

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-983 改0
提出年月日	平成30年8月3日

V-2-6-5-1 起動領域計装の耐震性についての計算書

目次

1. 概要	1
1.1 構造の説明	1
1.2 記号の説明	3
1.3 適用基準	4
1.4 形状・寸法・材料	4
1.5 解析範囲	4
1.6 計算条件	4
1.6.1 設計条件	4
1.6.2 運転条件	4
1.6.3 荷重の組合せと応力評価	4
1.6.4 材料	5
1.6.5 物性値	5
1.6.6 荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）	5
1.6.7 許容応力	5
1.6.8 溶接部の継手効率	5
1.6.9 応力の記号と方向	5
2. 耐震計算	12
2.1 計算方法	12
2.2 形状・寸法	12
2.3 設計震度	12
2.4 計算結果	13
2.4.1 固有値解析結果	13
2.4.2 動的応答加速度	13
2.4.3 静的加速度	13
2.5 地震荷重	13
3. 応力計算	20
3.1 応力解析の手順	20
3.1.1 荷重条件	20
3.1.2 応力計算と応力の分類	20
3.1.3 応力の評価	21
3.2 応力計算	21
3.2.1 外圧による応力	21
3.2.2 外荷重による応力	21
3.3 応力強さの評価	23
3.3.1 一次一般膜応力強さの評価	23
3.3.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	23

4. 結論	28
4.1 固有周期	28
4.2 応力評価のまとめ	28
5. 参照図書	28

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	6
図 2-1	計算モデル	14
図 2-2	振動モード（刺激関数モード）	16
図 2-3	動的応答加速度分布図	17
図 3-1	地震荷重による応力の計算モデル	24
表 1-1	ドライチューブの構造計画	2
表 1-2	外荷重	7
表 1-3	ドライチューブの各供用状態（許容応力状態）における外圧	8
表 1-4	荷重の組合せ	8
表 1-5	応力計算に使用する材料の物性値	8
表 1-6	荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）	9
表 1-7	許容応力	11
表 2-1	部材定数	15
表 2-2	節点質量	15
表 2-3	固有値解析結果	16
表 2-4	動的応答加速度	19
表 2-5	静的加速度	19
表 3-1	応力の分類	25
表 3-2	断面性状	26
表 3-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	27
表 3-4	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	27
表 4-1	計算結果の概要	29

1. 概要

本計算書は、起動領域計装ドライチューブ（以下「ドライチューブ」という。）（耐震設計上の重要度分類Sクラス）の耐震性についての計算書である。

なお、ドライチューブの設計用地震力を除く応力評価は、5章に示す平成4年6月3日付け発管業発第58号にて届出した起動領域計装設置工事 工事計画届出書 添付書類（以下、本書において「既工認」という。）による。

また、ドライチューブは、耐震Sクラスの設計基準対象施設であり、重大事故等対処設備に該当する。

1.1 構造の説明

ドライチューブの構造計画を表1-1に示す。

表 1-1 ドライチューブの構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
原子炉圧力容器内上部格子板で支持，炉心支持板で固定される。	起動領域計装ドライチューブは，外径 の長尺円筒構造物である。	

1.2 記号の説明

本計算書において、下記の記号を使用する。ただし、本文中に別途記載ある場合は、この限りではない。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
D _i	内径	mm
D _o	外径	mm
E	縦弾性係数	MPa
H	水平力	N
I	断面二次モーメント	mm ⁴
L	リングからプランジャ先端までの長さ	mm
<i>l</i>	リングからチャンネルボックスに接触する点までの距離	mm
<i>l'</i>	リングから応力評価点までの距離	mm
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
P _o	外圧	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d により定まる地震力又は静的地震力	—
S _m	設計応力強さ	MPa
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
V	鉛直力	N
t	厚さ	mm
δ _D	設計たわみ量	mm
η	溶接部の継手効率	—
σ _l	軸方向応力	MPa
σ _r	半径方向応力	MPa
σ _t	周方向応力	MPa
τ _{tℓ}	せん断応力	MPa

1.3 適用基準

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）（以下「設計・建設規格」という。）及び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 電気技術基準調査委員会 昭和59年）を適用する。

注：本計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格 ○○○-△△△△(◇)a. (a)」として示す。

1.4 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を、図1-1に示す。

1.5 解析範囲

応力計算は、図1-1に示す応力評価点について行う。

1.6 計算条件

1.6.1 設計条件

設計条件（最高使用圧力（外圧）、最高使用温度）は、既工認に示すとおりである。

1.6.2 運転条件

運転条件及び記号は、既工認に示すとおりである。

各運転条件における外荷重を、表1-2に示す。

各運転条件における、ドライチューブの外圧（原子炉圧力容器の内圧）の変化、周囲の流体の温度変化及びその繰返し回数は、既工認に示すとおりである。

なお、ドライチューブの外圧は、既工認より表1-3に示すとおりである。

1.6.3 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価項目の対応を表1-4に示す。

表1-4及び本計算書において使用する荷重の種類と記号は、下記のとおりである。

荷 重	記 号
(1) ドライチューブの外圧（原子炉圧力容器の内圧）	[L01]
(2) 死荷重（機器の自重により生じる荷重）	[L04]
(3) 機器の地震時の振動による地震荷重 S_d^* （一次荷重）	[L14]
(4) 機器の地震時の振動による地震荷重 S_s （一次荷重）	[L16]

1.6.4 材料

材料は、次に示すとおりである。

パイプ：SUS304TB 相当

1.6.5 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は、下記のとおりである。

- (1) 縦弾性係数Eは、設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表1に定められたものによる。
- (2) 応力計算に使用する物性値は、最高使用温度（302℃）に対する値を用いる。
- (3) 材料の物性値を、表1-5に示す。

1.6.6 荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）

荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）は、表1-6に示すとおりである。また、各供用状態（許容応力状態）で考慮する荷重は、1.6.2項に示すとおりである。

1.6.7 許容応力

- (1) 設計応力強さ S_m 、設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u は、それぞれ設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表1、表8及び表9に定められたものを使用する。
- (2) 一次応力の評価には、各運転状態における流体の最高温度（運転状態Ⅰ及びⅡ ）に対する許容応力を用いる。
- (3) ドライチューブの各運転状態の応力評価に用いる許容応力は、設計・建設規格 CSS-3110 により表1-7に示すとおりである。

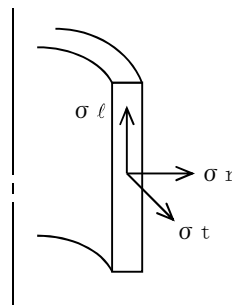
1.6.8 溶接部の継手効率

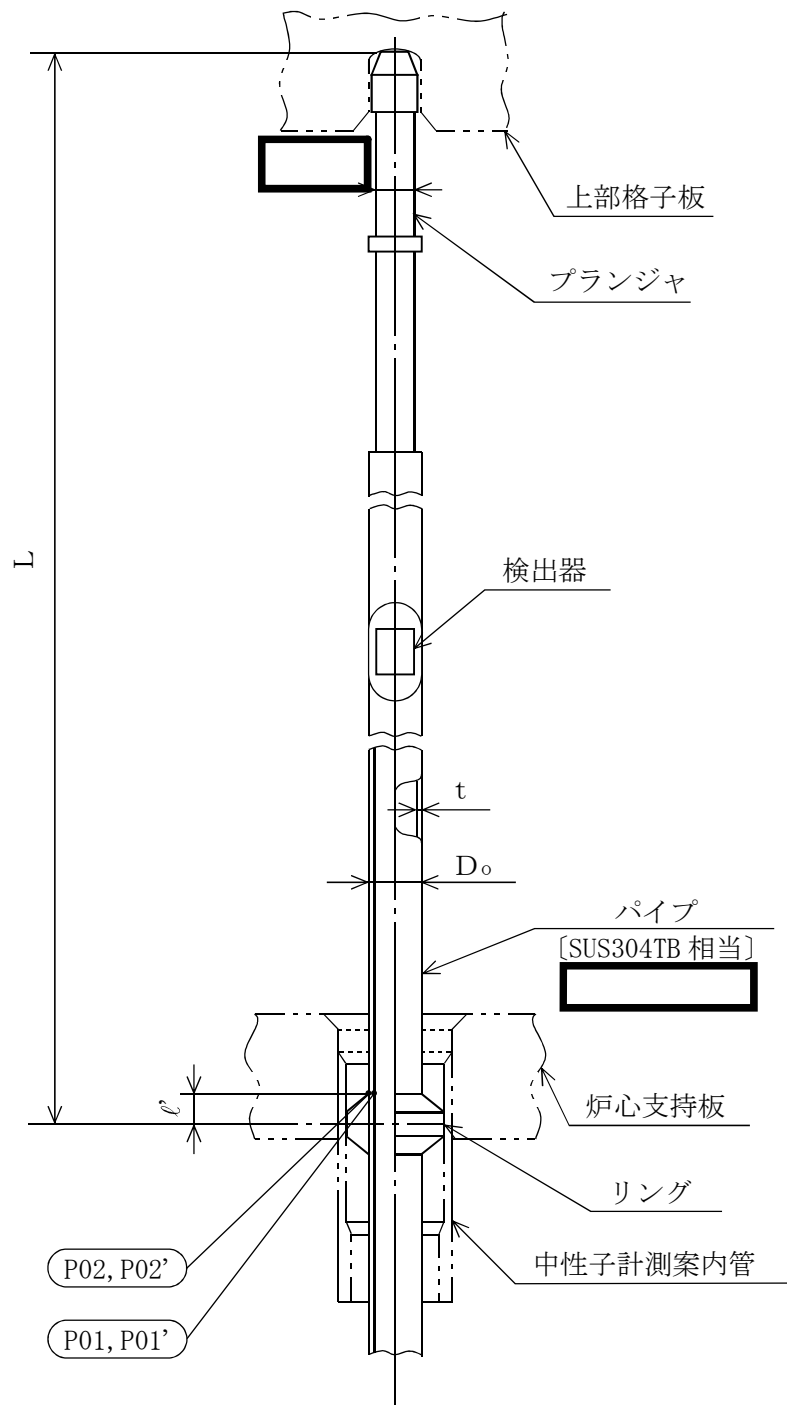
ドライチューブの応力評価点は、溶接部でないため $\eta = 1.00$ を用いる。

1.6.9 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は、下記のとおりとする。

- σ_t : 周方向応力
- σ_l : 軸方向応力
- σ_r : 半径方向応力
- τ_{tl} : せん断応力





 : 応力評価点
 [] : J I S 相当材
 () : 材 料

D_o =
 t =
 L =
 l' =

図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 1-2 外荷重

記号	荷重名称	鉛直力	水平力	地震時ドライチューブ 設計たわみ量
		V (N)	H (N)	δ_D (mm)
L04	死荷重			
L14	地震荷重 S_d^*			
L16	地震荷重 S_s			

注:

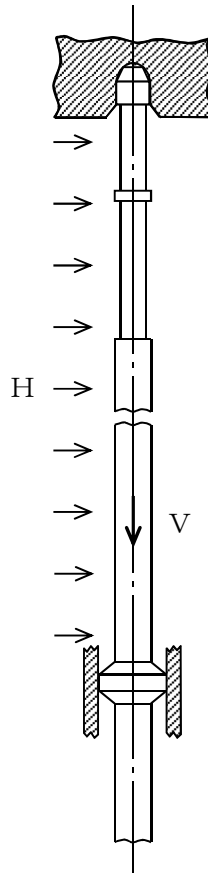


表 1-3 ドライチューブの各供用状態（許容応力状態）における外圧

(単位：MPa)

供用状態 (許容応力状態)	外圧
Ⅲ _A S	
Ⅳ _A S	

表 1-4 荷重の組合せ

供用状態 (許容応力状態)	荷重の組合せ	応力評価
Ⅲ _A S	L01+L04+L14	P_m $P_m + P_b$
Ⅳ _A S	L01+L04+L16	P_m $P_m + P_b$

表 1-5 応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (°C)	E $\times 10^5$ (MPa)
オーステナイト系ステンレス鋼	302	

表 1-6(1) 荷重の組合せ及び供用状態（許容応力状態）（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の 重要度分類	機器等の区分	供用状態 (許容応力状態)	荷重の組合せ
計測制御 系統設備	核計測 装置	起動領域計装 ドライチューブ*	S	—	Ⅲ _A S	$P + D + S_d^*$
					Ⅳ _A S	$P + D + S_s$

[記号の説明]

- P : 各供用状態（許容応力状態）における外圧
D : 死荷重
 S_d^* : 弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又は静的地震力
 S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力

6

注記 * : 炉心支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表 1-6(2) 荷重の組合せ及び供用状態（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	供用状態 (許容応力状態)	荷重の組合せ
計装制御 系統設備	核計測 装置	起動領域計装 ドライチューブ*2	常設耐震 ／防止	—	V _{AS} *3	P _{SAL} +D+S _d **4
						P _{SALL} +D+S _s *4

[記号の説明]

- P_{SAL} : 重大事故等時の状態で長期的に作用する圧力荷重
P_{SALL} : 重大事故等時の状態で超長期的に作用する圧力荷重
D : 死荷重
S_d* : 弾性設計用地震動 S_dにより定まる地震力又は静的地震力
S_s : 基準地震動 S_sにより定まる地震力

- 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: 炉心支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。
*3: V_{AS}として、IV_{AS}の許容限界を用いる。
*4:「P+D+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。

注：許容応力状態 V_{AS}における荷重の組合せで、重大事故後の状態における圧力荷重 P_{SAL}及び P_{SALL}は、設計基準対象施設で想定される圧力と比べて小さいため、許容応力状態 V_{AS}における荷重の組合せによる評価は、設計基準対象施設の評価に包絡される。

表 1-7(1) 許容応力

(単位：MPa)

応力分類	一次一般膜応力 (P_m)	
供用状態 (許容応力状態)	Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
温度 (°C)		
SUS304TB	172	260
許容応力の算出式	$1.5 \cdot S_m$	Min ($2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u$)

表 1-7(2) 許容応力

(単位：MPa)

応力分類	一次一般膜+一次曲げ応力 ($P_m + P_b$)	
供用状態 (許容応力状態)	Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
温度 (°C)		
SUS304TB	258	391
許容応力の算出式	$2.25 \cdot S_m$	Min ($3.6 \cdot S_m, S_u$)

2. 耐震計算

2.1 計算方法

(1) 材料及び形状に関するデータから、電子計算機により、固有周期を求める。さらに、固有値解析結果より、モード解析法に基づき動的応答加速度を求める。

固有周期の計算は、計算機コード「SAP-IV」を用いて行う。

(2) ドライチューブに対する地震荷重は、動的応答加速度及び静的加速度の両方について考慮する。

(3) 動的解析において、ドライチューブの質量は、炉心、原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物の全質量と比して小さいことから、これらとの連成系としては考えず、これらの構造物の地震応答解析*1により得られた炉心支持板及び上部格子板における応答スペクトル（減衰定数 1.0 %）*2を包絡してドライチューブに対する入力とする。

注記 *1：「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」参照。

*2：「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」参照。

2.2 形状・寸法

ドライチューブの動的解析計算モデルを、図 2-1 に示す。



また、各部材の長さ、断面二次モーメント、せん断断面積及び各節点の質量を、表 2-1 及び表 2-2 に示す。



2.3 設計震度

設計震度を下表に示す。

適用する地震動等		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
モード	固有周期 (s)	応答水平震度	鉛直震度	応答水平震度	鉛直震度
1次					
2次					
3次					
動的震度					
静的震度					

2.4 計算結果

2.4.1 固有値解析結果

固有値解析結果を、表 2-3 に示す。また、振動モードを図 2-2 に示す。

2.4.2 動的応答加速度

ドライチューブ節点位置における動的応答加速度を図 2-3 に示す。また、ドライチューブに作用する動的応答加速度の最大値を表 2-4 に示す。

2.4.3 静的加速度

ドライチューブに作用する静的加速度を、表 2-5 に示す。

2.5 地震荷重

ドライチューブに対する地震荷重を表 1-2 に示す。ここで、地震荷重 S_d^* については、表 2-4(1) 及び表 2-5 に示すように静的加速度より動的応答加速度の方が大きいので、動的応答加速度を用いて求めた結果を示す。

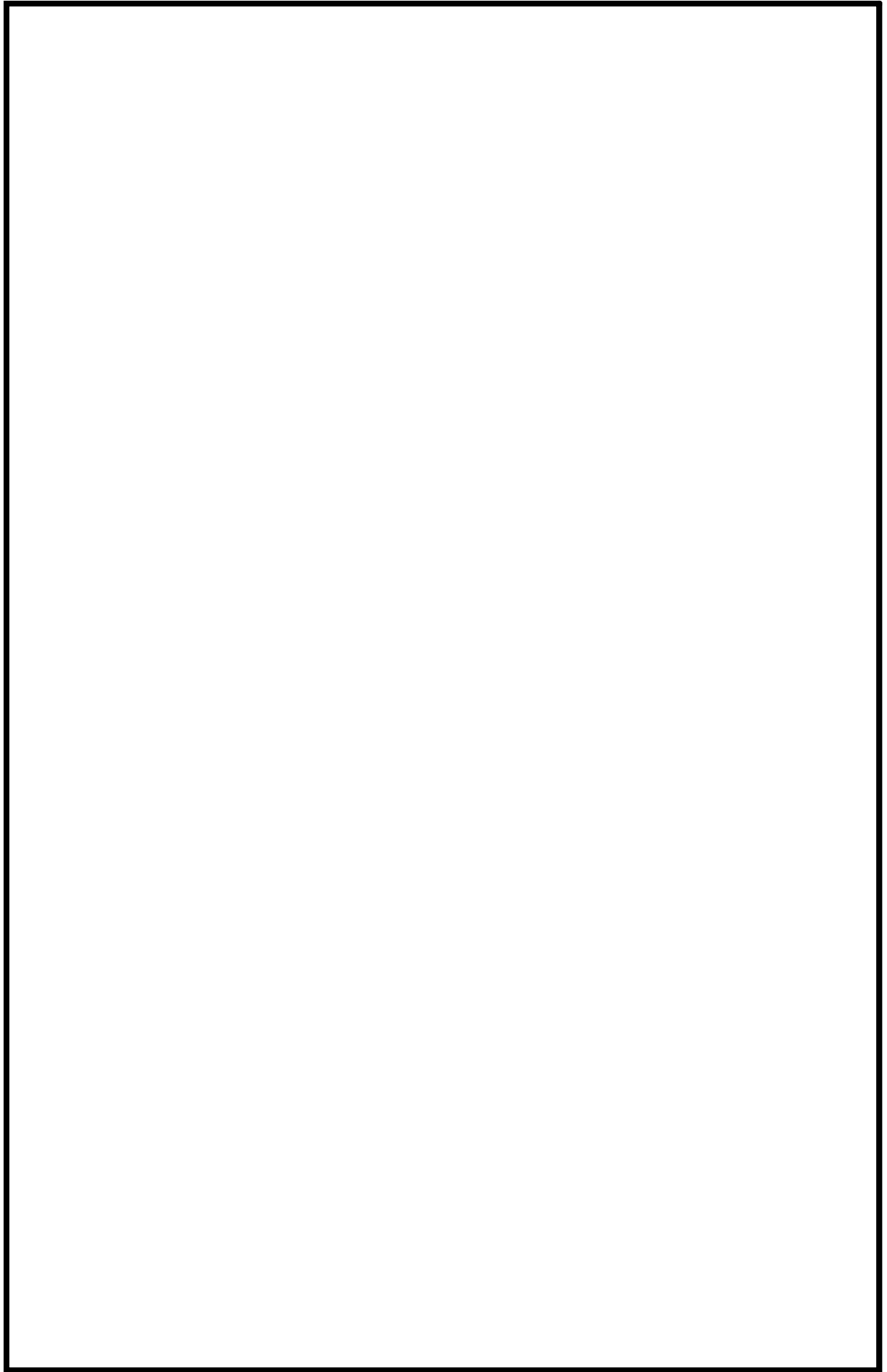


図 2-1 計算モデル

表 2-1 部材定数

部材番号	長さ (mm)	断面二次モーメント (mm ⁴)	せん断断面積 (mm ²)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

表 2-2 節点質量

節点番号	質量 (kg)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	

表 2-3 固有値解析結果

次数	固有周期 (s)	刺激係数
1次		
2次		



図 2-2 振動モード (刺激関数モード)

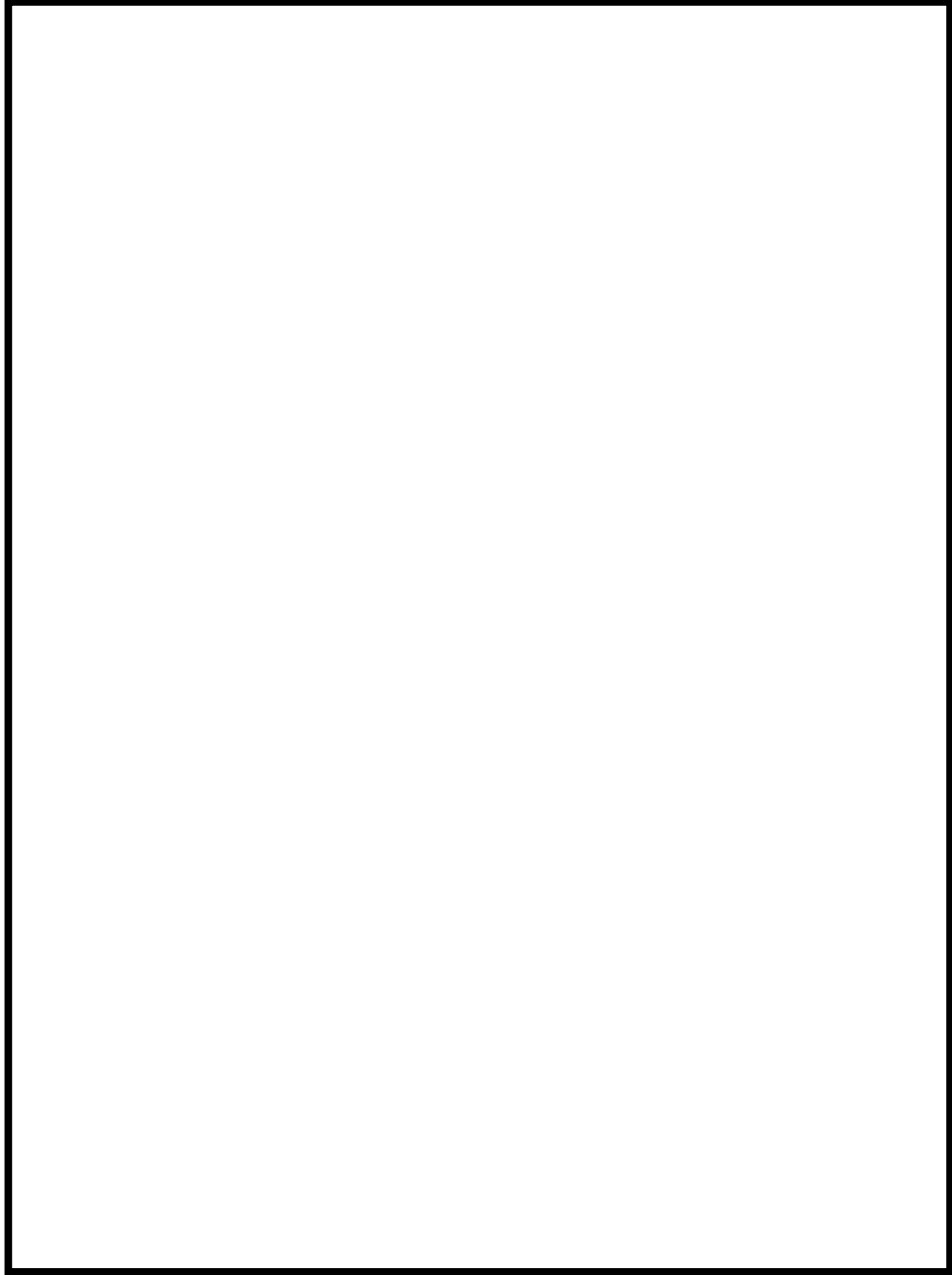


図 2-3(1) 動的応答加速度分布図
(弾性設計用地震動 S_d)

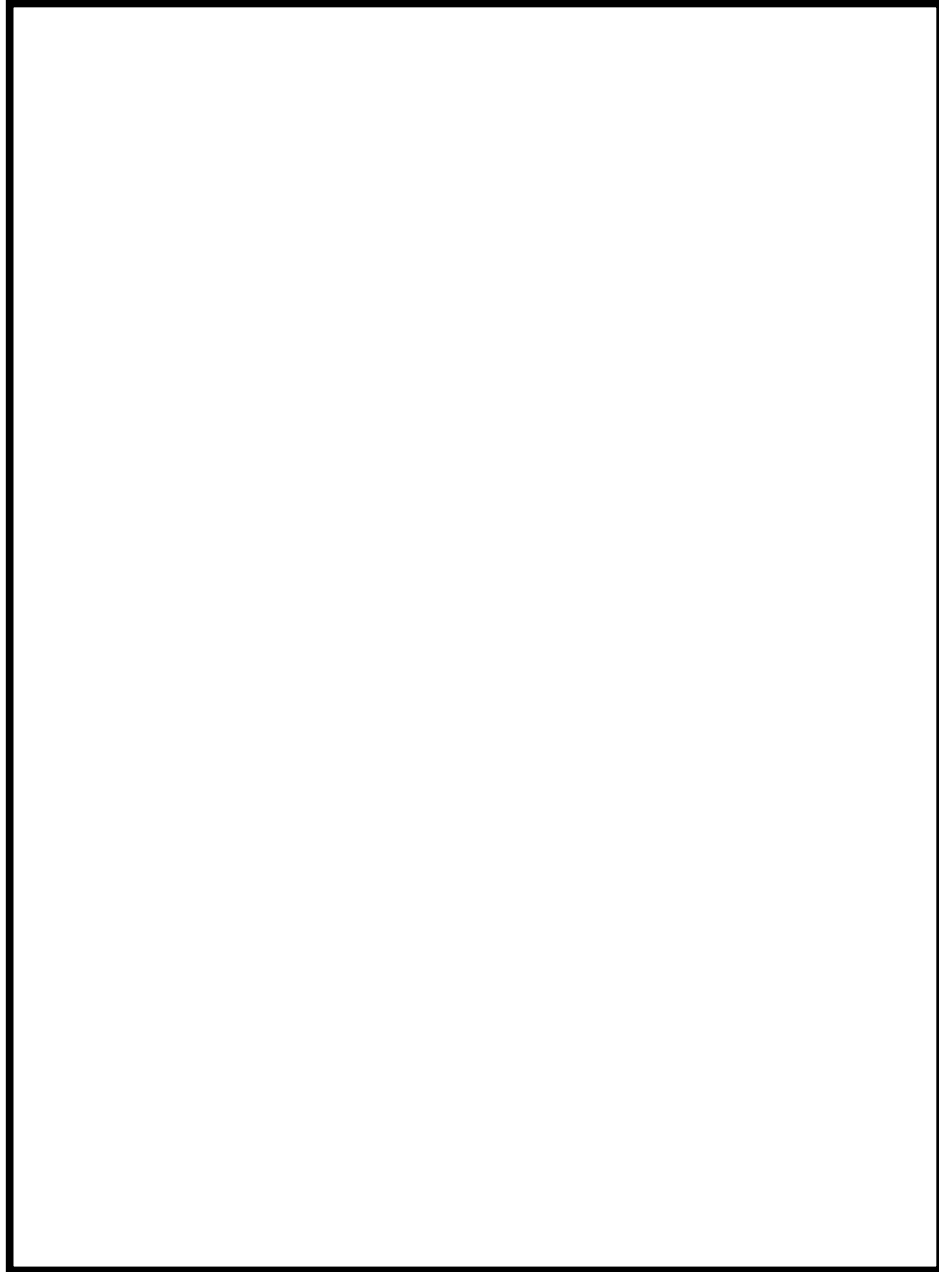


図 2-3(2) 動的応答加速度分布図
(基準地震動 S_s)

表 2-4(1) 動的応答加速度
(弾性設計用地震動 S_d)

(単位: m/s^2)

位置	加速度
節点番号 6	

表 2-4(2) 動的応答加速度
(基準地震動 S_s)

(単位: m/s^2)

位置	加速度
節点番号 6	

表 2-5 静的加速度

(単位: m/s^2)

位置	加速度
炉心支持板	
上部格子板	

3. 応力計算

3.1 応力解析の手順

応力解析を行う手順について述べる。

3.1.1 荷重条件

荷重条件は1章に示す。

3.1.2 応力計算と応力の分類

(1) 応力計算の方法

a. 応力計算は荷重の種類ごとに行う。荷重として与えられるものは次の2つである。

(a) 外圧

(b) 外荷重

b. 解析する箇所形状は、次の方針に従ってモデル化する。

(a) 構造の不連続を考慮して応力の最も厳しい箇所に応力評価点（面）を選ぶ。なお、軸対称モデル解析において、非軸対称な外荷重による応力評価を行った場合、荷重の入力方位と応力評価点の方位の関係により応力に極大値と極小値が生じる。外荷重による応力が極大となる方位の応力評価点は〔例 P01〕と表し、極小となる方位の応力評価点には、プライム（'）を付けて〔例 P01'〕と表す。

一次応力の評価は、内外面の応力評価点を含む断面（応力評価面）について行う。

(2) 応力の分類

応力の計算結果は、表3-1の応力の分類方法に従って分類し、計算を行う。

3.1.3 応力の評価

(1) 一次応力強さ

許容応力状態Ⅲ_AS及び許容応力状態Ⅳ_ASにおいて生じる一次一般膜応力及び一次一般膜＋一次曲げ応力の応力強さが、1.6.7項及び1.6.8項に示す許容値を満足することを示す。

3.2 応力計算

3.2.1 外圧による応力

(1) 荷重条件 (L01)

ドライチューブの各許容応力状態における外圧を、表1-3に示す。

(2) 計算方法

a. 一次一般膜応力

外圧 P_o による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = -\frac{Y}{Y-1} \cdot P_o$$

$$\sigma_l = -\frac{Y^2}{Y^2-1} \cdot P_o$$

$$\sigma_r = -\frac{Y}{Y+1} \cdot P_o$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

なお、各応力評価点での D_o 、 t は表3-2に示す。

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

外圧 P_o による一次曲げ応力は、存在しない。したがって、一次一般膜＋一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

3.2.2 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

ドライチューブに働く外荷重を、表1-2に示す。

(2) 計算方法

外荷重による応力は、以下により求める。

a. 死荷重 (L04)

死荷重による応力は次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = -\frac{V}{A}$$

b. 地震荷重 (L14 及び L16)

(a) 水平方向地震荷重による応力



応力計算モデルを図 3-1 に示す。



$$M_E = P_B \cdot (\ell - \ell') - \frac{1}{2} \cdot w \cdot (\ell - \ell')^2$$

$$F_E = w \cdot (\ell - \ell') - P_B$$

ここで,

$$P_B = \frac{w \cdot \ell}{3}$$

$$w = \frac{H}{L}$$

$$\ell = \left(\frac{72 \cdot \delta_D \cdot E \cdot I}{w} \right)^{\frac{1}{4}}$$

なお, I はパイプ母材に対する値を用いる。

したがって, 応力評価点に生じる一次曲げ応力は次のようになる。

$$\sigma_{\ell} = \pm \frac{M_E}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

また、各応力評価点で生じる一次一般膜応力は

$$\tau_{t\ell} = \pm \frac{F_E}{A}$$

ただし、各応力評価点の D_0 、 A 、 I は表3-2による。

(b) 鉛直方向地震荷重による応力

鉛直方向地震による応力は次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A}$$

3.3 応力強さの評価

応力強さの評価は、図1-1に示す応力評価点に対して行う。

3.3.1 一次一般膜応力強さの評価

各供用状態（許容応力状態）における評価をまとめて、表3-3に示す。

表3-3より、各供用状態（許容応力状態）の一次一般膜応力強さは、1.6.7項及び1.6.8項に示す許容値を満足する。

3.3.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各供用状態（許容応力状態）における評価をまとめて、表3-4に示す。

表3-4より、各供用状態（許容応力状態）の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、1.6.7項及び1.6.8項に示す許容値を満足する。



図 3-1 地震荷重による応力の計算モデル (単位 : mm)

表 3-1 応力の分類

	位 置	荷重の種類	応力の分類	
			管状構造物	不連続部より遠い部分
	外荷重又はモーメント	全断面について平均した一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b	

注：

P_m : 圧力差又は機械的荷重によって生じる膜応力であって、構造上の不連続性及び局部的形状の変化によって生じる膜応力は除く。ただし、実際の応力評価では、応力評価面を構造上の不連続部にとることが多いので、内径、板厚がその応力評価面での値に等しい単純な殻を仮定し、シェル理論又ははり理論を用いて計算した応力を、その応力評価面における P_m とする。

P_b : 外力、内力及びモーメントに対して、単純な平衡の法則を満足する曲げ応力をいう。

表 3-2 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02				

表 3-3 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態Ⅲ _A S		許容応力状態Ⅳ _A S	
	応力強さ	許容値	応力強さ	許容値
P01 P02	33	172	33	260
P01' P02'	33	172	33	260

表 3-4 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態Ⅲ _A S		許容応力状態Ⅳ _A S	
	応力強さ	許容値	応力強さ	許容値
P01 P02	130	258	187	391
P01' P02'	132	258	189	391

4. 結論

4.1 固有周期

次数	固有周期 (s)
1次	
2次	
3次	

4.2 応力評価のまとめ

ドライチューブに生じる応力は、表4-1に示すようにすべて許容応力以下である。

5. 参照図書

東海第二発電所 起動領域計装設置工事 工事計画届出書 添付書類

(1) 1-2-1 起動領域計装ドライチューブの耐震性についての計算書

表 4-1 計算結果の概要

部分及び 材料	供用状態 (許容応力状態)	一次一般膜応力 (MPa)			一次一般膜+一次曲げ応力 (MPa)		
		応力強さ	許容値	応力 評価面	応力強さ	許容値	応力 評価面
パイプ SUS304TB	Ⅲ _A S	33	172	P01'-P02'	132	258	P01'-P02'
	Ⅳ _A S	33	260	P01'-P02'	189	391	P01'-P02'