

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 2
提出年月日	平成 30 年 9 月 14 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	34

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。

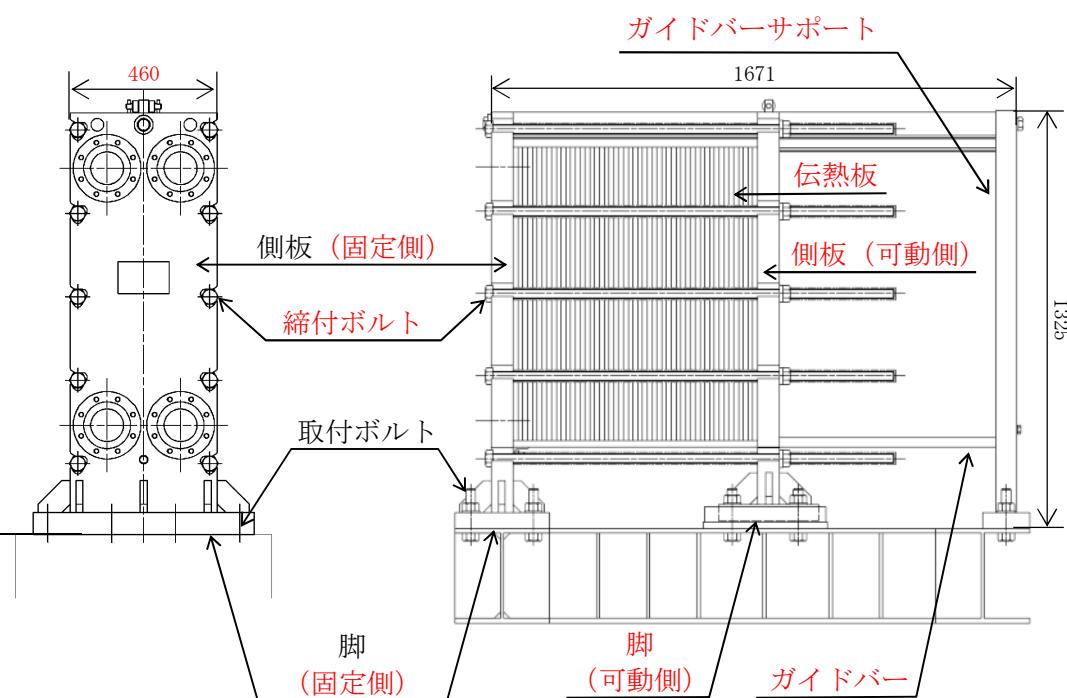
代替燃料プール冷却系熱交換器は、重大事故等対処設備においては常設**耐震重要**重大事故防止設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

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	
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。	伝熱板、側板、脚を有するプレート式熱交換器	 <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。

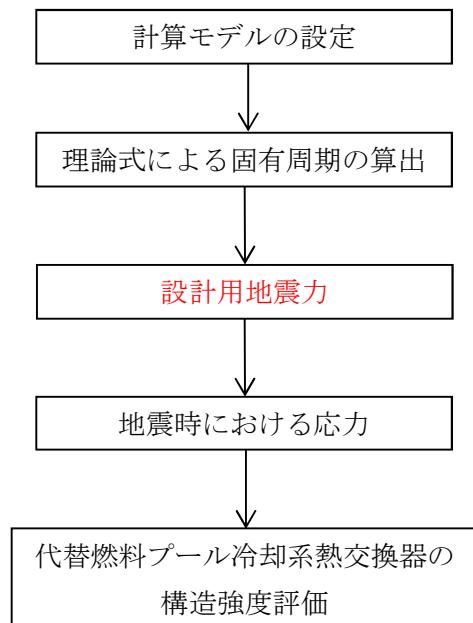


図 2-1 代替燃料プール冷却系熱交換器の耐震評価フロー

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
$A_{e,BP1,j}$	脚の有効せん断面積	mm ²
$A_{s,F,j}$	側板の有効せん断面積	mm ²
$A_{s,BPx,j}$	長手方向地震に対する脚の有効せん断面積	mm ²
$A_{s,BPy,j}$	横方向振動に対する脚の有効せん断面積	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_t^* を1.5倍した値)	MPa
$f_{t,0}$	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
$f_{t,s}$	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
$\ell_{b,j}$	取付ボルトの伸びに有効な長さ	mm
$\ell_{x,j}$	長手方向振動に対する取付ボルト締付幅	mm
$\ell_{x,BP1,j}$	側板中心から外側取付ボルトまでの長手方向距離	mm
$\ell_{x,BP2,j}$	側板中心から内側取付ボルトまでの長手方向距離	mm
$\ell_{y,BP1,j}$	横方向振動に対する外側取付ボルト締付幅の 1/2	mm
$\ell_{y,BP2,j}$	横方向振動に対する内側取付ボルト締付幅の 1/2	mm
m_0	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	—
$n_{y,BP1,j}$	$\ell_{y,BP1,j}$ の位置の取付ボルト本数	—
$n_{y,BP2,j}$	$\ell_{y,BP2,j}$ 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
$\sigma_{w, BPz, j}$	運転時質量による脚の曲げ応力	MPa
$\sigma_{w, Fz, j}$	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
$\tau_{ab, BPy, j}$	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
$\tau_{a, BPz, j}$	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
$\tau_{b, BPx, j}$	長手方向地震による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{b, BPy, j}$	横方向地震による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{w, BPz, j}$	運転時質量による脚のせん断応力	MPa
$\tau_{, Fx, j}$	長手方向地震による側板のせん断応力	MPa
$\tau_{, Fy, j}$	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}	°C	—	—	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、応力を生じますが、これに対し伝熱板は、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と考え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

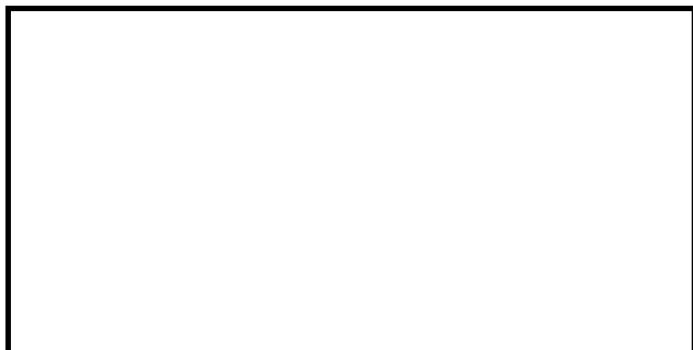


図 4-2 長手方向の振動モデル

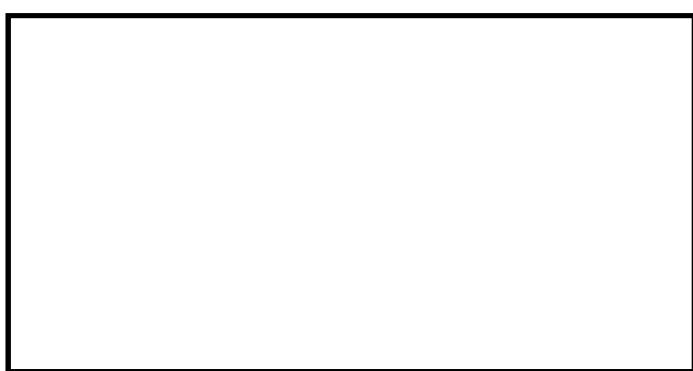


図 4-3 横方向の振動モデル

(4) 固有周期は次式で求める。

$$T_i = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{K_i \times 10^3}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.1)$$

$$K_i = K_{i,1} + K_{i,2} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.2)$$

$$K_{i,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.3)$$

ここに、添字：
 $i = 1, 2$ (1：長手方向，2：横方向)
 $j = 1, 2$ (1：固定側，2：可動側)

1) 側板の剛性

$$k_{F,i,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.4)$$

2) 脚の剛性

$$k_{\theta,Bi,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.5)$$

a. 長手方向に対する脚の剛性

(a) 脚の回転剛性

$$k_{\theta,BP1,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.6)$$

イ. せん断剛性

$$k_{s,BPx,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.7)$$

ロ. 曲げによる回転剛性

$$k_{b\theta,BPx,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1.1.8)$$

(b) 取付ボルト締結部の回転剛性

$$k_{\theta,b1,j} = \dots \quad (4.1.1.9)$$

ここで、

b. 横方向に対する脚の剛性

(a) 脚の回転剛性

$$k_{\theta, \text{BP2,j}} = \boxed{\hspace{1cm}} \dots \dots \dots \quad (4.1.1.10)$$

イ. 固定脚の面外剛性

$$k_{\text{BPy}, 1} = \boxed{} \dots \quad (4.1.1.11)$$

口. 可動脚の面外剛性

$$k_{\text{BPy}, 2} = \dots \quad (4.1.1.12)$$

(b) 取付ボルト締結部の回転剛性

$$k_{\theta,b2,j} = \dots \quad (4.1.1.13)$$

ここに,

c. 取付ボルト締結部の剛性

$$k_{b,j} = \boxed{} \dots \quad (4.1.1.14)$$

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。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 * : 鉛直方向は十分な剛構造を有しているため、固有周期の計算は省略する。

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、添付資料「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				
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの 許容限界を用いる)	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	

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				
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの許容限界を用いる)	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$\text{Min}[1.4 \cdot f_{t_o} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{t_o}]$

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 (R T) (MPa)
側 板	SGV410	最高使用温度	80	206	375	—
脚	[]	周囲環境温度	[]	201	373	—
取付ボルト	[]	周囲環境温度	[]	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	EL. 29.00 ^{*1}	[REDACTED]	[REDACTED]	— ^{*2}	[REDACTED]

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：鉛直方向は十分な剛構造を有しているため、固有周期の計算は省略する。

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

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

添字 : j=1,2 (1: 固定側, 2: 可動側)

(2) 鉛直方向地震力

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

(3) 長手方向地震力

1) 側板のせん断力

a. 固定側

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

b. 可動側

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

2) 側板の曲げモーメント

$$M_{,F_{x,j}} = \boxed{} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.1.5)$$

(4) 横方向地震力

1) 側板のせん断力

a. 固定側

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

b. 可動側

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

2) 側板の曲げモーメント

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

5.4.1.2 側板の計算方法

(1) 内圧による応力

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

(2) 運転時質量及び鉛直方向地震による応力

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

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

(3) 長手方向地震による応力

a. 曲げ応力

b. せん断応力

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

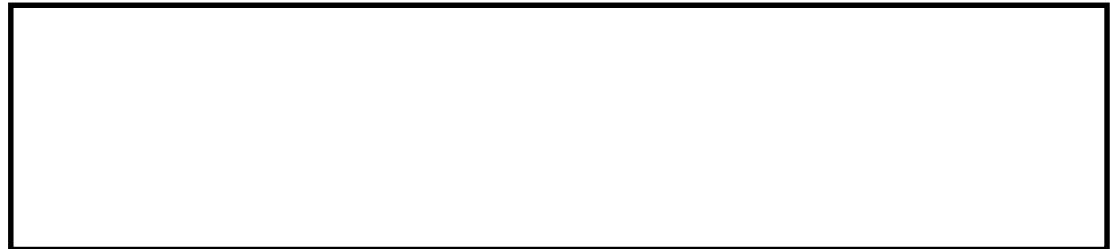
(4) 横方向地震による応力

a. 曲げ応力

b. せん断応力

(5) 組合せ応力

a. 一次一般膜応力



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

$$\sigma_{m1,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.9)$$

$$\sigma_{m2,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.10)$$

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

$$\sigma_{(m+b)x,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.11)$$

$$\sigma_{(m+b)x1,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.12)$$

$$\sigma_{(m+b)x2,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.13)$$

(b) 横方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{(m+b)y,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.14)$$

$$\sigma_{(m+b)y1,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.15)$$

$$\sigma_{(m+b)y2,j} = \boxed{\quad} \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.1.2.16)$$

(c) 一次応力の最大値

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

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

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

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

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

(b) 横方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{r(m+b)y,j} = \dots \quad (5.4.1.2.21)$$

$$\sigma_{r(m+b)y_1,j} = \boxed{} \dots \quad (5.4.1.2.22)$$

$$\sigma_{r(m+b)y_2,j} = \boxed{} \dots \quad (5.4.1.2.23)$$

(c) 一次+二次応力の変動値の最大値

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

5.4.1.3 脚の計算方法

(1) 運転時質量及び鉛直方向地震による応力

a. 曲げモーメント

$$M_{,Fz,j} = \boxed{\hspace{1cm}} \dots \quad (5.4.1.3.1)$$

$$F_{,BPZ,j} = \dots \quad (5.4.1.3.2)$$

ただし、

b. 運転時質量により脚に作用する応力

(a) 曲げ応力

$$\sigma_{w,BPz,j} = \frac{M_{Fz,j}}{Z_{e,BP1,j}} \quad \dots \quad (5.4.1.3.3)$$

(b) せん断応力

$$\tau_{w,BPz,j} = \frac{F_{,BPz,j}}{A_{e,BP1,j}} \quad \dots \quad (5.4.1.3.4)$$

c. 鉛直方向地震により脚に作用する応力

(a) 曲げ応力

$$\sigma_{a,BPz,j} = C_v \cdot \frac{M_{,Fz,j}}{Z_{e,BP1,j}} \quad \dots \quad (5.4.1.3.5)$$

(b) せん断応力

$$\tau_{a,BPz,j} = C_v \cdot \frac{F_{,BPz,j}}{A_{e,BP1,j}} \quad \dots \quad (5.4.1.3.6)$$

(2) 長手方向地震による応力

a. 曲げ応力

$$\sigma_{b,BPx,j} = \frac{M_{Fx,j}}{Z_{BP2,j}} \quad \dots \quad (5.4.1.3.7)$$

b. せん断応力

$$\tau_{b,BPx,j} = \frac{F_{b,BPx,j}}{A_{s,BPx,j}} \quad \dots \quad (5.4.1.3.8)$$

$$F_{BPX,j} = \dots \quad (5.4.1.3.9)$$

(3) 横方向地震による応力

a. 曲げ応力

$$\sigma_{b,BPy,j} = \boxed{\hspace{1cm}} \dots \dots \dots \quad (5.4.1.3.10)$$

ただし

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

b. せん断応力

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

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

$$\sigma_{\text{,BPx,j}} = \boxed{\hspace{1cm}} \dots \quad (5.4.1.3.13)$$

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

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

b. 横方向地震及び鉛直方向地震が作用した場合

$$\sigma_{ab\text{RPV}_i} \dots \quad (5.4.1.3.17)$$

$$\tau_{\text{ah pp}, \dots} = \dots \quad (5.4.1.3.18)$$

c 組合せ応力の最大値

$$\sigma_{RP} = \text{Max}(\sigma_{RP_{Vi}}, \sigma_{RP_{Vj}}) \quad \dots \quad (5.4.1.3.19)$$

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

$$F_{,bz i,j} = \boxed{\quad} \dots \dots \dots \quad (5.4.1.4.1)$$

ただし、

ここに、添字 $i : x = \text{長手方向}, y = \text{横方向}$, $j : 1 = \text{固定側}, 2 = \text{可動側}$

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

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

ただし,

(2) 取付ボルトのせん断応力

(3) 最大応力

a. 引張応力

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

b. せん断応力

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

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	弹性設計用地震動 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。

		弹性設計用地震動 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_{t_s} 以下であること。ただし、 f_{t_0} は下表による。

$$f_{t_s} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{t_0} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{t_0}] \quad \dots \quad (5.6.3.1)$$

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_{s_b} 以下であること。ただし、 f_{s_b} 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_{t_0}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{^*F}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{s_b}	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{^*F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$

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。

NT2 補② V-2-4-3-3-1 R1

【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】

1 重大事故等対応設備

1.1 設計条件

機 器 名 称	設備分類	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			
代替燃料プール冷却系熱交換器	常設耐震／防止	EL. 29.00 ^{*1}	[]	[]	— ^{*2}	—	[]	[]	0.98	80	[]

注記 *1 : 基準床レベルを示す。

*2 : 鉛直方向は十分な剛構造を有しているため、固有周期の計算は省略する。

1.2 機器要目

m_0 (kg)	H (mm)	$E_{,F,1}$ (MPa)	$E_{,F,2}$ (MPa)	$G_{,F,1}$ (MPa)	$G_{,F,2}$ (MPa)	$t_{,F,1}$ (mm)	$t_{,F,2}$ (mm)	$A_{,F,1}$ (mm ²)	$A_{,F,2}$ (mm ²)	$A_{S,F,1}$ (mm ²)	$A_{S,F,2}$ (mm ²)	$I_{,F1,1}$ (mm ⁴)	$I_{,F2,1}$ (mm ⁴)	$I_{,F1,2}$ (mm ⁴)

$A_{S,BPx,1}$ (mm ²)	$A_{S,BPx,2}$ (mm ²)	$I_{,BPx,1}$ (mm ⁴)	$I_{,BPx,2}$ (mm ⁴)	$n_{x,BP,1}$	$n_{x,BP,2}$	$\ell_{x,BP1,1}$ (mm)	$\ell_{x,BP1,2}$ (mm)	$\ell_{x,BP2,1}$ (mm)	$\ell_{x,BP2,2}$ (mm)	$n_{y,BP1,1}$	$n_{y,BP1,2}$	$n_{y,BP2,1}$	$n_{y,BP2,2}$	$E_{,BP,1}$ (MPa)	$E_{,BP,2}$ (MPa)

$G_{,BP,1}$ (MPa)	$G_{,BP,2}$ (MPa)	$A_{S,BPy,1}$ (mm ²)	$A_{S,BPy,2}$ (mm ²)	$I_{,BPy,1}$ (mm ⁴)	$I_{,BPy,2}$ (mm ⁴)	$E_{,b,1}$ (MPa)	$E_{,b,2}$ (MPa)	$\ell_{b,1}$ (mm)	$\ell_{b,2}$ (mm)	$A_{b,1}$ (mm ²)	$A_{b,2}$ (mm ²)	a_p (mm)	b_p (mm)	β_1	β_2

d_N (mm)	n_N	$Z_{,Fx,1}$ (mm ³)	$Z_{,Fx,2}$ (mm ³)	$Z_{,Fy,1}$ (mm ³)	$Z_{,Fy,2}$ (mm ³)	$Z_{e,BP1,1}$ (mm ³)	$Z_{e,BP1,2}$ (mm ³)	$A_{e,BP1,1}$	$A_{e,BP1,2}$	$Z_{,BP2,1}$ (mm ³)	$Z_{,BP2,2}$ (mm ³)	$\ell_{x,1}$ (mm)	$\ell_{x,2}$ (mm)	$\ell_{y,BP1,1}$ (mm)	$\ell_{y,BP1,2}$ (mm)

$\ell_{y,BP2,1}$ (mm)	$\ell_{y,BP2,2}$ (mm)	S_y (側板) (MPa)	S_u (側板) (MPa)	S_y (脚) (MPa)	S_u (脚) (MPa)	F (脚) (MPa)	F^* (脚) (MPa)	S_y (取付ボルト) (MPa)	S_u (取付ボルト) (MPa)	F (取付ボルト) (MPa)	F^* (取付ボルト) (MPa)
[]*1	[]*1	[]*2	[]*2	[]*2	[]	[]	[]*2	[]*2	[]*2	[]	[]*2

注記 *1 : 最高使用温度で算出

*2 : 周囲環境温度で算出

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

地震の種類	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	—	—		
運動時質量による応力	—	—		
鉛直方向地震による応力	—	—		
組合せ応力	—	—		

(単位: MPa)

b. 可動側

地震の種類	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	—	—		
運動時質量による応力	—	—		
鉛直方向地震による応力	—	—		
組合せ応力	—	—		

(単位: MPa)

(2) 一次応力

a. 固定側

地震の種類	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度				基準地震動 S_s			
	地震の方向		長手方向		横方向		長手方向	
	応力の方向	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
内圧による応力	—	—	—	—				
運動時質量による応力	—	—	—	—				
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	—	—	—	—				

(単位: MPa)

b. 可動側

地震の種類	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度				基準地震動 S_s			
	地震の方向		長手方向		横方向		長手方向	
	応力の方向	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
内圧による応力	—	—	—	—				
運動時質量による応力	—	—	—	—				
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	—	—	—	—				

(単位: MPa)

(3) 地震動のみによる一次+二次応力の変動値

a. 固定側

地震の種類	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	
地震の方向	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	—	—	—	—				

(単位 : MPa)

b. 可動側

地震の種類	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	
地震の方向	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	—	—	—	—				

(単位 : MPa)

1.3.2 脚に生じる応力

a. 固定側

地震の種類	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	—	—		

(単位 : MPa)

b. 可動側

地震の種類	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	—	—		

(単位 : MPa)

1.3.3 取付ボルトに生じる応力

a. 固定側

地震の種類		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
応力の方向		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

地震の種類		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
応力の方向		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	$T_1 =$ []
横 方 向	$T_2 =$ []
鉛 直 方 向	$T_3 =$ —*

注 * : 鉛直方向は十分な剛構造を有しているため、固有周期の計算は省略する。

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。

1.4.2 応 力

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	—	—	[]	[]		
		引 張 り	—	—	[]	[]		
		せ ん 断	—	—	[]	[]		*
注記 * : $f_{t,s} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{t,o} - 1.6 \cdot \tau_{t,b}, f_{t,o}]$ 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・ヴォアノフスキイクリーガー共著, 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.