

設工認その13で申請した設備機器のうち耐震裕度が厳しいものの保守性について

令和2年7月29日
日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所

【R2.7.13 審査会合コメント】

機器・配管の耐震性評価について、制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管、サイフォンブレイク弁、一次冷却材熱交換器、上部遮蔽体は裕度が少なくなっている。モデル化等で十分保守的な評価をしていることを示すこと。

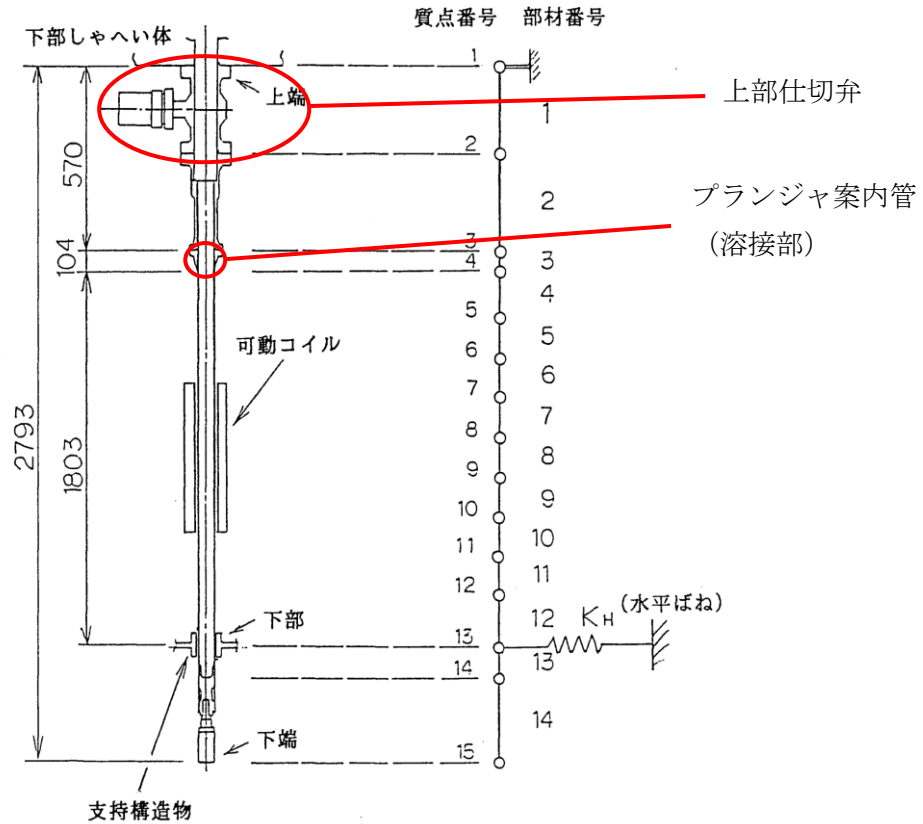
設工認その13で申請した機器配管の耐震評価の評価結果一覧において、裕度が1.04未満の機器を以下に示す。(R2.7.13 審査会合資料から抜粋)

設備機器	固有振動数 [Hz]		地震荷重				評価結果							
			震度[G]			使用質点 原子炉建家 (原子炉本体)	種類	減衰 [%]	応力が一番かかる部位	応力の種類	応力 [MPa]	許容 [MPa]	裕度 [-]	
	水平		鉛直	NS	EW									UD
	NS	EW	UD	NS	EW	UD								
制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管	10.3		145.4		-	-	3	時刻歴応答	1.0	制御棒駆動機構案内管	一次+二次	345	346	1.00
サイフォンブレイク弁 KV21-29	-		-		-	-	-	PCS-R-14の応答加速度	-	弁駆動部	応答加速度*	5.87*	6.00*	1.02
上部遮蔽体 固定遮蔽体	22.7		17.5		1.21	0.98	10	1.2ZPA	-	接続ボルト	引張	245	252	1.02
一次冷却材熱交換器	15.3		33.6		0.48	0.25	2	鉛直:1.2ZPA 水平:FRS読み取り値	1.0	基礎ボルト	引張	133	136	1.02

*単位：[G]

上記について、制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管、サイフォンブレイク弁、上部遮蔽体は許容応力状態IV_ASの評価結果である。一次冷却材熱交換器は許容応力状態B_ASの評価結果である。それぞれの評価における保守性について次ページ以降に示す。

①制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管



(単位:N/mm²)

	評価場所	材料	応力	許容応力状態IV _{AS}	
				算出応力	許容応力
裕度が一番厳しい部位	プランジャ案内管 (溶接部)	SUS304L	一次+二次	345	346
裕度が二番目に厳しい部位	上部仕切弁	SCS19A	曲げ	161	180
			ねじり	161	180

・保守性について

本評価における算出応力は、「添付書類 3-4-3-2. 制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管の地震応答解析」により得られた数値を用いて算出したものである。

通常の評価では Ss-1 から Ss-D の各波ごとに応力値（軸力、せん断、曲げモーメント）を算出し、一次応力や一次+二次応力を計算する。前述の添付書類に記載した地震応答解析により得られた数値は、制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管の各要素、各質点について Ss-1 から Ss-D の 5 波ある基準地震動の最大値をとったもので、その最大値を用いて一次応力や一次+二次応力を計算している。そのため、本評価の算出応力は個別の地震波に対する発生応力より保守的な値となる。

(例) Ss 地震応答解析結果における要素 1 及び質点 1 にかかる発生応力

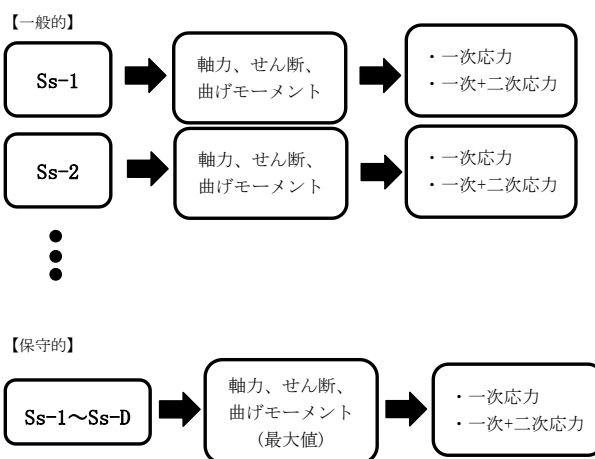
		Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-D
要素 1	軸力[N]	最大値				
要素 1	せん断[N]					最大値
質点 1	曲げモーメント[N・mm]			最大値		

荷重：Ss 地震動						
制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管						
要素	軸力[N]					
1	795	796	796	796	796	795
2	648	649	649	649	649	648
3	587	587	588	588	587	587
4	567	567	567	567	567	567
5	557	557	558	558	557	557
6	540	540	540	540	540	540
7	407	407	407	407	407	407
8	266	267	267	267	267	266
9	174	175	175	175	175	174
10	122	122	122	122	122	122
11	105	105	105	105	105	105
12	97	97	98	98	97	97
13	13	13	13	13	13	13
14	4	4	4	4	4	4

図-3-4-3-2. 制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管の軸力(Ss 地震応答解析)

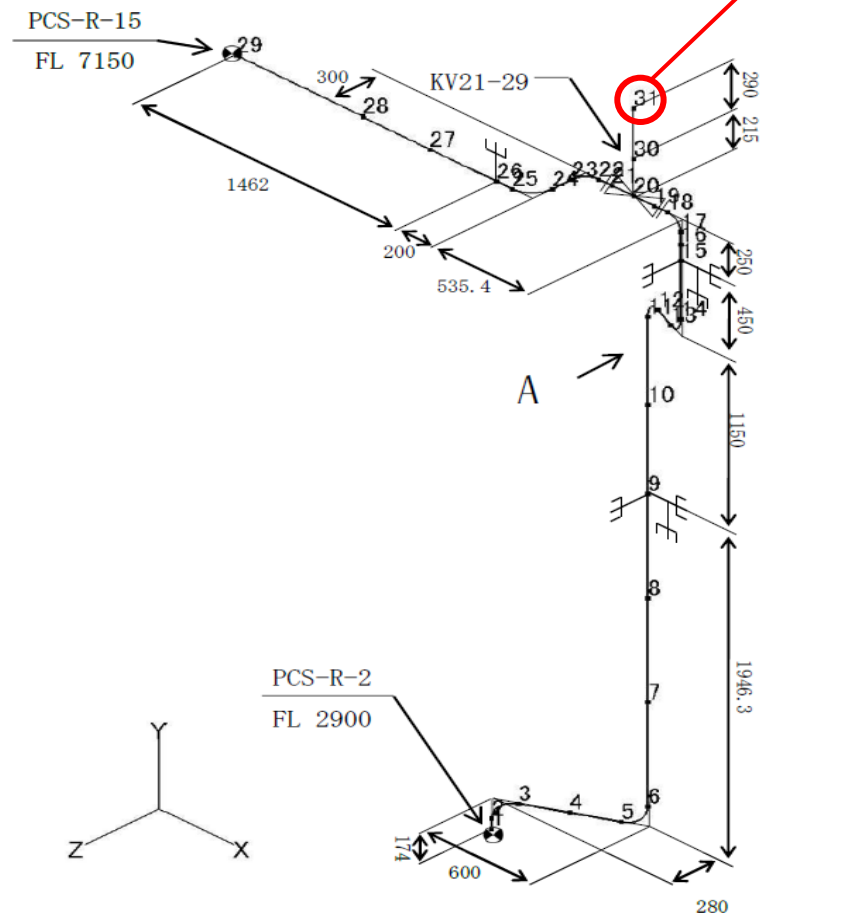
制御棒 1 本分のデータ

参考：添付書類 3-4-3-2. 制御棒駆動機構及び制御棒駆動機構案内管の地震応答解析（添 3-4-3-2-16）

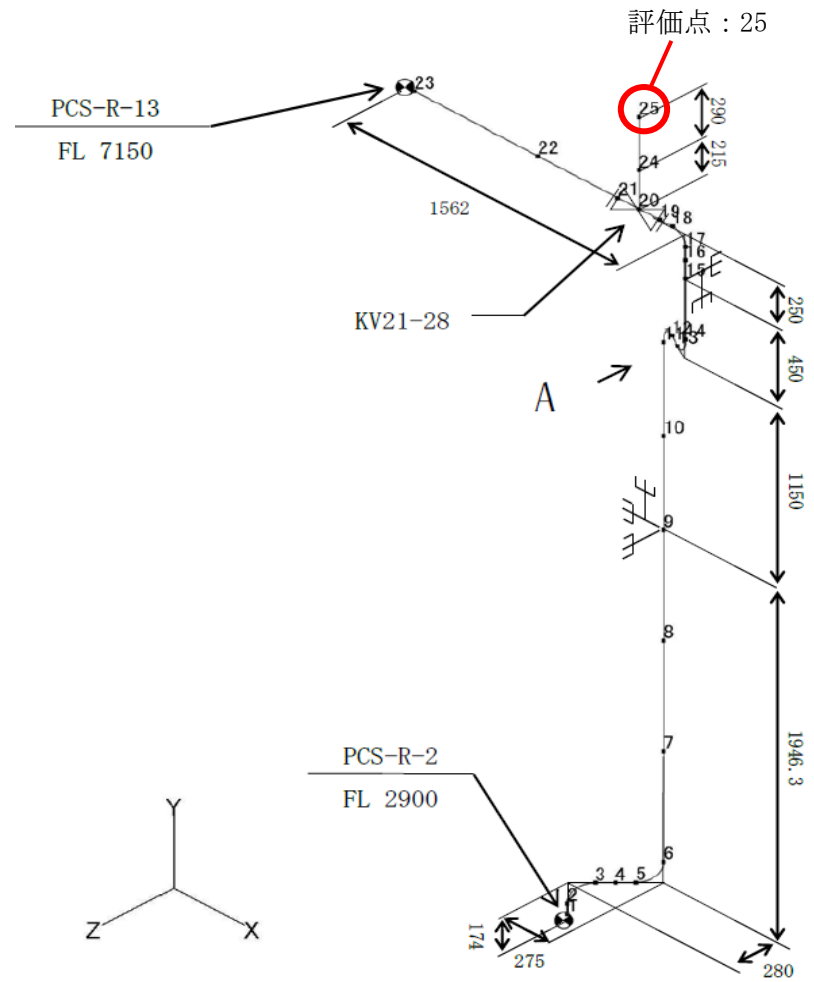


評価イメージ図

②サイフォンブレイク弁



PCS-R-14



PCS-R-12

弁駆動部の評価結果

	モデル	名称	許容応力状態Ⅳ _{AS}	
			水平応答加速度(G)	許容値(G)
裕度が一番厳しい部位	PCS-R-14	KV21-29 (評価点: 31)	5.87	6.00
裕度が二番目に厳しい部位			一次+二次 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)
			274	332
裕度が一番厳しい部位	PCS-R-12	KV21-28 (評価点: 25)	5.05	6.00
裕度が二番目に厳しい部位			一次+二次 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)
			176	332

・保守性について

サイフォンブレイク弁接続管に使用されるスペクトルモーダル解析では、スペクトルモーダル解析に入力される設計用床応答スペクトルを保守的に周期方向に±10%拡幅し、包絡したスペクトルを用いている。そのため、サイフォンブレイク弁の評価では、保守的に算出された応答加速度となっている。

・サイフォンブレイク弁及び接続管の評価における参考資料

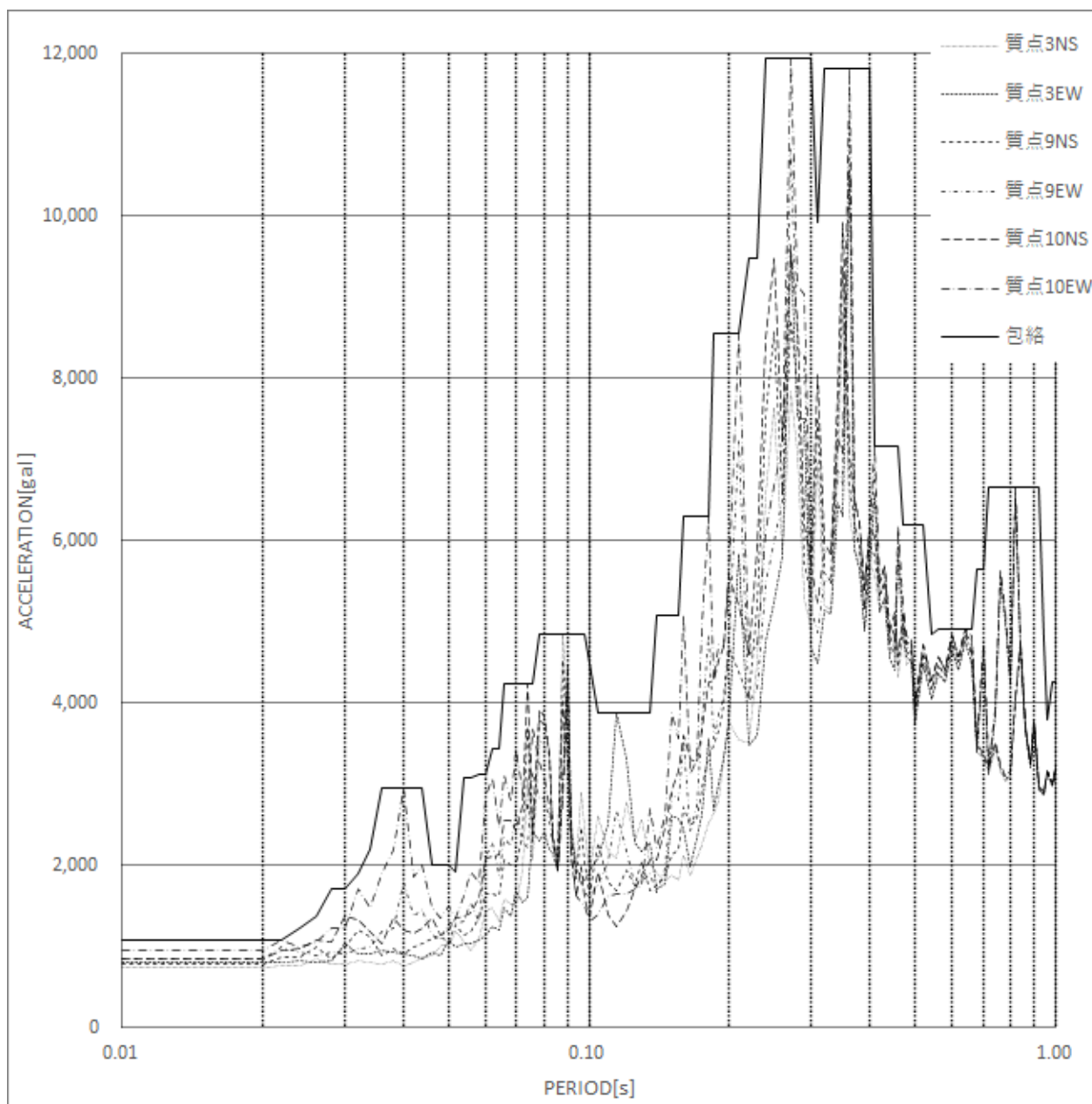
PCS-R-14 における固有値解析結果

モード次数	X 方向 (Hz)	有効質量比 (%)	Y 方向 (Hz)	有効質量比 (%)	Z 方向 (Hz)	有効質量比 (%)
1	22.3	20.3	91.4	31.8	11.7	35.6
2	110.7	14.2	362.1	7.8	38.4	17.1
3	144.7	10.8	142.6	7.1	248.6	6.3

各方向 1 次モード固有値解析結果における 10%拡幅前後の応答加速度比較

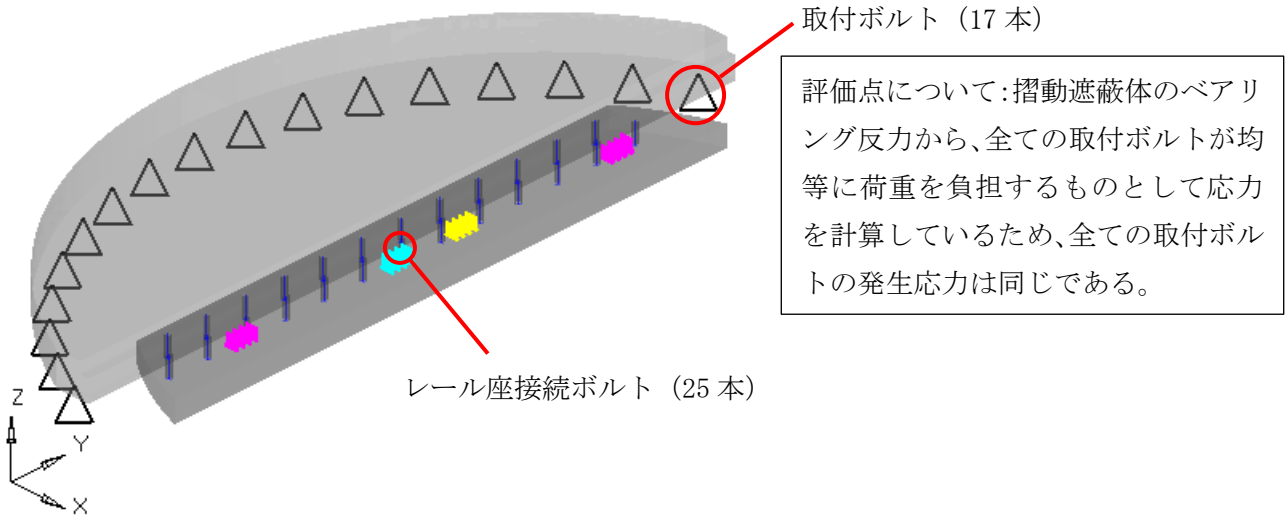
方向	(Hz)	10%拡幅前	10%拡幅後	応答加速度の 増加割合 (%)
		応答加速度 (gal)	応答加速度 (gal)	
X 方向	22.3	2000.587	2953.175	+47.615
Y 方向	91.4	953.253	1081.549	+13.458
Z 方向	11.7	2357.239	4851.849	+105.827

設計用床応答スペクトルの 10% 拡幅前後の比較グラフ



原子炉建家質点：3、9、10、方向：NSEW、減衰定数：0.5%

③上部遮蔽体



固定遮蔽体 (レール座接続ボルト及び取付ボルトの位置)

(単位: N/mm²)

	部材	材料	応力	許容応力状態IV _{AS}	
				算出 応力	許容 応力
裕度が一番厳しい部位	固定遮蔽体レール座接続ボルト (摺動遮蔽体閉時) (FEM)	S45C	引張	245	252
裕度が二番目に厳しい部位	固定遮蔽体取付ボルト (摺動遮蔽体閉時) (FEM)	SUS304L	せん断	96	142

・保守性について

今回、固定遮蔽体のボルトに発生する軸力 (鉛直方向) 及びせん断力 (水平方向) の解析には FEM モデルを使用しており、レール座接続ボルトについては 25 本のボルトをモデル化している。FEM 解析により得られたボルト部に発生する応力は以下のとおりであり、各方向の応力の最大値が発生している要素は異なるが、保守的に評価を行うために得られた各方向の最大値を組み合わせることでボルトの評価を実施した。

ボルトの静的応力解析結果 (設工認その1 3表 3-4-1-1.8 より抜粋)

	Z 方向軸力 Fz (N)	X 方向せん断力 Fx (N)	Y 方向せん断力 Fy (N)
摺動遮蔽体閉時 (IV _{AS})	339215.900	11361.060	19590.400

また、ボルトのせん断応力に対する組合せ応力は、水平地震力による応力と鉛直地震力による応力を SRSS 法で組み合わせるのが一般的であるが、今回のボルトのせん断応力は水平地震力による応力と鉛直地震力による応力を保守的に絶対値和法で組み合わせることで算出している。

$$\tau_b = \tau_V + \tau_H \quad (\text{設工認その13添3-1-1-23より})$$

τ_b : ボルトのせん断応力

τ_V : 鉛直震度によるせん断応力

τ_H : 水平震度によるせん断応力

そのため、以下に示すようにボルトのせん断応力は保守的に算出される。

	N/mm ²	備考
鉛直震度によるせん断応力 τ_V	17	$\sqrt{\left(\frac{F_x}{A_{b1}}\right)^2 + \left(\frac{F_y}{A_{b1}}\right)^2}$ ただし、 $A_{b1} = 1385\text{mm}^2$
水平震度によるせん断応力 τ_H	60	$\frac{F_4}{A_{b1} \times n_2}$ ただし、 $F_4 = 413092.7\text{ N}$ (設工認その13添3-4-1-1-14、2.2.3.(1)(a)において $C_H = 1.21$ とした) $A_{b1} = 1385\text{mm}^2$ $n_2 = 5$
絶対値和法によるボルトのせん断応力 τ_b	102	$\tau_V + 1.42 \times \tau_H$ ※水平2方向の組合せを考慮し、水平方向は1.42倍する。
SRSS法によるボルトのせん断応力 τ_b	89	$1.42 \times \sqrt{\tau_V^2 + \tau_H^2}$

更に、その影響から次頁の参考資料に示すとおり引張応力に対する許容応力値が減少し、相対的に裕度が下がっている。なお、以下に示すように固定遮蔽体のボルトのIV_AS状態に対する許容引張応力が摺動遮蔽体の開閉で大きく異なるのは、上記のとおり摺動遮蔽体閉時においてボルトのせん断応力を保守的に評価しているためである。

ボルトの許容応力 (設工認その13表3-4-1-1.12より抜粋)

部材	材料	摺動遮蔽体開閉	許容引張応力 (N/mm ²)
固定遮蔽体レール座接続ボルト	S45C	閉	252
		開	297
固定遮蔽体取付ボルト	SUS340L	閉	104
		開	154

以上から上部遮蔽体の耐震評価は、十分に保守的な評価を実施した上で許容値を満足するものである。

・ 上部遮蔽体のボルト評価における参考資料

d. ボルト等の応力

2章で求める各ボルトの引張応力は下記2式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。せん断応力 τ_b は、せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau_b$$

$$f_{ts} \leq f_{t0}$$

許容応力 S_a 許容応力状態	一次応力	
	許容引張応力 f_{t0}	許容せん断応力 f_{sb}
IV _A S B _A S	$1.5 \left(\frac{F}{2} \right)$	$1.5 \left(\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right)$

参考：添付書類 3-4-1-1. 上部遮蔽体の耐震強度評価（添 3-4-1-1-6）

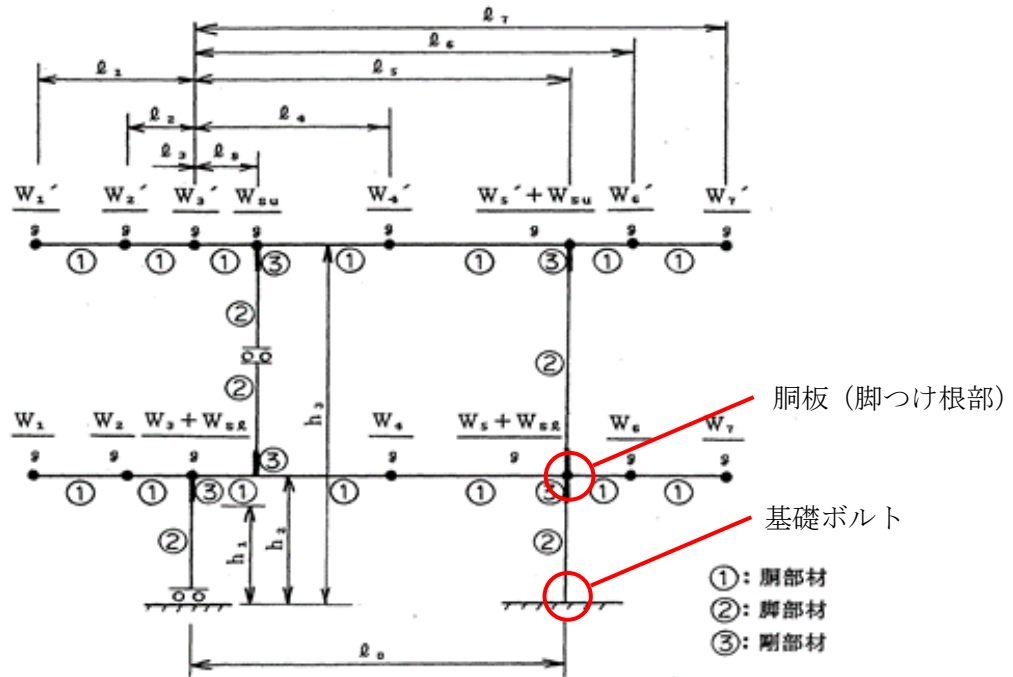
【SRSS 法】

$$\text{応力} = 1.42 \times \sqrt{\text{MAX}[\text{水平}X^2 + \text{鉛直}Y^2, \text{水平}Z^2 + \text{鉛直}Y^2]}$$

【絶対値和法】

$$\text{応力} = \text{MAX}[1.42 \times |\text{水平} X| + |\text{鉛直} Y|, 1.42 \times |\text{水平} Z| + |\text{鉛直} Y|]$$

④一次冷却材熱交換器



(単位: N/mm²)

	部材	材料	応力	許容応力状態 BAS	
				算出 応力	許容 応力
裕度が一番厳しい部位	基礎ボルト	SS400	引張	133	136
裕度が二番目に厳しい部位	銅板	SUS304L	一次膜+一次曲げ	90	166

・保守性について

許容応力状態 BAS の評価では、建家との共振の恐れがない場合は、鉛直方向の動的地震力は考慮不要だが、本モデルでは鉛直方向が剛でも保守的に動的地震力を考慮している。そのため、以下に示すように鉛直方向の動的地震力を考慮しない場合に比べ、大きな引張力が発生し、結果、引張応力も鉛直方向の地震力を考慮しない場合に比べ大きな値となっている。

基礎ボルトの発生応力の比較

	鉛直方荷重 P_s (N)	引張力 F_b (N)	引張応力 σ_{bl} (N/mm ²)	裕度
鉛直地震力を考慮 ($C_v = 0.25$)	32501.47	269503.06	132.37	1.027
鉛直地震力を無視 ($C_v = 0$)	43322.63	262970.76	129.16	1.052

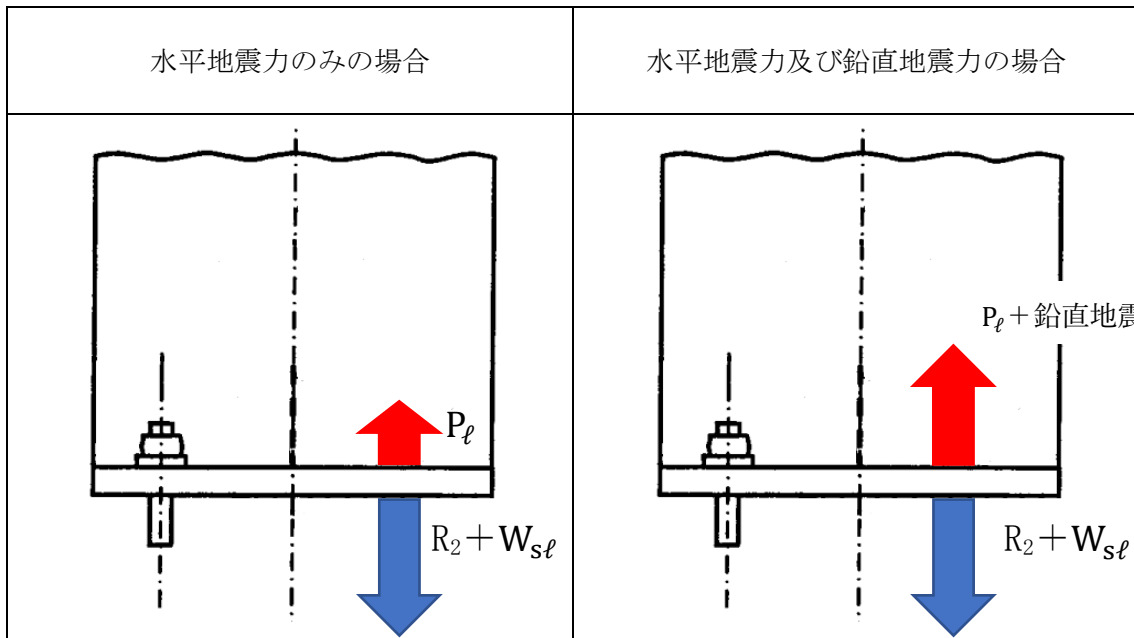
- 一次冷却材熱交換器の基礎ボルト評価における参考資料

長手方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合に脚底面に働く鉛直方向荷重 P_s は次式で表す。

【SRSS 法】

$$P_s = \underbrace{R_2 + W_{s\ell}}_{\text{圧縮荷重}} - \sqrt{\underbrace{\{C_v(R_2 + W_{s\ell})\}^2}_{\text{引張荷重}} + P_\ell^2}$$

鉛直地震力による荷重



R_2 : 第2脚の受ける重量 [N]

$W_{s\ell}$: 下胴の脚の重量 [N]

P_ℓ : 長手方向地震により下胴の脚つけ根部に働く鉛直方向荷重 [N]

C_v : 鉛直方向設計震度

参考：添付書類 3-3-2-2. 横置二胴円筒形容器（添 3-3-2-2-25）