

V-2-3-4-2-3 制御棒駆動機構ハウジング支持金具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 3
 - 2.4 記号の説明 4
 - 2.5 計算精度と数値の丸め方 5
- 3. 評価部位 6
- 4. 地震応答解析及び構造強度評価 7
 - 4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法 7
 - 4.2 荷重の組合せ及び許容限界 8
 - 4.3 解析モデル及び諸元 13
 - 4.4 固有周期 14
 - 4.5 設計用地震力 15
 - 4.6 計算方法 16
 - 4.7 計算条件 19
 - 4.8 応力の評価 19
- 5. 評価結果 19
 - 5.1 設計基準対象施設としての評価結果 19

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、制御棒駆動機構ハウジング（以下「CRDハウジング」という。）支持金具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。

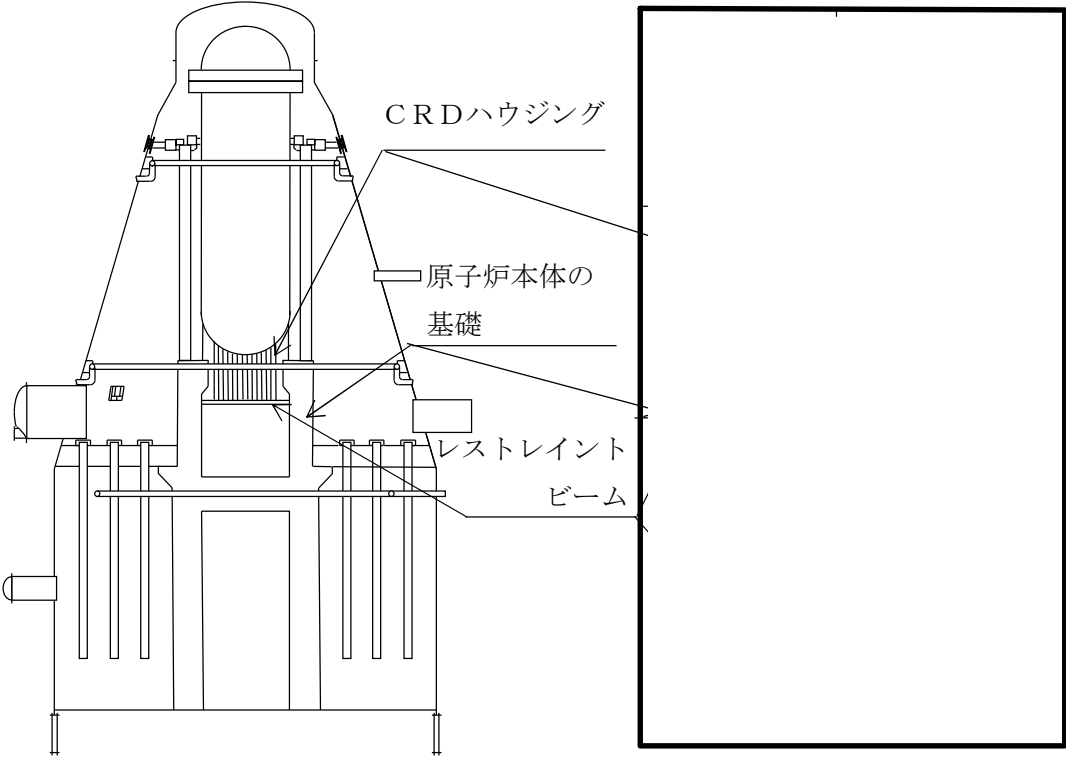
CRDハウジング支持金具は設計基準対象施設においてはSクラス施設に分類される。以下、設計基準対象施設としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

CRDハウジング支持金具の構造計画を表 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	
・CRDハウジング支持金具は原子炉本体の基礎に支持される。	・CRDハウジング支持金具は鋼製の支持構造物である。 ・制御棒駆動機構ハウジングが完全に破断またはフランジボルトが破断した場合に、制御棒を含めた駆動機構全体の落下を制限する。 ・制御棒駆動機構ハウジングの地震時横揺れを防止する。	

2.2 評価方針

C R Dハウジング支持金具の応力評価は、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C R Dハウジング支持金具の部位を踏まえた「3. 評価部位」にて設定する箇所において、地震により評価部位に作用する荷重で発生する応力等が許容限界内に収まることを、「4. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。評価結果を「5. 評価結果」に示す。

C R Dハウジング支持金具の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

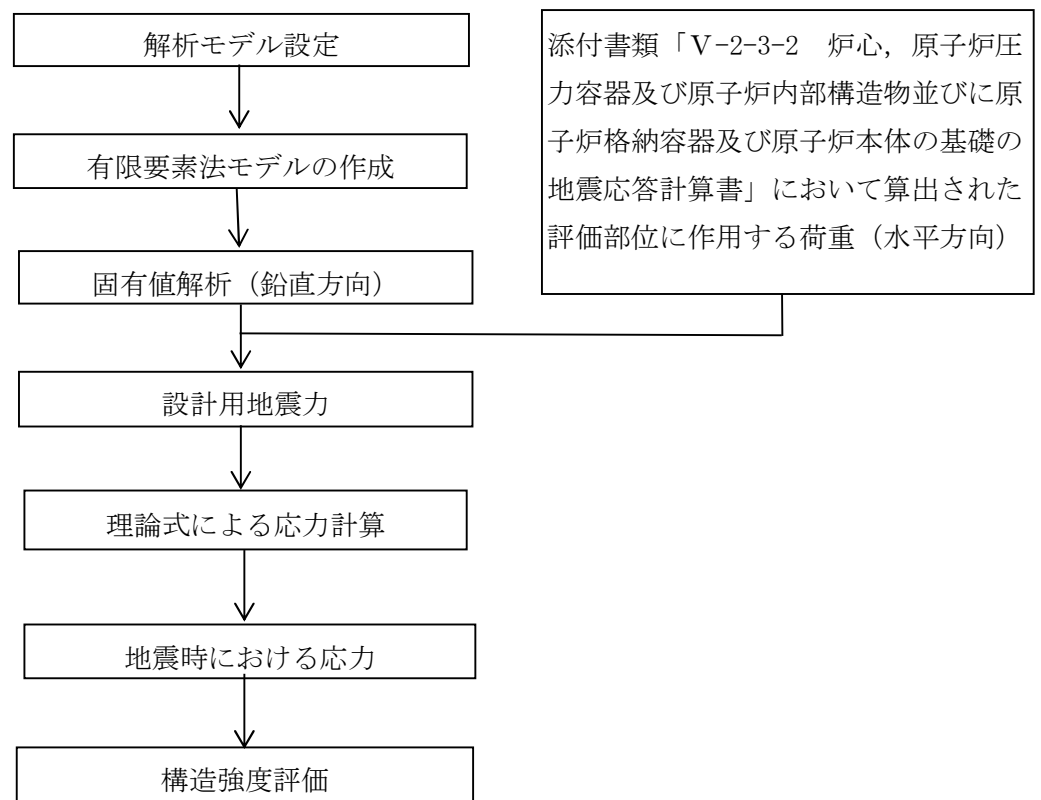


図 2-1 C R Dハウジング支持金具の耐震評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1 -1987（日本電気協会）
- (2) 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）
- (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	長さ, ボルト断面積	mm, mm ²
B	長さ	mm
C	長さ	mm
C _H	水平震度	—
C _V	鉛直震度	—
D	直径, ボルト呼び径	mm
d	ボルト呼び径	mm
F	基準応力, 荷重	MPa, N
f_b	許容曲げ応力 (f_b を1.5倍した値又は f_b^* を1.5倍した値)	MPa
f_s	許容せん断応力 (f_s を1.5倍した値又は f_s^* を1.5倍した値)	MPa
f_t	許容引張応力 (f_t を1.5倍した値又は f_t^* を1.5倍した値)	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるボルトの許容引張応力 (f_t を1.5倍した値又は f_t^* を1.5倍した値)	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
H	水平方向地震荷重	N
ℓ	長さ	mm
L	長さ	mm
M _H	水平方向地震による曲げモーメント	N・mm
M _V	鉛直方向地震による曲げモーメント	N・mm
n	ボルト本数	—
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	—
W _D	死荷重	N
w _D	死荷重による等分布荷重	N/mm
w _H	水平方向地震による等分布荷重	N/mm
w _V	鉛直方向地震による等分布荷重	N/mm
Z _H	断面係数	mm ³
Z _V	断面係数	mm ³
σ_b	曲げ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa

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
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*1}
断面係数	mm ³	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*1}
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁 ^{*1}
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*2}	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記 *1：絶対値が 1000 以上のときは、べき数表示とする。

*2：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の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

C R Dハウジング支持金具各部の形状及び主要寸法を図 3-1 に示す。また、使用材料及び使用部位を表 3-1 に示す。

なお、耐震評価上厳しくなるレストレントビーム一般部，端部及びレストレントビーム結合ボルトを評価する。

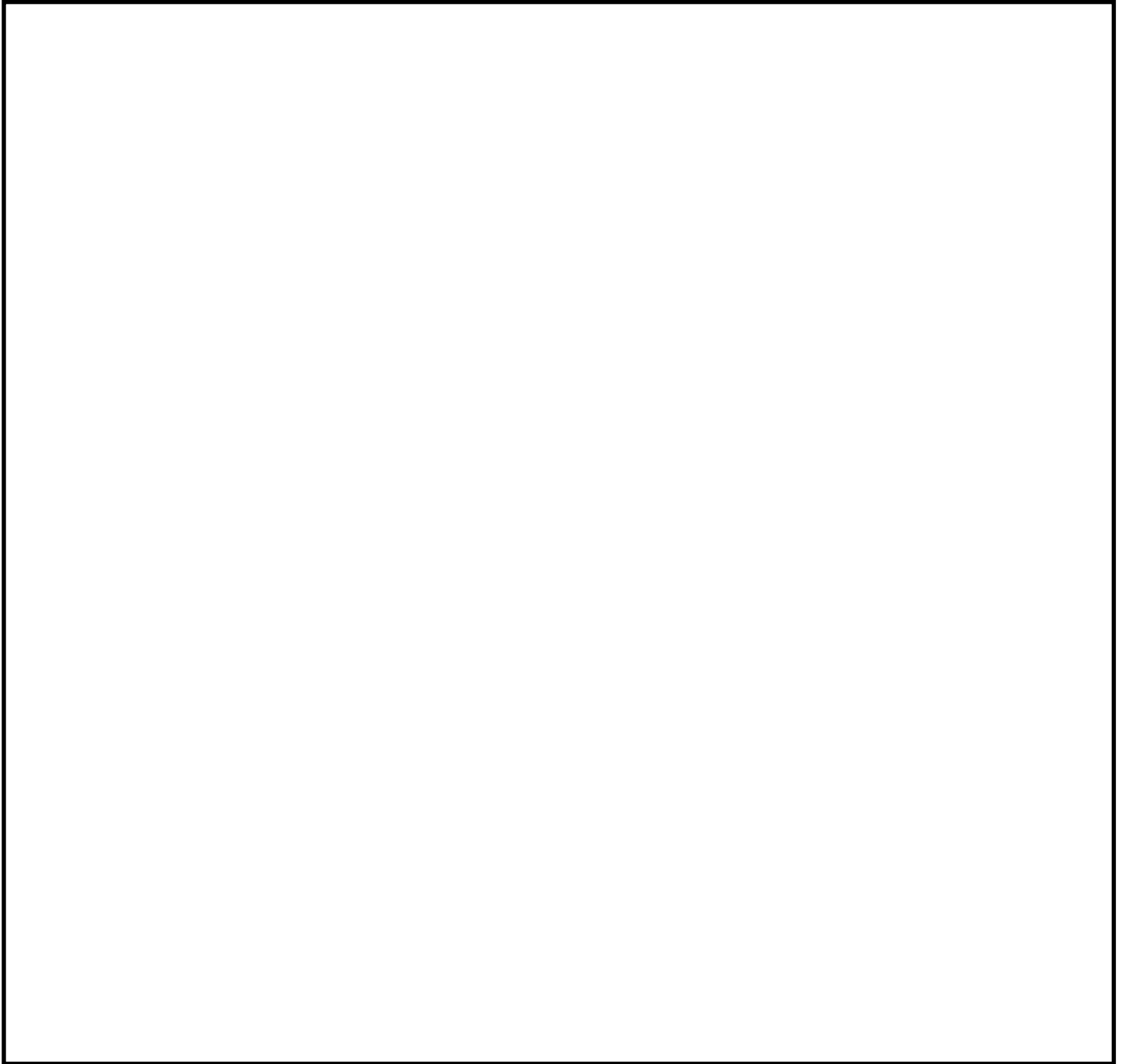


図 3-1 C R Dハウジング支持金具の形状及び主要寸法

表 3-1 使用材料表

使用部位	使用材料	備考
レストレントビーム	SM41B	SM400B*
レストレントビーム結合ボルト	F10T	

注記 *：新 JIS を示す。

4. 地震応答解析及び構造強度評価

4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) CRDハウジング支持金具は、原子炉本体の基礎の内周側に固定され、CRDハウジングの水平地震荷重を原子炉本体の基礎に伝達する構造物である。CRDハウジング支持金具に作用する地震力は、CRDハウジングから伝達される水平地震荷重に加え、鉛直の固有周期に応じた応答加速度に基づき算出する。CRDハウジング支持金具の耐震評価として、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」において計算された水平地震荷重と、上記の応答解析に基づき算出した鉛直地震力を用いて、構造強度評価を行う。
- (2) 構造評価に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (3) 概略構造図を表 2-1 に示す。

4.2 荷重の組合せ及び許容限界

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

CRDハウジング支持金具の荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4-1 に示す。表で使
される記号は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に従うものとする。

4.2.2 許容限界

CRDハウジング支持金具の許容限界を表 4-2 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件及び許容応力

CRDハウジング支持金具の使用材料の許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の
評価に用いるものを表 4-3 及び表 4-4 に示す。また、許容応力状態に対する許容応力のう
ち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4-5 に示す。

表4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態

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	荷重の組合せ	許容応力 状態
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 付属構造物	CRD ハウジング 支持金具	S	—*	$D + P_D + M_D + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	Ⅳ _A S

注記 *：耐震Sクラス設備の直接支持構造物として、その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許
容限界を適用する。

表4-2 許容限界（その他の支持構造物）

(設計基準対象施設)

許容応力 状 態	許容限界*1, *2, *3 (ボルト等以外)										許容限界*2, *4 (ボルト等)		形式試験に よる場合
	一次応力					一次＋二次応力					一次応力		許容荷重
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧	引張 圧縮	せん断	曲げ	支圧	座屈 ^{*5}	引張	せん断	
Ⅲ _A S	1.5・f _t	1.5・f _s	1.5・f _c	1.5・f _b	1.5・f _p	3・f _t	3・f _s ^{*6}	3・f _b ^{*7}	1.5・f _p ^{*8}	1.5・f _b , 1.5・f _s ^{*7, *8}	1.5・f _t	1.5・f _s	$T_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{S_{y d}}{S_{y t}}$
Ⅳ _A S	1.5・f _t [*]	1.5・f _s [*]	1.5・f _c [*]	1.5・f _b [*]	1.5・f _p [*]	S _d 又はS _s 地震動のみに よる応力振幅について評価 する。			1.5・f _p ^{*8}	1.5・f _s 又は 1.5・f _c	1.5・f _t [*]	1.5・f _s [*]	$T_L \cdot 0.6 \cdot \frac{S_{y d}}{S_{y t}}$

注記*1：「鋼構造設計規準 SI 単位版」（2002 年日本建築学会）等の幅厚比の制限を満足させる。

*2：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。

*3：耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であって耐圧部と一体の応力解析を行うものについては，耐圧部と同じ許容応力とする。

*4：コンクリートに埋め込まれるアンカボルトで地震応力の占める割合が支配的なものであって，トルク管理，材料の照合等を行わないものについては，材料の品質，据付状態等のゆらぎ等を考慮して，Ⅲ_A S の許容応力を一次引張応力に対しては f_t ，一次せん断応力に対しては f_s として，またⅣ_A S →Ⅲ_A S として応力評価を行う。

*5：薄肉円筒形状のものの座屈の評価にあつては，クラスMC 容器の座屈に対する評価式による。

*6：すみ肉溶接部にあつては最大応力に対して $1.5 \cdot f_s$ とする。

*7：設計・建設規格 SSB-3121.1(4)により求めた f_b とする。

*8：自重，熱膨張等により常時作用する荷重に，地震動による荷重を重ね合わせて得られる応力の圧縮最大値について評価する。

表4-3 使用材料（レストレントビーム）の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
レストレントビーム	SM400B	周囲環境 温度	171	—	201	373	—

表4-4 使用材料（レストレントビーム結合ボルト）の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
レストレントビーム結合ボルト	F10T	周囲環境 温度	171	—	900	1000	—

表4-5 許容応力状態に対する許容応力

(単位：MPa)

材料	温度 (℃)	許容応力 状態	基準応力 F	許容応力		
				引張応力 f_t	曲げ応力 f_b	せん断応力 f_s
SM400B	171	Ⅲ _A S	201	—	201	—
		Ⅳ _A S	241	—	241	—
F10T	171	Ⅲ _A S	700	525	—	404
		Ⅳ _A S	700	525	—	404

4.2.4 設計荷重

(1) 死荷重

レストレントビームの死荷重 W_D

(2) 地震荷重

CRDハウジング支持金具に加わる水平方向地震荷重について、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」において計算された計算結果を用いる。

レストレントビームの「弾性設計用地震動 S_d 又は静的地震力」及び「基準地震動 S_s 」による水平方向地震荷重を表 4-6 に示す。CRDハウジング支持金具に加わる鉛直地震力は「4.4 固有周期」に基づき「4.5 設計用地震力」に示す。

表 4-6 「弾性設計用地震動 S_d 又は静的地震力」及び「基準地震動 S_s 」による水平方向地震荷重

地震荷重	S_d^*	S_s
水平方向地震荷重 H (N)		

4.3 解析モデル及び諸元

解析モデルの概要を以下に示す。

- (1) CRDハウジング支持金具の固有値の評価は、はりモデルによる有限要素解析手法を適用する。
- (2) 固有値解析用モデルでは固有値を算出する。固有値解析用モデルについて図 4-1 に、機器諸元について表 4-7 に示す。
- (3) 解析コードはMSC NASTRANを使用する。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。

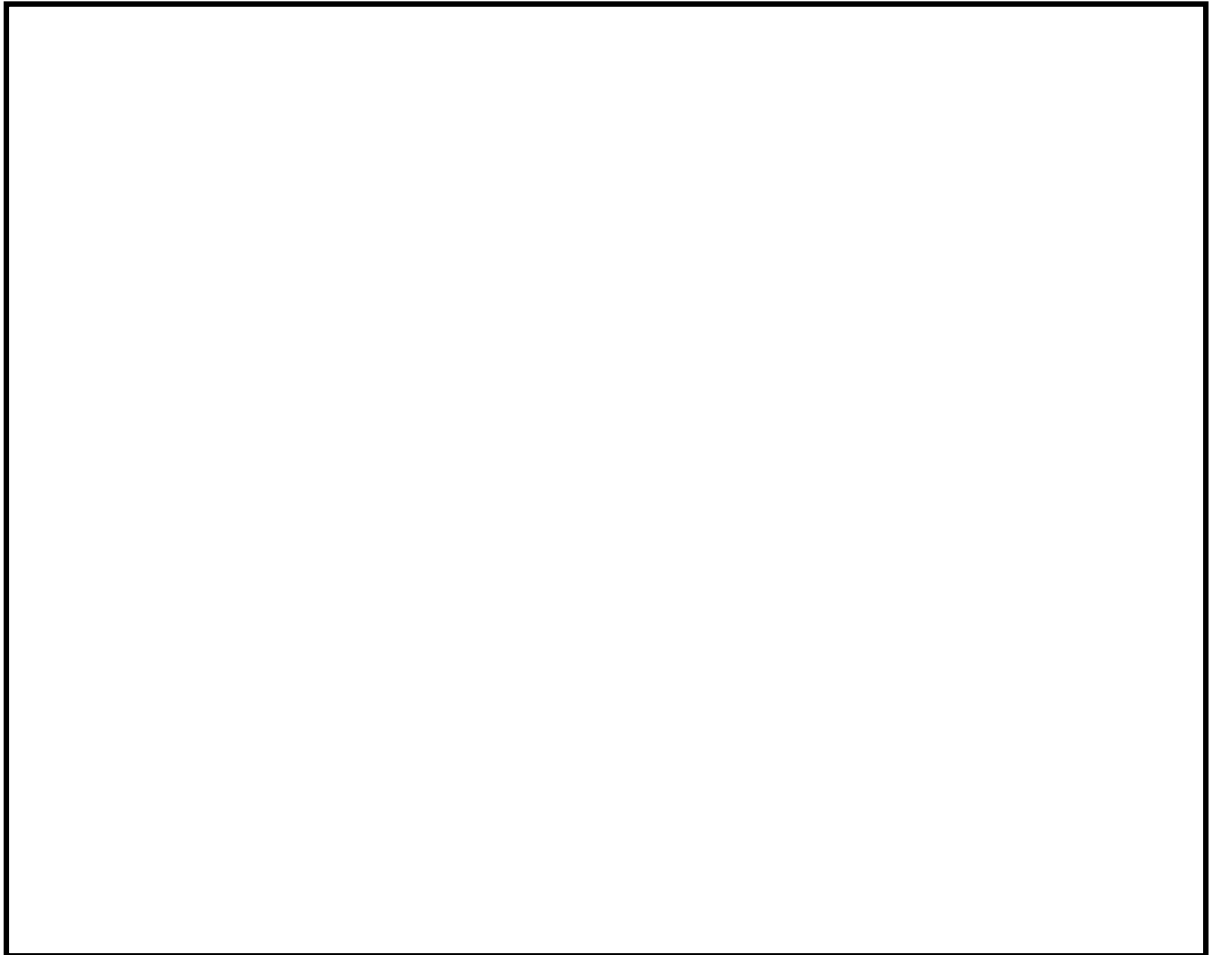


図 4-1 固有値解析用モデル

表 4-7 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SM400B
質量	m _o	kg	
温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	171
縦弾性係数	E	MPa	193000
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	個	図4-1に記載の とおり
節点数	—	個	

注記 * : 1/2 モデルのため、全体の半分の数値。

4.4 固有周期

固有値解析用モデルによる固有値解析の結果を表 4-8 に示す。

一次モードは鉛直方向に卓越し、固有周期が 秒であることを確認した。固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

また、水平方向は二次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

表 4-8 固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1 次		鉛直方向

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-9 に示す。

水平方向については、「4.2.4 設計荷重」に示す添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」で算出された地震荷重と，表 4-9 に示す震度により算出した荷重のうち大きい方を用いる。

鉛直方向については，「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は，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 4-9 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所 及び 設置高さ	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		減衰定数 (%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉本体 基礎 EL. m	— *1	0.05 以下 *2	$C_H=0.86$	$C_V=0.63$	$C_H=1.43$	$C_V=1.19$	—	—

注記 *1：固有周期は十分に小さく，計算は省略する。

*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

4.6 計算方法

4.6.1 応力評価点

C R Dハウジング支持金具の応力評価点は、C R Dハウジング支持金具を構成する部材の形状及び荷重伝達経路を考慮し、発生応力が大きくなる部位を選定する。選定した応力評価点を表 4-10 及び図 4-2 に示す。

表 4-10 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
A	レストレントビーム一般部*
B	レストレントビーム端部*
C	レストレントビーム結合ボルト

注記 *：曲げ荷重が支配的となるため、曲げ応力のみの評価とする。

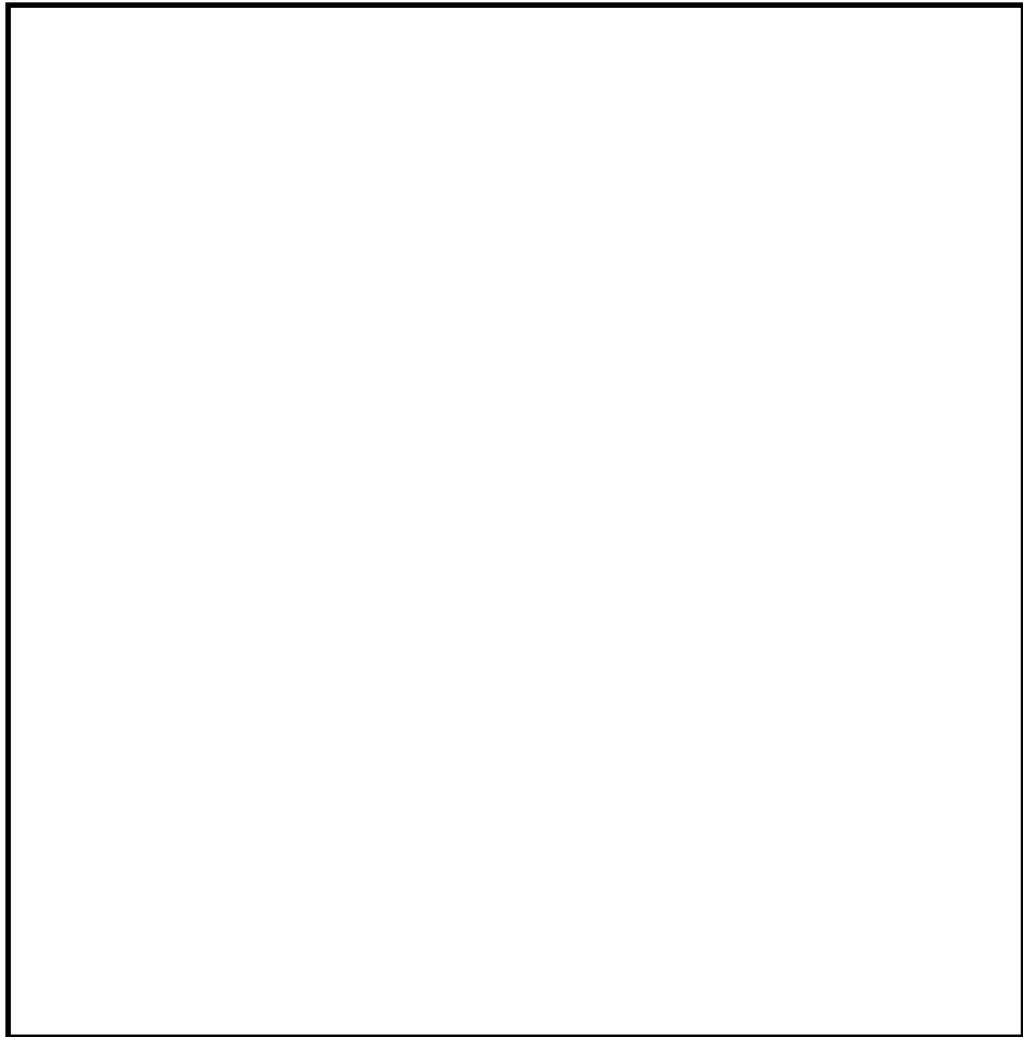


図 4-2 応力評価点

4.6.2 応力計算方法

レストレントビームに生じる応力は、次式により計算する。

(1) 荷重

図 4-3 に示す両端支持ばりとして計算する。自重による鉛直荷重も考慮する。

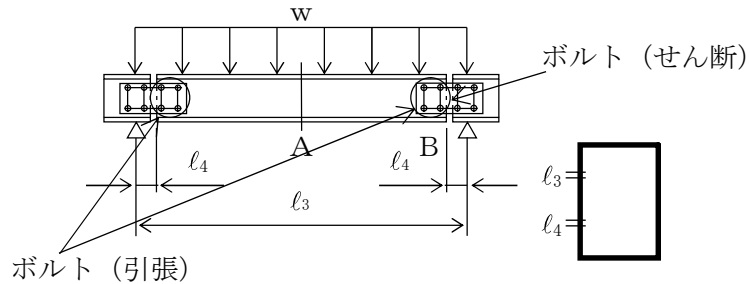


図 4-3 計算モデル (単位: mm)

a. 分布荷重

(a) 死荷重 \$W_D\$ による等分布荷重

$$w_D = \frac{W_D}{L}$$

ここで、

\$L\$: レストレントビーム全長 =

(b) 水平方向地震による等分布荷重

$$w_H = w_1$$

ここで、

\$w_1\$: 水平方向地震荷重 \$H\$ による等分布荷重*

$$w_1 = \frac{H}{\ell_3}$$

注記 * : 水平方向設計震度による地震慣性力は、水平方向地震荷重 \$H\$ と比較して非常に小さいため、ここでは考慮しない。

(c) 鉛直方向地震による等分布荷重

$$w_V = w_D \cdot (1 + C_V)$$

b. A点での曲げモーメント

(a) 水平方向地震によるモーメント

$$M_{HA} = \frac{w_H \cdot \ell_3^2}{8}$$

(b) 鉛直方向地震によるモーメント

$$M_{VA} = \frac{w_V \cdot \ell_3^2}{8}$$

c. B点での曲げモーメント

(a) 水平方向地震によるモーメント

$$M_{HB} = \frac{w_H \cdot \ell_4}{2} \cdot (\ell_3 - \ell_4)$$

(b) 鉛直地震によるモーメント

$$M_{VB} = \frac{w_v \cdot \ell_4}{2} \cdot (\ell_3 - \ell_4)$$

(2) 応力

a. A点での曲げ応力

$$\sigma_{bA} = \frac{M_{HA}}{Z_{HA}} + \frac{M_{VA}}{Z_{VA}}$$

ここで,

$$\begin{aligned} Z_{HA} &= \boxed{} \\ Z_{VA} &= \boxed{} \end{aligned}$$

b. B点での曲げ応力

$$\sigma_{bB} = \frac{M_{HB}}{Z_{HB}} + \frac{M_{VB}}{Z_{VB}}$$

ここで,

$$\begin{aligned} Z_{HB} &= \boxed{} \\ Z_{VB} &= \boxed{} \end{aligned}$$

c. ボルトの引張応力

$$\sigma_t = \frac{F_1}{n_1 \cdot A}$$

ここで,

F_1 : ボルトの引張力

$$F_1 = w_v \cdot \ell_3$$

d : ボルトの呼び径 = $\boxed{}$

A : ボルト断面積 = $\pi/4 \cdot d^2 = \boxed{}$

n_1 : 引張を受けるボルト本数 = $\boxed{}$

d. ボルトのせん断応力

$$\tau = \frac{F_2}{n_2 \cdot A}$$

ここで,

F_2 : ボルトのせん断力*

$$F_2 = w_H \cdot \ell_3 / 2$$

n_2 : せん断を受けるボルト本数 =

注記 * : 高力ボルトは、ボルトによって締め付けられる部材間の接触で生じる摩擦力により荷重伝達させる使い方をするボルトであるが、本計算書では部材間の接触で生じる摩擦力を考慮しないことで、せん断力が直接ボルトに生じるものとして評価を行う。

4.7 計算条件

応力解析に用いる自重及び荷重は、「4.2 荷重の組合せ及び許容限界」及び「4.5 設計用地震力」に示す。

4.8 応力の評価

「4.6 計算方法」で求めた応力は表 4-5 に記載される値以下であること。

5. 評価結果

5.1 設計基準対象施設としての評価結果

C R Dハウジング支持金具の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足しており、十分な構造強度を有することを確認した。

(1) 許容応力状態Ⅲ_ASに対する評価

許容応力状態Ⅲ_ASに対する応力評価結果を表 5-1 に示す。

表 4-1 に示す荷重の組合せのうち、 $D + P_D + M_D + S_d^*$ の評価について記載している。

(2) 許容応力状態Ⅳ_ASに対する評価

許容応力状態Ⅳ_ASに対する応力評価結果を表 5-2 に示す。

表 4-1 に示す荷重の組合せのうち、 $D + P_D + M_D + S_s$ の評価について記載している。

表 5-1 許容応力状態Ⅲ_AS に対する応力評価結果 (D + P_D + M_D + S_d*)

評価対象設備	評価部位		応力分類	Ⅲ _A S		判定	備考
				発生値	許容値		
				(MPa)	(MPa)		
CRDハウジング 支持金具	A	レストレントビーム一般部	曲げ応力	91	201	○	
	B	レストレントビーム端部	曲げ応力	54	201	○	
	C	レストレントビーム結合ボルト	引張応力	2	525*	○	
			せん断応力	128	404	○	

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

表 5-2 許容応力状態Ⅳ_AS に対する応力評価結果 (D + P_D + M_D + S_s)

評価対象設備	評価部位		応力分類	Ⅳ _A S		判定	備考
				発生値	許容値		
				(MPa)	(MPa)		
CRDハウジング 支持金具	A	レストレントビーム一般部	曲げ応力	149	241	○	
	B	レストレントビーム端部	曲げ応力	89	241	○	
	C	レストレントビーム結合ボルト	引張応力	3	394*	○	
			せん断応力	213	404	○	

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

V-2-3-4-2-4 差圧検出・ほう酸水注入管（ティーよりN10ノズル
までの外管）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	5
1.4	形状・寸法・材料	5
1.5	解析範囲	5
1.6	計算結果の概要	5
2.	計算条件	8
2.1	設計条件	8
2.2	運転条件	8
2.2.1	運転状態Ⅰ及びⅡ	8
2.2.2	運転状態Ⅲ	9
2.2.3	運転状態Ⅳ	9
2.2.4	試験状態	9
2.3	重大事故等時の条件	9
2.4	材料	9
2.5	物性値	9
2.6	荷重の組合せ及び許容応力状態	10
2.7	許容限界	10
2.8	溶接部の継手効率	10
2.9	荷重の組合せと応力評価	10
2.10	応力の記号と方向	10
3.	外荷重の条件	11
3.1	計算方法	11
3.2	解析モデル及び諸元	11
3.3	死荷重	11
3.4	地震荷重	11
3.4.1	固有周期	11
3.4.2	設計用地震力	11
3.4.3	地震荷重の算出結果	11
4.	応力解析	12
4.1	応力解析の手順	12
4.1.1	荷重条件	12
4.1.2	応力計算と応力の分類	12
4.2	応力計算	13
4.2.1	内圧による応力	13

4.2.2	外荷重による応力	14
4.2.3	計算結果	14
4.3	応力の評価	15
4.3.1	主応力	15
4.3.2	応力強さ	15
4.4	応力強さの評価	15
4.4.1	一次一般膜応力強さの評価	15
4.4.2	一次膜＋一次曲げ応力強さの評価	15
4.4.3	一次＋二次応力強さの評価	15
5.	繰返し荷重の評価	16
5.1	設計・建設規格 PVB-3140 についての検討	16
5.2	疲労解析	17
6.	引用文献	18

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	6
図 2-1	運転条件	19
図 3-1	解析モデル	32
図 3-2	振動モード	36
表 1-1	差圧検出・ほう酸水注入管の構造計画	2
表 1-2	計算結果の概要	7
表 2-1	各許容応力状態における内圧	23
表 2-2	材料の分類	23
表 2-3	応力計算に使用する材料の物性値	23
表 2-4	繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値	24
表 2-5	荷重の組合せ及び許容応力状態	25
表 2-6	許容限界	27
表 2-7	荷重の組合せ	31
表 3-1	節点座標	33
表 3-2	解析モデルのデータ諸元	34
表 3-3	外荷重	35
表 3-4	固有周期	36
表 3-5	設計用地震力	37
表 4-1	断面性状	38
表 4-2	応力の計算結果	39
表 4-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	41
表 4-4	一次膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	42
表 4-5	一次＋二次応力強さの評価のまとめ	43

1. 概要

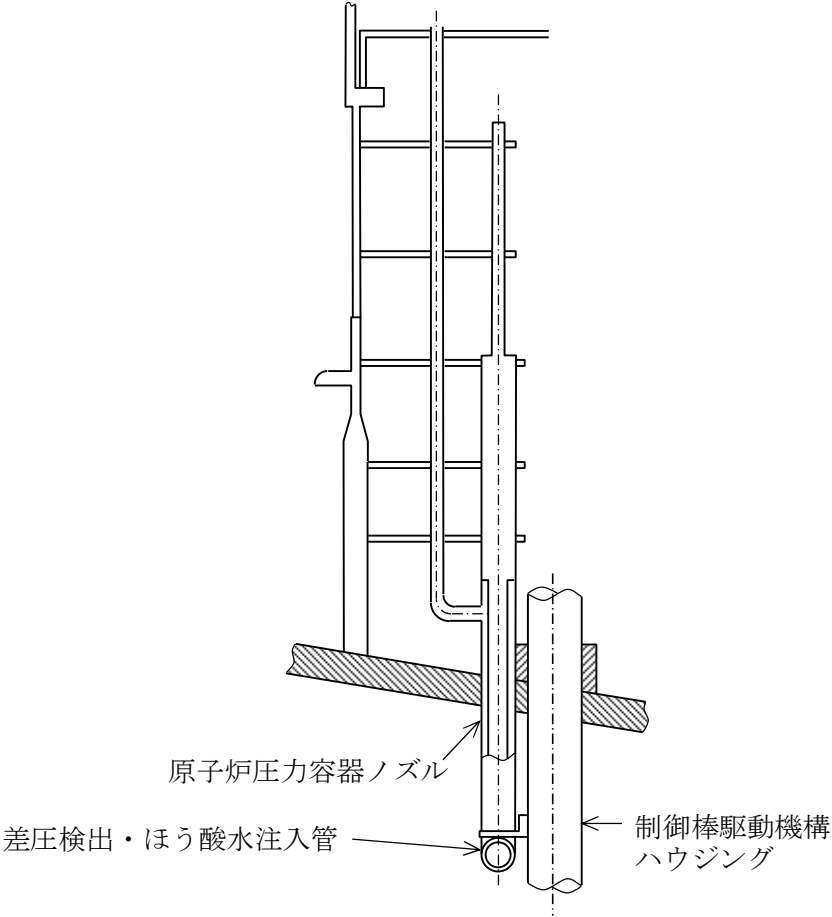
本計算書は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、差圧検出・ほう酸水注入管（ティーより N10 ノズルまでの外管）（以下「差圧検出・ほう酸水注入管」という。）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

差圧検出・ほう酸水注入管は設計基準対象施設においては S クラス施設に、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及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

1.1 構造の説明

差圧検出・ほう酸水注入管の構造計画を表 1-1 に示す。

表 1-1 差圧検出・ほう酸水注入管の構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
原子炉圧力容器ノズルに溶接され，制御棒駆動機構ハウジングにＵボルトにて支持される。	差圧検出管が外管，ほう酸水注入管が内管の二重構造となっている。	 原子炉圧力容器ノズル 差圧検出・ほう酸水注入管 制御棒駆動機構ハウジング

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。

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
F	ピーク応力	MPa
I	断面二次モーメント	mm ⁴
F _L	軸力	N
F _S	せん断力	N
M	曲げモーメント	N・mm
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S	10 ¹¹ 回に対応する許容繰返しピーク応力強さ	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 _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—
S ₁₂	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S ₂₃	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S ₃₁	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S _a	許容繰返しピーク応力強さ	MPa
S _m	設計応力強さ	MPa
S _n ^{#1}	許容応力状態Ⅲ _A Sのうち地震荷重 S _d [*] のみによる一次＋二次応力の 応力差最大範囲	MPa
S _n ^{#2}	許容応力状態Ⅳ _A Sのうち地震荷重 S _s のみによる一次＋二次応力の 応力差最大範囲	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
T	ねじりモーメント	N・mm

記号	記 号 の 説 明	単 位
t	厚さ	mm
ν	ポアソン比	—
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
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
$\tau_{\ell r}$	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\ell}$	せん断応力	MPa

1.3 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 J E A G 4 6 0 1 -1987 (日本電気協会)
- (2) 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)
- (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) (以下「設計・建設規格」という。)

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の形状・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 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-2 に示す。

なお,応力評価点の選定に当たっては,形状不連続部,溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し,応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

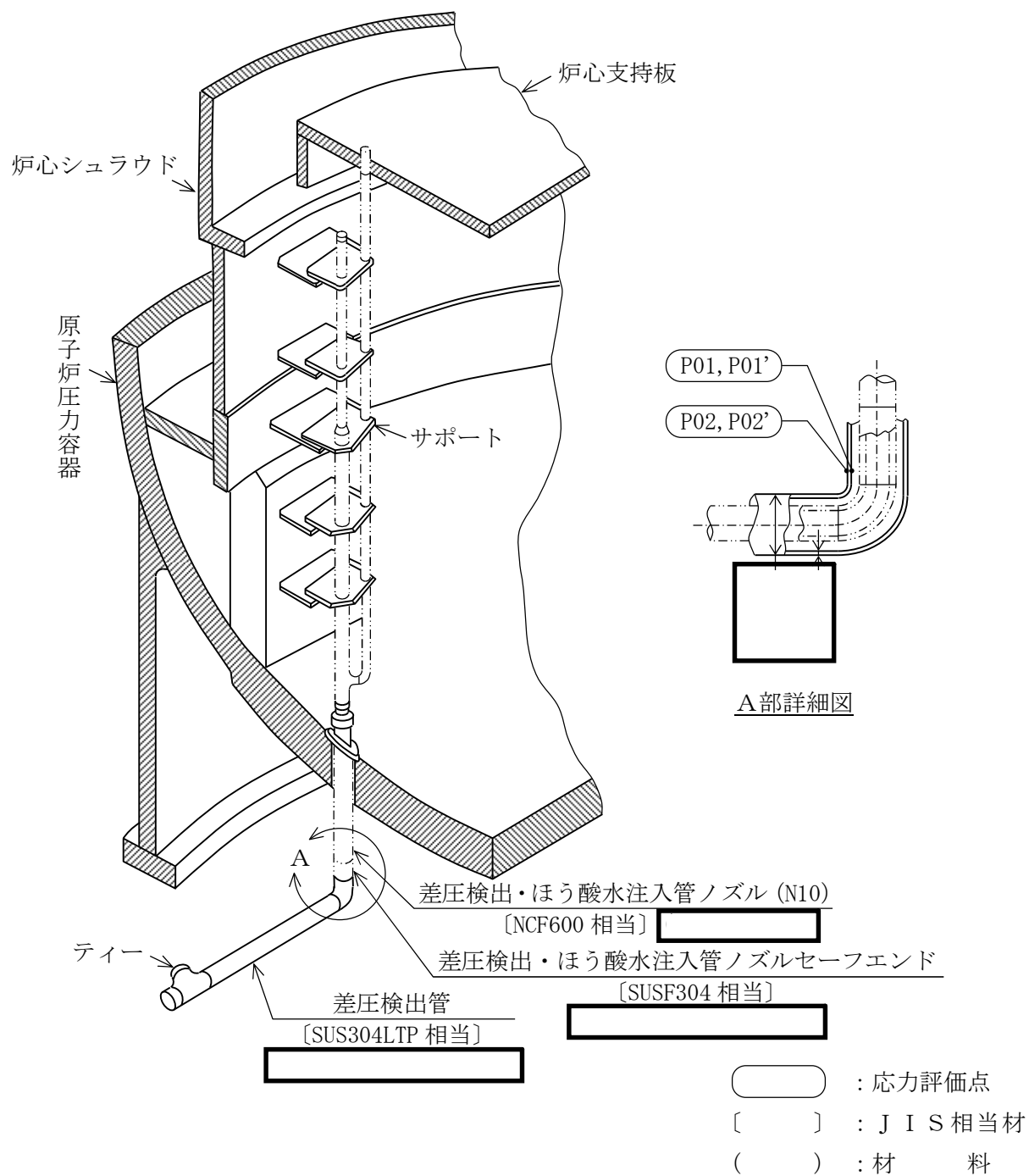


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位 : mm)

表 1-2 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力 状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次膜＋一次曲げ応力強さ (MPa)			一次＋二次応力強さ (MPa)			疲労解析		
		応力 強さ	許容値	応力 評価面	応力 強さ	許容値	応力 評価面	応力 強さ	許容値	応力 評価点	疲労累 積係数	許容値	応力 評価点
差圧検出管 SUS304LTP相当	Ⅲ _A S	41	116	P01-P02	41	161	P01-P02	－	－	－	－	－	－
	Ⅳ _A S	41	232	P01-P02	41	323	P01-P02	－	－	－	－	－	－
	Ⅲ _A S	－	－	－	－	－	－	25	294	P01	－＊	－＊	－＊
	Ⅳ _A S	－	－	－	－	－	－	34	294	P01	－＊	－＊	－＊

注記 ＊：疲労解析は、設計・建設規格 PVB-3140 により不要である。

2. 計算条件

差圧検出・ほう酸水注入管は、以下の荷重条件に耐えるように設計する。

機器の応力解析には本章に示す荷重を考慮する。

2.1 設計条件

原子炉压力容器の最高使用圧力 : 8.62 MPa

最高使用温度 : 302 °C

2.2 運転条件

運転条件及び記号は、次のとおりである。また、これらの記号を解析及び評価に用いる場合において、同一事象内に複数の解析時点がある場合は、記号に小番号を付して使用する。

[例 C03-01, C03-02]

なお、本計算書においては、{ }内の名称を用いる。

計算書では以下に示す運転条件のうち、一次応力強さの評価については、各許容応力状態を定義する各運転状態のうち、最も厳しい運転条件について選定し、一次＋二次応力強さの評価には、圧力変動、温度変動等を考慮して、最も厳しい運転条件を選定し使用する。

2.2.1 運転状態Ⅰ及びⅡ

(1) ボルト締付け	{ボルト締付け}	[C01]
(2) 耐圧試験（最高使用圧力以下）	{耐圧試験最高使用圧力以下}	[C02]
(3) 起動（昇温）	{起動昇温}	[C03]
(4) 起動（タービン起動）	{起動タービン起動}	[C04]
(5) 夜間低出力運転（出力 75 %）	{夜間低出力運転出力 75 %}	[C05]
(6) 週末低出力運転（出力 50 %）	{週末低出力運転出力 50 %}	[C06]
(7) 制御棒パターン変更	{制御棒パターン変更}	[C07]
(8) 給水加熱機能喪失（発電機トリップ）	{発電機トリップ}	[C08]
(9) 給水加熱機能喪失（給水加熱器部分バイパス）	{給水加熱器部分バイパス}	[C09]
(10) スクラム（タービントリップ）	{スクラムタービントリップ}	[C10]
(11) スクラム（その他のスクラム）	{スクラムその他のスクラム}	[C11]
(12) 定格出力運転	{定格出力運転}	[C12]
(13) 停止（タービン停止）	{停止タービン停止}	[C13]
(14) 停止（高温待機）	{停止高温待機}	[C14]
(15) 停止（冷却）	{停止冷却}	[C15]
(16) 停止（容器満水）	{停止容器満水}	[C16]
(17) 停止（満水後冷却）	{停止満水後冷却}	[C17]
(18) ボルト取外し	{ボルト取外し}	[C18]
(19) 燃料交換	{燃料交換}	[C19]
(20) スクラム（原子炉給水ポンプ停止）	{スクラム原子炉給水ポンプ停止}	[C20]

(21) スクラム(逃がし安全弁誤作動) {スクラム逃がし安全弁誤作動} [C21]

2.2.2 運転状態Ⅲ

(1) スクラム(過大圧力) {スクラム過大圧力} [C22]

(2) 冷却材再循環系仕切弁誤作動(冷状態) {冷再循環系仕切弁誤作動} [C23]

(3) 冷却材再循環ポンプ誤起動(冷状態) {冷再循環ポンプ誤起動} [C24]

2.2.3 運転状態Ⅳ

(1) 冷却材喪失事故 {冷却材喪失事故} [C25]

2.2.4 試験状態

(1) 耐圧試験(最高使用圧力を超えるもの) {耐圧試験最高使用圧力を超えるもの}[C26]

各運転条件における設計上定めた原子炉圧力容器内の流体の温度、圧力の変化及びその繰返し回数を図 2-1 に示す。

また、各許容応力状態において考慮する内圧を表 2-1 に示す。

2.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件は以下のとおりである。

圧力条件 : 設計条件と同じ

温度条件 : 設計条件と同じ

2.4 材料

材料は、次に示すとおりである。

パイプ : SUS304LTP 相当

2.5 物性値

応力計算及び繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値は、以下のとおりである。

(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) 繰返し荷重の評価に使用する物性値は、運転温度 ℃ : 定格出力運転時の蒸気温度) に対する値を用いる。

(3) 材料は、表 2-2 に従って分類する。

主な温度における材料の物性値を表 2-3 に示す。

繰返し荷重の評価に使用する物性値を表 2-4 に示す。

2.6 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態を表 2-5 に示す。

なお、差圧検出・ほう酸水注入管は、設計・建設規格 PPB 規定の適用対象であるが、PPB-1210 の規定により、クラス 1 容器の荷重の組合せ及び許容限界を適用する。

2.7 許容限界

- (1) 設計応力強さ S_m 、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ 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) 許容応力状態Ⅲ_AS 及び許容応力状態Ⅳ_AS の一次応力評価には、各運転状態における流体の最高温度（運転状態Ⅰ及びⅡ：℃）に対する許容限界を用いる。
- (3) 差圧検出・ほう酸水注入管の各運転状態の応力評価に用いる許容限界は、設計・建設規格 PVB-3110 により表 2-6 に示すとおりである。

2.8 溶接部の継手効率

差圧検出・ほう酸水注入管の応力評価点は、溶接部でないため $\eta = 1.00$ を用いる。

2.9 荷重の組合せと応力評価

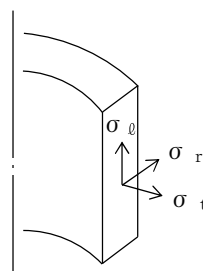
荷重の組合せと応力評価項目の対応を表 2-7 に示す。表 2-7 及び本計算書において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 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) 機器の地震時の慣性力による地震荷重 S_d^* （一次荷重）	[L14]
(4) 機器の拘束点の地震時の相対変位による地震荷重 S_d^* （二次荷重）	[L15]
(5) 機器の地震時の慣性力による地震荷重 S_s （一次荷重）	[L16]
(6) 機器の拘束点の地震時の相対変位による地震荷重 S_s （二次荷重）	[L17]

2.10 応力の記号と方向

応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

- σ_t : 周方向応力
 σ_ℓ : 軸方向応力
 σ_r : 半径方向応力
 $\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから、死荷重及び固有周期を求める。さらに、入力加速度に対する各節点の軸力、せん断力及びモーメントの最大値を求める。

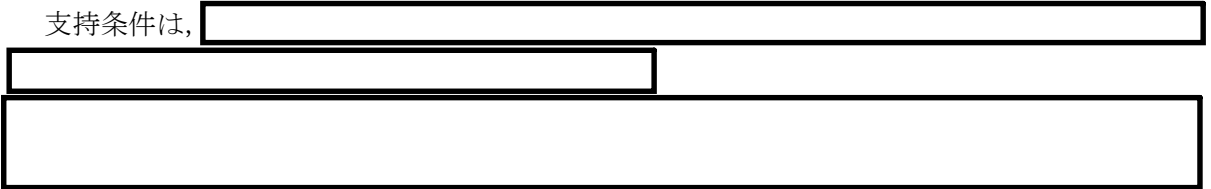
以上の計算は、解析コード「MSC NASTRAN」を用いて行う。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し、解析モデルを図 3-1 に示す。

また、各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は、



3.3 死荷重

差圧検出・ほう酸水注入管の評価に用いる死荷重を表 3-3 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

差圧検出・ほう酸水注入管の固有周期を表 3-4 に、振動モード図を図 3-2 に示す。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震力 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」及び「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表 3-5 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力することにより、差圧検出・ほう酸水注入管の評価位置に発生する荷重を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-3 に示す。

4. 応力解析

4.1 応力解析の手順

応力解析を行う手順について述べる。

4.1.1 荷重条件

荷重条件は2章及び3章に示す。

4.1.2 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) 内圧
 - (b) 外荷重
- b. 解析する箇所の形状は、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。

4.2 応力計算

4.2.1 内圧による応力

(1) 荷重条件 (L01)

各運転条件における内圧の変化を図 2-1 に示す。

計算は、最高使用圧力に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。各許容応力状態において考慮する内圧を表 2-1 に示す。

(2) 計算方法

a. 一次一般膜応力

内圧 P による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P$$

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

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

なお、各応力評価点での D_o 、 t は表 4-1 に示す。

b. 一次膜＋一次曲げ応力

内圧による一次曲げ応力は存在しない。したがって、一次膜＋一次曲げ応力は一次一般膜応力と同じである。

4.2.2 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L04, L14, L15, L16 及び L17)

差圧検出・ほう酸水注入管に働く外荷重を表 3-3 に示す。

(2) 計算方法

a. 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

b. 一次膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

c. 一次＋二次応力

地震荷重 S_d^* (二次荷重) 及び地震荷重 S_s (二次荷重) による二次応力は、一次膜＋一次曲げ応力と同じ式により求める。その他の外荷重による二次応力は存在しない。

4.2.3 計算結果

応力評価点での応力を分類して表 4-2 に示す。

4.3 応力の評価

4.3.1 主応力

4.2 節で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に σ_t , σ_ℓ , σ_r , $\tau_{t\ell}$, $\tau_{\ell r}$, τ_{rt} の 6 成分をもつが、主応力 σ

は、引用文献(1)の 1.3.6 項により、次式を満足する 3 根 σ_1 , σ_2 , σ_3 として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_\ell + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_\ell + \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{t\ell}^2 \\ & - \tau_{\ell r}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{\ell r}^2 + \sigma_\ell \cdot \tau_{rt}^2 + \sigma_r \cdot \tau_{t\ell}^2 \\ & - 2 \cdot \tau_{t\ell} \cdot \tau_{\ell r} \cdot \tau_{rt} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力を求める。

4.3.2 応力強さ

以下の 3 つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

4.4 応力強さの評価

4.4.1 一次一般膜応力強さ

各許容応力状態における評価をまとめて、表 4-3 に示す。

表 4-3 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、2.7 節に示す許容限界を満足する。

4.4.2 一次膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 4-4 に示す。

表 4-4 より、各許容応力状態の一次膜＋一次曲げ応力強さは、2.7 節に示す許容値を満足する。

4.4.3 一次＋二次応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 4-5 に示す。

表 4-5 より、各許容応力状態の一次膜＋一次曲げ応力強さは、2.7 節に示す許容限界を満足する。

5. 繰返し荷重の評価

差圧検出・ほう酸水注入管はクラス 1 配管であるため、運転状態Ⅰ及びⅡ並びに許容応力状態Ⅲ_AS 及び許容応力状態Ⅳ_AS による繰返し荷重に対し評価を実施する。

5.1 設計・建設規格 PVB-3140 についての検討

差圧検出・ほう酸水注入管について、設計・建設規格 PVB-3140 により疲労解析が不要となることを以下に示す。

なお、物性値 S_m 及び S の値は、表 2-4 による。

(1) 設計・建設規格 PVB-3140(1) (大気圧ー運転圧力ー大気圧の変動)

大気圧ー運転圧力ー大気圧の変動を生じる回数： N'

耐圧試験、最高使用圧力以下 (C02)

起動・停止 (スクラム逃がし安全弁誤作動を含む。)

(C03, C04, C13~C17, C21)

合 計

	回
	回
	回

許容繰返し回数： N

$3 \cdot S_m = 294 \text{ MPa}$ に対応する許容繰返し回数 (N) は、設計・建設規格 表 添付 4-2-2 より、

$$N = 78102 \text{ 回}$$

したがって、 $N' < N$ であり、条件を満足する。

(2) 設計・建設規格 PVB-3140(2) (起動時、停止時及び耐圧試験時等を除く供用状態 A 及び B の圧力変動)

著しい圧力変動： ΔP_1 (設計・建設規格 PVB-3140(2)a. の A_{m1} に対応)

$$\Delta P_1 = \frac{1}{3} \times \text{最高使用圧力} \times \frac{S}{S_m}$$

$$= \boxed{} \text{ MPa}$$

運転時の圧力変動が ΔP_1 を超えるものは、著しい圧力変動を生じるものとする。

著しい圧力変動を生じる回数： N'

スクラムタービントリップ (C10)

スクラムその他のスクラム (C11)

スクラム原子炉給水ポンプ停止 (C20)

合 計

	回
	回
	回

N' に対応する許容圧力変動： ΔP_2 (設計・建設規格 PVB-3140(2)b. の A_{m2} に対応)

$$\Delta P_2 = \frac{1}{3} \times \text{最高使用圧力} \times \frac{S_a}{S_m}$$

$$= \boxed{} \text{ MPa}$$

ここで、 S_a は設計・建設規格 表 添付 4-2-2 に示された $\boxed{}$ 回に対する値である。

運転時における圧力変動の全振幅： $\Delta P'$

最大（スクラム原子炉給水ポンプ停止（C20））

最小（スクラム原子炉給水ポンプ停止（C20））

差

$\Delta P' =$

MPa

MPa

MPa

したがって、 $\Delta P' < \Delta P_2$ であり条件を満足する。

- (3) 設計・建設規格 PVB-3140 (3)（起動時及び停止時の温度差）

管の内面は領域Cに接し、管の外表面は原子炉圧力容器下部鏡板と下部鏡板保温材との間に位置しており、管の外表面の熱伝達率は非常に低くなっている。

さらに、管の板厚が薄いため起動時及び停止時における管の内面及び外表面の温度は、領域Cの温度とほぼ等しくなり、管の内面と外表面における温度差は無視できる。

- (4) 設計・建設規格 PVB-3140 (4)（起動時及び停止時を除く供用状態A及びBの温度差変動）

前項(3)で述べた理由から、起動・停止を除く供用状態A及びBにおいても、管の内面と外表面における温度差変動は無視できる。

- (5) 設計・建設規格 PVB-3140 (5)（異なる材料よりなる部分の温度変動）

差圧検出・ほう酸水注入管には、縦弾性係数又は熱膨張係数の異なる材料よりなる部分は存在しない。

- (6) 設計・建設規格 PVB-3140 (6)（機械的荷重変動）

機械的荷重により生じる応力の全振幅が、荷重変動回数 10^{11} 回に対応する繰返しピーク応力強さを超えないことを確認する。

10^{11} 回に対応する繰返しピーク応力強さ： $S = 94 \text{ MPa}$

機械的荷重変動による応力の全振幅： $\Delta \sigma$

表 4-2(1)の応力評価点 P01 での一次＋二次応力に注目する。

$\Delta \sigma = \boxed{} = 33 \text{ MPa}$

したがって、 $\Delta \sigma < S$ であり、条件を満足する。

- (7) 検討結果

以上(1)から(6)より差圧検出・ほう酸水注入管は、設計・建設規格 PVB-3140 の要求をすべて満足している。

5.2 疲労解析

5.1 節に示すように、差圧検出・ほう酸水注入管は、疲労解析は不要である。

6. 引用文献

- (1) 機械工学便覧 基礎編 $\alpha 3$ (日本機械学会)

運 転 状 態	I 及 び II																			III			IV	試験状態		
運 転 条 件	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26
運 転 名 称	ボルト 締付け	耐圧試験	起動		夜間	週末	制御棒	給水加熱機能喪失		スクラム		定格	停止					ボルト	燃料	スクラム		冷却材 再循環系 仕切弁 誤作動 (冷状態)	冷却材 再循環 ポンプ 誤起動 (冷状態)	冷却材 喪失事故	耐圧試験	
		最高使用 圧力以下	昇温	タービン 起動	低出力 運転 (出力 75%)	低出力 運転 (出力 50%)	ハーターン 変更	発電機 トリップ	給水加熱 器部分 バイパス	タービン トリップ	その他の スクラム	出力 運転	タービン 停止	高温 待機	冷却	容器 満水	満水後 冷却	取外し	交換	原子炉給水ポンプ停止	逃がし 安全弁 誤作動					過大圧力

図2-1 (1) 運転条件（原子炉压力容器）

図 2-1(1) 運転条件（原子炉圧力容器）（続）

注記 *1 :
*2 :

注 1 :
注 2 :
注 3 :

注 4 :

注 5 :

注 6 :

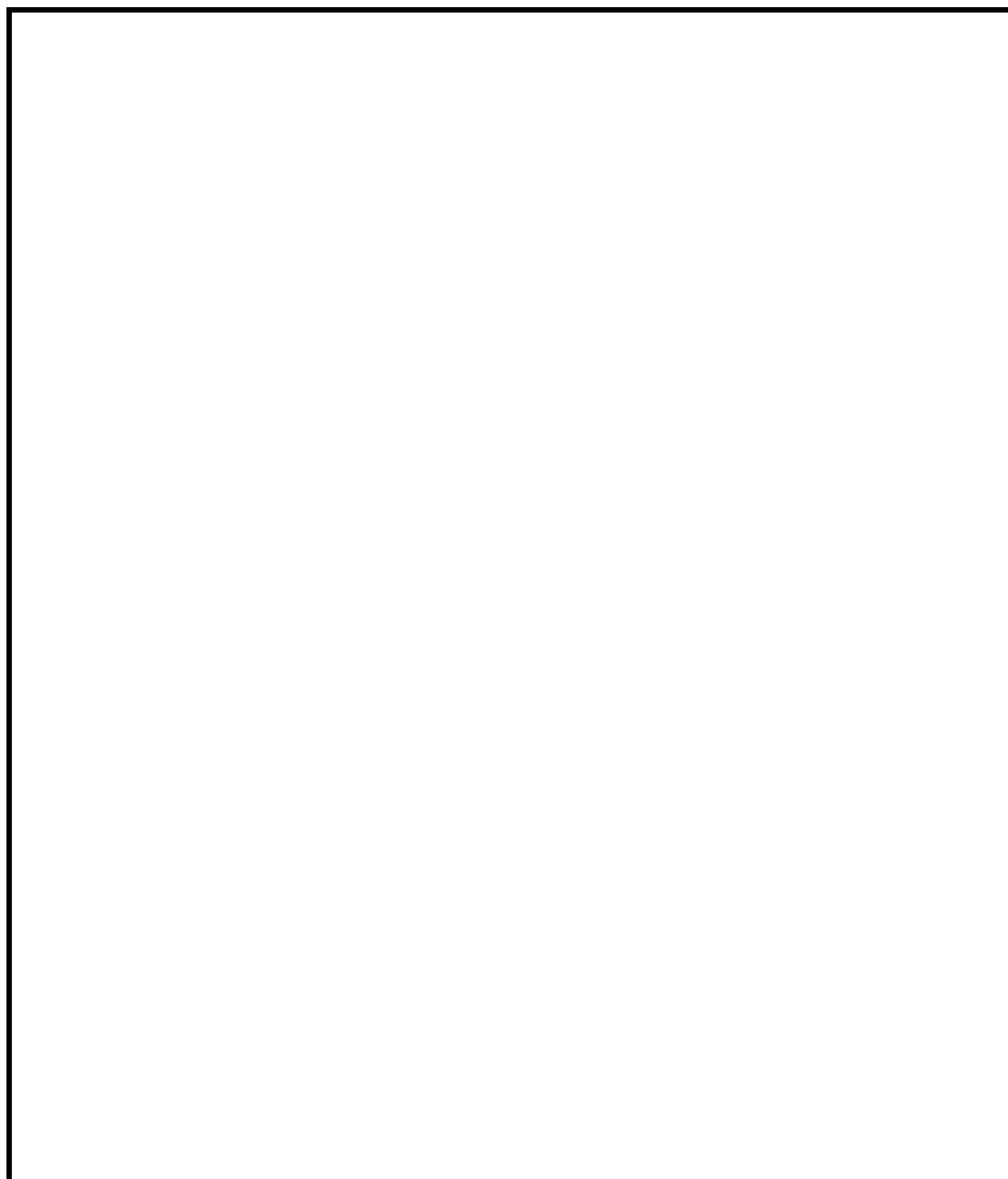


図 2-1 (2) 運転条件（原子炉压力容器内領域図）

運 転 条 件		C02		C03～C24

注記 *1 :
*2 :

注 1 :
注 2 :

図 2-1(3) 運転条件（差圧検出・ほう酸水注入管）

表 2-1 各許容応力状態における内圧

(単位：MPa)

許容応力状態	内圧
Ⅲ _A S	
Ⅳ _A S	

表 2-2 材料の分類

種類	使用材料
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304TP 相当
	SUSF304 相当
	SUS304LTP 相当
高ニッケル合金	NCF600 相当

注：以降，材料は新 J I S 相当材で記す。

表 2-3 応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (℃)	E ×10 ⁵ (MPa)	ν
SUS304TP SUSF304 SUS304LTP			
NCF600			

表 2-4 繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	S_m (MPa)	S (MPa)
SUS304LTP	98	94

注：

S_m ：運転温度 °C) に対する設計応力強さ

S：設計・建設規格 表 添付 4-2-2 の曲線 C に示された 10^{11} 回に対応する繰返しピーク応力強さ

表 2-5(1) 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の 重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 付属 構造物	差圧検出・ほう酸水 注入管	S	クラス 1 配管*	$P + D + S_d^*$	$III_A S$
					$P + D + S_s$	$IV_A S$

[記号の説明]

P : 各運転状態における圧力

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 * : 設計・建設規格 PPB 規定の適用対象であるが、PPB-1210 の規定により、クラス 1 容器の荷重の組合せ及び許容限界を適用する。

表 2-5(2) 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
原子炉 本体	原子炉 压力容器 付属 構造物	差圧検出・ほう酸水 注入管	常設耐震 ／防止 常設／緩和	重大事故等 クラス 2 配管 ^{*2}	$P_{SAL} + D + S_d^{**4}$	$V_A S^{*3}$ ($V_A S$ として $IV_A S$ の許容限 界を用いる。)
					$P_{SALL} + D + S_s^{*4}$	

[記号の説明]

P_{SAL} : 重大事故等時の状態（運転状態 V）で長期的（長期（L））に作用する圧力荷重

P_{SALL} : 重大事故等時の状態（運転状態 V）で長期的（長期（L））より更に長期的（長期（LL））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，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2 : 重大事故等クラス 2 配管であって設計基準対象施設でクラス 1 配管であることから，設計・建設規格 PPB 規定の適用対象であるが，PPB-1210 の規定により，クラス 1 容器の荷重の組合せ及び許容限界を適用する。

*3 : $V_A S$ として， $IV_A S$ 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 $V_A S$ 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 $V_A S$ 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 2-6(1) 許容限界

許容応力状態	許容限界			
	一次一般膜応力強さ	一次膜＋一次曲げ応力強さ	一次＋二次応力強さ	一次＋二次 ＋ピーク応力強さ
Ⅲ _A S	S_y と $2/3 \cdot S_u$ の小さい方 ただし、オーステナイト系 ステンレス鋼及び高ニッケ ル合金については $1.2 \cdot S_m$ とする。	左欄の α 倍の値 ^{*4}	$3 \cdot S_m$ ^{*1} S_d^* 又は S_s 地震動のみに よる応力振幅について評価 する。	^{*2, *3} S_d^* 又は S_s 地震動 のみによる疲労解析 を行い、運転状態Ⅰ 及びⅡにおける疲労 累積係数との和を 1 以下とする。
Ⅳ _A S	$2/3 \cdot S_u$ ただし、オーステナイト系 ステンレス鋼及び高ニッケ ル合金については $2/3 \cdot S_u$ と $2.4 \cdot S_m$ の小さい方。	左欄の α 倍の値 ^{*4}		

注記 *1： $3 \cdot S_m$ 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）の簡易弾塑性解析を用いる。

*2：設計・建設規格 PVB-3140(6)を満たすときは疲労解析不要。

ただし、PVB-3140(6)の「応力の全振幅」は「 S_d 又は S_s 地震動による応力の全振幅」と読み替える。

*3：運転状態Ⅰ，Ⅱにおいて疲労解析を要しない場合は、地震動のみによる疲労累積係数を 1.0 以下とする。

*4：設計・建設規格 PVB-3111 に準じる場合は、純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さい方の値（ α ）を用いる。

表 2-6(2) 許容限界

(単位：MPa)

応 力 分 類		一次一般膜応力強さ (P _m)	
許容応力状態		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
温 度 (℃)			
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304LTP	116	232
許容応力強さの算出式		1.2・S _m	Min (2.4・S _m , 2/3・S _u)

表 2-6(3) 許容限界

(単位：MPa)

応 力 分 類		一次膜＋一次曲げ応力強さ (P _L + P _b)	
供用状態 (許容応力状態)		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
温 度 (℃)			
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304LTP	161	323
許容応力強さの算出式		$\alpha \cdot 1.2 \cdot S_m$	$\alpha \cdot \text{Min} (2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$

注：α は，純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さい方の値とする。

本表には，α =1.392 の場合の値を示す。

表 2-6(4) 許容限界

(単位：MPa)

応 力 分 類		一次＋二次応力強さ ($P_L + P_b + Q$)	
許容応力状態		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
温 度 (℃)			
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304LTP	294	294
許容応力の算出式		$3 \cdot S_m$	$3 \cdot S_m$

表 2-7 荷重の組合せ

条件	荷重の組合せ	応力評価
許容応力状態Ⅲ _A S	L01+L04+L14	P_m $P_L + P_b$
	L14+L15	$P_L + P_b + Q$
許容応力状態Ⅳ _A S	L01+L04+L16	P_m $P_L + P_b$
	L16+L17	$P_L + P_b + Q$

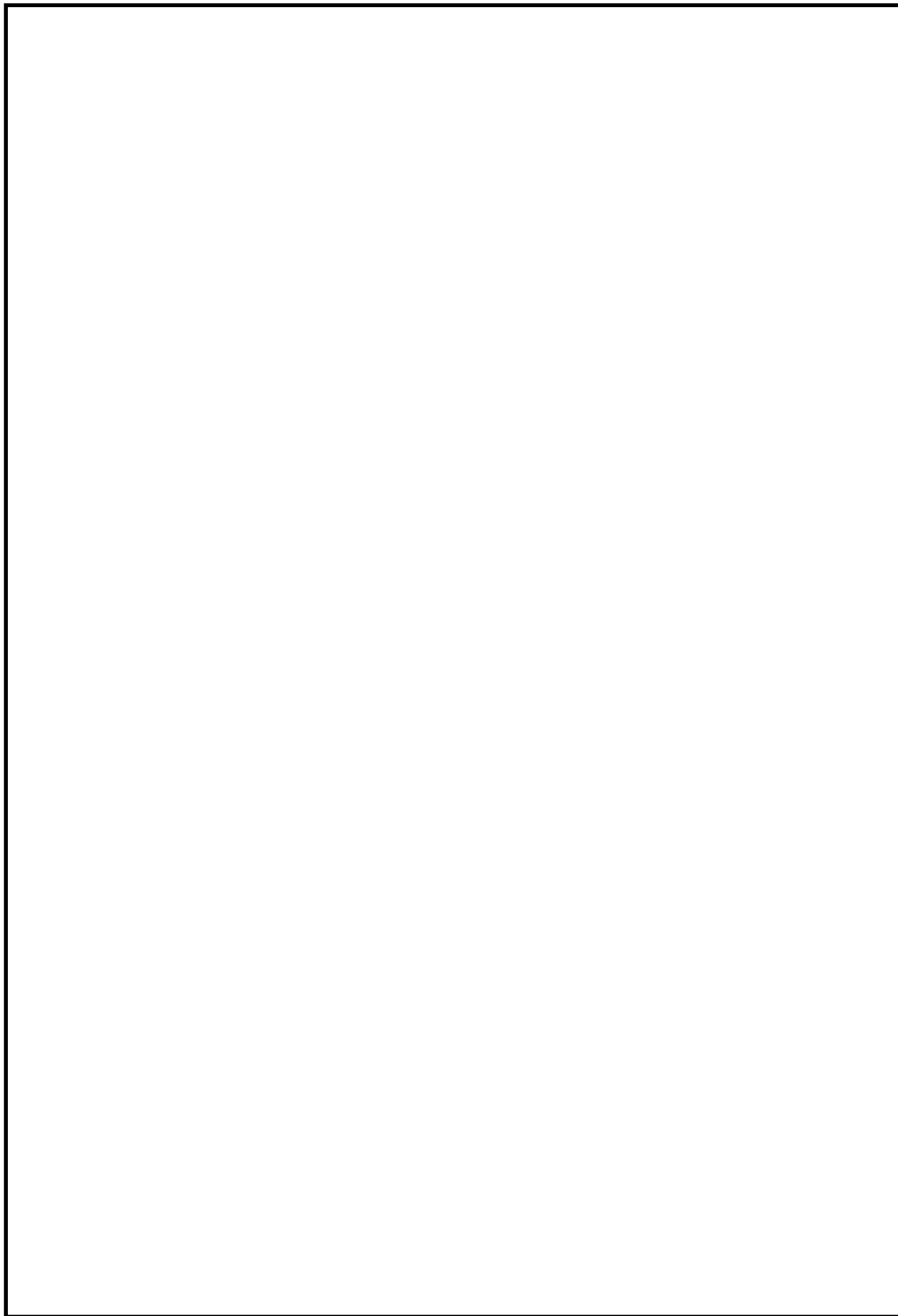


図 3-1 解析モデル

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	厚さ			
1～ 2					
2～ 3					
3～ 5					
5～ 9					
9～11					
4－12, 12～19					
1－20					
20～21					
21～24					
5－25, 25～29, 29－24					

表 3-3 外荷重

差圧検出・ほう酸水注入管外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	T (N・mm)	M (N・mm)
L04	死荷重	A				
L14	地震荷重 S_d^* (一次)	A				
L15	地震荷重 S_d^* (二次)	A				
L16	地震荷重 S_s (一次)	A				
L17	地震荷重 S_s (二次)	A				

注 1：死荷重は全ての運転時にかかるものとする。
 注 2：地震荷重（一次）とは、配管の地震時の慣性力による反力を示す。
 注 3：地震荷重（二次）とは、配管の拘束点の地震時の相対変位に伴う反力を示す。
 注 4：応力評価のための荷重の組合せ方は 2.9 節による。

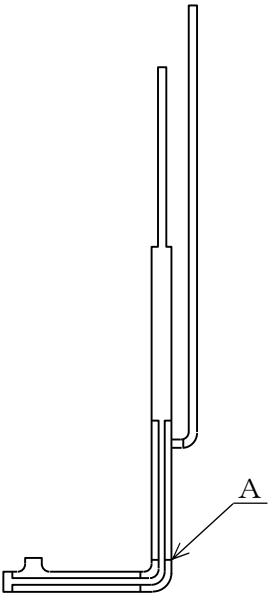
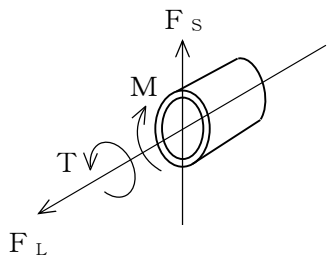


表 3-4 固有周期

次数	卓越方向	固有周期 (s)	刺激係数		
			X	Y	Z
1 次					
2 次					

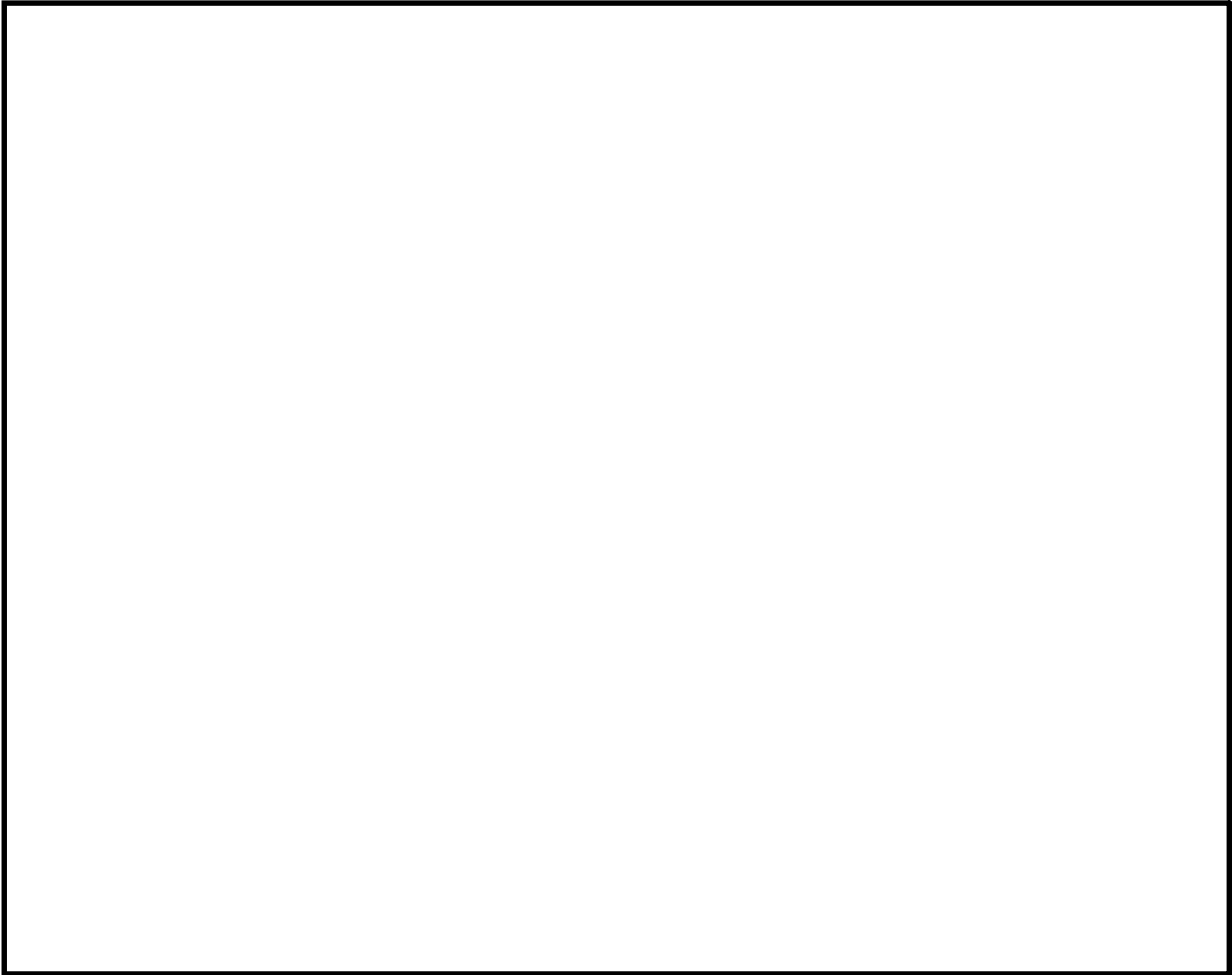


図 3-2 振動モード図（1 次 s）

表 3-5 設計用地震力

据付場所及び設置高さ (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		減衰定数 (%)	
		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	水平 方向	鉛直 方向
	0.054	 又は*1	 又は*1	 又は*2	 又は*2	1.0*	1.0*

注記 *1：弾性設計用地震動 S_d に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値

*2：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値

*3：溶接構造物に適用される減衰定数の値

表 4-1 断面性状

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

表 4-2(1) 応力の計算結果

応力評価点-P01, P02

(単位: MPa)

下記の荷重 による応力	分類	一次一般 膜応力 (P_m)	一次膜+ 一次曲げ応力 ($P_L + P_b$)	一次+二次応力 ($P_L + P_b + Q$)	
	応力 評価点	P01 P02	P01 P02	P01	P02
L01 内圧*	σ_t σ_ℓ σ_r				
L04 死荷重	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L14 地震荷重 S_d^* (一次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L15 地震荷重 S_d^* (二次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L16 地震荷重 S_s (一次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L17 地震荷重 S_s (二次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				

注記 * : 最高使用圧力による計算結果であり, 各許容応力状態での応力は比例計算により求める。

表 4-2(2) 応力の計算結果

応力評価点-P01', P02'

(単位: MPa)

下記の荷重 による応力	分類	一次一般 膜応力 (P_m)	一次膜+ 一次曲げ応力 ($P_L + P_b$)	一次+二次応力 ($P_L + P_b + Q$)	
	応力 評価点	P01' P02'	P01' P02'	P01'	P02'
L01 内圧*	σ_t σ_ℓ σ_r				
L04 死荷重	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L14 地震荷重 S_d^* (一次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L15 地震荷重 S_d^* (二次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L16 地震荷重 S_s (一次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				
L17 地震荷重 S_s (二次)	σ_ℓ $\tau_{t\ell}$				

注記 * : 最高使用圧力による計算結果であり, 各許容応力状態での応力は比例計算により求める。

表 4-3 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	41	116	41	232
P01' P02'	41	116	41	232

表 4-4 一次膜＋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	41	161	41	323
P01' P02'	41	161	41	323

表 4-5 一次＋二次応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

分類	一次＋二次応力差最大範囲 ($P_L + P_b + Q$)		
応力 評価点	$S_n^{\#1*1}$	$S_n^{\#2*2}$	許容値 $3 \cdot S_m$
P01	25	34	294
P01'	25	34	294
P02	25	34	294
P02'	25	34	294

注記 *1： $S_n^{\#1}$ は許容応力状態Ⅲ_A S による一次＋二次応力差の最大範囲を示す。

*2： $S_n^{\#2}$ は許容応力状態Ⅳ_A S による一次＋二次応力差の最大範囲を示す。

V-2-3-4-3-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針

目次

1. 概要	1
1.1 一般事項	1
1.2 構造の説明	1
1.3 適用基準	2
2. 記号の説明	4
3. 計算条件	5
3.1 評価対象箇所	5
3.2 形状及び寸法	6
3.3 物性値	6
3.4 荷重の組合せ及び許容応力状態（供用状態）	6
3.5 許容限界	6
4. 荷重条件	7
4.1 設計条件	7
4.2 運転条件	7
4.2.1 運転状態Ⅰ及びⅡ	7
4.2.2 運転状態Ⅲ	8
4.2.3 運転状態Ⅳ	8
4.3 重大事故等時の条件	8
4.4 外荷重の条件	8
4.4.1 死荷重	8
4.4.2 機械的荷重	8
4.4.3 地震荷重	8
4.5 荷重の組合せと応力評価	9
5. 応力解析の手順	10
5.1 計算に使用する解析コード	10
5.2 荷重の選定	10
5.3 応力計算と応力の分類	10
5.3.1 応力計算の方法	10
5.3.2 応力の分類	10
5.4 応力の評価	10
5.4.1 主応力	10
5.4.2 応力強さ	11
5.4.3 一次応力強さ	11
5.5 特別な評価	11
5.5.1 純せん断応力の評価	11
5.6 極限解析による評価	11

5.6.1 極限解析の方法	11
6. 評価結果の添付	12
6.1 応力評価結果	12
7. 引用文献	13
添付 1 溶接部の継手効率	41

図表目次

図 3-1	全体断面図	14
図 4-1	原子炉圧力容器内部構造物の各運転状態における差圧	15
図 4-2	原子炉圧力容器内部構造物の運転条件	16
図 5-1	応力解析の手順	26
表 1-1	原子炉圧力容器内部構造物の構造計画	3
表 3-1	材料の分類	27
表 3-2	応力計算に使用する材料の物性値	28
表 3-3	極限解析による評価に使用する材料の物性値	29
表 3-4	荷重の組合せ及び許容応力状態（供用状態）	30
表 3-5	原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容限界	32
表 4-1	外荷重	36
表 4-2	荷重の組合せ	39
表 5-1	応力の分類	40

1. 概要

1.1 一般事項

本書は、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、原子炉圧力容器内部構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

原子炉圧力容器内部構造物は、設計基準対象施設においては耐震Sクラスに分類される。

下記の機器は、重大事故等対処設備に該当し、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類され、その他の機器は重大事故等対処設備に該当しない。

以下、原子炉圧力容器内部構造物の耐震評価及び重大事故等時における強度評価について記載する。

【常設耐震重要重大事故防止設備】

- ・ジェットポンプ
- ・高圧炉心スプレイスパーチャ
- ・高圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）

【常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備】

- ・低圧炉心スプレイスパーチャ
- ・残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）
- ・低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）
- ・差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）

注1：本書に記載していない特別な内容がある場合は、各計算書に示す。

注2：図表は、原則として巻末に示す。

1.2 構造の説明

原子炉圧力容器内部構造物の構造計画を表1-1に示す。

なお、原子炉圧力容器内部構造物は、下記の機器により構成される。

- (1) 蒸気乾燥器
- (2) 気水分離器及びスタンドパイプ
- (3) シュラウドヘッド
- (4) ジェットポンプ
- (5) 給水スパーチャ
- (6) 高圧及び低圧炉心スプレイスパーチャ
- (7) 残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）
- (8) 高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）
- (9) 差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）
- (10) 中性子計測案内管

1.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 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。）
- (2) 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：本書及び各計算書において，設計・建設規格の条項は「設計・建設規格 ○○○-△△△△(◇)a. (a)」として示す。

表 1-1 原子炉圧力容器内部構造物の構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
蒸気乾燥器は原子炉圧力容器内部のブラケットにより支持される。気水分離器及びスタンドパイプはシュラウドヘッドに溶接により接続され、シュラウドヘッドは炉心シュラウド上にシュラウドヘッドボルトによりフランジ接続される。ジェットポンプは原子炉圧力容器ノズルから接続されシュラウドサポートプレート及び原子炉圧力容器により支持される。給水スパージャは原子炉圧力容器ノズルから接続され原子炉圧力容器内部のブラケットにより支持される。高圧及び低圧炉心スプレイスパージャは炉心シュラウドにより支持される。残留熱除去系配管は、原子炉圧力容器ノズルから接続され炉心シュラウドにより支持されている。高圧及び低圧炉心スプレイ配管は原子炉圧力容器ノズルから接続され原子炉圧力容器内部のブラケット及び炉心シュラウドにより支持されている。差圧検出・ほう酸水注入管は原子炉圧力容器ノズルから接続され、炉心シュラウド及びシュラウドサポートに設置されたサポートにより支持される。中性子計測案内管は中性子計測ハウジングに接続され、炉心支持板により支持される。	原子炉圧力容器内部構造物は蒸気乾燥器、気水分離器及びスタンドパイプ、シュラウドヘッド、ジェットポンプ、給水スパージャ、高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ、残留熱除去系配管、高圧及び低圧炉心スプレイ配管、差圧検出・ほう酸水注入管、中性子計測案内管により構成され、蒸気の湿分除去、炉心への冷却材の供給、炉内への均一な給水、炉心への冷却材のスプレイ及び注水（事故時）、炉心へのほう酸水の注入（事故時）、炉心差圧の計測、中性子計測装置の案内を行う構造となっている。	

2. 記号の説明

本書及び各計算書において、以下の記号を使用する。ただし、本書添付及び各計算書中に別途記載ある場合は、この限りでない。

なお、各計算書における記号の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
E	縦弾性係数	MPa
F_L	軸力	N
F_S	せん断力	N
H	水平力	N
M	モーメント	N・mm
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
S_d	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力	—
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	—
S_{12}	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
T	ねじりモーメント	N・mm
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	—
ν	ポアソン比	—
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
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
$\tau_{\ell r}$	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\ell}$	せん断応力	MPa
III_{AS}	設計・建設規格の供用状態C相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	—
IV_{AS}	設計・建設規格の供用状態D相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	—
V_{AS}	運転状態V相当の応力評価を行う許容応力を基本として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態	—

3. 計算条件

3.1 評価対象箇所

原子炉圧力容器内部構造物の各計算書における評価対象箇所は、次のとおりである。

(表 1-1, 図 3-1 参照)

機器名称		評価対象		
		耐震性についての計算書 (許容応力状態に対する評価)		〔 応力計算書 供用状態E に対する評価 〕
		Ⅲ _A S Ⅳ _A S	V _A S	
(1)	蒸気乾燥器	○	×*	×*
(2)	気水分離器及びスタンドパイプ	○	×*	×*
(3)	シュラウドヘッド	○	×*	×*
(4)	ジェットポンプ	○	○	○
(5)	給水スパージャ	○	×*	×*
(6)	高圧及び低圧炉心スプレイ スパージャ	○	○	○
(7)	残留熱除去系配管 (原子炉圧力容器内部)	○	○	○
(8)	高圧及び低圧炉心スプレイ配管 (原子炉圧力容器内部)	○	○	○
(9)	差圧検出・ほう酸水注入管 (原子炉圧力容器内部)	○	○	○
(10)	中性子計測案内管	○	×*	×*

注 : 「○」は評価対象, 「×」は評価対象外を示す。

注記 * : 設計基準対象施設としてのみ申請する設備

3.2 形状及び寸法

各部の形状及び寸法は、各計算書に示す。

3.3 物性値

応力計算及び極限解析による評価に使用する材料の物性値は、以下のとおりである。

- (1) 縦弾性係数 E は、設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び表 2 に定められたものによる。
- (2) 材料は、表 3-1 に従って分類する。
主な温度における材料の物性値を表 3-2 に示す。
極限解析による評価に使用する物性値を表 3-3 に示す。

3.4 荷重の組合せ及び許容応力状態（供用状態）

原子炉压力容器内部構造物の評価に用いる荷重の組合せ及び許容応力状態（供用状態）は、表 3-4 に示すとおりである。また、各許容応力状態（供用状態）で考慮する荷重は、4 章に示すとおりである。

なお、本書及び各計算書において、設計・建設規格 GNR-2120(1) の規定による最高使用圧力（供用状態 A を定義する運転状態において機器が受ける最高の圧力以上の圧力であって、設計上定めるものをいう。）を「設計差圧」と呼ぶ。（図 4-1 参照）

3.5 許容限界

- (1) 設計応力強さ S_m 、設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ 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) 許容応力状態 III_A S 及び許容応力状態 IV_A S の一次応力強さの評価には、各運転状態における流体の最高温度（運転状態 I 及び II °C）に対する許容限界を用いる。供用状態 E* の一次応力強さの評価には、運転状態 V における評価温度条件 °C）に対する許容限界を用いる。
- (3) 原子炉压力容器内部構造物の各運転状態の応力評価に用いる許容限界は、表 3-5 に示すとおりである。
- (4) 溶接部の許容限界は、表 3-5 に定める許容限界に継手効率を乗じたものである。
- (5) 溶接部の継手効率は、継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により、設計・建設規格 CSS-3150 に従って定める。
溶接部の継手効率を添付 1 に示す。

注記 *：供用状態 E とは、重大事故等時の状態（運転状態 V）であり、供用状態 D を超える状態である。許容限界の算出式は供用状態 D と同様とする。

4. 荷重条件

原子炉压力容器内部構造物は、以下の荷重条件に耐えるように設計する。

各機器の応力解析には、本章に示す荷重を考慮する。

4.1 設計条件

原子炉压力容器の最高使用圧力 : 8.62 MPa

設計差圧 : 図 4-1 に示す。

最高使用温度 : 302 °C

4.2 運転条件

運転条件及び記号は、次のとおりである。また、これらの記号を解析及び評価に用いる場合において、同一事象内に複数の解析時点がある場合は記号に小番号を付して使用する。

[例 C03-01, C03-02]

なお、各計算書においては、{ }内の名称を用いる。

計算書では以下に示す運転条件のうち、一次応力強さの評価については、各供用状態（許容応力状態）を定義する各運転状態のうち、最も厳しい運転条件について選定する。

4.2.1 運転状態Ⅰ及びⅡ

(1) ボルト締付け	{ボルト締付け}	[C01]
(2) 耐圧試験（最高使用圧力以下）	{耐圧試験最高使用圧力以下}	[C02]
(3) 起動（昇温）	{起動昇温}	[C03]
(4) 起動（タービン起動）	{起動タービン起動}	[C04]
(5) 夜間低出力運転（出力 75 %）	{夜間低出力運転出力 75 %}	[C05]
(6) 週末低出力運転（出力 50 %）	{週末低出力運転出力 50 %}	[C06]
(7) 制御棒パターン変更	{制御棒パターン変更}	[C07]
(8) 給水加熱機能喪失（発電機トリップ）	{発電機トリップ}	[C08]
(9) 給水加熱機能喪失（給水加熱器部分バイパス）	{給水加熱器部分バイパス}	[C09]
(10) スクラム（タービントリップ）	{スクラムタービントリップ}	[C10]
(11) スクラム（その他のスクラム）	{スクラムその他のスクラム}	[C11]
(12) 定格出力運転	{定格出力運転}	[C12]
(13) 停止（タービン停止）	{停止タービン停止}	[C13]
(14) 停止（高温待機）	{停止高温待機}	[C14]
(15) 停止（冷却）	{停止冷却}	[C15]
(16) 停止（容器満水）	{停止容器満水}	[C16]
(17) 停止（満水後冷却）	{停止満水後冷却}	[C17]
(18) ボルト取外し	{ボルト取外し}	[C18]
(19) 燃料交換	{燃料交換}	[C19]
(20) スクラム（原子炉給水ポンプ停止）	{スクラム原子炉給水ポンプ停止}	[C20]

(21) スクラム(逃がし安全弁誤作動) {スクラム逃がし安全弁誤作動} [C21]

4.2.2 運転状態Ⅲ

(1) スクラム(過大圧力) {スクラム過大圧力} [C22]

(2) 冷却材再循環系仕切弁誤作動(冷状態) {冷再循環系仕切弁誤作動} [C23]

(3) 冷却材再循環ポンプ誤起動(冷状態) {冷再循環ポンプ誤起動} [C24]

4.2.3 運転状態Ⅳ

(1) 冷却材喪失事故 {冷却材喪失事故} [C25]

各運転条件における原子炉压力容器内部構造物の周囲の流体の温度、圧力の変化及びその繰り返し回数を図 4-2 に示す。

4.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件は以下のとおりである。

温度条件 :

圧力条件 :

差圧条件 :

4.4 外荷重の条件

4.4.1 死荷重

荷重作用点において機器の自重により生じる荷重とし表 4-1 に示す。

なお、表 4-1 に記載のない機器の荷重については各計算書において示す。

4.4.2 機械的荷重

原子炉压力容器内部構造物に作用する死荷重及び地震荷重以外の機械的荷重には流体荷重があるが、重大事故後の状態で変化することはない。

なお、流体荷重がある機器の荷重については各計算書に示す。

4.4.3 地震荷重

原子炉压力容器内部構造物に加わる地震荷重については、添付資料「V-2-3-2 炉心、原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に基づくものとし、表 4-1 に地震荷重を示す。

なお、表 4-1 に記載のない機器の荷重については各計算書において示す。

4.5 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 4-2 に示す。表 4-2 及び各計算書において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

なお、荷重の組合せについては各機器ごとに適切に組み合わせる。

荷重	記号
(1) 原子炉圧力容器の内圧	[L01]
(2) 差圧	[L02]
(3) 死荷重（機器の自重により生じる荷重）	[L04]
(4) 活荷重（流体反力）	[L08]
(5) 配管又は機器の地震時の慣性力による地震荷重 S_d^* （一次荷重）	[L14]
(6) 配管又は機器の地震時の慣性力による地震荷重 S_s （一次荷重）	[L16]

注：L08は、L04として考慮する。

5. 応力解析の手順

応力解析の手順について述べる。

解析手順の概要を図 5-1 に示す。本図において、差圧による応力とその他の荷重による応力の計算で考慮する荷重を「機械荷重」という。

5.1 計算に使用する解析コード

解析コードは「ABAQUS」及び「MSC NASTRAN」を用いる。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」及び「V-5-5計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS」に示す。

5.2 荷重の選定

応力解析においては、4章に示した荷重条件のうちから、その部分に作用する荷重を選定して計算を行う。

5.3 応力計算と応力の分類

5.3.1 応力計算の方法

- (1) 応力計算は、5.2 項にて選定した荷重の種類ごとに計算モデルを作成して行う。
- (2) 解析コードを用いる場合の解析する箇所の形状は、次の方針に従って解析モデルを作成する。
 - a. 形状及び材料の不連続を考慮して、応力計算のためのメッシュ分割を行う。
 - b. 溶接部は、溶接金属に相当する鋼材と同じ物性値及び機械的性質を用いる。
- (3) モデル図と使用する境界条件（拘束条件）は、各計算書に示す。

5.3.2 応力の分類

応力の計算結果は、表 5-1 の応力の分類方法に従って分類し、計算を行う。

5.4 応力の評価

5.4.1 主応力

5.3 節で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に σ_t , σ_ℓ , σ_r , $\tau_{t\ell}$, $\tau_{\ell r}$, τ_{rt} の 6 成分をもつが、主応力 σ

は、引用文献(1)の 1・3・6 項により、次式を満足する 3 根 σ_1 , σ_2 , σ_3 として計算する。

$$\sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_\ell + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_\ell + \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{t\ell}^2 - \tau_{\ell r}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{\ell r}^2 + \sigma_\ell \cdot \tau_{rt}^2 + \sigma_r \cdot \tau_{t\ell}^2 - 2 \cdot \tau_{t\ell} \cdot \tau_{\ell r} \cdot \tau_{rt} = 0$$

上式により主応力を求める。

5.4.2 応力強さ

以下の 3 つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

5.4.3 一次応力強さ

許容応力状態Ⅲ_AS, 許容応力状態Ⅳ_AS 及び供用状態E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, 3.5 節に示す許容限界を満足することを示す。

5.5 特別な評価

5.5.1 純せん断応力の評価

純せん断荷重を受ける部分は, 設計・建設規格 CSS-3114 により評価する。解析箇所を以下に示す。許容限界は, 表 3-5(3)に示し, 評価方法は, 計算書に示す。

- (1) 蒸気乾燥器の耐震サポート

5.6 極限解析による評価

気水分離器及びスタンドパイプについては, 許容応力状態Ⅲ_AS 及び許容応力状態Ⅳ_AS に対して, 設計・建設規格 CSS-3160 に従い極限解析による評価を行う。

5.6.1 極限解析の方法

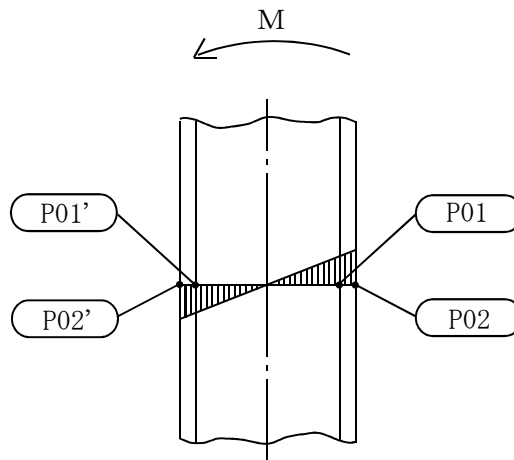
- (1) 極限解析は, 有限要素法による弾塑性解析を用いて行う。
- (2) 解析する箇所の形状は, 次の方針に従って解析モデルを作成する。
 - a. 形状及び材料の不連続を考慮して, 弾塑性解析のためのメッシュ分割を行う。
 - b. 溶接部は, 溶接金属に相当する鋼材と同じ物性値及び機械的性質を用いる。
- (3) モデル図と使用する境界条件(拘束条件)は, 計算書に示す。

6. 評価結果の添付

応力評価点番号は，計算書ごとに記号 P01 からの連番とする。奇数番号を内面の点，偶数番号を外面の点として，各計算書の形状・寸法・材料・応力評価点を示す図において定義する。

なお，軸対称モデルにおいて，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。



6.1 応力評価結果

- (1) 次の応力評価結果は，全応力評価点（面）について添付する。
 - a. 一次一般膜応力強さの評価のまとめ
 - b. 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ
- (2) 次の特別な評価は，対象となるすべての部位について評価し，この結果を記載する。
 - a. 純せん断応力
- (3) 極限解析による評価は，対象となるすべての部位について，結果を記載する。

7. 引用文献

文献番号は，本書及び各計算書において共通である。

- (1) 機械工学便覧 基礎編 $\alpha 3$ (日本機械学会)
- (2) Journal of Engineering for Industry, 「Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates with Square and Triangular Penetration Patterns」 (T. SLOT, W. J. O'DONNELL)

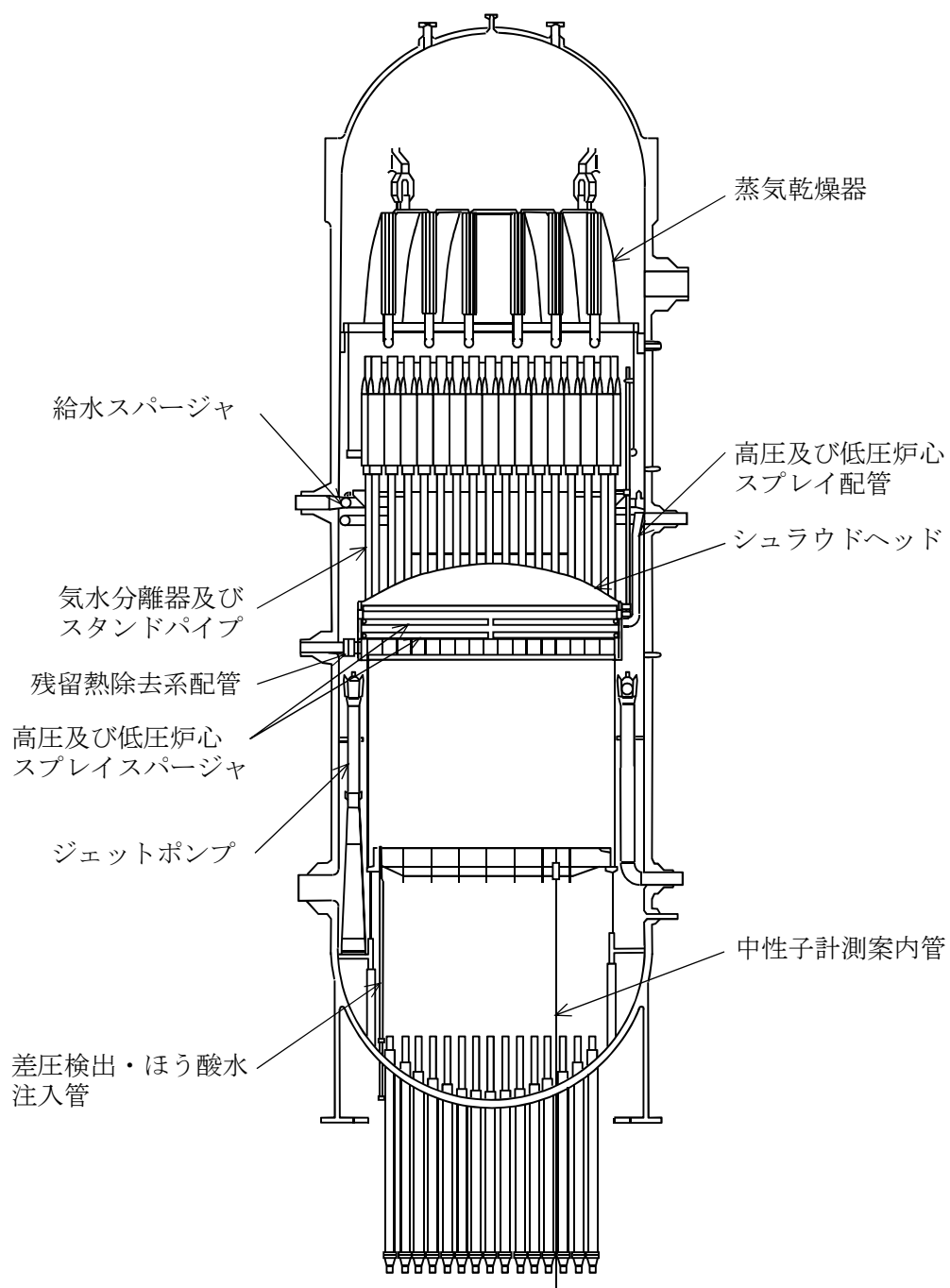
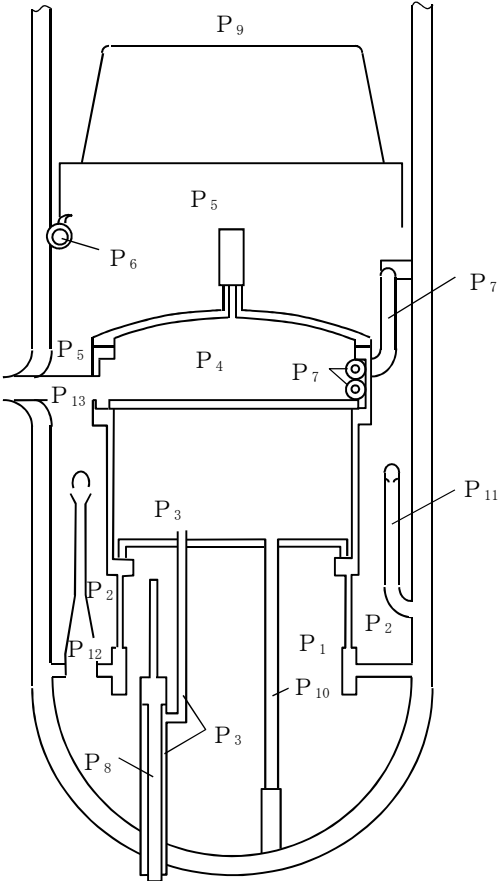


図 3-1 全体断面図



(単位：MPa)

部位		設計条件 (設計差圧)	運転状態 I , II	運転状態 III	運転状態 IV, V
蒸気乾燥器	$P_{59} = P_5 - P_9$				
気水分離器及び スタンドパイプ	$P_{45} = P_4 - P_5$				
シュラウドヘッド	$P_{45} = P_4 - P_5$				
ジェットポンプ	$P_{112} = P_{11} - P_2$				
	$P_{122} = P_{12} - P_2$				
給水スパージャ	$P_{65} = P_6 - P_5$				
高圧及び低圧炉心 スプレイスパージャ	$P_{74} = P_7 - P_4$				
残留熱除去系配管	$P_{135} = P_{13} - P_5$				
高圧及び低圧炉心 スプレイ配管	$P_{75} = P_7 - P_5$				
差圧検出・ほう酸水 注入管	$P_{13} = P_1 - P_3$				
	$P_{81} = P_8 - P_1$				
	$P_{83} = P_8 - P_3$				
中性子計測案内管	$P_{110} = P_1 - P_{10}$				

図 4-1 原子炉圧力容器内部構造物の各運転状態における差圧

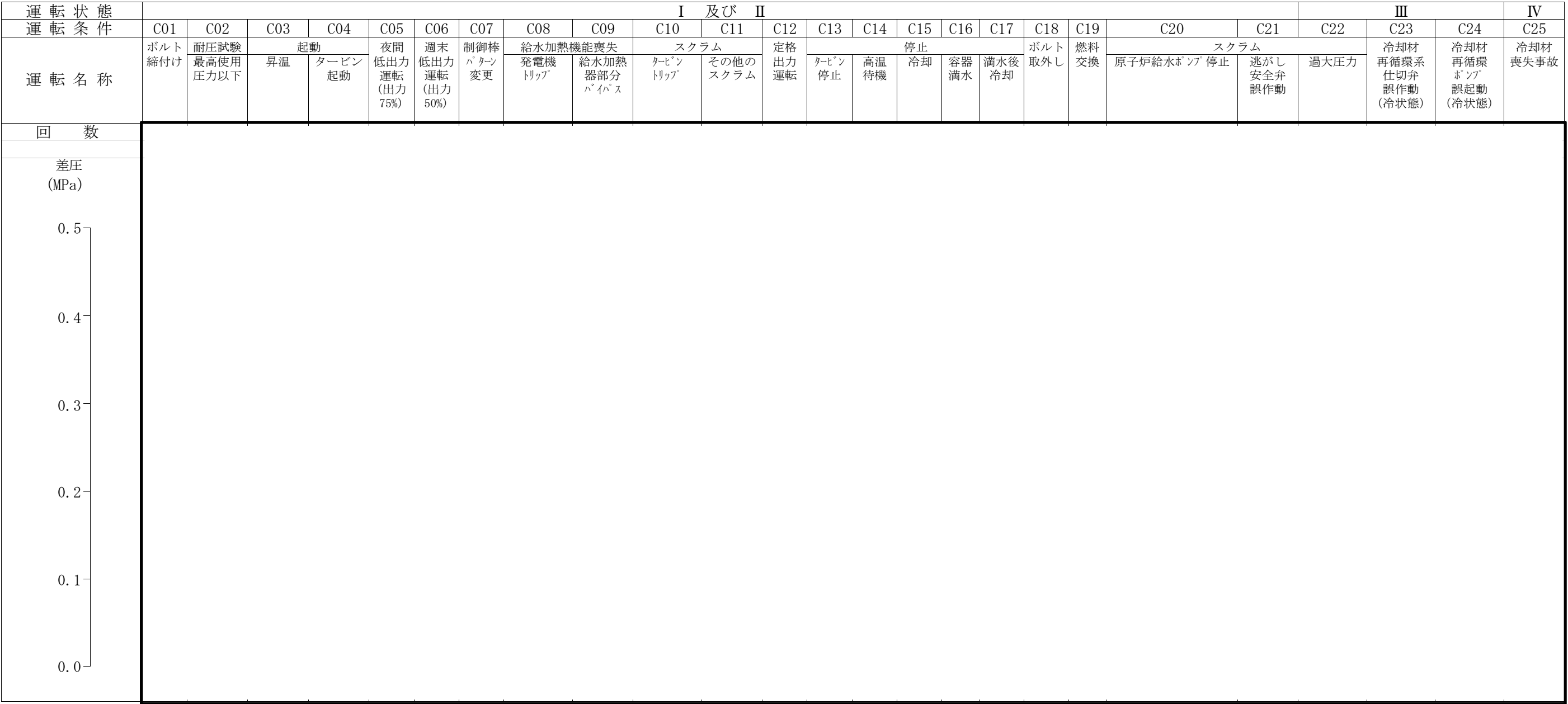


図4－2(1) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件

図 4-2(2) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件 (続)

注記 *1 :

*2 :

注 1 :

注 2 :

注 3 :

注 4 :

注 5 :

注 6 :

注 7 :

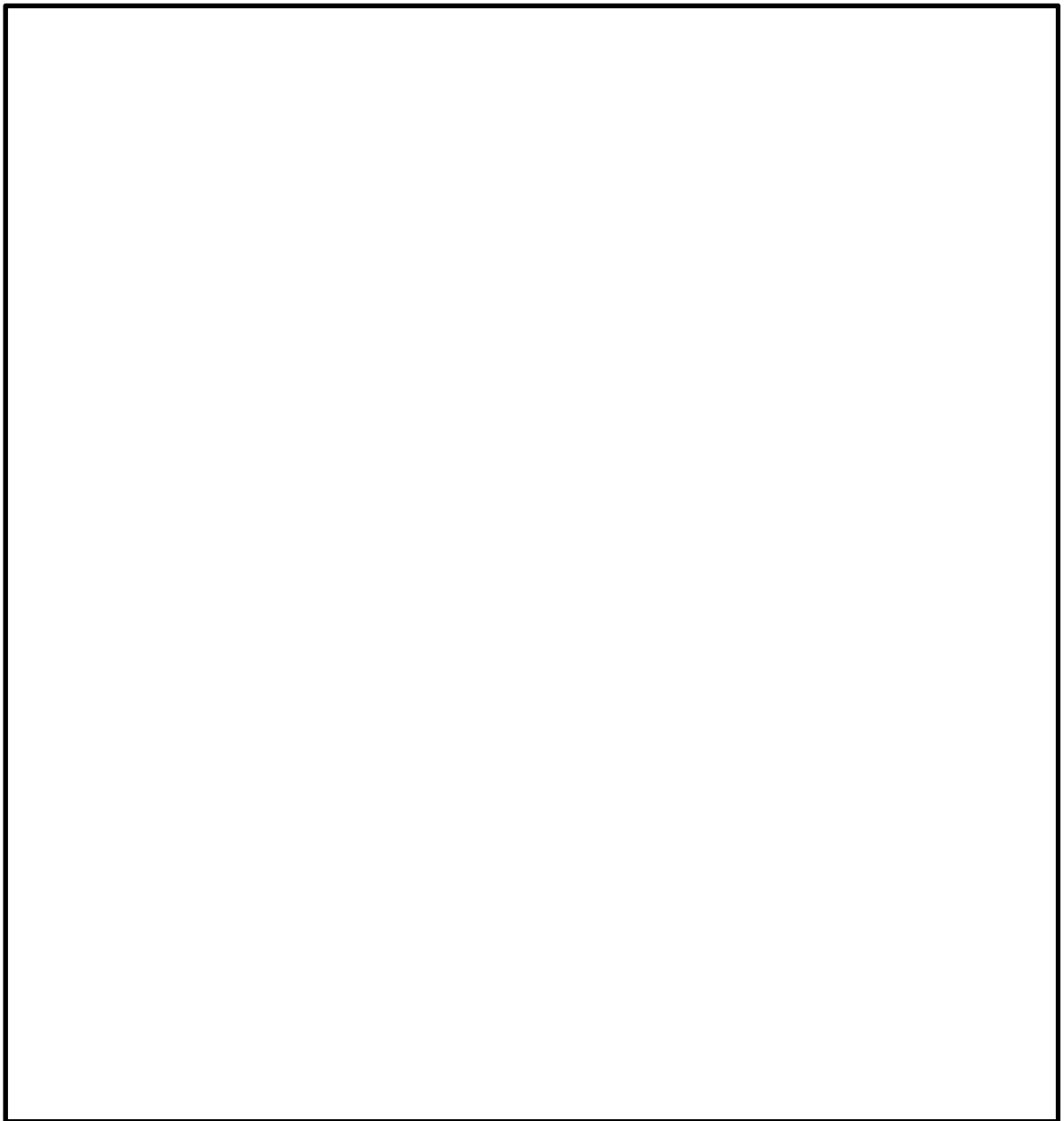


図 4-2(3) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件
(原子炉圧力容器内領域図)

20

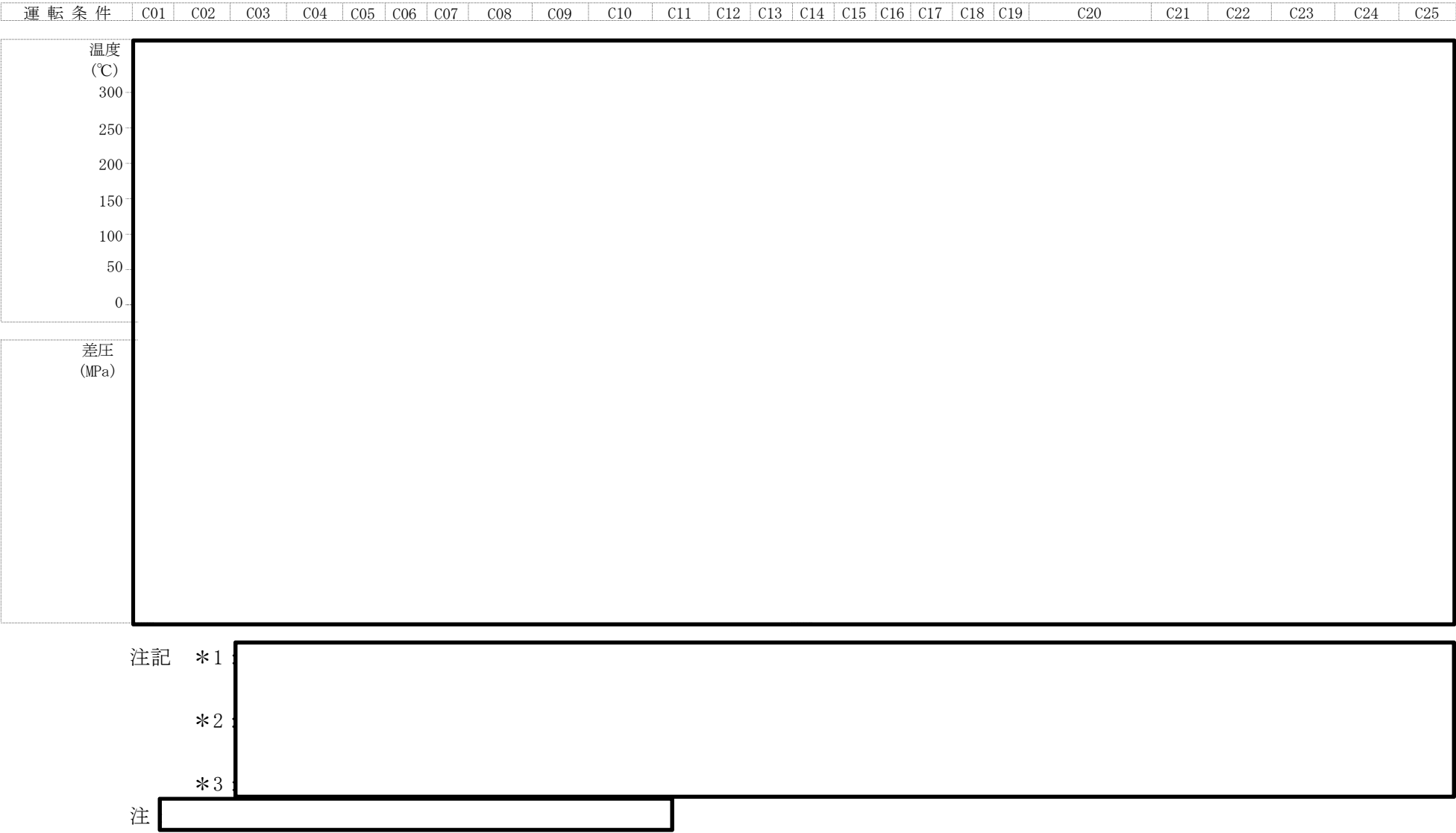
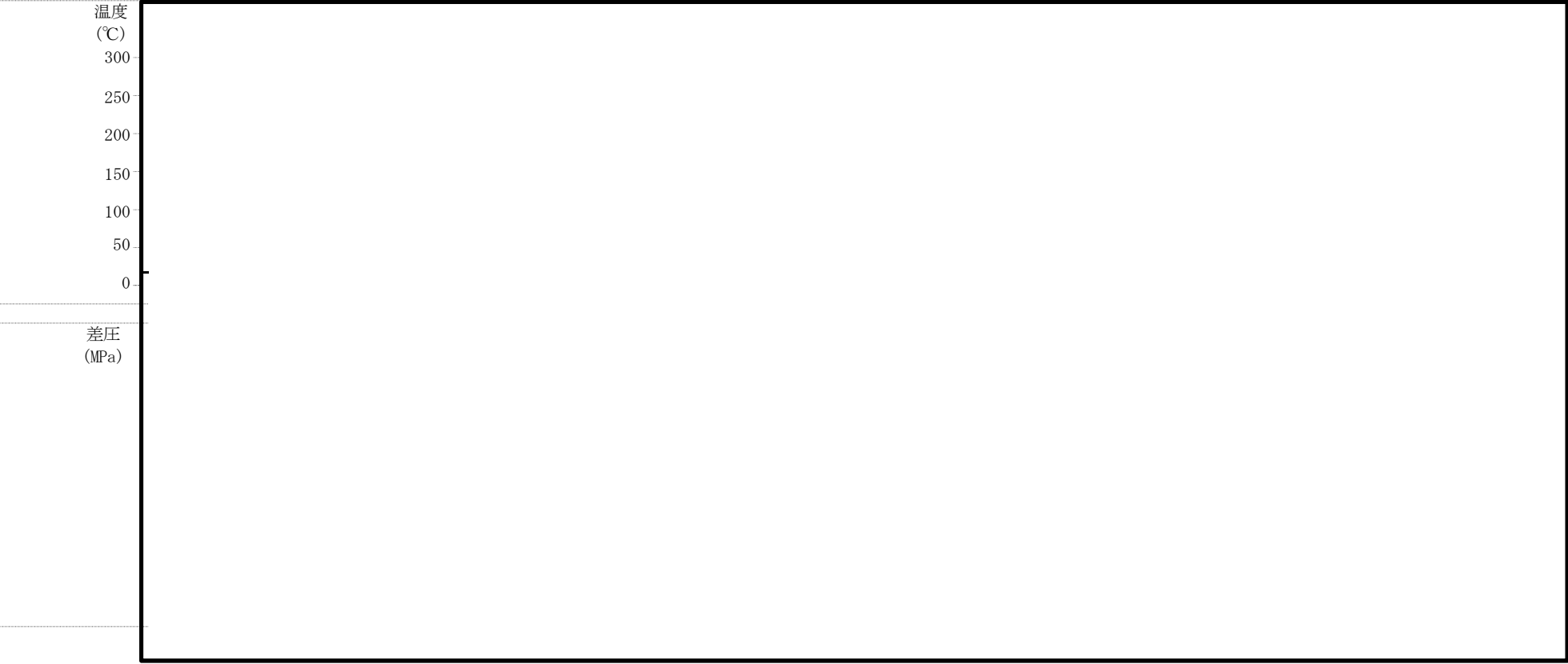


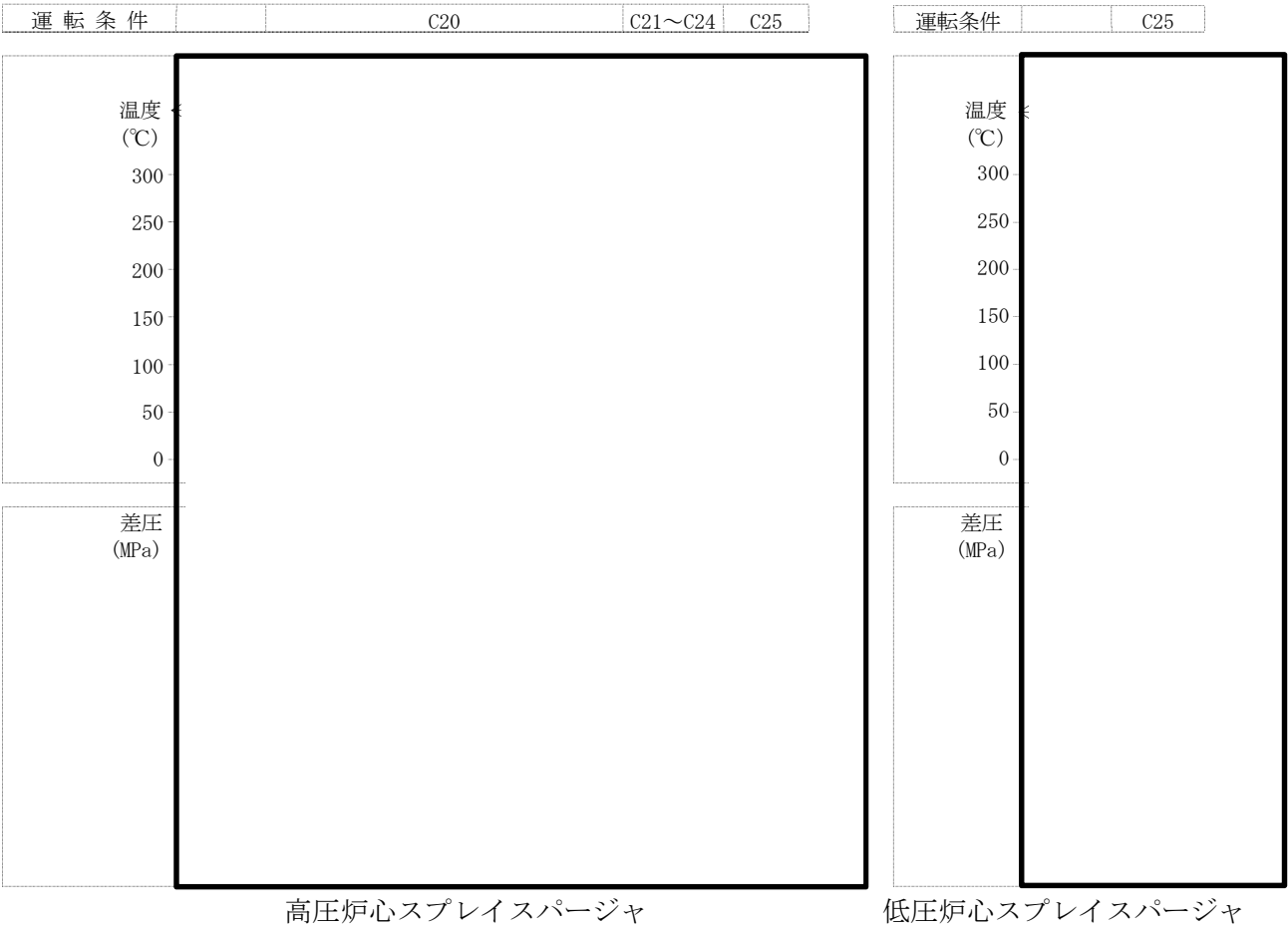
図 4-2(4) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（ジェットポンプ）

運 転 条 件	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25



注記 *1 :
*2
*3

図 4-2(5) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（給水スパージャ）



注記

*1

*2

注 1

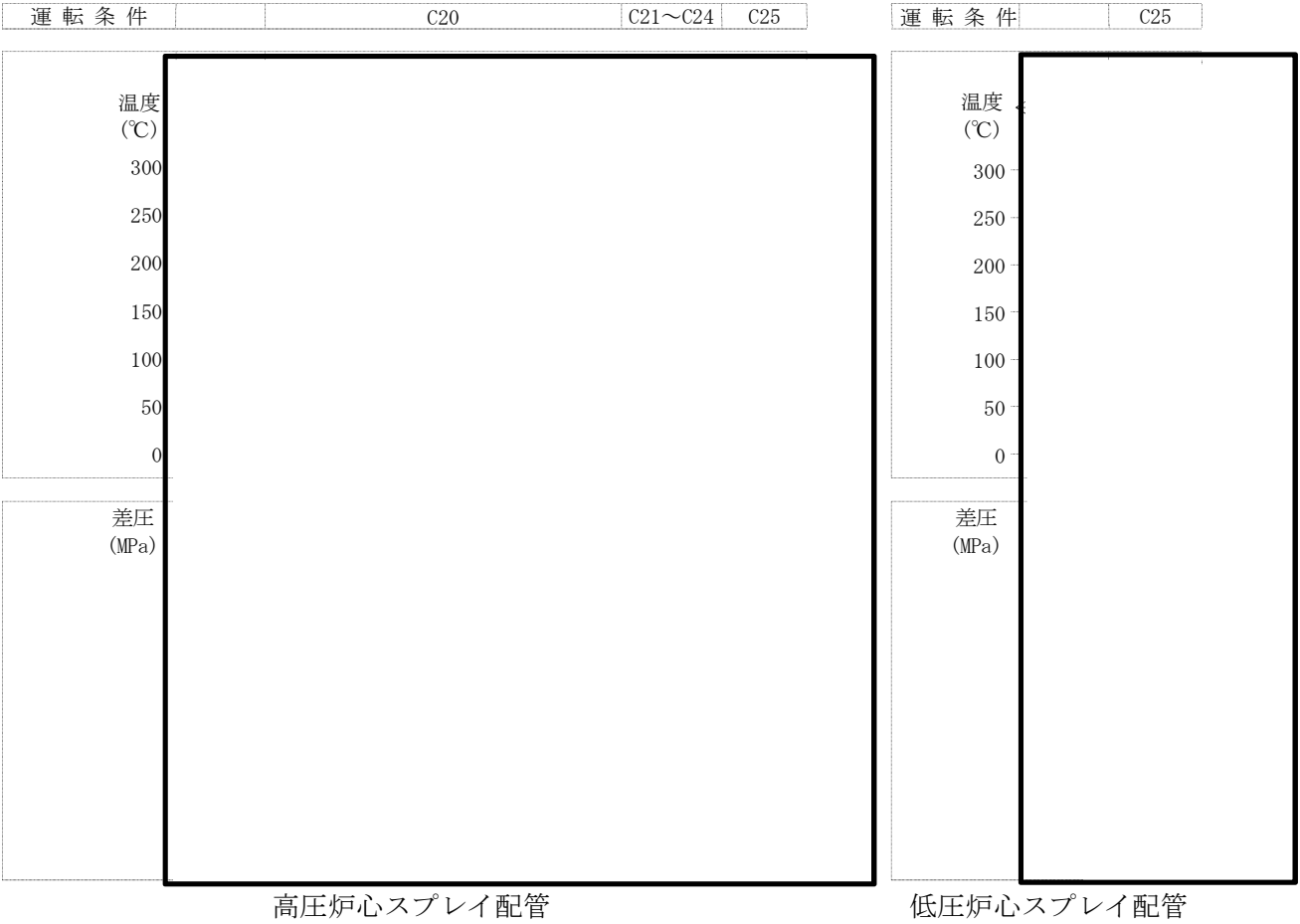
注 2

図 4-2(6) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（高圧及び低圧炉心スプレイスパーチャ）

運 転 条 件	C25

注記	
注 1	
注 2	

図 4-2(7) 原子炉压力容器内部構造物の運転条件（残留熱除去系配管）



注記

注 1

注 2

図 4-2(8) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（高圧及び低圧炉心スプレイ配管）

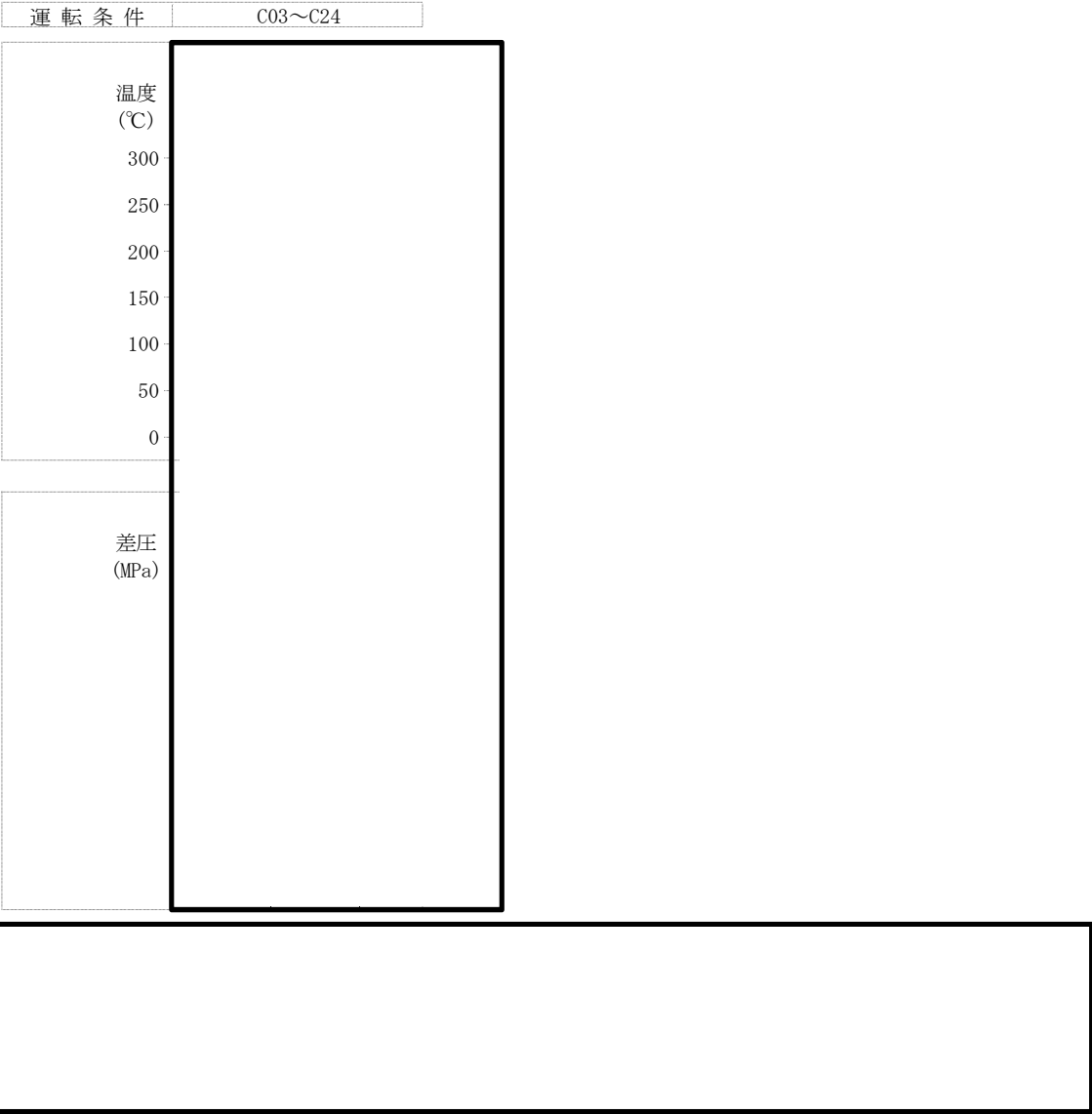


図 4-2(9) 原子炉圧力容器内部構造物の運転条件（差圧検出・ほう酸水注入管）

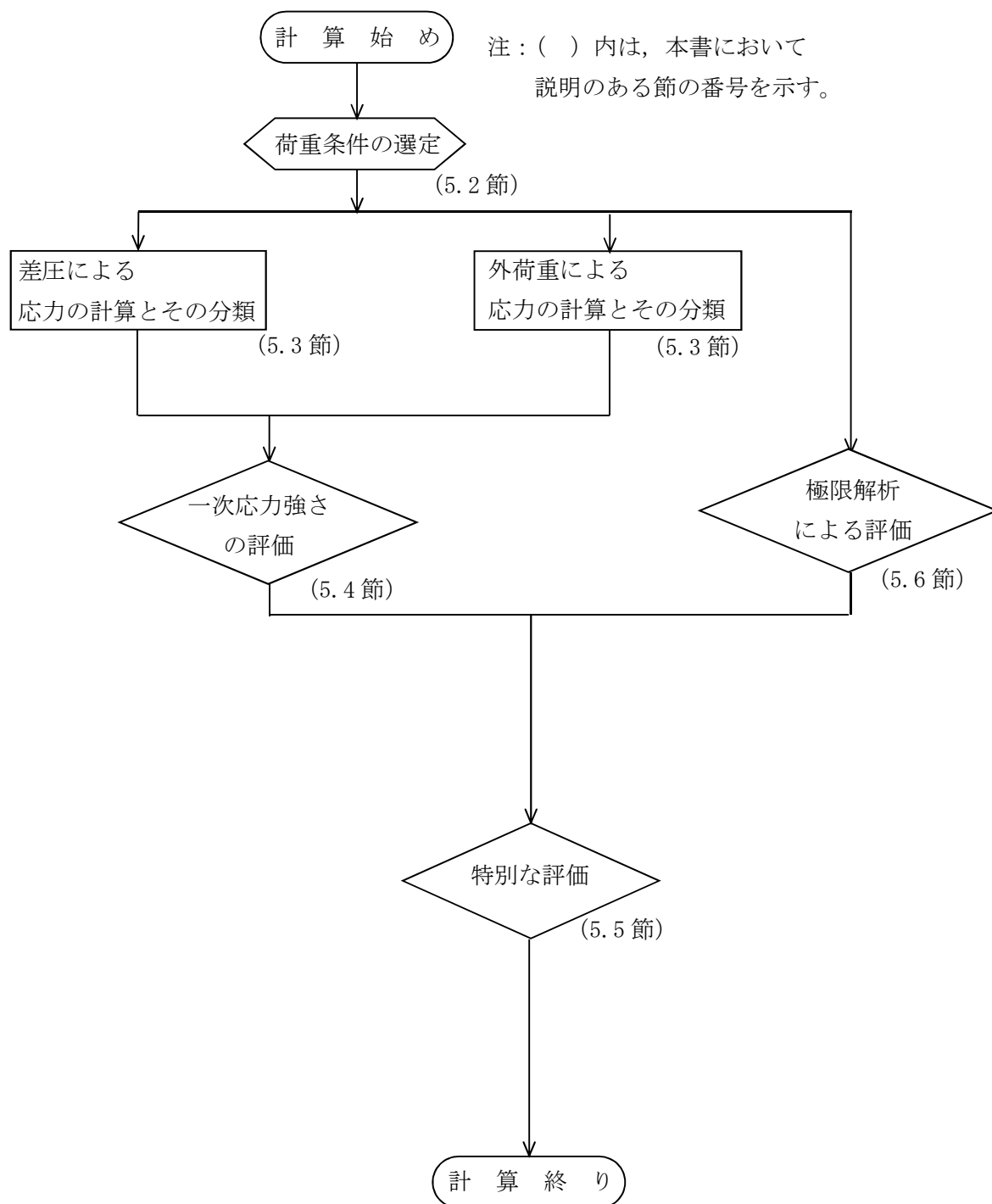


図 5-1 応力解析の手順

表 3-1 材料の分類

種類	使用材料		備考
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304 相当		
	SUS304 相当		
	SUS304TP 相当		
	SUS304TP 相当		
	SUS304TP 相当		
	SUSF304 相当		
	SUSF304 相当		
高ニッケル合金	SUS304LTP 相当		
	SUS316LTP		
	NCF600 相当		
	NCF600 相当		

注：以降，材料は新 J I S 相当材で記す。

表 3-2 応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (°C)	E × 10 ⁵ (MPa)	ν
SUS304	20		
SUS304TP	161		
SUSF304	302		
SUS304LTP			
NCF600	20		
	161		
	302		

表 3-3 極限解析による評価に使用する材料の物性値

材料	E $\times 10^5$ (MPa)	ν	降伏点 (MPa)	
			許容応力状態Ⅲ _A S	許容応力状態Ⅳ _A S
SUS304 SUS304TP	1.76	0.3	172	264
降伏点の算出式	—	—	$1.5 \cdot S_m$	Min ($2.3 \cdot S_m, 0.7 \cdot S_u$)

注：運転状態Ⅰ及びⅡの最高温度（℃）に対する物性値

表 3-4(1) 荷重の組合せ及び許容応力状態（供用状態）（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	許容応力状態	荷重の組合せ
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 内部 構造物	蒸気乾燥器 気水分離器及びスタンドパイプ シュラウドヘッド ジェットポンプ 給水スパージャ 高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ 残留熱除去系配管 高圧及び低圧炉心スプレイ配管 差圧検出・ほう酸水注入管 中性子計測案内管	S	—	Ⅲ _A S	$D + P_D + M_D + S_d^*$
					Ⅳ _A S	$D + P_D + M_D + S_s$

[記号の説明]

- D : 死荷重
 P_D : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲ及び地震従属事象として運転状態Ⅳに包絡する状態がある場合にはこれを含む。）又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重
 M_D : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲ及び地震従属事象として運転状態Ⅳに包絡する状態がある場合にはこれを含む。）又は当該設備に設計上定められた機械的荷重
 S_d^{*} : 弾性設計用地震動S_dにより定まる地震力又はSクラス設備に適用される静的地震力
 S_s : 基準地震動S_sにより定まる地震力

表 3-4(2) 荷重の組合せ及び許容応力状態（供用状態）（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	許容応力状態 (供用状態)	荷重の組合せ
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 内部 構造物	ジェットポンプ 高圧及び低圧炉心スプレイスパージャ 残留熱除去系配管	常設耐震／ 防止 常設／緩和	—	$V_A S^{*2}$	$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s^{*3}$
		高圧及び低圧炉心スプレイ配管 差圧検出・ほう酸水注入管			E	$D + P + M$

[記号の説明]

- D : 死荷重
 P : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態における圧力荷重
 M : 地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態で設備に作用している機械的荷重
 P_{SAD} : 重大事故等時の状態（運転状態V）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた設計圧力による荷重
 M_{SAD} : 重大事故等時の状態（運転状態V）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた機械的荷重
 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,「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2: $V_A S$ として, $IV_A S$ の許容限界を用いる。

*3:「 $D + P_D + M_D + S_s$ 」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 $V_A S$ 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_{SAD} 及び M_{SAD} は, 設計基準対象施設で想定される圧力及び機械的荷重と比べて小さい。また, 重大事故後の状態で設備に作用する機械荷重 M は発生しない。このことから, 許容応力状態 $V_A S$ 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 3-5(1) 原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容限界

許容応力状態	許容限界（ボルト等以外）					許容限界（ボルト等）		
	一次一般膜応力強さ	一次一般膜＋ 一次曲げ応力 強さ	特別な応力限界			一次一般膜応力強さ	一次一般膜 ＋一次曲げ 応力強さ	一次＋二 次応力強 さ
			純せん断 応力	支圧応力	ねじり 応力			
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot S_m^{*1}$	^{*1} 左欄の 1.5 倍 の値	$0.9 \cdot S_m$	^{*3} $1.5 \cdot S_y$ ($2.25 \cdot S_y$)	$1.2 \cdot S_m$	$1.5 \cdot S_m^{*1}$	左欄の 1.5 倍の値 ^{*1}	—
Ⅳ _A S	$2/3 \cdot S_u^{*2}$	^{*2} 左欄の 1.5 倍 の値	$1.2 \cdot S_m$	^{*3} $2 \cdot S_y$ ($3 \cdot S_y$)	$1.6 \cdot S_m$	$2/3 \cdot S_u^{*2}$	^{*2} 左欄の 1.5 倍の値	—
V _A S (V _A Sとして Ⅳ _A Sの許容限 界を用いる。)	ただし、オーステナ イト系ステンレス鋼 及び高ニッケル合金 については、 $2/3 \cdot S_u$ と $2.4 \cdot S_m$ の小さい方。					ただし、オーステナ イト系ステンレス鋼 及び高ニッケル合金 については、 $2/3 \cdot S_u$ と $2.4 \cdot S_m$ の小さい方。		

注記 *1：設計・建設規格 CSS-3160(2)の崩壊荷重の下限に基づく評価を適用する場合は、この限りではない。

*2：設計・建設規格 CSS-3160(3)の崩壊荷重の下限に基づく評価を適用する場合は、この限りではない。

*3：（ ）内は、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

表 3-5(2) 原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容限界

(単位：MPa)

応 力 分 類		一次一般膜応力強さ (P _m)		
状 態		許容応力状態Ⅲ _A S	許容応力状態Ⅳ _A S	供用状態 E
温 度 (°C)				
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304			
	SUS304TP	172	260	260
	SUSF304			
	SUS304LTP	145	232	232
	SUS316LTP	142	227	—
許容応力強さの算出式		$1.5 \cdot S_m$	Min ($2.4 \cdot S_m$, $2/3 \cdot S_u$)	Min ($2.4 \cdot S_m$, $2/3 \cdot S_u$)

表 3-5(3) 原子炉压力容器内部構造物用材料の許容限界

(単位：MPa)

応 力 分 類		一次一般膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ（ $P_m + P_b$ ）		
状 態		許容応力状態Ⅲ _A S	許容応力状態Ⅳ _A S	供用状態E
温 度（℃）				
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304	258	391	391
	SUS304TP			
	SUSF304			
	SUS304LTP	218	348	348
	SUS316LTP	213	341	—
許容応力強さの算出式		$2.25 \cdot S_m$	Min $(3.6 \cdot S_m, S_u)$	Min $(3.6 \cdot S_m, S_u)$

表 3-5(4) 原子炉圧力容器内部構造物用材料の許容限界

(単位：MPa)

応 力 分 類		純 せ ん 断 応 力		
状 態		許容応力状態Ⅲ _A S	許容応力状態Ⅳ _A S	供用状態E
温 度 (℃)				
オーステナイト系 ステンレス鋼	SUS304	103	137	137
許容応力の算出式		$0.9 \cdot S_m$	$1.2 \cdot S_m$	$1.2 \cdot S_m$

表 4-1(1) 外荷重

蒸気乾燥器外荷重

記号	荷重名称	鉛直力		水平力	
		全体に加わる荷重	最長の蒸気乾燥器ユニット列に加わる荷重	全体に加わる荷重	最長の蒸気乾燥器ユニット列に加わる荷重
		V_1 (kN)	V_2 (kN)	H_1 (kN)	H_2 (kN)
L04	死荷重				
L14	地震荷重 S_d^*				
L16	地震荷重 S_s				

注 1

注 2

表 4-1(2) 外荷重

気水分離器及びスタンドパイプ外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	鉛直力	水平力	モーメント
			V (kN)	H (kN)	M* (kN・m)
L04	死荷重	A			
L14	地震荷重 S _d *	A			
L16	地震荷重 S _s	A			

注記 * :

注 :

表 4-1 (3) 外荷重

シュラウドヘッド外荷重

記号	荷重名称	鉛直力		水平力	モーメント
		V ₁ (kN)	V ₂ (kN)	H (kN)	M (kN・m)
L04	死荷重				
L14	地震荷重 S _d [*]				
L16	地震荷重 S _s				

注 1

注 2

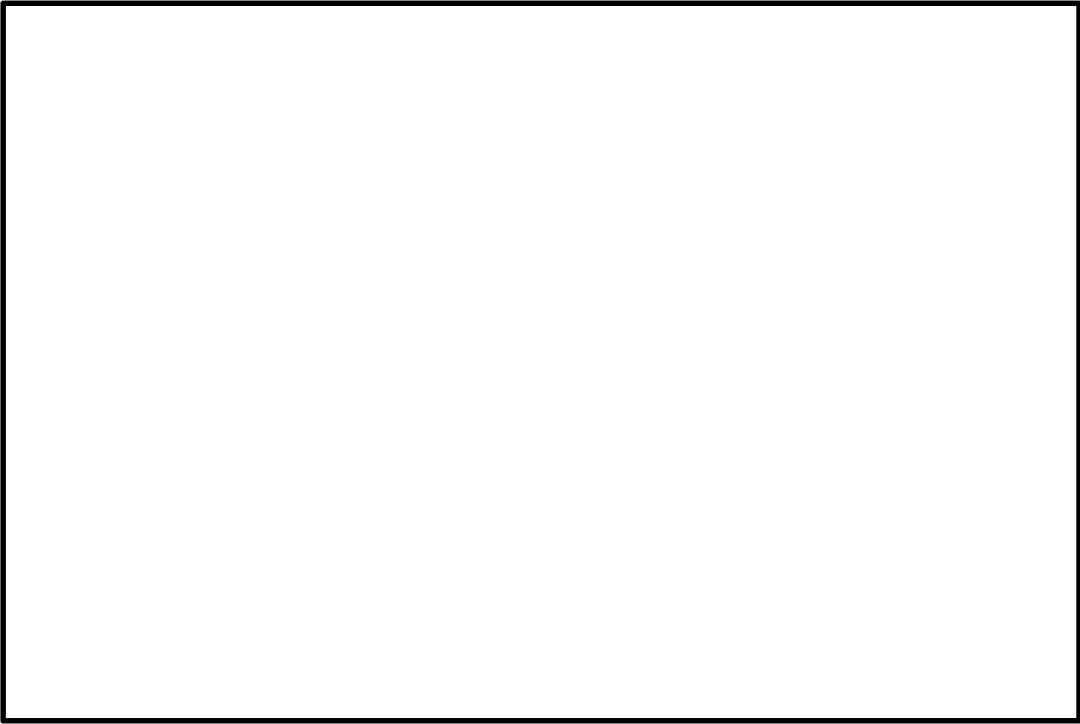


表 4-2 荷重の組合せ

条件	荷重の組合せ	応力評価
許容応力状態Ⅲ _A S	L02+L04+L14	P _m P _m +P _b 極限解析
許容応力状態Ⅳ _A S	L02+L04+L16	P _m P _m +P _b 極限解析
供用状態 E	L02+L04	P _m P _m +P _b

表 5-1 応力の分類

原子炉压力容器 内部構造物の要素	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	圧力差	一般膜応力	P_m
		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
	不連続部又はその付近	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
鏡板	全胴部の 任意断面	圧力差	全断面について平均した一般膜応力，断面に垂直な応力成分	P_m
		外荷重又はモーメント	一般膜応力 曲げ応力	P_m P_b
はり又は板	全般	外荷重，モーメント又は圧力差	全断面について平均した一般膜応力，断面に垂直な応力成分 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。

添付1 溶接部の継手効率

原子炉圧力容器内部構造物の主な溶接部の継手効率は、設計・建設規格 CSS-3150 に従い、
付表-1 のとおりに定められる。

付表-1

継手の箇所	継手の分類	継手の種類	検査の種類*	継手効率
蒸気乾燥器	リングとサポートの継手			
気水分離器及び スタンドパイプ	管と鏡板の周継手			
シュラウドヘッド	鏡板と胴の周継手			
	管と管の周継手			
ジェットポンプ	ライザの長手継手			
	ライザ下部の周継手			
	ディフューザ下部の 周継手			
	ライザブレースと原子炉 圧力容器内壁との継手			
給水スパージャ	レジューサとティーの 周継手			
	ティーとヘッダの周継手			
高圧及び低圧炉心 スプレイスパージャ	管端部の周継手			
	管とヘッダの周継手			
残留熱除去系配管	フランジネックとリング の周継手			
	サーマルスリーブとフラ ンジネックの周継手			
高圧及び低圧炉心 スプレイ配管	ヘッダと管の周継手			
	ヘッダとサーマル スリーブの周継手			
	管とスリーブの周継手			
差圧検出・ほう酸水 注入管	管と管の周継手			
	管とカップリングの周継 手			
	管とアダプタの周継手			
中性子計測案内管	管と管の周継手			

注記 * : 検査の種類を示す記号は次のとおりである。

R P T + F P T : 設計・建設規格 CSS-3150 に規定する D の検査
P T : 設計・建設規格 CSS-3150 に規定する E の検査
V T : 設計・建設規格 CSS-3150 に規定する F の検査

V-2-3-4-3-2 蒸気乾燥器の耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	2
1.3 形状・寸法・材料	2
1.4 解析範囲	2
1.5 計算結果の概要	2
2. 計算条件	8
2.1 設計条件	8
2.2 運転条件	8
2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態	8
2.4 材料	8
2.5 物性値	8
2.6 荷重の組合せと応力評価	8
2.7 許容限界	8
2.8 応力の記号と方向	8
3. 外荷重の条件	9
3.1 死荷重	9
3.2 地震荷重	9
4. 応力計算	9
4.1 応力評価点	9
4.2 差圧による応力	9
4.2.1 荷重条件 (L02)	9
4.2.2 計算方法	9
4.3 外荷重による応力	11
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	11
4.3.2 計算方法	11
4.4 応力の評価	12
5. 応力強さの評価	13
5.1 一次一般膜応力強さの評価	13
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	13
6. 特別な評価	14
6.1 純せん断応力の評価	14
6.1.1 計算データ及び荷重	14
6.1.2 計算方法	14
6.1.3 純せん断応力の評価	14

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点……………	3
図 4-1	応力計算モデル……………	15
表 1-1	計算結果の概要……………	6
表 4-1	断面性状……………	16
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ……………	17
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ……………	18
表 6-1	純せん断応力の評価……………	19

1. 一般事項

本計算書は、蒸気乾燥器の耐震性についての計算書である。

蒸気乾燥器は、原子炉圧力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

記号	記 号 の 説 明	単 位
A	ユニットサポートの断面積	mm ²
A ₀	耐震サポートのせん断断面積	mm ²
b	受圧幅	mm
e ₁	中立軸から各応力評価点までの距離	mm
e ₂	中立軸から各応力評価点までの距離	mm
e ₃	中立軸から各応力評価点までの距離	mm
e ₄	中立軸から各応力評価点までの距離	mm
F ₁	ユニットサポートに働くせん断力	N
F ₂	ユニットサポートに働くせん断力	N
F ₃	ユニットサポートに働くせん断力	N
F ₄	ユニットサポートに働くせん断力	N
F ₅	ユニットサポートに働くせん断力	N
h	受圧高さ	mm
I _y	ユニットサポートの断面二次モーメント	mm ⁴
I _z	ユニットサポートの断面二次モーメント	mm ⁴
L	最長蒸気乾燥器ユニット列の全長	mm
ℓ	最長蒸気乾燥器ユニット長さ	mm
M ₁	ユニットサポートに働くモーメント	N・mm
M ₂	ユニットサポートに働くモーメント	N・mm
M ₃	ユニットサポートに働くモーメント	N・mm
M ₄	ユニットサポートに働くモーメント	N・mm
M ₅	ユニットサポートに働くモーメント	N・mm
w ₁	ユニット列に働く単位長さ当たりの分布荷重	N/mm
w ₂	ユニット列に働く単位長さ当たりの分布荷重	N/mm
w ₃	ユニット列に働く単位長さ当たりの分布荷重	N/mm
w ₄	ユニット列に働く単位長さ当たりの分布荷重	N/mm
w ₅	ユニット列に働く単位長さ当たりの分布荷重	N/mm
τ _a	許容せん断応力	MPa

記号	記 号 の 説 明	単 位
ℓ_1	耐震サポート溶接部長さ	mm
ℓ_2	耐震サポート溶接部長さ	mm
ℓ_3	耐震サポート溶接部長さ	mm
ℓ_4	耐震サポート溶接部長さ	mm
b_1	耐震サポート溶接部脚長	mm
b_2	耐震サポート溶接部脚長	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

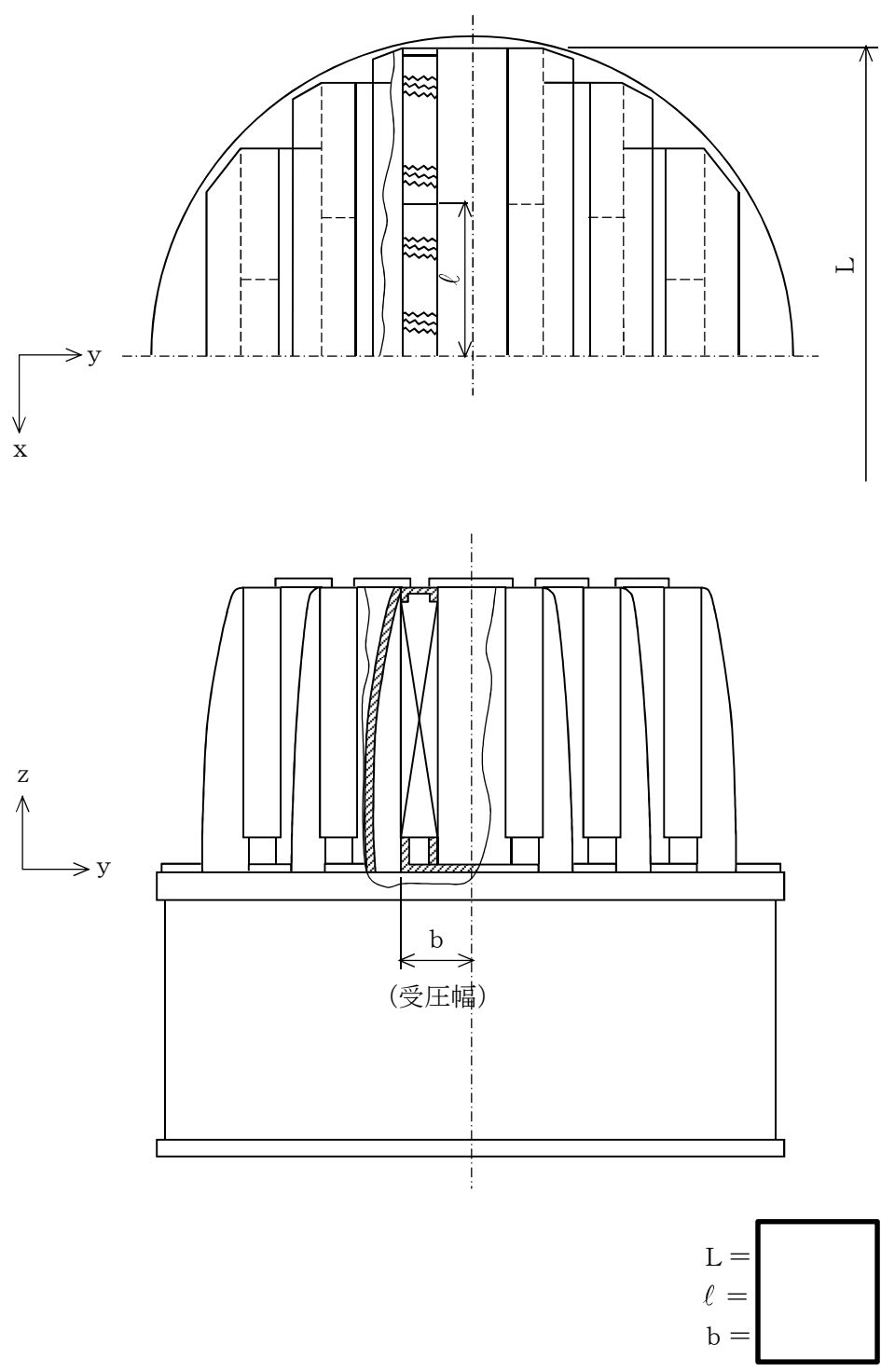


図 1-1(1) 形状・寸法・材料・応力評価点 (蒸気乾燥器) (単位: mm)

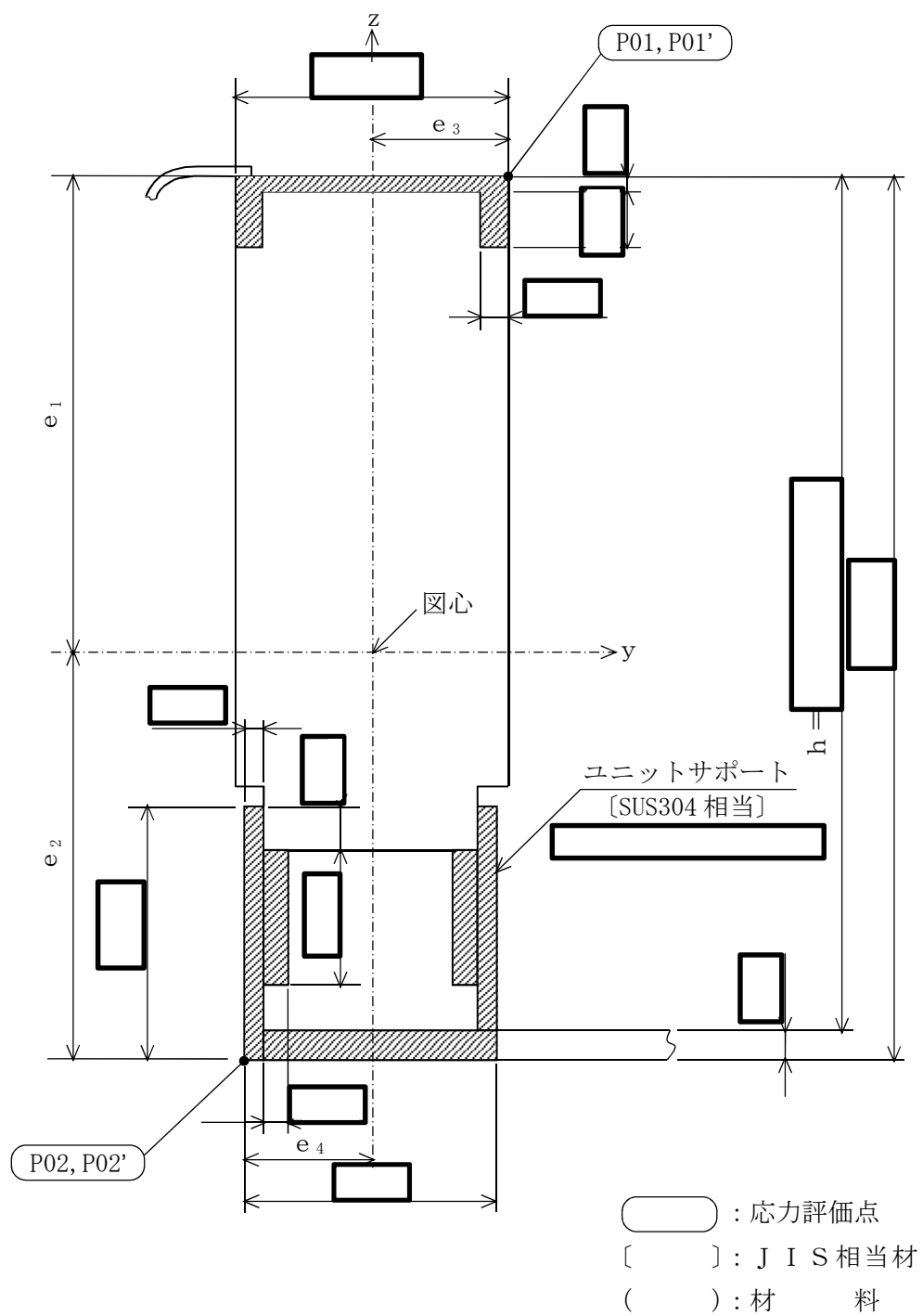


図 1-1 (2) 形状・寸法・材料・応力評価点
(ユニット及びユニットサポート) (単位: mm)

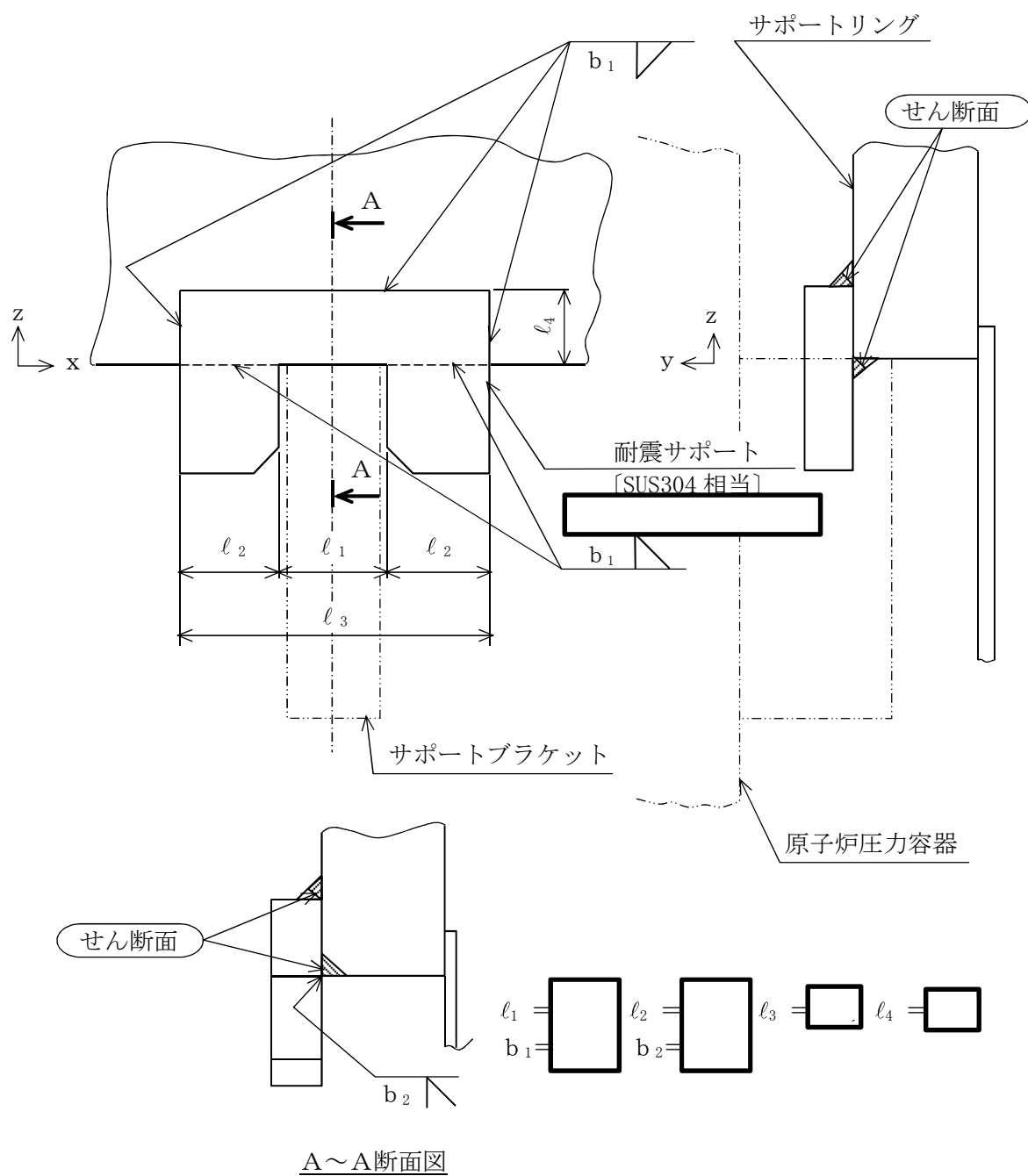


図 1-1(3) 形状・寸法・材料・応力評価点（耐震サポート）（単位：mm）

表 1-1(1) 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (MPa)		
		応力強さ	許容値	応力評価面	応力強さ	許容値	応力評価点
ユニットサポート SUS304	Ⅲ _A S	2	172	P01-P02	10	258	P01'
	Ⅳ _A S	3	260	P01-P02	15	391	P01'

表 1-1 (2) 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	純せん断応力 (MPa)	
		平均せん断応力	許容せん断応力
耐震サポート SUS304	Ⅲ _A S	39	61
	Ⅳ _A S	63	82

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.4 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.5 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.6 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.7 許容限界

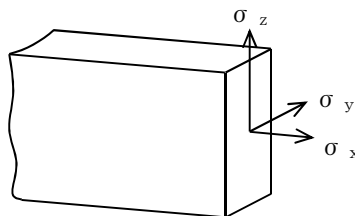
許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.8 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は、以下のとおりとする。

なお、主応力の算出は、「応力解析の方針」の 5.4.1 項に示される式において σ_t , σ_ℓ , σ_r , $\tau_{t\ell}$ をそれぞれ σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} に添字を置き換えて求める。

σ_x : x 方向応力
 σ_y : y 方向応力
 σ_z : z 方向応力
 τ_{xy} : せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 死荷重

蒸気乾燥器の評価に用いる死荷重を「応力解析の方針」の 4.4.1 項に示す。

3.2 地震荷重

蒸気乾燥器の評価に用いる地震荷重を「応力解析の方針」の 4.4.3 項に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 (2) 及び (3) に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

蒸気乾燥器には、6 列の蒸気乾燥器ユニット列が配置されているが、このうち最大応力の生じる最長のものについて評価する。

なお、強度は、図 1-1 (2) の斜線で示した部分（ユニットサポート）が有効であるものとして評価する。

耐震サポートについては、6 章で純せん断応力の評価を行う。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件（L02）

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

差圧 P_{59} による応力は、以下により求める。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件を、図 4-1 に示す。

(1) 差圧による荷重

a. 鉛直方向荷重

ユニット列にかかる鉛直方向、単位長さ当たりの分布荷重 w_1 は、次式で求める。

$$w_1 = P_{59} \cdot b$$

b. 水平方向荷重

ユニット列にかかる水平方向、単位長さ当たりの分布荷重 w_2 は、次式で求める。

$$w_2 = P_{59} \cdot h$$

(2) 中央部及び端部のモーメント，せん断力

a. 中央部

ユニット列全長の中央部のユニットサポートにかかるモーメント M_1 及びせん断力 F_1 は，次式で求める。

$$M_1 = \frac{w_1 \cdot L^2}{8}$$

$$F_1 = 0$$

b. 端部

各ユニットの端部のユニットサポートにかかるモーメント M_2 及びせん断力 F_2 は，次式で求める。

$$M_2 = \frac{w_2 \cdot \ell^2}{12}$$

$$F_2 = \frac{w_2 \cdot \ell}{2}$$

(3) 一次一般膜応力

$$\begin{array}{l} \text{P01 及び P01'} \\ \text{P02 及び P02'} \end{array} : \tau_{xy} = \frac{F_2}{A}$$

(4) 一次曲げ応力

$$\text{P01 及び P01'} : \sigma_x = \frac{M_1}{I_y} \cdot e_1 + \frac{M_2}{I_z} \cdot e_3$$

$$\text{P02 及び P02'} : \sigma_x = -\frac{M_1}{I_y} \cdot e_2 - \frac{M_2}{I_z} \cdot e_4$$

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

蒸気乾燥器ユニット列に働く外荷重を「応力解析の方針」の 4.4 節に示す。

4.3.2 計算方法

外荷重による応力は、以下により求める。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件を図 4-1 に示す。

(1) 死荷重 (L04)

- a. ユニット列にかかる鉛直方向，単位長さ当たりの分布荷重 w_3 は，次式で求める。

$$w_3 = \frac{V_2}{L}$$

- b. ユニット列全長の中央部のユニットサポートにかかるモーメント M_3 及びせん断力 F_3 は，次式で求める。

$$M_3 = \frac{w_3 \cdot L^2}{8}$$

$$F_3 = 0$$

- c. 一次曲げ応力

$$P01 \text{ 及び } P01' : \sigma_x = -\frac{M_3}{I_y} \cdot e_1$$

$$P02 \text{ 及び } P02' : \sigma_x = \frac{M_3}{I_y} \cdot e_2$$

なお，せん断力 $F_3 = 0$ であることより，一次一般膜応力は発生しない。

(2) 地震荷重 S_d^* ， S_s (L14, L16)

- a. 地震荷重 S_d^* ， S_s による荷重

(a) 鉛直方向荷重

ユニット列にかかる鉛直方向，単位長さ当たりの分布荷重 w_4 は，次式で求める。

$$w_4 = \frac{V_2}{L}$$

(b) 水平方向荷重

ユニット列にかかる水平方向，単位長さ当たりの分布荷重 w_5 は，次式で求める。

$$w_5 = \frac{H_2}{L}$$

b. 中央部及び端部のモーメント，せん断力

(a) 中央部

ユニット列全長の中央部のユニットサポートにかかるモーメント M_4 及びせん断力 F_4 は，次式で求める。

$$M_4 = \frac{w_4 \cdot L^2}{8}$$

$$F_4 = 0$$

(b) 端部

各ユニット端部のユニットサポートにかかるモーメント M_5 及びせん断力 F_5 は，次式で求める。

$$M_5 = \frac{w_5 \cdot \ell^2}{12}$$

$$F_5 = \frac{w_5 \cdot \ell}{2}$$

c. 一次一般膜応力

$$\begin{array}{l} \text{P01 及び P01'} \\ \text{P02 及び P02'} \end{array} : \tau_{xy} = \frac{F_5}{A}$$

d. 一次曲げ応力

$$\text{P01 及び P01'} : \sigma_x = \frac{M_4}{I_y} \cdot e_1 + \frac{M_5}{I_z} \cdot e_3$$

$$\text{P02 及び P02'} : \sigma_x = \frac{M_4}{I_y} \cdot e_2 + \frac{M_5}{I_z} \cdot e_4$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は，応力の分類ごとに重ね合わせ，組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

6. 特別な評価

耐震サポートには，地震荷重 S_d^* (L14)，地震荷重 S_s (L16) の水平力 H_1 により，純せん断応力が生じるため，純せん断応力の評価を行う。

6.1 純せん断応力の評価

耐震サポートには，水平力 H_1 により純せん断応力が生じる。

6.1.1 計算データ及び荷重

(1) 計算データ

耐震サポート溶接部のせん断断面積 (図 1-1 (3) 参照)



(2) 荷重

各運転条件における水平力を，「応力解析の方針」の 4.4 節に示す。

6.1.2 計算方法

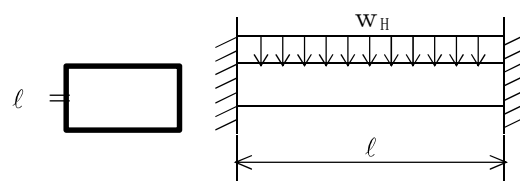
せん断面に発生する平均せん断応力 τ は，

$$\tau = \boxed{}$$

6.1.3 純せん断応力の評価

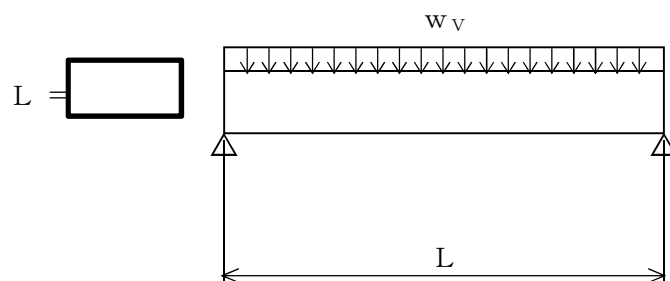
各許容応力状態における純せん断応力の評価を表 6-1 に示す。

表 6-1 より，各許容応力状態における平均せん断応力は，「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。



w_H : 水平方向分布荷重 (w_2 又は w_5)

図 4-1(1) 応力計算モデル (水平方向荷重) (単位 : mm)



w_V : 鉛直方向分布荷重 (w_1, w_3, w_4)

図 4-1(2) 応力計算モデル (鉛直方向荷重) (単位 : mm)

表4-1 断面性状

応力評価点	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ℓ (mm)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	e_3 (mm)	e_4 (mm)	A (mm ²)	I _y (mm ⁴)	I _z (mm ⁴)
P01, P01'											
P02, P02'											

表 5-1 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	2	172	3	260
P01' P02'	0	172	1	260

表 5-2 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 評価点	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	4	258	10	391
P01'	10	258	15	391
P02	4	258	6	391
P02'	4	258	6	391

表 6-1 純せん断応力の評価

(単位：MPa)

状態	平均せん断応力 τ	許容せん断応力 τ_a
許容応力状態Ⅲ _A S	39	61 [*]
許容応力状態Ⅳ _A S	63	82 [*]

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-3 気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 評価方針	1
1.2 記号の説明	2
1.3 適用基準	2
1.4 形状・寸法・材料	2
1.5 解析範囲	2
1.6 評価部位	2
1.7 計算結果の概要	2
2. 計算条件	6
2.1 設計条件	6
2.2 運転条件	6
2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態	6
2.4 材料	6
2.5 物性値	6
2.6 荷重の組合せと応力評価	6
3. 荷重条件	7
3.1 死荷重(L04)	7
3.2 差圧(L02)	7
3.3 地震荷重(L14 及び L16)	7
4. 許容限界	7
4.1 計算方法	7
4.2 解析モデル及び諸元	7
4.3 荷重変位線図	7
4.4 崩壊荷重の下限及び許容荷重	8
5. 評価結果	8

図表目次

図 1-1	気水分離器及びスタンドパイプの耐震評価フロー	1
図 1-2	形状・寸法・材料・評価部位	3
図 2-1	弾完全塑性体の概要	6
図 4-1	解析モデル	10
図 4-2	荷重変位線図	11
表 1-1	計算結果の概要	5
表 3-1	評価に用いる外荷重	9
表 4-1	各許容応力状態における許容荷重	12
表 5-1	評価のまとめ	12

1. 一般事項

本計算書は、気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書である。

1.1 評価方針

気水分離器及びスタンドパイプの耐震評価は、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づき、極限解析による評価を実施する。極限解析による評価は、「1.6 評価部位」にて設定する部位において、「3.3 地震荷重」で算出した設計用地震力が「4. 許容限界」に示す弾塑性解析にて求めた崩壊荷重の下限から定まる許容限界内に収まることを確認することで実施する。

気水分離器及びスタンドパイプの耐震評価フローを図 1-1 に示す。

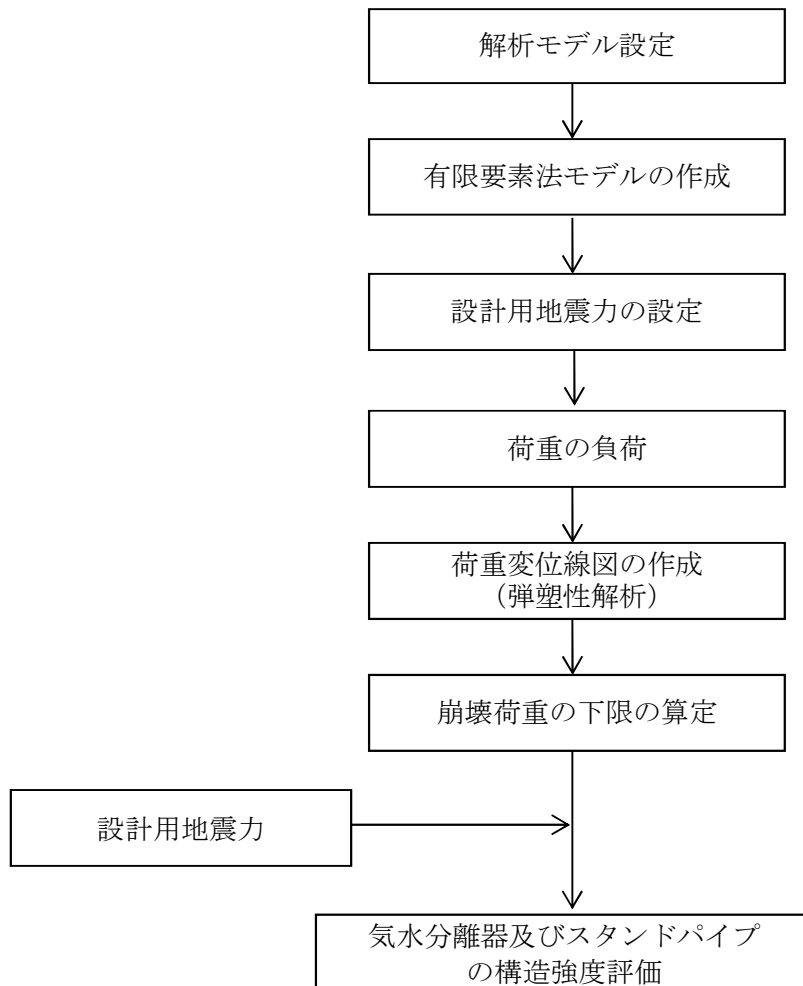


図 1-1 気水分離器及びスタンドパイプの耐震評価フロー

1.2 記号の説明

「応力解析の方針」の2章による。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

記号	記 号 の 説 明	単 位
D_i	内径	mm
D_o	外径	mm
t_1	スタンドパイプ厚さ	mm
t_2	シュラウドヘッド厚さ	mm

1.3 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.4 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-2に示す。

1.5 解析範囲

解析範囲を図1-2に示す。

1.6 評価部位

気水分離器及びスタンドパイプの耐震評価は、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、評価上厳しくなるシュラウドヘッドとスタンドパイプの接合部（以下「スタンドパイプ付根部」という。）について実施する。

気水分離器及びスタンドパイプの耐震評価部位を図1-2に示す。

1.7 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

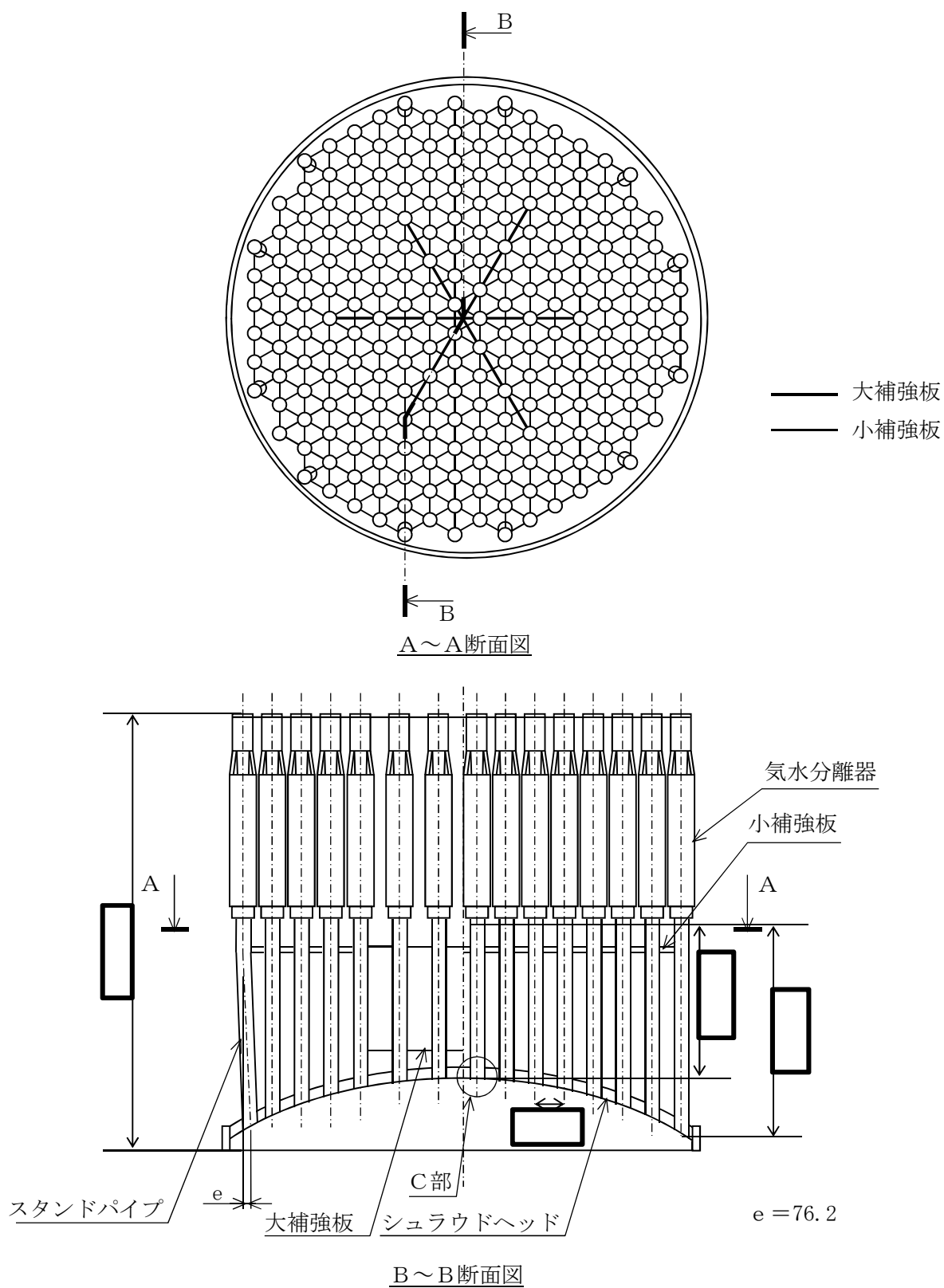
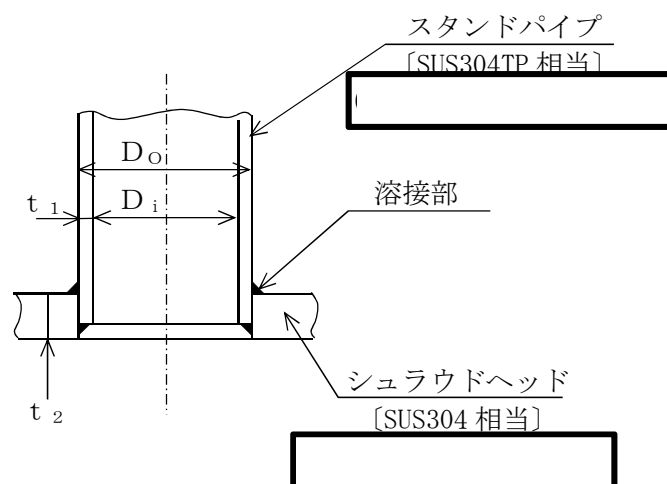


図 1-2(1) 形状・寸法・材料・評価部位 (単位: mm)



C 部（スタンドパイプ付根部）詳細図

[] : J I S 相当材	$D_o =$ [] (外径)
() : 材 料	$D_i =$ [] (内径)
	$t_1 =$ [] (スタンドパイプ厚さ)
	$t_2 =$ [] (シュラウドヘッド厚さ)

図 1-2(2) 形状・寸法・材料・評価部位（単位：mm）

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	鉛直力V (kN)		水平力H (kN)		モーメントM (kN・m)	
		地震荷重	許容荷重	地震荷重	許容荷重	地震荷重	許容荷重
スタンド パイプ SUS304TP	Ⅲ _A S	1.49	1.64	10.3	11.3	29.2	32.3
	Ⅳ _A S	2.73	2.78	15.4	15.6	43.9	44.7

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.4 材料

各部の材料を図 1-2 に示す。

2.5 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。計算に使用する応力ひずみ線図は、図 2-1 に示す許容応力状態Ⅲ_AS では $1.5S_m$ ，許容応力状態Ⅳ_AS では $2.3S_m$ と $0.7S_u$ の小さい方を降伏点とした弾完全塑性体とする。

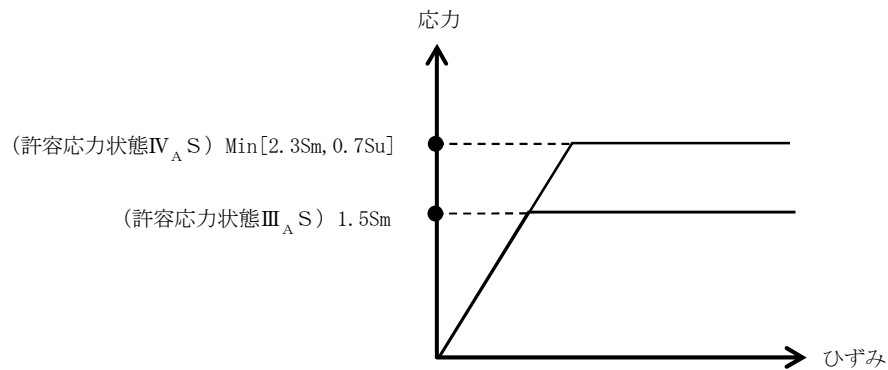


図 2-1 弾完全塑性体の概要

2.6 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

3. 荷重条件

3.1 死荷重 (L04)

スタンドパイプ 1 本あたりの付根部に働く死荷重は「応力解析の方針」の 4.4.1 項に示す死荷重を 225 本で除したものとする。評価に用いる死荷重を表 3-1 に示す。

3.2 差圧 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

3.3 地震荷重 (L14 及び L16)

スタンドパイプ 1 本あたりの付根部に働く地震荷重は「応力解析の方針」の 4.4.3 項に示す地震荷重を 225 本で除したものとする。評価に用いる地震荷重を表 3-1 に示す。

4. 許容限界

4.1 計算方法

許容限界は、J E A G 4 6 0 1・補-1984 の許容応力編で認められた手法として設計・建設規格 CSS-3160 の極限解析による評価（崩壊荷重の下限に基づく評価）にて求める。

計算は、ソリッド要素を使用した有限要素法による弾塑性解析を用いて行う。また、解析コード「ABAQUS」を用いて行う。

4.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-2 に示し、解析モデル及び諸元を図 4-1 に示す。

解析モデルは、評価上厳しくなるスタンドパイプ付根部の許容限界を求めるため、1 本のスタンドパイプ及びシュラウドヘッドの一部をソリッド要素でモデル化した 3 次元有限要素法モデルとする。境界条件は、シュラウドヘッド端部を全周固定とする。

4.3 荷重変位線図

図 4-1 に示す解析モデルに「3.1 死荷重」及び「3.2 差圧」を負荷し、その後、上端の断面中心から荷重を段階的に負荷することで、荷重とそれによる変形量の関係（以下「荷重変位線図」という。）を求める。上端の断面中心から負荷する荷重は、スタンドパイプの付根部に「3.3 地震荷重」にて求めた各許容応力状態における地震荷重の比例倍となる荷重とする。

荷重変位線図は、有限要素法による弾塑性解析を用いて求める。各許容応力状態における荷重変位線図を図 4-2 に示す。荷重変位線図に示す荷重はスタンドパイプ付根部における荷重とし、表 3-1 に示す各許容応力状態での地震荷重の荷重倍率として整理する。また、変位は解析モデルの上端の断面中心の変位量とする。

4.4 崩壊荷重の下限及び許容荷重

図 4-2 に示す荷重変位曲線から崩壊荷重の下限を求める。崩壊荷重の下限は、荷重とそれによる変形量の関係直線または曲線と荷重軸に対し弾性範囲の関係直線の勾配の 2 倍の勾配を有する直線が交わる点に対応する荷重とする。各許容応力状態における崩壊荷重の下限から、許容荷重を算出する。

許容荷重は許容応力状態Ⅲ_AS では許容応力状態Ⅲ_AS での崩壊荷重の下限と同じ値とし、許容応力状態Ⅳ_AS では許容応力状態Ⅳ_AS での崩壊荷重の下限に 0.9 を乗じた値とする。許容荷重を表 4-1 に示す。

5. 評価結果

各許容応力状態における評価をまとめて表 5-1 に示す。表 5-1 により、各許容応力状態の地震荷重は許容荷重を満足する。

表 3-1 評価に用いる外荷重

記号	荷重名称	鉛直力V (kN)	水平力H (kN)	モーメントM (kN・m)
L04	死荷重	2.52	—	—
L14	地震荷重 S _d *	1.49	10.3	29.2
L16	地震荷重 S _s	2.73	15.4	43.9

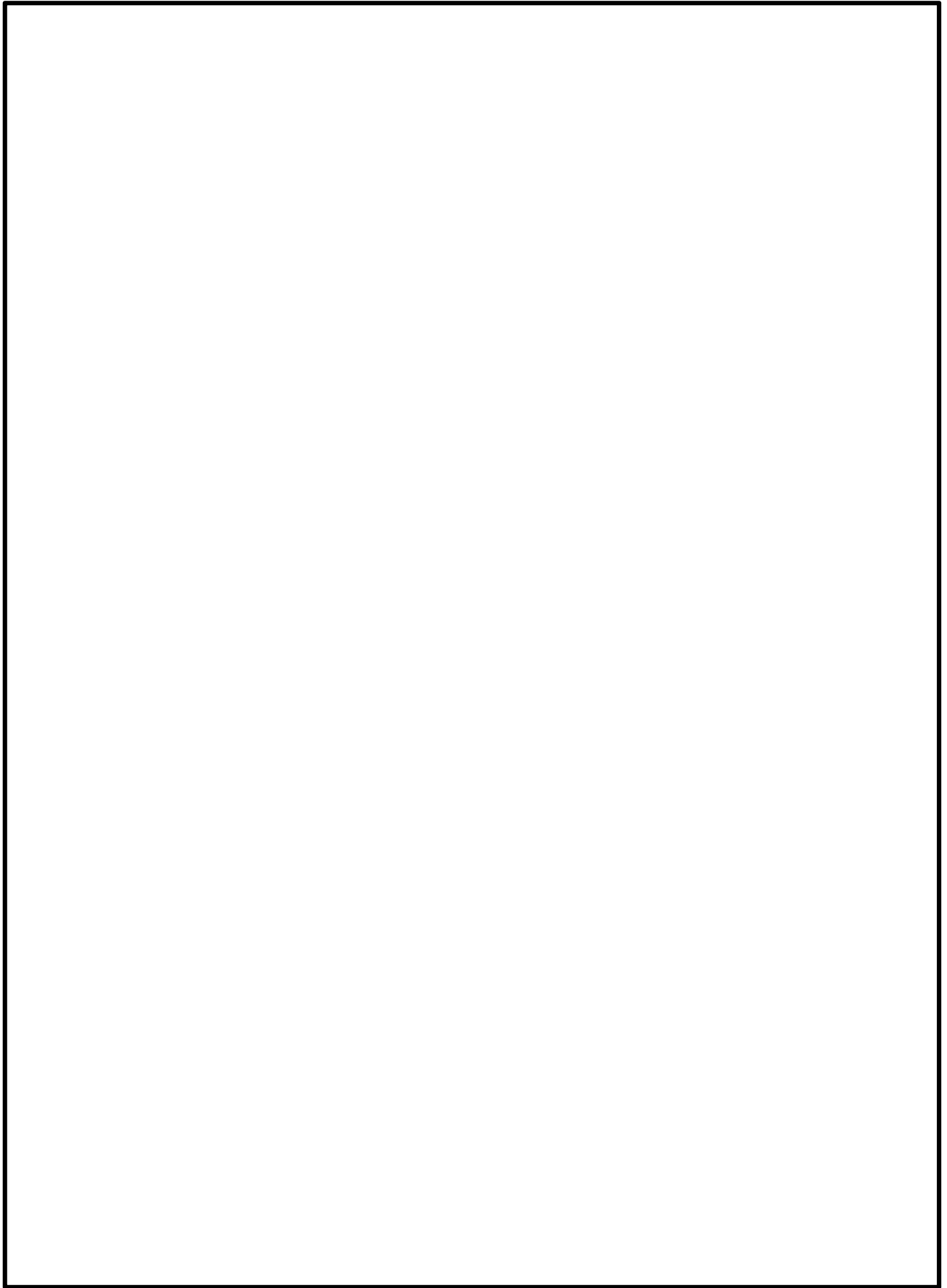


図 4-1 解析モデル

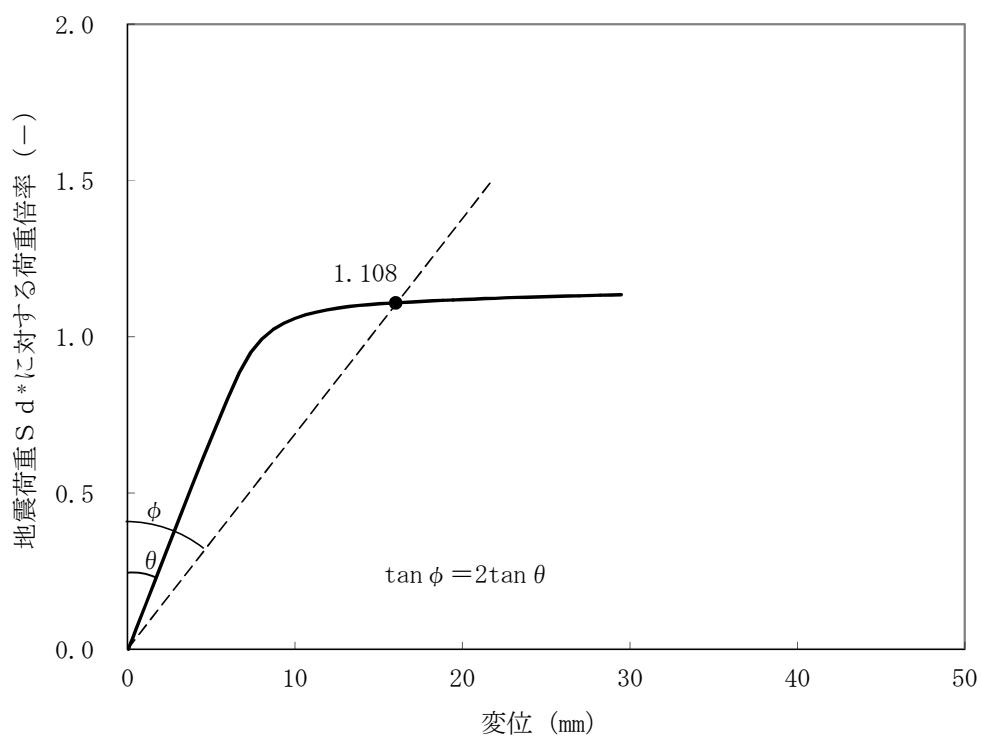


図 4-2(1) 荷重変位線図 (許容応力状態Ⅲ_A S)

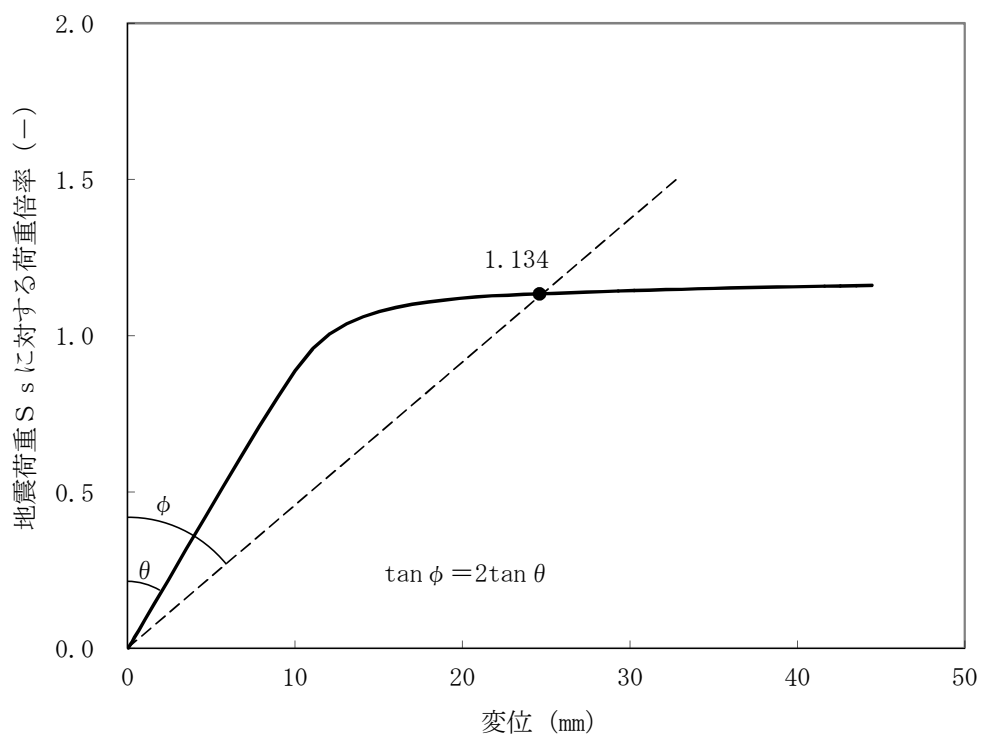


図 4-2(2) 荷重変位線図 (許容応力状態Ⅳ_A S)

表 4-1 各許容応力状態における許容荷重

条件	鉛直力V (kN)	水平力H (kN)	モーメントM (kN・m)
許容応力状態Ⅲ _A S	1.64	11.3	32.3
許容応力状態Ⅳ _A S	2.78	15.6	44.7

表 5-1 評価のまとめ

条件	鉛直力V (kN)		水平力H (kN)		モーメントM (kN・m)	
	地震荷重	許容荷重	地震荷重	許容荷重	地震荷重	許容荷重
許容応力状態Ⅲ _A S	1.49	1.64	10.3	11.3	29.2	32.3
許容応力状態Ⅳ _A S	2.73	2.78	15.4	15.6	43.9	44.7

V-2-3-4-3-4 シュラウドヘッドの耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	5
2.1 設計条件	5
2.2 運転条件	5
2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態	5
2.4 材料	5
2.5 物性値	5
2.6 荷重の組合せと応力評価	5
2.7 許容限界	5
2.8 応力の記号と方向	5
3. 外荷重の条件	6
3.1 死荷重	6
3.2 地震荷重	6
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	8
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	8
4.3.2 計算方法	8
4.4 応力の評価	9
5. 応力強さの評価	10
5.1 一次一般膜応力強さの評価	10
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	10

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点……………	2
図 4-1	解析モデル……………	11
表 1-1	計算結果の概要……………	4
表 4-1	断面性状……………	12
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ……………	13
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ……………	14

1. 一般事項

本計算書は、シュラウドヘッドの耐震性についての計算書である。

シュラウドヘッドは、原子炉圧力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

記号	記 号 の 説 明	単 位
A_1	鏡板の断面積	mm^2
A_2	外側スリーブの断面積	mm^2
D_i	フランジ内径	mm
D_o	フランジ外径	mm
$D_{s i}$	外側スリーブ内径	mm
$D_{s o}$	外側スリーブ外径	mm
R_m	球殻の平均半径	mm
t_s	鏡板厚さ	mm
R_s	球殻の内半径	mm
t	フランジ厚さ	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

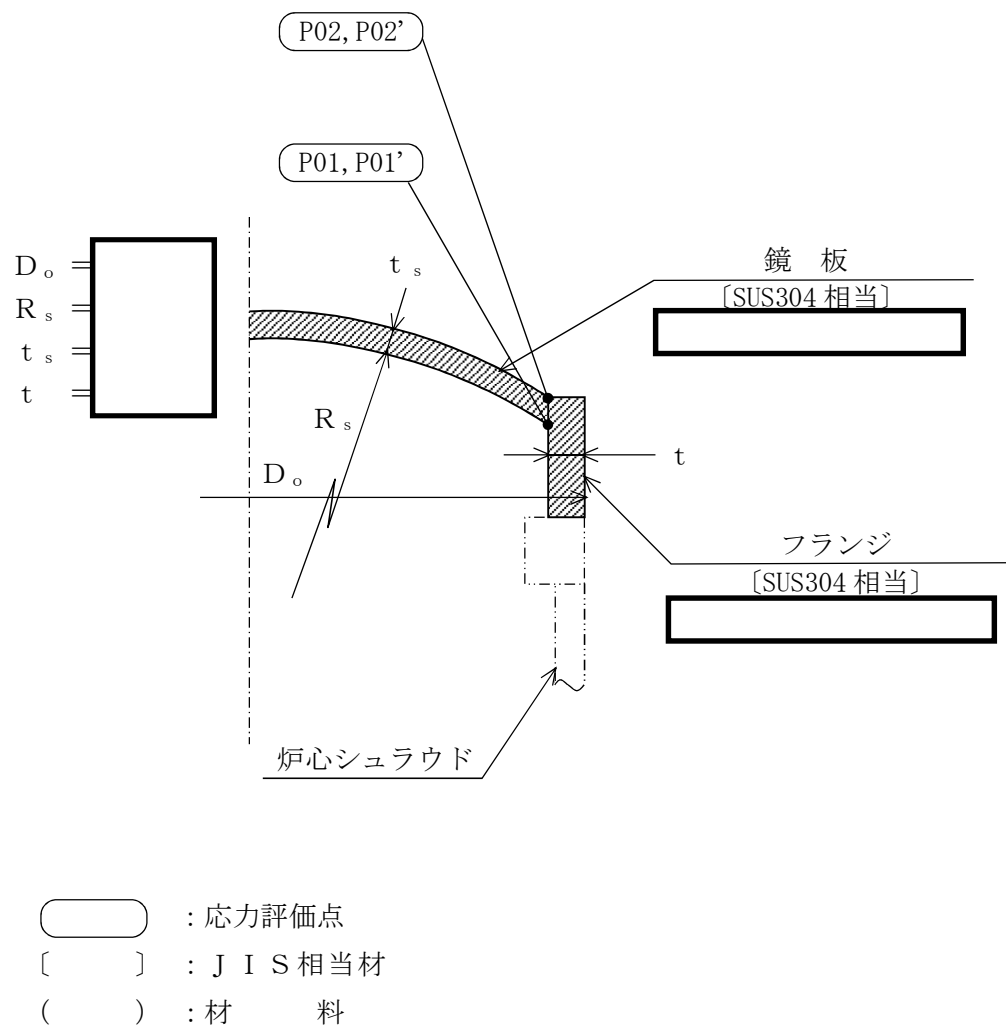


図 1-1 (1) 形状・寸法・材料・応力評価点（シュラウドヘッド）（単位：mm）

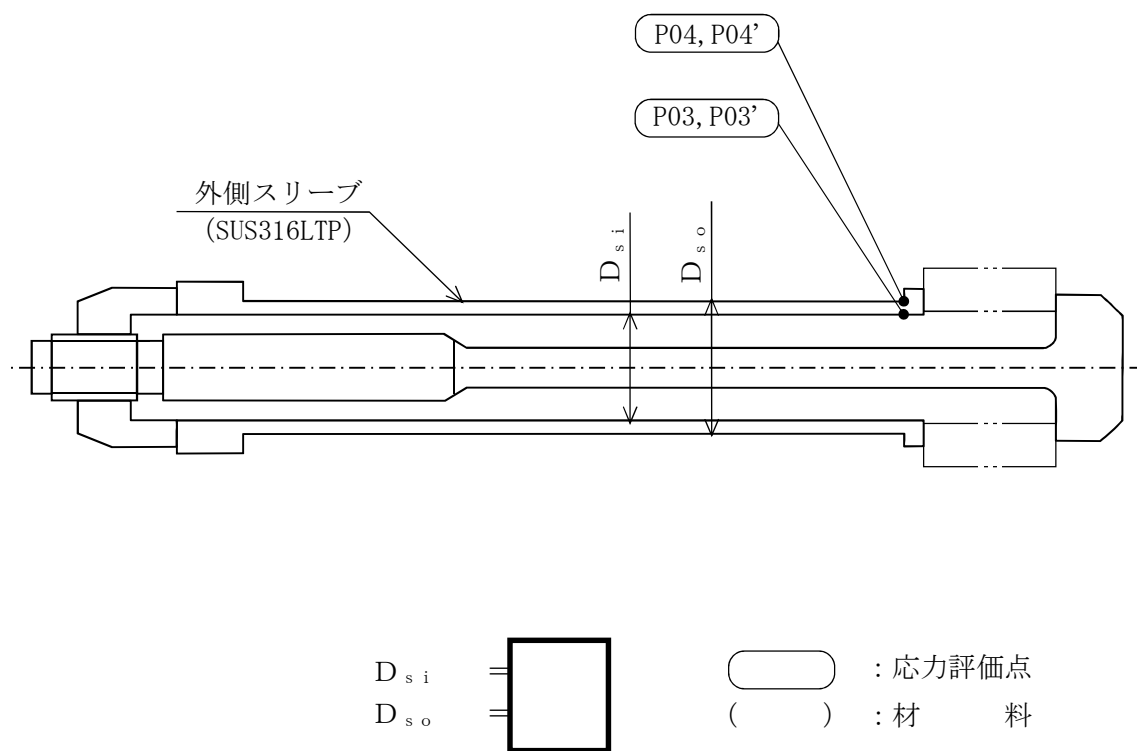


図 1-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点 (シールドヘッドボルト) (単位 : mm)

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (MPa)		
		応力強さ	許容値	応力評価面	応力強さ	許容値	応力評価点
シュラウドヘッド SUS304	Ⅲ _A S	52	111	P01'~P02'	125	167	P01
	Ⅳ _A S	79	169	P01'~P02'	187	254	P01
シュラウドヘッドボルト SUS316LTP	Ⅲ _A S	81	92	P03'~P04'	81	138	P03'~P04'
	Ⅳ _A S	131	147	P03'~P04'	131	221	P03'~P04'

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.4 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.5 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.6 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

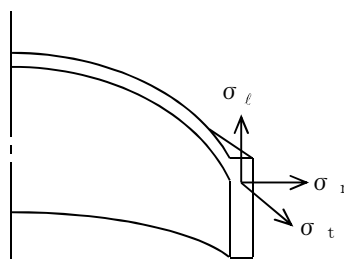
2.7 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

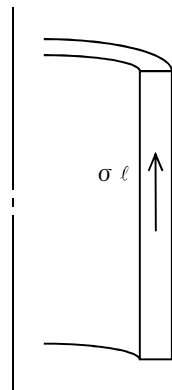
2.8 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は、以下のとおりとする。

- σ_t : 周方向応力
- σ_ℓ : 軸方向応力
- σ_r : 半径方向応力
- $\tau_{t\ell}$: せん断応力
- $\tau_{\ell r}$: せん断応力
- τ_{rt} : せん断応力



シュラウドヘッド



シュラウドヘッドボルト

3. 外荷重の条件

3.1 死荷重

シュラウドヘッド及びシュラウドヘッドボルトの評価に用いる死荷重を「応力解析の方針」の 4.4.1 項に示す。

3.2 地震荷重

シュラウドヘッド及びシュラウドヘッドボルトの評価に用いる地震荷重を「応力解析の方針」の 4.4.3 項に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 差圧による一次応力の計算

a. シュラウドヘッド

(a) 一次一般膜応力

差圧 P_{45} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \sigma_\ell = \frac{P_{45} \cdot R_m}{2 \cdot t_s}$$

$$\sigma_r = -\frac{P_{45}}{2}$$

(b) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

b. シュラウドヘッドボルト

(a) 差圧によるシュラウドヘッドの浮上がり力

差圧 P_{45} によるシュラウドヘッドの浮き上がり力 F_P は、次式で求める。

$$F_P = \frac{\pi \cdot P_{45} \cdot D_i}{4 \times \boxed{}}$$

(b) シュラウドヘッドの死荷重による押付け力

シュラウドヘッドの死荷重 V_1 による押付け力 F_{SH} は、次式で求める。

$$F_{SH} = \frac{V_1}{\boxed{}}$$

(c) 一次一般膜応力

差圧 P_{45} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = - \frac{F_P - F_{SH}}{A_2}$$

(d) 一次一般膜応力＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

シュラウドヘッドに働く外荷重を「応力解析の方針」の 4.4 節に示す。

4.3.2 計算方法

(1) 外荷重による一次応力の計算

a. シュラウドヘッド

(a) 一次一般膜応力

イ. 死荷重 (L04)

死荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\tau_{lr} = \frac{V_1}{A_1}$$

ロ. 地震荷重 (L14 及び L16)

地震荷重による一次一般膜応力の計算は、ソリッド要素でモデル化したシュラウドヘッドの FEM モデルに 3.2 節に示す地震荷重を入力して求める。

応力解析のモデル及び仮定した境界条件を、図 4-1 に示す。シュラウドヘッドのモデル化範囲は鏡板とフランジとし、機器の対称性から 180° の分割モデルとする。ここで、鏡板は を行う。

境界条件は、対称面で水平方向の変位を拘束し、支持条件はフランジ下端の板厚中央で、上下方向及び半径方向の変位を拘束されるものとする。

以上の計算は、解析コード「ABAQUS」を用いて行う。

(b) 一次一般膜＋一次曲げ応力

イ. 死荷重 (L04)

死荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\tau_{lr} = \frac{V_1}{A_1}$$

ロ. 地震荷重 (L14 及び L16)

地震荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力の計算は、4.3.2 項(1)a. (a)ロ「地震荷重」に示す解析コード「ABAQUS」を用いて行う。

b. シュラウドヘッドボルト

(a) 一次一般膜応力

イ. 死荷重及び地震荷重 (L04, L14 及び L16)

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = -\frac{V_2}{A_2}$$

(b) 一次一般膜＋一次曲げ応力

イ. 死荷重及び地震荷重 (L04, L14 及び L16)

外荷重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。

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

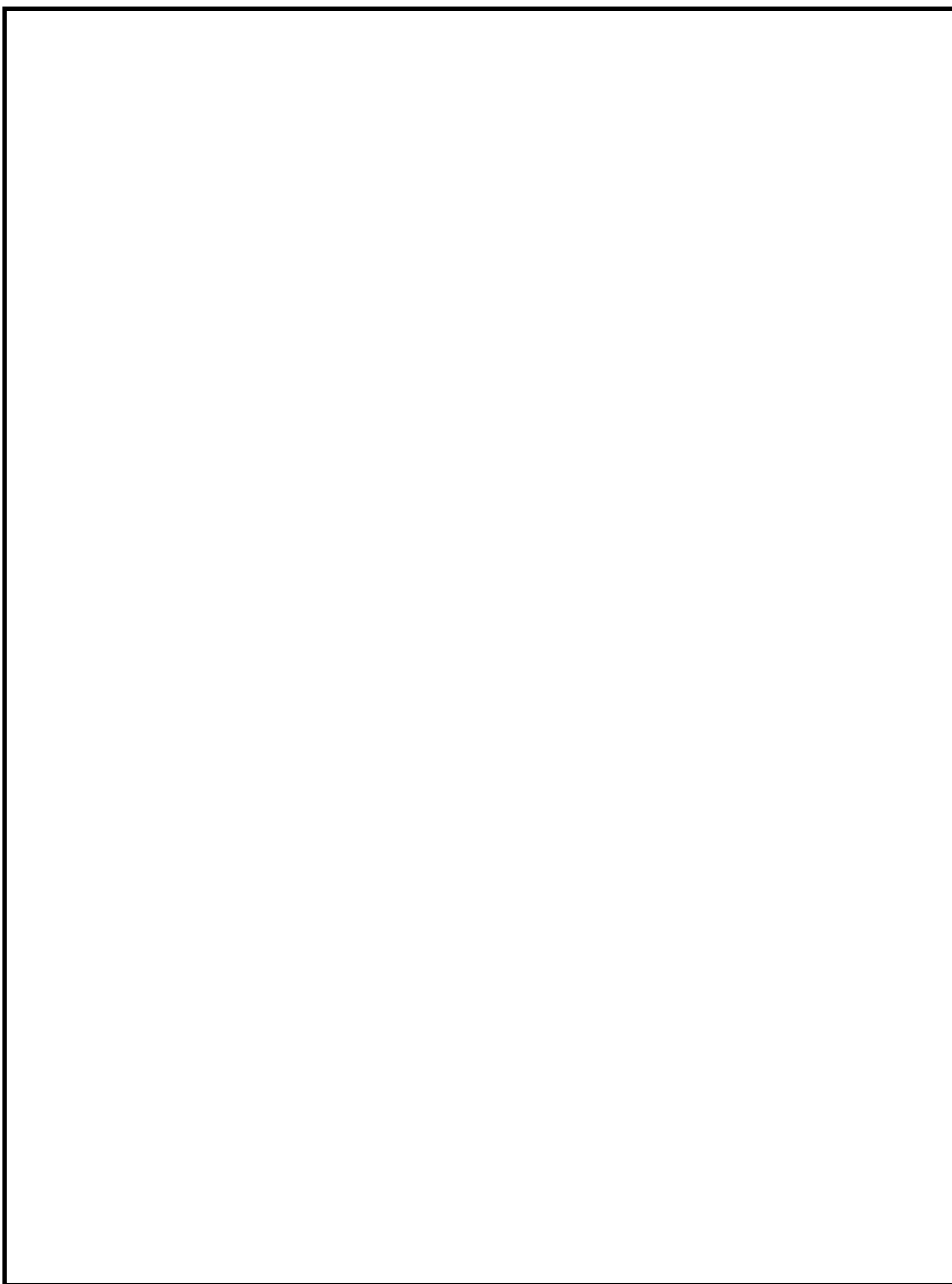


図 4-1 解析モデル

表 4-1 断面性状

応力評価点	D _i (mm)	D _{s i} (mm)	D _{s o} (mm)	R _m (mm)	t _s (mm)	A ₁ (mm ²)	A ₂ (mm ²)
P01, P02							
P03, P04							

注記 * : $A_1 = \pi \cdot D_i \cdot t_s$

表 5-1 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	50	111*	77	169*
P01' P02'	52	111*	79	169*
P03 P04	19	92*	19	147*
P03' P04'	81	92*	131	147*

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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 評価点	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	125	167*	187	254*
P01'	120	167*	182	254*
P02	92	167*	137	254*
P02'	81	167*	126	254*
P03 P04	19	138*	19	221*
P03' P04'	81	138*	131	221*

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-5 ジェットポンプの耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	4
2.1 設計条件	4
2.2 運転条件	4
2.3 重大事故等時の条件	4
2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	4
2.5 材料	4
2.6 物性値	4
2.7 荷重の組合せと応力評価	4
2.8 許容限界	4
2.9 応力の記号と方向	4
3. 外荷重の条件	5
3.1 計算方法	5
3.2 解析モデル及び諸元	5
3.3 死荷重	5
3.4 地震荷重	5
3.4.1 固有周期	5
3.4.2 設計用地震力	5
3.4.3 地震荷重の算出結果	5
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	7
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	7
4.3.2 計算方法	7
4.4 応力の評価	7
5. 応力強さの評価	8
5.1 一次一般膜応力強さの評価	8
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点……………	2
図 3-1	解析モデル……………	9
表 1-1	計算結果の概要……………	3
表 3-1	節点座標……………	10
表 3-2	解析モデルのデータ諸元……………	11
表 3-3	固有周期……………	12
表 3-4	設計用地震力……………	13
表 3-5	ジェットポンプ外荷重……………	14
表 4-1	断面性状……………	15
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ……………	16
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ……………	17

1. 一般事項

本計算書は、ジェットポンプの耐震性についての計算書である。

ジェットポンプは、原子炉圧力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm ⁴
I _p	ねじり係数	mm ⁴
t	厚 さ	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 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。

1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

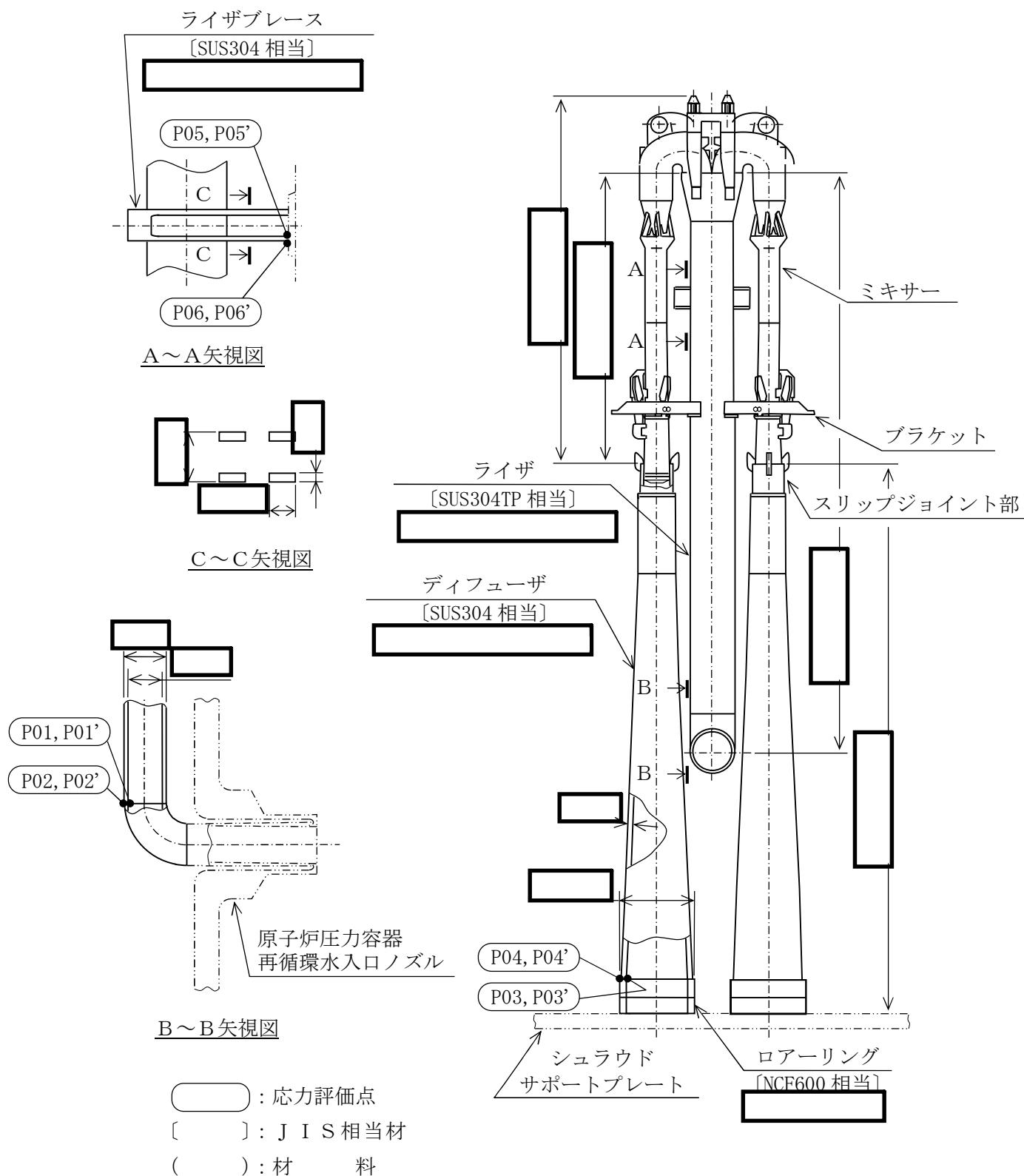


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点（単位：mm）

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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
ライザ SUS304TP	Ⅲ _A S	34	86	P01-P02	70	129	P01-P02
	Ⅳ _A S	35	130	P01-P02	78	195	P01-P02
ディフューザ SUS304	Ⅲ _A S	9	111	P03-P04	11	167	P03-P04
	Ⅳ _A S	10	169	P03-P04	14	254	P03-P04
ライザブレース SUS304	Ⅲ _A S	13	111	P05-P06	71	167	P05-P06
	Ⅳ _A S	17	169	P05-P06	100	254	P05-P06

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件を「応力解析の方針」の 4.3 節に示す。

2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.5 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.6 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.7 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.8 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.9 応力の記号と方向

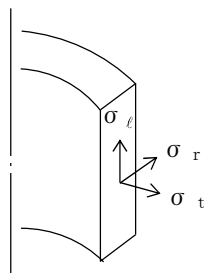
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから、3.2 節に示すはり要素でモデル化したジェットポンプの FEMモデルにより死荷重及び固有周期を求める。さらに、入力加速度に対する各節点の軸力、せん断力及びモーメントの最大値を求める。ここで、ジェットポンプの質量は、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により得られた 3.4.2 項に示す設計震度を入力加速度とする。

以上の計算は、解析コード「MSC NASTRAN」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し、解析モデルを図 3-1 に示す。

また、各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は、

する。

3.3 死荷重

ジェットポンプの評価に用いる死荷重を表 3-5 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

ジェットポンプの固有値解析の結果を表 3-3 に示す。

1 次モードは水平方向に卓越し、固有周期が 0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。また、鉛直方向は 2 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に基づき設定する。

評価に用いる設計用地震力を表 3-4 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力することにより、ジェットポンプの評価位置に発生する荷重を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-5 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{112} , P_{122} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{112}, \quad \sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{122}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{112}, \quad \sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{122}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{112}, \quad \sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{122}$$

$$\text{ここで,} \quad Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

ジェットポンプに働く外荷重を表 3-5 に示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{I_p} \cdot r_m$$

ここで、 r_m ：平均半径又はライザブレースの板厚

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot r_1$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{I_p} \cdot r_2$$

ここで、 r_1 ：外半径又はライザブレースの中立軸から応力評価点までの距離

r_2 ：外半径又はライザブレースの板厚

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

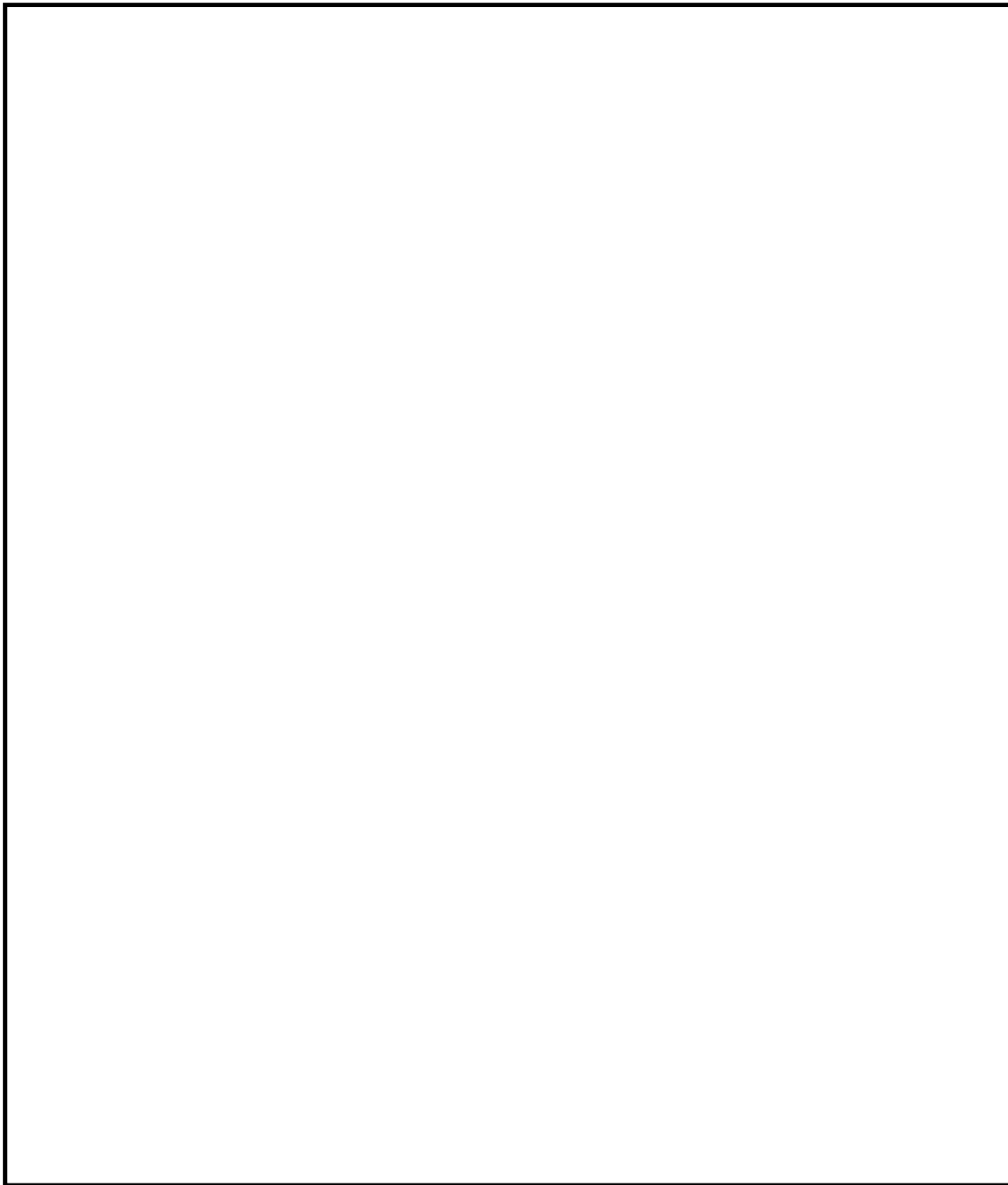


図 3-1 解析モデル

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	内径			
1～ 2, 35～36					
2～ 3, 36～37					
3～ 4, 37～38					
4～ 5, 38～39					
5～ 6, 39～40					
6～ 7, 40～41					
7～ 8, 41～42					
9～10, 43～44					
10～11, 44～45					
11～12, 45～46					
12～13, 46～47					
13～14, 47～48					
14～21, 48～54, 54～21					
21～22					
22～30					
30～31					
31～34					
55～56, 56～26, 26～57, 57～58					
59～63, 66～70					
63～64, 64～24, 24～65, 65～66					

表 3-3 固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1 次		水平

表 3-4 設計用地震力

据付場所 及び 設置高さ (m)	固有周期 (s)	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		水平方向 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
原子炉压力容器内 EL 		C _H =0.98	C _V =0.73	C _H =1.61	C _V =1.36

表 3-5 ジェットポンプ外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	T (N・m)	M (N・m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重 S_d^*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重 S_s	A				
		B				
		C				

注記 * : 流体反力を含む。

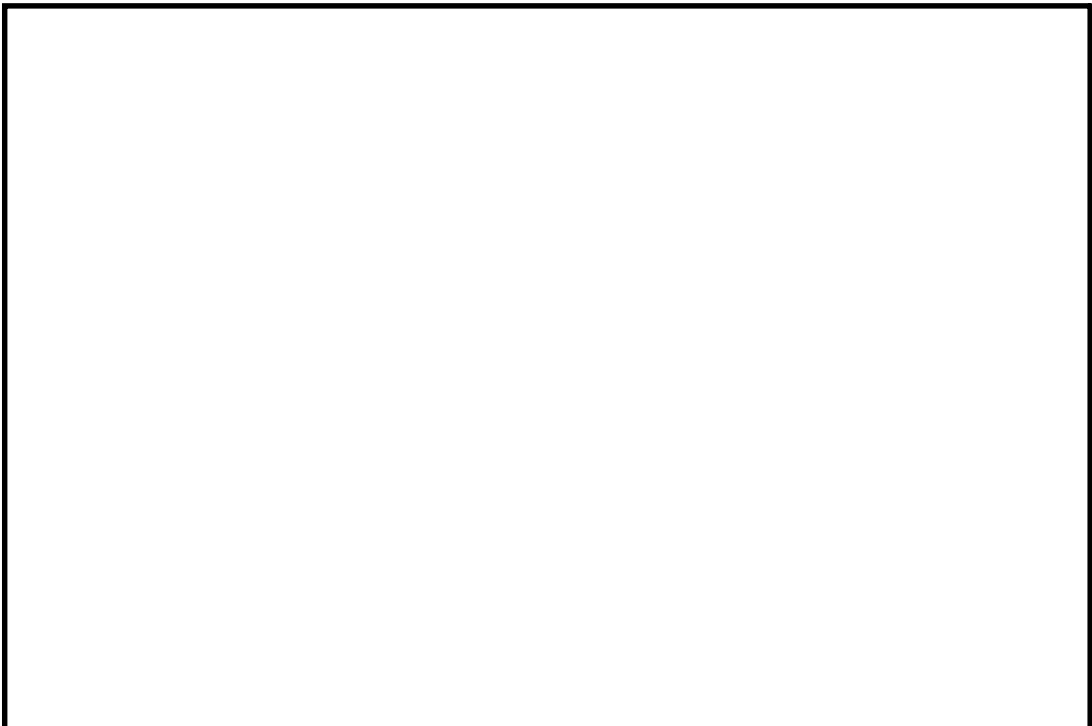


表 4-1 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	D _i (mm)	r _m (mm)	r ₁ (mm)	r ₂ (mm)	A (mm ²)	I ^{*5} (mm ⁴)	I _p (mm ⁴)
P01, P02									
P03, P04									
P05, P06									

注記 *1：平均半径を示す。 $r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$

*2：外半径を示す。 $r_1 = r_2 = \frac{D_o}{2}$

*3：ライザブレースの板厚を示す。

*4：ライザブレースの中立軸から応力評価点までの距離を示す。

*5：二段表記は上段が y 軸まわり，下段が z 軸まわりの値を示す。

y 軸，z 軸それぞれの方向は下図のとおりである。

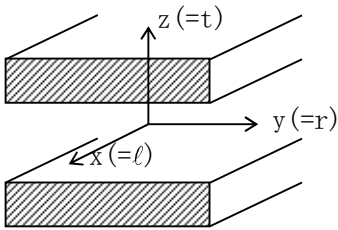


表 5-1 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

(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	34	86 ^{*1}	35	130 ^{*1}
P01' P02'	34	86 ^{*1}	35	130 ^{*1}
P03 P04	9	111 ^{*2}	10	169 ^{*2}
P03' P04'	9	111 ^{*2}	9	169 ^{*2}
P05 P06	13	111 ^{*2}	17	169 ^{*2}
P05' P06'	13	111 ^{*2}	16	169 ^{*2}

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。
*2：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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	70	129 ^{*1}	78	195 ^{*1}
P01' P02'	56	129 ^{*1}	64	195 ^{*1}
P03 P04	11	167 ^{*2}	14	254 ^{*2}
P03' P04'	10	167 ^{*2}	14	254 ^{*2}
P05 P06	71	167 ^{*2}	100	254 ^{*2}
P05' P06'	70	167 ^{*2}	99	254 ^{*2}

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。*2：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-6 給水スパージャの耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	4
2.1 設計条件	4
2.2 運転条件	4
2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態	4
2.4 材料	4
2.5 物性値	4
2.6 荷重の組合せと応力評価	4
2.7 許容限界	4
2.8 応力の記号と方向	4
3. 外荷重の条件	5
3.1 計算方法	5
3.2 解析モデル及び諸元	5
3.3 死荷重	5
3.4 地震荷重	5
3.4.1 固有周期	5
3.4.2 設計用地震力	5
3.4.3 地震荷重の算出結果	5
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	7
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	7
4.3.2 計算方法	7
4.4 応力の評価	7
5. 応力強さの評価	8
5.1 一次一般膜応力強さの評価	8
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	2
図 3-1	解析モデル	9
表 1-1	計算結果の概要	3
表 3-1	節点座標	10
表 3-2	解析モデルのデータ諸元	11
表 3-3	固有周期	12
表 3-4	設計用地震力	13
表 3-5	給水スパージャ外荷重	14
表 4-1	断面性状	15
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	16
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	17

1. 一般事項

本計算書は、給水スパージャの耐震性についての計算書である。

給水スパージャは、原子炉压力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm ⁴
t	厚 さ	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

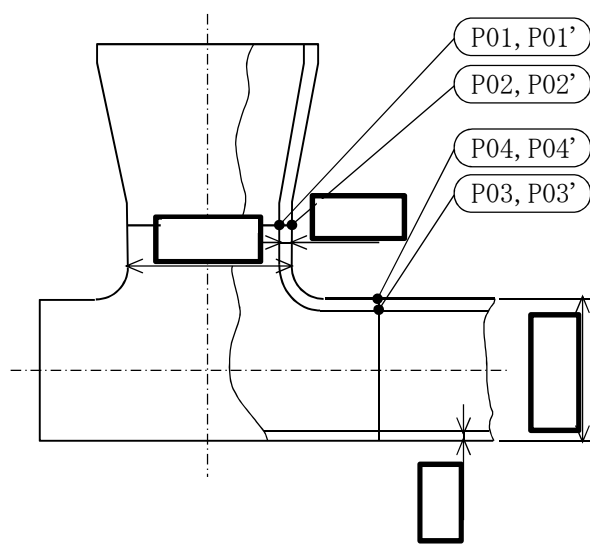
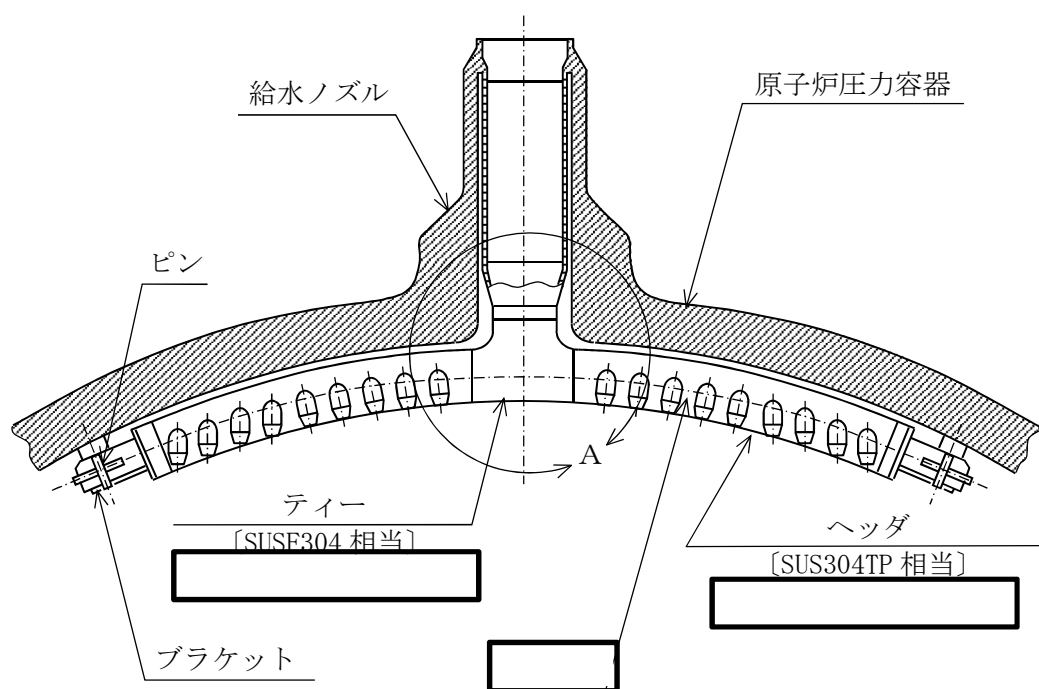
1.4 解析範囲

解析範囲を図 1-1 に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。



A部詳細図

○ : 応力評価点
 [] : J I S 相当材
 () : 材 料

図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位 : mm)

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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
ティー SUSF304	Ⅲ _A S	3	111	P01-P02	9	167	P01-P02
	Ⅳ _A S	3	169	P01-P02	12	254	P01-P02
ヘッド SUS304TP	Ⅲ _A S	3	111	P03'-P04'	22	167	P03-P04
	Ⅳ _A S	3	169	P03'-P04'	23	254	P03-P04

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.4 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.5 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.6 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.7 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.8 応力の記号と方向

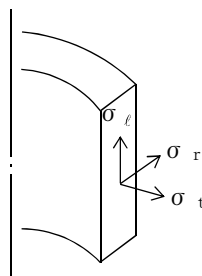
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから、3.2 節に示すはり要素でモデル化した給水スパージャの FEM モデルにより死荷重及び固有周期を求める。さらに、入力加速度に対する各節点の軸力、せん断力及びモーメントの最大値を求める。ここで、給水スパージャの質量は、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により得られた 3.4.2 項に示す設計震度を入力加速度とする。

以上の計算は、解析コード「MSC NASTRAN」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し、解析モデルを図 3-1 に示す。

また、各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は、

ものとする。

3.3 死荷重

給水スパージャの評価に用いる死荷重を表 3-5 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

給水スパージャの固有値解析の結果を表 3-3 に示す。

1 次モードは水平方向に卓越し、固有周期が 0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。また、鉛直方向は 2 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に基づき設定する。

評価に用いる設計用地震力を表 3-4 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力することにより、給水スパージャの評価位置に発生する荷重を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-5 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{65} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{65}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{65}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{65}$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

給水スパージャに働く外荷重を表 3-5 示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。



図 3-1 解析モデル

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	厚さ			
1～ 2					
2～ 3					
3～ 4					
4－15, 15－ 5, 5～ 9, 4－16, 16－10, 10～14					

表 3-3 固有周期

モード	固有周期	卓越方向
	(s)	
1 次		水平

表 3-4 設計用地震力

据付場所 及び 設置高さ (m)	固有周期 (s)	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		水平方向 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
原子炉圧力容器内 EL. 		C _H =0.97	C _V =0.75	C _H =1.62	C _V =1.38

表 3-5 給水スパージャ外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	T (N・m)	M (N・m)
L04	死荷重	A				
		B				
L14	地震荷重 S_d^*	A				
		B				
L16	地震荷重 S_s	A				
		B				

注記 * : 流体反力を含む。

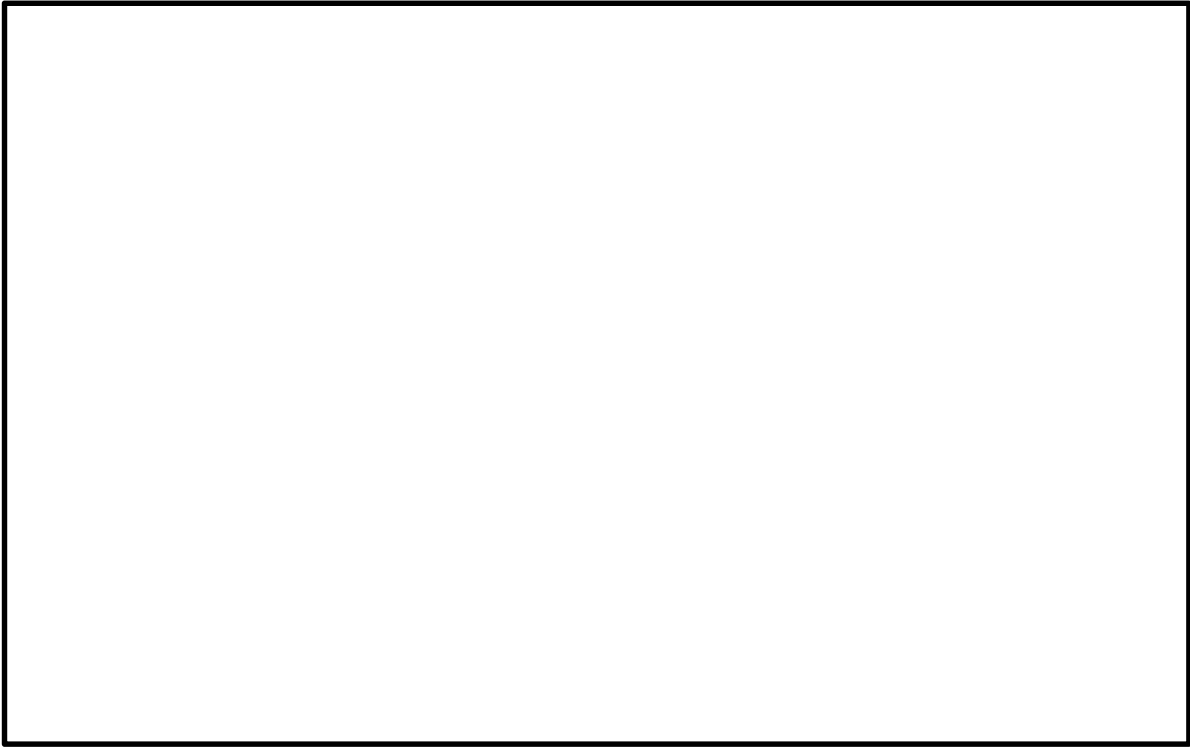


表 4-1 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02				
P03, P04				

表 5-1 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	3	111*	3	169*
P01' P02'	2	111*	3	169*
P03 P04	3	111*	3	169*
P03' P04'	3	111*	3	169*

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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	9	167*	12	254*
P01' P02'	6	167*	10	254*
P03 P04	22	167*	23	254*
P03' P04'	22	167*	23	254*

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-7 高圧及び低圧炉心スプレースパージャ
の耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	4
2.1 設計条件	4
2.2 運転条件	4
2.3 重大事故等時の条件	4
2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	4
2.5 材料	4
2.6 物性値	4
2.7 荷重の組合せと応力評価	4
2.8 許容限界	4
2.9 応力の記号と方向	4
3. 外荷重の条件	5
3.1 計算方法	5
3.2 解析モデル及び諸元	5
3.3 死荷重	5
3.4 地震荷重	5
3.4.1 固有周期	5
3.4.2 設計用地震力	5
3.4.3 地震荷重の算出結果	5
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	7
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	7
4.3.2 計算方法	7
4.4 応力の評価	7
5. 応力強さの評価	8
5.1 一次一般膜応力強さの評価	8
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点……………	2
図 3-1	解析モデル……………	9
表 1-1	計算結果の概要……………	3
表 3-1	節点座標……………	10
表 3-2	解析モデルのデータ諸元……………	11
表 3-3	固有周期……………	12
表 3-4	設計用地震力……………	13
表 3-5	高圧及び低圧炉心スプレイスパーージャ外荷重……………	14
表 4-1	断面性状……………	15
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ……………	16
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ……………	17

1. 一般事項

本計算書は、高圧及び低圧炉心スプレースパージャの耐震性についての計算書である。

高圧及び低圧炉心スプレースパージャは、原子炉压力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm ⁴
t	厚 さ	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

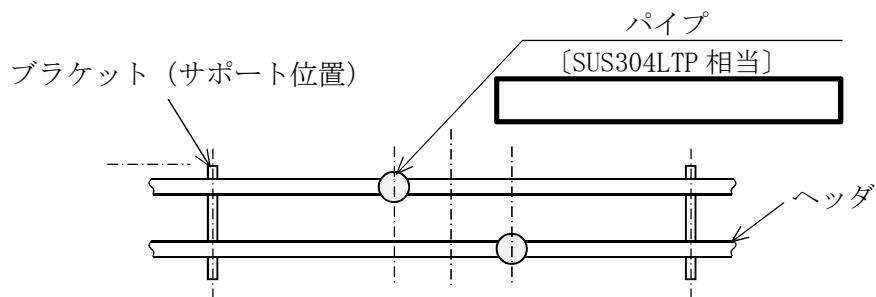
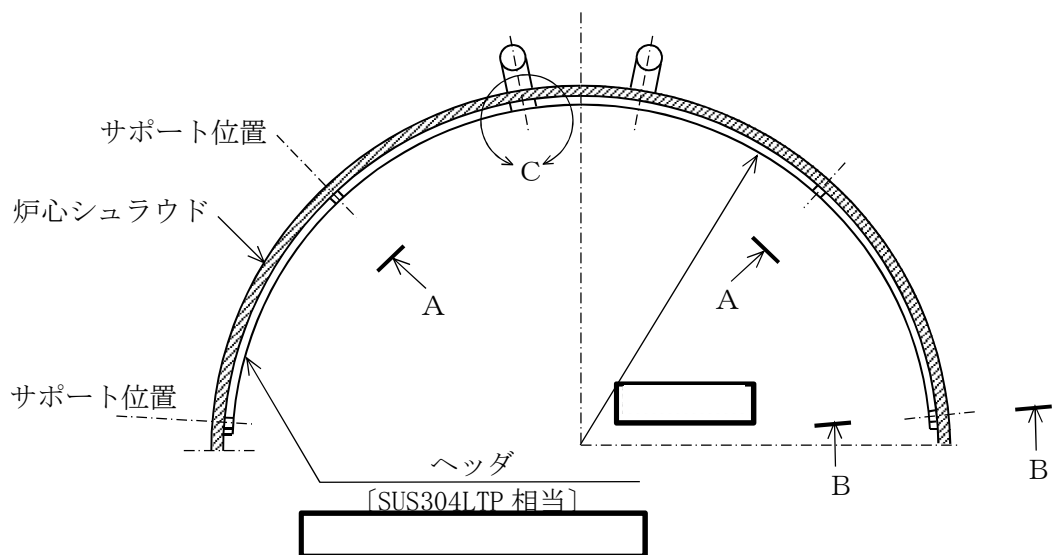
1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

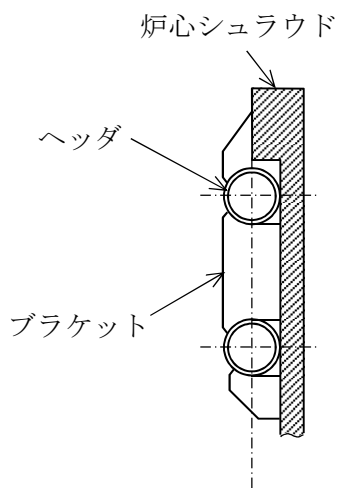
1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

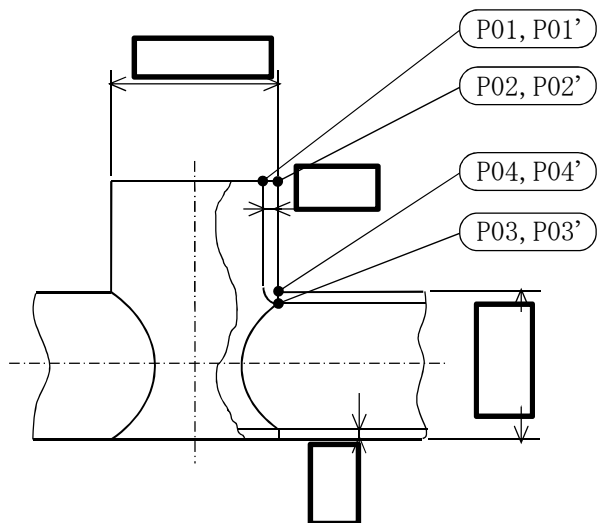
なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。



A～A矢視図



B～B断面図



C部詳細図

: 応力評価点
 : J I S 相当材
 : 材 料

図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位 : mm)

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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 SUS304LTP	Ⅲ _A S	7	94	P01-P02	12	141	P01-P02
	Ⅳ _A S	8	150	P01-P02	14	226	P01-P02
ヘッド SUS304LTP	Ⅲ _A S	6	94	P03-P04	37	141	P03-P04
	Ⅳ _A S	7	150	P03-P04	43	226	P03-P04

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件を「応力解析の方針」の 4.3 節に示す。

2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.5 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.6 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.7 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.8 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.9 応力の記号と方向

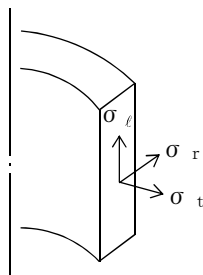
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから、3.2 節に示すはり要素でモデル化した高压及び低压炉心スパー ज्याの F E Mモデルにより死荷重及び固有周期を求める。さらに、入力加速度に対する各節点の軸力、せん断力及びモーメントの最大値を求める。ここで、高压及び低压炉心スパー ज्याの質量は、炉心、原子炉压力容器及び压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により得られた 3.4.2 項に示す設計震度を入力加速度とする。

以上の計算は、解析コード「M S C N A S T R A N」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し、解析モデルを図 3-1 に示す。

また、各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は、

とする。

3.3 死荷重

高压及び低压炉心スプレイスパー ज्या評価に用いる死荷重を表 3-5 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

高压及び低压炉心スプレイスパー ज्याの固有値解析の結果を表 3-3 に示す。

1 次モードは水平方向に卓越し、固有周期が 0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。また、鉛直方向は 2 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に基づき設定する。

評価に用いる設計用地震力を表 3-4 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力することにより、高压及び低压炉心スプレイスパー ज्याの評価位置に発生する荷重を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-5 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 節に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{74} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{74}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{74}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{74}$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

高圧及び低圧炉心スプレースパージャに働く外荷重を表 3-5 示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

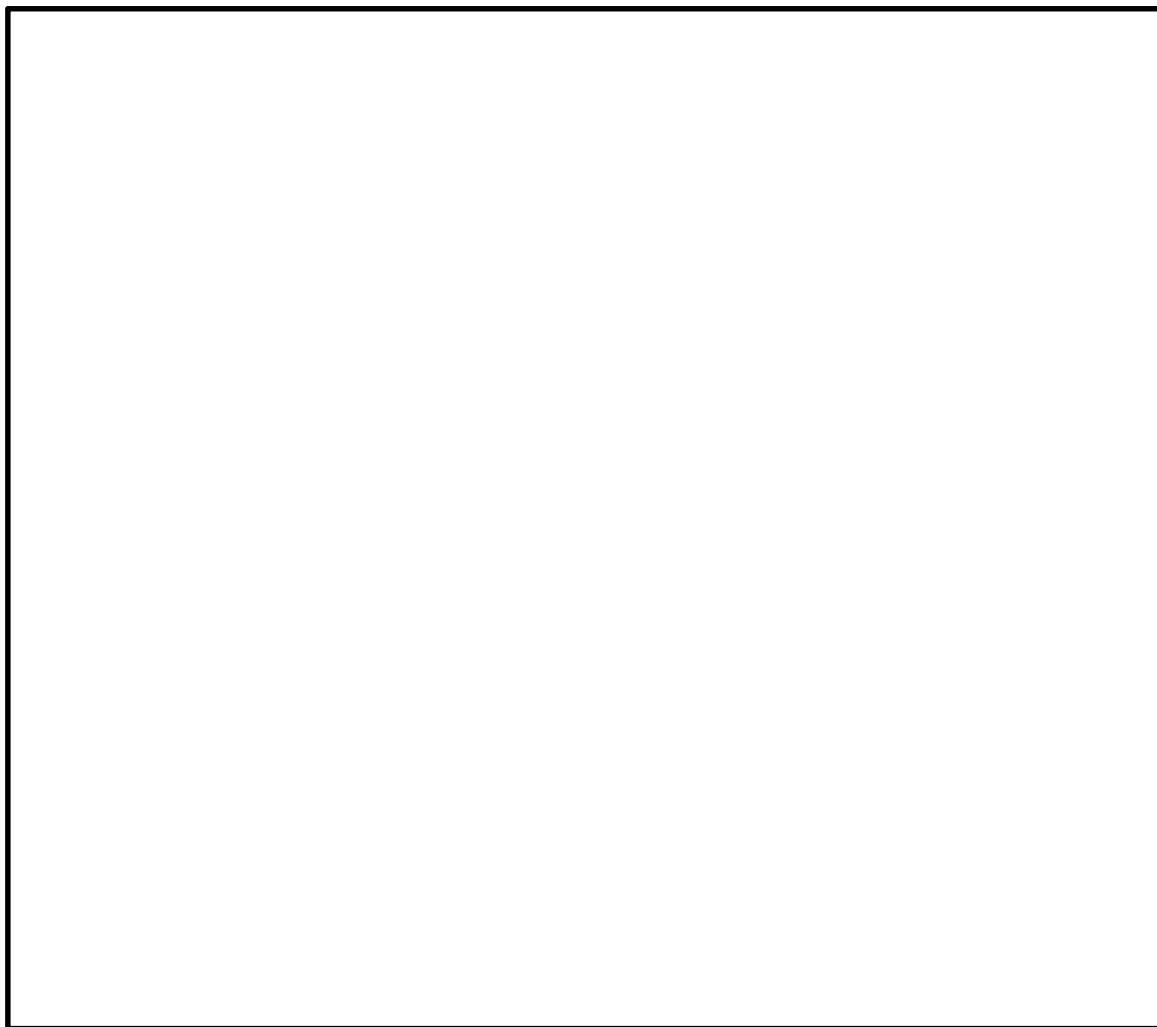


図 3-1 解析モデル

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	厚さ			
1～2					
2～15, 2～16, 16～30					

表 3-3 固有周期

モード	固有周期	卓越方向
	(s)	
1 次		水平

表 3-4 設計用地震力

据付場所 及び 設置高さ (m)	固有周期 (s)	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
		水平方向 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
原子炉压力容器内 EL. 		$C_H=1.68$	$C_V=0.77$	$C_H=2.54$	$C_V=1.42$

表 3-5 高圧及び低圧炉心スプレースパージャ外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F _L (N)	F _S (N)	T (N・m)	M (N・m)
L04	死荷重	A				
		B				
L14	地震荷重 S _d * [*]	A				
		B				
L16	地震荷重 S _s	A				
		B				

注記 * : 流体反力を含む。

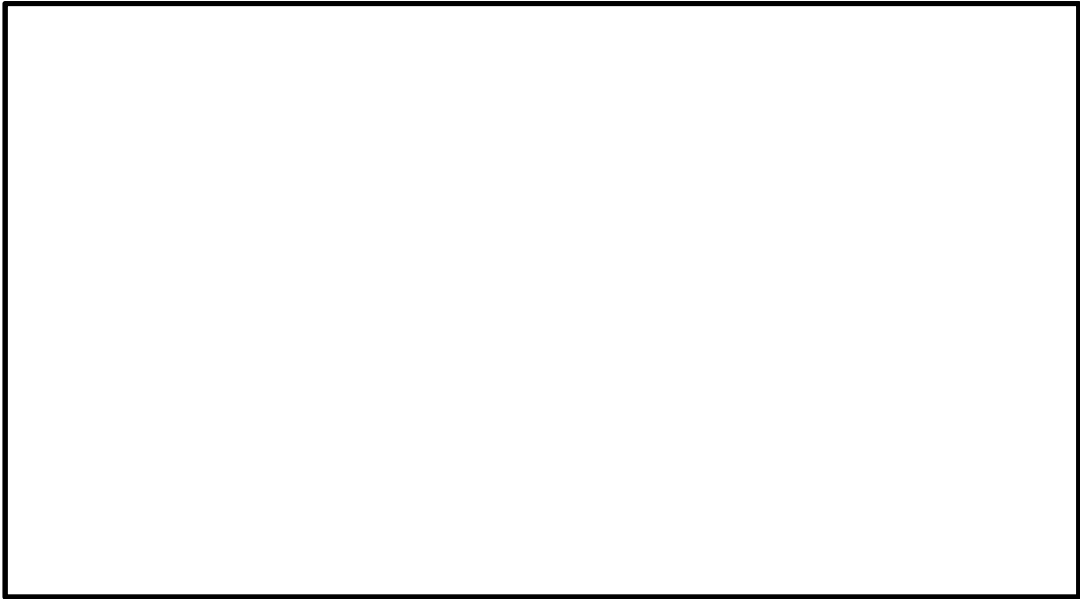


表 4-1 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02				
P03, P04				

表 5-1 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	7	94*	8	150*
P01' P02'	7	94*	7	150*
P03 P04	6	94*	7	150*
P03' P04'	6	94*	6	150*

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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	12	141 [*]	14
P01' P02'	10	141 [*]	12	226 [*]
P03 P04	37	141 [*]	43	226 [*]
P03' P04'	36	141 [*]	42	226 [*]

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-8 残留熱除去系配管（原子炉压力容器内部）
の耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	4
2.1 設計条件	4
2.2 運転条件	4
2.3 重大事故等時の条件	4
2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	4
2.5 材料	4
2.6 物性値	4
2.7 荷重の組合せと応力評価	4
2.8 許容限界	4
2.9 応力の記号と方向	4
3. 外荷重の条件	5
3.1 計算方法	5
3.2 解析モデル及び諸元	5
3.3 死荷重	5
3.4 地震荷重	5
3.4.1 固有周期	5
3.4.2 設計用地震力	5
3.4.3 地震荷重の算出結果	5
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	7
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	7
4.3.2 計算方法	7
4.4 応力の評価	7

5. 応力強さの評価	8
5.1 一次一般膜応力強さの評価	8
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	2
図 3-1	解析モデル	9
表 1-1	計算結果の概要	3
表 3-1	節点座標	10
表 3-2	解析モデルのデータ諸元	11
表 3-3	固有周期	12
表 3-4	設計用地震力	13
表 3-5	残留熱除去系配管外荷重	14
表 4-1	断面性状	15
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	16
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	17

1. 一般事項

本計算書は、残留熱除去系配管（原子炉压力容器内部）（以下「残留熱除去系配管」という。）の耐震性についての計算書である。

残留熱除去系配管は、原子炉压力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-4-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm^4
t	厚 さ	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の3.1節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

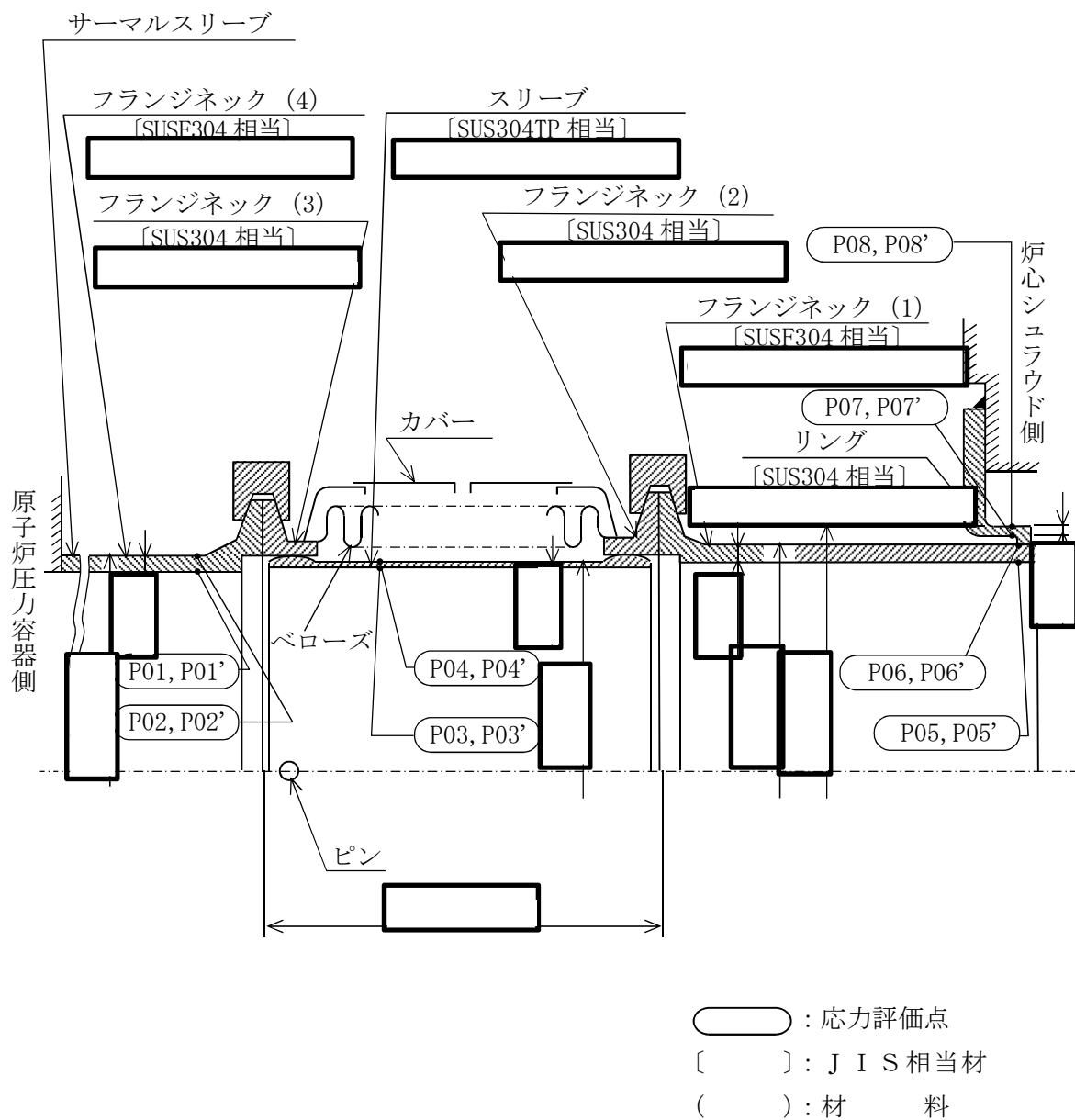


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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
フランジネック (4) SUSF304	Ⅲ _A S	1	111	P01-P02	1	167	P01-P02
	Ⅳ _A S	1	169	P01-P02	1	254	P01-P02
スリーブ SUS304TP	Ⅲ _A S	4	172	P03-P04	4	258	P03-P04
	Ⅳ _A S	4	260	P03-P04	4	391	P03-P04
フランジネック (1) SUSF304	Ⅲ _A S	2	68	P05-P06	2	103	P05-P06
	Ⅳ _A S	2	104	P05-P06	2	156	P05-P06
リング SUS304	Ⅲ _A S	4	172	P07-P08	4	258	P07-P08
	Ⅳ _A S	5	260	P07-P08	5	391	P07-P08

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件を「応力解析の方針」の 4.3 節に示す。

2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.5 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.6 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.7 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.8 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.6 節に示す。

溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の 3.7 節に示す。

2.9 応力の記号と方向

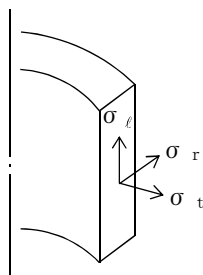
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから、死荷重及び固有周期を求める。さらに、入力加速度に対する各節点の軸力、せん断力及びモーメントの最大値を求める。

以上の計算は、解析コード「MSC NASTRAN」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し、解析モデルを図 3-1 に示す。

また、各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は、

を考慮する。

3.3 死荷重

残留熱除去系配管の評価に用いる死荷重を表 3-5 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

残留熱除去系配管の固有値解析の結果を表 3-3 に示す。

1 次モードは鉛直方向に卓越し、固有周期が 0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。また、水平方向は 2 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に基づき設定する。

評価に用いる設計用地震力を表 3-4 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力することにより、残留熱除去系配管の評価位置に発生する荷重を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-5 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{135} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{135}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{135}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{135}$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

残留熱除去系配管に働く外荷重を表 3-5 示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.6 節及び 3.7 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.6 節及び 3.7 節に示す許容値を満足する。

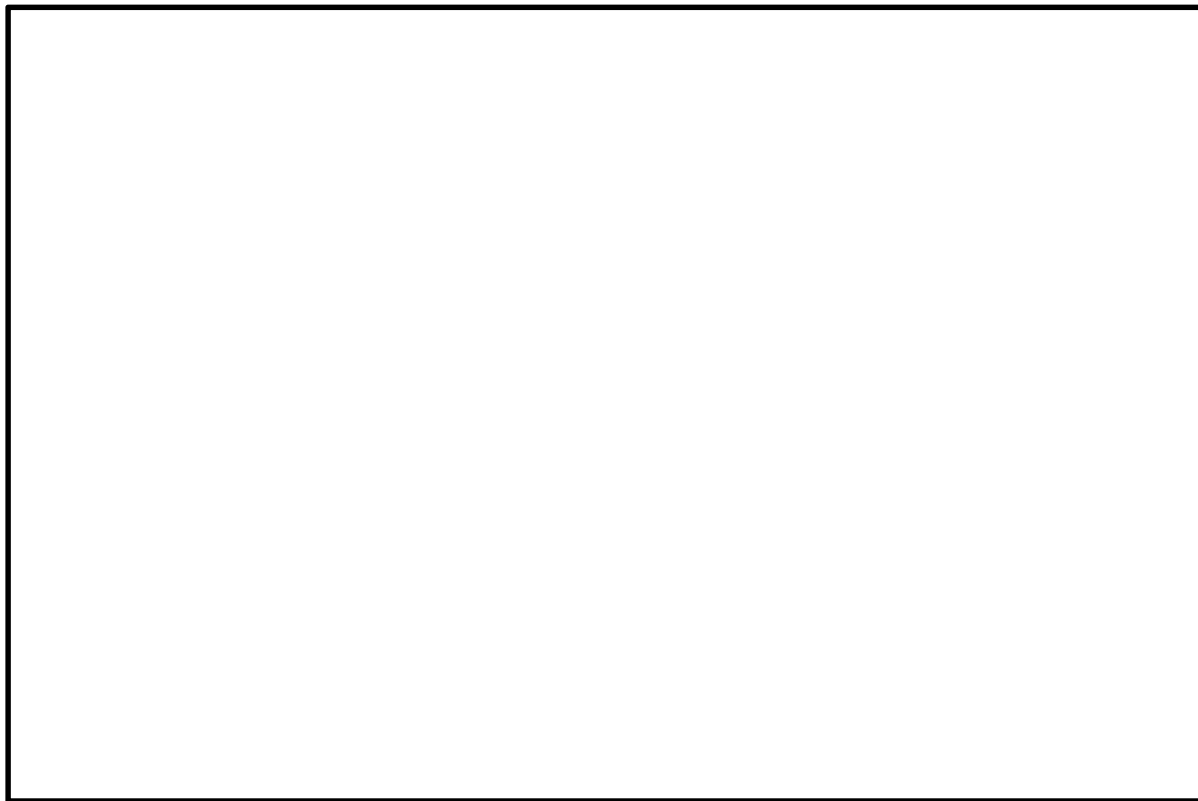


図 3-1 解析モデル

表 3－1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	厚さ			
1～10					
10～13					
13～17					
17～20					
20～21					
21～22					

注：節点 12 に対しては，集中荷重 を付加させる。

節点 18 に対しては，集中荷重 を付加させる。

表 3-3 固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1 次		鉛直

表 3-4 設計用地震力

据付場所 及び 設置高さ (m)	固有周期 (s)	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
		水平方向 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
原子炉压力容器内 EL 	0.007	$C_H=1.68$	$C_V=0.77$	$C_H=2.54$	$C_V=1.42$

表 3-5 残留熱除去系配管外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	T (N・m)	M (N・m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重 S_d^*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重 S_s	A				
		B				
		C				



表 4－1 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02				
P03, P04				
P05, P06				
P07, P08				

表 5-1 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	1	111 ^{*1}	1	169 ^{*1}
P01' P02'	1	111 ^{*1}	1	169 ^{*1}
P03 P04	4	172	4	260
P03' P04'	4	172	4	260
P05 P06	2	68 ^{*2}	2	104 ^{*2}
P05' P06'	2	68 ^{*2}	2	104 ^{*2}
P07 P08	4	172	5	260
P07' P08'	4	172	4	260

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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	1	167 ^{*1}	1	254 ^{*1}
P01' P02'	1	167 ^{*1}	1	254 ^{*1}
P03 P04	4	258	4	391
P03' P04'	4	258	4	391
P05 P06	2	103 ^{*2}	2	156 ^{*2}
P05' P06'	2	103 ^{*2}	2	156 ^{*2}
P07 P08	4	258	5	391
P07' P08'	4	258	4	391

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。*2：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-9 高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	4
2.1 設計条件	4
2.2 運転条件	4
2.3 重大事故等時の条件	4
2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	4
2.5 材料	4
2.6 物性値	4
2.7 荷重の組合せと応力評価	4
2.8 許容限界	4
2.9 応力の記号と方向	4
3. 外荷重の条件	5
3.1 計算方法	5
3.2 解析モデル及び諸元	5
3.3 死荷重	5
3.4 地震荷重	5
3.4.1 固有周期	5
3.4.2 設計用地震力	5
3.4.3 地震荷重の算出結果	5
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	7
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	7
4.3.2 計算方法	7
4.4 応力の評価	7
5. 応力強さの評価	8
5.1 一次一般膜応力強さの評価	8
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	2
図 3-1	解析モデル	9
図 3-2	振動モード図	13
表 1-1	計算結果の概要	3
表 3-1	節点座標	10
表 3-2	解析モデルのデータ諸元	11
表 3-3	固有周期	12
表 3-4	設計用地震力	15
表 3-5	高圧炉心スプレイ配管外荷重	16
表 3-6	低圧炉心スプレイ配管外荷重	17
表 4-1	断面性状	18
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	19
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	20

1. 一般事項

本計算書は、高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）（以下「高圧及び低圧炉心スプレイ配管」という。）の耐震性についての計算書である。

高圧及び低圧炉心スプレイ配管は、原子炉圧力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉圧力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm^4

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

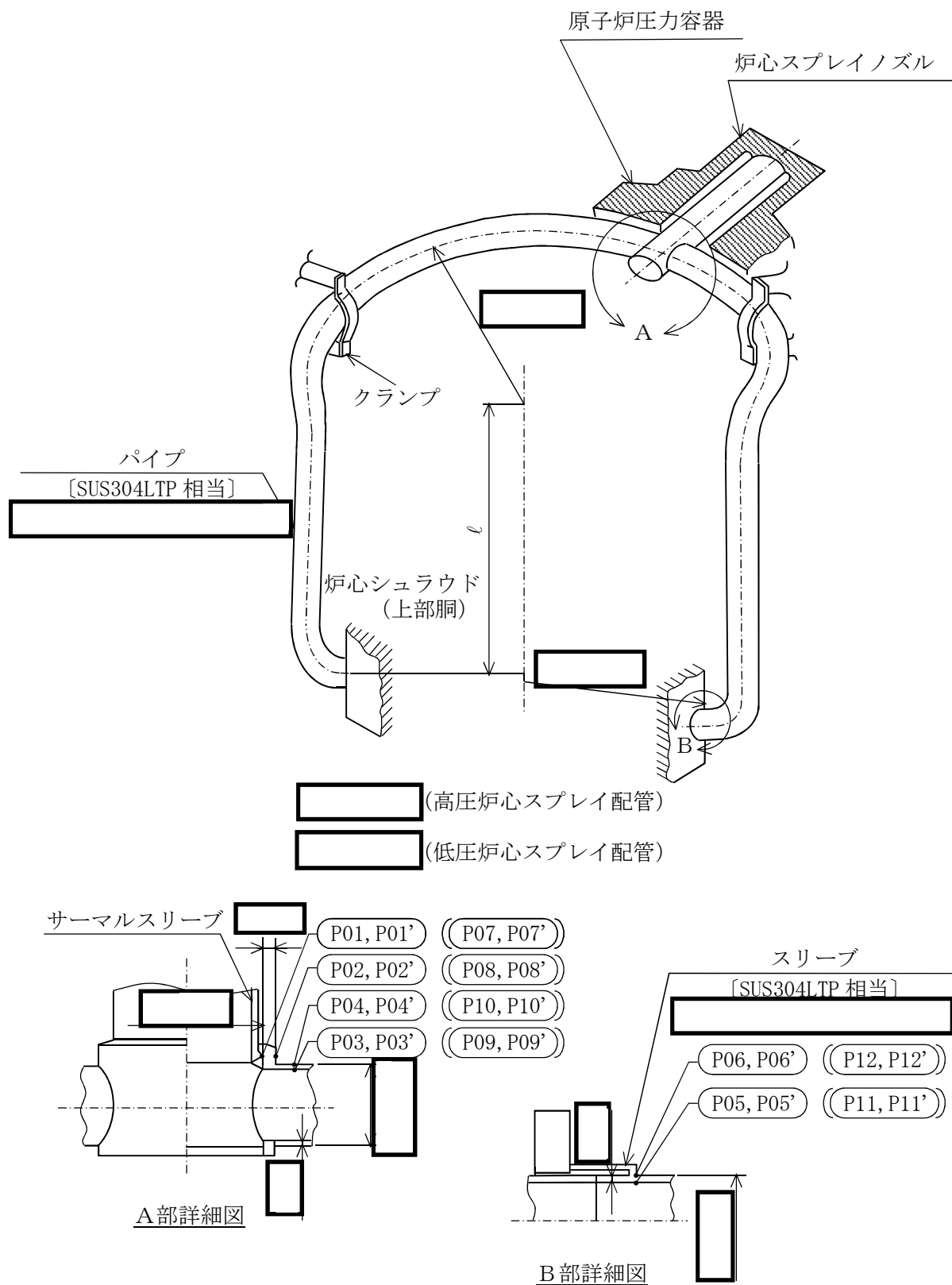


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位 : mm)

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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
高圧炉心スプレイ配管 SUS304LTP	Ⅲ _A S	37	65	P05'-P06'	106	163	P03-P04
	Ⅳ _A S	54	104	P05'-P06'	153	261	P03-P04
低圧炉心スプレイ配管 SUS304LTP	Ⅲ _A S	47	65	P11'-P12'	142	163	P09-P10
	Ⅳ _A S	78	104	P11'-P12'	228	261	P09-P10

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件を「応力解析の方針」の 4.3 節に示す。

2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.5 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.6 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.7 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.8 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.9 応力の記号と方向

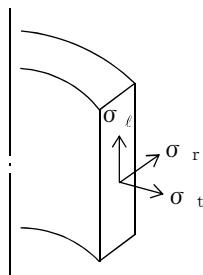
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから、3.2 節に示すはり要素でモデル化した高圧及び低圧炉心スプレイ配管の F E Mモデルにより死荷重及び固有周期を求める。さらに、入力加速度に対する各節点の軸力、せん断力及びモーメントの最大値を求める。ここで、高圧及び低圧炉心スプレイ配管の質量は、炉心、原子炉压力容器及び压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により得られた 3.4.2 項に示す設計震度及び応答曲線（減衰定数 1.0%）を包絡して入力加速度とする。

以上の計算は、解析コード「MSC NASTRAN」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し、解析モデルを図 3-1 に示す。

また、各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は、

とする。

3.3 死荷重

高圧及び低圧炉心スプレイ配管の評価に用いる死荷重を表 3-5 及び表 3-6 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

高圧及び低圧炉心スプレイ配管の固有周期を表 3-3 に、振動モード図を図 3-2 に示す。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」及び「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表 3-4 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力とし、静的解析及びスペクトルモード解析により、高圧及び低圧炉心スプレイ配管の評価位置に発生する荷重の包絡値を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-5 及び表 3-6 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{75} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{75}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{75}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{75}$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

高圧及び低圧炉心スプレイ配管に働く外荷重を表 3-5, 表 3-6 に示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

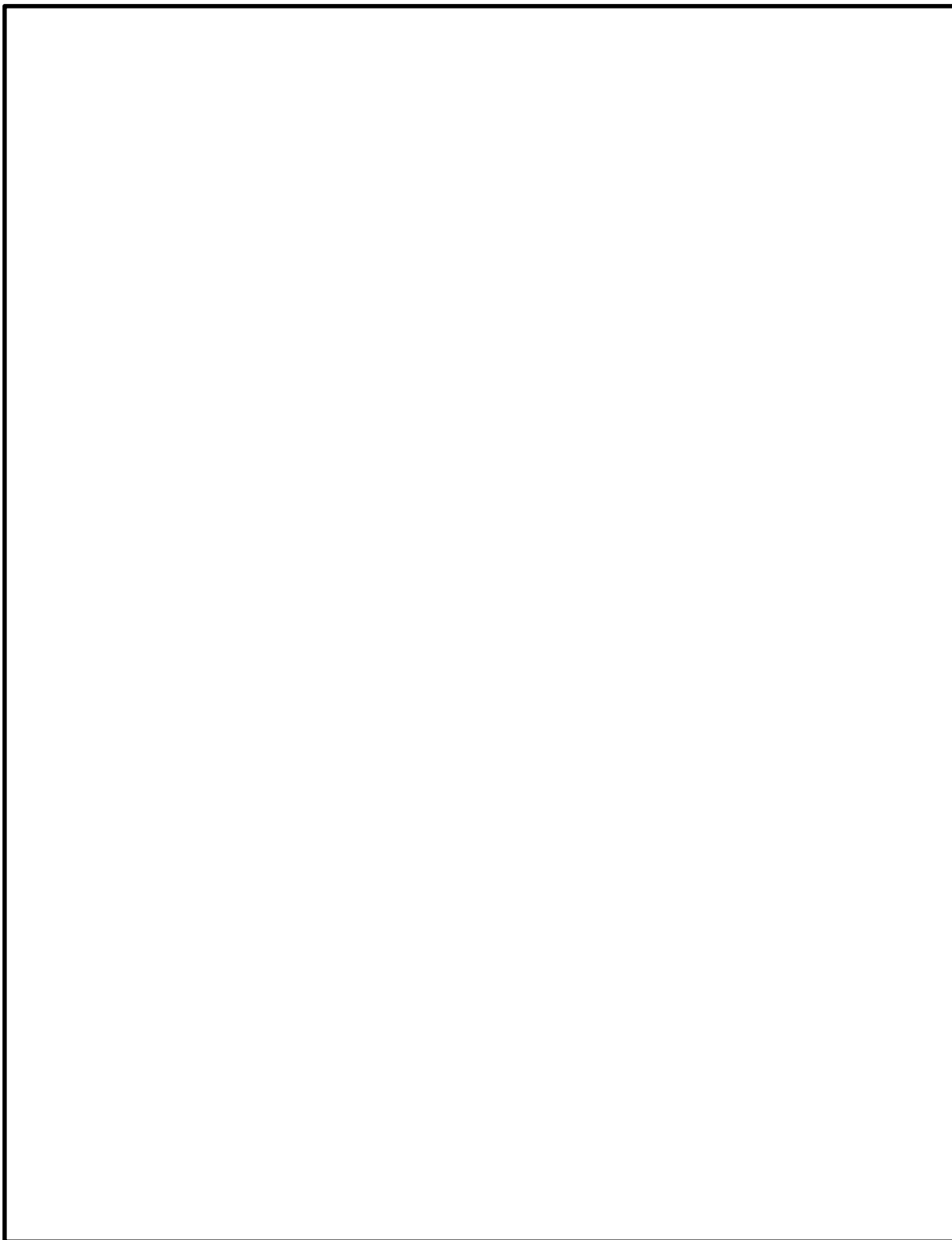


図 3-1 解析モデル

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標*		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

注記 *：（ ）内は、低圧炉心スプレイ配管に適用する。

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	厚さ			
1～ 3					
3～ 4					
4～18, 4～20, 20～29					
18～19, 29～30					

表 3-3(1) 固有周期（高圧炉心スプレイ配管）

部分	次数	固有周期	卓越方向	刺激係数		
		(s)		X	Y	Z
高圧炉心 スプレイ配管	1 次		水平			
	2 次		鉛直			
	3 次		水平			

表 3-3(2) 固有周期（低圧炉心スプレイ配管）

部分	次数	固有周期	卓越方向	刺激係数		
		(s)		X	Y	Z
低圧炉心 スプレイ配管	1 次		水平			
	2 次		鉛直			
	3 次		水平			



図 3-2(1) 振動モード図 (高圧炉心スプレイ配管 1 次)

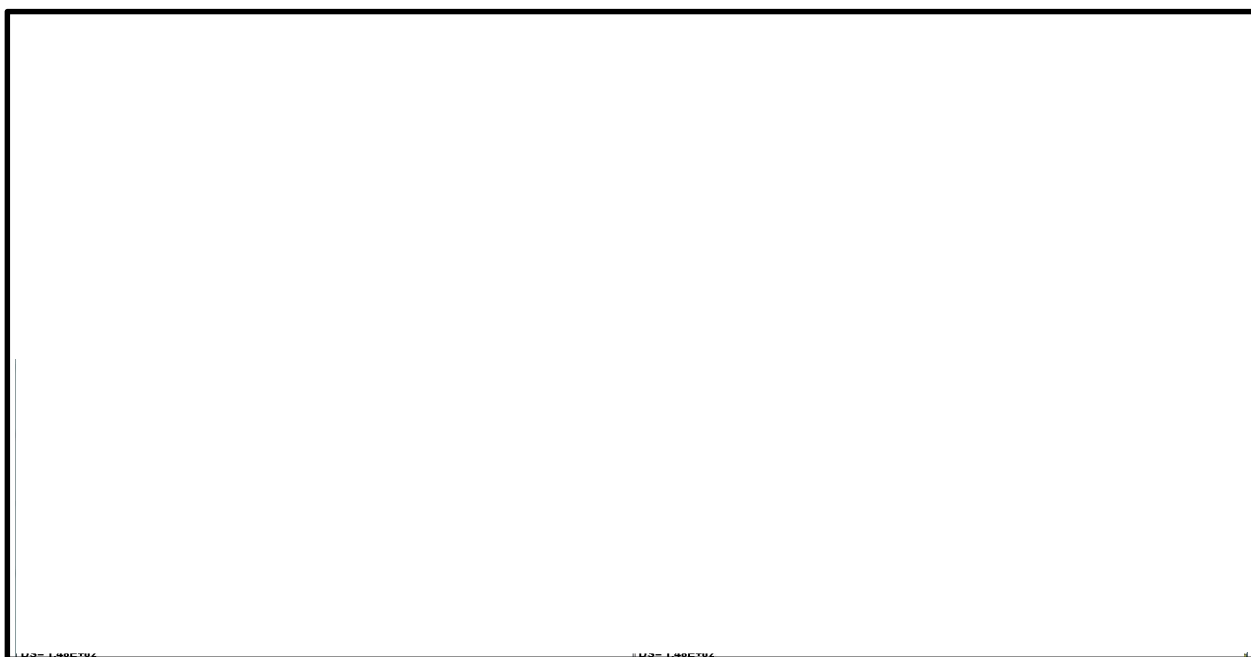


図 3-2(2) 振動モード図 (高圧炉心スプレイ配管 2 次)

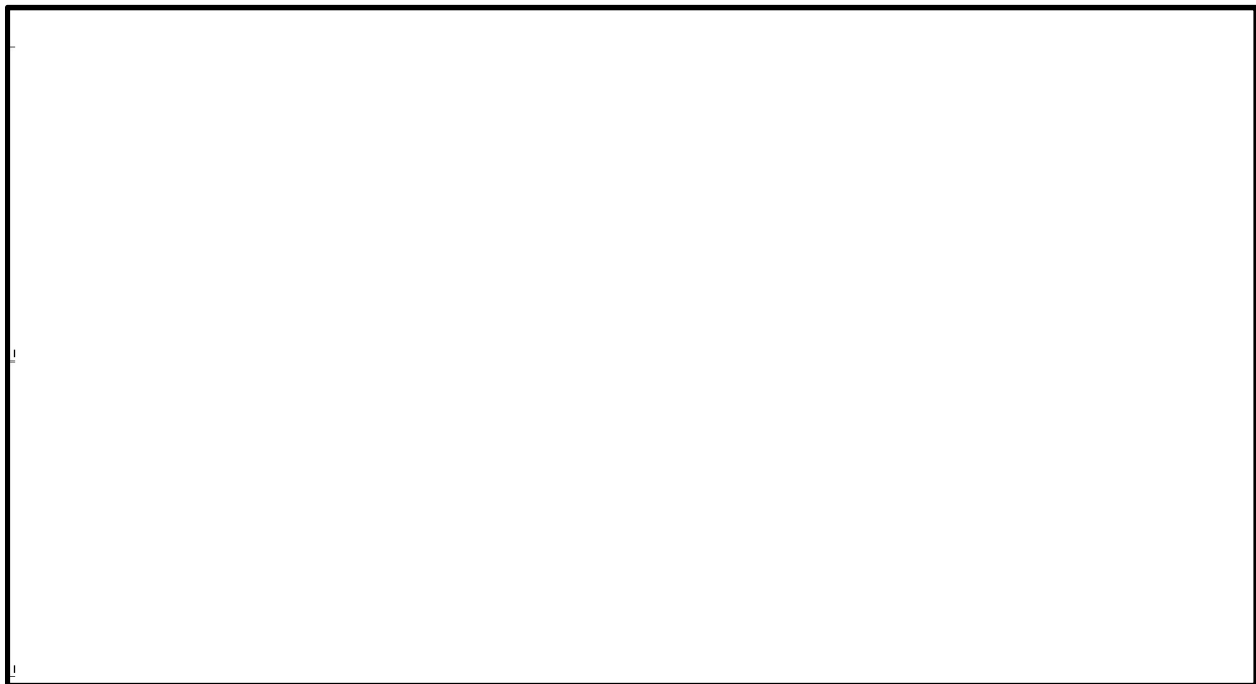


図 3-2(3) 振動モード図（低圧炉心スプレイ配管 1 次 ）

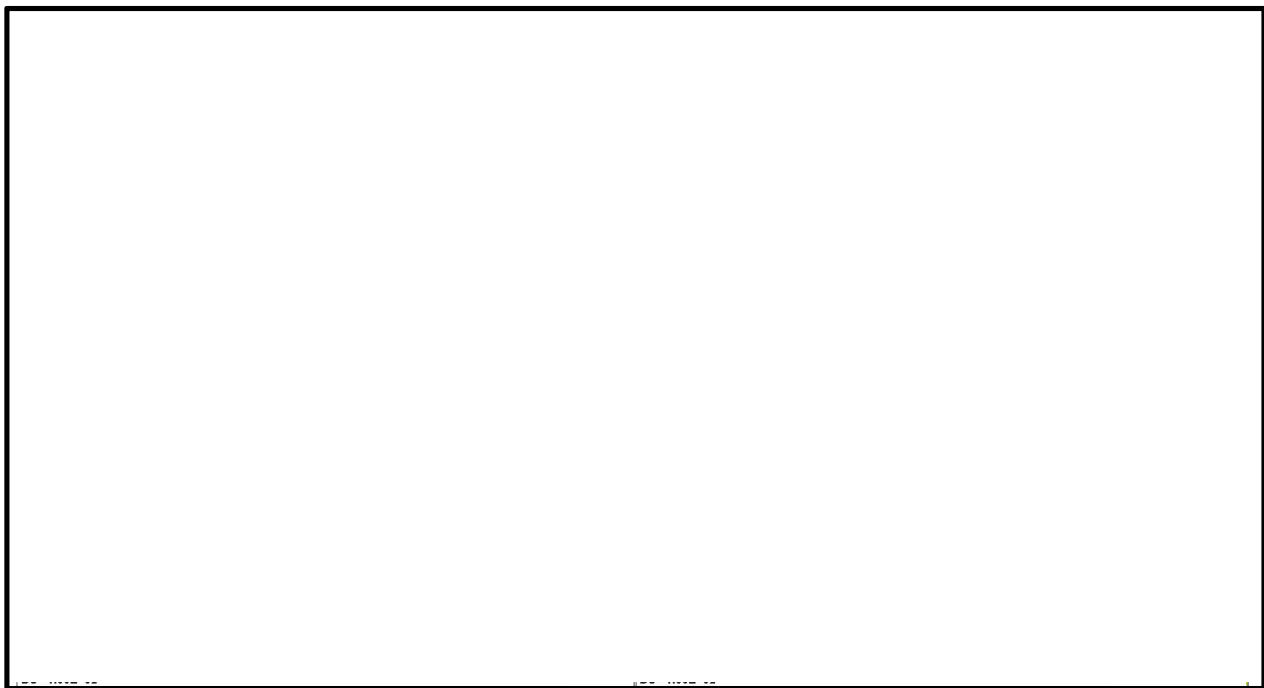


図 3-2(4) 振動モード図（低圧炉心スプレイ配管 2 次 ）

表 3-4 設計用地震力

据付場所及び設置高さ (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		減衰定数 (%)	
	高圧炉心ス プレイ配管	低圧炉心ス プレイ配管	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉圧力容器内 EL. 			C _H =0.97 又は*1	C _V =0.75 又は*1	C _H =1.62 又は*2	C _V =1.38 又は*2	1.0* ³	1.0* ³

注記 *1：弾性設計用地震動 S_dに基づく設備評価用床応答曲線より得られる値
 *2：基準地震動 S_sに基づく設備評価用床応答曲線より得られる値
 *3：溶接構造物に適用される減衰定数の値

表 3-5 高圧炉心スプレイ配管外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	T (N・m)	M (N・m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重 S_d^*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重 S_s	A				
		B				
		C				

注記 *：流体反力を含む。

表 3-6 低圧炉心スプレイ配管外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	T (N・m)	M (N・m)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
L14	地震荷重 S_d^*	A				
		B				
		C				
L16	地震荷重 S_s	A				
		B				
		C				

注記 * : 流体反力を含む。

表 4-1 断面性状

応力評価点	D _o (mm)	D _i (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02				
P03, P04				
P05, P06				
P07, P08				
P09, P10				
P11, P12				

表 5-1 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	7	65 ^{*1}	9	104 ^{*1}
P01' P02'	7	65 ^{*1}	10	104 ^{*1}
P03 P04	13	108 ^{*2}	19	174 ^{*2}
P03' P04'	14	108 ^{*2}	19	174 ^{*2}
P05 P06	36	65 ^{*1}	54	104 ^{*1}
P05' P06'	37	65 ^{*1}	54	104 ^{*1}
P07 P08	7	65 ^{*1}	11	104 ^{*1}
P07' P08'	7	65 ^{*1}	12	104 ^{*1}
P09 P10	16	108 ^{*2}	25	174 ^{*2}
P09' P10'	17	108 ^{*2}	25	174 ^{*2}
P11 P12	47	65 ^{*1}	78	104 ^{*1}
P11' P12'	47	65 ^{*1}	78	104 ^{*1}

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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	12	98 ^{*1}	17	156 ^{*1}
P01' P02'	13	98 ^{*1}	17	156 ^{*1}
P03 P04	106	163 ^{*2}	153	261 ^{*2}
P03' P04'	106	163 ^{*2}	153	261 ^{*2}
P05 P06	39	98 ^{*1}	57	156 ^{*1}
P05' P06'	40	98 ^{*1}	58	156 ^{*1}
P07 P08	16	98 ^{*1}	24	156 ^{*1}
P07' P08'	16	98 ^{*1}	25	156 ^{*1}
P09 P10	142	163 ^{*2}	228	261 ^{*2}
P09' P10'	142	163 ^{*2}	228	261 ^{*2}
P11 P12	50	98 ^{*1}	83	156 ^{*1}
P11' P12'	51	98 ^{*1}	84	156 ^{*1}

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-10 差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）
の耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	4
2.1 設計条件	4
2.2 運転条件	4
2.3 重大事故等時の条件	4
2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	4
2.5 材料	4
2.6 物性値	4
2.7 荷重の組合せと応力評価	4
2.8 許容限界	4
2.9 応力の記号と方向	4
3. 外荷重の条件	5
3.1 計算方法	5
3.2 解析モデル及び諸元	5
3.3 死荷重	5
3.4 地震荷重	5
3.4.1 固有周期	5
3.4.2 設計用地震力	5
3.4.3 地震荷重の算出結果	5
4. 応力計算	6
4.1 応力評価点	6
4.2 差圧による応力	6
4.2.1 荷重条件 (L02)	6
4.2.2 計算方法	6
4.3 外荷重による応力	7
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	7
4.3.2 計算方法	7
4.4 応力の評価	7
5. 応力強さの評価	8
5.1 一次一般膜応力強さの評価	8
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	2
図 3-1	解析モデル	9
図 3-2	振動モード図	12
表 1-1	計算結果の概要	3
表 3-1	節点座標	10
表 3-2	解析モデルのデータ諸元	11
表 3-3	固有周期	12
表 3-4	設計用地震力	13
表 3-5	差圧検出・ほう酸水注入管外荷重	14
表 4-1	断面性状	15
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	16
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	17

1. 一般事項

本計算書は、差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉压力容器内部）（以下「差圧検出・ほう酸水注入管」という。）の耐震性についての計算書である。

差圧検出・ほう酸水注入管は、原子炉压力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm ⁴
t	厚 さ	mm

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.4 解析範囲

解析範囲を図 1-1 に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

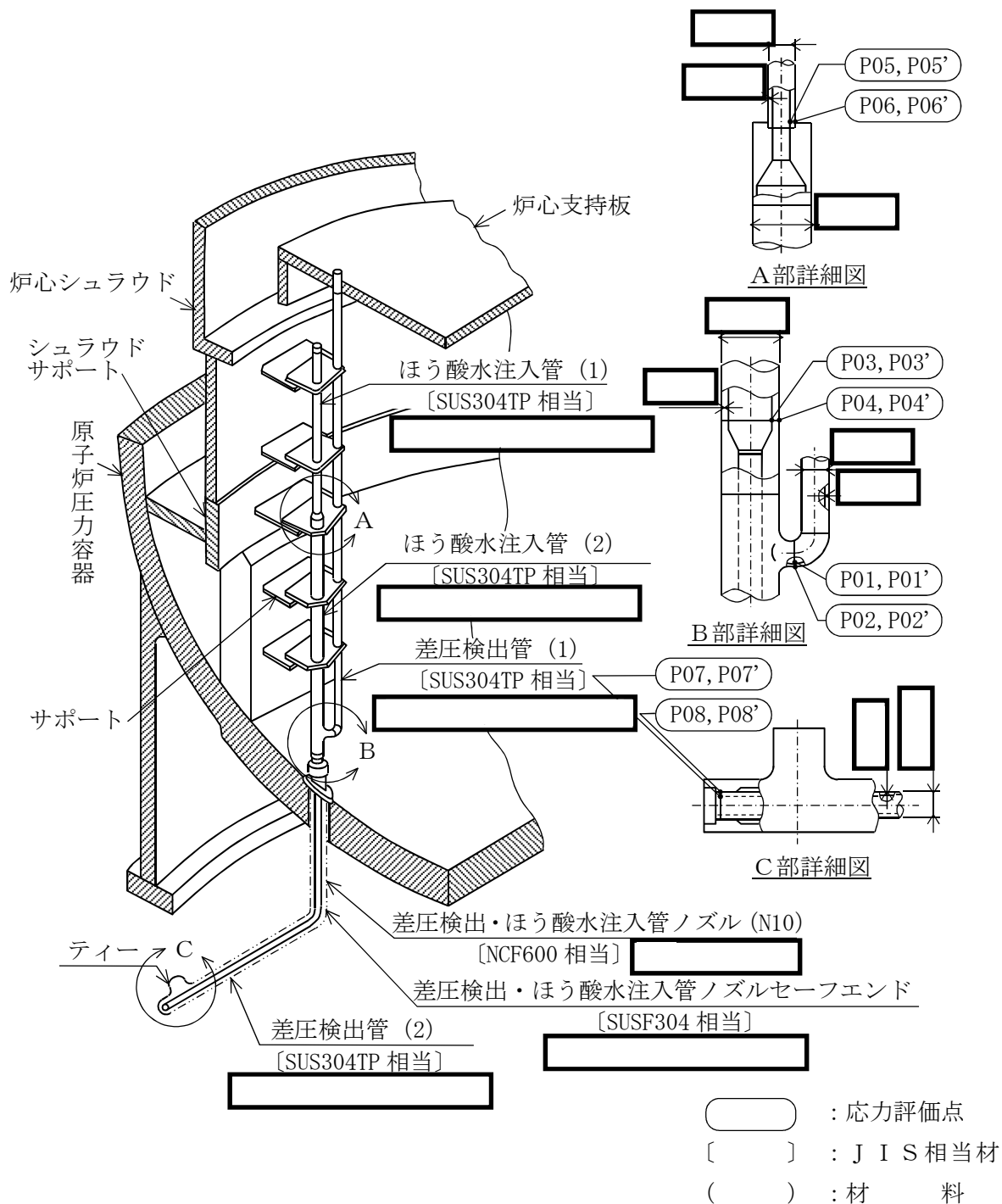


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位 : mm)

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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
差圧検出管 SUS304TP	Ⅲ _A S	2	111	P01-P02	8	167	P01-P02
	Ⅳ _A S	2	169	P01-P02	10	254	P01-P02
ほう酸水注入管 SUS304TP	Ⅲ _A S	6	68	P07-P08	39	103	P07-P08
	Ⅳ _A S	7	104	P07-P08	47	156	P07-P08

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 重大事故等時の条件

重大事故等時の条件を「応力解析の方針」の 4.3 節に示す。

2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.5 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.6 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節に示す。

2.7 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.8 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.9 応力の記号と方向

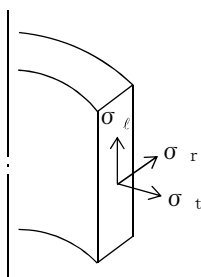
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから，3.2 節に示すはり要素でモデル化した差圧検出・ほう酸水注入管の F E M モデルにより死荷重及び固有周期を求める。さらに，入力加速度に対する各節点の軸力，せん断力及びモーメントの最大値を求める。ここで，差圧検出・ほう酸水注入管の質量は，炉心，原子炉压力容器及び压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により得られた 3.4.2 項に示す設計震度及び応答曲線（減衰定数 1.0%）を包絡して入力加速度とする。

以上の計算は，解析コード「M S C N A S T R A N」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し，解析モデルを図 3-1 に示す。

また，各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

支持条件は，

とする。

3.3 死荷重

差圧検出・ほう酸水注入管の評価に用いる死荷重を表 3-5 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

差圧検出・ほう酸水注入管の固有周期を表 3-3 に，振動モード図を図 3-2 に示す。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は，添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」及び「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。また，減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表 3-4 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力とし，静的解析及びスペクトルモード解析により，差圧検出・ほう酸水注入管の評価位置に発生する荷重の包絡値を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-5 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{13} 、 P_{81} 及び P_{83} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = -\frac{Y}{Y-1} \cdot P_{13} \quad , \quad \sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{81} \quad , \quad \sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{83}$$

$$\sigma_\ell = -\frac{Y^2}{Y^2-1} \cdot P_{13} \quad , \quad \sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{81} \quad , \quad \sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{83}$$

$$\sigma_r = -\frac{Y}{Y+1} \cdot P_{13} \quad , \quad \sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{81} \quad , \quad \sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{83}$$

$$\text{ここで,} \quad Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

差圧検出・ほう酸水注入管に働く外荷重を表 3-5 に示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力を分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

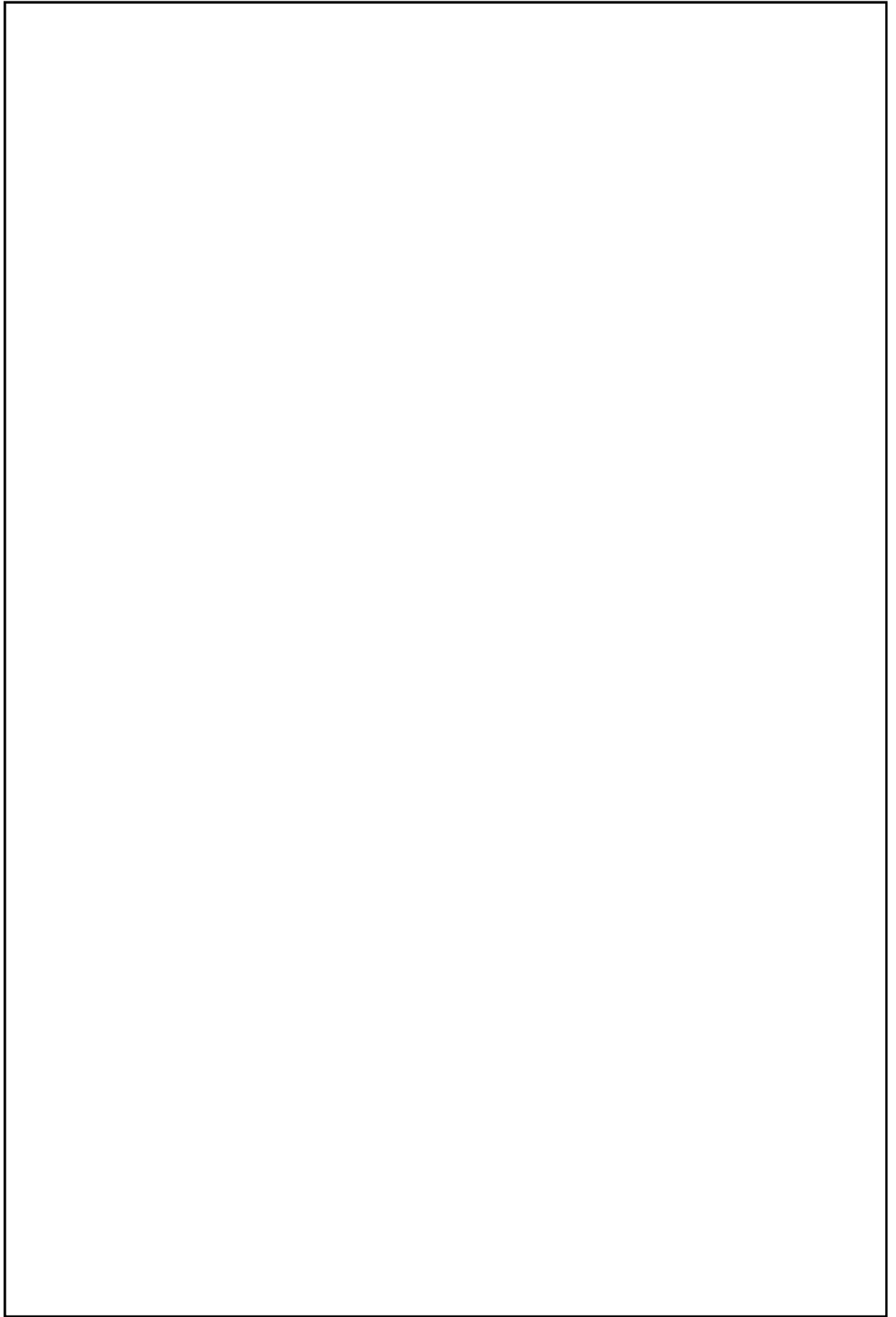


図 3-1 解析モデル

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm ³)
	外径	厚さ			
1～ 2					
2～ 3					
3～ 5					
5～ 9					
9～11					
4－12, 12～19					
1－20					
20～21					
21～24					
5－25, 25～29, 29－24					

表 3-3 固有周期

次数	固有周期	卓越方向	刺激係数		
	(s)		X	Y	Z
1 次		水平			
2 次		水平			

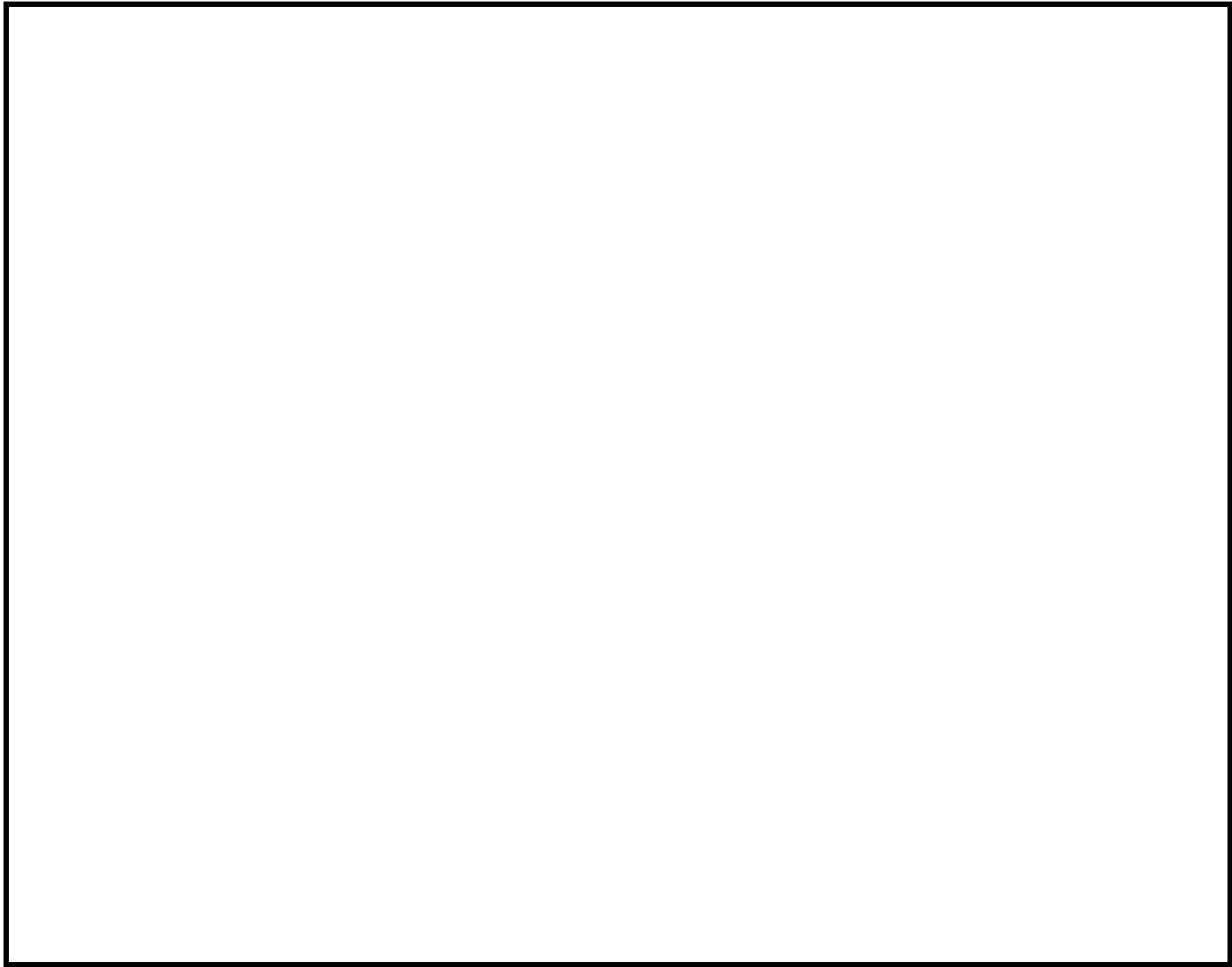


図 3-2 振動モード図（1 次 s）

表 3-4 設計用地震力

据付場所及び設置高さ(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		減衰定数(%)	
		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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉圧力容器内 EL 		$C_H=0.97$ 又は*1	$C_V=0.74$ 又は*1	$C_H=1.61$ 又は*2	$C_V=1.37$ 又は*2	1.0^{*3}	1.0^{*3}

注記 *1：弾性設計用地震動 S_d に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値

*2：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値

*3：溶接構造物に適用される減衰定数の値

表 3-5 差圧検出・ほう酸水注入管外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	ねじり モーメント	曲げ モーメント
			F _L (N)	F _S (N)	T (N・mm)	M (N・mm)
L04	死荷重	A				
		B				
		C				
		D				
L14	地震荷重 S _d *	A				
		B				
		C				
		D				
L16	地震荷重 S _s	A				
		B				
		C				
		D				

注記 *：流体反力を含む。

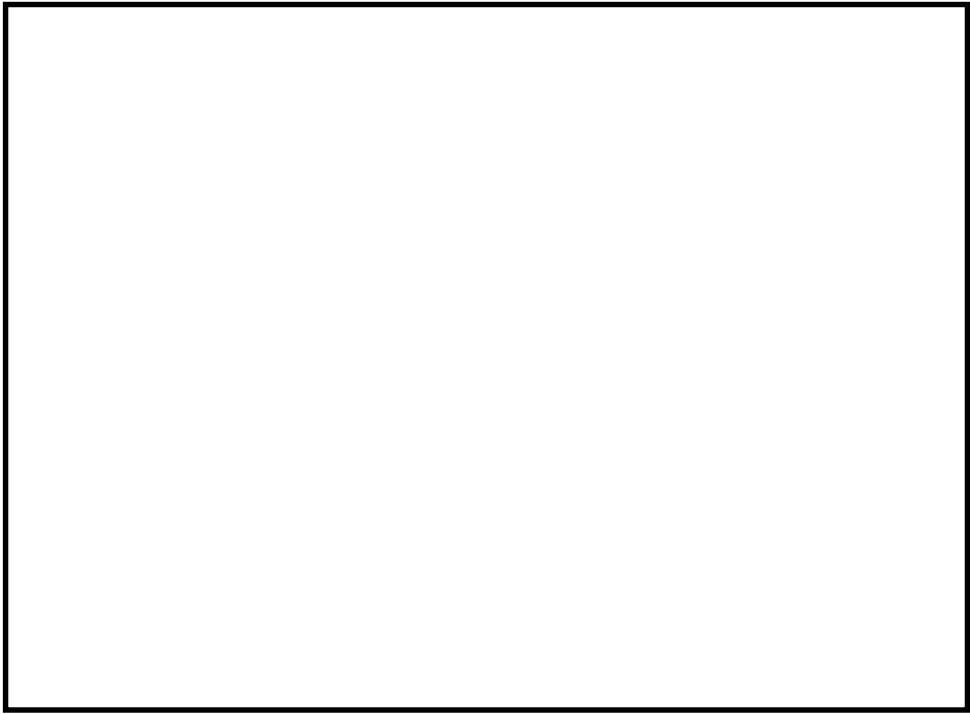


表 4-1 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02				
P03, P04				
P05, P06				
P07, P08				

表 5-1 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	2	111 ^{*1}	2	169 ^{*1}
P01' P02'	2	111 ^{*1}	2	169 ^{*1}
P03 P04	8	111 ^{*1}	8	169 ^{*1}
P03' P04'	8	111 ^{*1}	8	169 ^{*1}
P05 P06	6	68 ^{*2}	6	104 ^{*2}
P05' P06'	6	68 ^{*2}	6	104 ^{*2}
P07 P08	6	68 ^{*2}	7	104 ^{*2}
P07' P08'	6	68 ^{*2}	7	104 ^{*2}

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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	8	167 ^{*1}	10	254 ^{*1}
P01' P02'	7	167 ^{*1}	10	254 ^{*1}
P03 P04	8	167 ^{*1}	8	254 ^{*1}
P03' P04'	8	167 ^{*1}	8	254 ^{*1}
P05 P06	6	103 ^{*2}	6	156 ^{*2}
P05' P06'	6	103 ^{*2}	6	156 ^{*2}
P07 P08	39	103 ^{*2}	47	156 ^{*2}
P07' P08'	39	103 ^{*2}	47	156 ^{*2}

注記 *1：継手効率 を乗じた値を示す。*2：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-3-4-3-11 中性子計測案内管の耐震性についての計算書

目次

1. 一般事項	1
1.1 記号の説明	1
1.2 適用基準	1
1.3 形状・寸法・材料	1
1.4 解析範囲	1
1.5 計算結果の概要	1
2. 計算条件	5
2.1 設計条件	5
2.2 運転条件	5
2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態	5
2.4 材料	5
2.5 物性値	5
2.6 荷重の組合せと応力評価	5
2.7 許容限界	5
2.8 応力の記号と方向	5
3. 外荷重の条件	6
3.1 計算方法	6
3.2 解析モデル及び諸元	6
3.3 死荷重	7
3.4 地震荷重	7
3.4.1 固有周期	7
3.4.2 設計用地震力	7
3.4.3 地震荷重の算出結果	7
4. 応力計算	8
4.1 応力評価点	8
4.2 差圧による応力	8
4.2.1 荷重条件 (L02)	8
4.2.2 計算方法	8
4.3 外荷重による応力	9
4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)	9
4.3.2 計算方法	9
4.4 応力の評価	9
5. 応力強さの評価	10
5.1 一次一般膜応力強さの評価	10
5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	10

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点……………	2
図 3-1	解析モデル……………	11
図 3-2	解析モデル（中性子計測案内管スタビライザ）……………	12
図 3-3	中性子計測案内管と中性子計測案内管スタビライザの配置及びグループ分割…	13
図 3-4	振動モード図……………	18
表 1-1	計算結果の概要……………	4
表 3-1	節点座標……………	14
表 3-2	解析モデルのデータ諸元……………	15
表 3-3	並進ばね定数……………	16
表 3-4	回転ばね定数……………	16
表 3-5	固有周期……………	17
表 3-6	設計用地震力……………	22
表 3-7	中性子計測案内管外荷重……………	23
表 4-1	断面性状……………	24
表 5-1	一次一般膜応力強さの評価のまとめ……………	25
表 5-2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ……………	26

1. 一般事項

本計算書は、中性子計測案内管の耐震性についての計算書である。

中性子計測案内管は、原子炉压力容器内部構造物であるため、添付書類「V-2-3-4-3-1 原子炉压力容器内部構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づくものとする。

1.1 記号の説明

記号の説明は、「応力解析の方針」の2章に示す。

さらに、本計算書において、以下の記号を用いる。

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
I	断面二次モーメント	mm ⁴

1.2 適用基準

適用基準は、「応力解析の方針」の1.3節に示す。

1.3 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.4 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

1.5 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-1に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、形状不連続部、溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を本計算書に記載している。

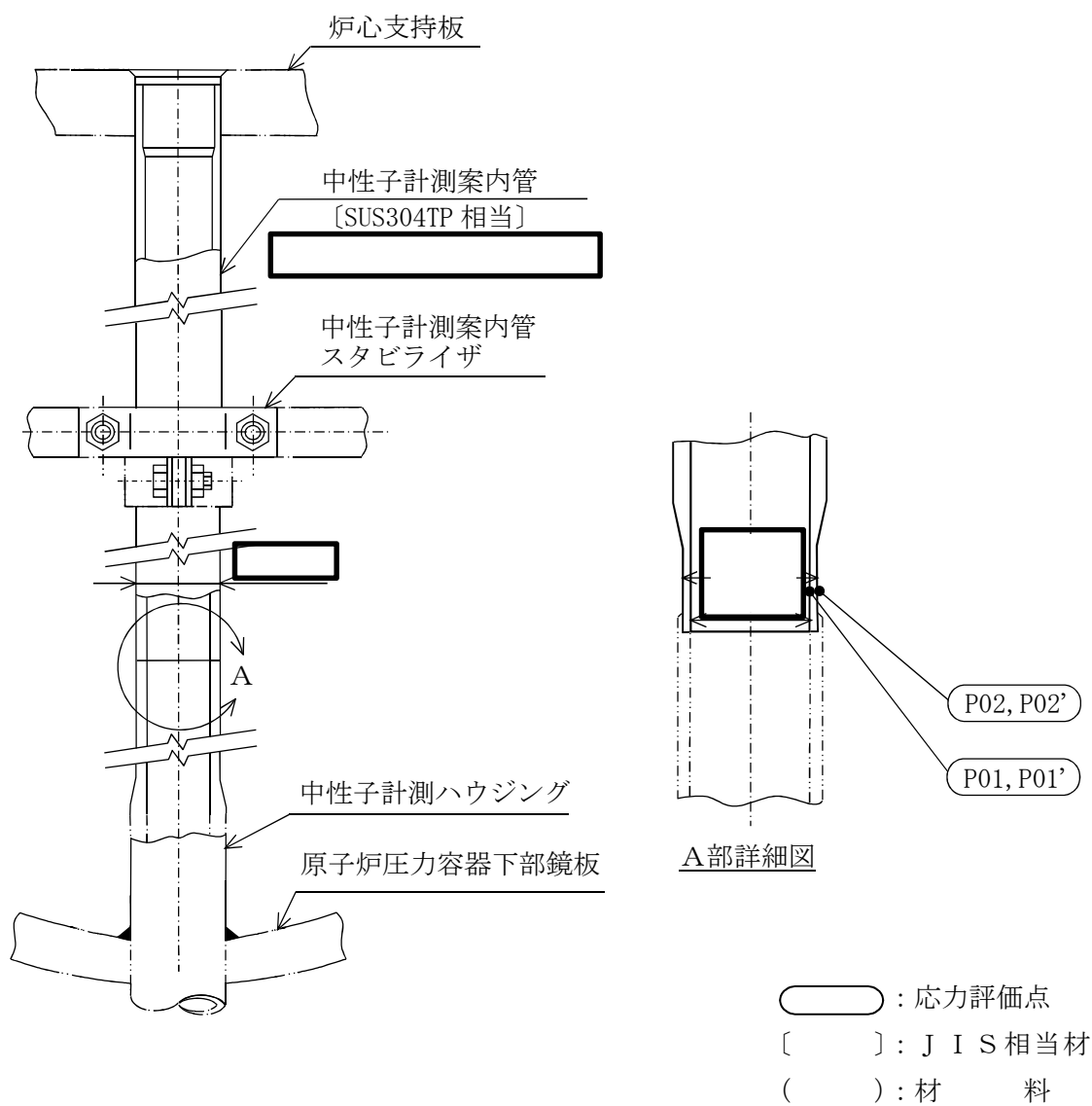


図 1-1(1) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位 : mm)

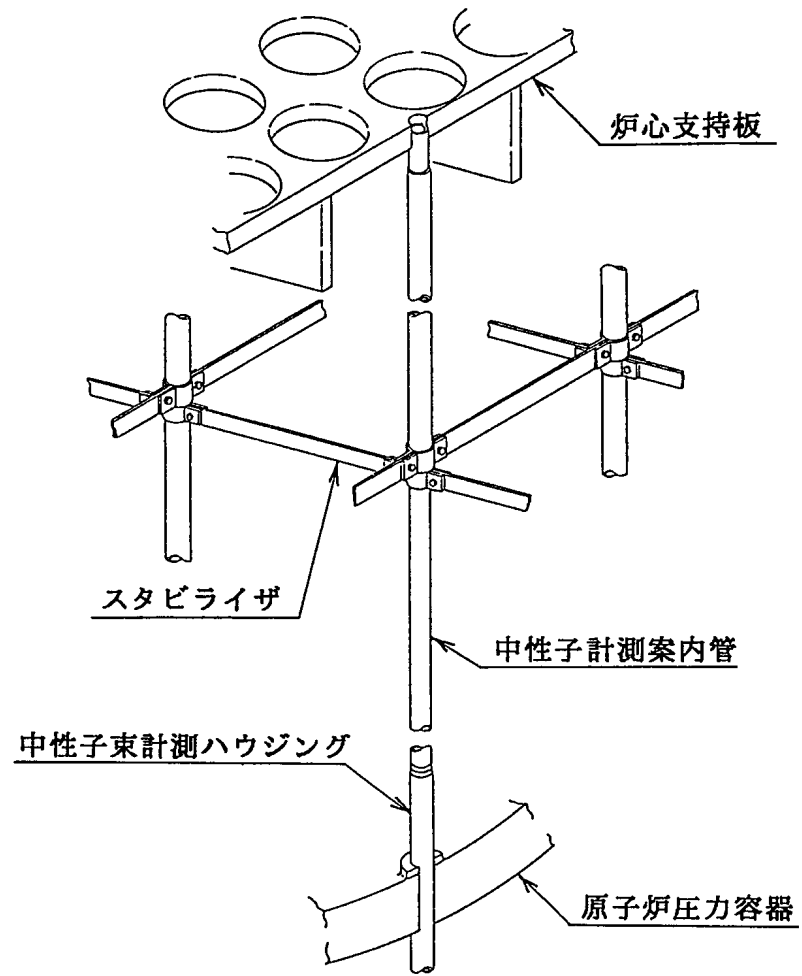


図 1-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点

表 1-1 計算結果の概要

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ (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
中性子計測案内管 SUS304TP	Ⅲ _A S	3	68	P01'– P02'	62	103	P01'– P02'
	Ⅳ _A S	4	104	P01'– P02'	102	156	P01'– P02'

2. 計算条件

2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の 4.1 節に示す。

2.2 運転条件

考慮した運転条件を「応力解析の方針」の 4.2 節に示す。

2.3 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ及び許容応力状態は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す。

2.4 材料

各部の材料を図 1-1 に示す。

2.5 物性値

物性値は、「応力解析の方針」の 3.3 節による。

2.6 荷重の組合せと応力評価

荷重の組合せと応力評価は、「応力解析の方針」の 4.5 節に示す。

2.7 許容限界

許容限界は、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す。

2.8 応力の記号と方向

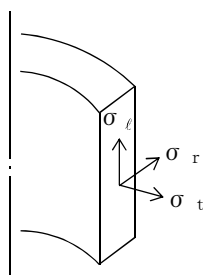
応力の記号と方向は、以下のとおりとする。

σ_t : 周方向応力

σ_ℓ : 軸方向応力

σ_r : 半径方向応力

$\tau_{t\ell}$: せん断応力



3. 外荷重の条件

3.1 計算方法

材料及び形状に関するデータから，3.2 節に示すはり要素でモデル化した中性子計測案内管の FEM モデルにより死荷重及び固有周期を求める。さらに，入力加速度に対する各節点のせん断力及びモーメントの最大値を求める。ここで，中性子計測案内管の質量は，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により得られた 3.4.2 項に示す設計震度及び応答曲線（減衰定数 1.0%）を包絡して入力加速度とする。

以上の計算は，解析コード「MSC NASTRAN」を用いて行う。

3.2 解析モデル及び諸元

本機器の形状を図 1-1 に示し，解析モデルを図 3-1，図 3-2 及び図 3-3 に示す。

また，各節点の座標及び解析モデルのデータ諸元を表 3-1 及び表 3-2 に，中性子計測案内管スタビライザのばね定数を表 3-3 及び表 3-4 に示す。

中性子計測案内管は，上端を炉心支持板により支持され，下端を中性子計測ハウジングに溶接された全長約 4m の管であり，原子炉圧力容器内に 55 本設置されている。また，高さ方向の中央部においてスタビライザにより互いに連結されている構成である。

中性子計測案内管の下端を支持する中性子計測ハウジングは，原子炉圧力容器下鏡に溶接されており，その炉内部分の長さは中央部から外周になるに従って短くなり，全体としては長さの異なる 55 本の中性子計測案内管－ハウジングが，スタビライザにより互いに連結されることにより独立な振動を防止する構造である。

本解析モデルは，図 3-1，図 3-2 及び図 3-3 に示すように

とする。

支持条件は，

とする。

3.3 死荷重

中性子計測案内管の評価に用いる死荷重を表 3-7 に示す。

3.4 地震荷重

3.4.1 固有周期

中性子計測案内管の固有周期を表 3-5 に、振動モード図を図 3-4 に示す。

鉛直方向については、0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。

3.4.2 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」及び「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表 3-6 に示す。

3.4.3 地震荷重の算出結果

図 3-1 に示す解析モデルに 3.4.2 節で設定した地震力を入力とし、静的解析及びスペクトルモーダル解析により、中性子計測案内管の評価位置に発生する荷重の包絡値を地震荷重とする。

算出された地震荷重を表 3-7 に示す。

4. 応力計算

4.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 1-1 に示す。

また、各応力評価点の断面性状を表 4-1 に示す。

4.2 差圧による応力

4.2.1 荷重条件 (L02)

各運転条件における差圧を「応力解析の方針」の 4 章の図 4-1 に示す。

計算は、設計差圧に対して行い、各許容応力状態での応力は、比例計算により求める。

4.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

差圧 P_{110} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = -\frac{Y}{Y-1} \cdot P_{110}$$

$$\sigma_\ell = 0$$

$$\sigma_r = -\frac{Y}{Y+1} \cdot P_{110}$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧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。

4.3 外荷重による応力

4.3.1 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

中性子計測案内管に働く外荷重を表 3-7 に示す。

4.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、次式で求める。

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

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot r_m$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{D_i + D_o}{4}$$

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次一般膜＋一次曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{F_L}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{F_S}{A} + \frac{T}{2 \cdot I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

4.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力は、応力を分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求め応力強さを算出する。

応力強さの算出方法は「応力解析の方針」の 5.4 節に示す。

5. 応力強さの評価

5.1 一次一般膜応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各許容応力状態の一次一般膜応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

5.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各許容応力状態における評価をまとめて、表 5-2 に示す。

表 5-2 より、各許容応力状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、「応力解析の方針」の 3.5 節に示す許容値を満足する。

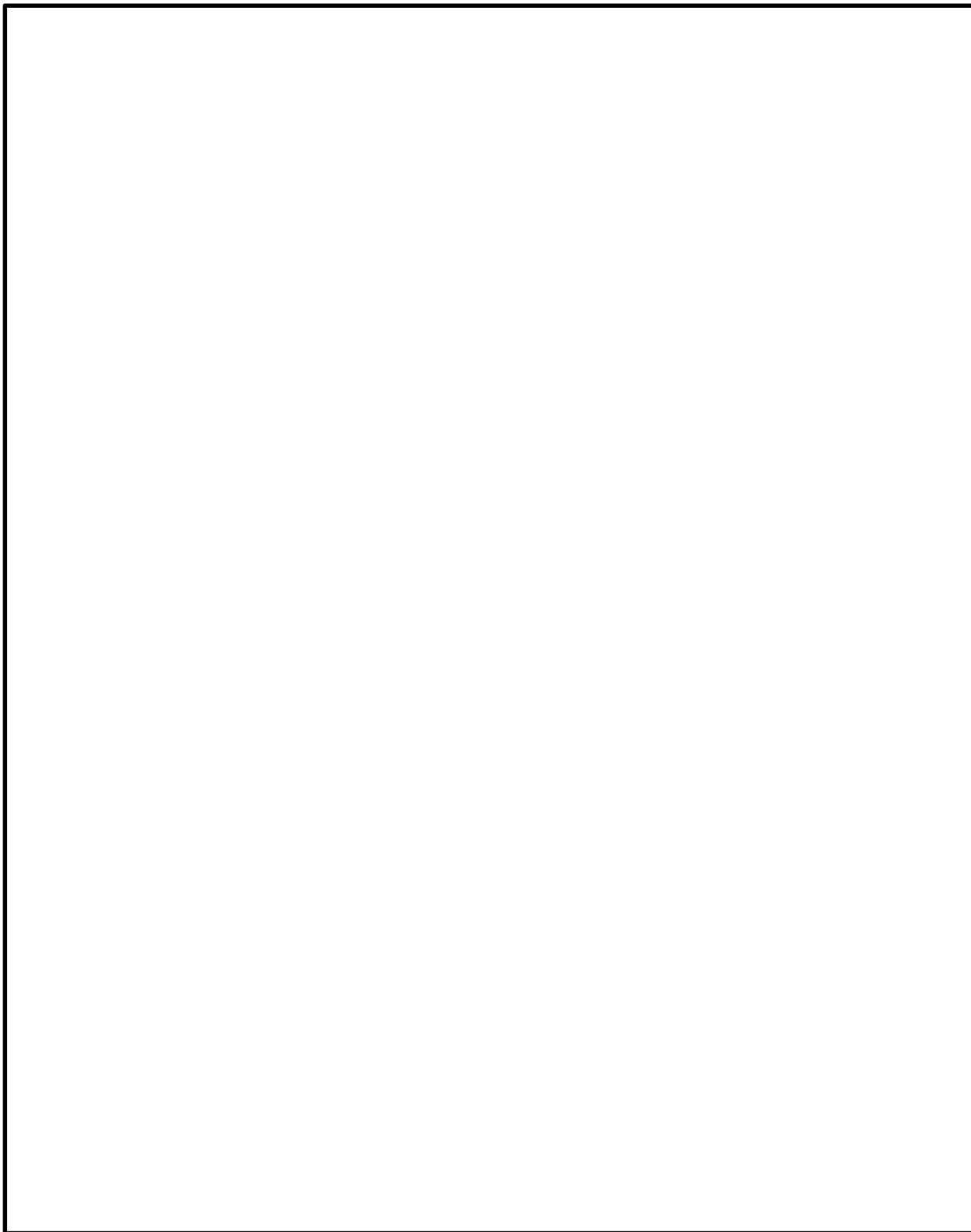


図 3-1 解析モデル



K_n : 並進ばね定数, $K_{\theta n}$: 回転ばね定数 ($n : 1 \sim 9$)

図 3-2 解析モデル (中性子計測案内管スタビライザ)

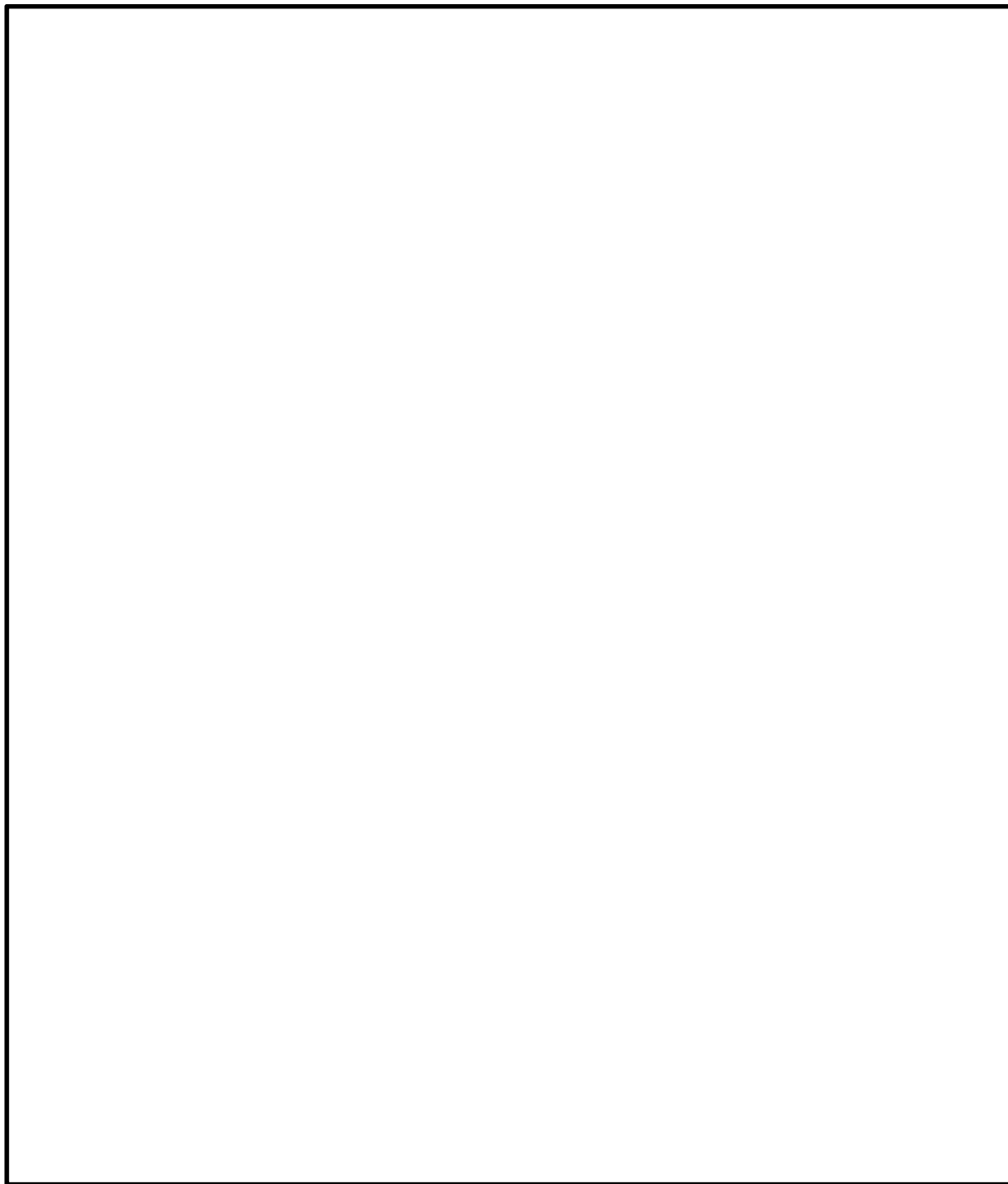


図 3-3 中性子計測案内管と中性子計測案内管スタビライザの
配置及びグループ分割

表 3-1 節点座標

(単位：mm)

節点番号	座標		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			

表 3-2 解析モデルのデータ諸元

部材端の節点番号	断面寸法 (mm)		縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/mm³)
	外径	厚さ			
1～ 7					
7～ 8					
9～15					
15～16					
17～23					
23～24					
25～31					
31～32					
33～38					
38～39					
39～40					
41～47					
47～48					
4－12					
12－20					
12－28					
20－28					
20－36					
20－44					
28－36					
28－44					
36－44					

注記 * : () 内は, G5 グループ中の取り替えた中性子計測ハウジングの寸法を示す。

表 3-3 並進ばね定数

(単位 : N/mm)

記号	
K_1	
K_2	
K_3	
K_4	
K_5	
K_6	
K_7	
K_8	
K_9	

表 3-4 回転ばね定数

(単位 : N・mm/rad)

記号	
$K_{\theta 1}$	
$K_{\theta 2}$	
$K_{\theta 3}$	
$K_{\theta 4}$	
$K_{\theta 5}$	
$K_{\theta 6}$	
$K_{\theta 7}$	
$K_{\theta 8}$	
$K_{\theta 9}$	

表 3-5 固有周期

モード	固有周期	卓越方向	刺激係数		
	(s)		X	Y	Z
1 次					
2 次					
3 次					
4 次					
5 次					
6 次					
7 次					
8 次					
9 次					

注 : 鉛直方向については, 0.05 秒以下であり, 剛であることを確認した。

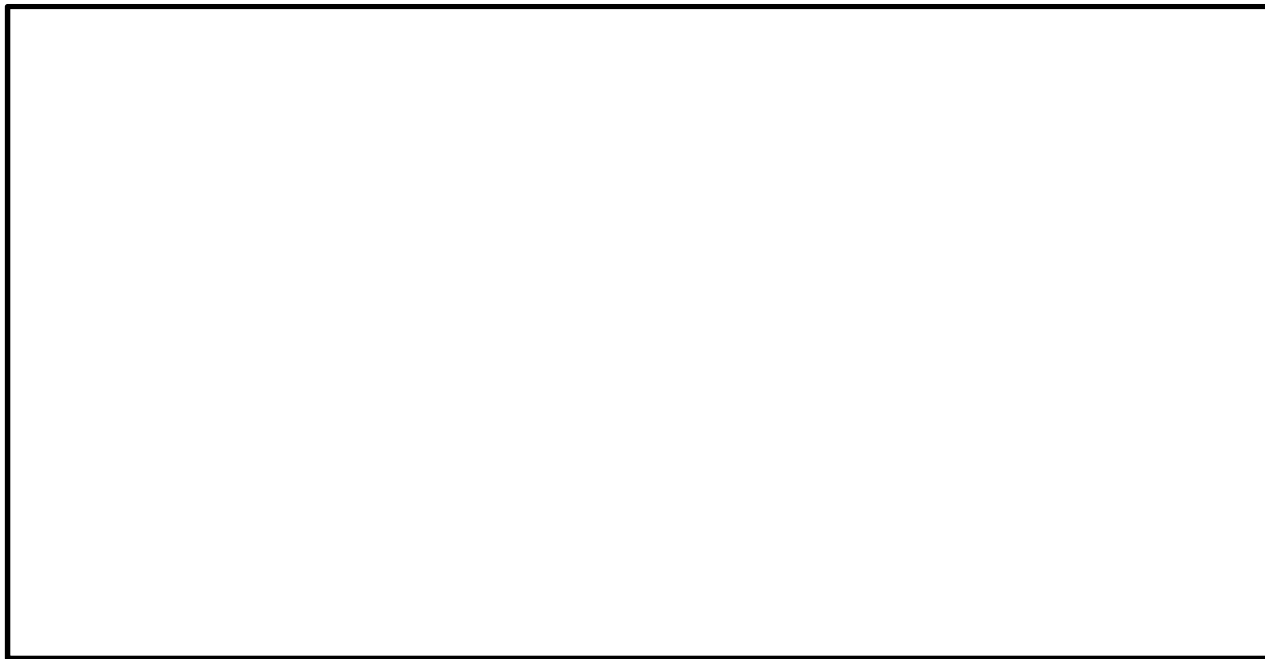


図 3-4(1) 振動モード図 (1 次 s)

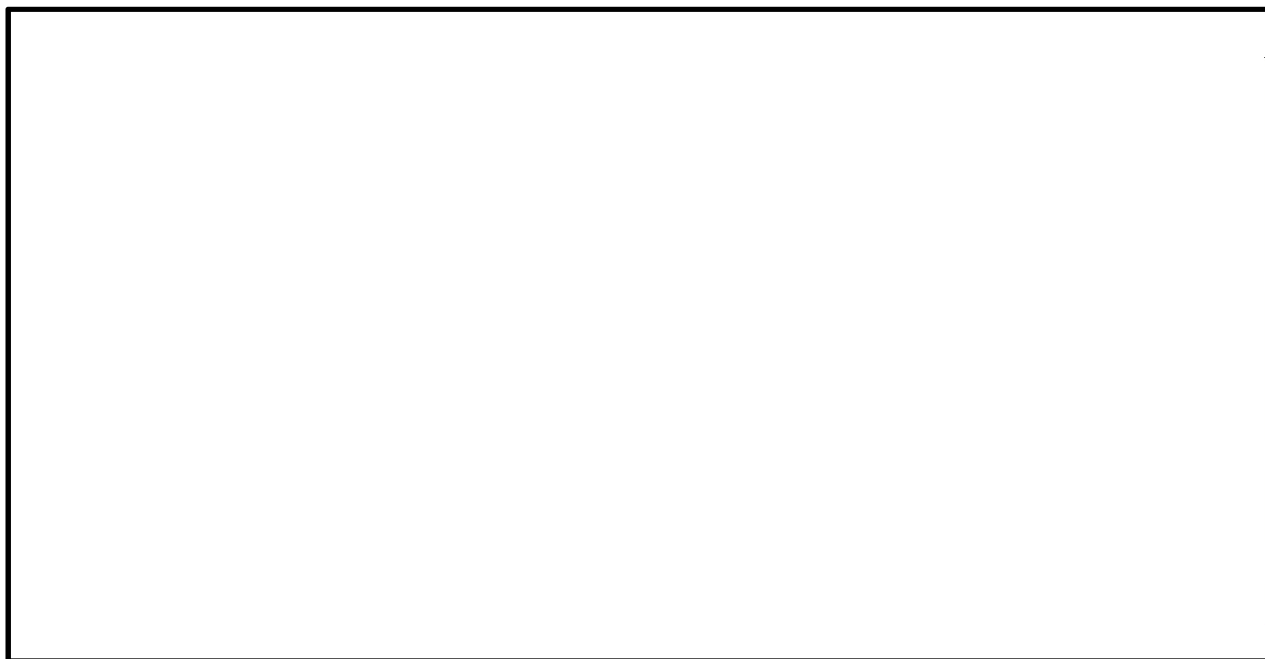


図 3-4(2) 振動モード図 (2 次 s)

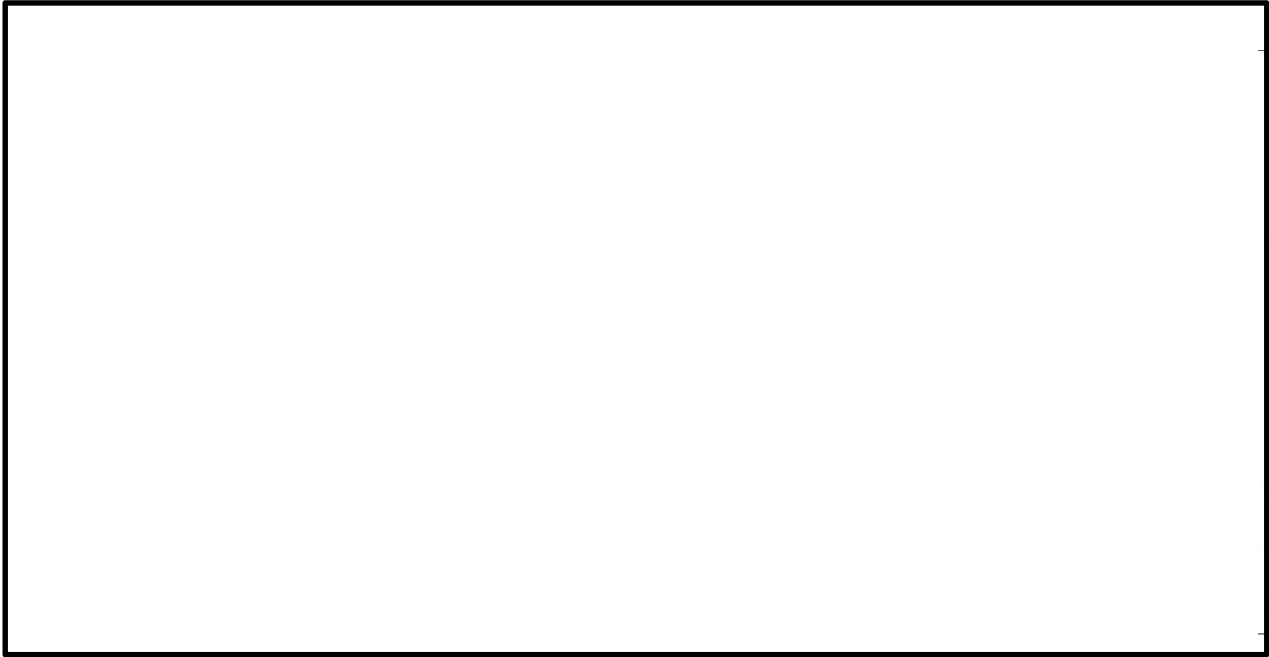


図 3-4(3) 振動モード図 (3 次 s)

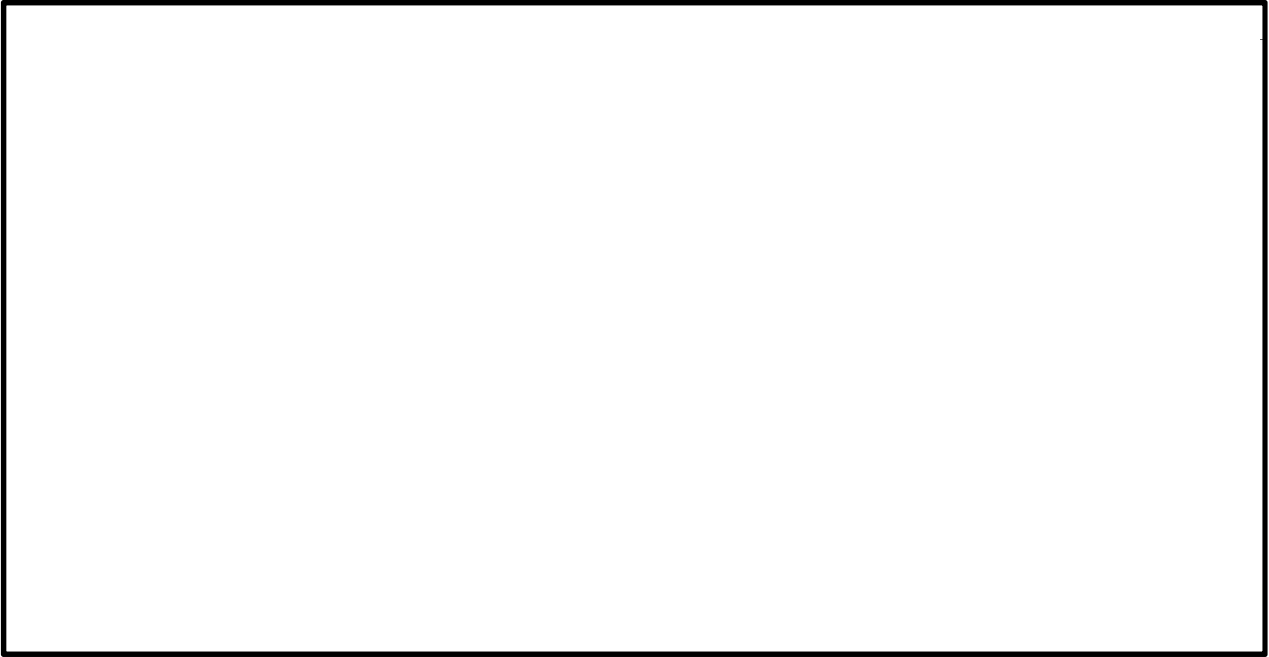


図 3-4(4) 振動モード図 (4 次 s)

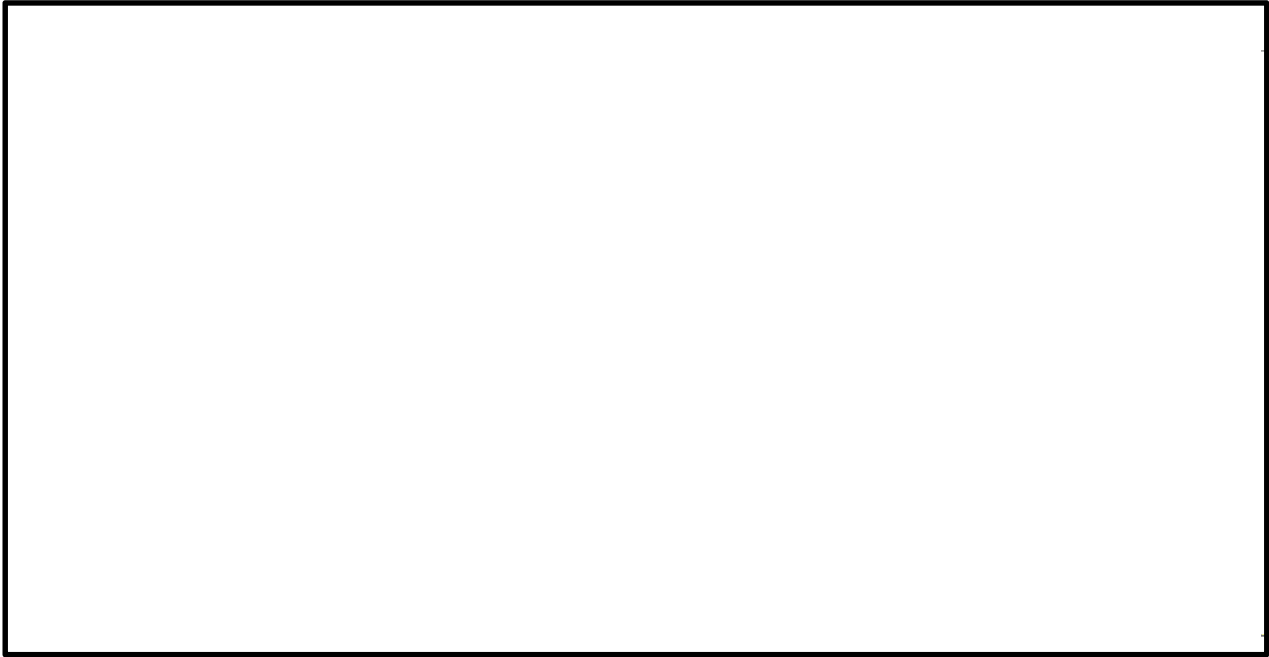


図 3-4(5) 振動モード図 (5 次 s)

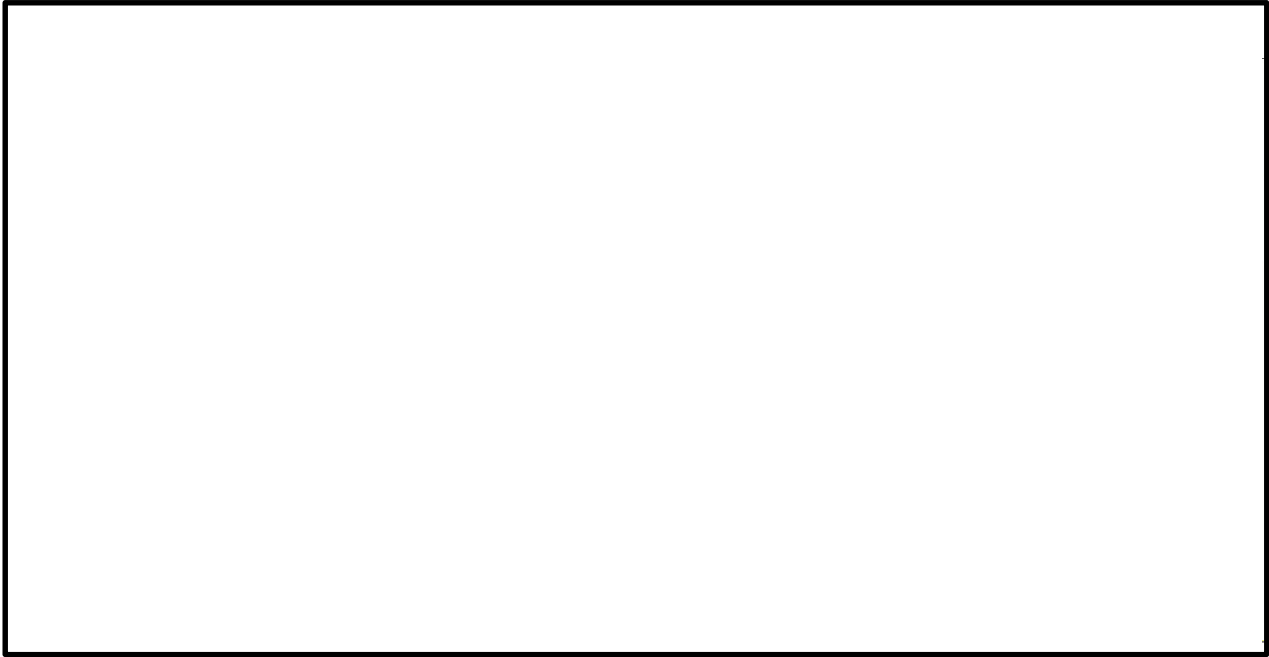


図 3-4(6) 振動モード図 (6 次 s)

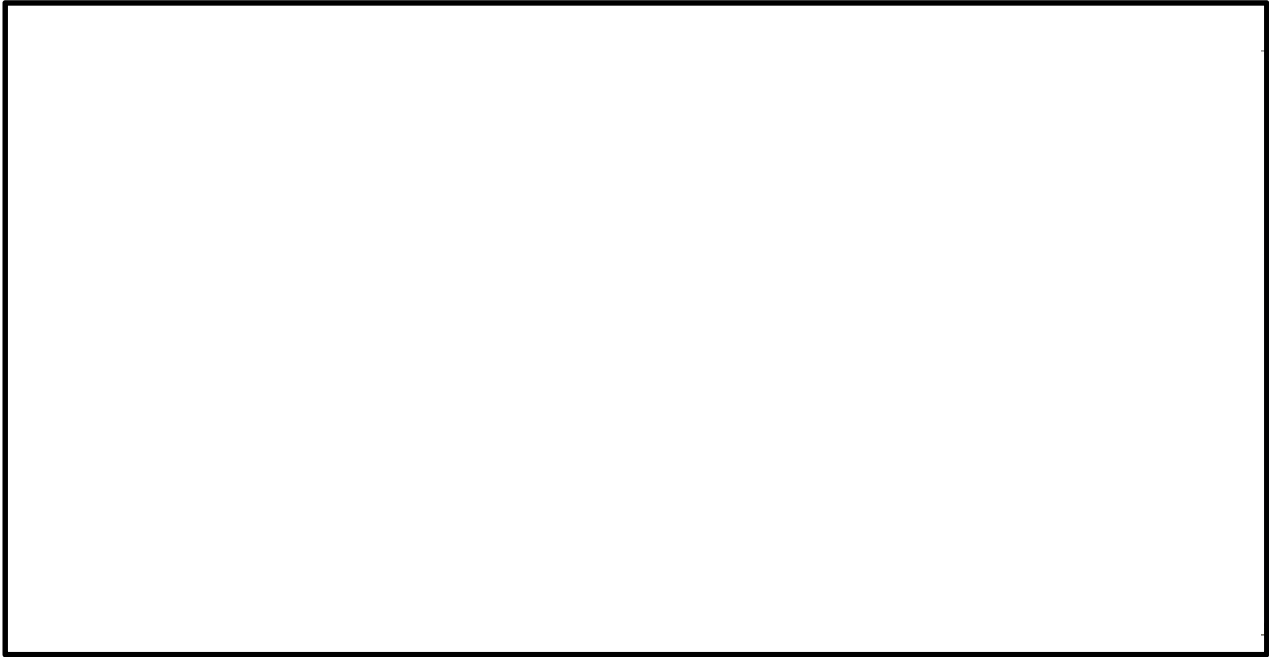


図 3-4(7) 振動モード図 (7 次 s)

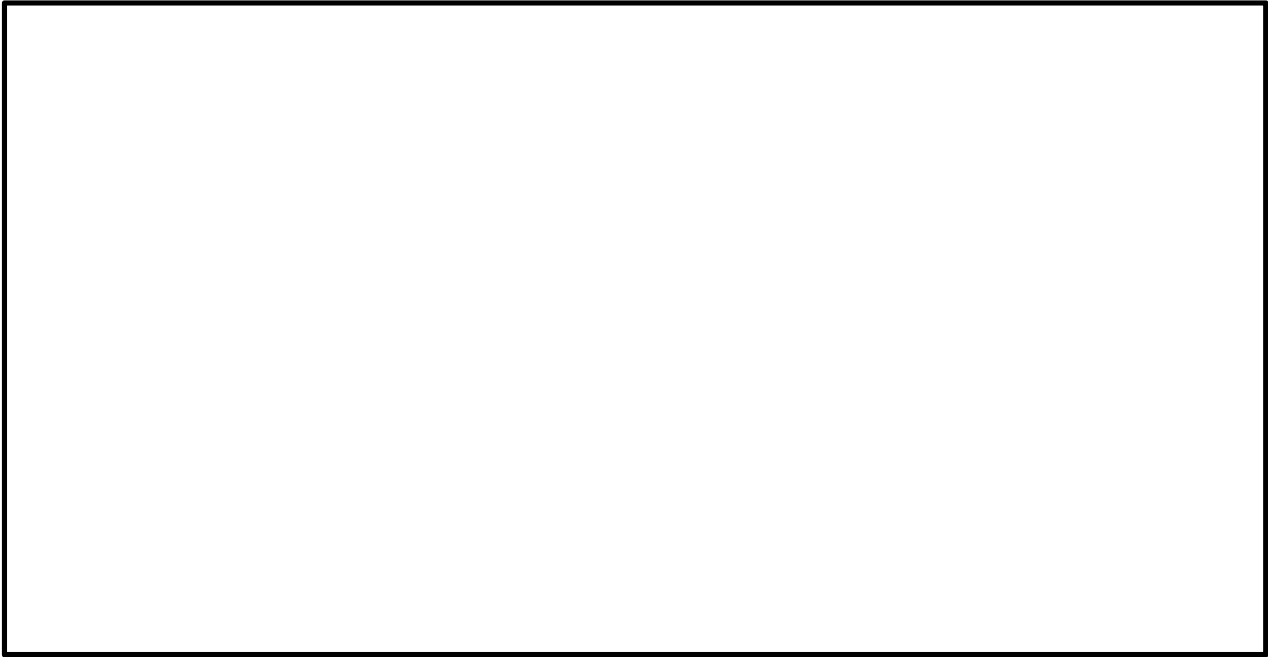


図 3-4(8) 振動モード図 (8 次 s)

表 3-6 設計用地震力

据付場所 及び 設置高さ (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		減衰定数 (%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉圧力容器内 EL. 		0.05 以下*1	$C_H=0.97$ 又は*2	$C_V=0.74$	$C_H=1.62$ 又は*3	$C_V=1.37$	1.0^{*4}	—

注記 *1：固有値解析より 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

*2：弾性設計用地震動 S_d に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値

*3：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値

*4：溶接構造物に適用される減衰定数の値

表 3-7 中性子計測案内管外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点	軸力	せん断力	曲げ モーメント
			F_L (N)	F_s (N)	M (N・m)
L04	死荷重	A			
L14	地震荷重 S_d^*	A			
L16	地震荷重 S_s	A			

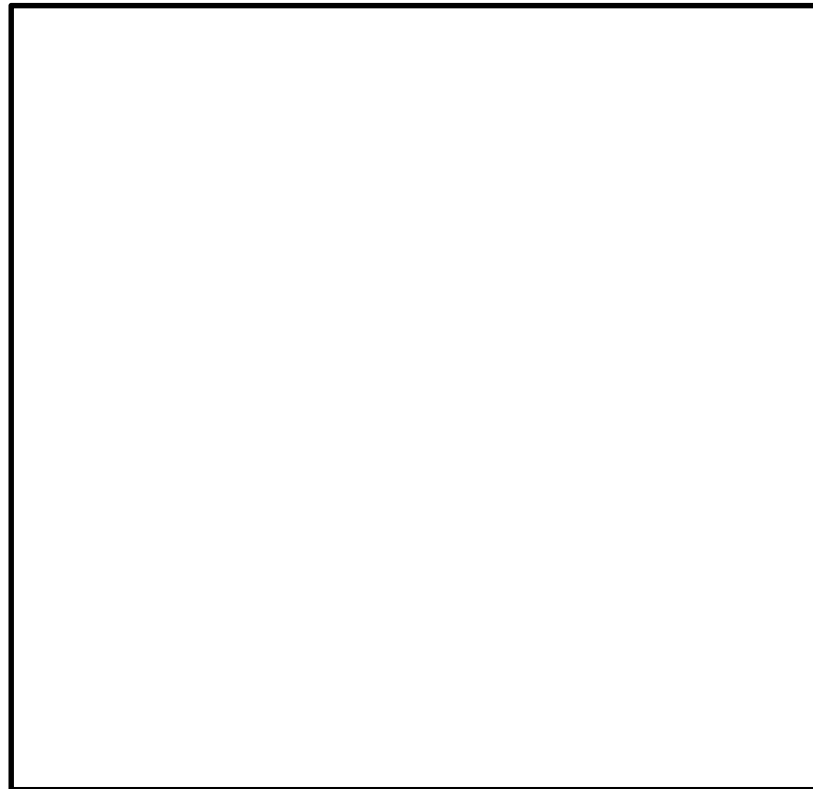


表 4-1 断面性状

応力評価点	D_o (mm)	D_i (mm)	A (mm^2)	I (mm^4)
P01, P02				

表 5-1 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	2 68*	3 104*	
P01' P02'	3 104*		4 104*	

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-2 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		許容応力状態	
	Ⅲ _A S		Ⅳ _A S	
	応力 強さ	許容値	応力 強さ	許容値
P01 P02	61	103*	102	156*
P01' P02'	62	103*	102	156*

注記 *：継手効率 を乗じた値を示す。

V-2-4-1 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の耐震計算結果

目次

1. 概要	1
2. 耐震評価条件整理	1

1. 概要

本資料は、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の設備の耐震計算の手法及び条件の整理について説明するものである。

2. 耐震評価条件整理

核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の設備に対して、設計基準対象施設の耐震クラス、重大事故等対処施設の設備分類を整理した。既設の設計基準対象施設については、耐震評価における手法及び条件について、既に認可を受けた実績と差異の有無を整理した。また、重大事故等対処施設のうち、設計基準対象施設であるものについては、重大事故等対処施設の評価条件と設計基準対象施設の評価条件の差異の有無を整理した。結果を表 2-1 に示す。

核燃料物資の取扱施設及び貯蔵施設のうち、新設又は、新規登録の設計基準対象施設並びに重大事故等対処施設の耐震計算は表 2-1 に示す計算書に記載することとする。

なお、既設の設備における弾性設計用地震動 S_d 又は静的地震力による耐震計算については、基準地震動 S_s による評価結果が弾性設計用地震動 S_d 又は静的地震力の許容限界を満足する場合、省略することとする。弾性設計用地震動 S_d による疲労評価については、弾性設計用地震動 S_d による繰返し回数が、基準地震動 S_s で設定している繰返し回数以内であることを確認しているため、省略する。

表 2-1 耐震評価条件整理一覧表 (1/3)

評価対象設備			設計基準対象施設			重大事故等対処設備		
			耐震設計上の重要度分類	新規制基準施行前に認可された実績との差異	耐震計算の記載箇所	設備分類 ^{*1}	設計基準対象施設との評価条件の差異	耐震計算の記載箇所
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料プール	S	—	V-2-4-2-1	常設耐震／防止 常設／緩和	無	V-2-4-2-1
		使用済燃料貯蔵ラック	S	無	V-2-4-2-2	常設耐震／防止 常設／緩和	有	V-2-4-2-2
		使用済燃料乾式貯蔵容器	S	無	V-2-4-2-3	—	—	—
		使用済燃料プール温度（S A）	—	—	—	常設／防止 常設／緩和	—	V-2-4-2-4
		使用済燃料プール水位・温度（S A 広域）	C (新規登録)	—	—	常設／防止 常設／緩和	—	V-2-4-2-5
	使用済燃料貯蔵槽冷却浄化設備	主配管	S	無	V-2-4-3-1-1	—	—	—
		常設低圧代替注水系ポンプ	—	—	—	常設耐震／防止 常設／緩和	—	V-2-5-5-5-1 ^{*2}
		主配管	—	—	—	常設耐震／防止 常設／緩和	—	V-2-4-3-2-1

表 2-1 耐震評価条件整理一覧表 (2/3)

評価対象設備			設計基準対象施設			重大事故等対処設備		
			耐震設計上の重要度分類	新規制基準施行前に認可された実績との差異	耐震計算の記載箇所	設備分類 ^{*1}	設計基準対象施設との評価条件の差異	耐震計算の記載箇所
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	—	V-2-4-3-3-1
		代替燃料プール冷却系ポンプ	—	—	—	常設耐震／防止	—	V-2-4-3-3-2
		主配管	—	—	—	常設耐震／防止	—	V-2-4-3-3-3
		使用済燃料プール	S(使用済燃料貯蔵設備に記載)	—	—	常設耐震／防止 常設／緩和	無	V-2-4-2-1
		使用済燃料貯蔵ラック	S(使用済燃料貯蔵設備に記載)	—	—	常設耐震／防止 常設／緩和	有	V-2-4-2-2
		代替淡水貯槽	—	—	—	常設耐震／防止 常設／緩和	—	V-2-2-29 ^{*3}
		西側淡水貯水設備	—	—	—	常設耐震／防止 常設／緩和	—	V-2-2-23 ^{*3}

表 2-1 耐震評価条件整理一覧表 (3/3)

評価対象設備				設計基準対象施設			重大事故等対処設備		
				耐震設計上の重要度分類	新規制基準施行前に認可された実績との差異	耐震計算の記載箇所	設備分類*1	設計基準対象施設との評価条件の差異	耐震計算の記載箇所
及び貯蔵施設	核燃料物質の取扱施設	その他	使用済燃料プール監視カメラ	—	—	—	常設／防止 常設／緩和	—	V-2-4-4-1
			使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置	—	—	—	常設／防止 常設／緩和	—	V-2-4-4-2

注記 *1:「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備,「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備,「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備を示す。

*2:原子炉冷却系統施設と兼用の設備であり、評価内容が共通であるため、耐震評価は添付書類「V-2-5 原子炉冷却系統施設の耐震性についての計算書」に記載する。

*3:代替淡水貯槽及び西側淡水貯水設備の耐震評価は、添付書類「V-2-2 耐震設計上重要な設備を設置する施設の耐震性についての計算書」に記載する。

V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	2
2.1 位置.....	2
2.2 構造概要.....	3
2.3 評価方針.....	6
2.4 適用規格・基準等.....	8
3. 応力解析による評価方法.....	9
3.1 評価対象部位及び評価方針.....	9
3.2 荷重及び荷重の組合せ.....	11
3.3 許容限界.....	20
3.4 解析モデル及び諸元.....	22
3.5 評価方法.....	28
4. 評価結果.....	44

別紙 1 鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響（使用済燃料プール）

別紙 2 原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した検討（使用済燃料プール）

1. 概要

本資料は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき、使用済燃料プールの地震時の構造強度及び機能維持の確認について説明するものであり、その評価は、応力解析による評価により行う。

使用済燃料プールは、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備」に分類される。

以下、それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 基本方針

2.1 位置

使用済燃料プールは原子炉建屋の一部を構成している。使用済燃料プールを含む原子炉建屋の設置位置を図 2-1 に示す。

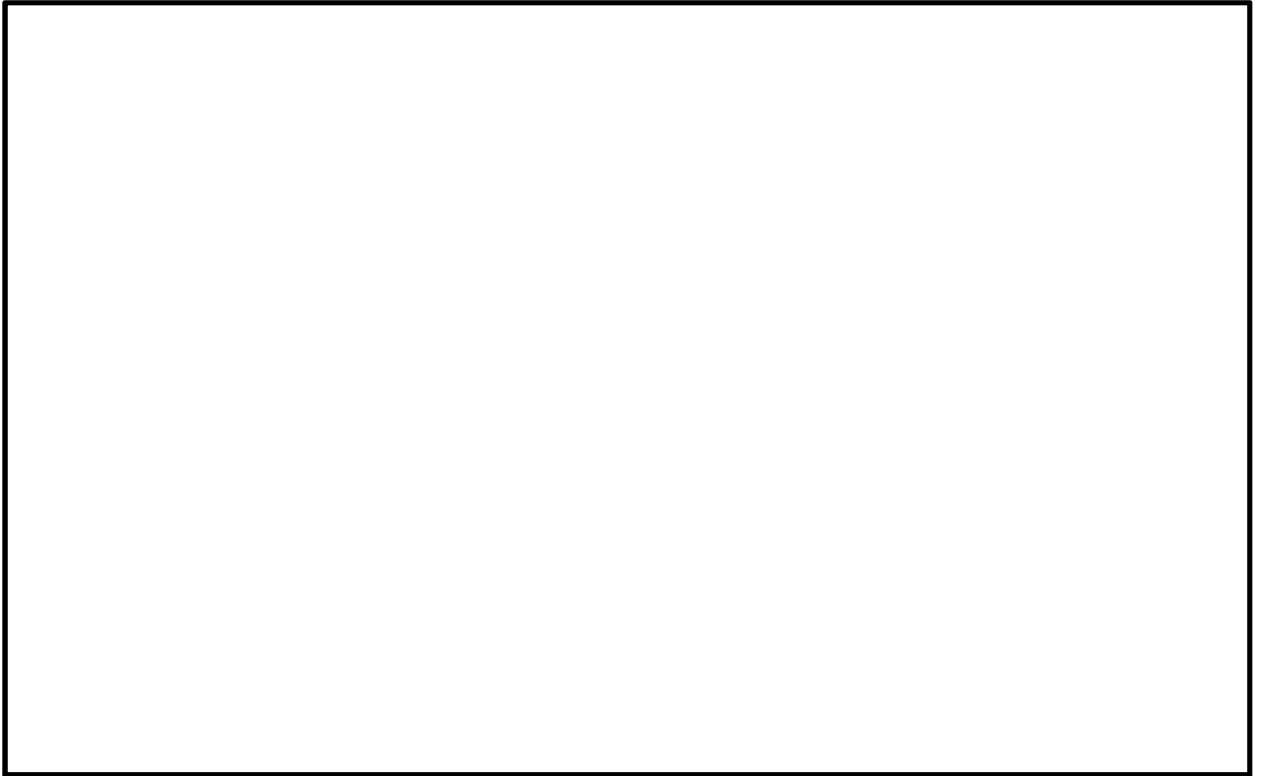


図 2-1 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の設置位置

2.2 構造概要

原子炉建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、鉄骨造陸屋根をもつ地下2階、地上6階の建物である。中央部には、平面が南北方向45.5 m、東西方向42.5 mの原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）があり、その周囲には、平面が南北方向68.5 m、東西方向68.25 mの原子炉建屋附属棟（以下「附属棟」という。）を配置している。

使用済燃料プールは原子炉棟の燃料取替床（EL.46.5 m）付近に位置する鉄筋コンクリート構造物で、使用済燃料、制御棒及び使用済燃料輸送容器が収容される。使用済燃料プール内には、収容される機器の遮蔽及び冷却のため常時水が張られている。使用済燃料プール内面はステンレス鋼でライニングされており、漏水を防ぐと共に、保守、点検についても考慮されている。なお、J E A G 4 6 0 1 -1987に基づき、鋼製ライナは耐漏洩機能を、鉄筋コンクリート部分は支持機能を有する。

また、使用済燃料プールの反対側には、原子炉ウェルをはさんで燃料交換時に蒸気乾燥器と気水分離器を仮置きする蒸気乾燥器・気水分離器ピットがある。（以下、使用済燃料プール、原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットの全てを示す場合は、これを「プール部」という。）

使用済燃料プールはほぼ長方形で、その大きさは、内面寸法で12.192 m×10.363 m、主要な壁厚2.154 m、底面スラブ厚1.599 mである。

使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図2-2及び図2-3に、使用済燃料プール周りの概略平面図及び概略断面図を図2-4及び図2-5に示す。

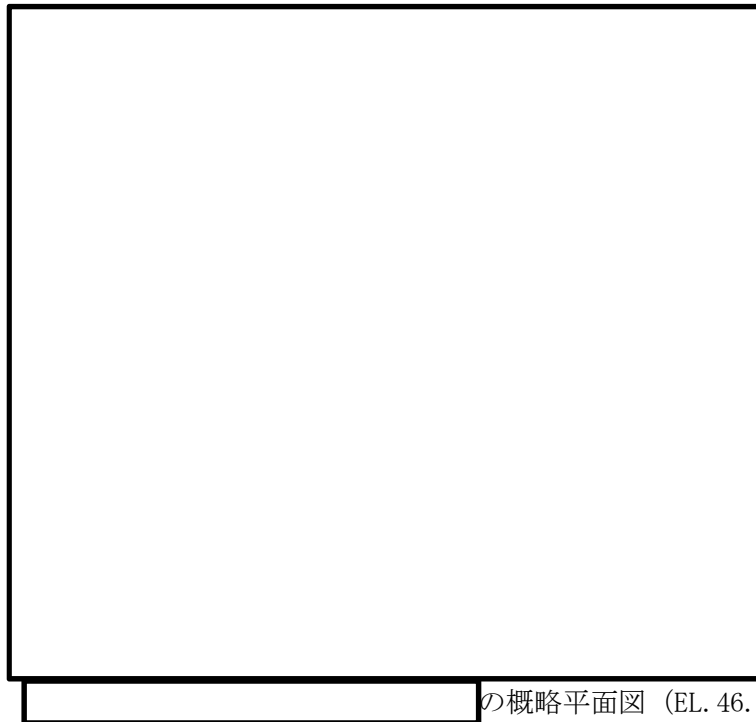


図 2-2 [] の概略平面図 (EL. 46.5 m)

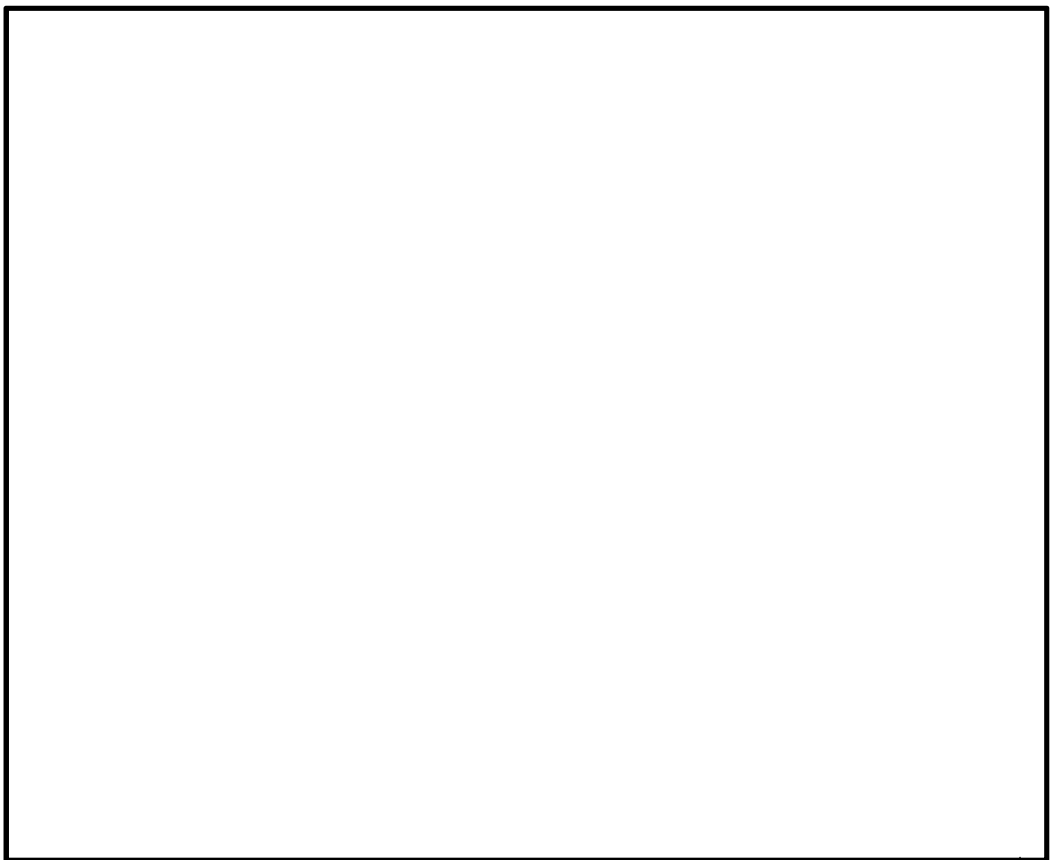


図 2-3 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面 NS 方向)

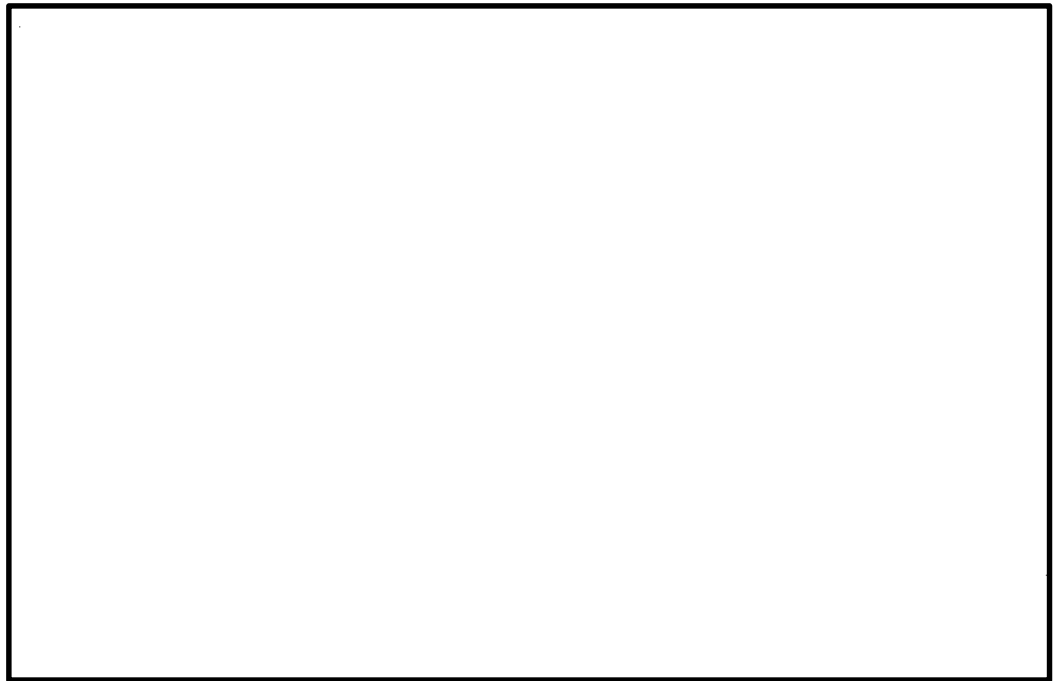


図 2-4 の概略平面図 (EL. 38.80 m)

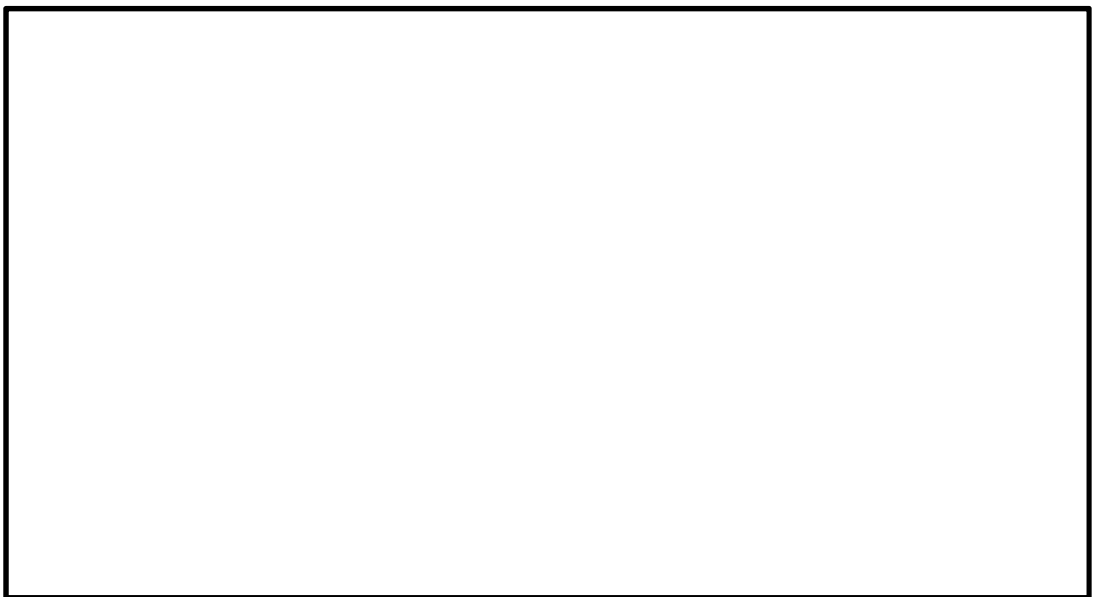


図 2-5 使用済燃料プール周りの概略断面図 (A-A 断面 NS 方向)

2.3 評価方針

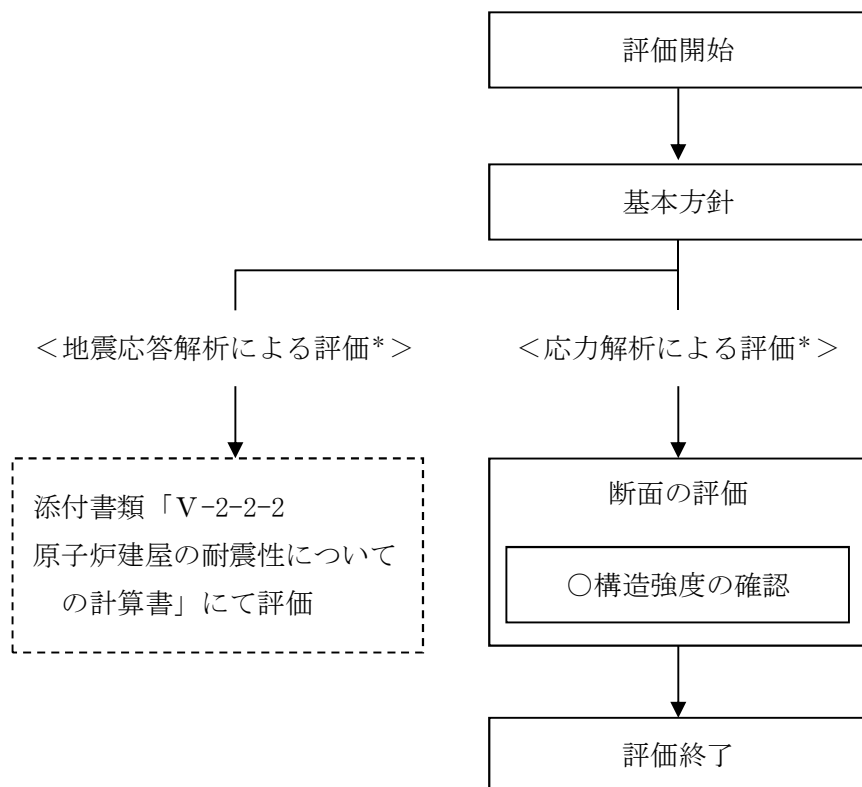
使用済燃料プールは、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備」に分類される。

使用済燃料プールの設計基準対象施設としての評価においては、弾性設計用地震動 S_d による地震力または静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対する評価（以下「 S_d 地震時に対する評価」という。）及び基準地震動 S_s による地震力に対する評価（以下「 S_s 地震時に対する評価」という。）を行うこととし、それぞれの評価は、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとする。

使用済燃料プールの評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき、応力解析による評価において断面の評価を行うことで、使用済燃料プールの地震時の構造強度の確認を行う。なお、使用済燃料プールの地震時の構造強度の確認には、地震応答解析による評価においてせん断ひずみ及び保有水平耐力の評価が必要であるが、使用済燃料プールが原子炉建屋の一部であることを踏まえ、使用済燃料プールを含む原子炉建屋全体としての評価結果を添付書類「V-2-2-2 原子炉建屋の耐震性についての計算書」に示すこととする。評価に当たっては、地盤物性のばらつきを考慮する。

また、重大事故等対処施設としての評価においては、 S_s 地震時に対する評価を行う。ここで、使用済燃料プールでは、運転時、設計基準事故時及び重大事故等時の状態において、温度の条件が異なるが、コンクリートの温度が上昇した場合においても、コンクリートの圧縮強度の低下は認められず、剛性低下は認められるがその影響は小さいと考えられる（別紙1「鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響（使用済燃料プール）」参照）こと、また、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」では部材内の温度差及び拘束力により発生する熱応力は自己拘束的な応力であり十分な塑性変形能力がある場合は終局耐力に影響しないこととされていることから、重大事故等対処施設としての評価は、設計基準対象施設としての評価と同一となる。

使用済燃料プールの評価フローを図2-6に示す。



注記 * : 添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえた評価を行う。

図 2-6 使用済燃料プールの評価フロー

2.4 適用規格・基準等

使用済燃料プールの評価において、適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1－1987 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補－1984 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1－1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ー許容応力度設計法ー ((社) 日本建築学会, 1999)
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会, 2005)
- ・ 発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 ((社) 日本機械学会, 2003) (以下「CCV規格」という。)

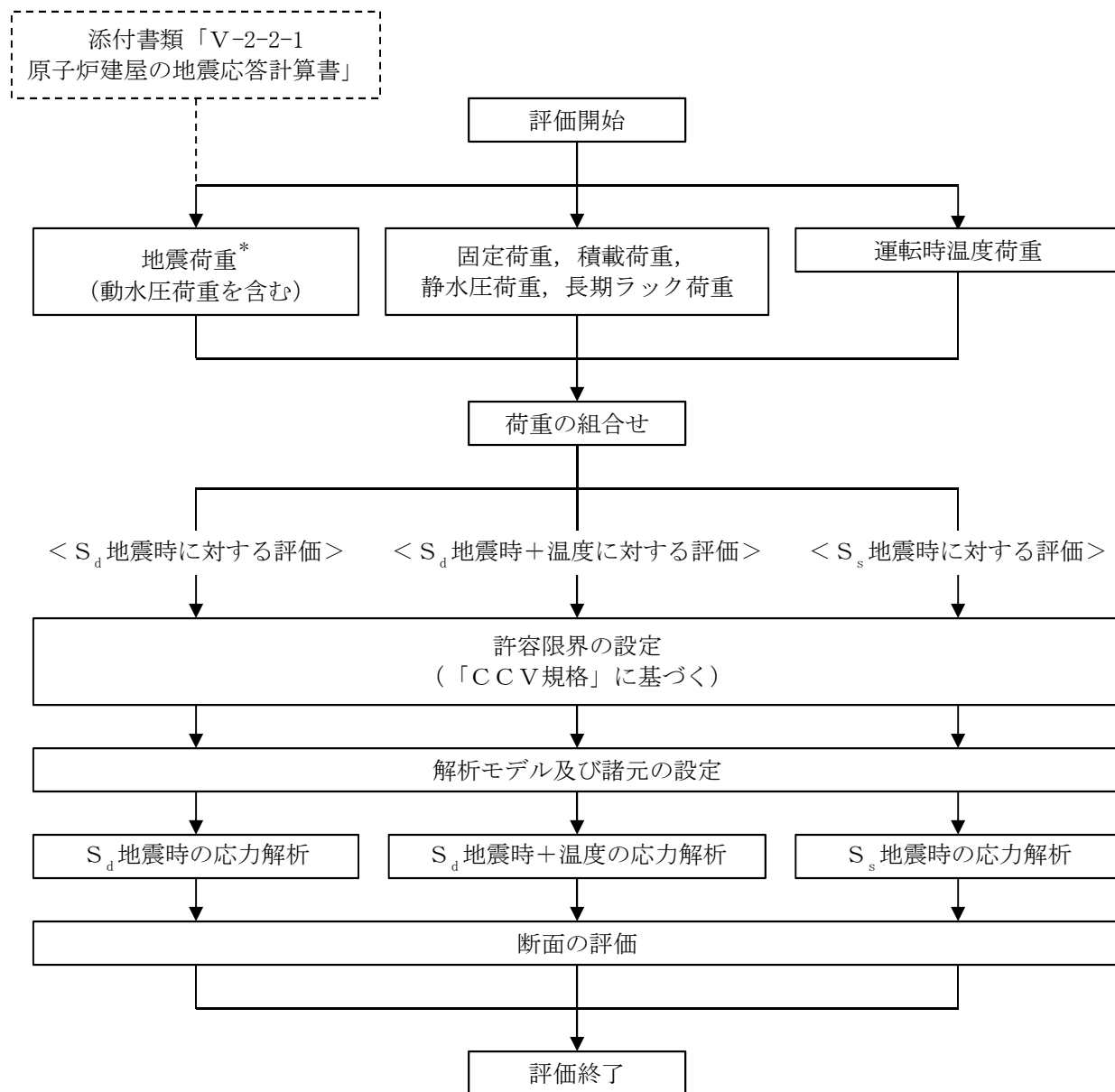
3. 応力解析による評価方法

3.1 評価対象部位及び評価方針

使用済燃料プールの応力解析による評価対象部位は、プールを構成する壁及び底版とし、以下の方針に基づき評価を行う。

S_d地震時及びS_s地震時に対する評価は、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析によることとし、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が、「CCV規格」に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析にあたっては、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」により得られた結果を用いて、荷重の組合せを行う。また、断面の評価については、地盤物性のばらつきを考慮した断面力に対して行うこととする。応力解析による評価フローを図3-1に示す。



注記 * : 地盤物性のばらつきを考慮する。

図 3-1 応力解析による評価フロー

3.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.2.1 荷重

(1) 固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P)

解析モデルに考慮する固定荷重を表 3-1 に示す。

解析モデルの床に考慮する積載荷重を表 3-2 に示す。これらは、床の F E M要素に面荷重として与える。また、プール部に連続する床が負担する荷重のうち、プール部に考慮する荷重を表 3-3 に示す。

表 3-1 固定荷重 (床及び壁)

部位	使用済燃料プール (kN/m ³)	蒸気乾燥器・気水分離器ピット (kN/m ³)
床	24.0	24.0
壁	24.0	24.0

表 3-2 積載荷重 (床)

荷重	使用済 燃料プール (kN/m ²)	蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット (kN/m ²)	EL. 46.5 m 床 (kN/m ²)	EL. 38.8 m 床 (kN/m ²)
機器荷重	17.1	—	(積載荷重に含む)	(積載荷重に含む)
配管荷重	2.94	2.94	2.94	2.94
積載荷重	4.90	4.90	48.1	9.32

表 3-3 プール部に連続する床に作用する荷重

荷重	EL. 46.5 m 東側床	EL. 46.5 m 西側床	EL. 38.8 m 東側床	EL. 38.8 m 西側床
躯体自重 ^{*1} (kN/m ²)	25.9	16.1	16.8	14.4
積載荷重 ^{*2} (kN/m ²)	48.1	48.1	9.32	9.32
配管荷重 ^{*2} (kN/m ²)	2.94	2.94	2.94	2.94
考慮する床の幅 ^{*3} (m)	2.15	2.30	2.15	2.30

注記 *1：単位体積重量 $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ として設定。

*2：既工事計画認可申請書 第 1 回申請 添付書類「Ⅲ-5 原子炉建屋の強度計算書」に基づき設定。

*3：隣接するスパン幅の半分を考慮。

(2) 静水压荷重 (H_s)

解析モデルに考慮するプール内の静水压荷重の算定条件を表 3-4 に示す。なお、プール部の水位は通常運転時の状態を対象とし、使用済燃料プールが満水で蒸気乾燥器・気水分離器ピット及び原子炉ウェルには水が無い状態とする。

表 3-4 プールの静水压荷重の算定条件

部位	最高水位 (m)	プール底面レベル (m)	最大水深 (m)
使用済燃料プール	EL. 46.195*	EL. 34.689* ¹	11.506

注記 * : 使用済燃料プールの通常運転時の水位及び底面レベルは、添付書類「V-1-3-1 使用済燃料貯蔵槽の温度、水位及び漏えいを監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」に基づき設定。

(3) 長期ラック荷重 (R_0)

解析モデルに考慮する使用済燃料プール底版に作用する使用済燃料ラックの長期荷重（以下「長期ラック荷重」という。）を表 3-5 に示す値とする。なお、長期ラック荷重は使用済燃料の重量を含んでいる。

表 3-5 長期ラック荷重*
(使用済燃料の重量を含む)

部位	荷重
使用済燃料プール	70.7 kN/m ²

注記 * : 平成 6 年 4 月 19 日付け 6 資庁第 2531 号にて認可された工事計画の「I 工事計画書」に基づき設定。

(4) 地震荷重 (S_d , S_s)

a. S_d 地震荷重 (S_d)

水平方向の S_d 地震荷重は、水平地震力及び動水圧荷重で構成される。鉛直方向の S_d 地震荷重は、鉛直地震力及び動水圧荷重で構成される。

S_d 地震荷重のうち、水平地震力は弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び層せん断力係数 3.0Ci より算定される静的地震力より設定する。

鉛直地震力は、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析より算定される動的地震力に、及び震度 0.3 を基準とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮した高さ方向に一定の鉛直震度より算定される静的地震力により設定する。このとき、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析より算定される動的地震力は、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に基づく応答値の最大値に地盤物性のばらつきを考慮して設定する。

b. S_s 地震荷重 (S_s)

水平方向の S_s 地震荷重は、水平地震力及び動水圧荷重で構成される。鉛直方向の S_s 地震荷重は、鉛直地震力及び動水圧荷重で構成される。

S_s 地震荷重のうち水平地震力及び鉛直地震力は、基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力より設定する。このとき、基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力は、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に基づく応答値の最大値に地盤物性のばらつきを考慮して設定する。

(5) 運転時温度荷重 (T)

運転時温度荷重は、通常運転時の夏季及び冬季の通常運転時温度荷重を考慮するものとする。通常運転時における使用済燃料プールの水温及び雰囲気温度を既工事計画認可申請書 第1回申請 添付書類「Ⅲ-2-1 原子炉格納容器の設計条件に関する説明書」及び東海第二発電所原子炉設置変更許可 添付書類八 「4. 燃料の貯蔵設備及び取扱設備 4.3.7 燃料プール浄化冷却系」に基づき設定し、表 3-6 及び図 3-2 に示す。

原子炉建屋内の雰囲気温度は、既工事計画認可申請書 第1回申請添付書類「Ⅲ-3-3-14 原子炉格納容器底部コンクリートマット強度計算書」に基づき、冬季及び夏季においてそれぞれ 10℃及び 40℃と設定し、外気温は、東海第二発電所原子炉設置変更許可 添付書類五 「5. 気象 5.2 最寄りの気象官署の資料による一般気象」に基づき、それぞれ 3℃及び 25.2℃とする。

プールの壁及び底版の温度分布設定箇所を図 3-3 に、各部位の表面温度を一定とした定常温度分布解析から算出される温度分布を表 3-7 に示す。

表 3-6 雰囲気温度（通常運転時）

荷重	通常運転時 (℃)
ドライウエル	66
原子炉ウエル	66
使用済燃料プール（水温）	52
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	10 （40）＊

注記 ＊1：蒸気乾燥器・気水分離器ピット内は
原子炉建屋内の雰囲気温度と同一。
カッコ内は夏季の温度を示す。



(a) 通常運転時（冬季）

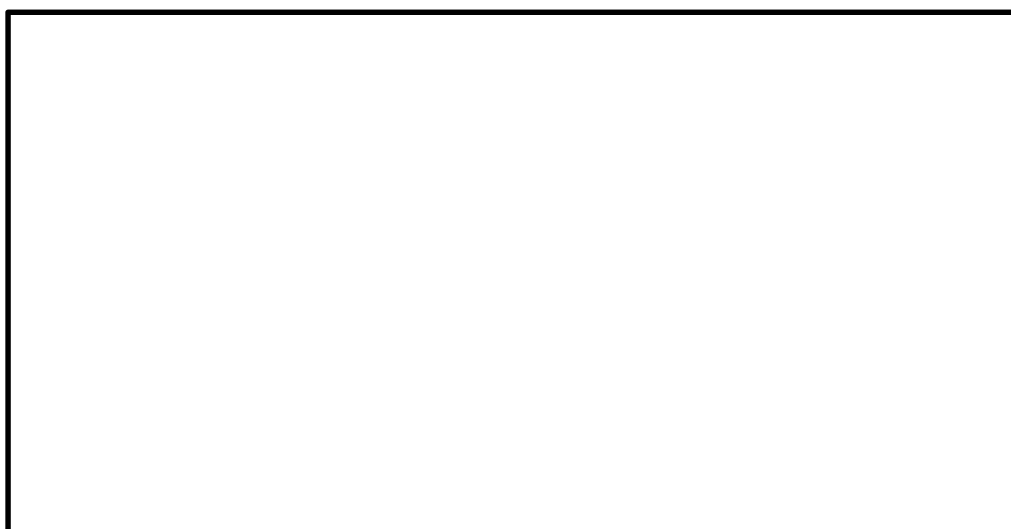
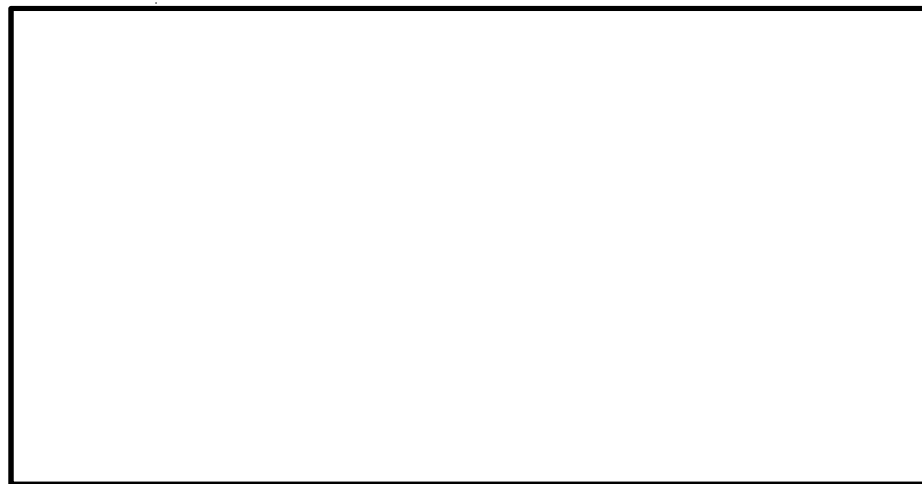
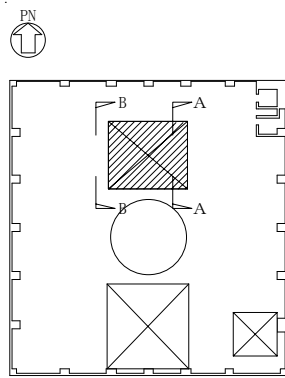
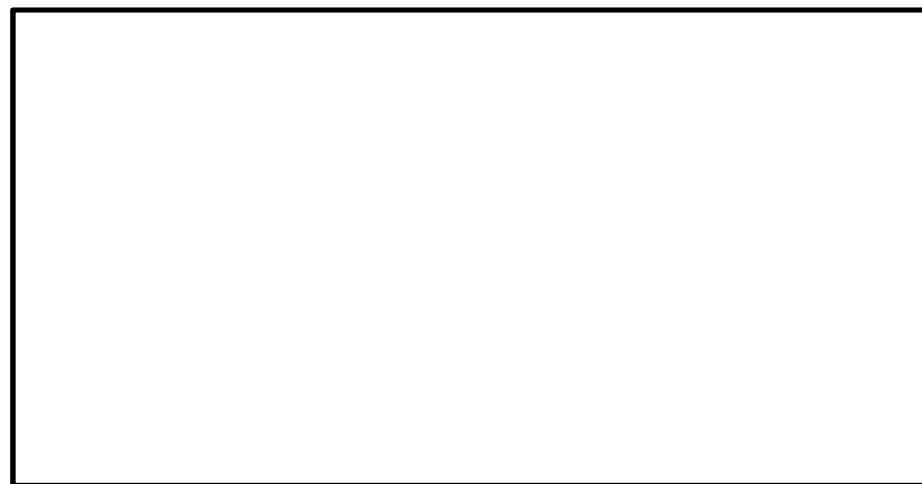


図 3-2 雰囲気温度



(a) 東側プール壁 (A-A 矢視)



(b) 西側プール壁 (B-B 矢視)

図 3-3 (1/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

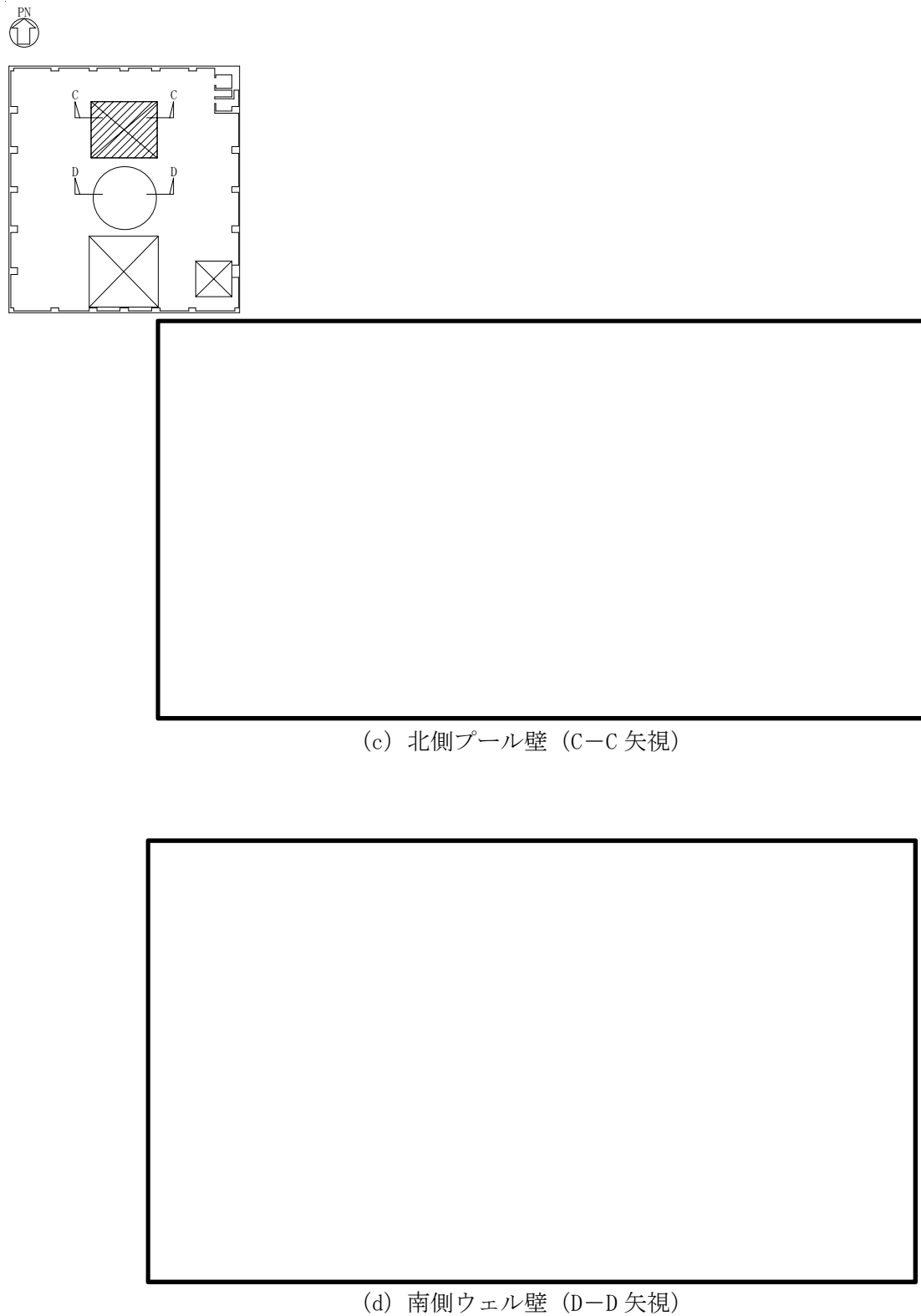


図 3-3 (2/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

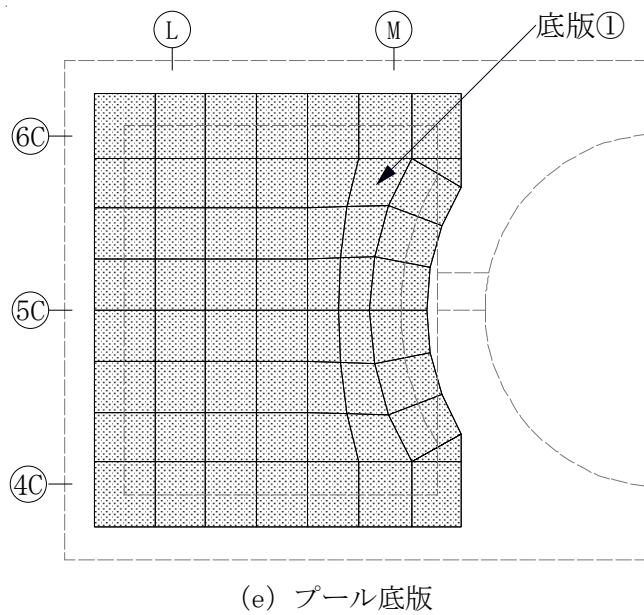


図 3-3 (3/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

表 3-7 温度分布（通常運転時）

部位	表面温度（℃）			
	冬季		夏季	
	プール内側	プール外側	プール内側	プール外側
東側壁①	52.0	17.5	52.0	42.1
西側壁①	52.0	20.7	52.0	43.0
西側壁②	52.0	17.5	52.0	42.1
南側壁①	52.0	62.8	52.0	62.8
南側壁②	52.0	62.8	52.0	62.8
南側壁③	52.0	63.2	52.0	63.2
北側壁①	52.0	17.9	52.0	42.3
底版①	52.0	19.5	52.0	42.7

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-8 に示す。

表 3-8 荷重の組合せ

外力の状態		荷重の組合せ
短期	S _d 地震時	GP + H _s + R ₀ + S _d
	S _d 地震時 + 温度	GP + H _s + R ₀ + S _d + T
S _s 地震時		GP + H _s + R ₀ + S _s

GP : 固定荷重及び積載荷重

H_s : 静水圧荷重

R₀ : 長期ラック荷重

S_d : S_d地震荷重

S_s : S_s地震荷重

T : 運転時温度荷重

3.3 許容限界

応力解析による評価における使用済燃料プールの許容限界は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に記載の構造強度上の制限の方針に基づき、表 3-9 及び表 3-10 のとおり設定する。

また、コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 3-11 及び表 3-12 に、コンクリート及び鉄筋の許容ひずみを表 3-13 に示す。

表 3-9 応力解析による評価における許容限界
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S_s	使用済燃料プール躯体	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「CCV規格」に基づく荷重状態Ⅳの許容値
		弾性設計用地震動 S_d 及び静的地震力	使用済燃料プール躯体	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「CCV規格」に基づく荷重状態Ⅲの許容値

表 3-10 応力解析による評価における許容限界
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部位	機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S_s	使用済燃料プール躯体	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「CCV規格」に基づく荷重状態Ⅳの許容値

表 3-11 コンクリートの許容応力度

外力の状態	$F_c = 22.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$			
	応力状態 1 ^{*1}		応力状態 2 ^{*2}	
	圧縮 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)	圧縮 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
S _d 地震時 S _d 地震時+温度	14.7	1.06	16.5	1.06
S _s 地震時	18.7	1.06	—	—

注記 *1:「応力状態 1」とは、各荷重状態において温度荷重により生じる応力を除いた応力が生じている状態をいう。

*2:「応力状態 2」とは、各荷重状態において温度荷重による応力が生じている状態をいう。

表 3-12 鉄筋の許容応力度

外力の状態	SD345*	
	引張及び圧縮 (N/mm ²)	面外せん断 (N/mm ²)
S _d 地震時 S _d 地震時+温度 S _s 地震時	345	345

注記 * : 建設当時の鉄筋の種類は SD35 であるが現在の規格 (SD345) に読み替えた許容応力度を示す。

表 3-13 コンクリート及び鉄筋の許容ひずみ

外力の状態	コンクリート (圧縮ひずみ)	鉄筋 (圧縮ひずみ及び引張ひずみ)
S _s 地震時	0.003	0.005

3.4 解析モデル及び諸元

3.4.1 モデル化の基本方針

(1) 基本方針

応力解析は、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施する。解析には、解析コード「MSC NASTRAN ver 2016.1.1」を用いる。また、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。

解析モデルは、使用済燃料プール、原子炉ウェル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットを一体としてモデル化する。また、プール部に連続する壁及び床については、これらのプール部に対する拘束効果を適切に反映した解析モデルとする。

解析モデル概要図を図3-4に示す。

(2) 使用要素

解析モデルに使用するFEM要素は、プール部についてはシェル要素とする。プール部の要素分割展開図を図3-5に示す。有限要素分割は四角形及び三角形で、要素は均質等方性な板要素である。各要素には板の曲げと軸力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮する。

(3) 境界条件

a. 水平地震力作用時及び温度荷重時以外

応力解析モデルの原子炉ウェル下端について鉛直方向変位及び回転を拘束し内部ボックス壁（I/W）下端を固定とする。応力解析モデルの下端以外の境界については、プール部に取り付く一般床及び内部ボックス壁（I/W）の面内剛性による拘束効果を考慮し、等価な曲げ・せん断剛性を有する梁要素でモデル化する。

b. 水平地震力作用時

応力解析モデルの原子炉ウェル下端を固定とし、内部ボックス壁（I/W）端部にはプール部と周辺構造物との間で生じる荷重の伝達を考慮し、鉛直方向の強制変位又は外力を与える。応力解析モデルの下端以外の境界については、プール部に取り付く一般床及び内部ボックス壁（I/W）の面内剛性による拘束効果を考慮し、等価な曲げ・せん断剛性を有する梁要素でモデル化する。

c. 温度荷重時

応力解析モデルの原子炉ウェル及び内部ボックス壁（I/W）下端について鉛直方向変位及び回転を拘束する。応力解析モデルの下端以外の境界については、プール部に取り付く一般床及び内部ボックス壁（I/W）の面内剛性による拘束効果を考慮し、等価な曲げ・せん断剛性を有する梁要素でモデル化する。

節点数：1028
要素数：1192

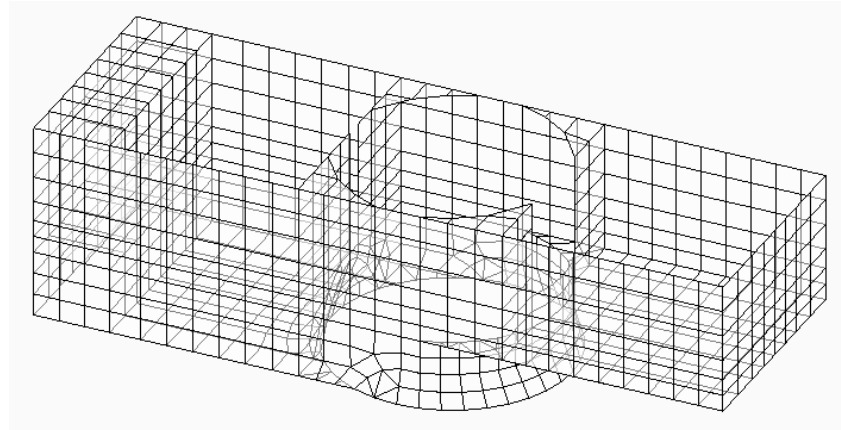
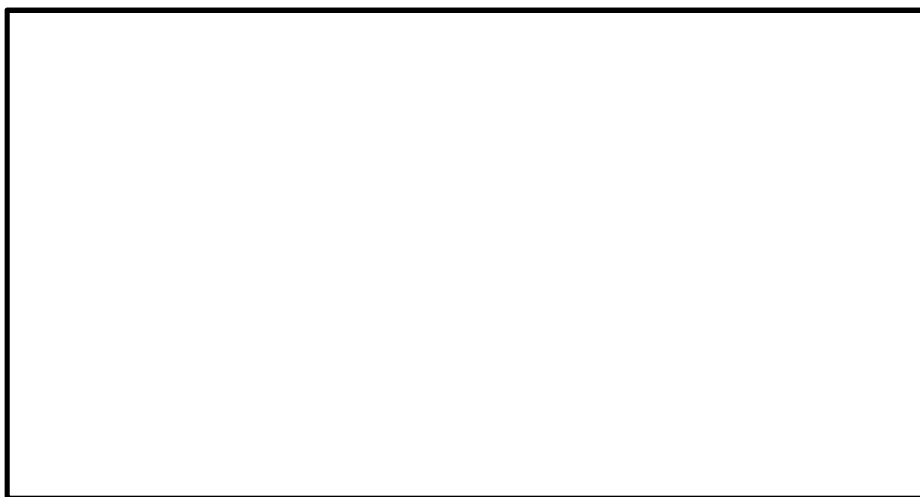
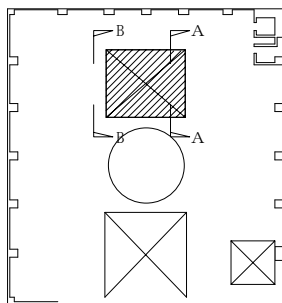
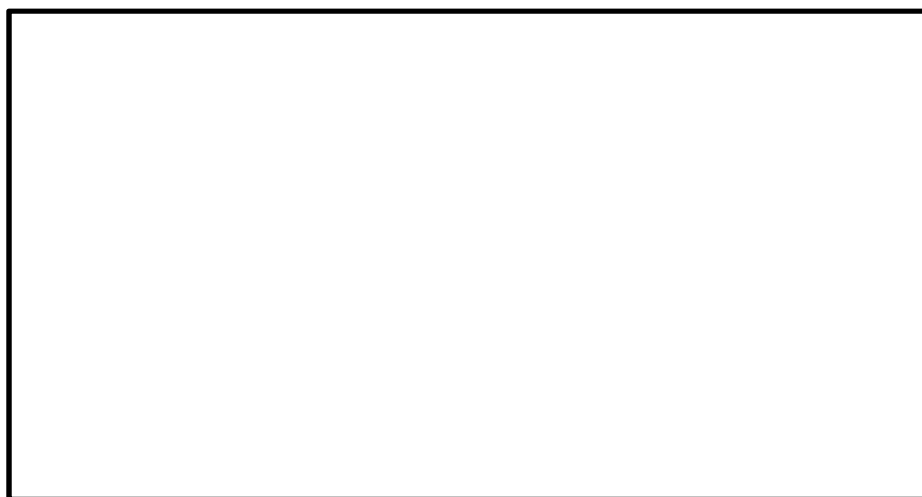


図 3-4 解析モデル概要図

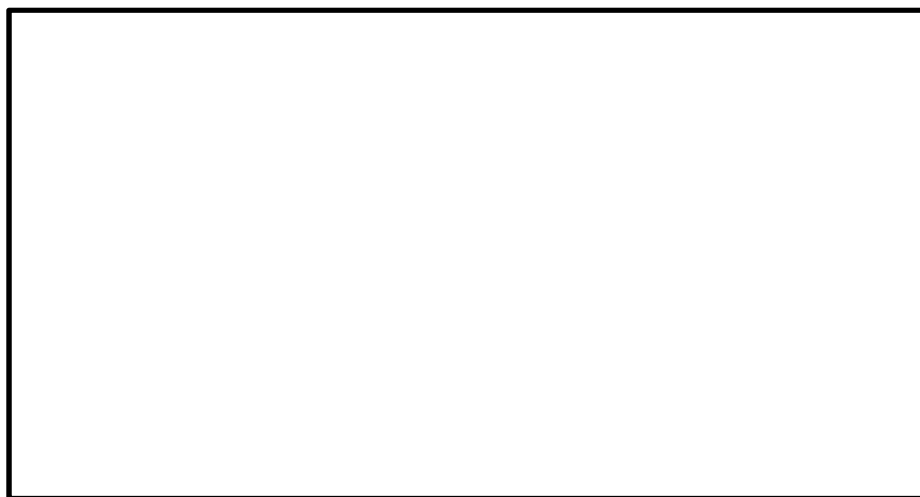
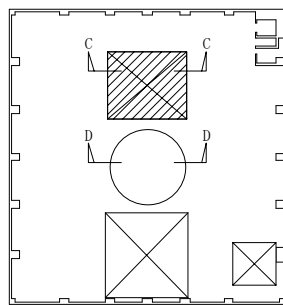


(a) 東側プール壁 (A-A 矢視)



(b) 西側プール壁 (B-B 矢視)

図 3-5 (1/3) プール部の要素分割展開図



(c) 北側プール壁 (C-C 矢視)



(d) 南側ウェル壁 (D-D 矢視)

図 3-5 (2/3) プール部の要素分割展開図

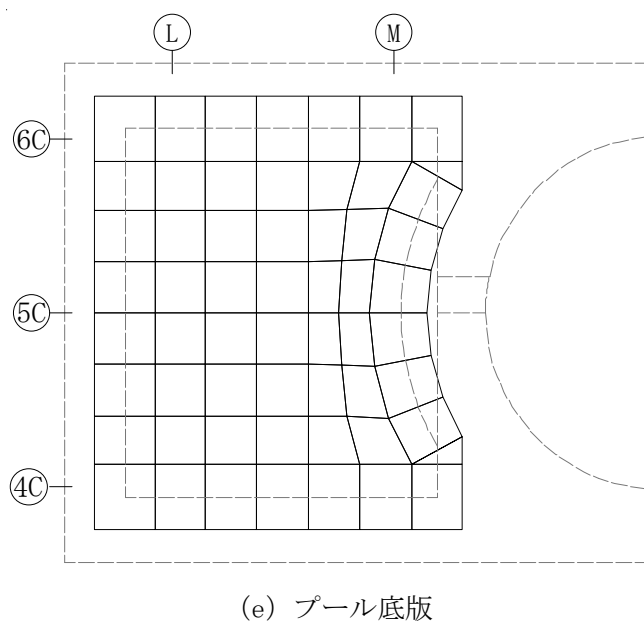


図 3-5 (3/3) プール部の要素分割展開図

3.4.2 解析諸元

コンクリート及び鉄筋の物性値を表 3-14 に示す。なお、鉄筋は SD345 (SD35) を使用しているが、弾性解析において鉄筋はモデル化しない。

表 3-14 (1/2) コンクリートの物性値

コンクリートの 設計基準強度 F_c (N/mm ²)	ヤング 係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
22.1	2.21×10^4	0.2

表 3-14 (2/2) 鉄筋の物性値

鉄筋の種類	ヤング係数 E (N/mm ²)
SD345 相当 (SD35)	2.05×10^5

3.5 評価方法

3.5.1 応力解析方法

使用済燃料プールについて、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施する。

(1) 荷重ケース

S_d 地震時、 S_d 地震時+温度及び S_s 地震時の応力は、単独荷重による解析で求まる応力を組合せて求める。

単独荷重の記号を以下に示す。

GP	: 固定荷重及び積載荷重		
H_s	: 静水圧荷重		
R_0	: 長期ラック荷重		
S_{dWE}^*	: S_d 地震荷重	W→E 方向	GP 及び R_0 による慣性力
S_{dSN}^*	: S_d 地震荷重	S→N 方向	GP 及び R_0 による慣性力
S_{dDU}^*	: S_d 地震荷重	鉛直方向	GP 及び R_0 による慣性力
H_{dWE}^*	: S_d 地震荷重	W→E 方向	水平地震力による動水圧荷重
H_{dSN}^*	: S_d 地震荷重	S→N 方向	水平地震力による動水圧荷重
H_{dDU}^*	: S_d 地震荷重	鉛直方向	鉛直地震力による動水圧荷重
S_{sWE}^*	: S_s 地震荷重	W→E 方向	GP 及び R_0 による慣性力
S_{sSN}^*	: S_s 地震荷重	S→N 方向	GP 及び R_0 による慣性力
S_{sDU}^*	: S_s 地震荷重	鉛直方向	GP 及び R_0 による慣性力
H_{sWE}^*	: S_s 地震荷重	W→E 方向	水平地震力による動水圧荷重
H_{sSN}^*	: S_s 地震荷重	S→N 方向	水平地震力による動水圧荷重
H_{sDU}^*	: S_s 地震荷重	鉛直方向	鉛直地震力による動水圧荷重
T_{01}	: 運転時温度荷重 (冬)		
T_{02}	: 運転時温度荷重 (夏)		

注記 * : 加力方向により絶対値の差異はないため、計算上の座標軸を基本として、EW 方向は W→E 方向加力、NS 方向は S→N 方向加力、鉛直方向は上向き加力を記載している。

(2) 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3-15～表 3-17 に示す。

水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1－2008（（社）日本電気協会，2008）」を参考に，組合せ係数法（組合せ係数は 1.0 と 0.4）を用いるものとする。

表 3-15 荷重の組合せケース（S_d地震時）

組合せ 係数	鉛直 方向	水平 方向	ケース No.	荷重の組合せ
水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	1－1	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}}$
		E→W	1－2	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}}$
		S→N	1－3	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}}$
		N→S	1－4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}}$
	下	W→E	1－5	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}}$
		E→W	1－6	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}}$
		S→N	1－7	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}}$
		N→S	1－8	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}}$
水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	1－9	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}}$
		E→W	1－10	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}}$
		S→N	1－11	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}}$
		N→S	1－12	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}}$
	下	W→E	1－13	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}}$
		E→W	1－14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}}$
		S→N	1－15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}}$
		N→S	1－16	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}}$

表 3-16 荷重の組合せケース（ S_d 地震時+温度）

	組合せ 係数	鉛直 方向	水平 方向	ケース No.	荷重の組合せ
冬	水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	2-1	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
			E→W	2-2	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
			S→N	2-3	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
			N→S	2-4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
		下	W→E	2-5	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
			E→W	2-6	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
			S→N	2-7	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
			N→S	2-8	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{01}$
	水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	2-9	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
			E→W	2-10	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
			S→N	2-11	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
			N→S	2-12	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
		下	W→E	2-13	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
			E→W	2-14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
			S→N	2-15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
			N→S	2-16	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{01}$
夏	水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	2-17	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
			E→W	2-18	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
			S→N	2-19	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
			N→S	2-20	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} + 0.4S_{d_{DU}} + 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
		下	W→E	2-21	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{WE}} + 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
			E→W	2-22	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{WE}} - 1.0H_{d_{WE}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
			S→N	2-23	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{d_{SN}} + 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
			N→S	2-24	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{d_{SN}} - 1.0H_{d_{SN}} - 0.4S_{d_{DU}} - 0.4H_{d_{DU}} + T_{02}$
	水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	2-25	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
			E→W	2-26	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
			S→N	2-27	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
			N→S	2-28	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} + 1.0S_{d_{DU}} + 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
		下	W→E	2-29	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{WE}} + 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
			E→W	2-30	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{WE}} - 0.4H_{d_{WE}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
			S→N	2-31	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{d_{SN}} + 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$
			N→S	2-32	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{d_{SN}} - 0.4H_{d_{SN}} - 1.0S_{d_{DU}} - 1.0H_{d_{DU}} + T_{02}$

表 3-17 荷重の組合せケース (S_s地震時)

組合せ 係数	鉛直 方向	水平 方向	ケース No.	荷重の組合せ
水平 1.0 鉛直 0.4	上	W→E	3-1	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SWE} + 1.0H_{SWE} + 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SDU}$
		E→W	3-2	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SWE} - 1.0H_{SWE} + 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SDU}$
		S→N	3-3	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SSN} + 1.0H_{SSN} + 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SDU}$
		N→S	3-4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SSN} - 1.0H_{SSN} + 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SDU}$
	下	W→E	3-5	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SWE} + 1.0H_{SWE} - 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SDU}$
		E→W	3-6	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SWE} - 1.0H_{SWE} - 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SDU}$
		S→N	3-7	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SSN} + 1.0H_{SSN} - 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SDU}$
		N→S	3-8	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SSN} - 1.0H_{SSN} - 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SDU}$
水平 0.4 鉛直 1.0	上	W→E	3-9	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SWE} + 0.4H_{SWE} + 1.0S_{SDU} + 1.0H_{SDU}$
		E→W	3-10	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SWE} - 0.4H_{SWE} + 1.0S_{SDU} + 1.0H_{SDU}$
		S→N	3-11	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SSN} + 0.4H_{SSN} + 1.0S_{SDU} + 1.0H_{SDU}$
		N→S	3-12	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SSN} - 0.4H_{SSN} + 1.0S_{SDU} + 1.0H_{SDU}$
	下	W→E	3-13	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SWE} + 0.4H_{SWE} - 1.0S_{SDU} - 1.0H_{SDU}$
		E→W	3-14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SWE} - 0.4H_{SWE} - 1.0S_{SDU} - 1.0H_{SDU}$
		S→N	3-15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SSN} + 0.4H_{SSN} - 1.0S_{SDU} - 1.0H_{SDU}$
		N→S	3-16	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SSN} - 0.4H_{SSN} - 1.0S_{SDU} - 1.0H_{SDU}$

(3) 荷重の入力方法

a. 固定荷重及び積載荷重

固定荷重は、プール部の要素に作用する物体力として入力する。また、表 3-2 に示す積載荷重は面荷重として、表 3-3 に示すプール部に連続する床に作用する荷重は線荷重として入力する。

b. 静水圧荷重

表 3-4 に示す静水圧荷重を、底版に面荷重として、壁に面荷重及び節点荷重として入力する。

c. 長期ラック荷重

表 3-5 に示す長期ラック荷重を使用済燃料プール底版に面荷重として入力する。

d. 地震荷重

(a) 固定・積載荷重による慣性力

水平地震力及び鉛直地震力は、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析より算定される動的地震力及び静的地震力並びに基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力に地盤物性のばらつきを考慮して設定する。

水平地震力は地震応答解析モデルにおける質点レベルに、せん断力及び曲げモーメントを節点力として入力する。なお、NS 方向の水平地震力として、プール部の壁が負担する鉛直方向のせん断力についても考慮し、内部ボックス壁 (I/W) 端部に鉛直方向の線荷重を入力する。また、EW 方向の水平地震力として、内部ボックス壁 (I/W) と原子炉ウェル部の回転変形の差から生じるねじりについても考慮し、内部ボックス壁 (I/W) と原子炉ウェル部の相対変形角を内部ボックス壁 (I/W) 端部の節点に強制変形を入力する。入力するせん断力及び曲げモーメントを表 3-18 に、NS 方向の水平地震時にプール部の壁に作用するせん断力を表 3-19 に、EW 方向の水平地震時に内部ボックス壁 (I/W) 端部に生じる相対変形角を表 3-20 に示す。

鉛直地震力は、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s により算出される動的地震力を包絡したプール部における鉛直震度とし、固定荷重及び機器荷重、配管荷重、積載荷重及び長期ラック荷重に乗じて入力する。鉛直地震力の算定に用いる鉛直震度を表 3-21 及び表 3-22 に示す。

(b) 動水圧荷重

水平地震力による動水圧荷重は、「J E A G 4 6 0 1 -1987」に掲載されているハウスナーの方法に基づき、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に示す弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s による応答解析結果から衝撃圧及び揺動圧を算定し、それらのうち最大となるケースとして、弾性設計用地震動 S_d では $S_d - 1.3$ 、基準地震動 S_s では $S_s - 1.3$ による評価値に対して地盤物性のばらつきを考慮してプール部の壁及び床の各要素に面荷重として入力する。水平地震力による動水圧荷重を図 3-7 及び図 3-8 に示す。

鉛直地震力による動水圧荷重は、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s により算出される動的地震力を包絡したプール部における鉛直震度とし、静水圧荷重に乘じ

面荷重として入力する。鉛直地震力による動水圧荷重の算定に用いる鉛直震度を表 3-21 及び表 3-22 に、地震応答解析モデルを図 3-6 に示す。

表 3-18 地震荷重（せん断力及び曲げモーメント）

(a) NS 方向

EL. (m)	せん断力 (kN)		曲げモーメント (kN・m)	
	S _d 地震時	S _s 地震時	S _d 地震時	S _s 地震時
46.5	47400	65000	76300	151000
38.8	-1670	-2200	8010	15400

(b) EW 方向

EL. (m)	せん断力 (kN)		曲げモーメント (kN・m)	
	S _d 地震時	S _s 地震時	S _d 地震時	S _s 地震時
46.5	28000	31900	27000	66700
38.8	970	4850	3680	10500

表 3-19 地震荷重（プール壁に作用するせん断力）

部位	せん断力 (kN)	
	S _d 地震時	S _s 地震時
使用済燃料プール	16300	24600
蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット	6660	10100

表 3-20 地震荷重（プール壁端部の相対変形角）

相対変形角 ($\times 10^{-4}$ rad.)	
S _d 地震時	S _s 地震時
0.980	1.33

表 3-21 鉛直地震力及び動水圧荷重の算定に用いる鉛直震度（ S_d 地震時）

質点番号	基 本 ^{*1} (cm/s^2)	地盤 $+\sigma$ ^{*2} (cm/s^2)	地盤 $-\sigma$ ^{*2} (cm/s^2)	最大値 (cm/s^2)	鉛直震度
3	435	474	404	474	0.49
4	414	451	384	451	
5	383	416	353	416	

注記 *1: S_d-D1 , S_d-11 , S_d-12 , S_d-13 , S_d-14 , S_d-21 ,
 S_d-22 及び S_d-31 の最大値

*2: S_d-D1 , S_d-21 , S_d-22 及び S_d-31 の最大値

表 3-22 鉛直地震力及び動水圧荷重の算定に用いる鉛直震度（ S_s 地震時）

質点番号	基 本 ^{*1} (cm/s^2)	地盤 $+\sigma$ ^{*2} (cm/s^2)	地盤 $-\sigma$ ^{*2} (cm/s^2)	最大値 (cm/s^2)	鉛直震度
3	823	913	729	913	0.94
4	785	869	693	869	
5	726	799	640	799	

注記 *1: S_d-D1 , S_d-11 , S_d-12 , S_d-13 , S_d-14 , S_d-21 ,
 S_d-22 及び S_d-31 の最大値

*2: S_d-D1 , S_d-21 , S_d-22 及び S_d-31 の最大値

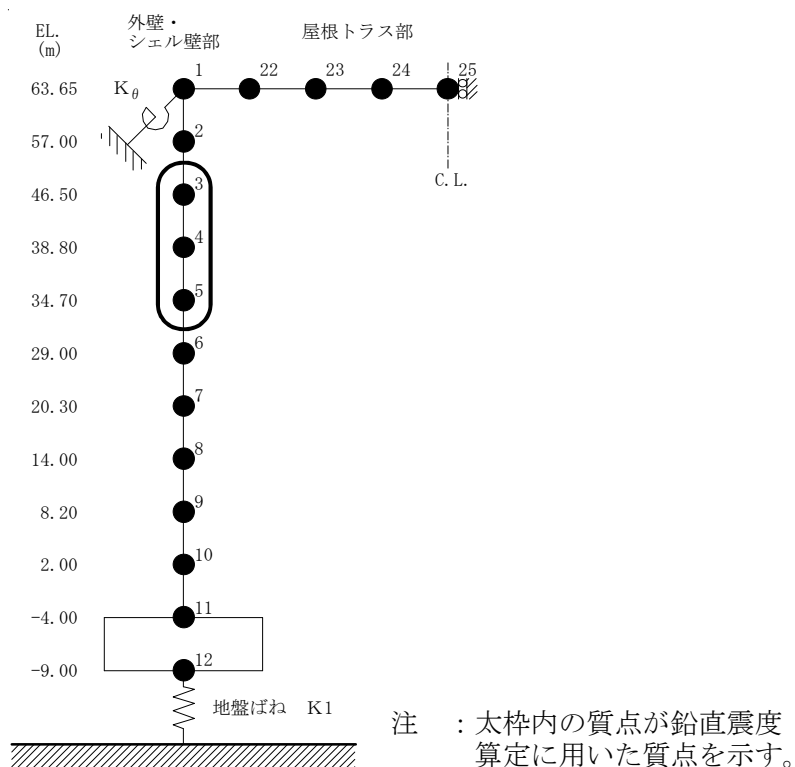


図 3-6 地震応答解析モデル（鉛直方向）

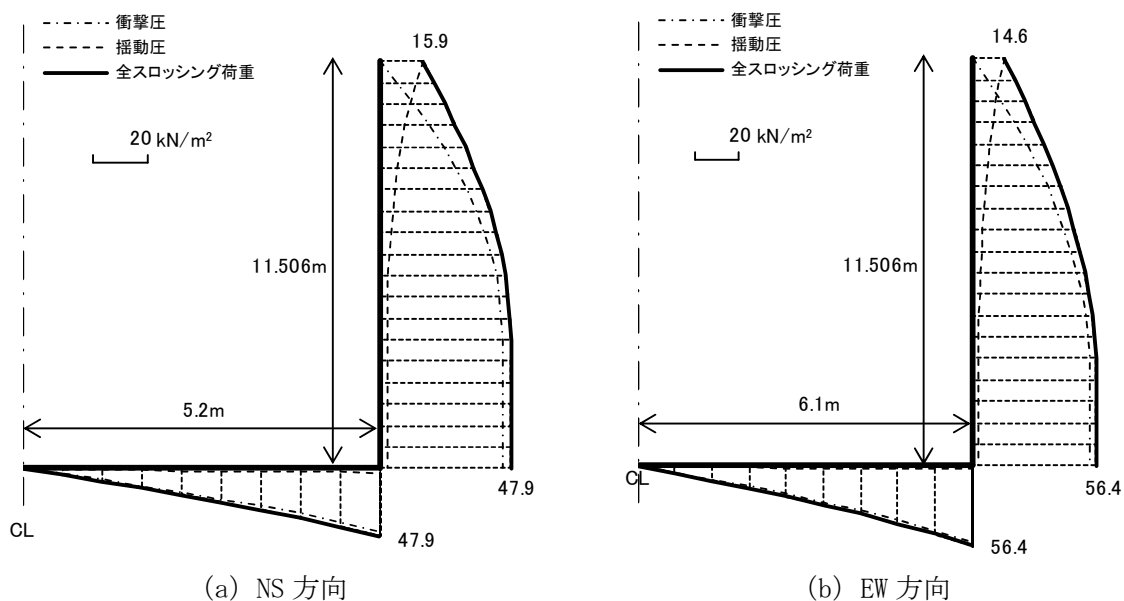


図 3-7 S_d 地震時 水平地震力による動水圧荷重

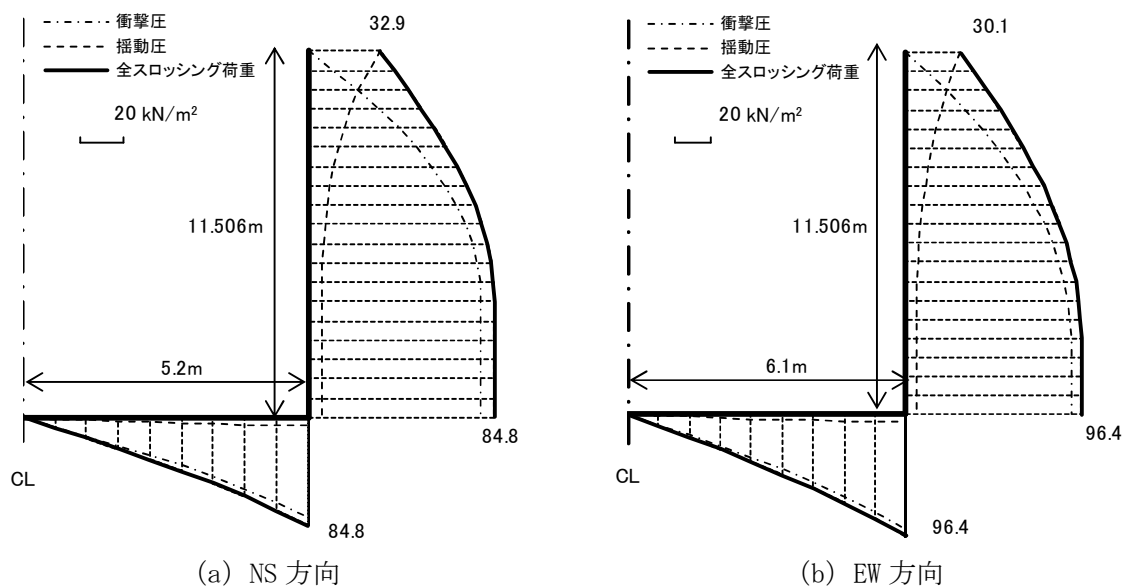


図 3-8 S_s 地震時 水平地震力による動水圧荷重

e. 運転時温度荷重

運転時温度荷重は、シェル要素に対し、要素の平均温度と温度勾配を入力する。温度応力については、「CCV規格」に準拠してひび割れ断面法により評価する。

3.5.2 断面の評価方法

(1) S_d地震時及びS_d地震時+温度

使用済燃料プールの断面の評価に用いる応力は、3次元FEMモデルを用いた応力解析により得られた各荷重による応力（軸力、曲げモーメント及びせん断力）とする。

a. 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面内せん断力並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

【軸力、曲げモーメント及び面内せん断力に対する断面の評価方法】

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度の算定においては、「CCV規格」のCVE-3511に基づき次の2つの計算式に示す等価膜力を考慮した上で、「CCV規格」のCVE-3511.1に基づき、表3-11及び表3-12に示す各許容値を超えないことを確認する。膜力と面内せん断力の関係図を図3-9に示す。

$$\begin{aligned} N_{\phi}^* &= N_{\phi} \pm |N_{\phi\theta}| \\ N_{\theta}^* &= N_{\theta} \pm |N_{\phi\theta}| \end{aligned}$$

ここで、

N_{ϕ}^* , N_{θ}^* : ϕ , θ 方向の等価膜力

N_{ϕ} , N_{θ} : ϕ , θ 方向の膜力

$N_{\phi\theta}$: 面内せん断力

（ ϕ 方向は子午線方向、 θ 方向は円周方向とする）

上記の式のうち、「膜力」は「軸力」に読み替えることとする。また、「子午線方向」は「縦方向」に、「円周方向」は「横方向」にそれぞれ読み替えることとする。

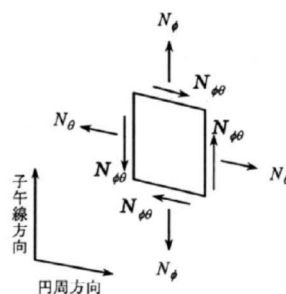


図 3-9 膜力と面内せん断力の関係図

【面内せん断力に対する断面の評価方法】

面内せん断力については、「CCV規格」のCVE-3512.1に基づき、評価対象部位に生じる面内せん断応力度が、次の2つの計算式により計算した終局面内せん断応力度のいずれか小さい方の0.75倍の値を超えないことを確認する。

$$\tau_u = 0.5 \left\{ (p_{t\phi} \cdot f_y - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta} \cdot f_y - \sigma_{0\theta}) \right\}$$

$$\tau_u = 1.10 \sqrt{F_c}$$

ここで、

- τ_u : 終局面内せん断応力度 (N/mm²)
- $p_{t\phi}$: 子午線方向主筋の鉄筋比
- $p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比
- $\sigma_{0\phi}$: 外力による子午線方向の膜応力度 (N/mm²)
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)
- $\sigma_{0\theta}$: 外力による円周方向の膜応力度 (N/mm²)
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)
- f_y : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度であり、表 3-12 に示す値 (N/mm²)
- F_c : コンクリートの設計基準強度であり、表 3-11 に示す値 (N/mm²)

上記の式のうち、「子午線方向主筋」は「縦方向主筋」に、「円周方向主筋」は「横方向主筋」にそれぞれ読み替えることとする。また、「子午線方向の膜応力度」は「縦方向の軸応力度」に、「円周方向の膜応力度」は「横方向の軸応力度」にそれぞれ読み替えることとする。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」のCVE-3513.1に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断応力度が、次の2つの計算式により計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の0.75倍の値を超えないことを確認する。

$$\tau_R = \Phi \left\{ 0.1(p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_y + 0.235\sqrt{F_c} \right\}$$

$$\tau_R = 1.10 \sqrt{F_c}$$

ここで、

- τ_R : 終局面外せん断応力度 (N/mm²)
- p_t : 主筋の鉄筋比
- σ_0 : 外力による膜応力度 (N/mm²) (引張の符号を正とする)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であって、次の計算式により計算した値

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)

b : 断面の幅 (mm)

x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

Φ : 低減係数であり、次の計算式により計算した値

(1 を超える場合は 1, 0.58 未満の場合は 0.58 とする)

$$\Phi = 1 / \sqrt{M / (Q \cdot d)}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

なお、 F_c は表 3-11 に、 f_y は表 3-12 による。また、上記の式のうち、「外力による膜応力度」は「外力による軸応力度」に読み替えることとする。

b. 底版

軸力、曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

【軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法】

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度の算定については、「CCV規格」の CVE-3521.1 に基づき、表 3-11 及び表 3-12 に示す各許容値を超えないことを確認する。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」の CVE-3522 に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式により計算した値を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \{ \alpha \cdot {}_c f_s + 0.5 {}_w f_t (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

${}_c f_s$: コンクリートの許容せん断応力度で、表 3-11 に示す値 (N/mm²)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であり、次の計算式により計算した値 (0.002 以上とし、0.012 を超える場合は 0.012 とする)

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)

x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

f_t : 面外せん断力に対する補強筋の許容引張応力度であり、表 3-12 に示す値 (N/mm²)

α : 割増し係数であり、次式により計算した値 (2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする)

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

(2) S_s 地震時

使用済燃料プールの断面の評価に用いる応力は、3次元FEMモデルを用いた応力解析により得られた各荷重による応力（軸力、曲げモーメント及びせん断力）とする。

a. 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断力並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

【軸力、曲げモーメント及び面内せん断力に対する断面の評価方法】

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみの算定においては、「CCV規格」のCVE-3511に基づき等価膜力を考慮した上で、「CCV規格」のCVE-3511.2に基づき、表3-13に示す各許容値を超えないことを確認する。膜力と面内せん断力の関係図を図3-9に示す。ここで、鉄筋のひずみ算定において、発生応力が鉄筋の降伏応力度を超える場合は、エネルギー一定則に基づきひずみを算定する。

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみを算定する際のコンクリート及び鉄筋の応力度－ひずみ関係図を図3-10に示す。

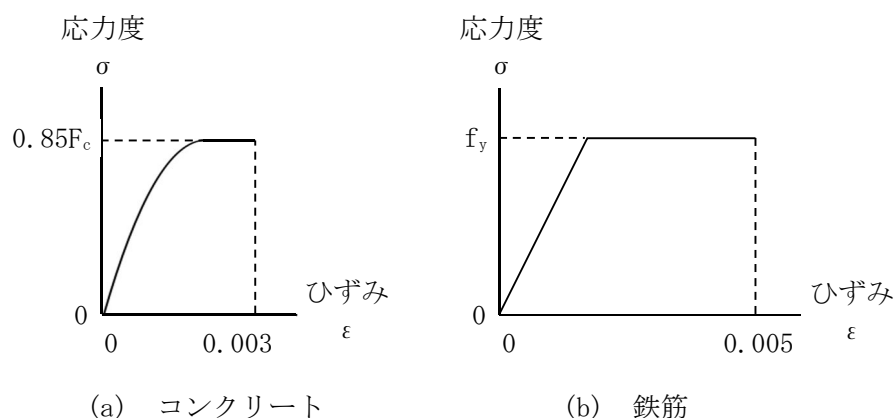


図 3-10 コンクリート及び鉄筋の応力度－ひずみ関係図

【軸力に対する断面の評価方法】

軸力による圧縮応力度については、「CCV規格」のCVE-3511.3に基づきコンクリートの設計基準強度の2/3倍の値を超えないことを確認する。

【面内せん断力に対する断面の評価方法】

面内せん断力については、「CCV規格」のCVE-3512.2に基づき、評価対象部位に生じる面内せん断応力度が、次の2つの計算式により計算した終局面内せん断応力度のいずれか小さい方の値を超えないことを確認する。

$$\begin{aligned}\tau_u &= 0.5 \left\{ (p_{t\phi} \cdot f_y - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta} \cdot f_y - \sigma_{0\theta}) \right\} \\ \tau_u &= 1.10 \sqrt{F_c}\end{aligned}$$

ここで、

- τ_u : 終局面内せん断応力度 (N/mm²)
- $p_{t\phi}$: 子午線方向主筋の鉄筋比
- $p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比
- $\sigma_{0\phi}$: 外力による子午線方向の膜応力度 (N/mm²)
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)
- $\sigma_{0\theta}$: 外力による円周方向の膜応力度 (N/mm²)
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)
- f_y : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度であり、表 3-12 に示す値 (N/mm²)
- F_c : コンクリートの設計基準強度であり、表 3-11 に示す値 (N/mm²)

上記の式のうち、「子午線方向主筋」は「縦方向主筋」に、「円周方向主筋」は「横方向主筋」にそれぞれ読み替えることとする。また、「子午線方向の膜応力度」は「縦方向の軸応力度」に、「円周方向の膜応力度」は「横方向の軸応力度」にそれぞれ読み替えることとする。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」のCVE-3513.2に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断応力度が、次の2つの計算式により計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の値を超えないことを確認する。

$$\begin{aligned}\tau_R &= \Phi \left\{ 0.1(p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_y + 0.235\sqrt{F_c} \right\} \\ \tau_R &= 1.10 \sqrt{F_c}\end{aligned}$$

ここで、

- τ_R : 終局面外せん断応力度 (N/mm²)
- p_t : 主筋の鉄筋比
- σ_0 : 外力による膜応力度 (N/mm²) (引張の符号を正とする)
- p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であって、次の計算式により計算した値
- $$p_w = a_w / (b \cdot x)$$
- a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)
- b : 断面の幅 (mm)
- x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)
- Φ : 低減係数であり、次の計算式により計算した値
(1 を超える場合は 1, 0.58 未満の場合は 0.58 とする)
- $$\Phi = 1 / \sqrt{M / (Q \cdot d)}$$
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Q : せん断力 (N)
- d : 断面の有効せい (mm)

なお、 F_c は表 3-11 に、 f_y は表 3-12 による。また、上記の式のうち、「外力による膜応力度」は「外力による軸応力度」に読み替えることとする。

b. 底版

軸力、曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

【軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法】

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみの算定については、「CCV規格」の CVE-3521.2 に基づき、表 3-13 に示す各許容値を超えないことを確認する。ここで、鉄筋のひずみ算定において、発生応力が鉄筋の降伏応力度を超える場合は、エネルギー一定則に基づきひずみを算定する。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」の CVE-3522 に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式により計算した値を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \{ \alpha \cdot c f_s + 0.5 w f_t (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

- Q_A : 許容面外せん断力 (N)
- b : 断面の幅 (mm)

- j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)
- $_c f_s$: コンクリートの許容せん断応力度で、表 3-11 に示す値 (N/mm²)
- p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であり、次の計算式により計算した値 (0.002 以上とし、0.012 を超える場合は 0.012 とする)
- $$p_w = a_w / (b \cdot x)$$
- a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)
- x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)
- $_w f_t$: 面外せん断力に対する補強筋の許容引張応力度であり、表 3-12 に示す値 (N/mm²)
- α : 割増し係数であり、次式により計算した値 (2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする)
- $$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$$
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Q : せん断力 (N)
- d : 断面の有効せい (mm)

4. 評価結果

「3.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。また、使用済燃料プールの配筋一覧を表 4-1 に示す。

(1) S_d 地震時及び S_d 地震時+温度

断面の評価結果を記載する要素を、以下のとおり選定する。

a. 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面内せん断力並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

b. 底版

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図 4-1 及び図 4-2 に、評価結果を表 4-2 及び表 4-3 に示す。

S_d 地震時及び S_d 地震時+温度において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面内せん断力並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

また、底版については、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

(2) S_s 地震時

断面の評価結果を記載する要素を、以下のとおり選定する。

a. 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断力並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

b. 底版

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

選定した要素の位置を図 4-3 に、評価結果を表 4-4 に示す。

S。地震時において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断力並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

また、底版については、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

表 4-1 使用済燃料プールの配筋一覧

(a) 壁

部位	レベル EL. (m)	壁厚 (cm)	配筋			
			縦筋		横筋	
北側壁	34.689～ 39.191	200	D35@200 2 段 内 D29@200 2 段 外		D29@200 2 段 内外共	
	39.191～ 46.5	200	D29@200 2 段 内外共		D29@200 2 段 内外共	
東側壁	34.689～ 39.191	215.4	D35@200 2 段 内 D29@200 2 段 外		D29@200 2 段 内外共	
	39.191～ 46.5	215.4	D29@200 2 段 内外共		D29@200 2 段 内外共	
南側壁	34.689～ 46.5	157.6	D38@200 2 段 内外共		D38@200 2 段 内外共	
西側壁	34.689～ 39.191	215.4	D35@200 2 段 内 D29@200 2 段 外		D29@200 2 段 内外共	
	39.191～ 41.547	215.4	D29@200 2 段 内外共		D29@200 2 段 内外共	
	41.547～ 43.198	137.2	D29@200 2 段 内外共		D29@200 2 段 内外共	
	43.198～ 46.5	137.2	D29@200 2 段 内外共		D29@150 2 段 内外共	

(b) 底版

部位	版厚 (cm)	配筋		
		主筋		せん断補強筋
底版	159.9	EW 方向	D38@200 2 段 内外共	D19@200×200
		NS 方向	D38@200 2 段 内外共	

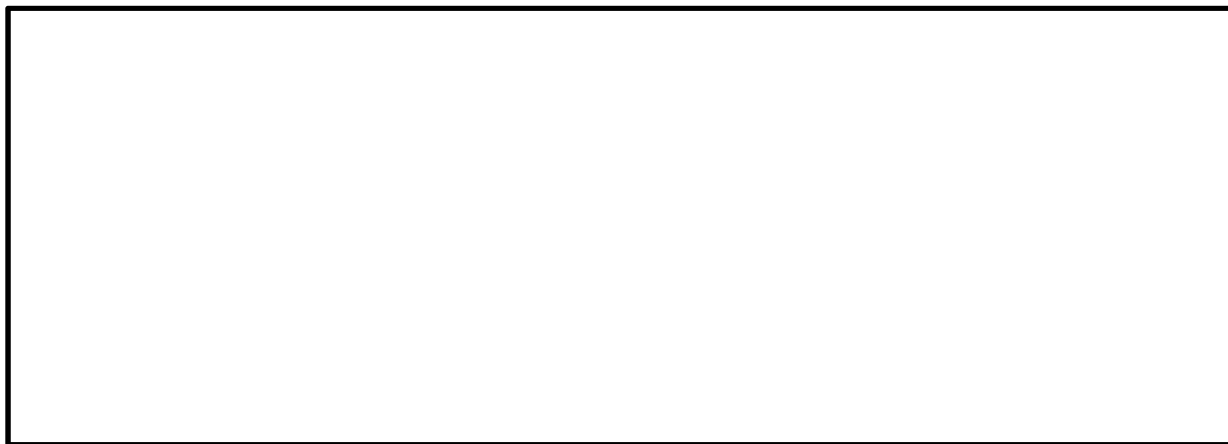
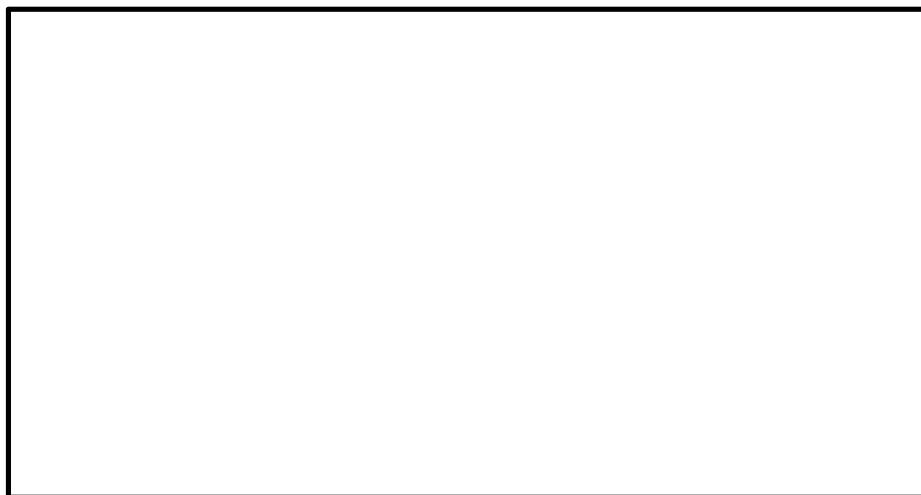


図 4-1 (1/4) 結果を記載する要素の位置 S_d 地震時



(a) 北側壁



(b) 東側壁

図 4-1 (2/4) 結果を記載する要素の位置 S_d地震時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 4-1 (3/4) 結果を記載する要素の位置 S_d地震時

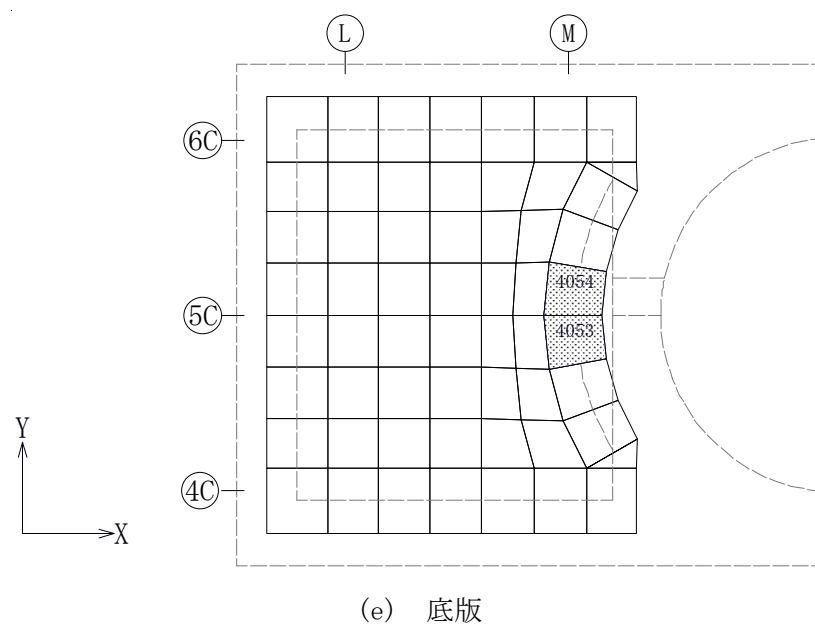


図 4-1 (4/4) 結果を記載する要素の位置 S_d 地震時



(a) 北側壁



(b) 東側壁

図 4-2 (1/3) 結果を記載する要素の位置 S_d地震時+温度



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 4-2 (2/3) 結果を記載する要素の位置 S_d地震時+温度

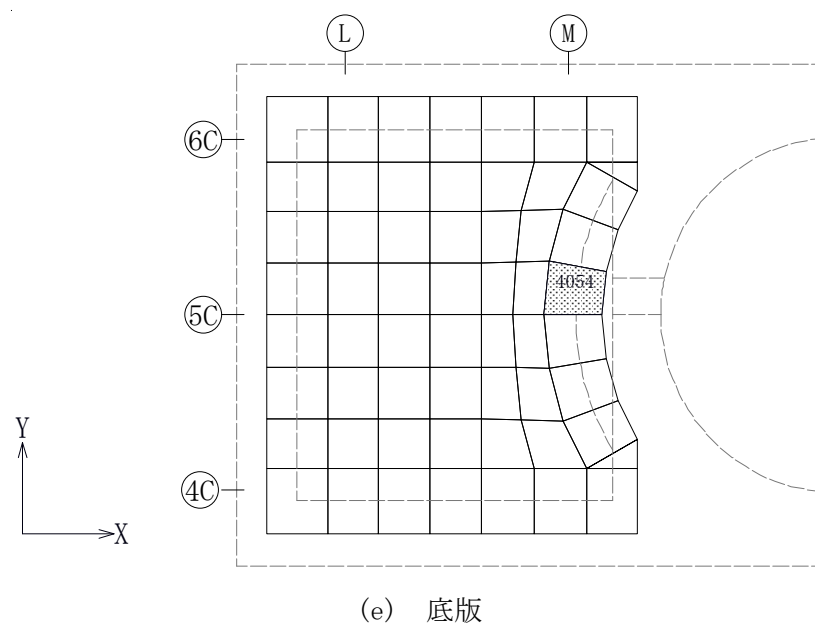
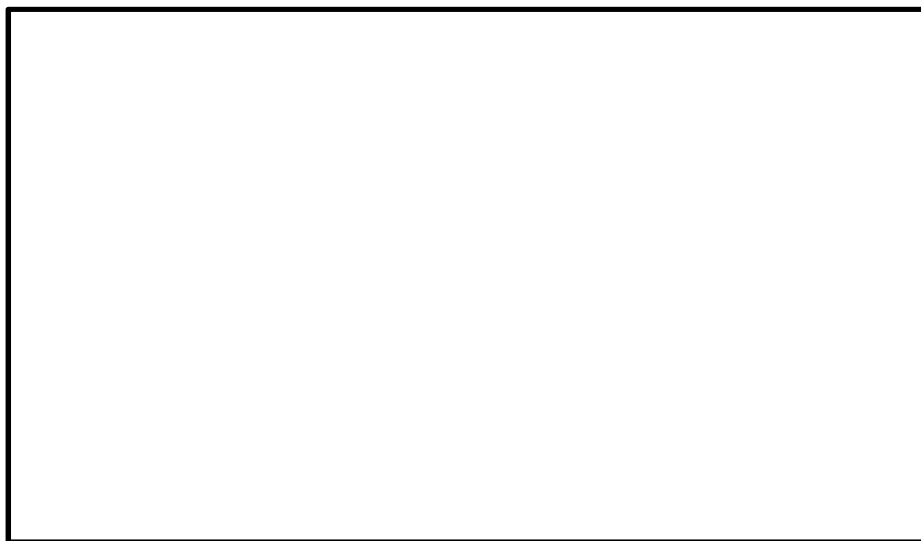


図 4-2 (3/3) 結果を記載する要素の位置 S_d地震時+温度



(a) 北側壁

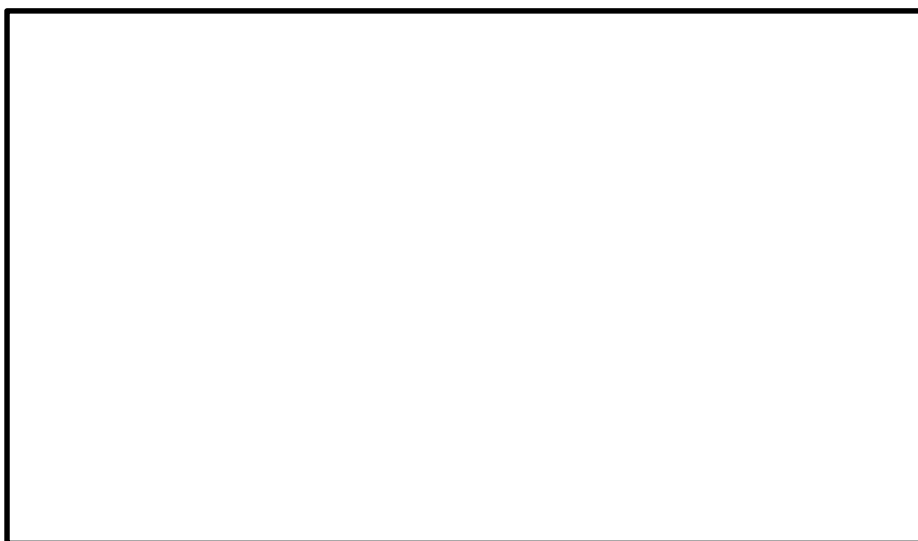


(b) 東側壁

図 4-3 (1/3) 結果を記載する要素の位置 S_s 地震時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 4-3 (2/3) 結果を記載する要素の位置 S_s 地震時

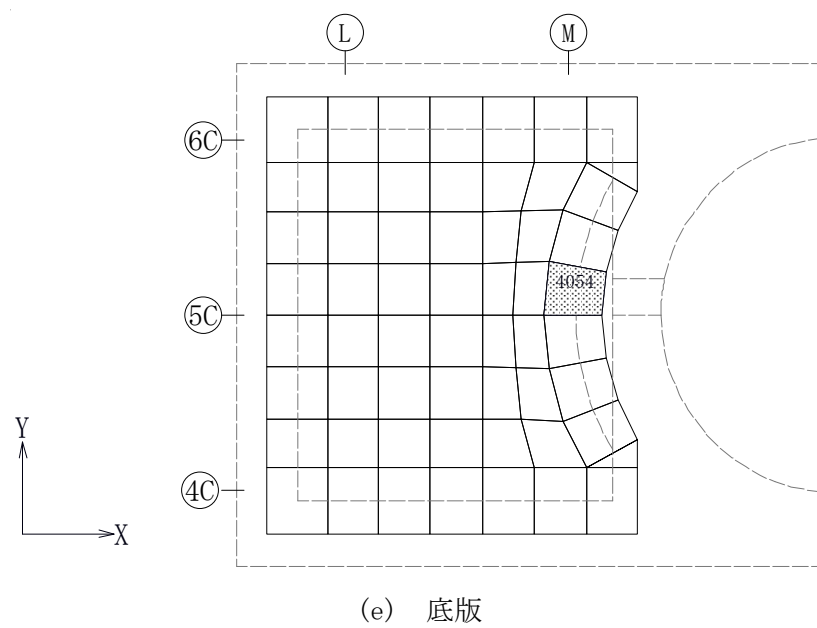


図 4-3 (3/3) 結果を記載する要素の位置 S_s 地震時

表 4-2 評価結果 S_a地震時

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 ＋ 曲げモーメント ＋ 面内せん断力※	北側壁	コンクリート (N/mm ²)	2219	1－8	1.48	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	2272	1－5	313	345	引張側
	東側壁	コンクリート (N/mm ²)	1535	1－5	1.56	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	1546	1－8	248	345	引張側
	南側壁	コンクリート (N/mm ²)	3055	1－15	4.05	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	3037	1－5	277	345	引張側
	西側壁	コンクリート (N/mm ²)	1035	1－6	1.66	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	1046	1－8	248	345	引張側
	底版	コンクリート (N/mm ²)	4054	1－7	5.59	14.7	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	4054	1－16	166	345	引張側
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2272	1－5	0.422	1.23	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1586	1－7	0.923	1.67	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3037	1－5	1.97	3.00	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1086	1－7	0.922	1.61	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	2228	1－8	0.526	0.987	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1536	1－5	0.366	1.01	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	7801	1－6	0.964	1.53	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1033	1－6	0.388	0.994	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm ²)	4053	1－15	1.64	3.01	

注：底版については、面内せん断力は考慮しない。

表 4-3 評価結果 S_d地震時+温度

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力※	北側壁	コンクリート (N/mm ²)	2204	2-1	4.16	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	2272	2-21	299	345	引張側
	東側壁	コンクリート (N/mm ²)	1582	2-3	5.46	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	1567	2-7	268	345	引張側
	南側壁	コンクリート (N/mm ²)	3055	2-15	6.26	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	3031	2-18	262	345	引張側
	西側壁	コンクリート (N/mm ²)	1082	2-3	5.45	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	1085	2-7	264	345	引張側
	底版	コンクリート (N/mm ²)	4054	2-23	5.74	16.5	圧縮側
		鉄筋 (N/mm ²)	4054	2-32	165	345	引張側
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2205	2-6	0.559	1.62	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1586	2-7	0.998	1.65	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3043	2-2	2.27	3.87	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1086	2-23	0.975	1.56	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	2228	2-8	0.545	0.986	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1536	2-5	0.471	1.00	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	7801	2-6	1.23	1.59	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1033	2-22	0.376	1.00	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm ²)	4054	2-15	1.75	3.01	

注：底版については、面内せん断力は考慮しない。

表 4-4 評価結果 S_s地震時

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力※	北側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	2219	3-16	0.142	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	2272	3-5	1.77	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1535	3-5	0.135	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1590	3-7	1.78	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	3055	3-15	0.393	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	3037	3-5	1.46	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1035	3-6	0.145	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1046	3-8	1.58	5.00	引張側
	底版	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	4054	3-15	0.542	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	4054	3-16	1.06	5.00	引張側
軸力	北側壁	圧縮応力度 (N/mm ²)	2272	3-2	0.701	14.7	
	東側壁	圧縮応力度 (N/mm ²)	1581	3-8	1.36	14.7	
	南側壁	圧縮応力度 (N/mm ²)	3055	3-15	3.15	14.7	
	西側壁	圧縮応力度 (N/mm ²)	1090	3-8	1.54	14.7	
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2268	3-13	0.648	1.97	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1590	3-7	1.06	1.50	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3037	3-5	2.08	3.93	
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1087	3-7	1.10	1.90	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	2228	3-16	0.666	1.28	
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1546	3-13	0.424	1.27	
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	7803	3-15	0.895	1.60	
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1033	3-6	0.457	1.32	
	底版	面外せん断応力度 (N/mm ²)	4054	3-15	2.15	3.01	

注 : 底版については、面内せん断力は考慮しない。

別紙 1 鉄筋コンクリート構造物の重大事故等時の高温による影響

(使用済燃料プール)

目次

1. 概要.....	別紙 1-1
2. コンクリート及び鉄筋の温度の影響に関する調査.....	別紙 1-1
2.1 鉄筋コンクリートの高温時の特性.....	別紙 1-1
2.2 既往の文献による高温時のコンクリートの特性.....	別紙 1-2
3. 施設を構成する部材の構造特性.....	別紙 1-4
4. まとめ.....	別紙 1-4

1. 概要

原子炉建屋原子炉棟内の燃料貯蔵設備である使用済燃料プールは、主要構造体を鉄筋コンクリート造の壁と床で構成する。使用済燃料プールの冷却機能や注水機能を喪失する重大事故等時において、使用済燃料プールの水温は高温状態が一定期間継続すると推定される。

よって、使用済燃料プールについて、既往の文献・規格等に基づき、高温時の健全性を確認する。

2. コンクリート及び鉄筋の温度の影響に関する調査

2.1 鉄筋コンクリートの高温時の特性

鉄筋コンクリートは、コンクリートと鉄筋で構成され、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック（（社）日本建築学会，2009）」によると、一般に、コンクリート・鉄筋は、温度の上昇と共に強度・剛性は劣化し、ひずみが大きくなる傾向にあるとされている。

コンクリートについては、セメント水和物及びその吸着水、水和物で構成される細孔内に存在する毛管水、毛管より大きな空隙に存在する自由水から成る多孔体である。一般的にコンクリートの温度が70℃程度では、コンクリートの基本特性に大きな影響を及ぼすような自由水の逸散は生じず、100℃以下では圧縮強度の低下は小さいとされる。また、コンクリートの温度が大気圧において100℃を超すと自由水が脱水し始め、その温度作用時間が長期間になると結晶水も脱水し始める。コンクリート温度が190℃付近では結晶水が解放され始め、さらに高温になると脱水現象が著しくなるため、コンクリートの特性に影響が出始めるとされる。

鉄筋については、「構造材料の耐火性ガイドブック（（社）日本建築学会，2009）」によると、強度及び剛性は、概ね200℃から300℃までは常温時の特性を保持するとされている。

2.2 既往の文献による高温時のコンクリートの特性

使用済燃料プールは、ステンレス鋼によりライニングされており、また、重大事故等時には、代替注水設備によりプールへの注水が行われるため、高温によるコンクリートからの水分逸散のないシール状態にある。それを踏まえ、シール状態で高温加熱を受けたコンクリートの文献収集を行った。高温を受けたコンクリートの圧縮強度に関する文献を表 2-1 に示す。

文献 No. 1 及び No. 2 では、加熱温度 175 °C のコンクリートへの影響について検討されている。文献 No. 1 では、シール状態において強度は熱水反応により一様な変化は示さないとされており、加熱期間 91 日までは、概ね加熱前と強度は同等と考えられる。アンシール状態では加熱期間 28 日までの低下率は 10 % 以内に収まるとされている。文献 No. 2 では、シール状態においては、加熱期間 91 日まで強度の低下は認められない。

また、文献 No. 3～No. 7 は、加熱温度 110 °C のコンクリートへの影響について検討されている。No. 4 は加熱期間 50 日について検討されており、強度低下は認められないとされている。また、No. 3 は加熱期間 3.5 年間、No. 5～No. 7 は加熱期間 2 年間について検討され、いずれも強度の低下傾向は認められないとされている。

それぞれの加熱温度における剛性に着目すると、加熱温度 175 °C において、アンシールの条件下では、加熱期間 1 日でも急激に低下する場合があるとされており、水分の逸散と高い相関があると考えられる。一方、シール状態では大きな低下はなく、加熱温度 110 °C では加熱後ごく初期に剛性の変化は収束するとされている。

以上より、175 °C 程度までの高温環境によるコンクリート強度への影響は小さい。また、コンクリートの剛性については、高温環境による水分逸散の影響が大きく、シール状態においても剛性の低下の傾向は認められるが、加熱後ごく初期に収束するため影響はない。

表 2-1 高温を受けたコンクリートの圧縮強度に関する文献一覧

No.	文献名 (出典)	著者	試験条件		
			温度	加熱期間	水分
1	高温 (175 ℃) を受けたコンクリートの強度性状 (セメント・コンクリート No. 449, July 1984)	川口 徹, 高橋久雄	175 ℃	1～91 日	シール アンシール
2	高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究 (日本建築学会構造系論文集 第 457 号, 1994 年 3 月)	長尾覚博, 中根 淳	40～175, 300, 600℃	1～91 日 (～175℃) 7 日 (300, 600℃)	シール アンシール
3	熱影響場におけるコンクリートの劣化に関する研究 (第 48 回セメント技術大会講演集, 1994)	長尾覚博, 鈴木智巳, 田渕正昭	①65, 90, 110℃の一定 加熱 ②20～110℃のサイクル 熱	1 日～3.5 年間	シール アンシール
4	長期高温加熱がコンクリートの力学特性に及ぼす影響の検討 (日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2010 年 9 月)	木場将雄, 山本知弘, 久野通也, 島本 龍, 一瀬賢一, 佐藤 立	①20℃の一定加熱 ②110℃のサイクル加熱	①50 日 ②1～50 サイクル (1 サイクル: 1 日) (注) 110℃の期間: 9h	シール アンシール
5	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その 1 実験計画と結果概要) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月)	藺田 敏, 長尾覚博, 北野剛人, 守屋正裕, 池内俊之, 大池 武	①20, 110, 180, 325℃ の一定加熱 ②～110℃, ～180℃ ～325℃のサイクル加 熱	①1 日～24 か月 ②1～180 サイクル (1 サイクル: 72 時間) (注) 高温保持時間: 24 時間	シール アンシール
6	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その 2 普通コンクリートの力学特性試験結果)) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月)	池内俊之, 長尾覚博, 北野剛人, 守屋正裕, 藺田 敏, 大池 武			
7	長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その 3 耐熱コンクリートの力学特性試験結果) (日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999 年 9 月)	大池 武, 池内俊之, 北野剛人, 長尾覚博, 藺田 敏, 守屋正裕			

3. 施設を構成する部材の構造特性

部材内の温度差及び拘束により発生する熱応力は、使用済燃料プールの壁が周囲の壁、床に比べて厚く、さらに取り付く床が少ないため、拘束応力のレベルが低いことに加え、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（(社)日本機械学会，2003）」では、自己拘束的な応力であることから、十分な塑性変形能力がある場合、終局耐力に影響しないこととされている。

以上を踏まえ、施設を構成する部材の構造特性については、高温時においても設計基準状態との相違は小さい。

4. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の高温時の健全性について、既往の文献・規格基準に基づき評価を行い、使用済燃料プールの重大事故等時における高温状態に対しても、鉄筋コンクリート構造物の強度及び剛性への影響は小さいことを確認した。

別紙 2 原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を
反映した検討（使用済燃料プール）

目次

1. 概要.....	別紙 2-1
2. 検討方針.....	別紙 2-1
3. 検討結果.....	別紙 2-3
4. まとめ.....	別紙 2-7

1. 概要

原子炉建屋の設備の補強や追加等の改造工事に伴う重量増加を考慮した応答増幅の影響についての検討を行う。

添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 別紙 原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析」に示した地震応答解析結果の応答比率を用いて、使用済燃料プールの応力解析による評価結果への影響を検討する。

2. 検討方針

使用済燃料プールを対象として、設備の補強や追加等の改造工事に伴う重量増加を考慮した応答比率と応力評価結果より影響検討を行う。

使用済燃料プールは、水平地震時荷重として、せん断力分配解析による内部ボックス壁（I/W）の EL. 46.5 m～EL. 34.7 m 位置（要素番号(3)及び要素番号(4)）でのせん断力を考慮し、鉛直震度として EL. 46.5 m～EL. 34.7 m 位置（質点番号 3～質点番号 5）の鉛直方向最大応答加速度より算出した値を考慮することから、NS 方向及び EW 方向は要素番号(3)及び要素番号(4)の最大応答せん断力の応答比率の最大値を、UD 方向は質点番号 3～質点番号 5 の最大応答加速度の応答比率の最大値を応答比率とし、各方向の応答比率の最大値を割増係数として設定し、応力評価結果の発生値に乗じて各許容値を超えないことを確認する。

表 2-1 に要素番号(3)及び要素番号(4)の最大応答せん断力の応答比率及び質点番号 3～質点番号 5 の最大応答加速度の応答比率、並びに割増係数を示す。

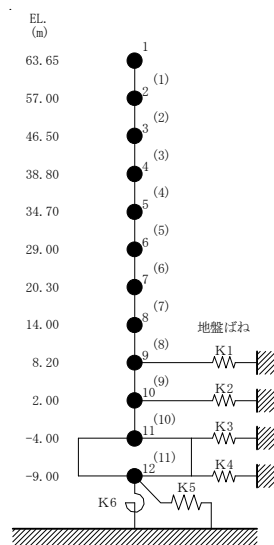
表 2-1 重量増加を考慮した割増係数：使用済燃料プール

	NS 方向	EW 方向	UD 方向
要素番号(3)及び要素番号(4) の最大値	1.03 ^{*1}	1.04 ^{*1}	—
質点番号 3～質点番号 5 の最大値	—	—	1.00 ^{*2}
割増係数	1.04 ^{*3}		

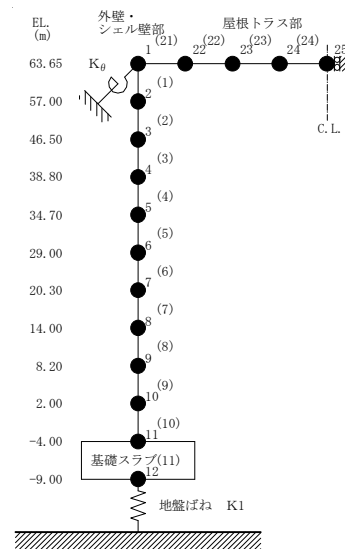
注記 *1：添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 別紙 原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析」に示す要素番号(3)及び要素番号(4)の最大応答せん断力の応答比率の最大値

*2：添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 別紙 原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析」に示す質点番号 3～質点番号 5 の最大応答加速度の応答比率の最大値

*3：各方向の応答比率の最大値



NS 方向及び EW 方向



UD 方向

3. 検討結果

各荷重時における評価結果を表 3-1～表 3-3 に示す。

重量増加を考慮した割増係数を乗じた結果においても、各許容値を超えないことを確認した。

表 3-1 重量増加を考慮した評価結果：S_d地震時

		評価項目	要素位置	解析結果 ①	割増係数 ②	①×②	許容値
軸力 ＋ 曲げモーメント ＋ 面内せん断力*	北側壁	コンクリート (N/mm ²)	2219	1.48	1.04	1.54	14.7
		鉄筋 (N/mm ²)	2272	313	1.04	326	345
	東側壁	コンクリート (N/mm ²)	1535	1.56	1.04	1.63	14.7
		鉄筋 (N/mm ²)	1546	248	1.04	258	345
	南側壁	コンクリート (N/mm ²)	3055	4.05	1.04	4.22	14.7
		鉄筋 (N/mm ²)	3037	277	1.04	289	345
	西側壁	コンクリート (N/mm ²)	1035	1.66	1.04	1.73	14.7
		鉄筋 (N/mm ²)	1046	248	1.04	258	345
	底版	コンクリート (N/mm ²)	4054	5.59	1.04	5.82	14.7
		鉄筋 (N/mm ²)	4054	166	1.04	173	345
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2272	0.422	1.04	0.439	1.23
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1586	0.923	1.04	0.960	1.67
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3037	1.97	1.04	2.05	3.00
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1086	0.922	1.04	0.959	1.61
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	2228	0.526	1.04	0.548	0.987
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1536	0.366	1.04	0.381	1.01
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	7801	0.964	1.04	1.01	1.53
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1033	0.388	1.04	0.404	0.994
	底版	面外せん断応力度 (N/mm ²)	4053	1.64	1.04	1.71	3.01

注記 *：底版については、面内せん断力は考慮しない。

表 3-2 重量増加を考慮した評価結果: S_d地震時+温度

		評価項目	要素位置	解析結果 ①	割増係数 ②	①×②	許容値
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力*	北側壁	コンクリート (N/mm ²)	2204	4.16	1.04	4.33	16.5
		鉄筋 (N/mm ²)	2272	299	1.04	311	345
	東側壁	コンクリート (N/mm ²)	1582	5.46	1.04	5.68	16.5
		鉄筋 (N/mm ²)	1567	268	1.04	279	345
	南側壁	コンクリート (N/mm ²)	3055	6.26	1.04	6.52	16.5
		鉄筋 (N/mm ²)	3031	262	1.04	273	345
	西側壁	コンクリート (N/mm ²)	1082	5.45	1.04	5.67	16.5
		鉄筋 (N/mm ²)	1085	264	1.04	275	345
	底版	コンクリート (N/mm ²)	4054	5.74	1.04	5.97	16.5
		鉄筋 (N/mm ²)	4054	165	1.04	172	345
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2205	0.559	1.04	0.582	1.62
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1586	0.998	1.04	1.04	1.65
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3043	2.27	1.04	2.37	3.87
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1086	0.975	1.04	1.02	1.56
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	2228	0.545	1.04	0.567	0.986
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1536	0.471	1.04	0.490	1.00
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	7801	1.23	1.04	1.28	1.59
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1033	0.376	1.04	0.392	1.00
	底版	面外せん断応力度 (N/mm ²)	4054	1.75	1.04	1.82	3.01

注記 * : 底版については、面内せん断力は考慮しない。

表 3-3 重量増加を考慮した評価結果：S_s地震時

		評価項目	要素位置	解析結果 ①	割増係数 ②	①×②	許容値
軸力 ＋ 曲げモーメント ＋ 面内せん断力*	北側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	2219	0.142	1.04	0.148	3.00
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	2272	1.77	1.04	1.85	5.00
	東側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1535	0.135	1.04	0.141	3.00
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1590	1.78	1.04	1.86	5.00
	南側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	3055	0.393	1.04	0.409	3.00
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	3037	1.46	1.04	1.52	5.00
	西側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1035	0.145	1.04	0.151	3.00
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1046	1.58	1.04	1.65	5.00
	底版	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	4054	0.542	1.04	0.564	3.00
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	4054	1.06	1.04	1.11	5.00
軸力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2272	0.701	1.04	0.730	14.7
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1581	1.36	1.04	1.42	14.7
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3055	3.15	1.04	3.28	14.7
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1090	1.54	1.04	1.61	14.7
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2268	0.648	1.04	0.674	1.97
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1590	1.06	1.04	1.11	1.50
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3037	2.08	1.04	2.17	3.93
	西側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1087	1.10	1.04	1.15	1.90
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	2228	0.666	1.04	0.693	1.28
	東側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1546	0.424	1.04	0.441	1.27
	南側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	7803	0.895	1.04	0.931	1.60
	西側壁	面外せん断応力度 (N/mm ²)	1033	0.457	1.04	0.476	1.32
	底版	面外せん断応力度 (N/mm ²)	4054	2.15	1.04	2.24	3.01

注記 *：底版については、面内せん断力は考慮しない。

4. まとめ

原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析に基づき影響検討を行い、重量増加を考慮した場合においても安全上問題とならないことを確認した。

V-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック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	7
3. 評価部位	8
4. 地震応答解析及び構造強度評価	8
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	8
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	12
4.3 解析モデル及び諸元	17
4.4 固有周期	21
4.5 設計用地震力	25
4.6 計算方法	27
4.7 計算条件	32
4.8 応力の評価	32
5. 評価結果	33
5.1 設計基準対象施設としての評価結果	33
5.2 重大事故等対処設備としての評価結果	33

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の設計方針に基づき、使用済燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

ラックは、設計基準対象施設においてはSクラス施設に、重大事故等対処施設においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、設計基準対象施設及び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

ラックの構造計画を表 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	
ラックは、たて置形で原子炉建屋の使用済燃料プールの床に置かれた共通ベース上に設置されラック取付ボルトで固定している。共通ベースは、使用済燃料プール床に取り付けてある基礎ボルトにより固定している。	角管市松模様配列構造ラック 使用済燃料貯蔵ラックは、70 体ラックが 7 個、110 体ラックが 16 個ある。	

2.2 評価方針

ラックの応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」のうち「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」にて示すラックの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.3 解析モデル及び諸元」及び「4.4 固有周期」で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、「4. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5. 評価結果」に示す。

ラックの耐震評価フローを図 2-1 に示す。

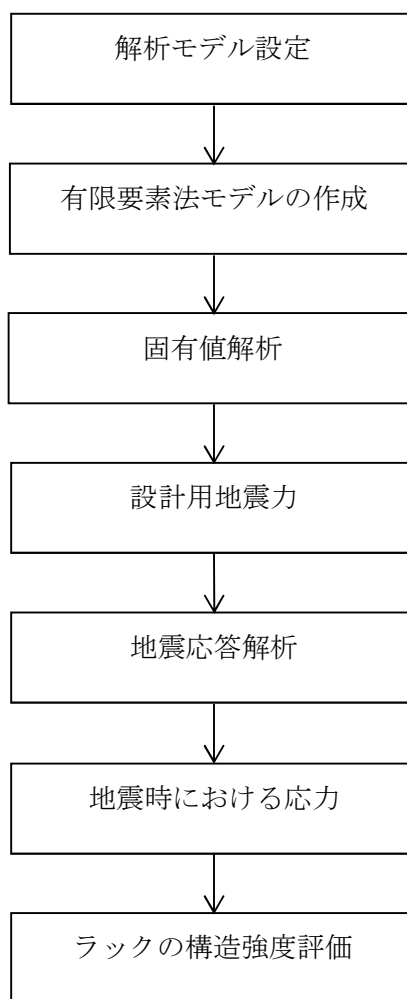


図 2-1 ラックの耐震評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1－1987（日本電気協会）
- (2) 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）
- (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）

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
E	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_i	ラックベース底部に働くせん断力 (70 体又は 110 体)	N
F_{ai}	110 体ラックベース底部に働くせん断力	N
F_{bi}	共通ベース底部に働くせん断力	N
f_{ji}	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに働く引張力 (1 本当たり)	N
f_s	部材の許容せん断応力 (f_s を 1.5 倍した値又は f_s^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_{sb}	せん断力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容せん断応力 (f_s を 1.5 倍した値又は f_s^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_t	部材の許容引張応力 (f_t を 1.5 倍した値又は f_t^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力 (f_t を 1.5 倍した値 f_t^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
G	せん断弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
h_1	使用済燃料貯蔵時のラック重心高さ	mm
h_2	共通ベース高さ	mm
ℓ_{gi}	ラックベース端又は共通ベース端から重心までの距離	mm
ℓ_{ji}	ラックベース端又は共通ベース端から各ボルトまでの距離	mm
M_i	ラックベース底部の転倒モーメント (70 体又は 110 体)	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_{ai}	110 体ラックベース底部の転倒モーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_{bi}	共通ベース底部の転倒モーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_{ci}	110 体ラックのせん断力による共通ベース底部の転倒モーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$

記号	記号の説明	単位
M_{ti}	ラック据付時の全体の転倒モーメント	N・mm
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n_{ji}	ラック取付ボルト又は基礎ボルト各部の本数	—
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値	MPa
t	部材の板厚	mm
m	使用済燃料貯蔵時のラック全質量 (70 体又は 110 体)	kg
m_a	110 体ラックの全質量	kg
m_b	共通ベースの質量	kg
m_F	燃料の質量	kg
m_R	ラックの質量	kg
m_t	ラック据付時の共通ベースの全質量	kg
m_W	ラックに含まれる水の質量	kg
σ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_x, σ_y	部材に生じる引張応力	MPa
σ_{fa}	部材に生じる組合せ応力	MPa
τ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{xy}	部材に生じるせん断応力	MPa

注 1 : $F_i, F_{ai}, F_{bi}, f_{ji}, \ell_{gi}, \ell_{ji}, M_i, M_{ai}, M_{bi}, M_{ci}, M_{ti}$ 及び n_{ji} の添字 i の意味は、以下のとおりとする。

$i = N : NS$ 方向

$i = E : EW$ 方向

注 2 : f_{ji}, ℓ_{ji} 及び n_{ji} の添字 j はボルトの列番号を示す。

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
設計震度	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
最高使用温度	℃	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積	mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
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の場合は、小数点以下表示とする。

*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設計引張強さ及び設計降伏点は、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

ラックの耐震評価は、「4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる角管及びプレート、シートプレート及びラックベース、ラック取付ボルト、基礎ボルトについて実施する。ラックの耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 地震応答解析及び構造強度評価

4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1)地震応答解析には、シェル要素を用いた有限要素法モデルによるスペクトルモーダル解析を用いる。
- (2)ラックは、原子炉建屋の使用済燃料プールの底部（EL. 34.69 m）に置かれた共通ベース上に設置され、ラック取付ボルトにより固定されるものとする。
- (3)ラックの質量には、使用済燃料の質量とラック自身の質量のほか、ラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量*を考慮する。
- (4)地震力は、ラックに対して水平方向から作用するものとする。
ここで、水平方向地震力は、ラックの長辺方向に作用する場合と短辺方向に作用する場合を考慮する。
また、鉛直方向地震力は、水平方向地震力と同時に不利な方向に作用するものとする。
- (5)構造概念図（110 体ラックの例）を図 4-1 に、各ラックの構造概要図を図 4-2 及び図 4-3 に示す。

注記 *：排除水質量とは、水中の機器の形状により排除される機器周囲の流体の質量である。

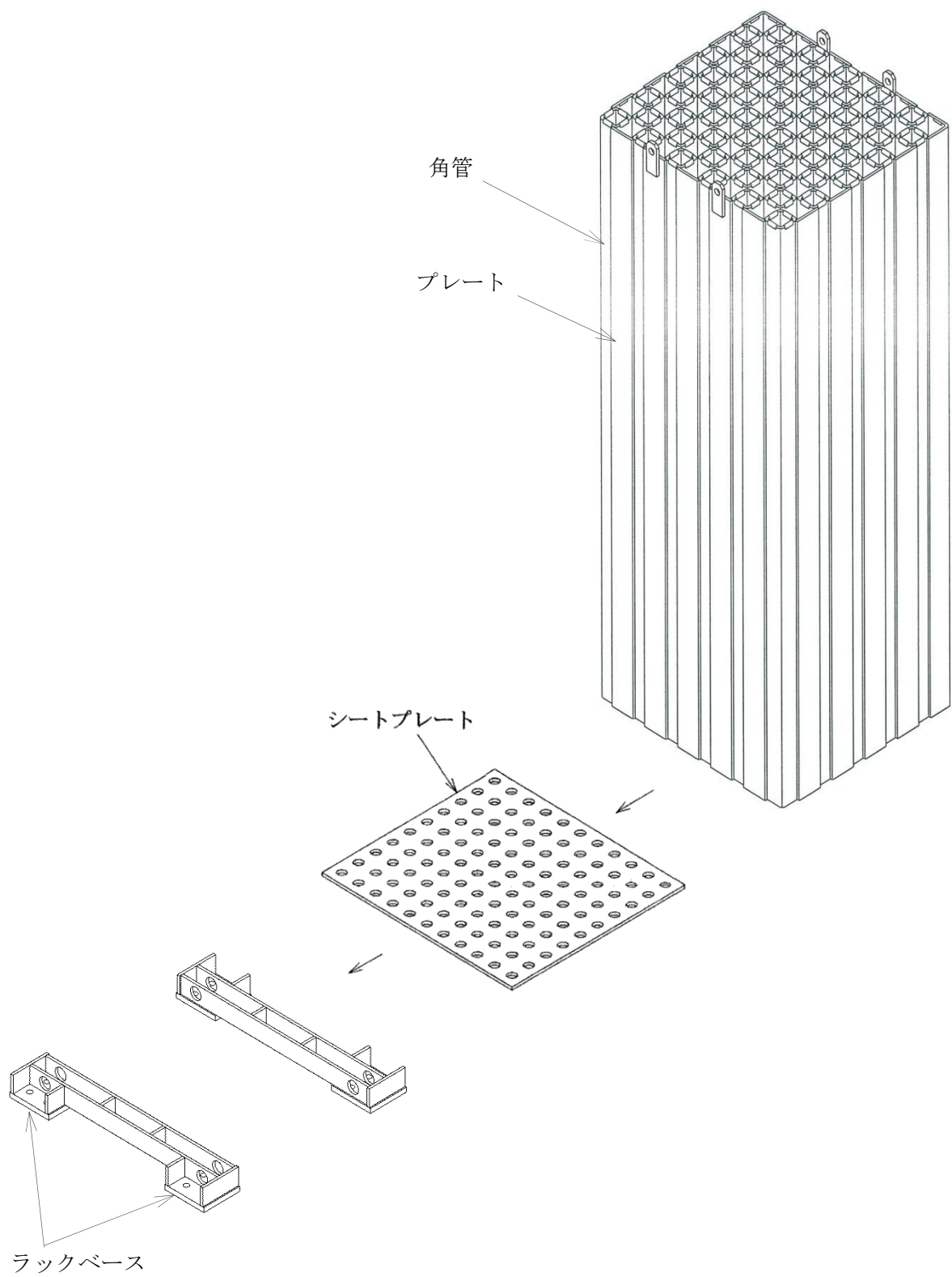


図 4-1 構造概念図 (110 体ラック)

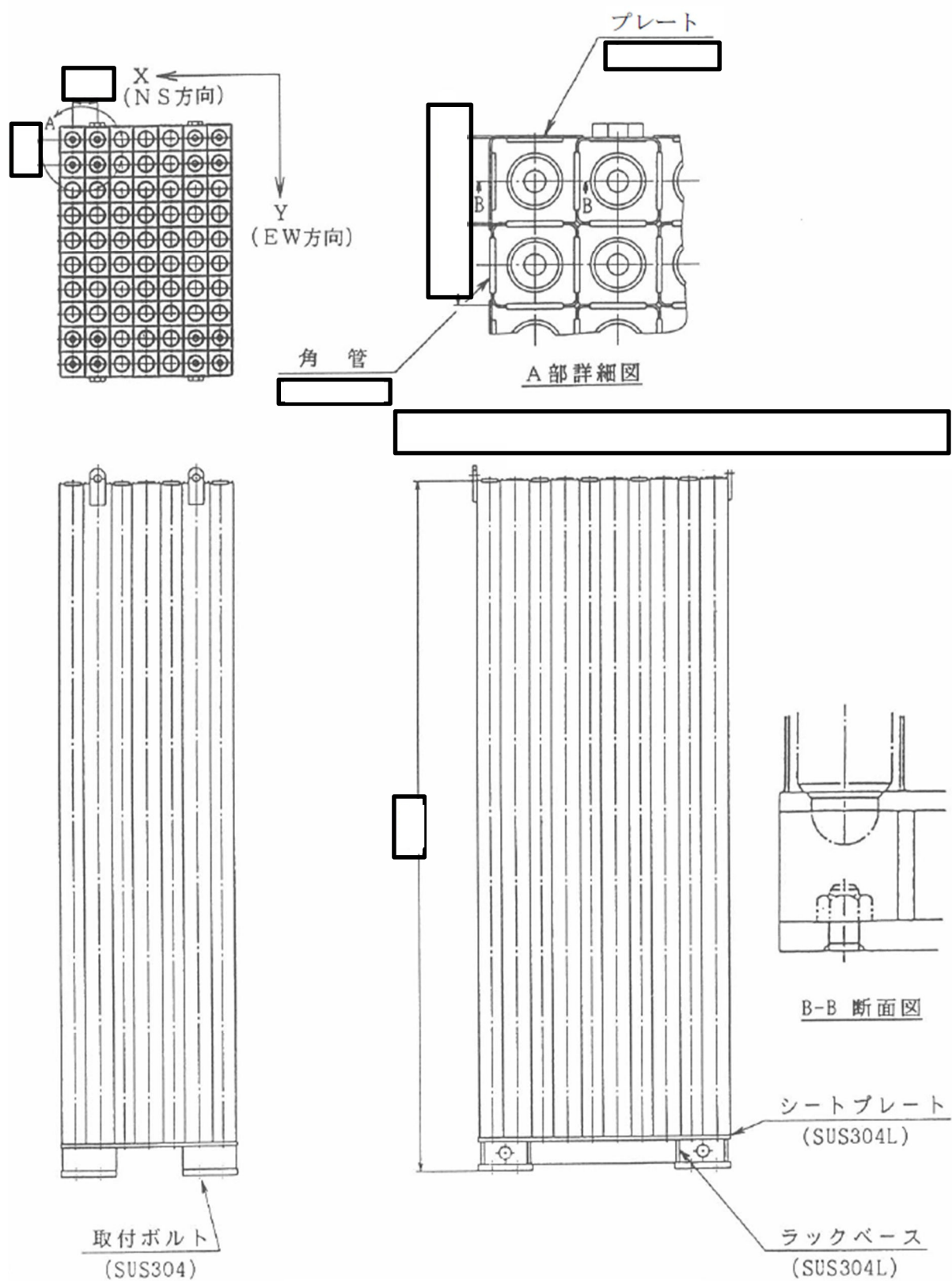


図 4-2 構造概要図 (70 体ラック) (単位 : mm)

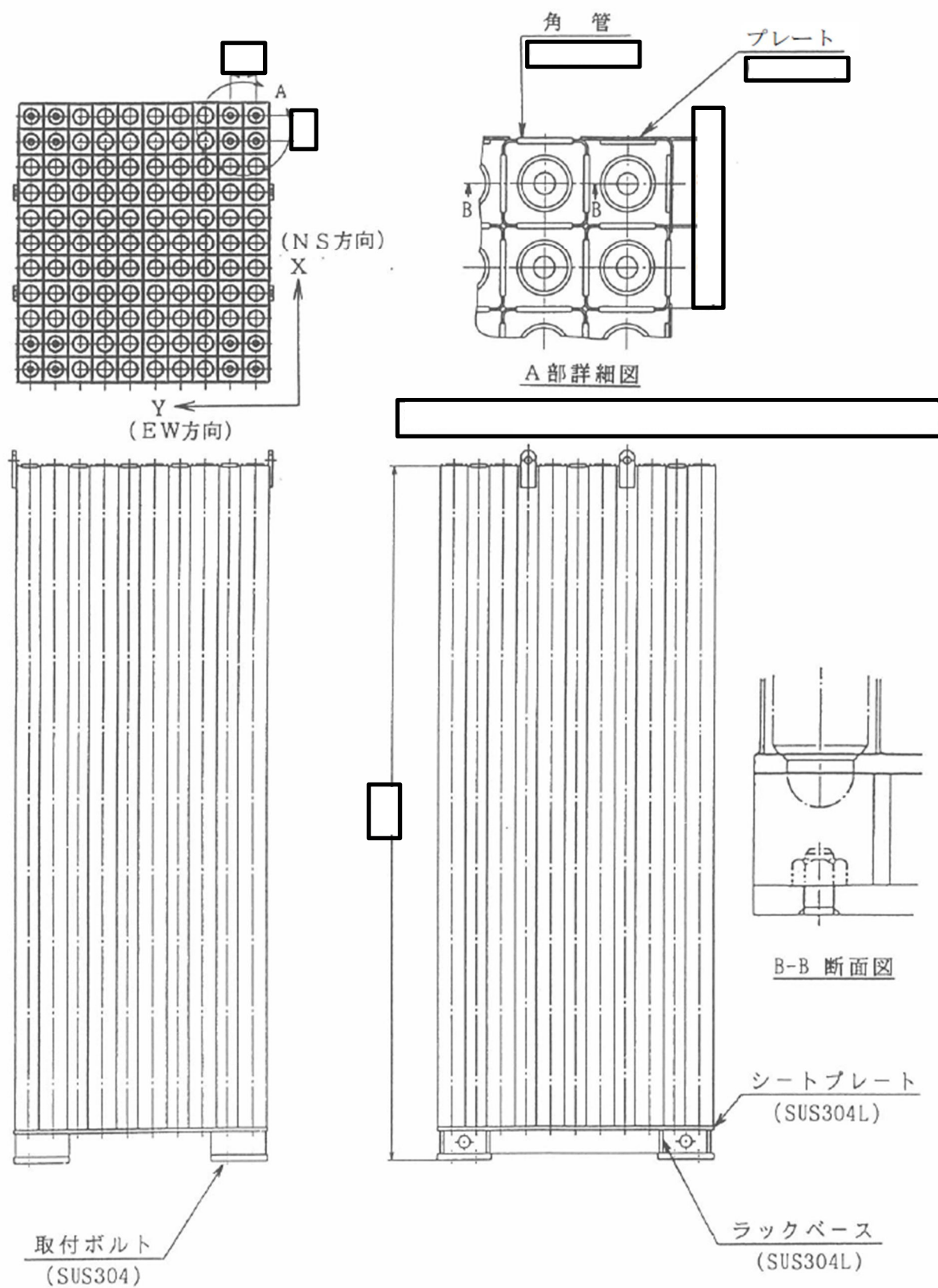


図 4-3 構造概要図 (110 体ラック) (単位 : mm)

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

ラックの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表4-1に, 重大事故等対処設備の評価に用いるものを表4-2に示す。

4.2.2 許容応力

ラックの許容応力は, 添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表4-3のとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

ラックの許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表4-4に, 重大事故等対処設備の評価に用いるものを表4-5に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震設計上の 重要度分類	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 貯蔵設備	使用済燃料 貯蔵ラック	S	— *1	$D + P_D + M_D + S_d^* \quad *2$	Ⅲ _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	Ⅳ _A S

注記 *1：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*2： S_s と組合せ、Ⅲ_A Sの評価を実施する。

表 4-2 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 貯蔵設備	使用済燃料 貯蔵ラック	常設耐震／防止 常設／緩和	— *2	$D + P_D + M_D + S_s \quad *3$	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，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*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4-3 許容応力（その他の支持構造物及び重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等以外)		許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力		一次応力	
	引張り	せん断	引張り	せん断
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$
Ⅳ _A S	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$
V _A S (V _A SとしてⅣ _A Sの許容限界を用いる)				

注記 *1：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 4-4 使用材料の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S _y ^{*1} (MPa)	S _u ^{*1} (MPa)	S _y (R T) ^{*2} (MPa)
角管及び プレート		最高使用温度	66	—	188 ^{*3}	479 ^{*3}	205 ^{*3}
シート プレート	SUS304L	最高使用温度	66	—	160	443	175
ラック ベース	SUS304L	最高使用温度	66	—	160	443	175
ラック取付 ボルト	SUS304	最高使用温度	66	—	188	479	205
基礎ボルト	SUS304	最高使用温度	66	—	188	479	205

注記 *1：最高使用温度（66 ℃）で算出

*2：室温で算出

*3： の S_y、S_uの値は、SUS304 の規格値を上回っているので安全側の評価とするため、S_y、S_uの値は、SUS304 の値を使用する。

表 4-5 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 (℃)		S (MPa)	S _y ^{*1} (MPa)	S _u ^{*1} (MPa)	S _y (R T) ^{*2} (MPa)
角管及び プレート		最高使用温度	100	—	171 ^{*3}	441 ^{*3}	205 ^{*3}
シート プレート	SUS304L	最高使用温度	100	—	145	408	175
ラック ベース	SUS304L	最高使用温度	100	—	145	408	175
ラック取付 ボルト	SUS304	最高使用温度	100	—	171	441	205
基礎ボルト	SUS304	最高使用温度	100	—	171	441	205

注記 *1：最高使用温度（100℃）で算出

*2：室温で算出

*3： の S_y、S_u の値は、SUS304 の規格値を上回っているので安全側の評価とするため、S_y、S_u の値は、SUS304 の値を使用する。

4.3 解析モデル及び諸元

ラックの解析モデルを図 4-4 及び図 4-5 に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を表 4-6 に示す。

ラックは、70 体、110 体ラック各々について、シェル要素を用いた有限要素法モデルとする。

ラックは、ラックベース底部で取付ボルトを介し共通ベースに固定されている。共通ベースは剛構造であるため、ラックはそれぞれ独立した系として計算する。

また、ラックの質量には使用済燃料の質量、ラック自身の質量、ラックに含まれる水の質量及び排除水質量を考慮し、これら使用済燃料、ラックに含まれる水の質量及び排除水質量は角管及びプレート全長にわたって等分布に与える。

本ラックに使用する [] であり、 []

[] 縦弾性係数は [] を用いるものとする。

また、計算に用いる設計条件、固有周期の算出及び部材とラック取付ボルト、基礎ボルトの応力評価に用いる要目を 4 章及び 5 章に示す。

解析コードは、「SAP-IV」を使用し、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-3 計算機プログラム（解析コード）の概要・SAP-IV」に示す。

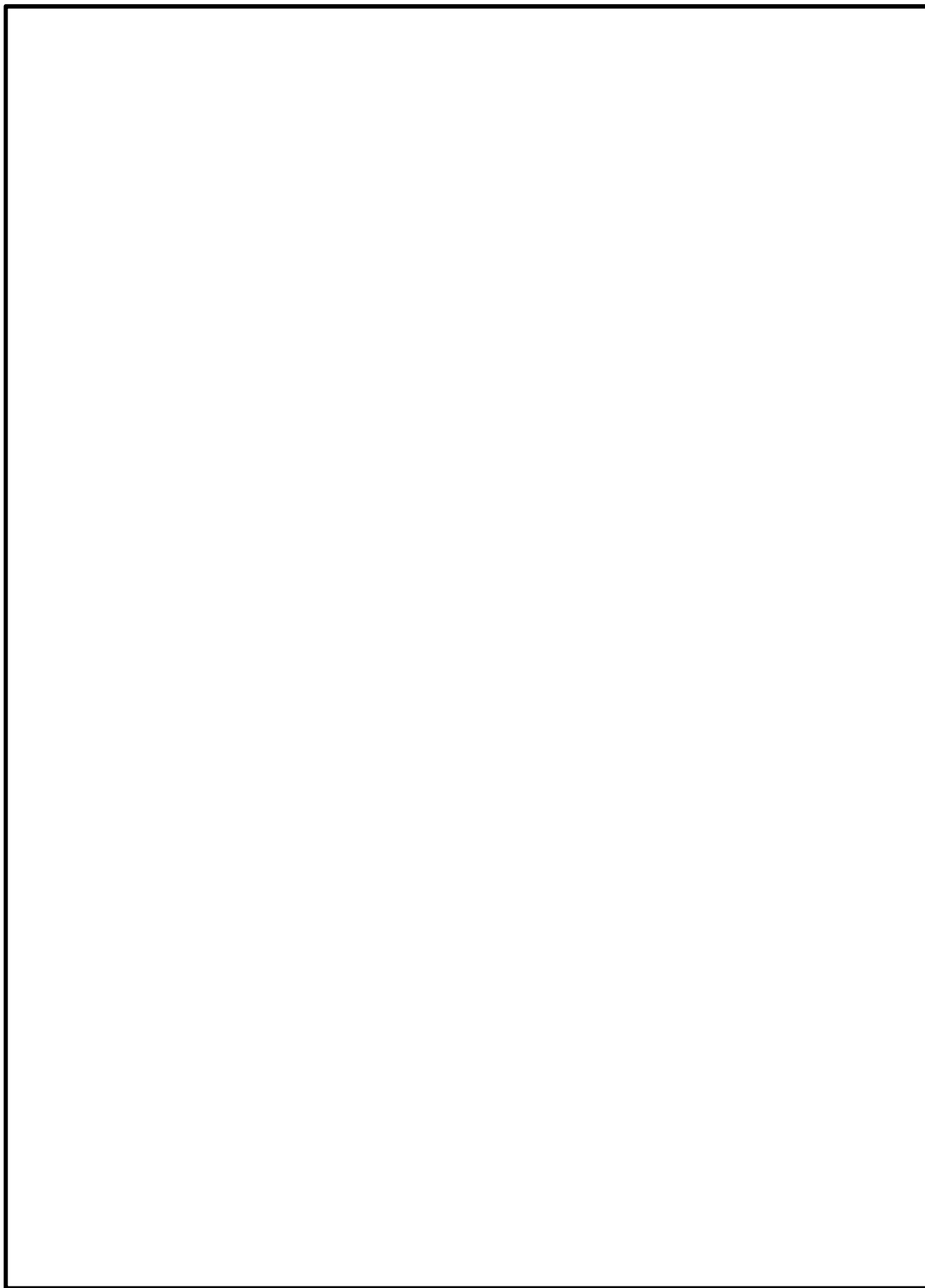


図 4-4 70 体ラック解析モデル

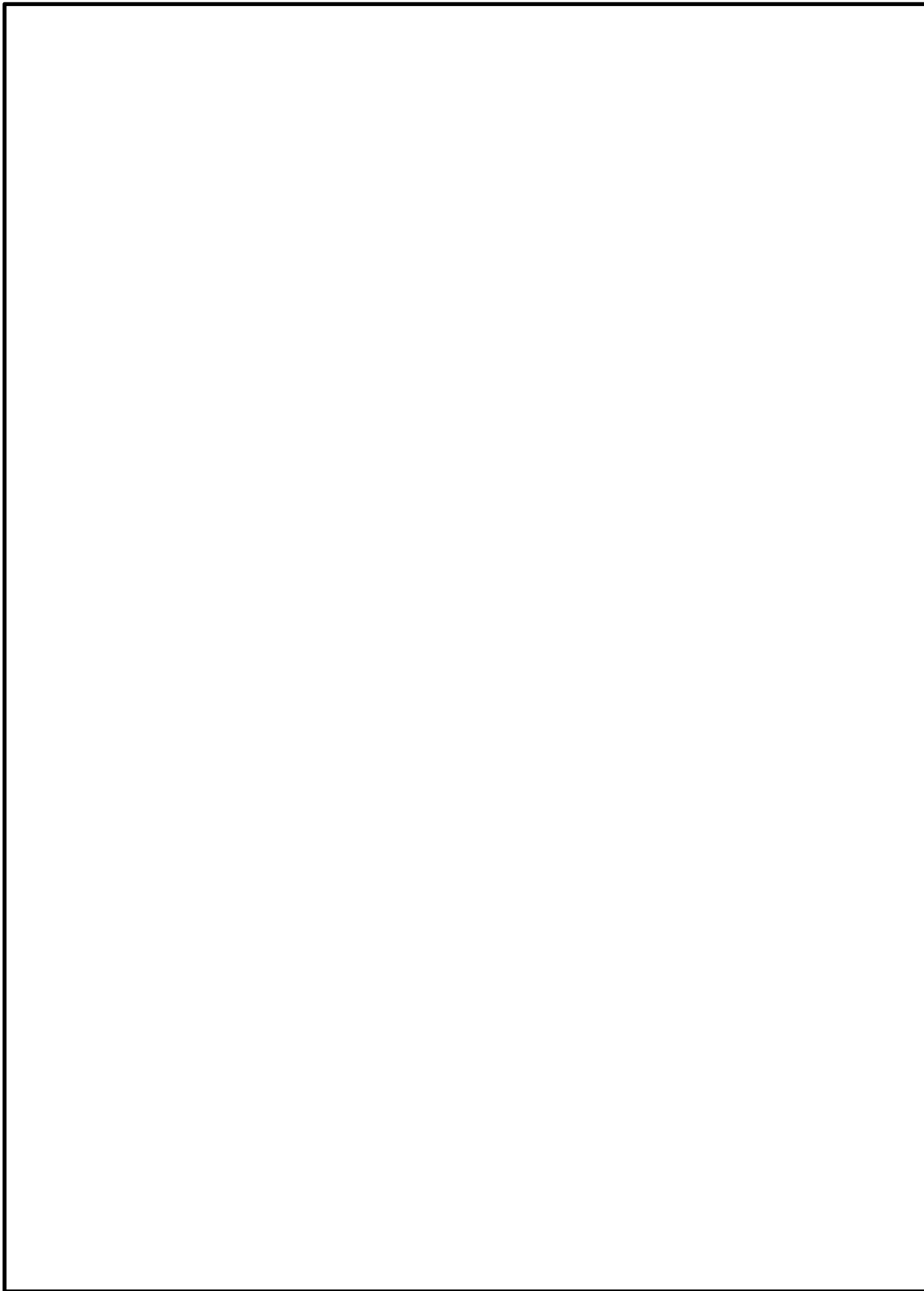


図 4-5 110 体ラック解析モデル

表4-6 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	 SUS304L（シートプレート及びラックベース）, SUS304（ラック取付ボルト及び基礎ボルト）
質量	m	kg	
温度条件 （最高使用温度）	T	℃	66
縦弾性係数	E *1	MPa	 192000（シートプレート及びラックベース）, 192000（ラック取付ボルト及び基礎ボルト）
ポアソン比	ν	—	
要素数	—	個	
節点数	—	個	

注記 *1：最高使用温度（66℃）で算出

*2：

4.4 固有周期

固有値解析の結果を表 4-7 に，振動モード図を図 4-6～図 4-11 に示す。鉛直方向は，5 次モード以降で卓越し，固有周期は 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

表 4-7 固有値解析結果

ラック	モード	固有周期 (s)	卓越方向	刺激係数			
				X	Y	Z	
70 体 ラック	1						
	2						
	3						
	4						
110 体 ラック	1						
	2						
	3						
	4						

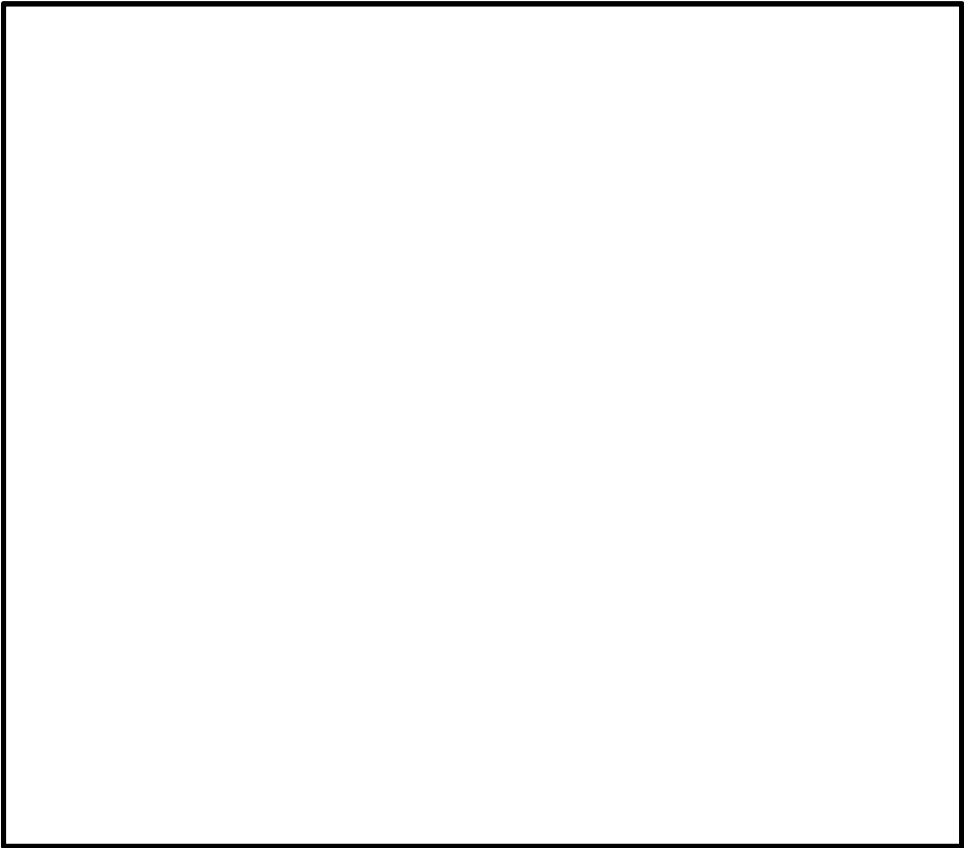


図 4-6 振動モード（70 体ラック 1 次モード

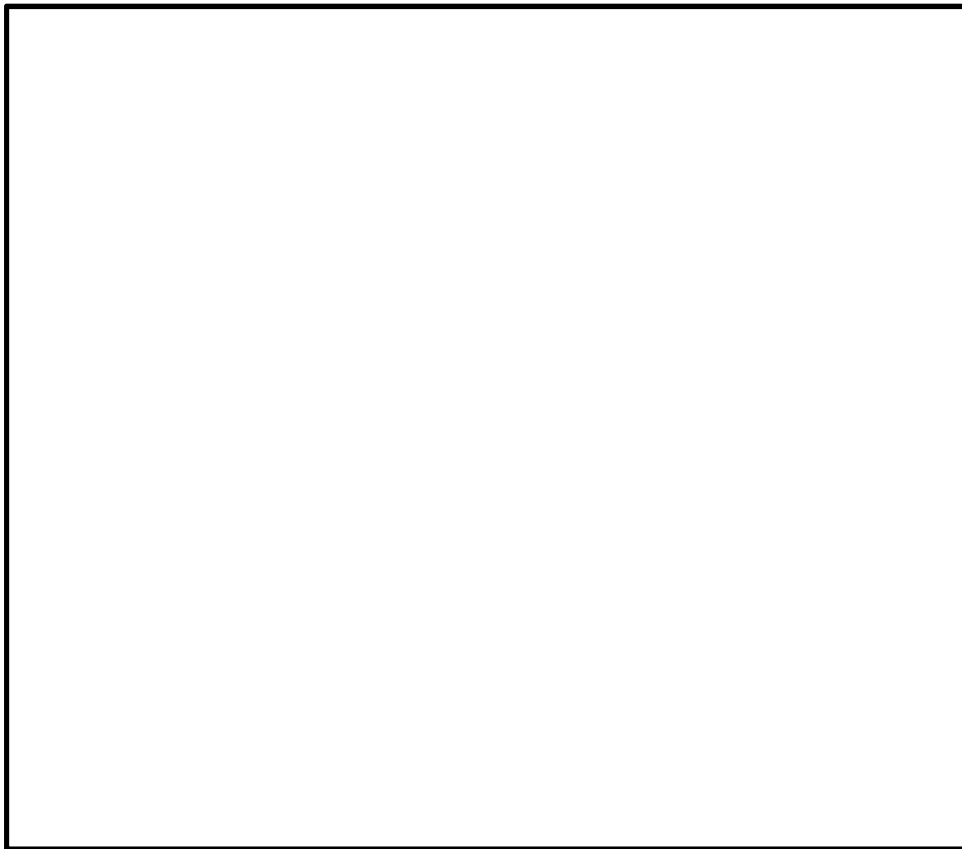


図 4-7 振動モード (70 体ラック 2 次モード

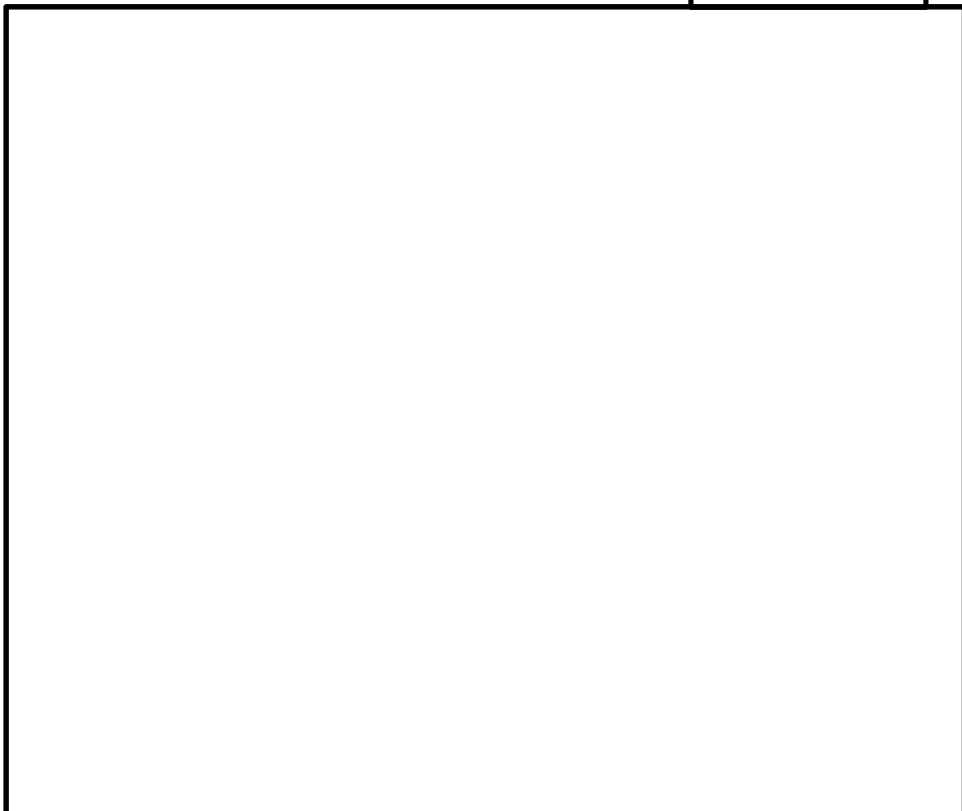


図 4-8 振動モード (70 体ラック 3 次モード



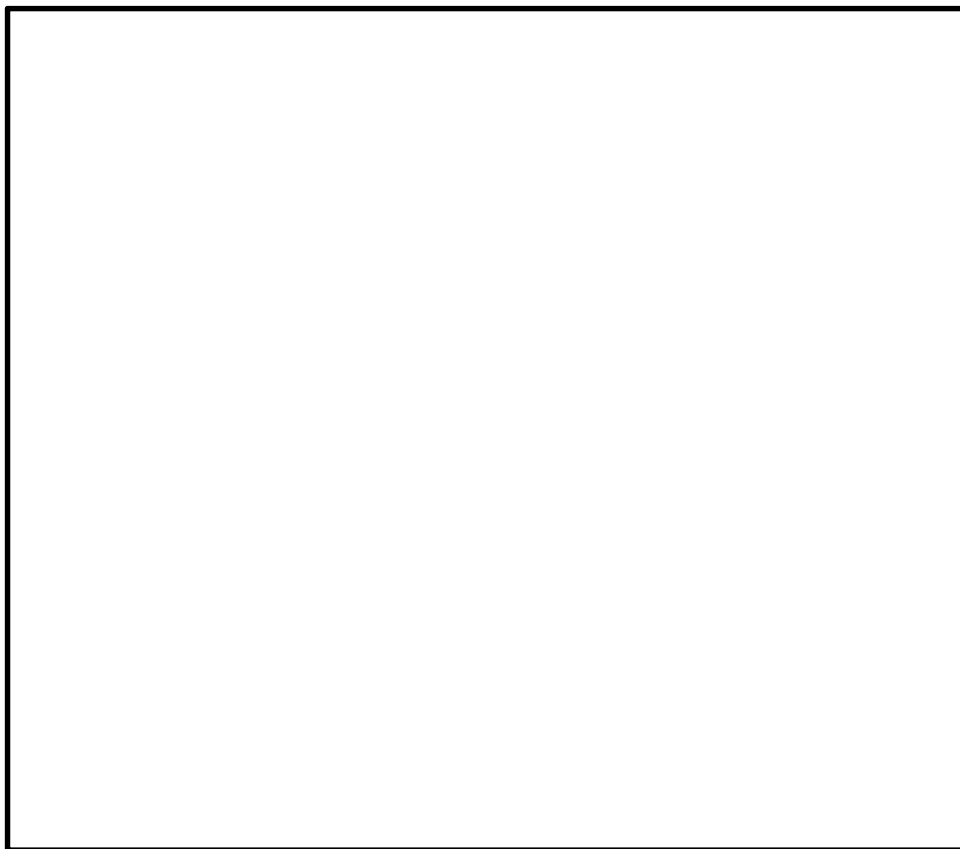


図 4-9 振動モード (110 体ラック 1 次モード

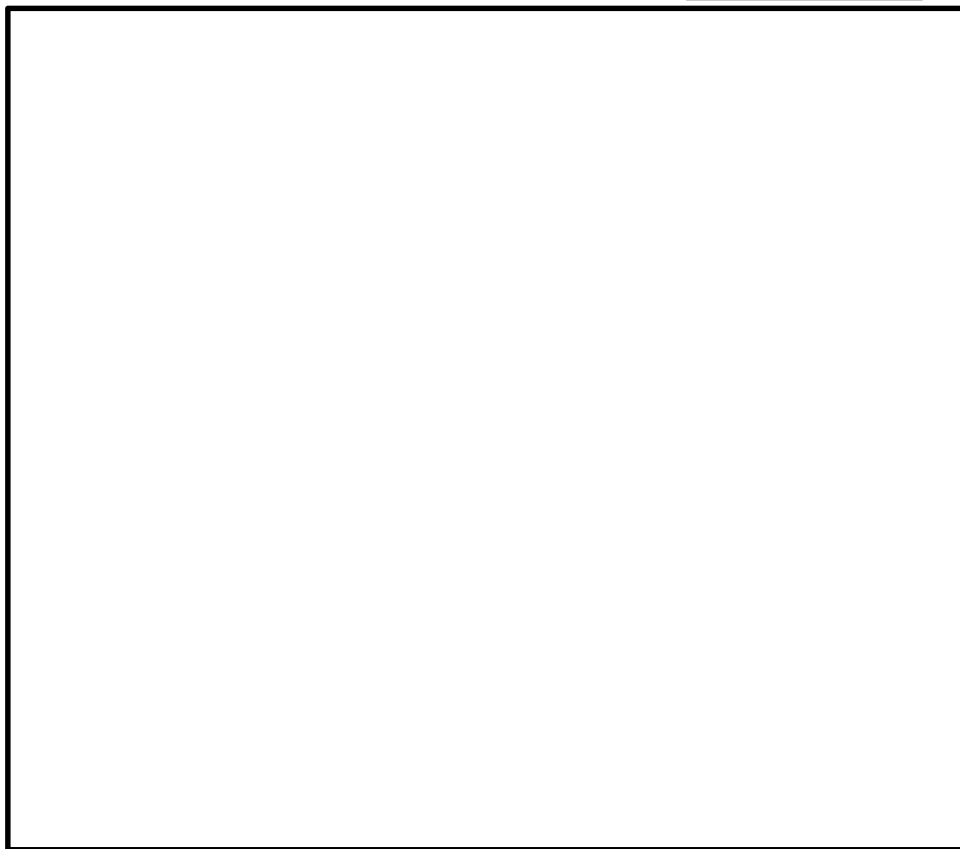


図 4-10 振動モード (110 体ラック 2 次モード



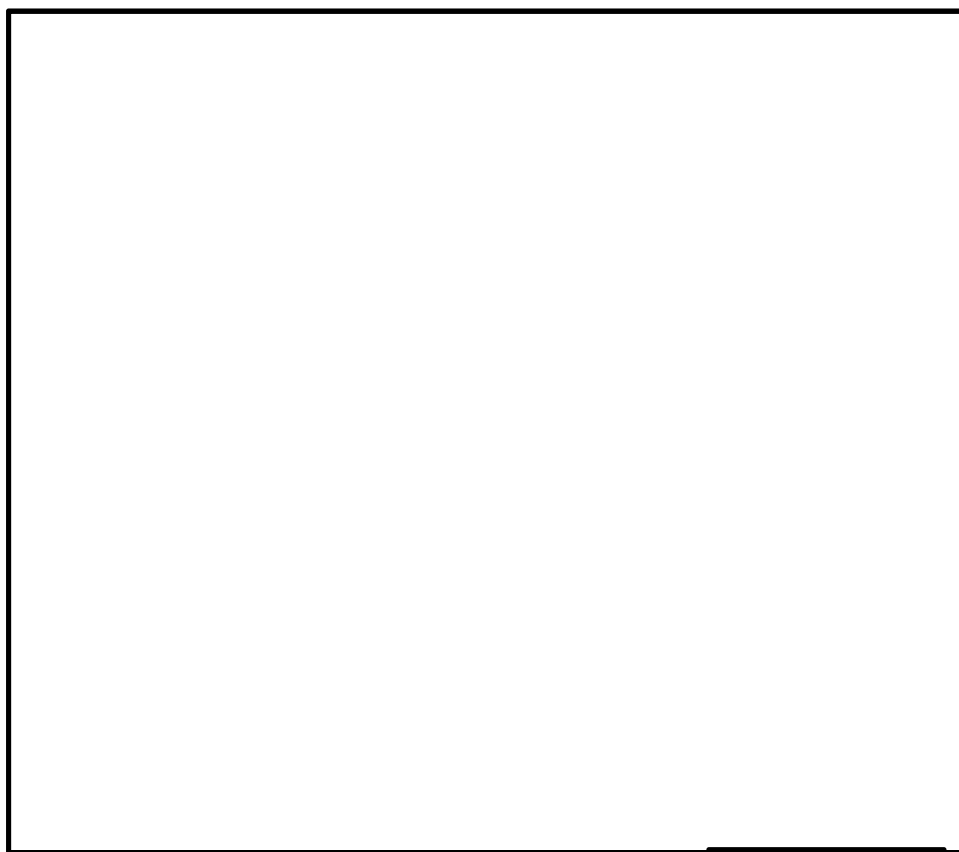


図 4-11 振動モード (110 体ラック 3 次モード



4.5 設計用地震力

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表4-8及び表4-9に示す。

表 4-8 設計用地震力（設計基準対象施設）

a. 70 体ラック

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		減衰定数(%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉建屋 EL. 34.7* ¹		0.05 以下* ²	—* ³	—* ³	$C_H =$ 1.10 又は* ⁴	$C_V = 0.90$	1.0* ⁵	—

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

*3：Ⅲ_ASについては，基準地震動 S_s で評価する。

*4：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値。

*5：溶接構造物に適用される減衰定数の値。

b. 110 体ラック

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		減衰定数(%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉建屋 EL. 34.7* ¹		0.05 以下* ²	—* ³	—* ³	$C_H =$ 1.10 又は* ⁴	$C_V = 0.90$	1.0* ⁵	—

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

*3：Ⅲ_ASについては，基準地震動 S_s で評価する。

*4：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値。

*5：溶接構造物に適用される減衰定数の値。

表 4-9 設計用地震力（重大事故等対処設備）

a. 70 体ラック

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		減衰定数(%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉建屋 EL. 34.7 ^{*1}		0.05 以下 ^{*2}	—	—	$C_H =$ 1.10 又は ^{*3}	$C_V = 0.90$	1.0 ^{*4}	—

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

*3：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値。

*4：溶接構造物に適用される減衰定数の値。

b. 110 体ラック

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		減衰定数(%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
原子炉建屋 EL. 34.7 ^{*1}		0.05 以下 ^{*2}	—	—	$C_H =$ 1.10 又は ^{*3}	$C_V = 0.90$	1.0 ^{*4}	—

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

*3：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値。

*4：溶接構造物に適用される減衰定数の値。

4.6 計算方法

4.6.1 応力の計算方法

4.6.1.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図 4-4、図 4-5 の解析モデルにて、角管及びプレート、シートプレート、ラックベースから成る系全体での応力計算を解析コード「SAP-IV」を使用して行い、引張応力、せん断応力を求め、本項に示す計算方法に従って組合せ応力を計算する。

解析コード内では、各部材の局所座標系及びせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y の働く向きを図 4-6 に示すように設定している。

各シェル部材の組合せ応力 σ_{fa} は、上述で計算したせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y を用いて (4.6.1) 式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \dots \dots \dots (4.6.1)$$

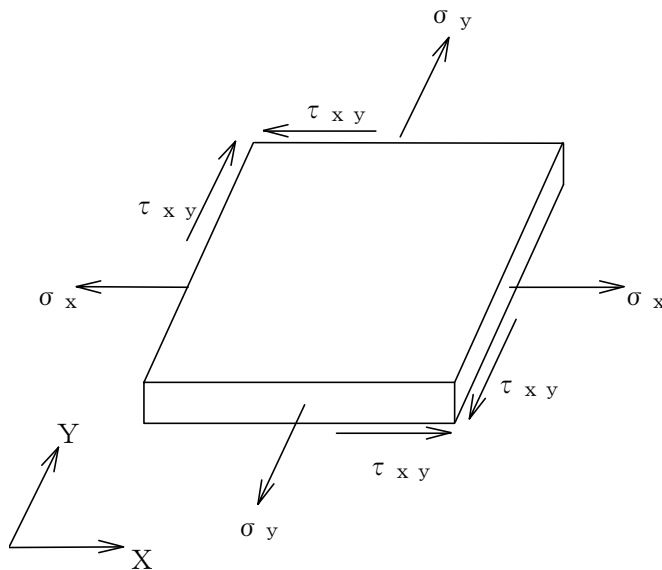


図 4-6 部材の応力計算モデル

4.6.1.2 ラック取付ボルトの応力

ラックの系全体での荷重計算を解析コード「SAP-IV」を使用して行い、求められた地震時のラックに作用する転倒モーメント M_i 及びラックベース底部に作用するせん断力 F_i が、ラックに図4-7のように負荷されるものとしてラック取付ボルトの応力を求める。

ラック取付ボルトの荷重状態を図4-7に示す。

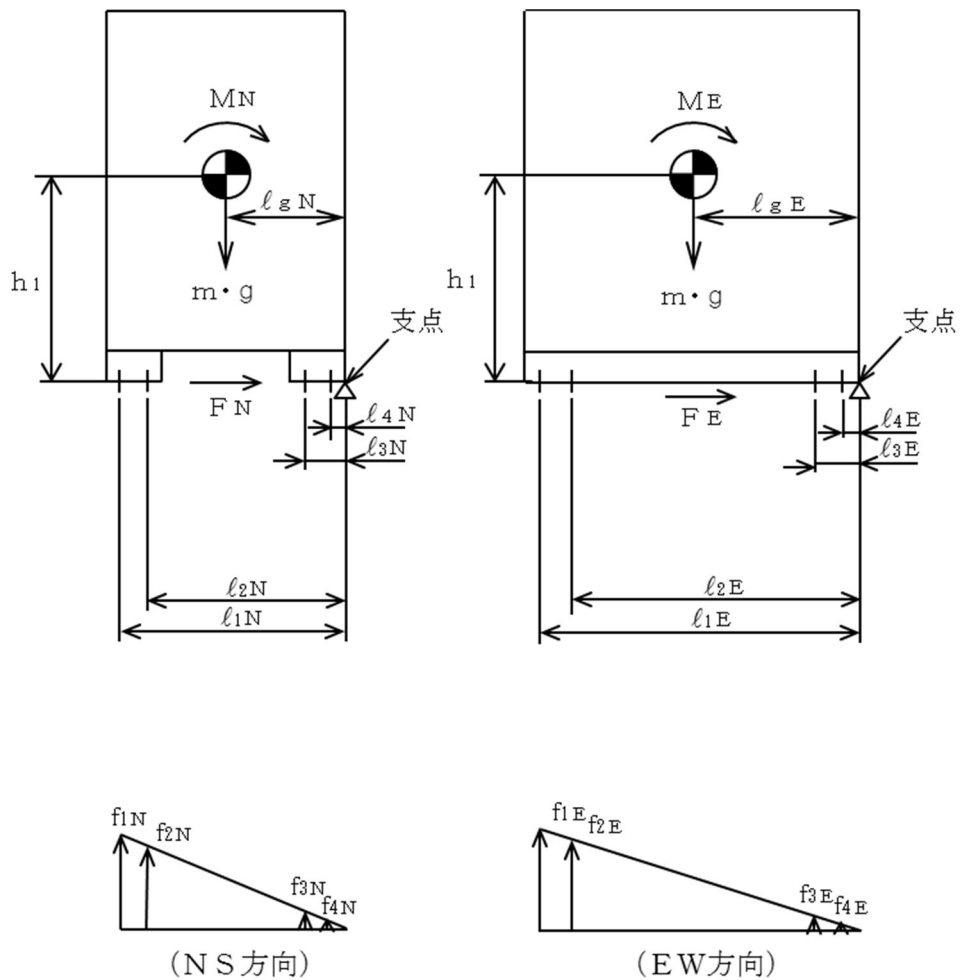


図4-7 ラック取付ボルトの荷重状態

(1) 引張応力

図 4-7 において支点回りのモーメントの平衡によりラック取付ボルト 1 本当たりの引張力 $f_{1i} \sim f_{ji}$ を求める。

$f_{1i} > f_{2i} > \dots > f_{ji}$ の関係にあるので f_{1i} のみを (4.6.2) 式より求める。

$$f_{1i} = \frac{\ell_{1i} \cdot \{ \sqrt{M_i^2 + (C_v \cdot m \cdot g \cdot \ell_{gi})^2} - m \cdot g \cdot \ell_{gi} \}}{n_{1i} \cdot \ell_{1i}^2 + n_{2i} \cdot \ell_{2i}^2 + \dots + n_{ji} \cdot \ell_{ji}^2} \quad \dots \quad (4.6.2)$$

したがって、引張力 f_{1i} によりラック取付ボルトに生じる引張応力 σ_b は、(4.6.3) 式より求める。

$$\sigma_b = \frac{f_{1i}}{A_b} \quad \dots \quad (4.6.3)$$

ただし、 f_{1i} の値が負となった場合は、引張力が生じないので以後の引張応力の計算は省略する。

(2) セン断応力

せん断力 F_i によりラック取付ボルトに生じるせん断応力 τ_b は、(4.6.4) 式より求める。

$$\tau_b = \frac{F_i}{n \cdot A_b} \quad \dots \quad (4.6.4)$$

4.6.1.3 基礎ボルトの応力

共通ベースの種類としては110体ラック1台と70体ラック1台設置用が4台、110体ラック2台設置用が3台、110体ラック2台と70体ラック1台設置用が3台あり、この中で荷重条件が厳しい110体ラック2台設置用について以下に示す。

本ケースのラック及び共通ベースに作用する水平方向の力は合計18本の共通ベース基礎ボルトで固定される。地震時に発生するラック据付時の全体の転倒モーメント M_{ti} 及び共通ベース底部に作用するせん断力 F_{bi} が、ラック及び共通ベースから成る系全体において図4-8のように負荷されるものとして基礎ボルトの応力を求める。

基礎ボルトの荷重状態を図4-8に示す。

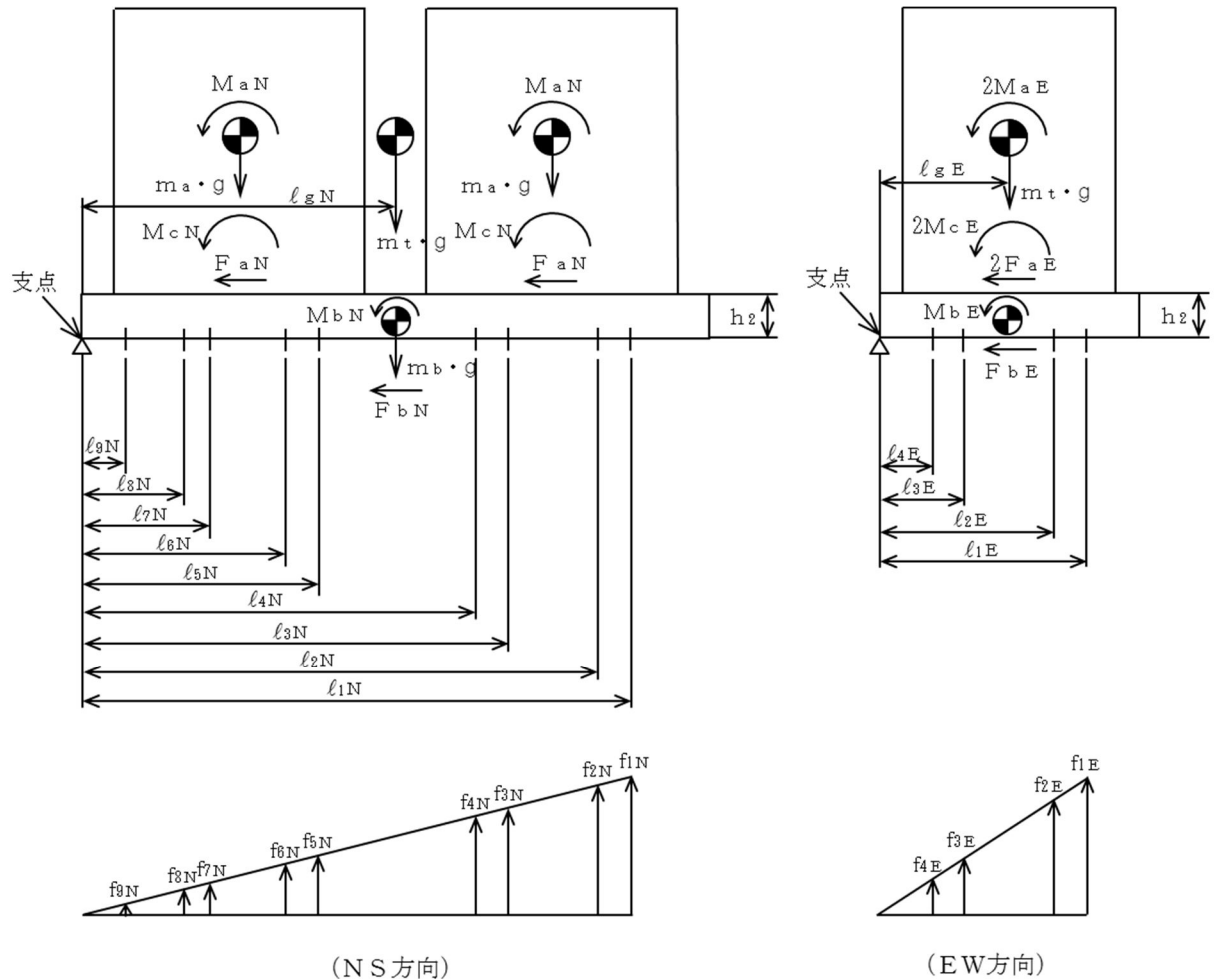


図 4-8 基礎ボルトの荷重状態

(1) 引張応力

図 4-8 において支点回りのモーメントの平衡により基礎ボルト 1 本当りりの引張力 $f_{1i} \sim f_{ji}$ を求める。

$f_{1i} > f_{2i} > \dots > f_{ji}$ の関係にあるので f_{1i} のみを (4.6.5) 式より求める。

$$f_{1i} = \frac{\ell_{1i} \cdot \{\sqrt{M_{ti}^2 + (C_v \cdot m_t \cdot g \cdot \ell_{gi})^2} - m_t \cdot g \cdot \ell_{gi}\}}{n_{1i} \cdot \ell_{1i}^2 + n_{2i} \cdot \ell_{2i}^2 + \dots + n_{ji} \cdot \ell_{ji}^2} \dots\dots\dots (4.6.5)$$

ここで,

$$M_{ti} = 2 \cdot M_{ai} + M_{bi} + 2 \cdot M_{ci}$$

$$M_{ci} = F_{ai} \cdot h_2$$

$$m_t = 2 \cdot m_a + m_b$$

したがって、引張力 f_{1i} により基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b は、(4.6.6) 式より求める。

$$\sigma_b = \frac{f_{1i}}{A_b} \dots\dots\dots (4.6.6)$$

ただし、 f_{1i} の値が負となった場合は、引張力が生じないので以後の引張応力の計算は省略する。

(2) セン断応力

せん断力 F_{bi} により基礎ボルトに生じるせん断応力 τ_b は、(4.6.7) 式より求める。

$$\tau_b = \frac{F_{bi}}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (4.6.7)$$

4.7 計算条件

応力解析に用いる自重及び荷重は、本計算書の【使用済燃料貯蔵ラック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。

4.8 応力の評価

4.8.1 部材の応力評価

4.6.1.1 項で求めた各部材の引張応力 σ_x 、 σ_y 及び組合せ応力 σ_{fa} が、許容引張応力 f_t 以下であること。

また、4.6.1.1 項で求めた各部材のせん断応力 τ_{xy} が、許容せん断応力 f_s 以下であること。

ただし、 f_t 及び f_s は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_t	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5^*$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5^*$
許容せん断応力 f_s	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5^*$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5^*$

注記 * : の引張強さと降伏点 (0.2 %耐力) の値は、SUS304 の規格値を上回っているので安全側の評価とするため、F 値は SUS304 の値を使用する。

4.8.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

4.6.1.2 項、4.6.1.3 項で求めたラック取付ボルト、基礎ボルトの引張応力 σ_b が、次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。

また、4.6.1.2 項、4.6.1.3 項で求めたラック取付ボルト、基礎ボルトのせん断応力 τ_b が、せん断力のみを受けるラック取付ボルト、基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b \quad \dots\dots\dots (4.8.1)$$

かつ、

$$f_{ts} \leq f_{to} \quad \dots\dots\dots (4.8.2)$$

ただし、 f_{to} 及び f_{sb} は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5. 評価結果

5.1 設計基準対象施設としての評価結果

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

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。なお、弾性設計用地震動 S_d 及び静的震度は基準地震動 S_s を下回っており、基準地震動 S_s による発生値が、弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度に対する評価における許容限界を満足するため、弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による発生値の算出を省略した。

5.2 重大事故等対処設備としての評価結果

ラック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。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

【使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機 器 名 称	耐震設計上の 重要度分類	据付場所及び 床面高さ (m)	ラック	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 (℃)	周囲環境温度 (℃)
				水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向			
使用済燃料貯蔵ラック	S	原子炉建屋 EL. 34.7 ^{*1}	70 体ラック		0.05 以下 ^{*2}	— ^{*3}	— ^{*3}	C _H =1.10又は [*] 4	C _V =0.90	—	66	—
			110 体ラック		0.05 以下 ^{*2}	— ^{*3}	— ^{*3}	C _H =1.10又は [*] 4	C _V =0.90			

注記 *1：基準床レベルを示す。
*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。
*3：Ⅲ_AS については，基準地震動 S_s で評価する。
*4：基準地震動 S_s に基づく設備評価用床応答曲線より得られる値。

1.2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

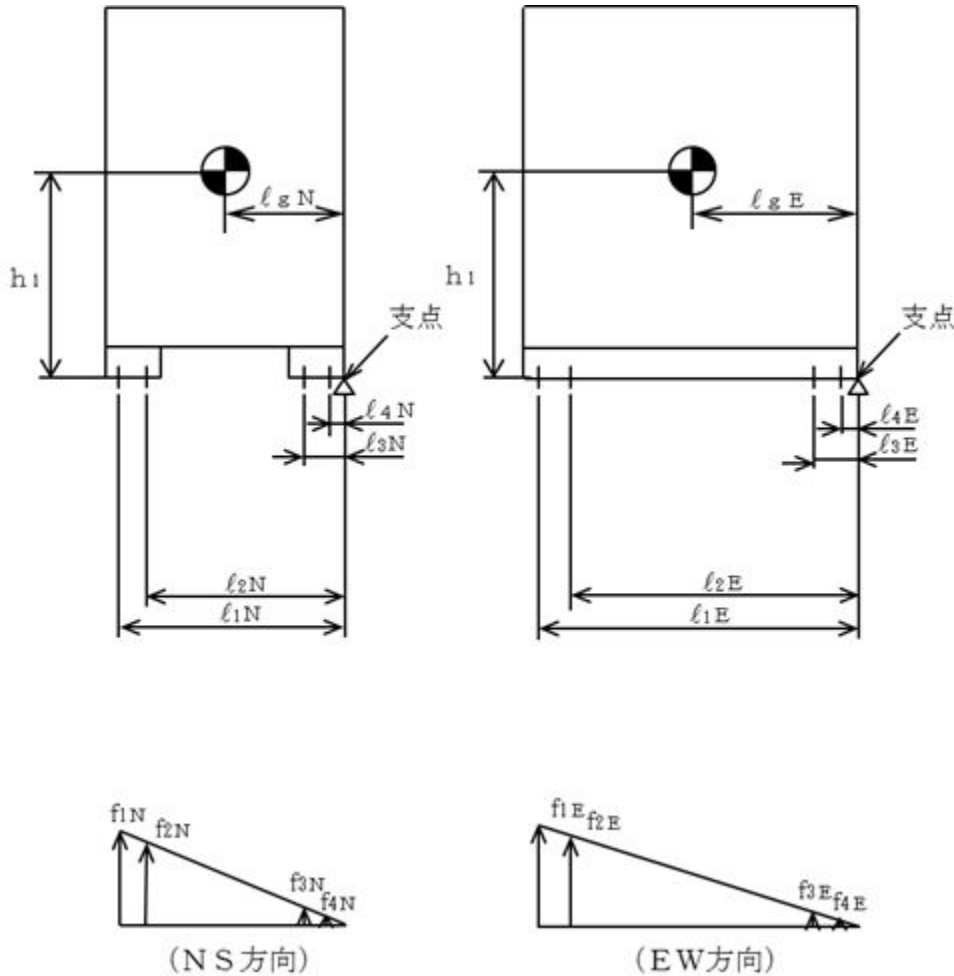
ラック	m (kg)	m _F (kg)	m _R (kg)	m _W (kg)	h ₁ (mm)	ℓ ₁ N (mm)	ℓ ₂ N (mm)	ℓ ₃ N (mm)	ℓ ₄ N (mm)	ℓ ₁ E (mm)	ℓ ₂ E (mm)	ℓ ₃ E (mm)	ℓ ₄ E (mm)	ℓ _g N (mm)	ℓ _g E (mm)
70 体ラック					2100	1072	909	257	94	1561	1398	257	94	583	827.5
110 体ラック					2100	1724	1561	257	94	1561	1398	257	94	909	827.5

A _b (mm ²)	n	n ₁ N	n ₂ N	n ₃ N	n ₄ N	n ₁ E	n ₂ E	n ₃ E	n ₄ E
1017.9 (M36)	16	4	4	4	4	4	4	4	4
1017.9 (M36)	16	4	4	4	4	4	4	4	4

ラック取付 ボルト材料	S _y ^{*1} (MPa)	S _y (R T) ^{*2} (MPa)	S _u ^{*1} (MPa)	F (ラック取付ボルト) (MPa)	F [*] (ラック取付ボルト) (MPa)
SUS304	188	205	479	205	205
SUS304	188	205	479	205	205

注記 *1：最高使用温度 (66 ℃) で算出
*2：室温で算出

ラック	地震力の種類	F _N (N)	F _E (N)	M _N (N・mm)	M _E (N・mm)
70 体ラック	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	—	—	—	—
	基準地震動 S _s	4.767×10 ⁵	3.465×10 ⁵	1.152×10 ⁹	7.993×10 ⁸
110 体ラック	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	—	—	—	—
	基準地震動 S _s	5.407×10 ⁵	5.407×10 ⁵	1.263×10 ⁹	1.341×10 ⁹



1.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

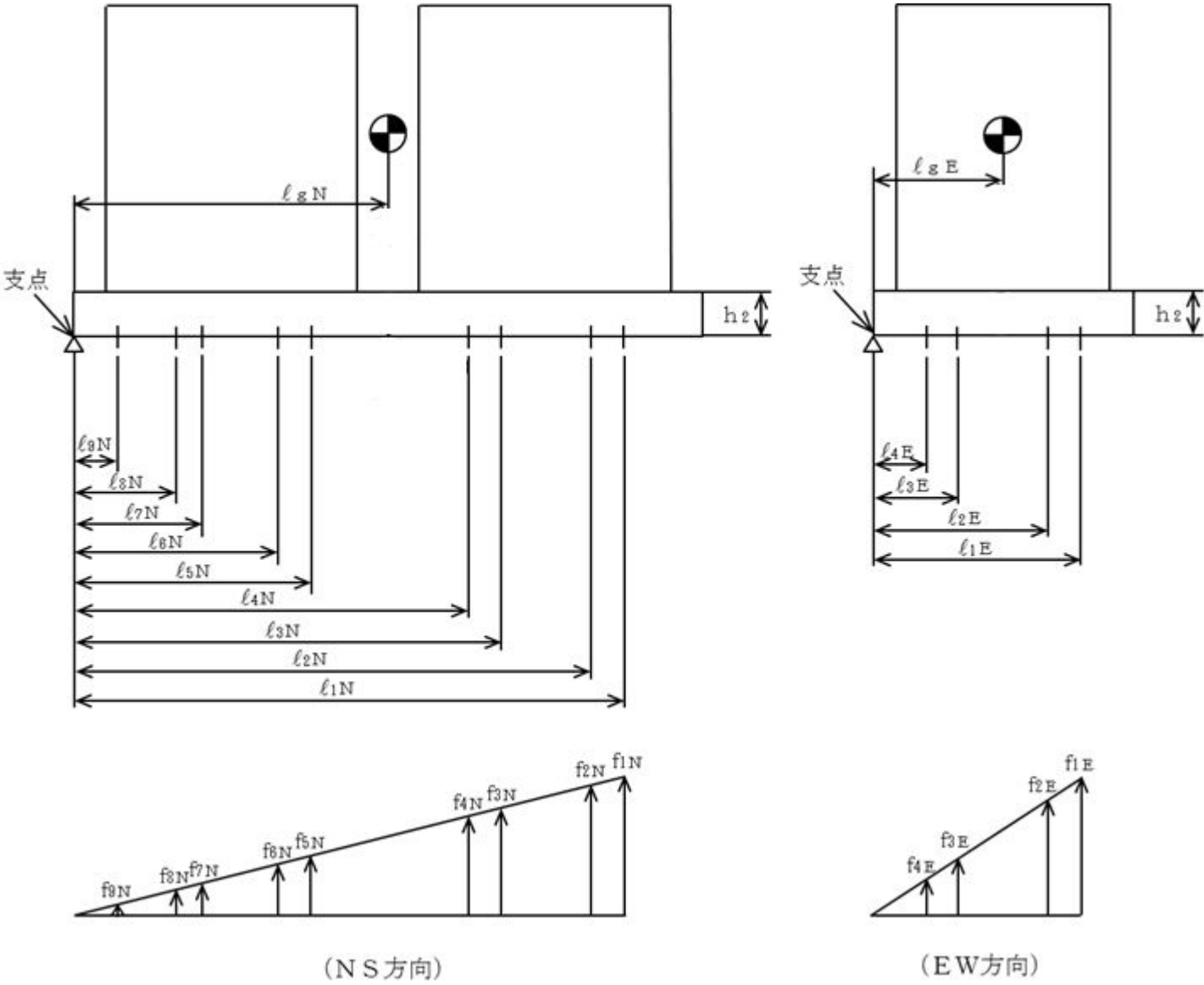
	m _t (kg)	m _b (kg)	h ₂ (mm)	ℓ ₁ N (mm)	ℓ ₂ N (mm)	ℓ ₃ N (mm)	ℓ ₄ N (mm)	ℓ ₅ N (mm)	ℓ ₆ N (mm)	ℓ ₇ N (mm)	ℓ ₈ N (mm)	ℓ ₉ N (mm)	ℓ ₁ E (mm)	ℓ ₂ E (mm)	ℓ ₃ E (mm)	ℓ ₄ E (mm)
共通ベース			195	3264	3191	2634	2561	1374	1301	744	671	114	1572	1415	270	113
ℓ _g N (mm)	ℓ _g E (mm)	A _b (mm ²)	n	n ₁ N	n ₂ N	n ₃ N	n ₄ N	n ₅ N	n ₆ N	n ₇ N	n ₈ N	n ₉ N	n ₁ E	n ₂ E	n ₃ E	n ₄ E
1929.75	842.5	1551.8 (1 3/4-5UNC)	18	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	5	4	5

基礎ボルト材料	S _y *1 (MPa)	S _y (R T) *2 (MPa)	S _u *1 (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)
SUS304	188	205	479	205	205

注記 *1：最高使用温度（66℃）で算出
*2：室温で算出

地震力の種類	F _a N (N)	F _a E (N)	F _b N (N)	F _b E (N)
弾性設計用地震動S _d 又は静的震度	—	—	—	—
基準地震動S _s	5.407×10 ⁵	5.407×10 ⁵	1.103×10 ⁶	1.103×10 ⁶

M _a N (N・mm)	M _a E (N・mm)	M _b N (N・mm)	M _b E (N・mm)
—	—	—	—
1.263×10 ⁹	1.341×10 ⁹	2.151×10 ⁶	2.151×10 ⁶



1.4 計算数値

1.4.1 部材に生じる応力

(1) 角管及びプレート

(単位：MPa)

ラック	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
70 体 ラック		引張り σ _x	—	—	5	5
		引張り σ _y	—	—	37	21
		せん断 τ _{x y}	—	—	28	17
		組合せ σ _{f a}	—	—	59	35
110 体 ラック		引張り σ _x	—	—	7	5
		引張り σ _y	—	—	31	36
		せん断 τ _{x y}	—	—	30	19
		組合せ σ _{f a}	—	—	59	47

(2) シートプレート及びラックベース

(単位：MPa)

ラック	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
70 体 ラック	SUS304L	引張り σ _x	—	—	14	5
		引張り σ _y	—	—	55	20
		せん断 τ _{xy}	—	—	10	4
		組合せ σ _{fa}	—	—	52	19
110 体 ラック		引張り σ _x	—	—	14	12
		引張り σ _y	—	—	20	42
		せん断 τ _{xy}	—	—	15	15
		組合せ σ _{fa}	—	—	31	46

1.4.2 ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック取付 ボルト	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
70 体 ラック	SUS304	引張り σ _b	—	—	126	50
		せん断 τ _b	—	—	30	22
110 体 ラック		引張り σ _b	—	—	68	85
		せん断 τ _b	—	—	34	34

1.4.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

基礎ボルト	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
共通ベース	SUS304	引張り σ_b	—	—	36	108
		せん断 τ_b	—	—	40	40

1.5 応力

(1) 部材に生じる応力

a. 角管及びプレート

(単位：MPa)

ラック	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
70 体 ラック		引張り	$\sigma_x = 5^*$	$f_t = 205$	$\sigma_x = 5$	$f_t = 205$
		引張り	$\sigma_y = 37^*$	$f_t = 205$	$\sigma_y = 37$	$f_t = 205$
		せん断	$\tau_{xy} = 28^*$	$f_s = 118$	$\tau_{xy} = 28$	$f_s = 118$
		組合せ	$\sigma_{fa} = 59^*$	$f_t = 205$	$\sigma_{fa} = 59$	$f_t = 205$
110 体 ラック		引張り	$\sigma_x = 7^*$	$f_t = 205$	$\sigma_x = 7$	$f_t = 205$
		引張り	$\sigma_y = 31^*$	$f_t = 205$	$\sigma_y = 31$	$f_t = 205$
		せん断	$\tau_{xy} = 30^*$	$f_s = 118$	$\tau_{xy} = 30$	$f_s = 118$
		組合せ	$\sigma_{fa} = 59^*$	$f_t = 205$	$\sigma_{fa} = 59$	$f_t = 205$

注記 *：基準地震動 S_s による算出応力の値

すべて許容応力以下である。

b. シートプレート及びラックベース

(単位：MPa)

(単位：MPa)						
ラック	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
70 体 ラック	SUS304L	引張り	σ _x =14*	f _t =175	σ _x =14	f _t =175
		引張り	σ _y =55*	f _t =175	σ _y =55	f _t =175
		せん断	τ _{xy} =10*	f _s =101	τ _{xy} =10	f _s =101
		組合せ	σ _{fa} =52*	f _t =175	σ _{fa} =52	f _t =175
110 体 ラック		引張り	σ _x =12*	f _t =175	σ _x =12	f _t =175
		引張り	σ _y =42*	f _t =175	σ _y =42	f _t =175
		せん断	τ _{xy} =15*	f _s =101	τ _{xy} =15	f _s =101
		組合せ	σ _{fa} =46*	f _t =175	σ _{fa} =46	f _t =175

注記 *：基準地震動 S_s による算出応力の値

すべて許容応力以下である。

(2) ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック取付 ボルト	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
70 体 ラック	SUS304	引張り	$\sigma_b = 126^{*1}$	$f_{ts} = 153^{*2}$	$\sigma_b = 126$	$f_{ts} = 153^{*2}$
		せん断	$\tau_b = 30^{*1}$	$f_{sb} = 118$	$\tau_b = 30$	$f_{sb} = 118$
110 体 ラック		引張り	$\sigma_b = 85^{*1}$	$f_{ts} = 153^{*2}$	$\sigma_b = 85$	$f_{ts} = 153^{*2}$
		せん断	$\tau_b = 34^{*1}$	$f_{sb} = 118$	$\tau_b = 34$	$f_{sb} = 118$

注記 *1：基準地震動 S_s による算出応力の値

*2： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出
すべて許容応力以下である。

(3) 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

基礎ボルト	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
共通ベース	SUS304	引張り	$\sigma_b = 108^{*1}$	$f_{ts} = 150^{*2}$	$\sigma_b = 108$	$f_{ts} = 150^{*2}$
		せん断	$\tau_b = 40^{*1}$	$f_{sb} = 118$	$\tau_b = 40$	$f_{sb} = 118$

注記 *1：基準地震動 S_s による算出応力の値

*2： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出
すべて許容応力以下である。

【使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】

2. 重大事故等対処設備

2.1 設計条件

機 器 名 称	設備分類	据付場所及び 床面高さ (m)	ラック	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 (℃)	周囲環境温度 (℃)
				水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向			
使用済燃料貯蔵ラック	常設耐震／防止 常設／緩和	原子炉建屋 EL. 34.7 ^{*1}	70 体ラック		0.05 以下 ^{*2}	—	—	C _H =1.10又は*3	C _V =0.90	—	100	—
			110 体ラック		0.05 以下 ^{*2}	—	—	C _H =1.10又は*3	C _V =0.90			

注記 *1：基準床レベルを示す。
*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。
*3：基準地震動 S_sに基づく設備評価用床応答曲線より得られる値。

2.2 ラック取付ボルトの応力評価に用いる要目

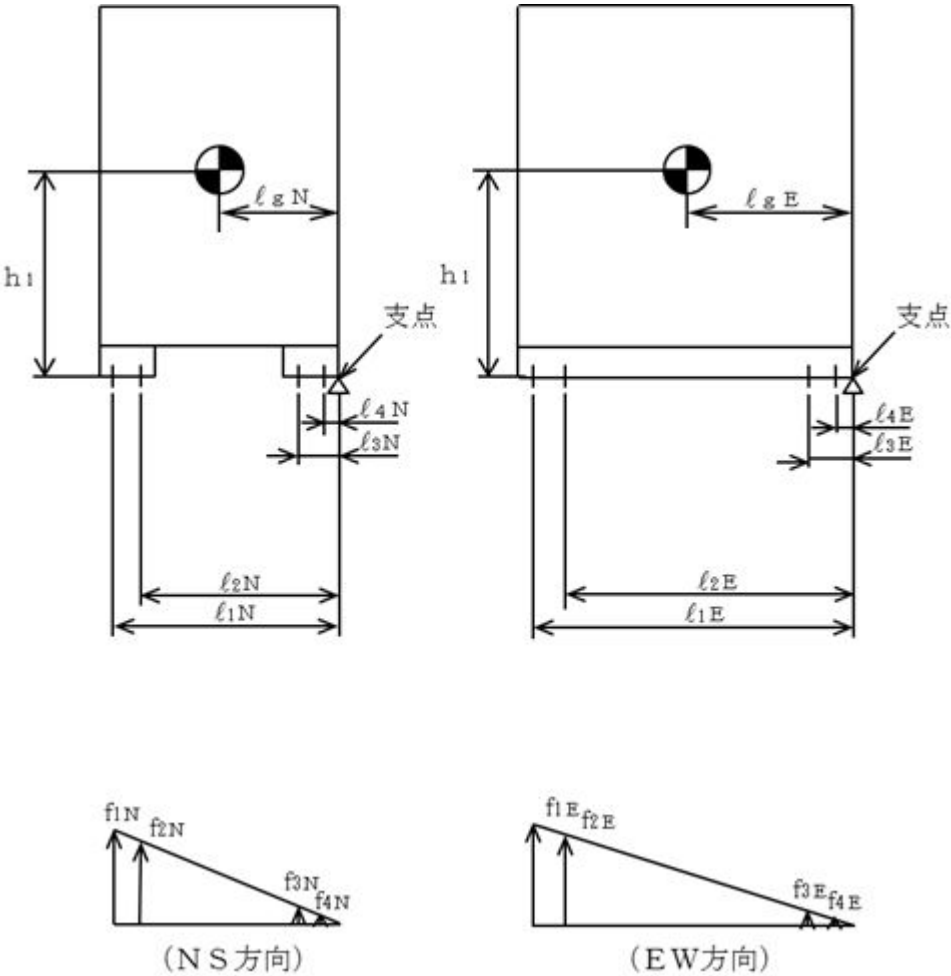
ラック	m (kg)	m _F (kg)	m _R (kg)	m _W (kg)	h ₁ (mm)	ℓ ₁ N (mm)	ℓ ₂ N (mm)	ℓ ₃ N (mm)	ℓ ₄ N (mm)	ℓ ₁ E (mm)	ℓ ₂ E (mm)	ℓ ₃ E (mm)	ℓ ₄ E (mm)	ℓ _g N (mm)	ℓ _g E (mm)
70 体ラック					2100	1072	909	257	94	1561	1398	257	94	583	827.5
110 体ラック					2100	1724	1561	257	94	1561	1398	257	94	909	827.5

A _b (mm ²)	n	n ₁ N	n ₂ N	n ₃ N	n ₄ N	n ₁ E	n ₂ E	n ₃ E	n ₄ E
1017.9 (M36)	16	4	4	4	4	4	4	4	4
1017.9 (M36)	16	4	4	4	4	4	4	4	4

ラック取付 ボルト材料	S _y ^{*1} (MPa)	S _y (R T) ^{*2} (MPa)	S _u ^{*1} (MPa)	F (ラック取付ボルト) (MPa)	F* (ラック取付ボルト) (MPa)
SUS304	171	205	441	205	205
SUS304	171	205	441	205	205

注記 *1：最高使用温度（100℃）で算出
*2：室温で算出

ラック	地震力の種類	F _N (N)	F _E (N)	M _N (N・mm)	M _E (N・mm)
70 体ラック	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	—	—	—	—
	基準地震動 S _s	4.767×10 ⁵	3.465×10 ⁵	1.152×10 ⁹	7.993×10 ⁸
110 体ラック	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	—	—	—	—
	基準地震動 S _s	5.407×10 ⁵	5.407×10 ⁵	1.263×10 ⁹	1.341×10 ⁹



2.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

	m_t (kg)	m_b (kg)	h_2 (mm)	ℓ_{1N} (mm)	ℓ_{2N} (mm)	ℓ_{3N} (mm)	ℓ_{4N} (mm)	ℓ_{5N} (mm)	ℓ_{6N} (mm)	ℓ_{7N} (mm)	ℓ_{8N} (mm)	ℓ_{9N} (mm)	ℓ_{1E} (mm)	ℓ_{2E} (mm)	ℓ_{3E} (mm)	ℓ_{4E} (mm)
共通ベース			195	3264	3191	2634	2561	1374	1301	744	671	114	1572	1415	270	113

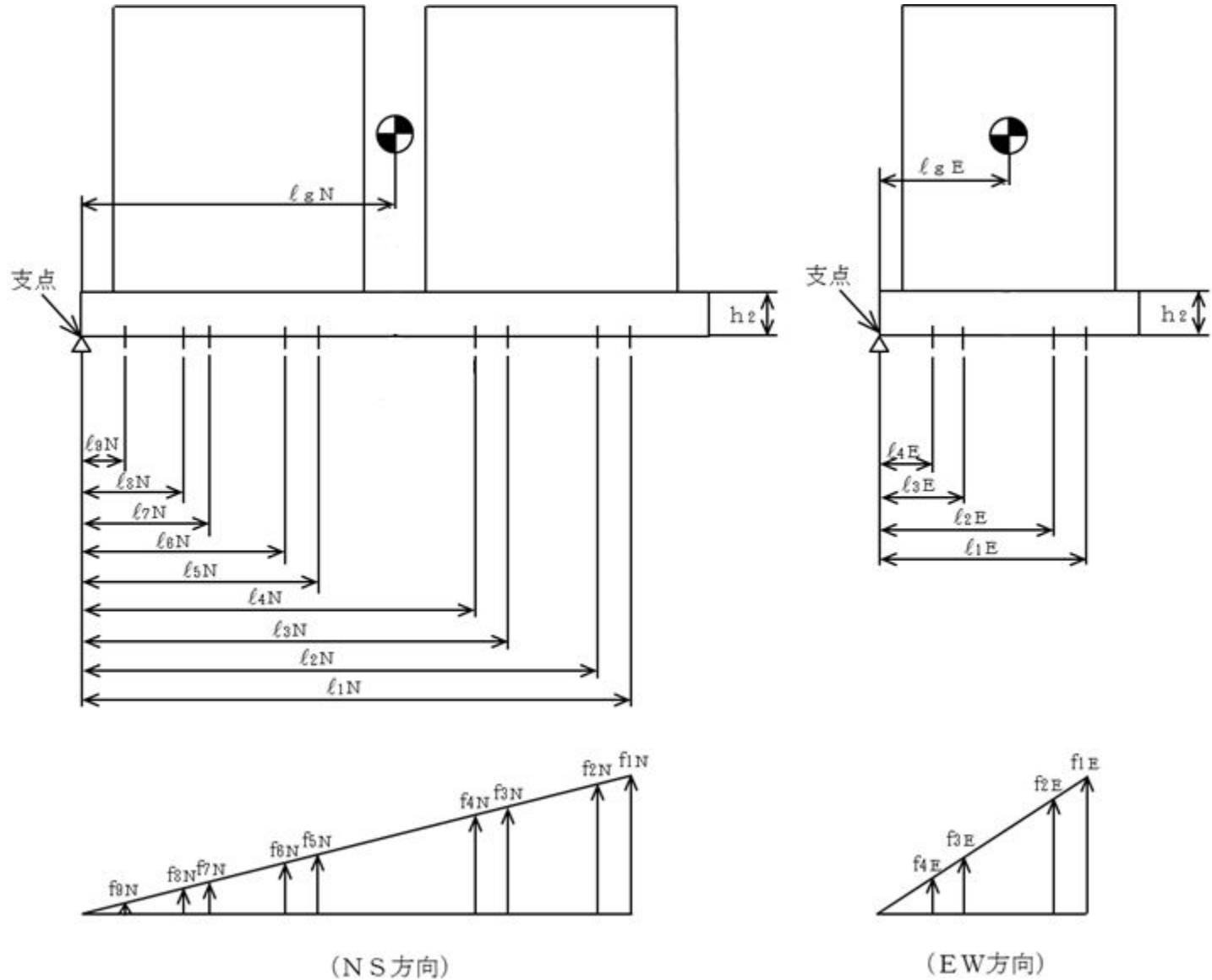
ℓ_{gN} (mm)	ℓ_{gE} (mm)	A_b (mm ²)	n	n_{1N}	n_{2N}	n_{3N}	n_{4N}	n_{5N}	n_{6N}	n_{7N}	n_{8N}	n_{9N}	n_{1E}	n_{2E}	n_{3E}	n_{4E}
1929.75	842.5	1551.8 (1 3/4-5UNC)	18	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	5	4	5

基礎ボルト材料	S_y^{*1} (MPa)	$S_y(RT)^{*2}$ (MPa)	S_u^{*1} (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)
SUS304	171	205	441	205	205

*2：室温で算出

地震力の種類	F_{aN} (N)	F_{aE} (N)	F_{bN} (N)	F_{bE} (N)
弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度	—	—	—	—
基準地震動 S_s	5.407×10^5	5.407×10^5	1.103×10^6	1.103×10^6

M_{aN} (N・mm)	M_{aE} (N・mm)	M_{bN} (N・mm)	M_{bE} (N・mm)
—	—	—	—
1.263×10^9	1.341×10^9	2.151×10^6	2.151×10^6



2.4 計算数値

2.4.1 部材に生じる応力

(1) 角管及びプレート

(単位：MPa)

ラック	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
70 体 ラック		引張り σ _x	—	—	5	5
		引張り σ _y	—	—	37	21
		せん断 τ _{x y}	—	—	28	17
		組合せ σ _{f a}	—	—	59	35
110 体 ラック		引張り σ _x	—	—	7	5
		引張り σ _y	—	—	31	36
		せん断 τ _{x y}	—	—	30	19
		組合せ σ _{f a}	—	—	59	47

(2) シートプレート及びラックベース

(単位：MPa)

ラック	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
70 体 ラック	SUS304L	引張り σ _x	—	—	14	5
		引張り σ _y	—	—	55	20
		せん断 τ _{xy}	—	—	10	4
		組合せ σ _{fa}	—	—	52	19
110 体 ラック		引張り σ _x	—	—	14	12
		引張り σ _y	—	—	20	42
		せん断 τ _{xy}	—	—	15	15
		組合せ σ _{fa}	—	—	31	46

2.4.2 ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック取付 ボルト	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
70 体 ラック	SUS304	引張り σ _b	—	—	126	50
		せん断 τ _b	—	—	30	22
110 体 ラック		引張り σ _b	—	—	68	85
		せん断 τ _b	—	—	34	34

2.4.3 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

基礎ボルト	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	
			N S 方向	E W 方向	N S 方向	E W 方向
共通ベース	SUS304	引張り σ_b	—	—	36	108
		せん断 τ_b	—	—	40	40

2.5 応力

(1) 部材に生じる応力

a. 角管及びプレート

(単位：MPa)

ラック	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
70 体 ラック		引張り	—	—	$\sigma_x = 5$	$f_t=205$
		引張り	—	—	$\sigma_y = 37$	$f_t=205$
		せん断	—	—	$\tau_{xy}=28$	$f_s=118$
		組合せ	—	—	$\sigma_{fa}=59$	$f_t=205$
110 体 ラック		引張り	—	—	$\sigma_x = 7$	$f_t=205$
		引張り	—	—	$\sigma_y = 31$	$f_t=205$
		せん断	—	—	$\tau_{xy}=30$	$f_s=118$
		組合せ	—	—	$\sigma_{fa}=59$	$f_t=205$

すべて許容応力以下である。

b. シートプレート及びラックベース

(単位：MPa)

ラック	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
70 体 ラック	SUS304L	引張り	—	—	$\sigma_x = 14$	$f_t = 175$
		引張り	—	—	$\sigma_y = 55$	$f_t = 175$
		せん断	—	—	$\tau_{xy} = 10$	$f_s = 101$
		組合せ	—	—	$\sigma_{fa} = 52$	$f_t = 175$
110 体 ラック		引張り	—	—	$\sigma_x = 12$	$f_t = 175$
		引張り	—	—	$\sigma_y = 42$	$f_t = 175$
		せん断	—	—	$\tau_{xy} = 15$	$f_s = 101$
		組合せ	—	—	$\sigma_{fa} = 46$	$f_t = 175$

すべて許容応力以下である。

(2) ラック取付ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

ラック取付 ボルト	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
70 体 ラック	SUS304	引張り	—	—	σ _b =126	f _{t s} =153*
		せん断	—	—	τ _b = 30	f _{s b} =118
110 体 ラック		引張り	—	—	σ _b = 85	f _{t s} =153*
		せん断	—	—	τ _b = 34	f _{s b} =118

注記 * : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出
すべて許容応力以下である。

(3) 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

基礎ボルト	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
共通ベース	SUS304	引張り	—	—	$\sigma_b = 108$	$f_{ts} = 150^*$
		せん断	—	—	$\tau_b = 40$	$f_{sb} = 118$

注記 * : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出
すべて許容応力以下である。

V-2-4-2-3 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書

V-2-4-2-3-1 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書
(タイプ I)

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	3
2.4 記号の説明	4
2.5 計算精度と数値の丸め方	8
3. 固有周期	9
3.1 固有周期の計算方法	9
3.2 固有周期の評価	9
4. 構造強度評価	10
4.1 構造強度評価方法	10
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	10
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	10
4.2.2 許容応力	10
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	10
4.3 設計用地震力	12
4.4 計算方法	12
4.5 応力の評価	12
5. 評価結果	12

図表目次

図 2-1	使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フロー	3
表 2-1	構造計画（タイプ I）	2
表 2-2	表示する数値の丸め方	8
表 3-1	固有周期の計算結果	9
表 4-1	荷重の組合せ及び許容限界	11
表 4-2	使用材料の許容応力評価条件	11
表 4-3	設計用地震力	12

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の設計方針に基づき、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅠ）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。

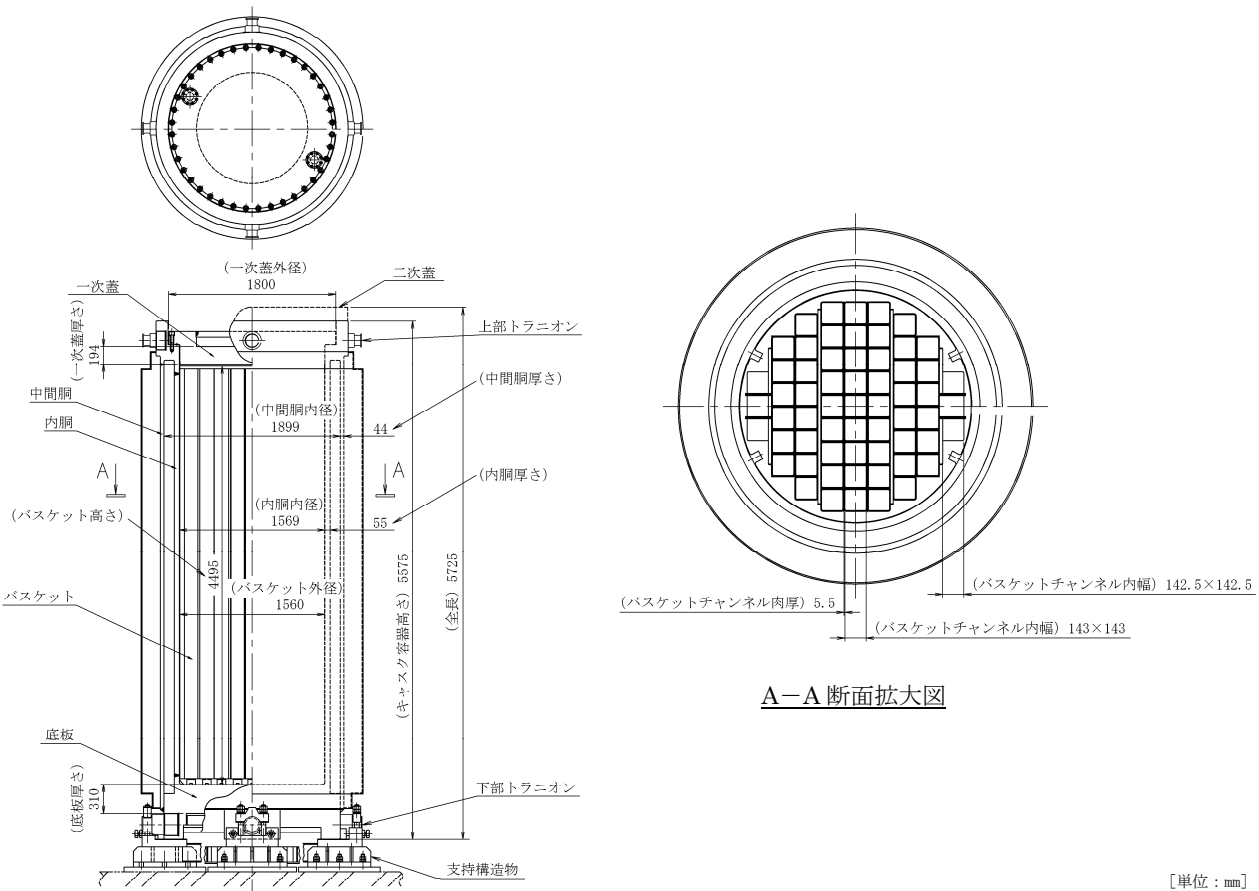
使用済燃料乾式貯蔵容器は、使用済燃料を貯蔵していること及び想定されるいかなる場合にも収納する使用済燃料の臨界を防止する必要があることから、Sクラス施設に分類される。以下、構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

使用済燃料乾式貯蔵容器の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画 (タイプ I)

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
使用済燃料乾式貯蔵容器は縦置型で、トラニオンを介し支持構造物で支持され、アンカーボルトで基礎に固定される。 使用済燃料はキャスク容器 *内に配置されたバスケットにより支持される。	縦置円筒型容器	 [単位: mm]

*: キャスク容器とは、内胴、中間胴、上部フランジ、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト、バルブカバー、バルブカバー締付けボルト、底部プラグをいう。

2.2 評価方針

使用済燃料乾式貯蔵容器の応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の「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」にて示す使用済燃料乾式貯蔵容器の部位を踏まえ、「3. 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対して算出する応力等が許容限界内に収まることを確認することで実施する。

使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

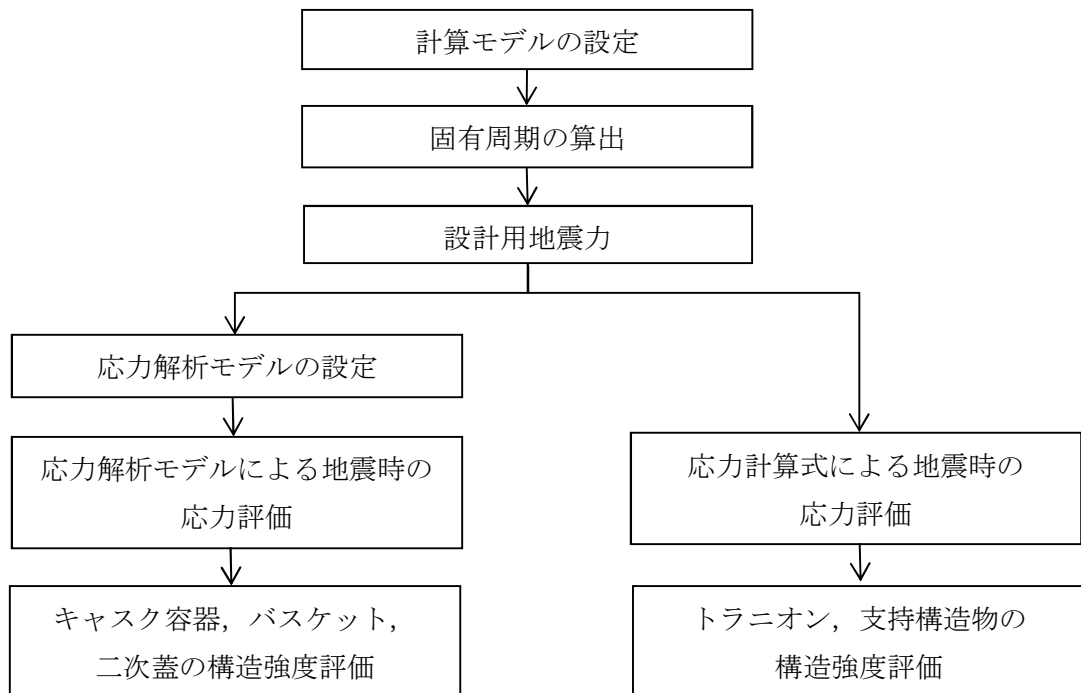


図 2-1 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1 -1987 (社) 日本電気協会
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 (社) 日本電気協会
- (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 (社) 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

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
A	断面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
D	直径	mm
E	縦弾性係数	MPa
g	重力加速度(=9.80665)	m/s ²
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—
S ₁₂	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S ₂₃	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S ₃₁	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
S _ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S _ℓ '	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
K	応力集中係数	—
U	疲労累積係数	—
T	締付けトルク	N・mm
N	許容繰返し回数	回
W	質量	kg
α	熱膨張係数	mm/mm℃
f _t	許容引張応力	MPa

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
$f_t^{*1)}$	許容引張応力	MPa
$f_s^{*1)}$	許容せん断応力	MPa
$f_c^{*1)}$	許容圧縮応力	MPa
$f_b^{*1)}$	許容曲げ応力	MPa
$f_p^{*1)}$	許容支圧応力	MPa
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_b	圧縮応力	MPa
σ_{bb}	曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_{bb}$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_{bb}$	引張側曲げ応力	MPa
σ_{cc}	圧縮応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_{tt}	引張応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{n\theta}$	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
F_X	単位長さあたりの X 方向荷重	N/mm
F_Y	単位長さあたりの Y 方向荷重	N/mm

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
L	バスケット全長	mm
L _S	サポートガイドの長さ	mm
Z	断面係数	mm ³
α_H	水平方向設計加速度	m/s ²
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s ²
ρ	密度	kg/mm ³
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力(x 方向)	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力(y 方向)	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力(z 方向)	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
a ₁	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
F _w	トラニオンに作用する荷重	N
f _t	許容引張応力	MPa
h _{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
M	曲げモーメント	N・mm
σ_b	圧縮側曲げ応力	MPa
σ_t	引張側曲げ応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
E	縦弾性係数	MPa
F _c	圧縮力	N
F ₁	支持台①の引張力	N
F ₂	支持台②の引張力	N
f _T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
W _c	貯蔵容器質量	kg
W _S	支持台 1 個の質量	kg
D	死荷重	—
M _d	当該設備に設計上定められた機械的荷重	—
P _d	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重	MPa
S	最高使用温度における設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 に規定する材料の許容引張応力	MPa

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
f_s	許容せん断応力 (f_s を 1.5 倍した値又は f_s^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_t	許容引張応力 (f_t を 1.5 倍した値又は f_t^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_c	許容圧縮応力 (f_c を 1.5 倍した値又は f_c^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_b	許容曲げ応力 (f_b を 1.5 倍した値又は f_b^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_p	許容支圧応力 (f_p を 1.5 倍した値又は f_p^* を 1.5 倍した値)	MPa

注記 1) : f_t^* , f_s^* , f_c^* , f_b^* , f_p^* : f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

2.5 計算精度と数値の丸め方

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	処理法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	—	—	設計値
質量	kg	—	—	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

注記 *：応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

4. 構造強度評価

4.1 構造強度評価方法

- (1) 地震力は使用済燃料乾式貯蔵容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。
- (2) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を用いる。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

使用済燃料乾式貯蔵容器の荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4-1 に示す。

4.2.2 許容応力

使用済燃料乾式貯蔵容器の許容応力については、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」のとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

使用済燃料乾式貯蔵容器の使用材料の許容応力評価条件については、表 4-2 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容限界

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	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 用容器	使用済燃料乾式貯蔵容器	S	—	$D + P + M + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P + M + S_s$	Ⅳ _A S

表 4-2 使用材料の許容応力評価条件

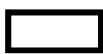
評価部材		材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _m (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)
キャスク容器	内胴, 中間胴	SUS304	最高使用温度	160	—	135	152	418
	一次蓋, 上部フランジ, 底板 底部プラグ, 密封シール部	SUSF304	最高使用温度	160	—	135	152	418
	一次蓋締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	160	—	275	825	—
	バルブカバー	SUS304	最高使用温度	160	—	135	152	418
	バルブカバー締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	160	—	275	825	—
バスケット	チャンネル	A5052TD-H34	最高使用温度	210	—	16	124	185
	サポートブロック, 底板	A5083FH-0	最高使用温度	210	—	13	100	169
	補強板, 仕切板	A5083P-0	最高使用温度	210	—	13	100	169
	サポートガイド	SUS304	最高使用温度	160	—	135	152	418
トラニオン	トラニオン	SUS630	最高使用温度	140	—	—	645	845
支持構造物	支持台座	SFVC2B	最高使用温度	130	—	—	222	438
	トラニオン固定金具	SNB23-3	最高使用温度	130	—	—	839	912
	容器押え金具	SNB23-3	最高使用温度	130	—	—	839	912
	トラニオン固定ボルト	SNB23-3	最高使用温度	130	—	—	839	912
	リブ	SM490B	最高使用温度	130	—	—	272	441
	アンカーボルト	SCM435	最高使用温度	130	—	—	665	847
二次蓋	二次蓋	SUSF304	最高使用温度	160	—	—	152	418
	二次蓋締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	160	200	—	—	—

4.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-3 に示す。

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

表 4-3 設計用地震力

据付場所及び 床面高さ(m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL8.3m ^{*1}		—	$C_H=0.72$	$C_V=0.36$	$C_H=1.17$	$C_V=0.65$

注 *1：基準床レベルを示す。

4.4 計算方法

使用済燃料乾式貯蔵容器の計算方法については、以下の各図書「3. 計算方法」に示す。

キャスク容器：添付書類「V-2-4-2-3-1-1 キャスク容器の耐震性についての計算書」

バスケット：添付書類「V-2-4-2-3-1-2 バスケットの耐震性についての計算書」

トラニオン：添付書類「V-2-4-2-3-1-3 トラニオンの耐震性についての計算書」

支持構造物：添付書類「V-2-4-2-3-1-4 支持構造物の耐震性についての計算書」

二次蓋：添付書類「V-2-4-2-3-1-5 二次蓋の耐震性についての計算書」

4.5 応力の評価

4.4 項で求めた計算値が、4.2.2 項で示した許容応力以下であること。

5. 評価結果

使用済燃料乾式貯蔵容器の応力の評価結果については、以下の各図書「応力の評価」に示す。計算値は許容応力以下であり、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

キャスク容器：添付書類「V-2-4-2-3-1-1 キャスク容器の耐震性についての計算書」

バスケット：添付書類「V-2-4-2-3-1-2 バスケットの耐震性についての計算書」

トラニオン：添付書類「V-2-4-2-3-1-3 トラニオンの耐震性についての計算書」

支持構造物：添付書類「V-2-4-2-3-1-4 支持構造物の耐震性についての計算書」

二次蓋：添付書類「V-2-4-2-3-1-5 二次蓋の耐震性についての計算書」

V-2-4-2-3-1-1 キャスク容器の耐震性についての計算書
(タイプ I)

目次

1. 概要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力の評価	2
5. 計算結果	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	3
6. 評価結果	4
6.1 キヤスク容器 (ボルトを除く) の応力評価	4
6.2 ボルトの応力評価	4
6.3 中間胴の応力評価	4
6.4 特別な応力の評価	4
6.5 繰返し荷重の評価	5
6.5.1 キヤスク容器 (ボルトを除く) の評価	5
6.5.2 ボルトの評価	5
6.5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討	5
6.5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析	5
6.5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析	6
7. 穴の補強	7

図表目次

図 2-1	キャスク容器及び中間胴の応力解析箇所	8
図 5-1	キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）	9
図 5-2	キャスク容器及び中間胴の解析モデル（地震時）	10
表 4-1	キャスク容器用材料の許容応力値	11
表 4-2	キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値	12
表 4-3	中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）用材料の許容応力値	12
表 4-4	中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値	13
表 5-1	キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	15
表 5-1	キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	20
表 5-2	キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	25
表 5-2	キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	28
表 6-1	繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）	31
表 6-2	繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）	31
表 7-1	貫通孔部の応力強さ	32

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅠ）のキャスク容器に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

キャスク容器及び中間胴の評価部位は、次のとおりである（図 2-1 参照）。

- (1) 内胴
- (2) 中間胴
- (3) 上部フランジ
- (4) 底板
- (5) 一次蓋
- (6) 一次蓋締付けボルト
- (7) パルプカバー
- (8) パルプカバー締付けボルト
- (9) 密封シール部
- (10) 底部プラグ

3. 計算方法

- (1) キャスク容器及び中間胴の応力計算は、想定される圧力荷重、機械的荷重を基に、キャスク容器及び中間胴の実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

解析コードの検証および妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS」に示す。

- (2) 応力計算は代表事象毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

- a. 内圧
- b. 機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器（二次蓋を含む）の貯蔵時の設計重量を用いる）、衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

- (3) 計算モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては、キャスク容器、中間胴、ガンマ線遮へい体の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは、1/2 対称の三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。また、モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

- (4) 構造及び材料の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

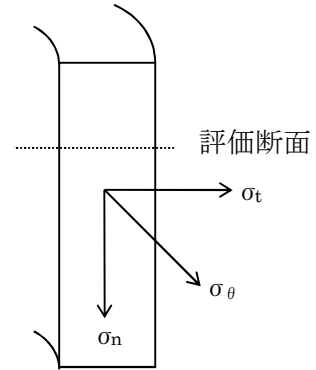
- (5) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

4. 応力の評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ_θ : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{n\theta}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力値を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

また、中間胴用材料の許容応力値を表 4-3 及び表 4-4 に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く）及び中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）の応力評価

キャスク容器及び中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）の応力評価は、設計・建設規格 PVB-3110 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価
 - (c) 圧縮応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 PVB-3120 に従い、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

(3) 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）の応力評価

中間胴の応力評価は、設計・建設規格 SSB-3010 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 組合せ応力

5. 計算結果

5.1 応力評価点

キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧力（ -0.1MPa ）＋蓋間圧力（ 0.4MPa ）＋ボルト初期締付け力
＋地震力＋自重

5.2.2 計算方法

(1) 一次応力及び一次＋二次応力

a. 内胴，上部フランジ，底板，中間胴，一次蓋及び一次蓋締付けボルト

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-2 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$$G_1 = \alpha_H, \quad G_2 = 9.81 - \alpha_V$$

ここで， α_H ：水平方向設計加速度（ $= C_H g = 11.48\text{m/s}^2$ ）

α_V ：鉛直方向設計加速度（ $= C_V g = 6.38\text{m/s}^2$ ）

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部の底板に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で表わされる。

$$\sigma_p = W_G \cdot G_Z / A$$

ここで， W_G ：バスケット及び燃料の質量（ $= 25200\text{ kg}$ ）

G_Z ：鉛直方向加速度（ $= 9.81 + \alpha_V = 16.19\text{ m/s}^2$ ）

A ：接触面積（ $= 1.17 \times 10^6\text{ mm}^2$ ）

(3) 座屈応力

中間胴に生じる圧縮応力（ σ_b ）は（1）a. の計算方法と同様である。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

6. 評価結果

6.1 キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の一次一般膜応力強さ（ P_m ），一次局部膜応力強さ（ P_L ），一次膜＋一次曲げ応力強さ（ P_L+P_b ）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（ P_L+P_b+Q ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 ボルトの応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.3 中間胴の応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際のキャスク容器との溶接部近接部分における一次一般膜応力強さ（ P_m ），一次局部膜応力強さ（ P_L ），一次膜＋一次曲げ応力強さ（ P_L+P_b ）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（ P_L+P_b+Q ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

また，上記以外の範囲における引張応力，せん断応力，圧縮応力，曲げ応力，支圧応力及び座屈応力並びに地震時の組合せ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.4 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

純せん断応力（ σ_s ）に該当する評価箇所がないため，評価を省略する。

(2) 支圧応力

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均支圧応力（ σ_p ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

(3) 圧縮応力

各設計事象における評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の圧縮応力（ σ_b ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.5 繰返し荷重の評価

6.5.1 キャスク容器（ボルトを除く）の評価

地震力により発生する応力の全振幅を表 5-1 及び表 5-2 に示した応力強さ（一次＋二次応力：地震力のみによる全振幅を示す）の最大値（ $S_{\max} = 62 \text{ MPa}$ ）とすると、この応力値は、設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において 10^{11} 乗を許容繰返し回数としたときにこれに対応する繰返しピーク応力強さの値の 114 MPa （設計・建設規格 添付 4-2-2 曲線 B に相当）以下となる（表 5-1）。したがって、地震力による応力は設計・建設規格 PVB-3140 の規定を満足しているため、疲労評価を必要としない。

6.5.2 ボルトの評価

6.5.1 項において疲労評価が不要となる条件を満足することから、一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトについて、地震動のみによる疲労累積係数が 1.0 以下となることを示す。

6.5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

- (1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり、設計・建設規格 PVB-3122(2) に従い、設計疲労曲線として設計・建設規格 添付 4-2 3.4 を使用する。
- (2) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが 0.375 mm 、バルブカバー締付けボルトが 0.25 mm であって 0.07 mm より大である。
- (3) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は、

$$\text{一次蓋締付けボルト} : \frac{2.2}{31} = 0.071$$

$$\text{バルブカバー締付けボルト} : \frac{1.0}{13} = 0.077$$

であって、 0.06 以上である。

6.5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析

一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは、次式で計算する。

$$S_p = K \cdot \frac{W_\ell \cdot G_1}{A} \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、 S_p : 繰返しピーク応力強さ (MPa)

K : 一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)

W_ℓ : 一次蓋の質量 (= 5400 kg)

G_1 : 軸方向の加速度

(地震時 S_d * 地震力が作用する場合 = 6.38 m/s^2)

(地震時 S_s 地震力が作用する場合 = 6.38 m/s^2)

A : 全数のボルト最小断面積 (= $3.01 \times 10^4 \text{ mm}^2$)

また、繰返しピーク応力強さは次式で計算する。ただし、 S_p はピーク応力強さの変動範囲である。

$$S_\ell = \frac{1}{2} \cdot S_p \cdots \cdots \cdots (6.2)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 (4) のとおり、縦弾性係数 (2.07×10^5) と材料の使用温度における縦弾性係数 ($E = 1.83 \times 10^5$ MPa) の比を繰返しピーク応力強さに乗じて補正する。

$$S_\ell' = S_\ell \cdot \frac{2.07 \times 10^5}{E} \cdots \cdots \cdots (6.3)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 により、補正した繰返しピーク応力強さ (S_ℓ') に対する許容繰返し回数を求める。繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 6-1 に示す通りとなり、地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。

ただし、 W_θ : バルブカバーの質量 (= 8 kg)

A : 全数のボルト最小断面積 (= 1.06×10^3 mm²)

繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 6-2 に示すとおりである。

したがって、地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

7. 穴の補強

設計・建設規格 PVB-3520 により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で表わされる。

$$S_e = K \cdot S \cdots \cdots \cdots (7.1)$$

ここで、 S_e : 貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (= 3.0)

S : 貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) は表 5-1 及び表 5-2 より求められる。

したがって、貫通孔部の応力強さ (S_e) は表 7-1 に示す通りとなり、すべて許容応力を満足するため、貫通孔の補強は不要となる。

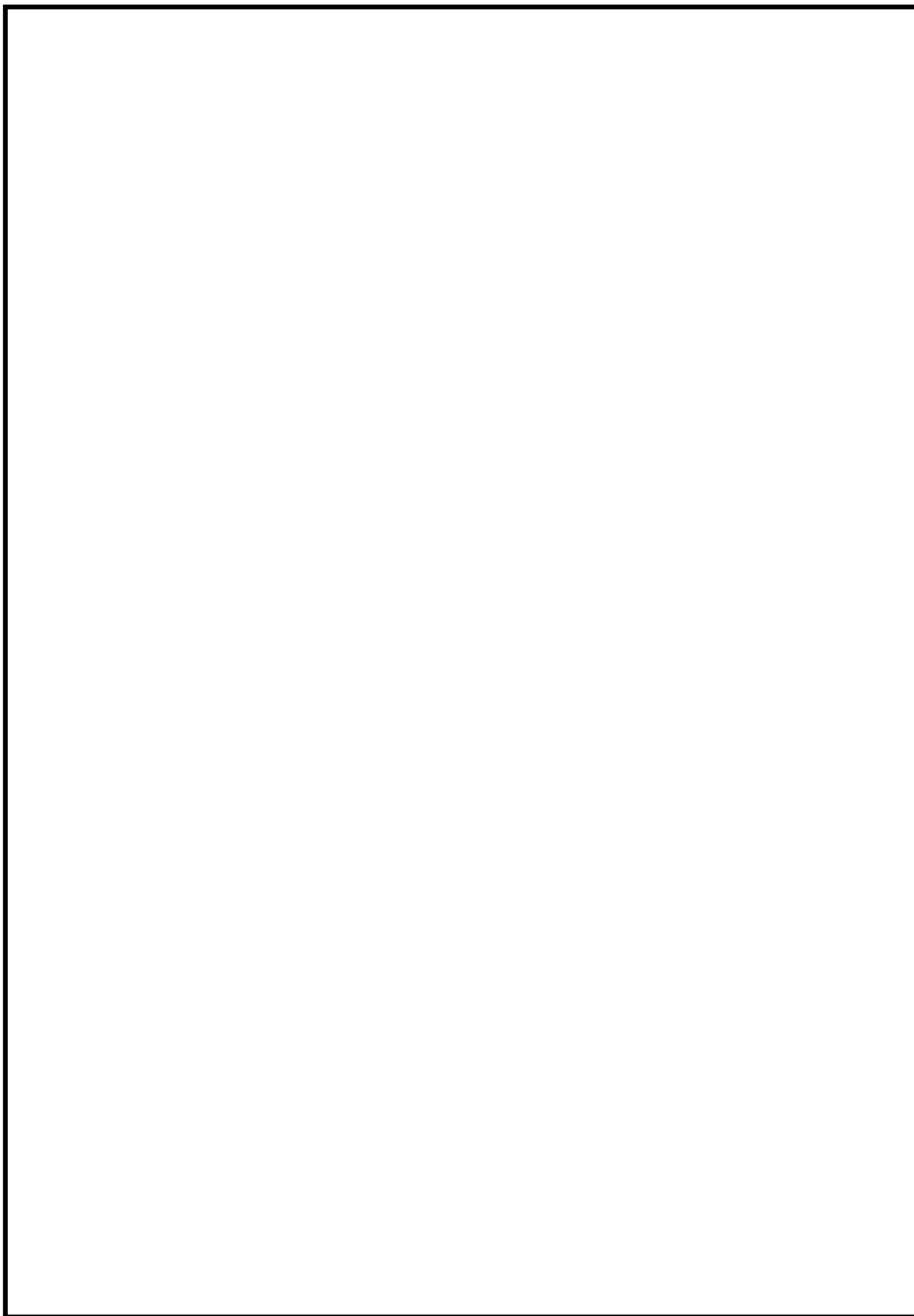


図 2-1 キヤスク容器及び中間胴の応力解析箇所

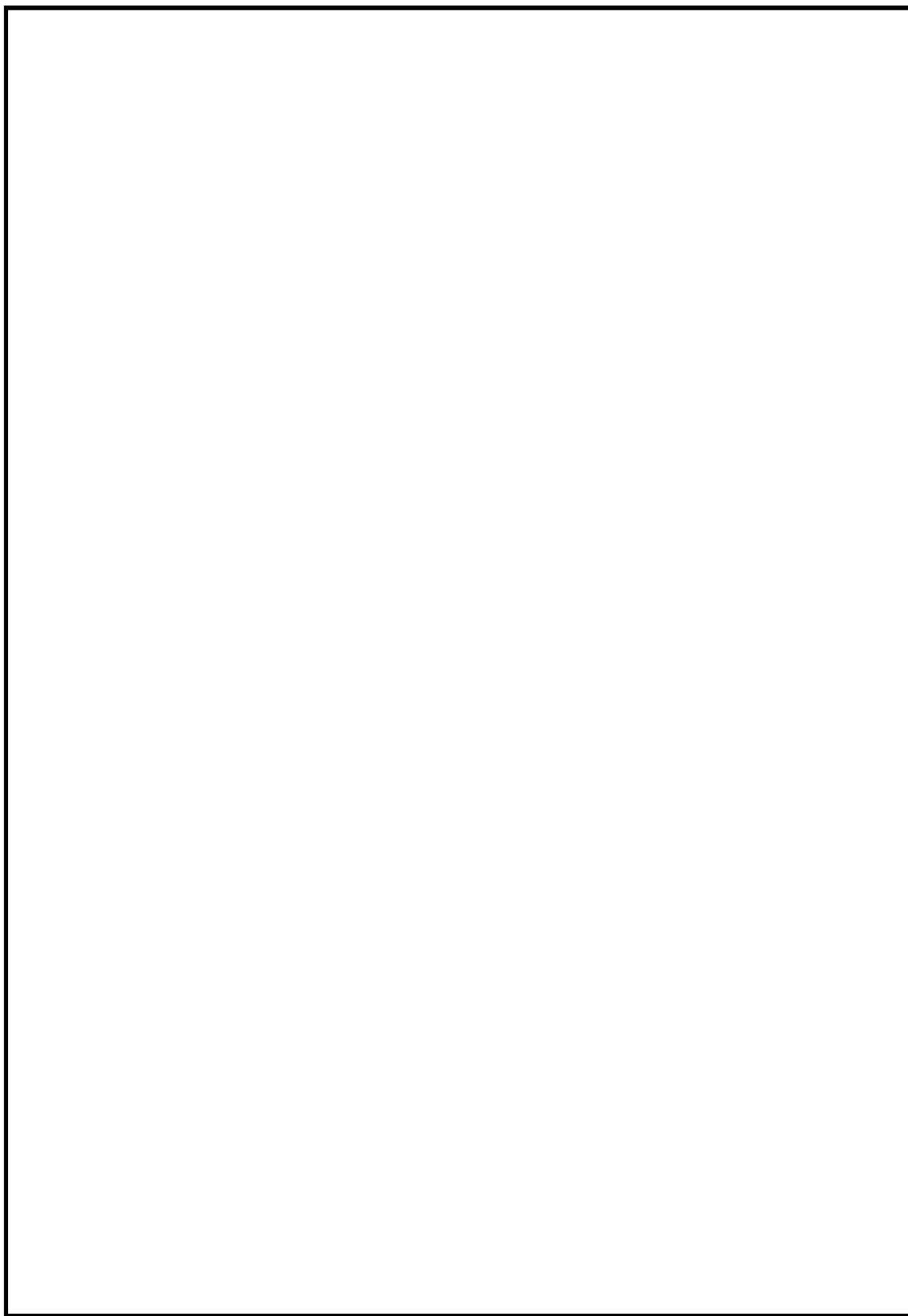


図 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）

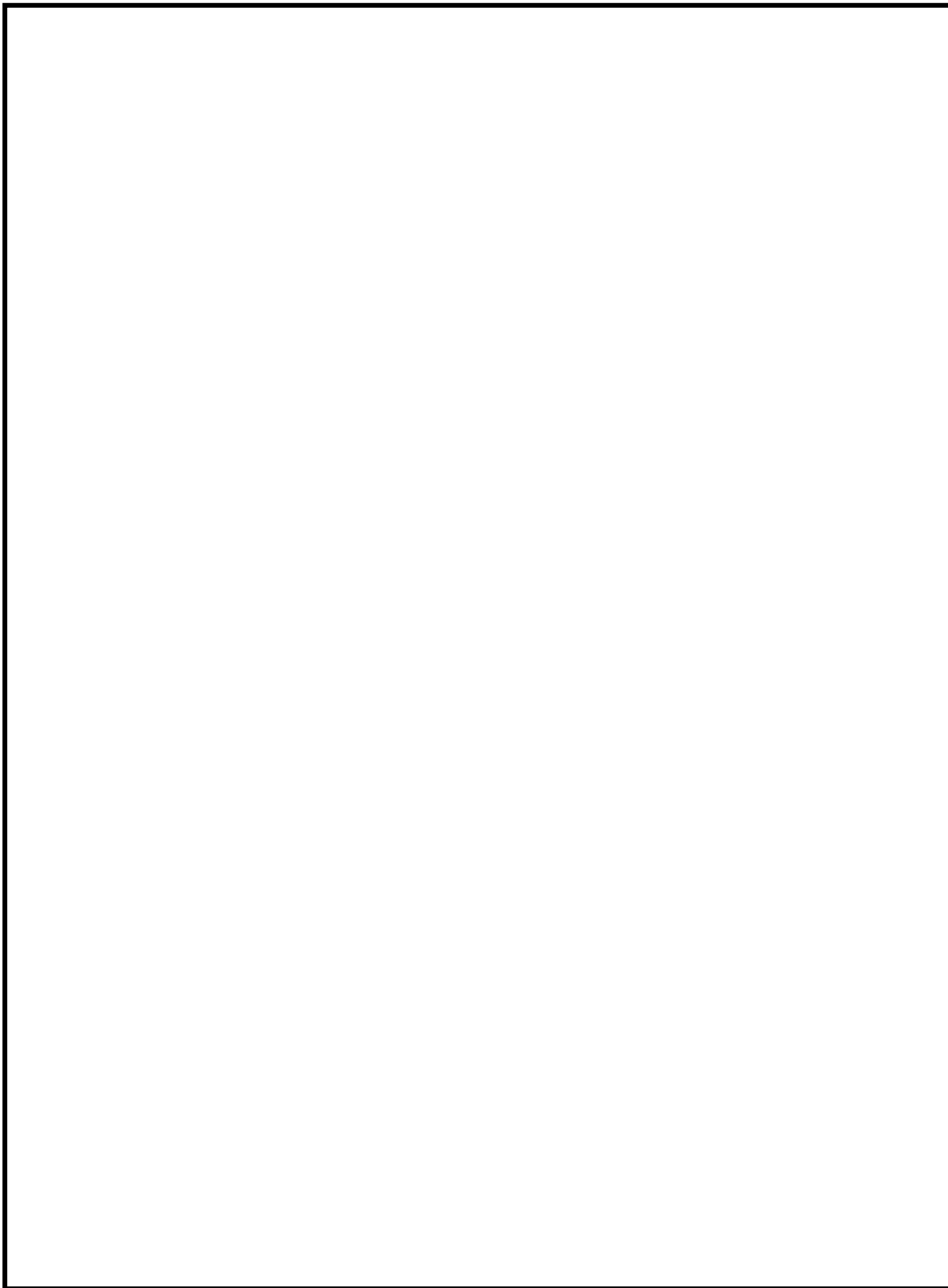


図 5-2 キャスク容器及び中間胴の解析モデル（地震時）

表 4-1 キヤスク容器用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許容応力値			
		オーステナイト系ステンレス鋼			
		密封シール部 以外の部位 ¹⁾		密封シール部	
		SUS 304 SUS F304	許容値 基準	SUS F304	許容値 基準
設計事象 I + S _d [*]	一次一般膜応力強さ P _m	162	1.2S _m	152	Min {S _y , 1.2S _m }
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P _L ＋P _b ⁴⁾	243	1.8S _m	152	S _y
	一次＋二次応力強さ P _L ＋P _b ＋Q ³⁾	405	3S _m	152	S _y
	純せん断応力 σ _s	81	0.6S _m		
	支圧応力 σ _p ²⁾	152 (228)	S _y (1.5S _y)		
設計事象 I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	278	Min {2.4S _m , 2/3S _u }	152	S _y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P _L ＋P _b ⁴⁾	418	Min {3.6S _m , S _u }	152	S _y
	一次＋二次応力強さ P _L ＋P _b ＋Q ³⁾	405	3S _m	152	S _y
	純せん断応力 σ _s	167	0.4S _u		
	支圧応力 σ _p ²⁾	418 (627)	S _u (1.5S _u)		

注記 1) : 底部プラグ溶接部の許容応力値は表に示される値の 1/2 とする。

2) : () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

3) : S_d^{*}又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。4) : P_Lの許容応力はP_L＋P_bの許容応力と同一とする。

表 4-2 キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許 容 応 力 値	
		合金鋼 SNB23-3	許 容 値 基 準
設計事象 $I + S_d^*$	平均引張応力	550	$2 S_m$
	平均引張応力+曲げ応力	825	$3 S_m$
設計事象 $I + S_s$	平均引張応力	825	S_y
	平均引張応力+曲げ応力	825	S_y

表 4-3 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許容応力値	
		オーステナイト系ステンレス鋼	
		SUS 304	許容値基準
設計事象 $I + S_d^*$	一次一般膜応力強さ P_m	162	$1.2 S_m$
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$ 3)	243	$1.8 S_m$
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q^{2)}$	405	$3 S_m$
	純せん断応力 σ_s	81	$0.6 S_m$
	支圧応力 $\sigma_p^{1)}$	152 (228)	$S_y (1.5 S_y)$
設計事象 $I + S_s$	一次一般膜応力強さ P_m	278	$\text{Min} \{2.4 S_m, 2/3 S_u\}$
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$ 3)	418	$\text{Min} \{3.6 S_m, S_u\}$
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q^{2)}$	405	$3 S_m$
	純せん断応力 σ_s	167	$0.4 S_u$
	支圧応力 $\sigma_p^{1)}$	418 (627)	$S_u (1.5 S_u)$

注記 1) : () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

2) : S_d^* 又は S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

3) : P_L の許容応力は $P_L + P_b$ の許容応力と同一とする。

表 4-4(1) 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUS304	許 容 値 基 準
設計事象 I + S _d * ¹⁾	一次 応力	引張応力	204	f_t
		圧縮応力	204	f_c
		せん断応力	117	f_s
		曲げ応力	204	f_b
		支圧応力	279	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 ²⁾	408	$2f_t$
		せん断応力 ²⁾	234	$2f_s$
		曲げ応力 ²⁾	408	$2f_b$
		支圧応力	279	f_p
		座屈応力	117	f_b, f_s 又は f_c

注記 1)：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力とせん断応力を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_t^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_n \cdot \sigma_t - \sigma_t \cdot \sigma_\theta - \sigma_\theta \cdot \sigma_n + 3\tau_{nt}^2 + 3\tau_{t\theta}^2 + 3\tau_{n\theta}^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{cc}|}{1.5f_c} + \frac{|c\sigma_{bb}|}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_{bb}| - |\sigma_{cc}|}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{tt}| + |t\sigma_{bb}|}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_{bb}| - |\sigma_{tt}|}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の $1.5 f_c$, $1.5 f_b$, $1.5 f_t$ は、 $3 f_c$, $3 f_b$, $3 f_t$ とする。

- 2)：S_d*地震力のみによる応力振幅について評価する。

表 4-4(2) 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUS304	許 容 値 基 準
設計事象 I + S _s ¹⁾	一次 応力	引張応力	204	f_t
		圧縮応力	204	f_c
		せん断応力	117	f_s
		曲げ応力	204	f_b
		支圧応力	279	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 ²⁾	408	$2f_t$
		せん断応力 ²⁾	234	$2f_s$
		曲げ応力 ²⁾	408	$2f_b$
		支圧応力	279	f_p
		座屈応力	117	f_b, f_s 又は f_c

注記 1)：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力とせん断応力を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_t^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_n \cdot \sigma_t - \sigma_t \cdot \sigma_\theta - \sigma_\theta \cdot \sigma_n + 3\tau_{nt}^2 + 3\tau_{t\theta}^2 + 3\tau_{n\theta}^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{cc}|}{1.5f_c} + \frac{|c\sigma_{bb}|}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_{bb}| - |\sigma_{cc}|}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{tt}| + |t\sigma_{bb}|}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_{bb}| - |\sigma_{tt}|}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力

の場合、分母の $1.5 f_c$ 、 $1.5 f_b$ 、 $1.5 f_t$ は、 $3 f_c$ 、 $3 f_b$ 、 $3 f_t$ とする。

2)：S_s地震力のみによる応力振幅について評価する。

表 5-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (1/5)
(貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
一 次 蓋	①	P _m							17	162
		P _L +P _b							7	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	①'	P _m							17	162
		P _L +P _b							27	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②	P _m							—	—
		P _L +P _b							20	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②'	P _m							—	—
		P _L +P _b							10	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
ボ 縮 一 ル 付 次 ト け 蓋	③	平均引張応力							211	550
		平均引張応力 +曲げ応力							218	825
内 胴	④	P _m							—	—
		P _L							45	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	④'	P _m							—	—
		P _L							45	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (2/5)
(貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
内 胴	⑤	P _m							62	162
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							15	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑤'	P _m							62	162
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							11	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥	P _m							—	—
		P _L							72	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							48	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥'	P _m							—	—
		P _L							72	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							62	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
上 部 フ ラ ン ジ	⑨	P _m							—	—
		P _L							32	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑨'	P _m							—	—
		P _L							32	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (3/5)
(貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合)

(単位: MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
上部 フランジ	⑩	P_m							—	—
		P_L							19	243
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑩'	P_m							—	—
		P_L							19	243
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底 板	⑪	P_m							30	162
		P_L+P_b							39	243
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							9	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	152
	⑪'	P_m							30	162
		P_L+P_b							23	243
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							14	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	152
	⑫	P_m							—	—
		P_L+P_b							36	243
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							34	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑫'	P_m							—	—
		P_L+P_b							29	243
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							31	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
シール 部	⑬	P_m							29	152
		P_L+P_b							48	152
		$P_L+P_b+Q^{(2)}$							2	152

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d *地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (4/5)

(貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合)

(単位: MPa)

部位	評価点 (面)	応 力 分 類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力						105	204
			圧縮応力						—	—
			せん断応力						2	117
			曲げ応力						79	204
			支圧応力						—	—
			垂直+せん断応力						93	204 ³⁾
			圧縮+曲げ応力						—	—
		一次+二次応力	引張+曲げ応力						79	204 ³⁾
			引張・圧縮応力 ²⁾						3	408
			せん断応力 ²⁾						3	234
			曲げ応力 ²⁾						3	408
			支圧応力						—	—
			座屈応力						—	—
			垂直+せん断応力 ²⁾						5	408 ³⁾
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						3	408 ³⁾
	⑭	一次応力	引張応力						125	204
			圧縮応力						—	—
			せん断応力						3	117
			曲げ応力						77	204
			支圧応力						—	—
			垂直+せん断応力						110	204 ³⁾
			圧縮+曲げ応力						—	—
		一次+二次応力	引張+曲げ応力						77	204 ³⁾
			引張・圧縮応力 ²⁾						10	408
			せん断応力 ²⁾						6	234
			曲げ応力 ²⁾						10	408
			支圧応力						—	—
			座屈応力						—	—
			垂直+せん断応力 ²⁾						12	408 ³⁾
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						10	408 ³⁾
	⑮	一次応力	引張応力						113	204
			圧縮応力						—	—
			せん断応力						7	117
			曲げ応力						107	204
			支圧応力						—	—
			垂直+せん断応力						110	204 ³⁾
			圧縮+曲げ応力						—	—
		一次+二次応力	引張+曲げ応力						107	204 ³⁾
			引張・圧縮応力 ²⁾						71	408
			せん断応力 ²⁾						14	234
			曲げ応力 ²⁾						71	408
			支圧応力						—	—
			座屈応力						—	—
			垂直+せん断応力 ²⁾						65	408 ³⁾
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						71	408 ³⁾

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力2) : S_d *地震力のみによる全振幅について示す。3) : $f_t = f_c = f_b$ であるので組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 5-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (5/5)
(貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
中間胴(キヤスク容器との溶接部近接部分)	⑦	P_m							—	—
		P_L							65	243
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							5	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑦'	P_m							—	—
		P_L							65	243
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧	P_m							—	—
		P_L							113	243
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							116	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧'	P_m							—	—
		P_L							113	243
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							36	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底部プラグ溶接部	⑱	P_m							68	81
		P_L							—	—
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							94	202
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力

2) : S_d^* 地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (1/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
一 次 蓋	①	P _m							17	278
		P _L +P _b							7	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	①'	P _m							17	278
		P _L +P _b							27	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②	P _m							—	—
		P _L +P _b							20	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②'	P _m							—	—
		P _L +P _b							10	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
ボ 縮 一 ル 付 次 ト け 蓋	③	平均引張応力							211	825
		平均引張応力 +曲げ応力							218	825
内 胴	④	P _m							—	—
		P _L							45	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	④'	P _m							—	—
		P _L							45	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (2/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
内 胴	⑤	P _m							62	278
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							15	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑤'	P _m							62	278
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							11	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥	P _m							—	—
		P _L							72	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							48	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥'	P _m							—	—
		P _L							72	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							62	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
上 部 フ ラ ン ジ	⑨	P _m							—	—
		P _L							32	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑨'	P _m							—	—
		P _L							32	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (3/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
上部 フランジ	⑩	P _m							—	—
		P _L							19	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑩'	P _m							—	—
		P _L							19	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底 板	⑪	P _m							30	278
		P _L +P _b							39	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							9	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	418
	⑪'	P _m							30	278
		P _L +P _b							23	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							14	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	418
	⑫	P _m							—	—
		P _L +P _b							36	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							34	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑫'	P _m							—	—
		P _L +P _b							29	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							31	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
シール 部	⑬	P _m							29	152
		P _L +P _b							48	152
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	152

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (4/5)

(貯蔵時: S_s 地震力が作用する場合)

(単位: MPa)

部位	評価点 (面)	応 力 分 類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力						105	204
			圧縮応力						—	—
			せん断応力						2	117
			曲げ応力						79	204
			支圧応力						—	—
			垂直+せん断応力						93	204 ³⁾
			圧縮+曲げ応力						—	—
			引張+曲げ応力						79	204 ³⁾
		一次+二次応力	引張・圧縮応力 ²⁾						3	408
			せん断応力 ²⁾						3	234
			曲げ応力 ²⁾						3	408
			支圧応力						—	—
			座屈応力						—	—
			垂直+せん断応力 ²⁾						5	408 ³⁾
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						3	408 ³⁾
		⑭	引張応力						125	204
			圧縮応力						—	—
			せん断応力						3	117
			曲げ応力						77	204
			支圧応力						—	—
			垂直+せん断応力						110	204 ³⁾
			圧縮+曲げ応力						—	—
			引張+曲げ応力						77	204 ³⁾
			引張・圧縮応力 ²⁾						10	408
			せん断応力 ²⁾						6	234
			曲げ応力 ²⁾						10	408
			支圧応力						—	—
			座屈応力						—	—
			垂直+せん断応力 ²⁾						12	408 ³⁾
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						10	408 ³⁾
		⑮	引張応力						113	204
			圧縮応力						—	—
			せん断応力						7	117
			曲げ応力						107	204
			支圧応力						—	—
			垂直+せん断応力						110	204 ³⁾
			圧縮+曲げ応力						—	—
			引張+曲げ応力						107	204 ³⁾
			引張・圧縮応力 ²⁾						71	408
			せん断応力 ²⁾						14	234
			曲げ応力 ²⁾						71	408
			支圧応力						—	—
			座屈応力						—	—
			垂直+せん断応力 ²⁾						65	408 ³⁾
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						71	408 ³⁾

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
2) : S_s 地震力のみによる全振幅について示す。
3) : $f_t = f_c = f_b$ 及び $f_t^* = f_c^* = f_b^*$ であるので組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 5-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (5/5)
(貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
中間胴(キヤスク容器との溶接部近接部分)	⑦	P_m							—	—
		P_L							65	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							5	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑦'	P_m							—	—
		P_L							65	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧	P_m							—	—
		P_L							113	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							116	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧'	P_m							—	—
		P_L							113	418
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							36	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底部プラグ溶接部	⑱	P_m							68	139
		P_L							—	—
		$P_L+P_b+Q^{2)}$							94	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s 地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-2 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
一 次 蓋	①－①’	P_m	17	162
	①	P_L+P_b	7	243
	①’		27	243
	①	P_L+P_b+Q	1	405
	①’		1	405
	②	P_L+P_b	20	243
	②’		10	243
	②	P_L+P_b+Q	2	405
	②’		1	405
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	211	550
		平均引張応力+ 曲げ応力	218	825
内 胴	④－④’	P_L	45	243
	④	P_L+P_b+Q	6	405
	④’		6	405
	⑤－⑤’	P_m	62	162
	⑤	P_L+P_b+Q	15	405
	⑤’		11	405
	⑥－⑥’	P_L	72	243
	⑥	P_L+P_b+Q	48	405
	⑥’		62	405

注記 1) : P_L+P_b+Q は S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
上部フランジ	⑨－⑨’	P_L	32	243
	⑨	P_L+P_b+Q	2	405
	⑨’		2	405
	⑩－⑩’	P_L	19	243
	⑩	P_L+P_b+Q	4	405
	⑩’		2	405
底 板	⑪－⑪’	P_m	30	162
		σ_P	1	152
	⑪	P_L+P_b	39	243
	⑪’		23	243
	⑪	P_L+P_b+Q	9	405
	⑪’		14	405
	⑫	P_L+P_b	36	243
	⑫’		29	243
	⑫	P_L+P_b+Q	34	405
	⑫’		31	405
密封シール部	⑬	P_m	29	152
		P_L+P_b	48	152
		P_L+P_b+Q	2	152
中間胴 （キヤスク容器との 溶接部近接部分）	⑦－⑦’	P_L	65	243
	⑦	P_L+P_b+Q	5	405
	⑦’		4	405
	⑧－⑧’	P_L	113	243
	⑧	P_L+P_b+Q	116	405
	⑧’		36	405
底部プラグ溶接部	⑰	P_m	68	81
		P_L+P_b+Q	94	202

注記 1）： P_L+P_b+Q は S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。（密封シール部を除く）

表 5-2 キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（3/3）

（単位：MPa）

部位	評価点 (面)	応 力 分 類		計 算 値	許容応力
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力	105	204
			圧縮応力	—	—
			せん断応力	2	117
			曲げ応力	79	204
			垂直応力+せん断応力	93	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	—	—
			引張応力+曲げ応力	79	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	3	408
			せん断応力 ¹⁾	3	234
			曲げ応力 ¹⁾	3	408
			座屈応力	—	—
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	5	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	3	408 ²⁾
	⑭	一次応力	引張応力	125	204
			圧縮応力	—	—
			せん断応力	3	117
			曲げ応力	77	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	—	—
			引張応力+曲げ応力	77	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	10	408
			せん断応力 ¹⁾	6	234
			曲げ応力 ¹⁾	10	408
			座屈応力	—	—
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	12	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	10	408 ²⁾
	⑮	一次応力	引張応力	113	204
			圧縮応力	—	—
			せん断応力	7	117
			曲げ応力	107	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	—	—
			引張応力+曲げ応力	107	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	71	408
			せん断応力 ¹⁾	14	234
			曲げ応力 ¹⁾	71	408
			座屈応力	—	—
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	65	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	71	408 ²⁾

注記 1) : S_d *地震力のみによる全振幅について示す。2) : $f_t=f_c=f_b$ であるので、組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 5-2 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1／3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
一 次 蓋	①－①’	P _m	17	278
	①	P _L +P _b	7	418
	①’		27	418
	①	P _L +P _b +Q	1	405
	①’		1	405
	②	P _L +P _b	20	418
	②’		10	418
	②	P _L +P _b +Q	2	405
	②’		1	405
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	211	825
		平均引張応力+ 曲げ応力	218	825
内 胴	④－④’	P _L	45	418
	④	P _L +P _b +Q	6	405
	④’		6	405
	⑤－⑤’	P _m	62	278
	⑤	P _L +P _b +Q	15	405
	⑤’		11	405
	⑥－⑥’	P _L	72	418
	⑥	P _L +P _b +Q	48	405
	⑥’		62	405

注記 1) : P_L+P_b+Q は S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
上部フランジ	⑨－⑨’	P _L	32	418
	⑨	P _L +P _b +Q	2	405
	⑨’		2	405
	⑩－⑩’	P _L	19	418
	⑩	P _L +P _b +Q	4	405
	⑩’		2	405
底 板	⑪－⑪’	P _m	30	278
		σ _P	1	418
	⑪	P _L +P _b	39	418
	⑪’		23	418
	⑪	P _L +P _b +Q	9	405
	⑪’		14	405
	⑫	P _L +P _b	36	418
	⑫’		29	418
	⑫	P _L +P _b +Q	34	405
	⑫’		31	405
密封シール部	⑬	P _m	29	152
		P _L +P _b	48	152
		P _L +P _b +Q	2	152
中間胴 （キヤスク容器との 溶接部近接部分）	⑦－⑦’	P _L	65	418
	⑦	P _L +P _b +Q	5	405
	⑦’		4	405
	⑧－⑧’	P _L	113	418
	⑧	P _L +P _b +Q	116	405
	⑧’		36	405
底部プラグ溶接部	⑲	P _m	68	139
		P _L +P _b +Q	94	202

注記 1）： P_L+P_b+Q は S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。（密封シール部を除く）

表 5-2 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3/3）

（単位：MPa）

部位	評価点 (面)	応 力 分 類		計 算 値	許容応力
中間胴 （キヤスク容器との溶接部近接部分を除く）	⑬	一次応力	引張応力	105	204
			圧縮応力	—	—
			せん断応力	2	117
			曲げ応力	79	204
			垂直応力+せん断応力	93	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	—	—
			引張応力+曲げ応力	79	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	3	408
			せん断応力 ¹⁾	3	234
			曲げ応力 ¹⁾	3	408
			座屈応力	—	—
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	5	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	3	408 ²⁾
	⑭	一次応力	引張応力	125	204
			圧縮応力	—	—
			せん断応力	3	117
			曲げ応力	77	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	—	—
			引張応力+曲げ応力	77	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	10	408
			せん断応力 ¹⁾	6	234
			曲げ応力 ¹⁾	10	408
			座屈応力	—	—
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	12	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	10	408 ²⁾
	⑮	一次応力	引張応力	113	204
			圧縮応力	—	—
			せん断応力	7	117
			曲げ応力	107	204
			垂直応力+せん断応力	110	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	—	—
			引張応力+曲げ応力	107	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	71	408
			せん断応力 ¹⁾	14	234
			曲げ応力 ¹⁾	71	408
			座屈応力	—	—
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	65	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	71	408 ²⁾

注記 1) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。2) : $f_t=f_c=f_b$ 及び $f_t^*=f_c^*=f_b^*$ であるので、組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 6-1 繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）

事 象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ s_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ s_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (－)
地震時	S_d^*	10000※	5	6	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000※	5	6	1.00×10^6	0.01
U（地震時）						0.02

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 6-2 繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）

事 象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ s_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ s_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (－)
地震時	S_d^*	10000※	1	2	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000※	1	2	1.00×10^6	0.01
U（地震時）						0.02

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 7-1 貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

設計事象	応力分類	貫通孔を無視した 場合の応力強さ (S)	貫通孔部の応力 (S _c)	許容応力
I + S _d [*]	P _L +P _b	27	81	243
	P _L +P _b +Q	2	6	405
I + S _s	P _L +P _b	27	81	418
	P _L +P _b +Q	2	6	405

V-2-4-2-3-1-2 バスケットの耐震性についての計算書
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	2
5. 応力計算	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	5
6. 評価結果	6
6.1 応力強さの評価	6
6.2 特別な応力の評価	6
6.2.1 純せん断応力	6
6.2.2 支圧応力	6
6.2.3 座屈応力	6

図表目次

図 2-1	バスケットの応力解析箇所	7
図 5-1	バスケットの応力評価点(面)	8
図 5-2(1)	バスケットの解析モデル (X方向の加速度が作用する場合)	9
図 5-2(2)	バスケットの解析モデル (Y方向の加速度が作用する場合)	10
図 5-3	サポートガイドの解析モデル	11
表 4-1	バスケット用材料の許容応力値	12
表 5-1	S_d *地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果	13
表 5-1	S_s 地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果	15
表 5-2	バスケットの応力評価 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合)	17
表 5-2	バスケットの応力評価 (貯蔵時: S_s 地震力が作用する場合)	18

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅠ）のバスケットに関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

バスケットの評価部位を行う箇所は次のとおりである(図 2-1 参照)。

- (1) チャンネル
- (2) サポートブロック
- (3) 補強板①
- (4) 補強板②
- (5) 仕切板
- (6) 底板
- (7) サポートガイド
- (8) サポートガイド溶接部

3. 計算方法

- (1) バスケット及びサポートガイドの応力計算は、想定される機械的荷重を基にバスケット及びサポートガイドの実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

解析コードの検証および妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS」に示す。

- (2) 応力計算は代表事象毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器の貯蔵時の設計重量を用いる。）、地震荷重をいう。

- (3) 計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化にあたっては、バスケットの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮し、1/2 形状の 2 次元平面固体要素及びはり要素による解析モデルとする。

b. 中性子吸収板は非構造強度部材としてモデルより除外する。

- (4) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

4. 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力 (x 方向)

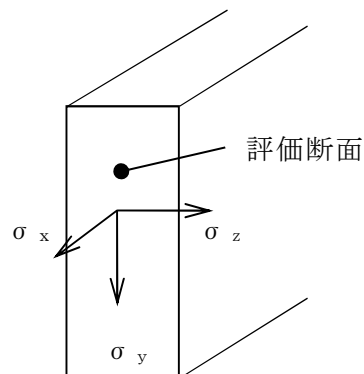
σ_y : 評価断面に平行な方向の応力 (y 方向)

σ_z : 評価断面に平行な方向の応力 (z 方向)

τ_{xy} : せん断応力

τ_{yz} : せん断応力

τ_{zx} : せん断応力



バスケット用材料の許容応力値を表 4-1 に示す。

(1) バスケット及びサポートガイドの応力評価

バスケット及びサポートガイドの応力評価は、設計・建設規格 CSS-3110 及び SSB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

a. 一次応力強さ

b. 特別な応力の検討

(a) 純せん断応力の評価

(b) 支圧応力の評価

(c) 座屈応力の評価

5. 応力計算

5.1 応力評価点

バスケットの応力評価点(面)を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力 + 自重

5.2.2 計算方法

(1) チャンネル, サポートブロック, 補強板及び仕切板

a. 一次応力強さ

(a) 鉛直方向(Z 方向)の加速度による応力

鉛直方向加速度により発生するバスケット軸方向の応力(σ_y)は次式で表される。

$$\sigma_y = -\rho \cdot G_1 \cdot L$$

ここで, ρ : 材料の密度 ($=2.70 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)

G_1 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

L : バスケット全長 ($=4495 \text{ mm}$)

他の応力成分は零である。

ただし, $G_1 = 9.81 + \alpha_v$

α_v : 鉛直方向設計加速度 ($=C_v g = 6.38 \text{ m/s}^2$)

(b) 水平方向(X 方向または Y 方向)の加速度による応力

解析コード「ABAQUS」の二次元平面固体(連続体)要素及びはり要素による解析モデルを図 5-2(1)及び図 5-2(2)に示す。

各部材間は相互の接触を考慮し, サポートブロックは内胴に設置されているサポートガイド接触面と接触境界を設けている。加速度は X 方向または Y 方向に作用されるものとし, その大きさは以下の通りとする。

X 方向加速度 : $G_2 (= \alpha_H)$

Y 方向加速度 : $G_3 (= \alpha_H)$

ただし, α_H : 水平方向設計加速度 ($=C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2$)

b. 支圧応力

水平方向加速度によりサポートブロックにおいてサポートガイドとの接触部に発生する平均支圧応力(σ_p)は次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{W \cdot \alpha_H}{4 \cdot A}$$

ここで、W : バスケット+使用済燃料(61 体)の質量 (=25200 kg)

A : サポートガイドとの接触面積 (=1.76×10⁵ mm²)

α_H : a. と同じ

c. 座屈応力

チャンネル及び仕切板に発生する圧縮応力は a. と同様にして求められる。

(2) サポートガイド

a. 一次応力強さ

解析コード「ABAQUS」の二次元平面固体(連続体)要素による解析モデルを図 5-3 に示す。

水平方向(X 方向または Y 方向)に加速度がバスケットに作用する場合、サポートガイド 1 個に作用する貯蔵容器軸方向単位長さ当たりの荷重は次式で与えられる。

$$F_X = \frac{W \cdot G_2}{4 \cdot L_S}$$

$$F_Y = \frac{W \cdot G_3}{4 \cdot L_S}$$

ここで、 F_X : X 方向荷重 (N/mm)

F_Y : Y 方向荷重 (N/mm)

W : バスケット+使用済燃料(61 体)の質量 (=25200 kg)

G_2 : X 方向加速度 (= α_H = 11.48 m/s²)

G_3 : Y 方向加速度 (= α_H = 11.48 m/s²)

L_S : サポートガイドの長さ (=4350 mm)

したがって、

$$F_X = 16.6 \text{ N/mm}, \quad F_Y = 16.6 \text{ N/mm}$$

内胴との溶接部(コーナー)を拘束する。

(3) サポートガイド溶接部

a. 平均せん断応力

サポートガイド溶接部において発生する平均せん断応力(σ_s)は次式で表される。

$$\sigma_s = \frac{W \cdot G_2}{4 \cdot A} \quad \text{または}$$

$$\sigma_s = \frac{W \cdot G_3}{4 \cdot A}$$

ここで, W, G_2, G_3 : (2)と同じ

A : サポートガイド溶接部の断面積 ($=4.31 \times 10^4 \text{mm}^2$)

(4) 底板

a. 支圧応力

底板底面に発生する平均支圧応力(σ_p)は次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{W \cdot G_1}{A}$$

ここで, W : (2)と同じ

G_1 : (1)と同じ

A : 底板底面のキャスク容器との接触面積 ($=1.17 \times 10^6 \text{mm}^2$)

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

6. 評価結果

6.1 応力強さの評価

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より、各設計事象の一次一般膜応力強さ(P_m)及び一次膜＋一次曲げ応力強さ($P_m + P_b$)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2 特別な応力の評価

6.2.1 純せん断応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より、各設計事象の平均せん断応力(σ_s)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.2 支圧応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より、各設計事象の平均支圧応力(σ_p)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.3 座屈応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より、各設計事象の座屈応力(σ_b)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

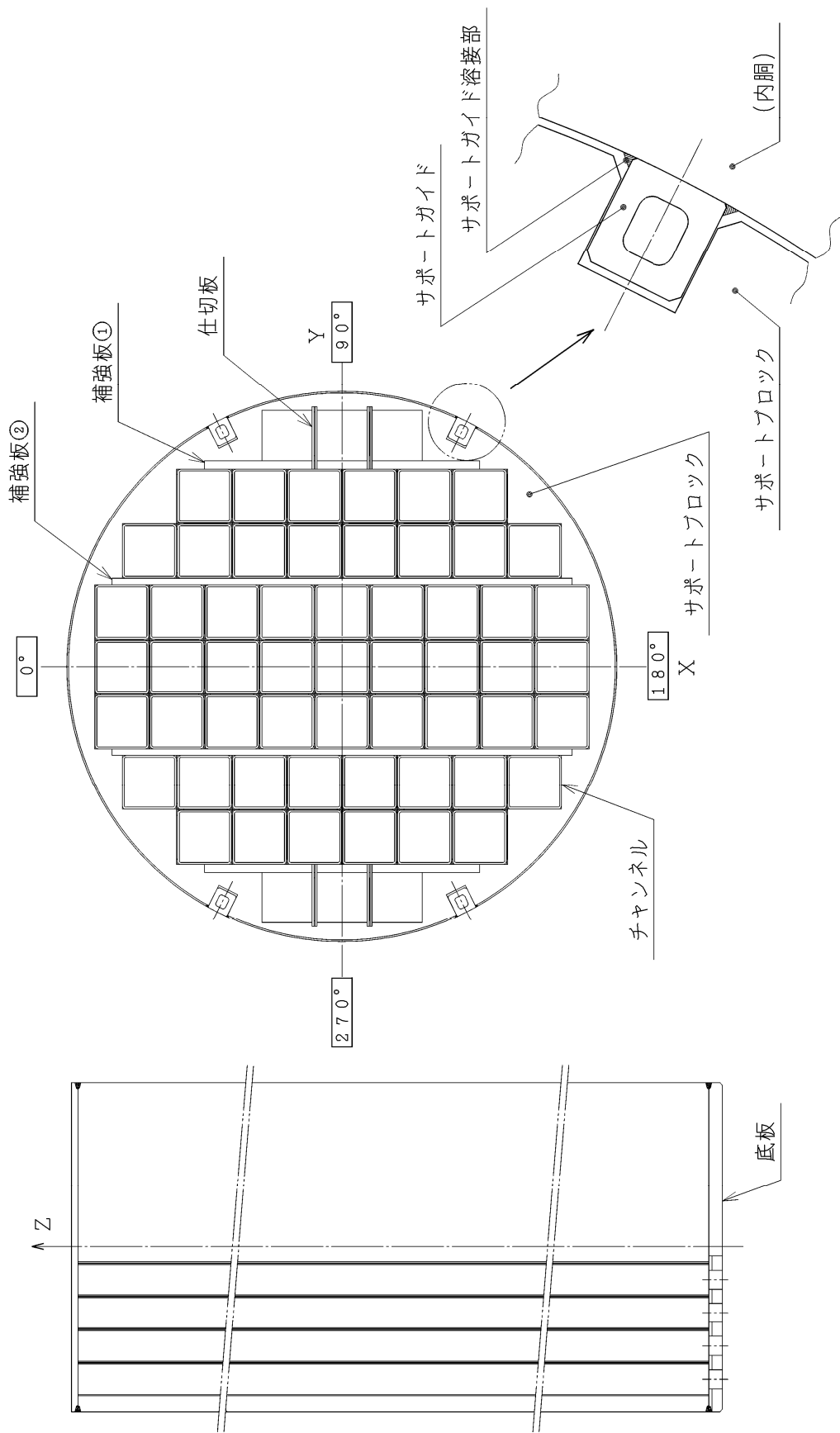


図 2-1 バスケットの応力解析箇所

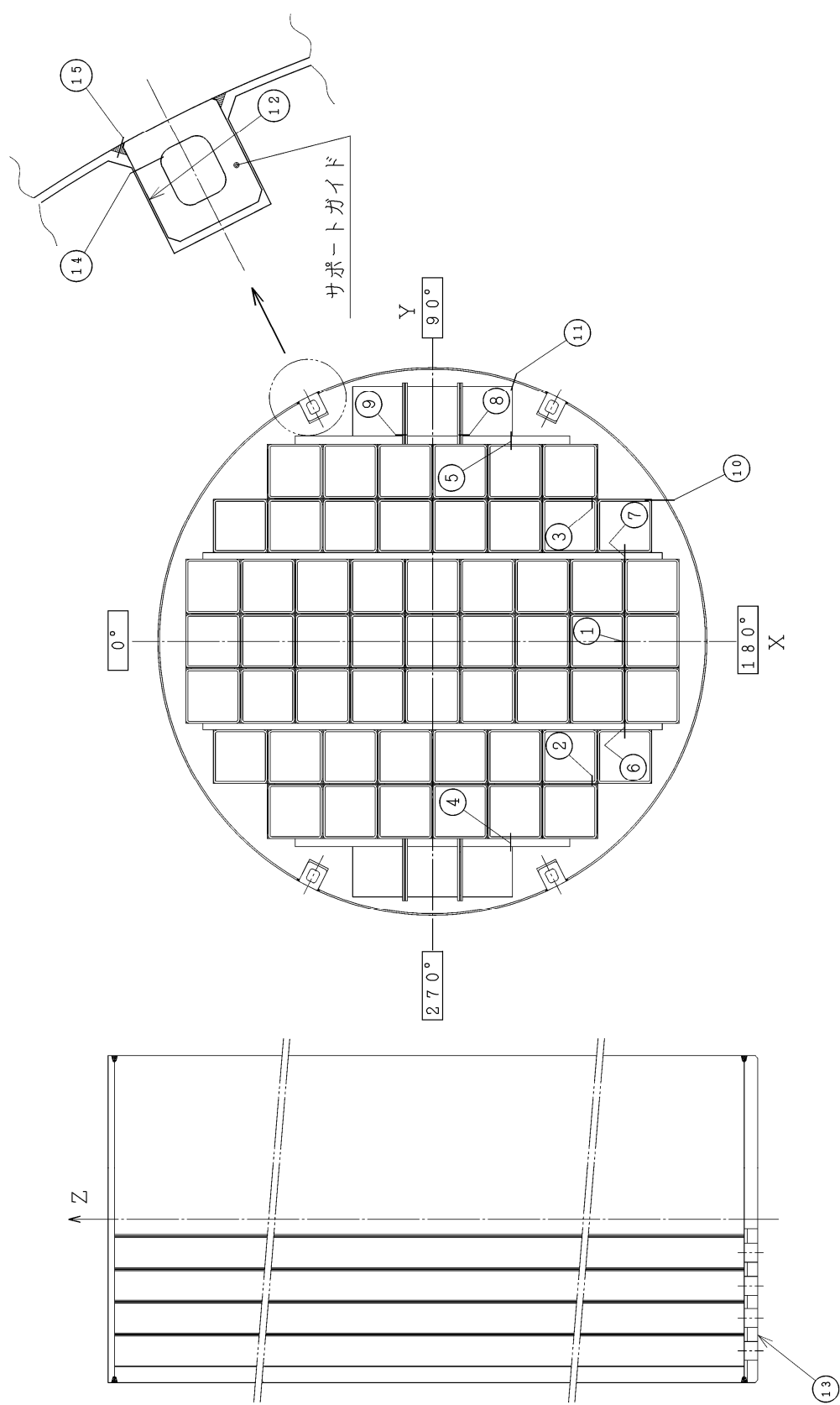
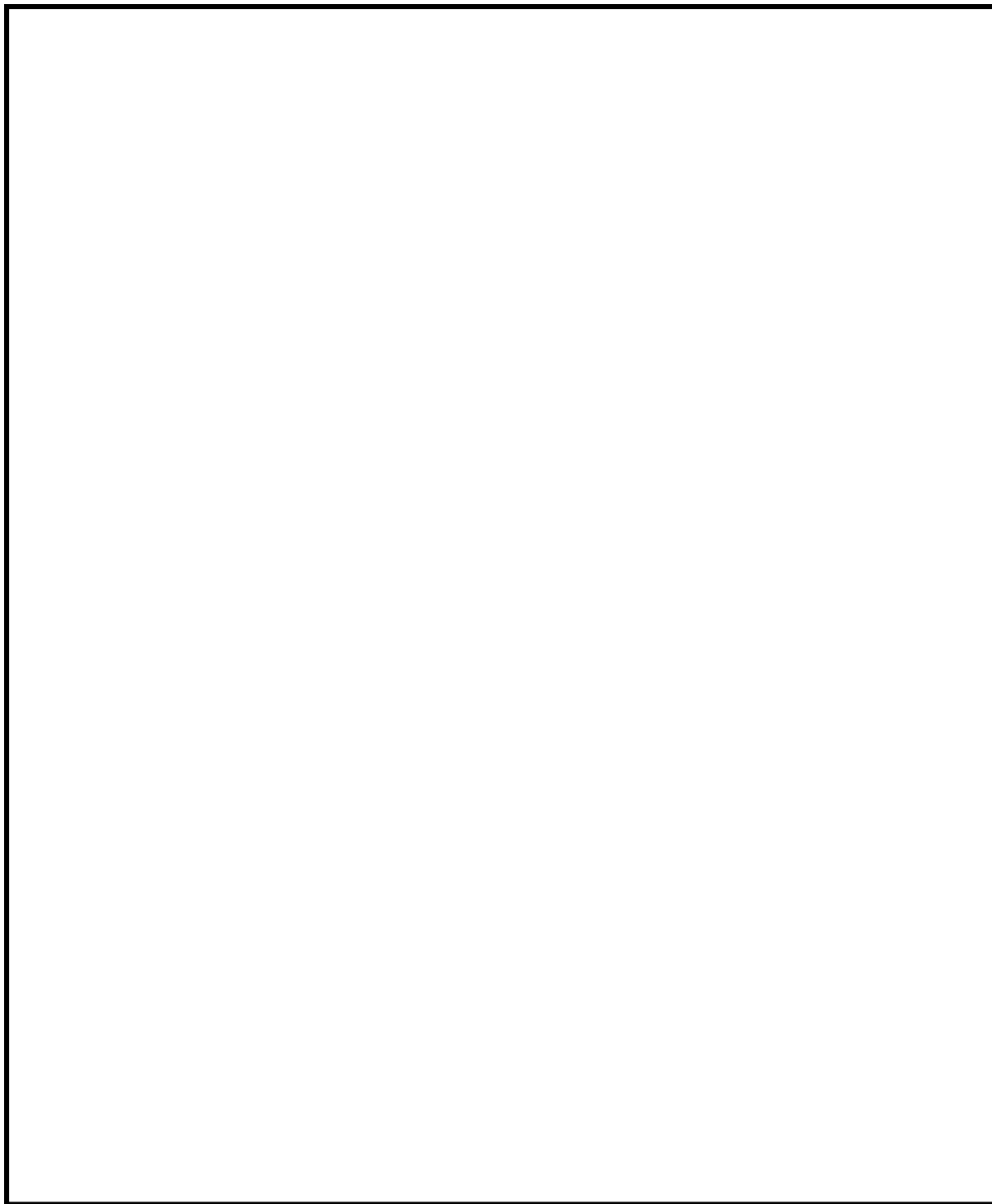
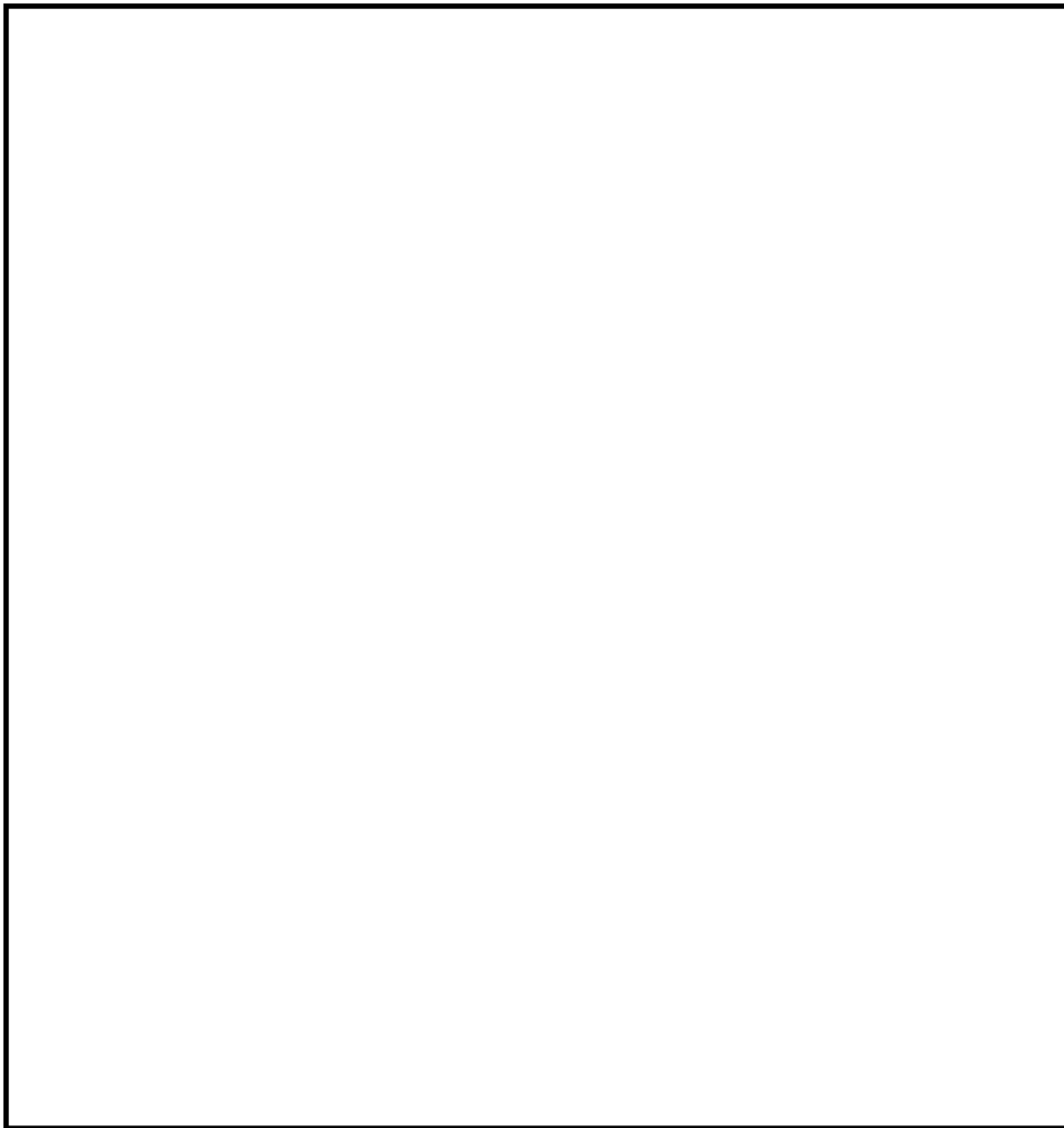


図 5-1 バスケットの応力評価点 (面)



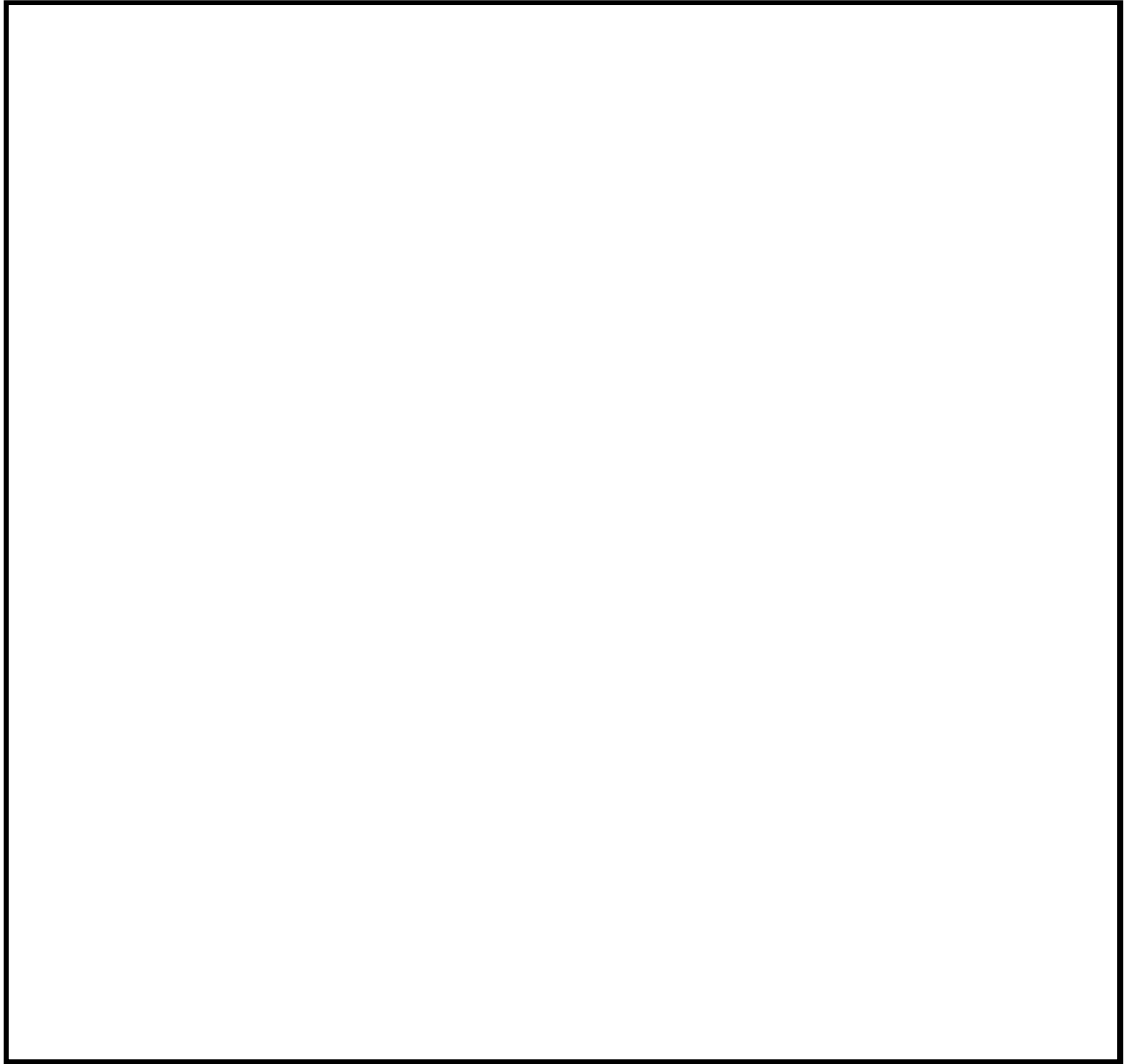
(単位：mm)

図 5-2(1) バスケットの解析モデル
(X方向の加速度が作用する場合)



(単位：mm)

図 5-2 (2) バスケットの解析モデル
(Y 方向の加速度が作用する場合)



(単位 : mm)

図 5-3 サポートガイドの解析モデル

表 4-1 バスケット用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許容応力値 (MPa)				
		アルミニウム合金 ²⁾		オーステナイト系ステンレス鋼		
		A5052TD -H34	A5083FH-0 ²⁾ 及び A5083P-0	許容値 基 準	SUS304 ²⁾	許容値 基 準
設計事象 I + S _d * I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m			1.5 S _m	202	1.5 S _m
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P _m ＋P _b			2.25 S _m	303	2.25 S _m
	純せん断応力 σ _s			0.9 S _m	121	0.9 S _m
	支圧応力 σ _p ¹⁾			1.5 S _y (2.25 S _y)	228 (342)	1.5 S _y (2.25 S _y)
	座屈応力 σ _b			1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c	117	1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c
設計事象 I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m			2/3 S _u	278	Min{2.4S _m , 2/3S _u }
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P _m ＋P _b			S _u	418	Min{3.6S _m , S _u }
	純せん断応力 σ _s			1.2 S _m	162	1.2 S _m
	支圧応力 σ _p ¹⁾			2 S _y (3 S _y)	304 (456)	2 S _y (3 S _y)
	座屈応力 σ _b			1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c	117	1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : ()内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

2) : サポートブロック内の周溶接は完全溶込み溶接とし、設計・建設規格 CSS-3150 に定められる検査の種類を A とするため、溶接効率は 1.0 である。また、サポートガイドと内胴との溶接は片側すみ肉溶接とし、設計・建設規格 CSS-3150 に定められる検査の種類を E とするため、溶接効率は 0.4 である。

表 5-1 S_d*地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (1/2)

(単位: MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
チ ャ ン ネ ル	P _m	①							1	
		②							1	
		③							1	
	P _m +P _b	①							3	
		②							2	
		③							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	①							1	
補 強 板 ①	P _m	④							1	
		⑤							1	
	P _m +P _b	④							2	
		⑤							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	—							—	
補 強 板 ②	P _m	⑥							1	
		⑦							1	
	P _m +P _b	⑥							4	
		⑦							4	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	—							—	
仕 切 板	P _m	⑧							1	
		⑨							1	
	P _m +P _b	⑧							2	
		⑨							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	⑨							1	

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 評価断面上のせん断応力

表 5-1 S_d^* 地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (2/2)
(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
サ ポ ー ト ブ ロ ッ ク	P_m	⑩							2	
		⑪							3	
	P_m+P_b	⑩							3	
		⑪							6	
	σ_s	—							—	
	σ_p	⑫							1	
	σ_b	—							—	
サ ポ ー ト ガ イ ド	P_m	⑭							4	202
	P_m+P_b	⑭							6	303
	σ_s	—							—	—
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
サ ポ ー ト ガ イ ド 溶 接 部	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	⑮							2	48
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
底 板	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	—							—	—
	σ_p	⑬							1	150
	σ_b	—							—	—

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 評価断面上のせん断応力

表 5-1 S_s地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (1/2)

(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
チ ャ ン ネ ル	P_m	①							1	
		②							1	
		③							1	
	P_m+P_b	①							3	
		②							2	
		③							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	①							1	
補 強 板 ①	P_m	④							1	
		⑤							1	
	P_m+P_b	④							2	
		⑤							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	—							—	
補 強 板 ②	P_m	⑥							1	
		⑦							1	
	P_m+P_b	⑥							4	
		⑦							4	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	—							—	
仕 切 板	P_m	⑧							1	
		⑨							1	
	P_m+P_b	⑧							2	
		⑨							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
	σ_b	⑨							1	

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 評価断面上のせん断応力

表 5-1 S_s地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (2/2)

(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
サ ポ ー ト ブ ロ ッ ク	P_m	⑩							2	
		⑪							3	
	P_m+P_b	⑩							3	
		⑪							6	
	σ_s	—							—	
	σ_p	⑫							1	
	σ_b	—							—	
サ ポ ー ト ガ イ ド	P_m	⑭							4	278
	P_m+P_b	⑭							6	418
	σ_s	—							—	—
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
サ ポ ー ト ガ イ ド 溶 接 部	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	⑮							2	64
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
底 板	P_m	—							—	—
	P_m+P_b	—							—	—
	σ_s	—							—	—
	σ_p	⑬							1	200
	σ_b	—							—	—

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 評価断面上のせん断応力

表 5-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
チャンネル	P_m	①	1	
	P_m+P_b	①	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	①	1	
補強板①	P_m	⑤	1	
	P_m+P_b	⑤	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
補強板②	P_m	⑥	1	
	P_m+P_b	⑥	4	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
仕切板	P_m	⑨	1	
	P_m+P_b	⑨	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	⑨	1	
サポートブロック	P_m	⑪	3	
	P_m+P_b	⑪	6	
	σ_s	—	—	
	σ_p	⑫	1	
	σ_b	—	—	
サポートガイド	P_m	⑭	4	202
	P_m+P_b	⑭	6	303
	σ_s	—	—	—
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
サポートガイド 溶接部	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	⑮	2	48
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
底 板	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	—	—	—
	σ_p	⑬	1	150
	σ_b	—	—	—

表 5-2 バスケットの応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
チャンネル	P_m	①	1	
	P_m+P_b	①	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	①		
補強板①	P_m	⑤	1	
	P_m+P_b	⑤	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
補強板②	P_m	⑥	1	
	P_m+P_b	⑥	4	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
仕切板	P_m	⑨	1	
	P_m+P_b	⑨	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	⑨		
サポートブロック	P_m	⑪	3	
	P_m+P_b	⑪	6	
	σ_s	—	—	
	σ_p	⑫	1	
	σ_b	—	—	
サポートガイド	P_m	⑭	4	278
	P_m+P_b	⑭	6	418
	σ_s	—	—	—
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
サポートガイド 溶接部	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	⑮	2	64
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
底板	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	—	—	—
	σ_p	⑬	1	200
	σ_b	—	—	—

V-2-4-2-3-1-3 トラニオンの耐震性についての計算書
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	1
5. 応力計算	2
5.1 応力評価点	2
5.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）	2
5.2.1 荷重条件	2
5.2.2 計算方法	2
5.2.3 計算結果	3
6. 評価結果	4
6.1 一次応力の評価	4
6.2 一次＋二次応力の評価	4
6.3 組合せ応力の評価	4

図表目次

図 2-1	トラニオンの応力解析箇所	5
図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	6
表 4-1	トラニオン用材料の許容応力値	7
表 5-1	トラニオンの応力評価 （貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	8

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅠ）のトラニオンに関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

トラニオンの評価部位は、次のとおりである（図 2-1 参照）。

(1) トラニオン

3. 計算方法

(1) トラニオンの応力計算は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

(2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(3) 貯蔵時においては、地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は、下部トラニオン 4 個で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(4) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

4. 応力評価

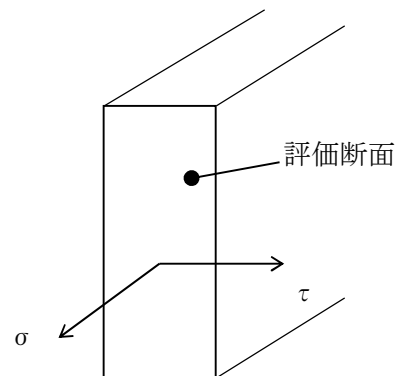
応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力

トラニオン用材料の許容応力値を表 4-1 に示す。



(1) トラニオンの応力評価

トラニオンの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-2-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

5. 応力計算

5.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点(面)を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重

5.2.2 計算方法

(1) 一次応力

a. セン断応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は、次式で表わされる(図 5-1 参照)。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_W}{A} \\ F_W &= \frac{W \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_3 \cdot a_2)}{\frac{2a_2^2}{a_1} + a_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $G_1 = \alpha_H$ 、 $G_3 = 9.81 - \alpha_V$

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (=2870 mm)

a_1 : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
(=2077.5 mm)

a_2 : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの
距離 (=949.5mm)

F_W : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 ($=1.19 \times 10^6$ N)

W : 貯蔵容器の質量 (=118000 kg)

A : 図 5-1 の評価点①の断面積 ($=1.75 \times 10^4$ mm²)

α_H : 水平方向設計加速度 ($=C_H g = 11.48$ m/s²)

α_V : 鉛直方向設計加速度 ($=C_V g = 6.38$ m/s²)

b. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点④である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で表わされる。

$$\sigma_b = \frac{F_w \cdot L}{Z} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで, F_w : (5.1)式と同じ

Z : 図 5-1 の評価点④の断面係数(=1.04×10⁶ mm³)

L : 図 5-1 の評価点④と荷重作用位置との距離(=184.5 mm)

c. 支圧応力

応力が発生する箇所は, 図 5-1 の下部トラニオンの評価点⑤である。トラニオン固定金具によって生じる支圧応力は (σ_p) は, 次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{F_w}{A_5} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで,

F_w : (5.1)式と同じ

A_5 : 評価点⑤に接触するトラニオン固定金具の投影面積 (=1.94×10³ mm²)

d. 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は, 次式で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで,

σ_b : (5.2)式と同じ

τ : (5.1)式と同じ

(2) 一次+二次応力

a. せん断応力

せん断応力の全振幅(τ)は, (5.1) 式と同様に与えられる。

b. 曲げ応力

曲げ応力の全振幅(σ_b)は, (5.2)式と同様に与えられる。

c. 支圧応力

支圧応力の全振幅 (σ_p) は, (5.3)式と同様に与えられる。

d. 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は, (5.4)式と同様に与えられる。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

6. 評価結果

6.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2 一次＋二次応力の評価

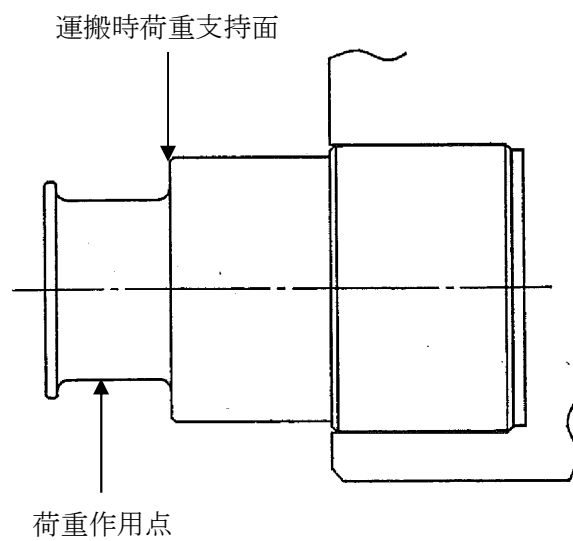
各設計事象における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各設計事象の一次＋二次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.3 組合せ応力の評価

各設計事象における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より、地震時における組合せ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。



下部トラニオン

注記) 貯蔵時に地震力が作用する場合は、下部トラニオンのみで荷重を支持する。

図 2-1 トラニオンの応力解析箇所

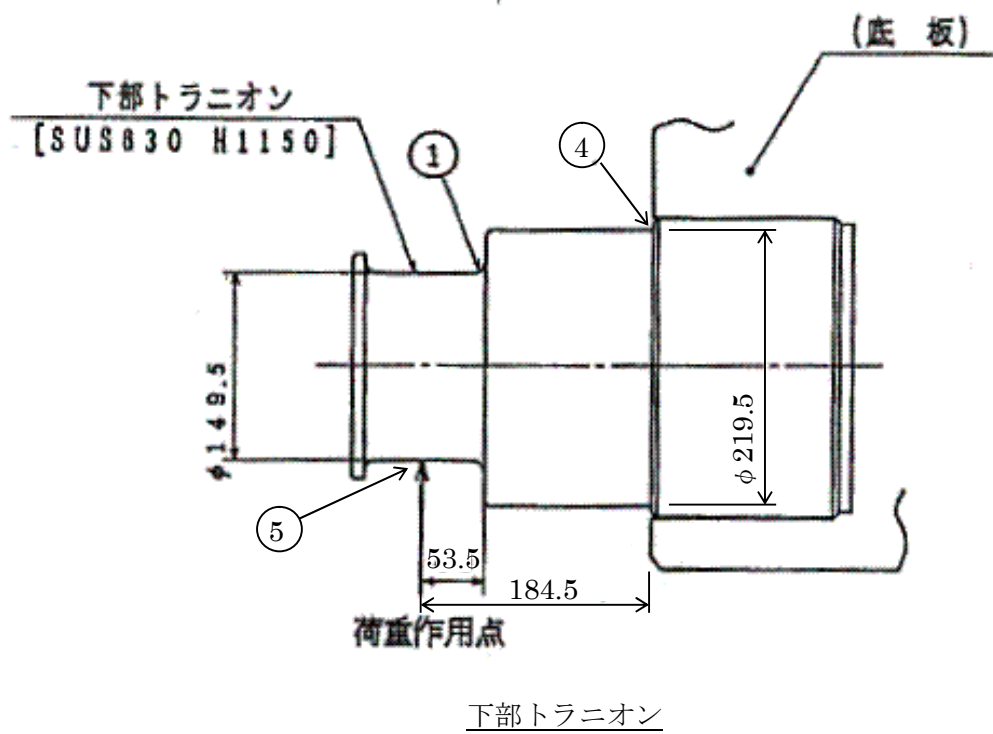


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点（面）

表 4-1 トラニオン用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許容応力値 (MPa)	
			析出硬化ステンレス鋼	
			SUS630 H1150	許 容 値 基 準
I + S _d * ¹⁾	一 次 応 力	引張応力	588	f_t
		圧縮応力	570	f_c
		せん断応力	339	f_s
		曲げ応力	588	f_b
		支圧応力	801	f_p
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 ²⁾	1176	$2f_t$
		せん断応力 ²⁾	678	$2f_s$
		曲げ応力 ²⁾	1176	$2f_b$
		支圧応力	801	f_p
		座屈応力	339	f_b, f_s 又は f_c
I + S _s ¹⁾	一 次 応 力	引張応力	588	f_t
		圧縮応力	570	f_c
		せん断応力	339	f_s
		曲げ応力	588	f_b
		支圧応力	801	f_p
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 ²⁾	1176	$2f_t$
		せん断応力 ²⁾	678	$2f_s$
		曲げ応力 ²⁾	1176	$2f_b$
		支圧応力	801	f_p
		座屈応力	339	f_b, f_s 又は f_c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c} + \frac{| \sigma_b |}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{| \sigma_b | - |\sigma_c|}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + | \sigma_b |}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{| \sigma_b | - |\sigma_t|}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、I + S_d*の一次応力については上式による。

I + S_sの一次応力の場合、分母の 1.5 f_c 、1.5 f_b 、1.5 f_t は、1.5 f_c^* 、1.5 f_b^* 、1.5 f_t^* とする。一次+二次応力の場合、分母の 1.5 f_c 、1.5 f_b 、1.5 f_t は、3 f_c 、3 f_b 、3 f_t とする。

- 2) : 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-1 トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類		S_d *地震力		S_s 地震力		許容応力
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
下部 トラニオン	一次 応力	せん断応力	68	①	68	①	339
		曲げ応力	212	④	212	④	588
		支圧応力	614	⑤	614	⑤	801
		組合せ応力	243	④	243	④	588
	1) 一次＋二次 応力	せん断応力	68	①	68	①	678
		曲げ応力	212	④	212	④	1176
		支圧応力	614	⑤	614	⑤	801
		組合せ応力	243	④	243	④	1176

注記 1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-1-4 支持構造物の耐震性についての計算書
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	1
5. 応力計算	2
5.1 応力評価点	2
5.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）	2
5.2.1 荷重条件	2
5.2.2 計算方法	2
5.2.3 計算結果	6
6. 応力の評価	7
6.1 一次応力の評価	7
6.2 一次＋二次応力の評価	7
6.3 組合せ応力の評価	7

図表目次

図 2-1	支持構造物の応力解析箇所	8
図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点(面)	9
図 5-2	地震時に作用する荷重の計算モデル	10
表 4-1	支持構造物用材料の許容応力値	11
表 4-2	支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値	13
表 5-1	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	14
表 5-2	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	15

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅠ）の支持構造物に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

支持構造物の評価部位は次のとおりである。（図 2-1 参照）

- (1) 支持台座
- (2) トラニオン固定金具
- (3) 容器押え金具
- (4) トラニオン固定ボルト
- (5) リブ
- (6) アンカーボルト

3. 計算方法

- (1) 支持構造物の応力解析は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。
- (2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

- (3) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向、下方向、水平方向荷重は、それぞれトラニオン固定金具、支持台座、容器押え金具で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

- (4) 構造の不連続性を考慮して応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、応力計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

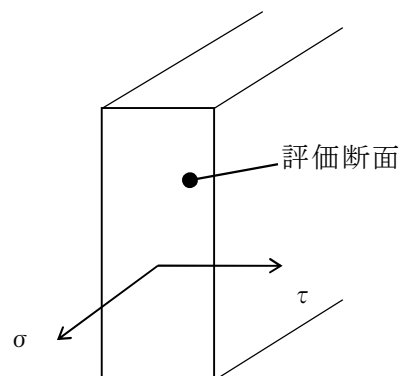
4. 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）の応力評価

支持構造物の応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3130 に従い添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重

5.2.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押え金具及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力（ F_1 ）は、図 5-2 に示す支持台①に生じ、次式により与えられる。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2a_2^2}{a_1} + a_1} W_C \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $G_1 = \alpha_H$ 、 $G_2 = 9.81 - \alpha_V$
 α_H : 水平方向設計加速度（ $=C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2$ ）
 α_V : 鉛直方向設計加速度（ $=C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$ ）
 h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ（ $=2870 \text{ mm}$ ）

a_1 : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
(=2077.5 mm)

a_2 : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離
(=949.5 mm)

W_c : 貯蔵容器質量 (=118000 kg)

この引張力(F_1)によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力(σ_t)は次式で表わされる。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで, F_1 : 引張力 (= 1.19×10^6 N)

n : トラニオン固定金具1組当たりのボルトの本数 (=2)

A : トラニオン固定ボルト(M45)の断面積 (= 1.59×10^3 mm²)

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)により曲げ応力(σ_b)が発生し, 次式により与えられる。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} F_1 \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで, F_1 : 引張力 (= 1.19×10^6 N)

L : トラニオン固定ボルト間距離 (=245 mm)

Z : トラニオン固定金具の断面係数 (= 1.53×10^5 mm³)

b. 一次+二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は, (5.3)式と同様に与えられる。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は, 次式により与えられる。

$$\sigma_t = F_1 / A \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで, F_1 : 引張力 (= 1.19×10^6 N)

A : 断面積 (= 5.29×10^4 mm²)

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(F_c)は支持台③に生じ, 次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \times (W_c + W_s) + 2F_2 + F_1 \cdots \cdots \cdots (5.5)$$

ここで, $G_1 = \alpha_H$, $G_2 = 9.81 + \alpha_v$

α_H : 5.2.2 項(1)a. と同じ

α_v : 5.2.2 項(1)a. と同じ

W_c : 貯蔵容器質量 (=118000 kg)

W_s : 支持台 1 個の質量 (=700 kg)

F_1 : (5.1)式と同じ (=1.19×10⁶ N)

F_2 : 支持台②での引張力 (= $\frac{a_2}{a_1} F_1 = 5.44 \times 10^5$ N)

a_1 : 5.2.2 項(1)a. と同じ

a_2 : 5.2.2 項(1)a. と同じ

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = F_c / A \cdots \cdots \cdots (5.6)$$

ここで, F_c : 圧縮力 (=4.20×10⁶ N)

A : 断面積 (=5.29×10⁴ mm²)

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は, 次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \cdots \cdots \cdots (5.7)$$

ここで, σ_t : 5.2.2 項(3)a. (a) と同じ

σ_c : 5.2.2 項(3)a. (b) と同じ

(4) アンカーボルト

a. 引張応力

(5.1)式により与えられる引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式により与えられる。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \cdots \cdots \cdots (5.8)$$

ここで, F_1 : (5.1)式と同じ (=1.19×10⁶ N)

n : 支持台 1 個当たりのアンカーボルトの本数 (=6)

A : アンカーボルト(M36)の断面積 (=1.01×10³ mm²)

b. セン断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は支持台③に生じ, 次式により与えられる。

$$F_H = \alpha_H \cdot (W_c + W_s) \cdots \cdots \cdots (5.9)$$

ここで, α_H : 5.2.2 項(1)a. と同じ

W_c, W_s : 5.2.2 項(3)a. (b) と同じ

この水平力(F_H)によりアンカーボルトに発生するせん断応力(τ)は, 次式で表

わされる。

$$\tau = F_H / (n \cdot A) \dots\dots\dots (5.10)$$

ここで, F_H : 水平力 ($=1.36 \times 10^6$ N)

n, A : 5.2.2 項(4)a. と同じ

(5) 容器押え金具

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押え金具に作用する最大水平力(F_H)は支持台③に生じ, 次式により与えられる。

$$F_H = \alpha_H \cdot W_c \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで, α_H : 5.2.2 項(1)a. と同じ

W_c : 5.2.2 項(3)a. (b) と同じ

水平力(F_H)より容器押え金具に発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = F_H / (n \cdot A) \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで, F_H : 水平力 ($=1.35 \times 10^6$ N)

n : 支持台 1 個当たりの容器押え金具の本数 (=2)

A : 容器押え金具の断面積 ($=1.78 \times 10^3$ mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は, (5.12)式と同様に与えられる。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は支持台③に生じ, 次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \times W_c + 2F_2 + F_1 \dots\dots\dots (5.13)$$

ここで, $G_1 = \alpha_H$, $G_2 = 9.81 + \alpha_v$

α_H, α_v : 5.2.2 項(1)a. と同じ

W_c : 5.2.2 項(3)a. (b) と同じ

F_1, F_2 : 5.2.2 項(3)a. (b) と同じ

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で表わされる。

$$\sigma_p = F_c / A \dots\dots\dots (5.14)$$

ここで, F_c : 圧縮力 ($=4.19 \times 10^6$ N)

A : 支持台座のキャスク容器底面接触面積 ($=1.18 \times 10^5$ mm²)

b. 一次＋二次応力

(a) 支圧応力

地震力のみによる支圧応力の全振幅(σ_p)は(5.14)式と同様に与えられる。

5.3.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

6. 応力の評価

6.1 一次応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，一次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2 一次＋二次応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，一次＋二次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.3 組合せ応力の評価

各設計事象において，組合せ応力の評価はない。

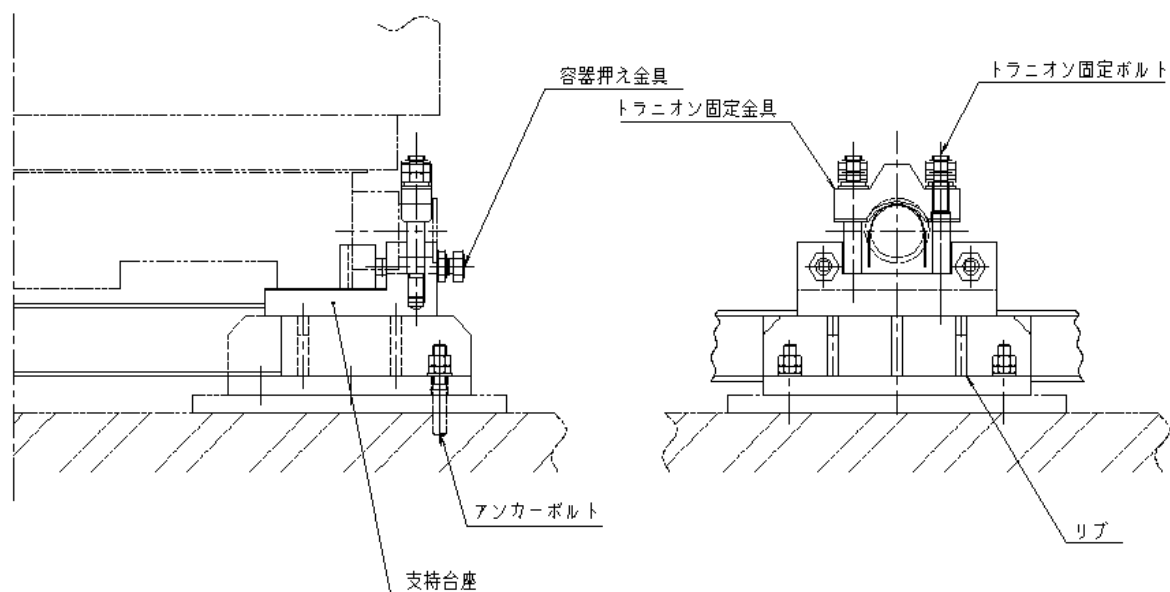
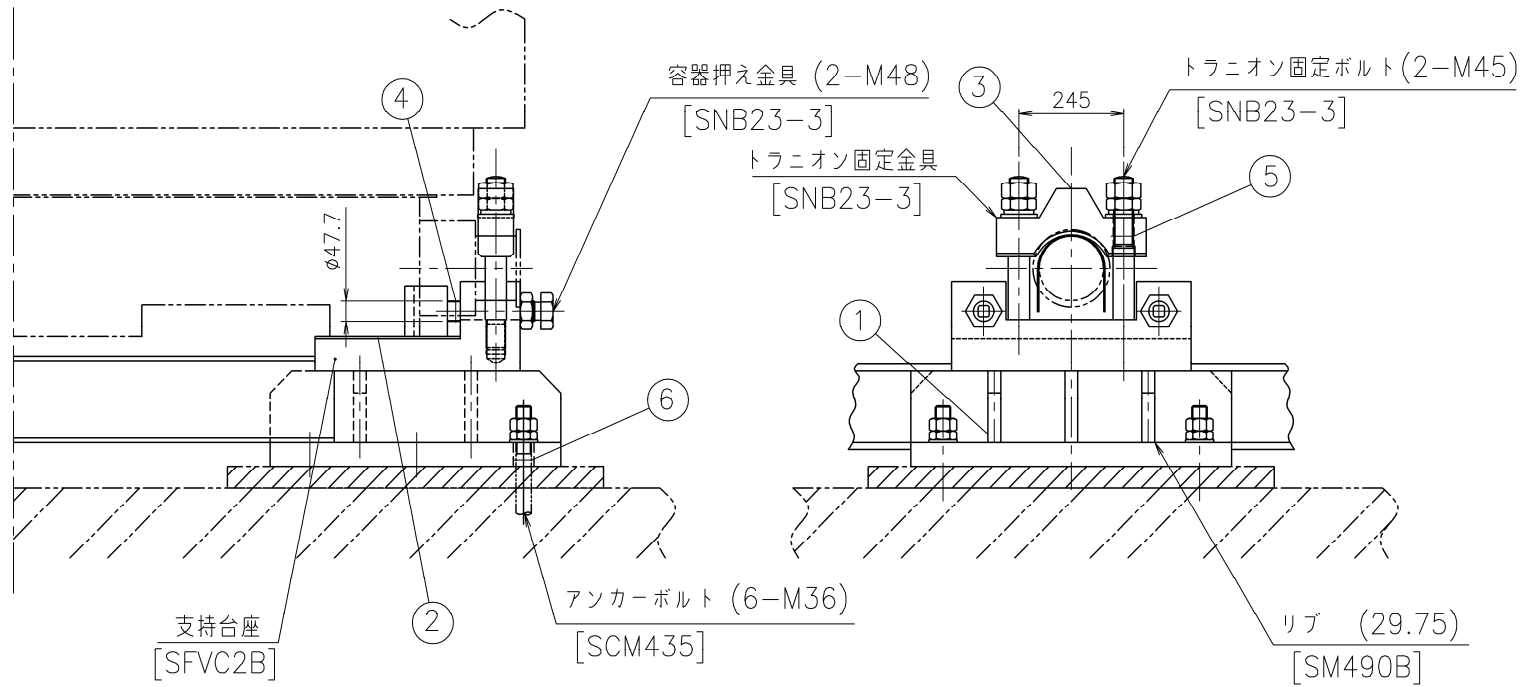


図 2-1 支持構造物の応力解析箇所

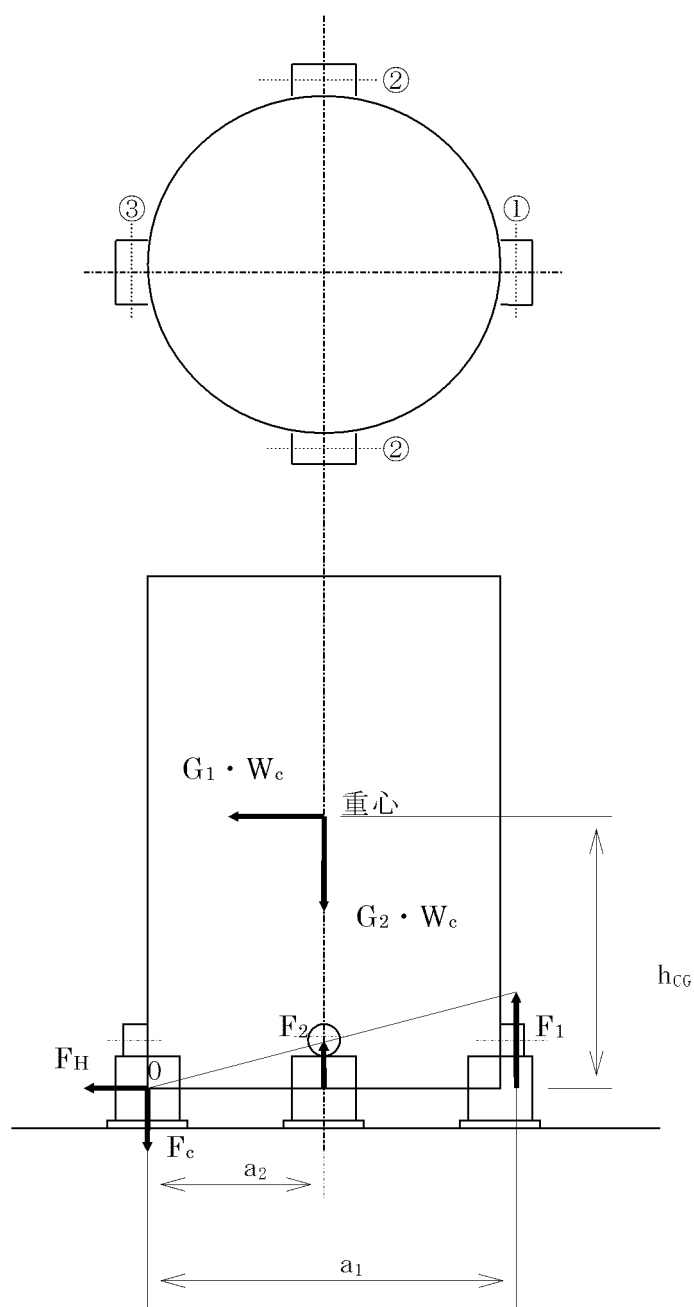


(単位: mm)

[]: 材料

①～⑥: 応力評価点

図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点(面)



○：支持台番号

図 5-2 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 4-1 (1) 支持構造物用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値 (MPa)				許容値基準
			炭素鋼		合金鋼	合金鋼	
			リ ブ	支持台座	トラン 固定金具	容器押え 金具	
			SM490B	SFVC2B	SNB23-3	SNB23-3	
I + S _d * 1)	一次 応力	引張応力	271	222	637	637	f_t
		圧縮応力	271	220	631	543	f_c
		せん断応力	156	127	367	367	f_s
		曲げ応力	271	222	637	637	f_b
		支圧応力	370	301	870	870	f_p
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 ²⁾	543	444	1275	1275	$2f_t$
		せん断応力 ²⁾	312	255	735	735	$2f_s$
		曲げ応力 ²⁾	543	444	1275	1275	$2f_b$
		支圧応力	370	301	870	870	f_p
		座屈応力	156	127	367	367	f_b, f_s 又は f_c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_τ)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|c \sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t \sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t \sigma_b|}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c \sigma_b| - |\sigma_t|}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、設計事象 I の一次応力については上式による。

I + S_d*の一次応力の場合、分母の f_c , f_b , f_t は、 $1.5 f_c$, $1.5 f_b$, $1.5 f_t$ とする。

I + S_d*の一次+二次応力の場合、分母の f_c , f_b , f_t は、 $3 f_c$, $3 f_b$, $3 f_t$ とする。

- 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 (2) 支持構造物用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値 (MPa)				
			炭素鋼		合金鋼	合金鋼	許容値基準
			リ ブ	支持台座	トラン 固定金具	容器押え 金具	
			SM490B	SFVC2B	SNB23-3	SNB23-3	
I + S _s ¹⁾	一 次 応 力	引張応力	307	265	637	637	f_t
		圧縮応力	307	265	631	543	f_c
		せん断応力	177	153	367	367	f_s
		曲げ応力	307	265	637	637	f_b
		支圧応力	420	361	870	870	f_p
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応 力 ²⁾	543	444	1275	1275	$2f_t$
		せん断応力 ²⁾	312	255	735	735	$2f_s$
		曲げ応力 ²⁾	543	444	1275	1275	$2f_b$
		支圧応力	420	361	870	870	f_p
		座屈応力	156	127	367	367	f_b, f_s 又は f_c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c^*} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次＋二次応力の場合、分母の $1.5 f_c^*$ 、 $1.5 f_b^*$ 、 $1.5 f_t^*$ は、 $3 f_c$ 、 $3 f_b$ 、 $3 f_t$ とする。

- 2) : S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許 容 応 力 値 (MPa)		
		合金鋼	低合金鋼	許容値基準
		トラニオン固定ボルト	アンカーボルト	
		SNB23-3	SCM435	
I + S _d * ¹⁾	引張応力	478 ¹⁾	261 ¹⁾	f_t
	せん断応力	367	340	f_s
I + S _s ¹⁾	引張応力	478 ¹⁾	261 ¹⁾	f_t
	せん断応力	367	340	f_s

注記 1) : 組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は，次の 2 つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 f_t - 1.6 \tau$$

$$f_T = f_t$$

ここで， τ : ボルトに発生するせん断応力 (MPa)
 ただし，設計事象 I の一次応力については上式による。
 I + S_d*の場合， f_t は 1.5 f_t とする。
 I + S_sの場合， f_t は 1.5 f_t^* とする。

表 5-1 支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力 ²⁾
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	477	③	637
	一次+二次応力 ¹⁾	曲げ応力	477	③	1275
リ ブ	一次応力	引張応力	23	①	271
		圧縮応力	80	①	271
	一次+二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	103	①	543
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	380	④	543
	一次+二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	380	④	1275
支持台座	一次応力	支圧応力	36	②	301
	一次+二次応力 ¹⁾	支圧応力	36	②	301
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	375	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	197	⑥	261
		せん断応力	225	⑥	340

注記 1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

2)：許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力にて評価を行う。

表 5-2 支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力 ²⁾
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	477	③	637
	一次＋二次応力 ¹⁾	曲げ応力	477	③	1275
リ ブ	一次応力	引張応力	23	①	307
		圧縮応力	80	①	307
	一次＋二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	103	①	543
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	380	④	543
	一次＋二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	380	④	1275
支持台座	一次応力	支圧応力	36	②	361
	一次＋二次応力 ¹⁾	支圧応力	36	②	361
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	375	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	197	⑥	261
		せん断応力	225	⑥	340

注記 1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

2)：許容応力状態IV_ASの許容応力にて評価を行う。

V-2-4-2-3-1-5 二次蓋の耐震性についての計算書
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力の評価	1
5. 計算結果	2
5.1 応力評価点	2
5.2 計算方法	2
5.3 計算結果	2
6. 評価結果	2

図表目次

図 2-1	二次蓋の構造	3
図 5-1	応力評価点（面）	4
図 5-2	計算モデル	5
表 4-1	二次蓋の許容応力値	6
表 4-2	二次蓋締付けボルトの許容応力値	6
表 5-1(1)	二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D+P _d +M _d +S _d *の場合）	7
表 5-1(2)	二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D+P _d +M _d +S _s の場合）	8
表 6-1	二次蓋の応力評価	9

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅠ）の二次蓋に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

二次蓋の評価部位を図 2-1 に示す。

3. 計算方法

(1) 二次蓋の応力計算は、二次蓋の実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」を用いて行う。

解析コードの検証および妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS」に示す。

(2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の 3 つである。

- a. 最高使用圧力 (0.4 MPa)
- b. ボルト初期締付け力 (4.6×10^6 N)
- c. 地震力

(3) 計算モデルは次の方針に従う。

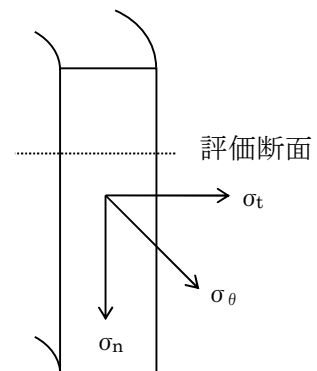
- a. モデル化に当たっては、二次蓋の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

4. 応力の評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

- σ_θ : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{n\theta}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



二次蓋用材料の許容応力値を表 4-1 に示す。

二次蓋締付けボルトの許容応力値を表 4-2 に示す。

(1) 二次蓋の応力評価

二次蓋の応力評価は、以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ（地震力のみによる応力振幅）

(2) 二次蓋締付けボルトの応力評価

二次蓋締付けボルトの応力評価は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 計算結果

5.1 応力評価点

評価対象として応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 計算方法

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-2 に示す。また、加速度として次の値を用いる。

S_d *地震力が作用する場合： $\alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2$, $\alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$

S_s 地震力が作用する場合： $\alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2$, $\alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$

5.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

6. 評価結果

各設計事象における二次蓋及び二次蓋締付けボルトの評価を表 6-1 に示す。

表 6-1 より各部の一次応力は許容値を満足する。また、二次蓋の一次+二次応力は $2 S_y$ 以下となり、疲労評価不要の条件を満足する。

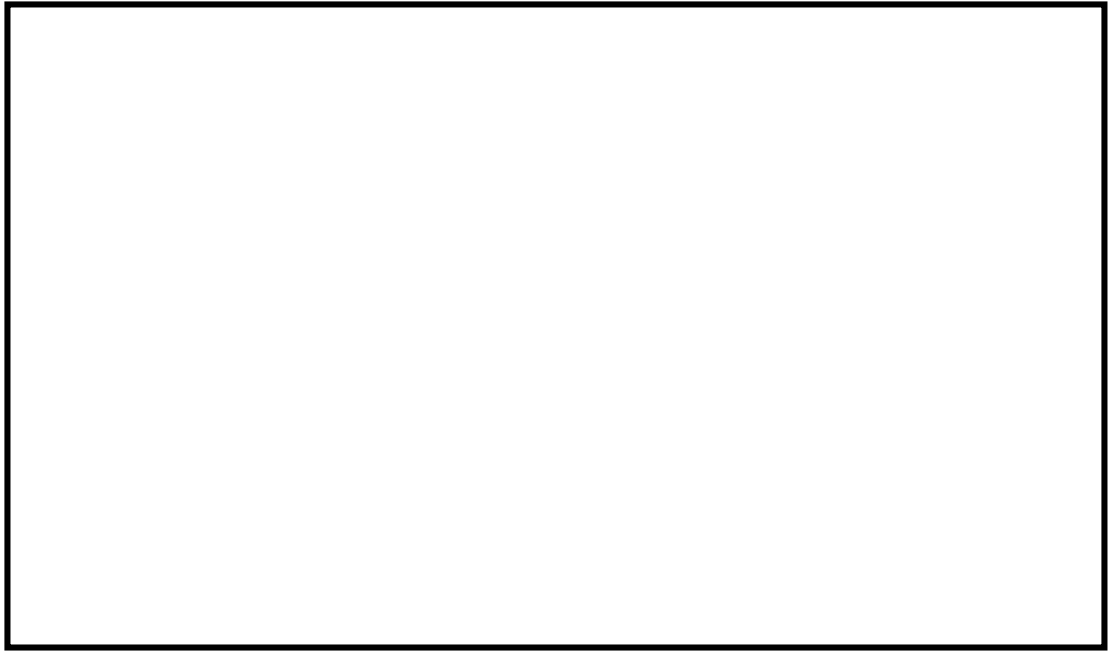


図 2-1 二次蓋の構造



図 5-1 応力評価点（面）

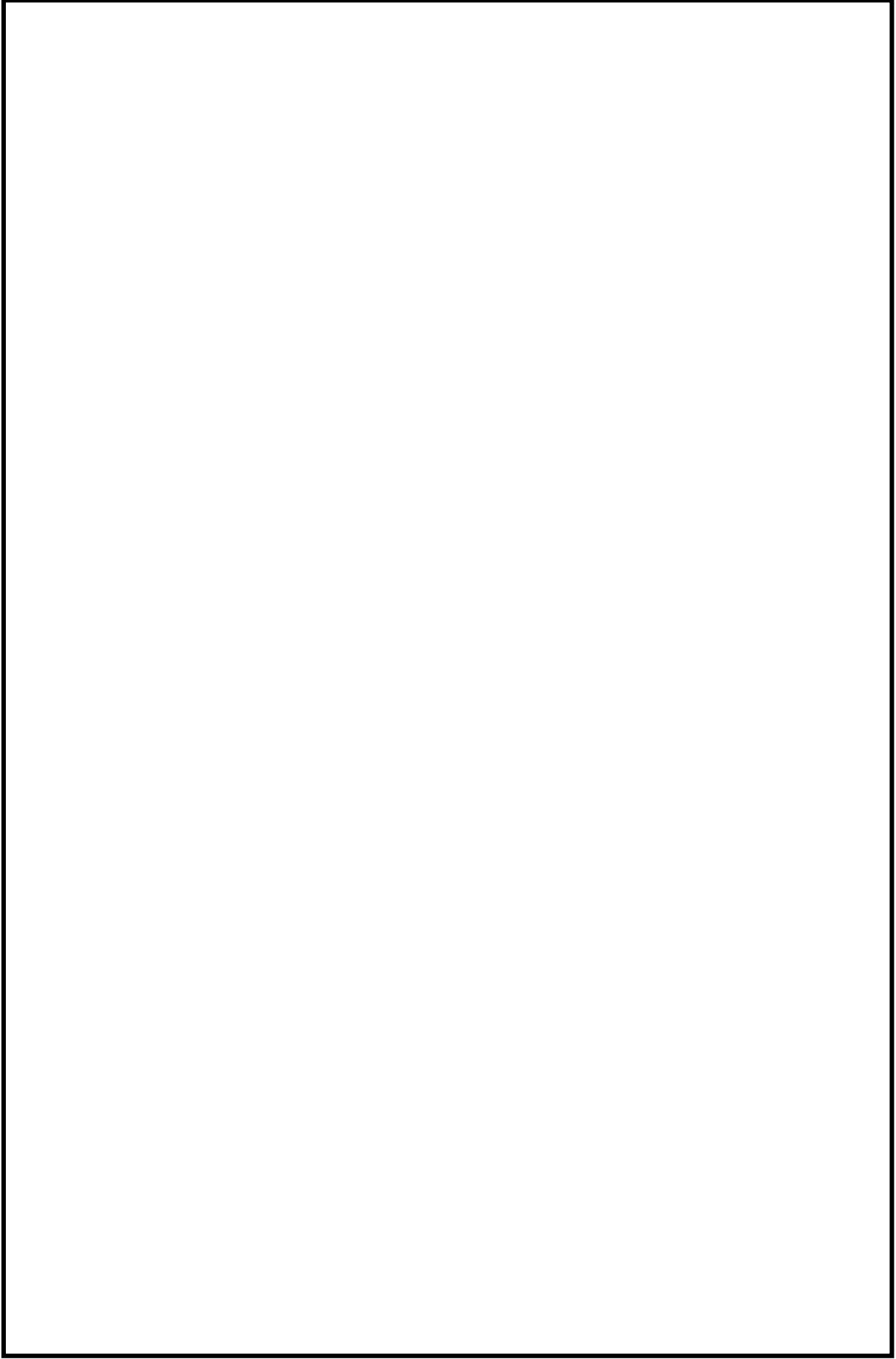


図 5-2 計算モデル

表 4-1 二次蓋の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	荷重の 組合せ	応力の種類	許容応力値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUSF304	許容値基準
I + S _d [*]	D+P _d +M _d +S _d [*]	一次一般膜応力 (P _m)	152	Min {S _y , 0.6S _u } と 1.2S の大きい方
		一次膜＋一次曲げ応力 (P _L +P _b)	228	上記の 1.5 倍
		一次＋二次応力 ¹⁾ (P _L +P _b +Q)	304	2S _y
I + S _s	D+P _d +M _d +S _s	一次一般膜応力 (P _m)	250	0.6S _u
		一次膜＋一次曲げ応力 (P _L +P _b)	376	0.9S _u
		一次＋二次応力 ¹⁾ (P _L +P _b +Q)	304	2S _y

注記 1) : S_d^{*} 又は S_s 地震動のみによる応力振幅について評価する。

表 4-2 二次蓋締付けボルトの許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	荷重の 組合せ	応力の種類	許容応力値	
			合金鋼 SNB23-3	許容値基準
I + S _d [*]	D+P _d +M _d +S _d [*]	平均引張応力	300	1.5S
I + S _s	D+P _d +M _d +S _s	平均引張応力	400	2S

表 5-1(1) 二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D+P_d+M_d+S_d*の場合）

（単位：MPa）

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
二次 蓋	①-①'	P _L +P _b							23	228
	①	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	①'								1	304
	②-②'	P _L +P _b							22	228
	②	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	②'								1	304
	③-③'	P _L +P _b							18	228
	③	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	③'								1	304
	④-④'	P _m							5	152
	④	P _L +P _b							34	228
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	④'	P _L +P _b							25	228
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
ボ ル ト	⑤	平均引張 応力							146	300

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力

σ_θ : 円周方向応力

σ_t : 評価断面に平行な方向の応力

τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力

2) : S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-1 (2) 二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D+P_d+M_d+S_s の場合）

（単位：MPa）

部位	評価点 (面)	応力分類	応 力 成 分 ¹⁾						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
二次 蓋	①-①'	P _L +P _b							23	376
	①	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	①'								1	304
	②-②'	P _L +P _b							22	376
	②	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	②'								1	304
	③-③'	P _L +P _b							18	376
	③	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	③'								1	304
	④-④'	P _m							5	250
	④	P _L +P _b							34	376
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	④'	P _L +P _b							25	376
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
ボ ル ト	⑤	平均引張 応力							146	400

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 二次蓋の応力評価

(単位：MPa)

許容応力 区分	荷重の組合せ	部 位	応力分類	評価点	計算値	許容 応力値
$I + S_d^*$	$D + P_d + M_d + S_d^*$	二次蓋	P_m	④－④'	5	152
			$P_L + P_b$	④	34	228
			$P_L + P_b + Q^{1)}$	②	1	304
		二次蓋 締付けボルト	平均引張応力	⑤	146	300
$I + S_s$	$D + P_d + M_d + S_s$	二次蓋	P_m	④－④'	5	250
			$P_L + P_b$	④	34	376
			$P_L + P_b + Q^{1)}$	②	1	304
		二次蓋 締付けボルト	平均引張応力	⑤	146	400

注記 1) : S_d^* 及び S_s 地震動のみによる応力振幅について評価する。

V-2-4-2-3-2 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書
(タイプⅡ)

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	3
2.4 記号の説明	4
2.5 計算精度と数値の丸め方	8
3. 固有周期	9
3.1 固有周期の計算方法	9
3.2 固有周期の評価	9
4. 構造強度評価	10
4.1 構造強度評価方法	10
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	10
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	10
4.2.2 許容応力	10
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	10
4.3 設計用地震力	12
4.4 計算方法	12
4.5 応力の評価	12
5. 評価結果	12

図表目次

図 2-1	使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フロー	3
表 2-1	構造計画（タイプⅡ）	2
表 2-2	表示する数値の丸め方	8
表 3-1	固有周期の計算結果	9
表 4-1	荷重の組合せ及び許容限界	11
表 4-2	使用材料の許容応力評価条件	11
表 4-3	設計用地震力	12

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の設計方針に基づき、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ）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。

使用済燃料乾式貯蔵容器は、使用済燃料を貯蔵していること及び想定されるいかなる場合にも収納する使用済燃料の臨界を防止する必要があることから、Sクラス施設に分類される。以下、構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

使用済燃料乾式貯蔵容器の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画（タイプⅡ）

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
使用済燃料乾式貯蔵容器は縦置型で、トラニオンを介し支持構造物で支持され、アンカーボルトで基礎に固定される。 使用済燃料はキャスク容器*内に配置されたバスケットにより支持される。	縦置円筒型容器	A-A 断面拡大図 [単位: mm]

*：キャスク容器とは、胴、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト、バルブカバー、バルブカバー締付けボルトをいう。

2.2 評価方針

使用済燃料乾式貯蔵容器の応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の「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」にて示す使用済燃料乾式貯蔵容器の部位を踏まえ、「3. 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対して算出する応力等が許容限界内に収まることを確認することで実施する。

使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

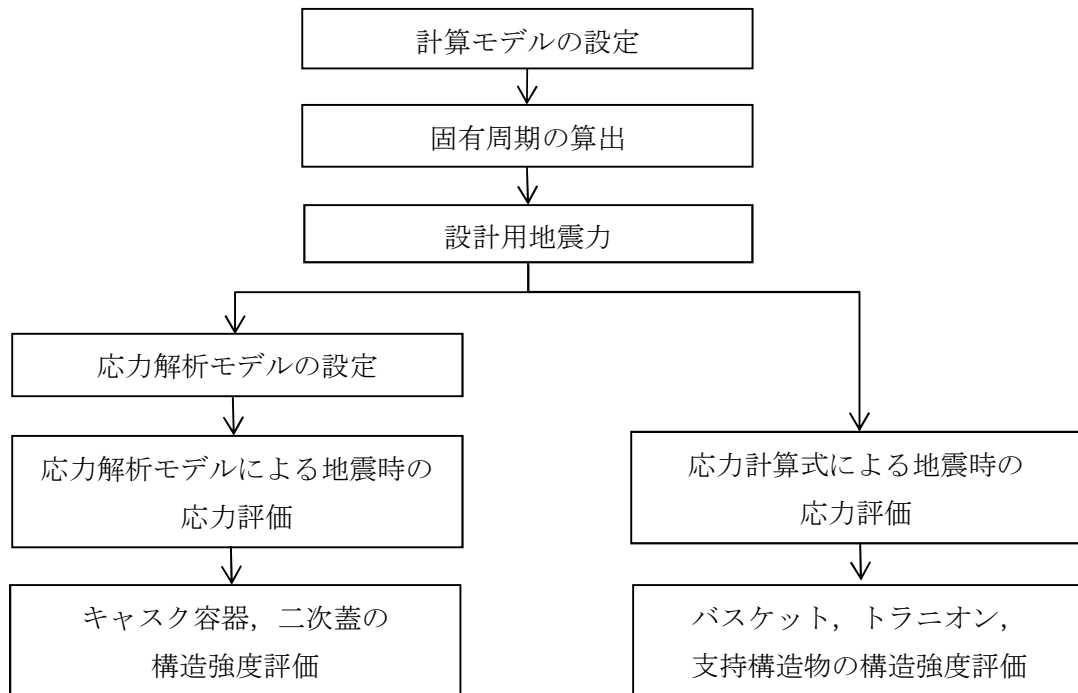


図 2-1 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1 -1987 (社) 日本電気協会
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 (社) 日本電気協会
- (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 (社) 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

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
B	「設計・建設規格」付録材料図表 Part7 図2の縦軸のB値	—
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
K	応力集中係数	—
m	質量	kg
N _a	許容繰返し回数	回
N _c	繰返し回数	回
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _{d o}	最高使用圧力 (外圧)	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s による地震力	—
S ₁₂	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S ₂₃	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S ₃₁	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
S _ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S _ℓ '	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
T _r	締付けトルク	N・mm
U _f	疲労累積係数	—
f _c *	許容圧縮応力*	MPa

計算書の記号	記号の説明	単位
α	熱膨張係数	mm/(mm・°C)
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力状態	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
ℓ	バスケットプレート長さ	mm
Z	断面係数	mm ³
ρ	密度	kg/mm ³
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力（x 方向）	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力（y 方向）	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力（z 方向）	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
A_b	トラニオンボルトの断面積	mm ²
a_1	地震時の乾式貯蔵キャスク回転支点 O から支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a_2	地震時の乾式貯蔵キャスク回転支点 O から支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
C_c	トラニオンボルト計算における係数	—
C_t	トラニオンボルト計算における係数	—
C_v	鉛直方向設計震度	—
D_{bi}	トラニオンボルト取付部の内径	mm

計算書の記号	記号の説明	単位
D_{bo}	トラニオンボルト取付部の外径	mm
D_c	トラニオンボルトのピッチ円直径	mm
e	トラニオンボルト計算における係数	—
F_{cc}	キャスク容器に作用する圧縮力	N
F_m	トラニオンに作用する荷重	N
F_{tb}	トラニオンボルトに作用する引張力	N
F_1	トラニオン固定ボルトの初期締付け力	N
f_T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f_t	許容引張応力	MPa
f_t^*	許容引張応力 *	MPa
f_s^*	許容せん断応力 *	MPa
f_b^*	許容曲げ応力 *	MPa
h_{CG}	乾式貯蔵キャスク底面から重心までの高さ	mm
k	トラニオンボルト計算における中立軸の荷重係数	—
L	荷重位置と評価点との距離	mm
t_1	トラニオンボルト面積相当幅	mm
t_2	圧縮側相当幅	mm
Z	トラニオンの断面係数	mm ³
z	トラニオンボルト計算における係数	—
σ	トラニオンの評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_{cc}	キャスク容器の圧縮応力	MPa
σ_T	トラニオンの組合せ応力	MPa
σ_{tb}	トラニオンボルトの引張応力	MPa
F_c	圧縮力	N
F_1	支持台①の引張力	N
F_2	支持台②の引張力	N
F_3	トラニオン固定ボルトの初期締付け力	N
F_H	水平力	N
f_p	許容支圧応力	MPa
f_p^*	許容支圧応力 *	MPa
L	トラニオン固定ボルト間距離	mm
m_c	貯蔵容器質量	kg
m_s	支持台 1 個の質量	kg
n_1	支持台の数	—
${}_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
D	死荷重	—

計算書の記号	記号の説明	単位
d_o	胴の外径	mm
d_i	胴の内径	mm
E	胴の縦弾性係数	MPa
I	胴の断面二次モーメント	mm ⁴
L	貯蔵容器の全長	mm
M_d	当該設備に設計上定められた機械的荷重	—
P_d	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重	—
S	許容引張応力	MPa
T	貯蔵容器の固有周期	S
f_s	許容せん断応力 (f_s を 1.5 倍した値又は f_s^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_t	許容引張応力 (f_t を 1.5 倍した値又は f_t^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_c	許容圧縮応力 (f_c を 1.5 倍した値又は f_c^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_b	許容曲げ応力 (f_b を 1.5 倍した値又は f_b^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_p	許容支圧応力 (f_p を 1.5 倍した値又は f_p^* を 1.5 倍した値)	MPa

注記 * : f_t^* , f_s^* , f_b^* は、各々 f_t , f_s , f_b の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a. の本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

2.5 計算精度と数値の丸め方

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	処理法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	—	—	設計値
質量	kg	—	—	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

注記 *：応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

3. 固有周期

3.1 固有周期の計算方法

使用済燃料乾式貯蔵容器をはりでモデル化すると、上端自由及び下端固定のはりの固有周期（ T ）は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L^2}{1.875^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{E \cdot I}} \\ m &= \frac{m_T}{L} \\ I &= \frac{\pi}{64} \cdot (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

- L : 貯蔵容器の全長 (= 5.435 m)
- E : 胴の縦弾性係数 (= 1.93×10^{11} Pa)
- I : 胴の断面二次モーメント (= 0.583 m⁴)
- m_T : 貯蔵容器（内部も含む）の総質量 (= 1.18×10^5 kg)
- d_o : 胴の外径 (= 2.059 m)
- d_i : 胴の内径 (= 1.571 m)

3.2 固有周期の評価

3.1 項の計算により得られた固有周期の計算結果を表 3-1 に示す。計算結果より、剛であることを確認した。

表 3-1 固有周期の計算結果

固有周期（秒）
$T = $

4. 構造強度評価

4.1 構造強度評価方法

- (1) 地震力は使用済燃料乾式貯蔵容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。
- (2) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を用いる。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

使用済燃料乾式貯蔵容器の荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4-1 に示す。

4.2.2 許容応力

使用済燃料乾式貯蔵容器の許容応力については、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」のとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

使用済燃料乾式貯蔵容器の使用材料の許容応力評価条件については、表 4-2 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容限界

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	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 用容器	使用済燃料乾式貯蔵容器	S	—	$D + P + M + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P + M + S_s$	Ⅳ _A S

表 4-2 使用材料の許容応力評価条件

評価部材		材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _m (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)
キャスク容器	胴, 底板, 密封シール部	GLF1	最高使用温度	170	—	120	181	377
	一次蓋	GLF1	最高使用温度	170	—	120	181	377
	一次蓋締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	170	—	275	825	—
	バルブカバー	SUS304	最高使用温度	170	—	133	150	414
	バルブカバー締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	170	—	275	825	—
バスケット	バスケットプレート	B-SUS	最高使用温度	260	—	134	207	404
	サポートシリンダ	SUS304	最高使用温度	260	—	120	133	395
トラニオン	トラニオン	SUS630	最高使用温度	140	—	—	646	845
	トラニオンボルト	SNB23-3	最高使用温度	140	—	—	836	907
支持構造物	支持台座	SFVC2B	最高使用温度	130	—	—	222	438
	トラニオン固定金具	SUS630	最高使用温度	130	—	—	650	845
	容器押えボルト	SNB23-3	最高使用温度	130	—	—	839	912
	トラニオン固定ボルト	SNB23-3	最高使用温度	130	—	—	839	912
	リブ	SM520C	最高使用温度	130	—	—	314	487
	アンカーボルト	SCM435	最高使用温度	130	—	—	665	847
二次蓋	二次蓋	GLF1	最高使用温度	100	—	—	187	377
	二次蓋締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	100	200	—	—	—

4.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-3 に示す。

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

表 4-3 設計用地震力

据付場所及び 床面高さ(m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL8.3m* ¹		—	$C_H=0.72$	$C_V=0.36$	$C_H=1.17$	$C_V=0.65$

注 * 1 : 基準床レベルを示す。

4.4 計算方法

使用済燃料乾式貯蔵容器の計算方法については、以下の各図書「3. 計算方法」に示す。

キャスク容器 : 添付書類「V-2-4-2-3-2-1 キャスク容器の耐震性についての計算書」

バスケット : 添付書類「V-2-4-2-3-2-2 バスケットの耐震性についての計算書」

トラニオン : 添付書類「V-2-4-2-3-2-3 トラニオンの耐震性についての計算書」

支持構造物 : 添付書類「V-2-4-2-3-2-4 支持構造物の耐震性についての計算書」

二次蓋 : 添付書類「V-2-4-2-3-2-5 二次蓋の耐震性についての計算書」

4.5 応力の評価

4.4 項で求めた計算値が、4.2.2 項で示した許容応力以下であること。

5. 評価結果

使用済燃料乾式貯蔵容器の応力の評価結果については、以下の各図書「応力の評価」に示す。計算値は許容応力以下であり、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

キャスク容器 : 添付書類「V-2-4-2-3-2-1 キャスク容器の耐震性についての計算書」

バスケット : 添付書類「V-2-4-2-3-2-2 バスケットの耐震性についての計算書」

トラニオン : 添付書類「V-2-4-2-3-2-3 トラニオンの耐震性についての計算書」

支持構造物 : 添付書類「V-2-4-2-3-2-4 支持構造物の耐震性についての計算書」

二次蓋 : 添付書類「V-2-4-2-3-2-5 二次蓋の耐震性についての計算書」

V-2-4-2-3-2-1 キヤスク容器の耐震性についての計算書
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力の評価	2
5. 計算結果	2
5.1 応力評価点	2
5.2 貯蔵時 (S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合)	2
5.2.1 荷重条件	2
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	3
6. 評価結果	4
6.1 キャスク容器 (ボルトを除く。) の応力評価	4
6.2 ボルトの応力評価	4
6.3 特別な応力の評価	4
6.4 繰返し荷重の評価	4
6.4.1 キャスク容器 (ボルトを除く。) の評価	4
6.4.2 ボルトの評価	8
6.4.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討	8
6.4.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析	8
6.4.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析	9
7. 穴の補強	10

図表目次

図 2-1	キャスク容器の応力解析箇所（全体断面図）	11
図 5-1	キャスク容器の応力評価点（面）	12
図 5-2	キャスク容器の解析モデル（圧力＋ボルト初期締付け力作用時）	13
図 5-3	キャスク容器の解析モデル（地震時）	14
表 4-1	キャスク容器用材料の許容応力値	15
表 4-2	キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値	17
表 5-1	キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	18
表 5-1	キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	21
表 5-2	キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	24
表 5-2	キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	26
表 6-1	キャスク容器（ボルトを除く。）の疲労解析不要の評価結果	28
表 6-2	疲労累積係数（一次蓋締付けボルト）	29
表 6-2	疲労累積係数（バルブカバー締付けボルト）	29
表 7-1	貫通孔部の応力強さ	30

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ）のキャスク容器に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

キャスク容器の評価部位は、次の通りである（図 2-1 参照）。

- (1) 胴
- (2) 底板
- (3) 一次蓋
- (4) 一次蓋締付けボルト
- (5) バルブカバー
- (6) バルブカバー締付けボルト
- (7) 密封シール部

3. 計算方法

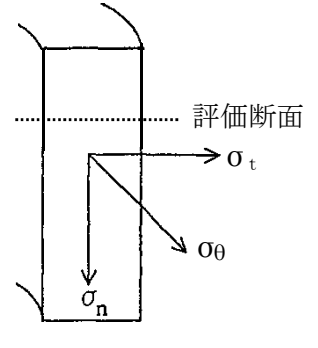
- (1) キャスク容器の応力計算は、想定される圧力荷重、機械的荷重を基に、キャスク容器の実形状をモデル化し、解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。
解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS」に示す。
- (2) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えるものは次の 2 つである。
 - a. 内圧
 - b. 機械的荷重
自重（燃料集合体含む貯蔵容器（二次蓋含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、
衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。
- (3) 計算モデルは次の方針に従う。
 - a. モデル化に当たっては、キャスク容器及び底部中性子遮へい体カバーの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
 - b. 荷重が局部的に作用する事象については、その局部的荷重による発生応力を評価するため三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。
また、モデル化に当たり、対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。
- (4) 構造及び材料の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、計算書の形状図中に、番号〔例①〕で示す。
- (5) 応力評価は、この応力評価点（面）について行う。
- (6) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

4. 応力の評価

応力の計算結果は、「設計・建設規格」GNR-2130 による定義に従い、応力種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は下記の通りである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{\theta n}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力値を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

キャスク容器の応力評価は、「設計・建設規格」PVB-3110 に従い、以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、「設計・建設規格」PVB-3120 に従い、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 計算結果

5.1 応力評価点

キャスク容器の応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。なお、地震力には S_s 地震力を適用する。

キャスク容器内圧力（ -0.1 MPa）＋蓋間圧力（ 0.4 MPa）＋ボルト初期締付け力
＋地震力＋自重

5.2.2 計算方法

(1) 一次応力及び一次＋二次応力

a. 胴，底板，一次蓋及び一次蓋締付けボルト

(a) 圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-2 に示す。

(b) 地震力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-3 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$$G_1 = C_H \cdot g, G_2 = (1 - C_V) \cdot g \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで， C_H ：水平方向設計震度（＝1.17）

C_V ：鉛直方向設計震度（＝0.65）

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで， $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

m_G ：バスケット及び燃料の質量（＝ kg）

A ：接触面積（＝ mm²）

C_V ：(1)a. (b) と同じ

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

6. 評価結果

6.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の一次一般膜応力強さ（ P_m ）、一次局部膜応力強さ（ P_L ）、一次膜＋一次曲げ応力強さ（ $P_L + P_b$ ）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（ $P_L + P_b + Q$ ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 ボルトの応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.3 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

平均せん断応力（ σ_s ）を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

(2) 支圧応力

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均支圧応力（ σ_p ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

(3) 軸圧縮応力

軸圧縮応力（ σ_b ）を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

6.4 繰返し荷重の評価

6.4.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の評価

設計・建設規格 PVB-3140 により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(6)に示し、表 5-1 にその評価結果のまとめを示す。なお、燃料装荷・取出しサイクルは通常 1 回であるが、本評価においては 100 回に想定しても条件を満足することを示す。

(1) 設計・建設規格 PVB-3140(1) （大気圧－使用圧力－大気圧の変動）

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数（ N_1 ）は、燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として評価する。

$$N_1 = 100 \text{ (回)}$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、設計温度における設計応力強さ $3 \cdot S_m$ (362 MPa) を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数（ N_a ）は、

$$N_a = 3756 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 < N_a$$

であり、条件を満足する。

- (2) 設計・建設規格 PVB-3140(2) (燃料装荷・取出し及び耐圧試験等を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおける圧力変動)

燃料装荷・取出しを除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおける圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.23 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、 P : 最高使用圧力 (=1.0 MPa)

S_m : 設計応力強さ (=120 MPa)

S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、 10^6 回を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (=86 MPa)

また、(6.1) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (A_m) は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

ここで、 S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(5.1) 式による値を超える実際の圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

(6.1) 式より、圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は、0.23 MPa となる。地震力が作用する場合における実際の圧力は密封容器のため 0.23 MPa を超える変動は生じないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として (6.2) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$A_m = 3.88 \text{ MPa}$$

となる。

したがって、燃料装荷・取出しを除く設計事象Ⅰ、設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合における圧力変動の全振幅を最高使用圧力 ($P=1.0$ MPa) と仮定しても、

$$P < A_m$$

であり、条件を満足する。

- (3) 設計・建設規格 PVB-3140(3) (燃料装荷・取出し時の温度差)

キャスク容器の任意の 2 点間の距離 (p) は、次式で計算する。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 942 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

ここで、 R : キャスク容器の平均半径 (=907.5 mm)

t : キャスク容器の板厚 (=244 mm)

キャスク容器の燃料装荷・取出し時において、相互の距離が p を超えない任意の 2 点間の温度差の許容値 (T) は、次式で計算する。なお、2 点間の平均温度はキャスク容器の最高使用温度 ($T_{max} = 170$ °C) とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 277 \text{ °C} \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

ここで、 E : 2 点間の平均温度における縦弾性係数 ($=1.93 \times 10^5$ MPa)

α : 2 点間の平均温度における瞬時熱膨張係数 ($=13.07 \times 10^{-6}$ mm/(mm $\cdot$ °C))

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、燃料装荷・取出しの回数 (100 回) を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ ($=1413$ MPa)

したがって、任意の 2 点間において生じる温度差を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 150$ °C) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

- (4) 設計・建設規格 PVB-3140(4) (燃料装荷・取出し時を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱの温度差変動)

燃料装荷・取出し時を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて、相互の距離が p を超えない任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅の許容値 (T) は、次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \dots\dots\dots (6.5)$$

ここで、 E, α : (3) と同じ

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(6.6)式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

$$T' = \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 17.0 \text{ °C} \dots\dots\dots (6.6)$$

ここで、 S : (2) と同じ

設計事象Ⅰ、設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので、任意の 2 点間の温度差の変動が(6.6)式により計算した値の 17.0 °Cを超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として (6.5) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$T = 277 \text{ °C}$$

したがって、キャスク容器の任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 150$ °C) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

- (5) 設計・建設規格 PVB-3140(5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

一次蓋締付けボルトとバルブカバー締付けボルトは同種の合金鋼を使用しており、一次蓋は炭素鋼、バルブカバーはステンレス鋼を使用している。

ここでは、縦弾性係数及び熱膨張係数の差が大きく、評価が厳しくなる組合せであるバルブカバーとバルブカバー締付けボルトを代表として評価する。

バルブカバーとバルブカバー締付けボルトの部分の温度変動の許容値 (T) は、(6.7) 式

で計算する。なお、縦弾性係数及び熱膨張係数はキャスク容器の最高使用温度($T_{max}=170^{\circ}\text{C}$)に対する値とする。

$$T = \frac{S}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} = 61.9^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

ここで、 S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において、許容繰返し回数 1×10^{11} 回に対する繰返しピーク応力強さ (=94 MPa)

E_1 : バルブカバーの縦弾性係数 (= 1.84×10^5 MPa)

E_2 : バルブカバー締付けボルトの縦弾性係数 (= 1.82×10^5 MPa)

α_1 : バルブカバーの瞬時熱膨張係数 (= 17.27×10^{-6} mm/(mm $\cdot^{\circ}\text{C}$))

α_2 : バルブカバー締付けボルトの瞬時熱膨張係数 (= 13.29×10^{-6} mm/(mm $\cdot^{\circ}\text{C}$))

また、(6.7) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (T) は、(6.8) 式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \quad \dots\dots\dots (6.8)$$

ここで、 S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において、(6.7) 式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ (MPa)

設計事象 I、設計事象 II 及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので、温度変動は、気温変動によるものと考え、(6.7) 式により計算した値の 61.9°C を超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし、計 100 回として評価すると、

$$S_a = 1.8 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$T = 1185.9^{\circ}\text{C}$$

したがって、設計事象 I、設計事象 II 及び地震力が作用する場合において生じる温度の変動を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 150^{\circ}\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(6) 設計・建設規格 PVB-3140(6) (機械的荷重の変動)

S_d^* 及び S_s 地震による繰返し回数 10000 回に対する許容繰返しピーク応力強さ (262 MPa) に対し、地震力により発生する応力の全振幅は表 6-1 に示すとおりすべて下回っている。また、地震力による疲労累積係数は 1.0 を下回っていることから、

$$\Delta \sigma \leq S$$

である。

なお、 S_d^* 及び S_s 地震による繰返し回数は、J E A G 4 6 0 1・補-1984 (社) 日本機械学会 参考資料 III 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

(7) 検討結果

以上の(1)から(6)より，設計・建設規格 PVB-3140 の規定を全て満足しているので，疲労解析を必要としない。

6.4.2 ボルトの評価

6.4.1 項において疲労評価が不要となる条件を満足することから，一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトについて，地震動のみによる疲労累積係数が 1.0 以下となることを示す。

6.4.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

- (1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり，設計・建設規格 PVB-3122 (2) に従い，設計疲労曲線として設計・建設規格 添付 4-2 3.4 を使用する。
- (2) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの平均引張応力＋曲げ応力の許容値を $3 \cdot S_m$ としたので，設計疲労曲線として，設計・建設規格 添付 4-2 3.4 の“曲線 2”を使用する。
- (3) ねじは三角ねじであり，ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが mm，バルブカバー締付けボルトが mm であって 0.07 mm より大である。
- (4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は，

$$\text{一次蓋締付けボルト} : \boxed{} = 0.062$$

$$\text{バルブカバー締付けボルト} : \boxed{} = 0.072$$

であって，0.06 以上である。

6.4.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析

一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは，次式で計算する。

$$S = K \cdot \left(\pm \frac{m_0 \cdot G_1}{A} \right) \dots\dots\dots (6.9)$$

ここで，S : ボルトのピーク応力強さ (MPa)

K : 一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)

A : 全数のボルト最小断面積 (= mm²)

m_0 : 一次蓋の質量 (=4900 kg)

G_1 : 軸方向の加速度

地震 S_d^* 6.38 m/s²

S_s 6.38 m/s²

また，繰返しピーク応力強さは次式で計算する。

$$S_{\sigma} = \frac{1}{2} \cdot S_P \dots\dots\dots (6.10)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 (4) のとおり，縦弾性係数（ $E_0 = 2.07 \times 10^5$ MPa）と解析に用いる縦弾性係数（ $E = 1.82 \times 10^5$ MPa）との比を考慮し補正する。

$$S_{\sigma}' = S_{\sigma} \cdot \frac{E_0}{E} \dots\dots\dots (6.11)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 により，補正した繰返しピーク応力強さ（ S_{σ}' ）に対する許容繰返し回数（ N ）を求める。繰返し回数（ N_c ）と許容繰返し回数（ N_a ）との比は表 6-1 に示す通りとなり，地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.4.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。

ただし，

m_r : バルブカバーの質量（=6 kg）

A : 全数のボルト最小断面積（= mm²）

繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 6-2 に示すとおりである。

したがって，地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

7. 穴の補強

設計・建設規格 PVB-3520 により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で計算する。

$$S_c = K \cdot S \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

ここで、 S_c : 貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0)

S : 貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) と貫通孔部の応力強さ (S_c) は表 7-1 に示す通りとなり、すべて許容応力を満足するため、貫通孔の補強は不要となる。

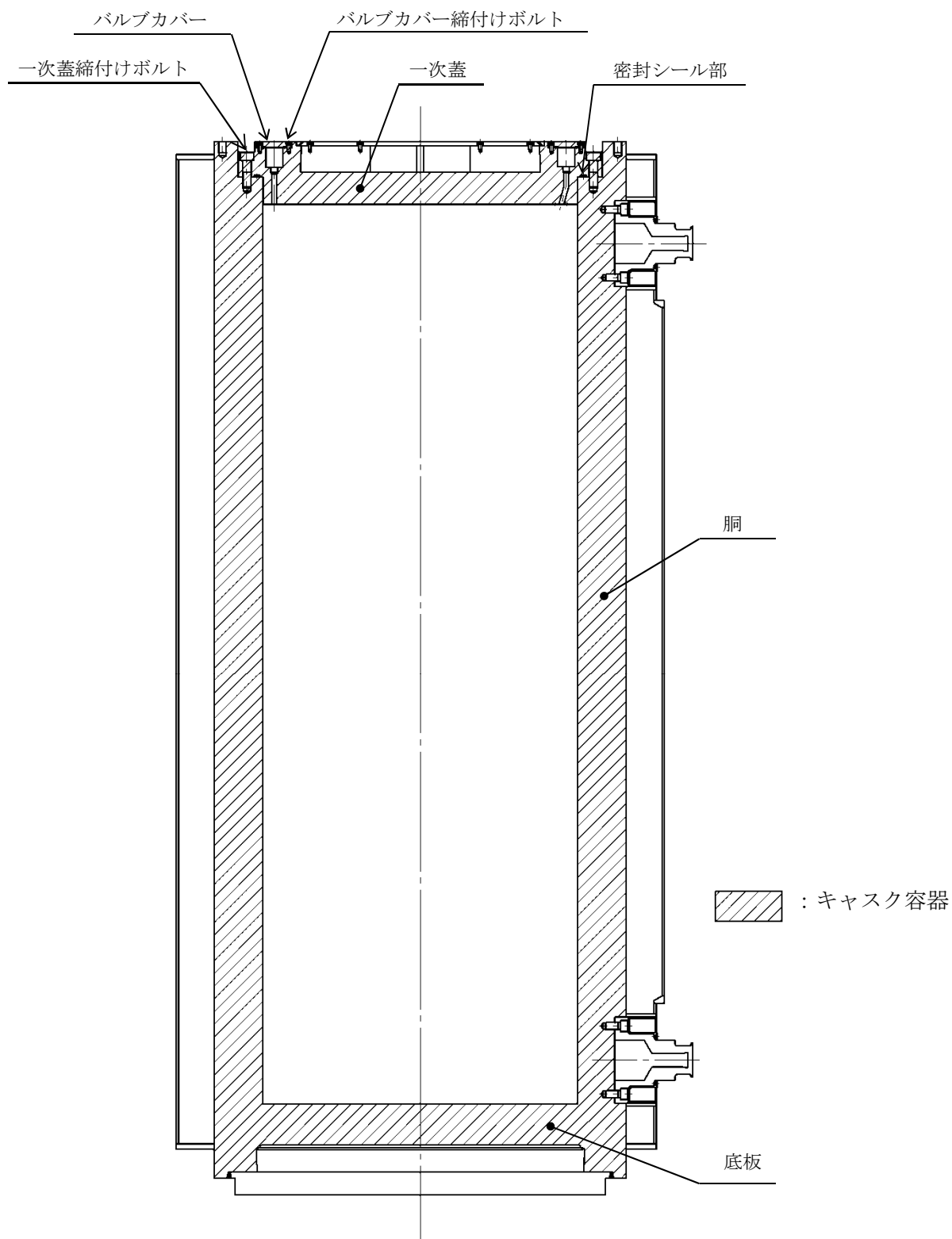


図 2-1 キャスク容器の応力解析箇所（全体断面図）

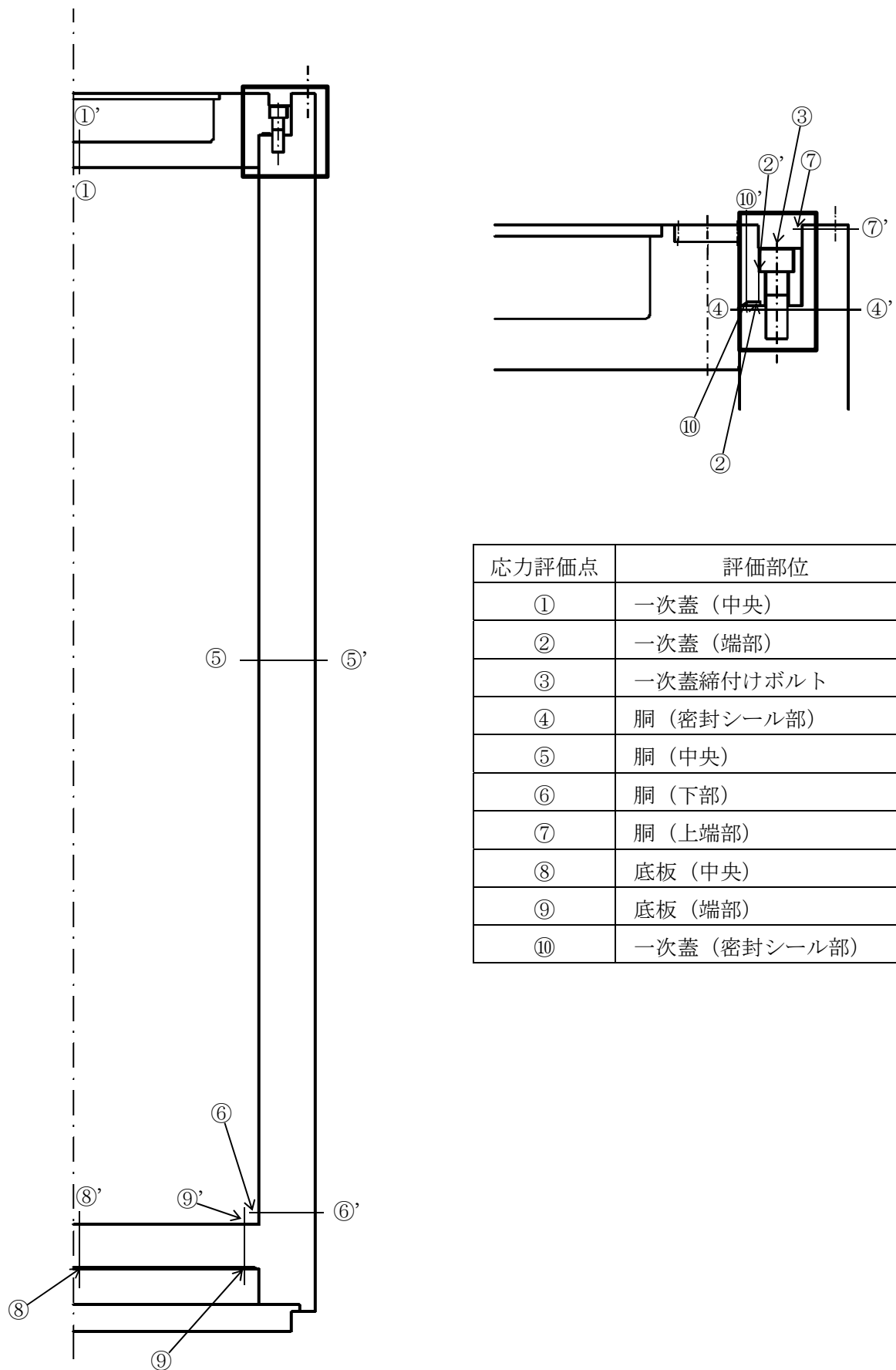


図 5-1 キヤスク容器の応力評価点（面）

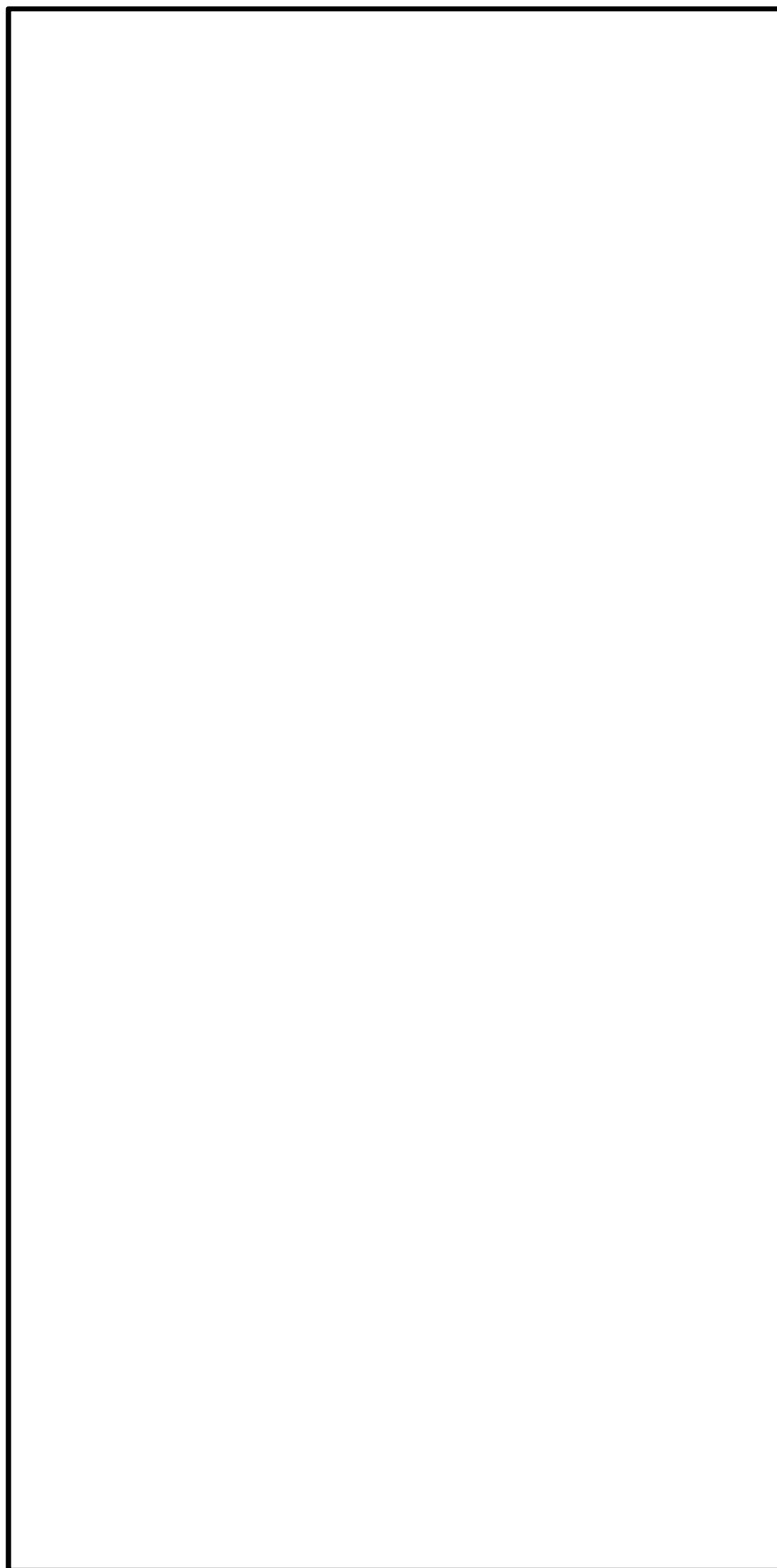


図 5-2 キヤスク容器の解析モデル
(圧力+ボルト初期締付け力作用時)

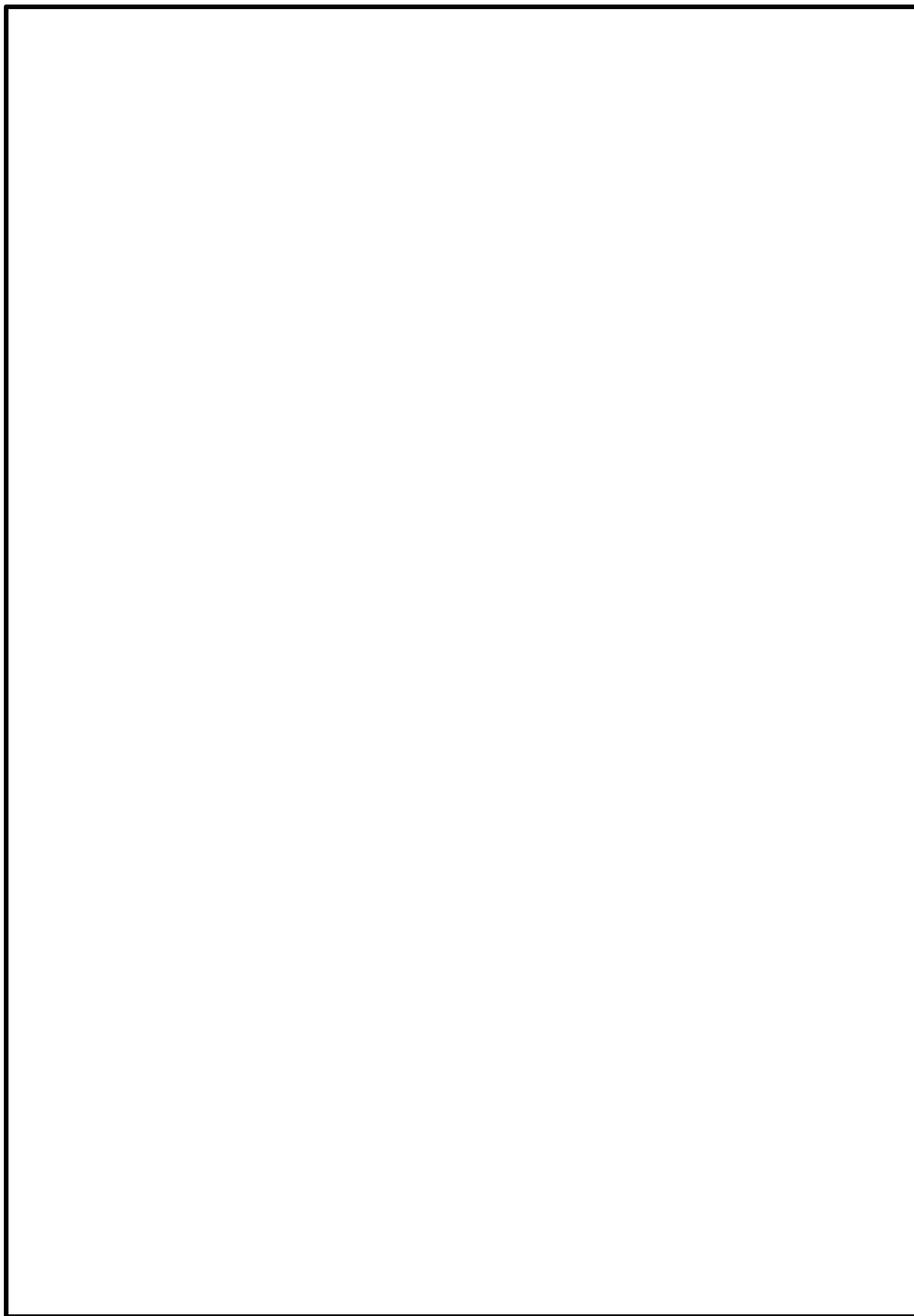


図 5-3 キャスク容器の解析モデル（地震時）

表 4-1 キヤスク容器用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		炭素鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		GLF1	許容値基準	GLF1	許容値基準
I + S _d * [*]	一次一般膜応力強さ P _m	181	Min {S _y , 2/3 S _u }	181	Min {S _y , 2/3 S _u }
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P _L + P _b	271	Min {1.5 S _y , S _u }	181	S _y
	一次＋二次応力強さ P _L + P _b + Q* ²	362	3 S _m	181	S _y
	平均せん断応力 σ _s	72	0.6 S _m		
	平均支圧応力 σ _p * ¹	181 (271)	S _y (1.5 S _y)		
I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	251	2/3 S _u	181	S _y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ P _L + P _b	377	S _u	181	S _y
	一次＋二次応力強さ P _L + P _b + Q* ²	362	3 S _m	181	S _y
	平均せん断応力 σ _s	150	0.4 S _u		
	平均支圧応力 σ _p * ¹	377 (565)	S _u (1.5 S _u)		

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

*2：S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 キャスク容器用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		ステンレス鋼	
		密封シール部以外	
		SUS304	許容値基準
$I + S_d^*$	一次一般膜応力強さ P_m	160	$1.2 S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	240	$1.8 S_m$
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q^{*2}$	401	$3 S_m$
	平均せん断応力 σ_s	80	$0.6 S_m$
	平均支圧応力 σ_p^{*1}	150 (225)	S_y ($1.5 S_y$)
$I + S_s$	一次一般膜応力強さ P_m	276	Min $\{2.4 S_m, 2/3 S_u\}$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	414	Min $\{3.6 S_m, S_u\}$
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q^{*2}$	401	$3 S_m$
	平均せん断応力 σ_s	165	$0.4 S_u$
	平均支圧応力 σ_p^{*1}	414 (621)	S_u ($1.5 S_u$)

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

*2： S_d^* 又は S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 キヤスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		低合金鋼	
		一次蓋締付けボルト バルブカバー締付けボルト	
		SNB23-3	許容値基準
$I + S_d^*$	平均引張応力	547	$2 S_m$
	平均引張応力＋曲げ応力	821	$3 S_m$
$I + S_s$	平均引張応力	820	S_y
	平均引張応力＋曲げ応力	820	S_y

表 5-1 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（1/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋 (中央)	①	P_m							3
		$P_L + P_b$							10
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							2
		σ_s							—
		σ_p							—
	①'	P_m							3
		$P_L + P_b$							8
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							2
		σ_s							—
		σ_p							—
一次蓋 (端部)	②	P_L							—
		$P_L + P_b$							42
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							28
		σ_s							—
		σ_p							—
	②'	P_L							—
		$P_L + P_b$							33
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							17
		σ_s							—
		σ_p							—
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張 応力							272
		平均引張応力 + 曲げ応力							335
胴 (密封シール部)	④	P_m							6
		$P_L + P_b$							17
		$P_L + P_b + Q$							12
		σ_s							—
		σ_p							—
	④'	P_m							6
		$P_L + P_b$							6
		$P_L + P_b + Q$							10
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 周方向応力 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$: せん断応力*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分 ^{*1}						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴 (中央)	⑤	P_m							4
		$P_L + P_b$							—
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							7
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑤'	P_m							4
		$P_L + P_b$							—
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							5
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (下部)	⑥	P_L							—
		$P_L + P_b$							27
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							93
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑥'	P_L							—
		$P_L + P_b$							27
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							123
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (上端部)	⑦	P_L							—
		$P_L + P_b$							2
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							1
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑦'	P_L							—
		$P_L + P_b$							2
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							2
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：周方向応力 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$ ：せん断応力*2： S_d^* 地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（3/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分 ^{*1}						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
底板 (中央)	⑧	P_m							3
		$P_L + P_b$							4
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							8
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑧'	P_m							3
		$P_L + P_b$							3
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							5
		σ_s							—
		σ_p							1
底板 (端部)	⑨	P_L							—
		$P_L + P_b$							11
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							38
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑨'	P_L							—
		$P_L + P_b$							11
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							45
		σ_s							—
		σ_p							1
一次蓋 (密封シール部)	⑩	P_m							10
		$P_L + P_b$							26
		$P_L + P_b + Q$							23
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑩'	P_m							10
		$P_L + P_b$							9
		$P_L + P_b + Q$							12
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 周方向応力 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$: せん断応力*2: S_d^* 地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分 ^{*1}						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋 (中央)	①	P _m							3
		P _L + P _b							10
		P _L + P _b + Q ^{*2}							2
		σ_s							—
		σ_p							—
	①'	P _m							3
		P _L + P _b							8
		P _L + P _b + Q ^{*2}							2
		σ_s							—
		σ_p							—
一次蓋 (端部)	②	P _L							—
		P _L + P _b							42
		P _L + P _b + Q ^{*2}							28
		σ_s							—
		σ_p							—
	②'	P _L							—
		P _L + P _b							33
		P _L + P _b + Q ^{*2}							17
		σ_s							—
		σ_p							—
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張 応力							272
		平均引張応力 + 曲げ応力							335
胴 (密封シール部)	④	P _m							6
		P _L + P _b							17
		P _L + P _b + Q							12
		σ_s							—
		σ_p							—
	④'	P _m							6
		P _L + P _b							6
		P _L + P _b + Q							10
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 周方向応力 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$: せん断応力*2: S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分 ^{*1}						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴 (中央)	⑤	P _m							4
		P _L + P _b							—
		P _L + P _b + Q ^{*2}							7
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑤'	P _m							4
		P _L + P _b							—
		P _L + P _b + Q ^{*2}							5
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (下部)	⑥	P _L							—
		P _L + P _b							27
		P _L + P _b + Q ^{*2}							93
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑥'	P _L							—
		P _L + P _b							27
		P _L + P _b + Q ^{*2}							123
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (上端部)	⑦	P _L							—
		P _L + P _b							2
		P _L + P _b + Q ^{*2}							1
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑦'	P _L							—
		P _L + P _b							2
		P _L + P _b + Q ^{*2}							2
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 周方向応力 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$: せん断応力*2: S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分 ^{*1}						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
底板 (中央)	⑧	P _m							3
		P _L + P _b							4
		P _L + P _b + Q ^{*2}							8
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑧'	P _m							3
		P _L + P _b							3
		P _L + P _b + Q ^{*2}							5
		σ_s							—
		σ_p							1
底板 (端部)	⑨	P _L							—
		P _L + P _b							11
		P _L + P _b + Q ^{*2}							38
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑨'	P _L							—
		P _L + P _b							11
		P _L + P _b + Q ^{*2}							45
		σ_s							—
		σ_p							1
一次蓋 (密封ノール部)	⑩	P _m							10
		P _L + P _b							26
		P _L + P _b + Q							23
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑩'	P _m							10
		P _L + P _b							9
		P _L + P _b + Q							12
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 周方向応力 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$: せん断応力*2: S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（1/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	3	251
	①	$P_L + P_b$	10	271
	①’	$P_L + P_b$	8	271
	①	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
	①’	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	42	271
	②’	$P_L + P_b$	33	271
	②	$P_L + P_b + Q^*$	28	362
	②’	$P_L + P_b + Q^*$	17	362
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	272	547
		平均引張応力＋ 曲げ応力	335	821
胴 (密封シール部)	④－④’	P_m	6	181
	④	$P_L + P_b$	17	181
	④’	$P_L + P_b$	6	181
	④	$P_L + P_b + Q$	12	181
	④’	$P_L + P_b + Q$	10	181
胴 (中央)	⑤－⑤’	P_m	4	181
	⑤	$P_L + P_b + Q^*$	7	362
	⑤’	$P_L + P_b + Q^*$	5	362

注記 *： S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（2/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
胴 (下部)	⑥	$P_L + P_b$	27	271
	⑥'	$P_L + P_b$	27	271
	⑥	$P_L + P_b + Q^*$	93	362
	⑥'	$P_L + P_b + Q^*$	123	362
胴 (上端部)	⑦	$P_L + P_b$	2	271
	⑦'	$P_L + P_b$	2	271
	⑦	$P_L + P_b + Q^*$	1	362
	⑦'	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
底板 (中央)	⑧－⑧'	P_m	3	181
	⑧'	σ_p	1	181
	⑧	$P_L + P_b$	4	271
	⑧'	$P_L + P_b$	3	271
	⑧	$P_L + P_b + Q^*$	8	362
	⑧'	$P_L + P_b + Q^*$	5	362
底板 (端部)	⑨'	σ_p	1	181
	⑨	$P_L + P_b$	11	271
	⑨'	$P_L + P_b$	11	271
	⑨	$P_L + P_b + Q^*$	38	362
	⑨'	$P_L + P_b + Q^*$	45	362
一次蓋 (密封シール部)	⑩－⑩'	P_m	10	181
	⑩	$P_L + P_b$	26	181
	⑩'	$P_L + P_b$	9	181
	⑩	$P_L + P_b + Q$	23	181
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	12	181

注記 *： S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）（1/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	3	251
	①	$P_L + P_b$	10	377
	①’	$P_L + P_b$	8	377
	①	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
	①’	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	42	377
	②’	$P_L + P_b$	33	377
	②	$P_L + P_b + Q^*$	28	362
	②’	$P_L + P_b + Q^*$	17	362
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	272	820
		平均引張応力＋ 曲げ応力	335	820
胴 (密封シール部)	④－④’	P_m	6	181
	④	$P_L + P_b$	17	181
	④’	$P_L + P_b$	6	181
	④	$P_L + P_b + Q$	12	181
	④’	$P_L + P_b + Q$	10	181
胴 (中央)	⑤－⑤’	P_m	4	251
	⑤	$P_L + P_b + Q^*$	7	362
	⑤’	$P_L + P_b + Q^*$	5	362

注記 *： S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）（2/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
胴 (下部)	⑥	$P_L + P_b$	27	377
	⑥'	$P_L + P_b$	27	377
	⑥	$P_L + P_b + Q^*$	93	362
	⑥'	$P_L + P_b + Q^*$	123	362
胴 (上端部)	⑦	$P_L + P_b$	2	377
	⑦'	$P_L + P_b$	2	377
	⑦	$P_L + P_b + Q^*$	1	362
	⑦'	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
底板 (中央)	⑧－⑧'	P_m	3	251
	⑧'	σ_p	1	377
	⑧	$P_L + P_b$	4	377
	⑧'	$P_L + P_b$	3	377
	⑧	$P_L + P_b + Q^*$	8	362
	⑧'	$P_L + P_b + Q^*$	5	362
底板 (端部)	⑨'	σ_p	1	377
	⑨	$P_L + P_b$	11	377
	⑨'	$P_L + P_b$	11	377
	⑨	$P_L + P_b + Q^*$	38	362
	⑨'	$P_L + P_b + Q^*$	45	362
一次蓋 (密封シール部)	⑩－⑩'	P_m	10	181
	⑩	$P_L + P_b$	26	181
	⑩'	$P_L + P_b$	9	181
	⑩	$P_L + P_b + Q$	23	181
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	12	181

注記 * : S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 キャスク容器（ボルトを除く。）の疲労解析不要の評価結果

設計・建設規格 PVB-3140	繰返し荷重		設定繰返し回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧→使用圧力→大気圧		100	繰返し数 $N_1=100$	$3S_m$ に対する許容繰返し数 $N_a=3756$	$N_1 < N_a$ であるので本条件を満足
(2)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象Ⅰ，Ⅱにおける圧力変動		100	圧力変動振幅 $P=1.0 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m=3.88 \text{ MPa}$	$P < A_m$ であるので本条件を満足
(3)	燃料装荷及び燃料取出しでの 2 点間の温度差		100	温度差 $\Delta T=150 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差許容値 $T=277 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(4)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象Ⅰ，Ⅱにおける 2 点間の温度差変動		100	温度差変動振幅 $\Delta T=150 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差変動許容値 $T=277 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(5)	異種材結合部の温度変動		100	温度変動振幅 $\Delta T=150 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T=1185.9 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(6)	機械的荷重の変動	地震力	1×10^4 ※	応力の全振幅 $\Delta \sigma = 123 \text{ MPa}$	1×10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S = 262 \text{ MPa}$	$\Delta \sigma < S$ であるので本条件を満足
				繰返し数 $N_c=10000$	ピーク応力強さに対する許容繰返し回数 $N_a=151811$	繰返し回数と許容繰返し回数の比 $(N_c/N_a) = 0.0659$ $U = 0.132 \leq 1.0$ であるので本条件を満足

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 6-2 疲労累積係数（一次蓋締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (—)
地震時	S_d^*	10000※	2	3	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000※	2	3	1.00×10^6	0.01
U（地震時）						0.02

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 6-2 疲労累積係数（バルブカバー締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (—)
地震時	S_d^*	10000※	1	2	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000※	1	2	1.00×10^6	0.01
U（地震時）						0.02

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 7-1 貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

設計事象	応力評価点	応力分類	貫通孔を無視した場合の応力強さ (S)	貫通孔部の応力 (S _c)	許容応力
I + S _d [*]	⑬	P _L + P _b	7	29	271
	⑬	P _L + P _b + Q	7	27	362
I + S _s	⑬	P _L + P _b	7	29	377
	⑬	P _L + P _b + Q	7	27	362

V-2-4-2-3-2-2 バスケットの耐震性についての計算書
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 応力解析の手順	1
4. 応力の分類	1
4.1 応力の評価	1
4.4.1 主応力	1
4.4.2 応力強さ	2
4.4.3 一次応力強さ	2
4.2 特別な応力の検討	2
4.2.1 純せん断応力の評価	2
4.2.2 支圧応力の評価	2
4.2.3 軸圧縮応力の評価	2
4.2.4 座屈応力の評価	2
5. 応力計算	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時（ S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	5
6. 評価結果	6
6.1 応力強さの評価	6
6.2 特別な応力の評価	6
6.2.1 純せん断応力	6
6.2.2 支圧応力	6
6.2.3 軸圧縮応力	6
6.2.4 座屈応力	6

図表目次

図 2-1	バスケットの応力解析箇所	7
図 5-1	バスケットの応力評価点（面）	8
図 5-2	地震時におけるバスケットの姿勢と荷重方向	9
表 4-1	バスケット用材料の許容応力値	10
表 5-1	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	11
表 5-2	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	12

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ）のバスケットに関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

バスケットの評価部位を図 2-1 に示す。

3. 応力解析の手順

(1)バスケットの応力計算は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

(2)応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは、以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(3)伝熱プレートは、非構造強度部材として評価対象より除外する。

(4)構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、計算書の形状図中に、番号〔例①〕で示す。

応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

4. 応力の分類

応力の計算結果は、表 4-1 に示すように応力の種類ごとに分類して、応力計算書に示す。このときの応力の定義と分類は、設計・建設規格 GNR-2130 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

なお、応力の記号とその方向は以下の通りである。

σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力（x 方向）

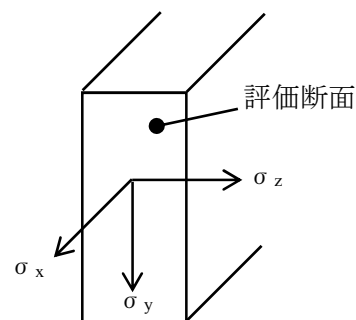
σ_y : 評価断面に平行な方向の応力（y 方向）

σ_z : 評価断面に平行な方向の応力（z 方向）

τ_{xy} : せん断応力

τ_{yz} : せん断応力

τ_{zx} : せん断応力



4.1 応力の評価

4.4.1 主応力

計算された各種の荷重による応力を重ね合わせ、各応力評価点（面）の組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} の 6 成分をもち、応力評価点（面）の主応力は、引用文献(1)の A4 編 1.4.1 項により次式を満足する 3 根として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \cdot \sigma^2 + (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x - \tau_{xy}^2 \\ & \quad - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \cdot \sigma - \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \tau_{yz}^2 + \sigma_y \cdot \tau_{zx}^2 \\ & \quad + \sigma_z \cdot \tau_{xy}^2 - 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ が求まる。

4.4.2 応力強さ

下記の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

4.4.3 一次応力強さ

機械的荷重により発生する一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さが、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

4.2 特別な応力の検討

4.2.1 純せん断応力の評価

純せん断荷重を受ける部分が、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

4.2.2 支圧応力の評価

支圧荷重を受ける部分が、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

4.2.3 軸圧縮応力の評価

軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴の部分が、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

4.2.4 座屈応力の評価

圧縮荷重を受ける部分が、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

バスケットの応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において、 S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。荷重の方向を図 5-2 に示す。なお、地震力には、 S_s 地震力を適用する。

地震力＋自重

5.2.2 計算方法

(1) バスケットプレート

a. 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは、バスケットプレート端部（図 5-1①部）である。

水平方向加速度により発生する応力（ σ_x ）は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_1}{A_1} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$

m_A ：図 5-1 に示す斜線部 A に含まれる使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量（＝ kg）

A_1 ：バスケットプレートの断面積（＝ mm²）

C_H ：水平方向設計震度（＝1.17）

g ：重力加速度（＝9.80665 m/s²）

下方向加速度により発生する応力（ σ_y ）は、次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_b \cdot G_2}{A_b} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、 $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

m_b ：バスケットプレートの全質量（＝ kg）

C_V ：鉛直方向設計震度（＝0.65）

A_b ：バスケットプレート底部の全面積（＝ mm²）

他の応力成分は、零である。

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのは、バスケットプレート格子端部（図 5-1②部）である。

水平方向加速度により発生する応力（ σ_x ， τ_{zx} ）は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{M}{Z} \\ M &= \frac{m_B \cdot G_1 \cdot \ell_p}{12 \cdot \frac{\ell_w}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.3)$$

$$\tau_{zx} = \frac{m_B \cdot G_1}{2 \cdot \frac{A_1}{2}} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、M : バスケットプレート格子中央部の単位幅当たりの曲げモーメント
(N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (= mm³/mm)

m_B : 図 5-1 に示す斜線部 B に含まれる使用済燃料、伝熱プレート及び
バスケットプレートの合計質量 (= kg)

ℓ_p : バスケットプレートの内り (= mm)

ℓ_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (燃料集合体の負荷
面の軸方向長さ) (= mm)

ただし、バスケットプレート同士の嵌合のための切欠きがあるた
め実際の荷重負荷面の長さをℓ_w/2 とする。

G₁ : a. と同じ

下方向加速度により発生する応力 (σ_y) は、一次一般膜応力と同様である。

ここで、G₂ : a. と同じ

他の応力成分は、零である。

c. 純せん断応力

バスケットプレート格子端部(図 5-1②部)に発生する平均せん断応力(σ_s)は、(5.4)
式で計算する。

d. 支圧応力

バスケットプレート端部 (図 5-1①部) に発生する平均支圧応力 (σ_p) は、(5.1)式
で計算する。

e. 座屈応力

バスケットプレート下端部 (図 5-1③部) に発生する座屈応力 (σ_b) は、(5.2) 式
で計算する。

(2) サポートシリンダ

a. 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは、サポートシリンダ下端部 (図 5-1④部) であり、下方向加速
度により発生する応力 (σ_x) は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_s \cdot G_2}{A_s} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、G₂ : (1)a. と同じ

A_s : サポートシリンダの断面積 (= mm²)

m_s : サポートシリンダの質量 (= kg)

b. 一次一般膜+一次曲げ応力

サポートシリンダには、曲げ応力は発生しないので、一次一般膜応力と同様である。

c. 支圧応力

サポートシリンダのバスケットプレート支持部（図 5-1⑤部）に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は，（5.1）式で計算する。

d. 軸圧縮応力

サポートシリンダ下端部（図 5-1④部）に発生する軸圧縮応力（ σ_c ）は，（5.5）式で計算する。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

6. 評価結果

6.1 応力強さの評価

地震時における応力強さの計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，地震時の一次一般膜応力強さ（ P_m ）及び一次一般膜＋一次曲げ応力強さ（ $P_m + P_b$ ）は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 特別な応力の評価

6.2.1 純せん断応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，地震時の平均せん断応力（ σ_s ）は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.2 支圧応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，地震時の平均支圧応力（ σ_p ）は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.3 軸圧縮応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，地震時の軸圧縮応力（ σ_c ）は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.4 座屈応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，地震時の座屈応力（ σ_b ）は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

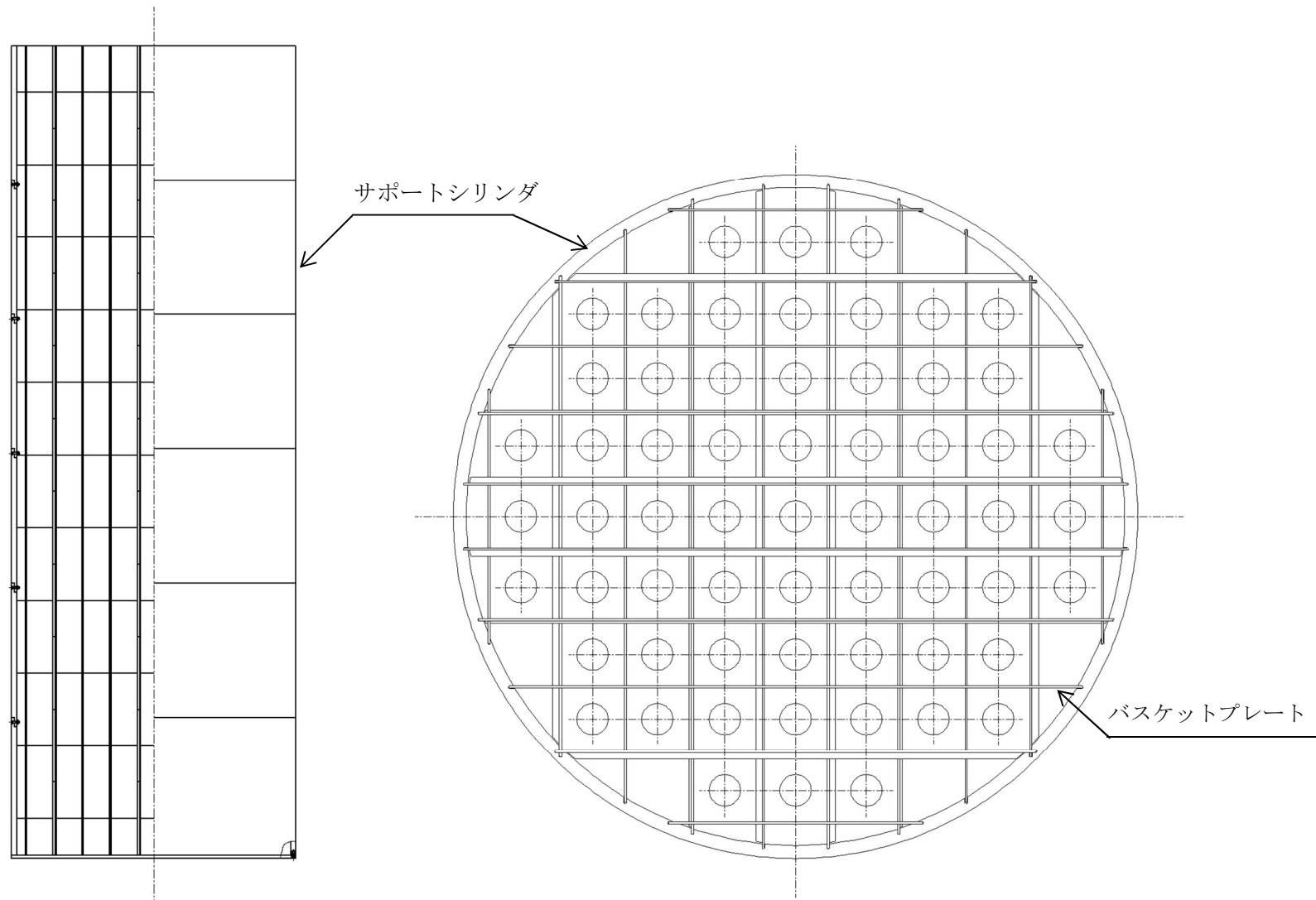


図 2-1 バスケットの応力解析箇所

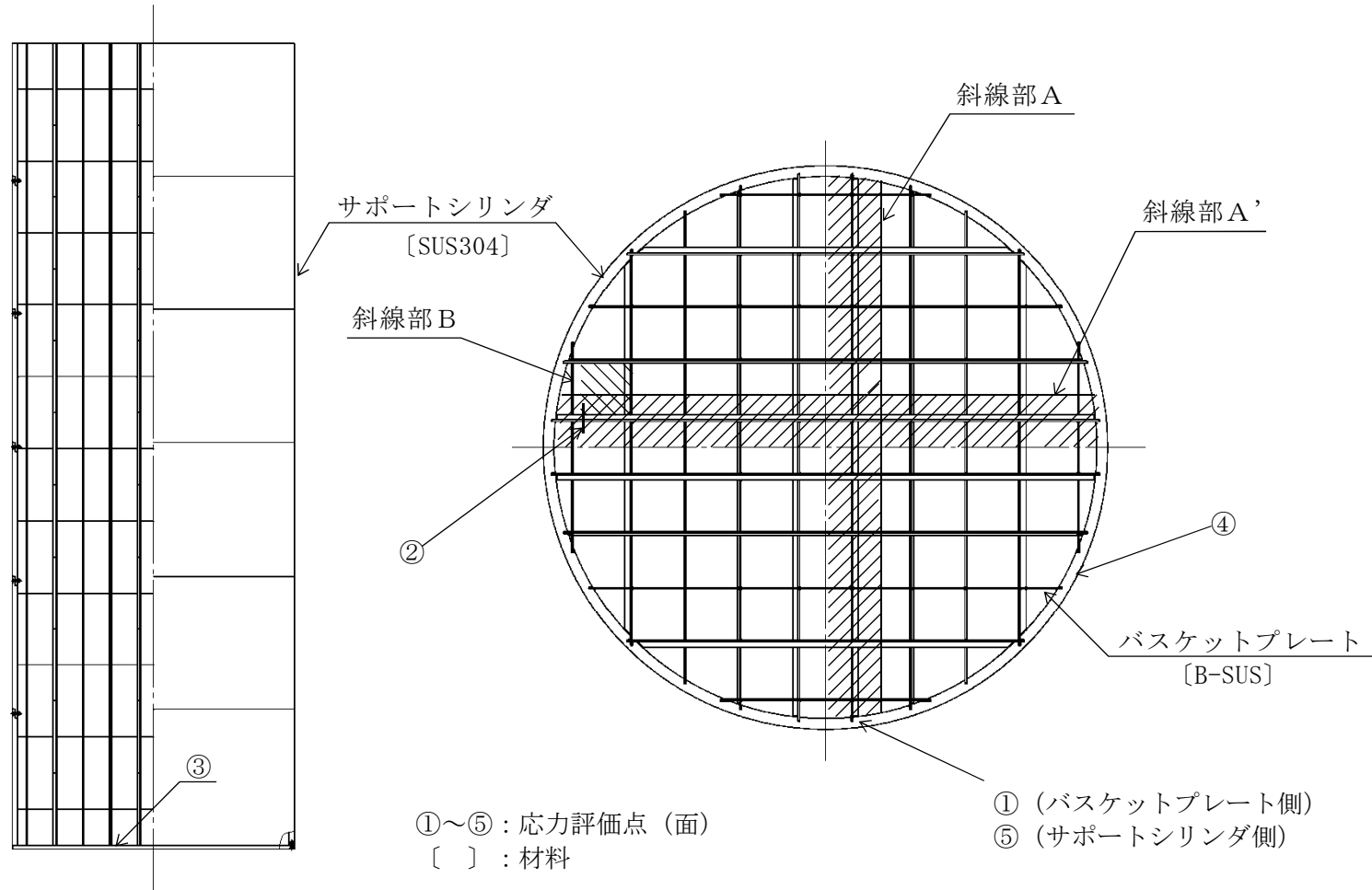


図 5-1 バスケットの応力評価点 (面)

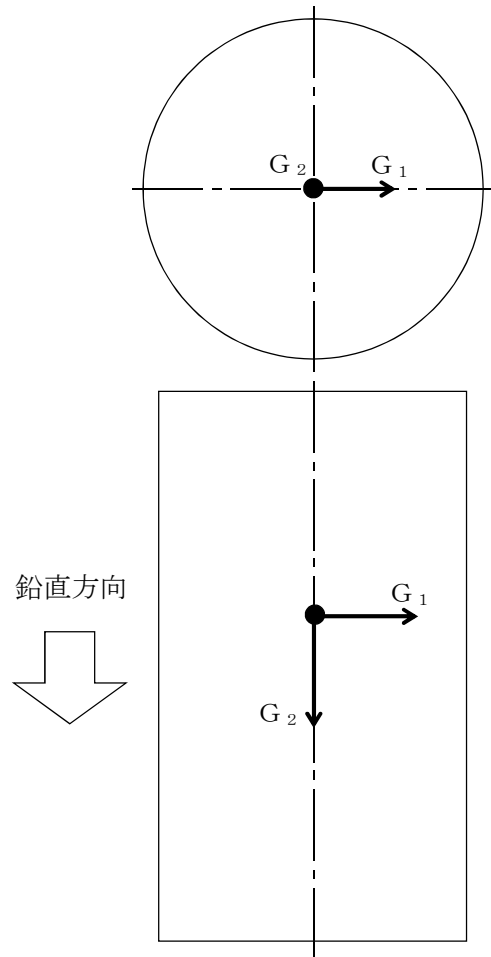


図 5-2 地震時におけるバスケットの姿勢と荷重方向

表 4-1 バスケット用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		バスケットプレート		サポートシリンダ	
		B-SUS	許容値基準	SUS304	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m	201	$1.5 S_m$	180	$1.5 S_m$
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	301	$2.25 S_m$	270	$2.25 S_m$
	平均せん断応力 σ_s	120	$0.9 S_m$	108	$0.9 S_m$
	平均支圧応力 σ_p^{*1}	311 (467)	$1.5 S_y$ ($2.25 S_y$)	200 (300)	$1.5 S_y$ ($2.25 S_y$)
	軸圧縮応力*2 σ_c	—	—	92	$1.5 \times \text{Min}\{S_m, B^{*3}\}$
	座屈応力 σ_b	180	$1.5 f_b,$ $1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$	—	—
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m	269	$\text{Min}\{2.4 S_m,$ $2/3 S_u\}$	263	$\text{Min}\{2.4 S_m,$ $2/3 S_u\}$
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	404	$\text{Min}\{3.6 S_m,$ $S_u\}$	395	$\text{Min}\{3.6 S_m,$ $S_u\}$
	平均せん断応力 σ_s	160	$1.2 S_m$	144	$1.2 S_m$
	平均支圧応力 σ_p^{*1}	415 (622)	$2 S_y$ ($3 S_y$)	266 (400)	$2 S_y$ ($3 S_y$)
	軸圧縮応力*2 σ_c	—	—	123	$2 \times \text{Min}\{S_m,$ $B^{*3}\}$
	座屈応力 σ_b	180	$1.5 f_b,$ $1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$	—	—

注記 *1: ()内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

*2: 円筒形の軸方向の圧縮に対して適用する。

*3: B値は、設計・建設規格 付録材料図表 Part7 図 1 から図 20 までにより求められた値。

表 5-1 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）
（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力
バスケット プレート	P_m	①	2	201
	$P_m + P_b$	②	7	301
	σ_s	②	1	120
	σ_p	①	2	311
	σ_b	③	1	180
サポート シリンダ	P_m	④	1	180
	$P_m + P_b$	④	1	270
	σ_s	—	—	108
	σ_p	⑤	2	200
	σ_c	④	1	92

表 5-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）
（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力
バスケット プレート	P_m	①	2	269
	$P_m + P_b$	②	7	404
	σ_s	②	1	160
	σ_p	①	2	415
	σ_b	③	1	180
サポート シリンダ	P_m	④	1	263
	$P_m + P_b$	④	1	395
	σ_s	—	—	144
	σ_p	⑤	2	266
	σ_c	④	1	123

V-2-4-2-3-2-3 トラニオンの耐震性についての計算書
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力の評価	2
4.1 応力の評価（ボルトを除く）	2
4.1.1 一次応力	2
4.1.2 一次＋二次応力	2
4.1.3 組合せ応力	2
4.2 ボルトの応力評価	2
5. 応力計算	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時（ S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	6
6. 評価結果	7
6.1 一次応力の評価	7
6.2 一次＋二次応力の評価	7
6.3 組合せ応力の評価	7

図表目次

図 2-1	トラニオンの応力解析箇所	8
図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	9
表 4-1	トラニオン用材料の許容応力値	10
表 4-2	トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値	11
表 5-1	トラニオンの応力評価 （貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	12

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ）のトラニオンに関する応力計算書である。

2. 評価部位

トラニオンの評価部位を図 2-1 に示す。

3. 計算方法

(1) トラニオンの応力計算は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

(2) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(3) 貯蔵時において、地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は、下部トラニオン 4 個で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央部とする。

(4) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、計算書の形状図中に、番号〔例①〕で示す。

応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

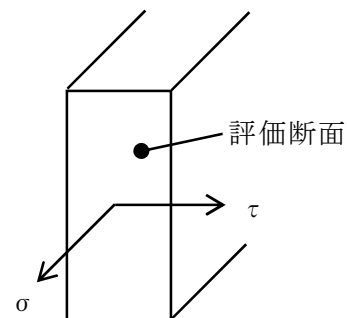
4. 応力の評価

応力の計算結果は表 4-1 及び表 4-2 に示すように応力の種類ごとに分類して、応力計算書に示す。このときの応力の定義と分類は設計・建設規格 GNR-2130 による。

なお、応力の記号とその方向は、以下の通りである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



4.1 応力の評価（ボルトを除く）

4.1.1 一次応力

機械的荷重により発生する一次応力が、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

4.1.2 一次＋二次応力

設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力及び S_s 地震力のみによって発生する一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力が、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

4.1.3 組合せ応力

応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認することにより行う。

4.2 ボルトの応力評価

ボルトの応力評価として、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において、 S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。なお、地震力には、 S_s 地震力を適用する。

地震力＋自重＋トラニオン固定ボルトの初期締付け力

5.2.2 計算方法

(1) トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算する(図 5-2 参照)。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{(F_m + F_1)}{A} \\ F_m &= \frac{m \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2)}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$ 、 $G_2 = (1 - C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (=2720 mm)

a_1 : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
(=2238 mm)

a_2 : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの
距離 (=924.5 mm)

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

m : 貯蔵容器の質量 (= kg)

A : 図 5-1 の評価点①の断面積 (= mm^2)

C_H : 水平方向設計震度 (=1.17)

C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.65)

F_1 : トラニオン固定ボルトの初期締付け力 (= N)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点②である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= (F_m + F_1) \cdot L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、 F_m : (5.1)式と同じ

F_1 : (a)と同じ

Z : 図 5-1 の評価点②の断面係数(= mm^3)

L : 図 5-1 の評価点②と荷重作用位置との距離(=274 mm)

(c) 組合せ応力

イ. せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点②である。

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、 σ_b : (5.2)式と同じ

τ : (5.1)式と同じ

A : 図 5-1 の評価点②の断面積(= mm^2)

b. 一次+二次応力

(a) せん断応力

せん断応力(τ)の全振幅は、(5.1)式で計算する。

(b) 曲げ応力

曲げ応力(σ_b)の全振幅は、(5.2)式で計算する。

(c) 組合せ応力

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、(5.3)式で計算する。

ここで、 σ_b : (5.2)式と同じ

τ : (5.1)式と同じ

A : a. (c).と同じ

(2) トラニオンボルト

トラニオンボルトに発生する引張応力(σ_{tb})は、次のように求める。

曲げモーメントが作用した場合に生じるトラニオンボルトの引張荷重とキャスク容器の圧縮荷重については、図 5-1 に示すように荷重の釣合い条件を考慮することにより求める。

以下にその手順を示す。

- a. σ_{tb} 及び σ_{cc} を仮定してトラニオンボルトの応力計算における中立軸の荷重係数 k を求める。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{tb}}{\sigma_{cc}}} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、 k : トラニオンボルト計算における中立軸の荷重係数(－)

σ_{tb} : トラニオンボルトの引張応力(MPa)

σ_{cc} : キヤスク容器の圧縮応力(MPa)

b. トラニオンボルトの応力計算における中立軸を定める角度 α を求める。

$$\alpha = \cos^{-1} (1 - 2 \cdot k) \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、 α : トラニオンボルト計算における中立軸を定める角度(rad)

c. 各定数 e 、 z 、 C_t 及び C_c を求める。

$$e = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{(\pi - \alpha) \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\pi - \alpha) + \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha} \right\} \dots\dots (5.6)$$

$$z = \frac{1}{2} \cdot \left(\cos \alpha + \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha} \right) \dots\dots\dots (5.7)$$

$$C_t = \frac{2 \cdot \{(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha\}}{1 + \cos \alpha} \dots\dots\dots (5.8)$$

$$C_c = \frac{2 \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha} \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで、 e 、 z 、 C_t 、 C_c : トラニオンボルト計算における係数(－)

d. 各定数を用いて F_{tb} 及び F_{cc} を求める。

$$F_{tb} = \frac{M}{e \cdot D_c} \dots\dots\dots (5.10)$$

$$F_{cc} = F_{tb} \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで、 F_{tb} : トラニオンボルトに作用する引張力(N)

M : (5.2) 式と同じ

L : 図 5-1 のトラニオンボルトと荷重作用点との距離(=342 mm)

D_c : トラニオンボルトのピッチ円直径(=340 mm)

F_{cc} : キヤスク容器に作用する圧縮力(N)

e. σ_{tb} 及び σ_{cc} を求める。

$$\sigma_{tb} = \frac{2 \cdot F_{tb}}{t_1 \cdot D_c \cdot C_t} \dots\dots\dots (5.12)$$

$$\sigma_{cc} = \frac{2 \cdot F_{cc}}{(t_2 + t_1) \cdot D_c \cdot C_c} \dots\dots\dots (5.13)$$

$$t_1 = \frac{n \cdot A_b}{\pi \cdot D_c} \dots\dots\dots (5.14)$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot (D_{bo} - D_{bi}) - t_1 \dots\dots\dots (5.15)$$

ここで, t_1 : トラニオンボルト面積相当板幅 (mm)

t_2 : 圧縮側相当幅 (mm)

n : トラニオンボルト本数 (=16)

A_b : トラニオンボルト (M36) の断面積 (=1.018×10³ mm²)

D_{bo} : トラニオンボルト取付部の外径 (=419.2 mm)

D_{bi} : トラニオンボルト取付部の内径 (=200.5 mm)

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

6. 評価結果

6.1 一次応力の評価

地震時における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より，地震時の一次応力は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 一次＋二次応力の評価

地震時における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より，地震時の一次＋二次応力は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.3 組合せ応力の評価

地震時における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より，地震時における組合せ応力は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

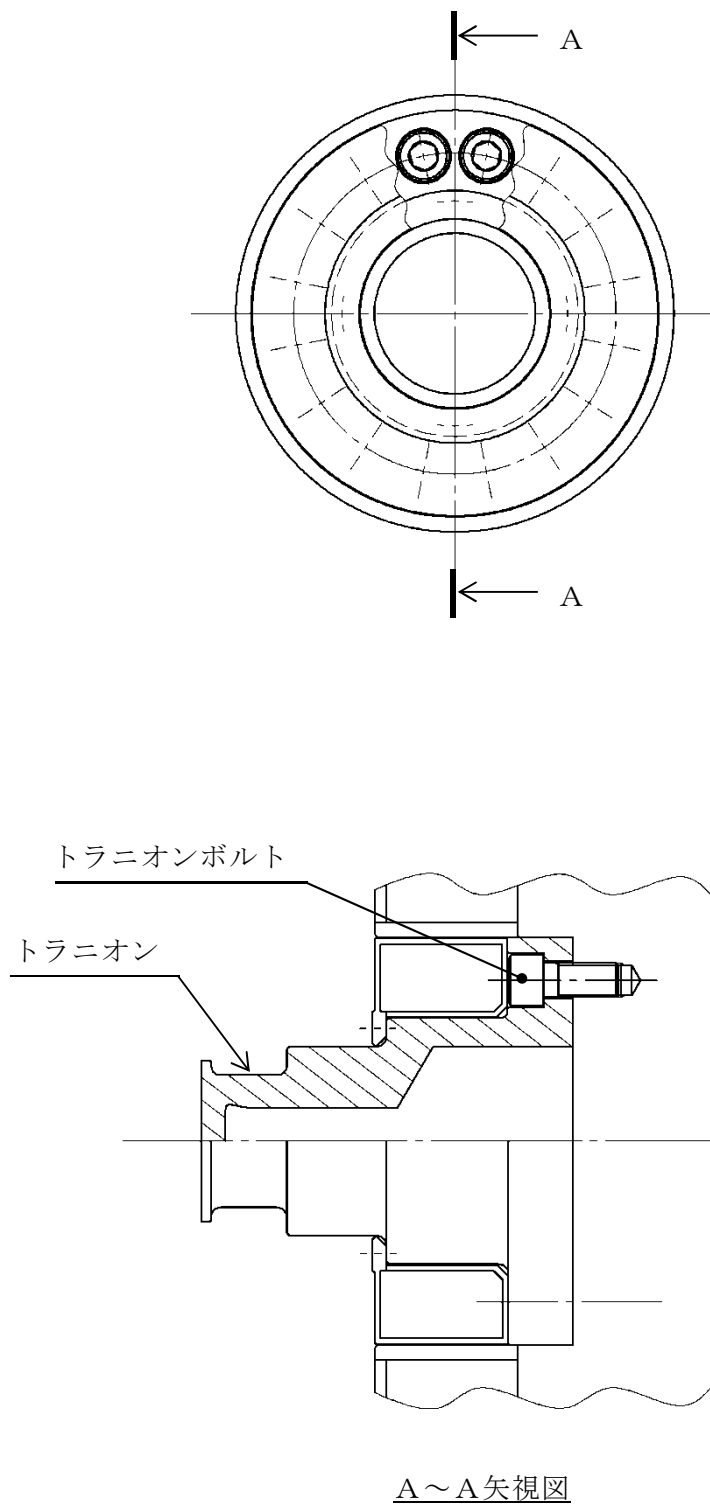


図 2-1 トランスオンの応力解析箇所

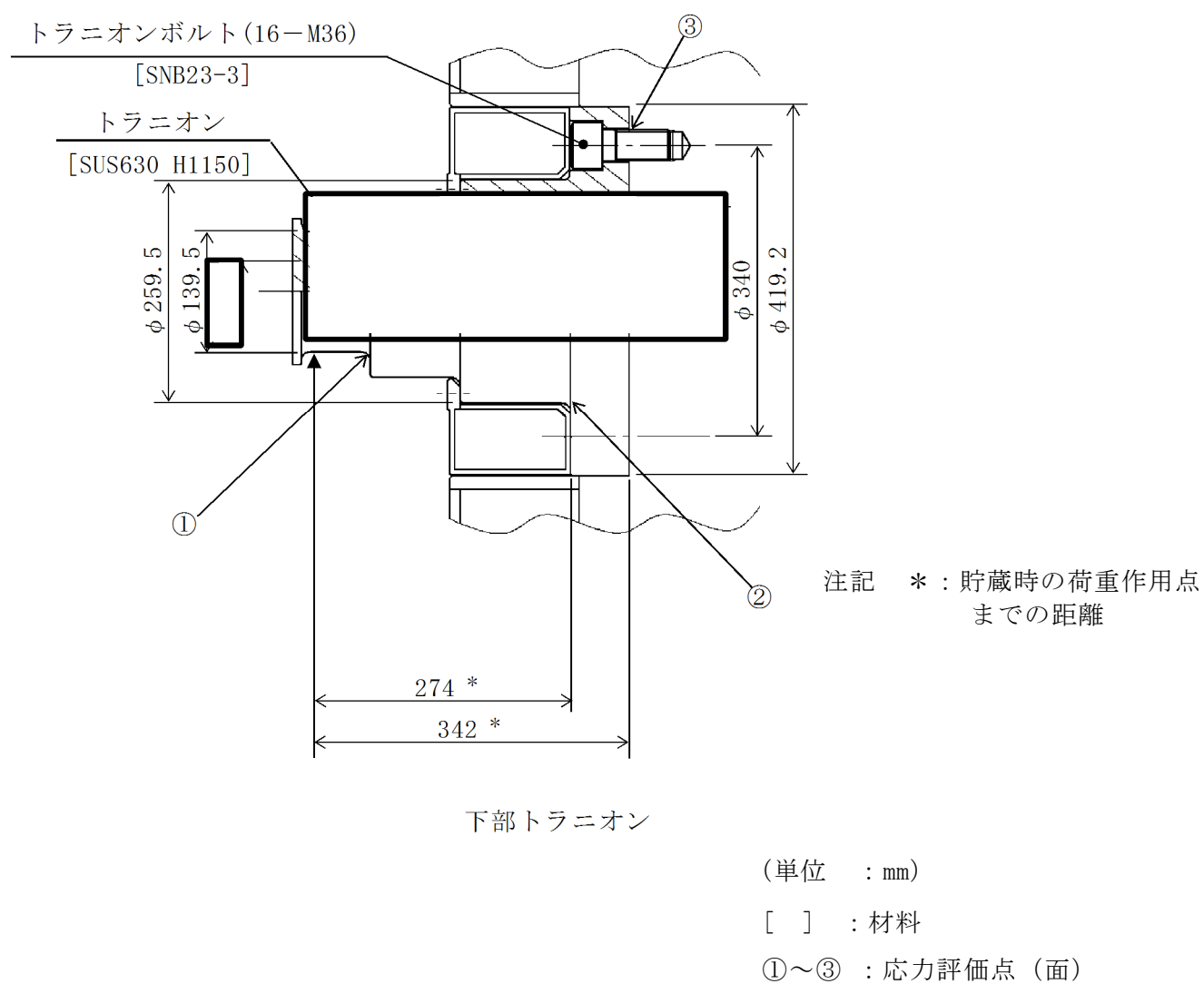


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)

表 4-1 トラニオン用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値	
			トラニオン	許容値基準
			SUS630 H1150	
I + S _d * *1	一次 応力	せん断応力 曲げ応力	341 591	f_s f_b
	一次＋ 二次応力	せん断応力 *2 曲げ応力 *2	682 1182	$2f_s$ $2f_b$
I + S _s *1	一次 応力	せん断応力 曲げ応力	341 591	f_s f_b
	一次＋ 二次応力	せん断応力 *2 曲げ応力 *2	682 1182	$2f_s$ $2f_b$

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（ σ ）とせん断応力（ τ ）を組み合わせた応力（ σ_T ）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

*2：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

設計応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		トラニオン ボルト	許容値基準
		SNB23-3	
I + S _d * *	引張応力	475	f_t
	せん断応力	366	f_s
I + S _s * *	引張応力	475	f_t
	せん断応力	366	f_s

注記 *：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は、次の2つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T \leq f_t$$

ここで、 τ ：ボルトに発生するせん断応力（MPa）

ただし、

I + S_d*の場合、 f_t は $1.5 f_t$ とする。

I + S_sの場合、 f_t は $1.5 f_t^*$ とする。

表 5-1 トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		S_d^* 地震力		S_s 地震力		許容応力
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
下 部 ト ラ ニ オ ン	一 次 応 力	せん断応力	148	①	148	①	341
		曲げ応力	419	②	419	②	591
		垂直応力と せん断応力 の組合せ	441	②	441	②	591
	一 次 ＋ 二 次 応 力	せん断応力	148	①	148	①	682
		曲げ応力	419	②	419	②	1182
		垂直応力と せん断応力 の組合せ	441	②	441	②	1182
ト ラ ニ オ ン ボ ル ト	－	引張応力	323	③	323	③	475

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-2-4 支持構造物の耐震性についての計算書
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	1
5. 応力計算	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	7
5.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	7
5.3.1 荷重条件	7
5.3.2 計算方法	7
5.3.3 計算結果	7
6. 応力の評価	8
6.1 一次応力の評価	8
6.2 一次+二次応力の評価	8
6.3 組合せ応力の評価	8

図表目次

図 2-1	支持構造物の応力解析箇所	9
図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	10
図 5-2	地震時に作用する荷重の計算モデル	12
表 4-1	支持構造物用材料の許容応力値	13
表 4-2	支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値	15
表 5-1	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	16
表 5-2	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	17

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ）の支持構造物に関する応力計算書である。

2. 評価部位

支持構造物の評価部位は、次のとおりである。（図 2-1 参照）

- (1) 支持台座
- (2) トラニオン固定金具
- (3) 容器押えボルト
- (4) トラニオン固定ボルト
- (5) リブ
- (6) 支持台用フレーム
- (7) アンカーボルト

3. 計算方法

- (1) 支持構造物の応力解析は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。
- (2) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。
 - a. 機械的荷重
- (3) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向、下方向、水平方向荷重は、それぞれトラニオン固定金具、支持台座、容器押えボルト及び支持台用フレームで支持する。
なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央部とする。
- (4) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、計算書の形状図中に、番号〔例①〕で示す。
- (5) 応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

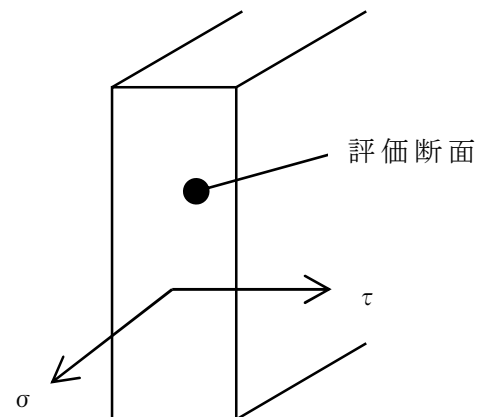
4. 応力評価

応力の計算結果は、「設計・建設規格」GNR-2130 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 4-1 及び 4-2 に示す。

(1) 支持構造物（ボルトを除く。）の応力評価

支持構造物の応力評価は、「設計・建設規格」SSB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、「設計・建設規格」SSB-3130 に従い添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d *地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。なお、地震力には S_s 地震力を適用する。

地震力＋自重＋熱荷重＋トラニオン固定ボルトの初期締付け力

5.2.2 計算方法

トラニオン固定ボルト、トラニオン固定金具、リブ、アンカーボルト、容器押えボルト、支持台座及び支持台用フレームの応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力(F_1)は、図 5-2 に示す支持台①に生じ、次式で計算する。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \cdot m_c \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$ 、 $G_2 = (1 - C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

C_H : 水平方向設計震度 (=1.17)

C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.65)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (= mm)

a_1 : 支点 O から支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
(mm)

a_2 : 支点 O から支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離
(= mm)

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

この引張力(F_1)によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力(σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、 F_1 : (5.1)式と同じ

n : トラニオン固定金具 1 組当たりのボルトの本数 (=)

A : トラニオン固定ボルト の断面積 (= mm^2)

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)及びトラニオン固定ボルトの初期締付け力(F_3)により曲げ応力(σ_b)が発生し、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} \cdot (F_1 + F_3) \cdots \cdots \cdots (5.3)$$

ここで、 F_1 : (5.1)式と同じ

F_3 : トラニオン固定ボルトの初期締付け力 (= N)

L : トラニオン固定ボルト間距離 (= mm)

Z : トラニオン固定金具の断面係数 (= mm^3)

b. 一次+二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は、(5.3)式と同様に計算する。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は、次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / A \cdots \cdots \cdots (5.4)$$

ここで、 F_1 : (5.1)式と同じ

A : 断面積 (= mm^2)

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(F_c)は図 5-2 に示す支持台③に生じ、次式で計算する。

$$F_c = G_2 \cdot (m_c + m_s) + 2 \cdot F_2 + F_1 \cdots \cdots \cdots (5.5)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$, $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

C_H, C_V : (1)a. と同じ

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

m_s : 支持台 1 個の質量 (= kg)

F_1 : (5.1)式と同じ

F_2 : 支持台②での引張力 ($= \frac{a_2}{a_1} \cdot F_1$) (N)

a_1, a_2 : (1)a. と同じ

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = F_c / A \cdots \cdots (5.6)$$

ここで, F_c : (5.5)式と同じ

A : (3)a. (a)と同じ

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は, 次式で計算する。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \cdots \cdots (5.7)$$

ここで, σ_t : (5.4)式と同じ

σ_c : (5.6)式と同じ

(4) アンカーボルト

支持台は図 5-1 に示すように形鋼で互いに接合されている。荷重がA部に加わる
と支持台用フレームを介してB部の支持台でも荷重を受ける。

a. 引張応力

(5.1)式により計算する引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力
(σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \cdots \cdots (5.8)$$

ここで, F_1 : (5.1)式と同じ

n : 支持台 1 個当たりのアンカーボルトの本数 (=)

A : アンカーボルト の断面積 (= mm²)

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は図 5-2 に示す支持台③に生じ, 次式で
計算する。

$$F_H = C_H \cdot g \cdot (m_c + n_1 \cdot m_s) \cdots \cdots (5.9)$$

ここで, C_H : (1)a. と同じ

m_c, m_s : (3)a. (b)と同じ

n_1 : 支持台の数 (=)

この水平力(F_H)は支持台 2 箇所を受けることから, アンカーボルトに発生するせん
断応力(τ)は, 次式で計算する。

$$\tau = F_H / (2 \cdot n \cdot A) \cdots \cdots (5.10)$$

ここで, F_H : (5.9)式と同じ

n, A : a. と同じ

(5) 容器押えボルト

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押えボルトに作用する最大水平力(F_H)は図 5-2 に示す支持台③に生じ, 次式
で計算する。

$$F_H = C_H \cdot g \cdot m_c \dots \dots \dots (5.11)$$

ここで, C_H : (1) a. と同じ
 m_c : (3) a. (b) と同じ

水平力(F_H)により容器押えボルトに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = F_H / (n \cdot A) \dots \dots \dots (5.12)$$

ここで, F_H : (5.11)式と同じ

n : 支持台 1 個当たりの容器押えボルトの本数 (=)

A : 容器押えボルトの断面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 座屈応力

容器押えボルトには地震時以外に外荷重が作用しないので, 地震力による座屈応力の最大値(σ)は, (5.12)式と同様に計算する。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は図 5-2 に示す支持台③に生じ, 次式で計算する。

$$F_c = G_2 \cdot m_c + 2 \cdot F_2 + F_1 + F_3 \dots \dots \dots (5.13)$$

ここで, $G_1 = C_H \cdot g$, $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s²)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s²)

C_H, C_V : (1) a. と同じ

m_c : (3) a. (b) と同じ

F_1 : (5.1)式と同じ

F_2 : (3) a. (b) と同じ

F_3 : (2) a. (a) と同じ

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で計算する。

$$\sigma_p = F_c / A \dots \dots \dots (5.14)$$

ここで, F_c : (5.13)式と同じ

A : 支持台座の貯蔵容器底面接触面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 支圧応力

支圧応力(σ_p)は(5.14)式と同様に計算する。

(7) 支持台用フレーム

a. 一次応力

(a) 引張応力

支持台用フレームには, (5.9)式により計算する最大水平力(F_H)の 1/2 の荷重が加わり, このときの引張応力 (σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_H / (2 \cdot A) \dots \dots \dots (5.15)$$

ここで、 F_H ：(5.9)式と同じ

A ：支持台用フレームの断面積（＝ mm^2 ）

b. 一次＋二次応力

(a) 引張応力

最大水平荷重による引張応力の全振幅(σ_t)は、(5.15)式と同様に計算する。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

5.3 貯蔵時（ S_s 地震力が作用する場合）

5.3.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重＋トラニオン固定ボルトの初期締付け力

5.3.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押えボルト，支持台座及び支持台用フレームの応力計算は 5.2.2 項と同様である。

ただし、 C_H ：水平方向設計震度（＝1.17）

C_V ：鉛直方向設計震度（＝0.65）

5.3.3 計算結果

応力計算結果を表 5-2 に示す。

6. 応力の評価

6.1 一次応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，一次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 一次＋二次応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，一次＋二次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.3 組合せ応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，各設計事象における組合せ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

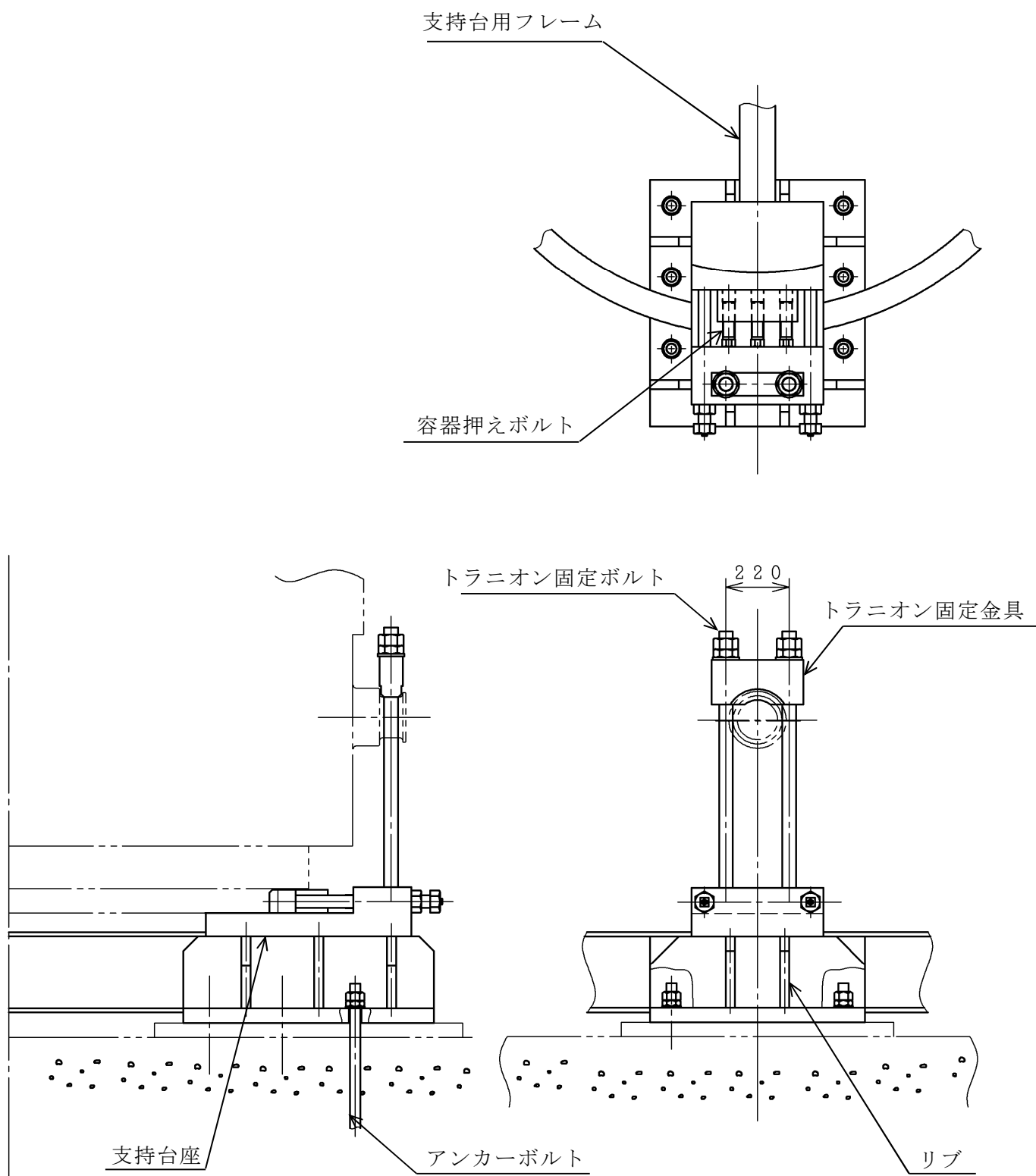


図 2-1 支持構造物の応力解析箇所

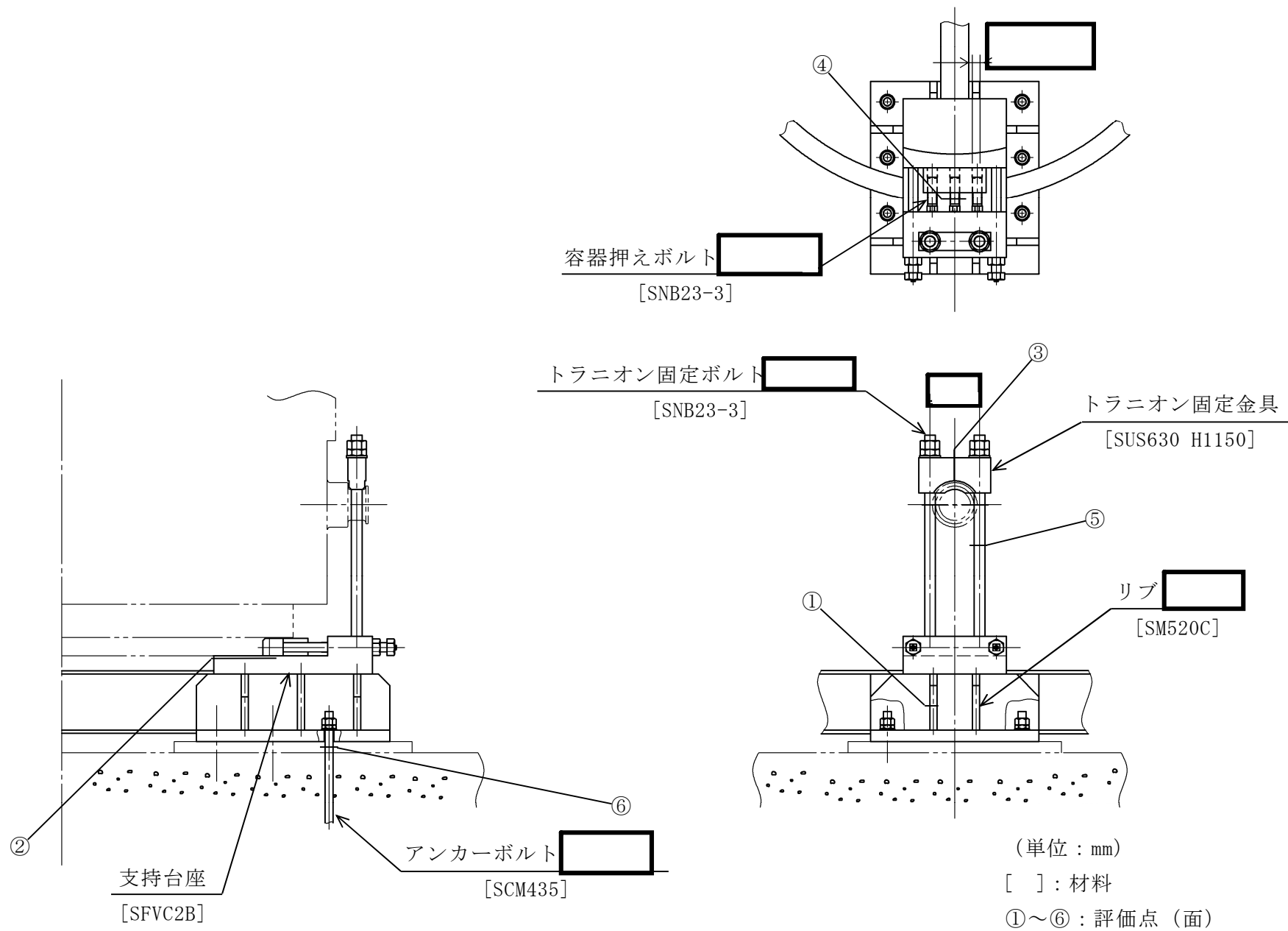
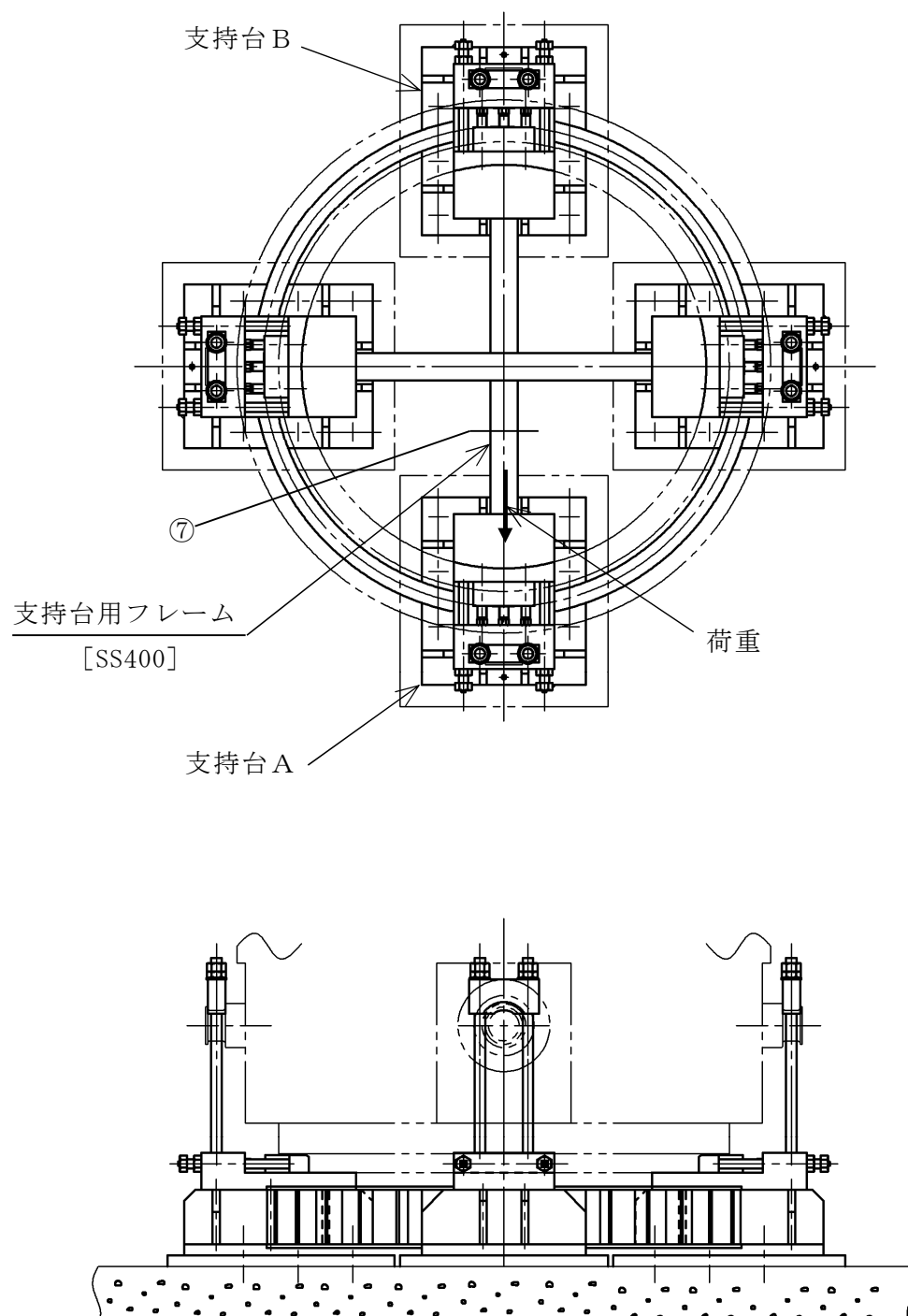


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面) (1/2)



[] : 材料
⑦ : 応力評価点 (面)

図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面) (2/2)

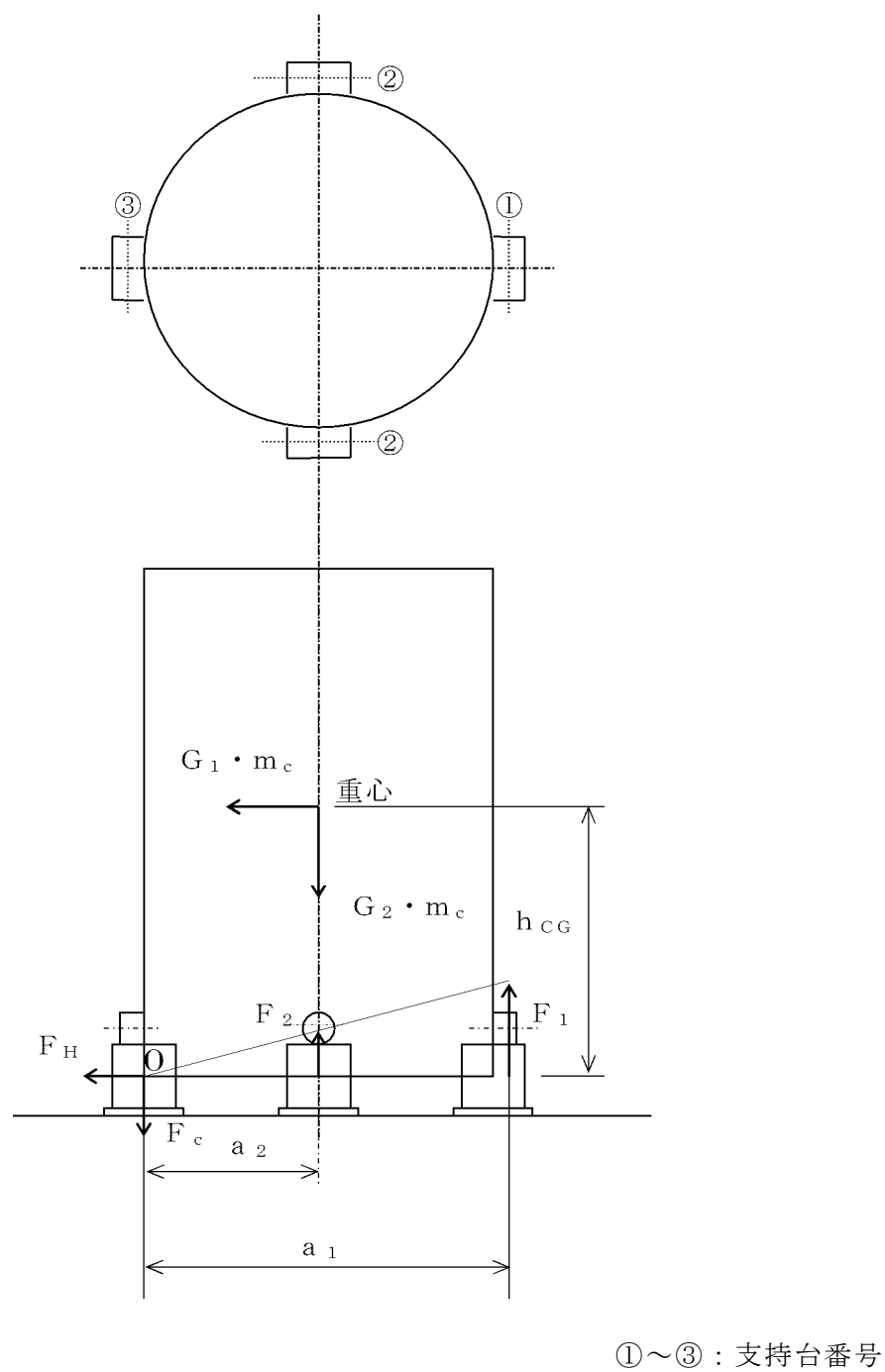


図 5-2 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 4-1 支持構造物用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値					
			炭素鋼	炭素鋼	ステンレス鋼	低合金鋼	炭素鋼	許容値基準
			リブ	支持 台座	トラニオン 固定金具	容器押え ボルト	支持台 用 フレーム	
			SM520C	SFVC2B	SUS630 H1150	SNB23-3	SS400	
I + S _d * ^{*1}	一次 応力	引張応力	305	222	591	638	212	f_t
		圧縮応力	284	222	591	631	212	f_c
		せん断応力	176	128	341	368	122	f_s
		曲げ応力	305	222	591	638	212	f_b
		支圧応力	415	302	805	870	289	f_p
	一次＋ 二次 応力	引張・圧縮応力 ^{*2}	610	444	1182	1276	424	$2f_t$
		せん断応力 ^{*2}	352	256	682	736	244	$2f_s$
		曲げ応力 ^{*2}	610	444	1182	1276	424	$2f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	f_p
		座屈応力	176	128	341	631	122	f_b, f_s 又は f_c

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|\sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|\sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + |\sigma_b|}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|\sigma_b| - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、設計事象 I の一次応力については上式による。

I + S_d*の一次応力の場合、分母の f_c 、 f_b 、 f_t は $1.5 f_c$ 、 $1.5 f_b$ 、 $1.5 f_t$ とする。
I + S_d*の一次＋二次応力の場合、分母の f_c 、 f_b 、 f_t は $3 f_c$ 、 $3 f_b$ 、 $3 f_t$ とする。

*2：S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 支持構造物用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値					許容値基準
			炭素鋼	炭素鋼	ステンレス鋼	低合金 鋼	炭素鋼	
			リブ	支持 台座	トラニオン 固定金具	容器押 え ボルト	支持台用 フレーム	
			SM520C	SFVC2B	SUS630 H1150	SNB23-3	SS400	
I + S _s *1	一次 応力	引張応力	340	266	591	638	254	f_t
		圧縮応力	314	266	591	631	254	f_c
		せん断応力	196	153	341	368	146	f_s
		曲げ応力	340	266	591	638	254	f_b
		支圧応力	463	362	805	870	346	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	610	444	1182	1276	424	$2f_t$
		せん断応力 *2	352	256	682	736	244	$2f_s$
		曲げ応力 *2	610	444	1182	1276	424	$2f_b$
		支圧応力	463	362	805	870	346	f_p
		座屈応力	176	128	341	631	122	f_b, f_s 又は f_c

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c^*} + \frac{| \sigma_b |}{1.5f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{1.5f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{| \sigma_b | - \sigma_t}{1.5f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の $1.5f_c^*$ 、 $1.5f_b^*$ 、 $1.5f_t^*$ は $3f_c$ 、 $3f_b$ 、 $3f_t$ とする。

*2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

設計応力 区分	応力の種類	許容応力値		
		低合金鋼	低合金鋼	許容値基準
		トラニオン 固定ボルト	アンカー ボルト	
		SNB23-3	SCM435	
I + S _d * *	引張応力	478	444	f_t
	せん断応力	368	341	f_s
I + S _s * *	引張応力	478	444	f_t
	せん断応力	368	341	f_s

注記 *：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は、次の2つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T \leq f_t$$

ここで、 τ ：ボルトに発生するせん断応力（MPa）

ただし、設計事象 I については上式による。I + S_d*の場合、 f_t は $1.5 f_t$ とする。I + S_sの場合、 f_t は $1.5 f_t^*$ とする。

表 5-1 支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	401	③	591
	一次＋二次応力 *	曲げ応力	401	③	1182
リ ブ	一次応力	引張応力	18	①	305
		圧縮応力	64	①	284
	一次＋二次応力 *	引張・圧縮 応力	81	①	610
容器押えボルト	一次応力	圧縮応力	417	④	631
	一次＋二次応力	座屈応力	417	④	631
支持台座	一次応力	支圧応力	41	②	302
	一次＋二次応力	支圧応力	41	②	302
支持台用 フレーム	一次応力	引張応力	99	⑦	212
	一次＋二次応力*	引張応力	99	⑦	424
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	305	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	181	⑥	444
		せん断応力	113	⑥	341
		組合せ応力	181	⑥	440

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	401	③	591
	一次+二次応力 *	曲げ応力	401	③	1182
リ ブ	一次応力	引張応力	18	①	340
		圧縮応力	64	①	314
	一次+二次応力 *	引張・圧縮 応力	81	①	610
容器押えボルト	一次応力	圧縮応力	417	④	631
	一次+二次応力	座屈応力	417	④	631
支持台座	一次応力	支圧応力	41	②	362
	一次+二次応力	支圧応力	41	②	362
支持台用 フレーム	一次応力	引張応力	99	⑦	254
	一次+二次応力*	引張応力	99	⑦	424
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	305	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	181	⑥	444
		せん断応力	113	⑥	341
		組合せ応力	181	⑥	440

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-2-5 二次蓋の耐震性についての計算書
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 評価方法	1
5. 計算結果	2
5.1 応力評価点	2
5.2 計算方法	2
5.3 計算結果	2
6. 評価結果	2

図表目次

図 2-1 二次蓋の構造	3
図 5-1 応力評価点（面）	3
図 5-2 計算モデル	4
表 4-1 二次蓋の許容応力値	5
表 4-2 二次蓋締付けボルトの許容応力値	5
表 5-1(1) 二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ： $D + P_d + M_d + S_d^*$ の場合）	6
表 5-1(2) 二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ： $D + P_d + M_d + S_s$ の場合）	7
表 6-1 二次蓋の応力評価	8

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅡ）の二次蓋に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

二次蓋の評価部位を図 2-1 に示す。

3. 計算方法

(1) 二次蓋の応力計算は、二次蓋の実形状をモデル化し、汎用解析コードである

「ABAQUS」を用いて行う。

解析コードの検証および妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS」に示す。

(2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の 3 つである。

- a. 最高使用圧力 (0.4 MPa)
- b. ボルト初期締付け力 (N)
- c. 地震力

(3) 計算モデルは次の方針に従う。

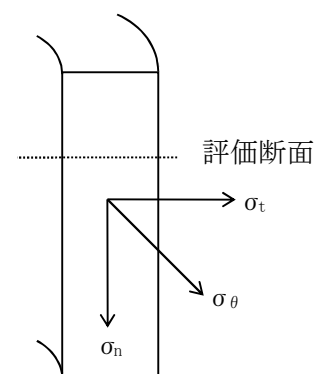
- a. モデル化に当たっては、二次蓋の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

4. 評価方法

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{n\theta}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



二次蓋用材料の許容応力値を表 4-1 に示す。

二次蓋締付けボルトの許容応力値を表 4-2 に示す。

(1) 二次蓋の応力評価

二次蓋の応力評価は、以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ（地震力のみによる応力振幅）

(2) 二次蓋締付けボルトの応力評価

二次蓋締付けボルトの応力評価は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 計算結果

5.1 応力評価点

評価対象として応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 計算方法

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-2 に示す。また、加速度として次の値を用いる。

$$S_d * \text{地震力が作用する場合} : \alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2, \quad \alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$$

$$S_s \text{ 地震力が作用する場合} : \alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2, \quad \alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$$

5.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

6. 評価結果

各設計事象における二次蓋及び二次蓋締付けボルトの評価を表 6-1 に示す。

表 6-1 より各部の一次応力は許容値を満足する。また、二次蓋の一次+二次応力は $2 S_y$ 以下となり、疲労評価不要の条件を満足する。

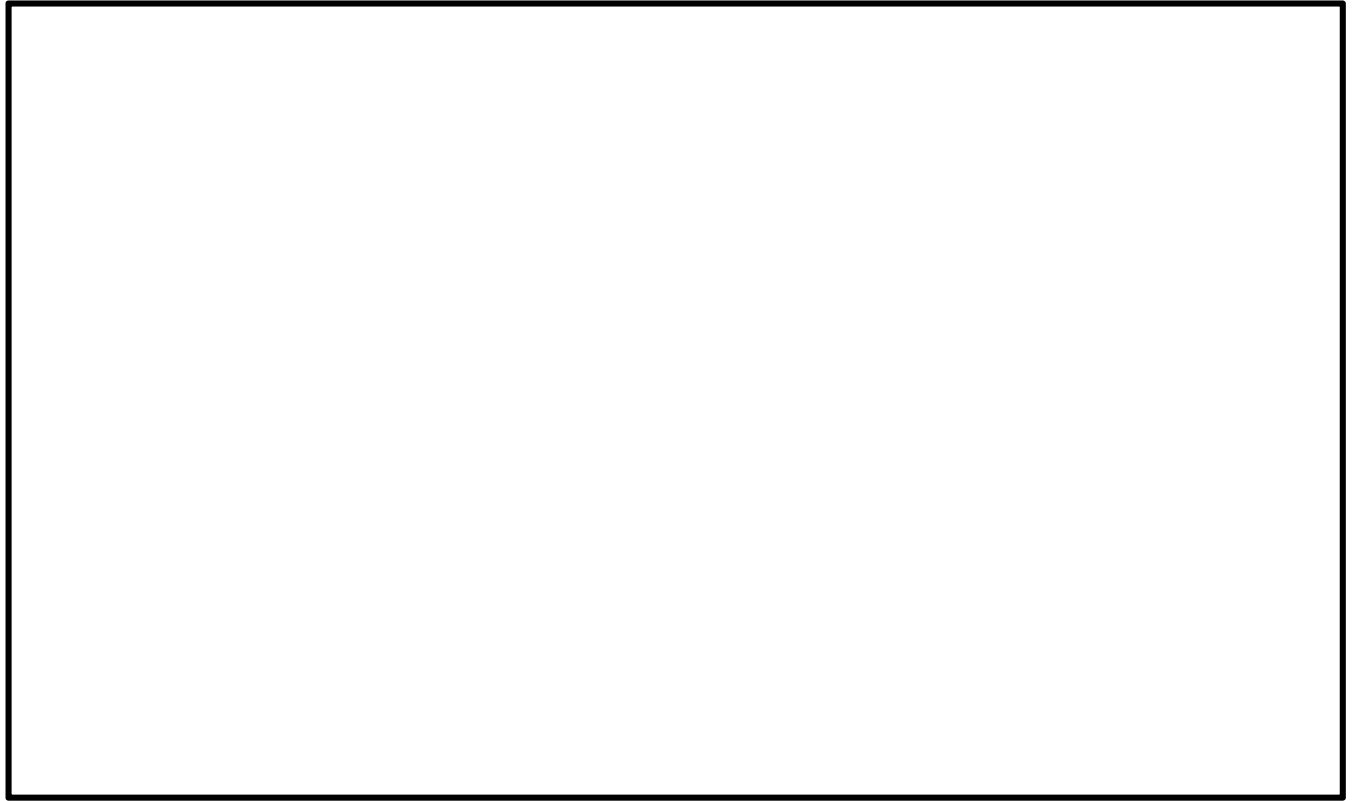


図 2-1 二次蓋の構造

- ①：二次蓋中央部
- ②：二次蓋端部
- ③：二次蓋締付けボルト

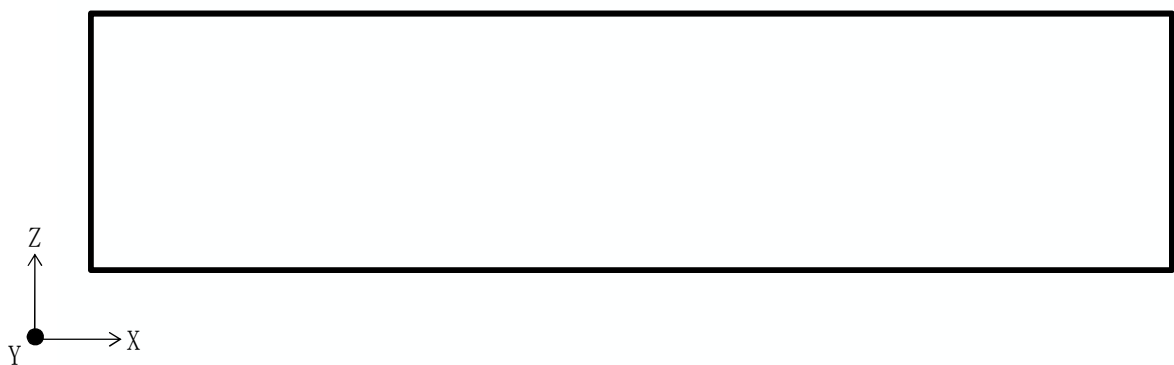


図 5-1 応力評価点（面）

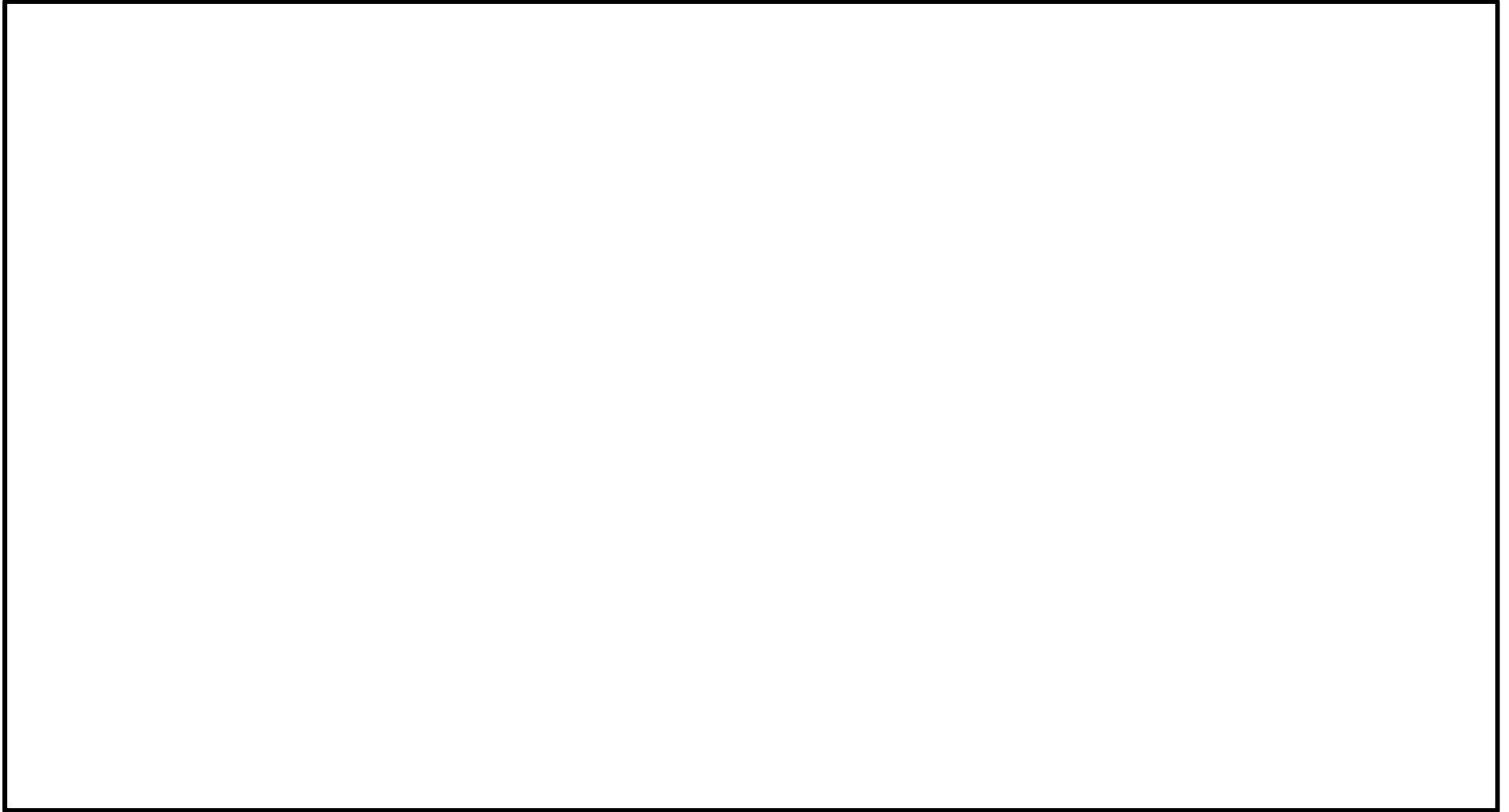


図 5-2 計算モデル

表 4-1 二次蓋の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 状態	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			炭素鋼	
			二次蓋	
			GLF1	許容値基準
$I + S_d^*$	$D + P_d + M_d + S_d^*$	一次一般膜応力 (P_m)	187	$\text{Min} (S_y, 0.6 S_u)$
		一次膜＋一次曲げ応力 ($P_L + P_b$)	280	上記の 1.5 倍
		一次＋二次応力* ($P_L + P_b + Q$)	374	$2 S_y$
$I + S_s$	$D + P_d + M_d + S_s$	一次一般膜応力 (P_m)	226	$0.6 S_u$
		一次膜＋一次曲げ応力 ($P_L + P_b$)	339	$0.9 S_u$
		一次＋二次応力* ($P_L + P_b + Q$)	374	$2 S_y$

注記 * : S_d^* 又は S_s 地震動のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 二次蓋締付けボルトの許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 状態	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			低合金鋼	
			二次蓋締付けボルト	
			SNB23-3	許容値基準
$I + S_d^*$	$D + P_d + M_d + S_d^*$	平均引張応力	300	$1.5 S$
$I + S_s$	$D + P_d + M_d + S_s$	平均引張応力	400	$2 S$

表 5-1(1) 二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D + P_d + M_d + S_d*の場合）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応 力 成 分* ¹						計算 値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$		
二 次 蓋	①-①'	P _m							1	187
	①	P _L + P _b							14	280
		P _L + P _b + Q* ²							1	374
	①'	P _L + P _b							15	280
		P _L + P _b + Q* ²							1	374
	②	P _L + P _b							47	280
		P _L + P _b + Q* ²							1	374
	②'	P _L + P _b							10	280
		P _L + P _b + Q* ²							1	374
二次蓋 締付け ボルト	③	平均引張応力							108	300

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力
 *2：S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-1(2) 二次蓋の応力計算結果（荷重組合せ：D + P_d + M_d + S_s の場合）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応 力 成 分*1						計算 値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$		
二 次 蓋	①-①'	P _m							1	226
	①	P _L + P _b							14	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
	①'	P _L + P _b							15	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
	②	P _L + P _b							47	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
	②'	P _L + P _b							10	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
二次蓋 締付け ボルト	③	平均引張応力							108	400

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力

σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力

*2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 二次蓋の応力評価

(単位：MPa)

許容応力 区 分	荷重の組合せ	部 位	応力分類	応力 評価点	計算値	許容 応力値
$I + S_d^*$	$D + P_d + M_d + S_d^*$	二次蓋	P_m	①－①'	1	187
			$P_L + P_b$	②	47	280
			$P_L + P_b + Q^*$	①	1	374
		二次蓋締 付けボルト	平均引張応力	③	108	300
$I + S_s$	$D + P_d + M_d + S_s$	二次蓋	P_m	①－①'	1	226
			$P_L + P_b$	②	47	339
			$P_L + P_b + Q^*$	①	1	374
		二次蓋締 付けボルト	平均引張応力	③	108	400

注記 * : S_d^* 又は S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-3 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書
(タイプⅢ)

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	3
2.4 記号の説明	4
2.5 計算精度と数値の丸め方	7
3. 固有周期	8
3.1 固有周期の計算方法	8
3.2 固有周期の評価	8
4. 構造強度評価	9
4.1 構造強度評価方法	9
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	9
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	9
4.2.2 許容応力	9
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	9
4.3 設計用地震力	11
4.4 計算方法	11
4.5 応力の評価	11
5. 評価結果	11

図表目次

図 2-1	使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フロー	3
表 2-1	構造計画（タイプⅢ）	2
表 2-2	表示する数値の丸め方	7
表 3-1	固有周期の計算結果	8
表 4-1	荷重の組合せ及び許容限界	10
表 4-2	使用材料の許容応力評価条件	10
表 4-3	設計用地震力	11

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の設計方針に基づき、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅢ）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。

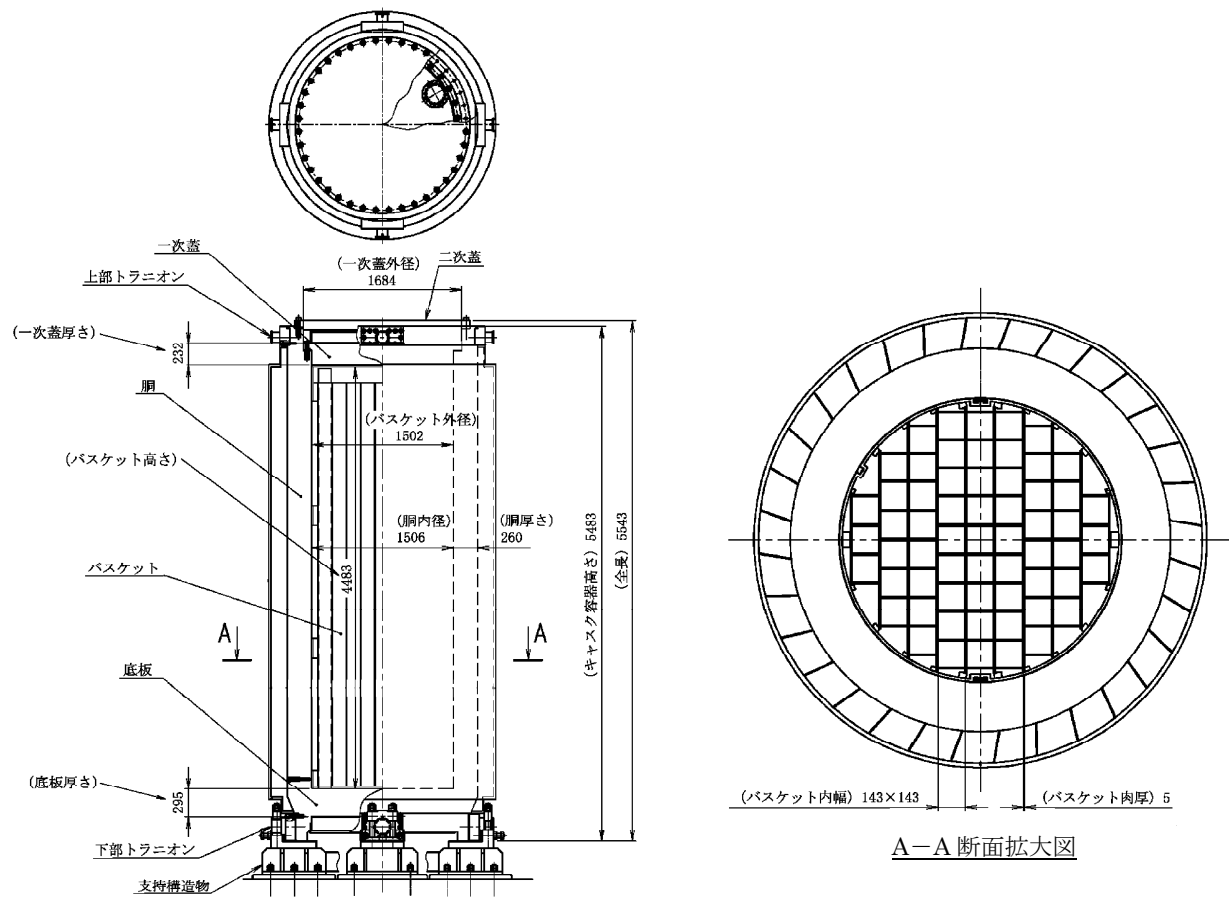
使用済燃料乾式貯蔵容器は、使用済燃料を貯蔵していること及び想定されるいかなる場合にも収納する使用済燃料の臨界を防止する必要があることから、Sクラス施設に分類される。以下、構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

使用済燃料乾式貯蔵容器の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画 (タイプⅢ)

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
使用済燃料乾式貯蔵容器は縦置型で、トラニオンを介し支持構造物で支持され、アンカーボルトで基礎に固定される。 使用済燃料はキャスク容器*内に配置されたバスケットにより支持される。	縦置円筒型容器	 A-A 断面拡大図 [単位: mm]

*: キャスク容器とは、胴、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト、バルブカバー、バルブカバー締付けボルトをいう。

2.2 評価方針

使用済燃料乾式貯蔵容器の応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の「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」にて示す使用済燃料乾式貯蔵容器の部位を踏まえ、「3. 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対して算出する応力等が許容限界内に収まることを確認することで実施する。

使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

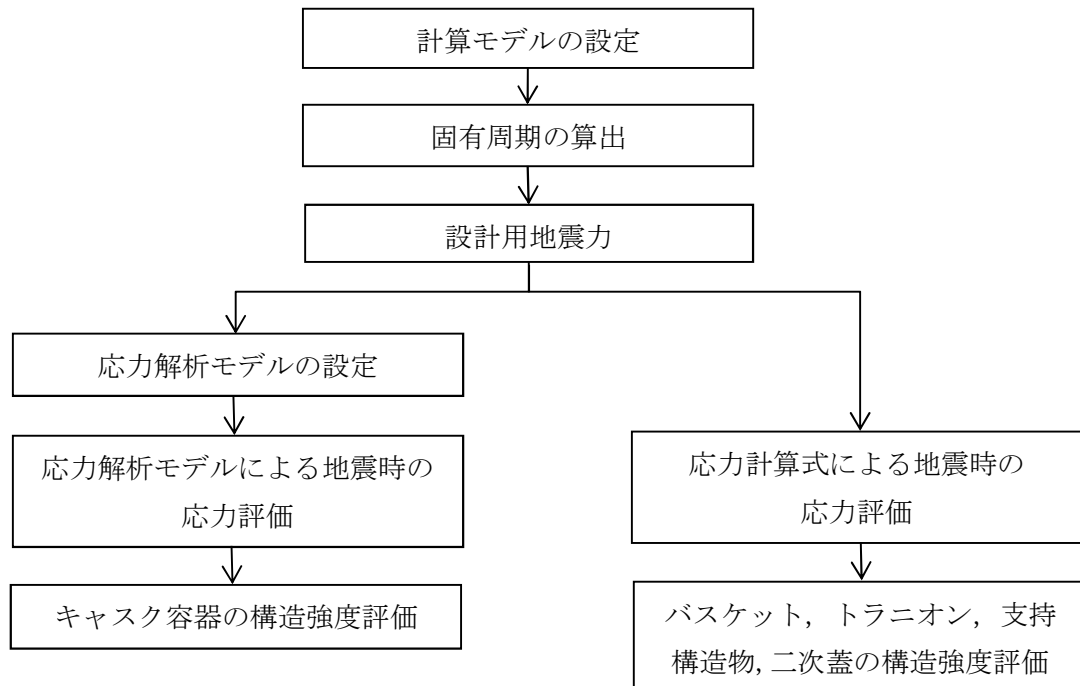


図 2-1 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1 -1987 (社) 日本電気協会
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 (社) 日本電気協会
- (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 (社) 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

計算書の記号	記号の説明	単 位
A	断面積	mm ²
B	設計・建設規格 付録材料図表 Part7 図 2 の縦軸の B 値	—
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
K	応力集中係数	—
m	質量	kg
N	許容繰返し回数	回
n	繰返し回数	回
P _a	許容外圧	MPa
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _{do}	最高使用圧力 (外圧)	MPa
P _L	一次局部膜応力強さ	MPa
P _m	一次一般膜応力強さ	MPa
Q	二次応力	MPa
R	キャスク容器の平均半径	mm
r	半径	mm
S	許容繰返し回数に対する繰返しピーク応力強さ	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の大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—

計算書の記号	記号の説明	単 位
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
S_ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S_ℓ'	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
T	温度	℃
T_r	締付けトルク	N・mm
t	板厚	mm
U	疲労累積係数	—
W	荷重	N
α	熱膨張係数	mm/mm℃
σ_b	圧縮応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
F_b	軸力	N/mm
F_f	ボルトの締付け力	N
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
ℓ	バスケットプレート長さ（バスケット全長）	mm
M	曲げモーメント	N・mm
Q_b	二次曲げ応力	MPa
Q_m	二次膜応力	MPa
Z	断面係数	mm ³
θ	角度	°
σ_f	ボルトの締付け応力	MPa
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力 (x 方向)	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力 (y 方向)	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力 (z 方向)	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
a_1	地震時の貯蔵容器回転支点 O から支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a_2	地震時の貯蔵容器回転支点 O から支持台⑥のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm

計算書の記号	記号の説明	単 位
F_m	トラニオンに作用する荷重	N
f_t	許容引張応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
$f_t^* *$	許容引張応力	MPa
$f_s^* *$	許容せん断応力	MPa
$f_c^* *$	許容圧縮応力	MPa
$f_b^* *$	許容曲げ応力	MPa
$f_p^* *$	許容支圧応力	MPa
h_{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
σ_B	トラニオン取付けボルトの引張応力	MPa
F_1	引張力	N
F_2	支持台②での引張力	N
F_c	圧縮力	N
F_H	水平力	N
f_T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
AB	ボルト全数の最小断面積	mm ²
d	直径	mm
D	死荷重	—
dG	ガスケットの平均径	mm
f	ガスケット 1 本当たりの線荷重	N/mm
FG	ガスケット反力	N
G	地震力による加速度	m/s ²
K	平板の取付方法による係数	—
MD	機械的荷重	—
P	最高使用圧力又は等分布荷重	MPa
PD	最高使用圧力による機械的荷重	—
r	ボルトピッチ円の半径	mm
σ_D	死荷重による応力	MPa
σ_P	最高使用圧力による応力	MPa
σ_M	機械的荷重による応力	MPa
σ_S	地震力による応力	MPa
f_s	許容せん断応力 (f_s を 1.5 倍した値又は f_s^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_t	許容引張応力 (f_t を 1.5 倍した値又は f_t^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_c	許容圧縮応力 (f_c を 1.5 倍した値又は f_c^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_b	許容曲げ応力 (f_b を 1.5 倍した値又は f_b^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_p	許容支圧応力 (f_p を 1.5 倍した値又は f_p^* を 1.5 倍した値)	MPa

注記 * : f_t^* , f_s^* , f_c^* , f_b^* , f_p^* : f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

2.5 計算精度と数値の丸め方

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	処理法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	—	—	設計値
質量	kg	—	—	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

注記 *：応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

3. 固有周期

3.1 固有周期の計算方法

使用済燃料乾式貯蔵容器をはりでモデル化すると、上端自由及び下端固定のはりの固有周期（T）は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L^2}{1.875^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{E \cdot I}} \\ m &= \frac{m_T}{L} \\ I &= \frac{\pi}{64} \cdot (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

- L : 貯蔵容器の全長 (= 5.543 m)
- E : 胴の縦弾性係数 (= 1.94×10^{11} Pa)
- I : 胴の断面二次モーメント (= 0.571 m⁴)
- m_T : 貯蔵容器（内部も含む）の総質量 (= 1.14×10^5 kg)
- d_o : 胴の外径 (= 2.026 m)
- d_i : 胴の内径 (= 1.506 m)

3.2 固有周期の評価

3.1 項の計算により得られた固有周期の計算結果を表 3-1 に示す。計算結果より、剛であることを確認した。

表 3-1 固有周期の計算結果

固有周期（秒）
T =

4. 構造強度評価

4.1 構造強度評価方法

- (1) 地震力は使用済燃料乾式貯蔵容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。
- (2) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を用いる。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

使用済燃料乾式貯蔵容器の荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4-1 に示す。

4.2.2 許容応力

使用済燃料乾式貯蔵容器の許容応力については、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」のとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

使用済燃料乾式貯蔵容器の使用材料の許容応力評価条件については、表 4-2 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容限界

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	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 用容器	使用済燃料乾式貯蔵容器	S	—	$D + P + M + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P + M + S_s$	Ⅳ _A S

表 4-2 使用材料の許容応力評価条件

評価部材		材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S _m (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)
キャスク容器	胴, 底板, 密封シール部	GLF1	最高使用温度	160	—	121	182	377
	一次蓋	GLF1 相当材	最高使用温度	160	—	121	182	377
	一次蓋締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	160	—	275	825	—
	バルブカバー	SUSF304	最高使用温度	160	—	135	152	418
	バルブカバー締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	160	—	275	825	—
バスケット	枠板 (大), (小)	SUS304, B-SUS	最高使用温度	230	—	125	138	399
	燃料支持板	SUS304	最高使用温度	230	—	125	138	399
	拘束リング	SUS304	最高使用温度	230	—	125	138	399
	拘束リングボルト	SUS630	最高使用温度	230	—	298	610	815
	枠板固定ボルト	SUS630	最高使用温度	230	—	298	610	815
トラニオン	トラニオン	SUS630	最高使用温度	160	—	—	636	841
	トラニオン取付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	160	—	—	825	898
支持構造物	支持台座	SF490A	最高使用温度	130	—	—	222	438
	トラニオン固定金具	SNB24-1	最高使用温度	130	—	—	967	1037
	容器押え金具	SNB23-1	最高使用温度	130	—	—	967	1037
	トラニオン固定ボルト	SNB23-1	最高使用温度	130	—	—	967	1037
	リブ	SM490B	最高使用温度	130	—	—	272	441
	アンカーボルト	SCM435	最高使用温度	130	—	—	665	847
二次蓋	二次蓋	SM400A	最高使用温度	100	—	—	194	373
	二次蓋締付けボルト	SNB23-3	最高使用温度	100	200	—	—	—

4.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-3 に示す。

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

表 4-3 設計用地震力

据付場所及び 床面高さ(m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL8.3m ^{*1}		—	$C_H=0.72$	$C_V=0.36$	$C_H=1.17$	$C_V=0.65$

注 *1：基準床レベルを示す。

4.4 計算方法

使用済燃料乾式貯蔵容器の計算方法については、以下の各図書「3. 計算方法」に示す。

キャスク容器：添付書類「V-2-4-2-3-3-1 キャスク容器の耐震性についての計算書」

バスケット：添付書類「V-2-4-2-3-3-2 バスケットの耐震性についての計算書」

トラニオン：添付書類「V-2-4-2-3-3-3 トラニオンの耐震性についての計算書」

支持構造物：添付書類「V-2-4-2-3-3-4 支持構造物の耐震性についての計算書」

二次蓋：添付書類「V-2-4-2-3-3-5 二次蓋の耐震性についての計算書」

4.5 応力の評価

4.4 項で求めた計算値が、4.2.2 項で示した許容応力以下であること。

5. 評価結果

使用済燃料乾式貯蔵容器の応力の評価結果については、以下の各図書「応力の評価」に示す。計算値は許容応力以下であり、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

キャスク容器：添付書類「V-2-4-2-3-3-1 キャスク容器の耐震性についての計算書」

バスケット：添付書類「V-2-4-2-3-3-2 バスケットの耐震性についての計算書」

トラニオン：添付書類「V-2-4-2-3-3-3 トラニオンの耐震性についての計算書」

支持構造物：添付書類「V-2-4-2-3-3-4 支持構造物の耐震性についての計算書」

二次蓋：添付書類「V-2-4-2-3-3-5 二次蓋の耐震性についての計算書」

V-2-4-2-3-3-1 キャスク容器の耐震性についての計算書
 (タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	2
5. 応力の評価	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	4
5.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	4
5.3.1 荷重条件	4
5.3.2 計算方法	4
5.3.3 計算結果	4
6. 評価結果	5
6.1 キャスク容器 (ボルトを除く) の応力評価	5
6.2 ボルトの応力評価	5
6.3 特別な応力の評価	5
6.4 繰り返し荷重の評価	6
6.4.1 キャスク容器 (ボルトを除く) の評価	6
6.4.2 ボルトの評価	10
6.4.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討	10
6.4.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析	10
6.4.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析	11
7. 穴の補強	12

図表目次

図 2-1	キャスク容器の応力解析箇所	13
図 5-1	キャスク容器の応力評価点（面）	15
図 5-2	キャスク容器の解析モデル（圧力+ボルト初期締付け力作用時）	16
図 5-3	キャスク容器の解析モデル（地震時）	17
図 5-4	キャスク容器の解析モデル（自重作用時）	18
表 4-1	キャスク容器用材料の許容応力値	19
表 4-2	キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値	21
表 5-1	キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	22
表 5-1	キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	26
表 5-2	キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	30
表 5-2	キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	32
表 6-1	キャスク容器（ボルトを除く）の疲労解析不要の評価結果	34
表 6-2	繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）	35
表 6-3	繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）	35
表 7-1	貫通孔部の応力強さ	36

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅢ）のキャスク容器に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

キャスク容器の評価部位は、次のとおりである（図 2-1 参照）。

- (1) 胴
- (2) 一次蓋
- (3) 一次蓋締付けボルト
- (4) バルブカバー
- (5) バルブカバー締付けボルト
- (6) 密封シール部

3. 計算方法

- (1) キャスク容器の応力解析は、想定される圧力荷重，機械的荷重を基に，キャスク容器の実形状をモデル化し，汎用解析コードである「A B A Q U S」及び応力評価式を用いて行う。

解析コードの検証および妥当性確認等の概要については，添付書類「V-5-5 計算機プログラム（解析コード）の概要・A B A Q U S」に示す。

- (2) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

- a. 内圧
- b. 機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器（二次蓋を含む）の貯蔵時の設計重量を用いる。），衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

- (3) 計算モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては，キャスク容器及び底部中性子遮蔽体カバーの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 荷重が局部的に作用するため，その局部的荷重による発生応力を評価するため三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

また，モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

- (4) 構造の不連続性を考慮して，応力評価点(面)をとる。評価点(面)は，応力計算書に示す。

応力評価は，この応力評価点(面)について行う。

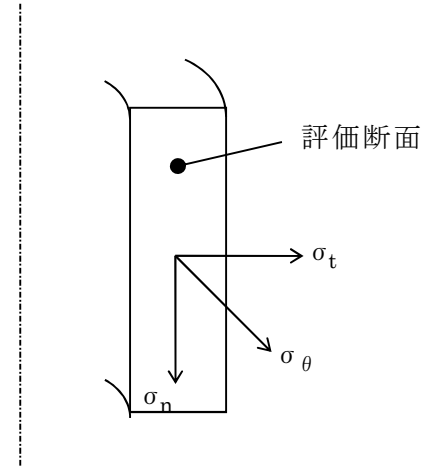
- (5) 溶接部については，母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

4. 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{\theta n}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力値を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

キャスク容器の応力評価は設計・建設規格 PVB-3110 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は設計・建設規格 PVB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 応力の評価

5.1 応力評価点

キャスク容器の応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d *地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧（ -0.1 MPa）＋蓋間圧力（ 0.4 MPa）＋ボルト初期締付け力＋地震力＋自重

5.2.2 計算方法

(1) 一次応力及び一次＋二次応力

a. 胴，底板，一次蓋及び一次蓋締付けボルト

(a) 圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-2 に示す。

(b) 地震力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-3 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$$G_1 = 0.72 \text{ g } (=7.06 \text{ m/s}^2)$$

$$G_2 = 0.36 \text{ g } (=3.53 \text{ m/s}^2) \dots\dots\dots (5.1)$$

(c) 自重が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-4 に示す。なお，解析モデル形状は(a)と同一である。

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部の底板に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_g \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで，

m_g : バスケット及び燃料の質量（＝ kg）

G_2 : 鉛直方向加速度（＝ $1 \text{ g} + 0.36 \text{ g}$ （＝ 13.34 m/s^2 ））

A : 接触面積（＝ mm^2 ）

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

5.3 貯蔵時（S₃地震力が作用する場合）

5.3.1 荷重条件

貯蔵時において S₃地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧（－0.1 MPa）＋蓋間圧力（0.4 MPa）＋ボルト初期締付け力＋
地震力＋自重

5.3.2 計算方法

計算方法は 5.2.2 と同様である。

ただし、

$$\begin{aligned} G_1 &= 1.17 \text{ g} (= 11.48 \text{ m/s}^2) \\ G_2 &= 0.65 \text{ g} (= 6.38 \text{ m/s}^2) \dots\dots\dots (5.3) \end{aligned}$$

また、平均支圧応力算出時の加速度は $G_2 = 1 \text{ g} + 0.65 \text{ g} (= 16.19 \text{ m/s}^2)$ である。

5.3.3 計算結果

応力計算結果を表 5-2 に示す。

6. 評価結果

6.1 キヤスク容器（ボルトを除く）の応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の一次一般膜応力強さ（ P_m ）、一次局部膜応力強さ（ P_L ）、一次膜＋一次曲げ応力強さ（ $P_L + P_b$ ）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さ（ $P_L + P_b + Q$ ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 ボルトの応力評価

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.3 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

平均せん断応力（ σ_s ）を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

(2) 支圧応力

評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均支圧応力（ σ_p ）は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

(3) 軸圧縮応力

軸圧縮応力（ σ_b ）を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

6.4 繰返し荷重の評価

6.4.1 キャスク容器（ボルトを除く）の評価

設計・建設規格 PVB-3140 により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(7)に示し、表 6-1 にその評価結果のまとめを示す。なお、燃料装荷・取出しサイクルは通常 1 回であるが、本評価においては 100 回と想定しても条件を満足することを示す。

(1) 設計・建設規格 PVB-3140(1)（大気圧－使用圧力－大気圧の変動）

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数（ N_1 ）は、燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として評価する。

$$N_1 = 100 \text{ (回)}$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、設計温度における設計応力強さ $3 \cdot S_m$ (364 MPa) を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数（ N_a ）は、

$$N_a = 3691 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 < N_a$$

であり、条件を満足する。

(2) 設計・建設規格 PVB-3140(2)（燃料装荷・取出し及び耐圧試験等を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおける圧力変動）

燃料装荷、燃料取出しを除く設計事象Ⅰ及びⅡにおける圧力変動の全振幅の許容値（ A_{m1} ）は次式で計算する。

$$A_{m1} = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.23 \text{ MPa} \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、

P : 最高使用圧力（＝1.0 MPa）

S_m : 設計応力強さ（＝121 MPa）

S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において 10^6 を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値（＝86 MPa）

また、(6.1) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値（ A_{m2} ）は次式で計算する。

$$A_{m2} = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \dots\dots\dots (6.2)$$

ここで、

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(6.1) 式による値を超える実際の圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値（MPa）

(6.1) 式より、圧力変動の全振幅の許容値 (A_{m1}) は、0.23 MPa となる。設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合における実際の圧力は密封容器のため (6.1) 式による値の 0.23 MPa を超える変動は生じないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし、計 100 回として

(6.2) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$A_{m2} = 3.8 \text{ MPa}$$

となる。

したがって、燃料装荷、燃料取出しを除く設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合における圧力変動の全振幅を最高使用圧力 ($P (=1.0 \text{ MPa})$) と仮定しても、

$$P < A_{m2}$$

であり、条件を満足する。

(3) 設計・建設規格 PVB-3140(3) (燃料装荷・取出し時の温度差)

キャスク容器の任意の 2 点間の距離 (p) は次式で計算する。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 956 \text{ mm} \dots\dots\dots (6.3)$$

ここで、

R : キャスク容器の平均半径 ($=882.5 \text{ mm}$)

t : キャスク容器の板厚 ($=259 \text{ mm}$)

キャスク容器の燃料装荷時及び燃料取出し時において、相互の距離が p を超えない任意の 2 点間の温度差の許容値 T は次式で計算する。なお、2 点間の平均温度はキャスク容器の最高使用温度 ($T_{\max}=160^\circ\text{C}$) とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 282^\circ\text{C} \dots\dots\dots (6.4)$$

ここで、

E : 2 点間の平均温度における縦弾性係数 ($=1.94 \times 10^5 \text{ MPa}$)

α : 2 点間の平均温度における瞬時熱膨張係数
($=12.88 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm}^\circ\text{C})$)

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、燃料装荷・取出しの回数 (100 回) を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 ($=1413 \text{ MPa}$)

したがって、任意の 2 点間において生じる温度差を最高使用温度 ($T_{\max}$) と常温との差 ($\Delta T=140^\circ\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(4) 設計・建設規格 PVB-3140(4) (燃料装荷・取出し時を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱの温度差変動)

燃料装荷, 燃料取出しを除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて, 相互の距離が p を超えない任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅の許容値 (T) は, 次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \dots\dots\dots (6.5)$$

ここで,

E, α : 6.4.1 (3) と同じ

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において, (5.6) 式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合に, これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

$$T' = \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 17.2^\circ\text{C} \dots\dots\dots (6.6)$$

ここで,

T' : 温度差変動の全振幅 ($^\circ\text{C}$)

S : 6.4.1 (2) と同じ

設計事象Ⅰ, 設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので, 任意の 2 点間の温度差の変動が (6.6) 式により計算した値の 17.2°C を超えることはないと考えられるが, 変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし, 計 100 回として (6.5) 式を用いて評価すると,

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$T = 282^\circ\text{C}$$

したがって, キャスク容器の任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度 ($T_{\max}$) と常温との差 ($\Delta T = 140^\circ\text{C}$) と仮定しても,

$$\Delta T < T$$

であり, 条件を満足する。

(5) 設計・建設規格 PVB-3140(5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

縦弾性係数又は熱膨張係数の値が異なる材料で作られた部分は, 一次蓋と一次蓋排水バルブ部 (一次蓋ボス) の部分である。

一次蓋と一次蓋ボスの温度変動の許容値 T は次式で計算する。なお, 縦弾性係数及び熱膨張係数はキャスク容器の最高使用温度 ($T_{\max} = 160^\circ\text{C}$) に対する値とする。

$$T = \frac{S}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} = 63^\circ\text{C} \dots\dots\dots (6.7)$$

ここで、

S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、 10^6 を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 ($=86 \text{ MPa}$)

E_1 : 一次蓋の縦弾性係数 ($=1.94 \times 10^5 \text{ MPa}$)

E_2 : 一次蓋ボスの縦弾性係数 ($=1.85 \times 10^5 \text{ MPa}$)

α_1 : 一次蓋の瞬時熱膨張係数 ($=12.88 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm}^\circ\text{C})$)

α_2 : 一次蓋ボスの瞬時熱膨張係数 ($=17.16 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm}^\circ\text{C})$)

また、(6.7) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (T) は次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \dots\dots\dots (6.8)$$

ここで、

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(6.7) 式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

設計事象 I, 設計事象 II 及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので、温度変動は、気温変動によるものと考え、(6.7) 式により計算した値の 63°C を超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし、計 100 回として評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$T = 1045 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、設計事象 I, 設計事象 II 及び地震力が作用する場合において生じる温度の変動を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(6) 設計・建設規格 PVB-3140(6) (機械荷重変動)

S_d^* 及び S_s 地震による繰返し回数 10000 回に対する許容繰返しピーク応力強さ (262 MPa) に対し、地震力により発生する応力の全振幅は表 6-1 に示すとおりすべて下回っている。また、地震力による疲労累積係数は 1.0 を下回っていることから、

$$\Delta \sigma \leq S$$

である。

なお、 S_d^* 及び S_s 地震による繰返し回数は、J E A G 4 6 0 1・補-1984(社) 日本機械学会 参考資料 III 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

(7) 検討結果

以上の(1)から(6)より、設計・建設規格 PVB-3140 の規定を全て満足しているので、疲労解析を必要としない。

6.4.2 ボルトの評価

6.4.1 項において疲労評価が不要となる条件を満足することから、一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトについて、地震動のみによる疲れ累積係数が 1.0 以下となることを示す。

6.4.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

- (1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり、設計・建設規格 PVB-3122(2)に従い、設計疲労線図として設計・建設規格 添付 4-2 3.4 に示されるものを使用する。
- (2) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが 0.4 mm, バルブカバー締付けボルトが 0.2mm であって 0.07mm より大である。
- (3) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は、

$$\text{一次蓋締付けボルト：} \quad \frac{2.0}{25.5} = 0.078$$

$$\text{バルブカバー締付けボルト：} \quad \frac{1.0}{9.5} = 0.105$$

であって、0.06 以上である。

6.4.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析

一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは次式で計算する。

$$S_p = K \cdot \frac{m_\ell \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで、

S_p : ピーク応力強さ (MPa)

K : 一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)

m_ℓ : 一次蓋の質量 (= kg)

G_2 : 鉛直方向加速度

$$S_d^* \quad 3.53 \text{ m/s}^2$$

$$S_s \quad 6.38 \text{ m/s}^2$$

A : 全数のボルト最小断面積 (= mm²)

また、繰返しピーク応力強さは次式で計算する。

$$S_{\ell} = \frac{1}{2} \cdot S_p \dots\dots\dots (6.10)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 (4) のとおり， (2.07×10^5) と材料の使用温度における縦弾性係数（ $E = 1.83 \times 10^5$ MPa）の比を繰返しピーク応力強さに乗じて補正する。

$$S_{\ell}' = S_{\ell} \cdot \frac{2.07 \times 10^5}{E} \dots\dots\dots (6.11)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 により，補正した繰返しピーク応力強さ（ S_{ℓ}' ）に対する許容繰返し回数を求める。繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 6-2 に示すとおりとなり，地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.4.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。

ただし，

m_{ℓ} : バルブカバーの質量（＝ kg）

A : 全数のボルト最小断面積（＝ mm²）

である。

繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 6-3 に示すとおりである。

したがって，地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

7. 穴の補強

設計・建設規格 PVB-3520 により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で計算する。

$$S_c = K \cdot S \dots\dots\dots (7.1)$$

ここで、

S_c : 貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0)

S : 貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ(S)は表 5-1 及び表 5-2 より求められる。

したがって、貫通孔部の応力強さ(S_c)は表 7-1 に示すとおりとなり、すべて許容応力を満足するため、貫通孔の補強は不要となる。

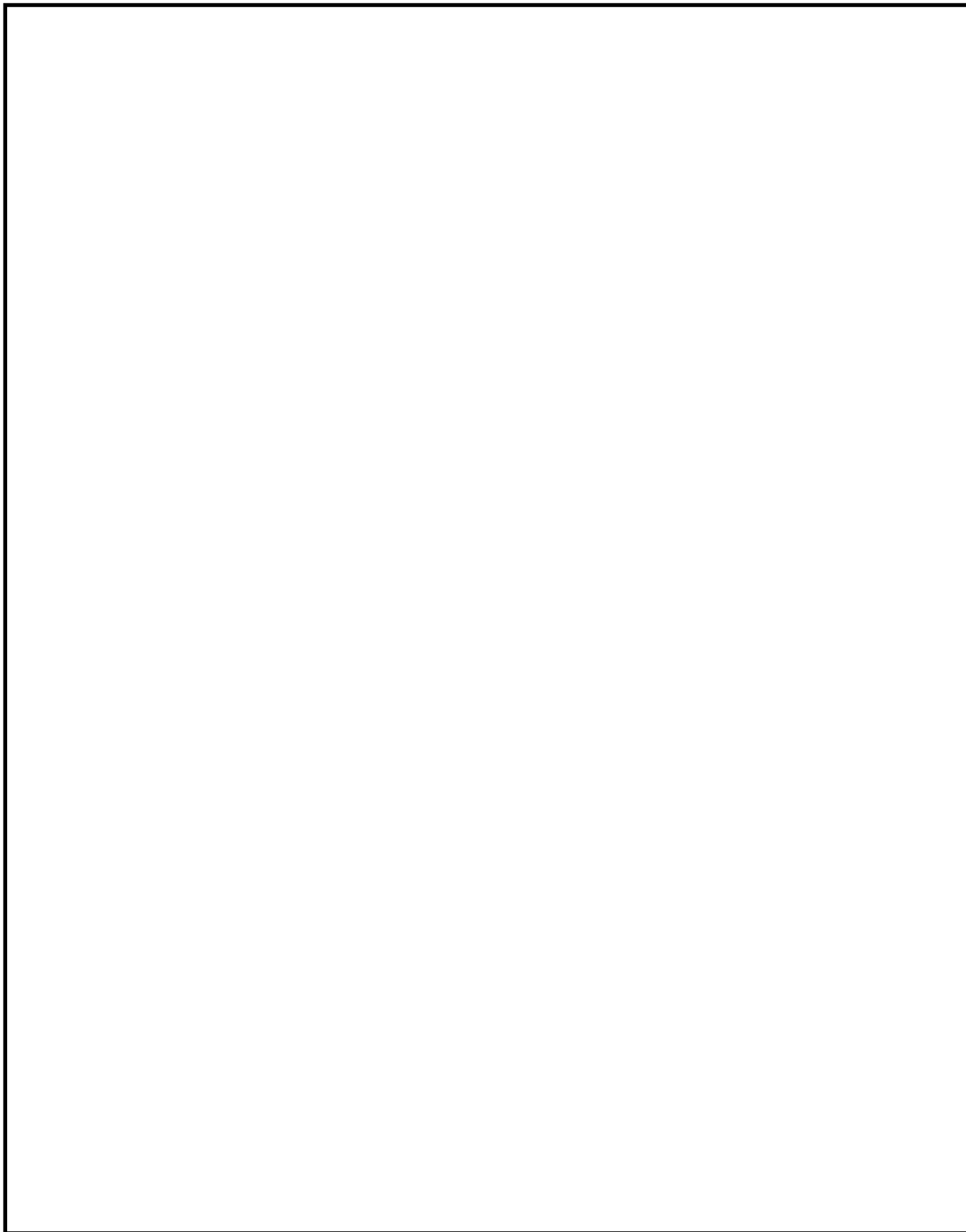


図 2-1 キャスク容器の応力解析箇所(1/2)

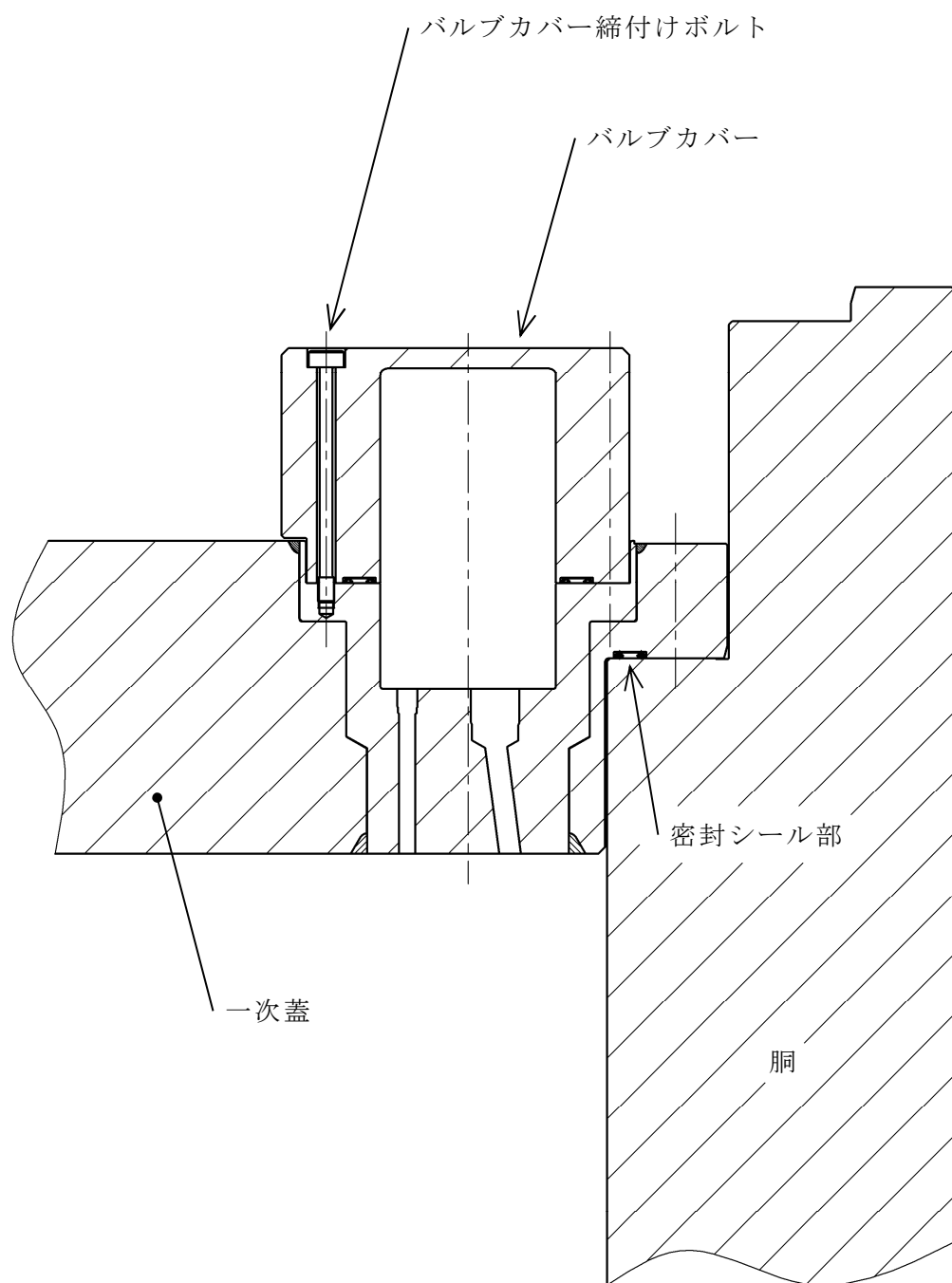


図 2-1 キャスク容器の応力解析箇所 (2/2)

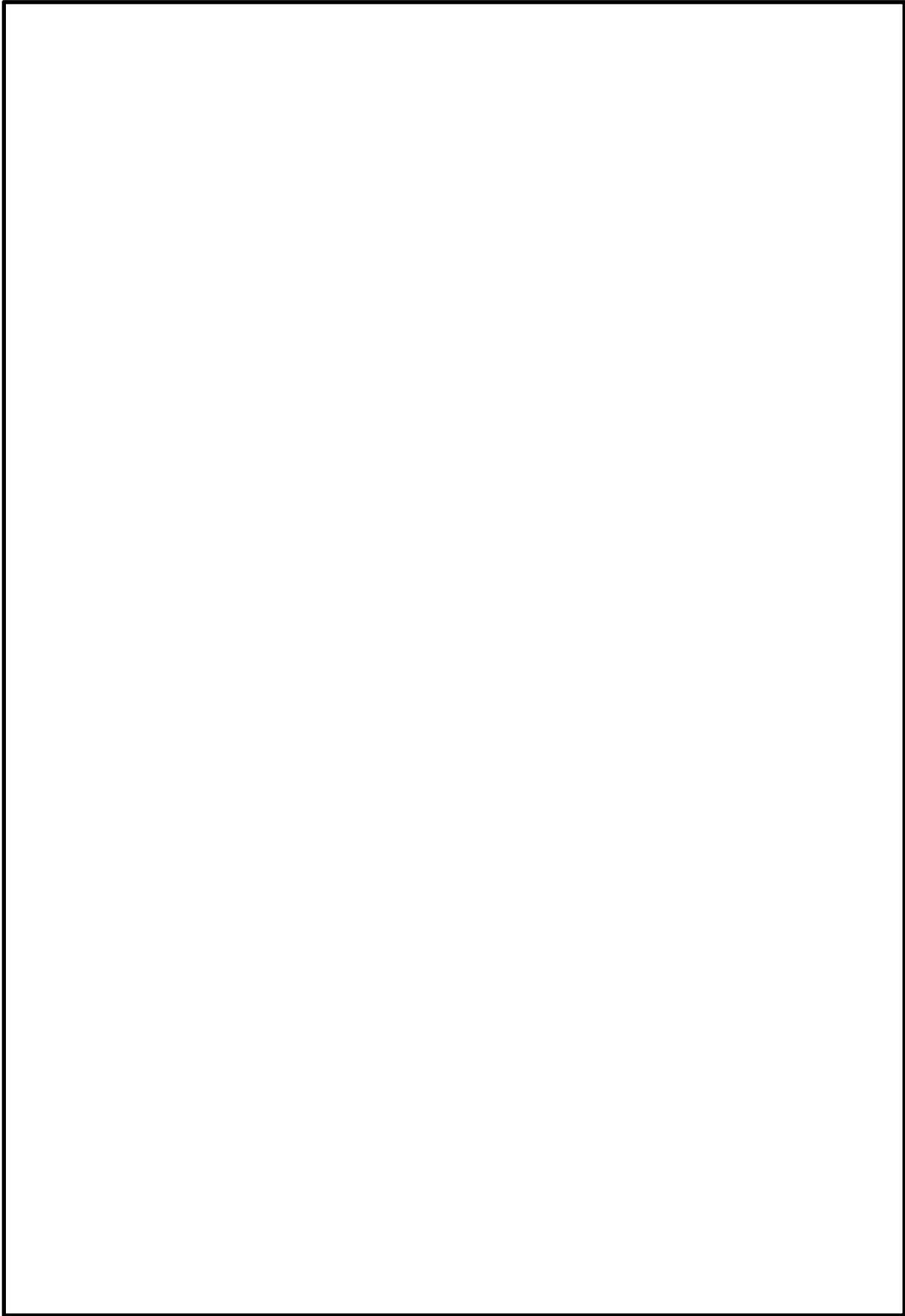


図 5-1 キヤスク容器の応力評価点（面）

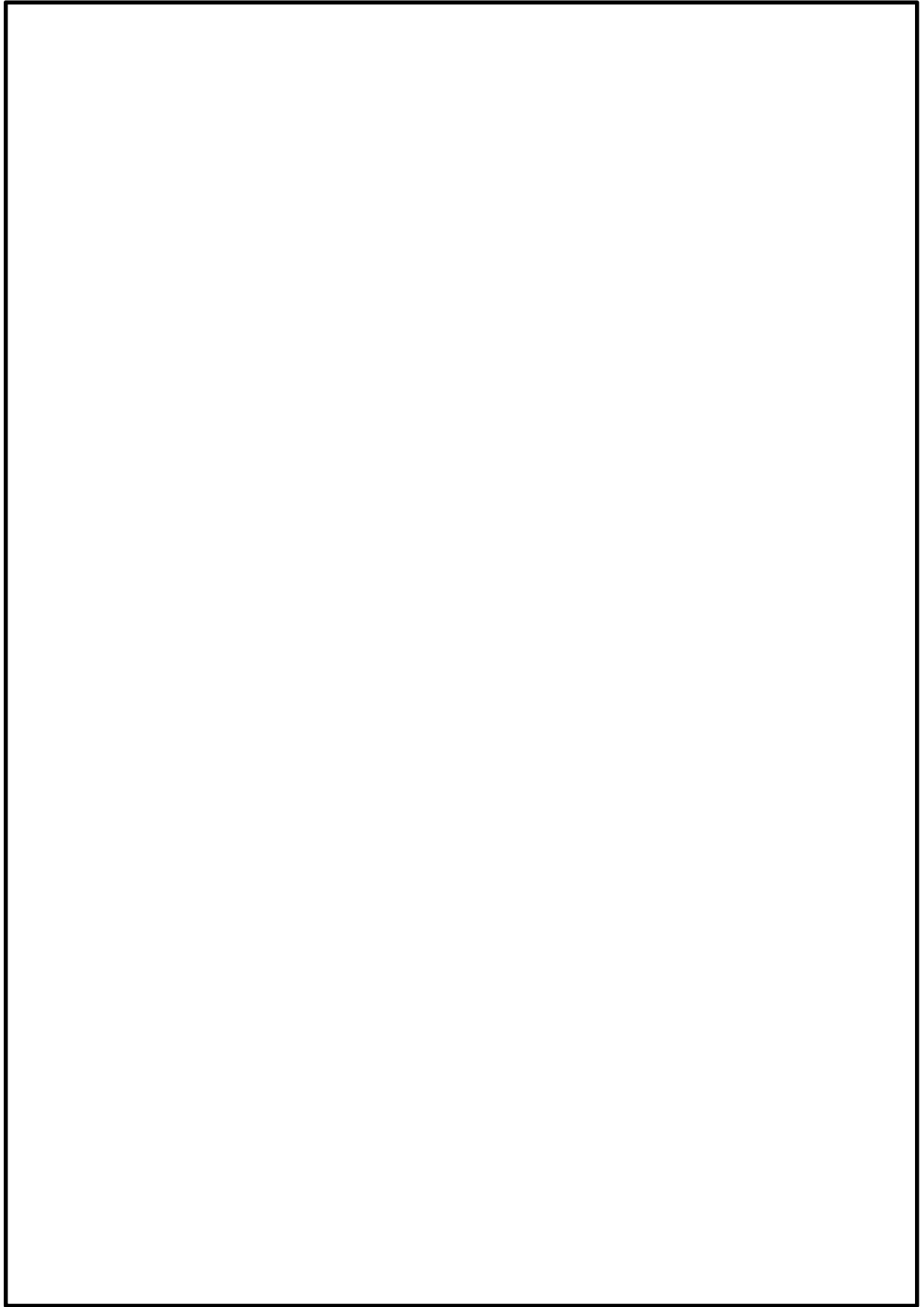


図 5-2 キヤスク容器の解析モデル（圧力＋ボルト初期締付け力作用時）

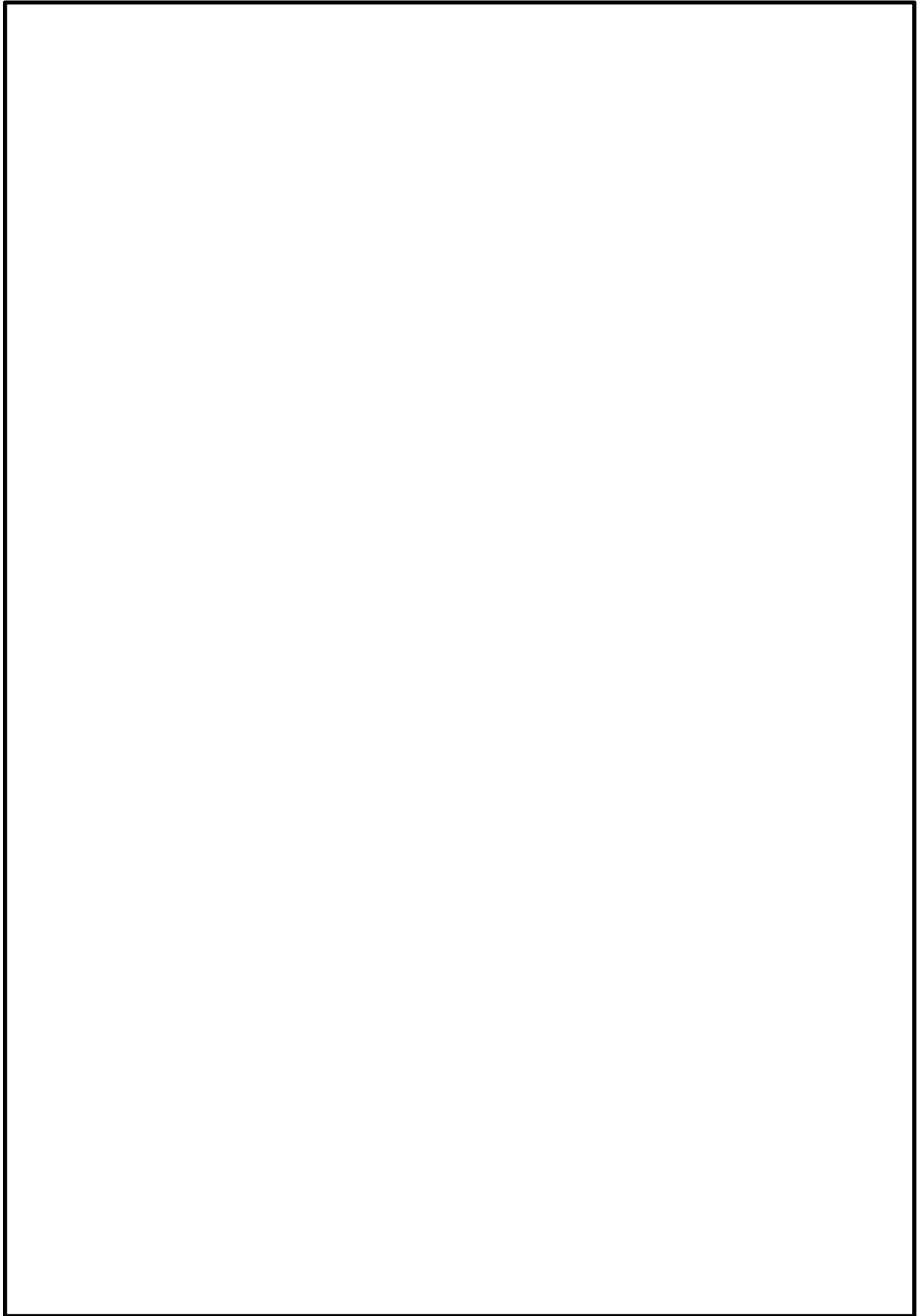


図 5-3 キヤスク容器の解析モデル（地震時）

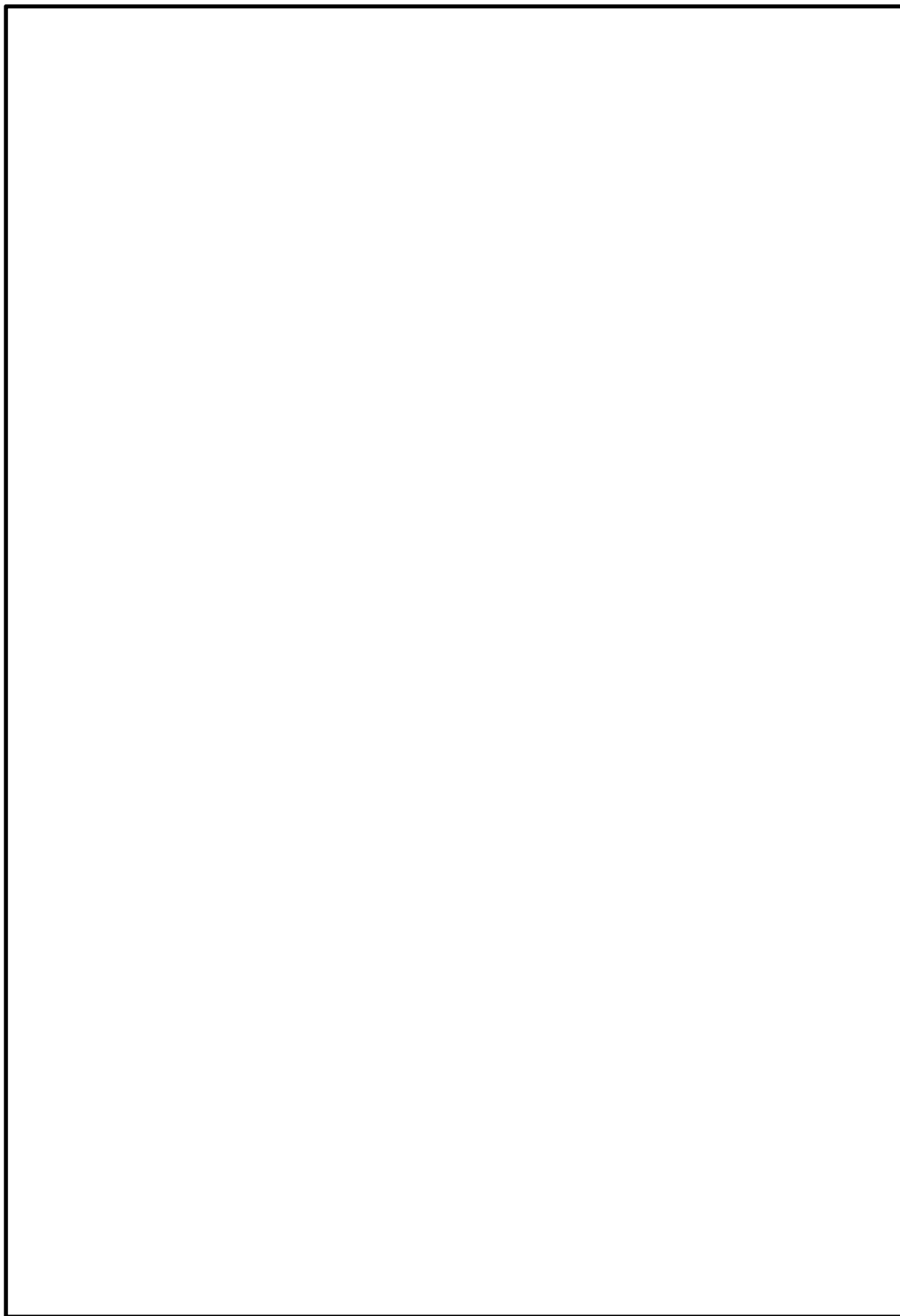


図 5-4 キヤスク容器の解析モデル（自重作用時）

表 4-1 キャスク容器用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		炭素鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		GLF1	許容値基準	GLF1	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m	182	Min. { S_y , $2/3 \cdot S_u$ }	182	Min. { S_y , $2/3 \cdot S_u$ }
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	273	Min. { $1.5 \cdot S_y$, S_u }	182	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *2	364	$3 \cdot S_m$	182	S_y
	純せん断応力 σ_s	72	$0.6 \cdot S_m$		
	支圧応力 σ_p *1	182 (273)	S_y ($1.5 \cdot S_y$)		
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m	251	$2/3 \cdot S_u$	182	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	377	S_u	182	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *2	364	$3 \cdot S_m$	182	S_y
	純せん断応力 σ_s	150	$0.4 \cdot S_u$		
	支圧応力 σ_p *1	377 (565)	S_u ($1.5 \cdot S_u$)		

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

*2：S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 キャスク容器用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		ステンレス鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		SUS304, SUSF304	許容値基準	SUS304, SUSF304	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m	162	$1.2 \cdot S_m$	152	Min. $\{1.2 \cdot S_m, S_y\}$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	243	$1.8 \cdot S_m$	152	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *2	406	$3 \cdot S_m$	152	S_y
	純せん断応力 σ_s	81	$0.6 \cdot S_m$		
	支圧応力 σ_p *1	152 (229)	$S_y (1.5 \cdot S_y)$		
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m	278	Min. $\{2.4 \cdot S_m,$ $2/3 \cdot S_u\}$	152	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	417	Min. $\{3.6 \cdot$ $S_m,$ $S_u\}$	152	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *2	406	$3 \cdot S_m$	152	S_y
	純せん断応力 σ_s	167	$0.4 \cdot S_u$		
	支圧応力 σ_p *1	418 (627)	$S_u (1.5 \cdot S_u)$		

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

*2：S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 キヤスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値
(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		低合金鋼	
		一次蓋締付けボルト バルブカバー締付けボルト	
		SNB23-3	許容値基準
I + S _d [*]	平均引張応力	550	2・S _m
	平均引張＋曲げ応力	826	3・S _m
I + S _s	平均引張応力	825	S _y
	平均引張＋曲げ応力	825	S _y

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（1/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋	①	P_m							2
		P_L+P_b							7
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	①'	P_m							2
		P_L+P_b							6
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	②	P_m							—
		P_L+P_b							6
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	②'	P_m							—
		P_L+P_b							7
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
一次蓋 縮みバレット	③	平均引張応力							267
		平均引張応力 + 曲げ応力							276
胴	④	P_m							2
		P_L+P_b							—
		P_L+P_b+Q *2							2
		σ_p							—
	④'	P_m							3
		P_L+P_b							—
		P_L+P_b+Q *2							3
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（2/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴	⑤	P_m							—
		P_L+P_b							6
		P_L+P_b+Q *2							15
		σ_p							—
	⑤'	P_m							—
		P_L+P_b							13
		P_L+P_b+Q *2							29
		σ_p							—
底板	⑥	P_m							2
		P_L+P_b							2
		P_L+P_b+Q *2							5
		σ_p							7
	⑥'	P_m							2
		P_L+P_b							3
		P_L+P_b+Q *2							6
		σ_p							—
	⑦	P_m							—
		P_L+P_b							20
		P_L+P_b+Q *2							38
		σ_p							—
	⑦'	P_m							—
		P_L+P_b							33
		P_L+P_b+Q *2							62
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力
 *2： S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（3/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
密封 シール部	⑧	P_m							4
		P_L+P_b							9
		P_L+P_b+Q *2							1
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P_m							—
		P_L+P_b							1
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	⑪'	P_m							—
		P_L+P_b							1
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P_m							—
		P_L+P_b							1
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	⑫'	P_m							—
		P_L+P_b							1
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P_m							—
		P_L+P_b							25
		P_L+P_b+Q *2							44
		σ_p							—
	⑬'	P_m							—
		P_L+P_b							62
		P_L+P_b+Q *2							126
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（4/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P_m							—
		P_L+P_b							10
		P_L+P_b+Q *2							17
		σ_p							—
	⑭'	P_m							—
		P_L+P_b							50
		P_L+P_b+Q *2							100
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P_m							—
		P_L+P_b							1
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	⑮'	P_m							—
		P_L+P_b							1
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P_m							—
		P_L+P_b							52
		P_L+P_b+Q *2							98
		σ_p							—
	⑯'	P_m							—
		P_L+P_b							51
		P_L+P_b+Q *2							114
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋	①	P _m							2
		P _L +P _b							7
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	①'	P _m							2
		P _L +P _b							6
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	②	P _m							—
		P _L +P _b							6
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	②'	P _m							—
		P _L +P _b							7
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
一次蓋 締付けボルト	③	平均引張応力							267
		平均引張応力 + 曲げ応力							279
胴	④	P _m							3
		P _L +P _b							—
		P _L +P _b +Q *2							3
		σ_p							—
	④'	P _m							3
		P _L +P _b							—
		P _L +P _b +Q *2							5
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
 *2: S_s地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴	⑤	P _m							—
		P _L +P _b							11
		P _L +P _b +Q *2							24
		σ_p							—
	⑤'	P _m							—
		P _L +P _b							22
		P _L +P _b +Q *2							48
		σ_p							—
底板	⑥	P _m							3
		P _L +P _b							4
		P _L +P _b +Q *2							7
		σ_p							9
	⑥'	P _m							3
		P _L +P _b							5
		P _L +P _b +Q *2							10
		σ_p							—
	⑦	P _m							—
		P _L +P _b							32
		P _L +P _b +Q *2							63
		σ_p							—
	⑦'	P _m							—
		P _L +P _b							53
		P _L +P _b +Q *2							102
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} , $\tau_{t\theta}$, $\tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力
*2：S_s地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3/4）

（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
密封 シール部	⑧	P _m							4
		P _L +P _b							9
		P _L +P _b +Q *2							1
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	⑪'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							2
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							2
		σ_p							—
	⑫'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							2
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P _m							—
		P _L +P _b							39
		P _L +P _b +Q *2							72
		σ_p							—
	⑬'	P _m							—
		P _L +P _b							103
		P _L +P _b +Q *2							207
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_s地震力のみによる全振幅について示す

表 5-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（4/4）

（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P _m							—
		P _L +P _b							13
		P _L +P _b +Q *2							27
		σ_p							—
	⑭'	P _m							—
		P _L +P _b							80
		P _L +P _b +Q *2							160
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	⑮'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P _m							—
		P _L +P _b							84
		P _L +P _b +Q *2							162
		σ_p							—
	⑯'	P _m							—
		P _L +P _b							88
		P _L +P _b +Q *2							188
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_s地震力のみによる全振幅について示す

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（1/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋	①－①′	P_m	2	182
	①	P_L+P_b	7	273
	①′		6	273
	①	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	①′		1	364
	②	P_L+P_b	6	273
	②′		7	273
	②	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	②′		1	364
一次蓋 締付けボルト	③	平均引張応力	267	550
		平均引張応力 ＋曲げ応力	276	826
胴	④	P_m	2	182
	④′		3	182
	④	$P_L+P_b+Q^*$	2	364
	④′		3	364
	⑤	P_L+P_b	6	273
	⑤′		13	273
	⑤	$P_L+P_b+Q^*$	15	364
	⑤′		29	364
底板	⑥－⑥′	P_m	2	182
	⑥	σ_p	7	182
	⑥	P_L+P_b	2	273
	⑥′		3	273
	⑥	$P_L+P_b+Q^*$	5	364
	⑥′		6	364
	⑦	P_L+P_b	20	273
	⑦′		33	273
	⑦	$P_L+P_b+Q^*$	38	364
	⑦′		62	364

注記 *： S_d *地震力のみによる全振幅について評価する

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（2/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
密封 シール部	⑧	P_m	4	182
		P_L+P_b	9	182
		$P_L+P_b+Q^*$	1	182
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P_L+P_b	1	273
	⑪'		1	273
	⑪	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑪'		1	364
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P_L+P_b	1	273
	⑫'		1	273
	⑫	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑫'		1	364
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P_L+P_b	25	273
	⑬'		62	273
	⑬	$P_L+P_b+Q^*$	44	364
	⑬'		126	364
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P_L+P_b	10	273
	⑭'		50	273
	⑭	$P_L+P_b+Q^*$	17	364
	⑭'		100	364
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P_L+P_b	1	273
	⑮'		1	273
	⑮	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑮'		1	364
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P_L+P_b	52	273
	⑯'		51	273
	⑯	$P_L+P_b+Q^*$	98	364
	⑯'		114	364

注記 *： S_d *地震力のみによる全振幅について評価する

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）（1/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋	①－①′	P_m	2	251
	①	P_L+P_b	7	377
	①′		6	377
	①	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	①′		1	364
	②	P_L+P_b	6	377
	②′		7	377
	②	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	②′		1	364
一次蓋 締付けボルト	③	平均引張応力	267	825
		平均引張応力 ＋曲げ応力	279	825
胴	④	P_m	3	251
	④′		3	251
	④	$P_L+P_b+Q^*$	3	364
	④′		5	364
	⑤	P_L+P_b	11	377
	⑤′		22	377
	⑤	$P_L+P_b+Q^*$	24	364
	⑤′		48	364
底板	⑥－⑥′	P_m	3	251
	⑥	σ_p	9	377
	⑥	P_L+P_b	4	377
	⑥′		5	377
	⑥	$P_L+P_b+Q^*$	7	364
	⑥′		10	364
	⑦	P_L+P_b	32	377
	⑦′		53	377
	⑦	$P_L+P_b+Q^*$	63	364
	⑦′		102	364

注記 *： S_s 地震力のみによる全振幅について評価する

表 5-2 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）（2/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
密封 シール部	⑧	P_m	4	182
		P_L+P_b	9	182
		$P_L+P_b+Q^*$	1	182
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P_L+P_b	1	377
	⑪'		1	377
	⑪	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑪'		2	364
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P_L+P_b	1	377
	⑫'		1	377
	⑫	$P_L+P_b+Q^*$	2	364
	⑫'		2	364
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P_L+P_b	39	377
	⑬'		103	377
	⑬	$P_L+P_b+Q^*$	72	364
	⑬'		207	364
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P_L+P_b	13	377
	⑭'		80	377
	⑭	$P_L+P_b+Q^*$	27	364
	⑭'		160	364
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P_L+P_b	1	377
	⑮'		1	377
	⑮	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑮'		1	364
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P_L+P_b	84	377
	⑯'		88	377
	⑯	$P_L+P_b+Q^*$	162	364
	⑯'		188	364

注記 * : S_s 地震力のみによる全振幅について評価する

表 6-1 キャスク容器（ボルトを除く）の疲労解析不要の評価結果

設計・建設規格 PVB-3140	繰返し荷重		設定 繰返し回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧→使用圧力→大気圧		100	繰返し数 $N_1=100$	$3S_m$ に対する許容繰返し数 $N_a=3691$	$N_1 < N_a$ であるので本条件を満足
(2)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象Ⅰ，Ⅱにおける圧力変動		100	圧力変動振幅 $P=1.0 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_{m2}=3.8 \text{ MPa}$	$P < A_{m2}$ であるので本条件を満足
(3)	燃料装荷及び燃料取出しでの2点間の温度差		100	温度差 $\Delta T=140 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差許容値 $T=282 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(4)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象Ⅰ，Ⅱにおける2点間の温度差変動		100	温度差変動振幅 $\Delta T=140 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差変動許容値 $T=282 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(5)	異種材結合部の温度変動		100	温度変動振幅 $\Delta T=140 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T=1045 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(6)	機械的荷重の変動	地震力	1×10^4 ※	応力の全振幅 $S_d^* : \Delta \sigma = 126 \text{ MPa}$ $S_s : \Delta \sigma = 207 \text{ MPa}$	1×10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S = 262 \text{ MPa}$	$\Delta \sigma \leq S$ であるので本条件を満足
				繰返し数 $N_c=10000$	ピーク応力強さに対する許容繰返し回数 $S_d^* : N_a=139103$ $S_s : N_a=22160$	繰返し回数と許容繰返し回数の比 (N_c/N_a) $S_d^* : 0.0719$ $S_s : 0.452$ $U=0.524 \leq 1.0$ であるので本条件を満足

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 6-2 繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (—)
地震時	S_d^*	10000※	4	5	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000※	7	8	1.00×10^6	0.01
U（地震時）						0.02

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 6-3 繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (—)
地震時	S_d^*	10000※	1	2	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000※	2	3	1.00×10^6	0.01
U（地震時）						0.02

※：J E A G 4 6 0 1・補－1984（社）日本機械学会 参考資料Ⅲ 耐震設計評価手法 「1. 地震動に対する機器の疲労評価の方法」に定められる疲労評価不要となる繰返し回数により定めた。

表 7-1 貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

設計事象	応力分類	貫通孔を無視した 場合の応力強さ (S)	貫通孔部の応力 (S_c)	許容応力
$I + S_d^*$	$P_L + P_b$	7	28	273
	$P_L + P_b + Q^*$	1	4	364
$I + S_s$	$P_L + P_b$	7	28	377
	$P_L + P_b + Q^*$	1	4	364

注記 *：地震力のみによる全振幅を示す。

V-2-4-2-3-3-2 バスケットの耐震性についての計算書
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	2
5. 計算結果	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	9
5.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	10
5.3.1 荷重条件	10
5.3.2 計算方法	10
5.3.3 計算結果	10
6. 評価結果	11
6.1 応力強さの評価	11
6.2 特別な応力の評価	11
6.2.1 純せん断応力	11
6.2.2 支圧応力	11
6.2.3 座屈応力	11

図表目次

図 2-1	バスケットの応力解析箇所	12
図 5-1	バスケットの応力評価点（面）	13
図 5-2(1)	桢板の応力評価で考慮する質量	14
図 5-2(2)	拘束リングの応力評価で考慮する質量	15
表 4-1	バスケット用材料の許容応力値	16
表 4-2	バスケット用材料（ボルト用材料）の許容応力値	17
表 5-1	バスケットの応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	18
表 5-1	バスケットの応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	19
表 5-2	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	20
表 5-2	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	21

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅢ）のバスケットに関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

バスケットの評価部位は次のとおりである（図 2-1 参照）。

- (1) 枠板（大）
- (2) 枠板（小）
- (3) 燃料支持板
- (4) 拘束リング
- (5) 拘束リングボルト
- (6) 枠板固定ボルト

3. 計算方法

(1) バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

(2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(3) 伝熱プレートは非構造強度部材として評価対象より除外する。

(4) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、応力計算書に示す。

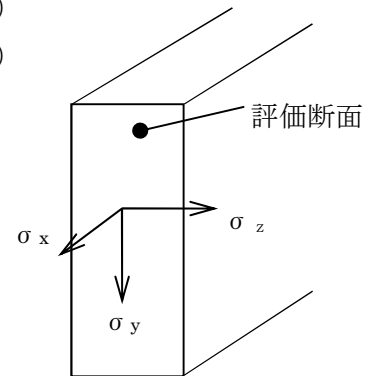
応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

4. 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力 (x 方向)
- σ_y : 評価断面に平行な方向の応力 (y 方向)
- σ_z : 評価断面に平行な方向の応力 (z 方向)
- τ_{xy} : せん断応力
- τ_{yz} : せん断応力
- τ_{zx} : せん断応力



バスケット用材料の許容応力値を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

(1) バスケット（ボルトは除く。）の応力評価

バスケットの応力評価は、設計・建設規格 CSS-3110 及び SSB-3120 に従い以下の項目において添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価
 - (c) 座屈応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 CSS-3120 に従い添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 計算結果

5.1 応力評価点

バスケットの応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d *地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

ボルト初期締付け力＋地震力＋自重

5.2.2 計算方法

(1) 枰板（大）

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、枰板（大）の①部（図 5-1 の①部）である。

下方向加速度により発生する圧縮応力（ σ_z ）は次式で表される。ただし、

$G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$, C_V : 鉛直方向加速度（ $=3.53 \text{ m/s}^2$ ）である。

$$\sigma_z = \frac{m_A \cdot G_1}{A_A} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

m_A : 全バスケット質量（ $=\boxed{} \text{ kg}$ ）

A_A : 枰板（大）及び枰板（小）の総断面積（ $=\boxed{} \text{ mm}^2$ ）

他の応力成分は零である。

水平方向加速度により発生する圧縮応力（ σ_x ）は次式で表される。ただし、

$G_3 = C_H$, C_H : 水平方向加速度（ $=7.06 \text{ m/s}^2$ ）である。

$$\sigma_x = \frac{m_1 \cdot G_3}{A_1} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

m_1 : 図 5-2(1) に示す斜線部①に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の
合計質量（ $=\boxed{} \text{ kg}$ ）の $1/3$ の質量

A_1 : 拘束リング幅に相当する長さにおける枰板（大）の断面積（ $=1000 \text{ mm}^2$ ）

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、枰板（大）の③部（図 5-1 の③部）である。

下方向加速度により発生する圧縮応力（ σ_z ）は、（5.1）式で表される。

水平方向加速度により発生する曲げ応力（ σ_x ）は次式で表される。ただし、

$G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$, $G_2 = C_H$ であり、 C_H , C_V は 5.2.2(1)a. と同等である。

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{\text{Max. } (|M_2|, |M_3|)}{Z} \\
 M_2 &= -\frac{m_3' \cdot G_2 \cdot \ell_1 \cdot \ell_2}{2 \cdot (\ell_1 + \ell_2)^2} \cdot (2 \cdot \ell_1 + \ell_2) \\
 M_3 &= \frac{m_3' \cdot G_2 \cdot \ell_1 \cdot \ell_2^2}{2 \cdot (\ell_1 + \ell_2)^3} \cdot (3 \cdot \ell_1 + 2 \cdot \ell_2) \\
 Z &= \frac{\ell_3 \cdot t^2}{6}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで,

m_3' : 図 5-2(1)に示す斜線部③' に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg) の 1/3 の質量

ℓ_1 : 枰板により構成される格子の内寸 (= mm)

ℓ_2 : 枰板により構成される格子の内寸の 1/2 の寸法 (= mm)

ℓ_3 : 拘束リング間長さから枰板 (大) と枰板 (小) の組合せ部を除いた長さ (= mm)

t : 枰板板厚 (= mm)

他の応力成分は零である。

水平方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_x) は次式で表される。ただし, $G_3 = C_H$ であり, C_H は 5.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_x = \frac{m_3 \cdot G_3}{A_3} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで,

m_3 : 図 5-2(1)に示す斜線部③に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg) の 1/3 の質量

A_3 : 拘束リング間長さにおける枰板 (大) の断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

d. セン断応力

せん断応力 (σ_s) の最大値は枰板 (大) の②部 (図 5-1 の②部) に発生し, 次式で表される。ただし, $G_2 = C_H$ であり, C_H は 5.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_s = \frac{m_2' \cdot G_2}{A_2'} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで,

m_2' : 枰板 (大) と枰板 (小) の組合せ部の間にある使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg)

A_2' : 枰板 (大) と枰板 (小) の組合せ部の間の断面積 (= mm²)

e. 支圧応力

支圧応力(σ_p)の最大値は杵板(大)の①部(図5-1の①部)に発生し、(5.2)式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は5.2.2(1)a.と同等である。

f. 座屈応力

座屈応力(σ_b)の最大値は杵板(大)の②部(図5-1の②部)に発生し、一次応力は次式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は5.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_{b(\text{一次})} = \frac{m_2 \cdot G_3}{A_2} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここで、

m_2 : 図5-2(1)に示す斜線部②に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量(= kg)の1/3の質量

A_2 : 拘束リング間長さにおける杵板(大)の断面積(= mm²)

(2) 杵板(小)

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、杵板(小)の⑥部(図5-1の⑥部)である。

下方向加速度により発生する圧縮応力(σ_z)は、(5.1)式で、水平方向加速度により発生する圧縮応力(σ_x)は、次式で表される。ただし、 $G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $G_2 = C_H$ であり、 C_H 、 C_V は5.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_x = \frac{m_6' \cdot G_2}{A_6} \dots\dots\dots (5.7)$$

ここで、

m_6' : 図5-2(1)に示す斜線部⑥'に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量(= kg)の1/3の質量

A_6 : 拘束リング幅に相当する長さにおける杵板(小)の断面積(= mm²)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜+一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、杵板(小)の⑥部(図5-1の⑥部)である。

下方向加速度により発生する圧縮応力(σ_z)は、(5.1)式で、水平方向加速度により発生する圧縮応力(σ_x)及び曲げ応力(σ_x)、(σ_z)は、(5.7)式及び次式で表される。

ただし、 $G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $G_2 = C_H$ 、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H 、 C_V は5.2.2(1)a.と同等である。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{M_{\max}}{Z} \\ M_{\max} &= \frac{m_6 \cdot G_3 \cdot \ell_5^2}{12} \\ Z &= \frac{\ell_1 \cdot t^2}{6} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.8)$$

ここで、

m_6 : 枰板（大）と枰板（小）の組合せ部の間にある使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量（= kg）

ℓ_1 : 枰板により構成される格子の内寸（= mm）

ℓ_5 : 枰板（大）と枰板（小）の組合せ部の間の長さ（= mm）

t : 枰板板厚（= mm）

他の応力成分は零である。

c. セン断応力

せん断応力(σ_s)の最大値は枰板（小）の⑤部（図 5-1 の⑤部）に発生し、次式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は 5.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_s = \frac{m_5' \cdot G_3}{A_5'} \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで、

m_5' : 枰板（大）と枰板（小）の組合せ部の間にある使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量（= kg）

A_5' : 枰板（大）と枰板（小）の組合せ部の 2 倍の断面積（= mm²）

他の応力成分は零である。

d. 支圧応力

支圧応力(σ_p)の最大値は枰板（小）の⑥部（図 5-1 の⑥部）に発生し、(5.7) 式で表される。ただし、 $G_2 = C_H$ であり、 C_H は 5.2.2(1)a. と同等である。

e. 座屈応力

座屈応力(σ_b)の最大値は枰板（小）の⑤部（図 5-1 の⑤部）に発生し、一次応力は(4.1) 式で求められる。ただし、 $G_2 = C_H$ であり、 C_H は 5.2.2(1)a. と同等である。

(3) 燃料支持板

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、燃料支持板の脚部（図 5-1 の⑦部）である。

下方向加速度により発生する圧縮応力(σ_x)は、次式で表される。ただし、

$G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$ であり、 C_V は5.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_x = \frac{m_T \cdot G_1}{A_L} \dots\dots\dots (5.10)$$

ここで、

m_T : バスケット総質量＋全使用済燃料質量 (= kg)

A_L : 燃料支持板脚部断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、燃料支持板の脚部（図5-1の⑦部）であり、一次膜＋一次曲げ応力強さ(σ_x)は、a.項の一次一般膜応力強さと同等である。

(4) 拘束リング

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、拘束リングの⑧部（図5-1の⑧部）である。

水平方向加速度により発生する応力(σ_x)は、次式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は4.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_x = \sum_{i=1}^5 m_{S_i} \cdot G_3 \cdot \sin \theta_{S_i} / A_S \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで、

m_{S1} : 図5-2(2)の斜線部①の使用済燃料と杵板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S1} : ボルト1の取付け角度 (=69.5°)

m_{S2} : 図5-2(2)の斜線部②の使用済燃料と杵板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S2} : ボルト2の取付け角度 (=50.0°)

m_{S3} : 図5-2(2)の斜線部③の使用済燃料と杵板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S3} : ボルト3の取付け角度 (=33.5°)

m_{S4} : 図5-2(2)の斜線部④の使用済燃料と杵板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S4} : ボルト4の取付け角度 (=20.0°)

m_{S5} : 図5-2(2)の斜線部⑤の使用済燃料と杵板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S5} : ボルト5の取付け角度 (=7.5°)

A_S : 拘束リングの断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、拘束リングの⑧部（図 5-1 の⑧部）であり、一次膜＋一次曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力と同等である。

(5) 拘束リングボルト

a. 一次一般膜応力強さ

拘束リングボルト（図 5-1 の⑨部）の一次一般膜応力強さは、次式で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = \sigma_f \\ \sigma_f = \frac{F_f}{A_{R1}} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5.10)$$

ここで、

σ_f : 拘束リングボルトの締付け応力

F_f : 拘束リングボルトの初期締付け力（＝4800 N）

A_{R1} : 拘束リングボルト（M12）の断面積（＝ mm²）で表される。

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

拘束リングボルト（図 5-1 の⑨部）の一次膜＋一次曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

c. 一次膜＋二次膜応力強さ

拘束リングボルト（図 5-1 の⑨部）の一次膜＋二次膜応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

d. （一次＋二次）膜応力＋曲げ応力強さ

拘束リングボルト（図 5-1 の⑨部）の（一次＋二次）膜応力＋曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

(6) 枠板固定ボルト

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、33.5 ° 位置の枠板固定ボルト（図 5-1 の⑩部）である。

初期締付け力による引張応力（ σ_x ）は、次式で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = \sigma_f \\ \sigma_f = \frac{F_f}{A_{R2}} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで、

σ_f : 枠板固定ボルトの締付け応力

F_f : 枠板固定ボルトの初期締付け力（＝4800 N）

A_{R2} : 桢板固定ボルト (M10) の断面積 (= mm²) 水平方向加速度により発生するせん断応力 (σ_s) は、次式で表わせる。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は 5.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_s = \frac{m_{S3} \cdot G_3 \cdot \sin \theta_{S3}}{n_2 \cdot A_{R2}} \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで、

m_{S3} : 図 5-2(2) の斜線部③の使用済燃料と桢板の質量 (= kg) の 1/3 の質量

θ_{S3} : 桢板固定ボルト⑩部の位置の角度 (= 33.5 °)

A_{R2} : 桢板固定ボルト (M10) の断面積 (= mm²)

n_2 : 桢板固定ボルト本数 (= 4 本)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

一次膜＋一次曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

5.3 貯蔵時（S_s地震力が作用する場合）

5.3.1 荷重条件

貯蔵時においてS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。
ボルト初期締付け力＋地震力＋自重

5.3.2 計算方法

桎板（大），桎板（小），燃料支持板，拘束リング及び桎板固定ボルトの応力計算は5.2.2項と同様である。

拘束リングボルトの応力計算は5.2.2項(5)a.及びb.と同様である。

5.3.3 計算結果

応力計算結果を表5-2に示す。

6. 評価結果

6.1 応力強さの評価

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，各設計事象の一次一般膜応力強さ(P_m)，一次膜＋一次曲げ応力強さ($P_m + P_b$)及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ($P_m + P_b + Q$)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2 特別な応力の評価

6.2.1 純せん断応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，各設計事象の平均せん断応力(σ_s)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.2 支圧応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，各設計事象の平均支圧応力(σ_p)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2.3 座屈応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，各設計事象の座屈応力(σ_b)は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

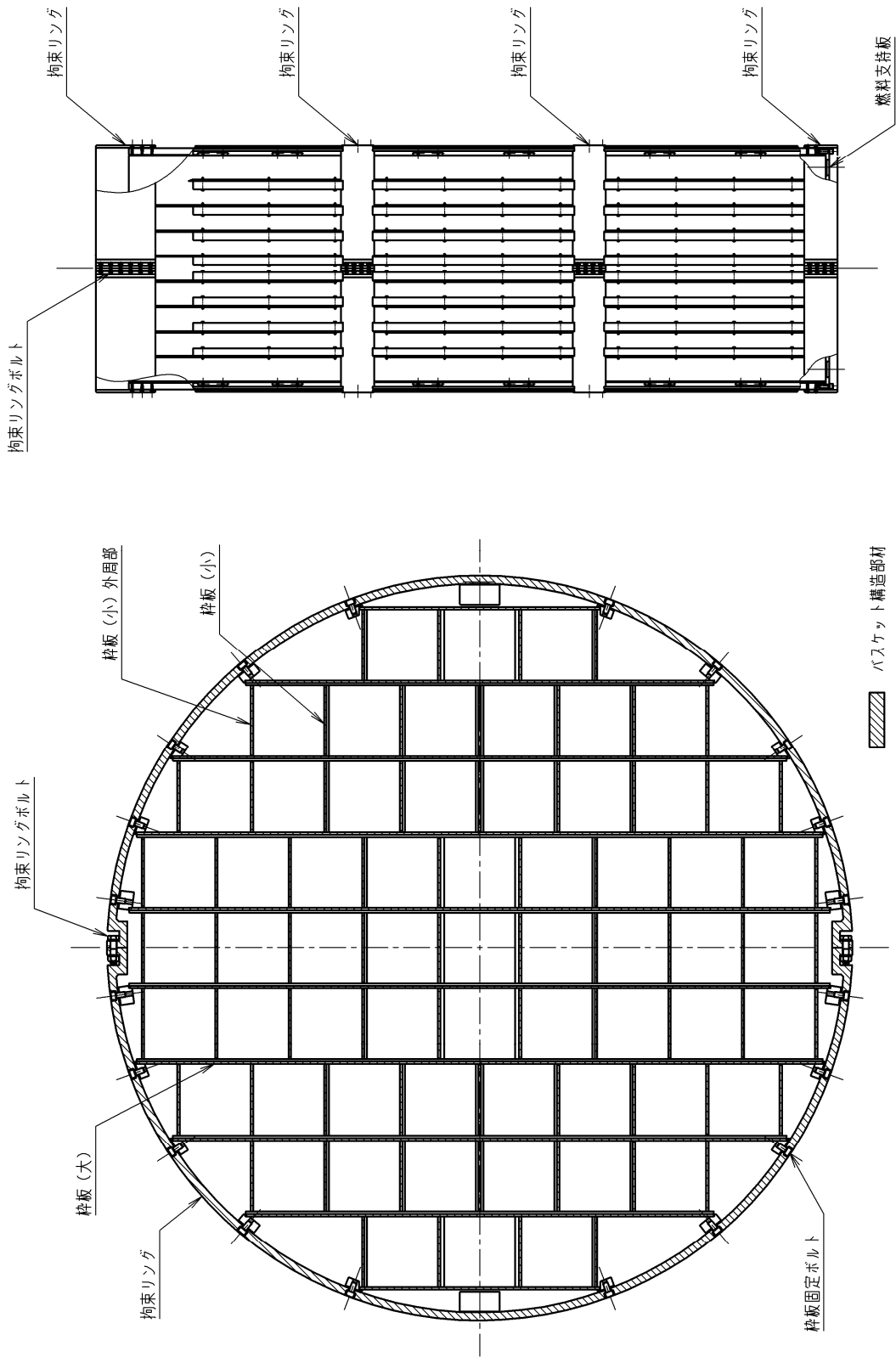


図 2-1 バスケットの応力解析箇所

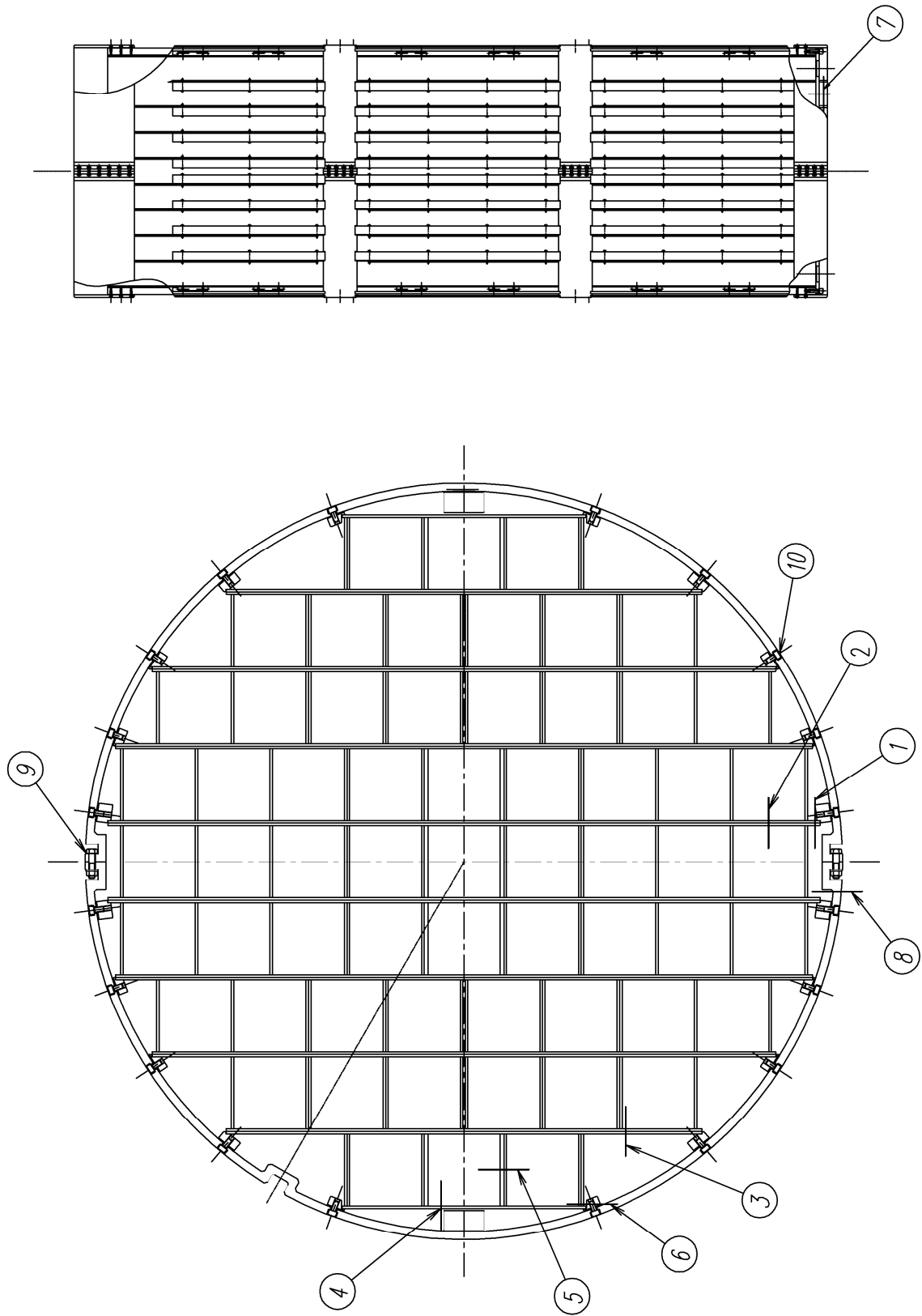


図 5-1 バスケットの応力評価点 (面)

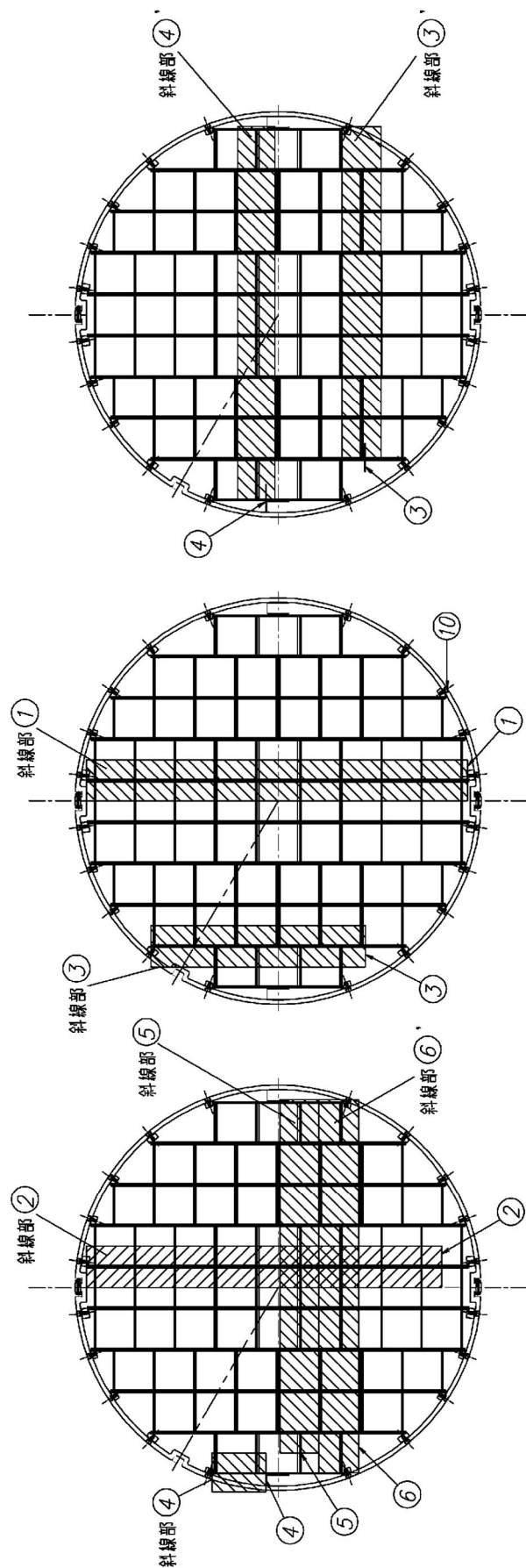


図 5-2(1) 枠板の応力評価で考慮する質量

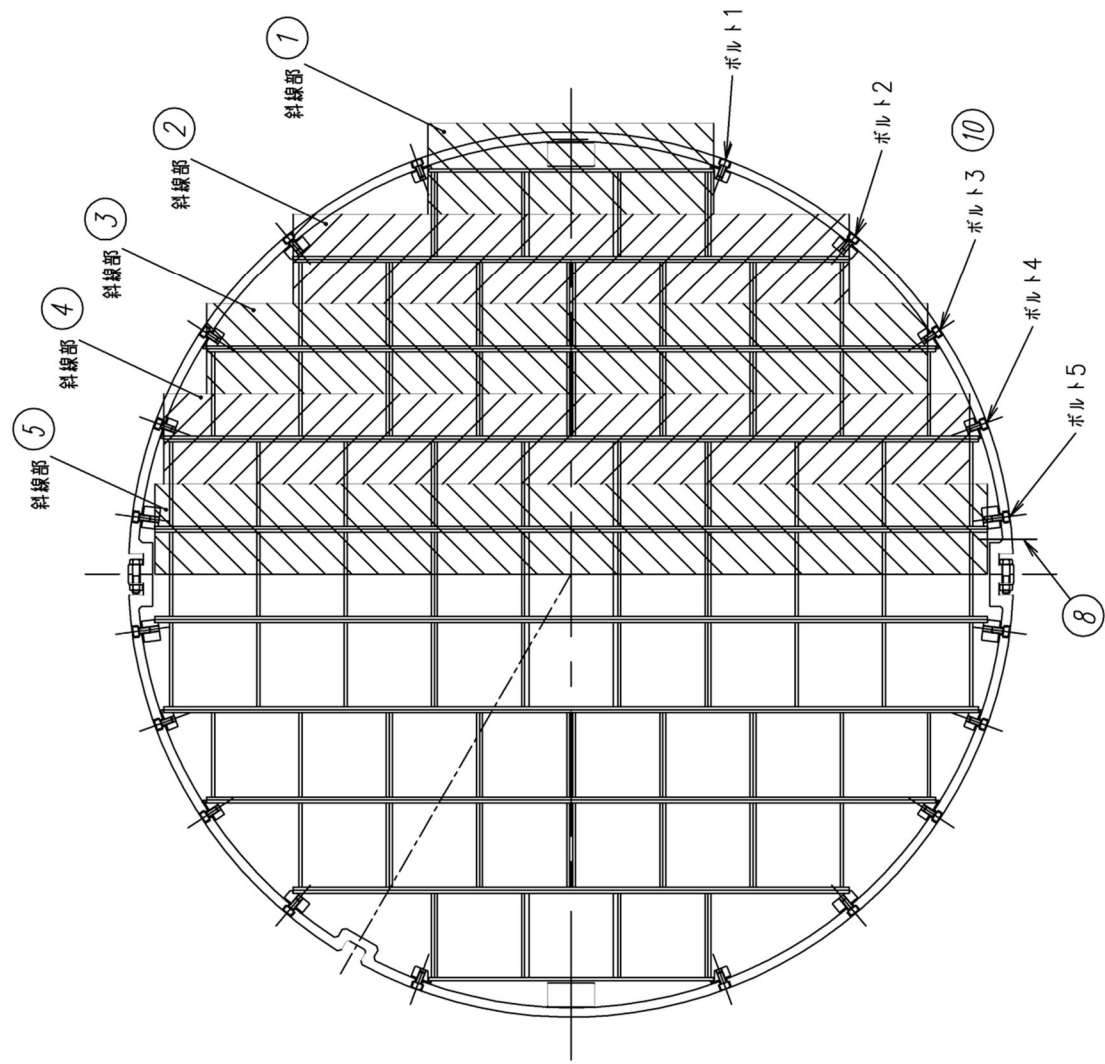


図 5-2(2) 拘束リングの応力評価で考慮する質量

表 4-1 バスケット用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値		
		枠板	枠板 拘束リング 燃料支持板	許容値基準
		B-SUS	SUS304	
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m		187	$1.5 \cdot S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$		281	$2.25 \cdot S_m$
	純せん断応力 σ_s		112	$0.9 \cdot S_m$
	支圧応力 σ_p^*		207 (310)	$1.5 \cdot S_y$ ($2.25 \cdot S_y$)
	座屈応力（一次＋二次） σ_b		105	$1.5 \cdot f_b$, $1.5 \cdot f_s$ 又は $1.5 \cdot f_c$
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m		266	Min. { $2.4 \cdot S_m$, $2/3 \cdot S_u$ }
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$		399	Min. { $3.6 \cdot S_m$, S_u }
	純せん断応力 σ_s		150	$1.2 \cdot S_m$
	支圧応力 σ_p^*		276 (414)	$2 \cdot S_y$ ($3 \cdot S_y$)
	座屈応力（一次＋二次） σ_b		105	$1.5 \cdot f_b$, $1.5 \cdot f_s$ 又は $1.5 \cdot f_c$

注記 *：（ ）内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

表 4-2 バスケット用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値		
		拘束リング ボルト	枠板 固定ボルト	許容値基準
		SUS630 H1150	SUS304	
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m		187	$1.5 \cdot S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$		281	$2.25 \cdot S_m$
	一次膜応力＋二次膜応力 $P_m + Q_m$			Min. $\{0.9 \cdot S_y, 2/3 \cdot S_u\}$
	一次応力＋二次応力 $P_m + Q_m + P_b + Q_b$			$0.9 \cdot S_y$
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m			$2/3 \cdot S_u$
				Min. $\{2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u\}$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$			S_u
			399	Min. $\{3.6 \cdot S_m, S_u\}$

表 5-1 バスケットの応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 *1						応力 強さ	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}		
桢板 (大)	P_m	①							8	187
	P_m+P_b	③							61	281
	σ_s	②							1	112
	σ_p	①							8	207
	σ_b	②							45	105
桢板 (小)	P_m	⑥							7	187
	P_m+P_b	⑥							29	281
	σ_s	⑤							1	112
	σ_p	⑥							7	207
	σ_b	⑤							2	105
燃料 支持板	P_m	⑦							8	187
	P_m+P_b	⑦							8	281
	σ_s	—							—	112
	σ_p	—							—	207
	σ_b	—							—	105
拘束 リング	P_m	⑧							4	121*2
	P_m+P_b	⑧							4	182*2
	σ_s	—							—	72*2
	σ_p	—							—	134*2
	σ_b	—							—	68*2
拘束 リング ボルト	P_m	⑨							43	447
	P_m+P_b	⑨							43	671
	P_m+Q_m	⑨							43	543
	$P_m+Q_m+P_b+Q_b$	⑨							43	549
桢板 固定 ボルト	P_m	⑩							65	187
	P_m+P_b	⑩							65	281

注記 *1： σ_x ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_z ：評価断面に平行な方向の応力 σ_y ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} ：評価断面上のせん断応力

*2：溶接継手効率を考慮

表 5-1 バスケットの応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 *1						応力 強さ	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}		
桢板 (大)	P_m	①							12	266
	P_m+P_b	③							98	399
	σ_s	②							1	150
	σ_p	①							12	276
	σ_b	②							45	105
桢板 (小)	P_m	⑥							11	266
	P_m+P_b	⑥							47	399
	σ_s	⑤							1	150
	σ_p	⑥							11	276
	σ_b	⑤							2	105
燃料 支持板	P_m	⑦							9	266
	P_m+P_b	⑦							9	399
	σ_s	—							—	150
	σ_p	—							—	276
	σ_b	—							—	105
拘束 リング	P_m	⑧							6	172*2
	P_m+P_b	⑧							6	259*2
	σ_s	—							—	97*2
	σ_p	—							—	179*2
	σ_b	—							—	68*2
拘束 リング ボルト	P_m	⑨							43	543
	P_m+P_b	⑨							43	815
桢板 固定 ボルト	P_m	⑩							70	266
	P_m+P_b	⑩							70	399

注記 *1: σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 評価断面上のせん断応力

*2: 溶接継手効率を考慮

表 5-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
枠板（大）	P_m	①	8	187
	P_m+P_b	③	61	281
	σ_s	②	1	112
	σ_p	①	8	207
	σ_b	②	45	105
枠板（小）	P_m	⑥	7	187
	P_m+P_b	⑥	29	281
	σ_s	⑤	1	112
	σ_p	⑥	7	207
	σ_b	⑤	2	105
燃料支持板	P_m	⑦	8	187
	P_m+P_b	⑦	8	281
	σ_s	—	—	112
	σ_p	—	—	207
	σ_b	—	—	105
拘束リング	P_m	⑧	4	121*
	P_m+P_b	⑧	4	182*
	σ_s	—	—	72*
	σ_p	—	—	134*
	σ_b	—	—	68*
拘束リングボルト	P_m	⑨	43	447
	P_m+P_b	⑨	43	671
	P_m+Q_m	⑨	43	543
	$P_m+Q_m+P_b+Q_b$	⑨	43	549
枠板固定ボルト	P_m	⑩	65	187
	P_m+P_b	⑩	65	281

注記 *：溶接継手効率を考慮

表 5-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
枠板（大）	P_m	①	12	266
	P_m+P_b	③	98	399
	σ_s	②	1	150
	σ_p	①	12	276
	σ_b	②	45	105
枠板（小）	P_m	⑥	11	266
	P_m+P_b	⑥	47	399
	σ_s	⑤	1	150
	σ_p	⑥	11	276
	σ_b	⑤	2	105
燃料支持板	P_m	⑦	9	266
	P_m+P_b	⑦	9	399
	σ_s	—	—	150
	σ_p	—	—	276
	σ_b	—	—	105
拘束リング	P_m	⑧	6	172*
	P_m+P_b	⑧	6	259*
	σ_s	—	—	97*
	σ_p	—	—	179*
	σ_b	—	—	68*
拘束リングボルト	P_m	⑨	43	543
	P_m+P_b	⑨	43	815
枠板固定ボルト	P_m	⑩	70	266
	P_m+P_b	⑩	70	399

注記 *：溶接継手効率を考慮

V-2-4-2-3-3-3 トラニオンの耐震性についての計算書
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力の評価	1
5. 計算結果	2
5.1 応力評価点	2
5.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)	2
5.2.1 荷重条件	2
5.2.2 計算方法	2
5.2.3 計算結果	4
6. 応力の評価	5
6.1 一次応力の評価	5
6.2 一次＋二次応力の評価	5
6.3 組合せ応力の評価	5

図表目次

図 2-1	トラニオンの応力解析箇所	6
図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	7
図 5-2	地震時に作用する荷重の計算モデル	8
表 4-1	トラニオン用材料の許容応力値	9
表 4-2	トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値	10
表 5-1	トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	11

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅢ）のトラニオンに関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

トラニオンの評価部位は、次のとおりである（図 2-1 参照）。

- (1) トラニオン
- (2) トラニオン取付けボルト

3. 計算方法

(1) トラニオンの応力計算は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

(2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(3) 貯蔵時においては、地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は、下部トラニオン 4 個で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(4) 構造の不連続性を考慮して応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

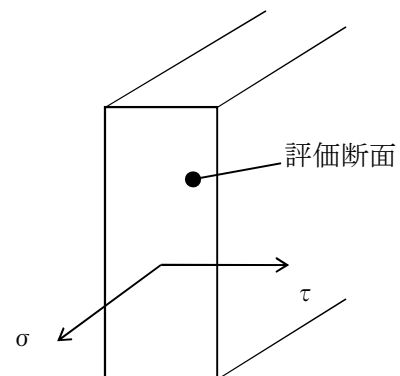
4. 応力の評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ ：評価断面に垂直な方向の応力

τ ：せん断応力



トラニオン用材料およびトラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値を表 4-1、表 4-2 に示す。

(1) トラニオン（ボルトを除く。）の応力評価

トラニオンの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

(2) トラニオン取付けボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3130 に従い添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 計算結果

5.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点（面）を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重

5.2.2 計算方法

(1) 一次応力

a. せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点③である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力（ τ ）は、次式で表される（図 5-2 参照）。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_m}{A_3} \\ F_m &= \frac{m \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_3 \cdot a_2)}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

$$G_1 = C_H$$

$$G_3 = 9.81 - C_V$$

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ（＝2820 mm）

a_1 : 支点 O から支持台㉔のトラニオン固定金具中心までの距離（＝2074.5 mm）

a_2 : 支点 O から支持台㉕のトラニオン固定金具中心までの距離（＝949.5 mm）

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重（＝ N）

m : 貯蔵容器の質量（＝ kg）

A_3 : 図 5-1 の評価点③の断面積（＝ mm²）

C_H : 水平方向設計震度（＝11.48 m/s²）

C_V : 鉛直方向設計震度（＝6.38 m/s²）

b. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 の下部トラニオンの評価点④である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力（ σ_{b4} ）は、次式で表される。

$$\sigma_{b4} = \frac{F_m \cdot L_4}{Z_4} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重（= N）

L_4 : 地震力が作用する場合の図 5-1 の評価点④と荷重作用位置との距離
（= 94.5 mm）

Z_4 : 図 5-1 の評価点④の断面係数（= mm³）

c. 支圧応力

応力が発生する箇所は、図 5-1 の下部トラニオンの評価点⑤である。トラニオン固定金具によって生じる支圧応力（ σ_p ）は、次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{F_m}{A_5} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重（= N）

A_5 : 評価点⑤に接触するトラニオン固定金具の投影面積（= mm²）

d. 組合せ応力

せん断応力（ τ ）と曲げ応力（ σ_{b4} ）との組合せ応力（ σ_T ）は、次式で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{b4}^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、

σ_{b4} : (5.2) 式と同じ

τ : (5.1) 式と同じ

e. トラニオン取付けボルトの引張応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-1 に示す下部トラニオンの評価点⑥である。

トラニオンに曲げモーメントが作用する場合にトラニオン取付けボルトに生ずる引張応力は、次式で表される。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{B6} = \frac{M_6}{Z_6} \\ M_6 = F_m \cdot L_6 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、

M_6 : 曲げモーメント（= 1.083×10^8 N・mm）

Z_6 : トラニオン取付けボルトの断面係数（= 1.009×10^6 mm³）

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重($=5.401 \times 10^5$ N)

L_6 : 地震力が作用する場合の図 5-1 の評価点⑥と荷重作用点との距離
($=200.5$ mm)

(2) 一次+二次応力

a. セン断応力

せん断応力の全振幅 (τ) は, (5.1) 式と同様に与えられる。

b. 曲げ応力

曲げ応力の全振幅 (σ_b) は, (5.2) 式と同様に与えられる。

c. 支圧応力

支圧応力の全振幅 (σ_p) は, (5.3) 式と同様に与えられる。

d. 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は, (5.4) 式と同様に与えられる。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

6. 応力の評価

6.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.2 一次＋二次応力の評価

各設計事象における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より、各設計事象の一次＋二次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

6.3 組合せ応力の評価

各設計事象における評価を表 5-1 に示す。

表 5-1 より、地震時における組合せ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の各規定を満足する。

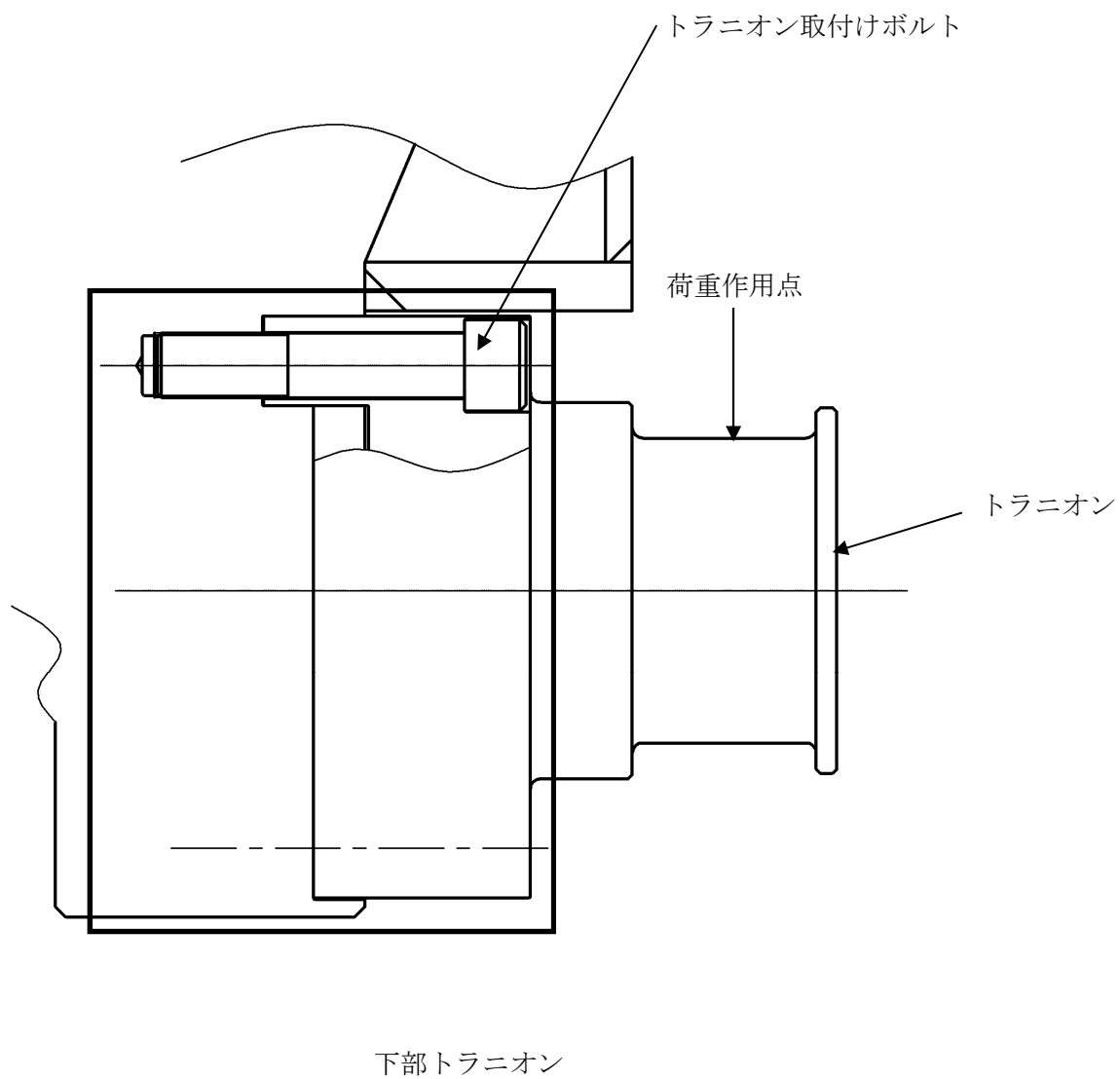


図 2-1 トラニオンの応力解析箇所

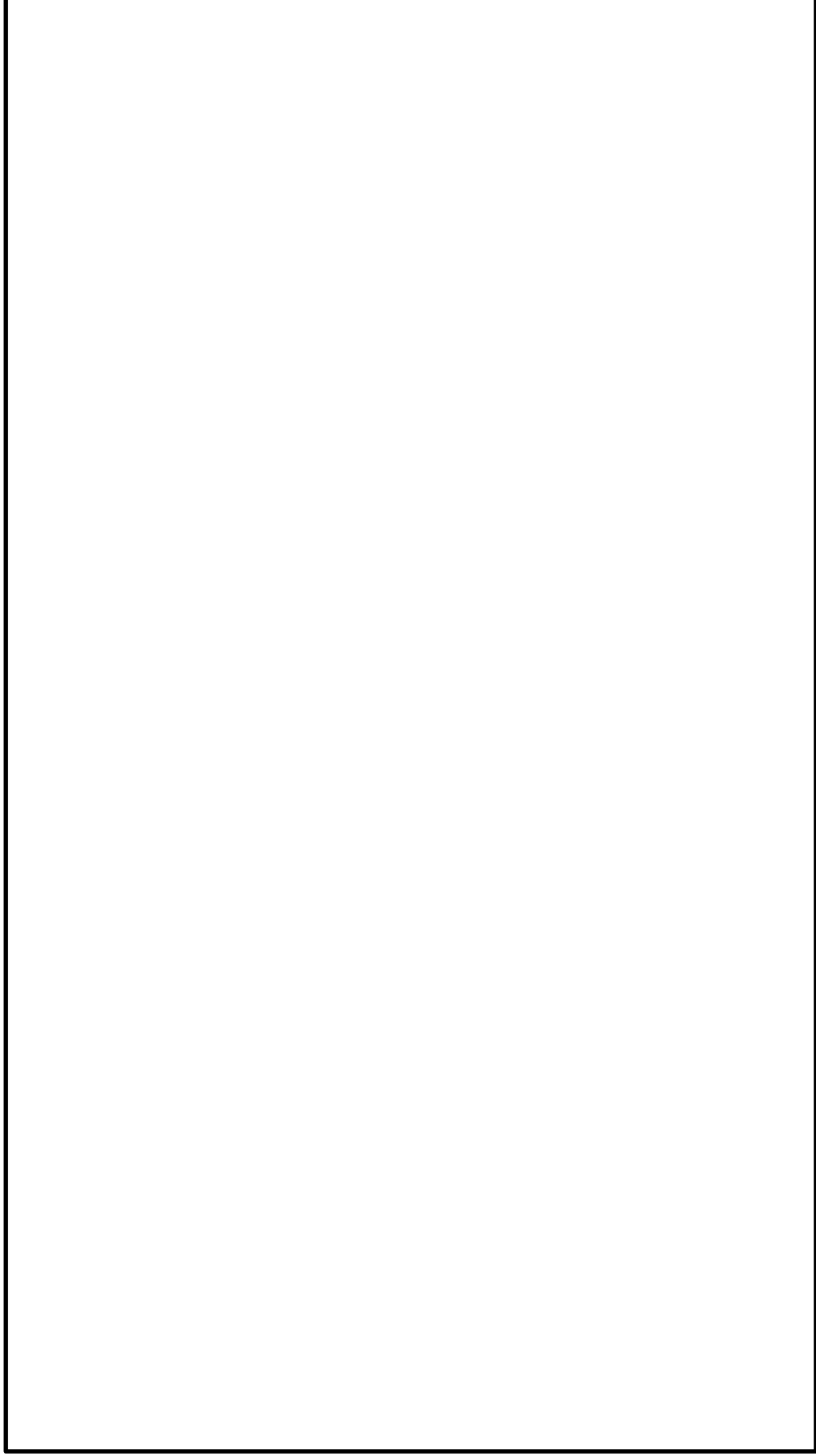
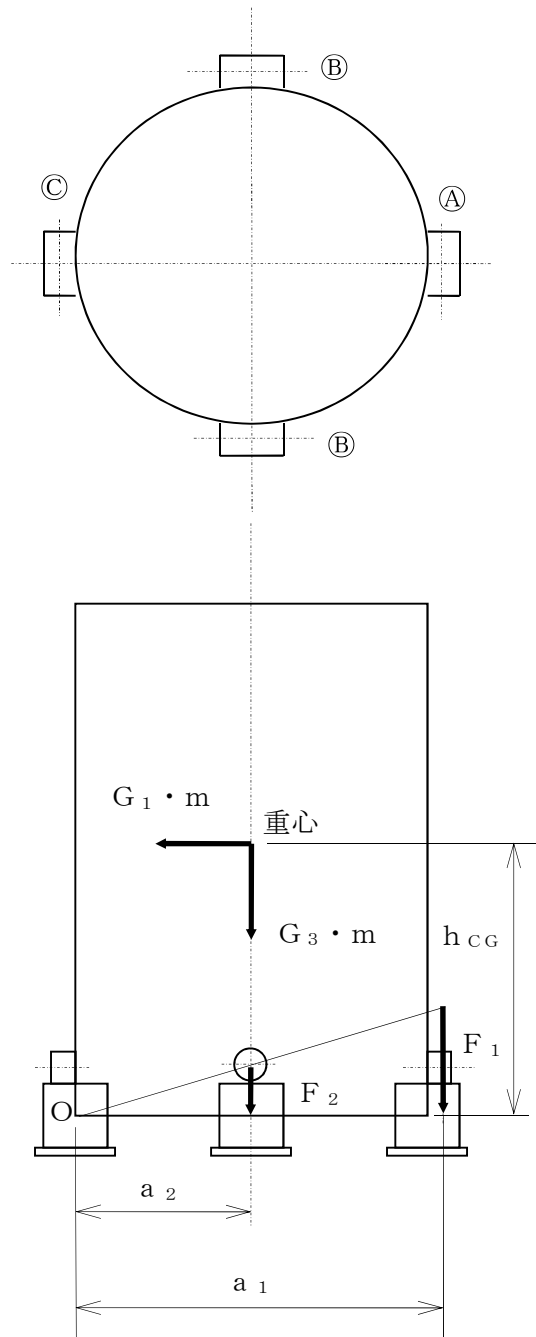


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)



Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ : 支持台番号

図 5-2 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 4-1 トラニオン用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値	
			ステンレス鋼	許容値基準
			SUS630 H1150	
I + S _d * *1	一次 応力	引張応力	588	f_t
		圧縮応力	587	f_c
		せん断応力	339	f_s
		曲げ応力	801	f_b
		支圧応力	801	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	1176	$2f_t$
		せん断応力 *2	678	$2f_s$
		曲げ応力 *2	1603	$2f_b$
		支圧応力	801	f_p
		座屈応力	339	f_b, f_s 又は f_c
I + S _s * *1	一次 応力	引張応力	588	f_t
		圧縮応力	587	f_c
		せん断応力	339	f_s
		曲げ応力	801	f_b
		支圧応力	801	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	1176	$2f_t$
		せん断応力 *2	678	$2f_s$
		曲げ応力 *2	1603	$2f_b$
		支圧応力	801	f_p
		座屈応力	339	f_b, f_s 又は f_c

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5 \cdot f_c^*} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の $1.5 \cdot f_c^*$ 、 $1.5 \cdot f_b^*$ 、 $1.5 \cdot f_t^*$ は $3 \cdot f_c$ 、 $3 \cdot f_b$ 、 $3 \cdot f_t$ とする。

*2：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類	許容応力値	
		低合金鋼	許容値基準
		トラニオン取付けボルト	
		SNB23-3	
$I + S_d^{* *1}$	引張応力	471	f_t
	せん断応力	362	f_s
$I + S_s^{* *1}$	引張応力	471	f_t
	せん断応力	362	f_s

注記 * 1 : 組合せ応力が考えられる場合の許容引張値 (f_t) は、次の2つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T \leq f_t$$

ここで、 τ : ボルトに発生するせん断応力 (MPa)

ただし、

$I + S_d^*$ の場合、 f_t は $1.5 f_t$ とする。

$I + S_s$ の場合、 f_t は $1.5 f_t^*$ とする。

表 5-1 トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		S_d^* 地震力		S_s 地震力		許容応力
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
下 部 ト ラ ニ オ ン	一 次 応 力	せん断応力	31	③	65	③	339
		曲げ応力	91	④	190	④	801
		支圧応力	112	⑤	232	⑤	801
		組合せ応力	104	④	217	④	588
	一 次 + 二 次 応 力 [*]	せん断応力	31	③	65	③	678
		曲げ応力	91	④	190	④	1603
		支圧応力	112	⑤	232	⑤	801
		組合せ応力	104	④	217	④	1176
ト ラ ニ オ ン 取 付 け ボ ル ト	一 次 応 力	引張応力	108	⑥	225	⑥	471

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-3-4 支持構造物の耐震性についての計算書
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力評価	2
5. 応力計算	3
5.1 応力評価点	3
5.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
5.2.1 荷重条件	3
5.2.2 計算方法	3
5.2.3 計算結果	7
5.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	8
5.3.1 荷重条件	8
5.3.2 計算方法	8
5.3.3 計算結果	8
6. 応力の評価	9
6.1 一次応力の評価	9
6.2 一次＋二次応力の評価	9
6.3 組合せ応力の評価	9

図表目次

図 2-1	支持構造物の応力解析箇所	10
図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	11
図 5-2	地震時に作用する荷重の計算モデル	12
表 4-1	支持構造物用材料の許容応力値	13
表 4-2	支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値	15
表 5-1	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	16
表 5-2	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	17

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅢ）の支持構造物に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

支持構造物の評価部位は次のとおりである（図 2-1 参照）。

- (1) 支持台座
- (2) トラニオン固定金具
- (3) 容器押え金具
- (4) トラニオン固定ボルト
- (5) リブ
- (6) アンカーボルト

3. 計算方法

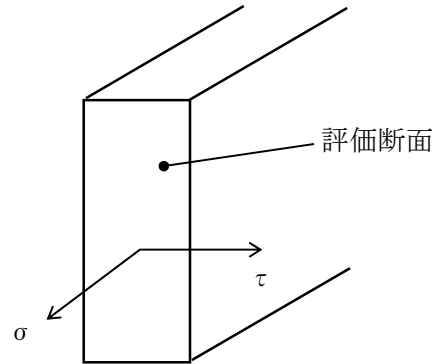
- (1) 支持構造物の応力計算は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。
- (2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。
 - a. 機械的荷重
- (3) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向、下方向、水平方向荷重は、それぞれトラニオン固定金具、支持台座、容器押え金具で支持する。
なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。
- (4) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。
応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

4. 応力評価

応力の計算結果は，設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い，応力の種類毎に分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ : 評価断面に垂直な方向の応力
- τ : せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）の応力評価

支持構造物の応力評価は，設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目について添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は，設計・建設規格 SSB-3130 に従い添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下であることを確認する。

5. 応力計算

5.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点(面)を図 5-1 に示す。

5.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)

5.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重

5.2.2 計算方法

トラニオン固定ボルト、トラニオン固定金具、リブ、アンカーボルト、容器押え金具及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力 (F_1) は図 5-2 に示す支持台④に生じ、次式により与えられる。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \cdot m_c \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

$$G_1 = C_H, \quad G_2 = 9.81 - C_V$$

C_H : 水平方向加速度 ($=7.06 \text{ m/s}^2$)

C_V : 鉛直方向加速度 ($=3.53 \text{ m/s}^2$)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ ($=2820 \text{ mm}$)

a_1 : 支点Oから支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離 ($=2074.5 \text{ mm}$)

a_2 : 支点Oから支持台⑤のトラニオン固定金具中心までの距離 ($=949.5 \text{ mm}$)

m_c : 貯蔵容器質量 ($=\boxed{} \text{ kg}$)

この引張力(F_1)によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力(σ_t)は次式で表わされる。

$$\sigma_t = \frac{F_1}{n_5 \cdot A_5} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

F_1 : 引張力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

n_5 : トラニオン固定金具 1 組当たりのボルトの本数 ($=\boxed{}$)

A_5 : トラニオン固定ボルト(M45)の断面積 ($=\boxed{} \text{ mm}^2$)

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)により曲げ応力(σ_b)が発生し、次式により与えられる。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} \cdot F_1 \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、

F_1 : 引張力 (= N)

L : トラニオン固定ボルト間距離 (=220 mm)

Z : トラニオン固定金具の断面係数 (= mm³)

b. 一次+二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は、(5.3)式と同様に与えられる。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は、次式により与えられる。

$$\sigma_t = \frac{F_1}{A_1} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、

F_1 : 引張力 (= N)

A_1 : リブの支持台座接触断面積 (= mm²)

(a) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(F_c)は支持台◎に生じ、次式により与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= G_2 \cdot (m_c + m_s) + 2 \cdot F_2 + F_1 \\ F_1 &= \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \cdot m_c \\ F_2 &= \frac{a_2}{a_1} \cdot F_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、

$$G_1 = C_H, \quad G_2 = 9.81 + C_V$$

C_H : 水平方向加速度 ($=7.06 \text{ m/s}^2$)

C_V : 鉛直方向加速度 ($=3.53 \text{ m/s}^2$)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ ($=2820 \text{ mm}$)

m_c : 貯蔵容器質量 ($=\boxed{} \text{ kg}$)

m_s : 支持台 1 個の質量 ($=\boxed{} \text{ kg}$)

F_1 : 支持台④での引張力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

F_2 : 支持台⑤での引張力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

a_1 : 支点 O から支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離
($=2074.5 \text{ mm}$)

a_2 : 支点 O から支持台⑤のトラニオン固定金具中心までの距離 ($=949.5 \text{ mm}$)

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_1} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここで,

F_c : 圧縮力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

A_1 : リブの支持台座接触断面積 ($=\boxed{} \text{ mm}^2$)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震のみによる応力の全振幅(σ)は、次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \dots\dots\dots (5.7)$$

ここで,

σ_t : a. (a)にて求めた引張応力

σ_c : a. (b)にて求めた圧縮応力

(4) アンカーボルト

a. 引張応力

(5.1)式により与えられる引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式により与えられる。

$$\sigma_t = \frac{F_1}{n_6 \cdot A_6} \dots\dots\dots (5.8)$$

ここで,

F_1 : (1)a.にて求めた引張力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

n_6 : 支持台 1 個当たりのアンカーボルト本数 ($=\boxed{}$)

A_6 : アンカーボルト(M36)の断面積 ($=\boxed{} \text{ mm}^2$)

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は支持台④, ⑤に生じ、次式により与えられる。

$$F_H = C_H \cdot (m_c + 4 \cdot m_s) \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで,

C_H : 水平方向加速度 ($=7.06 \text{ m/s}^2$)

m_c : 貯蔵容器質量 ($=\boxed{} \text{ kg}$)

m_s : 支持台 1 個の質量 ($=\boxed{} \text{ kg}$)

この水平力(F_H)によりアンカーボルトに生じるせん断応力(τ)は, 次式で表される。

$$\tau = \frac{F_H}{2 \cdot n_6 \cdot A_6} \dots\dots\dots (5.10)$$

ここで,

F_H : 水平力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

n_6 : 支持台 1 個当たりのアンカーボルト本数 ($=\boxed{}$)

A_6 : アンカーボルト(M36)の断面積 ($=\boxed{} \text{ mm}^2$)

(5) 容器押え金具

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押え金具に作用する最大水平力(F_H)は支持台◎に生じ, 次式により与えられる。

$$F_H = C_H \cdot m_c \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで,

C_H : 水平方向加速度 ($=7.06 \text{ m/s}^2$)

m_c : 貯蔵容器質量 ($=\boxed{} \text{ kg}$)

水平力(F_H)より容器押え金具に発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{F_H}{n_4 \cdot A_4} \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで,

F_H : 水平力 ($=\boxed{} \text{ N}$)

n_4 : 支持台 1 個当たりの容器押え金具の本数 ($=\boxed{}$)

A_4 : 容器押え金具(M42)の断面積 ($=\boxed{} \text{ mm}^2$)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は, (5.12)式と同様に与えられる。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は支持台◎に生じ, 次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \cdot m_c + 2 \cdot F_2 + F_1 \dots\dots\dots (5.13)$$

ここで,

$$G_2 = 9.81 + C_V$$

C_V : 鉛直方向加速度 ($= 3.53 \text{ m/s}^2$)

m_c : 貯蔵容器質量 ($= \boxed{} \text{ kg}$)

F_1 : 支持台①での引張力 ($= \boxed{} \text{ N}$)

F_2 : 支持台②での引張力 ($= \boxed{} \text{ N}$)

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で表わされる。

$$\sigma_p = \frac{F_c}{A_2} \dots\dots\dots (5.14)$$

ここで,

F_c : 圧縮力 ($= \boxed{} \text{ N}$)

A_2 : 支持台座のキャスク容器底面接触面積 ($= \boxed{} \text{ mm}^2$)

b. 一次＋二次応力

(a) 支圧応力

支圧応力(σ_p)は(5.14)式と同様に与えられる。

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

5.3 貯蔵時（ S_s 地震力が作用する場合）

5.3.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重

5.3.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押え金具及び支持台座の応力計算は5.2.2項と同様である。

5.3.3 計算結果

応力計算結果を表 5-2 に示す。

6. 応力の評価

6.1 一次応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，一次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.2 一次＋二次応力の評価

評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，一次＋二次応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

6.3 組合せ応力の評価

地震時における評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

表 5-1 及び表 5-2 より，地震時における組合せ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」の規定を満足する。

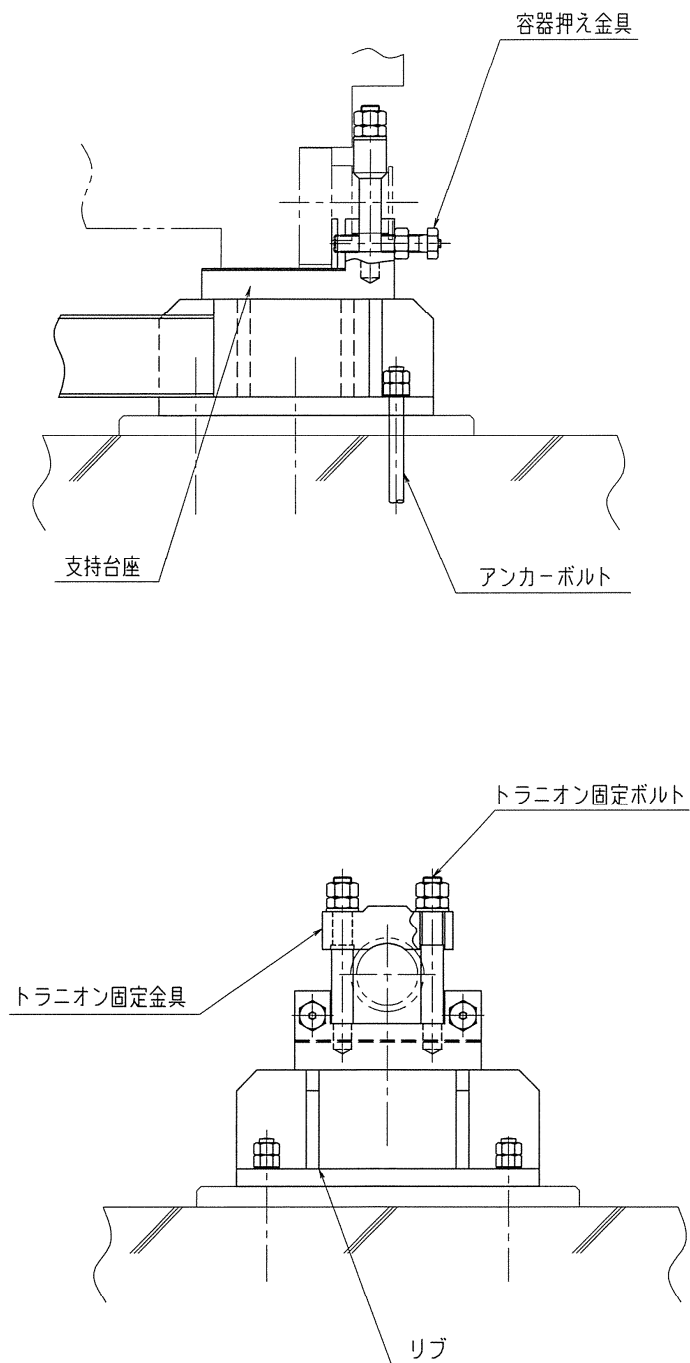


図 2-1 支持構造物の応力解析箇所

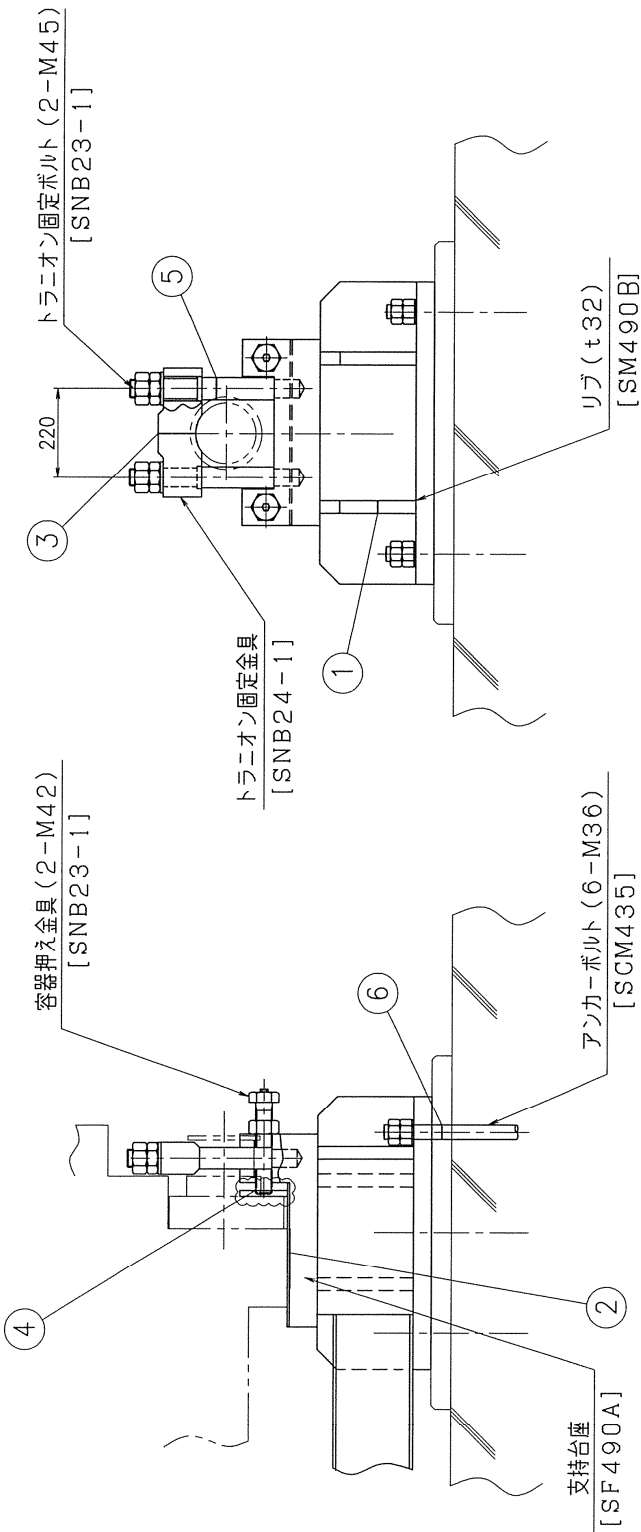
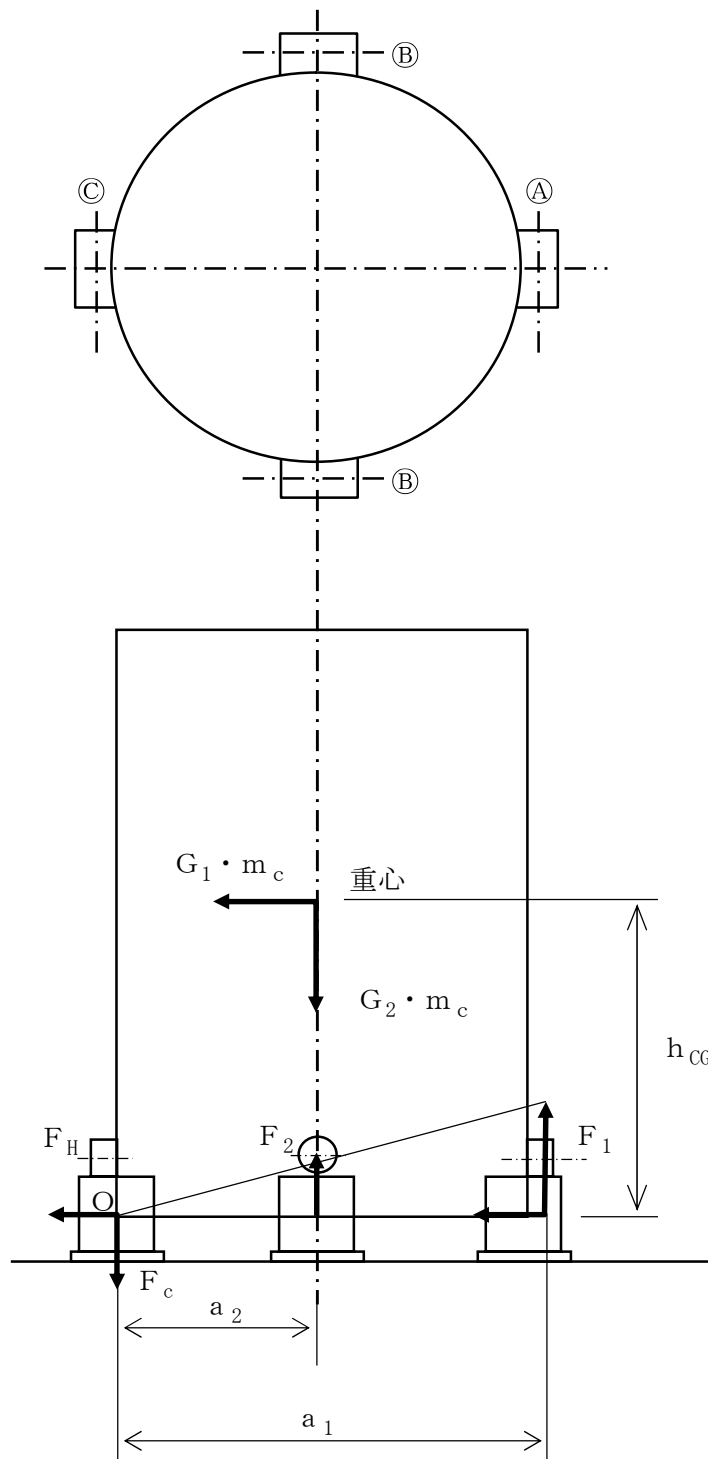


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)



①, ②, ③ : 支持台番号

図 5-2 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 4-1(1) 支持構造物用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値				許容値基準
			炭素鋼	炭素鋼	低合金鋼	低合金鋼	
			リブ	支持台座	トラニオン 固定金具	容器 押え金具	
			SM490B	SF490A	SNB24-1	SNB23-1	
I + S _d * *1	一次 応力	引張応力	272	222	726	726	f_t
		圧縮応力	259	221	723	713	f_c
		せん断応力	157	128	419	419	f_s
		曲げ応力	313	256	837	837	f_b
		支圧応力	370	302	990	990	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	544	444	1452	1452	$2f_t$
		せん断応力*2	314	256	838	838	$2f_s$
		曲げ応力*2	627	512	1675	1675	$2f_b$
		支圧応力	370	302	990	990	f_p
		座屈応力	157	128	419	419	f_b, f_s 又は f_c

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|c\sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、設計事象 I の一次応力については上式による。

I+S_d*の一次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は、 $1.5 \cdot f_c, 1.5 \cdot f_b, 1.5 \cdot f_t$ とする。

I+S_d*の一次+二次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は、 $3 \cdot f_c, 3 \cdot f_b, 3 \cdot f_t$ とする。

*2：S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 (2) 支持構造物用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値				
			リブ	支持台座	トラニオン 固定金具	容器 押え金具	許容値基準
			SM490B	SF490A	SNB24-1	SNB23-1	
I + S _s *1	一次 応力	引張応力	308	266	726	726	f_t
		圧縮応力	291	265	723	713	f_c
		せん断応力	177	153	419	419	f_s
		曲げ応力	355	306	837	837	f_b
		支圧応力	420	362	990	990	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	544	444	1452	1452	$2f_t$
		せん断応力 *2	314	256	838	838	$2f_s$
		曲げ応力 *2	627	512	1675	1675	$2f_b$
		支圧応力	420	362	990	990	f_p
		座屈応力	157	128	419	419	f_b, f_s 又は f_c

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5 \cdot f_c^*} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の $1.5 \cdot f_c^*$ 、 $1.5 \cdot f_b^*$ 、 $1.5 \cdot f_t^*$ は $3 \cdot f_c$ 、 $3 \cdot f_b$ 、 $3 \cdot f_t$ とする。

*2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類	許容応力値		
		低合金鋼	低合金鋼	許容値基準
		トラニオン固定ボルト	アンカーボルト	
		SNB23-1	SCM435	
I + S _d * *	引張応力	544	444 *	f_t
	せん断応力	419	341	f_s
I + S _s *	引張応力	544	444 *	f_t
	せん断応力	419	341	f_s

注記 * : 組合せ応力が考えられる場合の許容引張値 (f_t) は、次の 2 つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T = f_t$$

ここで、 τ : ボルトに発生するせん断応力 (MPa)。

ただし、設計事象 I の一次応力については上式による。I + S_d* の場合、 f_t は、 $1.5 \cdot$

f_t とする。I + S_s の場合、 f_t は、 $1.5 \cdot f_t^*$ とする。

表 5-1 支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			評価点 (面)	計算値	
リブ	一次応力	引張応力	①	10	272
		圧縮応力	①	37	259
	一次＋二次応力*	引張・圧縮応力	①	47	544
支持台座	一次応力	支圧応力	②	30	302
	一次＋二次応力*	支圧応力	②	30	302
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	③	280	837
	一次＋二次応力*	曲げ応力	③	280	1675
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	④	291	713
	一次＋二次応力*	引張・圧縮応力	④	291	1452
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	⑤	170	544
アンカー ボルト	—	引張応力	⑥	89	444
		せん断応力	⑥	68	341
		組合せ応力	⑥	89	444

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-2 支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			評価点 (面)	計算値	
リブ	一次応力	引張応力	①	21	308
		圧縮応力	①	56	291
	一次＋二次応力*	引張・圧縮応力	①	77	544
支持台座	一次応力	支圧応力	②	44	362
	一次＋二次応力*	支圧応力	②	44	362
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	③	583	837
	一次＋二次応力*	曲げ応力	③	583	1675
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	④	473	713
	一次＋二次応力*	引張・圧縮応力	④	473	1452
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	⑤	355	544
アンカー ボルト	—	引張応力	⑥	185	444
		せん断応力	⑥	110	341
		組合せ応力	⑥	185	444

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-3-5 二次蓋の耐震性についての計算書
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 評価部位	1
3. 計算方法	1
4. 応力の評価	1
4.1 地震時 (S_d^*) の応力計算	1
4.1.1 荷重条件	1
4.1.2 計算方法	1
4.1.3 計算結果	3
4.2 地震時 (S_s) の応力計算	3
4.2.1 荷重条件	3
4.2.2 計算方法	3
4.2.3 計算結果	3
4.3 二次蓋締付けボルトの応力計算	4
4.3.1 荷重条件	4
4.3.2 計算方法	4
4.3.3 計算結果	5
5. 応力評価	6
5.1 地震時の二次蓋応力評価	6
5.2 地震時の二次蓋締付けボルト応力評価	6

図表目次

図 2-1	二次蓋の構造	7
表 4-1	二次蓋の応力計算結果	8
表 4-2	二次蓋締付けボルトの応力計算結果	8
表 5-1	地震時 (S_d^*) の応力評価	8
表 5-2	地震時 (S_s) の応力評価	8
表 5-3	二次蓋締付けボルトの応力評価	8

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプⅢ）の二次蓋に関する耐震性についての計算書である。

2. 評価部位

二次蓋の評価部位を図 2-1 に示す。

3. 計算方法

(1) 二次蓋の応力計算は、応力評価式を用いて行う。

(2) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の 3 つである。

- a. 最高使用圧力 (0.4 MPa)
- b. ボルト初期締付け力
- c. 地震力

4. 応力の評価

4.1 地震時 (S_d^*) の応力計算

4.1.1 荷重条件

地震時 (S_d^*) 時における荷重は次に示す組合せとする。

$$D + P_D + M_D + S_d^*$$

ここで、

D : 死荷重

P_D : 地震と組み合わせるべき設計事象Ⅰ及びⅡ、又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重

M_D : 地震と組み合わせるべき設計事象Ⅰ及びⅡ、又は当該設備に設計上定められた機械的荷重（設計事象Ⅱ：貯蔵容器の支持構造物への衝突 (6g)）

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

である。

本計算書においては、 D は二次蓋の自重による荷重、 P_D は最高使用圧力による荷重、 M_D は設計事象Ⅰ及びⅡにおいて作用する加速度による荷重のうち最大のもの（支持構造物への衝突：底部脚部の衝突）とする。

4.1.2 計算方法

(1) 二次蓋の自重による荷重 (D)

二次蓋の自重による応力は次式で計算する。

$$\sigma_D = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

P : 等分布荷重 ($=8.595 \times 10^{-3}$ MPa)

$$P = m \cdot g / A$$

m: 二次蓋の質量 (= kg)

g: 重力加速度 (=9.81 m/s²)

A: 荷重負荷面積 (= $\pi \cdot r^2$ = mm²)

r: 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t: 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

(2) 最高使用圧力による荷重 (P_D)

二次蓋の最高使用圧力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_P = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで,

P: 最高使用圧力 (=0.4 MPa)

r: 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t: 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

(3) 機械的荷重 (M_D)

二次蓋の機械的荷重による応力は次式で計算する。

$$\sigma_M = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで,

P: 等分布荷重 (=5.155×10⁻² MPa)

$$P = m \cdot G / A$$

m: 二次蓋の質量 (= kg)

G: 加速度 (=58.84 m/s²)

A: 荷重負荷面積 (= $\pi \cdot r^2$ = mm²)

r: 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t: 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

(4) 地震力による荷重 (S_d*)

二次蓋の地震力による応力については、二次蓋はインロー構造によりキャスク本体に設置されるため水平方向の荷重は無視できる。

よって、二次蓋の地震力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_S = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで,

P: 等分布荷重 (=3.093×10⁻³ MPa)

$$P = m \cdot G / A$$

m: 二次蓋の質量 (= kg)

G: S_d*地震力による鉛直方向加速度 (=3.53 m/s²)

A: 荷重負荷面積 (= $\pi \cdot r^2$ = mm²)

r: 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t: 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

4.1.3 計算結果

応力計算結果を表 4-1 に示す。

4.2 地震時 (S_s) の応力計算

4.2.1 荷重条件

地震時 (S_s) 時における荷重は次に示す組合せとする。

$$D + P_D + M_D + S_s$$

ここで、 D 、 P_D 及び M_D は 4.1.1 項と同様である。

ただし、

S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力である。

4.2.2 計算方法

(1) 二次蓋の自重による荷重

二次蓋の自重による応力は 4.1.2(1) 項に示す計算方法により計算する。

(2) 最高使用圧力による荷重

二次蓋の最高使用圧力による応力は 4.1.2(2) 項に示す計算方法により計算する。

(3) 機械的荷重

二次蓋の機械的荷重による応力は 4.1.2(3) 項に示す計算方法により計算する。

(4) 地震力による荷重

二次蓋の地震力による応力については、4.1.2(4) 項に示す計算方法により計算する。

ただし、

P : 等分布荷重 (= MPa)

$$P = m \cdot G / A$$

G : S_s 地震力による鉛直方向加速度 (= 6.38 m/s²)

4.2.3 計算結果

応力計算結果を表 4-1 に示す。

4.3 二次蓋締付けボルトの応力計算

4.3.1 荷重条件

地震時における荷重は次に示す組合せとする。

$$D + P_D + M_D + S_d^* \text{ 又は } D + P_D + M_D + S_s$$

ここで、

D : 死荷重

P_D : 地震と組み合わせべき設計事象Ⅰ及びⅡ、又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重

M_D : 地震と組み合わせべき設計事象Ⅰ及びⅡ、又は当該設備に設計上定められた機械的荷重

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

である。

本計算書において、 D は二次蓋のガスケット反力、 P_D は最高使用圧力による荷重とし、 M_D は設計事象Ⅰ及びⅡにおいて作用する加速度による荷重のうち最大のもの（支持構造物への衝突：底部脚部の衝突）とする。

4.3.2 計算方法

(1) 二次蓋のガスケット反力による荷重 (D)

二次蓋締付けボルトのガスケット反力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_D = \frac{F_G}{A_B} \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、

F_G : ガスケット反力 (= N)

$$F_G = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d_G$$

f : ガスケット1本当たりの線荷重 (= N/mm)

d_G : ガスケットの平均径 (= mm)

A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm²)

(二次蓋締付けボルトの最小径: mm)

(二次蓋締付けボルトの本数: 本)

(2) 最高使用圧力による荷重 (P_D)

二次蓋締付けボルトの最高使用圧力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_P = \frac{P \cdot \pi \cdot r^2}{A_B} \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

P : 最高使用圧力 (= 0.4 MPa)

r : 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm^2)

(3) 機械的荷重 (M_D)

二次蓋締付けボルトの機械的荷重による応力は次式で計算する。

$$\sigma_M = \frac{m \cdot G}{A_B} \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで,

m : 二次蓋の質量 (= kg)

G : 加速度 (=58.84 m/s^2)

A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm^2)

(4) 地震力による荷重 (S_d^* 及び S_s)

二次蓋締付けボルトの地震力による応力は二次蓋に作用する慣性力により発生する。二次蓋はインロー構造によりキャスク本体に取り付けられるため水平方向の荷重は無視でき、鉛直方向の荷重のみを考慮すればよい。

二次蓋締付けボルトの地震力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_S = \frac{m \cdot G}{A_B} \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで,

m : 二次蓋の質量 (= kg)

G : S_d^* 地震力による鉛直方向加速度 (=3.53 m/s^2)

G : S_s 地震力による鉛直方向加速度 (=6.38 m/s^2)

A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm^2)

4.3.3 計算結果

応力計算結果を表 4-2 に示す。

5. 応力評価

5.1 地震時の二次蓋応力評価

各事象における評価を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

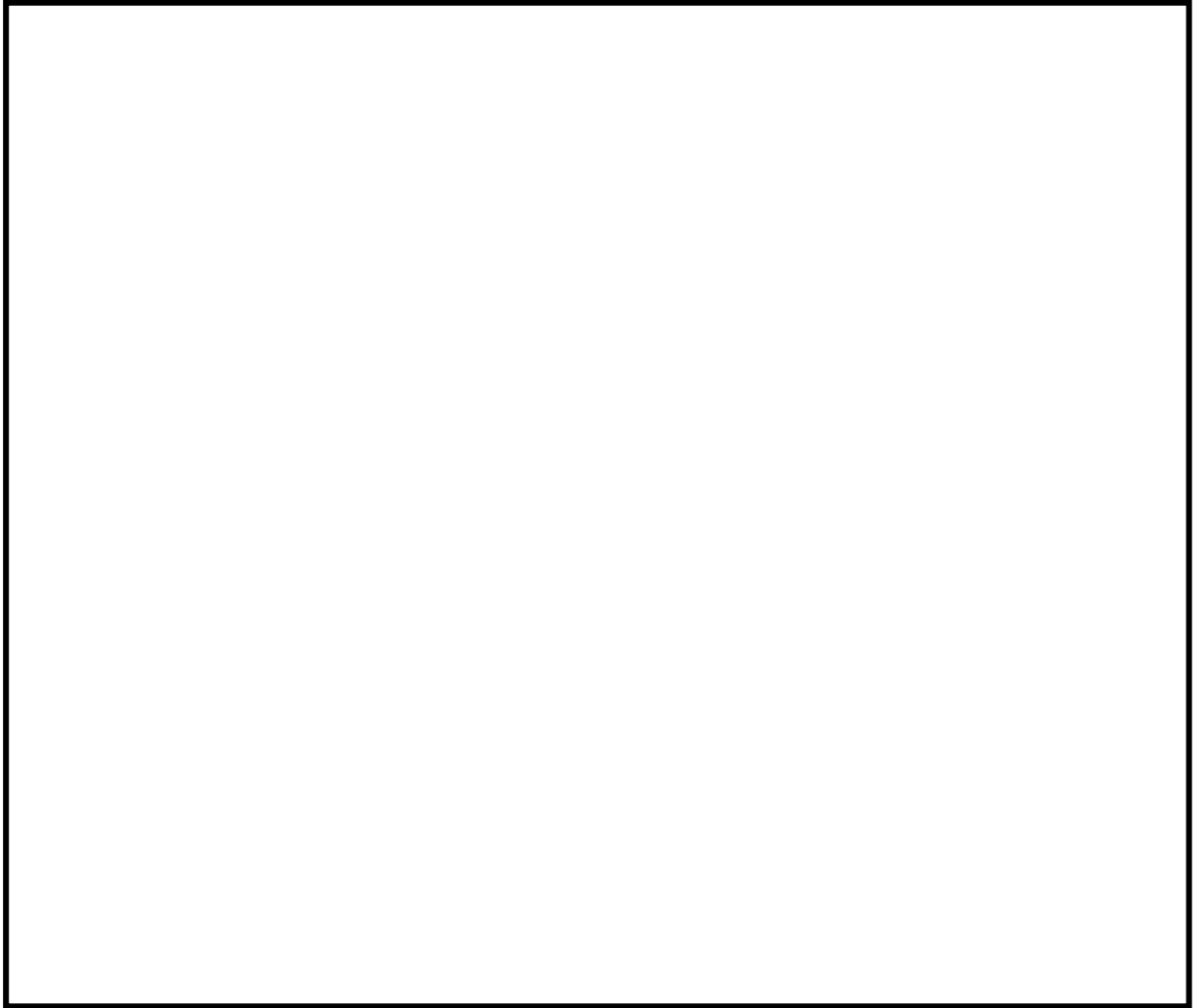
表 5-1 及び表 5-2 より，一次膜応力＋一次曲げ応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下である。

また，一次＋二次応力は疲労評価不要の条件を満足する。

5.2 地震時の二次蓋締付けボルト応力評価

各事象における評価を表 5-3 に示す。

表 5-3 より，平均引張応力は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」で示した許容応力以下である。



(単位：mm)

図 2-1 二次蓋の構造

表 4-1 二次蓋の応力計算結果

(単位：MPa)

応力分類	σ_D	σ_P	σ_M	σ_S	σ
S_d^*					
S_s					

表 4-2 二次蓋締付けボルトの応力計算結果

(単位：MPa)

応力分類	σ_D	σ_P	σ_M	σ_S	σ
S_d^*					
S_s					

表 5-1 地震時 (S_d^*) の応力評価

(単位：MPa)

応力分類	計算値	許容値	備考
一次一般膜応力	—	194	Min. $[S_y, 0.6 \cdot S_u]$
一次膜応力+一次曲げ応力	73	291	上記の 1.5 倍
一次+二次応力 *	2	388	$2 \cdot S_y$: 疲労解析不要の条件

注記 * : 地震力のみによる応力振幅

表 5-2 地震時 (S_s) の応力評価

(単位：MPa)

応力分類	計算値	許容値	備考
一次一般膜応力	—	223	$0.6 \cdot S_u$
一次膜応力+一次曲げ応力	73	334	上記の 1.5 倍
一次+二次応力 *	2	388	$2 \cdot S_y$: 疲労解析不要の条件

注記 * : 地震力のみによる応力振幅

表 5-3 二次蓋締付けボルトの応力評価

(単位：MPa)

地震力	平均引張応力	許容値	備考
S_d^*	194	300	$1.5 \cdot S$
S_s	194	400	$2 \cdot S$

V-2-4-2-4 使用済燃料プール温度（S A）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	7
3. 評価部位	8
4. 地震応答解析及び構造強度評価	8
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	8
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	8
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	8
4.2.2 許容応力	8
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	8
4.3 解析モデル及び諸元	11
4.4 固有周期	14
4.4.1 固有値解析方法	14
4.4.2 固有値解析結果	14
4.5 設計用地震力	15
4.6 計算方法	16
4.6.1 架構に生じる応力	16
4.6.2 基礎ボルトに生じる応力	18
4.7 計算条件	21
4.7.1 架構の応力計算条件	21
4.7.2 基礎ボルトの応力計算条件	21
4.8 応力の評価	21
4.8.1 架構における応力評価	21
4.8.2 基礎ボルトにおける応力評価	21
5. 機能維持評価	22
5.1 電氣的機能維持評価方法	22
6. 評価結果	23
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果	23

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、使用済燃料プール温度（S A）が設計用地震力に対して十分な構造強度及び電氣的機能を有していることを説明するものである。

使用済燃料プール温度（S A）は、重大事故等対処設備においては常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価及び電氣的機能維持評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

使用済燃料プール温度（S A）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	
検出器は、架構に固定された保護管に収納されている。 架構は床に基礎ボルトで固定されている。また、架構は使用済燃料プールワークテーブル用フックに取付フックで固定されている。	熱電対式温度検出器	The diagram illustrates the structural design of a temperature detector. It includes three views: a side view (側面図), a front view (正面図), and a base detail (据付部拡大図). The side view shows a vertical assembly with a total height of 8445.5 mm. The top section has a width of 739.5 mm and a height of 210.5 mm. The front view shows a similar assembly with a total height of 5434.5 mm. The top section has a width of 200 mm and a height of 350 mm. The base detail shows the detector mounted on a base plate with foundation bolts (基礎ボルト) and a base plate (後打ち金物). The detector is housed in a protective pipe (検出器保護管) which is fixed to a frame (架構). The frame is also fixed to a work table hook (ワークテーブル用フック) and a hook (取付フック). The detector is a thermocouple type (熱電対式温度検出器). The unit is in mm. 側面図 正面図 据付部拡大図 基礎ボルト 後打ち金物 検出器保護管 架構 取付フック ワークテーブル用フック 後打ち金物② (□250×250) 後打ち金物① (□180×180) (単位 : mm)

2.2 評価方針

使用済燃料プール温度（S A）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」にて示す使用済燃料プール温度（S A）の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.3 解析モデル及び諸元」及び「4.4 固有周期」で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、「4. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。また、使用済燃料プール温度（S A）の機能維持評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針 4.2 電氣的機能維持」にて設定した電氣的機能維持の方針に基づき、地震時の応答加速度が電氣的機能確認済加速度以下であることを、「5. 機能維持評価」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。

使用済燃料プール温度（S A）の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

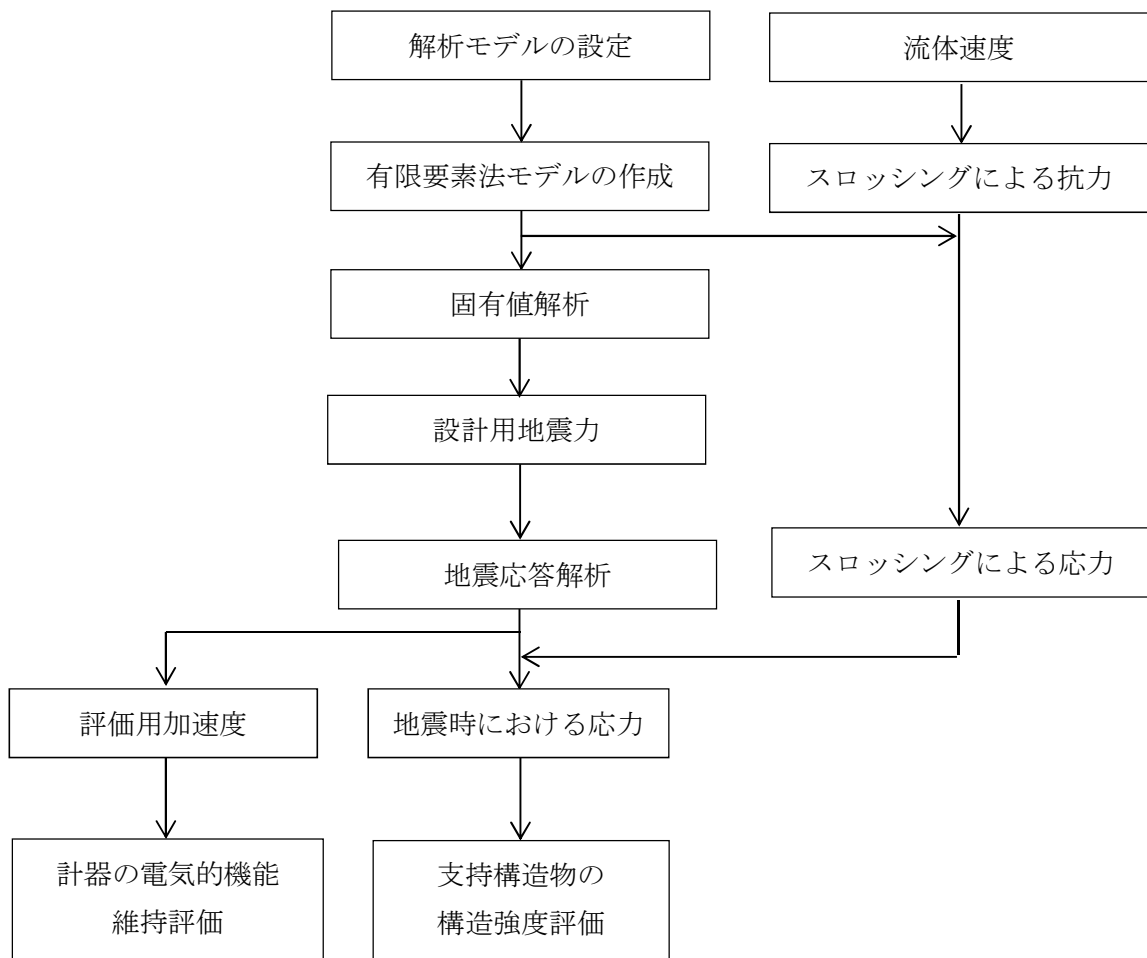


図 2-1 使用済燃料プール温度（S A）の耐震評価フロー

2.3 適用基準

適用基準等を以下に示す。

- (1) 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）
- (2) 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）
- (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）

2.4 記号の説明

記号	表示内容	単位
A	架構の断面積	mm ²
A _s	スロッシングによる架構の投影面積	mm ²
A _b	基礎ボルトの有効断面積	mm ²
C _d	架構の抗力係数	—
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
d	基礎ボルトの呼び径	mm
E	縦弾性係数	MPa
F [*]	設計・建設規格 SSB-3133 に定める値	MPa
F _b	基礎ボルトに作用する引張力 (1 本当たり)	MPa
F _x	地震及びスロッシングにより基礎ボルトに生じる反力 (X 方向)	N
F _y	地震及びスロッシングにより基礎ボルトに生じる反力 (Y 方向)	N
F _z	地震及びスロッシングにより基礎ボルトに生じる反力 (Z 方向)	N
F _{x1}	地震により基礎ボルトに生じる反力 (X 方向)	N
F _{y1}	地震により基礎ボルトに生じる反力 (Y 方向)	N
F _{z1}	地震により基礎ボルトに生じる反力 (Z 方向)	N
F _{x2}	スロッシングにより基礎ボルトに生じる反力 (X 方向)	N
F _{y2}	スロッシングにより基礎ボルトに生じる反力 (Y 方向)	N
F _{z2}	スロッシングにより基礎ボルトに生じる反力 (Z 方向)	N
F _s	スロッシングにより検出器に生じる抗力	N
f _{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力 (f _s を 1.5 倍した値又は f _s [*] を 1.5 倍した値)	MPa
f _{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力 (f _t を 1.5 倍した値又は f _t [*] を 1.5 倍した値)	MPa
f _{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
I _p	架構の断面二次極モーメント	mm ⁴
I _y	架構の断面二次モーメント (y 軸)	mm ⁴
I _z	架構の断面二次モーメント (z 軸)	mm ⁴
ℓ _{a1}	基礎ボルト間の水平方向距離	mm
ℓ _{a2}	基礎ボルト間の水平方向距離	mm
ℓ _b	後打ち金物から保護管支持架構までの水平方向距離	mm
m	検出器及び架構の総質量	kg
m _a	検出器の質量	kg
n	後打ち金物 1 枚当たりの基礎ボルトの本数	—
p	後打ち金物のプレート枚数	—

記号	表示内容	単位
Q_b	基礎ボルトに作用するせん断力（1本あたり）	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 付録材料表 Part5 表 8 に定める材料の 40℃における値	MPa
V	スロッシングにおける流速	m/s
Z_p	架構のねじり断面係数	mm ³
Z_y	架構の断面係数（y 軸）	mm ³
Z_z	架構の断面係数（z 軸）	mm ³
ν	ポアソン比	—
π	円周率	—
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_1	地震により架構に生じる組合せ応力	MPa
σ_{11}	地震により架構に生じる圧縮応力	MPa
σ'_{11}	地震により架構に生じる圧縮応力（手計算値）	MPa
σ_{12}	地震により架構に生じるせん断応力	MPa
σ_{13}	地震により架構に生じる曲げ応力	MPa
σ_2	スロッシングにより架構に生じる組合せ応力	MPa
σ_{21}	スロッシングにより架構に生じる圧縮応力	MPa
σ_{22}	スロッシングにより架構に生じるせん断応力	MPa
σ_{23}	スロッシングにより架構に生じる曲げ応力	MPa
σ_3	地震及びスロッシングにより架構に生じる組合せ応力	MPa
σ_{31}	地震及びスロッシングにより架構に生じる圧縮応力	MPa
σ_{32}	地震及びスロッシングにより架構に生じるせん断応力	MPa
σ_{33}	地震及びスロッシングにより架構に生じる曲げ応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
ρ	水の比重	kg/m ³

2.5 計算精度と数値の丸め方

計算の精度は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	—	少数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
温度	℃	—	—	整数位
質量 ^{*1}	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 ^{*3}
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*3}
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*2}	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の場合は、小数点以下表示とする。

*2：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降伏点及び引張強さ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：絶対値が1000以上のときは、べき数表示とする。

3. 評価部位

使用済燃料プール温度（S A）の耐震評価は、「4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる架構及び基礎ボルトについて実施する。

使用済燃料プール温度（S A）の耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 地震応答解析及び構造強度評価

4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 地震力は、使用済燃料プール温度（S A）に対して、水平方向及び鉛直方向から同時に作用するものとする。
- (2) 使用済燃料プール温度（S A）は、基礎ボルトにより床面及びワークテーブル用フックにより使用済燃料プール内の壁面に固定されるものとする。
- (3) 使用済燃料プール温度（S A）の質量は、検出器、検出器保護管及び架構を考慮する。
- (4) 使用済燃料プール温度（S A）の架構及び基礎ボルトに対する発生応力については、地震及びスロッシングによる発生応力の絶対値和とすることにより算出し評価する。
- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

使用済燃料プール温度（S A）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 4-1 に示す。

4.2.2 許容応力

使用済燃料プール温度（S A）の許容応力は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表 4-2 のとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

使用済燃料プール温度（S A）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 4-3 に示す。

表 4-1 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 設備	使用済燃料プール 温度（S A）	常設／防止 常設／緩和	— ^{*2}	$D + P_D + M_D + S_s^{*3, *4}$	$IV_A S$
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	$V_A S$ （ $V_A S$ として、 $IV_A S$ の許容限界を用いる。）

注記 *1：「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*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。

*4：地震荷重にはプール水のスロッシングによる荷重を含む。

表 4-2 許容応力（重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等以外)					許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力					一次応力	
	引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	引張り	せん断
IV _A S	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_c^*$	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_{to}^*$	$1.5 \cdot f_{sb}^*$
V _A S (V _A Sとして、IV _A Sの 許容限界を用いる。)							

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

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

表 4-3 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
架構		周囲環境温度	171	441	205
基礎ボルト		周囲環境温度	171	441	205

4.3 解析モデル及び諸元

使用済燃料プール温度（S A）の解析モデルを3次元はりモデルとして図4-1に、解析モデルの概要を以下に示す。

検出器が設置される架構（①～⑥）は鋼材で構成され、架構④、⑤にて原子炉建屋の床面に固定されており、架構①は使用済燃料プールの側面に沿って深部に向かい敷設されている。なお、架構①に取り付けられたフックを使用済燃料プール内のワークテーブル用フックに取り付けることにより、使用済燃料プール内においても固定されるものとする。

また、検出器保護管⑦は、架構①の側面に設置しており、固定金具により9箇所架構に溶接し、固定されるものとする。

なお、検出器の質量は質点に集中するものとする。

機器の諸元を表4-4、部材の機器要目を表4-5に示す。

- (1) 図4-1中○内の数字は部材番号（要素番号）を示す。
- (2) 図4-1中の●は使用済燃料プール温度（S A）の質点を示し、 m_a は□kgである。
- (3) 図4-1中の——は架構、--は仮想鋼材、は支持点を示す。
- (4) 拘束条件として、基礎部のXYZ方向及び回転方向を固定する。
- (5) 解析コードは、「NSAFE」を使用し、固有値及び荷重を求める。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-4 計算機プログラム（解析コード）の概要・HISAP及びNSAFE」に示す。
- (6) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

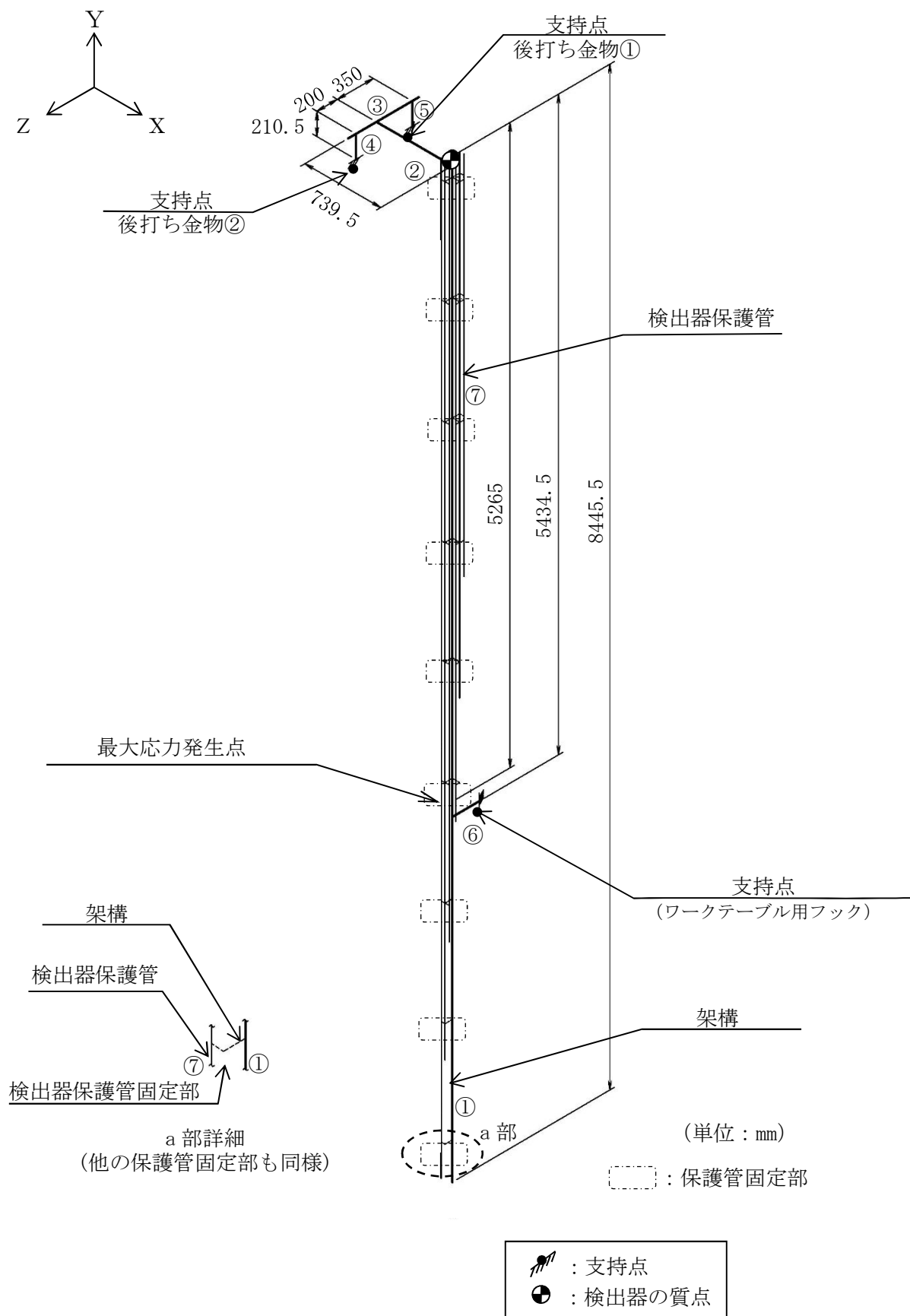
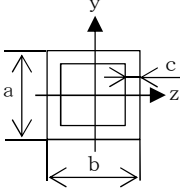
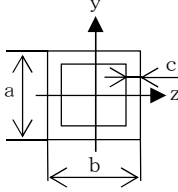
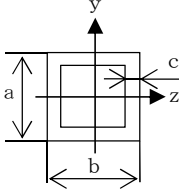
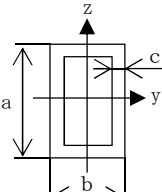
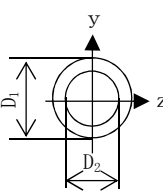


図 4-1 使用済燃料プール (SA) 解析モデル

表 4-4 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	
質量	m_a	kg	
温度条件（雰囲気温度）	T	℃	
縦弾性係数	E	MPa	
ポアソン比	ν	—	
要素数	—	個	
節点数	—	個	

表 4-5 部材の機器要目

材料					
対象要素	①	②～④	⑤	⑥	⑦
A (mm ²)					
I _y (mm ⁴)					
I _z (mm ⁴)					
I _p (mm ⁴)					
Z _y (mm ³)					
Z _z (mm ³)					
Z _p (mm ³)					
断面形状 (mm)	 125×125×4 (a × b × c)	 125×125×6 (a × b × c)	 100×100×6 (a × b × c)	 125×75×4 (a × b × c)	 D₁ = 17.3 D₂ = 12.7

4.4 固有周期

4.4.1 固有値解析方法

使用済燃料プール温度（S A）の固有値解析方法を「4.3 解析モデル及び諸元」に示す。

4.4.2 固有値解析結果

固有値解析結果を表 4-6、振動モード図を図 4-2 に示す。なお、鉛直方向は 6 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

表 4-6 固有値解析結果(s)

モード	固有周期	卓越方向	刺激係数		
			X 方向	Y 方向	Z 方向
1 次		水平	0.211	-0.060	-0.003
2 次		水平	0.112	0.099	0.142
3 次		水平	0.552	0.024	0.147
4 次		水平	-0.129	-0.076	0.526
5 次		水平	—	—	—

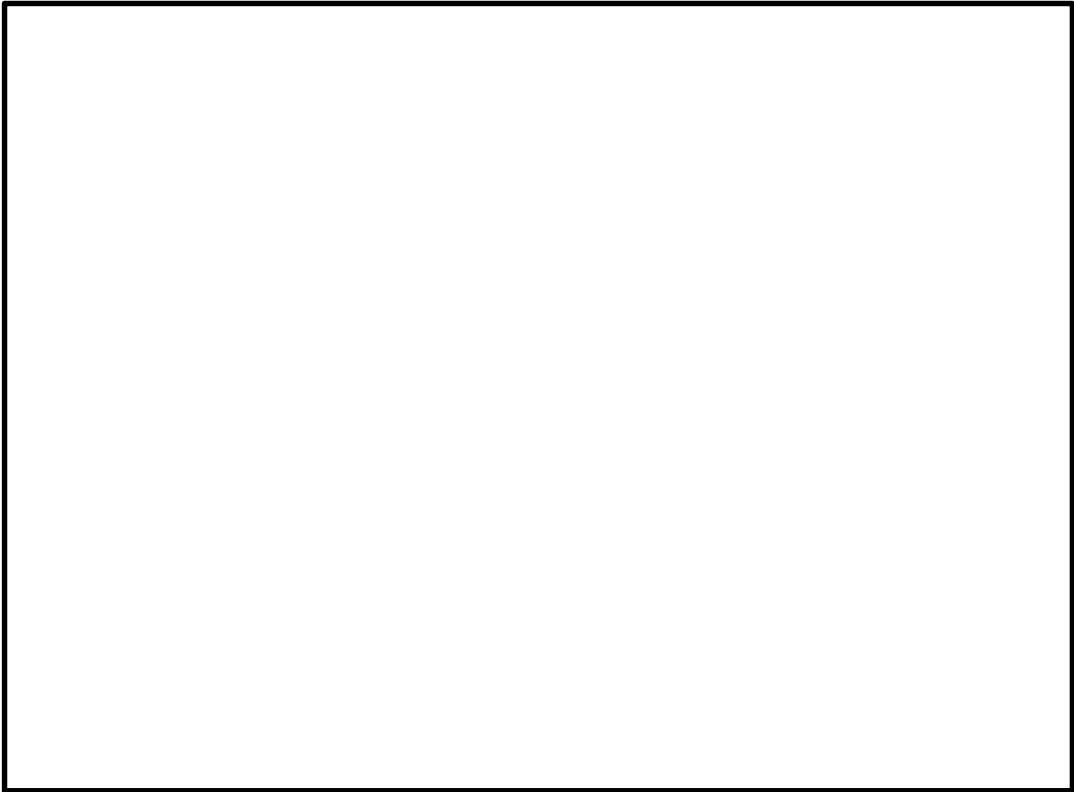


図 4-2 使用済燃料プール温度（S A） 振動モード図

4.5 設計用地震力

「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」に基づき設定する。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表 4-7 に示す。

表 4-7 設計用地震力（重大事故等対処設備）

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		減衰定数 (%)	
	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	水平 方向	鉛直 方向
EL. 46.50^{*1}			—	—	$C_H = 1.74$ 又は*3	$C_V = 1.52$	1.0 ^{*4}	—

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

*3：基準地震動 S_s に基づく設計用床応答曲線より得られる値。

*4：溶接構造物に適用される減衰定数の値。

4.6 計算方法

4.6.1 架構に生じる応力

4.6.1.1 地震により架構に生じる応力

- (1) 図 4-1 に示す解析モデルにより，水平方向及び鉛直方向の設計用床応答曲線を用いてスペクトルモーダル解析を実施し，圧縮応力，せん断応力及び曲げ応力を算出する。
- (2) 架構は鉛直方向において剛構造であることから，取付床面高さの鉛直方向設計震度を用いて，以下の式により圧縮応力を算出する。

$$\sigma_{11} = \frac{m \cdot g \cdot C_v}{A}$$

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ (4.6.1.1.1)

- (3) スペクトルモーダル解析による算出結果に，4.6.1.1.1 式による圧縮応力の算出値を足し合わせ，組合せ応力を算出する。算出結果を表 4-8 に示す。

表 4-8 地震により架構に生じる応力

(単位：MPa)

圧縮応力 σ_{11}	せん断応力 σ_{12}	曲げ応力 σ_{13}	組合せ応力* ² σ_1
11	12	131	144

注記 *：組合せ応力 $\sigma_1 = \sqrt{(\sigma_{11} + \sigma_{13})^2 + 3 \cdot \sigma_{12}^2}$

4.6.1.2 スロッシングにより架構に生じる応力

- (1) スロッシングによる応力の算出については、添付書類「V-1-1-8-3 溢水評価条件の設定」に示す基準地振動 S_s による使用済燃料プールの 3 次元流動解析により得られた流体速度時刻歴データを用いる。
- (2) 流体速度時刻歴データより水深毎の水平方向（X，Z 方向）の最大流速を用い、鉛直方向（Y 方向）については、架構底部高さにおける流速を用いて、架構に生じる抗力を算出する。
- (3) 抗力の算出には以下の式を用い、抗力係数 C_d は機械工学便覧 日本機械学会編（2007）より 2.0 とする。

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_s \cdot V^2$$

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ (4.6.1.2.1)

- (4) 算出した抗力を用いて、図 4-1 に示す解析モデルにより、架構に生じる応力を算出する。組合せ応力が最大となる算出結果を表 4-9 に示す。

表 4-9 スロッシングにより架構に生じる応力 (単位：MPa)

方向	圧縮応力 σ_{21}	せん断応力 σ_{22}	曲げ応力 σ_{23}	組合せ応力* σ_2
X	1	1	2	4
Y	1	1	1	3
Z	1	1	2	4
Max [X, Z] + Y	2	2	3	7

注記 * : 組合せ応力 $\sigma_2 = \sqrt{(\sigma_{21} + \sigma_{23})^2 + 3 \cdot \sigma_{22}^2}$

4.6.1.3 地震及びスロッシングにより架構に生じる応力

地震及びスロッシングにより架構に生じる応力を合算した結果を表 4-10 に示す。

表 4-10 地震及びスロッシングにより架構に生じる応力 (単位：MPa)

圧縮応力 σ_{31}	せん断応力 σ_{32}	曲げ応力 σ_{33}	組合せ応力* σ_3
13	14	134	149

注記 * : 組合せ応力 $\sigma_3 = \sqrt{(\sigma_{31} + \sigma_{33})^2 + 3 \cdot \sigma_{32}^2}$

4.6.2 基礎ボルトに生じる応力

4.6.2.1 地震により基礎ボルトに生じる反力

- (1) 図 4-1 に示す解析モデルにより水平方向及び鉛直方向の設計用床応答曲線を用いてスペクトルモーダル解析を実施する。
- (2) Y方向については、以下の式を用いて算出し、スペクトルモーダル解析による算出値と足し合わせる。各算出結果を表 4-11 に示す。

① 後打ち金物（1）基礎ボルト

$$F_{y1} = \frac{m(C_v - 1) \times \ell_b \times g}{(\ell_{a1} \times p)} \quad \dots \dots \dots (4.6.2.1.1)$$

② 後打ち金物（2）基礎ボルト

$$F_{y1} = \frac{m(C_v - 1) \times \ell_b \times g}{(\ell_{a2} \times p)} \quad \dots \dots \dots (4.6.2.1.2)$$

表 4-11 地震により基礎ボルトに生じる反力

部材	方法	反力 (N)		
		F _{x1}	F _{y1}	F _{z1}
後打ち金物（1） 基礎ボルト	スペクトル モーダル解析			
	計算式①			
後打ち金物（2） 基礎ボルト	スペクトル モーダル解析			
	計算式②			

4.6.2.2 スロッシングにより基礎ボルトに生じる反力

- (1) スロッシングにより基礎ボルトに生じる反力の算出は、「4.6.1.2 スロッシングにより架構に生じる応力」と同様とする。算出結果を表 4-12 に示す。

表 4-12 スロッシングにより基礎ボルトに生じる反力

部材	方向	反力 (N)		
		F_{x2}	F_{y2}	F_{z2}
後打ち金物 (1) 基礎ボルト				
後打ち金物 (2) 基礎ボルト				

4.6.2.3 地震及びスロッシングにより基礎ボルトに生じる反力

地震及びスロッシングにより基礎ボルトに生じる反力を合算した結果を表 4-13 に示す。

表 4-13 地震及びスロッシングにより基礎ボルトに生じる反力

部材	反力 (N)		
	F_x	F_y	F_z
後打ち金物 (1) 基礎ボルト			
後打ち金物 (2) 基礎ボルト			

4.6.2.4 基礎ボルトに生じる応力の計算方法

基礎ボルトに生じる応力は，後打ち金物 1 枚当たりのボルト本数で受けるものとして計算する。

(1) 引張応力

a. 引張力 (F_b)

$$F_b = \frac{F_y}{n} \quad \dots \dots \dots (4.6.2.3.1)$$

b. 引張応力 (σ_b)

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} \quad \dots \dots \dots (4.6.2.3.2)$$

ここで，

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \dots \dots \dots (4.6.2.3.3)$$

(2) せん断応力

a. せん断力 (Q_b)

$$Q_b = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_z^2}}{n} \quad \dots \dots \dots (4.6.2.3.4)$$

b. せん断応力 (τ_b)

$$\tau_b = \frac{Q_b}{A_b} \quad \dots \dots \dots (4.6.2.3.5)$$

4.7 計算条件

4.7.1 架構の応力計算条件

応力の計算に用いる計算条件は、本計算書の【使用済燃料プール温度（S A）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。

4.7.2 基礎ボルトの応力計算条件

応力の計算に用いる計算条件は、本計算書の【使用済燃料プール温度（S A）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。

4.8 応力の評価

4.8.1 架構における応力評価

4.6.1 項で求めた架構に生じる応力は、表 4-2 以下であること。

4.8.2 基礎ボルトにおける応力評価

4.6.2 項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min} [1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots \dots \dots (4.8.2.1)$$

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

	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_{to}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5. 機能維持評価

5.1 電氣的機能維持評価方法

使用済燃料プール温度（S A）の電氣的機能維持評価について以下に示す。

評価用加速度は，水平方向については「4.6.1 架構に生じる応力」に示す解析により得られた検出器保護管に生じる最大加速度を用い，鉛直方向については剛構造であることから添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。

使用済燃料プール温度（S A）の機能確認済加速度は，添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき，同形式の検出器単体の正弦波加振試験において電氣的機能の健全を確認した評価部位の加速度を適用する

機能確認済加速度を表 5-1 に示す。

表 5-1 機能確認済加速度 (×9.8 m/s²)

評価部位	方向	機能確認済加速度
使用済燃料プール温度（S A）	水平	
	鉛直	

6. 評価結果

6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

使用済燃料プール温度（S A）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。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度及び電氣的機能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。

(2) 機能維持評価結果

電氣的機能維持評価の結果を次頁以降の表に示す。

[使用済燃料プール温度（S A）の耐震性についての計算結果]

1. 重大事故等対処施設

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		周囲環境温度 (℃)
			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	
使用済燃料プール 温度（S A）	常設／防止 常設／緩和	EL. 46.50*1			—	—	1.74 又は*3	1.52	

注記 *1：基準床レベルを示す。
*2：固有値解析より 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。
*3：基準地震動 S_sに基づく設計用床応答曲線より得られる値。

1.2 機器要目

1.2.1 使用済燃料プール温度（S A）

部材	m (kg)	d (mm)	ℓ _{a1} (mm)	ℓ _{a2} (mm)	ℓ _b (mm)	A _b (mm ²)	n (-)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)	F* (MPa)
基礎ボルト								171	441	205	205

1.3 計算数値

1.3.1 ボルトに作用する力

(単位：N)

部材	F_b		Q_b	
	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度	基準地震動 S_s	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度	基準地震動 S_s
後打ち金物（１）基礎ボルト				
後打ち金物（２）基礎ボルト				

注記 *：応力評価は本値を基に実施する。

1.4 結論

1.4.1 架構の応力

(単位：MPa)

部材	圧縮応力		せん断応力		曲げ応力		組合せ応力	
	発生 応力	許容 応力	発生 応力	許容 応力	発生 応力	許容 応力	発生 応力	許容 応力
架構	13	42	14	118	134	205	149	205

すべて許容応力以下である。

1.4.2 ボルトの応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト		引張り	—	—	$\sigma_b = 24$	$f_{ts} = 123^*$
		せん断	—	—	$\tau_b = 17$	$f_{sb} = 94$

すべて許容応力以下である。

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

1.4.3 電氣的機能維持の評価結果

(×9.8 m/s²)

		評価用加速度	機能確認済加速度
使用済燃料プール温度 (S A)	水平方向	9.75	
	鉛直方向	1.26	

評価用加速度（水平：検出器保護管に生じる最大加速度，鉛直：1.0ZPA）はすべて機能確認済加速度以下である。

V-2-4-2-5 使用済燃料プール水位・温度（S A広域）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	7
3. 評価部位	8
4. 検出器の評価	8
4.1 検出器の地震応答解析及び構造強度評価	8
4.1.1 検出器の地震応答解析及び構造強度評価方法	8
4.1.2 検出器の荷重の組合せ及び許容応力	8
4.1.3 検出器の解析モデル及び諸元	10
4.1.4 検出器の固有周期	12
4.1.5 検出器の設計用地震力	13
4.1.6 検出器の計算方法	14
4.1.7 検出器の計算条件	16
4.1.8 検出器の応力の評価	16
5. 検出器架台の評価	17
5.1 検出器架台の固有周期	17
5.1.1 検出器架台の固有値解析方法	17
5.1.2 検出器架台の解析モデル及び諸元	17
5.1.3 検出器架台の固有値解析結果	18
5.2 検出器架台の構造強度評価	19
5.2.1 検出器架台の構造強度評価方法	19
5.2.2 検出器架台の荷重の組合せ及び許容応力	19
5.2.3 検出器架台の設計用地震力	21
5.2.4 検出器架台の計算方法	22
5.2.5 検出器架台の計算条件	26
5.2.6 検出器架台の応力の評価	26
6. 機能維持評価	27
6.1 電氣的機能維持評価方法	27
7. 評価結果	28
7.1 重大事故等対処設備としての評価結果	28

1. 概要

本計算書は、「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、使用済燃料プール水位・温度（S A広域）が設計用地震力に対して十分な構造強度及び電氣的機能を有していることを説明するものである。

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）は、設計基準対象施設においてはCクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価及び電氣的機能維持評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）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	
検出器は、ボール形状の上端部を検出器架台梁先端のソケットに接続する。 検出器架台梁及び検出器架台は、検出器架台取付ボルトによりベースプレートに固定され、ベースプレートは、基礎ボルトにより基礎に設置する。 また、検出器は使用済燃料プール壁面の埋込金物に検出器サポートで固定する。	測温抵抗体式温度検出器及びガイドパルス式水位検出器	The diagram illustrates the structural design of the detector assembly. It includes three views: a side view (側面), a front view (正面), and another side view (側面). The side view shows a vertical assembly with a detector (検出器) at the top, connected to a detector frame beam (検出器架台梁) via a socket (ソケット). The frame beam is supported by a base plate (ベースプレート) which is fixed to the foundation (基礎) using foundation bolts (基礎ボルト). The detector is also supported by a support structure (検出器サポート) embedded in the wall. Dimensions are provided in millimeters: 1291, 365, 11938, 564, 152, 345, and 645. Labels include: 検出器架台 (Detector frame), 基礎 (床面) (Foundation (floor surface)), 埋込金物・検出器サポート (Embedded metal fitting・Detector support), 検出器架台取付ボルト (Detector frame mounting bolt), 検出器架台梁 (Detector frame beam), ソケット (Socket), and ベースプレート (Base plate). (単位：mm)

2.2 評価方針

使用済燃料プール水位・温度計（S A広域）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」にて示す使用済燃料プール水位・温度計（S A広域）の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、検出器については「4.1.3 検出器の解析モデル及び諸元」及び「4.1.4 検出器の固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力が許容限界内に収まることを、「4.1 検出器の地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施し、検出器架台については「5.1 検出器架台の固有周期」で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、「5.2 検出器架台の構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。また、使用済燃料プール水位・温度計（S A広域）の機能維持評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定した電氣的機能維持の方針に基づき、地震時の応答加速度が電氣的機能維持確認済加速度以下であることを、「6. 機能維持評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「7. 評価結果」に示す。

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

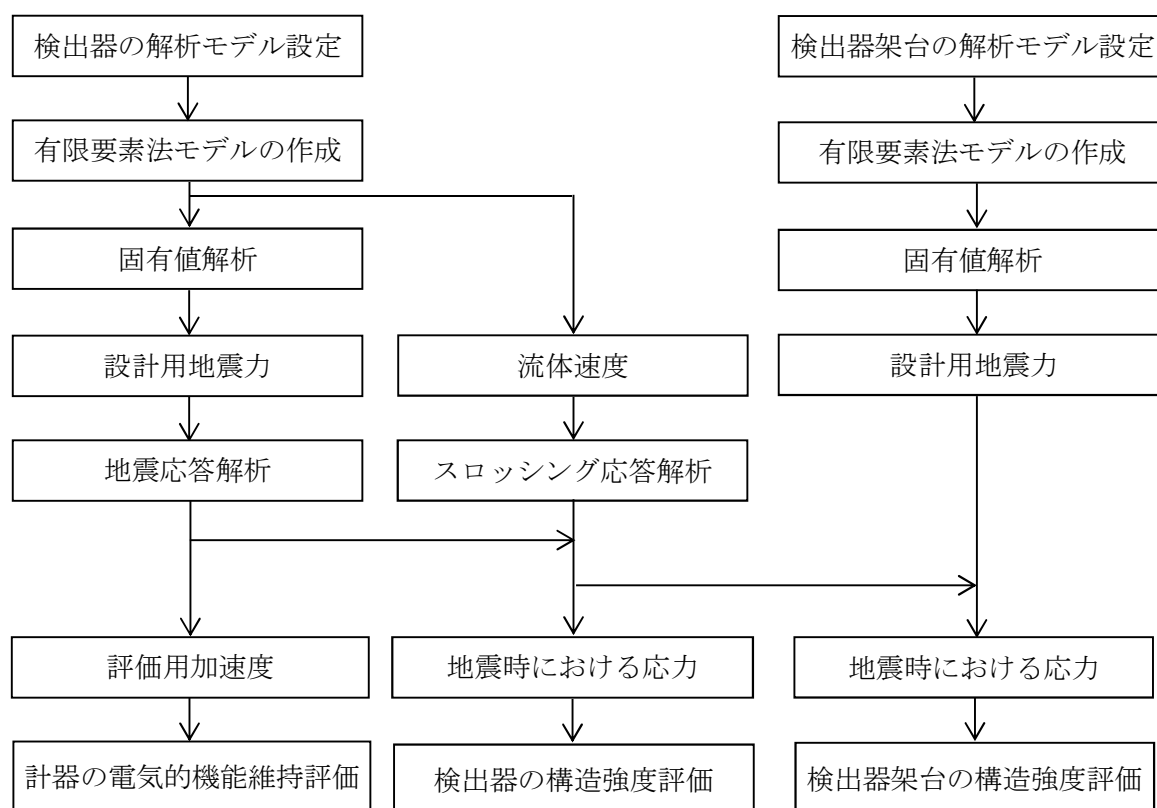


図 2-1 使用済燃料プール水位・温度（S A広域）の耐震評価フロー

2.3 適用基準

適用基準等を以下に示す。

- (1) 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）
- (2) 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）
- (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）（以下「設計・建設規格」という。）
- (5) 発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）J S M E S N J 1－2012（日本機械学会）

2.4 記号の説明

記 号	記 号 の 説 明	単 位
A_b	基礎ボルトの軸断面積	mm^2
A_p	スロッシングにおける検出器の投影面積	mm^2
C_d	検出器の抗力係数	—
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
d	基礎ボルトの呼び径	mm
d_o	検出器保護管外径	mm
d_i	検出器保護管内径	mm
d_r	検出器芯棒外径	mm
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3131 に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3133 に定める値	MPa
F_b	基礎ボルトに作用する引張力（1 本当たり）	N
F_s	スロッシングにより検出器に生じる抗力	N
F_x	検出器取付部における水平方向荷重	N
F_{x1}	地震力における水平方向荷重	N
F_{x11}	地震力における X 方向荷重	N
F_{x12}	地震力における Z 方向荷重	N
F_{x2}	スロッシングにおける水平方向荷重	N
F_{x21}	スロッシングにおける X 方向荷重	N
F_{x22}	スロッシングにおける Z 方向荷重	N
F_y	検出器取付部における鉛直方向荷重	N
F_{xB}	検出器取付部に作用する力（水平方向）	N
F_{yB}	検出器取付部に作用する力（鉛直方向）	N
f_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力 (f_s^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力 (f_t^* を 1.5 倍した値)	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
h_1	検出器架台の据付面から重心までの距離	mm
h_2	検出器取付部から検出器架台の重心までの鉛直方向距離	mm
ℓ_1	検出器架台の重心と基礎ボルト間の水平方向距離※	mm
ℓ_2	検出器架台の重心と基礎ボルト間の水平方向距離※	mm
ℓ_b	検出器取付部中心から重心までの水平方向距離	mm
ℓ_p	検出器長さ	mm

記 号	記 号 の 説 明	単 位
M_x	検出器架台の重心における検出器取付部から作用するモーメント (X軸周り)	N・mm
M_z	検出器架台の重心における検出器取付部から作用するモーメント (Z軸周り)	N・mm
m_{b1}	検出器架台質量	kg
m_{b2}	検出器架台梁質量	kg
m_p	検出器質量	kg
m_w	検出器内包水質量	kg
n	基礎ボルトの本数	—
n_f	評価上引張力を受けるとして期待する基礎ボルトの本数	—
Q_b	基礎ボルトに作用するせん断力	N
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
$S_y (R T)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part 5 表8に定める材料の 40℃における値	MPa
V_p	スロッシングにおける流速により生じる検出器の速度	m/s
V_w	スロッシングにおける流速	m/s
π	円周率	—
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_p	検出器に生じる曲げ応力	MPa
σ_{p1}	地震力における曲げ応力	MPa
σ_{p2}	スロッシングにおける曲げ応力	MPa
σ_{p21}	スロッシングにおけるX方向曲げ応力	MPa
σ_{p22}	スロッシングにおけるZ方向曲げ応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
ρ	水の密度	kg/m ³
ν	ポアソン比	—

注記 ※ : $\ell_1 \leq \ell_2$

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
刺激係数	—	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
温度	℃	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積 ^{*2}	mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*2}
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*3}	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記 *1：設計上定める値が小数点以下の場合は、小数点以下表示とする。

*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

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）の耐震評価は、検出器の上端部がボール形状であり、回転方向を拘束しない構造であることから、検出器と検出器架台についてそれぞれ評価を行う。検出器については、「4.1 検出器の地震応答解析及び構造強度評価」に示す条件に基づき評価を実施する。また、検出器架台については、「5.2 検出器架台の構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる基礎ボルトについて評価を実施する。

4. 検出器の評価

4.1 検出器の地震応答解析及び構造強度評価

4.1.1 検出器の地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 地震力は、検出器に対して、水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。
- (2) スロッシングは、検出器に対して、水平方向から作用するものとする。
- (3) 曲げの変形モードを考慮する。
- (4) 計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.1.2 検出器の荷重の組合せ及び許容応力

4.1.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）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 4-1 に示す。

4.1.2.2 検出器の許容応力

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器の評価に用いる許容応力は、「4.8.1 検出器の応力評価」に示す。

4.1.2.3 検出器の使用材料の許容応力評価条件

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出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 4-2 に示す。

表 4-1 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 貯蔵設備	使用済燃料プール 水位・温度（SA広 域）	常設／防止 常設／緩和	— ^{*2}	$D + P_D + M_D + S_s^{*3, *4}$	$IV_A S$
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s^{*4}$	$V_A S$ ($V_A S$ として $IV_A S$ の許容限 界を用いる。)

注記 *1：「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*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。

*4：地震荷重にはプール水のスロッシングによる荷重を含む。

表 4-2 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 (℃)		S_y (MPa)	S_u (MPa)	$S_y(RT)$ (MPa)	F (MPa)	F [*] (MPa)
検出器		周囲環境温度		171	—	—	—	—

4.1.3 検出器の解析モデル及び諸元

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器の解析モデルの概要を以下に示す。また、解析モデルを図4-1に、機器の諸元を表4-3に示す。

- (1) 使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器は、図4-1に示す3次元はりモデルとして考える。
- (2) 拘束条件は、検出器上端の取付部でX Y Z方向を、検出器中部並びに下部サポート点でX Z方向を固定する。
- (3) 円柱形状の検出器に含まれる水の質量及び検出器周囲の流体の付加質量を考慮する。ただし、検出器周囲の流体の付加質量は、検出器の全長における3箇所でのX Z方向にのみ与えられる。
- (4) 検出器周囲の流体の付加質量は各質点に付加する。
- (5) 解析コードは、「ANSYS」を使用し、固有値及び応力を求める。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-48 計算機プログラム（解析コード）の概要・ANSYS」に示す。

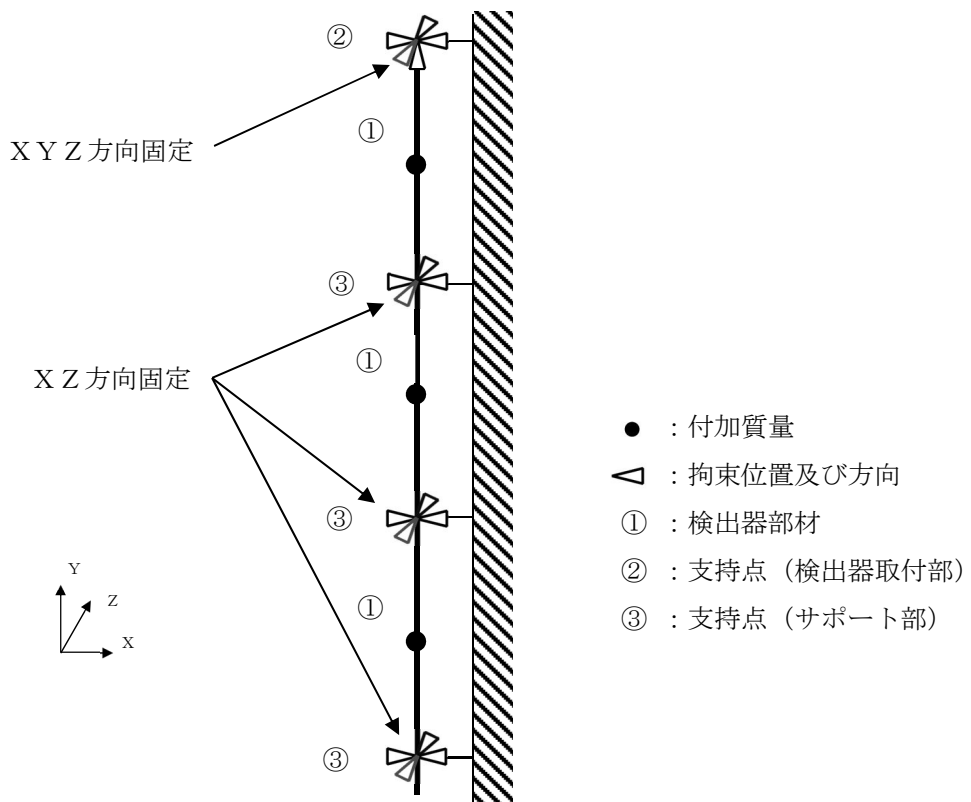


図 4-1 検出器の解析モデル

表4-3 検出器の機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	
検出器質量	m_p	kg	
検出器内包水質量	m_w	kg	
保護管外径	d_o	mm	
保護管内径	d_i	mm	
検出器芯棒外径	d_r	mm	
検出器長さ	ℓ_p	mm	
温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	
縦弾性係数	E	MPa	
ポアソン比	ν	—	
要素数	—	個	
節点数	—	個	

4. 1. 4 検出器の固有周期

検出器の固有値解析の結果を表4-4に、振動モード図を図4-2に示す。固有値解析の結果、鉛直方向は剛であることを確認した。

表4-4 検出器の固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向	刺激係数		
			X 方向	Y 方向	Z 方向
1次		水平	0. 316	$-0. 118 \times 10^{-15}$	$-0. 362 \times 10^{-7}$
2次		水平	$0. 362 \times 10^{-7}$	$0. 233 \times 10^{-15}$	0. 316
3次		水平	$0. 344 \times 10^{-2}$	$-0. 411 \times 10^{-15}$	$-0. 270 \times 10^{-8}$
4次		水平	$0. 270 \times 10^{-8}$	$-0. 280 \times 10^{-15}$	$0. 344 \times 10^{-2}$
5次		水平	0. 892	$-0. 126 \times 10^{-14}$	$0. 952 \times 10^{-6}$
6次		水平	$-0. 952 \times 10^{-6}$	$-0. 412 \times 10^{-15}$	0. 892
7次		鉛直	—	—	—

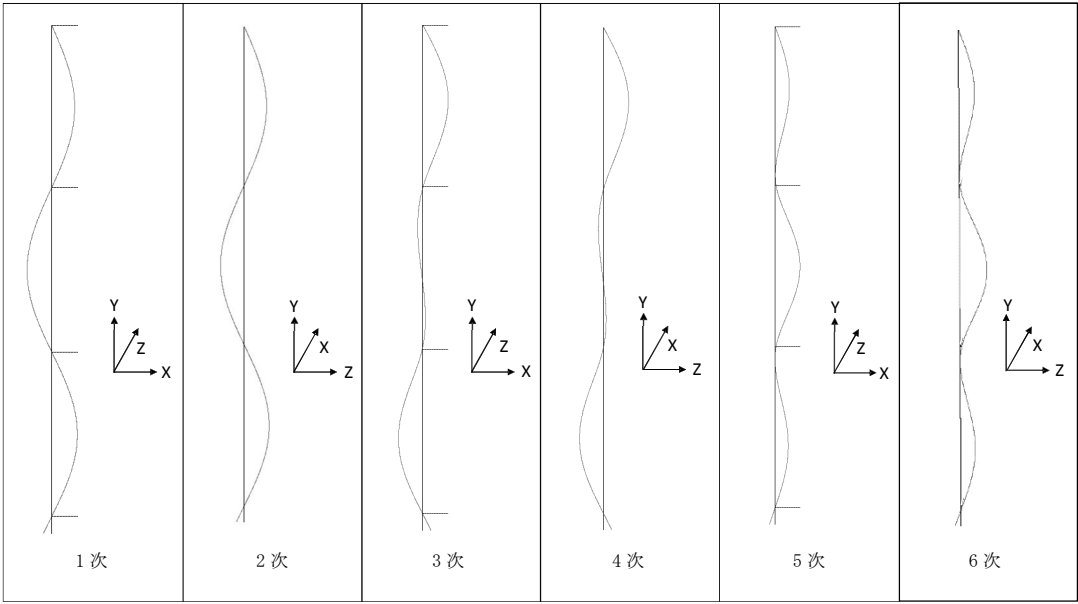


図4-2 検出器振動モード図

4.1.5 検出器の設計用地震力

「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、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に基づき設定する。

検出器の評価に用いる設計用地震力を表4-5に示す。

表4-5 検出器の評価に用いる設計用地震力

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		減衰定数 (%)	
	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	水平	鉛直
EL. 46.50 ^{*1}			—	—	$C_H=1.74$ 又は*2	$C_V=1.52$	1.0	—

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：基準地震動 S_s に基づく設計用床応答曲線より得られる値

4.1.6 検出器の計算方法

4.1.6.1 地震力における応力の算出

- (1) 図4-1に示す解析モデルによりスペクトルモーダル解析を実施する。
- (2) スペクトルモーダル解析により各節点の曲げモーメントを算出する。また、X及びZ方向の曲げモーメントはS R S S法を用いて組み合わせる。
- (3) 組み合わせた曲げモーメントを用いて、検出器に発生する曲げ応力を算出する。算出結果は表4-6に示す。

表4-6 地震力における曲げ応力

地震力における曲げ応力 σ_{p1} [MPa]
36

4.1.6.2 スロッシングにおける応力の算出

- (1) スロッシングにおける応力の算出においては、添付書類「V-1-1-8-3 溢水評価条件の設定」に示す基準地震動 S_s による使用済燃料プールの3次元流動解析により得られた流体速度時刻歴データを用いる。
- (2) 流体速度時刻歴データを用いた時刻歴応答解析により検出器に生じる抗力を算出する。
- (3) 抗力の算出には以下の式を用い、抗力係数 C_d は機械工学便覧 日本機械学会編 (2007) より1.2とする。なお、抗力の算出においては、抗力により生じる検出器の曲げによる変位から速度 V_p を算出し、時刻歴毎の流速と繰り返し計算を行うことで抗力の最大値を算出する。

$$F_s = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot A_p (V_w - V_p)^2$$

..... (4.1.6.2.1)

- (4) 抗力の算出から得られたX及びZ方向の曲げ応力について、SRSS法を用いて組み合わせる。各応力の算出結果を表4-7に示す。

表4-7 スロッシングにおける曲げ応力

基準地震動 S_s	X方向曲げ応力 σ_{p21} [MPa]	Z方向曲げ応力 σ_{p22} [MPa]	スロッシングにおける曲げ応力 σ_{p2} [MPa]
S_s -11	0	2	2
S_s -12	0	9	9
S_s -13	0	9	9*
S_s -14	0	7	7
S_s -21	0	3	3
S_s -22	0	4	4
S_s -31	0	1	1
S_s -D1	1	6	6

注記 * : スロッシングにおける曲げ応力の最大値

4.1.6.3 最大曲げ応力の算出

地震力における曲げ応力及びスロッシングにおける曲げ応力の最大値を絶対値和することにより、検出器に生じる曲げ応力を算出する。算出結果を表4-8に示す。

表4-8 検出器に生じる曲げ応力

検出器に生じる曲げ応力 σ_p [MPa]
45

4.1.7 検出器の計算条件

解析に用いる計算条件は、本計算書の【使用済燃料プール水位・温度（S A広域）の耐震性についての評価結果】の設計条件及び機器要目に示す。

4.1.8 検出器の応力の評価

4.1.8.1 検出器の応力評価

4.1.6.3 項で求めた検出器に生じる曲げ応力は設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に定める使用材料の設計降伏点 S_y 以下であること。

5. 検出器架台の評価

5.1 検出器架台の固有周期

5.1.1 検出器架台の固有値解析方法

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器架台の固有値解析方法を以下に示す。

- (1) 使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器架台は、5.1.2項に示すはり要素及びシェル要素として考える。

5.1.2 検出器架台の解析モデル及び諸元

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器架台の解析モデルの概要を以下に示す。

また、解析モデルを図5-1に、機器の諸元を表5-1に示す。

- (1) 拘束条件として、基礎部のX Y Z方向及び回転方向を固定する。
- (2) 解析コードは、「ANSYS」を使用し、固有値を求める。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-48 計算機プログラム（解析コード）の概要・ANSYS」に示す。

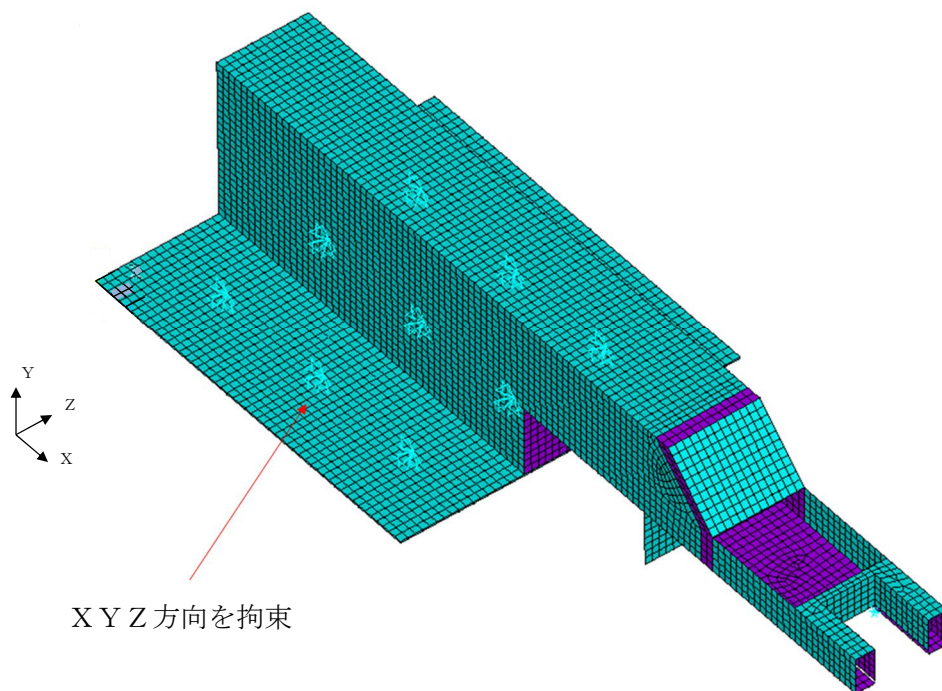


図5-1 検出器架台の解析モデル

表5-1 検出器架台の機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	
質量	m_{b1}	kg	
温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	
縦弾性係数	E	MPa	
ポアソン比	ν	—	
要素数	—	個	
節点数	—	個	

5.1.3 検出器架台の固有値解析結果

検出器架台の固有値解析結果を表5-2に示す。

1次モードは水平方向に卓越し、固有周期が0.05秒以下であり剛であることを確認した。
また、鉛直方向は2次モード以降で卓越し、固有周期は0.05秒以下であり剛であることを確認した。

表5-2 検出器架台の固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1次		水平

5.2 検出器架台の構造強度評価

5.2.1 検出器架台の構造強度評価方法

- (1) 地震力は、水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。
- (2) 「4.1.6 検出器の計算方法」に示す検出器の解析により得られた検出器取付部における荷重を、基礎ボルトの応力計算において組み合せて評価するものとする。
- (3) 検出器架台の質量は、重心に集中するものとする。
- (4) 検出器架台の重心位置については、計算条件が厳しくなる位置に重心を設定するものとする。
- (5) 検出器架台の転倒方向は、図5-2及び図5-3に示す左右方向及び前後方向について検討し、計算書には計算結果の厳しい方（許容値／発生値の小さい方をいう。）を記載する。
- (6) 計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

5.2.2 検出器架台の荷重の組合せ及び許容応力

5.2.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）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 4-1 に示す。

5.2.2.2 検出器架台の許容応力

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器架台の許容応力は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表 5-3 のとおりとする。

5.2.2.3 検出器架台の使用材料の許容応力評価条件

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）検出器架台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 5-3 許容応力（その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力	
	引張り	せん断
IV _A S	1.5・f _t *	1.5・f _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：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)	F (MPa)	F* (MPa)
基礎ボルト		周囲環境温度		176	476	205	—	246

5.2.3 検出器架台の設計用地震力

「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」に基づき設定する。

検出器架台の評価に用いる設計用地震力を表5-5に示す。

表5-5 検出器架台の評価に用いる設計用地震力

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
	水平 方向	鉛直 方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
EL. 46.50 ^{*1}			—	—	$C_H=1.74$	$C_V=1.52$

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

5.2.4 検出器架台の計算方法

5.2.4.1 検出器取付部における荷重の算出

- (1) 「4.1.6 検出器の計算方法」に示す検出器の地震応答解析により得られた検出器取付部におけるX及びZ方向の荷重を用いる。
- (2) 地震力及びスロッシングにおけるそれぞれのX及びZ方向の荷重をS R S S法を用いて水平方向荷重を算出する。算出結果は表5-6及び表5-7に示す。
- (3) 地震力における水平方向荷重及びスロッシングにおける水平方向荷重の最大値を絶対値和することにより、検出器取付部における水平方向荷重を算出する。
- (4) 検出器は鉛直方向において剛構造であることから、取付床面高さにおける鉛直方向設計震度を用いて検出器取付部における鉛直方向荷重を算出する。検出器取付部における荷重の算出結果は表5-8に示す。

表5-6 地震力における水平方向荷重

X方向荷重 F_{x11} [N]	Z方向荷重 F_{x12} [N]	水平方向荷重 F_{x1} [N]
435.9	435.9	616.5

表5-7 スロッシングにおける水平方向荷重

基準地震動 S s	X方向荷重 F_{x21} [N]	Z方向荷重 F_{x22} [N]	水平方向荷重 F_{x2} [N]
Ss-11	0.9341	59.74	59.75
Ss-12	2.269	185.8	185.8
Ss-13	1.735	196.5	196.5*
Ss-14	1.512	173.8	173.8
Ss-21	4.270	71.39	71.52
Ss-22	2.669	120.9	120.9
Ss-31	2.713	32.29	32.41
Ss-D1	6.628	150.1	150.3

注記 * : スロッシングにおける水平方向荷重の最大値

表5-8 検出器取付部における荷重

水平方向荷重 F_x [N]	鉛直方向荷重 F_y [N]
813.0	4.423×10^3

5.2.4.2 基礎ボルトの計算方法

基礎ボルトの応力は、地震による震度、検出器が架台の取付部にもたらす荷重から算出された転倒モーメントにより生じる引張力とせん断力について計算する。

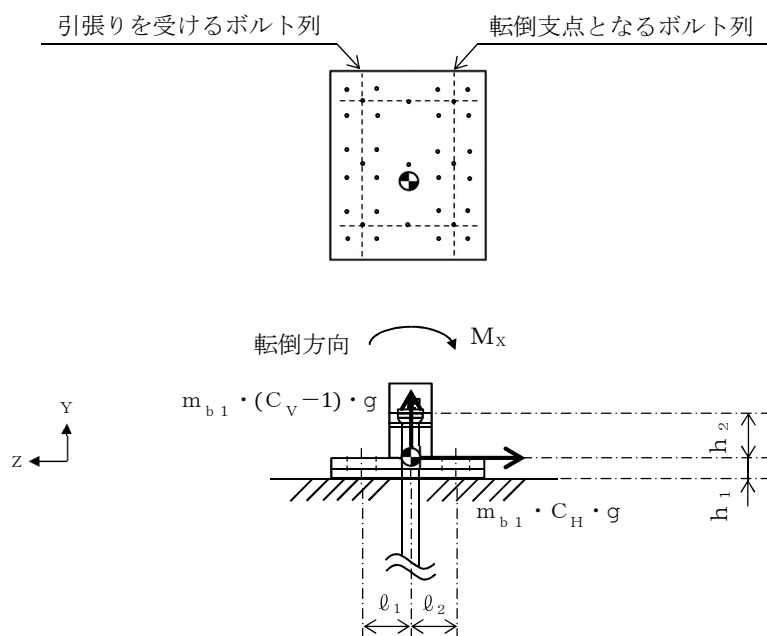


図5-2 計算モデル（左右方向転倒）

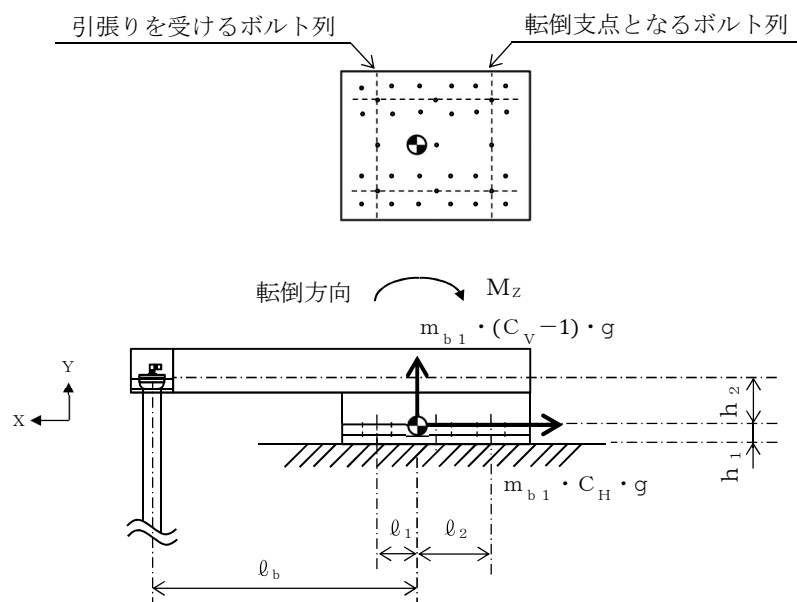


図5-3 計算モデル（前後方向転倒）

(1) 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 5-2 及び図 5-3 で最外列の基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の最外列の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

引張力 (F_b)

左右方向

$$F_b = \frac{m_{b1} \cdot g \cdot C_H \cdot h_1 - m_{b1} \cdot g \cdot (1 - C_V) \cdot \ell_2 + M_x}{n_f \cdot (\ell_1 + \ell_2)} \dots\dots\dots (5.2.4.2.1)$$

前後方向

$$F_b = \frac{m_{b1} \cdot g \cdot C_H \cdot h_1 - m_{b1} \cdot g \cdot (1 - C_V) \cdot \ell_2 + M_z}{n_f \cdot (\ell_1 + \ell_2)} \dots\dots\dots (5.2.4.2.2)$$

ここで、水平及び鉛直方向の検出器取付部に作用する力 F_{xB} 及び F_{yB} は次式で求める。

$$F_{xB} = C_H \cdot g \cdot m_{b2} + F_x \dots\dots\dots (5.2.4.2.3)$$

$$F_{yB} = (C_V - 1) \cdot g \cdot m_{b2} + F_y \dots\dots\dots (5.2.4.2.4)$$

また、検出器架台の重心における検出器取付部から作用する X 軸及び Z 軸周りのモーメント M_x 及び M_z は次式で求める。

$$M_x = F_{yB} \cdot \ell_2 + F_{xB} \cdot (h_1 + h_2) \dots\dots\dots (5.2.4.2.5)$$

$$M_z = F_{yB} \cdot (\ell_b + \ell_2) + F_{xB} \cdot (h_1 + h_2) \dots\dots\dots (5.2.4.2.6)$$

引張応力（ σ_b ）

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} \dots\dots\dots (5.2.4.2.7)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式で求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots\dots\dots (5.2.4.2.8)$$

(2) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断力は基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力（ Q_b ）

$$Q_b = m_{b1} \cdot g \cdot C_H + F_{xB} \dots\dots\dots (5.2.4.2.9)$$

せん断応力（ τ_b ）

$$\tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (5.2.4.2.10)$$

5.2.5 検出器架台の計算条件

応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【使用済燃料プール水位・温度（S A広域）の耐震性についての評価結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.2.6 検出器架台の応力の評価

5.2.6.1 基礎ボルトの応力評価

5.2.4.2 項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (5.2.6.1.1)$$

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

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

6. 機能維持評価

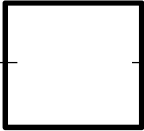
6.1 電氣的機能維持評価方法

評価用加速度と機能確認済加速度との比較により、地震時又は地震後の電氣的機能維持を評価する。

評価用加速度は、水平方向については「4.1.6 検出器の計算方法」に示す解析により得られた検出器に生じる最大加速度を用い、鉛直方向については検出器が剛構造であることから添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）の機能確認済加速度は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき、同形式の構成部位の正弦波加振試験において、電氣的機能の健全性を確認した評価部位の加速度を適用する。

機能確認済加速度を表 4-9 に示す。

表 4-9 機能確認済加速度 (×9.8 m/s ²)		
評価部位	方向	機能確認済加速度
使用済燃料プール水位・温度計 (S A広域)	水平	
	鉛直	

7. 評価結果

7.1 重大事故等対処設備としての評価結果

使用済燃料プール水位・温度（S A広域）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。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度及び電氣的機能を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次ページ以降の表に示す。

(2) 機能維持評価結果

電氣的機能維持評価の結果を次ページ以降の表に示す。

【使用済燃料プール水位・温度（S A 広域）の耐震性についての評価結果】

1. 重大事故等対処設備

1.1 検出器

1.1.1 設計条件

機 器 名 称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s		周囲環境温度 (℃)
			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	
使用済燃料プール 水位・温度計 (S A 広域)	常設／防止 常設／緩和	 EL. 46.50*1	—	—	$C_H=1.74$ 又は*2	$C_V=1.52$	

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：基準地震動 S_s に基づく設計用床応答スペクトルより得られる値

1.1.2 機器要目

部 材	m_p (kg)	m_w (kg)	d_o (mm)	d_i (mm)	d_r (mm)	$\varnothing_p$ (mm)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
検出器							171	—	—	—

1.1.3 固有周期 (単位：s)

モード	固有周期	卓越方向
1次		水平
2次		水平
3次		水平
4次		水平
5次		水平
6次		水平
7次		鉛直

1.1.4 計算数値

1.1.4.1 検出器に生じる曲げ応力 (単位：MPa)

方向	地震力における曲げ応力	スロッシングにおける曲げ応力*	検出器に生じる曲げ応力
X方向	—	$\sigma_{p21}=0$	—
Z方向	—	$\sigma_{p22}=9$	—
水平方向	$\sigma_{p1}=36$	$\sigma_{p2}=9$	$\sigma_p=45$

注記 *：スロッシングにおける曲げ応力の最大値

1.2 検出器架台

1.2.1 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		周囲環境温度 (℃)
			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	
使用済燃料プール 水位・温度計 (S A 広域)	常設／防止 常設／緩和	EL. 46.50^{*1}			—	—	$C_H=1.74$	$C_V=1.52$	

注記 *1：基準床レベルを示す。
*2：固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

1.2.2 機器要目

部 材	m_{b1} (kg)	m_{b2} (kg)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	ℓ_1^* (mm)	ℓ_2^* (mm)	ℓ_b (mm)	A_b (mm ²)	n	n_f^*
基礎ボルト										3
										3

注記 *：基礎ボルトの機器要目における上段は左右方向転倒に対する評価時の要目を示し、
下段は前後方向転倒に対する評価時の要目を示す。

部 材	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	F^* (MPa)	転倒方向	
					弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度	基準地震動 S_s
基礎ボルト	176	476	—	246	—	前後方向

1.2.3 計算数値

1.2.3.1 検出器取付部における荷重 (単位：N)

方向	地震における荷重	スロッシングにおける荷重*	検出器取付部における荷重
X方向			
Z方向			
水平方向			
鉛直方向			

注記 *：スロッシングにおける荷重の最大値

1.2.3.2 基礎ボルトに作用する力 (単位：N)

部 材	F _{x B}		F _{y B}		F _b		Q _b	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
基礎ボルト								

1.2.3.3 基礎ボルトに作用するモーメント (単位：N・mm)

部 材	M _x		M _z	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
基礎ボルト				

1.3 結論

1.3.1 使用済燃料プール水位・温度（S A 広域）の応力 （単位：MPa）

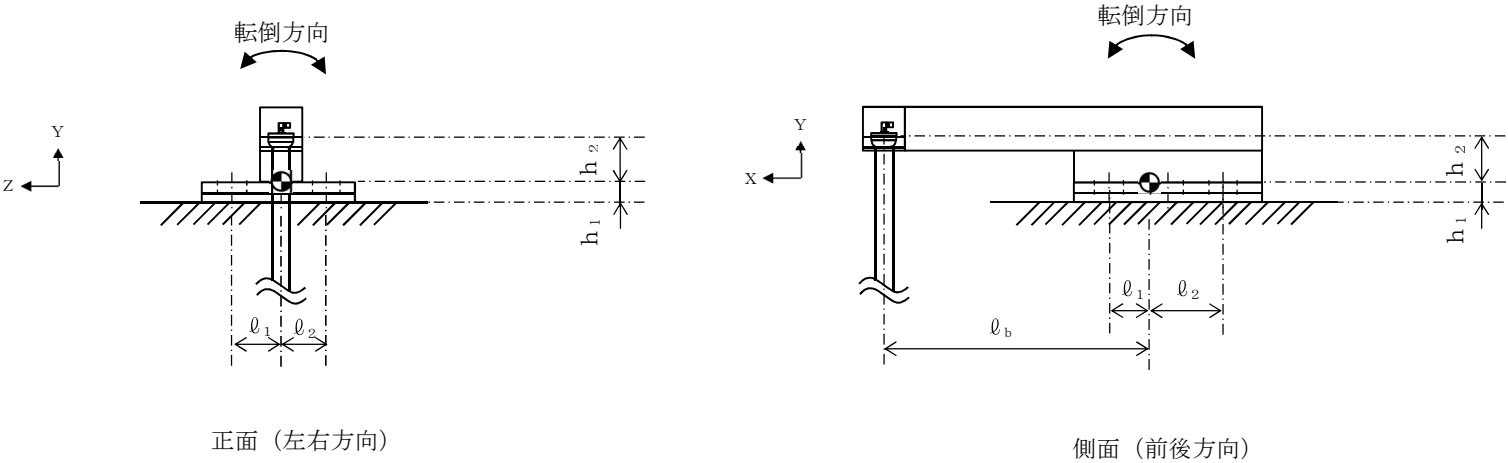
部 材	材 料	応 力	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
検出器	SUS304	曲 げ	—	—	$\sigma_p = 45$	$S_y = 171$
基礎ボルト	SUS316	引張り	—	—	$\sigma_b = 53$	$f_{ts} = 147^*$
		せん断	—	—	$\tau_b = 7$	$f_{sb} = 113$

すべて許容応力以下である。 注記＊： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出

1.3.2 電氣的機能維持の評価結果 （ $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ ）

		評価用加速度	機能確認済加速度
使用済燃料プール 水位・温度（S A 広域）	水平方向	5.20	
	鉛直方向	1.26	

評価用加速度（水平：検出器に生じる最大加速度，鉛直：1.0ZPA）は機能確認済加速度以下である。



V-2-4-3-1-1 管の耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 概略系統図及び鳥瞰図	2
2.1 概略系統図	2
2.2 鳥瞰図	4
3. 計算条件	7
3.1 荷重の組合せ及び許容応力	7
3.2 設計条件	8
3.3 材料及び許容応力	12
3.4 設計用地震力	13
4. 解析結果及び評価	14
4.1 固有周期及び設計震度	14
4.2 評価結果	20
4.2.1 管の応力評価結果	20
4.2.2 支持構造物評価結果	21
4.2.3 弁の動的機能維持評価結果	22
4.2.4 代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果	23

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」及び「V-2-1-14-6 管の耐震性についての計算書作成の基本方針」に基づき、管、支持構造物及び弁が設計用地震力に対して十分な構造強度又は動的機能を有していることを説明するものである。

評価結果記載方法は以下に示す通りである。

(1) 管

工事計画記載範囲の管のうち、各応力区分における最大応力評価点の評価結果を解析モデル単位に記載する。また、全5モデルのうち、各応力区分における最大応力評価点の許容値／発生値（裕度）が最小となる解析モデルを代表として鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載する。

代表モデルの選定結果及び全モデルの選定結果を4.2.4に記載する。

(2) 支持構造物

工事計画記載範囲の支持点のうち、種類及び型式ごとの反力が最大となる支持点の評価結果を代表として記載する。

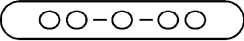
(3) 弁

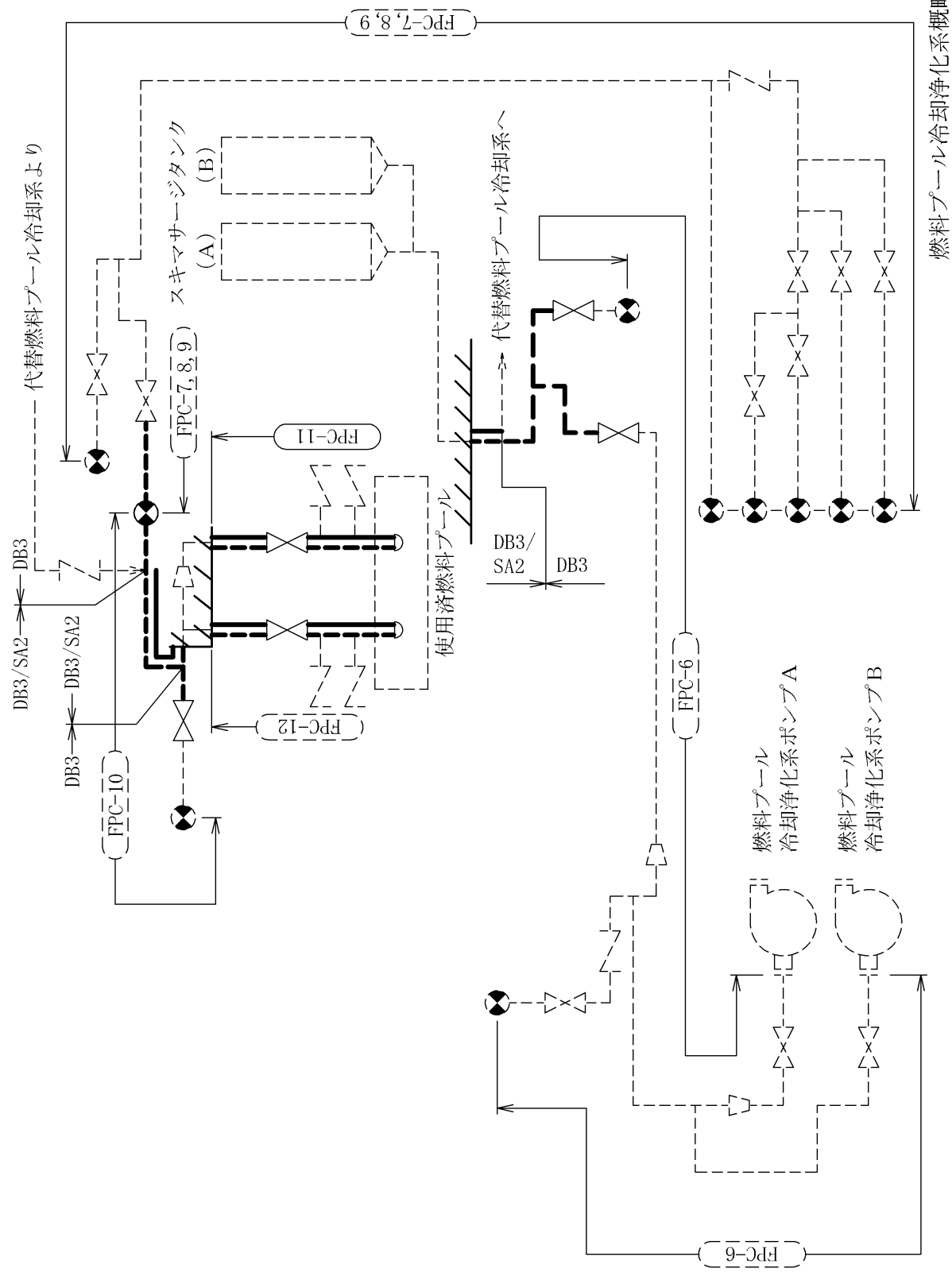
機能確認済加速度の応答加速度に対する裕度が最小となる動的機能維持要求弁を代表として評価結果を記載する。

2. 概略系統図及び鳥瞰図

2.1 概略系統図

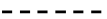
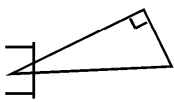
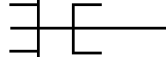
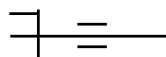
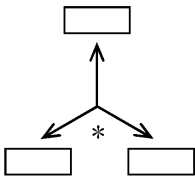
概略系統図記号凡例

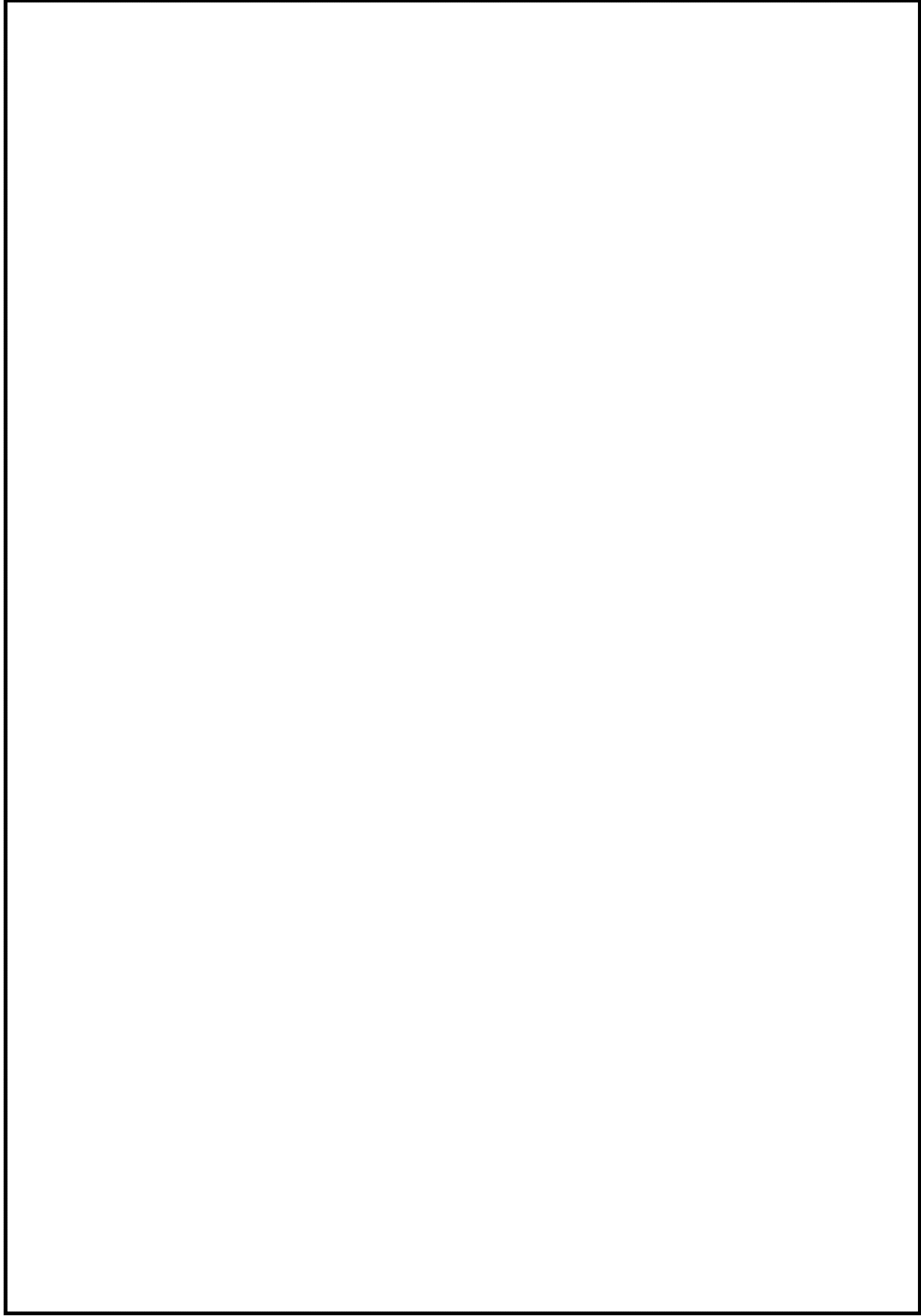
記 号	内 容
 (太線)	工事計画記載範囲の管のうち、本計算書記載範囲の管 (重大事故等対処設備)
 (太破線)	工事計画記載範囲の管のうち、本計算書記載範囲の管 (設計基準対象施設)
 (細線)	工事計画記載範囲の管のうち、本系統の管であって他 計算書記載範囲の管
 (破線)	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管の うち、他系統の管であって系統の概略を示すために表 記する管
	鳥瞰図番号 (鳥瞰図、評価条件及び評価結果を記載 する範囲)
	鳥瞰図番号 (評価結果のみ記載する範囲)
	アンカ
[管クラス]	
DB1	クラス 1 管
DB2	クラス 2 管
DB3	クラス 3 管
DB4	クラス 4 管
SA2	重大事故等クラス 2 管
SA3	重大事故等クラス 3 管
DB1/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 1 管
DB2/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 2 管
DB3/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 3 管
DB4/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 4 管



2.2 鳥瞰図

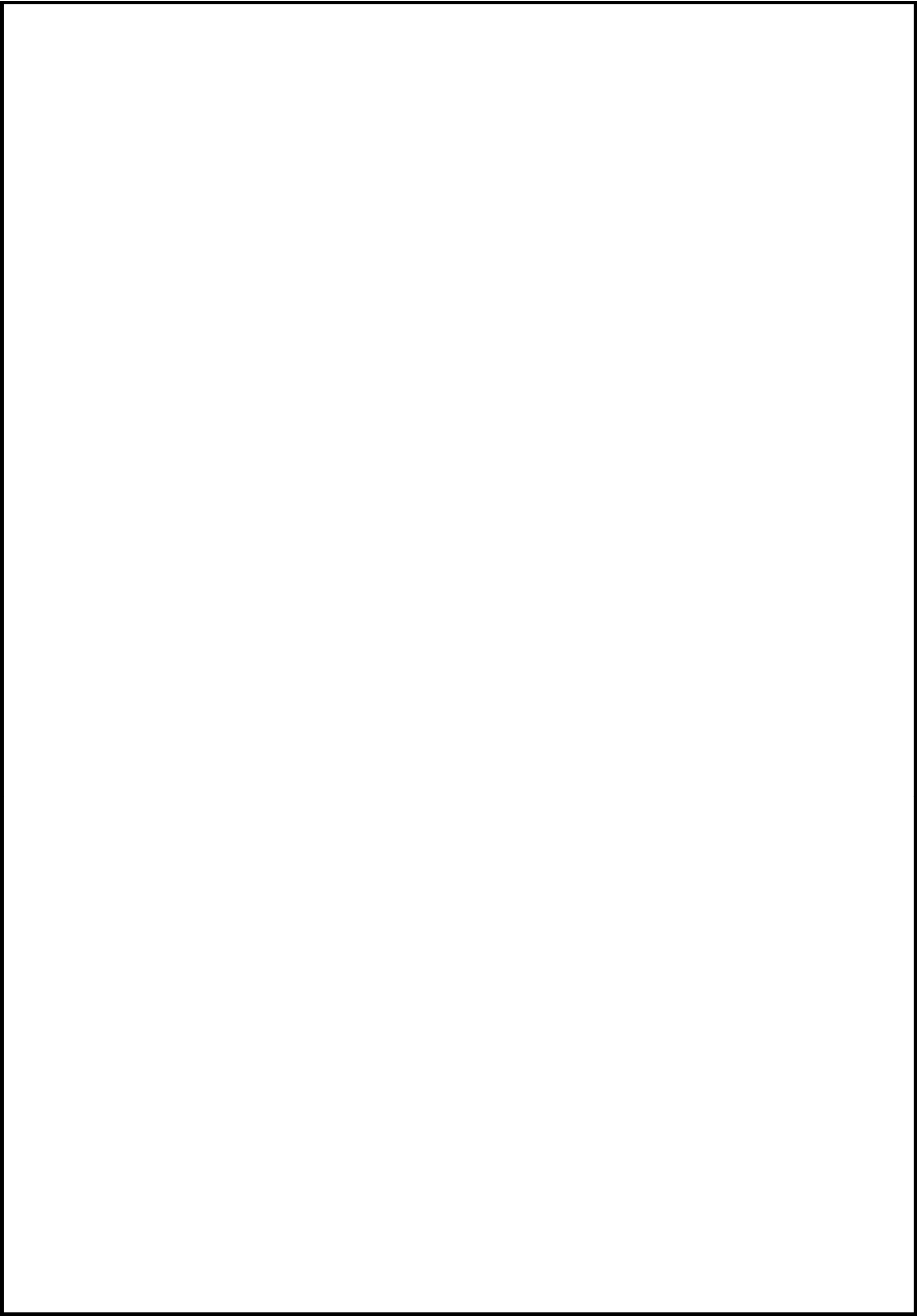
鳥瞰図記号凡例

記 号	内 容
 (太線)	工事計画記載範囲の管のうち、本計算書記載範囲の管 (重大事故等対処設備の場合は鳥瞰図番号の末尾を「(SA)」，設計基準対象施設の場合は鳥瞰図番号の末尾を「(DB)」とする。)
 (細線)	工事計画記載範囲の管のうち、本系統の管であって他計算書記載範囲の管
 (破線)	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管のうち、他系統の管であって解析モデルの概略を示すために表記する管
	質 点
	ア ン カ
	レストレイント (本図は斜め拘束の場合の全体座標系における拘束方向成分を示す。スナッパについても同様とする。)
	スナッパ
	ハンガ
	リジットハンガ
	拘束点の地震による相対変位量(mm) (* は評価点番号，矢印は拘束方向を示す。また，  内に 変位量を記載する。)
注： 鳥瞰図中の寸法の単位はmmである。	



鳥瞰図

FPC-11 (DB)



鳥瞰図

FPC-11 (SA)

3. 計算条件

3.1 荷重の組合せ及び許容応力

本計算書において考慮する荷重の組合せ及び許容応力を下表に示す。

施設名称	設備名称	系統名称	施設分類 ^{*1}	設備分類 ^{*2}	機器等の区分	耐震設計上の重要度分類	荷重の組合せ ^{*3, 4}	許容応力状態 ^{*5}
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	燃料プール冷却浄化系	DB	—	クラス3管	S	I _L + S _d	Ⅲ _A S
							Ⅱ _L + S _d	
							I _L + S _s	Ⅳ _A S
							Ⅱ _L + S _s	
		代替燃料プール冷却系	SA	常設耐震／防止	重大事故等クラス2管	—	V _L + S _s	V _A S

7

注記 *1：DBは設計基準対象施設，SAは重大事故等対処設備を示す。
*2：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。
*3：運転状態の添字Lは荷重，(L)は荷重が長期間作用している状態，(LL)は(L)より更に長期的に荷重が作用している状態を示す。
*4：許容応力状態ごとに最も厳しい条件又は包絡条件を用いて評価を実施する。
*5：許容応力状態V_ASは許容応力状態Ⅳ_ASの許容限界を使用し，許容応力状態Ⅳ_ASとして評価を実施する。

3.2 設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管番号で区分し、管番号と対応する評価点番号を示す。

鳥 瞰 図 FPC-11

管番号	対応する評価点	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (℃)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料	耐震設計上の 重要度分類	縦弾性係数 (MPa)
1	140N～141, 142～156	1.38	80	165.2	3.4	SUS304TP	S	

弁部の寸法

鳥 瞰 図 FPC-11

評価点	外径 (mm)	厚さ (mm)	長さ (mm)
141～142			

弁部の質量

鳥 瞰 図 FPC-11

質量	対応する評価点
	141～142

支持点及び貫通部ばね定数

鳥 瞰 図 FPC-11

支持点番号	各軸方向ばね定数(N/mm)			各軸回り回転ばね定数(N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
140N						
1450						
1470						
1490						
1510						
155						
156						

3.3 材料及び許容応力

使用する材料の最高使用温度での許容応力を下表に示す。

材 料	最高使用温度 (°C)	許容応力 (MPa)			
		S _m	S _y	S _u	S _h
SUS304TP	80	—	180	461	125

3.4 設計用地震力

本計算書において考慮する設計用地震力の算出に用いる設備評価用床応答曲線を下表に示す。

なお、設備評価用床応答曲線は添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき策定したものをを用いる。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

鳥瞰図	建物・構築物	標高	減衰定数 (%)
FPC-11	原子炉建屋		

4. 解析結果及び評価

4.1 固有周期及び設計震度

鳥瞰図 FPC-11

[illegible]

各モードに対応する刺激係数

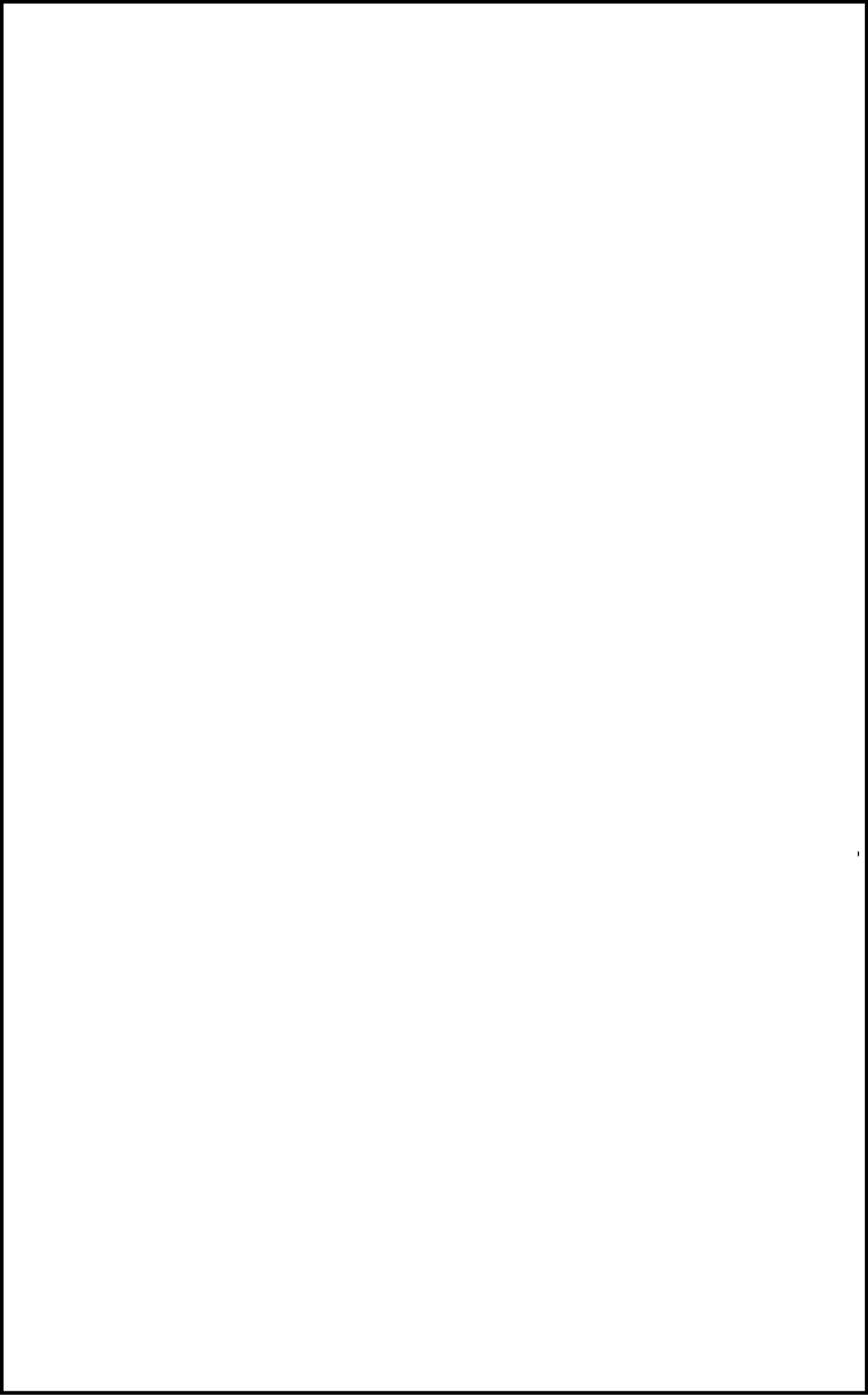
鳥 瞰 図 FPC-11

モード	固 有 周 期 (s)	刺 激 係 数		
		X 方向	Y 方向	Z 方向

代表的振動モード図

振動モード図は，３次モードまでを代表とし，各質点の変位の相対量・方向を破線で図示し，次ページ以降に示す。







4.2 評価結果

4.2.1 管の応力評価結果

下表に示すとおり最大応力及び疲労累積係数はそれぞれの許容値以下である。

重大事故等クラス2管であってクラス2以下の管

鳥瞰図	許 容 応 力 状 態 (供用状態)	最 大 応 力 評 価 点	最 大 応 力 区 分	一 次 応 力 評 価 (MPa)		一 次 + 二 次 応 力 評 価 (MPa)		疲 労 評 価
				計 算 応 力 $S_{\text{prm}} (S_d)$ $S_{\text{prm}} (S_s)$	許 容 応 力 S_y^* $0.9 S_u$	計 算 応 力 $S_n (S_s)$	許 容 応 力 $2 S_y$	
FPC-11	Ⅲ _A S	1452	$S_{\text{prm}} (S_d)$	142	180	—	—	—
FPC-11	Ⅳ _A S	1452	$S_{\text{prm}} (S_s)$	203	414	—	—	—
FPC-11	Ⅳ _A S	1452	$S_n (S_s)$	—	—	320	360	—

注記 *：オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については、 S_y と $1.2 S_h$ のうち大きい方とする。

4. 2. 2 支持構造物評価結果

下表に示すとおり計算応力及び計算荷重はそれぞれの許容値以下である。

支持構造物評価結果（荷重評価）

支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (℃)	評価結果	
					計算 荷重 (kN)	許容 荷重 (kN)
—	—	—	—	—	—	—

支持構造物評価結果（応力評価）

支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (℃)	支持点荷重						評価結果		
					反力 (kN)			モーメント (kN・m)			応力 分類	計算 応力 (MPa)	許容 応力 (MPa)
					F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z			
AN-FPC-74	アンカ	ラゲ	SUS304	66	9.5	8.2	2.7	2.6	0.6	11.8	組合せ	68	117
RE-FPC-97	レストレイント	パイプバンド	SM400B STK400	66	0	8.3	16.9	-	-	-	圧縮	17	142

4.2.3 弁の動的機能維持評価結果

下表に示すとおり応答加速度が機能確認済加速度以下又は計算応力が許容応力以下である。

弁番号	形式	要求機能	応答加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)		機能確認済加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)		構造強度評価結果 (MPa)	
			水平	鉛直	水平	鉛直	計算応力	許容応力
—	—	—	—	—	—	—	—	—

4.2.4 代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果
代表モデルは各モデルの最大応力点の応力と裕度を算出し、応力分類毎に裕度最小のモデルを選定して鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載している。下表に、代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果を示す。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス2，3範囲）

No	配管モデル	許容応力状態Ⅲ _A S					許容応力状態Ⅳ _A S											
		一次応力					一次応力					一次＋二次応力					疲労評価	
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表		
1	FPC-6	507	44	231	5.25	—	507	57	366	6.42	—	507	62	462	7.45	—	—	—
2	FPC-7	27	94	188	2.00	—	27	152	431	2.83	—	27	259	376	1.45	—	—	—
3	FPC-10	108A	68	188	2.76	—	108A	96	431	4.48	—	108A	148	376	2.54	—	—	—
4	FPC-11	1452	142	180	1.26	○	1452	203	414	2.03	○	1452	320	360	1.12	○	—	—
5	FPC-12	1731	99	180	1.81	—	1731	139	414	2.97	—	1731	198	360	1.81	—	—	—

V-2-4-3-2-1 管の耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 概略系統図及び鳥瞰図	2
2.1 概略系統図	2
2.2 鳥瞰図	4
3. 計算条件	10
3.1 荷重の組合せ及び許容応力.....	10
3.2 設計条件	11
3.3 材料及び許容応力	17
3.4 設計用地震力	18
4. 解析結果及び評価	19
4.1 固有周期及び設計震度	19
4.2 評価結果	25
4.2.1 管の応力評価結果	25
4.2.2 支持構造物評価結果	26
4.2.3 弁の動的機能維持評価結果	27
4.2.4 代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果	28

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」，「V-2-1-13-6 管の耐震性についての計算書作成の基本方針」及び「V-2-1-11 機器・配管の耐震支持設計方針」に基づき、管、支持構造物及び弁が設計用地震力に対して十分な構造強度又は動的機能を有していることを説明するものである。

評価結果の記載方法は以下に示す通りとする。

(1) 管

工事計画記載範囲の管のうち、各応力区分における最大応力評価点の評価結果を解析モデル単位に記載する。また、全3モデルのうち、各応力区分における最大応力評価点の許容値／発生値（裕度）が最小となる解析モデルを代表として鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載する。代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果を4.2.4に記載する。

(2) 支持構造物

工事計画記載範囲の支持点のうち、種類及び型式単位に支持点荷重が最大となる支持点の評価結果を代表として記載する。

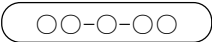
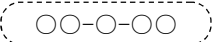
(3) 弁

機能確認済加速度の応答加速度に対する裕度が最小となる動的機能維持要求弁を代表として、評価結果を記載する。

2. 概略系統図及び鳥瞰図

2.1 概略系統図

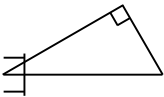
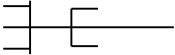
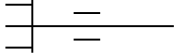
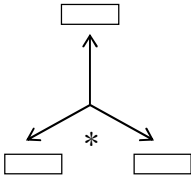
概略系統図記号凡例

記 号	内 容
 (太線)	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管 (重大事故等対処設備)
 (太破線)	工事計画記載範囲の管のうち，本計算書記載範囲の管 (設計基準対象施設)
 (細線)	工事計画記載範囲の管のうち，本系統の管であって他 計算書記載範囲の管
 (破線)	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管の うち，他系統の管であって系統の概略を示すために表 記する管
	鳥瞰図番号 (鳥瞰図，計算条件及び評価結果を記載す る範囲)
	鳥瞰図番号 (評価結果のみ記載する範囲)
	アンカ
[管クラス]	
DB1	クラス 1 管
DB2	クラス 2 管
DB3	クラス 3 管
DB4	クラス 4 管
SA2	重大事故等クラス 2 管
SA3	重大事故等クラス 3 管
DB1/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 1 管
DB2/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 2 管
DB3/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 3 管
DB4/SA2	重大事故等クラス 2 管であってクラス 4 管

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

2.2 鳥瞰図

鳥瞰図記号凡例

記 号	内 容
 (太線)	工事計画記載範囲の管のうち、本計算書記載範囲の管 (重大事故等対処設備の場合は鳥瞰図番号の末尾を「(SA)」, 設計基準対象施設の場合は鳥瞰図番号の末尾を「(DB)」とする。)
 (細線)	工事計画記載範囲の管のうち、本系統の管であって他計算書記載範囲の管
 (破線)	工事計画記載範囲外の管又は工事計画記載範囲の管のうち、他系統の管であって解析モデルの概略を示すために表記する管
	質 点
	ア ン カ
	レストレイント (本図は斜め拘束の場合の全体座標系における拘束方向成分を示す。スナッパについても同様とする。)
	スナッパ
	ハンガ
	リジットハンガ
	拘束点の地震による相対変位量(mm) (*は評価点番号, 矢印は拘束方向を示す。また,  内に 変位量を記載する。)
注：鳥瞰図中の寸法の単位は mm である。	

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

3. 計算条件

3.1 荷重の組合せ及び許容応力

本計算書において考慮する荷重の組合せ及び許容応力を下表に示す。

施設名称	設備名称	系統名称	施設分類*1	設備分類*2	機器等の区分	耐震設計上の重要度分類	荷重の組合せ*3,4	許容応力状態*5
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	代替燃料プール注水系	S A	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス2管	—	$V_L + S_s$	$V_A S$

注記*1： DBは設計基準対象施設，S Aは重大事故等対処設備を示す。

*2： 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*3： 運転状態の添字Lは荷重，(L)は荷重が長期間作用している状態，(LL)は(L)より更に長期的に荷重が作用している状態を示す。

*4： 許容応力状態ごとに最も厳しい条件又は包絡条件を用いて評価を実施する。

*5： 許容応力状態 $V_A S$ は許容応力状態 $IV_A S$ の許容限界を使用し，許容応力状態 $IV_A S$ として評価を実施する。

3.2 設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管番号で区分し，管番号と対応する評価点番号を示す。

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

管番号	対応する評価点	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (℃)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料	耐震設計上の 重要度分類	縦弾性係数 (MPa)
1	A00～A48, A42～B04 A48～D02, A48～E05	1.40	66	216.3	8.2	STPT410	—	
2	D03～D04, D06～D08 D10～D17, E06～E44 E46～E63	1.40	66	114.3	6.0	STPT410	—	
3	E64～E88, E88～F06 E88～G02, G04～G12 G14～G16	1.40	66	89.1	5.5	STPT410	—	
4	F08～H01	1.00	66	89.1	5.5	STPT410	—	

フランジ部の質量

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

質量	対応する評価点
	E20

弁部の寸法

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

評価点	外径 (mm)	厚さ (mm)	長さ (mm)	評価点	外径 (mm)	厚さ (mm)	長さ (mm)
D04～D06				D05～D05A			
D05A～D05B				D05B～D05C			
D08～D10				D09～D09A			
D09A～D09B				D09B～D09C			
E44～E46				E45～E45A			
E45A～E45B				E45B～E45C			
F06～F08				F07～F07A			
F07A～F07B				F07B～F07C			
G02～G04				G03～G03A			
G03A～G03B				G03B～G03C			
G12～G14							

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

弁部の質量

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

質量	対応する評価点	質量	対応する評価点
	D04, D06, E44, E46		D05, E45
	D05A, E45A		D05C, E45C
	D08, D10		D09
	D09A		D09C
	F06, F08, G02, G04		F07, G03
	F07A, G03A		F07C, G03C
	G12, G14		G13

支持点及び貫通部ばね定数

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

支持点番号	各軸方向ばね定数 (N/mm)			各軸回り回転ばね定数 (N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
A00						
A05						
A08						
A10						
A14						
A18						
A22						
A24						
A32						
A36						
B02						
B04						
D05B						
D07						
D09B						
D11						
D15						
D17						
E04						
E13						
E16						
E23						
E25						
E27						
E31						
E34						
E37						
E41						
E45B						
E47						

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

支持点及び貫通部ばね定数

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

支持点番号	各軸方向ばね定数 (N/mm)			各軸回り回転ばね定数 (N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
E50						
E54						
E59						
E62						
E69						
E73						
E79						
E83						
G03B						
G06						
G11						
F02						
F05						
F07B						
H01						

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

3.3 材料及び許容応力

使用する材料の最高使用温度での許容応力を下表に示す。

材 料	最高使用温度 (℃)	許容応力 (MPa) *			
		S m	S y	S u	S h
STPT410	66	—	231	407	—

注記 *：評価に使用しない許容応力については「—」を記載する。

3.4 設計用地震力

本計算書において考慮する設計用地震力の算出に用いる設備評価用床応答曲線を下表に示す。

なお、設備評価用床応答曲線は添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき策定したものをを用いる。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

鳥瞰図	建物・構築物	標高	減衰定数 (%)
ALPI-004R4F		EL. 57.000 m	

4. 解析結果及び評価

4.1 固有周期及び設計震度

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

耐震設計上の重要度分類		—		
適用する地震動等		S_s		
モード	固有周期 (s)	応答水平震度 ^{*1}		応答鉛直震度 ^{*1}
		X 方向	Z 方向	Y 方向
		4.80	4.80	6.82
		4.71	4.71	6.82
		4.71	4.71	6.82
		4.40	4.40	6.82
		2.56	2.56	6.90
		2.06	2.06	4.92
		1.99	1.99	4.59
		—	—	—
		—	—	—
動的震度 ^{*2}		2.09	2.09	1.77

注記 *1：各モードの固有周期に対し、設備評価用床応答曲線より得られる震度を示す。

*2： S_d 又は S_s 地震動に基づく最大設計用床応答加速度より定めた震度を示す。

*3：固有周期が0.050 s以下であることを示す。

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1

鳥 瞰 図 ALPI-004R4F

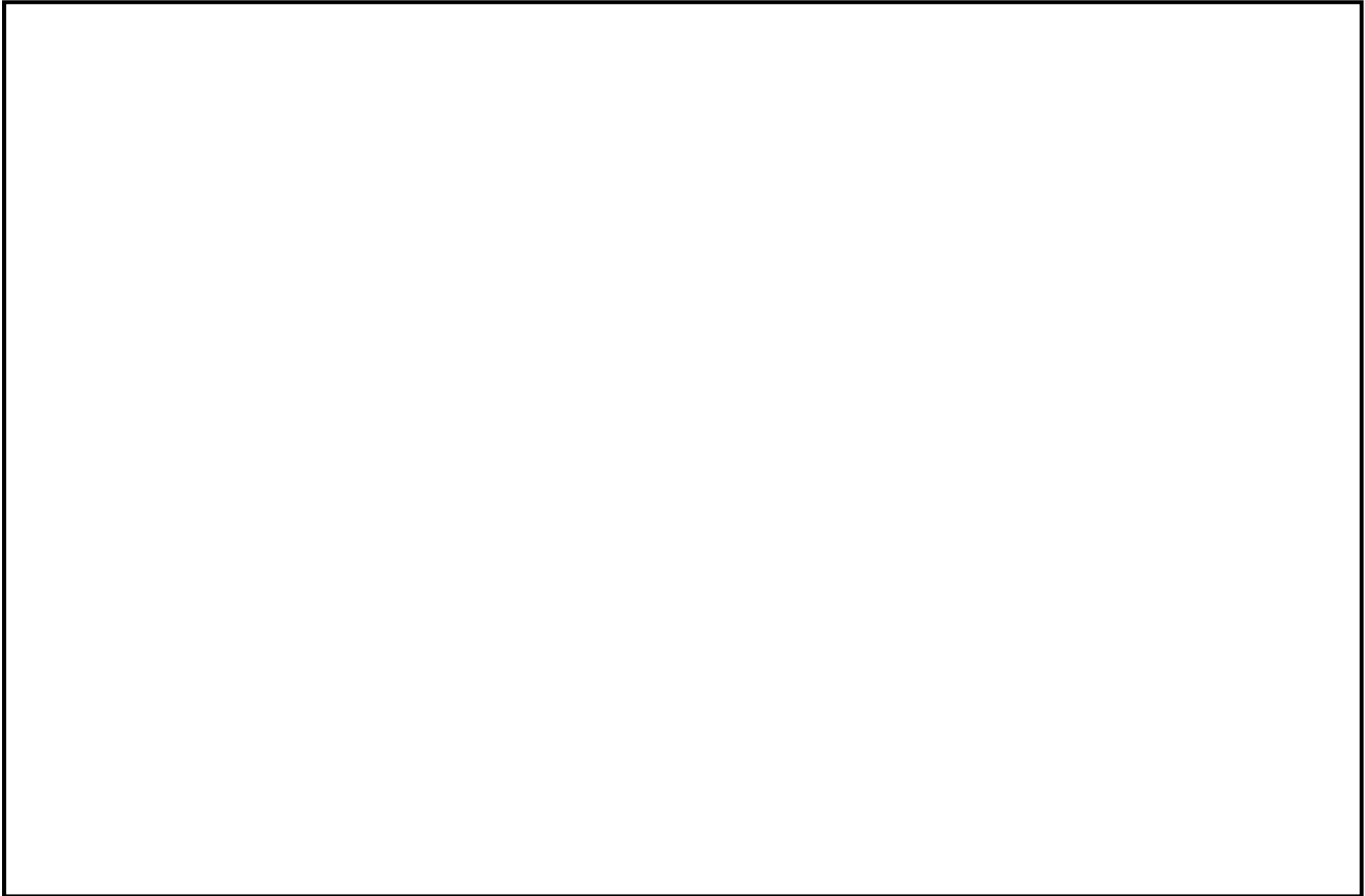
[illegible]

注記 *：刺激係数はモード質量を正規化し，固有ベクトルと質量マトリクス積から算出した値を示す。

代表的振動モード図

振動モード図は、3 次モードまでを代表とし、各質点の変位の相対量・方向を破線で図示し、次ページ以降に示す。

NT2 補② V-2-4-3-2-1 R1



4.2 評価結果

4.2.1 管の応力評価結果

下表に示すとおり最大応力及び疲労累積係数はそれぞれの許容値以下である。

重大事故等クラス2管

鳥瞰図	許 容 応 力 状 態 (供用状態)	最 大 応 力 評 価 点	最 大 応 力 区 分	一次応力評価 (MPa)		一次＋二次応力評価 (MPa)		疲労評価
				計算応力 $S_{prm} (S_s)$	許容応力 $0.9 S_u$	計算応力 $S_n (S_s)$	許容応力 $2 S_y$	疲労累積係数 $U S_s$
ALPI-004R4F	$V_A S$	G10F	$S_{prm} (S_s)$		366		—	—
ALPI-004R4F	$V_A S$	G10F	$S_n (S_s)$		—		462	—

4.2.2 支持構造物評価結果

下表に示すとおり計算応力及び計算荷重はそれぞれの許容値以下である。

支持構造物評価結果（荷重評価）

支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (°C)	評価結果	
					計算 荷重 (kN)	許容 荷重 (kN)
ALPI-234ROR-2	ロッドレストレイント	RSA-1	添付書類「V-2-1-12-1 配管及び支持構造物の 耐震計算について」参 照		3	18

支持構造物評価結果（応力評価）

支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (°C)	支持点荷重						評価結果		
					反力 (kN)			モーメント (kN・m)			応力 分類	計算 応力 (MPa)	許容 応力 (MPa)
					F _X	F _Y	F _Z	M _X	M _Y	M _Z			
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注 反力が最大となる支持点の支持構造物評価結果（応力評価）は、兼用の低圧代替注水系に示す。

4.2.3 弁の動的機能維持評価結果

下表に示すとおり応答加速度が機能確認済加速度以下又は計算応力が許容応力以下である。

弁番号	形式	要求 機能	応答加速度* ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)		機能確認済加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)		構造強度評価結果 (MPa)	
			水平	鉛直	水平	鉛直	計算応力	許容応力
—	—	—	—	—	—	—	—	—

注記 *：応答加速度は、打ち切り振動数 50Hz として計算した結果を示す。

4.2.4 代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果

代表モデルは各モデルの最大応力点の応力と裕度を算出し、応力分類毎に裕度最小のモデルを選定して鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載している。下表に、代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果を示す。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（重大事故等クラス 2 範囲）

No	配管モデル	許容応力状態 V_{AS}												
		一次応力					一次＋二次応力					疲労評価		
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	疲労累積 係数	代表
1	ALPI-008R6F	B09F	81	366	4.51	－	B09F	148	462	3.12	－	－	－	－
2	ALPI-009R6F	34	17	431	25.35	－	11	18	376	20.88	－	－	－	－
3	ALPI-004R4F	G10F	133	366	2.75	○	G10F	224	462	2.06	○	－	－	－