

2月13日の地震による原子炉建屋への 影響評価ならびに建屋健全性評価について

2021年3月22日



東京電力ホールディングス株式会社

(1) 2月13日の地震による原子炉建屋への影響評価について

(2) 建屋健全性評価について

(参考) 3号機原子炉建屋の地震観測について

5・6号機の観測記録, 1~4号機原子炉建屋臨時点検結果

5/6号機は、建屋内に設置されている地震計の観測記録から2月13日に発生した地震による揺れが基準地震動Ssによる揺れより小さいことを確認した

5・6号機原子炉建屋基礎版上（最地下階）

- ・基礎版上の最大加速度値：235ガル（6号機，東西方向）
- ・基準地震動Ss※を下回る揺れであったことを確認

※「発電原子炉施設に関する耐震設計審査指針（2006年改訂）」に基づく耐震安全性の評価で算定した基準地震動Ss-1~3に対する建屋の揺れの最大加速度値。

原子炉建屋 基礎版上	2月13日地震の観測記録の 最大加速度値(ガル)			基準地震動Ssに対する 最大応答加速度値(ガル)※		
	南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向
5号機	172	213	181	452	452	427
6号機	164	235	117	445	448	415

1~4号機は原子炉建屋の臨時点検を行い、外観上の変化が無いことを確認している。



1号機原子炉建屋 点検写真例（北側）



2号機原子炉建屋 点検写真例（南側）

2月13日地震観測記録による1～4号機原子炉建屋への影響評価 **TEPCO**

- 福島第一では、5・6号機原子炉建屋及び敷地南北の自由地盤系で地震観測を行っている。(各地震計の役割は、補足1-1参照)
- **1～4号機原子炉建屋について2月13日の観測記録を用いて以下の評価を実施した。**
その1：2月13日地震による揺れが基準地震動Ssによる揺れよりも小さいことの推定
その2：3号機原子炉建屋を代表とした、地盤観測記録を用いた地震応答解析

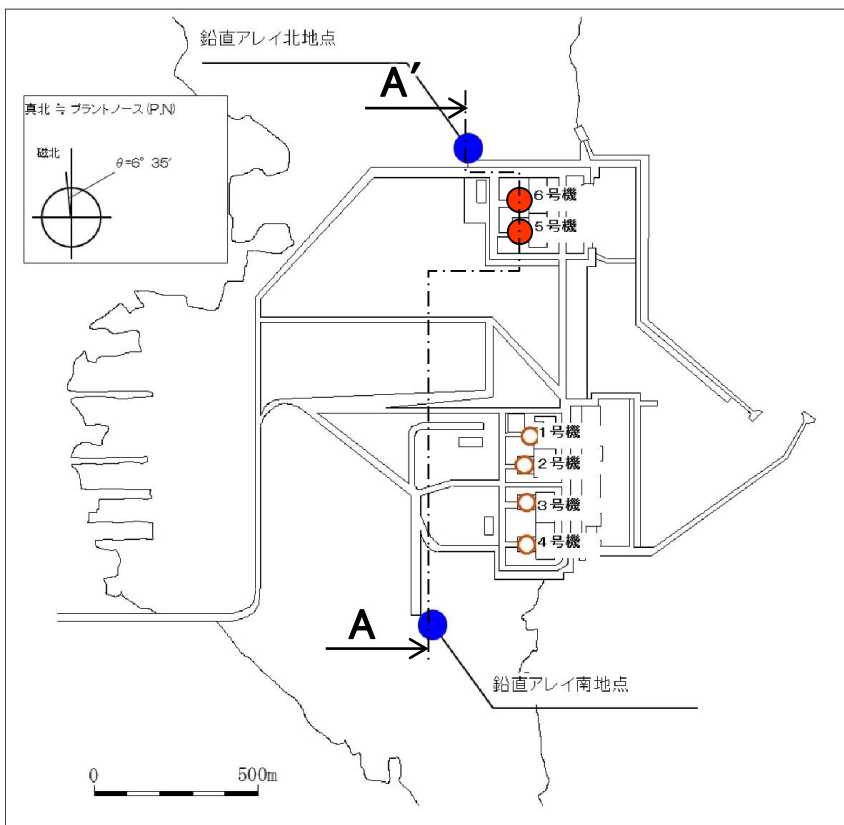
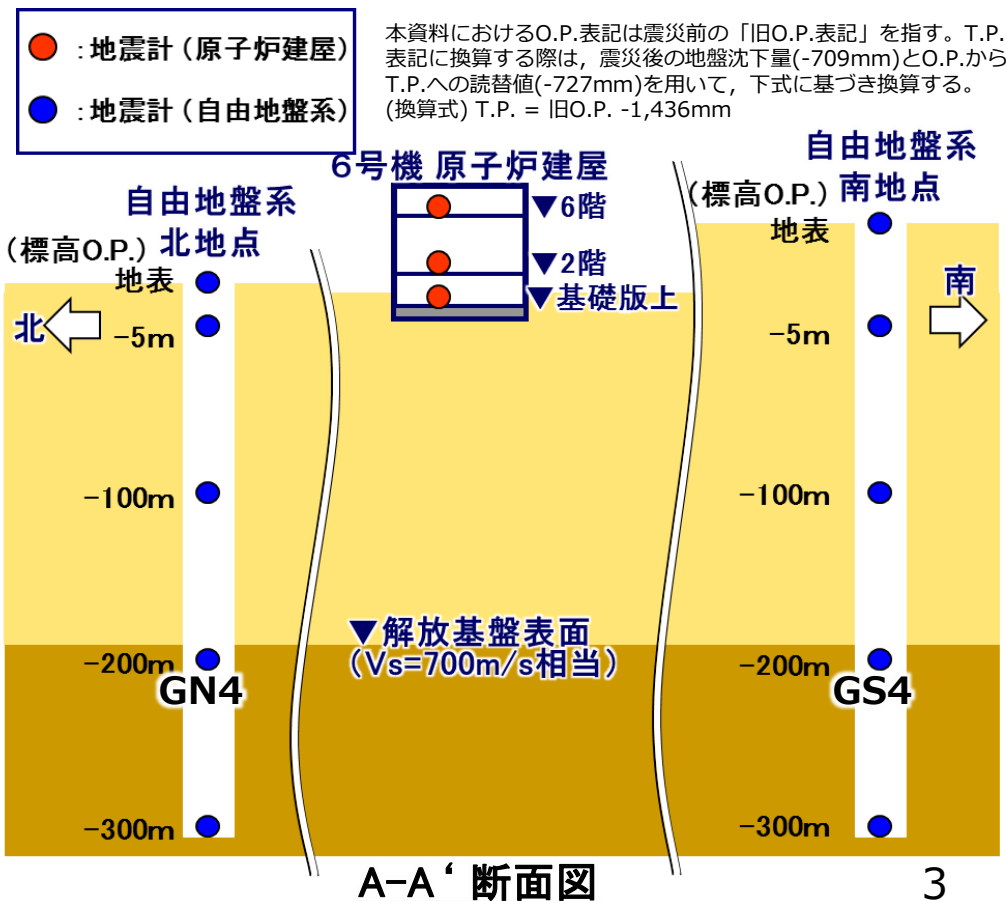


図1 福島第一における地震観測 (全体)

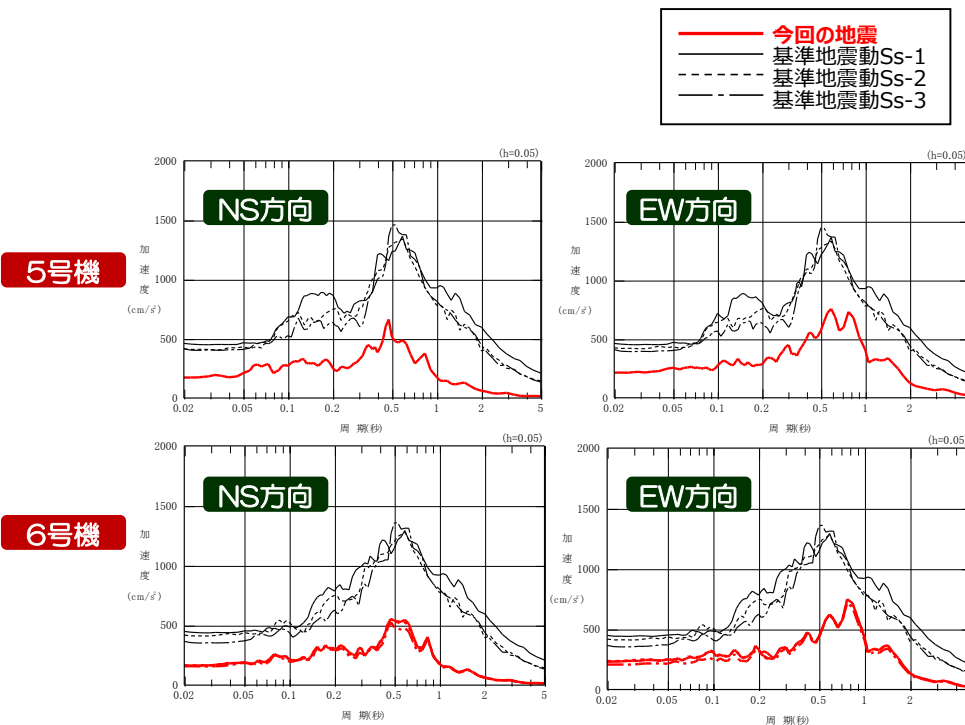


影響評価その1 (1~4号機の揺れの推定)

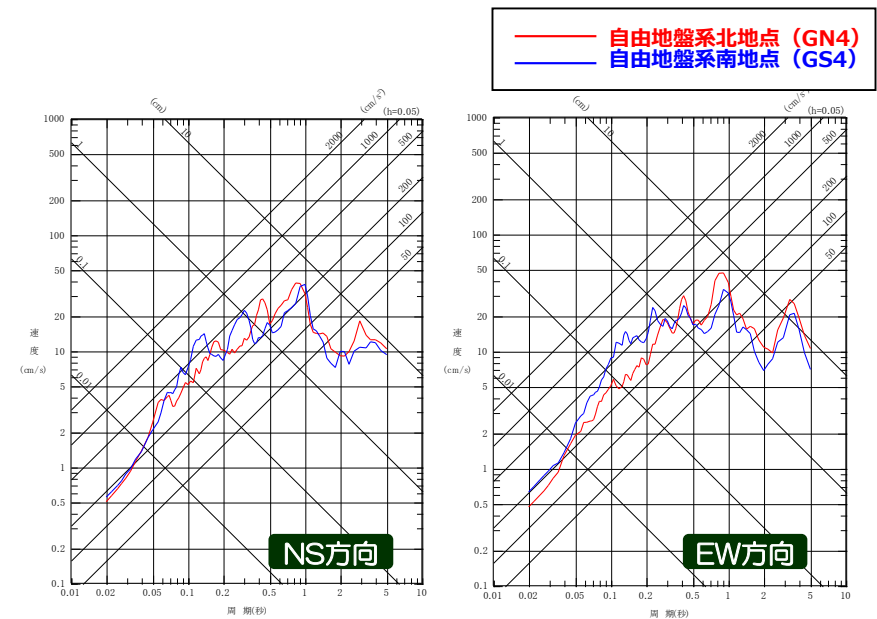
① 5・6号機では、原子炉建屋基礎版上の観測記録と既往の解析結果から、**2月13日の地震の揺れ**と**基準地震動Ss**の関係を確認

② -200m*の地中の観測記録から、**北地点(5・6号機側)**と**南地点(1~4号機側)**で、2月13日の地震の揺れが**大きく変わるものでない**ことを確認

*福島第一の解放基盤レベル近傍の観測点



図① 基礎版上における加速度応答スペクトル



図② 自由地盤系の速度応答スペクトル

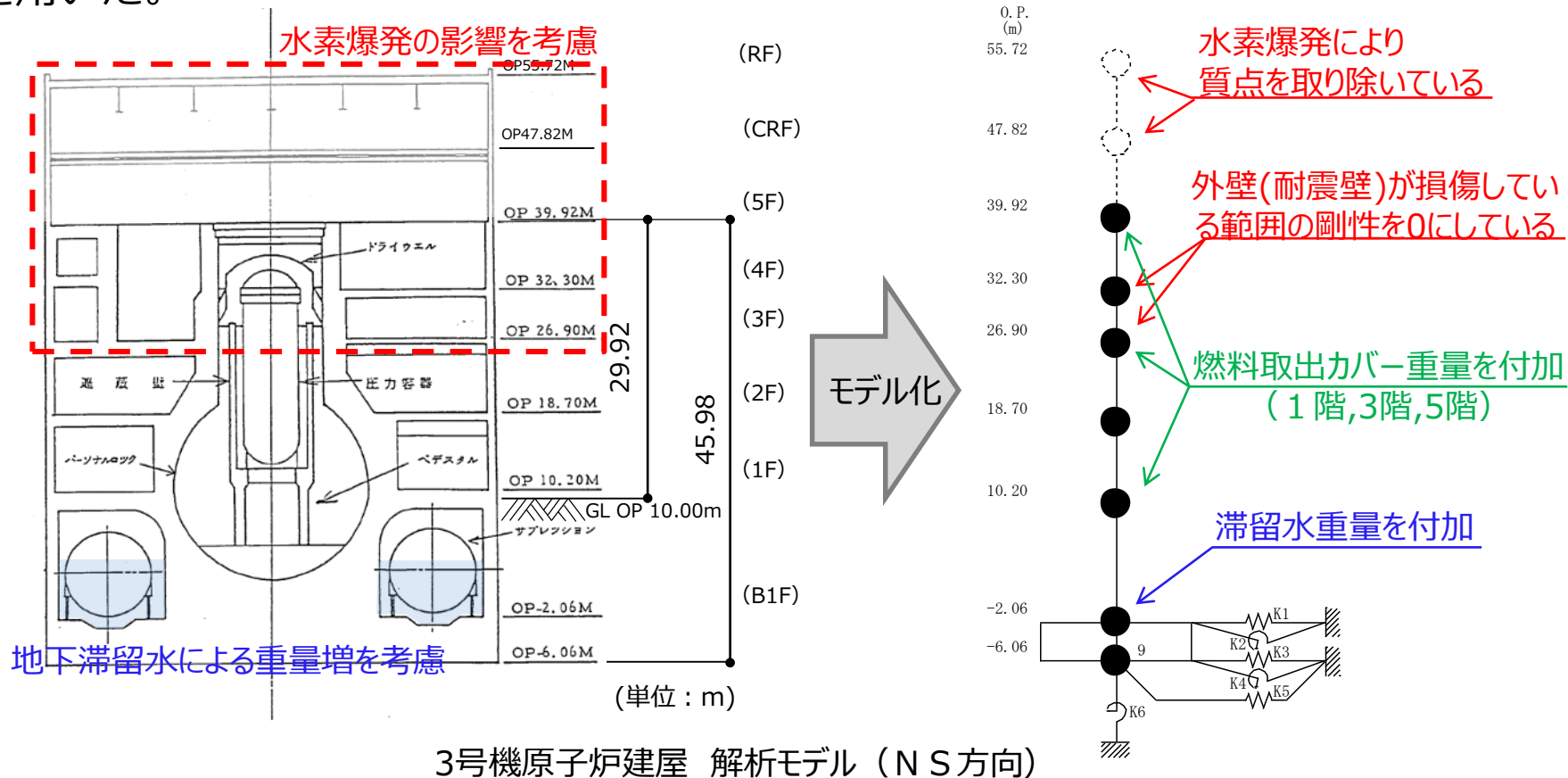
①②より、**1~4号機においても、2月13日の地震による揺れ**と**基準地震動Ss**の関係が推定される。

影響評価その2 (3号機を代表とした地震応答解析) (1/2)



※暫定結果のため、今後の変更の可能性あり

- 建屋に係る部分の諸元については、建屋損傷状況・地下滞留水・燃料取り出しカバー等の状況を踏まえて設定。
- 地震応答解析に用いる入力地震動は、自由地盤系南地点の観測点GS4の観測記録を用いた。



本資料におけるO.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
 (換算式) T.P. = 旧O.P. -1,436mm

影響評価その2 (3号機を代表とした地震応答解析) (2/2)

TEPCO

※暫定結果のため、今後の変更の可能性あり

- 2021年2月13日の福島県沖地震に対して、耐震壁のせん断ひずみは、最大で 0.10×10^{-3} (NS方向) ※¹であり、耐震壁の評価基準値 (4.0×10^{-3}) に対して **十分余裕がある**ことを確認した。

(単位: $\times 10^{-3}$)

階	O.P. (m) ※ ²	N S方向		E W方向	
		福島県沖の地震による解析値	評価基準値	福島県沖の地震による解析値	評価基準値
4F~5F	39.92~32.30	0.04	4.0以下	0.08	4.0以下
3F~4F	32.30~26.90	0.08		0.08	
2F~3F	26.90~18.70	0.07		0.07	
1F~2F	18.70~10.20	0.10		0.08	
B1F~1F	10.20~-2.06	0.07		0.06	

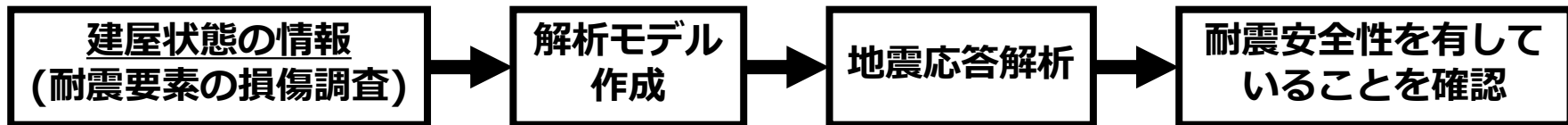
※¹ 評価基準値:耐震壁のせん断ひずみが鉄筋コンクリート造耐震壁の終局限界に対応する評価基準値(4.0×10^{-3})

※² O.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、次式に基づき換算する。(換算式) T.P. = 旧O.P. -1,436mm

※³ 本評価結果は、暫定結果のため、精緻な評価値としては今後の変更の可能性がある

原子炉建屋の長期健全性評価の目的

- 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屋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

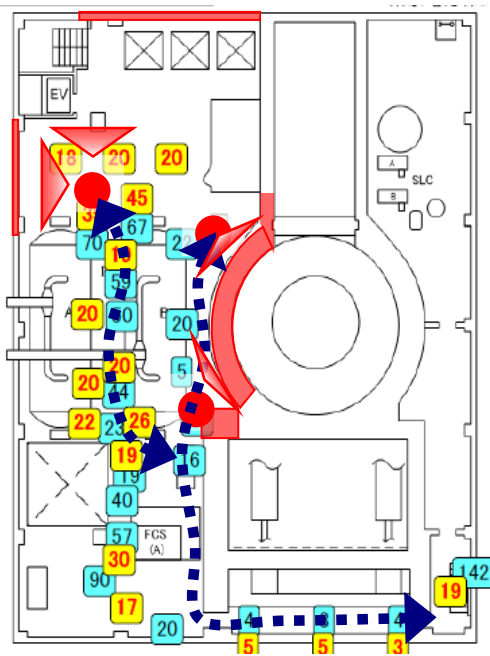
＜評価対象＞

- ・ 耐震安全性評価上で考慮している部位

建屋健全性評価の課題と対応 (1/2)

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ことが重要である。
- 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・省人化を検討していく。
- 1～3号機原子炉建屋は震災後の調査結果が反映されているが、耐震評価後に数年経っているため、有人による耐震壁等の状況調査を計画している。(2021年度)



4階調査範囲・ルート

← → : 調査のルート : H25.2/14測定値
● : 撮影場所 : 過去の測定値
 : 調査範囲 [単位: mSv/h]



4階 シェル壁 写真 (損傷なし)

過去に調査で確認した建屋の耐震評価上重要な部位について再調査を行い、変化の有無を確認する。

建屋健全性評価の課題と対応 (2/2)

2. 建屋部材の経年劣化の評価方法の検討

- 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、建屋部材の経年劣化の評価方法を検討し、具体化していく。
- 例えば、類似の環境条件かつ詳細調査が可能な建屋を活用した代替評価を検討する。
(4号機原子炉建屋等)

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)

- 3号機原子炉建屋で2020年4～6月に取得した観測記録の分析を実施中。課題はあるものの、今後は経年変化の傾向確認の評価方法を検討していく。(補足2-4スライド)
- 今後、1, 2号機にも設置を検討し、引き続き地震観測記録を蓄積していく。
- 地震計に限らず、他にも経年変化の把握に有用な方策※はないか継続検討していく。

※ 構造物監視に利用される計測技術の例： 光ファイバーを利用した歪み測定

- 広範囲で歪みを分布的かつリアルタイムに測定することで、構造物を監視。
- 橋梁などの長距離インフラ構造物において長期的に変形の進展が懸念される場合等にモニタリングに利用されている事例あり。

⇒ 1～3号機原子炉建屋は主要な耐震要素が高線量環境のため、広範囲に設置・維持する場合には作業被ばくの懸念が大きく、設置の目的や有効性を含めて整理/検討が必要。

(参考) 3号機地震計設置の経緯と今後の対応 (1/2)

【3号機原子炉建屋への地震計試験設置に至る経緯】

- これまで1～4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。
- 一方で、原子炉建屋については、建屋の長期健全性を確認していく必要があり、地震観測記録の分析により建屋全体の経年変化の傾向把握に活用できないか検討することを目的に、3号機原子炉建屋1階及び、5階オペレーティングフロアに各1台の地震計を設置し、2020年4月1日より試験運用を開始した。

【地震計故障および福島県沖地震発生までの経緯】

- 運用開始後、2020年6月までは問題なく地震記録が取得できており、建屋全体の劣化傾向分析への活用方法の検討を開始したが、7月3日に1階レベル（北西側構台下の屋外）に設置した地震計が大雨の影響により雨カバーを設置していたものの水没し故障に至った。
- 当該地震計については、現場詳細調査の上、再発防止として一旦基礎を新設せず取り付け箇所を少し高い位置に変更して暫定復旧し、その後に基礎を新設して嵩上げして本復旧する計画を立案した。（10月）
- こうした中、10月13日にもう1台の地震計（オペフロレベルに設置）の波形にノイズや欠測が確認されるようになったことから、原因調査を開始した。
- ノイズ原因不明のまま交換しても再発する可能性があると考えたため、水没した地震計についても、原因究明を行った後に復旧する方針に変更した。（2020年11月）

(参考) 3号機地震計設置の経緯と今後の対応 (2/2)

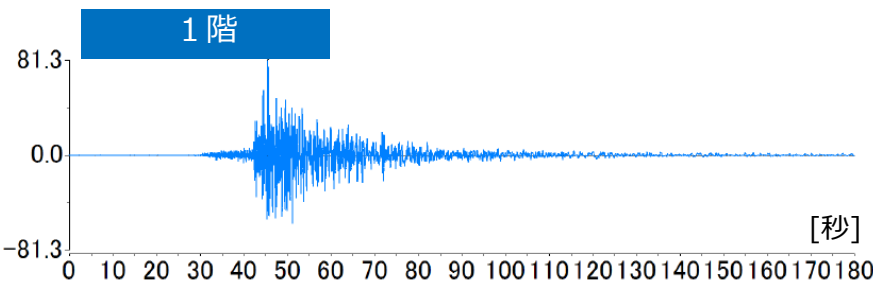
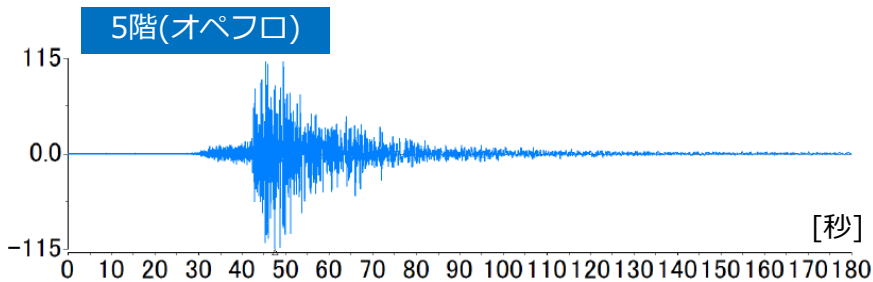
- ノイズが生じた地震計について詳細調査を実施した結果、基板に不具合があることを確認し、放射線による影響の可能性について過去の試験データと比較等の検討を開始した。(2021年1~2月)
- 2021年2月、原因究明は長期化する可能性が高いと判断し、データ継続取得の観点から2台とも新品に交換する計画として準備を開始していたところ、2月13日の地震が発生した。

【今後の対応等】

- 3月19日に当該地震計を復旧し試験観測を再開した。今後、基礎新設(嵩上げ)等により雨水による故障の再発防止対策を行うと共に、予備品を確保して故障に備えていく。
- オペフロの地震計が故障した原因の調査を継続し、原因がわかった段階で対策品への交換も含めて検討していく。
- 今後、3号機地震計の試運用結果を踏まえ、1、2号機へ地震計設置の拡大を検討していく。
- なお、福島第一原子力発電所では、5号機及び6号機の基礎版の地震計の観測結果から、2021年2月13日に発生した福島県沖地震は基準地震動 S_s を超えないものであることを確認している。

(参考) 3号機地震計観測記録 3月20日

- [発生日時]2021年3月20日18時09分 [震央地名] 宮城県沖 [地震規模] マグニチュード6.9
- 上記地震における各号機地震計の最大加速度を下表に示す。
 - 建屋構造や地震計の設置位置が異なるために単純に比較できるものではないが、3号機の最大加速度は5,6号機と比較して特異性は見られない。



3号機地震計 2021年3月20日の観測記録 (NS方向)

原子炉建屋	設置場所	最大加速度(gal)			設置目的
		NS	EW	UD	
3号機	5階(オペフ口)	114.6	127.4	43.8	地震記録を収集し、建屋経年変化の傾向把握が出来るかの検討に利用
	1階	81.3	74.5	52.3	
5号機	2階	56.7	61.0	41.0	建屋の振動特性分析に利用
	地下1階(基礎版)	42.6	46.8	35.2	発電所の運用に利用(バックアップ)
6号機	6階(オペフ口)	89.0	78.8	42.8	建屋の振動特性分析に利用
	地下2階(基礎版) ^{※2}	35.8	38.8	30.8	発電所の運用に利用

2021年3月20日の観測記録一覧

※2 基礎版上の3台の地震計の記録のうち、各成分の最大値を記載

(参考) 3号機原子炉建屋への地震計の試験設置の目的

- これまでに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において、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。一方で、原子炉建屋については、建屋の長期健全性を確認していく必要があります、地震観測記録の分析により建屋全体の経年変化の傾向把握に活用できないか検討することとした。
- 対象は、水素爆発による損傷が大きく、建屋全体の経年変化の傾向把握が必要であり、かつオペフロにもアクセス可能な3号機を選定し、試験的に設置した。
- 3号機は高線量下の設置作業であったため、小型・軽量・省電力で無線通信一体型の地震計を採用した。
- 試験観測により、観測データ活用の有効性、放射線劣化や耐候性の観点等で観測が問題なく行えるかを確認した上で他号機への水平展開を検討する。



6号機の既設地震計

3号機に設置した地震計
(1階レベル)

	6号機の地震計(基礎版上)	3号機地震計
種類	電磁式加速度計	MEMS型加速度計
電源	AC100V	ソーラーパネル
寸法	192mm×192mm× 150mm(H):地震計 約500mm×600mm× 1500mm(H):収録装置	163mm×135mm ×86mm(H) (地震計、収録装置一体)
重量	約5kg(収録装置除く)	約0.76kg
通信	有線	無線

(参考) 3号機地震計の設置状況 断面

- 3号機原子炉建屋「1階レベル」「オペフロレベル」に1台ずつ計2台の地震計を設置。

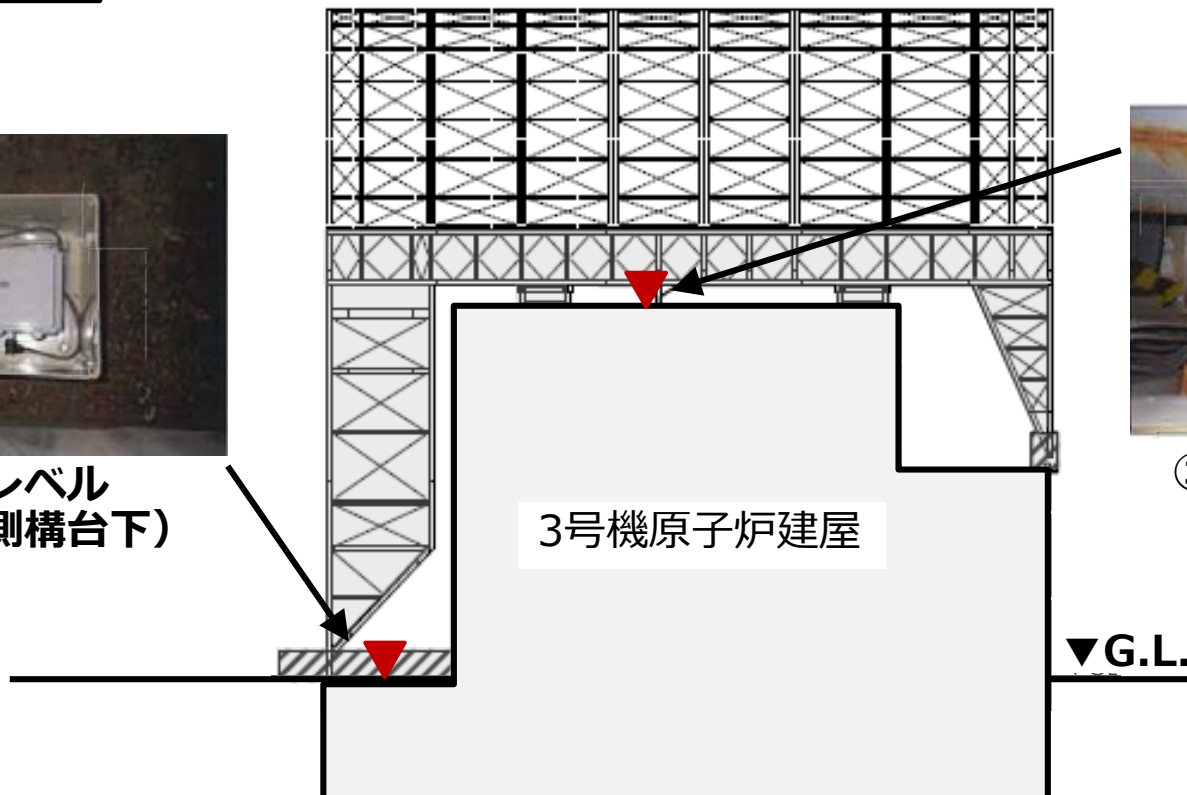


西側 (山側)

東側 (海側)



① 1階レベル
(北西側構台下)



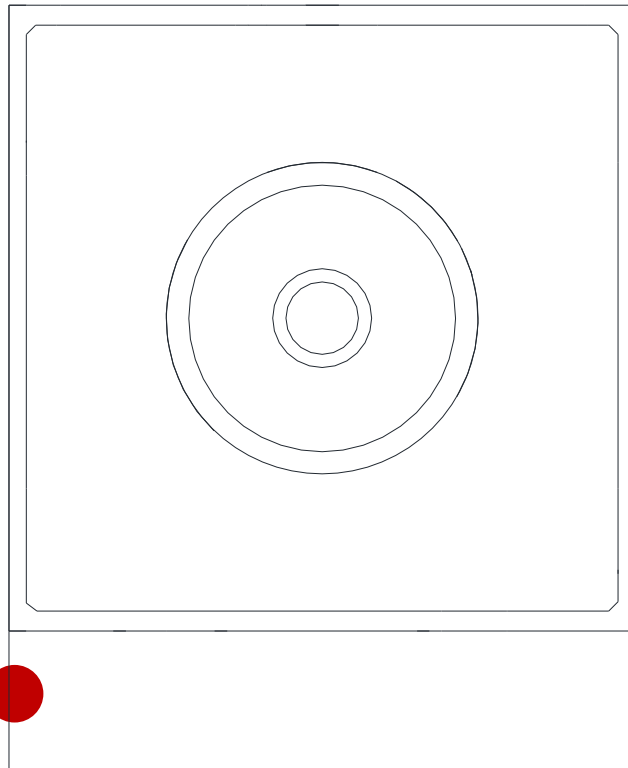
② オペフロレベル
(南西側カバー下)

地震計設置位置

(参考) 3号機地震計の設置状況 平面

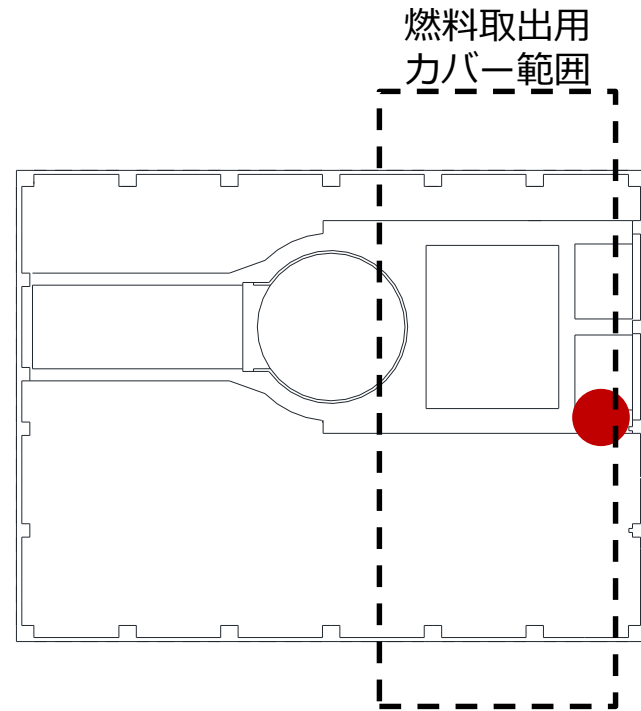


←北



雰囲気線量
約0.08mSv/h

1階レベル



燃料取出用
カバー範囲

雰囲気線量
約0.25mSv/h

オペフロレベル

地震計設置位置 (平面図)



(補足1-1) 福島第一原子力発電所における観測用地震計の役割

- 6号機の基礎版の地震計は発電所の運用（関係各所への連絡・公表、地震後の区分に応じた点検）に利用しており、最大加速度を速やかにお知らせしている。
- 5,6号機にある他の地震計についてはバックアップとして用いるほか、各種分析用に利用している。6号機基礎版の地震計が点検中の場合は、5号機の基礎版の地震計を代替で運用に使用することとし、観測値を速やかにお知らせすることになる。
- 自由地盤系の地震計については、基準地震動の策定等に利用するため観測を行っている。

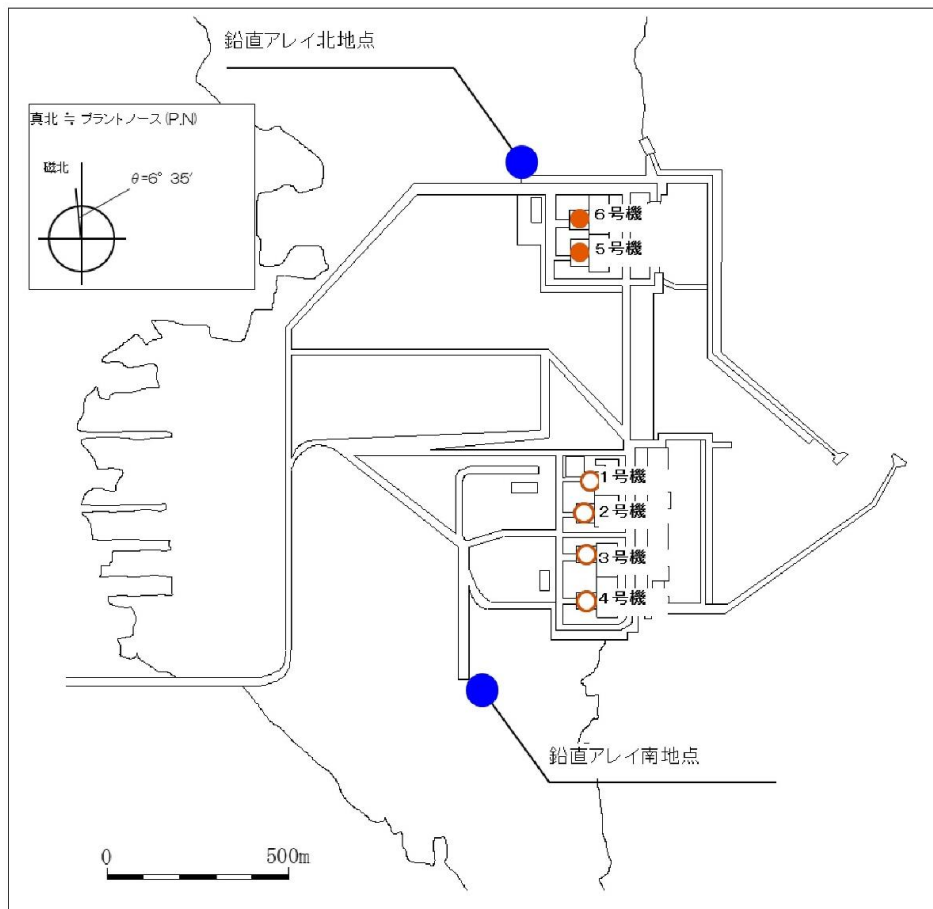


図1 福島第一における地震観測（全体）

		観測点	役割
原子炉建屋	5号機建屋	R/B (基礎版)	バックアップとして運用に利用
		R/B (中間階)	建屋の振動特性分析（6号機との相対比較）に利用
	6号機建屋	R/B (基礎版)	運用に利用 ※
		R/B (中間階) (最上階) 各1箇所	建屋の振動特性分析に利用
自由地盤系	南地点	基準地震動策定に利用し、今後大きな地震が発生した場合に妥当性検証に利用	
	北地点	基準地震動策定の補助として利用	

※ 最大加速度値（水平、垂直）をお知らせ済み 16

(補足1-2) 2.13 福島県沖地震 観測記録一覧

TEPCO

原子炉建屋

観測箇所	観測位置	観測点名	観測された最大加速度値 (単位 : Gal)		
			NS方向	EW方向	UD方向
5号機 原子炉建屋	2階	5-R1	277	246	187
	地下1階(基礎版上)	5-R2	172	213	181
6号機 原子炉建屋	6階	P10	324	323	179
	2階	P8	203	231	133
	地下2階(基礎版上)	6-R2	163	230	109
		P3	164	235 ※	109
		P5	157	206	117 ※
自由地盤系 南地点	O.P.+32.9m	GS1			262
	O.P. -5.0m	GS2			
	O.P. -100m	GS3	156	200	105
	O.P. -200m	GS4	174	198	95
	O.P. -300m	GS5	164	167	106
自由地盤系 北地点	O.P.+12.2m	GN1	404	436	182
	O.P. -5.0m	GN2			
	O.P. -100m	GN3	156	173	
	O.P. -200m	GN4	158	148	86
	O.P. -300m	GN5	164	182	87

自由地盤系

※ 6号機基礎版上の地震計の最大加速度値(水平, 垂直)についてはお知らせ済み

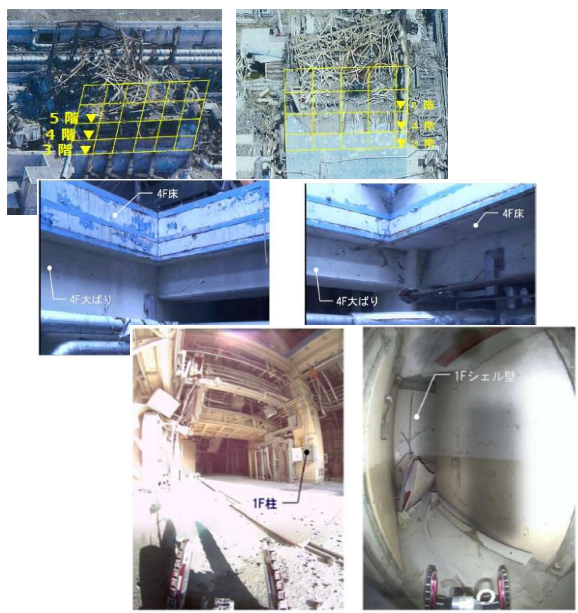
※ 本資料におけるO.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。

(換算式) T.P. = 旧O.P. -1,436mm

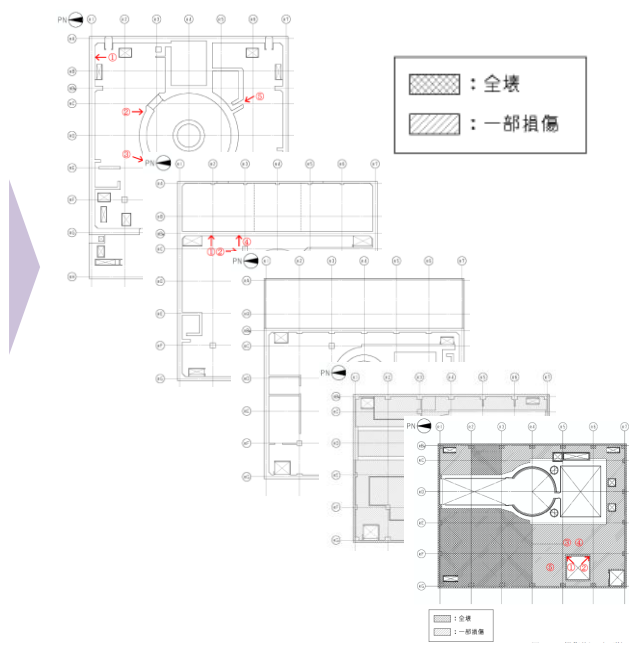
(補足2-1) 耐震安全性評価における建屋モデルの作成方法

- 解析モデル作成にあたっては，建屋内外の調査時画像データから損傷状況を反映。
- 建屋内は高線量のため，画像データの取得にあたっては1号機の一部調査を除き，遠隔操作によるロボット等で実施

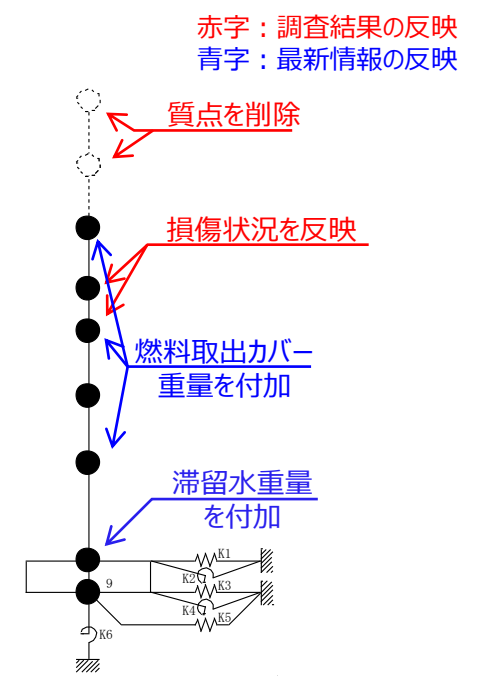
① 建屋内外の画像調査



② 損傷情報を反映



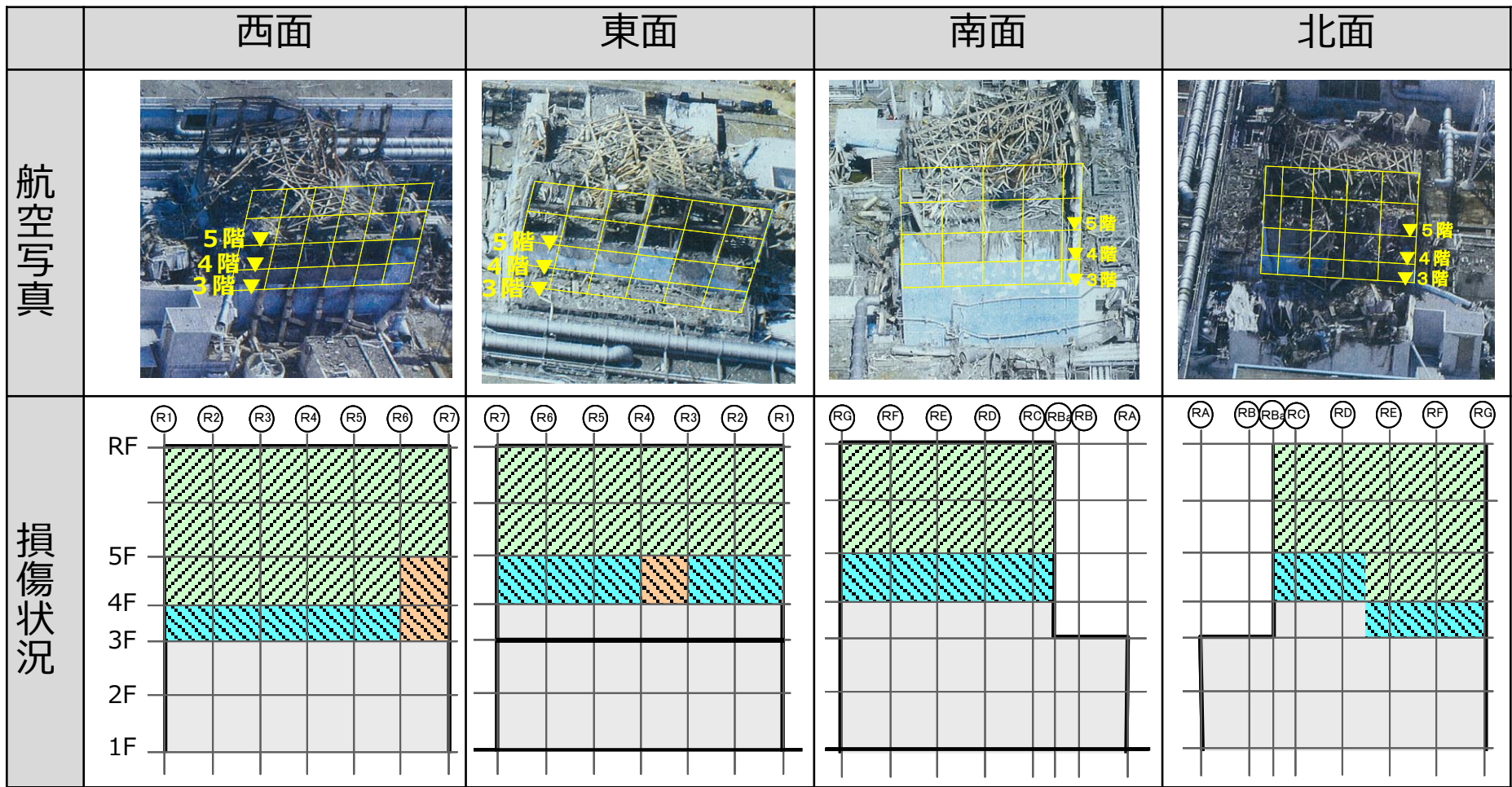
③ モデルの作成



解析モデル作成の流れ

(補足2-2) 調査結果に基づく損傷状況の反映方法① (3号機外壁の例) **TEPCO**





- 躯体の損傷状況は外観写真より階層別に評価している。
- 損傷箇所については，剛性を考慮していない。



全壊箇所
 半壊箇所 (評価上は全壊扱い)
 損傷はないが、評価上は全壊扱いした壁

(補足2-3) 調査結果に基づく損傷状況の反映方法② (建屋内調査の例) **TEPCO**

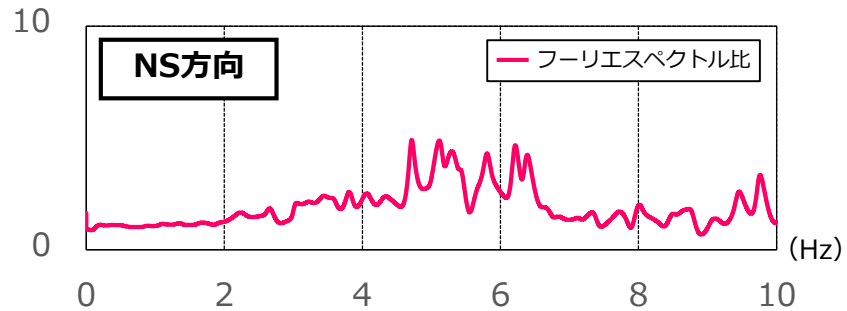
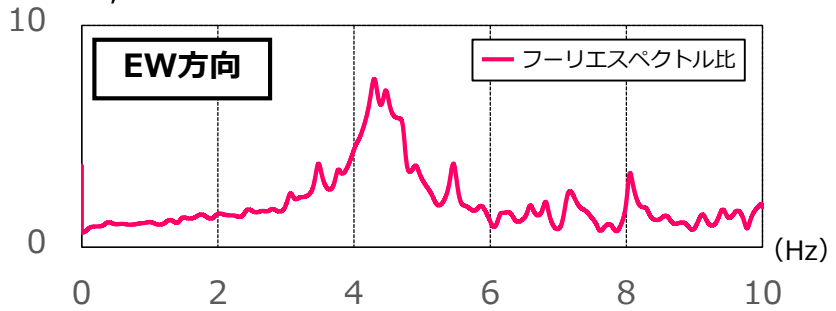
- 主要耐震要素であるシェル壁や使用済み燃料プール壁・外壁を中心に調査を実施
- 1号機は当社社員他による建屋内調査・ロボット調査を実施。3号機はロボット等による調査を実施
- シェル壁・使用済み燃料プール壁には、損傷は確認されていない。

	シェル壁	使用済み燃料プール壁
1号機	 <p>建屋内有人調査 (3階, 2014年2月)</p>	 <p>建屋内有人調査 (3階, 2014年2月)</p>
3号機	 <p>建屋内ロボット調査 (1階, 2011年9月)</p>	 <p>遠隔カメラ調査 (4階, 2012年7月)</p>

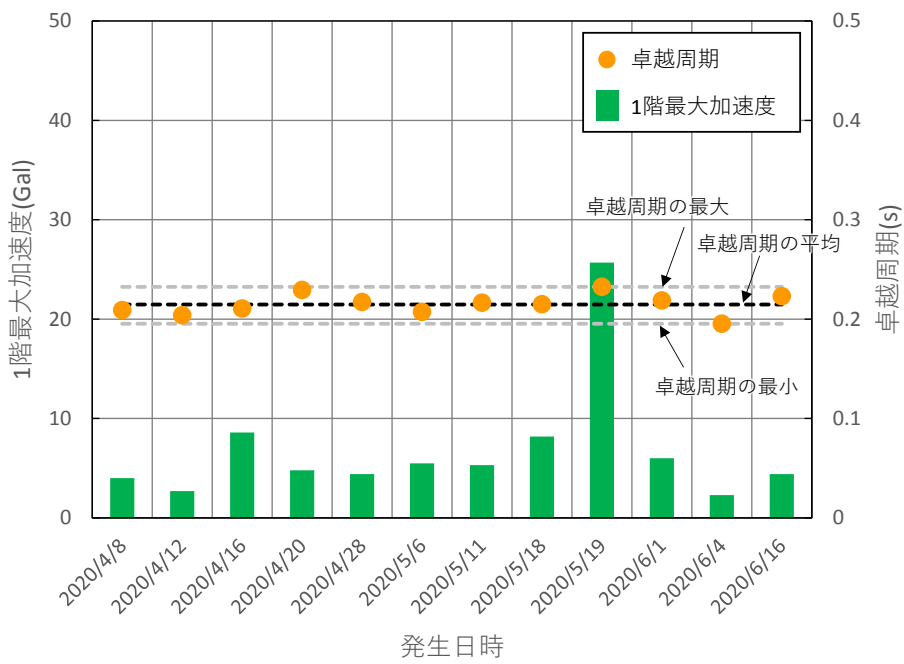
(補足2-4) 建屋の経年変化等の傾向把握の検討

※暫定結果のため、今後の変更の可能性あり

- EW方向は1階-5階のフーリエスペクトル比*のピークがある程度明瞭に現れている。NS方向はピークが明瞭ではない。原因として、1階と5階の地震計の平面的な位置関係が影響していると考えられる。今後、平面的な設置位置を合わせることも検討する。



3号機地震観測 1階-5階のフーリエスペクトル比【2020.5.19 福島県東方沖】



「建屋の経年変化等の傾向把握」への地震観測記録の活用イメージ

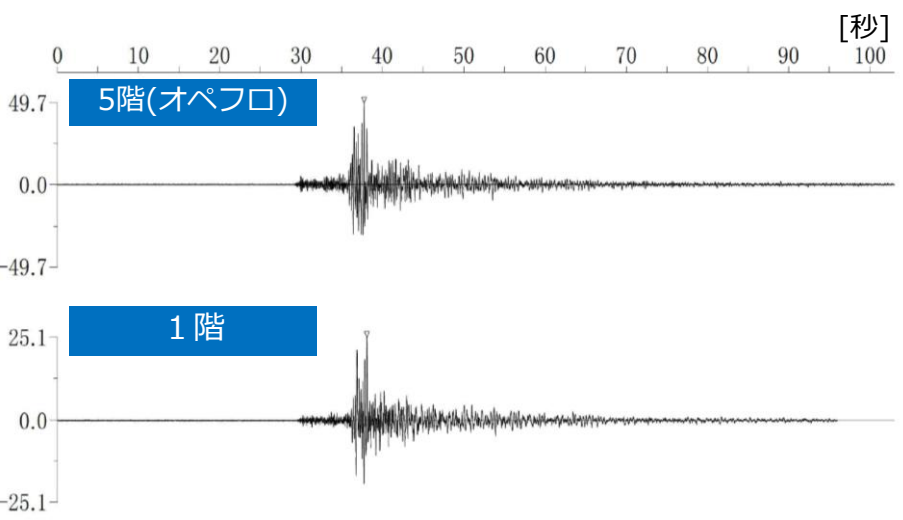
地震観測記録を収集し、1階と5階の記録から求められる地震計位置間の卓越周期（フーリエスペクトル比*がピークとなる周期）の傾向に顕著な変化が無いことを継続的に確認していく。

*フーリエスペクトル比：
5階のフーリエスペクトルを1階のフーリエスペクトルで除したもの



(補足2-5) 3号機原子炉建屋に設置した地震計の観測記録

- 3号機原子炉建屋に試験設置した地震計では2020年4~7月で計13回※¹の地震観測記録を取得し、建屋経年変化の傾向把握ができないか検討している。(4月:5回, 5月:4回, 6月:3回, 7月:1回)
※¹ 地震計が2台とも動作した地震の回数
- そのうち、最も大きな加速度を記録した地震は次の通り。
 - [発生日時]2020年5月19日12時17分 [震央地名] 福島県沖 [地震規模] マグニチュード5.4
- 上記地震における各号機地震計の最大加速度を下表に示す。
 - 建屋構造や設置位置が異なるために単純に比較できるものではないが、3号機の最大加速度は5,6号機と比較して特異性は見られない。



3号機地震計 2020年5月19日の観測記録 (南北方向)

原子炉建屋	設置場所	最大加速度(gal)			設置目的
		NS	EW	UD	
3号機	5階 (オペフロ)	49.7	44.3	22.0	地震記録を収集し、建屋経年変化の傾向把握が出来るかの検討に利用
	1階	25.1	25.7	23.5	
5号機	2階	26.3	20.8	17.8	建屋の振動特性分析に利用
	地下1階 (基礎版)	24.2	14.7	12.9	
6号機	6階 (オペフロ)	44.6	38.2	18.7	建屋の振動特性分析に利用
	地下2階 (基礎版)※ ²	13.6	16.7	16.0	

2020年5月19日の観測記録一覧

※² 基礎版上の3台の地震計の記録のうち、各成分の最大値を記載