

表 5-1 代表事象 (2/3)

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
II	B	支持脚への衝突時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力 : -0.101325 MPa ・蓋間圧力 : 0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 : <input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力 : <input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力 : <input type="text"/> MPa ・ボルト初期締付け力 ・支持脚への衝突時荷重 鉛直方向加速度 (下方向) : 2.5G (自重考慮) ・熱荷重 	—
		貯蔵架台への衝突時	・搬送中の急停止時	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力 : -0.101325 MPa ・蓋間圧力 : 0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 : <input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力 : <input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力 : <input type="text"/> MPa ・ボルト初期締付け力 ・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度 (下方向) : 5G (自重考慮) ・熱荷重 	荷重条件が最も厳しいのは、貯蔵架台への衝突時である。

注記*1 : 本事象について応力解析を行う。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 5-1 代表事象 (3/3)

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
I + S _d *	C _s	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 ・地震力*2 水平方向：1.40 G 鉛直方向：0.87 G ・熱荷重 	—
I + S _s	D _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 ・地震力 水平方向：1.40 G 鉛直方向：0.87 G ・熱荷重 	—
試験状態	試験状態	試験時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：1.25 MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 	—

注記*1：本事象について応力解析を行う。

*2：より高い地震力である S_s地震力を保守的に設定する。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 5-2 応力計算に使用する材料の物性値

構成部材	材料	温度 (°C)	縦弾性係数 (MPa)	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm \cdot °C))	ポアソン比 (-)
胴 底板 一次蓋	炭素鋼 (GLF1)	20	203000	9.73	0.3
		50	201000	10.10	
		75	200000	10.39	
		100	198000	10.69	
		125	196000	11.00	
		150	195000	11.28	
		175	193000	11.56	
二次蓋 底部中性子 遮蔽材 カバー	炭素鋼 (SGV480)	20	202000	9.73	0.3
		50	200000	10.10	
		75	198000	10.39	
		100	197000	10.69	
		125	195000	11.00	
		150	193000	11.28	
		175	192000	11.56	
カバープレート	ステンレス鋼 (SUS304)	20	195000	15.21	0.3
		50	193000	15.49	
		75	191000	15.68	
		100	190000	15.87	
		125	188000	16.05	
		150	186000	16.21	
		175	184000	16.37	
一次蓋ボルト カバープレート ボルト 二次蓋ボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	20	192000	11.14	0.3
		50	189000	11.40	
		75	188000	11.62	
		100	186000	11.82	
		125	185000	12.00	
		150	184000	12.21	
		175	182000	12.37	
200	180000	12.54			

表 6-1 密封容器用材料の許容応力 (1/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*2				
		炭素鋼				
		シール部以外			シール部	
		胴、一次蓋、底板、 底部中性子遮蔽材カバー			胴、一次蓋	
		GLF1	SGV480	許容値基準	GLF1	許容値 基準
設計条件	一次一般膜応力強さ P_m	122	155	S_m	—	S_y
	一次局部膜応力強さ P_L	183	232	$1.5 S_m$	183	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	183	232	$1.5 S_m$	—	S_y
供用状態 A及びB *1	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	366	465	$3 S_m$	183	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	183	—	S_y *3	—	—
	圧縮応力*4 σ_c	95	—	$\text{Min}(S_m, B)$	—	—
	最高使用圧力(外圧) P_{do}	15	—	P_a	—	—
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	183	232	$\text{Min}(S_y, 2/3 S_u)$	—	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	274	348	$\text{Min}(1.5 S_y, S_u)$	183	S_y
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *5	366	465	$3 S_m$	183	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	183	—	S_y *3	—	—
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	251	282	$2/3 S_u$	—	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	377	424	S_u	183	S_y
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *5	366	465	$3 S_m$	183	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	—	$0.4 S_u$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	377	—	S_u *3	—	—
試験状態	一次一般膜応力強さ P_m	186	238	$0.9 S_y$	—	$0.9 S_y$
	一次局部膜応力強さ P_L	279	357	$1.35 S_y$	207	S_y
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	279	357	$1.35 S_y$ *6	—	—
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	—	—	—	207	S_y

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価は設計条件に包絡されるため評価を省略する。

*2：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

*3：支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

*4：円筒形の軸方向の圧縮に対して適用する。

*5：地震力のみによる全振幅について評価する。

*6：ただし、 $P_m \leq 2/3 S_y$ のときの値

表 6-1 密封容器用材料の許容応力(2/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*2			
		ステンレス鋼			
		カバープレート			
		シール部以外		シール部	
		SUS304	許容値基準	SUS304	許容値基準
設計条件	一次一般膜応力強さ P_m	—	S_m	—	S_y
	一次局部膜応力強さ P_L	—	$1.5 S_m$	—	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	205	$1.5 S_m$	155	S_y
供用状態 A及びB *1	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	—	$3 S_m$	—	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y^{*3}	—	—
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	—	$1.2 S_m$	—	Min ($1.2 S_m, S_y$)
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	—	$1.8 S_m$	—	S_y
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q^{*4}$	—	$3 S_m$	—	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y^{*3}	—	—
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	—	Min ($2.4 S_m, 2/3 S_u$)	—	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	—	Min ($3.6 S_m, S_u$)	—	S_y
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q^{*4}$	—	$3 S_m$	—	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.4 S_u$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_u^{*3}	—	—
試験状態	一次一般膜応力強さ P_m	—	$0.9 S_y$	—	$0.9 S_y$
	一次局部膜応力強さ P_L	—	$1.35 S_y$	—	S_y
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	276	$1.35 S_y^{*5}$	—	—
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	—	—	205	S_y

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価は設計条件に包絡されるため評価を省略する。

*2：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

*3：支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

*4：地震力のみによる全振幅について評価する。

*5：ただし、 $P_m \leq 2/3 S_y$ のときの値

表 6-2 密封容器用材料（ボルト用材料）の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力	
		低合金鋼	
		一次蓋ボルト カバープレートボルト	
		SNB23-3	許容値基準
設計条件	平均引張応力	277	S_m
供用状態 A, B 及び C _s	平均引張応力	554	$2S_m$
	平均引張応力+曲げ応力	831	$3S_m$
供用状態 D _s	平均引張応力	831	S_y
	平均引張応力+曲げ応力	831	S_y

表 6-3 二次蓋用材料の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*2			
		炭素鋼			
		シール部以外		シール部	
		SGV480	許容値 基準	SGV480	許容値 基準
設計条件	一次一般膜応力強さ P_m	158	S_m	—	S_y
	一次局部膜応力強さ P_L	237	$1.5 S_m$	236	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	237	$1.5 S_m$	—	S_y
供用状態 A及びB *1	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	474	$3 S_m$	236	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y *3	—	—
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	236	Min ($S_y, 2/3 S_u$)	—	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	355	Min ($1.5 S_y, S_u$)	236	S_y
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *4	474	$3 S_m$	236	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y *3	—	—
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	286	$2/3 S_u$	—	S_y
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	429	S_u	236	S_y
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *4	474	$3 S_m$	236	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.4 S_u$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_u *3	—	—

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価は設計条件に包絡されるため評価を省略する。

*2：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

*3：支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

*4：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-4 二次蓋用材料（ボルト用材料）の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力	
		低合金鋼	
		二次蓋ボルト	
		SNB23-3	許容値基準
設計条件	平均引張応力	282	S_m
供用状態 A, B 及び C_s	平均引張応力	565	$2S_m$
	平均引張応力+曲げ応力	847	$3S_m$
供用状態 D_s	平均引張応力	848	S_y
	平均引張応力+曲げ応力	848	S_y

表 6-5 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	°C	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
熱膨張係数	mm/(mm・°C)	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
許容応力	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
応力の計算値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
加速度	m/s ²	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	—	—	設計値
質量	kg	—	—	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

添付書類 8-1-2

密封容器の応力計算書

目 次

1. 概要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価位置	2
2.2 設計時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 応力計算	2
2.2.3 計算結果	4
2.3 貯蔵時	4
2.3.1 荷重条件	4
2.3.2 応力計算	4
2.3.3 計算結果	5
2.4 吊上げ時	5
2.4.1 荷重条件	5
2.4.2 応力計算	5
2.4.3 計算結果	5
2.5 支持脚への衝突時	6
2.5.1 荷重条件	6
2.5.2 応力計算	6
2.5.3 計算結果	6
2.6 貯蔵架台への衝突時	6
2.6.1 荷重条件	6
2.6.2 応力計算	7
2.6.3 計算結果	7
2.7 貯蔵時 (S_a *地震力が作用する場合)	7
2.7.1 荷重条件	7
2.7.2 応力計算	7
2.7.3 計算結果	8
2.8 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	8
2.8.1 荷重条件	8
2.8.2 応力計算	8

2.8.3 計算結果	8
2.9 試験時	9
2.9.1 荷重条件	9
2.9.2 応力計算	9
2.9.3 計算結果	9
3. 応力評価	10
3.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の応力評価	10
3.2 ボルトの応力評価	10
3.3 特別な応力の評価	10
4. 繰返し荷重の評価	11
4.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の評価	11
4.2 ボルトの評価	16
4.2.1 金属キャスク構造規格 MCD-1322 及び 金属キャスク構造規格別図 8-4 に対する検討	16
4.2.2 一次蓋ボルトの疲労解析	16
4.2.3 カバープレートボルトの疲労解析	19
4.2.4 二次蓋ボルトの疲労解析	20
5. 穴の補強	21
6. 外圧の評価	22
7. 二次蓋の厚さの評価	23
7.1 応力計算	23
7.2 計算結果	23

図表目次

図 1-1	密封容器の形状・寸法・材料	24
図 1-2	二次蓋の形状・寸法・材料	25
図 2-1	密封容器及び二次蓋の応力評価位置	26
図 2-2	密封容器及び二次蓋の解析モデル（設計時）	27
図 2-3	密封容器及び二次蓋の解析モデル（貯蔵時）	28
図 2-4	密封容器及び二次蓋の解析モデル（吊上げ時）	29
図 2-5	密封容器及び二次蓋の解析モデル（支持脚への衝突時）	30
図 2-6	密封容器及び二次蓋の解析モデル（貯蔵架台への衝突時）	31
図 2-7	密封容器及び二次蓋の解析モデル（地震時）	32
図 2-8	密封容器の解析モデル（試験時）	33
表 2-1	一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果 （設計時）	34
表 2-2	カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）	35
表 2-3	カバープレートボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）	35
表 2-4	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時）	36
表 2-5	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時）	36
表 2-6	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果 （支持脚への衝突時）	36
表 2-7	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵架台への衝突時）	37
表 2-8	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））	37
表 2-9	カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果（試験時）	37
表 3-1	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（設計条件）	38
表 3-2	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）	39
表 3-3	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_s ）	41
表 3-4	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 D_s ）	44
表 3-5	密封容器の応力計算結果と許容応力（試験状態）	47
表 4-1	密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の疲労解析不要の評価結果	48
表 4-2	①の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	49

表 4-3	②及び③の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	49
表 4-4	④の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	50
表 4-5	応力差の変動 (一次蓋ボルト)	51
表 4-6	一次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果	52
表 4-7	疲労累積係数 (一次蓋ボルト)	52
表 4-8	①の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	53
表 4-9	②及び③の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	53
表 4-10	④の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	54
表 4-11	応力差の変動 (カバープレートボルト)	55
表 4-12	カバープレートボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果	56
表 4-13	疲労累積係数 (カバープレートボルト)	56
表 4-14	①の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	57
表 4-15	②及び③の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	57
表 4-16	④の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	58
表 4-17	応力差の変動 (二次蓋ボルト)	59
表 4-18	二次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果	60
表 4-19	疲労累積係数 (二次蓋ボルト)	60
表 5-1	一次蓋貫通孔部の応力強さ	61
表 7-1	二次蓋の計算上必要な厚さの計算条件及び計算結果	62

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型の密封容器及び二次蓋に関する応力計算書である。

なお、HDP-69B(B)型は一次蓋と二次蓋で多重の閉じ込め構造を形成し、二次蓋には一次蓋と同等の閉じ込め性能を要求するため、二次蓋は一次蓋と同様の応力評価を行う。

1.1 形状・寸法・材料

本書で評価する密封容器の形状・寸法・材料を図1-1に示す。また、二次蓋の形状・寸法・材料を図1-2に示す。

1.2 計算結果

計算結果を表3-1から表3-5に示す。なお、応力評価位置については、評価上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。

表中の「-」は、評価すべき応力が発生しない、又は評価上厳しくないため評価を省略している。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 応力計算

2.1 応力評価位置

密封容器及び二次蓋の応力評価位置を図2-1に示す。

2.2 設計時

2.2.1 荷重条件

設計時における荷重は次に示す組合せとする。

- 最高使用圧力 (1.0 MPa)
- ボルト初期締付け力
- 貯蔵架台への衝突時荷重 (自重を含む。)

2.2.2 応力計算

(1) 一次蓋, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー及び二次蓋

応力計算は, 解析コードABAQUSにより行う。三次元固体 (連続体) 要素及び三次元はり要素による解析モデルを図2-2に示す。

(2) 一次蓋ボルト, カバープレート, カバープレートボルト及び二次蓋ボルト

一次蓋ボルト, カバープレート, カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの応力計算は以下に示すとおりである。

a. 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット締付け時のボルト荷重による平均引張応力 (σ_{n1}) は次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n1} &= \frac{W_{m1}}{A} \\ W_{m1} &= H + H_P \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot D_G^2 \cdot P + H_P \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで,

- A : ボルト最小断面積の合計値
一次蓋ボルト (= mm²)
二次蓋ボルト (= mm²)
- H : フランジに加わる内圧による全荷重 (N)
- D_G : ガスケット反力の作用する位置
一次蓋ボルト (直径: 1740 mm)
二次蓋ボルト (直径: 1956 mm)
- H_P : 気密を十分保つために, ガスケット接触面にかける圧縮力
一次蓋ボルト (= N)
二次蓋ボルト (= N)

- P : 最高使用圧力
 一次蓋ボルト (=1.0 MPa)
 二次蓋ボルト (=0.4 MPa)

また、ガスケット締付け時の平均引張応力 (σ_{n2}) は次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n2} &= \frac{W_{m2}}{A} \\ W_{m2} &= H_P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

- W_{m2} : ガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重
 一次蓋ボルト (= N)
 二次蓋ボルト (= N)

なお、(2.1)式で用いる、気密を十分に保つためにガスケット接触面にかける圧縮力 (H_P) は、荷重としてより大きいガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重 (W_{m2}) で代表している。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

b. カバープレート

内圧により発生する一次膜+一次曲げ応力 ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$) は、カバープレート
 を周辺支持の円板にモデル化し、次式(1)で計算する。カバープレートの最大応力は図
 2-1⑦に発生する。また、カバープレート(シール部)に発生する応力はカバープレート
 の最大応力より小さいが、カバープレートに発生する応力と同じ値とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_\theta &= \sigma_r \\ \sigma_z &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

- P : 内圧 (=1.0 MPa)
 r : ボルトピッチ半径 (=76.5 mm)
 t : 板厚 (=35 mm)

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

c. カバープレートボルト

最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット締付け時のボルト荷重による平均
 引張応力 (σ_{n1}) は(2.1)式により同様に計算する。

ただし、

- A : ボルト最小断面積の合計値 (= mm²)
 D_G : ガスケット反力の作用する位置 (直径: 111 mm)
 H_P : 気密を十分保つために、ガスケット接触面にかける圧縮力 (= N)

P : 最高使用圧力 (=1.0 MPa)

また、ガスケット締付け時の平均引張応力 (σ_{n2}) は(2.2)式により同様に計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表3-1に示す。なお、表3-1には各評価位置のそれぞれにおいて計算値が最大となる解析ケースでの値を示している。

2.3 貯蔵時

2.3.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 自重
- トラニオン固定ボルトによる押付け力
- 熱荷重

2.3.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

- a. 一次蓋, 一次蓋ボルト, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー, 二次蓋及び二次蓋ボルト

応力計算方法は, 2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図 2-3 に示す。

- b. カバープレート及びカバープレートボルト

カバープレート及びカバープレートボルトについては, 2.2 節の設計時より圧力が低いことより本項以降, 試験時まで評価を省略する。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで,

m_G : バスケット及び使用済燃料集合体の質量 (=28300 kg)

G_2 : 鉛直方向加速度 (=1G)

A : 支圧荷重を受ける面積 (= mm²)

計算条件及び計算結果を表 2-4 に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は 2.2.2(1) の計算方法と同様である。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表 3-2 に示す。

2.4 吊上げ時

2.4.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 吊上げ荷重 (自重を含む。)
- 熱荷重

2.4.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

一次蓋, 一次蓋ボルト, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー, 二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は, 2.2.2(1) と同様である。解析モデルを図 2-4 に示す。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は, 2.3.2(2) と同様である。ただし, $G_2=1.3G$ とする。

計算条件及び計算結果を表 2-5 に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) の計算方法は 2.2.2(1) と同様である。

2.4.3 計算結果

応力計算結果を表 3-2 に示す。

2.5 支持脚への衝突時

2.5.1 荷重条件

支持脚への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 支持脚への衝突時荷重 (自重を含む。)
- 熱荷重

2.5.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

一次蓋, 一次蓋ボルト, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー, 二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は, 2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図2-5に示す。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は, 2.3.2(2)と同様である。ここで, $G_2=2.5G$ とする。

計算条件及び計算結果を表2-6に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) の計算方法は2.2.2(1)と同様である。

2.5.3 計算結果

応力計算結果を表3-2に示す。

2.6 貯蔵架台への衝突時

2.6.1 荷重条件

貯蔵架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 貯蔵架台への衝突時荷重 (自重を含む。)

- 熱荷重

2.6.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

一次蓋，一次蓋ボルト，胴，底板，底部中性子遮蔽材カバー，二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図2-6に示す。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は，2.3.2(2)と同様である。ここで， $G_2=5G$ とする。

計算条件及び計算結果を表2-7に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) の計算方法は2.2.2(1)と同様である。

2.6.3 計算結果

応力計算結果を表3-2に示す。

2.7 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)

2.7.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 自重
- 地震力
- 熱荷重

2.7.2 応力計算

(1) 一次応力

一次蓋，一次蓋ボルト，胴，底板，底部中性子遮蔽材カバー，二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。

解析モデルを図2-7に示す。

水平方向加速度 (G_1) 及び鉛直方向加速度 (G_2) として次の値を用いる。鉛直方向加速度については、プラスの方向とマイナスの方向を自重の加速度と組み合わせて考慮する。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= C_H \cdot G \\ G_2 &= (1 \pm C_V) \cdot G \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、

- C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.87)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

(2) 一次+二次応力

a. シール部を除く、一次蓋、胴、底板、底部中性子遮蔽材カバー及び二次蓋
 応力計算の方法は、(1)と同様である。ただし、荷重条件は地震力のみとして計算を行い、振幅を考慮して応力強さの最大値を2倍して求める。

b. シール部、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト
 応力計算の方法は、(1)と同様である。ただし、荷重条件として熱荷重を含める。

(3) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は、2.3.2(2)と同様である。ただし、 $G_2 = (1 + C_V) \cdot G$ とする。

ここで、 C_V : (1)と同じ
 計算条件及び計算結果を表2-8に示す。

2.7.3 計算結果

応力計算結果を表3-3に示す。

2.8 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)

2.8.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 地震力が作用する場合の荷重条件は、 S_s 地震力と S_d *地震力を同じとしているため2.7.1項と同様である。

2.8.2 応力計算

計算方法及び計算結果は2.7.2項と同様である。

2.8.3 計算結果

応力計算結果を表3-4に示す。

2.9 試験時

2.9.1 荷重条件

試験時における荷重条件は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力（最高使用圧力の1.25倍の圧力）
- ボルト初期締付け力
- 自重

2.9.2 応力計算

(1) 一次蓋，胴，底板及び底部中性子遮蔽材カバー

一次蓋，胴，底板及び底部中性子遮蔽材カバーの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図2-8に示す。

(2) カバープレート

カバープレートの応力計算方法は2.2.2(2)b.と同様である。ただし， $P=1.25\text{ MPa}$ とする。

計算条件及び計算結果を表2-9に示す。

2.9.3 計算結果

応力計算結果を表3-5に示す。

3. 応力評価

3.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の応力評価

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表3-1から表3-5に示す。

表3-1から表3-5に示すように、各供用状態の一次一般膜応力強さ（ P_m ）、一次局部膜応力強さ（ P_L ）、一次膜＋一次曲げ応力強さ（ $P_L + P_b$ ）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（ $P_L + P_b + Q$ ）は、金属キャスク構造規格MCD-1311、MCD-1312及びMCD-1318における各規定を満足する。

3.2 ボルトの応力評価

表3-1から表3-4に示すように、各供用状態における平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は、金属キャスク構造規格MCD-1321における規定を満足する。

3.3 特別な応力の評価

(1) 平均せん断応力

各供用状態において純せん断荷重を受ける箇所がないため、評価を省略する。

(2) 平均支圧応力

表3-2から表3-4に示すように、各供用状態の平均支圧応力（ σ_p ）は、金属キャスク構造規格MCD-1316における規定を満足する。

(3) 圧縮応力

表3-2に示すように、各供用状態の圧縮応力（ σ_c ）は、金属キャスク構造規格MCD-1317における規定を満足する。

4. 繰返し荷重の評価

4.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の評価

金属キャスク構造規格MCD-1332により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(6)に示し、表4-1にその評価結果のまとめを示す。なお、燃料装荷及び取出しサイクルは通常1回であるが、本評価においては10回に想定しても、その条件を満足することを示す。

(1) 金属キャスク構造規格 MCD-1332(1) (大気圧—使用圧力—大気圧の変動)

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数 (N_1) は、燃料装荷及び取出し想定回数である 10 回として評価する。

$$N_1 = 10 \text{ (回)}$$

金属キャスク構造規格別図 8-1 において、設計温度における設計応力強さ (S_m) の 3 倍の値 (366 MPa) を繰返しピーク応力強さとした場合の許容繰返し回数 (N_a) は、

$$N_a = 3627 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 \leq N_a$$

であり、条件を満足する。

また、二次蓋については金属キャスク構造規格別図 8-1 において、設計温度における設計応力強さ (S_m) の 3 倍の値 (474 MPa) を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数 (N_a) は 1650 回であり、同様に条件を満足する。

(2) 金属キャスク構造規格 MCD-1332(2) (燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動)

燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.23 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

P : 最高使用圧力 (=1.0 MPa)

S_m : 設計応力強さ (=122 MPa)

S : 金属キャスク構造規格別図 8-1 において、許容繰返し回数 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ (=86 MPa)

また、(4.1)式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (A_m) は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格別図 8-1 において, (4.1)式による値を超え
る圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合, それに対応する繰
返しピーク応力強さ (MPa)

(4.1)式より, 圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は, 0.23 MPa となる。燃料装荷時
及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における実際の圧力は, 密
封容器のため 0.23 MPa を超える変動は生じないと考えられるが, 変動回数を安全側に
燃料装荷及び取出し想定回数である 10 回として (4.2)式を用いて評価すると,

$$S_a = 3999 \text{ MPa}$$

$$A_m = 10 \text{ MPa}$$

となる。したがって, 燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A
及び B における圧力変動の全振幅を最高使用圧力 ($P = 1.0 \text{ MPa}$) と仮定しても,

$$P \leq A_m$$

であり, 条件を満足する。

次に, 二次蓋について同様に評価する。(4.1)式の A_m , P 及び S_m をそれぞれ以下に
示す条件に読み替えて計算すると, 圧力変動の全振幅の許容値 (A_{m2}) は, 0.07 MPa
となる。

A_{m2} : 二次蓋の圧力変動の全振幅の許容値 (MPa)

P_2 : 二次蓋の最高使用圧力 (=0.4 MPa)

S_{m2} : 二次蓋の使用材料の設計応力強さ (=158 MPa)

二次蓋において燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B における実際の
圧力の変動はほとんどないが, 一次蓋と二次蓋間の圧力を調整する可能性を考え, その
回数を 100 回として (4.2)式を用いて評価すると,

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$A_{m2} = 1.1 \text{ MPa}$$

となる。したがって, 燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B における圧
力変動の全振幅を二次蓋の最高使用圧力 ($P_2 = 0.4 \text{ MPa}$) と仮定しても,

$$P_2 \leq A_{m2}$$

であり, 条件を満足する。

(3) 金属キャスク構造規格 MCD-1332(3) (燃料装荷時及び燃料取出し時の温度差)

密封容器の任意の 2 点間の距離 (p) は, 次式で計算する。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 969 \text{ mm} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで,

R : 密封容器の平均半径 (=955 mm)

t : 密封容器の板厚 (=246 mm)

燃料装荷時及び燃料取出し時において、相互の距離が p を超えない密封容器の任意の 2 点間の温度差の許容値 (T) は、次式で計算する。なお、2 点間の平均温度は密封容器の最高使用温度 ($T_{max}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$) とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 808\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、

- E : 2 点間の平均温度における縦弾性係数 ($=1.95 \times 10^5\text{ MPa}$)
- α : 2 点間の平均温度における瞬時熱膨張係数 ($=12.69 \times 10^{-6}\text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})$)
- S_a : 金属キャスク構造規格別図 8-1 において、燃料装荷及び取出しの回数 (10 回) を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ ($=3999\text{ MPa}$)

したがって、密封容器の任意の 2 点間の距離 (p) は 969 mm であるが、任意の 2 点間において生じる温度差を保守側に最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、条件を満足する。なお、二次蓋については、上記評価で代表できるため、同様に条件を満足する。

(4) 金属キャスク構造規格 MCD-1332(4) (燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B の温度差変動)

燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B において、相互の距離が (4.3) 式にて計算された p の値を超えない任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅の許容値 (T) は、次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、

- E, α : (3) と同じ
- S_a : 金属キャスク構造規格別図 8-1 において、(4.6) 式により計算した値を超える温度差 (T') の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ (MPa)

$$T' = \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 17\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

- S : 金属キャスク構造規格別図 8-1 において、許容繰返し回数 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ (MPa)

供用状態A及びBにおいて密封容器は密封状態であり、かつ温度変動する加熱源を収納していないので、任意の2点間の温度差の変動が(4.6)式により計算した値の17℃を超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷及び取出し想定回数である10回として(4.5)式を用いて評価すると、

$$S_a = 3999 \text{ MPa}$$

$$T = 808 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、密封容器の任意の2点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度(T_{max})と常温との差($\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$)と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、条件を満足する。なお、二次蓋については、上記評価で代表できるため、同様に条件を満足する。

(5) 金属キャスク構造規格MCD-1332(5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトは同種の合金鋼を使用しており、一次蓋及び二次蓋は炭素鋼、カバープレートはステンレス鋼を使用している。ここでは、縦弾性係数及び熱膨張係数の差が大きく、評価が厳しくなる組合せであるカバープレートとカバープレートボルトを代表として評価する。

カバープレートとカバープレートボルトの部分の温度変動の許容値(T)は、(4.7)式で計算する。なお、縦弾性係数及び熱膨張係数は密封容器の最高使用温度($T_{max} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$)に対する値とする。

$$T = \frac{S}{2 \cdot (E_c \cdot \alpha_c - E_{cb} \cdot \alpha_{cb})} = 61 \text{ }^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、

S : 金属キャスク構造規格別図8-2において、許容繰返し回数 10^{11} 回に対応する繰返しピーク応力強さ (=94 MPa)

E_c : カバープレートの縦弾性係数 (=1.86×10⁵ MPa)

E_{cb} : カバープレートボルトの縦弾性係数 (=1.84×10⁵ MPa)

α_c : カバープレートの瞬時熱膨張係数 (=17.04×10⁻⁶ mm/(mm·°C))

α_{cb} : カバープレートボルトの瞬時熱膨張係数 (=13.06×10⁻⁶ mm/(mm·°C))

また、(4.7)式で計算される値を超えるものにあつては、許容値(T)は、(4.8)式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_c \cdot \alpha_c - E_{cb} \cdot \alpha_{cb})} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格別図8-2において、(4.7)式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ (MPa)

(4.7)式より、温度変動の許容値は61℃となるが、燃料装荷時及び燃料取出し時における温度変動を最高使用温度(T_{max})と常温との差($\Delta T=130$ ℃)と仮定すると、この温度($T=61$ ℃)を超える。一方、燃料装荷時及び燃料取出し時以外においては、温度変動する加熱源を収納していないので、61℃を超える温度変動はないと考えられる。したがって、著しい温度差が生じる変動回数を燃料装荷及び取出し想定回数である10回として評価すると、

$$S_a = 4881 \text{ MPa}$$

$$T = 3184 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、供用状態A及びBにおいて生じる温度変動を最高使用温度(T_{max})と常温との差($\Delta T=130$ ℃)と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、条件を満足する。

(6) 金属キャスク構造規格 MCD-1332(6) (機械的荷重により生じる応力の全振幅)

供用状態A及びBにおける機械的荷重の変動回数は、以下に示すように全事象の合計回数の216回と想定する。

燃料装荷時及び取出し時	10回
吊上げ時	200回
支持脚への衝突時	3回
貯蔵架台への衝突時	3回
合計	216回

この回数に対応する繰返しピーク応力強さ S_a は金属キャスク構造規格別図8-1より、

$$S_a = 1034 \text{ MPa}$$

である。

表3-2に示した供用状態A及びBにおける応力強さの最大値($\Delta\sigma_1=92$ MPa)の2倍を機械的荷重により発生する応力の全振幅と考えたとしても、

$$2 \cdot \Delta\sigma_1 \leq S_a$$

であり、条件を満足する。

また、供用状態 C_s 及び D_s における機械的荷重の変動回数は、地震時

(S_a *地震力又は S_s 地震力が作用する場合)の最大回数である 10^4 回と想定する。この回数に対応する繰返しピーク応力強さ S_a は金属キャスク構造規格別図8-1より、

$$S_a = 262 \text{ MPa}$$

である。

表3-3及び表3-4に示した地震力のみによる全振幅について評価した応力強さの最大値($\Delta\sigma_2=217$ MPa)は、

$$\Delta\sigma_2 \leq S_a$$

であり、条件を満足する。

(7) 検討結果

以上の(1)から(6)の評価結果のまとめを表4-1に示す。表4-1に示すとおり、金属キャスク構造規格MCD-1332の規定にすべて適合しているため、疲労解析を必要としない。

4.2 ボルトの評価

金属キャスク構造規格MCD-1322に従って疲労解析を行う。なお、本項においても燃料装荷及び取出しサイクルの回数を10回に想定しても規定を満足することを示す。

4.2.1 金属キャスク構造規格MCD-1322及び金属キャスク構造規格別図8-4に対する検討

- (1) 一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの最小引張強さは1000 MPaであり、金属キャスク構造規格MCD-1322に従い、設計疲労曲線として金属キャスク構造規格別図8-4を使用する。
- (2) 一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの平均引張応力+曲げ応力は、358 MPa、142 MPa及び277 MPaであり、この値は $2.7 S_m$ 以下であるため、設計疲労曲線として金属キャスク構造規格別図8-4の“曲線1”を使用する。
- (3) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋ボルトが mm、カバープレートボルトが mm、二次蓋ボルトが mmであって0.07 mm以上である。
- (4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比（小数点以下第4位を切捨て）は以下に示されるとおり

一次蓋ボルト : = 0.062

カバープレートボルト : = 0.065

二次蓋ボルト : = 0.062

であって、0.06以上である。したがって金属キャスク構造規格別図8-4の適合条件を満足する。

4.2.2 一次蓋ボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① 一次蓋ボルトの取付け・取外し時
- ② 吊上げ時

- ③ 衝突時（支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時）
- ④ 地震時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合）

①の事象において、一次蓋ボルトの取付け・取外し時におけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さは、ボルト初期締付け時の垂直応力（ σ_{b1} ）とボルト初期締付け時のねじり応力（ τ_{b1} ）を合成した応力にボルトねじ部の応力集中係数（ K ）を考慮した値で求める。計算式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned}
 S &= K \cdot S_b \\
 S_b &= \sqrt{\sigma_{b1}^2 + 4 \cdot \tau_{b1}^2} \\
 \sigma_{b1} &= \frac{F_b}{A_b} \\
 \tau_{b1} &= \frac{Tr}{\frac{\pi \cdot d_s^3}{16}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.9)$$

ここで、

- S : ボルトのピーク応力強さ (MPa)
- K : ボルトねじ部の応力集中係数 (=4)
- S_b : ボルト締付け時に発生する応力強さ (MPa)
- σ_{b1} : ボルト初期締付け時の垂直応力 (MPa)
- τ_{b1} : ボルト初期締付け時のねじり応力 (MPa)
- F_b : ボルトの初期締付け力 (= N)
- A_b : ボルトの最小軸断面積 (= mm²)
- Tr : ボルトの締付けトルク (= N・mm)
- d_s : ボルトの最小径 (= mm)

①の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-2に示す。

②及び③の事象において、一次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）は、①で求めたボルト締付け時に発生する応力強さ（ S_b ）に一次蓋の慣性力により一次蓋ボルトへ作用する荷重（ボルトの初期締付け力と反対方向の荷重）を考慮し、次式により計算する。

$$S = K \cdot \left(S_b + \frac{m_{e1} \cdot G_2}{A} \right) \dots\dots\dots (4.10)$$

ここで、

- S_b, K : (4.9) 式に同じ
- m_{e1} : 一次蓋の質量 (=3700 kg)
- G_2 : 鉛直方向の加速度

内は商業機密のため、非公開とします。

- 吊上げ時 (= -1.3G)
- 支持脚への衝突時 (= -2.5G)
- 貯蔵架台への衝突時 (= -5.0G)

A : ボルト最小断面積の合計値 (= mm²)

②及び③の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-3に示す。

④の事象においては、地震動のみによる疲労解析を行うため、一次蓋の慣性力により一次蓋ボルトへ作用する荷重のみを考慮し、一次蓋ボルトのピーク応力強さ (S) は、次式により計算する。

$$S = K \cdot \left(\pm \frac{m_{e1} \cdot G_2}{A} \right) \dots\dots\dots (4.11)$$

ここで、

K : (4.9) 式に同じ

A, m_{e1} : (4.10)式に同じ

G₂ : 鉛直方向の加速度

$$G_2 = C_v \cdot G$$

C_v : 鉛直方向設計震度

S_d*地震時 (=0.87)

S_s 地震時 (=0.87)

G : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

④の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-4に示す。

(4.9)式, (4.10)式及び(4.11)式で求めたボルトのピーク応力強さ (S) と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲 (S_P) 並びに各事象の繰返し回数を表4-5に示す。

各応力サイクルに対応したピーク応力強さの範囲 (S_P) から、次式により繰返しピーク応力強さ (S_e, S_e') を求める。ここで、繰返しピーク応力強さ (S_e) は、金属キャスク構造規格別図8-4に使用されている設計疲労線図の縦弾性係数 (E₀=2.07×10⁵ MPa) と解析に用いる縦弾性係数 (E=1.84×10⁵ MPa) との比を考慮し補正する。

$$\left. \begin{aligned} S_e &= \frac{1}{2} \cdot S_P \\ S_e' &= S_e \cdot \frac{E_0}{E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.12)$$

繰返しピーク応力強さ (S_e, S_e') の計算条件及び計算結果を表4-6に示す。

内は商業機密のため、非公開とします。

金属キャスク構造規格別図8-4より、補正した繰返しピーク応力強さ (S_0') に対する許容繰返し回数 (N_a) を求める。各サイクルの繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は表4-7に示すとおりとなり、供用状態A及びBによる疲労累積係数は1.0以下であり、地震時における疲労累積係数との和も1.0以下となるため、金属キャスク構造規格MCD-1322の規定を満足する。

4.2.3 カバープレートボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① カバープレートボルトの取付け・取外し時
- ② 吊上げ時
- ③ 衝突時 (支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時)
- ④ 地震時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合)

①の事象において、カバープレートボルトの取付け・取外し時におけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さ (S) は(4.9)式により同様に求める。また、②及び③の事象におけるボルトのピーク応力強さ (S) の計算は(4.10)式、④の事象におけるボルトのピーク応力強さ (S) の計算は(4.11)式により同様に求める。ここで、

- $K, S_b, \sigma_{b1}, \tau_{b1}$: (4.9) 式と同じ
 G_2 : (4.10), (4.11)式と同じ
 F_b : ボルト初期締付け力 (= N)
 A_b : ボルト最小軸断面積 (= mm^2)
 T_r : ボルト締付けトルク (= $\text{N}\cdot\text{mm}$)
 d_s : ボルトの最小径 (= mm)
 m_{e3} : カバープレートの質量 (=8 kg)
 A : ボルト最小断面積の合計値 (= mm^2)

①の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-8に、②及び③の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-9に、④の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-10に示す。

ボルトのピーク応力強さ (S) と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲 (S_p) 並びに各事象の繰返し回数を表4-11に示す。

繰返しピーク応力強さ (S_0, S_0') は、(4.12)式により同様に求める。

繰返しピーク応力強さ (S_0, S_0') の計算条件及び計算結果を表4-12に示す。

各サイクルの繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は表4-13に示すとおりとなり、供用状態A及びBによる疲労累積係数は1.0以下であり、地震時における疲労

累積係数との和も1.0以下となるため、金属キャスク構造規格MCD-1322の規定を満足する。

4.2.4 二次蓋ボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① 二次蓋ボルトの取付け・取外し時
- ② 吊上げ時
- ③ 衝突時（支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時）
- ④ 地震時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合）

①の事象において、二次蓋ボルトの取付け・取外し時におけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さ（ S ）は(4.9)式により同様に求める。また、②及び③の事象におけるボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算は(4.10)式、④の事象におけるボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算は(4.11)式により同様に求める。ここで、

$K, S_b, \sigma_{b1}, \tau_{b1}$: (4.9) 式に同じ
G_2	: (4.10), (4.11)式に同じ
F_b	: ボルト初期締付け力 (= <input type="text"/> N)
A_b	: ボルト最小軸断面積 (= <input type="text"/> mm ²)
T_r	: ボルト締付けトルク (= <input type="text"/> N・mm)
d_s	: ボルトの最小径 (= <input type="text"/> mm)
m_{g2}	: 二次蓋の質量 (=4600 kg)
A	: ボルト最小断面積の合計値 (= <input type="text"/> mm ²)

①の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-14に、②及び③の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-15に、④の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-16に示す。

ボルトのピーク応力強さ（ S ）と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲（ S_p ）並びに各事象の繰返し回数を表4-17に示す。

繰返しピーク応力強さ（ S_e, S_e' ）は、(4.12)式により同様に求める。なお、縦弾性係数 E は $E=1.86 \times 10^5$ MPaに読み替える。

繰返しピーク応力強さ（ S_e, S_e' ）の計算条件及び計算結果を表4-18に示す。

各サイクルの繰返し回数（ N_c ）と許容繰返し回数（ N_a ）との比は表4-19に示すとおりとなり、供用状態A及びBによる疲労累積係数は1.0以下であり、地震時における疲労累積係数との和も1.0以下となるため、金属キャスク構造規格MCD-1322の規定を満足する。

5. 穴の補強

金属キャスク構造規格MCD-1700により，一次蓋貫通孔の補強が不要となることを示す。
一次蓋貫通孔部の応力強さは，応力集中係数を用いて次式で計算する。

$$S_o = K \cdot S \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで，

S_o : 一次蓋貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0⁽²⁾)

S : 一次蓋貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

一次蓋貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) と一次蓋貫通孔部の応力強さ (S_o) は表5-1に示すとおりとなり，すべて許容応力を満足するため，一次蓋貫通孔の補強は不要となる。

6. 外圧の評価

供用状態A及びBの場合に、密封容器の内圧は負圧であり、最高使用圧力（外圧）（ P_{d0} ）は0.65 MPaである。許容外圧（ P_a ）は「添付書類8-1-1 密封容器の応力解析の方針」表6-1（1/2）より15 MPaであるので、金属キャスク構造規格MCD-1410(1)の規定を満足する。

7. 二次蓋の厚さの評価

ここでは、設計・建設規格クラス3容器の規定である、平板の必要板厚の計算を行い、二次蓋の板厚が基準を満足していることを示す。

7.1 応力計算

二次蓋の計算上必要な厚さ (t_{21}) は設計・建設規格PVD-3310の規定中 (PVD-5) 式から、次式で表される。

$$t_{21} = d \cdot \sqrt{\frac{K \cdot P}{S}} \dots\dots\dots (7.1)$$

ここで、

- t_{21} : 二次蓋の計算上必要な厚さ (mm)
- d : 二次蓋ボルトピッチの円の直径 (=2045 mm)
- P : 最高使用圧力 (=0.4 MPa)
- S : 最高使用温度における付録材料図表 Part5 表 5 又は表 6 に規定する材料の許容引張応力 (=120 MPa)
- K : 平板の取付方法による係数 (=0.17, 表 PVD-3310-1 (a) に相当)

であり、計算上必要な厚さは $t_{21}=48.68$ mm である。

設計・建設規格PVD-3322による、直径が $1/2 d$ 以下の穴を設けた場合の計算上必要な厚さ (t_{22}) は (PVD-6) 式から

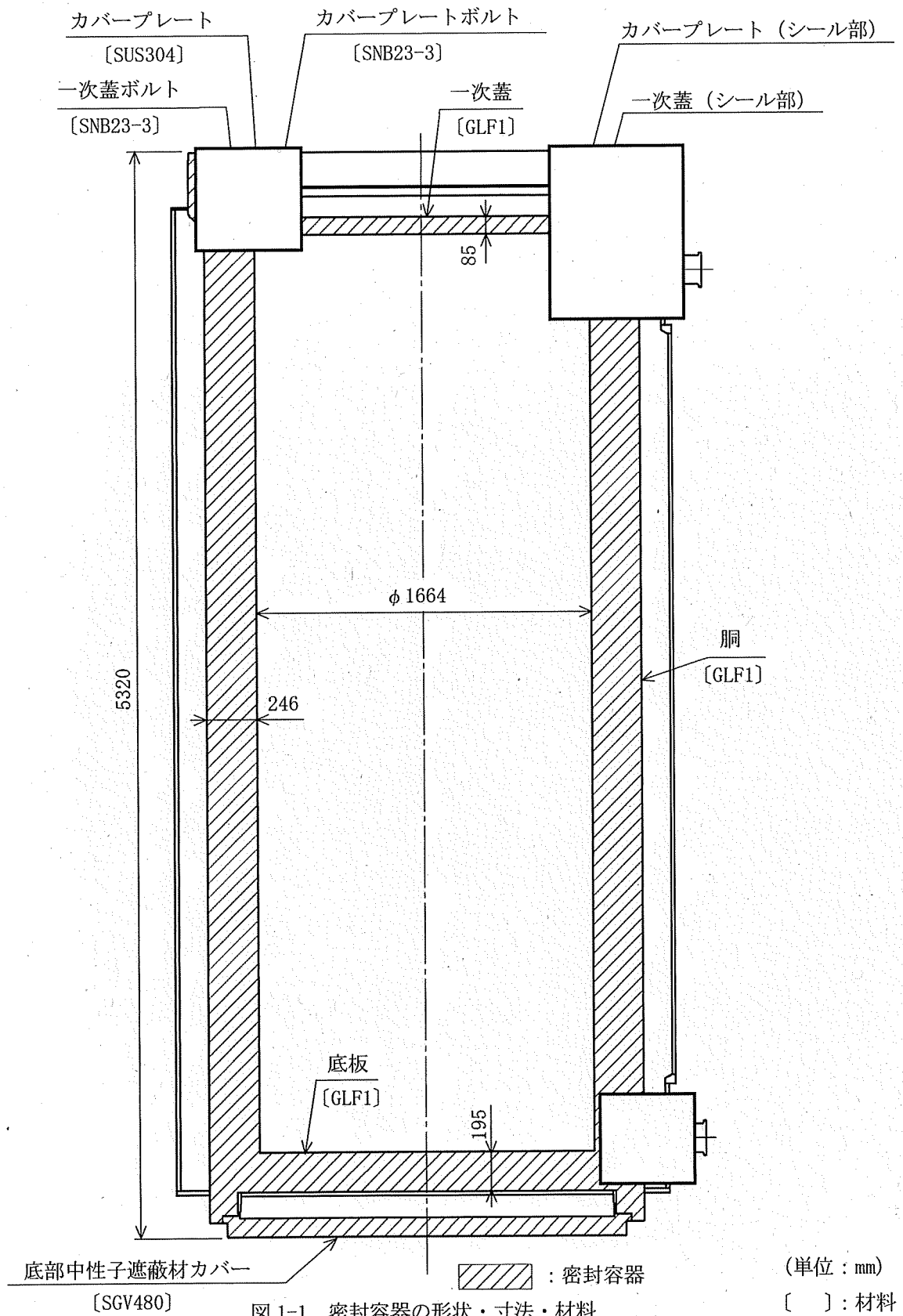
$$t_{22} = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot P}{S}} \dots\dots\dots (7.2)$$

であり、計算上必要な厚さは $t_{22}=68.85$ mm である。

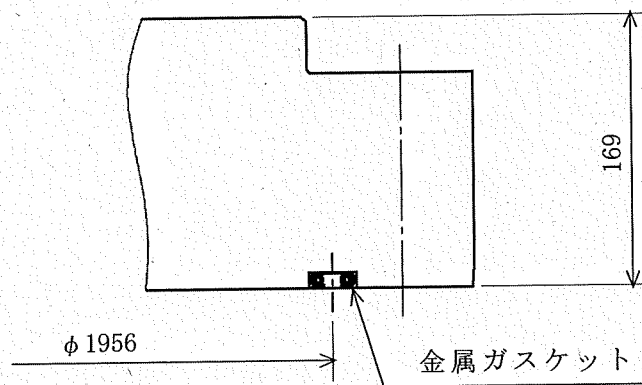
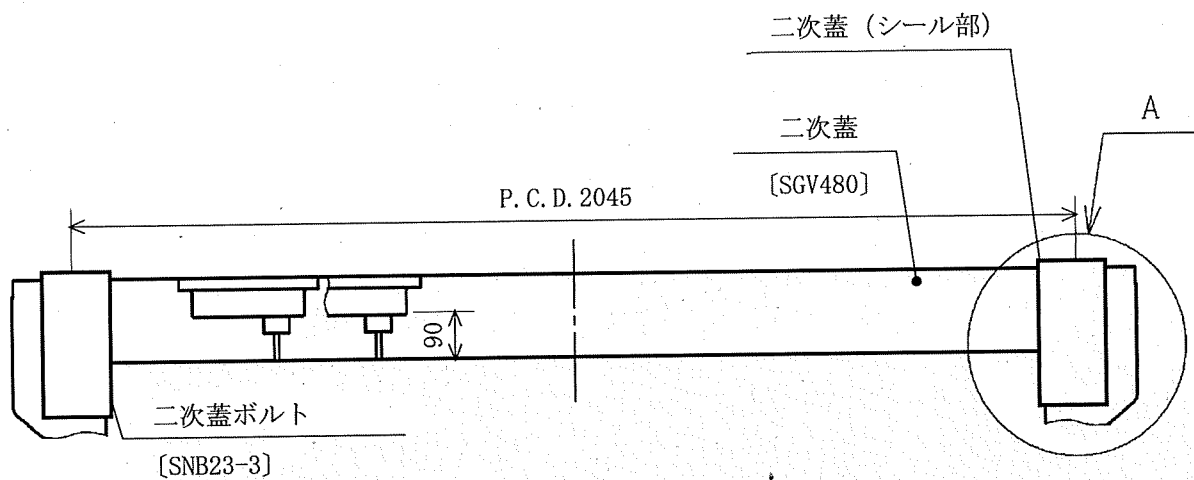
二次蓋の計算上必要な厚さの計算条件及び計算結果を表7-1に示す。

7.2 計算結果

以上の計算から、図1-2に示す穴を除く二次蓋の最小厚さ (=90 mm) は二次蓋の計算上必要な厚さ t_{21} 及び t_{22} を上回っており、設計・建設規格PVD-3310及びPVD-3322の規定を満足する。



内は商業機密のため、非公開とします。



A部詳細

(単位 : mm)

[] : 材料

図 1-2 二次蓋の形状・寸法・材料

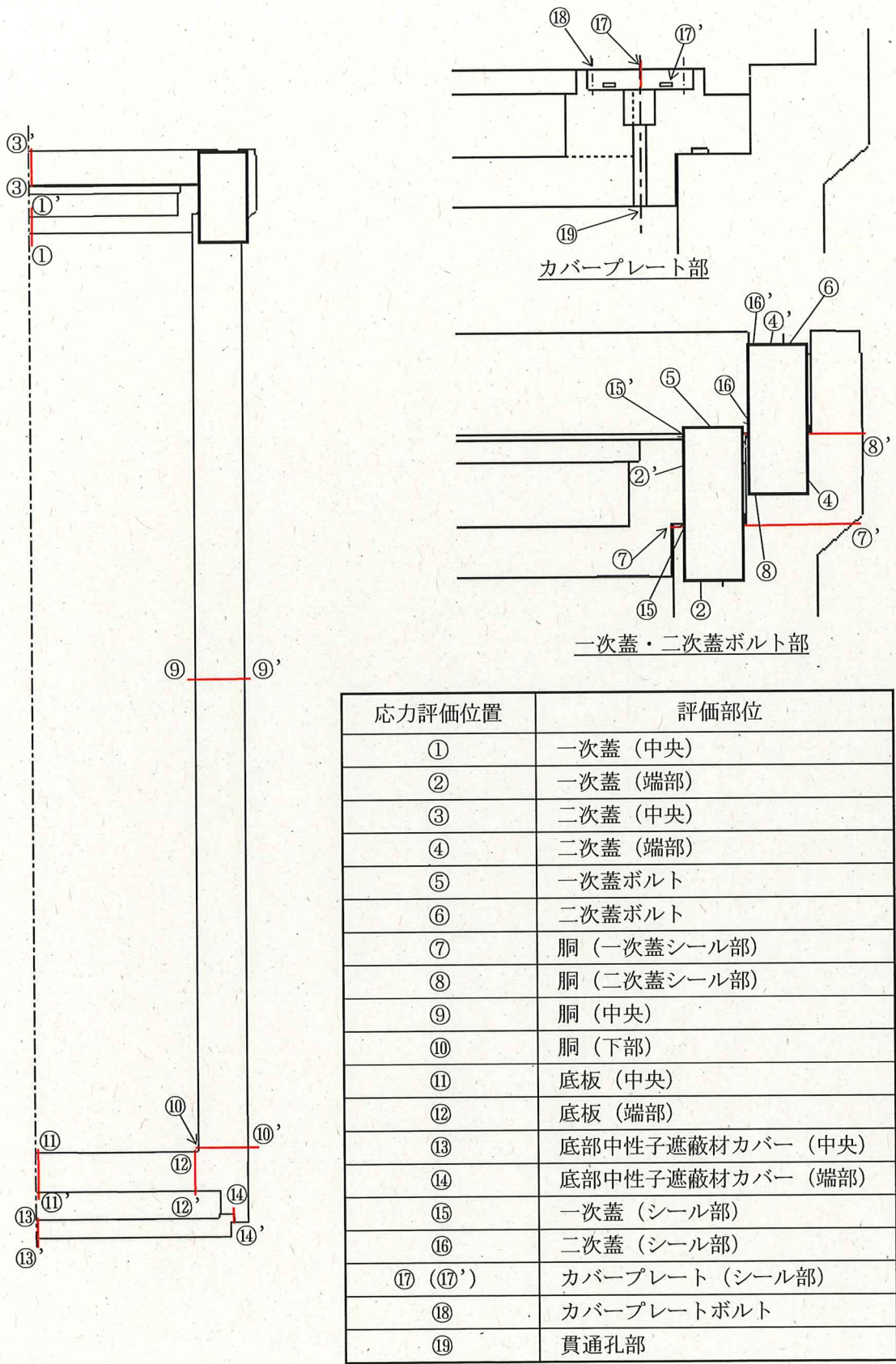


図 2-1 密封容器及び二次蓋の応力評価位置

内は商業機密のため、非公開とします。

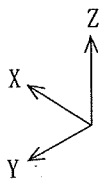
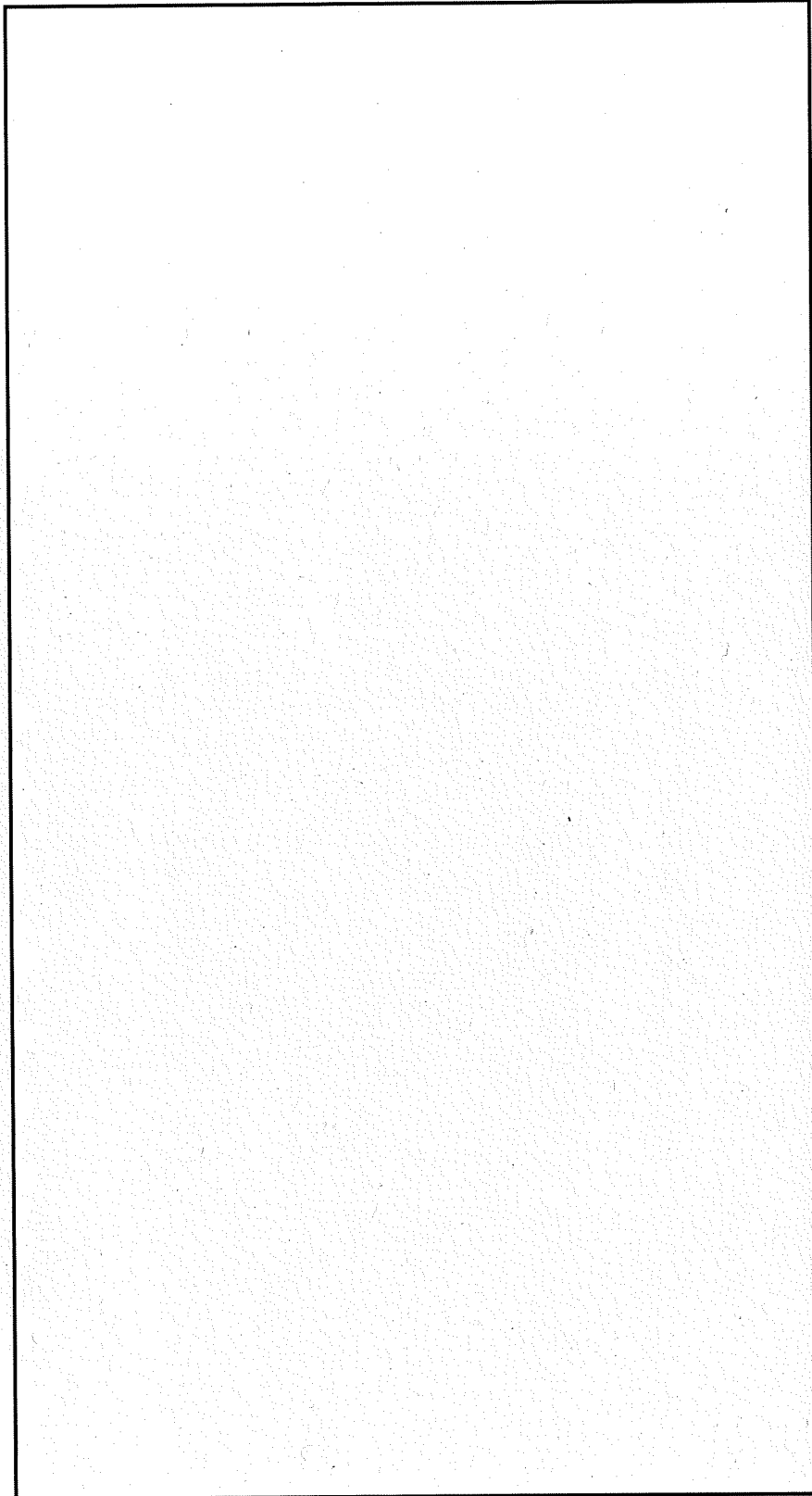


図 2-2 密封容器及び二次蓋の解析モデル（設計時）

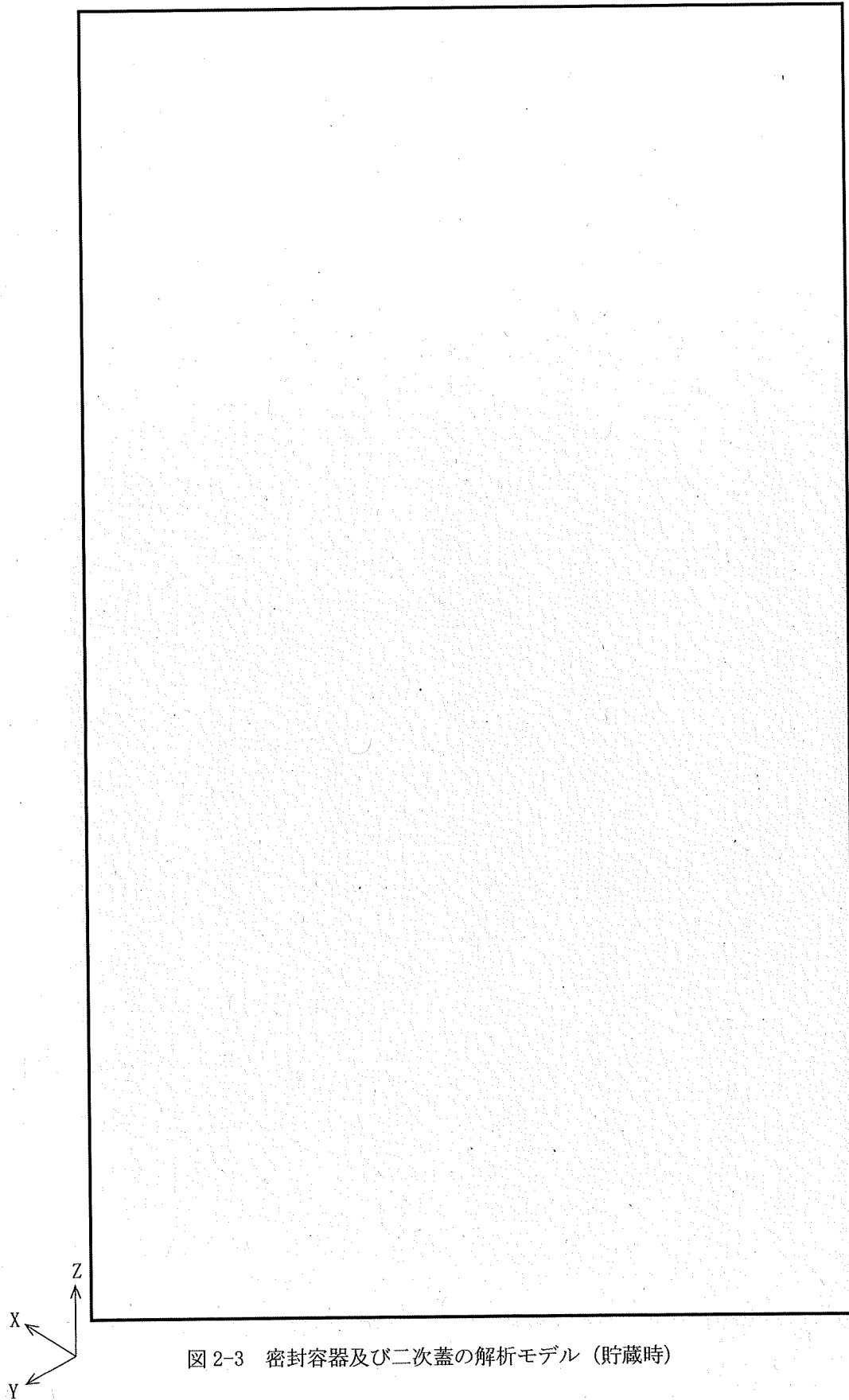


図 2-3 密封容器及び二次蓋の解析モデル (貯蔵時)

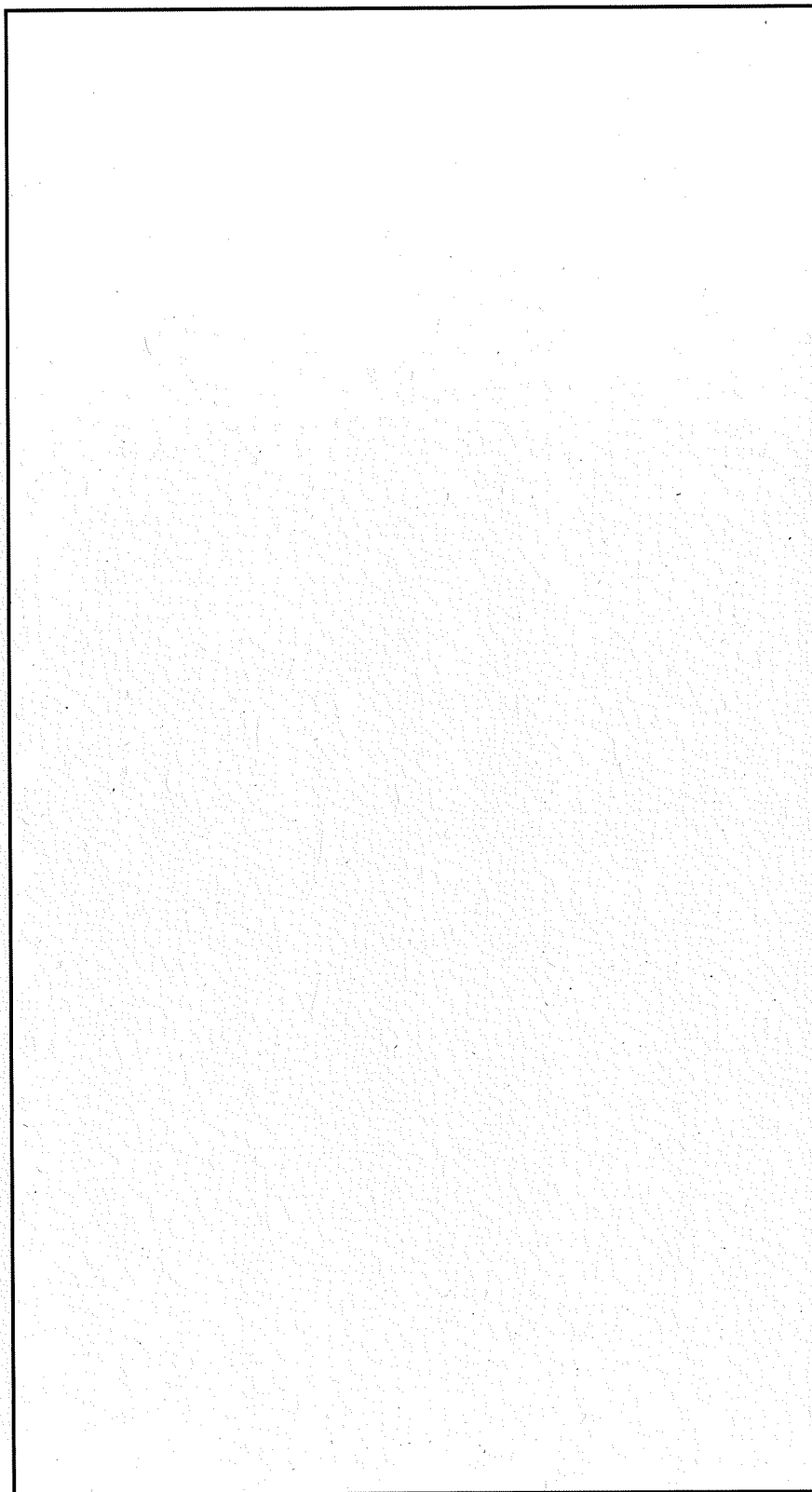
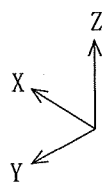


図 2-4 密封容器及び二次蓋の解析モデル（吊上げ時）

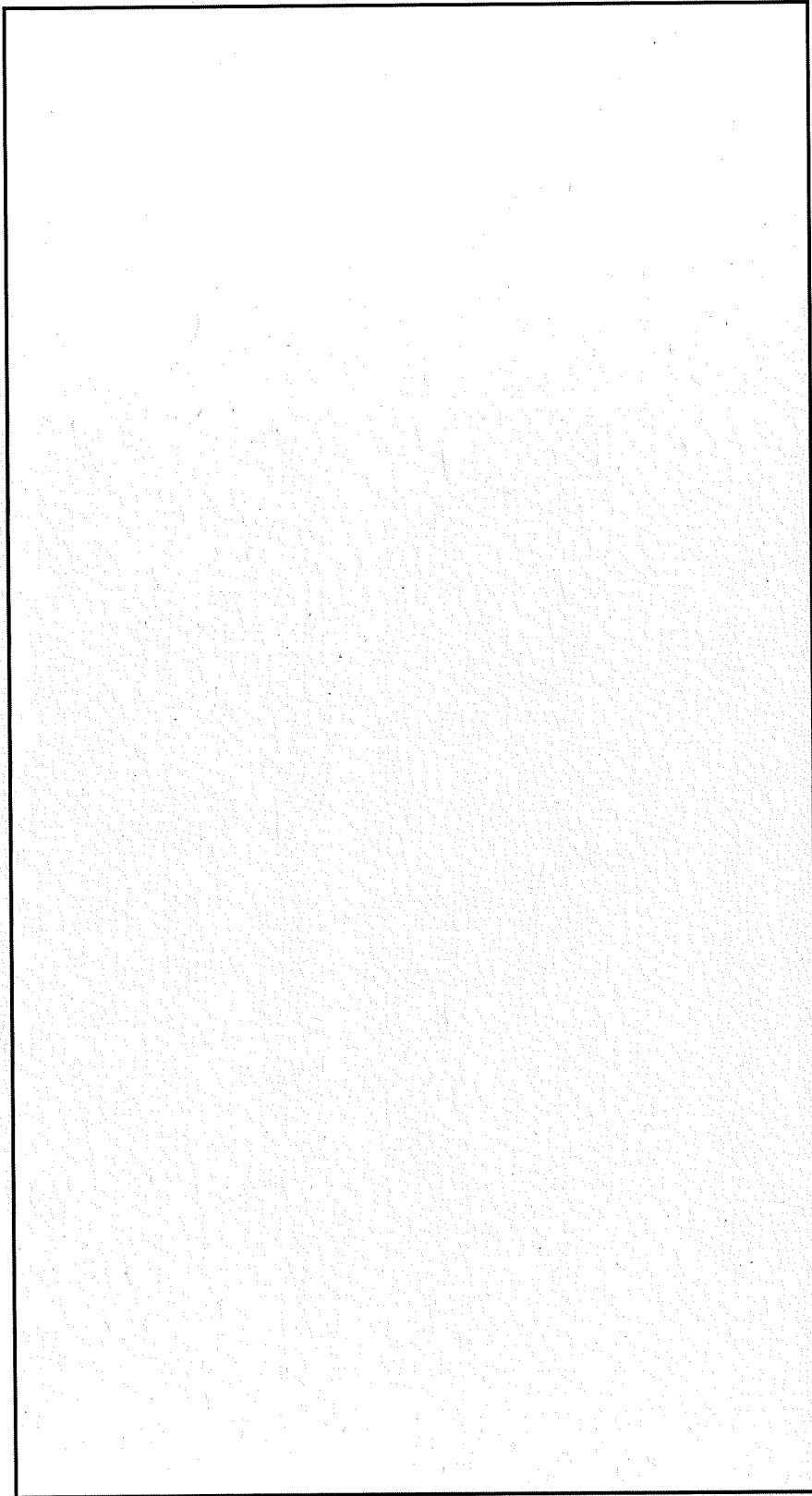
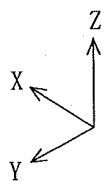


図 2-5 密封容器及び二次蓋の解析モデル（支持脚への衝突時）

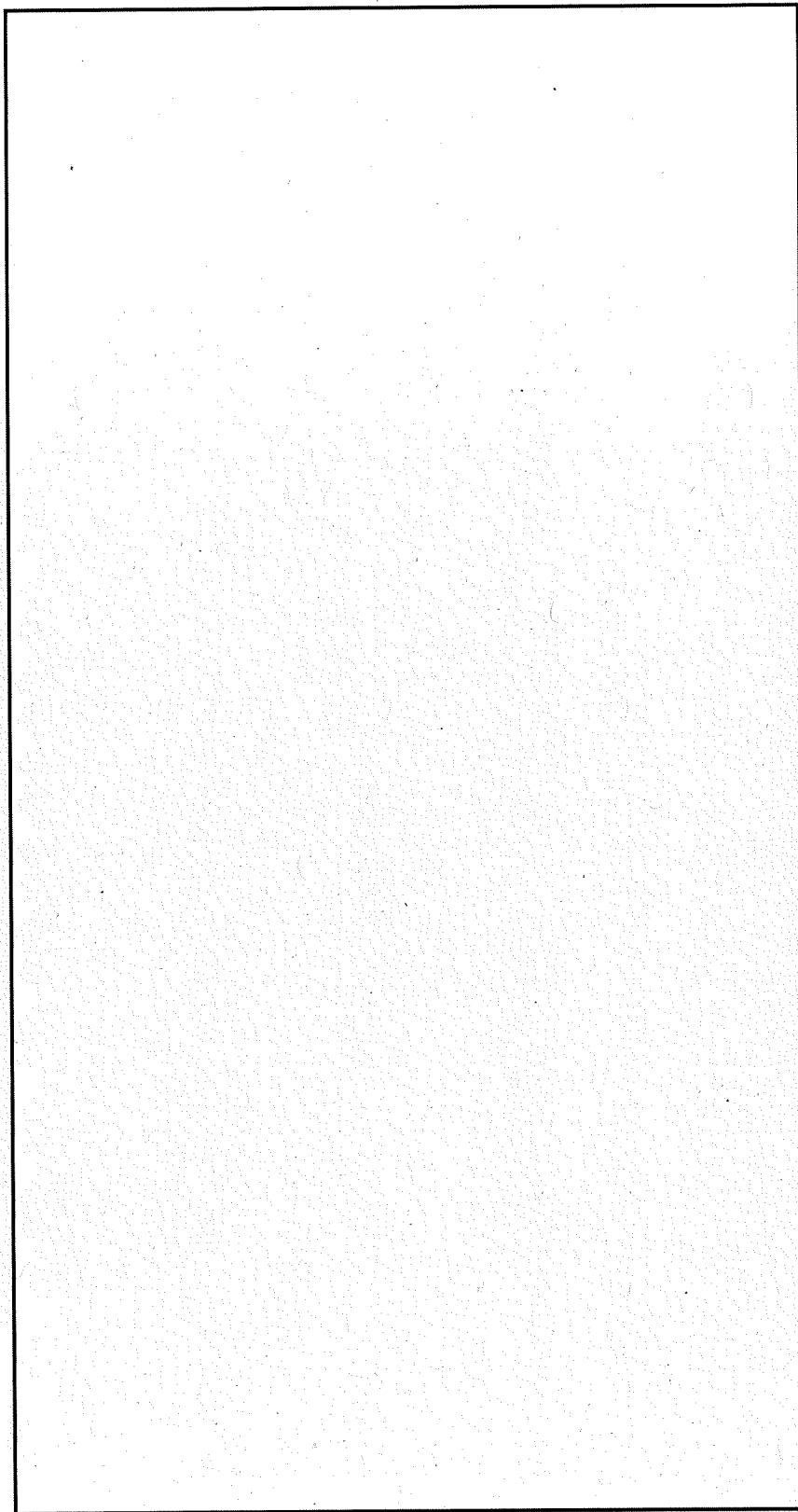
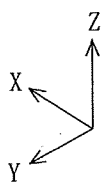


図 2-6 密封容器及び二次蓋の解析モデル (貯蔵架台への衝突時)

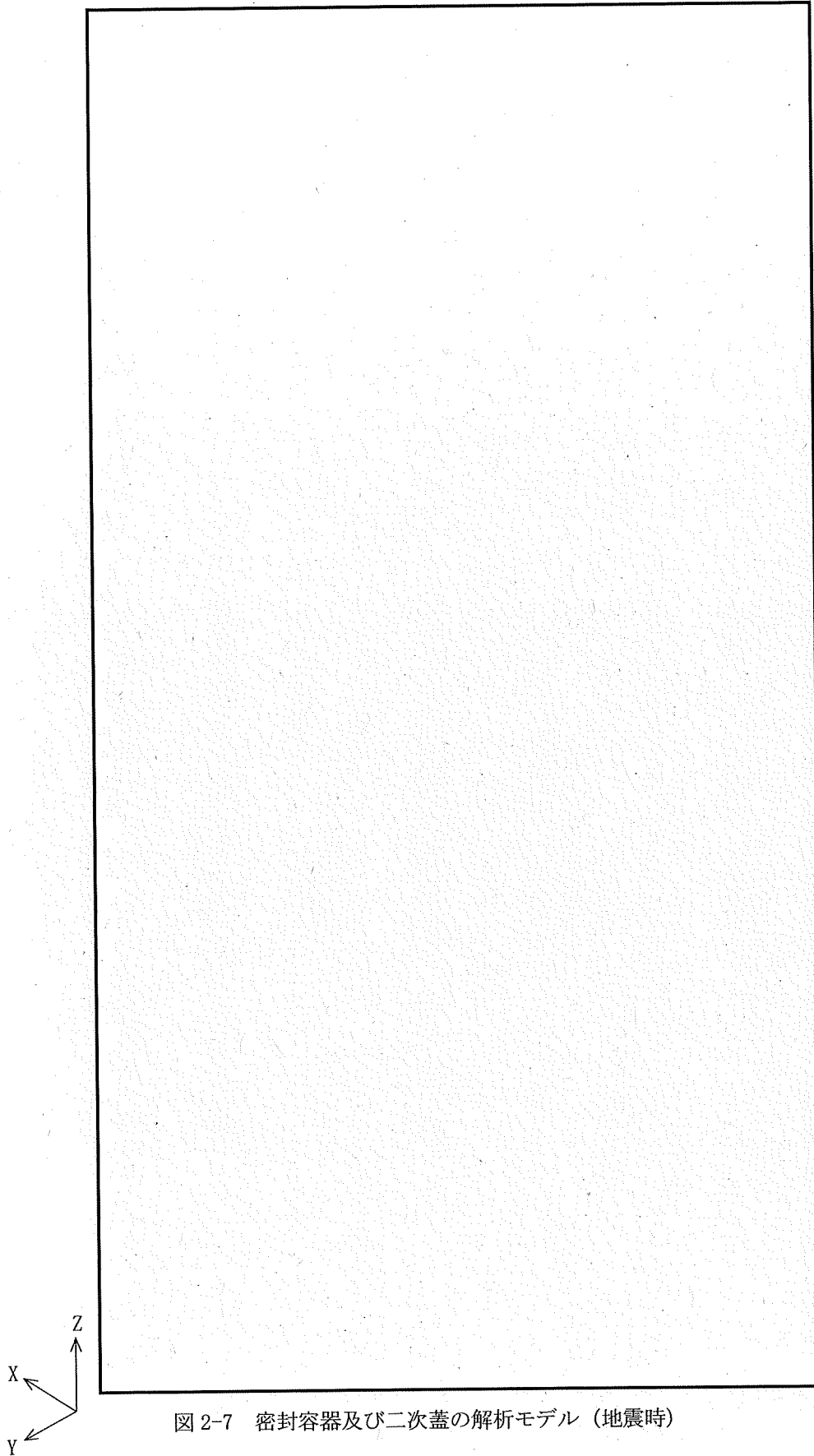


図 2-7 密封容器及び二次蓋の解析モデル（地震時）

内は商業機密のため、非公開とします。

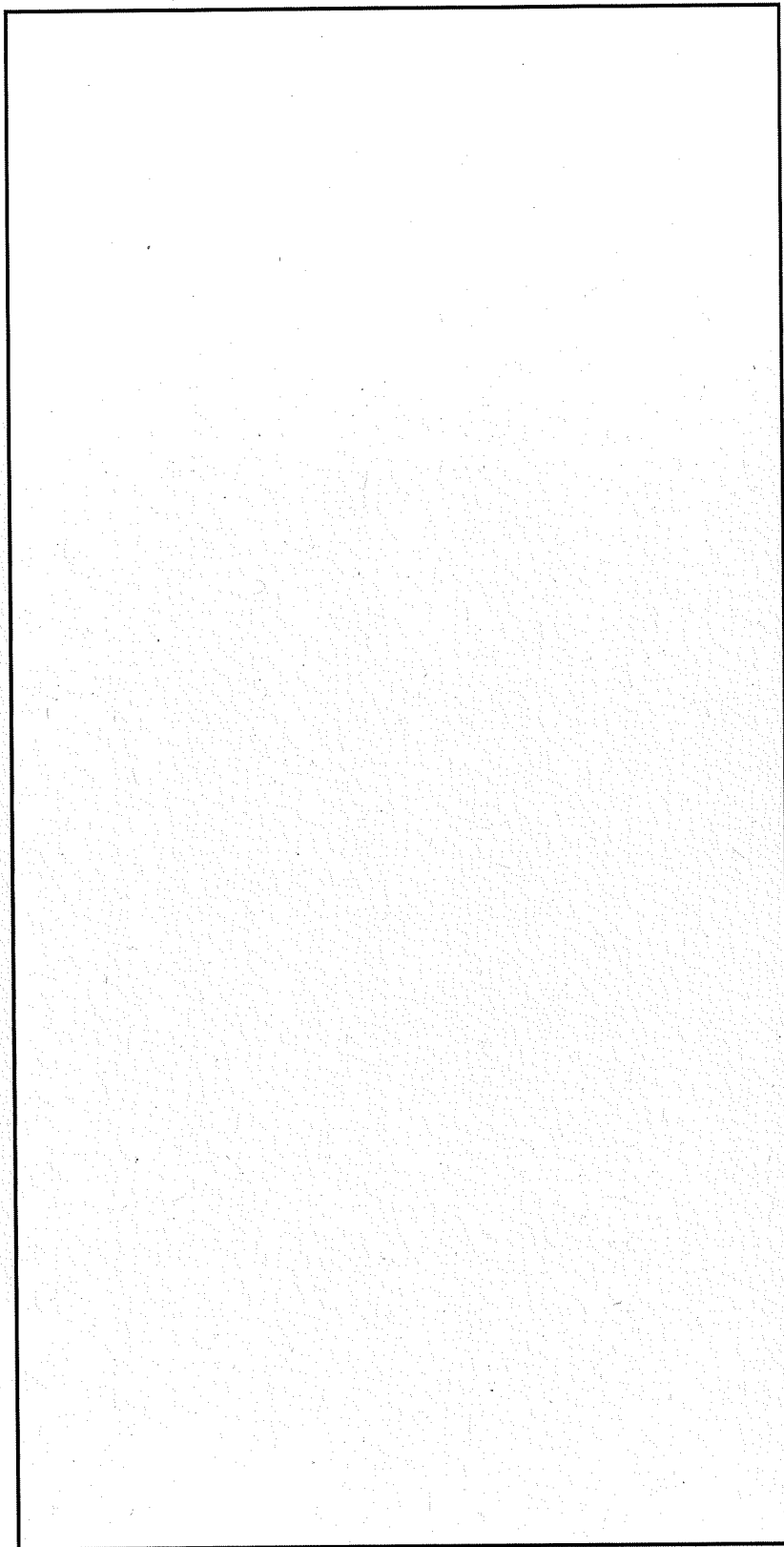
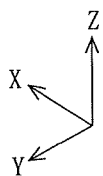


図 2-8 密封容器の解析モデル (試験時)

表 2-1 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果
(設計時)

項目	記号	数値	単位
ボルト最小断面積の合計値 (一次蓋)	A	<input type="text"/>	mm ²
ボルト最小断面積の合計値 (二次蓋)		<input type="text"/>	mm ²
フランジに加わる内圧による全荷重 (一次蓋)	H	<input type="text"/>	N
フランジに加わる内圧による全荷重 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
ガスケット反力の作用する位置 (一次蓋)	D _G	1740	mm
ガスケット反力の作用する位置 (二次蓋)		1956	mm
ガスケット接触面にかかる圧縮力 (一次蓋)	H _P	<input type="text"/>	N
ガスケット接触面にかかる圧縮力 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
最高使用圧力 (一次蓋)	P	1.0	MPa
最高使用圧力 (二次蓋)		0.4	MPa
使用状態での必要な最小ボルト荷重 (一次蓋)	W _{m1}	<input type="text"/>	N
使用状態での必要な最小ボルト荷重 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
平均引張応力 (一次蓋)	σ _{n1}	116	MPa
平均引張応力 (二次蓋)		84	MPa
ガスケット締付け時に必要な 最小ボルト荷重 (一次蓋)	W _{m2}	<input type="text"/>	N
ガスケット締付け時に必要な 最小ボルト荷重 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
ガスケット締付け時の 平均引張応力 (一次蓋)	σ _{n2}	74	MPa
ガスケット締付け時の 平均引張応力 (二次蓋)		67	MPa

表 2-2 カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）

項目	記号	数値	単位
内圧	P	1.0	MPa
ボルトピッチ半径	r	76.5	mm
板厚	t	35	mm
半径方向の応力	σ_r	6	MPa
円周方向の応力	σ_θ	6	MPa
軸方向の応力	σ_z	0	MPa

表 2-3 カバープレートボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）

項目	記号	数値	単位
カバープレートボルト 最小断面積の合計値	A		mm ²
フランジに加わる内圧による全荷重	H		N
ガスケット反力の作用する位置	D _G	111	mm
ガスケット接触面にかける圧縮力	H _P		N
最高使用圧力	P	1.0	MPa
使用状態での必要な最小ボルト荷重	W _{m1}		N
平均引張応力	σ_{n1}	142	MPa
ガスケット締付け時に必要な 最小ボルト荷重	W _{m2}		N
ガスケット締付け時の 平均引張応力	σ_{n2}	134	MPa

表 2-4 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時）

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	1G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-5 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時）

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	1.3G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-6 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	2.5G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-7 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時)

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	5G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-8 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	1.87G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-9 カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果 (試験時)

項目	記号	数値	単位
内圧	P	1.25	MPa
ボルトピッチ半径	r	76.5	mm
板厚	t	35	mm
半径方向の応力	σ_r	8	MPa
円周方向の応力	σ_θ	8	MPa
軸方向の応力	σ_z	0	MPa

表 3-1 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（設計条件）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋（中央）	①-①'	P_m	10	122
	①	$P_L + P_b$	21	183
	①'	$P_L + P_b$	4	183
一次蓋（端部）	②-②'	P_L	23	183
二次蓋（中央）	③-③'	P_m	1	158
	③	$P_L + P_b$	1	237
	③'	$P_L + P_b$	1	237
二次蓋（端部）	④-④'	P_L	19	237
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	116	277
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	84	282
胴（一次蓋 シール部）	⑦-⑦'	P_L	11	183
胴（二次蓋 シール部）	⑧-⑧'	P_L	17	183
胴（中央）	⑨-⑨'	P_m	4	122
胴（下部）	⑩-⑩'	P_L	8	183
底板（中央）	⑪-⑪'	P_m	3	122
	⑪	$P_L + P_b$	16	183
	⑪'	$P_L + P_b$	22	183
底板（端部）	⑫-⑫'	P_L	10	183
底部中性子遮蔽材 カバー（中央）	⑬-⑬'	P_m	1	155
	⑬	$P_L + P_b$	1	232
	⑬'	$P_L + P_b$	1	232
底部中性子遮蔽材 カバー（端部）	⑭-⑭'	P_L	7	232
一次蓋 （シール部）	⑮-⑮'	P_L	12	183
二次蓋 （シール部）	⑯-⑯'	P_L	7	236
カバープレート	⑰	$P_L + P_b$	6	205
カバープレート （シール部）	⑰'	$P_L + P_b$	6	155
カバープレート ボルト	⑱	平均引張応力	142	277

表 3-2 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 A 及び B）（1/2）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価 位置	応力分類	計算値				許容 応力
			貯蔵時	吊上げ 時	支持脚 への 衝突時	貯蔵架台 への 衝突時	
一次蓋 (中央)	①	$P_L + P_b + Q$	9	9	9	8	366
	①'	$P_L + P_b + Q$	14	14	14	14	366
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b + Q$	44	45	44	44	366
	②'	$P_L + P_b + Q$	55	58	57	54	366
二次蓋 (中央)	③	$P_L + P_b + Q$	11	12	11	10	474
	③'	$P_L + P_b + Q$	17	17	16	15	474
二次蓋 (端部)	④	$P_L + P_b + Q$	33	34	34	32	474
	④'	$P_L + P_b + Q$	16	27	27	15	474
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	241	243	241	240	554
	⑤	平均引張応力 + 曲げ応力	332	358	331	329	831
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	244	244	243	243	565
	⑥	平均引張応力 + 曲げ応力	272	277	271	271	847
胴（一次蓋 シール部）	⑦	$P_L + P_b + Q$	25	31	25	25	183
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	11	12	12	11	183
胴（二次蓋 シール部）	⑧	$P_L + P_b + Q$	37	39	37	37	183
	⑧'	$P_L + P_b + Q$	9	9	9	9	183
胴 (中央)	⑨	$P_L + P_b + Q$	18	17	19	19	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q$	7	8	8	7	366
	⑨-⑨'	σ_c	8	7	9	9	95
胴 (下部)	⑩	$P_L + P_b + Q$	21	27	37	20	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	35	18	19	17	366
	⑩-⑩'	σ_c	5	4	6	5	95

表 3-2 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 A 及び B）(2/2)

(単位：MPa)

部 位	応力 評価 位置	応力分類	計算値				許容 応力
			貯蔵時	吊上げ 時	支持脚 への 衝突時	貯蔵架台 への 衝突時	
底板 (中央)	⑪	$P_L + P_b + Q$	31	32	34	36	366
	⑪'	$P_L + P_b + Q$	29	28	25	20	366
	⑪	σ_p	1	1	1	1	183
底板 (端部)	⑫	$P_L + P_b + Q$	27	26	26	19	366
	⑫'	$P_L + P_b + Q$	25	17	21	21	366
	⑫	σ_p	1	1	1	1	183
底部中性子遮蔽材 カバー(中央)	⑬	$P_L + P_b + Q$	8	15	15	10	465
	⑬'	$P_L + P_b + Q$	8	36	39	10	465
底部中性子遮蔽材 カバー(端部)	⑭	$P_L + P_b + Q$	37	76	92	57	465
	⑭'	$P_L + P_b + Q$	21	17	18	16	465
一次蓋 (シール部)	⑮	$P_L + P_b + Q$	29	29	29	29	183
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	56	59	59	56	183
二次蓋 (シール部)	⑯	$P_L + P_b + Q$	18	18	18	17	236
	⑯'	$P_L + P_b + Q$	9	13	12	9	236

表 3-3 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力 (供用状態 C_s) (1/3)

(単位 : MPa)

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	5	183
	①	$P_L + P_b$	9	274
	①'	$P_L + P_b$	2	274
	①	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
	①'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	2	366
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	18	274
	②'	$P_L + P_b$	18	274
	②	$P_L + P_b + Q^{*1}$	46	366
	②'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	49	366
二次蓋 (中央)	③-③'	P_m	1	236
	③	$P_L + P_b$	15	355
	③'	$P_L + P_b$	16	355
	③	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	474
	③'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	474
二次蓋 (端部)	④	$P_L + P_b$	30	355
	④'	$P_L + P_b$	30	355
	④	$P_L + P_b + Q^{*1}$	54	474
	④'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	66	474
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	241	554
		平均引張応力 + 曲げ応力	337	831
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	244	565
		平均引張応力 + 曲げ応力	274	847

注記*1 : 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-3 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_s）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
胴 (一次蓋 シール部)	⑦	$P_L + P_b$	10	183
	⑦'	$P_L + P_b$	10	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	183
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	12	183
胴 (二次蓋 シール部)	⑧	$P_L + P_b$	16	183
	⑧'	$P_L + P_b$	16	183
	⑧	$P_L + P_b + Q$	37	183
	⑧'	$P_L + P_b + Q$	9	183
胴 (中央)	⑨-⑨'	P_m	2	183
	⑨	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
胴 (下部)	⑩	$P_L + P_b$	30	274
	⑩'	$P_L + P_b$	30	274
	⑩	$P_L + P_b + Q^{*1}$	51	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	83	366
底板 (中央)	⑪-⑪'	P_m	3	183
	⑪	$P_L + P_b$	7	274
	⑪'	$P_L + P_b$	9	274
	⑪	$P_L + P_b + Q^{*1}$	8	366
	⑪'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	9	366
	⑪	σ_p	1	183

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-3 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_s）(3/3)

(単位：MPa)

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
底板 (端部)	⑫	$P_L + P_b$	10	274
	⑫'	$P_L + P_b$	10	274
	⑫	$P_L + P_b + Q^{*1}$	24	366
	⑫'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	32	366
	⑫	σ_p	1	183
底部中性子遮蔽 材カバー(中央)	⑬-⑬'	P_m	10	232
	⑬	$P_L + P_b$	16	348
	⑬'	$P_L + P_b$	23	348
	⑬	$P_L + P_b + Q^{*1}$	19	465
	⑬'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	12	465
底部中性子遮蔽 材カバー(端部)	⑭	$P_L + P_b$	91	348
	⑭'	$P_L + P_b$	91	348
	⑭	$P_L + P_b + Q^{*1}$	217	465
	⑭'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	152	465
一次蓋 (シール部)	⑮	$P_L + P_b$	7	183
	⑮'	$P_L + P_b$	7	183
	⑮	$P_L + P_b + Q$	30	183
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	61	183
二次蓋 (シール部)	⑯	$P_L + P_b$	9	236
	⑯'	$P_L + P_b$	9	236
	⑯	$P_L + P_b + Q$	18	236
	⑯'	$P_L + P_b + Q$	12	236

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-4 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態D_s）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	5	251
	①	$P_L + P_b$	9	377
	①'	$P_L + P_b$	2	377
	①	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
	①'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	2	366
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	18	377
	②'	$P_L + P_b$	18	377
	②	$P_L + P_b + Q^{*1}$	46	366
	②'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	49	366
二次蓋 (中央)	③-③'	P_m	1	286
	③	$P_L + P_b$	15	429
	③'	$P_L + P_b$	16	429
	③	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	474
	③'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	474
二次蓋 (端部)	④	$P_L + P_b$	30	429
	④'	$P_L + P_b$	30	429
	④	$P_L + P_b + Q^{*1}$	54	474
	④'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	66	474
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	241	831
		平均引張応力 + 曲げ応力	337	831
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	244	848
		平均引張応力 + 曲げ応力	274	848

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-4 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態D_s）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
胴 (一次蓋 シール部)	⑦	$P_L + P_b$	10	183
	⑦'	$P_L + P_b$	10	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	183
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	12	183
胴 (二次蓋 シール部)	⑧	$P_L + P_b$	16	183
	⑧'	$P_L + P_b$	16	183
	⑧	$P_L + P_b + Q$	37	183
	⑧'	$P_L + P_b + Q$	9	183
胴 (中央)	⑨-⑨'	P_m	2	251
	⑨	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
胴 (下部)	⑩	$P_L + P_b$	30	377
	⑩'	$P_L + P_b$	30	377
	⑩	$P_L + P_b + Q^{*1}$	51	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	83	366
底板 (中央)	⑪-⑪'	P_m	3	251
	⑪	$P_L + P_b$	7	377
	⑪'	$P_L + P_b$	9	377
	⑪	$P_L + P_b + Q^{*1}$	8	366
	⑪'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	9	366
	⑪	σ_p	1	377

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-4 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態D_s）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
底板 (端部)	⑫	$P_L + P_b$	10	377
	⑫'	$P_L + P_b$	10	377
	⑫	$P_L + P_b + Q^{*1}$	24	366
	⑫'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	32	366
	⑫	σ_p	1	377
底部中性子遮蔽 材カバー(中央)	⑬-⑬'	P_m	10	282
	⑬	$P_L + P_b$	16	424
	⑬'	$P_L + P_b$	23	424
	⑬	$P_L + P_b + Q^{*1}$	19	465
	⑬'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	12	465
底部中性子遮蔽 材カバー(端部)	⑭	$P_L + P_b$	91	424
	⑭'	$P_L + P_b$	91	424
	⑭	$P_L + P_b + Q^{*1}$	217	465
	⑭'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	152	465
一次蓋 (シール部)	⑮	$P_L + P_b$	7	183
	⑮'	$P_L + P_b$	7	183
	⑮	$P_L + P_b + Q$	30	183
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	61	183
二次蓋 (シール部)	⑯	$P_L + P_b$	9	236
	⑯'	$P_L + P_b$	9	236
	⑯	$P_L + P_b + Q$	18	236
	⑯'	$P_L + P_b + Q$	12	236

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-5 密封容器の応力計算結果と許容応力 (試験状態)

(単位 : MPa)

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	13	186
	①	$P_L + P_b$	27	279
	①'	$P_L + P_b$	5	279
一次蓋 (端部)	②-②'	P_L	25	279
胴 (一次蓋 シール部)	⑦-⑦'	P_L	11	207
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	207
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	6	207
胴 (中央)	⑨-⑨'	P_m	5	186
胴 (下部)	⑩-⑩'	P_L	5	279
底板 (中央)	⑪-⑪'	P_m	2	186
	⑪	$P_L + P_b$	11	279
	⑪'	$P_L + P_b$	16	279
底板 (端部)	⑫-⑫'	P_L	8	279
底部中性子遮蔽 材カバー(中央)	⑬-⑬'	P_m	1	238
	⑬	$P_L + P_b$	1	357
	⑬'	$P_L + P_b$	1	357
底部中性子遮蔽 材カバー(端部)	⑭-⑭'	P_L	3	357
一次蓋 (シール部)	⑮-⑮'	P_L	15	207
	⑮	$P_L + P_b + Q$	13	207
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	21	207
カバープレート	⑰	$P_L + P_b$	8	276
カバープレート (シール部)	⑰'	$P_L + P_b$	8	205

表 4-1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の疲労解析不要の評価結果

金属キヤスク構造規格 MCD-1332	繰返し荷重	設定繰返し回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧→使用圧力→大気圧の変動	10	繰返し回数 $N_1 = 10$	$3 S_m$ に対する許容繰返し回数 $N_a = 3627$	$N_1 \leq N_a$ であり、 本条件を満足
(2)	燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動	10	圧力変動の全振幅 $P = 1.0 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m = 10 \text{ MPa}$	$P \leq A_m$ であり、 本条件を満足
(3)	燃料装荷時及び燃料取出し時の温度差	10	温度差 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差許容値 $T = 808 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であり、 本条件を満足
(4)	燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B の温度差変動	10	温度差変動の全振幅 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T = 808 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であり、 本条件を満足
(5)	異なる材料で作られた部分の温度変動	10	温度変動 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T = 3184 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であり、 本条件を満足
(6)	地震力以外	216	応力の全振幅 $2 \cdot \Delta \sigma_1 = 184 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動回数 216 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S_a = 1034 \text{ MPa}$	$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$ であり、 本条件に対する評価で考慮する必要がない。
	機械的荷重により生じる応力の全振幅	10^4	応力の全振幅 $\Delta \sigma_2 = 217 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動回数 10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S_a = 262 \text{ MPa}$	$\Delta \sigma_2 \leq S_a$ であり、 本条件に対する評価で考慮する必要がない。

表 4-2 ①の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	374	MPa
ボルト初期締付け時の垂直応力	σ_{b1}	247* ¹	MPa
ボルト初期締付け時のねじり応力	τ_{b1}	141* ¹	MPa
ボルトの初期締付け力	F_b		N
ボルトの最小軸断面積	A_b		mm ²
ボルトの締付けトルク	T_r		N・mm
ボルトの最小径	d_s		mm
ボルトのピーク応力強さ	S	1496	MPa

注記*1：表中では整数位表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用

表 4-3 ②及び③の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		吊上げ時	支持脚への衝突時	貯蔵架台への衝突時	
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4			-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	374			MPa
一次蓋の質量	m_{g1}	3700			kg
鉛直方向の加速度	G_2	-1.3G	-2.5G	-5.0G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665			m/s ²
ボルト最小断面積の合計値	A				mm ²
ボルトの最小軸断面積	A_b				mm ²
ボルトのピーク応力強さ	S	1493	1490	1483	MPa

表 4-4 ④の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
一次蓋の質量	m_{e1}	3700	kg
ボルト最小断面積の合計値	A	<input type="text"/>	mm ²
鉛直方向の加速度	G_z	0.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
ボルトのピーク応力強さ	S	2.2	MPa

表 4-5 応力差の変動（一次蓋ボルト）

No.	事象	事象	S _P (MPa)
1	C01	C00	1496
2	C06	C04	13
3	CSd	—	4
4	CSs	—	4

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。

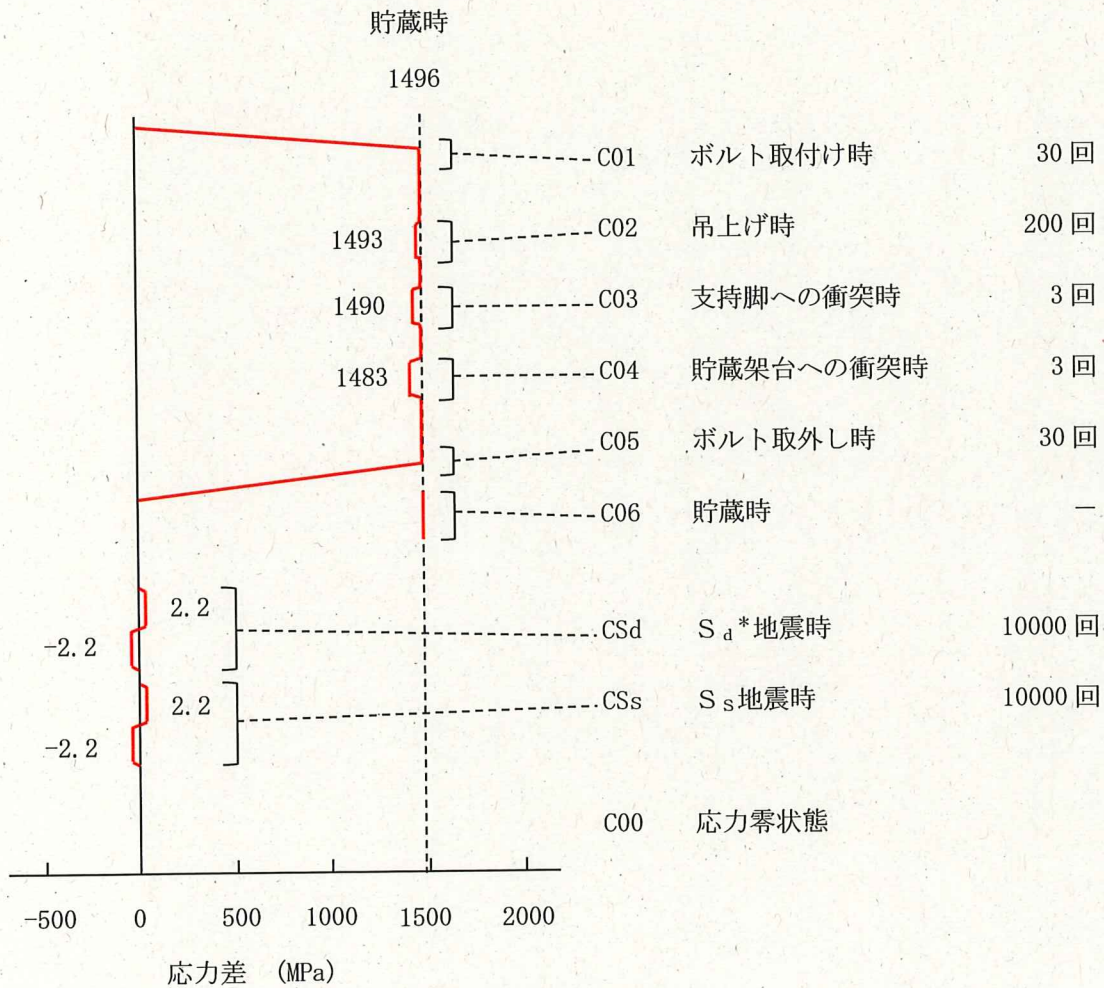


表 4-6 一次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		①の事象	②及び③ の事象	④の事象	
ピーク応力強さの範囲	S_P	1496	13	4	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_θ	748	6	2	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_0	2.07×10^5			MPa
解析に用いる縦弾性係数	E	1.84×10^5			MPa
縦弾性係数で補正した繰 返しピーク応力強さ	S_θ'	841	7	3	MPa

表 4-7 疲労累積係数 (一次蓋ボルト)

No.	S_b (MPa)	S (MPa)	S_P (MPa)	S_θ (MPa)	S_θ' (MPa)	N_a	N_c	N_c/N_a
1	374	1496	1496	748	841	679	30	0.0442
2	374	1483	13	6	7	10^6	3	0.0000
疲労累積係数 $U_n=0.0442$								
3	—	2.2	4	2	3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{sd}=0.0100$								
4	—	2.2	4	2	3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{ss}=0.0100$								
疲労累積係数 $U_f=U_n+U_{ss}=0.0542$								

表 4-8 ①の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	361	MPa
ボルト初期締付け時の垂直応力	σ_{b1}	214* ¹	MPa
ボルト初期締付け時のねじり応力	τ_{b1}	146* ¹	MPa
ボルトの初期締付け力	F_b		N
ボルトの最小軸断面積	A_b		mm ²
ボルトの締付けトルク	T_r		N・mm
ボルトの最小径	d_s		mm
ボルトのピーク応力強さ	S	1443.6	MPa

注記*1: 表中では整数位表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用

表 4-9 ②及び③の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		吊上げ時	支持脚への 衝突時	貯蔵架台への 衝突時	
ボルトねじ部の応力 集中係数	K	4			-
ボルト締付け時に 発生する応力強さ	S_b	361			MPa
カバープレートの質量	m_{e3}	8			kg
鉛直方向の加速度	G_2	-1.3G	-2.5G	-5.0G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665			m/s ²
ボルト最小断面積の 合計値	A				mm ²
ボルトの最小軸断面積	A_b				mm ²
ボルトのピーク応力強さ	S	1443.3	1443.0	1442.3	MPa

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 4-10 ④の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
カバープレートの質量	m_{e3}	8	kg
ボルト最小断面積の合計値	A	<input type="text"/>	mm ²
鉛直方向の加速度	G_2	0.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
ボルトのピーク応力強さ	S	0.23	MPa

表 4-11 応力差の変動 (カバープレートボルト)

No.	事象	事象	S _P (MPa)
1	C01	C00	1444
2	C06	C04	1
3	CSd	—	0.5
4	CSs	—	0.5

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。

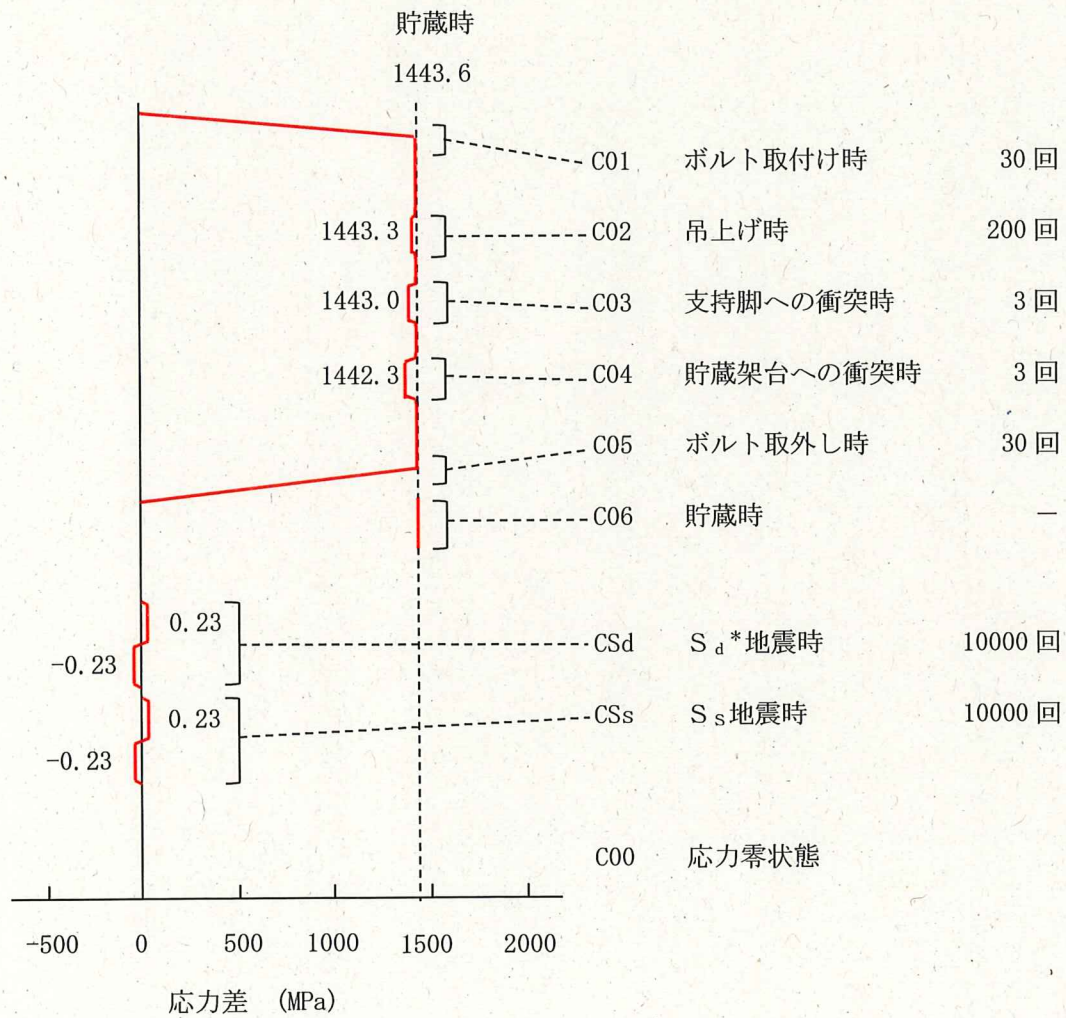


表 4-12 カバープレートボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		①の事象	②及び③の事象	④の事象	
ピーク応力強さの範囲	S_P	1444	1	0.5	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_e	722	1	0.2	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_0	2.07×10^5			MPa
解析に用いる縦弾性係数	E	1.84×10^5			MPa
縦弾性係数で補正した繰返しピーク応力強さ	S_e'	812	1	0.3	MPa

表 4-13 疲労累積係数 (カバープレートボルト)

No.	S_b (MPa)	S (MPa)	S_P (MPa)	S_e (MPa)	S_e' (MPa)	N_a	N_c	N_c/N_a
1	361	1443.6	1444	722	812	727	30	0.0413
2	361	1442.3	1	1	1	10^6	3	0.0000
疲労累積係数 $U_n=0.0413$								
3	—	0.23	0.5	0.2	0.3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{sd}=0.0100$								
4	—	0.23	0.5	0.2	0.3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{ss}=0.0100$								
疲労累積係数 $U_r=U_n+U_{ss}=0.0513$								

表 4-14 ①の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	337	MPa
ボルト初期締付け時の垂直応力	σ_{b1}	247* ¹	MPa
ボルト初期締付け時のねじり応力	τ_{b1}	115* ¹	MPa
ボルトの初期締付け力	F_b		N
ボルトの最小軸断面積	A_b		mm ²
ボルトの締付けトルク	T_r		N・mm
ボルトの最小径	d_s		mm
ボルトのピーク応力強さ	S	1345	MPa

注記*1：表中では整数位表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用

表 4-15 ②及び③の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		吊上げ時	支持脚への衝突時	貯蔵架台への衝突時	
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4			-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	337			MPa
二次蓋の質量	m_{02}	4600			kg
鉛直方向の加速度	G_z	-1.3G	-2.5G	-5.0G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665			m/s ²
ボルト最小断面積の合計値	A				mm ²
ボルトの最小軸断面積	A_b				mm ²
ボルトのピーク応力強さ	S	1341	1338	1332	MPa

表 4-16 ④の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
二次蓋の質量	m_{d2}	4600	kg
ボルト最小断面積の合計値	A	<input type="text"/>	mm ²
鉛直方向の加速度	G_2	0.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
ボルトのピーク応力強さ	S	2.2	MPa

表 4-17 応力差の変動 (二次蓋ボルト)

No.	事象	事象	S _p (MPa)
1	C01	C00	1345
2	C06	C04	13
3	CSd	—	4
4	CSs	—	4

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。

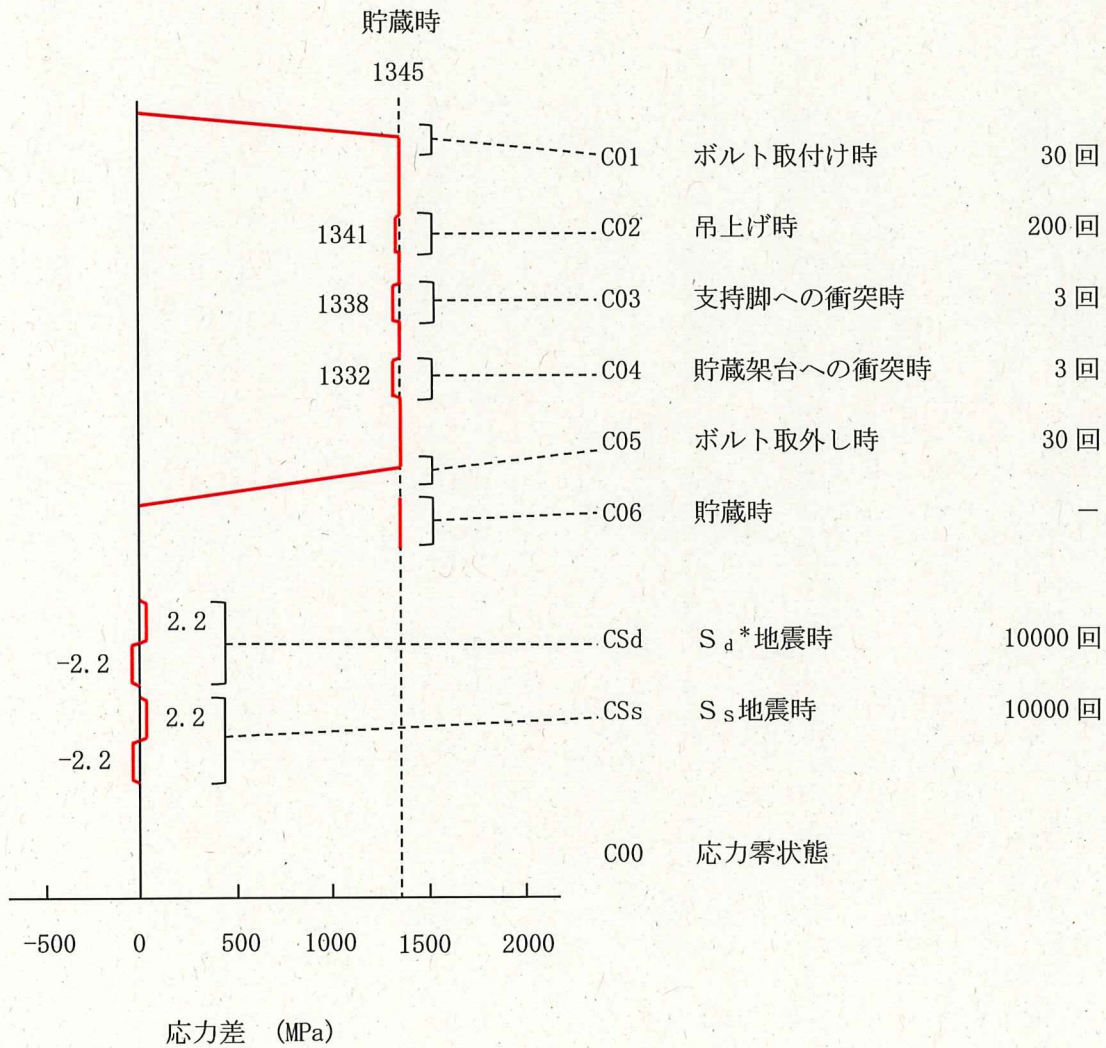


表 4-18 二次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		①の事象	②及び③ の事象	④の事象	
ピーク応力強さの範囲	S_P	1345	13	4	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_ℓ	672	6	2	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_0	2.07×10^5			MPa
解析に用いる縦弾性係数	E	1.86×10^5			MPa
縦弾性係数で補正した繰 返しピーク応力強さ	S_ℓ'	748	7	2	MPa

表 4-19 疲労累積係数 (二次蓋ボルト)

No.	S_b (MPa)	S (MPa)	S_P (MPa)	S_ℓ (MPa)	S_ℓ' (MPa)	N_a	N_c	N_c/N_a
1	337	1345	1345	672	748	852	30	0.0353
2	337	1332	13	6	7	10^6	3	0.0000
疲労累積係数 $U_n=0.0353$								
3	—	2.2	4	2	2	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{sd}=0.0100$								
4	—	2.2	4	2	2	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{ss}=0.0100$								
疲労累積係数 $U_f=U_n+U_{ss}=0.0453$								

表 5-1 一次蓋貫通孔部の応力強さ

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力評価 位置	応力分類	貫通孔を無視した 場合の応力強さ (S)	貫通孔部の 応力強さ (S _c)	許容応力
設計条件	⑱	P _L	4	16	183
	⑱	P _L +P _b	16	63	183
供用状態 A及びB	⑱	P _L +P _b +Q	61	241	366
供用状態 C _s	⑱	P _L +P _b	6	22	274
	⑱	P _L +P _b +Q* ¹	7	26	366
供用状態 D _s	⑱	P _L +P _b	6	22	377
	⑱	P _L +P _b +Q* ¹	7	26	366
試験状態	⑱	P _L	5	20	279
	⑱	P _L +P _b	20	80	279

注記*1 : 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 7-1 二次蓋の計算上必要な厚さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
二次蓋の計算上必要な厚さ (設計・建設規格の(PVD-5)式から)	t_{21}	48.68	mm
二次蓋ボルトピッチの円の直径	d	2045	mm
最高使用圧力	P	0.4	MPa
最高使用温度における付録材料図表 Part5 表 5 又は表 6 に規定する材料の許容引張応力	S	120	MPa
平板の取付方法による係数	K	0.17	-
直径が $1/2 d$ 以下の穴を設けた場合の 計算上必要な厚さ (設計・建設規格の(PVD-6)式から)	t_{22}	68.85	mm

添付書類 8-2

バスケットの強度に関する説明書

添付書類 8-2-1

バスケットの応力解析の方針

目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	2
3. 記号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析対象	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 許容応力	6
6. 応力解析の手順	7
6.1 解析手順の概要	7
6.2 荷重条件の選定	7
6.3 応力計算と評価	7
6.3.1 応力計算の方法	7
6.3.2 応力の評価	7
6.3.3 数値の丸め方	8

図表目次

図 5-1	応力解析対象	9
図 6-1	バスケットの応力解析フロー図	10
表 4-1	バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	11
表 5-1	代表事象	12
表 6-1	バスケット用材料の許容応力	13
表 6-2	数値の丸め方一覧表	14

1. 概要

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要な容器等の材料及び構造は「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）第14条に規定されており、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有することが要求されている。

本書は、金属キャスクのバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

バスケットの強度評価基準については、(社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)
(事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定 (FA-CC-004) を含む。) を適用する。

なお、バスケットプレート用ほう素添加ステンレス鋼 B-SUS304P-1 の材料特性を「添付書類 8-2-3 ほう素添加ステンレス鋼に関する説明書」に示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び「添付書類 8-2-2 バスケットの応力計算書」(以下「応力計算書」という。)において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

記号	記号の説明	単位
A_{bP}	バスケットプレートの断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
C_S	供用状態Aの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用する場合の供用状態	—
D_S	供用状態Aの貯蔵時の状態において、 S_S 地震力が作用する場合の供用状態	—
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_c^*	許容圧縮応力*1	MPa
G	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
G_1	水平方向加速度	m/s^2
G_2	鉛直方向加速度	m/s^2
l_P	バスケットプレートの内のり	mm
l_W	バスケットプレートの全長	mm
M_i	バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$
m_A	応力計算書で用いる斜線部Aの質量	kg
m_B	応力計算書で用いる斜線部Bの質量	kg
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—

注記*1: f_c の値を算出する際に、金属キャスク構造規格 MCD-2317(1)a. の (MCD-104) 式において、 S_y (RT) とあるのを $1.2S_y$ (RT) と読み替えて算出した値

記号	記号の説明	単位
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
Z_i	バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数	mm^3/mm
ρ	バスケットプレートの密度	kg/mm^3
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_x	バスケットの鉛直方向の応力 (x 方向)	MPa
σ_y	バスケットの水平方向の応力 (y 方向)	MPa
σ_z	バスケットの面に垂直な方向の応力 (z 方向)	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa

4. 設計条件

バスケットは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

バスケットは、バスケットプレートの組み合わせにより、使用済燃料集合体を収納する格子を形成している。バスケットに関する応力計算の基本仕様を以下に示す。

最高使用温度	260 °C*1
バスケットプレートの材質	ほう素添加ステンレス鋼 (B-SUS304P-1)
バスケットプレートの密度	7.93×10^{-6} kg/mm ³ *2

注記*1：最高使用温度は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す解析結果から得られた温度を保守側に設定した値である。

*2：バスケットプレートの材質はB-SUS304P-1であるが、材料密度が保守的となるようにSUS304の密度を使用している。

4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内における選定事象を以下に示す。

設計事象	供用状態	使用済燃料貯蔵施設内における選定事象*1
I	A	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵（貯蔵時） ・ 金属キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時） ・ 搬送台車による搬送（台車搬送時） ・ 貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）
II	B	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクの支持脚への衝突（支持脚への衝突時） ・ 金属キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時） ・ 搬送台車による搬送中の急停止（搬送中の急停止時）
I + S _d *	C _s	<ul style="list-style-type: none"> ・ S_d*地震時（貯蔵時（S_d*地震力が作用する場合））
I + S _s	D _s	<ul style="list-style-type: none"> ・ S_s地震時（貯蔵時（S_s地震力が作用する場合））

注記*1：本書及び応力計算書において、事象を（ ）内の呼称とする場合がある。

4.3 荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表4-1に示す。応力解析に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2節で示した使用済燃料貯蔵施設内における選定事象のうち、表5-1に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析対象

応力解析の対象は、次のとおりである（図5-1参照）。

(1) バスケットプレート

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 許容応力

バスケットの許容値基準は、金属キャスク構造規格 MCD-2300（事例規格を含む。）による。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

6.1 解析手順の概要

バスケットの応力解析フローを図 6-1 に示す。

バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4 章に示しているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む HDP-69B(B) 型（吊上げ時、支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時においては三次蓋を含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

b. 熱荷重

(2) 伝熱プレートは非構造強度部材として評価対象より除外する。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価位置をとる。応力評価位置は、応力計算書に示す。

(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

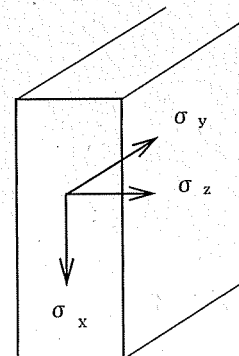
6.3.2 応力の評価

応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

- σ_x : バスケットの鉛直方向の応力 (x 方向)
- σ_y : バスケットの水平方向の応力 (y 方向)
- σ_z : バスケットの面に垂直な方向の応力 (z 方向)
- τ_{xy} : せん断応力
- τ_{yz} : せん断応力
- τ_{zx} : せん断応力

バスケット用材料の許容応力を表 6-1 に示す。



(1) バスケット（ボルトを除く。）の応力評価

バスケットの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-2310 に従い以下の項目を評価する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 特別な応力の検討
 - (a) 平均せん断応力
 - (b) 平均支圧応力
 - (c) 圧縮応力

(2) ボルトの応力評価

バスケットにボルトを使用していないのでボルトの応力評価は不要である。

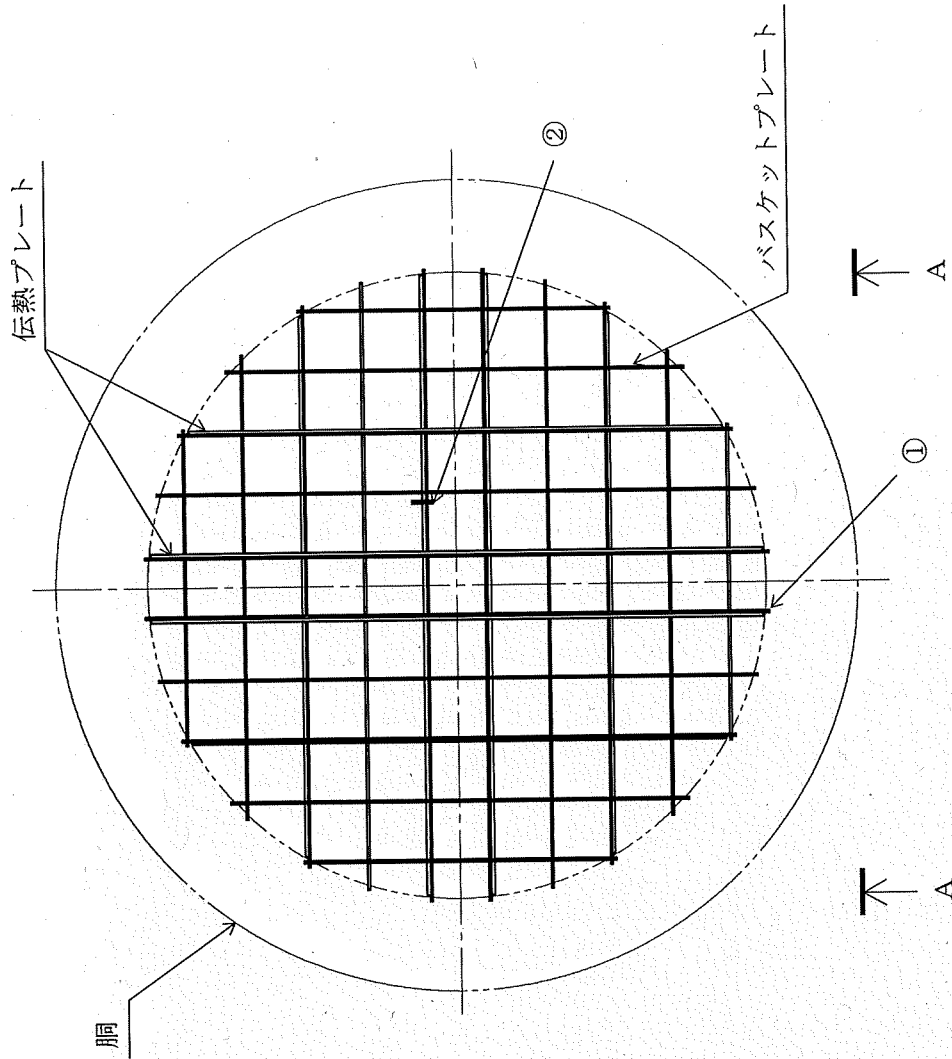
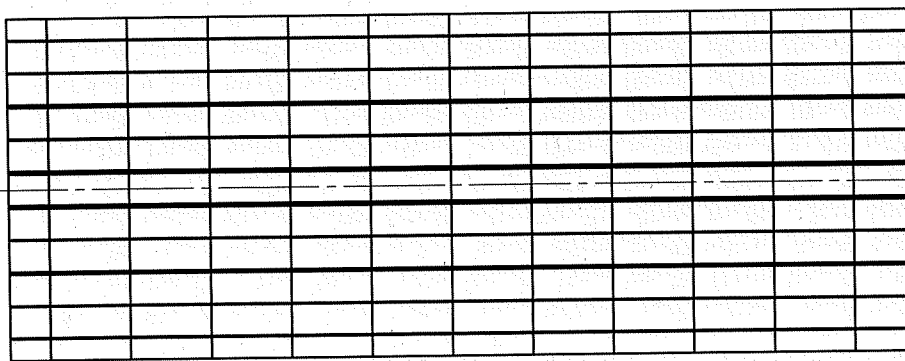
6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。

A~A矢視図



①~③：応力評価位置

図 5-1 応力解析対象

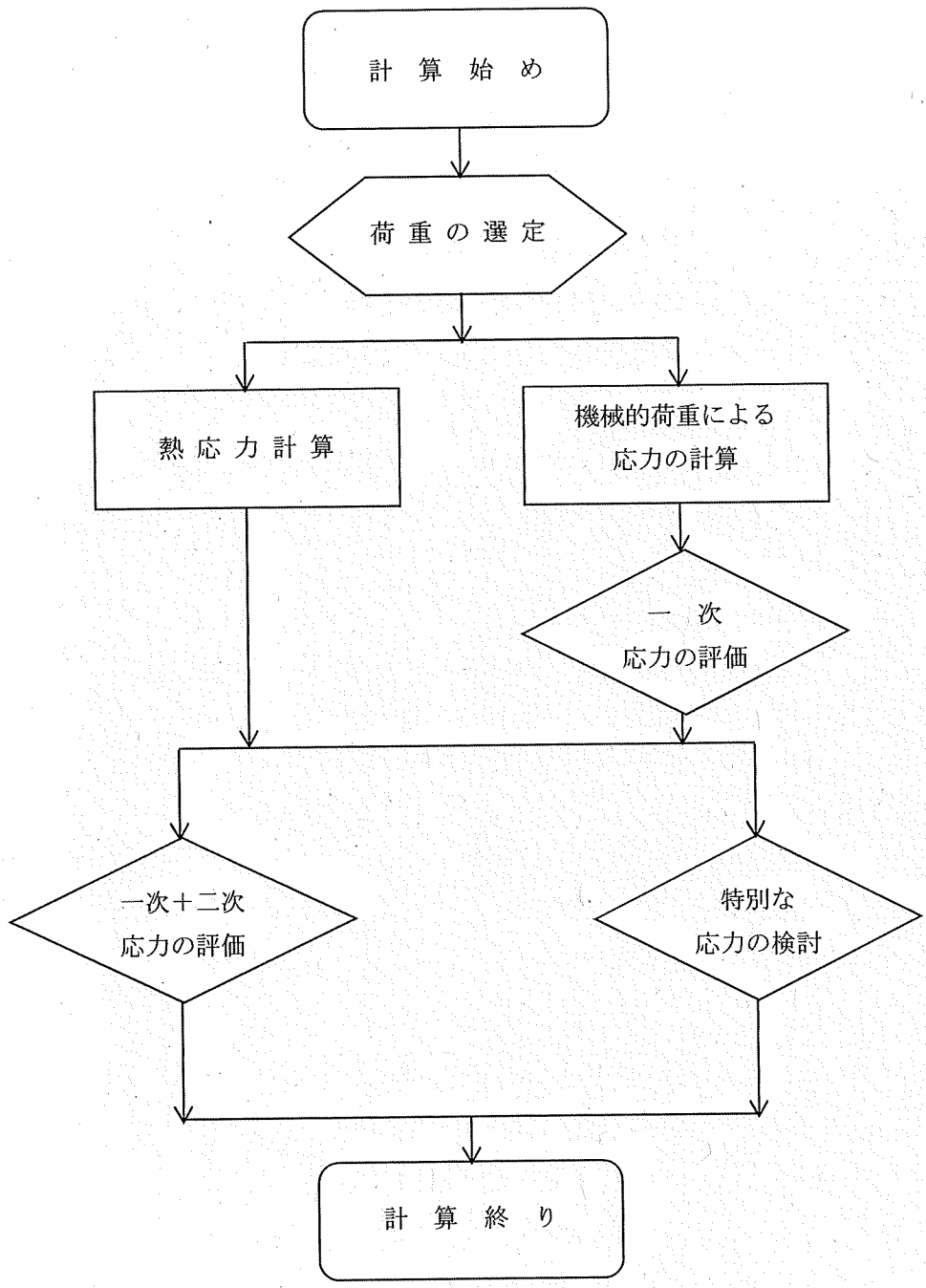


図 6-1 バスケットの応力解析フロー図

表 4-1 バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	供用状態	評価事象	荷 重				
			自重による荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	地震荷重
設計条件	設計条件	設計時 ^{*1}	— ^{*4}	○	○	—	—
I	A ^{*2}	貯蔵時 ^{*3}	○	—	—	○	—
		吊上げ時 ^{*3}	— ^{*4}	○	—	○	—
II	B ^{*2}	衝撃荷重作用時 ^{*3}	— ^{*4}	—	○	○	—
I + S _d [*]	C _s	S _d [*] 地震力が作用する場合	○	—	—	○	○
I + S _s	D _s	S _s 地震力が作用する場合	○	—	—	— ^{*5}	○

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価を代表する事象

*2：評価事象の中で、他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

*3：一次応力評価は、設計時の評価に包絡されるため、評価を省略する。

*4：本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

*5：変形量の評価時のみ、熱荷重を考慮する。

表 5-1 代表事象

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
設計条件	設計条件	設計時*2	—	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向）：5G（自重考慮） 	供用状態 A 及び B のうち、荷重条件が最も厳しいのは貯蔵架台への衝突時荷重である。
I 及び II	A 及び B	貯蔵架台への衝突時	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵時 吊上げ時 台車搬送時 準備作業時 支持脚への衝突時 搬送中の急停止時 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向）：5G（自重考慮） 熱荷重 	供用状態 A 及び B のうち、荷重条件が最も厳しいのは、貯蔵架台への衝突時である。
$I + S_d^*$	C_s	貯蔵時 (S_d^* 地震力が作用する場合)	—	<ul style="list-style-type: none"> 自重 地震力*3 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G 熱荷重 	—
$I + S_s$	D_s	貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	—	<ul style="list-style-type: none"> 自重 地震力 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G 熱荷重 	—

注記*1：本事象について応力解析を行う。

*2：供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象

*3：より高い地震力である S_s 地震力を保守的に設定する。

表 6-1 バスケット用材料の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*3	
		ほう素添加 ステンレス鋼	
		B-SUS304P-1	許容値基準
設計 条件	一次一般膜応力強さ P_m	146	S_m
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	219	$1.5 S_m$
供用状態 A及びB	一次+二次応力強さ $P_m + P_b + Q$	438	$3 S_m$
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$
	平均支圧応力 σ_p	202	S_y^{*1}
	圧縮応力*2 (評価位置③) σ_c	127	f_c
191		$1.5 f_c$	
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	219	$1.5 S_m$
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	328	$2.25 S_m$
	平均せん断応力 σ_s	131	$0.9 S_m$
	平均支圧応力 σ_p	303	$1.5 S_y^{*1}$
	圧縮応力*2 (評価位置①/③) σ_c	176/191	$1.5 f_c$
		176/191	$1.5 f_c$
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	291	$\text{Min}\{2.4 S_m, 2/3 S_u\}$
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	437	$\text{Min}\{3.6 S_m, S_u\}$
	平均せん断応力 σ_s	175	$1.2 S_m$
	平均支圧応力 σ_p	404	$2 S_y^{*1}$
	圧縮応力*2 (評価位置①/③) σ_c	184/201	$1.5 f_c^*$
176/191		$1.5 f_c$	

注記*1：支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合
以外の値

*2：上段は一次応力に対する基準，下段は一次+二次応力に対する基準

*3：評価すべき応力が発生しないか，又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

表 6-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
応力の計算値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
加速度	m/s ²	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

添付書類 8-2-2

バスケットの応力計算書

目 次

1. 概要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価位置	2
2.2 設計時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 応力計算	2
2.3 貯蔵架台への衝突時	2
2.3.1 荷重条件	2
2.3.2 応力計算	3
2.4 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
2.4.1 荷重条件	3
2.4.2 応力計算	3
2.5 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	6
2.5.1 荷重条件	6
2.5.2 応力計算	6
3. 応力の評価	7
3.1 応力強さの評価	7
3.2 特別な応力の評価	7
3.2.1 平均せん断応力	7
3.2.2 平均支圧応力	7
3.2.3 圧縮応力	7

図表目次

図 1-1	バスケットの形状・寸法・材料	8
図 2-1	バスケットの応力評価位置	9
図 2-2	各代表事象におけるバスケットの姿勢と荷重方向	10
表 2-1	バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果 (設計時, 貯蔵架台への衝突時)	11
表 2-2	バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))	11
表 2-3	バスケットプレート端部に発生する応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))	11
表 2-4	バスケットプレート格子端部に発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))	12
表 2-5	バスケットプレート格子端部に発生するせん断応力の計算条件及び計算結果 (貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))	12
表 3-1	バスケットの応力計算結果と許容応力 (設計条件, 供用状態A及びB)	13
表 3-2	バスケットの応力計算結果と許容応力 (供用状態 C_s)	13
表 3-3	バスケットの応力計算結果と許容応力 (供用状態 D_s)	13

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型のバスケットに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本書で評価するバスケットの形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.2 計算結果

計算結果を表3-1, 表3-2, 表3-3に示す。

なお、応力評価位置については、解析上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。

表中の「-」は、評価すべき応力が発生しない、又は評価上厳しくないため、評価を省略している。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 応力計算

2.1 応力評価位置

バスケットの応力評価位置を図 2-1 に示す。

2.2 設計時

2.2.1 荷重条件

設計時における荷重は貯蔵架台への衝突時荷重（自重を含む。）とする。荷重の方向を図 2-2 に示す。

2.2.2 応力計算

(1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部（図 2-1③部）である。鉛直方向加速度により発生する応力（ σ_x ）は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \rho \cdot l_w \cdot G_2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

ρ : バスケットプレートの密度（ $=7.93 \times 10^{-6}$ kg/mm³）

l_w : バスケットプレートの全長（ $=$ mm）

G_2 : 鉛直方向加速度（下方向）（ $=5G$ ）

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

上記以外の応力成分は零である。

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

バスケットプレート下端部（図 2-1③部）には、衝突によって一次曲げ応力は発生しないため、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 貯蔵架台への衝突時

2.3.1 荷重条件

貯蔵架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を図 2-2 に示す。

- ・貯蔵架台への衝突時荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

なお、熱応力については、バスケットプレート間及びバスケットプレートと胴間のはめ合部にはギャップを設けており熱膨張による拘束が生じないことから、著しい熱応力は発生しないため考慮しない。以下、本章において同様である。

2.3.2 応力計算

(1) 一次＋二次応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。貯蔵架台への衝突により発生する一次＋二次応力 (σ_x) は, (2.1) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

(2) 平均せん断応力

鉛直方向加速度により, バスケットプレート下端部 (図 2-1③部) に平均せん断応力 (σ_s) は発生しないため, 評価を省略する。

(3) 平均支圧応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。鉛直方向加速度により発生する平均支圧応力 (σ_p) は, (2.1) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

(4) 圧縮応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。鉛直方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_c) は, (2.1) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

2.4 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)

2.4.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を図 2-2 に示す。

- ・地震力
- ・自重
- ・熱荷重

なお, 熱応力については 2.3.1 項で述べたように著しい熱応力が発生しないため考慮しない。

2.4.2 応力計算

(1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2-1①部) の下端部である。

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

鉛直方向加速度により発生する応力 (σ_x) は, (2.1) 式で計算する。

ただし,

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2) ただし, $G_2 = (1 + C_v) \cdot G$

C_v : 鉛直方向設計震度 (=0.87)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

b. 水平方向加速度により発生する応力

水平方向加速度により発生する応力 (σ_y) は、次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_A \cdot G_1}{A_{bp}} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

m_A : 図2-1の斜線部Aに含まれる使用済燃料集合体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (=3790 kg)

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2) ただし, $G_1 = C_H \cdot G$

C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)

A_{bp} : バスケットプレートの断面積 (= mm^2)

計算条件及び計算結果を表2-3に示す。

上記a.及びb.以外の応力成分は零である。

(2) 一次一般膜+一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部(図2-1②部)の下端部である。

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

鉛直方向加速度により、バスケットプレートに一次曲げ応力は発生しないため、(1)a.と同様である。

b. 水平方向加速度により発生する応力

水平方向加速度により発生する応力 (σ_y) は、バスケットプレートを両端固定梁としてモデル化し、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \frac{M_i}{Z_i} \\ M_i &= \frac{m_B \cdot G_1 \cdot \ell_P}{12 \cdot \frac{\ell_W}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

M_i : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント ($N \cdot mm/mm$)

Z_i : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (= mm^3/mm)

m_B : 図2-1の斜線部Bに含まれる使用済燃料集合体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (=381 kg)

ℓ_P : バスケットプレートの内り (= mm)

l_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (使用済燃料集合体の負荷面の軸方向長さ) (= mm)
 ただし、バスケットプレートどうしのはめ合のための切欠きがあるため実際の荷重負荷面の長さを $l_w/2$ とする。

G_1 : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-4 に示す。

水平方向加速度により発生するせん断応力 (τ_{yz}) は、次式で計算する。

$$\tau_{yz} = \frac{m_B \cdot G_1}{2 \cdot \frac{A_{bp}}{2}} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

G_1, A_{bp} : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-5 に示す。

上記 a. 及び b. 以外の応力成分は零である。

(3) 平均せん断応力

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

鉛直方向加速度により、バスケットプレートにせん断応力は発生しないため、評価を省略する。

b. 水平方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部 (図 2-1②部) である。水平方向加速度により発生する平均せん断応力 (σ_s) は、(2.4)式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-5 に示す。

(4) 平均支圧応力

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。鉛直方向加速度により発生する平均支圧応力 (σ_p) は、(2.1) 式で計算する。

ただし、

G_2 : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

b. 水平方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2-1①部) である。水平方向加速度により発生する平均支圧応力 (σ_p) は、(2.2) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

内は商業機密のため、非公開とします。

(5) 圧縮応力

a. 鉛直方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート下端部 (図 2-1③部) である。鉛直方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_c) は, (2.1) 式で計算する。

ただし,

G_2 : (1)と同じ

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

b. 水平方向加速度により発生する応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2-1①部) である。水平方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_c) は, (2.2) 式で計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

2.5 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)

2.5.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 地震力が作用する場合の荷重条件は, S_s 地震力と S_d^* 地震力を同じとしているため 2.4.1 項と同様である。

2.5.2 応力計算

計算方法及び計算結果は 2.4.2 項と同様である。

3. 応力の評価

3.1 応力強さの評価

各供用状態において、応力成分から算出した応力強さの計算結果と許容応力を表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態における一次一般膜応力強さ (P_m)、一次一般膜＋一次曲げ応力強さ ($P_m + P_b$) 及び一次＋二次応力強さ ($P_m + P_b + Q$) は、金属キャスク構造規格 MCD-2311、MCD-2312、MCD-2313 及び MCD-2314 の各規定を満足する。

3.2 特別な応力の評価

3.2.1 平均せん断応力

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態の平均せん断応力 (σ_s) は、金属キャスク構造規格 MCD-2315 の各規定を満足する。

3.2.2 平均支圧応力

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 に示す。なお、表 3-2 及び表 3-3 においては、計算結果が許容応力に対して最も厳しくなる評価位置での計算結果を示している。

表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態の平均支圧応力 (σ_p) は、金属キャスク構造規格 MCD-2316 の各規定を満足する。

3.2.3 圧縮応力

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 に示す。なお、表 3-2 及び表 3-3 においては、計算結果が許容応力に対して最も厳しくなる評価位置での計算結果を示している。

表 3-1、表 3-2 及び表 3-3 より、各供用状態の圧縮応力 (σ_c) は、金属キャスク構造規格 MCD-2317 の各規定を満足する。

A~A矢視図

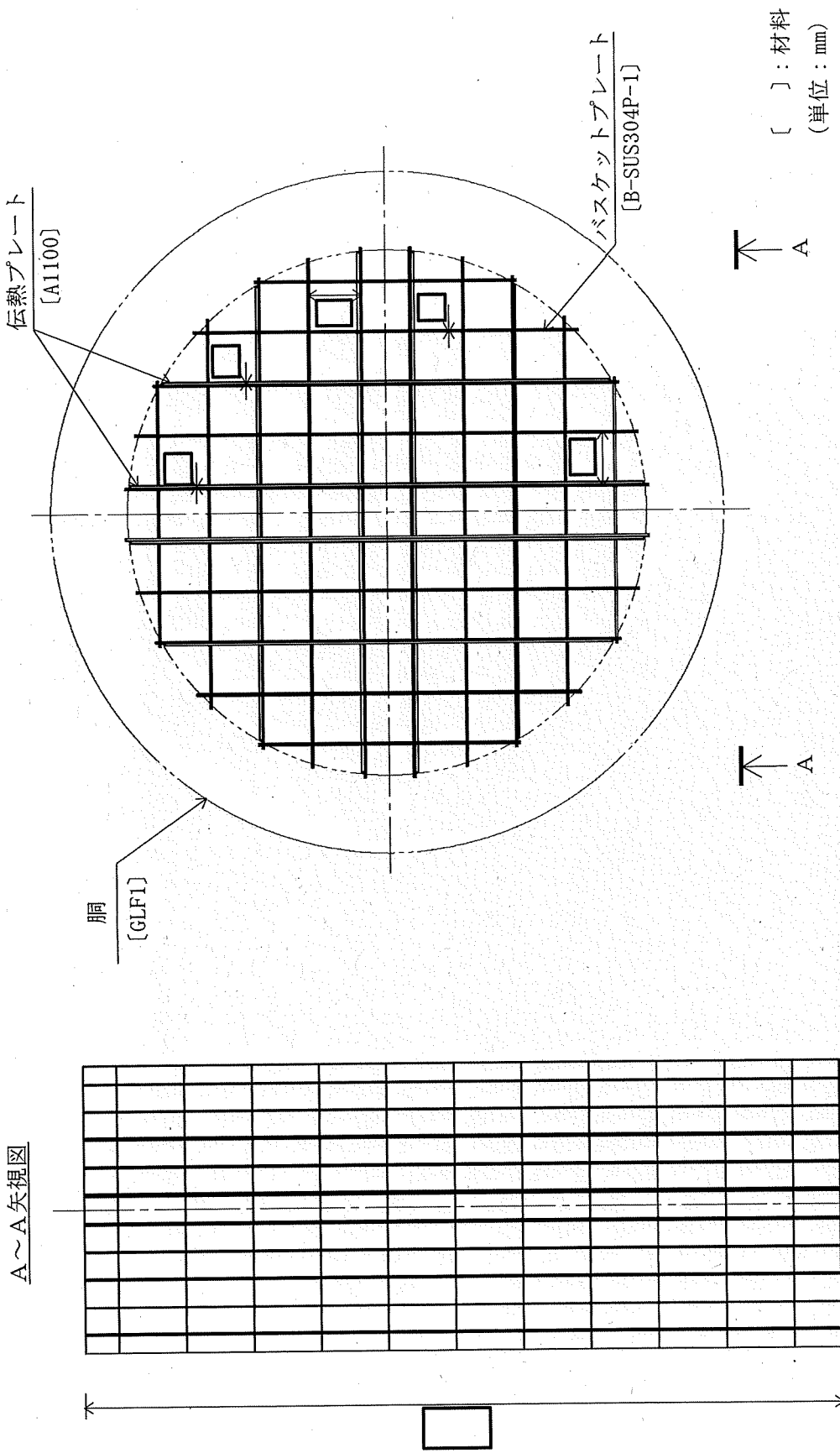


図 1-1 バスケットの形状・寸法・寸法・材料

□内は商業機密のため、非公開とします。

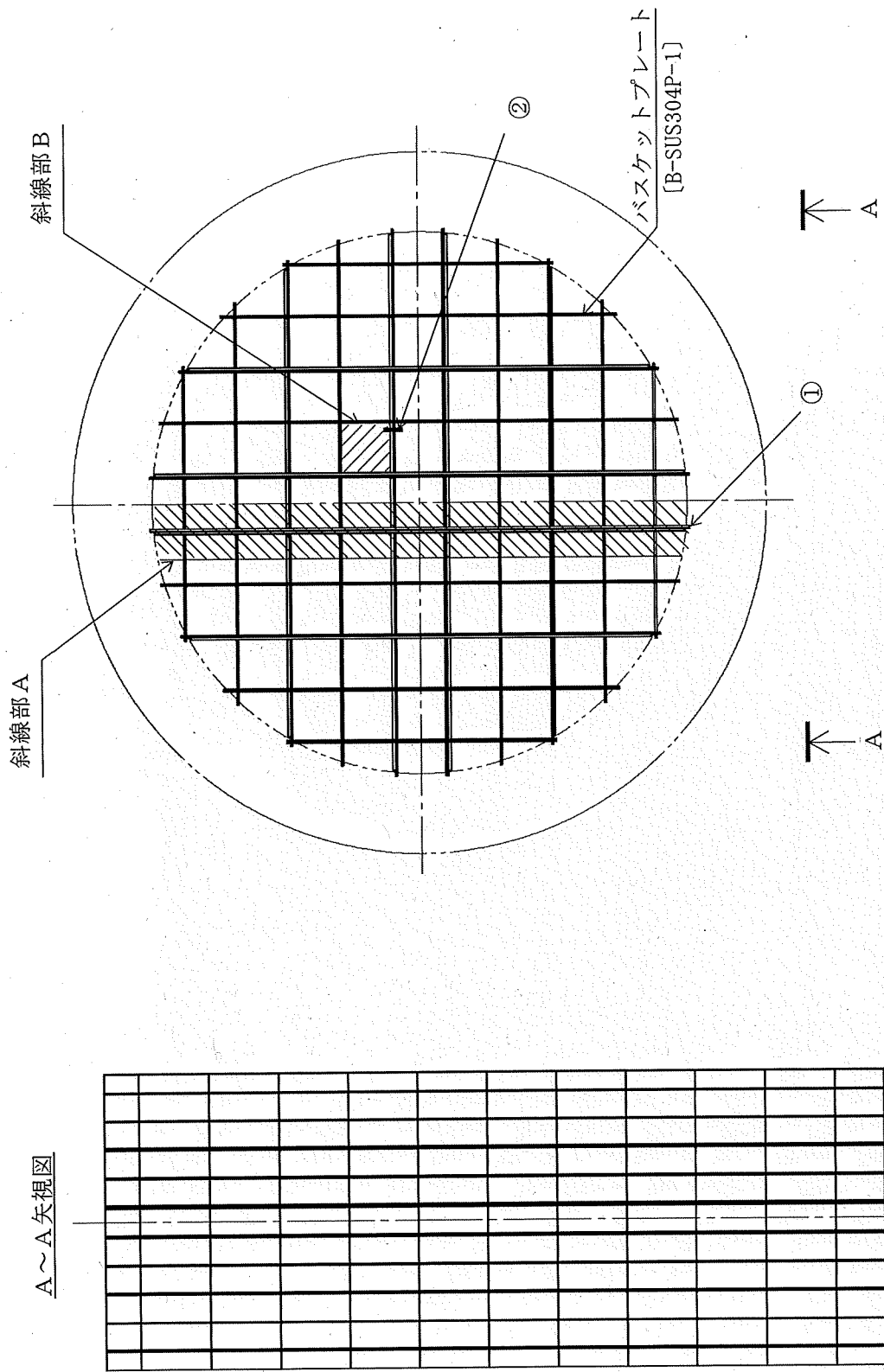
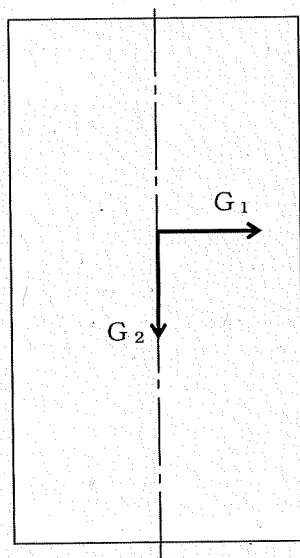
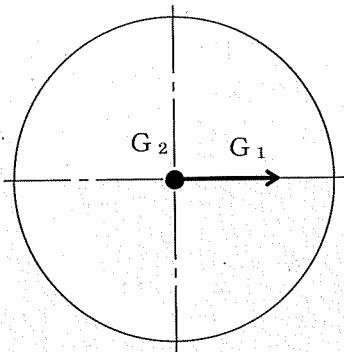


図 2-1 バスケットの応力評価位置



G_1 : 水平方向加速度

G_2 : 鉛直方向加速度

図2-2 各代表事象におけるバスケットの姿勢と荷重方向

表 2-1 バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果
(設計時, 貯蔵架台への衝突時)

項目	記号	数値	単位
バスケットプレートの密度	ρ	7.93×10^{-6}	kg/mm ³
バスケットプレートの全長	l_w	<input type="text"/>	mm
鉛直方向加速度 (下方向)	G_z	5G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
バスケットプレート下端部に発生する応力	σ_x	2	MPa

表 2-2 バスケットプレート下端部に発生する応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d*地震力又はS_s地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
バスケットプレートの密度	ρ	7.93×10^{-6}	kg/mm ³
バスケットプレートの全長	l_w	<input type="text"/>	mm
鉛直方向加速度	G_z	1.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	—
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
バスケットプレート下端部に発生する応力	σ_x	1	MPa

表 2-3 バスケットプレート端部に発生する応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d*地震力又はS_s地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
図 2-1 の斜線部 A に含まれる使用済燃料集合体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量	m_A	3790	kg
水平方向加速度	G_H	1.40G	m/s ²
水平方向設計震度	C_H	1.40	—
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
バスケットプレートの断面積	$A_{b,p}$	<input type="text"/>	mm ²
バスケットプレート端部に発生する応力	σ_y	2	MPa

表 2-4 バスケットプレート格子端部に発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
バスケットプレート格子端部の 単位幅当たりの曲げモーメント	M_i	<input type="text"/> *1	$N \cdot mm/mm$
バスケットプレートの単位幅当たりの 断面係数	Z_i	<input type="text"/>	mm^3/mm
図 2-1 の斜線部 B に含まれる使用済燃料集合 体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの 合計質量	m_B	381	kg
バスケットプレートの内り	l_P	<input type="text"/>	mm
バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (使用済燃料集合体の負荷面の軸方向長さ)	l_W	<input type="text"/>	mm
水平方向加速度	G_1	1.40G	m/s^2
水平方向設計震度	C_H	1.40	—
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
バスケットプレート格子端部に発生する 曲げ応力	σ_y	6	MPa

注記*1: 表中では有効数字 4 桁としているが, 計算は桁数処理前の数値を使用

表 2-5 バスケットプレート格子端部に発生するせん断応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
図 2-1 の斜線部 B に含まれる使用済燃料集合 体, 伝熱プレート及びバスケットプレートの 合計質量	m_B	381	kg
バスケットプレートの断面積	A_{bP}	<input type="text"/>	mm^2
水平方向加速度	G_1	1.40G	m/s^2
水平方向設計震度	C_H	1.40	—
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
バスケットプレート格子端部に発生する せん断応力	τ_{yz}	1	MPa

表 3-1 バスケットの応力計算結果と許容応力 (設計条件, 供用状態A及びB)

(単位: MPa)

部 位	応力分類	設計時		貯蔵架台 への衝突時		許容 応力
		計算値	評価位置	計算値	評価位置	
バスケット プレート	P_m	2	③	—	—	146
	$P_m + P_b$	2	③	—	—	219
	$P_m + P_b + Q$	—	—	2	③	438
	σ_p	—	—	2	③	202
	σ_c	—	—	2	③	127

表 3-2 バスケットの応力計算結果と許容応力 (供用状態C_s)

(単位: MPa)

部 位	応力分類	計算値	評価位置	許容応力
バスケット プレート	P_m	2	①	219
	$P_m + P_b$	6	②	328
	σ_s	1	②	131
	σ_p	2	①	303
	σ_c	2	①	176

表 3-3 バスケットの応力計算結果と許容応力 (供用状態D_s)

(単位: MPa)

部 位	応力分類	計算値	評価位置	許容応力
バスケット プレート	P_m	2	①	291
	$P_m + P_b$	6	②	437
	σ_s	1	②	175
	σ_p	2	①	404
	σ_c	2	①	176

添付書類 8-2-3

ほう素添加ステンレス鋼に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 適用範囲	2
3. 材料規定	3
3.1 材料名称	3
3.2 化学成分	3
3.3 設計応力強さ	3
3.4 設計降伏点	3
3.5 設計引張強さ	3
3.6 縦弾性係数	3
3.7 熱膨張係数	3
4. 製造管理規定	7

図表目次

図 4-1	製造フロー	7
図 4-2	品質管理項目	8
表 3-1	材料の規定名称	4
表 3-2	化学成分規定	4
表 3-3	材料の各温度における設計応力強さ S_m	5
表 3-4	材料の各温度における設計降伏点 S_y	5
表 3-5	材料の各温度における設計引張強さ S_u	5
表 3-6	材料の各温度における縦弾性係数	6
表 3-7	材料の各温度における熱膨張係数	6
表 4-1	機械的性質	7

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するほう素添加ステンレス鋼 (B-SUS304P-1) の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

なお、本材料は (社) 日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)(事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定 (FA-CC-004) を含む。) に規定されている。

2. 適用範囲

本材料を HDP-69B(B) 型のバスケットプレートに適用するに当たり、本材料及びこれを使用するバスケットは、以下の事項に適合すること。

- (1) 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。

3. 材料規定

本規定は、設計貯蔵期間における設計評価に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4章に示す製造管理規定を満足しなければならない。

3.1 材料名称

材料の規定名称は表 3-1 に示すものであること。

3.2 化学成分

化学成分は表 3-2 に示す百分率の値の範囲内にあること。

3.3 設計応力強さ

設計応力強さは表 3-3 の規定によること。

3.4 設計降伏点

設計降伏点は表 3-4 の規定によること。

3.5 設計引張強さ

設計引張強さは表 3-5 の規定によること。

3.6 縦弾性係数

縦弾性係数は表 3-6 の規定によること。

3.7 熱膨張係数

熱膨張係数は表 3-7 の規定によること。

表 3-1 材料の規定名称

材料の名称	記号
バスケットプレート用材料 ほう素添加ステンレス鋼	B-SUS304P-1

表 3-2 化学成分規定

記号	化学成分 (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B
B-SUS304P-1	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.040 以下	0.015 以下	8.00 以上 10.50 以下	18.00 以上 20.00 以下	1.00 以上 1.25 以下

表 3-3 材料の各温度における設計応力強さ S_m (MPa)

記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)								
			-25 ~40	75	100	150	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	520	255	170	165	159	152	148	147	146	146	145

注) 温度の間における値は、比例法によって計算する。

表 3-4 材料の各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)								
			-25 ~40	75	100	150	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	520	255	255	219	216	215	211	208	204	200	197

注) 温度の間における値は、比例法によって計算する。

表 3-5 材料の各温度における設計引張強さ S_u (MPa)

記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)								
			-25 ~40	75	100	150	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	520	255	520	495	477	456	443	440	438	437	436

注) 温度の間における値は、比例法によって計算する。

表 3-6 材料の各温度における縦弾性係数 (MPa)

記号	温 度 (°C)											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	216000	216000	214000	212000	210000	208000	206000	204000	202000	200000	199000	197000

注) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

表 3-7 材料の各温度における熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm \cdot °C))

記号	区 分	温 度 (°C)											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
B-SUS 304P-1	A	15.22	15.78	16.22	16.61	16.96	17.28	17.56	17.80	18.01	18.17	18.30	18.39
	B	15.22	15.52	15.88	16.24	16.24	16.24	16.43	16.63	16.83	17.02	17.12	17.22

注) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。区分 A は瞬時熱膨張係数, B は室温からその温度までの平均熱膨張係数を表す。

4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、表 3-2 に示す百分率の値の範囲内にあること。
- (2) 材料の製造は図 4-1 に示す製造フローに従い、圧延により製造したものであること。
- (3) 材料は圧延後、固溶化熱処理を行うこと。
- (4) 機械的性質は、表 4-1 に示す値に適合すること。
- (5) 本材料は板厚 5~14mm の範囲で使用すること。寸法許容差は、熱間圧延の場合は「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4304(2005))、冷間圧延の場合は「冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4305(2005))によるものとする。
- (6) 本材料の各製造段階で実施する品質管理項目を図 4-2 に示す。

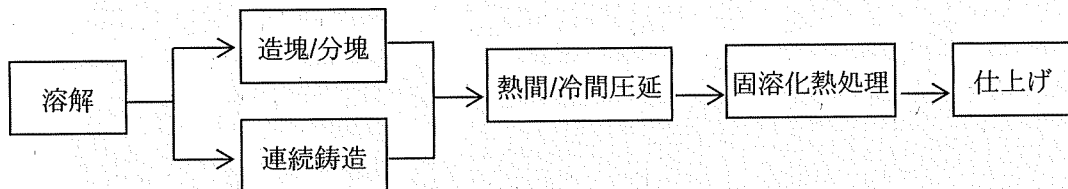


図 4-1 製造フロー

表 4-1 機械的性質

記号	引張試験		
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
B-SUS 304P-1	520 以上	255 以上	10 以上

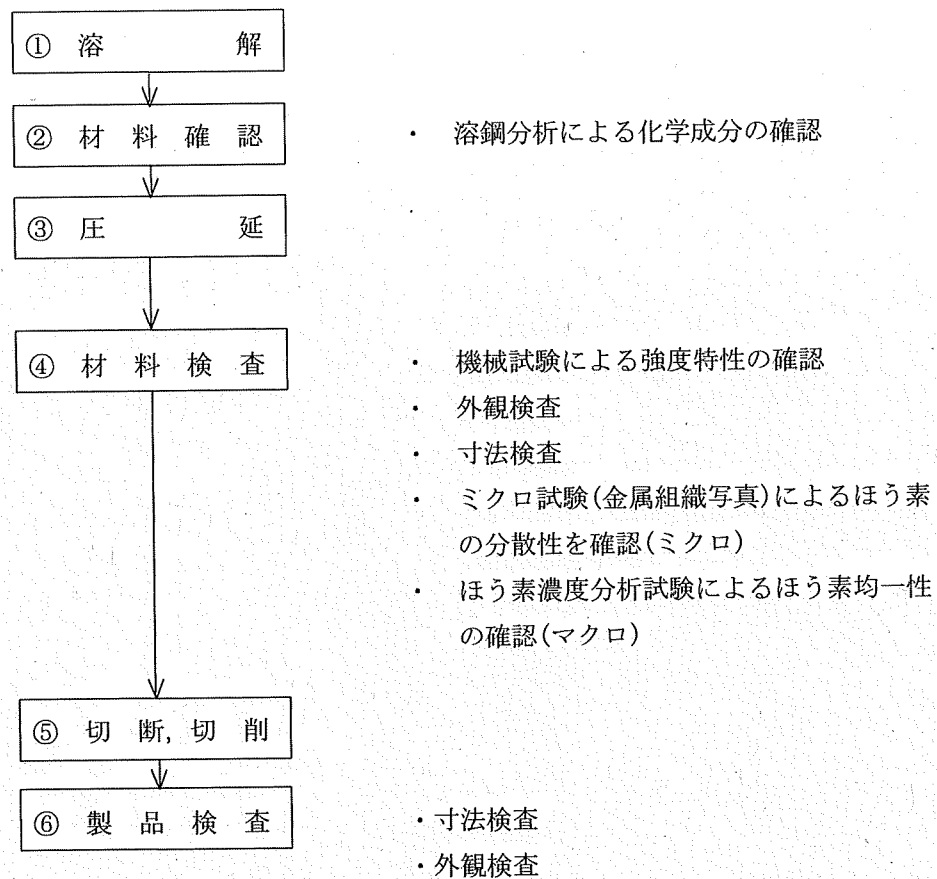


図 4-2 品質管理項目

ほう素添加ステンレス鋼の材料特性に関する説明書

目 次

1. 材料の用途	1
1.1 用途	1
2. 材料の仕様	1
2.1 適合規格	1
2.2 化学成分	1
2.3 機械的性質	2
2.4 寸法制限及び寸法許容差	6
3. 使用条件	6
3.1 適用範囲	6
3.2 温度範囲	6
4. 特徴及び使用上の留意事項	6
4.1 特徴	6
4.2 特許及びライセンス	6
5. 製造工程及び製造条件	7
5.1 製造方法	7
5.2 熱処理	7
5.3 品質管理	7
6. 化学成分	8
7. マクロ及びマイクロ組織	9
8. 実用試験	13
9. 加工性及び加工条件	13
10. 機械的性質	13
10.1 引張特性	13
10.2 じん性	14
10.3 硬さ (参考)	19
11. 高温及び低温引張特性	20
11.1 高温引張特性	20
11.2 低温引張特性	21
12. クリープ特性及びクリープ破断特性	22
13. じん性 (時効後)	22
14. 耐食性	22
15. 設計降伏点	23
16. 設計引張強さ	24
17. 設計応力強さ	25

18. 設計引張応力	25
19. 疲労	25
20. その他特性	26
20.1 熱膨張係数	26
20.2 熱伝導率	27
20.3 温度伝導率	28
20.4 縦弾性係数	28
20.5 ポアソン比	29
21. 照射影響	30
22. 引用文献	31

図表目次

図 2-1	0.2%耐力の正規確率プロット	4
図 2-2	引張強さの正規確率プロット	5
図 5-1	製造フロー	7
図 5-2	品質管理項目	7
図 7-1	マクロ観察結果の例 (標本 7)	9
図 7-2	EPMA 分析結果の例 (標本 7)	12
図 10-1	動的破壊じん性試験における荷重-開口変位線図(試験片番号 7-2)	16
図 10-2	動的破壊じん性試験における荷重-時間線図(試験片番号 7-2)	17
図 10-3	動的破壊じん性試験における荷重-開口変位線図(試験片番号 7-2 を除く。)	18
図 11-1	引張強さの温度依存性	20
図 11-2	0.2%耐力の温度依存性	21
図 11-3	伸びの温度依存性	22
図 15-1	0.2%耐力における $r(T)_y$ のトレンドカーブ	23
図 15-2	各標本データと S_y 設定値	23
図 16-1	引張強さにおける $r(T)_y$ のトレンドカーブ	24
図 16-2	各標本データと S_u 設定値	24
図 20-1	熱膨張係数(平均)の温度依存性	26
図 20-2	熱伝導率の温度依存性	27
図 20-3	縦弾性係数の温度依存性	28
図 20-4	ポアソン比の温度依存性	29
表 2-1	化学成分仕様	1
表 2-2	機械的性質 (常温)	2
表 2-3	試験データと 1%破損確率値	3
表 6-1	各標本の化学成分と板厚	8
表 6-2	各標本と各試験の対応	8
表 7-1	ミクロ組織観察結果	10
表 10-1	常温における引張特性 (平均値 (n=3))	13
表 10-2	動的破壊じん性試験結果	15
表 10-3	常温における硬度 (Hv)	19
表 15-1	材料の各温度における設計降伏点 S_y	23
表 16-1	材料の各温度における設計引張強さ S_u	24
表 17-1	材料の各温度における設計応力強さ S_m	25
表 20-1	本材料の熱膨張係数	26
表 20-2	本材料の熱伝導率設定値	27

表 20-3	本材料の温度伝導率設定値	28
表 20-4	材料の各温度における縦弾性係数	28

1. 材料の用途

1.1 用途

本材料は、HDP-69B(B)型の内部に設置される使用済燃料集合体を保持するためのバスケットプレートに適用する。

2. 材料の仕様

2.1 適合規格

本材料の適合規格はない。

2.2 化学成分

本材料の化学成分仕様は、表 2-1 に規定のとおりである。

表 2-1 化学成分仕様

記号	化学成分 (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B
B-SUS304P-1	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.015	8.00~ 10.50	18.00~ 20.00	1.00~ 1.25
SUS304 (参考)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00~ 10.50	18.00~ 20.00	—

2.3 機械的性質

ほう素添加ステンレス鋼は、SUS304 にほう素を添加したものであり、ほう素添加に伴い延性が低下する方向となるが、当該添加量程度では母材である SUS304 と同様に延性挙動を示す材料であり、時効の影響はない。

使用温度領域の機械試験の結果からトレンドカーブを評価し、保守的な設計強度を設定した。

常温規格値（引張強さ、耐力及び伸び）については、表 2-2 示す値に適合すること。規格値については、常温の規格値を以下のように定めた。

- (1) 同じ化学成分仕様値及び圧延工程を経て製作された、常温の引張試験データを複数準備する。
- (2) 今回の標本 1~4 については、常温の引張試験を行っているのをこの含む。
- (3) 全データの平均値を求める。
- (4) 全データの平均値との比を求め、累積確率分布を確率分布紙にプロットする。
- (5) 上記の近似直線を最小二乗法によって求め、99%信頼下限(1%破損確率値)を求める。
- (6) 上記 1%破損確率値を下回るように常温仕様値を決定する。

なお、標本 1~4 の常温引張試験のデータ数は n 数=3 の試験であり、全体で 12 点と統計処理を行う上でサンプル数が少ないため、過去に購入した同材料のミルシートに記載の引張試験値 27 点を含める。

表 2-3 に、常温における 0.2%耐力及び引張強さデータと、それらの 1%破損確率値を示す。図 2-1 及び図 2-2 にこれらの分布を示す。

表 2-2 機械的性質(常温)

記号	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
B-SUS304P-1	520 以上	255 以上	10 以上
SUS304 (参考)	520 以上	205 以上	40 以上

表 2-3 試験データと 1%破損確率値

No.	標本又は 供試材	0.2%耐力値 (MPa)	引張強さ (MPa)	備考
1	標本 1	299	632	A 社
2		303	633	
3		298	634	
4	標本 2	382	618	B 社
5		379	610	
6		367	620	
7	標本 3	371	656	C 社
8		359	653	
9		371	650	
10	標本 4	297	567	A 社
11		383	556	
12		320	555	
13	供試材 1	313	584	A 社 1
14	供試材 2	322	611	A 社 2
15	供試材 3	331	606	A 社 3
16	供試材 4	338	602	A 社 4
17	供試材 5	315	603	A 社 5
18	供試材 6	333	623	A 社 6
19	供試材 7	340	555	A 社 7
20	供試材 8	356	606	A 社 8
21	供試材 9	321	538	A 社 9
22	供試材 10	304	647	B 社 1
23	供試材 11	318	641	B 社 2
24	供試材 12	330	614	B 社 3
25	供試材 13	336	610	B 社 4
26	供試材 14	329	673	B 社 5
27	供試材 15	340	688	B 社 6
28	供試材 16	287	594	B 社 7
29	供試材 17	295	602	B 社 8
30	供試材 18	296	711	B 社 9
31	供試材 19	333	630	C 社 1
32	供試材 20	355	670	C 社 2
33	供試材 21	335	650	C 社 3
34	供試材 22	327	684	C 社 4
35	供試材 23	333	670	C 社 5
36	供試材 24	334	688	C 社 6
37	供試材 25	358	689	C 社 7
38	供試材 26	328	684	C 社 8
39	供試材 27	321	695	C 社 9
—	平均値	332.2	629.5	—
—	1%破損確率値	268.5	521.8	—
—	常温仕様値	255	520	—

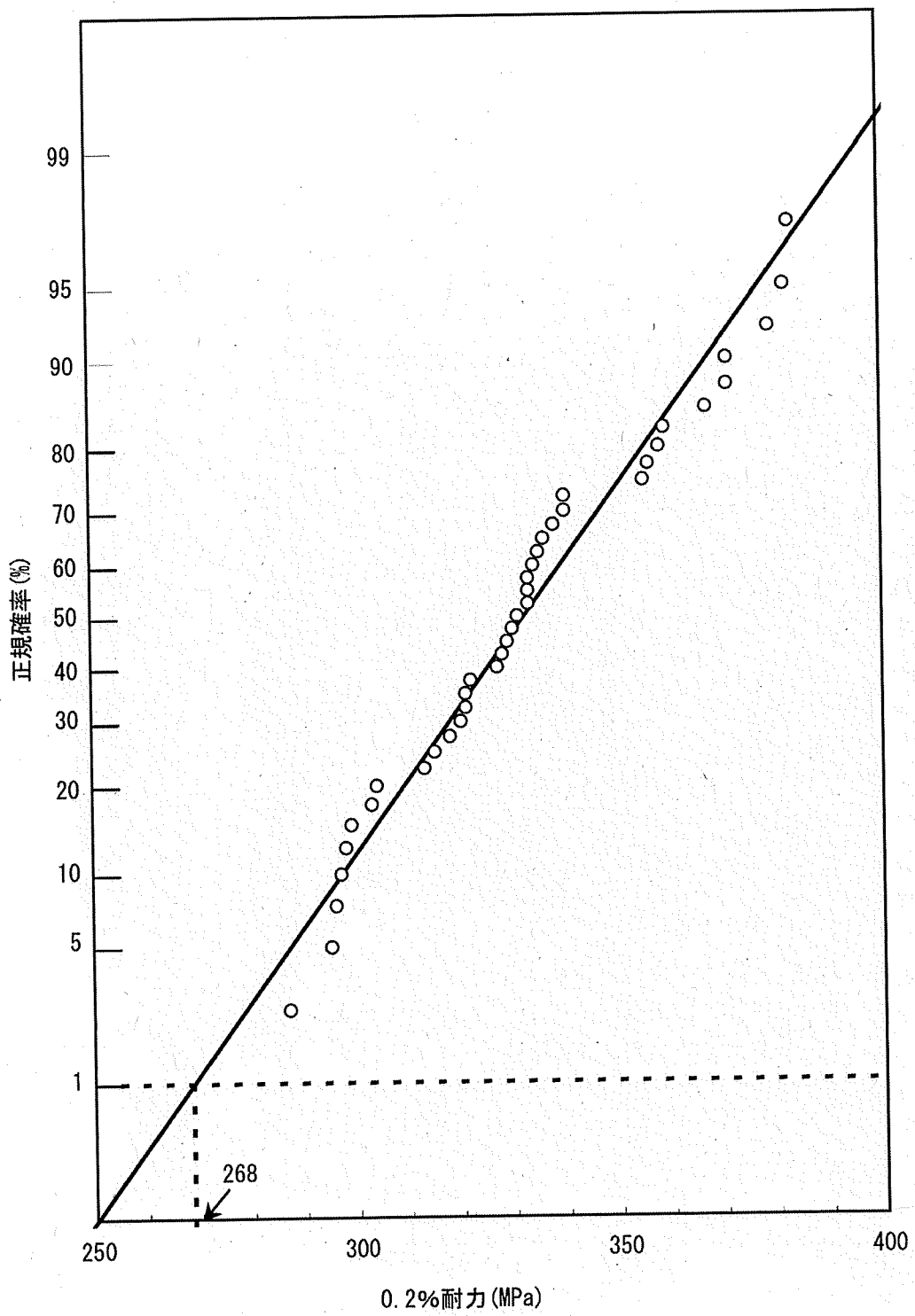


図 2-1 0.2%耐力の正規確率プロット

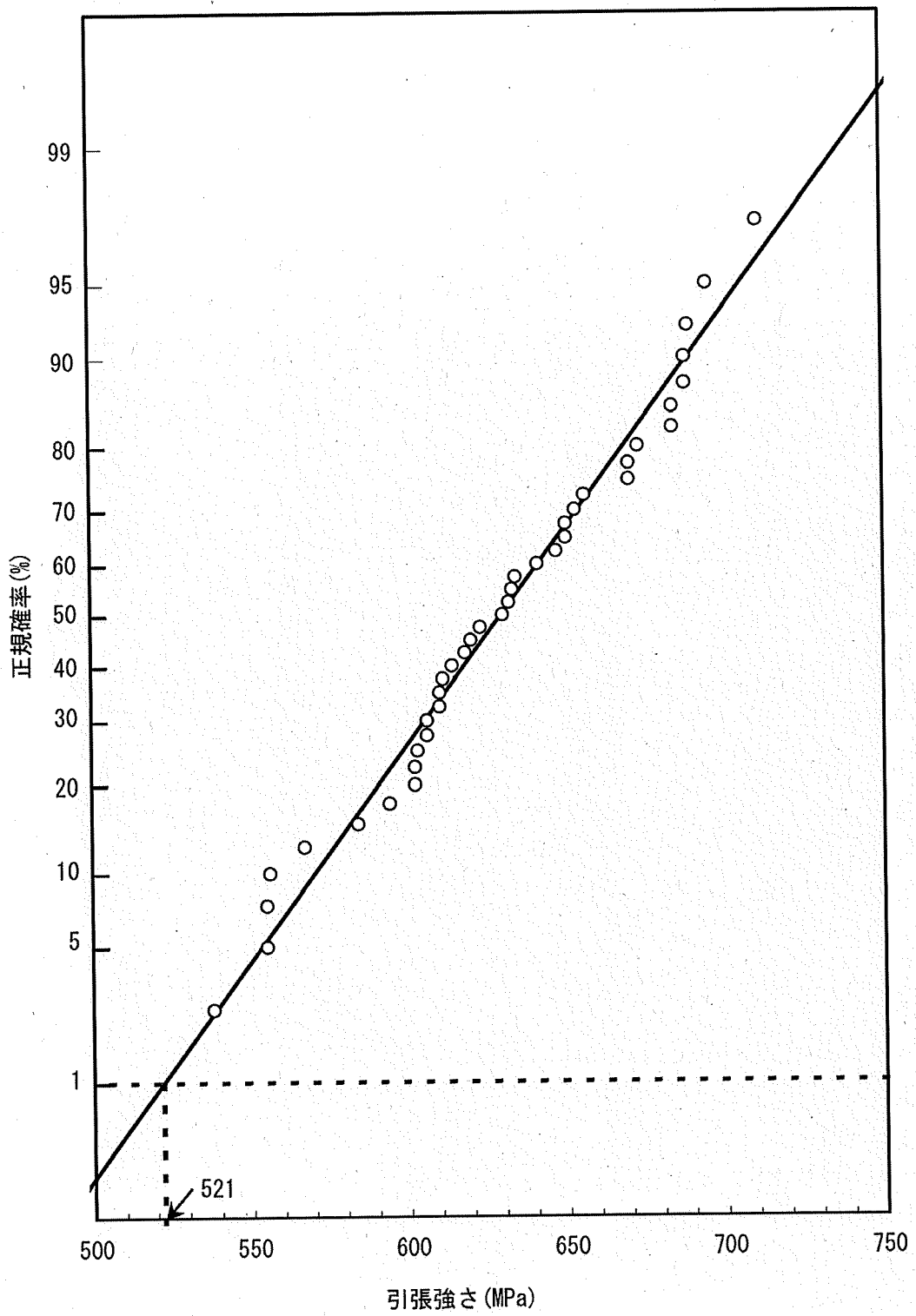


図 2-2 引張強さの正規確率プロット

2.4 寸法制限及び寸法許容差

本材料の板厚は、5～14mm とすること。寸法許容差は、熱間圧延の場合は「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4304(2005))、冷間圧延の場合は「冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」(JIS G 4305(2005))によるものとする。

3. 使用条件

3.1 適用範囲

本材料をHDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するに当たり、本材料及びこれを使用するバスケットは、以下の事項に適合すること。

- (1) 設計貯蔵期間(供用期間)は60年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。

3.2 温度範囲

- ・最高使用温度：300℃
- ・最低使用温度：-25℃

4. 特徴及び使用上の留意事項

4.1 特徴

本材料はSUS304を基本としてほう素を添加させた材料であり、適切な中性子吸収能力と強度及び耐久性を有する材料である。また、本材料と同様にほう素を添加させたステンレス鋼は国内の使用済燃料貯蔵ラックや輸送容器で使用実績があり、多数の技術文献が公開されている^{(1)~(7)}。

ただし、金属キャスクバスケットプレート用のほう素添加ステンレス鋼は、使用済燃料貯蔵ラック材料と比較して使用環境が異なる点があり、新規許容応力の設定等、これらに配慮する必要がある。本書で説明するB-SUS304P-1は、SUS304をベースとして、金属キャスクバスケットプレートへの適用性を考慮し、適切なほう素添加量範囲、強度特性を鑑みて各種特性を定めた材料である。

本材料B-SUS304P-1は、金属キャスクバスケット材料に適した機械的特性、破壊じん性を有することが報告されている^{(8)~(10)}。

4.2 特許及びライセンス

なし。

5. 製造工程及び製造条件

5.1 製造方法

本材料の製造方法は、一般的な鋼板の方法と同様である。本材料の製造フローは図 5-1 に示すとおりである。ほう素は、溶解時にフェロボロンの形で必要量混合される。溶解の後、造塊工程を経て圧延を行う場合と、連続製造で圧延される場合がある。圧延後は、SUS304 と同様に固溶化熱処理(約 1000~1150℃, 急冷)を行っている。

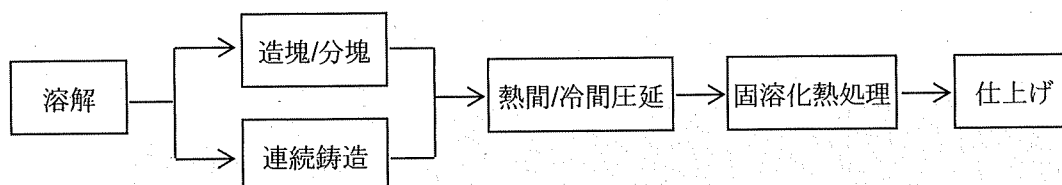


図 5-1 製造フロー

5.2 熱処理

本材料は、5.1 節で述べたように、SUS304 と同様に固溶化熱処理を行う。

5.3 品質管理

本材料の各製造段階で実施する品質管理項目を図 5-2 に示す。なお、本材料は板厚 14mm 以下の寸法制限のため、金属キャスク構造規格 MCM-2420 で要求される非破壊試験要求(厚さ 19mm 以上の板)の対象ではない。

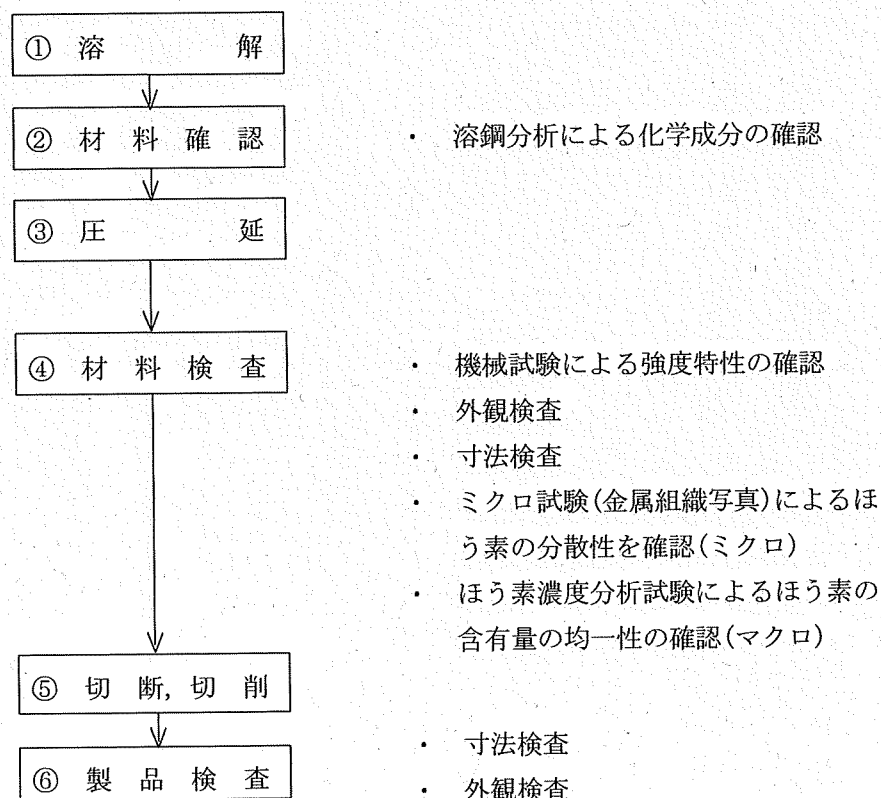


図 5-2 品質管理項目

6. 化学成分

各試験に用いられた標本の化学成分及び板厚を表 6-1 に、各標本と試験の対応を表 6-2 に示す。圧延材においては厚板でない限り材料特性への影響は考えにくいですが、引張試験及び衝撃試験においては、それぞれ標本 4 及び標本 7 について比較的厚めの板 (14mm) のデータを含めて試験を行った。

衝撃試験においては、実施時期が異なるため、別標本でのデータとなっている。

なお、標本は全て使用済燃料貯蔵ラック等で使用される実製品規模の溶鋼、圧延、熱処理 (固溶化熱処理) を行った鋼板より採取した。

表 6-1 各標本の化学成分と板厚

標本 No.	化学成分 (mass%)								板厚 (mm)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B	
B-SUS 304P-1 (仕様)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.015	8.00~ 10.50	18.00~ 20.00	1.00~ 1.25	—
標本 1	0.02	0.79	1.01	0.024	0.000	10.25	19.67	1.14	5
標本 2	0.02	0.36	1.15	0.028	0.001	9.87	18.28	1.22	5
標本 3	0.03	0.64	0.98	0.020	0.001	8.40	19.26	1.06	5
標本 4	0.02	0.72	0.95	0.020	0.002	10.06	18.76	1.16	14
標本 5	0.02	0.20	1.05	0.030	0.001	9.45	19.86	1.05	5
標本 6	0.01	0.75	0.99	0.023	0.000	10.17	19.64	1.09	5
標本 7	0.02	0.79	0.95	0.024	0.001	10.26	19.62	1.14	14

表 6-2 各標本と各試験の対応

標本 No.	引張試験		縦弾性係数	ポアソン比	熱膨張係数	熱伝導率	比熱	衝撃試験	板厚 (mm)
	耐力	引張強さ							
標本 1	○	○	○	○	○	○	○	—	5
標本 2	○	○	○	○	○	○	○	—	5
標本 3	○	○	○	○	○	○	○	—	5
標本 4	○	○	—	—	—	—	—	—	14
標本 5	—	—	—	—	—	—	—	○	5
標本 6	—	—	—	—	—	—	—	○	5
標本 7	—	—	—	—	—	—	—	○	14

7. マクロ及びマイクロ組織

本材料のマクロ写真を図 7-1 に示す。一般的な鉄鋼材料と大きな違いはない。

また、供試材のマイクロ組織観察結果を表 7-1 に示す。なお、ほう素の分散性を確認するため、圧延材の先端と終端でほう素濃度の ICP 分析を実施し、規定を満足していることを確認している。表 7-1 では、各供試材の圧延先端部と後端部のマイクロ組織写真とその位置でのほう素濃度をそれぞれ示した。写真中黒色に見える部分がボライドであり、ほう素と鉄及びクロムの共晶組織である。図 7-2 に、マイクロ写真と元素分析(EPMA)結果との対比を示す。マイクロ組織観察における黒色部には、B, Cr が観察されることから、この部分がボライドであることがわかる。写真及びほう素量分析結果からわかるようにボライドの分布に偏りはない。

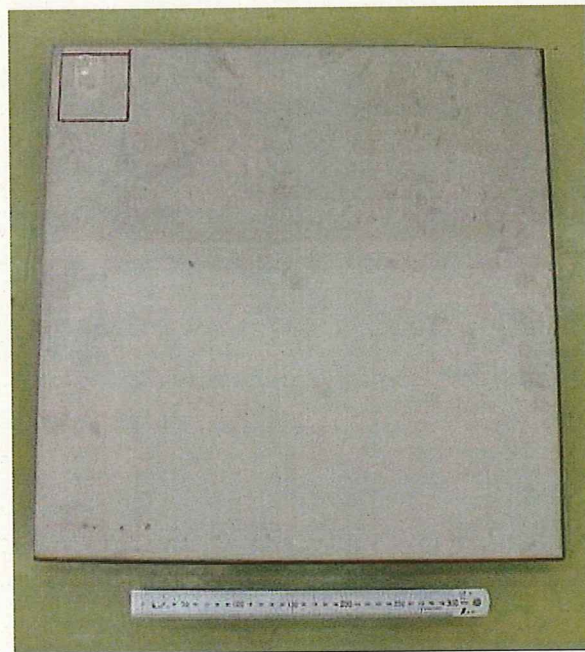

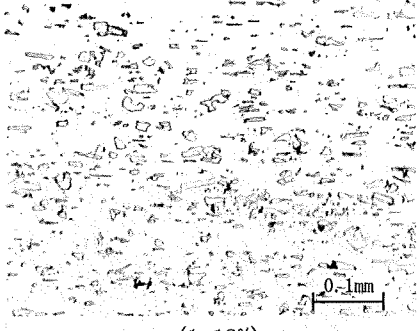
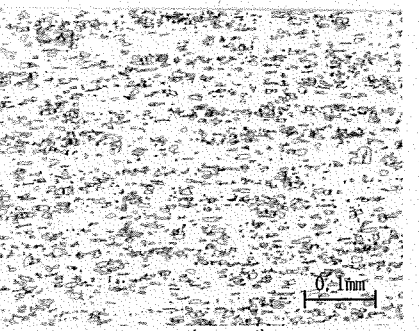
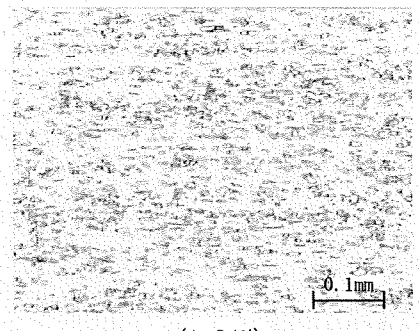
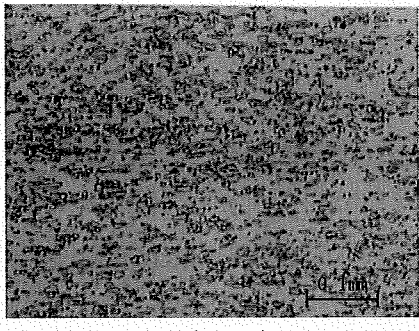
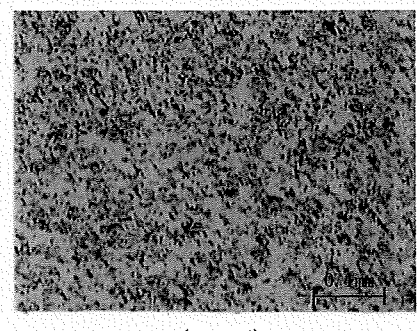

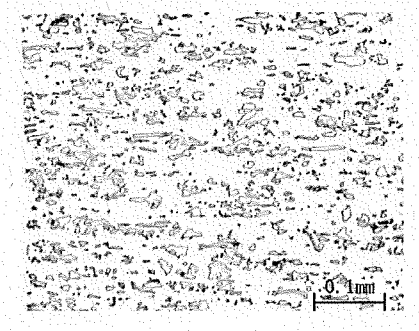


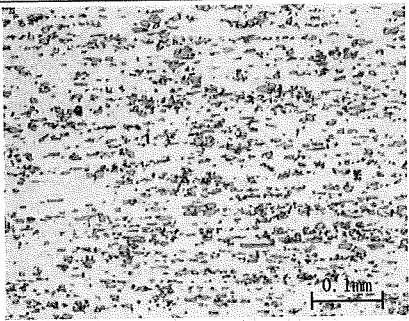
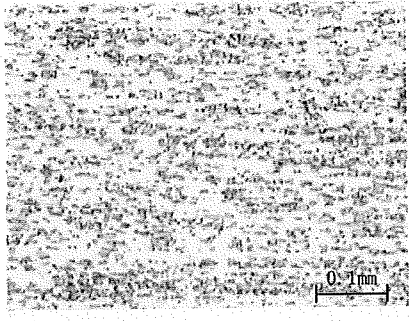
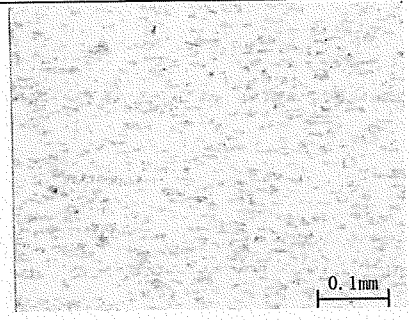
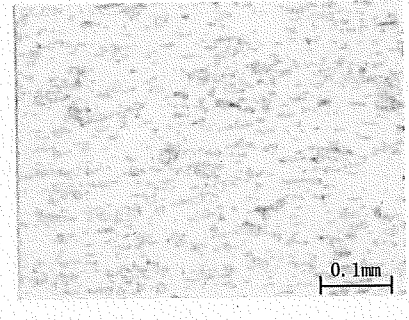

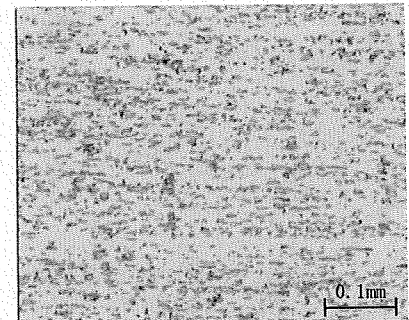
図 7-1 マクロ観察結果の例 (標本 7)

表 7-1(1) ミクロ組織観察結果

標本 No. (B 量*)	圧延方向先端写真 (B 量)	圧延方向後端写真 (B 量)
標本 1 (1.14%)	 <p>(1.13%)</p>	 <p>(1.12%)</p>
標本 2 (1.22%)	 <p>(1.25%)</p>	 <p>(1.24%)</p>
標本 3 (1.06%)	 <p>(1.03%)</p>	 <p>(1.10%)</p>
標本 4 (1.16%)	 <p>(1.15%)</p>	 <p>(1.17%)</p>

* : 標本 No. 欄の B(ほう素)量は溶鋼分析時の結果を示す。本表の B 量の単位は全て mass% である。

表 7-1(2) ミクロ組織観察結果

標本 No. (B 量*)	圧延方向先端写真 (B 量)	圧延方向後端写真 (B 量)
標本 5 (1.05%)	 <p>(1.04%)</p>	 <p>(1.04%)</p>
標本 6 (1.09%)	 <p>(1.07%)</p>	 <p>(1.08%)</p>
標本 7 (1.14%)	 <p>(1.11%)</p>	 <p>(1.12%)</p>

* : 標本 No. 欄の B(ほう素)量は溶鋼分析時の結果を示す。本表の B 量の単位は全て mass% である。

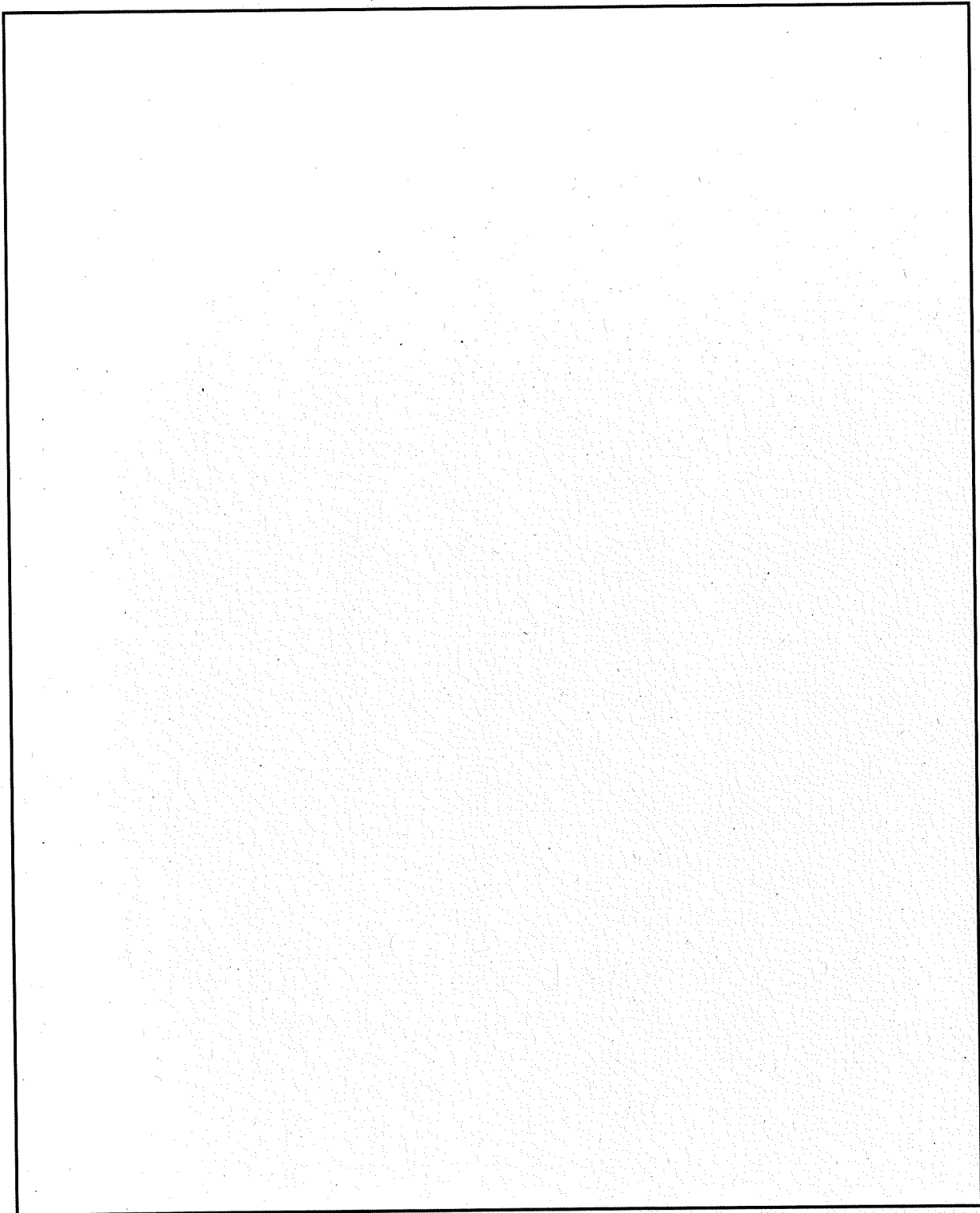


図 7-2 EPMA 分析結果の例(標本 7)

内は商業機密のため、非公開とします。

8. 実用試験

本材料は圧延鋼板として製作され、使用形状は板状で、切断・切削加工しか行わないため、実用試験は不要と考える。

9. 加工性及び加工条件

本材料の加工は切断、切削のみとする。切断については、シャー、プラズマ、レーザー、ウォータージェット等の切断機器により、SUS304と同様に切断することができる。切削加工については、ボライドの影響により硬度が高く、工具の磨耗が大きい傾向にあるが十分に切削可能である。

10. 機械的性質

10.1 引張特性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 1~4 を対象とした。供試材は鋼板端部から少なくとも板厚以上離れた位置から採取した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2201「金属材料引張試験片」13B 号又は 5 号試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」による。高温時は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」による。
- ・ 試験温度 : 常温
- ・ 記録 : 引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

表 10-1 に引張試験結果を示す。この結果より、引張強さ、耐力及び伸びの常温の規格値は、試験データの 99%が包絡されるような最低強度として、安全側に丸めた値とした。

表 10-1 常温における引張特性(平均値(n=3))

標本	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
標本 1	633	300	22.7
標本 2	616	376	16.9
標本 3	653	367	16.0
標本 4	559	333	20.4
B-SUS304P-1 仕様値(参考)	520	255	10 以上
SUS304 仕様値(参考)	520	205	40 以上

10.2 じん性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 5~7 を対象とした。
- ・ 試験片 : ASTM E 1820-05a C(T) 試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : ASTM E 1820-05a による。
- ・ 試験温度 : -25°C
- ・ 応力拡大係数速度 : $300 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ 以上
- ・ 記録 : K_{Q} 値を測定した。

(2) 試験結果

表 10-2 に動的破壊じん性試験結果を示す。各標本それぞれ 3 回動的破壊じん性試験を実施した結果、 K_{Q} 値は $38 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上であった。図 10-1 に試験時の荷重-開口変位、図 10-2 に荷重-時刻の関係を示す。いずれの試験結果も同様の傾向であるので試験片 7-2 の結果で代表する。同図からわかるように、破壊形態としては脆性破壊が生じた場合に観測される最大荷重に達する前に荷重が急激に低下するような現象は見られず、最大荷重後も安定的に荷重が低下していく安定破壊が観測されている。

本試験より、本材料は典型的な脆性破壊とは様相が異なり、介在物を基点とした延性破壊の進展による安定的な破壊形態と推察される。

なお、試験片 7-2 を除く全試験に対する荷重-開口変位を図 10-3 にまとめて示す。

表 10-2 動的破壊じん性試験結果

試験片記号			5-1	5-2	5-3	6-1	6-2	6-3	7-1	7-2	7-3
試験機ストローク速度 mm/sec											
K値の変化速度 MPa・m ^{1/2} /sec											
試験片厚さ mm	B										
試験片幅 mm	W										
試験温度 °C											
静的0.2%耐力 MPa	σ_{YS}										
動的0.2%耐力 ¹⁾ MPa	σ_{YD}										
P ₀ 荷重 kN	P ₀										
最大荷重 kN	P _{max.}										
機械切欠長さ mm M											
疲労き裂長さ mm	0/4・B	a _{f0}									
	1/4・B	a _{f1}									
	2/4・B	a _{f2}									
	3/4・B	a _{f3}									
	4/4・B	a _{f4}									
	最小値	a _{f min.}									
	最大値	a _{f max.}									
き裂長さ ²⁾ mm a											
係数 f(a/W)											
K ₀ 値 MPa・m ^{1/2}	K ₀		60.6	55.3	54.5	40.1	47.8	54.3	38.8	42.3	42.0
P _{max} /P ₀ (≤ 1.10)											
$B \geq 2.5 (K_0 / \sigma_{YD})^2$											
$a \geq 2.5 (K_0 / \sigma_{YD})^2$											
K _{IC} 値 MPa・m ^{1/2}	K _{IC}		-								

- 1) ASTM-E1820 式(A13.2)を用いた
 2) $a = M + (a_{f1} + a_{f2} + a_{f3}) / 3$

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

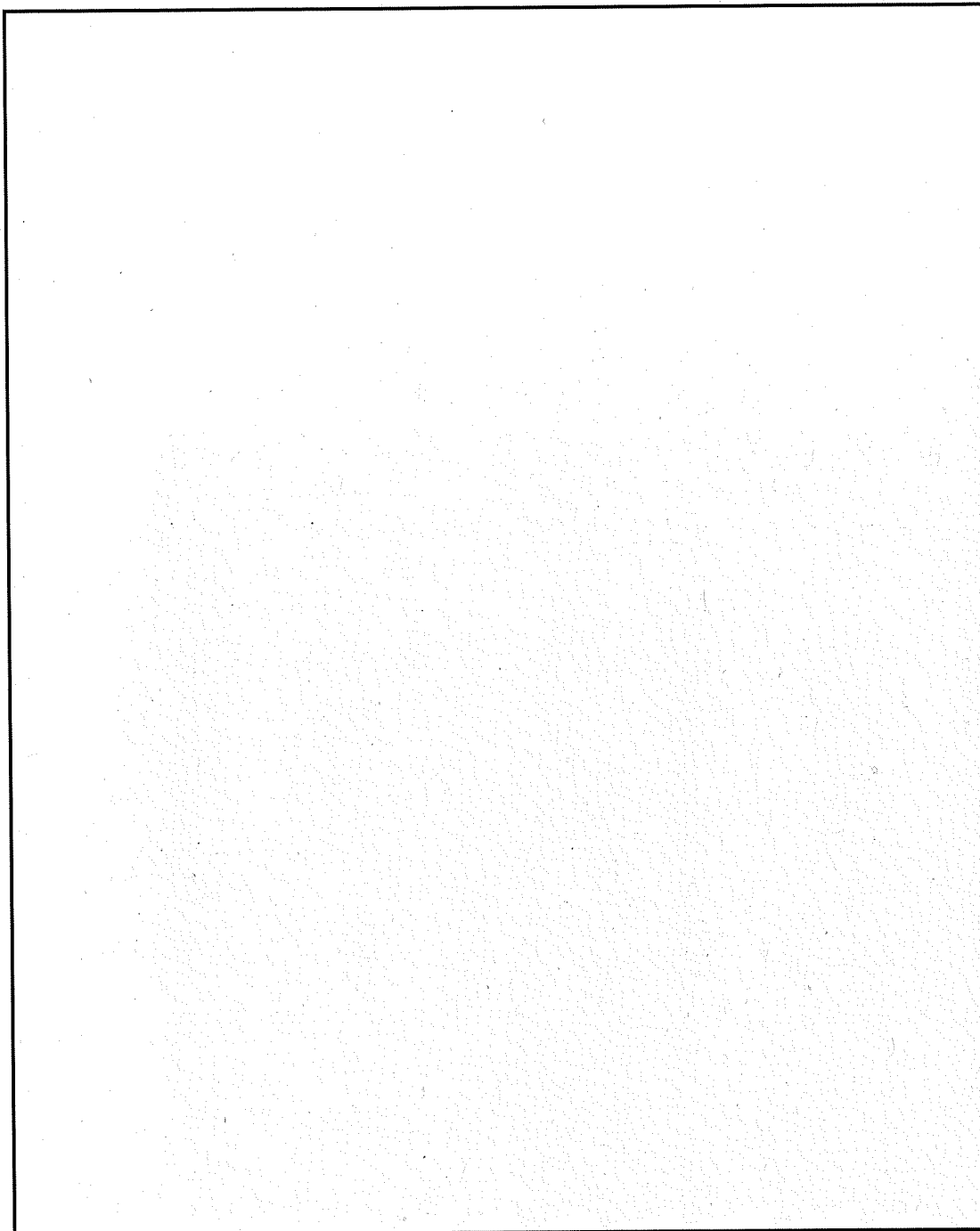


図 10-1 動的破壊じん性試験における荷重-開口変位線図(試験片番号 7-2)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

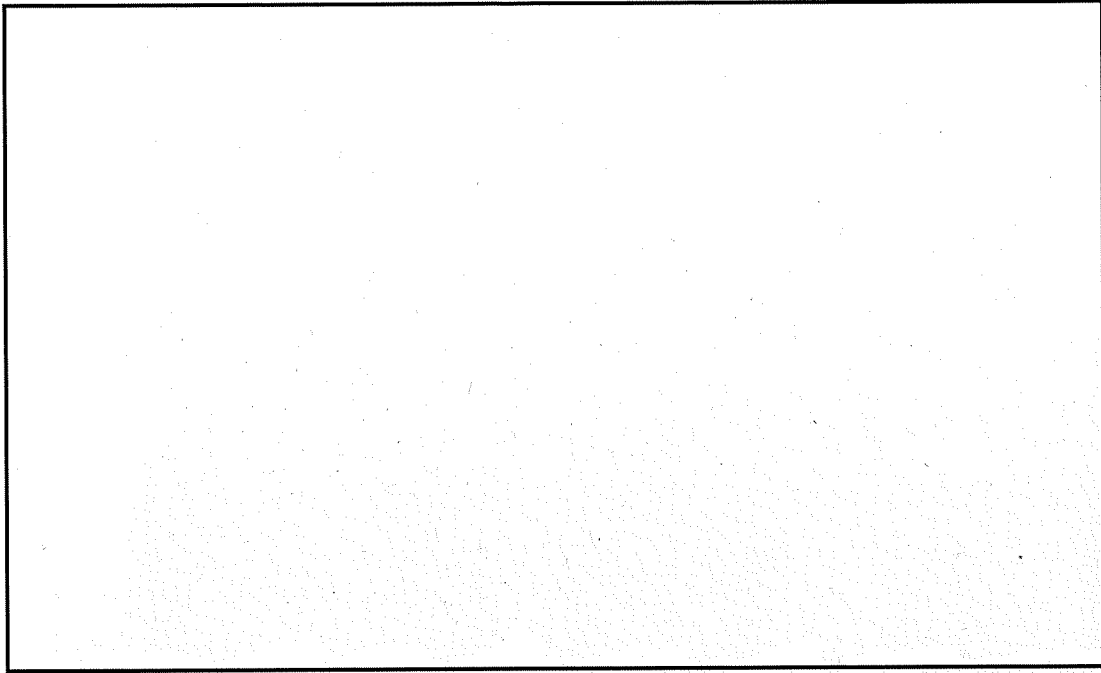


図 10-2 動的破壊じん性試験における荷重-時間線図(試験片番号 7-2)

内は商業機密のため、非公開とします。

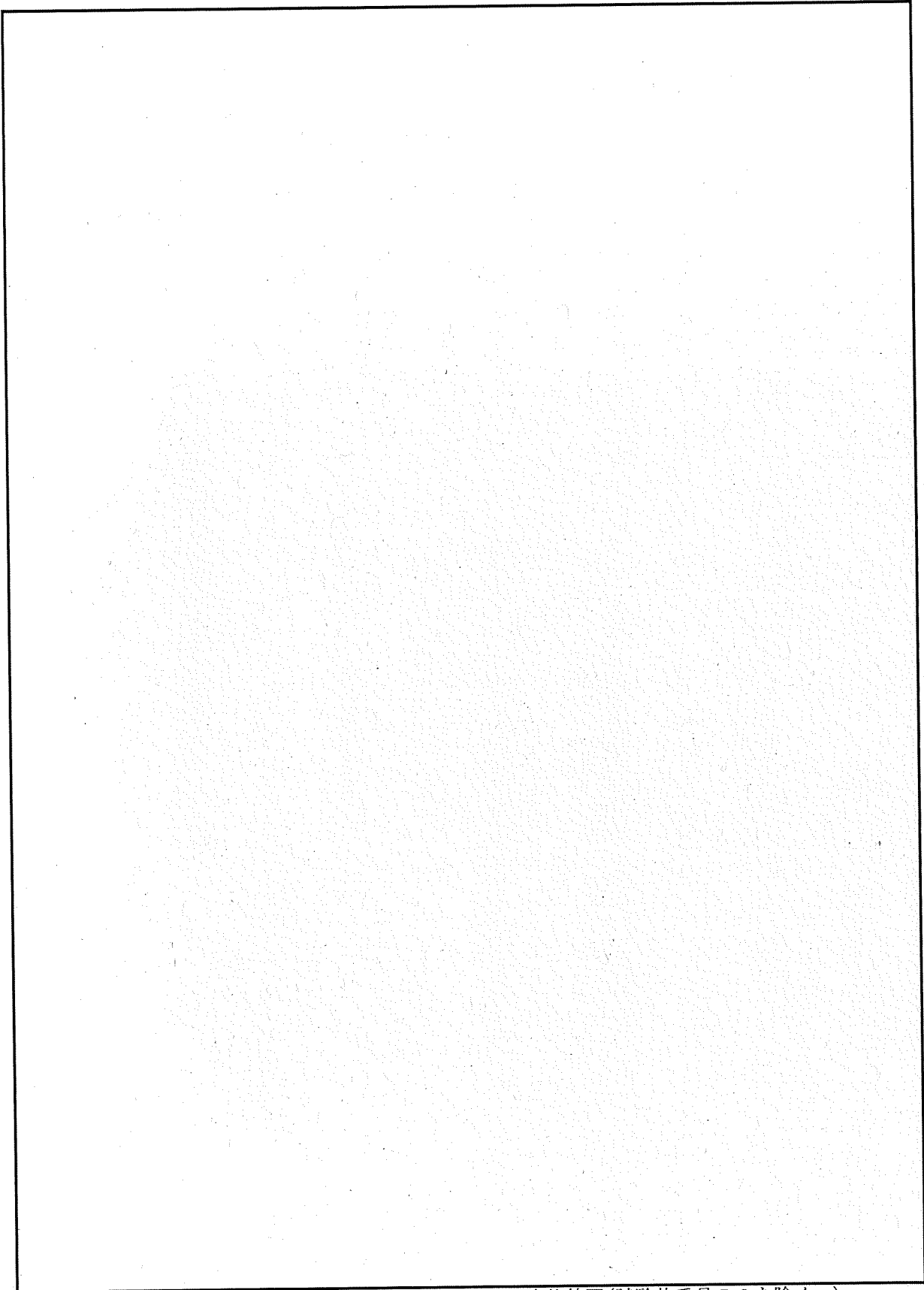


図 10-3 動的破壊じん性試験における荷重-開口変位線図(試験片番号 7-2 を除く。)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

10.3 硬さ (参考)

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 1~7 を対象とした。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2244 「ビッカース硬さ試験」による。
- ・ 試験温度 : 常温
- ・ 記録 : ビッカース硬さを測定した。

(2) 試験結果

表 10-3 に硬さ試験結果を示す。本材料は、ほう素を添加していることから、通常のステンレス鋼 (規格値 : ≤ 200 (Hv)) より硬度は増すが、9 章で示したように製造上及び使用上特に問題となることはない。

表 10-3 常温における硬度 (Hv)

項目	Hv
標本 1	268
標本 2	221
標本 3	230
標本 4	270
標本 5	212
標本 6	224
標本 7	251
平均値	239

11. 高温及び低温引張特性

11.1 高温引張特性

(1) 試験条件

- ・ 供試材 : 表 6-1 に示す標本 1~4 を対象とした。供試材は鋼板端部から少なくとも板厚以上離れた位置から採取した。
- ・ 試験片 : JIS Z 2201「金属材料引張試験片」13B 号又は 5 号試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」による。高温時は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」による。
- ・ 試験温度 : 20°C, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C 及び 350°C
- ・ 記録 : 引張強さ, 0.2%耐力及び伸びを測定した。

(2) 試験結果

引張強さ, 0.2%耐力, 伸びについてそれぞれ図 11-1~図 11-3 に引張試験結果を示す。

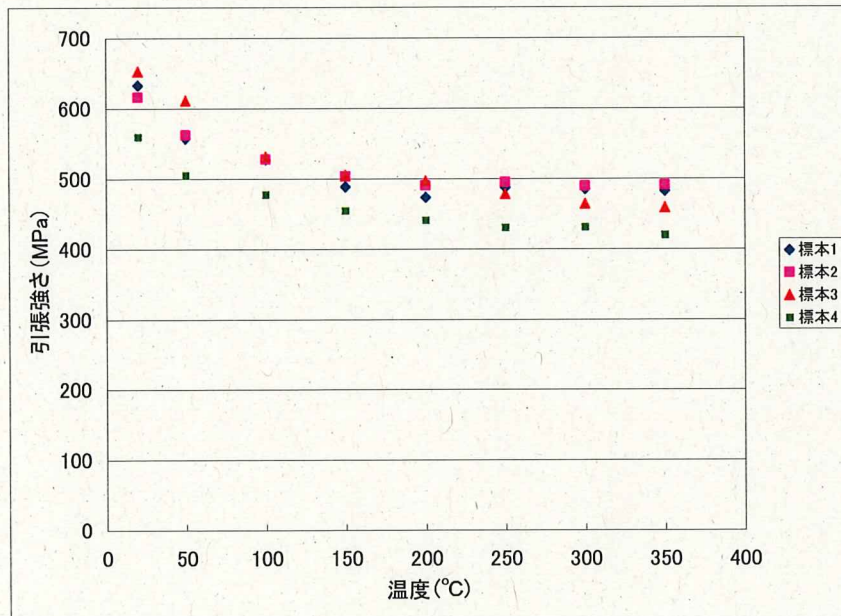


図 11-1 引張強さの温度依存性

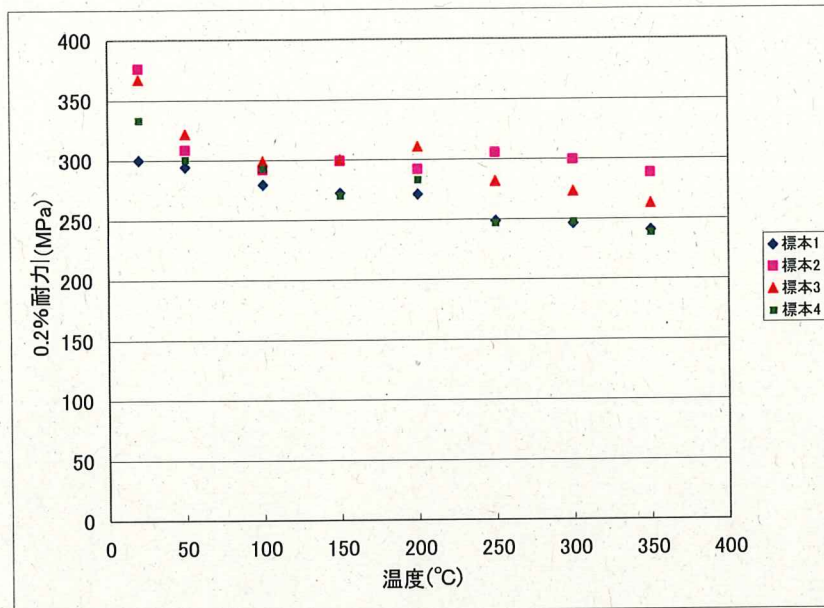


図 11-2 0.2%耐力の温度依存性

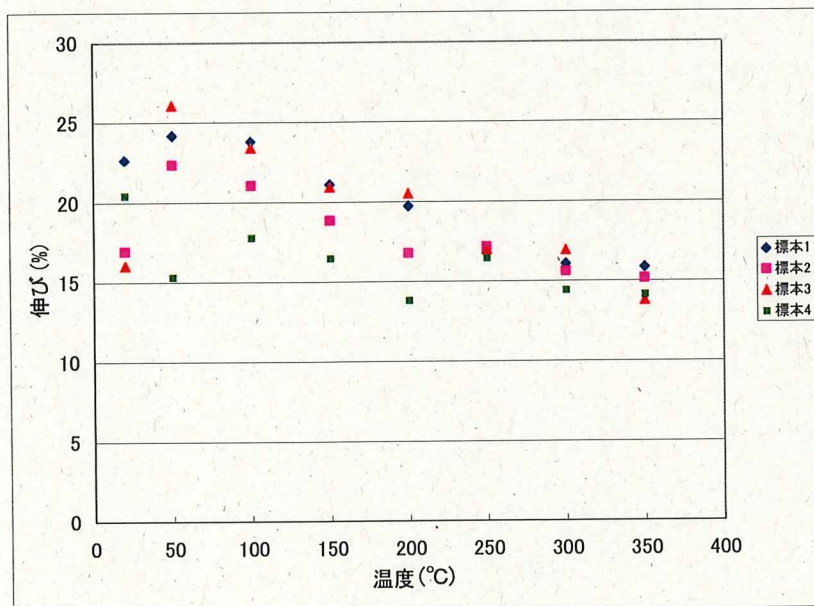


図 11-3 伸びの温度依存性

11.2 低温引張特性

常温以下の低温に対しては常温の値を設定することとし、設定応力を高くしないので、低温引張特性データは採取しない。

12. クリープ特性及びクリープ破断特性

バスケットの最高使用温度は300℃である。本材料の母材である SUS304 は 425℃までクリープの影響を考慮せずに適用される材料であり、かつほう素を添加したことによるボライドの析出硬化により、クリープ特性がより改善されることが知られている。したがって、本材料の使用環境においてはクリープ特性及びクリープ破断特性は考慮不要である。

13. じん性（時効後）

本材料中に存在するボライドの融点(1273℃)に比べ、本材料の最高使用温度の300℃と比較して十分低く、かつ長期貯蔵中に温度は更に低下するため、ボライドの結晶の成長によるじん性の低下は起こらない。したがって、時効の影響は考慮不要である。

14. 耐食性

バスケットは使用済燃料を装荷する際に燃料プール内に浸漬されるが、同様の環境にて長期間プール内で使用されている使用済燃料貯蔵ラックで十分実績があること、燃料装荷後は脱水し、十分乾燥した後に不活性ガス（ヘリウム）を充填して使用することから、腐食を促進する環境ではないため、耐食性については問題ないと考える。

15. 設計降伏点

11.1 節で示した高温引張データに基づき、以下の要領で設計降伏点を策定した。

- (1) 各温度 T における 0.2%耐力値を、各標本の室温データで除した値を $r(T)y$ とする。
- (2) $r(T)y$ を各温度の 5 次の多項式で近似した曲線をトレンドカーブとする。
- (3) 室温の 0.2%耐力の規定値 $\min_{\text{nr}} S_y$ に $r(T)y$ を乗じてその温度の S_y とする。ただし、高温での強度が低温よりも高くないようにする。

各温度の $r(T)y$ 及び設計降伏点 (S_y) 設定値を図 15-1、図 15-2 及び表 15-1 に示す。表 15-1 については、常温より高温域の記載温度を（社）日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 (2007 年追補版含む。）」（以下「設計・建設規格」という。）付録材料図表 Part5 表 8 に合わせた。

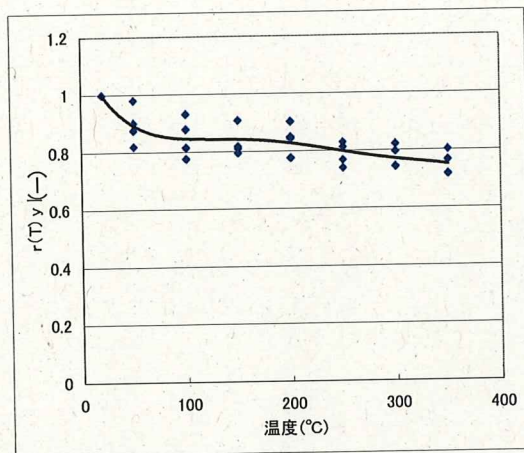


図 15-1 0.2%耐力における $r(T)y$ のトレンドカーブ

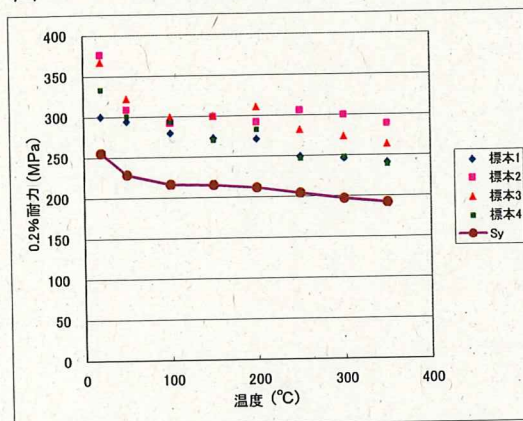


図 15-2 各標本データと S_y 設定値

表 15-1 材料の各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

種類	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)										
			-25~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1の設計降伏点	520	255	255	219	216	215	211	208	204	200	197	194	191
SUS304(参考)	520	205	205	183	171	155	144	139	135	131	127	125	124

16. 設計引張強さ

11.1 節で示した高温引張データに基づき、以下の要領で設計引張強さを策定した。

- (1) 各温度 T における引張強さを、各標本の室温データで除した値 $r(T)_T$ とする。
- (2) $r(T)_T$ を各温度の 5 次の多項式で近似した曲線のトレンドカーブとする。
- (3) 室温の引張強さの規定値 $\min_{RT} S_B$ に $1.1 \times r(T)_T$ を乗じてその温度の S_u とする。ただし、高温での強度が低温よりも高くないようにする。

各温度の $r(T)_T$ 及び設計引張強さ (S_u) 設定値を図 16-1、図 16-2 及び表 16-1 に示す。表 16-1 については、常温より高温域の記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に合わせた。

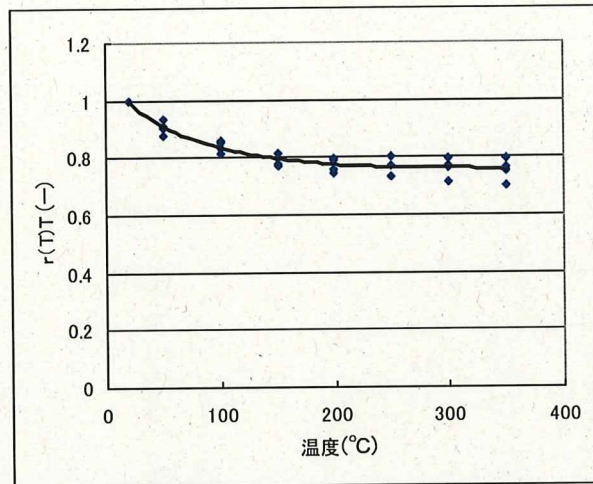


図 16-1 引張強さにおける $r(T)_T$ のトレンドカーブ

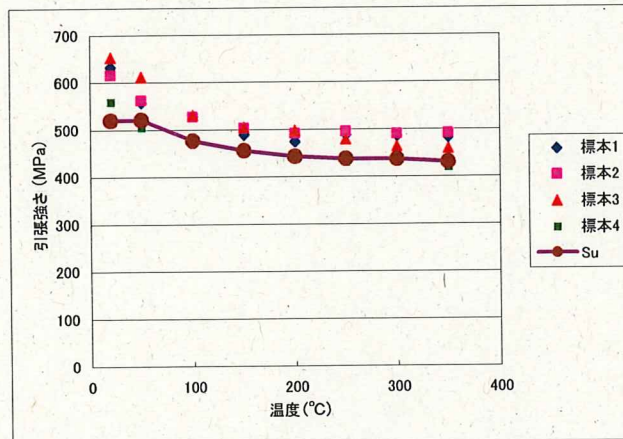


図 16-2 各標本データと S_u 設定値

表 16-1 材料の各温度における設計引張強さ S_u (MPa)

種類	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)										
			-25 ~ 40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の設計引張強さ	520	255	520	495	477	456	443	440	438	437	436	435	430
SUS304(参考)	520	205	520	466	441	422	402	400	397	394	391	391	391

17. 設計応力強さ

15, 16 章で示した設計降伏点及び設計引張強さに基づき, 下表に示す各温度ごとに求められる数値の小さな値を設計応力強さとした。

製品/材料	引張強さ		降伏点[耐力]	
	常温	高温	常温	高温
鉄鋼及び非鉄	$1/3 \times S_T^*$	$1.1/3 \times S_T^* \times r(T)_T$	$2/3 \times S_y$	$2/3 \times S_y \times r(T)_y$ 若しくは $0.9 \times S_y \times r(T)_y$

* 常温における引張強さの規格値(JIS, ASTM の規格等の値) (MPa)

ここで, 各温度の値はそれより低温の値を超えないように修正する。なお, 降伏点で 0.9 の係数を用いるのはオーステナイト鋼及び高ニッケル合金である。

本材料はオーステナイト鋼であるから, 上記に従って設定した設計応力強さ (S_m) を表 17-1 に示す。表 17-1 については, 常温より高温域の記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1 に合わせた。

表 17-1 材料の各温度における設計応力強さ S_m (MPa)

種 類	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温 度 (°C)										
			-25 ~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の設計応力強さ	520	255	170	165	159	152	148	147	146	146	145	145	143
SUS304(参考)	520	205	137	137	137	137	129	126	122	118	115	113	111

18. 許容引張応力

本材料は, 使用温度がクリープ領域でなく, 許容引張応力は使用しないため, 策定しない。

19. 疲労

貯蔵時においてバスケットに対する圧力及び熱荷重の繰返しサイクルや, 通常輸送時及び地震時においてバスケットに作用する繰返し応力は微小であるため, 疲労解析が不要であり, 疲労線図作成のためのデータは不要である。

20. その他特性

20.1 熱膨張係数

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までの熱膨張係数測定試験を実施 (n=3) した。熱膨張係数について図 20-1 に示し、設定値を表 20-1 に示す。表 20-1 については、記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 2 に合わせた。

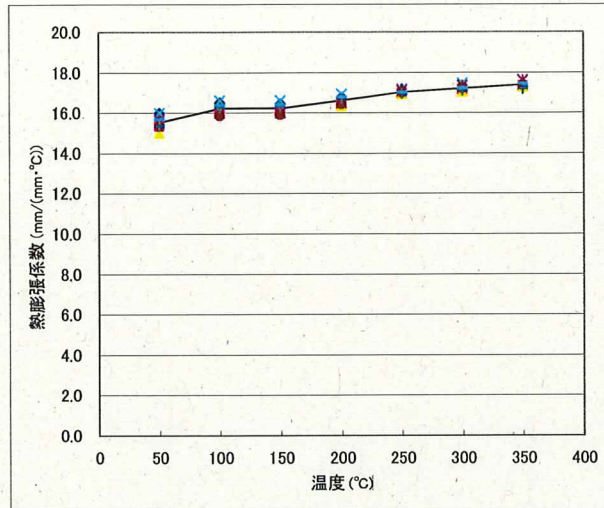


図 20-1 熱膨張係数(平均)の温度依存性

表 20-1 本材料の熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm·°C))

種 類	温 度 (°C)													
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の 瞬時熱膨張係数	15.22	15.78	16.22	16.61	16.96	17.28	17.56	17.80	18.01	18.17	18.30	18.39	18.45	18.46
B-SUS304P-1 の 平均熱膨張係数	15.22	15.52	15.88	16.24	16.24	16.24	16.43	16.63	16.83	17.02	17.12	17.22	17.30	17.39
SUS304 の瞬時 熱膨張係数(参考)	15.21	15.72	16.09	16.43	16.73	17.04	17.33	17.59	17.84	18.08	18.33	18.55	18.76	18.94
SUS304 の平均 熱膨張係数(参考)	15.21	15.49	15.68	15.87	16.05	16.21	16.37	16.52	16.66	16.81	16.94	17.07	17.20	17.33

20.2 熱伝導率

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までの熱伝導率測定試験を実施 (n=3) した。熱伝導率について図 20-2 に示し、設定値を表 20-2 に示す。

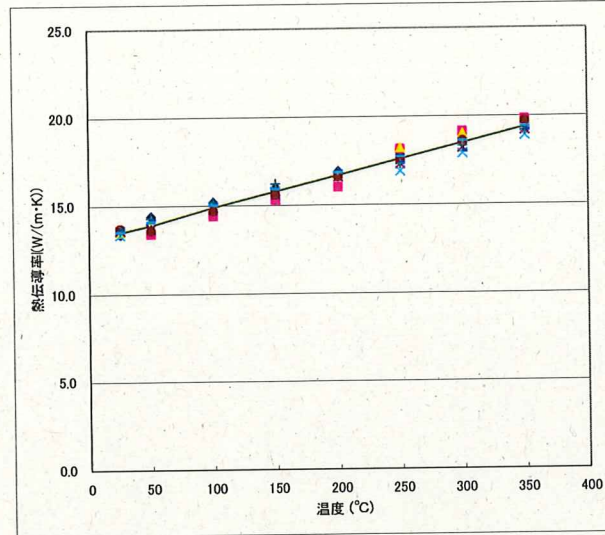


図 20-2 熱伝導率の温度依存性

表 20-2 本材料の熱伝導率設定値 (W/(m·K))

種 類	温 度 (°C)							
	室温	50	100	150	200	250	300	350
B-SUS304P-1 の熱伝導率	13.5	13.9	14.9	15.8	16.7	17.6	18.5	19.4
SUS304 の熱伝導率(参考)*	14.8	15.3	16.2	17.0	17.9	18.6	19.4	20.1

* ASME Sec II, PartD TABLE TCD より 18Cr-8Ni の値

20.3 温度伝導率

温度伝導率については、標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50℃高い温度である 350℃までの比熱測定試験を実施(n=3)し、材料密度 7.8g/cm³として求めた。設定値を表 20-3 に示す。

表 20-3 本材料の温度伝導率設定値 (mm²/s)

種 類	温 度 (°C)							
	室温	50	100	150	200	250	300	350
B-SUS304P-1 の温度伝導率	3.67	3.77	3.89	3.99	4.11	4.14	4.23	4.35
SUS304 の温度伝導率(参考)*	3.90	3.94	4.04	4.14	4.24	4.35	4.46	4.57

* ASME Sec II, PartD TABLE TCD より 18Cr-8Ni の値

20.4 縦弾性係数

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50℃高い温度である 350℃までの縦弾性係数測定試験を実施(n=3)した。縦弾性係数について図 20-3 に示し、設定値を表 20-4 に示す。表 20-4 については、記載温度を設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 に合わせた。

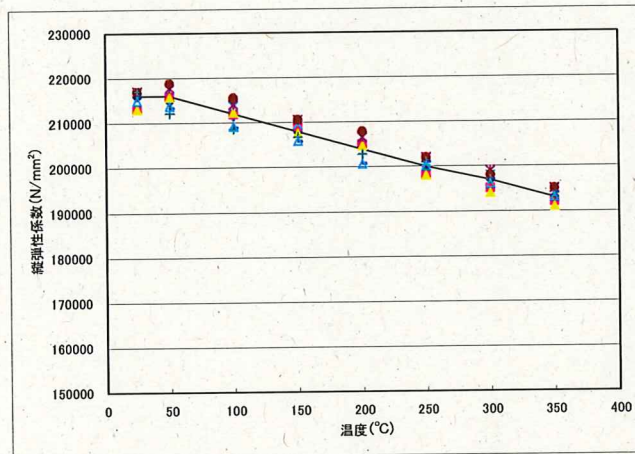


図 20-3 縦弾性係数の温度依存性

表 20-4 材料の各温度における縦弾性係数 (MPa)

種 類	温 度 (°C)													
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
B-SUS304P-1 の縦弾性係数	216000	216000	214000	212000	210000	208000	206000	204000	202000	200000	199000	197000	195000	193000
SUS304 の縦弾性係数(参考)	195000	193000	191000	190000	188000	186000	184000	183000	180000	178000	177000	176000	174000	173000

20.5 ポアソン比

標本 1~3 に対して、常温から最高使用温度より 50°C 高い温度である 350°C までのポアソン比測定試験を実施 (n=3) した。ポアソン比について図 20-4 に示す。なお、ポアソン比はばらつきも小さく、設計に大きく影響しないことから、設定値としては常温から 300°C まで一定値 0.3 とする。

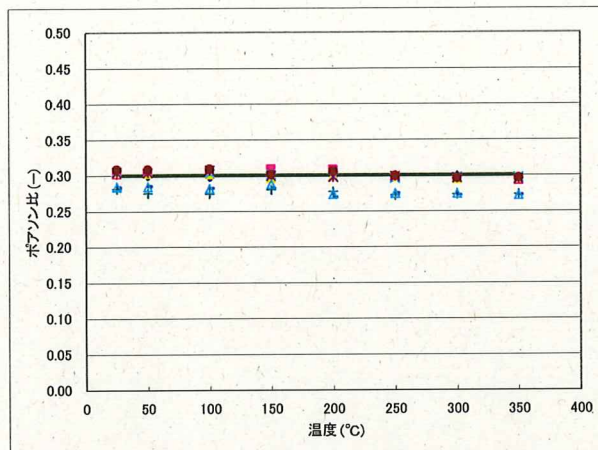


図 20-4 ポアソン比の温度依存性

21. 照射影響

B-SUS304P-1 の母材であるステンレス鋼は、従来から原子炉材料として広く使用されており、その機械的性質に及ぼす中性子照射の影響は良く知られている。ステンレス鋼は照射量の増加に伴い耐力及び引張強さが上昇し、伸びが低下するという照射影響が現れる⁽¹¹⁾。

しかし、今回のバスケットの中性子による 60 年間の累積照射量は 10^{15} n/cm² 程度と見積もられ、炉内における $10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm² の照射量に比べ極めて少ない量である。ステンレス鋼の機械的性質の変化が顕著に現れるのは 10^{19} n/cm² 程度からであり⁽¹²⁾、 10^{15} n/cm² 程度では機械的性質にほとんど変化が無いものと考えられる。

一方、B-SUS304P-1 は、ほう素を一定量含有するという点においてステンレス鋼と異なり、照射影響については ^{10}B の (n, α) 反応による He の挙動を考慮しなければならない。金属内で生成した He はバブルとなって粒界に移動することにより金属の機械的性質に影響を及ぼすことになる。しかし、このような現象は「高温照射脆化」と呼ばれ、約 500°C 以上で著しくなることが知られている⁽¹³⁾。これに対し、バスケットの場合、すでに述べたとおり中性子照射量が低く、最高使用温度が 330 °C 以下であることから、高温照射脆化は起こらないと考えられる。これはほう素約 1 % を添加した B-SUS304P-1 の照射データからも確認することができる⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾。すなわち、ステンレス鋼の照射影響の程度と特段差がなく、 10^{15} n/cm² 程度の中性子照射量においてはほとんど問題がないものと考えられる。

また、バスケットを 60 年間使用した場合の ^{10}B の劣化量は、初期値の 10^{-5} 未満であり、核的な減損は無視できるため中性子吸収能力に変化はない。

したがって、バスケットに用いられる B-SUS304P-1 への照射影響は、中性子による 60 年間の累積照射量が少ないことより問題となることはない。

22. 引用文献

- (1) 山本定弘, 本田正春, 小林泰男, 崎山哲雄, 江平義博, 長嶺多加志, 「熱中性子遮蔽用ボロン含有ステンレス鋼板」, 火力原子力発電, Vol. 41, No. 9, pp. 1149-1157, (1990)
- (2) 日立製作所, 「沸騰水型原子力発電所 使用済燃料貯蔵ラックの使用材料としてのボロン添加ステンレス鋼について」, HLR-061, (1998)
- (3) 坪田基司, 及川誠, 「中性子遮蔽用ボロン添加ステンレス鋼板」, ふえらむ, Vol. 10, No. 12, pp. 25-27, (2005)
- (4) ステンレス協会編, 「ステンレス鋼便覧 第3版」, 日刊工業新聞社, (1995)
- (5) 加藤哲男, 藤倉正国, 市川二郎, 「原子力用含Bステンレス鋼の特性」, 電気製鋼, Vol. 49, No. 2, pp. 108-116, (1978)
- (6) 古谷俊直, 金井秀俊, 廣瀬豊, 「ボロン添加ステンレス鋼の材料特性に関する研究」, 火力原子力発電, Vol. 45, No. 11, pp. 1289-1296 (1994)
- (7) 武本敏彦, 山崎和信, 川合裕, 「熱中性子遮蔽用ボロン添加ステンレス鋼の開発」, まてりあ, Vol. 35, No. 4, pp. 412-414 (1996)
- (8) 堂守生剛, 川内進司, 平沼健, 「輸送貯蔵キャスク用バスケット材ボロン添加ステンレス鋼板(B-SUS304P-1)の機械的特性」, 日本機械学会論文集(A編), Vol. 76, No. 772, pp. 1834-1836, (2010)
- (9) 宮井悠真, 保高剛, 二杉拓哉, 蓮沼将太, 小川武史, 「オーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展特性に及ぼすボロン添加の影響」, 材料, Vol. 65, No. 12, pp. 856-861, (2016)
- (10) 川内進司, 平沼健, 中根一起, 「金属キャスクバスケット用ボロン添加ステンレス鋼(B-SUS304P-1)の強度特性評価」, 日本機械学会 2019年度年次大会, (2019)
- (11) H. R. Higgy and F. H. Hammad, 「EFFECT OF FAST-NEUTRON IRRADIATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEELS: AISI TYPES 304, 316 AND 347」, Journal of Nuclear Materials, Vol. 55, No. 2, pp. 177-186, (1975)
- (12) ステンレス協会編, 「ステンレス鋼便覧 第2版」, 日刊工業新聞社, (1973)
- (13) 石野栞, 「照射損傷, 原子力工学シリーズ-8」, 東京大学出版会, (1979)
- (14) 日本原子力研究所材料試験炉部, 「JMTR 試用期間照射報告書 第4部ジルコニウム・その他材料」, JAERI-M-5648, (1974)
- (15) S. E. Soliman, D. L. Youchison, A. J. Baratta and T. A. Balliett, 「NEUTRON EFFECTS ON BORATED STAINLESS STEEL」, Nuclear Technology, Vol. 96, No. 3, pp. 346-352, (1991)

ほう素添加ステンレス鋼の破壊じん性に関する説明書

目 次

1. はじめに	1
2. 設計の考え方	1
3. 材料特性 (破壊じん性)	1
3.1 破壊じん性試験	1
4. 許容欠陥寸法の評価	5
5. 引用文献	7

図表目次

表 1-1	シャルピー衝撃試験結果	2
表 1-2	時効後じん性確認試験条件と試験結果	3
図 1-1	時効後じん性確認試験の結果	4
図 1-2	許容欠陥寸法評価モデル及び評価式	5
図 1-3	想定欠陥深さと破壊じん性値 (K_0 値) との関係	6

1. はじめに

HDP-69B(B)型のバスケットプレートに適用するバスケットプレート用材料ほう素添加ステンレス鋼(B-SUS304P-1)の破壊じん性に係る特性をまとめたものである。

2. 設計の考え方

HDP-69B(B)型は、使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するためのバスケット格子構造、及びバスケットプレートに添加された中性子吸収材により臨界に達することを防止する設計である。

バスケットプレートは、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するために塑性変形しない、若しくは変形量をわずかに抑える設計であり、設計降伏点(S_y)を重視した設計としている。

3. 材料特性(破壊じん性)

B-SUS304P-1は、ほう素及びほう素化合物が介在物として材料中に分散している。これらの材料の破壊形態は、介在物を起点として延性破壊が進展するマイクロボイド合体型の延性破壊であり、脆性破壊ではない。しかし、ほう素を添加していない母材と比較して材料の伸びが小さくなり、この影響でじん性が低下する可能性があるため、破壊じん性試験を行う。

3.1 破壊じん性試験

(1) シャルピー衝撃試験

(a) 試験条件

- ・ 供試材 : 補足説明資料1 表6-1に示す標本5~7を対象とした。
- ・ 試験片 : JIS Z 2202「金属材料衝撃試験片」Vノッチシャルピー衝撃試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」による。
- ・ 試験温度 : -25°C
- ・ 記録 : 横棒出量及び衝撃値を測定した。

(b) 試験結果

表1-1にシャルピー衝撃試験結果を示す。各標本ごとの試験数は3とした。(社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)表MCM-2332-1に示される、横膨出量の基準値は0.50mm以上であり、試験結果は基準値以下となる。しかしながら、本材料はSUS304を母材としており、衝撃値は低いものの基本的には延性挙動を示す材料であるとともに脆性遷移を示さない材料である。

また、材料特性確認として、初期材及び長時間過時効熱処理材に対して、シャルピー衝撃試験を行った。試験条件と試験結果を表1-2に示し、これらをLMPで整理した結果を図1-1に示す。表1-2からわかるように、各温度とも100hrまでは非時効材と同程度

であった。また、図 1-1 に示すように、LMP で 300℃、60 年相当までじん性低下は見られない。

表 1-1 シャルピー衝撃試験結果

温度(℃)	試験片 No.	横膨出量(mm)	衝撃値(J/cm ²)	備考
-25				
	平均値	0.24	23	9点の平均

内は商業機密のため、非公開とします。

表 1-2 時効後じん性確認試験条件と試験結果

時効温度	時効時間(hr)	衝撃値(J/cm ²)	横膨出量(mm)
最低値			
		22	0.20

※：試験温度は全て-25°Cで実施

□内は商業機密のため、非公開とします。

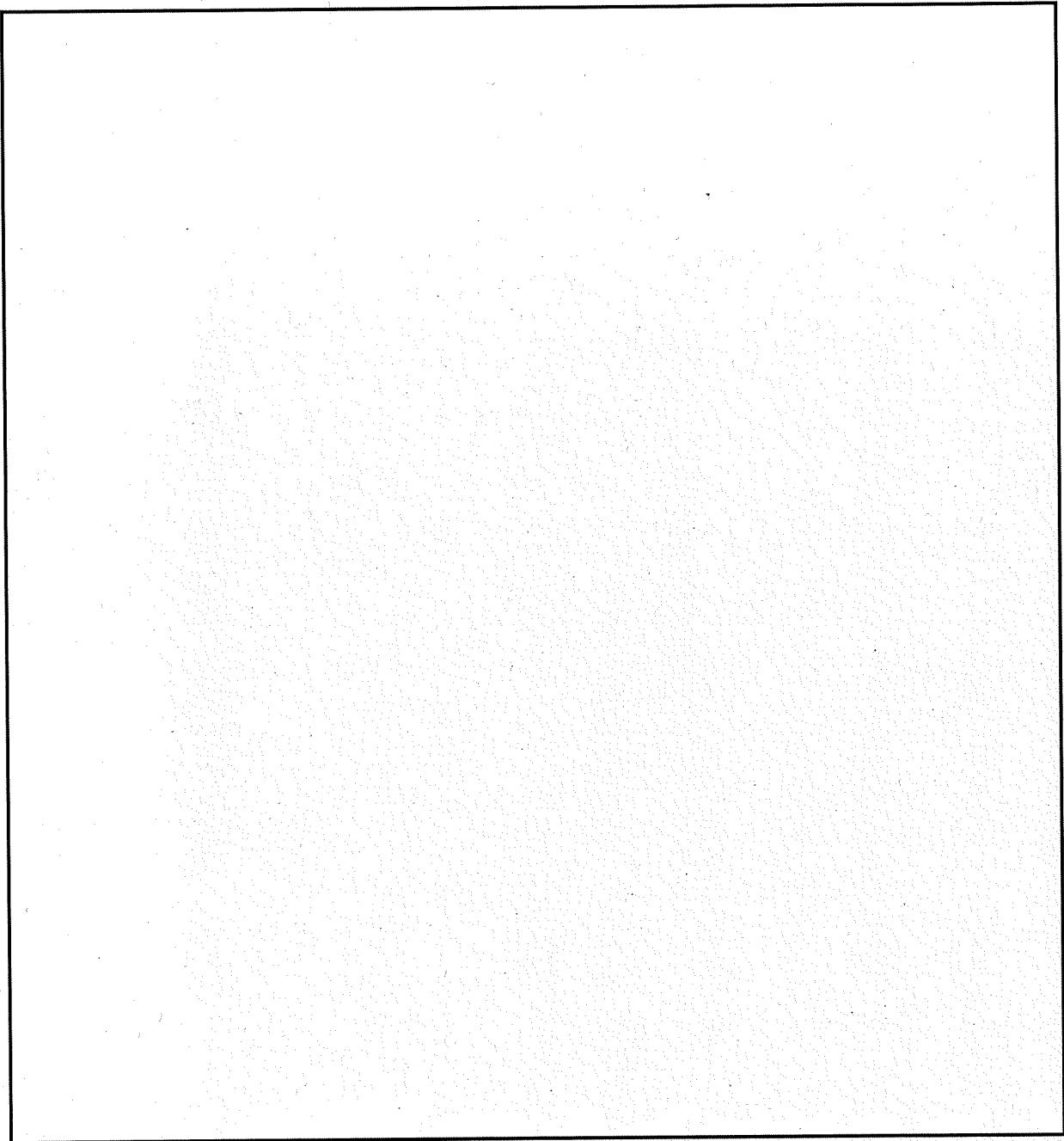


図 1-1. 時効後じん性確認試験の結果

内は商業機密のため、非公開とします。

(2) 動的破壊じん性試験

(a) 試験条件

- ・ 供試材 : 補足説明資料 1 表 6-1 に示す標本 5~7 を対象とした。
- ・ 試験片 : ASTM E 1820-05a C(T) 試験片を用いた。
- ・ 試験方法 : ASTM E 1820-05a による。
- ・ 試験温度 : -25°C
- ・ 応力拡大係数速度 : 300 MPa√m/s 以上
- ・ 記録 : K_Q 値を測定した。

(b) 試験結果

補足説明資料 1 表 10-2 の動的破壊じん性試験結果より、K_Q 値は 38 MPa√m 以上である。

4. 許容欠陥寸法の評価

B-SUS304P-1 に一様線状の欠陥を想定し、3.1 (2) に示す破壊じん性値を基に図 1-2 に示す方法により許容欠陥寸法評価を行った。図 1-3 に想定欠陥深さと破壊じん性値 (K_Q 値) との関係を示す。

図 1-3 に示すとおり、想定欠陥深さは最大板厚 14mm では板厚の 3 分の 1 程度、最小板厚 5mm では板厚の 2 分の 1 程度まで許容される。当該ほう素添加ステンレス鋼が衝撃荷重負荷時の破断に対して大きな裕度を有している

B-SUS304P-1 は、補足説明資料 1 図 5-2 に示す品質管理を行っており、許容欠陥寸法を超えるような欠陥を含む材料を使用しないことから問題ない。

- (a) 想定欠陥：一様深さの表面き裂（線状欠陥）
- (b) 荷重：仮想的に設計降伏点（S_y=255 MPa）の曲げ応力を想定
- (c) 評価方法：図 1-2 に示す評価式

$$K = (F_m \sigma_m + F_b \sigma_b) \sqrt{\pi a}$$

$$\sigma_m = \frac{P}{2bt}, \quad \sigma_b = \frac{3M}{bt^2}$$

$$F_m = \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \frac{0.752 + 2.02 \frac{a}{t} + 0.37 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2t}\right)\right]^3}{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}$$

$$F_b = \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \frac{0.923 + 0.199 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2t}\right)\right]^4}{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}$$

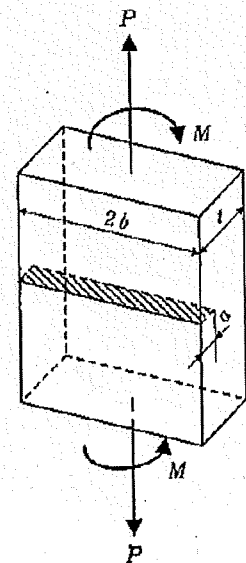


図 1-2 許容欠陥寸法評価モデル及び評価式⁽¹⁾

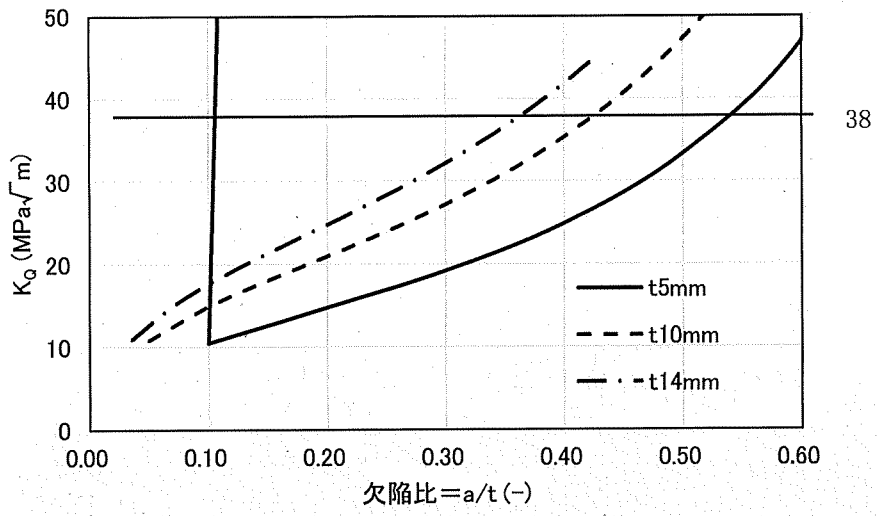


図 1-3 想定欠陥深さと破壊じん性値 (K_Q 値) との関係

5. 引用文献

- (1) 小林英男ら,「構造健全性評価ハンドブック」, 共立出版, (2005)

添付書類 8-3

トランニオンの強度に関する説明書

添付書類 8-3-1

トランニオンの応力解析の方針

目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	2
3. 記号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析対象	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 許容応力	6
6. 応力解析の手順	7
6.1 解析手順の概要	7
6.2 荷重条件の選定	7
6.3 応力計算と評価	7
6.3.1 応力計算の方法	7
6.3.2 応力の評価	7
6.3.3 数値の丸め方	8
7. 引用文献	8

図表目次

図 5-1	応力解析対象	9
図 6-1	トラニオンの応力解析フロー図	10
表 4-1	トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	11
表 5-1	代表事象	12
表 6-1	トラニオン用材料の許容応力	13
表 6-2	数値の丸め方一覧表	15

1. 概要

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要な容器等の材料及び構造は「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）第14条に規定されており，適切な材料を使用し，十分な構造及び強度を有することが要求されている。

本書は，HDP-69B(B)型のトラニオンに関する応力解析の方針を述べるものである。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

トランニオンの強度評価基準については、(社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)を適用する。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び「添付書類8-3-2 トラニオンの応力計算書」（以下「応力計算書」という。）において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

記号	記号の説明	単位
A	評価位置の断面積	mm ²
a _k	支点Oから固定装置⑥のトラニオンへの荷重作用位置（固定金具中心）までの距離	mm
a _h	支点Oから固定装置⑥のトラニオンへの荷重作用位置（固定金具中心）までの距離	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
C _S	供用状態Aの貯蔵時の状態において、S _d *地震力が作用する場合の供用状態	—
d _i	評価位置におけるトラニオン内径	mm
d _o	評価位置におけるトラニオン外径	mm
D _S	供用状態Aの貯蔵時の状態において、S _s 地震力が作用する場合の供用状態	—
E	縦弾性係数	MPa
E ₀	設計疲労線図の縦弾性係数	MPa
F ₁	下部トラニオン固定装置の初期締付け力	N
F _m	トラニオンに作用する荷重	N
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _t *	許容引張応力* ¹	MPa
f _s *	許容せん断応力* ¹	MPa
f _c *	許容圧縮応力* ¹	MPa

注記*1: f_t, f_s, f_c, f_b, f_pを算出する際に金属キャスク構造規格 MCD-3311.1(1)a.の本文中S_yとあるのを1.2S_yと読み替えて算出した値

記号	記号の説明	単位
f_b^*	許容曲げ応力* ¹	MPa
f_p^*	許容支圧応力* ¹	MPa
G	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G_1	水平方向加速度	m/s ²
G_2	鉛直方向加速度	m/s ²
h_{CG}	HDP-69B(B)型の底面から重心までの高さ	mm
K_r	表面粗さによる応力集中係数	—
K_t	評価位置の段付き部の応力集中係数	—
L	評価位置と荷重作用位置との距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
m_1	吊上げ時における HDP-69B(B)型の質量	kg
m_2	貯蔵時における HDP-69B(B)型の質量	kg
N_a	許容繰返し回数	—
N_{c1}	吊上げ事象の繰返し回数	—
S	ピーク応力強さ	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力の いずれか大きい方	—
S_d	繰返しピーク応力強さ	MPa
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
S_y	設計降伏点	MPa
U_f	疲労累積係数	—
Z	評価位置の断面係数	mm ³
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	評価位置に発生する曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力 (絶対値)	MPa
${}_t\sigma_b$	引張側曲げ応力 (絶対値)	MPa
σ_c	評価位置に発生する圧縮応力 (絶対値)	MPa
σ_T	評価位置に発生する組合せ応力	MPa
σ_t	評価位置に発生する引張応力	MPa
τ	評価位置に発生するせん断応力	MPa

注記*1: f_t , f_s , f_c , f_b , f_p を算出する際に金属キャスク構造規格 MCD-3311.1(1)a. の本文中 S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値

4. 設計条件

トラニオンは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

HDP-69B(B)型には、上部に2対、下部に2対のトラニオンが取り付けられている。トラニオンに関する応力計算の基本条件を以下に示す。

最高使用温度	130 °C* ¹
トラニオンの材質	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)
吊上げ時における HDP-69B(B)型の質量	120200 kg
貯蔵時における HDP-69B(B)型の質量	118300 kg

注記*1：最高使用温度は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す解析結果から得られた温度を保守側に設定した値である。

4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内における選定事象を以下に示す。

設計事象	供用状態	使用済燃料貯蔵施設内における選定事象* ¹
I	A	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵（貯蔵時） ・金属キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時） ・搬送台車による搬送（台車搬送時） ・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）
II	B	<ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスクの支持脚への衝突（支持脚への衝突時） ・金属キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時） ・搬送台車による搬送中の急停止（搬送中の急停止時）
I + S _d * ¹	C _s	・ S _d * ¹ 地震時（貯蔵時（S _d * ¹ 地震力が作用する場合））
I + S _s	D _s	・ S _s 地震時（貯蔵時（S _s 地震力が作用する場合））

注記*1：本書及び応力計算書において、事象を（ ）内の呼称とする場合がある。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表4-1に示す。応力解析に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2節で示した使用済燃料貯蔵施設内における選定事象のうち、表5-1に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析対象

応力解析の対象は、次のとおりである（図5-1参照）。

(1) トラニオン

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 許容応力

各供用状態における許容値基準は、金属キャスク構造規格 MCD-3300による。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

6.1 解析手順の概要

トラニオンの応力解析フローを図6-1に示す。

トラニオンの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の2つである。

a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含むHDP-69B(B)型（吊上げ時、支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時においては三次蓋を含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

b. 熱荷重

(2) 上部トラニオン2個には、吊上げ時において吊上げ荷重が作用する。また、下部トラニオン2個には、支持脚への衝突時において鉛直方向加速度による荷重が作用する。下部トラニオン4個には、貯蔵時において地震力が作用する場合の鉛直方向荷重及び水平方向荷重が作用する。

なお、荷重作用位置は荷重支持面の中央部とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価位置をとる。応力評価位置は、応力計算書に示す。

(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

6.3.2 応力の評価

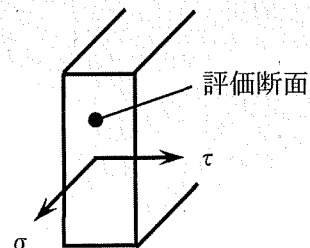
応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力

トラニオン用材料の許容応力を表6-1に示す。



(1) トラニオンの応力評価

トラニオンの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-3310 に従い以下の項目を評価する。

- a. 一次応力
- b. 一次+二次応力
- c. 繰返し荷重の評価

6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

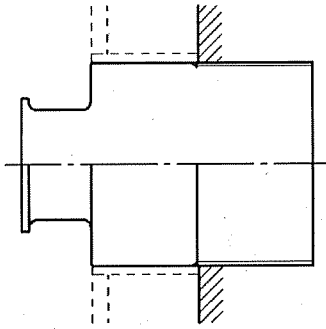
また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表6-2に示す。

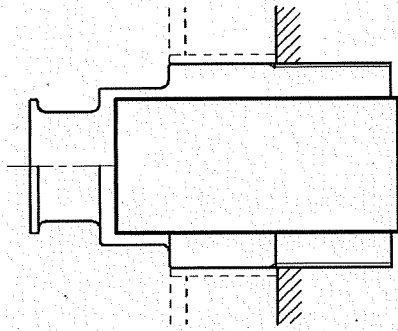
7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

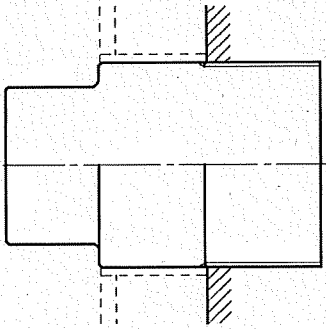
- (1) The American Society of Mechanical Engineers, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2015 Edition", Section VIII Division3 (2015)
- (2) 西田正孝, 「応力集中 増補版」, 森北出版(株) (1973)



(a) 上部トラニオン (0° , 180°)



(b) 上部, 下部トラニオン (90° , 270°)



(c) 下部トラニオン (0° , 180°)

図 5-1 応力解析対象

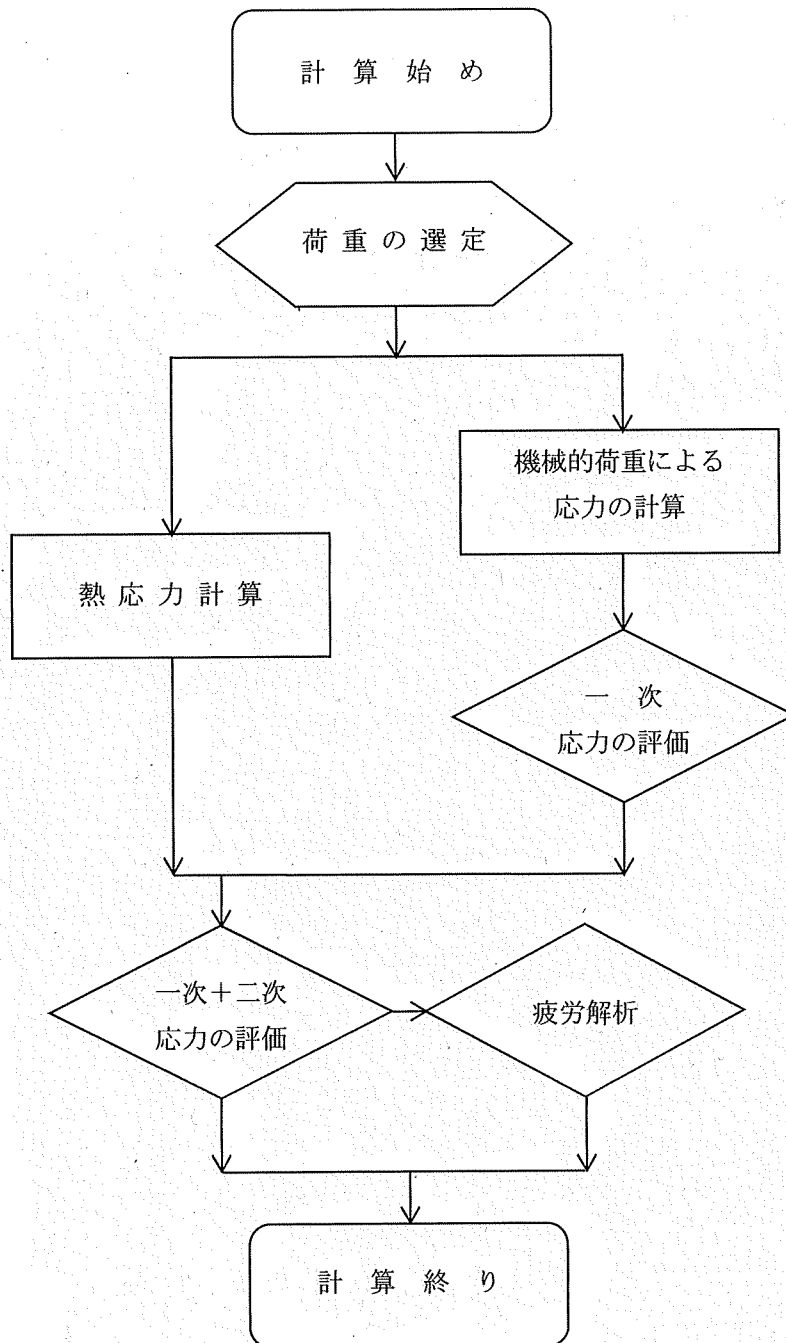


図 6-1 トラニオンの応力解析フロー図

表 4-1 トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計 事象	供用 状態	評価事象	荷 重					
			自重 による 荷重	固 縛 荷 重	吊 上 げ 荷 重	衝 撃 荷 重	熱 荷 重 *1	地 震 荷 重
I	A	貯蔵時	○	○	—	—	○	—
		吊上げ時	—*2	—	○	—	○	—
II	B	衝撃荷重作用時	—*2	—	—	○	○	—
$I + S_d^*$	C_s	S_d^* 地震力が作用する場合	○	○	—	—	—	○
$I + S_s$	D_s	S_s 地震力が作用する場合	○	○	—	—	—	○

注記*1：密封容器の熱膨張により生じる荷重に限る。

*2：本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

表 5-1 代表事象

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
I	A	貯蔵時	<ul style="list-style-type: none"> ・準備作業時 ・台車搬送時 	<ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・トラニオン固定ボルトの初期締付け力 ・熱荷重 	—
		吊上げ時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・吊上げ荷重 鉛直方向加速度（下方向）：1.3G（自重考慮） ・熱荷重 	荷重条件が最も厳しいため、代表事象を吊上げ時とする。
II	B	支持脚への衝突時	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵架台への衝突時 ・搬送中の急停止時 	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃荷重 鉛直方向加速度（下方向）：2.5G（自重考慮） ・熱荷重 	荷重条件が最も厳しいため、代表事象を支持脚への衝突時とする。
I + S _d *	C _s	貯蔵時 （S _d *地震力が作用する場合）	—	<ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・トラニオン固定ボルトの初期締付け力 ・地震力*2 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G 	—
I + S _s	D _s	貯蔵時 （S _s 地震力が作用する場合）	—	<ul style="list-style-type: none"> ・自重 ・トラニオン固定ボルトの初期締付け力 ・地震力 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G 	—

注記*1：本事象について応力解析を行う。

*2：より高い地震力であるS_s地震力を保守的に設定する。

表 6-1 トライオン用材料の許容応力 (1/2)

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力*3	
			ステンレス鋼	
			SUS630 H1150	許容値基準
供用状態 A及びB	一次 応力 *1	引張応力	—	f_t
		圧縮応力	—	f_c
		せん断応力	227	f_s
		曲げ応力	394	f_b
		支圧応力	—	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力	—	$3f_t$
		せん断応力	682	$3f_s$
		曲げ応力	1182	$3f_b$
		支圧応力	—	$1.5f_p$
		座屈応力	—	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$
供用状態 C _s	一次 応力 *1	引張応力	—	$1.5f_t$
		圧縮応力	—	$1.5f_c$
		せん断応力	341	$1.5f_s$
		曲げ応力	591	$1.5f_b$
		支圧応力	—	$1.5f_p$
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力*2	—	$3f_t$
		せん断応力*2	682	$3f_s$
		曲げ応力*2	1182	$3f_b$
		支圧応力	—	$1.5f_p$
		座屈応力	—	$1.5f_b, 1.5f_s$ 又は $1.5f_c$

注記*1 : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c + c\sigma_b}{f_c} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、供用状態A及びBの一次応力については上式による。供用状態C_sの一次応力の場合、分母の f_c 、 f_b 、 f_t は $1.5f_c$ 、 $1.5f_b$ 、 $1.5f_t$ とする。

*2 : 地震力のみによる全振幅について評価する。

*3 : 評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

表 6-1 トラニオン用材料の許容応力 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力*3	
			ステンレス鋼	
			SUS630 H1150	許容値基準
供用状態 D _s	一次 応力 *1	引張応力	—	1.5 f _t *
		圧縮応力	—	1.5 f _c *
		せん断応力	341	1.5 f _s *
		曲げ応力	591	1.5 f _b *
		支圧応力	—	1.5 f _p *
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力*2	—	3 f _t
		せん断応力*2	682	3 f _s
		曲げ応力*2	1182	3 f _b
		支圧応力	—	1.5 f _p *
		座屈応力	—	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c}{1.5f_c^*} + \frac{c\sigma_b}{1.5f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{1.5f_t^*} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{1.5f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{1.5f_b^*} \leq 1$$

*2：地震力のみによる全振幅について評価する。

*3：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

表 6-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
応力の計算値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
加速度	m/s ²	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
断面係数	mm ³	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

添付書類 8-3-2

トランニオンの応力計算書

目 次

1. 概要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価位置	2
2.2 貯蔵時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 応力計算	2
2.3 吊上げ時	3
2.3.1 荷重条件	3
2.3.2 応力計算	3
2.4 支持脚への衝突時	5
2.4.1 荷重条件	5
2.4.2 応力計算	5
2.5 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	7
2.5.1 荷重条件	7
2.5.2 応力計算	7
2.6 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	8
2.6.1 荷重条件	8
2.6.2 応力計算	8
3. 応力の評価	9
3.1 一次応力の評価	9
3.2 一次+二次応力の評価	9
4. 繰返し荷重の評価	10

図表目次

図 1-1	トラニオンの形状・寸法・材料・応力評価位置	11
図 2-1	地震時に作用する荷重の評価モデル	12
表 2-1	下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力の 計算条件及び計算結果（貯蔵時）	13
表 2-2	下部トラニオンの評価位置②に発生する曲げ応力の 計算条件及び計算結果（貯蔵時）	13
表 2-3	上部トラニオンの評価位置①に発生するせん断応力の 計算条件及び計算結果（吊上げ時）	14
表 2-4	上部トラニオンの評価位置①に発生する曲げ応力の 計算条件及び計算結果（吊上げ時）	14
表 2-5	上部トラニオンの評価位置①に発生する組合せ応力の 計算結果（吊上げ時）	15
表 2-6	下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力の 計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）	16
表 2-7	下部トラニオンの評価位置③に発生する曲げ応力の 計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）	16
表 2-8	下部トラニオンの評価位置②に発生する曲げ応力の 計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）	17
表 2-9	下部トラニオンの評価位置②に発生する組合せ応力の 計算結果（支持脚への衝突時）	17
表 2-10	下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））	18
表 2-11	下部トラニオンの評価位置②に発生する曲げ応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））	18
表 2-12	下部トラニオンの評価位置②に発生する組合せ応力の計算結果 （貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））	19
表 2-13	下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力及び曲げ応力 （一次＋二次応力）の計算結果 （貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））	19
表 3-1	トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）	20
表 3-2	トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態 C_s 及び D_s ）	21

表 4-1	上部トラニオンの評価位置①に発生する繰返しピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	22
表 4-2	トラニオンの疲労累積係数	22

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型のトラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本書で評価するトラニオンの形状・寸法・材料を図1-1に示す。

1.2 計算結果

計算結果を表3-1及び表3-2に示す。

なお、応力評価位置については、評価上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。

表中の「—」は、評価すべき応力が発生しない、又は評価上厳しくないため、評価を省略している。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 応力計算

2.1 応力評価位置

トラニオンの応力評価位置を図1-1に示す。

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重
- ・下部トラニオン固定装置の初期締付け力
- ・熱荷重

2.2.2 応力計算

(1) 下部トラニオン

a. 一次応力

一次応力として評価すべき荷重（自重）の影響は無視できるため、評価を省略する。

b. 一次+二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、熱荷重の考慮は不要である。

(a) せん断応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。下部トラニオン固定装置の初期締付け力により発生するせん断応力（ τ ）は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_m}{A} \\ F_m &= F_1 \\ A &= \frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

- F_m : トラニオンに作用する荷重 (N)
- F_1 : 下部トラニオン固定装置の初期締付け力 (= 1.300×10^6 N)
- A : 評価位置の断面積 (mm^2)
- d_o : 評価位置におけるトラニオン外径 (= 200 mm)
- d_i : 評価位置におけるトラニオン内径 (= mm)

計算条件及び計算結果を表2-1に示す。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。下部トラニオン固定装置の初期締付け力により発生する曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= F_m \cdot L \\ Z &= \frac{\pi}{32 d_o} (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : 評価位置の断面係数 (mm³)
- F_m : (2.1)式と同じ
- L : 評価位置と荷重作用位置との距離 (=90 mm)
- d_o : 2.2.2(1)b. (a)と同じ
- d_i : 2.2.2(1)b. (a)と同じ

計算条件及び計算結果を表2-2に示す。

2.3 吊上げ時

2.3.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・吊上げ荷重 (自重を含む。)
- ・熱荷重

2.3.2 応力計算

(1) 上部トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置①である。吊上げ荷重により発生するせん断応力 (τ) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_m}{A} \\ F_m &= \frac{m_1}{2} \cdot G_2 \\ A &= \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

- F_m : トラニオンに作用する荷重 (N)
- m_1 : 吊上げ時における HDP-69B(B)型の質量 (=120200 kg)
- G_2 : 鉛直方向加速度 (=1.3G)
- A : 評価位置の断面積 (mm²)
- d_o : 評価位置におけるトラニオン外径 (=200 mm)
- d_i : 評価位置におけるトラニオン内径 (= mm)

計算条件及び計算結果を表2-3に示す。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置①である。吊上げ荷重により発生する曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= F_m \cdot L \\ Z &= \frac{\pi}{32 d_o} (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
- F_m : (2.3)式と同じ
- L : 評価位置と荷重作用位置との距離 (=150 mm)
- Z : 評価位置の断面係数 (mm³)
- d_o : 2.3.2(1)a. (a)と同じ
- d_i : 2.3.2(1)a. (a)と同じ

計算条件及び計算結果を表2-4に示す。

(c) 組合せ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置①である。曲げ応力 (σ_b) とせん断応力 (τ) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、

σ_b : (2.4)式と同じ

τ : (2.3)式と同じ

計算条件及び計算結果を表2-5に示す。

b. 一次+二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、トラニオンに発生する一次+二次応力は、2.3.2(1)a.と同様である。

2.4 支持脚への衝突時

2.4.1 荷重条件

支持脚への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・衝撃荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

2.4.2 応力計算

(1) 下部トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。衝撃荷重により発生するせん断応力 (τ) は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$
$$F_m = \frac{m_1}{2} \cdot G_2$$

(2.6)

ここで、

F_m : トラニオンに作用する荷重 (N)

m_1 : 2.3.2(1)a. (a)と同じ

G_2 : 鉛直方向加速度 (=2.5G)

A : 2.2.2(1)b. (a)と同じ

計算条件及び計算結果を表2-6に示す。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置③である。衝撃荷重により発生する曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= F_m \cdot L \\ Z &= \frac{\pi}{32 d_o} (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
- F_m : (2.6)式と同じ
- L : 評価位置と荷重作用位置との距離 (=197.5 mm)
- Z : 評価位置の断面係数 (mm³)
- d_o : 評価位置におけるトラニオン外径 (=260 mm)
- d_i : 評価位置におけるトラニオン内径 (= mm)

計算条件及び計算結果を表2-7に示す。

(c) 組合せ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。衝撃荷重により発生する曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= F_m \cdot L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
- F_m : (2.6)式と同じ
- L : 評価位置と荷重作用位置との距離 (=57.5 mm)
- Z : 2.2.2(1)b. (b)と同じ

計算条件及び計算結果を表2-8に示す。

曲げ応力 (σ_b) とせん断応力 (τ) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、

- σ_b : (2.8)式と同じ
- τ : (2.6)式と同じ

計算条件及び計算結果を表2-9に示す。

b. 一次+二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、トラニオンに発生する一次+二次応力は、2.4.2(1)a.と同様である。

2.5 貯蔵時 (S_d*地震力が作用する場合)

2.5.1 荷重条件

貯蔵時においてS_d*地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

- ・地震力
- ・自重
- ・下部トラニオン固定装置の初期縮付け力

2.5.2 応力計算

(1) 下部トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力 (τ) は、次式で計算する。なお、地震力により下部トラニオンに作用する荷重 (F_m) は、図2-1に示すように支点Oを回転中心とする回転モーメントの釣合いより求める。

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_h)}{a_k + 2 \cdot \frac{a_h^2}{a_k}} \quad \dots \dots \dots (2.10)$$

ここで、

- F_m : トラニオンに作用する荷重 (N)
- m_2 : 貯蔵時における HDP-69B(B)型の質量 (=118300 kg)
- G_1 : 水平方向加速度 (m/s²) ただし、 $G_1 = C_H \cdot G$
- G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s²) ただし、 $G_2 = (1 - C_V) \cdot G$
- C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.87)
- h_{CG} : HDP-69B(B)型の底面から重心までの高さ (=2672 mm)
- a_k : 支点Oから固定装置②のトラニオンへの荷重作用位置 (固定金具中心) までの距離 (=2288 mm)
- a_h : 支点Oから固定装置②のトラニオンへの荷重作用位置 (固定金具中心) までの距離 (=990 mm)
- A : 2.2.2. (1)b. (a)と同じ

計算条件及び計算結果を表2-10に示す。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$
$$M = F_m \cdot L$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

F_m : (2.10)式と同じ

L : 2.2.2. (1)b. (b)と同じ

Z : 2.2.2. (1)b. (b)と同じ

計算条件及び計算結果を表2-11に示す。

(c) 組合せ応力

最大応力が発生する位置は、図1-1に示す評価位置②である。曲げ応力 (σ_b) とせん断応力 (τ) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで、

σ_b : (2.11)式と同じ

τ : (2.10)式と同じ

計算条件及び計算結果を表2-12に示す。

b. 一次+二次応力

(a) せん断応力

地震力によるせん断応力 (τ) の全振幅は、(2.10)式で計算したせん断応力 (τ) の2倍とする。

(b) 曲げ応力

地震力による曲げ応力 (σ_b) の全振幅は、(2.11)式で計算した曲げ応力 (σ_b) の2倍とする。

計算条件及び計算結果を表2-13に示す。

2.6 貯蔵時 (S_s地震力が作用する場合)

2.6.1 荷重条件

貯蔵時においてS_s地震力が作用する場合の荷重条件はS_s地震力とS_d*地震力を同じとしているため、2.5.1項と同様である。

2.6.2 応力計算

計算方法及び計算結果は、2.5.2項と同様である。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表3-1及び表3-2に示す。

表3-1及び表3-2に示すように、各供用状態における一次応力は金属キャスク構造規格 MCD-3311の規定を満足する。

3.2 一次＋二次応力の評価

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表3-1及び表3-2に示す。

表3-1及び表3-2に示すように、各供用状態における一次＋二次応力は金属キャスク構造規格 MCD-3312の規定を満足する。

4. 繰返し荷重の評価

金属キャスク構造規格 MCD-3313に従い、吊上げ時における疲労評価を行う。吊上げ事象の繰返し回数は、200回とする。設計疲労線図は、ASMEのFigure KD-320.4Mを適用する。

上部トラニオンの評価位置①に生じる繰返しピーク応力強さ (S_e) は以下で計算する。

$$S_e = \frac{1}{2} \cdot K_t \cdot K_r \cdot S \cdot \frac{E_0}{E} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \dots \dots \dots (4.1)$$

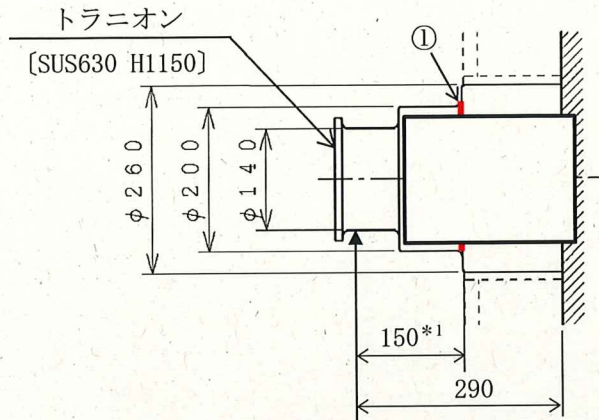
$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \tau^2}$$

ここで、

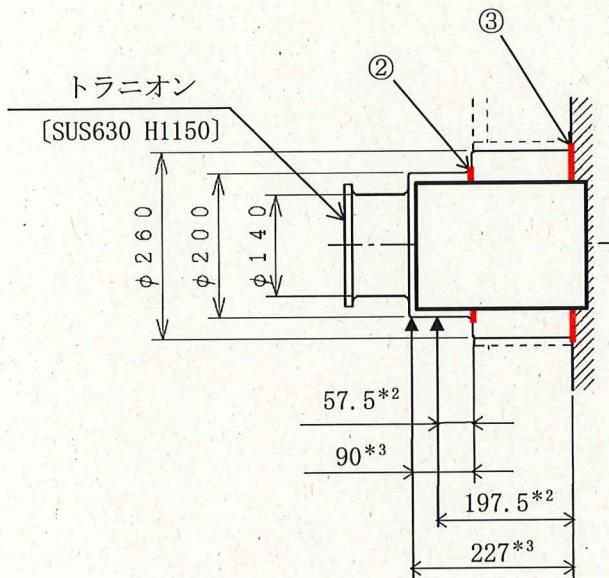
- K_t : 評価位置の段付き部の応力集中係数 (=2.1⁽²⁾)
- K_r : 表面粗さによる応力集中係数 (=1.3⁽¹⁾)
- S : ピーク応力強さ (MPa)
- τ : (2.3)式と同じ
- σ_b : (2.4)式と同じ
- E_0 : 設計疲労線図の縦弾性係数 (=2.00×10⁵ MPa⁽¹⁾)
- E : 縦弾性係数 (=1.88×10⁵ MPa)

繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果を表4-1に示す。

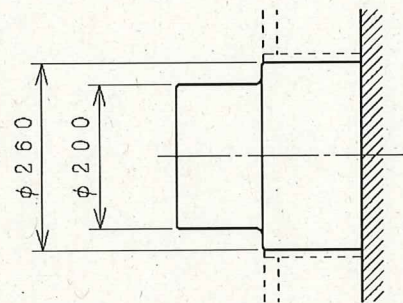
次に、ASMEのFigure KD-320.4Mより、繰返しピーク応力強さ (S_e) に対する許容繰返し回数 (N_a) を求める。吊上げ事象の繰返し回数 (N_{c1}) と許容繰返し回数 (N_a) との比は表4-2に示すとおりとなり、疲労累積係数 (U_f) は1.0以下となるため、金属キャスク構造規格 MCD-3313の規定を満足する。



上部トラニオン (90° - 270° 側)



下部トラニオン (90° - 270° 側)



下部トラニオン (0° - 180° 側) *4

注記*1 : 吊上げ時の荷重作用位置までの距離

*2 : 支持脚への衝突時の荷重作用位置までの距離

*3 : 貯蔵時の荷重作用位置までの距離

*4 : いずれの下部トラニオンも同様の荷重を受けるが、断面の小さい90° - 270° 側のトラニオンを評価対象とする。

(単位 : mm)

[] : 材料

①~③ : 応力評価位置

図 1-1 トラニオンの形状・寸法・材料・応力評価位置

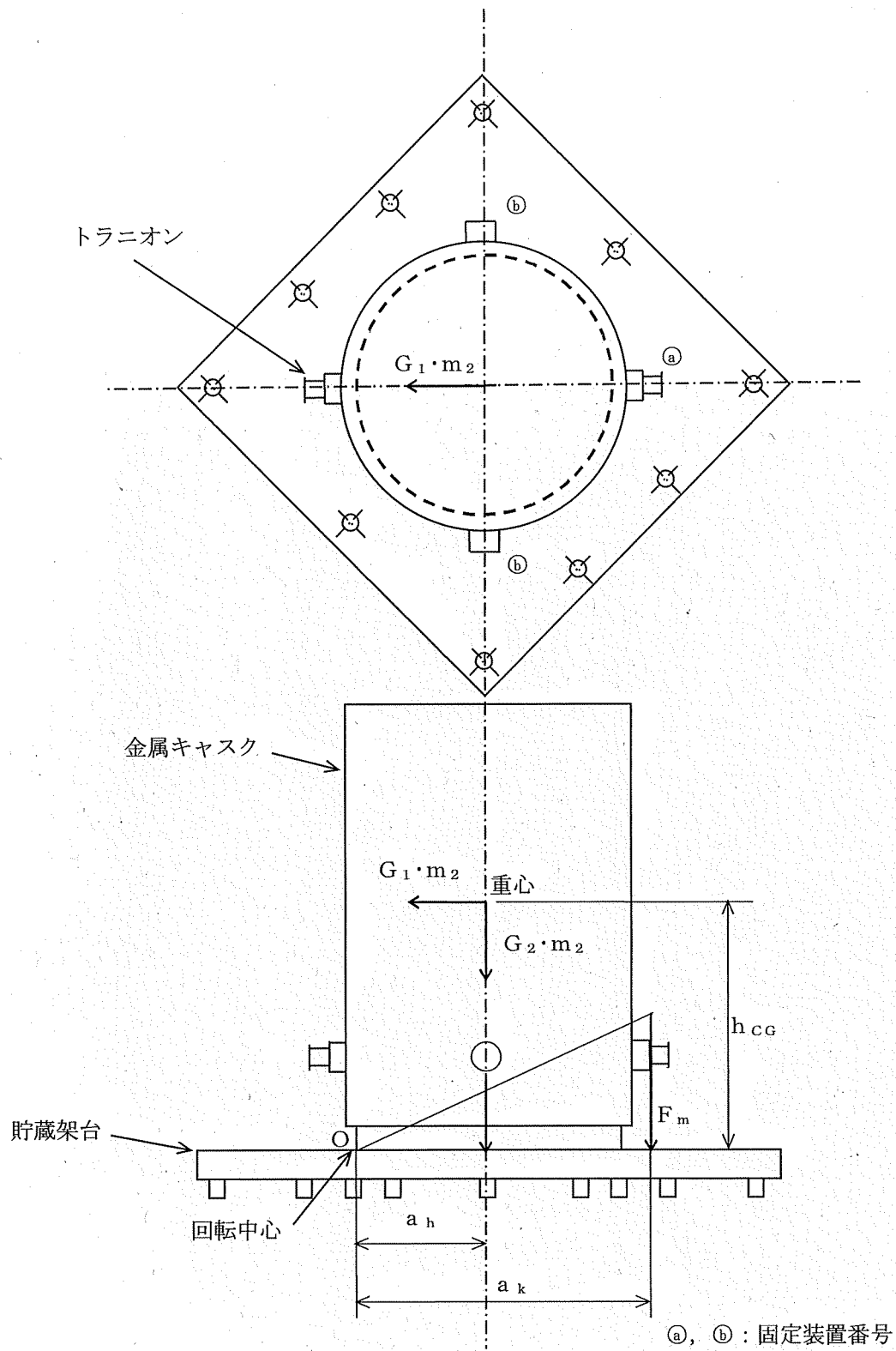


図 2-1 地震時に作用する荷重の評価モデル

表 2-1 下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力の
計算条件及び計算結果（貯蔵時）

項目	記号	数値*1	単位
トラニオンに作用する荷重	F_m	1.300×10^6	N
下部トラニオン固定装置の 初期締付け力	F_1	1.300×10^6	N
評価位置の断面積	A		mm ²
評価位置におけるトラニオン外径	d_o	200	mm
評価位置におけるトラニオン内径	d_i		mm
評価位置に発生するせん断応力	τ	86	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-2 下部トラニオンの評価位置②に発生する曲げ応力の
計算条件及び計算結果（貯蔵時）

項目	記号	数値*1	単位
曲げモーメント	M	1.170×10^8	N・mm
評価位置の断面係数	Z		mm ³
評価位置におけるトラニオン外径	d_o	200	mm
評価位置におけるトラニオン内径	d_i		mm
トラニオンに作用する荷重	F_m	1.300×10^6	N
評価位置と荷重作用位置との距離	L	90	mm
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	204	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-3 上部トラニオンの評価位置①に発生するせん断応力の
計算条件及び計算結果（吊上げ時）

項目	記号	数値*1	単位
トラニオンに作用する荷重	F_m	7.662×10^5	N
吊上げ時における HDP-69B(B)型の質量	m_1	120200	kg
評価位置の断面積	A		mm ²
評価位置におけるトラニオン外径	d_o	200	mm
評価位置におけるトラニオン内径	d_i		mm
鉛直方向加速度	G_2	1.3G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
評価位置に発生するせん断応力	τ	51	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-4 上部トラニオンの評価位置①に発生する曲げ応力の
計算条件及び計算結果（吊上げ時）

項目	記号	数値*1	単位
曲げモーメント	M	1.149×10^8	N・mm
評価位置の断面係数	Z		mm ³
評価位置におけるトラニオン外径	d_o	200	mm
評価位置におけるトラニオン内径	d_i		mm
トラニオンに作用する荷重	F_m	7.662×10^5	N
評価位置と荷重作用位置との距離	L	150	mm
吊上げ時における HDP-69B(B)型の質量	m_1	120200	kg
鉛直方向加速度	G_2	1.3G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	201	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-5 上部トラニオンの評価位置①に発生する組合せ応力の
計算結果 (吊上げ時)

項目	記号	数値*1	単位
評価位置に発生するせん断応力	τ	51	MPa
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	201	MPa
評価位置に発生する組合せ応力	σ_T	219	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-6 下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力の
計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）

項目	記号	数値*1	単位
トラニオンに作用する荷重	F_m	1.473×10^6	N
吊上げ時における HDP-69B(B)型の質量	m_1	120200	kg
評価位置の断面積	A		mm ²
鉛直方向加速度	G_2	2.5G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
評価位置に発生するせん断応力	τ	98	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-7 下部トラニオンの評価位置③に発生する曲げ応力の
計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）

項目	記号	数値*1	単位
曲げモーメント	M	2.910×10^8	N・mm
評価位置の断面係数	Z		mm ³
評価位置におけるトラニオン外径	d_o	260	mm
評価位置におけるトラニオン内径	d_i		mm
トラニオンに作用する荷重	F_m	1.473×10^6	N
評価位置と荷重作用位置との距離	L	197.5	mm
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	190	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-8 下部トラニオンの評価位置②に発生する曲げ応力の
計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）

項目	記号	数値*1	単位
曲げモーメント	M	8.472×10^7	N・mm
評価位置の断面係数	Z		mm ³
トラニオンに作用する荷重	F _m	1.473×10^6	N
評価位置と荷重作用位置との距離	L	57.5	mm
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	148	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-9 下部トラニオンの評価位置②に発生する組合せ応力の
計算結果（支持脚への衝突時）

項目	記号	数値*1	単位
評価位置に発生するせん断応力	τ	98	MPa
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	148	MPa
評価位置に発生する組合せ応力	σ_T	224	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-10 下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力の
計算条件及び計算結果（貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））

項目	記号	数値*1	単位
水平方向加速度	G_1	1.40G	m/s^2
鉛直方向加速度	G_2	0.13G	m/s^2
水平方向設計震度	C_H	1.40	-
鉛直方向設計震度	C_V	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
HDP-69B(B)型の底面から重心までの高さ	h_{CG}	2672	mm
支点Oから固定装置④のトラニオンへの荷重作用位置（固定金具中心）までの距離	a_k	2288	mm
支点Oから固定装置⑥のトラニオンへの荷重作用位置（固定金具中心）までの距離	a_h	990	mm
トラニオンに作用する荷重	F_m	1.333×10^6	N
貯蔵時における HDP-69B(B)型の質量	m_2	118300	kg
評価位置の断面積	A		mm^2
評価位置に発生するせん断応力	τ	88	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-11 下部トラニオンの評価位置②に発生する曲げ応力の
計算条件及び計算結果（貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））

項目	記号	数値*1	単位
曲げモーメント	M	1.199×10^8	$N \cdot mm$
トラニオンに作用する荷重	F_m	1.333×10^6	N
評価位置の断面係数	Z		mm^3
評価位置と荷重作用位置との距離	L	90	mm
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	209	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-12 下部トラニオンの評価位置②に発生する組合せ応力の
計算結果 (貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値*1	単位
評価位置に発生するせん断応力	τ	88	MPa
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	209	MPa
評価位置に発生する組合せ応力	σ_T	259	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-13 下部トラニオンの評価位置②に発生するせん断応力及び曲げ応力
(一次+二次応力) の計算結果 (貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値*1	単位
評価位置に発生するせん断応力	τ	177	MPa
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	418	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

表 3-1 トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）

（単位：MPa）

部位	応力の種類		貯蔵時		吊上げ時		支持脚への衝突時		許容 応力
			計算値	評価 位置	計算値	評価 位置	計算値	評価 位置	
上部 トラ ニオン	一 次 応 力	せん断応力	—	—	51	①	—	—	227
		曲げ応力	—	—	201	①	—	—	394
		組合せ応力	—	—	219	①	—	—	394
	一 次 + 二 次 応 力	せん断応力	—	—	51	①	—	—	682
		曲げ応力	—	—	201	①	—	—	1182
	下部 トラ ニオン	一 次 応 力	せん断応力	—	—	—	—	98	②
曲げ応力			—	—	—	—	190	③	394
組合せ応力			—	—	—	—	224	②	394
一 次 + 二 次 応 力		せん断応力	86	②	—	—	98	②	682
		曲げ応力	204	②	—	—	190	③	1182

表 3-2 トラニオンの応力計算結果と許容応力（供用状態 C_s 及び D_s）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類	供用状態 C _s			供用状態 D _s			
		計算値	評価 位置	許容 応力	計算値	評価 位置	許容 応力	
下 部 ト ラ ニ オ ン	一 次 応 力	せん断応力	88	②	341	88	②	341
		曲げ応力	209	②	591	209	②	591
		組合せ応力	259	②	591	259	②	591
	一 次 + 二 次 応 力 <small>*1</small>	せん断応力	177	②	682	177	②	682
		曲げ応力	418	②	1182	418	②	1182

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 上部トラニオンの評価位置①に発生する繰返しピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値*1	単位
評価位置の段付き部の応力集中係数	K_t	2.1	—
表面粗さによる応力集中係数	K_r	1.3	—
ピーク応力強さ	S	225	MPa
評価位置に発生するせん断応力	τ	51	MPa
評価位置に発生する曲げ応力	σ_b	201	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_o	2.00×10^5	MPa
縦弾性係数	E	1.88×10^5	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_e	327	MPa

注記*1：計算は、桁数処理前の数値を使用

表 4-2 トラニオンの疲労累積係数

No.	S_e (MPa)	N_a	N_{c1}	N_{c1}/N_a
1	327	9.354×10^4	200	0.0022
疲労累積係数 $U_f = 0.0022$				

添付書類 8-4

外筒及び中性子遮蔽材カバーの強度に関する説明書

添付書類 8-4-1

外筒及び中性子遮蔽材カバーの応力解析の方針

目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	2
3. 記号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	7
4.1 基本仕様	7
4.2 設計事象	7
4.3 荷重の種類とその組合せ	8
5. 計算条件	8
5.1 解析対象とする事象	8
5.2 解析対象	8
5.3 形状及び寸法	8
5.4 許容応力	8
6. 応力解析の手順	9
6.1 解析手順の概要	9
6.2 荷重条件の選定	9
6.3 応力計算と評価	9
6.3.1 応力計算の方法	9
6.3.2 応力の評価	9
6.3.3 数値の丸め方	10
7. 引用文献	10

図表目次

図 5-1	外筒の応力解析対象	11
図 5-2	蓋部中性子遮蔽材カバーの応力解析対象	12
図 6-1	外筒の応力解析フロー図	13
表 4-1	設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	14
表 5-1	代表事象	15
表 6-1	外筒の許容応力	16
表 6-2	蓋部中性子遮蔽材カバーの許容応力	18
表 6-3	数値の丸め方一覧表	18

1. 概要

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要な容器等の材料及び構造は「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）第14条に規定されており、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有することが要求されている。

本書は、HDP-69B(B)型の外筒（端板含む。）及び中性子遮蔽材カバーに関する応力解析の方針を述べるものである。

なお、HDP-69B(B)型の中性子遮蔽材カバーのうち、本書は蓋部中性子遮蔽材カバーを対象とし、底部中性子遮蔽材カバーの応力解析の方針については、「添付書類8-1-1 密封容器の応力解析の方針」に示す。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

(1) 外筒

HDP-69B(B)型の外筒（端板を含む。）は、放射性物質の閉じ込め境界ではないが、自らが遮蔽体であると同時に、外筒内部に配置される中性子遮蔽材を保持する機能が求められる。類似の機能を持つ部材として、(社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」（以下「金属キャスク構造規格」という。）に示される中間胴があり、外筒の構造強度評価手法としては中間胴の規定を用いる。ただし、中間胴は密封容器を支持し、その損壊を防止する機能が要求されるため、密封容器との溶接部近接部分に対する特別な規定が設けられている（金属キャスク構造規格 MCD-3710）が、外筒においてはこの機能は要求されないため、当該規定は適用しない。

(2) 蓋部中性子遮蔽材カバー

HDP-69B(B)型の蓋部中性子遮蔽材カバーは、一次蓋の中性子遮蔽材を覆うカバーであり、一次蓋と二次蓋の間にヘリウムガスを封入して圧力を監視することから、圧力に対して十分な強度が求められる。このため、蓋部中性子遮蔽材カバーの構造強度評価手法としては、圧力荷重に対する評価要求が定められている(社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005 (2007年追補版含む。）」（以下「設計・建設規格」という。）のクラス3容器の規定を用いる。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び「添付書類 8-4-2 外筒及び中性子遮蔽材カバーの応力計算書」（以下「応力計算書」という。）において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りではない。

なお、応力計算書の字体及び大きさは、本書と異なる場合がある。

記号	記号の説明	単位
A_s	長方形板の面積	mm^2
A_o	伝熱フィン一區画当たりの外筒の面積	mm^2
A_1	外筒の水平方向断面積	mm^2
A_2	胴の水平方向断面積	mm^2
a	長方形板の一辺の長さ	mm
a_1	胴による拘束がない場合の熱膨張後の下部端板の外半径	mm
a_2	下部端板による拘束がない場合の熱膨張後の胴の外半径	mm
a_c	正方形板の一辺の長さ（蓋部中性子遮蔽材カバーの半径）	mm
a_f	最大の伝熱フィンピッチ幅	mm
b_1	胴による拘束がない場合の熱膨張後の下部端板の内半径	mm
b_2	下部端板による拘束がない場合の熱膨張後の胴の内半径	mm
C_H	水平方向設計震度	—
C_s	供用状態Aの貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用する場合の供用状態	—
C_v	鉛直方向設計震度	—
D_d	胴外径	mm
D_s	供用状態Aの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用する場合の供用状態	—
E_1	外筒・端板の縦弾性係数	MPa
E_2	胴の縦弾性係数	MPa
F_{THz}	外筒と胴の軸方向熱膨張差による熱荷重	N
f_t	許容引張応力	MPa
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa

記号	記号の説明	単位
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
f_t^*	許容引張応力*1	MPa
f_s^*	許容せん断応力*1	MPa
f_c^*	許容圧縮応力*1	MPa
f_b^*	許容曲げ応力*1	MPa
f_p^*	許容支圧応力*1	MPa
G	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
m_f	伝熱フィン一区画当たりの中性子遮蔽材と外筒の質量	kg
m_{a11}	外筒, 端板, 伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量	kg
P	圧力	MPa
p_1	中性子遮蔽材充填部内圧	MPa
p_2	中性子遮蔽材及び外筒の慣性力による分布荷重	MPa
p_3	蓋部中性子遮蔽材カバーの最高使用圧力	MPa
p_4	蓋部中性子遮蔽材カバーの自重による分布荷重	MPa
R ₀₀	外筒の外半径	mm
R ₁₀	外筒の内半径	mm
R ₀₁	下部端板の外半径	mm
R ₁₁	下部端板の内半径	mm
R ₀₂	胴の外半径	mm
R ₁₂	胴の内半径	mm
P _{THR}	熱荷重による下部端板付け根の径方向圧力	MPa
S	許容引張応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—

注記*1: f_t , f_s , f_c , f_b , f_p を算出する際に金属キャスク構造規格 MCD-3311.1(1)a.の本文中 S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値

記号	記号の説明	単位
S_y	設計降伏点	MPa
t	板厚	mm
t_o	外筒の板厚	mm
t_b	下部端板の板厚	mm
t_L	蓋部中性子遮蔽材カバーの板厚	mm
α_1	外筒・端板の平均熱膨張係数	mm/(mm \cdot °C)
α_2	胴の平均熱膨張係数	mm/(mm \cdot °C)
β	長方形板の最大応力の係数	—
β_1	同上(下部端板の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値)	—
β_2	同上(外筒の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値)	—
β_3	正方形板の最大応力の係数	—
ΔT_1	外筒・端板の常温との温度差	°C
ΔT_2	胴の常温との温度差	°C
η	継手効率	—
ν_1	外筒・端板のポアソン比	—
ν_2	胴のポアソン比	—
ρ_s	ステンレス鋼(SUS304)の基本質量	kg/mm/mm ²
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	長方形板に生じる最大曲げ応力	MPa
σ_{br}	長方形板に生じる最大曲げ応力(径方向応力)	MPa
$\sigma_{b\theta}$	長方形板に生じる最大曲げ応力(周方向応力)	MPa
$c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力(絶対値)	MPa
$t\sigma_b$	引張側曲げ応力(絶対値)	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_{THr}	熱荷重による径方向応力	MPa
σ_{THz}	熱荷重による軸方向応力	MPa
$\sigma_{TH\theta}$	熱荷重による周方向応力	MPa

記号	記号の説明	単位
τ	せん断応力	MPa
τ_{rz}	せん断応力（径方向に垂直な面の軸方向せん断応力）	MPa
τ_{THz}	熱荷重によるせん断応力（軸方向せん断応力）	MPa

4. 設計条件

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーは、以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

HDP-69B(B)型の外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに関する応力計算の基本条件を以下に示す。

外筒	材 料	炭素鋼 (SM400B)
	最高使用圧力	<input type="text"/> MPa
	最高使用温度	120 °C*1
蓋部中性子遮蔽材カバー	材 料	ステンレス鋼 (SUS304)
	最高使用圧力	0.4 MPa
	最高使用温度	110 °C*1

注記*1：最高使用温度は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す解析結果から得られた温度を保守側に設定した値である。

4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内における選定事象を以下に示す。

設計事象	供用状態	使用済燃料貯蔵施設内における選定事象*1
I	A	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵 (貯蔵時) ・ 金属キャスクの吊上げ, 吊下げ, 移動 (吊上げ時) ・ 搬送台車による搬送 (台車搬送時) ・ 貯蔵前作業及び搬出前作業 (準備作業時)
II	B	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクの支持脚への衝突 (支持脚への衝突時) ・ 金属キャスクの貯蔵架台への衝突 (貯蔵架台への衝突時) ・ 搬送台車による搬送中の急停止 (搬送中の急停止時)
I + S _d *	C _s	・ S _d *地震時 (貯蔵時 (S _d *地震力が作用する場合))
I + S _s	D _s	・ S _s 地震時 (貯蔵時 (S _s 地震力が作用する場合))

注記*1：本書及び応力計算書において、事象を () 内の呼称とすることがある。

内は商業機密のため、非公開とします。

4.3 荷重の種類とその組合せ

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-1 に示す。応力評価に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2節で示した使用済燃料貯蔵施設内における選定事象のうち、表5-1に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析対象

応力解析の対象は、次のとおりである。

- (1) 外筒 (図 5-1 参照)
- (2) 蓋部中性子遮蔽材カバー (図 5-2 参照)

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 許容応力

(1) 外筒

各供用状態における許容値基準は、金属キャスク構造規格 MCD-3720 による。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

(2) 蓋部中性子遮蔽材カバー

蓋部中性子遮蔽材カバーの形状は平板である。設計・建設規格 クラス 3 容器の規定において、PVD-3310 に最高使用圧力に対する平板の最小必要厚さを定める規定がある。この規定は、平板に圧力が作用した場合の最大曲げ応力値を $1.5S$ (S : 許容引張応力) に制限するという考え方に基づいているので、この規定の考え方を準用する。溶接部においては、設計・建設規格 クラス 3 容器の規定を参考にして継手効率を考慮する。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

6.1 解析手順の概要

外筒の応力解析フローを図 6-1 に示す。

外筒の応力解析は、想定される内圧、機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。一方、蓋部中性子遮蔽材カバーの応力解析は、想定される圧力に対して応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の3つである。

- a. 内圧
- b. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含むHDP-69B(B)型（吊上げ時、支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時においては三次蓋を含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

- c. 熱荷重

熱荷重は、各部に生じる温度変化及び温度勾配による荷重であり、「添付書類5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に記載する除熱解析の結果から得られるものをいう。

6.3.2 応力の評価

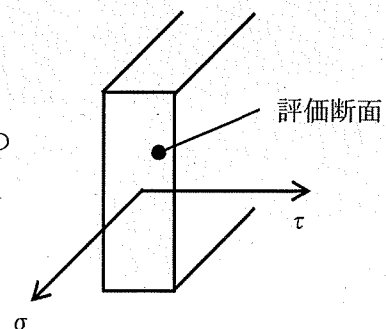
応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は以下のとおりである。ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力

外筒の許容応力を表 6-1 に、蓋部中性子遮蔽材カバーの許容応力を表 6-2 に示す。



(1) 外筒の応力評価

外筒の応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-3720 を準用し、以下の項目を評価する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力

(2) 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価

蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価は、設計・建設規格 PVD-3310 を準用し、以下の項目を評価する。

- a. 一次応力

6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) (社)日本機械学会、「機械工学便覧 新版」、丸善株式会社 (1987年)

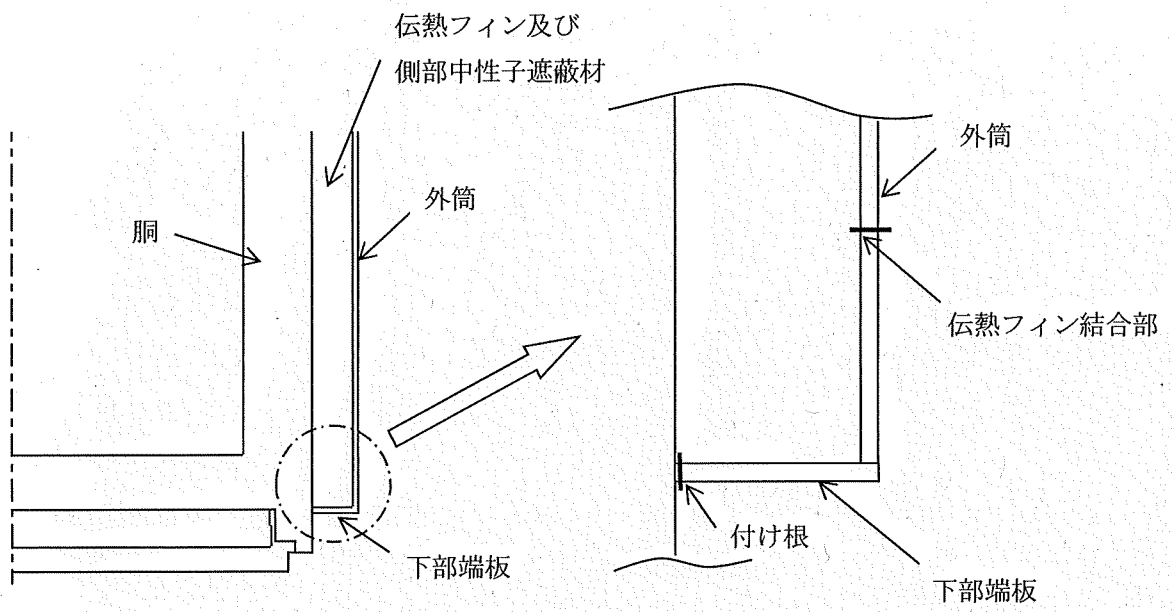


図 5-1 外筒の応力解析対象

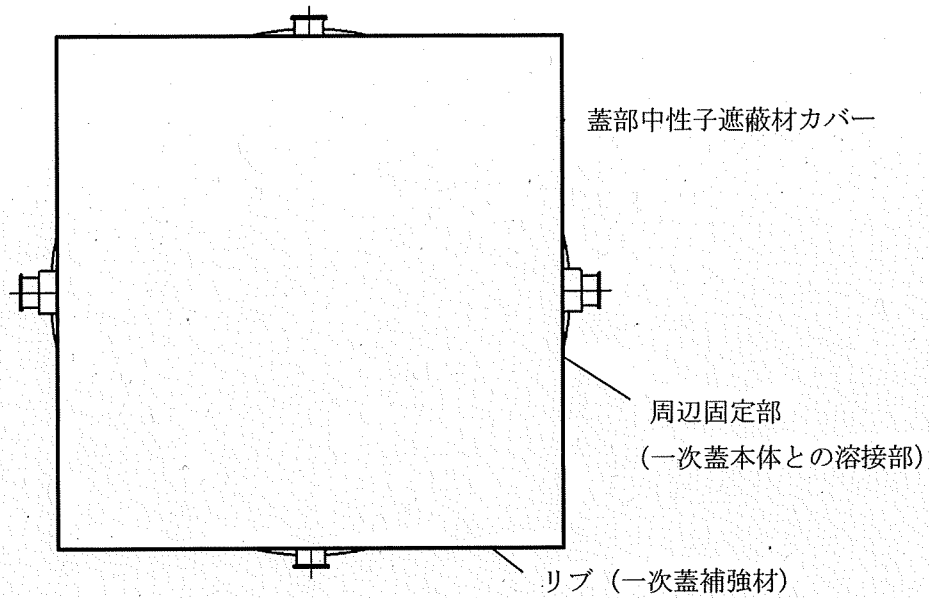


図 5-2 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力解析対象

内は商業機密のため、非公開とします。

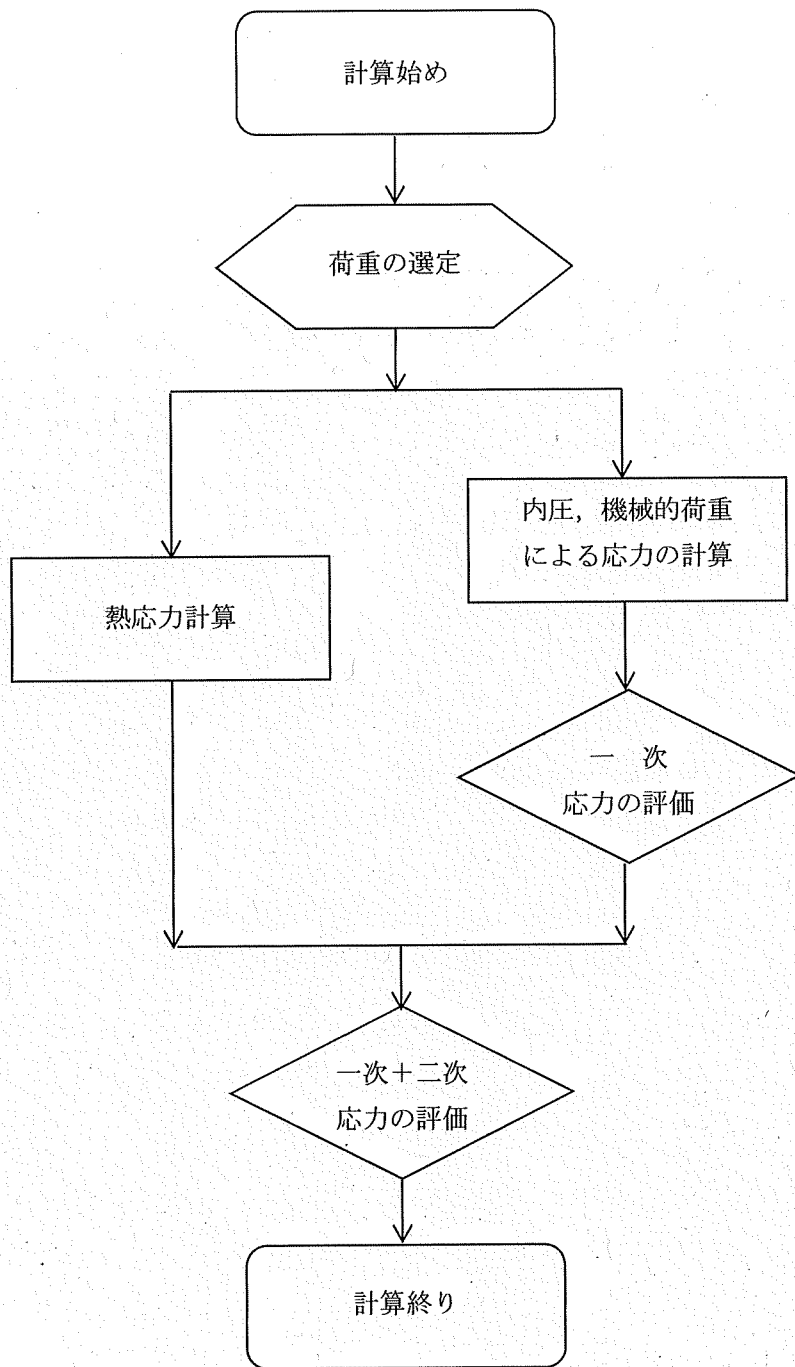


図 6-1 外筒の応力解析フロー図

表 4-1 設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計 事象	供用 状態	荷 重 評価事象*1	圧 力 に よ る 荷 重	自 重 に よ る 荷 重	吊 上 げ 時 荷 重	衝 撃 荷 重	熱 荷 重	地 震 荷 重
I	A	貯蔵時	○	○	—	—	○	—
		吊上げ時	○	—*2	○	—	○	—
II	B	衝撃荷重作用時	○	—*2	—	○	○	—
$I + S_d^*$	C_s	S_d^* 地震力が作用する場合	○	○	—	—	—	○
$I + S_s$	D_s	S_s 地震力が作用する場合	○	○	—	—	—	○

注記*1：蓋部中性子遮蔽材カバーの評価事象は、最高使用圧力時のみとする。

*2：本状態での自重による荷重は、吊上げ時荷重又は衝撃荷重の慣性力による荷重に含まれる。

表 5-1 代表事象

設計事象	供用状態	代表事象	包含される事象	荷重条件	備考
I 及び II	A 及び B	貯蔵架台への衝突時	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時 ・吊上げ時 ・台車搬送時 ・準備作業時 ・支持脚への衝突時 ・搬送中の急停止時 	<ul style="list-style-type: none"> ・内圧 ・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向（下方）：5G（自重考慮） ・熱荷重 	荷重条件が最も厳しいのは貯蔵架台への衝突時荷重
I + S _d *	C _s	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	<ul style="list-style-type: none"> ・内圧 ・自重 ・地震力 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G 	—
I + S _s	D _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	<ul style="list-style-type: none"> ・内圧 ・自重 ・地震力 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G 	—

表 6-1 外筒の許容応力 (1/2)

(単位 : MPa)

許容応力区分	応力の種類		許容応力*3	許容値基準
供用状態 A及びB	一次 応力 *1	引張応力	137	f_t
		圧縮応力	—	f_c
		せん断応力	79	f_s
		曲げ応力	137	f_b
		支圧応力	—	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力	412	$3f_t$
		せん断応力	238	$3f_s$
		曲げ応力	412	$3f_b$
		支圧応力	—	$1.5f_p$
		座屈応力	—	$1.5f_s$ 又は $1.5f_c$
供用状態 C _s	一次 応力 *1	引張応力	206	$1.5f_t$
		圧縮応力	—	$1.5f_c$
		せん断応力	119	$1.5f_s$
		曲げ応力	206	$1.5f_b$
		支圧応力	—	$1.5f_p$
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力*2	—	$3f_t$
		せん断応力*2	238	$3f_s$
		曲げ応力*2	412	$3f_b$
		支圧応力	—	$1.5f_p$
		座屈応力	—	$1.5f_c, 1.5f_b$ 又は $1.5f_s$

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合せた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c + c\sigma_b}{f_c} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ただし、供用状態C_sの一次応力の場合、分母の f_s, f_b, f_t は、 $1.5f_s, 1.5f_b, 1.5f_t$ とする。

*2：地震力のみによる全振幅について評価する。

*3：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

表 6-1 外筒の許容応力 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類		許容応力*3	許容値基準
供用状態 D _s	一次 応力 *1	引張応力	247	1.5 f _t *
		圧縮応力	—	1.5 f _c *
		せん断応力	142	1.5 f _s *
		曲げ応力	247	1.5 f _b *
		支圧応力	—	1.5 f _p *
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力*2	—	3 f _t
		せん断応力*2	238	3 f _s
		曲げ応力*2	412	3 f _b
		支圧応力	—	1.5 f _p *
		座屈応力	—	1.5 f _c , 1.5 f _b 又は 1.5 f _s

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合せた応力 (σ_T) は，引張応力に対する許容応力以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_c}{1.5f_c^*} + \frac{c\sigma_b}{1.5f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t\sigma_b - \sigma_c}{1.5f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t\sigma_b}{1.5f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c\sigma_b - \sigma_t}{1.5f_b^*} \leq 1$$

*2：地震力のみによる全振幅について評価する。

*3：評価すべき応力が発生しないか，又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

表 6-2 蓋部中性子遮蔽材カバーの許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力	許容値基準*1
最高使用圧力時 (設計条件)	一次 応力	曲げ応力	117	$1.5 \eta S$

注記*1： η は継手効率 (=0.65)

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	°C	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
平均熱膨張係数	mm/ (mm・°C)	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
許容応力	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
応力の計算値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
加速度	m/s ²	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

添付書類 8-4-2

外筒及び中性子遮蔽材カバーの応力計算書

目 次

1. 概要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価位置	2
2.2 外筒の応力計算	3
2.2.1 貯蔵架台への衝突時	3
2.2.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	8
2.2.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	11
2.3 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力計算	12
2.3.1 最高使用圧力時	12
3. 応力の評価	13
3.1 外筒の応力評価	13
3.1.1 一次応力の評価	13
3.1.2 一次+二次応力の評価	13
3.2 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価	13

図表目次

図 1-1	外筒の形状・寸法・材料・応力評価位置	14
図 1-2	蓋部中性子遮蔽材カバーの形状・寸法・材料・応力評価位置	15
図 2-1	各代表事象における荷重の方向	16
表 2-1	外筒の一次応力の計算条件及び計算結果（貯蔵架台への衝突時）	17
表 2-2	外筒の熱荷重による応力の計算条件及び計算結果（貯蔵架台への衝突時）	19
表 2-3	外筒の一次＋二次応力の計算条件及び計算結果（貯蔵架台への衝突時）	22
表 2-4	外筒の一次応力の計算条件及び計算結果 （ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合）	23
表 2-5	外筒の一次＋二次応力の計算条件及び計算結果 （ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合）	25
表 2-6	蓋部中性子遮蔽材カバーの一次応力の計算条件及び計算結果	27
表 3-1	外筒の応力計算値と許容応力（供用状態 A 及び B）	28
表 3-2	外筒の応力計算値と許容応力（供用状態 C_s ）	29
表 3-3	外筒の応力計算値と許容応力（供用状態 D_s ）	30
表 3-4	蓋部中性子遮蔽材カバーの応力計算値と許容応力	31

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型の外筒（端板含む。）及び中性子遮蔽材カバーに関する応力計算書である。

なお、HDP-69B(B)型の中性子遮蔽材カバーのうち、本書は蓋部中性子遮蔽材カバーを対象とし、底部中性子遮蔽材カバーの応力計算は、「添付書類8-1-2 密封容器の応力計算書」に示す。

1.1 形状・寸法・材料

本書で評価する部位の形状・寸法・材料を図1-1及び図1-2に示す。

1.2 計算結果

計算結果を表3-1、表3-2、表3-3及び表3-4に示す。

なお、応力の計算位置は、評価上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。

表中の「－」は、評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくないため、評価を省略していることを表す。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 応力計算

2.1 応力評価位置

(1) 外筒

外筒は、金属キャスク容器外周部に円筒形で配置され、内部には中性子遮蔽材が充填される。外筒は板厚が 20 mm の炭素鋼であり、端板及び伝熱フィンを介し、厚肉で強固な胴に溶接で固定される。外筒の応力評価位置を図 1-1 に示す。

貯蔵架台への衝突時においては、金属キャスクは縦姿勢であり、衝突時に発生する加速度に応じて、外筒や中性子遮蔽材等の慣性力が下部端板付け根に作用するので、ここを評価部位（図 1-1 応力評価位置①）とする。

貯蔵時（ S_d 地震力が作用する場合、又は S_s 地震力が作用する場合）においては、水平地震力により外筒内面に中性子遮蔽材の質量に応じた慣性力と中性子遮蔽材充填部内圧が作用する。この場合、外筒と伝熱フィンとの結合部には曲げ応力が発生するので、ここを評価部位とする（図 1-1 応力評価位置②）。

(2) 蓋部中性子遮蔽材カバー

蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価位置を図 1-2 に示す。

蓋部中性子遮蔽材カバーに蓋間圧力が作用する場合に最大応力が発生するのは蓋部中性子遮蔽材カバーの周辺固定部であるので、ここを評価部位（図 1-2 応力評価位置③）とする。

2.2 外筒の応力計算

2.2.1 貯蔵架台への衝突時

(1) 荷重条件

貯蔵架台への衝突時における荷重は、次に示す組合せとする。荷重の方向を図 2-1 に示す。

- ・内圧
- ・貯蔵架台への衝突時荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

(2) 計算方法

a. 一次応力

(a) 鉛直方向衝撃荷重によるせん断応力

貯蔵架台への衝突時は、金属キャスクが縦姿勢での事象であるので、外筒、端板、伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材に生じた慣性力は、それぞれ胴との結合部で支持される。

慣性力の考慮においては、簡単化のため、伝熱フィンや端板の結合部がないものとして、外筒部に生じた慣性力がすべて下部端板と胴の接合部に生じた場合の応力を評価する。

外筒、端板、伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材に、貯蔵架台への衝突時の衝撃加速度が作用し、これを下部端板の付け根（胴結合部）においてせん断力として受ける場合の応力評価位置①に生じるせん断応力は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{m_{a11} \cdot G_2}{\pi \cdot D_d \cdot t_b} \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、

- τ : せん断応力 (MPa)
- τ_{rz} : せん断応力 (径方向に垂直な面の軸方向のせん断応力) (MPa)
 $\tau_{rz} = \tau$
- m_{a11} : 外筒、端板、伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量
(=15500 kg)
- G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)
 $G_2 = 5G$
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)
- D_d : 胴外径 (下部端板の内径) (=2156 mm)
- t_b : 下部端板の板厚 (=25 mm)

(b) 中性子遮蔽材充填部内圧による曲げ応力

外筒は伝熱フィンで区切られて伝熱フィン及び端板に溶接される。また、下部端板も伝熱フィンで区切られて胴、外筒、及び伝熱フィンに溶接される。このため、外筒及び下部端板は、四辺を固定された板とみなすことができる。外筒及び下部端板には、中性子遮蔽材充填部内圧が作用する。外筒及び下部端板内面に内圧が作用すると、図 1-1 に示す応力評価位置①及び②には曲げ応力が発生し、その値を次式で計算する。

$$\sigma_b = \beta \cdot \frac{P \cdot a^2}{t^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

- σ_b : 長方形板に生じる最大曲げ応力 (MPa)
- σ_{br} : 径方向の最大曲げ応力 (MPa)
 $\sigma_{br} = \sigma_b$
- β : 長方形板の最大応力の係数 (-)
 $\beta = \beta_1$ 又は $\beta = \beta_2$
- β_1 : 下部端板の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値 (=0.5⁽¹⁾)
- β_2 : 外筒の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値 (=0.5⁽¹⁾)
- P : 圧力 (MPa)
 $P = p_1$
- p_1 : 中性子遮蔽材充填部内圧 (= MPa)
- a : 長方形板の一辺の長さ (mm)
 $a = a_f$
- a_f : 最大の伝熱フィンピッチ幅 (= mm)
- t : 板厚 (mm)
 $t = t_b$ 又は $t = t_o$
- t_b : 下部端板の板厚 (=25 mm)
- t_o : 外筒の板厚 (=20 mm)

(c) 組合せ応力

応力評価位置①には、曲げ応力とせん断応力が同時に作用するため、組合せ応力を評価する。組合せ応力は次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

- σ_T : 組合せ応力 (MPa)

内は商業機密のため、非公開とします。

b. 一次+二次応力

(a) 下部端板と胴の径方向熱膨張差による応力

下部端板と胴の径方向熱膨張差に基づく熱荷重により下部端板の周方向及び径方向に発生する応力は、下部端板及び胴を組合せ円筒として各々下式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{TH}\theta} &= P_{\text{THr}} \cdot \frac{a_1^2 + b_1^2}{a_1^2 - b_1^2} \\ \sigma_{\text{THr}} &= -P_{\text{THr}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{ただし, } P_{\text{THr}} = \frac{a_2 - b_1}{\frac{b_1}{E_1} \left(\frac{a_1^2 + b_1^2}{a_1^2 - b_1^2} + \nu_1 \right) + \frac{a_2}{E_2} \left(\frac{a_2^2 + b_2^2}{a_2^2 - b_2^2} - \nu_2 \right)} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、

- $\sigma_{\text{TH}\theta}$: 熱荷重による下部端板の周方向応力 (MPa)
- σ_{THr} : 熱荷重による下部端板の径方向応力 (MPa)
- P_{THr} : 熱荷重による下部端板付け根の径方向圧力 (MPa)
- a_1 : 胴による拘束がない場合の熱膨張後の下部端板の外半径 (mm)
 $a_1 = R_{O1} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T_1)$
- b_1 : 胴による拘束がない場合の熱膨張後の下部端板の内半径 (mm)
 $b_1 = R_{I1} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T_1)$
- a_2 : 下部端板による拘束がない場合の熱膨張後の胴の外半径 (mm)
 $a_2 = R_{O2} \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T_2)$
- b_2 : 下部端板による拘束がない場合の熱膨張後の胴の内半径 (mm)
 $b_2 = R_{I2} \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T_2)$
- R_{O1} : 下部端板の外半径 (=1241 mm)
- R_{I1} : 下部端板の内半径 (=1078 mm)
- R_{O2} : 胴の外半径 (=1078 mm)
- R_{I2} : 胴の内半径 (=832 mm)
- α_1 : 外筒・端板の 120 °Cにおける平均熱膨張係数
(=11.27×10⁻⁶ mm/(mm・°C))
- α_2 : 胴の 150 °Cにおける平均熱膨張係数 (=11.28×10⁻⁶ mm/(mm・°C))
- ΔT_1 : 外筒・端板の常温との温度差 (=120-20=100 °C)
- ΔT_2 : 胴の常温との温度差 (=150-20=130 °C)
- E_1 : 外筒・端板の 120 °Cにおける縦弾性係数 (=196×10³ MPa)
- E_2 : 胴の 150 °Cにおける縦弾性係数 (=195×10³ MPa)
- ν_1 : 外筒・端板のポアソン比 (=0.3)
- ν_2 : 胴のポアソン比 (=0.3)

(b) 外筒と胴の軸方向熱膨張差による端板のせん断応力

外筒は、端板及び伝熱フィンを介し、厚肉で強固な胴に溶接で固定されており、胴と外筒の軸方向熱膨張差により軸方向の熱荷重が発生する。当該熱荷重は、伝熱フィンを見做し、胴と外筒を一様断面の組合せ棒として計算する。当該熱荷重に基づき下部端板に発生するせん断応力は、次式で計算する。

なお、当該せん断応力は、(2.1)式で計算する貯蔵架台への衝突時に下部端板に発生するせん断応力とは逆向きとなるため、便宜的に負符号をつけて表している。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{THz} &= -\frac{F_{THz}}{\pi D_d t_b} \\ F_{THz} &= \frac{E_1 A_1 (\alpha_2 \Delta T_2 - \alpha_1 \Delta T_1)}{1 + \frac{E_1 A_1}{E_2 A_2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、

- τ_{THz} : 熱荷重によるせん断応力 (軸方向のせん断応力) (MPa)
- F_{THz} : 外筒と胴の軸方向熱膨張差による熱荷重 (N)
- D_d : 胴の外径 (=2156 mm)
- t_b : 下部端板の板厚 (=25 mm)
- E_1 : 外筒・端板の 120 °Cにおける縦弾性係数 (=196×10³ MPa)
- E_2 : 胴の 150 °Cにおける縦弾性係数 (=195×10³ MPa)
- A_1 : 外筒の水平方向面積 (mm²)
 $A_1 = \pi \cdot (R_{O0}^2 - R_{I0}^2)$
- A_2 : 胴の水平方向断面積 (mm²)
 $A_2 = \pi \cdot (R_{O2}^2 - R_{I2}^2)$
- R_{O0} : 外筒の外半径 (=1241 mm)
- R_{I0} : 外筒の内半径 (=1221 mm)
- R_{O2} : 胴の外半径 (=1078 mm)
- R_{I2} : 胴の内半径 (=832 mm)
- α_1 : 外筒・端板の 120 °Cにおける平均熱膨張係数
(=11.27×10⁻⁶ mm/(mm・°C))
- α_2 : 胴の 150 °Cにおける平均熱膨張係数 (=11.28×10⁻⁶ mm/(mm・°C))
- ΔT_1 : 外筒・端板の常温との温度差 (=120-20=100 °C)
- ΔT_2 : 胴の常温との温度差 (=150-20=130 °C)

(c) 外筒と胴の軸方向熱膨張差による外筒の引張応力

外筒と胴の軸方向熱膨張差による熱荷重に基づき外筒の軸方向に引張応力が発生する。当該引張応力は、次式で計算する。

$$\sigma_{\text{THz}} = \frac{F_{\text{THz}}}{A_1} \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、

σ_{THz} : 熱荷重による外筒軸方向の引張応力 (MPa)

F_{THz} : 外筒と胴の軸方向熱膨張差による熱荷重 (N) ((2.6) 式による。)

A_1 : 外筒の水平方向断面積 (mm²)

$$A_1 = \pi \cdot (R_{O0}^2 - R_{I0}^2)$$

R_{O0} : 外筒の外半径 (=1241 mm)

R_{I0} : 外筒の内半径 (=1221 mm)

(3) 計算結果

貯蔵架台への衝突時における外筒に発生する応力の計算条件及び計算結果を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

2.2.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)

(1) 荷重条件

貯蔵時において、 S_d *地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。

荷重の方向を図 2-1 に示す。

- ・内圧
- ・地震力
- ・自重

(2) 計算方法

a. 一次応力

(a) 鉛直方向地震荷重によるせん断応力

鉛直方向地震荷重による応力評価位置①のせん断応力は、(2.1) 式で計算する。

ここで、

τ_{rz} : せん断応力 (MPa)

$$\tau_{rz} = \tau$$

τ : せん断応力 (MPa)

m_{all} : 外筒, 端板, 伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量
(=15500 kg)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

$$G_2 = (1 + C_v) \cdot G$$

C_v : 鉛直方向設計震度 (=0.87)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

D_d : 胴外径 (=2156 mm)

t_b : 下部端板の板厚 (=25 mm)

(b) 中性子遮蔽材充填部内圧による曲げ応力

中性子遮蔽材充填部内圧による応力評価位置①の曲げ応力は、(2.2) 式で計算する。

(c) 中性子遮蔽材充填部内圧及び水平方向地震荷重による曲げ応力

外筒を伝熱フィンに区切られる幅ごとに考えると、外筒内面には水平方向地震力による中性子遮蔽材の慣性力が作用する。また、中性子遮蔽材充填部内圧も同時に作用する。このとき、外筒の伝熱フィン結合部の端点（応力評価位置②）には曲げ応力が作用するので、(2.2) 式で計算する。

ここで、

$\sigma_{b\theta}$: 外筒の周方向曲げ応力 (MPa)

$$\sigma_{b\theta} = \sigma_b$$

σ_b : 長方形板に生じる最大曲げ応力 (MPa)

β : 長方形板の最大応力の係数 (-)

$$\beta = \beta_2$$

β_2 : 外筒の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値 (=0.5⁽¹⁾)

P : 圧力 (MPa)

$$P = p_1 + p_2$$

p_1 : 中性子遮蔽材充填部内圧 (= MPa)

p_2 : 中性子遮蔽材及び外筒の慣性力による分布荷重 (MPa)

$$p_2 = m_f \cdot G_1 / A_s$$

m_f : 伝熱フィン一区間当たりの中性子遮蔽材と外筒の質量 (=510 kg)

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

$$G_1 = C_H \cdot G$$

C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

A_s : 長方形板の面積 (mm^2)

$$A_s = A_0$$

A_0 : 伝熱フィン一区間当たりの外筒の面積 (= mm^2)

a : 長方形板の一辺の長さ (mm)

$$a = a_f$$

a_f : 最大の伝熱フィンピッチ幅 (= mm)

t : 板厚 (mm)

$$t = t_0$$

t_0 : 外筒の板厚 (=20 mm)

内は商業機密のため、非公開とします。

b. 一次+二次応力

(a) せん断応力

短期繰返し荷重 (S_d *地震力) のみによる応力評価位置①におけるせん断応力の全振幅は, (2.1) 式で求まるせん断応力の2倍とする。ここで,

- τ : せん断応力 (MPa)
- m_{a11} : 外筒, 端板, 伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量 (=15500 kg)
- G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)
 $G_2 = C_v \cdot G$
- C_v : 鉛直方向設計震度 (=0.87)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)
- D_d : 胴外径 (=2156 mm)
- t_b : 下部端板の板厚 (=25 mm)

(b) 曲げ応力

短期繰返し荷重 (S_d *地震力) のみによる応力評価位置②における曲げ応力の全振幅は, (2.2) 式で求まる曲げ応力の2倍とする。ここで,

- σ_b : 長方形板に生じる最大曲げ応力 (MPa)
- β : 長方形板の最大応力の係数 (-)
 $\beta = \beta_2$
- β_2 : 外筒の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値 (=0.5⁽¹⁾)
- P : 圧力 (MPa)
 $P = p_2$
- p_2 : 中性子遮蔽材及び外筒の慣性力による分布荷重 (MPa)
 $p_2 = m_f \cdot G_1 / A_s$
- m_f : 伝熱フィン一区間あたりの中性子遮蔽材と外筒の質量 (=510 kg)
- G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)
 $G_1 = C_H \cdot G$
- C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)
- A_s : 長方形板の面積 (mm^2)
 $A_s = A_0$
- A_0 : 伝熱フィン一区間あたりの外筒の面積 (= mm^2)
- a : 長方形板の一辺の長さ (mm)
 $a = a_f$
- a_f : 最大の伝熱フィンピッチ幅 (= mm)
- t : 板厚 (mm)
 $t = t_0$
- t_0 : 外筒の板厚 (=20 mm)

内は商業機密のため, 非公開とします。

(3) 計算結果

貯蔵時 (S_d^* 地震力が作用する場合) における外筒の一次応力及び一次＋二次応力の計算条件と計算結果を各々表 2-4 及び表 2-5 に示す。

2.2.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)

(1) 荷重条件

貯蔵時において、 S_s 地震力が作用する場合の荷重条件は、 S_s 地震力と S_d^* 地震力を同じとしているため、2.2.2(1)項と同じである。

(2) 計算方法

計算方法は、2.2.2(2)項と同じである。

(3) 計算結果

貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合) における外筒の一次応力及び一次＋二次応力の計算条件と計算結果は、2.2.2(3)項と同じである。

2.3 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力計算

2.3.1 最高使用圧力時

(1) 荷重条件

蓋部中性子遮蔽材カバーの最高使用圧力時の荷重は、次に示す組合せとする。

- ・圧力
- ・自重

(2) 計算方法

a. 一次応力

蓋部中性子遮蔽材カバーには、一次蓋と二次蓋間に封入されるヘリウムガスの圧力が作用するので、この最高使用圧力に対する応力を評価する。一次蓋の中性子遮蔽材充填部には、図 1-2 に示すようにリブが設けられており、蓋間圧力が作用する場合には、このリブと周辺固定部（溶接部）で蓋部中性子遮蔽材カバーの荷重を支持する構造となっている。

ここでは、十字に交差するリブと周辺固定部で形成される四半円形状に着目し、蓋部中性子遮蔽材カバーの半径を一辺とする正方形の板に圧力が作用するモデルを考える。四辺は対称条件もしくは溶接により固定されるため、四辺固定条件となる。四辺固定の正方形の板において、等分布荷重が作用するときの最大曲げ応力は固定辺中央に生じ、(2.2)式で計算する。ここで、

- $\sigma_{b\theta}$: 蓋部中性子遮蔽材カバーの最大曲げ応力（周方向）(MPa)
 $\sigma_{b\theta} = \sigma_b$
- σ_b : 長方形板に生じる最大曲げ応力 (MPa)
- β : 長方形板の最大応力の係数 (-)
 $\beta = \beta_3$
- β_3 : 正方形板の最大応力の係数 (=0.32⁽¹⁾)
- P : 圧力 (MPa)
 $P = p_3 + p_4$
- p_3 : 蓋部中性子遮蔽材カバーの最高使用圧力 (=0.4 MPa)
- p_4 : 蓋部中性子遮蔽材カバーの自重による分布荷重 (MPa)
 $p_4 = \rho_s \cdot t_L \cdot G$
- ρ_s : ステンレス鋼 (SUS304) の基本質量 (=7.93×10⁻⁶ kg/mm/mm²)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- a : 長方形板の一辺の長さ (mm)
 $a = a_c$
- a_c : 正方形板一辺の長さ（蓋部中性子遮蔽材カバーの半径）(=787.5 mm)
- t : 板厚 (mm)
 $t = t_L$
- t_L : 蓋部中性子遮蔽材カバーの板厚 (=40 mm)

(3) 計算結果

最高使用圧力時の蓋部中性子遮蔽材カバーにおける一次応力の計算条件と計算結果を表 2-6 に示す。

3. 応力の評価

3.1 外筒の応力評価

3.1.1 一次応力の評価

各供用状態における一次応力の評価を表 3-1, 表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-1, 表 3-2 及び表 3-3 により, 各供用状態の一次応力は, 金属キャスク構造規格 MCD-3721 の規定を満足する。

3.1.2 一次+二次応力の評価

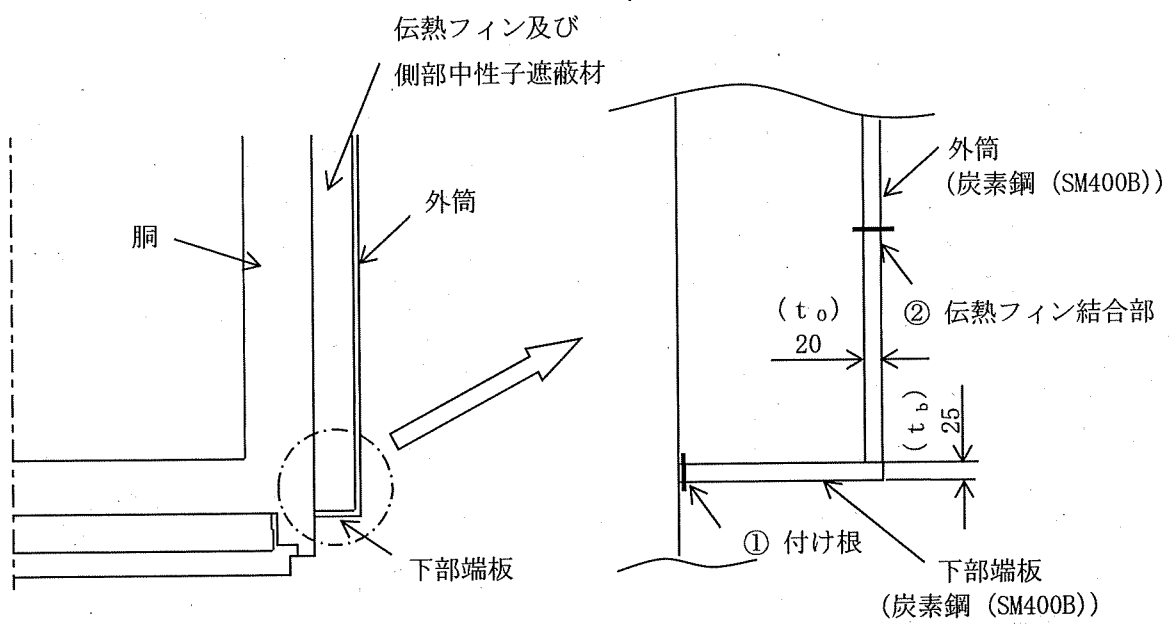
各供用状態における一次+二次応力の評価を表 3-1, 表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-1, 表 3-2 及び表 3-3 により, 各供用状態の一次+二次応力は, 金属キャスク構造規格 MCD-3722 の規定を満足する。

3.2 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価

蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価を表 3-4 に示す。

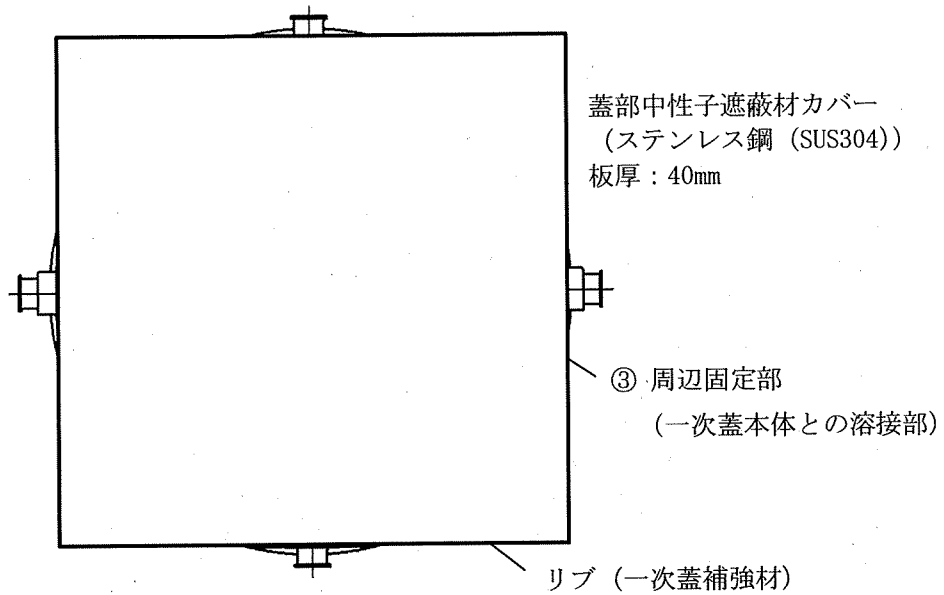
表 3-4 により, 最高使用圧力時の応力計算値は許容応力を満足し, 想定する圧力に対して十分な強度を有する。



(単位：mm)

①, ②：応力評価位置

図 1-1 外筒の形状・寸法・材料・応力評価位置



③: 応力評価位置

図 1-2 蓋部中性子遮蔽材カバーの形状・寸法・材料・応力評価位置

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

(1) 貯蔵架台への衝突時の衝撃加速度：

・鉛直方向加速度： $G_2 = 5G$ (G ：重力加速度 ($=9.80665 \text{ m/s}^2$))

(2) 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合) 又は

貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合) の加速度：

・水平方向加速度： $G_1 = 1.40G$

・鉛直方向加速度： $G_2 = (1+0.87) \cdot G$

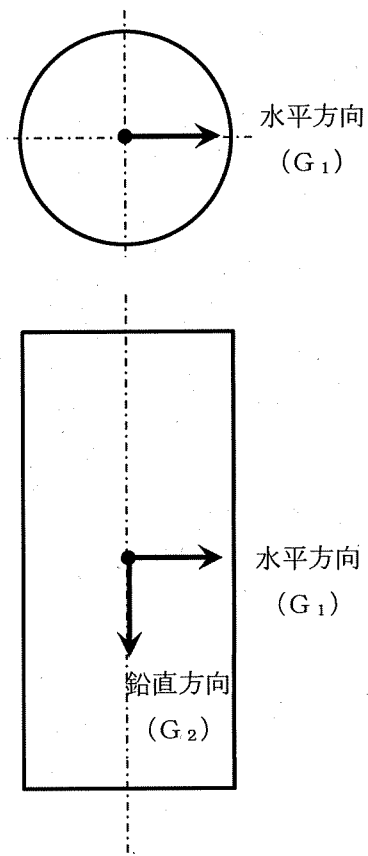


図 2-1 各代表事象における荷重の方向

表 2-1 外筒の一次応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時) (1/2)

項目	記号	数値	単位
外筒, 端板, 伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量	m_{a11}	15500	kg
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
鉛直方向加速度	G_2	5 G	m/s ²
胴外径	D_d	2156	mm
板厚 ($t = t_b$)	t	25	mm
下部端板の板厚	t_b	25	mm
長方形板の最大応力の係数 ($\beta = \beta_1$)	β	0.5	—
長方形板の最大応力の係数 (下部端板の伝熱フィン区画の縦横比を考慮した値)	β_1	0.5	—
圧力 ($P = p_1$)	P	□	MPa
中性子遮蔽材充填部内圧	p_1		MPa
長方形板の一辺の長さ ($a = a_f$)	a		mm
最大の伝熱フィンピッチ幅	a_f		mm
せん断応力 (応力評価位置①)	τ_{rz}	5 ^{*1}	MPa
曲げ応力 (応力評価位置①)	σ_{br}	39 ^{*1}	MPa
組合せ応力 (応力評価位置①)	σ_T	39 ^{*1}	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 2-1 外筒の一次応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時) (2/2)

項目	記号	数値	単位
長方形板の最大応力の係数 ($\beta = \beta_2$)	β	0.5	—
長方形板の最大応力の係数 (外筒の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値)	β_2	0.5	—
圧力 ($P = p_1$)	P		MPa
中性子遮蔽材充填部内圧	p_1		MPa
長方形板の一辺の長さ ($a = a_f$)	a		mm
最大の伝熱フィンピッチ幅	a_f		mm
板厚 ($t = t_0$)	t	20	mm
外筒の板厚	t_0	20	mm
曲げ応力 (応力評価位置②)	$\sigma_{b\theta}$	60*1	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 2-2 外筒の熱荷重による応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時) (1/3)

項目	記号	数値	単位
下部端板の外半径	R_{01}	1241	mm
下部端板の内半径	R_{11}	1078	mm
胴の外半径	R_{02}	1078	mm
胴の内半径	R_{12}	832	mm
外筒・端板の 120 °Cにおける平均熱膨張係数	α_1	11.27×10^{-6}	mm/(mm·°C)
胴の 150 °Cにおける平均熱膨張係数	α_2	11.28×10^{-6}	mm/(mm·°C)
外筒・端板の常温との温度差	ΔT_1	100	°C
胴の常温との温度差	ΔT_2	130	°C
胴による拘束がない場合の熱膨張後の下部端板の外半径	a_1	1242 ^{*1}	mm
胴による拘束がない場合の熱膨張後の下部端板の内半径	b_1	1079 ^{*1}	mm
下部端板による拘束がない場合の熱膨張後の胴の外半径	a_2	1080 ^{*1}	mm
下部端板による拘束がない場合の熱膨張後の胴の内半径	b_2	833 ^{*1}	mm
外筒・端板の 120 °Cにおける縦弾性係数	E_1	196×10^3	MPa
胴の 150 °Cにおける縦弾性係数	E_2	195×10^3	MPa
外筒・端板のポアソン比	ν_1	0.3	—
胴のポアソン比	ν_2	0.3	—
熱荷重による下部端板付け根の径方向圧力	P_{THr}	5.978 ^{*2}	MPa
熱荷重による周方向応力 (応力評価位置①)	$\sigma_{TH\theta}$	43 ^{*2}	MPa
熱荷重による径方向応力 (応力評価位置①)	σ_{THr}	-6 ^{*2}	MPa

注記*1: この数値を使用する計算は、桁数処理前の数値を適用

*2: 計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-2 外筒の熱荷重による応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時) (2/3)

項目	記号	数値	単位
胴の外径	D_d	2156	mm
下部端板の板厚	t_b	25	mm
外筒の外半径	R_{00}	1241	mm
外筒の内半径	R_{10}	1221	mm
胴の外半径	R_{02}	1078	mm
胴の内半径	R_{12}	832	mm
外筒・端板の 120 °Cにおける平均熱膨張係数	α_1	11.27×10^{-6}	mm/(mm·°C)
胴の 150 °Cにおける平均熱膨張係数	α_2	11.28×10^{-6}	mm/(mm·°C)
外筒・端板の常温との温度差	ΔT_1	100	°C
胴の常温との温度差	ΔT_2	130	°C
外筒・端板の 120 °Cにおける縦弾性係数	E_1	196×10^3	MPa
胴の 150 °Cにおける縦弾性係数	E_2	195×10^3	MPa
外筒の水平方向断面積	A_1	1.547×10^5	mm ²
胴の水平方向断面積	A_2	1.476×10^6	mm ²
外筒と胴の軸方向熱膨張差による熱荷重	F_{THz}	9.310×10^6	N
熱荷重によるせん断応力 (応力評価位置①)	τ_{THz}	-55^{*1}	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-2 外筒の熱荷重による応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時) (3/3)

項目	記号	数値	単位
外筒の外半径	R_{00}	1241	mm
外筒の内半径	R_{10}	1221	mm
胴の外半径	R_{02}	1078	mm
胴の内半径	R_{12}	832	mm
外筒・端板の 120 °Cにおける平均熱膨張係数	α_1	11.27×10^{-6}	mm/(mm·°C)
胴の 150 °Cにおける平均熱膨張係数	α_2	11.28×10^{-6}	mm/(mm·°C)
外筒・端板の常温との温度差	ΔT_1	100	°C
胴の常温との温度差	ΔT_2	130	°C
外筒・端板の 120 °Cにおける縦弾性係数	E_1	196×10^3	MPa
胴の 150 °Cにおける縦弾性係数	E_2	195×10^3	MPa
外筒の水平方向断面積	A_1	1.547×10^5	mm ²
胴の水平方向断面積	A_2	1.476×10^6	mm ²
外筒と胴の軸方向熱膨張差による熱荷重	F_{THz}	9.310×10^6	N
熱荷重による軸方向応力 (応力評価位置②)	σ_{THz}	61*1	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

表 2-3 外筒の一次+二次応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時)

(単位: MPa)

応力 評価 位置	応力 分類	項目	記号	数値*1
①	一次 応力	貯蔵架台への衝突時の鉛直方向衝撃荷重によるせん断応力	τ_{rz}	5
		中性子遮蔽材充填部内圧による曲げ応力	σ_{br}	39
	二次 応力	熱荷重によるせん断応力	τ_{THz}	-55
		熱荷重による周方向応力	$\sigma_{TH\theta}$	43
		熱荷重による径方向応力	σ_{THr}	-6
	一次 + 二次 応力	せん断応力	τ^{*2}	51*3
		引張応力 (周方向)	$\sigma_{TH\theta}$	43
圧縮応力 (径方向)		σ_{THr}	6*3	
曲げ応力 (径方向)		σ_{br}	39	
②	一次 応力	中性子遮蔽材充填部内圧による曲げ応力	$\sigma_{b\theta}$	60
	二次 応力	熱荷重による引張応力 (軸方向)	σ_{THz}	61
	一次 + 二次 応力	引張応力 (軸方向)	σ_{THz}	61
		曲げ応力 (周方向)	$\sigma_{b\theta}$	60

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

*2: $\tau = \tau_{rz} + \tau_{THz}$

*3: 絶対値を表す。

表 2-4 外筒の一次応力の計算条件及び計算結果
 (S_d*地震力又はS_s地震力が作用する場合) (1/2)

項目	記号	数値	単位
外筒, 端板, 伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量	m _{all}	15500	kg
鉛直方向設計震度	C _v	0.87	—
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
鉛直方向加速度	G ₂	1.87G	m/s ²
胴外径	D _d	2156	mm
板厚 (t = t _b)	t	25	mm
下部端板の板厚	t _b	25	mm
長方形板の最大応力の係数 (β = β ₁)	β	0.5	—
長方形板の最大応力の係数 (下部端板の伝熱フィン一区画の縦横比を考慮した値)	β ₁	0.5	—
圧力 (P = p ₁)	P		MPa
中性子遮蔽材充填部内圧	p ₁		MPa
長方形板の一辺の長さ (a = a _f)	a		mm
最大の伝熱フィンピッチ幅	a _f		mm
せん断応力 (応力評価位置①)	τ _{rz}	2* ¹	MPa
曲げ応力 (応力評価位置①)	σ _{br}	39* ¹	MPa
組合せ応力 (応力評価位置①)	σ _T	39* ¹	MPa

注記*1: 計算は, 桁数処理前の数値を使用

内は商業機密のため, 非公開とします。

表 2-4 外筒の一次応力の計算条件及び計算結果
 (S_d*地震力又はS_s地震力が作用する場合) (2/2)

項目	記号	数値	単位
長方形板の最大応力の係数 ($\beta = \beta_2$)	β	0.5	—
長方形板の最大応力の係数 (外筒の伝熱フィン区画の縦横比を考慮した値)	β_2	0.5	—
圧力 ($P = p_1 + p_2$)	P		MPa
中性子遮蔽材充填部内圧	p_1		MPa
中性子遮蔽材及び外筒の慣性力による分布荷重 ($p_2 = m_f \cdot G_1 / A_s$)	p_2	5.370×10^{-3}	MPa
伝熱フィン区間当たりの中性子遮蔽材と外筒の質量	m_f	510	kg
水平方向加速度	G_1	1.40G	m/s ²
水平方向設計震度	C_H	1.40	—
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
長方形板の面積 ($A_s = A_o$)	A_s		mm ²
伝熱フィン区間当たりの外筒の面積	A_o		mm ²
長方形の一辺の長さ ($a = a_f$)	a		mm
最大の伝熱フィンピッチ幅	a_f		mm
板厚 ($t = t_o$)	t	20	mm
外筒の板厚	t_o	20	mm
曲げ応力 (応力評価位置②)	$\sigma_{b\theta}$	61 ^{*1}	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 2-5 外筒の一次+二次応力の計算条件及び計算結果
 (S_d*地震力又はS_s地震力が作用する場合) (1/2)

項目	記号	数値	単位
外筒, 端板, 伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材の総質量	m _{all}	15500	kg
鉛直方向加速度	G _z	0.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C _v	0.87	—
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
胴外径	D _d	2156	mm
板厚 (t = t _b)	t	25	mm
下部端板の板厚	t _b	25	mm
せん断応力 (応力評価位置①)	τ	1* ¹	MPa
せん断応力の全振幅 (応力評価位置①)	2τ	2* ¹	MPa

注記*1: 計算は, 桁数処理前の数値を使用

表 2-5 外筒の一次+二次応力の計算条件及び計算結果
 (S_d*地震力又はS_s地震力が作用する場合) (2/2)

項目	記号	数値	単位
長方形板の最大応力の係数 ($\beta = \beta_2$)	β	0.5	—
長方形板の最大応力の係数 (外筒の伝熱フィン区画の縦横比を考慮した値)	β_2	0.5	—
圧力 ($P = p_2$)	P	5.370×10^{-3}	MPa
中性子遮蔽材及び外筒の慣性力による分布荷重 ($p_2 = m_f \cdot G_1 / A_s$)	p_2	5.370×10^{-3}	MPa
伝熱フィン区間当たりの中性子遮蔽材と外筒の質量	m_f	510	kg
水平方向加速度	G_1	1.40G	m/s ²
水平方向設計震度	C _H	1.40	—
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
長方形板の面積 ($A_s = A_o$)	A_s	□	mm ²
伝熱フィン区間当たりの外筒の面積	A_o		mm ²
長方形板の一辺の長さ ($a = a_f$)	a		mm
最大の伝熱フィンピッチ幅	a_f		mm
板厚 ($t = t_o$)	t	20	mm
外筒の板厚	t_o	20	mm
曲げ応力 (応力評価位置②)	σ_b	1*1	MPa
曲げ応力の全振幅 (応力評価位置②)	$2\sigma_b$	1*1	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 2-6 蓋部中性子遮蔽材カバーの一次応力の計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
長方形板の最大応力の係数 ($\beta = \beta_3$)	β	0.32	—
正方形板の最大応力の係数 (蓋部中性子遮蔽材カバーの四半円形状の模擬)	β_3	0.32	—
圧力 ($P = p_3 + p_4$)	P	4.031×10^{-1}	MPa
蓋部中性子遮蔽材カバーの最高使用圧力 (蓋間 He ガス充填圧力)	p_3	0.4	MPa
蓋部中性子遮蔽材カバーの自重による分布荷重 ($p_4 = \rho_s \cdot t_L \cdot G$)	p_4	3.111×10^{-3}	MPa
ステンレス鋼 (SUS304) の基本質量	ρ_s	7.93×10^{-6}	kg/mm/mm ²
蓋部中性子遮蔽材カバーの板厚	t_L	40	mm
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
長方形板の一辺の長さ ($a = a_c$)	a	787.5	mm
正方形板の一辺の長さ (蓋部中性子遮蔽材カバー半径)	a_c	787.5	mm
板厚 ($t = t_L$)	t	40	mm
曲げ応力 (応力評価位置③)	$\sigma_{b\theta}$	50*1	MPa

注記*1: 計算は、桁数処理前の数値を使用

表 3-1 外筒の応力計算値と許容応力
(供用状態A及びB)

(単位 : MPa)

応力評価位置	応力の種類	貯蔵架台への衝突時		
		応力計算値	許容応力	
①	一次応力	引張応力	—	—
		圧縮応力	—	—
		せん断応力	5	79
		曲げ応力	39	137
		支圧応力	—	—
		組合せ応力	39	137
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力	43	412
		せん断応力	51	238
		曲げ応力	39	412
		支圧応力	—	—
		座屈応力	—	—
②	一次応力	引張応力	—	—
		圧縮応力	—	—
		せん断応力	—	—
		曲げ応力	60	137
		支圧応力	—	—
		組合せ応力	—	—
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力	61	412
		せん断応力	—	—
		曲げ応力	60	412
		支圧応力	—	—
		座屈応力	—	—

表 3-2 外筒の応力計算値と許容応力
(供用状態 C_s)

(単位: MPa)

応力評価位置	応力の種類	貯蔵時 (S _d *地震力が作用する場合)		
		応力計算値	許容応力	
①	一次応力	引張応力	—	—
		圧縮応力	—	—
		せん断応力	2	119
		曲げ応力	39	206
		支圧応力	—	—
		組合せ応力	39	206
	一次+二次応力	引張・圧縮応力	—	—
		せん断応力	2	238
		曲げ応力	—	—
		支圧応力	—	—
		座屈応力	—	—
②	一次応力	引張応力	—	—
		圧縮応力	—	—
		せん断応力	—	—
		曲げ応力	61	206
		支圧応力	—	—
		組合せ応力	—	—
	一次+二次応力	引張・圧縮応力	—	—
		せん断応力	—	—
		曲げ応力	1	412
		支圧応力	—	—
		座屈応力	—	—

表 3-3 外筒の応力計算値と許容応力
(供用状態D_s)

(単位: MPa)

応力評価位置	応力の種類	貯蔵時 (S _s 地震力が作用する場合)		
		応力計算値	許容応力	
①	一次応力	引張応力	—	—
		圧縮応力	—	—
		せん断応力	2	142
		曲げ応力	39	247
		支圧応力	—	—
		組合せ応力	39	247
	一次+二次応力	引張・圧縮応力	—	—
		せん断応力	2	238
		曲げ応力	—	—
		支圧応力	—	—
		座屈応力	—	—
②	一次応力	引張応力	—	—
		圧縮応力	—	—
		せん断応力	—	—
		曲げ応力	61	247
		支圧応力	—	—
		組合せ応力	—	—
	一次+二次応力	引張・圧縮応力	—	—
		せん断応力	—	—
		曲げ応力	1	412
		支圧応力	—	—
		座屈応力	—	—

表 3-4 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力計算値と許容応力

(単位：MPa)

応力評価 位置	応力の種類		最高使用圧力時	
			応力計算値	許容応力
③	一次応力	曲げ応力	50	117

添付資料 8-5

金属キャスクの耐食性に関する説明書

目 次

1. 設計方針	1
2. HDP-69B(B)型の構成部材	2
3. 経年変化に関する評価条件	2
4. 経年変化に関する評価結果	2
5. 引用文献	3

図表目次

図 4-1	炭素鋼・低合金鋼のシャルピー遷移温度増加と照射量 (n/m^2) の関係	5
図 4-2	ステンレス鋼の中性子照射の影響評価結果	6
図 4-3	中性子遮蔽材の重量減損データ	7
図 4-4	中性子遮蔽材の中性子照射の影響	8
表 2-1	HDP-69B(B)型の主要な構成部材の材質	9
表 3-1	HDP-69B(B)型の主要な構成部材の温度条件	10
表 3-2	HDP-69B(B)型の主要な構成部材の中性子照射量	11
表 4-1	HDP-69B(B)型の主要な構成部材の経年変化に対する評価について	12

1. 設計方針

HDP-69B(B)型は、基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持できる設計とした。また、HDP-69B(B)型は、金属キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料の腐食等を防止するために、使用済燃料を不活性ガスとともに封入して貯蔵する設計とした。なお、金属キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆処理を施す。

2. HDP-69B(B)型の構成部材

HDP-69B(B)型の主要な構成部材の材質を表 2-1 に示す。HDP-69B(B)型は、基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定している。

3. 経年変化に関する評価条件

HDP-69B(B)型の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材の経年変化に対する評価条件を以下に示す。

- ・ 金属キャスク内面、バスケット及び使用済燃料の腐食等を防止するために、使用済燃料収納時にその内部空間を真空乾燥し、不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、使用済燃料を貯蔵する。
- ・ 設計貯蔵期間は 60 年間とする。
- ・ HDP-69B(B)型の主要な構成部材の温度は、除熱解析結果より表 3-1 に示す条件とする。
- ・ HDP-69B(B)型の主要な構成部材の中性子照射量は、遮蔽解析結果より表 3-2 に示す条件とする。

4. 経年変化に関する評価結果

HDP-69B(B)型の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間における環境条件（熱、放射線、腐食）の影響を考慮して、文献や試験データに基づき、経年変化の影響を評価した。HDP-69B(B)型の主要な構成部材ごとに評価した具体的内容を表 4-1 に示す。

評価結果より、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して、主要な構成部材の健全性を維持できることを確認した。

5. 引用文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構,「平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告」(平成16年6月), P.217-221
- (2) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版)(JSME S FA1-2007)」(2007年12月)
- (3) (一社)日本機械学会,「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版(2007年追補版含む。))〈第I編 軽水炉規格〉(JSME S NC1-2005/2007)」(2007年9月)
- (4) ステンレス協会,「ステンレス鋼便覧(第3版)」,日刊工業新聞社(1995),P216, 1428
- (5) (一社)日本機械学会,「金属便覧(改訂6版)」,丸善(株)(平成12年), P.475
- (6) (一社)日本アルミニウム協会,「アルミニウムハンドブック(第6版)」(2001),P.63
- (7) R. R. Gaugh, “Stress corrosion cracking of precipitation-hardening stainless steels”, Materials Performance, Vol.26, No.2(1987)
- (8) (一社)腐食防食協会,「材料環境学入門」,丸善(1993), P.17,18
- (9) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, The use of small scale specimens for testing irradiated material, ASTM STP888(1986)
- (10) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版) JSME S FA1-2007, 事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定(JSME S FA-CC-004)」(2009)
- (11) S. E. Soliman, et al., “Neutron effects on borated stainless steel”, Nucl. Tech., Vol.96(1991)P.346-352
- (12) H. Yoshida, et al., “Reactor irradiation effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol. 24, P.1-6(1981)
- (13) (一財)原子力発電技術機構,「平成15年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, P.221-263(平成15年9月)
- (14) N. Kumagai, et al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. the 15th Int. Symp. on PATRAM(2007)
- (15) 小崎明朝,「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」,(株)日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」(1998)
- (16) 東京電力(株),「福島第一原子力発電所 既設乾式貯蔵キャスクの点検報告」(平成25年5月31日)
- (17) 加藤治, 伊藤千浩,「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」,(一財)電力中央研究所(U92009)(平成4年7月)
- (18) (一財)電力中央研究所,「使用済核燃料貯蔵の基礎」,株式会社ERC出版(2014年4月20日)

- (19) (一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書」 (平成 22 年 3 月), P.15-16
- (20) R. P. Shogan, "NEUTRON IRRADIATION EFFECTS ON THE TENSILE PROPERTIES OF INCONEL 718, WASPALOY AND A-286", WANL-TME-2791(1971)
- (21) T. S. Byun, K. Farrell, "Tensile Properties of Inconel 718 after Low Temperature Neutron Irradiation", J. Nucl. Mater., Vol. 318(2003), P.292-299
- (22) K. Farrell, et al., "An evaluation of low temperature radiation embrittlement mechanisms in ferritic alloys", J. Nucl. Mater., Vol. 210(1994), P.268-281
- (23) 土肥謙次ら, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果(その 2) - 熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響 -」, (一財)電力中央研究所(平成 9 年 6 月), P.10
- (24) S. Shirai, et al., "Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask", Proc. the 12th Int. Conf. on PATRAM(1998)

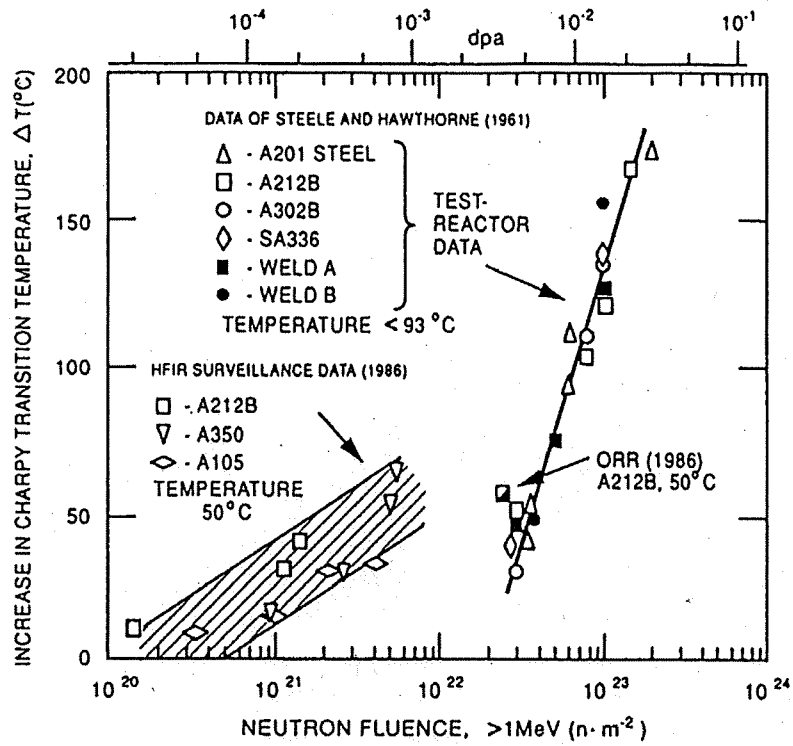


図 4-1 炭素鋼・低合金鋼のシャルピー遷移温度増加と照射量 (n/m^2) の関係⁽²²⁾
 (図中の中性子照射量の単位 $1 n/m^2$ は、 $1 \times 10^{-4} n/cm^2$)

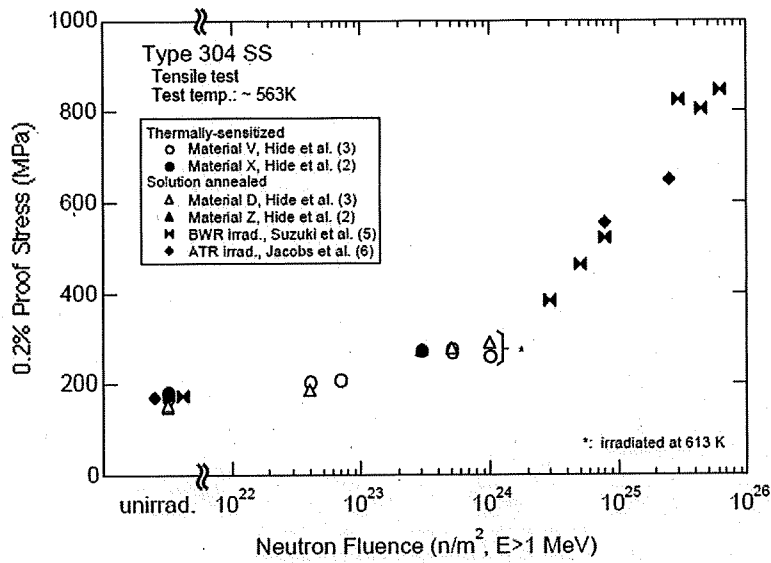


図 3-1. 引張試験時の 0.2%耐力の中性子照射量依存性
 Fig. 3-1. Neutron fluence dependence of 0.2% proof stress obtained from tensile tests.

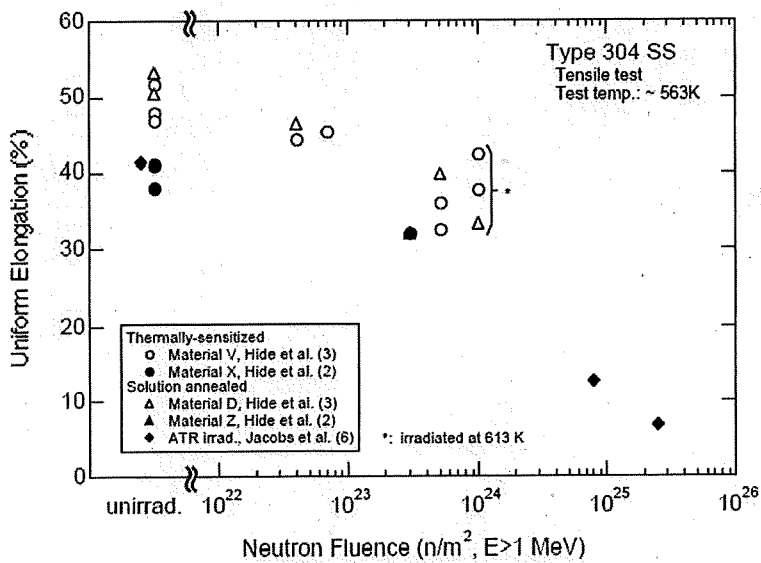
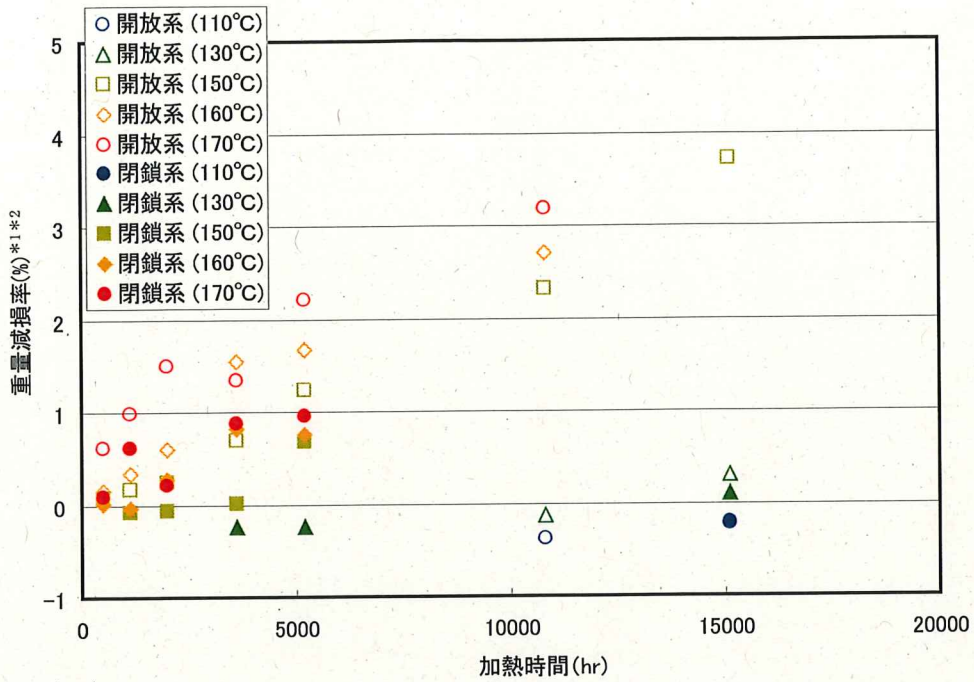


図 3-2. 引張試験時の一様ひずみの中性子照射量依存性
 Fig. 3-2. Neutron fluence dependence of uniform elongation obtained from tensile tests.

図 4-2 ステンレス鋼の中性子照射の影響評価結果⁽²³⁾
 (図中の中性子照射量の単位 1 n/m² は, 1×10⁻⁴ n/cm²)



注記*1：重量減損率は6つの試験片から得た値の平均値。

*2：劣化パラメータより中性子遮蔽材の重量減損率を評価。

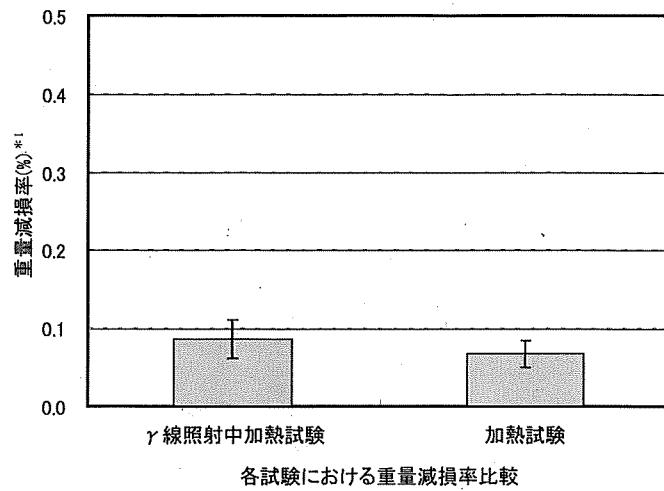
$$\Delta w : \text{レジンの重量減損率 (\%)} = 0.83 \times 10^{-3} \times E_p - 11.1$$

$$E_p : \text{劣化パラメータ} = T \times (24.2 + \ln(t))$$

T : レジン温度 (K)

t : レジン加熱時間 (h)

図 4-3 中性子遮蔽材の重量減損データ⁽¹⁴⁾



加熱条件 : 開放系, 140 °C × 500 h
 照射条件 : 開放系, ガンマ線照射量 5.6×10^4 Gy

注記*1 : 重量減損率は6つの試験片から得た値の平均値。

図 4-4 中性子遮蔽材の中性子照射の影響⁽¹⁴⁾
 (文献記載の試験データを再構成したもの)

表 2-1 HDP-69B(B)型の主要な構成部材の材質

構成部材	材質
金属キャスク本体	
胴	炭素鋼 (GLF1) *1
外筒	炭素鋼 (SM400B) *2
底部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼 (SGV480)
トランニオン	ステンレス鋼 (SUS630)
伝熱フィン	炭素鋼 (SM400B) 及び銅 (C1020P)
中性子遮蔽材 (底部, 側部)	樹脂 (レジン)
バスケット	
バスケットプレート	ほう素添加ステンレス鋼 (B-SUS304P-1)
伝熱プレート	アルミニウム合金 (A1100)
蓋 部	
一次蓋	炭素鋼 (GLF1) *3
二次蓋	炭素鋼 (SGV480) *3
一次蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNB23-3) *4
二次蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNB23-3) *4
中性子遮蔽材 (蓋部)	樹脂 (レジン)
蓋部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304)
金属ガasket	ニッケル基合金/アルミニウム

注記*1: 胴の表面のうち, 一次蓋, 二次蓋の

を, 胴外面のうち大気に触れる部分については塗装を施す。

*2: 外筒の外表面には, 塗装を施す。

*3: 一次蓋及び二次蓋のうち, 胴の

を, 大気に触れる部分については塗装を施す。

*4: 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの表面には, メッキを施す。

表 3-1 HDP-69B(B)型の主要な構成部材の温度条件

構成部材	最高温度*1 (°C)
胴	135
底板	142
外筒	113
底部中性子遮蔽材カバー	142*2
一次蓋	97
二次蓋	86
蓋部中性子遮蔽材カバー	97*2
一次蓋ボルト	90
二次蓋ボルト	86
伝熱フィン	135*2
中性子遮蔽材（蓋部，底部，側部）	128
金属ガスケット	90
バスケットプレート及び伝熱プレート	251*2
トラニオン	120

注記*1：除熱解析結果から得られた温度であり，配置(i)，配置(ii)における評価結果のうち，高い温度を示している（「添付書類5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」参照）。

*2：底部中性子遮蔽材カバーは底板の温度，蓋部中性子遮蔽材カバーは一次蓋の温度，伝熱フィンは胴の温度，伝熱プレートはバスケットプレートの温度と同じとして評価した。

表 3-2 HDP-69B(B)型の主要な構成部材の中性子照射量

構成部材	中性子照射量*1 (n/cm ²)
胴 (底板を含む。)	9.3×10^{14}
外筒	9.3×10^{14} *2
トラニオン	9.3×10^{14} *2
蓋部*3	2.9×10^{13}
中性子遮蔽材 (蓋部, 底部, 側部)	1.0×10^{14}
バスケットプレート及び伝熱プレート	2.2×10^{15}
伝熱フィン	1.0×10^{14}

注記*1：遮蔽解析結果から得られた中性子束が60年間一定であると仮定して算出した値。

*2：外筒及びトラニオンの中性子照射量は、保守的に胴の値と同じとした。

*3：一次蓋, 二次蓋, 蓋部中性子遮蔽材カバー, 一次蓋ボルト, 二次蓋ボルト及び金属ガスケットを含む。

表 4-1 HDP-69B (B) 型の主要な構成部材の経年変化に対する評価について (1/2)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係るデータ	設計条件	評価
胴 (内面), 一次蓋, 二次蓋 (内面), 二次蓋ポルト, 一次蓋ポルト 【材質】 炭素鋼 ニッケルクロムモリブデン鋼	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 1. %燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機燃焼環境における, 鉄系材料の最大腐食速度により, 60年間の腐食量を推定しても0.5mm程度⁽¹⁾。 中性子遮蔽材 (樹脂) に接する胴 (外面) 及び外筒 (内面) が全面腐食すると仮定して算出したところ, 1mm程度 (別紙1)。 	使用環境: ・ヘリウム雰囲気 ・中性子遮蔽材と接触	胴 (内面), 一次蓋, 二次蓋 (内面) 及び一次蓋ポルトは, 不活性雰囲気下で維持される限り, 腐食しない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても, 胴 (内面) の腐食による構造強度への影響はない。 胴 (外面) 及び外筒 (内面) は, 中性子遮蔽材の劣化により生じる水による全面腐食を考慮しても, 構造強度への影響はない。また, 腐食が伝熱フィンとの接合部で局所的に生じては, 除熱機能への影響は小さい。
	熱	●構造強度: 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽²⁾ (設計・建設規格 (2007年追補版)⁽³⁾ 適用) では, 350℃又は425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 クリープによる変形を考慮すべき温度 (融点 [絶対温度] の 1/3 に相当) は約 300℃⁽⁴⁾⁽⁵⁾。 	使用環境温度: 142℃以下	使用環境温度は, 300℃よりも十分低く, クリープを考慮する必要はないため, 構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度: 照射による機械的性質の変化	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは, 顕著な特性変化は認められない (図 4-1)。 	中性子照射量: 10^{16} n/cm ² 未満 (60年間一定)	中性子照射量は, 機械的的特性に変化が認められる値以下であり, 構造強度への影響はない。
外筒 (外面), 二次蓋 (外面), 二次蓋ポルト, 底部中性子遮蔽材カバナー 【材質】 炭素鋼 ニッケルクロムモリブデン鋼	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 各種金属材料の 16年間の海浜大気暴露試験結果から, 最も定常腐食速度の大きい炭素鋼のデータ (2.1µm/年) で 60年間の腐食量を推定しても 1.26mm程度⁽⁶⁾。 	使用環境: ・外気 (海塩粒子雰囲気) ・結露水	外筒 (外面), 二次蓋 (外面) 及び二次蓋ポルトは防錆処理により腐食しない。なお, 防錆処理の補修が困難である金属キャスク本体底部についで, 防錆効果を考慮せず評価しても, 腐食による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度: 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽²⁾ (設計・建設規格 (2007年追補版)⁽³⁾ 適用) では, 350℃又は425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 クリープによる変形を考慮すべき温度 (融点 [絶対温度] の 1/3 に相当) は約 300℃⁽⁴⁾⁽⁵⁾。 	使用環境温度: 142℃以下	使用環境温度は, 300℃よりも十分低く, クリープを考慮する必要はないため, 構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度: 照射による機械的性質の変化	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは, 顕著な特性変化は認められない (図 4-1)。 	中性子照射量: 10^{16} n/cm ² 未満 (60年間一定)	中性子照射量は, 機械的的特性に変化が認められる値以下であり, 構造強度への影響はない。
トランニオン蓋部中性子遮蔽材カバナー 【材質】 ステンレス鋼	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 0.2%耐力相当の応力を負荷した条件における海浜環境での長期曝露試験において, 応力腐食割れに対する高い耐食性が確認された⁽⁷⁾。 	使用環境: ・外気 (海塩粒子雰囲気) ・結露水 ・ヘリウム雰囲気	実機より厳しい使用環境 (応力及び雰囲気) においても応力腐食割れに対する高い耐食性を有し, 腐食による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度: 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽²⁾ (設計・建設規格 (2007年追補版)⁽³⁾ 適用) では, 350℃又は425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 クリープによる変形を考慮すべき温度 (融点 [絶対温度] の 1/3 に相当) は約 280℃⁽⁴⁾⁽⁵⁾。 	使用環境温度: 120℃以下	使用環境温度は, 280℃よりも十分低く, クリープを考慮する必要はないため, 構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度: 照射による機械的性質の変化	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは, 顕著な特性変化は認められない (図 4-2)。 	中性子照射量: 10^{16} n/cm ² 未満 (60年間一定)	中性子照射量は, 機械的的特性に変化が認められる値以下であり, 構造強度への影響はない。
伝熱フィン 【材質】 炭素鋼 (銅クラッド鋼)	腐食	●除熱機能: 腐食によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 炭素鋼が全面腐食すると仮定して算出したところ, 1mm程度 (別紙1)。 銅は鉄に比べてイオン化傾向の低い金属であるため, 腐食しない⁽⁸⁾。 	使用環境: ・胴と外筒間の間隙環境 ・中性子遮蔽材と接触	炭素鋼は, 中性子遮蔽材の劣化により生じる水による全面腐食を考慮しても, 構造強度への影響はない。また, 腐食が伝熱フィンの接合部で局所的に生じては, 除熱機能への影響は小さい。銅は腐食しないため, 除熱機能への影響はない。
	熱	●除熱機能: 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 炭素鋼は, 金属キャスク構造規格⁽²⁾ (設計・建設規格 (2007年追補版)⁽³⁾ 適用) では, 350℃又は425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 炭素鋼は, クリープによる変形を考慮すべき温度 (融点 [絶対温度] の 1/3 に相当) は約 300℃⁽⁴⁾⁽⁵⁾。 	使用環境温度: 135℃以下	使用環境温度は, 300℃よりも十分低く, 炭素鋼のクリープを考慮する必要はないため, 除熱機能への影響はない。
	照射	●除熱機能: 照射によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 炭素鋼は, 中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは, 顕著な特性変化は認められない (図 4-1)。 銅は, 中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは, 顕著な特性変化は認められない⁽⁹⁾。 	中性子照射量: 10^{16} n/cm ² 未満 (60年間一定)	中性子照射量は, 機械的的特性に変化が認められる値以下であり, 除熱機能への影響はない。

表 4-1 HDP-69B (B) 型の主要な構成部材の経年変化に対する評価について (2/2)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係るデータ	設計条件	評価
バスケットブレード 【材質】 ほう素添加ステン レス鋼	腐食	● 構造強度： 腐食による構造強 度の低下 ● 構造強度： 熱によるき裂・破 損	<ul style="list-style-type: none"> 1. %燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境における、バスケット材（ほう素添加ステンレス鋼）の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても30 μm程度⁽¹⁾。 金属キヤスタ構造規格⁽²⁾（設計・建設規格（2007年追加補版）⁽³⁾適用）の事例規格 FA-CC-004⁽⁴⁾では、300℃までの設計用強度・物性値がクリープによる変形を考慮すべき温度（融点【絶対温度】の1/3に相当）は約280℃⁽⁵⁾。 	<p>使用環境： ヘリウム雰囲気</p> <p>使用環境温度： 251℃以下</p>	<p>不活性雰囲気維持される限り腐食の影響はない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても腐食は僅かなものであり、構造強度への影響はない。</p> <p>使用環境温度は、280℃よりも低く、クリープを考慮する必要はないため、構造強度への影響はない。</p>
	熱	● 未臨界機能： 照射による中性子 吸収材の減損 ● 構造強度： 照射による機械的 特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 【未臨界機能】 中性子吸収材であるB-10の60年間の貯蔵中の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても10⁻⁵程度。 【構造強度】 中性子照射量が10¹⁷ n/cm²までは、顕著な特性変化は認められない⁽¹⁾。 金属キヤスタ内部に残留する酸素量がすべてバスケット材（アルミニウム合金）の腐食に算やされたとして評価しても、腐食量は1 μm以下⁽²⁾。 構造強度部材として使用する場合は、使用温度に応じてクリープによる強度の低下を考慮する必要がある。 	<p>中性子照射量： 10¹⁶ n/cm²未満 (60年間一定)</p>	<p>B-10の減損割合は無視でき、また、中性子照射量は機械的特性に変化が認められる値以下であるため、未臨界機能及び構造強度への影響はない。</p>
伝熱プレート 【材質】 アルミニウム合金	腐食	● 除熱機能： 熱によるき裂・破 損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キヤスタ内部に残留する酸素量がすべてバスケット材（アルミニウム合金）の腐食に算やされたとして評価しても、腐食量は1 μm以下⁽²⁾。 	<p>使用環境： ヘリウム雰囲気</p> <p>使用環境温度： 251℃以下</p>	<p>不活性雰囲気維持される限り腐食の影響はない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても腐食は僅かなものであり、除熱機能への影響はない。</p> <p>構造強度部材ではないため、クリープを考慮する必要はなく、除熱機能への影響はない。</p>
	熱	● 除熱機能： 熱によるき裂・破 損	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が10¹⁹ n/cm²までは、顕著な特性変化は認められない⁽²⁾。 	<p>中性子照射量： 10¹⁶ n/cm²未満 (60年間一定)</p> <p>使用環境温度： 128℃以下</p> <p>使用環境： 閉鎖環境 放射線照射量： 10⁸ Gy~10¹¹ Gy 程度*1 (60年間、一部減衰考 慮)</p>	<p>中性子照射量は機械的特性に変化が認められる値以下であり、除熱機能への影響はない。</p> <p>設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮すると、設計貯蔵期間経過時までのレジン中の減損率は約1%となる。これを丸めて2%の減損があるとして評価する。</p> <p>照射中加熱試験は設計条件を超える照射量で行っており、照射による重量減損を考慮する必要はない。</p>
中性子遮蔽材 【材質】 樹脂	熱	● 遮蔽機能： 重量減損の有無	<ul style="list-style-type: none"> 自社開発製品に対する社内試験データに基づいて、熱による中性子遮蔽材の重量減損率は約2%と評価⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾（図4-3）。 	<p>使用環境： 閉鎖環境</p> <p>放射線照射量： 10⁸ Gy~10¹¹ Gy 程度*1 (60年間、一部減衰考 慮)</p>	<p>設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮すると、設計貯蔵期間経過時までのレジン中の減損率は約1%となる。これを丸めて2%の減損があるとして評価する。</p> <p>照射中加熱試験は設計条件を超える照射量で行っており、照射による重量減損を考慮する必要はない。</p>
	腐食	● 遮蔽機能： 重量減損の有無	<ul style="list-style-type: none"> 自社開発レジンの加熱照射試験（140℃、5.6×10⁴ Gy）の重量減損率は加熱試験（140℃）の結果とほぼ等しく、重量減損に占める照射の影響は小さい⁽¹⁾（図4-4）。 	<p>使用環境： 二次側内側： ヘリウム雰囲気 二次側外側： 外気（海塩粒子雰 囲気）、結露水</p> <p>使用環境温度： 90℃以下</p>	<p>一次側及び二次側内側の金属ガスケットは、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。二次側外側の金属ガスケットは、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても腐食しにくい率に変化はなく、閉じ込め機能への影響はない。また、海水流入のような腐食環境に置かれても、ただちに閉じ込め機能に影響はなく、金属キヤスタを点検可能な構造としており、必要に応じて対処可能である。</p> <p>使用環境温度から設計貯蔵期間（60年間）に相当するLMPを算出するとLMPの定数C=20の場合は約9.4×10⁹、C=14の場合は約7.2×10⁹となり、設計貯蔵期間を通じて初期の腐食率維持されると判断される。</p>
金属ガスケット 【材質】 ニッケル合金 アルミニウム	腐食	● 閉じ込め機能： 腐食による閉じ込 め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 蓋部縮小モデルにおける約3年間の塩水噴霧試験では、漏えい率に変化はない⁽¹⁾⁽²⁾。 長期保管後の海水流入時においても漏えい率は判定基準値以下であり、ただちに漏えい率に影響はない⁽¹⁾⁽²⁾。 	<p>使用環境： 二次側内側： ヘリウム雰囲気 二次側外側： 外気（海塩粒子雰 囲気）、結露水</p> <p>使用環境温度： 90℃以下</p>	<p>一次側及び二次側内側の金属ガスケットは、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。二次側外側の金属ガスケットは、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても腐食しにくい率に変化はなく、閉じ込め機能への影響はない。また、海水流入のような腐食環境に置かれても、ただちに閉じ込め機能に影響はなく、金属キヤスタを点検可能な構造としており、必要に応じて対処可能である。</p> <p>使用環境温度から設計貯蔵期間（60年間）に相当するLMPを算出するとLMPの定数C=20の場合は約9.4×10⁹、C=14の場合は約7.2×10⁹となり、設計貯蔵期間を通じて初期の腐食率維持されると判断される。</p>
	熱	● 閉じ込め機能： 熱による閉じ込め 機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 初期の閉じ込め機能（1×10⁻¹⁰ Pa・m³/s）を保持できる限界ラウン・ミラー・パラメータ（LMP）は、定数Cが20の場合は約11.0×10⁹⁽¹⁾⁽²⁾、14の場合は8.0×10⁹⁽¹⁾⁽²⁾。 長期密封性能試験⁽¹⁾⁽²⁾において130℃~140℃（19年以上）で閉じ込め機能維持。 	<p>使用環境： 二次側内側： ヘリウム雰囲気 二次側外側： 外気（海塩粒子雰 囲気）、結露水</p> <p>使用環境温度： 90℃以下</p>	<p>一次側及び二次側内側の金属ガスケットは、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。二次側外側の金属ガスケットは、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても腐食しにくい率に変化はなく、閉じ込め機能への影響はない。また、海水流入のような腐食環境に置かれても、ただちに閉じ込め機能に影響はなく、金属キヤスタを点検可能な構造としており、必要に応じて対処可能である。</p> <p>使用環境温度から設計貯蔵期間（60年間）に相当するLMPを算出するとLMPの定数C=20の場合は約9.4×10⁹、C=14の場合は約7.2×10⁹となり、設計貯蔵期間を通じて初期の腐食率維持されると判断される。</p>
照射	照射による機械的 特性の変化	● 照射による機械的 特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ニッケル合金は、中性子照射量が10¹⁷ n/cm²までは、顕著な特性変化は認められない⁽²⁾⁽³⁾。 アルミニウムは、中性子照射量が10¹⁹ n/cm²までは、顕著な特性変化は認められない⁽²⁾。 	<p>中性子照射量： 10¹⁴ n/cm²未満 (60年間一定)</p>	<p>中性子照射量は、各材料の機械的特性に変化が認められる値以下であり、閉じ込め機能への影響はない。</p>

注記*1：表3-2に示す中性子遮蔽材の中性子照射量を実効線量に換算した。

中性子遮蔽材の熱分解により生じる水分による
胴、伝熱フィン及び外筒の腐食量評価

HDP-69B(B)型で用いる中性子遮蔽材の樹脂(エポキシ系レジン)は、熱分解により水、二酸化炭素、炭化水素、水素が生じるが、その大部分が水分であることが確認されている⁽²⁴⁾。胴外面、伝熱フィン及び外筒内面は、これら生成物により腐食される可能性がある。そこで、中性子遮蔽材の熱分解による生成物をすべて水とし、水による胴外面、伝熱フィン及び外筒内面の腐食量を評価する。

1) 生成される水分量

設計貯蔵期間(60年)のHDP-69B(B)型の中性子遮蔽材の重量減損は、使用環境温度を考慮し評価した wt%を用いる。そのすべてが水とした場合、側部中性子遮蔽材の長手方向の単位長さ当たりの重量から、単位長さ当たりに生じる水重量は g/cm と求められる。ここで、水の分子量は 18.01528 g/mol であることから、単位長さ当たりに生じる水のモル数 N_{H_2O} は mol/cm となる。

2) 腐食量の評価

胴及び外筒は炭素鋼で構成される。また、伝熱フィンは銅と炭素鋼で構成されるが、高湿度雰囲気では炭素鋼が腐食し銅はほとんど腐食しないため、炭素鋼の腐食量を求める。なお、炭素鋼は鉄 100% とする。鉄の酸化反応を、 $2Fe+3H_2O \rightarrow 3H_2+Fe_2O_3$ と仮定すると、単位長さ当たりの酸化される鉄の重量 m_{Fe} (g/cm) は以下の式より求められる。

$$m_{Fe} = \frac{2}{3} N_{H_2O} \times M_{Fe}$$

ここで、 N_{H_2O} : 単位長さ当たりに生じる水のモル数

M_{Fe} : 鉄の原子量 (=55.845 g/mol)

したがって、

$$m_{Fe} = \frac{2}{3} \times \text{} \times 55.845$$

$$= \text{} \text{ g/cm}$$

胴及び外筒の腐食厚さ t (cm) は全面腐食を仮定すると以下の式より求められる。

$$t = \frac{(m_{Fe} / \rho_{Fe})}{A_s}$$

ここで、 ρ_{Fe} : 鉄の密度 (=7.85 g/cm³)

A_s : 単位長さ当たりの胴外面、伝熱フィン及び外筒内面の表面積 (= cm²/cm)

したがって、

$$t = (\text{} / 7.85) / \text{}$$

$$= 0.022 \text{ cm} \rightarrow 1 \text{ mm}$$

よって、胴(外面)、伝熱フィン及び外筒(内面)の腐食厚さは 1 mm 程度となる。

資料9

添付書類9

当該申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びに
その実施に係る組織に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 型式設計特定容器等の製作等に係る組織	1
2.1 設計・技術組織	1
2.2 品質管理組織	2
2.3 その他補助組織	3
3. 品質マネジメントシステムに係る文書	3
3.1 品質マネジメントシステム計画書	3
3.2 文書の管理	4
3.3 記録の管理	4
4. 型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画	5
4.1 プロジェクト・マネージャーの配置	5
4.2 顧客関連のプロセス	5
4.3 プロジェクト組織の確立と運営	5
4.4 プロジェクト工程管理	5
5. 型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画と実施のプロセス	5
6. 設計に係る品質管理の方法	5
6.1 設計インプットの明確化	5
6.2 設計計画の作成と業務管理	6
6.3 設計インタフェース管理	6
6.4 設計の体系的レビュー	7
6.5 設計解析	7
6.6 設計アウトプットの文書化	8
6.7 設計検証	8
6.8 設計の妥当性確認	9
6.9 設計変更管理	9

6.10	型式指定申請書の作成	9
7.	製造に係る品質管理の方法	10
7.1	設計要求事項及び購入要求事項	10
7.2	製造工程管理	10
7.3	識別管理	12
7.4	発送前点検の実施	13
7.5	出荷準備及び輸送	13
8.	検査に係る品質管理の方法	14
8.1	検査要領の確立	14
8.2	検査員の力量管理	15
8.3	検査設備（計測器、試験機等）の管理	15
8.4	検査の実施	15
8.5	不適合製品の識別及び隔離	15
8.6	発送前検査の実施	15
8.7	溶接検査の計画	16
9.	調達に係る品質管理の方法	16
9.1	調達計画及び調達先の選定	16
9.2	調達先とのコミュニケーション	16
9.3	発注	17
9.4	文書の管理	17
9.5	検査及び受入管理	17
9.6	品質記録の保管	18

図表目次

図 2-1	型式設計特定容器等の製作等に係る組織	19
図 3-1	品質マネジメントシステムに係る文書体系図	20
図 5-1	型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画と実施のプロセス	21
図 7-1	特定容器 HDP-69B(B)型の製造手順の概略 (例)	22
表 3-1	品質マネジメントシステム文書体系	23
表 3-2	品質マネジメントシステムに係る主な文書	24

1. 概要

本書は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（昭和32年6月10日法律第166号）及び「原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則」（令和2年1月23日原子力規制委員会規則第2号）（以下「品質管理基準規則」という。）に適合するための計画として「型式設計特定容器等の型式指定申請書」（以下「本申請書」という。）「7. 申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織に関する事項」に記載した事項のうち「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成25年12月6日原子力規制委員会規則第24号）及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」（昭和53年12月28日総理府令第57号）（以下「外運搬規則」という。）等に対する適合性の確保に必要な設計、製造、検査及び調達に係る品質管理の方法、及び組織について記載したものである。

2. 型式設計特定容器等の製作等に係る組織

型式設計特定容器等の製作等に係る組織を図2-1に、責任及び役割については2.1節から2.3節に示す。なお、2.3節に示す組織については、型式設計特定容器等の製作等における社内の業務プロセスにおいて、2.1節から2.2節に識別される組織を補足する組織、例えば、対顧客上のプロセスを実施する組織等として識別される（品質管理基準規則に対する適合性確保に必要な設計、製造、検査及び調達に係る組織以外の組織）。各組織長の責任及び権限等については、社内一次文書である品質マネジメントシステム計画書に記載する。

原子力品質保証本部の長は品質マネジメントシステム管理責任者として取締役社長から本申請書7.3.7項に記載の責任及び権限を与えられている。また、原子力品質保証本部の長並びに原子力生産本部の長は管理者として取締役社長から、本申請書7.3.8項に記載の責任及び権限を与えられている。なお、検査の独立性を確保するため、設計・製造に係る部門（設計・技術組織）とは別に品質管理を所管する部門（品質管理組織）を設け、品質管理組織の要員が検査等を実施することとする。

2.1 設計・技術組織

型式設計特定容器等における設計及び製造に係る組織の総称で、型式設計特定容器等の機器を所管する部門を指す。

型式設計特定容器等の製造においては原子力生産本部に属する組織のうち、原子力設計部、原子力計画部、原子力製造部、原子力調達部が該当する。

2.1.1 設計に係る組織

原子力生産本部 原子力設計部は設計部門として、また他の設計部門を含めた設計取りまとめとして、設計開発の計画（以下「設計計画」という。）の立案、基本設計、基本形状図の作成、解析条件書の作成、安全解析、解析報告書の作成、型式指定申請書の取りまとめを行い、その他設計部門とのインタフェース調整、各プロセスに関するレビュー活動取りまとめを行う。

原子力生産本部 原子力計画部は設計部門として、設計取りまとめの指示に従い、臨界防止及び遮蔽に係る安全解析及び解析報告書の作成を行い、その結果を設計取りまとめに報告する。

2.1.2 製造に係る組織

設計取りまとめは、製作図面／組立図面の発行、購入仕様書の発行、溶接検査計画書の発行及び製造、検査に関連するレビュー等を行う。

原子力生産本部 原子力製造部は製造部門として、製作手順並びに製造工程を計画し、計画された製作手順を生産管理票として発行し、製造を行い、製造に関する結果を作業記録に記録する。また、製造、検査に関連するレビュー等を行う。

2.1.3 調達に係る組織

設計部門及び製造部門は購入要求元部門として、調達先監査・調査・評価、購入仕様書の発行、調達先が発行する図面、仕様書、各種要領書のレビュー・承認、調達先の製造・役務の受入、調達先認定更新及び調達に関連するレビュー等を行う。

原子力生産本部 原子力調達部は調達部門として、調達先監査・調査・評価、調達先決定、発注等を行う。

2.2 品質管理組織

型式設計特定容器等の製造等において、品質管理活動の担保や各種検査の独立性、中立性を確保するために、2.1節に記載のある設計・技術組織とは別に、設ける部門を指す。

原子力品質保証本部に属する組織のうち、原子力品質保証部が該当する。

2.2.1 検査に係る組織

原子力品質保証本部原子力品質保証部は品質管理担当部門（以下「品管担当部門」という。）として、品質マネジメントシステム計画書を作成し、その他関連部門に配付し、品質管理活動の実施状況をモニタリングする。また、製造部門が実施した製造に対する検査の実施手順を検査要領書に定め、検査を行い結果を記録する。

調達に関連する活動として、品管担当部門は品質管理要求事項を作成し、調達先に配付、調達先の品質マネジメントシステムへの反映結果をレビュー、調達先監査・調査・評価、調達先認定、調達先認定更新、図面、仕様書、各種要領書のレビュー、調達先の製造・役務に対する受入・工程中・完成検査、出荷許可証の発行、品質記録の発行、調達に関連するレビュー等を行う。

2.3 その他補助組織

型式設計特定容器等の製作等における社内の業務プロセスにおいて、製品実現の計画を立案する上で必要な組織等を指す。型式設計特定容器等の品質管理規準規則への適合を担保するために必要な設計、製造、検査及び調達に係る組織を補助する組織の総称である。プロジェクト部門として、福島・サイクル技術本部 福島・サイクルプロジェクト部、営業部門として、原子力営業本部、物流部門として、株式会社日立製作所 エネルギービジネスユニット 製造本部 プロセスマネジメント推進部が該当する。これら補助部門の役割や定義、責任等については、社内一次文書である品質マネジメントシステム計画書に記載する。

3. 品質マネジメントシステムに係る文書

型式設計特定容器等の製作等に係る組織における、品質マネジメントシステム文書は以下のとおりである。

- (1) 品質方針及び品質目標
- (2) 品質マネジメントシステム計画書
- (3) 実効性のあるプロセスの計画的な実施及び管理がなされるようにするために、組織が必要と決定した文書
- (4) 品質管理活動に関する計画、運用及び管理を確実に実施するためのプロセスを定めた手順書、指示書、図面等（以下「手順書等」という。）

これらの体系を図 3-1、表 3-1 に示す。

3.1 品質マネジメントシステム計画書

型式設計特定容器等の製作等に係る組織は、品質マネジメントシステム計画書に次の事項を定める。

- (1) 品質マネジメントシステムの運用に係る組織に関する事項
- (2) 品質管理活動の計画、実施、評価及び改善に関する事項
- (3) 品質マネジメントシステムの適用範囲
- (4) 品質マネジメントシステムについて確立され、文書化された手順書等、又はそれらを参照できる名称や文書番号等の情報
- (5) 品質マネジメントシステムのプロセス間の相互関係に関する記述

品質マネジメントシステム計画書は、品管担当部門にて作成、審査、承認する。
改訂する場合においては、上記と同じ手続きを経て承認する。

3.2 文書の管理

- (1) 型式設計特定容器等の製作等に係る組織は、品質マネジメント文書を管理する。
- (2) 型式設計特定容器等の製作等に係る組織は、要員が判断及び決定をするに当たり、適切な品質マネジメント文書を利用できるよう上記3章に記載した品質マネジメントシステムを構成する文書に対して、以下の内容を含む手順書を定める。ただし、記録は、文書の一種ではあるが、「3.3 記録の管理」に従って管理する。品質マネジメントシステムに係る主な文書については、表3-2を参照。
 - (a) 品質マネジメント文書を発行するに当たり、その妥当性を審査し、発行を承認する。
 - (b) 品質マネジメント文書の改訂の必要性について評価するとともに、改訂に当たり、その妥当性を審査し、改訂を承認する（改訂の妥当性を審査することを含む。）。
 - (c) 品質マネジメント文書の審査及び評価には、その対象となる文書に定められた活動を実施する部門の要員を参画させる（品質マネジメントシステム計画書に記載の組織の最小単位）。
 - (d) 品質マネジメント文書の改訂内容及び最新の改訂状況を識別できるようにする。
 - (e) 改訂のあった品質マネジメント文書を利用する場合には、当該文書の適切な制定版又は改訂版が利用しやすい体制を確保する。
 - (f) 品質マネジメント文書を、読みやすく容易に内容を把握することができるようにする。
 - (g) 組織の外部で作成された品質マネジメント文書を識別し、その配付を管理する。
 - (h) 廃止した品質マネジメント文書が使用されることを防止する。この場合において、当該文書を保持するときは、その目的にかかわらず、これを識別し、管理する。

3.3 記録の管理

- (1) 型式設計特定容器等の製作等に係る組織は、個別業務等要求事項への適合及び品質マネジメントシステムの実効性を実証する記録を明確にするとともに、当該記録を、読みやすく容易に内容を把握することができ、かつ、検索することができるように作成し、品質管理活動の重要度に応じてこれを管理する。

- (2) 型式設計特定容器等の製作等に係る組織は、(1)の記録の識別、保存、保護、検索及び廃棄に関し、所要の管理の方法を定めた手順書等を作成する。

4. 型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画

4.1 プロジェクト・マネージャーの配置

プロジェクトの計画から引渡しに至るまでの全期間に渡って、社外及び社内に関連部署間との調整を行い、プロジェクト工程、品質を管理し、契約の円滑なる推進を図るため、プロジェクト・マネージャー（以下「プロマネ」という。）を配置する。

4.2 顧客関連のプロセス

製品化に伴い、プロマネは、設計部門及びその他関連部門の協力により、営業部門経由あるいは顧客と直接コミュニケーションを取ることによって、個別業務等要求事項を明確にする。

4.3 プロジェクト組織の確立と運営

プロマネは、関連部門の長と協議の上、各部門の分担を明確にし、実施段階以降、必要に応じて部門内分担の詳細を決定させる。

4.4 プロジェクト工程管理

プロマネは、顧客要求を反映した主要工程表を取りまとめ、関連部門に周知徹底させる。主要工程表においては、ホールドポイントを明確にする。

プロマネは、設計部門間、及び設計部門と製造部門に関連する事項を調整する。

5. 型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画と実施のプロセス

型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画と実施のプロセスを図 5-1 に示す。なお、具体的な品質管理の方法については 6 章、7 章、8 章及び 9 章に示す。

6. 設計に係る品質管理の方法

6.1 設計インプットの明確化

設計部門は、設計作業が正しい方法で実施されるよう、また設計内容の決定、設計検証の実施、妥当性確認の実施及び設計変更の評価を行うための適切な基準を与えるよう、設計インプットを適時、明確に文書化する。また、設計部門は、設計インプットの相互関係、漏れあるいは曖昧さの有無を把握の上、不完全、不明確あるいは矛盾する要求事項については、インプット発信元と確認するなど、設計インプットについて適切性の確認を行う。

設計部門は、型式設計特定容器等の製作等に関する法令、規則（「使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則」（平成12年6月16日 通商産業省令第112号）（以下「貯蔵規則」という。）、「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）及び外運搬規則等）、技術基準及び既に認可を取得した当該型式証明申請書を確実にインプットとして管理する。

6.2 設計計画の作成と業務管理

設計部門は、設計プロセスが正しい方法で実施されるよう、また設計が要求事項に適合していることを検証できるよう、次の事項を含む設計活動を詳細化した設計計画を作成する。

- (1) 設計部門の業務
- (2) 設計インプットの適切性の確認方法
- (3) 設計のレビュー方法
- (4) 設計の変更管理方法
- (5) 設計解析要領
- (6) 適用社内基準一覧
- (7) 設計業務フロー及び設計インタフェース
- (8) 解析業務実施要領（解析業務を行う場合）
- (9) 設計工程
- (10) 設計体制
- (11) 設計アウトプット
- (12) 設計検証の要領^(注1)
- (13) 設計の妥当性確認方法^(注1)

(注1) 設計レビュー、設計検証、設計の妥当性確認は、異なる目的を持つ。それらは、製品及び組織に適するように、個々に又はどのような組合せでも、実施し、記録することができることとしている。

設計計画に付属する設計活動計画書及び業務管理表において、設計の進捗を適宜確認し、計画に対する実績を管理する。また、設計インプット、設計アウトプット、設計の妥当性確認結果を明確にする。(6.8節参照)

6.3 設計インタフェース管理

設計部門は、設計計画に付属する業務管理表において、個々の設計作業に先立ち、必要に応じて、詳細な設計分担・インタフェース管理要領を作成し、管理する。この設計分担・インタフェース管理要領について、事前にその他関連部門の了解を得る。

6.4 設計の体系的レビュー

設計部門は、設計インプットが適切に選定され、かつ設計アウトプットが要求事項を満たせるかどうかを評価するために、包括的かつ体系的なレビュー活動を適切な段階で計画的に実施する。

なお、新設計品及び開発品については、設計のレビューの一環として、デザインレビュー会議を行うものとし、その対象、範囲、具体的な要領について品管担当部門が制定した社内基準に基づいて実施する。

6.5 設計解析

許認可等の重要な安全評価に係る解析業務については、(社)原子力安全推進協会「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン JANSI-GQA-01-第2版」に準拠して次のとおり管理する。

6.5.1 解析業務の計画

設計部門は、解析業務の計画段階において、次の事項の計画を明確にする。

- (1) 解析業務の作業手順（設計レビュー、審査方法、時期等を含む。）
- (2) 解析結果の検証
- (3) 業務報告書の確認
- (4) 解析業務の変更管理

設計部門は、新設計を採用した場合、あるいは新しい解析手順や計算機プログラムを適用した場合など、許認可申請用の設計解析に新規性が認められる場合には、デザインレビュー会議により検証する。計算機プログラムを検証した場合には、名称及びバージョンを登録リストに登録しておくことを原則とする。計算機プログラム名称が同じであってもバージョンが相違する計算機プログラムを使用する場合は、改めて検証を実施する。

6.5.2 入力根拠の明確化

設計部門は、解析業務における入力値が妥当であることを確認するため、各計算機プログラムへの入力データの技術的な根拠事項を文書化する。

6.5.3 入力結果の確認

設計部門は、入力値の確認のため、確認方法の状態に応じたエビデンス（エコー [計算機が読み込んだ入力値を出力として書き出したもの]、入力画面、入力リスト等）を技術図書として残す。なお、入力値の確認に当たっては、必要に応じてダブルチェックによる確認を実施する。

6.5.4 業務報告書の確認

設計部門は、顧客の要求する解析業務報告書が、所定の要求事項（様式等）に適合し、また、確認済みの解析結果が適切に解析業務報告書に反映されていることを確認する。

6.5.5 解析業務の変更管理

設計部門は、解析業務に変更が生じた場合は変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映する。また、変更に伴う影響範囲等を考慮し、入力根拠の反映、計算機プログラムへの入力が正確に実施されたことの確認、解析結果の検証、及び解析業務報告書の確認等を実施する。

6.5.6 品質記録の保管管理

設計部門は、解析業務に係る必要な文書（解析業務計画書、入力根拠書、解析業務報告書、チェックシート及びチェックのための照合資料、入出力値の記録等）を品質記録として保管期限を定め適切に管理する。また、調達先に対しても同様の管理を実施することを要求する。ただし、調達先において当社と同等の管理が実施できない場合には、当該設計部門が該当する品質記録を引き取り管理する。

6.6 設計アウトプットの文書化

設計部門は、プラント、設備、機器・装置の機能条件等を十分に考慮の上、その他関連部門及び顧客に対して要求すべき事項を、設計アウトプットとして図面、仕様書、技術資料等の設計文書により明確にし、指示内容を下流工程又は顧客に確実に伝達する。

これらの設計文書は、次の条件を満たすこととしている。

- (1) 設計検証が可能となるように十分詳細に文書によって設計インプットと関連付けられている。
- (2) 要求すべき検査が規定され、適切な判定基準が含まれているか又は参照されている。
- (3) 設計される製品の機器名称が明確にされている。

6.7 設計検証

設計部門は、設計アウトプットが設計インプットを満たしていることを確実にするために、原則として設計図書が作成された都度、設計検証を行う。

6.7.1 設計検証の方法

設計部門は、次のいずれかの方法（又は組合せ）により、設計検証を実施する。

- (1) 確認実験の実施と評価

- (2) 別法による計算結果との比較評価
- (3) 類似の実績ある設計との比較評価
- (4) 設計インプット、設計レビューの資料及び記録等との比較評価
- (5) 過去の経験から得られた不適合、製品事故などの教訓との比較評価

6.7.2 設計検証のタイミング

設計検証は、設計部門から設計アウトプットとして図面、仕様書、技術資料等の設計文書が出図される前に行う。

6.7.3 設計検証記録

設計部門は、設計検証の結果が確認できるように記録する。また、設計検証の結果によって必要な処置がある場合は記録する。それらの記録は、適切に保管する。

6.8 設計の妥当性確認

設計部門は、結果として得られる製品が、設計要求事項を満たし得ることを確実にするために、6.2節で計画された方法と実施時期及び次の事項に従って、設計の妥当性確認を実施する。

- (1) 設計の妥当性確認は、型式設計特定容器等の引渡し前、あるいは実行可能な段階で実施し、その時期、方法、評価対象の記録等に関連する事項を明確にして実施する。
- (2) 品管担当部門が作成する検査要領書のレビューを通じて、検査段階で設計の妥当性確認が実施できることを確認する。
- (3) 妥当性確認の結果の記録、及び必要な処置があれば、その記録を維持する。

6.9 設計変更管理

設計部門は、設計のレビュー又は設計検証完了後に変更が生じた場合、変更の内容及び規模に応じて、再度設計のレビューあるいは設計検証、及びその変更が妥当であるかの確認を行う。変更が妥当であるかの確認においては、その変更が型式設計特定容器等を構成する他の要素、及びすでに引き渡たされている製品に及ぼす影響についての評価を含める。変更が妥当であるかの確認の結果の記録、及び必要な処置があれば、その記録を維持する。

6.10 型式指定申請書の作成

設計取りまとめは、6.1節、6.2節、6.5節及び6.6節の設計インプット及び設計アウトプットを基に、型式指定申請書に必要な資料等を次のとおり取りまとめる。

6.10.1 本文の作成

設計取りまとめは、文書化された設計インプット及び設計アウトプットを基に、貯蔵規則第43条の2の8第1項の要求に従って、必要な事項（申請者及び製造工場、並びに型式設計特定容器等の種類、名称・型式、設計及び製作の概要、設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織等）を本文として取りまとめる。

6.10.2 添付書類の作成

設計取りまとめ及び設計部門は、設計インプットを基に設計解析を行い、結果を設計アウトプットとして文書化する。設計取りまとめは、設計アウトプット文書を基に、貯蔵規則第43条の2の8第2項の要求に従って、必要な事項（型式証明を受けた設計との整合性、臨界防止、遮蔽、閉じ込め、除熱、火災及び爆発の防止、耐震性、耐圧強度及び耐食性等）を添付書類として取りまとめる。

6.10.3 型式指定申請書の検証

設計取りまとめは検証を実施し、その結果としてコメントが付された場合は、必要に応じ資料を修正したうえで再度検証する。必要に応じこれらを繰り返し、型式指定申請書の検証を完了する。

7. 製造に係る品質管理の方法

7.1 設計要求事項及び購入要求事項

購入要求元部門は、必要に応じ、製造部門、品管担当部門と協議し、適用法令、規格、基準、契約仕様及び次の要求事項を設計・調達文書で明確に規定する。

- (1) 検査判定に係わる基準
- (2) 適用法令、規格
- (3) 識別、マーキングに係る事項
- (4) 特殊工程に係る事項（溶接、非破壊試験、熱処理、レジン充填）
- (5) 製品品質に係る重要度
- (6) 取扱い、保管、梱包、出荷、運搬に係る事項
- (7) 関連技術資料
- (8) その他

7.2 製造工程管理

製造部門及び品管担当部門は、担当する業務について次の事項を計画し、管理する。

7.2.1 技量管理

- (1) 製造部門及び品管担当部門は、次の作業について技量管理要領をあらかじめ確立し、技量管理を行う。
 - (a) 溶接作業
 - (b) 非破壊試験作業
 - (c) レジン充填作業
- (2) 製造部門及び品管担当部門は、技量管理に関する記録を作成し管理する。

7.2.2 設備管理

製造部門及び品管担当部門は、製品要求事項への適合に影響ある設備（治工具等を含むインフラストラクチャ。）の機能・性能及び精度等を確保し、管理されている設備により、製造、取扱い、運搬等の作業を行う。なお、管理する設備には、次のようなものがある。

- (1) 製造に使用する設備（工作機械、溶接機、治工具類、計測器、試験機、純水製造装置、揚重クレーン他）
- (2) 製造に適した環境を保持する設備（集塵、空調設備、換気設備他）
- (3) その他、製品要求事項への適合に影響ある設備等

7.2.3 製造の管理

7.2.3.1 製造に使用する図面

- (1) 製造部門は、製造に使用する図面において、原則、最新の「決定図書」に基づいて製造を行う。設計部門は製造工程に支障がないよう、適切な時期に顧客と調整し、図面を「決定図書」とする。

7.2.3.2 製作手順の計画と管理

- (1) 製造部門は、製作開始前に図面、仕様書、該当する場合は検査項目一覧表等、契約内容並びに適用法令を反映した図書及び社内の製造、検査の規格・規準に基づいて、製品（以下、部品、材料を含む。）に応じた製作手順並びに製造工程（製作日程、スケジュール）を計画する。特定容器 HDP-69B(B)型の製造手順の概略（例）を図 7-1 に示す。
- (2) 製造部門は、計画された製作手順を生産管理票として発行する。生産管理票は、製造工程、検査工程等の指示と実行、及びそれらの管理に使用する。
- (3) 製造部門は、計画された製造工程を、適宜、工程表に展開し、管理実行する。

7.2.3.3 製作要領書の作成

製造部門は、要領書あるいは指示書がなければ品質に有害な影響を及ぼす製造工程について、作業規格あるいは作業指導書を作成し、実施する。

作業規格又は作業指導書は、必要に応じて、次の項目を記載する。

- (1) 作業要領
- (2) 作業者の資格
- (3) 使用する設備
- (4) 作業の監視と管理方法
- (5) 作業環境

7.2.3.4 作業の指示と管理

(1) 製品の製作、検査の工程は、生産管理票によって指示され、各工程が完了したことを確認しながら、その順序に従って工程を進める。

(2) 生産管理票には、必要に応じて次の事項を記載し、作業者に必要な情報を与える。

- (a) プロジェクトあるいはロット
- (b) 作業番号（作番）
- (c) 図面、仕様書、作業規格、作業指導書等の番号
- (d) 作業工程
- (e) 作業上の注意事項

7.2.3.5 作業の監視

製造部門は、作業工程に応じた現場巡視（パトロール）等によって作業状況及び品質の監視を行う。

7.3 識別管理

7.3.1 識別

7.3.1.1 識別を要する材料

設計部門は、次の材料の識別表示を図面あるいは購入仕様書で規定する。

- (1) JSME クラス要求対象材
- (2) 溶接検査対象材
- (3) 設計部門が特に指定するもの

7.3.1.2 識別マーキングの実施

(1) 製造部門は、製造工程中、次のいずれか又は組合せた方法によって製品を識別し、それを維持する責任を有する。

- (a) 帳票による識別：当該品の図面番号，作番などを示す帳票（生産管理票，荷札等）が現品とともに移動することによって識別を行う。
 - (b) ペイント又は永久マーキングによる識別：当該品上にペイント又は永久マーキングにより，作番，号機番号，部品名等の1つ又は組合せた表示によって識別を行う。
- (2) 永久マーキングは，対象物の厚さにより次項に定めるいずれかの方法により行う。
- (a) 低応力スタンプによる刻印
 - (b) 銘板取付
 - (c) バイブレーションツール（彫刻機を含む。）によるマーキング

7.3.1.3 材料識別表示の記録

品管担当部門は，材料リストなどを基に組立品あるいは部品のどの部分にどの材料，部品が使われたかを明確に記録する。

7.3.2 材料使用前の確認

品管担当部門は，使用材料の成績書と図面，必要に応じて購入仕様書を現品と照合確認して，現品に対して刻印などにより使用可否の識別をする。

7.3.3 マークシフト

- (1) 製造部門は，設計部門より要求された材料の識別表示を，製造工程中適切に維持する。
- (2) 製造部門は，製造中に刻印・識別マーキングが機械加工，切断等により消える場合，当該刻印・識別マーキングが消える前に官庁，顧客あるいは品管担当部門立会のもとで移し換えを行うか，維持のための適切な保護措置をとる。

7.4 発送前点検の実施

- (1) 製造部門は，製作手順書のすべての作業ステップが完了していることを確認し，設計部門-製造部門-品管担当部門による発送前点検を実施する。その後，設計指示事項に基づき養生を実施する。

7.5 出荷準備及び輸送

- (1) 製造部門は，設計より発行された納入品明細書の情報を基に，品管担当部門へ発送許可を依頼する。
- (2) 品管担当部門は，製造部門からの依頼内容と製品を照合し，発送前検査を実施する。検査完了後，製造部門より物流部門へ製品の輸送を依頼する。

- (3) 物流部門は、製品が輸送中に損傷・破損・劣化しないよう設計指示事項に基づき梱包を実施し、輸送を行う。

8. 検査に係る品質管理の方法

8.1 検査要領の確立

8.1.1 設計要求事項及び購入要求事項

購入要求元部門は、必要に応じ、製造部門、品管担当部門と協議し、適用法令、規格、基準、契約仕様及び次の要求事項を設計・調達文書で明確に規定する。

- (1) 検査判定に係わる基準
- (2) 適用法令、規格
- (3) 識別、マーキングに係る事項
- (4) 特殊工程に係る事項（溶接、非破壊試験、熱処理、レジン充填）
- (5) 製品品質に係る重要度
- (6) 取扱い、保管、梱包、出荷、運搬に係る事項
- (7) 関連技術資料
- (8) その他

8.1.2 検査の計画

品管担当部門は、設計結果を含む技術基準及び規則等への適合を確認することを目的とし、必要な検査を計画する。

8.1.3 検査の管理

設計部門は、製品品質の重要度に応じ、材料調達、製造（調達製品を含む。）の各段階で実施する検査項目、立会検査の程度を示す「検査項目及び立会区分一覧表」を作成し、発行する。また、プロジェクトマネジメント部門は、検査要領書の作成の有無を明確にした「提出図書一覧表」を作成し、発行する。

8.1.4 検査要領書の作成

品管担当部門は、「検査項目及び立会区分一覧表」に従い、検査要領書を作成し、発行する。検査要領書には下記の事項を明確に記載する。

- (1) 目的
- (2) 適用範囲
- (3) 検査場所
- (4) 適用規格
- (5) 検査の項目及び立会程度
- (6) 検査の要領と判定基準

(7) 記録の顧客への提出範囲及び保管期限

8.2 検査員の力量管理

品管担当部門は、次の事項により検査員の力量管理を行う。

- (1) 作業内容に応じて定められた要領書に従い力量認定された検査員に検査を実施させることにより、各種検査の中立性及び信頼性を確保する。
- (2) 非破壊試験は、(財)日本規格協会「非破壊試験技術者の資格及び認証 JIS Z 2305」に基づく資格認定取得者に実施させる。

8.3 検査設備（計測器、試験機等）の管理

品管担当部門は、製品の合否判定に使用する検査設備を管理するために、次の事項を行う。

- (1) 検査設備の精度及び性能を維持し管理する。
- (2) 検査設備の使用前に検査設備の計量機器の検査結果に関する図書を必要に応じて準備し、検査が適切に実施されていること、かつ有効期限内であること及び記載内容に不備がないことを確認する。

8.4 検査の実施

- (1) 品管担当部門は、設計部門とは独立した立場で検査の実施に当たり、各種検査の中立性及び信頼性を確保する。また、事前に適用する要領書を明確にし、検査員に指示するとともに、周知する。
- (2) 品管担当部門は、検査依頼に基づき設計指示事項及び適用要領書に従い検査を行うとともに、要求される検査記録を作成する。

8.5 不適合製品の識別及び隔離

品管担当部門は、検査結果に基づき、次の方法により不適合製品を識別及び隔離する。

- (1) 不適合製品又は他の適切な場所に、「不合格」ステッカを貼付する。
- (2) 不適合製品は、「不適合及び是正処理管理要領」に従い処置する。
- (3) 「不合格」ステッカは、適切に処置がされた時点で、品管担当部門の担当者が除去する。

8.6 発送前検査の実施

品管担当部門は、製品に発生した全ての不適合が処理されていること、及び製造工程中に作成した検査記録に問題がないことを確認する。

8.7 溶接検査の計画

設計部門は、溶接検査計画書を作成し、顧客に提出する。

9. 調達に係る品質管理の方法

9.1 調達計画及び調達先の選定

9.1.1 調達計画

(1) 購入要求元部門は、計画段階において調達を要する対象を明確にし、その種類に応じて購入仕様書を計画的に発行する。

9.1.2 調達先の選定

(1) 品管担当部門は、調達先の選定に先立ち、社内規定に従い、調達先が必要な品質に関する要求事項に適合する製品を供給し得るか否かの能力を評価の上、調達先候補をあらかじめ認定し、登録する。

(2) 調達部門及び購入要求元部門は以下の項目に関する考慮の上、調達先を選定する。

- (a) 調達先の調達管理を含めた技術的能力及び品質管理体制
- (b) 製品の供給実績
- (c) 製品の使用実績
- (d) 製品サンプル

(3) 購入要求元部門、調達部門及び品管担当部門は、既に評価済みの調達先が要求品質を満足する調達製品の供給能力を維持していることを上記(2)の(a)～(d)に関する調査・評価・監査を適宜行うことにより確認する。

9.2 調達先とのコミュニケーション

購入要求元部門、調達部門及び品管担当部門は、調達先とのコミュニケーションを図り、次の事項を行う。

(1) 購入要求元部門

(a) 進捗状況のステイタス管理（設計・製造工程に基づく文書提出・製造状況の把握）

(2) 調達部門

- (a) 適切な調達先の選定、早期発注による納期確保
- (b) 進捗日程フォロー（情報入手と関係先への周知）、納期管理

(3) 品管担当部門

- (a) 不適合の早期発見による是正処置
- (b) 製造工程上のホールドポイントの明確化、必要に応じた出張立会検査

(4) その他

購入要求元部門、調達部門及び品管担当部門は、調達製品の特異性、複雑さ、調達頻度、過去の不適合事例等を勘案し、次の例に示す場を活用して調達先とのコミュニケーションを強化する。

- (a) 交流会、講演会
- (b) 発注時、製造又は作業着手前のキックオフミーティング
- (c) 不適合事例周知、コンプライアンス及び原子力安全に関連した個別の連絡会等

9.3 発注

(1) 購入要求元部門の担当者は、購入仕様書を作成し、審査を受けた後、承認を受ける。

また、レビューが必要な仕様書は発行前に関係先のレビューを受ける。

(2) 調達部門は、最新の購入仕様書に基づき、9.1.2において選定された調達先へ発注する。

9.4 文書の管理

購入要求元部門及び調達部門は、調達文書について、次のとおり管理する。

(1) 調達文書に業務の範囲、管理の要求事項、技術的要求事項、品質管理に関する要求事項、調達先への立入権限、不適合に関する要求事項等を発注文書により連絡する。

(2) 上記の発注文書、及び標準品質保証仕様書の調達先への発行によって、「当社と調達先の責任範囲」「要求事項の適用を二次調達先以降、最終の調達先まで及ぼすための事項」「製品を受領する場合に使用する、調達製品に関する要求事項への適合状況を記録した文書」の提出を要求する。

(3) 特に許認可申請用の設計解析を伴う調達に係る調達文書には、発注範囲に応じて上記(1)及び(2)に要求する項目に加え、設計解析に関する要求事項、及び解析コードの変更の周知・教育に関する要求事項を調達先及びその調達先の二次調達先以降が遵守するように要求する。

9.5 検査及び受入管理

調達製品が調達要求事項を満足していることを確認するために、購入要求元部門及び品管担当部門は調達製品に対して次のとおり検査及び受入管理を行う。

(1) 品管担当部門は、購入仕様書に基づき、製品の検査を実施し、記録を作成する。

- (2) 設計役務の調達の場合、購入要求元部門は役務（成果物含む。）が当該購入仕様書の要求事項に適合していることを確認し、確認した結果を記録として維持する。
- (3) 品管担当部門は、調達製品に不適合が発生した場合、不適合の処置及び再発防止対策を図る。

9.6 品質記録の保管

- (1) 品管担当部門は、購入仕様書の要求に従って提出された品質記録（検査記録、補修記録等）を保管する。

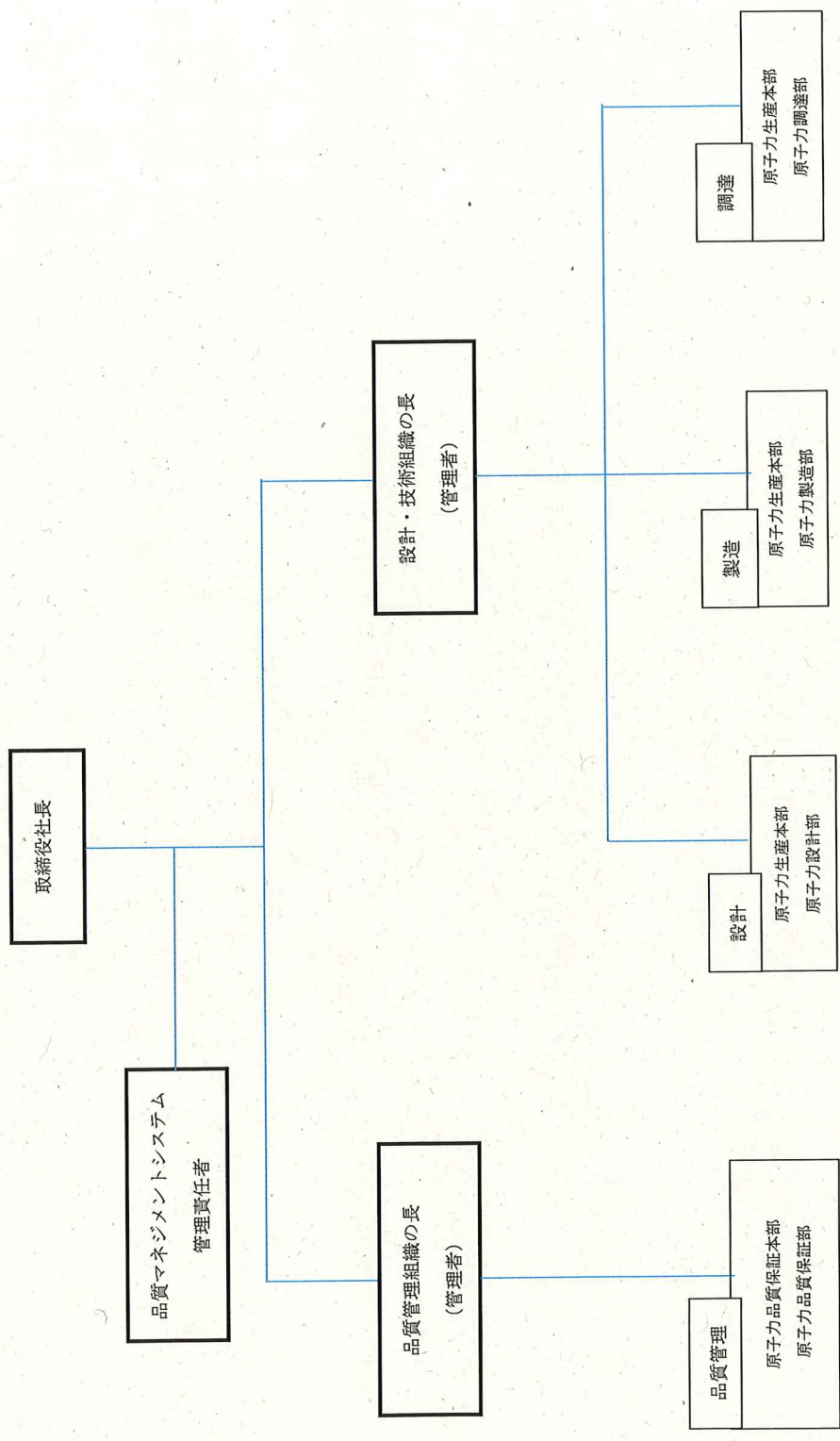


図 2-1 型式設計特定容器等の製作等に係る組織

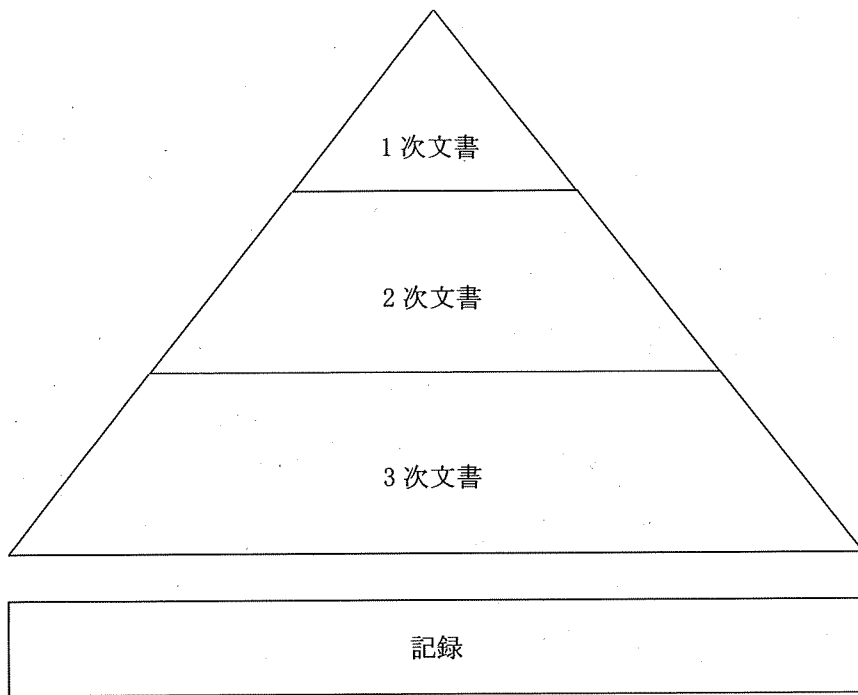


図 3-1 品質マネジメントシステムに係る文書体系図

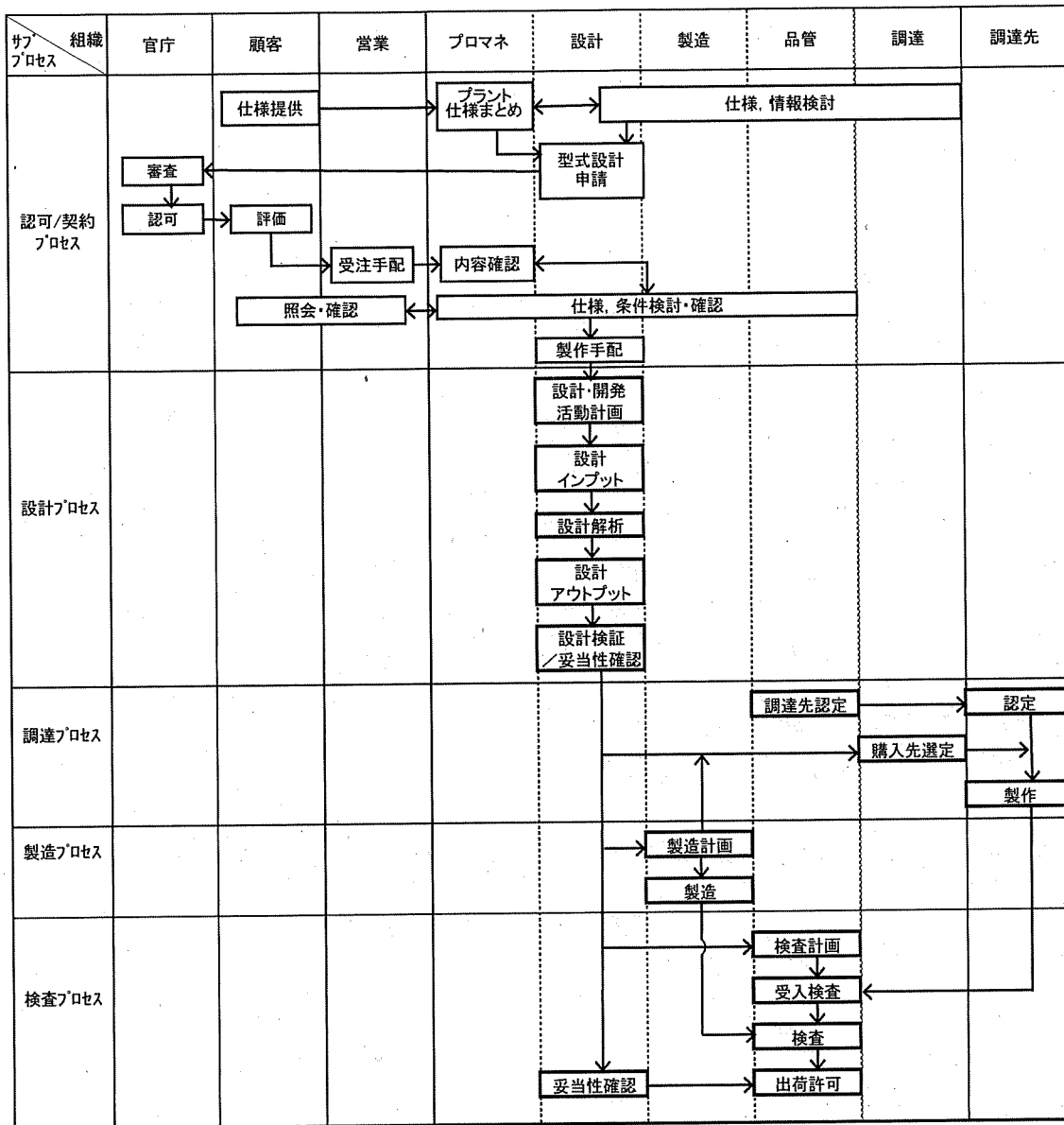


図 5-1 型式設計特定容器等の製作等に係る製品実現の計画と実施のプロセス

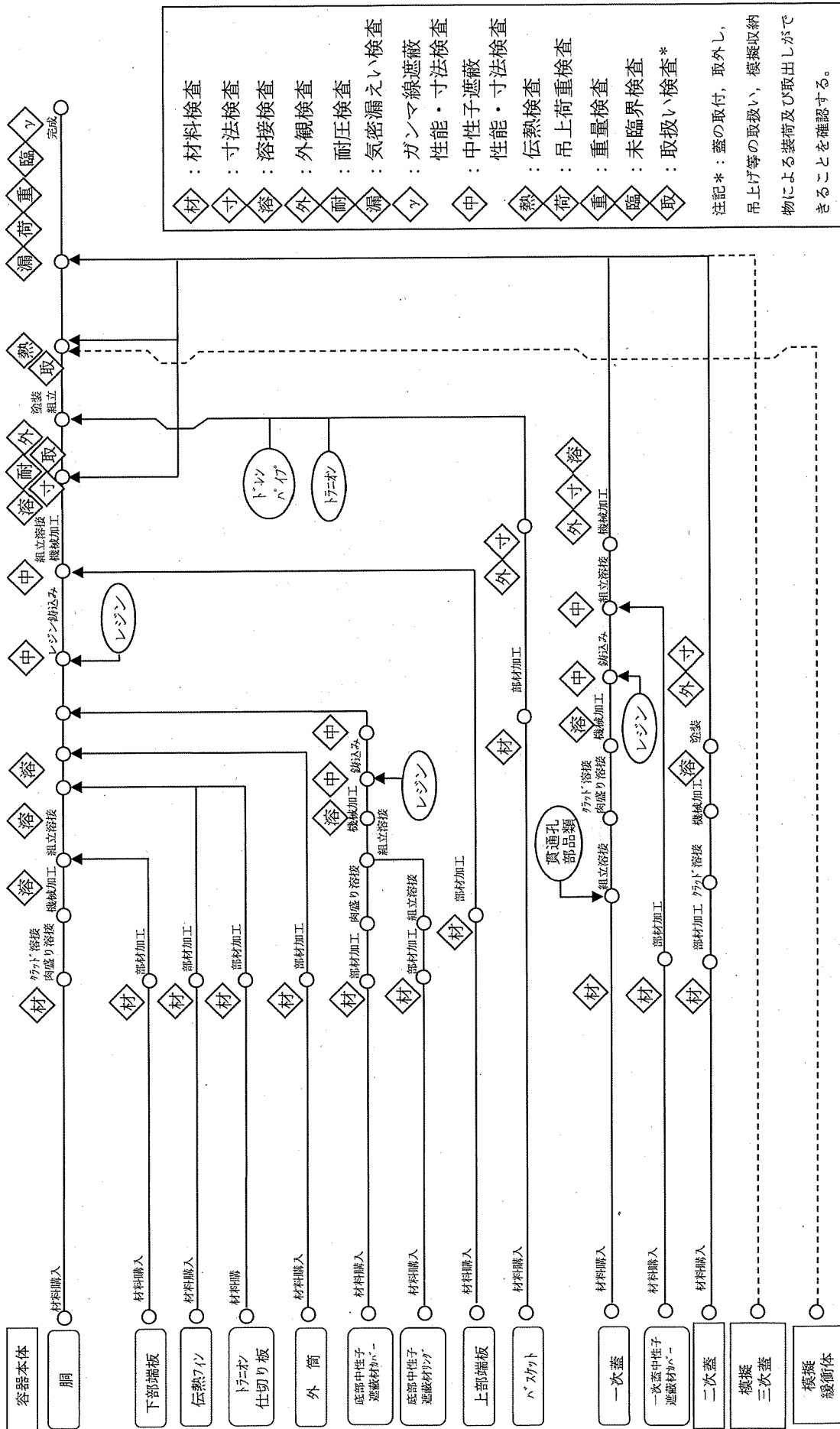


図 7-1 特定容器 HDP-69B (B) 型の製造手順の概略 (例)

表 3-1 品質マネジメントシステム文書体系

	文書名
1 次文書	品質マネジメントシステム計画書（品質方針（品質目標）を含む。）
2 次文書	3(1)に関する文書
	3(4)として文書・記録に関する文書
	3(4)として不適合管理，是正処置等及び未然防止処置に関する文書
3 次文書*	手順書，指示書

注記*：具体的な品質マネジメントシステムに係る主な文書については，表 3-2 を参照

表 3-2 品質マネジメントシステムに係る主な文書(1/2)

No	文書区分	文書名	各部署	品管担当部門 ^{*1}	Prj ^{*2}	営業部門	顧客 ^{*3}	備考	製作 ^{*4}	製品化 ^{*5}
1	契約関係	(1) 見積仕様書	C	—	C	PRAiS	—		—	○
		(2) 契約仕様書	C	—	C	PRAiS	—		—	○
		(3) 受注決定仕様書	C	—	PRAC	RAiS	—	受注伝票, 仕様訂正票等を含む。	—	○
2	官庁関係	(1) 工事計画認可申請書	PRAiC	—	PCS	—	i	変更申請書, 届出書等	—	○
		(2) 溶検申請書	PRAiS	—	—	—	C		—	○
		(3) 電気事業法以外の法令許認可申請, 届出関係文書	PRAiC	—	—	—	iS		○	○
3	設計関係	(1) 承認図(決定図)	PRAiS	—	C	—	AC		—	○
		(2) 製作図, 施工図	PRAiS	—	—	—	—		○	○
		(3) 設計仕様書	PRAiS	—	C	—	AC	共通設計, 系統設計, 機器設計, 購入仕様書, P&ID等を含む。	○	○
		(4) 設計指示仕様書	PRAiS	—	C	—	—	購入, 製作, 検査, 工事, 変更等を含む。	○	○
4	QA関係	(1) 品質マネジメントシステム計画書	C	PRAiS	C	C	AC		○	○
5	工程関係	(1) 工程表	PRAiS	—	C	C	—		○	○
6	製造計画関係	(1) 要領書	PRAiS	—	C	—	AC		○	○
7	施工管理関係	(1) 作業指示書	PRAiS	—	—	—	—	安全指示, 防護指示を含む。	○	○
8	施工記録関係	(1) 施工記録	PRAiS	—	—	—	—		○	○
9	検査計画関係	(1) 要領書	PRAiS	—	—	—	AC		○	○

記号 P:作成 R:審査 A:承認 i:発行 S:原本保管(社外文書の場合は, 正本保管)

C:受領, 確認, 必要により写し保管 —:該当せず

注記 *1:原子力品質保証部(原子力事業品質マネジメントシステム計画の推進実務の活動範囲)

*2:プロジェクトマネジメント部門

*3:顧客への標準的な提出範囲を示し, 契約等により指定のある場合は契約事項に従う。

*4:型式設計特定容器等(HDP-69B(B))製作にて作成する図書を○とする。

*5:製品化に伴い作成する図書を○とする。

<補足説明>

表3-2に示す文書のうち, 記録として取り扱うものにおける保管部署や保管期限については, 3.3記録の管理に従う。

表 3-2 品質マネジメントシステムに係る主な文書(2/2)

No	文書区分	文書名	各部署	品管担当部門 ^{*1}	Prj ^{*2}	営業部門	顧客 ^{*3}	備考	製作 ^{*4}	製品化 ^{*5}
10	検査関係	(1) 検査記録	PRiS	PRAiS	—	—	C		○	○
11	不適合管理関係	(1) 検査票	PRiS	PRAiS	—	—			○	○
		(2) 不具合報告書	PRiS	PRAiS	—	—			—	○
12	内部監査関係	(1) 計画書	C	PRAiS	C	—			○	○
		(2) 結果報告書	C	PRAiS	C	—			○	○
13	教育訓練関係	(1) 計画書	PRAiS	—	—	—	—		○	○
		(2) 実施記録	PRAiS	—	—	—	—		○	○
14	連絡関係	(1) エンジニアリングシート	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	C		—	○
		(2) 議事録	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	C		—	○
		(3) 事項通知書	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	—		○	○
15	法令規格関係	(1) 法令	C	C	—	—	—	電気事業法令, 労働基準法令, 労働安全衛生法令, 消防法令, 高圧ガス保安法令等	○	○
		(2) 社外規格	C	C	C	—	—	JIS, JEAC, JEAG, 顧客規格等	○	○
		(3) 社内規格	PRAiSC	PRAiSC	PRAiSC	—	—	全社規格, 各部署規格, 現地事務所規格等	○	○
16	文書管理関係	(1) 提出図書取扱基準	C	C	PRAiS	C	C	提出図書一覧表を含む。	—	○
17	委託・R&D関係	(1) 実施計画書	PRAiSC	—	C	—	C		○	○
		(2) 技術検討書	PRAiSC	—	C	—	C		○	○
		(3) 実施報告書	PRAiSC	R	C	—	C		○	○
18	その他の文書	(1) 機器取扱説明書	PRAiS	—	—	—	C		—	○

記号 P:作成 R:審査 A:承認 i:発行 S:原本保管(社外文書の場合は,正本保管)

C:受領,確認,必要により写し保管 —:該当せず

注記 *1:原子力品質保証部(原子力事業品質マネジメントシステム計画の推進実務の活動範囲)

*2:プロジェクトマネジメント部門

*3:顧客への標準的な提出範囲を示し,契約等により指定のある場合は契約事項に従う。

*4:型式設計特定容器等(HDP-69B(B))製作にて作成する図書を○とする。

*5:製品化に伴い作成する図書を○とする。

<補足説明>

表 3-2 に示す文書のうち,記録として取り扱うものにおける保管部署や保管期限については,3.3 記録の管理に従う。

資料 10

添付書類 10

第 43 条の 2 の 7 の購入契約を締結している者にあつては当該契約書の写し

1. 概要

HDP-69B(B)型の型式指定申請において、申請者は型式設計特定容器等を製作することを業とする者であるため、「使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則」（平成12年6月16日通商産業省令第112号）第43条の2の7に規定される当該契約書の写しは添付しない。

資料 11

添付書類 11

申請に係る型式設計特定容器等の特定容器等型式証明通知書の写し

原規規発第 1903259 号
平成 31 年 3 月 26 日

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
取締役社長 久米 正 殿

原子力規制委員会

使用済燃料貯蔵施設に関する特定容器等の設計の型式証明について

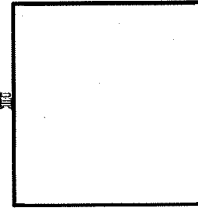
平成29年11月17日付けDoc No. FRO-TA-0001 (平成30年7月23日付けDoc No. FRO-TA-0023/REV. 0及び平成30年12月3日付けDoc No. FRO-TA-0042/REV. 0をもって一部補正)をもって申請のあった使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明の申請については、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(昭和32年法律第166号)第43条の26の2第1項の規定に基づき、特定容器等の型式の設計について承認します。

原規規発第 2105274 号
令和 3 年 5 月 27 日

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

取締役社長 佐藤 深一郎 殿

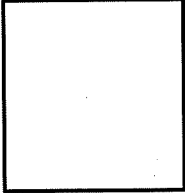
原子力規制委員



特定容器等型式証明通知書の修正について

平成29年11月17日付けDoc No. FRO-TA-0001（平成30年7月23日付けDoc No. FRO-TA-0023/REV. 0及び平成30年12月3日付けDoc No. FRO-TA-0042/REV. 0をもって一部補正）をもって申請のあった使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明について交付した特定容器等型式証明通知書（平成31年3月26日付け原規規発第1903259号）の記載に誤りがあったため、以下のとおり修正します。

内は商業機密のため、非公開とします。



【正誤表】

正	誤
平成29年11月17日付けDoc No. FRO-TA-0001 (平成30年7月23日付けDoc No. FRO-TA-0023/REV. 0及び平成30年12月3日付けDoc No. FRO-TA-0042/REV. 0をもって一部補正) をもって申請のあった使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明の申請については、核燃料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 (昭和32年法律第166号) 第43条の26の2第1項の規定に基づき、特定容器等の型式の設計について型式証明を <u>行</u> います。	平成29年11月17日付けDoc No. FRO-TA-0001 (平成30年7月23日付けDoc No. FRO-TA-0023/REV. 0及び平成30年12月3日付けDoc No. FRO-TA-0042/REV. 0をもって一部補正) をもって申請のあった使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明の申請については、核燃料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 (昭和32年法律第166号) 第43条の26の2第1項の規定に基づき、特定容器等の型式の設計について <u>承認</u> します。

内は商業機密のため、非公開とします。

参考図面

各部の公称寸法及び許容範囲

図表目次

図 1 HDP-69B(B)型の構造図	1
表 1 HDP-69B(B)型の設計仕様となる公称寸法の許容範囲	2

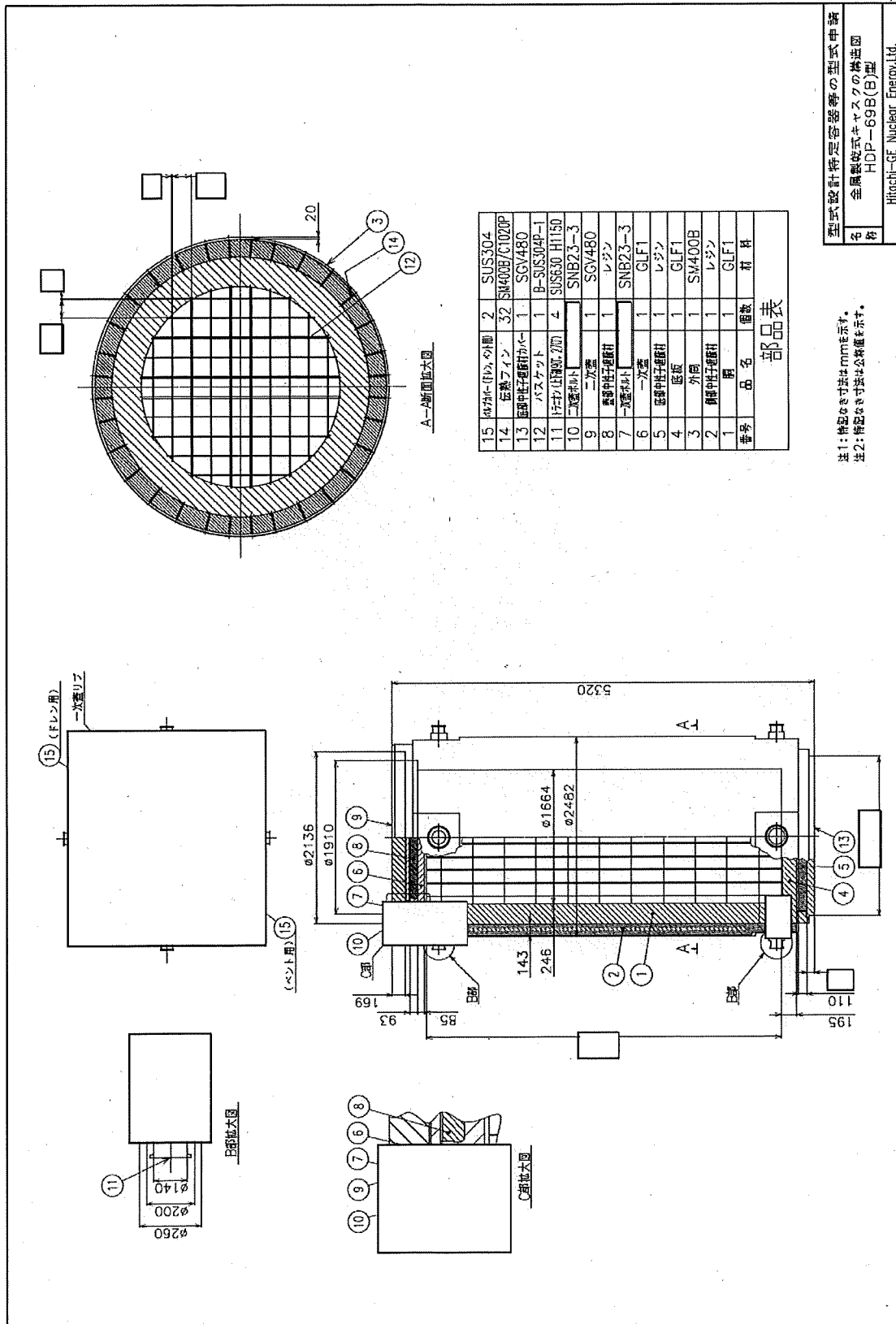


図1 HDP-69B(B)型の構造図

内は商業機密のため、非公開とします。

表1 HDP-69B(B)型の設計仕様となる公称寸法の許容範囲(1/2)

主要寸法 (mm) *1, 呼び径又は数量			許容範囲 (mm)	根 拠	
全 長		5320	□	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準	
外 径		2482		同上	
金属 キャスク 本体	胴	内 径		1664	同上
		胴板厚さ		246	同上
		底板厚さ		195	同上
外筒	外 径	2482		同上	
	厚 さ	20		JISによる材料公差及び製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準	
トラニオン	外 径	260		□	製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
		200			
		140			
□					
底部中性子 遮蔽材カバ 二	外 径	□	□	同上	
	厚 さ	□		同上	
側部中性子遮蔽材厚さ		143		同上	
底部中性子遮蔽材厚さ		110		同上	

注記*1: 主要寸法は, 型式指定申請書本文記載の公称値である。

□ 内は商業機密のため, 非公開とします。

表 1 HDP-69B(B)型の設計仕様となる公称寸法の許容範囲(2/2)

主要寸法 (mm) *1, 呼び径又は数量			許容範囲 (mm)	根 拠
一次蓋	外 径	1910		製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
	厚 さ	85		同上
	蓋部中性子遮蔽材厚さ	93		同上
一次蓋 ボルト	呼び径			—
	本 数			—
二次蓋	外 径	2136		製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
	厚 さ	169		同上
二次蓋 ボルト	呼び径			—
	本 数			—
バスケット	外 径	1664*2		—
	高 さ			製造能力, 製造実績を考慮したメーカー基準
	内 幅			同上
	バスケットプレート厚さ		同上	

注記*1: 主要寸法は, 型式指定申請書本文記載の公称値である。

*2: バスケット外径は, バスケットプレートを胴内面の溝で支持する構造であるため, 胴内径の寸法を示す。

指摘事項リスト（まとめ資料へ反映箇所）

2023年10月20日

No.	実施回	指摘事項	回答	反映箇所	ページ番号	回答時期
1	3/23 第1回面談	共用プールにある燃料の搬出、移送、仮保管等の全体工程や具体的な作業内容等について、講ずべき事項Ⅰ. 全体工程とリスク評価の項目に係るまとめ資料として示すこと。	本申請に係る内容についてはまとめ資料Ⅰ及びⅡ.5に記載を追加する。キャスク仮保管設備における作業内容等については別途「使用済燃料乾式キャスク仮保管設備の増設」のまとめ資料に反映する。	まとめ資料Ⅰ, まとめ資料Ⅱ.5	I-1~15 II-5-91~98	2023年9月22日
2	3/23 第1回面談	まとめ資料は、講ずべき事項に定める要求項目に対して、実施計画変更認可申請書の内容、面談等で説明に用いた資料及び技術的な根拠資料等の本申請に関する情報を包括的に記載する形で作成すること。	輸送貯蔵兼用キャスクの安全評価に関する記載はまとめ資料Ⅱ.5に、耐震評価に関する記載はⅡ.14.②に反映。また、別紙として型式証明と型式指定をまとめ資料に添付する。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-2~98 II-14-②-2~53	2023年10月20日
3	3/23 第1回面談	製造工程等の関係から当該キャスクに係る部分のみを分離、先行して申請するとのことであったが、キャスク製造に影響がなく分割する必要性がないのであれば、別途申請を予定している当該キャスクの仮保管設備の拡張に係る実施計画変更案件との関係を改めて整理して説明すること。	まとめ資料Ⅰに輸送貯蔵兼用キャスク（増設30基）に係る工程を示す。	まとめ資料Ⅰ 参考資料-2	I-12~15	2023年9月22日
4	3/23 第1回面談	講ずべき措置Ⅱ.5.燃料取り出し及び取り出した燃料の適切な貯蔵・管理についても、まとめ資料の作成対象項目とすること。	本申請範囲における燃料取り扱い作業を抽出しまとめ資料Ⅱ.5に記載を追加する。また、キャスク仮保管設備における現行の既設65基の運用・管理についてもⅡ.5に記載する。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-87~98	2023年9月22日
5	3/23 第1回面談	また上記の整理を踏まえつつ、外部人為事象等の別途申請予定の仮保管設備の拡張に係る変更の範囲となる項目については、その旨をまとめ資料作成対象の有無の理由として記載すること。	「措置を講ずべき事項の該当項目の整理」に反映。	措置を講ずべき事項の 該当項目の整理	-	2023年7月31日
6	3/23 第1回面談	実用発電用原子炉施設の審査で参照している「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイドの制定について（平成31年3月13日制定）」に規定する項目のうち、本申請で参照可能な項目の取扱について説明すること。	「設置許可基準規則」、「貯蔵事業許可基準規則」及び「兼用キャスクガイド」等から本申請で参照可能な要求事項を整理し、まとめ資料Ⅱ.5及びⅡ.14.①に反映。	まとめ資料Ⅱ.5, Ⅱ.14.①	II-5-34,35,78~86 II-14-①-5	2023年10月20日
7	3/23 第1回面談	収納可能燃料の冷却期間について、燃焼度がある程度低いのに対して冷却期間を長期間としている理由について説明すること。 (2023年7月31日) 右記の回答内容をまとめ資料にも反映すること。 (2023年9月22日) 燃料被覆管の設計基準温度であることがわかるような記載にすること。	新型8×8燃料の冷却期間（28年以上）が新型8×8ジルコニウムライナ燃料（18年以上）及び高燃焼度8×8燃料（18年以上）の冷却期間に対して長期間であるのは、新型8×8燃料の設計基準温度が他の燃料タイプに比べて200℃と低いため。 なお、設計基準温度については、平成18年度及び19年度に原子力安全基盤機構(JNES)にて実施された貯蔵燃料長期健全性等確認試験において、照射硬化回復現象及び水素化合物の再配向による燃料被覆管の機械的特性への影響を考慮して設定されており、ライナー無し燃料（新型8×8燃料）は200℃、ライナー有り燃料（新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料）は300℃が設計基準温度となる。 (2023年9月22日) 上記内容をまとめ資料Ⅱ.5に反映。 (2023年10月20日) 左記コメントを反映。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-40	2023年7月31日 2023年9月22日 2023年10月20日
8	3/23 第1回面談	除熱機能の補足説明のうち、東京電力福島第一原子力発電所における保管姿勢及び保管状況を踏まえた解析結果については、キャスク自体の基本的安全機能に係る内容であり、型式証明申請書時の解析から変更した解析条件等の詳細を含めて改めて説明するとともに、申請内容として追加すること。	まとめ資料Ⅱ.5に反映。また、別紙として型式証明と型式指定をまとめ資料に添付する。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-37~53	2023年9月22日
9	3/23 第1回面談	構造強度評価等で想定した評価条件と、当該キャスク運搬時の状態（輸送荷姿等）が整合することについて説明すること。	構造強度評価については既設65基と同様であり、まとめ資料Ⅱ.5に記載を追加。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-12~32	2023年10月20日
10	7/31 第2回面談	使用済燃料乾式キャスクのうち輸送貯蔵兼用キャスク（以下「兼用キャスク」という。）に係る申請については、今回の基数変更及び収納可能燃料、また別途申請した仮保管設備の増設があるが、申請対象範囲を明確にする観点から、第Ⅰ章のまとめ資料に本件申請の範囲を記載した資料を追加して説明すること。	まとめ資料Ⅰに反映。	まとめ資料Ⅰ 参考資料-1	I-10,11	2023年9月22日
11	7/31 第2回面談	指摘事項への回答（No.6）として、兼用キャスクの審査ガイドに係る内容等は仮保管設備の増設の方であわせて説明するとしているが、本件申請範囲となる兼用キャスク本体に関する内容については、本件のまとめ資料に関係資料を追加して説明すること。	「設置許可基準規則」、「貯蔵事業許可基準規則」及び「兼用キャスクガイド」等から本申請で参照可能な要求事項を整理し、まとめ資料Ⅱ.5及びⅡ.14.①に反映。	まとめ資料Ⅱ.5, Ⅱ.14.①	II-5-34,35,78~86 II-14-①-5	2023年10月20日
12	7/31 第2回面談	スケジュールに関しては、第Ⅰ章のまとめ資料に記載すること。また、使用前検査として立会が必要となる基数の考え方についても資料に記載すること。	まとめ資料Ⅰに輸送貯蔵兼用キャスク（増設30基）に係る工程を示す。	まとめ資料Ⅰ 参考資料-2	I-12~15	2023年9月22日
13	7/31 第2回面談	まとめ資料Ⅱ.5には、型式証明申請書に記載されている使用範囲、兼用キャスクのスペックや使用個数等の基本的な情報も追記すること。	まとめ資料Ⅱ.5に反映。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-9,10,35,36	2023年10月20日
14	7/31 第2回面談	まとめ資料Ⅱ.5の除熱機能等に係る説明資料として、型式証明申請書と1F使用条件の評価項目に対する比較表を記載しているが、審査においては、申請内容が型式証明の範囲に包絡されているかどうかではなく、兼用キャスクに関する規制基準等に合致しているかどうかを判断するために具体的な評価条件等を確認する必要があることから、その根拠となる当該申請書の関係箇所を添付する等、資料を追加して説明すること。	まとめ資料Ⅱ.5に反映。また、別紙として型式証明と型式指定をまとめ資料に添付する。	まとめ資料Ⅱ.5	II-5-37~53	2023年9月22日

No.	実施回	指摘事項	回答	反映箇所	ページ番号	回答時期
15	7/31 第2回面談	解析コード（ORIGEN2、ABAQUS）による除熱評価のフロー図について、実機条件との整合性を確認する観点から、インプット情報やモデル構築に関する具体的な内容を資料に追加して説明すること。 (2023年9月22日) フロー図の文中名称と図中名称が異なるため統一し、なお書きは不要のため削除すること。	まとめ資料Ⅱ.5に反映。また、別紙として型式証明と型式指定をまとめ資料に添付する。 (2023年10月20日) 左記コメントを反映。	まとめ資料Ⅱ.5, 別紙-2	Ⅱ-5-37~53 別紙-2 P211~P284	2023年9月22日 2023年10月20日
16	7/31 第2回面談	まとめ資料Ⅱ.14.⑨検査可能性に対する設計上の考慮についても該当項目として追加した上で、外観確認、蓋部の分解点検、気密性確認等のキャスク本体に関する確認事項について整理し、まとめ資料に追加して説明すること。 (2023年9月22日) 具体的な措置について、関連する部分を別紙（型式証明・型式指定）から抜き出して記載すること。	「措置を講ずべき事項の該当項目の整理」に反映。まとめ資料Ⅱ.14.⑨に記載を追加。 (2023年10月20日) 型式指定の該当箇所を記載。	措置を講ずべき事項の 該当項目の整理, まとめ資料Ⅱ.14.⑨	Ⅱ-14-⑨-2~4	2023年9月22日 2023年10月20日
17	7/31 第2回面談	まとめ資料Ⅰ章の異常時評価における「キャスクをコンクリートモジュールに収納する」という記載を「仮保管設備に移送する」に修正すること。また、異常時評価の記載をまとめ資料Ⅰ章からⅡ-5に移行すること。	輸送貯蔵兼用キャスクの貯蔵に関する記載を削除し、記載項目をまとめ資料Ⅱ.5に移行。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-91~98	2023年9月22日
18	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5の実施計画本文の記載は現行の実施計画に対する変更箇所を記載する。また、評価内容である「具体的な設計」の本文には評価の概要を記載し、詳細については別紙参照にすること。別紙参照であっても評価結果を明記し要求事項を満足していることを示すこと。	まとめ資料Ⅱ.5に記載の実施計画本文については該当箇所を抜粋して記載。安全評価についてはまとめ資料本文に概要を記載し、詳細を添付資料に記載。添付資料では型式指定から該当箇所を抜粋して記載。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-2~11,34~75	2023年10月20日
19	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5除熱機能の表1-2について、燃焼度（平均燃焼度と最高燃焼度）が分かりづらいので記載を見直すこと。	現行の実施計画を踏襲し平均燃焼度のみを記載。なお、注記を削除し冷却期間は型式指定本文の記載に見直し。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-40	2023年10月20日
20	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5除熱機能の表1-4について、現行の実施計画同様に注記を記載すること。	配置ごとに注記を追加。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-45,46	2023年10月20日
21	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5除熱機能の参考資料表1について、注記の形態係数の説明が分かりづらいので記載を見直すこと。	形態係数の説明を修正。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-49	2023年10月20日
22	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5遮蔽機能の表1について、解析モデル上は型式指定と同じモデルを使用しており、実際の使用条件は異なることを補足として記載すること。	注記を追加。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-66	2023年10月20日
23	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5臨界防止機能の表1についても、上記と同様補足を記載すること。	注記を追加。また、添付資料本文に型式指定の概要を追記し、解析モデルの詳細については別紙（型式指定）の該当箇所を記載。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-67~69,71	2023年10月20日
24	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.5参考資料の各申請に対する措置を講ずべき事項への該当項目について、技術会合で示した項目以外の審査対象項目についても漏れなく記載すること。	措置を講ずべき事項のⅡ.12等の記載を追加。	まとめ資料Ⅱ.5	Ⅱ-5-78~86	2023年10月20日
25	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅱ.14.①準拠規格等について、改正日と制定日が混在しているため統一すること。	制定日に統一。	まとめ資料Ⅱ.14.①	Ⅱ-14-①-5	2023年10月20日
26	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅷについて、キャスク単体で実施する確認事項のみ記載すること。	キャスク単体では不要な確認事項を削除。	まとめ資料Ⅷ	Ⅷ-1,2	2023年10月20日
27	9/22 第3回面談	まとめ資料Ⅷの確認事項のうち、キャスク単体で構造強度・耐震性を確認する場合、実施計画にもそれらの記載が必要。	構造強度評価について、既設評価と同一であることからまとめ資料Ⅱ.5の対応方針に既設65基の評価を記載し、参考資料に既設65基と増設30基の比較を記載。 耐震評価についてはまとめ資料Ⅱ.14.②に記載を追加。	まとめ資料Ⅱ.5, Ⅱ.14.②	Ⅱ-5-12~32,76,77 Ⅱ-14-②-2~53	2023年10月20日