

JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書（その 1 1）に係る追加説明事項

令和 2 年 4 月 2 0 日
日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所

【R2.1.27 審査会合コメント】

原子炉本体には 1 次冷却系配管等の複数の配管が接続されているが、特に径の大きい 1 次冷却系設備主配管については原子炉本体には多少なりとも影響があると考え。これらの複数の配管の影響を考慮せず単体モデルを使用していることの妥当性について、定量的な根拠を示して説明すること。

2.3 項に示す原子炉本体の単体モデル（以下、単体モデルという。）と 1 次冷却系配管を組み入れた連成モデル（以下、連成モデルという。）の応答加速度比較結果から、各質点において応答加速度の増減はあるが、その増加率は鉛直方向における質点 25 が最大（+105.53%）であり、その変化量は 0.1G 程度である。

上記の結果を踏まえて、応答加速度の増加率が最大である質点 25 に設置されている格子板支持胴について、得られた応答加速度を用いて応力評価を行った結果を 2.5 項に示す。単体モデル及び連成モデルに対してスペクトル応答解析を行った結果の比較では、基礎ボルトの引張応力が連成モデルにおいて 2.0 N/mm^2 増加したが、許容応力値が十分大きいため、原子炉本体への影響は微小である。

また、設工認で申請している格子板支持胴の評価結果（時刻歴応答解析）と、連成モデル（スペクトル応答解析）の評価結果を比較しても、基礎ボルトの引張応力が 3.0 N/mm^2 増加するが、許容応力値が十分大きいため、原子炉本体への影響は微小である。

そのため、地震応答解析における耐震裕度を考慮すれば 1 次冷却系配管の原子炉本体モデルへの影響は微小であると言えることから、JEAG4601-1987 に示されているモデル化の原則に従い、本設工認申請では原子炉本体を単体でモデル化している。この考え方は既認可の設工認*におけるモデル化の考え方と同様であり、今回の評価において変更したものではない。また、本資料において簡易的にスペクトル応答解析を実施したが、本申請の原子炉本体の地震応答解析は JEAG4601-1987 に従い、時刻歴応答解析を実施している。

*「JRR-3 の設計及び工事の方法の認可申請書〔JRR-3 の改造（その 3）〕」（昭和 61 年 8 月 20 日 61 安（原規）第 78 号にて認可）

- ・ 近傍の数字は質点No.
- ・ □内は部材No.

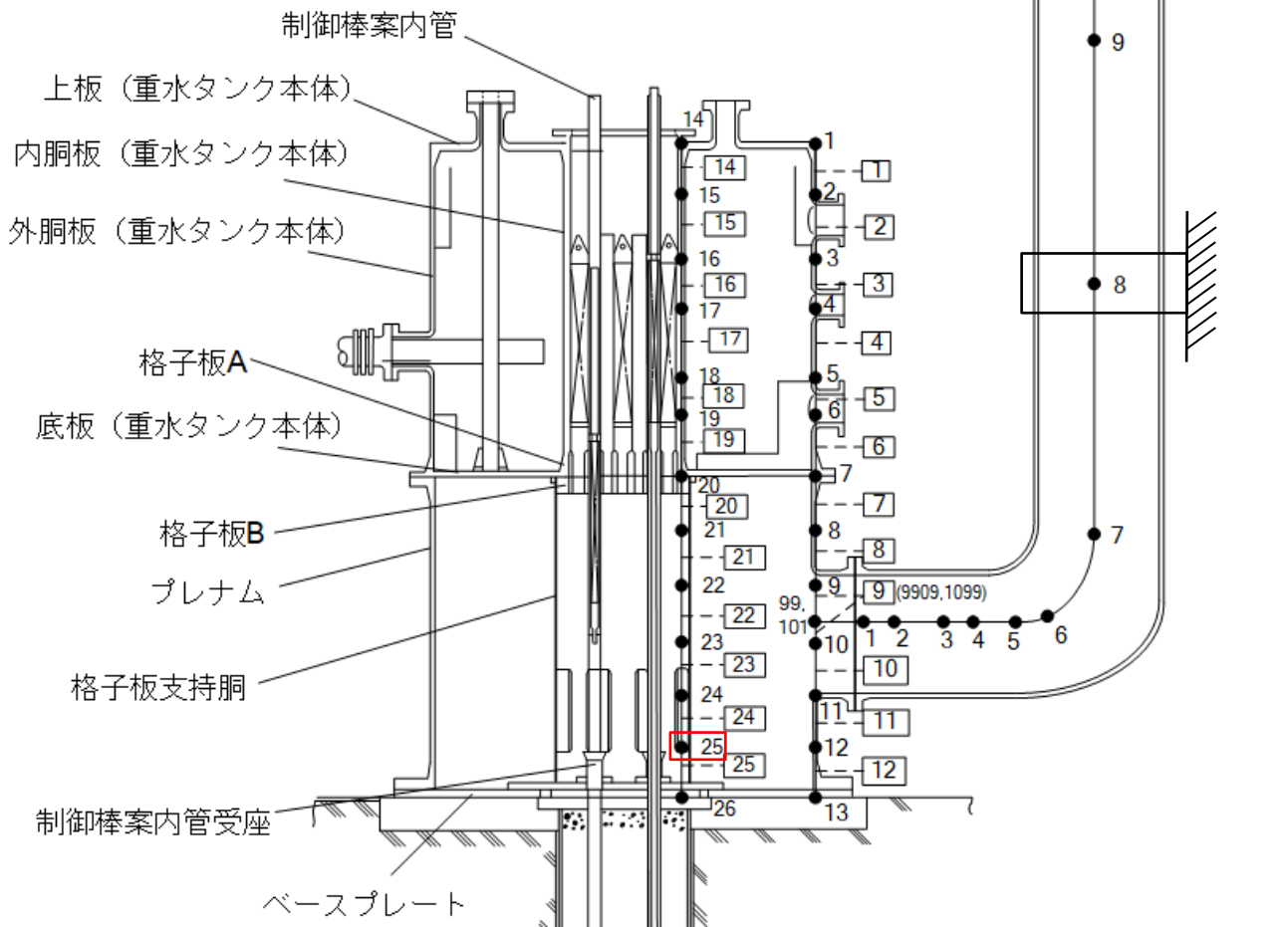


図1. 1次冷却系配管を組み入れた原子炉本体の連成モデル概念図

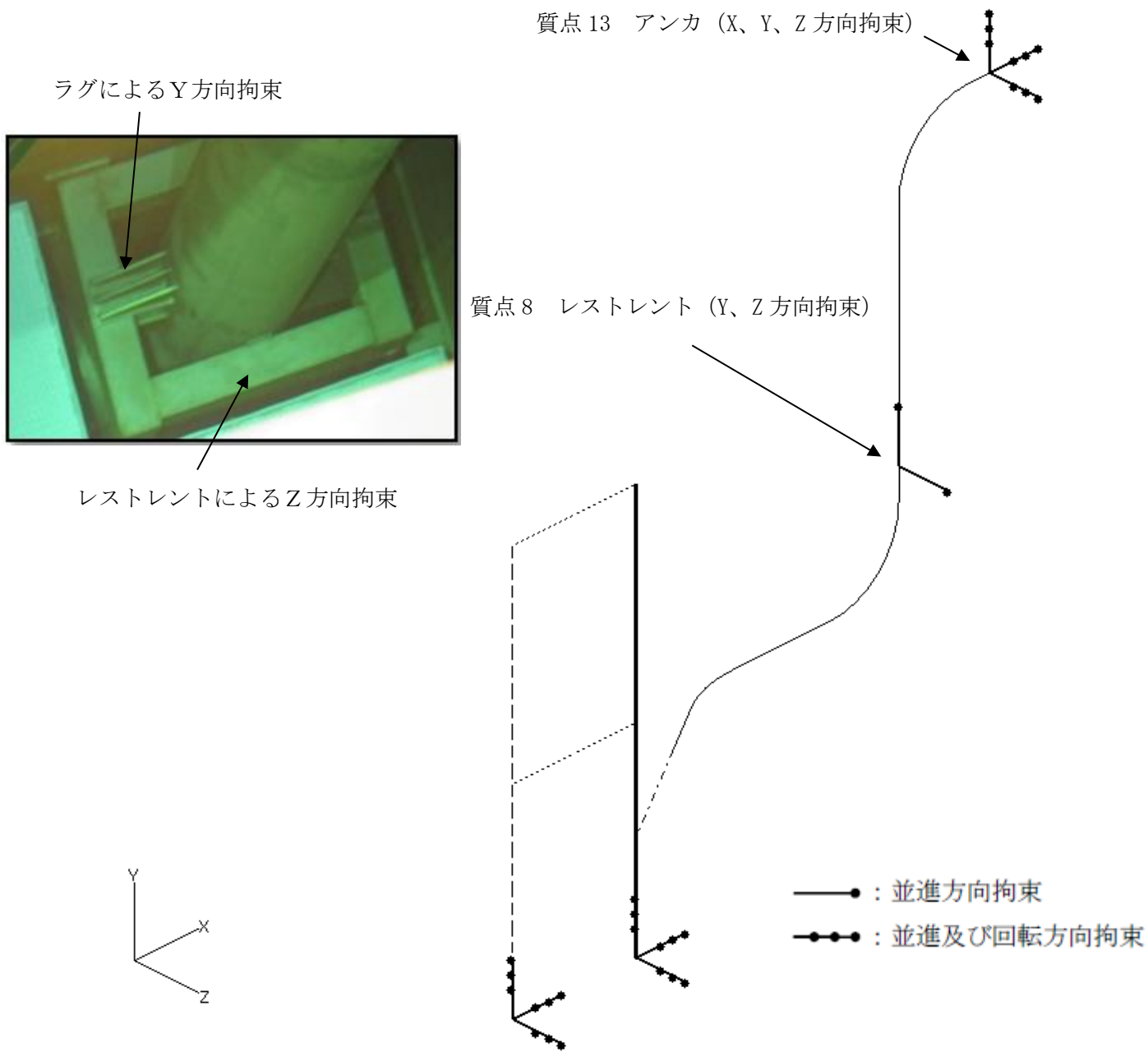


図2. 解析モデル図

1. 地震動

適用する地震動の種類を下表に示す。本資料の評価では原子炉本体設置フロアである質点3の地震動を用いている。

地震種類	建家	質点番号	減衰定数
基準地震動 S s	原子炉建家	3 (GL -0.175m)	1.0%

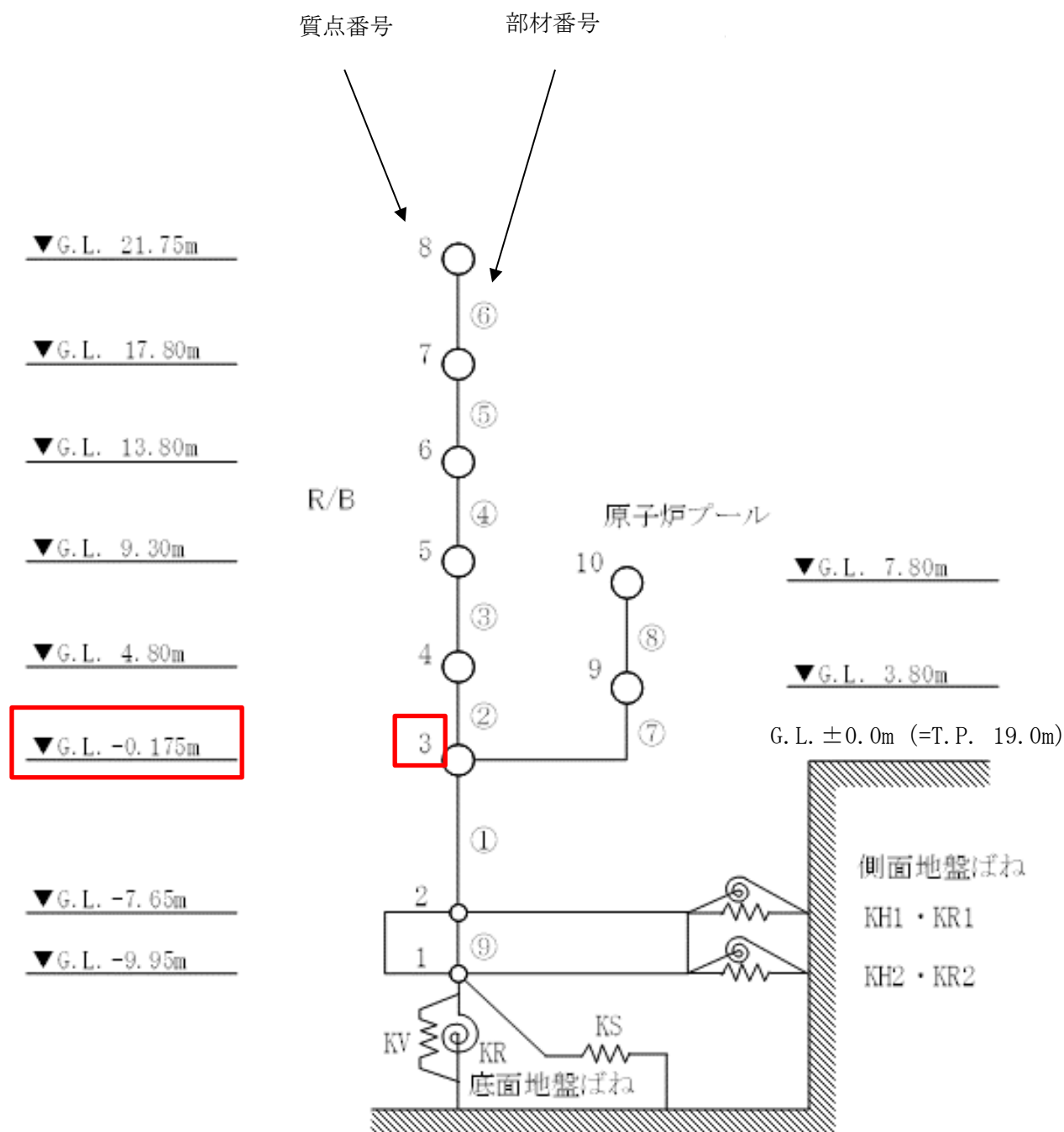


図3. 原子炉建家解析モデル（水平方向）

<参考>「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の原子炉施設（JRR-3 原子炉施設）の変更に係る設計及び工事の方法の認可申請書（その4）」（原規規発第 1904051 号平成 31 年 4 月 5 日にて認可）

2. 解析結果

2.1. 固有値解析結果

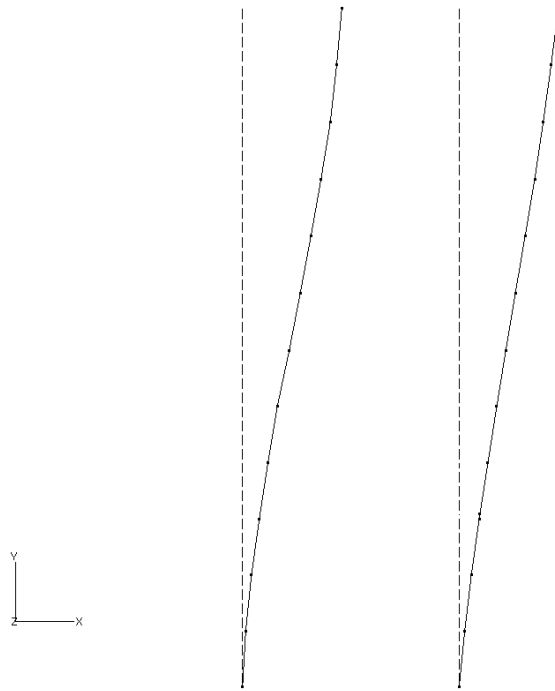
下表に、単体モデルと連成モデルの1次固有振動数を示す。連成モデルの固有値は単体モデルに比べ、0.37Hz 小さくなる結果となった。

単体モデル		連成モデル	
次数	固有振動数[Hz]	次数	固有振動数[Hz]
1	36.69	1	36.32

2.2. モード図

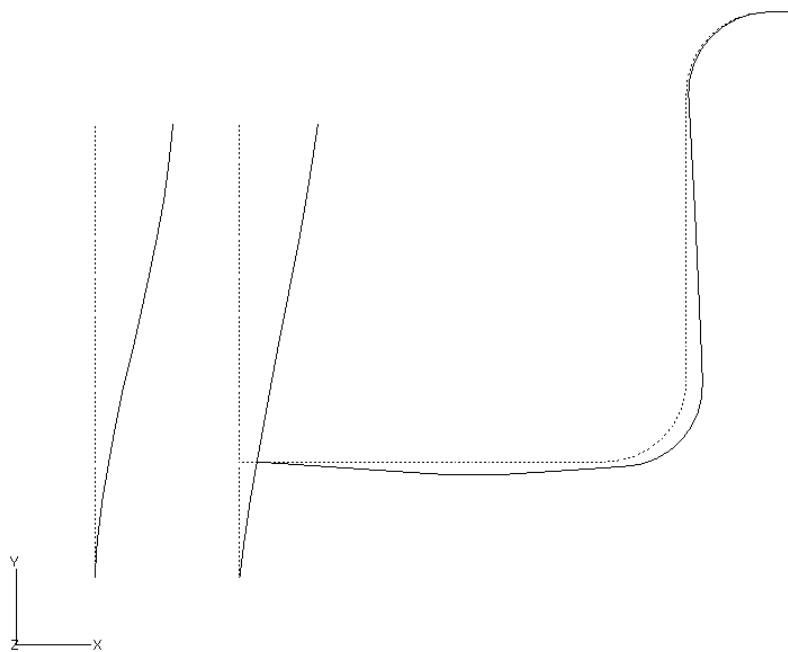
・単体モデル

1次モード 36.69Hz



・連成モデル

1次モード 36.32Hz



2.3. 応答加速度

■水平X方向加振

節点 番号	応答加速度[G]		変化率 [%]
	単体モデル	連成モデル	
1	1.47	1.50	+2.22%
2	1.32	1.38	+4.08%
3	1.19	1.25	+5.16%
4	1.08	1.13	+4.52%
5	0.96	1.00	+3.18%
6	0.86	0.87	+0.40%
7	0.79	0.75	-4.16%
8	0.69	0.64	-7.14%
9	0.60	0.53	-11.52%
10	0.52	0.43	-17.24%
11	0.40	0.30	-23.93%
12	0.22	0.16	-27.21%
13	0.00	0.00	-
14	1.47	1.50	+2.22%
15	1.41	1.44	+2.20%
16	1.37	1.41	+3.03%
17	1.19	1.25	+5.04%
18	1.00	1.07	+6.69%
19	0.84	0.89	+5.03%
20	0.79	0.75	-4.16%
21	0.64	0.62	-3.57%
22	0.58	0.55	-5.29%
23	0.51	0.47	-7.99%
24	0.37	0.33	-10.42%
25	0.18	0.15	-12.10%
26	0.00	0.00	-

※1 応答加速度の増加・減少の差が最大である箇所

※2 変化率の増加・減少が最大である箇所

■水平Z方向加振

節点 番号	応答加速度[G]		変化率 [%]
	単体モデル	連成モデル	
1	1.47	1.48	+0.79%
2	1.32	1.35	+2.21%
3	1.19	1.23	+3.08%
4	1.08	1.11	+2.89%
5	0.96	0.98	+2.09%
6	0.86	0.86	-0.85%
7	0.79	0.74	-5.34%
8	0.69	0.64	-7.17%
9	0.60	0.54	-9.64%
10	0.52	0.44	-14.23%
11	0.40	0.32	-19.89%
12	0.22	0.17	-23.58%
13	0.00	0.00	-
14	1.47	1.48	+0.79%
15	1.41	1.41	-0.04%
16	1.37	1.36	-0.85%
17	1.19	1.20	+0.79%
18	1.00	1.03	+2.71%
19	0.84	0.86	+2.21%
20	0.79	0.74	-5.34%
21	0.64	0.65	+0.20%
22	0.58	0.61	+4.87%
23	0.51	0.55	+6.74%
24	0.37	0.40	+6.52%
25	0.18	0.19	+5.79%
26	0.00	0.00	-

■鉛直Y方向加振

節点 番号	応答加速度[G]		変化率 [%]
	単体モデル	連成モデル	
1	1.08	0.89	-17.85%
2	1.05	0.76	-28.05%
3	※1 1.00	※1 0.66	-34.26%
4	0.94	0.62	-34.35%
5	0.87	0.59	-31.59%
6	0.80	0.64	-20.25%
7	0.73	0.71	-2.57%
8	0.66	0.71	+7.81%
9	0.57	0.67	+17.36%
10	0.45	0.59	+31.66%
11	0.31	0.45	+47.34%
12	0.16	0.26	+61.69%
13	0.00	0.00	-
14	1.08	0.89	-17.85%
15	1.08	0.90	-16.98%
16	1.05	0.87	-17.42%
17	0.94	0.68	-27.11%
18	0.84	0.53	※2 -36.83%
19	0.77	0.53	-30.94%
20	0.73	0.71	-2.57%
21	0.55	0.61	+11.56%
22	0.46	0.62	+36.27%
23	※1 0.36	※1 0.60	+65.86%
24	0.23	0.45	+93.85%
25	0.11	0.22	※2 +105.53%
26	0.00	0.00	-

2.4. 軸力及びせん断力

要素番号	軸力				せん断力			
	単体モデル (設工認) [N]	単体モデル [N]	連成モデル [N]	*1 変化率 [%]	単体モデル (設工認) [N]	単体モデル [N]	連成モデル [N]	*1 変化率 [%]
1	7132.00	9912.28	6067.32	-38.79	12880.00	19773.26	20189.69	2.11
2	12960.00	17463.50	10721.62	-38.61	19490.00	29270.73	30069.02	2.73
3	19200.00	25147.45	15464.85	-38.50	26390.00	38259.48	39625.83	3.57
4	29000.00	36425.93	22429.13	-38.43	36940.00	50738.79	53056.18	4.57
5	38190.00	45955.03	28299.83	-38.42	46530.00	60906.02	64037.80	5.14
6	44440.00	51734.70	31844.72	-38.45	52830.00	66809.86	70414.25	5.40
7	45700.00	51306.27	31542.84	-38.52	57930.00	68390.35	71819.17	5.01
8	51660.00	55563.50	34115.97	-38.60	63660.00	72414.86	76017.67	4.98
9909	(要素番号9)57330.00	58984.00	8297.34	*2 -85.93	(要素番号9)68990.00	75455.19	79147.75	4.89
1099		58984.00	8297.34	*2 -85.93		75455.19	86195.12	*2 14.23
10	63910.00	62046.36	39087.27	-37.00	75470.00	78053.36	88939.36	13.95
11	69420.00	63776.27	40174.21	-37.01	81160.00	79481.86	90386.09	13.72
12	74840.00	64646.40	40722.16	-37.01	86750.00	80175.74	91062.11	13.58
14	1102.00	1325.74	799.96	-39.66	3328.00	5000.06	5139.50	2.79
15	1791.00	2156.54	1326.88	-38.47	2544.00	3810.99	3927.76	3.06
16	5193.00	6502.06	3997.32	-38.52	1255.00	1946.87	1991.21	2.28
17	5328.00	6658.49	4093.11	-38.53	1401.00	2144.35	2199.06	2.55
18	5462.00	6796.33	4177.70	-38.53	1543.00	2304.99	2374.11	3.00
19	5596.00	6915.57	4251.08	-38.53	1680.00	2425.91	2512.81	3.58
20	16750.00	17465.79	10816.44	-38.07	8811.00	10693.87	11634.47	8.80
21	17660.00	18026.08	11159.61	-38.09	9673.00	11237.31	12210.01	8.66
22	18610.00	18515.88	11459.21	-38.11	10550.00	11668.04	12660.71	8.51
23	19550.00	18901.35	11694.69	-38.13	11450.00	11973.77	12973.57	8.35
24	20450.00	19135.80	11837.75	-38.14	12370.00	12145.22	13143.51	8.22
25	21350.00	19242.87	11903.05	-38.14	13300.00	12213.60	13209.09	8.15

*1単体モデルでの応力に対して連成モデルでの応力の増加・減少を示す。

*2変化率の増加・減少が最大である箇所

2.5. 格子板支持胴の評価結果比較

2.5.1. 原子炉本体の単体モデルを使用した評価結果（スペクトル応答解析）

(単位：N/mm²)

許容応力状態	部材	材料	応力	算出応力	許容応力
IV _{AS}	格子板支持胴	A5052P-0	組合せ	$\sigma_K=23$	$f_t=66$
			圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	$\frac{\eta(\sigma_{K1} + \sigma_{K2} + \sigma_{K3})}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_{K4}}{f_b} \leq 1$	
				0.319	
	基礎ボルト	SUS304	引張	$\sigma_b=16$	$f_{ts}=172$
せん断			$\tau_b=9$	$f_{sb}=132$	

2.5.2. 1次冷却系配管を組み入れた連成モデルを使用した評価結果（スペクトル応答解析）

(単位：N/mm²)

許容応力状態	部材	材料	応力	算出応力	許容応力
IV _{AS}	格子板支持胴	A5052P-0	組合せ	$\sigma_K=23$	$f_t=66$
			圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	$\frac{\eta(\sigma_{K1} + \sigma_{K2} + \sigma_{K3})}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_{K4}}{f_b} \leq 1$	
				0.319	
	基礎ボルト	SUS304	引張	$\sigma_b=18$	$f_{ts}=172$
せん断			$\tau_b=9$	$f_{sb}=132$	

2.5.3. 設工認で申請している原子炉本体の単体モデルを使用した評価結果（時刻歴応答解析）

(単位：N/mm²)

許容応力状態	部材	材料	応力	算出応力	許容応力
IV _{AS}	格子板支持胴	A5052P-0	組合せ	$\sigma_K=23$	$f_t=66$
			圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	$\frac{\eta(\sigma_{K1} + \sigma_{K2} + \sigma_{K3})}{f_c} + \frac{\eta \cdot \sigma_{K4}}{f_b} \leq 1$	
				0.319	
	基礎ボルト	SUS304	引張	$\sigma_b=15$	$f_{ts}=172$
せん断			$\tau_b=9$	$f_{sb}=132$	

(1) 機器・配管系のモデル化基本方針

ここでは、機器設備を容器、配管、その他に分類しそのモデル化の基本原則について示した。

a. 容器

容器の地震応答解析モデルは、原則として多質点系はりモデルとし、以下の基本原則に基づいてモデル化を行う。

(a) 一般原則

- (i) モデルは、その振動特性に応じたモデルとする。
- (ii) 質点並びに節点は、容器の質量分布、剛性変化、寸法等に注意し、代表的な振動モードを適切に表現できるよう、かつ、応力解析上の主要点に着目して決める。
- (iii) 質点間のはりの剛性評価に当たっては、原則として曲げ、せん断、必要に応じねじり、及び軸方向剛性が評価されたモデルとする。
- (iv) 容器の質量評価に当たっては容器自体の質量の他に付属機器、保温材、保有流体等の質量を集中質量系又は分布質量系として評価する。
- (v) 部材の剛性評価に用いる材料の縦弾性係数、せん断弾性係数は地震動を受ける際の部材の運転温度における値を採用することを原則とする。

(b) 接続配管との相互作用の評価

容器とそれに接続する配管とのモデル上の連成の要否については、容器の質量及び剛性と接続する配管系のそれとを比較し、両者の間の相互作用が無視できると判断される場合には分割して容器単体としてモデル化する。

上記以外の場合には、接続配管で十分剛な範囲までを含めた連成モデルとする。

(c) 容器と建屋との相互作用の評価

容器とそれを支持する建物・構築物との相互作用については、容器を直接支持する構築物の質量、並びに剛性が容器本体に比較的接近し、相互に影響を及ぼすと考えられる場合は両者を連成させたモデルとする。

(d) 支持構造物の評価

容器の支持構造物は、原則としてその剛性を評価したばね又は部材としてモデル化する。

b. 配管

配管系のモデル化を行う場合、下記を考慮してモデル化を行う。

(a) 一般原則

- (i) 配管系は3次元でモデル化し、曲げ、せん断、ねじり、軸力に対する剛性を考慮する。
- (ii) 弁等の偏心重量がある場合には、その影響を評価できるモデル化を行う。
- (iii) 同一モデルに含める範囲は、原則としてアンカー点からアンカー点までとする。

b. 耐震解析と安全性評価

機器・配管系は、その耐震上の重要度に応じて適切に分類され、それぞれの耐震クラス (A_s , A, B, C) に応じた設計用地震力に対して安全であることを確認しなければならない。

設計用地震力は、それぞれの耐震クラスに対応した水平静的震度による地震力と、 A_s , A クラスでは基準地震動 S_1 、更に A_s クラスでは基準地震動 S_2 による適切な地震応答解析に基づいた動的な地震力、及び鉛直震度による地震力を算定しなければならない。

機器・配管系の耐震安全性評価は、上記設計用地震力による適切な応力・強度解析に基づいた地震応力と、組合すべき他の荷重による応力との組合せ応力が、その許容限界内にあることを確認すること（解析による設計）を基本とする。しかし、系の解析の複雑さ、信頼度の問題、あるいは系の耐震安全性が応力許容限界だけから律することができない機器機能維持上の評価が必要な場合には、適切な振動試験等によって確認すること（試験による評価）ができる。

(2) 地震応答解析と設計用地震荷重

a. 応答解析法

耐震 A_s , A クラス機器・配管系の地震応答解析は、据付床の設計用床応答スペクトルに基づいたスペクトルモーダル解析法を採用することを基本とする。

設計用床応答スペクトルは、当該系の重心位置に近いか、あるいは耐震支持点の最も多い床のもの等最も適切な床のものを採用することを基本とするが、耐震安全評価上必要ある場合は関連する床応答スペクトルによる多入力解析、又はそれと同等の近似解析法を用いることができる。

鉛直震度による応答と前記水平動的応答の組合せは、絶対和法を採用するものとする。

原子炉格納容器、原子炉圧力容器、炉内構造物については、その構造体の規模、多様な耐震支持法、応答相対変位解析の重要性により、原子炉建屋と連成した解析モデル又は分離したサブストラクチャー法に類似したモデルを用いた時刻歴応答解析法の採用を原則とする。

耐震 A_s クラスもので、基準地震動 S_2 による解析には、 S_2 設計用床応答スペクトルに基づいた線形スペクトルモーダル解析法を用いて弾性設計することは差支えないが、当該系の適切な復元力特性に基づいて上に示したような据付点、耐震支持点からの入力による非線形時刻歴応答解析法を採用することができる。

耐震 B クラスのもので、その基本固有振動数から共振のおそれがあると判断されるものは、 S_1 設計用床応答スペクトルの $1/2$ のスペクトルに基づいて動的検討を行い、その耐震安全性を確認するものとする。

なお、地震応答解析には安全上支障ないことを示した上で、近似法又は簡便法を用