

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-8-2_改0
提出年月日	2021年3月5日

補足-600-8-2 建屋-機器連成解析における解析モデルの設定に係る補足説明資料

目次

1. 地震応答解析モデルの設定について.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 既工認同様の地震応答解析モデルの設定方法.....	8
1.2.1 質点位置.....	8
1.2.2 質点質量.....	8
1.2.3 断面剛性（有効せん断断面積及び断面二次モーメント）.....	8
1.2.4 構造物間ばね定数.....	10
1.2.5 材料物性値（縦弾性係数，ポアソン比）.....	75
1.2.6 シュラウド溶接線分離ケースのモデル化.....	77
1.3 新たに採用する地震応答解析モデルの設定.....	82
1.3.1 鉛直方向解析モデルの扱い.....	82
1.3.2 鉛直方向解析モデルの設定について.....	85

1. 地震応答解析モデルの設定について

1.1 はじめに

地震応答解析モデルの設定については、添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の解析モデルの設定方針に基づいており、設定内容については、添付書類「VI-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」で説明している。

ここで，今回工認の地震応答解析モデルは，既工認のモデル諸元を適用することを基本とするが，適正な地震応答解析を実施する観点及び鉛直方向応答を適切に評価する観点から，新たに原子炉本体の基礎（以下「RPV ペDESTAL」という。）への非線形復元力特性の考慮（詳細は「補足 600-8-3 建屋-機器連成解析モデルにおける原子炉本体の基礎の非線形復元力特性等の設定に関する補足説明資料」参照。）と鉛直方向地震応答解析モデルの追加を行っている。今回工認での水平方向の地震応答解析モデルを図 1-1～図 1-4 に，鉛直方向の地震応答解析モデルを図 1-5 及び図 1-6 に示す。

本章では，地震応答解析モデルに関して，既工認での設定内容及び今回工認での設定内容等について説明する。

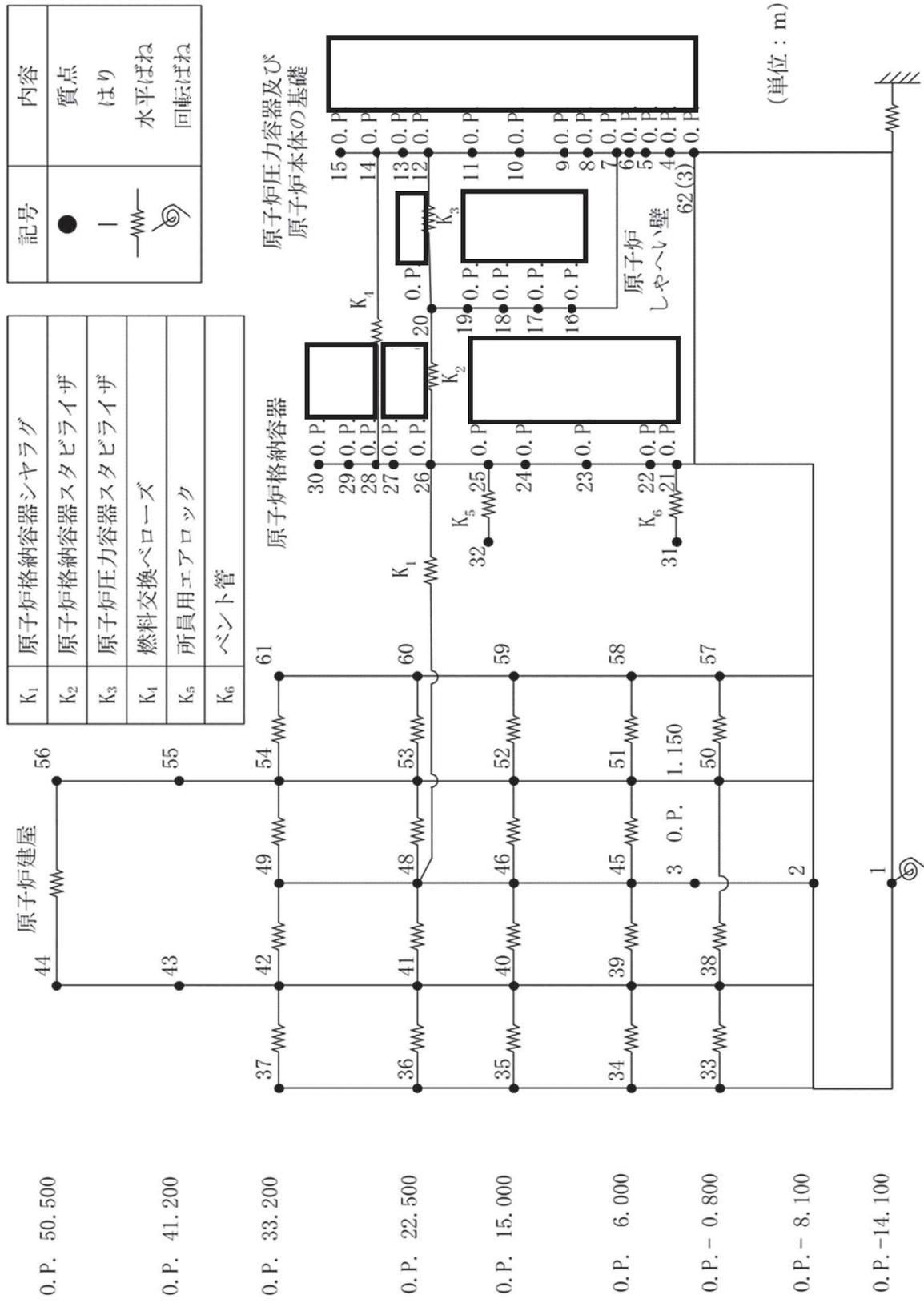
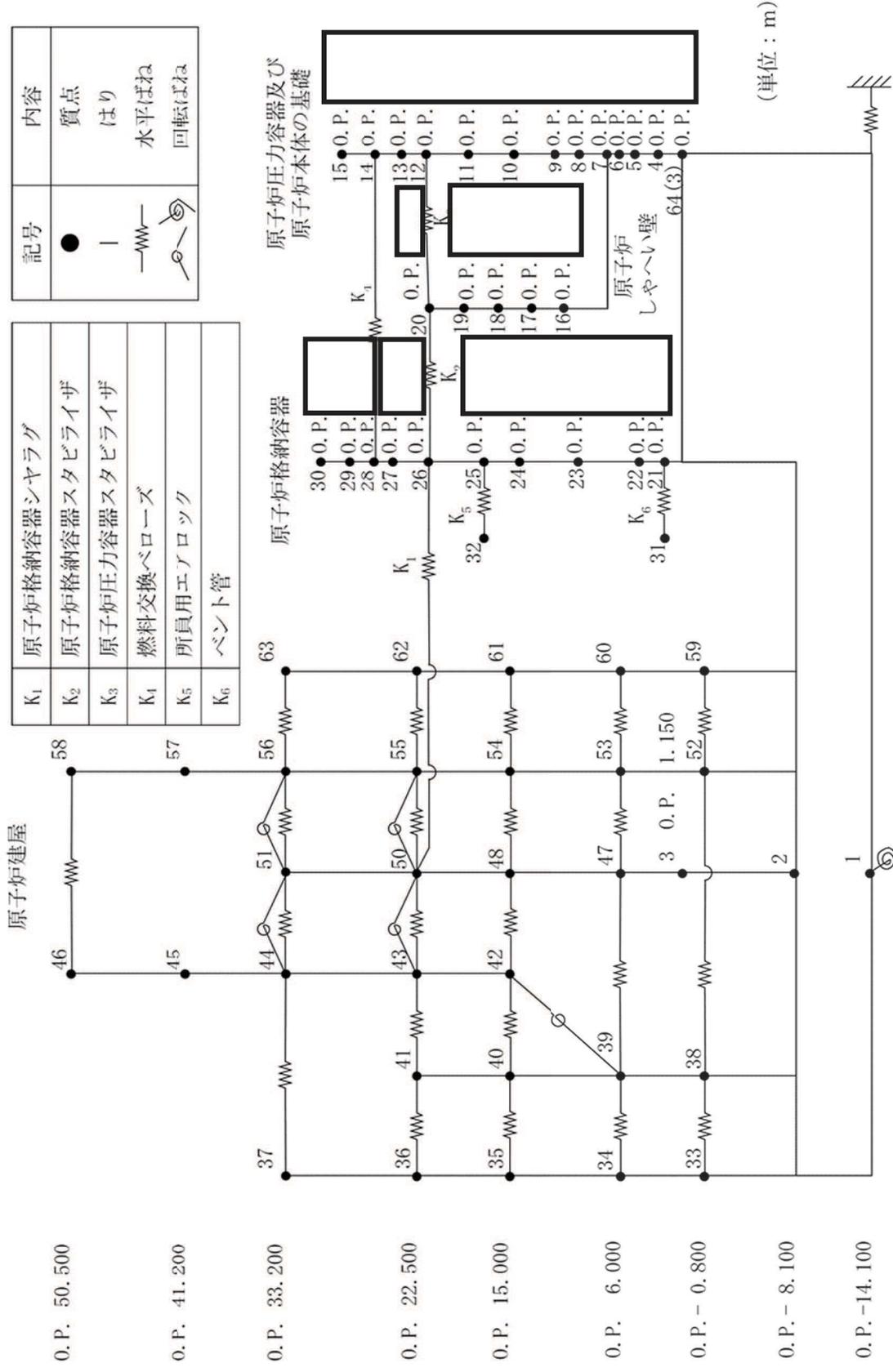


図 1-1 水平方向地震応答解析モデル (大型機器系, NS 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



記号	内容
●	質点
—	はり
—	水平ばね
○	回転ばね

K ₁	原子炉格納容器シヤラダ
K ₂	原子炉格納容器スタビライザ
K ₃	原子炉圧力容器スタビライザ
K ₄	燃料交換ベローズ
K ₅	所員用エアロツク
K ₆	ベント管

- O. P. 50. 500
- O. P. 41. 200
- O. P. 33. 200
- O. P. 22. 500
- O. P. 15. 000
- O. P. 6. 000
- O. P. - 0. 800
- O. P. - 8. 100
- O. P. -14. 100

図 1-2 水平方向地震応答解析モデル (大型機器系, EW 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

記号	内容
●	質点
—	はり
— —	水平ばね
— —	回転ばね

K ₁	原子炉格納容器スタビライザ
K ₂	原子炉圧力容器スタビライザ
K ₃	制御棒駆動機構ハウジングレストレイントビーム
K ₄	シュラウドサポート
K ₅	上部サポート
K ₆	下部スタビライザ
K ₇	炉心シュラウド支持ロッド

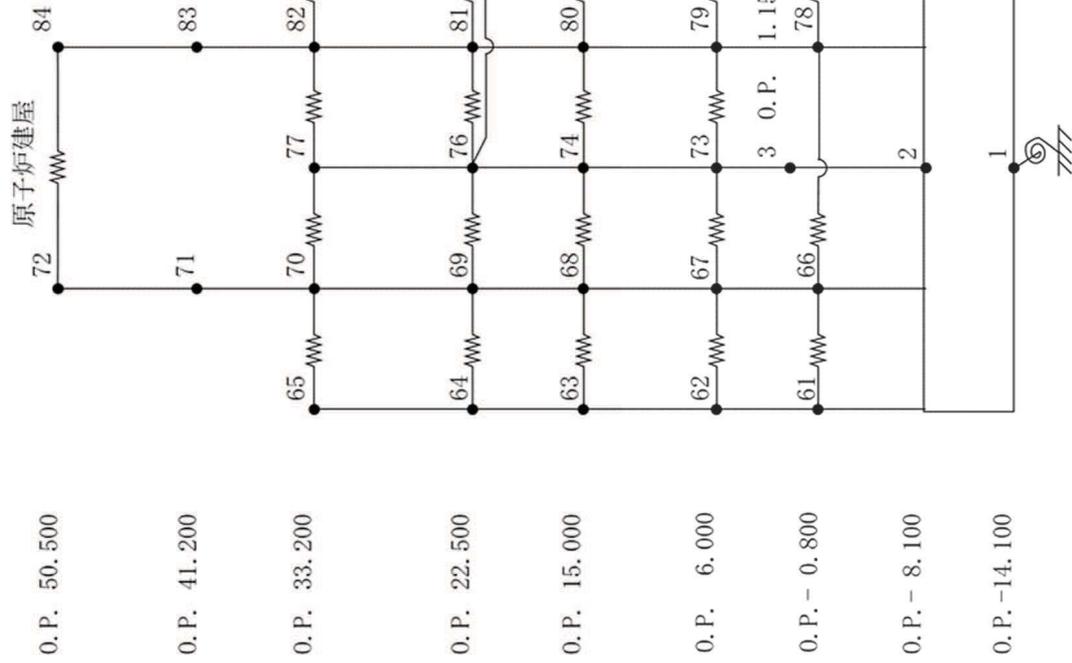


図 1-3 水平方向地震応答解析モデル (炉内構造物系, NS 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

記号	内容
●	質点
—	はり
—	水平ばね
—	回転ばね

K ₁	原子炉格納容器スタブライザ
K ₂	原子炉圧力容器スタブライザ
K ₃	制御棒駆動機構ハウジングレストレイントビーム
K ₄	シュラウドサポート
K ₅	上部サポート
K ₆	下部スタブライザ
K ₇	炉心シュラウド支持ロッド

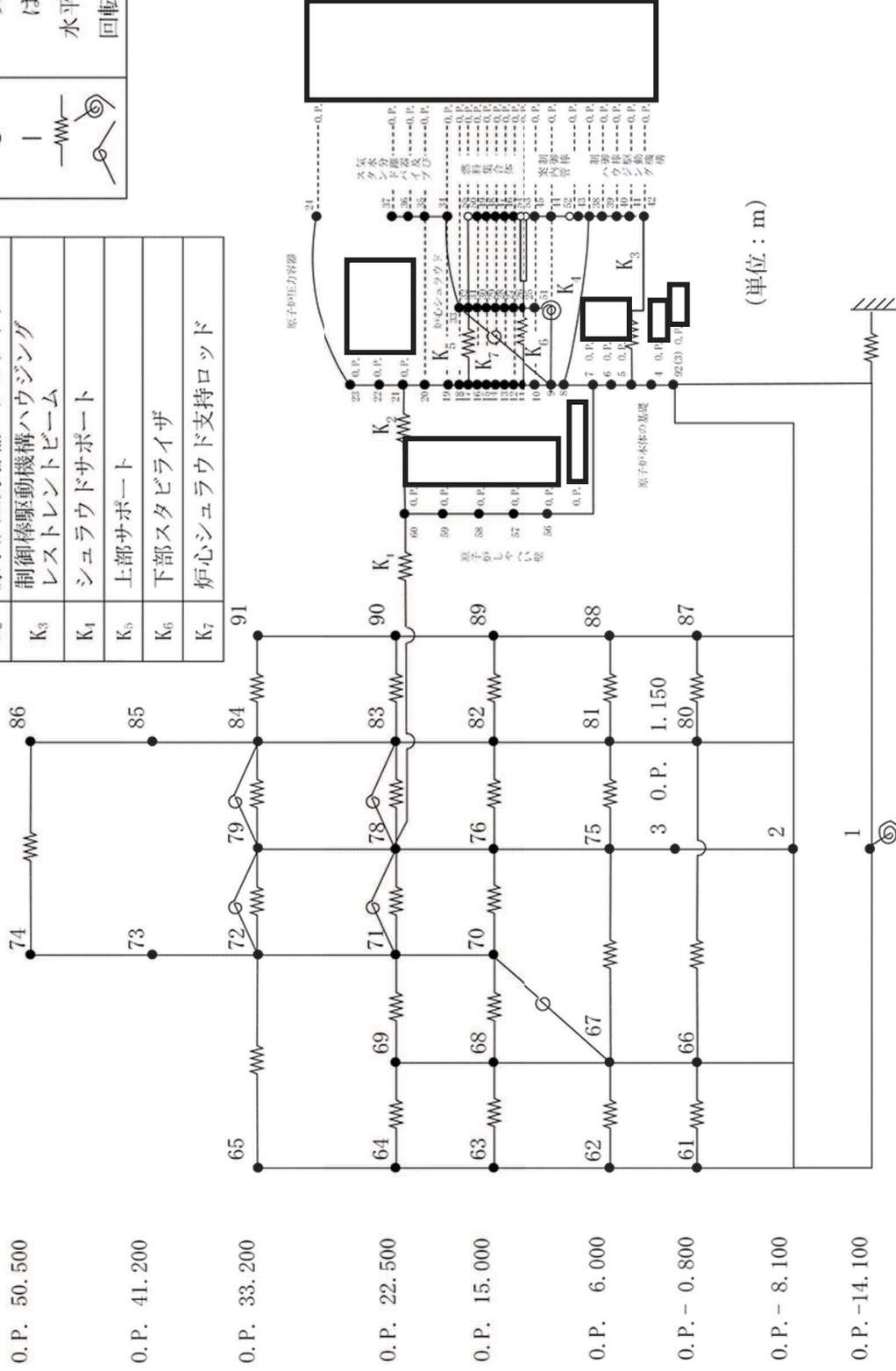


図 1-4 水平方向地震応答解析モデル (炉内構造物系, EW 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

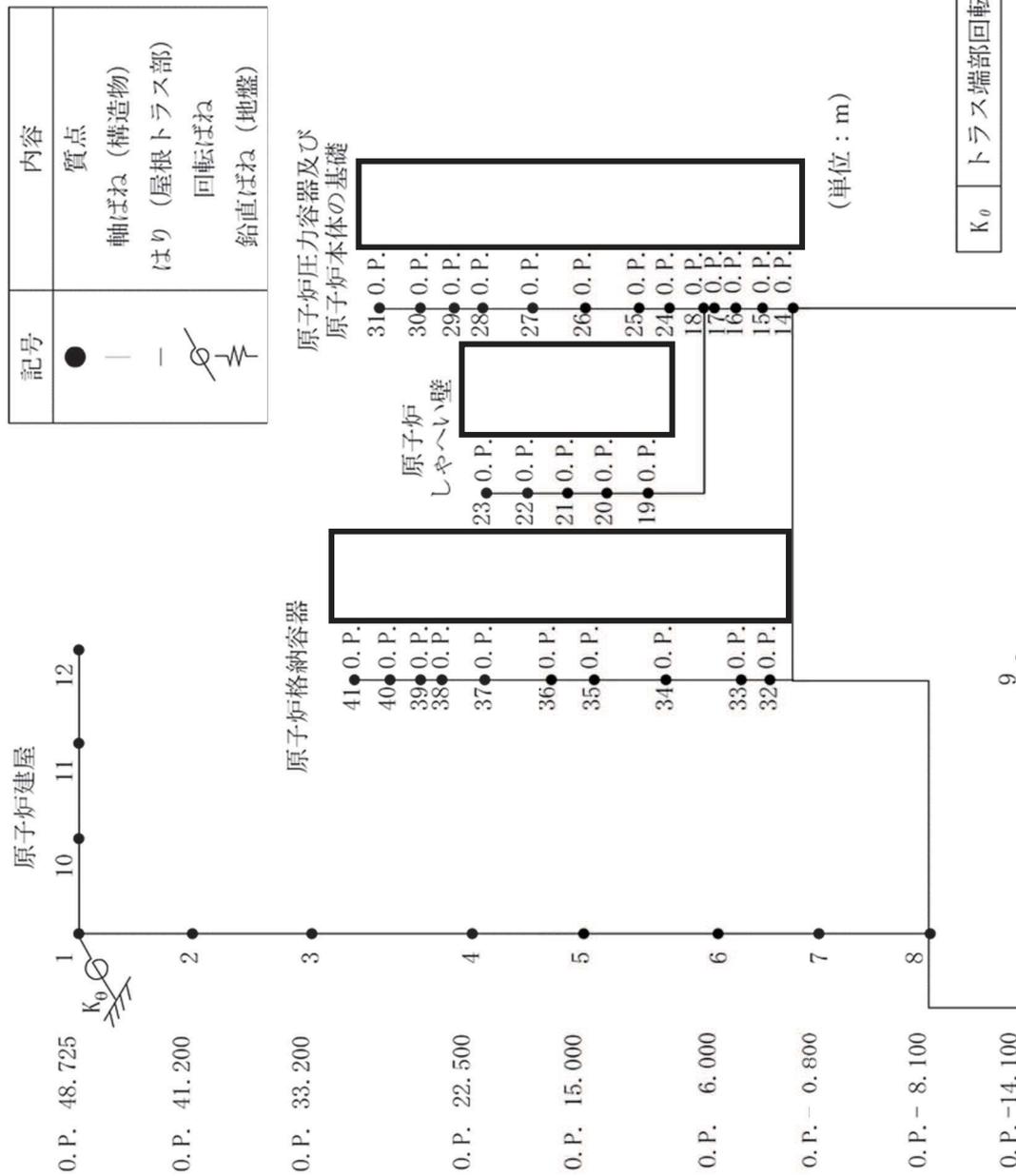


図 1-5 鉛直方向地震応答解析モデル (大型機器系)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

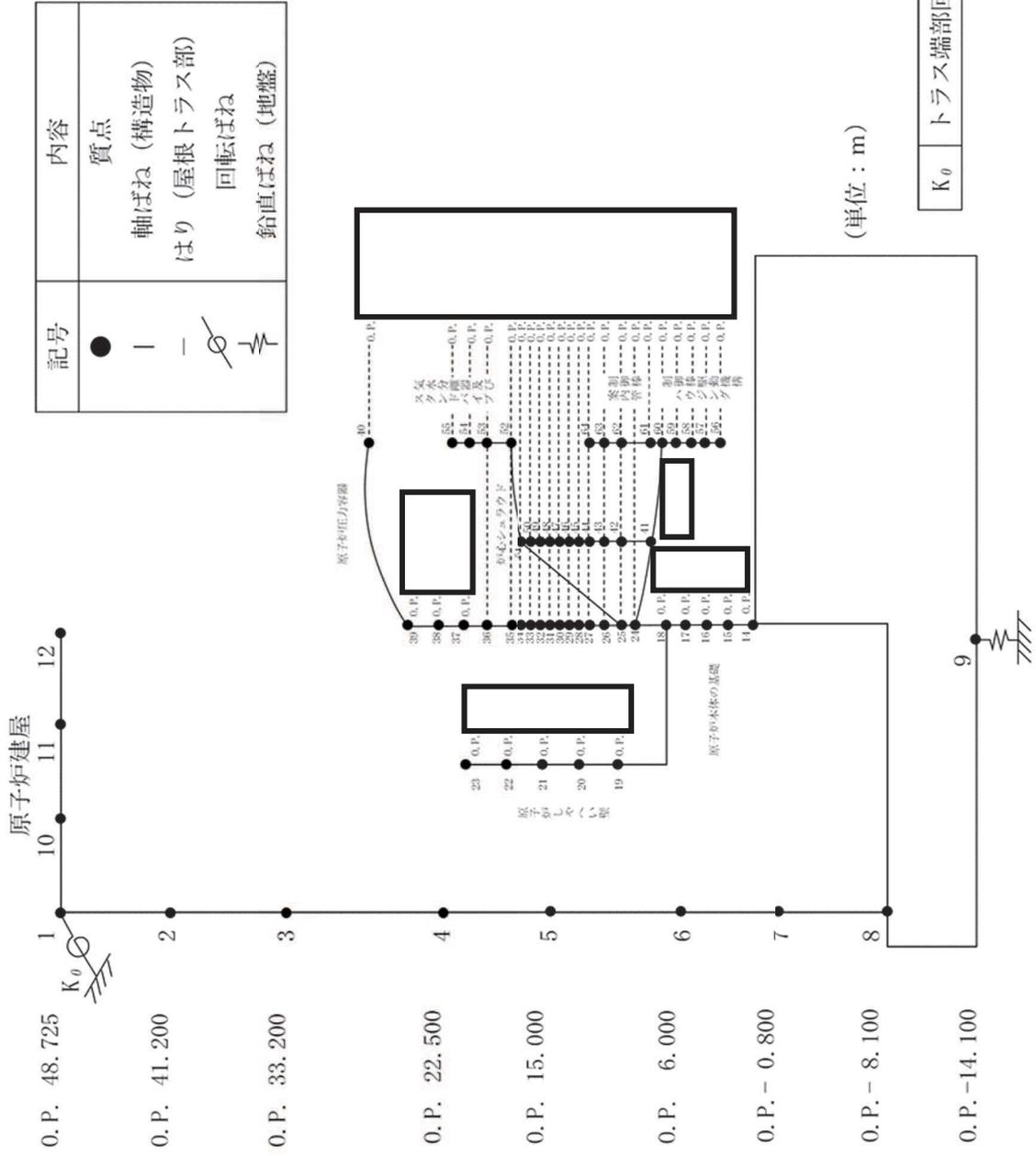


図 1-6 鉛直方向地震応答解析モデル (炉内構造物系)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1.2 既工認同様の地震応答解析モデルの設定方法

1.2.1 質点位置

解析モデルの質点位置は、各構造物の振動性状を適切に評価できるよう配慮するとともに、部材の剛性が変化する点、構造的に不連続となる位置、応力評価点等を考慮して設定する。なお、炉内構造物系の解析モデルの原子炉压力容器胴板の質点位置は、大型機器系の質点位置をベースとして炉水の付加質量効果の反映を簡便に算定するため、原子炉压力容器内部構造物の質点位置と同一標高となるように設定する。

1.2.2 質点質量

質点質量は、各構造物の連続する2質点間の質量の1/2を各質点に加え、2質点間の付加物等の質量も考慮する。なお、質量は定格運転時質量を使用する。

1.2.3 断面剛性（有効せん断断面積及び断面二次モーメント）

各構造物の連続する質点間のはりは、等価な曲げ及びせん断剛性を有するようモデル化している。円筒形またはそれに準ずる構造物について、断面二次モーメント及び有効せん断断面積は下式により算定している。なお、算定に際しては原則として、公称寸法を使用し、部材中央の断面で評価する。

$$\text{断面二次モーメント： } I = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4)$$

$$\text{有効せん断断面積： } A_s = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

ここで、

D_o ：外径（m）

D_i ：内径（m）

断面剛性（断面二次モーメント及び有効せん断断面積）の算定例を以下に示す。

(1) 原子炉压力容器胴板（NS/EW 方向の炉内構造物系モデルでの質点番号：18-19）

原子炉压力容器胴板の構造概要を図 1-7 に示す。原子炉压力容器胴板の断面剛性は、部材の諸元を用いて、以下のとおり算定する。

$$D_o = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$D_i = \boxed{} \text{ (m)}$$

よって、

$$I = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4)$$

$$= \frac{\pi}{64} (\boxed{}^4 - \boxed{}^4) = \boxed{}$$

$$A_s = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

$$= \frac{\pi}{8} (\boxed{}^2 - \boxed{}^2) = \boxed{}$$

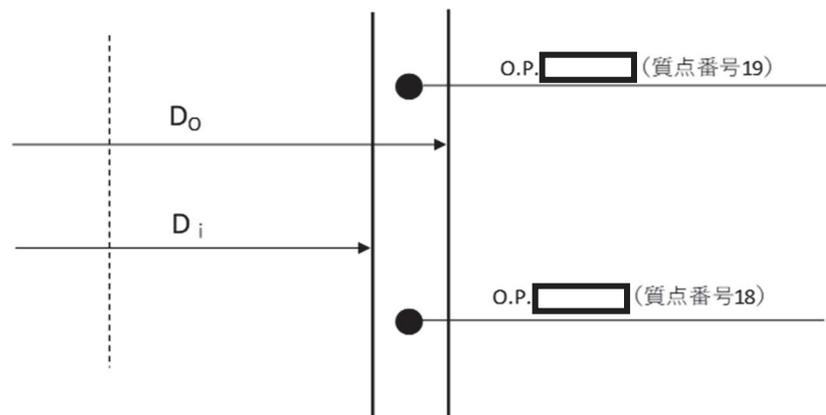


図 1-7 原子炉压力容器胴板（質点番号：18-19）の構造概要

1.2.4 構造物間ばね定数

各構造物間を接続する各機器を等価なばねでモデル化する。ばね定数の設定に際しては、ばねとしてモデル化する部材の形状を考慮して、材料力学のはりの公式、文献等による理論式又はFEM解析によりばね定数を算定する。以下に、大型機器系及び炉内構造物系に用いているばね定数の算出過程を示す。

1.2.4.1 大型機器系

大型機器系に用いているばね定数の数値一覧を表1-1に、ばね定数の算定方法の詳細を以下に示す。

表 1-1 大型機器系のばね定数

No.	名称	ばね定数 (t/m)	
		NS 方向	EW 方向
K ₁	原子炉格納容器シヤラグ		
K ₂	原子炉格納容器スタビライザ		
K ₃	原子炉圧力容器スタビライザ		
K ₄	燃料交換ベローズ		
K ₅	所員用エアロック		
K ₆	ベント管		

(1) 原子炉格納容器シヤラグ：K₁

a. 原子炉格納容器シヤラグの構造

原子炉格納容器シヤラグは、原子炉格納容器の上部球形部の周方向に8ヶ所設置され、原子炉格納容器の外側マイルシヤラグが原子炉建屋の外側フィメールシヤラグと嵌め合い構造となっており、水平方向変位を拘束する。原子炉格納容器シヤラグの構造概要を図1-8に示す。

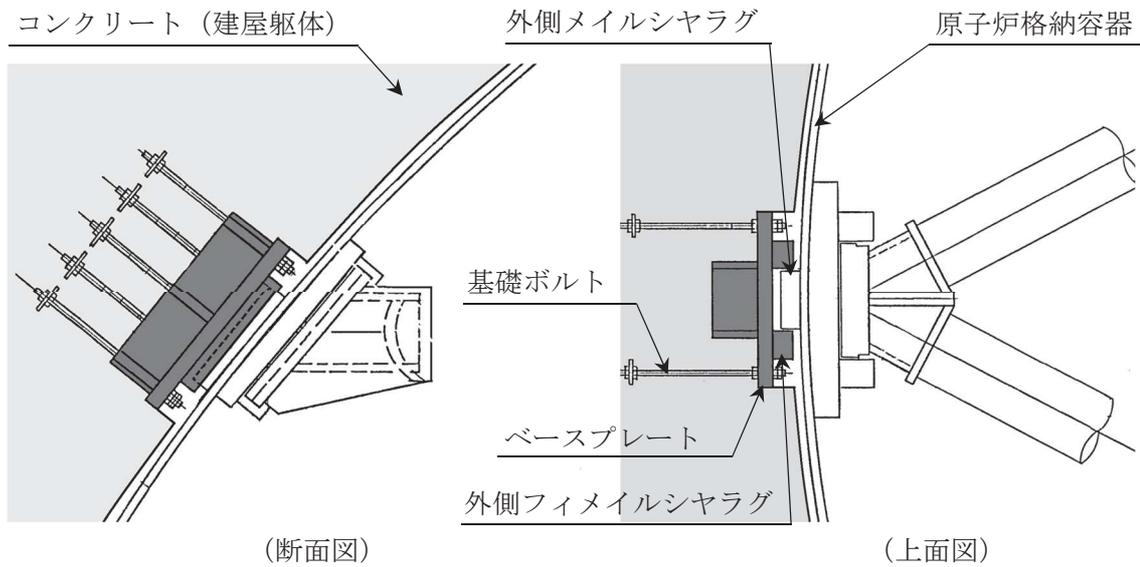
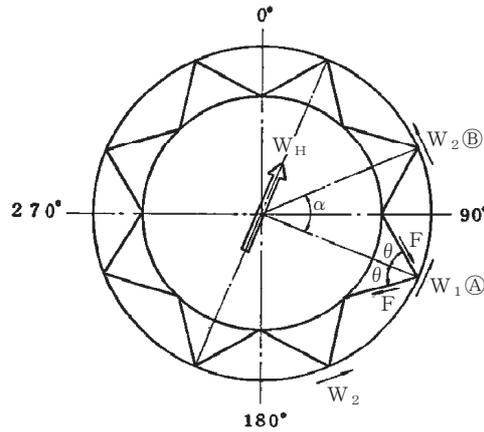


図1-8 原子炉格納容器シヤラグの構造概要

b. 原子炉格納容器シヤラグのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

原子炉格納容器シヤラグは、ドライウエル周方向に 45° ピッチで 8 個配置されていることから、任意の方向の荷重に対して有効なシヤラグ個数は 4 個である。



原子炉格納容器シヤラグに最大反力が生じる、図に示す方向に荷重が作用する場合の各位置における荷重の分配は次式による。

$$W_H = 2 \cdot (W_1 + 2 \cdot W_2 \cos \alpha)$$

ここに、

W_1 : ①点に作用する力

W_2 : ②点に作用する力

α :

θ :

$W_2 = W_1 \cdot \cos \alpha$ から

$$W_H = 2 \cdot W_1 \cdot (1 + 2 \cos^2 \alpha) = 4 \cdot W_1$$

よって、原子炉格納容器シヤラグ全体のばね定数 K_1 は以下の式により求められる。

$$K_1 = 4 \times K_c$$

$$= \text{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

(b) 合成ばね定数算定方法

原子炉格納容器シヤラグのばね定数は外側フィメールシヤラグ及び外側メイルシヤラグのばね定数を連結して求める。

合成ばね定数 K_c は、以下の式により求められる。

$$K_c = \frac{1}{\frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_b}}$$

$$= \text{}$$

$$= \text{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

ここで、

K_a : 外側フィメイルシヤラグのばね定数

K_b : 外側メイルシヤラグのばね定数

(c) フィメイルシヤラグ及びメイルシヤラグのばね定数算定方法

フィメイルシヤラグ及びメイルシヤラグのばね定数（各々 K_a 及び K_b とする）は、いずれもせん断変形が支配的であると仮定して算出する。

せん断力によるせん断ひずみ δ は、

$$\delta = \frac{6}{5 \cdot A \cdot G} \int_{X_1}^{X_2} F \cdot dx$$

よって、ばね定数 K は、

$$K = \frac{F}{\delta} = \frac{5 \cdot A \cdot G}{6(X_2 - X_1)}$$

ここで、

A : せん断断面積 (mm^2)

$$A_1 = \varnothing_5 \times \varnothing_7 = \boxed{} \quad (\text{外側フィメイルシヤラグ})$$

$$A_2 = \varnothing_4 \times \varnothing_6 = \boxed{} \quad (\text{外側メイルシヤラグ})$$

G : せん断弾性係数 (kg/mm^2) = $\frac{E}{2(1+\nu)}$

E : 縦弾性係数 (kg/mm^2) = $\boxed{}$ (= $\boxed{}$ (t/m^2))

$(X_2 - X_1)$: せん断長さ (mm) $\boxed{}$ (外側フィメイルシヤラグ)

$\boxed{}$ (外側メイルシヤラグ)

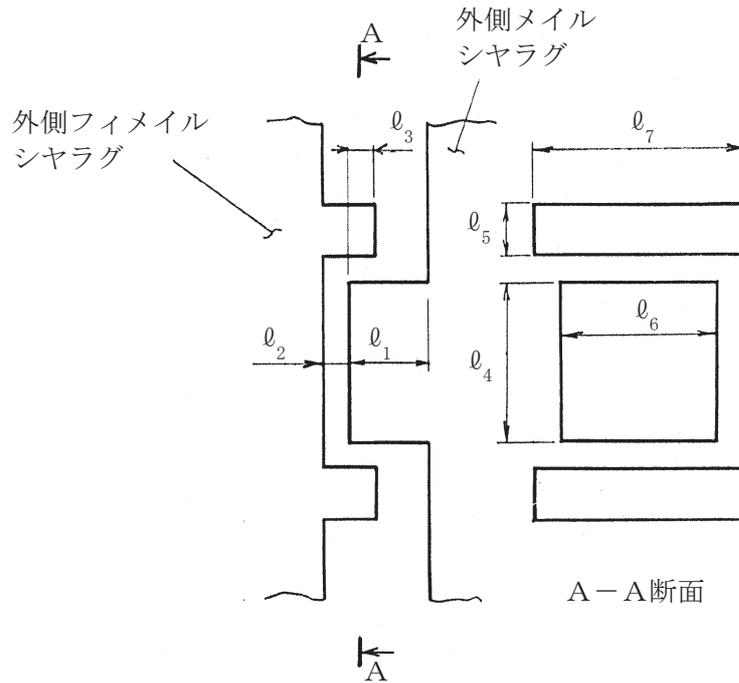


図 1-9 外側フィメイルシヤラグと外側メイルシヤラグの嵌め合い構造

各部の長さ

$l_1 =$	<input type="text"/>	(mm)	$l_2 =$	<input type="text"/>	(mm)	$l_3 =$	<input type="text"/>	(mm)
$l_4 =$	<input type="text"/>	(mm)	$l_5 =$	<input type="text"/>	(mm)	$l_6 =$	<input type="text"/>	(mm)
$l_7 =$	<input type="text"/>	(mm)						

外側フィメイルシヤラグのばね定数： $K_a =$ (kg/mm = t/m)

外側メイルシヤラグのばね定数： $K_b =$ (kg/mm = t/m)

(2) 原子炉格納容器スタビライザ：K₂

a. 原子炉格納容器スタビライザの構造

原子炉格納容器スタビライザは、パイプを主たる構造とする8組のトラス構造で、原子炉しゃへい壁頂部に溶接接続され、他方の端部は原子炉格納容器シヤラグと水平方向の嵌め合い構造となっており、水平方向地震荷重を伝達する。

原子炉格納容器スタビライザの構造概要を図1-10に示す。

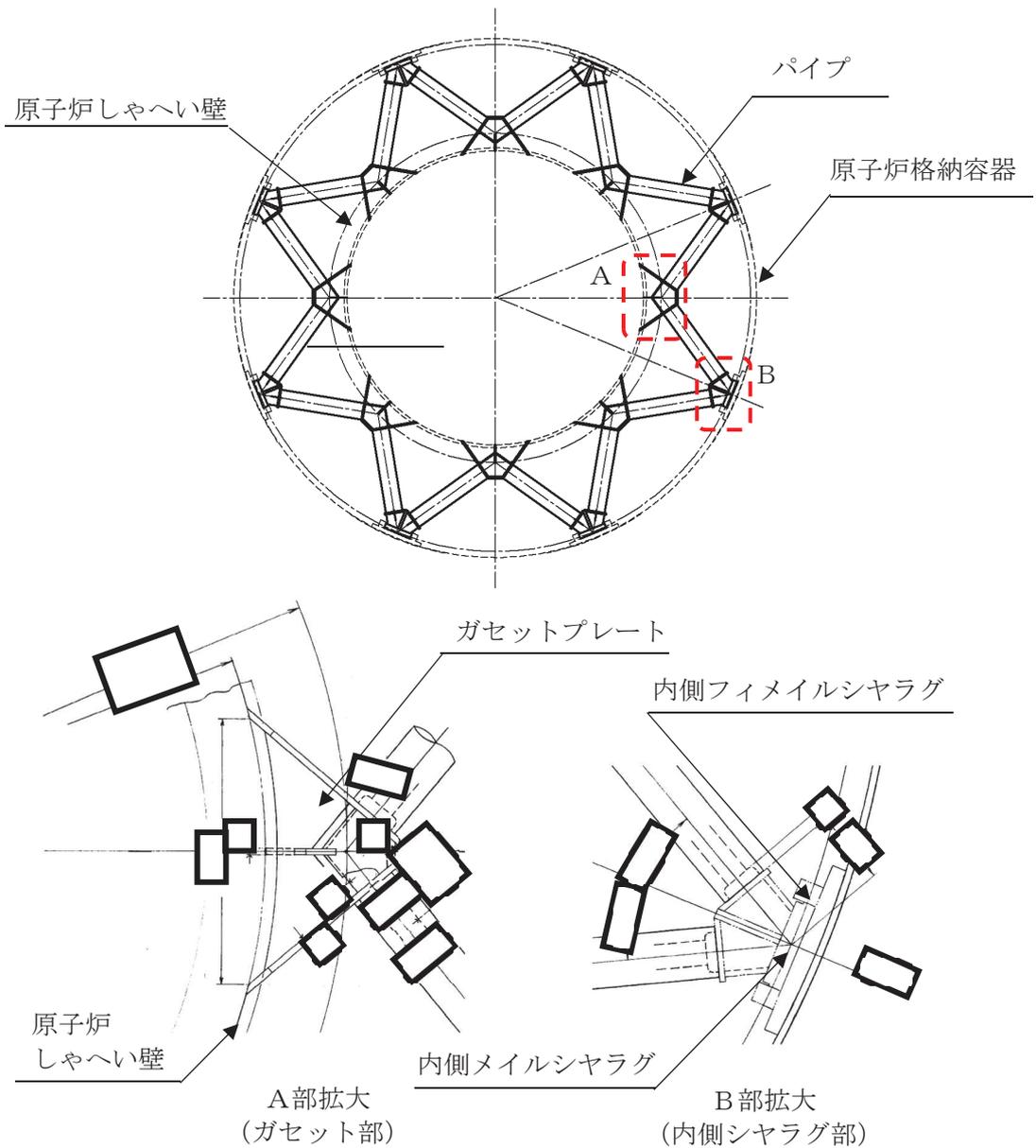


図1-10 原子炉格納容器スタビライザの構造概要（平面図）

b. 原子炉格納容器スタビライザのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

原子炉格納容器スタビライザのばね定数 K_2 は、

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{K_P} + \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_S}}$$
$$= \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

ここで、

K_P : パイプ部全体のばね定数

K_G : ガセット部のばね定数

K_S : 内側マイルシヤラグ部のばね定数

(b) パイプ部全体のばね定数 K_P

パイプ部全体のばね定数は、以下の式に基づき算定する。パイプ部全体の形状及び主要寸法を図 1-11 に示す。

$$K_P = \frac{F}{\delta} = 8 \sin^2 \theta \cdot \frac{E}{\left(\frac{\ell_1}{A_1} + \frac{\ell_2}{A_2} + \frac{\ell_3}{A_3} + \frac{\ell_4}{A_4} + \frac{\ell_5}{A_5} + \frac{\ell_6}{A_6} + \frac{\ell_7}{A_7} + \frac{\ell_8}{A_8} \right)}$$
$$= \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

パイプ取付角度 (シヤラグ側) $\theta =$

ガセットの断面積 $A_1 =$ (mm²)

プレートの断面積 $A_2 = A_4 =$ (mm²)

パイプ本体部の断面積 $A_3 =$ (mm²)

パイプ両端部の断面積 $A_7 = A_8 =$ (mm²)

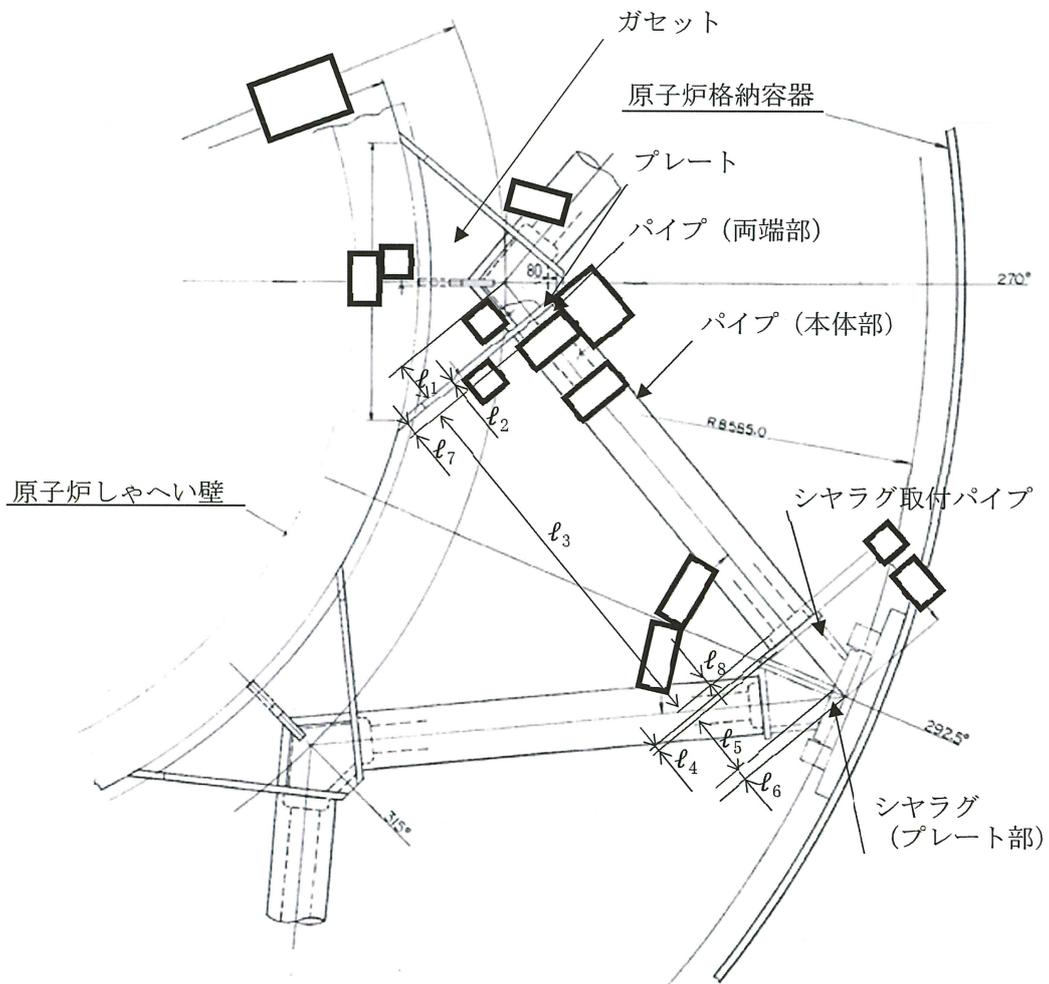
シヤラグ取付パイプの断面積 $A_5 =$ (mm²)

シヤラグ (プレート部) の断面積 $A_6 =$ (mm²)

各部の長さ $l_1 =$ (mm) $l_2 =$ (mm) $l_3 =$ (mm)

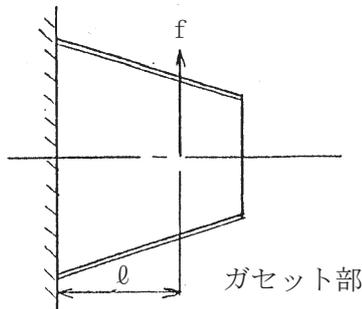
$l_4 =$ (mm) $l_5 =$ (mm) $l_6 =$ (mm)

$l_7 =$ (mm) $l_8 =$ (mm)



(c) ガセット部のばね定数 K_G

各ガセット部の接線方向のばね定数を K_g とする。



せん断力によるガセット部のたわみを考慮したときの、各ガセット部接線方向のばね定数 K_g は、

$$K_g = \frac{5 \cdot G \cdot A}{6 \cdot l}$$

ガセット部のばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_G = \frac{F}{\delta} = \frac{16}{\left(\frac{\cos \beta}{\sin \theta}\right)^2 (1 + 2 \cos \alpha + 2 \cos^2 \alpha)} \cdot \frac{5 \cdot G \cdot A}{6 \cdot l}$$

= (kg/mm = t/m)

取付角度 $\alpha =$ $\beta =$ $\theta =$

せん断弾性係数 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ (kg/mm²)

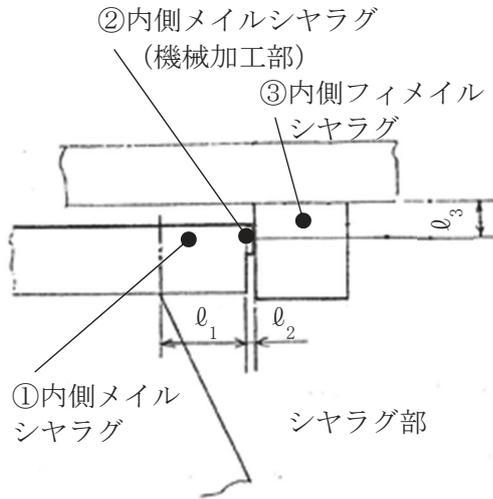
縦弾性係数 $E =$ (kg/mm²) (= t/m²)

せん断断面積 $A =$ (mm²) (ガセット部)

せん断長さ $l =$ (mm) (ガセット部)

(d) 内側シヤラグ部のばね定数 K_s

内側シヤラグ部 1 箇所あたりのばね定数を K_o とする。



①のばね定数 k_1 は,

$$k_1 = \frac{E \cdot A_1}{l_1}$$

②のばね定数 k_2 は,

$$k_2 = \frac{E \cdot A_2}{l_2}$$

③のばね定数 k_3 は,

$$k_3 = \frac{5 \cdot A_3 \cdot G}{6 \cdot l_3}$$

内側シヤラグ部 1 箇所あたりのばね定数 K_o は,

$$K_o = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}}$$

内側シヤラグ部全体のばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_s = \frac{F}{\delta} = \frac{4}{\frac{l_1}{E \cdot A_1} + \frac{l_2}{E \cdot A_2} + \frac{6 \cdot l_3}{5 \cdot A_3 \cdot G}}$$

= (kg/mm = t/m)

内側メイルシヤラグの断面積

$$A_1 = \text{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

内側メイルシヤラグ (機械加工部) の断面積

$$A_2 = \text{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

内側フィメイルシヤラグのせん断断面積

$$A_3 = \text{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

せん断弾性係数 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ (kg/mm²)

縦弾性係数

$$E = \text{} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (= \text{} \text{ t/m}^2\text{)}$$

各部の長さ

$$l_1 = \text{} \text{ (mm)} \quad l_2 = \text{} \text{ (mm)} \quad l_3 = \text{} \text{ (mm)}$$

(3) 原子炉圧力容器スタビライザ：K₃

a. 原子炉圧力容器スタビライザの構造

原子炉圧力容器スタビライザ（以下「RPV スタビライザ」という。）は、原子炉しゃへい壁頂部に円周状に8箇所設置され、原子炉圧力容器付属構造物であるスタビライザブラケットを、あらかじめ初期締付荷重を与えた2組の皿ばねを介して両側から挟み込む構造であり、原子炉圧力容器と原子炉しゃへい壁との水平方向地震荷重を伝達する。RPV スタビライザの構造概要を図 1-12 に示す。

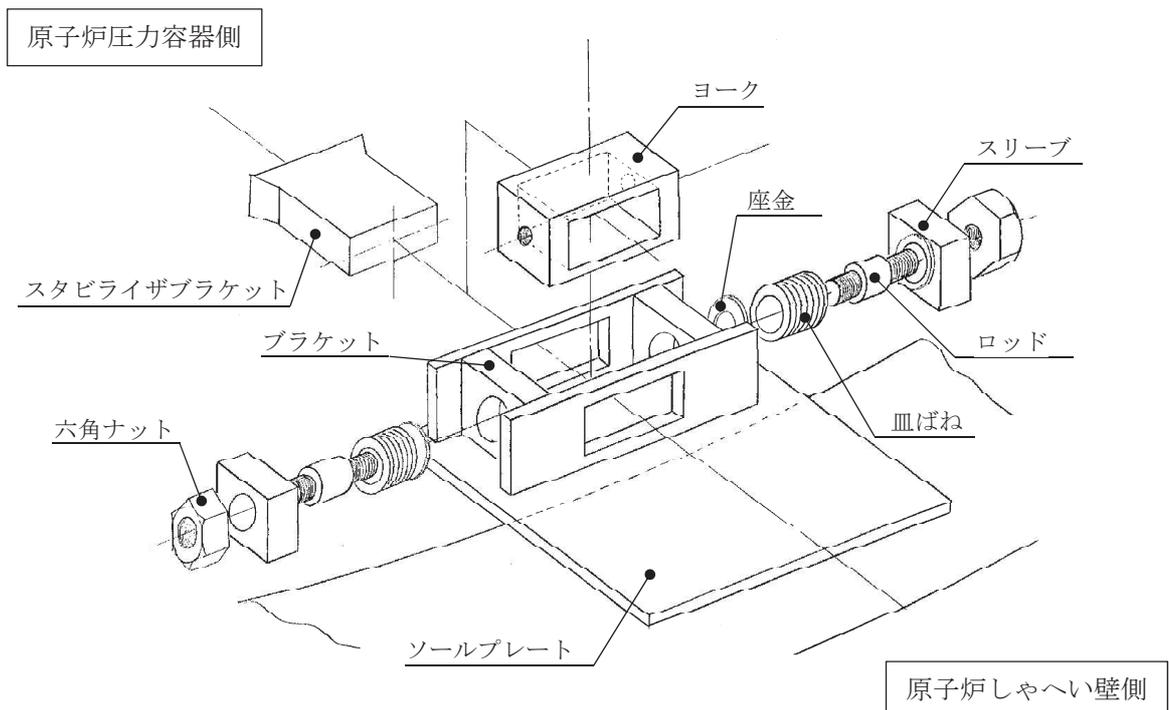


図 1-12 RPV スタビライザの構造概要

b. RPV スタビライザのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

RPV スタビライザのばね定数K₃は、RPV スタビライザの構成部材のうち、スタビライザブラケットからの水平方向荷重に対して寄与する部材を対象とし、これらの構成要素のばね定数を並列及び直列に組み合わせて算定する。

図 1-13 に全体ばねの模式図を示す。

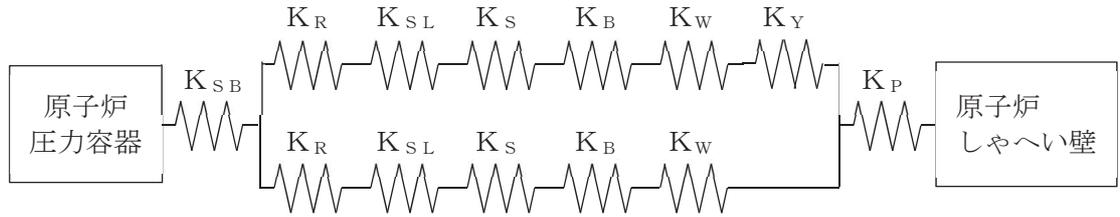


図 1-13 全体ばねの模式図

RPV スタビライザ 1 基当たりのばね定数を K とすると、 K は次式により算定される。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_{SB}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_Y}} + \frac{1}{K_P}}}$$

RPV スタビライザ 8 基分の全体でのばね定数 K_3 は、1 基当たりのばね定数 K から、荷重—変位の関係により算定する。図 1-14 に示すとおり、RPV スタビライザに強制変位 x を負荷した場合に強制変位と同じ方向に生じる全体荷重 W を算出する。90° 及び 270° の位置に設置された RPV スタビライザに生じる荷重を W_1 、45°、135°、225° 及び 315° の位置に設置された RPV スタビライザに生じる荷重を W_2' とし、荷重 W_2' の強制変位 x と同じ方向の分力を W_2 とする。強制変位 x を負荷したときの 45°、135°、225° 及び 315° の位置に設置された RPV スタビライザに生じる接線方向の変位は $x \cdot \cos \alpha$ であることから、荷重 W_2' は以下のとおりとなる。

$$W_2' = K \cdot x \cdot \cos \alpha$$

図 1-14 内の拡大図の関係から強制変位 x と同じ方向の分力 W_2 は以下のとおりとなる。

$$W_2 = W_2' \cdot \cos \alpha = K \cdot x \cdot \cos^2 \alpha$$

したがって、RPV スタビライザ 8 基（全体）のばね定数 K_5 は以下のとおりとなる。

$$W = 2 \cdot W_1 + 4 \cdot W_2 = 2 \cdot (K \cdot x) + 4 \cdot (K \cdot x \cdot \cos^2 \alpha) = 4 \cdot K \cdot x$$

$$K_3 = \frac{W}{x} = 4 \cdot K$$

ここで,

K_S : 皿ばねのばね定数

K_W : 座金のばね定数

K_{SL} : スリーブのばね定数

K_R : ロッドのばね定数

K_Y : ヨークのばね定数

K_{SB} : スタビライザブラケットのばね定数

K_B : ブラケットのばね定数

K_P : ソールプレートのばね定数

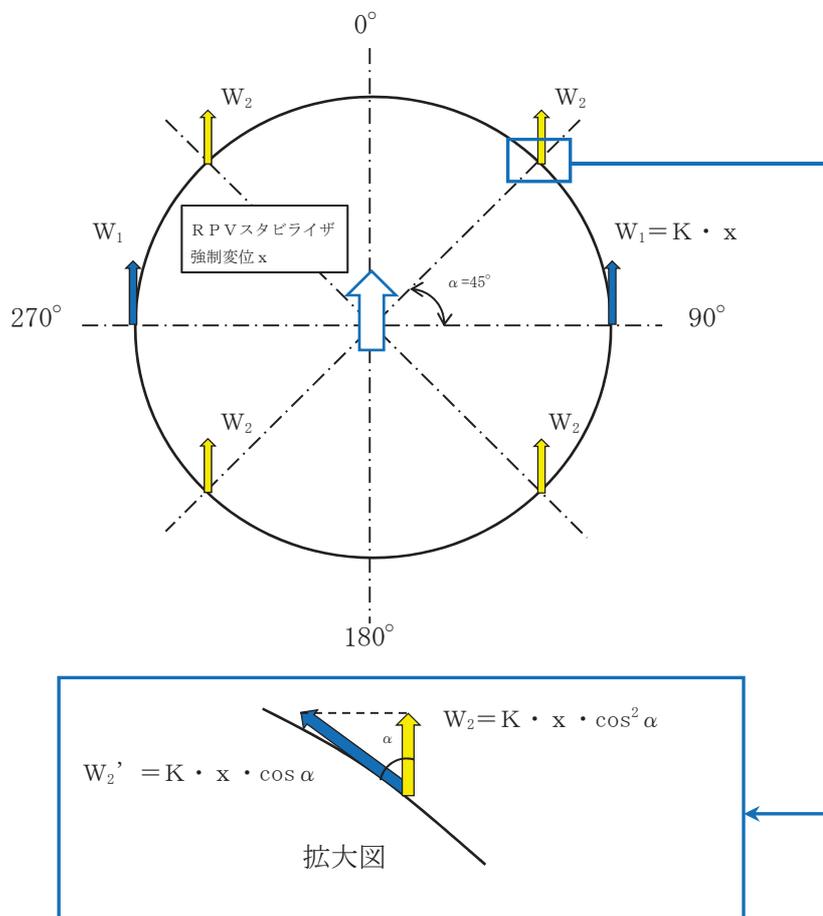


図 1-14 水平荷重の分配

(b) 評価部材のばね定数算定方法

イ. 皿ばね K_s

皿ばねのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_s = n \cdot K_{s1}$$

ここで、

$$K_{s1} : 1 \text{ 枚当たりのばね定数} = \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

$$n : \text{皿ばねの積層枚数} = \boxed{} \text{ (-)}$$

ロ. 座金 K_w

座金の軸方向ばね定数は、以下の式に基づき算定する。

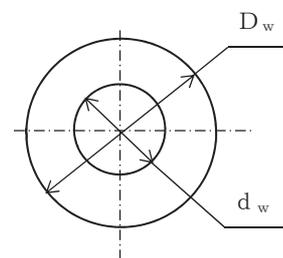
$$K_w = \frac{A_w \cdot E}{L_w}$$

ここで、

$$A_w : \text{断面積} = \frac{\pi \cdot (D_w^2 - d_w^2)}{4} = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$L_w : \text{板厚 (2 枚分)} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

$$E : \text{縦弾性係数} = \boxed{} \text{ (kg/mm}^2\text{)} (= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)})$$



[単位: mm]
 $D_w = \boxed{}$
 $d_w = \boxed{}$
 $t = \boxed{}$

ハ. スリーブ K_{SL}

スリーブのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{SL} = \frac{E}{\frac{L_{SL1}}{A_{SL1}} + \frac{L_{SL2}}{A_{SL2}}}$$

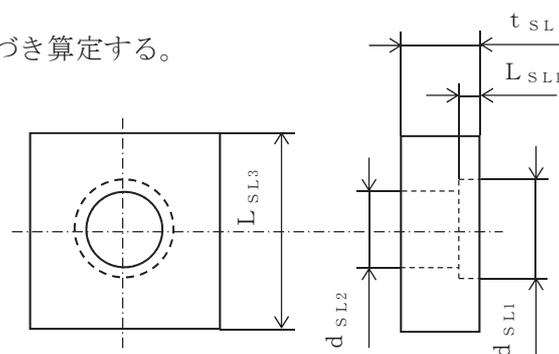
ここで、

$$A_{SL1} : \text{座繰り穴側の断面積} \\ = L_{SL3}^2 - \frac{\pi \cdot d_{SL1}^2}{4} = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$A_{SL2} : \text{ねじ穴側の断面積} \\ = L_{SL3}^2 - \frac{\pi \cdot d_{SL2}^2}{4} = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$L_{SL2} : \text{ねじ穴深さ} = t_{SL} - L_{SL1} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

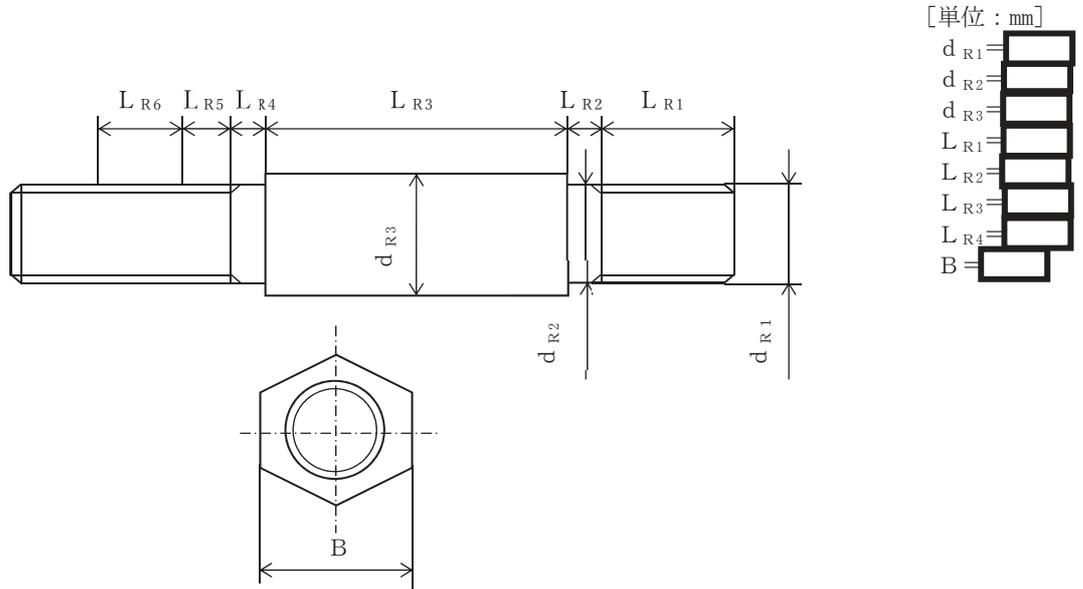
$$E : \text{縦弾性係数} = \boxed{} \text{ (kg/mm}^2\text{)} (= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)})$$



[単位: mm]
 $L_{SL3} = \boxed{}$
 $d_{SL1} = \boxed{}$
 $d_{SL2} = \boxed{}$
 $t_{SL} = \boxed{}$
 $L_{SL1} = \boxed{}$

二. ロッド K_R

ロッドのばね定数は、以下の式に基づき算定する。



$$K_R = \frac{E}{\frac{0.6 \cdot L_{R1}}{A_{R1}} + \frac{L_{R2}}{A_{R2}} + \frac{L_{R3}}{A_{R3}} + \frac{L_{R4}}{A_{R4}} + \frac{L_{R5}}{A_{R5}} + \frac{0.6 \cdot L_{R6}}{A_{R6}} + \frac{0.6 \cdot L_{R6}}{A_N}}$$

ここで、

A_{R1} , A_{R5} 及び A_{R6} : ねじ部断面積

$$= \frac{\pi \cdot d_{R1}^2}{4} = \text{} (\text{mm}^2)$$

A_{R2} 及び A_{R4} : 非ねじ部断面積

$$= \frac{\pi \cdot d_{R2}^2}{4} = \text{} (\text{mm}^2)$$

A_{R3} : 丸棒部断面積

$$= \frac{\pi \cdot d_{R3}^2}{4} = \text{} (\text{mm}^2)$$

A_N : ナットの断面積

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot B^2}{2} - \frac{\pi \cdot d_{R1}^2}{4} = \text{} (\text{mm}^2)$$

B : ナットの 2 面幅寸法 = (mm)

L_{R5} : 丸棒部先端からスリーブの六角ナット側端面の距離

$$= \text{} (\text{mm})$$

L_{R6} : ナット高さ = (mm)

E : 縦弾性係数 = (kg/mm²) (= t/m²)

ホ. ヨーク K_Y

ヨークのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_Y = \frac{1}{\frac{1}{K_{Y1}} + 2 \cdot \frac{1}{K_{Y2}}}$$

ここで、

①及び②：図 1-15 に示すヨークのばね定数算定のための計算モデル分割による。

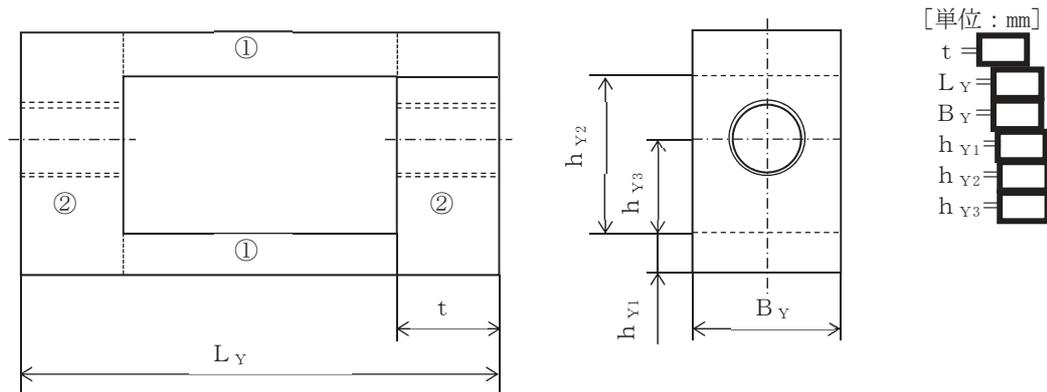


図 1-15 ヨークのばね定数算定のための計算モデル分割

$$K_{Y1} : \text{①のばね定数} = \frac{2 \cdot A_1 \cdot E}{L_Y - 2 \cdot t} = \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

$$A_1 : \text{①の断面積} = h_{Y1} \cdot B_Y = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$E : \text{縦弾性係数} = \boxed{} \text{ (kg/mm}^2\text{)} (= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)})$$

$$K_{Y2} : \text{②のばね定数}$$

$$= \frac{E}{\frac{8 \cdot (h_{Y2} - h_{Y3})^2 \cdot h_{Y3}^3}{(h_{Y2} + 2 \cdot h_{Y3})^2 \cdot A_2 \cdot t^2} + \frac{k \cdot (h_{Y2} - h_{Y3}) \cdot (1 + \nu) \cdot h_{Y3}}{B_Y \cdot t \cdot h_{Y2}}}$$

$$= \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

$$A_2 : \text{②の断面積} = t \cdot B_Y = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$k : \text{[1] に定める係数} = \boxed{} \text{ (-)}$$

$$\nu : \text{ポアソン比} = \boxed{} \text{ (-)}$$

へ、ブラケット K_B

ブラケットのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_B = \frac{1}{\frac{1}{K_{B1}} + \frac{1}{K_{B2}}}$$

ここで、

①及び②：図 1-16 に示すブラケットのばね定数算定のため、スタビライザ中央で対称境界とした計算モデル分割による。

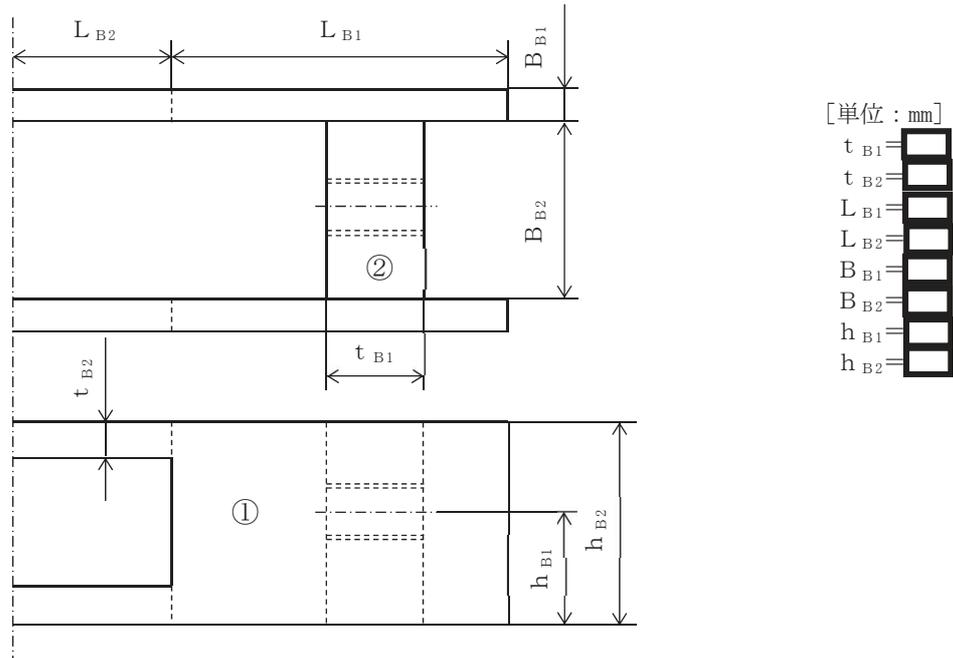


図 1-16 ブラケットのばね定数算定のための計算モデル分割

K_{B1} : ①のばね定数

$$= \frac{1}{\frac{h_{B1}^2}{6 \cdot E \cdot I} \{2 \cdot h_{B1} - \varepsilon \cdot (3 \cdot h_{B3} - h_{B1})\} + \frac{2 \cdot (1 + \nu) \cdot k \cdot h_{B1}}{A_1 \cdot E} \cdot (1 - \varepsilon)}$$

I : 断面二次モーメント = (mm⁴)

k : 係数 = (—)

E : 縦弾性係数 = (kg/mm²) (= (t/m²))

ν : ポアソン比 = (—)

なお、以下の各記号は図 1-17 に示す①のばね定数計算モデルによる。

ε : Q点における荷重 W_Q とP点における荷重 W_P の比

$$\frac{W_Q}{W_P} = \frac{\frac{h_{B1}^2}{6 \cdot I} \cdot (3 \cdot h_{B3} - h_{B1}) + \frac{2 \cdot (1 + \nu) \cdot k \cdot h_{B1}}{A_1}}{\frac{h_{B3}^3}{3 \cdot I} + \frac{2 \cdot (1 + \nu) \cdot k \cdot h_{B3}}{A_1} + \frac{L_{B2}}{A_2}} = \boxed{} (-)$$

A_1 : ①の断面積 = $2 \cdot B_{B1} \cdot L_{B1} = \boxed{}$ (mm²)

A_2 : ②の断面積 = $2 \cdot B_{B1} \cdot t_{B2} = \boxed{}$ (mm²)

h_{B3} : 支持端からQ点までの距離 = $\boxed{}$ (mm)

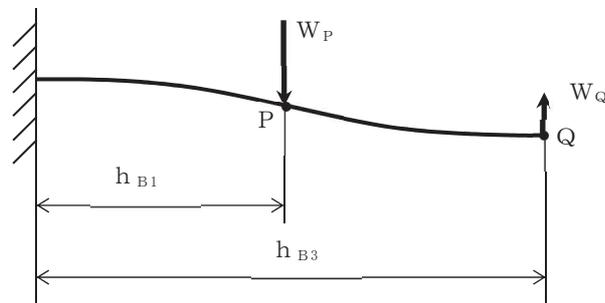


図 1-17 ①のばね定数計算モデル

$$K_{B2} : \text{②のばね定数} = \frac{E \cdot t_{B1} \cdot h_{B2}}{\frac{B_{B2}^3}{16 \cdot t_{B1}^2} + \frac{(1 + \nu) \cdot B_{B2}}{2}}$$

なお、図 1-18 に②のばね定数計算モデルを示す。

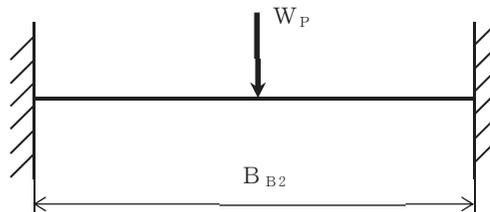
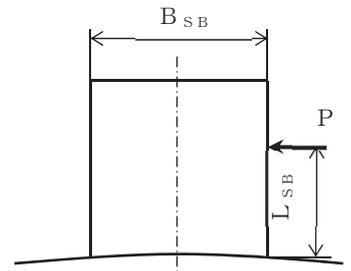


図 1-18 ②のばね定数計算モデル

ト. スタビライザブラケット K_{SB}

スタビライザブラケットのばね定数は、以下の式^[1]に基づき算定する。

$$K_{SB} = \frac{A \cdot E}{2 \cdot L_{SB} \cdot \left\{ 2 \cdot \left(\frac{L_{SB}}{B_{SB}} \right)^2 + k \cdot (1 + \nu) \right\}}$$



ここで、

A : 断面積 = $t_{SB} \cdot B_{SB} =$ (mm²)

k : 係数 = (-)

E : 縦弾性係数 = (kg/mm²) (= (t/m²))

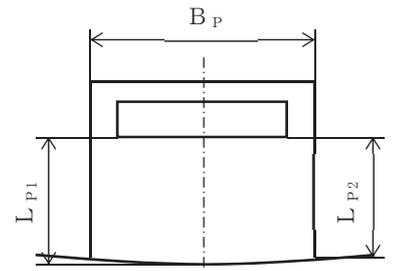
ν : ポアソン比 = (-)

[単位: mm]
 $L_{SB} =$
 $t_{SB} =$
 $B_{SB} =$

チ. ソールプレート K_P

ソールプレート^[1]のばね定数は、以下の式^[1]に基づき算定する。

$$K_P = \frac{A_P \cdot E}{k \cdot 2 \cdot (1 + \nu) \cdot L_P}$$



ここで、

A_P : 断面積 = $B_P \cdot t_P =$ (mm²)

L_P : 原子炉しゃへい壁からの距離
 = $(L_{P1} + L_{P2}) / 2 =$ (mm)

k : 係数 = (-)

E : 縦弾性係数 = (kg/mm²) (= (t/m²))

ν : ポアソン比 = (-)

[単位: mm]
 $t_P =$
 $L_{P1} =$
 $L_{P2} =$
 $B_P =$

c. RPV スタビライザのばね定数算定結果

以上より算定した構成部材，RPV スタビライザ 1 基及び全体のばね定数の算定結果を表 1-2 に示す。

表 1-2 RPV スタビライザのばね定数

	記号	ばね定数
皿ばねのばね定数	K_S	
座金のばね定数	K_W	
スリーブのばね定数	K_{SL}	
ロッドのばね定数	K_R	
ヨークのばね定数	K_Y	
スタビライザブラケットのばね定数	K_{SB}	
ブラケットのばね定数	K_B	
ソールプレートのばね定数	K_P	
RPV スタビライザ 1 基分のばね定数	K	
RPV スタビライザ全体のばね定数	K_3	

(4) 燃料交換ベローズ：K₄

a. 燃料交換ベローズの構造

燃料交換ベローズは、燃料取替時にウェルプラットフォーム上部へ水張りをを行う際に、原子炉圧力容器と原子炉格納容器の間を接続するためのステンレス製の構造物であり、運転時の原子炉圧力容器と原子炉格納容器との熱移動量を吸収できるように蛇腹構造としている。燃料交換ベローズの構造概要を図 1-19 に示す。

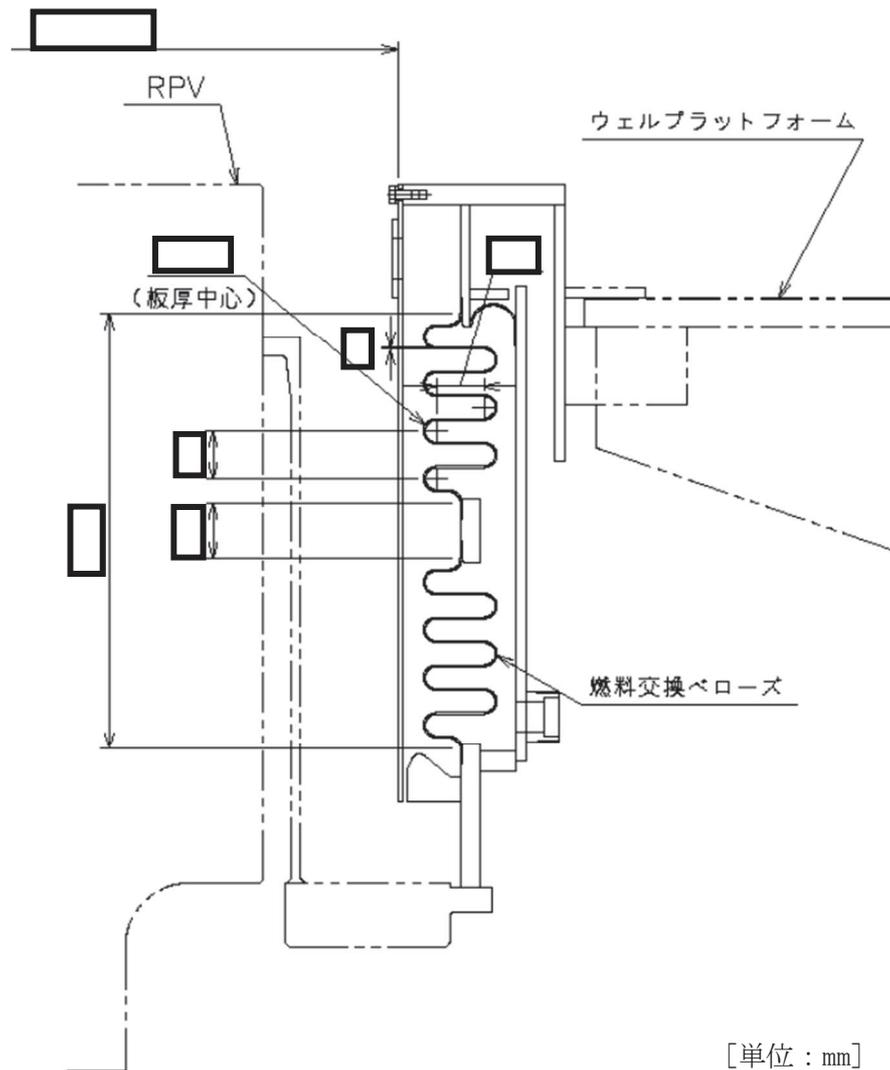


図 1-19 燃料交換ベローズの構造概要

b. 燃料交換ベローズのばね定数算定方法

燃料交換ベローズのばね定数 K_4 は、文献から導出される計算式の組合せで算定する。

(a) 1山当たりの鉛直方向ばね定数^[3]： K_V

$$K_V = \frac{E \cdot \pi \cdot D_m \cdot t^3}{24 \cdot \left\{ \frac{a^3}{12} + \frac{\pi}{4} \cdot a^2 \cdot r + 2 \cdot a \cdot r^2 + \frac{\pi}{2} \cdot r^3 \right\}}$$

(b) 水平方向変位 1mm (単位長さ) に対する鉛直方向変位^[4]： δ_y

$$\delta_y = \frac{3 \cdot D_m}{N \cdot \left\{ L + 1 \cdot \left(\frac{1}{L} + 1 \right) \right\}}$$

(c) 径方向ばね定数^[5]： K_4

$$K_4 = \frac{K_V \cdot D_m \cdot \delta_y}{2 \cdot L}$$

ここで、

- E : 縦弾性係数 = (kg/mm²) (= (t/m²))
- D_m : 平均半径 = (mm)
- L : 長さ = (mm)
- t : 板厚 = (mm)
- a : 円板部の厚さ = (mm)
- r : 山・谷の半径 = (mm)
- l : 中間長さ = (mm)
- N : 山の個数 = (—)

c. 燃料交換ベローズのばね定数算定結果

燃料交換ベローズのばね定数の算定結果を表 1-3 に示す。

表 1-3 燃料交換ベローズのばね定数

部位	記号	ばね定数
燃料交換ベローズ	K_4	<input type="text"/>

(5) 所員用エアロック：K₅

a. 所員用エアロックの構造

所員用エアロックは、ドライウェル球形部に設置される円筒形の構造物である。
所員用エアロックの構造概要を図 1-20 に示す。

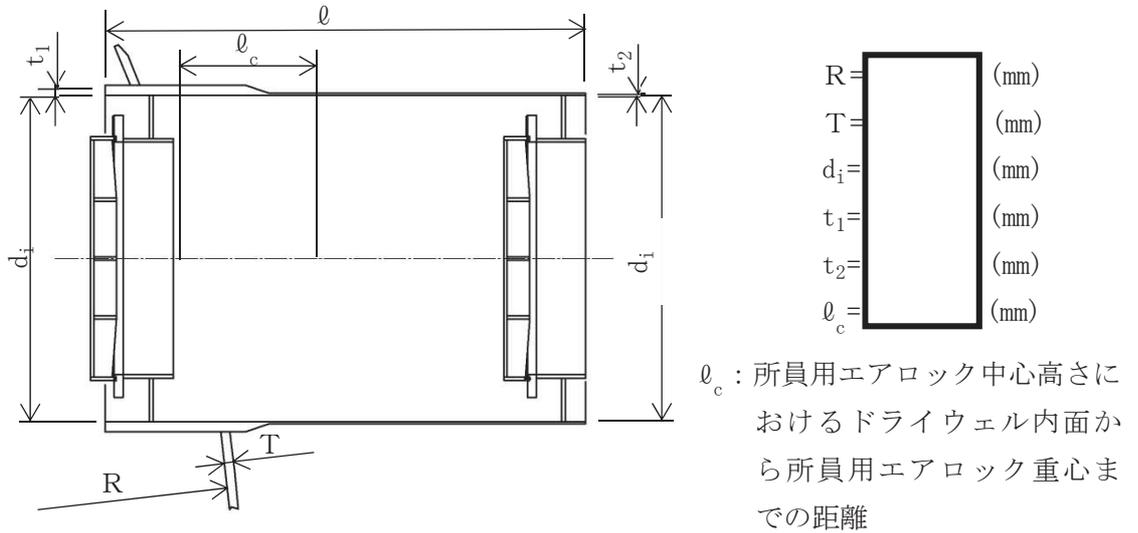


図 1-20 所員用エアロックの構造概要

b. 所員用エアロックのばね定数算定方法

(a) ばね定数算定方法

所員用エアロックのばね定数K₅は、所員用エアロック取付部のばね定数K_Sと、所員用エアロック自体の変位に伴うばね定数K_Lを用い、以下の式により求められる。

$$K_5 = \frac{1}{\frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_L}}$$

所員用エアロック軸方向 (NS 方向) のばね定数K ₅	所員用エアロック軸直角方向 (EW 方向) のばね定数K ₅
$K_5 = \frac{1}{\frac{1}{K_{S1}} + \frac{1}{K_{L1}}}$	$K_5 = \frac{1}{\frac{1}{K_{S2}} + \frac{1}{K_{L2}}}$
$=$	$=$
$=$ (kg/mm = t/m)	$=$ (kg/mm = t/m)

(b) 所員用エアロック取付部のドライウェル変位に伴うばね定数 K_s

所員用エアロック取付部のドライウェル変位に伴うばね定数は、文献 [6] により単位荷重による変位量を算出し求める。

軸方向のばね定数 K_{s1}	軸直角方向のばね定数 K_{s2}
$K_{s1} = \left(\frac{\delta_1}{P} \right)^{-1}$ $= \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$	$K_{s2} = \left(\frac{\delta_2}{M} \right)^{-1} \cdot \frac{(d_i/2+t_1)^2}{\rho_c}$ $= \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$

ここで、

P : 軸力 (kg)

M : モーメント (kg・mm)

E : 縦弾性係数 $\boxed{}$ (kg/mm²) (= $\boxed{}$ t/m²)

δ_n : 変位 (n=1, 2) (mm)

(c) 所員用エアロック自体の変位に伴うばね定数 K_L

軸方向のばね定数 K_{L1}	軸直角方向のばね定数 K_{L2}
<p>断面積</p> $A = \pi \cdot \frac{(d_i + 2 \cdot t_2)^2 - d_i^2}{4}$ <p>所員用エアロック自体の変位に伴うばね定数</p> $K_{L1} = \frac{A \cdot E}{\ell_c}$ <p>= <input type="text"/></p> <p>= <input type="text"/> (kg/mm = t/m)</p>	<p>断面二次モーメント</p> $I = \pi \cdot \frac{(d_i + 2 \cdot t_2)^4 - d_i^4}{64}$ <p>所員用エアロック自体のたわみによるばね定数</p> $K_{L2} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{\ell_c^3}$ <p>= <input type="text"/></p> <p>= <input type="text"/> (kg/mm = t/m)</p>

ここで,

E : 縦弾性係数 (kg/mm²) (= t/m²)

(6) ベント管 : K₆

a. ベント管の構造

ベント管は、ドライウエル下鏡とサプレッションチェンバとの間に 8 個設置される円筒形の構造物である。ベント管の構造概要を図 1-21 に示す。

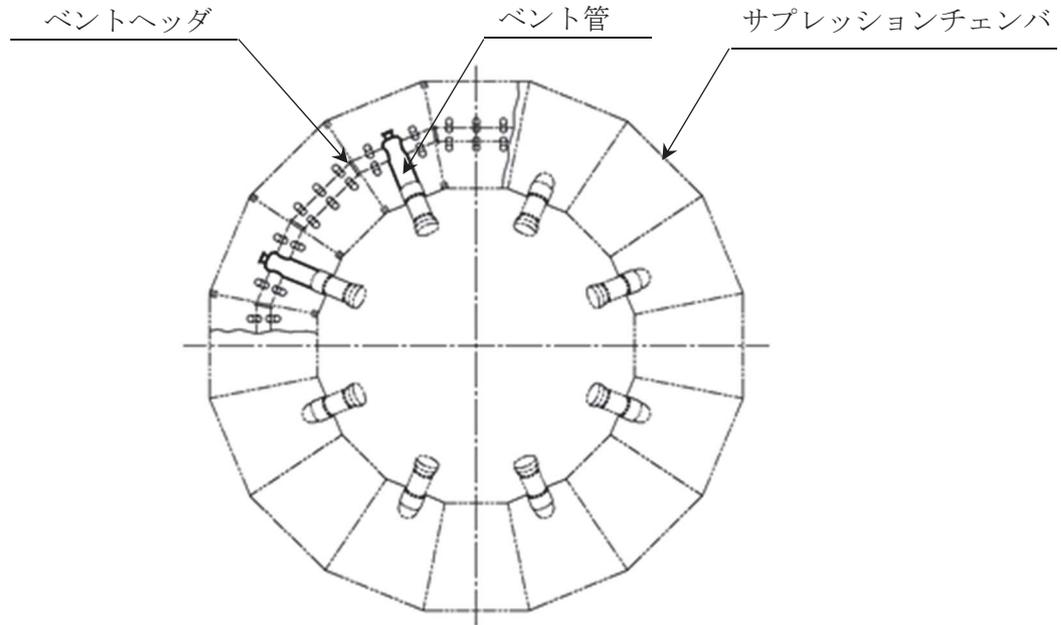


図 1-21 ベント管の構造概要

b. ベント管のばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

ベント管は、ドライウエル周方向に 45° ピッチで 8 個配置されていることより、任意の方向の荷重に対して有効なベント管個数は 4 個である。

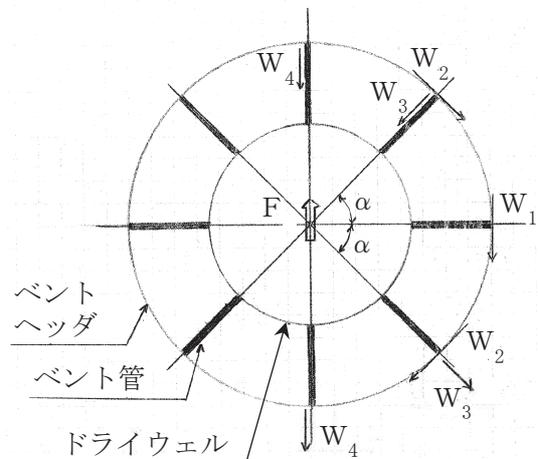
$$F = 2W_1 + 4(W_2 \cdot \cos \alpha + W_3 \cdot \sin \alpha) + 2W_4$$

$$W_2 = W_1 \cdot \cos \alpha$$

$$W_3 = W_4 \cdot \sin \alpha$$

$$F = 2W_1 \cdot (1 + 2 \cos^2 \alpha) + 2W_4 \cdot (1 + 2 \sin^2 \alpha)$$

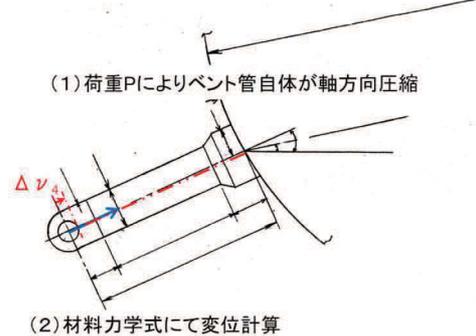
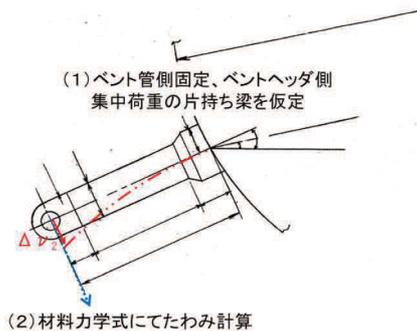
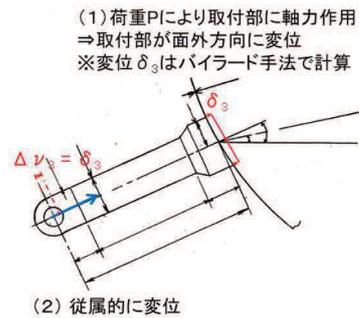
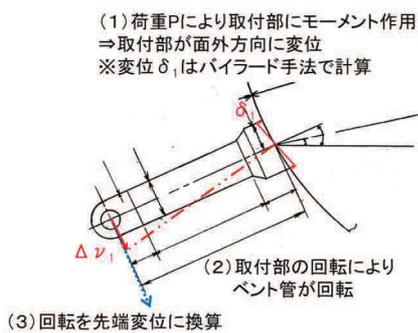
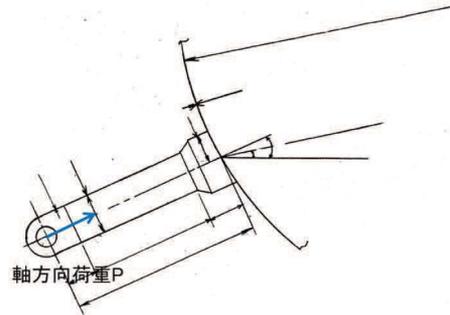
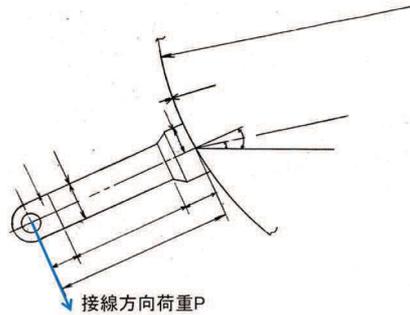
$$= 4(W_1 + W_4)$$



(b) 各方向のばね定数算定方法

接線方向，軸方向とも，荷重 $P = \square$ (kg) を仮定する。

接線方向のばね定数 K_L	軸方向のばね定数 K_A
$K_L = \frac{P}{\Delta v_1 + \Delta v_2}$ $= \square$ $= \square \text{ (kg/mm = t/m)}$	$K_A = \frac{P}{\Delta v_3 + \Delta v_4}$ $= \square$ $= \square \text{ (kg/mm = t/m)}$
<p>ここで，</p> <p>P : 接線方向に作用する荷重 (荷重作用点は ベントヘッダ中心)</p> <p>Δv_1 : ベント管取付部の 回転に伴う変位</p> <p>Δv_2 : ベント管自体の たわみによる変位</p>	<p>ここで，</p> <p>P : 軸方向に作用する荷重 (荷重作用点は ベントヘッダ中心)</p> <p>Δv_3 : ベント管取付部の軸方向変位</p> <p>Δv_4 : ベント管自体の軸方向変位</p>



(c) ベント管取付部のドライウェル変位及びベント管自体の変位

ベント管取付部のドライウェル変位及びベント管自体の変位は、文献 [6] により単位荷重による変位量を求める。

軸直角方向の変位 δ_1	軸方向の変位 δ_3
$\delta_1 = \boxed{}$ (mm)	$\delta_3 = \boxed{}$ (mm)

ここで、

E : 縦弾性係数 $\boxed{}$ t/m²)

δ_n : 変位 (n=1, 3) (mm)

接線方向の変位 $\Delta v_1, \Delta v_2$	軸方向の変位 $\Delta v_3, \Delta v_4$
ベント管取付部の回転角 $\Delta \theta_1 = \tan^{-1} \frac{ \delta_1 }{r_o + t_o/2}$	ベント管取付部の変位 $\Delta v_3 = \delta_3 = \boxed{} \text{ mm}$
ベント管取付部の回転に伴う荷重作用点の変位 $\Delta v_1 = 1 \cdot \Delta \theta_1$ $= \boxed{}$	ベント管各部の断面積 A_H, A_o, A_i
断面二次モーメント $I = \pi \cdot \frac{(d_i + 2 \cdot t)^4 - d_i^4}{64}$	ベント管自体の変位 $\Delta v_4 = \frac{P \cdot \ell_H}{A_H \cdot E} + \frac{P \cdot \ell_o}{A_o \cdot E} + \frac{P \cdot \ell_i}{A_i \cdot E}$ $= \boxed{}$
ベント管自体のたわみによる変位 $\Delta v_2 = \frac{P \cdot \ell^3}{3 \cdot E \cdot I}$ $= \boxed{}$ $= \boxed{} \text{ (mm)}$	$= \boxed{} \text{ (mm)}$

ここで、

A_H : 厚さ $t_H = \boxed{}$ におけるベント管の断面積 (mm²)

A_o : 厚さ $t_o = \boxed{}$ におけるベント管の断面積 (mm²)

A_i : 厚さ $t = \boxed{}$ におけるベント管の断面積 (mm²)

1.2.4.2 炉内構造物系

炉内構造物系に用いているばね定数の数値一覧を表 1-4 に、ばね定数の算定方法の詳細を以下に示す。なお、原子炉格納容器スタビライザ及び原子炉圧力容器スタビライザのばね定数は大型機器系と同じであるため、ばね定数の算定方法は 1.2.4.1 の大型機器系を参照する。

表 1-4 炉内構造物系のばね定数

No.	名称	ばね定数		
		NS 方向	EW 方向	単位
K ₁	原子炉格納容器スタビライザ			(t/m)
K ₂	原子炉圧力容器スタビライザ			(t/m)
K ₃	制御棒駆動機構ハウジング レストレントビーム			(t/m)
K ₄	シュラウドサポート			(t・m/rad)
K ₅	上部サポート			(t/m)
K ₆	下部スタビライザ			(t/m)
K ₇	炉心シュラウド支持ロッド			(t・m/rad)

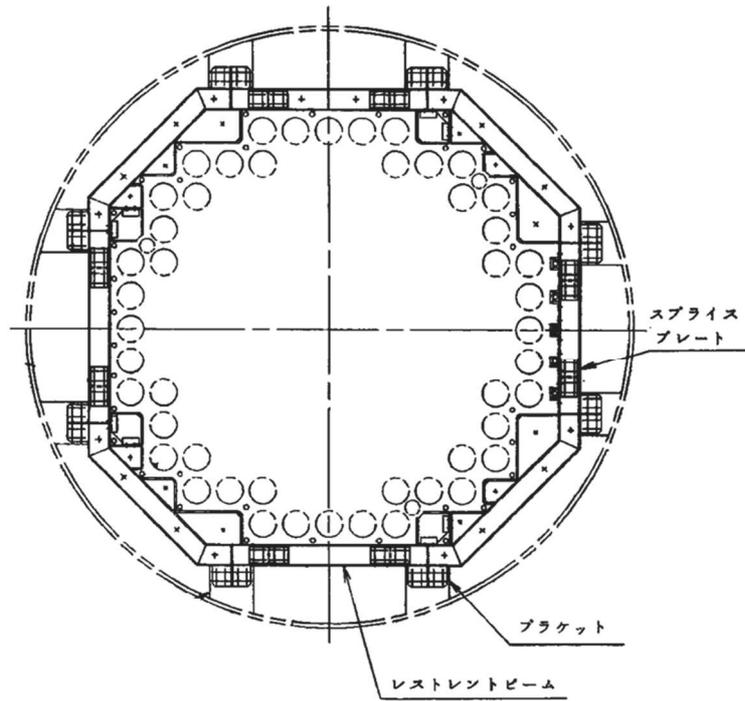
(1) 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム：K₃

a. 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームの構造

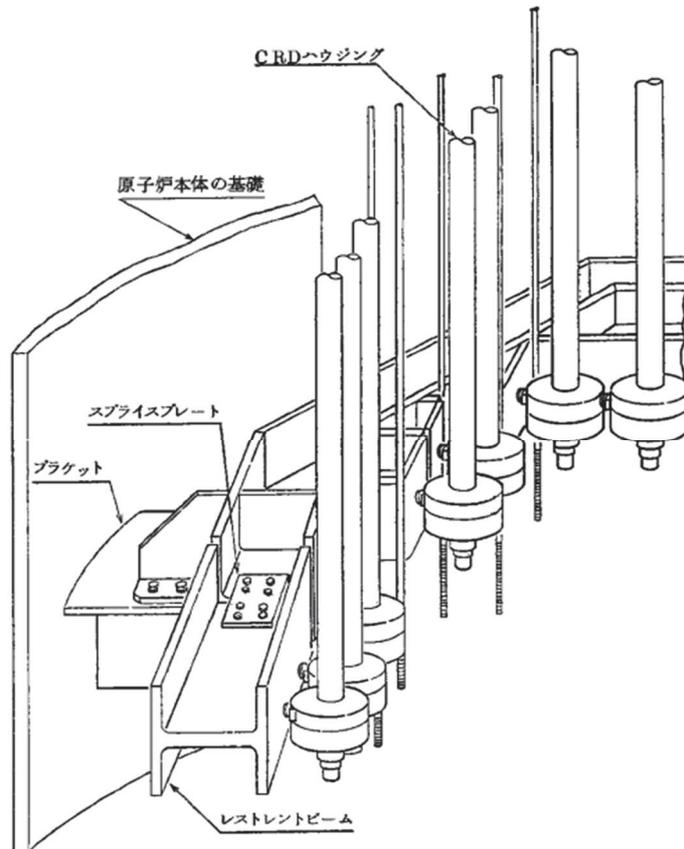
制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム（以下「CRDH レストレントビーム」という。）は、原子炉本体の基礎に対し、ブラケットを介して設置され、ブラケットは原子炉本体の基礎に溶接接続された構造物である。構成部材としてはCRDH レストレントビーム、ブラケット、スプライスプレートからなる。

CRDH レストレントビームは、制御棒駆動機構ハウジングの水平方向地震荷重を受けるが、CRDH レストレントビームは制御棒駆動機構ハウジングを接触のみで支持しているため、圧縮方向の荷重は伝達するが引張方向の荷重は伝達しない構造である。

CRDH レストレントビームの構造概要を図 1-22 に示す。また、各部材の断面寸法形状を図 1-23 に示す。



(a) 構造概要



(b) 概略形状

図 1-22 CRDH レストレントビームの構造概要

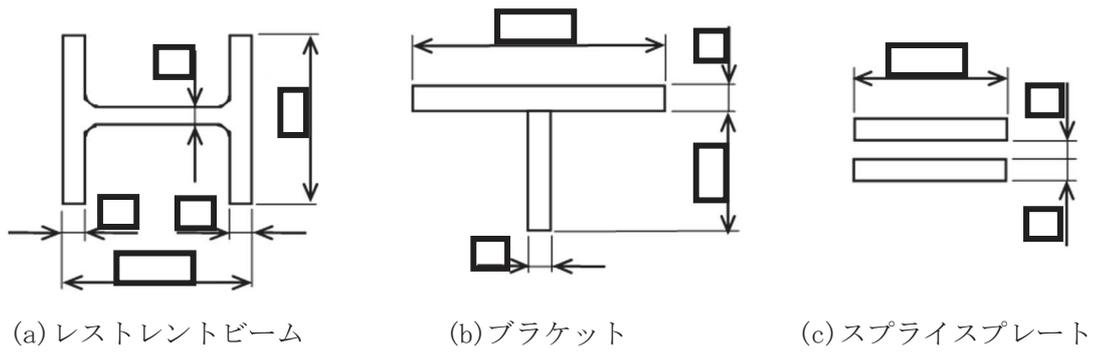


図 1-23 各部材の断面寸法

b. CRDH レストレントビームのばね定数算定方法

CRDH レストレントビームのばね定数 K_3 は、FEM 解析により算定する。具体的には、制御棒駆動機構ハウジングの列ごとに設定した水平荷重を静的に付加した際の平均変位量を全水平荷重で除することにより算定する。

c. 計算方法

計算機コード「SAP-V」により、各部材に断面積、断面二次モーメント、重量等を与えるビーム要素モデルで解析する。

d. 計算条件

(a) 解析モデル

CRDH レストレントビームの解析モデルを図 1-24 に示す。

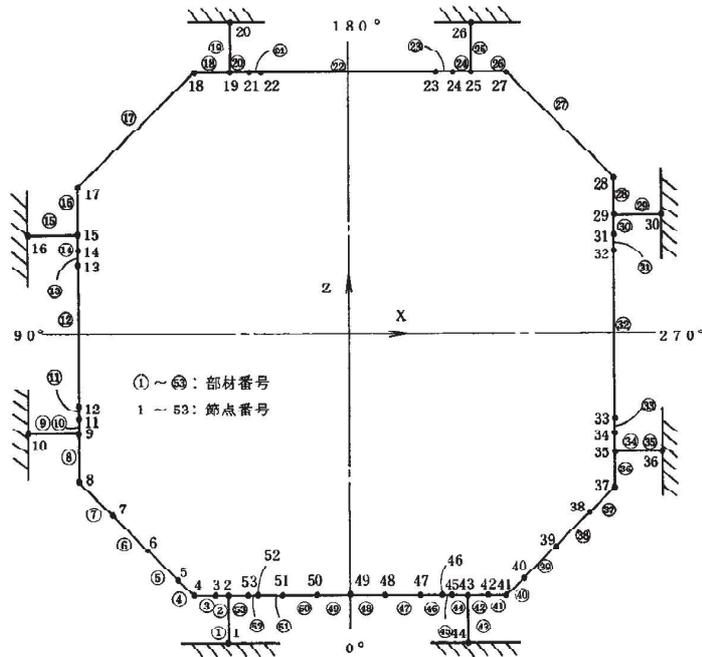


図 1-24 CRDH レストレントビーム解析モデル

(b) 各構成部材の材料物性

解析に用いる材料物性を以下に示す。

縦弾性係数 $E = \square$ (t/m²), ポアソン比 $\nu = \square$

(c) 荷重条件

CRDH レストレントビームに作用する全ての水平荷重 W を, 制御棒駆動機構ハウジングの列ごとの本数に応じて分配した荷重 W_i を付加する。荷重の分配は以下に示すとおりである。

CRD13 本 : $W_1 = \square$ (kg)

CRD11 本 : $W_2 = \square$ (kg)

CRD 9 本 : $W_3 = \square$ (kg)

CRD 5 本 : $W_4 = \square$ (kg)

(d) 境界条件

ブラケット端部は原子炉本体の基礎に溶接されていることから境界条件は固定とする。

e. CRDH レストレントビームのばね定数算定結果

ばね定数は次式にて算定し, その算定結果を表 1-5 に示す。

$$K_3 = \frac{W}{\delta}$$

表 1-5 CRDH レストレントビームのばね定数

全水平荷重 W (kg)	平均変位量 δ (mm)	ばね定数 K_3 (t/m)
\square	\square	\square

(2) シュラウドサポート (回転ばね) : K₄

a. シュラウドサポートの構造

シュラウドサポートは、シュラウドサポートシリンダ、シュラウドサポートプレート及びシュラウドサポートレグからなる溶接構造物である。シュラウドサポートレグ下端及びシュラウドサポートプレート外周が原子炉圧力容器に溶接されており、シュラウドサポートシリンダを介して炉心シュラウドを支持する。

シュラウドサポートの構造概要を図 1-25 に示す。

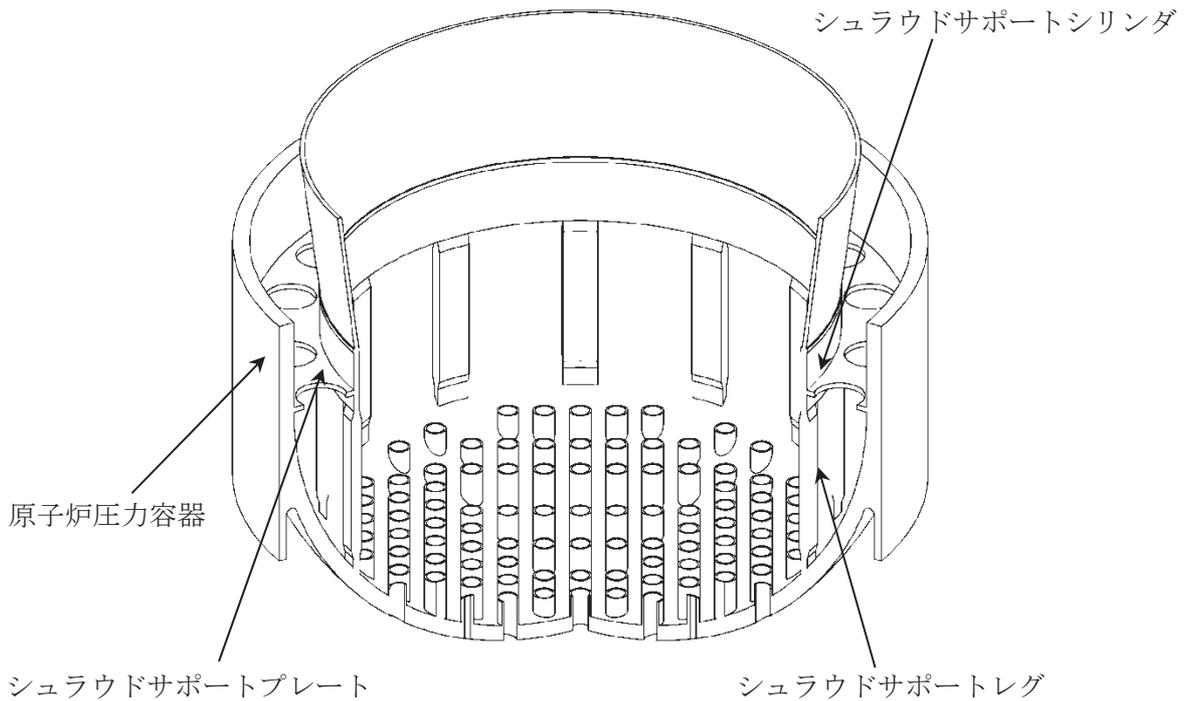


図 1-25 シュラウドサポートの構造概要

b. シュラウドサポートのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

シュラウドサポート全体でのばね定数 K_4 は、シュラウドサポートシリンダ、シュラウドサポートレグ及びシュラウドサポートプレートの回転ばね定数を算出し、以下のとおり組み合わせて算定する。図 1-26 にばね全体の模式図を示す。

$$K_4 = \frac{1}{\frac{1}{K_{MA1}} + \frac{1}{K_{MA2}}} + K_{MB}$$

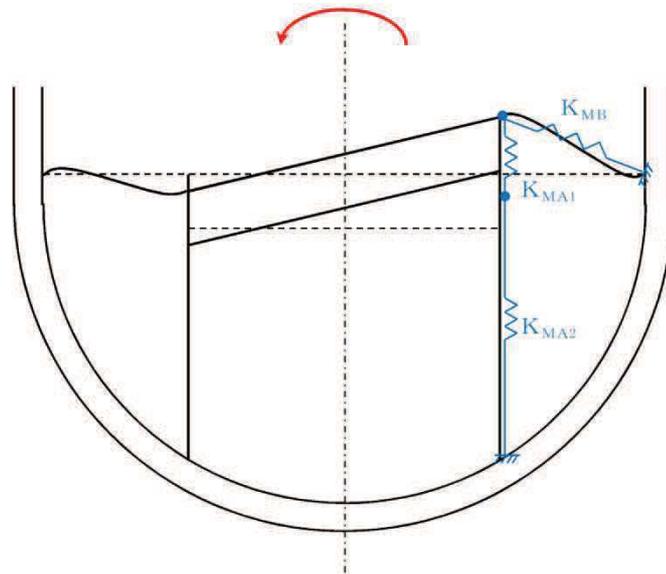


図 1-26 全体ばねの模式図

ここで、

K_{MA1} : シュラウドサポートシリンダのばね定数

K_{MA2} : シュラウドサポートレグのばね定数

K_{MB} : シュラウドサポートプレートのばね定数

(b) 構成部材のばね定数算定方法

イ. シュラウドサポートシリンダ K_{MA1}

シュラウドサポートシリンダのばね定数 K_{MA1} は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{MA1} = \frac{R_m^2 \cdot A_1 \cdot E}{2L_1}$$

ロ. シュラウドサポートレグ K_{MA2}

シュラウドサポートレグのばね定数 K_{MA2} は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{MA2} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_m^2 \cdot A_2 \cdot E}{2L_2}} + \frac{1}{\frac{R_m^2 \cdot A_3 \cdot E}{2L_3}} + \frac{1}{\frac{R_m^2 \cdot A_4 \cdot E}{2L_4}} + \frac{1}{\frac{R_m^2 \cdot A_5 \cdot E}{2L_5}}}$$

ハ. シュラウドサポートプレート K_{MB}

シュラウドサポートプレートのばね定数 K_{MB} は、以下の式^[7]に基づき算定する。

$$K_{MB} = \alpha_2 \cdot E \cdot t_5^3$$

ここで、以下の各記号は図 1-27 に示す原子炉圧力容器断面図による。

$$R_m : = \frac{1}{2}(D_i - t_1) = \boxed{} \text{ (m)}$$

A_1 : シュラウドサポートシリンダ断面積

$$A_1 = \pi \cdot t_1 \cdot (D_i - t_1) = \boxed{} \text{ (m}^2\text{)}$$

$A_2 \sim A_5$: シュラウドサポートレグ断面積

$$A_2 = N \cdot B \cdot (t_2 + t_3) / 2 = \boxed{} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_3 = N \cdot B \cdot t_3 = \boxed{} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_4 = N \cdot B \cdot (t_3 + t_4) / 2 = \boxed{} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_5 = N \cdot B \cdot t_4 = \boxed{} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$L_1 : \text{シュラウドサポートシリンダ長さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$L_2 : \text{シュラウドサポートレグ長さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$L_3 : \text{シュラウドサポートレグ長さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$L_4 : \text{シュラウドサポートレグ長さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$L_5 : \text{シュラウドサポートレグ長さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$t_1 : \text{シュラウドサポートシリンダ厚さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$t_2 : \text{シュラウドサポートレグ厚さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$t_3 : \text{シュラウドサポートレグ厚さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$t_4 : \text{シュラウドサポートレグ厚さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$t_5 : \text{シュラウドサポートプレート厚さ} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$D_i : \text{シュラウドサポートシリンダ外径} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$B : \text{シュラウドサポートレグ幅} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$N : \text{シュラウドサポートレグ個数} = \boxed{} \text{ (-)}$$

$$E : \text{縦弾性係数} = \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)}$$

$$\alpha_2 : \text{[7] に定める値} = \boxed{} \text{ (-)}$$

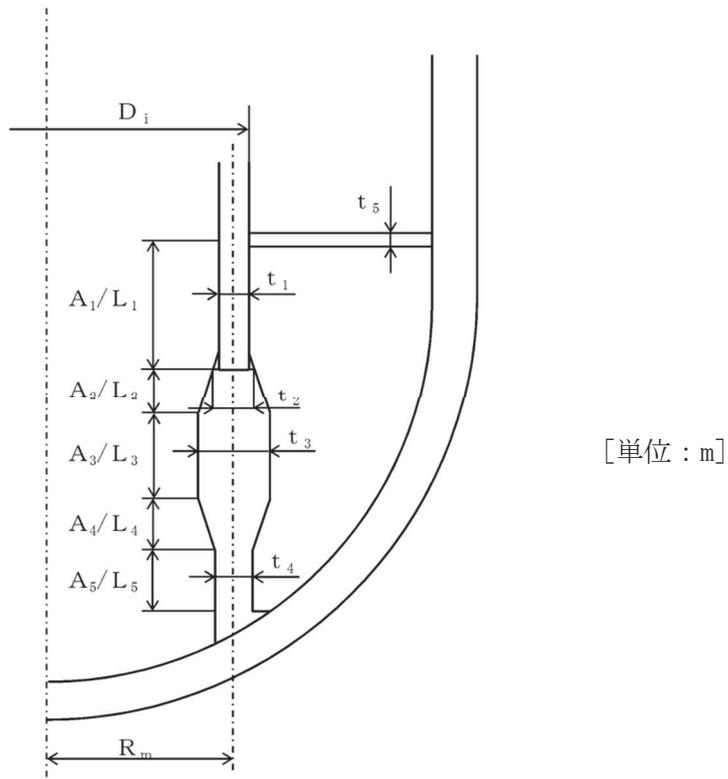


図 1-27 原子炉圧力容器断面図

c. シュラウドサポートのばね定数算定結果

以上より算定した構成部材及び全体のばね定数の算定結果を表 1-6 に示す。

表 1-6 シュラウドサポートのばね定数

	記号	ばね定数
シュラウドサポートシリンダのばね定数	K_{MA1}	
シュラウドサポートレグのばね定数	K_{MA2}	
シュラウドサポートプレートのばね定数	K_{MB}	
シュラウドサポートのばね定数	K_4	

(3) 炉心シュラウド支持ロッド上部サポートの水平ばね：K₅

炉心シュラウド支持ロッドは炉心シュラウド及びシュラウドサポートに対して設置され、炉心シュラウドの周方向溶接線が全破断した際の炉心シュラウドの炉心支持機能を保持するために設置される構造物である。構成部材としては、主に、上部サポート、上部タイロッド、下部タイロッドからなる。

鉛直方向において、炉心シュラウド支持ロッドは、炉心シュラウドとシュラウドサポートプレートを締め付けるため、軸方向の引張荷重を受ける構造である。また、水平方向において、炉心シュラウド支持ロッドのうち上部サポートは、炉心シュラウド上部胴と原子炉圧力容器の地震による水平荷重圧縮を伝達する構造であり、炉心シュラウド支持ロッドのうち下部スタビライザは、炉心シュラウド中間胴と原子炉圧力容器の地震による水平荷重圧縮を伝達する構造である。

炉心シュラウド支持ロッドの構造概要を図 1-28 に示す。

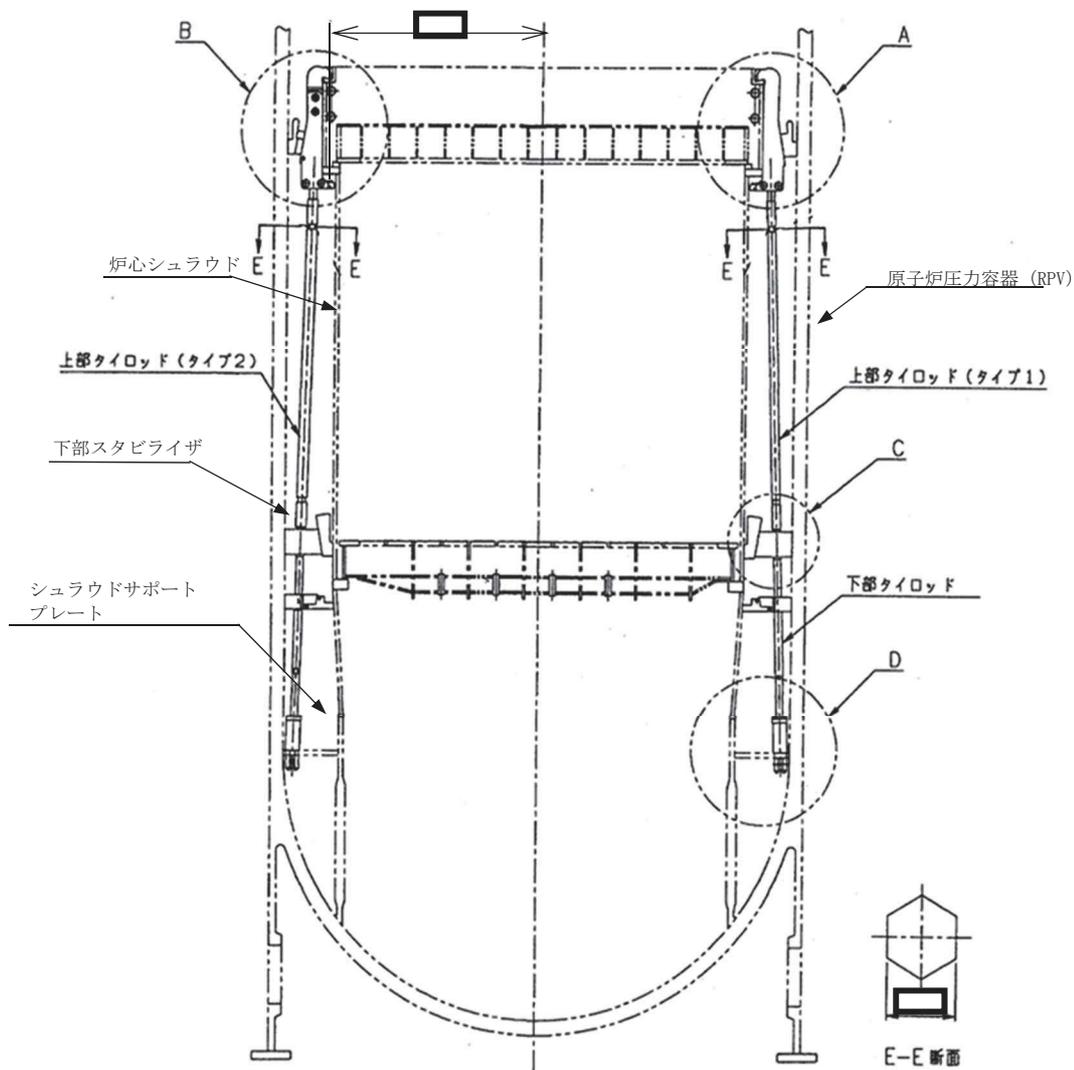


図 1-28(1) 炉心シュラウド支持ロッドの概要構造

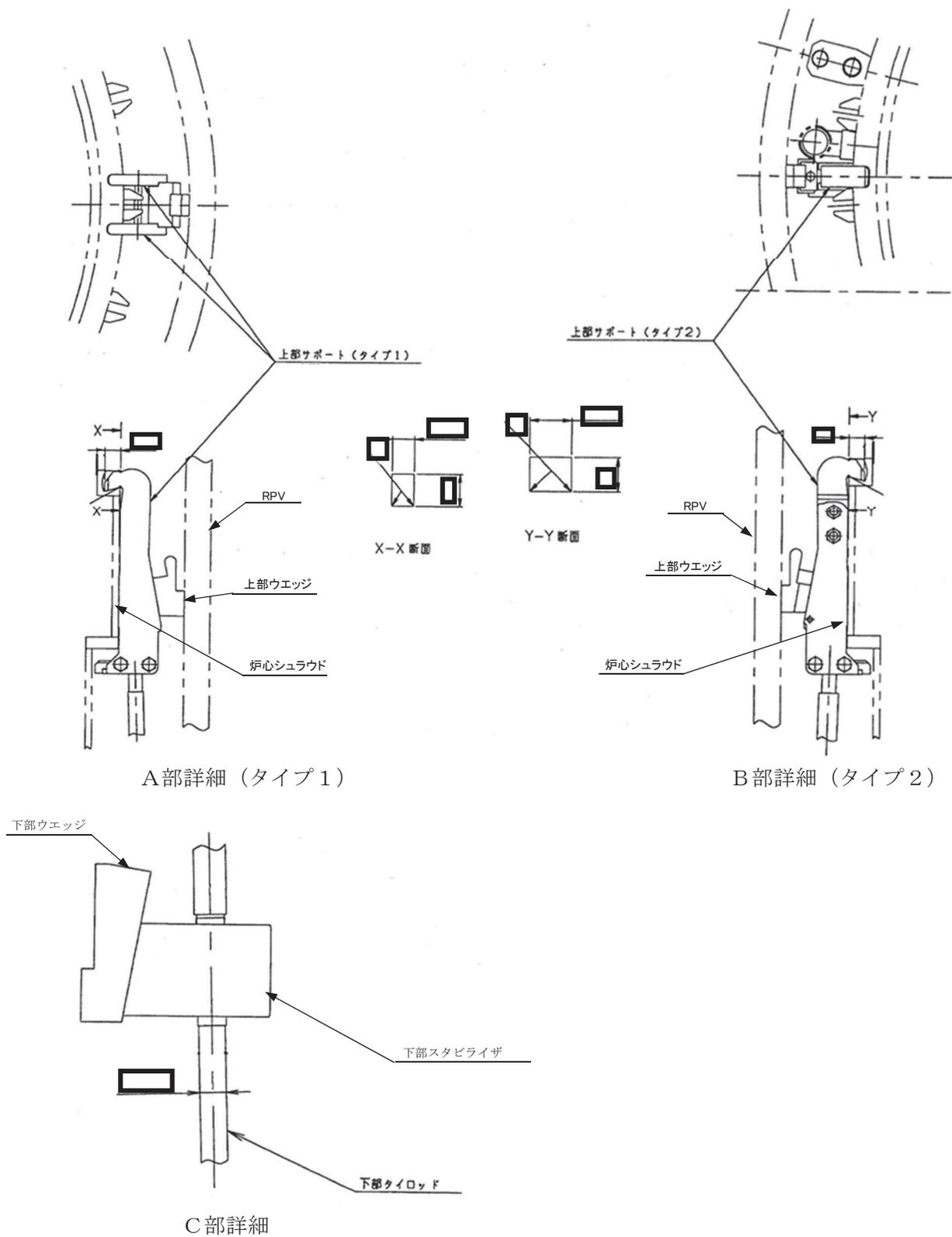


図 1-28(2) 炉心シュラウド支持ロッドの概要構造

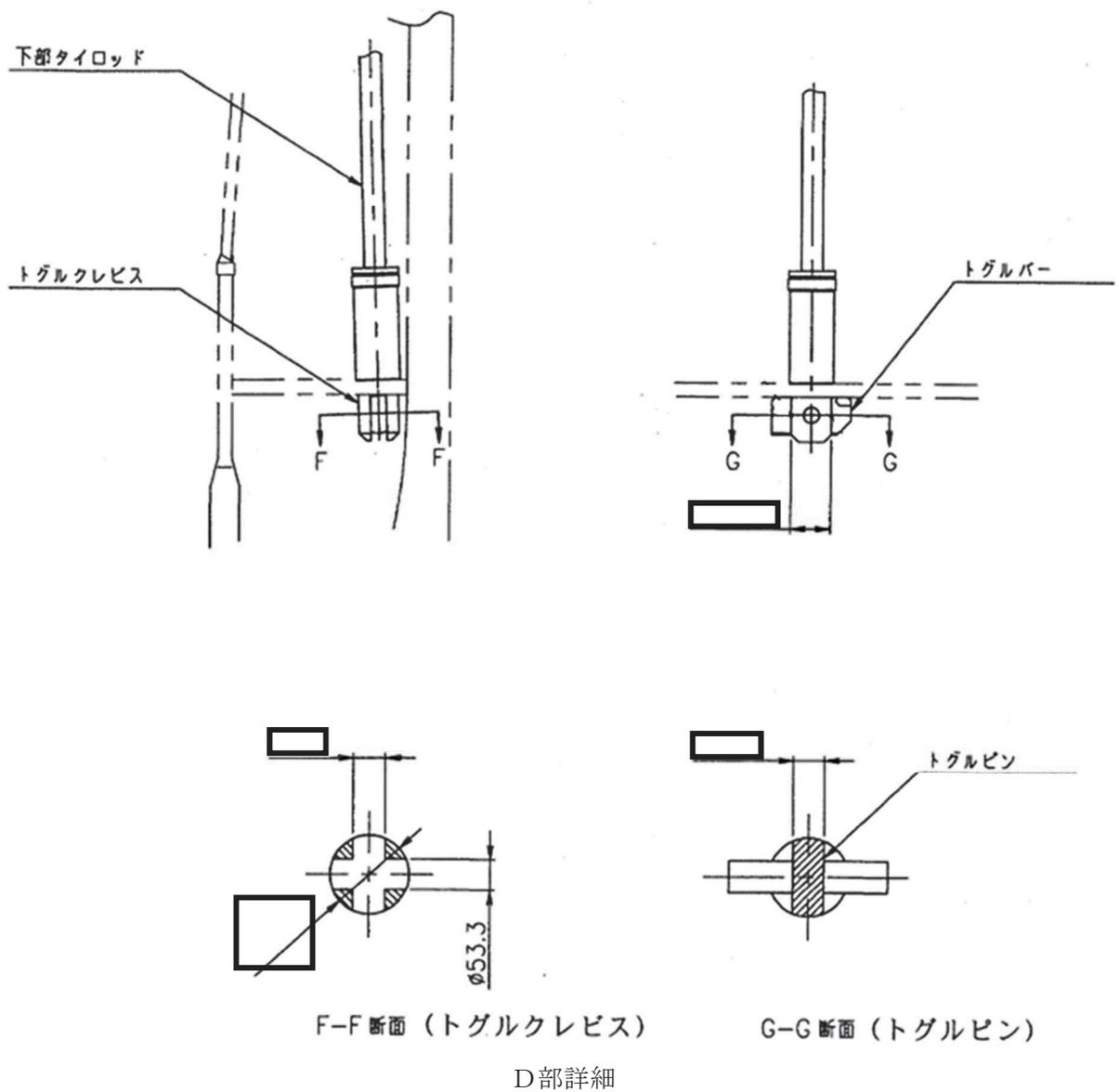


図 1-28(3) 炉心シュラウド支持ロッドの概要構造

a. 炉心シュラウド支持ロッド上部サポートの構造

図 1-28(2)に示すように、炉心シュラウド支持ロッドのうち上部サポートは炉心シュラウド及びRPV に対して設置され、炉心シュラウド支持ロッドの上下方向拘束の上端の固定機能及び炉心シュラウドと RPV 間の水平方向の位置決め機能を有する。構成部材としては、上部サポート、上部ウエッジからなる。炉心シュラウド支持ロッドの上部サポートにはタイプ 1 とタイプ 2 の 2 種類が存在する。

b. 炉心シュラウド支持ロッド上部サポートのばね定数算出方法

(a) 全体でのばね定数算出方法

上部サポート部の水平方向ばね定数は、上部ウェッジと上部サポートのばね定数、及び上部サポートを介して荷重が伝達されるRPVの局所変形によるばね定数、さらに上部サポートと接触する炉心シュラウド上部胴の局所変形によるばね定数を合成して算出したものである。

図1-29に上部サポート部のばね定数算定で考慮した評価モデルを示す。

$$K_5 = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{rpvup}} + \frac{1}{K_{usshr}} + \frac{1}{K_{us}} + \frac{1}{K_{uswdg}} \right)}$$

ここで、

K_{rpvup} : 上部サポート起因のRPVの局所変形によるばね定数 (t/m)

K_{usshr} : 上部サポート起因のシュラウドの局所変形ばね定数 (t/m)

K_{us} : 上部サポートのばね定数 (t/m)

K_{uswdg} : 上部ウェッジのばね定数 (t/m)

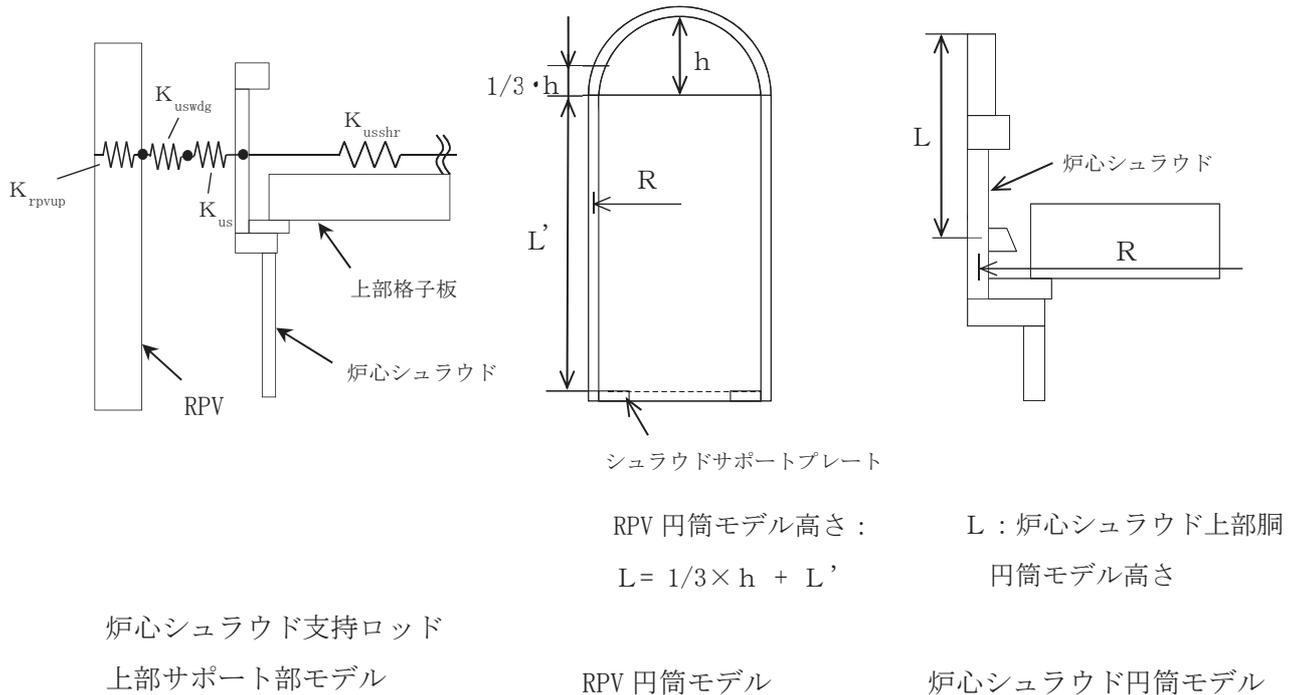


図1-29 炉心シュラウド支持ロッド上部サポートの解析モデル図

(b) 構成部材のばね定数算出方法

イ. 上部サポート起因のRPVの局所変形によるばね定数： K_{rpvup}

上部サポート位置においてRPVには上部ウエッジの荷重伝達面を介して荷重が付与され、これによりRPVは局所的なひずみを生じる。ここでは、図1-30のような円筒の端からbの位置にある $C_1 \times C_2$ の面にpの分布荷重が作用した場合の荷重点での変位量wを基に、ばね定数を以下の式から求める。

$$K_{rpvup} = (1 + (1 - 2C_3^2)) K_1 / 2$$

$$K_1 = F / w$$

$$F = 2c_1 \times 2c_2 \times P$$

$$w = \frac{1^4}{2D} \sum \sum \Phi_{mn} Z_{mn}$$

ここで、

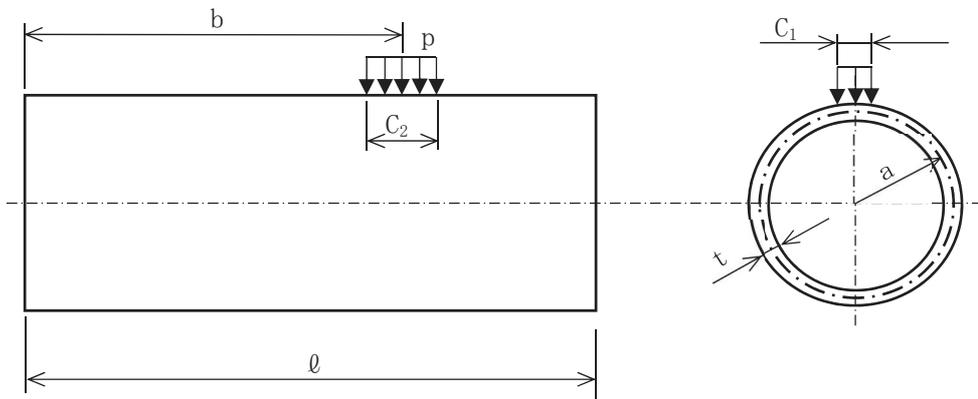
$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$\Phi_{mn} = \frac{2(m^2 \alpha^2 + n^2 \pi^2)^2}{(m^2 \alpha^2 + n^2 \pi^2)^4 + 12(1-\nu^2)n^4 \pi^4 \alpha^4 \gamma^2 - m^2 \alpha^4 [2m^4 \alpha^4 + (6+\nu-\nu^2)n^4 \pi^4 + (7+\nu)m^2 \alpha^2 n^2 \pi^2]}$$

$$Z_{mn} = \begin{cases} \frac{4\beta_1 p}{\pi^2} \frac{\sin \frac{n\pi c_2}{l}}{n} \sin \frac{n\pi b}{l} & \begin{cases} m=0 \\ n=1, 2, 3, \dots \end{cases} \\ \frac{8}{\pi^2} \frac{p}{mn} \sin(n\beta_1) \sin \frac{n\pi c_2}{l} \sin \frac{n\pi b}{l} & \begin{cases} m=1, 2, 3, \dots \\ n=1, 2, 3, \dots \end{cases} \end{cases}$$

ただし、

$$\alpha = l/a, \quad \gamma = a/t, \quad \beta_1 = c_1/a, \quad \beta_2 = c_2/a, \quad \lambda = n\pi a/l, \quad C_3 = C_2/C_1$$



l : 円筒長さ a : 円筒半径 C_1 : 荷重面幅 b : 荷重中心までの距離
 C_2 : 荷重面長さ t : 板厚 E : 縦弾性係数 w : 変位
 p : 分布荷重 (便宜的に1MPaと仮定) ν : ポアソン比 ()

図1-30 円筒の弾性解析モデル

各部の評価に用いた諸元及び算定したばね定数を表1-7に示す。

表 1-7 上部ウェッジ/RPV側評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ	
ウェッジ荷重伝達面 寸法	幅 $2 \cdot c_1$ (mm)	
	高さ $2 \cdot c_2$ (mm)	
	荷重点 b (mm)	
RPV 円筒モデル寸法	半径 a (mm)	
	長さ (高さ) ℓ (mm)	
	板厚 t (mm)	
	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	
ばね定数	K_{rpvup} (kg/mm = t/m)	

ロ. 上部サポート起因のシュラウドの局所変形ばね定数： K_{usshr}

炉心シュラウド支持ロッドの上部サポート位置において炉心シュラウドには2体から成る上部サポート胴部の荷重伝達面を介して荷重が付与され、これにより局所的なひずみが生じる。したがってイ項と同様に円筒の弾性解析モデルを適用し、ばね定数を算出する。

各部の評価に用いたモデル諸元及び算定したばね定数を表1-8に示す。

表 1-8 上部サポート/シュラウド側評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ	
上部サポート 荷重伝達面寸法	幅 $2 \cdot c_1$ (mm)	
	高さ $2 \cdot c_2$ (mm)	
	荷重点 b (mm)	
炉心シュラウド 円筒モデル寸法	半径 a (mm)	
	長さ (高さ) ℓ (mm)	
	板厚 t (mm)	
	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	
ばね定数	K_{usshr} (kg/mm = t/m)	

ハ. 上部サポートのばね定数： K_{us}

上部サポートの水平方向ばね定数は以下の式より算定する。

$$K_{us} = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

ここで、

- E : 縦弾性係数
- A : 断面積(= b h)
- L : 対象部位長さ
- b : 幅
- h : 高さ

各部の評価に用いたモデル諸元及び算定したばね定数を表1-9に示す。

表1-9 上部サポート評価モデル諸元及びばね定数

パラメータ		
幅	b (mm)	
高さ	h (mm)	
長さ	L (mm)	
縦弾性係数	E (kg/mm ²)	
ばね定数	K_{us} (kg/mm = t/m)	

ニ. 上部ウェッジのばね定数 : K_{uswdg}

上部サポートと同様にハ項の(1)式を用いて算定する。

各部の評価に用いたモデル諸元及び算定したばね定数を表1-10に示す。

表 1-10 上部ウェッジ評価モデル諸元及びばね定数

パラメータ	寸法
幅 b (mm)	
高さ h (mm)	
長さ L (mm)	
縦弾性係数 E (kg/mm ²)	
ばね定数 K_{uswdg}	
(kg/mm= t/m)	

以上より、上部サポート部の連成ばね定数は次のように求まる。

$$K_5 = \boxed{} \text{ (kg/mm=t/m)}$$

(4) 炉心シュラウド支持ロッド下部スタビライザの水平ばね：K₆

a. 炉心シュラウド支持ロッド下部スタビライザの構造

下部スタビライザ部は、RPVに接触し荷重伝達を担う下部スタビライザ、炉心シュラウドに接する下部ウエッジ、さらに炉心シュラウドと炉心支持板との間に設置される炉心支持板ウエッジから構成されている。

図 1-31 に下部スタビライザの構造を示す。

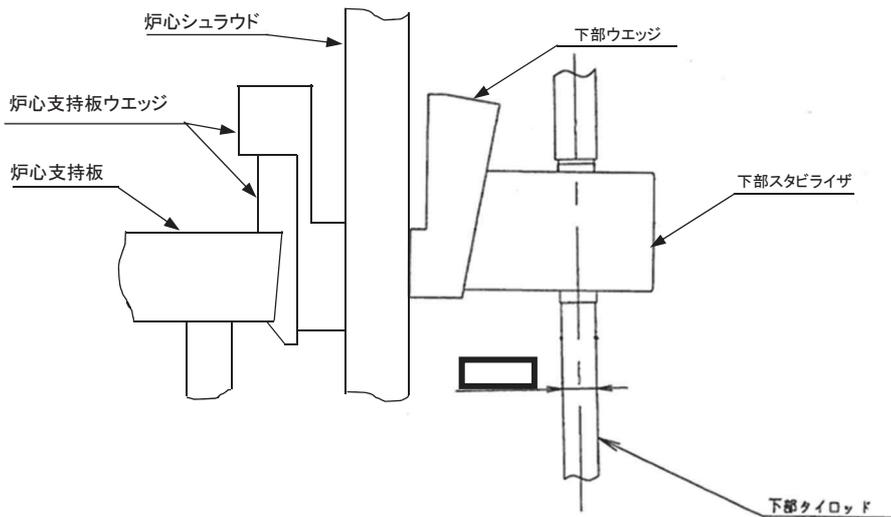


図1-31 炉心シュラウド支持ロッドのうち下部スタビライザの構造

b. 炉心シュラウド支持ロッド下部スタビライザのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

炉心シュラウド支持ロッド下部スタビライザのばね定数算出式を以下に、図 1-32 に下部スタビライザ部ばね定数算定モデルを示す。

$$K_6 = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{rpv1}} + \frac{1}{K_{cp}} + \frac{1}{K_{lswsc}} \right)}$$

$$K_{lswsc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{lsa}} + \frac{1}{K_{lsb}} + \frac{1}{K_{lsc}} + \frac{1}{K_{lsw}} + \frac{1}{K_{shr}} + \frac{1}{K_{cpw}} \right)}$$

ここで、

K_{rpv1} : RPV局所変形ばね定数 (kg/mm = t/m)

K_{cp} : 炉心支持板ばね定数 (kg/mm = t/m)

K_{lswsc} : 下部スタビライザ部連成ばね定数 (kg/mm = t/m)

K_{lsa} : 下部スタビライザ部領域A (RPV側部材)のばね定数 (kg/mm = t/m)

K_{lsb} : 下部スタビライザ部領域B (中間部材)のばね定数 (kg/mm = t/m)

- K_{1sc} : 下部スタビライザ部領域C (炉心シュラウド側部材)のばね定数 (kg/mm = t/m)
- K_{1sw} : 下部ウェッジ部のばね定数 (kg/mm = t/m)
- K_{1shr} : 炉心シュラウド部のばね定数 (kg/mm = t/m)
- K_{cpw} : 炉心支持板ウェッジのばね定数 (kg/mm = t/m)

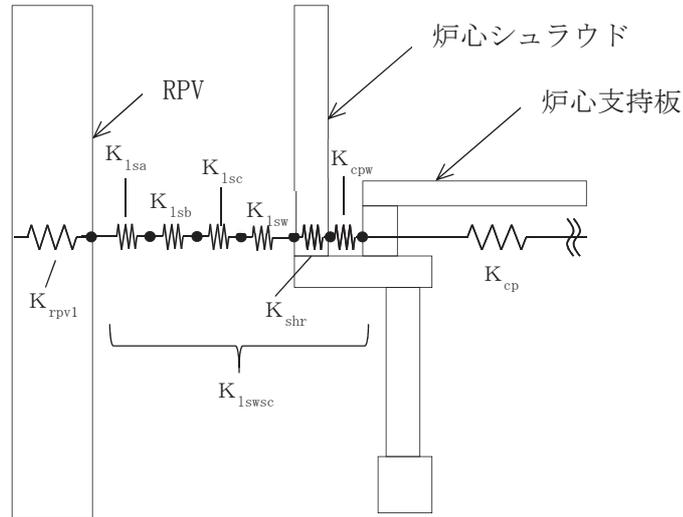


図 1-32 下部スタビライザ部ばね定数算定モデル

イ. RPV 局所変形ばね定数 : K_{rpv1}

下部スタビライザ位置においてRPVには下部スタビライザの荷重伝達面を介して荷重が付与され、これによりRPVは局所的なひずみが生じる。したがって、ここでは文献 [8] による円筒の弾性解析モデルを適用し、評価した。

各部の評価モデル諸元及びばね定数算定結果を表1-11に示す。

表 1-11 下部スタビライザ/RPV側評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ	寸法
下部スタビライザ 荷重伝達面寸法	幅 (mm)	
	高さ (mm)	
	荷重点 (mm)	
RPV 円筒モデル寸法	半径 (mm)	
	長さ (高さ) L (mm)	
	板厚 (mm)	
	縦弾性係数 (kg/mm ²)	
ばね定数	K_{rpv1} (kg/mm = t/m)	

ロ. 炉心支持板ばね定数： K_{cp}

炉心支持板には炉心支持板ウエッジを介して局所的に水平方向への荷重が負荷される。炉心支持板を多孔円板としてモデル化し、荷重作用方向の長さに関するばね定数 K_{cp} を求めると次式が得られる。評価モデルの概略図を図1-33に示す。

$$K_{cp} = \frac{2h E t}{\pi p}$$

ここで、

E：母材の縦弾性係数

t：炉心支持板の板厚

h：孔間隔

p：孔ピッチ

炉心支持板の評価寸法及びばね定数算定結果を表1-12に示す。

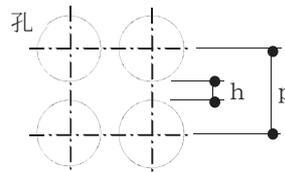


図 1-33 炉心支持板モデル図

表 1-12 炉心支持板評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ	寸法
炉心支持板	板厚 t (mm)	
	孔ピッチ p (mm)	
	孔間隔 (mm) h (mm)	
	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	
ばね定数	K_{cp} (kg/mm = t/m)	

ハ. 下部スタビライザ部連成ばね定数： K_{1swsc}

各部位のばね定数は(3)b.(b)ハ項の(1)式により算出する。

各部位の評価モデル諸元及びばね定数算定結果を表1-13にまとめて示す。

表 1-13 下部スタビライザ部の評価モデル諸元及びばね定数

部位		パラメータ				ばね定数 (kg/mm = t/m)
		高さ h (mm)	幅 b (mm)	長さ (厚さ) L (mm)	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	
下部スタビライザ	領域A					K_{1sa}
	領域B					K_{1sb}
	領域C					K_{1sc}
下部ウエッジ						K_{1sw}
炉心シュラウド						K_{1shr}
炉心支持板 ウエッジ						K_{cpw}
						K_{1swsc}

以上より下部スタビライザ部の連成ばね定数は、各部のばね定数を組み合わせて次のように求まる。

$$K_6 = \boxed{} \text{ (kg/mm = t/m)}$$

(5) 炉心シュラウド支持ロッドの回転ばね： K_7

a. 炉心シュラウド支持ロッドのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

炉心シュラウド支持ロッドの回転ばね定数は、軸方向ばね定数を算出した結果を用いて回転ばね定数を算定する。軸方向ばね定数の算出に当たっては、荷重伝達経路に相当する各部位ごとにばね定数を算出した後に、全体を直列ばねとして組み合わせて評価する。評価対象は上部から上部サポート（サポートブロックを含む）、上部タイロッド、下部タイロッド及びシュラウドサポートプレート（トグル貫通部）である。以下にそれぞれの算定方法を示す。図1-34に炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数評価モデルを示す。

$$K_7 = 2 K_{am} R^2$$

$$K_{am} = \frac{K_{axial1} + K_{axial2}}{2}$$

$$K_{axial1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us1}} + \frac{1}{K_{utr1}} + \frac{1}{K_{ltr}} + \frac{1}{K_{LP}} \right)}, \quad K_{axial2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us2}} + \frac{1}{K_{utr2}} + \frac{1}{K_{ltr}} + \frac{1}{K_{LP}} \right)}$$

ここで、

- K_{am} : タイプ1とタイプ2の支持ロッドの軸方向ばね定数の平均値
- R : 支持ロッドの据付半径
- K_{axial1} : タイプ1の支持ロッドの軸方向ばね定数
- K_{axial2} : タイプ2の支持ロッドの軸方向ばね定数
- K_{us1} : タイプ1の上部サポートの軸方向ばね定数
- K_{us2} : タイプ2の上部サポートの軸方向ばね定数
- K_{utr1} : タイプ1の上部タイロッドの軸方向ばね定数
- K_{utr2} : タイプ2の上部タイロッドの軸方向ばね定数
- K_{ltr} : 下部タイロッドの軸方向ばね定数
- K_{LP} : シュラウドサポートプレート局部ばね定数

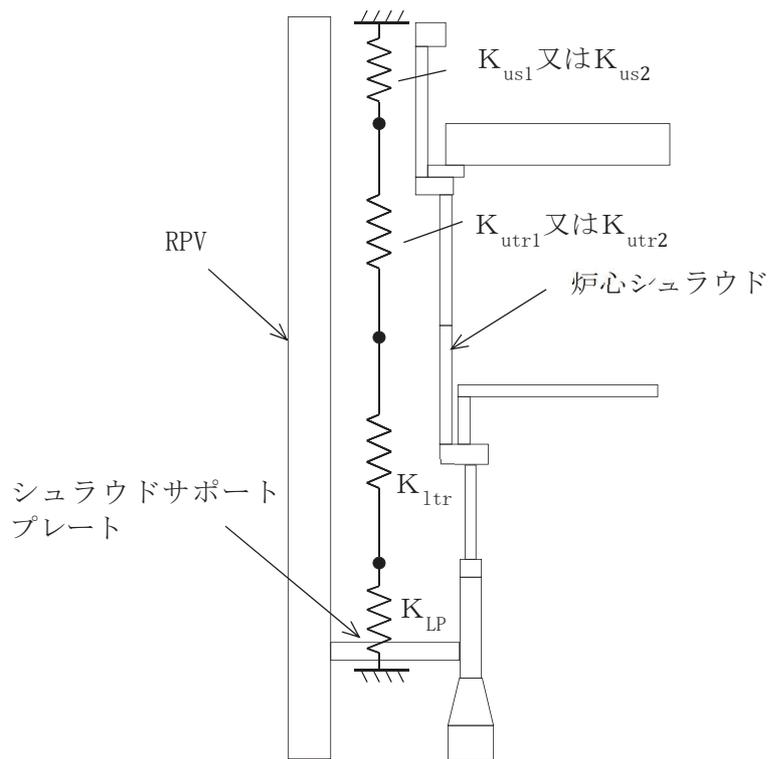


図 1-34 炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数評価モデル

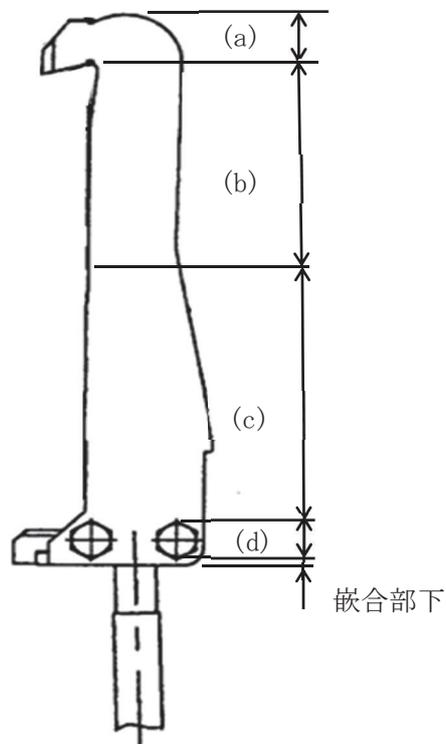
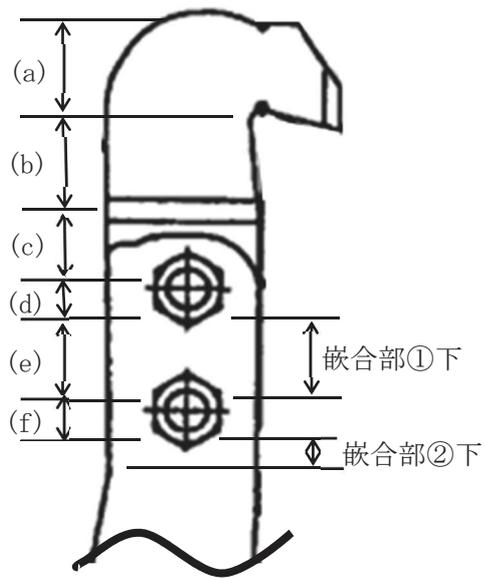
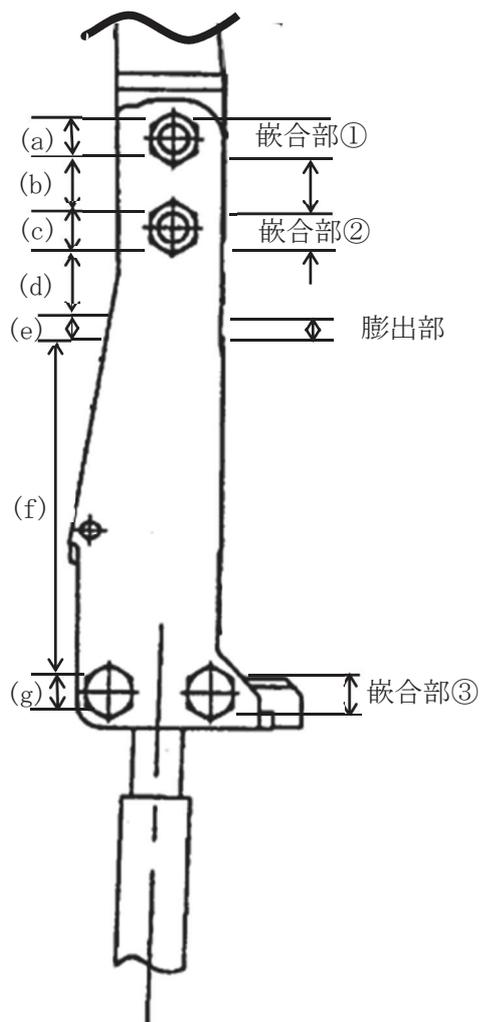


図 1-35 上部サポート (タイプ1) の領域説明図



クリフハンガー部



サポート胴部

図 1-36 上部サポート (タイプ2) の領域説明図

(b) 構成部材のばね定数算出方法

イ. 上部サポート(タイプ1) K_{us1}

上部サポート(タイプ1)が2体からなることを考慮して、軸方向ばね定数は次式にて求まる。

$$K_{us1} = \frac{2}{\left(\frac{1}{K_{us1a}} + \frac{1}{K_{us1m}}\right)}$$

$$K_{us1a} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us1a}(a)} + \frac{1}{K_{us1a}(b)} + \frac{1}{K_{us1a}(c)} + \frac{1}{K_{us1a}(d)}\right)}$$

$$K_{us1m} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us1b}} + \frac{1}{K_{us1s}}\right)}$$

ここで、

K_{us1a} : 上部サポート(タイプ1)引張荷重に対するばね定数

K_{us1m} : 嵌合部下における曲げ, せん断荷重に対するばね定数

$K_{us1a}(a)$, $K_{us1a}(b)$, $K_{us1a}(c)$, $K_{us1a}(d)$:

引張荷重に対する領域(a), (b), (c), (d)におけるばね定数
($= E A_{us1a} / L_{us1a}$)

K_{us1b} : 嵌合部下における曲げに対するばね定数 ($= 1296 E I_{us1b} / 5 L_{us1b}^3$)

K_{us1s} : 嵌合部下におけるせん断に対するばね定数 ($= 16/3 G A_{us1s} / L_{us1s}$)

- E : 縦弾性係数(= kg/mm²)
 A_{us1a} : 上部サポート(タイプ1)の断面積 ($= b_{us1a} \times h_{us1a}$)
 L_{us1a} : 上部サポート(タイプ1)の対象部位長さ
 b_{us1a} : 上部サポート(タイプ1)の幅
 h_{us1a} : 上部サポート(タイプ1)の高さ
 I_{us1b} : 上部サポート(タイプ1)の嵌合部下の断面二次モーメント
 $(= b_{us1b} \times h_{us1b}^3 / 12)$
 L_{us1b} : 上部サポート(タイプ1)の嵌合部下の対象部位長さ ($= L_{us1s}$)
 G : せん断弾性係数 ($= E / 2 (1 + \nu)$)
 A_{us1s} : 上部サポート(タイプ1)の嵌合部下の断面積 ($= b_{us1s} \times h_{us1s}$)
 ν : ポアソン比 ($=$)
 b_{us1s} : 上部サポート(タイプ1)の嵌合部下の幅
 h_{us1s} : 上部サポート(タイプ1)の嵌合部下の高さ

各部の評価に用いた諸元及び各部位ごとに算定したばね定数を表1-14及び表1-15に示す。

表 1-14 上部サポート (タイプ1) の引張荷重に対するモデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ			ばね定数 (kg/mm = t/m)
	高さ (長さ) L_{us1a} (mm)	幅 b_{us1a} (mm)	厚さ h_{us1a} (mm)	
(a) 上端から R 部 中心点の高さまで				$K_{us1a} (a)$
(b) R 部中心から 厚板部下端				$K_{us1a} (b)$
(c) 厚板部下端か らピン孔上端				$K_{us1a} (c)$
(d) 嵌合部				$K_{us1a} (d)$

表 1-15 上部サポート (タイプ1) の曲げ及びせん断荷重に対するモデル諸元及びばね定数

部位		パラメータ			ばね定数 (kg/mm = t/m)
		高さ h_{us1b} h_{us1s} (mm)	幅 b_{us1b} b_{us1s} (mm)	長さ L_{us1b} L_{us1s} (mm)	
嵌合部下	曲げ				K_{us1b}
	せん断				K_{us1s}

ロ. 上部サポート(タイプ2) K_{us2}

上部サポート(タイプ2)は短尺のクリフハンガーの下部を2つの胴板が挟み、ピンにより固定される構成となっている。したがってばね定数の算出は、クリフハンガー部とサポート胴部の2つの部位に分けて評価し、次式により組み合わせて算定する。

$$K_{us2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us2ca}} + \frac{1}{K_{us2cm}} + \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{K_{us2fa}} + \frac{1}{K_{us2fm}}} \right)}$$

$$K_{us2ca} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us2ca}(a)} + \frac{1}{K_{us2ca}(b)} + \frac{1}{K_{us2ca}(c)} + \frac{1}{K_{us2ca}(d)} + \frac{1}{K_{us2ca}(e)} + \frac{1}{K_{us2ca}(f)} \right)}$$

$$K_{us2cm} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{b1}} + \frac{1}{K_{s1}} + \frac{1}{K_{b2}} + \frac{1}{K_{s2}} \right)}$$

$$K_{us2fa} =$$

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us2fa}(a)} + \frac{1}{K_{us2fa}(b)} + \frac{1}{K_{us2fa}(c)} + \frac{1}{K_{us2fa}(d)} + \frac{1}{K_{us2fa}(e)} + \frac{1}{K_{us2fa}(f)} + \frac{1}{K_{us2fa}(g)} \right)}$$

$$K_{us2fm} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{us2b}} + \frac{1}{K_{us2b1}} + \frac{1}{K_{us2s1}} + \frac{1}{K_{us2b2}} + \frac{1}{K_{us2s2}} + \frac{1}{K_{us2b3}} + \frac{1}{K_{us2s3}} \right)}$$

ここで、

K_{us2ca} : クリフハンガー部軸方向荷重に対するばね定数

K_{us2cm} : 嵌合部下における曲げ、せん断荷重に対するばね定数

K_{us2fa} : 上部サポート胴部の軸方向荷重に対するばね定数

K_{us2fm} : 嵌合部下における曲げ、せん断荷重に対するばね定数

$K_{us2ca}(a)$, $K_{us2ca}(b)$, $K_{us2ca}(c)$, $K_{us2ca}(d)$, $K_{us2ca}(e)$, $K_{us2ca}(f)$:
クリフハンガー部の領域(a), (b), (c), (d), (e), (f)の軸方向荷重ばね定数

$$\left(= \alpha_{us2ca} \times E \times (b_{us2ca} \times h_{us2ca}) / L_{us2ca} \right)$$

K_{b1} , K_{b2} : クリフハンガー嵌合部①下及び②下の曲げに対するばね定数

$$\left(= 2 \times 192E \times (b_{us2cm} \times h_{us2cm}^3 / 12) / L_{us2cm}^3 \right)$$

K_{s1} , K_{s2} : クリフハンガー嵌合部①下及び②下のせん断に対するばね定数

$$\left(= 2 \times 2G \times 2/3A_{us2cm} / L_{us2cm} \right)$$

$K_{us2fa}(a), K_{us2fa}(b), K_{us2fa}(c), K_{us2fa}(d), K_{us2fa}(e), K_{us2fa}(f),$
 $K_{us2fa}(g)$: サポート胴部の領域(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g)の軸方向ばね定数 $(= \alpha_{us2fa} \times E \times (b_{us2fa} \times h_{us2fa}) / L_{us2fa})$

K_{us2b} : 膨出部の曲げに対するばね定数 $(= 3E \times (b_{us2fm} \times h_{us2fm}^3 / 12) / L_{us2fm}^3)$

K_{us2b1}, K_{us2b2} : サポート胴部嵌合部①上及び②上の曲げに対するばね定数
 $(= 2 \times 192E \times (b_{us2fam} \times h_{us2fm}^3 / 12) / L_{us2fm}^3)$

K_{us2s1}, K_{us2s2} : サポート胴部嵌合部①上及び②上のせん断に対するばね定数
 $(= 2 \times 2G \times 2/3A_{us2fm} / L_{us2fm})$

K_{us2b3} : サポート胴部嵌合部③上の曲げに対するばね定数
 $(= 2 \times 648E (b_{us2fm} \times h_{us2fm}^3 / 12) / 5L_{us2fm}^3)$

K_{us2s3} : サポート胴部嵌合部③上のせん断に対するばね定数
 $(= 2 \times 4G \times 2/3A_{us2fm} / L_{us2fm})$

$L_{us2ca}, b_{us2ca}, h_{us2ca}$: 表1-16に記載のパラメータ

A_{us2ca} : クリフハンガー部の断面積 $(= h_{us2cm} \times b_{us2cm})$

$L_{us2cm}, b_{us2cm}, h_{us2cm}$: 表1-17に記載のパラメータ

A_{us2fm} : サポート胴部の断面積 $(= h_{us2fm} \times b_{us2fm})$

$b_{us2fa}, h_{us2fa}, L_{us2fa}$: 表1-18に記載のパラメータ

$b_{us2fm}, h_{us2fm}, L_{us2fm}$: 表1-19に記載のパラメータ

E : 縦弾性係数 $(= \square \text{ t/m}^2)$

G : せん断弾性係数 $(= E/2 (1 + \nu))$

ν : ポアソン比 $(= \square)$

$\alpha_{us2ca}, \alpha_{us2fa}$: 荷重に対する係数

各部の評価に用いた諸元及び各部位毎に算定したばね定数を表1-16から表1-20に示す。

表 1-16 上部サポート（タイプ2（クリフハンガー部））の軸方向評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ				ばね定数 (kg/mm = t/m)
	高さ L_{us2ca} (mm)	幅 b_{us2ca} (mm)	厚さ h_{us2ca} (mm)	係数 α_{us2ca}	
(a) 上端から R 部 中心点の高さまで					$K_{us2ca}(a)$
(b) R 部中心から 厚板部下端					$K_{us2ca}(b)$
(c) 厚板部下端か らピン孔上端					$K_{us2ca}(c)$
(d) 嵌合部①					$K_{us2ca}(d)$
(e) 嵌合部①下端 から嵌合部②上端					$K_{us2ca}(e)$
(f) 嵌合部②					$K_{us2ca}(f)$
					K_{us2ca}

表 1-17 上部サポート（タイプ2（クリフハンガー部））の曲げ，せん断に対する
評価モデル諸元及びばね定数

部位		パラメータ			ばね定数 (kg/mm = t/m)			
		高さ h_{us2cm} (mm)	幅 b_{us2cm} (mm)	長さ L_{us2cm} (mm)				
嵌合部①下	曲げ				K_{b1}			
	せん断				K_{s1}			
嵌合部②下	曲げ				K_{b2}			
	せん断				K_{s2}			
								K_{us2fm}

表 1-18 上部サポート（タイプ2（サポート胴部））の軸方向評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ				ばね定数 (kg/mm = t/m)
	高さ L_{us2fa} (mm)	幅 b_{us2fa} (mm)	厚さ h_{us2fa} (mm)	係数 α_{us2fa}	
(a) 嵌合部①					$K_{us2fa} (a)$
(b) 嵌合部①-②間					$K_{us2fa} (b)$
(c) 嵌合部②					$K_{us2fa} (c)$
(d) 嵌合部②下端から膨出部上端まで					$K_{us2fa} (d)$
(e) 膨出部					$K_{us2fa} (e)$
(f) 膨出部下端から嵌合部③上端まで					$K_{us2fa} (f)$
(g) 嵌合部③					$K_{us2fa} (g)$
					K_{us2fa}

表 1-19 上部サポート（タイプ2（サポート胴部））曲げ及びせん断に対する評価モデル諸元及びばね定数

部位		パラメータ			ばね定数 (kg/mm = t/m)
		高さ h_{us2fm} (mm)	幅 b_{us2fm} (mm)	長さ L_{us2fm} (mm)	
膨張部	曲げ				K_{us2b}
嵌合部①上	曲げ				K_{us2b1}
	せん断				K_{us2s1}
嵌合部②上	曲げ				K_{us2b2}
	せん断				K_{us2s2}
嵌合部③下	曲げ				K_{us2b3}
	せん断				K_{us2s3}
					K_{us2fm}

表 1-20 上部サポート(タイプ2)のばね定数まとめ

部位	ばね定数 (kg/mm = t/m)
クリフハンガー部軸方向に対するばね定数 K_{us2ca}	
嵌合部下における曲げ，せん断荷重に対するばね定数 K_{us2cm}	
上部サポート胴部の軸方向荷重に対するばね定数 K_{us2fa}	
嵌合部下における曲げ，せん断荷重に対するばね定数 K_{us2fm}	
上部サポートのばね定数 K_{us2}	

ハ. 炉心シュラウド支持ロッド K_{tr}

炉心シュラウド支持ロッドは上部及び下部の2本のロッドが下部スタビライザを挟んで連結される構造となっており，上部タイロッドはタイプ1及びタイプ2により外径が異なる。

図 1-37に示すように断面形状ごとに区分し，各区分における長さを算出する。

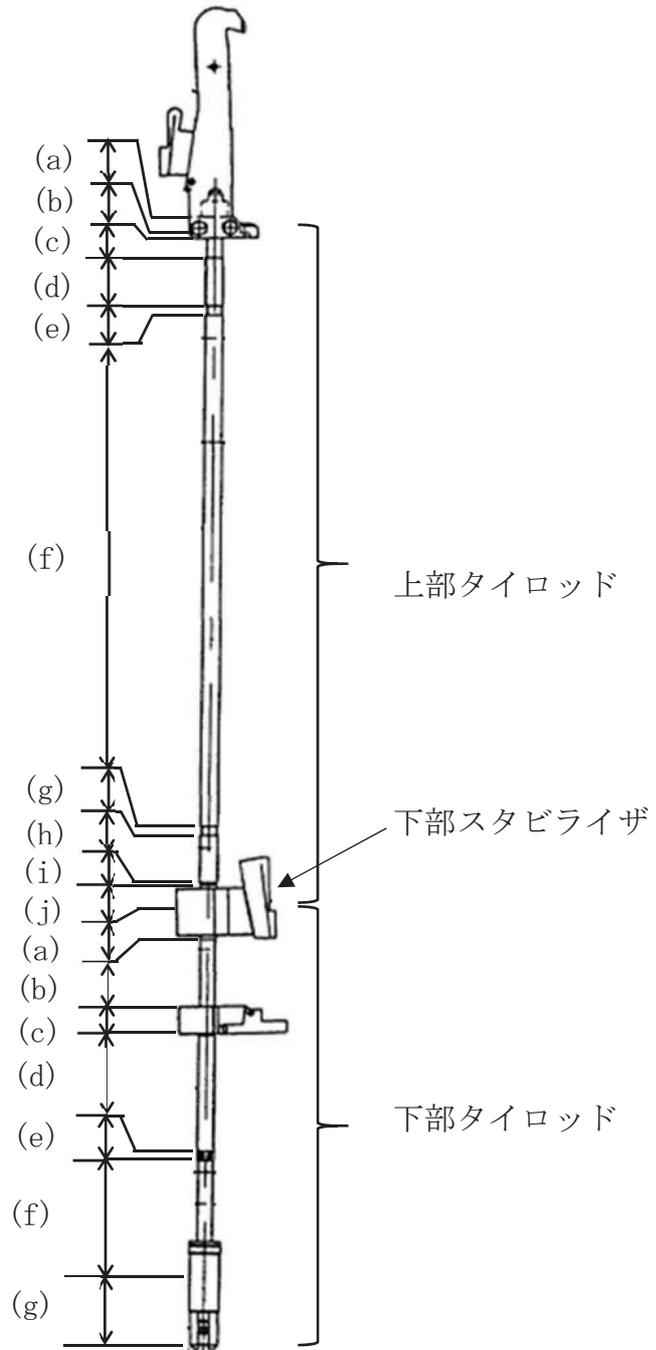


図 1-37 炉心シュラウド支持ロッドの領域説明図

タイプ1及びタイプ2の上部タイロッドのばね定数はそれぞれの上部タイロッドのばね

定数と下部タイロッドのばね定数を組み合わせて次式に示す式により求める。

$$K_{tr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{utr}} + \frac{1}{K_{ltr}}\right)}$$

$$K_{utr1} =$$

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{K_{utr}(a)} + \frac{1}{K_{utr}(b)} + \frac{1}{K_{utr}(c)} + \frac{1}{K_{utr}(d)} + \frac{1}{K_{utr}(e)} + \frac{1}{K_{utr}(f)} + \frac{1}{K_{utr}(g)} + \frac{1}{K_{utr}(h)} + \frac{1}{K_{utr}(i)} + \frac{1}{K_{utr}(j)}\right)}$$

$$K_{utr2} =$$

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{K_{utr}(a)} + \frac{1}{K_{utr}(b)} + \frac{1}{K_{utr}(c)} + \frac{1}{K_{utr}(d)'} + \frac{1}{K_{utr}(e)} + \frac{1}{K_{utr}(f)'} + \frac{1}{K_{utr}(g)} + \frac{1}{K_{utr}(h)'} + \frac{1}{K_{utr}(i)} + \frac{1}{K_{utr}(j)}\right)}$$

$$K_{ltr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{ltr}(a)} + \frac{1}{K_{ltr}(b)} + \frac{1}{K_{ltr}(c)} + \frac{1}{K_{ltr}(d)} + \frac{1}{K_{ltr}(e)} + \frac{1}{K_{ltr}(f)} + \frac{1}{K_{ltr}(g)}\right)}$$

ここで、

K_{utr} : 上部タイロッドのばね定数

K_{ltr} : 下部タイロッドのばね定数

K_{utr1} : タイプ1の上部タイロッドのばね定数

K_{utr2} : タイプ2の上部タイロッドのばね定数

$K_{utr}(a) \sim K_{utr}(j)$: 領域A～Jのばね定数 (= E A/L)

($K_{utr}(d)$, $K_{utr}(f)$, $K_{utr}(h)$ において「'」無しはタイプ1を示し, 「'」有はタイプ2を示す)

$K_{ltr}(a) \sim K_{ltr}(g)$: 領域A～Gのばね定数 (= E A/L)

E : 縦弾性係数 (= kg/mm²) (= t/m²)

A : 断面積 (= $\pi D^2/4$)

(ただし, 六角部は $A_{hex} =$)

L : 対象部位長さ

D : 口径

各部の評価に用いた諸元及び各部位ごとに算定したばね定数を表1-21及び表1-22に示す。これらの結果から、タイロッドのばね定数 K_{tr} は次のように求まる。

タイプ1 : $K_{tr1} =$ (kg/mm = t/m)

タイプ2 : $K_{tr2} =$ (kg/mm = t/m)

表 1-21 上部タイロッドの評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ		ばね定数 (kg/mm = t/m)
	口径 D (mm)	長さ L (mm)	
(a) 領域 A			$K_{utr}(a)$
(b) 領域 B			$K_{utr}(b)$
(c) 領域 C			$K_{utr}(c)$
(d) 領域 D (タイプ 1)			$K_{utr}(d)$
(d) 領域 D' (タイプ 2)			$K_{utr}(d)'$
(e) 領域 H 六角部			$K_{utr}(e)$
(f) 領域 F (タイプ 1)			$K_{utr}(f)$
(f) 領域 F' (タイプ 2)			$K_{utr}(f)'$
(g) 領域 G 六角部			$K_{utr}(g)$
(h) 領域 H (タイプ 1)			$K_{utr}(h)$
(h) 領域 H' (タイプ 2)			$K_{utr}(h)'$
(i) 領域 I			$K_{utr}(i)$
(j) 領域 J			$K_{utr}(j)$
			K_{utr1}
	K_{utr2}		

表 1-22 下部タイロッドの評価モデル諸元及びばね定数

部位	パラメータ		ばね定数 (kg/mm = t/m)
	口径 D (mm)	長さ L (mm)	
(a) 領域 A			$K_{ltr} (a)$
(b) 領域 B			$K_{ltr} (b)$
(c) 領域 C			$K_{ltr} (c)$
(d) 領域 D			$K_{ltr} (d)$
(e) 領域 H 六角部			$K_{ltr} (e)$
(f) 領域 F			$K_{ltr} (f)$
(g) 領域 G			$K_{ltr} (g)$
			K_{ltr}

ニ. シュラウドサポートプレート（トグル貫通部） K_{LP}

シュラウドサポートプレートには炉心シュラウド支持ロッド貫通孔のトグルとの接触部において上方への引き上げ荷重が付与される。これを外周単純支持円板にモデル化し，文献[1]A4-55, No.9 より次式を用いてばね定数を算出する。

$$K_{LP} = \frac{E h^3}{\alpha_9 a^2}$$

ここで，

E : 縦弾性係数

h : 板厚

α_9 : たわみ係数 () (図1-38)

a : 孔半径

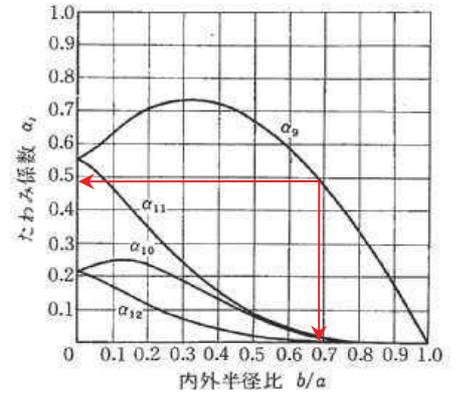


図 1-38 たわみ係数と半径比の関係

評価モデル諸元及びばね定数算定結果を表1-23に示す。

表 1-23 シュラウドサポートプレート局部評価モデル諸元及びばね定数

穴直径	2 a (mm)	
外半径	b (mm) *1	
板厚	h (mm)	
内外半径比	b / a	
たわみ係数		
縦弾性係数 E	(kg/mm ²)	
ばね定数 K_{LP}	(kg/mm = t/m)	

注記 *1 : RPV内壁までの距離

以上より、タイプごとの炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数 K_{axial} 及び回転ばね定数 K_7 をまとめて、表1-24及び表1-25に示す。

表 1-24 炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数

部位	タイプ 1	タイプ 2
上部サポート K_{us} (kg/mm = t/m)		
上部タイロッド軸ばね K_{utr} (kg/mm = t/m)		
下部タイロッド軸ばね K_{ltr} (kg/mm = t/m)		
シュラウドサポートプレート局部ばね K_{LP} (kg/mm = t/m)		
炉心シュラウド支持ロッド軸方向ばね K_{axial} (kg/mm = t/m)		
炉心シュラウド支持ロッド軸方向ばね (平均値) K_{am} (kg/mm = t/m)		

表 1-25 炉心シュラウド支持ロッドの回転ばね定数評価結果

パラメータ	タイプ 1/タイプ 2
炉心シュラウド支持ロッド軸方向ばね (平均値) K_{am} (kg/mm = t/m)	
据付半径 R (mm) (上部サポートブロック嵌合ピン中間)	
K_7 (t・m/rad)	

1.2.5 材料物性値（縦弾性係数，ポアソン比）

大型機器，炉内構造物系の材料物性値（縦弾性係数，ポアソン比）は，適用する規格・基準に基づき，表 1-26，表 1-27 に示す値を使用する。また，原子炉建屋の材料物性値（縦弾性係数，ポアソン比）は，VI-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，表 1-28～表 1-29 に示す値を使用する。

表 1-26 解析に用いる大型機器系の物性値（水平方向）

名称	縦弾性係数 E ($\times 10^7 \text{t/m}^2$)	ポアソン比 ν	出典
原子炉しゃへい壁			(縦弾性係数) 昭和 55 年 告示 501 号 (ポアソン比) 日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 -許容応 力度設計法-
原子炉本体の基礎			
原子炉圧力容器			

表 1-27 解析に用いる炉内構造物系の物性値（水平方向）

名称	縦弾性係数 E ($\times 10^7 \text{t/m}^2$)	ポアソン比 ν	出典
原子炉圧力容器支持スカート			(縦弾性係数) 昭和 55 年 告示 501 号 (ポアソン比) 日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 -許容応力 度設計法-
炉心シュラウド			
原子炉圧力容器下部鏡板			
制御棒案内管			
制御棒駆動機構ハウジング			
燃料集合体			文献に基づくメーカー採用値

表 1-28 解析に用いる建屋の物性値 (NS 方向)

名称	縦弾性係数 E ($\times 10^4 \text{t/m}^2$)	ポアソン比 ν	出典
原子炉建屋	202.5	0.167	日本建築学会 1988 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
原子炉建屋 (オペフロ上部)	81.0	0.167	日本建築学会 1988 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
原子炉建屋 (補強耐震壁)	257.0	0.2	日本建築学会 1999 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計法-
原子炉建屋 (鉄骨ブレース)	2100.0	0.3	日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-

表 1-29 解析に用いる建屋の物性値 (EW 方向)

名称	縦弾性係数 E ($\times 10^4 \text{t/m}^2$)	ポアソン比 ν	出典
原子炉建屋	216.0	0.167	日本建築学会 1988 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
原子炉建屋 (オペフロ上部)	135.0	0.167	日本建築学会 1988 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
原子炉建屋 (補強耐震壁)	257.0	0.2	日本建築学会 1999 年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計法-

表 1-30 解析に用いる建屋の物性値 (鉛直方向)

名称	縦弾性係数 E ($\times 10^4 \text{t/m}^2$)	ポアソン比 ν	出典
原子炉建屋(鉄筋 コンクリート造)	—	—	—
原子炉建屋(屋根 トラス部)	270.0	0.3	日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-

1.2.6 シュラウド溶接線分離ケースのモデル化

炉内構造物系の地震応答解析においては、【補足-600-8-1 建屋-機器連成解析モデルの時刻歴応答解析における材料物性の不確かさを考慮した設計用地震力の設定について】に示したように4つのシュラウド溶接線分離ケースを想定しており、溶接線が分離していることを仮定して、分離部における力の伝達等を考慮した地震応答解析モデルを設定している。

以下にシュラウド溶接線分離ケースのモデル化設定を示す。

1.2.6.1 シュラウド周方向溶接線が健全な場合

(1) 炉心シュラウド支持ロッド

一般に、図 1-39(a)に示すようにシュラウドを円筒の構造物としてみなし、円筒胴のある方向に炉心シュラウド支持ロッドによる補強材が設けられると想定した場合、シュラウドの倒れこみにより炉心シュラウド支持ロッドには [] の力が発生する ([])。この時の回転力 (モーメント) は [] となる。ここで、シュラウド中心線の倒れこむ角度 Φ は微小であるので (図 1-39(b))、炉心シュラウド支持ロッドの伸びは [] として求められ、回転力は [] となる (図 1-39(c))。したがって、単位角度当たりの回転ばね力 (回転ばね定数) は [] となる。

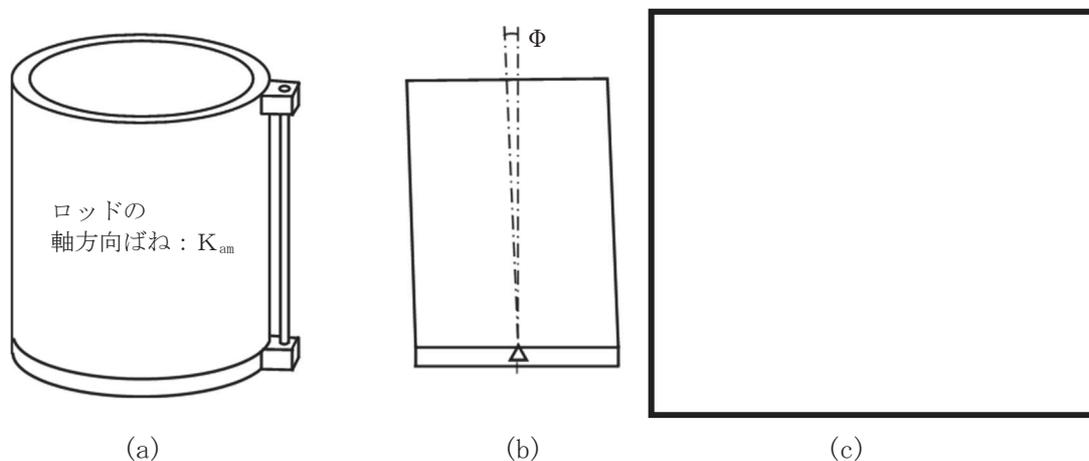


図 1-39 シュラウド溶接線分離のモデル化概要 (健全)

実際には炉心シュラウド支持ロッドは4本あるので、前述の内容を踏まえて回転ばね定数 K_7 を求めると次のようになる。



図 1-40 炉心シュラウド支持ロッドの回転ばね定数算定概要（健全）



1.2.6.2 シュラウド周方向溶接線に全周貫通き裂が生じたと想定した場合

(1) 炉心シュラウド支持ロッド

シュラウド周方向溶接線に全周貫通き裂が生じたと想定した場合は、図 1-41 のようにシュラウドは

1.2.6.1 と同様の考え方で回転ばね定数 K_7 を求めると次のようになる。

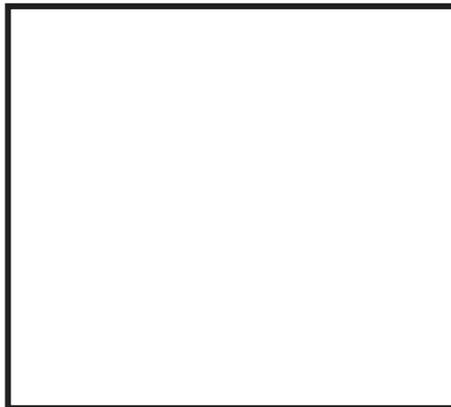


図 1-41 シュラウド溶接線分離のモデル化概要（全溶接線分離）

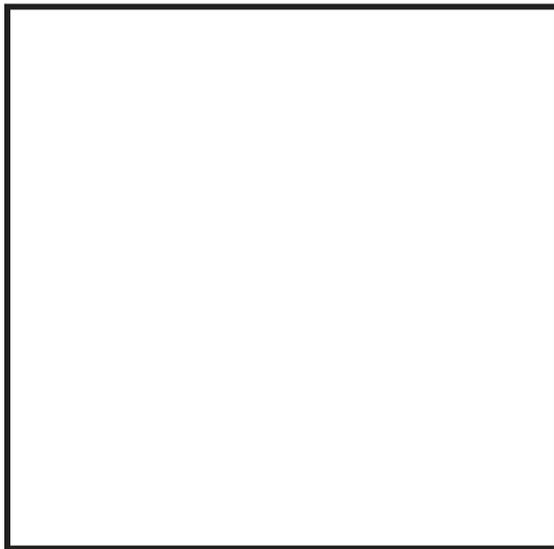


図 1-42 炉心シュラウド支持ロッドの回転ばね定数算定概要（全溶接線分離）



(2) シュラウド

端部におけるき裂までの角度 ϕ は、以下の通り設定される。

$$\delta = \boxed{}$$

$$\phi = \boxed{}$$



なお、 δ は次のように算定する。き裂部が開くまで生じている力としては、 $\boxed{}$

$\boxed{}$ がある。 $\boxed{}$

$\boxed{}$ 変位量 δ までが力の伝達が考慮できる範囲とする。

a. 炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数 K_{am}

計算条件を以下のとおり設定する（図 1-43）。

<input type="text"/>	: F (t)
シュラウド半径	: R (m)
シュラウド長	: L (m)
炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数	: K_{am} (t/m)
縦弾性係数	: E (t/m ²)
シュラウド断面積	: A (m ²)

炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数は、炉心シュラウド支持ロッドが 4 本あるため、計 $4 K_{am}$ (t/m) となる。

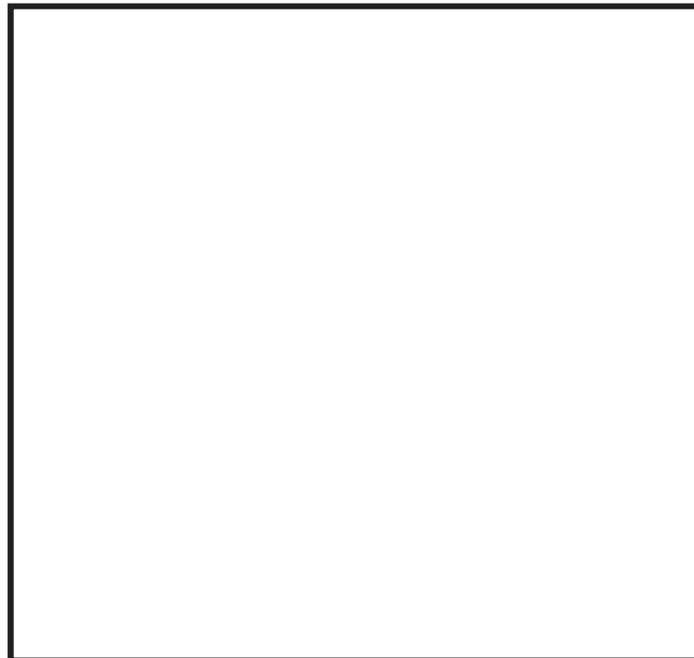


図 1-43 炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数算定概要

b. シュラウド自体の引張に対するばね定数 K_s

シュラウド自体の引張に対するばね定数 K_s は、以下のとおりとなる。

(図 1-44)

$$K_s = \frac{E A}{L}$$

によるシュラウドの変位量 δ は、炉心シュラウド支持ロッドの軸方向ばね定数とシュラウド自体のばね定数により算出される。

$$F = K \delta$$

ここで、

$$K = \boxed{}$$

よって、シュラウドの変位量 δ は、以下のとおりとなる。

$$\delta = \boxed{}$$

この変位量 δ までシュラウドにき裂が生じないものとする。

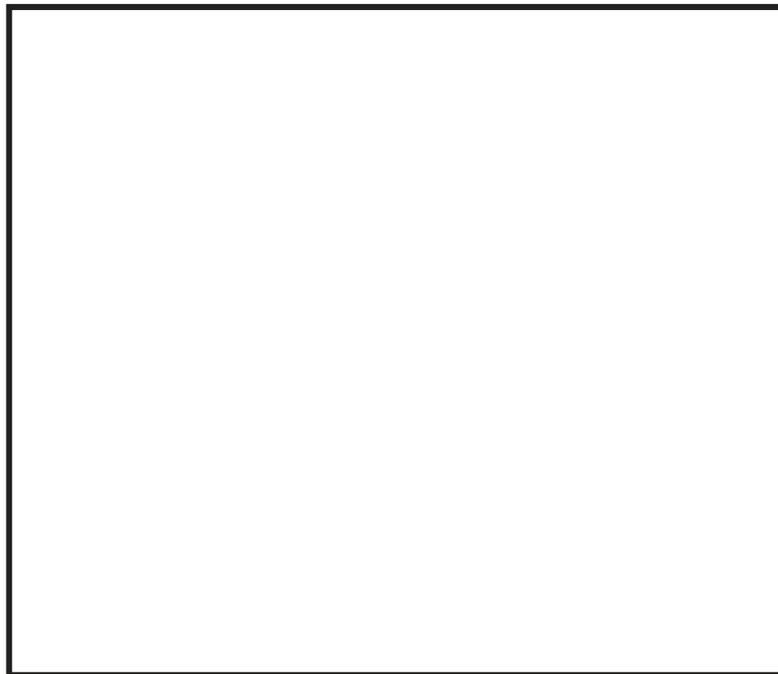


図 1-44 シュラウドの変位量 δ の概要

1.3 新たに採用する地震応答解析モデルの設定

1.3.1 鉛直方向解析モデルの扱い

既工認においては、動的地震動を水平方向に対してのみ考慮すればよく、設計の進捗にあわせて、段階的に以下の大型機器系と炉内構造物系の2種類の水平方向解析モデルを用いて分割申請を行っていた。

大型機器系 : 原子炉建屋～原子炉格納容器～原子炉しゃへい壁・原子炉本体の基礎～原子炉圧力容器

炉内構造物系 : 原子炉建屋～原子炉しゃへい壁・原子炉本体の基礎～原子炉圧力容器～炉内構造物（気水分離器，炉心シュラウド，燃料集合体，制御棒案内管）～制御棒駆動機構ハウジング

これに対して、今回工認では、鉛直動的地震動が導入されたことから、原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向応答を適切に評価する観点で、水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向応答解析モデル（図 1-45 及び図 1-46 参照）を新たに採用し、鉛直地震動に対する評価を実施している。

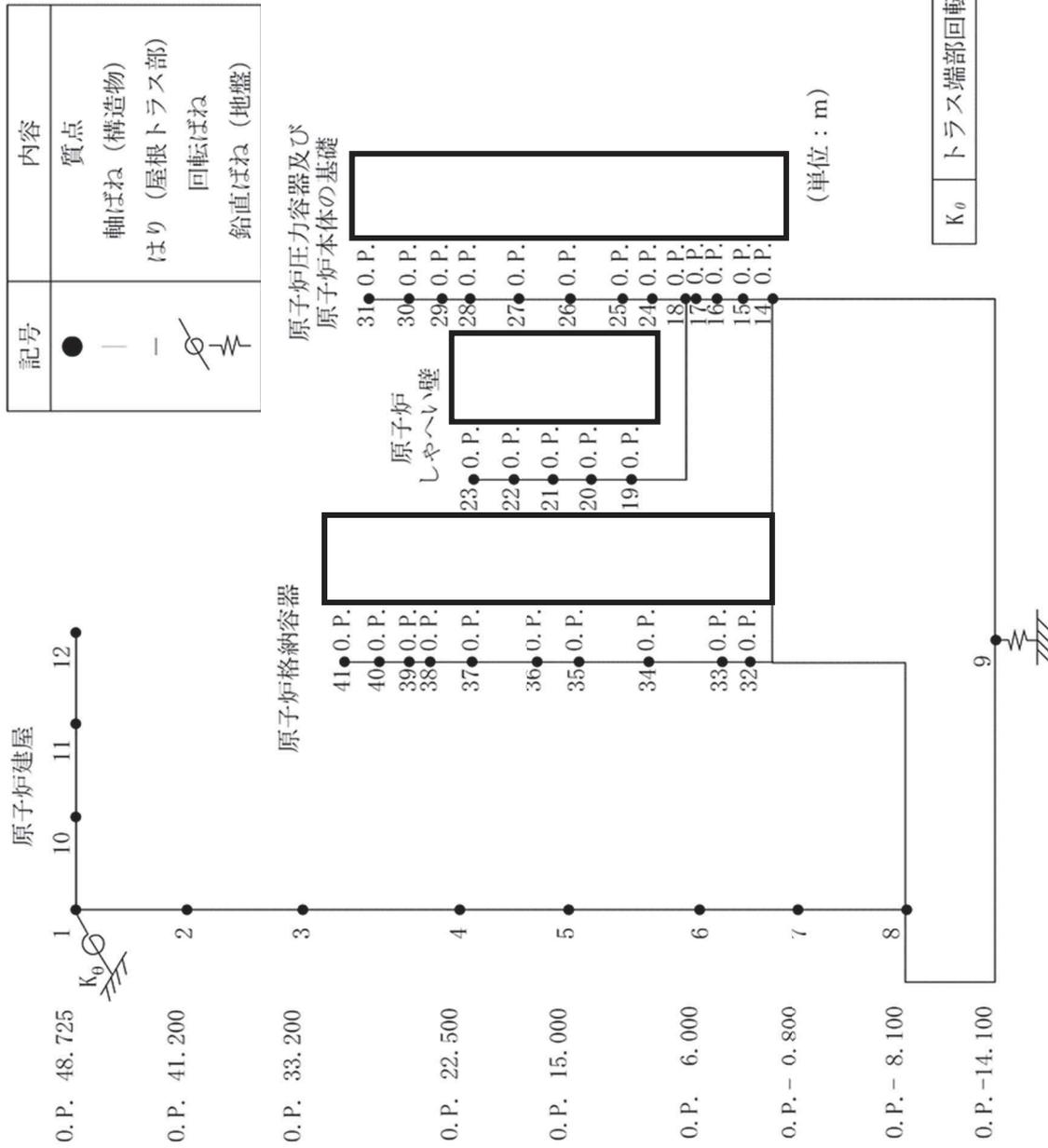


図 1-45 鉛直方向解析モデル：大型機器系（今回工認）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

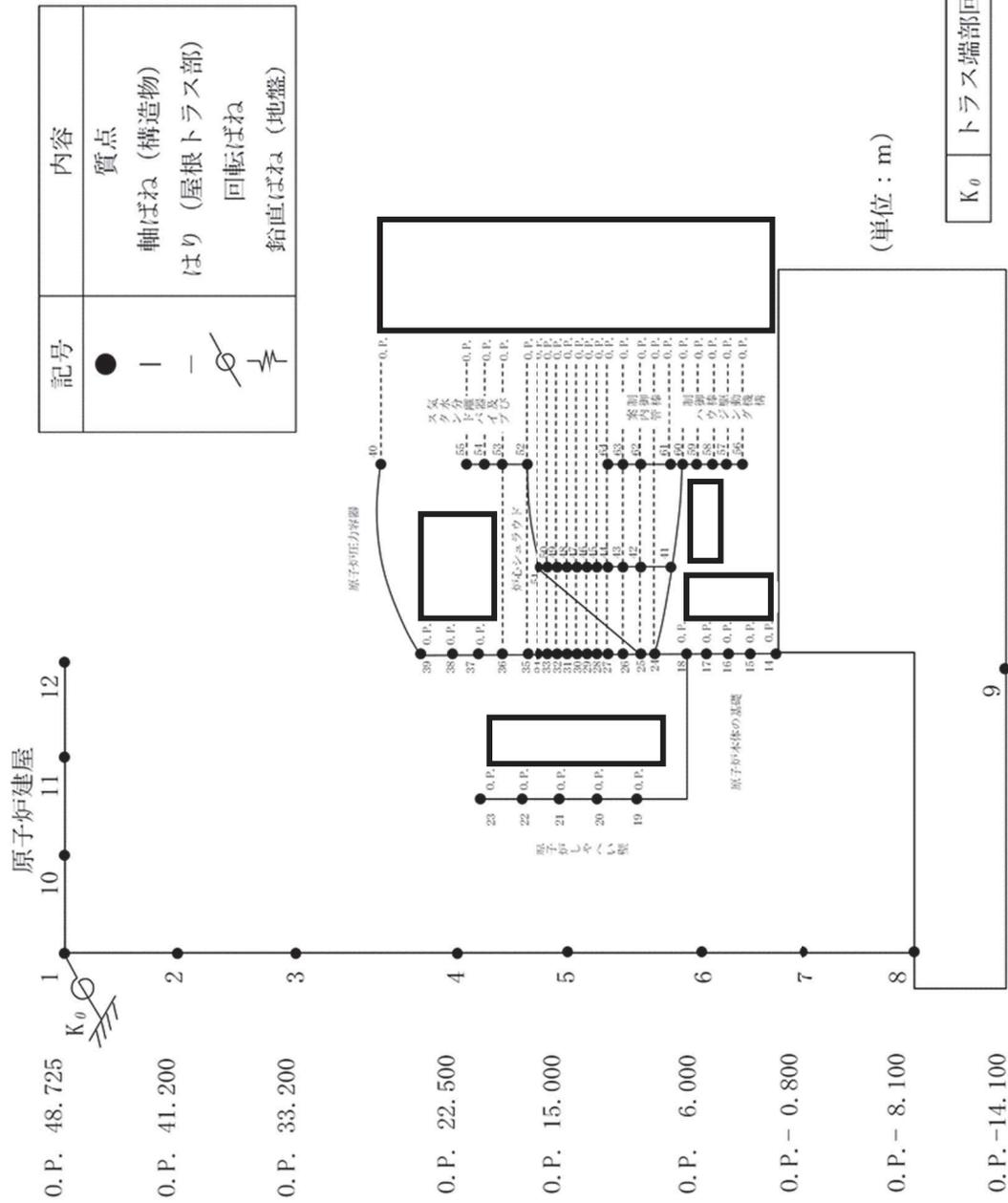


図 1-46 鉛直方向解析モデル：炉内構造物系（今回工認）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1.3.2 鉛直方向解析モデルの設定について

新たに作成する鉛直方向解析モデルは、水平方向解析モデルとの整合を図ることを基本とし、上下方向の自由度のみを有する、集中質量質点と軸圧縮引張りばねで構成されるモデルとして作成している。ここで、水平方向解析モデルでばねとして考慮している設備は、表 1-31 及び表 1-32 に示す理由により鉛直方向の振動特性には影響を与えないことから、鉛直方向解析モデルではばねとしてモデル化していない。なお、燃料集合体は燃料支持金具上に置かれているだけであり、制御棒案内管の鉛直方向の動きに燃料集合体が追従するだけのため、制御棒案内管の鉛直方向荷重（軸力）に影響を与えるのは燃料集合体重量のみとの考え方にに基づき、燃料集合体はモデル化をせず、制御棒案内管の上端に重量のみ付加している。今回工認における設計用地震力は、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に示すとおり、鉛直方向最大応答震度が 1G を超えており燃料集合体の浮上りが生じる可能性がある。燃料集合体の浮上り評価では【補足-600-16 制御棒の挿入性評価について】に記載のとおり、水平及び鉛直方向加速度による浮上り量は小さく、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の影響がないことから、鉛直方向加速度が制御棒挿入評価に影響を与えないことを確認している。

表 1-31 鉛直方向解析モデルではばねとしてモデル化していない設備（大型機器系）

No.	名称	ばねとしてモデル化していない理由
K ₁	原子炉格納容器 シヤラグ	鉛直方向には拘束しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₂	原子炉格納容器 スタビライザ	鉛直方向には作用しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₃	原子炉圧力容器 スタビライザ	鉛直方向には作用しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₄	燃料交換ベローズ	燃料交換ベローズは鉛直方向に伸縮する構造であり、鉛直方向の剛性は小さいため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₅	所員用エアロック	所員用エアロックは鉛直方向に剛であり、PCVと一体となって振動すると考えられるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₆	ベント管	ベント管は個別に解析モデルを作成して応答評価することから、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。

表 1-32 鉛直方向解析モデルではばねとしてモデル化していない設備（炉内構造物系）

No.	名称	ばねとしてモデル化していない理由
K ₁	原子炉格納容器 スタビライザ	鉛直方向には作用しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₂	原子炉圧力容器 スタビライザ	鉛直方向には作用しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₃	制御棒駆動機構ハウジング レストレントビーム	鉛直方向には作用しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₄	シュラウドサポート	水平方向解析モデルでは、水平方向の荷重を受けたシュラウドサポートプレート、レグ、シリンダ及びリングによる回転振動を考慮するために回転ばねに置換していたが、鉛直方向ではシュラウドの荷重はリング、シリンダ及びレグを介して原子炉圧力容器下部鏡板に伝達されることから、鉛直方向解析モデルでは回転ばねではなく、シュラウドサポートレグ、シリンダ及びリングを軸圧縮引張りばねとしてモデル化している。
K ₅	上部サポート	鉛直方向には拘束しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。
K ₆	下部スタビライザ	鉛直方向には拘束しない構造であるため、鉛直方向解析モデルではモデル化していない。

鉛直方向解析モデルの質点質量算定の基本方針は、水平方向解析モデルと同様とし、炉水の質量は炉水を支持する部位の面積に対応して配分する等、荷重伝達経路を考慮して振り分けを行う。

鉛直方向解析モデルの断面剛性算定の基本方針は、円筒形またはそれに準ずる構造物について、下式により全断面を用いてばね定数を算定している。

$$K = \frac{AE}{L}$$

ここで、

A：断面積 (m²)

E：縦弾性係数 (t/m²)

L：部材長 (m)

なお、スタンドパイプを支持するシュラウドヘッドと CRD ハウジングを支持する原子炉圧力容器下部鏡板については、シェルの理論式でばね定数を算定する。

質点質量及びばね定数の算定例を以下に示す。

1.3.2.1 質点質量

(1) 原子炉圧力容器胴板 (質点番号：36)

原子炉圧力容器胴板の質点質量は、水平方向解析モデルにおいて考慮している質量のうち、鉛直方向振動に対しては原子炉圧力容器胴板が負担しない炉水質量を除く、本体質量及び付加物質量を考慮することにより算定している。

水平方向解析モデル及び鉛直方向解析モデルにおける原子炉圧力容器胴板の質点質量の算定結果を表 1-33 に示す。

鉛直方向解析モデル質点質量 = 水平方向解析モデル質点質量 - 炉水質量

$$= \boxed{} - \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (t)}$$

表 1-33 原子炉圧力容器胴板の質点質量算定結果

		水平方向 解析モデル	鉛直方向 解析モデル	備考	
質点番号		20	36		
標高 O.P. (m)					
本体質量(t)					
付加物 質量(t)	配管				
	炉内機器				
炉水質量(t)					鉛直方向振動に対しては、負担しないため考慮しない。
質点質量(t)					

1.3.2.2 ばね定数

(1) 原子炉圧力容器胴板（質点番号：34-35）

原子炉圧力容器胴板の全断面によるばね定数を，部材の諸元を用いて，以下のとおり算定する。

$$A = (\text{NS 方向有効せん断断面積}) + (\text{EW 方向有効せん断断面積})$$

$$= \boxed{} + \boxed{} = \boxed{} (\text{m}^2)$$

$$E = \boxed{} (\text{t/m}^2)$$

$$L = \boxed{} (\text{m})$$

よって，

$$K = \frac{AE}{L}$$

$$= \boxed{} \boxed{} (\text{t/m})$$

(2) シュラウドヘッド (質点番号 : 51-52)

シュラウドヘッドの剛性評価には, スタンドパイプの貫通孔による剛性低下の効果を, 物性値を補正することにより模擬し, 貫通孔なしとして評価を行う。

$$\eta = (P - D) / P$$

$$= \boxed{}$$

よって右下表より

$$\frac{E^*}{E} = 0.529 + (0.79 - 0.529) \times \frac{\boxed{} - 0.5}{0.7 - 0.5}$$

$$= \boxed{} = \boxed{}$$

$$\nu^* = 0.319 + (0.308 - 0.319) \times \frac{\boxed{} - 0.5}{0.7 - 0.5}$$

$$= \boxed{} = \boxed{}$$

ここに,

η : リガメント効率

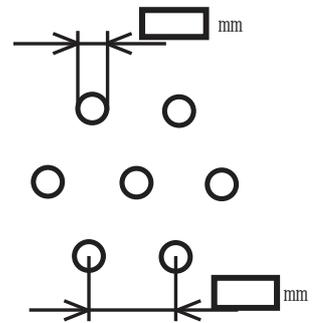
P : スタンドパイプ間隔 (mm)

D : スタンドパイプ外径 (mm)

E^* : 補正後の縦弾性係数 (t/m²)

E : 補正前の縦弾性係数 (t/m²)

ν^* : 補正後のポアソン比



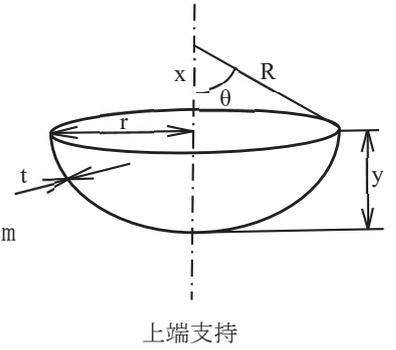
スタンドパイプ貫通孔の配置

η	0.333	0.5	0.7	1.0
E^*/E	0.311	0.529	0.79	1.0
ν^*	0.363	0.319	0.308	0.3

出典 : [9]

理論式に使用する寸法は板厚中心とした。

右図に理論式^[2]に使用する諸元を示す。



$$\begin{aligned}
 R &= \boxed{} + (\boxed{} / 2) = \boxed{} \text{ mm} = \boxed{} \text{ m} \\
 r &= (\boxed{} - 2 \times (\boxed{} / 2)) / 2 = \boxed{} \text{ mm} = \boxed{} \text{ m} \\
 x &= \sqrt{\boxed{}^2 - \boxed{}^2} \\
 &= \boxed{} \text{ m} = \boxed{} \text{ m} \\
 t &= \boxed{} \text{ mm} = \boxed{} \text{ m} \\
 E &= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{) より} \\
 E^* &= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

理論式^[2]による剛性

$$\Delta y = \frac{\rho R^2}{E^*} \left[\sin^2 \theta + (1 + \nu^*) \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right]$$

$$P = 2 \pi R^2 (1 - \cos \theta) t \rho \quad (\text{自重})$$

$$K = \frac{P}{\Delta y}$$

$$= \frac{2 \pi (1 - \cos \theta) t E^*}{\sin^2 \theta + (1 + \nu^*) \ln \frac{2}{1 + \cos \theta}}$$

$$= \frac{2 \pi \times \left(1 - \frac{\boxed{}}{\boxed{}}\right) \times \boxed{} \times \boxed{} \times \boxed{}}{\left(\frac{\boxed{}}{\boxed{}}\right)^2 + (1 + \boxed{}) \ln \frac{2}{1 + \frac{\boxed{}}{\boxed{}}}}$$

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (t/m)}$$

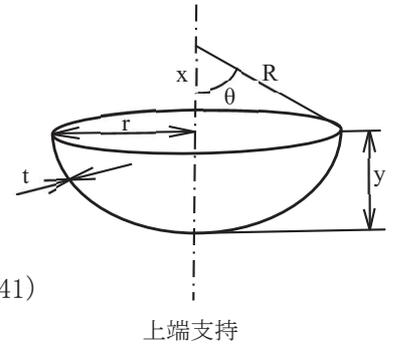
(3) 原子炉圧力容器下部鏡板

a. シュラウドサポート取付質点～RPV下端（質点番号：41-60）

貫通孔部は補強されているため、貫通孔による剛性低下は考慮しない。

理論式^[2]に適用する寸法は板厚中心とした。

右図に理論式に適用する諸元を示す。



$$R = \boxed{} + \boxed{}/2 = \boxed{} \text{ (mm)}$$

$$= \boxed{} \text{ (m)}$$

$$y = \boxed{} \text{ (m)} \text{ (シュラウドサポート取付質点 No. 41)}$$

$$x = \boxed{} - \boxed{} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$r = \sqrt{\boxed{}^2 - \boxed{}^2}$$

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (m)}$$

$$t = \boxed{} \text{ (mm)} = \boxed{} \text{ (m)}$$

$$E = \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)} \quad \nu = \boxed{}$$

理論式^[2]による剛性

$$\Delta y = \frac{\rho R^2}{E} \left[\sin^2 \theta + (1+\nu) \ln \frac{2}{1+\cos \theta} \right]$$

$$P = 2 \pi R^2 (1-\cos \theta) t \rho \quad (\text{自重})$$

$$K = \frac{P}{\Delta y}$$

$$= \frac{2 \pi (1-\cos \theta) t E}{\sin^2 \theta + (1+\nu) \ln \frac{2}{1+\cos \theta}}$$

$$= \frac{2 \pi \times \left(1 - \frac{\boxed{}}{\boxed{}}\right) \times \boxed{} \times \boxed{}}{\left(\frac{\boxed{}}{\boxed{}}\right)^2 + (1 + \boxed{}) \ln \frac{2}{1 + \frac{\boxed{}}{\boxed{}}}}$$

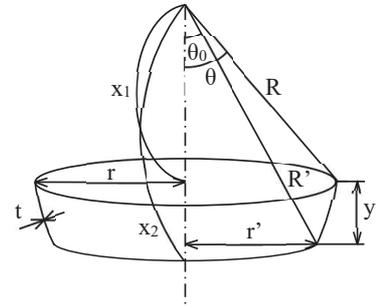
$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (t/m)}$$

b. シュラウドサポート取付部～RPVスカート付根位置（質点番号：24-41）

理論式^[2]に適用する諸元を示す。

$$\begin{aligned}
 R &= R' = \boxed{} \text{ (m)} \\
 x_1 &= x_2 - y = \boxed{} - \boxed{} = \boxed{} \text{ (m)} \\
 r &= \sqrt{\boxed{}^2 - \boxed{}^2} \\
 &= \boxed{} \\
 &= \boxed{} \text{ (m)} \\
 t &= \boxed{} \text{ (mm)} = \boxed{} \text{ (m)} \\
 E &= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)} \quad \nu = \boxed{}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 y &= \boxed{} \text{ (m)} \quad (= \boxed{} - \boxed{}) \\
 R' &= \boxed{} \text{ (m)} \\
 x_2 &= \boxed{} \text{ (m)} \\
 r' &= \boxed{} \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

理論式^[2]による剛性

$$\Delta y = \frac{P(1+\nu)}{2\pi E t} \left[\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) - \ln\left(\tan\frac{\theta_0}{2}\right) \right]$$

$$K = \frac{P}{\Delta y} = \frac{P}{\frac{P(1+\nu)}{2\pi E t} \left[\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) - \ln\left(\tan\frac{\theta_0}{2}\right) \right]}$$

$$= \frac{2\pi E t}{1+\nu} \times \frac{1}{\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) - \ln\left(\tan\frac{\theta_0}{2}\right)}$$

$$\tan\frac{1}{2}\theta = \frac{\sin\theta}{1+\cos\theta}$$

$$K = \frac{2\pi E t}{1+\nu} \times \frac{1}{\ln\left(\frac{\sin\theta}{1+\cos\theta}\right) - \ln\left(\frac{\sin\theta_0}{1+\cos\theta_0}\right)}$$

$$= \frac{2\pi E t}{1+\nu} \times \frac{1}{\ln\left(\frac{\frac{r}{R}}{1+\frac{x_1}{R}}\right) - \ln\left(\frac{\frac{r'}{R'}}{1+\frac{x_2}{R'}}\right)}$$

