

破壊制御技術導入による 大規模バウンダリ破壊防止策に関する研究

—設計(深層防護第1層～第3層)とは異なる
設計を超える状態(第4層)のための構造強度研究—

2021年3月17日

研究代表者：東京大学 笠原直人

連携機関：日本原子力研究開発機構
防災科学技術研究所

1. 研究目標と全体研究計画

研究目標

福島第一原子力発電所事故の教訓として、「構造設計」の役割が見直されている。破壊防止を目的とした設計（深層防護1層～3層）に留まらず、破壊が起きても、その影響拡大を緩和する等の広義の設計概念の構築が求められている（主に第4層）。

受託者が提唱する破壊制御技術は、設計想定を超える極限荷重の発生時に、被害の小さい壊れ方を先行させることによって荷重やエネルギーを低減させ、破局的な壊れ方を避けることを目指す**新しい技術**である。これを応用して、第4層に相当する極限状態に対して冷却機能や閉じ込め機能の喪失に繋がる大規模バウンダリ破壊を防止する**広義の構造設計法**を開発する。

具体的には、事故時の高温・高圧荷重下において、ねらった局部から小規模な漏洩を起こすことで荷重を開放し大量漏洩につながる**大規模破壊を防止する容器構造**、過大地震時に塑性変形により振動エネルギーを散逸させ**破断を防ぐ配管構造**を提案する。

全体研究計画

実施項目	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
I. 高温・高圧時破壊制御技術		<p>I-a. 高温・高圧破壊クライテリア(JAEA) [破壊現象解明、模擬材料試験技術]</p> <p>I-b. 高温・高圧破壊基礎試験 [破壊現象解明、相対強度評価]</p> <p>I-c. 高温・高圧破壊構造物試験 [相対強度評価、破壊制御構造]</p>		
II. 過大地震時破壊制御技術		<p>II-a. 振動破壊クライテリア [破壊現象解明、相対強度予測]</p> <p>II-b. 振動破壊基礎試験 [破損現象解明、相対強度予測]</p> <p>II-c. 振動破壊構造物試験(防災科研) [模擬材料試験技術、破壊制御構造]</p>		
III. 大規模バウンダリ破壊防止法の提案		<p>III. 設計基準外事象に対する破壊防止ガイドライン [BDBEの考え方、破壊制御法]</p>		
IV. 研究推進	▼ ▼	▼ ▼ ▼	▼ ▼ ▼	▼ ▼ ▼

2. 研究成果

2-1 高温・高圧時破壊制御技術

設計想定を超える高温・高圧荷重を受ける容器では、破損モードとして延性破壊と局部破損が生じる可能性がある。高温高圧時の破損箇所と破損モードを精度良く予測し制御するため、延性破壊と原子炉構造設計基準で考慮されない局部破損を連続的に評価する高温・高圧破壊クライテリアを開発した。

FY2016-FY2017



切り欠き付き丸棒試験



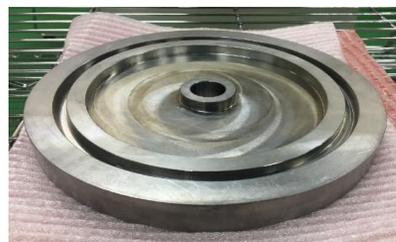
内圧引張円筒試験

FY2018-FY2019



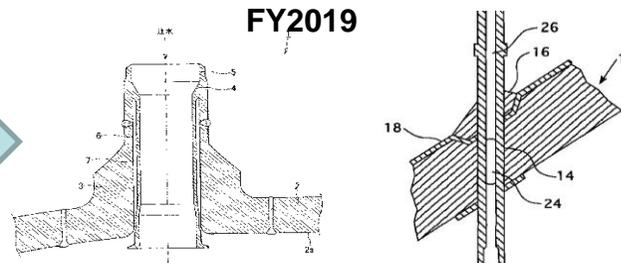
ノズル付き容器試験

FY2017-FY2018



ノズル付き円板試験

FY2019



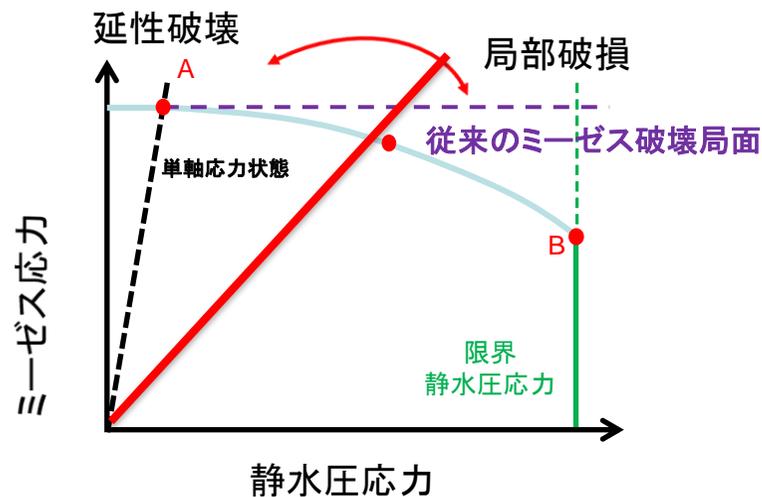
実機(解析)

模擬材料による構造物試験技術を開発し適用

高温・高圧破壊クライテリアの開発

静水圧応力とミーゼス応力の組み合わせにより、延性破壊と局部破壊の両破壊モードを連続的に評価できる高圧破壊クライテリアを提案

延性破壊
(3軸応力度小)



局部破壊
(3軸応力度大)



$$3\text{軸応力度} = \text{静水圧応力} / \text{ミーゼス応力}$$

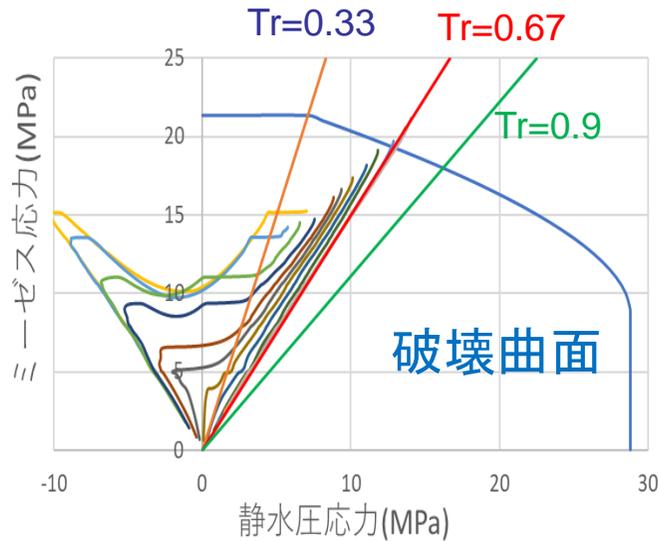
構造物試験による高温・高圧破壊クライテリアの検証



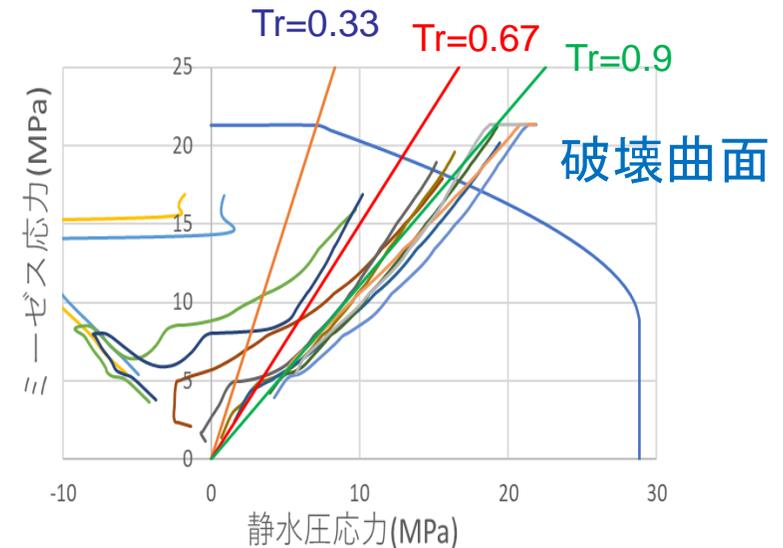
延性破壊



局部破損



小さな3軸応力度で破壊曲面
にぶつかる



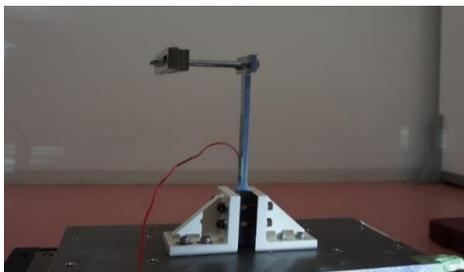
大きな3軸応力度(1.0程度)で
集中的に破壊曲面とぶつかる

高温高圧時の破損箇所と破損モードを精度良く予測できるようになった。

2-2 過大地震時破壊制御技術

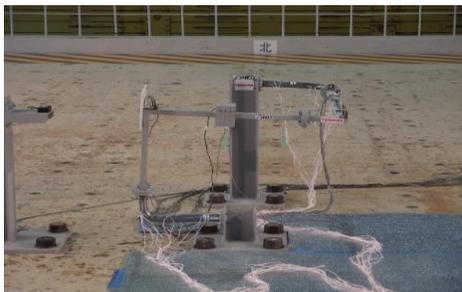
過大地震を受ける配管で想定される破損モードとして、**ラチェット変形**（荷重の繰り返しに応じて進行する変形）と**塑性崩壊**がある。過大地震時の破損箇所と破損モードを制御するため、**交番荷重の特徴を考慮した**振動破壊クライテリアを開発する。

FY2016-FY2019



梁試験

FY2018-FY2019



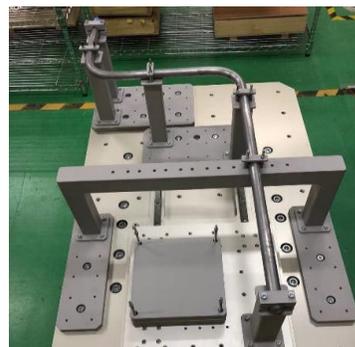
2エルボ配管試験

FY2017-FY2018

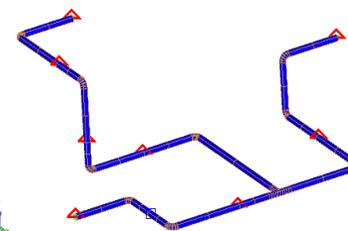


1エルボ配管試験

FY2019



配管系模擬試験

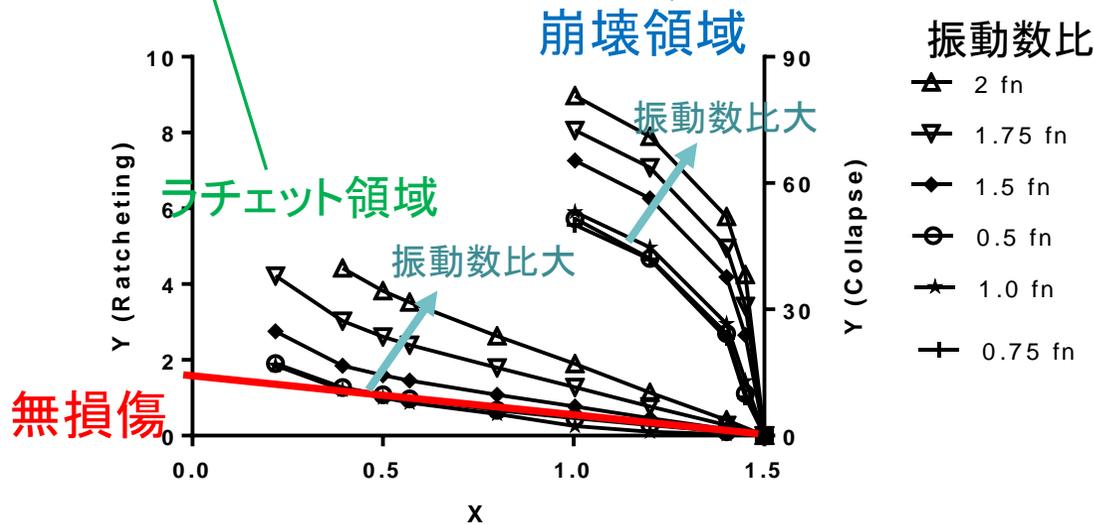
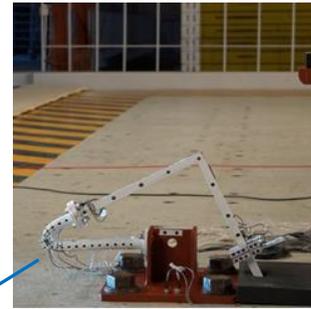


実機(解析)

模擬材料による構造物試験技術を開発し適用

振動数比に着目した振動破壊クライテリアの開発

重力と振動加速度、**振動数比(入力振動数/固有振動数)**の組み合わせにより、ラチェット変形と崩壊の破損モードのメカニズムと相対強度を予測する振動破壊クライテリアを開発した。



振動数比

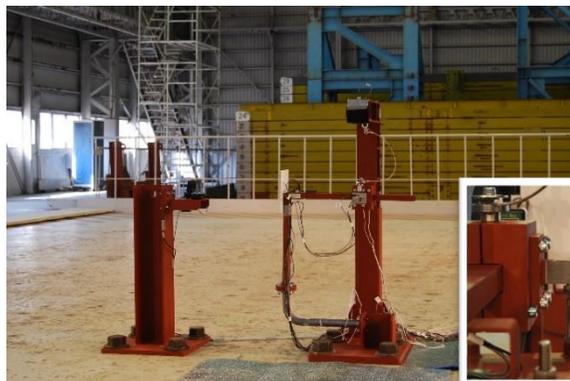
- ▲ 2 fn
- ▼ 1.75 fn
- ◆ 1.5 fn
- 0.5 fn
- ★ 1.0 fn
- ✦ 0.75 fn

振動数比が大きくなると、荷重と変位の位相差が大きくなり、床から構造に振動エネルギーが伝達されにくくなる。

重力による応力 $X = \sigma_g / \sigma_y$

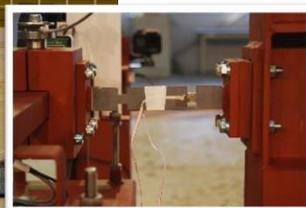
加速度による見かけの応力 $Y = \sigma_{ext} / \sigma_y$

破壊制御のデモンストレーション実験(動画)



初期状態

- 振動数比1以下の加振
- 支持部材を入れることで応答抑制



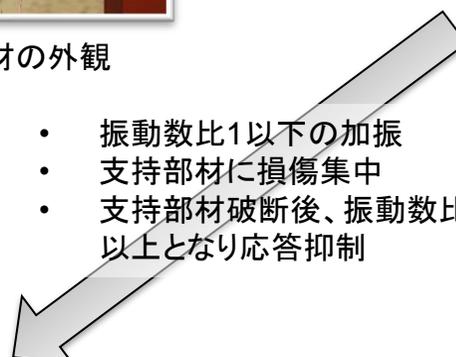
板材の外観



2.5Hz-10サイクル入力後
・6Hz加振開始前
(板材破断前)



- 振動数比1以下の加振
- 支持部材に損傷集中
- 支持部材破断後、振動数比1以上となり応答抑制



6Hz-710サイクル入力後
(板材破断後+100サイクル)



- 振動数比1以下の加振に変更
- 試験体倒壊をワイヤにより防止

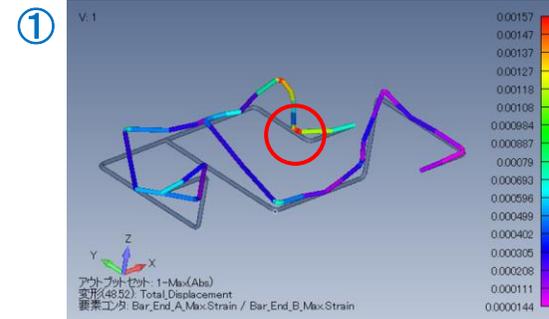
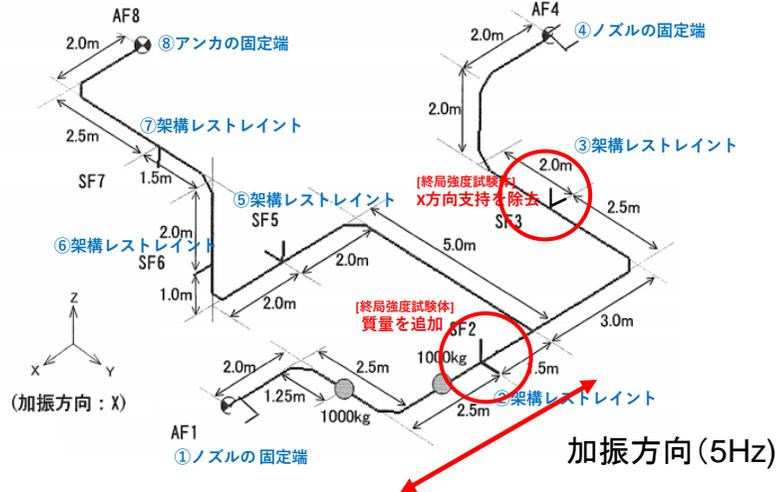


2.5Hz-5サイクル入力後
(板材破断後)

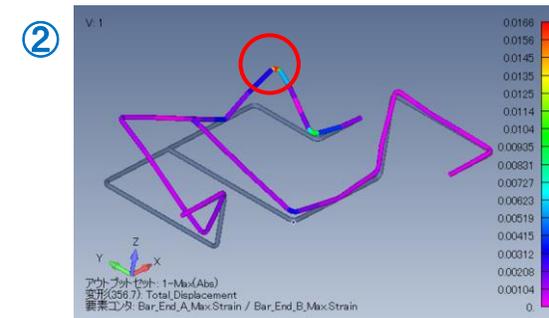
支持部の先行損傷により配管の破壊を制御できる例を示した

過大地震を受ける配管の緩和対策の例

過大地震時の破断を防ぐ配管構造の例として、NUPEC軽水炉主蒸気配管試験を取り上げる。破壊制御により、配管共振周波数を地震周波数より下げること、地震動の配管への伝達を防ぎ、配管自体の健全性を保つ。

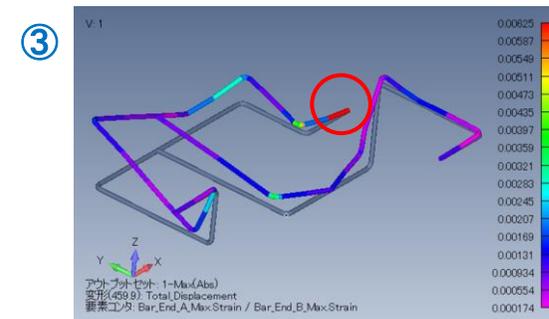


以下を破壊制御
配管支持構造強度
< 配管本体強度



支持構造破損時の
主要な周波数成分

配管共振周波数
< 地震周波数



支持部が2か所破
損することで、設計
時より振動数比が
大きくなることにより
最大応力と最大ひ
ずみが低下すること
を確認

モデル	設計時	1か所破損	2か所破損
固有値	7.87 Hz	5.41 Hz	2.19 Hz
支持構造	破損なし	③ 破損	② ③ 破損
付加質量	1,000 kg × 1 (①)	1,000 kg × 2 (① ②)	
口径(外径)	200A (外径の公称値 216.3 mm)		
肉厚	Sch40 (肉厚の公称値 8.2 mm)		
材質	炭素鋼 STS410		

モデル	設計時	1か所破損	2か所破損
最大ひずみ (%)	② 0.19	① 2.01	③ 0.65
最大応力 (MPa)	② 349.7	① 483.8	③ 383.6

設計基準外事象に対する構造強度ガイドライン*

BDBE1000 総則

BDBE2000 設計基準外事象に対する対策の考え方

BDBE2100 設計基準外事象に対する安全の考え方

BDBE2200 構造強度に関する現状の課題と新しい考え方

BDBE3000 設計基準外事象に対する構造強度の考え方

BDBE3100 設計基準外事象に対する要求性能

BDBE3200 実際の破損挙動予測の必要性

BDBE3300 実際の破損挙動予測の方法

BDBE4000 設計基準外事象に対する破損影響の緩和

BDBE4100 破壊制御技術の適用

BDBE4200 緊急対応策(AM)との効果的組み合わせ

BDBE5000 破壊制御を適用した破損影響の緩和対策

BDBE5100 高温・高圧荷重を受ける容器の破損影響緩和対策

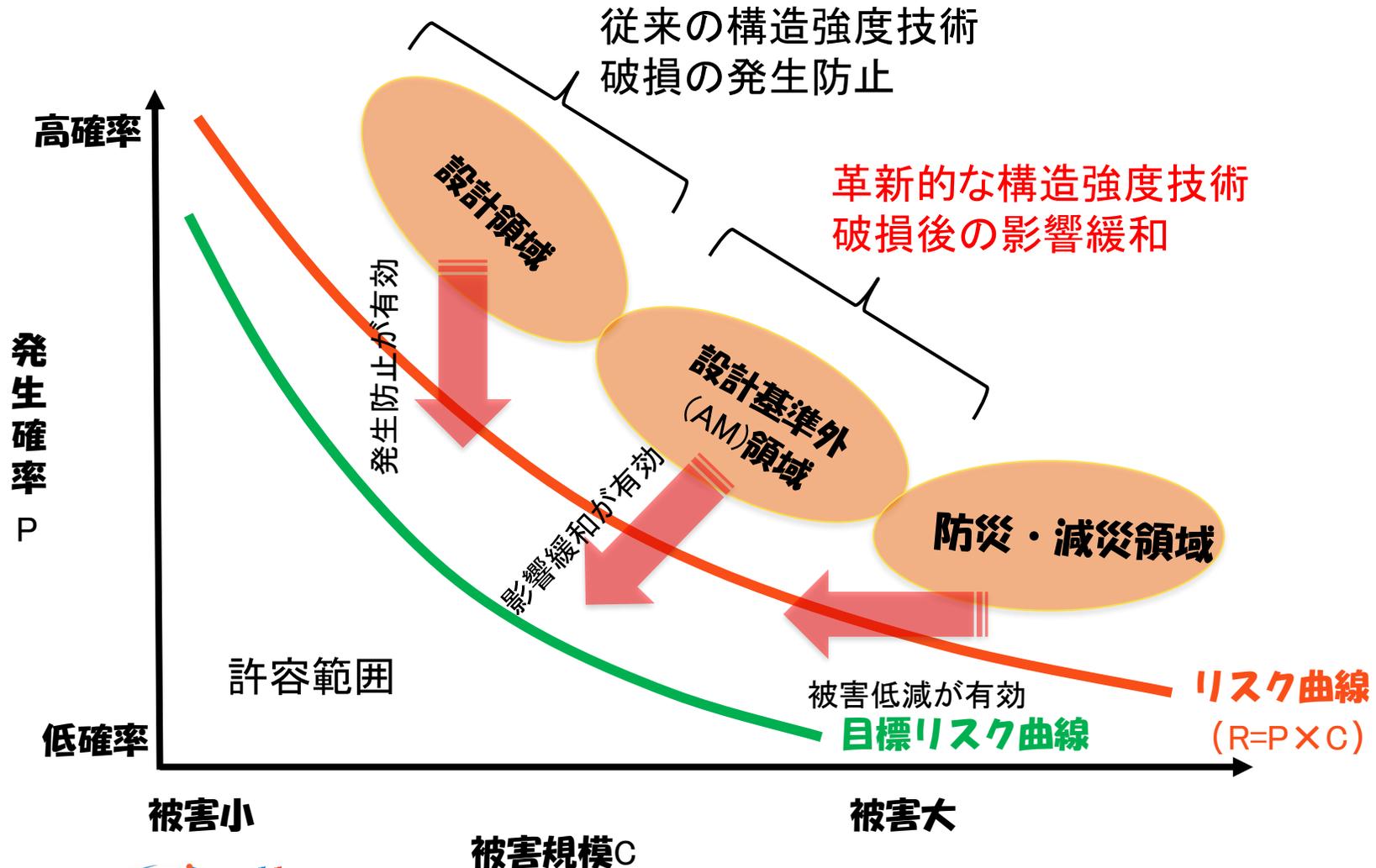
BDBE5200 過大地震を受ける配管の破損影響緩和対策

* 将来的に日本溶接協会から発行することを想定

BDBE2000 設計基準外事象に対する対策の考え方

BDBE2100 設計基準外事象に対する安全の考え方

従来とは異なる新しい構造強度アプローチを提案



国際会議における討論の主導

原子力構造工学分野の2大国際会議にて、BDDBEに対する構造強度アプローチに関する議論をリードした。

米国機械学会圧力容器会議 (ASME PVP) 毎年開催

設計基準外事象セッションを企画

「DA-14 Evaluation and Countermeasure for Beyond Design Basis Events」

発表実績

PVP2017 (2件発表, 受賞1件), PVP2018 (3件発表),

PVP2019 (3件発表), PVP2020 (3件発表)

原子炉構造力学国際会議 (SMiRT) 1年おきに開催

SMiRT会議日本開催に向けた特別セッションを企画

「Actual system failure sequences and mechanisms under extreme loadings」

発表実績

SMiRT24 (3件発表, 受賞1件), SMiRT25 (4件発表) ……

SMiRT27 (日本誘致成功)

日本開催SMiRTにて、福島第一発電所事故を教訓とした新しい技術として世界に発信する準備を進めている (JASMiRT国内シンポジウム)



SMiRTボードメンバー, 元カナダ規制委員長らとの意見交換

3. まとめ

構造強度工学は従来主にDBEに適用され、破損発生防止を目的としてきた。これに対し本研究ではBDBEに対する新たな構造強度アプローチとして、破壊制御技術を適用した破損影響の緩和策の開発を目的とした。

- ・原子炉構造に対する破壊制御を実現するための新しい技術として、SA時の破損モードを評価する高温・高圧破壊クライテリアと、過大地震時の破損モードを評価する振動破壊クライテリアを開発し、構造物試験によりその有効性を検証した。
- ・また、破壊制御構造の具体例として、過酷事故時にも冷却材保持機能を失わない高速炉原子炉容器と、過大地震時にも冷却材輸送機能を失わない配管構造を提示した。
- ・さらに当初計画に加え、新技術実用化に必要な規格基準化を促進するため日本溶接協会において「設計基準外事象に対する構造強度ガイドライン」を提案し、検証試験を安全で安価に行うための模擬材料による構造物試験技術を開発した。

本研究により、BDBEに対する新たな構造強度アプローチが認知され、30年ぶりで我が国で開催予定のSMiRT国際会議で、福島第一原子力発電所事故を経験した我が国から世界に発信する主要テーマの一つとなった。