

女川原子力発電所第2号機
建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の
耐震評価について
(3. 11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価
における指摘事項に対する回答)

2021年11月18日
東北電力株式会社

1. 本日のご説明内容

- 第970回審査会合(2021年4月27日)において、主要説明項目(第876回審査会合(2020年7月14日)にて説明)「No.2-4 3.11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価」について説明し、以下の指摘があった。

審査会合	指摘事項
第970回審査会合 (2021年4月27日)	機器・配管系の耐震評価方法及び設計成立性について、建屋剛性の不確かさケースを含めた地震応答解析の結果を踏まえて説明すること。

- 上記指摘事項に対しては、「建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価について」に係る第979回審査会合(2021年6月1日)において、機器・配管系の耐震評価方法として、建屋剛性の不確かさケースを含めた地震応答解析を踏まえる方針であることを説明した。
- 具体的には、以下のとおり、3.11地震等の影響を踏まえた建屋耐震評価に係る第970回審査会合(2021年4月27日)で示した既設各建屋の地震応答解析モデル及び入力地震動の設定方法を適用し、機器・配管系の耐震評価に反映する。

- ① 初期剛性低下を反映した建屋の地震応答解析モデル【参考(1)(2)】
- ② 基準地震動S_s相当の更新地震による剛性低下を反映した建屋の地震応答解析モデル【参考(3)】
- ③ 各建屋のシミュレーション解析を踏まえて設定した建屋の入力地震動【参考(4)(5)】

- 本資料では、上記を踏まえた機器・配管系の耐震評価結果(設計成立性)に係る整理結果を説明する。

2. 機器・配管系の耐震評価

- 機器・配管系の耐震評価にあたっては、図1に示すとおり、入力地震動及び地震応答解析モデル（建屋地震応答解析モデル、建屋－大型機器連成地震応答解析モデル*1）に対して、3.11地震等の影響を踏まえた建屋耐震評価に係る検討結果を適用し、設計用地震力を設定した。
- 上記で設定した設計用地震力に対して、機器・配管系の耐震評価を実施し、いずれも耐震性が確保されること（設計成立性）を確認した（評価結果は別紙参照）。

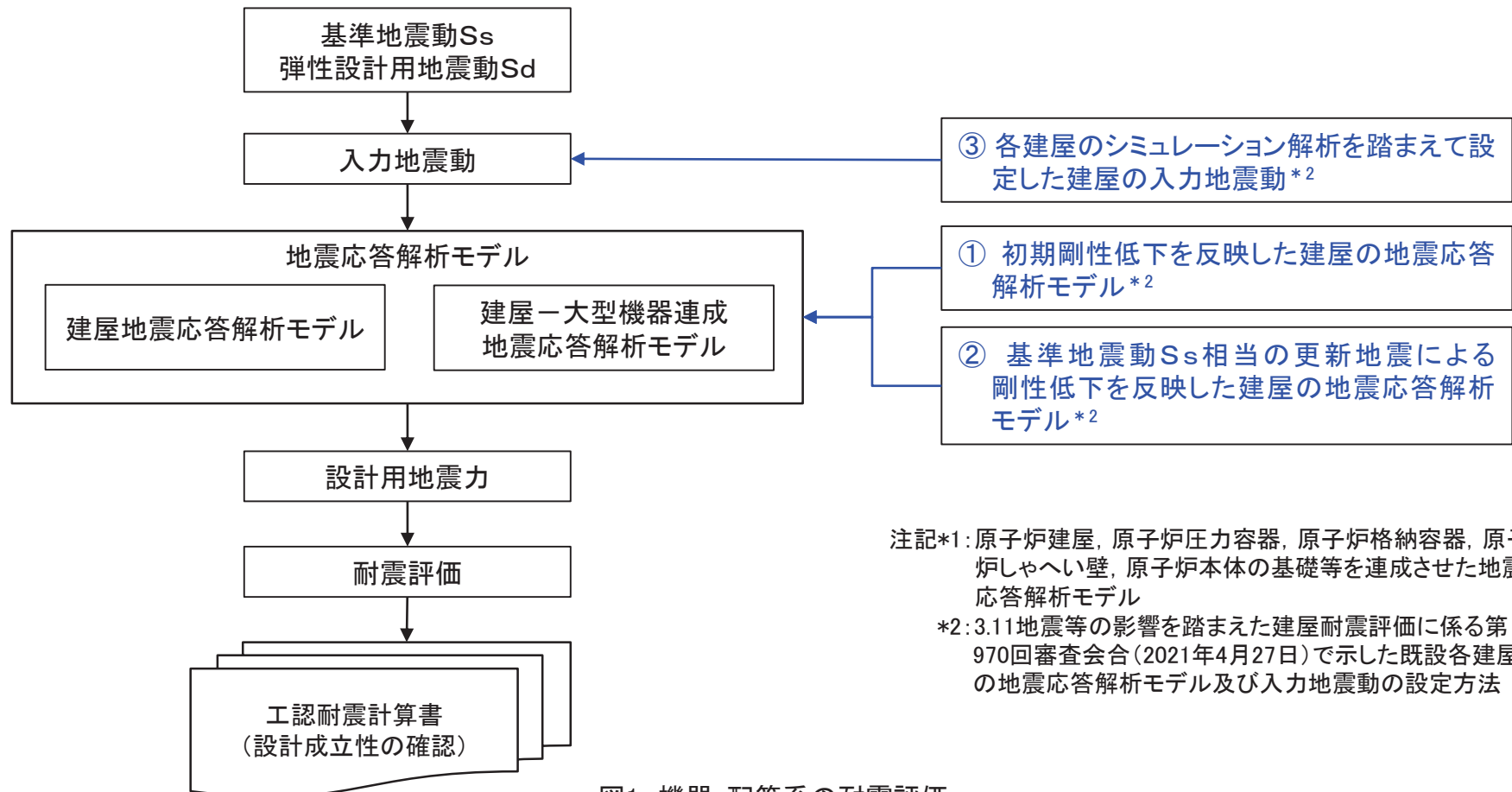


図1 機器・配管系の耐震評価

【別紙】 機器・配管系の耐震評価結果(設計成立性)(1/4)

➤ 表1に各施設ごとの耐震評価結果及び代表設備の評価結果例*を示す。なお、上記以外の評価結果も含めて工認耐震計算書として取り纏めている。

注記* : 代表設備のうち最小裕度となる評価部位の評価結果

表1 機器・配管系の耐震評価結果(1/4)

VI-2-3 原子炉本体の耐震性についての計算書【24図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _s)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-3-4-1-2 原子炉压力容器の耐震性についての計算書	ノズルセーフ エンド (低圧注水ノズル)	疲労	0.871	1	○
VI-2-4 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の耐震性についての計算書【10図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _s)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック(第1, 2号機 共用)の耐震性についての計算書	補強板d (170体ラック)	組合せ応力 (引張り+せん断)	193MPa	205MPa	○
VI-2-5 原子炉冷却系統施設の耐震性についての計算書【38図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _s)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-5-4-1-4 管の耐震性についての計算書 (残留熱除去系)	メカニカル スナッパ	曲げ応力	323MPa	404MPa	○

【別紙】 機器・配管系の耐震評価結果(設計成立性)(2/4)

表1 機器・配管系の耐震評価結果(2/4)

VI-2-6 計測制御系統施設の耐震性についての計算書【73図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書	制御棒挿入性	燃料集合体 相対変位	54.2mm	60mm	○
VI-2-7 放射性廃棄物の廃棄施設の耐震性についての計算書【2図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-7-3-1-1 管の耐震性についての計算書 (放射性ドレン移送系)	配管本体	一次+二次 応力	331MPa	398MPa	○
VI-2-8 放射線管理施設の耐震性についての計算書【16図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-8-3-1-5 中央制御室再循環フィルタ装置の 耐震性についての計算書	基礎ボルト	せん断応力	38MPa	159MPa	○

表1 機器・配管系の耐震評価結果(3/4)

VI-2-9 原子炉格納施設の耐震性についての計算書【34図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-9-2-1-2 サプレッションチェンバの耐震性についての計算書	外側ボックス サポート取付部 (P10)	一次+二次 応力	330MPa	393MPa	○
VI-2-10 その他発電用原子炉の附属施設の耐震性についての計算書【43図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-10-1-2-1-1 非常用ディーゼル発電設備 機関・発電機の耐震性についての計算書	軸受台 取付ボルト (発電機)	引張り応力	136MPa	204MPa	○
VI-2-11 波及的影響を及ぼすおそれのある施設の耐震性についての計算書【6図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-11-2-8 原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書	脱線防止ラグ	圧縮応力	261MPa	308MPa	○

【別紙】 機器・配管系の耐震評価結果(設計成立性)(4/4)

表1 機器・配管系の耐震評価結果(4/4)

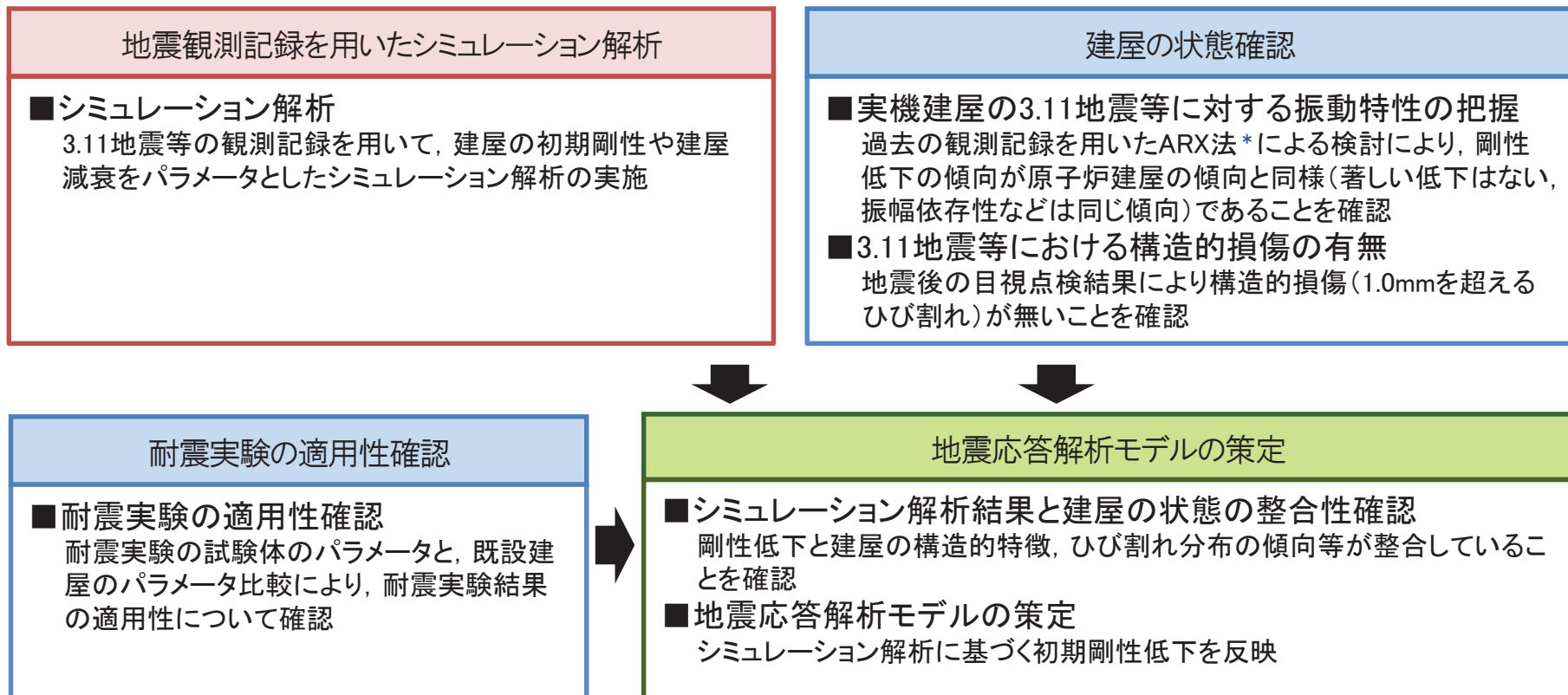
VI-2-別添1 火災防護設備の耐震性についての計算書【6図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-別添1-7 消火配管の耐震性についての計算書	配管本体	一次+二次 応力	331MPa	410MPa	○
VI-2-別添2 溢水防護に係る施設の耐震性に関する説明書【1図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-別添2-2 溢水源としない耐震B, Cクラス機器 の耐震性についての計算書	配管本体 (給水系)	一次+二次 応力	389MPa	438MPa	○
VI-2-別添3 可搬型重大事故等対処設備等の耐震性に関する説明書【2図書】						
評価結果	〔代表設備の評価結果例〕	評価部位	応力分類	発生値 (基準地震動S _S)	許容値 (許容応力状態IV _A S)	評価結果
○	VI-2-別添3-4 可搬型重大事故等対処設備のうち ポンベ設備の耐震計算書	中央制御室 待避所加圧設備 (空気ポンベ) フレーム	組合せ応力 (引張り+せん断)	175MPa	280MPa	○

(1) 既設建屋への初期剛性低下反映フロー

第970回審査会合(2021年4月27日)資料1-2抜粋, 青字追記

- 原子炉建屋(主にオペフロ上部)を代表に3.11地震等の施設への影響を踏まえた設計体系に反映すべき事項の検討を実施し, 初期剛性低下の要因分析とその要因が終局耐力等に与える影響について確認を行った。
- **原子炉建屋以外の既設建屋**についても, 地震観測記録によって算定された剛性低下率は, 構造的特徴も踏まえると, 原子炉建屋上部や下部の検討結果と同様の特徴・傾向を有していること, 過去の観測記録の検討により剛性低下の傾向も同様であることから, **地震観測記録を踏まえた剛性低下を地震応答解析モデルに反映する方針**としている。
- 既設建屋への反映にあたっては, 以下のフローにて実施した。

既設建屋への反映フロー



* :ARX(autoregressive auxiliary input)モデルは, パラメトリック同定で一般的に使用されるモデルであり, 最小二乗法により計算される方法

- 原子炉建屋は、質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、過去の地震観測記録の傾向分析や点検結果等を踏まえて、設計値に対する補正係数を0.3~0.8と設定し、地震応答解析モデルに反映している。
- 原子炉建屋以外の既設建屋についても同様な検討を行い、剛性低下と建屋の構造的特徴、ひび割れ分布の傾向等が整合していることを確認の上、設計値に対する補正係数を設定した。

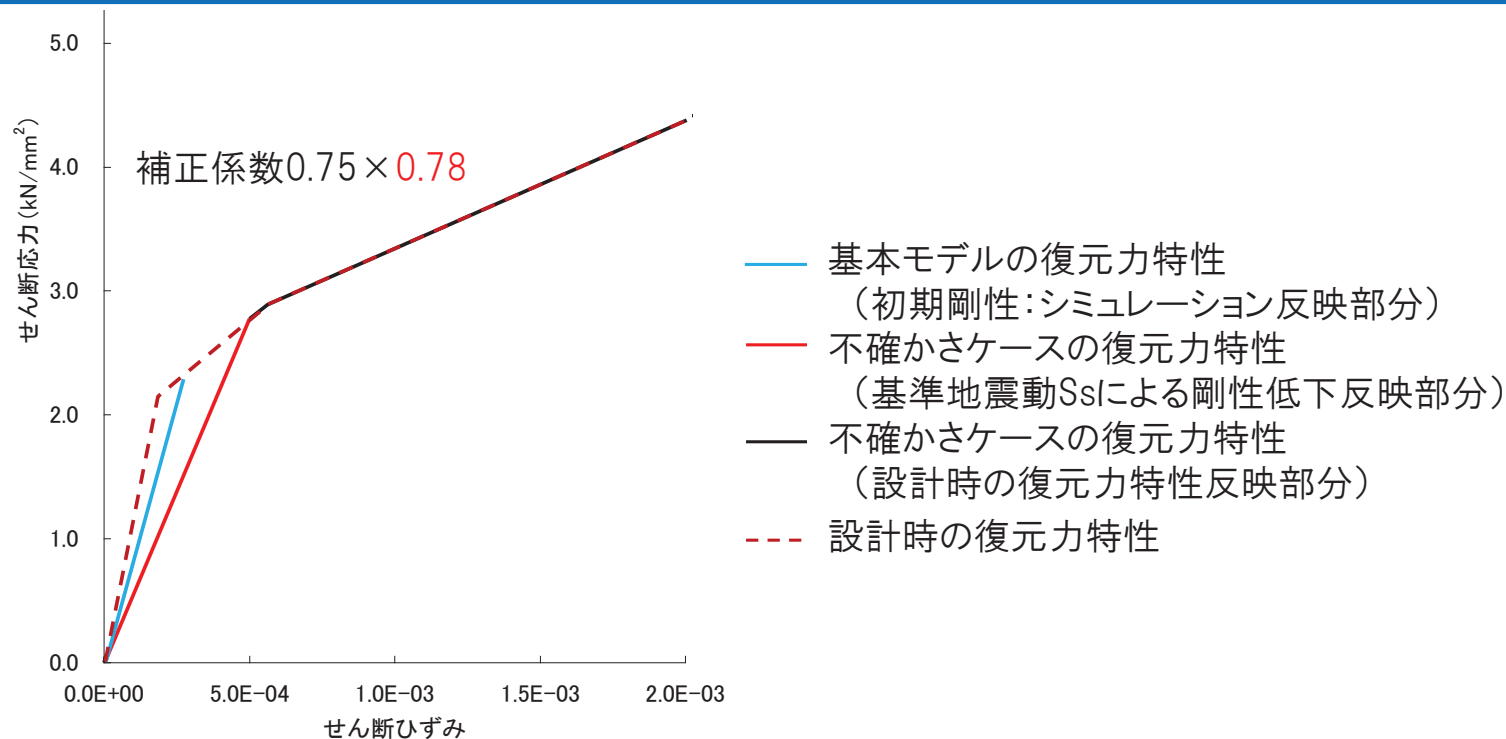
今回工認における既設建屋の初期剛性の設計値に対する補正係数

建屋		補正係数								(参考)建屋に要求される機能 (今回工認)	
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
原子炉建屋	地上3階及びクレーン階 (O.P.33.2mより上部)	NS ●		EW ●							Sクラス (原子炉建屋原子炉棟:二次格納施設) Sクラス設備の間接支持機能
	地下3階~地上2階 (O.P.33.2mより下部)						NSEW ● ●				
制御建屋				NSEW ● ●							Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	地上2階及びクレーン階 (O.P.24.8mより上部)	NSEW ● ●									Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む) の間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を 与えないこと
	地下2階~地上1階 (O.P.24.8mより下部)	NSEW ● ●									
補助ボイラー建屋									NS・EW ◆		Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
第3号機海水熱交換器建屋							NS・EW ●				浸水防護施設の間接支持機能
第1号機制御建屋		NS ●		EW ●							制御建屋へ波及的影響を与えないこと

- : 原子炉建屋オペフロ上部と同様の大架構的特徴を有した部位
- : 原子炉建屋オペフロ下部と同様の耐震壁の配置が密な部位
- ◆: 補助ボイラー建屋は、地震計が設置されていなく、シミュレーション解析が実施できないことから、設計剛性を採用

【原子炉建屋の基準地震動Ss評価に対する不確かさケース】

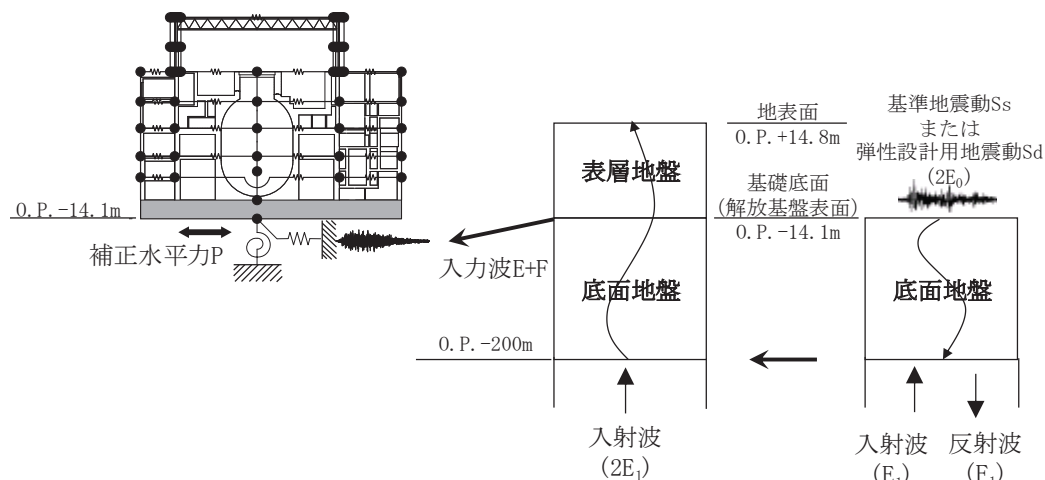
- 過去の中小地震も含めた記録では時間経過に伴い剛性が低下する傾向の他に、過去の観測よりも大きな加速度となる更新地震によっても剛性が低下する傾向が認められていることから、初期剛性低下の影響を保守的に反映するモデルを不確かさケースとして採用する。
- 不確かさケースの初期剛性は、基準地震動Ss入力前後の1次固有振動数の比($f_{Ss後} / f_{Ss前}$)から剛性比を算定し、それを基本モデルの初期剛性に掛けることによって算定する。(原子炉建屋の場合、基本ケースの0.78倍)
- 不確かさケースは、応答が小さい耐震壁の剛性も含めて一律に低下させるため、基本モデルに基準地震動Ssを繰り返し入力する応答よりも変形が進み、保守的評価となる。



不確かさケースのせん断力復元力特性
(原子炉建屋: 補正係数0.75の例)

【原子炉建屋での見直し概要】

- 既工認においては、深く埋め込まれている原子炉建屋であっても表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果(側面地盤ばね)は考慮しない地震応答解析モデルを採用し、保守的な評価としていた。
- これに対し、**3.11地震等の観測記録を用いた原子炉建屋等のシミュレーション解析**では、表層地盤の影響を考慮した入力地震動を用いた方が、直接入力するケースに比べ、より観測記録との整合性が良く、**表層地盤の影響が確認された**。
- 一方、埋込み効果については、原子炉建屋のシミュレーション解析では**側面地盤ばねを考慮しないモデルが観測記録と整合性が良かった**。
- 以上の結果を踏まえ、今回工認では、**表層地盤が入力地震動に与える影響が確認された建屋について入力地震動の評価方法を見直した**。



今回工認における地震応答解析モデルへの入力概要

既工認からの見直しの概要(2号炉原子炉建屋(R/B))

JEAG4601での記載	
入力地震動	埋込み効果の評価
埋込まれている場合は、表層地盤の影響*が期待出来る旨の記載あり *E+F入力、直接入力(2E)より小さい	支持地盤と側面地盤のせん断波速度(V _s)の違いが大きい場合は 側面地盤ばねの評価に留意する必要がある旨の記載あり

○(女川は約29mの埋込み) △(女川の支持地盤は硬質でありVsの違いが大きい)

既工認での周辺地盤の影響評価

既工認では側面地盤ばね評価の課題も踏まえて、以下のとおり設定

入力地震動	埋込み効果
基準地震動を直接入力 (表層地盤の影響を無視)	側面地盤ばねを設けず (埋込み効果を無視)

※既工認では、参考検討として、採用手法と、【E+F入力+埋込み効果考慮(JEAG手法で評価(Novakばね))】の比較から採用手法の保守性を確認

建設の特徴、観測記録の傾向

入力地震動	埋込み効果
3.11地震等のはざとり波を用いた建屋シミュレーション解析 ⇒ 表層地盤の影響を考慮するE+F入力が直接入力(2E)よりも適合性が良い	・建屋周囲は、掘削土等により埋戻しを実施している。 ⇒埋込みによる拘束等は小さい状況 ・3.11地震のはざとり波を用いた 建屋シミュレーション(R/B, Hx/B)でも、Novakばね無しの方が適合性が良い

今回工認での周辺地盤の影響評価

今回工認では建設の特徴や観測記録の傾向を考慮し、以下のとおり設定

入力地震動	埋込み効果
表層地盤の影響を考慮するE+F入力に変更	側面地盤ばねを設けず (埋込み効果を無視)

(5) 原子炉建屋以外の既設建屋の入力地震動の算定方法

第970回審査会合(2021年4月27日)資料1-2抜粋

➤ 表層地盤の影響を考慮する建屋は以下の手順で選定した。

建屋の周辺状況から検討対象建屋を選定 ⇒ 3.11地震等によるシミュレーション解析からE+F効果について確認

➤ 建屋の周辺状況からの検討対象建屋の選定では、埋込み深さがある程度深く、かつ、2～3面程度周辺地盤と接している建屋を選定した。その上で、シミュレーション解析の結果、2E入力よりもE+F入力の方が観測記録との整合性が良い結果を与えた建屋については、今回工認において表層地盤の影響を考慮する。

今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	地盤 状況	シミュレーシ ョン解析	表層地盤の 影響考慮 (E+F入力)	(参考) 建屋に要求される機能 (今回工認)
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	2Eに比べ E+F入力 がより 整合	考慮	Sクラス(原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1～2面 接地	—	非考慮* (既工認と同じ)	Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2～3面 接地	2Eに比べ E+F入力 がより 整合	考慮	Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の 間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を 与えないこと
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	—	非考慮*	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
第3号機 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	2Eに比べ E+F入力 がより 整合	考慮	浸水防護施設の間接支持機能
第1号機 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	—	非考慮* (既工認と同じ)	制御建屋へ波及的影響を与えないこと

* : 「非考慮」としている建屋の入力地震動は、基準地震動Ss又は弾性設計用地震動Sdを直接入力としている。