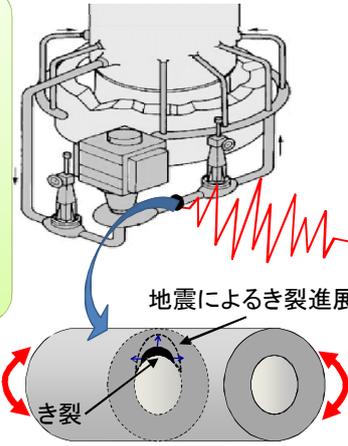


原子炉配管を対象とした地震時き裂進展評価手法に関する研究

はじめに

- 国内の軽水炉プラントの供用年数の増加に伴い、配管等においてき裂の存在が報告されている。
- また、これらは、近年従来の設計基準地震動を超えるような大地震を経験しているため、設備の地震時構造健全性を評価する必要があるとともに、プラントの外部事象に係るリスク評価のため、設計基準地震動を超えるような大きな地震を考慮する必要がある。
- 以上を踏まえ、地震時構造健全性評価や外部事象に係るリスク評価に資するため、き裂の存在及び大きな地震動による応答荷重を対象としたき裂進展評価手法を確立することが重要である。
- 本研究では、代表的軽水炉配管であるステンレス鋼や炭素鋼配管を対象に、従来の評価手法では対応できない大きな地震動による弾性域を超えるような応答荷重を対象としたき裂進展評価手法を構築し、配管試験体を用いたき裂進展試験によりその妥当性を確認する。



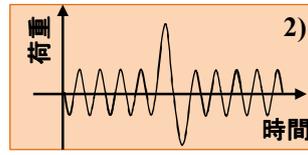
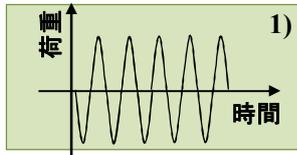
従来の評価手法における課題

- 1) 弾性域の荷重にのみ適用可能
- 2) 波形を一定振幅に置き換えて評価

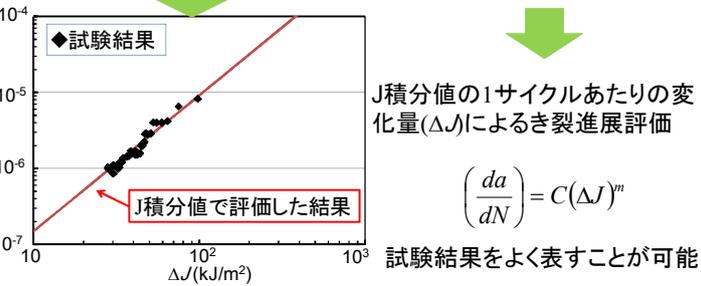
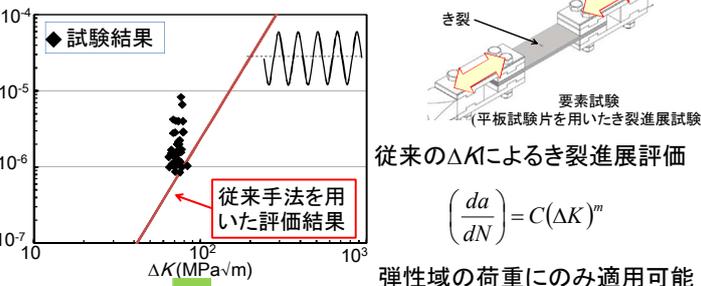
地震時構造健全性評価では、塑性域とランダムな波形の応答荷重を考慮する必要があり、従来の評価手法は適用できない。

塑性域の応答荷重を対象とした評価手法の構築

1) 塑性域の荷重と2) ランダムな波形を考慮し、設計基準地震動を超える地震動に対応できる評価手法を構築

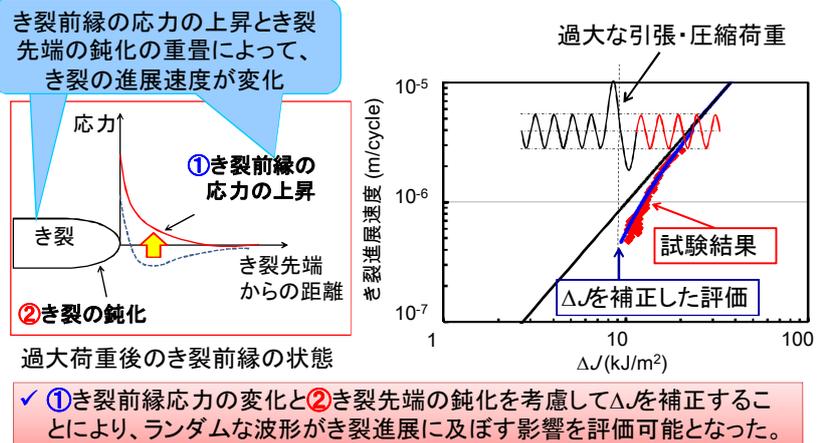


塑性域の荷重に対応したパラメータ(ΔJ)の使用



✓ ΔJを用いたき裂進展評価が有効であることを確認した。

ランダムな波形がき裂進展に及ぼす影響の評価

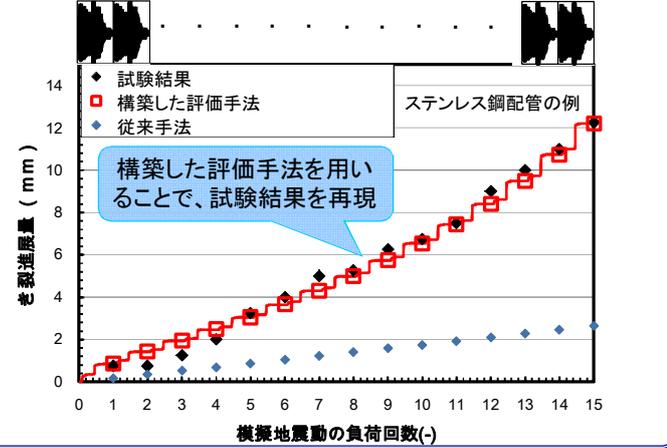
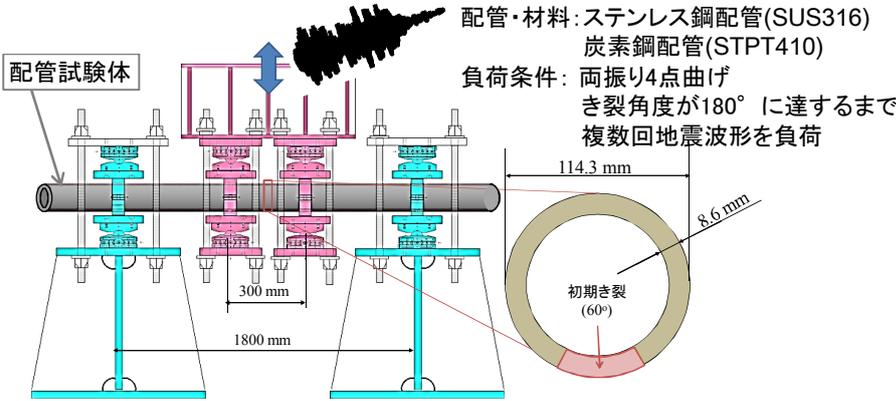


評価手法

$$\frac{da}{dN} = C' \left[\frac{\beta_a}{\beta_b} \Delta J(a_i) \left(\frac{r'_{pi}}{r'_{pel} + a_{el} - a_i} \right)^{YR'} - \Delta J_{i=1} \left(\frac{J_{max,el} - J_{max,i}}{J_{max,el} - J_{max,1}} \right)^{m'} \right]^m$$

①き裂前縁応力の変化に基づく項 ②き裂の鈍化に基づく項

配管試験体を用いた評価手法の妥当性確認



まとめ

- 要素試験により、き裂進展速度評価へのΔJの有効性を確認するとともに、ランダムな波形がき裂進展に与える影響を明らかにし、地震時き裂進展評価手法を構築した。また、配管試験体を用いたき裂進展試験により、その手法の妥当性を確認した。
- 本手法は、き裂の存在及び大きな地震動により弾性域を超えるような応答荷重を対象としてき裂進展を評価することができ、地震時の設備構造健全性評価や既設プラントの外部事象に係るリスク評価に活用することができる。

原子炉配管を対象とした地震とき裂進展評価手法に関する研究 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

国内の軽水炉プラントの供用年数の増加に伴い、配管等においてき裂の存在が報告されている。また、近年従来の設計基準地震動を超えるような大地震を経験しているため、設備の地震時構造健全性を評価する必要がある。加えて、プラントの外部事象に係るリスク評価を実施するため、設計基準地震動を超えるような大地震を対象とする必要がある。こうした背景を踏まえ、地震時構造健全性評価や外部事象に係るリスク評価に資する地震時のき裂進展を評価する必要がある。

設計基準地震動を超えるような地震による応答荷重は、ランダムな繰返し荷重波形である特徴を有するとともに、その絶対値は弾性域を超える可能性を否定できない。従来の地震とき裂進展評価手法は、弾性域においてのみ適用可能な応力拡大係数を用いたき裂進展評価を行うため、設計基準地震動を超える地震には適用できなく、ランダムな波形を有する塑性域の応答荷重を考慮した評価手法を構築する必要がある。

塑性域の一定振幅繰返し荷重によるき裂進展を評価する手法として、応力拡大係数範囲(ΔK)に代わり、き裂の進展によって解放されるエネルギーに相当する J 積分値の 1 荷重サイクル当たりの変化量(ΔJ)を用いる手法が知られている。本研究では、塑性域の両振り繰返し荷重を負荷可能な中央切欠き付き平板試験片を用いたき裂進展試験を実施し、 ΔJ のき裂進展評価への適用性を確認した。その結果、 ΔK を用いた手法と比較して、 ΔJ を用いた手法では試験結果をよく表せており、 ΔJ を用いたき裂進展評価が有効であることを確認した。

ランダムな波形がき裂進展に及ぼす影響を評価するために、平板試験片を用いて、ランダムな波形の荷重において最も影響の大きい過大な引張・圧縮荷重を含む繰返し荷重を負荷する試験を実施した。その結果、過大な引張・圧縮荷重によってき裂進展速度が変化することを確認した。このき裂進展速度変化のメカニズムを明らかにするため、過大な引張・圧縮荷重負荷後のき裂先端形状の観察と試験を模擬した有限要素解析を行い、き裂進展速度変化はき裂前縁の応力の変化とき裂先端の鈍化の重畳によるものであることを明らかにした。これを踏まえ、き裂前縁応力の変化とき裂先端の鈍化を考慮して ΔJ を補正することで、ランダムな波形がき裂進展に及ぼす影響を評価することが可能な手法を提案した。

これらの考察を総合して構築した地震とき裂進展評価手法の妥当性を確認するために、周方向貫通き裂を有する配管試験体に地震動による応答荷重を模擬した波形を負荷するき裂進展試験を実施した。試験において測定したき裂進展量と評価手法を用いて評価した結果とを比較した結果、構築した評価手法を用いることで、試験結果を良好に再現することが可能であることを確認し、評価手法の妥当性を明らかにした。

本研究において構築した地震とき裂進展評価手法は、き裂の存在及び大きな地震動により弾性域を超えるような応答荷重を対象としてき裂進展を評価することができ、地震時の設備構造健全性評価や既設プラントの外部事象に係るリスク評価等への活用が期待される。

はじめに

- 軽水炉発電プラントの長期運転に伴い、圧力バウンダリ機器のニッケル合金異材溶接部において、PWR一次系水質環境中の応力腐食割れ (PWSCC) や、BWR環境中の応力腐食割れ (NiSCC) が顕在化している。これらのき裂を有する機器の構造健全性に影響を及ぼすパラメータ (影響因子) には大きなばらつきがあり、このばらつきを考慮した合理的な健全性評価やリスク評価を行うためには、確率的破壊力学 (PFM) が有用である。

研究目的と内容

- ニッケル合金異材溶接部におけるPWSCCとNiSCCを対象に、PFM解析コードを開発する。
- PWSCCによる実機の損傷事例解析を行い、実機情報との比較により本解析コードの有用性を確認する。

確率的破壊力学解析コードPASCAL-NP*の概要

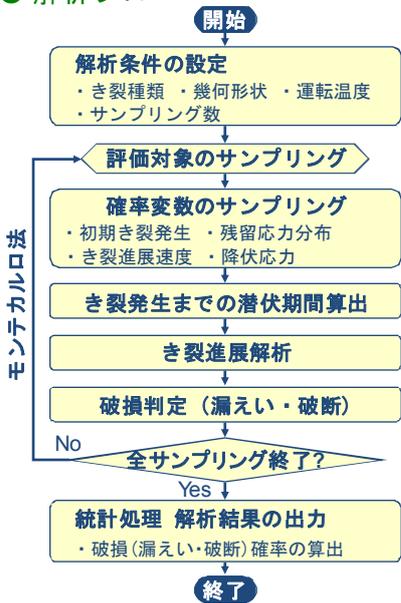
*PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR - NiSCC / PWSCC

モンテカルロ法に基づきPWSCCやNiSCCに係る影響因子のばらつきを評価し、き裂発生・進展による機器の破損 (漏えいや破断) 確率を算出

● PWSCC / NiSCC の影響因子

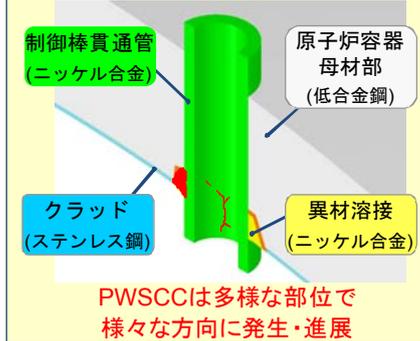
	PWSCC	NiSCC
環境	PWR1次系	BWR炉水
応力	溶接残留応力 + 表面切削 + 運転応力	
材料	ニッケル合金 (母材/溶接金属)	

● 解析フロー



き裂種類

実機の損傷事例を踏まえて、多種多様なき裂に対応した評価が可能



き裂発生までの潜伏期間

き裂発生までの潜伏期間 t_i を、環境・応力・材料の各影響因子を踏まえて評価

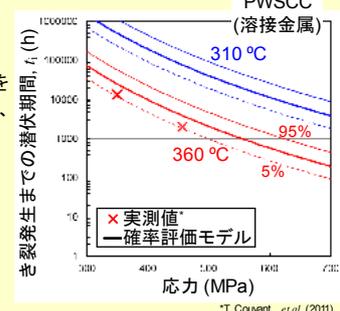
温度が高くなり、応力が増加する程、 t_i は短くなることなどを評価可能

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

C. Amzallag, et al. (2000)

C. Amzallagらが提案した式に、ばらつきを与えるパラメータ α_i を導入することにより、潜伏期間のばらつきを評価

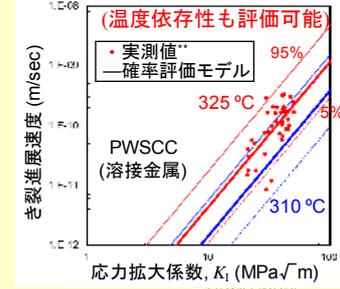
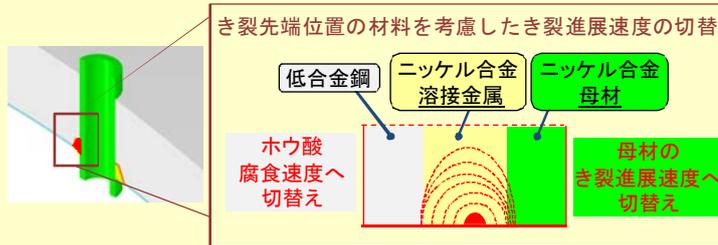
環境因子 $i_0 = A_0 \times \exp(-Q_0/RT)$ 温度など	材料因子 i_m : 下記項目に基づきデータテーブルから値を選択 製造プロセス (熱間/冷間加工)、化学成分 (Cr含有量)、熱処理など
応力因子 $i_\sigma = A_\sigma \times \sigma_{eff}^n$ 溶接残留応力、表面切削、運転応力など	



異材溶接部におけるき裂進展速度の取扱い

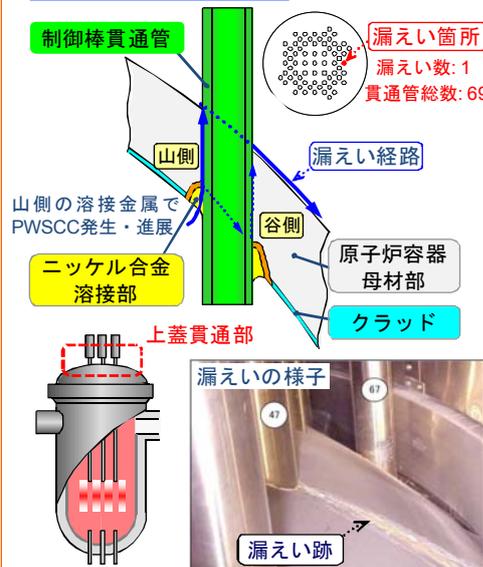
き裂形状を半楕円で近似し、き裂の最深点と表面点における材料の違いを考慮してき裂進展量を評価

ばらつきを有するき裂進展速度を評価



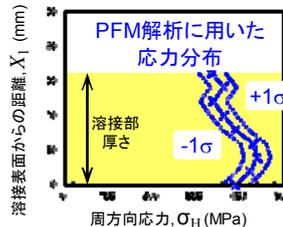
大飯3号機の上蓋貫通部におけるPWSCC損傷事例解析

PWSCCの発生事例



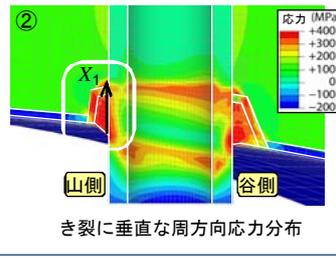
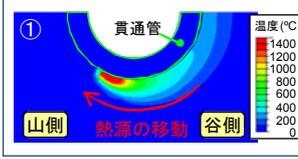
解析条件

項目	値など
サンプリング数	1 × 10 ⁸
運転時温度、圧力	310°C, 15.4 MPa
応力拡大係数解	APIの平板式
き裂発生の際のばらつき	ワイブル分布
き裂進展速度の際のばらつき	対数正規分布
残留応力の際のばらつき	正規分布

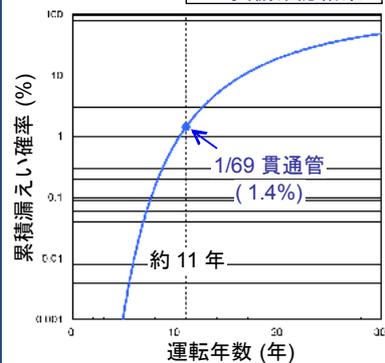


PFM解析に用いる応力分布を求めるための有限要素解析

- ① 熱源の移動を考慮した伝熱解析
- ② 伝熱解析で得られた温度履歴を入力とした熱弾塑性応力解析



— 解析結果
● 実機確認結果



- 解析結果と実機確認結果は概ね一致
- 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

まとめ

- き裂を有する機器の構造健全性評価や、既設軽水炉発電プラントのリスク評価に資する解析コードを整備し、事例解析によりその有用性を確認した。
- 今後も最新知見を反映してPASCAL-NPの機能追加等を継続するとともに構造健全性評価手法を改良し、規制における実用化を目指す。

Ni 合金異材溶接部の応力腐食割れに関する破損確率解析

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

軽水炉発電プラントの長期供用に伴い、圧力バウンダリ機器のニッケル合金異材溶接部において、PWR 一次系水質環境中の応力腐食割れ (PWSCC) や BWR 水質環境中の応力腐食割れ (NiSCC) が顕在化している。これらのき裂を有する機器の構造健全性に影響を及ぼすパラメータには大きなばらつきがあり、このばらつきを考慮した合理的な健全性評価やリスク評価等を行うためには、確率論的破壊力学 (PFM) が有用である。本研究では、ニッケル合金異材溶接部における PWSCC と NiSCC を対象に、PFM 解析コード PASCAL-NP を開発した。また、本解析コードを用いて PWSCC による実機の損傷事例を対象とした事例解析を実施し、実機情報との比較により本解析コードの有用性を確認した。

PASCAL-NP は、PWSCC 及び NiSCC の影響因子である PWR 一次系及び BWR 水質環境等の環境因子、溶接残留応力、表面切削や運転応力等の応力因子、ニッケル合金 (母材と溶接金属) 等の材料因子を考慮し、確率論的計算に係るモンテカルロ法に基づき、き裂発生や進展による機器の破損確率 (漏えいや破断) を算出する。解析ステップは主に、解析条件の設定、評価対象のサンプリング、確率変数のサンプリング、き裂発生までの潜伏期間の算出、き裂進展解析、破損判定及び統計処理と解析結果の出力で構成する。実機の損傷事例では、PWSCC は複雑な形状を有する異材溶接部に発生し、き裂の発生箇所や方向が多種多様であった。原子炉容器上蓋貫通部の損傷事例を例に挙げると、PWSCC はニッケル合金の母材や溶接金属に発生し、制御棒貫通管の軸/周、内/外表面、溶接金属内き裂といった複雑な形態を有する。PASCAL-NP は、このような実機の損傷事例を踏まえ、多種多様なき裂に対応した評価機能を備えている。また、き裂発生までの潜伏期間を評価する機能として、前述した環境、応力及び材料等の影響因子を考慮し、ばらつきを表現した確率評価モデルを設定できる。き裂進展解析ではき裂形状を半楕円き裂としてモデル化し、き裂最深点及び表面点の応力拡大係数を影響関数法を用いて評価する。ニッケル合金溶接金属において発生したき裂は、溶接金属に進展する間、ニッケル合金溶接金属におけるき裂進展速度を用いてき裂進展評価を行うが、ニッケル合金母材に達すると母材におけるき裂進展速度に切り替え、低合金鋼に達するとホウ酸腐食速度に切り替える。解析コードに整備した PWSCC のき裂進展速度はいずれも温度依存性を考慮できる確率論的評価モデルである。

PWSCC による実機の損傷事例の一例として、大飯 3 号機の原子炉容器上蓋貫通部における PWSCC 発生事例を対象に漏えい確率解析を実施した。事例では、PWSCC は貫通部のニッケル合金溶接金属から発生し、溶接部を貫通するまで進展を続けて冷却水の漏えいに至った。溶接残留応力等の応力条件は有限要素解析より求め、PASCAL-NP の入力条件として用いて漏えい確率解析を実施した。解析から得られた累積漏えい確率は、11 年を経過すると 1.4%を超える。大飯 3 号機の制御棒貫通管の総数は 69 本であり、このうちの 1 本 (約 1.4%) において約 11 年 (全出力換算年) で漏えいが確認されたことから、PFM 解析結果は実機確認結果と良く一致したことが分かる。このように、事例解析により PASCAL-NP は PWSCC の発生・進展評価を考慮した漏えい確率解析に有用であることを確認できた。

これからも最新知見を反映して PASCAL-NP の機能拡充等を継続し、解析コードの実用化を目指す。