

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 添-2-033-3 改0
提出年月日	2023年11月27日

VI-2-3-2-3 炉心支持構造物の応力計算書

K6 ① VI-2-3-2-3 R0

2023年11月
東京電力ホールディングス株式会社

VI-2-3-2-3 炉心支持構造物の応力計算書

目 次（全体目次）

1. 概要	1-1
2. 炉心シュラウドの応力計算	2-1
3. シュラウドサポートの応力計算	3-1
4. 上部格子板の応力計算	4-1
5. 炉心支持板の応力計算	5-1
6. 燃料支持金具の応力計算	6-1
7. 制御棒案内管の応力計算	7-1

目 次
(炉心シュラウド)

2. 炉心シュラウドの応力計算	2-1
2.1 一般事項	2-1
2.1.1 記号の説明	2-1
2.1.2 形状・寸法・材料	2-1
2.1.3 解析範囲	2-1
2.1.4 計算結果の概要	2-1
2.2 計算条件	2-4
2.2.1 設計条件	2-4
2.2.2 運転条件	2-4
2.2.3 材料	2-4
2.2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	2-4
2.2.5 荷重の組合せ及び応力評価	2-4
2.2.6 許容応力	2-4
2.2.7 応力の記号と方向	2-4
2.3 応力計算	2-5
2.3.1 応力評価点	2-5
2.3.2 差圧による応力	2-5
2.3.3 外荷重による応力	2-6
2.3.4 応力の評価	2-6
2.4 応力強さの評価	2-7
2.4.1 一次一般膜応力強さの評価	2-7
2.4.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	2-7
2.5 特別な応力の評価	2-8
2.5.1 支圧応力の評価	2-8

図 表 目 次
(炉心シュラウド)

図 2-1	形状・寸法・材料・応力評価点	2-2
図 2-2	支圧荷重の支持面	2-9
表 2-1	計算結果の概要	2-3
表 2-2	断面性状	2-10
表 2-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	2-11
表 2-4	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	2-12
表 2-5	支圧応力の評価	2-13

目 次
(シュラウドサポート)

3. シュラウドサポートの応力計算	3-1
3.1 一般事項	3-1
3.1.1 記号の説明	3-1
3.1.2 形状・寸法・材料	3-1
3.1.3 解析範囲	3-2
3.1.4 計算結果の概要	3-2
3.2 計算条件	3-5
3.2.1 設計条件	3-5
3.2.2 運転条件	3-5
3.2.3 材料	3-5
3.2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	3-5
3.2.5 荷重の組合せ及び応力評価	3-5
3.2.6 許容応力	3-5
3.2.7 応力の記号と方向	3-5
3.3 応力計算	3-6
3.3.1 応力評価点	3-6
3.3.2 差圧による応力	3-6
3.3.3 外荷重による応力	3-6
3.3.4 応力の評価	3-6
3.4 応力強さの評価	3-7
3.4.1 一次一般膜応力強さの評価	3-7
3.4.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	3-7
3.5 特別な応力の評価	3-8
3.5.1 座屈に対する評価	3-8

図 表 目 次
(シュラウドサポート)

図 3-1	形状・寸法・材料・応力評価点	3-3
図 3-2	応力計算のモデル	3-11
表 3-1	計算結果の概要	3-4
表 3-2	機器諸元	3-12
表 3-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	3-13
表 3-4	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	3-14
表 3-5	座屈に対する評価	3-15

目 次
(上部格子板)

4. 上部格子板の応力計算	4-1
4.1 一般事項	4-1
4.1.1 記号の説明	4-1
4.1.2 形状・寸法・材料	4-1
4.1.3 解析範囲	4-1
4.1.4 計算結果の概要	4-1
4.2 計算条件	4-5
4.2.1 設計条件	4-5
4.2.2 運転条件	4-5
4.2.3 材料	4-5
4.2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	4-5
4.2.5 荷重の組合せ及び応力評価	4-5
4.2.6 許容応力	4-5
4.2.7 応力の記号と方向	4-6
4.3 応力計算	4-7
4.3.1 応力評価点	4-7
4.3.2 差圧による応力	4-7
4.3.3 外荷重による応力	4-9
4.3.4 応力の評価	4-11
4.4 応力強さの評価	4-12
4.4.1 一次一般膜応力強さの評価	4-12
4.4.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	4-12

図 表 目 次
(上部格子板)

図 4-1	形状・寸法・材料・応力評価点	4-2
図 4-2	応力計算モデル	4-13
表 4-1	計算結果の概要	4-4
表 4-2	断面性状	4-15
表 4-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ (リム胴板)	4-16
表 4-4	一次一般膜応力強さの評価のまとめ (グリッドプレート)	4-16
表 4-5	一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ (リム胴板)	4-17
表 4-6	一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ (グリッドプレート)	4-17

目 次
(炉心支持板)

5. 炉心支持板の応力計算	5-1
5.1 一般事項	5-1
5.1.1 記号の説明	5-1
5.1.2 形状・寸法・材料	5-2
5.1.3 解析範囲	5-2
5.1.4 計算結果の概要	5-2
5.2 計算条件	5-7
5.2.1 設計条件	5-7
5.2.2 運転条件	5-7
5.2.3 材料	5-7
5.2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	5-7
5.2.5 荷重の組合せ及び応力評価	5-7
5.2.6 許容応力	5-7
5.2.7 応力の記号と方向	5-8
5.3 応力計算	5-9
5.3.1 応力評価点	5-9
5.3.2 差圧による応力	5-9
5.3.3 外荷重による応力	5-12
5.3.4 応力の評価	5-15
5.4 応力強さの評価	5-16
5.4.1 一次一般膜応力強さの評価	5-16
5.4.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	5-16

図 表 目 次
(炉心支持板)

図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点	5-3
図 5-2	補強ビームの荷重計算モデル	5-17
図 5-3	補強ビームの応力計算モデル	5-17
図 5-4	支持板の荷重計算及び応力計算モデル	5-19
図 5-5	支持板の応力計算モデル	5-20
表 5-1	計算結果の概要	5-6
表 5-2	断面性状	5-21
表 5-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	5-22
表 5-4	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	5-23

目 次
(燃料支持金具)

6. 燃料支持金具の応力計算	6-1
6.1 一般事項	6-1
6.1.1 記号の説明	6-1
6.1.2 形状・寸法・材料	6-1
6.1.3 解析範囲	6-1
6.1.4 計算結果の概要	6-1
6.2 計算条件	6-5
6.2.1 設計条件	6-5
6.2.2 運転条件	6-5
6.2.3 材料	6-5
6.2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	6-5
6.2.5 荷重の組合せ及び応力評価	6-5
6.2.6 許容応力	6-5
6.2.7 応力の記号と方向	6-5
6.3 応力計算	6-6
6.3.1 応力評価点	6-6
6.3.2 差圧による応力	6-6
6.3.3 外荷重による応力	6-7
6.3.4 応力の評価	6-7
6.4 応力強さの評価	6-8
6.4.1 一次一般膜応力強さの評価	6-8
6.4.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	6-8

図 表 目 次
(燃料支持金具)

図 6-1	形状・寸法・材料・応力評価点	6-2
図 6-2	中央燃料支持金具の差圧による応力計算モデル	6-9
図 6-3	中央燃料支持金具の外荷重による応力計算モデル	6-9
表 6-1	計算結果の概要	6-4
表 6-2	断面性状	6-10
表 6-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	6-11
表 6-4	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	6-12

目 次
(制御棒案内管)

7. 制御棒案内管の応力計算	7-1
7.1 一般事項	7-1
7.1.1 記号の説明	7-1
7.1.2 形状・寸法・材料	7-1
7.1.3 解析範囲	7-1
7.1.4 計算結果の概要	7-1
7.2 計算条件	7-4
7.2.1 設計条件	7-4
7.2.2 運転条件	7-4
7.2.3 材料	7-4
7.2.4 荷重の組合せ及び許容応力状態	7-4
7.2.5 荷重の組合せ及び応力評価	7-4
7.2.6 許容応力	7-4
7.2.7 応力の記号と方向	7-4
7.3 応力計算	7-5
7.3.1 応力評価点	7-5
7.3.2 差圧による応力	7-5
7.3.3 外荷重による応力	7-6
7.3.4 応力の評価	7-6
7.4 応力強さの評価	7-7
7.4.1 一次一般膜応力強さの評価	7-7
7.4.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	7-7

図 表 目 次
(制御棒案内管)

図 7-1	形状・寸法・材料・応力評価点	7-2
表 7-1	計算結果の概要	7-3
表 7-2	断面性状	7-8
表 7-3	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	7-9
表 7-4	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	7-10

1. 概要

本計算書は、炉心支持構造物の応力計算書である。

本計算書の各機器は、炉心支持構造物であるため、VI-2-3-2-2「炉心支持構造物の応力解析の方針」（以下「応力解析の方針」という。）に基づき評価する。

本計算書は、炉心支持構造物であって、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備に分類される下記の機器について、構造強度評価の結果を示すものである。

- ・炉心シュラウド
- ・シュラウドサポート
- ・上部格子板
- ・炉心支持板
- ・制御棒案内管
- ・燃料支持金具

注：本計算書においては、平成5年6月17日付け4資庁第14561号にて認可された工事計画の添付書類（「応力解析の方針」の参照図書(1)）を「既工認」という。

2. 炉心シュラウドの応力計算

2.1 一般事項

本章は、炉心シュラウドの応力計算について示すものである。

炉心シュラウドは、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。

2.1.1 記号の説明

記号の説明を「応力解析の方針」の2.4節に示す。

さらに、本章において、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
σ _c	平均支圧応力	MPa

2.1.2 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図2-1に示す。

2.1.3 解析範囲

解析範囲を図2-1に示す。

なお、下部胴とシュラウドサポートとの接合部の応力解析及び評価は、3章に記載する。

2.1.4 計算結果の概要

計算結果の概要を表2-1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記載する。

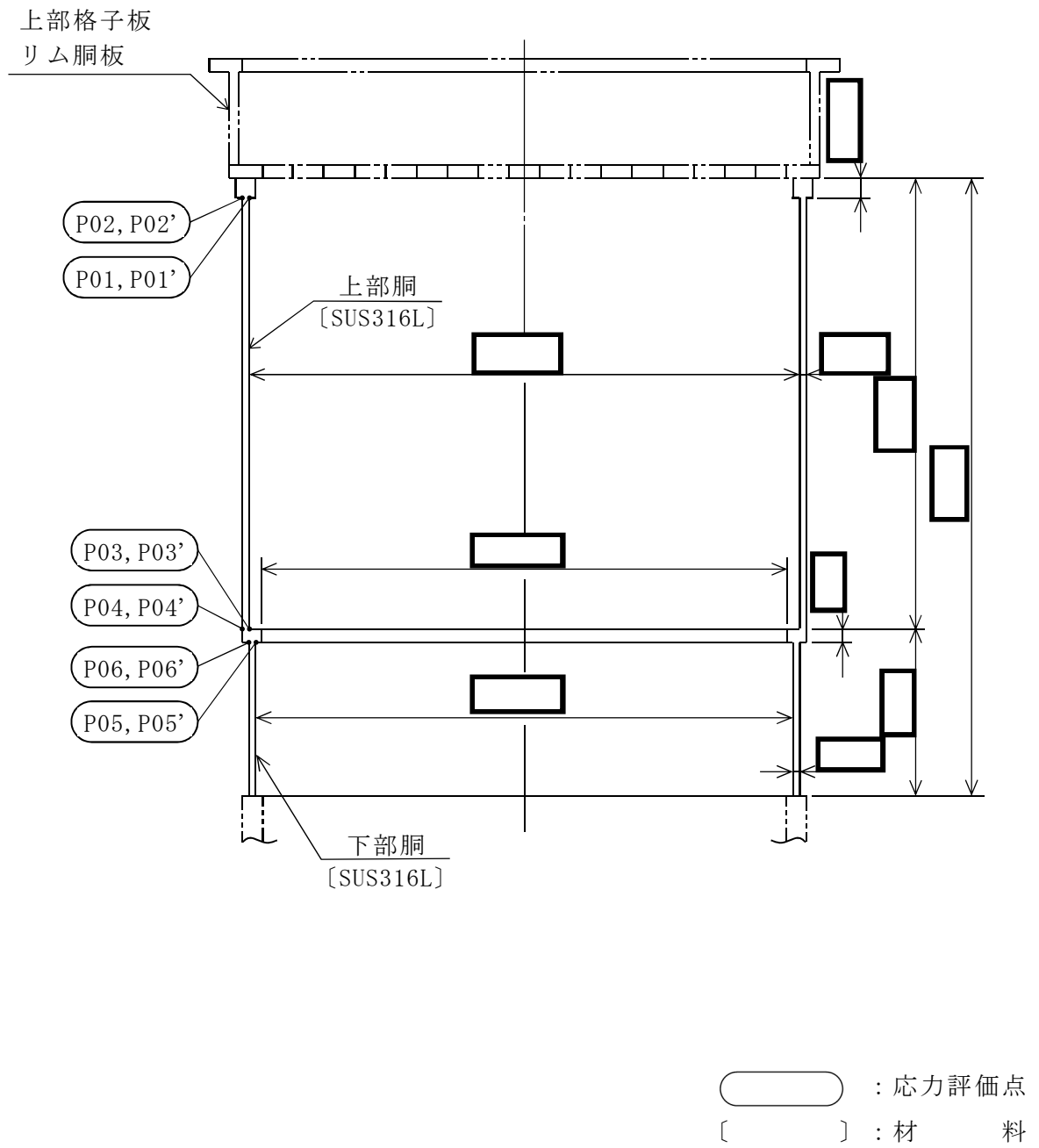


図2-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 2-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ		一次一般膜+一次曲げ応力強さ	
		応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
上部胴 SUS316L	Ⅲ A S	11	128*	11	192*
	Ⅳ A S	14	205*	14	308*
	Ⅲ A S	24	128*	24	192*
	Ⅳ A S	28	205*	28	308*
下部胴 SUS316L	Ⅲ A S	26	128*	26	192*
	Ⅳ A S	29	205*	29	308*

注記*：継手効率 \square を乗じた値を示す。

表 2-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	支圧応力	
		平均支圧応力	許容応力
炉心支持板支持面 SUS316L	Ⅲ A S	1	157
	Ⅳ A S	1	210

2.2 計算条件

2.2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の4.1節に示す。

2.2.2 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。

2.2.3 材料

各部の材料を図2-1に示す。

2.2.4 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を「応力解析の方針」の3.3節に示す。

2.2.5 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価を「応力解析の方針」の4.3節に示す。

2.2.6 許容応力

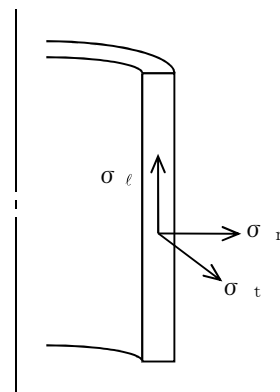
許容応力を「応力解析の方針」の3.4節に示す。

溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の3.6節に示す。

2.2.7 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



2.3 応力計算

2.3.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 2-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 2-2 に示すとおりである。

2.3.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧は、既工認から変更はなく「応力解析の方針」の参照図書(1)b.に定めるとおりである。

(2) 計算方法

a. 一次一般膜応力

差圧 P による一次一般膜応力は、内圧を受ける円筒にモデル化し、次式で求める。

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

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

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

ここで、 $Y = \frac{D_o}{D_i}$

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。

2.3.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

外荷重を「応力解析の方針」の表 4-1(1)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、外荷重と各応力評価断面の断面性状により次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{H}{A}$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

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。

2.3.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力を分類ごとに重ね合わせて組合せ応力を求め、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 5.2.2 項に定めるとおりである。

2.4 応力強さの評価

2.4.1 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表 2-3 に示す。

表 2-3 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

2.4.2 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表 2-4 に示す。

表 2-4 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

2.5 特別な応力の評価

2.5.1 支圧応力の評価

炉心シュラウドの炉心支持板支持面には、鉛直力により支圧応力が生じるため、支圧応力の評価を行う。

(1) 支圧面積（図 2-2 参照）

炉心支持板支持面の支圧荷重を受ける面積は、以下のとおりである。

$$A = \boxed{\phantom{\hspace{4cm}}} \text{mm}^2$$

(2) 支圧荷重

各許容応力状態における炉心支持板支持面に作用する鉛直力を「応力解析の方針」の表 4-1(1)に示す。

(3) 平均支圧応力

平均支圧応力 σ_c は、次式で求める。

$$\sigma_c = \frac{V}{A}$$

(4) 支圧応力の評価

各許容応力状態における評価を表 2-5 に示す。

表 2-5 より、各許容応力状態の平均支圧応力は、「応力解析の方針」の 3.4 節に示す許容応力を満足する。

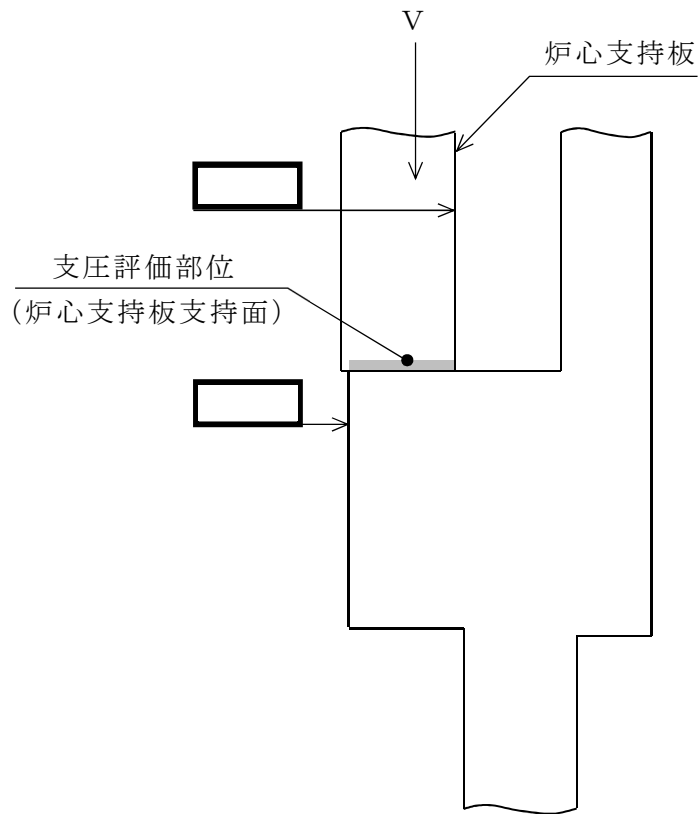


図 2-2 支圧荷重の支持面 (単位 : mm)

表 2-2 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				

表 2-3 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	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	8	128*	11	205*
P01' P02'	11	128*	14	205*
P03 P04	20	128*	23	205*
P03' P04'	24	128*	28	205*
P05 P06	23	128*	25	205*
P05' P06'	26	128*	29	205*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 2-4 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態Ⅲ A S		許容応力状態Ⅳ A S	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	8	192*	11	308*
P01' P02'	11	192*	14	308*
P03 P04	20	192*	23	308*
P03' P04'	24	192*	28	308*
P05 P06	23	192*	25	308*
P05' P06'	26	192*	29	308*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 2-5 支圧応力の評価

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態	平均支圧応力	許容応力
炉心支持板 支持面	Ⅲ A S	1	157
	Ⅳ A S	1	210

3. シュラウドサポートの応力計算

3.1 一般事項

本章は、シュラウドサポートの応力計算について示すものである。

シュラウドサポートは、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。

注：以下、シュラウドサポートレグ、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炉心シュラウド下部胴を、それぞれ「レグ」、「シリンダ」、「プレート」及び「下部胴」という。

3.1.1 記号の説明

記号の説明を「応力解析の方針」の2.4節に示す。

さらに、本章において、以下の記号を用いる。

記号	記号の説明	単位
A	レグ1本当たりの断面積	mm ²
B	レグの幅	mm
C	部材両端の拘束条件に対する座屈長さの係数	—
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値	MPa
F*	設計・建設規格 SSB-3121.3に定める値	MPa
f_c	許容応力 設計・建設規格 SSB-3121.1(3)に定める値	MPa
I	座屈軸についての断面二次モーメント	mm ⁴
i	座屈軸についての断面二次半径	mm
ℓ	レグの長さ	mm
ℓ_k	座屈長さ	mm
T	レグの板厚	mm
Λ	限界細長比	—
λ	有効細長比	—
ν	設計・建設規格 SSB-3121.1(3)a.における ν	—

3.1.2 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図3-1に示す。

3.1.3 解析範囲

解析範囲を図3-1に示す。

3.1.4 計算結果の概要

計算結果の概要を表3-1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記載する。

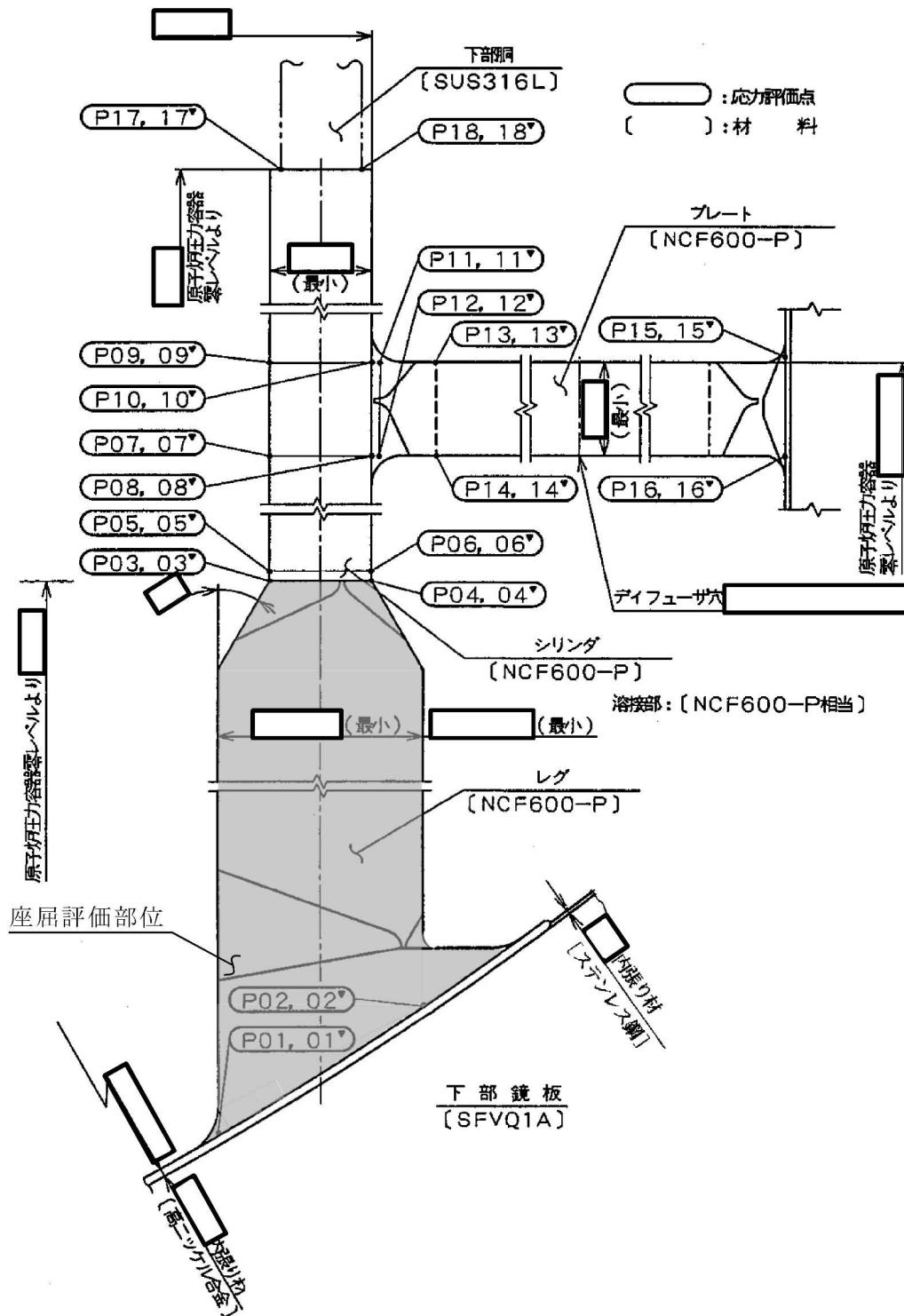


図3-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 3-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ		一次一般膜＋一次曲げ応力強さ	
		応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
レグ NCF600-P	ⅢA S	69	246	P03 - P04 69	P03 - P04 369
	ⅣA S	75	334	P03 - P04 75	P03 - P04 501
シリンドラ NCF600-P	ⅢA S	36	246	P09 - P10 36	P09 - P10 369
	ⅣA S	40	334	P05 - P06 40	P05 - P06 501
プレート NCF600-P	ⅢA S	25	221*	P15' - P16' 25	P15' - P16' 332*
	ⅣA S	31	300*	P15' - P16' 31	P15' - P16' 450*
下部胴 SUS316L	ⅢA S	31	128*	P17 - P18 31	P17 - P18 192*
	ⅣA S	33	205*	P17 - P18 33	P17 - P18 308*

注記* : 継手効率 を乗じた値を示す。

表3-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	座屈に対する評価	
		圧縮応力	許容応力
レグ NCF600-P	ⅢA S	57	243
	ⅣA S	63	260

3.2 計算条件

3.2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の4.1節に示す。

3.2.2 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。

3.2.3 材料

各部の材料を図3-1に示す。

3.2.4 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を「応力解析の方針」の3.3節に示す。

3.2.5 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価を「応力解析の方針」の4.3節に示す。

3.2.6 許容応力

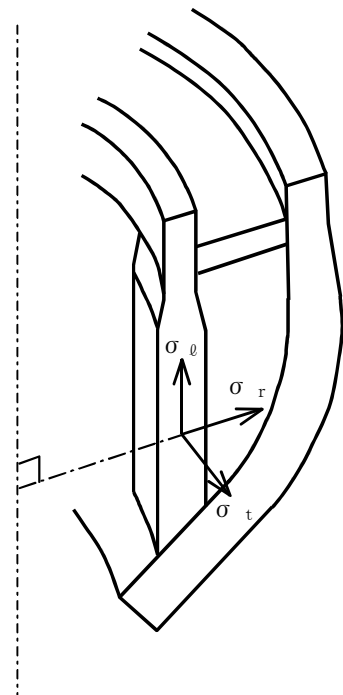
許容応力を「応力解析の方針」の3.4節に示す。

溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の3.6節に示す。

3.2.7 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



3.3 応力計算

3.3.1 応力評価点

応力評価点の位置を図3-1に示す。

3.3.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧は、既工認から変更はなく「応力解析の方針」の参照図書(1)c.に定めるとおりである。

(2) 計算方法

差圧による応力の計算は、既工認から変更はなく「応力解析の方針」の参照図書(1)c.に定めるとおりである。

3.3.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L12, L13, L18, L19, L14及びL16)

外荷重を「応力解析の方針」の表4-1(2)に示す。

(2) 計算方法

外荷重による応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、「応力解析の方針」の5.1節に示す解析コード「STAX」及び「ASHSD」により行う。

解析においては、原子炉圧力容器及びシュラウドとの取り合い部で溶接されるため、原子炉圧力容器（下部鏡板及び胴板）及びシュラウドの一部を含めてモデル化している。拘束条件は、下部鏡板及び胴板の端部の変位を拘束している。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件を図3-2に示す。また、地震による評価に用いる機器の諸元について表3-2に示す。

3.3.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力を分類ごとに重ね合わせて組合せ応力を求め、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5.2.2項に定めるとおりである。

3.4 応力強さの評価

3.4.1 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表3-3に示す。

表3-3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3.4節及び3.6節に示す許容応力を満足する。

3.4.2 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表3-4に示す。

表3-4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3.4節及び3.6節に示す許容応力を満足する。

3.5 特別な応力の評価

3.5.1 座屈に対する評価

レグには、シュラウドサポートに作用する鉛直力及びモーメントにより、圧縮応力が生じる。したがって、これらの荷重の組合せにより発生する圧縮応力の評価を行う。

(1) 計算データ

a. 座屈長さ ℓ_k

a. 座 $\ell_k = C \cdot \ell = 0.7 \times$ $=$ mm

ここで、 $C = 0.7$

ℓ : レグの長さ $=$ mm

b. 座屈軸についての断面二次半径 i

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} =$$
 $=$ mm

ここで、 I : 座屈軸についての断面二次モーメント

$$= \frac{1}{12} \cdot T^3 \cdot B =$$
 mm⁴

T : レグの板厚 $=$ mm

B : レグの幅 $=$ mm

A : レグ 1 本当たりの断面積

$$= T \cdot B =$$
 mm²

c. 有効細長比 λ

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i} =$$
 $=$

(2) 荷重

シュラウドサポートに作用する鉛直力及びモーメントを「応力解析の方針」の表4-1(2)に示す。

(3) 圧縮応力

各許容応力状態においてレグに発生する圧縮応力を表3-5に示す。

レグに発生する圧縮応力は、応力評価面P03'-P04'での一次一般膜応力 (σ_e) を示す。

(4) 許容応力

各許容応力状態における許容応力の計算は、設計・建設規格 SSB-3121を準用して計算する。

a. 許容応力状態ⅢA S

許容応力状態ⅢA Sにおける許容応力 f_c は、次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比} : \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \boxed{}}{0.6 \times \boxed{}}} \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

ここで、F : 許容応力度 = $\boxed{}$ MPa

E : 縦弾性係数 = $\boxed{}$ MPa ($\boxed{}$ °Cにおける値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$\begin{aligned} f_c &= 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \\ &= 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\boxed{} \right)^2 \right\} \times \boxed{} = 243 \text{ MPa} \end{aligned}$$

ここで、 $\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\boxed{} \right)^2 = \boxed{}$$

b. 許容応力状態ⅣA S

許容応力状態ⅣA Sにおける許容応力 f_c は、次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比} : \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F^*}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \boxed{}}{0.6 \times \boxed{}}} \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

ここで、F* : 許容応力度 = $\boxed{}$ MPa

E : 縦弾性係数 = $\boxed{}$ MPa ($\boxed{}$ °Cにおける値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$\begin{aligned} f_c &= 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F^*}{\nu} \\ &= 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\boxed{} \right)^2 \right\} \times \boxed{} = 260 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } \nu &= 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \\ &= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\boxed{} \right)^2 = \boxed{} \end{aligned}$$

(5) 座屈に対する評価

各許容応力状態における座屈に対する評価を表3-5に示す。

表3-5より、各許容応力状態における圧縮応力は、許容応力を満足するため、座屈は発生しない。

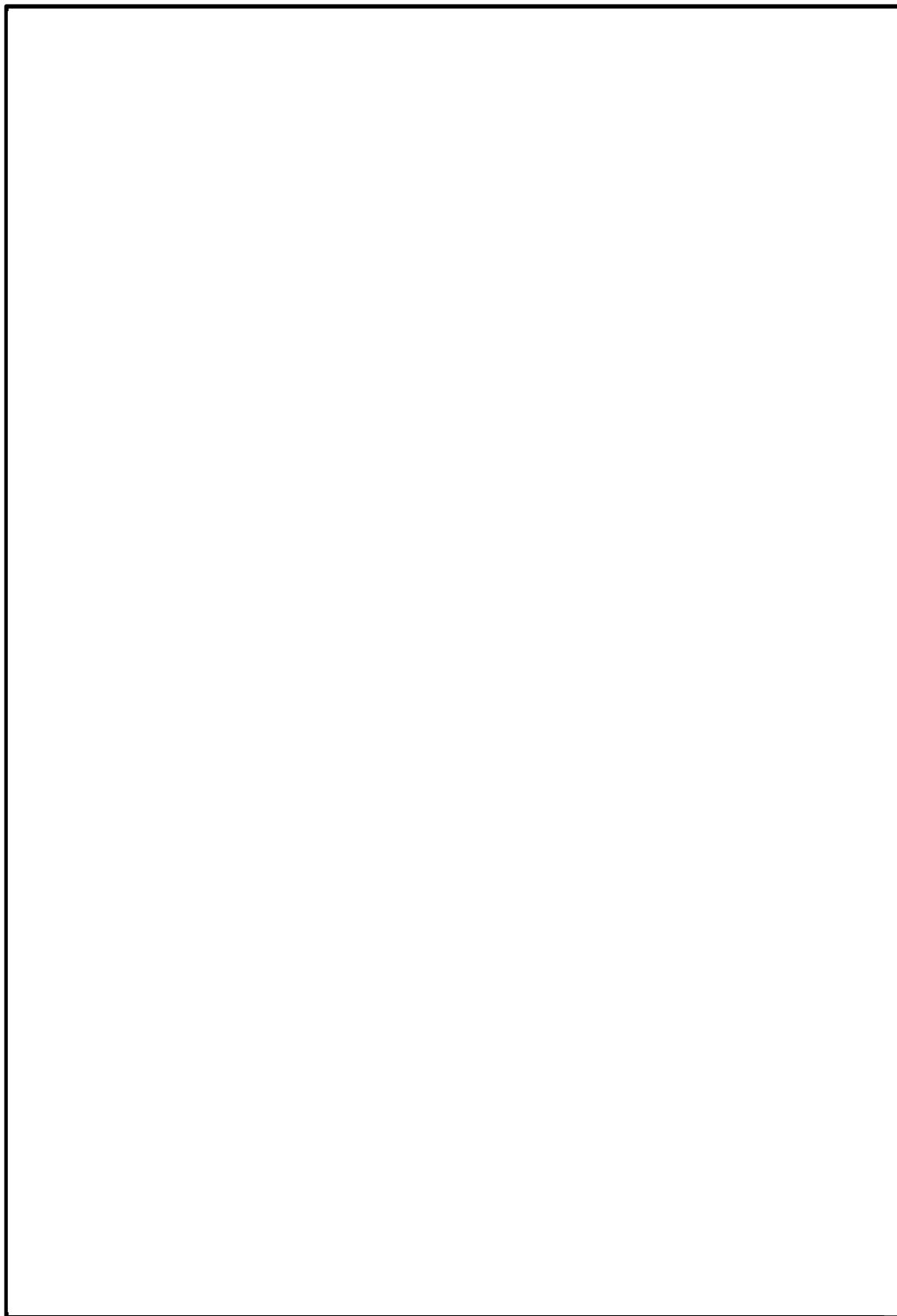


図3-2 応力計算のモデル

表 3-2 機器諸元

項目		記号	単位	入力値
材質		—	—	SFVQ1A
		—	—	SUS316L
		—	—	NCF600-P
温度条件		T	℃	
縦弾性係数	SFVQ1A	E	MPa	
	SUS316L	E	MPa	
	NCF600-P	E	MPa	
ポアソン比		ν	—	
要素数		—	—	
節点数		—	—	

表 3-3 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態Ⅲ A S		許容応力状態Ⅳ A S	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	42	221*	47	300*
P01' P02'	27	221*	31	300*
P03 P04	69	246	75	334
P03' P04'	41	246	47	334
P05 P06	35	246	40	334
P05' P06'	18	246	20	334
P07 P08	26	246	30	334
P07' P08'	26	246	28	334
P09 P10	36	246	38	334
P09' P10'	23	246	27	334
P11 P12	15	221*	15	300*
P11' P12'	23	221*	28	300*
P13 P14	11	246	15	334
P13' P14'	25	246	30	334
P15 P16	7	221*	13	300*
P15' P16'	25	221*	31	300*
P17 P18	31	128*	33	205*
P17' P18'	26	128*	27	205*

注記* : 継手効率 を乗じた値を示す。

表 3-4 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態ⅢA S		許容応力状態ⅣA S	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	42	332*	47	450*
P01' P02'	27	332*	31	450*
P03 P04	69	369	75	501
P03' P04'	41	369	47	501
P05 P06	35	369	40	501
P05' P06'	18	369	20	501
P07 P08	26	369	30	501
P07' P08'	26	369	28	501
P09 P10	36	369	38	501
P09' P10'	23	369	27	501
P11 P12	15	332*	15	450*
P11' P12'	23	332*	28	450*
P13 P14	11	369	15	501
P13' P14'	25	369	30	501
P15 P16	7	332*	13	450*
P15' P16'	25	332*	31	450*
P17 P18	31	192*	33	308*
P17' P18'	26	192*	27	308*

注記* : 継手効率 を乗じた値を示す。

表3-5 座屈に対する評価

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態	圧縮応力	許容応力
P03'-P04'	Ⅲ A S	57	243
	Ⅳ A S	63	260

4. 上部格子板の応力計算

4.1 一般事項

本章は、上部格子板の応力計算について示すものである。

上部格子板は、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。

4.1.1 記号の説明

記号の説明を「応力解析の方針」の2.4節に示す。

さらに、本章において、以下の記号を用いる。

記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
a	グリッドプレートの板厚	mm
D _i	内径	mm
D _o	外径	mm
h	グリッドプレートの高さ	mm
I	断面二次モーメント	mm ⁴
L	グリッドプレート17スパンの長さ	mm
ℓ	グリッドプレート1スパンの長さ	mm

4.1.2 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図4-1に示す。

4.1.3 解析範囲

解析範囲を図4-1に示す。

4.1.4 計算結果の概要

計算結果の概要を表4-1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記載する。

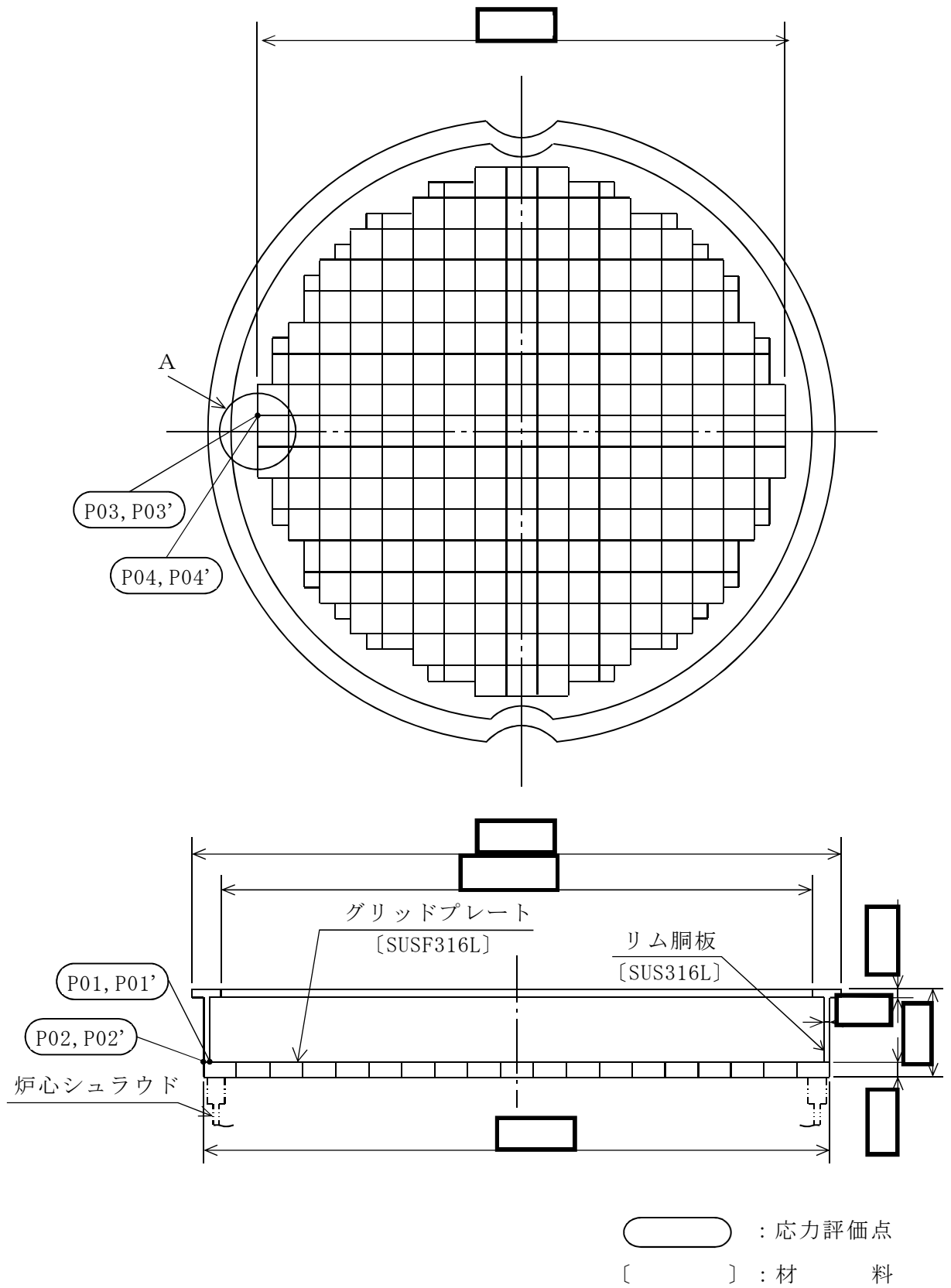


図 4-1(1) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

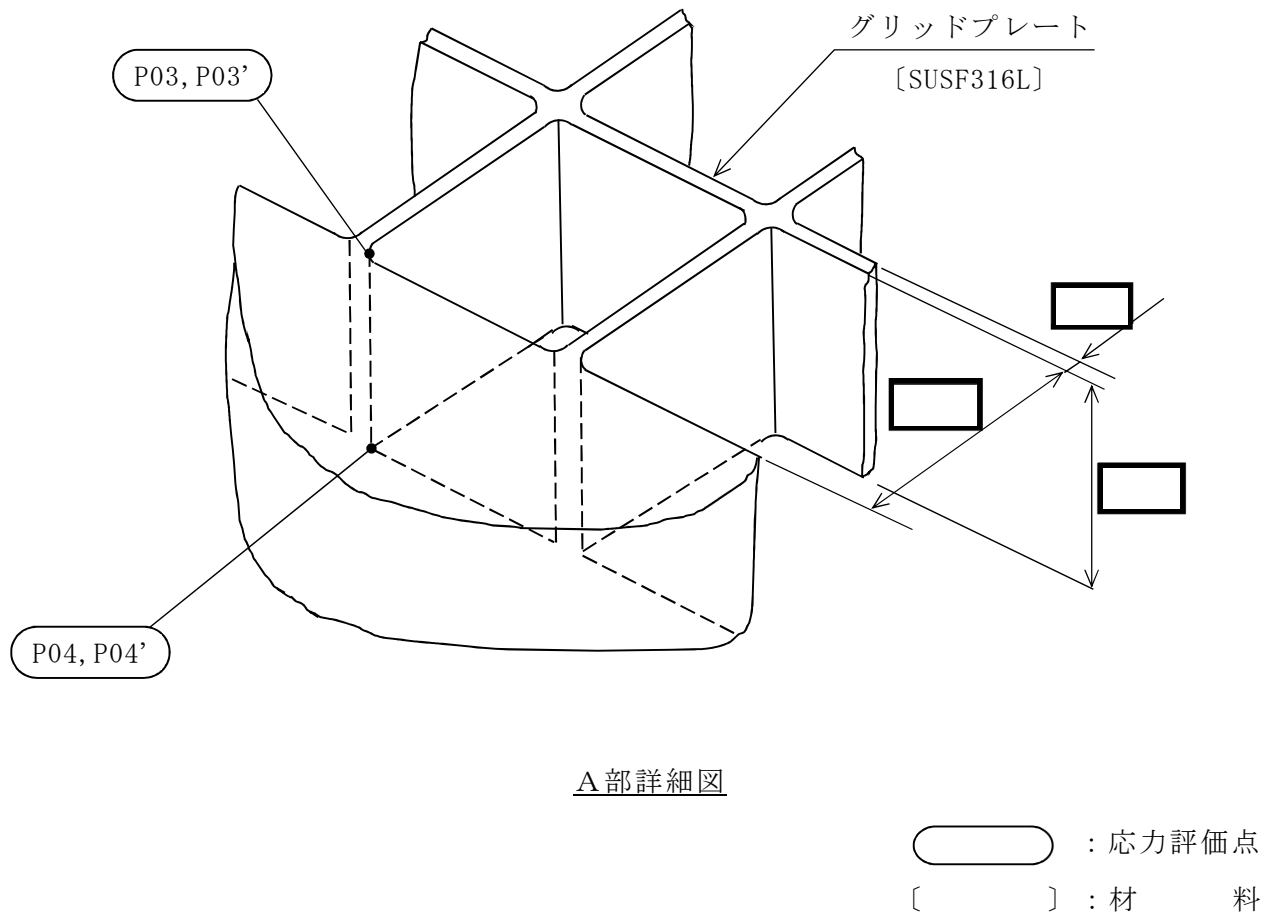


図 4-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 4-1 (1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ		
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価面
リム胴板 SUS316L	ⅢA S	10	128*	P01'-P02'	10	192*	P01'-P02'
	ⅣA S	13	205*	P01'-P02'	13	308*	P01'-P02'

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 4-1 (2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ			一次一般膜＋一次曲げ応力強さ		
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価点
グリッド プレート SUS316L	ⅢA S	3	142	P03-P04	32	213	P03
	ⅣA S	4	228	P03-P04	48	342	P03

4.2 計算条件

4.2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の4.1節に示す。

4.2.2 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。

4.2.3 材料

各部の材料を図4-1に示す。

4.2.4 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を「応力解析の方針」の3.3節に示す。

4.2.5 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価を「応力解析の方針」の4.3節に示す。

4.2.6 許容応力

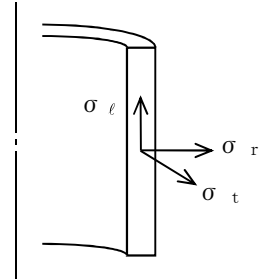
許容応力を「応力解析の方針」の3.4節に示す。

溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の3.6節に示す。

4.2.7 応力の記号と方向

リム胴板部の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
- τ_{tl} : せん断応力
- τ_{lr} : せん断応力

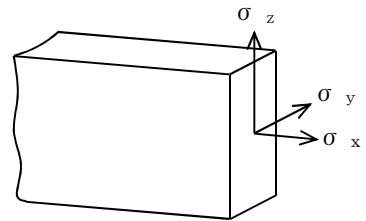


グリッドプレートの応力の記号とその方向は、以下のとおりとする。

なお、主応力の算出は、「応力解析の方針」の5.2.1項に示される式において、

σ_t , σ_l , σ_r , τ_{tl} , τ_{lr} , τ_{rtl} をそれぞれ σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} 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
- τ_{yz} : せん断応力
- τ_{zx} : せん断応力



4.3 応力計算

4.3.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 4-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 4-2 に示すとおりである。

4.3.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧は、既工認から変更はなく「応力解析の方針」の参照図書(1)d.に定めるとおりである。

(2) リム胴板部の計算方法

a. 一次一般膜応力

リム胴板部における差圧 P_{42} による一次一般膜応力は、内圧を受ける円筒にモデル化し、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{42}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{42}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{42}$$

ここで、 $Y = \frac{D_o}{D_i}$

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。

(3) グリッドプレートの計算方法

グリッドプレートの差圧 P_{34} による一次応力は、最大応力の発生する最長グリッドプレートを、図 4-2(1)に示す等分布荷重を受ける両端固定ばりにモデル化し、以下により求める。

- a. 差圧 P_{34} による荷重

$$W_P = -P_{34} \cdot a \cdot L$$

- b. 端部におけるモーメント

$$M = \frac{W_P \cdot L}{12}$$

- c. 曲げ応力

$$\sigma_x = \frac{M}{I_1} \cdot \frac{h}{2}$$

- d. せん断応力

$$\tau_{zx} = \frac{W_P}{2 \cdot A}$$

4.3.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

外荷重を「応力解析の方針」の表 4-1(3)に示す。

(2) リム胴板部の計算方法

a. 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は，外荷重と応力評価断面の断面性状により次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A} + \frac{M}{I_1} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{H}{A}$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

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。

(3) グリッドプレートの計算方法

外荷重による一次応力は、以下により求める。

a. 鉛直方向荷重による応力

最大応力の発生する最長グリッドプレートを、図 4-2(1)に示す等分布荷重を受ける両端固定ばりにモデル化し、以下により求める。

(a) グリッドプレートの端部における鉛直方向荷重

$$W_v = 17 \cdot V$$

(b) グリッドプレートの端部におけるモーメント

$$M_v = \frac{W_v \cdot L}{12}$$

(c) 曲げ応力

$$\sigma_x = \frac{M_v}{I_1} \cdot \frac{h}{2}$$

(d) せん断応力

$$\tau_{zx} = \frac{W_v}{2 \cdot A}$$

b. 水平方向荷重による応力

格子 1 個当たりのグリッドプレートを，図 4-2(2)に示す等分布荷重を受ける両端固定ばりにモデル化し，以下により求める。

(a) 格子 1 個当たりの水平方向荷重

$$W_H = \frac{4 \cdot H}{\square}$$

(b) 格子の端部におけるモーメント

$$M_H = \frac{W_H \cdot \ell}{12}$$

(c) 曲げ応力

$$\sigma_x = \frac{M_H}{I_2} \cdot \frac{a}{2}$$

(d) せん断応力

$$\tau_{xy} = \frac{W_H}{2 \cdot A}$$

4.3.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力を分類ごとに重ね合わせて組合せ応力を求め，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 5.2.2 項に定めるとおりである。

4.4 応力強さの評価

4.4.1 一次一般膜応力強さの評価

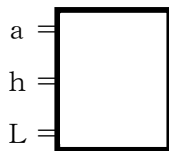
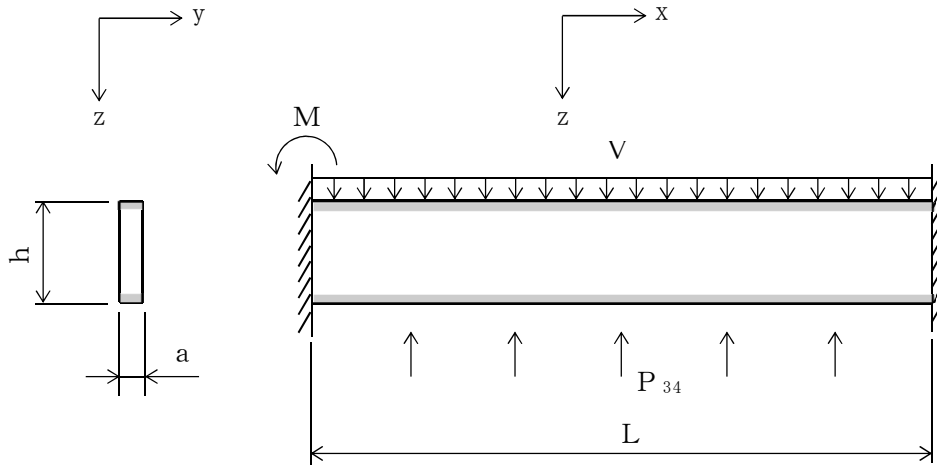
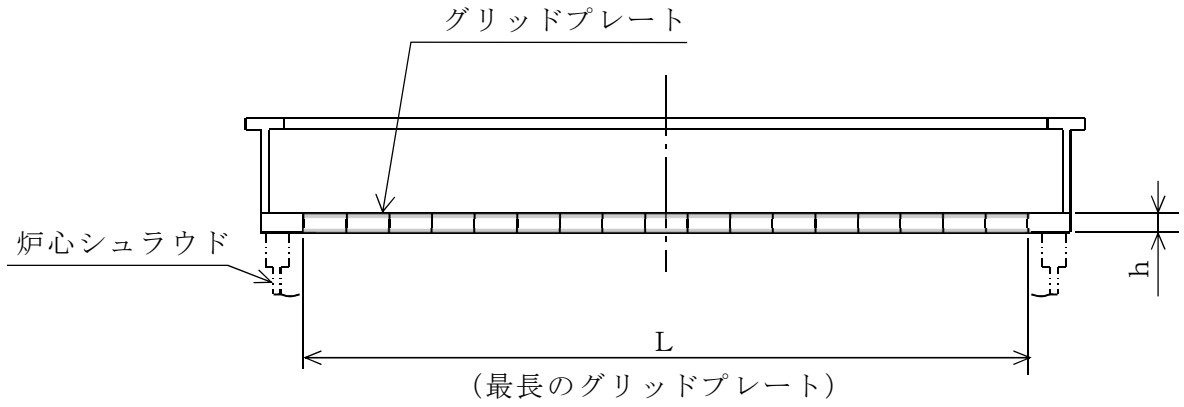
各許容応力状態における評価を表 4-3 及び表 4-4 に示す。

表 4-3 及び表 4-4 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

4.4.2 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価

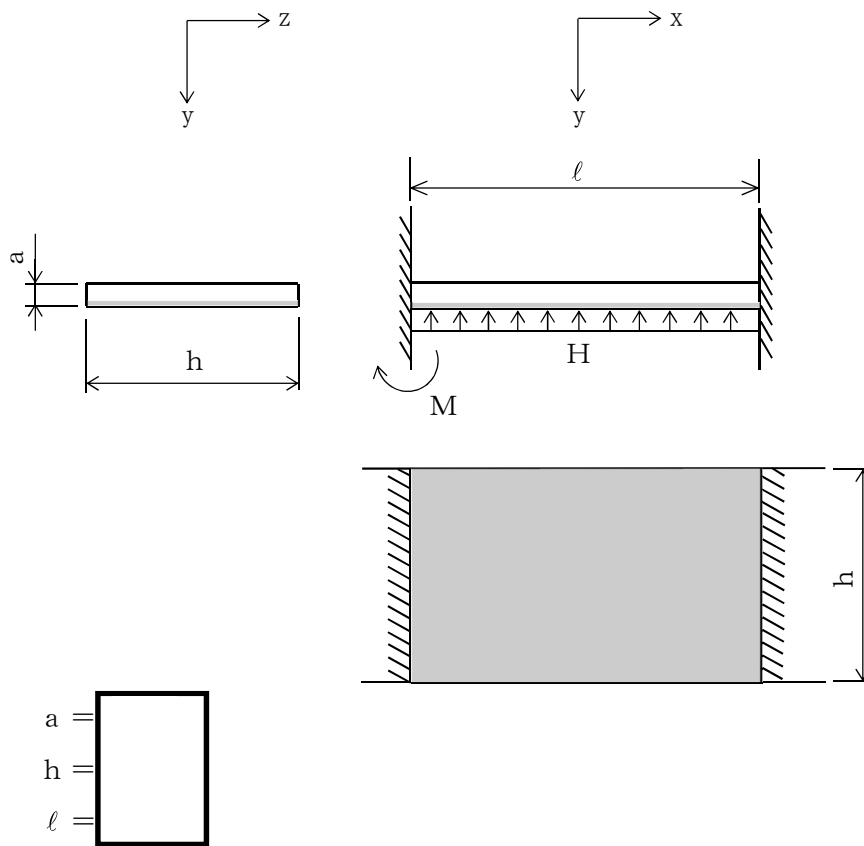
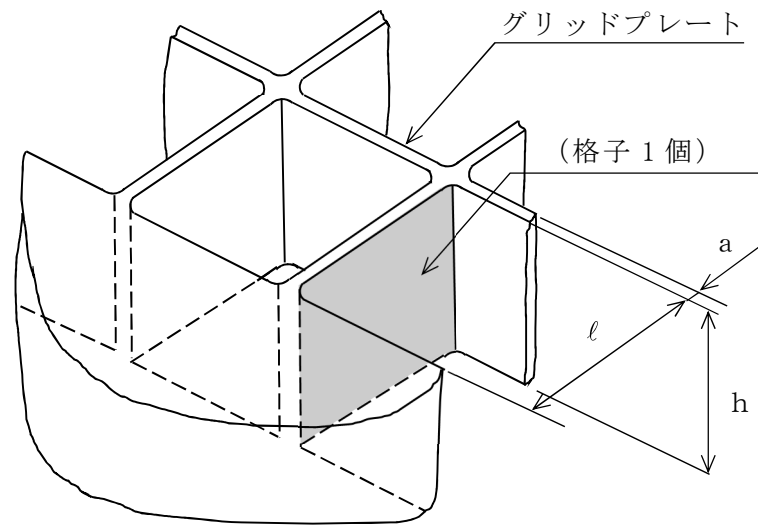
各許容応力状態における評価を表 4-5 及び表 4-6 に示す。

表 4-5 及び表 4-6 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。



モデル図 (最長のグリッドプレート)

図 4-2(1) 応力計算モデル (鉛直方向荷重) (単位: mm)



モデル図 (格子 1 個)

図 4-2(2) 応力計算モデル (水平方向荷重) (単位 : mm)

表 4-2 断面性状

応力評価点	D_o (mm)	D_i (mm)	a (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I_1 (mm ⁴)	I_2 (mm ⁴)
P01, P02							
P03, P04							

注記*1: グリッドプレートの y 軸まわりの断面二次モーメント

*2: グリッドプレートの z 軸まわりの断面二次モーメント

表 4-3 一次一般膜応力強さの評価のまとめ（リム胴板）

（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	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	8	128*	10	205*
P01' P02'	10	128*	13	205*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 4-4 一次一般膜応力強さの評価のまとめ（グリッドプレート）

（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	許容応力	応力強さ	許容応力
P03 P04	3	142	4	228
P03' P04'	3	142	4	228

表 4-5 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ（リム胴板）

（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	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	8	192*	10	308*
P01' P02'	10	192*	13	308*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 4-6 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ（グリッドプレート）

（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	許容応力	応力強さ	許容応力
P03	32	213	48	342
P03'	24	213	40	342
P04	24	213	40	342
P04'	32	213	48	342

5. 炉心支持板の応力計算

5.1 一般事項

本章は、炉心支持板の応力計算について示すものである。

炉心支持板は、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。

5.1.1 記号の説明

記号の説明を「応力解析の方針」の2.4節に示す。

さらに、本章において、以下の記号を用いる。

記号	記号の説明	単位
a_i	補強ビーム長さ	mm
b_e	等価幅	mm
D	制御棒案内管用穴径	mm
d	中性子束計測案内管用穴径	mm
e_1	中立軸からの距離	mm
e_1'	中立軸からの距離	mm
e_2	中立軸からの距離	mm
e_3	中立軸からの距離	mm
e_A	中立軸からの距離	mm
e_B	中立軸からの距離	mm
h_c	支持板の板厚	mm
h_1	補強ビーム高さ	mm
I_1	断面二次モーメント	mm ⁴
I_2	断面二次モーメント	mm ⁴
I_3	断面二次モーメント	mm ⁴
I_A	断面二次モーメント	mm ⁴
I_B	断面二次モーメント	mm ⁴
l_p	補強ビーム1スパン当たりの長さ	mm
t	補強ビーム板厚	mm

5.1.2 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 5-1 に示す。

5.1.3 解析範囲

解析範囲を図 5-1 に示す。

5.1.4 計算結果の概要

計算結果の概要を表 5-1 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記載する。

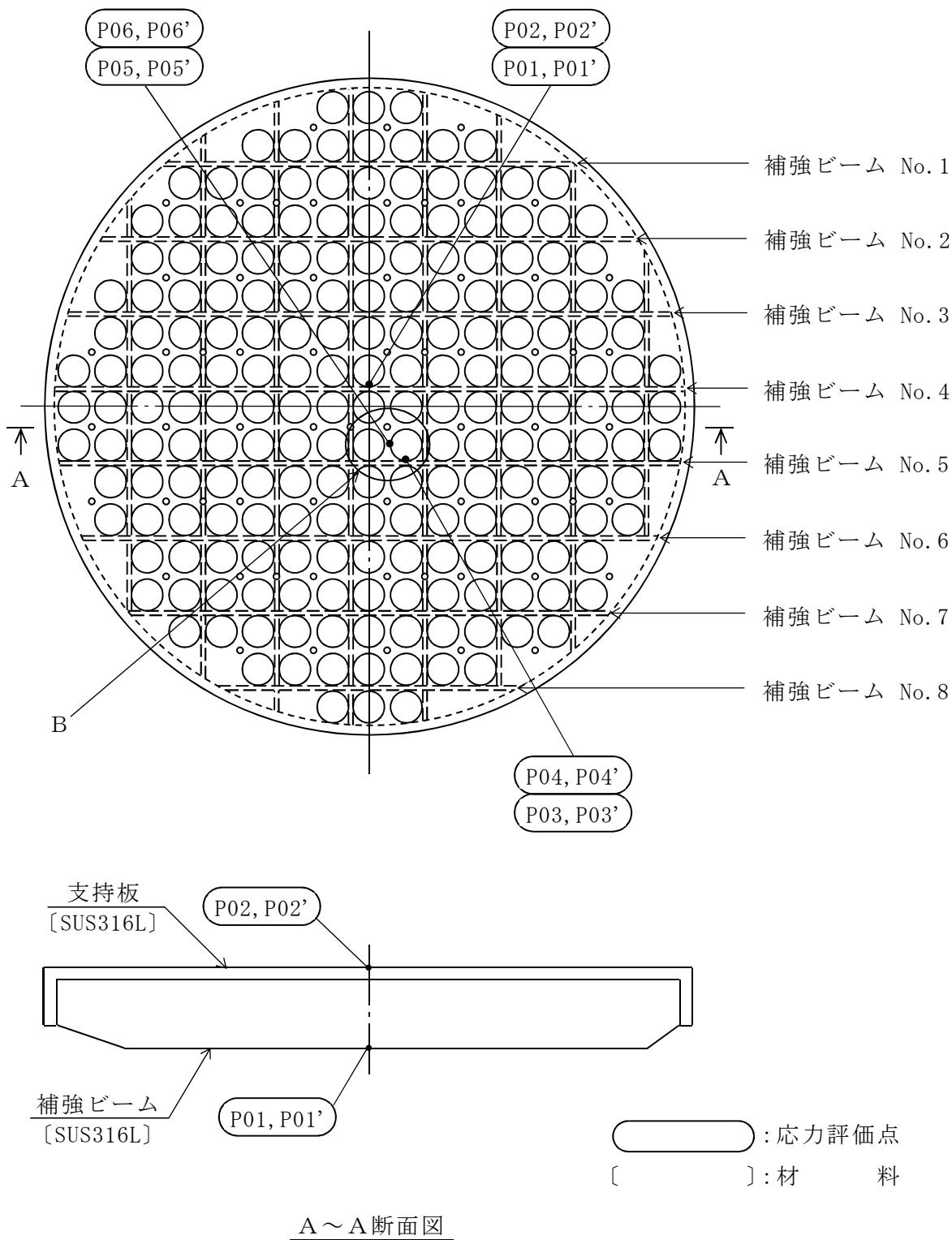


図 5-1(1) 形状・寸法・材料・応力評価点

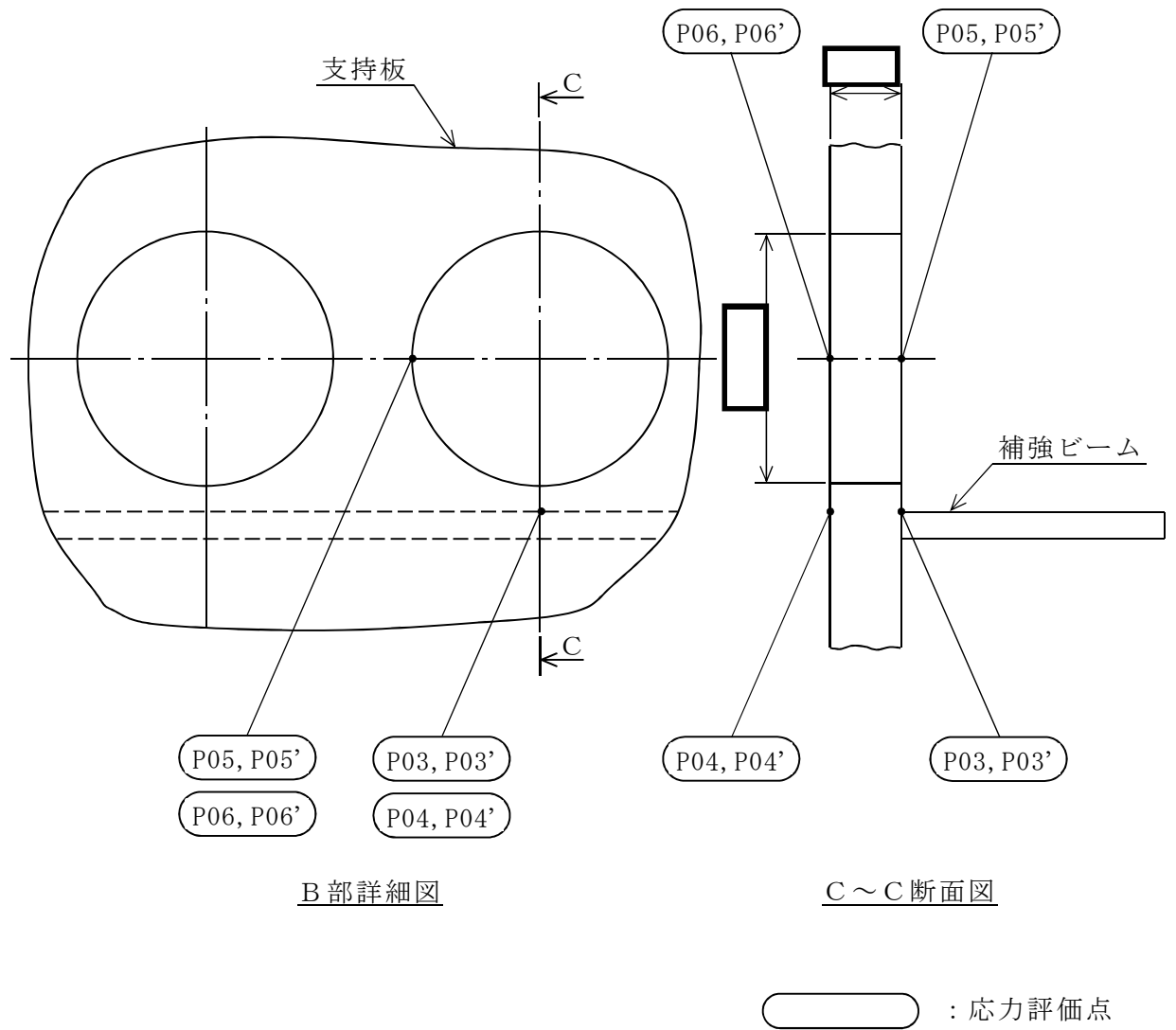
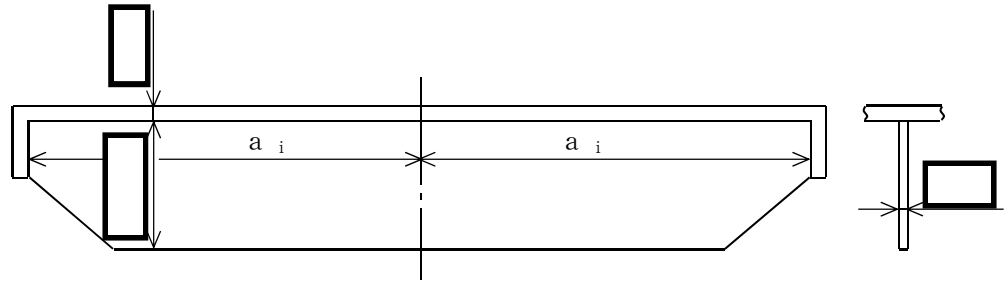


図 5-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)



各補強ビームの a_i の寸法

番号 i	補強ビーム番号	a_i
1	No. 1	
2	No. 2	
3	No. 3	
4	No. 4	
5	No. 5	
6	No. 6	
7	No. 7	
8	No. 8	

図 5-1(3) 形状・寸法・材料・応力評価点（補強ビーム）（単位：mm）

表 5-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ			一次一般膜+一次曲げ応力強さ		
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価点
補強ビーム SUS316L	Ⅲ A S	0	142	P01-P02	63	213	P01'
	Ⅳ A S	0	228	P01-P02	66	342	P01'
支持板 SUS316L	Ⅲ A S	13	142	P05'-P06'	68	213	P05'
	Ⅳ A S	17	228	P05'-P06'	83	342	P05'

5.2 計算条件

5.2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の4.1節に示す。

5.2.2 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。

5.2.3 材料

各部の材料を図5-1に示す。

5.2.4 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を「応力解析の方針」の3.3節に示す。

5.2.5 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価を「応力解析の方針」の4.3節に示す。

5.2.6 許容応力

許容応力を「応力解析の方針」の3.4節に示す。

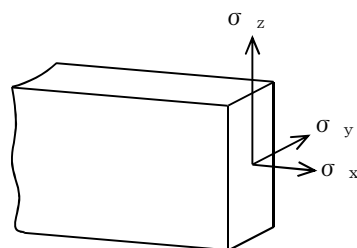
溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の3.6節に示す。

5.2.7 応力の記号と方向

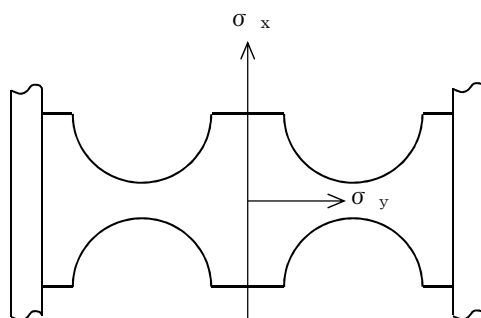
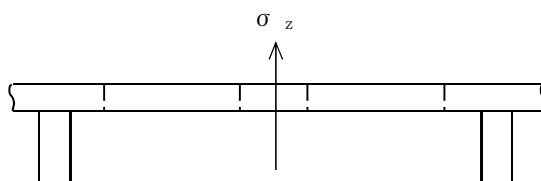
応力の記号とその方向は、以下のとおりとする。

なお、主応力の算出は、「応力解析の方針」の 5.2.1 項に示される式において、 $\sigma_t, \sigma_l, \sigma_r, \tau_{tl}, \tau_{lr}, \tau_{rt}$ をそれぞれ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 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
- τ_{yz} : せん断応力
- τ_{zx} : せん断応力



補強ビーム



支持板

5.3 応力計算

応力計算において、荷重は各補強ビームに加わると考えて計算する。

5.3.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 5-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 5-2 に示すとおりである。

5.3.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧は、既工認から変更はなく「応力解析の方針」の参照図書(1)e. に定めるとおりである。

(2) 計算方法

a. 補強ビーム

補強ビームの差圧による各応力は、図 5-2 及び図 5-3 に示す等分布荷重を受ける両端支持ばりにモデル化し、以下により求める。

(a) 差圧による荷重

補強ビームの荷重計算モデルを図 5-2 に示す。

差圧による単位長さ当たりの分布荷重 W_1 は、次式で求める。

$$W_1 = -P_{13} \cdot \frac{1}{\ell_p} \cdot \left(2 \cdot \ell_p^2 - 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \right)$$

(b) 曲げ応力（一次応力）

図 5-2 に示す補強ビームの荷重計算モデルにより荷重を求め、図 5-3 に示す補強ビームの応力計算モデルにより曲げ応力を求める。ここで、断面二次モーメント I_1 は、支持板を穴の部分の面積を除いたものと等しい面積を持つ穴のない帯状の板に置き換えて計算する。穴としては、制御棒案内管の入る穴及び中性子束計測案内管の入る穴を考慮する。

イ. モーメント

$$M = \frac{W_1}{2} \cdot a_i^2$$

ロ. 曲げ応力

$$\sigma_x = \frac{M}{I_1} \cdot e_1 \quad (\text{補強ビームの下端})$$

$$\sigma_x = -\frac{M}{I_1} \cdot e_1' \quad (\text{補強ビームの上端})$$

ここで、 I_1 : I_1 部の断面二次モーメント

(c) せん断応力（一次一般膜応力）

補強ビームの中央でせん断応力は発生しない。

b. 支持板

支持板の差圧による各応力は、図 5-4 に示す等分布荷重を受ける両端固定ばりにモデル化し、以下により求める。

(a) 差圧による荷重

支持板の荷重計算モデルを図 5-4 に示す。

差圧による単位長さ当たりの分布荷重 W_2 は、次式で求める。

$$W_2 = -P_{13} \cdot \frac{1}{2 \cdot \ell_4} \cdot \left(2 \cdot \ell_4 \cdot \ell_p - 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \right)$$

(b) 曲げ応力（一次応力）

図 5-4 に示す支持板の応力計算モデルにより曲げ応力を求める。

イ. モーメント

$$M = M_A - W_2 \cdot \ell_4 \cdot y + \frac{W_2}{2} \cdot y^2$$

ロ. 曲げ応力

固定端における曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_y = -\frac{M_A}{I_2} \cdot e_2 \quad (\text{支持板の下面})$$

$$\sigma_y = \frac{M_A}{I_2} \cdot e_2 \quad (\text{支持板の上面})$$

また、 $y = \boxed{} \text{mm}$ における曲げ応力は、次式で求める。

$$\sigma_y = -\frac{M}{I_3} \cdot e_3 \quad (\text{支持板の下面})$$

$$\sigma_y = \frac{M}{I_3} \cdot e_3 \quad (\text{支持板の上面})$$

ここで、 M_A ：固定端モーメント

$$M_A = \left[\frac{2 \cdot \ell_4^3 - \left(\frac{I_2}{I_3} - 1 \right) \cdot (\ell_3^3 - \ell_2^3 - 3 \cdot \ell_3^2 \cdot \ell_4 + 3 \cdot \ell_2^2 \cdot \ell_4)}{6 \cdot \left\{ \ell_4 + \left(\frac{I_2}{I_3} - 1 \right) \cdot (\ell_3 - \ell_2) \right\}} \right] \cdot W_2$$

I_2 ： I_2 部の断面二次モーメント

I_3 ： I_3 部の断面二次モーメント

(c) せん断応力（一次一般膜応力）

固定端におけるせん断応力は、次式で求める。

$$\tau_{yz} = \frac{W_2 \cdot \ell_4}{h_c \cdot \ell_5}$$

y = mm におけるせん断応力は、次式で求める。

$$\tau_{yz} = \frac{W_2}{h_c \cdot \ell_6} \cdot (\ell_4 - \text{})$$

5.3.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件（L04, L14 及び L16）

外荷重を「応力解析の方針」の表 4-1(4)に示す。

(2) 計算方法

a. 補強ビーム

補強ビームの外荷重による各応力は、図 5-2 及び図 5-3 に示す等分布荷重を受ける両端支持ばりにモデル化し、以下により求める。

(a) 死荷重による単位長さ当たりの分布荷重

補強ビームの荷重計算モデルを図 5-2 に示す。

死荷重による単位長さ当たりの分布荷重 W_3 は、次式で求める。

$$W_3 = \frac{V_1}{\ell_p}$$

(b) 鉛直方向地震荷重による単位長さ当たりの分布荷重

補強ビームの荷重計算モデルを図 5-2 に示す。

鉛直方向地震荷重による単位長さ当たりの分布荷重 W_4 は、次式で求める。

$$W_4 = \frac{V_1}{\ell_p}$$

(c) 曲げ応力及びせん断応力

5.3.2(2)a. 項と同様にして求める。

b. 支持板

支持板の外荷重による各応力は，図 5-4 及び図 5-5 に示す等分布荷重を受ける両端固定ばりにモデル化し，以下により求める。

(a) 死荷重による単位長さ当たりの分布荷重

支持板の荷重計算モデルを図 5-4 に示す。

死荷重による単位長さ当たりの分布荷重 W_5 は，次式で求める。

$$W_5 = \frac{V_2}{2 \cdot \ell_4}$$

(b) 鉛直方向地震荷重による単位長さ当たりの分布荷重

支持板の荷重計算モデルを図 5-4 に示す。

鉛直方向地震荷重による単位長さ当たりの分布荷重 W_6 は，次式で求める。

$$W_6 = \frac{V_2}{2 \cdot \ell_4}$$

(c) 水平方向地震荷重による荷重

図 5-5 に示す 1 本の制御棒案内管が支持板に与える水平方向地震荷重 H_p は，次の値を用いる。

$$H_p = \frac{4 \cdot H}{\square}$$

ここで， H は水平方向地震荷重で，「応力解析の方針」の表 4-1(4) に示すとおりである。

(d) 曲げ応力及びせん断応力

イ. 鉛直方向荷重（死荷重及び鉛直方向地震荷重）

5.3.2(2)b.項と同様にして求める。

ロ. 水平方向地震荷重

図5-5に示す支持板の応力計算モデルにより曲げ応力を求める。

(イ) モーメント

固定端におけるモーメント M_A

$$M_A = \left(-\boxed{} + \frac{\boxed{}}{2 \cdot l_4} \right) \cdot H_p$$

$y = \boxed{}$ mmにおけるモーメント M_B

$$M_B = \frac{\boxed{}}{2 \cdot l_4} \cdot H_p$$

(ロ) 引張応力（一次一般膜応力）

固定端における引張応力

$$\sigma_y = \frac{H_p}{h_c \cdot l_5}$$

$y = \boxed{}$ mmにおける引張応力

$$\sigma_y = \frac{H_p}{h_c \cdot l_6}$$

- (ハ) 曲げ応力 (一次応力)
固定端における曲げ応力

$$\sigma_y = \frac{M_A}{I_A} \cdot e_A$$

y = mm における曲げ応力

$$\sigma_y = \frac{M_B}{I_B} \cdot e_B$$

ここで、 I_A : I_A 部の断面二次モーメント
 I_B : I_B 部の断面二次モーメント

- (ニ) せん断応力 (一次一般膜応力)
固定端におけるせん断応力

$$\tau_{xy} = \frac{H_p}{h_c \cdot \ell_5}$$

y = mm におけるせん断応力

$$\tau_{xy} = \frac{H_p}{h_c \cdot \ell_6}$$

5.3.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力を分類ごとに重ね合わせて組合せ応力を求め、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5.2.2項に定めるとおりである。

5.4 応力強さの評価

5.4.1 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表 5-3 に示す。

表 5-3 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

5.4.2 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表 5-4 に示す。

表 5-4 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

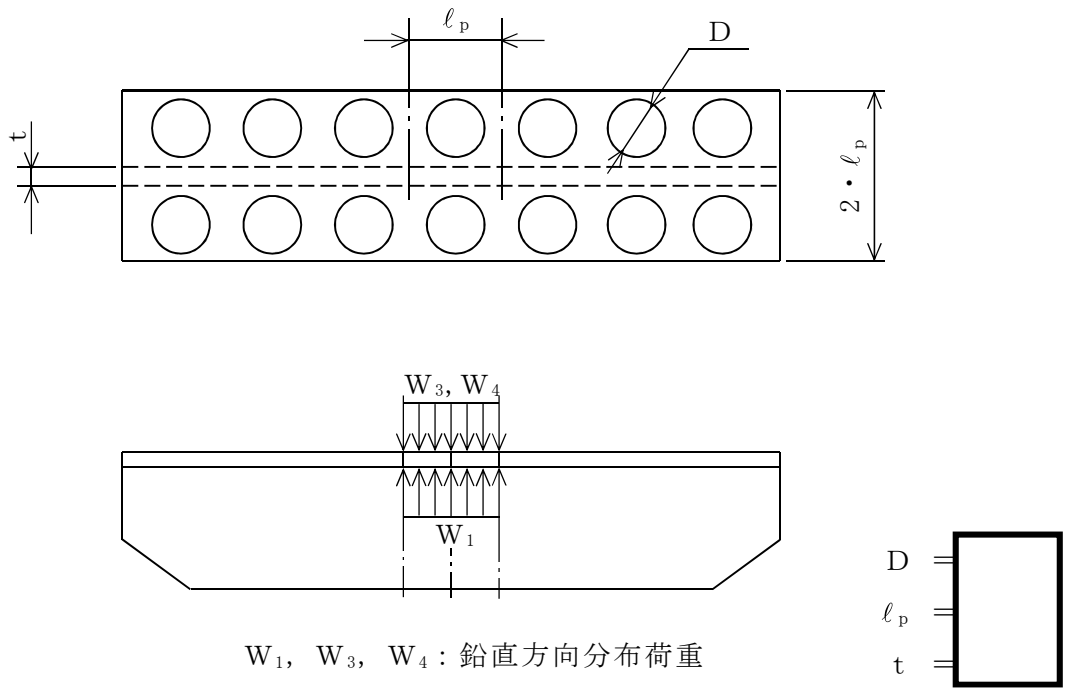


図 5-2 補強ビームの荷重計算モデル (単位 : mm)

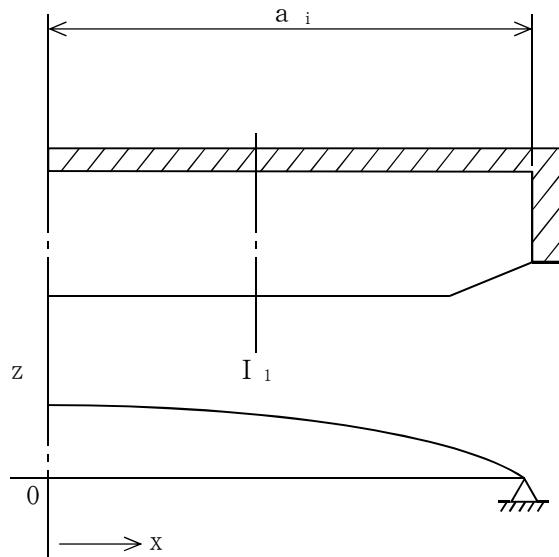
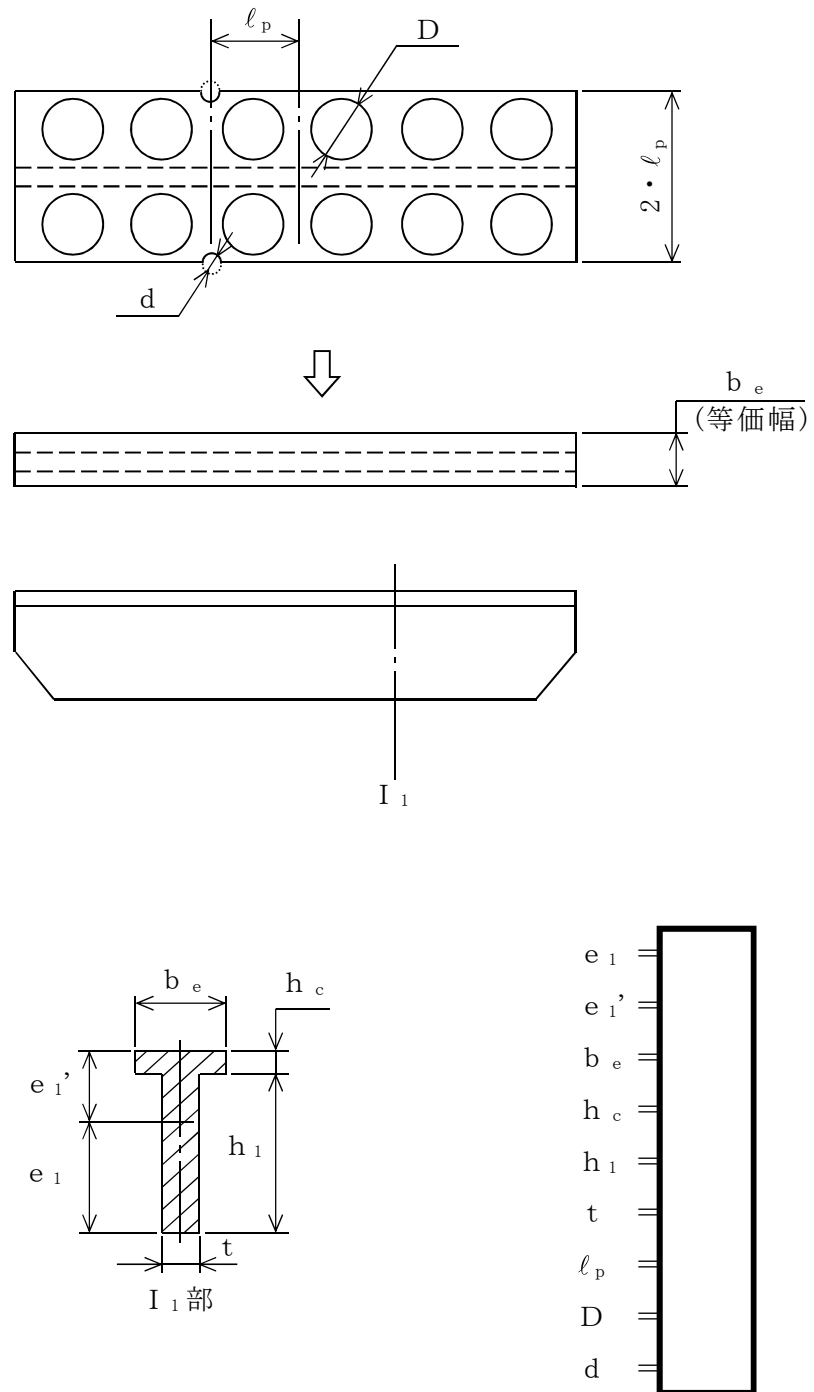
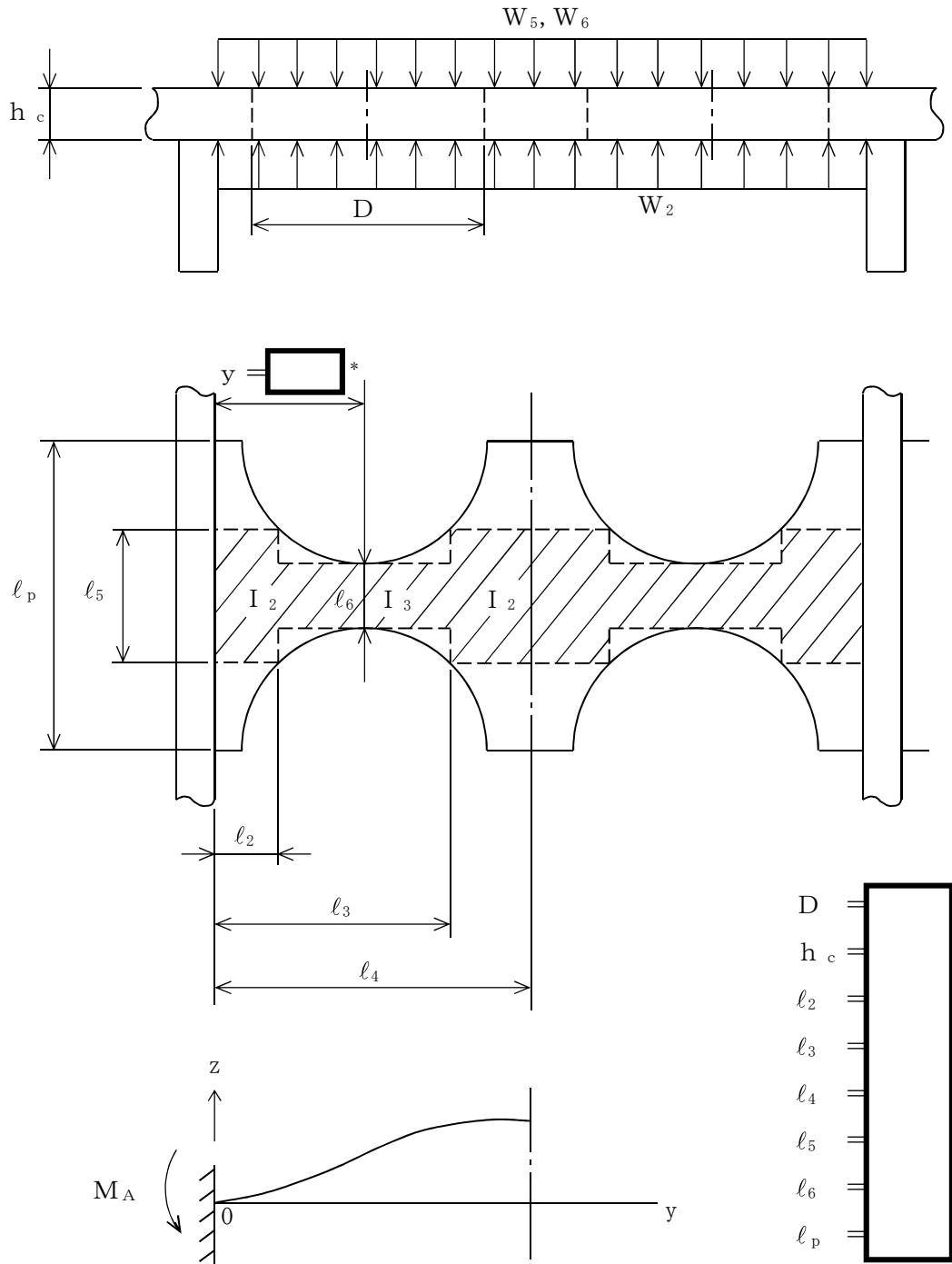


図 5-3(1) 補強ビームの応力計算モデル



ここで、
$$b_e = \frac{1}{l_p} \cdot \left(2 \cdot l_p^2 - 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)$$

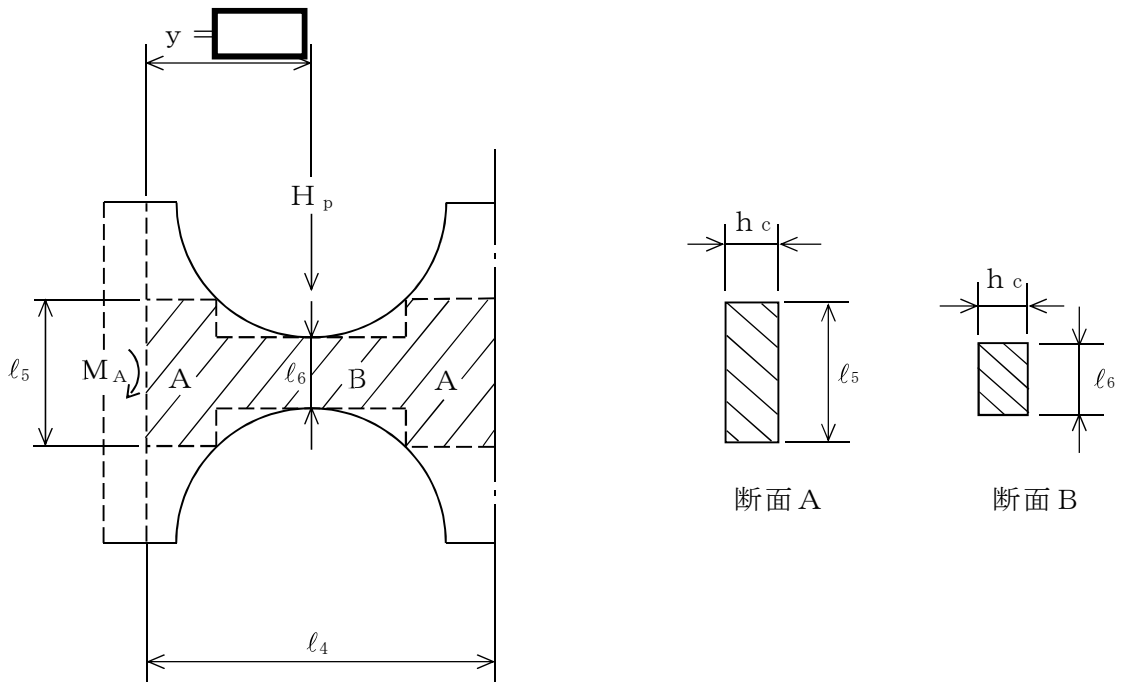
図 5-3(2) 補強ビームの応力計算モデル (単位: mm)



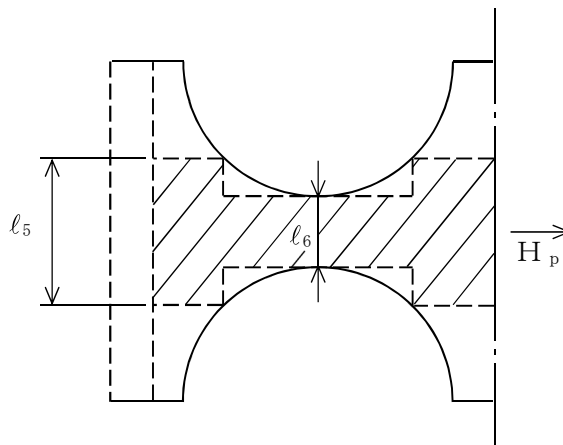
W_2, W_5, W_6 : 鉛直方向分布荷重

注記* : 固定端から最小幅になる部分までの距離

図 5-4 支持板の荷重計算及び応力計算モデル (単位 : mm)



H_p の方向が補強ビームに平行な場合



H_p の方向が補強ビームに垂直な場合

H_p : 制御棒案内管用穴 1 つあたりに作用する水平方向地震荷重

図 5-5 支持板の応力計算モデル (単位 : mm)

表 5-2 断面性状

応力評価点	補強ビームに平行な軸		補強ビームに垂直な軸	
	I (mm ⁴)	e (mm)	I (mm ⁴)	e (mm)
P01, P01'				
P02, P02'				
P03, P03'				
P04, P04'				
P05, P05'				
P06, P06'				

表 5-3 一次一般膜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	許容応力	応力強さ	許容応力
P01	0	142	0	228
P01'	0	142	0	228
P02	0	142	0	228
P02'	0	142	0	228
P03	5	85*	6	136*
P03'	5	85*	6	136*
P04	5	142	6	228
P04'	5	142	6	228
P05	12	142	17	228
P05'	13	142	17	228
P06	12	142	17	228
P06'	13	142	17	228

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-4 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価点	許容応力状態Ⅲ A S		許容応力状態Ⅳ A S	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01	59	213	57	342
P01'	63	213	66	342
P02	32	213	33	342
P02'	30	213	29	342
P03	32	128*	34	205*
P03'	30	128*	30	205*
P04	39	213	36	342
P04'	55	213	59	342
P05	36	213	49	342
P05'	68	213	83	342
P06	41	213	55	342
P06'	60	213	75	342

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

6. 燃料支持金具の応力計算

6.1 一般事項

本章は、燃料支持金具の応力計算について示すものである。

燃料支持金具は、設計基準対象施設においてはSクラス施設に、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。

6.1.1 記号の説明

記号の説明を「応力解析の方針」の2.4節に示す。

さらに、本章において、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
ℓ	高さ	mm
t	厚さ	mm

6.1.2 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図6-1に示す。

6.1.3 解析範囲

解析範囲を図6-1に示す。

6.1.4 計算結果の概要

計算結果の概要を表6-1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記載する。

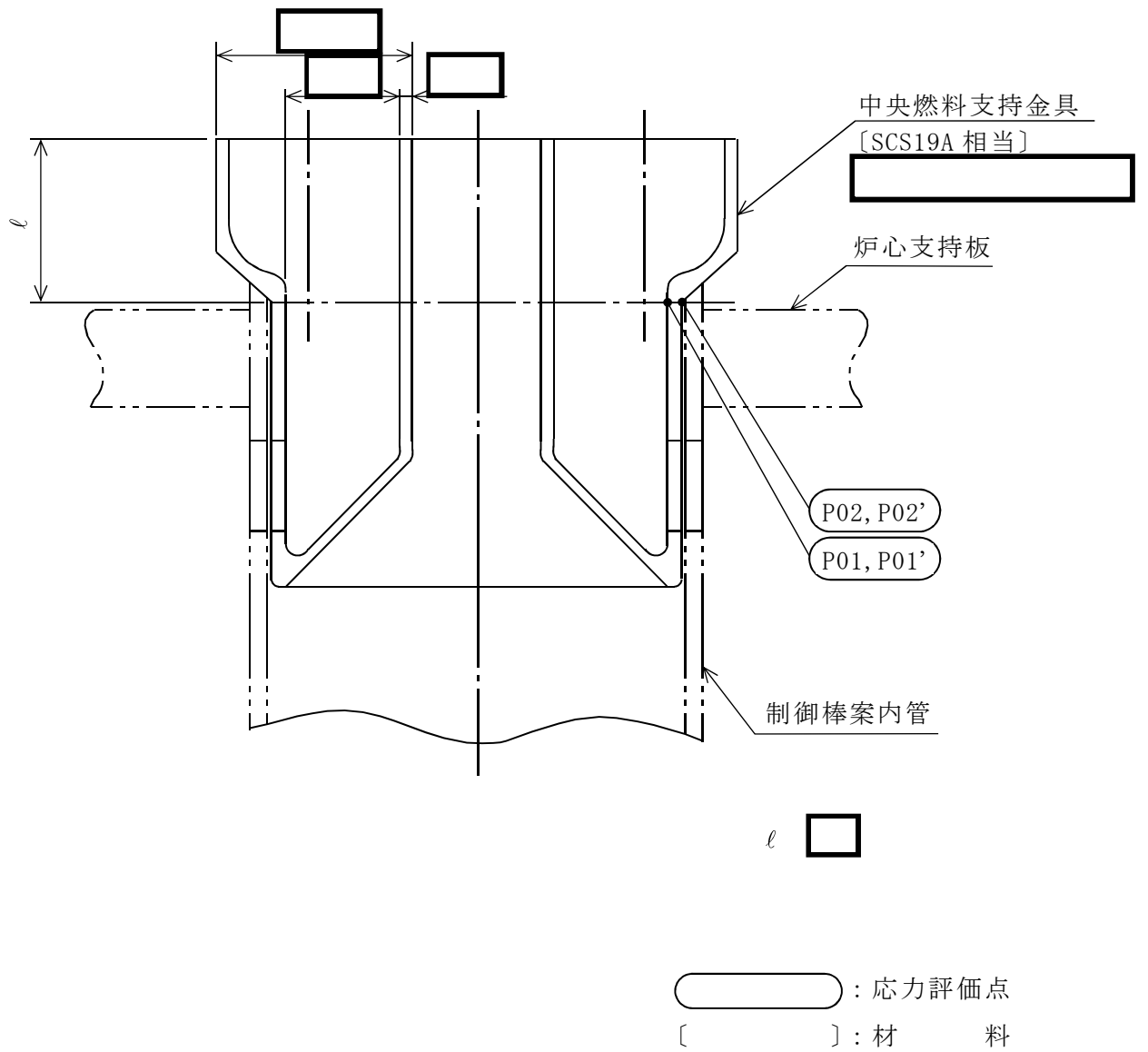


図6-1(1) 形状・寸法・材料・应力評価点 (単位: mm)

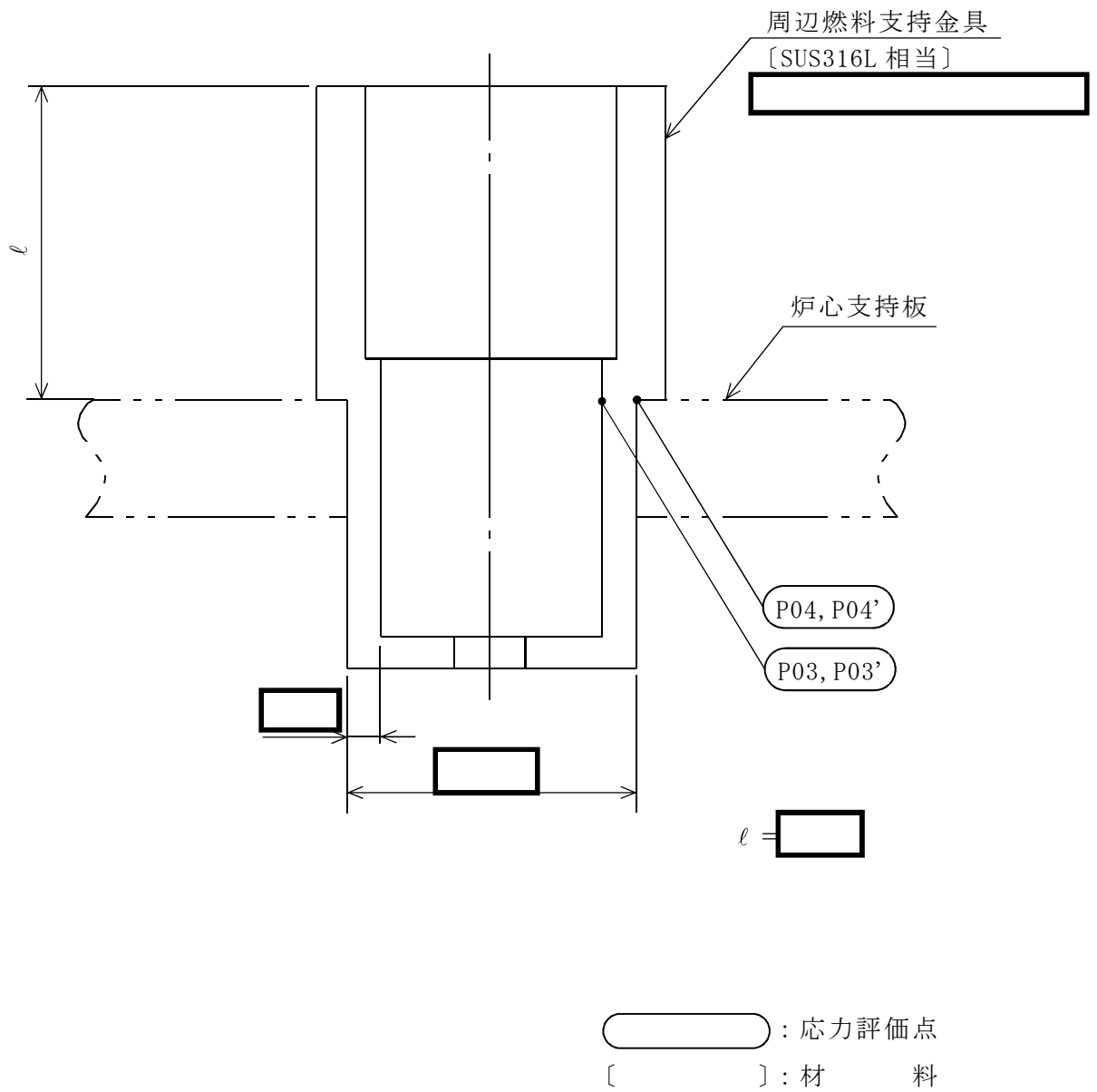


図6-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 6-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ			一次一般膜+一次曲げ応力強さ		
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価面
中央燃料 支持金具 SCS19A相当	III A S	13	172	P01'-P02'	13	258	P01'-P02'
	IV A S	18	248	P01'-P02'	18	372	P01'-P02'
周辺燃料 支持金具 SUS316L相当	III A S	7	85*	P03'-P04'	7	128*	P03'-P04'
	IV A S	10	136*	P03'-P04'	10	205*	P03'-P04'

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

6.2 計算条件

6.2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の4.1節に示す。

6.2.2 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。

6.2.3 材料

各部の材料を図6-1に示す。

6.2.4 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を「応力解析の方針」の3.3節に示す。

6.2.5 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価を「応力解析の方針」の4.3節に示す。

6.2.6 許容応力

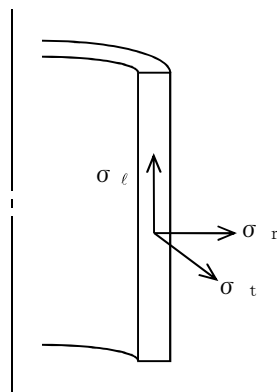
許容応力を「応力解析の方針」の3.4節に示す。

溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の3.6節に示す。

6.2.7 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



6.3 応力計算

6.3.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 6-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 6-2 に示すとおりである。

6.3.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧は、「応力解析の方針」の参照図書(1)a.に定める差圧 P_{13} である。

(2) 計算方法

中央燃料支持金具の差圧による応力は、応力評価点の位置における断面で、外径を mm とし、かつ厚さが最小となる円筒を考え、内圧を受ける円筒にモデル化し、計算する。

中央燃料支持金具の差圧による応力計算のモデルを図 6-2 に示す。

周辺燃料支持金具の差圧による応力は、応力評価点の位置における断面の円筒を考え計算する。

a. 一次一般膜応力

差圧 P_{13} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{13}$$

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

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{13}$$

ここで、 $Y = \frac{D_o}{D_i}$

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。

6.3.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

外荷重を「応力解析の方針」の表 4-1(5)に示す。

(2) 計算方法

中央燃料支持金具の外荷重による応力は、応力評価点の位置における断面で、その断面の最小幅を内径とし、かつ厚さが最小となる円筒を考え計算する。

中央燃料支持金具の外荷重による応力計算のモデルを図 6-3 に示す。

周辺燃料支持金具の外荷重による応力は、応力評価点の位置における断面の円筒を考え計算する。

a. 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は、外荷重と各応力評価断面の断面性状により次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{H}{A}$$

ここで、M：応力評価点での水平力Hにより発生するモーメント

$$M = H \cdot \ell$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

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。

6.3.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力を分類ごとに重ね合わせて組合せ応力を求め、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 5.2.2 項に定めるとおりである。

6.4 応力強さの評価

6.4.1 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表 6-3 に示す。

表 6-3 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

6.4.2 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表 6-4 に示す。

表 6-4 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

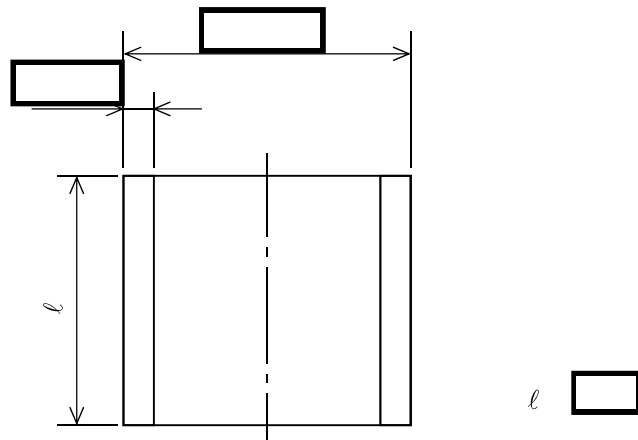


図 6-2 中央燃料支持金具の差圧による応力計算モデル (単位: mm)

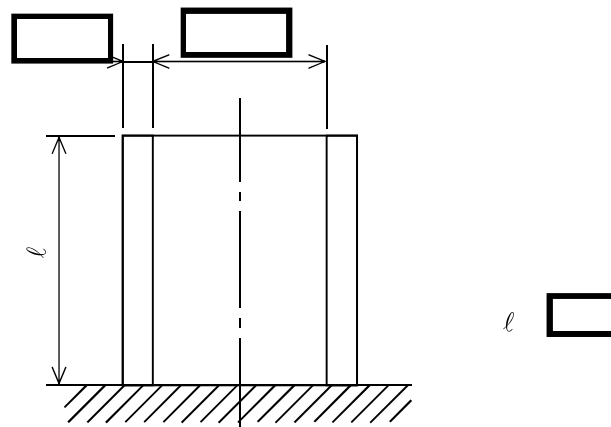


図 6-3 中央燃料支持金具の外荷重による応力計算モデル (単位: mm)

表 6-2 断面性状

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

注記*：上段は差圧による応力計算モデルの断面性状を示し，下段は外荷重による応力計算モデルの断面性状を示す。

表 6-3 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	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	8	172	12	248
P01' P02'	13	172	18	248
P03 P04	4	85*	7	136*
P03' P04'	7	85*	10	136*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 6-4 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態Ⅲ A S		許容応力状態Ⅳ A S	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	8	258	12	372
P01' P02'	13	258	18	372
P03 P04	4	128*	7	205*
P03' P04'	7	128*	10	205*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

7. 制御棒案内管の応力計算

7.1 一般事項

本章は、制御棒案内管の応力計算について示すものである。

制御棒案内管は、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。

7.1.1 記号の説明

記号の説明を「応力解析の方針」の2.4節に示す。

さらに、本章において、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

7.1.2 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図7-1に示す。

7.1.3 解析範囲

解析範囲を図7-1に示す。

7.1.4 計算結果の概要

計算結果の概要を表7-1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記載する。

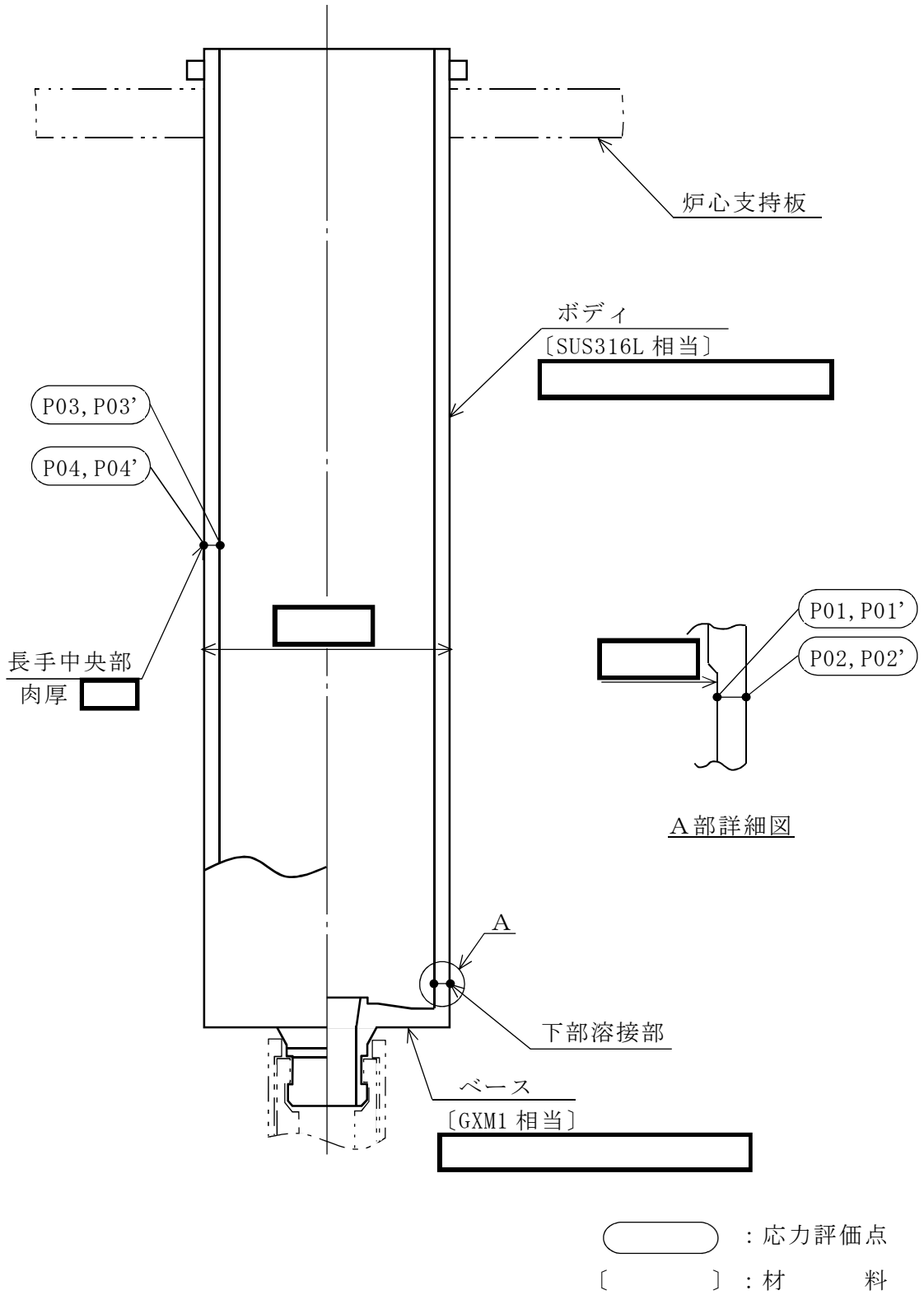


図7-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 7-1 計算結果の概要

(単位 : MPa)

部分及び材料	許容応力状態	一次一般膜応力強さ			一次一般膜+一次曲げ応力強さ		
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価面
下部溶接部 SUS316L相当	Ⅲ A S	6	92*	P01'-P02'	6	139*	P01'-P02'
	Ⅳ A S	8	148*	P01'-P02'	8	222*	P01'-P02'
長手中央部 SUS316L相当	Ⅲ A S	11	142	P03'-P04'	11	213	P03'-P04'
	Ⅳ A S	12	228	P03'-P04'	12	342	P03'-P04'

注記* : 継手効率 を乗じた値を示す。

7.2 計算条件

7.2.1 設計条件

設計条件を「応力解析の方針」の4.1節に示す。

7.2.2 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。

7.2.3 材料

各部の材料を図7-1に示す。

7.2.4 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を「応力解析の方針」の3.3節に示す。

7.2.5 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価を「応力解析の方針」の4.3節に示す。

7.2.6 許容応力

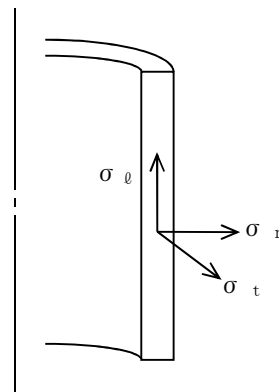
許容応力を「応力解析の方針」の3.4節に示す。

溶接部の継手効率を「応力解析の方針」の3.6節に示す。

7.2.7 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



7.3 応力計算

7.3.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 7-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 7-2 に示すとおりである。

7.3.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧は、既工認から変更はなく「応力解析の方針」の参照図書(1)f.に定めるとおりである。

(2) 計算方法

a. 一次一般膜応力

差圧 P_{13} による一次一般膜応力は、外圧を受ける円筒にモデル化し、次式で求める。

なお、制御棒案内管は片端開放であるから、軸方向応力は発生しない。

$$\sigma_t = -\frac{Y}{Y-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_\ell = 0$$

$$\sigma_r = -\frac{Y}{Y+1} \cdot P_{13}$$

$$\text{ここで、 } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

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。

7.3.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L04, L14 及び L16)

外荷重を「応力解析の方針」の表 4-1(6)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，外荷重と各応力評価断面の断面性状により次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{D_o}{2}$$

$$\tau_{t\ell} = \frac{H}{A}$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

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。

7.3.4 応力の評価

各応力評価点で計算された応力を分類ごとに重ね合わせて組合せ応力を求め，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 5.2.2 項に定めるとおりである。

7.4 応力強さの評価

7.4.1 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表 7-3 に示す。

表 7-3 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

7.4.2 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表 7-4 に示す。

表 7-4 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 3.4 節及び 3.6 節に示す許容応力を満足する。

表 7-2 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				

表 7-3 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	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	5	92*	7	148*
P01' P02'	6	92*	8	148*
P03 P04	10	142	11	228
P03' P04'	11	142	12	228

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 7-4 一次一般膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	許容応力状態Ⅲ A S		許容応力状態Ⅳ A S	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	5	139*	7	222*
P01' P02'	6	139*	8	222*
P03 P04	10	213	11	342
P03' P04'	11	213	12	342

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。