

大型廃棄物保管庫建屋の 耐震補強概要

2023年 11月7日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

1. はじめに

- 大型廃棄物保管庫建屋は2020年5月に認可（原規規発第2005271号）を受け、着工。2023年6月に使用前検査実施済。
- その後、2022年11月16日の原子力規制委員会では了承された「東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における耐震クラス分類と地震動の適用の考え方」を踏まえて、建屋の耐震クラスの見直しを実施した。
- 2023年3月6日の技術会合より、建屋の耐震クラスがCクラス（Ss900）と位置付けられたことから、建屋の使用済吸着塔への波及的影響を防止するために耐震補強が必要となった。
- 適用する地震動の見直しに伴い、建屋耐震補強に関して構造強度および耐震性について検討を実施する。

2. 大型廃棄物保管庫 耐震補強 目次

- 2023年11月～2024年1月に係る事前面談の内容案は以下の通り。
- 本日の面談内容は下記の通り。

【構造強度及び耐震性について】

1. 概要

1.1 一般事項

1.2 構造概要

11月説明

: 今回ご説明範囲

2. 構造強度（許容応力度設計）

2.1 設計方針

2.2 大型廃棄物保管庫の構造強度に対する検討

- ・ 建屋本体の構造強度に対する検討
- ・ 基礎の構造強度に関する検討
- ・ 改良地盤の構造強度に関する検討

設計方針・クライテリア：11月
検討結果：1月

3. 耐震性（波及的影響、間接支持機能維持の評価）

3.1 耐震性の設計方針

3.2 大型廃棄物保管庫の耐震性に対する検討

- ・ 建屋本体の耐震性に対する検討
- ・ 基礎の耐震性に関する検討
- ・ 改良地盤の耐震性に関する検討

設計方針・クライテリア：11月
検討結果：12月

3 : 1.2 構造概要

- 既設建屋は鉄骨造の地上2階で、平面が23.35m (EW) ×186.2m (NS) であり、地上高さは22.85m である。
- 耐震補強は建屋東側に、東西方向の変形抑制のためのバットレスを設置し、建屋既設フレーム内に、南北方向の変形抑制のためのブレースを追設する。
- 耐震補強による基礎は既設建屋と一体化し、直下の地盤も既設部と同様に地盤改良を実施する。

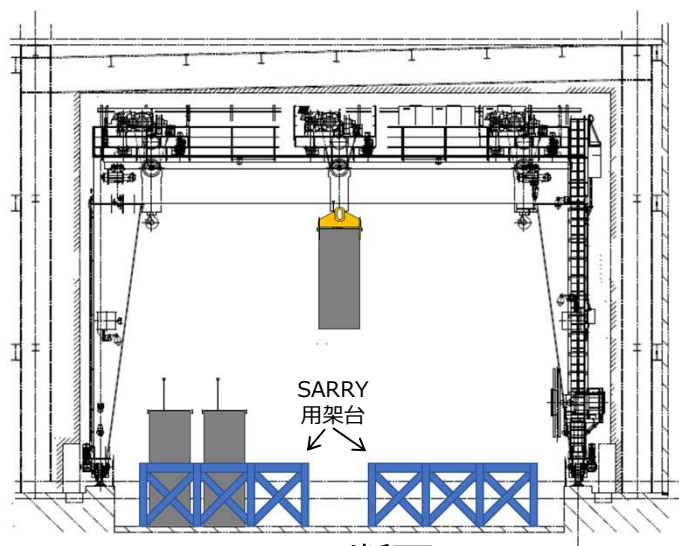
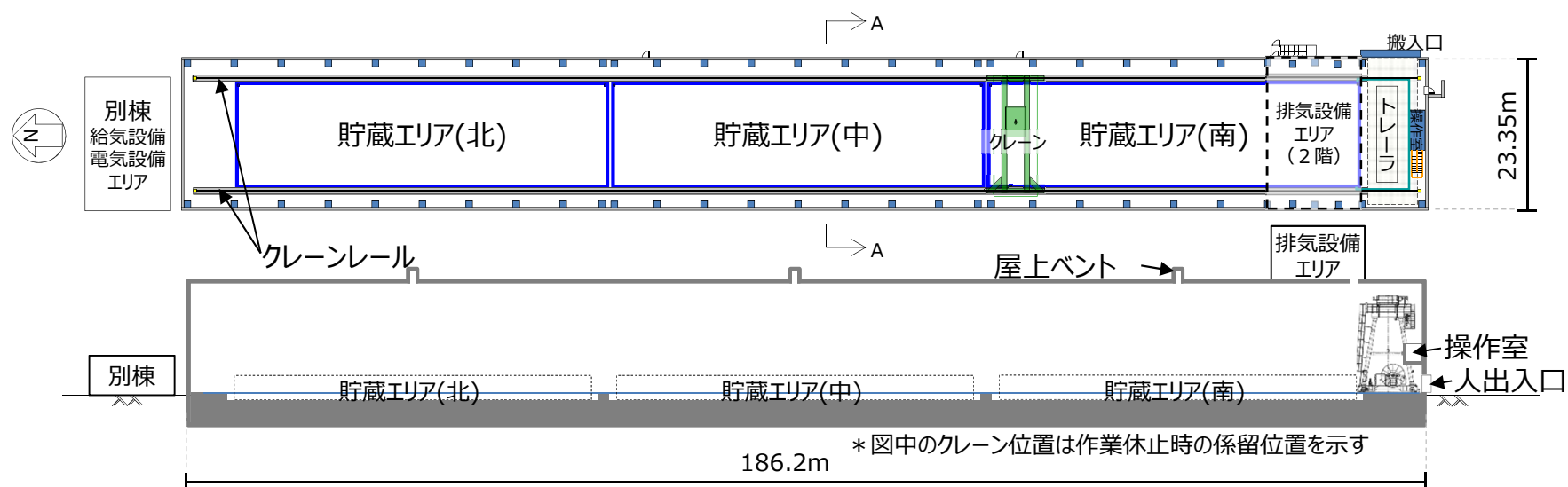
2-3. 大型廃棄物保管庫の耐震クラスについて

9

クレーンの確認用地震動についてSd450を適用できる場合、大型廃棄物保管庫の耐震クラスは、以下のとおりとなる。<最終>

設備名称	耐震クラス	動的地震力		静的地震力	確認用地震動（波及的影響，間接支持機能）	説明
		機能維持	弾性範囲（共振時のみ）			
（使用済吸着塔）	S	Ss900	Sd450	水平：3.6Ci (0.72G) 鉛直：1.2Cv (0.24G)	—	・実力としてSクラス地震動により保管状態の吸着塔本体が破損し、内包水や吸着材が漏えいしないことを確認する。
建屋（屋根）	C	—	—	水平：1.0Ci (0.2G) 鉛直：—	Ss900	・Ss900で使用済吸着塔に波及的影響は与えないが、建屋の耐震機能は維持できない。 建屋耐震力がないものとして線量評価を実施した結果、公衆被ばく線量は、50μSv以下となるため、Cクラスの地震力を適用する。
建屋（壁）						
建屋（柱，梁）						
建屋（基礎（墩））						
クレーン	C	—	—	水平：1.2Ci (0.24G) 鉛直：—	Sd450	・フロ-2の施設・設備の特徴に応じた評価（7ページ参照）
使用済吸着塔架台	S	Ss900	Sd450	水平：3.6Ci (0.72G) 鉛直：1.2Cv (0.24G)	—	・使用済吸着塔の直接支持構造物
換気設備	C	—	—	水平：1.2Ci (0.24G) 鉛直：—	—	・認可済
非常用ベント口						
電源・計装設備						

3 : 1.2 構造概要

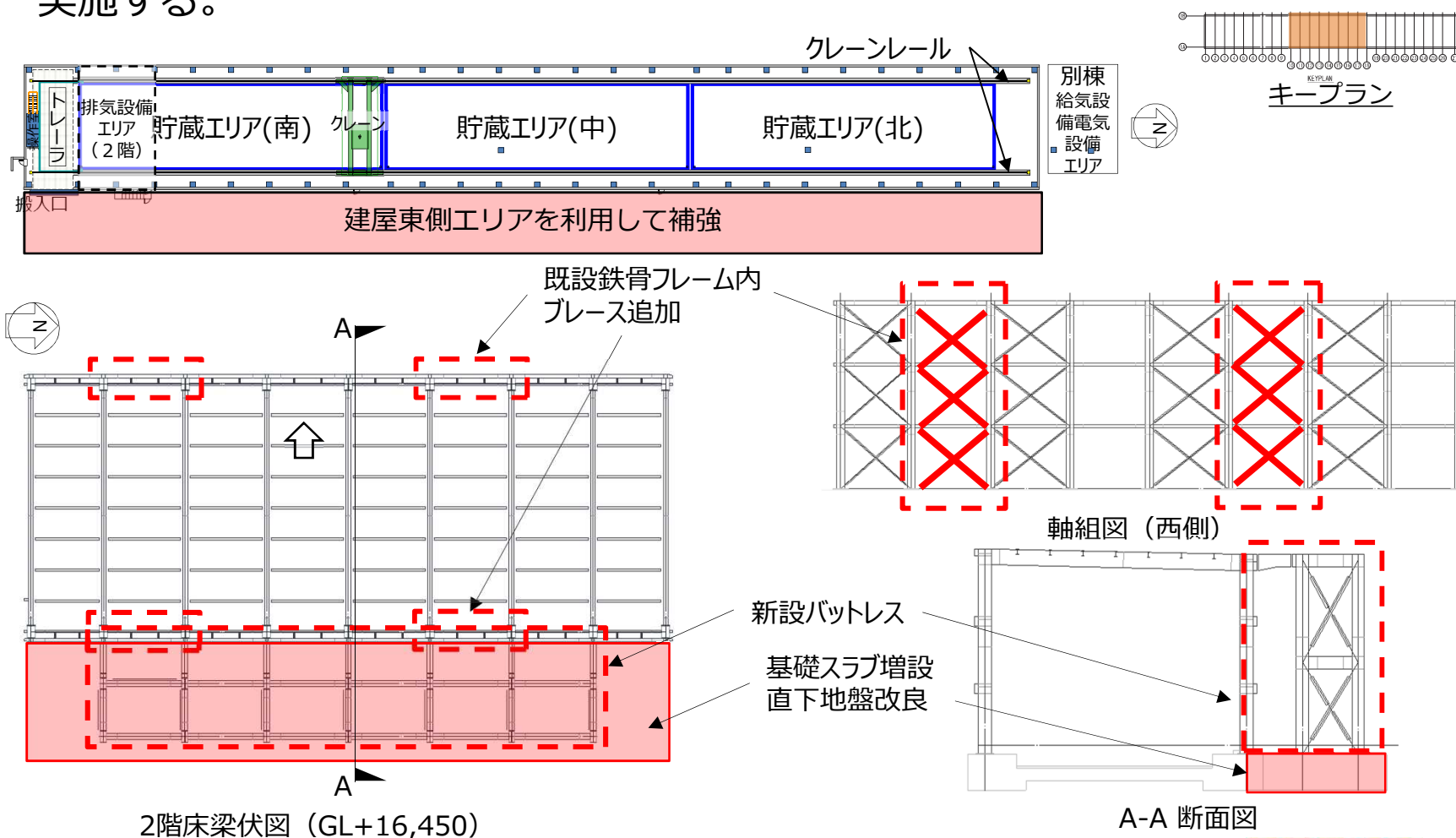


A-A 断面

建屋概略図

3 : 1.2 構造概要

- 耐震補強は建屋東側に、東西方向の変形抑制のためのバットレスを設置し、建屋既存フレーム内に、南北方向の変形抑制のためのブレースを追加する。
- 耐震補強による基礎は既存建屋と一体とし、耐震補強部直下の地盤は地盤改良を実施する。



補強概要 (検討案、中央棟)

2 - 3. 大型廃棄物保管庫の耐震クラスについて

9

クレーンの確認用地震動についてSd450を適用できる場合、大型廃棄物保管庫の耐震クラスは、以下のとおりとなる。<最終>

設備名称	耐震クラス	動的地震力		静的地震力	確認用地震動（波及的影響、間接支持機能）	説明
		機能維持	弾性範囲（共振時のみ）			
（使用済吸着塔）	S	Ss900	Sd450	水平：3.6Ci (0.72G) 鉛直：1.2Cv (0.24G)	—	・実力としてSクラス地震動により保管状態の吸着塔本体が破損し、内包水や吸着材が漏れいしないことを確認する。
建屋（屋根）	C	—	—	水平：1.0Ci (0.2G) 鉛直：—	Ss900	・Ss900で使用済吸着塔に波及的影響は与えないが、建屋の耐震性能は維持できない。 建屋耐震力がないものとして線量評価を実施した結果、公衆被ばく線量は、50μSv以下となるため、Cクラスの地震力を適用する。
建屋（壁）						
建屋（柱、梁）						
建屋（基礎（堰））						
クレーン	C	—	—	水平：1.2Ci (0.24G) 鉛直：—	Sd450	・フロー2の施設・設備の特徴に応じた評価（7ページ参照）
使用済吸着塔架台	S	Ss900	Sd450	水平：3.6Ci (0.72G) 鉛直：1.2Cv (0.24G)	—	・使用済吸着塔の直接支持構造物
換気設備	C	—	—	水平：1.2Ci (0.24G) 鉛直：—	—	・認可済
非常用ベント口						
電源・計装設備						

4 : 3.1 耐震性の設計方針

- 大型廃棄物保管庫における波及的影響・間接支持機能維持の検討は、第27回特定原子力施設監視・評価検討会「東京電力福島第一原子力発電所の外部事象に対する防護の検討について」（平成26年10月3日）にて示した検討用地震動（最大応答加速度900gal。以下、「Ss900」）とする。
- Ss900による地震応答解析を行い、本体建屋、屋根、外壁が使用済吸着塔に対する波及的影響を与えないこと、及び基礎が使用済吸着塔に対する間接支持機能が維持されることを確認する。
- 建屋の地震応答解析は、水平2方向及び鉛直方向への地震力を同時に入力（以下、「3方向同時入力」という）する。

4 : 3.1 耐震性の設計方針

- 大型廃棄物保管庫は、Ss900に対して吸着塔への波及的影響を及ぼさないこととし、本体建屋の許容限界は下表に示すとおりとする。

許容限界と考え方

部位		性能目標	事象	想定される事象	評価方針	許容限界
大型廃棄物保管庫	本体建屋	—	全体崩落	・ 架構全体が許容限界を超えて傾き、防護対象施設・設備へ落下する。	・ 最大層間変形角が波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認する。 ^{※1}	層間変形角 1/30 ^{※2}
				・ 架構が崩壊機構を構成し、架構全体が倒れることにより、架構全体が防護対象施設・設備へ崩落する。	・ 架構の崩壊機構が構成されないことを確認する。	崩壊機構が構成されないこと

※1: 大型廃棄物保管庫建屋は使用済吸着塔を長期間保管する施設であることを考慮し、Ss900における層間変形角として1/75程度を目標とする。

※2: 「震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（（財）日本建築防災協会）」を参考に許容限界を設定している。なお、被災度区分判定基準においては、柱の残留傾斜角が1/30を超えた場合に大破と判定しているが、保守的に最大層間変形角を用いて評価を行う。

5.2 大型廃棄物保管庫の架構のモデル化

- 大型廃棄物保管庫をSs900で評価するに当たっては、3次元フレームモデルによる3方向同時入力にて地震応答解析を実施する。建物のモデル化の概要は以下の通り。
 - 建屋は3次元フレームモデルとし、柱、大梁、ブレース、小梁、間柱、及び屋根スラブをモデル化する。
 - 構成部材は、下表に示す非線形特性を考慮する。
 - 基礎は質点系に集約し、地盤との動的相互作用を考慮した地盤ばねを考慮する。
 - 建屋重量は、固定荷重(DL)、積載荷重(LL)、配管荷重(PL)を考慮し、外壁・屋根の支配面積に応じて柱・梁(小梁)の交点に集中質量として考慮する。

鋼製部材の非線形特性

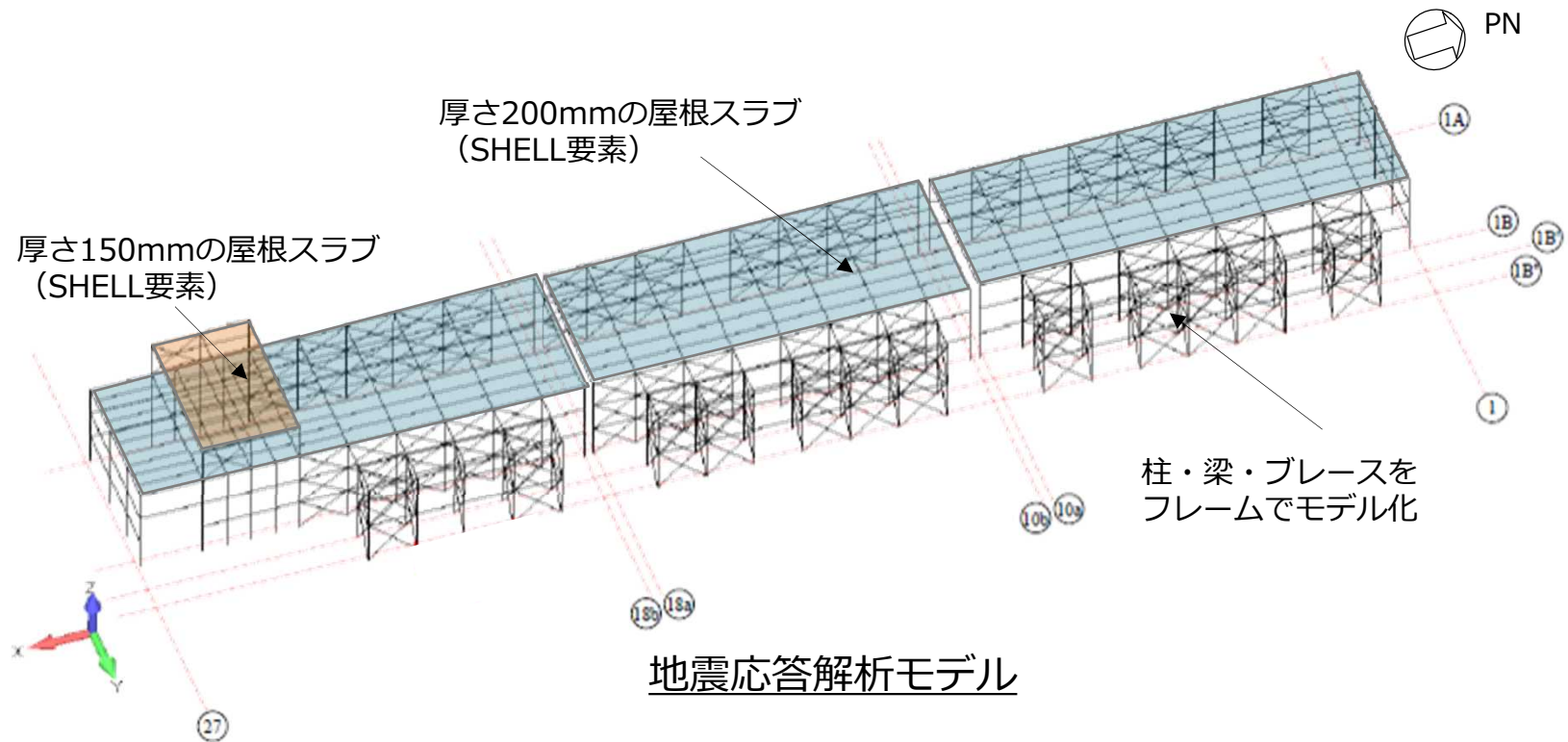
種別	構成部材	モデル要素	備考
鉄骨部	ブレース	ロッド要素 ^{※1}	引張耐力(引張側)及び座屈耐力低下(圧縮側)を考慮した修正若林モデル
	大梁	ビーム要素 ^{※2}	端部に剛塑性ばね(全塑性モーメント)を考慮した非線形要素(バイリニア型)
	柱	ビーム要素	端部を剛塑性ばね(全塑性モーメント)として、曲げ及び軸力変動を考慮した非線形要素(バイリニア型)
	小梁	ビーム要素	線形要素
	間柱	ロッド要素	

※1 ロッド要素：軸剛性のみを持つ線材要素(トラス要素)

※2 ビーム要素：軸剛性、曲げ剛性、せん断剛性を持つ線材要素

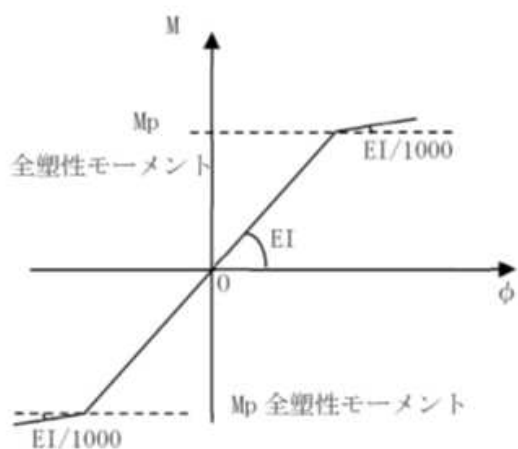
4 : 3.1 耐震性の設計方針

- 解析モデルは3次元フレームモデルで構築する。
- 屋根スラブは、RCスラブであることから、シェル要素でモデル化する。

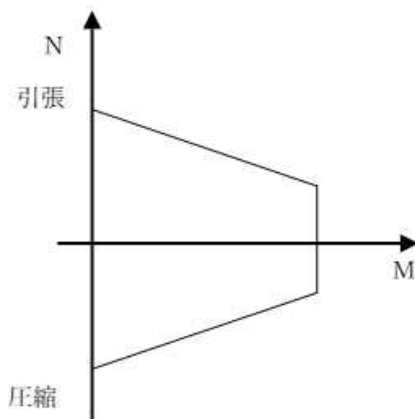


5.5 架構の非線形特性

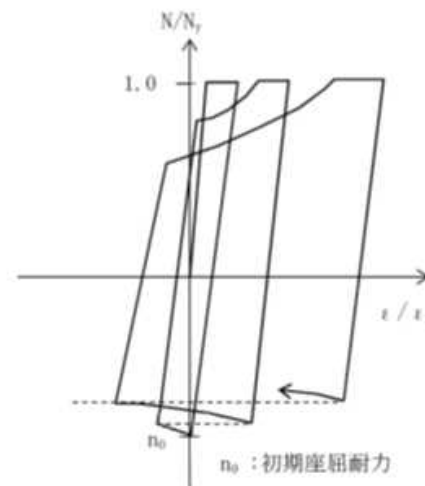
■ 各構成要素の非線形特性を以下に示す。



a) 梁・柱のM-φ特性



b) 柱のN-M曲線

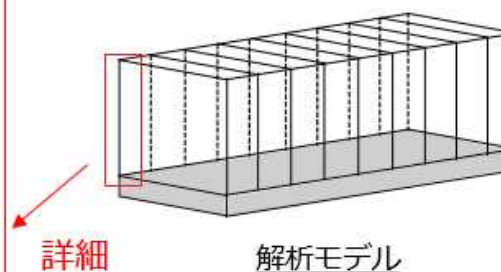
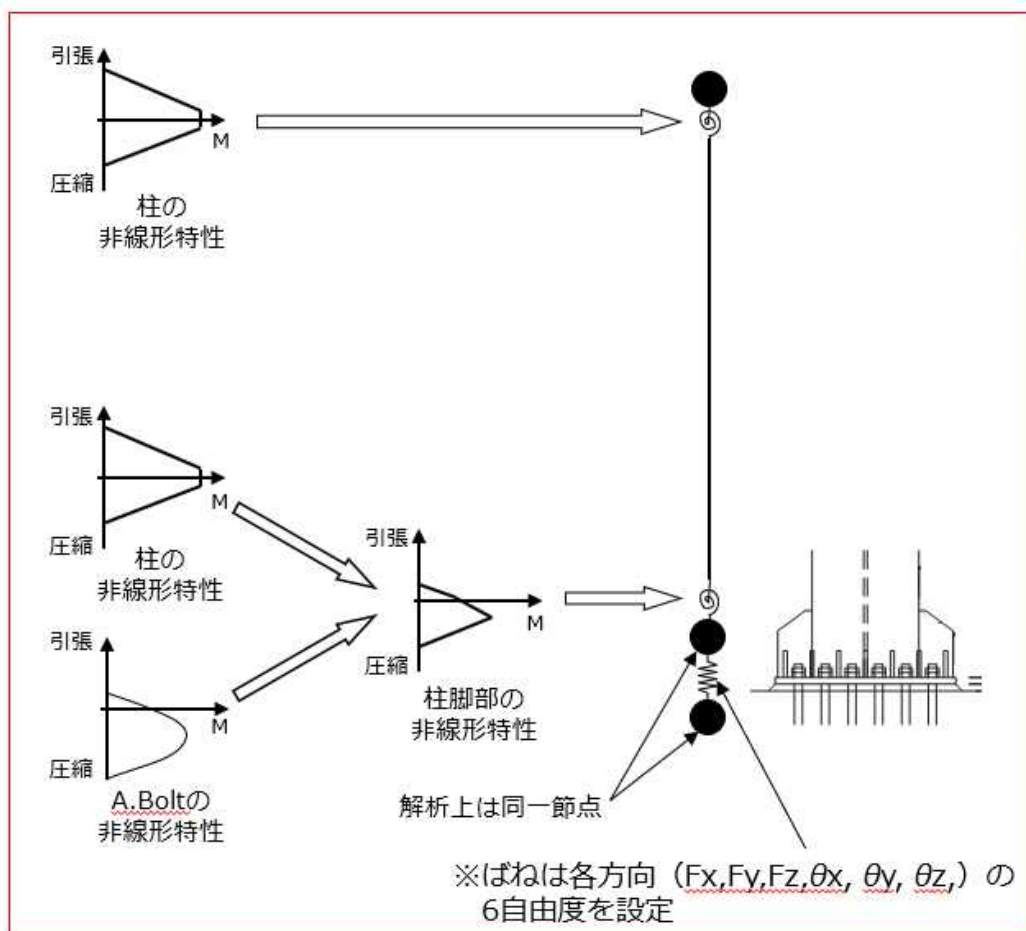


c) ブレースの復元力特性
(修正若林モデル)

構成部材の非線形特性

5.6 柱脚部のモデル化(2)

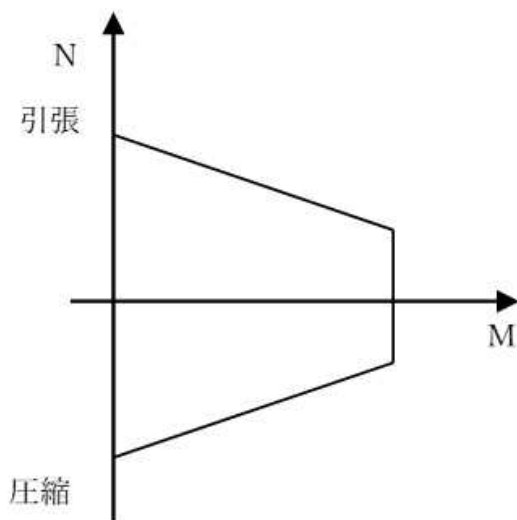
- 柱材は線材でモデル化し、端部に剛塑性ばね（全塑性モーメント）として、曲げ、及び軸力変動を考慮した非線形要素（バイリニア）とする。



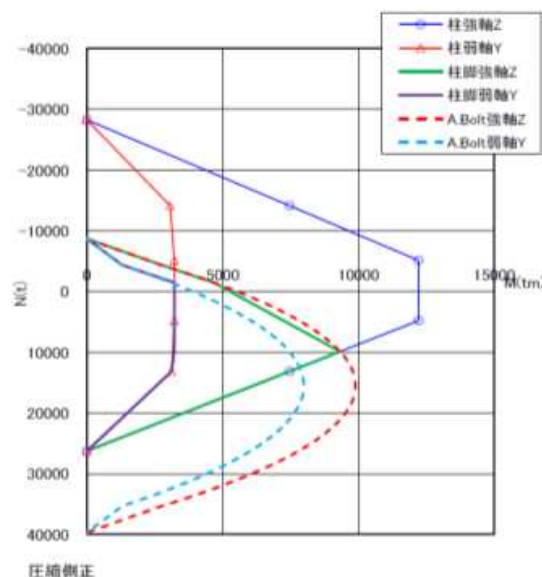
5.6 柱脚部のモデル化(3)

モデル化の概要

- 柱脚部の非線形特性は、柱のM-Nスケルトン曲線と露出柱脚（アンカーボルト）のM-Nスケルトン曲線の最小値取りしたM-Nスケルトン曲線とする。



a)柱のN-M曲線



b)柱脚部の部材とアンカーボルトの非線形特性を最小値取りしたN-M曲線

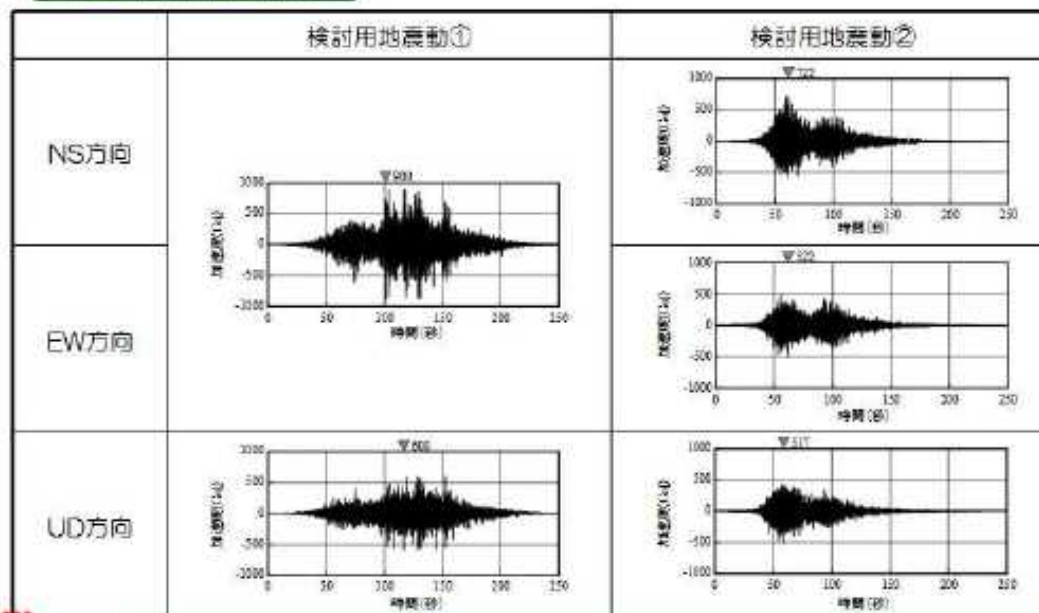
4. 検討に用いる地震動の概要 (1/2)

5

- 本検討に用いる地震動は、第27回特定原子力施設監視・評価検討会にてご説明した、検討用地震動（以下「Ss900」という）とする。
- Ss900は以下の二つの地震動からなる。

4. 1 検討用地震動の評価（検討用地震動）

加速度時刻歴波形



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

2/3

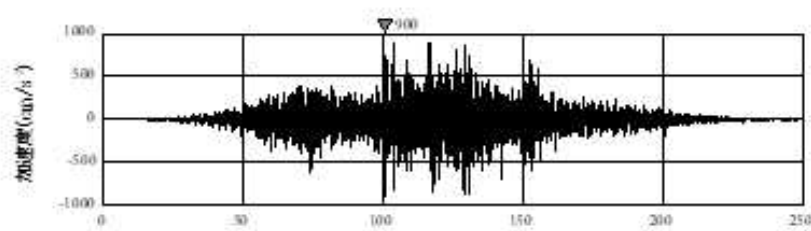
第27回特定原子力施設監視・評価検討会 資料2「東京電力福島第一原子力発電所の外部事象に対する防護の検討について」より抜粋

4 : 3.1 耐震性の設計方針

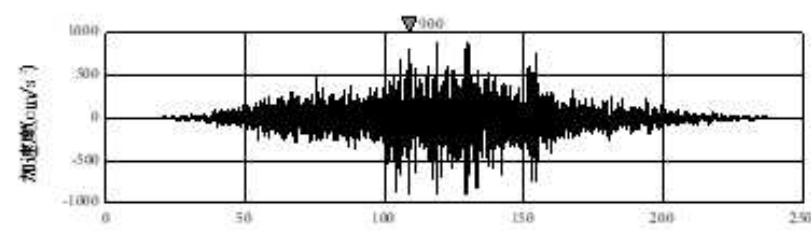
6

4. 検討に用いる地震動の概要(2/2)

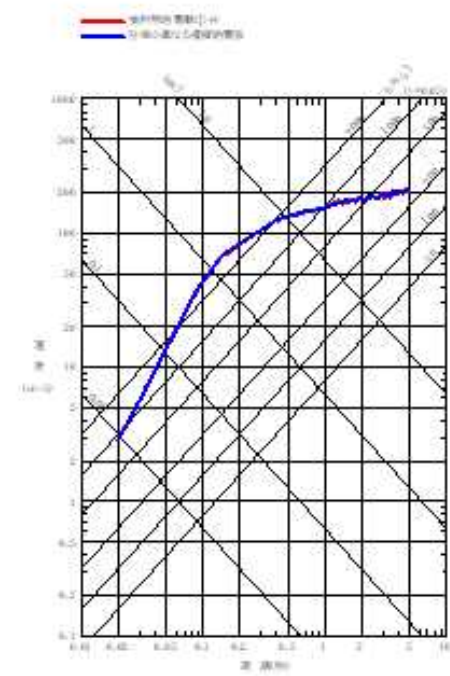
- 水平2方向の影響評価を実施するに当たっては、水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力を行う。
- 影響評価に当たっては、全く同じ地震動が同時に水平2方向に入力されることは現実的に考えにくいことから、検討用地震動①を作成した方法と同一の方法で、目標とする応答スペクトルに適合する位相の異なる模擬地震波を利用する。
- なお、検討用地震動①-Hの位相が、2011年東北地方太平洋沖地震において福島第一原子力発電所敷地内の地震観測記録のNS方向の位相を基に作成していることから、模擬地震波はそれと直交するEW方向の位相を基に作成する。



検討用地震動①-Hの加速度時刻歴波形



位相の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形



検討用地震動①の設計用応答スペクトル

4 : 3.1 耐震性の設計方針

地震応答解析方法

- 解析は、弾塑性時刻歴応答解析とする。また、時間刻みは0.001秒とする。
- 建屋の減衰は $h=0.02$ とし、建屋一次固有振動数に対して剛性比例型減衰を与える。
- 解析プログラムは、「DYNA 2E Version7.2.56」とする。
- 入力地震動は、建屋方向のN→Sを+方向、E→Wを+方向、鉛直上向きを+方向として解析を行う。
- 入力地震動はSs900-1およびSs900-2とし、3方向同時入力を行う。

5.7 地盤モデル

18

等価地盤モデル (Ss900-1)

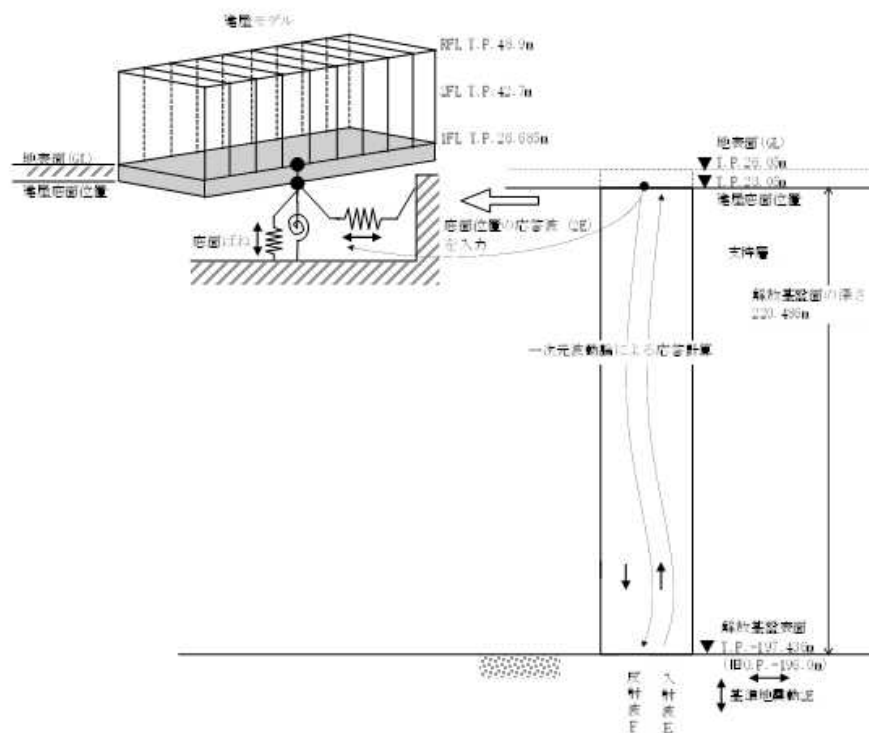
標高 T.P. (m)	層厚 (m)	地質	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	初期 せん断波速度 V_{s0} (m/s)	初期 せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	剛性低下率 G/G_0	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	せん断波速度 V_s (m/s)	縦波速度 V_p (m/s)	減衰定数 H (%)
23.05 ~ 15.40	7.65	改良地盤	17.8	0.260	360※	235000	0.95	223000	350	620	3
15.40 ~ -74.436	89.836	泥岩	17.0	0.459	470	383000	0.66	253000	380	1390	3
-74.436 ~ -100.436	26.0		17.4	0.447	530	498000	0.64	319000	420	1370	4
-100.436 ~ -182.436	82.0		17.4	0.443	580	597000	0.68	406000	480	1500	4
-182.436 ~ -197.436	15.0		17.6	0.410	750	1010000	0.78	788000	660	1700	3
-197.436 ~	—	解放基礎	17.6	0.410	750	1010000	—	1010000	750	1920	—

注：剛性低下率及び減衰定数は、Ss-1H及びSs-1Pによる等価線形解析結果の最小値とする。

※20210705「大型廃棄物保管庫の掘削設備及び架台設置に係る実施計画の変更について（第11回面談）」に記載の方法により、初期せん断波速度を設定している。

5.9 地震応答解析の概要

- 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図を下図に示す。モデルに入力する地震動は一次元波動論に基づき、解放基盤表面で定義されるSs900に対する地盤の応答として評価する。



入力地震動の概要図