

1号機 新潟県中越沖地震のシミュレーション解析における 原子炉建屋応答解析と観測記録との相違の影響について

1. はじめに

新潟県中越沖地震後の設備健全性評価（以下、「設備健全性評価」）において、観測記録が取れている原子炉建屋の中間階（T.P+12.8m）にて、観測記録と建屋応答解析結果（シミュレーション解析）の床応答スペクトルを比較した結果を下記に示す（図 1）。観測記録と建屋応答解析とは全体的に良く整合しているが、水平方向では、一部周期帯において建屋応答解析結果が観測記録を下回り、鉛直方向では建屋応答解析結果が観測記録を上回っている。

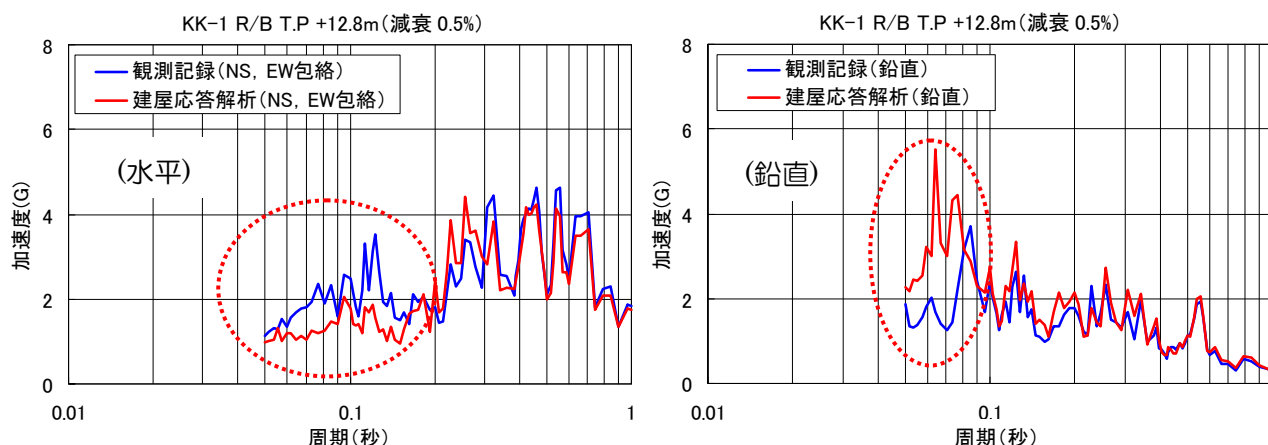


図 1 1号機原子炉建屋中間階床応答スペクトル（観測記録および建屋応答解析）
（減衰定数：水平 0.5%，鉛直 0.5%）

2. 耐震安全性評価への影響

耐震安全性評価における入力基準地震動 S_s であり、設備健全性評価のような観測記録が存在しないことや、原子炉建屋モデルは設備健全性評価と耐震安全性評価で異なる（構造 W44-6）ことから、基準地震動 S_s 応答に対する差異の定量的な推定はできない。しかしながら、原子力安全・保安院殿の指示により、中越沖地震時の観測記録と建屋応答解析との相違の影響を確認することとした。

なお、影響の確認にあたってはこれらを踏まえて、機器の入力条件としては設備健全性評価と同様に原子炉建屋の補助壁を考慮した基準地震動 S_s による地震応答を用い、個別の検討においてはより現実的な条件を考慮した評価とした。

3. 検討対象設備

検討対象の選定に際して考慮した条件は次のとおりである。

条件①：床応答加速度を用いて評価をおこなうもの

条件②：柔構造であること（固有周期が 0.05 秒以上であること）

条件①については、観測記録は加速度として得られているものであり、例えば、炉内構造物などの地震応答解析から算出される荷重を用いて評価する設備については、差異の定量的な把握ができないためである。

次に条件②については、柔構造の設備は剛構造の設備に比べ裕度が小さい傾向であることが挙げられる。また、剛構造の設備については、JEAG4601-1987 に従い、床の最大応答加速度(ZPA)を 1.2 倍した値を用いて評価を実施しており、これは、ZPA における観測記録と建屋応答解析結果の相違（水平方向で約 1.1 倍）を包含していると考えられるためである。

1号機の耐震安全性評価対象設備のうち、以上の条件に合致する設備は下記のとおりであり、このうち代表として評価基準値に対して比較的発生値に近い設備である制御棒・破損燃料貯蔵ラック、燃料交換機、配管系（不活性ガス系、主蒸気系）を選定した。

- ・ 残留熱除去系熱交換器
- ・ 高圧炉心スプレイ系ポンプ

- ・燃料交換機
- ・原子炉複合建屋原子炉棟クレーン
- ・使用済燃料貯蔵ラック
- ・制御棒・破損燃料貯蔵ラック
- ・配管系（床応答加速度を用いて評価をおこなうもの）

4. 検討方法

中越沖地震の観測記録とシミュレーション解析結果の補正比率を下記のように定義し、床応答スペクトルから、固有周期ごとに補正比率を算出した。なお、補正比率は観測記録が取れている中間階で算出しているが、他のフロアについても同じ補正比率を用いた。

$$\text{補正比率} = \frac{\text{中越沖地震の観測記録に基づく震度}}{\text{中越沖地震のシミュレーション解析結果に基づく震度}}$$

制御棒・破損燃料貯蔵ラックの検討においては、評価震度（水平方向・鉛直方向）に補正比率を乗じたのち、耐震安全性評価と同様な評価をおこなった。

燃料交換機の検討においては、算出された発生値（水平方向、鉛直方向）に補正比率を乗じ、影響の確認をおこなった。

配管系の検討においては、周期ごとの補正比率を基準地震動 S_s のスペクトルに乗じて新たなスペクトル（補正スペクトル）を作成し、スペクトルモーダル解析により影響の確認をおこなった。

5. 検討結果

(1) 制御棒・破損燃料貯蔵ラック

制御棒・破損燃料貯蔵ラック（以下、「ラック」）の耐震安全性評価においては、ラックの評価用震度は安全側の条件として、ラックのフロアレベル（T.P 6.18m）の階上（T.P 12.8m）の震度を用いている。そのため本検討に際しては、階下（T.P 5.3m）との間で線形補間した震度を用いた（図 2，表 1）。なお、観測記録とシミュレーション解析の差異の影響検討であることを踏まえ、震度を読み取る際の床応答スペクトルは、設備健全性評価と同様に 10% 拡幅をおこなわないものを用いた。

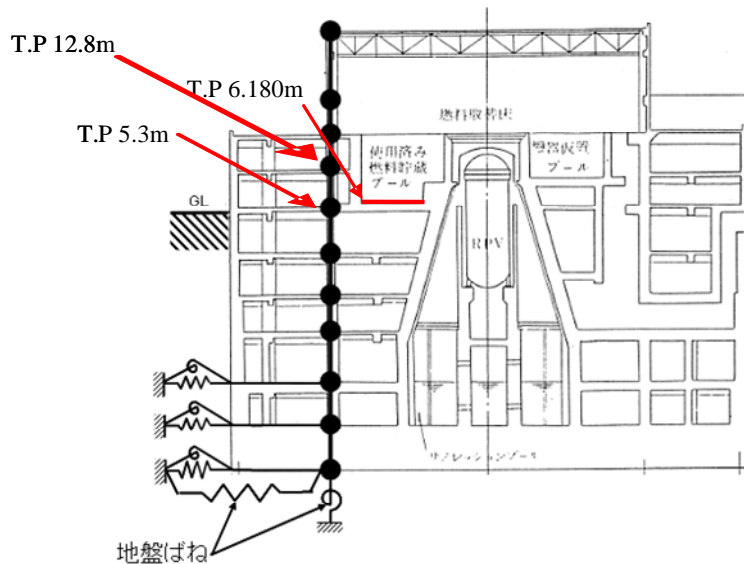


図 2 原子炉建屋解析モデルとラック設置レベルの関係

表 1 制御棒・破損燃料貯蔵ラック評価用震度

評価ケース	評価条件	水平震度	鉛直震度
耐震安全性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁無し ・ スペクトル拡幅有り ・ T.P 12.8m 	3.16	1.40
本検討	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁有り ・ スペクトル拡幅無し ・ T.P 6.18m（線形補間） 	1.70	1.11

中越沖地震の観測記録とシミュレーション建屋応答の床応答スペクトル (図 3) から読み取った、ラックの固有周期 (水平 : 0.127 秒, 鉛直 : 0.05 秒以下) における補正比率を表 2 に示す。

表 2 制御棒・破損燃料貯蔵ラックの固有周期における補正比率

	水平	鉛直
補正比率	1.83	0.71

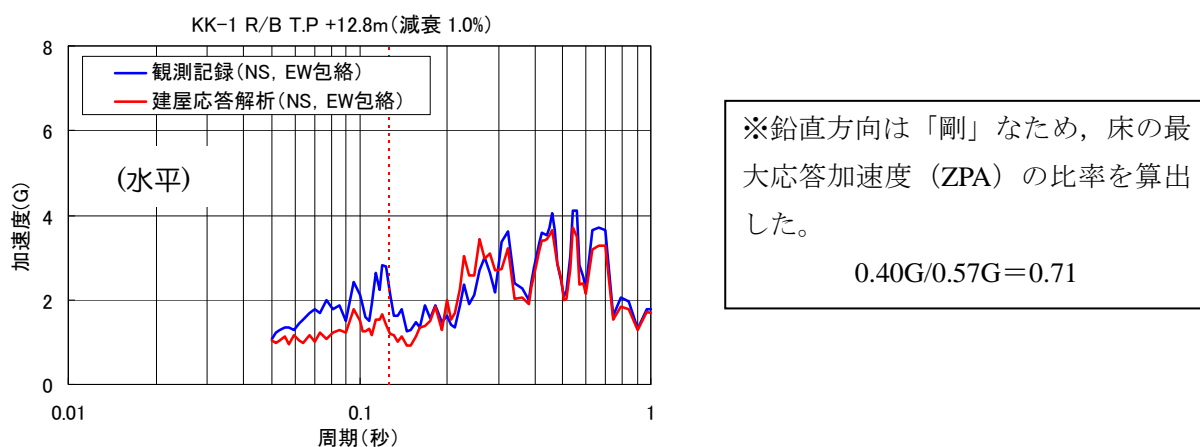


図 3 1号機原子炉建屋中間階床応答スペクトル (観測記録および建屋応答解析)
(減衰定数 : 水平 1.0%)

この補正比率を、表 1 の評価用震度に乗じて、耐震安全性評価と同様の計算方法でラック本体の構造強度評価をおこなった。

その結果、観測記録との相違の影響を考慮しても、耐震安全性に影響を与えるものではないことを確認した (表 3)。

表 3 制御棒・破損燃料貯蔵ラックの検討結果

評価ケース	評価条件	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
①耐震安全性評価 (報告値)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁無し ・ スペクトル拡幅有り ・ T.P 12.8m 	106	108
②本検討, 補正前	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁有り ・ スペクトル拡幅無し ・ T.P 6.18m (線形補間) 	58	108
③本検討, 補正後	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁有り ・ スペクトル拡幅無し ・ T.P 6.18m (線形補間) ・ 震度補正 	104	108

(2) 燃料交換機

燃料交換機の耐震安全性評価では時刻歴解析を用いていることから、本検討に際しては、原子炉建屋の補助壁を考慮した基準地震動 S_s による地震応答波を用いて時刻歴解析をおこなった。

燃料交換機に発生する応力は、水平方向と鉛直方向の発生値の **SRSS**（二乗和平方根）により算出していることから、水平方向の発生応力と鉛直方向の発生応力それぞれに補正比率を乗じて検討をおこなった。

中越沖地震の観測記録とシミュレーション建屋応答の床応答スペクトル（図 4）から読み取った、燃料交換機の卓越振動モードに対応する固有周期（0.0746 秒）における補正比率を表 4 に示す。

表 4 燃料交換機の固有周期における補正比率

	水平	鉛直
補正比率	1.43	0.56

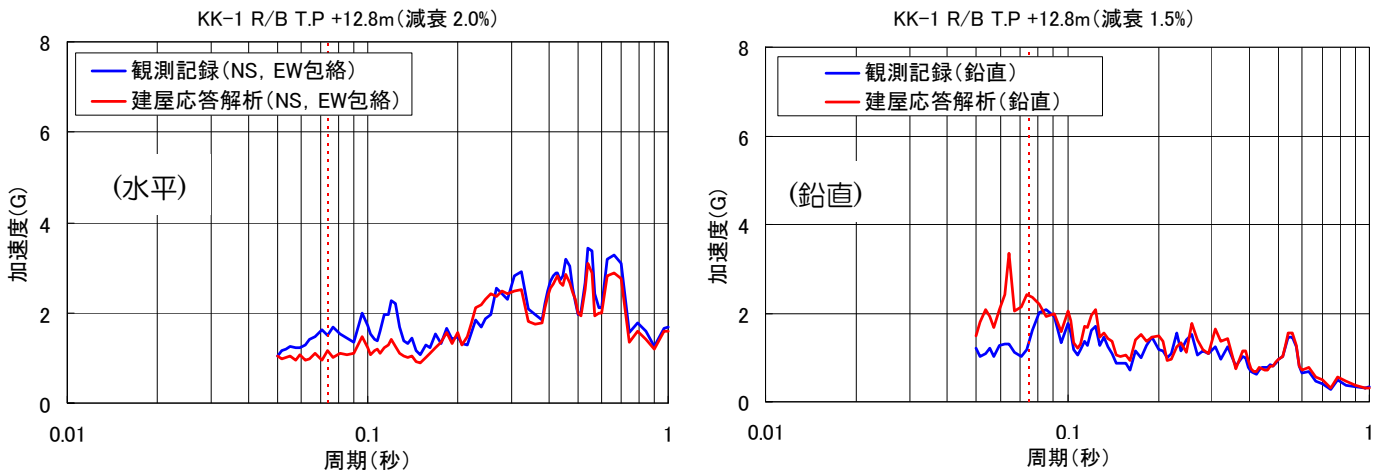


図 4 1号機原子炉建屋中間階床応答スペクトル（観測記録および建屋応答解析）
（減衰定数：水平 2.0%，鉛直 1.5%）

この補正比率を用いて、耐震安全性評価に対する影響を検討した。その結果、観測記録との相違の影響を考慮しても、燃料交換機の耐震安全性に影響を与えるものではないことを確認した（表5）。

表5 燃料交換機の検討結果

評価ケース	評価条件	水平	鉛直	水平+鉛直	評価基準値 (MPa)
		組合せ応力 (MPa)	組合せ応力 (MPa)	組合せ応力 (MPa)	
①耐震安全性評価 (報告値)	・補助壁無し	189	201	276 (275.6)	276
②本検討, 補正前	・補助壁有り	176	159	237	276
③本検討, 補正後	・補助壁有り	252	89	267	276

(3) 配管系

1) 不活性ガス系配管

今回の耐震安全性評価では、当該配管が敷設されている標高における床応答スペクトルを全て包絡したものをを用いて評価をおこなっている。JEAG4601-1987によれば、配管系の入力とするスペクトルは、当該系の重心位置に近いものを用いることが認められていることから、本検討においては、配管の重心位置に近い標高の床応答スペクトルを用いて、補正スペクトルを作成した（図5）。なお、制御棒・破損燃料貯蔵ラックと同様に、床応答スペクトルは、±10%拡幅をおこなわないものを用いた。

この補正スペクトルを用いて、スペクトルモーダル解析により発生値を算出した結果、観測記録との相違の影響を考慮しても、耐震安全性に影響を与えるものではないことを確認した（表6）。

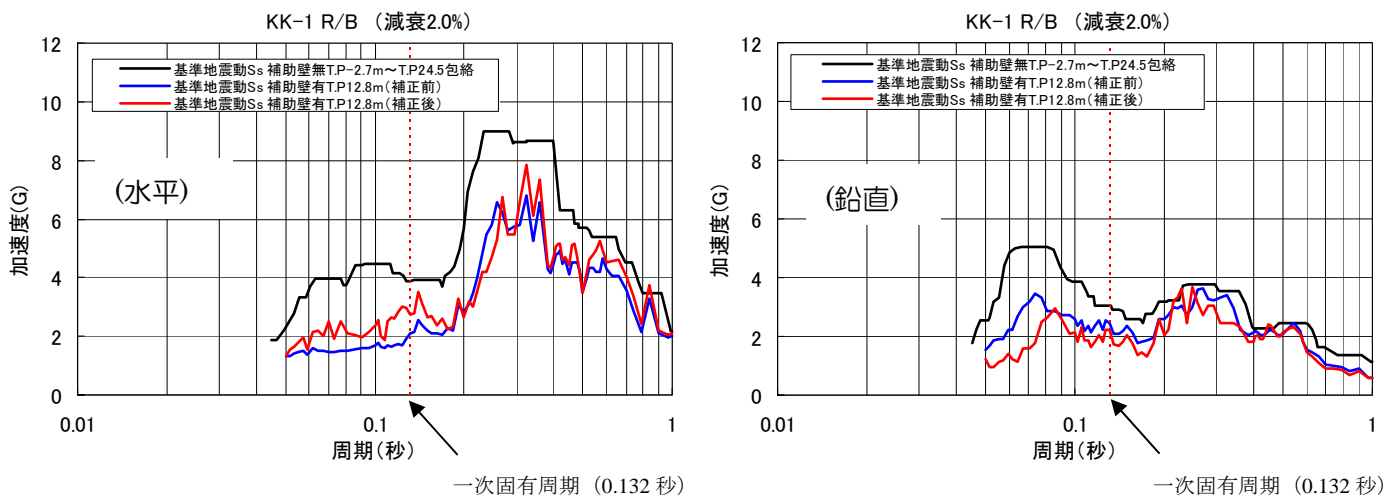


図5 基準地震動 Ss による配管評価用床応答スペクトル（不活性ガス系の例）
（減衰定数：水平 2.0%，鉛直 2.0%）

表 6 不活性ガス系配管の検討結果

評価ケース	評価条件	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
①耐震安全性評価 (報告値)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁無し ・ スペクトル拡幅有り ・ スペクトル包絡 	188	335
②本検討, 補正前	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁有り ・ スペクトル拡幅無し ・ スペクトル重心位置 	104	335
③本検討, 補正後	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補助壁有り ・ スペクトル拡幅無し ・ スペクトル重心位置 ・ 補正スペクトル 	129	335

2) 主蒸気系配管

検討にあたっては不活性ガス系配管と同様に、補助壁を考慮した基準地震動 S_s による地震応答（床応答スペクトルは±10%拡幅をおこなわないもの）を用いて、補正スペクトルを作成した。

補正スペクトルを用いて、スペクトルモーダル解析により発生値を算出した結果、観測記録との相違の影響を考慮しても、耐震安全性に影響を与えるものではないことを確認した（表7）。

表7 主蒸気系配管の検討結果

評価ケース	評価条件	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
①耐震安全性評価 (報告値)	・補助壁無し ・スペクトル拡幅有り	277	375
②本検討, 補正前	・補助壁有り ・スペクトル拡幅無し	214	375
③本検討, 補正後	・補助壁有り ・スペクトル拡幅無し ・補正スペクトル	259	375