

JASMiRT 主催 第1回ワークショップ

『設計基準を超える地震・津波等自然外的ハザードに対する安全性』

# 破損モードを考慮したベストエスティメートに基づく フラジリティ評価の必要性

---

平成28年10月21日

東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻  
笠原直人

# 1. 背景と課題

福島原子力発電所事故の教訓として、「事故が起こらないように設計する」から「事故が起こることを前提とした設計と対策」への明瞭な意識の転換が必要となっている（政府事故調報告書）。それを具体化するため、**深層防護の「第1層から第3層（設計）」**に加えて**「第4層（設計を超える状態）」**への重点的な取り組みが要求されている。

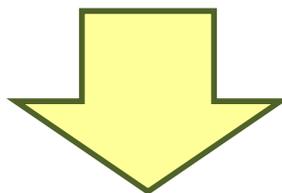
第4層において現実的な事故シナリオに基づく対策を立案するには、**壊れる場所、順番、破損モードの特定と各破損モードに対する最適強度評価**を介したベストエスティメートに基づくフラジリティ評価が必要である。

これに対して、シビアアクシデントや過大地震など設計を超える極限荷重に対しては、原子炉構造物の壊れ方ははっきり分かっていないことに課題がある。

## 設計段階における苛酷事故時への対応の導入

### IAEA NS-R-1(2000) Safety of Nuclear Power Plants: Design

運転状態		事故状態	
通常運転	予想される 運転時の事象	設計基準事故(DBA)	設計基準外事故 (BDBA)
設計基準			アクシデントマネジメント



### IAEA SSR-2/1 (2012) Safety of Nuclear Power Plants: Design Specific Safety Requirements

運転状態		事故状態	
通常運転	予想される 運転時の事象	設計基準事故(DBA) <b>保守的評価</b>	設計拡張状態(DEC) <b>最適評価</b>
設計基準			

# 第4層(設計を超える状態)における破壊現象の調査

## 炉心損傷後の荷重と破損モード

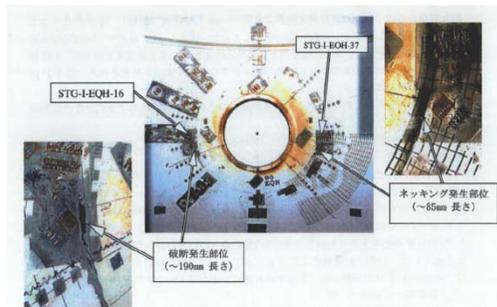
[従来基準の想定]

高温内圧による原子炉圧力容器や格納容器の**延性破壊**

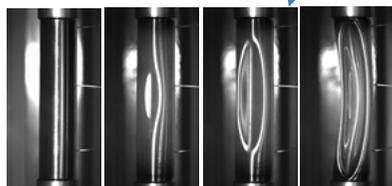


[試験観察]

高温内圧による原子炉格納容器の**局部破損**



[福島事故解析]  
中性子計装管の  
高温外圧座屈



## 過大地震時の想定破損モード

[従来基準の想定]

最大加速度(慣性力)による**崩壊**およびそれに続く**破断**

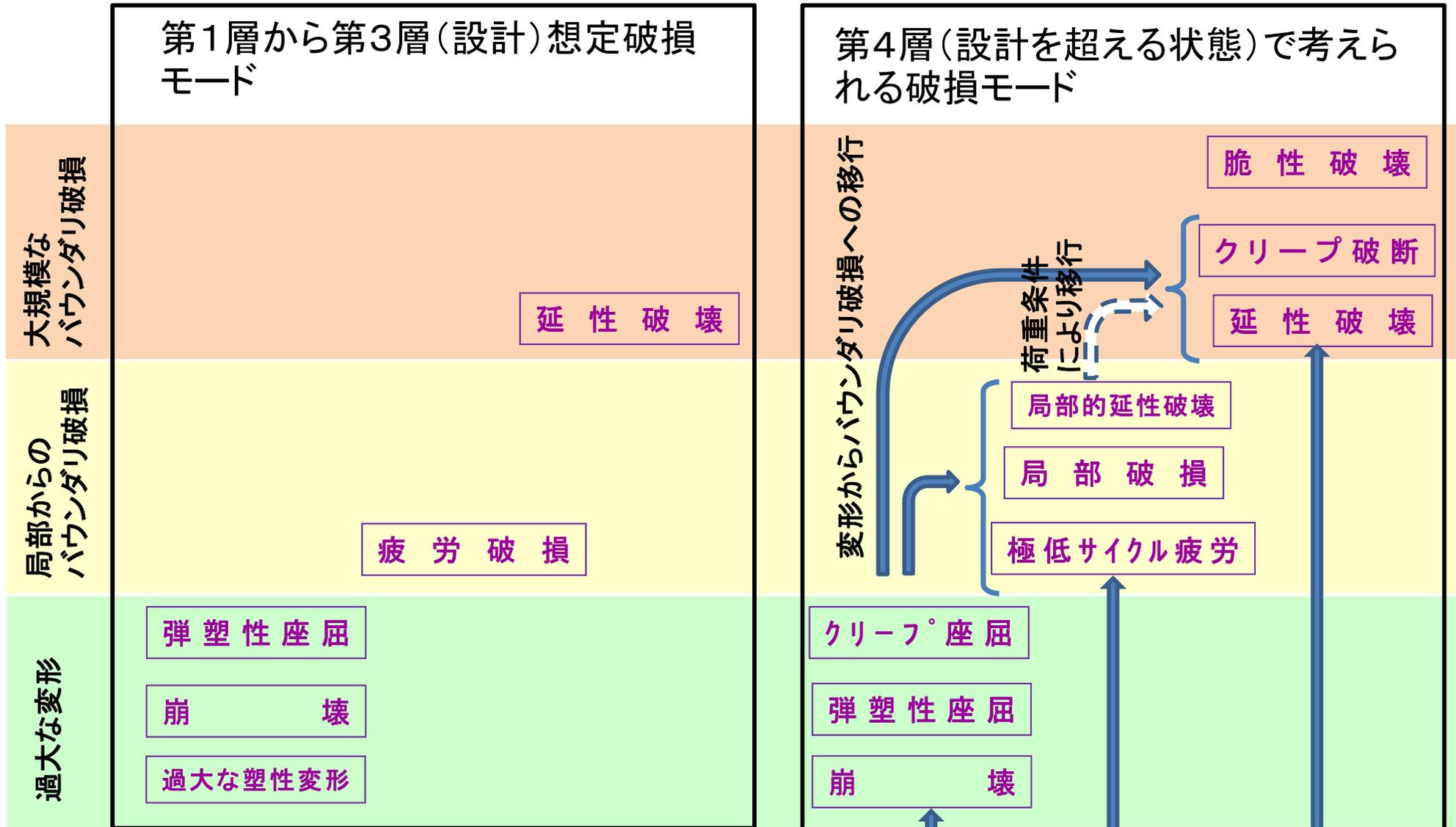


[試験観察]

ひずみの繰り返しで生じる**疲労き裂**の発生と進展



# 設計状態と設計を超える状態における破損モードの比較

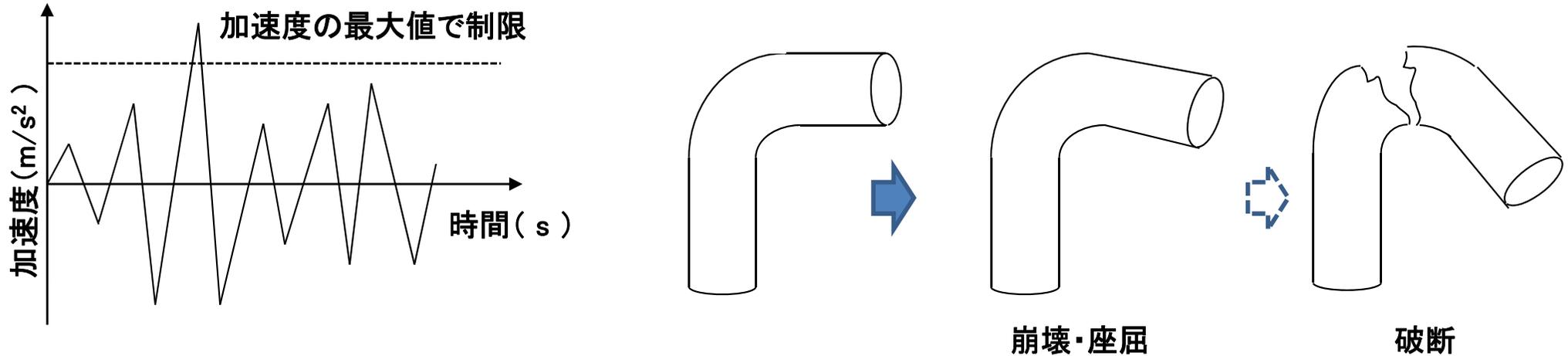


設計評価:  
すべての供用状態で想定される破損モードに対して安全側に評価

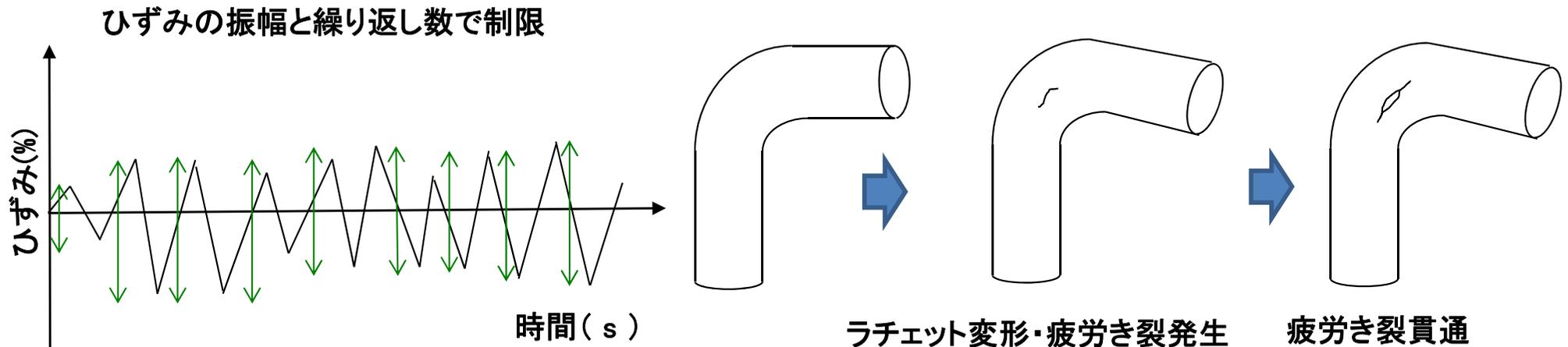
設計想定外荷重に対する評価:  
それぞれの破損様式に対して最適評価

## 2. 過大地震荷重による配管の破損モード解明

従来の設計で想定されているのは、最大加速度(慣性力)による崩壊・座屈およびそれに続く破断であり、地震PSA等も本想定で評価されている。



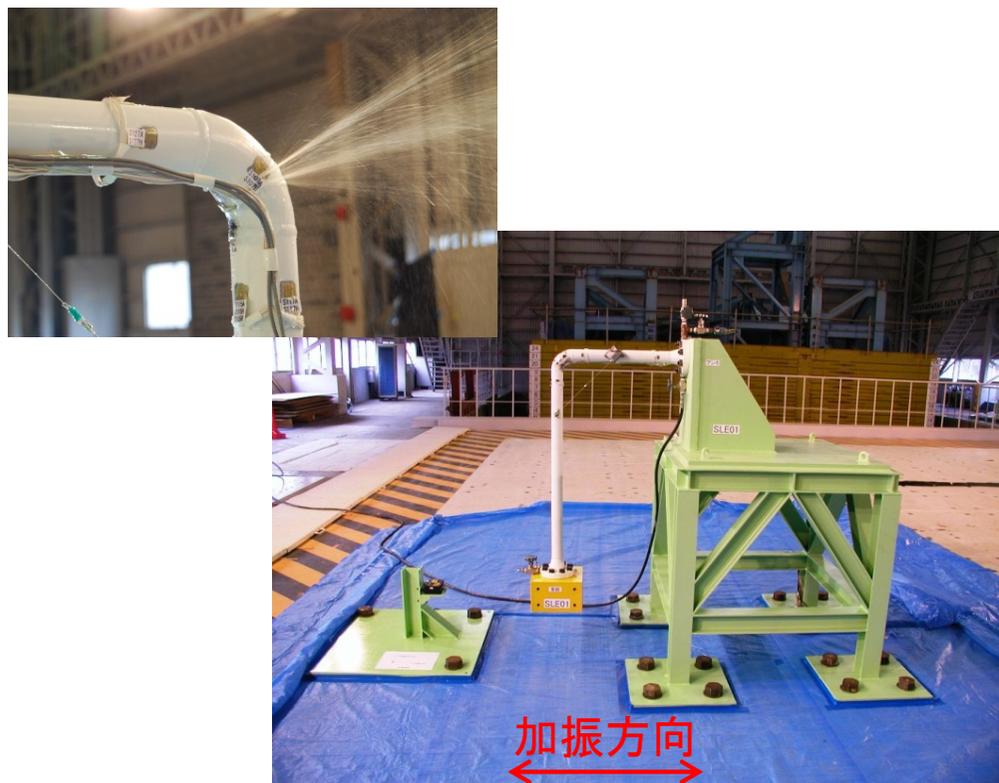
近年の実験では、ひずみの繰り返しで生じる疲労き裂の発生と進展が支配的である結果が得られており、民間基準(JEAC4601-2008)で提案されているが、規制には認められてない。



# 強振動荷重と模擬材料(鉛)による配管破損試験

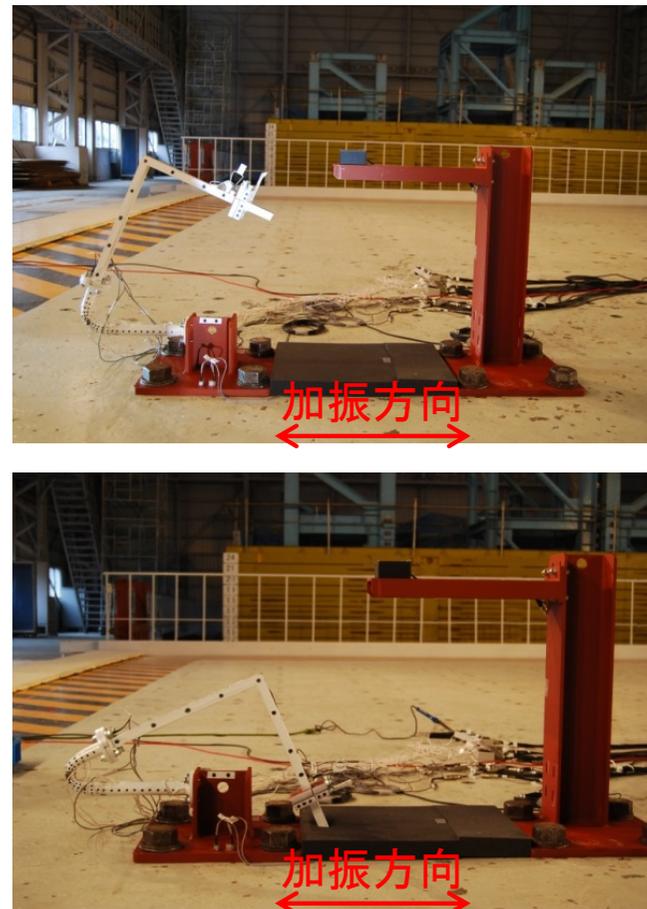
## 実機材料によるエルボ振動試験

設計での崩壊レベルを大きく超える(約20倍)入力でも疲労破損のみが発生した。



## 模擬材料によるエルボ試験

降伏応力の約30倍を超える場合にラチェット後の崩壊が生じた。

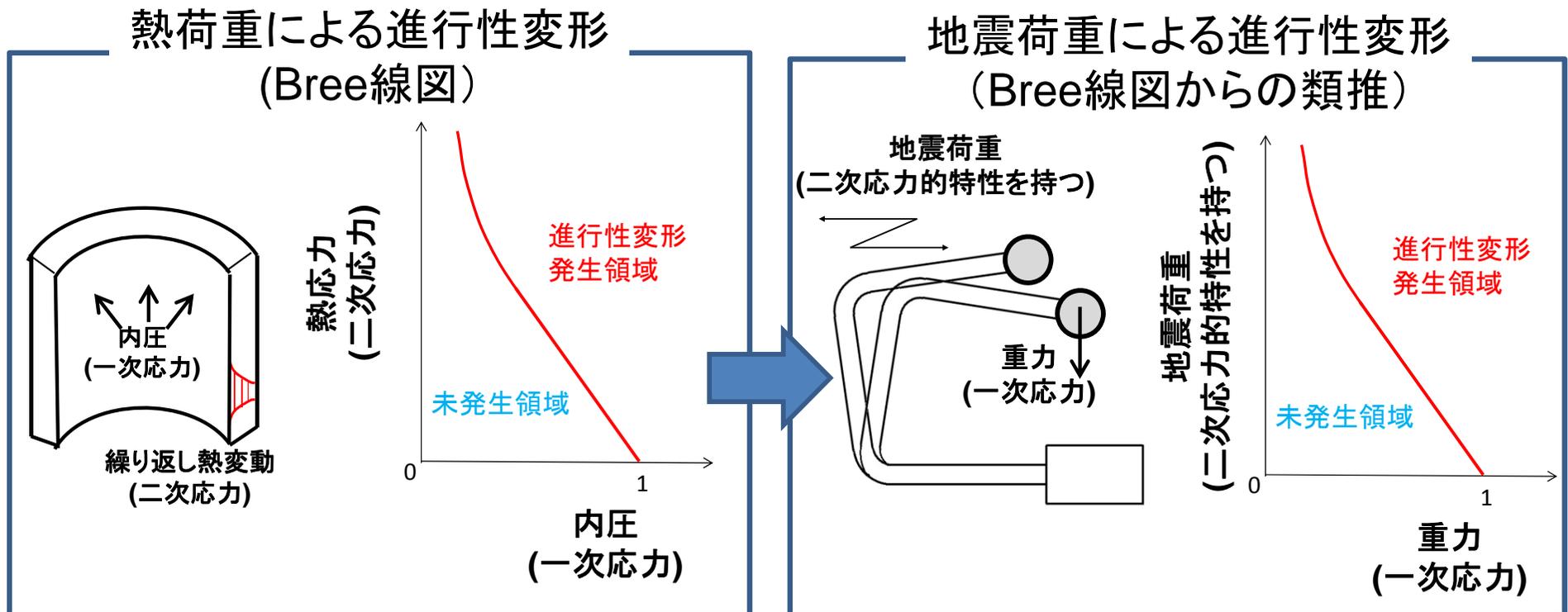


これらの結果から、地震荷重により、ラチェット変形、崩壊、疲労の各破損モードが生じる条件を、加振力と重力荷重の組み合わせにより整理した。

# 3. 力学パラメータに基づく破損モードマップの開発

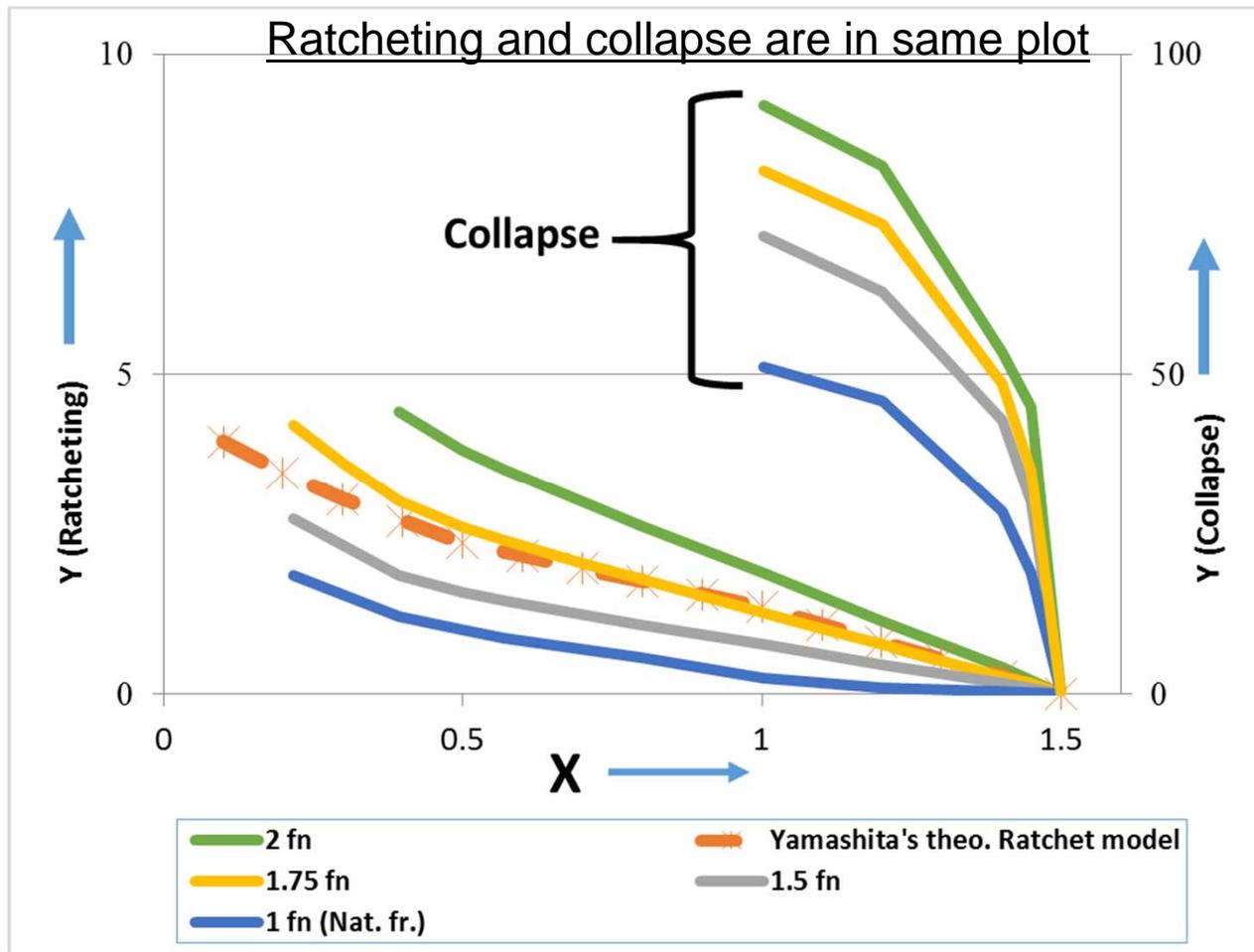
## 熱荷重と地震荷重の相違点に着目したデータの整理

- ▶ 地震荷重は従来は荷重制御型として扱われるが、交番性を持つことから変位制御型としての性質も持つことがわかってきた



- ▶ **重力を一次応力、地震荷重を二次応力**として扱うことで、熱ラチェット変形の発生条件と同様に評価することが可能ではないか？

# 破損モードマップの例



fn:固有振動数

Md Abdullah Al BARI, Sakemi RYOTA, Takuya SATO, Naoto KASAHARA, Numerical study on piping failure modes under seismic loading - ratcheting and collapse, 日本保全学会第13回学術講演会, 神奈川県立かながわ労働プラザ(2016)

## 4. まとめ

深層防護の「第1層から第3層（設計）」と「第4層（設計を超える状態）」では荷重条件が異なることから、破損モードの種類も異なってくる。また、保守的評価が目的の設計用クライテリアは必ずしも現実の破損モードと対応していない。

過大地震を受ける配管の破損モードを実験的、解析的に調べ、疲労、ラチェット変形、崩壊の3種類のモードの破損データを得た。

熱ラチェット評価線図に、周波数の概念を導入することで、地震荷重に対するラチェット変形と崩壊の破損モードを識別評価する破損モードマップを検討した。

地震荷重に限らずSA時の高温高圧荷重も含めて、第4層に対応するには、現実の破損モードと対応したフラジリティ評価が必要である。