

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-14 改 02
提出年月日	2023 年 4 月 7 日

弾性設計用地震動 S d - 1 及び基準地震動 S 1 による
機器・配管系の耐震評価結果の比較

2023 年 4 月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要.....	1
2. 島根 2 号機における弾性設計用地震動の設定方法及び検討の背景.....	1
3. 検討方針.....	2
4. 代表設備の選定.....	2
5. 検討結果.....	3
6. まとめ.....	5

添付-1 機器・配管系の耐震評価に係る新旧設計体系の主な相違点

1. 概要

本資料は、島根2号機における弾性設計用地震動 S_{d-1} （以下「 S_{d-1} 」という。）について、説明性向上の観点から、建設時工認と今回工認における新旧設計体系の違いを踏まえた基準地震動 S_1^* （以下「 S_1 」という。）と S_{d-1} の評価結果の比較照査を行い、適用性の検討を行うものである。本検討の背景を2. に示す。また、機器・配管系の耐震評価に係る新旧設計体系の主な相違点について、添付-1に示す。

なお、今回工認においては、弾性設計用地震動 S_d （以下「 S_d 」という。）の評価として S_d 全波（ S_{d-D} 、 F_1 、 F_2 、 N_1 、 N_2 及び S_{d-1} ）の応答を包絡し、地盤物性の不確かさを考慮した設計用条件を用いており、 S_{d-1} 単独の評価を行っていないことから、 S_d 全波による耐震評価結果を用いて建設時工認の S_1 による耐震評価結果との比較による要因分析を実施する。

本資料の関連資料は以下の通り。

- ・VI-2-1-2「基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の策定概要」
- ・NS2-補-023-16「弾性設計用地震動 S_d の設定について」

注記*：「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定、平成13年3月24日一部改訂）」における基準地震動 S_1 を示す。

2. 島根2号機における弾性設計用地震動の設定方法及び検討の背景

島根2号機の弾性設計用地震動 S_d の設定においては、弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_s との応答スペクトルの比率に関する知見及び弾性設計用地震動 S_d の役割を踏まえ、基準地震動 S_s に係数0.5を乗じて設定する。

さらに、平成18年の耐震設計審査指針の改訂に伴いAクラスがSクラスに格上げされたことに鑑み、旧指針において、 S_1 がAクラス施設の耐震性を担保（ S_1 と組み合わせる荷重の考慮を含む）してきたことを踏まえ、 S_1 の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した地震動も S_{d-1} として追加設定する。

（VI-2-1-2「基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の策定概要」参照）

模擬地震波の応答スペクトル（水平方向）の比較を図1に示す。 S_{d-1} の応答スペクトルは S_1 の応答スペクトルをおおむね下回らない値となっている。なお、模擬波作成時の適合精度により S_1 が S_{d-1} を上回る周期ポイントがあり、 S_1 が S_{d-1} を上回る周期ポイントの混在する周期帯に固有周期を有する主要な施設（原子炉建物、炉内構造物等）があるが、それぞれの周期毎の応答スペクトル比（ S_1/S_{d-1} ）を確認した結果、最大で1.08（制御棒の挿入性）であり、その違いは数パーセントである。また、既設（Sクラス）施設は、 S_1 による地震力に対して設計していることから、応答スペクトル比の違いが施設の耐震性に与える影響は軽微と判断した。（NS2-補-023-16「弾性設計用地震動 S_d の設定について」参照）

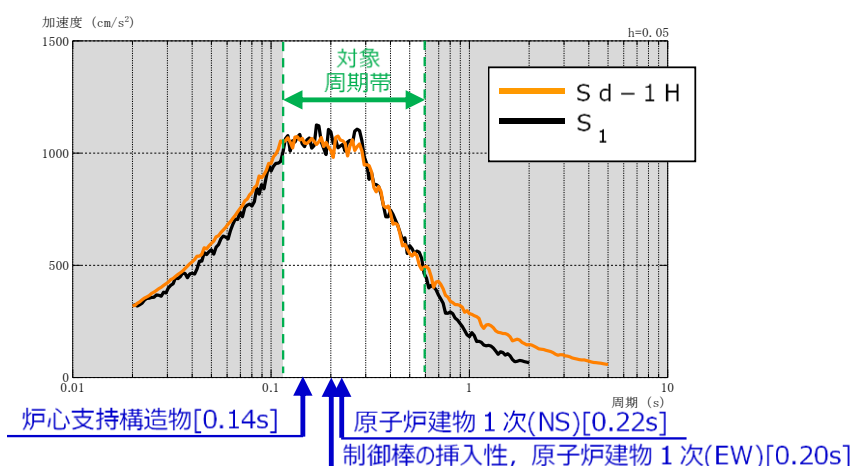


図1 模擬地震波の応答スペクトル（水平方向）の比較

ここで、 S_{d-1} の設定の考え方は審査実績が無いものであり、図1に示す通り S_{d-1} の応答スペクトルは一部周期で S_1 の応答スペクトルを下回っていることから、 S_{d-1} の適用性について、説明性向上の観点から、1. に示す検討を実施する。

3. 検討方針

原子炉建物に設置される代表設備について、建設時工認における S_1 による耐震評価結果と今回工認における S_d （ S_d 全波）による耐震評価結果の比較を実施する。

4. 代表設備の選定

2. に示す通り主要な施設のうち固有周期における S_1 と S_{d-1} の応答スペクトル（水平方向）比が最大となる制御棒の挿入性（燃料集合体の相対変位にて評価）及び燃料集合体のうち、今回工認の耐震評価における裕度が小さい制御棒の挿入性を代表設備として選定する。

また、上記以外の代表設備選定にあたり、建設時工認では A_s 及び A クラスの設備について、基準地震動 S_1 による地震と静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対して、許容応力状態 $III_A S$ を適用して耐震評価を行っていた。この結果と今回工認の S_d による評価結果を比較するため、設計震度が静的地震力ではなく S_1 及び S_d で決まっており、かつ建設時から改造を行っていない設備から代表設備を選定する。ここで、建設時から改造を行っていない設備は主にタンク、ポンプ等の剛構造の設備であり、対象設備として原子炉補機冷却水ポンプ、ほう酸水注入ポンプ、原子炉補機冷却系サージタンク、ほう酸水貯蔵タンク等が挙げられるが、そのうち原子炉建物中間階（EL 15.3m）に設置されており、構造的にも一般的な横形ポンプである原子炉補機冷却水ポンプを代表として選定する。

なお、代表設備に含まれない主な設備として配管が挙げられるが、基準地震動の見直しに伴い改造及び耐震補強を実施しており、建設時工認と今回工認の耐震評価結果を比較できないことから、代表として選定しない。

5. 検討結果

(1) 制御棒の挿入性

S_1 及び S_d における制御棒の挿入性（燃料集合体）の評価結果の比較を表2に示す。

S_1 と S_d-1 （基本ケース）の相対変位はNS方向では S_d-1 の値が大きく、EW方向では同程度である。また、制御棒挿入性の評価に用いる設計用荷重（相対変位）は建設時工認よりも今回工認の方が大きな値となる。

S_1 と S_d-1 （基本ケース）による燃料集合体の応答に差異が生じた要因として、**入力地震動算定モデル**、原子炉建物応答解析モデル、原子炉建物－大型機器連成解析モデルの差異（添付-1 参照）が挙げられる。

今回工認における設計用荷重が建設時工認よりも大きな値となる要因として、今回工認において S_d 全波の応答を包絡し、地盤物性の不確かさを考慮して設計用荷重を設定していることが挙げられる。

表1 制御棒の挿入性（燃料集合体）評価結果の比較

	各方向相対変位 (mm)		設計用荷重 (相対変位) (mm)	確認済相対変位 (mm)
	NS 方向	EW 方向		
建設時工認 (S_1)	16.9	27.8	27.8	40
今回工認 (S_d)	21.9* ¹	27.6* ¹	33.9* ²	40

注記*1： S_d-1 の基本ケースの応答を示す。

*2： S_d 全波の応答を包絡し、地盤物性の不確かさを考慮した設計用荷重（相対変位）を示す。

(2) 原子炉補機冷却ポンプ

S₁及びS_dにおける原子炉補機冷却ポンプ設置位置（原子炉建物 EL 15.3m）の床応答の最大加速度及び設計震度の比較を表 2，評価結果の比較を表 3 に示す。

S₁とS_{d-1}（基本ケース）による床応答の最大加速度を比較すると基準地震動S₁の方が1~2割程度大きいですが、設計震度は建設時工認よりも今回工認の方が大きな値となる。算出応力は基礎ボルト及びポンプ取付ボルトのせん断応力を除いて今回工認の方が大きな値となる。

S₁とS_{d-1}（基本ケース）による床応答の最大加速度に差異が生じた要因として、入力地震動算定モデル、原子炉建物応答解析モデルの差異（添付-1 参照）が挙げられる。

床応答の最大加速度はS₁の方が大きいですが、設計震度は建設時工認よりも今回工認の値が大きい要因としては、建設時工認では水平方向の設計震度として各方向の最大加速度を1.2倍した値、鉛直方向の設計震度として静的震度0.29を設定している一方で、今回工認ではS_d全波の応答を包絡し、地盤物性の不確かさを考慮した床応答の最大加速度を1.2倍して設定した設計用震度及び静的震度を上回る設計震度を設定していることによる。

設計震度の比に対して相対的に今回工認の算出応力は小さい傾向があるが、この要因としては、表 4 に参考で示す通り、評価に適用する機器の質量として建設時工認では計画値、今回工認では実質量に基づく耐震計算を行っていることが挙げられる。また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せについて建設時工認では絶対値和、今回工認ではSRSS法を適用していることが挙げられる。

表 2 最大加速度及び設計震度の比較（原子炉補機冷却ポンプ）

	各方向最大加速度 (m/s ²) *1			設計震度 (×9.8m/s ²)	
	NS 方向	EW 方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
建設時工認 (S ₁)	5.07	5.90	-	0.73*3	0.29*4
今回工認 (S _d)	4.52*2	4.82*2	4.22*2	1.56*5	0.75*5

注記*1：原子炉補機冷却ポンプ設置位置（原子炉建物 EL 15.3m）における値

*2：S_{d-1}の基本ケースの応答を示す。

*3：各方向の最大加速度の1.2倍

*4：静的震度

*5：S_d全波の応答を包絡し、地盤物性の不確かさを考慮した床応答の最大加速度を1.2倍して設定した設計用震度（水平方向：設計用震度Ⅱ，鉛直方向：設計用震度Ⅰ）及び静的震度を上回る値として設定した設計震度を示す。

表 3 原子炉補機冷却ポンプ評価結果の比較

部材	応力分類	建設時工認 (S ₁)			今回工認 (S _d)		
		算出応力 (kg/mm ² (MPa 換算値))	許容応力* ¹ (kg/mm ² (MPa 換算値))	(参考) 運転時 質量* ² (kg)	算出応 力(MPa)	許容応 力* ¹ (MPa)	(参考) 運転時 質量* ² (kg)
基礎ボルト	引張	1.9(19)	47.9(469)		21	469	
	せん断	1.5(15)	36.8(360)		14	361	
ポンプ取付 ボルト	引張	1.0(10)	45.3(444)		12	444	
	せん断	1.6(16)	34.8(341)		11	342	
原動機取付 ボルト	引張	0.5(5)	16.6(162)		10	172	
	せん断	0.6(6)	12.8(125)		11	132	

注記*1：原動機取付ボルトの新旧許容応力の差異は、評価に適用する温度条件の差異（既工認：最高使用温度，今回工認：環境温度）による。基礎ボルト及びポンプ取付ボルトにおける新旧許容応力の差異は、丸め誤差による。

*2：建設時工認では計画値，今回工認では実質量を評価に適用

6. まとめ

原子炉建物に設置される代表設備について、建設時工認における基準地震動S₁の耐震評価結果と今回工認における弾性設計用地震動S_dの耐震評価結果の比較を実施した結果、S₁とS_d-1（基本ケース）の応答は一部標高・方向においてS₁がS_d-1を上回る場合があるが、設計用地震力については今回工認が建設時工認を上回っており、今回工認の条件が一定の安全性を有することが確認された。また、評価結果については今回工認の方が算出応力が小さい場合もあるが、これは実機条件（運転時質量等）の反映や妥当性が確認された手法（SRSS法等）の適用によるものである。

機器・配管系の耐震評価に係る新旧設計体系の主な相違点

大項目	小項目	建設時工認	今回工認
入力地震動算定モデル	入力地震動の算定方法 [計算機コード]	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析 [VESL-DYN] 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析 [SuperFLUSH]
	速度層区分	建設時の地質調査結果に基づき設定	建設時の地質調査結果に加えて、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果（ボーリング、PS検層）に基づき設定
	地盤物性値	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤については、建設時の地質調査結果に基づき設定 表層地盤については、文献に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 表層地盤については、地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定
	境界条件 (2次元FEM)	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：粘性境界 	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：エネルギー伝達境界 ※側方地盤への波動の逸散をより詳細に評価する境界条件に変更
建物の地震応答解析モデル	モデル	<ul style="list-style-type: none"> 水平：多軸床剛多質点系モデル 鉛直：応答解析を実施せず 	<ul style="list-style-type: none"> 水平：多軸床剛多質点系モデル 鉛直：多軸多質点系モデル
	材料物性	検討時の規準に基づき設定 <ul style="list-style-type: none"> コンクリートのヤング係数, ポアソン比 $E = 2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI換算) $\nu = 0.167$	適用規準の見直しによる再設定 <ul style="list-style-type: none"> コンクリートのヤング係数, ポアソン比 $E = 2.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ $\nu = 0.2$ <ul style="list-style-type: none"> 鉄骨のヤング係数, ポアソン比 $E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ $\nu = 0.3$

大項目	小項目	建設時工認	今回工認
原子炉建物—大型 機器連成 解析モデル	モデル化範囲	PCV-RPVモデル RPV-Rinモデル	PCV-RPV-Rinモデル
	原子炉格納 容器スタビ ライザのば ね定数算出 方法	手計算 (1対のトラス(パイプ2本)の荷 重—変位関係により算定)	FEM解析 (取り合い部のガセットプレート 及び内側シャラグを含めてモデ ル化した全体モデルの荷重—変 位関係により算定)
	原子炉圧力 容器スタビ ライザのば ね定数算出 方法	理論式により算出 (ロッド, サラ バネのみ剛性を考慮)	理論式により算出 (ガンマ線遮 蔽壁ブラケット, スリーブ等の 剛性を追加で考慮)
設計用地 震力	鉛直方向地 震力	静的震度にて設定	震度: 動的地震力による床応答 最大加速度 (1.2ZPA) 及び静的 震度を包絡する値として設定 床応答スペクトル: 動的地震力 による床応答時刻歴により設定
	設計に考慮 する地震動	S ₁	S _{d-D} , F ₁ , F ₂ , N ₁ , N ₂ 及びS _{d-1}
	ばらつき考 慮	考慮なし	地盤物性のばらつきを考慮
評価手法	水平方向と 鉛直方向の 荷重の組合 せ	絶対値和	SRSS 法又は組合せ係数法