

(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	—	51	[Redacted]	470	8.21
		せん断	—	7		271	37.7
		曲げ	—	19		470	23.7
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	87		470	4.40
		せん断	—	15		271	17.0
		曲げ	—	49		470	8.59
下部端板	⑮	引張	—	40		410	9.25
		せん断	—	11		236	20.4
		曲げ	—	58		410	6.06
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		472	—
		せん断	—	4		272	67.0
		曲げ	—	9		472	51.4
	⑰	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	33		410	11.4
		せん断	—	8	236	28.5	
		曲げ	—	26	410	14.7	
	⑲	引張	—	15	410	26.3	
		せん断	—	9	236	25.2	
		曲げ	—	61	410	5.72	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	22	186	7.45	
			外	9		19.6	
	㉑	—	内	21	185	7.80	
			外	18		9.27	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	63		1.93	
	㉓	—	内	25	185	6.40	
			外	24		6.70	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	249	562	1.25	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	250	843	2.37	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	196	564	1.87	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	202	846	3.18	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	234	564	1.41	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	326	846	1.59	

(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⑫~⑲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)

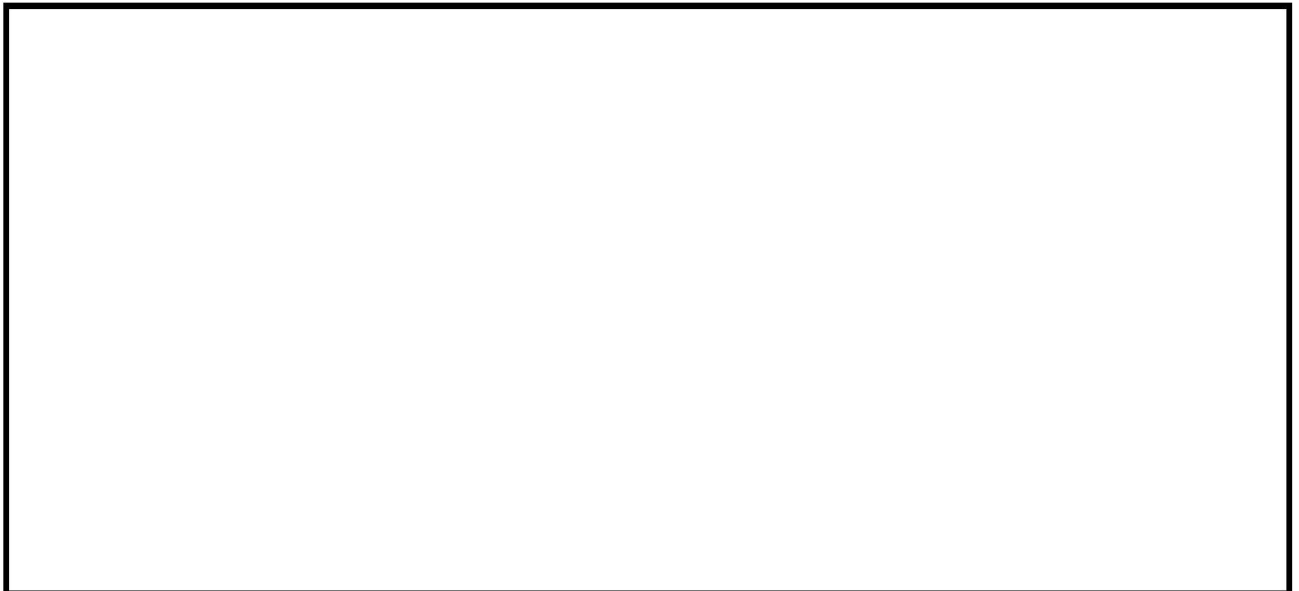
b_{B1} : バスケットプレート B 幅 1 (mm)

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	5600	270

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	36	4.14
	B	7		4.14

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。なお、許容圧縮応力は、バスケットプレート B の方が小さいため、バスケットプレート B を評価対象とする。

(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			6.94 × 10 ⁴

項目	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			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。

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

ここで、

W : 燃料被覆管最下端における質量 (kg)

G_V : 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 ($a \leq r \leq b$)

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、589 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 (㍀)-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。

(㍀)-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	A型	B型
燃料被覆管最下端における質量 : W (kg)		
衝撃加速度 : G _v (m/s ²)	270	270
燃料被覆管外径 : d _o (mm)	9.50	9.50
燃料被覆管内径 : d _i (mm)	8.36	8.36
内圧 : P _o (MPa)	11.77	11.38
応力強さ : S (MPa)	105	102
降伏応力 : σ_y (MPa)	589	589
余裕率 : MS (-)	4.60	4.77

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

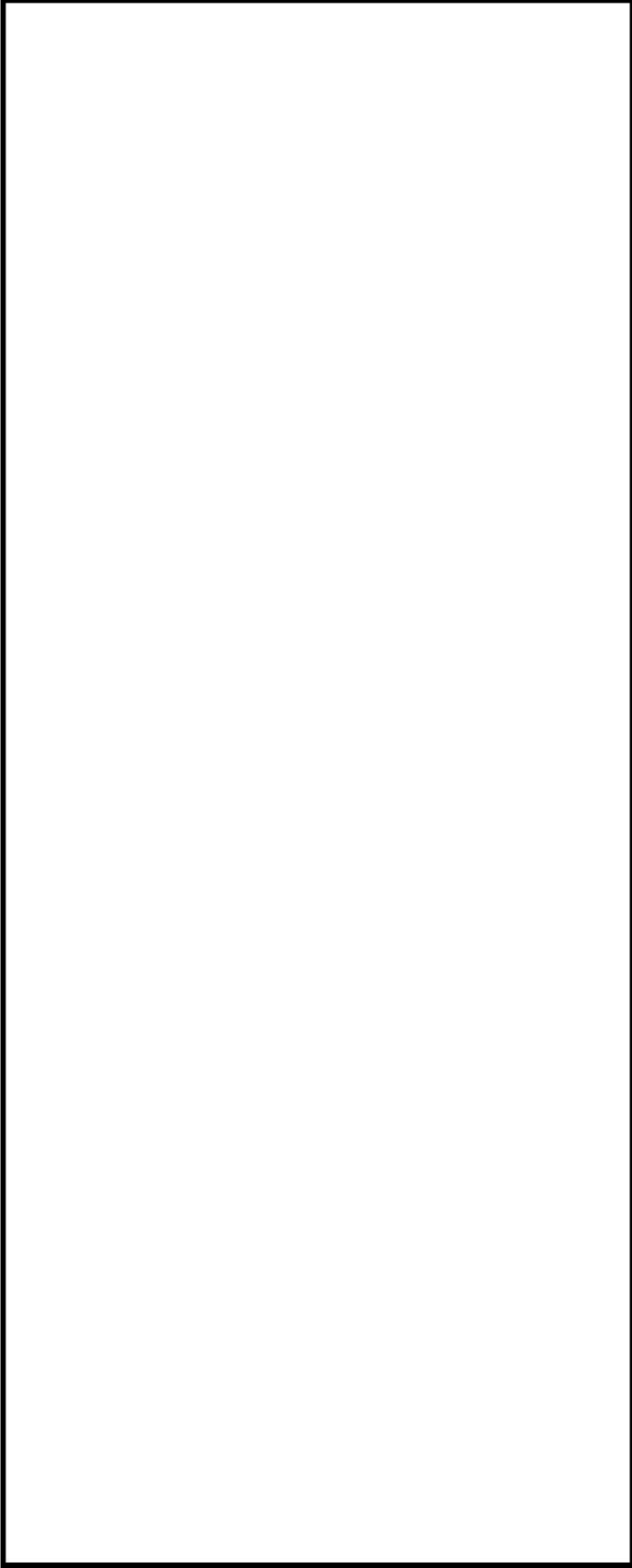
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 衝撃加速度 (210 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} : 一次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二次蓋間圧力 (0.19 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)

$F_{i,w}$: 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力

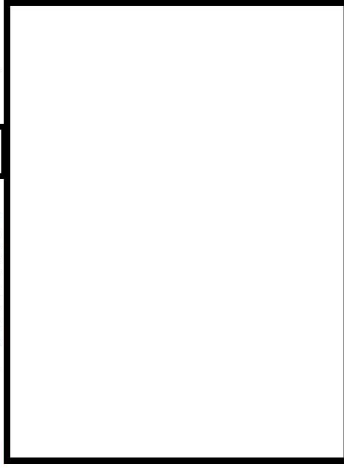
F_{tr} : 上部緩衝体反力

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)

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 0.18 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. 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	—	3		124	40.3
		P_L+P_b	内	8		186	22.2
			外	10			17.6
	②	P_L	—	10		186	17.6
二次蓋	③	P_m	—	6		124	19.6
		P_L+P_b	内	15		186	11.4
			外	20			8.30
	④	P_L	—	19		186	8.78
三次蓋	⑤	P_m	—	13		137	9.53
		P_L+P_b	内	23		205	7.91
			外	22			8.31
	⑥	P_L	—	24		205	7.54
胴	⑦	P_L	—	66		186	1.81
	⑧	P_m	—	21		123	4.85
		P_L+P_b	内	20	184	8.20	
			外	29		5.34	
	⑨-1	P_L	—	20	184	8.20	
⑨-2	P_L	—	31	4.93			
胴(底板)	⑩	P_m	—	11	122	10.0	
		P_L+P_b	内	12	183	14.2	
	外		13	13.0			
⑪	P_L	—	18	183	9.16		
外筒	⑫	引張	—	77	156	1.02	
		圧縮	—	20	156	6.80	
		せん断	—	30	90	2.00	
		曲げ	—	87	156	0.79	
	⑬	引張	—	41	156	2.80	
		圧縮	—	13	156	11.0	
		せん断	—	3	90	29.0	
		曲げ	—	7	156	21.2	
	⑭	引張	—	14	156	10.1	
		圧縮	—	18	156	7.66	
		せん断	—	20	90	3.50	
		曲げ	—	86	156	0.81	

(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. 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	—	8		136	16.0
		圧縮	—	13		136	9.46
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	63		136	1.15
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	2		157	77.5
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	13		157	11.0
	⑰	引張	—	14		157	10.2
		圧縮	—	5		157	30.4
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	24		157	5.54
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	5		136	26.2
		圧縮	—	30		136	3.53
		せん断	—	17		78	3.58
		曲げ	—	11		136	11.3
	⑲	引張	—	12		136	10.3
		圧縮	—	56		136	1.42
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	67		136	1.02
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	15	186	11.4	
	㉑	P_L	—	67	185	1.76	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	40	185	3.62	
	㉓	P_L	—	57	185	2.24	

(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		372	52.1
			外	12			30.0
	②	—	内	15		372	23.8
			外	13			27.6
二次蓋	③	—	内	14		372	25.5
			外	18			19.6
	④	—	内	54		372	5.88
			外	32			10.6
三次蓋	⑤	—	内	25		411	15.4
			外	25			15.4
	⑥	—	内	43		411	8.55
			外	64	5.42		
胴	⑦	—	内	101	372	2.68	
			外	78		3.76	
	⑧	—	内	23	369	15.0	
			外	36		9.25	
	⑨-1	—	内	25	369	13.7	
			外	24		14.3	
	⑨-2	—	内	43		7.58	
			外	32		10.5	
胴(底板)	⑩	—	内	33	366	10.0	
			外	11		32.2	
	⑪	—	内	39	366	8.38	
			外	45		7.13	

(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。

(ロ)-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	—	99		470	3.74
		せん断	—	26		271	9.42
		曲げ	—	72		470	5.52
	⑬	引張	—	64		470	6.34
		せん断	—	3		271	89.3
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	86		470	4.46
		せん断	—	30		271	8.03
		曲げ	—	134		470	2.50
下部端板	⑮	引張	—	60		410	5.83
		せん断	—	33		236	6.15
		曲げ	—	146		410	1.80
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑰	引張	—	12		472	38.3
		せん断	—	6		272	44.3
		曲げ	—	25		472	17.8
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	64	410	5.40	
		せん断	—	17	236	12.8	
		曲げ	—	8	410	50.2	
	⑲	引張	—	80	410	4.12	
		せん断	—	16	236	13.7	
		曲げ	—	59	410	5.94	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	36	186	4.16	
			外	25		6.44	
	㉑	—	内	61	185	2.03	
			外	62		1.98	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	70		1.64	
	㉓	—	内	57	185	2.24	
			外	56		2.30	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	251	562	1.23	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	590	843	0.42	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	241	564	1.34	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	596	846	0.41	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	285	564	0.97	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	468	846	0.80	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

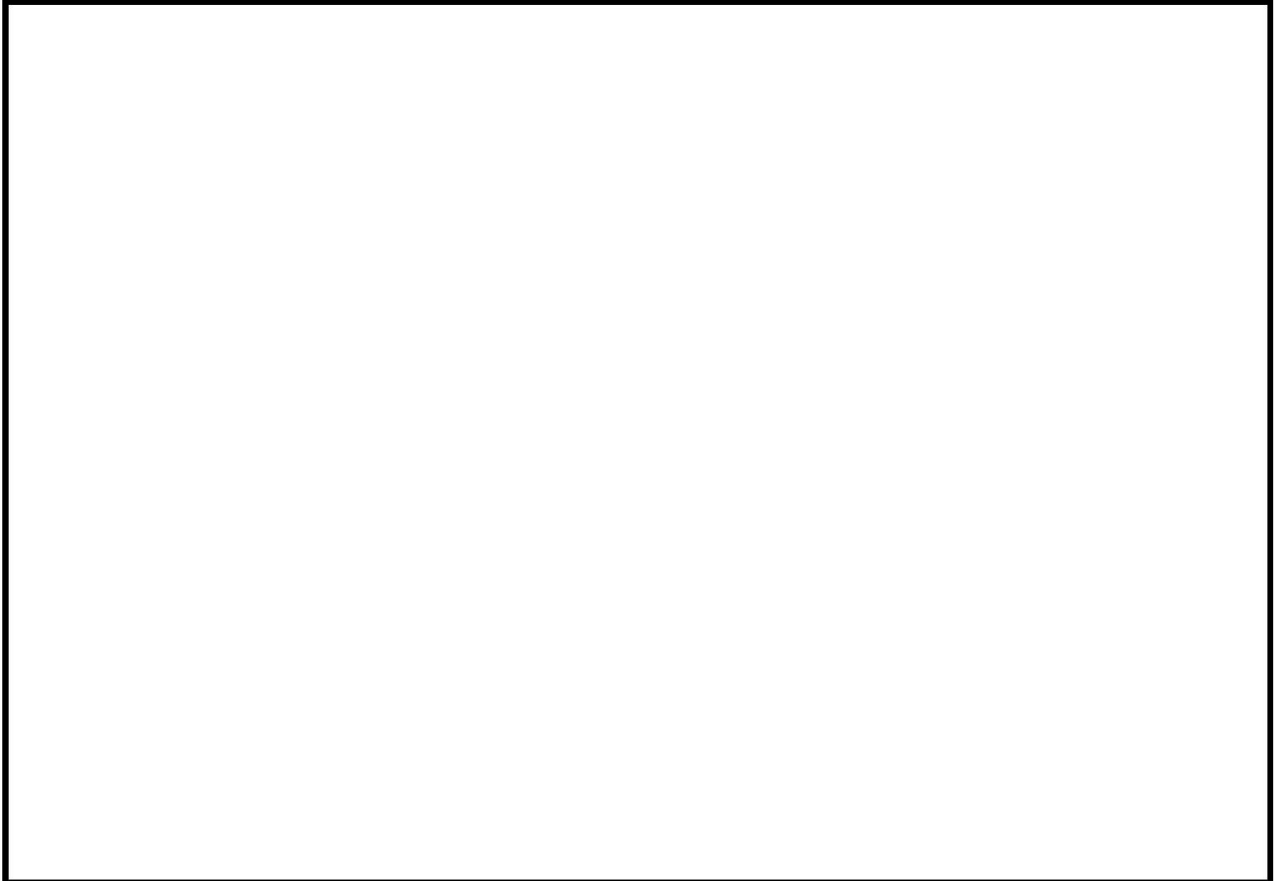
(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(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

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切欠部には(ロ)-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。



(ロ)-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)

$$\Lambda = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2$$

b₁ : バスケットプレート幅 1 (mm)

b₂ : バスケットプレート幅 2 (mm)

h₁ : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b₃ : バスケットプレート幅 3 (mm)

b₄ : バスケットプレート幅 4 (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(BP 無, BP 有) : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数(BP 無, BP 有) : 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	680, <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	210

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幅 2 : b_2 (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 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート幅 4 : b_4 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm ²)
数値	<input type="text"/>						

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	<input type="text"/>	12	36	2.00

(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。

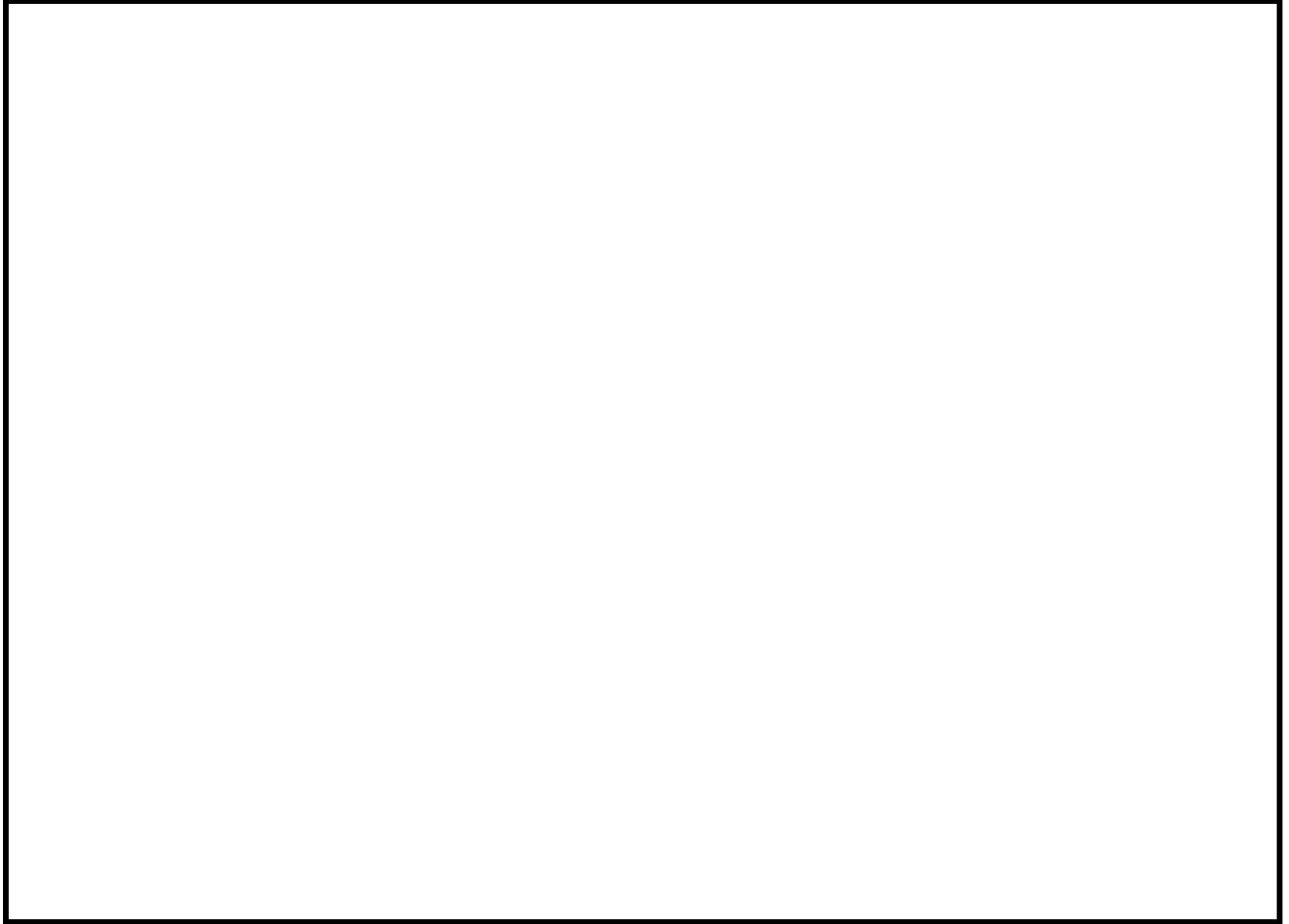
バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)
 バスケットサポートの質量 : (kg)
 燃料集合体の合計質量 : $680 \times$ (kg)

(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(BP有) : 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						210

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	46	4.75

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	21	9.50

(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 °Cにおける照射後の降伏応力 σ_y は、589 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 (㍀)-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。

(㍀)-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	A型	B型
ペレット単位長さ当たり質量： W_f (kg/mm)		
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)	210	210
支持スパン： l (mm)		
燃料被覆管外径： d_o (mm)		
燃料被覆管内径： d_i (mm)	9.50	9.50
内圧： P_o (MPa)	8.36	8.36
応力強さ： S (MPa)	11.77	11.38
降伏応力： σ_y (MPa)	141	140
余裕率：MS (-)	589	589
	3.17	3.20

3. コーナー落下

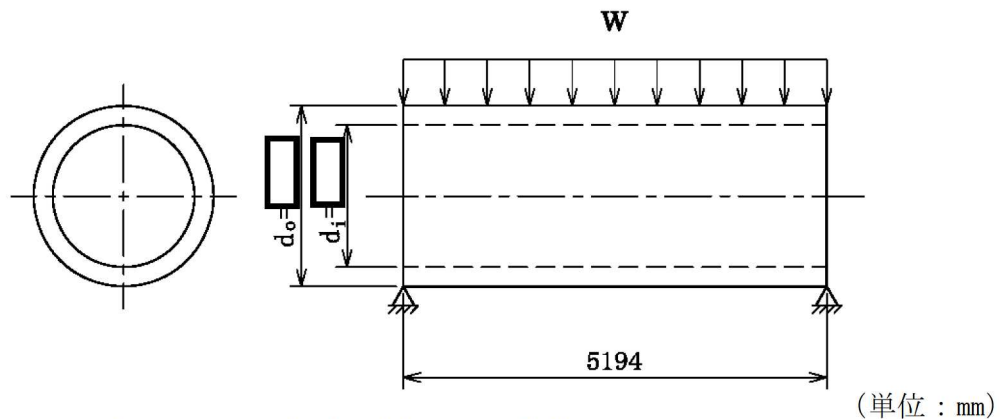
(㍀)-第 A. 19 表に示すように、コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下時に比べて小さく、垂直及び水平落下時に比べて条件が厳しくない。ただし、頭部コーナー落下時は、頭部垂直落下時と違い蓋部に作用する緩衝体の圧潰力が蓋全面に作用せず内部の収納物等による慣性力が蓋を介して蓋ボルトに作用する。この蓋ボルトへの荷重については、より衝撃加速度の大きい特別の試験条件で評価し、蓋ボルトの応力が設計降伏点より低いことを確認している。したがって、コーナー落下時に輸送容器及び収納物の構造健全性が損なわれることはない。

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 1.344×10^5 kg の5倍に相当する 6.720×10^5 kg (6.591×10^6 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、 6.720×10^5 kg (6.591×10^6 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) をよこ置きにして両端を単純支持し、鉛直方向に 6.591×10^6 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	6.591×10^6	5194			7	184	25.2

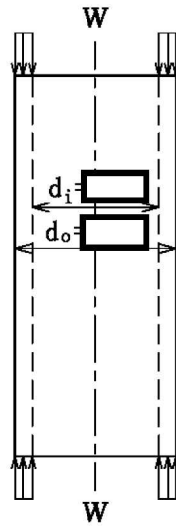
2. 軸方向の荷重の場合

(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)



(単位 : 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	6.591×10^6			5	184	35.8

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□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。

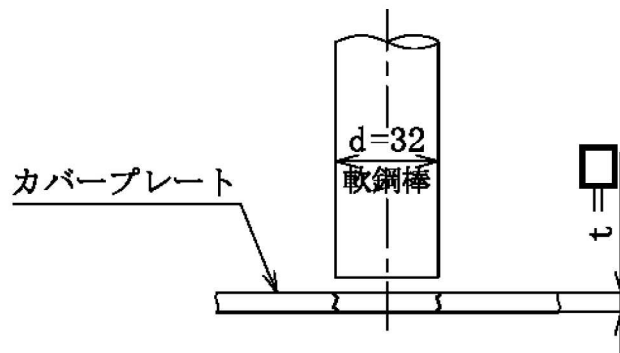
その他の箇所のせん断に要するエネルギーは、緩衝体カバープレートより大きいため、せん断破壊はおこらず、密封部の健全性が維持され、また、熱解析及び遮蔽解析への影響は無視できる。

(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 134. 4 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-24P 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. 4 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. 4 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	13	13. 3
三次蓋 (P _L +P _b)	1. 5S _m	205	19	9. 78
胴 (P _L +P _b)	1. 5S _m	184	3	60. 3
胴 (底板) (P _m)	S _m	122	1	121
外筒 (引張)	f _t	156	21	6. 42
外筒 (圧縮)	f _c	156	2	77. 0
外筒 (せん断)	f _s	90	8	10. 2
外筒 (曲げ)	f _b	156	35	3. 45
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	12	10. 3
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	4	33. 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	29	3. 68
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	33	4. 60
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	186	13	13. 3
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	9	40. 3
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	12	30. 0
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	27	14. 2
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	20	17. 4
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	27	12. 5
外筒 (引張)	3f _t	470	82	4. 73
外筒 (せん断)	3f _s	271	17	14. 9
外筒 (曲げ)	3f _b	470	82	4. 73
下部端板 (引張)	3f _t	410	48	7. 54
下部端板 (せん断)	3f _s	236	24	8. 83
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	4	117
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	2	135
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	3	156
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	34	11. 0
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	21	18. 5
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	60	2. 08
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	22	7. 45
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	249	1. 25
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	206	1. 73
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	219	2. 86
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	229	1. 46
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	320	1. 64
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0. 08 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	65	1.86
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	34	4.47
三次蓋 (P _L)	1.5S _m	205	36	4.69
胴 (P _L)	1.5S _m	186	43	3.32
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	183	6	29.5
外筒 (引張)	f _t	156	39	3.00
外筒 (圧縮)	f _c	156	24	5.50
外筒 (せん断)	f _s	90	14	5.42
外筒 (曲げ)	f _b	156	45	2.46
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	12	10.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	17	8.23
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	10	8.00
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	70	1.24
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	3	25.0
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	16	7.50
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	48	2.85
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	31	4.96
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	66	4.63
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	34	9.94
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	85	3.83
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	76	3.89
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	23	14.9
外筒 (引張)	3f _t	470	82	4.73
外筒 (せん断)	3f _s	271	18	14.0
外筒 (曲げ)	3f _b	470	85	4.52
下部端板 (引張)	3f _t	410	48	7.54
下部端板 (せん断)	3f _s	236	24	8.83
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	107	2.83
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	11	41.9
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	11	23.7
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	64	6.37
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	35	10.7
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	9	44.5
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	96	0.92
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	43	3.30
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	323	1.60
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	212	1.66
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	323	1.61
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	204	1.76
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	216	2.91
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	16	10.6
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	5	36.2
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	39	4.25
胴 (P _L)	1.5S _m	184	23	7.00
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	183	30	5.10
外筒 (引張)	f _t	156	37	3.21
外筒 (圧縮)	f _c	156	5	30.2
外筒 (せん断)	f _s	90	8	10.2
外筒 (曲げ)	f _b	156	39	3.00
下部端板 (引張)	f _t	136	7	18.4
下部端板 (圧縮)	f _c	136	2	67.0
下部端板 (せん断)	f _s	78	11	6.09
下部端板 (曲げ)	f _b	136	43	2.16
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	14	8.71
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	8	8.75
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	57	1.38
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	36	4.13
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	14	12.2
(一次+二次) 応力				
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	22	15.9
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	55	6.47
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	44	7.38
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	49	6.46
外筒 (引張)	3f _t	470	87	4.40
外筒 (せん断)	3f _s	271	15	17.0
外筒 (曲げ)	3f _b	470	49	8.59
下部端板 (引張)	3f _t	410	40	9.25
下部端板 (せん断)	3f _s	236	11	20.4
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	58	6.06
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	4	67.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	11	41.9
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	33	11.4
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	9	25.2
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	61	5.72
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	63	1.93
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	22	7.45
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	249	1.25
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	250	2.37
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	202	3.18
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	234	1.41
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	326	1.59
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	36	7	4.14
	f_c	37	7	4.28
(4) 燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	589	105	4.60

(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	10	17.6
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	20	8.30
三次蓋 (P _L)	1.5S _m	205	24	7.54
胴 (P _L)	1.5S _m	186	66	1.81
胴 (底板) (P _L)	1.5S _m	183	18	9.16
外筒 (引張)	f _t	156	77	1.02
外筒 (圧縮)	f _c	156	20	6.80
外筒 (せん断)	f _s	90	30	2.00
外筒 (曲げ)	f _b	156	87	0.79
下部端板 (引張)	f _t	136	8	16.0
下部端板 (圧縮)	f _c	136	13	9.46
下部端板 (せん断)	f _s	78	16	3.87
下部端板 (曲げ)	f _b	136	63	1.15
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	5	30.4
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	6	14.0
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	24	5.54
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	56	1.42
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	17	3.58
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	67	1.02
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	57	2.24
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	67	1.76
(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	54	5.88
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	64	5.42
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	101	2.68
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	45	7.13
外筒 (引張)	3f _t	470	99	3.74
外筒 (せん断)	3f _s	271	30	8.03
外筒 (曲げ)	3f _b	470	134	2.50
下部端板 (引張)	3f _t	410	60	5.83
下部端板 (せん断)	3f _s	236	33	6.15
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	146	1.80
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	6	44.3
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	25	17.8
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	80	4.12
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	17	12.8
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	59	5.94
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	70	1.64
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	62	1.98
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	251	1.23
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	590	0.42
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	241	1.34
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	596	0.41
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	285	0.97
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	468	0.80
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.18 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	36	12	2.00
バスケットプレート横板(σ_b)	αS_m	46	8	4.75
バスケットプレート横板(τ)	$0.6S_m$	21	2	9.50
(3) 燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	589	141	3.17

(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	184	7	25.2
軸方向	S _y	184	5	35.8
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	1.344×10 ⁵	9.80665	9000	1.187×10 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	7.449×10 ⁷	555	600	262	684
	底部	6.472×10 ⁷	482	500	302	608
水平落下		9.299×10 ⁷	692	710	273	374.5
コーナー 落下	頭部	6.130×10 ⁷	457	480	760	826
	底部	6.057×10 ⁷	451	—	754	827

(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 (600 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 (600 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。

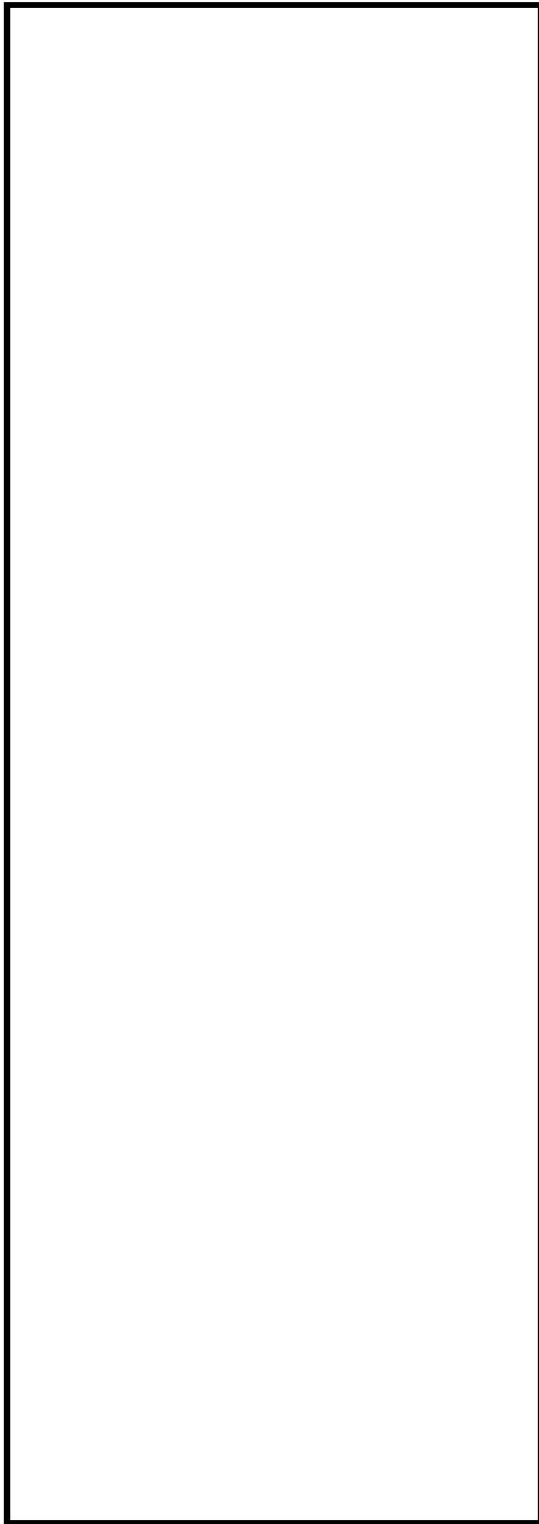
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (500 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 (500 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 (0.19 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)

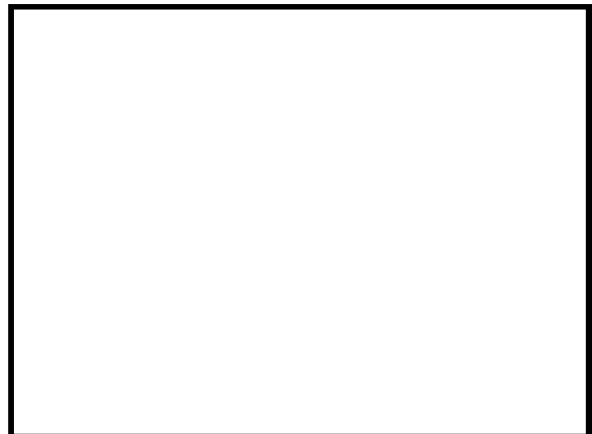
P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

F_{rw} : 上部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

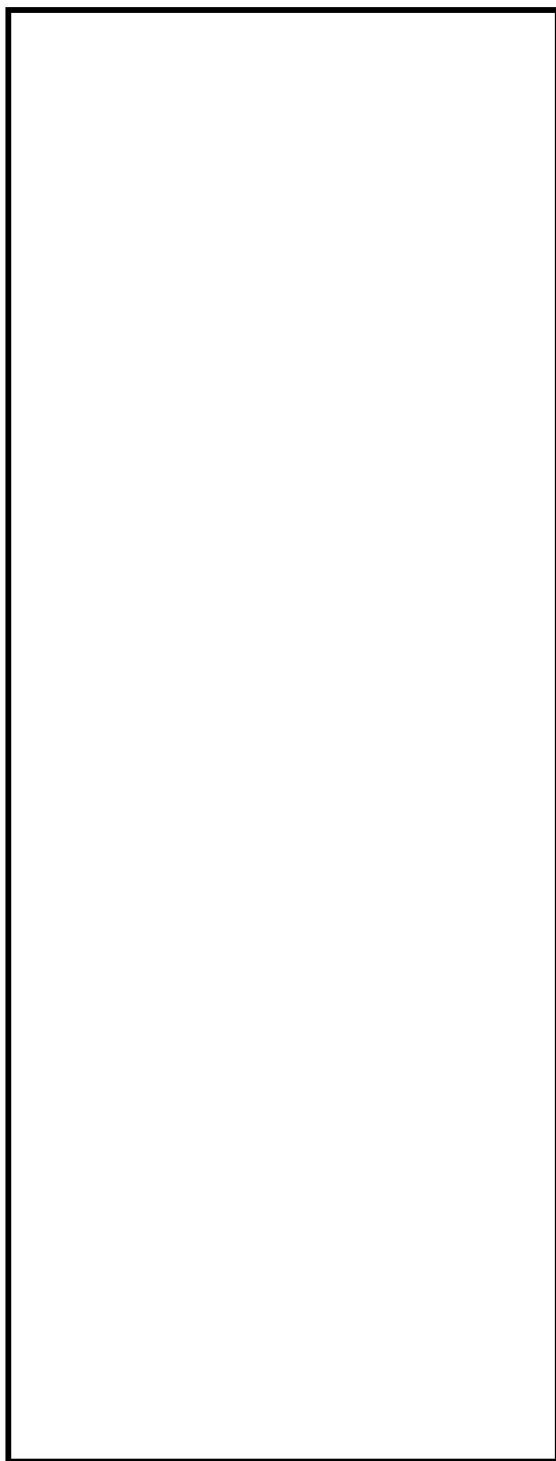
P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

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 (0.19 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	—	22	[Redacted]	251	10.4
		P_L+P_b	内	91		377	3.14
	外		124	2.04			
	④	P_L	—	18		377	19.9
三次蓋	⑤	P_m	—	26		270	9.38
		P_L+P_b	内	39		406	9.41
	外		78	4.20			
	⑥	P_L	—	86		406	3.72
胴	⑦	P_L	—	106		377	2.55
	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	—	13	28.0			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	2	251	124	
		P_L+P_b	内	13	377	28.0	
	外		12	30.4			
⑪	P_L	—	9	377	40.8		
外筒	⑫	引張	—	25	282	10.2	
		圧縮	—	50	282	4.64	
		せん断	—	45	162	2.60	
		曲げ	—	170	282	0.65	
	⑬	引張	—	99	282	1.84	
		圧縮	—	7	282	39.2	
		せん断	—	1	162	161	
		曲げ	—	3	282	93.0	
	⑭	引張	—	11	282	24.6	
		圧縮	—	3	282	93.0	
		せん断	—	14	162	10.5	
		曲げ	—	62	282	3.54	

(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	—	3	[]	218	71.6
		圧縮	—	1		218	217
		せん断	—	8		126	14.7
		曲げ	—	26		218	7.38
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	—		217	—
		圧縮	—	1		217	216
		せん断	—	1		125	124
		曲げ	—	2		217	107
	⑲	引張	—	1		217	216
		圧縮	—	2		217	107
		せん断	—	1		125	124
		曲げ	—	1		217	216
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	72	186	1.58	
		P_L+P_b+Q	外	77		1.41	
	㉑	P_L+P_b+Q	内	79	185	1.34	
		P_L+P_b+Q	外	72		1.56	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	311	848	1.72	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	663	848	0.27	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	180	848	3.71	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	216	848	2.92	

(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		251	34.8
		P_L+P_b	内	52		377	6.25
	外		50	6.54			
④	P_L	—	17	377		21.1	
三次蓋	⑤	P_m	—	5		270	53.0
		P_L+P_b	内	21		406	18.3
	外		22	17.4			
⑥	P_L	—	50	406		7.12	
胴	⑦	P_L	—	10		377	36.7
	⑧	P_m	—	20		251	11.5
		P_L+P_b	内	21		377	16.9
	外		20	17.8			
	⑨-1	P_L	—	31		377	11.1
⑨-2	P_L	—	60	5.28			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	17	251	13.7	
		P_L+P_b	内	100	377	2.77	
	外		123	2.06			
⑪	P_L	—	49	377	6.69		
外筒	⑫	引張	—	17	282	15.5	
		圧縮	—	—	282	—	
		せん断	—	9	162	17.0	
		曲げ	—	43	282	5.55	
	⑬	引張	—	53	282	4.32	
		圧縮	—	1	282	281	
		せん断	—	1	162	161	
		曲げ	—	2	282	140	
	⑭	引張	—	27	282	9.44	
		圧縮	—	15	282	17.8	
		せん断	—	20	162	7.10	
		曲げ	—	85	282	2.31	

(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. 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	—	18		218	11.1
		圧縮	—	7		218	30.1
		せん断	—	26		126	3.84
		曲げ	—	107		218	1.03
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	42		217	4.16
		圧縮	—	1		217	216
		せん断	—	14		125	7.92
		曲げ	—	44		217	3.93
	⑲	引張	—	43		217	4.04
		圧縮	—	6		217	35.1
		せん断	—	14		125	7.92
		曲げ	—	99		217	1.19
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	30		186	5.20
		P_L+P_b+Q	外	19			8.78
	㉑	P_L+P_b+Q	内	45	185	3.11	
		P_L+P_b+Q	外	35		4.28	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	200	848	3.24	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	209	848	3.05	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	302	848	1.80	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	436	848	0.94	

(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 (600 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	5600	1560

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	38	79	1.07
	B	38		1.07

(□)-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			6.94×10^4

項目	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: $1.5f_c$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			38	66	0.73

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

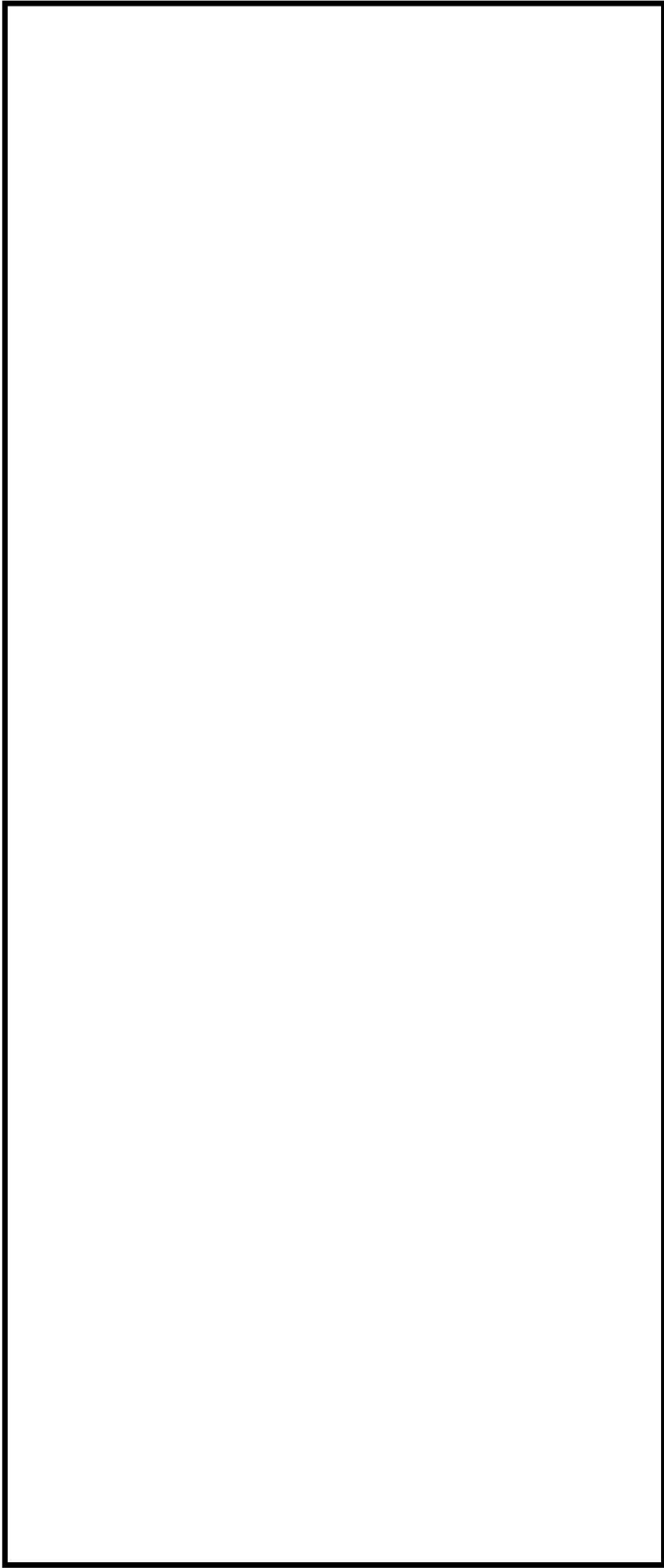
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

- ・ 容器本体には、衝撃加速度 (710 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 (710 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・下部緩衝体を取り付く面 (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} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.19 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

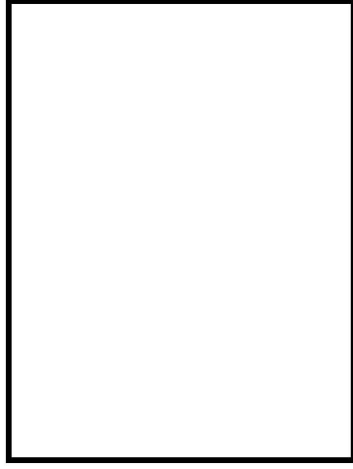
F_{tr} : 上部緩衝体反力

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)

(ロ)-第 A. 42 図 9 m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

(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. 39 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	12.9
		P _L +P _b	内	29		377	12.0
	外		40	8.42			
	④	P _L	—	57		377	5.61
三次蓋	⑤	P _m	—	48		270	4.62
		P _L +P _b	内	45		406	8.02
	外		76	4.34			
	⑥	P _L	—	60		406	5.76
胴	⑦	P _L	—	172		377	1.19
	⑧	P _m	—	67		251	2.74
		P _L +P _b	内	66		377	4.71
	外		94	3.01			
	⑨-1	P _L	—	68		377	4.54
⑨-2	P _L	—	108	2.49			
胴 (底板)	⑩	P _m	—	27	251	8.29	
		P _L +P _b	内	28	377	12.4	
	外		38	8.92			
⑪	P _L	—	56	377	5.73		
外筒	⑫	引張	—	185	282	0.52	
		圧縮	—	51	282	4.52	
		せん断	—	95	162	0.70	
		曲げ	—	174	282	0.62	
	⑬	引張	—	119	282	1.36	
		圧縮	—	53	282	4.32	
		せん断	—	7	162	22.1	
		曲げ	—	18	282	14.6	
	⑭	引張	—	33	282	7.54	
		圧縮	—	50	282	4.64	
		せん断	—	69	162	1.34	
		曲げ	—	205	282	0.37	

(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	—	22		218	8.90
		圧縮	—	35		218	5.22
		せん断	—	41		126	2.07
		曲げ	—	171		218	0.27
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	5		217	42.4
		圧縮	—	89		217	1.43
		せん断	—	46		125	1.71
		曲げ	—	21		217	9.33
	⑲	引張	—	36		217	5.02
		圧縮	—	142		217	0.52
		せん断	—	47		125	1.65
		曲げ	—	140		217	0.55
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	127		186	0.46
		P_L+P_b+Q	外	63			1.95
	㉑	P_L+P_b+Q	内	149	185	0.24	
		P_L+P_b+Q	外	155		0.19	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	314	848	1.70	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	809	848	0.04	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	420	848	1.01	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	767	848	0.10	

(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 (710 m/s^2) に乗じる。計算条件と計算結果を(□)-第 A. 43 表及び(□)-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。

(□)-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(BP 無, BP 有) : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数 (BP 無, BP 有) : 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	680,				852

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幅 2 : b_2 (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 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート幅 4 : b_4 (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		46	79	0.71

(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 : $680 \times$ (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)

(ロ)-第 A. 44 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 (BP 有) : 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						852

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 : $(2/3) \alpha S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			32	103	2.21

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm ²)	せん断応力 : τ (MPa)	基準値 : $1.2S_m$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			8	43	4.37

A. 6. 1. 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に比べて小さい。

したがって、コーナー落下時の輸送容器の各部の応力は垂直及び水平落下時の結果よりも厳しくなることはない。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ため蓋ボルトの健全性を評価する。

1. 二次蓋ボルト

頭部コーナー落下時に、二次蓋ボルトには、二次蓋自重及び蓋間圧力による引張応力が生じる。ここで、初期締付トルク、熱応力及び蓋間圧力によってボルト引張力とフランジ部とは釣合った状態になっているが、コーナー落下時、二次蓋ボルトには二次蓋自重の慣性力が外力としてボルトに加わる。

(1) 初期締付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力

初期締付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により二次蓋ボルトに生じる引張応力 σ_{t1} (MPa) は、 MPa である。

(2) 慣性力により生じる引張応力

慣性力によりボルトに生じる引張応力 σ_{t2} (MPa) は、次式で与えられる。

$$\sigma_{t2} = \frac{WG_c \cos \theta}{\frac{\pi}{4} d^2 n}$$

ここで、

W : 二次蓋の質量 (kg)

G_c : 衝撃加速度 (m/s^2)

θ : 落下角度 ($^\circ$)

d : ボルト軸径 (mm)

n : ボルトの数 (本)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 45 表に示す。

(ロ)-第 A. 45 表 慣性力によりボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	二次蓋の 質量 : W (kg)	衝撃加速度 : G_c (m/s^2)	落下角度 : θ ($^\circ$)	ボルト軸径 : d (mm)	ボルトの数 : n (本)	引張応力 : σ_{t2} (MPa)
数値	4.5×10^3	480	28.6			44

(3) ボルトに生じる引張応力

各荷重によりボルトに生じる引張応力 σ_t (MPa) の合計は、次式で与えられる。

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \phi \sigma_{t2}$$

ここで、

ϕ : ボルト内力係数(-)

計算条件と計算結果を (p)-第 A. 46 表に示す。

(p)-第 A. 46 表 ボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	初期締付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力： σ_{t1} (MPa)	ボルト内力係数： ϕ (-)	慣性力により生じる引張応力： σ_{t2} (MPa)	ボルトに生じる引張応力： σ_t (MPa)	解析基準値： S_y (MPa)	余裕率 (-)
数値			44	214	848	2.96

2. 三次蓋ボルト

頭部コーナー落下時に、三次蓋ボルトには、三次蓋自重及び蓋間圧力による引張応力が生じる。ここで、初期締付トルク、熱応力及び蓋間圧力によってボルト引張力とフランジ部とは釣合った状態になっているが、コーナー落下時、三次蓋ボルトには三次蓋自重の慣性力が外力としてボルトに加わる。

(1) 初期締付力、熱応力及び蓋間圧力により生じる引張応力

初期締付力、熱応力及び蓋間圧力により三次蓋ボルトに生じる引張応力 σ_{t1} (MPa) は、(p)-第 A. 17 表より 229 MPa である。

(2) 慣性力により生じる引張応力

慣性力によりボルトに生じる引張応力 σ_{t2} (MPa) は、W を三次蓋の質量として二次蓋と同様に求める。

計算条件と計算結果を (p)-第 A. 47 表に示す。

(p)-第 A. 47 表 慣性力によりボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	三次蓋の質量： W (kg)	衝撃加速度： G_c (m/s ²)	落下角度： θ (°)	ボルト軸径： d (mm)	ボルトの数： n (本)	引張応力： σ_{t2} (MPa)
数値	3.3×10^3	480	28.6			47

(3) ボルトに生じる引張応力

各荷重によりボルトに生じる引張応力 σ_t (MPa) の合計は、二次蓋と同様に求める。
計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 48 表に示す。

(ロ)-第 A. 48 表 ボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	初期締付力、熱応力及び蓋間圧力により生じる引張応力： σ_{t1} (MPa)	ボルト内力係数： ϕ (-)	慣性力により生じる引張応力： σ_{t2} (MPa)	ボルトに生じる引張応力： σ_t (MPa)	解析基準値： S_y (MPa)	余裕率 (-)
数値			47	236	848	2.59

A. 6. 1. 4 傾斜落下

傾斜落下については、落下方向がコーナー落下と垂直落下との間の場合とコーナー落下と水平落下との間の場合がある。

前者の場合は、落下エネルギーの一部が輸送物を垂直方向に回転させるのに費やされるので、エネルギーの吸収は垂直落下とコーナー落下よりも小さくなり、これらのいずれよりも条件が厳しくなることはない。

一方、後者の場合、細長い輸送物では落下エネルギーの一部が輸送物の回転運動エネルギーとなり二次衝撃側の吸収エネルギーが増加する。特に、蓋密封部が二次衝撃側となる場合、密封性能を損なうおそれがあるため、二次衝撃側の衝撃加速度の影響を評価する必要がある。A. 10. 3 に示すように、落下試験結果を基にした密封性能の評価の結果、傾斜落下時に輸送物の健全性が損なわれることはない。

A. 6. 1. 5 結果の要約

1. 結果の要約

9 m 落下試験の衝撃加速度と緩衝体変形量の要約は(ρ)-第 A. 37 表のとおりである。なお、緩衝体変形量は設計基準変形量以下であり、容器本体に発生する衝撃加速度が急激に上昇することはない。

また、本試験では、緩衝体は変形するが、緩衝体は容器本体からはずれることはない。

2. 結果の検討

9 m 落下試験による塑性変形は、緩衝体に生じるが、容器本体及びバスケットの構造上の健全性が損なわれることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38 °C の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては、A. 4. 2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく、機械的性質が低下することがないので、輸送物の構造上の健全性は維持される。

A. 6. 2 強度試験・落下試験Ⅱ（1 m 落下時）

本項では、9 m 落下試験に引き続いて 1 m 貫通試験が起こるとして輸送物が 1 m 高さから直径 150 mm の軟鋼棒へ落下した場合に対して、輸送物の構造の健全性を解析によって示す。

1 m 貫通試験は、輸送物が最大破損をうけるよう垂直及び水平方向に落下し、衝突時に輸送物の重心の真下に軟鋼棒があるとして解析した。

これ以外の落下は、落下エネルギーが回転モーメントとして作用するので輸送物に対して上記落下より大きな破損を生じることはない。

解析は垂直方向落下において蓋部及び底部について行う。また、水平方向落下においては胴について行う。

なお、三次蓋のリリーフバルブカバープレート上への垂直方向落下、及び三次蓋シール部への垂直方向落下又は水平方向落下では、過大な圧縮力により塑性変形が生じ、O リングと三次蓋又は胴フランジのシール面との間に生じた隙間が原因で密封性能を損なう恐れがあるが、MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルの緩衝体は、A. 10. 1 に示すとおり当該部への直接的な荷重入力を防止するために緩衝体内部のカバープレートの剛性を高める設計としており、1m 貫通試験で密封性能が維持されることを確認している。MSF-24P 型の緩衝体は落下試験モデルと同じ構造であり、かつ、A. 10. 3 に示すとおり MSF-24P 型は落下試験モデルに比べ高い密封性能を有しているため、密封性能が損なわれることはない。

1. 垂直落下

(1) 蓋部の貫通強度

蓋部については、三次蓋が貫通しないことを示す。

落下時に軟鋼棒が圧潰することにより輸送容器に加わる最大荷重 F_{bar} (N) は以下のとおり求められる。

$$F_{\text{bar}} = \sigma_u A$$

ここで、

σ_u : 軟鋼棒の設計引張強さ (MPa)

A : 軟鋼棒の断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

d : 軟鋼棒の直径 (mm)

計算条件と計算結果を (p)-第 A. 49 表に示す。

(p)-第 A. 49 表 輸送容器に加わる最大荷重計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d (mm)	軟鋼棒の設計引張強さ : σ_u (MPa)	最大荷重 : F_{bar} (N)
数値	150	400	7.068×10^6

押抜きせん断によって板にせん断破壊を引き起すのに必要な力 F (N) は、次式で表わされる。

$$F = \pi dtS$$

ここで、

d : 軟鋼棒直径 (mm)

t : 板厚 (mm)

S : せん断強さ (MPa)

計算条件と計算結果を (p)-第 A. 50 表に示す。三次蓋が貫通されることはない。したがって、これらに覆われる二次蓋、これに付属するモニタリングポートカバープレート、二次蓋に覆われる一次蓋及びバルブカバープレートは貫通されることなく健全性は担保される。また、三次蓋は胴フランジ部に押付けられ、Oリング取り付け位置での口開きは生じない。

(ロ)-第 A. 50 表 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d(mm)	板厚 : t(mm)	せん断強さ : S(MPa)	せん断破壊に 必要な力 : F(N)	最大荷重 : F _{bar} (N)	余裕率 (-)
数値	150	<input type="text"/> (注 1)	<input type="text"/> (注 2)	1.323×10 ⁷	7.068×10 ⁶	0.87

(注 1)

(注 2) せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき設計引張強さ S_u の $1/\sqrt{3}$ とする。ここで、(ロ)-第 A. 2 図及び(ロ)-第 A. 3 図より上部緩衝体カバープレートの材料 () の MPa であるので、低い方の設計引張強さ MPa を使用し、せん断強さ S は、 $S = \text{}$ MPa。

(2) 底部（底部中性子遮蔽材カバー）の貫通強度

底部については底部中性子遮蔽材カバーが貫通しないことを蓋部と同様に示す。

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A. 51 表に示す。底部（底部中性子遮蔽材カバー）が貫通されることはない。

(ロ)-第 A. 51 表 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d(mm)	板厚 : t(mm)	せん断強さ : S(MPa)	せん断破壊に 必要な力 : F(N)	最大荷重 : F _{bar} (N)	余裕率 (-)
数値	150	<input type="text"/> (注 1)	<input type="text"/> (注 2)	7.596×10 ⁶	7.068×10 ⁶	0.07

(注 1)

(注 2)

2. 水平落下

(1) 胴の貫通強度

水平落下の場合、軟鋼棒には外筒が衝突して変形し、破損する可能性がある。したがって、水平落下では胴に対して検討する。

押抜きせん断によって胴がせん断破壊を引き起こすのに必要な力 $F(N)$ は、1. の (1) と同様の式で与えられる。計算条件と計算結果を (p)-第 A. 52 表に示す。胴が貫通されることはない。

(p)-第 A. 52 表 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : $d(\text{mm})$	板厚 : $t(\text{mm})$	せん断強さ : $S(\text{MPa})$	せん断破壊に 必要な力 : $F(N)$	最大荷重 : $F_{\text{bar}}(N)$	余裕率 (-)
数値	150	<input type="text"/>	<input type="text"/> ^(注1)	2.403×10^7	7.068×10^6	2.39

(注1) であるので、せん断強さ S は、
 $S = \text{ MPa}$ 。

A. 6. 2. 1 結果の要約

1 m 貫通試験においては緩衝体、外筒及び中性子遮蔽材に貫通又は変形が生じるおそれがあるが、容器本体に破損が生じることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38 °C の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては、A. 4. 2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく、機械的性質が低下することがないので、輸送物の構造上の健全性に問題はない。

A. 6. 3 熱的試験

A. 6. 3. 1 温度及び圧力の要約

1. 温度

輸送物各部の最高温度は(□)章 B の熱解析から求まる。各部位の最高温度と解析基準値を定める温度を(□)-第 A. 53 表に示す。

(□)-第 A. 53 表 特別の試験条件における最高温度の要約

(単位：℃)

部位	熱解析結果	解析基準値設定温度
胴 (本体部)	206	
胴 (フランジ部)	224	
胴 (底板)	175	
二次蓋	137	
三次蓋	186	
二次蓋ボルト	137	
三次蓋ボルト	153	
外筒	714	
下部端板	655	
底部中性子遮蔽材カバー	161	

2. 圧力

(㍑)章 B の熱解析から求まる特別の試験条件における輸送容器各部の圧力及び構造解析で使用する圧力を(㍑)-第 A. 54 表に示す。

(㍑)-第 A. 54 表 特別の試験条件の熱解析の要約と評価

項目	熱解析結果	構造解析使用圧力	圧力設定方法
胴内圧	0.307 MPa (0.206 MPa G)	0.351325 MPa (0.25 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析結果に余裕を取った値を使用
一二次蓋間圧力	0.420 MPa (0.319 MPa G)	0.441325 MPa (0.34 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析結果に余裕を取った値を使用
二三次蓋間圧力	0.272 MPa (0.171 MPa G)	0.371325 MPa (0.27 MPa G)	三次蓋に対して安全側となるように熱解析結果(二三次蓋間圧力)に余裕を取った値を使用

なお、蓋部中性子遮蔽材充填空間については、当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して、 MPa G (MPa) とする。

側部中性子遮蔽材充填空間は、外筒部を MPa G (MPa)、端板部を MPa G (MPa) とする。底部中性子遮蔽材充填空間は、 MPa G (MPa) とする。

A. 6. 3. 2 熱膨張

1. 応力計算

本項では、特別の試験条件下における容器本体各部の熱応力と胴内圧による応力の計算を行う。B. 5. 3 及び B. 5. 4 に示す温度分布と胴内圧を荷重条件とし、解析は有限要素法による ABAQUS コードを用いて行う。

(1) 解析モデル

A. 5. 1. 3 と同様に、三次元有限要素を用いた(□)-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

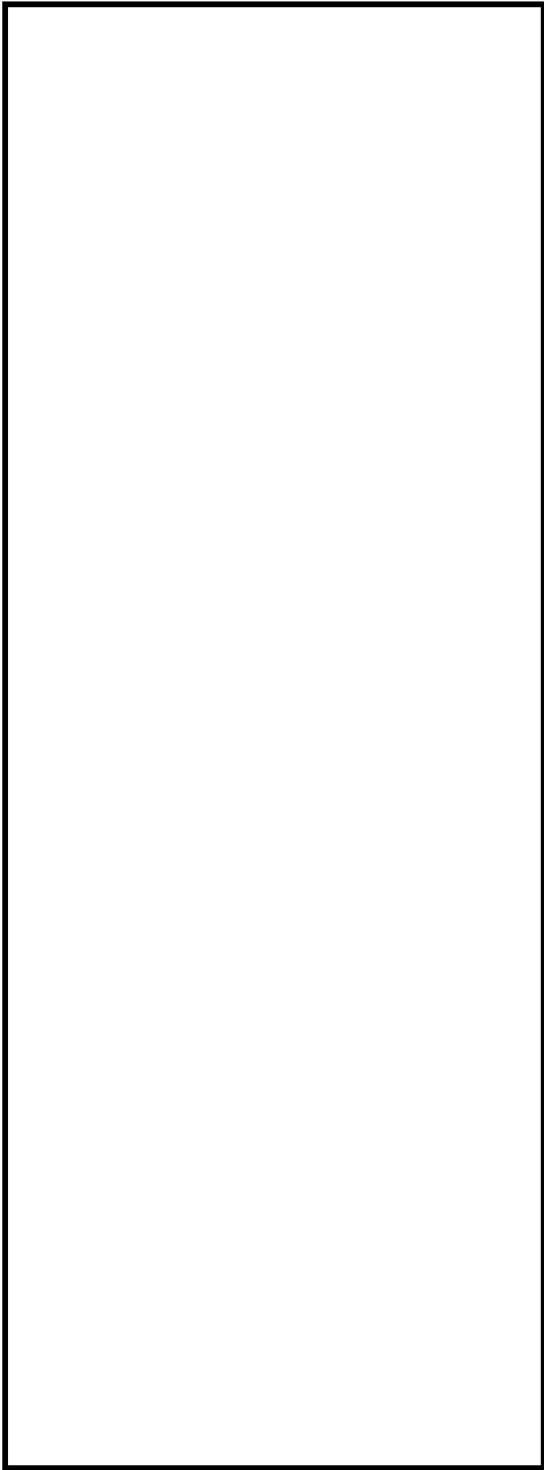
B. 5. 3 に示される容器本体の温度差が一番大きくなる火災後 30 分における温度分布(□)-第 B. 12 図参照)、胴内圧 (0. 25 MPa G)、一二次蓋間圧力 (0. 34 MPa G)、二次蓋間圧力 (0. 27 MPa G) を荷重条件とする。

蓋部中性子遮蔽材充填空間は、当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して、□ MPa G とする。

側部中性子遮蔽材充填空間は、外筒部を□ MPa G、端板部を□ MPa G、底部中性子遮蔽材充填空間は、□ MPa G とする。

b. 境界条件

(□)-第 A. 43 図に示すように、底部の 1 箇所軸方向変位及び対称面の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とする。



P_i : 胴内圧 (0.25 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.34 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.27 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)

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. 43 図 特別の試験条件の熱的試験における荷重条件及び境界条件

A. 6. 3. 3 許容応力との比較

1. 容器本体各部

(□)-第 A. 30 図に示す容器本体の主要な評価位置における一次応力及び蓋ボルトの応力の評価結果を(□)-第 A. 55 表に示す。表に示すように、いずれの応力も A. 1. 2 に定めた解析基準値以下である。

なお、三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため、運搬中に予想される $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で三次蓋ボルトを締め付けた後、特別の試験条件下に置かれた場合は、ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼製の三次蓋ボルトの熱膨張係数の差により三次蓋ボルトの軸力が約 5%増加するものの余裕率が 0. 05 以上あるため、また周囲温度 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ で締め付けた後、特別の試験条件下に置かれた場合には、軸力が約 2%低下するものの Oリングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため、三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。一方、一次蓋ボルトと二次蓋ボルトは、それぞれ一次蓋と二次蓋との温度の差及び熱膨張係数の差が小さいため、軸力の変化は三次蓋ボルトに比べ軽微であることから、ゆるみや破損を生じることはない。

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 $0. 32\text{ mm}$ 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. 55 表 特別の試験条件における胴内圧による容器本体に対する

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	—	2	[Redacted]	251	124
		P_L+P_b	内	8		377	46.1
	外		9	40.8			
④	P_L	—	4	377		93.2	
三次蓋	⑤	P_m	—	6		251	40.8
		P_L+P_b	内	28		377	12.4
	外		26	13.5			
⑥	P_L	—	8	377		46.1	
胴	⑦	P_L	—	2		377	187
	⑧	P_m	—	1		251	250
		P_L+P_b	内	1		377	376
	外		1	376			
	⑨-1	P_L	—	2		377	187
⑨-2	P_L	—	2	187			
胴 (底板)	⑩	P_m	—	1	251	250	
		P_L+P_b	内	2	377	187	
	外		3	124			
⑪	P_L	—	1	377	376		
外筒	⑫	引張	—	11	124	10.2	
		圧縮	—	—	124	—	
		せん断	—	8	72	8.00	
		曲げ	—	34	124	2.64	
	⑬	引張	—	21	124	4.90	
		圧縮	—	1	124	123	
		せん断	—	1	72	71.0	
		曲げ	—	2	124	61.0	
	⑭	引張	—	6	124	19.6	
		圧縮	—	1	124	123	
		せん断	—	8	72	8.00	
		曲げ	—	35	124	2.54	

(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. 55 表 特別の試験条件における胴内圧による容器本体に対する

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	—	2	—	144	71.0
		圧縮	—	1		144	143
		せん断	—	3		83	26.6
		曲げ	—	12		144	11.0
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	3		201	66.0
		圧縮	—	1		201	200
		せん断	—	6		116	18.3
		曲げ	—	19		201	9.57
	⑲	引張	—	8		201	24.1
		圧縮	—	—		201	—
		せん断	—	11		116	9.54
		曲げ	—	70		201	1.87
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	27		183	5.77
		P_L+P_b+Q	外	20			8.15
	㉑	P_L+P_b+Q	内	115	174	0.51	
		P_L+P_b+Q	外	112		0.55	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	307	833	1.71	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	766	833	0.08	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	391	825	1.10	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	669	825	0.23	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

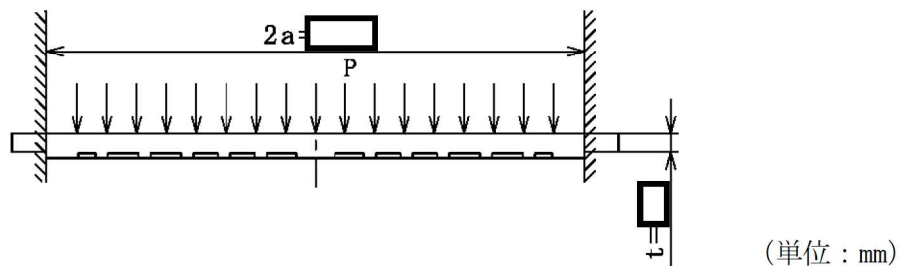
(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

A. 6. 4 浸漬

本輸送物の収納物は、最大放射エネルギーが A_2 値の 10 万倍を超えるので、A. 7 において 200 m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行い、胴、底板及び三次蓋に破損のないことを確認している。

特別の試験条件の 15 m 浸漬試験においては、200 m 浸漬試験の負荷条件より厳しくないため密封装置は A. 1. 2 で定めた基準を満足するが、「規則」及び「告示」に基づいて 15 m 浸漬試験における三次蓋の強度を確認する。

三次蓋の強度解析モデルを(□)-第 A. 44 図に示す。



(□)-第 A. 44 図 三次蓋の強度解析モデル図

三次蓋を端部固定の円板としてモデル化すると、その最大曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。¹⁵⁾

$$\sigma_b = 0.75 \frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで、

a : 円板の半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

計算条件と計算結果を(□)-第 A. 56 表に示す。三次蓋は、外圧に対して十分な強度を有する。なお、上記の発生応力値は(□)°Cにおける三次蓋の材料の設計降伏点 ($S_y = 166$ MPa) より低く、また、外圧は蓋を胴に押し付けるように作用するので蓋 O リングの密封性能は 15 m 浸漬時において保持される。

(□)-第 A. 56 表 三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)	最大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	三次蓋の 温度 (°C)	基準値 : MIN[3.6 S_m , S_u] (MPa)	余裕率 (-)
数値	(□)	0.251325	(□)	41	(□)	406	8.90

また、外筒及び底部中性子遮蔽材カバーは内部空間にそれぞれ \square MPa G 及び \square MPa G の内圧が生じているが、水深 15m の水圧 (0.15 MPa) が外圧として負荷されることで差圧が緩和されるため、遮蔽解析に影響を及ぼすような破損は生じない。

A.6.5 結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

特別の試験条件における輸送物に対する評価結果の要約を(ρ)-第 A.57 表に示す。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。

(ρ)-第 A.57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (1/4)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等 (-)
9 m落下試験				
1. 垂直落下				
(1) 容器本体 (頭部垂直落下)				
二次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	124	2.04
三次蓋 (P _L)	S _u	406	86	3.72
胴 (P _L)	S _u	377	106	2.55
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	13	28.0
外筒 (引張)	1.5f _t	282	99	1.84
外筒 (圧縮)	1.5f _c	282	50	4.64
外筒 (せん断)	1.5f _s	162	45	2.60
外筒 (曲げ)	1.5f _b	282	170	0.65
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	3	71.6
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	1	217
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	8	14.7
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	26	7.38
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	217	1	216
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	217	2	107
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	125	1	124
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	217	2	107
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	79	1.34
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	311	1.72
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	663	0.27
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	180	3.71
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	216	2.92

(ロ)-第 A. 57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (2/4)

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)				
二次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	52	6.25
三次蓋 (P _L)	S _u	406	50	7.12
胴 (P _L)	S _u	377	60	5.28
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	123	2.06
外筒 (引張)	1.5f _t	282	53	4.32
外筒 (圧縮)	1.5f _c	282	15	17.8
外筒 (せん断)	1.5f _s	162	20	7.10
外筒 (曲げ)	1.5f _b	282	85	2.31
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	18	11.1
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	7	30.1
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	26	3.84
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	107	1.03
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	217	43	4.04
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	217	6	35.1
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	125	14	7.92
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	217	99	1.19
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	45	3.11
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	200	3.24
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	209	3.05
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	302	1.80
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	436	0.94
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.01 mm以下	基準に合致
(3) バスケット				
バスケットプレート (σ _c)	2/3S _u	79	38	1.07
	1.5f _c	66	38	0.73

(ロ)-第 A. 57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (3/4)

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				
二次蓋 (P _L)	S _u	377	57	5.61
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	406	76	4.34
胴 (P _L)	S _u	377	172	1.19
胴 (底板) (P _L)	S _u	377	56	5.73
外筒 (引張)	1.5f _t	282	185	0.52
外筒 (圧縮)	1.5f _c	282	53	4.32
外筒 (せん断)	1.5f _s	162	95	0.70
外筒 (曲げ)	1.5f _b	282	205	0.37
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	22	8.90
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	35	5.22
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	41	2.07
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	171	0.27
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	217	36	5.02
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	217	142	0.52
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	125	47	1.65
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	217	140	0.55
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	155	0.19
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	314	1.70
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	809	0.04
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	420	1.01
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	767	0.10
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.39 mm	基準に合致
(2) バスケット				
バスケットプレート 縦板 (σ _o)	2/3S _u	79	46	0.71
バスケットプレート 横板 (σ _b)	2/3 α S _u	103	32	2.21
(τ)	1.2S _m	43	8	4.37
3. コーナー落下				
二次蓋ボルト	S _y	848	214	2.96
三次蓋ボルト	S _y	848	236	2.59
1 m貫通試験				
(1) 垂直落下				
蓋部	許容貫通強度	1.323×10 ⁷ N	7.068×10 ⁶ N	0.87
底部	許容貫通強度	7.596×10 ⁶ N	7.068×10 ⁶ N	0.07
(2) 水平落下				
胴	許容貫通強度	2.403×10 ⁷ N	7.068×10 ⁶ N	2.39

(ロ)-第 A. 57 表 特別の試験条件における構造解析結果の要約 (4/4)

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				
二次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	9	40.8
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	377	28	12.4
胴 (P _L)	S _u	377	2	187
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	3	124
外筒 (引張)	1.5f _t	124	21	4.90
外筒 (圧縮)	1.5f _c	124	1	123
外筒 (せん断)	1.5f _s	72	8	8.00
外筒 (曲げ)	1.5f _b	124	35	2.54
下部端板 (引張)	1.5f _t	144	2	71.0
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	144	1	143
下部端板 (せん断)	1.5f _s	83	3	26.6
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	144	12	11.0
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	201	8	24.1
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	201	1	200
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	116	11	9.54
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	201	70	1.87
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	174	115	0.51
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	833	307	1.71
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	833	766	0.08
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	825	391	1.10
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	825	669	0.23
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.32 mm	基準に合致
15 m 浸漬				
三次蓋	S _u	406	41	8.90

2. 破損の要約

特別の試験条件における輸送物の主な破損の要約を(□)-第 A. 58 表に示す。

各解析で考慮するこれらの影響の具体的評価は、(□)章各項で検討する。

(□)-第 A. 58 表 特別の試験条件における輸送物破損の評価

(備考) ○印は破損有り, -印は破損無し

試験	部位	本体	緩衝体	バスケット	備考
9 m落下試験		-	○	-	・緩衝体が塑性変形する。最大変形は頭部コーナー落下時に上部緩衝体に生じ、最大760 mm圧潰する。緩衝体は変形するが、容器本体からはずれることはない。
1 m貫通試験		○	○	-	・緩衝体及び外筒には貫通または変形が生じる。
熱的試験		-	-	-	—
浸漬試験		-	-	-	—

A.7 強化浸漬試験

1. 外圧に対する胴の耐圧強度

本輸送物の収納物は、最大放射エネルギーが A₂ 値の 10 万倍を超えるので、200 m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行う。

金属キャスク構造規格¹⁾においては、本試験条件における円筒の許容外圧 1.5P_a (MPa) は、次の式のいずれか小さい方で与えられる。

$$1.5P_{a1} = 1.5 \times \left(\frac{2.167t}{D_o} - 0.0833 \right) B$$

$$1.5P_{a2} = 1.5 \times \frac{2St}{D_o} \left(1 - \frac{t}{D_o} \right)$$

ここで、

t : 胴板厚 (mm)

D_o : 胴外径 (mm)

B : L/D_o、D_o/t 及び温度で定まる値 (MPa)

L : 胴支持間隔 (mm)

S : 設計応力強さの 1.5 倍又は設計降伏点の 0.9 倍の小さい方 (MPa)

計算条件と計算結果を(□)-第 A.59 表に示す。胴の耐圧強度は十分である。

(□)-第 A.59 表 胴の許容外圧計算条件及び計算結果

項目	胴板厚 : t (mm)	胴外径 : D _o (mm)	L/D _o 、D _o /t 及び温度で 定まる値 : B (MPa)	胴支持 間隔 : L (mm)	許容外圧 : 1.5P _a (MPa)	外圧 : P _o (MPa)	余裕率 (-)
数値	□	□	90 (注1)	□	19 (注2)	2.101325	8.04

(注1) 金属キャスク構造規格¹⁾ 別図 7-1 と別図 7-2 により、□°C における炭素鋼に対する B 値は、L/D_o=□、D_o/t=□であるから、B=90 MPa

(注2) □であり、1.5P_{a1}=□ MPa、1.5P_{a2}=□となるため、□を許容外圧 1.5P_a として採用

2. 外圧に対する底板の強度

胴 (底板) を端部固定の円板にモデル化すると、その最大曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で与えられる。¹⁵⁾

$$\sigma_b = 0.75 \frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで、

a : 円板の半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

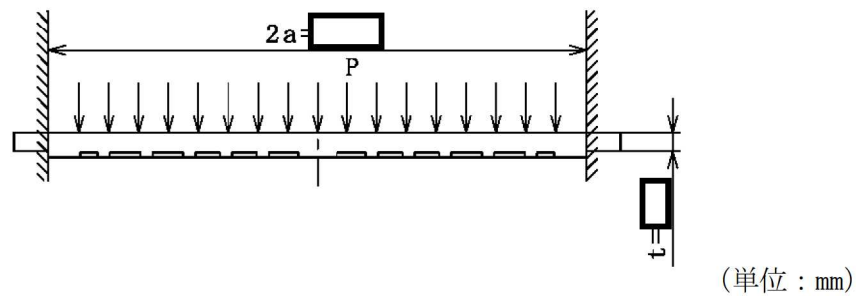
計算条件と計算結果を(□)-第 A. 60 表に示す。胴 (底板) は、外圧に対して十分な強度を有する。

(□)-第 A. 60 表 胴 (底板) の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)	最大 曲げ応力 : σ_b (MPa)	胴 (底板) の温度 (°C)	設計 引張強さ : S_u (MPa)	余裕率 (-)
数値	□	2.101325	□	29	□	377	12.0

3. 外圧に対する二次蓋の強度

三次蓋の強度解析モデルを(□)-第 A. 45 図に示す。



(□)-第 A. 45 図 外圧に対する三次蓋の解析モデル

三次蓋の最大応力は蓋端部に生じる。この半径方向曲げ応力 σ_b (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_b = 0.75 \frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで、

a : 三次蓋半径 (mm)

P : 差圧 (MPa)

t : 板厚 (mm)

計算条件と計算結果を(□)-第 A. 61 表に示す。三次蓋は、外圧に対して十分な強度を有する。

(㉓)-第 A. 61 表 三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	三次蓋半径 : a (mm)	差圧 : P (MPa)	板厚 : t (mm)
数値	<input type="text"/>	2.101325	<input type="text"/>

項目	最大曲げ応力 : σ_b (MPa)	三次蓋の 温度 (°C)	基準値 : MIN[3.6S _m , S _u] (MPa)	余裕率 (-)
数値	340	<input type="text"/>	406	0.19