

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0100 改32
提出年月日	平成29年1月20日

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

地震による損傷の防止について
(補足説明資料)

平成29年1月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

I. 既工認との手法の相違点について

1. 建屋及び原子炉の地震応答解析モデルの詳細化について

別紙1 原子炉建屋の地震応答解析におけるコンクリート実剛性の採用について

別紙2 地震応答解析モデルにおける補助壁の評価方法について

別紙3 建屋側面地盤回転ばねを考慮することの妥当性について

別紙4 原子炉本体基礎の復元力特性について

2. 既工認実績のない規格・手法の適用性について

2-1 原子炉格納容器コンクリート部の応力解析における弾塑性解析の採用について

2-2 土木構造物の解析手法および解析モデルの精緻化について

2-3 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について

3. その他手法の相違点等について

3-1 原子炉建屋屋根トラス及び排気筒の評価モデルについて

3-2 機器・配管系設備に関するその他手法の相違点について

4. 機器・配管系の設備の既工認からの構造変更について

II. 下位クラス施設の波及的影響の検討について

III. 水平2方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について

IV. 建屋傾斜が1/2,000を超えることに対する耐震設計方針について

下線部：今回ご提出資料

IV. 建屋傾斜が 1/2,000 を超えることに対する

耐震設計方針について

目 次

	頁
1. 概要	1
2. 建屋傾斜に対する影響検討	1
2. 1 建屋傾斜による地震荷重及び地震と組み合わせるべき荷重への影響	3
3. 耐震設計における建屋傾斜による影響の考慮方針の検討	5
3. 1 入力条件毎の反映方法の検討	6
3. 2 耐震性評価手法毎の反映方法の検討	6

1. 概要

「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に「許容される傾斜が各建物及び構築物に対する要求性能に応じて設定されており、動的解析の結果に基づいて求められた基礎の最大不等沈下量及び残留不等沈下量による傾斜が許容値を超えてないことを確認する。一般建築物の構造的な障害が発生する限界（亀裂の発生率、発生区間等により判断）として建物の変形角を施設の傾斜に対する評価の目安に、 $1/2,000$ 以下となる旨の評価していることを確認する。なお、これは、基本設計段階での目安値であり、機器、設備等の仕様が明らかになる詳細設計段階において詳細に評価を行うこととなる。」との記載があるが、柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉において、基礎地盤の安定性評価の結果、原子炉建屋の傾斜が基準地震動 S_s に対し一時的に $1/2,000$ を超える結果となっていることから原子炉建屋が傾斜する影響を検討する。

2. 建屋傾斜に対する影響検討

原子炉建屋の基礎地盤の安定性評価結果を表1に示す。原子炉建屋の傾斜が $1/2,000$ を超えるのは汀線平行断面のみであるが、汀線平行・直交に関わらず、原子炉建屋の基礎地盤の安定性評価にて算定された傾斜のうち、最大である $1/1,600$ を包絡する $1/1,000$ を検討用の傾斜とする。また、建屋傾斜が $1/2,000$ を超えるのは最大不等沈下による一時的なものである（図1及び図2参照）が、基礎地盤の残留不等沈下が $1/1,000$ という仮定で行う。

建屋傾斜の影響は、6号炉及び7号炉の原子炉建屋及び原子炉建屋に支持される機器・配管系のうち、以下を対象として検討する。

- (1) 設計基準対象施設のうち、耐震重要度分類のSクラスに属する設備
- (2) 重大事故等対処施設のうち、常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備
- (3) (1)及び(2)の間接支持構造物である原子炉建屋
- (4) (1)及び(2)の設備への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備

表 1 原子炉建屋の基礎地盤の安定性評価結果*

評価対象	上段：最大相対変位 (cm), 下段：最大傾斜										
	Ss-1		Ss-2	Ss-3		Ss-4	Ss-5	Ss-6	Ss-7	Ss-8	
6号炉 原子炉建屋 訂線平行断面	2.8 〔6.79〕	3.0 (正,逆) 〔6.78〕	2.2 〔23.56〕	2.4 〔35.69〕	—	1.3 〔51.87〕	1.4 〔51.88〕	1.4 〔51.87〕	1.2 〔51.43〕	3.5 〔8.01〕	—
	1/2,000	1/1,800	1/2,500	1/2,300	—	1/4,200	1/4,100	1/4,000	1/4,700	1/1,600	—
6号炉 原子炉建屋 訂線直交断面	1.5 〔5.76〕	—	1.4 〔22.52〕	1.2 〔25.00〕	1.5 (正,逆) 〔17.49〕	1.2 〔51.96〕	1.1 〔46.56〕	1.2 〔54.60〕	1.4 〔46.97〕	1.7 〔8.02〕	1.7 (逆,正) 〔8.01〕
	1/3,900	—	1/4,300	1/4,900	1/4,000	1/5,000	1/5,100	1/5,000	1/4,200	1/3,500	1/3,400
7号炉 原子炉建屋 訂線平行断面	3.3 〔5.77〕	—	1.9 〔21.54〕	2.8 〔19.15〕	—	1.2 〔51.91〕	1.4 〔46.56〕	1.6 〔51.92〕	1.2 〔46.58〕	3.3 〔8.07〕	—
	1/1,700	—	1/2,900	1/2,000	—	1/4,500	1/4,100	1/3,600	1/4,600	1/1,700	—
7号炉 原子炉建屋 訂線直交断面	2.4 〔5.74〕	—	2.2 〔20.83〕	1.9 〔19.12〕	2.1 (正,逆) 〔17.50〕	1.8 〔52.57〕	1.7 〔46.54〕	2.0 〔51.94〕	1.9 〔46.95〕	2.5 〔8.03〕	—
	1/2,500	—	1/2,700	1/3,000	1/2,800	1/3,200	1/3,500	1/2,900	1/3,000	1/2,400	—
5号炉 原子炉建屋 訂線平行断面	2.5 〔18.79〕	—	1.9 〔23.54〕	2.1 〔36.55〕	2.1 (正,逆) 〔19.61〕	1.3 〔51.87〕	1.4 〔46.49〕	1.1 〔51.88〕	1.0 〔46.49〕	3.0 〔8.00〕	3.1 (逆,正) 〔7.99〕
	1/3,200	—	1/4,400	1/3,900	1/3,900	1/6,300	1/5,900	1/7,500	1/8,200	1/2,700	1/2,700
5号炉 原子炉建屋 訂線直交断面	2.3 〔9.18〕	—	2.1 〔22.53〕	1.6 〔37.21〕	1.8 〔17.51〕	1.6 〔51.96〕	1.9 〔46.56〕	1.5 〔51.96〕	1.6 〔46.96〕	2.3 〔8.03〕	—
	1/3,600	—	1/4,000	1/5,200	1/4,500	1/5,200	1/4,400	1/5,600	1/5,300	1/3,600	—

※ 下線は、各号炉における最大相対変位及び最大傾斜の最大値を示す。 ※ Ss-1, 3, 8の左側に、位相反転なしの場合の最大相対変位及び最大傾斜を記載。
 ※ Ss-1, 3, 8の右側に、位相反転ありの場合の最大相対変位及び最大傾斜が位相反転なしの場合の最大相対変位及び最大傾斜を上回った場合の最大相対変位及び最大傾斜を記載。
 ※ Ss-1, 3, 8の右側に記載の、(逆,正)は水平反転、(正,逆)は鉛直反転、(逆,逆)は水平反転かつ鉛直反転を示す。 ※〔〕は、発生時刻(秒)を示す。

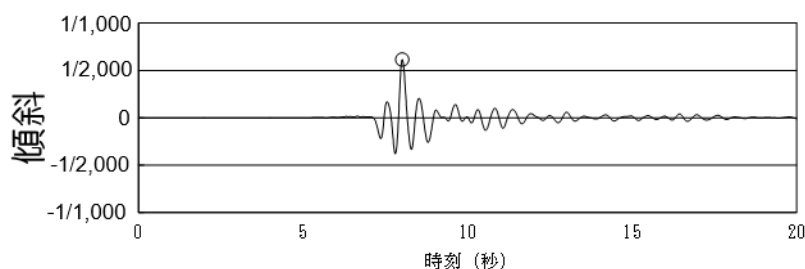


図 1 6号炉原子炉建屋の傾斜 (Ss-8) *

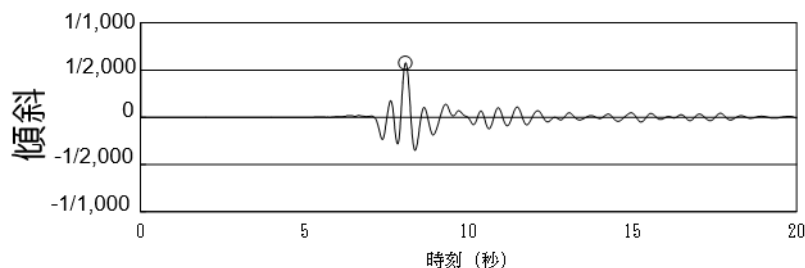


図 2 7号炉原子炉建屋の傾斜 (Ss-8) *

* 柏崎刈羽原子力発電所 6号炉及び7号炉 原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性について (平成 28 年 12 月 26 日, 第 425 回審査会合資料 1-3-1) より抜粋

2. 1 建屋傾斜による地震荷重及び地震と組み合わせるべき荷重への影響

基準地震動 S_s と組み合わせるべき荷重は死荷重, 圧力荷重及び機械的荷重が挙げられる。以降で各荷重に対する建屋傾斜の影響を検討する。

2. 1. 1 基準地震動 S_s により定まる地震力への影響

耐震性評価用のせん断力, 曲げモーメント及び床応答スペクトル等の地震力は地震による加速度を入力として算定される。そこで, 建屋傾斜の有無による地震加速度への影響を検討する。

建屋傾斜が発生している状況の地震加速度を図3に示す。検討用の傾斜 (1/1,000) により水平方向, 鉛直方向の地震加速度はそれぞれ以下のように表される。

○傾斜時に発生する水平地震加速度：

$$C_H \cos\theta + C_V \sin\theta = \frac{1000}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_H + \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_V \cong 0.999 C_H + 0.001 C_V \cong C_H$$

○傾斜時に発生する鉛直地震加速度：

$$C_V \cos\theta - C_H \sin\theta = \frac{1000}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_V - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_H \cong 0.999 C_V - 0.001 C_H \cong C_V$$

傾斜が発生している場合の水平地震加速度及び鉛直地震加速度は傾斜が発生していない場合の地震加速度と同等であり, 傾斜が発生している場合の地震力についても, 傾斜が発生していない場合と同等になると考えられる。

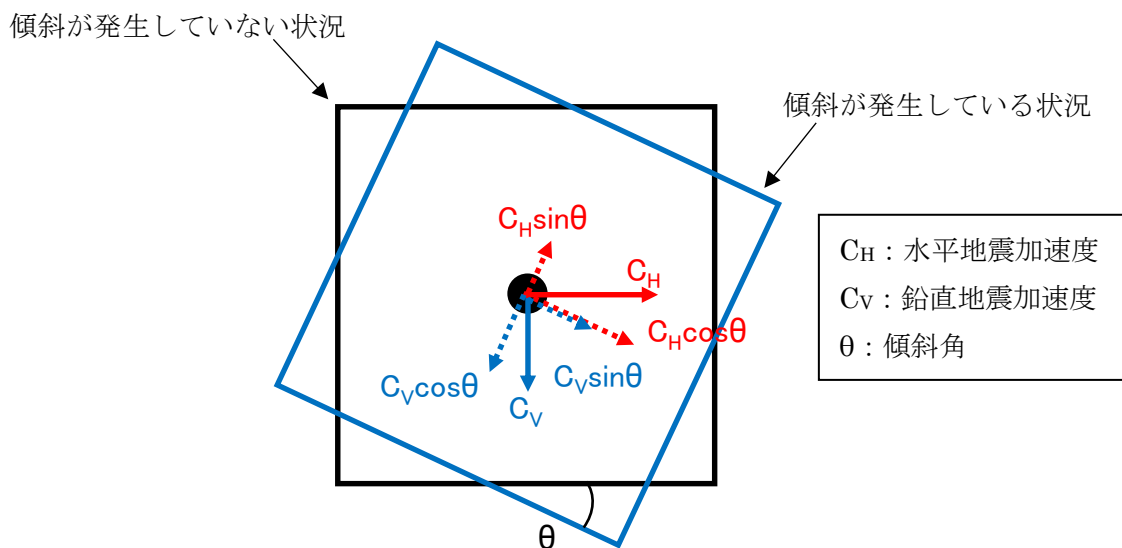


図3 傾斜が発生している状況での地震加速度概念図

2. 1. 2 死荷重への影響

建屋傾斜が発生している状況での死荷重を図4に示す。傾斜が発生していない場合, 死荷

重は鉛直方向のみに作用する。傾斜が発生している場合、水平方向に自重の分力が発生し、鉛直方向は水平方向に分力されるため、従来作用していた荷重より小さくなる。すなわち、傾斜を考慮すると水平方向の曲げモーメント及びせん断力が新たに発生し、鉛直方向の荷重は $mg\cos\theta$ となり、従来作用していた荷重 mg よりも減少する。

○傾斜時に新たに発生する曲げモーメント： $mg\sin\theta\times h$

○傾斜時に新たに発生するせん断力： $mg\sin\theta$

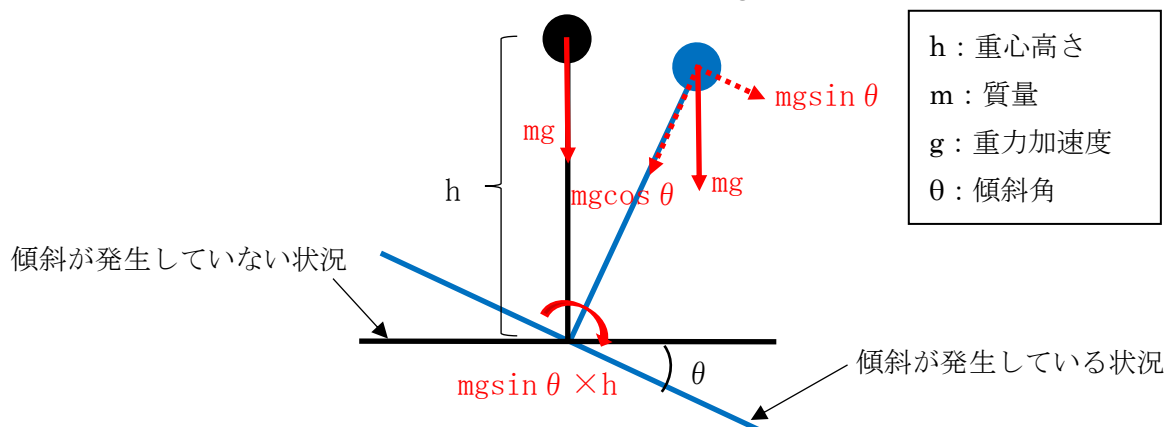


図4 傾斜が発生している状況での荷重概念図

2. 1. 3 圧力荷重及び機械的荷重への影響

圧力荷重は傾斜による影響が無いため変化しない。また、機械的荷重は、安全弁吹出し時の反力荷重、スクラム反力及びポンプの振動等があるが傾斜による影響が無いため変化しない。

2. 1. 4 建屋傾斜による荷重への影響検討結果

建屋傾斜による荷重への影響検討結果を表2に示す。建屋傾斜が発生している状況では、死荷重による曲げモーメント及びせん断力が水平方向に新たに発生する。

表2 建屋傾斜による荷重への影響検討結果

	水平方向	鉛直方向
Ss による地震力	地震加速度は傾斜が発生している場合と傾斜が発生していない場合を比較すると同等であるため、Ss による地震力も同等である。	同左
死荷重	基礎地盤が傾くことにより新たに、曲げモーメント ($mg\sin\theta\times h$)、せん断力 ($mg\sin\theta$) が発生する。	軸力が mg から $mg\cos\theta$ に減少する。
圧力荷重 機械的荷重	変化なし	変化なし

3. 耐震設計における建屋傾斜による影響の考慮方針の検討

残留不等沈下による基礎地盤の傾斜が 1/1,000 という仮定をした場合に、死荷重により新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を耐震設計で考慮する。建屋傾斜を考慮すべき対象について耐震性評価手法を分類し、評価手法毎に基礎地盤の傾きにより新たに発生する荷重の反映方針を検討する。なお、傾斜時の死荷重による鉛直方向の荷重については傾斜がない場合よりも小さくなるため、設計で考慮しない。評価手法の分類を図5に示す。

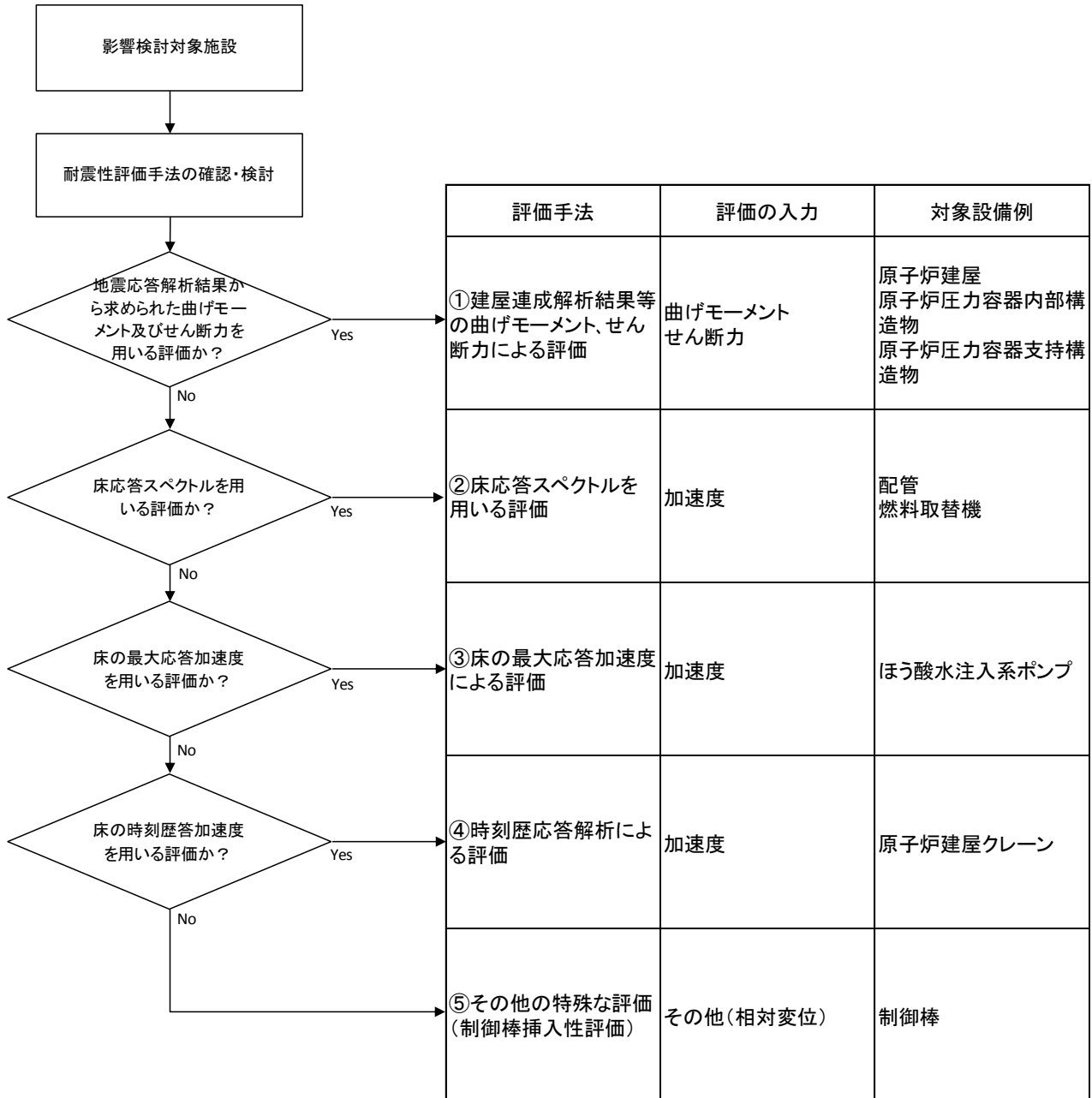


図5 耐震性評価手法の分類

3. 1 入力条件毎の反映方法の検討

評価手法を整理した結果，耐震性評価の入力として曲げモーメント及びせん断力を用いる評価と加速度を用いる評価に大きく分類される。それぞれに対する反映方法を検討する。

3. 1. 1 曲げモーメント及びせん断力を入力とする評価

基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を算定し，傾斜を考慮せずに算定した曲げモーメント及びせん断力に上乘せする。

3. 1. 2 加速度を入力とする評価

基礎地盤の傾きにより新たに発生するせん断力及び曲げモーメントは図6に示す通り，水平方向に加速度 $g \sin \theta$ が発生した状態と等価であることから，傾斜を考慮せずに算定した水平加速度に $g \sin \theta$ を上乘せする。

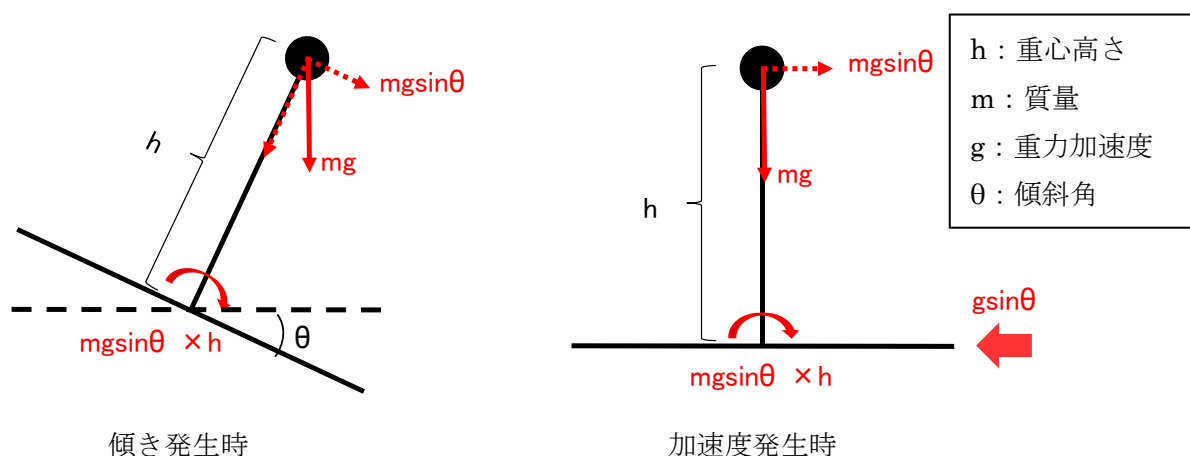


図6 傾き発生時と加速度発生時の荷重状態

3. 2 耐震性評価手法毎の反映方法の検討

図5にて分類した評価手法毎の反映方法を検討する。

3. 2. 1 建屋連成解析結果等の曲げモーメント及びせん断力による評価 (図5の①)

原子炉建屋内の原子炉圧力容器，原子炉遮蔽壁，原子炉本体基礎等の大型機器・構造物は，原子炉建屋基礎版やダイヤフラムフロアを介して原子炉建屋からの地震の入力があることを考慮して，図7に示すように連成させたモデルを使用し，基準地震動 S_s による地震応答解析を実施することによって大型機器・構造物の評価用曲げモーメントやせん断力を算定している。

原子炉本体基礎を例として算定した曲げモーメントやせん断力が伝達されるイメージと基礎地盤の傾きにより発生する曲げモーメント及びせん断力を図8に示す。

建屋傾斜による影響の反映方法として，基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモー

メントやせん断力を地震応答解析で算定した値に加算する。なお、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメントやせん断力は水平方向に加速度 $g \sin \theta$ が負荷されている状態と等価であるため、 $g \sin \theta$ を入力とした静的解析を実施することにより算定する。

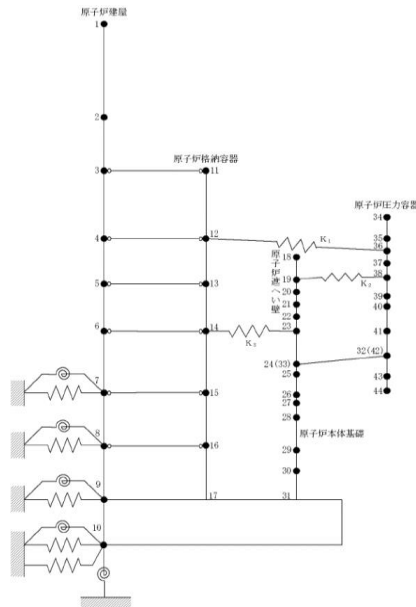


図7 原子炉建屋と大型機器を連成させた地震応答解析モデル例

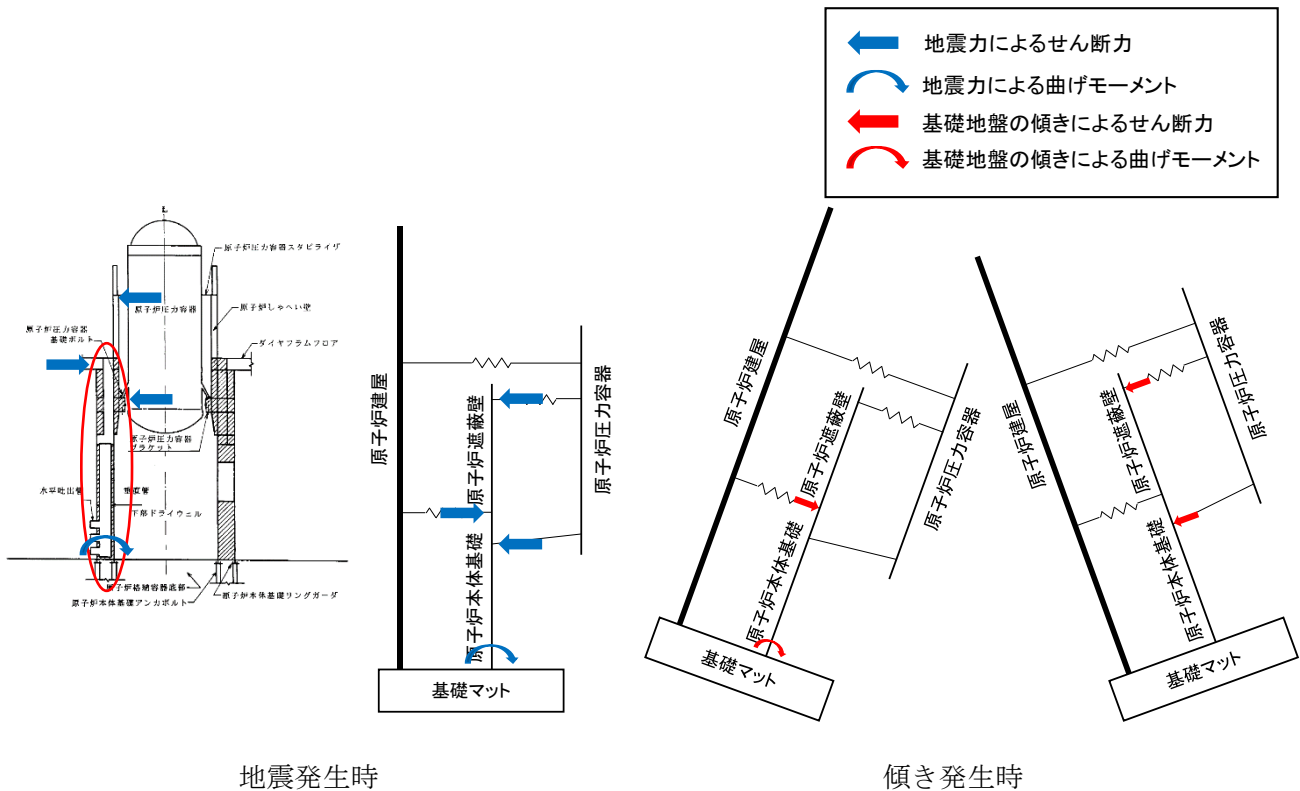


図8 原子炉本体基礎に作用する曲げモーメント及びせん断力のイメージ

3. 2. 2 床応答スペクトルを用いる評価 (図5の②)

配管や燃料取替機は床応答スペクトルを入力として評価している。建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を、加速度として水平方向の床応答スペクトルの全周期に $g\sin\theta$ を加算する。加算するイメージを図9に示す。

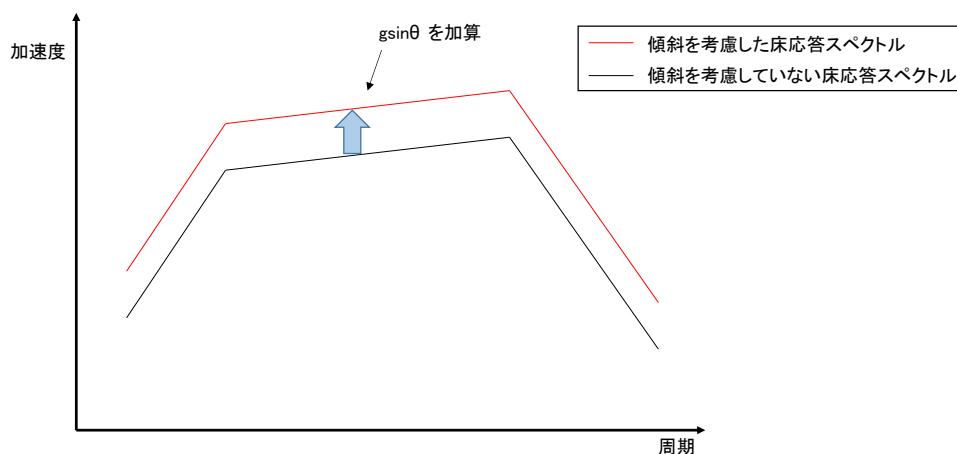


図9 傾斜を考慮した床応答スペクトルのイメージ

3. 2. 3 床の最大応答加速度による評価 (図5の③)

剛な設備の構造健全性評価や動的機器の機能維持評価に床の最大応答加速度を用いている。建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を、水平方向加速度として床の最大応答加速度に $g\sin\theta$ を加算する。

3. 2. 4 時刻歴応答解析による評価 (図5の④)

原子炉建屋クレーンは浮き上がりを考慮するため、クレーンガーダの各車輪にギャップ要素を持つ非線形 FEM 解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行う。建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を、入力として用いる時刻歴応答加速度の全時刻に (最大加速度 + $g\sin\theta$) / (最大加速度) を乗算する。乗算するイメージを図10に示す。

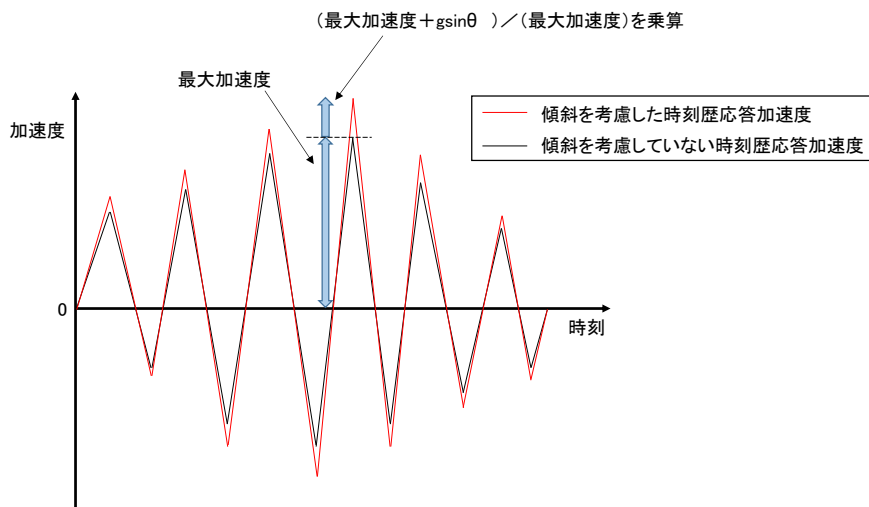


図 10 傾斜を考慮した時刻歴応答加速度のイメージ

3. 2. 5 その他の特殊な評価 (制御棒挿入性評価) (図 5 の⑤)

制御棒の挿入性は、図 11 に示すような、燃料集合体、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉遮蔽壁、原子炉本体基礎、原子炉压力容器、原子炉压力容器内部構造物及び原子炉压力容器支持構造物等を連成させたモデルを基準地震動 S_s に対する地震応答解析により、燃料集合体の相対変位を算定し、制御棒の挿入が確認されている相対変位と比較することにより評価する。

建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する相対変位 (たわみ) を、地震応答解析で算定した値に加算する。基礎地盤の傾きにより新たに発生するたわみのイメージを図 12 に示す。なお、基礎地盤の傾きにより新たに発生するたわみは水平方向に加速度 $g \sin \theta$ が負荷されている状態と等価であるため、 $g \sin \theta$ を入力とした静的解析を実施することにより算定する。

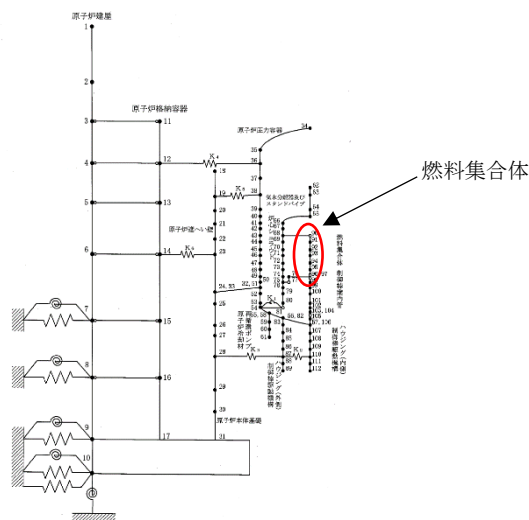


図 11 原子炉压力容器及び原子炉压力容器内部構造物の地震応答解析モデル例

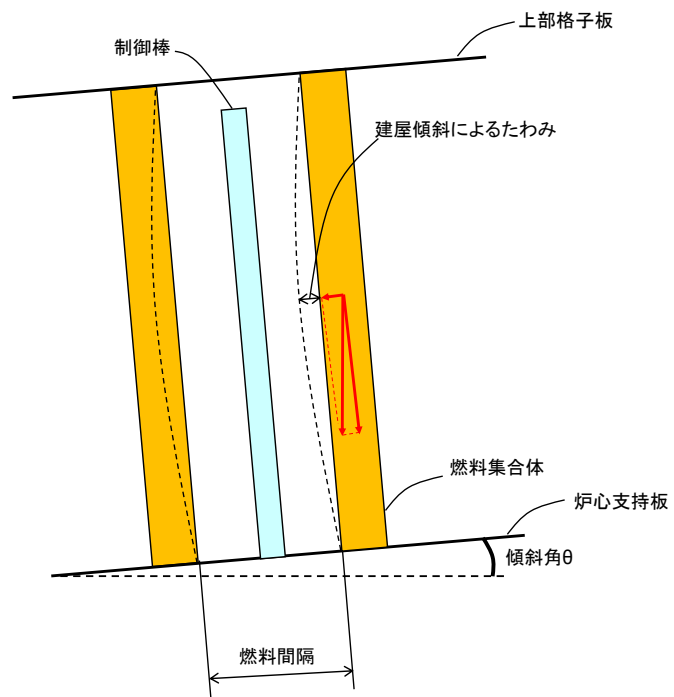


図 1 2 建屋傾斜が発生している状況での燃料集合体のたわみのイメージ