

柏崎刈羽原子力発電所6/7号機

建屋のロッキング振動に関する
機器・配管系の耐震安全性評価に対する考察

〔平成21年6月9日（改）〕

平成21年6月17日

東京電力株式会社



東京電力

検討の背景

- 新潟県中越沖地震の観測記録のうち，6号機の上下動成分が他号機と比較して大きかった要因について，ロッキング振動の影響との仮定の下，分析および考察を行った。
(第34回構造WGにて説明)



- ✓ 5～7号機において観測された上下動記録から，推定されるロッキング振動による上下動を除去したところ，プラント間で上下応答の差異は小さくなった。
- ✓ 5～7号機の上下動の分析の結果，0.3秒の固有周期を持つロッキング振動により，上下動が増幅された可能性（6号機におけるロッキング振動の影響が顕著）。



機器・配管系への耐震安全性評価の妥当性について検証

基準地震動Ssとロッキング振動の影響検討

基準地震動Ss

F-B断層

- Ss-1 → 新潟県中越沖地震の観測記録を考慮し、スペクトルを作成
- Ss-2 → 新潟県中越沖地震の観測記録を考慮し、断層モデルにより地震動を策定

【参考】
基準地震動Ssの策定方法

耐震安全性評価は、ロッキング振動の影響を考慮したものとしなせる

長岡平野西縁断層帯

- Ss-3
 - Ss-4
 - Ss-5
- 新潟県中越沖地震の観測記録は、考慮されていない

耐震安全性評価に対するロッキング振動の影響を検証する必要性

【検討2】地震計の位置による影響の検討
【検討3】ロッキング振動の影響の定量的把握

【検討1】スペクトルの比較

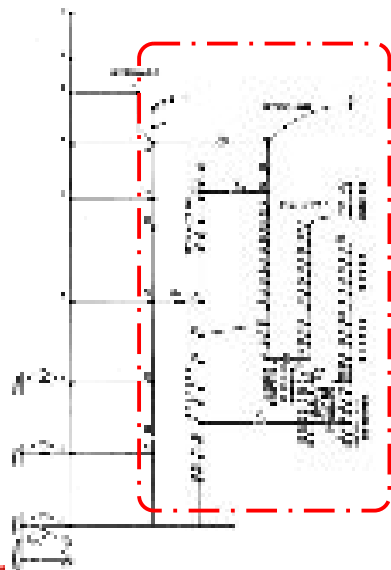
基準地震動Ssとロッキング振動の影響検討

【検討1】スペクトルの比較

- ✓ Ss-3～5について、水平動より算出したロッキング振動による上下動を加味した場合の耐震安全性評価への影響について、スペクトルの比較により検討する。

【検討2】地震計の位置による影響の検討

- ✓ スペクトルの比較により、ロッキング振動による機器・配管系評価の妥当性への影響は小さいものと判断できるが、念のため、その程度を検証。
- ✓ ただし、建屋 - 機器連成モデルで評価する大型機器については耐震安全性評価において既にロッキング振動が考慮されていることから検証は行わない（下図参照）。



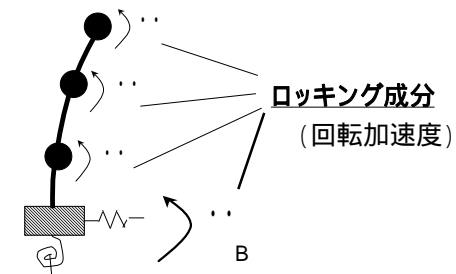
■ 大型機器の耐震評価の流れ

- 左図を例とした建屋と連成させた地震応答解析モデルで地震荷重を算定する。
- それら地震荷重を用いて個別の部位の構造強度評価を行う。

< 荷重を用いて評価を行う設備の例 >

- ◆ 原子炉圧力容器
- ◆ 炉内構造物
- ◆ 炉心支持構造物 など

水平地震動によって励起される各質点及び原子炉基礎版の回転自由度が解析に含まれるため、ロッキング振動は解析上、考慮されている。



大型機器地震応答解析モデル例

基準地震動Ssとロッキング振動の影響検討

【検討2】地震計の位置による影響の検討（つづき）

- ✓ Ss-1及びSs-2の策定には，原子炉建屋に設置された地震計により観測された新潟県中越沖地震の観測記録を用いているが（ロッキング振動の影響を加味しているが），地震計よりも建屋外周側に位置する機器・配管系については，より大きなロッキング振動が加わるものと仮定して，その影響について検証する。

【検討3】ロッキング振動の影響の定量的把握

- ✓ 一般的検証の一例として，代表設備を選定し，ロッキング振動の地震応答解析への寄与について詳細解析（スペクトルモーダル解析，時刻歴解析）により定量化して検証，考察する。

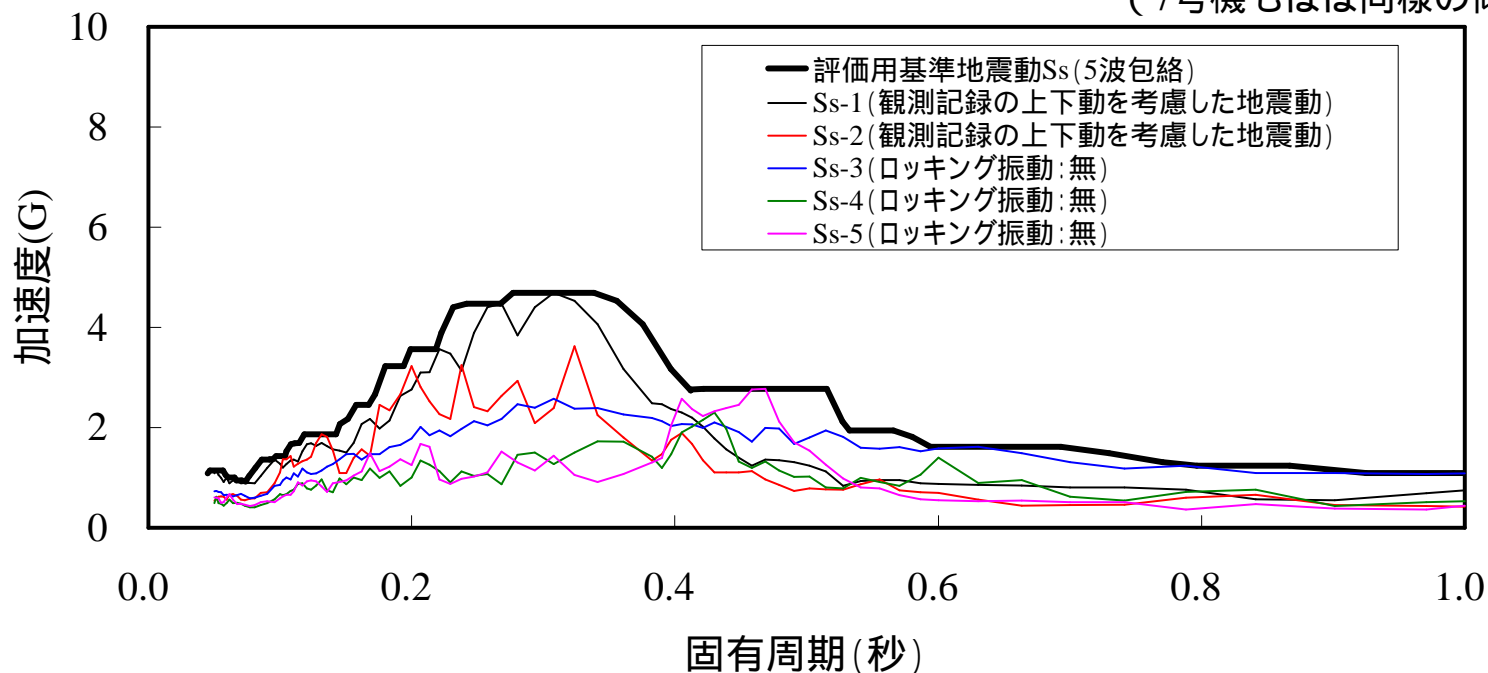
【検討1】スペクトルの比較

- 評価用基準地震動Ssの床応答スペクトルと基準地震動Ss-1～5の床応答スペクトルの特徴

6号機 原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトル

(上下方向:減衰2.0%)

(7号機もほぼ同様の傾向)



- ✓ 機器・配管系は、評価用基準地震動Ss (Ss-1～5の10%振幅を包絡) により評価
- ✓ 機器・配管系の固有周期帯 (~0.4秒) ではSs-1が、長周期側ではSs-3が支配的

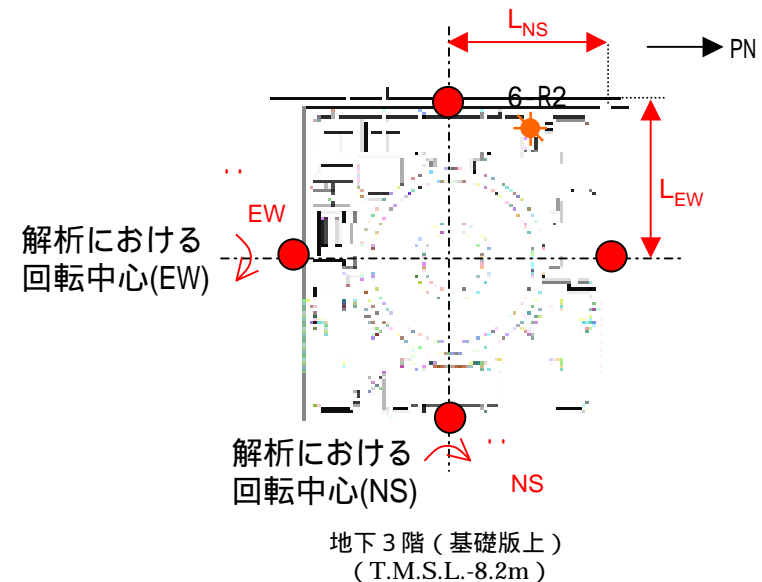
減衰2.0% : 配管系の解析において平均的に用いられる減衰定数

【検討1】スペクトルの比較

■基準地震動Ss-3～5におけるロッキング振動の考慮

- ✓ 基準地震動Ss-3～5による，原子炉建屋のNS，EW方向の地震応答解析結果から得られる回転加速度から算定したロッキング振動による上下動成分を，原子炉建屋の上下方向の地震応答解析結果に加算し，建屋外壁部の鉛直加速度を算定した。

- ケース1 NS+ 端部上下(回転考慮) = 上下応答 + L_{NS}
- ケース2 NS- 端部上下(回転考慮) = 上下応答 - L_{NS}
- ケース3 EW+ 端部上下(回転考慮) = 上下応答 + L_{EW}
- ケース4 EW- 端部上下(回転考慮) = 上下応答 - L_{EW}



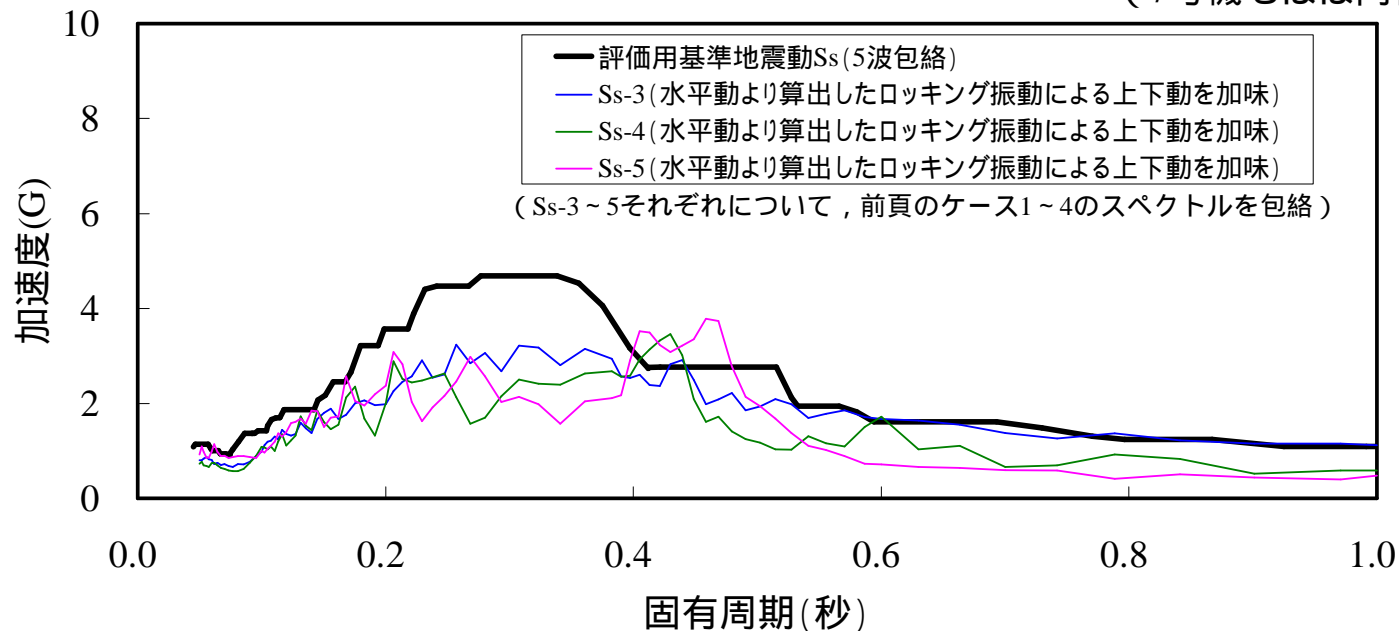
(Ss-3の例)

【検討1】スペクトルの比較

■基準地震動Ss-3～5におけるロッキング振動の考慮

6号機 原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトル
(上下方向:減衰2.0%)

(7号機もほぼ同様の傾向)



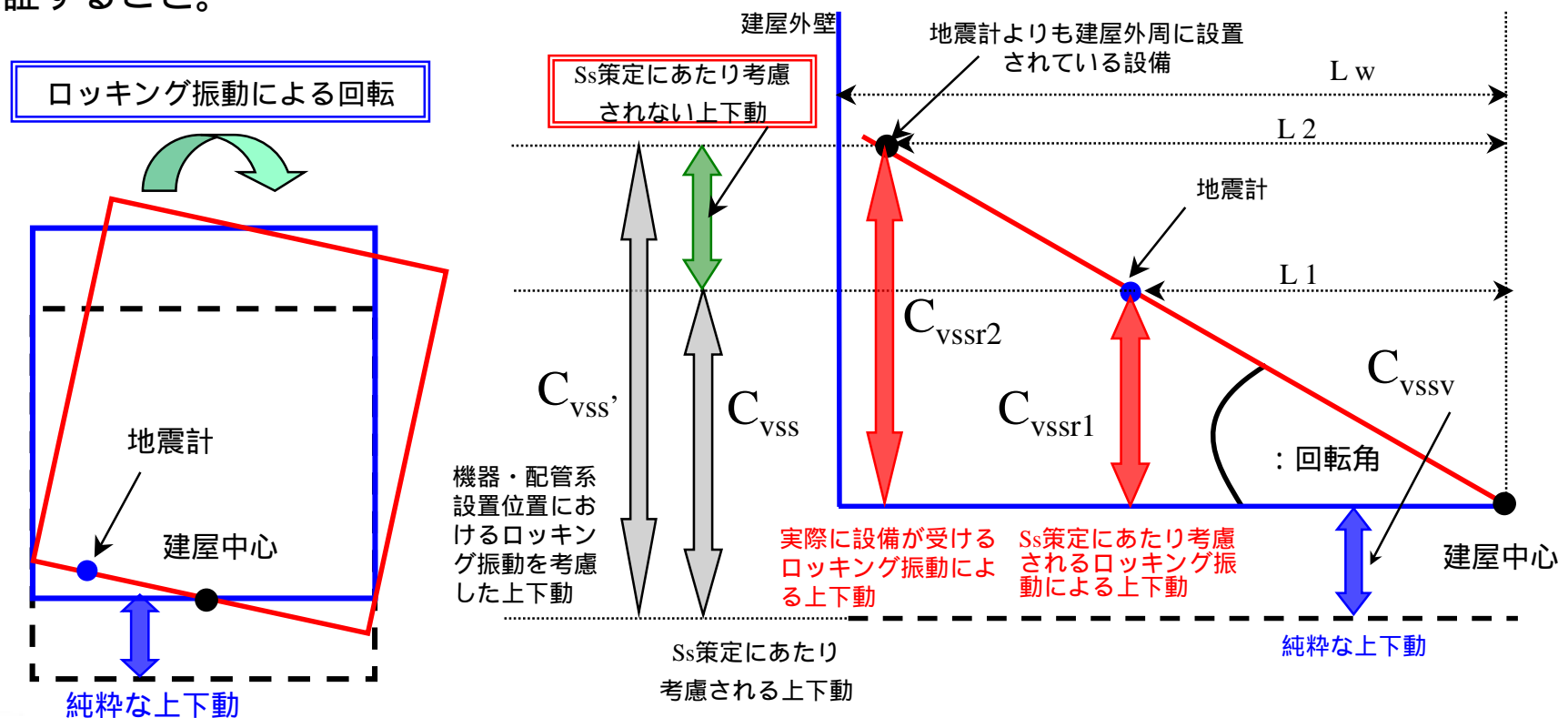
- ✓ 機器・配管系の固有周期帯（～0.4秒）では評価用基準地震動Ssがロッキング振動を考慮した基準地震動Ss-3～5を包絡
- ✓ Ss-3～5にロッキング振動を考慮しても、[機器・配管系の耐震安全性評価に対する影響は無い。](#)

【検討2】地震計の位置による影響の検討

- 基準地震動 S_s ($S_s-1, 2$) は、ロッキング振動の影響が含まれる新潟県中越沖地震の観測記録を考慮して策定したが、地震計よりも建屋外周に設置されている設備に対しては、ロッキング振動の影響が小さく見積もられていることから、地震計よりも建屋外周に設置される設備への入力地震動はより大きくなることが考えられる。

■ 検討の目的

地震計よりも建屋外周に設置されている設備への、ロッキング振動を考慮した場合の影響を検証すること。

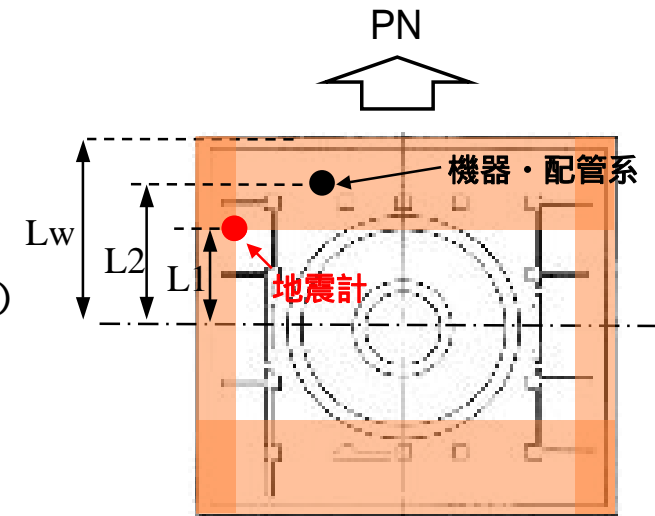


【検討2】地震計の位置による影響の検討

■ 検討方法

(1) ロッキング振動による上下動の増分を考慮した床応答加速度

- Ss-1による上下動を純粋な上下動成分とロッキング振動による上下動成分に分解。
- 機器・配管系設置位置と地震計の設置位置の関係 (=L2/L1) をロッキング振動による上下動成分に乗じて、地震計より外周側に設置される機器・配管系におけるロッキング振動の増分(上下動の床応答加速度)を算定(下式)。



機器・配管系設置位置におけるロッキング振動を考慮した上下動の床応答加速度
(Ss-1) C_{vssv}

$$= \underbrace{Ss-1による純粋な上下動の床応答加速度}_{C_{vss}} + \left(\underbrace{Ss-1による純粋な上下動の床応答加速度}_{C_{vssv}} - \underbrace{Ss-1による純粋な上下動の床応答加速度}_{C_{vssv}} \right) \times \frac{L2}{L1}$$

ロッキング振動による上下動成分 C_{vssr1}

機器・配管系の設置位置による増分を考慮したロッキング振動による上下動成分 C_{vssr2}

Lw : 建屋中心軸から建屋最外周までの距離, L1 : 建屋中心軸から地震計までの距離

L2 : 建屋中心軸から個別の機器・配管系設置位置までの距離

- 耐震安全性評価に一定の余裕がある場合には、簡便のため、L2/L1に替えてLw/L1として評価を実施

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 機器・配管系の評価 (簡易評価)

- 原子炉建屋の床面に設置されている設備のうち，地震計の建屋外周側に設置されている設備を抽出。
- 前項の C_{vss}' を用いて機器・配管系の地震応答解析を行うことで，発生応力等が算出できるが，ここでは，簡便のため，上下動の増加割合と耐震安全性評価の裕度を比較することにより，検証を行う。

$$\text{耐震安全性評価の発生値に対する} \\ \text{評価基準値の倍率 ()} = \frac{\text{耐震安全性評価における評価基準値}}{\text{耐震安全性評価における発生値}} \times \frac{C_{vss}'}{C_{vss}} \text{ (上下動増加率 ())}$$

- 上記により検証が困難な場合には， C_{vss}' を用いて地震応答解析を実施する。

【検討2】地震計の位置による影響の検討

■ 検討結果

(1) 上下動増加率

(6号機)

T.M.S.L. [m]	床応答加速度 [G]		
	Cvss	Cvss'	
49.7	0.98	1.27	1.30
38.2	0.95	1.24	<u>1.31</u>
31.7	0.92	1.20	1.30
23.5	0.90	1.17	1.30
18.1	0.88	1.14	1.30
12.3	0.85	1.11	<u>1.31</u>
4.8	0.83	1.09	<u>1.31</u>
-1.7	0.81	1.06	<u>1.31</u>
-8.2	0.80	1.04	1.30

●本表のCvss'はLw/L1を用いて算出

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(1) 上下動増加率

(7号機)

T.M.S.L. [m]	床応答加速度 [G]		
	Cvss	Cvss'	
49.7	0.96	1.25	1.30
38.2	0.93	1.21	1.30
31.7	0.90	1.18	1.31
23.5	0.88	1.15	1.31
18.1	0.86	1.12	1.30
12.3	0.85	1.11	1.31
4.8	0.83	1.08	1.30
-1.7	0.81	1.05	1.30
-8.2	0.79	1.04	<u>1.32</u>

●本表のCvss'はLw/L1を用いて算出

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果(6号機)(1/4)

評価対象設備		耐震安全性評価					本検討	
		評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)		検討 結果	
計測制御系統設備	駆制御系 棒	水圧制御ユニット	フレーム	組合せ応力	40	276	6.90	1.31
	ほう酸水 注入系	ほう酸水注入系 ポンプ	ポンプ 取付ボルト	せん断応力	48	146	3.04	
		ほう酸水注入系貯蔵 タンク	基礎ボルト	引張応力	72	207	2.88	
	放射線 計測装置	燃料取替エリア 排気放射線モニタ	検出器 取付ボルト	引張応力	8	207	25.88	
	盤	原子炉系(系) 計装ラック	取付ボルト	引張応力	7	207	29.57	

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (6号機) (2 / 4)

評価対象設備		耐震安全性評価					本検討	
		評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)		検討結果	
原子炉冷却系統設備	残留熱除去系	残留熱除去系熱交換器	胴板	一次応力	161	408	2.53	1.31
		残留熱除去系ポンプ	原動機台取付ボルト	引張応力	38	444	11.68	
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ	基礎ボルト	引張応力	78	202	2.59	
		原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用蒸気タービン	基礎ボルト	引張応力	61	202	3.31	
	高圧炉心注水系	高圧炉心注水系ポンプ	原動機台取付ボルト	引張応力	36	455	12.64	

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果(6号機)(3/4)

評価対象設備			耐震安全性評価				本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)		検討 結果
格納施設 原子炉	可燃性ガス濃度 制御系	可燃性ガス濃度制御系 可搬式再結合装置	取付ボルト	せん断応力	94	350	3.72	1.31
		可燃性ガス濃度制御系 可搬式再結合装置ブロー	ブレース	圧縮応力	14	209	14.93	
放射線管理設備	非常用ガス処理系	非常用ガス処理系 排風機	基礎ボルト	引張応力	36	202	5.61	
		非常用ガス処理系 乾燥装置	基礎ボルト	引張応力	52	202	3.88	
		非常用ガス処理系 フィルタ装置	取付ボルト	せん断応力	146	342	2.34	

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (6号機) (4 / 4)

評価対象設備			耐震安全性評価				本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)		検討 結果
附帯設備	非常用 発電設備 ディーゼル	ディーゼル機関	基礎ボルト	せん断応力	62	225	3.63	1.31
		空気だめ	胴板	一次一般膜応力	91	262	2.85	
		燃料ディタンク	スカート	座屈	0.24	1.00	4.17	
		発電機	機関側軸受台下部 ベース取付ボルト	引張応力	101	205	2.03	

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果(7号機)(1/4)

評価対象設備			耐震安全性評価				本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)		検討 結果
計測制御系統設備	駆制御系	水圧制御ユニット	フレーム	組合せ応力	107	253	2.36	1.32
	ほう酸水注入系	ほう酸水注入系ポンプ	ポンプ取付ボルト	せん断応力	47	146	3.11	
		ほう酸水注入系貯蔵タンク	基礎ボルト	せん断応力	52	159	3.06	
	放射線管理用計測装置	燃料取替エリア排気放射線モニタ	検出器取付ボルト	せん断応力	4	159	39.75	
	盤	原子炉系(系)計装ラック	取付ボルト	せん断応力	4	159	39.75	

詳細評価による値(第26回構造WGにて説明)。

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果(7号機)(2/4)

評価対象設備			耐震安全性評価				本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)		検討 結果
原子炉冷却系統設備	残留熱除去系	残留熱除去系熱交換器	胴板	一次応力	288	408	1.42	1.32
		残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	14	350	25.00	
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ	基礎ボルト	引張応力	87	455	5.23	
		原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用蒸気タービン	タービン取付ボルト	引張応力	57	444	7.79	
	高圧炉心注水系	高圧炉心注水系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	20	350	17.50	

残留熱除去系熱交換器の発生値288MPaは応答倍率法による値であり、実際の の値は1.42よりも大きくなる。
また、 の算出においては建屋最外周の距離を用いていることから(P9, 12参照)、実際の は1.32よりも小さくなる。

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (7号機) (3 / 4)

評価対象設備			耐震安全性評価				本検討		
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)		検討 結果	
放射線 管理設備	非常用 ガス処理系	非常用ガス処理系 排風機	排風機取付 ボルト	引張応力	67	177	2.65	1.32	
		非常用ガス処理系 乾燥装置	取付ボルト	せん断応力	108	341	3.16		
		非常用ガス処理系 フィルタ装置	取付ボルト	せん断応力	141	341	2.42		

詳細評価による値(第26回構造WGにて説明)。

【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (7号機) (4 / 4)

評価対象設備		耐震安全性評価					本検討		
		評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)		検討結果		
附帯設備	非常用ディーゼル発電設備	ディーゼル機関	基礎ボルト	せん断応力	58	225	1.32		
		空気だめ	胴板	一次応力	92	262		2.85	
		燃料ディタンク	スカート	座屈	0.23	1.0		4.35	
		発電機	機関側軸受台下部ベース取付ボルト	引張応力	86	205		2.38	

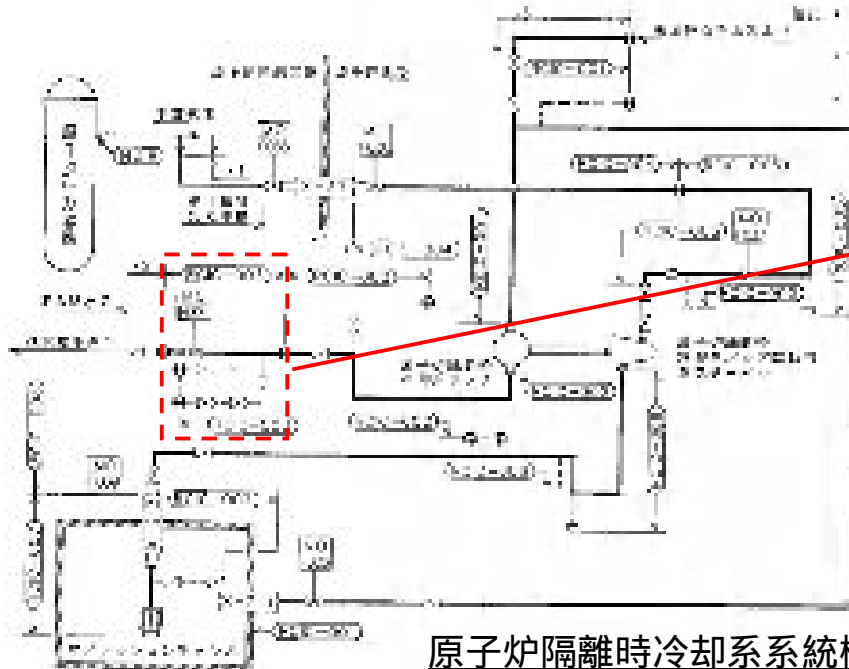
【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

■ 検証対象設備の選定

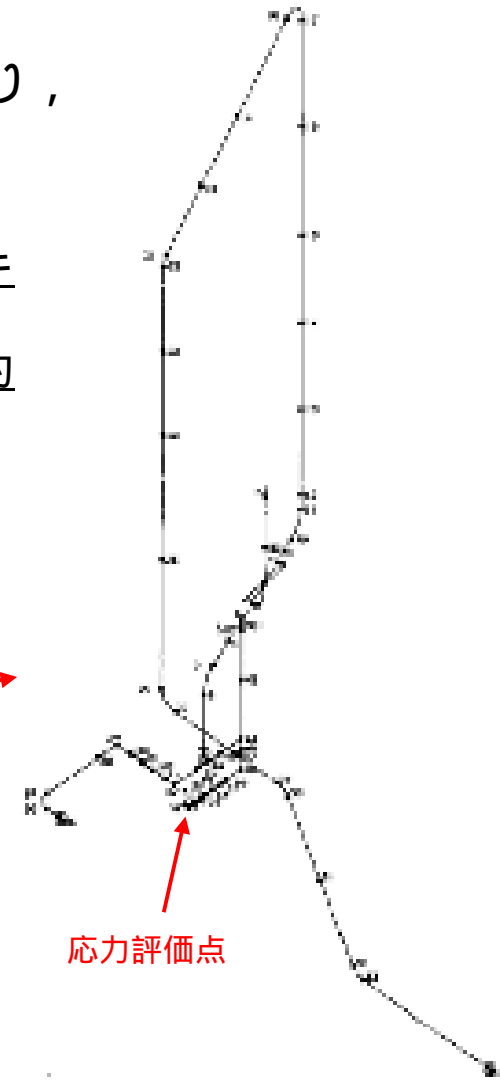
ロッキング振動に対する定量的な検証を実施するにあたり、原子炉隔離時冷却系配管を代表として選定

【選定理由】

- ✓ 原子炉建屋内で外壁近傍にまで広がるモデルであり、ロッキング振動による影響を受けやすい。
- ✓ 固有周期が大きく、また、上下動に対する刺激係数が比較的大きいため、ロッキング振動による影響を受けやすい。



原子炉隔離時冷却系系統概要



応力評価点

検証対象配管鳥瞰図

【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

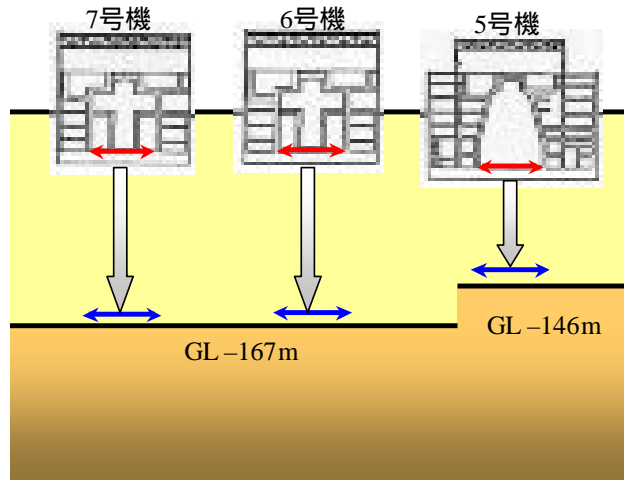
■ 原子炉隔離時冷却系配管の検証解析ケース

検証ケース	入力条件	機器・配管系の評価に用いる入力波の特徴	
報告書記載値 (スペクトルモーダル解析)	評価用 基準地震動 S_s	中越沖地震観測記録の上下動を考慮した S_s-1 の他, S_s5 波による建屋応答解析結果より得られる床応答スペクトルを包絡	ロッキング 振動考慮
スペクトルモーダル解析	S_s-1 (スペクトル)	中越沖地震観測記録の上下動を考慮し策定した S_s-1 による建屋応答解析結果より得られる床応答スペクトル	ロッキング 振動考慮
スペクトルモーダル解析	S_s-1' (スペクトル) (次頁参照)	S_s-1 からロッキング振動による上下動成分を除去した S_s-1' による建屋応答解析結果より得られる床応答スペクトル	ロッキング 振動除去
時刻歴解析	S_s-1 (時刻歴波)	中越沖地震観測記録の上下動を考慮し策定した S_s-1 による建屋応答解析結果より得られる時刻歴波形	ロッキング 振動考慮
時刻歴解析	S_s-1' (時刻歴波) (次頁参照)	S_s-1 からロッキング振動による上下動成分を除去した S_s-1' による建屋応答解析結果より得られる時刻歴波形	ロッキング 振動除去

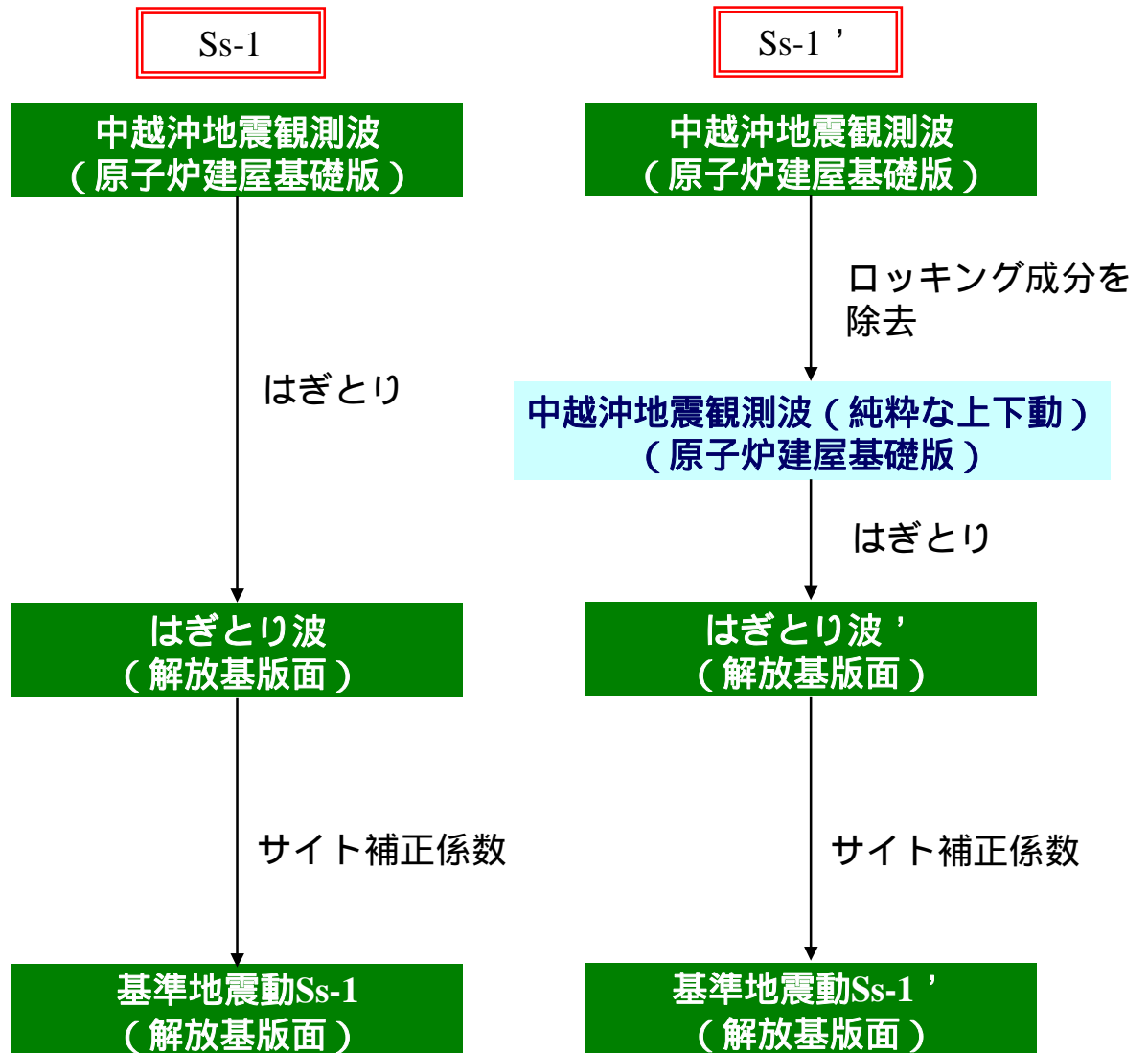
スペクトルモーダル解析においてはスペクトルに $\pm 10\%$ の拡幅を考慮

【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

■ Ss-1' 波の概要



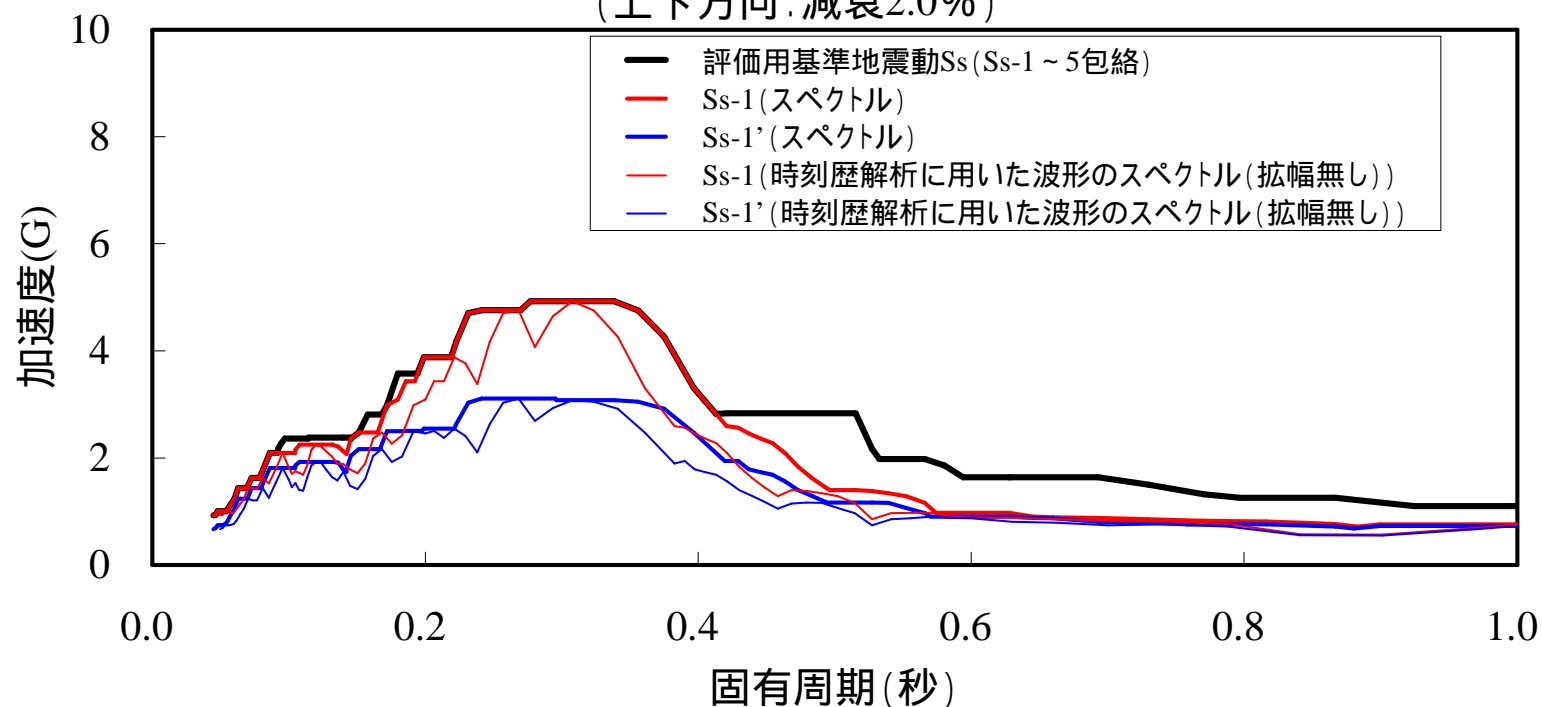
中越沖地震の各号機原子炉建屋基礎版上の観測記録から推定した解放基盤波と耐専スペクトルの比を包絡して設定



【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

■ 入力条件の比較

原子炉隔離時冷却系配管の検証解析用床応答スペクトル
(上下方向:減衰2.0%)



【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

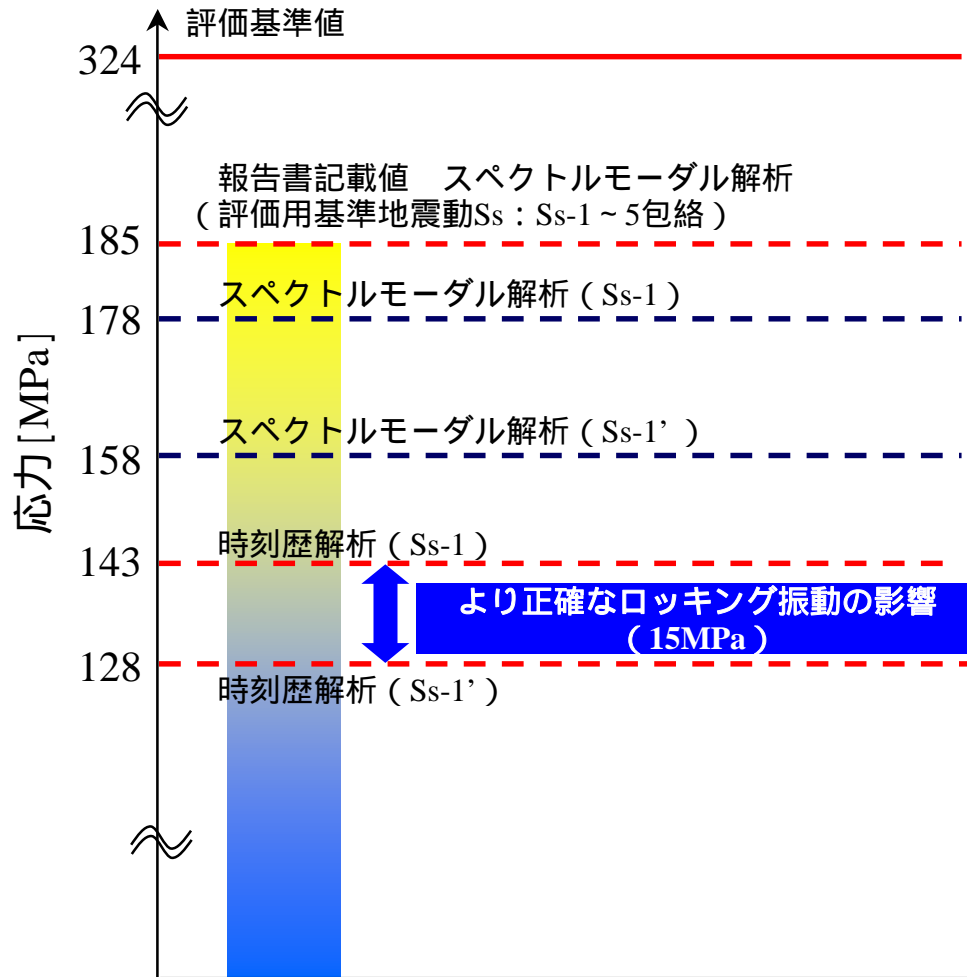
■ 検証解析結果

検証ケース	入力条件	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]	備考
報告書記載値 (スペクトルモーダル解析)	評価用 基準地震動Ss	配管 本体	一次 応力	185	324	-
スペクトルモーダル解析	Ss-1 (スペクトル)			178		1
スペクトルモーダル解析	Ss-1' (スペクトル)			158		
時刻歴解析	Ss-1 (時刻歴波)			143		2
時刻歴解析	Ss-1' (時刻歴波)			128		

- 1 スペクトルモーダル解析によるロッキング振動の影響把握
- 2 時刻歴解析による、より正確なロッキング振動の影響把握

【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

■ 考 察



- ✓ 自重，内圧等の地震以外の応力，水平地震動による応力を含む全体の発生応力に対して，ロッキング振動（上下地震動）による影響は比較的小さい。
- ✓ 時刻歴解析（ ， ）を用いて，ロッキング振動の有無による影響を検証した結果，報告書記載値（ ）に対して影響は軽微であることを確認。
- ✓ ロッキング振動を考慮した時刻歴解析結果（ ）は，ロッキング振動を考慮しないスペクトルモーダル解析結果（ ）より小さな値となり，スペクトルモーダル解析の有する保守性に包絡される結果。

まとめ

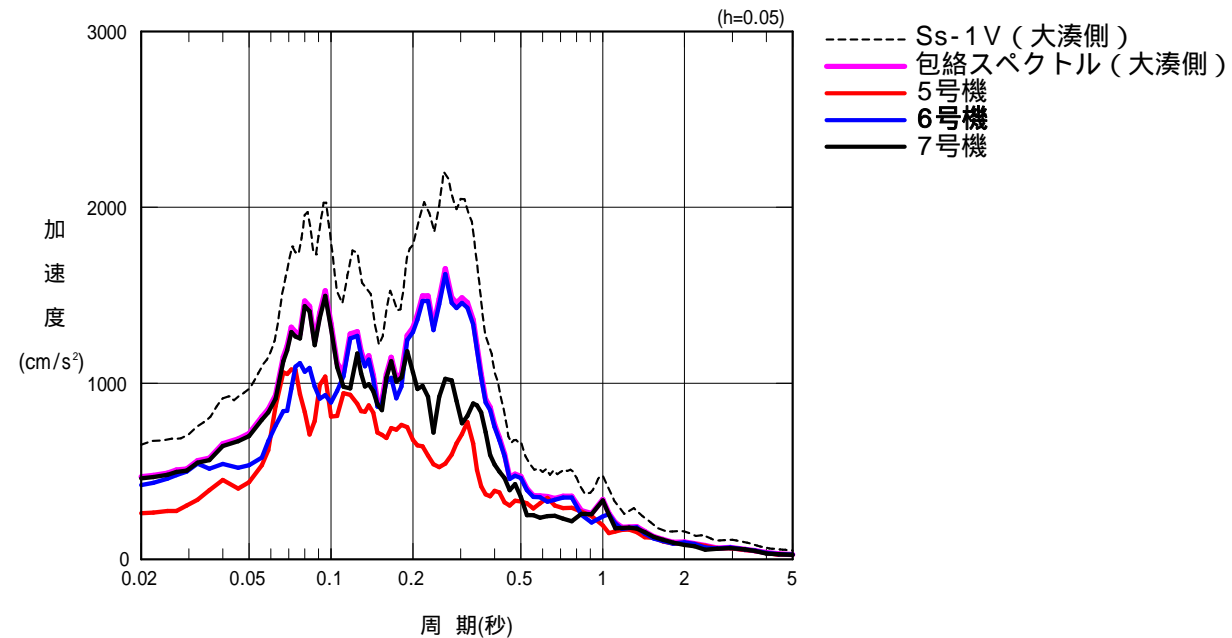
- ✓ 機器・配管系の固有周期帯（～0.4秒）では，評価用基準地震動 S_s による床応答スペクトルがロッキング振動を考慮した基準地震動 S_s -3～5による床応答スペクトルを包絡していることから，長岡平野西縁断層帯に対してロッキング振動を考慮しても，機器・配管系の耐震安全性評価への影響は無い。
- ✓ 基準地震動 S_s が中越沖地震の観測記録に基づき策定されていることに鑑み，地震計よりも外側に配置される設備への影響を検証した結果，影響は軽微であることを確認した。
- ✓ ロッキング振動の定量的把握を目的として，原子炉隔離時冷却系配管を用いた検証解析を実施した結果，ロッキング振動の有無による影響は，これまで実施した耐震安全性評価の結果に対して軽微であるとともに，スペクトルモーダル解析の有する保守性にも包絡される程度であることを確認した。
- ✓ 機器・配管系の耐震評価にあたっては，ロッキング挙動の正確な把握やこれに対する評価手法等，なお一層の知見の収集や研究による中長期的な検討が必要であるものと考えられるが，現時点においては，ロッキング振動が，機器・配管系の耐震安全性評価の妥当性を損なう影響を与えることはないものと判断できる。

【参考】基準地震動Ssの策定方法

■ 基準地震動Ss-1

- 新潟県中越沖地震の観測記録を元に評価された解放基盤波を考慮
- 上下動の最も大きかった6号機のスペクトルも包絡したスペクトルを元に策定

➡ 観測記録にはロッキング振動の影響が含まれているため，Ss-1にもロッキング振動の影響が含まれている

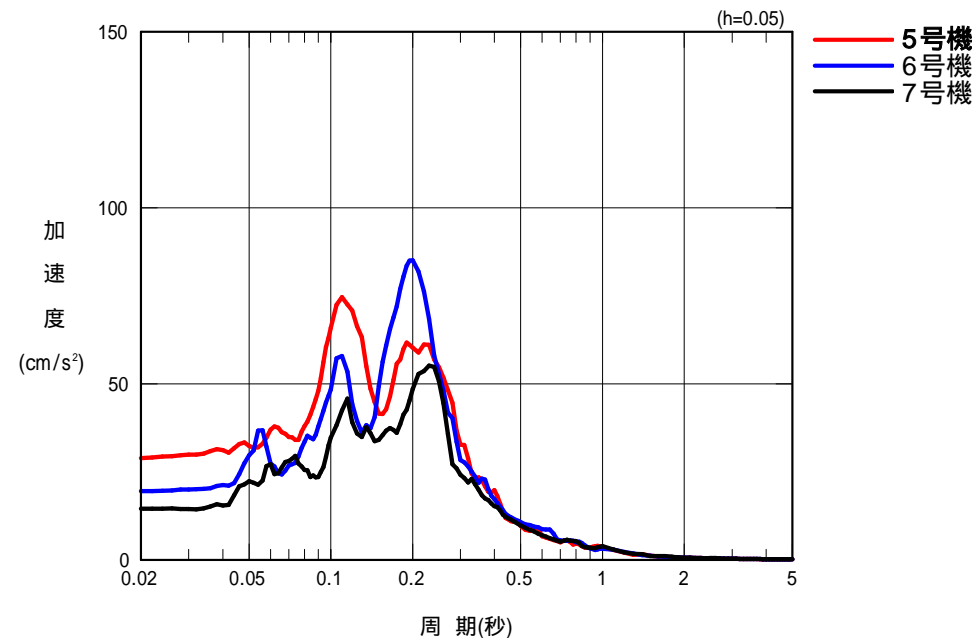


中越沖地震の解放基盤波の包絡スペクトル(大湊側:上下動)

【参考】基準地震動Ssの策定方法

■ 基準地震動Ss-2

- 新潟県中越沖地震の余震を要素地震として経験的グリーン関数法にて評価を実施
 - 機器・配管系への影響が最も大きいと考えられる5号機の基礎版上の観測記録を基に解放基盤波を評価し、経験的グリーン関数として採用
- ➡ 観測記録にはロッキング振動の影響が含まれているため、Ss-2にもロッキング振動の影響が含まれている



要素地震の基礎版記録の応答スペクトル(大湊側:上下動)

参考解析：配管系における地震計の位置の影響

検証ケース	入力条件	評価部位	応力分類	地震 [MPa]	地震 以外 [MPa]	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
報告書記載値 (スペクトルモーダル解析)	評価用 基準地震動Ss	配管 本体	一次 応力	119	66	185	324
スペクトルモーダル解析	Ss-1 (スペクトル)			112	66	178	
スペクトルモーダル解析	Ss-1' (スペクトル)			92	66	158	

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)
原子炉隔離時冷却系 配管本体	配管本体	一次 応力	192	324

- ✓ スペクトルモーダル解析により推定したロッキング振動による一次応力成分：20 MPa (112 - 92)
- ✓ 6号機の上下動増加率 (建屋最外周)：1.31
- ✓ 配管系が建屋最外周に存在したと仮定した場合のロッキング振動による一次応力成分：27 MPa (20 × 1.31 = 26.2)
- ✓ 耐震安全性報告書記載値にロッキング振動による一次応力増加分を加算：192 MPa (185 + 27 - 20)