

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-28 改 02
提出年月日	2023年2月22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2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. 評価の考え方	1
2.1 一次+二次応力の評価について	1
2.2 疲労評価について	1
3. 結論	2

1. 概要

本資料は、添付書類VI-2-3-3-1-1「原子炉压力容器の応力解析の方針」及びVI-2-3-3-1-2「原子炉压力容器の耐震性についての計算書」において、ブラケット類の一次+二次応力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ものである。

2. 評価の考え方

ブラケット類は、原子炉压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^[1]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、一次応力及び一次+二次応力は、外荷重に比例した値となる。このため、一次応力の評価における最も厳しい応力比（応力強さ/許容応力）が一次+二次応力の応力比より大きい場合、一次応力が限界に達するところまで荷重を増大させたとしても、一次+二次応力は許容応力に対してまだ余裕がある。従って、先に限界に達する一次応力が許容応力を満足していれば、一次+二次応力も許容応力を満足するため、一次+二次応力の評価を省略することが可能である。なお、許容応力はVI-2-3-3-1-1「原子炉压力容器の応力解析の方針」の表 3-3 に従って計算する。

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 よりブラケット類の耐震計算結果から一次膜+一次曲げ（ $P_L + P_b$ ）で応力比（応力強さ/許容応力）が厳しい蒸気乾燥器支持ブラケットに着目し、一次+二次応力強さを算出する。

ブラケット付根の一次+二次応力は、引用文献[4]に基づき計算される。計算された応力から算出したブラケット付根の一次+二次応力強さの評価を表 3 に示す。なお、計算の概要は別紙に示す。

表 3 に示すとおり、一次+二次応力強さ S_n は許容値（ $3 \cdot S_m$ ）を下回る。また、一次応力の応力比は、一次+二次応力の応力比よりも大きいことから、一次+二次応力の評価は一次応力の評価で代表可能である。このため、ブラケット類では一次+二次応力の評価を省略する。

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^[1]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^[1]における疲労評価不要の条件（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) は、既工認の応力解析の方針^[2]の図 4-1 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^[3]のブラケット及びその取付部に使用している材料 (SQV2A, 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) 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+二次及びピーク応力は、一次応力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円筒胴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、2.1 と同様に蒸気乾燥器支持ブラケットに着目し、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' を計算した結果を示す。表 5 より、S d 地震の補正繰返しピーク応力強さ S_e' は MPa, S s 地震の補正繰返しピーク応力強さ S_e' は MPa となり、S d 地震繰返し回数 300 回に対応する許容繰返しピーク応力強さの MPa 及び S s 地震繰返し回数 150 回に対応する許容繰返しピーク応力強さの MPa をそれぞれ下回ることから、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+二次応力の評価は、一次応力の評価で代表することが可能であるため評価を省略し、疲労評価は、設計・建設規格^[1]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^[3]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 (スタビライザブラケット)

形状・寸法	a	幅 (mm)	403.70		
	t	高さ (mm)	147.80		
	ℓ	荷重点の距離 (mm)	254.80		
	ℓ _x	荷重点の距離 (mm)	201.85		
	ℓ _y	荷重点の距離 (mm)	0.00		
	F _x	荷重* (kN)	±4.150×10 ³ ±4.950×10 ³		
	F _y	荷重* (kN)	0.000 0.000		
	F _z	荷重* (kN)	0.000 0.000		
	A	断面積 (mm ²)	5.967×10 ⁴		a・t
	Z _x	断面係数 (mm ³)	1.470×10 ⁶		$\frac{a \cdot t^2}{6}$
	Z _y	断面係数 (mm ³)	4.015×10 ⁶		$\frac{a^2 \cdot t}{6}$
外荷重	F	力* (kN)	4.150×10 ³ 4.950×10 ³	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
	M _x	モーメント* (kN・mm)	0.000 0.000	F _y ・ℓ + F _z ・ℓ _y	
	M _y	モーメント* (kN・mm)	±1.057×10 ⁶ ±1.261×10 ⁶	-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)	±264 ±315	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
	τ	平均せん断応力* (MPa)	70 83	$\frac{F}{A}$	

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)	100.00		
	t	高さ (mm)	300.00		
	ℓ	荷重点の距離* (mm)			114.60
					110.20
	ℓ _x	荷重点の距離 (mm)	0.00		
	ℓ _y	荷重点の距離 (mm)	150.00		
	F _x	荷重* (kN)			±5.329×10 ²
					±1.219×10 ³
	F _y	荷重* (kN)			−3.112×10 ²
					−4.268×10 ²
	F _z	荷重* (kN)			±1.556×10 ²
					±2.134×10 ²
A	断面積 (mm ²)	3.000×10 ⁴	a・t		
Z _x	断面係数 (mm ³)	1.500×10 ⁶	$\frac{a \cdot t^2}{6}$		
Z _y	断面係数 (mm ³)	5.000×10 ⁵	$\frac{a^2 \cdot t}{6}$		
外荷重	F	力* (kN)	6.171×10 ²	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
			1.291×10 ³		
	M _x	モーメント* (kN・mm)	−5.900×10 ⁴	F _y ・ℓ + F _z ・ℓ _y	
−7.904×10 ⁴					
M _y	モーメント* (kN・mm)	±6.107×10 ⁴	−F _x ・ℓ − F _z ・ℓ _x		
		±1.343×10 ⁵			
計算結果	σ _{z1}	引張応力* (MPa)	±6	$-\frac{F_z}{A}$	
			±8		
	σ _{z2}	曲げ応力* (MPa)	±162	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
±322					
τ	平均せん断応力* (MPa)	21	$\frac{F}{A}$		
		43			

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 (給水スパージブラケット)

形状・寸法	a	幅	(mm)	68.50		
	t	高さ	(mm)	176.30		
	l	荷重点の距離	(mm)	99.60		
	lx	荷重点の距離	(mm)	0.00		
	ly	荷重点の距離	(mm)	0.00		
	F _x	荷重*	(kN)	±9.200 ±26.20		
	F _y	荷重*	(kN)	±6.800 ±19.40		
	F _z	荷重*	(kN)	-15.90 -28.50		
	A	断面積	(mm ²)	1.208×10 ⁴		a・t
	Z _x	断面係数	(mm ³)	3.548×10 ⁵		$\frac{a \cdot t^2}{6}$
	Z _y	断面係数	(mm ³)	1.379×10 ⁵		$\frac{a^2 \cdot t}{6}$
外荷重	F	力*	(kN)	11.44 32.60	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
	M _x	モーメント*	(kN・mm)	±6.773×10 ² ±1.932×10 ³	F _y ・l + F _z ・l _y	
	M _y	モーメント*	(kN・mm)	∓9.163×10 ² ∓2.610×10 ³	-F _x ・l - F _z ・l _x	
計算結果	σ _{z1}	引張応力*	(MPa)	2 3	$-\frac{F_z}{A}$	
	σ _{z2}	曲げ応力*	(MPa)	±9 ∓25	$\pm \frac{M_x}{Z_x} \pm \frac{M_y}{Z_y}$	
	τ	平均せん断応力*	(MPa)	1 3	$\frac{F}{A}$	

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 (炉心スプレイブラケット)

形状・寸法	d	直径 (mm)	50.80		
	ℓ	荷重点の距離 (mm)	138.70		
	F _x	荷重*	(kN)		±4.700
					±12.40
	F _y	荷重*	(kN)		±4.200
					±11.10
	F _z	荷重*	(kN)		-4.400
-11.30					
A	断面積 (mm ²)	2.027×10 ³	$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$		
Z	断面係数 (mm ³)	1.287×10 ⁴	$\frac{\pi \cdot d^3}{32}$		
外荷重	F	力* (kN)	6.303	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
			16.64		
M	モーメント* (kN・mm)		8.743×10 ²	$\ell \cdot \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	
			2.308×10 ³		
計算結果	σ _{z1}	引張応力* (MPa)	3	$-\frac{F_z}{A}$	
			6		
	σ _{z2}	曲げ応力* (MPa)		±68	$\pm \frac{M}{Z}$
				±180	
	τ	平均せん断応力* (MPa)		4	$\frac{F}{A}$
9					

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	ⅢAS	ⅣAS	ⅢAS	ⅣAS
スタビライザブラケット (SQV2A)	応力強さ (MPa)	140	167	298	356
	許容応力 (MPa)	303	326	454	490
	応 力 比	0.462	0.512	0.656	0.727
蒸気乾燥器支持ブラケット (SUSF316)	応力強さ (MPa)	42	87	172	340
	許容応力 (MPa)	143	284	214	427
	応 力 比	0.294	0.306	0.804	0.796
給水スパージャブラケット (SUSF316)	応力強さ (MPa)	3	6	34	71
	許容応力 (MPa)	143	284	214	427
	応 力 比	0.021	0.021	0.159	0.166
炉心スプレイブラケット (SUSF316)	応力強さ (MPa)	7	18	71	186
	許容応力 (MPa)	143	284	214	427
	応 力 比	0.049	0.063	0.332	0.436

表 3 蒸気乾燥器支持ブラケットの一次+二次応力の評価

項目	S _d	S _s
一次+二次応力強さ S _n (MPa)	84	161
一次+二次応力強さの許容応力 3・S _m (MPa)	360	360
応力比	0.233	0.447

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

項目	S d (300回)	S s (150回)
一次+二次+ピーク応力強さ S_p (MPa) *1	167	322
繰返しピーク応力強さ S_0 (MPa)	84	161
補正繰返しピーク応力強さ S_0' (MPa) *2, 3	□	□
地震繰返し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 S_0' を計算する際に， E_0/E はオーステナイト系ステンレス鋼の値 \square を一律に考慮した。

*3：補正繰返しピーク応力強さ S_0' は，地震繰返し回数に対応した許容繰返しピーク応力を満たす。

引用図書及び文献

[1] 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)

[2] 第5回工事計画認可申請書 添付書類 IV-3-1-1-1 「原子炉圧力容器の応力解析の方針」

[3] 第5回工事計画認可申請書 添付書類 IV-3-1-1-22 「ブラケット類の応力計算書」

[4] March 1979 Revision of WRC Bulletin 107/August 1965

"Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings"

蒸気乾燥器支持ブラケットの一次+二次応力強さ及び繰返しピーク応力強さ

蒸気乾燥器支持ブラケットの一次+二次応力強さ及び繰返しピーク応力強さの計算における荷重条件，応力値を別表 1，2 に示す。

別表 1 一次+二次応力強さ及び繰返しピーク応力強さ (S d)

荷重条件

軸方向モーメント M_L : kN・m ($V_L \cdot L$ を含む)

軸方向せん断力 V_L : kN

周方向モーメント M_c : kN・m ($V_c \cdot L$ を含む)

周方向せん断力 V_c : kN

形状

板厚 T : mm

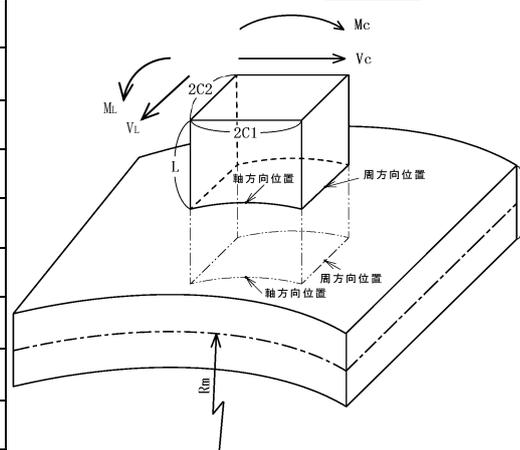
平均半径 R_m : mm

板幅 $2C1$: mm

板幅 $2C2$: mm

モーメントアーム L^{*1} : mm

		応力値 (MPa) *2	
		軸方向位置	周方向位置
σ_t の和	σ_{tm} (局部膜応力)	± 2.1	± 1.8
	σ_{tb} (表面応力)	± 16.7	± 39.8
	σ_t (合計)	± 18.8	± 41.6
σ_ℓ の和	$\sigma_{\ell m}$ (局部膜応力)	± 1.8	± 1.9
	$\sigma_{\ell b}$ (表面応力)	± 23.5	± 22.1
	σ_ℓ (合計)	± 25.3	± 24.0
せん断応力 (円筒胴)		± 19.5	± 3.8



一次+二次応力強さ S_n^{*1} : 84MPa

繰返しピーク応力強さ $S_\ell^{*1 *3}$: 84MPa

補正繰返しピーク応力強さ $S_\ell'^{*1 *4}$: MPa

注：引用文献[4]に基づく計算結果を示す。

注記*1：ブラケット付根から先端までの長さ

*2：応力の評価位置を右図に示す。

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

*4：補正繰返しピーク応力強さ $S_\ell'^{*1}$ を計算する際に， E_0/E は使用している材料の中の最大値 を一律に考慮した。

別表2 一次+二次応力強さ及び繰返しピーク応力強さ (S s)

荷重条件

軸方向モーメント M_L : kN・m ($V_L \cdot L$ を含む)

軸方向せん断力 V_L : kN

周方向モーメント M_c : kN・m ($V_c \cdot L$ を含む)

周方向せん断力 V_c : kN

形状

板厚 T : mm

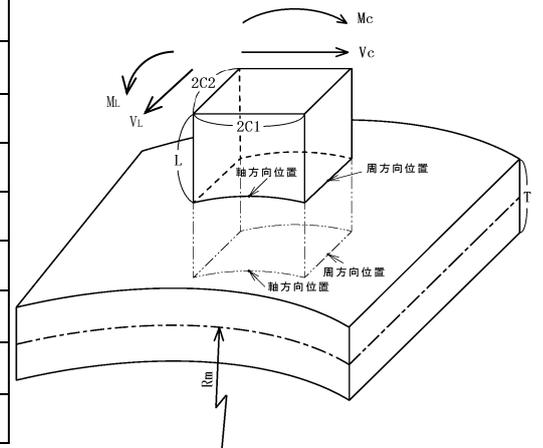
平均半径 R_m : mm

板幅 $2C_1$: mm

板幅 $2C_2$: mm

モーメントアーム L^{*1} : mm

		応力値 (MPa) *2	
		軸方向位置	周方向位置
σ_t の和	σ_{tm} (局部膜応力)	± 2.9	± 2.5
	σ_{tb} (表面応力)	± 23.0	± 78.0
	σ_t (合計)	± 25.9	± 80.5
σ_ℓ の和	$\sigma_{\ell m}$ (局部膜応力)	± 2.4	± 2.6
	$\sigma_{\ell b}$ (表面応力)	± 32.2	± 40.7
	σ_ℓ (合計)	± 34.6	± 43.3
せん断応力 (円筒胴)		± 44.5	± 5.2



一次+二次応力強さ S_n^{*2} : 161MPa

繰返しピーク応力強さ $S_\ell^{*2 *3}$: 161MPa

補正繰返しピーク応力強さ $S_\ell'^{*2 *4}$: MPa

注：引用文献[4]に基づく計算結果を示す。

注記*1：ブラケット付根から先端までの長さ

*2：応力の評価位置を右図に示す。

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

*4：補正繰返しピーク応力強さ $S_\ell'^{*2}$ を計算する際に、 E_0/E は使用している材料の中の最大値 を一律に考慮した。