

建物構造物の健全性評価手法確立に向けた 取り組み状況について

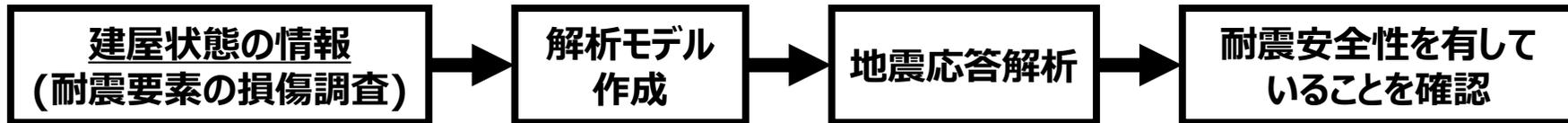
2024年10月28日



東京電力ホールディングス株式会社

建物健全性評価の目的

- これまで、1～3号機原子炉建屋については、損傷状況を反映した耐震安全性評価を行い、基準地震動Ssに対して十分な耐震安全性を有していることを確認している



耐震安全性評価の流れ

- 一方、1～3号機原子炉建屋については、デブリ取り出し完了までの長期にわたって建物健全性を確認していく必要がある

【1～3号機原子炉建屋の長期健全性評価】

建屋状態の情報を更新し、必要な性能（耐震安全性等）を有していることを継続的に確認していくこと

<観点>

- ・経年劣化等により部材性能が低下していないか
- ・大地震等により部材が追加で損傷していないか

<評価対象>

- ・耐震安全性評価上で考慮している部位

建物健全性評価の検討項目

1. 高線量エリアにおける無人・省人による調査方法の検討

- 耐震安全性評価で考慮している耐震要素の経年劣化・地震時の追加損傷等の有無を確認し、必要に応じて、耐震安全性評価モデルに反映していく
- 原子炉建屋内は高線量であることから、被ばくを抑制して定期的に耐震壁等の調査ができるように、ロボット・ドローン等による建屋内調査の無人化・省人化を検討する

2. 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討

- 1～3号機原子炉建屋内は高線量であり、建屋躯体のコア採取による詳細調査が行えないことから、類似の環境条件かつ詳細調査が可能な4号機を活用した代替評価を検討する

3. 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討（地震計の活用）

- 1～3号機原子炉建屋に地震計を設置し、観測記録を継続的に見ていくことで建屋全体の経年変化の傾向確認ができるか検討する

① 高線量エリアにおける無人・省人による調査方法の検討

第1章



② 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討

第2章



③ 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討（地震計の活用）

第3章



長期健全性評価の確立

本日まで説明する範囲

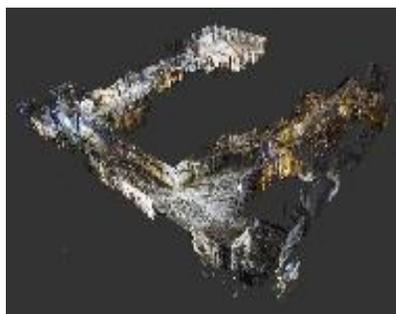


3号機原子炉建屋における無人航空機（以下、ドローン）調査

- 遠隔操作による画像取得について、「ダスト飛散影響」「操作性」「画像解像度」を検証することを目的に、3号機原子炉建屋1階でドローン調査を実施
- 検証した結果、「ダスト飛散影響」「画像解像度」は問題なく実施することが可能であることを確認
- 一方、遠隔による「操作性」を向上されることが課題であると確認できたため、今後捜査訓練を実施予定
- 今後、3階・4階の4足歩行ロボットで調査が難しい箇所について、ドローン調査予定



今回調査範囲



ドローン撮影画像

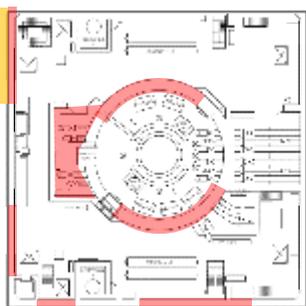
壁面調査可能範囲

凡例

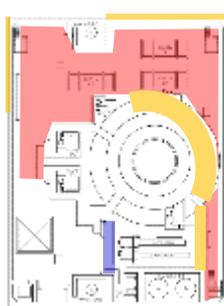
4足歩行ロボット調査済範囲

3Dスキャナー調査済範囲

ドローン調査予定範囲



1階



2階
2階



3階

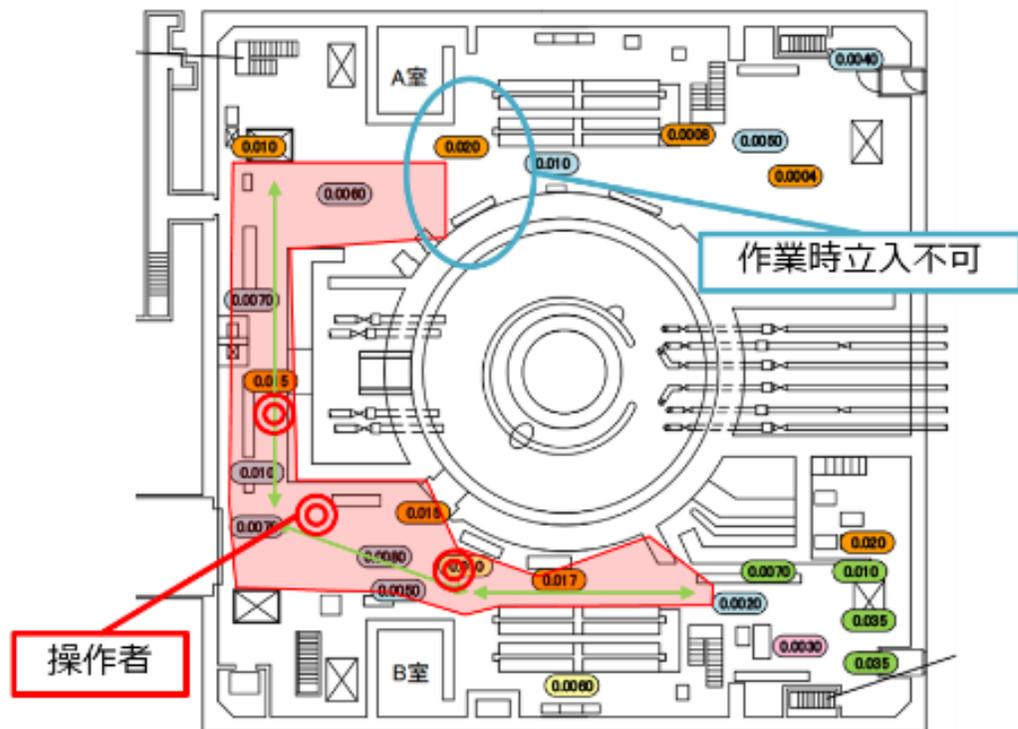


4階

3号機原子炉建屋1階～4階の調査対象範囲

4号機原子炉建屋における4足歩行ロボット (以下, SPOT) 調査

- 4足歩行ロボットでの無人調査について, 「SPOT搭載の360°カメラによる画像解像度」「通信環境」を検証することを目的に, 360°カメラを搭載したSPOTでの調査を実施
- 検証した結果, 「SPOT搭載の360°カメラによる画像解像度」「通信環境」については問題なく実施することが可能であることを確認
- 今後, 無人走行を実施し更なる被ばく抑制の可能性について調査予定



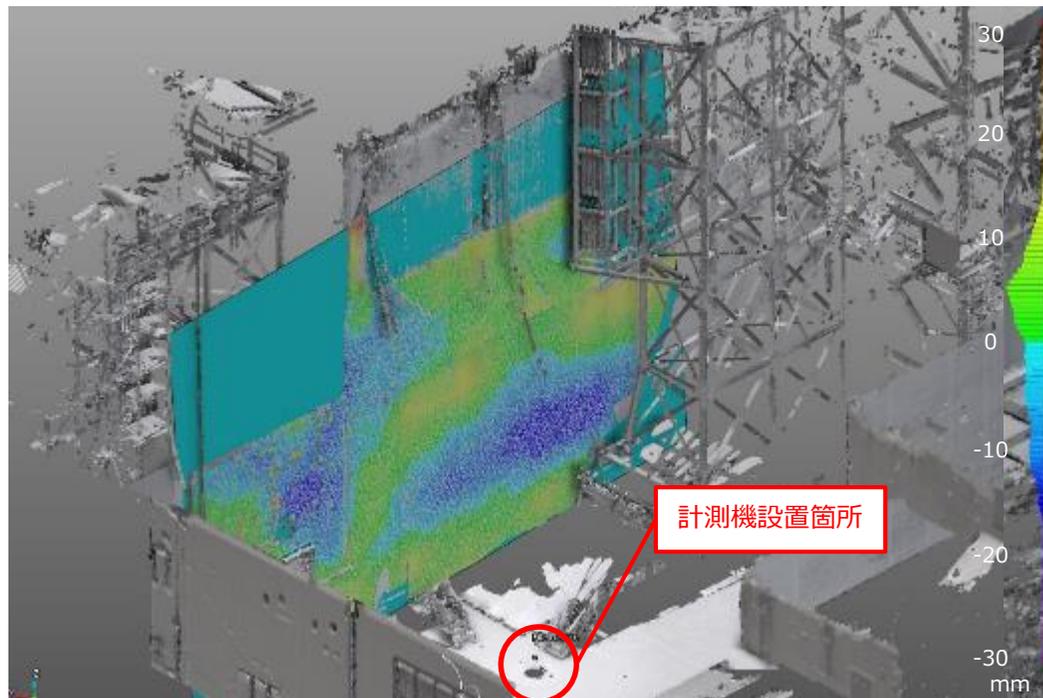
SPOT歩行状況 (保護具着用)
搭載機器: 通信機器, 360°カメラ



4号機南側シェル壁
撮影状況

3号機点群データによる差分分析

- 置型3Dレーザースキャナーを利用して、3号機原子炉建屋外壁の計測を実施
- 現状は10mm程度の凹凸であり、塗装の有無やコンクリート鉄筋かぶり程度の差しか見られない
- 今後、継続的に外壁面の計測・差分分析を行い、計測結果・分析結果に大きな変化が無いか確認予定



凡例 (地面に対して垂直な基準面 に対する差分)
■ : 30mm ■ : 20mm ■ : 10mm ■ : 0mm ■ : -10mm ■ : -20mm ■ : -30mm
図中カラーバー横軸は分析対象の点群中の割合

点群データの差分分析



3号機原子炉建屋北側外壁



3Dレーザースキャナー計測の様子

2. 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討 (1/3)

経年劣化（中性化，塩分浸透）に対する調査および評価

- 4号機原子炉建屋の4箇所（地下1階, 1階屋内, 1階屋外, 2階屋外）において経年劣化評価のためのコア採取を実施し，採取したコアの中性化深さを測定（2023年3月）
- 表面付着塩分測定（ガーゼ拭き取り法）をコア採取箇所近傍にて実施した結果，2箇所において極めて微量な塩分付着量を確認し，2箇所は未検値であった（下記表参照）
- 同様に，採取したコアの塩分浸透測定を実施し，「塩分浸透」に対する評価を実施する（次ページ参照）
- 今後，「中性化」「塩分浸透」の評価結果を踏まえ，経年劣化に対する調査・評価の実施頻度を検討する



地下階のコア採取状況

ガーゼ拭き取り法の結果

測定位置	付着塩分量 (NaCl mg/m ²)
4号機原子炉建屋 地下1階内壁	10
4号機原子炉建屋 1階西側外壁（屋外側）	10
4号機原子炉建屋 1階西側外壁（屋内側）	未検値
4号機原子炉建屋 2階北側外壁（屋外側）	未検値



ガーゼ拭き取り法の状況

2. 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討 (2/3)

塩化物イオン量の分析結果

- 4号機原子炉建屋から採取したコアの塩化物イオン量分析を実施
- 各箇所採取コア3本の塩化物イオン量平均値から、鉄筋腐食によるひび割れ発生年数を算出
- 今回の結果から、次ページの中性化に対する経年劣化評価も踏まえ、長期的な点検頻度を設定

測定位置	深さ (mm)	コンクリート試験結果 塩化物イオン濃度 (%)			コンクリート試験結果 塩化物イオン量 (kg/m ³) (①~③平均値)	環境条件			鉄筋腐食による ひび割れ 発生年数 (年)
		①	②	③		温度 (°C)	湿度 (%)	酸素 濃度 (%)	
地下1階内壁	5	0.060	0.044	0.045	1.167	13.8	72	20	68
	15	0.064	0.115	0.122	2.357				
	25	0.065	0.125	0.085	2.150				
	35	0.101	0.114	0.094	2.410				
	50	0.083	0.125	0.122	2.583				
	70	0.078	0.112	0.091	2.197				
1階西側外壁 (屋内側) ↑ 屋内	5	0.039	0.001	0.041	0.637	13.8	72	20	111
	15	0.050	0.011	0.038	0.773				
	25	0.019	0.022	0.032	0.563				
	35	0.037	0.056	0.033	0.983				
	50	0.045	0.039	0.053	1.070				
	70	0.036	0.041	0.038	0.893				
1階西側外壁 (屋外側) ↓ 屋外	5	0.015	0.044	0.024	0.647	13.8	72	20	104
	15	0.056	0.085	0.065	1.610				
	25	0.043	0.061	0.049	1.187				
	35	0.028	0.045	0.047	0.940				
	50	0.025	0.040	0.037	0.803				
	70	0.029	0.046	0.035	0.857				
2階北側外壁 (屋外側)	5	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.024未満	13.8	72	20	174
	15	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.024未満				
	25	0.001未満	0.001未満	0.006	0.063				
	35	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.024未満				
	50	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.024未満				
	70	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.024未満				

2. 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討 (3/3)

(参考) 中性化に対する経年劣化評価結果

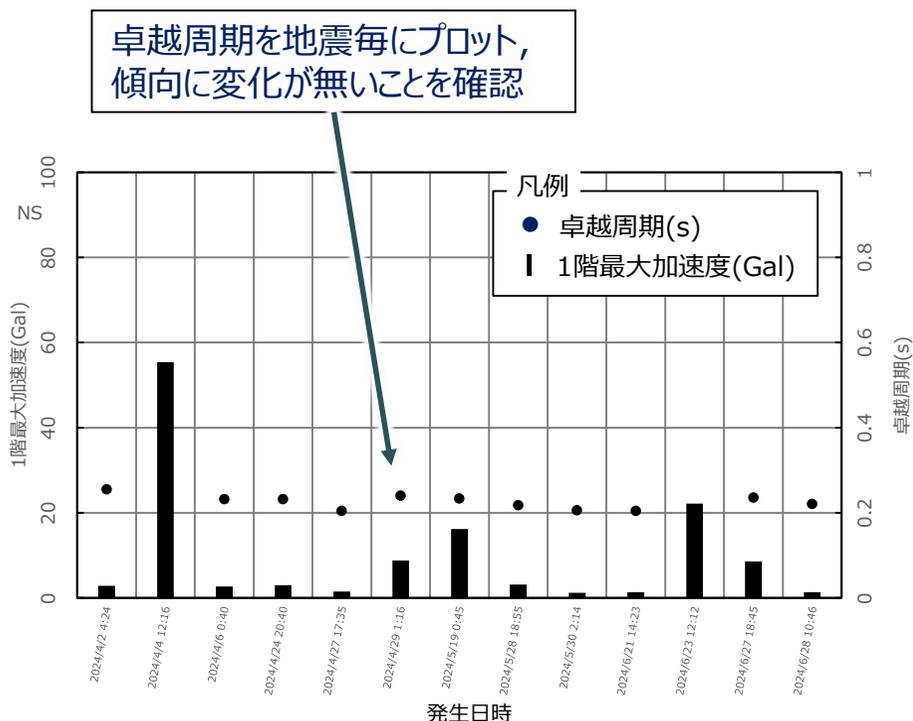
- 4号機原子炉建屋から採取したコアの中性化深さの測定結果に基づき、①√t式により鉄筋腐食開始年数等を推定した（参考に、コンクリート仕様及び環境条件に基づく算定式②岸谷式と③森永式も算出）

測定位置	識別番号	コンクリート 試験結果 中性化深さ (cm)	環境条件			運開から100年後の 中性化深さ (cm)				鉄筋腐食開始年数 (年)			
			温度 (℃)	湿度 (%)	CO2 (ppm)	①√t式	(参考) ②岸谷式	(参考) ③森永式	(参考) ③森永式 湿度40%	①√t式	(参考) ②岸谷式	(参考) ③森永式	(参考) ③森永式 湿度40%
地下1階内壁	1F-4R-B1NW I ①	0.84	13.8	72	415	1.27	6.83	1.54	3.32	2232	77	1518	326
	1F-4R-B1NW I ②	0.96	13.8	72	415	1.45	6.83	1.54	3.32	1712	77	1518	326
	1F-4R-B1NW I ③	0.45	13.8	72	415	0.68	6.83	1.54	3.32	7785	77	1518	326
	1F-4R-B1NW I ①～③平均	0.75	13.8	72	415	1.13	6.83	1.54	3.32	2819	77	1518	326
1階西側外壁 (屋外側)	1F-4R-1WO ①	0.75	13.8	72	415	1.13	4.02	1.54	3.32	1253	99	674	145
	1F-4R-1WO ②	0.45	13.8	72	415	0.68	4.02	1.54	3.32	3460	99	674	145
	1F-4R-1WO ③	0.61	13.8	72	415	0.92	4.02	1.54	3.32	1890	99	674	145
	1F-4R-1WO ①～③平均	0.60	13.8	72	415	0.90	4.02	1.54	3.32	1975	99	674	145
1階西側外壁 (屋内側)	1F-4R-1W I ①	2.18	13.8	72	415	3.29	6.83	1.54	3.32	332	77	1518	326
	1F-4R-1W I ②	1.73	13.8	72	415	2.61	6.83	1.54	3.32	528	77	1518	326
	1F-4R-1W I ③	2.01	13.8	72	415	3.03	6.83	1.54	3.32	392	77	1518	326
	1F-4R-1W I ①～③平均	1.97	13.8	72	415	2.97	6.83	1.54	3.32	408	77	1518	326
2階北側外壁 (屋外側)	1F-4R-2NO ①	2.03	13.8	72	415	3.06	4.02	1.54	3.32	170	99	674	145
	1F-4R-2NO ②	2.25	13.8	72	415	3.39	4.02	1.54	3.32	139	99	674	145
	1F-4R-2NO ③	2.06	13.8	72	415	3.11	4.02	1.54	3.32	165	99	674	145
	1F-4R-2NO ①～③平均	2.11	13.8	72	415	3.18	4.02	1.54	3.32	158	99	674	145

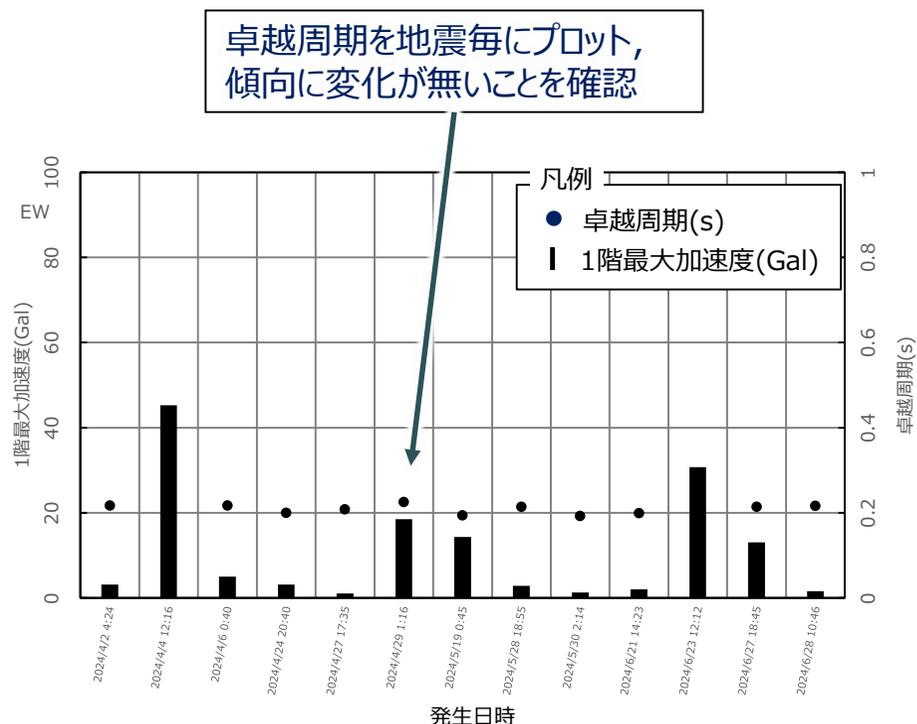
3. 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討 (1/4)

地震計のデータ取得・評価の継続 (1号機)

- 1号機原子炉建屋地震計のデータ取得し、2024年4月～2024年6月の観測記録から、卓越周期の傾向が変化していないことを確認



NS方向の卓越周期の推移
(1号機地震計：2024年4月～2024年6月)

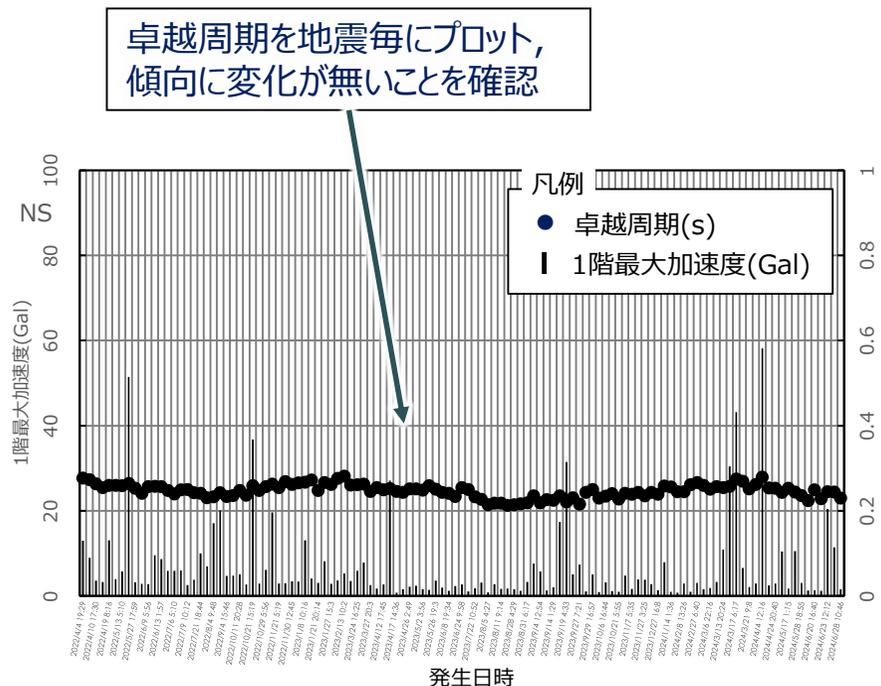


EW方向の卓越周期の推移
(2号機地震計：2024年4月～2024年6月)

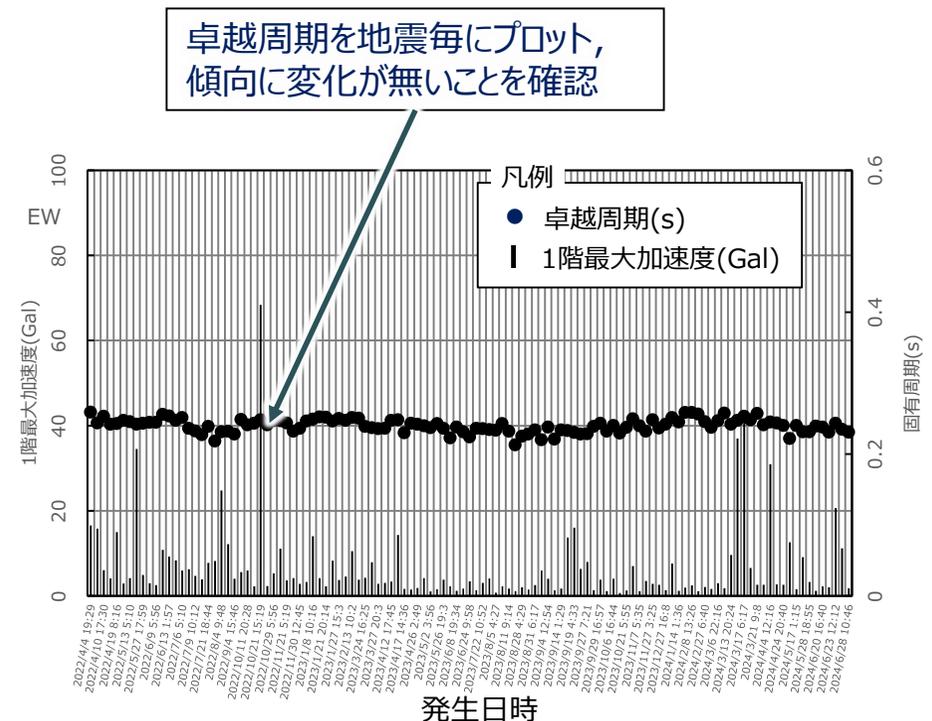
3. 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討 (2/4)

地震計のデータ取得・評価の継続 (2号機)

- 2号機原子炉建屋地震計のデータ取得を継続的し、2022年4月～2024年6月の観測記録から、卓越周期の傾向が変化していないことを確認



NS方向の卓越周期の推移
(2号機地震計：2022年4月～2024年6月)

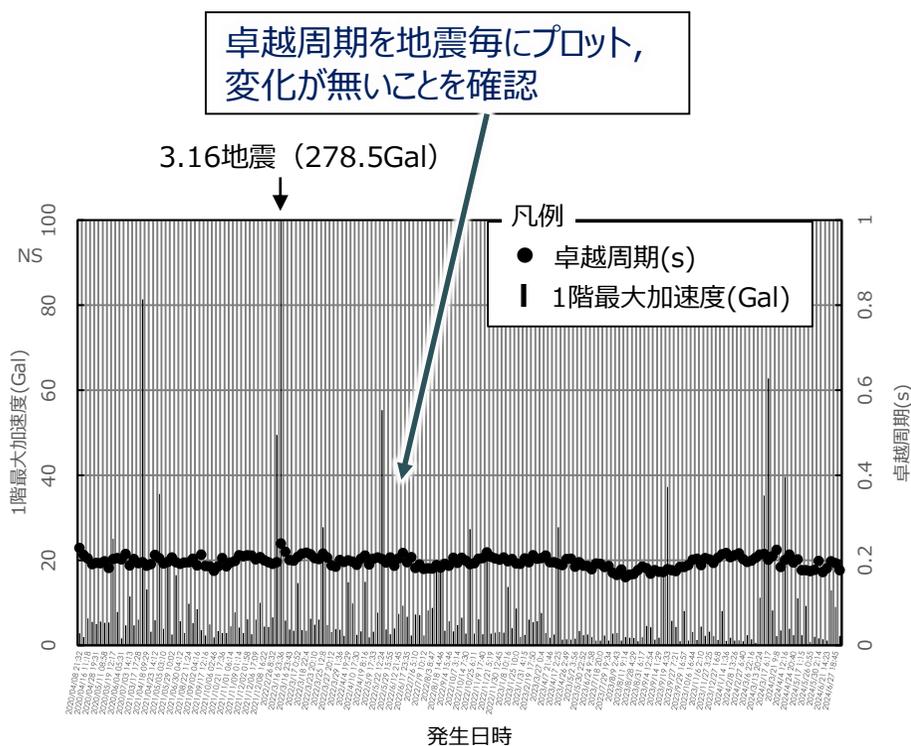


EW方向の卓越周期の推移
(2号機地震計：2022年4月～2024年6月)

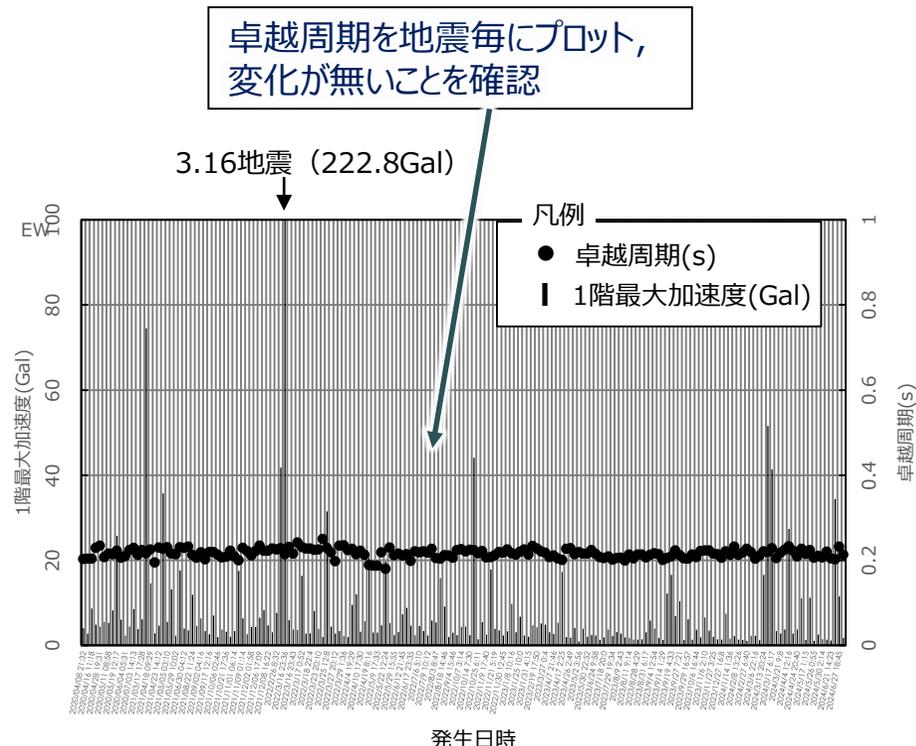
3. 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討 (3/4)

地震計のデータ取得・評価の継続 (3号機)

- 3号機原子炉建屋地震計のデータ取得を継続的し、2020年4月～2024年6月の観測記録から、卓越周期の傾向が変化していないことを確認



NS方向の卓越周期の推移
(3号機地震計：2020年4月～2024年6月)

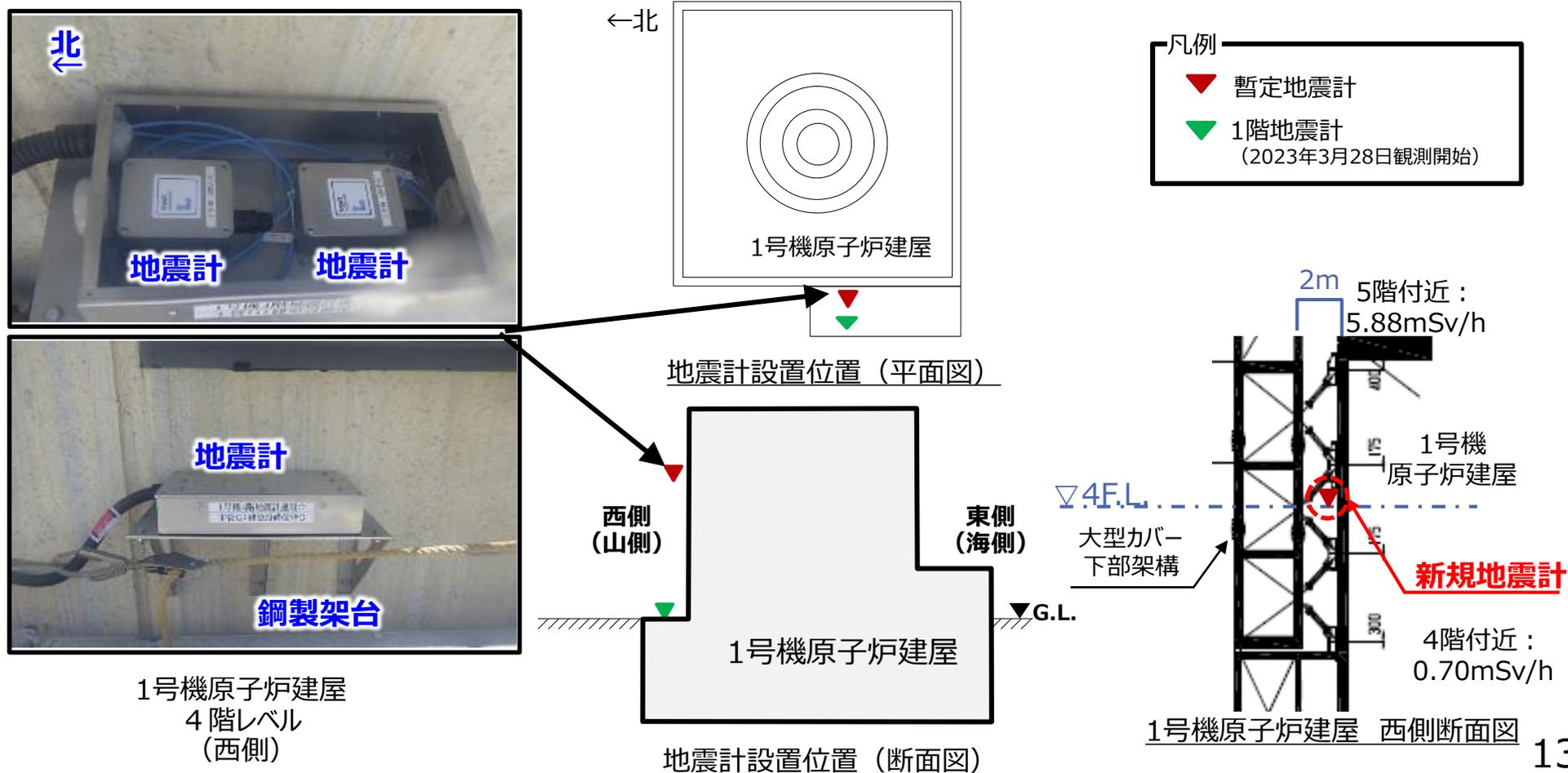


EW方向の卓越周期の推移
(3号機地震計：2020年4月～2024年6月)

3. 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討 (4/4)

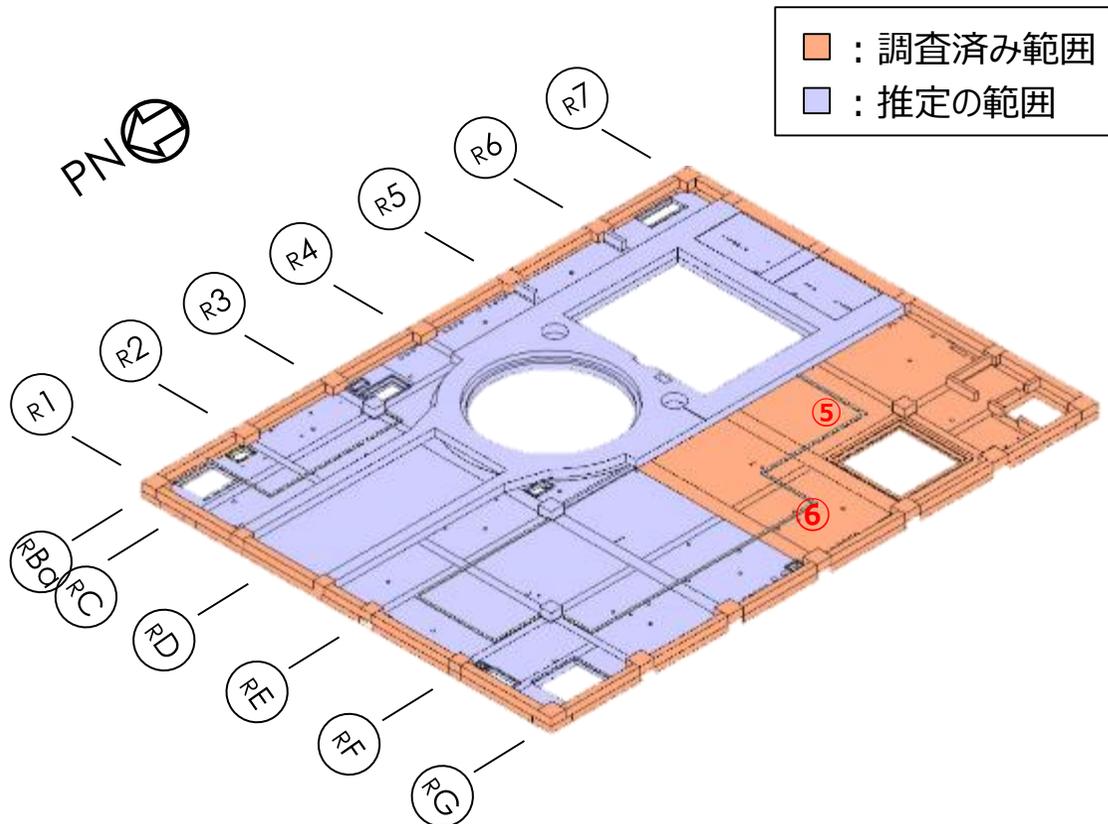
(参考) 1号機原子炉建屋上階への地震計設置完了

- 1号機原子炉建屋上部付近への暫定的な地震計の設置位置として、地震観測の信頼性が確保できる4階フロア付近西側外壁へ3月29日に地震計を設置完了、3月30日から観測開始
- 今後、地震観測記録を建屋健全性評価等に活用予定



原子炉建屋における点検結果の反映 (BIMの利用)

- 3号機原子炉建屋をモデルに，震災以降の耐震評価に資する調査結果をBIMモデルに反映
- 調査済み及び推定の範囲は以下のとおり (例：3号機原子炉建屋4階)
- 調査済みの箇所は，写真データ等も含め点検結果としてBIMモデルに反映



例：3号機原子炉建屋4階
BIMモデル点検結果反映状況例

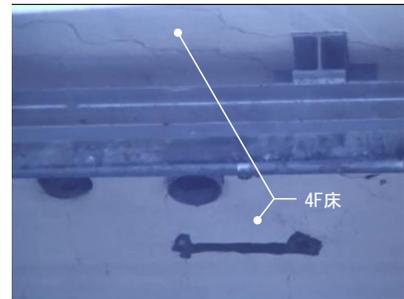
⑤4F床 (大物搬入口東側)



⑥4F床 (大物搬入口北側)



⑤4F床 (大物搬入口東側)



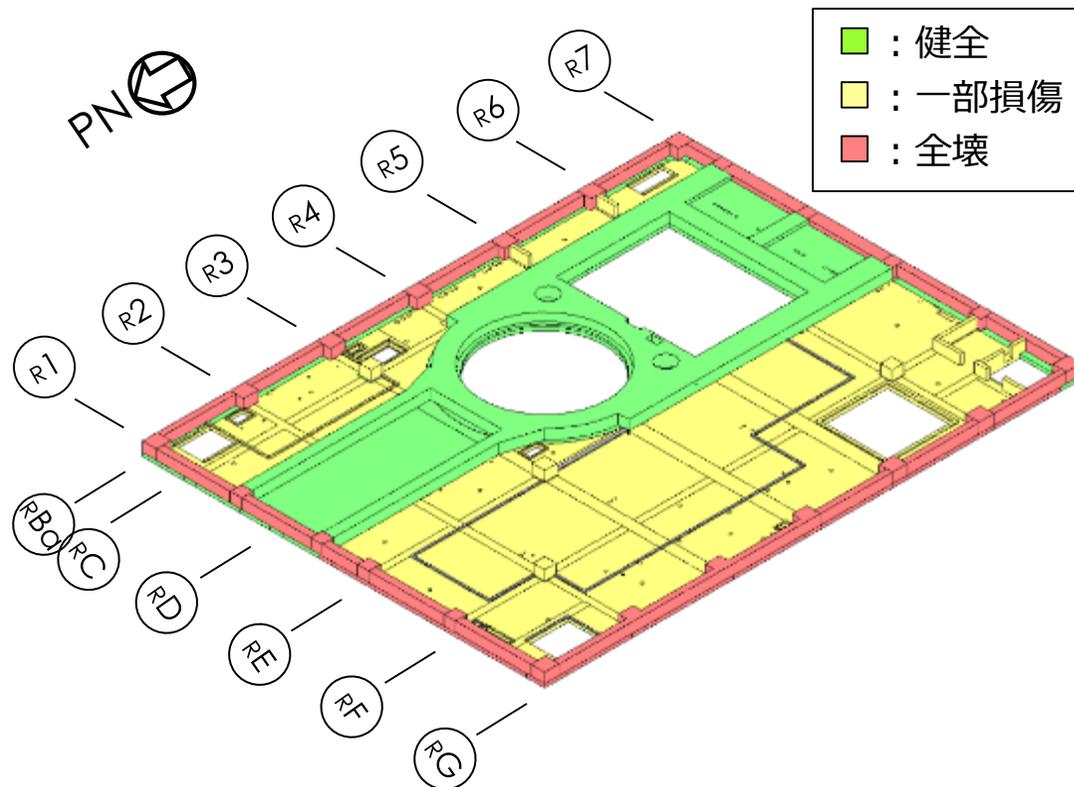
⑥4F床 (大物搬入口北側)



例：3号機原子炉建屋4階
点検結果例

点検結果等を踏まえた推定範囲の健全性判定

- 前述の点検結果から、推定範囲を含め耐震部材別に損傷状況を踏まえ「健全」「一部損傷」「全壊」を判定し、BIMモデルに反映
- 推定範囲に関する「健全」「一部損傷」「全壊」の判断基準は、過去の実施計画策定時の判断基準を採用（実施計画Ⅲ-3-1-3 添4より抜粋，実施計画Ⅲ-3-1-3作成時より10%点検範囲拡大）



例：3号機原子炉建屋4階
BIMモデル 損傷状況

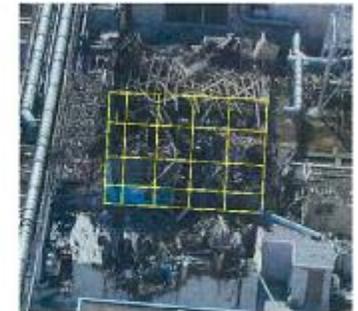
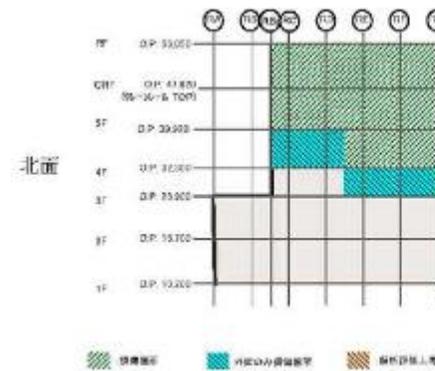


図-4.1 3号機原子炉建屋の損傷状況（立面図）

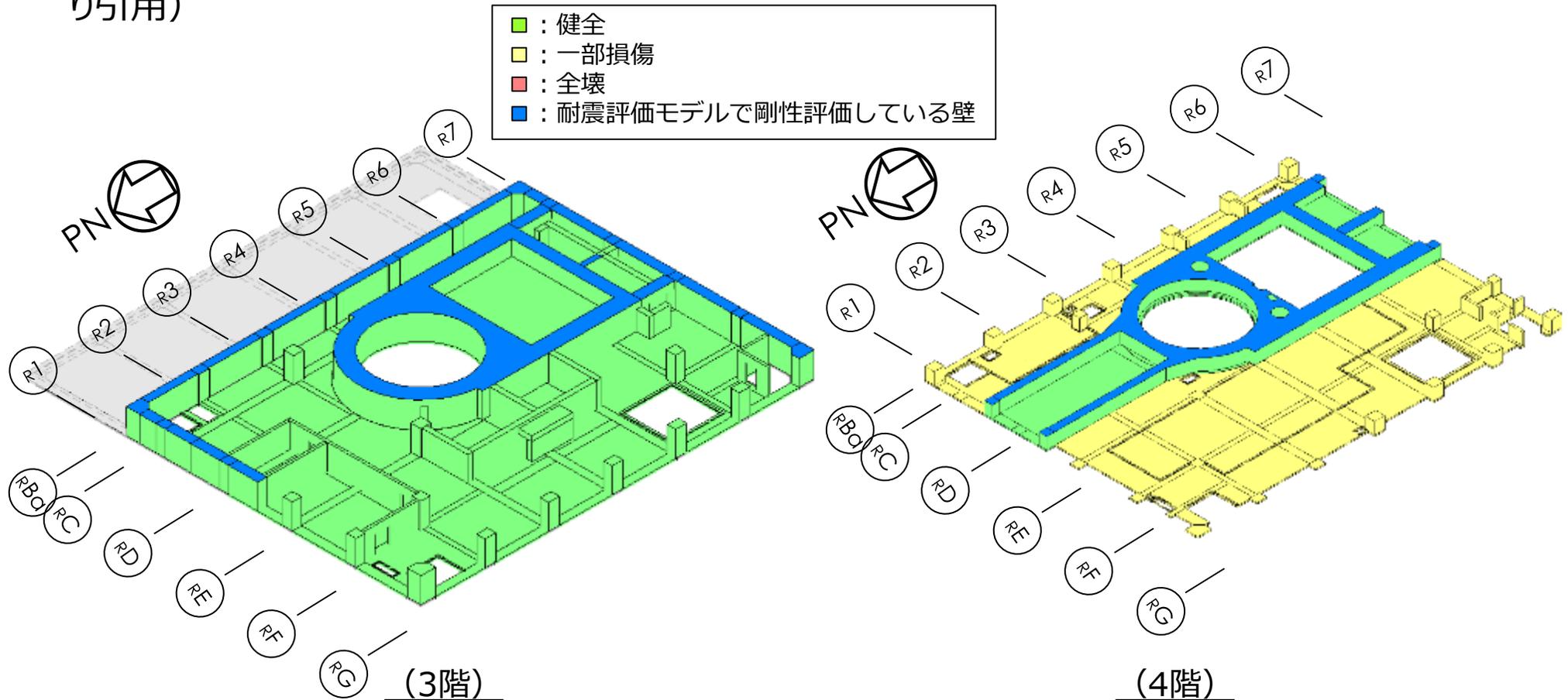


判断基準
(実施計画Ⅲ-3-1-3 添4より抜粋)

4. 原子炉建屋の点検結果等を踏まえた耐震評価検討 (3/6)

損傷状況を踏まえた耐震評価モデルの作成 (3号機原子炉建屋3階/4階)

- 損傷状況を踏まえ、3号機原子炉建屋をモデルに耐震要素を踏まえた耐震評価モデルを作成
- 本耐震評価モデルについても、過去の実施計画策定時の考え方を採用 (実施計画Ⅲ-3-1-3 添4より引用)

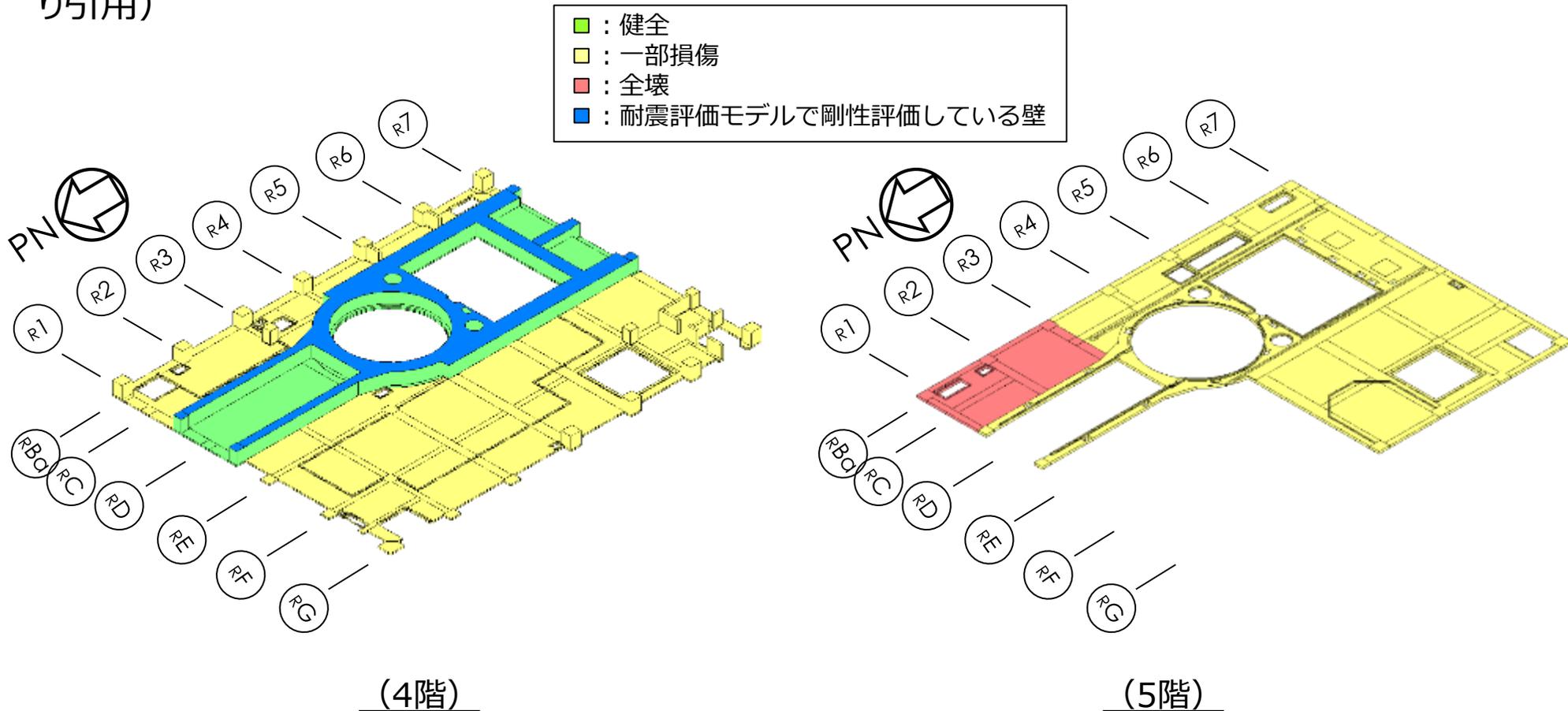


床スラブの損傷や外壁・内壁・柱の損傷状況を反映したBIMモデル

4. 原子炉建屋の点検結果等を踏まえた耐震評価検討 (4/6)

損傷状況を踏まえた耐震評価モデルの作成 (3号機原子炉建屋4階/5階)

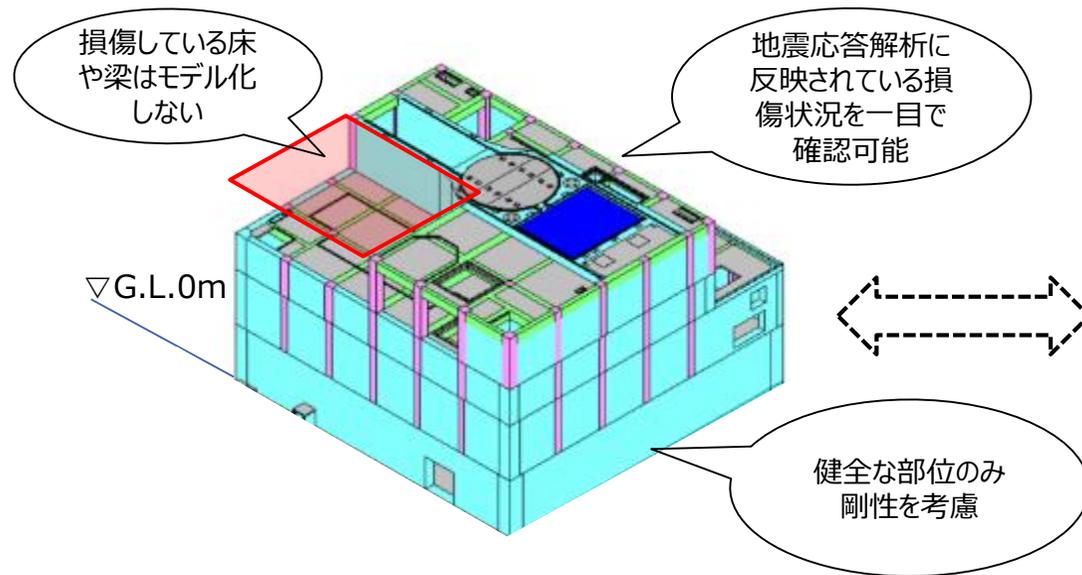
- 損傷状況を踏まえ、3号機原子炉建屋をモデルに耐震要素を踏まえた耐震評価モデルを作成
- 本耐震評価モデルについても、過去の実施計画策定時の考え方を採用 (実施計画Ⅲ-3-1-3 添4より引用)



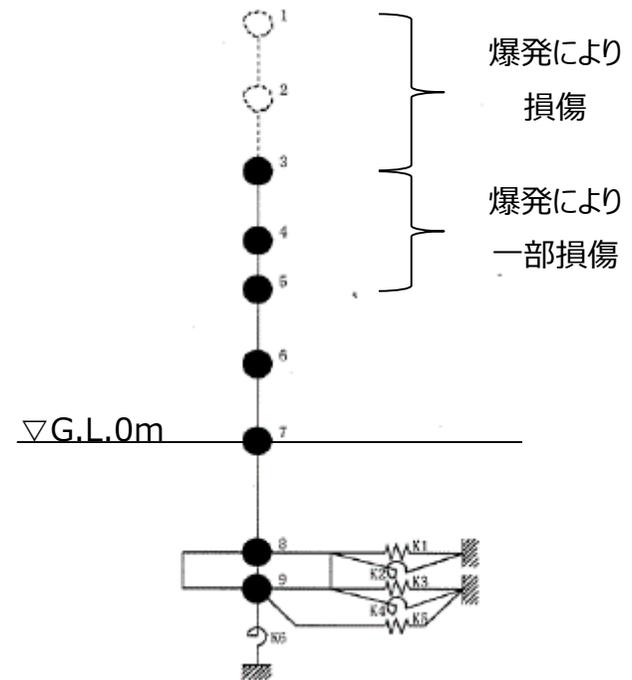
床スラブの損傷や外壁・内壁・柱の損傷状況を反映したBIMモデル

BIMモデルと地震応答解析モデルの関係

- 損傷状況を踏まえたBIMモデルを利用し、その更新状況に応じて必要と判断した場合に地震応答解析モデルに反映し、耐震評価を実施



原子炉建屋のBIMモデル (地上より上)

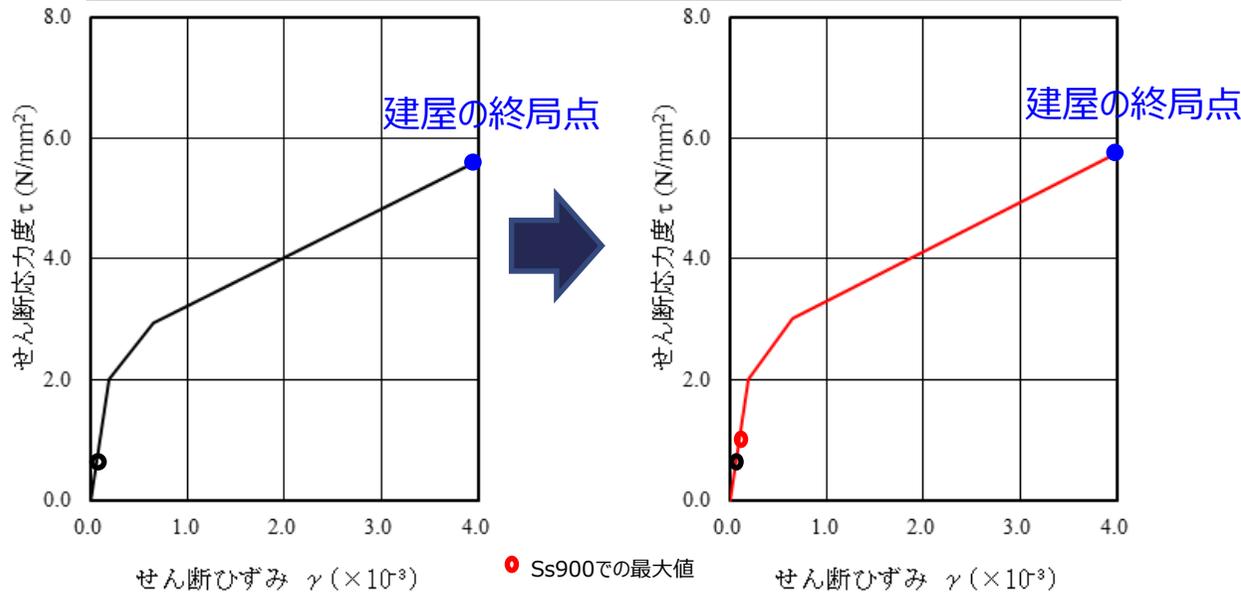


原子炉建屋の地震応答解析モデル

震災前後の耐震評価比較 (例：3号機原子炉建屋)

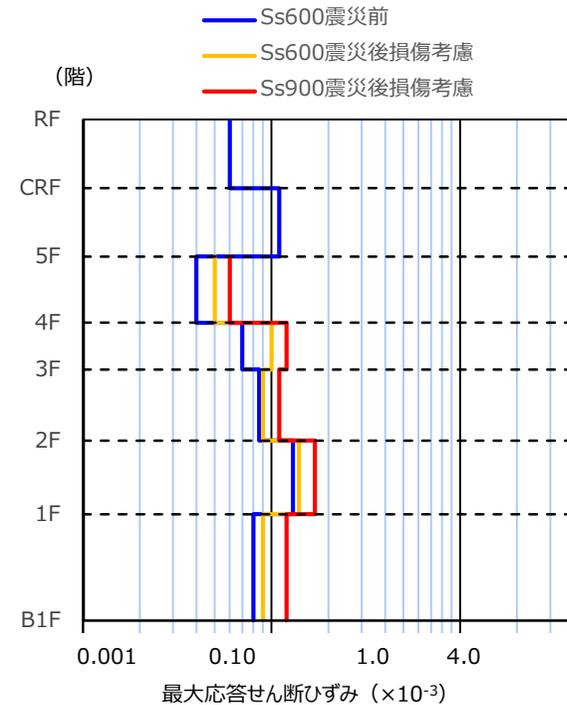
- 損傷状況を考慮した耐震評価を実施，地震時 (Ss900) に発生する壁のせん断ひずみ (0.17×10^{-3}) は終局ひずみ (4.0×10^{-3}) よりも十分小さく裕度あり
- 今後，点検等により新たな情報が確認された場合，BIMモデルへ反映し，必要に応じて地震応答解析モデルを変更して耐震評価を実施していく予定

建屋の損傷状態を考慮した耐震安全性の変化イメージ
(3号機R/B, 地上1階の耐震壁)



(a) 震災前
(バックチェック時)

(b) 現在
(爆発による損傷状況を考慮)



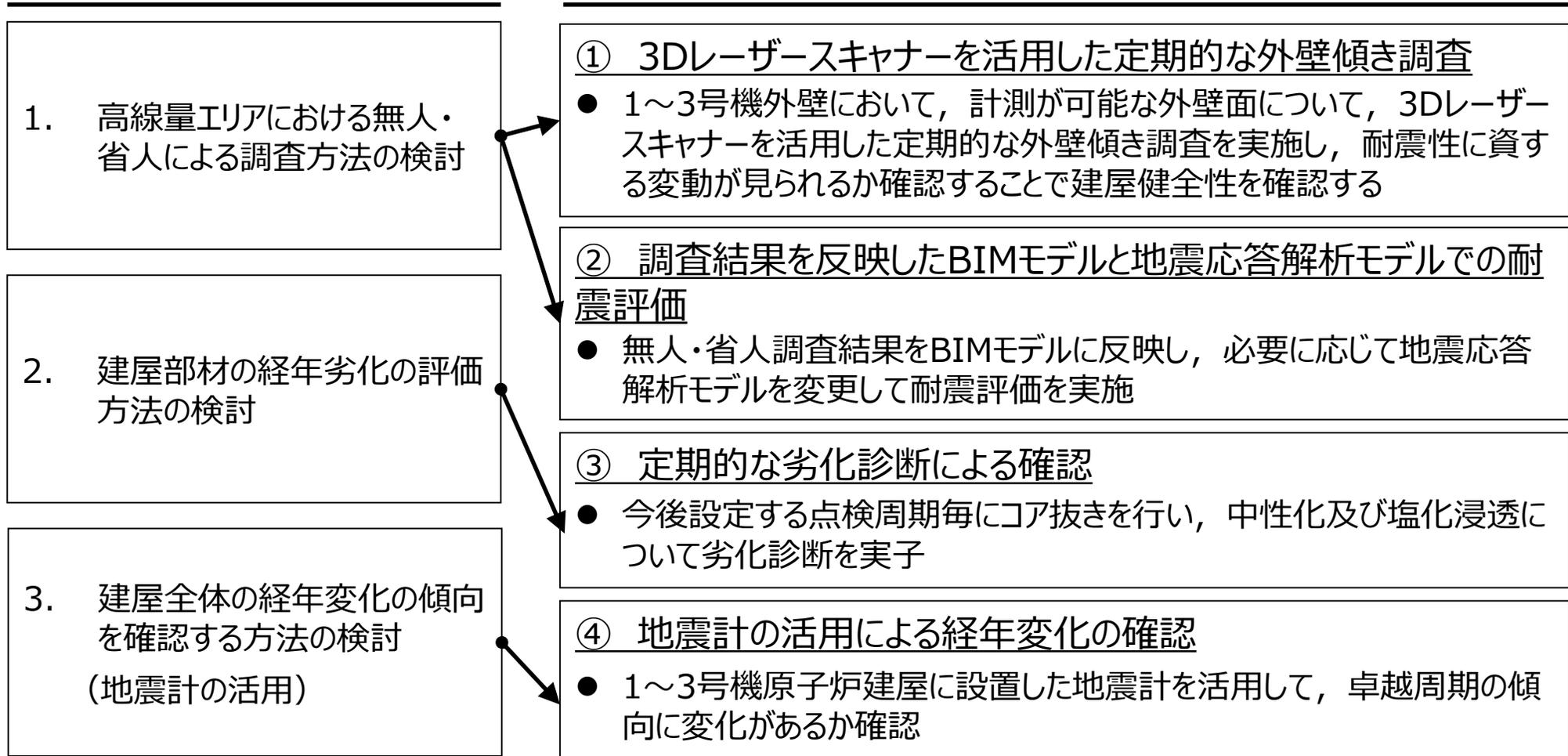
震災前と震災後の
耐震評価の比較

5. 長期的建屋健全性評価の方向性

- 前述までの3つの建屋健全性評価検討項目における結果から、長期的な建屋健全性評価の方向性として以下の4項目を想定

検討項目

長期的建屋健全性 評価手法



6. 全体工程

テーマ	実施項目	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
1. 高線量エリアにおける無人・省人による調査方法の検討	有人調査 (建屋内情報取得)	1R/B・2R/B・3R/B有人調査		3R/B外壁有人調査	点群データ活用部位検討
	無人調査方法の検討	ロボット検討	通信テスト・操作訓練等	ドローン検討	ドローンモックアップ(3号機)
		SPOT調達	モックアップ(5号機)	操作訓練・申請 モックアップ(4号機)	調査・評価手法検討
2. 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討	調査箇所検討	データ整理・現場調査			
	サンプル採取・分析	サンプル採取方法検討	サンプル採取	分析・評価	点検頻度・評価手法検討
3. 建屋全体の経年変化の傾向を確認する方法の検討	地震計による観測 地震計データの分析	3号多重化 2号インサービス	1号インサービス(1階)	1号インサービス(上部階)	継続実施
	建屋地震計追設	2号新設工事(1階,5階)	1号新設工事(1階)	1号新設工事(上部階)	