

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-808 改4
提出年月日	平成30年9月26日

V-2-4-3-3-1 代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震性について
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 適用基準	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	9
4. 固有周期	10
4.1 固有周期の計算方法	10
4.2 固有周期の計算条件	13
4.3 固有周期の計算結果	13
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
5.3 設計用地震力	18
5.4 計算方法	19
5.5 計算条件	27
5.6 応力の評価	27
6. 評価結果	28
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果	28
7. 引用文献	32

1. 概要

本計算書は、添付書類「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及び機能維持の設計方針に基づき、代替燃料プール冷却系熱交換器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。

代替燃料プール冷却系熱交換器は、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

代替燃料プール冷却系熱交換器の構造計画を表 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>代替燃料プール冷却系熱交換器は側板を2個の脚で支持し、架台に取付ボルトで設置する。</p>	<p>伝熱板、側板、脚を有するプレート式熱交換器</p>	<p>(単位: mm)</p>

2.2 評価方針

代替燃料プール冷却系熱交換器の応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針 3.1 構造強度上の制限」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」にて示す代替燃料プール冷却系熱交換器の部位を踏まえ「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。

代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

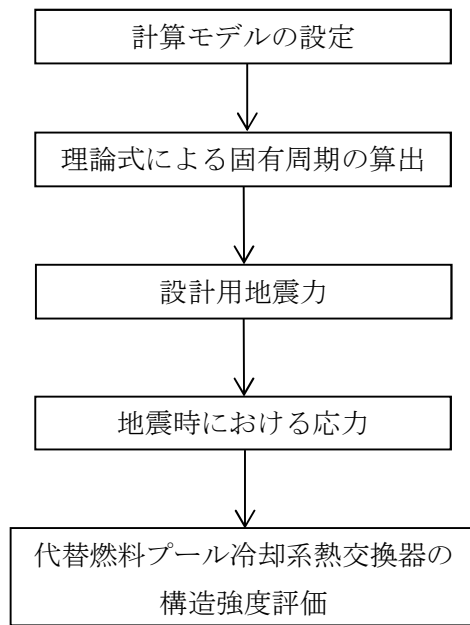


図 2-1 代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価フロー

2.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 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
(日本電気協会)
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 －1987 (日本電気協会)
- (3) 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 (日本電気協会)
- (4) 発電用原子力設備規格 (設計・建設規格(2005年版 (2007年追補版含む。)) J S M E
S N C 1－2005/2007) (日本機械学会 2007年9月) (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_p	内圧に対する側板の有効幅	mm
$A_{,F,j}$	側板の断面積	mm ²
$A_{b,j}$	取付ボルトの断面積	mm ²
$A_{e,BP1,j}$	脚の有効せん断断面積	mm ²
$A_{s,F,j}$	側板の有効せん断断面積	mm ²
$A_{s,BPx,j}$	長手方向地震に対する脚の有効せん断断面積	mm ²
$A_{s,BPy,j}$	横方向振動に対する脚の有効せん断断面積	mm ²
b_p	内圧に対する側板の有効長さ	mm
C_v	鉛直方向設計震度	—
C_H	水平方向設計震度	—
d_N	側板の開口部直径	mm
$E_{,b,j}$	取付ボルト材の縦弾性係数	MPa
$E_{,BP,j}$	脚材の縦弾性係数	MPa
$E_{,F,j}$	側板材の縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1又はSSB-3131に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	MPa
$F_{,bzi,j}$	取付ボルトの引張力	N
$F_{,BPx,j}$	長手方向地震により脚に作用するせん断力	N
$F_{,BPy,j}$	横方向地震により脚に作用するせん断力	N
$F_{,BPz,j}$	運転時質量による脚のせん断力	N
$F_{,Fgv,j}$	運転時質量による側板の軸力	N
$F_{,Fv,j}$	鉛直方向地震による側板の軸力	N
$F_{,Fx,j}$	長手方向地震により重心位置に作用するせん断力	N
$F_{,Fy,j}$	横方向地震により重心位置に作用するせん断力	N
f_t	脚の許容引張応力 (f_t^* を1.5倍した値)	MPa
$f_{s,b}$	せん断力のみを受ける取付ボルトの許容せん断応力 (f_s^* を1.5倍した値)	MPa
f_{t0}	引張力のみを受ける取付ボルトの許容引張応力 (f_t^* を1.5倍した値)	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける取付ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
$G_{,BP,j}$	脚のせん断弾性係数	MPa
$G_{,F,j}$	側板のせん断弾性係数	MPa
H	機器の重心高さ	mm
$I_{,BPx,j}$	長手方向振動に対する脚の断面二次モーメント	mm ⁴
$I_{,BPy,j}$	横方向振動に対する脚の断面二次モーメント	mm ⁴
$I_{,Fi,j}$	側板の断面二次モーメント	mm ⁴

記号	記号の説明	単位
$k_{b,j}$	取付ボルトの締結部剛性	N/mm
$k_{b\theta, BPx,j}$	長手方向振動に対する脚の曲げによる回転剛性	N・mm/rad
$k_{,Fi,j}$	側板の剛性	N/mm
$k_{,BPY,j}$	横方向振動に対する脚のせん断/曲げ剛性	N/mm
$k_{s, BPx,j}$	長手方向振動に対する脚のせん断剛性	N/mm
$k_{\theta, bi,j}$	取付ボルト締結部の回転剛性	N・mm/rad
$k_{\theta, Bi,j}$	脚の剛性	N・mm/rad
$k_{\theta, BPi,j}$	脚の回転剛性	N・mm/rad
K_i	固定側及び可動側の並列剛性	N/mm
$K_{i,j}$	固定側、若しくは可動側の全体剛性	N/mm
$l_{b,j}$	取付ボルトの伸びに有効な長さ	mm
$l_{x,j}$	長手方向振動に対する取付ボルト締付幅	mm
$l_{x, BP1,j}$	側板中心から外側取付ボルトまでの長手方向距離	mm
$l_{x, BP2,j}$	側板中心から内側取付ボルトまでの長手方向距離	mm
$l_{y, BP1,j}$	横方向振動に対する外側取付ボルト締付幅の 1/2	mm
$l_{y, BP2,j}$	横方向振動に対する内側取付ボルト締付幅の 1/2	mm
m_o	機器の運転時質量	kg
$M_{,Fx,j}$	長手方向地震による重心位置の曲げモーメント	N・mm
$M_{,Fy,j}$	横方向地震による重心位置の曲げモーメント	N・mm
$M_{,Fz,j}$	運転時質量により脚に作用する曲げモーメント	N・mm
n_N	側板開口部の数	—
$n_{x, BP,j}$	長手方向の荷重に寄与する脚片側の取付ボルト本数	—
$n_{y, BP1,j}$	$l_{y, BP1,j}$ の位置の取付ボルト本数	—
$n_{y, BP2,j}$	$l_{y, BP2,j}$ の位置の取付ボルト本数	—
P	機器に作用する内圧	MPa
S_a	側板の許容応力	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
$S_y (RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の 40 °Cにおける値	MPa
$t_{,F,j}$	側板の板厚	mm
T_i	機器の固有周期	s
$Z_{,Fx,j}$	長手方向地震に対する側板の断面係数	mm ³
$Z_{,Fy,j}$	横方向地震に対する側板の断面係数	mm ³
$Z_{,BP2,j}$	長手方向地震に対する脚の総断面係数	mm ³
$Z_{e, BP1,j}$	脚の有効断面係数	mm ³

記号	記号の説明	単位
β_i	応力係数	—
π	円周率	—
$\sigma_{a, BPz, j}$	鉛直方向地震による脚の曲げ応力	MPa
$\sigma_{a, Fz, j}$	鉛直方向地震による側板の応力	MPa
$\sigma_{ab, BPx, j}$	鉛直方向地震と長手方向地震による脚の長手方向の組合せ応力	MPa
$\sigma_{ab, BPy, j}$	鉛直方向地震と横方向地震による脚の横方向の組合せ応力	MPa
$\sigma_{, b}$	取付ボルトの最大引張応力	MPa
$\sigma_{, bi, j}$	取付ボルトの引張応力	MPa
$\sigma_{b, Fx, j}$	長手方向地震による側板の曲げ応力	MPa
$\sigma_{b, Fy, j}$	横方向地震による側板の曲げ応力	MPa
$\sigma_{b, BPx, j}$	長手方向地震による脚の曲げ応力	MPa
$\sigma_{b, BPy, j}$	横方向地震による脚の曲げ応力	MPa
σ_m	側板の一次一般膜応力の最大値	MPa
$\sigma_{m1, j}$	側板軸方向の一次一般膜応力	MPa
$\sigma_{m2, j}$	側板水平方向の一次一般膜応力	MPa
$\sigma_{(m+b)}$	側板の一次応力の最大値	MPa
$\sigma_{(m+b)x, j}$	長手方向地震が作用した場合の側板の一次応力	MPa
$\sigma_{(m+b)x1, j}$	長手方向地震が作用した場合の側板軸方向の一次応力	MPa
$\sigma_{(m+b)x2, j}$	長手方向地震が作用した場合の側板水平方向の一次応力	MPa
$\sigma_{(m+b)y, j}$	横方向地震が作用した場合の側板の一次応力	MPa
$\sigma_{(m+b)y1, j}$	横方向地震が作用した場合の側板軸方向の一次応力	MPa
$\sigma_{(m+b)y2, j}$	横方向地震が作用した場合の側板水平方向の一次応力	MPa
$\sigma_{p, Fi, j}$	内圧による側板の応力	MPa
$\sigma_{r(m+b)}$	側板の一次＋二次応力の変動値の最大値	MPa
$\sigma_{r(m+b)x, j}$	長手方向地震による側板の一次＋二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{r(m+b)x1, j}$	長手方向地震による側板軸方向の一次＋二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{r(m+b)x2, j}$	長手方向地震による側板水平方向の一次＋二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{r(m+b)y, j}$	横方向地震による側板の一次＋二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{r(m+b)y1, j}$	横方向地震による側板軸方向の一次＋二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{r(m+b)y2, j}$	横方向地震による側板水平方向の一次＋二次応力の変動値	MPa
$\sigma_{, BP}$	脚の組合せ応力の最大値	MPa
$\sigma_{, BPx, j}$	鉛直方向地震と長手方向地震による脚の組合せ応力	MPa
$\sigma_{, BPy, j}$	鉛直方向地震と横方向地震による脚の組合せ応力	MPa
σ_w, BPz, j	運転時質量による脚の曲げ応力	MPa
σ_w, Fz, j	運転時質量による側板の応力	MPa
$\tau_{ab, BPx, j}$	鉛直方向地震と長手方向地震による脚長手方向の組合せせん断応力	MPa

記号	記号の説明	単位
$\tau_{ab, BP_y, j}$	鉛直方向地震と横方向地震による脚横方向の組合せせん断応力	MPa
$\tau_{a, BP_z, j}$	鉛直方向地震による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{, b}$	取付ボルトの最大せん断応力	MPa
$\tau_{, bi, j}$	取付ボルトのせん断応力	MPa
$\tau_{b, BP_x, j}$	長手方向地震による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{b, BP_y, j}$	横方向地震による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{w, BP_z, j}$	運転時質量による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{, F_x, j}$	長手方向地震による側板のせん断応力	MPa
$\tau_{, F_y, j}$	横方向地震による側板のせん断応力	MPa

注：添字の意味は、以下のとおりとする。

x：長手方向， y：横方向

i：1＝長手方向， 2＝横方向

j：1＝固定側， 2＝可動側

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は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* ¹	℃	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ* ¹	mm	—	—	整数位
面積	mm ²	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位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価は、「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、地震荷重を受け持つ主要な部材である側板、脚、取付ボルトについて実施する。代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

なお、側板は下部が固定されているため、地震時には側板の上部（側板と伝熱板の一体部）が挙動することで応力が生じる。一方、伝熱板は側板と一体となって全面が挙動し、固定部分を持たないことから、地震時に伝熱板に発生する応力は小さいと考えられ、支配的に応力が生じる側板を評価部位とし、伝熱板は評価部位から除外する。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

代替燃料プール冷却系熱交換器の固有周期の計算方法を以下に示す。

4.1.1 水平方向

- (1) 代替燃料プール冷却系熱交換器の質量は、重心に集中するものとする。
- (2) 代替燃料プール冷却系熱交換器は、固定側板と可動側板の並列結合により 1 質点を支持するものとし、図 4-1 に示す計算モデルとして考える。
- (3) 各側板は、脚及び取付ボルト締結部の剛性からなる回転ばねと側板の剛性からなる曲げせん断ばねの直列結合と考える。長手方向の振動モデルを図 4-2、横方向の振動モデルを図 4-3 に示す。



図 4-1 固有周期の計算モデル



図 4-2 長手方向の振動モデル



図 4-3 横方向の振動モデル

(b) 取付ボルト締結部の回転剛性

$$k_{\theta, b1, j} = \boxed{\hspace{10em}} \dots\dots\dots (4.1.1.9)$$

ここに, $\boxed{\hspace{2em}}$

b. 横方向に対する脚の剛性

(a) 脚の回転剛性

$$k_{\theta, BP2, j} = \boxed{\hspace{10em}} \dots\dots\dots (4.1.1.10)$$

イ. 固定脚の面外剛性

$$k_{,BPY, 1} = \boxed{\hspace{15em}} \dots\dots\dots (4.1.1.11)$$

ロ. 可動脚の面外剛性

$$k_{,BPY, 2} = \boxed{\hspace{15em}} \dots\dots\dots (4.1.1.12)$$

(b) 取付ボルト締結部の回転剛性

$$k_{\theta, b2, j} = \boxed{\hspace{10em}} \dots\dots\dots (4.1.1.13)$$

ここに, $\boxed{\hspace{10em}}$

c. 取付ボルト締結部の剛性

$$k_{b, j} = \boxed{\hspace{2em}} \dots\dots\dots (4.1.1.14)$$

4.1.2 鉛直方向

代替燃料プール冷却系熱交換器は、伝熱板及び側板が一体に締付けられた構造であり、一体での挙動を示す。鉛直方向の剛性は、側板の軸方向剛性と脚及び取付ボルト締結部の剛性の直列結合であることから、鉛直方向は十分な剛性を有しているとみなせるため、固有周期の計算を省略する。

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【代替燃料プール冷却系熱交換器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。

4.3 固有周期の計算結果

固有周期の計算結果を表 4-1 示す。代替燃料プール冷却系熱交換器の固有周期は 0.05 秒以下であることから、剛構造である。

表 4-1 固有周期 (s)

水平方向		鉛直方向
長手方向	横方向	
□	□	—*

注記 * : 固有周期は十分に小さく計算は省略する。

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

- (1) 計算方法は既往研究「BWRプラントへのプレート式熱交換器適用化に関する研究」(引用文献(1))に準拠する。
- (2) 代替燃料プール冷却系熱交換器の質量は、重心に集中するものとする。
- (3) 地震力は、代替燃料プール冷却系熱交換器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。
- (4) 代替燃料プール冷却系熱交換器は 2 個の脚で支持され、脚は 1 個につき取付ボルトが 2 列以上になっている。このため、脚は固定支持として扱う。
- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

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

代替燃料プール冷却系熱交換器の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-1 に示す。

5.2.2 許容応力

代替燃料プール冷却系熱交換器の許容応力は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表 5-2、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

代替燃料プール冷却系熱交換器の使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備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（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類* ¹	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質 の取扱施設 及び 貯蔵施設	使用済燃料 貯蔵槽冷却 浄化設備	代替燃料プール冷却系熱交換器	常設耐震 ／防止	重大事故等 クラス 2 容器* ²	$D + P_D + M_D + S_s$ * ³	IV _A S
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	V _A S (V _A Sとして IV _A Sの許容限 界を用いる)

注記 *1：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備を示す。

*2：重大事故等クラス 2 容器の支持構造物を含む。

*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため，評価結果の記載を省略する。

表5-2 許容応力（重大事故等クラス2容器（クラス2，3容器））

許容応力状態	許容限界*1			
	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
IV _A S	0.6・S _u	左欄の1.5倍の値	S _s 地震動のみによる疲労解析*2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*2は不要	
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの許容限界を用いる)				

注記 *1：座屈に対する評価が必要な場合には、クラスMC容器の座屈に対する評価式による。

*2：2・S_yを超える場合は弾塑性解析を行う。この場合、設計・建設規格 PVB-3300（PVB-3313を除く。S_mは2/3・S_yと読み替える。）の簡易弾塑性解析を用いる。

表 5-3 許容応力（重大事故等クラス 2 支持構造物（クラス 2， 3 支持構造物））

許容応力状態	許容限界*1, *2 (脚)	許容限界*1, *2 (取付ボルト)		
	一次応力	一次応力		
	組合せ	引張り	せん断	組合せ
IV _A S	1.5・f _t [*]	1.5・f _t [*]	1.5・f _s [*]	Min[1.4・f _{to} - 1.6・τ _b , f _{to}]
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの許 容限界を用いる)				

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*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 5-4 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		最高使用温度				
側板	SGV410	最高使用温度	80	206	375	—
脚	<input type="text"/>	周囲環境温度	<input type="text"/>	201	373	—
取付ボルト	<input type="text"/>	周囲環境温度	<input type="text"/>	673	759	—

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。

「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づく。

表 5-5 設計用地震力（重大事故等対処設備）

設備分類	据付場所及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)		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
常設耐震／防止	<input type="text"/> EL. 29.00* ¹	<input type="text"/>	—* ²	<input type="text"/>	

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有周期は十分に小さく計算は省略する。

5.4 計算方法

5.4.1 応力の計算方法

5.4.1.1 部材力の算定



(1) 運転時質量による軸力

$$F_{,Fgv,j} = \frac{m_0 \cdot g}{2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.1)$$

添字： j=1,2 (1：固定側，2：可動側)

(2) 鉛直方向地震力

$$F_{,Fv,j} = \frac{m_0 \cdot g \cdot C_v}{2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.2)$$

(3) 長手方向地震力

1) 側板のせん断力

a. 固定側

$$F_{,Fx,1} = \boxed{} \dots\dots\dots (5.4.1.1.3)$$

b. 可動側

$$F_{,Fx,2} = \boxed{} \dots\dots\dots (5.4.1.1.4)$$

2) 側板の曲げモーメント

$$M_{,Fx,j} = \boxed{} \dots\dots\dots (5.4.1.1.5)$$

(4) 横方向地震力

1) 側板のせん断力

a. 固定側

$$F_{,Fy,1} = \boxed{} \dots\dots\dots (5.4.1.1.6)$$

b. 可動側

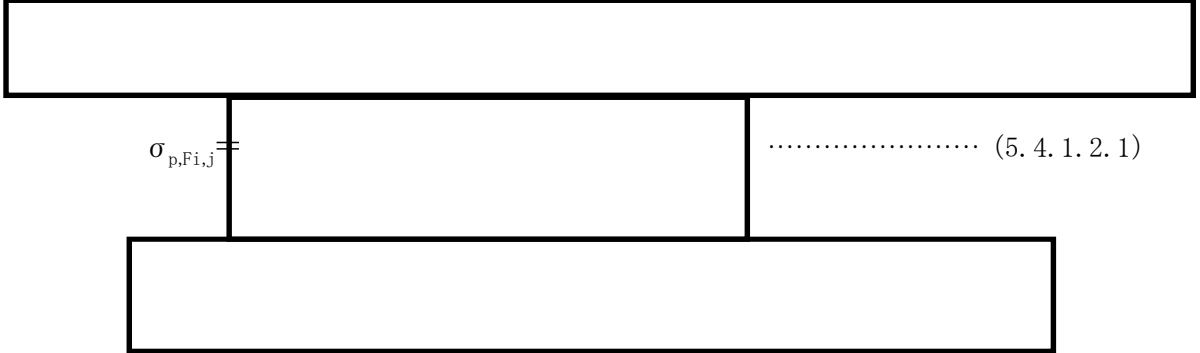
$$F_{,Fy,2} = \boxed{} \dots\dots\dots (5.4.1.1.7)$$

2) 側板の曲げモーメント

$$M_{,Fy,j} = \boxed{} \dots\dots\dots (5.4.1.1.8)$$

5.4.1.2 側板の計算方法

(1) 内圧による応力



$$\sigma_{p,Fi,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.2.1)$$

(2) 運転時質量及び鉛直方向地震による応力

$$\sigma_{w,Fz,j} = \frac{F_{,Fgv,j}}{A_{,F,j}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.2)$$

$$\sigma_{a,Fz,j} = \frac{F_{,Fv,j}}{A_{,F,j}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.3)$$

(3) 長手方向地震による応力

a. 曲げ応力

$$\sigma_{b,Fx,j} = \frac{M_{,Fx,j}}{Z_{,Fx,j}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.4)$$

b. せん断応力

$$\tau_{,Fx,j} = \frac{F_{,Fx,j}}{A_{s,F,j}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.5)$$

(4) 横方向地震による応力

a. 曲げ応力

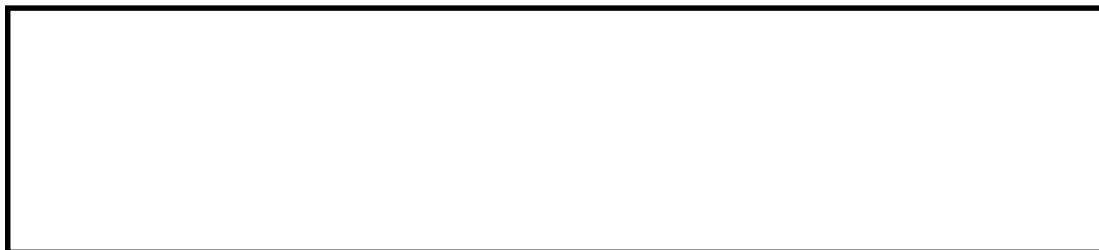
$$\sigma_{b,Fy,j} = \frac{M_{,Fy,j}}{Z_{,Fy,j}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.6)$$

b. せん断応力

$$\tau_{,Fy,j} = \frac{F_{,Fy,j}}{A_{s,F,j}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.7)$$

(5) 組合せ応力

a. 一次一般膜応力



$$\sigma_m = \text{Max}(\sigma_{m1,j}, \sigma_{m2,j}) \dots\dots\dots (5.4.1.2.8)$$

$$\sigma_{m1,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.9)$$

$$\sigma_{m2,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.10)$$

b. 一次応力

(a) 長手方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{(m+b)x,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.11)$$

$$\sigma_{(m+b)x1,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.12)$$

$$\sigma_{(m+b)x2,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.13)$$

(b) 横方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{(m+b)y,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.14)$$

$$\sigma_{(m+b)y1,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.15)$$

$$\sigma_{(m+b)y2,j} = \text{[]} \dots\dots\dots (5.4.1.2.16)$$

(c) 一次応力の最大値

$$\sigma_{(m+b)} = \text{Max}(\sigma_{(m+b)x,j}, \sigma_{(m+b)y,j}) \dots\dots\dots (5.4.1.2.17)$$

c. 地震力のみによる一次+二次応力の変動値

(a) 長手方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{r(m+b)x,j} = \boxed{\hspace{15em}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.18)$$

$$\sigma_{r(m+b)x1,j} = \boxed{\hspace{10em}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.19)$$

$$\sigma_{r(m+b)x2,j} = \boxed{\hspace{2em}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.20)$$

(b) 横方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{r(m+b)y,j} = \boxed{\hspace{15em}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.21)$$

$$\sigma_{r(m+b)y1,j} = \boxed{\hspace{10em}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.22)$$

$$\sigma_{r(m+b)y2,j} = \boxed{\hspace{2em}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.23)$$

(c) 一次+二次応力の変動値の最大値

$$\sigma_{r(m+b)} = \text{Max}(\sigma_{r(m+b)x,j}, \sigma_{r(m+b)y,j}) \dots\dots\dots (5.4.1.2.24)$$

(3) 横方向地震による応力

a. 曲げ応力

$$\sigma_{b,BPy,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.10)$$

ただし,

$$F_{,BPY,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.11)$$

b. せん断応力

$$\tau_{b,BPy,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.12)$$

ただし,

(4) 組合せ応力

a. 長手方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{,BPx,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.13)$$

$$\sigma_{ab,BPx,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.14)$$

$$\tau_{ab,BPx,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.15)$$

b. 横方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{,BPy,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.16)$$

$$\sigma_{ab,BPy,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.17)$$

$$\tau_{ab,BPy,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.3.18)$$

c. 組合せ応力の最大値

$$\sigma_{,BP} = \text{Max}(\sigma_{,BPx,j}, \sigma_{,BPy,j}) \dots\dots\dots (5.4.1.3.19)$$

5.4.1.4 取付ボルトの計算方法

取付ボルトの応力は、運転時質量による軸力と水平方向（長手方向，横方向）及び鉛直方向地震の組合せによる引張力，水平方向地震によるせん断力に基づき計算する。

(1) 取付ボルトの引張応力



a. 取付ボルトに作用する引張力

$$F_{,bzi,j} = \text{[Empty Box]} \dots\dots\dots (5.4.1.4.1)$$

ただし，

ここに，添字 i : x =長手方向， y =横方向， j : 1 =固定側， 2 =可動側

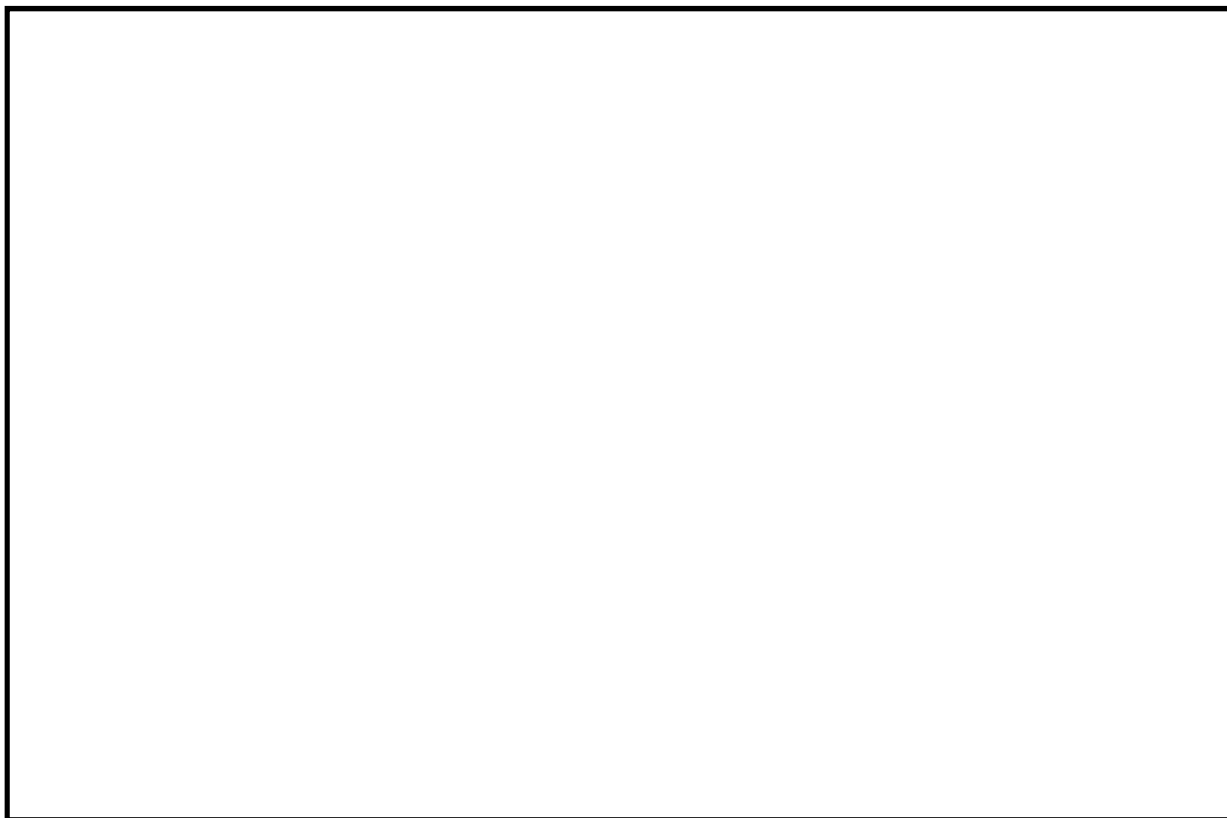
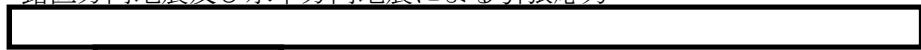


図 5-1 脚部に作用する外荷重と取付ボルトの引張力の関係

b. 鉛直方向地震及び水平方向地震による引張応力



$$\sigma_{bi,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.4.2)$$

ただし,



(2) 取付ボルトのせん断応力



$$\tau_{bi,j} = \dots\dots\dots (5.4.1.4.3)$$

(3) 最大応力

a. 引張応力

$$\sigma_b = \text{Max}(\sigma_{bx,j}, \sigma_{by,j}) \dots\dots\dots (5.4.1.4.4)$$

b. せん断応力

$$\tau_b = \text{Max}(\tau_{bx,j}, \tau_{by,j}) \dots\dots\dots (5.4.1.4.5)$$

5.5 計算条件

応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【代替燃料プール冷却系熱交換器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 側板の応力評価

5.4.1.2項で求めた側板の組合せ応力 $\sigma_{(m+b)}$ は許容応力 S_a 以下であること。

	許 容 応 力 S_a	
応力の種類	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による荷重との組合せの場合	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	S_y と $0.6 \cdot S_u$ の小さい方 ただし、ASS（オーステナイト系ステンレス鋼）及びHNA（高ニッケル合金）については上記値と $1.2 \cdot S$ との大きい方	$0.6 \cdot S_u$
一 次 応 力	上記の1.5倍の値	上記の1.5倍の値
一次+二次応力	地震動のみによる一次+二次応力の変動値が $2 \cdot S_y$ 以下であれば、疲労解析は不要	

5.6.2 脚の応力評価

5.4.1.3項で求めた脚の組合せ応力 σ_{BP} は許容引張応力 f_t 以下であること。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による荷重との組合せの場合	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	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

5.6.3 取付ボルトの応力評価

5.4.1.4 項で求めた取付ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{t0} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{t0} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{t0}] \dots\dots\dots (5.6.3.1)$$

せん断応力 τ_b はせん断力のみを受ける取付ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による荷重との組合せの場合	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_{t0}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 評価結果

6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

代替燃料プール冷却系熱交換器の重大事故等時の状態を考慮した場合の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容応力を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有することを確認した。

(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。

1.3 計算数値

1.3.1 側板に生じる応力

(1) 一次一般膜応力

a. 固定側

(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	
	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力
内圧による応力	—			
運転時質量による応力	—			
鉛直方向地震による応力	—	—		
組合せ応力	—			

b. 可動側

(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	
	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力
内圧による応力	—			
運転時質量による応力	—			
鉛直方向地震による応力	—			
組合せ応力	—			

(2) 一次応力

a. 固定側

(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			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力
内圧による応力	—	—	—					
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	曲げ	—	—	—				
	せん断	—	—	—				
組合せ応力	—		—					

b. 可動側

(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			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力
内圧による応力	—	—	—					
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	曲げ	—	—	—				
	せん断	—	—	—				
組合せ応力	—		—					

(3) 地震動のみによる一次+二次応力の変動値

a. 固定側

(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			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力
鉛直方向地震による応力	-	-	-	-				
水平方向地震による応力	曲げ	-	-	-				
	せん断	-	-	-				
組合せ応力	-	-	-	-				

b. 可動側

(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			
	長手方向		横方向		長手方向		横方向	
	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力	軸方向応力	横方向応力
鉛直方向地震による応力	-	-	-	-				
水平方向地震による応力	曲げ	-	-	-				
	せん断	-	-	-				
組合せ応力	-	-	-	-				

1.3.2 脚に生じる応力

a. 固定側

(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	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	曲げ	-		
	せん断	-		
鉛直方向地震による応力	曲げ	-		
	せん断	-		
水平方向地震による応力	曲げ	-		
	せん断	-		
組合せ応力	-	-		

b. 可動側

(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	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
運転時質量による応力	曲げ	-		
	せん断	-		
鉛直方向地震による応力	曲げ	-		
	せん断	-		
水平方向地震による応力	曲げ	-		
	せん断	-		
組合せ応力	-	-		

1.3.3 取付ボルトに生じる応力

a. 固定側 (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	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び水平方向地震による応力	引張り	—		
水平方向地震による応力	せん断	—		

b. 可動側 (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	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び水平方向地震による応力	引張り	—		
水平方向地震による応力	せん断	—		

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位: s)

方 向	固 有 周 期
長 手 方 向	$T_1 =$ <input type="text"/>
横 方 向	$T_2 =$ <input type="text"/>
鉛 直 方 向	$T_3 =$ —*

注 * : 固有周期は十分小さく計算は省略する。

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
側 板	SGV410	一次一般膜	—	—		
		一 次	—			
		一次+二次	—			
脚		組 合 せ	—			
取付ボルト		引 張 り	—			
		せ ん 断	—			

注記 * : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出

すべて許容応力以下である。

7. 引用文献

引用文献を以下に示す。

- (1) 大山 ほか, BWRプラントへのプレート式熱交換器適用化に関する研究, 火力原子力発電, 第576号, Vol. 55, No. 9, 2004年, pp. 962-969.
- (2) チモシェンコ・ヴォアノフスキー・リーガー共著, 板とシェルの理論<上> (長谷川 節訳), プレイン図書出版, 1994年5月
- (3) Warren C. Young, Richard G. Budynas: Roark's Formulas for Stress and Strain, 7th Edition, 2002, McGraw-Hill, pp. 194-196.