

(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 : 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					1020

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			38	110	1.89

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			10	44	3.40

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	4.3×10^3	510	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	210	848	3.03

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 233 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	3.5×10^3	510	28.6			52

(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			52	241	848	2.51

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-21P 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-21P 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-21P 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)	1.543×10 ⁷	7.068×10 ⁶	1.18

(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)	7.627×10 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 (ロ)-第 A. 52 表に示す。胴が貫通されることはない。

(ロ)-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)	2.505×10^7	7.068×10^6	2.54

(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)	237	
胴 (フランジ部)	211	
胴 (底板)	168	
二次蓋	134	
三次蓋	172	
二次蓋ボルト	134	
三次蓋ボルト	148	
外筒	727	
下部端板	660	
底部中性子遮蔽材カバー	156	

2. 圧力

(ロ)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(ロ)-第 A. 54 表に示す。

(ロ)-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. 293 MPa (0. 192 MPa G)	0. 341325 MPa (0. 24 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. 418 MPa (0. 317 MPa G)	0. 451325 MPa (0. 35 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. 353 MPa (0. 252 MPa G)	0. 461325 MPa (0. 36 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

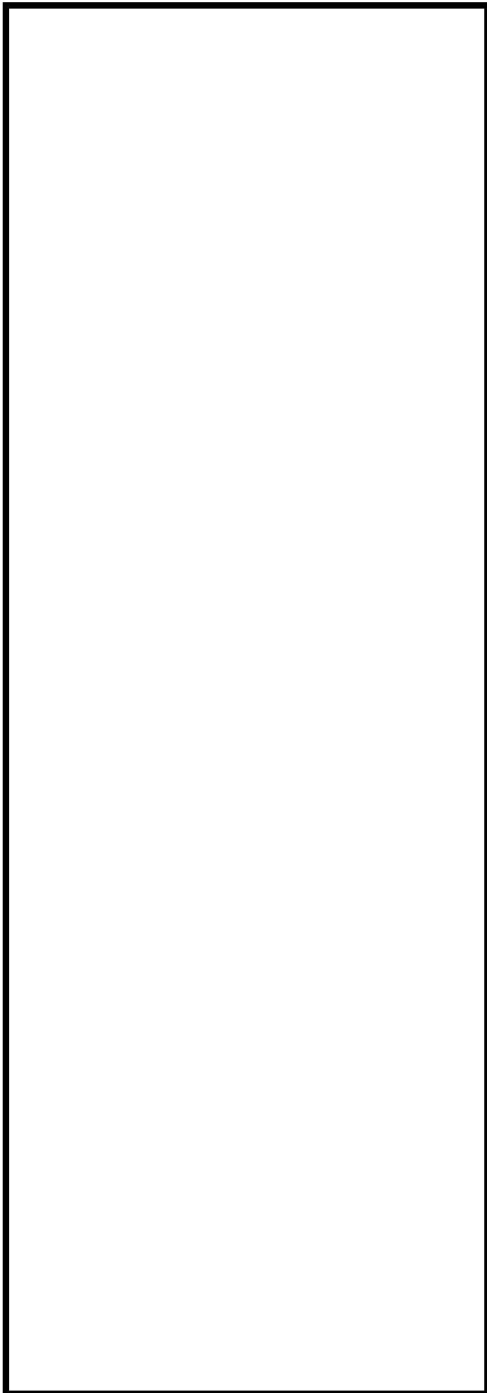
B. 5. 3 に示される容器本体の温度差が一番大きくなる火災後 30 分における温度分布(□)-第 B. 12 図参照)、胴内圧 (0. 24 MPa G)、一二次蓋間圧力 (0. 35 MPa G)、二次蓋間圧力 (0. 36 MPa G) を荷重条件とする。

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 (0.24 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.35 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.36 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 4%増加するものの余裕率が 0. 04 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 $\square\text{ mm}$ 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	—	1	[Redacted]	251	250
		P_L+P_b	内	4		377	93.2
	外		5	74.4			
	④	P_L	—	4		377	93.2
三次蓋	⑤	P_m	—	4		253	62.2
		P_L+P_b	内	42		380	8.04
	外		42	8.04			
	⑥	P_L	—	8		380	46.5
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	—	4	120	29.0	
		圧縮	—	3	120	39.0	
		せん断	—	9	69	6.66	
		曲げ	—	15	120	7.00	
	⑬	引張	—	20	120	5.00	
		圧縮	—	1	120	119	
		せん断	—	1	69	68.0	
		曲げ	—	2	120	59.0	
	⑭	引張	—	5	120	23.0	
		圧縮	—	2	120	59.0	
		せん断	—	9	69	6.66	
		曲げ	—	22	120	4.45	

(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. 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	[Redacted]	144	71.0
		圧縮	—	1		144	143
		せん断	—	3		83	26.6
		曲げ	—	9		144	15.0
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	3		202	66.3
		圧縮	—	1		202	201
		せん断	—	3		116	37.6
		曲げ	—	21		202	8.61
	⑲	引張	—	4		202	49.5
		圧縮	—	—		202	—
		せん断	—	12		116	8.66
		曲げ	—	31		202	5.51
二次蓋 シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	25		183	6.32
		P_L+P_b+Q	外	25			6.32
	㉑	P_L+P_b+Q	内	111	175	0.57	
		P_L+P_b+Q	外	107		0.63	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	307	835	1.71	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	762	835	0.09	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	431	828	0.92	
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	709	828	0.16	

(注1) (□)-第 A. 30 図参照

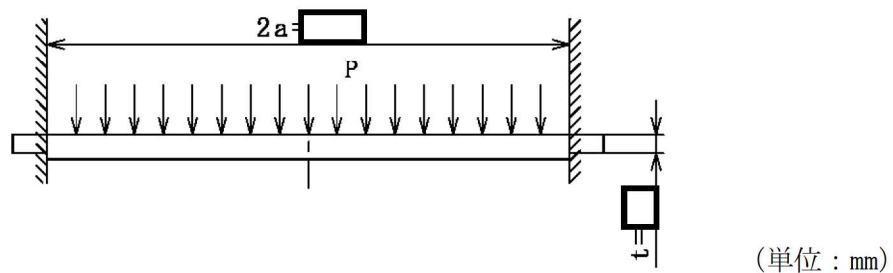
(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

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	(□)	39	(□)	406	9.41

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(□)-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。

(□)-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	78	3.83
三次蓋 (P _L)	S _u	406	67	5.05
胴 (P _L)	S _u	377	96	2.92
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	12	30.4
外筒 (引張)	1.5f _t	283	104	1.72
外筒 (圧縮)	1.5f _c	283	45	5.28
外筒 (せん断)	1.5f _s	163	93	0.75
外筒 (曲げ)	1.5f _b	283	126	1.24
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	4	53.5
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	1	217
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	9	13.0
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	30	6.26
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	218	1	217
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	218	2	108
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	126	1	125
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	218	1	217
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	74	1.50
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	323	1.62
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	623	0.36
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	174	3.87
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	219	2.87

(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	40	8.42
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	406	69	4.88
胴 (P _L)	S _u	377	54	5.98
胴 (底板) (P _L +P _b)	S _u	377	103	2.66
外筒 (引張)	1.5f _t	283	53	4.33
外筒 (圧縮)	1.5f _c	283	6	46.1
外筒 (せん断)	1.5f _s	163	15	9.86
外筒 (曲げ)	1.5f _b	283	33	7.57
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	14	14.5
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	5	42.6
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	23	4.47
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	87	1.50
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	218	38	4.73
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	218	5	42.6
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	126	17	6.41
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	218	50	3.36
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	31	5.00
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	198	3.28
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	297	1.85
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	443	0.91
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	85	40	1.12
	1.5f _c	66	40	0.65

(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	59	5.38
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	406	98	3.14
胴 (P _L)	S _u	377	176	1.14
胴 (底板) (P _L)	S _u	377	62	5.08
外筒 (引張)	1.5f _t	283	136	1.08
外筒 (圧縮)	1.5f _c	283	68	3.16
外筒 (せん断)	1.5f _s	163	58	1.81
外筒 (曲げ)	1.5f _b	283	144	0.96
下部端板 (引張)	1.5f _t	218	25	7.72
下部端板 (圧縮)	1.5f _c	218	39	4.58
下部端板 (せん断)	1.5f _s	126	45	1.80
下部端板 (曲げ)	1.5f _b	218	166	0.31
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	218	38	4.73
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	218	149	0.46
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	126	50	1.52
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	218	107	1.03
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	165	0.12
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	318	1.66
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	819	0.03
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	848	430	0.97
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	848	720	0.17
三次蓋相対口開き変形量	—	□ mm	0.35 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	85	37	1.29
バスケットプレート 横板 (σ _b)	2/3 α S _u	110	38	1.89
(τ)	1.2S _m	44	10	3.40
3. コーナー落下				
二次蓋ボルト	S _y	848	210	3.03
三次蓋ボルト	S _y	848	241	2.51
1 m貫通試験				
(1) 垂直落下				
蓋部	許容貫通強度	1.543×10 ⁷ N	7.068×10 ⁶ N	1.18
底部	許容貫通強度	7.627×10 ⁶ N	7.068×10 ⁶ N	0.07
(2) 水平落下				
胴	許容貫通強度	2.505×10 ⁷ N	7.068×10 ⁶ N	2.54

(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	5	74.4
三次蓋 (P _L +P _b)	S _u	380	42	8.04
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	120	20	5.00
外筒 (圧縮)	1.5f _c	120	3	39.0
外筒 (せん断)	1.5f _s	69	9	6.66
外筒 (曲げ)	1.5f _b	120	22	4.45
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	9	15.0
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	1.5f _t	202	4	49.5
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	1.5f _c	202	1	201
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	1.5f _s	116	12	8.66
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	1.5f _b	202	31	5.51
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	175	111	0.57
二次蓋ボルト (σ _m)	S _y	835	307	1.71
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	835	762	0.09
三次蓋ボルト (σ _m)	S _y	828	431	0.92
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	S _y	828	709	0.16
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	39	9.41

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780 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 A_2 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)	□	21 (注2)	2.101325	8.99

(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、 $L/D_o = \square$ 、 $D_o/t = \square$ であるから、 $B = 90$ MPa

(注2) □であり、 $1.5P_{a1} = \square$ MPa、 $1.5P_{a2} = \square$ 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)

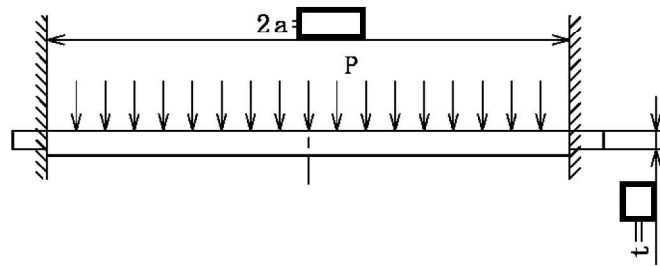
計算条件と計算結果を(□)-第 A. 60 表に示す。胴 (底板) は、外圧に対して十分な強度を有する。

(□)-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	□	16	□	377	22.5

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。



(単位 : mm)

(□)-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	320	<input type="text"/>	406	0.26

A.8 放射性収納物

本輸送物の放射性収納物は、PWR 使用済燃料集合体であり、PWR 燃料集合体の構造図を(イ)-第 D.1 図に示す。

各収納物の構造的特徴及び仕様は(イ)章 D. に示すとおりである。

燃料集合体の強度解析については、一般の試験条件である 0.3 m 落下時に輸送容器と等しく落下衝撃を受けるものとして行っている。その結果、燃料被覆管の強度上の余裕は十分あり、燃料被覆管内の核分裂生成物は、外部に放散されることはない。

なお、特別の試験条件において、燃料集合体の強度評価は行っていないが、9 m 落下時には上・下部ノズル及び燃料棒の変形が想定される¹⁸⁾ ことから、特別の試験条件では各安全解析における燃料集合体の状態を(ロ)-第 A.62 表に示すように設定して評価を行う。

(ロ)-第 A.62 表 各安全解析における燃料集合体の設定

解析項目	解析における燃料集合体の設定
熱解析	燃料棒ピッチの変化及び上下部ノズルの変形が輸送容器及び燃料棒の温度に与える影響は小さいので、変形を無視する。ただし、保守的に全ての燃料棒の密封機能が失われたと仮定し、容器内部のガスの熱伝導率に核分裂生成ガスの影響を考慮する。
密封解析	全燃料棒の密封性が失われたと仮定する。
遮蔽解析	燃料棒ピッチの変化や燃料有効部の移動の可能性があるが、線量当量率の最大値は 1 m 貫通落下による側部中性子遮蔽材の損傷により本体側部に生じ、これらの燃料の変形等が影響を与えないため、考慮しない。

A.9 核分裂性輸送物

本輸送物は核分裂性輸送物に該当する。したがって、本項では、(ρ)章 E. 臨界解析において想定する輸送物の損傷状態を、以下の試験条件に対して評価する。

なお、本輸送物は周囲温度-20℃以上で使用し、A.4.2に示すとおり、周囲温度-20～38℃の温度条件でき裂、破損等の生じるおそれはない。

A.9.1 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件は、告示により次の3種類が定められており、(i)については連続条件となる。

(i) 落下試験

① 水噴霧

② 0.3 m自由落下

(ii) 積み重ね試験

(iii) 6 kg 棒貫通試験

(ρ)章 E. の臨界解析における評価方法を考慮して、影響する輸送物の損傷状態を A.5 の解析結果をもとに評価すると次のようになる。

1. 落下試験

(1) 水噴霧

A.5.2 と同一であり、輸送物に損傷はない。

(2) 0.3 m自由落下

A.5.3 と同一であり、緩衝体に変形が生じるがそれ以外の部位に損傷はない。

2. 積み重ね試験

A.5.4 と同一であり、輸送容器に損傷はない。

3. 6 kg 棒貫通試験

A.5.5 と同一であり、軟鋼棒は緩衝体カバープレートを貫通しない。

以上の結果より、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態は(ρ)-第 A.63 表のようにまとめられる。本輸送物は、(ρ)-第 A.64 表に示すように、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件において、規則及び告示に定められている核分裂性輸送物としての要件を満足する。

(ロ)-第 A. 63 表 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態

試験条件		輸送物の損傷状態	備考
落下試験	水噴霧	損傷なし	—
	0.3 m落下	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
積み重ね		緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
6 kg棒貫通		損傷なし	—

(ロ)-第 A. 64 表 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における適合性評価

核分裂性輸送物としての要件	評価
構造部に一辺10 cmの立方体を包含するようなくぼみが生じないこと。	緩衝体の変形するが、一辺が10 cmの立方体を包含するようなくぼみが生じるような変形ではない。

A. 9. 2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

A. 9. 1 の一般の試験条件に続いて 15 m 浸漬試験が実施される場合には、A. 6. 4 に示すように本輸送物の損傷が拡大することはないので、本輸送物に関する核分裂性輸送物に係る特別の試験条件は最大破損条件となる以下の順序で実施する。

- ① A. 9. 1 の一般の試験条件
- ② 9 m 落下試験
- ③ 1 m 貫通試験
- ④ 熱的試験（火災）
- ⑤ 0. 9 m 浸漬試験

ここで、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件としては(ρ)-第 A. 63 表に示すように損傷がある落下試験を採用する。

(ρ)章 E. 臨界解析における評価方法を考慮して、影響する輸送物の損傷状態を評価すると次のようになる。

1. 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件のうち落下試験

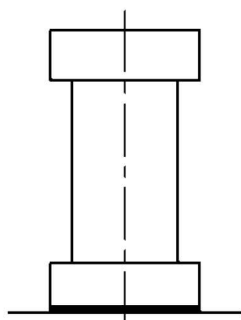
本試験条件における輸送物の損傷状態は(ρ)-第 A. 63 表に示すとおりである。

2. 9 m 落下試験

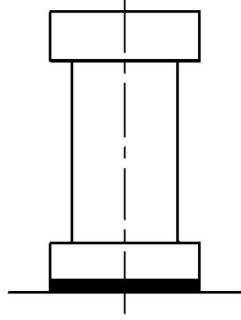
(1) 落下姿勢と落下試験の順序

(ρ)-第 A. 46 図に落下姿勢と落下試験の順序を示す。

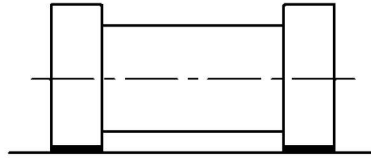
A. 9. 1 の 0. 3 m 落下と 9 m 落下の落下方向が同一の場合に緩衝体の変形量が最大になると考えられるので、この場合について検討を行う。



(垂直)

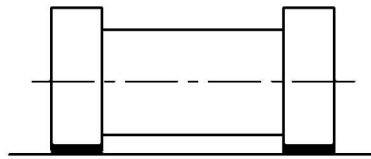


(垂直)



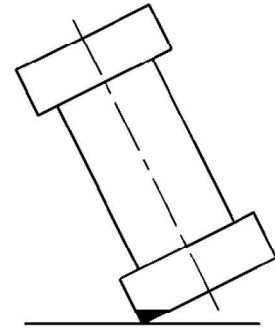
(水平)

0.3 m 落下

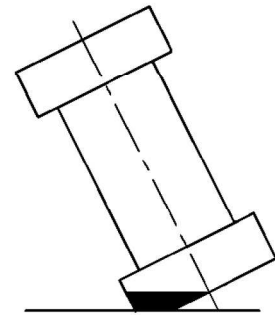


(水平)

9 m 落下



(コーナー)



(コーナー)

(□)-第 A. 46 図 落下姿勢と試験の順序

(2) 9 m 落下試験時の変形量と衝撃加速度

落下高さとしては、0.3 m 落下と 9 m 落下の合計 9.3 m を与える。A. 6. 1 の 1. と同様に、落下エネルギー E_k は与えられる。計算条件と計算結果を(□)-第 A. 65 表に示す。

(□)-第 A. 65 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 最大総重量 : 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	9300	1.197×10^{10}

A. 6. 1 の 1. に示す手法を用いて、変形量 δ 及び衝撃加速度 G を求める。評価結果の緩衝体の累積変形量及び最大衝撃加速度は(□)-第 A. 66 表に示すとおりである。

(□)-第 A. 66 表 9 m 落下試験における緩衝体の累積変形量と衝撃加速度

落下姿勢		緩衝体の 累積変形量 (mm)	設計基準 変形量 ^(注1) (mm)	衝撃加速度 (A) (m/s ²)	9 m 落下試験時 設計加速度 (B) (m/s ²)	加速度の 比 (A/B)
垂直 落下	頭部	303	684	551	610	0.90
	底部	314	608	467	480	0.97
水平落下		270	388	837	850	0.98
コーナー 落下	頭部	785	834	502	510	0.98
	底部	740	839	500	—	—

(注 1) 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。

(3) 容器本体及びバスケットの構造健全性評価

本落下試験時の衝撃加速度は(□)-第 A. 66 表に示すように A. 6. 1 の設計加速度と比較して 1 以下であり、A. 6. 1 の評価より小さい。また、累積変形量は、設計基準変形量以下であるので、本落下試験においても容器本体及びバスケットの構造健全性は維持される。

(4) 三次蓋 O リングの密封性能の評価（歪レベルの評価）

(ロ)-第 A. 57 表に示したように、9 m 落下試験の O リング位置での蓋とキャスク本体との相対口開き変形量は基準値に対して十分な余裕を有しており、本試験条件においても密封性能が損なわれることはない。

(5) 二次蓋防水機能の評価

(ロ)-第 A. 67 表に示すように、特別の試験条件における二次蓋金属ガスケットの横ずれ量は基準値に対して十分な余裕を有しており、また二次蓋ボルトに生じる応力は S_y 以下で締付力は維持されており二次蓋の残留口開きは生じないため、本試験条件においても防水機能が損なわれることはない。なお、二次蓋貫通孔のモニタリングポートカバープレートは O リングで密封されており、本落下試験条件においても防水機能が維持される。

(ロ)-第 A. 67 表 特別の試験条件における二次蓋部金属ガスケットの密封性能の評価

条件		二次蓋ガスケットの横ずれ量(mm)	密封性能 (5×10^{-3} ref cm^3/s) を維持する基準値(mm) ^{17), 19)}
9 m 落下	垂直落下	0.57	3
	水平落下	1.03	3
熱的試験		0.47	3

3. 1 m 貫通試験

1. 及び 2. の落下試験において緩衝体に変形するが、これらは A. 6. 2 に示すように 1m 貫通試験に対する評価において関係しない。したがって、本試験における輸送物の損傷状態は A. 6. 2 の結果 (A. 6. 5 に示す要約参照) と同一である。

4. 熱的試験

1. 及び 2. の落下試験における緩衝体の累積変形量は、A. 6. 1 に示す 9 m 落下試験の各落下試験時の変形量に対して若干増加しているが、特別の試験条件の熱解析モデルに考慮する緩衝体変形量 (B. 5. 2 参照) は、1. 及び 2. の落下試験における緩衝体の累積変形量を包絡した値としている。したがって、本熱的試験における輸送物の損傷評価は A. 6. 5 の 2. と同一となる。

5. 0.9 m 浸漬試験

0.9m 浸漬試験の条件及び評価結果は、A. 6. 4 に示す 15 m 浸漬試験の条件及び評価結果に包絡されるため、0.9 m 浸漬試験において輸送物は損傷が拡大することはない。

6. 輸送物の損傷状態の要約

(□)-第 A. 68 表に特別の試験条件における輸送物の損傷状態の要約を示す。なお、特別の試験条件において燃料集合体の強度評価は行っていないが、9 m 落下時には、上・下部ノズルの変形及び燃料棒の変形が想定される¹⁸⁾ことから、燃料集合体については、臨界解析において(□)-第 A. 69 表に示すように条件を設定する。

(□)-第 A. 68 表 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の輸送物の損傷状態

条件	輸送物の損傷状態	備考
9 m落下	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視。
1 m貫通	緩衝体、外筒及び中性子遮蔽材の変形	緩衝体及び中性子遮蔽材は臨界解析では無視。
熱的試験 (火災時)	中性子遮蔽材の一部焼損 各部位の温度が上昇	臨界解析上は中性子遮蔽材を無視し、燃料温度を20 °Cとしている。
0.9 m浸漬	損傷なし	密封装置及び二次蓋の密封性が健全であるので、胴内に浸水することはない。

(□)-第 A. 69 表 臨界解析における燃料集合体の設定

解析項目	解析における燃料集合体の設定
臨界解析	支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの拡大及び縮小を仮定する。

A.10 付属書類

A.10.1 MSF キャスクの落下試験

1. 試験目的

本試験は、MSF-21P 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を用いて 9.3 m 落下試験（垂直及び傾斜）を実施し、容器の胴及び蓋に取り付けた加速度計によりデータを取得するとともに、落下後の緩衝体の変形量等を測定した。

2. 試験項目

(1) 頭部垂直落下

9.3 m の高さから落下試験モデル頭部を下側にして、垂直姿勢にて落下させた。

(2) 傾斜落下

9.3 m の高さから 10 ° 傾斜させた状態で水平方向に落下させる。なお、底部側が一次衝突、頭部側が二次衝突するよう傾斜させ、落下させた。

3. 試験装置

(1) 落下試験モデル

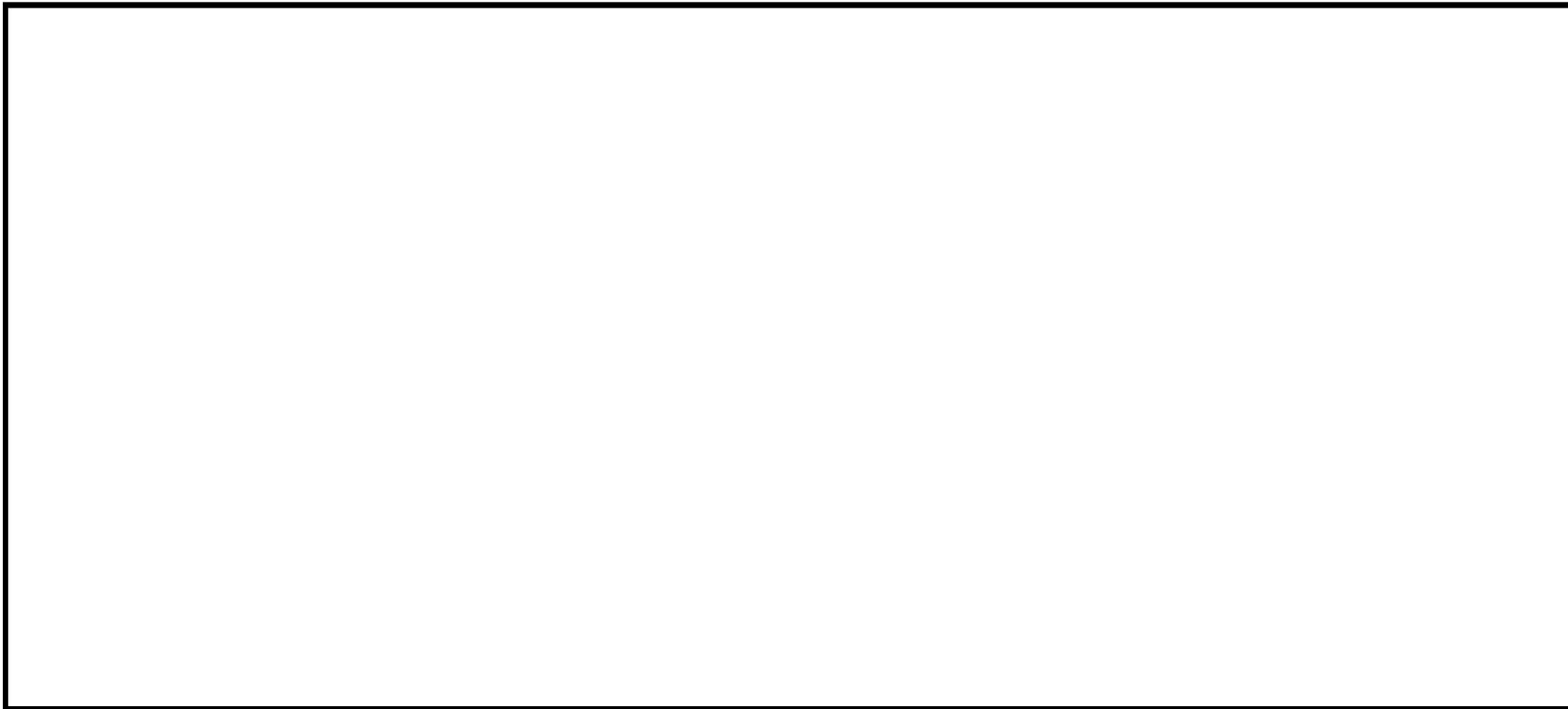
落下試験モデルは、BWR 燃料集合体を 69 体収納する設計である。本体は、胴（鍛造材）、中性子遮蔽材及び外筒（炭素鋼）から構成され、胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。

蓋部は、一次蓋と二次蓋の二重構造とし、本体胴フランジに、金属ガスケットを取り付けた一次蓋及び二次蓋をボルトにより締結することで密封性を維持する構造としている。

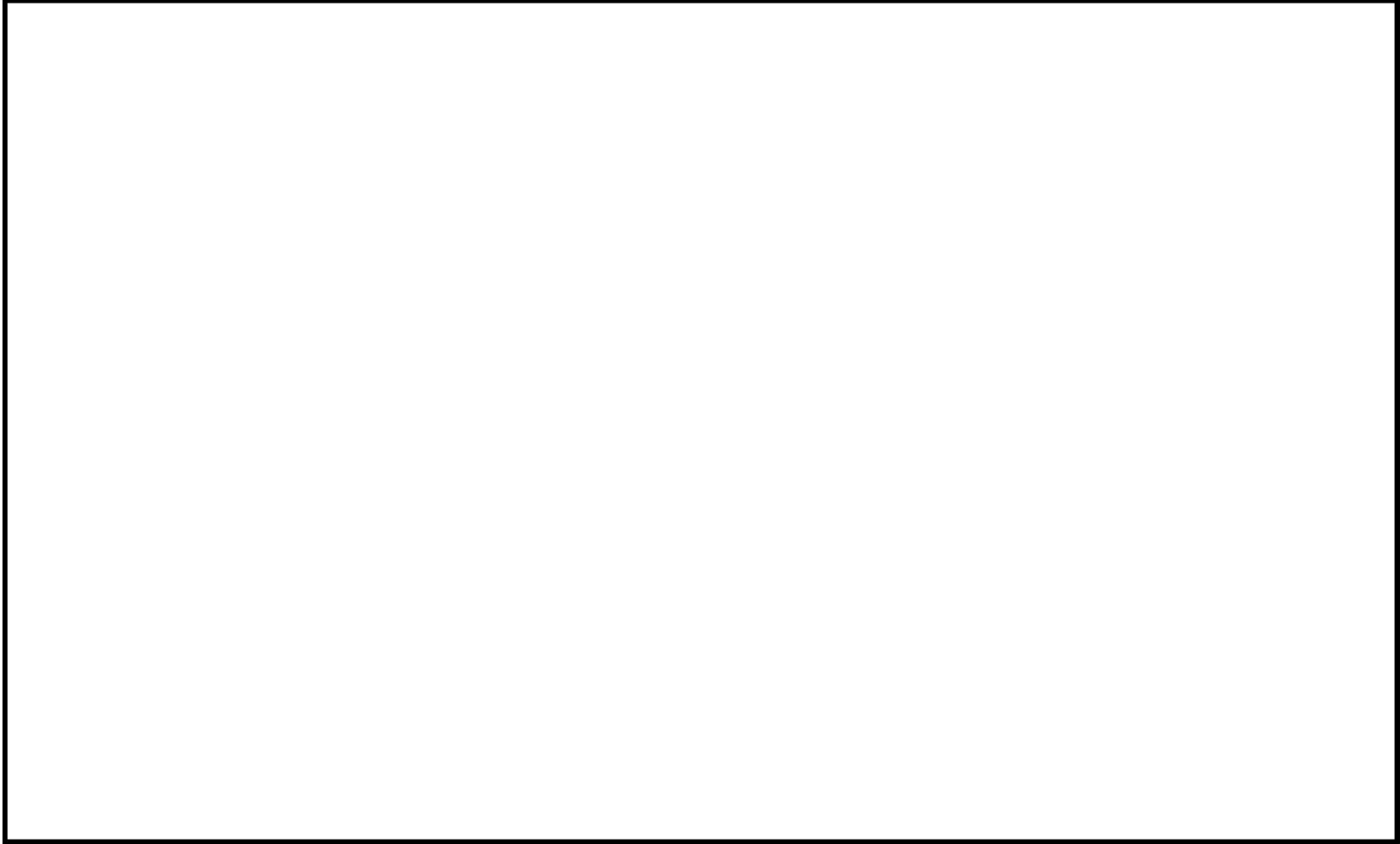
バスケットはアルミニウム合金の角パイプからなる構造とし、キャビティ内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造としている。落下試験時には、独立した 69 個のバスケットセルに燃料集合体を模擬した重量体を挿入した。

材質は基本的に実機と同じ又は相当材である。また、胴内、一二次蓋間は計装配線の関係から開放されており、大気圧である。

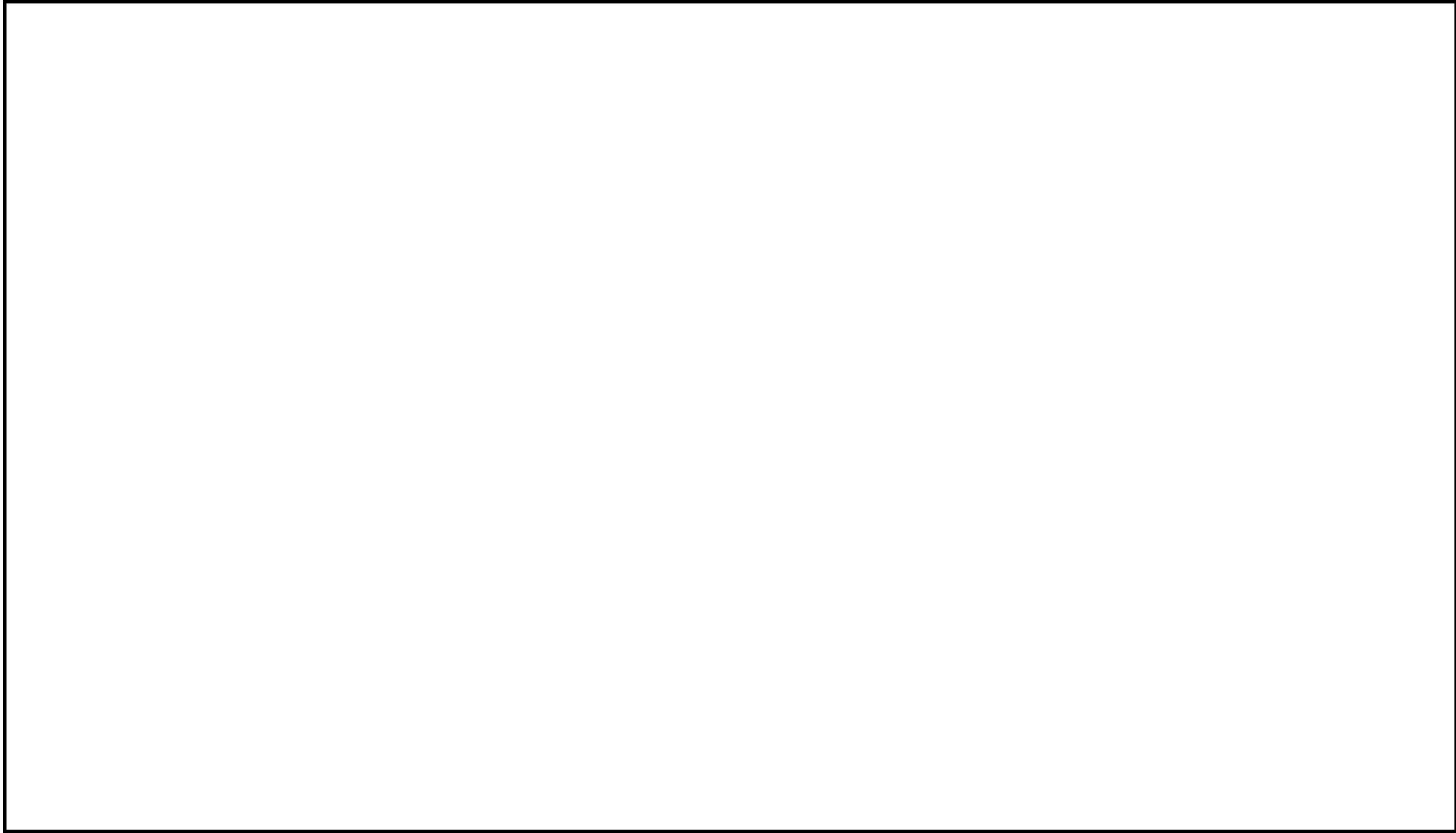
落下試験モデルの概要図を (ロ)-第 A. 47 図～(ロ)-第 A. 51 図に示す。



(ア)-第 A. 47 図 落下試験モデル全体図



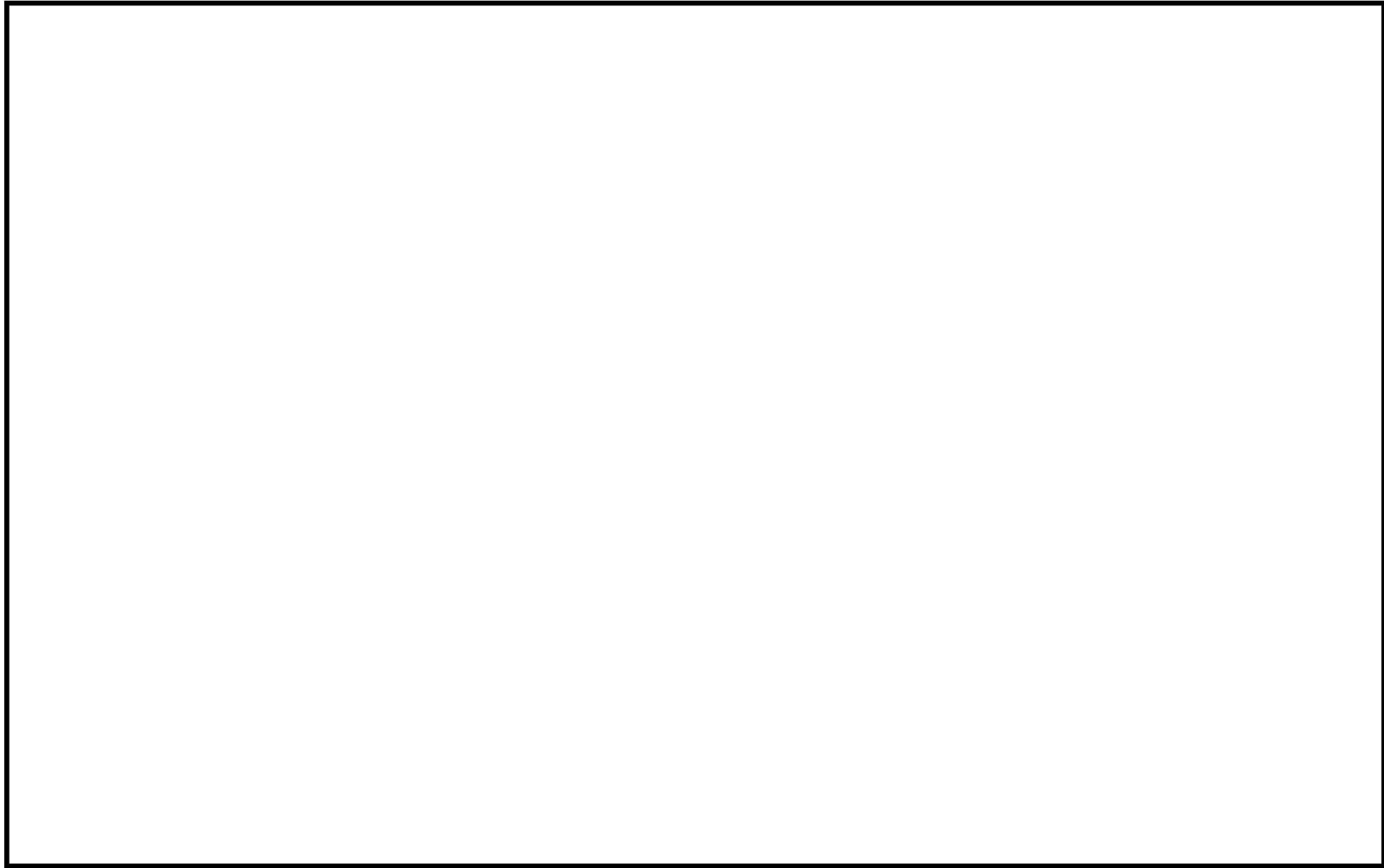
(ア)-第 A. 48 図 一次蓋 (落下試験モデル)



(ロ)-第 A. 49 図 二次蓋 (落下試験モデル)



(ロ)-第 A. 50 図 上部緩衝体 (落下試験モデル)



(平)-第 A. 51 図 下部緩衝体 (落下試験モデル)

(2) 測定項目及び測定方法

a. 測定項目

落下試験モデルを用いた落下試験において測定した主な測定項目と測定部位及び測定器等について(□)-第 A. 70 表に示す。また、加速度計及びひずみゲージの取付位置を(□)-第 A. 52 図に示す。

(□)-第 A. 70 表 落下試験における主な測定項目

測定項目	測定部位	測定器等
緩衝体変形量	上部・下部緩衝体	スケール
加速度	胴、一次蓋、二次蓋	加速度計
ひずみ (参考値)	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	ひずみゲージ
蓋の横ずれ (参考値)	一次蓋、二次蓋	隙間ゲージ デプスゲージ



(ロ)-第 A. 52 図 加速度計及びひずみゲージの取付位置

4. 試験結果

(1) 頭部 9.3 m 垂直落下

(p)-第 A. 53 図に頭部 9.3 m 垂直落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に頭部 9.3 m 垂直落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(p)-第 A. 71 表に緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(p)-第 A. 54 図に胴中央の加速度履歴を示す。(p)-第 A. 72 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量（参考値）

(p)-第 A. 73 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋については蓋の横ずれが確認され、横ずれ量は最大 0.24 mm であった。二次蓋については、蓋の横ずれは生じなかった。

d. ボルトに作用する応力（参考値）

(p)-第 A. 74 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率（参考値）

(p)-第 A. 75 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 ($5 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ [$=5 \times 10^{-3} \text{ ref cm}^3/\text{s}$]) を満足した。また、二次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。

(㍑)-第 A. 71 表 9.3 m 頭部垂直落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	259	

(㍑)-第 A. 72 表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	59
胴上部 (180°)	落下方向	63
胴中央	落下方向	72
一次蓋	落下方向	448
二次蓋	落下方向	533

(㍑)-第 A. 73 表 9.3 m 頭部垂直落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

部位	位置	横ずれ量 ^(注1) (mm)
一次蓋	0° 側	-0.24
	90/270° 側	0.02 / -0.15
	180° 側	-0.04
二次蓋	0° 側	0.0
	90/270° 側	0.0 / 0.0
	180° 側	0.0

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

(㉓)-第 A. 74 表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大応力 (参考値)

部位	位置	応力成分	最大応力 ^(注1) (MPa)	基準値 ^(注2) (MPa)
一次蓋ボルト	0° 側	膜	468	890
		曲げ	164	890
	90° 側	膜	508	890
		曲げ	216	890
	180° 側	膜	413	890
		曲げ	201	890
二次蓋ボルト	0° 側	膜	-29	890
		曲げ	14	890
	90° 側	膜	-27	890
		曲げ	11	890
	180° 側	膜	-50	890
		曲げ	32	890

(注1)膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT)とした。

(㉓)-第 A. 75 表 9.3 m 頭部垂直落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
一次蓋	1.0×10^{-8}	3.9×10^{-6}
二次蓋	2.0×10^{-11}	1.7×10^{-11}

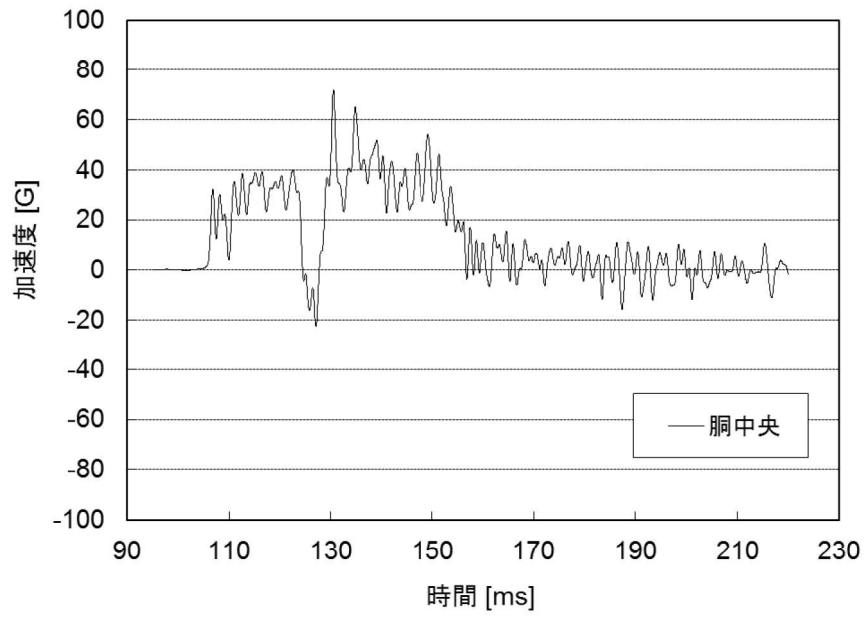


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(ロ)-第 A. 53 図 9.3 m 頭部垂直落下試験時の落下試験モデル写真



(㊦)-第 A. 54 図 9.3 m 頭部垂直落下時の落下方向加速度履歴

(2) 9.3 m 傾斜落下

(ロ)-第 A. 55 図に 9.3 m 傾斜落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に 9.3 m 傾斜落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(ロ)-第 A. 76 表に各緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(ロ)-第 A. 56 図に胴上部、胴中央及び胴下部の加速度履歴を示す。(ロ)-第 A. 77 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量 (参考値)

(ロ)-第 A. 78 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋及び二次蓋ともに落下側及び反落下側のずれ量が大きく、最大の横ずれ量は一次蓋の落下側の 0.81 mm であった。

d. ボルトに作用する応力 (参考値)

(ロ)-第 A. 79 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率 (参考値)

(ロ)-第 A. 80 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。二次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 (5×10^{-4} Pa m^3/s [= 5×10^{-3} ref cm^3/s]) を満足した。

(㍀)-第 A. 76 表 9.3 m 傾斜落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	253	
下部緩衝体	174	

(㍀)-第 A. 77 表 9.3 m 傾斜落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	150
胴中央	落下方向	85
胴下部	落下方向	77
一次蓋	落下方向	149
二次蓋	落下方向	148

(㍀)-第 A. 78 表 9.3 m 傾斜落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

部位	位置	横ずれ量 ^(注1) (mm)
一次蓋	落下側	-0.81
	側面	0.14 / 0.21
	反落下側	-0.07
二次蓋	落下側	0.09
	側面	0.02 / -0.01
	反落下側	-0.79

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

(ロ)-第 A. 79 表 9.3 m 傾斜落下時の最大応力 (参考値)

部位	位置	応力成分	最大応力 ^(注1) (MPa)	基準値 ^(注2) (MPa)
一次蓋ボルト	反落下側	膜	-5	890
		曲げ	4	890
	側面	膜	3	890
		曲げ	21	890
	落下側	膜	74	890
		曲げ	82	890
二次蓋ボルト	反落下側	膜	-14	890
		曲げ	141	890
	側面	膜	-18	890
		曲げ	181	890
	落下側	膜	178	890
		曲げ	243	890

(注1)膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT)とした。

(ロ)-第 A. 80 表 9.3 m 傾斜落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
一次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 1 \times 10^{-11}$
二次蓋	7.4×10^{-9}	1.6×10^{-6}

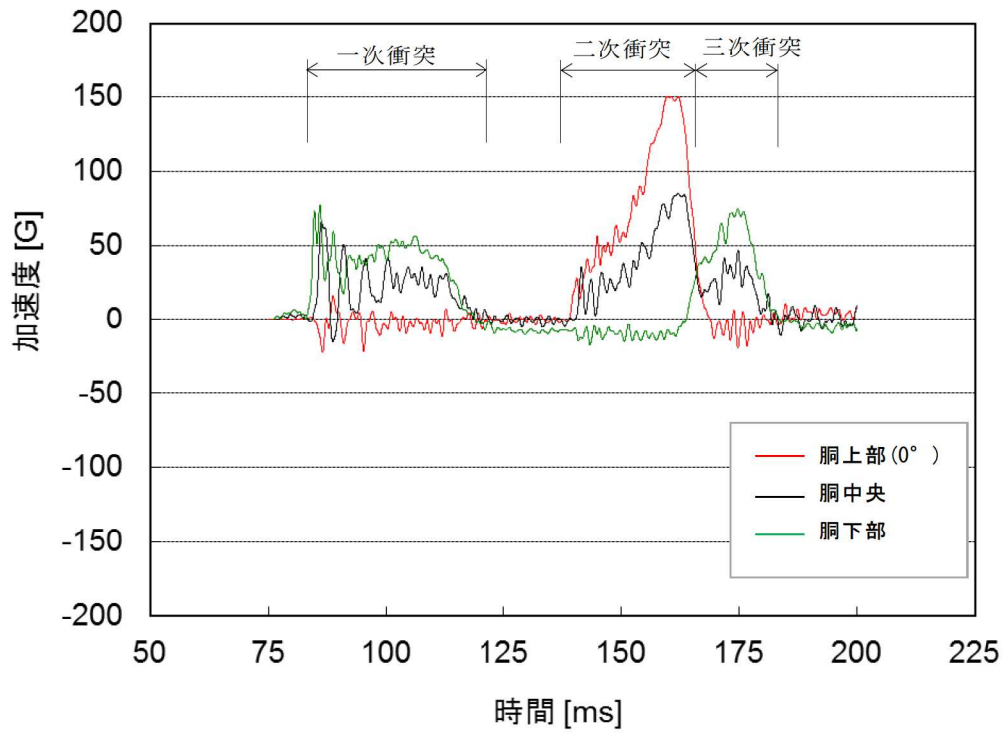


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(ロ)-第 A. 55 図 9.3 m 傾斜落下試験時の落下試験モデル写真



(ロ)-第 A. 56 図 9.3 m 傾斜落下時の落下方向加速度履歴

A. 10.2 CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の検証

MSF-21P 型輸送容器の構造設計は、緩衝体性能及び密封性能の維持の観点から、落下試験モデルをベースに、基本構造が同様となるよう設計している。

本項では、上述の落下試験で得られた試験結果 (A. 10.1 4. 参照) に基づき、MSF-21P 型輸送容器の落下解析で使用している CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を確認した。

1. CRUSH 解析手法の検証

落下試験モデルの落下試験結果 (A. 10.1 4. 参照) と CRUSH 解析の結果を比較し、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。比較結果を (ロ)-第 A. 81 表及び (ロ)-第 A. 82 表に示す。CRUSH による加速度及び緩衝体変形量の解析結果は落下試験と同等であり、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。

(ロ)-第 A. 81 表 落下試験結果と CRUSH コードの比較(最大衝撃加速度)

試験条件	最大衝撃加速度 (m/s ²)	
	落下試験 (注1)	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	598 (61G)	618 (63G)
9.3 m 傾斜落下	1451 (148G)	1510 (154G)

(注1) 落下試験での計測結果 (A. 10.1 4. 参照)

- ・ 9.3 m 頭部垂直落下 : 胴上部の落下方向加速度の平均値
- ・ 9.3 m 傾斜落下 : 二次蓋の落下方向加速度

(ロ)-第 A. 82 表 落下試験結果と CRUSH コードの比較(緩衝体変形量)

試験条件	緩衝体変形量 (mm)	
	落下試験 (注1)	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	259	308
9.3 m 傾斜落下	253	314

(注1) 落下試験での計測結果 (A. 10.1 4. 参照)

2. ABAQUS 解析手法の検証

落下試験で計測された蓋部のひずみを基に、MSF-21P 型と落下試験モデルの寸法差等を考慮して算出した MSF-21P 型輸送容器に発生する応力と、A. 6. 1 に記載される ABAQUS 解析結果とを比較し、ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を検証した。

(1) 検証手順

以下に ABAQUS による解析手法の検証手順を示す。(□)-第 A. 57 図参照)

- a. MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位の寸法を抽出する。
- b. 各部位の設計条件（材質、設計温度、縦弾性係数）を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の強度比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件（キャスク重量、落下時の衝撃加速度）を抽出し、MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- e. 荷重比、各部位の強度比および落下試験モデルの各部位に作用した応力（落下試験で計測したひずみから算出）を用いて、MSF-21P 型輸送容器の各部位に作用する応力を算出する。
- f. e. で算出した応力と、解析結果を比較し、ABAQUS による解析手法を検証する。

(2) 評価結果及びまとめ

9 m 頭部垂直落下時及び 9 m 水平落下時に MSF-21P 型輸送容器に発生する応力について、落下試験結果より算出した結果と解析結果の比較を(□)-第 A. 83 表及び(□)-第 A. 84 表に示す。

9 m 頭部垂直落下時及び 9 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力は、落下試験結果より算出した応力が解析結果より小さく、ABAQUS 解析による評価手法は妥当である。

(ロ)-第 A. 83 表 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

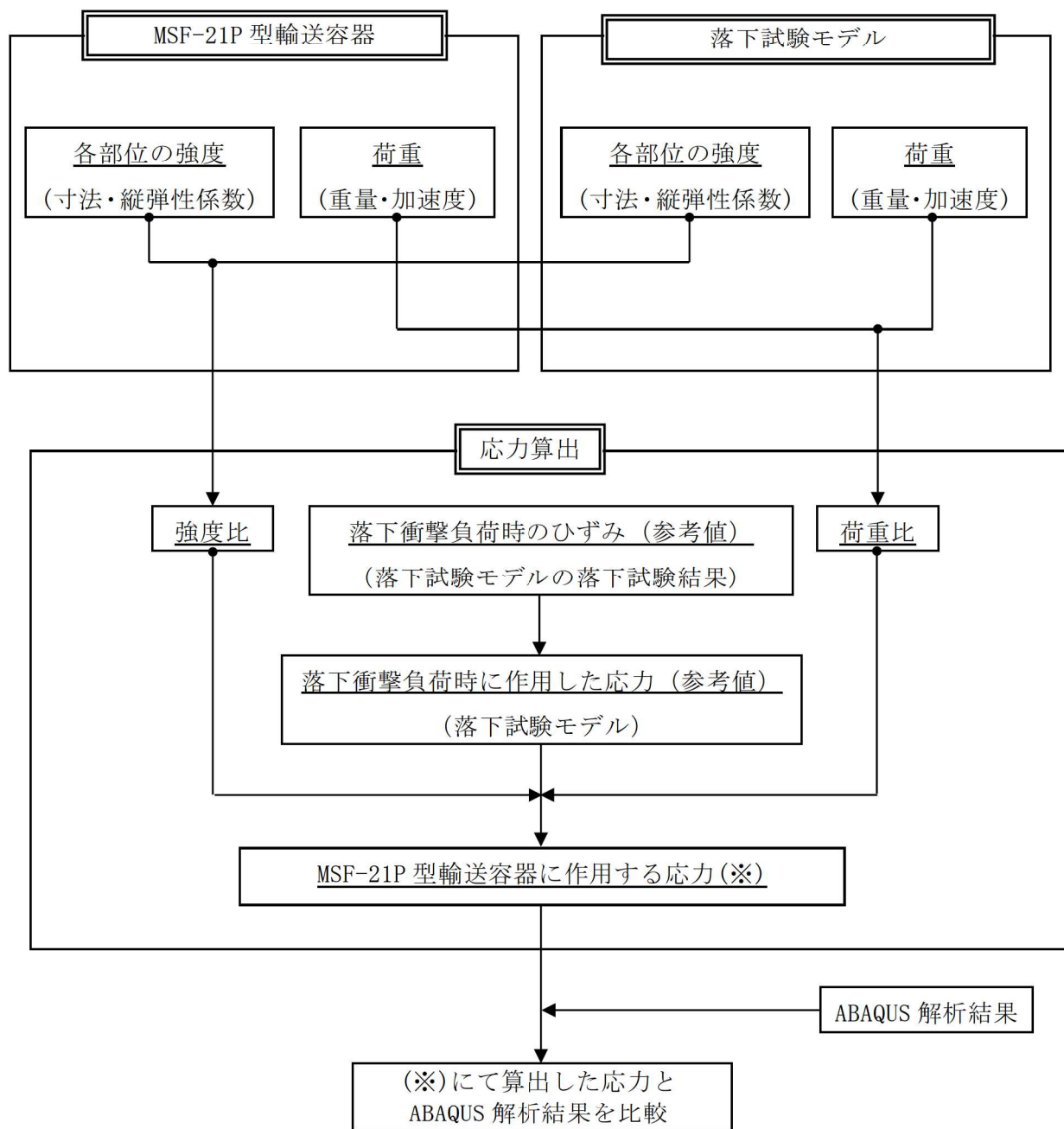
部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 ^(注1) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	46	178	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	56	50	848

(注1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置(軸方向)であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置(軸方向)の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを0として測定しているが、ABAQUS解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。

(ロ)-第 A. 84 表 9.3 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 ^(注1) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	108	157	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	321	407	848

(注1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置(軸方向)であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置(軸方向)の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを0として測定しているが、ABAQUS解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。



(ロ)-第 A. 57 図 ABAQUS 解析手法の検証手順

A.10.3 MSF-21P 型輸送容器の落下試験結果に基づく密封性能の検証

MSF-21P 型輸送容器の 9.3 m 傾斜落下条件下における密封性能について落下試験結果に基づき評価・検証を行った。

1. MSF-21P 型輸送容器の密封設計

落下試験結果に基づき落下時の蓋密封部挙動について考察し、蓋密封部の漏えいメカニズムを分析した。それら結果に基づき、MSF-21P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目を(ロ)-第 A.85 表に示す。また、(ロ)-第 A.58 図に MSF-21P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋部構造の比較を示す。

2. MSF-21P 型輸送容器の密封性能評価

9.3 m 傾斜落下において、MSF-21P 型輸送容器の密封性能が維持することを、落下試験により密封性能が維持することが実証されている落下試験モデル及びその落下試験結果を用いて検証する。

落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられた金属ガスケットまたはゴム O リングと胴フランジ面との口開き量の増加、金属ガスケットの相対横ずれ量の増加、金属ガスケットまたはゴム O リングの圧縮量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するリークパスの発生とガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、MSF-21P 型輸送容器の蓋、胴フランジ及び蓋ボルトの変形量が落下試験モデルに比べて小さいことを示すことにより、MSF-21P 型輸送容器の密封性能を検証する。

また、MSF-21P 型輸送容器の三次蓋構造に対して落下試験モデルは二次蓋構造であるが、荷重の伝達経路と蓋密封部の構造について、MSF-21P 型輸送容器の三次蓋周辺部（最外の蓋）と落下試験モデルの二次蓋周辺部（最外の蓋）は同様であり、MSF-21P 型輸送容器の二次蓋周辺部及び一次蓋周辺部（内側の蓋）と落下試験モデルの一次蓋周辺部（内側の蓋）で同様である。したがって、MSF-21P 型輸送容器の蓋密封部（三次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（二次蓋）と、MSF-21P 型輸送容器の蓋密封部（二次蓋及び一次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（一次蓋）と比較する。

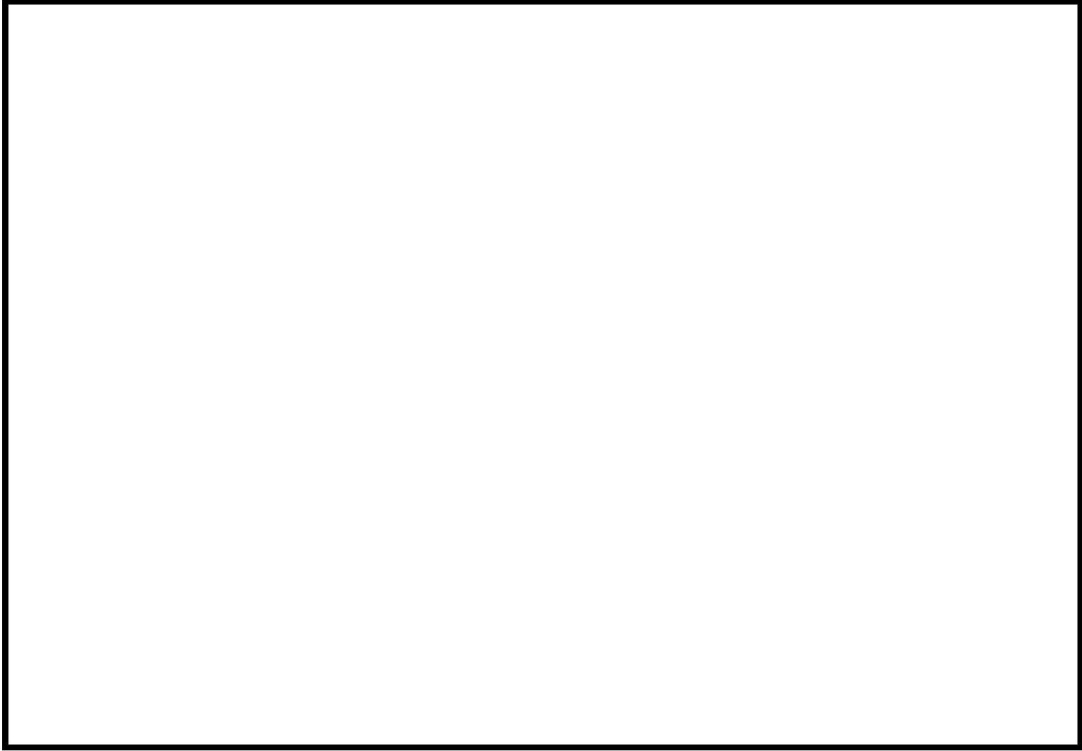
(1) 評価手順

密封性能評価方法の手順を以下に示す。(□)-第 A. 59 図参照)

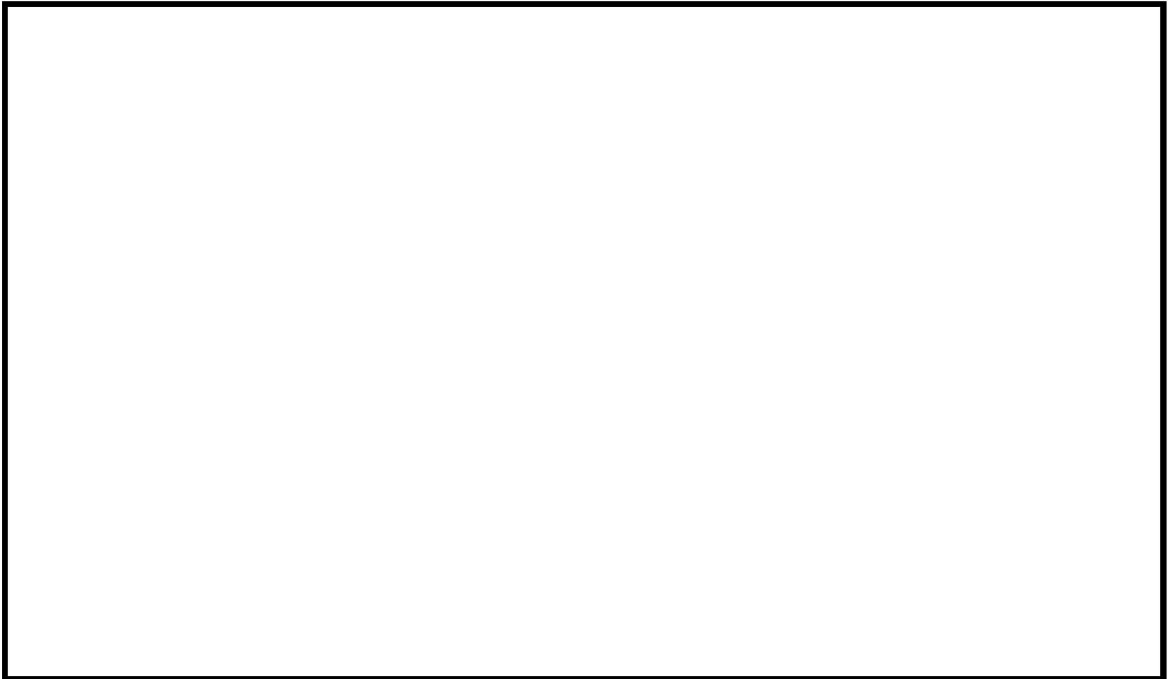
- a. MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位(胴フランジ、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、圧縮、引張、オーバル変形)の剛性に影響する寸法を抽出する。
- b. 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、設計温度、縦弾性係数)を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の剛性比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件(キャスク重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- e. 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下衝撃負荷時の変形量比を算出する。
- f. e. で算出した変形量比が 1 以下(MSF-21P 型輸送容器の方が小さい)であれば、落下試験モデルに比べて、より高い密封性能を有していることが示される。

(ロ)-第 A. 85 表 MSF-21P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目

部位	落下試験等の結果	蓋密封部設計に反映した項目
蓋密封部	<p>(1) 落下衝撃荷重が胴フランジ及び蓋側面に作用し、胴フランジ、二次蓋及び二次蓋ボルトが曲げ及び引張変形し、蓋の横ずれ及び口開きが生じた。</p> <p>(2) 上記(1)により、落下試験では、二次蓋(最外蓋)の 9.3m 落下試験後の漏えい率は基準値を満足したものの、試験前より 2~3 桁程度増加した。</p>	<p>以下に示す反映により、落下試験モデルよりも密封性能を向上させる。</p> <p>(1) 胴フランジ、一次蓋及び二次蓋の剛性を落下試験モデルよりも高めることで蓋密封部の変形量を低減させる。</p> <p>(2) 落下試験モデルの二次蓋(最外蓋)に加えて三次蓋(最外蓋)を追加し、密封機能の向上を図る。</p>
緩衝体	<p>(1) 緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能が有効に機能したため、緩衝体の変形量は許容量以下であることを確認した(但し、許容変形量に対する余裕は小さい)。</p>	<p>(1) 緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能を維持するため、輸送容器の緩衝体構造は、落下試験により検証された基本構造を採用する。</p> <p>(2) 緩衝材高温時の強度低下を考慮した上で、比較的固い木材を適用した上で、外形制限寸法内の範囲内で緩衝体を径方向に大型化し、緩衝性能を向上させる。</p>



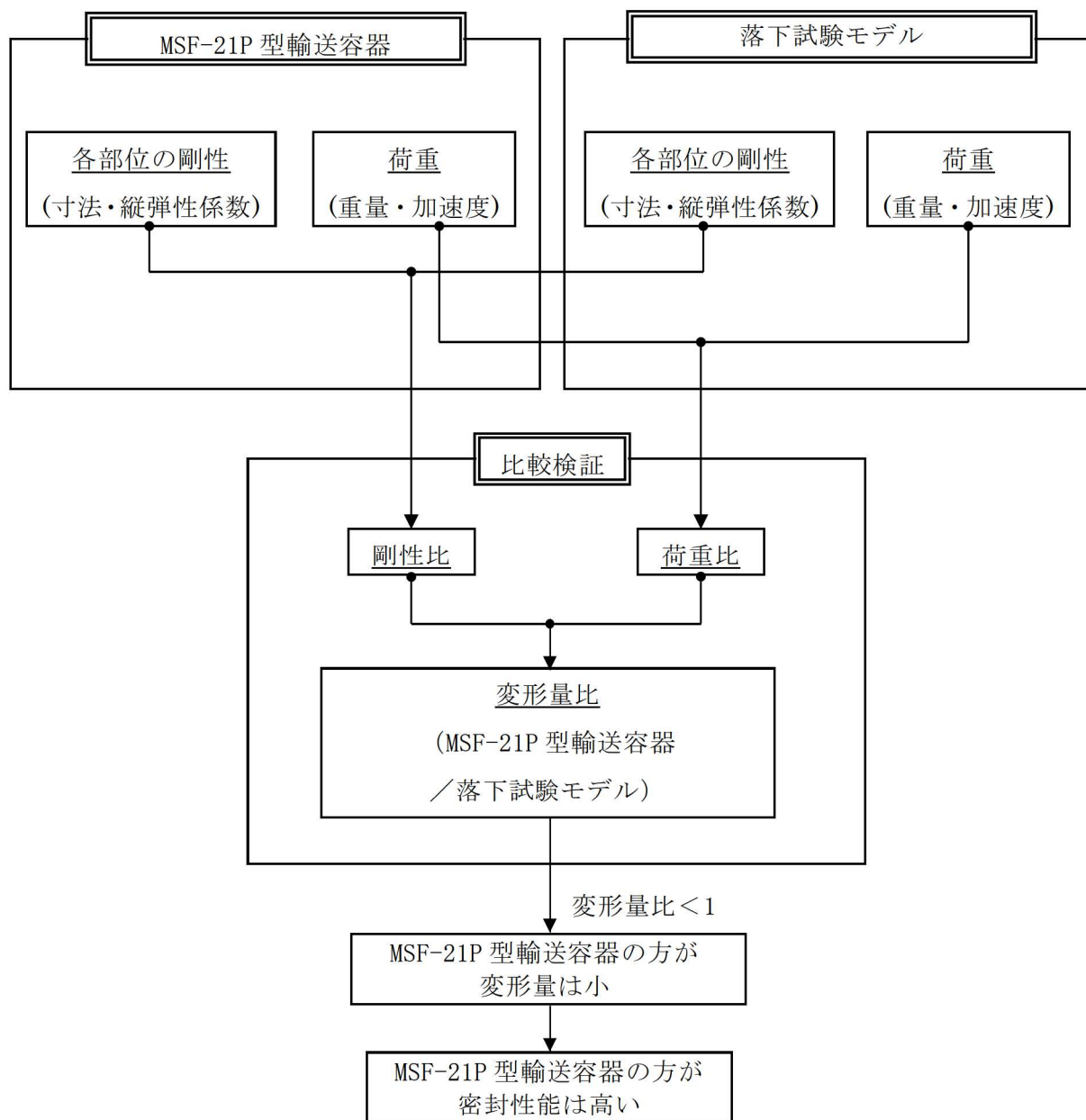
MSF-21P 型輸送容器



落下試験モデル

(単位 : mm)

(㊦)-第 A. 58 図 MSF-21P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋密封部構造の比較



(□)-第 A. 59 図 密封性能評価手順

(2) 評価結果及びまとめ

9 m 傾斜落下において、MSF-21P 型輸送容器の密封性能が維持されていることを落下試験結果を用いて検証した。検証結果を以下に示す。

a. 9 m 傾斜落下

9 m 傾斜落下時の蓋部の変形量比較結果を(ρ)-第 A. 86 表に示す。全ての評価部位において変形量比は 1 以下であり、MSF-21P 型輸送容器の蓋部の変形量は落下試験モデルに比べ小さい。したがって、MSF-21P 型輸送容器は、落下試験モデルに比べて高い密封性能を有している。

(ρ)-第 A. 86 表 9 m 傾斜落下時の蓋部の変形量評価結果

部位 ^(注1)	変形モード	荷重比 ^(注2)	剛性比 ^(注2)	変形量比 ^(注2)
一次蓋	曲げ	0.64	1.72	0.37
一次蓋ボルト	引張	0.64	0.86	0.74
	曲げ	0.64	0.86	0.74
二次蓋	曲げ	0.53	2.73	0.19
二次蓋ボルト	引張	0.53	0.86	0.61
	曲げ	0.53	0.86	0.61
三次蓋	曲げ	0.66	0.83	0.80
三次蓋ボルト	引張	0.66	1.00	0.67
	曲げ	0.66	1.41	0.47
胴フランジ (二次蓋側)	曲げ	0.97	1.24	0.78
胴フランジ (三次蓋側)	曲げ	0.97	1.40	0.69

(注1) 部位は、MSF-21P 型輸送容器の各部位を示す。

(注2) 荷重比、剛性比及び変形量比は全て、落下試験モデルに対する MSF-21P 型輸送容器の比を示す。

A. 10.4 緩衝材低温時の強度評価

MSF-21P 型輸送容器の緩衝体緩衝材には木材 を適用している。緩衝材である各木材は、使用最低温度である -20°C では常温時に対して強度が 16%~29%上昇する。 -20°C の木材強度を用いて評価を行った場合にキャスクへ発生する衝撃加速度は、(□)-第 A. 19 表及び(□)-第 A. 37 表に示す設計加速度（常温時の解析結果に裕度を考慮した値）に対して増加する。本項では、その衝撃加速度の増加を考慮しても、キャスクの各部位に発生する応力は評価基準を満足することを確認した。

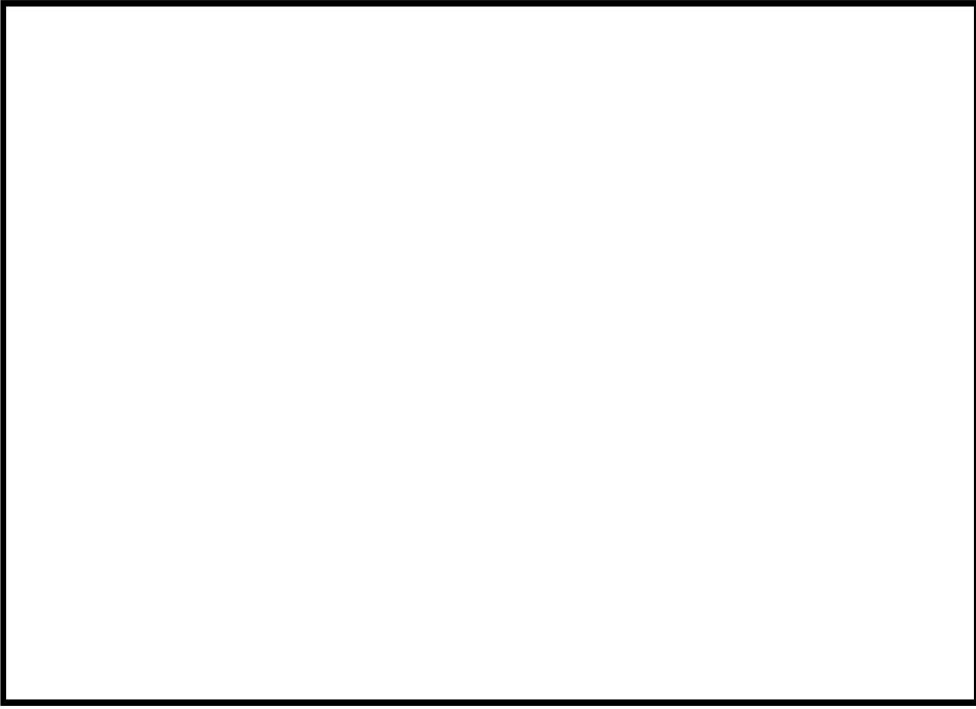
1. -20°C における木材強度の上昇割合

木材は温度が低くなると強度が上昇する。その特性を CRUSH 解析で考慮するために、温度係数として緩衝材の応力-ひずみ特性に考慮する。各木材の温度と温度係数の関係を(□)-第 A. 60 図~(□)-第 A. 62 図に示す。

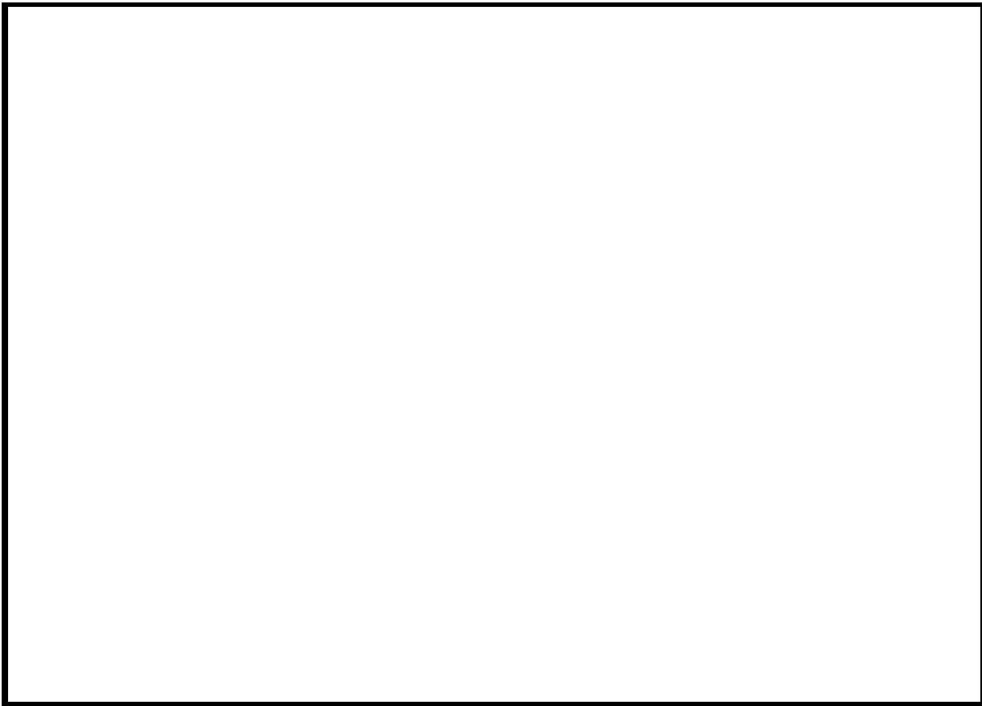
その関係式から、木材の温度を本輸送物の周囲温度 -20°C とした場合の温度係数を求めた。木材低温時に木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数を(□)-第 A. 87 表に示す。

(□)-第 A. 87 表 木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数（低温時： -20°C ）

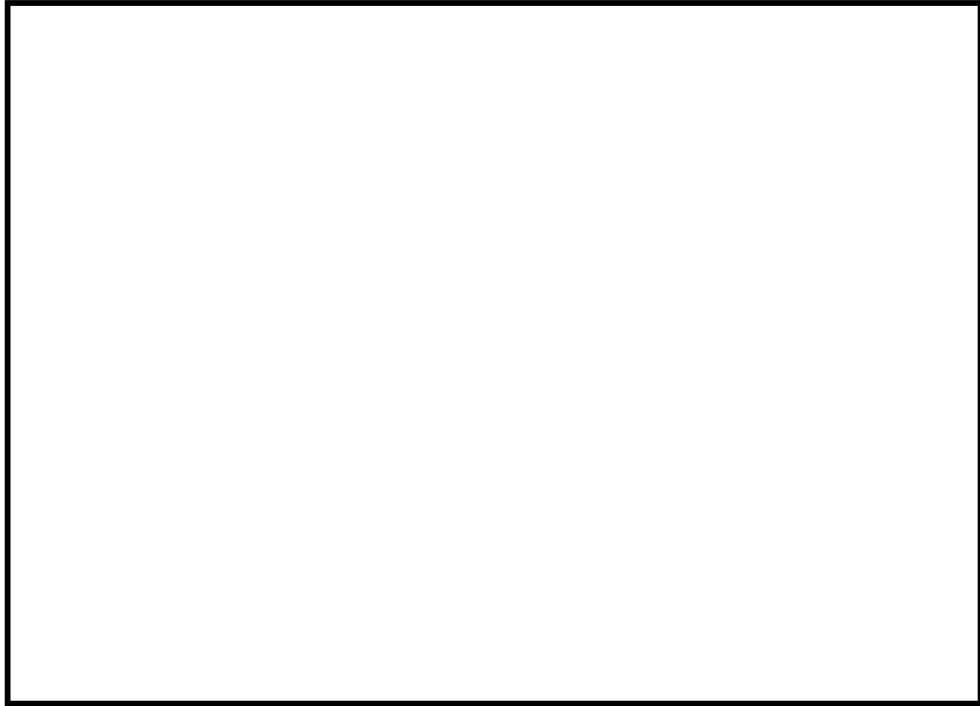
木材種	温度係数
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>	



(□)-第 A. 60 図 温度と温度係数の関係 (□)



(□)-第 A. 61 図 温度と温度係数の関係 (□)



(□)-第 A. 62 図 温度と温度係数の関係 (□)

2. -20°Cにおける衝撃加速度

1 項に示す木材強度の上昇割合を考慮して CRUSH 解析を行った結果を(□)-第 A. 88 表 (0.3m 落下時) 及び(□)-第 A. 89 表 (9m 落下時) に示す。その他解析条件は A. 5. 3. 1 及び A. 6. 1 に示す条件と同様である。

木材温度が低くなると木材の強度は上昇するため、(□)-第 A. 88 表及び(□)-第 A. 89 表に示すとおり、落下時の衝撃加速度は常温時に比べて大きくなる。

(□)-第 A. 88 表 0.3m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	木材温度	衝撃加速度 (m/s ²)		
		計算結果 ^(注1) (A)	設計加速度 ^(注1) (B)	(A)/(B)
頭部垂直	常温	238	250	0.95
	低温	267		1.07
底部垂直	常温	238	250	0.95
	低温	266		1.06
水平	常温	187	200	0.94
	低温	205		1.03
頭部コーナー	常温	34	—	—
	低温	35		—
底部コーナー	常温	31	—	—
	低温	31		—

(注1) 計算結果（常温）と設計加速度は、(□)-第 A. 19 表に記載する値。

(□)-第 A. 89 表 9m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	木材温度	衝撃加速度 (m/s ²)		
		計算結果 ^(注1) (A)	設計加速度 ^(注1) (B)	(A)/(B)
頭部垂直	常温	551	610	0.90
	低温	576		0.94
底部垂直	常温	467	480	0.97
	低温	528		1.10
水平	常温	837	850	0.98
	低温	887		1.04
頭部コーナー	常温	502	510	0.98
	低温	512		1.00
底部コーナー	常温	500	—	—
	低温	512		—

(注1) 計算結果（常温）と設計加速度は、(□)-第 A. 66 表に記載する値（落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果）。また、計算結果（低温）は、落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果。

3. 衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響

木材常温時に対する木材低温時における衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響について以下に示す。

(□)-第 A. 88 表及び(□)-第 A. 89 表に示すとおり、木材低温時の衝撃加速度は、(□)-第 A. 19 表及び(□)-第 A. 37 表に示す設計加速度（構造評価に入力する加速度）から増加する。ここで、余裕率が最も小さい部位について、木材低温時の衝撃加速度において発生する応力を評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_1 = (\sigma_2 - \sigma_f) \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \sigma_f \quad (\text{蓋ボルトの評価式})$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (\text{蓋ボルト以外の評価式})$$

ここで、

σ_1 : 木材低温時の 0.3m 又は 9m 落下時に評価部位に発生する応力 (MPa)

σ_2 : 0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度において評価部位に発生する応力 (MPa)

σ_f : 二次蓋ボルト又は三次蓋ボルトの初期締付応力 (MPa)

α_1 : 木材低温時の衝撃加速度 (m/s²)

α_2 : 0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度 (m/s²)

評価条件及び評価結果を(□)-第 A. 90 表及び(□)-第 A. 91 表に示す。(□)-第 A. 90 表及び(□)-第 A. 91 表に示すとおり余裕率が最も小さい部位へ発生する応力は評価基準を満足する。

(v)-第 A. 90 表 0.3m 落下時の強度評価

落下姿勢	0.3m 頭部垂直落下		0.3m 底部垂直落下		0.3m 水平落下	
評価部位	蓋部中性子 遮蔽材 カバー	二次蓋 ボルト	下部端板	三次蓋 ボルト	下部端板	二次蓋 ボルト
σ_2	58 MPa	206 MPa	35 MPa	216 MPa	50 MPa	554 MPa
σ_f	-	200 MPa	-	190 MPa	-	200 MPa
α_1	267 m/s ²		266 m/s ²		205 m/s ²	
α_2	250 m/s ²		250 m/s ²		200 m/s ²	
σ_1	62 MPa	207 MPa	38 MPa	218 MPa	52 MPa	563 MPa
評価 基準 ^(注1)	168 MPa (f_b : <input type="text"/> °C)	590 MPa ($2S_m$: <input type="text"/> °C)	136 MPa (f_b : <input type="text"/> °C)	590 MPa ($2S_m$: <input type="text"/> °C)	136 MPa (f_b : <input type="text"/> °C)	885 MPa ($3S_m$: <input type="text"/> °C)

(注 1) 評価基準を設定する温度 (キャスク各部位の低温時温度) は、木材温度と同程度低下 (木材温度: 38°C から -20°C へ約 60°C 低下) するとし、「低温時温度 = (設計温度) - 60°C」とした。

(v)-第 A. 91 表 9m 落下時の強度評価

落下姿勢	9m 頭部垂直落下		9m 底部垂直落下		9m 水平落下		9m コーナー 落下
評価部位	外筒	二次蓋 ボルト	下部端板	三次蓋 ボルト	二次蓋 シール部	二次蓋 ボルト	三次蓋 ボルト
σ_2	93 MPa	623 MPa	87 MPa	443 MPa	165 MPa	819 MPa	241 MPa
σ_f	-	200 MPa	-	190 MPa	-	200 MPa	190 MPa
α_1	576 m/s ²		528 m/s ²		887 m/s ²		512 m/s ²
α_2	610 m/s ²		480 m/s ²		850 m/s ²		510 m/s ²
σ_1	88 MPa	600 MPa	96 MPa	469 MPa	173 MPa	846 MPa	242 MPa
評価 基準 ^(注1)	174 MPa ($1.5f_s$: <input type="text"/> °C)	884 MPa (S_y : <input type="text"/> °C)	246 MPa ($1.5f_b$: <input type="text"/> °C)	884 MPa (S_y : <input type="text"/> °C)	201 MPa (S_y : <input type="text"/> °C)	884 MPa (S_y : <input type="text"/> °C)	884 MPa (S_y : <input type="text"/> °C)

(注 1) 評価基準を設定する温度 (キャスク各部位の低温時温度) は、木材温度と同程度低下 (木材温度: 38°C から -20°C へ約 60°C 低下) するとし、「低温時温度 = (設計温度) - 60°C」とした。

A.10.5 MSF-21P 型輸送容器のバスケットプレート用材料

アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

1. 概要

本書は、MSF-21P 型輸送容器のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

2. 適用範囲

本材料を MSF-21P 型のバスケットプレートに適用するにあたり、本材料及びこれを使用するバスケットは以下の事項に適合すること。

- (1) 供用期間は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。
- (6) 供用状態によらずバスケットプレートの発生応力は、弾性範囲内であること。
- (7) 供用状態によらずバスケットは長期間にわたる熱応力を生じない構造とすること。

3. 材料規定

本規定は、設計評価に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4. に示す製造管理規定を満足しなければならない。

(1) 材料名称

材料の規定名称は (p)-第 A. 92 表 に示すものであること。

(2) 化学成分

化学成分は (p)-第 A. 93 表 に示す百分率の値の範囲内にあること。

(3) 設計応力強さ

設計応力強さは (p)-第 A. 94 表の規定によること。

(4) 許容引張応力

許容引張応力は (p)-第 A. 95 表 の規定によること。

(5) 設計降伏点

設計降伏点は(ρ)-第 A. 96 表の規定によること。

(6) 設計引張強さ

設計引張強さは(ρ)-第 A. 97 表の規定によること。

(7) 縦弾性係数

縦弾性係数は(ρ)-第 A. 98 表の規定によること。

(8) 熱膨張係数

熱膨張係数は(ρ)-第 A. 99 表の規定によること。

4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、(ρ)-第 A. 93 表に示す百分率の値の範囲内にあること。この場合において、化学成分は溶湯成分分析によること。化学成分の分析試験は、JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」（以下「JIS H 4100」という。）によること。
- (2) 材料の製造は、(ρ)-第 A. 63 図に示す製造フローに従い、熱間押出成形加工されたものであること。
- (3) 材料は、熱間押出成形加工後、熱処理は行わず、空冷されたものであること。熱間加工によって得られるか又はごくわずかな冷間加工を加えただけの状態であること。質別 H112 は、JIS H 0001「アルミニウム、マグネシウム及びそれらの合金－質別記号」によること。
- (4) 機械的性質は、(ρ)-第 A. 100 表に示す値に適合すること。
- (5) 製品の寸法の許容差は、以下及び JIS H 4100 によること。これを逸脱する寸法を適用する場合、機械的性質が(ρ)-第 A. 100 表を満足することを確認すること。
 - ・肉厚 : 16mm 以下
 - ・押出比^(注1) : 10 以上

(注1) ビレットの押出方向に垂直な断面積と押出材の押出方向に垂直な断面積の比
- (6) 本材料は、耐食性向上等を目的として表面処理を行う場合がある。表面処理を行う場合、機械的性質が(ρ)-第 A. 100 表を満足することを確認すること。
- (7) 本材料は、(ρ)-第 A. 63 図の製造フローの各段階において、(ρ)-第 A. 101 表に示す品質管理を行う。

- (8) 上記規定以外の規定については、JIS H 4100 又は EN 755-1「Aluminium and aluminium alloys- Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery」によること。

(㍀)-第 A. 92 表 材料の規定名称

材料の名称	記号	質別
バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	MB-A3004	H112

(㍀)-第 A. 93 表 化学成分規定

記号	化学成分 (mass%)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他		Al
										個々	合計	
MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下	残部

(ロ)-第 A. 94 表 材料の各温度における設計応力強さ S_m (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	37	37	37	37	37	37	36	31	25	21	17

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 95 表 材料の各温度における許容引張応力 S (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)									
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	250
MB-A3004	37	37	37	37	29	21	15	11	8	8

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 96 表 材料の各温度における設計降伏点 S_y (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 97 表 材料の各温度における設計引張強さ S_u (注1)(注2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注2) 時効による強度低下を考慮した値である。