

設計を超える状態に対する
構造強度分野からのアプローチの意義と課題
— 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊の防止 —

2018年 8月23日

東京大学 佐藤拓哉、笠原直人

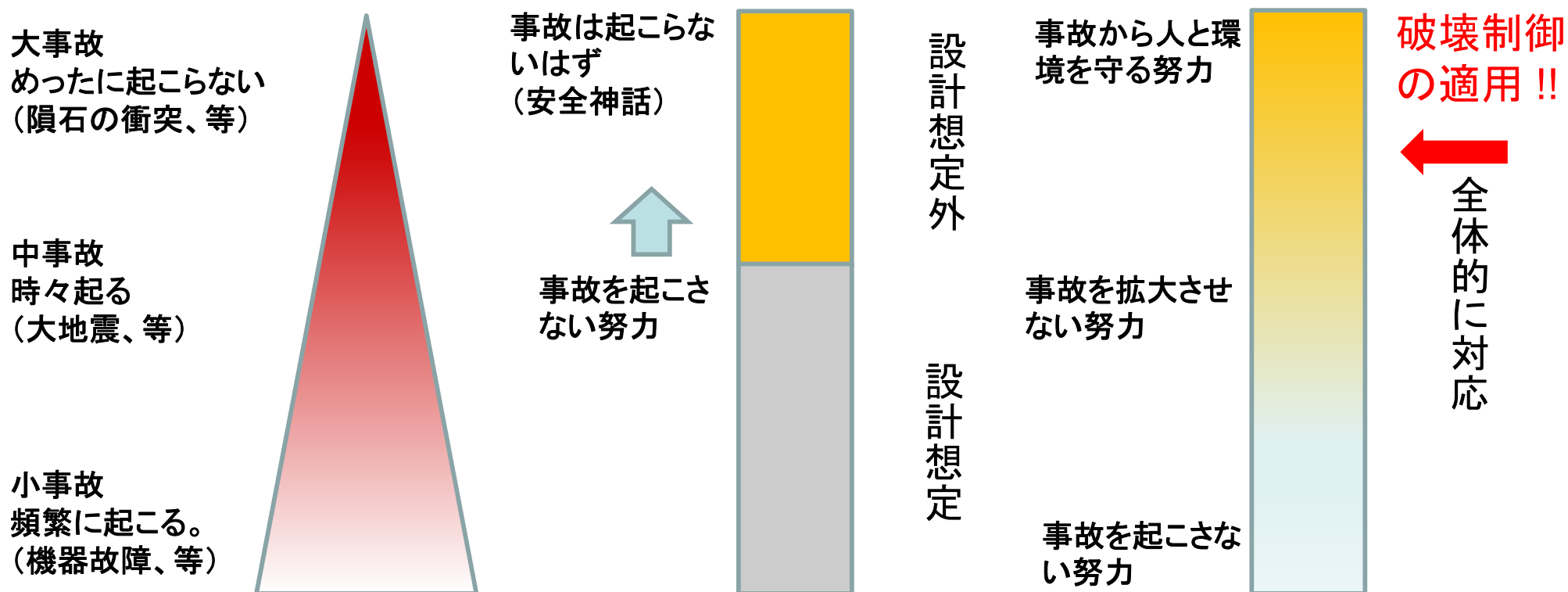
発表内容

1. はじめにー背景と目的
2. BDBEにおける大規模バウンダリ破壊防止の意義
3. DBEとBDBEにおける構造強度分野からのアプローチの違い
4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止
 - (1) 破壊制御の目的
 - (2) 破壊制御に関連する技術
 - (3) 原子炉への破壊制御技術の適用の原則
 - (4) 破壊制御技術の適用例
5. まとめー今後の展望と課題

1. はじめに — 背景

福島原子力発電所事故の教訓として、「設計（深層防護の第1層から第3層）」に加えて、事故が例え起こったとしても影響を緩和しその拡大をサイト内で防止するための「**設計を超える状態（第4層）**」への重点的な取り組みが要求されている。

第4層への取り組み：わが国は技術に対して二者択一的判断を求める傾向がある



実際の事故の発生頻度

日本の対応(二者択一的思考)

欧米(起こり得ることすべてに対して対応)

1. はじめに ー 目的

従来の安全に対するアプローチ

「設計状態:DBE(第1層～第3層)」

構造強度分野及び安全工学分野からのアプローチによる放射性物質漏洩の予防

「設計を超える状態:BDBE(第4層以降)」

安全工学分野からのアプローチによる放射性物質漏洩の影響緩和

研究目的

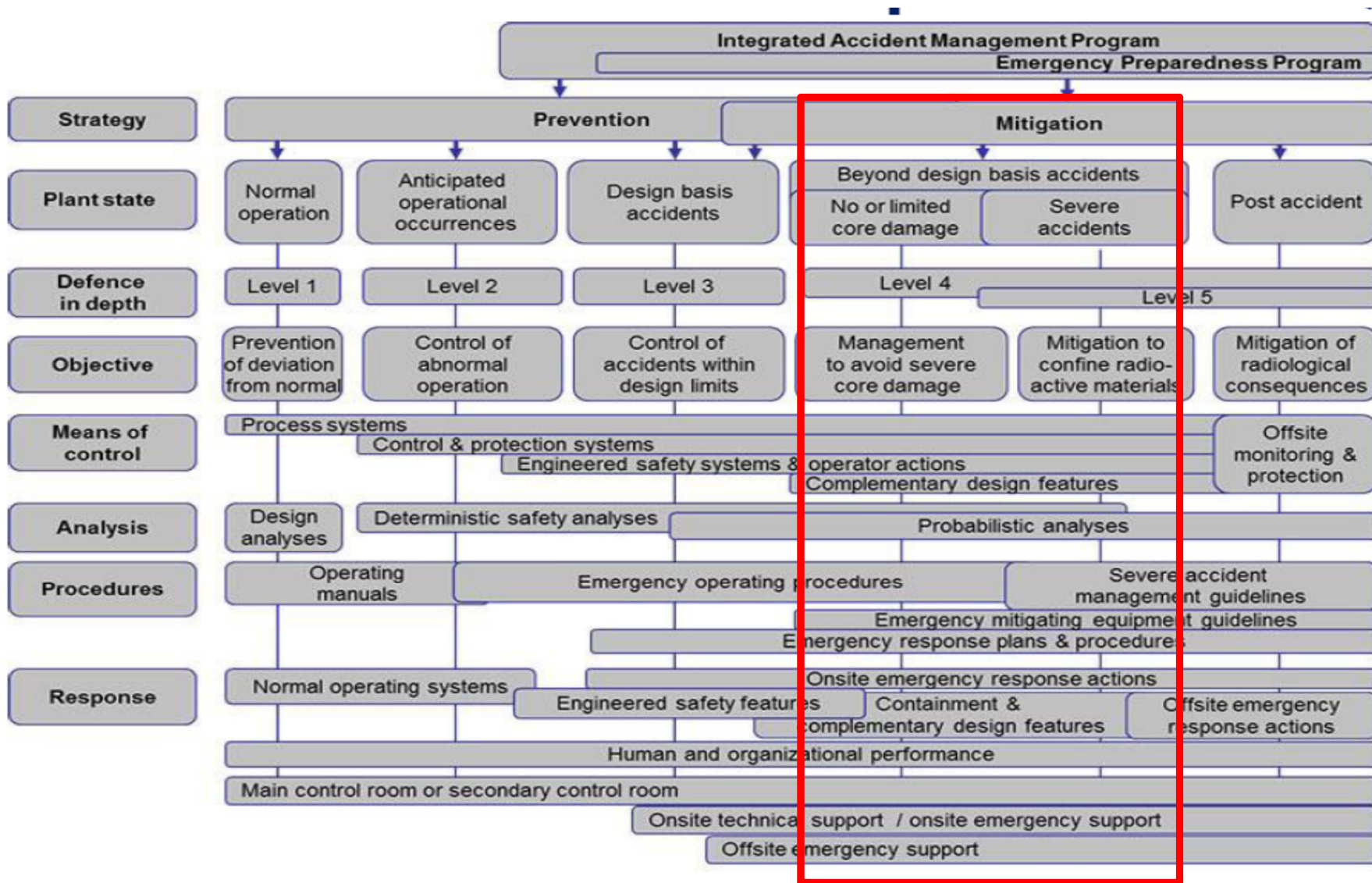
「設計を超える状態:BDBE(第4層以降)」

構造強度分野からのアプローチを適用することにより、安全工学分野からのアプローチによる放射性物質漏洩の有効な影響緩和を容易にする。

具体的には、破壊制御技術の適用によって大規模バウンダリ破壊を防止する。

1. はじめに 一 目的

深層防護の考え方の中における研究の位置づけ



2. 大規模バウンダリ破壊防止の意義

現状のBDBE対応の問題点

DBEにおける構造設計

想定した設計条件に対して構造健全性を確保するように構造、寸法を決定
発生応力が許容応力(降伏点、引張強度などに基づく)以下
作用荷重が許容荷重(崩壊荷重に基づく)以下



極限状態になり圧力バウンダリが破壊するとした場合、
「どの部位が」「どのような壊れ方」をするか分からない。



BDBEにおける影響緩和対策は常に「最悪」を想定？

もし、小規模バウンダリ破壊が先行することにより、荷重が緩和し、
大規模バウンダリ破壊を防ぐことができれば…



BDBEにおける影響緩和対策をより有効なものに

3. DBEとBDBEの構造強度分野からのアプローチの違い

技術的な開発に先行して基本的な考え方を明らかにし、それが社会的に理解され、コンセンサスが得られるようにすることが重要

構造強度分野からのアプローチの基本的考え方

- 安全の基本原則 (Fundamental Safety Principal)
- 基本思想 (Basic Philosophy)
- 基本クライテリア (Basic Criteria)
- 技術的手法
(Technical Procedures or Technical Requirements)

3. DBEとBDBEの構造強度分野からのアプローチの違い

		DBE	BDBE
安全の基本原則 (Fundamental Safety Principal)		安全の目的:放射能から人々の生命と健康、財産(生活)を守り、環境を守ること	
基本思想 (Basic Philosophy)	深層防護(Defense in Depth (DiD))	第1～3層	第4～5層
	基本的目的 (Basic Purpose)	<p>想定する条件に対し、原子炉容器、配管、格納容器などの圧力バウンダリの構造健全性を保ち、放射性物質を系内に封じ込める。</p>	<p>万が一、原子炉容器、配管、格納容器などの圧力バウンダリが破壊し、放射性物質を系内に封じ込めることができない場合、その影響を限定的なものにする、あるいは影響の程度を緩和する。構造問題の観点としては、小規模な破壊を先行させて荷重を緩和し、大規模な破壊を防ぐことによって、その後の影響の緩和対策を現実的で効果的なものにすることを目指す。</p>

3. DBEとBDBEの構造強度分野からのアプローチの違い

		DBE	BDBE
基本クライテリア (Basic Criteria)	荷重条件 (Loading Conditions)	圧力バウンダリに発生することが予想されるすべての破損モードが発生しないことを評価	何らかの原因で原子炉に発生する重大な事象及びその事象を引き起こすことが予想される外的要因 例) LOCA、炉心損傷(溶融)、巨大地震、巨大津波
	破損モード (Failure Modes)	圧力バウンダリに発生することが予想されるすべての破損モードが発生しないことを評価	重大な事象が発生した場合に生じる損傷モードの進展を考慮して評価
	破損の評価 (Failure Evaluation)	対象とする破損モードが発生しないこと、又は 許容値以下 であることをモード毎に独立に評価	どのような破損がどこに発生するのか(破損モードと 発生部位、順序、破損の規模 などの特定)
	対策 (Countermeasure)	機能に影響する破損を起こさないようにする。	小規模破壊を先行させて荷重を緩和し、大規模破壊を防ぐことにより、その後の影響の緩和策を現実的で効果的なものにする。

3. DBEとBDBEの構造強度分野からのアプローチの違い

		DBE	BDBE
技術的手法 (Technical Procedures or Technical Requirements)	解析及び設計の目的 (Purpose of Analysis and Design)	破損の評価を保証するような 材料、構造、寸法を決定 すること	決められた材料、構造、寸法を基に発生する 破損モードと部位を推定
	解析及び設計の手法 (Analysis and Design Method)	安全側の解析 及び設計手法で十分 弾性解析を基本とし、必要に応じて非弾性解析を実施	可能な限り正確に実際の現象をシミュレート(best estimate) 弾塑性やクリープ、大変形効果などを考慮した非線形解析が必要
	解析結果の評価 (Evaluation of Analysis Results)	個別の破損モードに対して 絶対強度評価 が必要 許容値又は許容範囲の概念が必須	相対強度評価 が有効となる場合が多い。どのような破損モードが先行し、どう発展するか。どの部位の破損が先行するか。最終的には圧力バウンダリ破壊の評価が重要となる。基本的には 許容値 という概念は存在しない。

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(1) 破壊制御の目的

破壊制御は、航空機や自動車の分野で損傷許容設計がさらに発展した先進技術である。化学プラントの世界でも一部に使われている。原子力の世界では破断前漏洩(LBB)論理が類似の考え方に基づくものである。

破壊制御技術の導入により

新規に建設する原子炉:

DiD 第4層に対するレジリエントな性質を備えた原子炉の実現

既存の原子炉:

DiD 第4層に対する有効で現実的な影響緩和対策の実現

構造強度分野からのアプローチ

DBE : 絶対強度評価が重要(許容値を満足)

BDBE : 破壊の順番を決定する相対強度評価が重要

破損モードの特定と進展の可能性

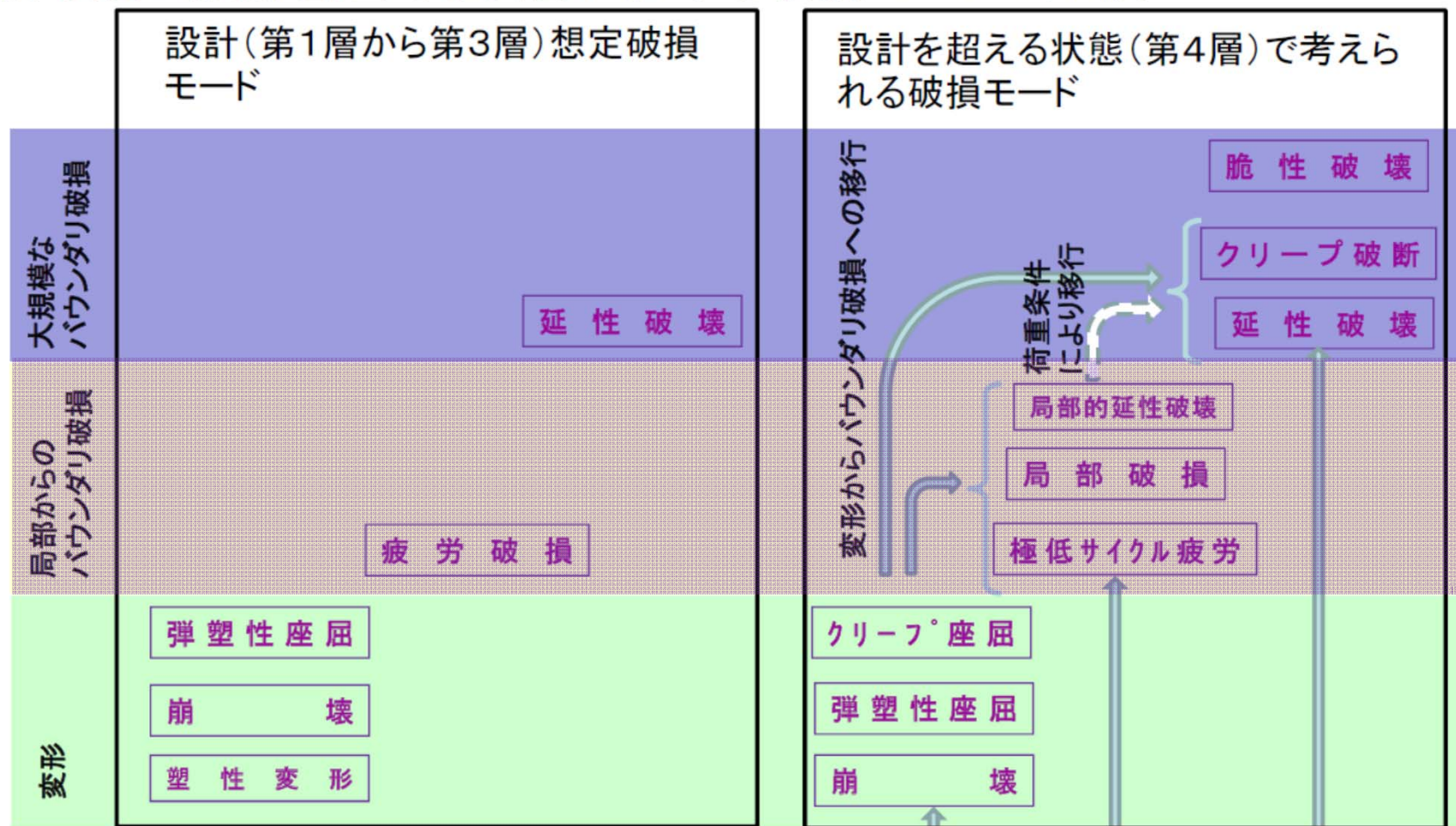
破壊する箇所の特定制と順番

(許容値の概念が不要)

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(1) 破壊制御の目的

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

原子カシステム事業、極限荷重に対する原子炉建造物の破損メカニズム解明と破局的破壊防止策に関する研究開発

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(1) 破壊制御の目的

破壊制御の観点から、現状の設計法（既存の原子炉）は；

- 基本は弾性解析ベース（応力分類に対応した許容値）
- 安全側の解析及び評価（絶対強度評価）
- 破損モード個別の評価
- 対応していない破損モードの存在（局部破損）

その結果として；

- 万一破壊する場合、「どの部位が」、「どのような破損モードで」、「どの程度の規模で」破壊するのか不明（相対強度評価の欠如）
- 破壊がどのように進展するのか不明（小さい破壊から大規模破壊へ）



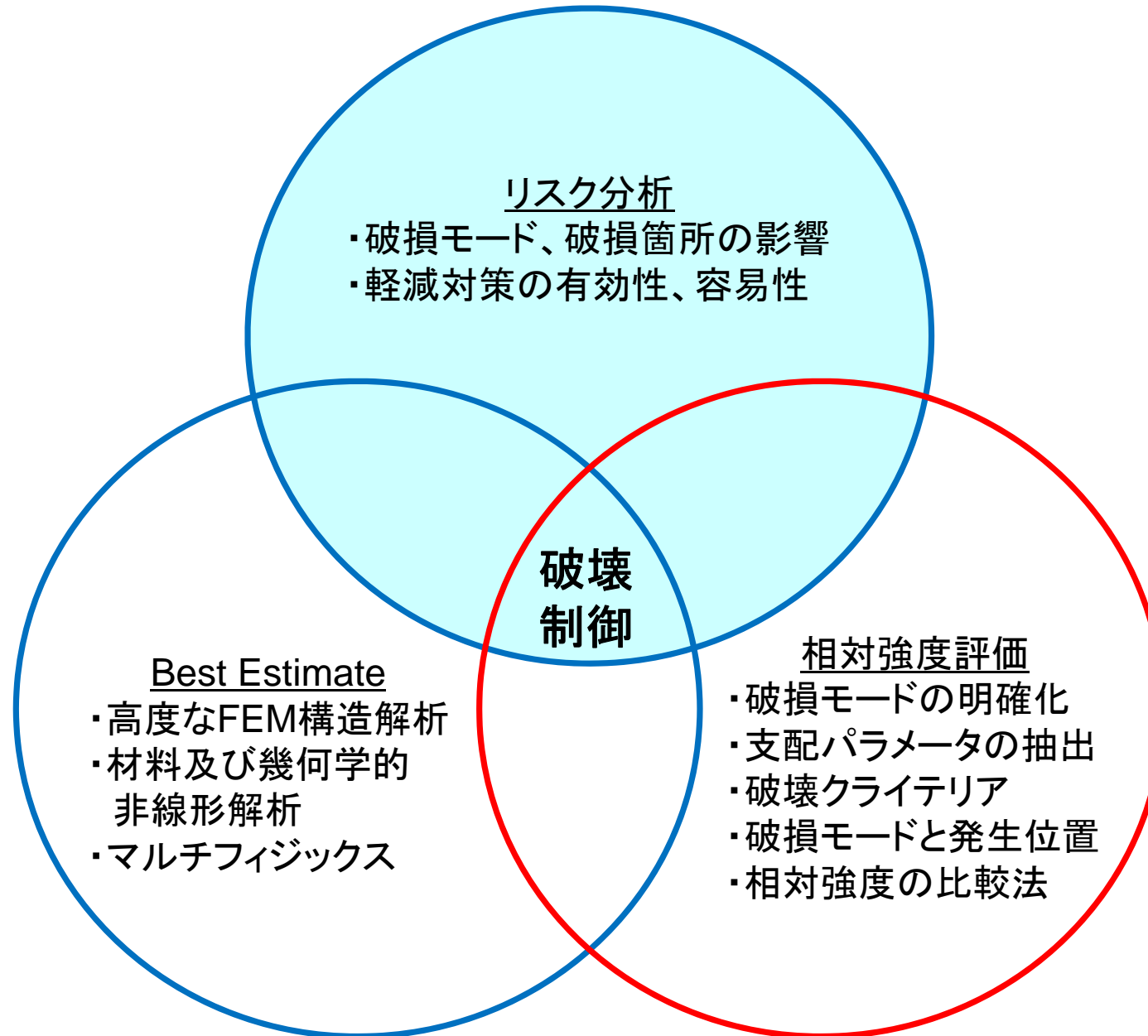
適正なリスク分析ができない。



限られたリソースを最適な対策に充てることができない。

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(2) 破壊制御に関連する技術



4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(2) 破壊制御に関連する技術

破壊制御を実現するための要素技術

(1) 実際の破壊現象の解明

設計想定とは異なる事故時の破損モードの解明

設計基準は破壊防止のための保守的包絡法(決め事)であって、実際の破壊現象と対応しないことが多い。

(2) 破損箇所と破損モードの起こる順番の予測技術開発(相対強度の評価)

破損自体を防止する訳ではないので、絶対強度評価は必須ではない。

(3) 小規模破損が大規模破損に先行して起こる構造の考案

シビアアクシデント時の高温・高圧荷重に対する容器

小規模破損が先行することにより荷重緩和(内圧低下など)の期待
過大地震に対する配管系

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(3) 原子炉への破壊制御技術の適用の原則

- ① 大規模圧力バウンダリ破壊となる破損モードを取り上げる
(破損モードの相対比較)。
- ② 一般部の破壊より構造不連続部の破壊を優先させる
(破壊部位の相対比較)。
- ③ 容器下部の破壊より上部の破壊を優先させる
(破壊部位の相対比較)。
- ④ 複数の破壊の可能性がある場合は、規模が小さい破壊、
有効な対策が立てやすい破壊を優先させる
(破壊の順番の相対比較)。

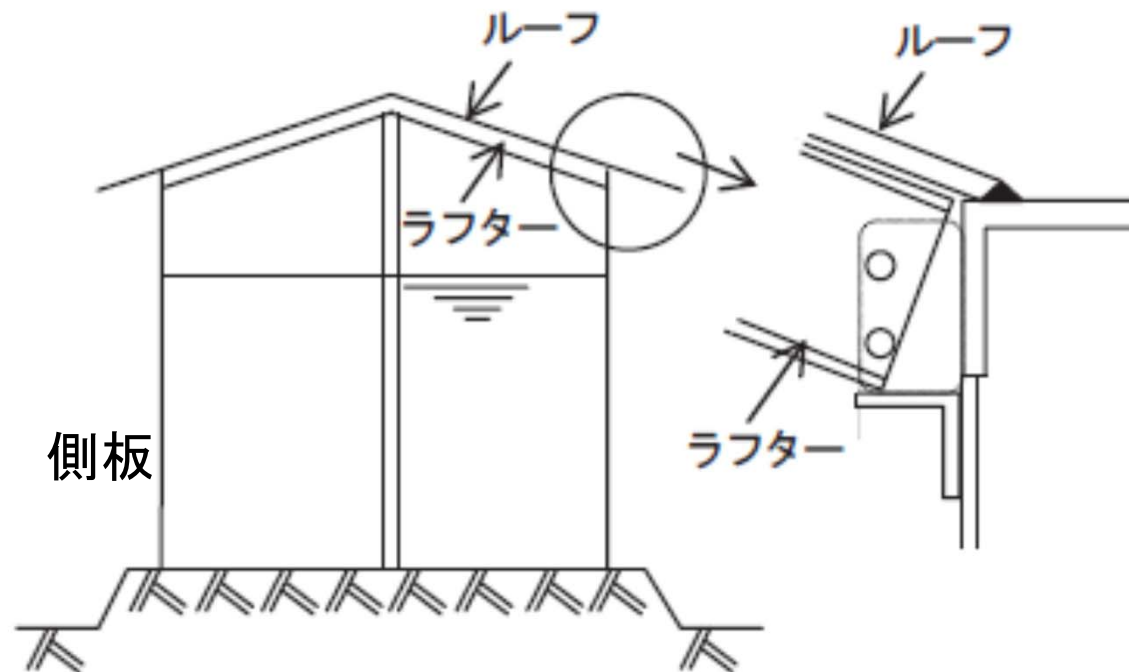
4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(4) 破壊制御技術の適用例①

破壊制御(Fracture Control)の化学プラントへの適用例

コーンルーフタンク

タンクの屋根と側板の取付け部の強度は、側板自体や側板と底板の取付け強度より、相対的に弱いものにしてある。これにより、内圧が上昇した場合、屋根との接続部が壊れて減圧して側板を守ること、液を外部に漏らさない。



文献: 佐藤拓哉, 圧力設備の破損モードと応力, 日本工業出版(2013)

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(4) 破壊制御技術の適用例②

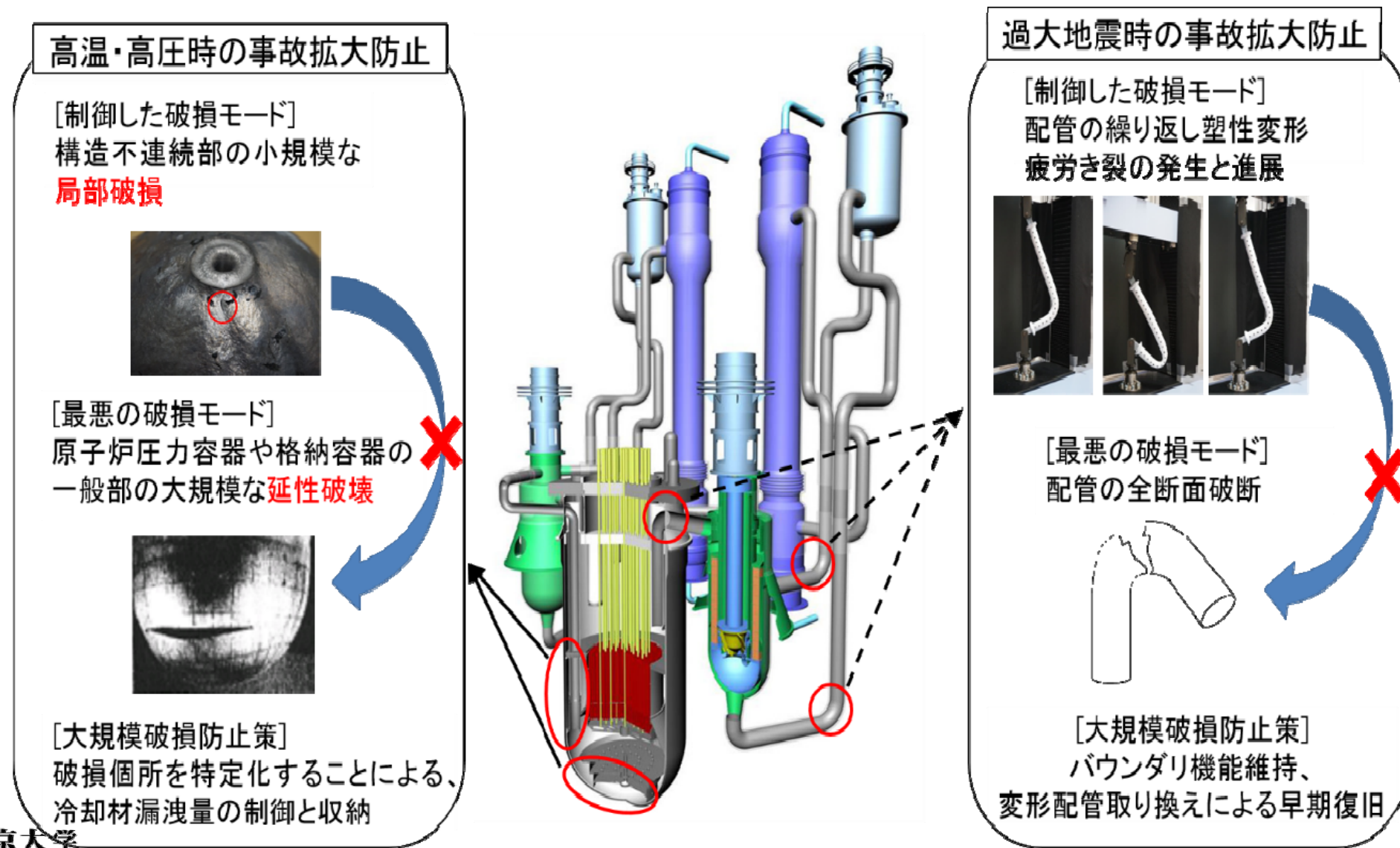
破壊制御(Fracture Control)の車体設計への適用例

周辺部を破損させることでエネルギーを吸収しコックピットを護るレーシングカーの車体

4. 破壊制御技術の適用による大規模バウンダリ破壊防止

(4) 破壊制御技術の適用例③

高速炉を対象とした場合の事故拡大防止策の具体例



5. まとめ – 今後の展望と課題

今後の展望

「設計を超える状態：BDBE(第4層以降)」

構造強度分野からのアプローチを適用することにより、安全工学分野からのアプローチによる放射性物質漏洩の有効な影響緩和を容易にする

破壊制御技術の導入により

新規に建設する原子炉:

破壊の箇所、破損モード、破損の順番を制御

⇒ DiD 第4層に対するレジリエントな性質を備えた原子炉の実現

既存の原子炉:

破壊の箇所、破損モード、破損の順番を知る

⇒ DiD 第4層に対する有効で現実的な影響緩和対策の実現

構造強度分野からのアプローチ

破壊の順番を決定する相対的強度評価が重要

破損モードの特定と進展の可能性

破壊する箇所の特定と順番

5. まとめ – 今後の展望と課題

今後の課題

① 社会的コンセンサスの醸成

「原子炉が破壊することはあってはならない」という従来の観念の払拭

DBEに対する概念とBDBEに対する概念の明確な区別

DBE: 想定した荷重、条件に対して破壊しない構造物の設計

BDBE: 何らかの原因で万が一破壊するとした場合の構造物の破壊の評価

② 構造強度評価技術の高度化

強度評価の発想転換

絶対強度評価から相対強度評価へ

すべての破損モードに対する破損クライテリアの確立、高度化

局部破損の解明 ⇒ 原子炉構造設計基準へ追加

③ 関連する技術分野との整合性、バランス

リスクベース工学とのバランスの取れた協調

Best estimate の高度化

数値解析技術の高度化

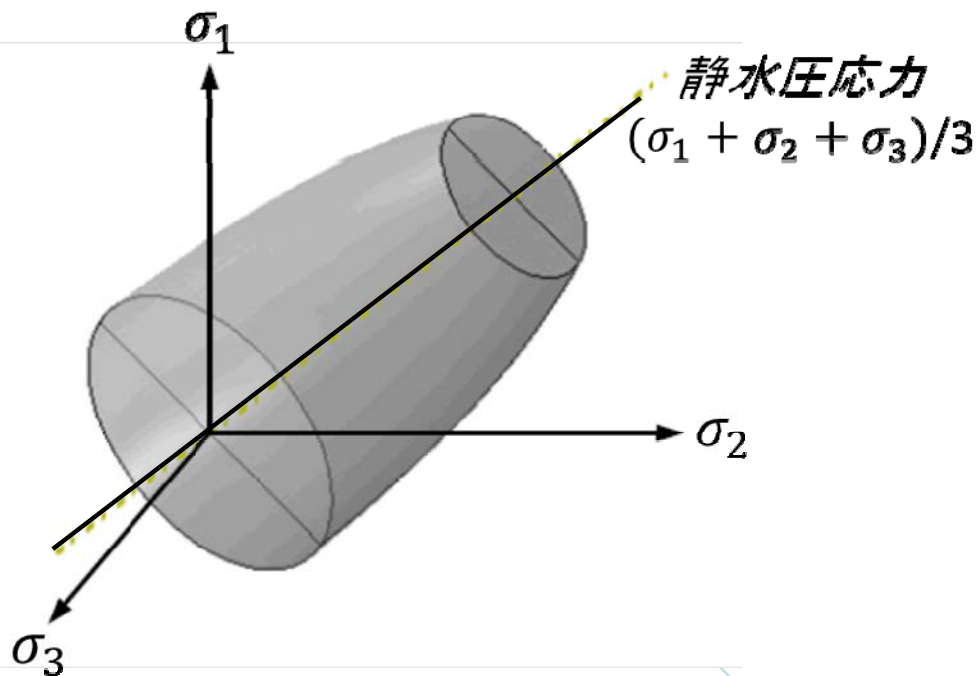
材料データの蓄積

試験による実証

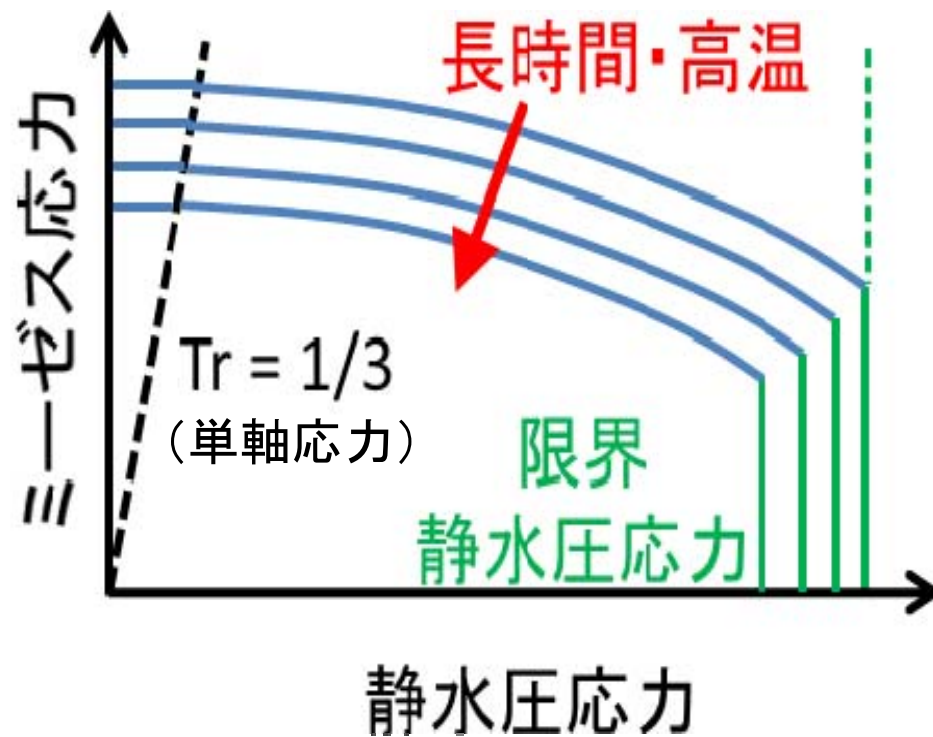
5. まとめ - 今後の展望と課題

具体的研究課題の例

局部破損の解明



静水圧応力を考慮した破壊局面の提案



弾塑性領域からクリープ温度領域まで
統一的に表す等時(等温)破壊局面