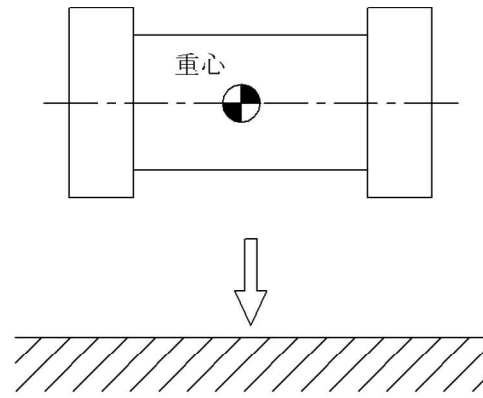
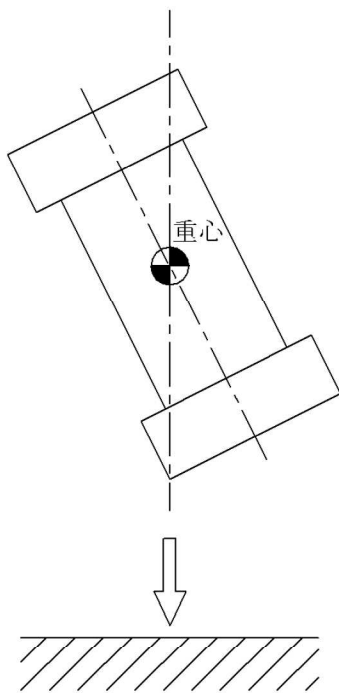


垂直落下
(頭部及び底部)

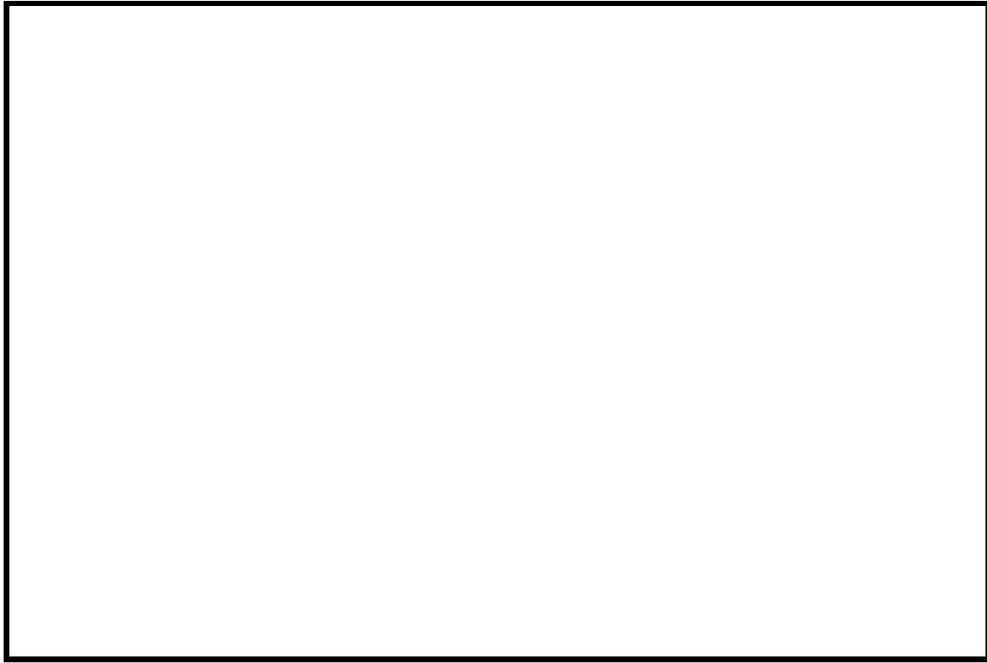


水平落下

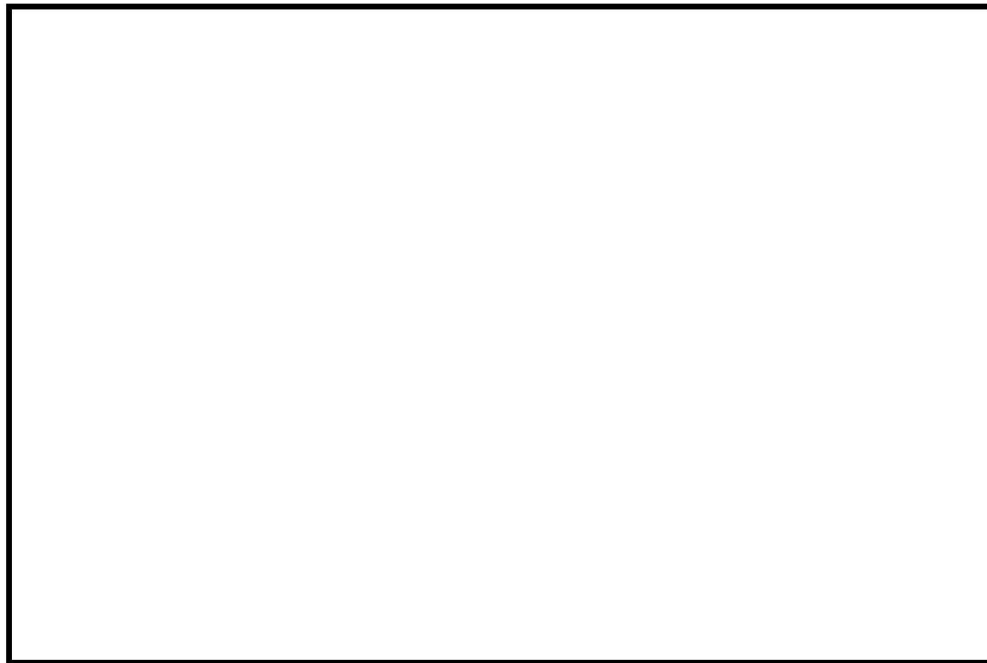


コーナー落下
(頭部及び底部)

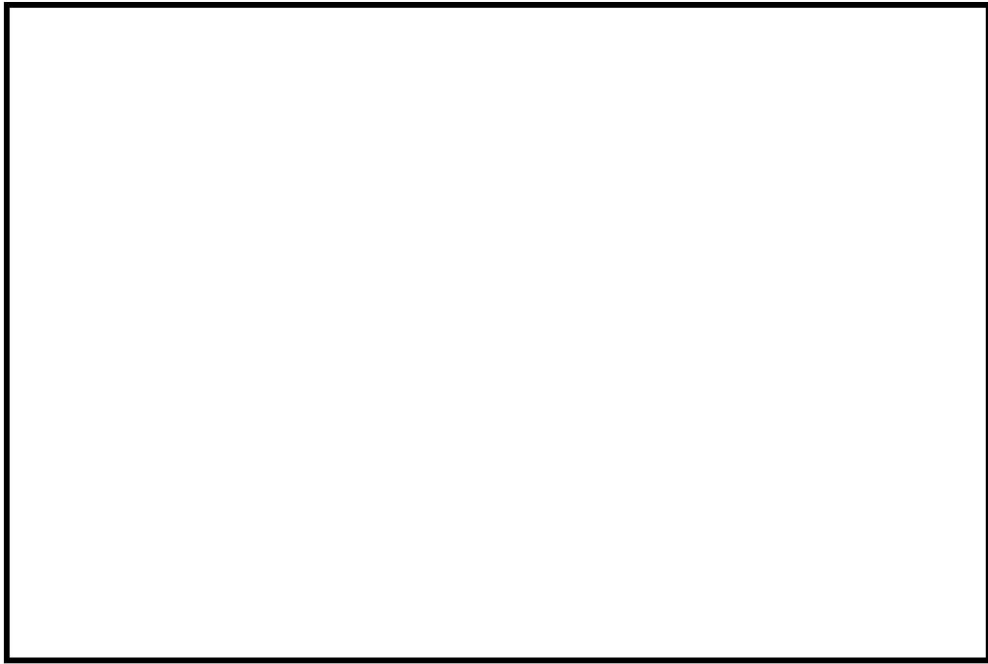
(□)-第 A. 19 図 0.3 m 落下試験での落下姿勢



(□)-第 A. 20 図 □ の圧潰特性



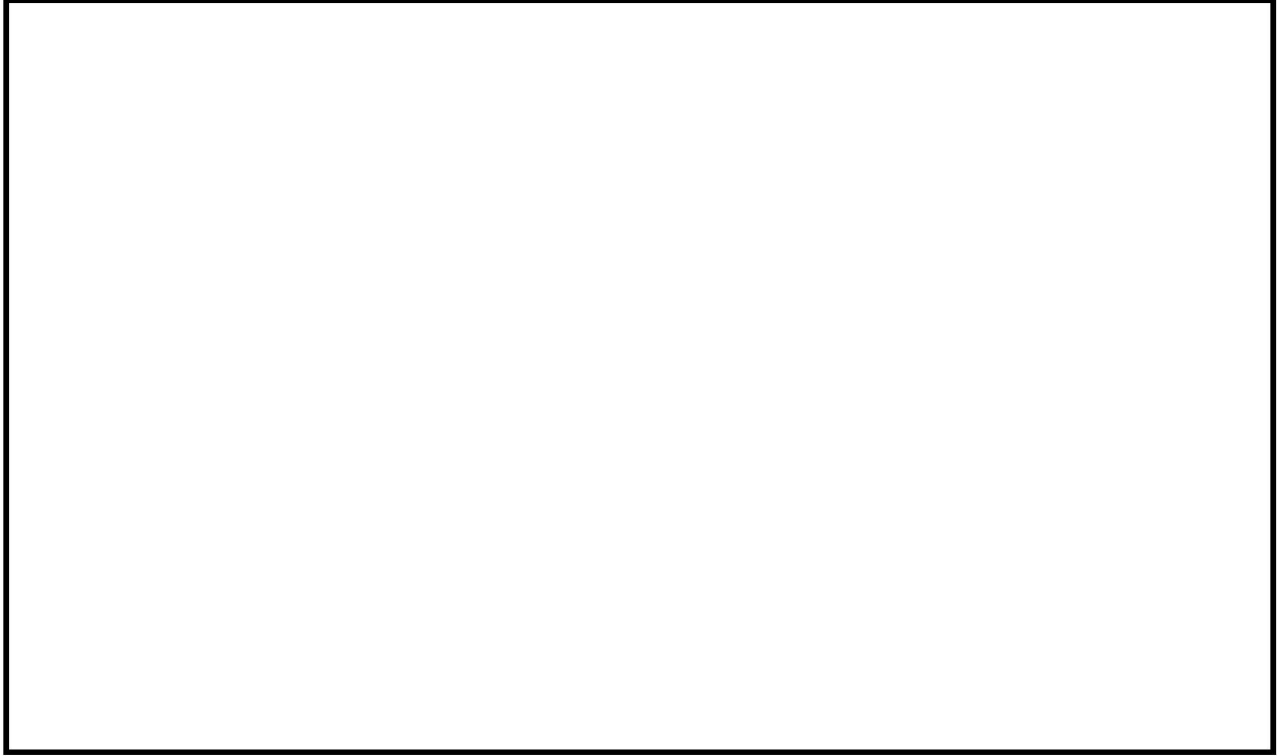
(□)-第 A. 21 図 □ の圧潰特性



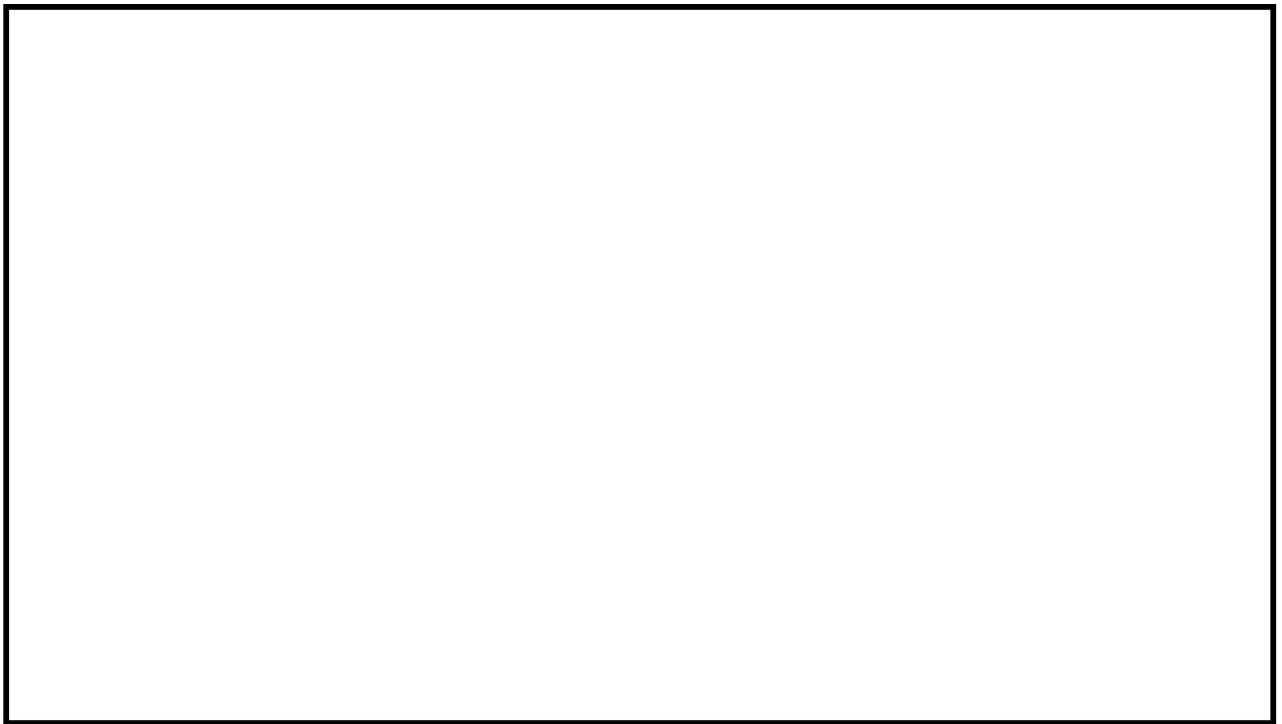
(□)-第 A. 22 図 □ の圧潰特性

(3) 各落下方向解析モデル

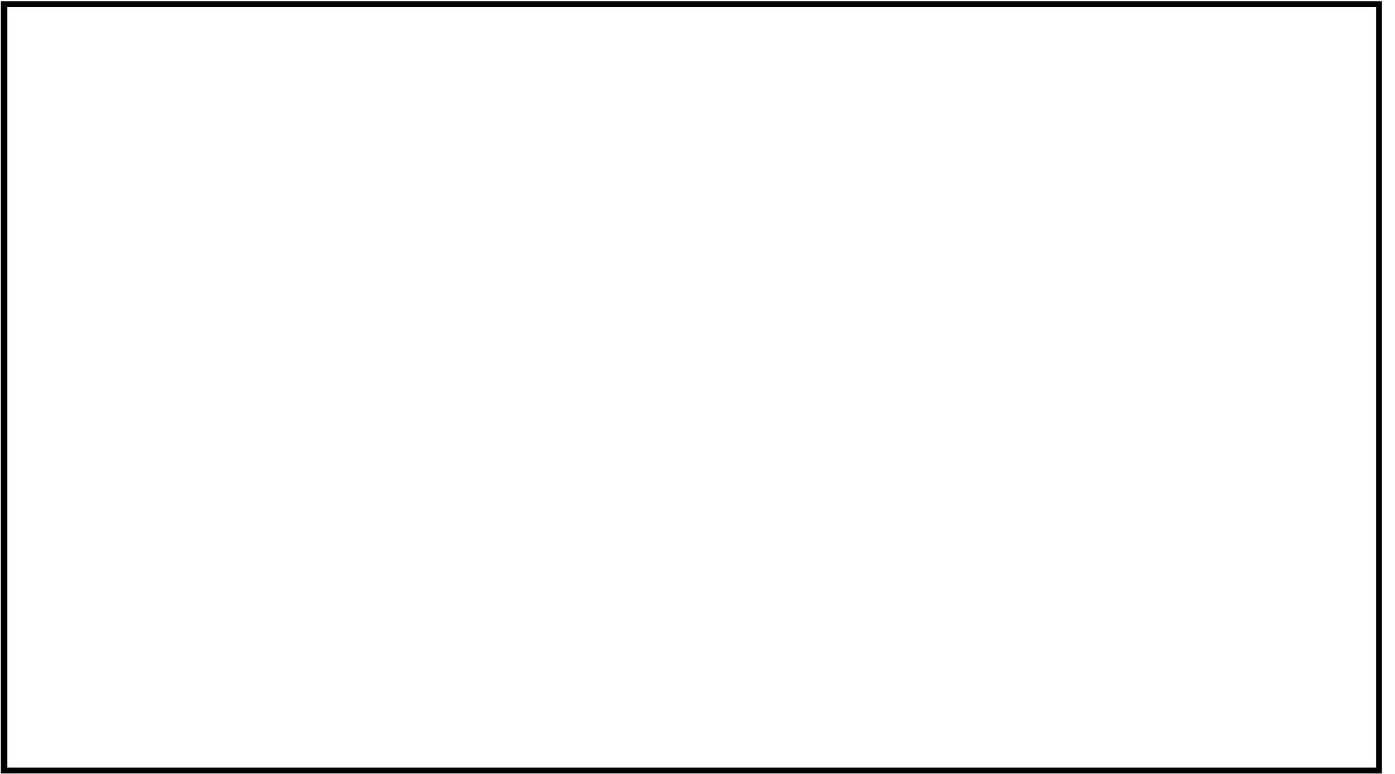
各落下方向の解析モデルを(ロ) 第 A. 23 図～(ロ) 第 A. 27 図に示す。斜線を施した部分、すなわち緩衝体内の木材が深さ δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。



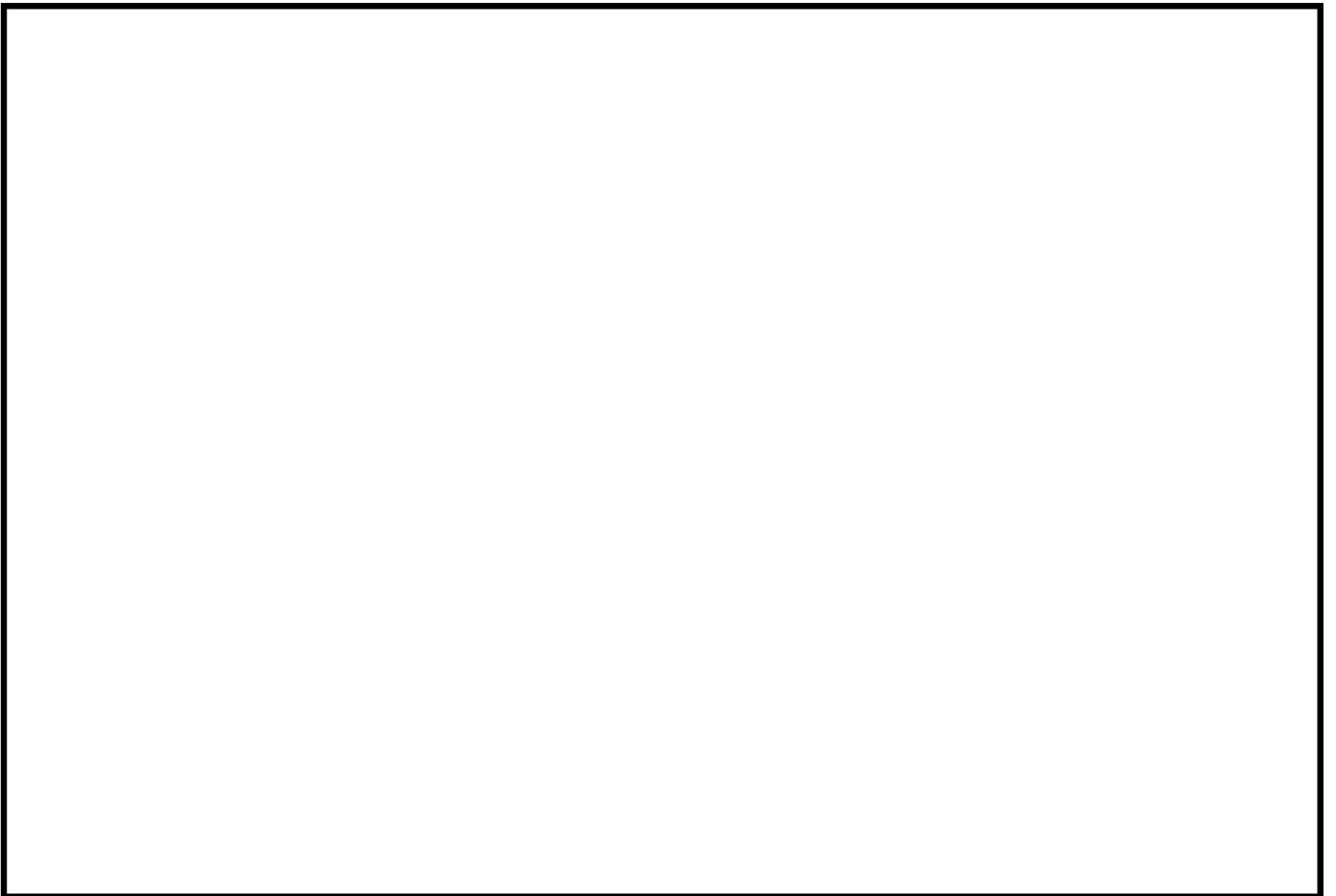
(ロ)-第 A. 23 図 頭部垂直落下解析モデル



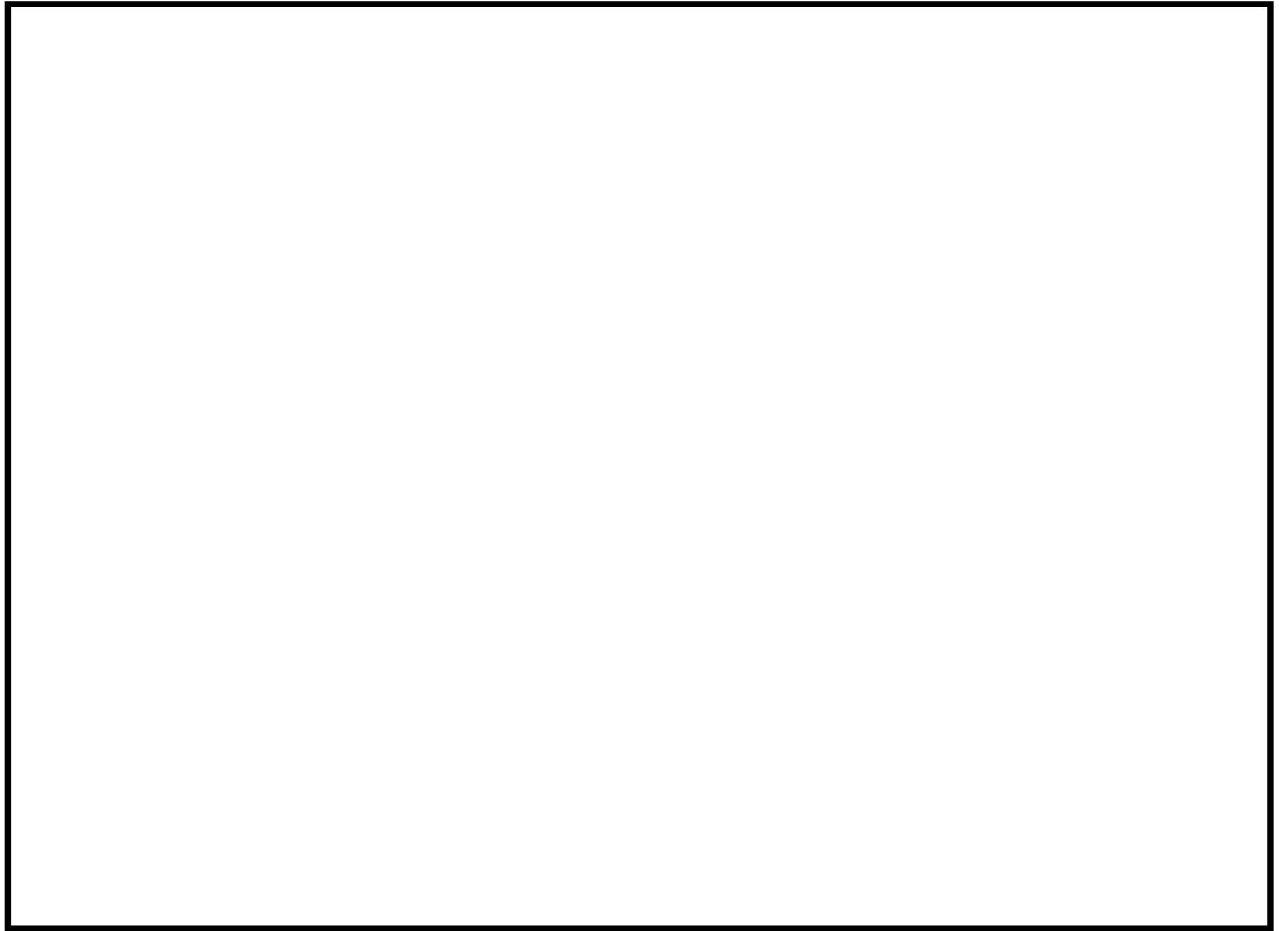
(ロ)-第 A. 24 図 底部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A. 25 図 水平落下解析モデル



(ロ)-第 A. 26 図 頭部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A. 27 図 底部コーナー落下解析モデル

2. 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

1. に示した方法により求めた落下エネルギー E_k に対応する変形量 δ と衝撃加速度 G を(□)-第A.19表に示す。

ここで、衝撃加速度 G は次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

m : 輸送物質量 (kg)

(□)-第A.19表 自由落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 : F (N)	衝撃 加速度 G : (m/s ²)	設計 加速度 ^(注1) (m/s ²)	緩衝体の 変形量 : δ (mm)	設計基準 変形量 ^(注2) : δ max (mm)
垂直 落下	頭部	3.138×10^7	238	250	29	684
	底部	3.138×10^7	238	250	28	608
水平落下		2.469×10^7	187	200	46	388
コーナー 落下	頭部	4.380×10^6	34	—	313	834
	底部	4.080×10^6	31	—	337	839

(注1)設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注2)設計基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

A.5.3.2 落下時の応力計算

0.3 m 落下時の衝撃力に対して、容器本体は十分な強度で密封性を保持することを示す。また、胴内のバスケット及び燃料集合体が健全性を維持することを示す。

1. 垂直落下

(1) 容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。また落下方向は頭部及び底部落下とする。

a. 解析モデル

A.5.1.3 と同様に、三次元有限要素を用いた (ρ)-第 A.16 図に示す三次元 180 ° 対称モデルを用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) ①荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 衝撃加速度 (250 m/s²) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 下部緩衝体の自重による慣性力が胴 (底板) 外面に働く。
- ・ 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力が一次蓋内面に働く。
- ・ 落下時の上部緩衝体反力が三次蓋外面に働く。

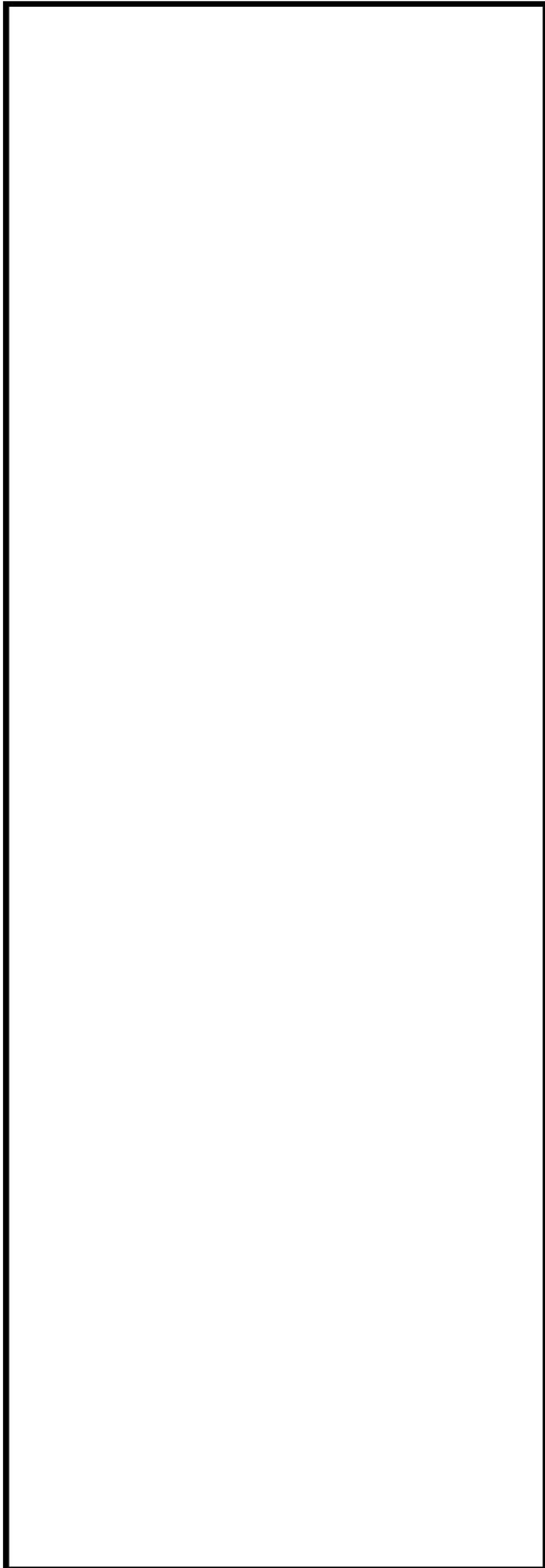
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 衝撃加速度 (250 m/s²) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋上面に働く。
- ・ 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力が胴 (底板) 内面に働く。

(b) ②境界条件

境界条件は衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とした。

それぞれの落下方向に対する荷重条件及び境界条件を (ρ)-第 A.28 図及び(ρ)-第 A.29 図に示す。

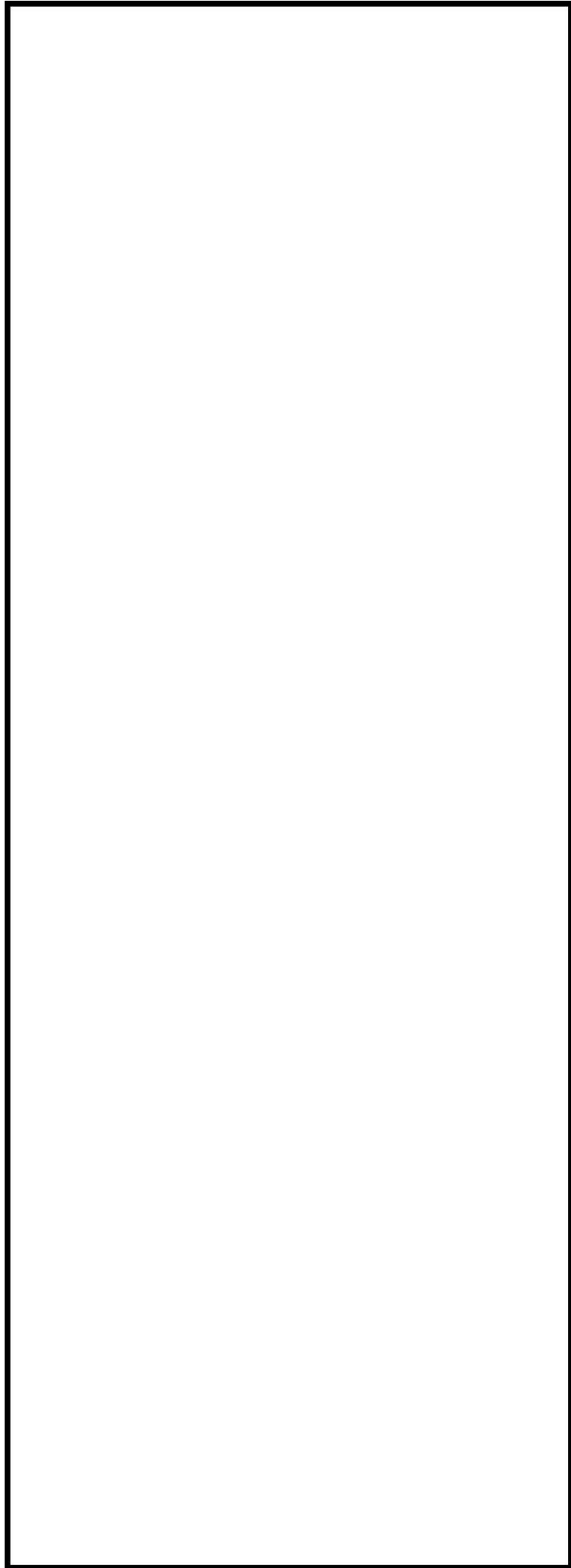


- F_{ab} : 下部緩衝体の慣性力
- P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)
- F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)
- P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- F_{rw} : 上部緩衝体反力
- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

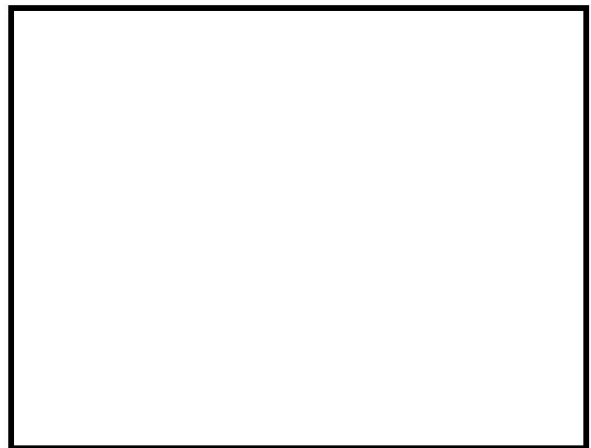


(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(ロ)-第 A. 28 図 頭部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



- F_{ab} : 上部緩衝体の慣性力
- P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)
- F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力
[] MPa G)
- P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力
[] MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 [] MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 [] MPa G)
- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 [] MPa)
- P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 [] MPa)
- P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 [] MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

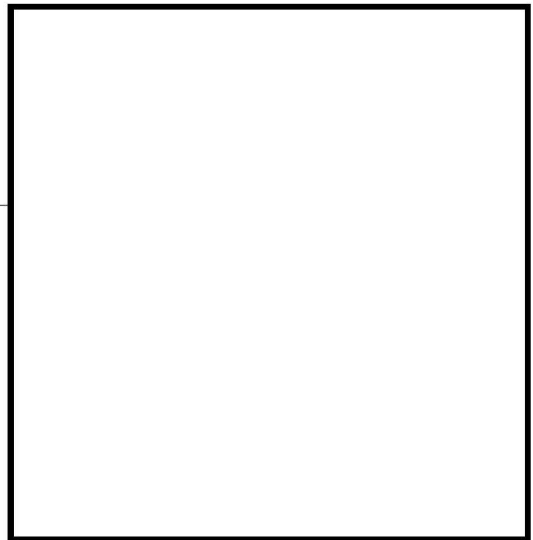
(□)-第 A. 29 図 底部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

c. 解析結果

主要な位置（(□) 第 A. 30 図参照）に対する頭部垂直落下時の一次応力の評価結果を(□)-第 A. 20 表に、（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの応力の評価結果を(□)-第 A. 21 表に、また、底部垂直落下時の一次応力の評価結果を(□)-第 A. 22 表に、（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価結果を(□)-第 A. 23 表に示す。

それぞれの表に示すように、すべての評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準を満足する。

また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.01 mm 以下であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。



評価断面	部位
①	一次蓋中央部
②	一次蓋端部
③	二次蓋中央部
④	二次蓋端部
⑤	三次蓋中央部
⑥	三次蓋端部
⑦	胴上部
⑧	胴中央部
⑨	胴下部
⑩	胴（底板）中央部
⑪	胴（底板）端部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	下部端板端部
⑯	蓋部中性子遮蔽材カバー中央部
⑰	蓋部中性子遮蔽材カバー端部
⑱	底部中性子遮蔽材カバー中央部
⑲	底部中性子遮蔽材カバー端部
⑳	二次蓋シール部（蓋）
㉑	二次蓋シール部（胴）
㉒	一次蓋シール部（蓋）
㉓	一次蓋シール部（胴）

(注) 評価断面⑨-2 は下部トランニオンを取り付けていない断面を含む。

(ロ)-第 A. 30 図 自由落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A. 20 表 頭部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	3	[Redacted]	124	40.3
		P_L+P_b	内	55		186	2.38
	外		56	2.32			
	②	P_L	—	28		186	5.64
二次蓋	③	P_m	—	2		124	61.0
		P_L+P_b	内	21		186	7.85
	外		24	6.75			
④	P_L	—	5	186		36.2	
三次蓋	⑤	P_m	—	5		137	26.4
		P_L+P_b	内	37		205	4.54
	外		30	5.83			
⑥	P_L	—	26	205		6.88	
胴	⑦	P_L	—	36		186	4.16
	⑧	P_m	—	8		124	14.5
		P_L+P_b	内	9	186	19.6	
	外		8	22.2			
	⑨-1	P_L	—	5	186	36.2	
⑨-2	P_L	—	5	36.2			
胴(底板)	⑩	P_m	—	2	123	60.5	
		P_L+P_b	内	5	184	35.8	
	外		5	35.8			
⑪	P_L	—	4	184	45.0		
外筒	⑫	引張	—	11	157	13.2	
		圧縮	—	17	157	8.23	
		せん断	—	27	90	2.33	
		曲げ	—	34	157	3.61	
	⑬	引張	—	38	157	3.13	
		圧縮	—	2	157	77.5	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	157	156	
	⑭	引張	—	6	157	25.1	
		圧縮	—	2	157	77.5	
		せん断	—	10	90	8.00	
		曲げ	—	24	157	5.54	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面①～⑪の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 20 表 頭部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	2	[Redacted]	136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	4		78	18.5
		曲げ	—	11		136	11.3
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	5		157	30.4
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	3		90	29.0
		曲げ	—	15		157	9.46
	⑰	引張	—	14		157	10.2
		圧縮	—	—		157	—
		せん断	—	8		90	10.2
		曲げ	—	58		157	1.70
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	1		136	135
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	1		78	77.0
		曲げ	—	5		136	26.2
	⑲	引張	—	1	136	135	
		圧縮	—	1	136	135	
		せん断	—	3	78	25.0	
		曲げ	—	8	136	16.0	
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	13	186	13.3	
	㉑	P_L	—	27	185	5.85	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	43	185	3.30	
	㉓	P_L	—	17	185	9.88	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第 A. 21 表 頭部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する (一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	56	[Redacted]	372	5.64
			外	54			5.88
	②	—	内	32		372	10.6
			外	46			7.08
二次蓋	③	—	内	21		372	16.7
			外	24			14.5
	④	—	内	14		372	25.5
			外	17			20.8
三次蓋	⑤	—	内	32		411	11.8
			外	35			10.7
	⑥	—	内	53		411	6.75
			外	31	12.2		
胴	⑦	—	内	60	372	5.20	
			外	38		8.78	
	⑧	—	内	22	372	15.9	
			外	15		23.8	
	⑨-1	—	内	10	372	36.2	
			外	27		12.7	
	⑨-2	—	内	20		17.6	
			外	22		15.9	
胴(底板)	⑩	—	内	18	369	19.5	
			外	2		183	
	⑪	—	内	17	369	20.7	
			外	22		15.7	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)第 A. 21 表 頭部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する (一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力の 種類 (注 2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	29	[Redacted]	472	15.2
		せん断	—	13		272	19.9
		曲げ	—	6		472	77.6
	⑬	引張	—	44		472	9.72
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	1		472	471
	⑭	引張	—	83		472	4.68
		せん断	—	17		272	15.0
		曲げ	—	35		472	12.4
下部端板	⑮	引張	—	46		410	7.91
		せん断	—	27		236	7.74
		曲げ	—	109		410	2.76
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	7		472	66.4
		せん断	—	4		272	67.0
		曲げ	—	17		472	26.7
	⑰	引張	—	12		472	38.3
		せん断	—	8		272	33.0
		曲げ	—	61		472	6.73
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	39	410	9.51	
		せん断	—	1	236	235	
		曲げ	—	7	410	57.5	
	⑲	引張	—	33	410	11.4	
		せん断	—	3	236	77.6	
		曲げ	—	6	410	67.3	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	21	186	7.85	
			外	15		11.4	
	㉑	—	内	40	185	3.62	
			外	36		4.13	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	57	185	2.24	
			外	83		1.22	
	㉓	—	内	18	185	9.27	
			外	15		11.3	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	289	562	0.94	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	314	843	1.68	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	206	564	1.73	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	298	846	1.83	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	197	564	1.86	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	197	846	3.29	

(注 1) (ロ) 第 A. 30 図参照

(注 2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注 3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y より小さい。

(ロ)-第 A. 22 表 底部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	1	[Redacted]	124	123
		P_L+P_b	内	15		186	11.4
	外		14	186		12.2	
	②	P_L	—	12		186	14.5
二次蓋	③	P_m	—	1		124	123
		P_L+P_b	内	9		186	19.6
	外		8	22.2			
④	P_L	—	6	186		30.0	
三次蓋	⑤	P_m	—	3		137	44.6
		P_L+P_b	内	36		205	4.69
	外		35	4.85			
⑥	P_L	—	13	205		14.7	
胴	⑦	P_L	—	5		186	36.2
	⑧	P_m	—	10		124	11.4
		P_L+P_b	内	11	186	15.9	
	外		10	17.6			
	⑨-1	P_L	—	14	186	12.2	
⑨-2	P_L	—	20	8.30			
胴(底板)	⑩	P_m	—	7	123	16.5	
		P_L+P_b	内	20	184	8.20	
	外		25	6.36			
⑪	P_L	—	11	184	15.7		
外筒	⑫	引張	—	6	157	25.1	
		圧縮	—	1	157	156	
		せん断	—	7	90	11.8	
		曲げ	—	13	157	11.0	
	⑬	引張	—	37	157	3.24	
		圧縮	—	1	157	156	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	157	156	
	⑭	引張	—	10	157	14.7	
		圧縮	—	2	157	77.5	
		せん断	—	7	90	11.8	
		曲げ	—	14	157	10.2	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面①～⑪の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値 f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 22 表 底部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	6		136	21.6
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	9		78	7.66
		曲げ	—	35		136	2.88
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	3		157	51.3
	⑰	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	3		157	51.3
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	9		157	16.4
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	11		136	11.3
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	2		78	38.0
		曲げ	—	18		136	6.55
	⑲	引張	—	12		136	10.3
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	9		78	7.66
		曲げ	—	26		136	4.23
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	11		186	15.9
	㉑	P_L	—	13		185	13.2
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	30	185	5.16	
	㉓	P_L	—	17	185	9.88	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第 A. 23 表 底部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する (一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	15	372	372	23.8
			外	16			22.2
	②	—	内	18		372	19.6
			外	15			23.8
二次蓋	③	—	内	9		372	40.3
			外	8			45.5
	④	—	内	11		372	32.8
			外	10			36.2
三次蓋	⑤	—	内	33		411	11.4
			外	37			10.1
	⑥	—	内	34		411	11.0
			外	43	8.55		
胴	⑦	—	内	20	372	17.6	
			外	14		25.5	
	⑧	—	内	24	372	14.5	
			外	17		20.8	
	⑨-1	—	内	13	372	27.6	
			外	37		9.05	
	⑨-2	—	内	16		22.2	
			外	38		8.78	
胴(底板)	⑩	—	内	40	369	8.22	
			外	32		10.5	
	⑪	—	内	18	369	19.5	
			外	31		10.9	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)第 A. 23 表 底部 0.3 m 垂直落下時の容器本体に対する (一次+二次)

応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力の 種類 (注 2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	28	[Redacted]	472	15.8
		せん断	—	24		272	10.3
		曲げ	—	10		472	46.2
	⑬	引張	—	44		472	9.72
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	1		472	471
	⑭	引張	—	84		472	4.61
		せん断	—	17		272	15.0
		曲げ	—	25		472	17.8
下部端板	⑮	引張	—	40		410	9.25
		せん断	—	15		236	14.7
		曲げ	—	67		410	5.11
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		472	—
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑰	引張	—	3		472	156
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	5		472	93.4
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	40	410	9.25	
		せん断	—	3	236	77.6	
		曲げ	—	22	410	17.6	
	⑲	引張	—	23	410	16.8	
		せん断	—	10	236	22.6	
		曲げ	—	28	410	13.6	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	23	186	7.08	
		—	外	12		14.5	
	㉑	—	内	20	185	8.25	
		—	外	20		8.25	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	30	185	5.16	
		—	外	45		3.11	
	㉓	—	内	16	185	10.5	
		—	外	17		9.88	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	248	562	1.26	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	249	843	2.38	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	196	564	1.87	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	205	846	3.12	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	216	564	1.61	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	308	846	1.74	

(注 1) (ロ) 第 A. 30 図参照

(注 2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注 3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y より小さい。

(2) バスケット

バスケットは、頭部側と底部側で同様な構造である（(ロ) 第 A. 31 図参照）。設計加速度は頭部落下の方が大きいため、頭部落下の値を用いて評価する。

垂直落下時に最下段のバスケットプレートには、それより上部にあるバスケットプレートを含む自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_V}{A_1}$$

ここで、

W_b : バスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材の合計質量 (kg)

G_V : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

$$A_1 = (b_{A1} - b_{A2}) \cdot L_1 \cdot n_A + (b_{B1} - b_{B2}) \cdot L_1 \cdot n_B$$

b_{A1} : バスケットプレート A 幅 1 (mm)

b_{A2} : バスケットプレート A 幅 2 (mm)

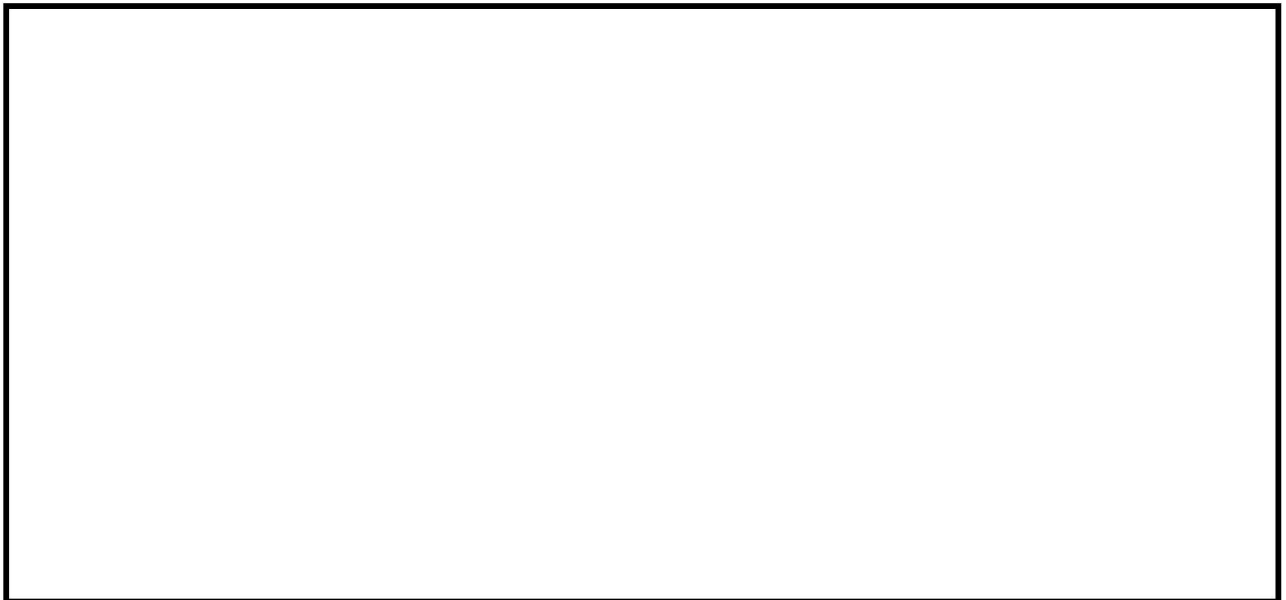
b_{B1} : バスケットプレート B 幅 1 (mm)

b_{B2} : バスケットプレート B 幅 2 (mm)

L_1 : バスケットプレート長さ (mm)

n_A : 胴に接触するバスケットプレート A L_1 部の個数 (-)

n_B : 胴に接触するバスケットプレート B L_1 部の個数 (-)



(ロ)-第 A. 31 図 バスケットプレートの解析モデル図

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 24 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第A.24表 バスケット格子の応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット 合計質量 : W_b (kg)	垂直落下時の 衝撃加速度 : G_v (m/s ²)
数値	5900	250

項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート 全厚さ : b_1 (mm)	バスケット プレート 内幅 : b_2 (mm)	バスケット プレート長 さ : L_1 (mm)	胴に接触す るバスケット プレート L_1 部の個数 : n (-)	バスケット プレートと胴 の接触面積 : A_1 (mm ²)
数値	A					
	B					

項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	7	37	4.28
	B	7		4.28

次に、一次圧縮応力について検討する。

バスケットプレートの有効細長比 λ は、次式で与えられる。

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

ここで、

ℓ_k : 座屈長さ (一端支持、他端固定) (mm)

i : 座屈軸についての断面二次半径 (mm)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_2}}$$

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{1}{12}(b_1^3 - b_2^3)L$$

A_2 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

$$A_2 = (b_1 - b_2)L$$

L : バスケットプレート長さ (mm)

また、バスケットプレートの限界細長比 Λ は、次式により与えられる。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

ここで、

E : 縦弾性係数 (MPa)

F : 設計降伏点又は設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値 (MPa)

バスケットプレートの有効細長比は、限界細長比より小さいので、許容圧縮応力 f_c は、次式で与えられる。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

$$\nu : \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 25 表に示す。

(ロ)-第 A. 25 表 バスケットプレートの一次圧縮応力の計算条件及び計算結果

項目	バスケットプレートのタイプ	バスケットプレート長さ : L (mm)	バスケットプレートの断面積 : A_2 (mm ²)	バスケットプレートの縦弾性係数 : E (MPa)
数値	A			7.00 × 10 ⁴
	B			

項目	バスケットプレートのタイプ	座屈長さ : l_k (mm)	設計降伏点又は設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値 : F (MPa)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	許容圧縮応力 : f_c (MPa)	余裕率 (-)
数値	A			7	37	4.28
	B			7	37	4.28

(3) 燃料集合体

垂直落下時に燃料被覆管に生じる応力は、落下衝撃による圧縮応力 σ_c (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。垂直落下時において最大応力強さ S (MPa) は、燃料被覆管内面に生じるので燃料被覆管内面のみ評価する。

a. 落下衝撃により生じる圧縮応力

落下衝撃により生じる圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = -\frac{WG_y}{A}$$

ここで、

W : 燃料被覆管最下端における質量 (kg)

G_y : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : 燃料被覆管の断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)$$

d_o : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管の内径 (mm)

b. 内圧による各方向応力

内圧 P_o により生じる各方向応力は、以下の式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_r = -\frac{\frac{K^2}{R^2} - 1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{K^2}{R^2} + 1}{K^2 - 1} P_o$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (MPa)

σ_r : 半径方向応力 (MPa)

σ_θ : 周方向応力 (MPa)

$$K = \frac{b}{a}$$

b : 燃料被覆管外半径 (mm)

$$b = \frac{d_o}{2}$$

a : 燃料被覆管内半径 (mm)

$$a = \frac{d_i}{2}$$

P_o : 内圧 (MPa)

$$R = \frac{r}{a} \quad (\text{内面においては } R=1)$$

r : 評価位置 (a ≤ r ≤ b)

c. 応力強さ

垂直落下時に生じる圧縮応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、以下の式で与えられる。

$$S = \text{Max} \{ |\sigma_{rL} - \sigma_{\theta L}|, |\sigma_{\theta L} - \sigma_{zL}|, |\sigma_{zL} - \sigma_{rL}| \}$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_\theta$$

$$\sigma_{zL} = \sigma_c + \sigma_z$$

燃料被覆管材料 (ジルカロイ-4) の °C における照射後の降伏応力 σ_y は、595 MPa⁴⁾ であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の諸式を用いて燃料に対して計算した結果を (ロ)-第 A. 26 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは基準値以下である。

(ロ)-第 A. 26 表 垂直落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料 (48GWd/t, 39 GWd/t)		14×14燃料 (55GWd/t, 48GWd/t, 39 GWd/t)	
	A型	B型	A型	B型
燃料被覆管最下端における質量 : W (kg)	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
衝撃加速度 : G _v (m/s ²)	250	250	250	250
燃料被覆管外径 : d _o (mm)	9.50	9.50	10.72	10.72
燃料被覆管内径 : d _i (mm)	8.36	8.36	9.48	9.40
内圧 : P _o (MPa)	11.15	10.76	12.28	13.43
応力強さ : S (MPa)	100	96	114	118
降伏応力 : σ_y (MPa)	595	595	595	595
余裕率 : MS (-)	4.95	5.19	4.21	4.04

2. 水平落下

(1) 容器本体

水平落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

a. 解析モデル

A. 5. 1. 3 と同様に、三次元有限要素を用いた (ロ)-第 A. 16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) 荷重条件

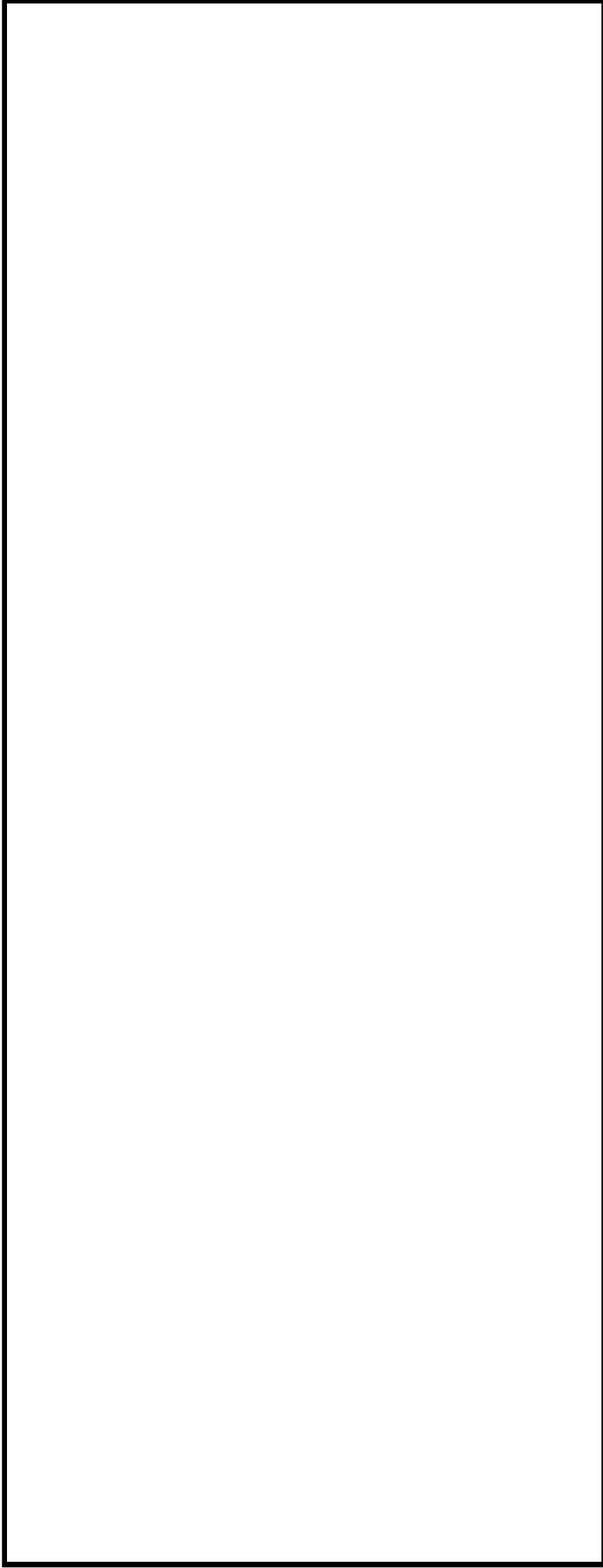
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 衝撃加速度 (200 m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力が胴内面へ働く。
- ・ 落下時の上・下部緩衝体反力が胴フランジ面及び底板に働く。

(b) 境界条件

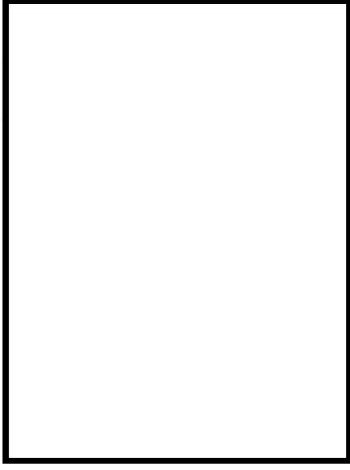
上・下部緩衝体を取り付く面 (反力を受ける面) の上・下 1 箇所の X 方向変位を拘束した。また、 $0^\circ - 180^\circ$ 面の対称面において Y 方向の変位を拘束した。

水平落下時に作用する荷重条件及び境界条件を (ロ)-第 A. 32 図に示す。



- P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 MPa G)
- P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 MPa G)
- F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力
- F_{tr} : 上部緩衝体反力
- F_{br} : 下部緩衝体反力

- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 MPa)
- P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 MPa)
- P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(マ)-第 A.32 図 0.3m 水平落下時の荷重及び境界条件

c. 解析結果

水平落下時の主要な位置（(□) 第 A. 30 図参照）に対する一次応力の評価結果を (□)-第 A. 27 表に、（一次＋二次）応力の評価結果を (□)-第 A. 28 表に示す。表に示すように、すべての評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.17 mm であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(㍀)-第 A. 27 表 0.3 m 水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	2		124	61.0
		P_L+P_b	内	8		186	22.2
			外	9			19.6
	②	P_L	—	8		186	22.2
二次蓋	③	P_m	—	4		124	30.0
		P_L+P_b	内	7		186	25.5
			外	11			15.9
	④	P_L	—	11		186	15.9
三次蓋	⑤	P_m	—	13		137	9.53
		P_L+P_b	内	42		205	3.88
			外	38			4.39
	⑥	P_L	—	24		205	7.54
胴	⑦	P_L	—	56		186	2.32
	⑧	P_m	—	19		124	5.52
		P_L+P_b	内	18	186	9.33	
			外	26		6.15	
	⑨-1	P_L	—	18	186	9.33	
	⑨-2	P_L	—	27		5.88	
胴(底板)	⑩	P_m	—	11	123	10.1	
		P_L+P_b	内	11	184	15.7	
			外	13		13.1	
⑪	P_L	—	16	184	10.5		
外筒	⑫	引張	—	32	157	3.90	
		圧縮	—	35	157	3.48	
		せん断	—	13	90	5.92	
		曲げ	—	24	157	5.54	
	⑬	引張	—	38	157	3.13	
		圧縮	—	11	157	13.2	
		せん断	—	2	90	44.0	
		曲げ	—	3	157	51.3	
	⑭	引張	—	9	157	16.4	
		圧縮	—	17	157	8.23	
		せん断	—	21	90	3.28	
		曲げ	—	51	157	2.07	

(注1) (㍀)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面①～⑩の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A. 27 表 0.3 m 水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	7		136	18.4
		圧縮	—	12		136	10.3
		せん断	—	14		78	4.57
		曲げ	—	50		136	1.72
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	1		157	156
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	7		157	21.4
	⑰	引張	—	12		157	12.0
		圧縮	—	5		157	30.4
		せん断	—	5		90	17.0
		曲げ	—	13		157	11.0
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	—		136	—
		圧縮	—	12		136	10.3
		せん断	—	15		78	4.20
		曲げ	—	10		136	12.6
	⑲	引張	—	10		136	12.6
		圧縮	—	46		136	1.95
		せん断	—	14		78	4.57
		曲げ	—	38		136	2.57
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	14	186	12.2	
	㉑	P_L	—	62	185	1.98	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	32	185	4.78	
	㉓	P_L	—	50	185	2.70	

(注 1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(㍀)-第 A. 28 表 0.3 m 水平落下時の容器本体に対する

(一次 | 二次) 応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注 2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	7	[Redacted]	372	52.1
			外	10			36.2
	②	—	内	10		372	36.2
			外	15			23.8
二次蓋	③	—	内	6		372	61.0
			外	9			40.3
	④	—	内	32		372	10.6
			外	20			17.6
三次蓋	⑤	—	内	45		411	8.13
			外	38			9.81
	⑥	—	内	29		411	13.1
			外	57	6.21		
胴	⑦	—	内	83	372	3.48	
			外	68		4.47	
	⑧	—	内	24	372	14.5	
			外	27		12.7	
	⑨-1	—	内	24	372	14.5	
			外	29		11.8	
	⑨-2	—	内	47		6.91	
			外	28		12.2	
胴(底板)	⑩	—	内	29	369	11.7	
			外	11		32.5	
	⑪	—	内	32	369	10.5	
			外	35		9.54	

(注 1) (㍀)-第 A. 30 図参照

(注 2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(㍑)-第 A. 28 表 0.3 m 水平落下時の容器本体に対する
(一次+二次) 応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力の 種類 (注 2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	71	[Redacted]	472	5.64
		せん断	—	29		272	8.37
		曲げ	—	26		472	17.1
	⑬	引張	—	77		472	5.12
		せん断	—	3		272	89.6
		曲げ	—	4		472	117
	⑭	引張	—	85		472	4.55
		せん断	—	25		272	9.88
		曲げ	—	58		472	7.13
下部端板	⑮	引張	—	58		410	6.06
		せん断	—	34		236	5.94
		曲げ	—	137		410	1.99
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	3		472	156
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	2		472	235
	⑰	引張	—	9		472	51.4
		せん断	—	5		272	53.4
		曲げ	—	16		472	28.5
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	51	410	7.03	
		せん断	—	15	236	14.7	
		曲げ	—	9	410	44.5	
	⑲	引張	—	77	410	4.32	
		せん断	—	14	236	15.8	
		曲げ	—	29	410	13.1	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	24	186	6.75	
			外	13		13.3	
	㉑	—	内	57	185	2.24	
			外	55		2.36	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	54		2.42	
	㉓	—	内	53	185	2.49	
			外	53		2.49	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	260	562	1.16	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	579	843	0.45	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	230	564	1.45	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	554	846	0.52	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	295	564	0.91	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	470	846	0.80	

(注 1) (㍑) 第 A. 30 図参照

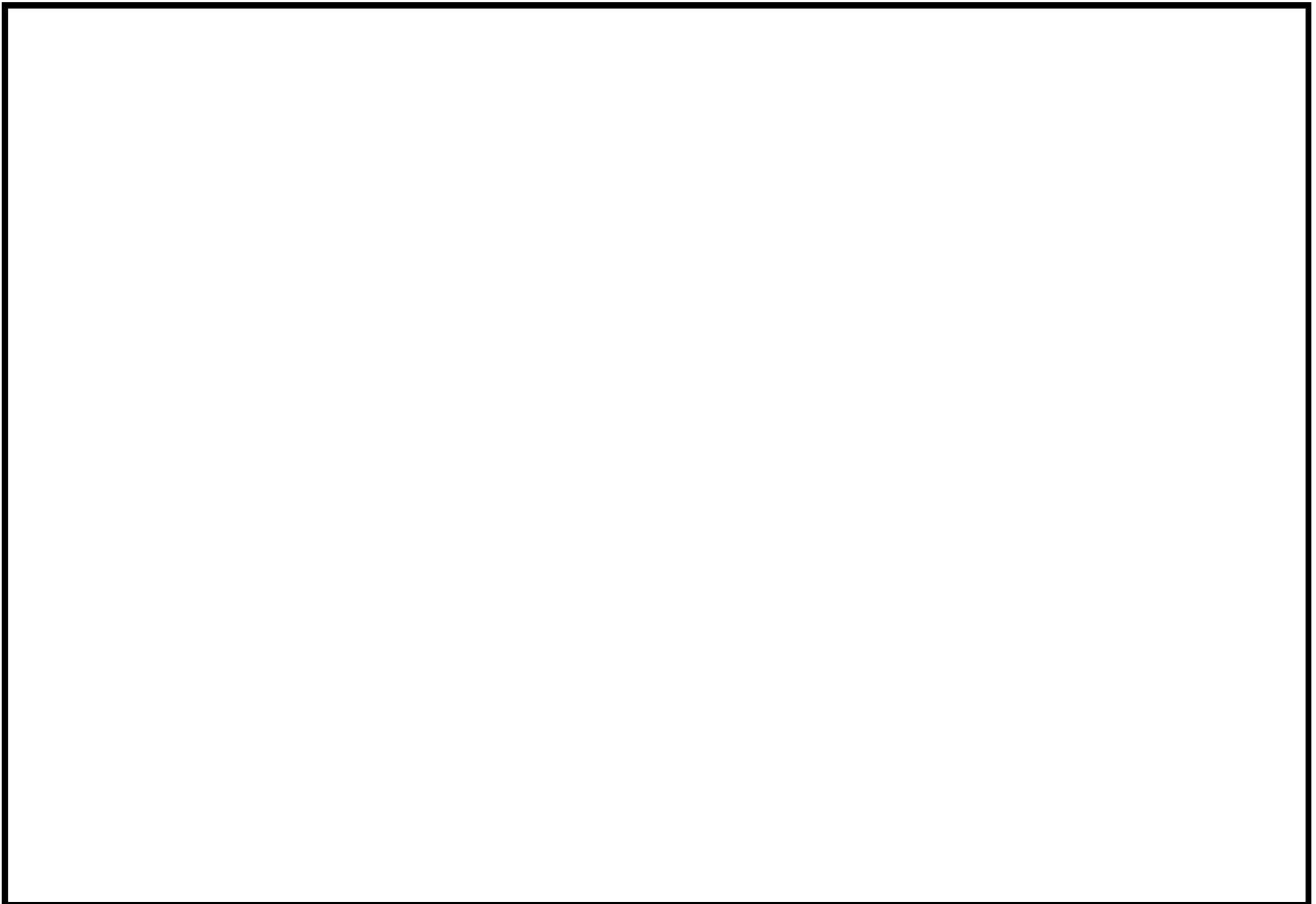
(注 2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注 3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

(2) バスケット

a. バスケットプレート縦板

水平落下時にバスケットプレート縦板には(□)-第 A. 33 図に示すように、領域 I の範囲にあるバスケットプレート、バスケットサポート及び燃料集合体の自重による慣性力並びに、領域 II のバスケットプレートの自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。



(□)-第 A. 33 図 バスケットプレート縦板の解析モデル

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \cdot N} G_H$$

ここで、

W_I : 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 (kg)

W_{II} : 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

N_f : 領域 I の範囲にある燃料集合体の数 (体)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

N : バスケットプレートの数 (枚)

A : 断面積 (mm²)

$$A = b_1 \times h_1 - (b_2 + b_3 \times 2) \times h_2$$

b₁ : バスケットプレート幅 1 (mm)

h₁ : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b₂ : バスケットプレート幅 2 (mm)

b₃ : バスケットプレート幅 3 (mm)

h₂ : バスケットプレート高さ 2 (mm)



(□)-第 A. 34 図 バスケットプレート解析モデル図

計算条件と計算結果を(□)-第 A. 29 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、180 ° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第 A. 29 表 バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数 : N_f (体)	領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 ^(注 1) : W_I (kg)	領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 ^(注 2) : W_{II} (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値	709				200

項目	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm ²)
数値						

項目	バスケットプレートの数 : N (枚)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値		8	37	3.62

(注 1) 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は、以下のとおりである。

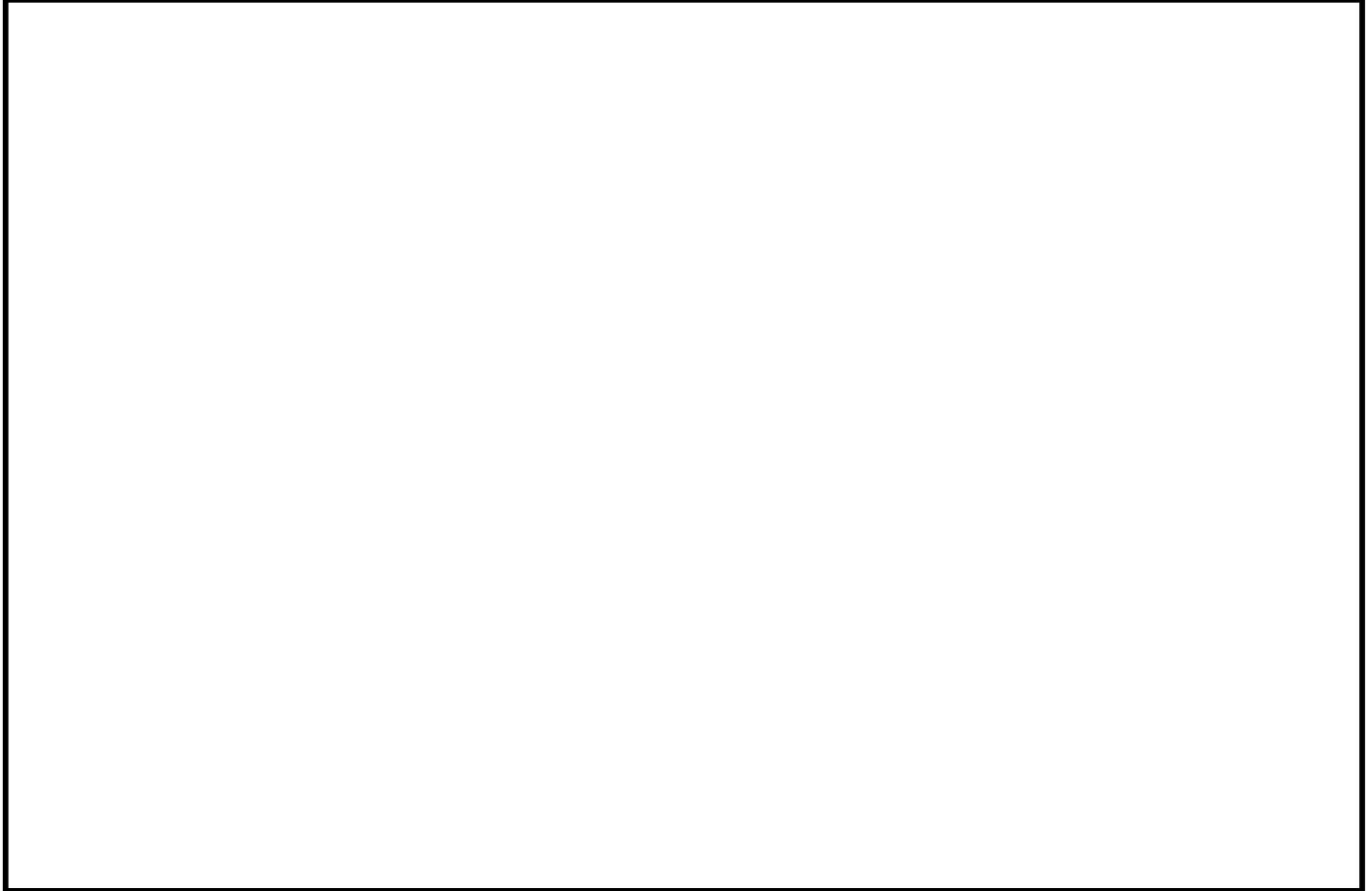
バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)
 バスケットサポートの質量 : (kg)
 燃料集合体の合計質量 : 709 (kg)

(注 2) 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)

b. バスケットプレート横板

水平落下時にバスケットプレート横板切欠部には、(ロ) 第 A. 35 図に示すようにバスケットプレート、中性子吸収材及び燃料集合体の自重による慣性力により曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。



(ロ)-第 A. 35 図 バスケットプレート横板の解析モデル

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

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

ここで、

σ_b : 曲げ応力 (MPa)

τ : せん断応力 (MPa)

M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = \frac{w \cdot \ell^2}{12} G_H$$

Z : 断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1}$$

A : 断面積 (mm²)

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2)$$

F : せん断力 (N)

$$F = w \times \ell / 2 \times G_H$$

w : 分布荷重 (kg/mm)

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N}$$

ℓ : バスケットセルの内幅 (mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s²)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

W_b : バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

N : バスケットプレートの数 (段)

h_1 : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)

b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)

h_2 : バスケットプレート高さ 2 (mm)

b_3 : バスケットプレート幅 3 (mm)



(ロ)-第 A. 36 図 バスケットプレート解析モデル図

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 30 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1.2 に示す解析基準値を満足する。なお、180 ° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第 A. 30 表 バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 : W_f (kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b (kg)	バスケットプレートの数 : N (枚)	バスケットセルの内幅 : l (mm)	分布荷重 : w (kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値	709					200

項目	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)
数値					

項目	曲げモーメント : M (N・mm)	断面係数 : Z (mm ³)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : αS_m (MPa)	余裕率 (-)
数値			8	48	5.00

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm ²)	せん断応力 : τ (MPa)	基準値 : $0.6S_m$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			2	22	10.0

(3) 燃料集合体

水平落下時に生じる応力は、落下衝撃による曲げ応力 σ_b (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。水平落下時において最大応力強さ S (MPa) は、外面に生じるので外面のみ評価する。

a. 落下衝撃により生じる曲げ応力

燃料被覆管は支持格子により支持される連続梁とみなすことができ、1 つの支持スパン内の部分を考えると両端固定梁となる。したがって、落下衝撃により生じる最大曲げ応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{Md_o}{2I}$$

$$M = \frac{1}{12}(W_f + W_c)\ell^2 \times G_H$$

$$I = \frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4)$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

W_f : ペレット単位長さ当たり質量 (kg/mm)

W_c : 燃料被覆管単位長さ当たり質量 (kg/mm)

ℓ : 支持スパン (mm)

d_o : 燃料被覆管外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管内径 (mm)

b. 内圧による各方向応力

内圧 P_o により生じる各方向応力は、1. (3) と同じである。

c. 応力強さ

水平落下時に生じる曲げ応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、以下の式で与えられる。

$$S = \text{Max} (| \sigma_{rL} - \sigma_{\theta L} | , | \sigma_{\theta L} - \sigma_{zL} | , | \sigma_{zL} - \sigma_{rL} |)$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_\theta$$

$$\sigma_{zL} = -\sigma_b + \sigma_z$$

燃料被覆管材料（ジルカロイ-4）の \square °Cにおける照射後の降伏応力 σ_y は、595 MPa⁴⁾ であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の諸式を用いて各燃料に対して計算した結果を (ロ)-第 A. 31 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは基準値以下である。

(ロ)-第 A. 31 表 水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料 (48GWd/t, 39GWd/t)		14×14燃料 (55GWd/t, 48GWd/t, 39GWd/t)	
	A型	B型	A型	B型
ペレット単位長さ当たり質量 : W_f (kg/mm)	\square		\square	
燃料被覆管単位長さ当たり質量 : W_c (kg/mm)				
衝撃加速度 : G_H (m/s ²)	200	200	200	200
支持スパン : l (mm)	\square		\square	
燃料被覆管外径 : d_o (mm)	9.50	9.50	10.72	10.72
燃料被覆管内径 : d_i (mm)	8.36	8.36	9.48	9.40
内圧 : P_o (MPa)	11.15	10.76	12.28	13.43
応力強さ : S (MPa)	135	133	157	154
降伏応力 : σ_y (MPa)	595	595	595	595
余裕率 : MS (-)	3.40	3.47	2.78	2.86

3. コーナー落下

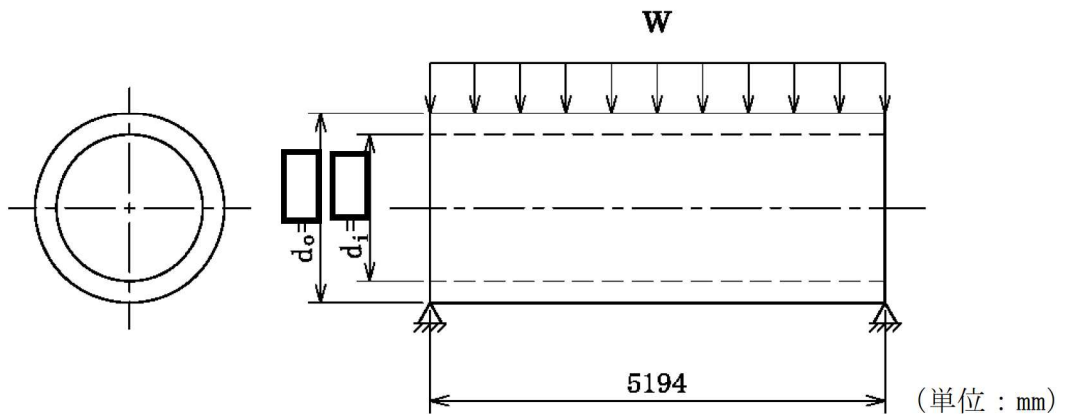
(ロ)-第 A. 19 表に示すように、コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下時に比べて小さく、垂直及び水平落下時に比べて条件が厳しくない。ただし、頭部コーナー落下時は、頭部垂直落下時と違い蓋部に作用する緩衝体の圧潰力が蓋全面に作用せず内部の収納物等による慣性力が蓋を介して蓋ボルトに作用する。この蓋ボルトへの荷重については、より衝撃加速度の大きい特別の試験条件で評価し、蓋ボルトの応力が設計降伏点より低いことを確認している。したがって、コーナー落下時に輸送容器及び収納物の構造健全性が損なわれることはない。

A.5.4 積み重ね試験

本項の条件として、輸送物の5倍に相当する荷重又は鉛直投影面積に 1.3×10^{-2} MPaのいずれか厳しい方を負荷することになっている。本輸送物の場合、輸送物の構造解析上での総質量 1.312×10^5 kgの5倍に相当する 6.560×10^5 kg (6.434×10^6 N)の荷重の方が、本輸送容器の鉛直投影面積に 1.3×10^{-2} MPaを乗じて得た値に相当する荷重より大きいので、 6.560×10^5 kg (6.434×10^6 N)の荷重が輸送容器の軸に垂直方向にかかる場合及び軸方向にかかる場合について評価を行う。

1. 軸に垂直な方向の荷重の場合

本輸送物では、容器本体を円筒構造とみなして、最も厳しい条件として(□)-第 A.37 図に示すように、長さL、外径 d_o （胴外径）、内径 d_i （胴内径）の円筒（胴）を横置きにして両端を単純支持し、鉛直方向に 6.434×10^6 Nの等分布荷重が負荷する場合について解析する。



(□)-第 A.37 図 両端単純支持された容器本体の解析モデル図

この場合、荷重を受けるのは容器本体であり、緩衝体が両端支持として働く。容器本体を梁と仮定すれば、生じる最大曲げ応力 σ_b (MPa)は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M_{\max} d_o}{2I}$$

ここで、

M_{\max} : 最大曲げモーメント (N・mm)

$$M_{\max} = \frac{1}{8} WL$$

L : 円筒の長さ (mm)

I : 円筒の中心軸に垂直な断面におけるZ軸に関する断面二次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$$

d_o : 円筒外径 (mm)

d_i : 円筒内径 (mm)

W : 荷重 (N)

ここで、胴部をこの円筒とみなして曲げ応力を計算した場合の計算条件と計算結果を、(㍀)-第 A. 32 表に示す。本輸送物は、軸に垂直な方向の荷重により圧潰することはない。

(㍀)-第 A. 32 表 容器本体の軸に垂直方向の積み重ね応力計算条件及び計算結果

評価位置	輸送物総質量の 5 倍の荷重 : W (N)	容器本体の 全長 : L (mm)	胴外径 : d_o (mm)	胴内径 : d_i (mm)	最 大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率 (-)
容器 本体	6.434×10^6	5194			7	185	25.4

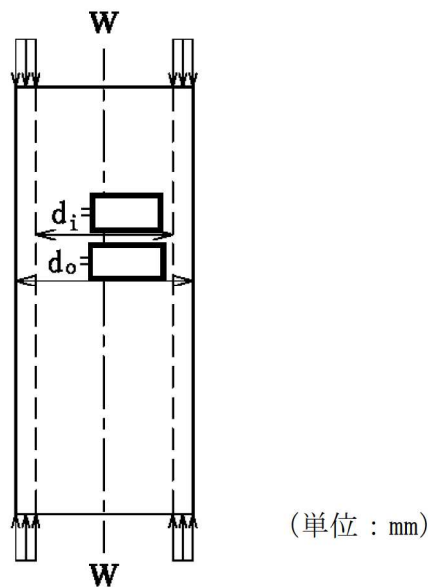
2. 軸方向の荷重の場合

(ロ) 第 A. 38 図に示すように、円筒をたて置きにし、円筒の軸方向に両端から等分布荷重 W をかけたときに円筒に生じる圧縮応力 σ_c (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = \frac{W}{\frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)}$$

ここで、

- W : 荷重 (N)
- d_i : 円筒内径 (mm)
- d_o : 円筒外径 (mm)



(ロ)-第 A. 38 図 両端より圧縮される容器本体の解析モデル図

ここで、胴部をこの円筒とみなして圧縮応力を計算した場合の計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 33 表に示す。本輸送物は、軸方向の荷重により圧潰することはない。

(ロ)-第 A. 33 表 容器本体の軸方向の積み重ね応力計算条件及び計算結果

評価位置	輸送物総質量の 5 倍の荷重 : W (N)	胴外径 : d_o (mm)	胴内径 : d_i (mm)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率 (-)
容器本体	6.434×10^6			5	185	36.0

以上より、容器本体の構造健全性が維持されるので、密封部の健全性が維持される。なお、実際に輸送物を積み重ねた場合には緩衝体部分が積み重なり、外筒や蓋部及び底部中性子遮蔽材カバーには荷重が作用しないため、遮蔽解析に影響を及ぼすような

破損は生じない。一方、緩衝体は、最大 20mm 程度変形する可能性があるが、ロ章 D の遮蔽解析で考慮している 0.3m 落下で想定される変形量には包絡される。

A.5.5 貫通

本項では、質量 6 kg、直径 3.2 cm の軟鋼棒が 1 m の高さから本輸送物外表面で最も板厚の薄い緩衝体カバープレート（板厚 \square mm）へ落下するとした場合に、緩衝体カバープレートが破断せず軟鋼棒は内部に貫通しないことを示す。

6 kg の軟鋼棒が 1 m の高さから落下したときの落下エネルギー E (N・mm) は、次式で与えられる。

$$E = mgH$$

ここで、

m : 軟鋼棒の質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

H : 落下高さ (mm)

一方、軟鋼棒が緩衝体カバープレートへ落下した際、貫通するためには落下エネルギーが (ロ)-第 A.39 図に示すようにカバープレートのせん断に必要なエネルギーより大きい場合である。この場合のせん断に要するエネルギー E_s (N・mm) は、次式で与えられる。

$$E_s = \frac{\pi}{2} dt^2 S$$

ここで、

d : 軟鋼棒の直径 (mm)

t : 緩衝体カバープレートの板厚 (mm)

S : カバープレートのせん断強さ (MPa)

(せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき、カバープレートの設計引張強さの $1/\sqrt{3}$ とする。)

落下エネルギー E とせん断エネルギー E_s を比較すると、計算条件と計算結果は (ロ)-第 A.34 表に示すように $E < E_s$ となり、カバープレートは軟鋼棒の落下によりせん断破壊せず、軟鋼棒は緩衝体カバープレートを貫通しない。

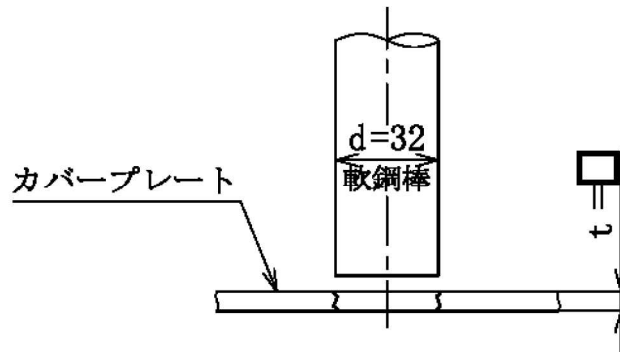
その他の箇所のせん断に要するエネルギーは、緩衝体カバープレートより大きいため、せん断破壊はおこらず、密封部の健全性が維持され、また、熱解析及び遮蔽解析への影響は無視できる。

(ロ)-第 A. 34 表 軟鋼棒の落下エネルギー及びカバープレートせん断エネルギー

計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒の質量 : m (kg)	重力加速度 : g (m/s ²)	落下高さ : H (mm)	落下エネルギー : E (N・mm)
数値等	6	9.80665	1000	5.884 × 10 ⁴

項目	軟鋼棒の直径 : d (mm)	緩衝体 カバープレート の板厚 : t (mm)	カバープレートの 設計引張強さ : S _u (MPa)	カバープレートの せん断強さ : S (MPa)	せん断 エネルギー : E _s (N・mm)
数値等	32				4.505 × 10 ⁵



(単位 : mm)

(ロ)-第 A. 39 図 せん断による貫通モデル図

A. 5.6 角又は縁落下

本輸送物は、鋼製の円筒形で質量は 131.2 トンであり、角又は縁落下は該当しない。

A. 5.7 結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

一般の試験条件における輸送物に対する解析結果の要約を(ロ)-第 A. 35 表に示す。自由落下試験及び積み重ね試験により緩衝体に永久変形が生じるが、表に示すように、各試験条件下において輸送物各部は A. 1.2 に定めた基準を満足し、構造上の健全性が損なわれることはない。また、三次蓋の口開き変形が基準を満足していることから、密封性能も維持される。

なお、頭部 0.3m 垂直落下時には、一次蓋内面、バスケット及び燃料集合体に、底部 0.3m 垂直落下時には、胴底部内面、バスケット及び燃料集合体に、衝撃加速度を上回る加速度が発生すると考えられるが、それらの部材に加速度割増を考慮しても健全性に影響はない。

(注) A. 10.1 に示す MSF-21P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの 9.3m 頭部垂直落下試験で計測された内部収納物の加速度割増を基に、0.3m 垂直落下時には 1.5 倍程度の加速度割増が生じると考えられるが、輸送物の各部材は 0.5 以上の余裕率を有する。

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (1/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
熱的試験				
(1) 容器本体 一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	7	25.5
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	6	30.0
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	35	4.85
胴 (P _m)	S _m	124	2	61.0
胴 (底板) (P _m)	S _m	123	1	122
外筒 (引張)	f _t	157	20	6.85
外筒 (圧縮)	f _c	157	3	51.3
外筒 (せん断)	f _s	90	9	9.00
外筒 (曲げ)	f _b	157	22	6.13
下部端板 (引張)	f _t	136	2	67.0
下部端板 (圧縮)	f _c	136	1	135
下部端板 (せん断)	f _s	78	3	25.0
下部端板 (曲げ)	f _b	136	8	16.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	—	—
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	1	156
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	1	89.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	3	51.3
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	2	67.0
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	5	14.6
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	12	10.3
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	28	5.60
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	186	11	15.9
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	11	32.8
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	8	45.5
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	37	10.1
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	23	15.1
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	23	15.0
外筒 (引張)	3f _t	472	82	4.75
外筒 (せん断)	3f _s	272	24	10.3
外筒 (曲げ)	3f _b	472	31	14.2
下部端板 (引張)	3f _t	410	46	7.91
下部端板 (せん断)	3f _s	236	26	8.07
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	110	2.72
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	4	117
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	1	271
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	5	93.4
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	38	9.78
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	4	58.0
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	10	40.0
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	44	3.20
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	21	7.85
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	248	1.26
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	251	2.35
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	202	1.79
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	208	3.06
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	233	1.42
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	334	1.53
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.09 mm	基準に合致
水噴霧試験				
	吸水性	無	無	基準に合致
	水切り	有	有	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (2/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
自由落下試験				
1. 垂直落下				
(1) 容器本体 (頭部垂直落下)				
一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	56	2.32
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	24	6.75
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	37	4.54
胴 (P _L)	1.5S _m	186	36	4.16
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	184	5	35.8
外筒 (引張)	f _t	157	38	3.13
外筒 (圧縮)	f _c	157	17	8.23
外筒 (せん断)	f _s	90	27	2.33
外筒 (曲げ)	f _b	157	34	3.61
下部端板 (引張)	f _t	136	2	67.0
下部端板 (圧縮)	f _c	136	1	135
下部端板 (せん断)	f _s	78	4	18.5
下部端板 (曲げ)	f _b	136	11	11.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	14	10.2
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	1	156
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	8	10.2
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	58	1.70
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	3	25.0
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	8	16.0
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	43	3.30
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	27	5.85
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	56	5.64
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	24	14.5
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	53	6.75
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	60	5.20
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	22	15.7
外筒 (引張)	3f _t	472	83	4.68
外筒 (せん断)	3f _s	272	17	15.0
外筒 (曲げ)	3f _b	472	35	12.4
下部端板 (引張)	3f _t	410	46	7.91
下部端板 (せん断)	3f _s	236	27	7.74
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	109	2.76
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	12	38.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	8	33.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	61	6.73
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	39	9.51
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	3	77.6
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	7	57.5
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	83	1.22
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	40	3.62
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	289	0.94
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	314	1.68
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	206	1.73
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	298	1.83
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	197	1.86
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	197	3.29
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.01 mm以下	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (3/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(2) 容器本体 (底部垂直落下)				
一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	15	11.4
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	9	19.6
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	36	4.69
胴 (P _L)	1.5S _m	186	20	8.30
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	184	25	6.36
外筒 (引張)	f _t	157	37	3.24
外筒 (圧縮)	f _c	157	2	77.5
外筒 (せん断)	f _s	90	7	11.8
外筒 (曲げ)	f _b	157	14	10.2
下部端板 (引張)	f _t	136	6	21.6
下部端板 (圧縮)	f _c	136	2	67.0
下部端板 (せん断)	f _s	78	9	7.66
下部端板 (曲げ)	f _b	136	35	2.88
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	—	—
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	3	51.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	2	44.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	9	16.4
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	12	10.3
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	2	67.0
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	9	7.66
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	26	4.23
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	30	5.16
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	13	13.2
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	18	19.6
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	11	32.8
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	43	8.55
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	38	8.78
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	40	8.22
外筒 (引張)	3f _t	472	84	4.61
外筒 (せん断)	3f _s	272	24	10.3
外筒 (曲げ)	3f _b	472	25	17.8
下部端板 (引張)	3f _t	410	40	9.25
下部端板 (せん断)	3f _s	236	15	14.7
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	67	5.11
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	3	156
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	1	271
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	5	93.4
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	40	9.25
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	10	22.6
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	28	13.6
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	45	3.11
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	23	7.08
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	248	1.26
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	249	2.38
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	196	1.87
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	205	3.12
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	216	1.61
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	308	1.74
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.01 mm以下	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (4/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(3) バスケット バスケットプレート (σ_c)	S_m	37	7	4.28
	f_c	37	7	4.28
(4) 燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	595	118	4.04

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (5/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
2. 水平落下				
(1) 容器本体				
一次応力				
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	9	19.6
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	11	15.9
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	42	3.88
胴 (P _L)	1.5S _m	186	56	2.32
胴 (底板) (P _m)	S _m	123	11	10.1
外筒 (引張)	f _t	157	38	3.13
外筒 (圧縮)	f _c	157	35	3.48
外筒 (せん断)	f _s	90	21	3.28
外筒 (曲げ)	f _b	157	51	2.07
下部端板 (引張)	f _t	136	7	18.4
下部端板 (圧縮)	f _c	136	12	10.3
下部端板 (せん断)	f _s	78	14	4.57
下部端板 (曲げ)	f _b	136	50	1.72
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	12	12.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	5	30.4
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	5	17.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	13	11.0
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	10	12.6
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	46	1.95
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	15	4.20
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	38	2.57
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	50	2.70
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	62	1.98
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	15	23.8
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	32	10.6
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	57	6.21
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	83	3.48
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	35	9.54
外筒 (引張)	3f _t	472	85	4.55
外筒 (せん断)	3f _s	272	29	8.37
外筒 (曲げ)	3f _b	472	58	7.13
下部端板 (引張)	3f _t	410	58	6.06
下部端板 (せん断)	3f _s	236	34	5.94
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	137	1.99
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	9	51.4
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	5	53.4
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	16	28.5
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	77	4.32
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	15	14.7
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	29	13.1
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	54	2.42
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	57	2.24
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	260	1.16
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	579	0.45
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	230	1.45
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	554	0.52
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	295	0.91
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	470	0.80
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.17 mm	基準に合致

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (6/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
(2) バスケット				
バスケットプレート縦板(σ_c)	S_m	37	8	3.62
バスケットプレート横板(σ_b)	αS_m	48	8	5.00
バスケットプレート横板(τ)	$0.6S_m$	22	2	10.0
(3) 燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	595	157	2.78

(ロ)-第 A. 35 表 一般の試験条件における構造解析結果の要約 (7/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
3. コーナー落下	衝撃加速度が垂直落下及び水平落下に比べ小さいので、垂直落下及び水平落下の結果より厳しくない。			
積み重ね試験				
半径方向	S _y	185	7	25.4
軸方向	S _y	185	5	36.0
貫通				
緩衝体	せん断 エネルギー	4.505×10^5 N・mm	5.884×10^4 N・mm	基準に合致

A.6 特別の試験条件

本節では輸送物が規則及び告示に規定された特別の試験条件下において、A.1.2 に示す基準を満足することを示す。

特別の試験は強度試験に引きつづいて火災試験が行われるとする。火災試験に影響を及ぼす強度試験による変形は、輸送物の熱的性能に係る緩衝体の変形である。9 m 落下試験と 1 m 貫通試験の試験順序の違いによってこれらの破損または変形に有意な差は生じないので、これらに引きつづく火災試験においては、強度試験の順序の違いは輸送物に影響を与えない。したがって、強度試験は 9 m 落下試験に続いて 1 m 貫通試験が行われるとして解析する。

A.6.1 強度試験・落下試験 I (9 m 落下時)

連続しておこる特別の試験条件の第 1 番目は、輸送物が最大破損を受けるよう、平らな降伏しない落下試験台上に 9 m の高さから輸送物を落下させるものである。

本項では輸送物が 9 m 落下した場合、その落下エネルギーが、容器本体端部に取り付けられた緩衝体の変形によって吸収され、輸送物に加わる衝撃力が十分緩和されることを示し、それに対する輸送物の健全性を検討する。

1. 解析モデル

(1) 解析する落下姿勢

輸送物が最大破損を受ける落下方向としては次の 4 種類を考える。

- ① 垂直落下
- ② 水平落下
- ③ コーナー落下 (落下点が輸送物の重心を通る鉛直線上にある場合)
- ④ 傾斜落下

(2) 解析方法

緩衝体の変形量と衝撃力の計算方法は A. 5. 3. 1 の 1. に示す方法と同様に行う。
落下エネルギーの計算条件と計算結果を(ρ)-第 A. 36 表に示す。

(ρ)-第 A. 36 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大 総質量 :m(kg)	重力加速度 :g(m/s ²)	落下高さ :H(mm)	輸送物の 落下エネルギー :E _k (N・mm)
数値	1. 312×10 ⁵	9. 80665	9000	1. 158×10 ¹⁰

(3) 各落下方向解析モデル

各落下方向の解析モデルは(ρ)-第 A. 23 図～(ρ)-第 A. 27 図に示したとおりである。

2. 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

落下エネルギーE_kに対応する変形量δと衝撃加速度Gは(ρ)-第 A. 37 表に示すようになる。
なお、衝撃加速度Gは次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

ここで、

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

m : 輸送物質量 (kg)

(ρ)-第 A. 37 表に示すとおり、9 m 落下試験時において輸送物の緩衝体に圧潰変形が生じる。

(ロ)-第 A. 37 表 9 m 落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 : F(N)	衝撃加速度 : G (m/s ²)	設計加速度 ^(注1) (m/s ²)	緩衝体の 変形量 δ (mm)	設計基準 変形量 ^(注2) δ _{max} (mm)
垂直 落下	頭部	7.071×10 ⁷	536	610	297	684
	底部	6.087×10 ⁷	462	480	307	608
水平落下		1.080×10 ⁸	818	850	266	388
コーナー 落下	頭部	6.441×10 ⁷	488	510	780	834
	底部	6.402×10 ⁷	485	—	735	839

(注1)設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注2)設計基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

A. 6. 1. 1 垂直落下

9 m 垂直落下時の衝撃力に対して、容器本体は十分な強度で密封性を保持し、かつ、遮蔽評価に影響を及ぼすような塑性変形が生じないことを示す。また、胴内のバスケットは破損しないことを示す。

1. 容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。また、落下方向は頭部及び底部落下とする。

(1) 解析モデル

A. 5. 3. 2 と同様に、三次元有限要素を用いた (p)-第 A. 16 図に示す三次元 180 ° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (610 m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 下部緩衝体の自重による慣性力が底板外面に働く。
- ・ 一次蓋内面には、衝撃加速度 (610 m/s^2) に加速度割増係数として 2.6^{17} を乗じた加速度による内部収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力が働く。
- ・ 落下時の上部緩衝体反力が蓋部に働く。

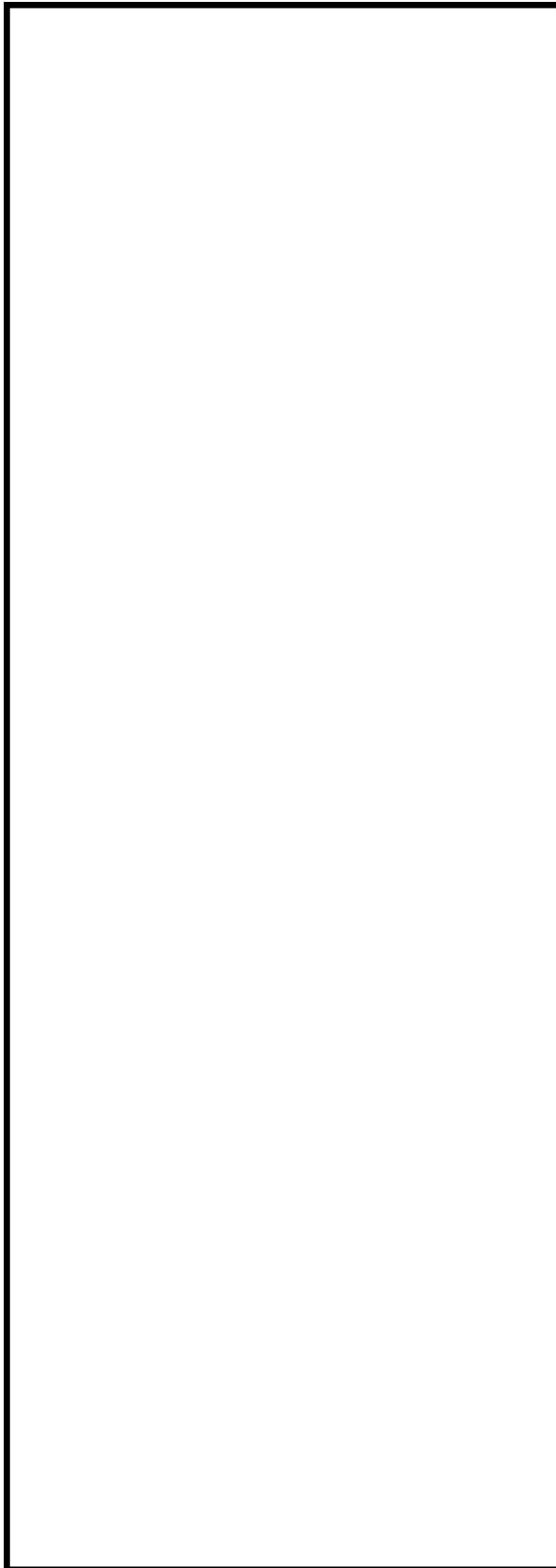
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (480 m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋外面に働く。
- ・ 胴底部内面には、衝撃加速度 (480 m/s^2) に加速度割増係数として 2.6^{17} を乗じた加速度による内部収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力が働く。

b. 境界条件

境界条件は緩衝体の衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とした。

それぞれの落下方向に対する荷重条件及び境界条件を (p)-第 A. 40 図及び (p)-第 A. 41 図に示す。



F_{ab} : 下部緩衝体の慣性力

P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)

F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体)
の慣性力

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力
(MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力
(MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

F_{rw} : 上部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

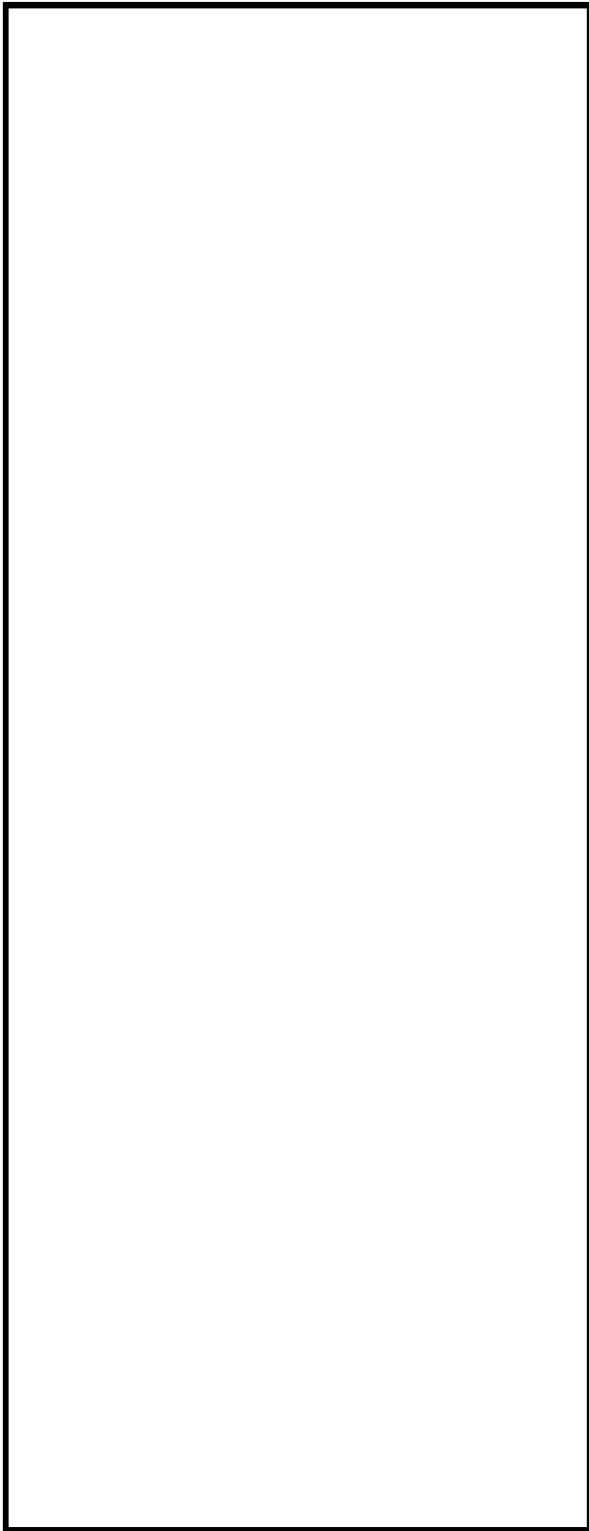
P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(p)-第 A. 40 図 頭部 9 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



- F_{ab} : 上部緩衝体の慣性力
- P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)
- F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 () MPa G)
- P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 () MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 () MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 () MPa G)
- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 () MPa)
- P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 () MPa)
- P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 () MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(p)-第 A. 41 図 底部 9 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

主要な位置（(□)-第 A. 30 図参照）に対する頭部垂直落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(□)-第 A. 38 表に、また、底部垂直落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(□)-第 A. 39 表に示す。

それぞれの表に示すように、すべての評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準を満足する。

また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0. 01mm 以下であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第 A.38 表 頭部 9 m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	13	251	251	18.3
		P_L+P_b	内	54		377	5.98
			外	78			3.83
	④	P_L	—	17		377	21.1
三次蓋	⑤	P_m	—	20		270	12.5
		P_L+P_b	内	26		406	14.6
			外	64			5.34
	⑥	P_L	—	67		406	5.05
胴	⑦	P_L	—	96		377	2.92
	⑧	P_m	—	19		251	12.2
		P_L+P_b	内	20		377	17.8
			外	18			19.9
	⑨-1	P_L	—	11		377	33.2
⑨-2	P_L	—	12	30.4			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	4	251	61.8	
		P_L+P_b	内	12	377	30.4	
			外	11		33.2	
⑪	P_L	—	8	377	46.1		
外筒	⑫	引張	—	37	283	6.64	
		圧縮	—	45	283	5.28	
		せん断	—	93	163	0.75	
		曲げ	—	126	283	1.24	
	⑬	引張	—	104	283	1.72	
		圧縮	—	2	283	140	
		せん断	—	2	163	80.5	
		曲げ	—	2	283	140	
	⑭	引張	—	11	283	24.7	
		圧縮	—	4	283	69.7	
		せん断	—	18	163	8.05	
		曲げ	—	44	283	5.43	

(注1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。

断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(ロ)-第 A.38 表 頭部 9 m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	4	[Redacted]	218	53.5
		圧縮	—	1		218	217
		せん断	—	9		126	13.0
		曲げ	—	30		218	6.26
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	—		218	—
		圧縮	—	1		218	217
		せん断	—	1		126	125
		曲げ	—	1		218	217
	⑲	引張	—	1		218	217
		圧縮	—	2		218	108
		せん断	—	1		126	125
		曲げ	—	1		218	217
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	56	186	2.32	
		P_L+P_b+Q	外	64		1.90	
	㉑	P_L+P_b+Q	内	74	185	1.50	
		P_L+P_b+Q	外	68		1.72	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	323	848	1.62	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	623	848	0.36	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	174	848	3.87	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	219	848	2.87	

(注1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

(ロ)-第 A.39 表 底部 9 m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	7	[Redacted]	251	34.8
		P_L+P_b	内	40		377	8.42
	外		29	12.0			
	④	P_L	—	13		377	28.0
三次蓋	⑤	P_m	—	8		270	32.7
		P_L+P_b	内	69		406	4.88
	外		55	6.38			
	⑥	P_L	—	31		406	12.0
胴	⑦	P_L	—	8		377	46.1
	⑧	P_m	—	19		251	12.2
		P_L+P_b	内	19		377	18.8
	外		19	18.8			
	⑨-1	P_L	—	28		377	12.4
⑨-2	P_L	—	54	5.98			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	29	251	7.66	
		P_L+P_b	内	81	377	3.65	
	外		103	2.66			
⑪	P_L	—	46	377	7.19		
外筒	⑫	引張	—	9	283	30.4	
		圧縮	—	1	283	282	
		せん断	—	6	163	26.1	
		曲げ	—	12	283	22.5	
	⑬	引張	—	53	283	4.33	
		圧縮	—	2	283	140	
		せん断	—	1	163	162	
		曲げ	—	1	283	282	
	⑭	引張	—	22	283	11.8	
		圧縮	—	6	283	46.1	
		せん断	—	15	163	9.86	
		曲げ	—	33	283	7.57	

(注1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。

断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $\text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$ 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $\text{MIN}[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(□)-第 A. 39 表 底部 9 m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	14	[Redacted]	218	14.5
		圧縮	—	5		218	42.6
		せん断	—	23		126	4.47
		曲げ	—	87		218	1.50
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	36		218	5.05
		圧縮	—	1		218	217
		せん断	—	4		126	30.5
		曲げ	—	35		218	5.22
	⑲	引張	—	38		218	4.73
		圧縮	—	5		218	42.6
		せん断	—	17		126	6.41
		曲げ	—	50		218	3.36
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	31		186	5.00
		P_L+P_b+Q	外	18			9.33
	㉑	P_L+P_b+Q	内	30	185	5.16	
		P_L+P_b+Q	外	27		5.85	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	198	848	3.28	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	209	848	3.05	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	297	848	1.85	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	443	848	0.91	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

2. バスケット

垂直落下時にバスケットに生じる応力は A. 5. 3. 2 と同様に求める。ここで、垂直落下時の衝撃加速度には、加速度割増係数として 2.6^{17} を衝撃加速度 (610 m/s^2) に乗じる。計算条件と計算結果を(□)-第 A. 40 表及び(□)-第 A. 41 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いのでバスケットは塑性変形しない。

(□)-第 A. 40 表 バスケットの応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット 合計質量 : W_b (kg)	垂直落下時の 衝撃加速度 : G_v (m/s^2)
数値	5900	1586

項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート 全厚さ : b_1 (mm)	バスケット プレート 内幅 : b_2 (mm)	バスケット プレート長さ : L_1 (mm)	胴に接触するバスケット プレート L_1 部の個数 : n (-)	バスケット プレートと胴 の接触面積 : A_1 (mm^2)
数値	A					
	B					

項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : $2/3S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	40	85	1.12
	B	40		1.12

(□)-第 A. 41 表 バスケットプレートの一次圧縮応力の計算条件及び計算結果

項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート長さ : L (mm)	バスケット プレートの 断面積 : A_2 (mm^2)	バスケット プレートの 縦弾性係数 : E (MPa)
数値	A			7.00×10^4
	B			

項目	バスケット プレートの タイプ	座屈長さ : l_k (mm)	設計降伏点の 1.2 倍 の値又は設計引張強 さの 0.7 倍の値のい ずれか小さい方の値 : F (MPa)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	許容圧縮 応力 : f_c (MPa)	余裕率 (-)
数値	A			40	66	0.65
	B			40	66	0.65

A. 6. 1. 2 水平落下

9 m 水平落下時の衝撃力に対して、容器本体は十分な強度で密封性を保持し、かつ、遮蔽評価に影響を及ぼすような塑性変形が生じないことを示す。また、胴内のバスケットは破損しないことを示す。

1. 容器本体

水平落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(1) 解析モデル

A. 5. 3. 2 と同様に、三次元有限要素を用いた (p)-第 A. 16 図に示す三次元 180 ° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

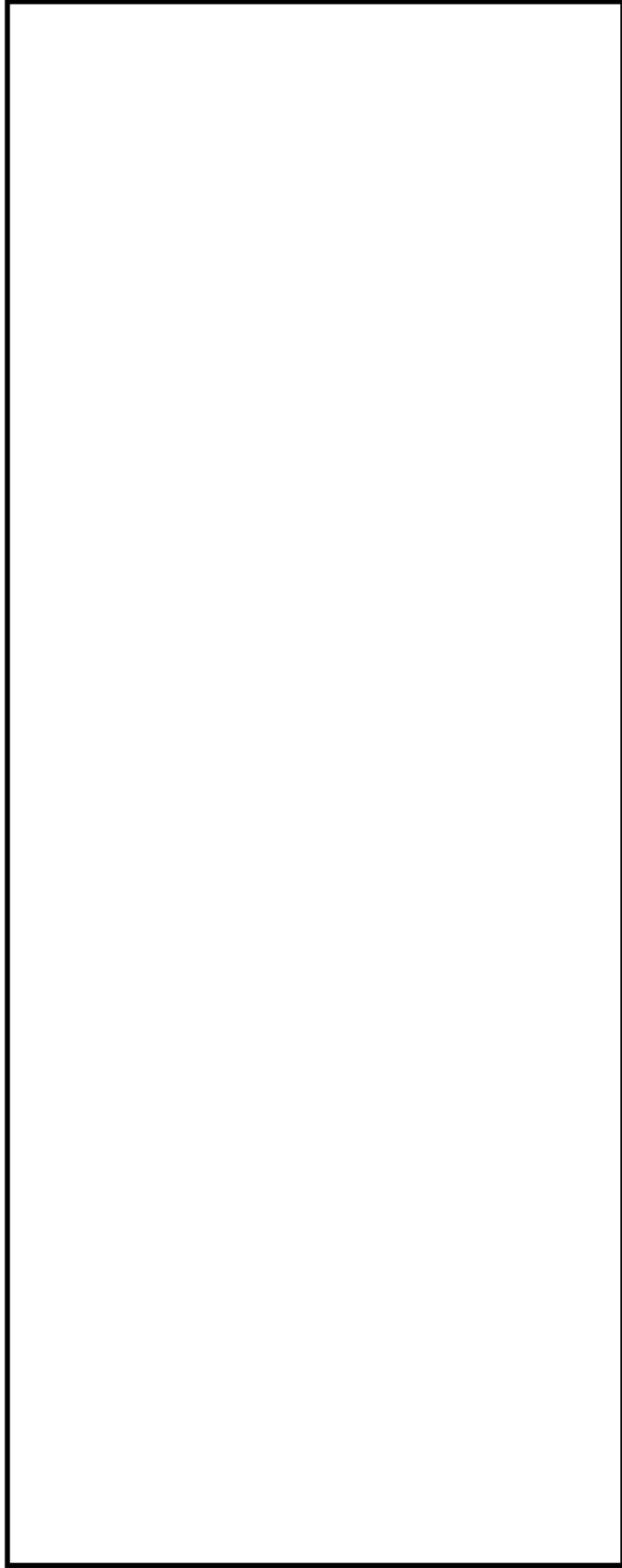
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (850 m/s^2) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 胴内面には、衝撃加速度 (850 m/s^2) に加速度割増係数として $1.2^{17)}$ を乗じた加速度による内部収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力が働く。
- ・ 落下時の上・下部緩衝体木材反力が胴フランジ面及び底板へ働く。

b. 境界条件

上・下部緩衝体に取り付く面 (反力を受ける面) の上・下 1 箇所 X 方向変位を拘束した。また、 $0^\circ - 180^\circ$ 面の対称面において Y 方向の変位を拘束した。

水平落下時に作用する荷重条件及び境界条件を (p)-第 A. 42 図に示す。



P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二次蓋間圧力 (0.30 MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 MPa G)

F_{iw} : 内部収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力

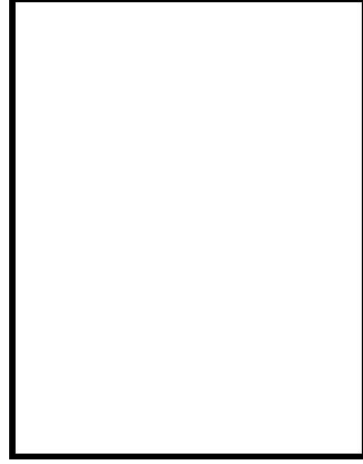
F_{tr} : 上部緩衝体反力

F_{br} : 下部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(3) 解析結果

水平落下時の主要な位置 ((p)-第 A. 30 図参照) に対する一次応力の評価結果を (p)-第 A. 42 表 に示す。表に示すように、すべての評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。

また、三次蓋とキャスク本体の O リング取り付け位置での相対口開き変形量は 0. 35 mm であり、O リングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第 A. 42 表 9 m 水平落下時の容器本体に対する一次応力

及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P _m	—	18	251	251	12.9
		P _L +P _b	内	27		377	12.9
	外		39	377		8.66	
	④	P _L	—	59		377	5.38
三次蓋	⑤	P _m	—	63		270	3.28
		P _L +P _b	内	98		406	3.14
	外		82	3.95			
	⑥	P _L	—	78		406	4.20
胴	⑦	P _L	—	176		377	1.14
	⑧	P _m	—	76		251	2.30
		P _L +P _b	内	74		377	4.09
	外		106	2.55			
	⑨-1	P _L	—	78		377	3.83
	⑨-2	P _L	—	114			2.30
胴 (底板)	⑩	P _m	—	35	251	6.18	
		P _L +P _b	内	36	377	9.47	
	外		50	6.54			
⑪	P _L	—	62	377	5.08		
外筒	⑫	引張	—	96	283	1.94	
		圧縮	—	68	283	3.16	
		せん断	—	44	163	2.70	
		曲げ	—	65	283	3.35	
	⑬	引張	—	136	283	1.08	
		圧縮	—	64	283	3.42	
		せん断	—	6	163	26.1	
		曲げ	—	15	283	17.8	
	⑭	引張	—	33	283	7.57	
		圧縮	—	58	283	3.87	
		せん断	—	58	163	1.81	
		曲げ	—	144	283	0.96	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、P_L : 一次局部膜応力、P_b : 一次曲げ応力(注3) 断面③~④及び⑦~⑪の P_m に対する基準値は 2/3S_u、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。

断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は MIN[2.4S_m, 2/3S_u]、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は MIN[3.6S_m, S_u] である。断面⑫~⑭に示す引張応力に対する基準値は 1.5f_t、圧縮応力に対する基準値は 1.5f_c、せん断応力に対する基準値は 1.5f_s、曲げ応力に対する基準値は 1.5f_b である。

(□)-第 A. 42 表 9 m 水平落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	25	[Redacted]	218	7.72
		圧縮	—	39		218	4.58
		せん断	—	45		126	1.80
		曲げ	—	166		218	0.31
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	—		218	—
		圧縮	—	50		218	3.36
		せん断	—	50		126	1.52
		曲げ	—	19		218	10.4
	⑲	引張	—	38		218	4.73
		圧縮	—	149		218	0.46
		せん断	—	50		126	1.52
		曲げ	—	107		218	1.03
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	134		186	0.38
		P_L+P_b+Q	外	63			1.95
	㉑	P_L+P_b+Q	内	159	185	0.16	
		P_L+P_b+Q	外	165		0.12	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	318	848	1.66	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	819	848	0.03	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	430	848	0.97	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	720	848	0.17	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

2. バスケット

水平落下時にバスケットに生じる応力は A. 5. 3. 2 と同様に求める。ここで、水平落下時の衝撃加速度には加速度割増係数として $1.2^{17)}$ を衝撃加速度 (850 m/s^2) に乗じる。計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 43 表及び (ロ)-第 A. 44 表に示す。表に示すように、評価位置において A. 1. 2 に示す解析基準値を満足する。なお、 180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。なお、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第 A. 43 表 バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数 : N_f (体)	領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 ^(注1) : W_I (kg)	領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 ^(注2) : W_{II} (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s^2)
数値	709				1020

項目	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm^2)
数値						

項目	バスケットプレートの数 : N (枚)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : $(2/3)S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値		37	85	1.29

(注 1) 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は、以下のとおりである。

バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)
 バスケットサポートの質量 : (kg)
 燃料集合体の合計質量 : 709 (kg)

(注 2) 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)