

## はじめに

- 安全上重要な機器である原子炉压力容器(RPV)に関して、炉心領域部における中性子照射脆化の指標である関連温度の予測法や加圧熱衝撃(PTS)に対する健全性評価法、炉心領域部以外で顕在化しているPWR一次系炉水環境中応力腐食割れ(PWSCC)等の評価について、最新の知見や解析技術に基づき高度化を図ることが重要である。

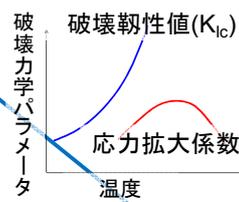
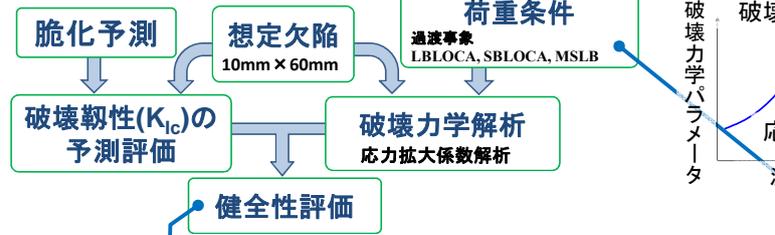
## 研究目的と内容

- 現行の健全性評価法について、原子炉容器全体を対象とした健全性評価を可能にすることを旨として最新の有限要素解析や確率論的破壊力解析技術に基づき、原子炉压力容器における炉心領域部及び炉心領域部以外の部位の劣化事象に関する評価法を構築する。

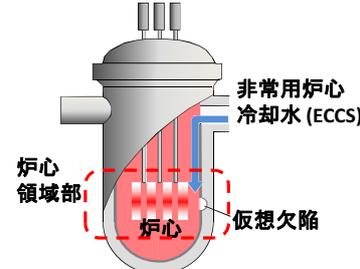
## 炉心領域部の健全性評価法高度化に関する研究

- ★ 現行の規制基準における原子炉压力容器の中性子照射脆化を考慮した健全性評価法 → 日本電気協会規程に準拠(JEAC 4201及びJEAC4206)
- 加圧水型原子炉における原子炉压力容器(RPV)の非延性破壊防止に関する健全性評価は、主としてPTSの発生を想定して実施。
- 容器内面に半楕円の表面欠陥を想定し、PTS時の応力分布及び温度分布を基に、欠陥が脆性的に進展を開始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>

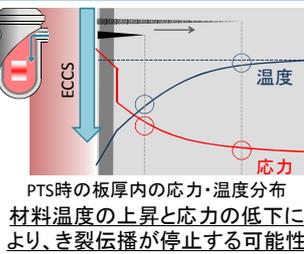
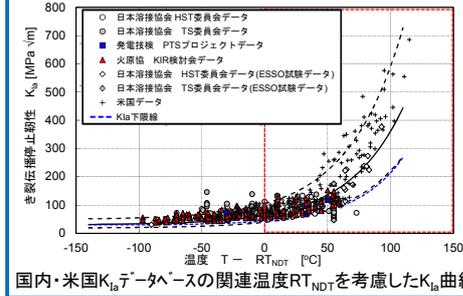


PTS発生時、 $K_I$ が $K_{Ic}$ を超えると、RPVが非延性破壊すると判定



### ■ 耐圧機能喪失評価に関する検討

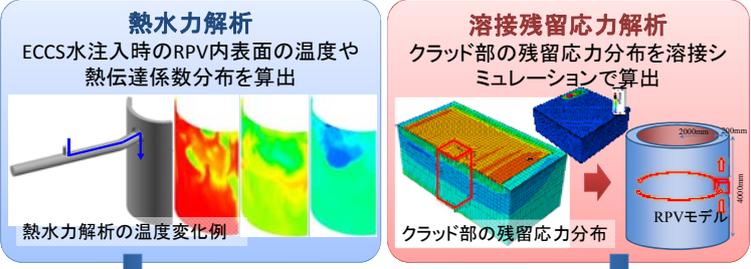
非延性破壊発生のみ注目した現行の評価法を高度化し、現実に合わせてき裂伝播停止靱性( $K_{Ia}$ )を考慮した評価法を検討。



PTS時の板厚内の応力・温度分布  
材料温度の上昇と応力の低下により、き裂伝播が停止する可能性

- 国内原子炉压力容器鋼材に適切な $K_{Ia}$ カーブとその不確かさを評価。  
⇒ 確率論的評価に適用

### ■ 3次元解析技術に基づく荷重条件の検討



PTSを模擬した熱応力解析  
RPV中の現実的な応力分布を評価

- 現行の健全性評価で用いられるPTS時の応力データと比較。  
⇒ 現行手法で想定される荷重条件の妥当性を確認  
⇒ より現実的な評価が可能となる荷重条件を検討

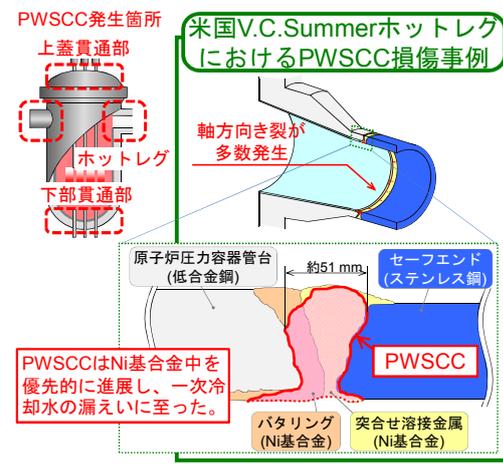
原子炉規制庁からの受託事業「高経年化技術評価高度化事業(原子炉压力容器の健全性評価方法の高度化)」の成果を含む。

### ■ 確率論的評価法の検討

- 確率論的破壊力学(PFM)解析コードを用いた原子炉压力容器の健全性評価法の標準化に向け、関連する専門家の意見等を踏まえて、PFM解析の標準手法に関する指針案の検討を進めている。
- RPVの健全性評価に関する最新知見に基づいて、PFM解析コードPASCAL3の高度化を進めている。

## 炉心領域部以外の健全性評価法高度化に関する研究

健全性評価で重要なパラメータのばらつきを適切に考慮して破損確率を算出するため、PASCAL-NPを開発。異材・複雑形状溶接部であるセーフエンドにおけるPWSCCの確率論的評価を実施。



### PASCAL-NPによる漏えい確率解析

#### 損傷事例を模擬した軸方向溶接金属内き裂発生・進展解析

#### き裂進展モデル

低合金鋼 (B1点): き裂進展なし  
ステンレス鋼 (B2点): Ni基合金中の進展速度の1/100程度

溶接残留応力がき裂進展の駆動力

#### 考慮した確率変数

✓ き裂発生までの潜伏期間  $t_i$

$$t_i = \frac{\alpha_i \times t_{i0}}{i_0 \times i_\sigma \times i_m}$$

$t_i$ は温度( $i_0$ )、応力( $i_\sigma$ )及び材料の耐食性( $i_m$ )の影響を受ける  
 $t_i$ 算出式のばらつき( $\alpha_i$ )を右図のように考慮

✓ PWSCC き裂進展速度線図

$$\frac{da}{dt} = \alpha_r \times (K_I - K_{Ith})^\beta$$

き裂進展速度を応力拡大係数 $K_I$ の関数として求める。  
き裂進展速度のばらつき( $\alpha_r$ )を考慮

#### 解析結果

解析結果 (1/3 ホットレグ) (33.3%)  
き裂発生確率 (0.19%)

(漏えい確率)  
解析結果と検査結果は概ね一致

- PWSCCの発生・進展評価や漏えい確率算出に有用であることを確認

1) 宇田川誠、勝山仁哉、鬼沢邦雄: Ni基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学解析コードPASCAL-NPの使用手引き, JAEA-Data/Code2013-013, (2013).

## まとめ

- 確率論的評価手法の規制基準への反映のための実用化を目指す。
- 現行の原子炉压力容器に対する健全性評価法の妥当性確認に必要な技術的根拠を最新知見に基づき整備する。

## 原子炉压力容器の健全性評価方法の高度化に関する研究

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 構造健全性評価研究グループ

安全上重要な機器である原子炉压力容器（RPV）に関して、炉心領域部における中性子照射脆化の指標である関連温度の予測法や加圧熱衝撃（PTS）に対する健全性評価法、炉心領域部以外で顕在化している PWR 一次系炉水環境中応力腐食割れ（PWSCC）等の評価について、最新の有限要素解析や確率論的破壊力解析技術に基づき高度化を図っている。

### ■ 炉心領域部の健全性評価法高度化に関する研究

〔荷重条件の検討〕冷却材喪失事故時には、非常用炉心冷却系の作動し、低温の冷却水が一次系内に注入されるため、圧力がかかったまま RPV が冷却され RPV 内表面に引張の熱応力が生じる加圧熱衝撃（PTS）が発生する。PTS 時のより現実的な健全性評価に向けて、RPV 製造時に生じる残留応力解析とともに、荷重条件を設定するための熱水力解析等の高度化が重要である。3次元モデルを用いた熱水力解析と溶接残留応力解析手法を整備するとともに、これら解析結果を基に熱応力解析を行っている。

〔耐圧機能喪失評価に関する検討〕現行の RPV の健全性評価は、PTS 時の非延性破壊の発生のみを対象としている。しかし、実際には鋼材内部は高温のため高い靱性が保たれ、かつ熱応力も低いため、き裂進展は停止する可能性がある。したがって、耐圧機能の喪失に直接結び付き裂の貫通には裕度がある。そこで、き裂が板厚を貫通する状態に至るまでのき裂伝播停止を考慮した破壊力学的評価を可能にするため、国内 RPV 鋼材のき裂伝播停止靱性に関するデータの整理を行っている。

〔確率論的評価法の検討〕機器・構造物の健全性評価に対して確率論的手法の適用が進むことを念頭に、確率論的破壊力学（PFM）解析技術に関する課題抽出、及び国内規制基準への PFM 解析の適用性検討を行っている。また、原子炉压力容器の PFM 解析コード PASCAL3 に対する計算モデルの検証とコードの妥当性確認のための要領を検討し、標準手法に向けた指針案の策定を行っている。

### ■ 炉心領域部以外の健全性評価法高度化に関する研究

原子炉容器の上蓋貫通部、下部貫通部、ホットレグ等で顕在化している PWSCC に関して破損確率を評価する PFM 解析コード PASCAL-NP の開発を進めている。これまで、米国 V.C.Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例を対象に確率論的評価を実施した。

# 巨大地震による配管のき裂進展を考慮した確率論的評価手法の研究

原子炉安全研究ユニット  
構造健全性評価研究グループ

## はじめに

- 安全上重要な機器である圧力バウンダリの配管等においては、検査等で欠陥が見付った場合、運転荷重や地震に伴う繰返し荷重により、供用期間中にき裂が進展して壊れないか健全性評価が行われる。
- 近年、低頻度であっても巨大な地震が起きることを想定して、配管の構造健全性を評価することが重要課題となっている。従来き裂進展評価に用いられてきた手法は、過大な地震荷重のような大きくかつ不規則な振幅の繰返し荷重には対応していないため、新たな手法を提案する必要がある。
- 本研究では、過大な地震荷重に対応したき裂進展評価手法を提案する。また、耐震裕度の定量評価に有用な確率論的破壊力学解析コードに、提案したき裂進展評価手法を導入して得られた成果について報告する。

## 過大な地震荷重下におけるき裂進展評価手法の提案

### 大きな地震によるき裂進展の問題点

大きな振幅の荷重によるき裂進展評価には、従来の応力拡大係数(弾性域のみ)を用いることができない

過大な引張・圧縮荷重を与えた場合、その後の疲労き裂進展が遅延・加速する

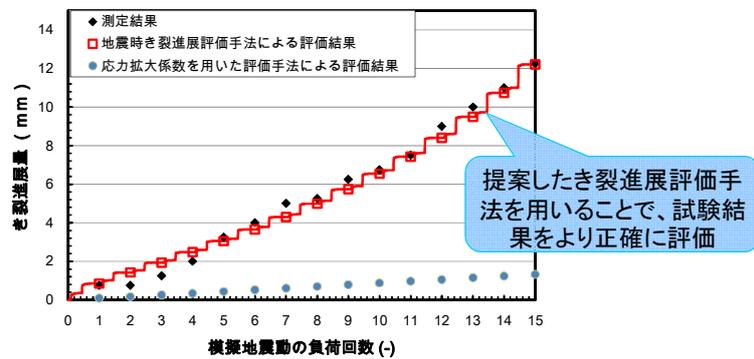
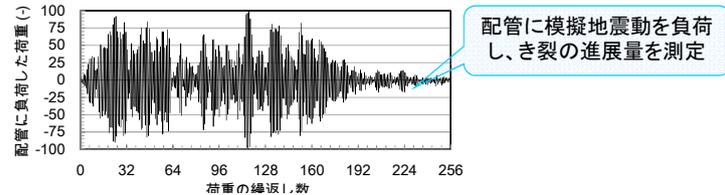
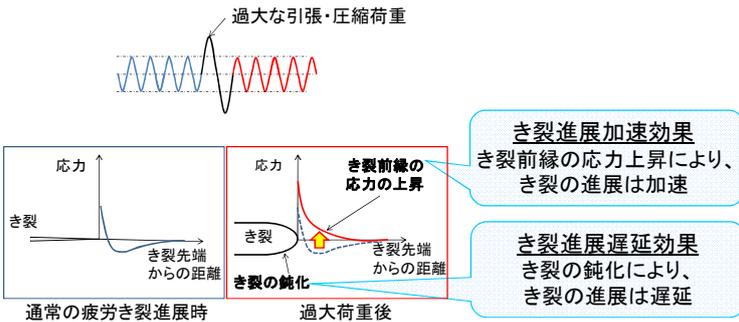
### 実験及び解析から明らかになったこと

弾塑性破壊力学パラメータ積分値を使用することで、大きな振幅でのき裂進展評価が可能

過大な引張荷重によりき裂が鈍化  
過大な圧縮荷重によりき裂前縁の応力が上昇

## 過大荷重によるき裂前縁の応力の変化及びき裂鈍化をモデル化し、 $\Delta I$ を用いたき裂進展評価式を構築

### 過大な引張・圧縮荷重前後におけるき裂の状態

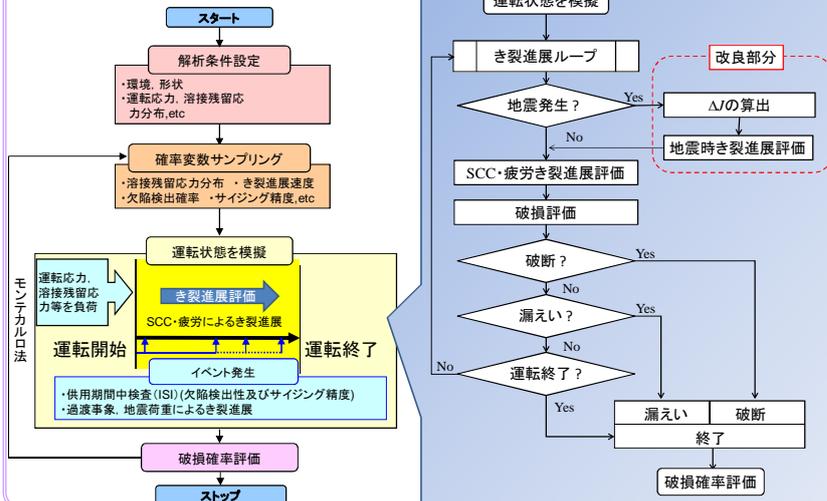


- ✓ き裂先端の大きな変形を伴う不規則な繰返し荷重を考慮して、不規則な地震荷重を1波ずつ忠実にき裂進展量を評価することで、従来の手法に比べ正確に評価可能

山口義仁ほか、地震荷重下における配管のき裂進展評価手法の提案、日本機械学会論文集(A編)、Vol.79、No.802、2013、pp.730-734

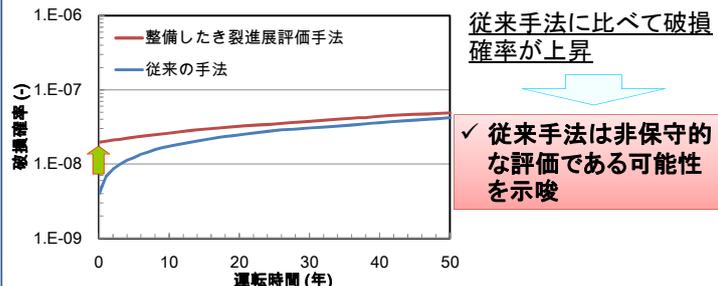
## 巨大地震を考慮した確率論的破壊力学解析コードの整備

### PASCAL-SPのフローチャート



### PASCAL-SP

原子炉配管溶接部におけるき裂進展を対象とし、き裂進展速度、供用中検査等のばらつきを考慮して、破損確率を評価する。(JAEA Data/Code 2009-025)



## まとめ

- 巨大地震に対応したき裂進展評価手法と確率論的破壊力学解析コードPASCAL-SPを整備した。
- 原子力施設機器類の健全性維持や高経年化対策に関する規制基準の高度化に貢献する。

## 巨大地震による配管のき裂進展を考慮した確率論的評価手法の研究

原子炉安全研究ユニット  
構造健全性評価研究グループ

原子炉配管に検査等で欠陥が見付った場合、運転荷重や地震に伴う繰返し荷重により、供用期間中にき裂が進展して壊れないかの評価が行われる。通常、振幅の小さい弾性域の評価に適したパラメータである応力拡大係数範囲( $\Delta K$ )を用い、地震荷重を一定振幅の繰返し荷重に置き換えて評価が行われる。しかし、非常に大きな地震では、 $\Delta K$ の適用範囲を超え、塑性域に達する荷重が加わることなどに対応したき裂進展評価手法が必要である。そこで、大きくかつ不規則な振幅の繰返し荷重を受ける場合のき裂進展評価手法を提案し、耐震裕度の定量評価に有用な確率論的破壊力学(PFM)解析コードに導入した。

まず、大きくかつ一定振幅の繰返し荷重による疲労き裂進展速度が、弾塑性破壊力学パラメータである  $J$  積分値の 1 サイクル当たりの変化量( $\Delta J$ ) を用いた方法で評価できることを実験で確認した。次に、 $\Delta J$ を用いる手法を不規則な振幅の繰返し荷重によるき裂進展に対応させるため、一定振幅の繰返し荷重に 1 回の過大な引張・圧縮荷重を負荷するき裂進展試験や有限要素解析を通じて、過大荷重によるき裂の鈍化及びき裂前縁の応力の変化に伴うき裂進展速度の変化を考慮したき裂進展評価手法を提案した。

そして、我々が開発を進めている PFM 解析コード PASCAL-SP に、提案したき裂進展評価手法を導入し、巨大な地震の発生が配管破損確率に及ぼす影響を評価した。