

泊発電所 1 号炉 審査資料	
資料番号	HTN1-PLM30(冷停)-耐震 改 1
提出年月日	平成 31 年 2 月 1 日

泊発電所 1 号炉 高経年化技術評価  
(耐震安全性評価)

補足説明資料

平成 31 年 2 月 1 日  
北海道電力株式会社

: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

## 目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価対象と評価手法	4
3.1 評価対象	4
3.1.1 耐震安全性評価対象機器	4
3.1.2 耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の抽出	4
3.2 評価手法	7
3.2.1 主な適用規格	7
3.2.2 冷温停止状態が維持されることを前提とした評価における劣化評価期間	7
3.2.3 耐震安全性評価の評価手法	9
3.3 評価用地震力	13
3.4 評価用地震動	14
3.5 代表の選定	17
4. 代表の耐震安全性評価	19
4.1 耐震安全性評価	19
4.1.1 低サイクル疲労	19
4.1.2 高サイクル熱疲労	20
4.1.3 中性子照射脆化	20
4.1.4 熱時効	21
4.1.5 中性子照射による靱性低下	21
4.1.6 中性子及び $\gamma$ 線照射脆化	22
4.1.7 応力腐食割れ	22
4.1.8 摩耗	23
4.1.9 流れ加速型腐食	23
4.1.10 全面腐食	24
4.1.11 動的機能維持に係る耐震安全性評価	25
4.1.12 照射誘起型応力腐食割れ	27
4.2 現状保全	28
4.3 総合評価	28
5. まとめ	29
5.1 審査ガイド適合性	29
5.2 保守管理に関する方針として策定する事項	33

別紙 1.	建設後の耐震補強の実績について……………	1-1
別紙 2.	耐震安全性評価に用いる現行の JEAG4601 以外の値を適用した ケースについて……………	2-1
別紙 3.	冷温停止状態における耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象の 発生・進展について……………	3-1
別紙 4.	機器・配管に係る，比率で示された耐震安全性評価結果 (疲労累積係数を除く) について……………	4-1
別紙 5.	主蒸気管の伸縮継手の疲労割れに対する耐震安全性評価について……………	5-1
別紙 6.	アンカーサポート取付部 (余熱除去系統配管) の疲労割れに対する 耐震安全性評価について……………	6-1
別紙 7.	余熱除去系統配管の高サイクル熱疲労割れに対する耐震安全性評価 について……………	7-1
別紙 8.	原子炉容器の中性子照射脆化に対する耐震安全性評価について……………	8-1
別紙 9.	炉心そうの中性子照射による靱性低下に対する耐震安全性評価について……………	9-1
別紙 10.	原子炉容器サポート (サポートブラケット (サポートリブ)) の 中性子及びγ線照射脆化に対する耐震安全性評価について……………	10-1
別紙 11.	低水質廃液蒸発装置 (蒸発器胴板) の応力腐食割れに対する 耐震安全性評価について……………	11-1
別紙 12.	蒸気発生器支持脚 (ヒンジ摺動部) の摩耗に対する耐震安全性評価 について……………	12-1
別紙 13.	主蒸気系統配管他の内面からの腐食 (流れ加速型腐食) に対する 耐震安全性評価について……………	13-1
別紙 14.	ディーゼル機関空気冷却器伝熱管他の内面腐食 (流れ加速型腐食) に対する耐震安全性評価について……………	14-1
別紙 15.	制御用空気だめ他の腐食 (全面腐食) に対する耐震安全性評価について……………	15-1
別紙 16.	バッフルフォーマボルトの照射誘起型応力腐食割れが抽出されない理由 について……………	16-1

### 3.5 代表の選定

耐震安全性評価においては「技術評価」における評価対象機器全てを対象として耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象を抽出し、経年劣化を考慮した耐震安全性評価を実施することにより、耐震安全性に問題ないことを確認している。

補足説明資料では、耐震安全性評価を実施する機器のうち、表5に示すとおり冷温停止状態で発生・進展しない事象であるが評価した機器及び冷温停止状態において発生・進展が想定される事象で評価結果が厳しいことが想定される機器を代表として選定し、詳細な評価内容について記載する。

なお、耐震安全性評価書において比率で示された評価結果（疲労累積係数を除く）について、各々の分子と分母の値を単位とともに記載した表を別紙4に示す。

表5 補足説明資料における代表の選定

評価項目	詳細評価内容を記載する 機器・部位	選定理由	
冷温停止状態で発生・進展なし	低サイクル疲労	伸縮継手（主蒸気管）	基準地震動 $S_s$ 又は $S_1$ による疲労累積係数が最も大きい機器
		アンカーサポート取付部 （余熱除去系統配管）	発生応力と許容応力の比にて評価を実施した機器
	高サイクル熱疲労	ステンレス鋼配管（余熱除去系統配管）	高サイクル熱疲労を考慮した評価が必要となる機器
	中性子照射脆化	原子炉容器胴部（炉心領域部）	中性子照射脆化を考慮した評価が必要となる機器
	熱時効	1次冷却材管	熱時効を考慮する必要がある機器のうち、機器に作用する応力が最大の機器
	中性子照射による靱性低下	炉心そう	中性子照射による靱性低下を考慮した評価が必要となる機器
	中性子及び $\gamma$ 線照射脆化	原子炉容器サポート（サポートブラケット（サポートリブ））	中性子及び $\gamma$ 線照射脆化を考慮した評価が必要となる機器
	摩耗	蒸気発生器支持脚（ヒンジ摺動部）	摩耗を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最も大きい機器
流れ加速型腐食 （冷温停止状態で流れなし）	炭素鋼配管（主蒸気系統配管）	耐震重要度が高く、配管の腐食（流れ加速型腐食）による配管減肉を考慮した耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最大である箇所	
冷温停止状態で発生・進展可能性あり	応力腐食割れ	低水質廃液蒸発装置蒸発器胴板	応力腐食割れを考慮した評価の結果、発生応力と亀裂安定限界応力の比が最も大きい機器
	全面腐食	制御用空気だめ	腐食（全面腐食）を考慮した評価が必要となる機器
	流れ加速型腐食 （冷温停止状態で流れあり）	ディーゼル機関空気冷却器	耐震重要度が高く、内部流体が海水であり、伝熱管の腐食（流れ加速型腐食）の耐震評価の結果、発生応力と許容応力の比が最も大きい機器
動的機能維持	弁箱	振動応答特性上又は構造・強度上「軽微若しくは無視」できない事象の機器	

#### 4. 代表の耐震安全性評価

##### 4.1 耐震安全性評価

##### 4.1.1 低サイクル疲労

##### (1) 伸縮継手（主蒸気管）

伸縮継手（主蒸気管）について、運転開始後60年までの推定過渡回数を考慮して算出した疲労累積係数と、基準地震動  $S_s$  又は  $S_1$  を考慮した地震時の疲労累積係数の合計が許容値 1 以下となることから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果を表 6 に、算出過程を別紙 5 にそれぞれ示す。

表 6 伸縮継手（主蒸気管）の低サイクル疲労の耐震安全性評価結果

対象機器	運転実績回数* <sup>1</sup> に基づく疲労累積係数	地震動による疲労累積係数（基準地震動 $S_s$ ）	合計（許容値 1 以下）
伸縮継手（主蒸気管）	0.032	0.436	0.468

\*1：過渡実績を踏まえ、運転開始後60年までの運転過渡を想定した疲労累積係数

##### (2) アンカーサポート取付部（余熱除去系統配管）

アンカーサポート取付部（余熱除去系統配管）について、地震時の発生応力を評価した結果、地震時の発生応力は許容応力を超えることはないことから、耐震安全性評価上問題ない。

評価結果を表 7 に、算出過程を別紙 6 にそれぞれ示す。

表 7 アンカーサポート取付部（余熱除去系統配管）の低サイクル疲労の耐震安全性評価結果

評価対象	耐震重要度	評価地震力	許容応力状態	応力種別	応力比	発生応力 (MPa)	許容応力* <sup>2</sup> (MPa)
配管とパッドの溶接部	S	$S_s$ * <sup>1</sup>	$IV_{AS}$	一次応力	0.57	65	115
				一次+二次応力	0.51	59	115
パッドとラグの溶接部	S	$S_s$ * <sup>1</sup>	$IV_{AS}$	一次応力	0.60	69	115
				一次+二次応力	0.64	63	99
ラグとプレートの溶接部	S	$S_s$ * <sup>1</sup>	$IV_{AS}$	一次応力	0.52	62	120
				一次+二次応力	0.58	57	99

\*1： $S_s$ 地震力が  $S_1$ 地震力及びSクラスの機器に適用される静的地震力より大きく、 $S_s$ 地震力による発生応力が  $S_1$ 地震力及びSクラスの機器に適用される静的地震力の許容応力を下回るため、 $S_1$ 地震力及び静的地震力による評価を省略した。

\*2：設計・建設規格付録材料図表Part5表 8 及び表 9 より求まる値

タイトル 主蒸気管の伸縮継手の疲労割れに対する耐震安全性評価について

説明 主蒸気管の伸縮継手の疲労割れに対する評価について評価内容を以下に示す。  
また、耐震安全性評価のうち疲労評価に用いた等価繰返し回数を添付-1に示す。

1. 記号の説明  
伸縮継手の疲労評価に用いる記号について、表 5-1 に示す。

表 5-1 伸縮継手の疲労評価に用いる記号

記号	単位	定 義
b	mm	継手部の波のピッチの2分の1
c	—	継手部の層数
d <sub>p</sub>	mm	継手部の有効径
E	MPa	常温 (21℃) における JSME S NC1-2005(2007)付録材料図表 Part6 表 1 に規定する材料の縦弾性係数
e	mm	継手部の1山当たりの総変位量
e <sub>x</sub>	mm	軸方向変位による継手部の1山当たりの変位量
e <sub>y</sub>	mm	軸直角方向変位による継手部の1山当たりの変位量
h	mm	継手部の波の高さ
L	mm	継手部の有効長さ
ℓ	mm	中間の管の長さ
N	—	許容繰返し回数 (地震時)
N <sub>R</sub>	—	評価繰返し回数 (地震時)
n	—	継手部1個の山数の2倍の値 (1山の継手にあつては2)
P	MPa	原子炉格納容器最高使用圧力
t	mm	継手部の板の厚さ
UF	—	疲労累積係数 (地震時)
W <sub>N</sub>	—	継手部1個の山数
X	mm	軸方向地震変位量 (表 5-3 及び表 5-4 における X の2倍(両振幅))
Y	mm	軸直角方向地震変位量 (表 5-3 及び表 5-4 における $\delta y = \sqrt{Y^2 + Z^2}$ の2倍(両振幅))
δ	mm	全伸縮量 (地震)
σ	MPa	発生応力
σ <sub>D</sub>	MPa	全伸縮量 (地震) による応力
σ <sub>P</sub>	MPa	最高使用圧力による応力

伸縮継手の基本寸法箇所を図 5-1 に示す。

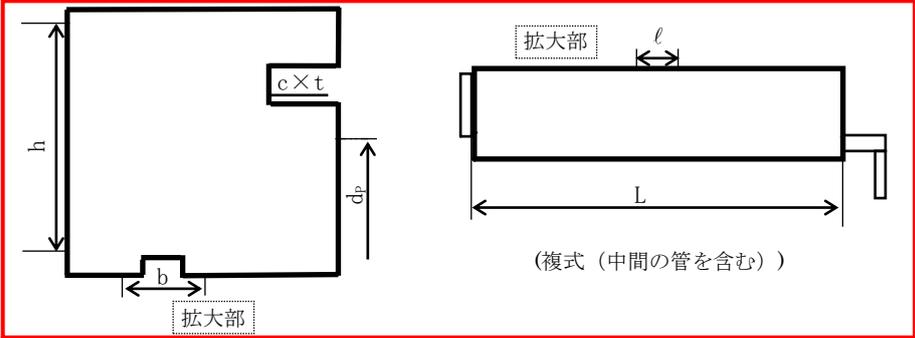


図 5-1 伸縮継手の基本寸法箇所

## 2. 評価部位

図 5-2 に主蒸気管の伸縮継手の模式図を示す。

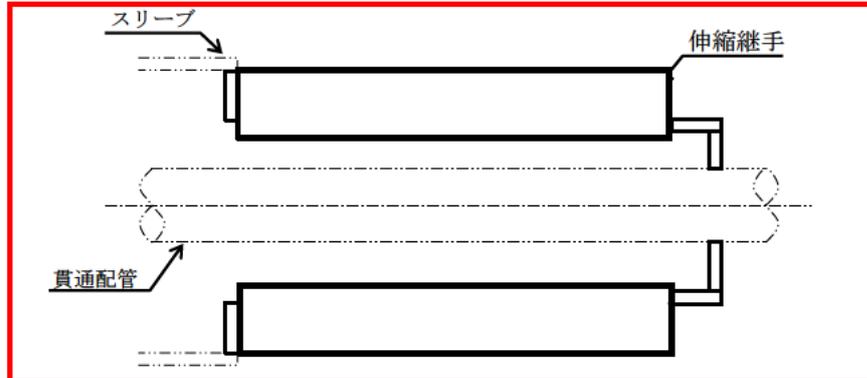


図 5-2 伸縮継手模式図

評価部位は、図 5-3 に示す伸縮継手の頂部とする。

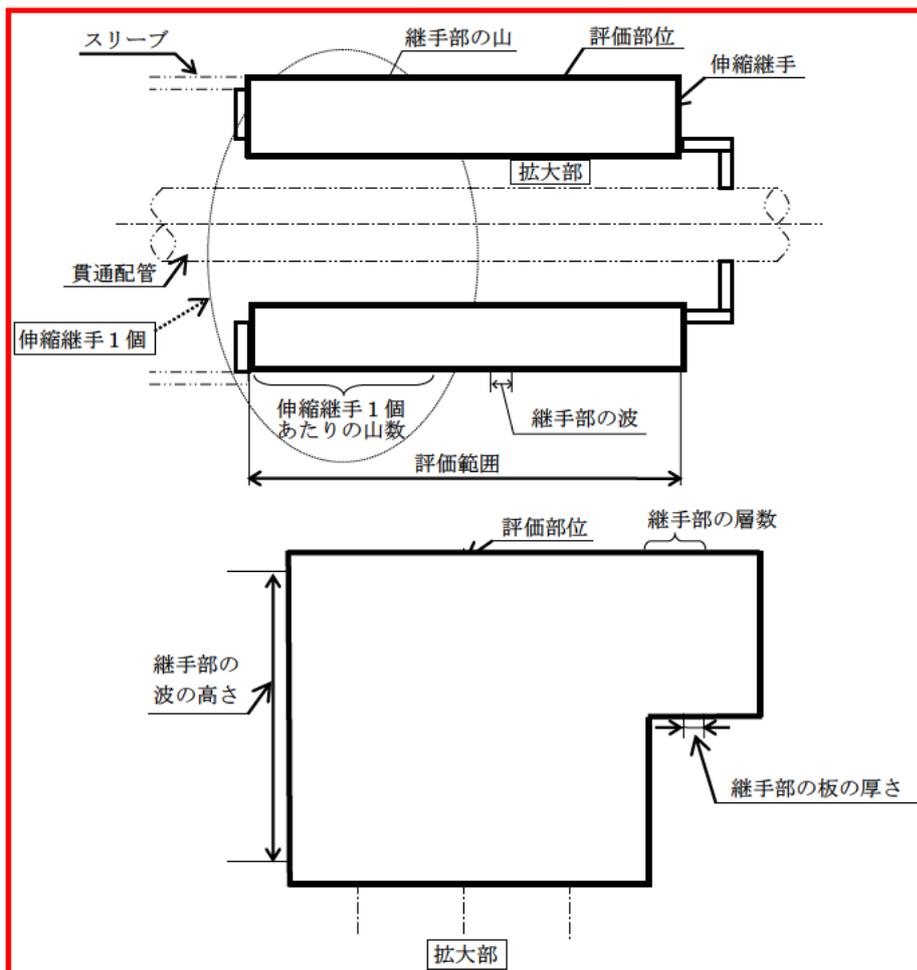


図 5-3 伸縮継手の評価部位

### 3. 評価内容

#### (1) 格納容器貫通部の仕様

格納容器貫通部の仕様について表 5-2 に示す。

表 5-2 (1/2) 格納容器貫通部の仕様

格納容器貫通部	原子炉格納容器 最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	伸縮継手 有効径 (mm)	継手部の 波の高さ (mm)	継手部の 波のピッチの 2分の1 (mm)	継手部の 板の厚さ (mm)
	P		$d_p$	h	b	t
主蒸気管 貫通部	0.255	291				

表 5-2 (2/2) 格納容器貫通部の仕様

格納容器貫通部	伸縮継手 1個の 山数 $W_N$	継手部 の 層数 c	材料	評価温度における 縦弾性係数 (MPa) E	複式伸縮継手の長さ (mm)	
					中間の管 の長さ $\ell$	伸縮継手 の長さ L
主蒸気管 貫通部			SUS304	195,000	110	610

#### (2) 地震時の伸縮継手の変位

基準地震動  $S_s$  又は  $S_1$  を考慮した伸縮継手の変位をそれぞれ表 5-3 及び表 5-4 に示す。

表 5-3 伸縮継手の変位 (基準地震動  $S_s$ )

格納容器貫通部	地震合計変位 (mm)			
	X	Y	Z	$\delta_y = \sqrt{(Y^2+Z^2)}$
主蒸気管 貫通部				

表 5-4 伸縮継手の変位 (基準地震動  $S_1$ )

格納容器貫通部	地震合計変位 (mm)			
	X	Y	Z	$\delta_y = \sqrt{(Y^2+Z^2)}$
主蒸気管 貫通部				

注：表 5-3、表 5-4 に示す座標系は、格納容器半径方向を X 方向、鉛直方向を Z 方向とする右手直交座標系であり、表 5-1 に示す X、Y とは異なるものである。

#### (3) 疲労累積係数 (地震時) の算出

地震時の伸縮継手の変位から発生応力を算出し許容繰返し回数を求め、評価繰返し回数と許容繰返し回数の比 (疲労累積係数) を算出する (日本機械学会 「設計・建設規格 2005 年版 (2007 年追補版を含む) JSME S NC1-2005(2007)」 (以下、「設計・建設規格」という) の PVE-3800 伸縮継手を参照)。

a. 伸縮継手の変位

(a) 軸方向変位による継手部の 1 山当たりの変位量

$$e_x = \frac{X}{2W_N}$$

(b) 軸直角方向変位による継手部の 1 山当たりの変位量

$$e_y = \frac{3d_p Y}{2W_N \left\{ L + \ell \left( \frac{\ell}{L} + 1 \right) \right\}}$$

(c) 継手部の 1 山当たりの総変位量

$$e = e_x + e_y$$

(d) 伸縮継手の全伸縮量 (地震)

$$\delta = eW_N$$

b. 伸縮継手の応力と許容繰返し回数 (設計・建設規格 PVE-3800)

(a) 伸縮継手の応力

全伸縮量 (地震) による応力

$$\sigma_D = \frac{1.5Et \delta}{n \sqrt{bh^3}}$$

最高使用圧力による応力

$$\sigma_P = \frac{Ph^2}{2t^2c}$$

発生応力

$$\sigma = \sigma_D + \sigma_P$$

(b) 許容繰返し回数 (地震時)

$$N = \left( \frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5}$$

(c) 疲労累積係数 (地震時)

$$UF = \frac{N_R}{N}$$

4. 評価結果

(1) 地震による疲労評価結果

基準地震動  $S_s$  又は  $S_1$  による疲労評価結果をそれぞれ表 5-5 及び表 5-6 に示す。

表 5-5 基準地震動  $S_s$  による疲労評価結果

格納容器貫通部	発生応力 $\sigma$ (MPa)	許容繰返し 回数 N	評価繰返し 回数 $N_R$	疲労累積係数 UF
主蒸気管 貫通部	1,915	459	200	0.436

表 5-6 基準地震動  $S_1$  による疲労評価結果

格納容器貫通部	発生応力 $\sigma$ (MPa)	許容繰返し 回数 N	評価繰返し 回数 $N_R$	疲労累積係数 UF
主蒸気管 貫通部	1,587	886	300	0.339

(2) 運転実績回数\*1に基づく疲労累積係数との組合せによる評価結果

運転実績回数に基づく疲労累積係数と、基準地震動  $S_s$  又は  $S_1$  を考慮して算出した結果をそれぞれ表 5-7 及び表 5-8 に示す。

表 5-7 基準地震動  $S_s$  と運転実績回数に基づく  
疲労累積係数との組合せによる評価結果

格納容器貫通部	運転実績回数 に基づく 疲労累積係数	地震動による 疲労累積係数 (基準地震動 $S_s$ )	合計 (許容値 1 以下)
主蒸気管 貫通部	0.032	0.436	0.468

表 5-8 基準地震動  $S_1$  と運転実績回数に基づく  
疲労累積係数との組合せによる評価結果

格納容器貫通部	運転実績回数 に基づく 疲労累積係数	地震動による 疲労累積係数 (基準地震動 $S_1$ )	合計 (許容値 1 以下)
主蒸気管 貫通部	0.032	0.339	0.371

\*1: 過渡実績を踏まえ、運転開始後 60 年後までの運転過渡を想定した疲労累積係数

以上より、主蒸気管の伸縮継手の疲労割れに対する耐震安全性に問題はない。

以上

## 耐震安全性評価のうち疲労評価に用いた等価繰返し回数について

S<sub>s</sub>地震時及びS<sub>1</sub>地震時の疲労累積係数算出に用いた等価繰返し回数について表 5-1-1 に示す。なお、泊 1 号炉の耐震安全性評価のうち、地震時の疲労累積係数算出においては、すべて表 5-1-1 と同じ等価繰返し回数を用いている。

表 5-1-1 疲労評価に用いた等価繰返し回数

地震動	等価繰返し回数
S <sub>s</sub> 地震動	200 回
S <sub>1</sub> 地震動	300 回

以 上

<p>タイトル</p>	<p>アンカーサポート取付部（余熱除去系統配管）の疲労割れに対する耐震安全性評価について</p>															
<p>説明</p>	<p>1. 評価仕様                  評価に用いたデータを図6-1及び表6-1に示す。</p> <div data-bbox="395 613 1321 1375" style="text-align: center;"> <p>図6-1 アンカーサポートの外形図</p> </div> <p>表6-1 諸元表（1 / 2）（単位：mm）</p> <table border="1" data-bbox="504 1603 1241 1951"> <tr> <td>パッドの幅（母管外径）</td> <td>b</td> <td rowspan="7" style="width: 50px;"></td> </tr> <tr> <td>パッドの長さ</td> <td>h</td> </tr> <tr> <td>配管とパッドの溶接脚長</td> <td><math>T_{WP1}</math></td> </tr> <tr> <td>パッドとラグの溶接脚長</td> <td><math>T_{WP2}</math></td> </tr> <tr> <td>ラグと底板の溶接脚長</td> <td><math>T_{WP3}</math></td> </tr> <tr> <td>角型鋼管の大きさ</td> <td>a</td> </tr> <tr> <td>角型鋼管の厚さ</td> <td>t</td> </tr> </table>	パッドの幅（母管外径）	b		パッドの長さ	h	配管とパッドの溶接脚長	$T_{WP1}$	パッドとラグの溶接脚長	$T_{WP2}$	ラグと底板の溶接脚長	$T_{WP3}$	角型鋼管の大きさ	a	角型鋼管の厚さ	t
パッドの幅（母管外径）	b															
パッドの長さ	h															
配管とパッドの溶接脚長	$T_{WP1}$															
パッドとラグの溶接脚長	$T_{WP2}$															
ラグと底板の溶接脚長	$T_{WP3}$															
角型鋼管の大きさ	a															
角型鋼管の厚さ	t															

表6-1 諸元表 (2/2)

評価部位	L <sup>(注1)</sup> (mm)	A <sub>w</sub> (mm <sup>2</sup> )	Z <sub>wx</sub> (mm <sup>3</sup> )	Z <sub>wy</sub> (mm <sup>3</sup> )	Z <sub>wp</sub> (mm <sup>3</sup> )
①配管とパッド の溶接部					
②パッドとラグ の溶接部					
③ラグと底板の 溶接部					

L：荷重作用点から評価部までの距離

A<sub>w</sub>：溶接部の断面積

Z<sub>wx</sub>, Z<sub>wy</sub>, Z<sub>wp</sub>：各方向の溶接部の断面係数

(注1) Lは安全側に配管中心から底板までの最長距離を一律に用いた。

## 2. 解析モデル及び入力（荷重）条件

### (1) 評価用荷重の算出

評価用荷重は、配管を3次元はりモデル化してS<sub>s</sub>地震時のアンカーサポートに作用する配管反力をスペクトルモーダル解析にて算出している。支持点解析モデル図を添付-1に示す。

評価部位はサポートラグ（固定点）であり、隣接する解析ブロックとの境界部である。このため、両ブロックの解析結果から得られた荷重を合成<sup>\*</sup>し、評価用荷重としている。算出された評価用荷重を表6-2に示す。

表6-2 評価用荷重 (S<sub>s</sub>)

方向	荷重	
	一次	一次+二次
F <sub>x</sub> (kN)		
F <sub>y</sub> (kN)		
F <sub>z</sub> (kN)		
M <sub>x</sub> (kN・m)		
M <sub>y</sub> (kN・m)		
M <sub>z</sub> (kN・m)		

<sup>\*</sup>荷重は、配管解析で求めた荷重を以下のとおり合成している。

自重：代数和，慣性力：絶対和，相対変位：絶対和

(代数和： $\sum_{i=1}^N x_i$ ，絶対和： $\sum_{i=1}^N |x_i|$ )

なお、慣性力は動的と静的の大きい方を評価用荷重としている。

(2) 発生応力の算出

溶接部に発生する応力は、下式で算出している。本評価式は、材料力学に基づく公式をもとにして設定したものであり、設計・建設規格や耐震設計技術指針等に規定されたものではなく、応力集中係数に係る規定はない。また、支持構造物は降伏点を許容値としており、許容値を厳しくする設計体系となっていることから、発生応力の算出において応力係数を考慮する必要はないと判断している。

$$\sigma_1 = \frac{|Mx| + |Fy| \cdot L}{Z_w x} + \frac{|My| + |Fx| \cdot L}{Z_w y} + \frac{|Fz|}{A_w}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\left(\frac{Fx}{A_w}\right)^2 + \left(\frac{Fy}{A_w}\right)^2} + \frac{|Mz|}{Z_w p}$$

応力評価は、以下の組合せ応力を用いる。

○パッドと配管、パッドとラグ、ラグと底板の溶接部（すみ肉溶接部）

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

3. 評価結果

各部位の許容応力を表6-3に、評価結果を表6-4に示す。

表6-3 許容応力※1

部位		パッド※2	ラグ	底板
物性値	材質	SUS304TP	STKR41	SS41
	使用温度 (°C)	177	177	177
	F 値 (MPa)	201	174	190
一次応力の許容値 (MPa)	S s	115	120	130
一次+二次応力の許容値 (MPa)	S s	115	99	109

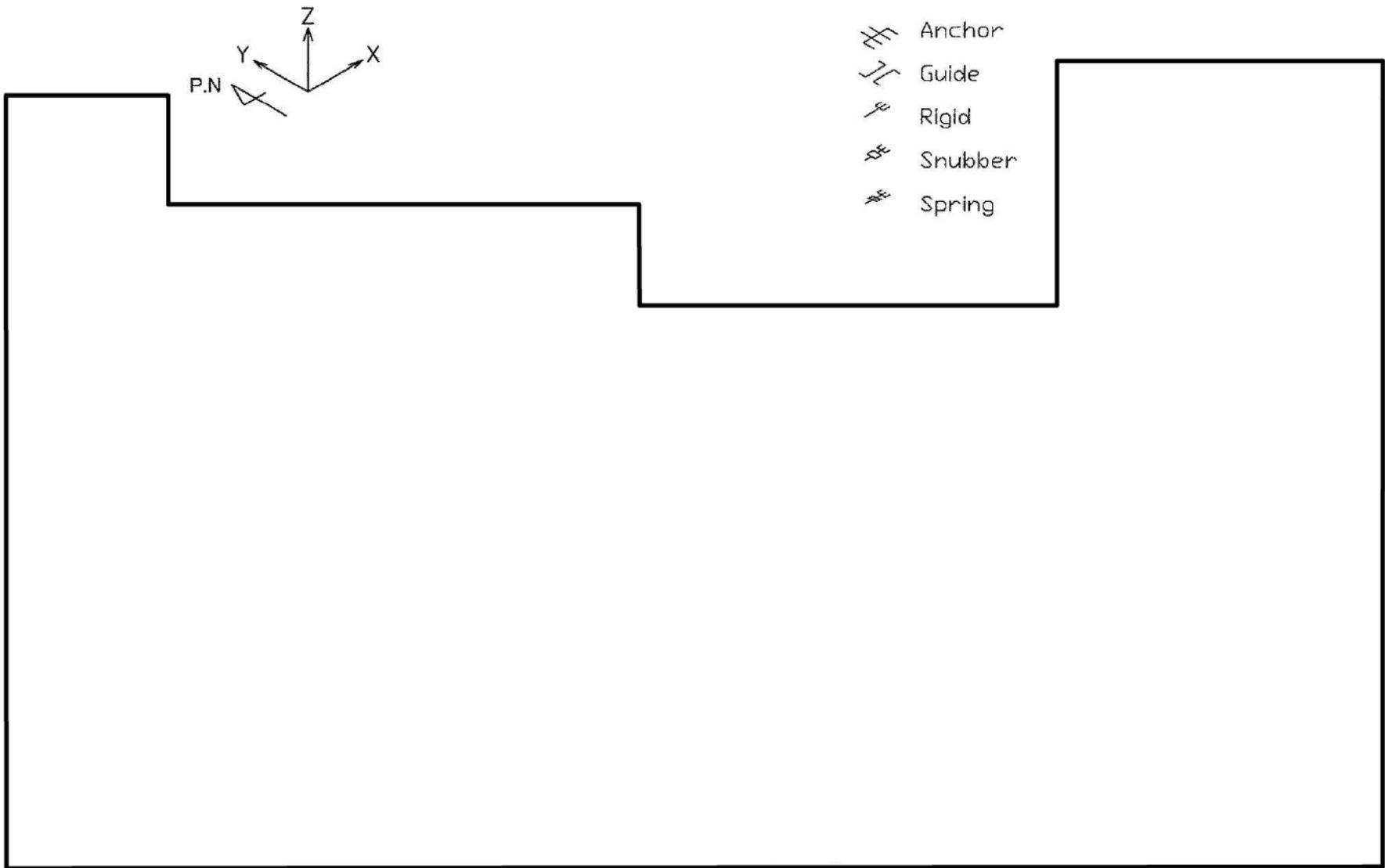
※1：許容値の算出は添付-2参照

※2：パッドを取り付ける配管の材質はSUS316TPである（許容値は安全側にSUS304TPを使用しているため、記載を省略する）。

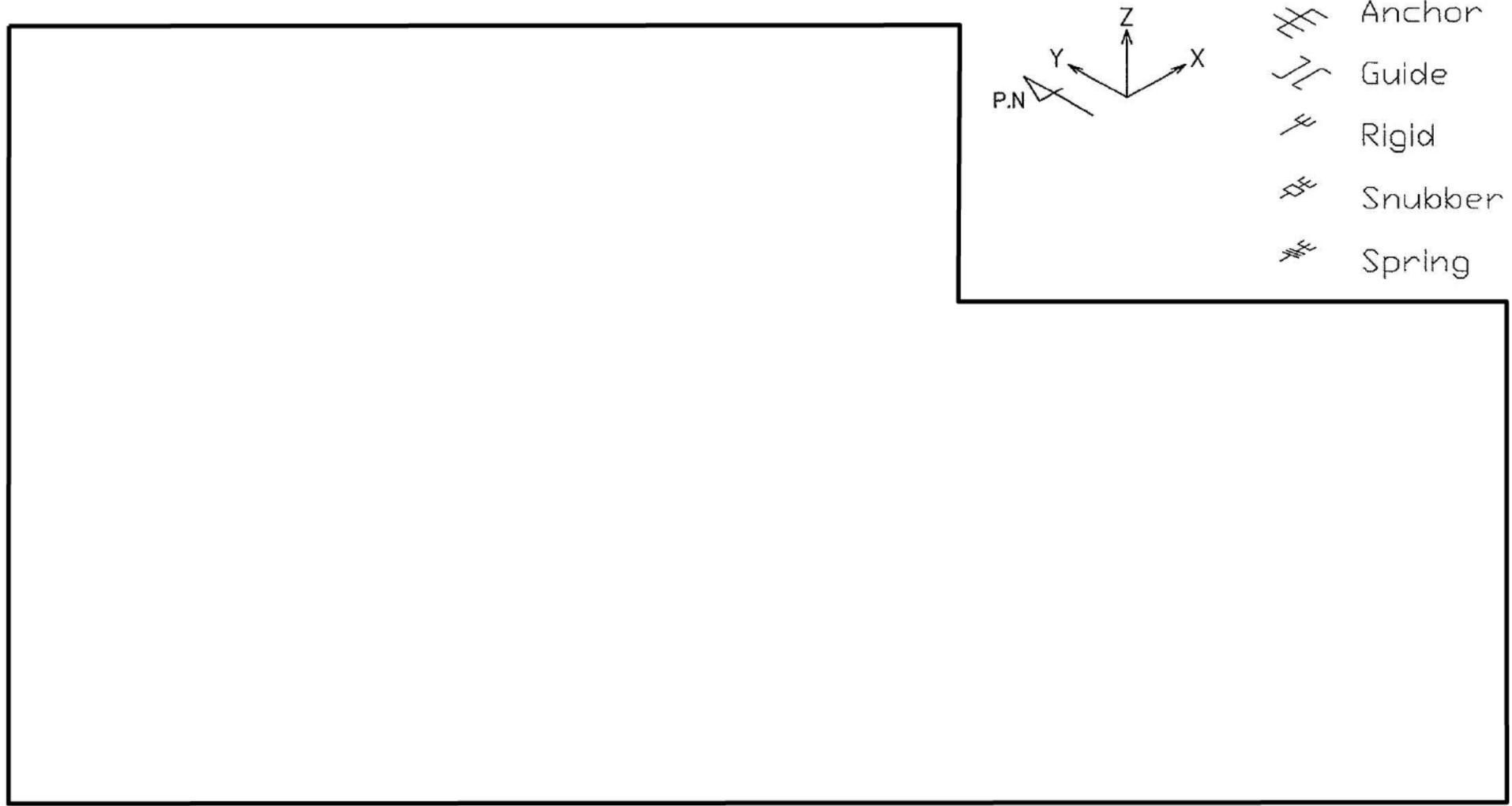
表6-4 評価結果

配管とパッド の溶接部 (評価部位①)	一次応力 評価	発生応力	65 MPa
		許容応力	115 MPa
		応力比	0.57
	一次+二次 応力評価	発生応力	59 MPa
		許容応力	115 MPa
		応力比	0.51
パッドとラグ の溶接部 (評価部位②)	一次応力 評価	発生応力	69 MPa
		許容応力	115 MPa
		応力比	0.60
	一次+二次 応力評価	発生応力	63 MPa
		許容応力	99 MPa
		応力比	0.64
ラグと底板の 溶接部 (評価部位③)	一次応力 評価	発生応力	62 MPa
		許容応力	120 MPa
		応力比	0.52
	一次+二次 応力評価	発生応力	57 MPa
		許容応力	99 MPa
		応力比	0.58

以 上



A-余熱除去系統配管 (CV内MCP側) 解析モデル (RH11)



A-余熱除去系統配管 (CV内PEN側) 解析モデル (RH12)

## 許容応力の算出

(単位：MPa)

アンカーサポート番号		RH-11-6A		
部位		パッド	ラグ	底板 16 < t ≤ 40
物性値	材質 <sup>※1</sup>	SUS304TP	STKR41	SS41
	評価温度 (°C)	177	177	177
	① Sy (付録図表Part5表8) (at 使用温度)	149	174	190
	Su (付録図表Part5表9) (at 使用温度)	411	373	373
	② Sy (at 常温)	205	—	—
	③ 1.35Sy	201	—	—
	④ 0.7Su	287	261	261
	F=min (②, ③, ④) <sup>※2</sup>	201	174	190
	引張許容応力 ft=F/1.5	134	116	126
	曲げ許容応力 fb=F/1.5	134	116	126
せん断許容応力 fs=F/1.5√3	77	66	73	
一次応力の許容値	引張許容応力 1.5ft [1.5ft*] <sup>※3</sup>	201 [201]	174 [207]	189 [228]
	曲げ許容応力 1.5fb [1.5fb*] <sup>※3</sup>	201 [201]	174 [207]	189 [228]
	せん断許容応力 1.5fs [1.5fs*] <sup>※3</sup>	115 [115]	99 [120]	109 [130]
一次+二次応力の許容値	引張許容応力 3ft	402	348	378
	曲げ許容応力 3fb	402	348	378
	せん断許容応力 1.5fs (すみ肉)	115	99	109

※1：STKR41はSTKR400，SS41はSS400として評価する。

※2：使用温度が40°Cを超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の場合のみ。それ以外はF=min (①, ④)

※3：S s 地震の一次応力評価では，JEAG4601の支持構造物規定に従い①，②の値を「告示501号 別表第9 (設計・建設規格 付録図表Part5表8) に定める値の1.2倍の値」と読み替えて算出した値を使用する。

タイトル	原子炉容器の中性子照射脆化に対する耐震安全性評価について
説明	<p>原子炉容器の中性子照射脆化に対する評価についての具体的な評価内容を以下に記す。冷温停止状態を前提とした評価においては、加圧熱衝撃事象（PTS事象）は発生しないことから、PTS事象との組み合わせは不要とした。</p> <p>1. S s 地震時の応力評価部位と応力値</p> <p>S s 地震による原子炉容器胴部に生じる曲げモーメント<sup>※1</sup>として、最大となる節点（原子炉容器管台ノズル部（添付－1の図中⑦））の <math>2.00 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{mm}</math> を使用している。この曲げモーメントを断面係数（<math>1.57 \times 10^9 \text{mm}^3</math>）で除して算出した曲げ応力値<sup>※2</sup>（<math>\sigma_b</math>）は 12.8MPa となる。</p> <p>※1：曲げモーメントは原子炉建屋（内部コンクリート：EL. 20m）での減衰定数 1% の発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成 18 年 9 月 19 日）により策定した基準地震動 S s による床応答曲線を用いてスペクトルモーダル解析により算出している。</p> <p>※2：原子炉容器中心を基準として、系全体で見たときに、曲げとしての応力が作用していることから、曲げ応力値としている。</p> <p>2. <math>K_{Ic}</math> の算出式とその根拠</p> <p><math>K_{Ic}</math> は JEAC4206-2007 の附属書 C 「供用状態 C, D における加圧水型原子炉圧力容器の炉心領域部に対する非延性破壊防止のための評価方法」に基づき、以下の式で計算している。（技術評価書「容器－原子炉容器」参照）</p> $K_{Ic} = 20.16 + 129.9 \exp \{ 0.0161 (T - T_p) \} \quad (\text{MPa} \sqrt{\text{m}})$ <p>3. <math>K_I</math> 値の評価結果</p> <p>S s 地震で生じる <math>K_I</math> 値は、原子炉容器胴部に仮定した周方向想定欠陥（長さ 60mm、深さ 10mm の半楕円表面欠陥、母材厚さ <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span> mm）に上記 1. 項の荷重が作用した場合に生じる値として、JEAC4206-2007 F-3300 に記載している ASME Sec. XI App. A の式を用いて <math>5.1 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}</math> を算出している。</p> <p>S s 地震で生じる <math>K_I</math> 値の算出には、JEAC4206-2007 の附属書 F-3300 にて記載のある ASME Sec. XI App. A の解の式（①式）を用いて算出している。式を以下に示す。</p> $K_I = \left\{ (\sigma_m + A_p) M_m + \sigma_b M_b \right\} \sqrt{\frac{\pi a}{1000Q}} \cdots \textcircled{1}$

<記号説明>

$K_I$  : 応力拡大係数 (  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  )

$\sigma_m$  : 膜応力 (MPa)

$A_p$  : 内表面亀裂にかかる内圧 (MPa)

$M_m$  : 膜応力の補正係数 (=  $G_0$ )

$\sigma_b$  : 曲げ応力 (MPa)

$M_b$  : 曲げ応力の補正係数 (=  $G_0 - 2(a/t)G_1$ )

$Q$  : 亀裂形状の補正係数 (=  $1 + 4.593(a/\ell)^{1.65} - q_y$ )

$q_y$  : 塑性域補正係数 (=  $\{(\sigma_m \cdot M_m + A_p \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b) / \sigma_{ys}\}^2 / 6$ )

$G_0, G_1$  : 想定欠陥深さ位置での係数

(JEAC4206-2007 附属書表 F-3200-1(1/2))

$\sigma_{ys}$  : 降伏応力 (MPa)

$a$  : 欠陥深さ (mm)

$\ell$  : 欠陥長さ (mm)

S s 地震で生じる  $K_I$  値 :  $5.1 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  の算出過程を以下に示す。

応力拡大係数を計算する際の想定欠陥は、長さ 60mm、深さ 10mm の半楕円表面欠陥とし、上記①式を用いて、 $K_I$  値を算出する。

なお、上記①式の曲げ応力 ( $\sigma_b$ ) は、1 項で算出した曲げ応力値 (12.8MPa) を用いる。その考え方については添付-2 に示す。

欠陥深さ  $a=10$  (mm)

欠陥長さ  $\ell=60$  (mm)

母材厚さ  $t=$   (mm)

JEAC4206-2007 附属書表 F-3200-1 (添付-3) において、 $a/t=0.060$ ,  
 $a/\ell=0.167$ より、

$M_m = G_0 = 1.0938$

$G_1 = 0.6779$

よって、

$$q_y = \{(\sigma_m \cdot M_m + A_p \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b) / \sigma_{ys}\}^2 / 6 \\ = 0.00182$$

ここで、 $A_p=17.16$  (MPa) ※

$$M_b = G_0 - 2(a/t)G_1$$

$$= 1.0125$$

$$\sigma_{ys} = 304.4 \text{ (MPa)}$$

( $T_c=288.1^\circ\text{C}$ における JSME S NC1-2005/2007 の値)

$$\sigma_m = 0$$

※ : 欠陥面にかかる内圧は最高使用圧力 (17.16MPa) を評価に使用している。

$$Q = 1 + 4.593(a/\ell)^{1.65} - q_y \\ = 1.237$$

以上より,

$$K_I = \left\{ (\sigma_m + A_p) M_m + \sigma_b M_b \right\} \sqrt{\frac{\pi a}{1000 Q}}$$

$$= 5.1 (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

となる。S s 地震動を考慮した評価結果を図 8-1 に示す。運転開始後 60 年時点での  $K_{Ic}$  下限包絡曲線と S s 地震を考慮した  $K_I$  曲線の両曲線は交差することはなく、 $K_{Ic} > K_I$  は満足され、原子炉容器の中性子照射による関連温度上昇は、耐震安全性評価上問題ない。

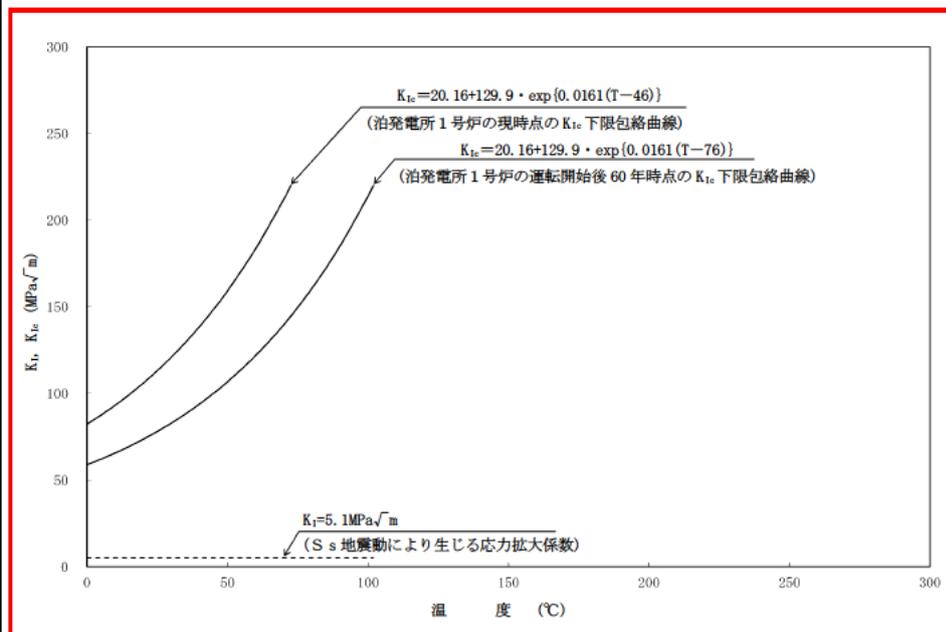
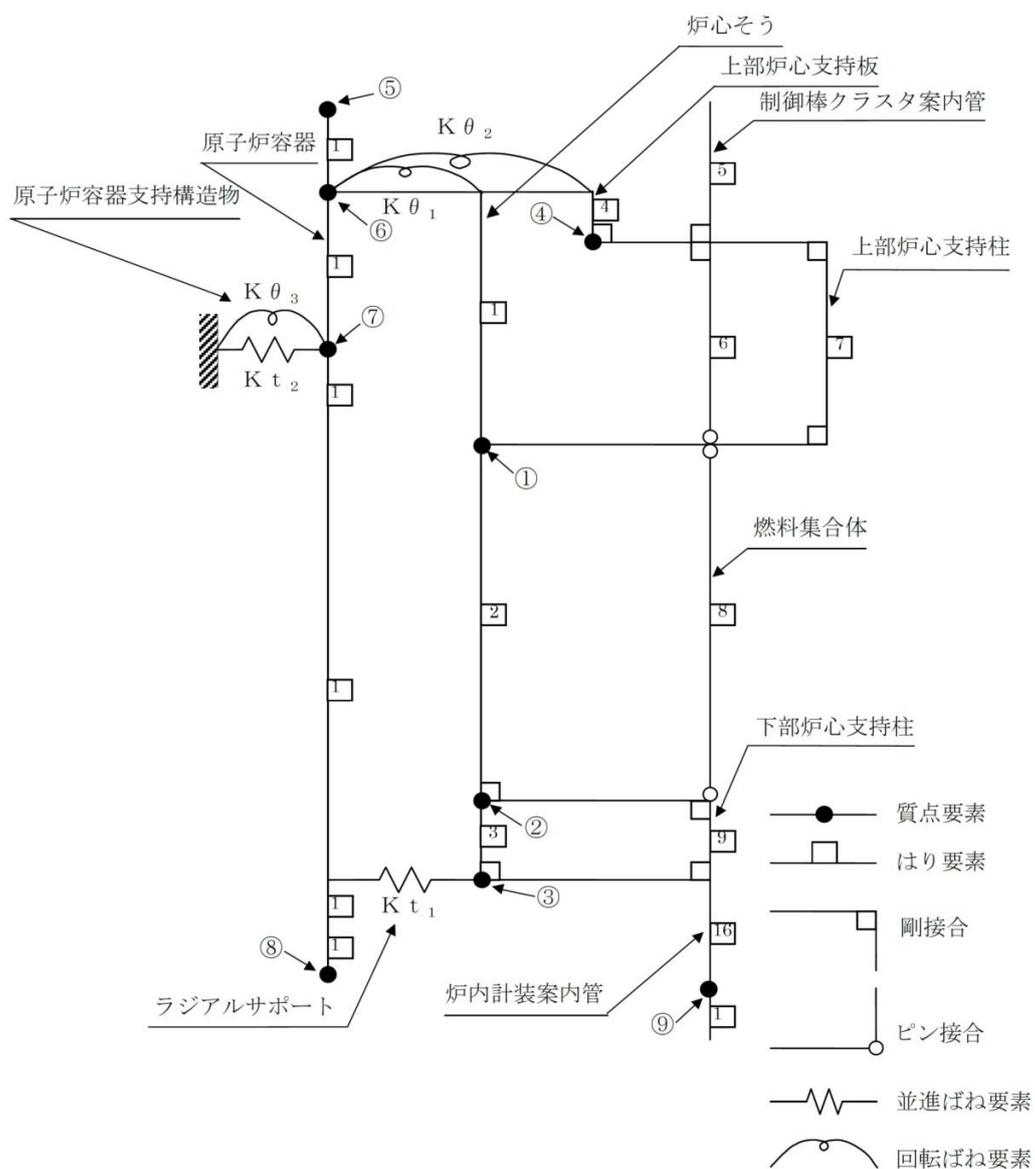


図 8-1 泊 1 号炉の S s 地震動による破壊評価

以上



原子炉容器胴部の地震評価に使用するモデル

### K<sub>I</sub>値の算出に用いる曲げ応力について

K<sub>I</sub>値は、JEAC4206-2007の附属書F-3300にて記載のあるASME Sec. XI App. Aの解の式を用いて算出している。

K<sub>I</sub>値の算出に際し、原子炉容器中心を基準として系全体で見たときに、曲げとしての応力が作用していることから、S<sub>s</sub>地震による原子炉容器胴部に生じる曲げモーメントを断面係数で除して算出した曲げ応力値(σ<sub>b</sub>)を用いている。その考え方について以下に示す。

#### 1. S<sub>s</sub>地震時の応力値

JEAC4206-2007 附属書C-3310に記載の通り、想定欠陥は軸方向である為、鉛直方向の地震及び水平方向の地震のどちらにおいても、K<sub>I</sub>値に寄与する応力は原子炉容器胴部に発生しない。そこで安全側に、想定欠陥が周方向とした場合にK<sub>I</sub>値への寄与度が大きい水平地震時の応力を用いて評価に用いるK<sub>I</sub>値を算定している。

水平方向の地震時の発生応力は、はりモデルに置き換えた場合に曲げ応力となる。はりモデルにおける応力分布の概念図を図8-2-1に示す。

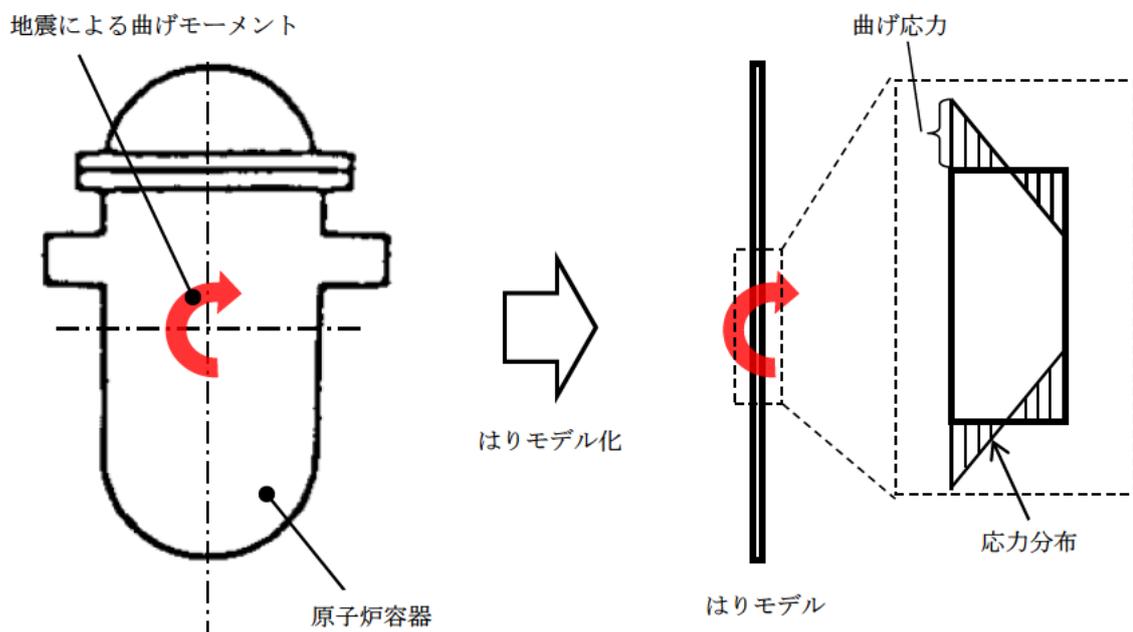


図 8-2-1 原子炉容器のはりモデル化による応力分布の概念図

## 2. K<sub>I</sub>値の確認

### 2.1 確認方法

JEAC4206 は地震時の評価のための規格ではなく、圧力や熱による評価を対象としたものであり、仮想欠陥に生じる応力を  $\sigma_b$  と  $\sigma_m$  に分類して K<sub>I</sub> 値を算出している。

ここで、図 8-2-2 に JEAC4206-2007 F-3300 の附属書図 F-3300-1 を示す。図 8-2-2 を参照し、地震時の板厚断面の発生応力を詳細に  $\sigma_b$  と  $\sigma_m$  に分類して評価する。

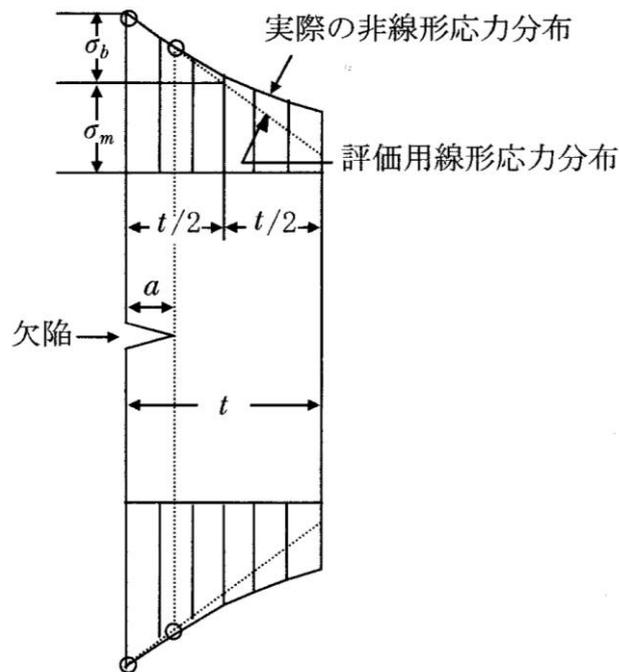


図 8-2-2 JEAC4206-2007 F-3300 附属書図 F-3300-1

### 2.2 確認結果

地震荷重には、S<sub>s</sub>地震（水平）による原子炉容器胴部における曲げモーメント  $2.00 \times 10^{10}$  (N・mm) を使用する。

この際、原子炉容器胴部外面に生じる地震荷重による曲げ応力  $\sigma_{bo}$  は、

$$\sigma_{bo} = M/Z_o = 12.8 \text{ (MPa)}$$

- 曲げモーメント  $M = 2.00 \times 10^{10}$  (N・mm)

- 断面係数  $Z_o = \frac{\pi}{32 \times d_o} (d_o^4 - d_i^4) = 1.57 \times 10^9$  (mm<sup>3</sup>)

- 原子炉容器胴部 外径  $d_o = \boxed{\phantom{0000}}$  (mm), 内径  $d_i = \boxed{\phantom{0000}}$  (mm)

また、原子炉容器胴部内面に生じる地震荷重による曲げ応力  $\sigma_{bi}$  は、

$$\sigma_{bi} = M/Z_i = 11.6 \text{ (MPa)}$$

- 断面係数  $Z_i = \frac{\pi}{32 \times d_i} (d_o^4 - d_i^4) = 1.73 \times 10^9$  (mm<sup>3</sup>)

よって、膜応力  $\sigma_m$  と曲げ応力  $\sigma_b$  に分類すると、

$$\sigma_m = (\sigma_{bo} + \sigma_{bi}) / 2 = 12.2 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_b = \sigma_{bo} - \sigma_m = 0.6 \text{ (MPa)} \text{ (※欠陥を想定している内面においては } -0.6 \text{ (MPa))}$$

JEAC4206-2007 附属書F-3300 ASME Sec. XI Appendix Aの解（作用分布応力を線形近似する場合）により、 $K_I$ を算出する。想定欠陥のサイズは、

- ・ 欠陥深さ  $a = 10$  (mm)
- ・ 欠陥長さ  $\ell = 60$  (mm)
- ・ 母材厚さ  $t = \boxed{\phantom{000}}$  (mm)

附属書表F-3200-1 (1/2) 最深点Aでの係数において、 $a/t = 0.060$ ,  $a/\ell = 0.167$ より、

$$M_m = G_0 = 1.0938$$

$$G_1 = 0.6779$$

よって、欠陥を想定している内面において、

$$\begin{aligned} q_y &= \{(\sigma_m \cdot M_m + A_p \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b) / \sigma_{ys}\}^2 / 6 \\ &= \{(12.2 \cdot 1.0938 + 17.16 \cdot 1.0938 - 0.6 \cdot 1.0125) / 304.4\}^2 / 6 \\ &= 0.00179 \end{aligned}$$

$$A_p = 17.16 \text{ (MPa)} \text{ (原子炉容器の最高使用圧力)}$$

$$M_b = G_0 - 2(a/t)G_1 = 1.0125$$

$$\sigma_{ys} = 304.4 \text{ (MPa)}$$

(JSME S NC1-2005/2007より  $T_c = 288.1^\circ\text{C}$ における設計降伏点)

$$Q = 1 + 4.593(a/\ell)^{1.65} - q_y = 1.237$$

$$\begin{aligned} K_I &= \{(\sigma_m + A_p) \cdot M_m + \sigma_b \cdot M_b\} \sqrt{\frac{\pi a}{1000Q}} \\ &= \{(12.2 + 17.16) \cdot 1.0938 - 0.6 \cdot 1.0125\} \sqrt{\frac{\pi \times 10}{1000 \times 1.237}} \\ &= 5.1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}) \end{aligned}$$

以上より、 $\sigma_b$ と $\sigma_m$ に分類して評価した場合でも  $K_I = 5.1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$ であり、分類しない場合と同程度である。

以 上

附属書表 F-3200-1 (1/2) 最深点 A での係数

Uniform  $G_0$

$a/t$	$a/\ell$					
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.00	1.1208	1.0969	1.0856	1.0727	1.0564	1.0366
0.05	1.1461	1.1000	1.0879	1.0740	1.0575	1.0373
0.10	1.1945	1.1152	1.0947	1.0779	1.0609	1.0396
0.15	1.2670	1.1402	1.1058	1.0842	1.0664	1.0432
0.20	1.3654	1.1744	1.1210	1.0928	1.0739	1.0482
0.25	1.4929	1.2170	1.1399	1.1035	1.0832	1.0543
0.30	1.6539	1.2670	1.1621	1.1160	1.0960	1.0614
0.40	2.1068	1.3840	1.2135	1.1448	1.1190	1.0772
0.50	2.8254	1.5128	1.2693	1.1757	1.1457	1.0931
0.60	4.0420	1.6372	1.3216	1.2039	1.1699	1.1058
0.70	6.3743	1.7373	1.3610	1.2237	1.1868	1.1112
0.80	11.991	1.7899	1.3761	1.2285	1.1902	1.1045

$a/t = 0.060$   
 $a/\ell = 0.167$   
 $G_0 = 1.0938$

Linear  $G_1$

$a/t$	$a/\ell$					
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.00	0.7622	0.6635	0.6826	0.7019	0.7214	0.7411
0.05	0.7624	0.6651	0.6833	0.7022	0.7216	0.7413
0.10	0.7732	0.6700	0.6855	0.7031	0.7221	0.7418
0.15	0.7945	0.6780	0.6890	0.7046	0.7230	0.7426
0.20	0.8267	0.6891	0.6939	0.7067	0.7243	0.7420
0.25	0.8706	0.7029	0.7000	0.7094	0.7260	0.7451
0.30	0.9276	0.7193	0.7073	0.7126	0.7282	0.7468
0.40	1.0907	0.7584	0.7249	0.7209	0.7338	0.7511
0.50	1.3501	0.8029	0.7454	0.7314	0.7417	0.7566
0.60	1.7863	0.8488	0.7671	0.7441	0.7520	0.7631
0.70	2.6125	0.8908	0.7882	0.7588	0.7653	0.7707
0.80	4.5727	0.9288	0.8063	0.7753	0.7822	0.7792

$a/t = 0.060$   
 $a/\ell = 0.167$   
 $G_1 = 0.6779$

タイトル	原子炉容器サポート（サポートブラケット（サポートリブ））の中性子及び $\gamma$ 線照射脆化に対する耐震安全性評価について
説明	<p>原子炉容器サポート（サポートブラケット（サポートリブ））の中性子及び<math>\gamma</math>線照射脆化に対する評価についての評価内容を以下に示す。</p> <p>1. サポートリブに発生するせん断応力値の算出 サポートリブに発生するせん断応力値<math>\sigma</math>は、原子炉容器支持構造物に作用する接線方向の最大荷重<math>T</math>と鉛直方向の最大荷重<math>N</math>を基に算出した。（詳細は添付-1のとおり）</p> <p>せん断応力値<math>\sigma = 15 \text{ MPa}</math>（<math>S_1</math>地震時）</p> <p>2. 想定欠陥 本評価では、評価対象であるサポートリブを、想定欠陥を含めモデル化した。（詳細は添付-2のとおり）</p> <p>3. 応力拡大係数の算出 応力拡大係数<math>K</math>をRaju-Newmanの算出式を用いて算出する。</p> $K = F \sigma \sqrt{\frac{\pi a / 1000}{Q}}$ $F = \left\{ M_1 + M_2 \times \left( \frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \times \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right\} \times g \times f_\phi \times f_w$ $Q = 1 + 1.464 \times \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65}$ $M_1 = 1.13 - 0.09 \times \left( \frac{a}{c} \right)$ $M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}}$ $M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \times \left( 1 - \frac{a}{c} \right)^{24}$ $f_\phi = \left\{ \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right\}^{\frac{1}{4}}$ $g = 1 + \left\{ 0.1 + 0.35 \times \left( \frac{a}{t} \right)^2 \right\} \times (1 - \sin \phi)^2$ $f_w = \left\{ \sec \left( \pi c \frac{\sqrt{\frac{a}{t}}}{2b} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$

<記号説明>

- a : 想定亀裂深さ (=15 (mm))
- b : 平板の幅の半長 (=1000 (mm))
- c : 表面長さの半長 (=45 (mm))
- t : 平板の厚さ (=60 (mm))
- $\phi$  : 亀裂前縁の位置を示す角度 (=  $\pi/2$ )
- F : 応力拡大係数の補正係数 (=1.169)
- Q : 表面亀裂の形状補正係数 (=1.239)
- $M_1, M_2, M_3$  : 数式項の置き換え記号 ( $M_1=1.1, M_2=1.129, M_3=-0.516$ )
- $f_\phi$  : 内部亀裂を表面亀裂に変換する際の補正係数 (=1)
- g : 解の定式化のための係数 (=1)
- $f_w$  : 有限板幅に関する補正係数 (=1)

なお、高経年化技術評価では、NUREG-1509「Radiation Effects on Reactor Pressure Vessel Supports」の評価手法に従い、応力拡大係数Kに安全率 $\sqrt{2}$ を乗じた値を評価に用いている。

$$\begin{aligned}\sqrt{2}K &= 1.169 \times 15 \times \sqrt{\frac{\pi \times \frac{15}{1000}}{1.239}} \times \sqrt{2} \\ &= 4.9 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}\end{aligned}$$

また、破壊靱性値について、本評価はせん断応力に対する評価であり、許容値としてはモードII（せん断）における破壊靱性値 $K_{II R}$ を使用することが最適であるが、試験法が確立していないこと等により値がないため、安全側と考えられるモードI（引張）での破壊靱性値 $K_{I R}$ を代用して評価している。許容値 $K_{I R}$ （=33.2MPa $\sqrt{\text{m}}$ ）の算出過程については添付-3に示す。

#### 4. 評価結果

評価結果を表10-1に示す。応力拡大係数は破壊靱性値を超えることはないため、原子炉容器サポート（サポートブラケット（サポートリブ））の中性子及び $\gamma$ 線照射脆化は、耐震安全性評価上問題ない。

表10-1 原子炉容器サポート（サポートブラケット（サポートリブ））の中性子及び $\gamma$ 線照射脆化に対する耐震安全性評価結果

応力拡大係数 $K_I$ (= $\sqrt{2} K$ ) (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )	破壊靱性値 $K_{I R}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )	$K_I / K_{I R}$
4.9	33.2	0.15

以上

原子炉容器サポート（サポートブラケット（サポートリブ））に発生するせん断応力 $\sigma$ の算出について

### 1. 原子炉容器支持構造物に作用する荷重

原子炉容器支持構造物に作用する荷重方向図を図10-1-1に、荷重を表10-1-1に示す。

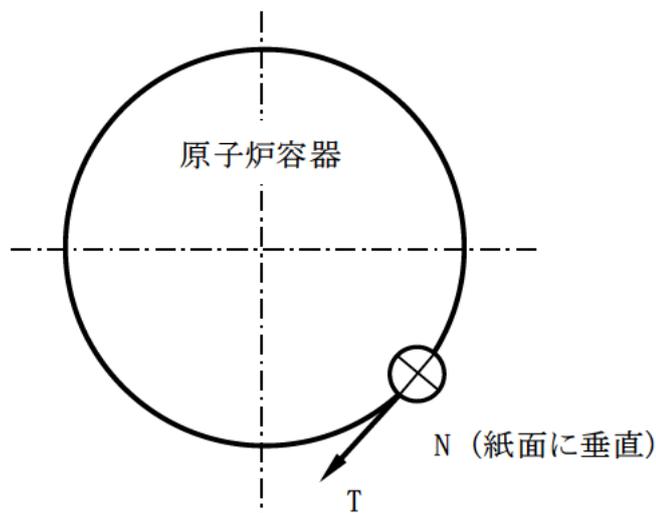


図10-1-1 荷重方向図

表10-1-1 原子炉容器支持構造物に作用する一次+二次応力評価用荷重

(単位：kN)

	S <sub>s</sub> 地震時		S <sub>1</sub> 地震時	
	接線方向荷重	鉛直方向荷重	接線方向荷重	鉛直方向荷重
	T	N	T	N
自重	—	-1,038	—	-1,038
熱膨張荷重	—	-1,473	—	-1,473
地震荷重	±3,851	-1,762	±3,132	-2,681
最大荷重	±3,851	-4,273	±3,132	-5,192

(注1) 鉛直方向荷重において負符号(-)は、鉛直下向きを示す。

(注2) Nの最大荷重は、自重と熱膨張荷重と地震荷重を加算したものである。

(注3) S<sub>s</sub>地震時は建屋-ループ連成モデルの時刻歴解析、S<sub>1</sub>地震動はスペクトルモード解析を用いて地震荷重を算出している。

2. 応力の算出

2.1 原子炉容器支持構造物の応力計算

原子炉容器支持構造物の構造及び評価箇所を図10-1-2に示す。評価対象とするサポートリブの①及び②部におけるせん断応力を算出する。

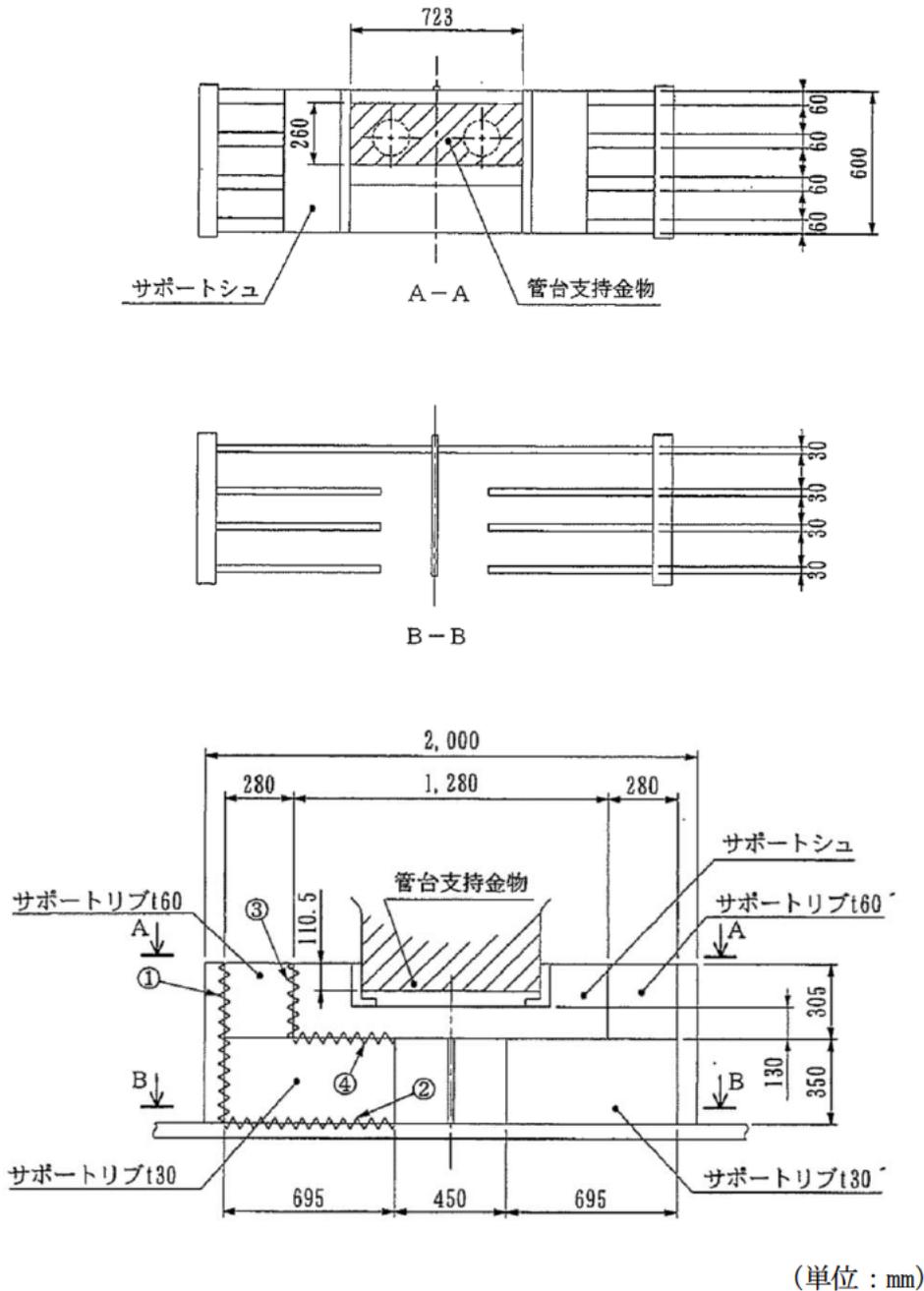


図 10-1-2 原子炉容器支持構造物の構造及び評価箇所

(1) サポートシュに作用する荷重

サポートシュには図10-1-3に示すとおり荷重が作用する。

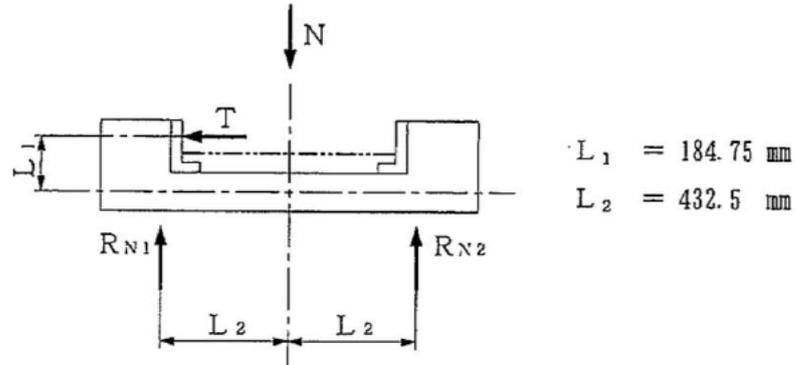


図10-1-3 サポートシュに作用する荷重

図10-1-3よりサポートリブからの反力 $R_{N1}$ ,  $R_{N2}$ を次式より求める。

$$R_{N1} + R_{N2} = N$$

$$R_{N1} \cdot L_2 = T \cdot L_1 + R_{N2} \cdot L_2$$

なお、 $N$ ,  $T$ については表10-1-1に、 $L_1$ ,  $L_2$ については表10-1-2に示す。

(2) サポートリブに作用する荷重

原子炉容器支持構造物を図10-1-4のようにモデル化し、サポートリブに作用する荷重を求める。

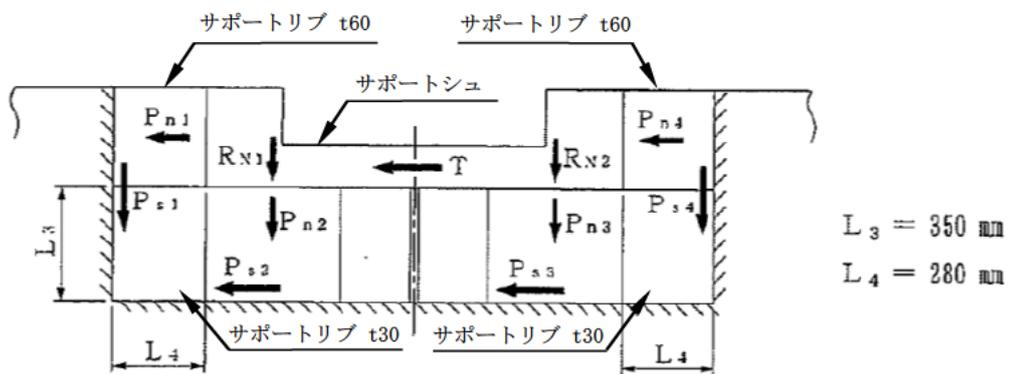


図10-1-4 サポートリブに作用する荷重

$P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}, P_{n4}, P_{s1}, P_{s2}, P_{s3}, P_{s4}$  はサポートシユより受ける荷重である。

ここでは、条件の厳しいt60, t30のサポートリブについて評価するが、サポートシユは剛体であり、サポートリブとは溶接による一体構造であることから、次式が成立する。

$$P_{n1} + P_{s2} = \frac{T}{2} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\text{i})$$

$$P_{s1} + P_{n2} = R_{N1} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\text{ii})$$

サポートリブ (①部) のせん断による変位

$$D_{s1} = \frac{1}{G} \times \frac{P_{s1}}{A_{s1}} \times L_4$$

サポートリブ (②部) のせん断による変位

$$D_{s2} = \frac{1}{G} \times \frac{P_{s2}}{A_{s2}} \times L_3$$

サポートリブ (③部) の圧縮による変位

$$D_{c3} = \frac{1}{E} \times \frac{P_{n1}}{A_{c3}} \times L_4$$

サポートリブ (④部) の圧縮による変位

$$D_{c4} = \frac{1}{E} \times \frac{P_{n2}}{A_{c4}} \times L_3$$

圧縮による変位とせん断による変位の連続条件から

$$\frac{1}{E} \times \frac{P_{n1}}{A_{c3}} \times L_4 = \frac{1}{G} \times \frac{P_{s2}}{A_{s2}} \times L_3 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\text{iii})$$

$$\frac{1}{E} \times \frac{P_{n2}}{A_{c4}} \times L_3 = \frac{1}{G} \times \frac{P_{s1}}{A_{s1}} \times L_4 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\text{iv})$$

(i), (ii), (iii) 及び (iv) 式より  $P_{s1}$  及び  $P_{s2}$  は次式より求められる。

$$P_{n1} = \frac{\frac{T}{2}}{1 + \frac{L_4}{E \times A_{c3}} \times \frac{G \times A_{s2}}{L_3}}$$

$$P_{n2} = \frac{R_{N1}}{1 + \frac{L_3}{E \times A_{c4}} \times \frac{G \times A_{s1}}{L_4}}$$

$$P_{s1} = \frac{L_3}{E \times A_{c4}} \times \frac{G \times A_{s1}}{L_4} \times P_{n2}$$

$$P_{s2} = \frac{L_4}{E \times A_{c3}} \times \frac{G \times A_{s2}}{L_3} \times P_{n1}$$

ここで,

$P_{s1}$  : サポートリブ (①部) に作用するせん断荷重 (kN)

$P_{s2}$  : サポートリブ (②部) に作用するせん断荷重 (kN)

$P_{n1}$  : サポートリブ (③部) に作用する圧縮荷重 (kN)

$P_{n2}$  : サポートリブ (④部) に作用する圧縮荷重 (kN)

$A_{s1}$  : 荷重  $P_{s1}$  を受けるサポートリブ (①部) のせん断に対する断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$A_{s2}$  : 荷重  $P_{s2}$  を受けるサポートリブ (②部) のせん断に対する断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$A_{c3}$  : 荷重  $P_{n1}$  を受けるサポートリブ (③部) の圧縮に対する断面積 ( $\text{mm}^2$ )

$A_{c4}$  : 荷重  $P_{n2}$  を受けるサポートリブ (④部) の圧縮に対する断面積 ( $\text{mm}^2$ )

なお,  $T$  については表10-1-1に,  $E$ ,  $G$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $A_{s1}$ ,  $A_{s2}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{c4}$  については表10-1-2に示す。

## 2.2 原子炉容器支持構造物各部の応力計算方法

2.1項で求めた荷重より, サポートリブに発生する応力を算出する。

### (1) サポートリブ

#### a. せん断応力 (①部)

$$\tau_1 = \frac{P_{s1}}{A_{s1}}$$

#### b. せん断応力 (②部)

$$\tau_2 = \frac{P_{s2}}{A_{s2}}$$

## 3. 応力の計算結果

## 3.1 計算条件

原子炉容器支持構造物の応力計算条件を表10-1-2に示す。

表10-1-2 原子炉容器支持構造物の応力計算条件

名 称	記号	単位	数値
荷重作用点までの距離	$L_1$	mm	184.75
荷重作用点までの距離	$L_2$	mm	432.5
部材の長さ	$L_3$	mm	350
部材の長さ	$L_4$	mm	280
サポートリブ (①部) のせん断に対する断面積	$A_{s1}$	mm <sup>2</sup>	115,000
サポートリブ (②部) のせん断に対する断面積	$A_{s2}$	mm <sup>2</sup>	83,400
サポートリブ (③部) の圧縮に対する断面積	$A_{c3}$	mm <sup>2</sup>	73,200
サポートリブ (④部) の圧縮に対する断面積	$A_{c4}$	mm <sup>2</sup>	49,800
サポートリブの縦弾性係数 <sup>(注1)</sup>	E	MPa	197,000
サポートリブの横弾性係数 <sup>(注2)</sup>	G	MPa	75,800
サポートリブの材質	—	—	SM50B

(注1) サポートリブの最高使用温度におけるJSME S NC1付録材料図表part6に規定する縦弾性係数。

(注2) サポートリブの最高使用温度におけるJSME S NC1付録材料図表part6に規定する縦弾性係数から求めた横弾性係数。

## 3.2 計算結果

2. 項で示した計算方法により求めた原子炉容器支持構造物の応力計算結果を、表10-1-3に示す。せん断応力が最も大きい $S_1$ 地震時のサポートリブ (①部) のせん断応力 ( $\sigma = \tau_1 = 15\text{MPa}$ ) を評価に使用する。

表10-1-3 原子炉容器支持構造物の応力計算結果 (一次+二次応力評価)

(単位: MPa)

部材名	記号	地震時せん断応力	
		$S_s$ 地震時	$S_1$ 地震時
サポートリブ (①部)	$\tau_1$	14	15
サポートリブ (②部)	$\tau_2$	6	5

以 上

## 想定欠陥について

本評価では、評価対象であるサポートリブを、想定欠陥を含め図 10-2-1 のとおりモデル化し、せん断応力の生じる図 10-2-2 中①及び②の位置を評価対象とした。想定欠陥のモデル図を図 10-2-1 に、評価対象箇所を図 10-2-2 にそれぞれ示す。

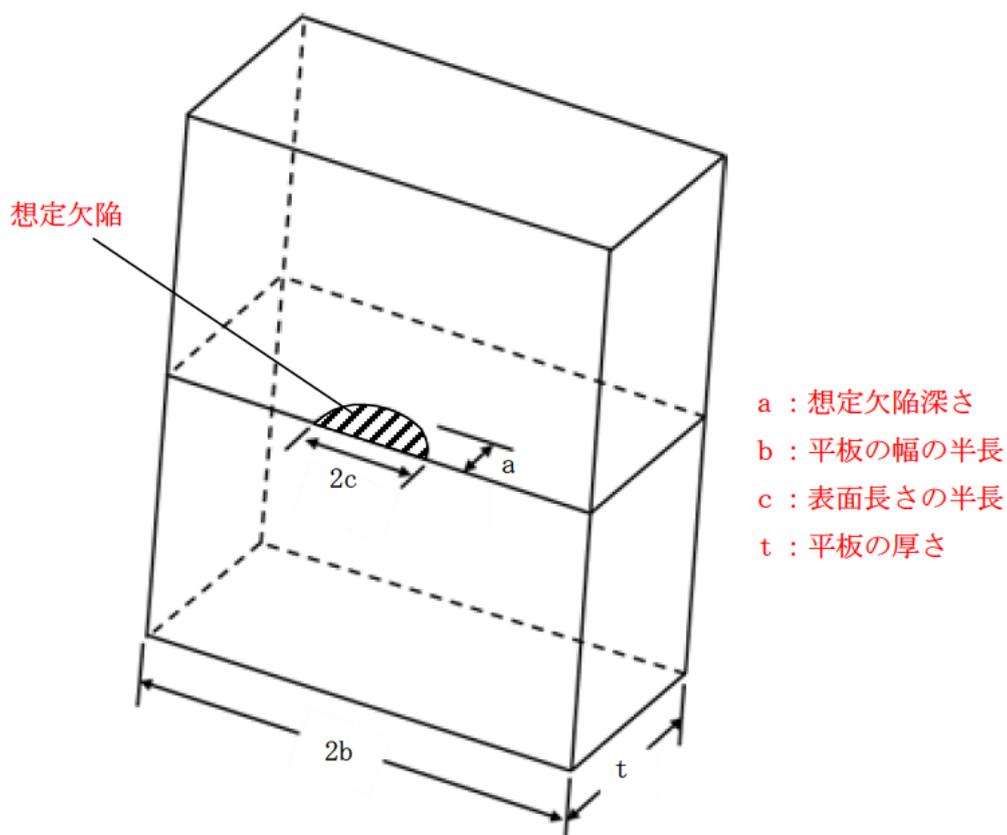


図 10-2-1 想定欠陥のモデル図

評価対象

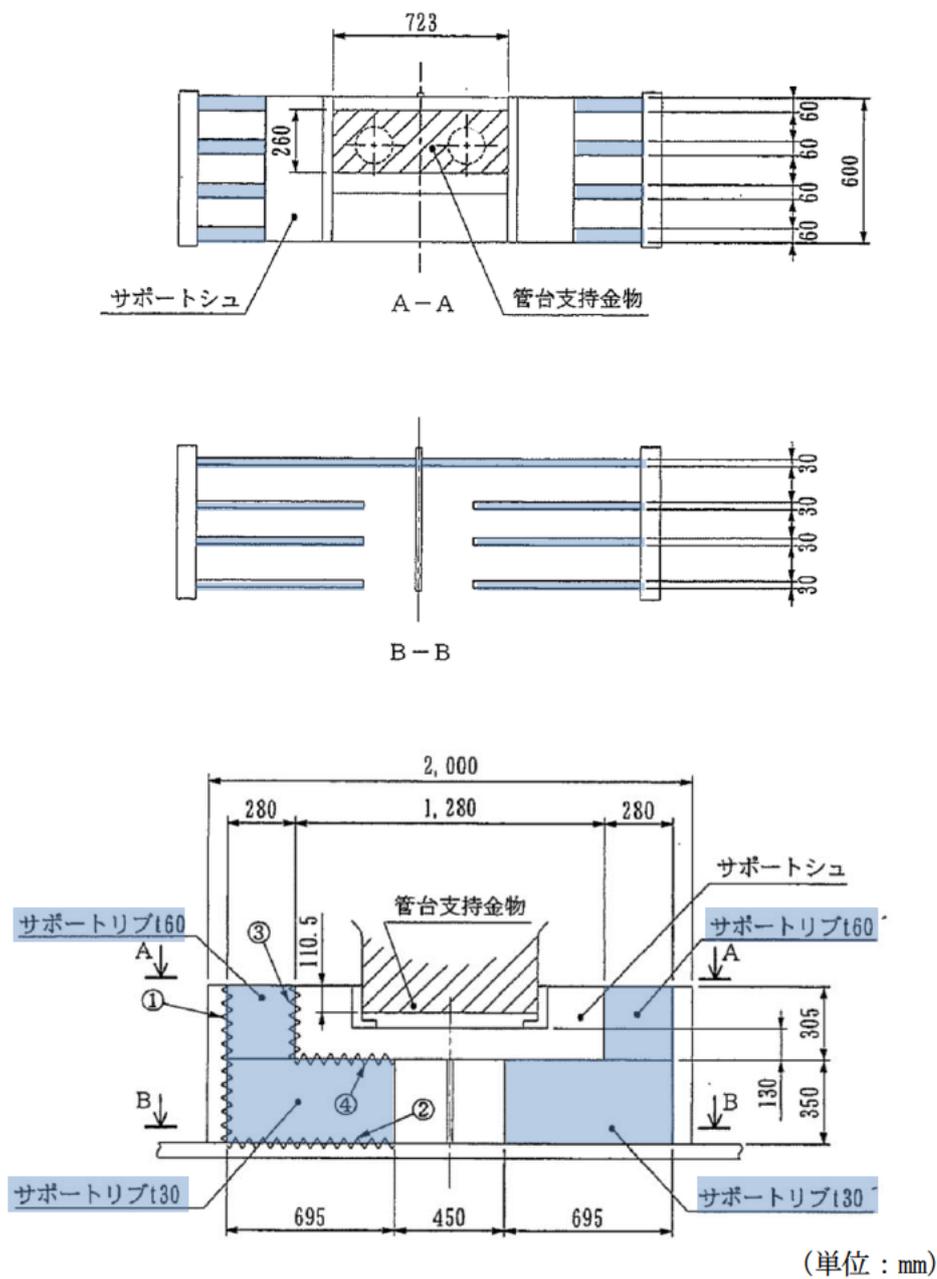


図 10-2-2 評価対象箇所

K<sub>IR</sub>の算出根拠・過程について

K<sub>IR</sub>については、図10-3-1に示すフローに基づき算出する。

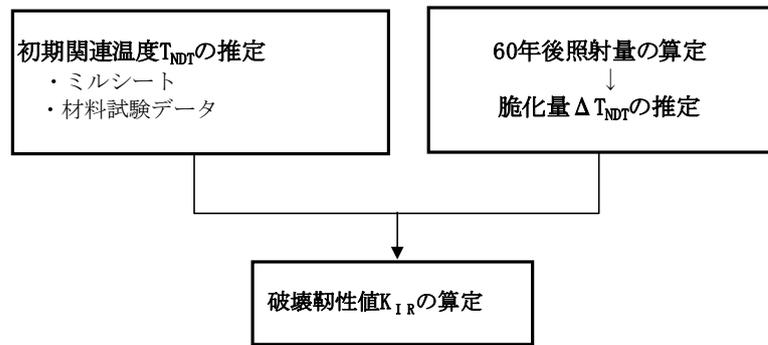


図10-3-1 K<sub>IR</sub>の算定フロー

詳細については、以下のとおりである。

### 1. 吸収エネルギー曲線

国内PWRプラントの建設時のミルシートを基に、製作した供試材を用いた、引張試験，落重試験，シャルピー衝撃試験，破壊靱性試験結果から求めた吸収エネルギー遷移曲線を図10-3-2に示す。

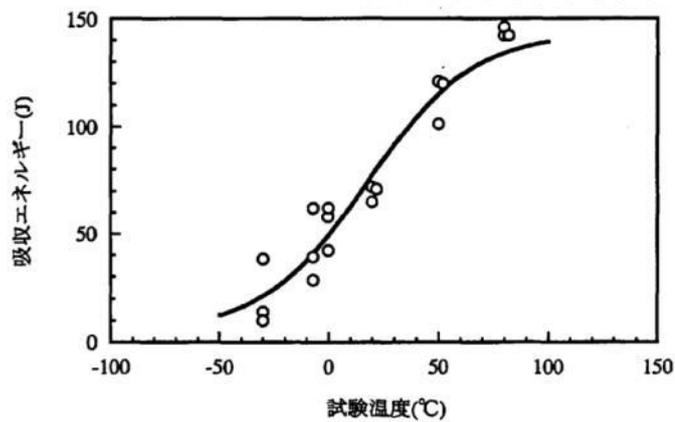


図10-3-2 リブ材(SM50B鋼)の吸収エネルギー遷移曲線

[出典：電力共同研究「原子炉容器支持構造物の照射脆化に関する研究」1999年度]

2. 初期関連温度 ( $T_{NDT}$ ) の推定

図10-3-2の曲線 (以下, 遷移曲線A) と, 国内外データ・文献データ等の吸収エネルギー遷移曲線 (以下, 遷移曲線B) を使い, 「JSME 設計・建設規格 付録材料図表 Part5表3」及び「JEAC4206 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」から求めた吸収エネルギー値 (リブ材: 41J) を満足する温度 $T_i$ における吸収エネルギー $C_v(T_i)$  A及び $C_v(T_i)$  Bと, 推定 $T_{NDT}A$ 及び推定 $T_{NDT}B$ の関係をプロットし, 初期関連温度 ( $T_{NDT}$ ) を推定する。

【評価結果】  $-57^{\circ}C$

初期関連温度 ( $T_{NDT}$ ) の推定の流れを, 図10-3-3に示す。

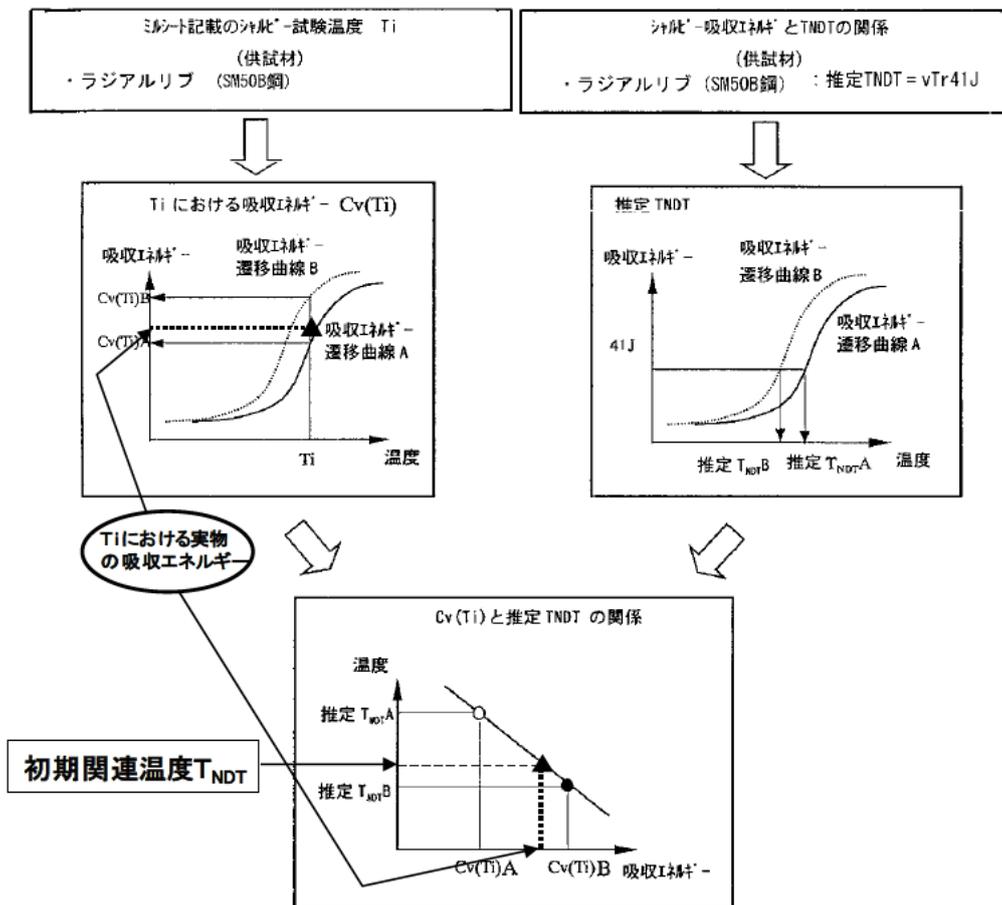


図10-3-3 シャルピー吸収エネルギー $C_v(T_i)$ と推定 $T_{NDT}$ の関係

3. 中性子照射量の算定及び脆化量 $\Delta T_{NDT}$ の推定

中性子照射量については、米国オークリッジ国立研究所で開発改良された「二次元輸送解析コード“DORT”を用いて算定する。

【評価結果】 0.0063 dpa

この値を基に図10-3-4に示す、NUREG-1509「ORNLのHFIR炉のサーベイランスデータ及び米国 SHIPPINGPORT 炉の材料試験データ等の上限を包絡する曲線」を基にした脆化予測曲線を用いてラジアルリブの脆化度（脆化量推定量（ $\Delta T_{NDT}$ ））を推定する。

【評価結果】  $T_{NDT} : 69.5^{\circ}\text{C}$        $\Delta T_{NDT} : 126.5^{\circ}\text{C}$

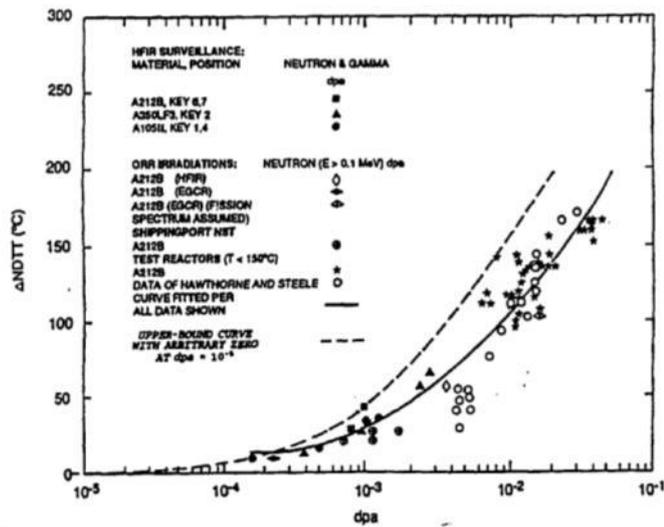


図10-3-4 RVサポートの脆化予測曲線

[出典：NUREG-1509 “Radiation Effects on Reactor Pressure Vessel Supports”

R. E. Johnson, R. E. Lipinski NRC 1996 P14]

4. 破壊靱性値 $K_{IR}$ の推定

ASME Section III Appendix Gに記載されている下式により算出する。

$$K_{IR} = 29.43 + 1.344 \exp(0.0261(T - T_{NDT} + 88.9))$$

$K_{IR}$  : 破壊靱性値 ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

T : 最低使用温度 ( $21^{\circ}\text{C}$ )

$T_{NDT}$  : 関連温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) (初期 $T_{NDT}$ 推定値+脆化量推定値 ( $\Delta T_{NDT}$ ))

【評価結果】  $K_{IR} : 33.2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

タイトル	低水質廃液蒸発装置（蒸発器胴板）の応力腐食割れに対する耐震安全性評価について																																																																	
説明	<p data-bbox="405 421 1348 499">低水質廃液蒸発装置（蒸発器胴板）の応力腐食割れに対する評価の具体的内容を以下に示す。</p> <p data-bbox="405 562 576 595">1. 評価仕様</p> <p data-bbox="459 609 796 642">評価仕様を表 11-1 に示す。</p> <p data-bbox="759 658 994 692">表 11-1 評価仕様</p> <table border="1" data-bbox="466 696 1287 1449"> <thead> <tr> <th data-bbox="466 696 831 745">項目</th> <th data-bbox="831 696 943 745">単位</th> <th data-bbox="943 696 1054 745">記号</th> <th data-bbox="1054 696 1287 745">数値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="466 745 831 786">板厚</td> <td data-bbox="831 745 943 786">mm</td> <td data-bbox="943 745 1054 786">t</td> <td data-bbox="1054 745 1287 786"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 786 831 826">亀裂角度</td> <td data-bbox="831 786 943 826">rad</td> <td data-bbox="943 786 1054 826"><math>2\theta</math></td> <td data-bbox="1054 786 1287 826"><math>\pi</math></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 826 831 866">胴外径</td> <td data-bbox="831 826 943 866">mm</td> <td data-bbox="943 826 1054 866"><math>d_o</math></td> <td data-bbox="1054 826 1287 866" rowspan="3"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 866 831 907">胴内径</td> <td data-bbox="831 866 943 907">mm</td> <td data-bbox="943 866 1054 907"><math>d_i</math></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 907 831 947">胴板断面二次モーメント</td> <td data-bbox="831 907 943 947"><math>\text{mm}^4</math></td> <td data-bbox="943 907 1054 947">I</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 947 831 987">最高使用圧力</td> <td data-bbox="831 947 943 987">MPa</td> <td data-bbox="943 947 1054 987">P</td> <td data-bbox="1054 947 1287 987">0.1</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 987 831 1028">最高使用温度</td> <td data-bbox="831 987 943 1028"><math>^{\circ}\text{C}</math></td> <td data-bbox="943 987 1054 1028">—</td> <td data-bbox="1054 987 1287 1028">150</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1028 831 1068">蒸発器質量</td> <td data-bbox="831 1028 943 1068">kg</td> <td data-bbox="943 1028 1054 1068"><math>m_0</math></td> <td data-bbox="1054 1028 1287 1068" rowspan="3"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1068 831 1108" rowspan="2">質点質量 (図 11-2 参照)</td> <td data-bbox="831 1068 943 1108">kg</td> <td data-bbox="943 1068 1054 1108"><math>m_1</math></td> </tr> <tr> <td data-bbox="831 1108 943 1149">kg</td> <td data-bbox="943 1108 1054 1149"><math>m_2</math></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1149 831 1189">設計降伏点</td> <td data-bbox="831 1149 943 1189">MPa</td> <td data-bbox="943 1149 1054 1189"><math>S_y</math></td> <td data-bbox="1054 1149 1287 1189">130</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1189 831 1229">設計引張強さ</td> <td data-bbox="831 1189 943 1229">MPa</td> <td data-bbox="943 1189 1054 1229"><math>S_u</math></td> <td data-bbox="1054 1189 1287 1229">424</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1229 831 1270" rowspan="2">基準点からの距離 (図 11-2 参照)</td> <td data-bbox="831 1229 943 1270">mm</td> <td data-bbox="943 1229 1054 1270"><math>H_1</math></td> <td data-bbox="1054 1229 1287 1270" rowspan="2"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="831 1270 943 1310">mm</td> <td data-bbox="943 1270 1054 1310"><math>H_2</math></td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1310 831 1350">設計地震力</td> <td data-bbox="831 1310 943 1350">—</td> <td data-bbox="943 1310 1054 1350"><math>C_H</math></td> <td data-bbox="1054 1310 1287 1350">6.3055</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1350 831 1391">胴板材質</td> <td data-bbox="831 1350 943 1391">—</td> <td data-bbox="943 1350 1054 1391">—</td> <td data-bbox="1054 1350 1287 1391">SUS316L</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1391 831 1431">重力加速度</td> <td data-bbox="831 1391 943 1431"><math>\text{m/s}^2</math></td> <td data-bbox="943 1391 1054 1431">g</td> <td data-bbox="1054 1391 1287 1431">9.80665</td> </tr> </tbody> </table>	項目	単位	記号	数値	板厚	mm	t		亀裂角度	rad	$2\theta$	$\pi$	胴外径	mm	$d_o$		胴内径	mm	$d_i$	胴板断面二次モーメント	$\text{mm}^4$	I	最高使用圧力	MPa	P	0.1	最高使用温度	$^{\circ}\text{C}$	—	150	蒸発器質量	kg	$m_0$		質点質量 (図 11-2 参照)	kg	$m_1$	kg	$m_2$	設計降伏点	MPa	$S_y$	130	設計引張強さ	MPa	$S_u$	424	基準点からの距離 (図 11-2 参照)	mm	$H_1$		mm	$H_2$	設計地震力	—	$C_H$	6.3055	胴板材質	—	—	SUS316L	重力加速度	$\text{m/s}^2$	g	9.80665
項目	単位	記号	数値																																																															
板厚	mm	t																																																																
亀裂角度	rad	$2\theta$	$\pi$																																																															
胴外径	mm	$d_o$																																																																
胴内径	mm	$d_i$																																																																
胴板断面二次モーメント	$\text{mm}^4$	I																																																																
最高使用圧力	MPa	P	0.1																																																															
最高使用温度	$^{\circ}\text{C}$	—	150																																																															
蒸発器質量	kg	$m_0$																																																																
質点質量 (図 11-2 参照)	kg	$m_1$																																																																
	kg	$m_2$																																																																
設計降伏点	MPa	$S_y$	130																																																															
設計引張強さ	MPa	$S_u$	424																																																															
基準点からの距離 (図 11-2 参照)	mm	$H_1$																																																																
	mm	$H_2$																																																																
設計地震力	—	$C_H$	6.3055																																																															
胴板材質	—	—	SUS316L																																																															
重力加速度	$\text{m/s}^2$	g	9.80665																																																															

## 2. 評価モデル

評価モデルは、蒸発器胴板に地震時発生応力が最も大きくなる箇所に図 11-1 に示す通り 1 gpm (0.2271m<sup>3</sup>/h) の漏えい量以上となる半周の貫通亀裂※を想定し、図 11-2 に示す通りの 2 質点系のモデルにて評価している。

※メーカー試験結果(三菱重工技報 Vol.18 NO.4(1981-7))に基づき、亀裂幅を   m と設定した場合における 1 gpm (0.2271m<sup>3</sup>/h) の漏えい亀裂角度は 105° であるが、本評価ではより安全側の半周亀裂(亀裂角度 180° =  $\pi$  rad) としている。

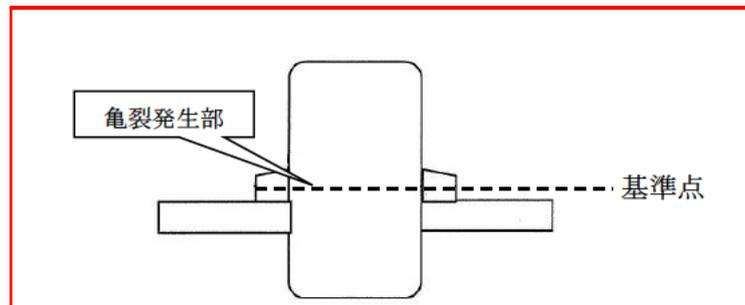


図 11-1 低水質廃液蒸発装置蒸発器 亀裂想定箇所

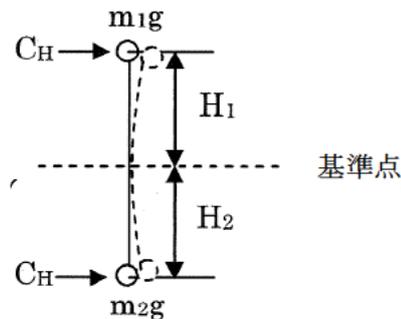


図 11-2 評価モデル

なお、亀裂想定箇所は低水質廃液蒸発装置蒸発器の地震時応力最大点としており溶接位置とは異なっているが、溶接位置においても耐震安全性評価上問題ないことを確認している。詳細を添付-1 に示す。

### 3. 入力（荷重）条件

#### 3.1 地震荷重

低水質廃液蒸発装置は、耐震Bクラスであるため、設置エリアに対応する水平静的震度 0.468 (G※) と、1/2S<sub>1</sub> の水平動的震度 6.3055 (G) (S<sub>1</sub> 床応答曲線のピーク値の 1/2：添付-2 参照) の大きい方である 6.3055 (G) (=C<sub>H</sub>) を使用する。

※9.80665 (m/s<sup>2</sup>)

#### 3.2 地震時発生応力

地震時の発生応力算出式を以下に示す。

発生応力： $\sigma = \sigma_{\text{内圧}} + \sigma_{\text{自重}} + \sigma_{\text{地震}}$

・内圧による応力

$$\sigma_{\text{内圧}} = \frac{P \times (d_i + 1.2t)}{4 \times t}$$

・自重による応力

$$\sigma_{\text{自重}} = \frac{m_0 \times g}{\pi \times t \times (d_i + t)}$$

・地震による応力

$$\sigma_{\text{地震}} = \frac{m_1 \times g \times H_1 \times (d_i + 2t) \times C_H}{2I} + \frac{m_2 \times g \times H_2 \times (d_i + 2t) \times C_H}{2I}$$

#### 3.3 亀裂安定限界応力

日本電気協会「原子力発電所配管破損防護設計技術指針（JEAG 4613-1998）」3.2.3 き裂安定性評価に基づき、半周の貫通亀裂を考慮した安定限界応力 P<sub>f</sub> を算出する。算出式を以下に示す。

$$P_f = P_m + P_b'$$

<記号説明>

P<sub>m</sub> : 内圧によって発生する膜応力 (= P × d<sub>o</sub> / 4t)

P<sub>b</sub>' : 曲げ応力 (= 2σ<sub>f</sub> (2sinβ - sinθ) / π)

β : { π - θ - (P<sub>m</sub> / σ<sub>f</sub>) π } / 2

σ<sub>f</sub> : 流動応力 (S<sub>y</sub> + S<sub>u</sub>) / 2

#### 4. 評価結果

評価結果を表 11-2 に示す。低水質廃液蒸発装置（蒸発器胴板）に応力腐食割れを考慮しても、地震時に発生する応力が亀裂安定限界応力を超えることはないことから、耐震安全性評価上問題はない。

表 11-2 応力腐食割れに対する耐震安全性評価結果

想定亀裂 亀裂角度 (rad)	耐震安全性評価		
	地震時応力 (MPa)	亀裂安定限界応力 (MPa)	応力比
$\pi$	19	71	0.27

なお、低水質廃液蒸発装置（蒸発器胴板）と同様に、経年劣化事象として応力腐食割れが想定される良水質廃液蒸発装置（蒸発器胴板）については、低水質廃液蒸発装置（蒸発器胴板）と寸法、板厚、重量及び設置フロア等の各条件が同じであることから、応力腐食割れに対する耐震安全性に問題ない。

以 上

### 低水質廃液蒸発装置蒸発器の溶接位置における耐震安全性評価について

低水質廃液蒸発装置蒸発器の溶接位置における評価を実施し、亀裂想定箇所による評価が耐震安全上問題のないことを以下に示す。

#### 1. 溶接位置

低水質廃液蒸発装置蒸発器の溶接位置と亀裂想定箇所を図 11-1-1 に示す。

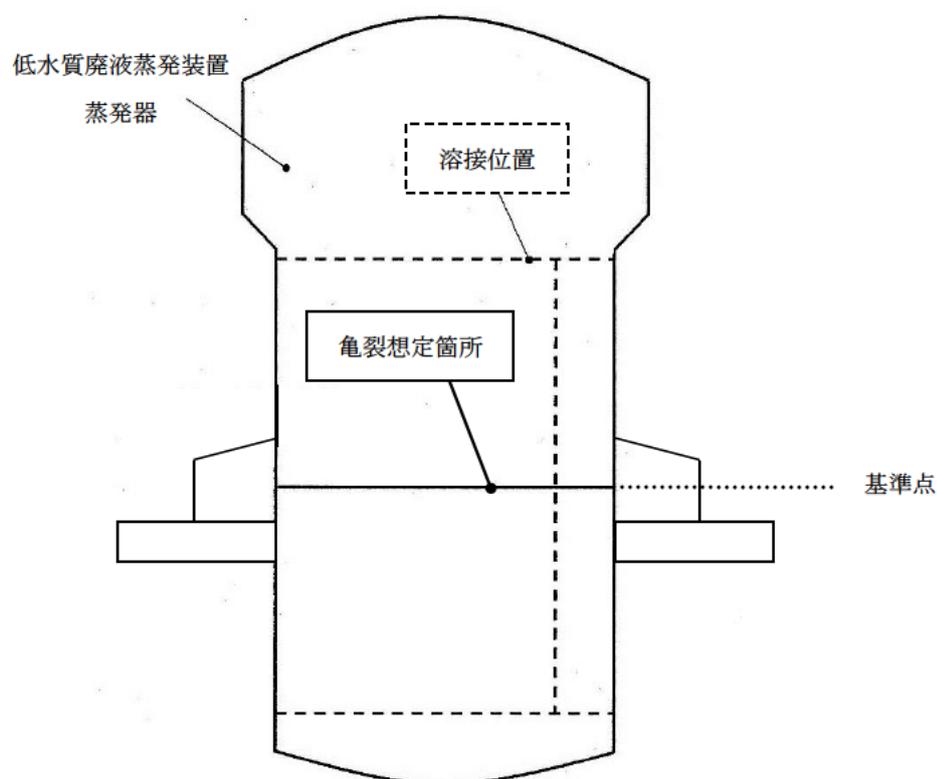


図 11-1-1 溶接位置と亀裂想定箇所

## 2. 応力の算出

低水質廃液蒸発装置蒸発器の溶接位置における評価は、日本機械学会「維持規格 2008 年版 JSME S NA1-2008」(添付 E-9) に基づく弾塑性破壊力学評価法により、蒸発器胴板上部の周方向溶接部での応力比(曲げ応力)を算出し実施する。

## 2.1 評価仕様

評価仕様を表 11-1-1 に示す。

表 11-1-1 評価仕様

項目	単位	記号	数値
板厚	mm	t	
亀裂角度	rad	$2\theta$	$\pi$
胴外径	mm	$d_o$	
胴内径	mm	$d_i$	
最高使用圧力	MPa	P	0.1
最高使用温度	°C	—	150
蒸発器上部の質点質量	kg	$m_1$	
設計降伏点	MPa	$S_y$	130
設計引張強さ	MPa	$S_u$	424
基準点から蒸発器 上端までの距離	mm	$L_1$	
基準点から上部周方向 溶接線までの距離	mm	$X_1$	
設計地震力	—	$C_H$	6.3055
胴板材質	—	—	SUS316L
重力加速度	$m/s^2$	g	9.80665

## 2.2 許容曲げ応力

周方向溶接部での許容曲げ応力  $S_c$  の算出式<sup>\*1</sup> を以下に示す。

$$S_c = 1 \times (P_b' / Z) - P_m \times (1 - 1/Z)$$

$$= \square \text{ (MPa)}$$

<記号説明>

$Z$  :  $Z$  係数 (GTAW (ティグ溶接) 及び SMAW (被覆アーク溶接) における値)  
 (=  $0.2921 \log \{ (d_o) / 25 \} + 0.986$ )

$P_b'$  : 曲げ応力 (半周亀裂が発生する場合) (=  $2 \sigma_f (2 \sin \beta - \sin \theta) / \pi$ )

$\beta$  :  $\{ \pi - \theta - (P_m / \sigma_f) \pi \} / 2$

$\sigma_f$  : 流動応力 (=  $(S_y + S_u) / 2$ )

$P_m$  : 一次一般膜応力 (=  $P \times d_o / 4t$ )

\*1: 蒸発器胴板は拘束されていないので、熱膨張応力  $P_e$  は考慮しない。

## 2.3 発生曲げ応力

周方向溶接部での発生曲げ応力  $\sigma$  の算出式を以下に示す。

$$\sigma = M / Z_{\text{断面}}$$

$$= \square \text{ (MPa)}$$

<記号説明>

$M$  : 上部周方向溶接部での発生モーメント (=  $p \times m_1 (L_1 - X_1)^2 / 2$ )

$Z_{\text{断面}}$  : 上部周方向溶接部の断面係数 (=  $\pi (d_o^4 - d_i^4) / (32 \times d_o)$ )

$p$  : 上部等分布加重 (=  $(m_1 \times g \times C_H) / L_1$ )

## 3. 評価結果

評価結果を表 11-1-2 に示す。胴板上部の周方向溶接部の評価の結果、発生曲げ応力は許容曲げ応力を超えることはないことから、耐震安全性評価上問題ない。

なお、胴板上部の周方向溶接部の評価の結果、応力比は 0.14 であり、亀裂想定箇所による評価の応力比 0.27 と比較しても小さいことから、亀裂想定箇所による評価は安全側となる。

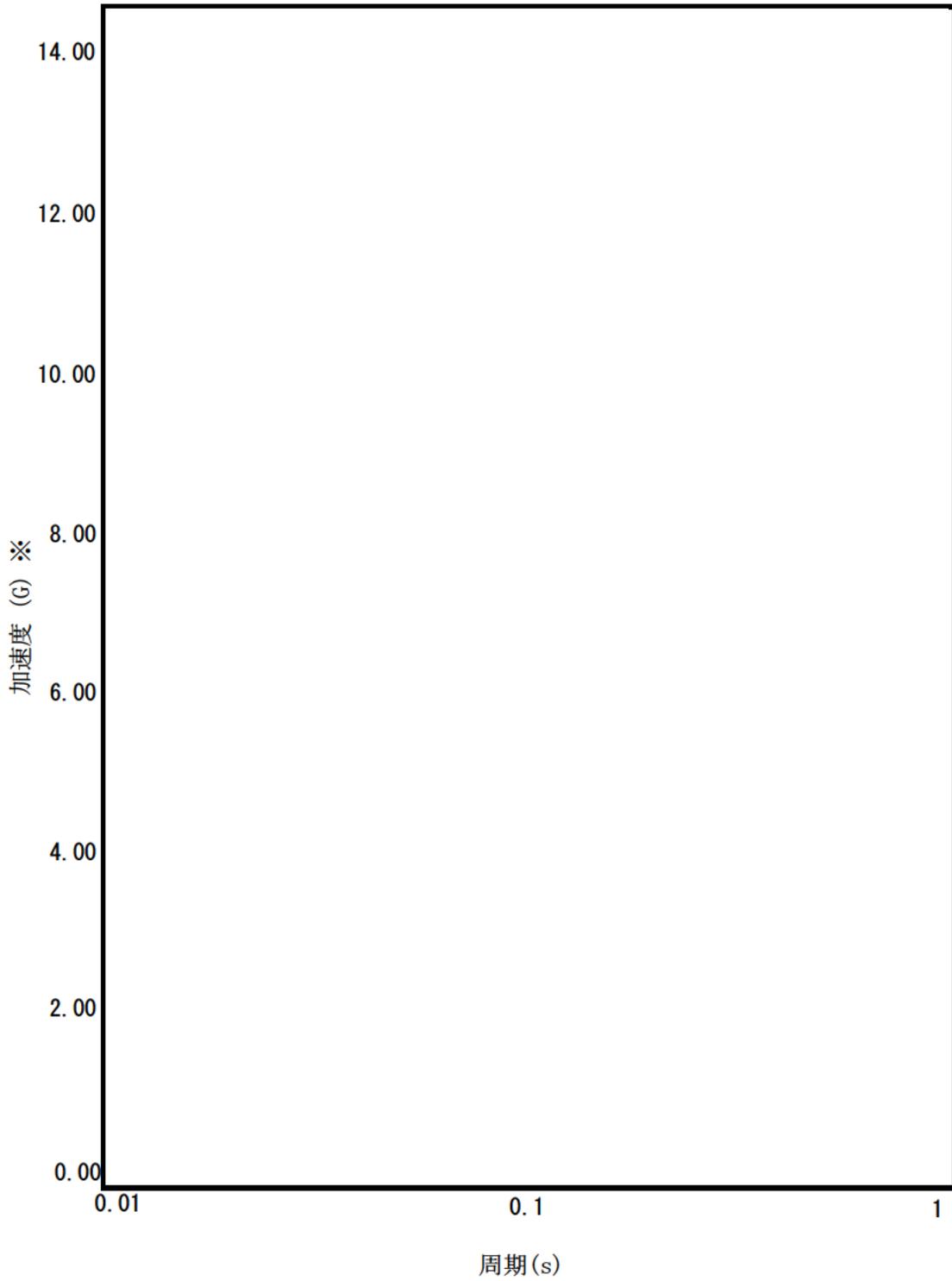
表 11-1-2 評価結果の比較

周方向溶接部の評価結果 応力比	亀裂想定箇所の評価結果 応力比
0.14	0.27

以 上

低水質廃液蒸発装置蒸発器胴板 (原子炉補助建屋 EL. 24.8m)

S<sub>1</sub>地震動 水平方向床応答曲線図 (減衰1%)

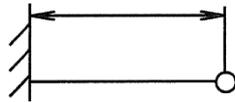


タイトル	ディーゼル機関空気冷却器伝熱管他の内面腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全性評価について																																								
説明	<p>ディーゼル機関空気冷却器伝熱管の内面腐食（流れ加速型腐食）に対する評価の具体的内容を以下に示す。</p> <p>また、ディーゼル機関空気冷却器伝熱管以外の設備（原子炉補機冷却水冷却器伝熱管，空調用冷凍機凝縮器伝熱管）の評価内容を添付－3，4にそれぞれ示す。</p> <p>1. 評価仕様</p> <p>評価仕様を表 14-1 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 14-1 評価仕様</p> <table border="1" data-bbox="491 857 1264 1406"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>単位</th> <th>記号</th> <th>数値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>最高使用圧力</td> <td>MPa</td> <td><math>P_m</math></td> <td>0.69</td> </tr> <tr> <td>最高使用温度</td> <td>℃</td> <td>—</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>伝熱管外径</td> <td>mm</td> <td><math>D_o</math></td> <td>12.43</td> </tr> <tr> <td>伝熱管厚さ</td> <td>mm</td> <td>—</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>伝熱管減肉後厚さ<sup>※1</sup></td> <td>mm</td> <td><math>t'</math></td> <td rowspan="3" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>伝熱管評価質量</td> <td>kg/m</td> <td><math>m_e</math></td> </tr> <tr> <td>断面二次モーメント</td> <td><math>m^4</math></td> <td><math>I</math></td> </tr> <tr> <td>伝熱管材質</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>C7060TS (キューブ ロニッケル)</td> </tr> <tr> <td>伝熱管支持間距離<sup>※2</sup> (管 板－支持板)</td> <td>mm</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">L</td> <td rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>伝熱管支持間距離<sup>※2</sup> (支持板－支持板)</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1：伝熱管内面に、施栓基準である <input type="text" value=""/> mm <input type="text" value=""/> %減肉) まで一様減肉が生じたと仮定する。</p> <p>※2：支持間距離は各々最大支持間隔を用いる。</p>	項目	単位	記号	数値	最高使用圧力	MPa	$P_m$	0.69	最高使用温度	℃	—	190	伝熱管外径	mm	$D_o$	12.43	伝熱管厚さ	mm	—	0.8	伝熱管減肉後厚さ <sup>※1</sup>	mm	$t'$		伝熱管評価質量	kg/m	$m_e$	断面二次モーメント	$m^4$	$I$	伝熱管材質	—	—	C7060TS (キューブ ロニッケル)	伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (管 板－支持板)	mm	L		伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (支持板－支持板)	mm
項目	単位	記号	数値																																						
最高使用圧力	MPa	$P_m$	0.69																																						
最高使用温度	℃	—	190																																						
伝熱管外径	mm	$D_o$	12.43																																						
伝熱管厚さ	mm	—	0.8																																						
伝熱管減肉後厚さ <sup>※1</sup>	mm	$t'$																																							
伝熱管評価質量	kg/m	$m_e$																																							
断面二次モーメント	$m^4$	$I$																																							
伝熱管材質	—	—	C7060TS (キューブ ロニッケル)																																						
伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (管 板－支持板)	mm	L																																							
伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (支持板－支持板)	mm																																								

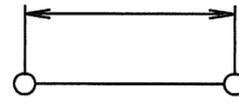
## 2. 解析モデル

解析モデルは、減肉後の伝熱管を、支持条件に対し以下の通りモデル化している。

- ・ 管板－支持板間：片端固定－片端支持はりモデル
- ・ 支持板－支持板間：両端支持はりモデル



管板－支持板間  
(固定－支持条件)



支持板－支持板間  
(支持－支持条件)

## 3. 入力（荷重）条件

地震荷重は、ディーゼル機関空気冷却器の耐震重要度に応じたSクラス地震荷重を適用する。

入力（荷重）条件を以下に示す。

### (1) 固有振動数の算出

$$f = \lambda \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L^4}}$$

f：伝熱管の固有振動数 (Hz)

λ：管の支持方法による係数

(管板－支持板：2.454, 支持板－支持板：1.571)

E：管の縦弾性係数 (N/m<sup>2</sup>) (=1.17×10<sup>5</sup> (MPa) =1.17×10<sup>11</sup> (N/m<sup>2</sup>))

I：断面二次モーメント (m<sup>4</sup>)

m<sub>e</sub>：伝熱管評価質量 (kg/m)

L：支持間隔 (m)

### (2) モーメントの算出

① 管板－支持板（固定－支持条件）の場合

$$M = \frac{3WL}{16}$$

②支持板—支持板（支持—支持条件）の場合

$$M = \frac{WL}{4}$$

W：はりの中心に作用する集中荷重(N)

$M_a$ （自重による最大曲げモーメント）算出時

$$W = m_e \cdot L \cdot g$$

$M_b$ （地震荷重による最大曲げモーメント）算出時

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C$$

ここで、

C＝合成地震力（G）とし、以下の式により算出する。

$$C = \sqrt{C_H^2 + C_V^2}$$

$C_H$ ：水平地震力

$C_V$ ：鉛直地震力

g：重力加速度（= 9.80665m/s<sup>2</sup>）

(3)発生応力の算出

地震時の伝熱管に発生する応力は、以下の計算式により求める。

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

S：発生応力(MPa)

$P_m$ ：伝熱管内の最高使用圧力(MPa)

$D_o$ ：伝熱管の外径(mm)

$t'$ ：伝熱管減肉後厚さ(mm)

$i_1$ ：応力係数（=1.33）

$M_a$ ：自重による最大曲げモーメント(N・mm)

$M_b$ ：地震荷重による最大曲げモーメント(N・mm)

Z：伝熱管の断面係数(mm<sup>3</sup>)

#### 4. 算出過程

##### ①管板—支持板の場合

$$f = \lambda \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L^4}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (Hz)}$$

固有周期 T は,

$$T = \frac{1}{f} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (s)}$$

水平方向地震力  $C_H$

$$K_h (S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.58 = 0.696 \text{ (G)}$$

$$3.6C_I = 0.962 \text{ (G)}$$

以上より  $C_H = 3.6C_I = 0.962 \text{ (G)}$

鉛直方向地震力  $C_V$

$$K_V (S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.42 = 0.504 \text{ (G)}$$

以上より  $C_V = K_V (S_s) = 0.504 \text{ (G)}$

よって,

$$C = \sqrt{C_H^2 + C_V^2} = 1.087 \text{ (G)}$$

自重による最大曲げモーメント  $M_a$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N)}$$

$$M_a = \frac{3WL}{16} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

地震荷重による最大曲げモーメント  $M_b$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N)}$$

$$M_b = \frac{3WL}{16} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_a = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_b = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

伝熱管に発生する応力は、以下により算出される。

断面係数

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{12.43^4 - \boxed{\phantom{0000}}}{12.43} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$\text{伝熱管外径 } D_o = 12.43 \text{ (mm)}$$

$$\text{伝熱管減肉後厚さ } t' = \boxed{\phantom{00}} \text{ (mm)}$$

$$\text{伝熱管内径 } D_i = D_o - 2t' = \boxed{\phantom{00}} \text{ (mm)}$$

以上より、発生応力 S は、

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$
$$= \boxed{\phantom{00}} \text{ (MPa)}$$

②支持板—支持板の場合

$$f = \lambda \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L^4}} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (Hz)}$$

固有周期 T は、

$$T = \frac{1}{f} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (s)}$$

水平方向地震力  $C_H$

$$K_h(S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.58 = 0.696 \text{ (G)}$$

$$3.6C_I = 0.962 \text{ (G)}$$

以上より  $C_H = 3.6C_I = 0.962 \text{ (G)}$

鉛直方向地震力  $C_V$

$$K_v(S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.42 = 0.504 \text{ (G)}$$

以上より  $C_V = K_v(S_s) = 0.504 \text{ (G)}$

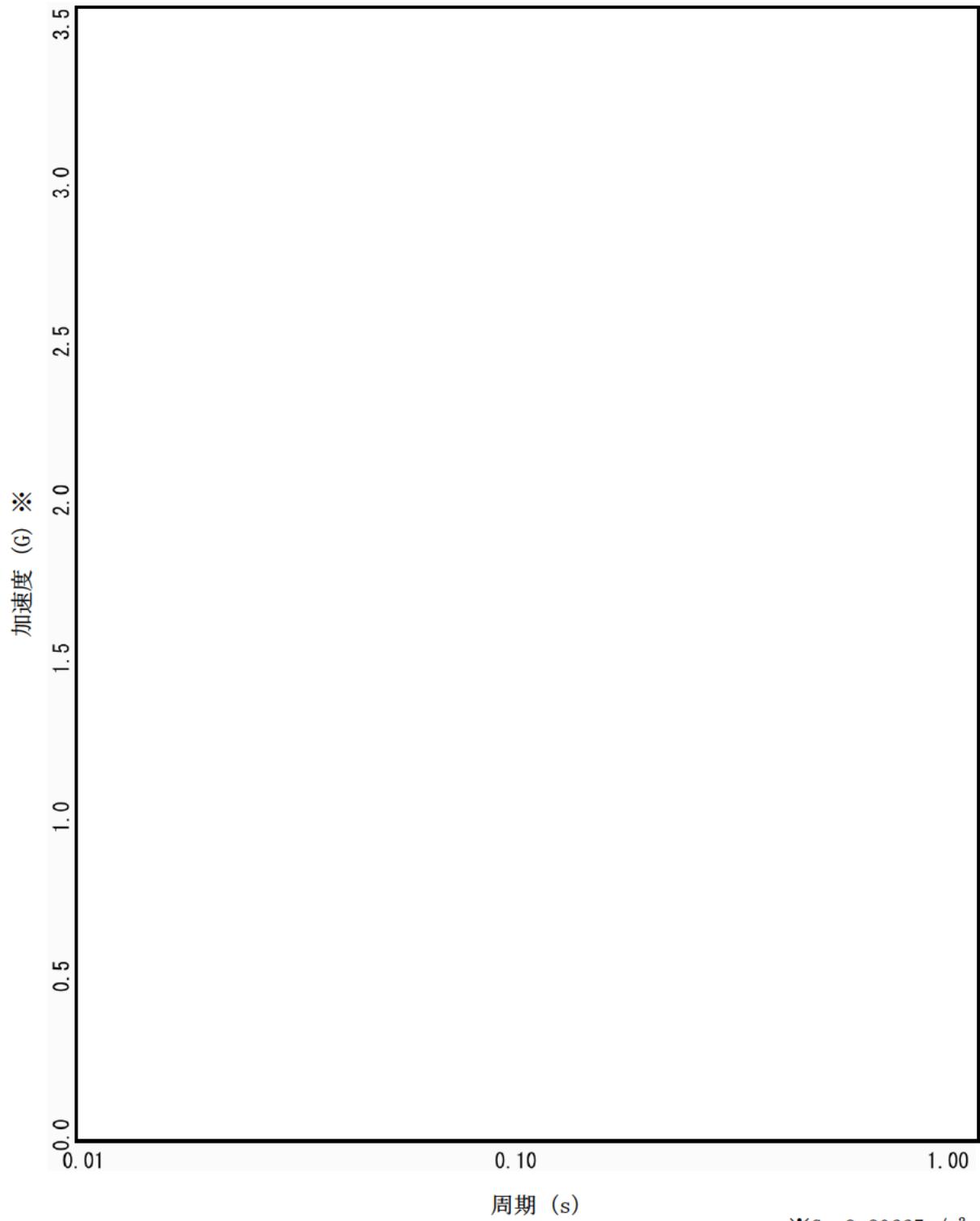
よって、

$$C = \sqrt{C_H^2 + C_V^2} = 1.087 \text{ (G)}$$



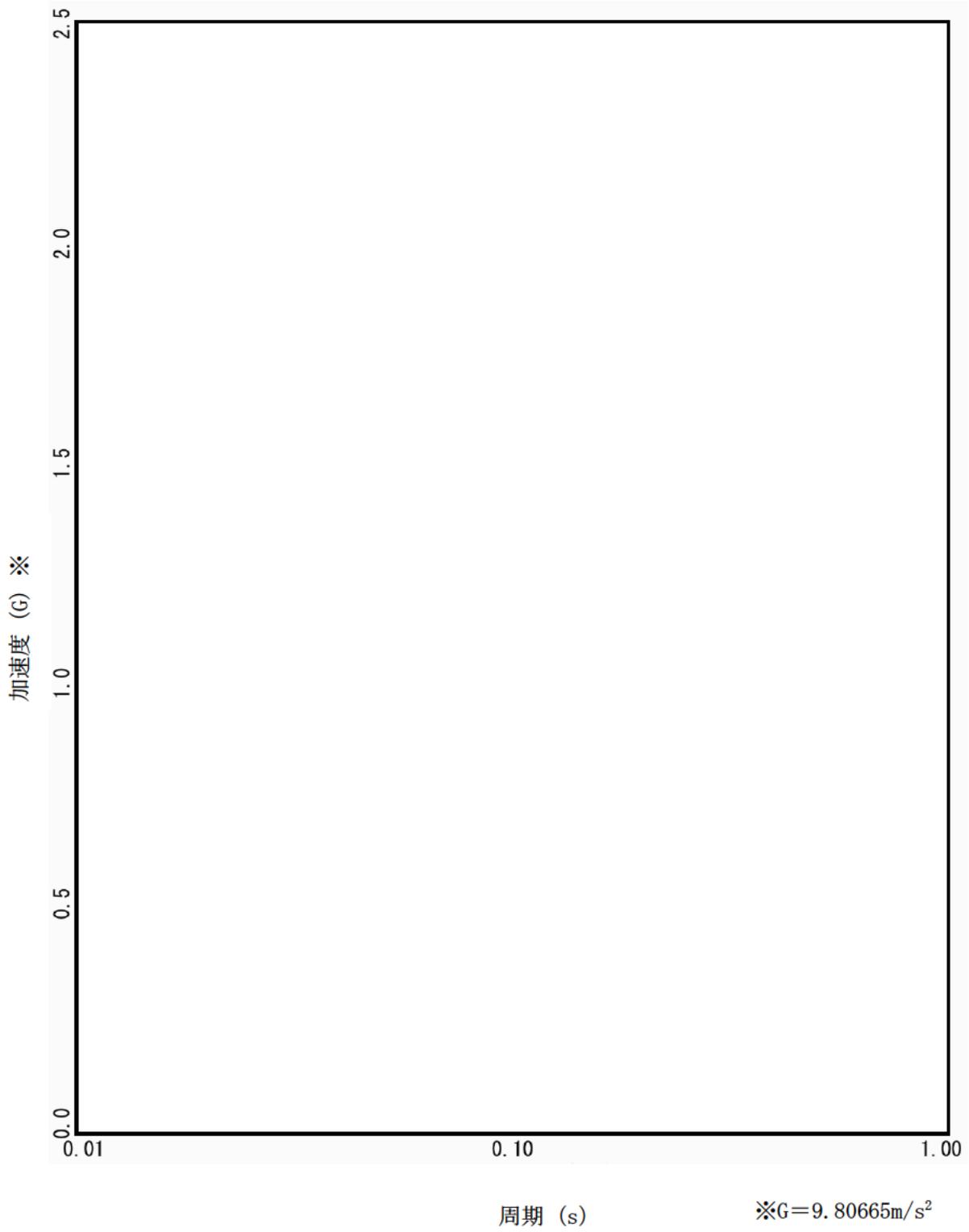
ディーゼル機関空気冷却器 (原子炉建屋 EL. 10.3m)

S s 地震動 水平方向床応答曲線図 (減衰 1%)



ディーゼル機関空気冷却器 (原子炉建屋 EL.10.3m)

S s 地震動 鉛直方向床応答曲線図 (減衰1%)



原子炉補機冷却水冷却器伝熱管の内面腐食（流れ加速型腐食）  
に対する耐震安全性評価について

原子炉補機冷却水冷却器伝熱管の内面腐食（流れ加速型腐食）に対する評価の具体的内容を以下に示す。

### 1. 評価仕様

評価仕様を表 14-3-1 に示す。

表 14-3-1 評価仕様

項目	単位	記号	数値
最高使用圧力	MPa	$P_m$	0.7
最高使用温度	℃	—	95
伝熱管外径	mm	$D_o$	
伝熱管厚さ	mm	—	
伝熱管減肉後厚さ <sup>※1</sup>	mm	$t'$	
伝熱管評価質量	kg/m	$m_e$	
断面二次モーメント	$m^4$	$I$	
伝熱管材質	—	—	C6871T (アルミニウム黄銅)
伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (管板—邪魔板)	mm	L	
伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (邪魔板—邪魔板)	mm		

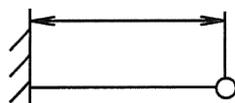
※1：伝熱管内面に、施栓基準である  mm  %減肉) まで一様減肉が生じたと仮定する。

※2：支持間距離は各々最大支持間隔を用いる。

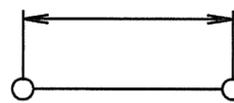
### 2. 解析モデル

解析モデルは、減肉後の伝熱管を、支持条件に対し以下の通りモデル化している。

- ・管板—邪魔板間：片端固定—片端支持はりモデル
- ・邪魔板—邪魔板間：両端支持はりモデル



管板—邪魔板間  
(固定—支持条件)



邪魔板—邪魔板間  
(支持—支持条件)

## 3. 入力（荷重）条件

地震荷重は、原子炉補機冷却水冷却器の耐震重要度に応じたSクラス地震荷重を適用する。

入力（荷重）条件を以下に示す。

## (1) 固有振動数の算出

$$f = \lambda \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L^4}}$$

f : 伝熱管の固有振動数 (Hz)

λ : 管の支持方法による係数

(管板-邪魔板 : 2.454, 邪魔板-邪魔板 : 1.571)

E : 管の縦弾性係数 (N/m<sup>2</sup>)

(=  MPa) =  (N/m<sup>2</sup>)

I : 断面二次モーメント (m<sup>4</sup>)

m<sub>e</sub> : 伝熱管評価質量 (kg/m)

L : 支持間隔 (m)

## (2) モーメントの算出

① 管板-邪魔板（固定-支持条件）の場合

$$M = \frac{3WL}{16}$$

② 邪魔板-邪魔板（支持-支持条件）の場合

$$M = \frac{WL}{4}$$

W : はりの中心に作用する集中荷重 (N)

M<sub>a</sub> (自重による最大曲げモーメント) 算出時

$$W = m_e \cdot L \cdot g$$

M<sub>b</sub> (地震荷重による最大曲げモーメント) 算出時

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C$$

ここで,

C=合成地震力 (G) とし, 以下の式により算出する。

$$C = \sqrt{C_H^2 + C_V^2}$$

$C_H$ : 水平地震力

$C_V$ : 鉛直地震力

$g$ : 重力加速度 (= 9.80665m/s<sup>2</sup>)

### (3) 発生応力の算出

地震時の伝熱管に発生する応力は, 以下の計算式により求める。

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

S: 発生応力 (MPa)

$P_m$ : 伝熱管内の最高使用圧力 (MPa)

$D_o$ : 伝熱管の外径 (mm)

$t'$ : 伝熱管減肉後厚さ (mm)

$i_1$ : 応力係数 (=1.33)

$M_a$ : 自重による最大曲げモーメント (N・mm)

$M_b$ : 地震荷重による最大曲げモーメント (N・mm)

Z: 伝熱管の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

## 4. 算出過程

### ① 管板-邪魔板の場合

$$f = \lambda \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L^4}} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (Hz)}$$

固有周期 T は,

$$T = \frac{1}{f} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (s)}$$

水平方向地震力  $C_H$

$$K_h(Ss) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.56 = 0.672 \text{ (G)}$$

$$3.6C_I = 0.576 \text{ (G)}$$

$$\text{以上より } C_H = K_h(Ss) = 0.672 \text{ (G)}$$

鉛直方向地震力  $C_V$

$$K_v(Ss) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.41 = 0.492 \text{ (G)}$$

$$\text{以上より } C_V = K_v(Ss) = 0.492 \text{ (G)}$$

よって,

$$C = \sqrt{C_H^2 + C_V^2} = 0.83285533 \text{ (G)}$$

自重による最大曲げモーメント  $M_a$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N)}$$

$$M_a = \frac{3WL}{16} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

地震荷重による最大曲げモーメント  $M_b$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N)}$$

$$M_b = \frac{3WL}{16} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_a = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_b = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

伝熱管に発生する応力は、以下により算出される。

断面係数

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{\boxed{\phantom{000000}} - \boxed{\phantom{000000}}}{\boxed{\phantom{000000}}} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$\text{伝熱管外径 } D_o = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (mm)}$$

$$\text{伝熱管減肉後厚さ } t' = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (mm)}$$

$$\text{伝熱管内径 } D_i = D_o - 2t' = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (mm)}$$

以上より、発生応力  $S$  は、

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

$$= \boxed{\phantom{000}} \text{ (MPa)}$$

② 邪魔板—邪魔板の場合

$$f = \lambda \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L^4}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (Hz)}$$

固有周期  $T$  は、

$$T = \frac{1}{f} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (s)}$$

水平方向地震力  $C_H$

$$K_h(S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.56 = 0.672 \text{ (G)}$$

$$3.6C_I = 0.576 \text{ (G)}$$

以上より  $C_H = K_h(S_s) = 0.672 \text{ (G)}$

鉛直方向地震力  $C_V$

$$K_v(S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.41 = 0.492 \text{ (G)}$$

以上より  $C_V = K_v(S_s) = 0.492 \text{ (G)}$

よって、

$$C = \sqrt{C_H^2 + C_V^2} = 0.83285533 \text{ (G)}$$

自重による最大曲げモーメント  $M_a$  は、

$$W = m_e \cdot L \cdot g = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N)}$$

$$M_a = \frac{WL}{4} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

地震荷重による最大曲げモーメント  $M_b$  は、

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N)}$$

$$M_b = \frac{WL}{4} = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_a = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_b = \boxed{\phantom{000000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

以上より、発生応力  $S$  は、

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

$$= \boxed{\phantom{000000}} \text{ (MPa)}$$

以上より、発生応力の大きい、邪魔板—邪魔板の場合の  $\boxed{\phantom{000000}}$  (MPa) を発生応力値とした。

## 5. 評価結果

評価結果を表 14-3-2 に示す。伝熱管に減肉を考慮しても、地震時の伝熱管の発生応力は許容応力を超えることはなく、耐震安全性評価上問題ない。

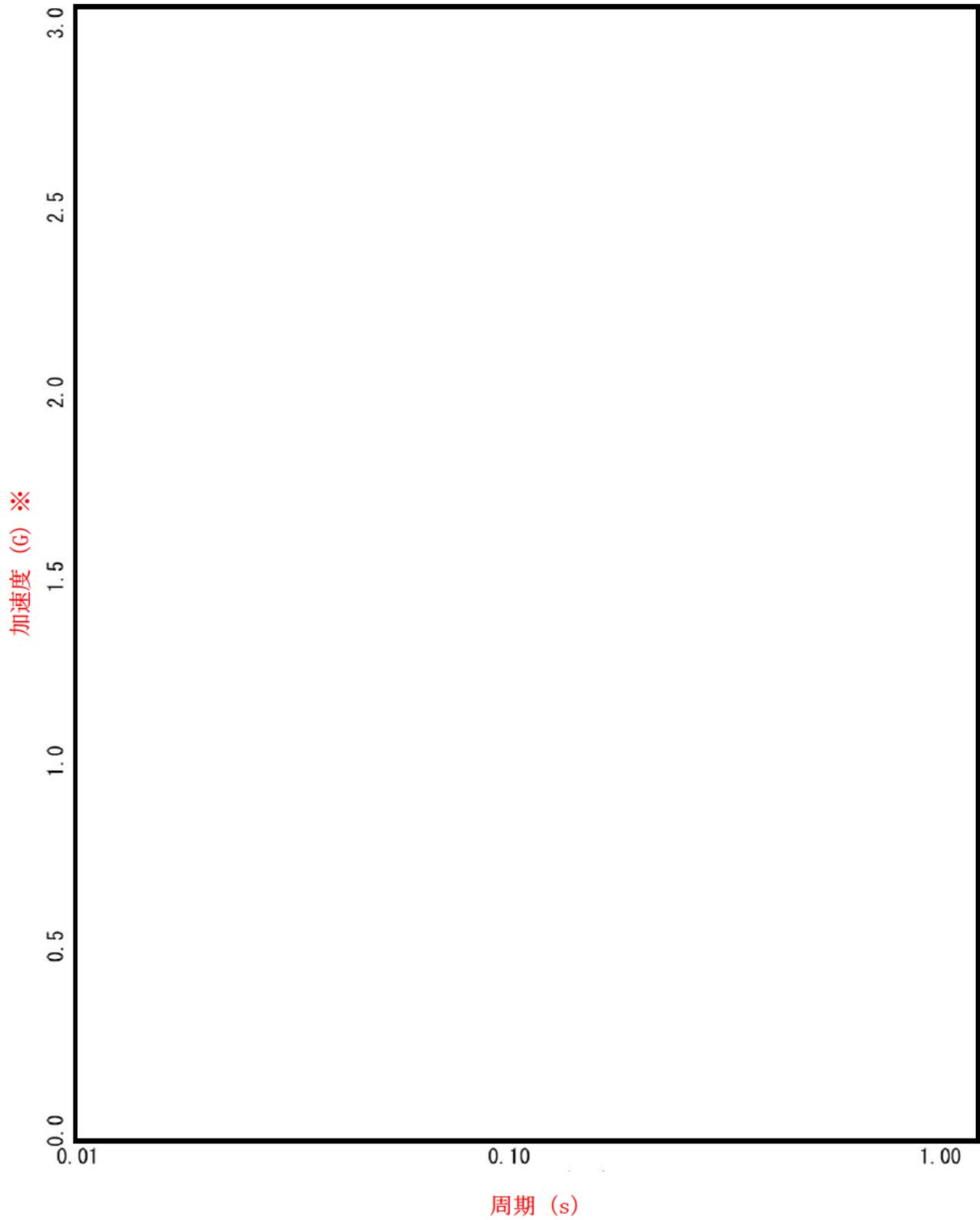
表 14-3-2 泊 1 号炉 原子炉補機冷却水冷却器伝熱管の  
内面腐食（流れ加速型腐食）に対する評価結果

評価部位	地震時の発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	応力比
原子炉補機冷却水 冷却器伝熱管			0.11

以 上

原子炉補機冷却水冷却器 (原子炉補助建屋 EL. 3.3m)

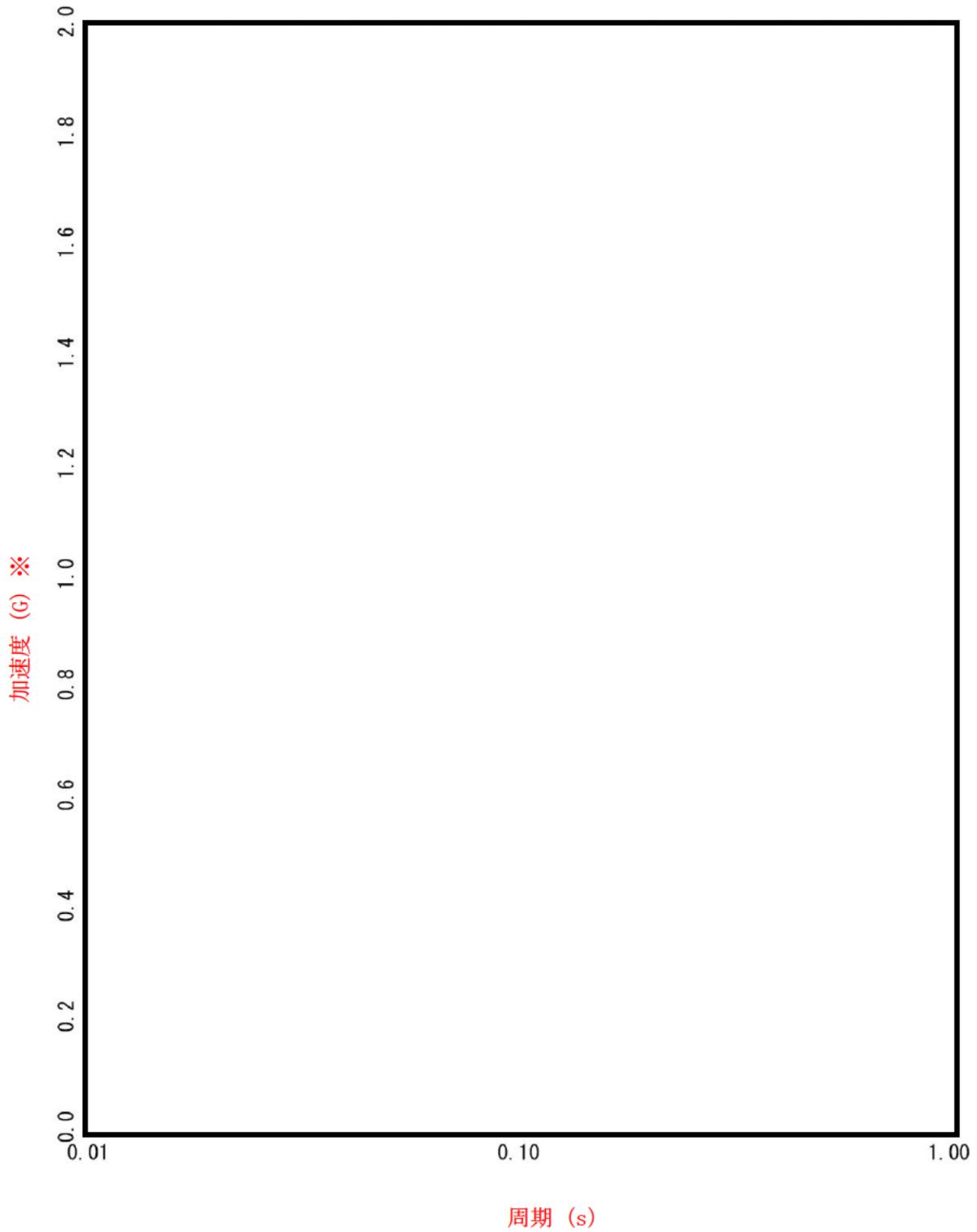
S s 地震動 水平方向床応答曲線図 (減衰 1%)



※G=9.80665m/s<sup>2</sup>

原子炉補機冷却水冷却器 (原子炉補助建屋 EL. 3.3m)

S s 地震動 鉛直方向床応答曲線図 (減衰 1%)



空調用冷凍機凝縮器伝熱管の内面腐食（流れ加速型腐食）  
に対する耐震安全性評価について

空調用冷凍機凝縮器伝熱管の内面腐食（流れ加速型腐食）に対する評価の具体的内容を以下に示す。

### 1. 評価仕様

評価仕様を表 14-4-1 に示す。

表 14-4-1 評価仕様

項目	単位	記号	数値
最高使用圧力	MPa	$P_m$	0.69
最高使用温度	℃	—	35.3
伝熱管外径	mm	$D_o$	15.88
伝熱管厚さ	mm	—	0.89
伝熱管減肉後厚さ <sup>※1</sup>	mm	$t'$	
伝熱管評価質量	kg/m	$m_e$	
伝熱管材質	—	—	C7060T
伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (管板—支持板)	mm	L	
伝熱管支持間距離 <sup>※2</sup> (支持板—支持板)	mm		

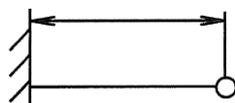
※1：伝熱管内面に、施栓基準である  mm  %減肉) まで一様減肉が生じたと仮定する。

※2：支持間距離は各々最大支持間隔を用いる。

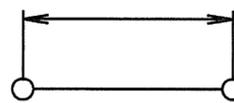
### 2. 解析モデル

解析モデルは、減肉後の伝熱管を、支持条件に対し以下の通りモデル化している。

- ・管板—支持板間：片端固定—片端支持はりモデル
- ・支持板—支持板間：両端支持はりモデル



管板—支持板間  
(固定—支持条件)



支持板—支持板間  
(支持—支持条件)

### 3. 入力（荷重）条件

地震荷重は、空調用冷凍機凝縮器の耐震重要度に応じたCクラス地震荷重を適用する。

入力（荷重）条件を以下に示す。

#### (1) モーメントの算出

①管板—支持板（固定—支持条件）の場合

$$M = \frac{3WL}{16}$$

②支持板—支持板（支持—支持条件）の場合

$$M = \frac{WL}{4}$$

W：はりの中心に作用する集中荷重(N)

$M_a$ （自重による最大曲げモーメント）算出時

$$W = m_e \cdot L \cdot g$$

$M_b$ （地震荷重による最大曲げモーメント）算出時

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C_H$$

ここで、

$C_H$ ：水平地震力

$g$ ：重力加速度（=9.80665m/s<sup>2</sup>）

#### (2) 発生応力の算出

地震時の伝熱管に発生する応力は、以下の計算式により求める。

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

S：発生応力(MPa)

$P_m$ ：伝熱管内の最高使用圧力(MPa)

$D_o$ ：伝熱管の外径(mm)

$t'$ ：伝熱管減肉後厚さ(mm)

$i_1$ ：応力係数（=1.33）

$M_a$ ：自重による最大曲げモーメント(N・mm)

$M_b$ ：地震荷重による最大曲げモーメント(N・mm)

Z：伝熱管の断面係数(mm<sup>3</sup>)

## 4. 算出過程

## ①管板一支持板の場合

水平方向地震力  $C_H$ 

$$1.2C_I = 0.192 \text{ (G)}$$

以上より  $C_H = 1.2C_I = 0.192 \text{ (G)}$ 自重による最大曲げモーメント  $M_a$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N)}$$

$$M_a = \frac{3WL}{16} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

地震荷重による最大曲げモーメント  $M_b$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C_H = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N)}$$

$$M_b = \frac{3WL}{16} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_a = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_b = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

伝熱管に発生する応力は、以下により算出される。

断面係数

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{15.88^4 - \boxed{\phantom{0000}}}{15.88} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (mm}^3\text{)}$$

伝熱管外径  $D_o = 15.88 \text{ (mm)}$ 伝熱管減肉後厚さ  $t' = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (mm)}$ 伝熱管内径  $D_i = D_o - 2t' = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (mm)}$ 以上より、発生応力  $S$  は,

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

$$= \boxed{\phantom{0000}} \text{ (MPa)}$$

## ②支持板一支持板の場合

水平方向地震力  $C_H$ 

$$1.2C_I = 0.192 \text{ (G)}$$

以上より  $C_H = 1.2C_I = 0.192 \text{ (G)}$

自重による最大曲げモーメント  $M_a$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N)}$$

$$M_a = \frac{WL}{4} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

地震荷重による最大曲げモーメント  $M_b$  は,

$$W = m_e \cdot L \cdot g \cdot C_H = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N)}$$

$$M_b = \frac{WL}{4} = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_a = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

$$M_b = \boxed{\phantom{0000}} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

以上より, 発生応力  $S$  は,

$$S = \frac{P_m \cdot D_o}{4t'} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

$$= \boxed{\phantom{00}} \text{ (MPa)}$$

以上より, 発生応力の大きい, 管板-支持板の場合の  $\boxed{\phantom{00}}$  (MPa) を発生応力値とした。

## 5. 評価結果

評価結果を表 14-4-2 に示す。伝熱管に減肉を考慮しても, 地震時の伝熱管の発生応力は許容応力を超えることはなく, 耐震安全性評価上問題ない。

表 14-4-2 泊1号炉 空調用冷凍機凝縮器伝熱管の内面腐食（流れ加速型腐食）に対する評価結果

評価部位	地震時の発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	応力比
空調用冷凍機凝縮器伝熱管			0.46

以上

タイトル	制御用空気だめ他の腐食（全面腐食）に対する耐震安全性評価について																																																																																							
説明	<p>制御用空気だめの腐食（全面腐食）に対する評価の具体的内容を以下に示す。</p> <p>なお、基礎ボルトの大気接触部の腐食（塗装なし部）（全面腐食）を、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出しない根拠を添付-3に示す。</p> <p>1. 評価仕様</p> <p>評価仕様を表 15-1 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 15-1 評価仕様</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>単位</th> <th>記号</th> <th>数値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>容器の有効運転質量 （容器充満時の質量）</td> <td>kg</td> <td><math>m_0</math></td> <td>4,002</td> </tr> <tr> <td>容器の空質量</td> <td>kg</td> <td><math>m_e</math></td> <td>3,925</td> </tr> <tr> <td>減肉後の胴の内径*</td> <td>mm</td> <td><math>D_i</math></td> <td>2,001.6</td> </tr> <tr> <td>減肉後の胴の板厚*</td> <td>mm</td> <td><math>t</math></td> <td>15.2</td> </tr> <tr> <td>胴のスカート接合点から 重心までの距離</td> <td>mm</td> <td><math>l</math></td> <td>936</td> </tr> <tr> <td>スカートの長さ</td> <td>mm</td> <td><math>l_s</math></td> <td>702</td> </tr> <tr> <td>最高使用圧力</td> <td>MPa</td> <td><math>P_r</math></td> <td>0.83</td> </tr> <tr> <td>評価温度</td> <td>°C</td> <td>—</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>設計引張強さ</td> <td>MPa</td> <td><math>S_u</math></td> <td>406</td> </tr> <tr> <td>評価用加速度（水平）</td> <td><math>m/s^2</math></td> <td><math>a_H</math></td> <td>9.43</td> </tr> <tr> <td>評価用加速度（鉛直）</td> <td><math>m/s^2</math></td> <td><math>a_V</math></td> <td>4.94</td> </tr> <tr> <td>胴板及びスカートの材質</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>SB410</td> </tr> <tr> <td>重力加速度</td> <td><math>m/s^2</math></td> <td><math>g</math></td> <td>9.80665</td> </tr> <tr> <td>スカートの内径</td> <td>mm</td> <td><math>D_s</math></td> <td>2,000</td> </tr> <tr> <td>スカートの厚さ</td> <td>mm</td> <td><math>t_s</math></td> <td>16.0</td> </tr> <tr> <td>胴の縦弾性係数</td> <td>MPa</td> <td><math>E</math></td> <td><math>2.01 \times 10^5</math></td> </tr> <tr> <td>スカートの縦弾性係数</td> <td>MPa</td> <td><math>E_s</math></td> <td><math>2.01 \times 10^5</math></td> </tr> <tr> <td>胴のせん断弾性係数</td> <td>MPa</td> <td><math>G</math></td> <td><math>7.73 \times 10^4</math></td> </tr> <tr> <td>スカートのせん断弾性係数</td> <td>MPa</td> <td><math>G_s</math></td> <td><math>7.73 \times 10^4</math></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">スカートに設けられた開口 部の穴径</td> <td>mm</td> <td><math>D_1</math></td> <td>105.3</td> </tr> <tr> <td>mm</td> <td><math>D_2, D_3, D_4</math></td> <td>200.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 内面に運転開始後 60 年時点での腐食量 0.8mm の一様減肉を想定</p>	項目	単位	記号	数値	容器の有効運転質量 （容器充満時の質量）	kg	$m_0$	4,002	容器の空質量	kg	$m_e$	3,925	減肉後の胴の内径*	mm	$D_i$	2,001.6	減肉後の胴の板厚*	mm	$t$	15.2	胴のスカート接合点から 重心までの距離	mm	$l$	936	スカートの長さ	mm	$l_s$	702	最高使用圧力	MPa	$P_r$	0.83	評価温度	°C	—	50	設計引張強さ	MPa	$S_u$	406	評価用加速度（水平）	$m/s^2$	$a_H$	9.43	評価用加速度（鉛直）	$m/s^2$	$a_V$	4.94	胴板及びスカートの材質	—	—	SB410	重力加速度	$m/s^2$	$g$	9.80665	スカートの内径	mm	$D_s$	2,000	スカートの厚さ	mm	$t_s$	16.0	胴の縦弾性係数	MPa	$E$	$2.01 \times 10^5$	スカートの縦弾性係数	MPa	$E_s$	$2.01 \times 10^5$	胴のせん断弾性係数	MPa	$G$	$7.73 \times 10^4$	スカートのせん断弾性係数	MPa	$G_s$	$7.73 \times 10^4$	スカートに設けられた開口 部の穴径	mm	$D_1$	105.3	mm	$D_2, D_3, D_4$	200.0
項目	単位	記号	数値																																																																																					
容器の有効運転質量 （容器充満時の質量）	kg	$m_0$	4,002																																																																																					
容器の空質量	kg	$m_e$	3,925																																																																																					
減肉後の胴の内径*	mm	$D_i$	2,001.6																																																																																					
減肉後の胴の板厚*	mm	$t$	15.2																																																																																					
胴のスカート接合点から 重心までの距離	mm	$l$	936																																																																																					
スカートの長さ	mm	$l_s$	702																																																																																					
最高使用圧力	MPa	$P_r$	0.83																																																																																					
評価温度	°C	—	50																																																																																					
設計引張強さ	MPa	$S_u$	406																																																																																					
評価用加速度（水平）	$m/s^2$	$a_H$	9.43																																																																																					
評価用加速度（鉛直）	$m/s^2$	$a_V$	4.94																																																																																					
胴板及びスカートの材質	—	—	SB410																																																																																					
重力加速度	$m/s^2$	$g$	9.80665																																																																																					
スカートの内径	mm	$D_s$	2,000																																																																																					
スカートの厚さ	mm	$t_s$	16.0																																																																																					
胴の縦弾性係数	MPa	$E$	$2.01 \times 10^5$																																																																																					
スカートの縦弾性係数	MPa	$E_s$	$2.01 \times 10^5$																																																																																					
胴のせん断弾性係数	MPa	$G$	$7.73 \times 10^4$																																																																																					
スカートのせん断弾性係数	MPa	$G_s$	$7.73 \times 10^4$																																																																																					
スカートに設けられた開口 部の穴径	mm	$D_1$	105.3																																																																																					
	mm	$D_2, D_3, D_4$	200.0																																																																																					

## 2. 評価モデル

制御用空気だめの構造概略図は図 15-1 に示すとおりである。この構造概略図を基に、評価モデルを図 15-2 に示すとおりの下端固定 1 質点系のモデルとして評価している。

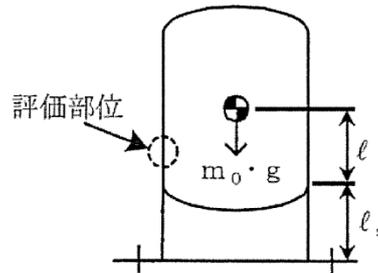


図 15-1 構造概要図

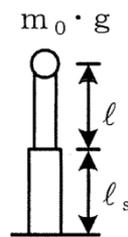


図 15-2 評価モデル

## 3. 固有周期

固有周期  $T$  は以下による。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{10^3 \cdot K}} = 0.009 \text{ (s)}$$

ここで、曲げ及びせん断変形によるばね定数  $K$

$$K = \frac{1}{\frac{l^3}{3E \cdot I} + \frac{1}{3E_s \cdot I_s} (3l^2 \cdot l_s + 3l \cdot l_s^2 + l_s^3) + \frac{l}{G \cdot A_e} + \frac{l_s}{G_s \cdot A_{se}}}$$

$$= 1.938 \times 10^6 \text{ (N/mm)}$$

また、スカートに設けたマンホール等の開口部による影響を考慮した場合の、胴とスカートの断面性能（断面二次モーメント及び有効せん断面積）は以下のとおり。

胴の断面二次モーメント I

$$I = \frac{\pi}{8} (D_i + t)^3 t = 4.897 \times 10^{10} (\text{mm}^4)$$

胴の有効せん断面積  $A_e$

$$A_e = \frac{2}{3} \pi (D_i + t) t = 6.420 \times 10^4 (\text{mm}^2)$$

スカート断面二次モーメント  $I_s$

$$I_s = \frac{\pi}{8} (D_s + t_s)^3 t_s - \frac{1}{4} (D_s + t_s)^2 t_s \cdot Y = 4.000 \times 10^{10} (\text{mm}^4)$$

スカートの有効せん断面積  $A_{se}$

$$A_{se} = \frac{2}{3} \{ \pi (D_s + t_s) - Y \} t_s = 6.002 \times 10^4 (\text{mm}^2)$$

なお、スカート開口部の水平断面における最大円周長さ Y

$$Y = \sum_{j=1}^4 \left\{ (D_s + t_s) \sin^{-1} \left( \frac{D_j}{D_s + t_s} \right) \right\} = 7.063 \times 10^2 (\text{mm})$$

#### 4. 胴の応力計算

胴の応力の算出過程を以下に示す。

##### 4.1 地震荷重

地震荷重は、制御用空気だめの耐震重要度に応じた S クラス地震荷重を適用する。

水平方向加速度  $a_H$  (添付-1 参照)

$$K_h(S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.58 = 0.696 (G) = 6.83 (\text{m/s}^2)$$

$$3.6C_I = 0.962 (G) = 9.43 (\text{m/s}^2)$$

以上より  $a_H = 3.6C_I = 9.43 (\text{m/s}^2)$

鉛直方向加速度  $a_V$  (添付-2 参照)

$$K_v(S_s) = 1.2ZPA = 1.2 \times 0.42 = 0.504 (G) = 4.94 (\text{m/s}^2)$$

$$1.2C_v = 0.288 (G) = 2.82 (\text{m/s}^2)$$

以上より  $a_V = K_v(S_s) = 4.94 (\text{m/s}^2)$

#### 4.2 内圧による応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{P_r(D_i+1.2t)}{2t} = 55.147 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{x1} = \frac{P_r(D_i+1.2t)}{4t} = 27.573 \text{ (MPa)}$$

#### 4.3 運転時質量及び鉛直方向地震による応力

胴がスカートと接合する点を境とし、下部には下部の胴自身の質量と内容物の質量による引張応力が生じる。

$$\sigma_{x2} = \frac{(m_0 - m_e) \cdot (g + a_V)}{\pi (D_i + t)t} = 0.012 \text{ (MPa)}$$

#### 4.4 水平方向地震による応力

水平方向の地震力により、胴はスカート接合部で最大となる曲げモーメントを受ける。この曲げモーメントによる軸方向応力と地震力によるせん断応力は次のように求める。

$$\sigma_{x3} = \frac{4m_0 \cdot a_H \cdot \ell}{\pi (D_i + t)^2 t} = 0.727 \text{ (MPa)}$$

$$\tau = \frac{2m_0 \cdot a_H}{\pi (D_i + t)t} = 0.784 \text{ (MPa)}$$

#### 4.5 組合せ応力

4.2～4.4によって求めた胴の応力を以下のように組み合わせる。

##### (1) 一次一般膜応力

周方向応力  $\sigma_{\phi}$

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi 1} = 55.147 \text{ (MPa)}$$

軸方向応力  $\sigma_x$

$$\sigma_x = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} = 28.312 \text{ (MPa)}$$

組合せ応力  $\sigma_1$

組合せ応力は、周方向応力  $\sigma_{\phi}$ 、軸方向応力  $\sigma_x$  及びせん断応力  $\tau$  を組み合わせて求める。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi} + \sigma_x + \sqrt{(\sigma_{\phi} - \sigma_x)^2 + 4\tau^2} \right\} \\ &= 56 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

(2)一次応力

一次応力は，一次一般膜応力と同じになるため省略する。

以上より，制御用空気だめの発生応力は56MPaと算出した。

5. 評価結果

評価結果を表15-2に示す。制御用空気だめの内面に減肉を考慮しても，地震時の発生応力は許容応力を超えることはなく，耐震安全性評価上問題ない。

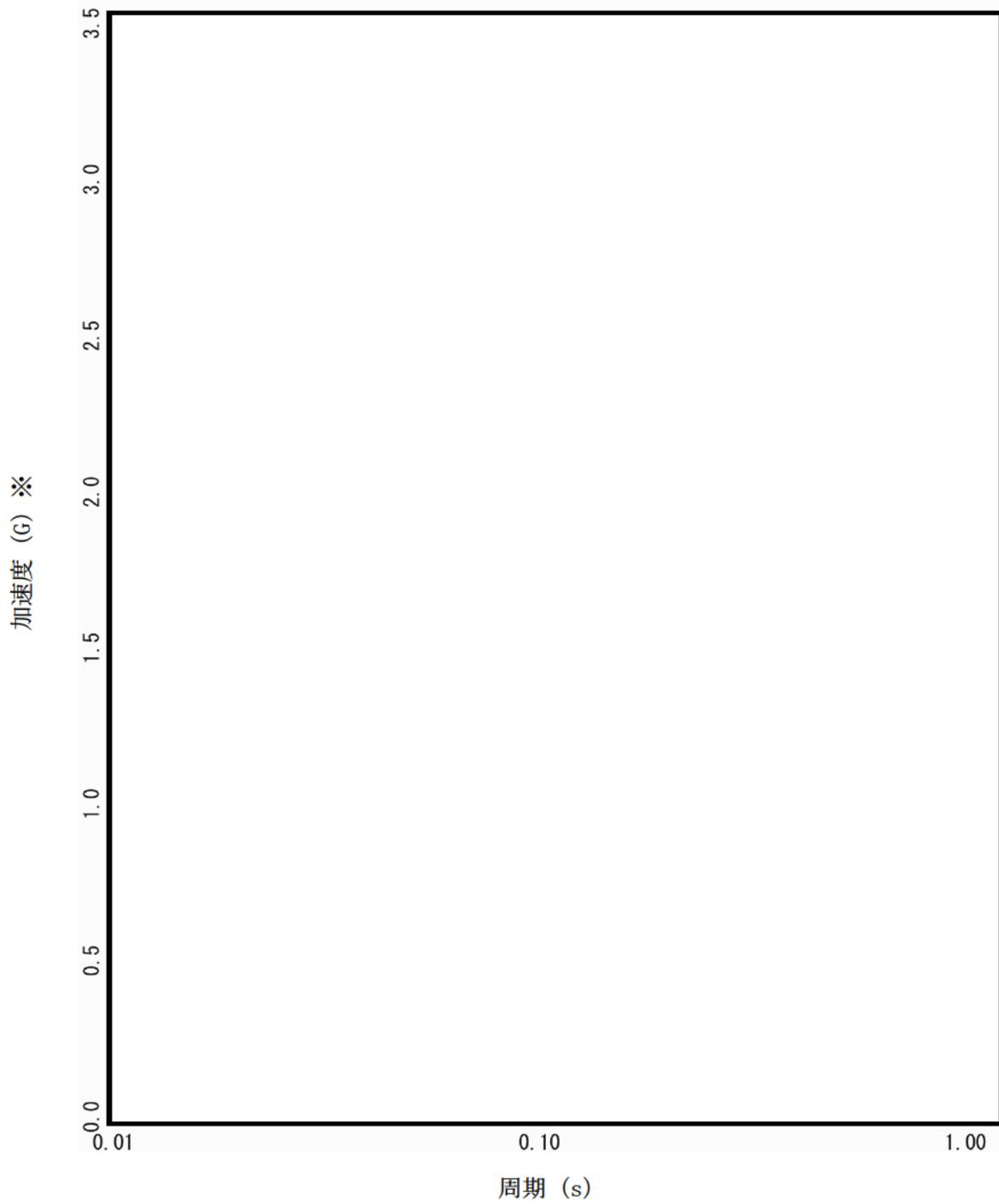
表15-2 制御用空気だめの腐食（全面腐食）に対する評価結果

評価部位	発生応力 (MPa)	許容応力※ (MPa)	応力比
制御用空気だめ	56	243	0.23

※ 設計・建設規格付録材料図表Part5表9より求まる値

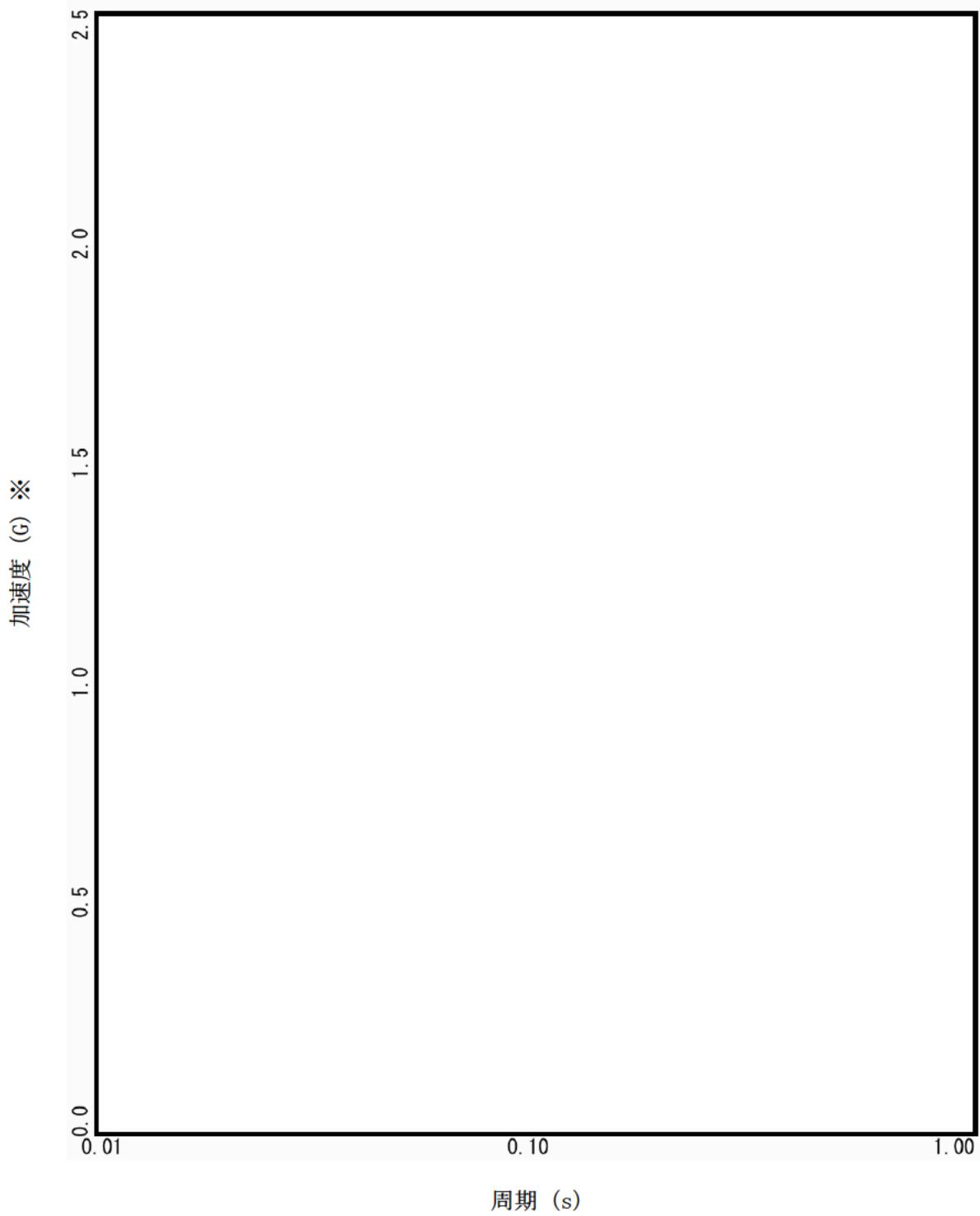
以 上

制御用空気だめ (原子炉建屋 EL. 10.3m)  
S<sub>s</sub>地震動 水平方向床応答曲線図 (減衰1%)



※ $G=9.80665\text{m/s}^2$

制御用空気だめ (原子炉建屋 EL.10.3m)  
S<sub>s</sub>地震動 鉛直方向床応答曲線図 (減衰1%)



※G=9.80665m/s<sup>2</sup>

基礎ボルトの大气接触部の腐食（塗装なし部）（全面腐食）を耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出しない根拠について

泊1号炉の高経年化技術評価対象となる基礎ボルトは屋内に設置されている。

また、基礎ボルトの点検を実施しており、代表箇所のナットを取外してコンクリート直上部の大气接触部を目視確認した結果、腐食は認められていない。

以下に、基礎ボルトの大气接触部の腐食（塗装なし部）（全面腐食）を耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象として抽出しないと判断した根拠を示す。

### 1. 「技術評価」における検討結果

基礎ボルトは、大气接触部として①塗装あり部と②塗装なし部があり、さらに③コンクリート埋設部を加えた3つの領域に分けられる。代表的な構造図を図15-3-1に示す。

②塗装なし部（全面腐食）については、代表箇所のナットを取外してコンクリート直上部の大气接触部を目視確認したところ腐食は認められず、今後も機能の維持は可能であることから高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象とした（△事象又は▲事象）。

そして、次の2)に該当する事象であるが保全によりその傾向が維持できていることを確認している事象（日常劣化管理事象）（△事象）と判断した。

- 1) 想定した劣化傾向と実際の劣化傾向の乖離が考えがたい経年劣化事象であって、想定した劣化傾向等に基づき適切な保全活動を行っているもの
- 2) 現在までの運転経験や使用条件から得られた材料試験データとの比較等により、今後も経年劣化の進展が考えられない、または進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象

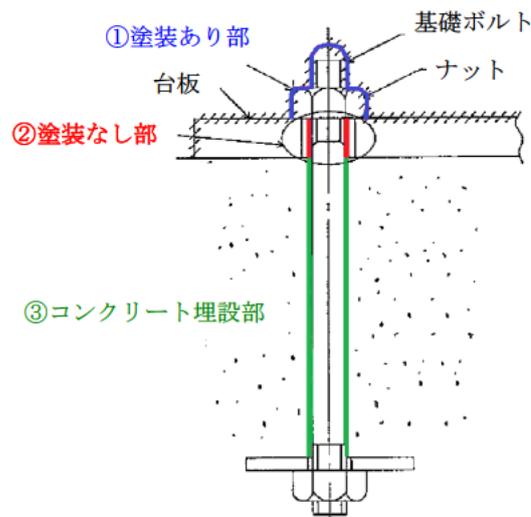


図15-3-1 基礎ボルトの代表的な構造図（スタッドボルト）

## 2. 耐震安全性評価における検討結果

耐震安全性評価においては、想定されるすべての経年劣化事象のうち、前項 2) に該当する事象については、現在発生しておらず、今後発生の可能性がない、又は小さい経年劣化事象であることから、耐震安全性に有意な影響を与えるものではないと判断し、評価の対象外としている。

よって、②塗装なし部（全面腐食）については、「技術評価」での検討結果に基づき、日常劣化管理事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、又は小さいものと判断し、耐震安全性評価不要とした。図 15-3-2 に、耐震安全性評価書 p. 4 表 1 において基礎ボルトの大気接触部の腐食（塗装なし部）（全面腐食）が該当する箇所を示す。

以 上

表1 耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象の抽出までの手順

「技術評価」で想定される経年劣化事象		ステップ1	ステップ2	ステップ3	備考	
高経年化対策上 着目すべき 経年劣化事象	下記 ▲を除く経年劣化事象	○	高経年化対策上着目すべき 経年劣化事象であるか、現 在発生しておらず、今後も 発生の可能性がないもの、 又は小さいもの  現在発生しているか、又は 将来にわたって起こること が否定できないもの  ○	×	振動応答特性上又は構造・強度上 「軽微若しくは無視」できない事象 ◎ 振動応答特性上又は構造・強度上 「軽微若しくは無視」できる事象 ■	耐震安全上考慮す る必要がある経年 劣化事象は個別機 器ごとに抽出
	▲	○	想定した劣化傾向と実際の劣化傾向の乖離が考 えがたい経年劣化事象であった、想定した劣化 傾向等に基づき適切な保全活動をを行っているも の(ただし、今後も経年劣化の進展が考えられ ない、又は進展傾向が極めて小さいと考えられ る事象であるが、保全によりその傾向が維持で きていることを確認している事象を含む。) (日常劣化管理事象)  現在発生しているか、又は 将来にわたって起こること が否定できないもの  ○	○	振動応答特性上又は構造・強度上 「軽微若しくは無視」できない事象 ◎ 振動応答特性上又は構造・強度上 「軽微若しくは無視」できる事象 ■	ステップ3に係る 検討については、 「表4」にて耐震 安全上考慮する必 要のある経年劣化 事象を抽出
高経年化対策上 着目すべき 経年劣化事象 ではない事象	▲	-	現在までの運転経験や使用条件から得られた材 料試験データとの比較等により、今後も経年劣 化の進展が考えられない、又は進展傾向が極め て小さいと考えられる経年劣化事象(ただし、 今後も経年劣化の進展が考えられない、又は進 展傾向が極めて小さいとその傾向が維持できていること を確認している事象を除く。) (日常劣化管理事象以外)  現在発生しているか、又は 将来にわたって起こること が否定できないもの  -	-	-	

▲: 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象(日常劣化管理事象)  
 ▲: 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象ではない事象(日常劣化管理事象以外)  
 ○: 評価対象として抽出  
 ○: 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象であり、日常劣化管理事象以外であるもの、あるいは発生しているものの、又は小さいものとして評価対象から除外  
 ×: 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象であるが、現在発生しておらず、今後も発生の可能性がないもの、又は小さいものとして評価対象から除外  
 ■: 振動応答特性上又は構造・強度上「軽微若しくは無視」できる事象として評価対象から除外  
 ◎: 耐震安全上考慮する必要がある経年劣化事象として抽出  
 \*1: 冷温停止状態が維持されることを前提とした場合には発生・進展が想定されないが、耐震安全性評価のために評価する事象を含む

図 15-3-2 耐震安全性評価書 p. 4 表1において基礎ボルトの  
大気接触部の腐食(塗装なし部)(全面腐食)が該当する箇所