

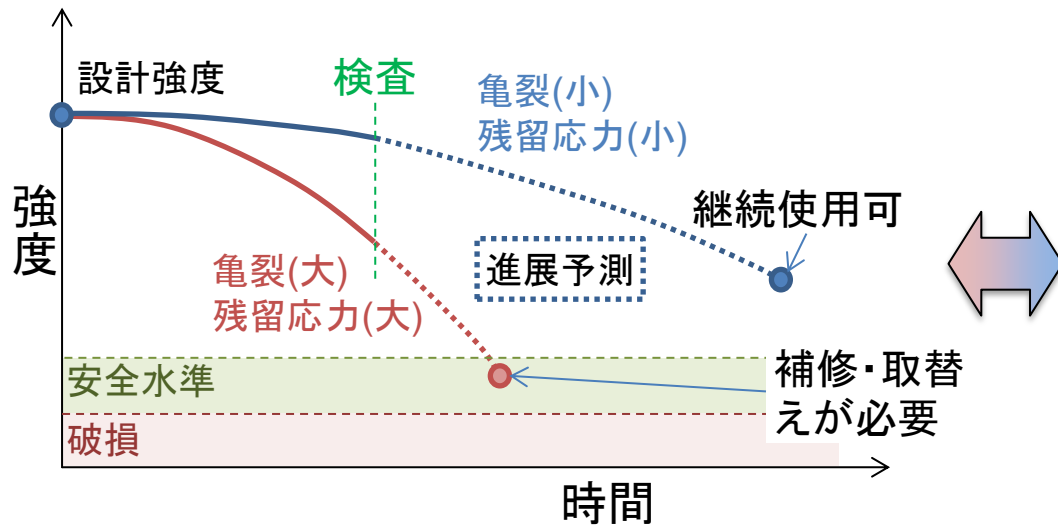


Japan Atomic Energy Agency

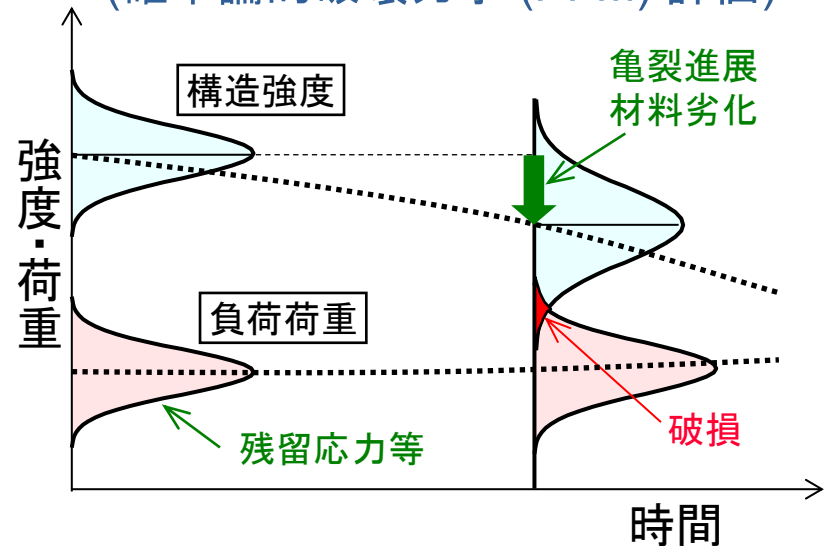
原子力配管に対する 確率論的破壊力学評価手法の適用

JAEA 勝山仁哉
山口義仁
李銀生

決定論的手法 (現行の評価法・保守的な評価)



確率論的手法 (確率論的破壊力学 (PFM) 評価)



確率論的破壊力学 (PFM: Probabilistic Fracture Mechanics) による確率論的健全性評価は様々なメリットがある。例えば、

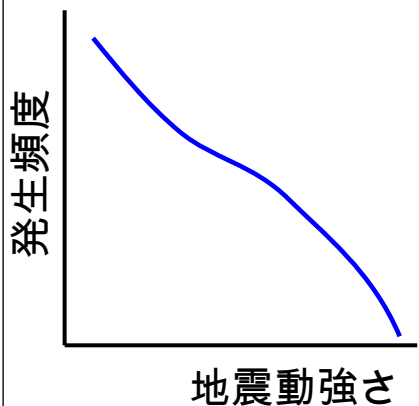
- 健全性評価に係る個々の影響因子の固有の確率分布を考慮することによって、より合理的な定量評価を行うことができる。
- 破壊力学に基づく評価手法であるため、亀裂進展を伴う経年劣化や異なる地震動による応答応力の大きさや波形の違いを考慮した損傷確率を評価できる。
- 発生頻度が低い(破損事例がない等)事象に対する定量評価が可能
- リスク評価(内部事象、外部事象)、RI-ISI(リスク情報を活用した供用期間中検査)評価等に活用できる。

ハザード評価

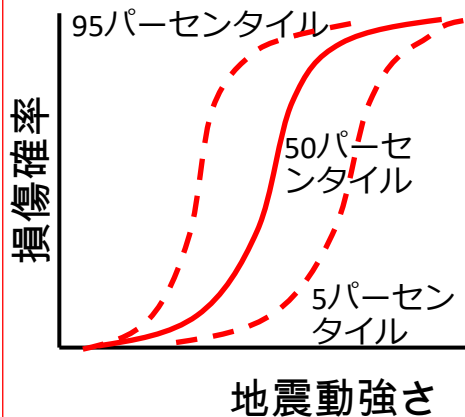
フラジリティ評価

事故シーケンス評価

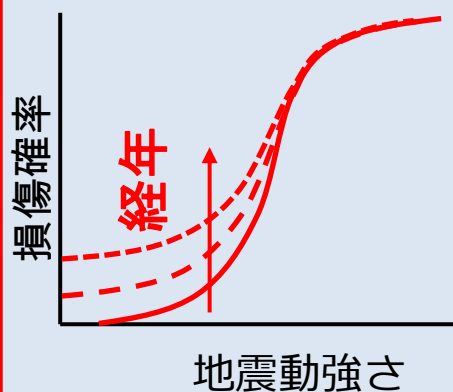
地震ハザード曲線



フラジリティ曲線



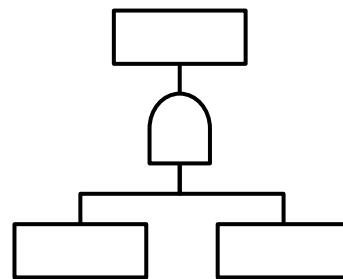
フラジリティ曲線



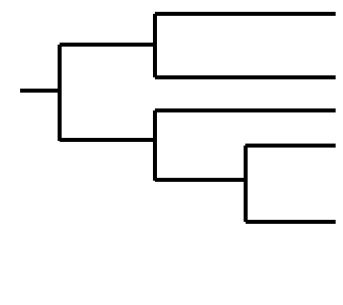
PFMの適用



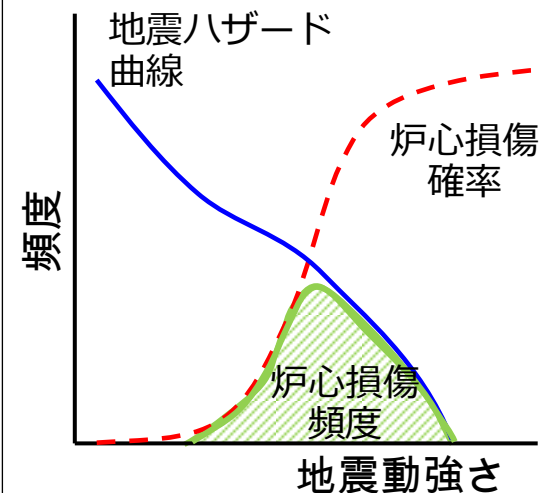
フォールトツリー



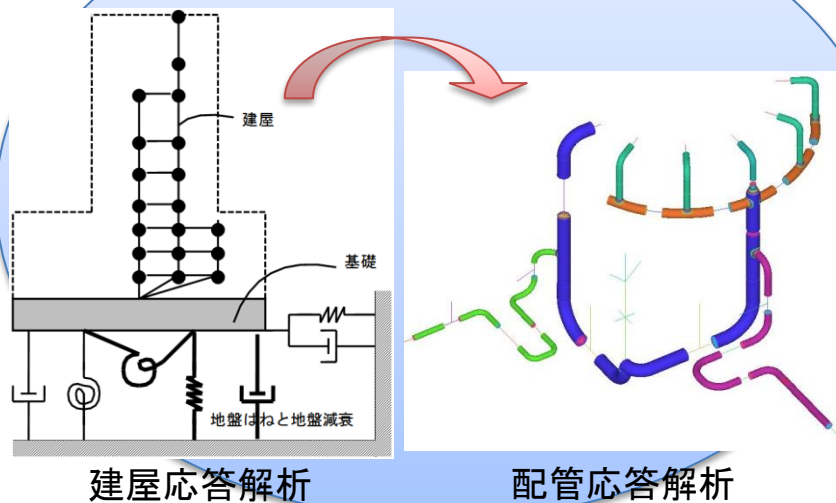
イベントツリー



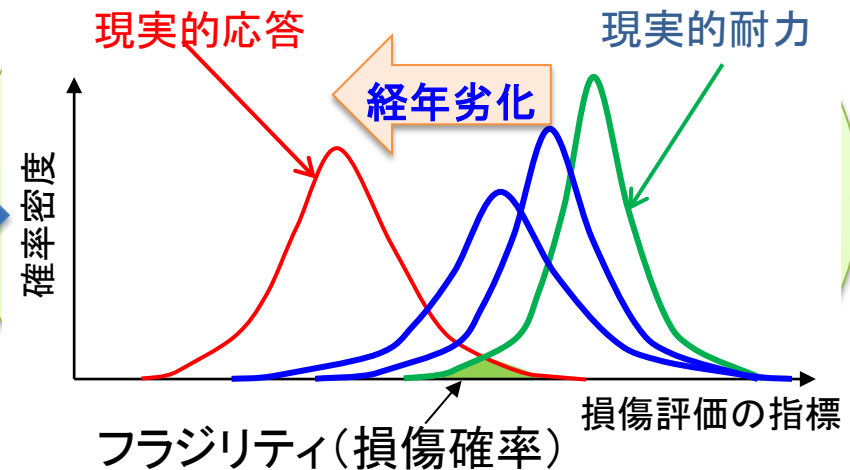
損傷頻度



地震応答解析



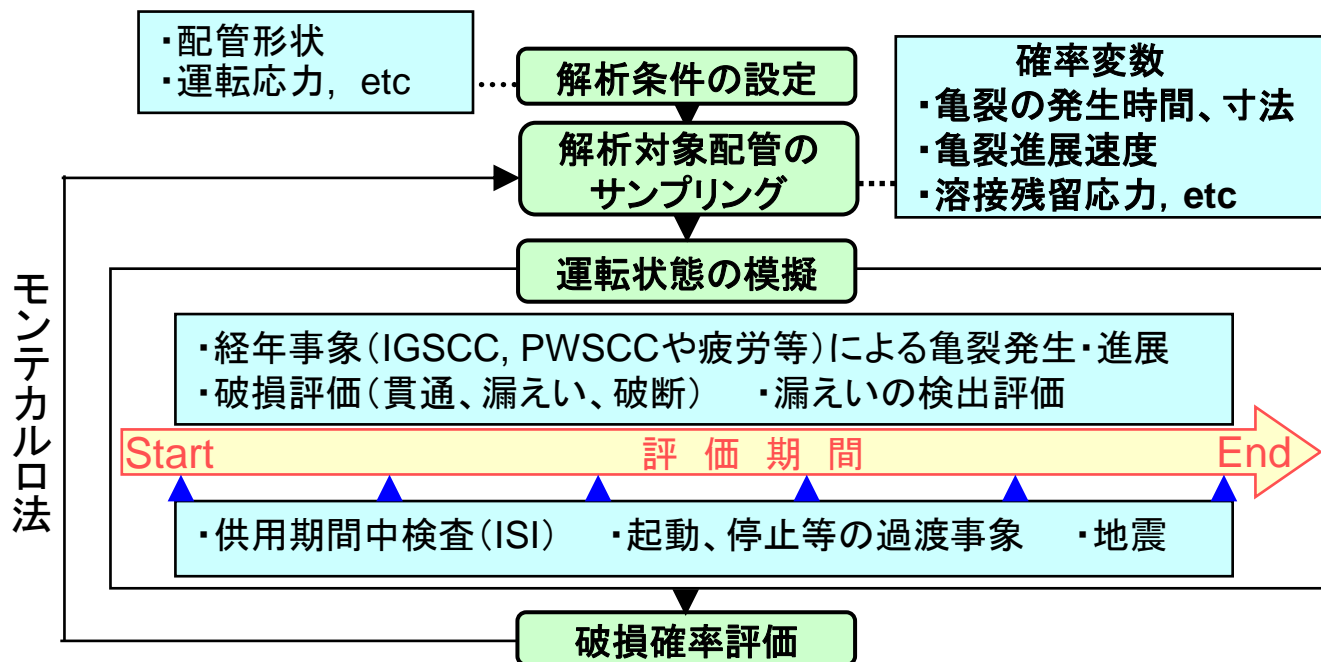
PFM解析に基づく fragility評価



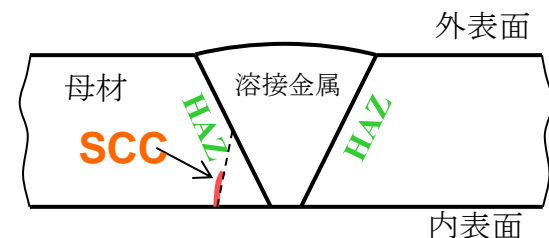
- 地震応答解析により得られた設備(配管)応答の結果(前の講演)を、設備(配管)に対する脆弱性評価の入力とする
- 亀裂進展等の経年劣化による現実的耐力の変化を考慮した脆弱性評価にPFM解析を適用

配管溶接部における応力腐食割れや疲労等の経年劣化を考慮して破損確率を評価可能なPFM解析コード (<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2009-025.pdf>)

• PASCAL-SPの評価フロー



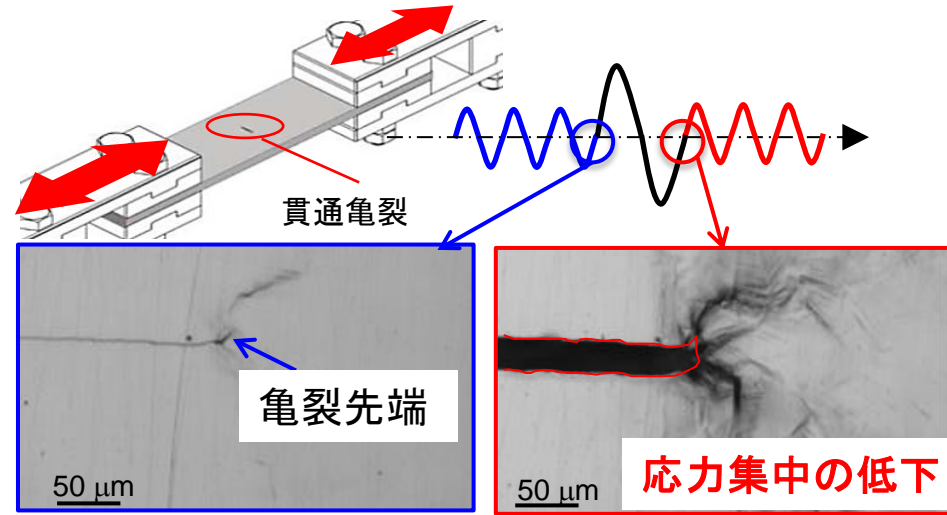
• 考慮可能な亀裂の例



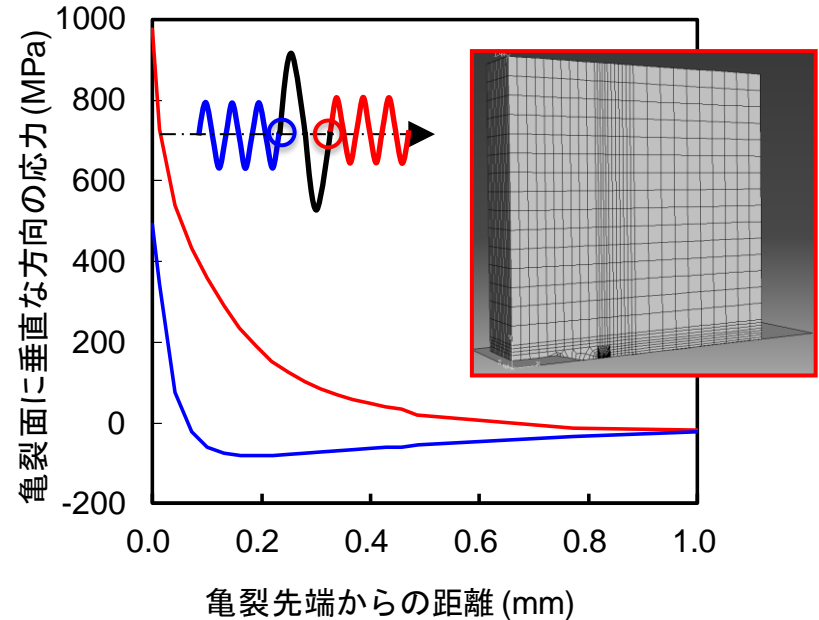
経年劣化を考慮したフラジリティ評価における課題

- 設計基準を超える地震動に対応した亀裂進展評価手法の整備
- 信頼度評価手法の整備

要素試験



有限要素解析



亀裂進展評価手法を提案

- 塑性変形を伴う繰返し荷重に対応 → 弾塑性破壊力学パラメータ(ΔJ)を適用
- 荷重振幅の不規則な変動の影響を考慮 → 亀裂先端形状の変化及び応力分布の変化を考慮

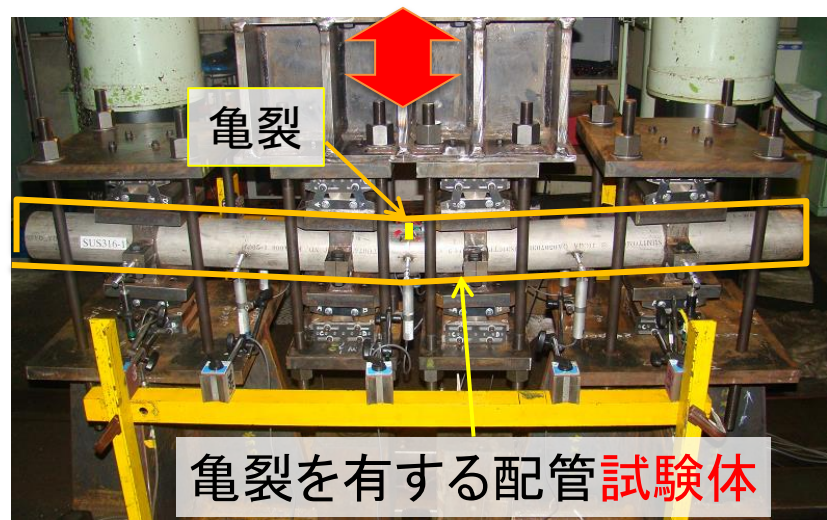
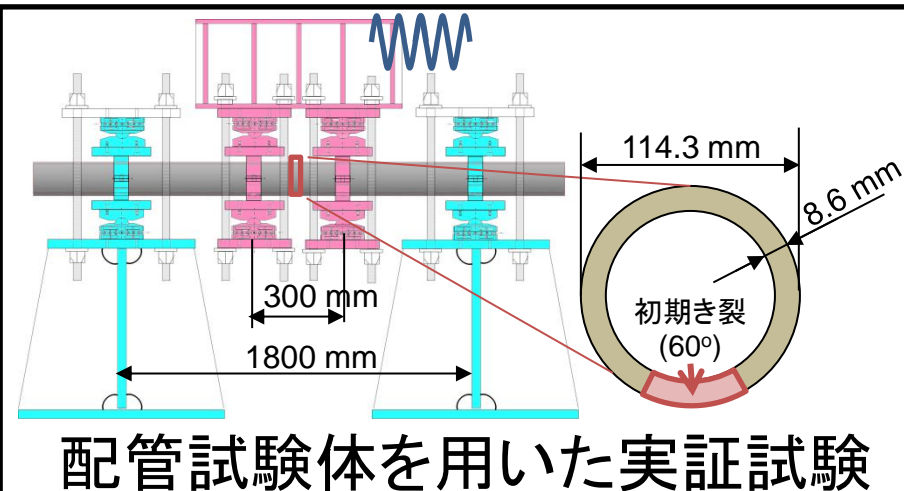
$$\frac{da}{dN} = C' [\Delta J_{eff}]^{m'}$$

$$\Delta J_{eff} = \beta \Delta J \left(\frac{r'_{pi}}{r'_{pol} + a_{ol} - a_i} \right)^{\gamma R'} - \alpha \Delta J_{th}$$

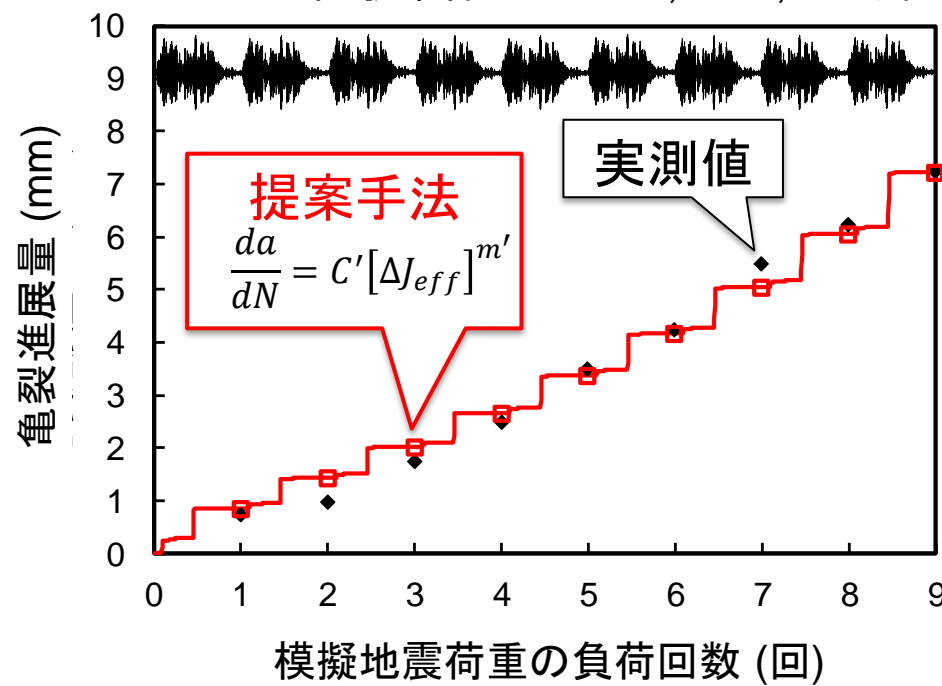
応力分布の変化を考慮して ΔJ を補正する項

亀裂先端形状の変化を考慮して ΔJ を補正する項

- 亀裂を有する配管を用いた模擬地震荷重負荷試験により妥当性確認を実施

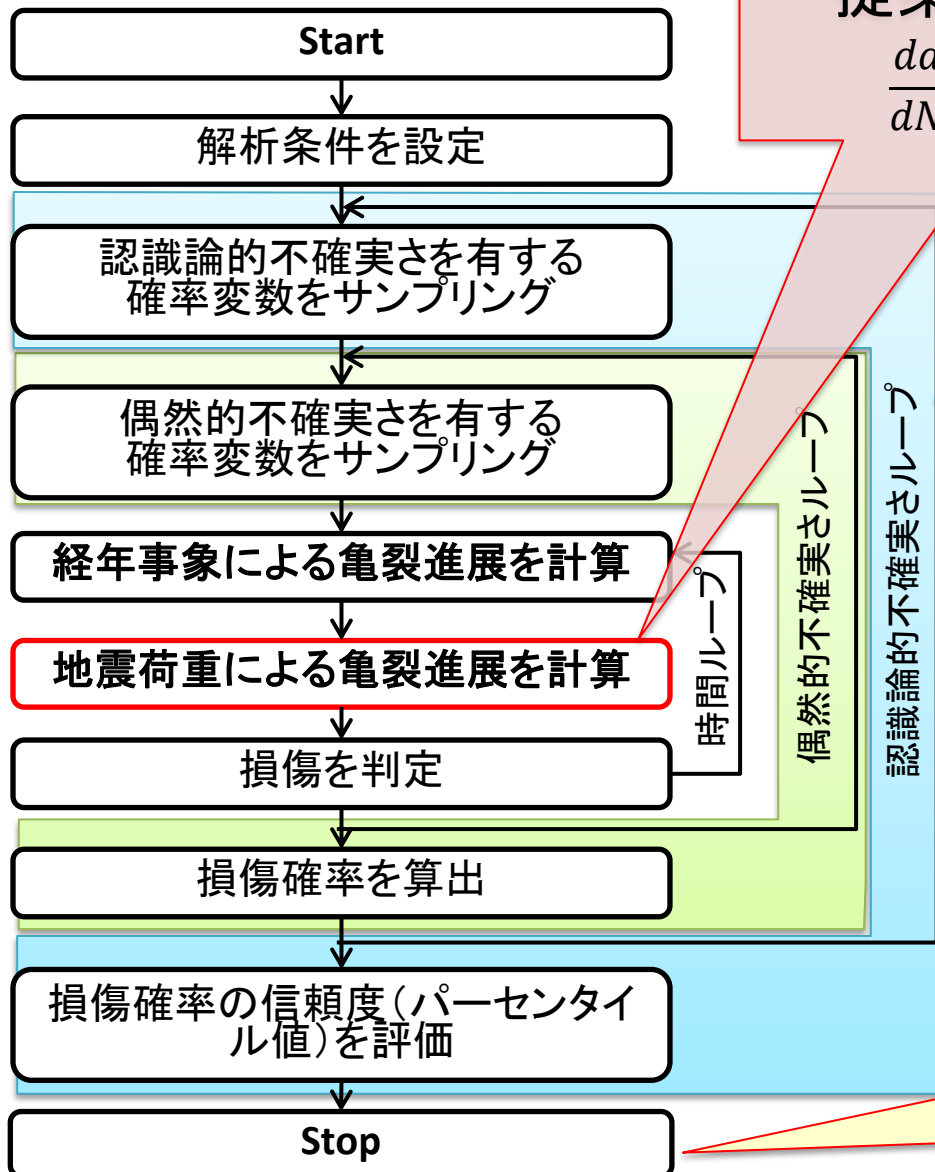


試験条件: SUS316, 室温, 大気中



提案手法による評価結果は、実測値とほぼ一致
 ⇨ 提案手法の妥当性を確認

PASCAL-SPの解析フロー



提案手法を導入

$$\frac{da}{dN} = C'[\Delta J_{eff}]^{m'}$$

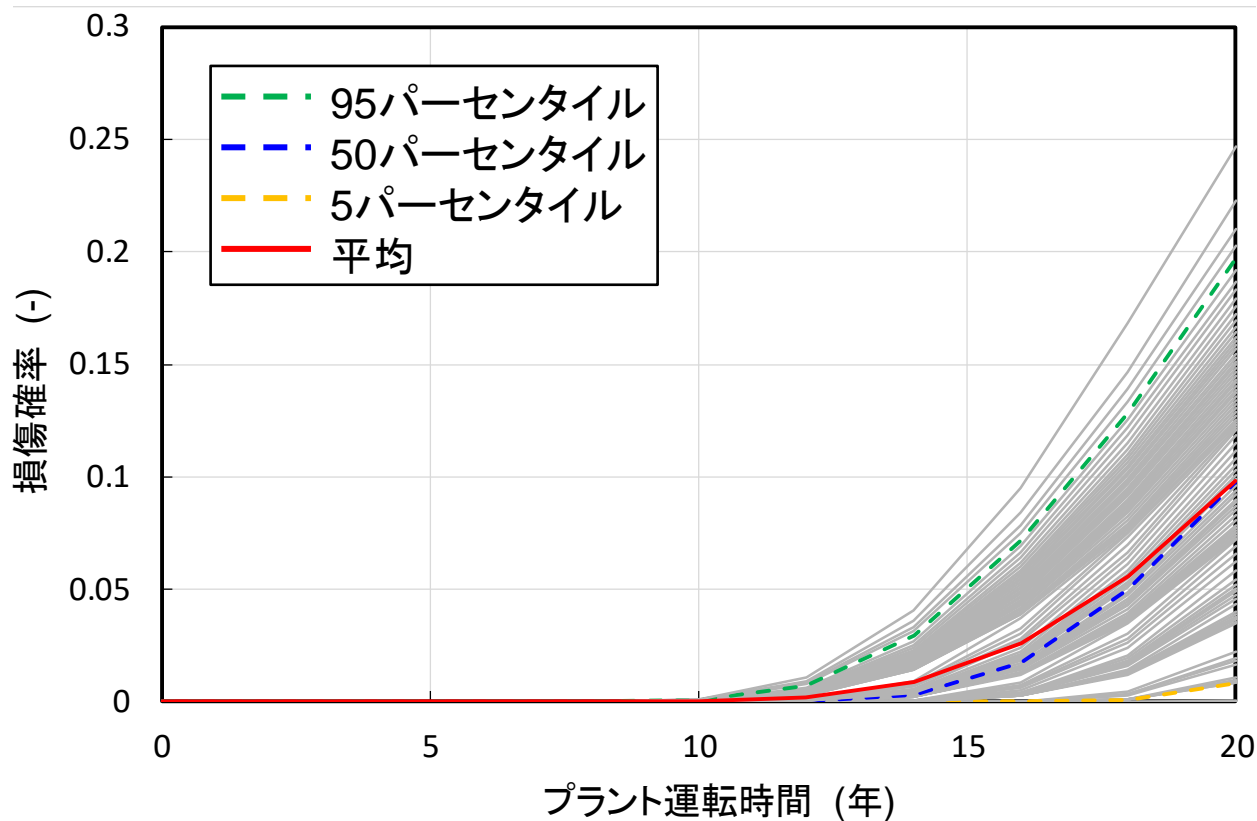
認識論的不確実さと偶然的不確実さを分類し、二重ループのサンプリングを行えるようにした

改良後の特徴

- 設計基準を超える地震動に対応した地震荷重を考慮可能
- 認識論的不確実さを考慮した信頼度の評価が可能

地震動強さを変えてPFM解析を行い、得られる損傷確率と地震動強さの関係に整理し、フラジリティを評価

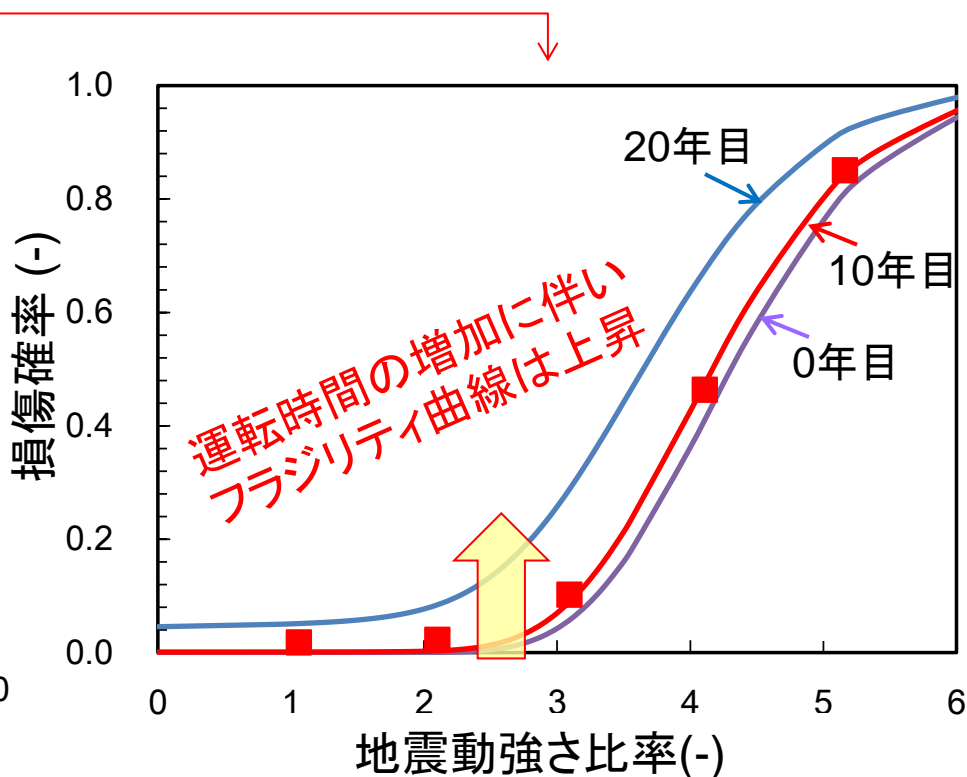
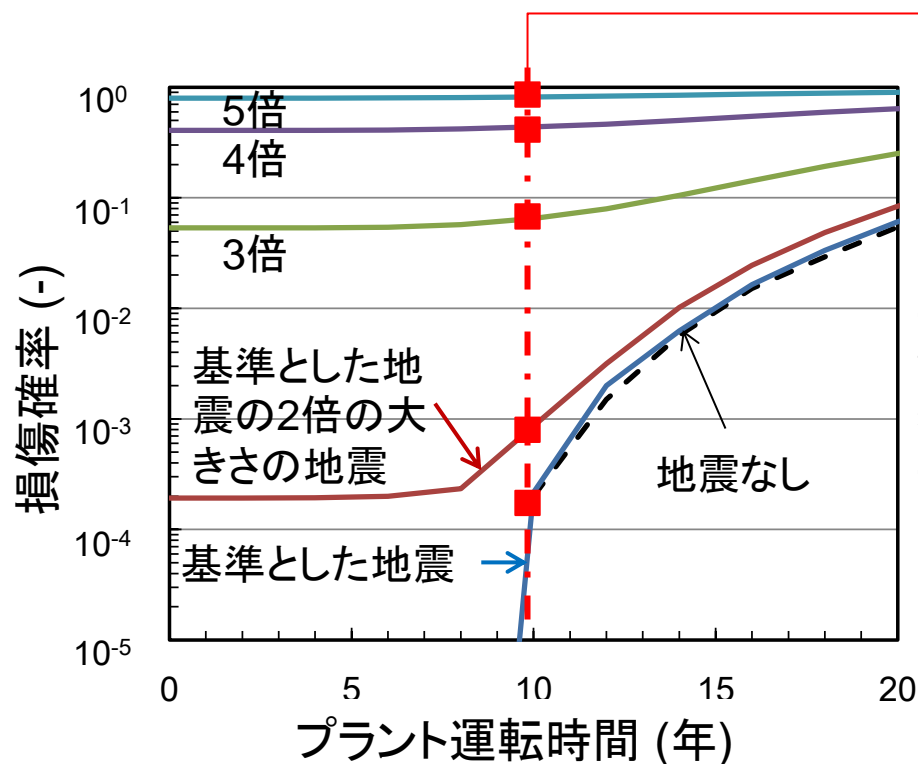
- ✓ 対象: ステンレス鋼管(寸法: 400A Sch. 100)
- ✓ 経年事象: SCCによる亀裂発生、SCCと疲労による亀裂進展
- ✓ 負荷: 通常運転時応力(内圧、過渡条件による応力、溶接残留応力 等)
地震による応答応力



- プラント運転時間の増加に伴い損傷確率は増加
- 二重ループのサンプリングにより損傷確率の信頼度を評価

- PFM解析結果を用いて、プラント運転時間に応じたフラジリティ曲線を評価

- 地震動強さを変えて損傷確率を算出
- 地震動強さと損傷確率の関係(フラジリティ曲線)に整理

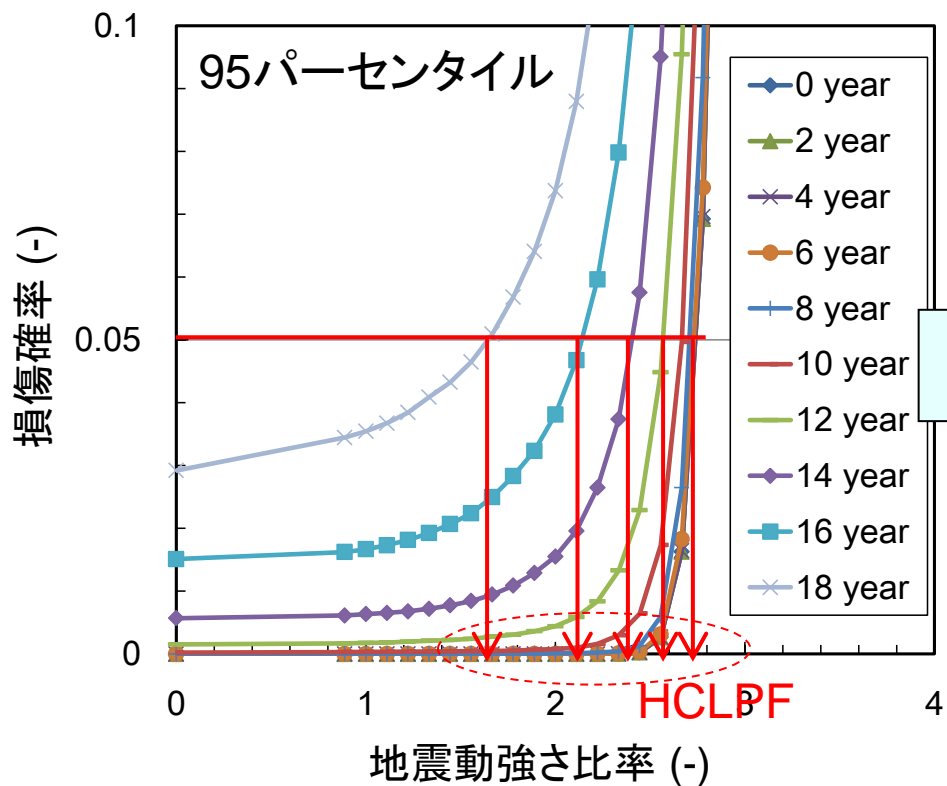


プラント運転時間と損傷確率の関係

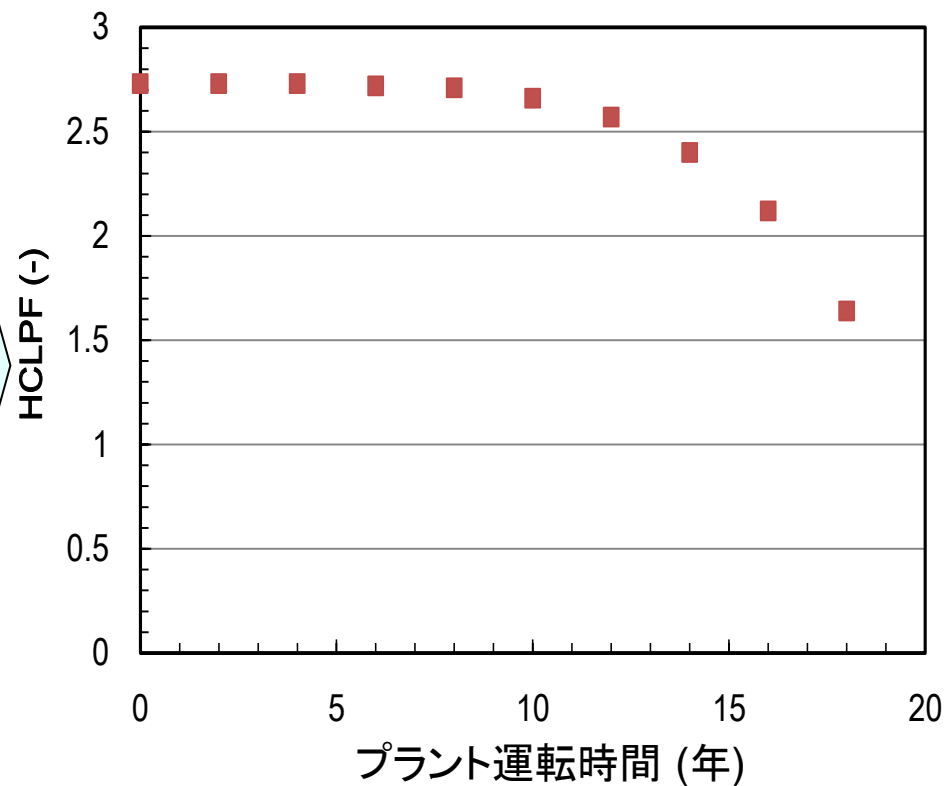
フラジリティ曲線

- PASCAL-SPにより経年劣化を考慮したフラジリティ評価が可能

- 95%信頼度における5%損傷確率に相当する地震動強さ(高信頼度低損傷確率(HCLPF)値)を数値指標として耐震裕度を評価



フラジリティ曲線



HCLPF値を数値指標とした耐震裕度評価例

- HCLPF値を数値指標として、プラント運転時間に対応した耐震裕度の変化を定量的に評価

- 設計基準を超える地震動を考慮したPFM評価事例を紹介。
 - 経年劣化を考慮したフラジリティ評価
 - 耐震裕度の定量的評価
- PFM解析を活用することにより、損傷確率を数値指標とした経年劣化の影響等の定量的な評価が可能になる。

課題

- 建屋/機器応答解析手法の整備
 - 解析モデルの3次元化・詳細化、大規模計算への対応
 - 配管サポートの設定等
- フラジリティ評価における不確実さ等の検討
 - 認識論的不確実さと偶然的不確実さの分類・設定等
- PFM評価手法の実用化
 - 海外では規制における活用が進められている。
 - RI-ISIやPRAへの適用

PFMに係る最近の動向と展望

- RI-ISI、安全性向上評価等への活用
 - ◆ 本講演では割愛したが、非破壊検査や緩和措置(溶接残留応力の低減措置、水素注入による水質改善)等の影響を定量評価するにもPFM解析が有用であることを示している。
- 原子炉圧力容器の破損頻度算出のためのガイドライン(日本電気協会)の策定が進められている。