

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 補足-028-10-39 改0
提出年月日	2023年11月27日

原子炉圧力容器の耐震性についての計算書における
ブラケット類の応力評価について

2023年11月

東京電力ホールディングス株式会社

原子炉圧力容器の耐震性についての計算書における
ブラケット類の応力評価について

1. 概要

本資料は、VI-2-3-3-1-1「原子炉圧力容器の応力解析の方針」及びVI-2-3-3-1-2「原子炉圧力容器の耐震計算結果」において応力評価を実施しているブラケット類について、一次＋二次応力強さの評価及び疲労評価を省略することの妥当性を説明する。

2. 評価の考え方

ブラケット類は、原子炉圧力容器に溶接により取り付けられる部材であることから、設計・建設規格^[3]における、クラス1容器の規定に基づき評価を行うこととなり、一次応力の評価に加えて、一次＋二次応力強さの評価及び疲労評価が必要となるが、計算書においてブラケット類の応力評価では、一次＋二次応力強さの評価及び疲労評価を省略していることから、その考え方を、以下に示す。

2.1 一次＋二次応力強さの評価について

ブラケット類の評価において考慮する評価条件は、外荷重のみであり、一次応力及び二次応力は、外荷重に比例した値となる。そのため、一次応力が最大となるブラケットが一次＋二次応力強さも最大となる。従って、全てのブラケットのうち、一次応力が最大となるブラケットにおける一次＋二次応力強さと、一次＋二次応力強さの許容応力 ($3 \cdot S_m$) が最小となるブラケットにおける許容応力との比較を、一次＋二次応力強さの評価の代表とすることが可能である。

ブラケット付根の一次応力は、既に認可された工事計画の添付書類(以下「既工認」という。)と同様に、はり理論によって計算される。応力の計算結果を表1に示し、計算された応力から算出したブラケット付根の一次応力強さ及び応力比(応力強さ/許容応力)を表2に示す。

表2より、全てのブラケットのうち、一次応力が最大となる蒸気乾燥器支持ブラケットを代表として選定し、表3に蒸気乾燥器支持ブラケットの一次＋二次応力差最大範囲 S_n 及び許容応力 ($3 \cdot S_m$) が最小となる SUSF316 の許容応力を示す。

表3に示すとおり、全てのブラケットのうち、最大となる一次＋二次応力強さ (224MPa) は、最小となる許容応力 (360MPa) を満足しており、保守的な評価において一次＋二次応力強さの裕度は十分確保できていることから、一次＋二次応力強さの評価を省略する。

2.2 疲労評価について

ブラケット類の疲労評価は、設計・建設規格^[3]における疲労解析不要の条件 (PVB-3140) に適合する場合、評価を不要とすることが可能である。表4に設計・建設規格^[3]における疲労解析不要の条件 (PVB-3140) 並びに各条件に対する判定結果を示す。

表4の項目(1)～(5)については、既工認の応力解析の方針^[1]の図4-1(1)に記載している原子炉圧力容器の運転条件(圧力、温度)、並びに既工認の計算書^[2]のブラケット及びその取付部に使用している材料 (SQV2A, SFVQ1A 及び SUSF316) から、いずれも疲労評価は不要と判定することができる。

表4の項目(6)については、機械的荷重による応力変動を評価する必要がある。機械的荷重により生じる一次＋二次＋ピーク応力の応力差は、一次＋二次応力強さに構造不連続の影響を考慮したものである。ブラケットにおいて構造不連続の影響は、ブラケットと取付部の構造によ

り決まり、ブラケット本体より遥かに大きな胴板に取り付く構造は各ブラケット共通であることから、構造不連続による影響は、各ブラケットで異なることはないと考えられる。よって、一次応力の応力比が最も厳しいブラケットを代表として確認する。

表2より原子炉压力容器の耐震計算結果から一次膜＋一次曲げ応力（ $P_L + P_b$ ）で厳しい蒸気乾燥器支持ブラケットに着目し、機械的荷重により生じる応力の全振幅を計算することで、疲労評価不要の規定を満たすことを確認する。

表5に蒸気乾燥器支持ブラケットの機械的荷重により生じる応力の全振幅である補正繰返しピーク応力強さ $S_i'^{\#2}$ を計算した結果を示す。表4より、補正繰返しピーク応力強さ $S_i'^{\#2}$ は MPaとなり、地震繰返し回数200回に対応する許容繰返しピーク応力強さの MPaを下回ることから、疲労評価は不要と判定することができる。

3. 結論

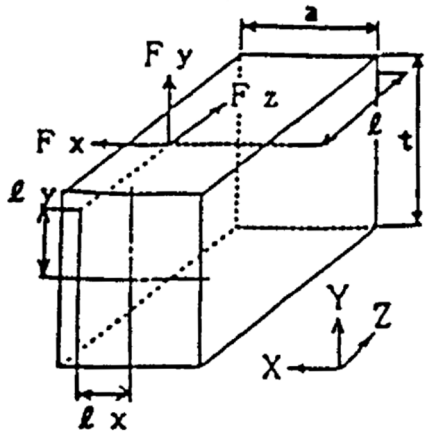
2章より、ブラケット類の応力評価において、一次＋二次応力強さの評価については、保守的な評価において十分裕度が確保できているため評価を省略し、疲労評価については、設計・建設規格^[3]における疲労解析不要の条件（PVB-3140）の各規定を満たしているため、既工認^[2]と同様に疲労評価結果の記載は不要としている。

表 1(1) ブラケット付根の応力計算 (原子炉圧力容器スタビライザブラケット)

形状・寸法	a	幅 (mm)	404.04		
	t	高さ (mm)	147.8		
	l	荷重点の距離 (mm)	400.0		
	l _x	荷重点の距離 (mm)	—		
	l _y	荷重点の距離 (mm)	—		
	F _x	荷重* (kN)	±559 ±590		
	F _y	荷重* (kN)	— —		
	F _z	荷重* (kN)	— —		
	A	断面積 (mm ²)	5.972×10 ⁴		a・t
	Z _x	断面係数 (mm ³)	1.471×10 ⁶		$\frac{a \cdot t^2}{6}$
	Z _y	断面係数 (mm ³)	4.021×10 ⁶		$\frac{a^2 \cdot t}{6}$
	外荷重	F	力* (kN)		559 590
M _x		モーメント* (N・mm)	0 0	F _y ・l + F _z ・l _y	
M _y		モーメント* (N・mm)	±2.236×10 ⁸ ±2.360×10 ⁸	-F _x ・l - F _z ・l _x	
計算結果	σ _{z1}	引張応力* (MPa)	0 0	$-\frac{F_z}{A}$	
	σ _{z2}	曲げ応力* (MPa)	±56 ±59	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
	τ	平均せん断応力* (MPa)	9 10	$\frac{F}{A}$	

注記* : 上段は許容応力状態Ⅲ_ASにおける値を示し, 下段は許容応力状態Ⅳ_ASにおける値を示す。

表 1(2) ブラケット付根の応力計算 (蒸気乾燥器支持ブラケット)

形状・寸法	a	幅 (mm)	263.3		
	t	高さ (mm)	236.8		
	ℓ	荷重点の距離 (mm)	301.0		
	ℓ _x	荷重点の距離 (mm)	—		
	ℓ _y	荷重点の距離 (mm)	90.0		
	F _x	荷重* (kN)	±255 ±483		
	F _y	荷重* (kN)	−382 −537		
	F _z	荷重* (kN)	255 483		
	A	断面積 (mm ²)	6.235×10 ⁴		$a \cdot t$
	Z _x	断面係数 (mm ³)	2.461×10 ⁶		$\frac{a \cdot t^2}{6}$
Z _y	断面係数 (mm ³)	2.736×10 ⁶	$\frac{a^2 \cdot t}{6}$		
外荷重	F	力* (kN)	4.593×10 ² 7.223×10 ²	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
	M _x	モーメント* (N・mm)	−9.203×10 ⁷ −1.182×10 ⁸	$F_y \cdot \ell + F_z \cdot \ell_y$	
	M _y	モーメント* (N・mm)	±7.676×10 ⁷ ±1.454×10 ⁸	$-F_x \cdot \ell - F_z \cdot \ell_x$	
計算結果	σ _{z1}	引張応力* (MPa)	−4 −8	$-\frac{F_z}{A}$	
	σ _{z2}	曲げ応力* (MPa)	±65 ±101	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
	τ	平均せん断応力* (MPa)	7 12	$\frac{F}{A}$	

注記*：上段は許容応力状態Ⅲ_ASにおける値を示し，下段は許容応力状態Ⅳ_ASにおける値を示す。

表 1(3) ブラケット付根の応力計算 (給水スパージャブラケット)

形状・寸法	a	幅 (mm)	68.5		
	t	高さ (mm)	173.0		
	l	荷重点の距離 (mm)	97.0		
	l _x	荷重点の距離 (mm)	—		
	l _y	荷重点の距離 (mm)	—		
	F _x	荷重* (kN)	—		
	F _y	荷重* (kN)	—		
	F _z	荷重* (kN)	—		
	A	断面積 (mm ²)	1.185×10 ⁴		a・t
	Z _x	断面係数 (mm ³)	3.417×10 ⁵		$\frac{a \cdot t^2}{6}$
Z _y	断面係数 (mm ³)	1.353×10 ⁵	$\frac{a^2 \cdot t}{6}$		
外荷重	F	力* (kN)	4.7 9.3	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
	M _x	モーメント* (N・mm)	-4.559×10 ⁵ -9.021×10 ⁵	F _y ・l + F _z ・l _y	
	M _y	モーメント* (N・mm)	0.0 0.0	-F _x ・l - F _z ・l _x	
計算結果	σ _{z1}	引張応力* (MPa)	-3 -7	$-\frac{F_z}{A}$	
	σ _{z2}	曲げ応力* (MPa)	±1 ±3	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
	τ	平均せん断応力* (MPa)	0 1	$\frac{F}{A}$	

注記*：上段は許容応力状態Ⅲ_ASにおける値を示し，下段は許容応力状態Ⅳ_ASにおける値を示す。

表 1(4) ブラケット付根の応力計算 (低圧注水スパージャブラケット)

形状・寸法	a	幅 (mm)	68.5		
	t	高さ (mm)	173.0		
	l	荷重点の距離 (mm)	97.0		
	l _x	荷重点の距離 (mm)	—		
	l _y	荷重点の距離 (mm)	—		
	F _x	荷重* (kN)	—		
	F _y	荷重* (kN)	—4.7 —9.3		
	F _z	荷重* (kN)	39.7 78.9		
	A	断面積 (mm ²)	1.185×10 ⁴		a・t
	Z _x	断面係数 (mm ³)	3.417×10 ⁵		$\frac{a \cdot t^2}{6}$
Z _y	断面係数 (mm ³)	1.353×10 ⁵	$\frac{a^2 \cdot t}{6}$		
外荷重	F	力* (kN)	4.7 9.3	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
	M _x	モーメント* (N・mm)	-4.559×10 ⁵ -9.021×10 ⁵	F _y ・l + F _z ・l _y	
	M _y	モーメント* (N・mm)	0.0 0.0	-F _x ・l - F _z ・l _x	
計算結果	σ _{Z1}	引張応力* (MPa)	-3 -7	$-\frac{F_z}{A}$	
	σ _{Z2}	曲げ応力* (MPa)	±1 ±3	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
	τ	平均せん断応力* (MPa)	0 1	$\frac{F}{A}$	

注記* : 上段は許容応力状態Ⅲ_ASにおける値を示し, 下段は許容応力状態Ⅳ_ASにおける値を示す。

表2 一次応力評価における応力比と機械的荷重による応力変動の代表計算を行うブラケットの選択

機 器 (材 料)	応力分類	P _m		P _L + P _b	
	許容応力状態	ⅢA S	ⅣA S	ⅢA S	ⅣA S
スタビライザブラケット (SQV2A)	応力強さ (MPa)	19	20	59	62
	許容応力 (MPa)	303	326	454	490
	応 力 比	0.063	0.061	0.130	0.127
蒸気乾燥器支持ブラケット (SFVQ1A)	応力強さ (MPa)	16	25	71	112* ¹
	許容応力 (MPa)	303	320	454	481
	応 力 比	0.053	0.078	0.156	0.233
給水スパーチャブラケット (SUSF316)	応力強さ (MPa)	4	7	5	10
	許容応力 (MPa)	142	280	214	420
	応 力 比	0.028	0.025	0.023	0.024
低圧注水スパーチャブラケット (SUSF316)	応力強さ (MPa)	4	7	5	10
	許容応力 (MPa)	142	280	214	420
	応 力 比	0.028	0.025	0.023	0.024

注記*1：全てのブラケットのうち、一次応力が最大となる応力強さを示す。

表3 ブラケットの一次+二次応力強さの代表評価

	ブラケット	備考
一次+二次応力差最大範囲 S _n ^{#2} (MPa)	224	一次膜+一次曲げ応力 (P _L + P _b) が最大の蒸気乾燥器支持ブラケットの一次+二次応力強さ
一次+二次応力強さの許容応力 3・S _m (MPa)	360	全てのブラケットの材料のうち、3・S _m が最も小さいSUSF316の許容応力

表4 RPVブラケット類の疲労評価不要の条件とその評価

適用 J S M E S N C 1 -2005/2007 PVB-3140			評 価	疲労評価 要否判定
項目	条 件	判定基準		
(1)	大気圧ー運転圧力 変動回数	$N_1 \leq N_a$	使用している材料について、PVB-3140(1)における N_a の最小値は <input type="text"/> 回であり、評価の基準となる N_1 (起動・停止回数) の <input type="text"/> 回よりも多く、疲労評価不要の条件を満たす。	不要
(2)	運転時の圧力変動	$\Delta P \leq A_{m2}$	使用している材料について、PVB-3140(2)b. における A_{m2} の最小値は <input type="text"/> MPaであり、評価の基準となる ΔP (起動時、停止時及び耐圧試験時を除く供用状態A及び供用状態Bにおける実際の圧力変動幅) の <input type="text"/> MPaより大きく、疲労評価不要の条件を満たす。	不要
(3)	起動時及び停止時の 温度差	$\Delta T \leq T_1$	使用している材料について、PVB-3140(3)における T_1 の最小値は <input type="text"/> °Cである。 <input type="text"/> 疲労評価不要の条件を満たす。	不要
(4)	運転時の温度差変動	$\Delta T_R \leq T_1$	使用している材料について、PVB-3140(4)における T_2 の最小値としてSUSF316の <input type="text"/> °Cを考慮した場合に、起動時及び停止時を除く供用状態A及び供用状態Bにおいて T_2 を超える領域温度変動回数は、領域Aにおいては <input type="text"/> 回、領域Bにおいては <input type="text"/> 回である。この場合、領域A及びBで求められる T_1 の最小値は <input type="text"/> °Cとなる。評価の基準となる ΔT_R (起動時及び停止時を除く供用状態A及び供用状態Bの領域最大温度変動幅) は、RPVサーマルサイクルでは領域Aで <input type="text"/> °C、領域Bで <input type="text"/> °Cであり、疲労評価不要の条件を満たす。	不要
(5)	異なる材料よりなる 部分の温度変動	$\Delta T \leq T_1$	使用している材料について、PVB-3140(5)における T の最小値として領域Aにおいて <input type="text"/> °C、領域Bにおいて <input type="text"/> °Cを考慮した場合に、供用状態A及び供用状態Bに対し T を超える領域温度変動回数は、領域Aにおいて <input type="text"/> 回、領域Bにおいて <input type="text"/> 回である。この場合、 T_1 の最小値は <input type="text"/> °Cとなる。評価の基準となる ΔT (供用状態A及び供用状態Bの最大温度変動幅) は、RPVサーマルサイクルでは <input type="text"/> °Cであり、疲労評価不要の条件を満たす。	不要
(6)	機械的荷重による 応力変動	$\Delta \sigma \leq S$	一次応力評価で許容応力に対する応力比が最も小さくなる蒸気乾燥器支持ブラケットにおいて、応力変動幅 $\Delta \sigma$ は <input type="text"/> MPaであり、評価の基準となる S (地震繰り返し回数200回に対する最大応力変動幅) の <input type="text"/> MPaを下回ることで、疲労評価不要の条件を満たす。	不要

表5 蒸気乾燥器支持ブラケットの繰返しピーク応力強さ

	蒸気乾燥器支持ブラケット (SFVQ1A)
	S _s (200回)
一次+二次+ピーク応力差最大範囲 S _p ^{#2} (MPa) *1	784
繰返しピーク応力強さ S ₀ ^{#2} (MPa)	392
補正繰返しピーク応力強さ S ₀ ' ^{#2} (MPa) *2,3	
地震繰返し回数に対応した許容繰返しピーク応力強さ (MPa)	

注記*1：応力集中係数は引用文献[1]付録2に示す計算式により $K_n = \square$, $K_b = \square$ と計算し、その最大値 \square を一律に考慮した。

*2：補正繰返しピーク応力強さ S₀'^{#2} を計算する際に、E₀/Eは \square を一律に考慮した。

*3：補正繰返しピーク応力強さ S₀'^{#2} は、地震繰返し回数に対応した許容繰返しピーク応力強さを満たす。

引用図書及び文献

- [1] 第5回工事計画認可申請書 添付書類 IV-3-1-2-1 原子炉压力容器の応力解析の方針
- [2] 第5回工事計画認可申請書 添付書類 IV-3-1-2-19 ブラケット類の応力計算書
- [3] 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007)

以上