

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7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7添-2-042-8-3 改2
提出年月日	2020年8月19日

V-2-10-2-4-3(3) アクムレータの耐震性についての計算書

K7 ① V-2-10-2-4-3(3) R0

2020年8月

東京電力ホールディングス株式会社

(3) アキュムレータの耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用規格・基準等	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	9
3. 評価部位	10
4. 固有周期	11
4.1 固有周期の計算方法	11
4.2 固有周期の計算条件	12
4.3 固有周期の計算結果	12
5. 構造強度評価	13
5.1 構造強度評価方法	13
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	13
5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	13
5.2.2 許容応力	13
5.2.3 使用材料の許容応力評価条件	13
5.3 設計用地震力	18
5.4 計算方法	19
5.4.1 応力の計算方法	19
5.5 計算条件	26
5.6 応力の評価	26
5.6.1 胴の応力評価	26
5.6.2 脚の応力評価	26
6. 評価結果	27
6.1 設計基準対象施設としての評価結果	27
7. 引用文献	31

1. 概要

本計算書は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、原子炉補機冷却海水系ポンプ室取水計測装置空気供給用アキュムレータ（以下「アキュムレータ」という。）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

アキュムレータは、設計基準対象施設においてはSクラス施設に分類される。以下、設計基準対象施設としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

アキュムレータの構造計画を表2-1に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>胴を 1 個の脚で支持し、脚を溶接で架台に据え付ける。</p>	<p>両端に平板を有する縦置円筒形容器</p>	<p>(単位 : mm)</p>

2.2 評価方針

アキュムレータの応力評価は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示すアキュムレータの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」にて算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 評価結果」に示す。

アキュムレータの耐震評価フローを図2-1に示す。

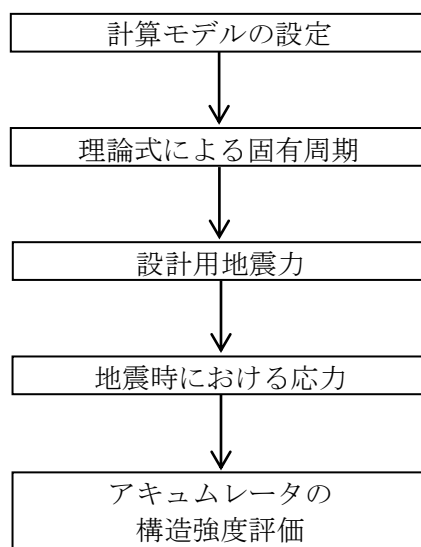


図2-1 アキュムレータの耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984
（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 （（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・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）（以下「設計・建設規格」という。）

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_s	脚の断面積	mm^2
A_{s1}	脚の鉛直方向に対する有効せん断断面積	mm^2
A_{s2}	脚の横方向に対する有効せん断断面積	mm^2
A_{s3}	脚の鉛直方向に対するせん断断面積	mm^2
A_{s4}	脚の横方向に対するせん断断面積	mm^2
C_{cj}	周方向モーメントによる応力の補正係数（引用文献(2)より得られる値）（ $j=1$:周方向応力, $j=2$:軸方向応力）	—
C_H	水平方向設計震度	—
$C_{\ell j}$	軸方向モーメントによる応力の補正係数（引用文献(2)より得られる値）（ $j=1$:周方向応力, $j=2$:軸方向応力）	—
C_v	鉛直方向設計震度	—
C_1	脚の横方向幅の2分の1	mm
C_2	脚の鉛直方向幅の2分の1	mm
D_i	胴の内径	mm
E_s	脚の縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1 (1) に定める値	MPa
f_t	脚の許容引張応力	MPa
G_s	脚のせん断弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
h_1	架台から脚の胴付け根部までの長さ	mm
h_2	架台から胴の中心までの長さ	mm
I_{sx}	脚の鉛直方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
I_{sy}	脚の横方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
K_{1j}, K_{2j}	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数（ $j=1$:周方向応力, $j=2$:軸方向応力）	—
K_a	ばね定数（胴の横方向に水平力が作用する場合）	N/m
K_b	ばね定数（胴の鉛直方向に鉛直力が作用する場合）	N/m
$K_{cj}, K_{\ell j}$	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数（ $j=1$:周方向応力, $j=2$:軸方向応力）	—
M	運転時質量により胴の脚付け根部に作用する曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_c	胴の横方向地震により胴の脚付け根部に作用する曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_e	鉛直方向地震により胴の脚付け根部に作用する曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_x	胴に生じる軸方向の曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$
M_ϕ	胴に生じる周方向の曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$
m_o	容器の運転時質量	kg

記号	記号の説明	単位
N_x	胴に生じる軸方向の膜力	N/mm
N_ϕ	胴に生じる周方向の膜力	N/mm
P_c	脚の軸方向地震により胴の脚付け根部に作用する反力	N
P_r	最高使用圧力	MPa
r_m	脚付け根部における胴の平均半径	mm
r_o	脚付け根部における胴の外半径	mm
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5に定める値	MPa
S_a	胴の許容応力	MPa
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
T_1	水平方向固有周期	s
T_2	鉛直方向固有周期	s
t	胴板の厚さ	mm
Z_{sx}	脚の鉛直方向軸に対する断面係数	mm ³
Z_{sy}	脚の横方向軸に対する断面係数	mm ³
β, β_1, β_2	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータ	—
γ	引用文献(2)によるシェルパラメータ	—
π	円周率	—
σ_0	胴の組合せ一次一般膜応力の最大値	MPa
σ_{0x}	胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{0\phi}$	胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
σ_1	胴の組合せ一次応力の最大値	MPa
σ_{1c}	鉛直方向と胴の横方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1cx}	鉛直方向と胴の横方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1c\phi}$	鉛直方向と胴の横方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_{1p}	鉛直方向と脚の軸方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1px}	鉛直方向と脚の軸方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1p\phi}$	鉛直方向と脚の軸方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_2	地震動のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和の変動値の最大値	MPa
σ_{2p}	鉛直方向と脚の軸方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa

記号	記号の説明	単位
σ_{2c}	鉛直方向と胴の横方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa
σ_{2cx}	鉛直方向と胴の横方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2c\phi}$	鉛直方向と胴の横方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
σ_{2px}	鉛直方向と脚の軸方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2p\phi}$	鉛直方向と脚の軸方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
σ_s	脚の組合せ応力の最大値	MPa
σ_{sc}	鉛直方向と胴の横方向地震が作用した場合の脚の組合せ応力	MPa
σ_{sp}	鉛直方向と脚の軸方向地震が作用した場合の脚の組合せ応力	MPa
σ_{s1}	運転時質量により脚に生じる曲げ応力	MPa
σ_{s2}	鉛直方向地震により脚に生じる曲げ応力	MPa
σ_{s3}	胴の横方向地震により脚に生じる曲げ応力	MPa
σ_{s4}	脚の軸方向地震により脚に生じる圧縮応力	MPa
$\sigma_{\phi 1}, \sigma_{x 1}$	内圧により胴に生じる周方向及び軸方向応力	MPa
$\sigma_{\phi 2}, \sigma_{x 2}$	運転時質量により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 3}, \sigma_{x 3}$	鉛直方向地震により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 4}, \sigma_{x 4}$	胴の横方向地震により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi 5}, \sigma_{x 5}$	脚の軸方向地震により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 3}, \sigma_{2x 3}$	鉛直方向地震により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 4}, \sigma_{2x 4}$	胴の横方向地震により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向二次応力	MPa
$\sigma_{2\phi 5}, \sigma_{2x 5}$	脚の軸方向地震により胴の脚付け根部に生じる周方向及び軸方向二次応力	MPa

記号	記号の説明	単位
τ_c	胴の横方向地震により胴の脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_d	運転時質量により胴の脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{de}	鉛直方向地震により胴の脚付け根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{s1}	運転時質量により脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s2}	鉛直方向地震により脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s3}	胴の横方向地震により脚に生じるせん断応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりとする。

表2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
震度	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用圧力	MPa	—	—	小数点以下第2位
温度	℃	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	整数位 ^{*1}
	胴板の厚さ	mm	—	小数点以下第1位
面積	mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*3}	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は、小数点以下第1位表示とする。

*2：絶対値が1000以上のときはべき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

アキュムレータの耐震評価は、「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる胴板及び脚について評価を実施する。アキュムレータの耐震評価部位については、表2-1の概略構造図に示す。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

アキュムレータの固有周期の計算方法を以下に示す。

(1) 計算モデル

- a. アキュムレータの質量は、重心に集中するものとする。
- b. アキュムレータは胴を1個の脚で支持し、脚は溶接で架台に据え付けているため、固定端とする。
- c. 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。
- d. アキュムレータの荷重状態及び胴板に生じるモーメントを図4-1及び図4-2に示す。

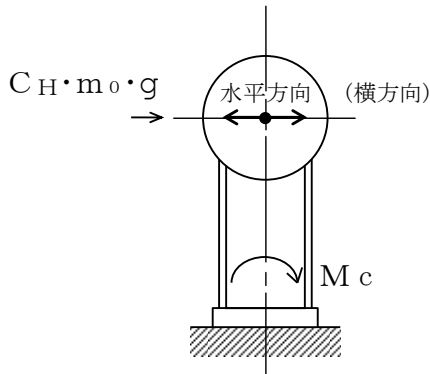


図4-1 水平方向荷重による胴の脚付け根部のモーメント

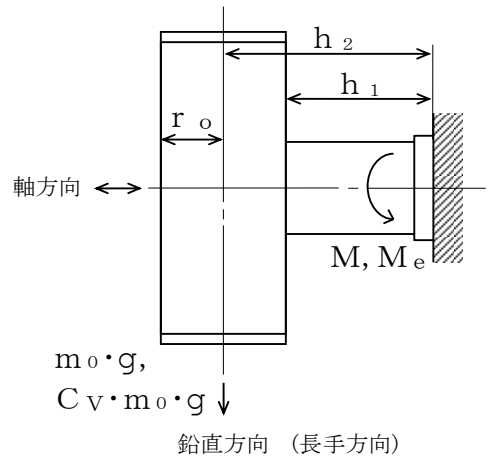


図4-2 鉛直方向荷重による胴の脚付け根部のモーメント

- e. アキュムレータは、図4-3に示す一端固定の1質点系振動モデルとして考える。

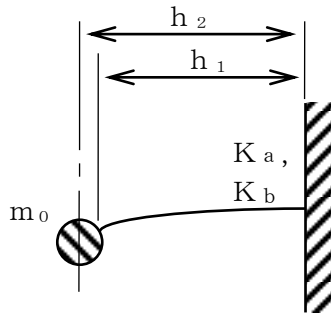


図4-3 固有周期の計算モデル

(2) 水平方向固有周期 (胴の横方向)

図4-3における水平方向のばね定数は次式で求める。

$$K_a = \frac{1000}{\frac{h_1^2 \cdot (3 \cdot h_2 - h_1)}{6 \cdot E_s \cdot I_{sx}} + \frac{(h_2 - h_1) \cdot h_1 \cdot (h_2 - h_1 / 2)}{E_s \cdot I_{sx}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s2}}} \dots \dots \dots (4.1.1)$$

水平方向固有周期は次式で求める。

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{K_a}} \dots \dots \dots (4.1.2)$$

(3) 鉛直方向固有周期（胴の長手方向）

図 4-3 における鉛直方向のばね定数は次式で求める。

$$K_b = \frac{1000}{\frac{h_1^2 \cdot (3 \cdot h_2 - h_1)}{6 \cdot E_s \cdot I_{sy}} + \frac{(h_2 - h_1) \cdot h_1 \cdot (h_2 - h_1 / 2)}{E_s \cdot I_{sy}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s1}}} \quad \dots\dots\dots (4.1.3)$$

鉛直方向固有周期は次式で求める。

$$T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{K_b}} \quad \dots\dots\dots (4.1.4)$$

4.2 固有周期の計算条件

固有周期の計算に用いる計算条件は、本計算書の【アキュムレータの耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

4.3 固有周期の計算結果

固有周期の計算結果を表4-1に示す。計算の結果、固有周期は0.05秒以下であり、剛であることを確認した。

表4-1 固有周期 (単位：s)

水平方向	<input type="text"/>
鉛直方向	<input type="text"/>

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.1項 a. ～e. のほか、次の条件で計算する。

地震力はアキュムレータに対して水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

アキュムレータの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表5-1に示す。

5.2.2 許容応力

アキュムレータの許容応力は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表5-2及び表5-3のとおりとする。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

アキュムレータの使用材料の許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表5-4に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
その他発電 用原子炉の 附属施設	浸水防護 施設	取水槽水位計 （原子炉補機冷却海水系 ポンプ室取水水位計測装置 空気供給用アキュムレータ）	S	クラス3容器 [*]	$D + P_D + M_D + S_s$	ⅢA S

注記*：クラス3容器の支持構造物を含む。

表 5-2 許容応力 (クラス 2, 3 容器)

許容応力状態	許容限界 ^{*1, *2}			
	一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力
Ⅲ _A S	S _y と 0.6・S _u の小さい方 ただし、オーステナイト系 ステンレス鋼及び高ニッケル 合金については上記値と 1.2・Sのうち大きい方	左欄の 1.5 倍の値	弾性設計用地震動 S _d 又は基準地震動 S _s のみ による疲労解析を行い、疲労累積係数が 1.0 以 下であること。 ただし、地震動のみによる一次+二次応力の変 動値が 2・S _y 以下であれば疲労解析は不 要。	

注記*1：座屈による評価は、クラスMC容器の座屈に対する評価式による。

*2：当該の応力が生じない場合、規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-3 許容応力 (クラス 2, 3 支持構造物)

許容応力状態	許容限界* (脚)
	一次応力
	組合せ
ⅢA S	$1.5 \cdot f_t$

注記* : 当該の応力が生じない場合, 規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-4 使用材料の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		最高使用温度					
胴板	SUS304TP	最高使用温度	66	126	188	479	—
脚	SS400 (厚さ ≤ 16mm)	周囲環境温度	50	—	241	394	—

5.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 5-5 に示す。

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s」による地震力は、
V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。

表 5-5 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度

注記*：基準床レベルを示す。

5.4 計算方法

5.4.1 応力の計算方法

応力計算は、絶対値和を用いて行う。

5.4.1.1 胴の応力

(1) 内圧による応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.1)$$

$$\sigma_{x 1} = \frac{P_r \cdot (D_i + 1.2 \cdot t)}{4 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.2)$$

(2) 運転時質量による脚付け根部の応力

運転時質量により脚付け根部に生じる曲げモーメントは次式で求める。

$$M = m_o \cdot g \cdot r_o \dots\dots\dots (5.4.1.1.3)$$

$$r_o = \frac{D_i}{2} + t \dots\dots\dots (5.4.1.1.4)$$

この曲げモーメントMにより生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は引用文献(2)より次のように求める。

脚が胴に及ぼす力の関係を図5-1に示す。

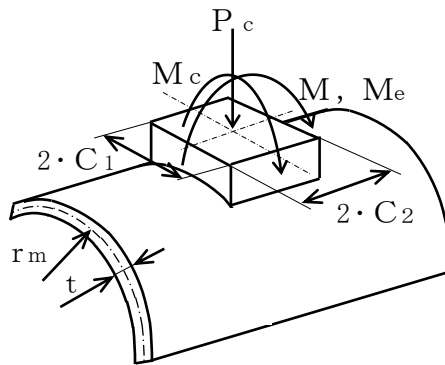


図5-1 脚が胴に及ぼす力の関係

ここで、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β は以下のように定義する。

$$\gamma = r_m / t \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.5)$$

$$\beta_1 = C_1 / r_m \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.6)$$

$$\beta_2 = C_2 / r_m \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.7)$$

$$r_m = (D_i + t) / 2 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.8)$$

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.9)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより応力は次式で求める。

$$\sigma_{\phi 2} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.10)$$

$$\sigma_{x 2} = \left\{ \frac{N_x}{M / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.11)$$

また、運転時質量が作用した場合、脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_d = \frac{m_o \cdot g}{4 \cdot C_2 \cdot t} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.12)$$

(3) 鉛直方向地震による脚付け根部の応力

鉛直方向地震により脚付け根部に生じる曲げモーメントは次式で求める。

$$M_e = C_v \cdot m_o \cdot g \cdot r_o \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.13)$$

曲げモーメント M_e により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図により値（以下*を付記するもの）を求めることにより (5.4.1.1.14) 式～ (5.4.1.1.17) 式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 3} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_e / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_e}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.14)$$

$$\sigma_{x 3} = \left\{ \frac{N_x}{M_e / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_e}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.15)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 3} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_e / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_e}{r_m \cdot \beta \cdot t^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.16)$$

$$\sigma_{2x 3} = \left\{ \frac{M_x}{M_e / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_e}{r_m \cdot \beta \cdot t^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.17)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β は、(5.4.1.1.9) 式と同様である。

ただし、二次応力を求める場合は、更に K_{lj} を乗じた値とする。

また、鉛直方向地震が作用した場合、脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_{de} = \frac{C_v \cdot m_0 \cdot g}{4 \cdot C_2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.18)$$

(4) 胴の横方向地震による脚付け根部の応力

胴の横方向地震により脚付け根部に生じる曲げモーメントは次式で求める。

$$M_c = C_H \cdot m_0 \cdot g \cdot r_o \dots\dots\dots (5.4.1.1.19)$$

曲げモーメント M_c により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値(以下*を付記するもの)を求めることにより(5.4.1.1.20)式～(5.4.1.1.23)式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 4} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t} \right) \cdot C_{c1} \dots\dots\dots (5.4.1.1.20)$$

$$\sigma_{x 4} = \left\{ \frac{N_x}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t} \right) \cdot C_{c2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.21)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 4} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r_m \cdot \beta \cdot t^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.22)$$

$$\sigma_{2x 4} = \left\{ \frac{M_x}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r_m \cdot \beta \cdot t^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.23)$$

ここで、アタッチメントパラメータ β は、

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.24)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

また、二次応力を求める場合は、更に K_{cj} を乗じた値とする。

胴の横方向地震が作用した場合、脚付け根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_c = \frac{C_H \cdot m_0 \cdot g}{4 \cdot C_1 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.25)$$

(5) 脚の軸方向地震による脚付け根部の応力

脚の軸方向地震により脚付け根部に生じる反力は次式で求める。

$$P_c = C_H \cdot m_0 \cdot g \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.26)$$

半径方向荷重 P_c により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値（以下*を付記するもの）を求めることにより (5.4.1.1.27) 式～ (5.4.1.1.30) 式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 5} = \left(\frac{N_\phi}{P_c / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_c}{r_m \cdot t} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.27)$$

$$\sigma_{x 5} = \left(\frac{N_x}{P_c / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_c}{r_m \cdot t} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.28)$$

二次応力

$$\sigma_{2\phi 5} = \left(\frac{M_\phi}{P_c} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_c}{t^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.29)$$

$$\sigma_{2x 5} = \left(\frac{M_x}{P_c} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_c}{t^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.30)$$

ここで、シェルパラメータ γ は(5.4.1.1.5)式と同じであるが、アタッチメントパラメータ β は次式による。

$4 \geq \beta_1 / \beta_2 \geq 1$ のとき

$$\beta = \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} - 1 \right) \cdot (1 - K_{1j}) \right) \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.31)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

$1/4 \leq \beta_1 / \beta_2 < 1$ のとき

$$\beta = \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \cdot (1 - K_{2j}) \right) \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.32)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

(6) 組合せ応力

(1)～(5)によって算出される脚付け根部に生じる胴の応力を以下のように組合せる。

a. 一次一般膜応力

$$\sigma_0 = \text{Max} \{ \text{周方向応力}(\sigma_{0\phi}), \text{軸方向応力}(\sigma_{0x}) \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.33)$$

ここで,

$$\sigma_{0\phi} = \sigma_{\phi 1} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.34)$$

$$\sigma_{0x} = \sigma_{x 1} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.35)$$

b. 一次応力

胴の横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1c\phi} + \sigma_{1cx}) + \sqrt{(\sigma_{1c\phi} - \sigma_{1cx})^2 + 4 \cdot (\tau_d + \tau_{de} + \tau_c)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.36)$$

ここで,

$$\sigma_{1c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.37)$$

$$\sigma_{1cx} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.38)$$

脚の軸方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1p} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1p\phi} + \sigma_{1px}) + \sqrt{(\sigma_{1p\phi} - \sigma_{1px})^2 + 4 \cdot (\tau_d + \tau_{de})^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.39)$$

ここで,

$$\sigma_{1p\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 5} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.40)$$

$$\sigma_{1px} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 5} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.41)$$

したがって、胴に生じる一次応力の最大値は、

$$\sigma_1 = \text{Max} \{ \text{胴の横方向地震時応力}(\sigma_{1c}), \text{脚の軸方向地震時応力}(\sigma_{1p}) \} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.42)$$

とする。

c. 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

胴の横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{2c} = (\sigma_{2c\phi} + \sigma_{2cx}) + \sqrt{(\sigma_{2c\phi} - \sigma_{2cx})^2 + 4 \cdot (\tau_{de} + \tau_c)^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.43)$$

ここで,

$$\sigma_{2c\phi} = \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{2\phi 3} + \sigma_{2\phi 4} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.44)$$

$$\sigma_{2cx} = \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4} + \sigma_{2x 3} + \sigma_{2x 4} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.45)$$

脚の軸方向地震が作用した場合

$$\sigma_{2p} = (\sigma_{2p\phi} + \sigma_{2px}) + \sqrt{(\sigma_{2p\phi} - \sigma_{2px})^2 + 4 \cdot \tau_{de}^2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.46)$$

ここで,

$$\sigma_{2p\phi} = \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 5} + \sigma_{2\phi 3} + \sigma_{2\phi 5} \dots \dots \dots (5.4.1.1.47)$$

$$\sigma_{2px} = \sigma_{x 3} + \sigma_{x 5} + \sigma_{2x 3} + \sigma_{2x 5} \dots \dots \dots (5.4.1.1.48)$$

したがって、胴に生じる地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値の最大値は、

$$\sigma_2 = \text{Max} \{ \text{胴の横方向地震時応力}(\sigma_{2c}), \text{脚の軸方向地震時応力}(\sigma_{2p}) \} \dots \dots \dots (5.4.1.1.49)$$

とする。

5.4.1.2 脚の応力

(1) 運転時質量による応力

曲げ応力は,

$$\sigma_{s1} = \frac{m_0 \cdot g \cdot h_2}{Z_{sy}} \dots \dots \dots (5.4.1.2.1)$$

せん断応力は,

$$\tau_{s1} = \frac{m_0 \cdot g}{A_{s3}} \dots \dots \dots (5.4.1.2.2)$$

(2) 鉛直方向地震による応力

曲げ応力は,

$$\sigma_{s2} = \frac{C_v \cdot m_0 \cdot g \cdot h_2}{Z_{sy}} \dots \dots \dots (5.4.1.2.3)$$

せん断応力は,

$$\tau_{s2} = \frac{C_v \cdot m_0 \cdot g}{A_{s3}} \dots \dots \dots (5.4.1.2.4)$$

(3) 胴の横方向地震による応力

曲げ応力は,

$$\sigma_{s3} = \frac{C_H \cdot m_0 \cdot g \cdot h_2}{Z_{sx}} \dots \dots \dots (5.4.1.2.5)$$

せん断応力は,

$$\tau_{s3} = \frac{C_H \cdot m_0 \cdot g}{A_{s4}} \dots \dots \dots (5.4.1.2.6)$$

(4) 脚の軸方向地震による圧縮応力

$$\sigma_{s4} = \frac{C_H \cdot m_0 \cdot g}{A_s} \dots \dots \dots (5.4.1.2.7)$$

(5) 組合せ応力

胴の横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{sc} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s3})^2 + 3 \cdot (\tau_{s1} + \tau_{s2} + \tau_{s3})^2}$$

..... (5.4.1.2.8)

脚の軸方向地震が作用した場合

$$\sigma_{sp} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3 \cdot (\tau_{s1} + \tau_{s2})^2}$$

..... (5.4.1.2.9)

したがって、脚に生じる最大応力は、

$$\sigma_s = \text{Max} \{ \text{胴の横方向地震時応力}(\sigma_{sc}), \text{脚の軸方向地震時応力}(\sigma_{sp}) \}$$

..... (5.4.1.2.10)

とする。

5.5 計算条件

胴及び脚の応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【アキュムレータの耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.6 応力の評価

5.6.1 胴の応力評価

5.4.1.1項で求めた組合せ応力が胴の最高使用温度における許容応力 S_a 以下であること。ただし、 S_a は下表による。

応力の種類	許容応力 S_a
	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
一次一般膜応力	設計降伏点 S_y と設計引張強さ S_u の0.6倍のいずれか小さい方の値 ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては許容引張応力 S の1.2倍の方が大きい場合はこの大きい方の値とする。
一次応力	上記の1.5倍の値
一次応力と二次応力の和	地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値が設計降伏点 S_y の2倍以下であれば、疲労解析は不要とする。

5.6.2 脚の応力評価

5.4.1.2項で求めた脚の組合せ応力が許容応力 f_t 以下であること。ただし、 f_t は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_t	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

アキュムレータの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

【アキュムレータの耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度 分類	据付場所及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度			
アキュムレータ	S								0.86	66	50

注記*：基準床レベルを示す。

1.2 機器要目

m _o (kg)	D _i (mm)	t (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	I _{sx} (mm ⁴)	I _{sy} (mm ⁴)	Z _{sx} (mm ³)	Z _{sy} (mm ³)	A _s (mm ²)	E _s (MPa)	G _s (MPa)
	297.9	10.3	126	250	100	100	4.720×10 ⁷	1.600×10 ⁷	4.720×10 ⁵	1.600×10 ⁵	6.353×10 ³	201000	77300

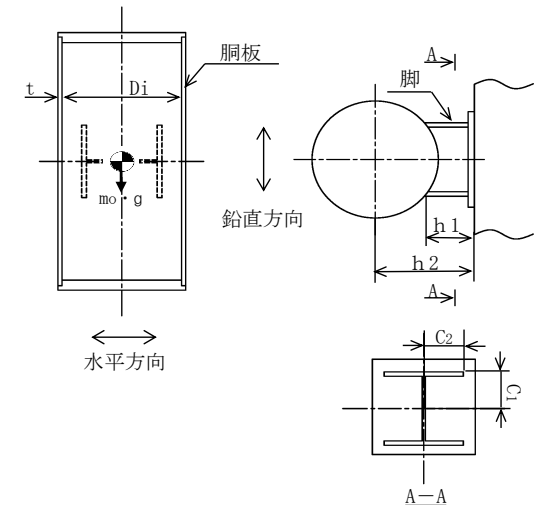
A _{s1} (mm ²)	A _{s2} (mm ²)	A _{s3} (mm ²)	A _{s4} (mm ²)	K ₁₁ *3	K ₁₂ *3	K ₂₁ *3	K ₂₂ *3	K _{ℓ1}	K _{ℓ2}	K _{c1}	K _{c2}	C _{ℓ1}	C _{ℓ2}	C _{c1}	C _{c2}
4.287×10 ³	1.588×10 ³	3.207×10 ³	1.437×10 ³			—	—								

S _y (胴板) (MPa)	S _u (胴板) (MPa)	S (胴板) (MPa)	S _y (脚) (MPa)	S _u (脚) (MPa)	F (脚) (MPa)
188 *1	479 *1	126 *1	241 *2 (厚さ≦16mm)	394 *2	241

注記 *1: 最高使用温度で算出

*2: 周囲環境温度で算出

*3: 表中で上段は一次応力, 下段は二次応力の係数とする。



1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

(単位：MPa)

地震の種類 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力	—	—	$\sigma_{\phi 1} = 13$	$\sigma_{x 1} = 7$
運転時質量による応力	—	—	—	—
鉛直方向地震による応力	—	—	—	—
水平方向地震による応力	—	—	—	—
組合せ応力	—		$\sigma_0 = 13$	

(2) 一次応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度				基準地震動 S _s			
	胴の横方向		脚の軸方向		胴の横方向		脚の軸方向	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
内圧による応力	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 1} = 13$	$\sigma_{x 1} = 7$	$\sigma_{\phi 1} = 13$	$\sigma_{x 1} = 7$
運転時質量による応力	引張り	—	—	—	$\sigma_{\phi 2} = 2$	$\sigma_{x 2} = 1$	$\sigma_{\phi 2} = 2$	$\sigma_{x 2} = 1$
	せん断	—		—		$\tau_{de} = 1$		$\tau_{de} = 1$
鉛直方向地震による応力	引張り	—	—	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$	$\sigma_{\phi 3} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$
	せん断	—		—		$\tau_{de} = 1$		$\tau_{de} = 1$
水平方向地震による応力	引張り	—	—	—	$\sigma_{\phi 4} = 2$	$\sigma_{x 4} = 4$	$\sigma_{\phi 5} = 2$	$\sigma_{x 5} = 2$
	せん断	—		—		$\tau_c = 1$		—
組合せ応力	—		—		$\sigma_{1c} = 18$		$\sigma_{1p} = 19$	

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度				基準地震動 S s			
		胴の横方向		脚の軸方向		胴の横方向		脚の軸方向	
		周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
鉛直方向地震による応力	引張り	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 3} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$	$\sigma_{\phi 3} = 2$	$\sigma_{x 3} = 1$
	せん断	—	—	—	—	$\sigma_{2\phi 3} = 3$	$\sigma_{2x 3} = 4$	$\sigma_{2\phi 3} = 3$	$\sigma_{2x 3} = 4$
水平方向地震による応力	引張り	—	—	—	—	$\sigma_{\phi 4} = 2$	$\sigma_{x 4} = 4$	$\sigma_{\phi 5} = 2$	$\sigma_{x 5} = 2$
	せん断	—	—	—	—	$\sigma_{2\phi 4} = 14$	$\sigma_{2x 4} = 7$	$\sigma_{2\phi 5} = 6$	$\sigma_{2x 5} = 4$
組合せ応力		—	—	—	—	$\tau_{de} = 1$		$\tau_{de} = 1$	
組合せ応力		—	—	—	—	$\tau_c = 1$		—	
組合せ応力		—	—	—	—	$\sigma_{2c} = 38$		$\sigma_{2p} = 23$	

1.3.2 脚に生じる応力

(単位：MPa)

地震の種類 地震の方向	地震の種類 地震の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
		胴の横方向	脚の軸方向	胴の横方向	脚の軸方向
		運動時質量による応力	曲げ	—	—
鉛直方向地震による応力	せん断	—	—	$\tau_{s1} = 1$	$\tau_{s1} = 1$
	曲げ	—	—	$\sigma_{s2} = 2$	$\sigma_{s2} = 2$
水平方向地震による応力	せん断	—	—	$\tau_{s2} = 1$	$\tau_{s2} = 1$
	曲げ	—	—	$\sigma_{s3} = 1$	—
	圧縮	—	—	—	$\sigma_{s4} = 1$
組合せ応力		—	—	$\tau_{s3} = 2$	—
組合せ応力		—	—	$\sigma_{sc} = 6$	$\sigma_{sp} = 5$

1.4 結論

1.4.1 固有周期

(単位：s)

方向	固有周期
水平方向	
鉛直方向	

1.4.2 応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板	SUS304TP	一次一般膜	—	—	$\sigma_0 = 13$	$S_a = 188$
		一次	—	—	$\sigma_1 = 19$	$S_a = 282$
		一次+二次	—	—	$\sigma_2 = 38$	$S_a = 377$
脚	SS400	組合せ	—	—	$\sigma_s = 6$	$f_t = 241$

すべて許容応力以下である。

7. 引用文献

- (1) Bijlaard, P.P.: Stresses from Radial Loads and External Moments in Cylindrical Pressure Vessels, The Welding Journal, 34(12), Research Supplement, 1955.
- (2) Wichman, K.R. et al.: Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107 / August 1965.