



Japan Atomic Energy Agency

設計上の想定を超える地震を考慮した 経年配管の健全性評価

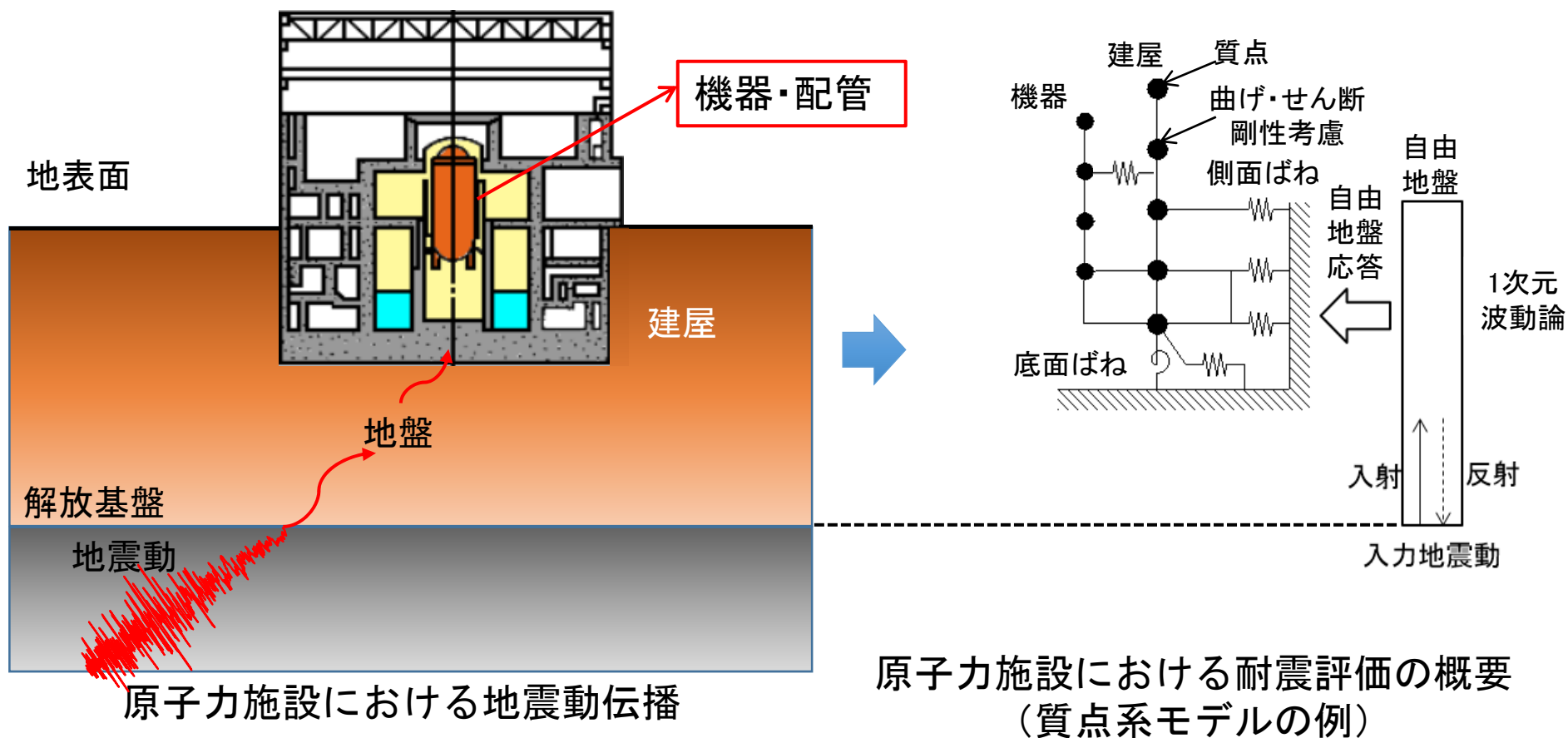
日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
材料・構造安全研究ディビジョン
構造健全性評価研究グループ

山口 義仁

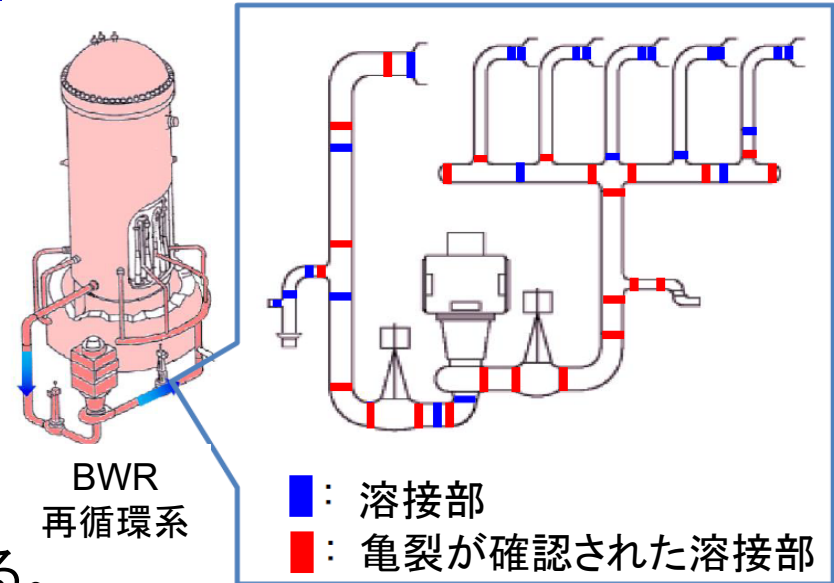
平成29年度 安全研究センター報告会
平成29年11月29日
富士ソフト アキバプラザ

本発表の一部は原子力規制庁からの受託事業の成果です

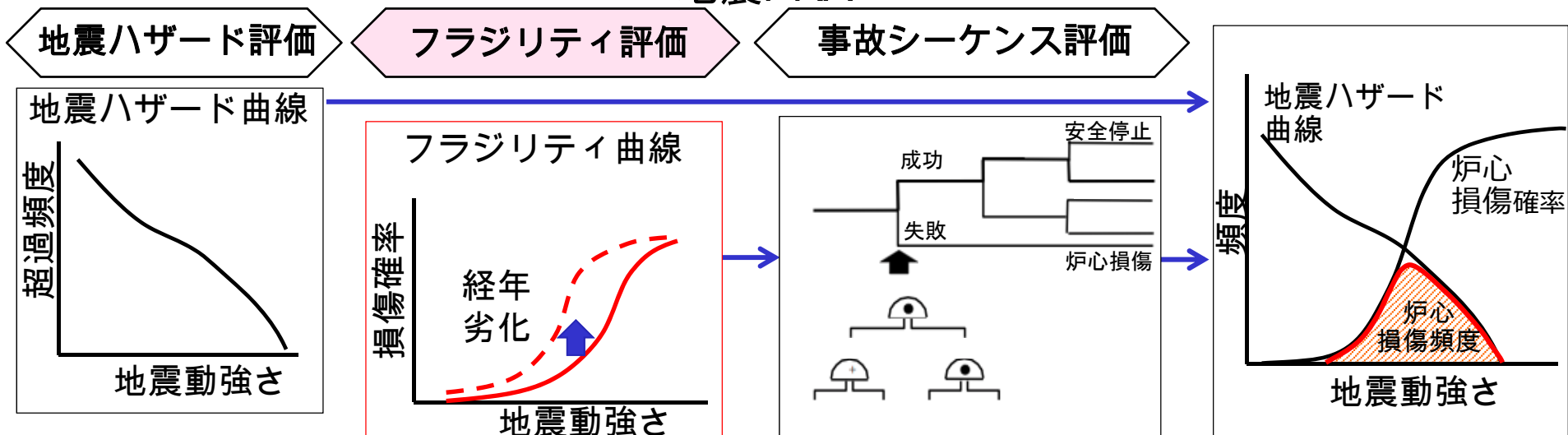
耐震評価では、地盤・建屋を通じて機器・配管に伝播する地震動を考慮した評価が行われる。



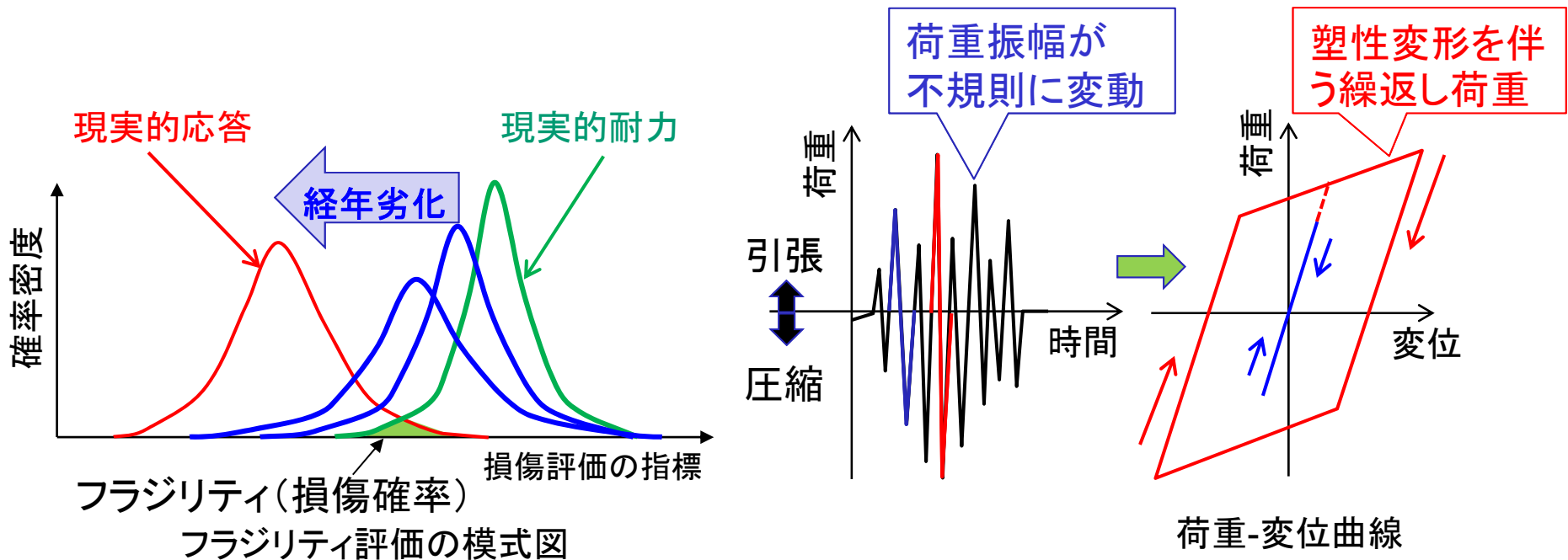
- 経年劣化による亀裂の顕在化
 - ・応力腐食割れ(SCC) 等
- 設計上の想定を超える地震の発生
 - ・新潟県中越沖地震(2007)
 - ・東北地方太平洋沖地震(2011)
- 規制の動向
 - ・安全性向上評価の実施が求められている。
 - ・地震を起因とした確率論的リスク評価(地震PRA): フラジリティの評価が必要



地震PRA



- ◆ 既設の原子力発電プラントを対象としたフラジリティ評価では、経年劣化を考慮する必要がある。
- ◆ 亀裂を有する配管の地震による損傷を評価するためには、地震時の亀裂進展を評価する必要がある。しかし、設計上の想定を超える地震のように塑性変形を伴う繰返し荷重による亀裂進展では、
 - 現行の疲労亀裂進展評価手法の適用範囲を超える場合がある。
 - 荷重振幅の不規則な変動が亀裂進展に及ぼす影響を無視できない。



① 地震時亀裂進展評価手法の整備

①-1 地震時亀裂進展評価手法の提案

①-2 提案手法の妥当性確認

② フラジリティ評価手法の整備

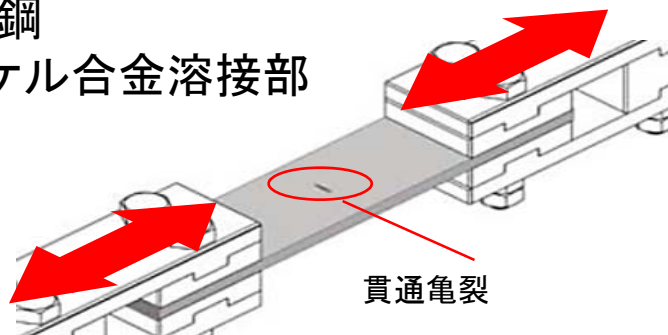
①-1 地震時亀裂進展評価手法の提案

要素試験、有限要素解析

- 塑性変形を伴う繰返し荷重に対応した亀裂進展評価手法の検討
- 荷重振幅の不規則な変動の影響を考慮した亀裂進展評価手法の検討

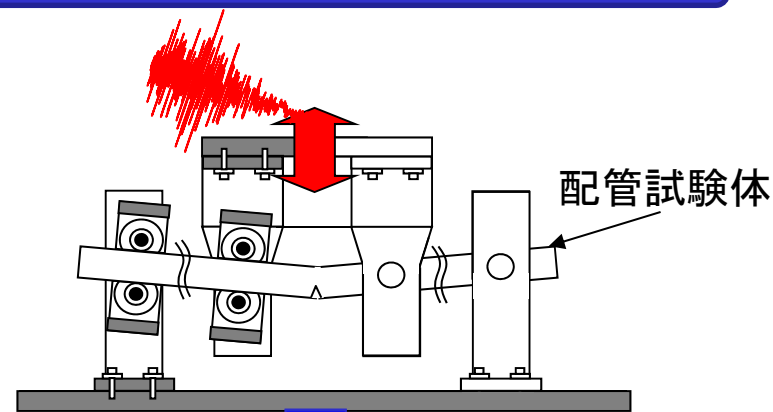
対象

- ✓ ステンレス鋼
- ✓ 炭素鋼
- ✓ ニッケル合金溶接部



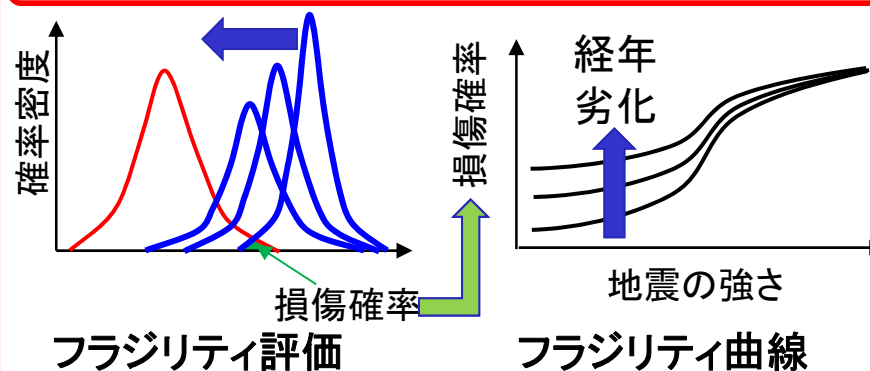
①-2 提案手法の妥当性確認

配管を用いた妥当性確認試験



② フラジリティ評価手法の整備

確率論的破壊力学解析コードの整備



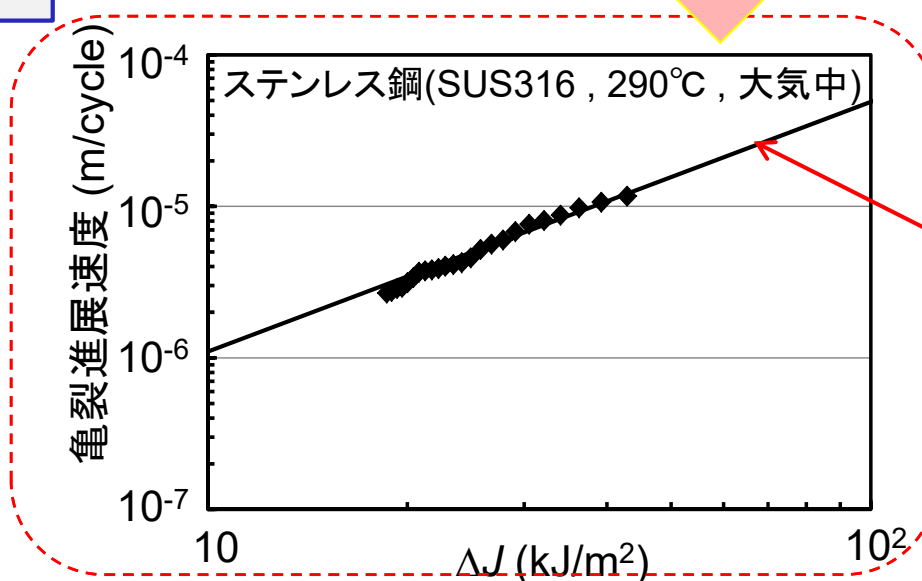
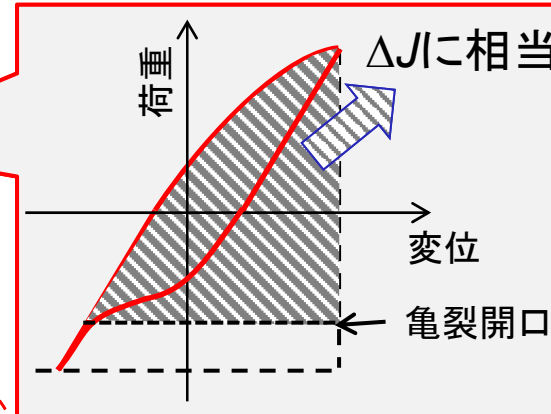
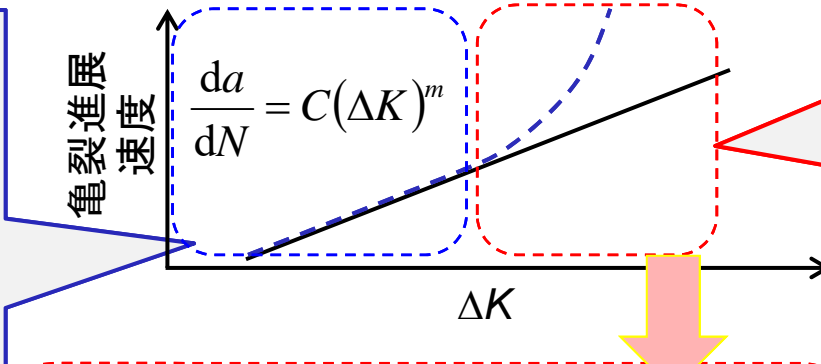
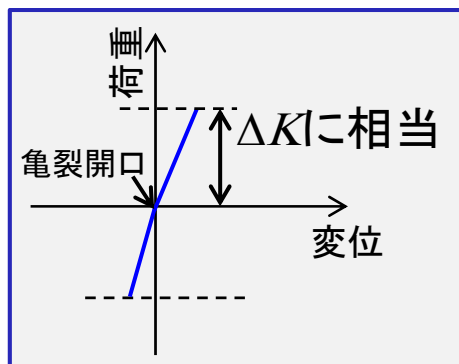
現行評価

- 線形破壊力学に基づくパラメータ
応力拡大係数範囲 (ΔK) を使用



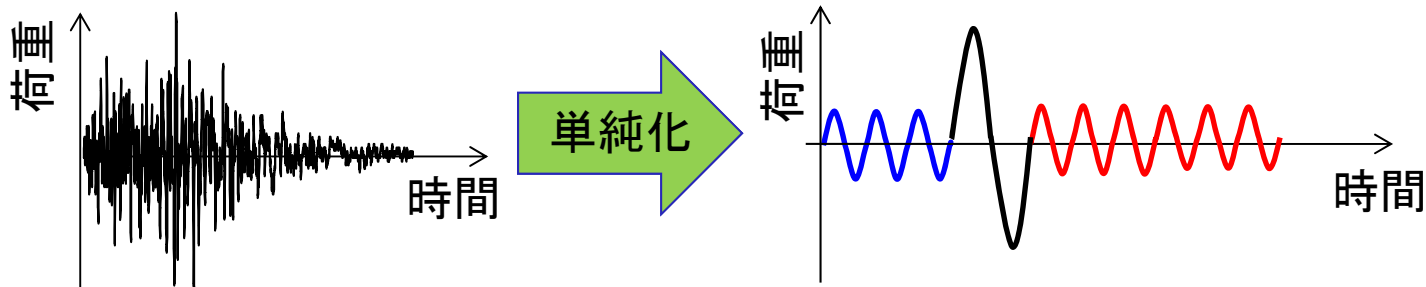
弾塑性破壊力学パラメータ(ΔJ)を用いた評価

- 計測される荷重-変位曲線から算出可能
- 亀裂進展により解放されるエネルギー



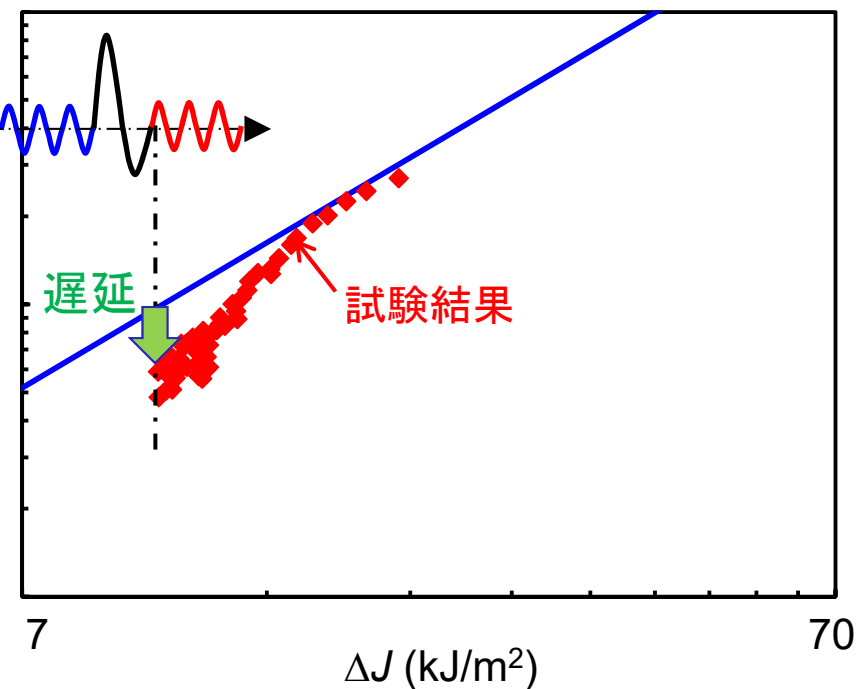
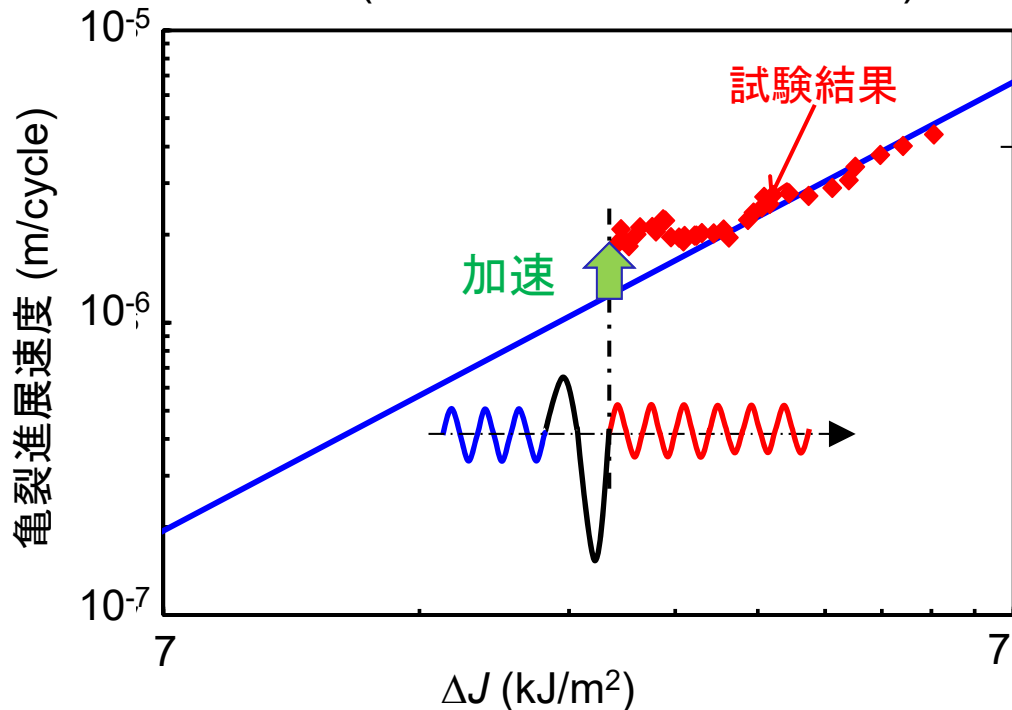
$$\frac{da}{dN} = C'(\Delta J)^{m'}$$

塑性変形を伴う繰返し荷重において ΔJ を用いた評価が有効であることを確認



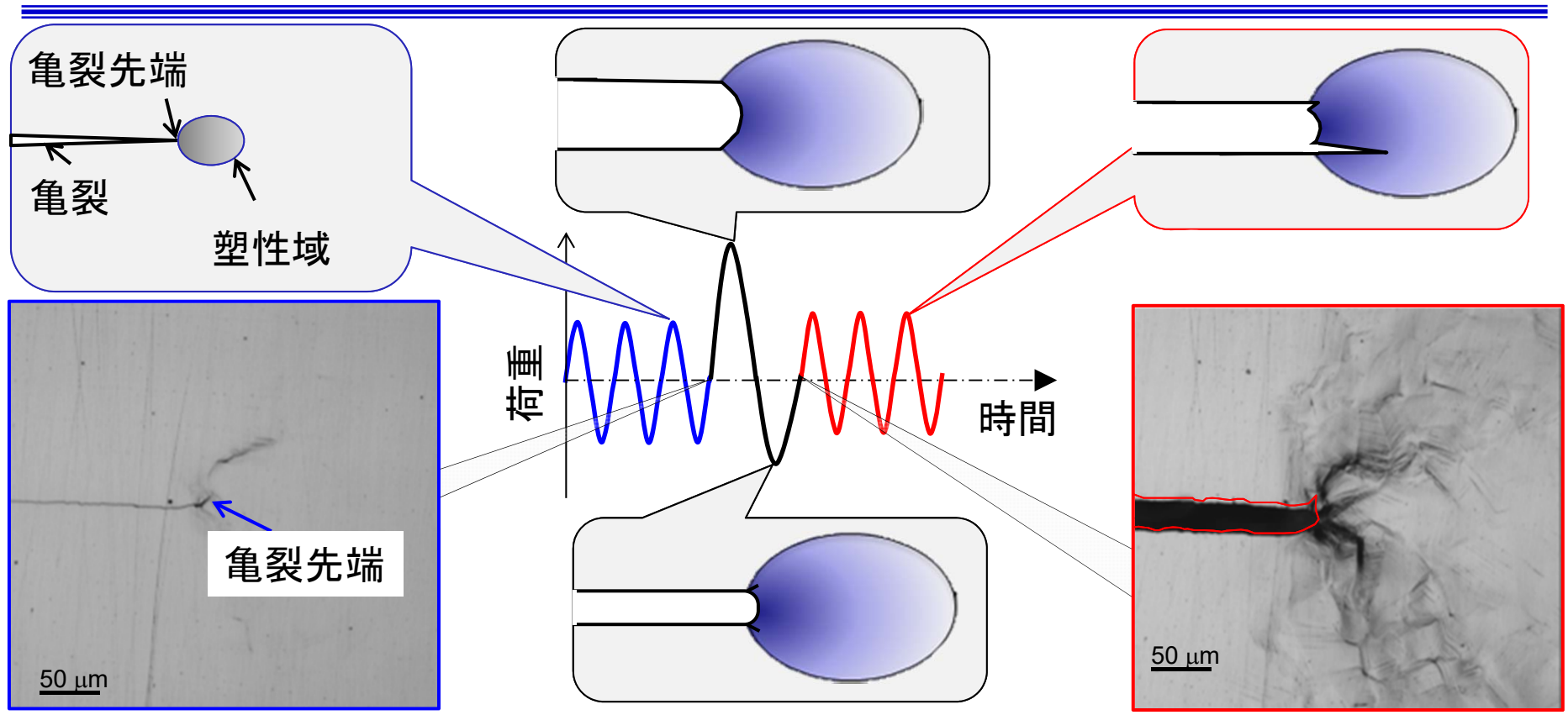
炭素鋼(STPT410, 290°C, 大気中)

ステンレス鋼(SUS316, 290°C, 大気中)



荷重振幅の変動の影響を考慮した亀裂進展評価手法が必要

JAEA 荷重振幅の変動による亀裂先端近傍の変化 7



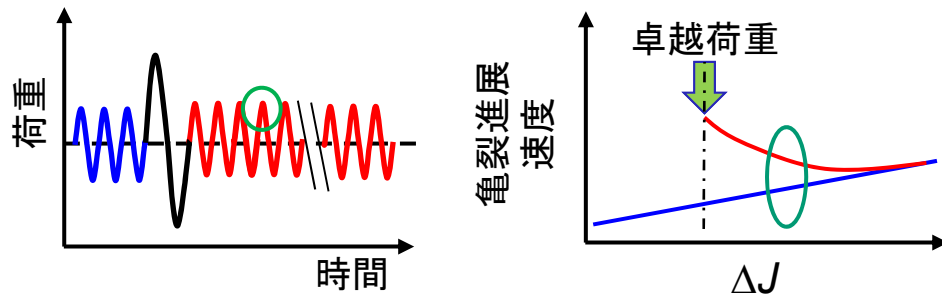
塑性域の影響

亀裂先端の形状の影響

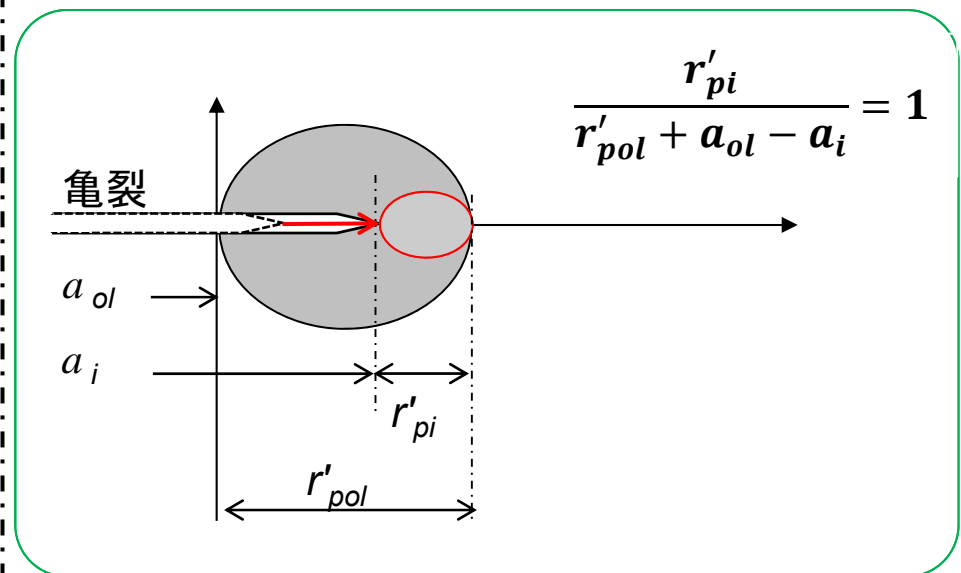
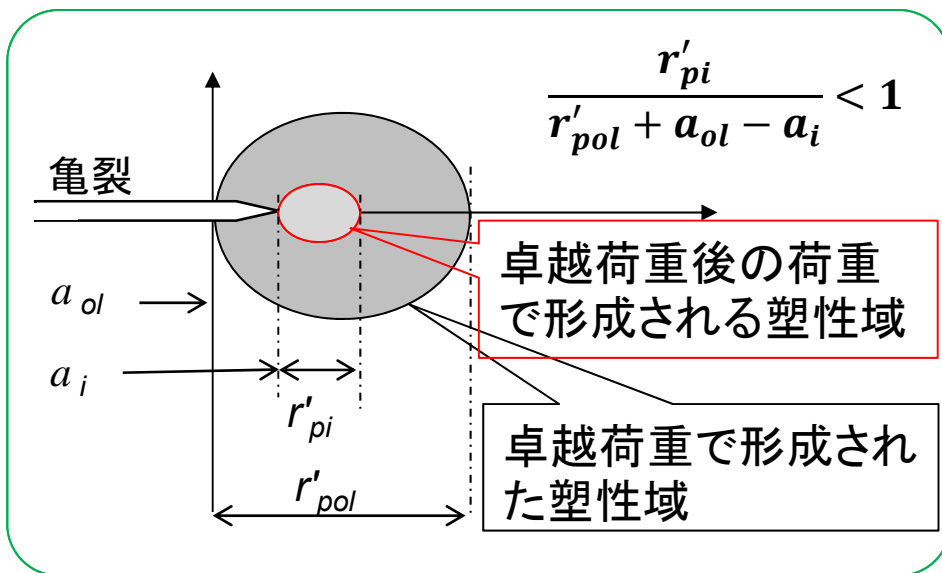
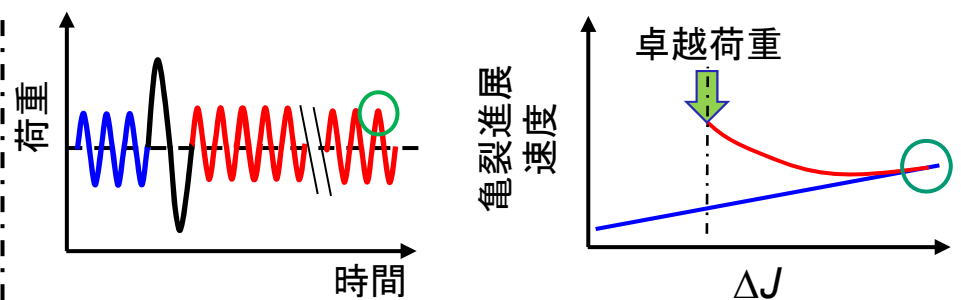
これらの影響を定量的に評価し、荷重振幅の変動が亀裂進展に及ぼす影響を考慮した亀裂進展評価手法を提案

*塑性域: 亀裂前縁に広がる塑性した領域

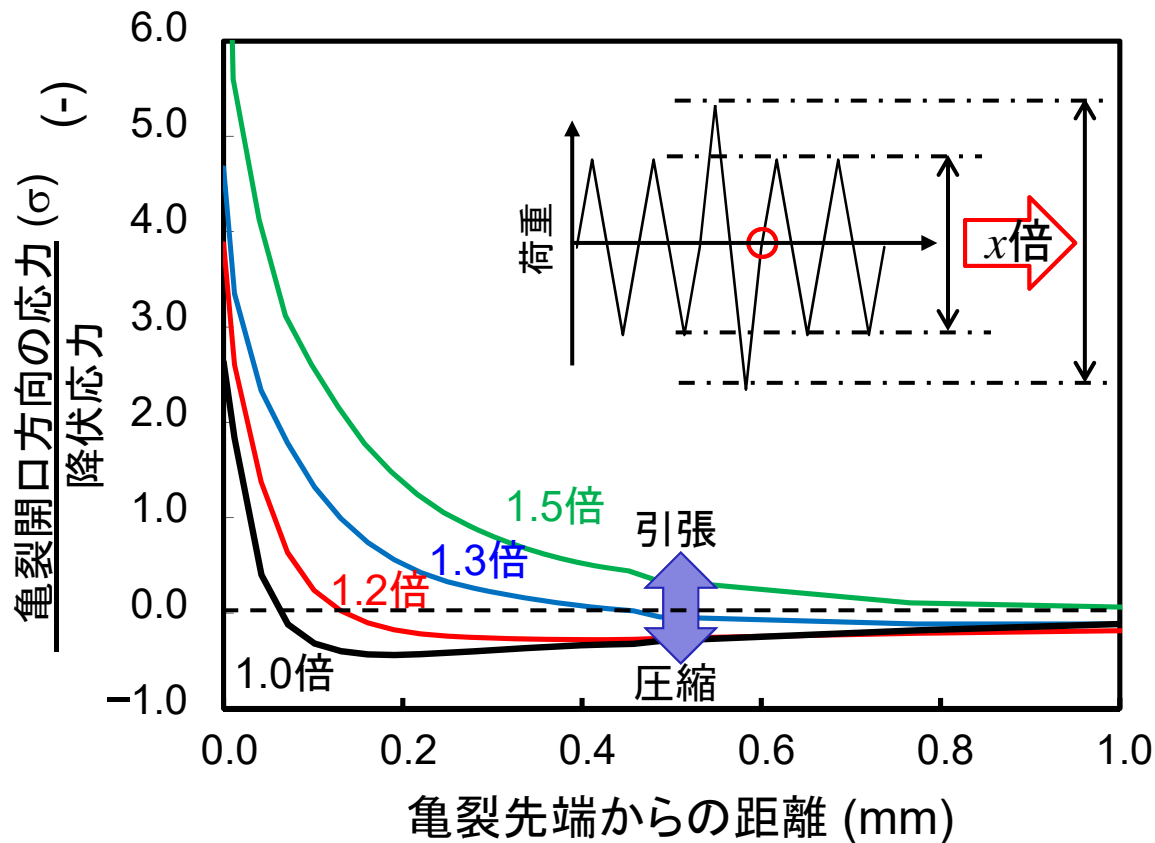
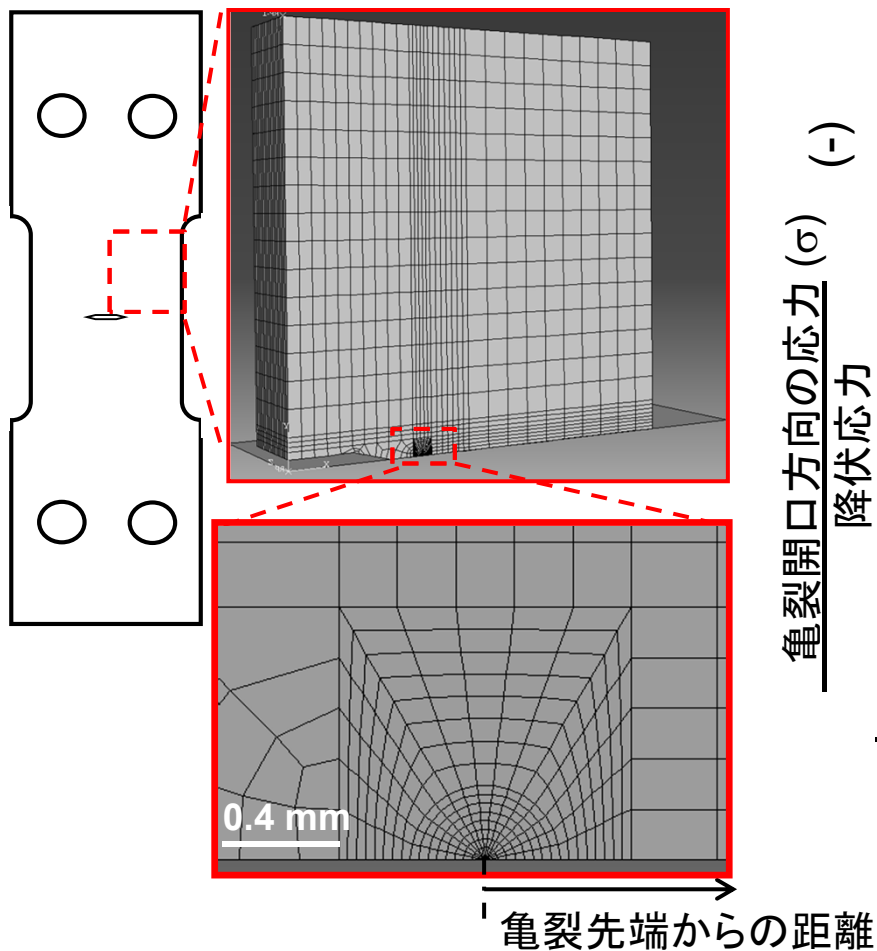
影響範囲内



影響が消える時



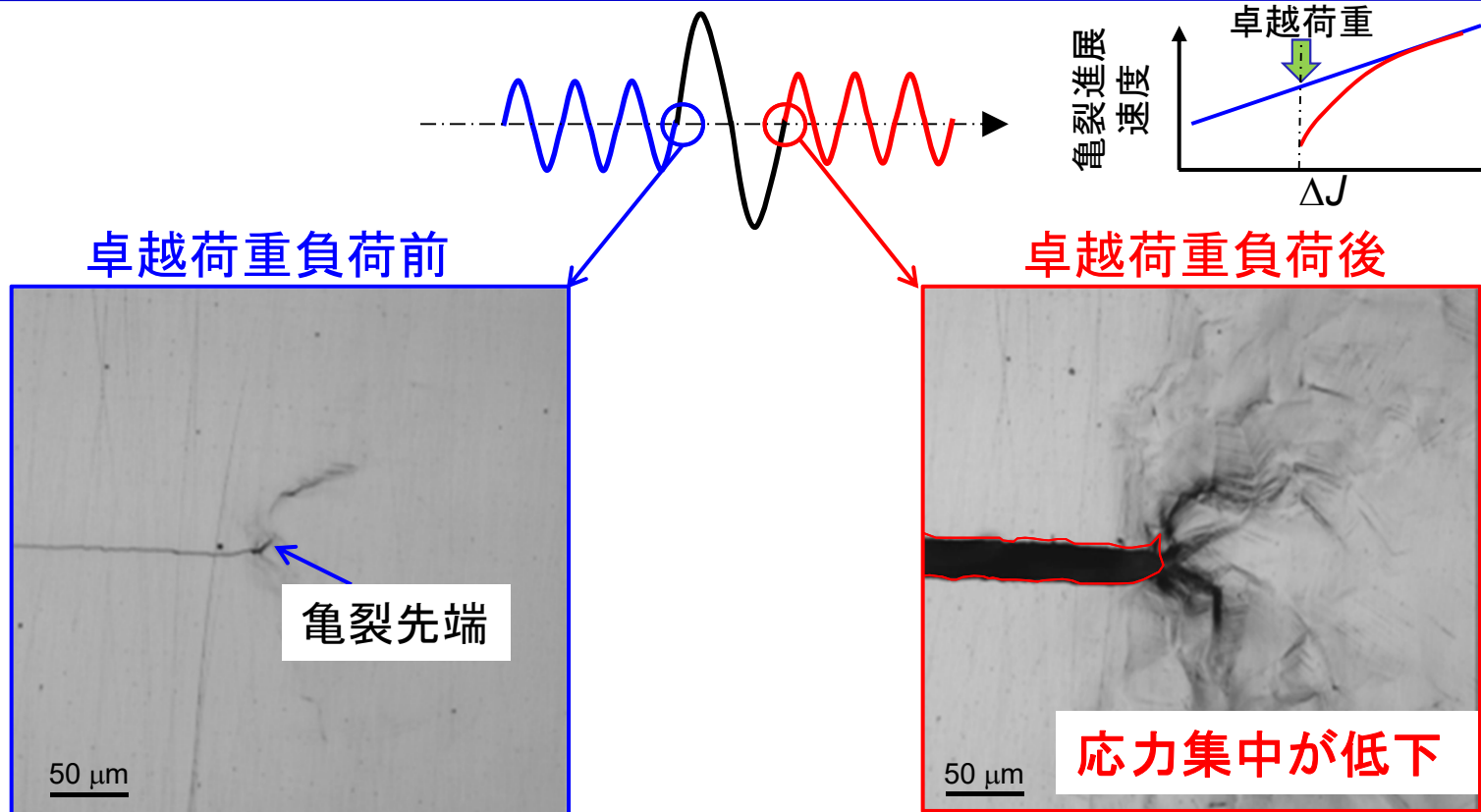
$\frac{r'_{pi}}{r'_{pol} + a_{ol} - a_i} < 1$ 塑性域の影響を受ける範囲は、塑性域と亀裂長さをを用いて定量的に評価



$$\text{Log} \left(\frac{\sigma_{x\text{倍}}}{\sigma_{1.0\text{倍}}} \right) \propto R'$$

*σ: 亀裂先端の応力値

亀裂進展速度への塑性域の影響の大きさは、卓越引張荷重と圧縮荷重から計算される荷重比 R を用いて評価



切欠きからの亀裂進展を評価する式¹⁾

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K - \Delta K_{th}]^m$$

ΔJへの拡張

$$\frac{da}{dN} = C'[\Delta J - \alpha\Delta J_{th}]^{m'}$$

* α: 鈍化の影響範囲を表す係数

亀裂進展速度への亀裂先端形状の影響は、亀裂が進展可能なΔJの下限界値(ΔJ_{th})を用いて定量的に評価

1) J. T. P. Castro, M. A. Meggiolaro and A. C. O. Miranda: Singular and non-singular approaches for predicting fatigue crack growth behavior, International Journal of Fatigue, 27, 10-12 (2005), 1366-1388.

荷重振幅の不規則な変動を考慮した亀裂進展評価手法を以下のように提案

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

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

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

塑性域の影響を考慮して ΔJ を補正する項

$-\alpha \Delta J_{th}$

亀裂先端形状の影響を考慮して ΔJ を補正する項

* β : 亀裂開閉口を考慮するパラメータ

| 種類 | パラメータ | 概要 | 備考 |
|------|-----------------|------------------------------|------------|
| 材料物性 | C' | 疲労亀裂進展則の係数 | 規格等に則り設定 |
| | m' | 疲労亀裂進展則の係数 | 規格等に則り設定 |
| | γ | ΔJ の補正係数 (塑性域の影響の考慮) | 要素試験から設定 |
| | ΔJ_{th} | 亀裂進展における下限界値 ΔJ | 規格等に則り設定 |
| 荷重条件 | ΔJ | 亀裂進展の駆動力 | 荷重変位曲線から算出 |
| | β | ΔJ の補正係数 (亀裂開閉口の考慮) | 荷重変位曲線から算出 |
| | r'_p | 塑性域寸法 | 荷重変位曲線から算出 |
| | R' | 卓越荷重比 | 荷重変位曲線から算出 |
| | α | 亀裂先端形状の影響の範囲を表す係数 | 荷重変位曲線から算出 |

荷重振幅の不規則な変動を考慮した亀裂進展評価手法を以下のように提案

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

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

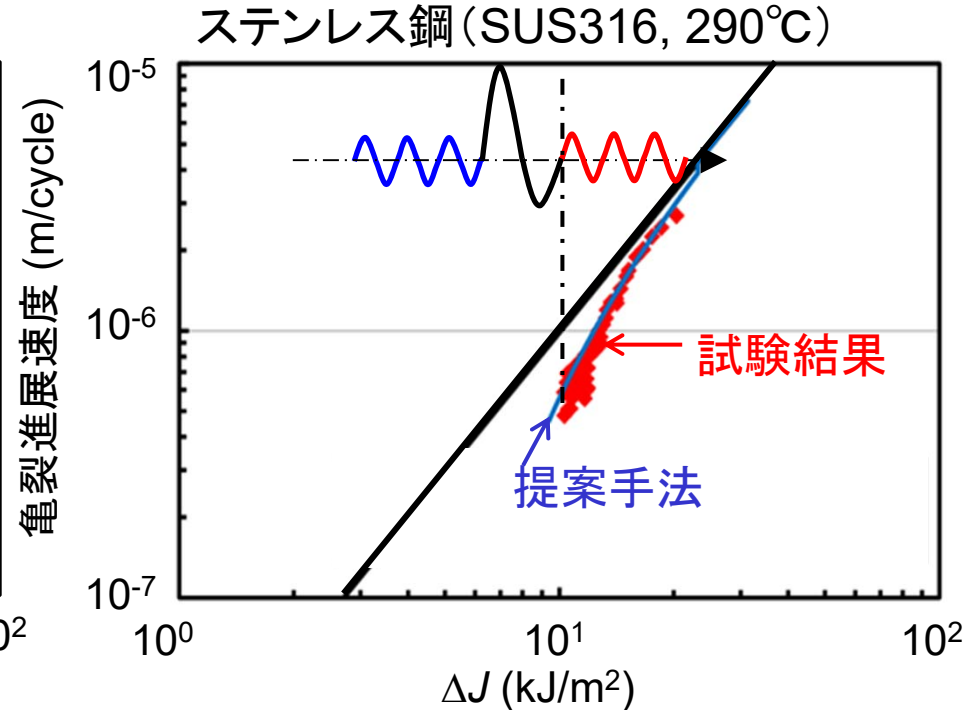
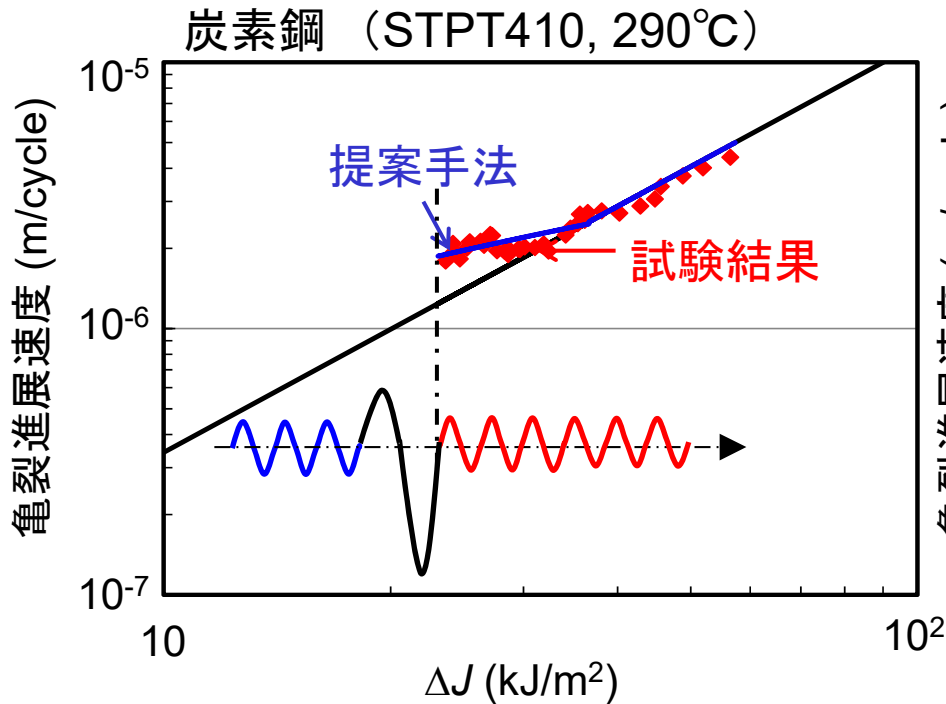
$$\Delta J_{eff} = \beta \Delta J \left(\frac{r'_{pi}}{r'_{pol} + a_{ol} - a_i} \right)^{\gamma R'}$$

塑性域の影響を考慮してΔJを補正する項

$$- \alpha \Delta J_{th}$$

亀裂先端形状の影響を考慮してΔJを補正する項

*β: 亀裂開閉口を考慮するパラメータ

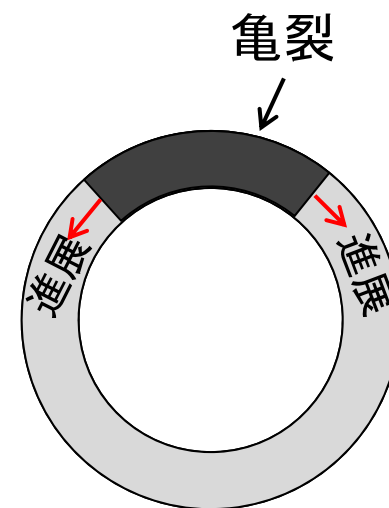
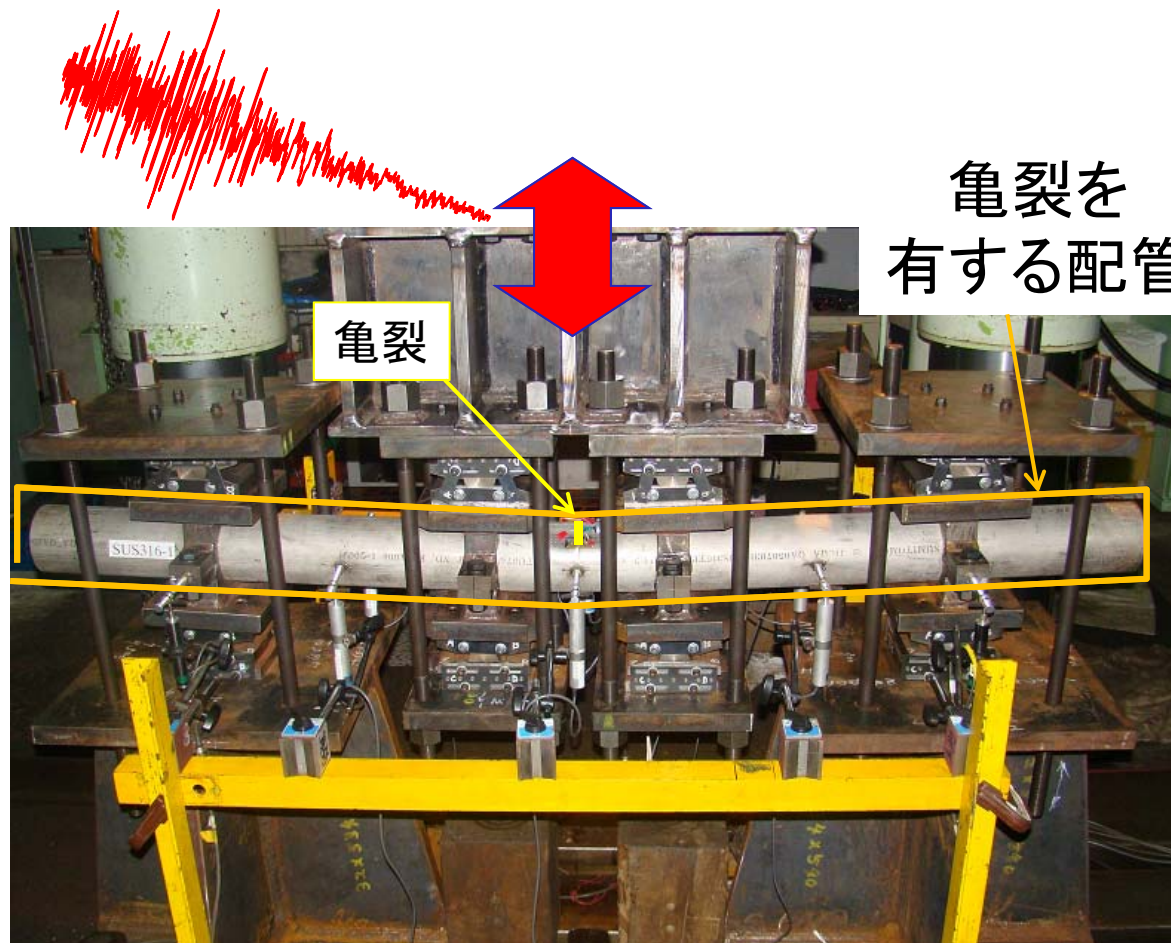


要素試験と有限要素解析を通じて、地震時亀裂進展評価手法を提案

亀裂を有する配管に模擬地震動による応答荷重を負荷する亀裂進展試験を実施

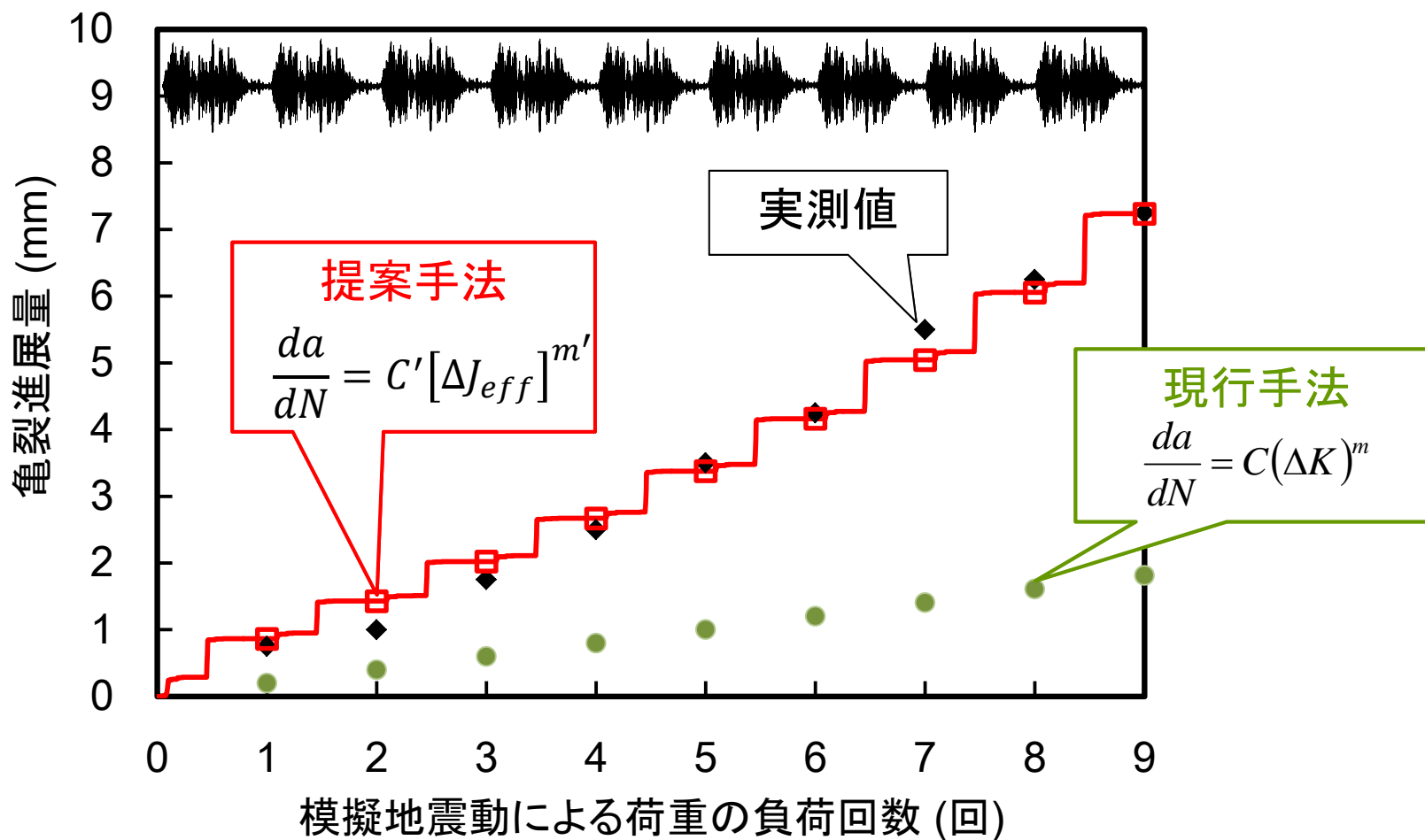


亀裂進展量について、実測値と提案手法により求めた値とを比較



亀裂部分の断面

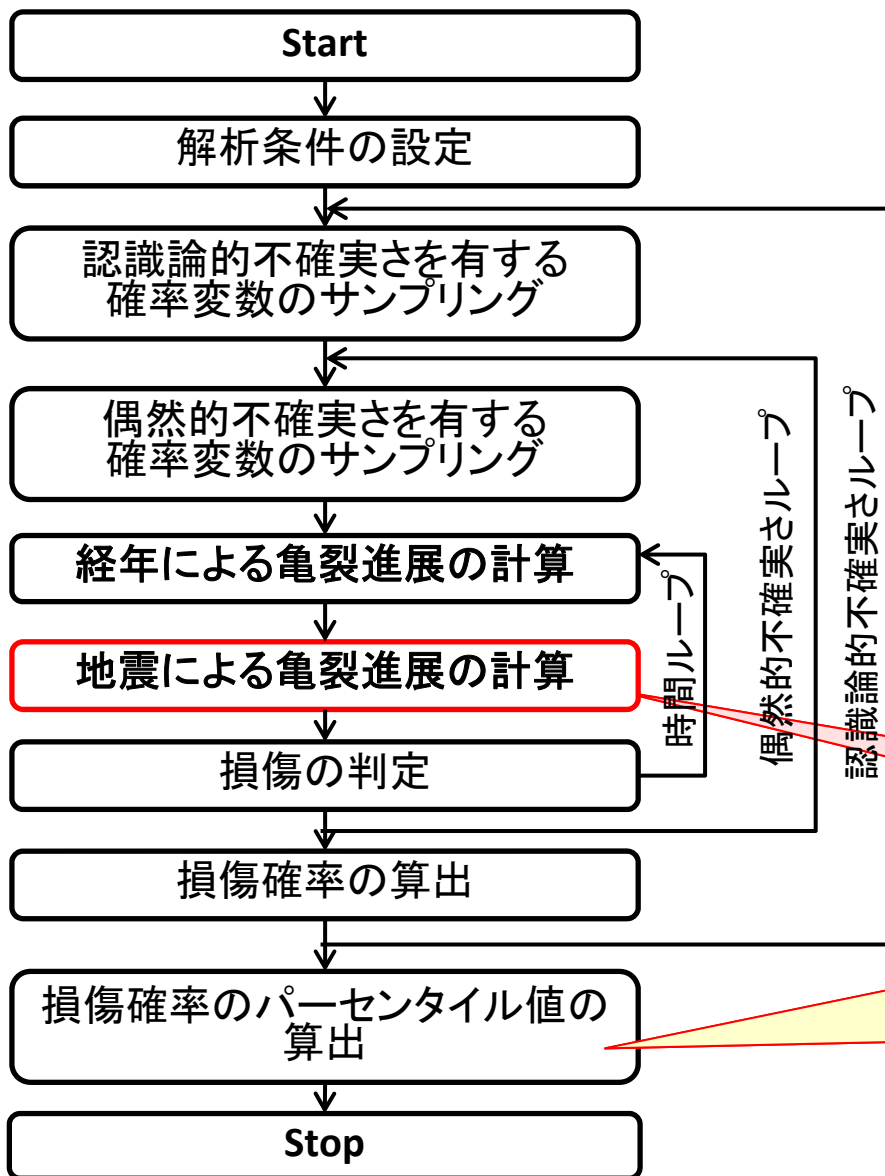
ステンレス鋼(SUS316, 室温, 大気中)



提案手法での評価結果は実測値とほぼ一致

配管を用いた試験により、提案手法の妥当性を確認

PASCAL-SPの解析フロー

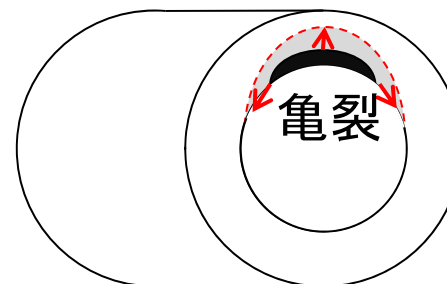


PASCAL-SP:

原子力発電プラントの配管を対象として、疲労、IGSCC、PWSCC等の経年劣化事象による亀裂の発生や進展を考慮して、損傷確率をモンテカルロ法により求めることが可能な確率論的破壊力学解析コード

*IGSCC: 粒界型応力腐食割れ

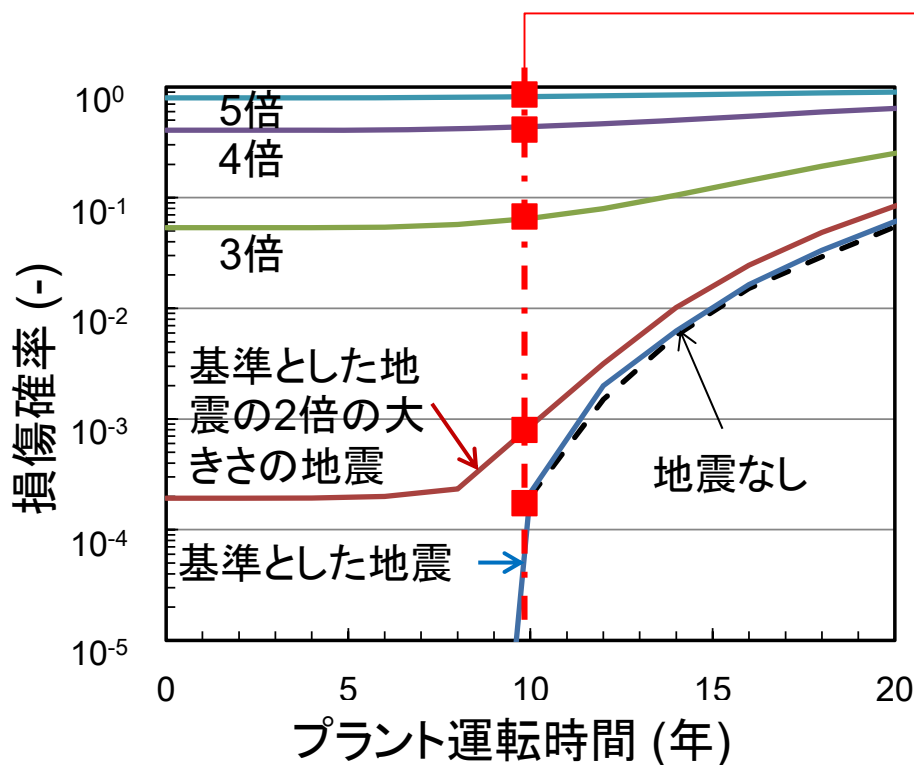
*PWSCC: 一次系環境下応力腐食割れ



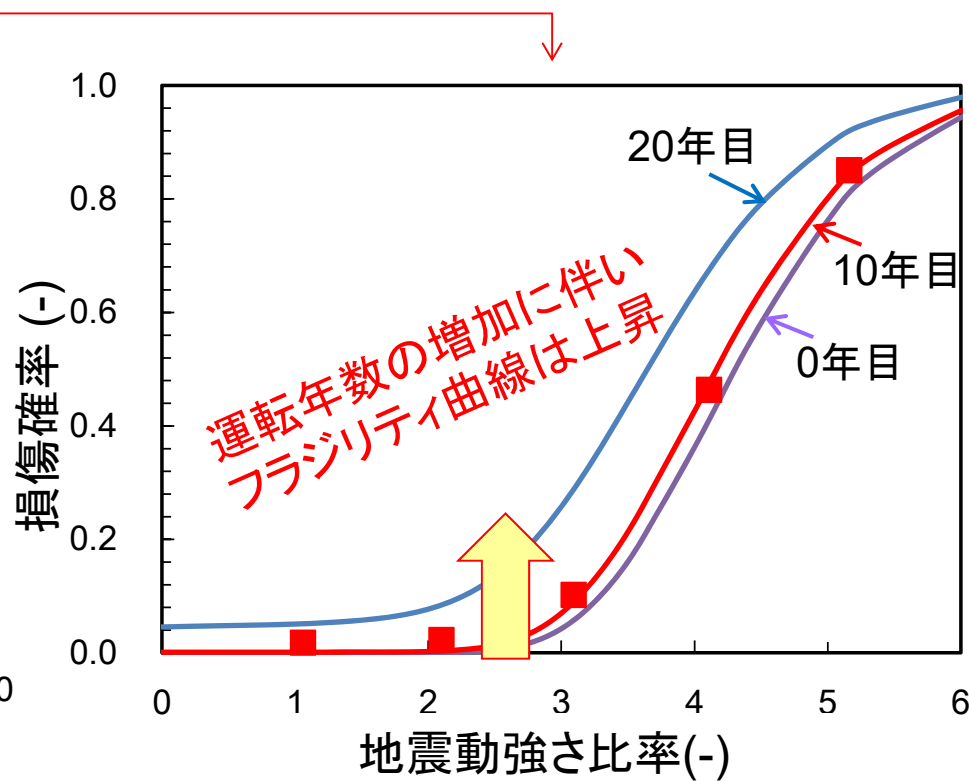
提案手法をPASCAL-SPに導入

得られた損傷確率を地震動強さとの関係に整理することで、フレンジリティを評価可能

- ✓ 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



プラント運転年数と損傷確率の関係



脆弱性曲線

PASCAL-SPを用いて経年配管を対象とした脆弱性評価が可能となった。

- ① 地震時亀裂進展評価手法の整備
 - 設計上の想定を超える地震による亀裂進展の評価を可能にした。
 - 配管を用いた試験により、提案手法の妥当性を確認した。
- ② フラジリティ評価手法の整備
 - 既設プラントの地震PRAに資する経年配管を対象としたフラジリティ評価を可能にした。

今後の計画：

- 地震時亀裂進展評価手法におけるパラメータのばらつき評価モデルの精緻化を図る。
- 地震PRAに資するフラジリティ評価を評価者が容易に実施できるよう、経年配管を対象とした評価を行う上での基本事項、その考え方及び技術的根拠をまとめたフラジリティ評価要領を整備する。
- フラジリティ評価手法の経年劣化事象に関する適用対象の拡大を図る。