠陥評価点と監視試験片採取位置の破壊靱性^[1]



クラッド下直線状亀裂を付与した試験体の破壊靱性試験結果^[2]

[1] Y. Ha et al., PVP 2021-61892.

[2] M. Shimodaira et al., Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.144, 011304, (2022).

確率論的破壊力学(PFM)解析 (1/2)

✓ RPVを対象としたPFM解析コード:PASCAL5 (公開手続き中)

RPVの中性子照射脆化等に係る最新知見を反映し、様々な破壊力学影響因子の不確かさを考慮して、RPVの破損頻度等を求める解析コードの高度化を進めている。

近年の代表的な成果

コード整備

- PWRのRPVに加えBWRのRPVも対象として評価できるように、解析機能を拡充
- BNP法に基づく脆化評価法を導入する等、材料劣化評価に係る機能を高度化

解析要領の整備

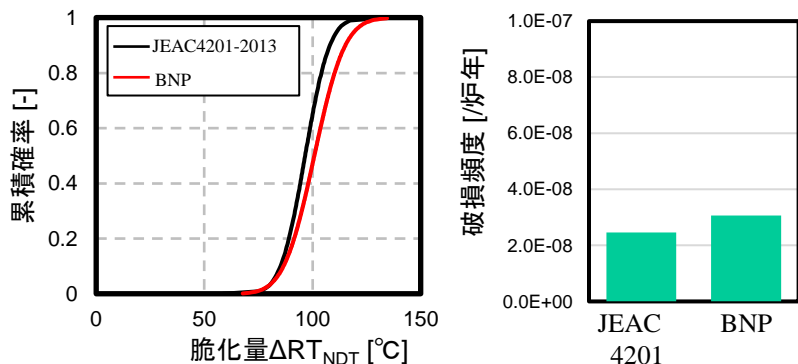
- RPVのPFM解析に関する解析手順、解析手法・モデルや技術的根拠等を取りまとめた世界初の標準的解析要領をBWRのRPVを対象に拡充

コード検証

- 国内の産学9機関が参加する検討会を継続的に主催し、コードを検証
- 米国NRCとのベンチマーク解析、欧州における高経年化したプラントに対する先進的加圧熱衝撃解析プロジェクト(APAL)に参画

解析事例の整備

- 国内PWRモデルプラントを対象に、BNP法と現行の脆化評価法による脆化量の確率分布が破損頻度に及ぼす影響を評価(左下図)
- 国内BWRモデルプラントを対象に、非破壊検査の影響評価等の活用事例を整備



PWRモデルプラントを対象としたBNP法と現行の脆化評価法による脆化量の確率分布及び破損頻度の比較

PFM解析コード、標準的解析要領、解析事例の整備を通じて、非破壊検査の影響を定量的に示す等、確率論的健全性評価におけるPFMの有用性を明確にした。

確率論的破壊力学(PFM)解析 (2/2)

- ✓ 原子炉配管を対象とした確率論的解析コード:PASCAL-SP2、PASCAL-EC
 経年劣化事象を考慮した原子炉配管の様々な破壊力学影響因子の不確かさを考慮して、経年配管の破損確率を求める解析コードの高度化を進めている。

近年の代表的な成果

コード整備

- 地震を起因とした破損確率の算出に必要な、地震時亀裂進展評価手法等を整備し、解析コードに導入
- PWRの蒸気発生器(SG)伝熱管を対象に、減肉や亀裂を有する管の破裂評価手法を改良し、解析コードに導入可能な手法を整備

コード検証

- 米国NRCとのベンチマーク解析を実施
- OECD/NEAのベンチマークプロジェクトに参画

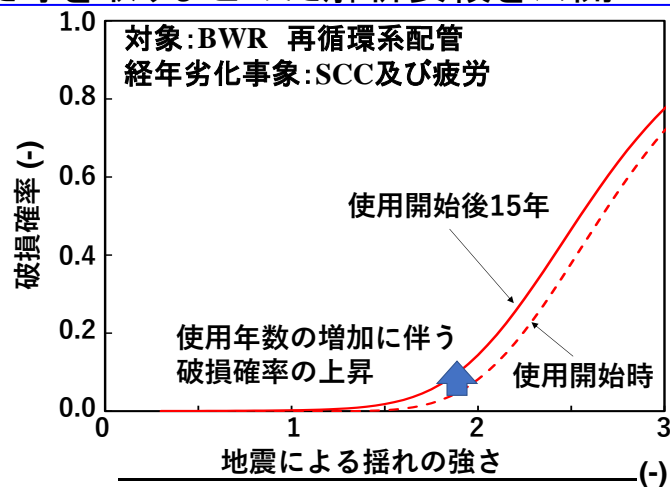
解析要領の整備

- 配管の地震による破損を考慮したPFM解析に関する解析手順、解析手法・モデルや技術的根拠等を取りまとめた解析要領を公開

解析事例の整備

- 原子炉配管を対象に、使用年数の増加や地震による揺れの増大に伴う破損確率の変化を定量的に評価(右図)
- SG伝熱管を対象に検査で確認された減肉や亀裂の寸法が破裂確率に及ぼす影響を評価

原子炉配管を対象に、経年劣化事象や地震の大きさ等が破損確率に及ぼす影響を定量的に示す等、リスク情報活用等におけるPFMの有用性を示した。



設計上想定される地震による揺れの強さと経年劣化事象と地震を考慮した破損確率評価例

[1] 山口義仁ほか, 経年配管を対象とした地震フラジリティ評価要領(受託研究), JAEA-Research 2020-017, 2021, 80p.

[2] 山口義仁ほか, 原子炉配管に対する確率論的破壊力学解析コードPASCAL-SP2の使用手引き及び解析手法(受託研究), JAEA-Data/Code 2020-021, 2021, 176p.

応力腐食割れ(SCC)・水化学

背景・目的

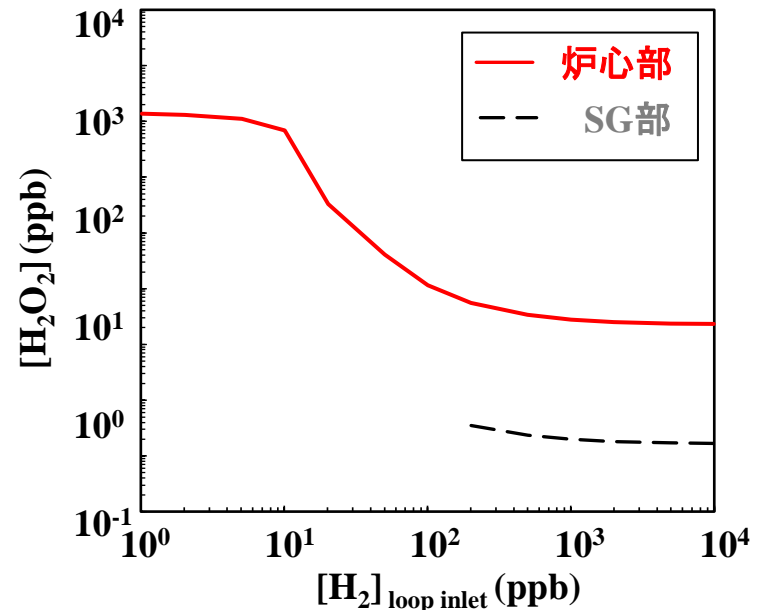
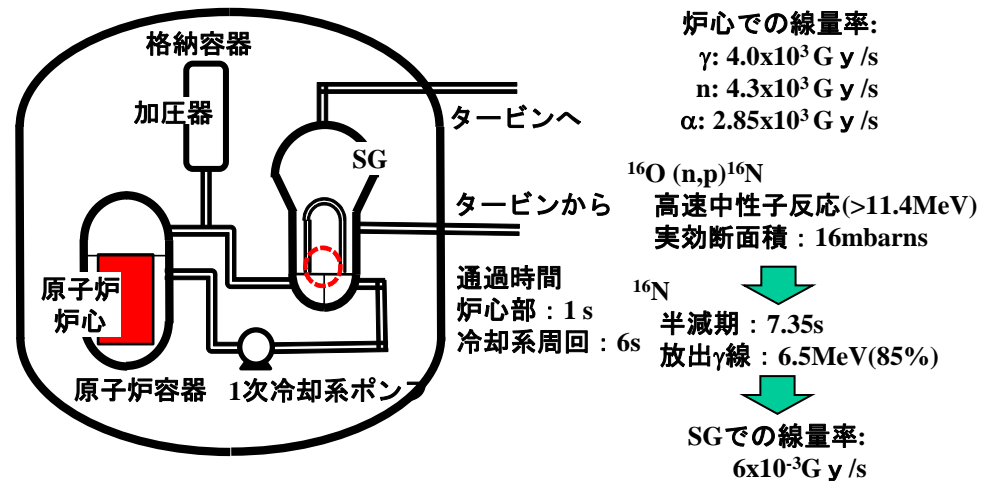
PWR一次系冷却水環境中でのNi合金のSCC進展速度が国内の溶存水素濃度管理幅で極大値を示すことが知られており、溶存水素濃度の最適化が議論されている。

SCCの発生・進展に影響を与える主要な環境因子である腐食電位(ECP)の点から溶存水素濃度の影響を評価するため、ECP解析コードを整備する。

近年の代表的な成果とその活用

JAEAにおいて整備したBWR及びPWR両方の一次系冷却水環境を評価可能な統一的なECP解析コードに対して、最新のラジオリシス研究成果の反映、Ni合金を対象としたECP解析手法の整備を行うとともに、仮想的なPWR一次系冷却水環境に対する水素添加量とECPの関係を推定した(右図)。

個別のPWRプラントに対して本解析コードを適用することによりPWR一次系冷却水における最適溶存水素濃度の妥当性の評価に活用できる。



仮想的なPWR一次系(上)、及び炉心と蒸気発生器(SG)において予測されたECP値とH₂添加量との関係(下) 7