

JASMiRT 第2回国内ワークショップ

放射線照射がコンクリート特性に及ぼす影響

2018年8月23日

紺谷 修
鹿島建設

①既往研究(～2016年度)

原子力規制庁

高経年化技術評価高度化

放射線照射によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究

参加機関:三菱総合研究所、名古屋大学、鹿島建設

参考文献:I. Maruyama, et. al., "Development of Soundness Assessment Procedure for Concrete Members Affected by Neutron and Gamma-Ray Irradiation," Advanced Concrete Technology, Vol.15, pp440-523, Sept. 2017

②新規研究(2017年度～)

経済産業省資源エネルギー庁

原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業

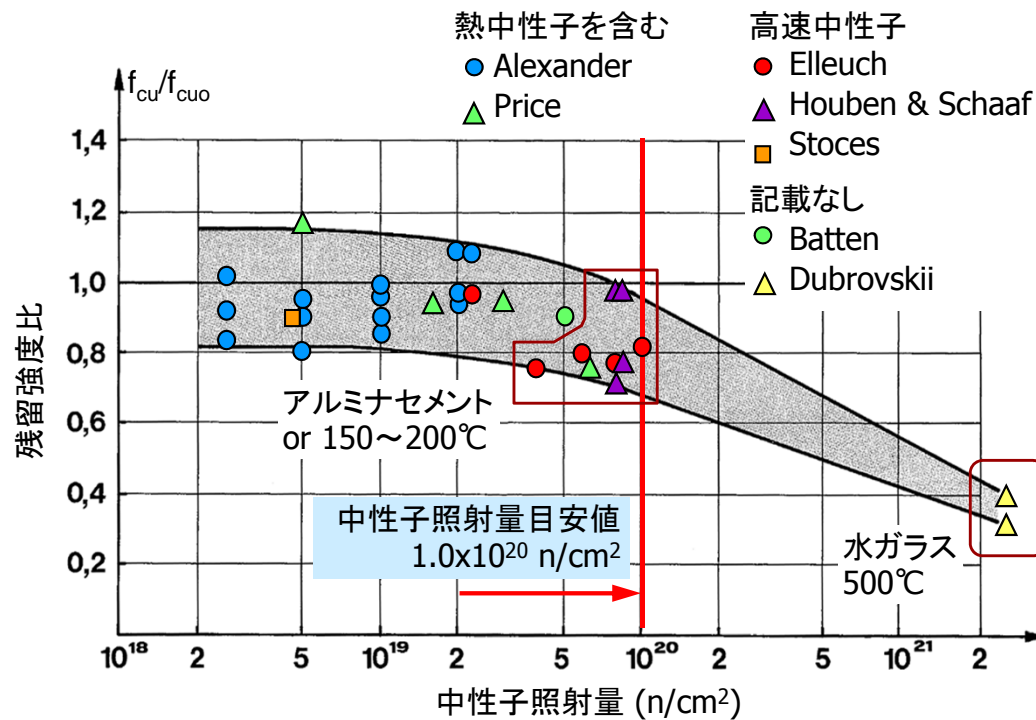
高経年化対策に資するコンクリート照射劣化に関する研究

参加機関:三菱総合研究所、名古屋大学、鹿島建設、千葉大学、
長岡技術科学大学、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)

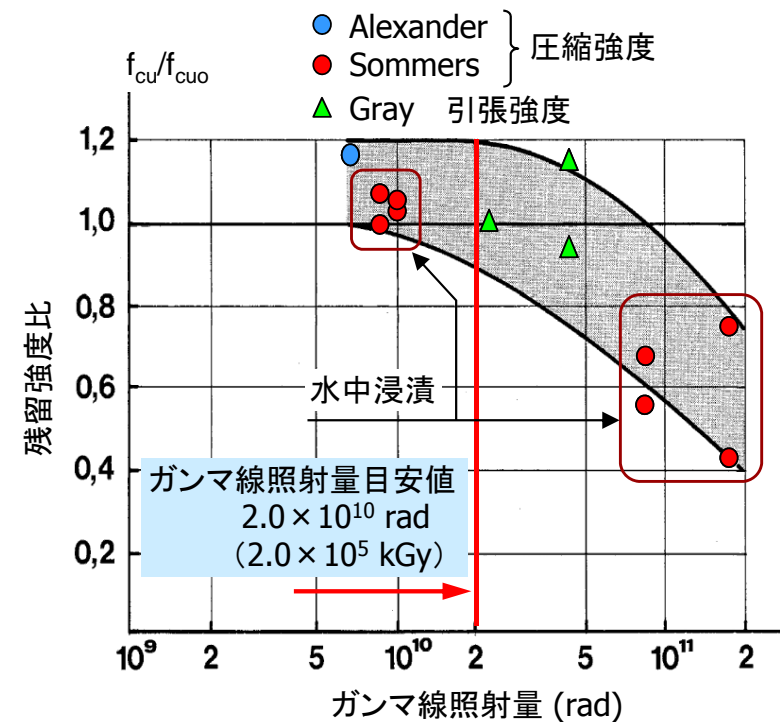
既往研究の成果の概要

研究の背景

- 放射線に対するコンクリートの健全性評価では、**最大60年間の累積照射量の予測値が目安値以下であればコンクリートは健全であると評価している。**
- 目安値 中性子: 1.0×10^{20} n/cm² ガンマ線: 2.0×10^5 kGy
- 下図は、1960～1970年代に実施された照射試験結果を照射量と残留強度比で整理したものである。**軽水炉の材料条件・照射条件とは異なる条件で得られた試験データ(赤枠)が多く含まれており、目安値の妥当性については明確になっていない。**



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/非照射試験体)



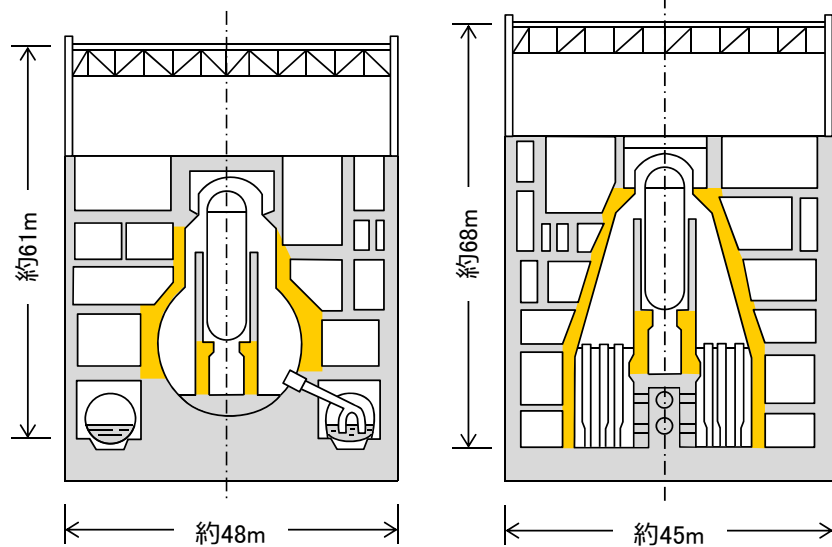
ガンマ線照射線量とコンクリート強度の関係
(照射試験体/非照射試験体)

* Hilsdorf, H. K., et al., "The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete," ACI SP-55, 1978

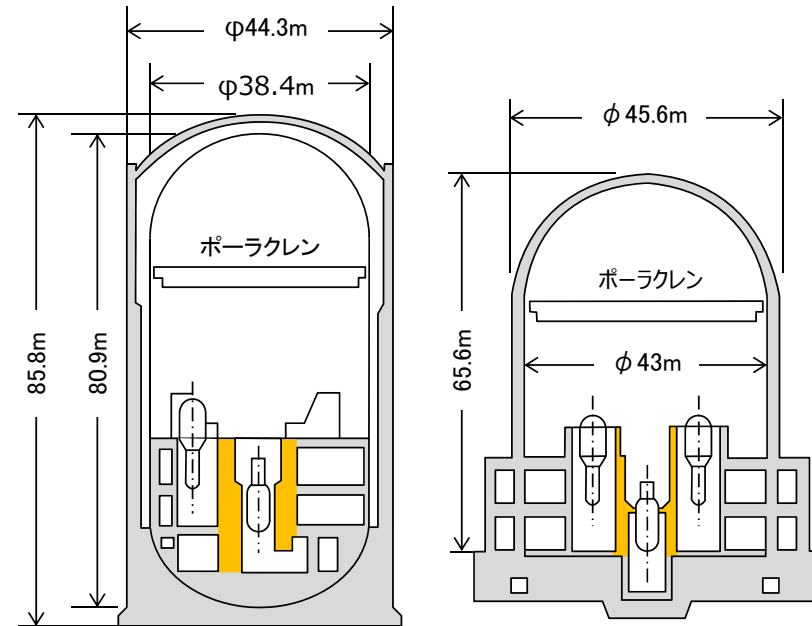
研究の目的

- 原子力発電所で放射線環境下であり、遮蔽機能 and/or 支持機能が要求される **コンクリート構造物の健全性**を評価するために、下記について検討する。

- 1) 放射線照射による**コンクリート劣化メカニズムの解明**
- 2) 60年間の累積照射量の制限値としている**目安値の妥当性の確認**
- 3) **健全性評価フローの提案**とその評価に必要な放射線環境下のコンクリート材料・部材の健全性を評価する**数値解析手法の構築**



BWR: ペDESTAL, 一次遮蔽壁



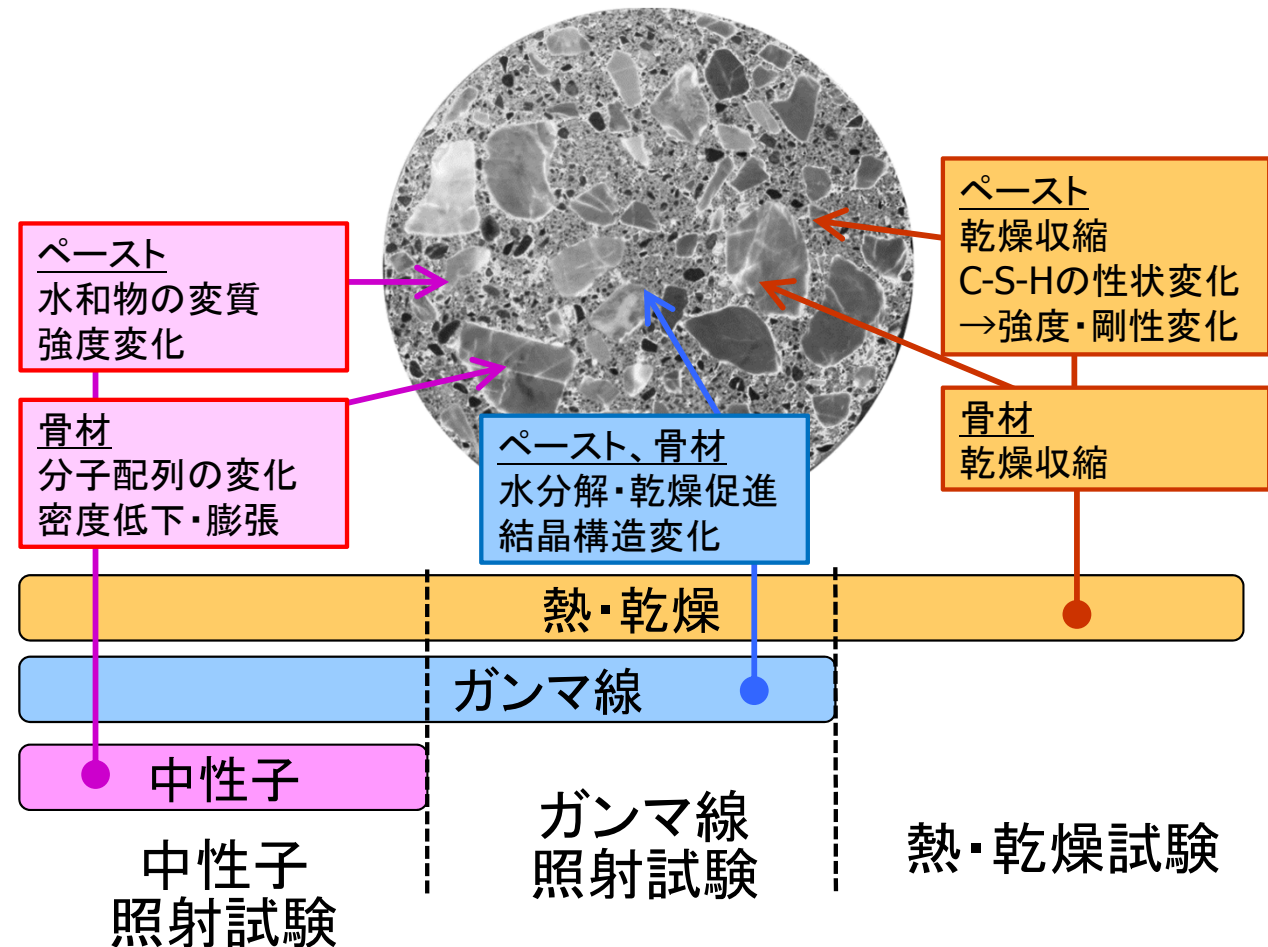
PWR: 一次遮蔽壁

* 原子力ハンドブック編集委員会 (2007) 「原子力ハンドブック」, オーム社

放射線によるコンクリート劣化メカニズム

- 放射線照射影響を検討するため、**放射線物理・化学、鉱物学などの専門家との打合せ**を実施し、評価すべき項目について整理し、放射線による**コンクリートの劣化メカニズムの仮説**を設定した。
- 劣化メカニズムの仮説を証明するために、試験パラメータを抽出し、試験計画立案するとともに、数値解析手法を起案した。
- 中性子照射では、ガンマ線と放射線発熱が伴い、ガンマ線照射では、放射線発熱が伴うので、**中性子、ガンマ線および熱の影響**を別々に評価する必要がある。

コンクリート劣化メカニズム（仮説）
放射線発熱による**セメントペースト収縮**
+ 中性子照射による**骨材膨張**
→ コンクリートの**強度・剛性低下**



ガンマ線照射試験の状況

● ガンマ線照射施設(高崎)



Co⁶⁰ 照射施設
旧高崎量子応用研究所
日本原子力研究開発機構



試験体サイズ
Φ5x10cm

セメントペースト相互作用試験
(ステンレス容器に封入して照射し、発生ガスを捕集)

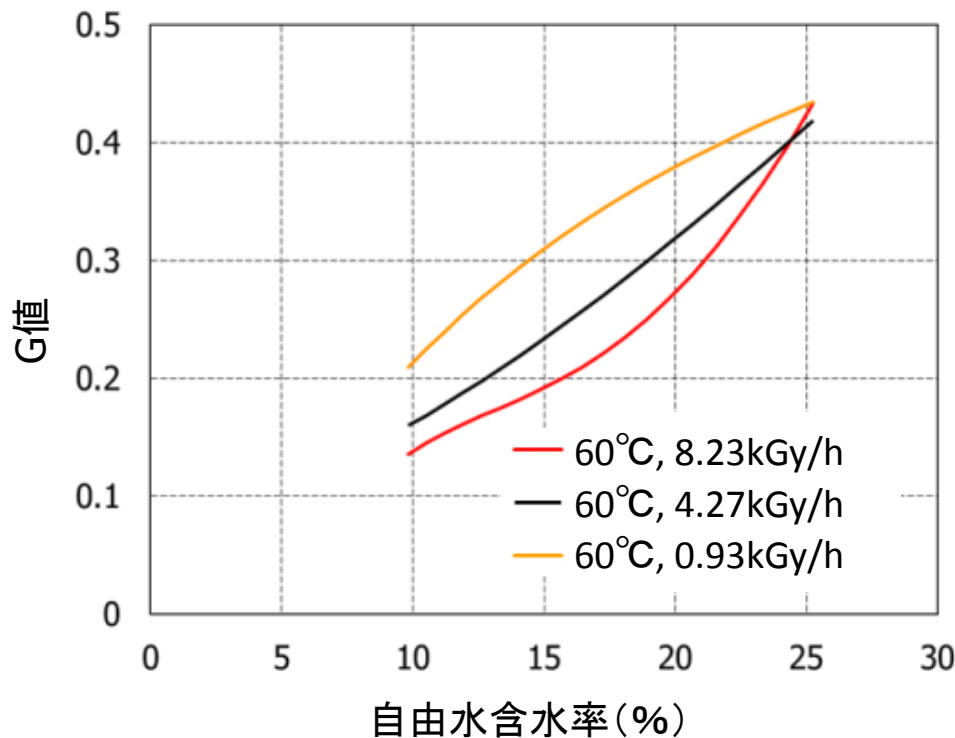


試験体サイズ
Φ4x6cm
(中性子照射試験
と同一試験体)

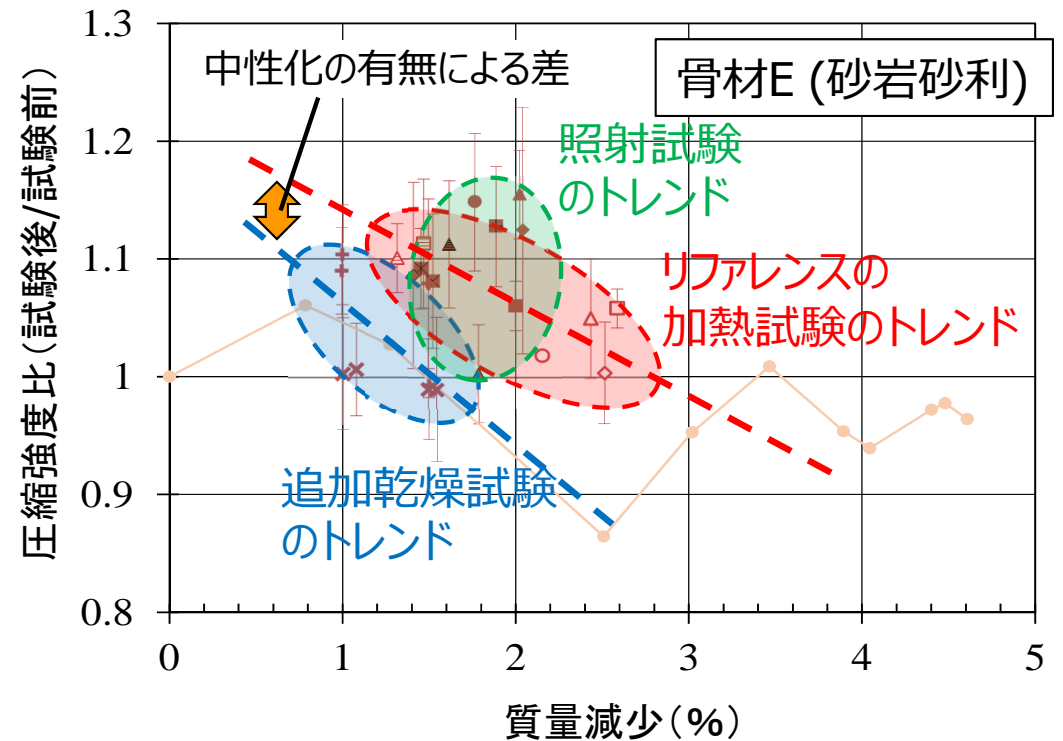
コンクリート物理特性試験
(試験体を照射室内で曝露)

ガンマ線照射試験の主な結果

- 水の放射線分解に関するG値(100eVのガンマ線エネルギー吸収により分解する水分子の個数)の分析により、ガンマ線照射により自由水は分解するが、化学的結合水はほとんど分解しないことが明らかとなった。
- ガンマ線照射試験と加熱試験では、**コンクリート強度特性は同様の傾向**を示した。
- ガンマ線照射では、**ガンマ線自体がコンクリート特性に及ぼす影響は小さい**ため、考慮する必要はないが、**ガンマ線発熱による熱・乾燥影響を評価する必要がある**。



セメントペーストの含水率と水素発生量に関するG値との関係



ガンマ線照射が圧縮強度に及ぼす影響

中性子照射試験の状況

● 中性子照射施設(ノルウェー)



研究炉JEEP II 外観

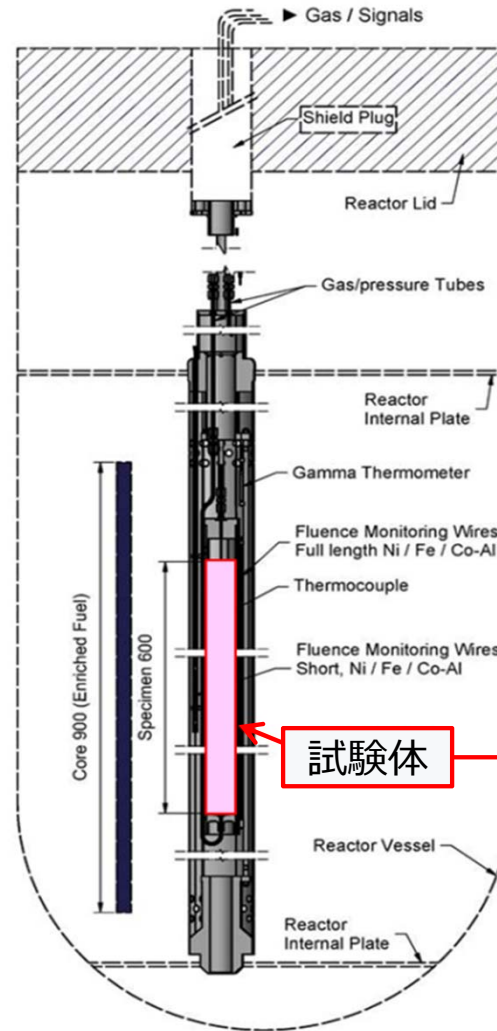


研究炉JEEP II

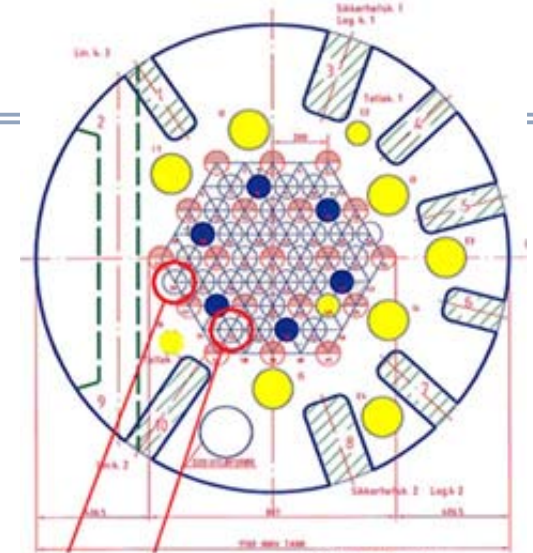
エネルギー技術研究所 (IFE)



JEEP II 炉心上部照射キャプセルの設置

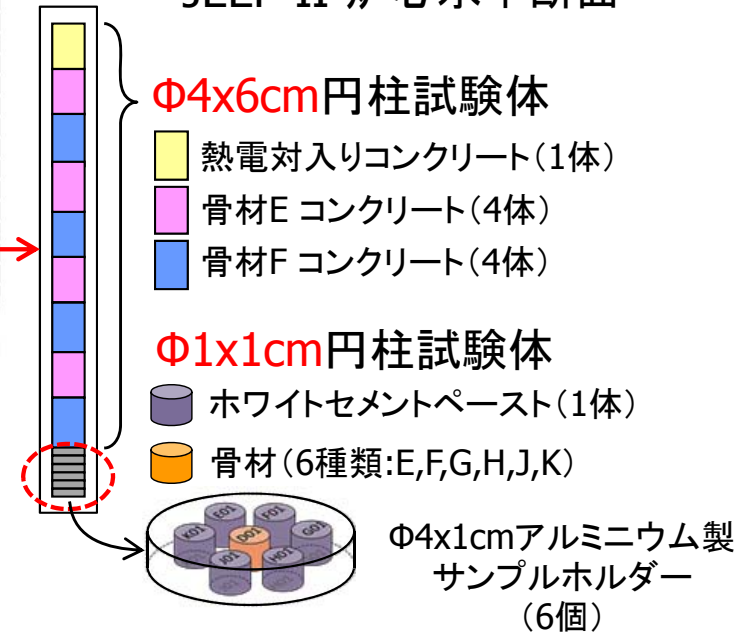


JEEP-II 炉心縦断面



- #36 #52
- 燃料集合体
- 照射孔(冷却あり)
- 制御棒
- 照射孔(冷却なし)

JEEP-II 炉心水平断面



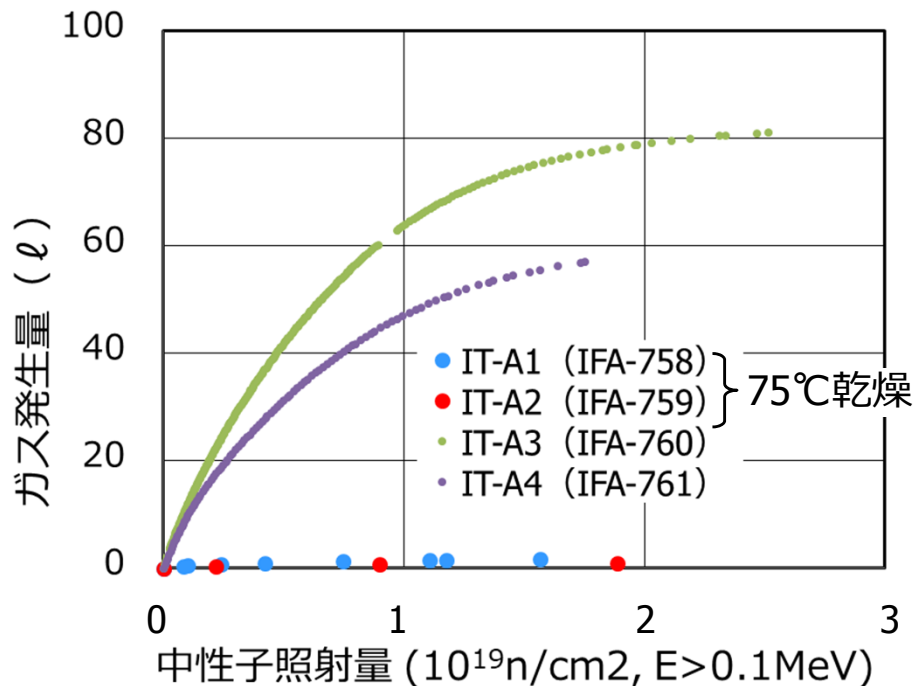
キャプセル内の試験体配置

中性子照射によるガス発生量と骨材膨張

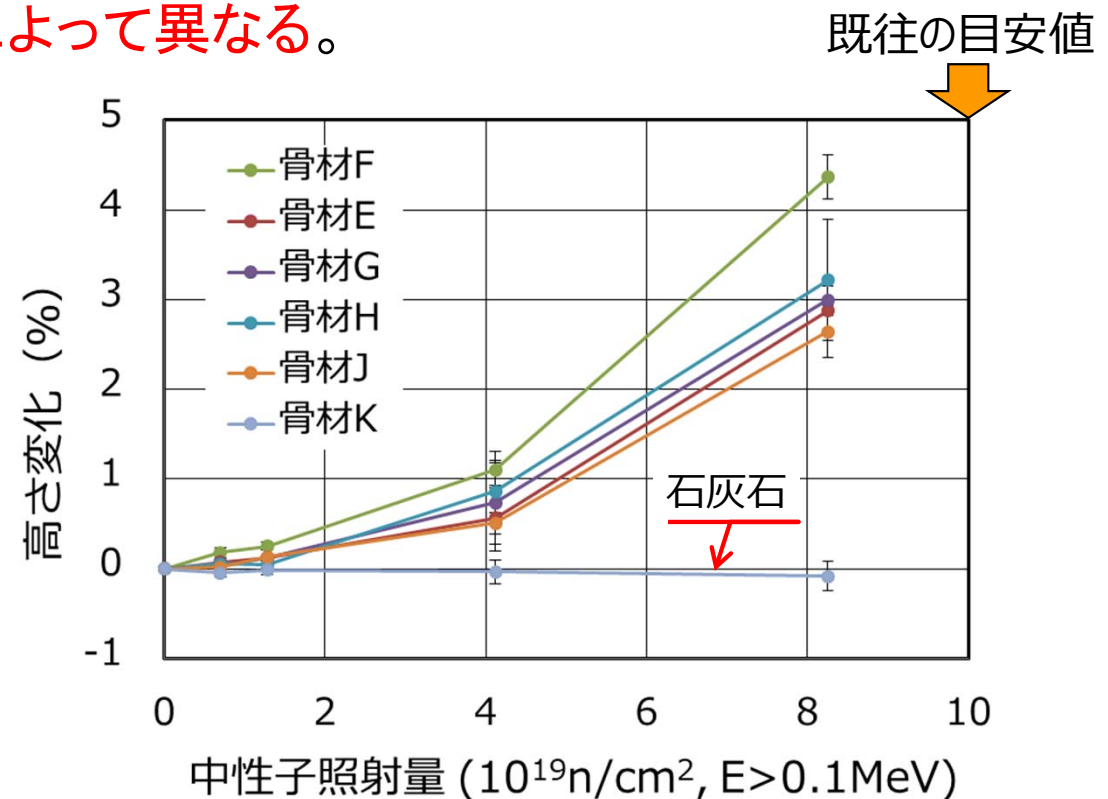
- 中性子照射によるガス発生量の評価より、ガンマ線照射と同様に、化学的結合水はほとんど分解しない。
- 中性子照射の影響を受けやすい**石英**の含有量が多い骨材Fは、中性子照射量の増大に伴い**4.4%膨張**した。
- 一方、コンクリート骨材に用いられる**石灰石**は、結晶性が低く、**イオン結合性**なので、ほとんど**膨張しなかった**。
- **骨材の膨張量は岩種や含まれる鉱物によって異なる。**



照射後の骨材の様子
ひび割れが見られる



中性子による相互作用試験におけるガス発生量
(75°C乾燥した試験体の結晶水はほとんど分解しない)



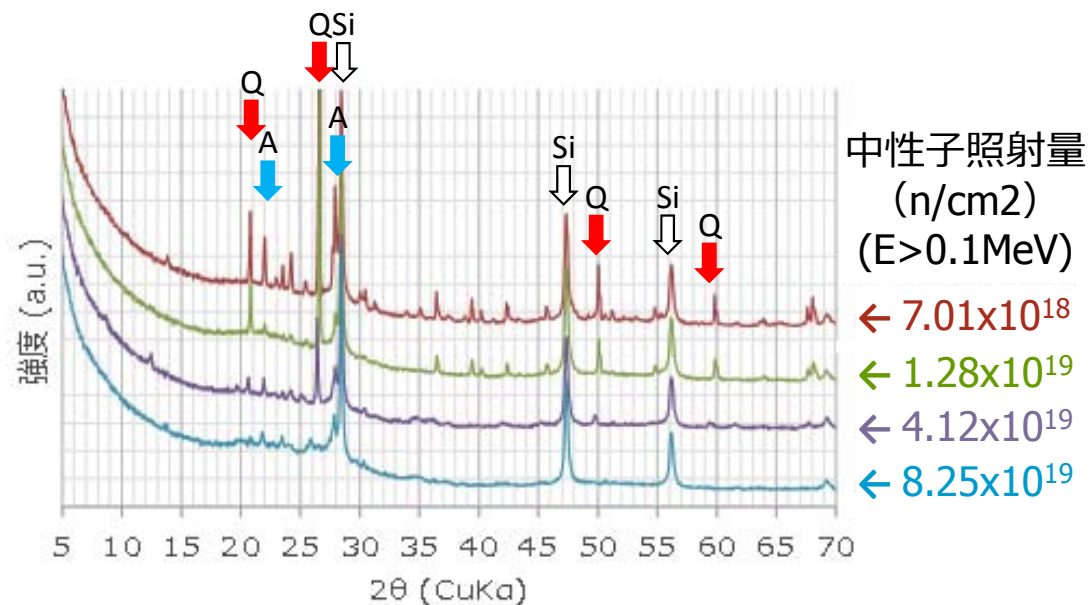
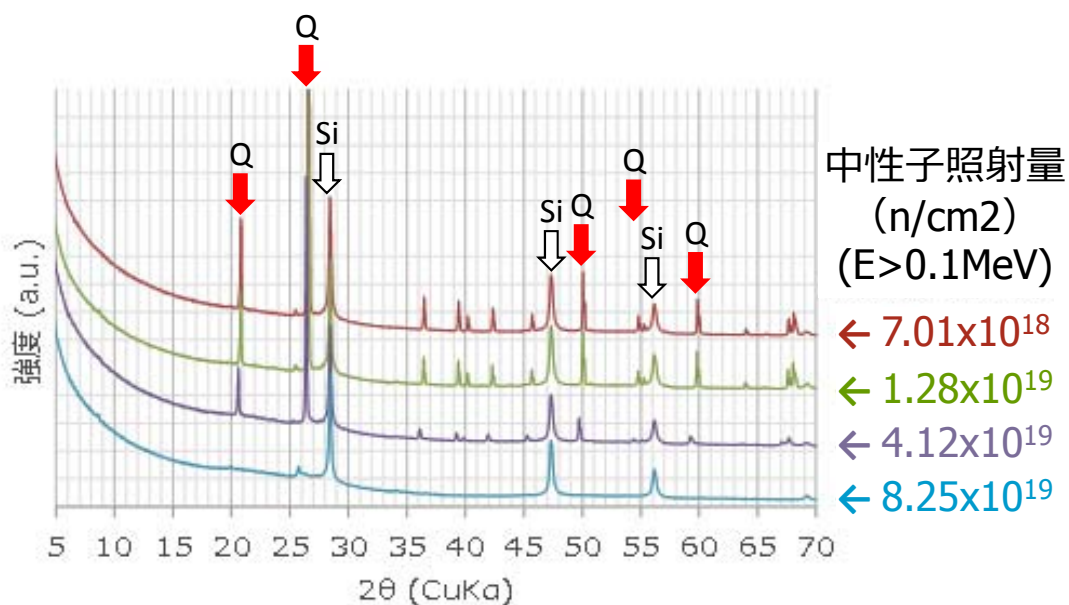
各骨材の寸法変化と照射量の関係

中性子照射による骨材の非結晶化

- 骨材Fでは、照射量の増加に伴い、石英(Q)のピークが左にシフトし、最終的にピークが確認できなくなっている。
- 骨材Eでは、照射量の増加に伴い、石英(Q)および曹長石(A)のピークが左にシフトし、最終的にピークが確認できなくなっている。
- 照射量の増加に伴い、結晶格子間隔が大きくなったので、ピークが左にシフトし、さらなる増加により、結晶の周期性がなくなったので、ピークが確認できなくなり、最終的に、非結晶化し、膨張したと考えられる。

骨材F(凝灰岩碎石:石英量90%以上)

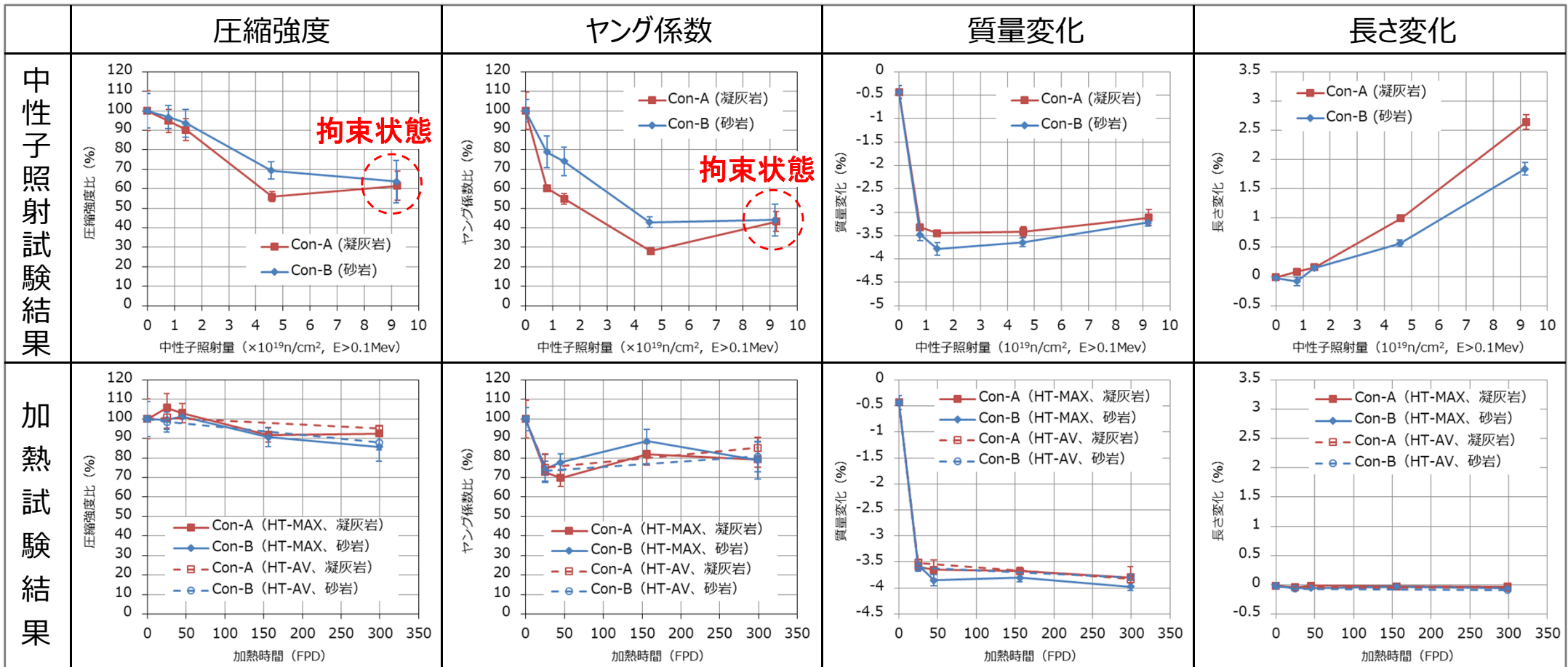
骨材E(砂岩砂利:石英/長石/粘土鉱物)



XRD/リートベルト解析結果

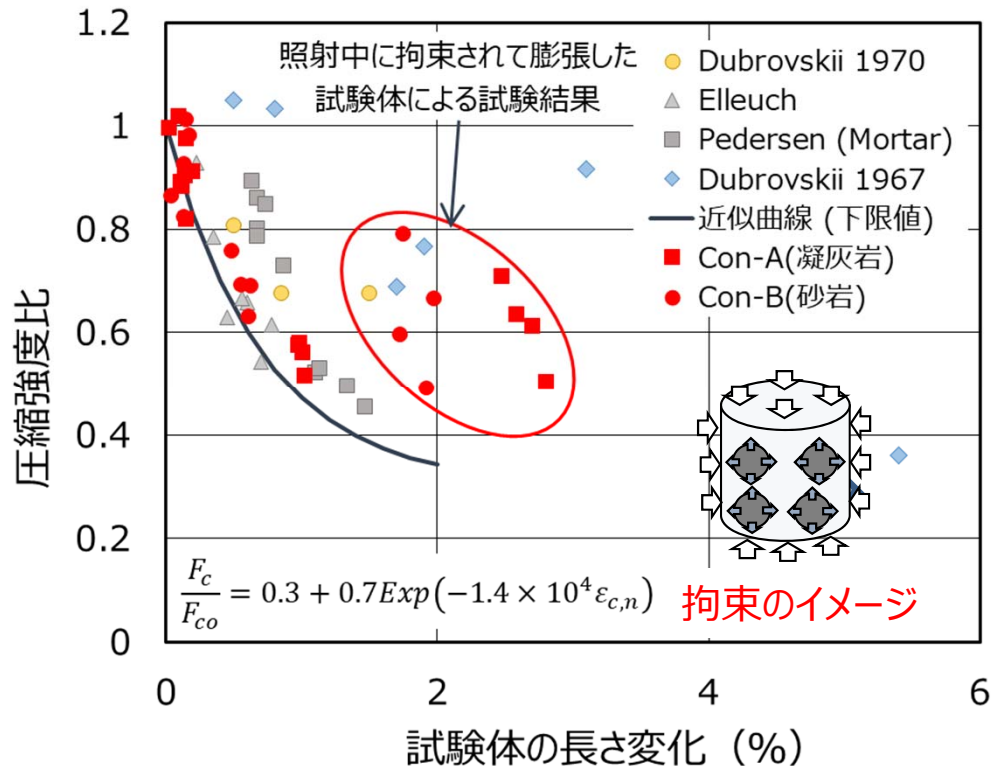
中性子照射によるコンクリート特性変化

- 中性子照射試験では、照射量の増大に伴い、**圧縮強度・剛性は大幅に低下する**。
- 加熱試験でも**15%程度強度低下**するが、照射試験よりも強度低下は小さい。
- 中性子照射と加熱では、質量変化は同程度、長さ変化は中性子照射で明確な膨張。
- 最大照射量の試験では、コンクリートが膨張しキャプセルを押し広げた。その結果、**試験体は拘束状態で膨張し、コンクリートの強度・剛性低下が抑制された**と考えられる。

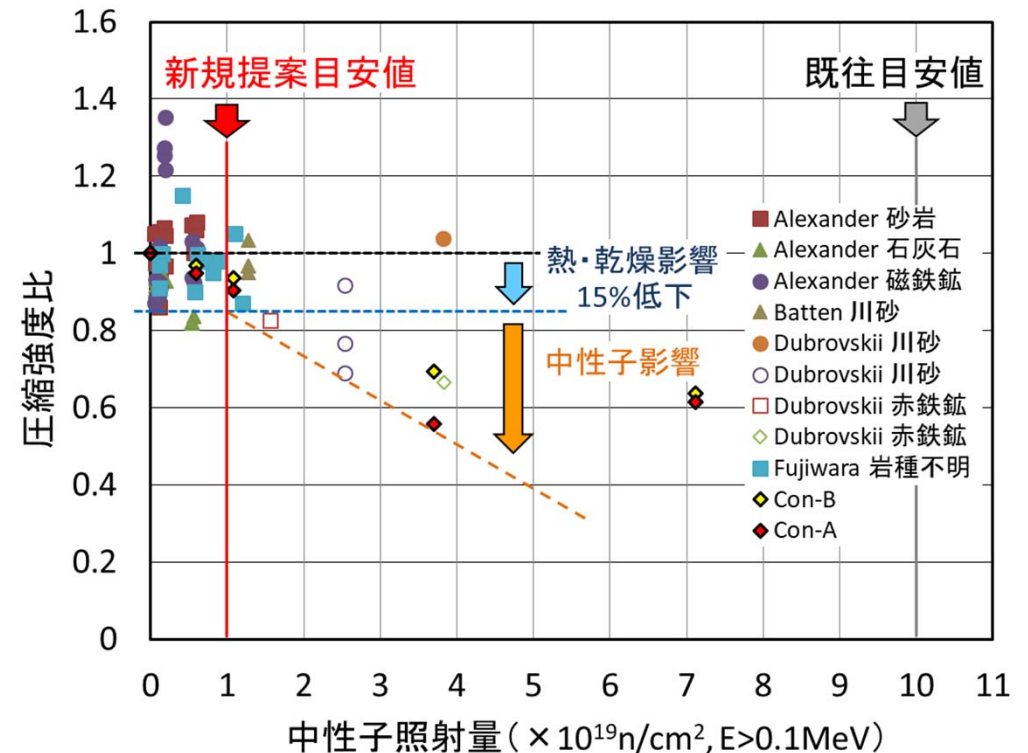


中性子累積照射量の目安値

- 既往の試験結果(骨材膨張によるコンクリート強度低下)を長さ変化と圧縮強度比で整理すると、本研究の結果も同様の傾向を示し、ほぼ下限値に位置している。
- 楕円内データは、照射中に拘束状態でコンクリートが膨張し、強度低下が抑制されたために、同一長さ変化に対して他のデータよりも上方に位置していると考えられる。
- 既往研究を含めたデータの分析より、**熱・乾燥影響で15%強度低下し、それを下回る領域が放射線影響**と考え、**中性子照射の影響が発生する累積照射量は、 $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ となる。**

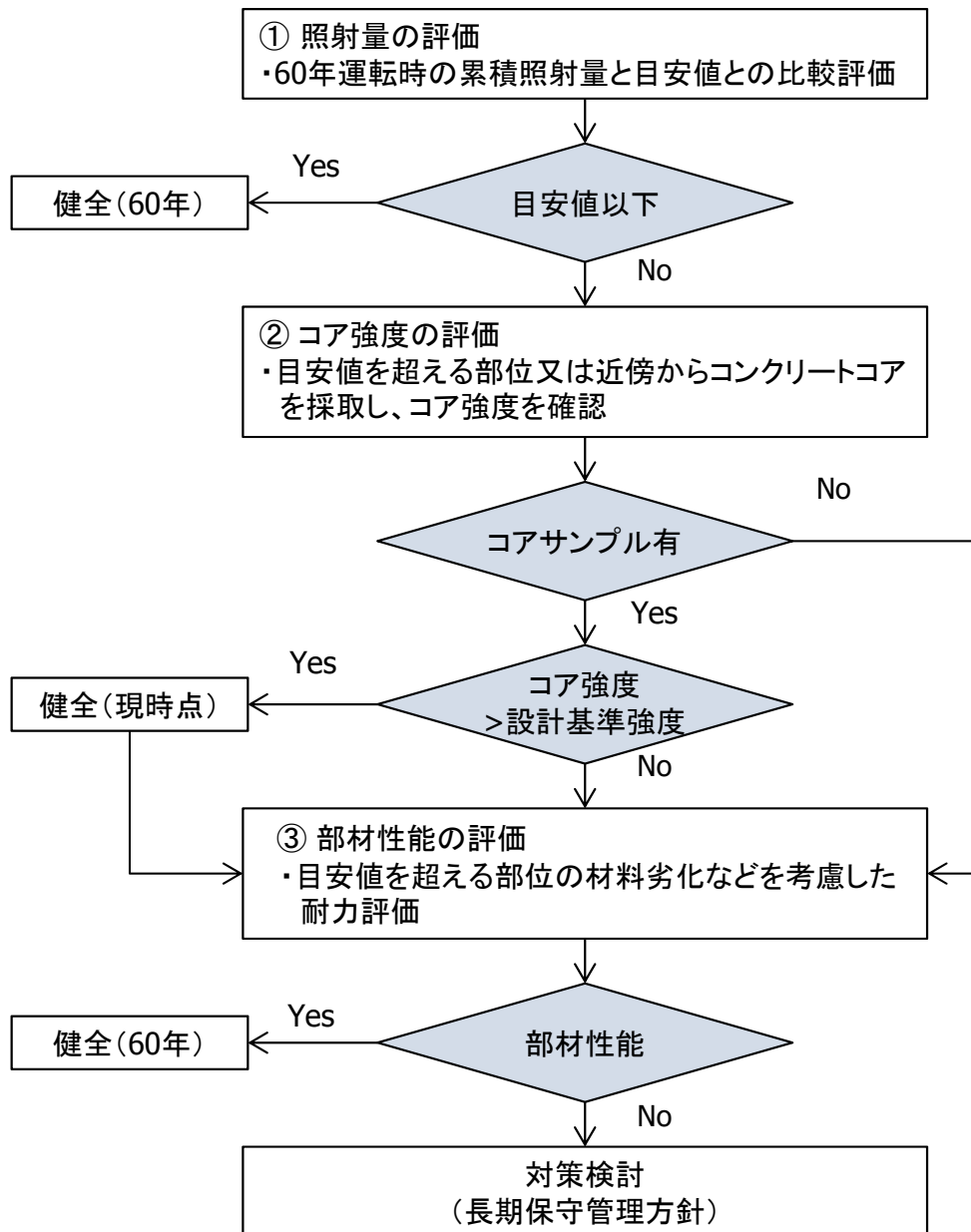


試験体の膨張と強度比の関係



高速中性子照射量と強度比の関係
(実機の55℃照射条件に換算)

コンクリートの健全性評価フロー(案)



照射量ベースの評価

計算・計測による中性子照射量と目安値との比較による評価

コンクリート強度ベースの評価

部材のコンクリート強度と設計基準強度との比較による評価

強度評価法

- ・コアサンプル
- ・数値解析評価

部材性能ベースの評価

材料劣化を考慮した部材性能と設計荷重との比較による評価

断面内強度分布評価法

- ・コアサンプル
- ・数値解析評価

なお、部材評価で対応できない場合は、構造体ベースの評価を行う。

既往研究のまとめ

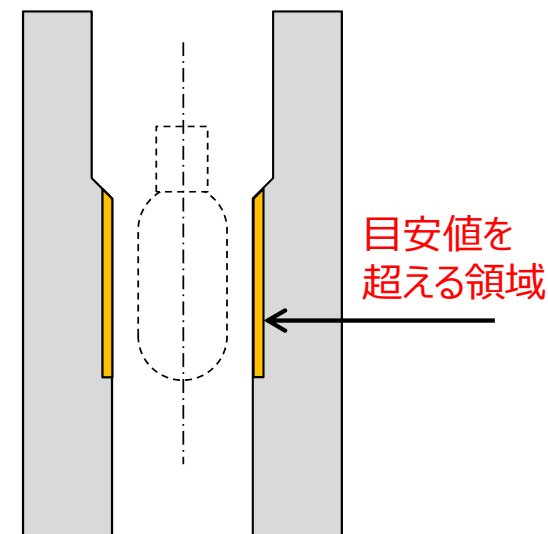
- 放射線照射による**コンクリート劣化メカニズムの解明**
 - ガンマ線照射では、ガンマ線発熱によりコンクリートは熱・乾燥影響を受けるが、ガンマ線自体がコンクリート特性に及ぼす影響は非常に小さい。
 - 中性子照射では、中性子による弾き出しにより、骨材の結晶性が失われ膨張する。
 - 放射線照射によりコンクリート強度低下は、**中性子による骨材の膨張と放射線発熱によるペーストの収縮**に起因することが明確になった。
- 60年間の累積照射量の制限値としている**目安値の妥当性の確認**
 - ガンマ線照射では、熱影響を考慮する必要があるが、累積照射量と目安値との比較による**健全性評価の枠組みは撤廃**できる。
 - 中性子照射では、熱・乾燥影響との関連を考慮して、放射線影響が発生する累積照射量の目安値として **$1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を提案**した。これは、どのような骨材を用いても放射線影響が発生しない、非常に保守的な値であり、**石灰石コンクリートへの適用は合理的ではない**。
- **健全性評価フローの提案とコンクリートの健全性を評価する数値解析手法の構築**
 - 照射量評価、コンクリート強度評価、部材性能評価と**段階的に健全性を評価する**フローを提案した。
 - 数値解析ツールとして、放射線照射環境下の**コンクリートの物性およびその経時変化を予測する数値解析プログラムDEVICE**を開発した。

提案した目安値が既往の評価に及ぼす影響

- 多くのPWRプラントで、60年間の中性子累積照射量が、**既往研究で提案した目安値 $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超えている**ので、健全性評価の枠組みを検討する必要がある。
- ガンマ線自体がコンクリートに与える影響は小さいので、**検討対象としなくてよい**。

プラント名称		部位	高速中性子照射量 (n/cm^2)	ガンマ線照射量 (kGy)
BWR	東海第二	原子炉ペDESTALコンクリート上部	5.05×10^{16}	
		1次遮へい壁内面		6.98×10^1
	1F-6	原子炉ペDESTALコンクリート上部	2.33×10^{15}	
		1次遮へい壁内面		1.74×10^1
	浜岡2	原子炉ペDESTALコンクリート上部	1.9×10^{13}	
		原子炉ペDESTALコンクリート		5.3×10^1
PWR	玄海2	1次遮へい壁炉心側	6.5×10^{19}	2.8×10^5
	伊方2		6.2×10^{19}	2.4×10^5
	大飯1		1.7×10^{19}	1.1×10^5
	大飯2		1.7×10^{19}	1.1×10^5
	美浜3		4.7×10^{19}	2.5×10^5
	高浜1		4.5×10^{19}	2.3×10^5
	高浜2		4.5×10^{19}	2.4×10^5
累積照射量 目安値		従来の値	1.0×10^{20}	2.0×10^5
		既往研究での提案	1.0×10^{19}	枠組み撤廃

照射量が目安値を超える領域を無視して、断面性能を評価することにより、健全性を確認した実績あり。



ガンマ線照射による
PWR一次遮蔽壁の健全性評価
(部材性能ベースの評価)

各プラントの照射量は高経年化対策に関する報告書(公開資料)に基づく。 : 廃炉プラント

新規研究の骨子

多種多様な岩種・鉱物の膨張特性

- 原子力発電所で用いられている骨材の調査・収集
 - ・既往研究では、石英の含有量が多い砂岩系の砕石を用いた照射試験を行い、骨材種類にかかわらず膨張しない**保守的な目安値として $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$** を提案した。
 - ・一方、石灰石は照射量 $7 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ でも膨張しないので、**異なる指標が必要**である。
 - ・新規研究では、特に、**火成岩および火成岩に多く含まれる鉱物などに注目して、調査・選定した骨材を用いて、中性子照射試験を行う。**
 - ・石英より密度の小さい二酸化ケイ素の結晶多形(クリストバライト、トリディマイト)が含まれている火成岩では、砂岩よりも中性子による膨張が小さい可能性がある。
 - ・**異なる岩種による膨張特性を把握し、目安値の運用について検討する必要がある。**

岩種	各岩種に含まれる鉱物										
	二酸化ケイ素				長石類		ケイ酸塩鉱物			鉄チタン 鉱物	粘土 鉱物
	石英	クリスト バライト	トリディ マイト	ガラス	斜長石	カリ長石	輝石	かんらん 石	黒雲母		
	2.7	2.3	2.2	2.2	2.62	2.6	3.2-3.6	3.2-4.4	2.8-3.0	4.7	
砂岩	○				○	○					○*1
玄武岩		○		○	○		○	○		○	○*2
安山岩		○	○	○	○		○			○	
花崗岩	○				○	○			○		

*1: 緑泥石, 雲母粘土鉱物

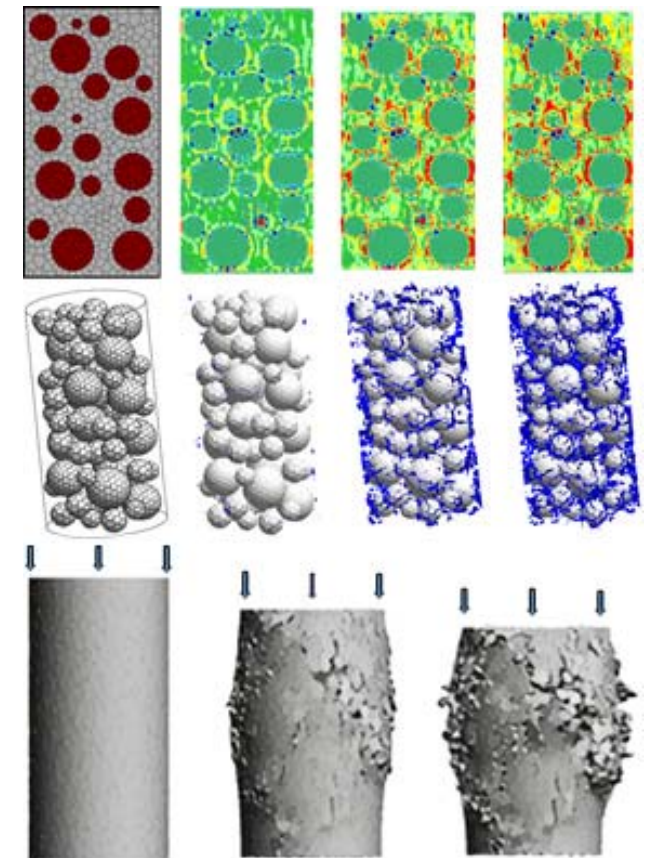
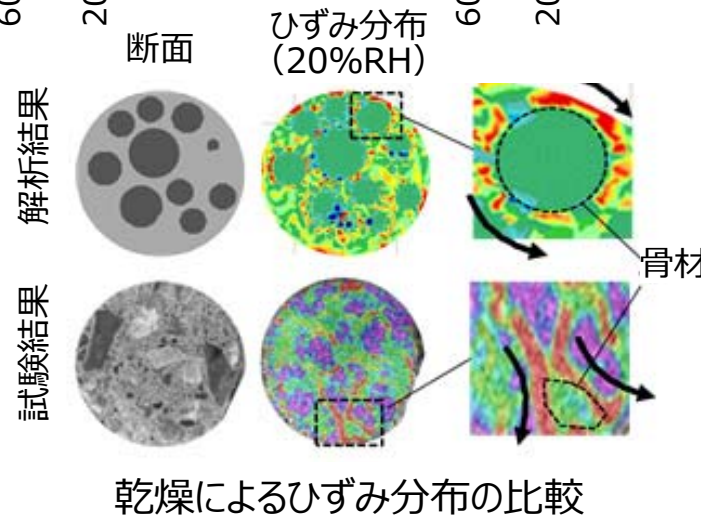
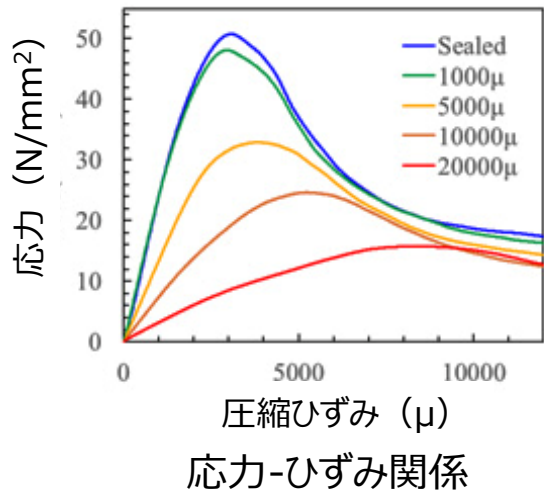
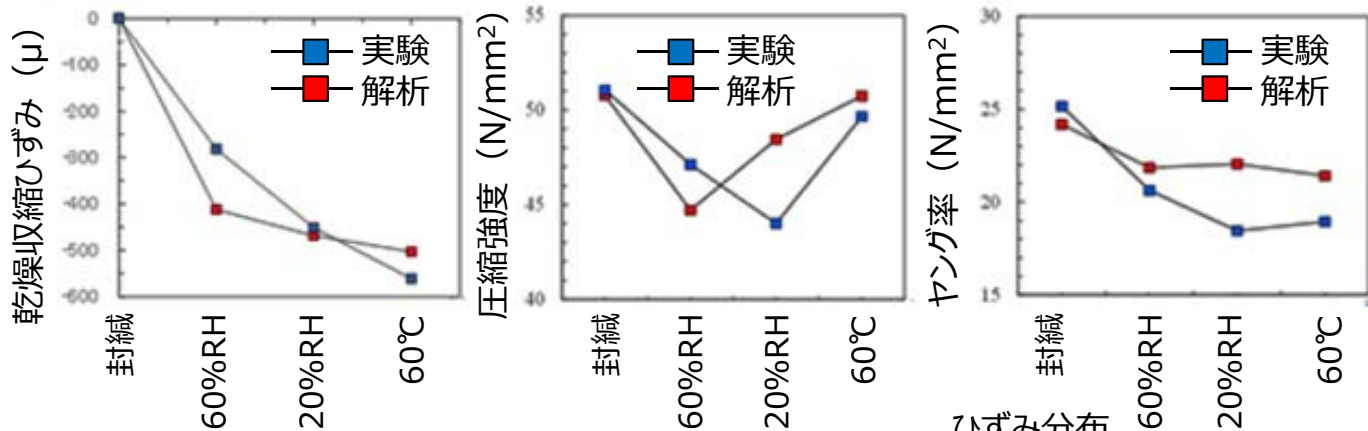
*2: スメクタイト

コンクリートの材料構成則(健全性評価フロー)

● 乾燥・中性子照射影響を考慮したコンクリート構成則の検討

- ・乾燥時のコンクリートの強度・剛性を予測するために、**RBSM***により、**乾燥影響を考慮できるモデル**を開発し、乾燥時挙動をおおむね評価できることを確認した。
- ・今後は、中性子照射による強度・剛性、割裂強度などを評価するために、**骨材・鉱物の膨張を考慮できるようモデルを拡張**する。
- ・さらに、**市販FEMコードの構成則へ展開**する。

*: Rigid Body-Spring Model



乾燥影響を考慮したコンクリートの圧縮強度・剛性を評価

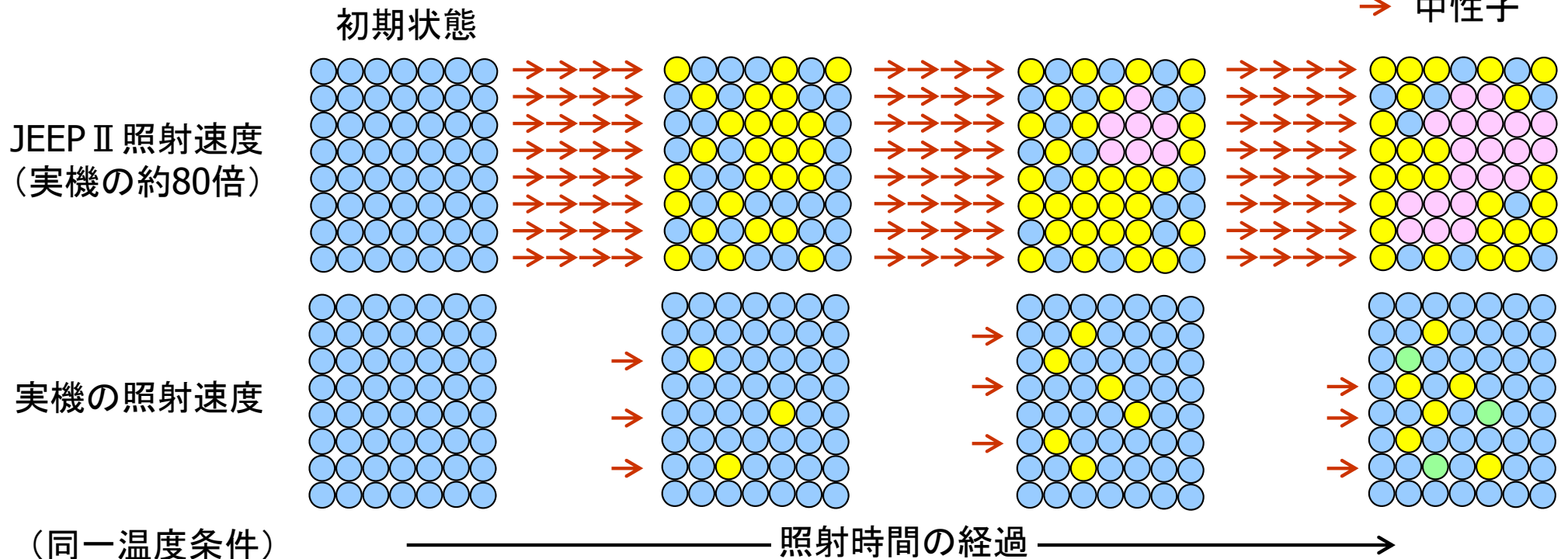
中性子照射における速度効果の検討

● 3相モデル(結晶相/遷移相/非結晶相)による速度効果の検討

- ・中性子の衝突により結晶相は遷移相に移行する。
- ・遷移相がクラスターを形成すると、さらなる中性子衝突により、非結晶相に移行する。
- ・非結晶相から遷移相に戻ることはない。
- ・遷移相に移行しても、中性子の衝突がなければ結晶相に戻る。

→ 中性子が結晶相に衝突して不安定な状態(遷移相)に移行しても、しばらく次の衝突がなければ、結晶相に戻る(治癒効果)。

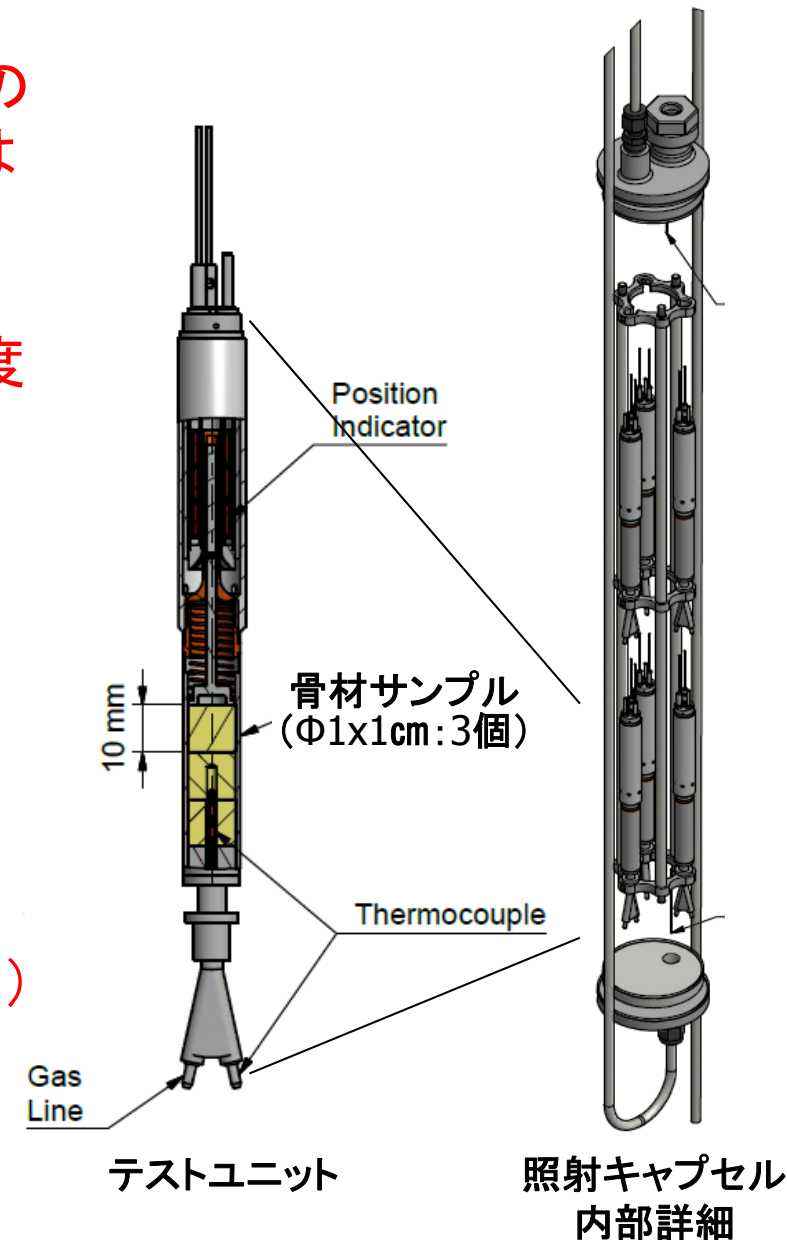
- 結晶相
- 結晶相(治癒後)
- 遷移相
- 非結晶相
- 中性子



メタミクト化における速度効果のイメージ

照射温度をパラメータとした骨材の照射試験

- 骨材膨張を評価する3相モデル
 - 照射速度をパラメータとする実験が好ましいが、**単一の研究炉で中性子束を変更**（10倍、100倍など）するのは**非常に難しい**。
 - **骨材の劣化評価に用いる3相モデル**では、**照射速度・照射温度の両方の影響を考慮しているため、照射温度をパラメータとして照射試験を行い、3相モデル設定に必要な定数を求める**。
- 中性子照射中の骨材寸法変化計測
 - 1体の照射キャプセルに、テストユニット6体を設置し、すべてのユニットに変位計を取り付け、骨材の寸法変化を連続的に計測する。
- 温度制御システム
 - 炉外の加熱/冷却装置により、**目標温度**（20,58,110℃）に調節した重水を、キャプセル内（テストユニット周囲）に循環させ、試験体温度を制御する。
 - 試験体中央に設置した熱電対により、ユニット毎に試験体の温度を計測する。



新規研究での主な研究内容

● 骨材種別膨張影響の評価

- 骨材種類にかかわらず膨張しない保守的な目安値 1×10^{19} n/cm²を提案した。しかし、石灰石は、イオン結合性なので、 7×10^{19} n/cm²を超える照射量でもほとんど膨張しない。

⇒異なる岩種・鉱物による膨張特性の違いを把握し、設定した目安値の運用について検討する必要がある。

● 鉄筋コンクリート部材レベルでの評価手法の確立

- 鉄筋コンクリート部材の健全性評価法を構築するためには、骨材が膨張する場合の構成則や鉄筋とコンクリートの付着挙動などを適切に表現する必要がある。

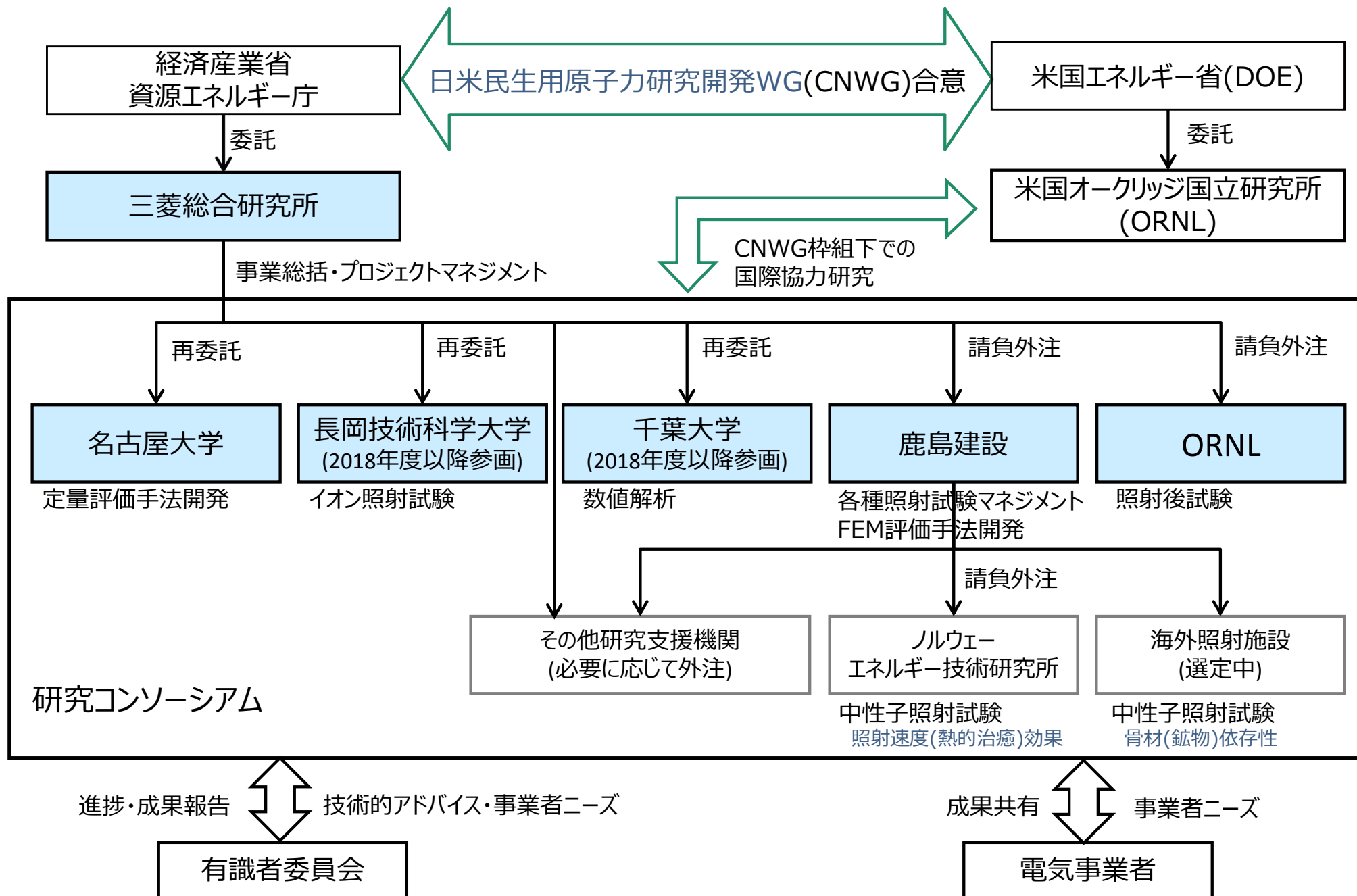
⇒RBSMなどの詳細解析により構成則や付着挙動を把握し、これらの検討結果を、FEMの構成則などへ展開し、市販FEMコードで解析評価できる枠組みを構築する。

● 実機環境の劣化メカニズム解明(照射速度効果の把握)

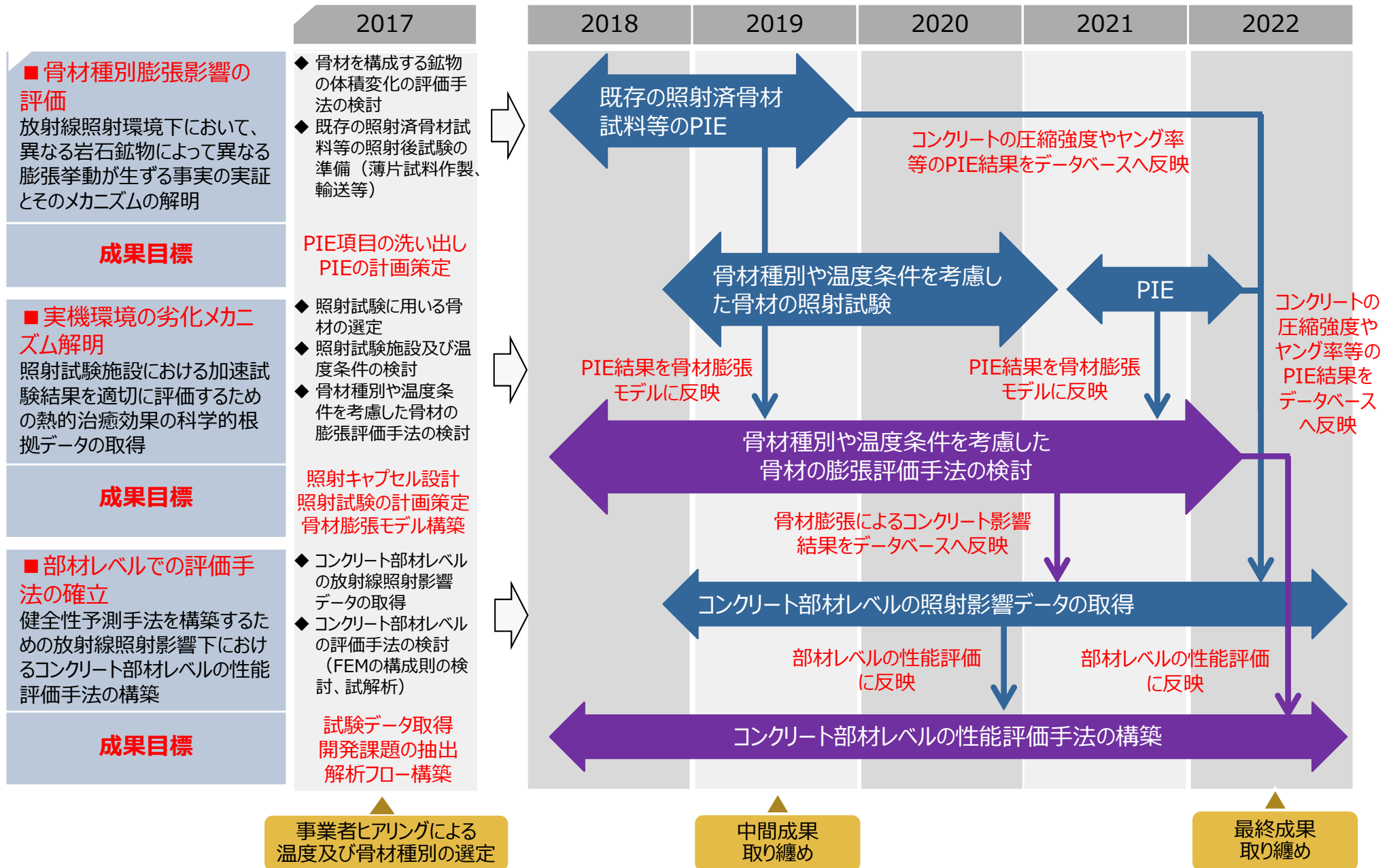
- 中性子照射試験の照射速度が実機の約80倍なので、加速照射の影響を把握する必要がある。

⇒骨材の劣化評価に用いる3相モデルでは、照射速度・照射温度の両方の影響を考慮している。照射速度をパラメータとする実験が好ましいが、単一の研究炉で中性子束のオーダーを変更するのは非常に難しいので、照射温度をパラメータとして照射試験を行い、3相モデルの定数を評価する。

新規研究の実施体制



新規研究の全体工程



ご清聴ありがとうございました