



福島第一原子力発電所  
廃炉検討委員会セッション  
個別セッション(C-2)

# コンクリート構造物の健全性

東北大学

大学院工学研究科 都市・建築学専攻

○前田匡樹, 西脇智哉, 五十嵐 豪

大学院工学研究科 土木工学専攻

久田 真, 皆川 浩, 宮本慎太郎

災害科学国際研究所

鈴木裕介

- 原子力発電所に要求される機能
- 東北大学の原子力発電所コンクリート構造物に関する研究活動
  1. 廃止措置等基盤研究人材育成
  2. コンクリート構造物TGの研究の概要
  3. コンクリート材料の性能劣化に関する既往の知見と今後の課題
  4. RC造構造物の性能評価の現状と課題



# 原子力発電所に要求される機能

日本建築学会「原子力建屋の維持管理指針」より  
一止める・冷やす・閉じ込める

要求機能		関連する性能	性能水準
建築物に求められる一般的な機能	使用機能	構造安全性	建築基準法に規定される各種荷重に対し耐えられる性能水準
		使用性	要求機能に応じて、一般建築物と同等に求められる性能水準
原子力施設に求められる特有の機能	支持機能	構造安全性	原子力施設の安全性確保の重要性に鑑み、高度の信頼性を確保するための性能水準
	遮へい機能	遮へい性	生体保護の観点から求められる放射線(主に中性子やガンマ線)を遮へいする性能水準
	漏えい防止機能	使用性(水密)	流体状の放射性物質が漏えいし難い構造で、漏えいの拡大を防止し得る性能水準
	負圧維持機能	使用性(気密)	気体状の放射性物質の放散防止を目的に、建築物内部の負圧維持に支障をきたす隙間を生じない性能水準
	波及的影響の防止機能	構造安全性	建築物が破壊し、落下または転倒することにより、より重要な設備の機能を阻害しないための性能水準

## 「廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム」

(2014年度～2018年度)

【基盤研究】 *現場ニーズが高く、かつ本学の研究ポテンシャルが高い分野*

(1) 格納容器・建屋等の健全性・信頼性確保のための基礎・基盤研究  
→『放射性物質閉じ込め機能』と『安定冷却』の維持

(2) 燃料デブリの処理と放射性廃棄物の処分に関する基礎・基盤研究  
→科学的・合理的な処理・処分方法の策定

【人材育成】

「廃止措置工学コースの設置」

- ①原理・原則に立ち戻って課題解決を図る能力
- ②課題の本質(幹と枝葉)を的確に見分ける能力
- ③異分野専門家との高度コミュニケーション・協働能力

- 基盤研究への主体的参加
- 専門家との議論

合理的な道筋は？  
クリティカルパスは？

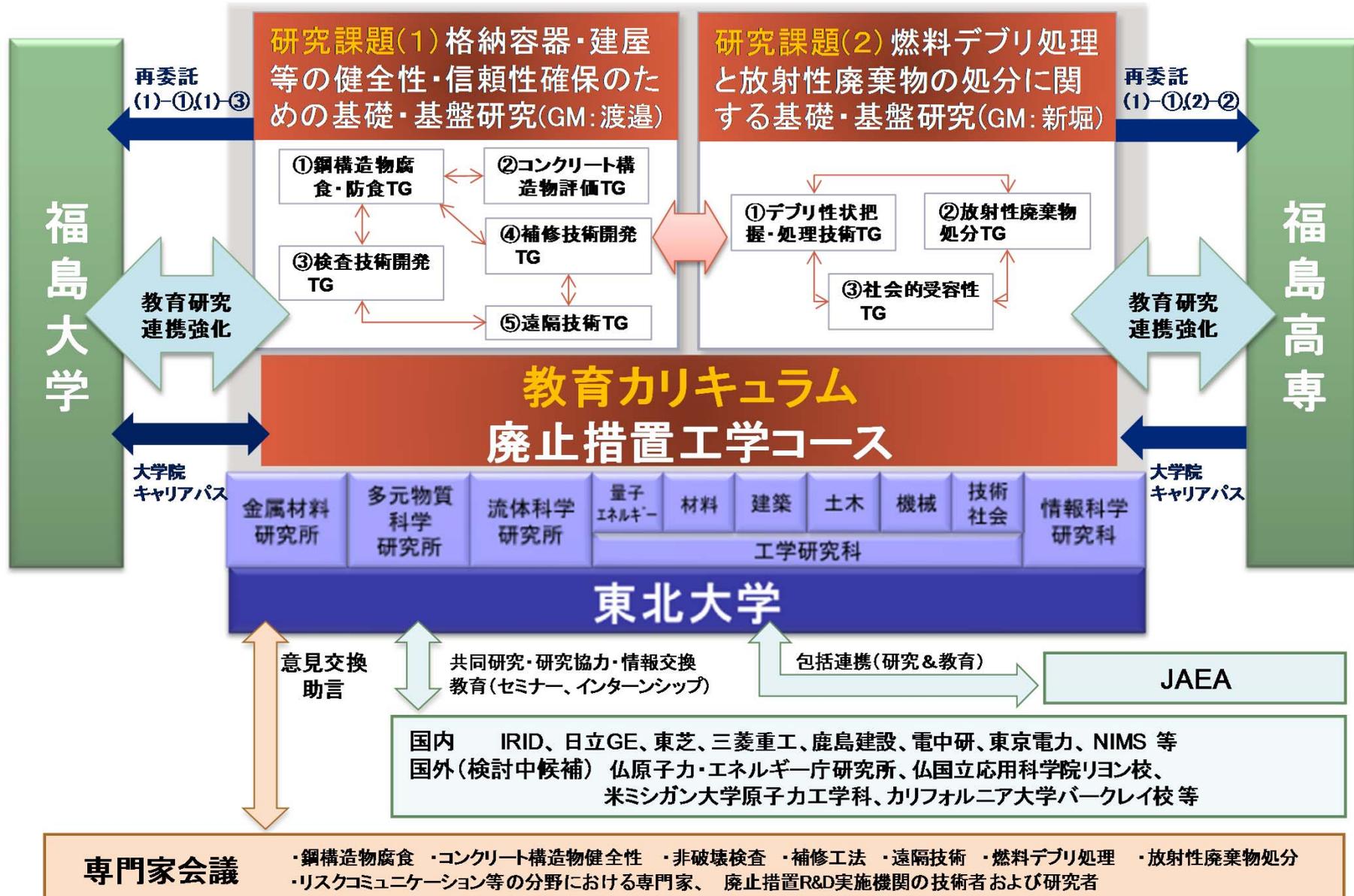
専門的カリキュラムによる教育

状況が変化する廃止措置工程への的確かつ重層的対応能力を持つ中核人材





# 東北大学「廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム」



## ■ 福島第一原子力発電所の廃炉が完了するまでのコンクリート構造物の要求機能維持に対する構造性能の健全性

### ■ 将来の健全性予測も含めた精確な評価手法

1. コンクリート・鉄筋などの材料
2. 柱・梁・壁など構造部材
3. 建物の全体

### ■ 必要に応じた補修／補強の要否判定手法

※要求機能・性能: 支持、遮へい、漏えい防止、負圧維持、波及的影響の防止、安全性

## ■ 荷重・外力・外乱のレベルと影響範囲

- 地震動
- 爆発による衝撃力
- 熱
- 放射線
- 塩分

これらの複合作用

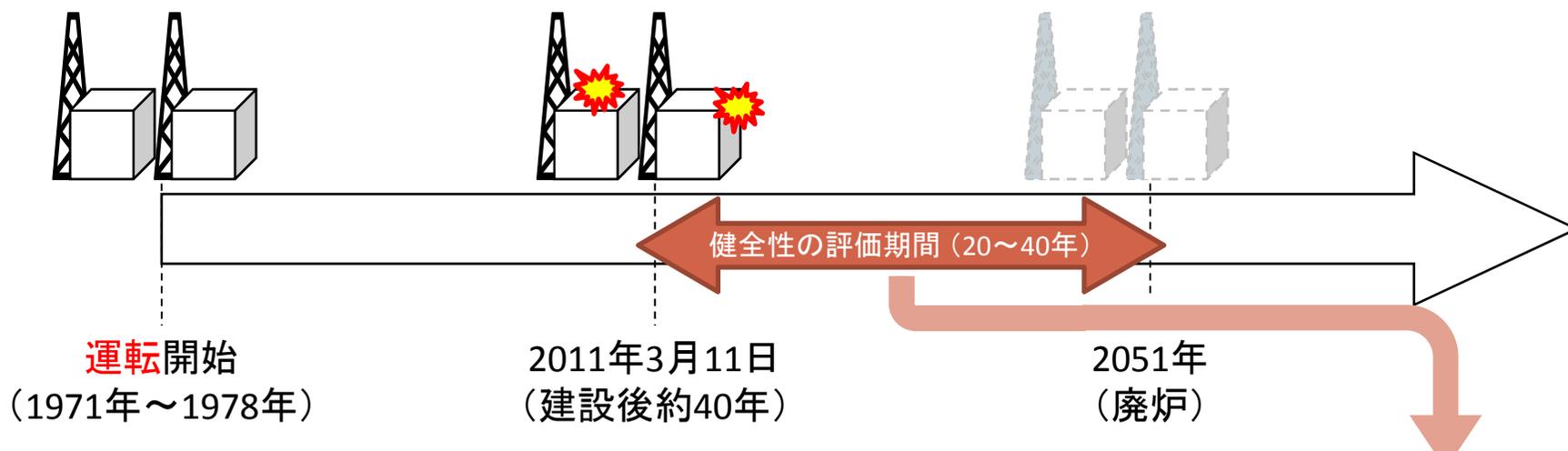
## ■ 性能評価の対象

- 建設当初の状態(設計図書・資料)
- 3.11震災直前の状態
- 3.11震災後の状態
- 廃炉までの将来の予測



東北大学

# RC造建屋の性能評価対象と各種外乱

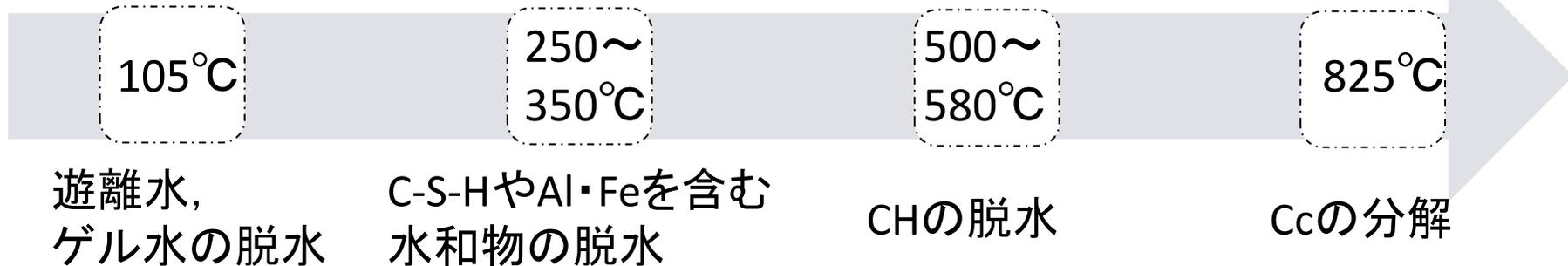


	建設時	3.11震災前	3.11震災	将来(廃炉まで)
地震動	設計用地震動と応答	中小地震の記録 ひび割れ・損傷	本震・余震の記録 ひび割れ・損傷	想定する地震動のレベル
爆発	.....	.....	衝撃荷重の大きさ・影響 範囲、ひび割れ・損傷	.....
放射線	.....	通常運転時の低レベル放射線	炉心溶融による高放射線	.....
熱	.....	通常運転時の熱	炉心溶融による高温 注水による急速な冷却	.....
塩分	使用骨材	飛来塩分	海水(津波/冷却時)	飛来塩分、中性化・腐食の予測

➡ 各時期における、外乱(履歴, レベル, 作用時間及び範囲)分析と建屋性能評価が必要

# 高温がコンクリート強度に及ぼす影響 1

【高温下のコンクリートの物性】阪元, 1979

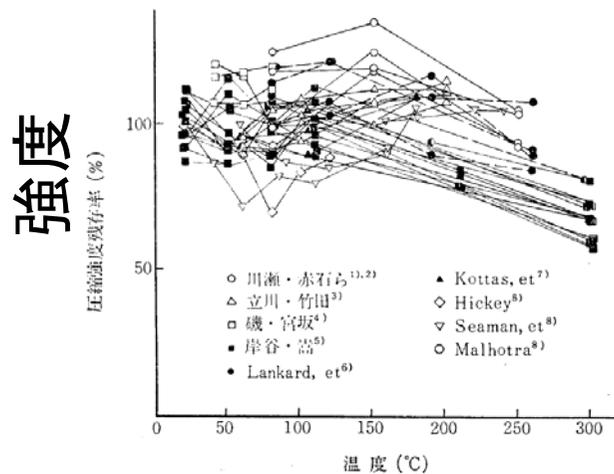


【加熱によるコンクリートへの影響】嵩, 1984

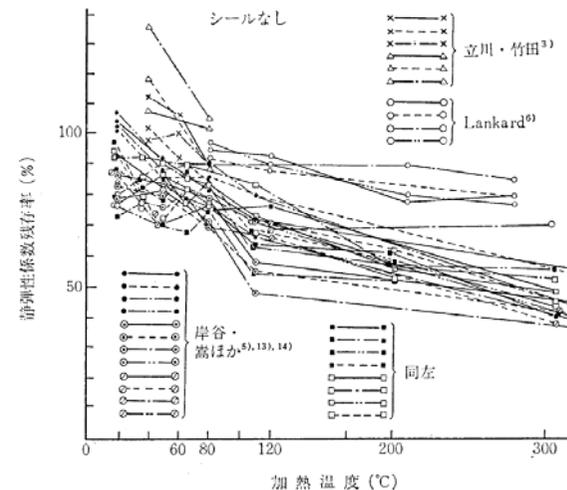
高温になるほどコンクリートの**強度や弾性係数が低下**



- 各種セメント水和物の分解や溶融
- セメントペーストと骨材(岩石)の熱膨張量の差異

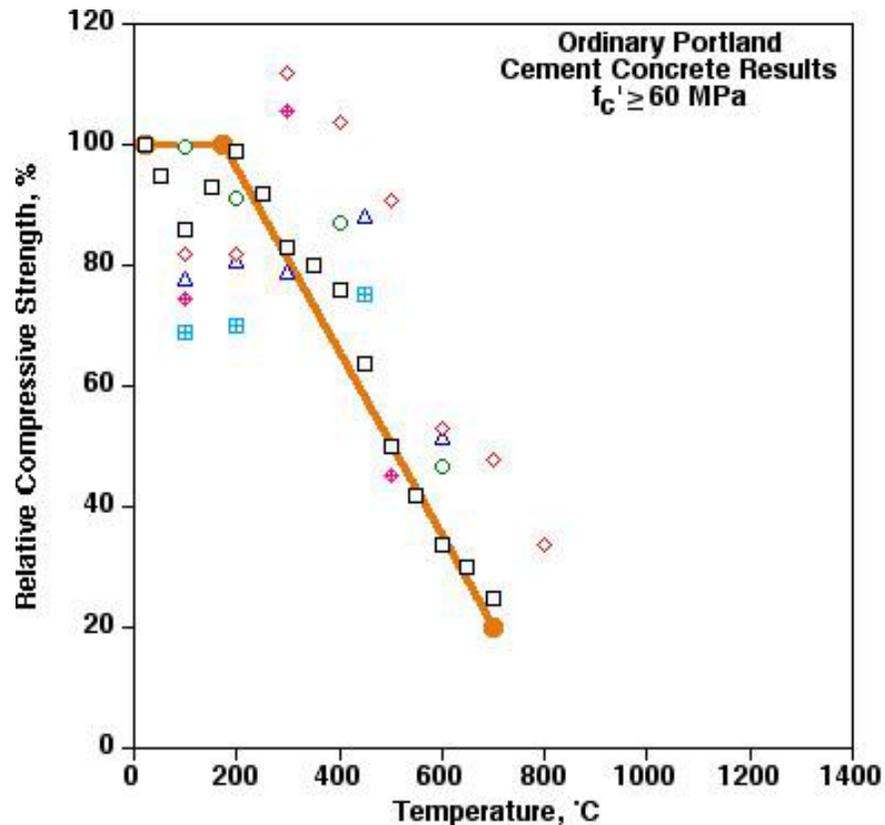


静弾性係数



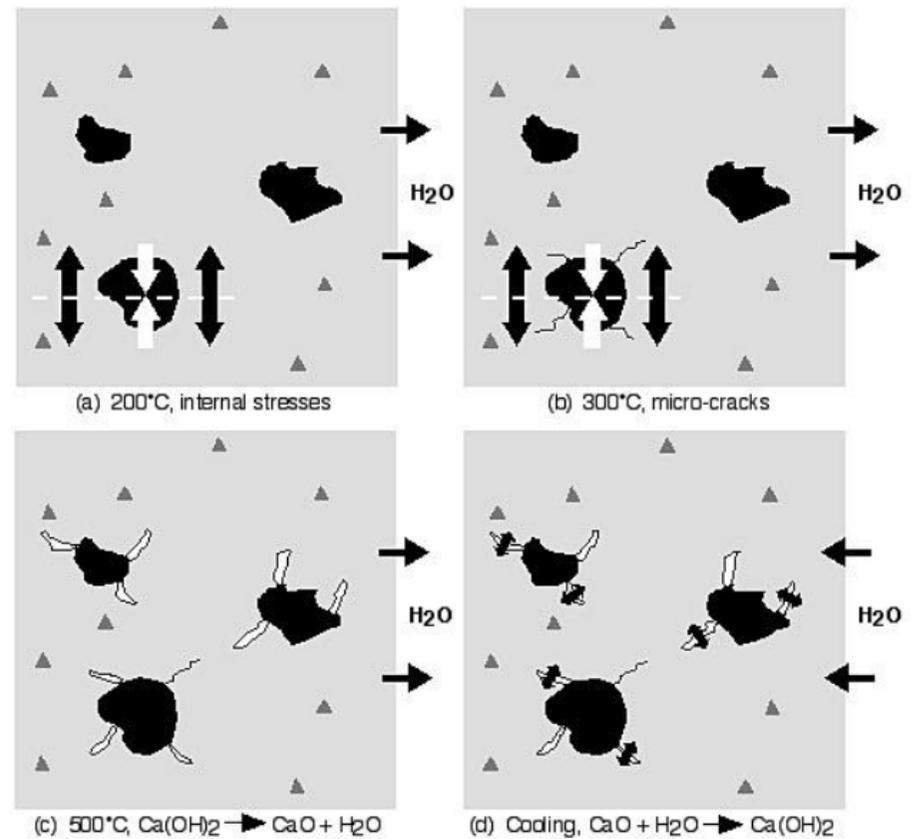
# 高温がコンクリート強度に及ぼす影響2

高温になるほどコンクリートの**強度や弾性係数は低下**  
 ⇒セメント水和物の分解や溶融，セメントペーストと骨材の**温度上昇に伴う体積変化の差異**が原因



圧縮強度比と温度の関係

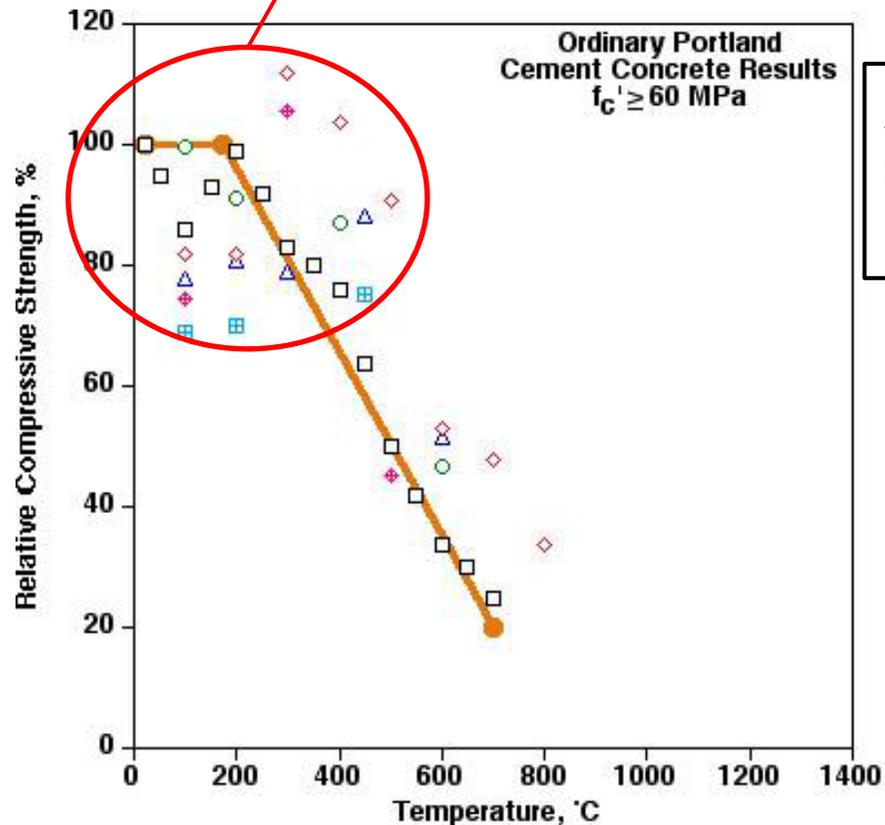
(出典：U. S. NRC. NUREG/CR-7031 ORNL/TM-2009/175, p. 65)



受熱による力学的特性の変化のメカニズム

# 高温がコンクリート強度に及ぼす影響③

温度履歴が300°C程度までは、それほど強度特性に大きな影響はない可能性がある。



圧縮強度比と温度の関係

(出典 : U. S. NRC. NUREG/CR-7031 ORNL/TM-2009/175, p. 65)

AFm相 (AlやFeを含む水和物の一つ) や C-S-Hの脱水は、他の水和物の脱水と比較して、強度低下にそれほど影響はない？

・セメントペーストの受熱による変質と強度低下の因果関係を明らかにする。

→骨材周りに多く析出する水酸化カルシウムの脱水による影響は？

→受熱脱水後に再び水を与えたときの挙動は？

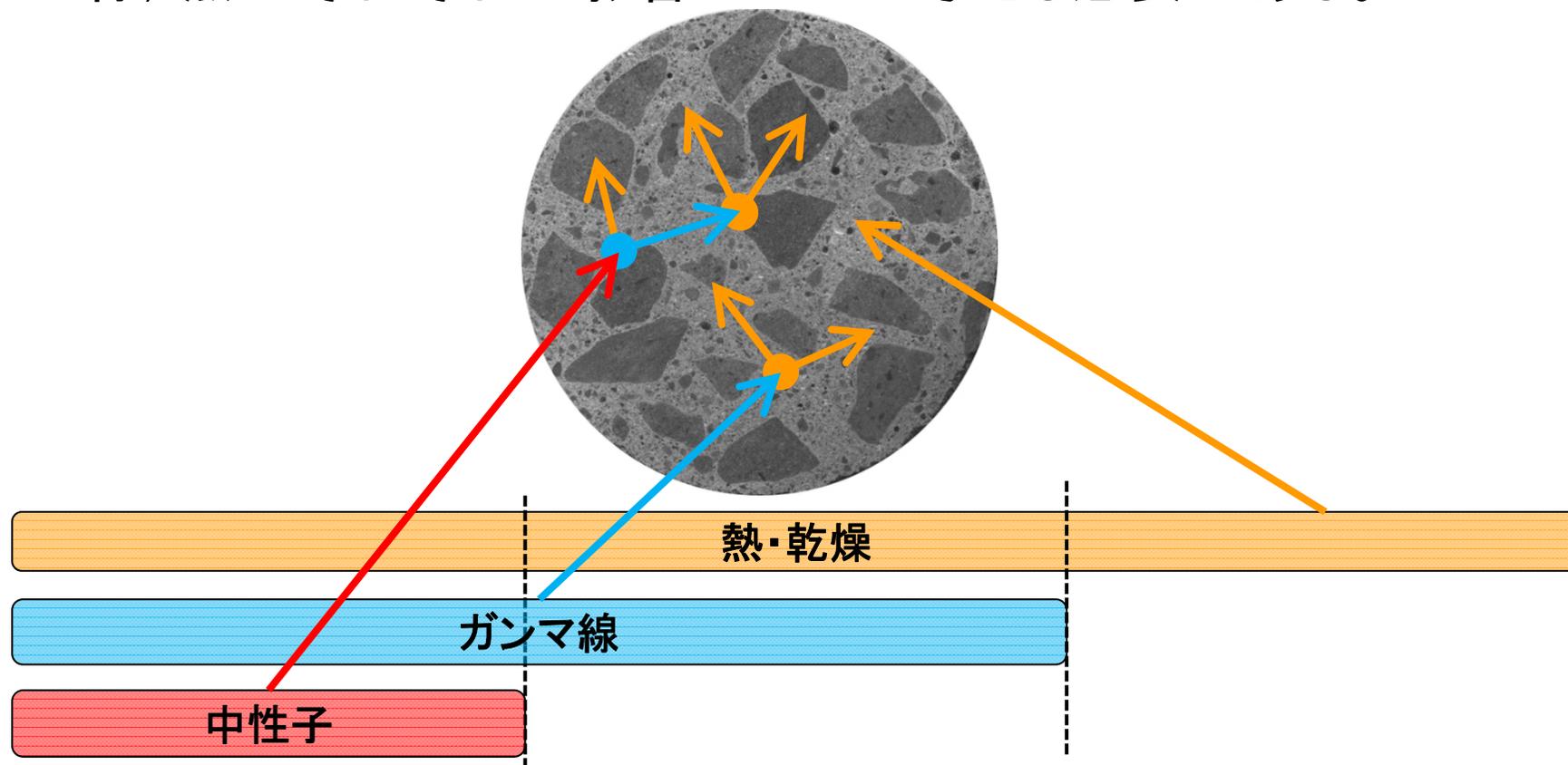
→その他、受熱に伴う骨材の変質、鉄筋腐食の促進など。



# 放射線がコンクリート強度に及ぼす影響1

## ◆ 放射線がコンクリート強度低下に及ぼす影響

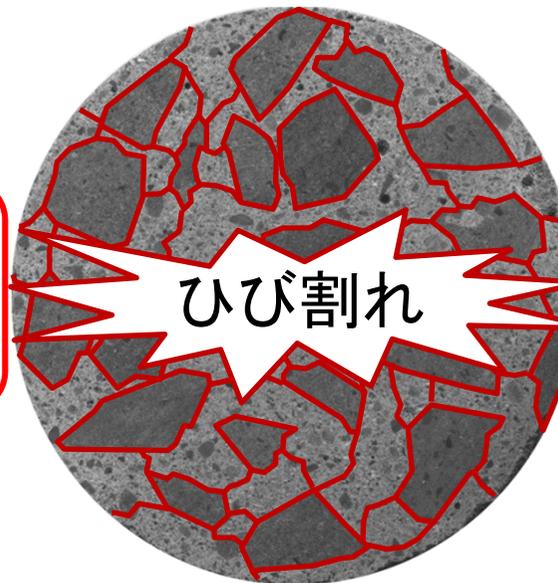
中性子は、原子核と衝突をした際にガンマ線と熱を発生する。ガンマ線は、原子と衝突をした際に熱が発生する。放射線の影響は、中性子、ガンマ線、熱のそれぞれの影響について考える必要がある。



## ◆ 放射線がコンクリート強度低下に及ぼす影響の仮説と課題

骨材(岩石)

・ 鉱物の原子配列のゆがみ  
→ 強度↓, 剛性↓, 体積↑



ひび割れ

セメントペースト

・ 主要水和物の結晶化  
・ 乾燥収縮

→ 強度↑, 剛性↑, 体積↓

### 【課題】

- 放射線がセメントペースト-骨材間にひび割れを発生させると考えられるが、メカニズムは未解明。
- 正しい理解には、建屋コンクリートの使用骨材(岩石), 調合のデータが必要。

# 放射線がコンクリート強度に及ぼす影響3

## ◆ 放射線がコンクリート強度低下に及ぼす影響のレビュー

- コンクリート強度と放射線照射量には負の相関がみられる。  
←ポルトランドセメント以外のデータ, 高温環境のデータが混在。
- 適切な条件下における大照射量時(中性子:  $1.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ , ガンマ線:  $2.0 \times 10^{10} \text{ rad}$ )の一般的なコンクリートの情報は存在しない。
- 福島第一原発での建屋コンクリートが実際に受けた照射量のデータが必要。

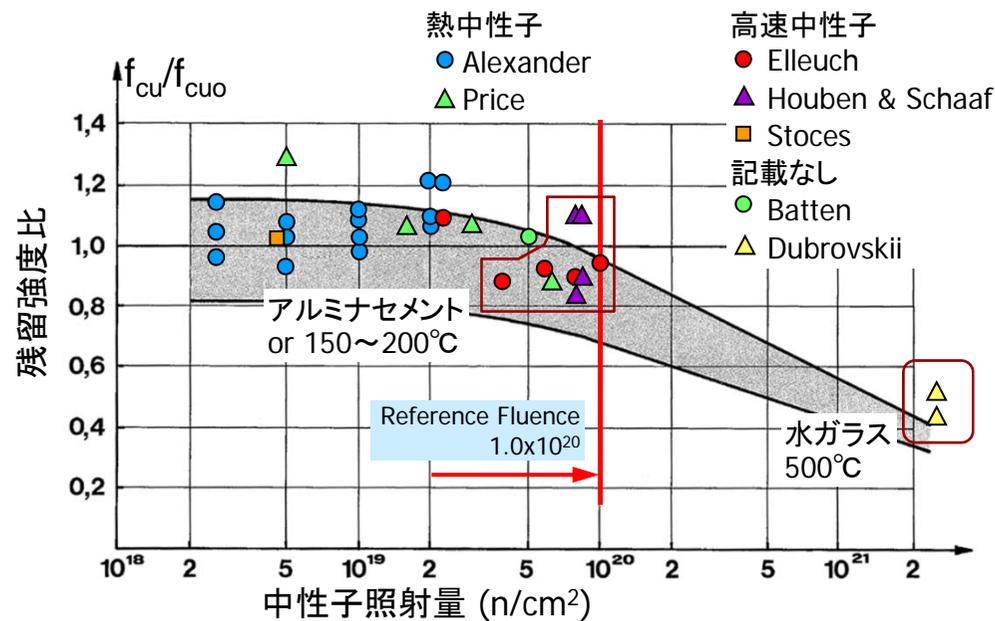


図1 中性子照射量とコンクリート圧縮強度の関係  
(照射試験体/コントロール試験体)

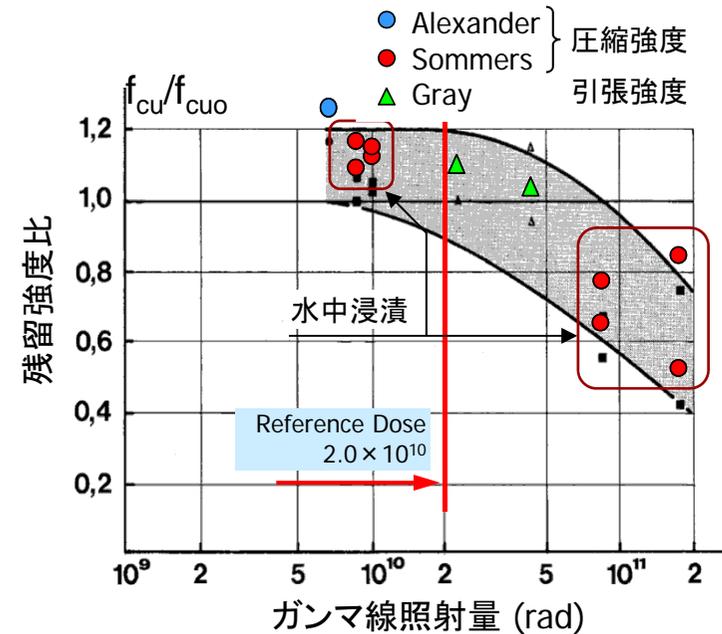


図2 ガンマ線照射線量とコンクリート強度の関係  
(照射試験体/コントロール試験体)

(Hilsdorf[1978]より、凡例の記号を変更した。)

# 塩分(海水)の作用による影響1

## <セメントペーストの物性そのものへの影響>

【既知】 塩分はセメントの水和反応や二次鉱物の生成に影響する

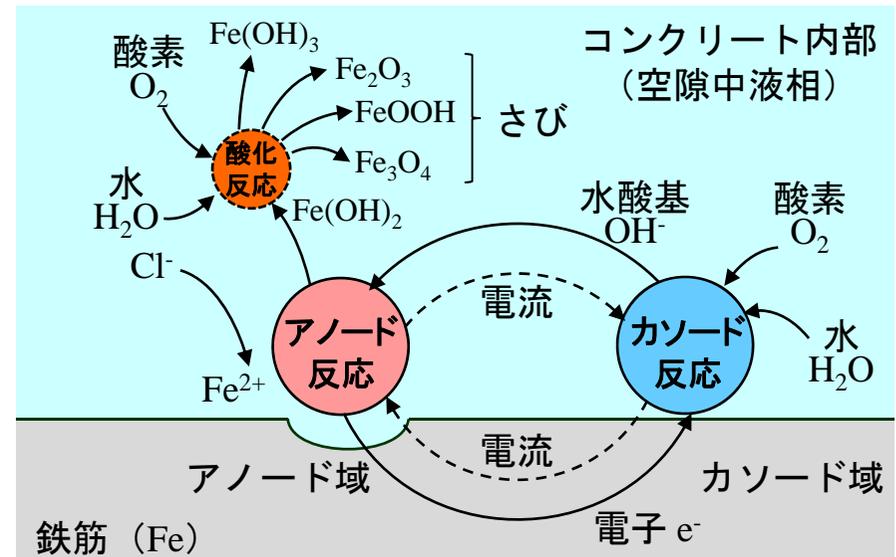


【課題】 受熱後，放射線被照射後のセメント水和物の変質に塩分が影響する可能性がある。 (要検討)

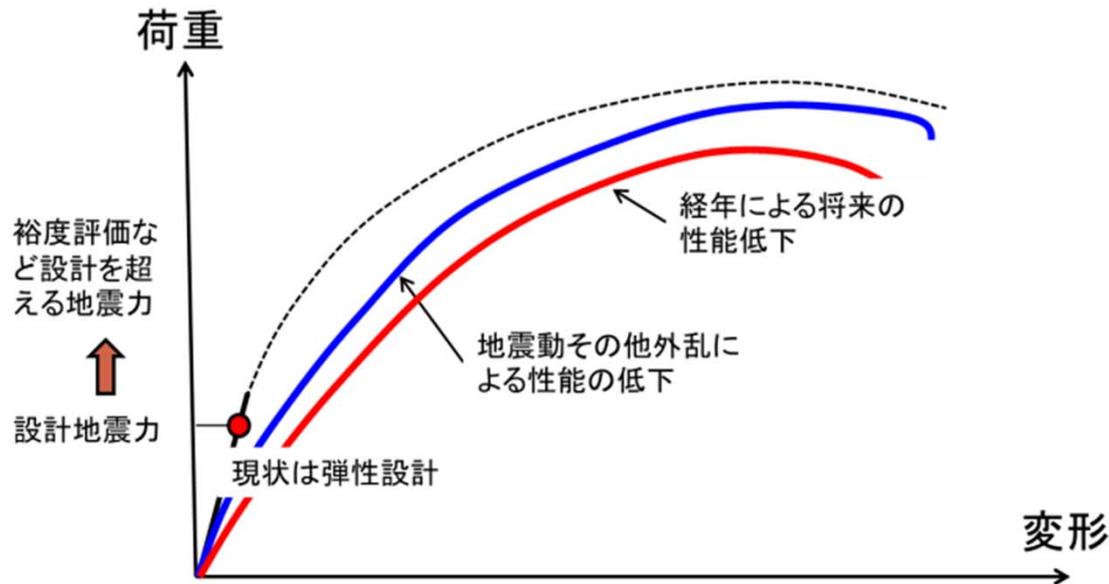
## <コンクリート中鉄筋への影響>

【既知】 **常温・常圧下**における鉄筋腐食の影響要因とその影響度

- ✓ コンクリートの品質
  - ・ 空隙構造，ひび割れ  
⇒ 物資透過性： $\text{Cl}^-$ ， $\text{H}_2\text{O}$ ， $\text{O}_2$  の供給速度に影響
  - ・ 水和物，二次鉱物  
⇒ 空隙中液相のpHに影響
- ✓ 気温（ $0\sim 50^\circ\text{C}$ ），湿度



## ①構造物の性能 $\geq$ ②荷重・外乱による応答



従来(新築)の評価: 弾性設計(①と②は別個に扱う)

→性能は低下しないことが前提

今後は...: 過大外力や長期使用下での非線形化・低下

→性能低下の影響因子の抽出と評価法

## 建設時

- 設計図書・計算書
- 設計地震動と解析モデル

## 3.11震災まで

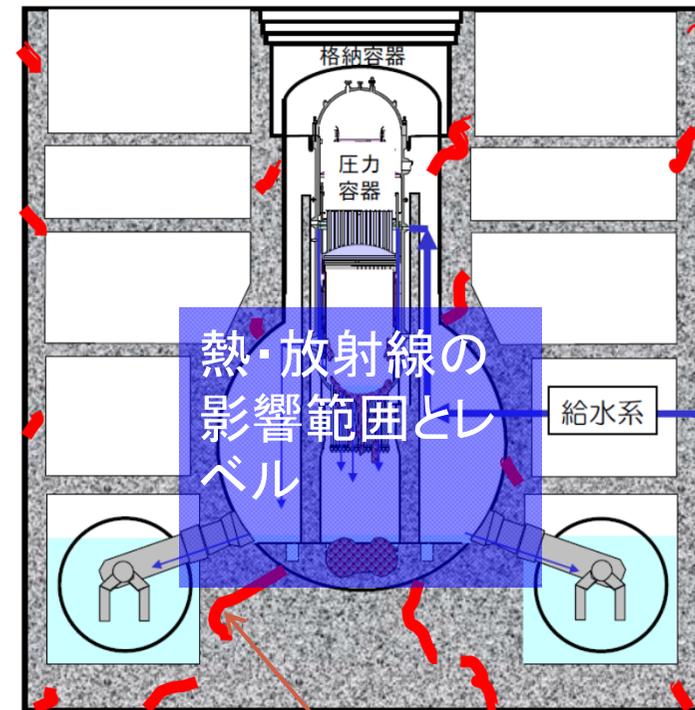
- 地震動観測記録
- 損傷状況と補修・補強の履歴

## 3.11震災後

- 地震動観測記録
- 損傷状況と応急復旧
- 性能の劣化の予測
- 部材／建物の解析モデル

## 廃炉まで

- 将来の地震動予測



地震による損傷(ひび割れなど)の程度・範囲



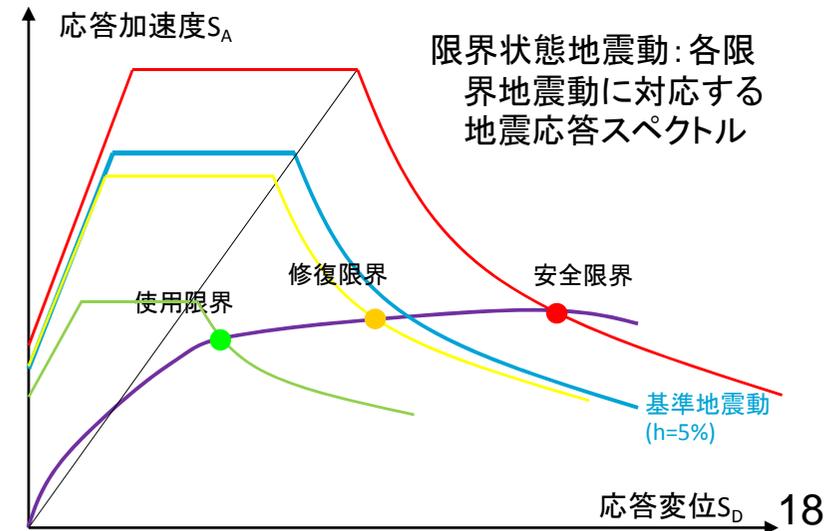
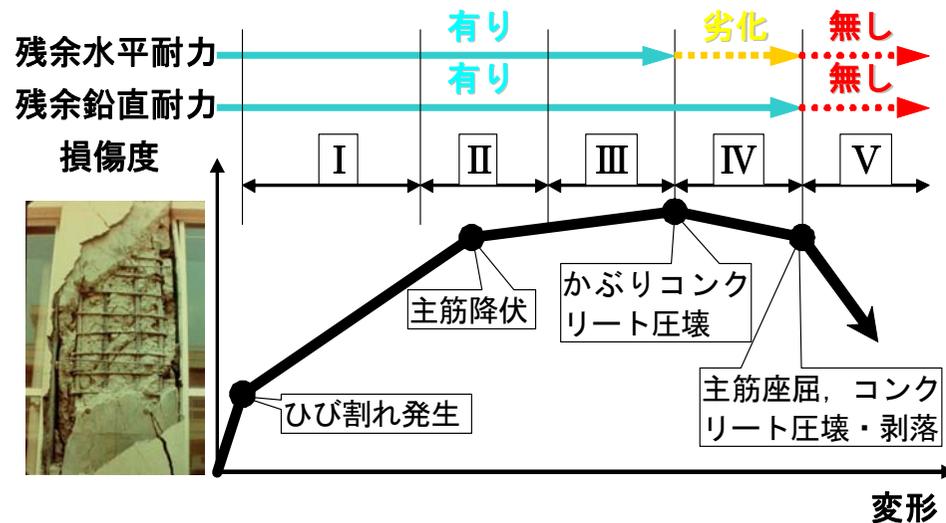
# 地震動による応答・損傷と性能評価のイメージ

## 一般建築の指針・基準 → 原子力建屋への適用性の検討

被災度区分判定基準  
(建築防災協会)



RC造建築物の耐震性能評価指針  
(日本建築学会)



# 地震動による応答・損傷と性能

- 建屋(耐震要素)の耐震性に関する研究資料は比較的豊富。  
非構造部材の研究は少ない  
→しかし、外力は地震のみ、複合外力は未検討

		主要構造部の耐震性	非構造部材 (機器の支持機能・遮蔽性)
地震力		○ 弾性 △ 塑性化領域(損傷)	○? 弾性 △~× 塑性化領域
複合要因	爆発	× ほぼ研究資料なし	←
	放射線	△ 低放射線はあり	←
	熱	△ 一部あり	←
	塩分	△ 鉄筋腐食による劣化	←

## 【課題】

- 原子力構造物の損傷評価
- 熱、放射線、塩害(及び複合)により、材料性能が劣化した時の  
部材／建物性能の劣化モデル  
→ 部材実験／FEM解析



# 研究項目と計画

	短期(～5年)	中期(5～10年)	長期(10～20年)	超長期(20年～)
材料レベル	放射線の影響(文献)	単独要因による性能低下(応力度～ひずみ度関係, 物質透過性)のモデル化	劣化した材料の補修技術 コンクリート中鉄筋の防食技術	サイトからのニーズ, 要求機能・性能
	コンクリート	熱の影響(実験)	複合要因による性能低下(応力度～ひずみ度関係, 物質透過性)のモデル化	↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	鉄筋	塩分(海水)の影響(実験)	コンクリートの長期性能劣化, コンクリート中鉄筋の腐食の予測	↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	爆発の影響(文献)			部材・構造性能評価への物性値の引き渡し
部材レベル	地震による損傷	複合要因による損傷	材料劣化に基づく部材の復元モデル	経年化や外乱による性能劣化を評価する高精度な部材モデル (構造/非構造部材, 設備・機器)
	その他要因による損傷	補修・補強工法の検討		
	接合部・非構造部材(機器、設備)	地震時応答と性能(クライテリア)の把握 クリティカルな部位の同定(平常時/地震後)	限界状態とクライテリアの高精度化	
構造物	弾性解析	非線形解析 ・要求性能と限界状態 ・設備・機器との相互作用	地震による性能低下 ・部材モデルの適用(質点系) その他要因による性能低下 ・材料モデルの適用(FEM)	将来の性能予測 ・長期の性能劣化 ・想定する地震レベル(極大地震)
	性能評価(質点系・FEM)			他の原子力建屋への展開 ・新築、リスク評価 ・高経年化、運転延長 ・地震後点検、再起動
補修・補強維持管理		・補修/補強の要否判定法 ・補修/補強工法の開発		

