

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関係す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 (ロ)-第 A. 36 表に示す。

(ロ)-第 A. 36 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大 総質量 :m(kg)	重力加速度 :g(m/s ²)	落下高さ :H(mm)	輸送物の 落下エネルギー :E _K (N・mm)
数値	1.312×10 ⁵	9.80665	9000	1.158×10 ¹⁰

(3) 各落下方向解析モデル

各落下方向の解析モデルは (ロ)-第 A. 23 図～(ロ)-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 (ロ)-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)

(ロ)-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。

(a)-第 A. 37 表 9 m 落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

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

(注1) 設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

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

A. 6. 1. 1 垂直落下

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

1. 容器本体

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

(1) 解析モデル

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

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

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

底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

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

b. 境界条件

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

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



F_{ab} : 下部緩衝体の慣性力

P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)

F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体)
の慣性力

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力

(MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力

(MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

F_{rw} : 上部緩衝体反力

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

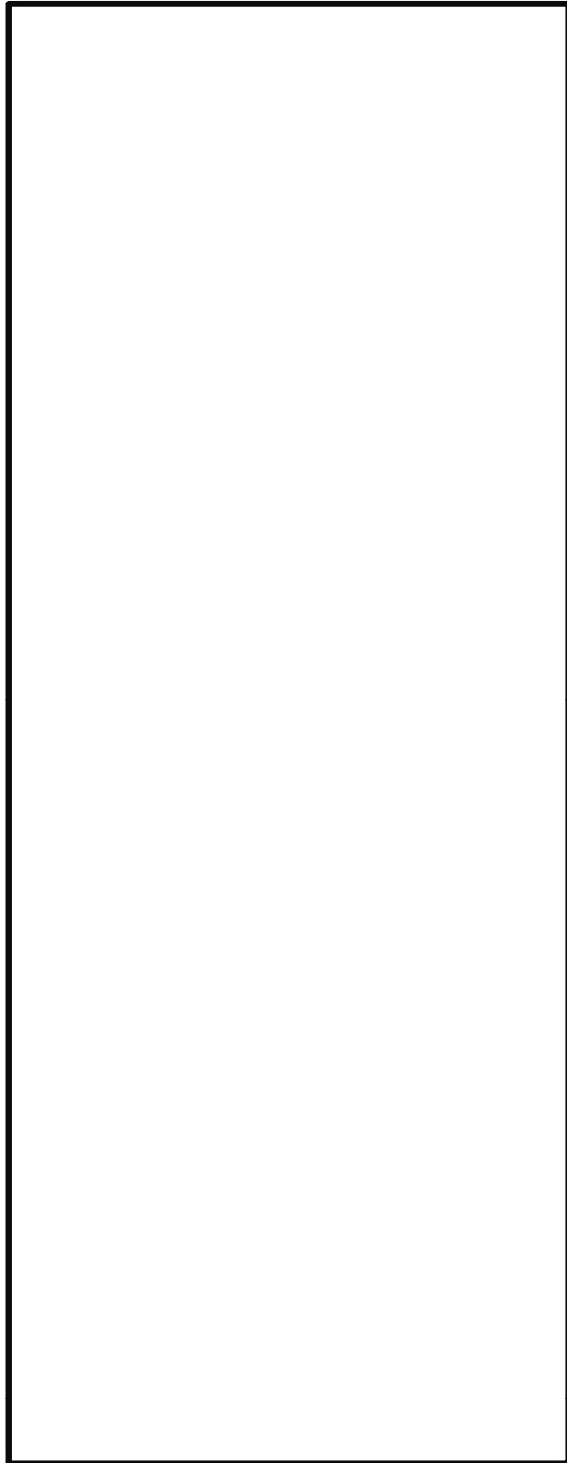
P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(□)-第 A. 40 図 頭部 9 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



F_{ab} : 上部緩衝体の慣性力

P_i : 胴内圧 (-0.101325 MPa G)

P_{ii} : 一二次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{iii} : 二三次蓋間圧力 (0.30 MPa G)

F_{iw} : 内部の収納物等 (バスケット、燃料集合体)
の慣性力

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力

(MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力

(MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(□)-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 (℃)	解析 基準値 (MPa) ^(注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	13	251	251	18.3
		P_L+P_b	内	54		377	5.98
	外		78	377		3.83	
	④	P_L	—	17		377	21.1
三次蓋	⑤	P_m	—	20		270	12.5
		P_L+P_b	内	26		406	14.6
	外		64	406		5.34	
⑥	P_L	—	67	406		5.05	
胴	⑦	P_L	—	96		377	2.92
	⑧	P_m	—	19		251	12.2
		P_L+P_b	内	20		377	17.8
	外		18	377		19.9	
	⑨-1	P_L	—	11		377	33.2
⑨-2	P_L	—	12	377		30.4	
胴(底板)	⑩	P_m	—	4	251	61.8	
		P_L+P_b	内	12	377	30.4	
	外		11	377	33.2		
⑪	P_L	—	8	377	46.1		
外筒	⑫	引張	—	37	283	6.64	
		圧縮	—	45	283	5.28	
		せん断	—	93	163	0.75	
		曲げ	—	126	283	1.24	
	⑬	引張	—	104	283	1.72	
		圧縮	—	2	283	140	
		せん断	—	2	163	80.5	
		曲げ	—	2	283	140	
	⑭	引張	—	11	283	24.7	
		圧縮	—	4	283	69.7	
		せん断	—	18	163	8.05	
		曲げ	—	44	283	5.43	

(注1) (ロ)-第 A. 30 図参照

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

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

(p)-第 A. 38 表 頭部 9 m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

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

(注1) (p)-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。

(ウ)-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 (℃)	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	40		377	8.42
	外		29	12.0			
	④	P_L	—	13		377	28.0
三次蓋	⑤	P_m	—	8		270	32.7
		P_L+P_b	内	69		406	4.88
	外		55	6.38			
⑥	P_L	—	31	406		12.0	
胴	⑦	P_L	—	8		377	46.1
	⑧	P_m	—	19		251	12.2
		P_L+P_b	内	19		377	18.8
	外		19	18.8			
	⑨-1	P_L	—	28		377	12.4
⑨-2	P_L	—	54	5.98			
胴(底板)	⑩	P_m	—	29	251	7.66	
		P_L+P_b	内	81	377	3.65	
	外		103	2.66			
⑪	P_L	—	46	377	7.19		
外筒	⑫	引張	—	9	283	30.4	
		圧縮	—	1	283	282	
		せん断	—	6	163	26.1	
		曲げ	—	12	283	22.5	
	⑬	引張	—	53	283	4.33	
		圧縮	—	2	283	140	
		せん断	—	1	163	162	
		曲げ	—	1	283	282	
	⑭	引張	—	22	283	11.8	
		圧縮	—	6	283	46.1	
		せん断	—	15	163	9.86	
		曲げ	—	33	283	7.57	

(注1) (ウ)-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⑦~⑩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。

(p)-第 A. 39 表 底部 9 m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

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

(注1) (p)-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. 6¹⁷⁾ を衝撃加速度 (610 m/s²) に乗じる。計算条件と計算結果を (ロ)-第 A. 40 表及び(ロ)-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。

(ロ)-第 A. 40 表 バスケットの応力計算条件及び計算結果

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

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

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

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

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

項目	バスケット プレートの タイプ	座屈長さ : l_k (mm)	設計降伏点の 1. 2 倍 の値又は設計引張強 さの 0. 7 倍の値のい ずれか小さい方の値 : F (MPa)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	許容圧縮 応力 : f_c (MPa)	余裕率 (-)
数値	A			40	66	0.65
	B			40	66	0.65

A. 6. 1. 2 水平落下

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

1. 容器本体

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

(1) 解析モデル

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

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

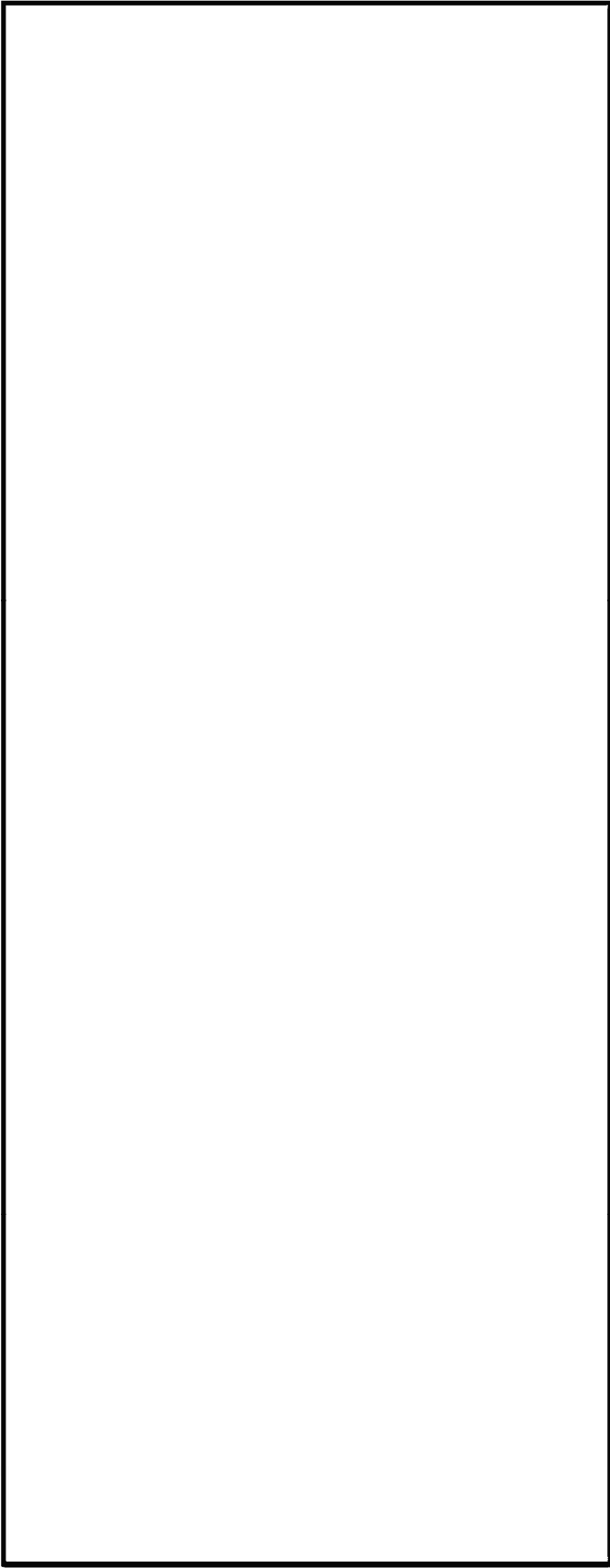
水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

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

b. 境界条件

上・下部緩衝体を取り付く面 (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} : 一次蓋間圧力 (0.31 MPa G)

P_{im} : 二次蓋間圧力 (0.30 MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部 (外筒側面) 圧力 (MPa G)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部 (端板面) 圧力 (MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

F_{iw} : 内部収納物等 (バスケット、燃料集合体) の慣性力

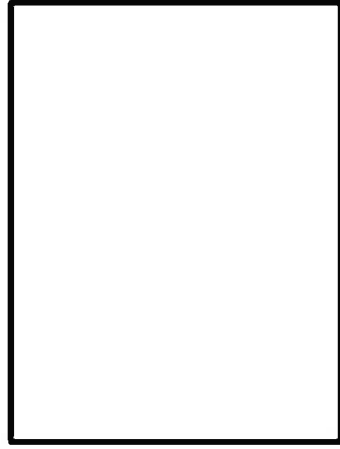
F_{ur} : 上部緩衝体反力

F_{br} : 下部緩衝体反力

$P_{b,i}$: 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

$P_{b,ii}$: 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

$P_{b,iii}$: 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(3) 解析結果

水平落下時の主要な位置（(p)-第 A. 30 図参照）に対する一次応力の評価結果を (p)-第 A. 42 表に示す。表に示すように、すべての評価位置において A. 1.2 に示す解析基準値を満足する。

また、三次蓋とキャスク本体の Oリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.35 mm であり、Oリングの初期締め付け代 mm より小さく、密封性が損なわれることはない。

(□)-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 (℃)	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	27		377	12.9
	外		39	8.66			
	④	P_L	—	59		377	5.38
三次蓋	⑤	P_m	—	63		270	3.28
		P_L+P_b	内	98		406	3.14
	外		82	3.95			
⑥	P_L	—	78	406		4.20	
胴	⑦	P_L	—	176		377	1.14
	⑧	P_m	—	76		251	2.30
		P_L+P_b	内	74		377	4.09
	外		106	2.55			
	⑨-1	P_L	—	78		377	3.83
	⑨-2	P_L	—	114			2.30
胴(底板)	⑩	P_m	—	35	251	6.18	
		P_L+P_b	内	36	377	9.47	
	外		50	6.54			
⑪	P_L	—	62	377	5.08		
外筒	⑫	引張	—	96	283	1.94	
		圧縮	—	68	283	3.16	
		せん断	—	44	163	2.70	
		曲げ	—	65	283	3.35	
	⑬	引張	—	136	283	1.08	
		圧縮	—	64	283	3.42	
		せん断	—	6	163	26.1	
		曲げ	—	15	283	17.8	
	⑭	引張	—	33	283	7.57	
		圧縮	—	58	283	3.87	
		せん断	—	58	163	1.81	
		曲げ	—	144	283	0.96	

(注1) (□)-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。

(p)-第A.42表 9 m水平落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

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

(注1) (p)-第A.30図参照

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

2. バスケット

水平落下時にバスケットに生じる応力はA. 5. 3. 2と同様に求める。ここで、水平落下時の衝撃加速度には加速度割増係数として $1.2^{17)}$ を衝撃加速度(850 m/s²)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 : W_f (kg)	領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数 : N_f (体)	領域Ⅰのバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 ^(注1) : W_I (kg)	領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 ^(注2) : W_{II} (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_{II} (m/s ²)
数値					1020

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

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

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

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

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

バスケットプレートの質量 : (kg)
 中性子吸収材の質量 : (kg)

(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						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 : $1.2 S_m$ (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)	ボルトの枚 : 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(□)-第A.48表に示す。

(□)-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(□)-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(□)-第 A. 49 表に示す。

(□)-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(□)-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。

(□)-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	□ (注 1)	□ (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、(□)-第 A. 2 図及び(□)-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、 $S = \square$ 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(□)-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。

(□)-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	□ (注 1)	□ (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(□)-第 A. 52 表に示す。胴が貫通されることはない。

(□)-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	□	□ (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、
 $S = \square \text{ MPa}$ 。

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 (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

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 ((p)-第 B. 12 図参照)、胴内圧 (0. 24 MPa G)、一二次蓋間圧力 (0. 35 MPa G)、二三次蓋間圧力 (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

(p)-第 A. 43 図に示すように、底部の 1 箇所の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)

(p) 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°C ～ 38°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°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°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、三次蓋ボルトにゆり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、ゆり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。

(p)-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 (℃)	解析 基準値 (MPa) ^(注3)	余裕率 (MS)
二次蓋	③	P_m	—	1	[]	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) (p)-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。

(p)-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) (p)-第 A. 30 図参照

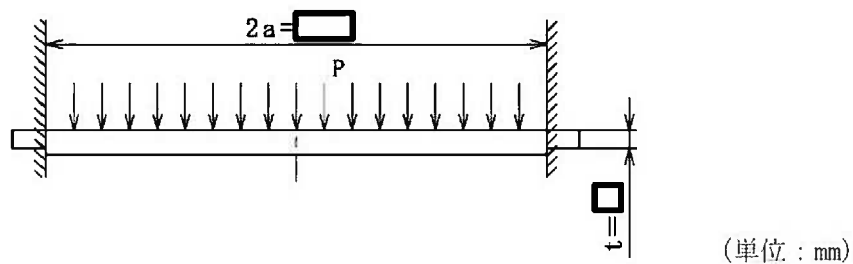
(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力(注3) 断面⑮、⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

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 (p)-第 A.44 図に示す。



(p)-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 (p)-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。

(p)-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	<input type="text"/>	0.251325	<input type="text"/>	39	<input type="text"/>	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 (p)-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。

(p)-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)	$1.5f_{t1}$	218	4	53.5
下部端板 (圧縮)	$1.5f_{c1}$	218	1	217
下部端板 (せん断)	$1.5f_{s1}$	126	9	13.0
下部端板 (曲げ)	$1.5f_{b1}$	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 ($\sigma_m + \sigma_b$)	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 ($\sigma_m + \sigma_b$)	S_y	848	219	2.87

(a)-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

(a)-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 _c)	2/3S _u	85	37	1.29
バスケットプレート 横板 (σ _b)	2/3α 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

(a)-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 (v)-第 A.59 表に示す。胴の耐圧強度は十分である。

(v)-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、 \square °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) \square であり、 $1.5P_{a1} = \square$ MPa、 $1.5P_{a2} = \square$ となるため、 \square 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)

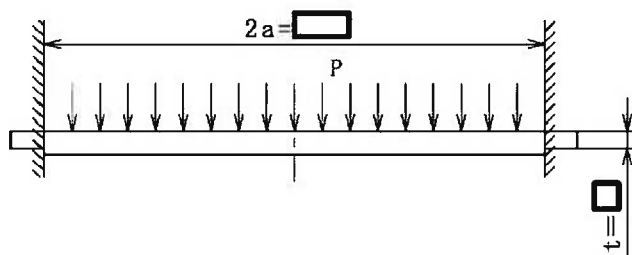
計算条件と計算結果を(□)-第 A. 60 表に示す。胴 (底板) は、外圧に対して十分な強度を有する。

(□)-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. 外圧に対する三次蓋の強度

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。

(a)-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、(p)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

(p)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(p)-第 A.63 表のようにまとめられる。本輸送物は、(p)-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

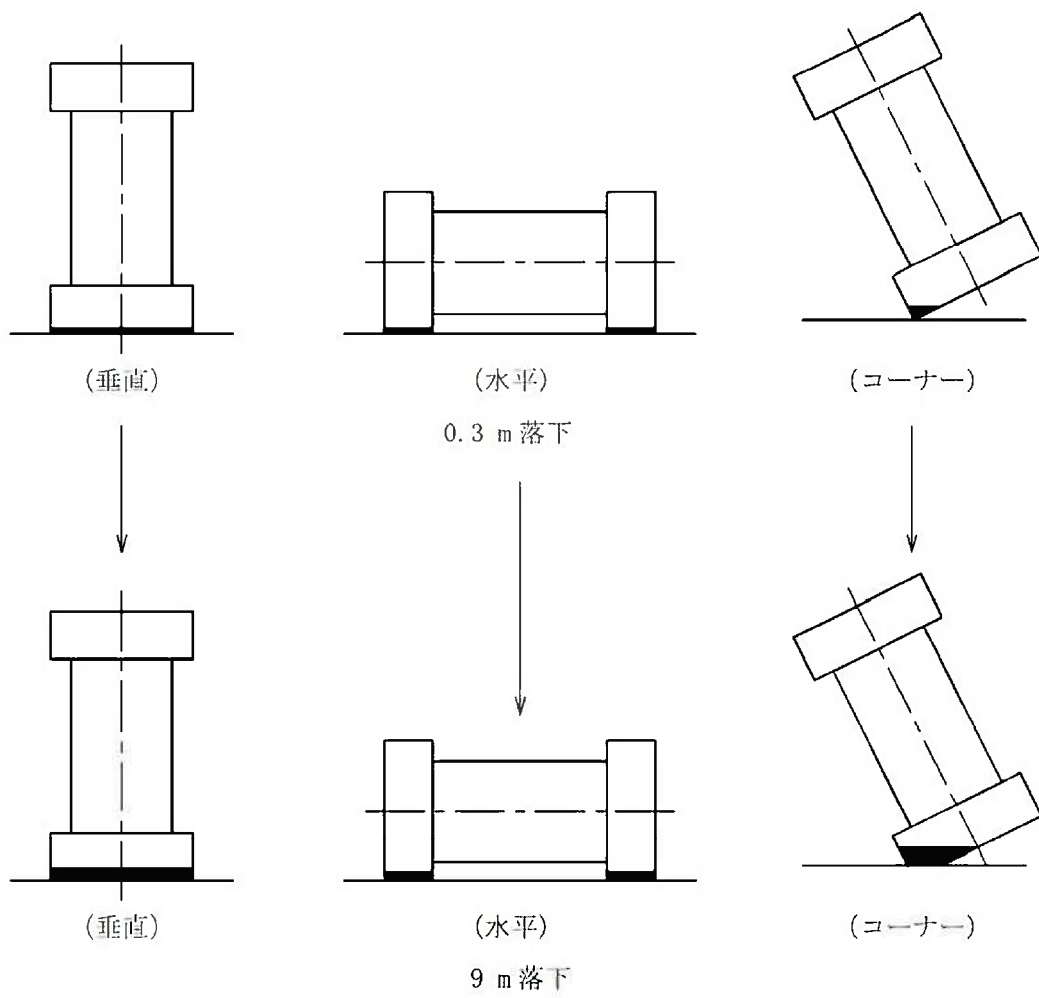
本試験条件における輸送物の損傷状態は(ρ)-第 A. 63 表に示すとおりである。

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。



(□)-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 (ロ)-第 A. 65 表に示す。

(ロ)-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 (ロ)-第 A. 66 表に示すとおりである。

(ロ)-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 (ロ)-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）

(p)-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

(p)-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。

(p)-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℃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

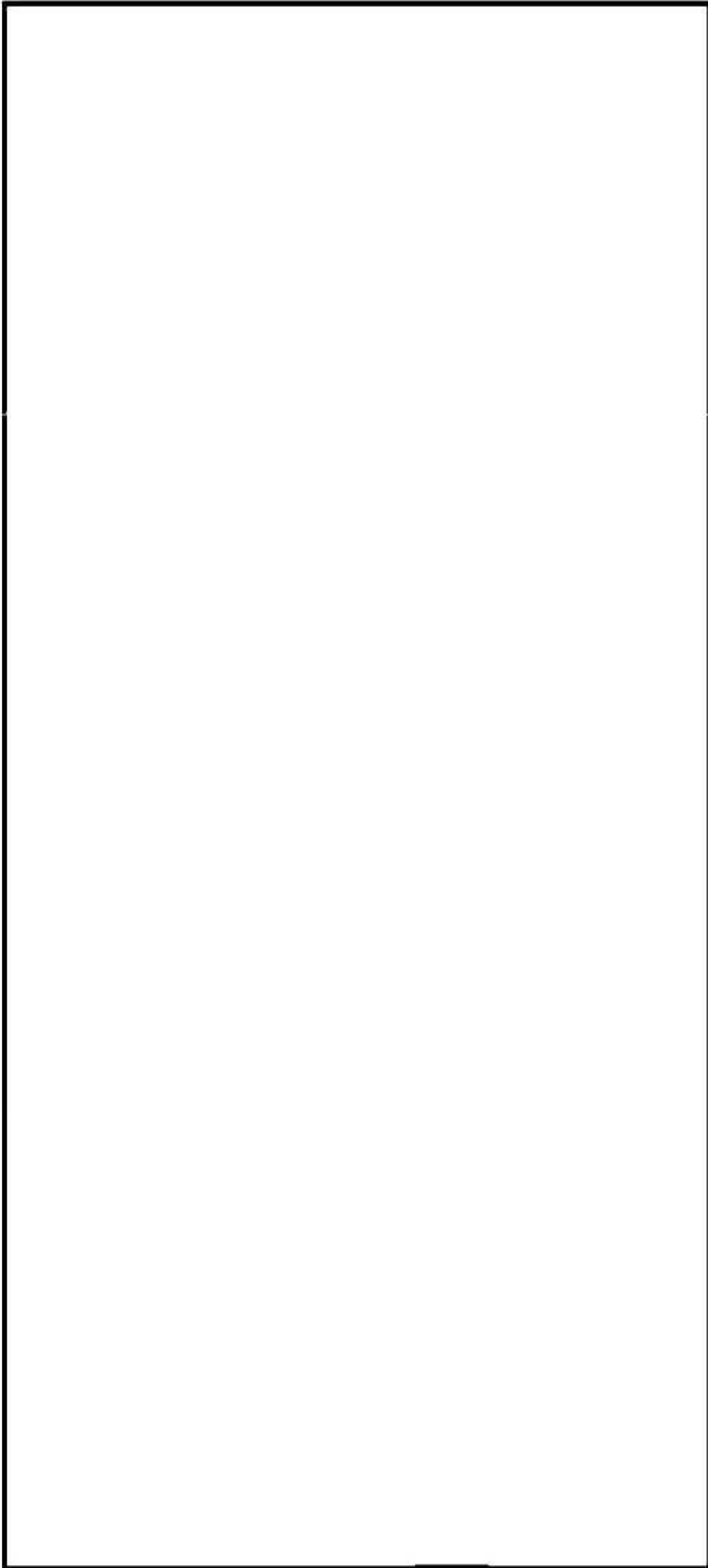
落下試験モデルは、BWR 燃料集合体を 69 体収納する設計である。本体は、胴（鍛造材）、中性子遮蔽材及び外筒（炭素鋼）から構成され、胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。

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。

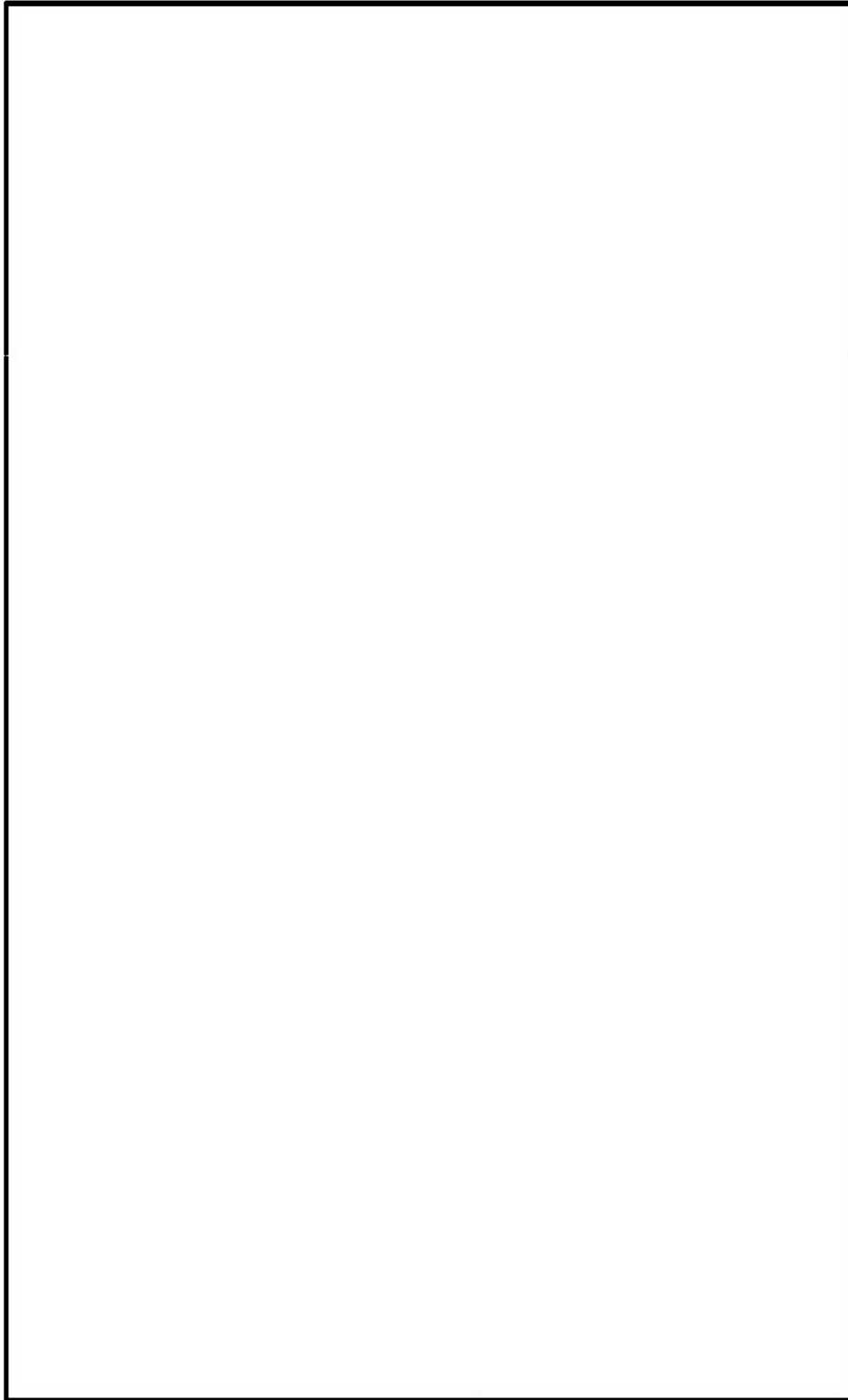
バスケットはアルミニウム合金の角パイプからなる構造とし、キャビティ内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造としている。落下試験時には、独立した 69 個のバスケットセルに燃料集合体を模擬した重量体を挿入した。

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。

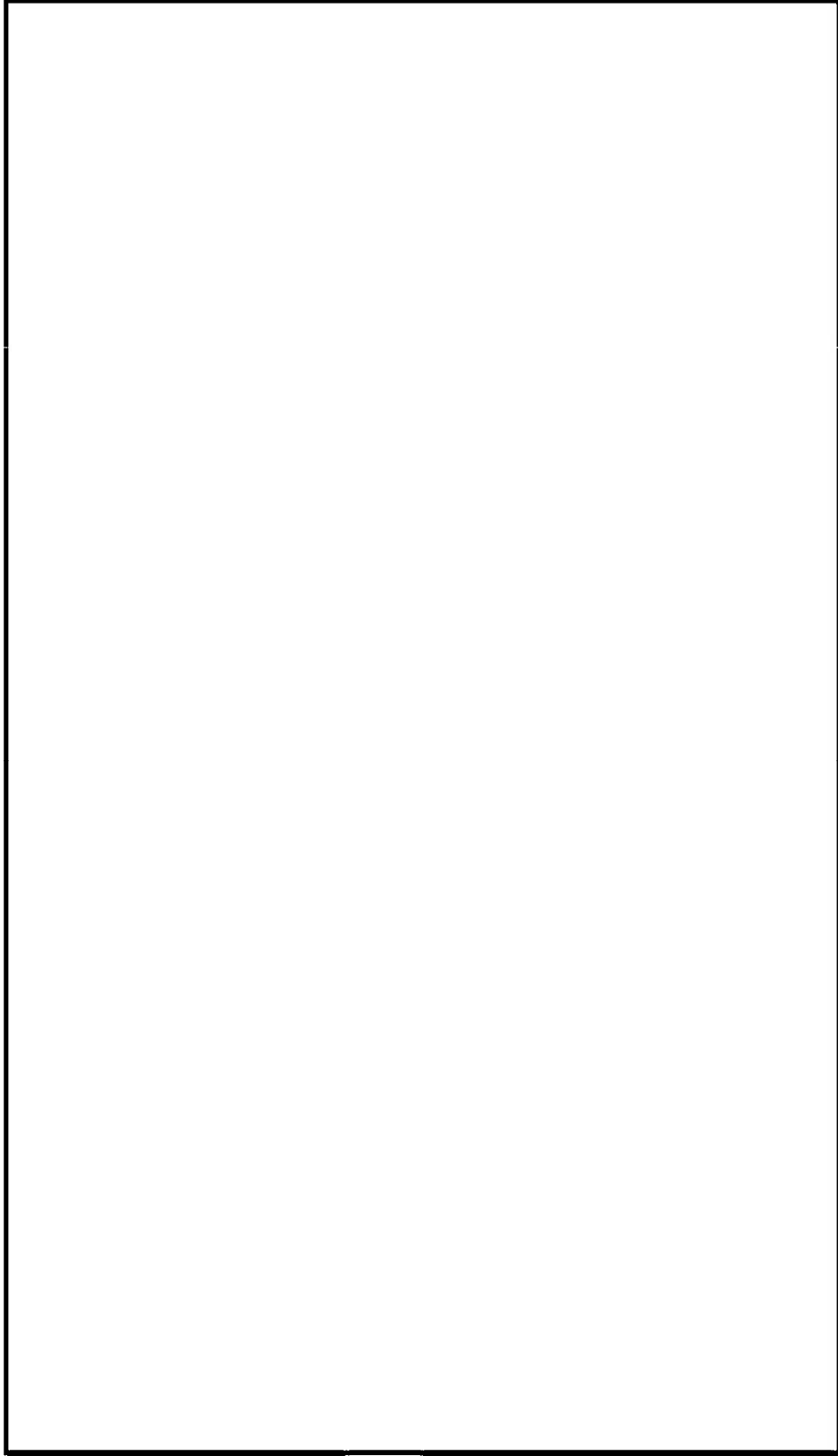
落下試験モデルの概要図を (a)-第 A. 47 図～(a)-第 A. 51 図に示す。



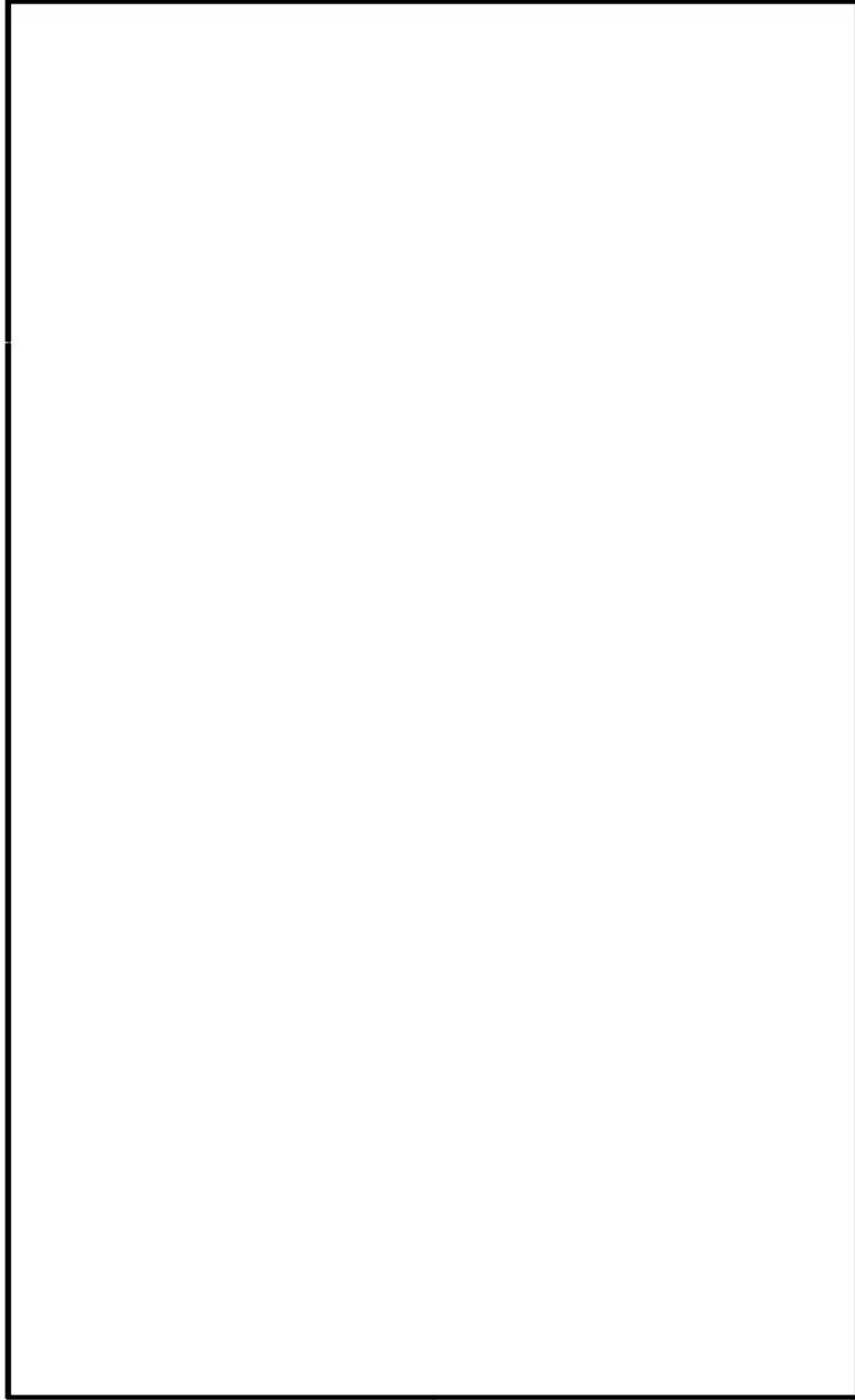
(ロ)-第A.47 図 落下試験モデル全体図



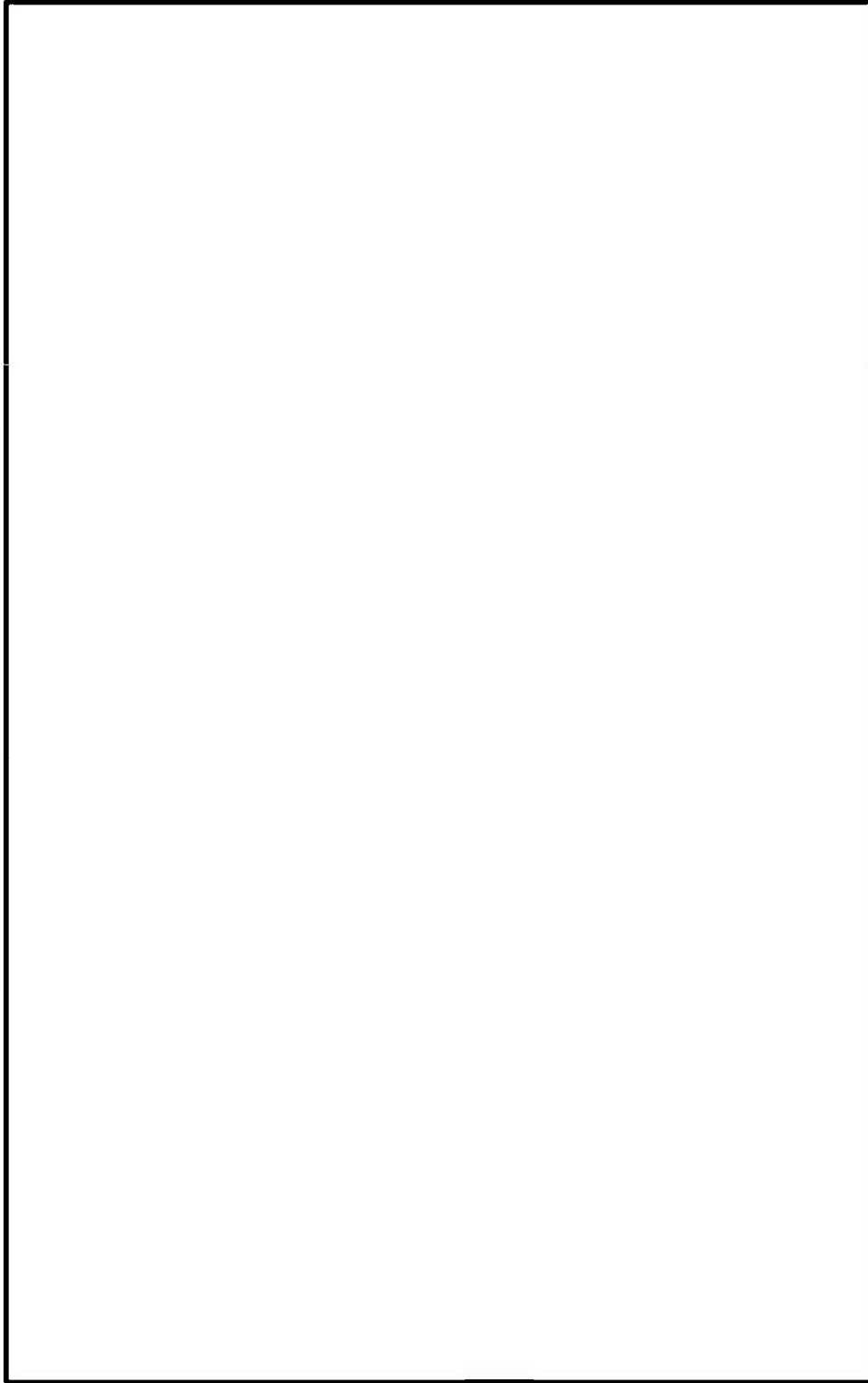
(ロ)-第 A. 48 図 一次蓋 (落下試験モデル)



(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)



(ア) 第 A. 51 図 下部緩衝体 (落下試験モデル)

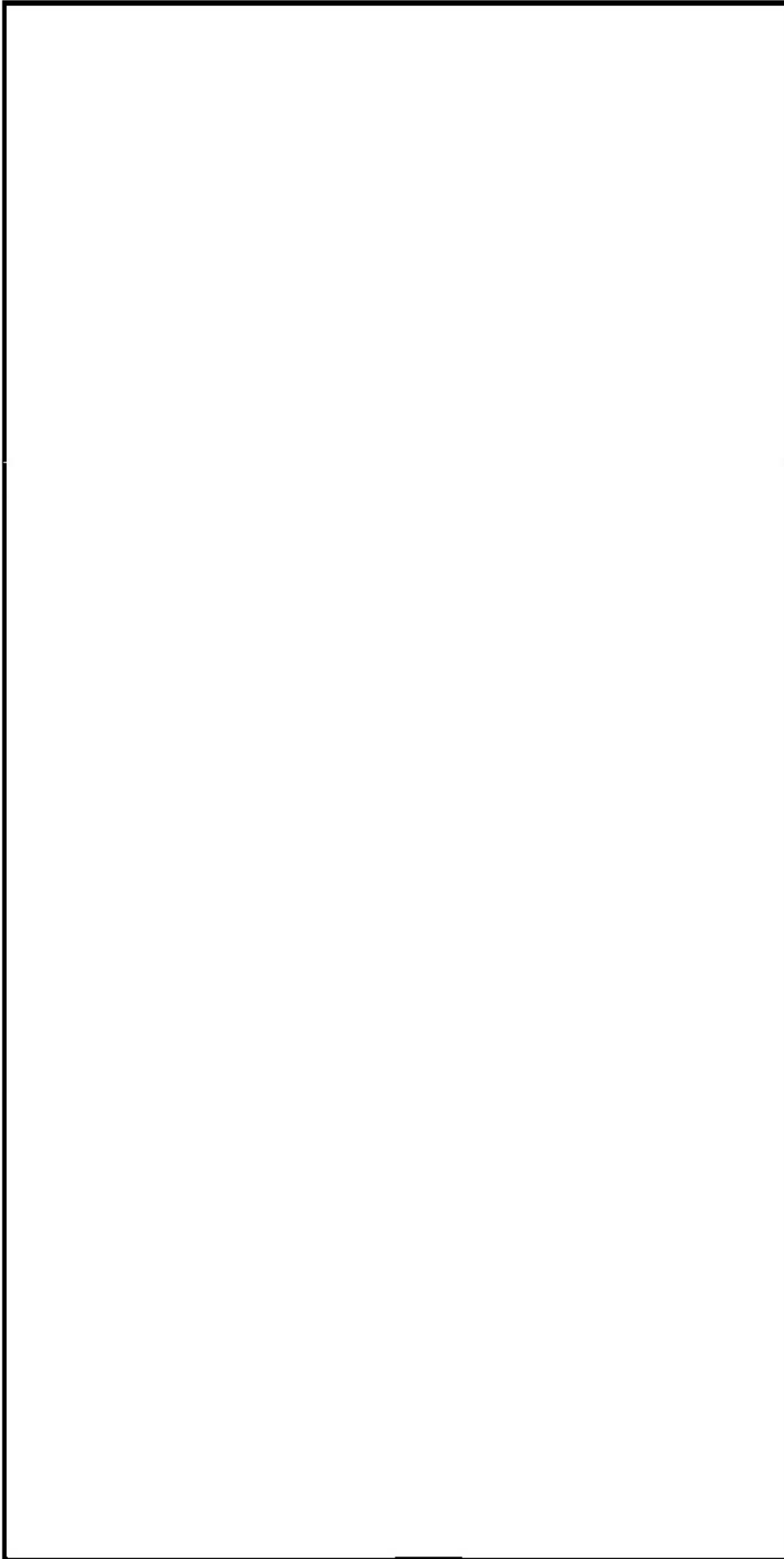
(2) 測定項目及び測定方法

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 加速度計及びひび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 (5×10^{-4} Pa m³/s [= 5×10^{-3} ref cm³/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。

(□)-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	

(□)-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

(□)-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。

(ロ)-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。

(ロ)-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}

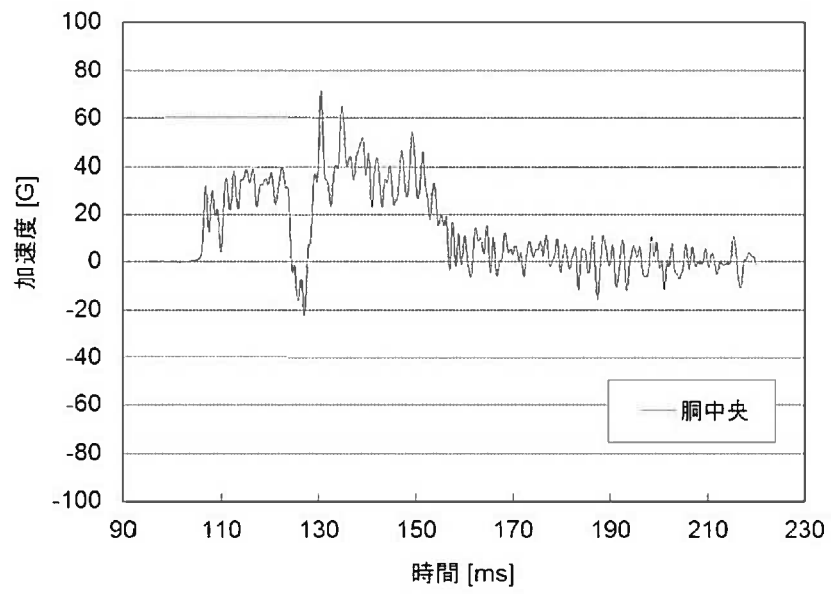


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(p)-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



(a)-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

(p)-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

(p)-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

(p)-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。(p)-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)

(p)-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)

(p)-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)

(p)-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 [$=5 \times 10^{-3}$ ref cm^3/s]) を満足した。

(ロ)-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	

(ロ)-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

(ロ)-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}

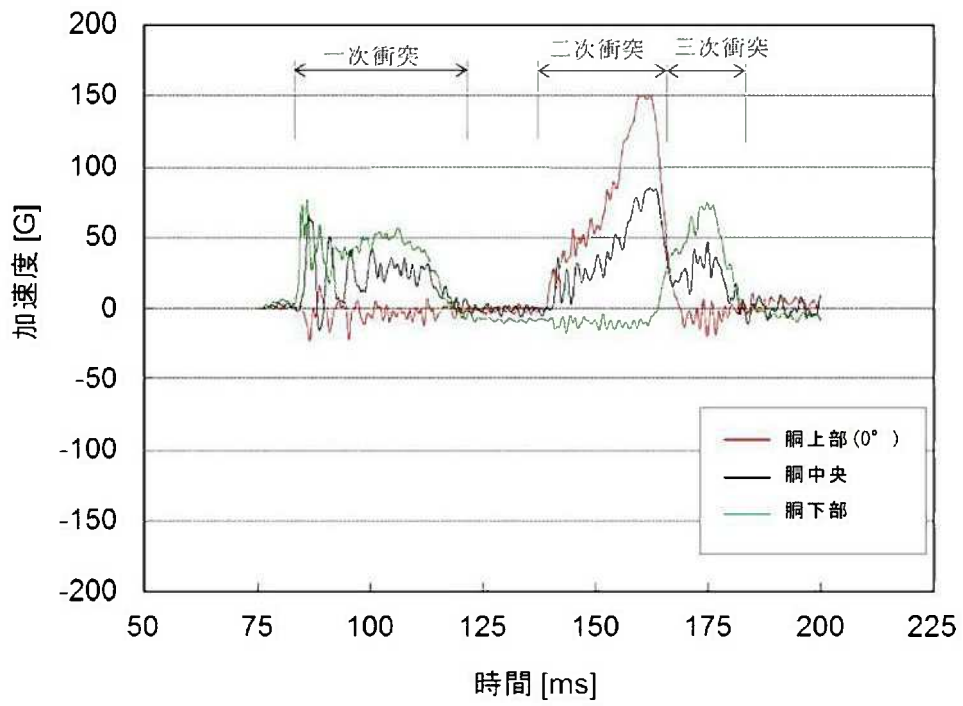


(1) 落下試験前



(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



(p)-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

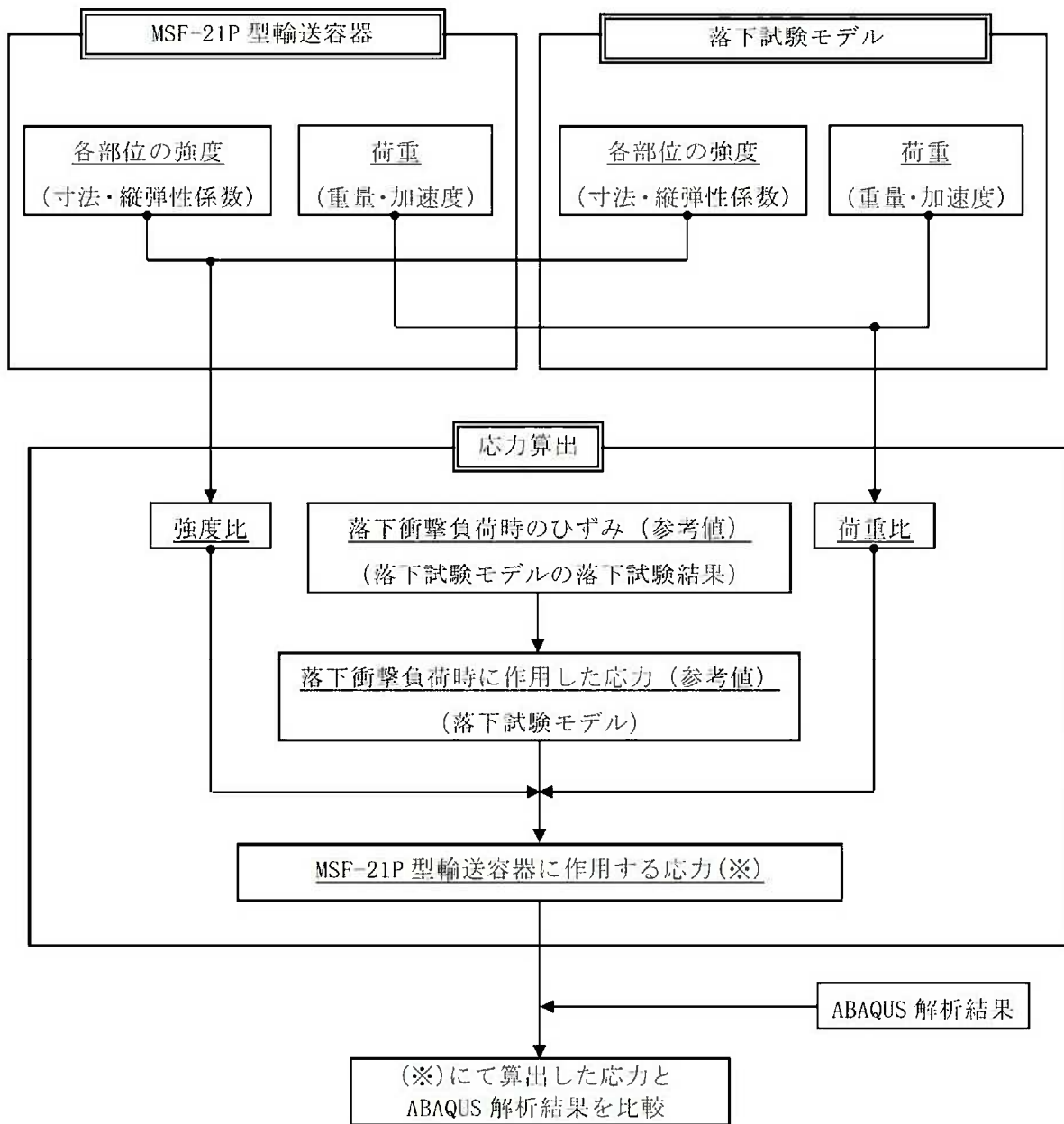
部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 (注 1) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	46	178	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	56	50	848

(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(甲)-第 A.85 表に示す。また、(甲)-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。

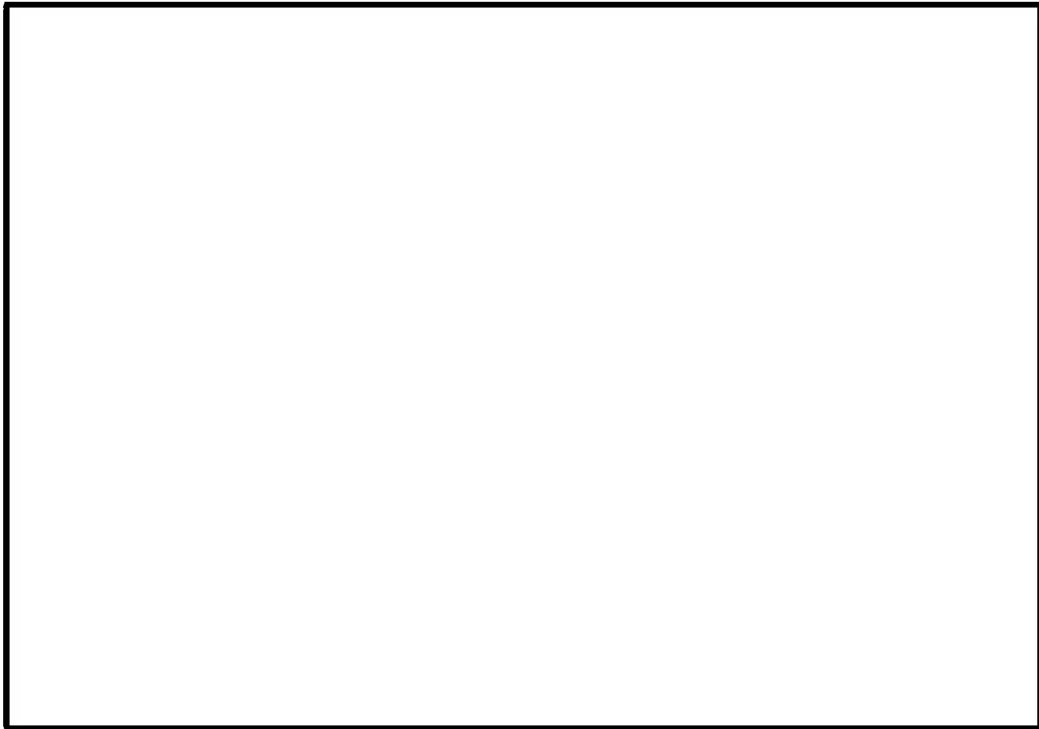
(1) 評価手順

密封性能評価方法の手順を以下に示す。(□-第 A. 59 図参照)

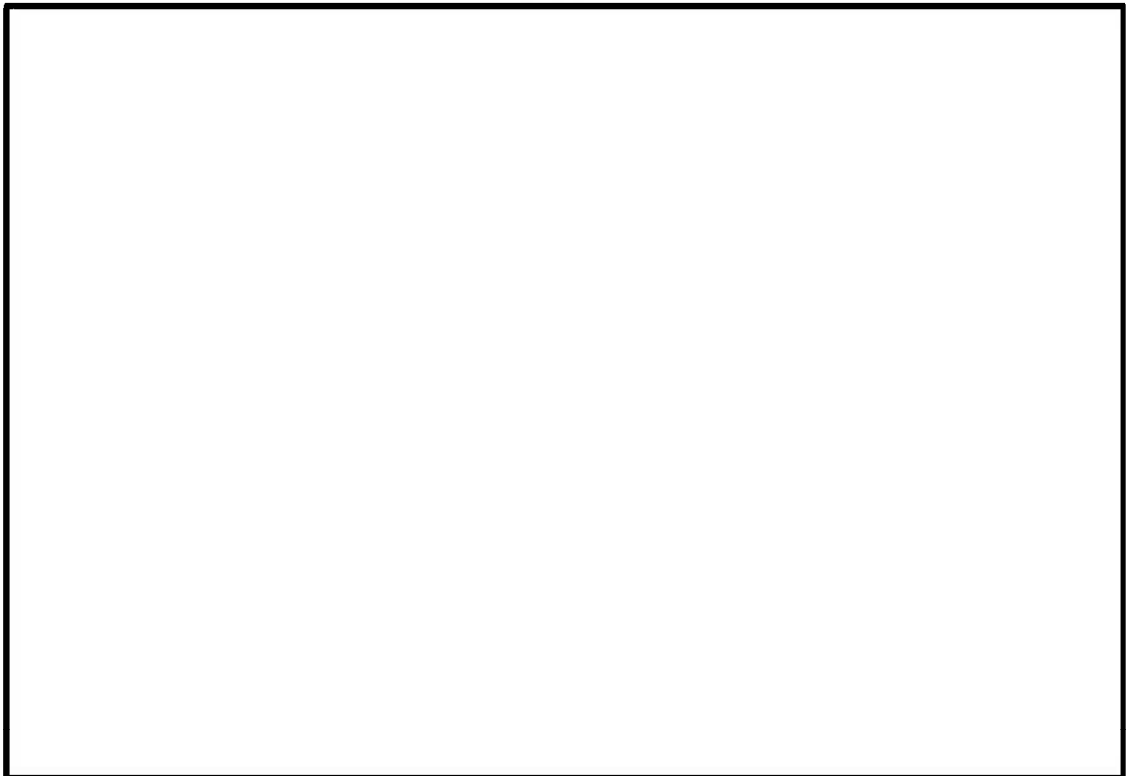
- a. MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位(胴フランジ、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、圧縮、引張、オーバル変形)の剛性に影響する寸法を抽出する。
- b. 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、設計温度、縦弾性係数)を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の剛性比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件(キャスク重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、MSF-21P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- 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

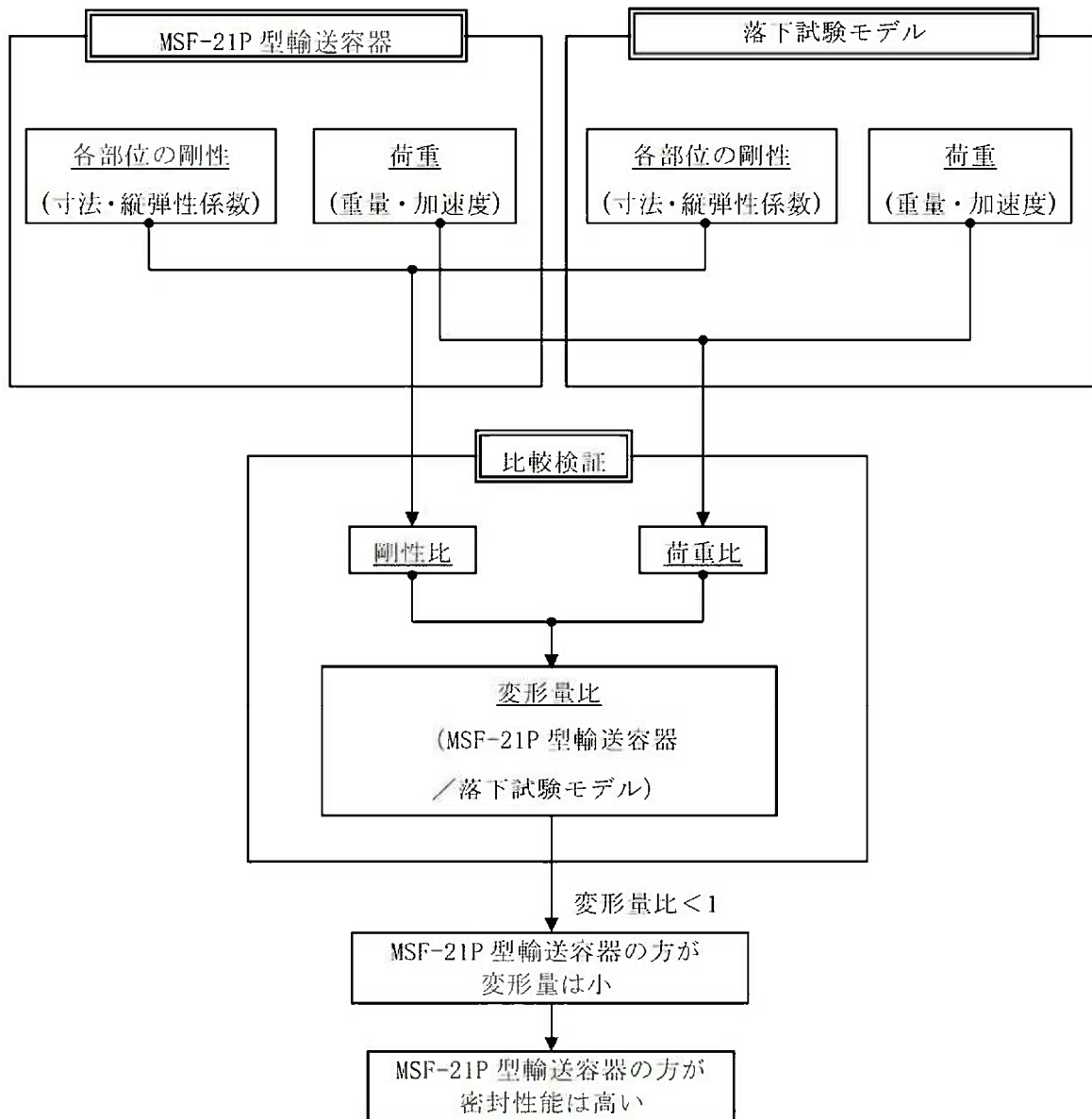
部位	落下試験等の結果	蓋密封部設計に反映した項目
蓋密封部	<p>(1) 落下衝撃荷重が胴フランジ及び蓋側面に作用し、胴フランジ、二次蓋及び二次蓋ボルトが曲げ及び引張変形し、蓋の横ずれ及び口開きが生じた。</p> <p>(2) 上記(1)により、落下試験では、二次蓋(最外蓋)の 9.3m 落下試験後の漏えい率は基準値を満足したものの、試験前より 2~3 桁程度増加した。</p>	<p>以下に示す反映により、落下試験モデルよりも密封性能を向上させる。</p> <p>(1) 胴フランジ、一次蓋及び二次蓋の剛性を落下試験モデルよりも高めることで蓋密封部の変形量を低減させる。</p> <p>(2) 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



(ア)-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



(ロ)-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(□)-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。

(□)-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。

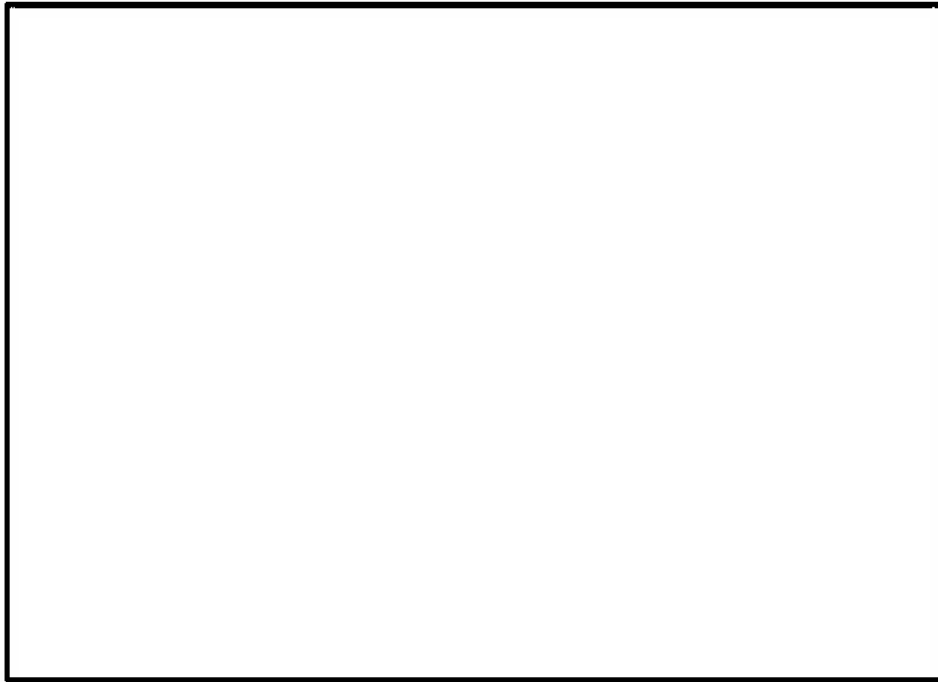
1. -20°C における木材強度の上昇割合

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。

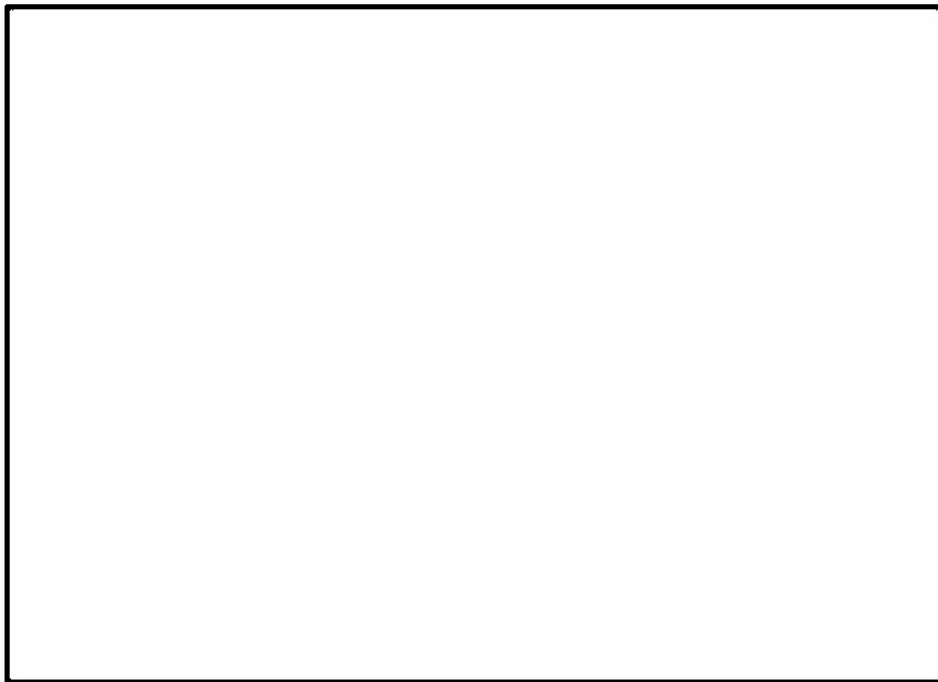
その関係式から、木材の温度を本輸送物の周囲温度 -20°C とした場合の温度係数を求めた。木材低温時に木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数を(□)-第 A. 87 表に示す。

(□)-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 ）

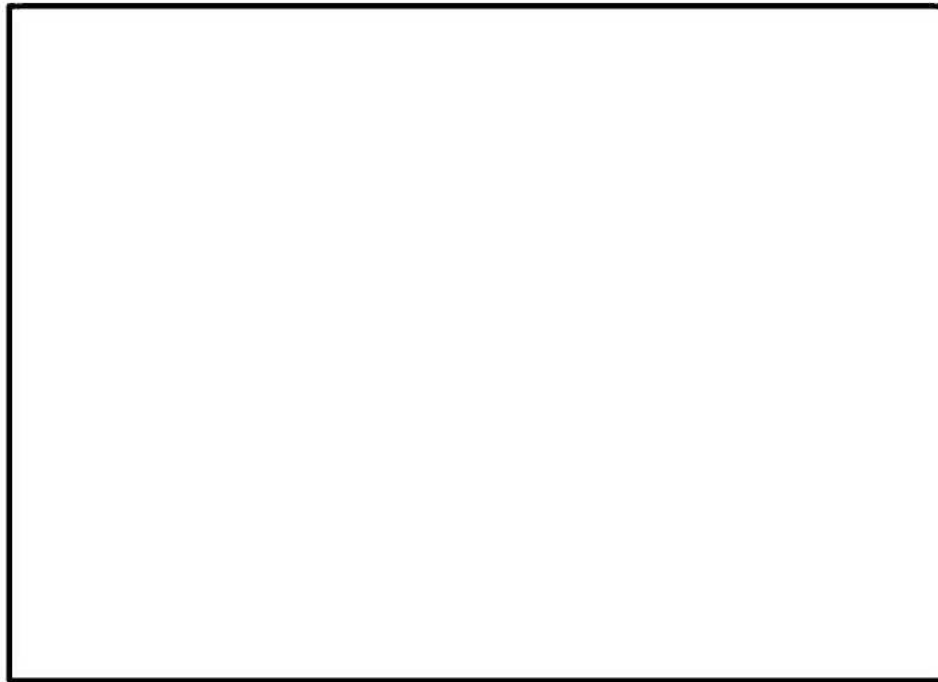
木材種	温度係数
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>	



(a)-第 A. 60 図 温度と温度係数の関係 ()



(a)-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℃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。

(p)-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、(p)-第 A. 19 表に記載する値。

(p)-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、(p)-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。

(ρ)-第 A. 88 表及び(ρ)-第 A. 89 表に示すとおり、木材低温時の衝撃加速度は、(ρ)-第 A. 19 表及び(ρ)-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。

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

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

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_r : 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(ρ)-第 A. 90 表及び(ρ)-第 A. 91 表に示す。(ρ)-第 A. 90 表及び(ρ)-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。

(ロ)-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_z	58 MPa	206 MPa	35 MPa	216 MPa	50 MPa	554 MPa
σ_r	-	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。

(ロ)-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_z	93 MPa	623 MPa	87 MPa	443 MPa	165 MPa	819 MPa	241 MPa
σ_r	-	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 (a)-第 A. 92 表に示すものであること。

(2) 化学成分

化学成分は (a)-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 (a)-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 (a)-第 A. 95 表の規定によること。

(5) 設計降伏点

設計降伏点は(p)-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(p)-第 A. 97 表の規定によること。

(7) 縦弾性係数

縦弾性係数は(p)-第 A. 98 表の規定によること。

(8) 熱膨張係数

熱膨張係数は(p)-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、(p)-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、(p)-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、(p)-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(p)-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) ピ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(p)-第 A. 100 表を満足することを確認すること。
- (7) 本材料は、(p)-第 A. 63 図の製造フローの各段階において、(p)-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。

(□)-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

(□)-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

(a)-第 A. 94 表 材料の各温度における設計応力強さ S_d (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。

(b)-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	

(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。

(c)-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。

(d)-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。

(㉔)-第 A. 98 表 材料の各温度における縦弾性係数^(注1)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	73900	73300	72800	72100	71400	70600	69800	68900	67900	66900	65800	64600

(注1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(㉔)-第 A. 99 表 材料の各温度における熱膨張係数^(注1)単位： $\times 10^{-6}$ mm/mm \cdot °C

記号	区分 (注2)	温 度 (°C)											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	A	22.75	23.52	24.02	24.42	24.76	25.05	25.35	25.68	26.06	26.54	27.14	27.91
	B	22.61	23.14	23.48	23.76	23.99	24.17	24.33	24.48	24.63	24.79	24.99	25.24

(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) 区分 A は瞬時熱膨張係数、区分 B は常温から当該温度までの平均熱膨張係数を表す。

(p)-第 A. 100 表 機械的性質 (注 1)

記号	引張試験 (試験温度：常温)			シャルピー衝撃試験 (注 2) (試験温度：-40 °C)
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
MB-A3004	185 以上	85 以上	15 以上	41 以上

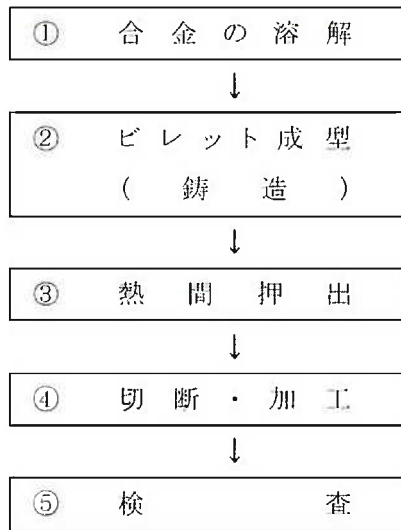
(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

(p)-第 A. 101 表 管理程度表



製造工程 (注 1)	管理項目		材料保証 (規定)	製造管理 (参考)
①合金の溶解	材料特性 (初期材)	化学成分(溶湯)	○	—
⑤検査		引張強度特性	—	○
		シャルピー 衝撃特性	—	○
		組織観察	—	○
③熱間押出	製造条件	押出比	○	—
		押出条件	—	○
		押出冷却条件	—	○
		整直条件	—	○
		質別	○	—

(注 1) 製造工程は (p)-第 A. 63 図の製造フローに対応する。



(㊦)-第 A. 63 図 製造フロー

A.10.6 参考文献

- 1) (一社)日本機械学会, 「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」, (2007).
- 2) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2012)」, (2012).
- 3) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 4) “Proving Test on the Reliability for PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan”, Proceedings of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20, (1988).
- 5) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 (AESJ-SC-F006:2013)」, (2014).
- 6) 
- 7) 
- 8) 原燃輸送株式会社, 「高性能使用済燃料輸送容器の安全性に関する技術調査 (PWR) H5 年度上半期 (最終報告書)」, (1993).
- 9) 木材工業ハンドブック編集委員会, 「木材工業ハンドブック, 改訂3版」, (1982).
- 10) 産業技術センター, 「複合材料技術集成」(1976).
- 11) 機械設計便覧編集委員会, 「機械設計便覧 (第3版)」, (1992).
- 12) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 3”, (2015).
- 13) 西田正孝, 「応力集中 増補版」, (1973).
- 14) 「クレーン構造規格」, 平成7年労働省告示第134号, (1995).
- 15) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 新版」, (1984).
- 16) 幾島, 浅田, 「放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発 (1) 緩衝体付き輸送容器衝突計算コード CRUSH」, 日本原子力学会誌 Vol. 33 No. 4, (1991).
- 17) (独)原子力安全基盤機構, 「金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書 1/3 最終報告」, (2004).
- 18) International Atomic Energy Agency, “Spent Fuel Performance Assessment and Research, Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR-III) 2009-2014”, (2015).
- 19) (独)原子力安全基盤機構, 「中間貯蔵施設健全性評価手法等調査報告書最終報告」, (2005).

B. 熱解析

B.1 概要

1. 輸送物の熱設計

本輸送物の熱放散システムは次のとおりであり、自然冷却にて使用済燃料の崩壊熱を除熱している。

- ・ 胴内に収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、主に胴内に充填されたヘリウムの熱伝導と放射によりバスケットに伝えられる。
- ・ バスケットに伝えられた熱は主に熱伝導によってバスケット外面に伝わり、ヘリウムの熱伝導と放射により胴内面に伝えられる。
- ・ 胴内面に伝えられた熱は、熱伝導によって胴外面に伝えられる。
- ・ 胴外面に伝えられた熱は、主に胴と外筒の間に設けられた銅製の伝熱フィンの熱伝導によって外筒に伝えられる。
- ・ 外筒に伝えられた熱は、放射と空気の自然対流により大気に放散される。

(ロ)章 B 熱解析では、一般の試験条件における輸送物各部の温度を求め、構成部品の温度が使用可能温度を超えないことを示すとともに、他の解析への条件を示す。また、一般の試験条件において人の近づきうる表面の最高温度が 85 °C 以下であることを示す。

さらに、特別の試験条件における輸送物各部の温度を求め、構成部品の健全性に与える影響を示すとともに、他の解析への条件を示す。

上記に加え、一般及び特別の試験条件における輸送物各部の圧力を求め、他の解析への条件を示す。

2. 熱解析の条件

熱解析は、(ロ)-第 B.1 表に示す条件で行う。

輸送物の最大崩壊熱量は、(イ)-第 A.1 表に示したように 14×14 燃料を収納する場合に比べ 17×17 燃料を収納する場合の方が大きいため、熱解析では 17×17 燃料を収納する場合を代表とする。17×17 燃料を収納する場合の最大崩壊熱量は、13.9 kW 以下であるが、熱解析ではこれに余裕をみた設計崩壊熱量とする。

(ロ) 第B.1表 熱解析の主な条件及び方法

項目	条件	一般の試験条件				特別の試験条件		
		最高温度評価条件	人の近づきうる表面の最高温度評価条件	最低温度評価条件	火災前	火災時	火災後	
設計崩壊熱量	17×17 燃料	15.8 kW	15.8 kW	0 kW	15.8 kW	15.8 kW	15.8 kW	
環境条件	周囲温度	静止空気 38 °C	静止空気 38 °C	静止空気 -20 °C	静止空気 38 °C	火災 30 分間 800 °C	静止空気 38 °C	
	太陽熱放射	あり	なし	なし	あり	あり	あり	
	周囲吸収率	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9 (注)	1.0	
計算モデル	輸送物	三次元 90 ° 対称全体モデル (燃料領域は均質化領域としてモデル化)						
	燃料集合体	燃料集合体モデル						
温度分布計算プログラム		ABAQUS ¹⁾ コード						

(注) 火災の放射率を示す。

B.2 材料の熱的性質

熱解析で用いた材料の熱的性質を(□)-第 B.2 表、(□)-第 B.3 表及び(□)-第 B.4 表に示す。

(□)-第 B.2 表 材料の熱的性質 (固体) (1/3)

材料	密度 (kg/m ³)	放射率 (-)	温度		熱伝導率 (W/(m・K))	比熱 (kJ/(kg・K))
			(K)	(°C)		
ステンレス鋼 (□) ²⁾	7.92×10 ³	0.15	300	26.85	16.0	0.499
			400	126.85	16.5	0.511
			600	326.85	19.0	0.556
			800	526.85	22.5	0.620
			1000	726.85	25.7	0.644
析出硬化系 ステンレス鋼 (SUS630) ³⁾	7.75×10 ³	-	293.15	20	17.3	0.465
			398.15	125	18.9	0.501
			498.15	225	20.7	0.547
			598.15	325	22.2	0.592
			698.15	425	23.3	0.649
			798.15	525	23.9	0.743
			898.15	625	24.5	0.914
			973.15	700	25.1	0.841
炭素鋼 (□) ²⁾	7.85×10 ³	-	300	26.85	43.0	0.465
			500	226.85	38.6	0.528
			800	526.85	27.7	0.622
炭素鋼 (□) ²⁾	7.85×10 ³	-	300	26.85	43.0	0.465
			500	226.85	38.6	0.528
			800	526.85	27.7	0.622
ニッケル クロム モリブデン鋼 (□) ³⁾	7.75×10 ³	-	293.15	20	36.3	0.445
			398.15	125	37.0	0.492
			498.15	225	37.2	0.529
			598.15	325	36.5	0.569
			698.15	425	35.0	0.614
			798.15	525	33.3	0.675
			898.15	625	31.5	0.774
			973.15	700	30.1	0.923
中性子吸収材 ⁴⁾	□	0.20	293.15	20	□	□
			398.15	125		
			473.15	200		
アルミニウム 合金 ³⁾	2.72×10 ³	0.055 (酸化面:0.33)	293.15	20	162.1	0.888
			398.15	125	170.1	0.936
			473.15	200	173.6	0.966

(ロ)-第B.2表 材料の熱的性質 (固体) (2/3)

材料	密度 (kg/m ³)	放射率 (-)	温度		熱伝導率 (W/(m・K))	比熱 (kJ/(kg・K))
			(K)	(°C)		
二酸化ウラン 2), 5)	[] (注1)	-	300	26.85	2.00 (注2)	0.237
			500	226.85		0.286
			800	526.85		0.300
			1300	1026.85		0.322
			1800	1526.85		0.369
ジルカロイ 2), 6)	6.55×10 ³	0.8	273	-0.15	12.4	0.275
			300	26.85	12.7	0.281
			400	126.85	14.0	0.302
			600	326.85	16.5	0.326
			1000	726.85	21.6	0.366
インコネル ²⁾	8.25×10 ³	-	300	26.85	12.0	0.425
銅 ²⁾	8.88×10 ³	-	150	-123.15	428	0.322
			250	-23.15	404	0.376
			300	26.85	398	0.386
			600	326.85	383	0.425
			800	526.85	371	0.447
			1000	726.85	357	0.471
			1200	926.85	342	0.492
中性子遮蔽材 (レジン) ⁷⁾	1.67×10 ³	-	常温		0.645	1.00
[] ⁸⁾	[]	-	300	26.85	[]	[]
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
			1100	826.85		
[] ⁸⁾	[]	-	300	26.85	[]	[]
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
			1100	826.85		

(注1) 文献値に理論密度比を乗じた値

(注2) 照射を考慮した値

(ロ)-第 B. 2 表 材料の熱的性質 (固体) (3/3)

材料	密度 (kg/m ³)	放射率 (-)	温度		熱伝導率 (W/(m・K))	比熱 (kJ/(kg・K))
			(K)	(°C)		
[] ⁸⁾	[]	-	300	26.85	[]	[]
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
			1100	826.85		

(ロ)-第 B. 3 表 材料の熱的性質 (気体)

材料	温度		密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/(m・K))	比熱 ^(注1) (kJ/(kg・K))	動粘性 係数 (mm ² /s)	粘性係数 (μ Pa・s)	プラントル数 (-)
	(K)	(°C)						
ヘリウム ²⁾	200	-73.15	0.16253	0.1150 ^(注2)	3.116	—	15.35	0.693
	300	26.85		0.1527 ^(注2)		—	19.93	0.678
	400	126.85		0.1882 ^(注2)		—	24.29	0.670
	500	226.85		0.2212 ^(注2)		—	28.36	0.666
	600	326.85		0.2523 ^(注2)		—	32.21	0.663
	700	426.85		0.2780 ^(注2)		—	35.89	0.670
	800	526.85		0.3040 ^(注2)		—	39.43	0.670
	1000	726.85		0.3540 ^(注2)		—	46.16	0.680
空気 ²⁾	200	-73.15	1.1763	0.01810	0.7220	7.58	—	0.747
	300	26.85		0.02614	0.7200	15.83	—	0.717
	400	126.85		0.03305	0.7280	26.39	—	0.715
	500	226.85		0.03951	0.7440	38.58	—	0.710
	600	326.85		0.04560	0.7650	52.36	—	0.710
	700	426.85		0.05130	0.7890	67.70	—	0.715
	800	526.85		0.05690	0.8120	84.50	—	0.719
	900	626.85		0.06250	0.8350	102.70	—	0.722
	1000	726.85		0.06720	0.8550	122.10	—	0.732
	1100	826.85		0.07170	0.8730	143.00	—	0.742
キセノン ^{2), 9)}	300	26.85	—	0.00562	0.09502	—	23.30	—
	400	126.85	—	0.00728		—	30.29	—
	500	226.85	—	0.00881		—	36.80	—
	600	326.85	—	0.01025		—	42.81	—

(注1) 文献記載の定圧比熱を定積比熱に換算して求めた値。

(注2) 圧力を考慮しても常圧の値と有意な差がないため、常圧の値を設定している。

(□)-第 B.4 表 材料の熱的性質 (その他)

材料	放射率 ²⁾ (-)	吸収率 ¹⁰⁾ (-)
塗装面	0.8	0.5

B.3 構成要素の仕様

1. 三次蓋 O リング

EPDM

使用可能温度 : $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹¹⁾ /一般の試験条件

: $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹²⁾ /特別の試験条件

2. 一次蓋及び二次蓋金属ガスケット

アルミニウム、ニッケル基合金

使用可能温度 : $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹³⁾ /一般の試験条件

: $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹⁴⁾ /特別の試験条件

3. 中性子遮蔽材

レジン

使用可能温度 : $149\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁷⁾ /一般の試験条件

: $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹⁵⁾ /特別の試験条件

B.4 一般の試験条件

B.4.1 熱解析モデル

B.4.1.1 解析モデル

輸送物の熱解析は、ABAQUS コードを用いた有限要素法により行った。解析に用いるモデル及び解析条件を以下に示す。

1. 解析に用いる各モデル

一般の試験条件における本輸送物の各部位の温度を算出するために、解析モデルとして以下の2種類のモデルを適用した。

- ・三次元 90° 対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）
- ・燃料集合体モデル

各解析モデルにおける温度算出部位は次のとおりである。

全体モデル …………… 上・下部緩衝体表面、胴、外筒、下部端板、一次蓋、二次蓋、三次蓋、一次蓋金属ガスケット、二次蓋金属ガスケット、三次蓋 O リング、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、三次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、バスケット^(注)、伝熱フィン、トラニオン

燃料集合体モデル …… 燃料集合体

(注)バスケットは、アルミニウム合金製のバスケットプレート、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材、アルミニウム合金製のバスケットサポートで構成される。本評価におけるバスケットの最高温度は、これらの構成部材の最高温度とする。

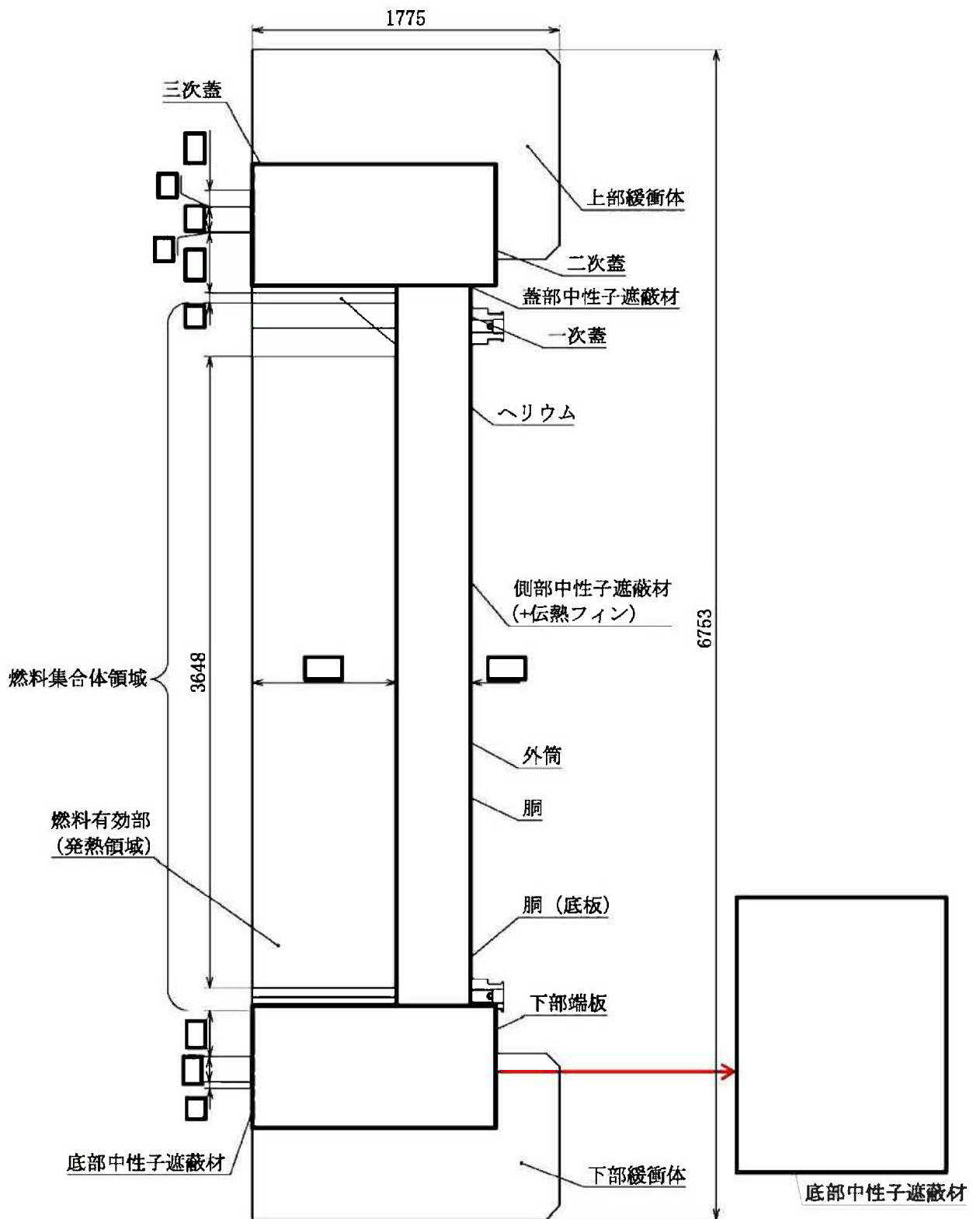
全体モデルでは、バスケット格子の内側の領域（以下「燃料集合体領域」という。）を燃料集合体構成部材（ジルカロイ、二酸化ウラン、ステンレス鋼、インコネル）及び充填気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料集合体領域の平均密度及び軸方向の平均熱伝導率は体積平均値とし、平均比熱は重量平均値とする。また、径方向の平均熱伝導率については、燃料有効部のみ燃料集合体モデルの解析結果を基に設定した等価熱伝導率とし、それ以外の領域においては体積平均値とする。

全体モデルに入力する崩壊熱量は、軸方向の燃焼度分布を考慮する。

燃料集合体の最高温度については、燃料集合体モデルで算出する。燃料集合体モデルでは、燃料棒の領域を構成部材（二酸化ウラン、ジルカロイ）及び封入されていた気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料棒の均質化領域における平均熱伝導率は体積平均値とする。また、制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルについては、燃料棒と同じように均質化領域としてモデル化する。制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルは、燃料棒と同じ形状及び物性値を入力しているが、崩壊熱量は入力しない。

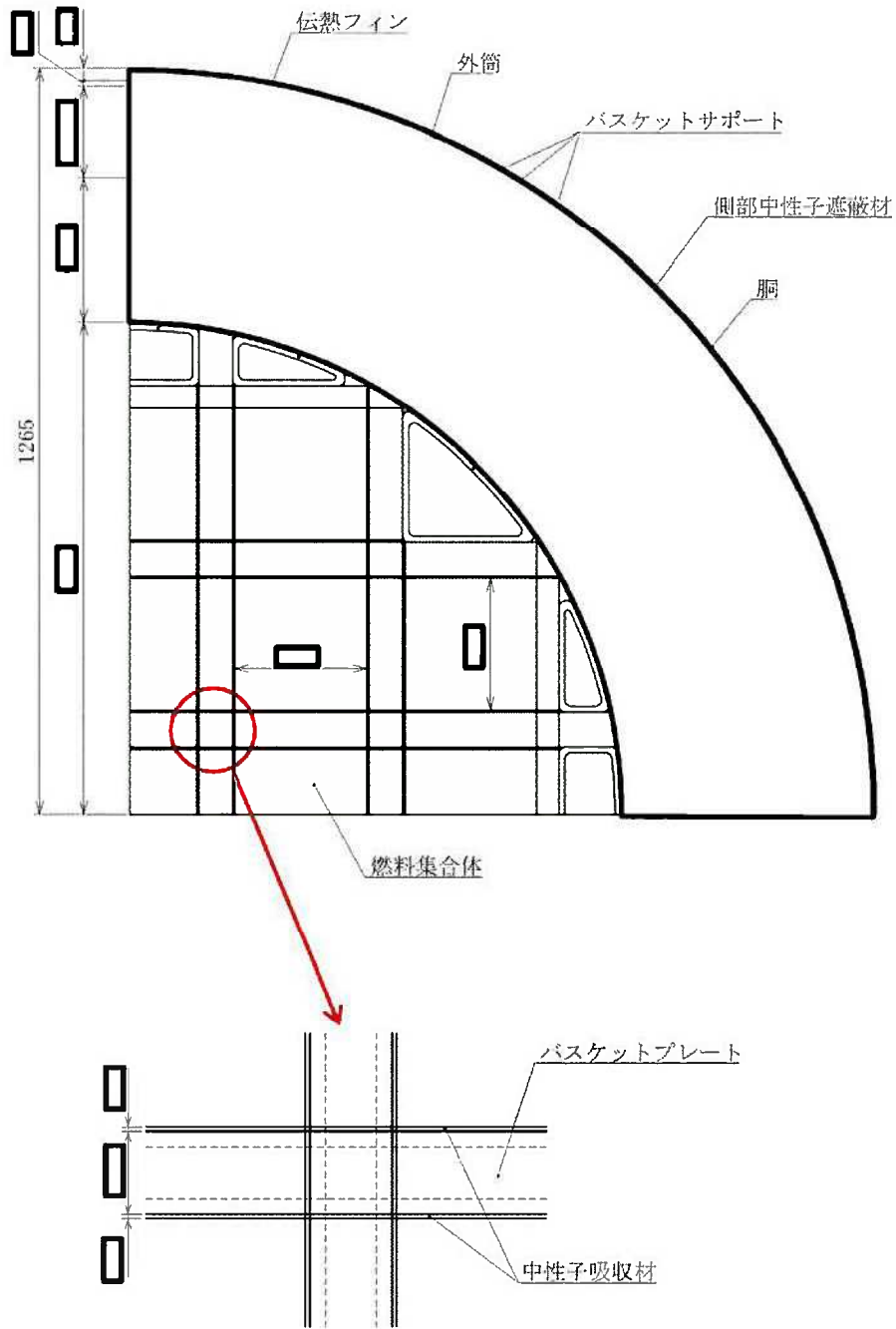
一般の試験条件のうち、水噴霧試験では輸送物は変形しないが、自由落下試験、積み重ね試験及び貫通試験では緩衝体に変形が生じる。ただし、一般の試験条件では、緩衝体に変形しないものとする方が収納物の温度及び緩衝体最高温度を高く評価できることを確認したことから、一般の試験条件の熱解析では、輸送物の変形は考慮しない。

各解析モデルの形状及び要素分割図を (a)-第 B. 1 図～(a)-第 B. 4 図に示す。



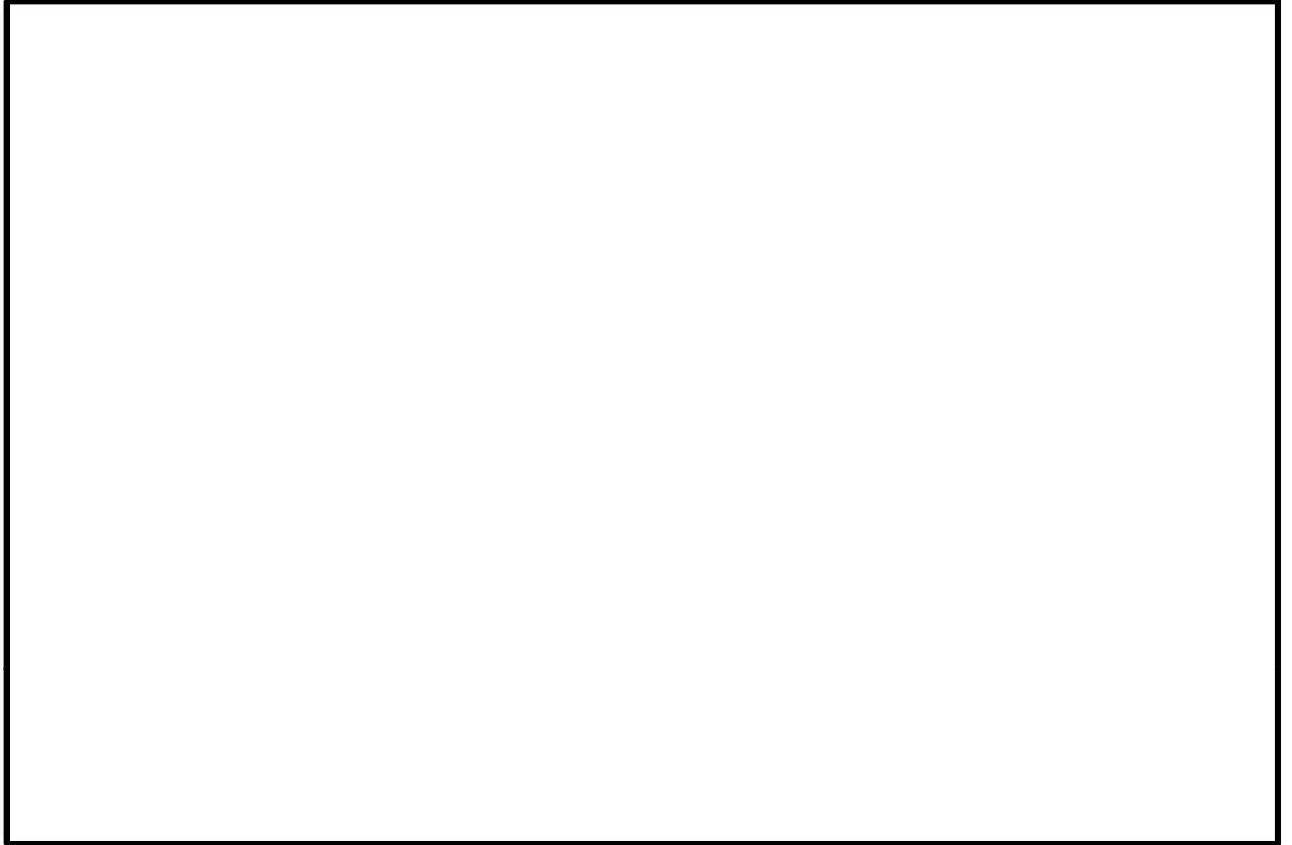
(単位：mm)

(u)-第 B.1 図 一般の試験条件の全体モデル形状図 (1/2) (縦断面図)



(単位 : mm)

(p)-第 B.1 図 一般の試験条件の全体モデル形状図 (2/2) (横断面図)

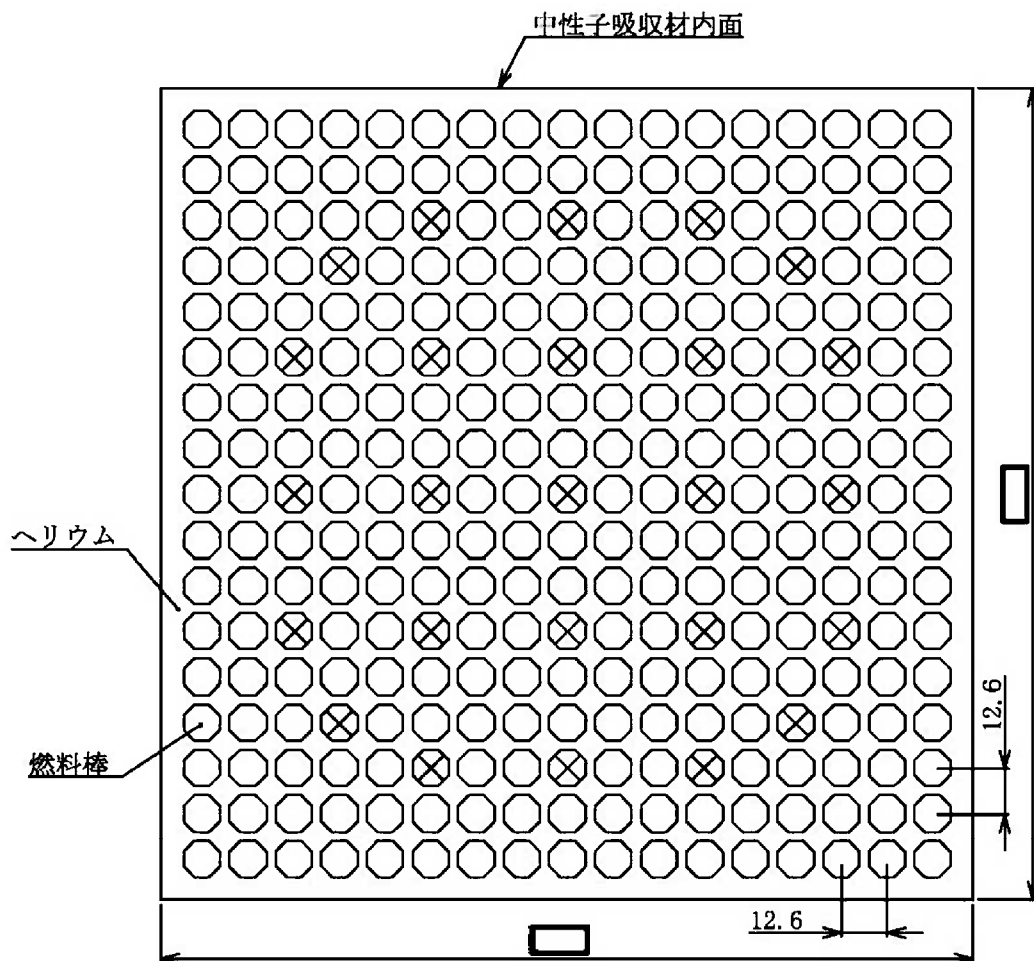


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

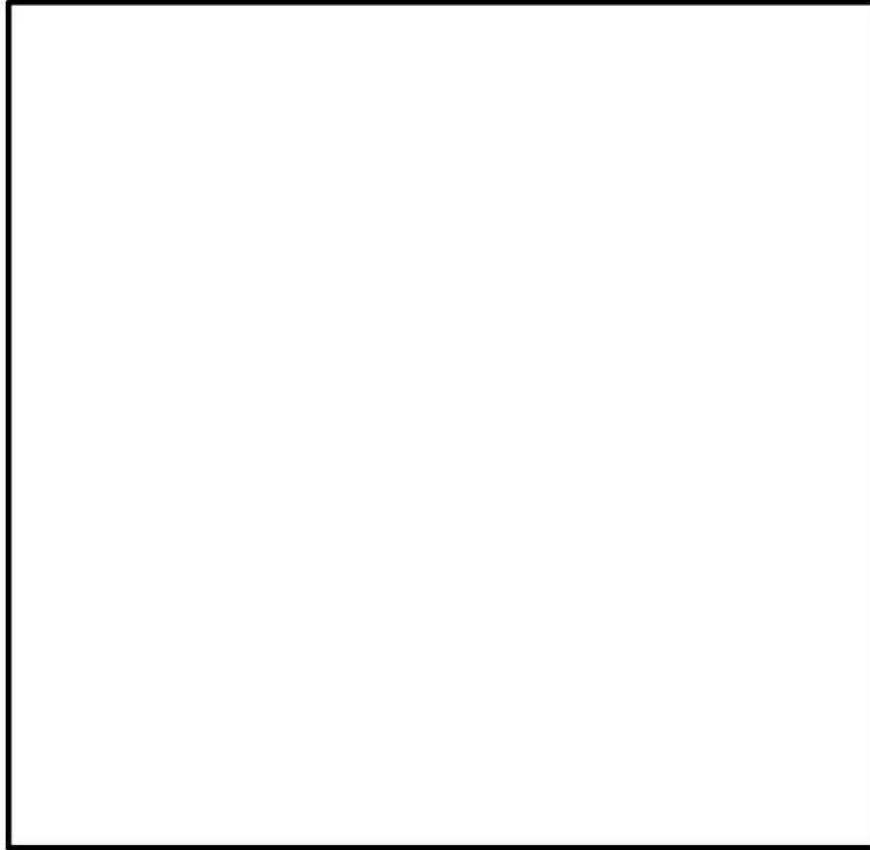
(p)-第 B. 2 図 一般の試験条件の全体モデル要素分割図



(単位 : mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

(B)-第 B. 3 図 燃料集合体モデル形状図




(v) 第 B. 4 図 燃料集合体モデル要素分割図

2. 解析条件

一般の試験条件における解析条件を (p)-第 B. 5 表に示す。また、太陽熱放射を (p)-第 B. 6 表に示す。各モデルにおいて考慮した解析条件は次のとおりである。

- ・全体モデルにおいては、燃料集合体の軸方向の発熱分布を考慮するために、燃料有効部の範囲を 48 領域に分割した。燃料集合体 21 体あたりの燃料有効部における軸方向崩壊熱量分布を (p)-第 B. 5 図に示す。
- ・全体モデルにおいては、中央領域 9 体に最高燃焼度の崩壊熱量を入力した。一方、外周部 12 体には、キャスクに収納する 21 体の崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量 21 体分となるように調整した崩壊熱量を入力した。径方向の崩壊熱量設定を (p)-第 B. 6 図に示す。
- ・全体モデルにおいては、周囲温度を境界条件として、自然対流熱伝達と放射による放熱を考慮した。
- ・燃料集合体モデルにおいては、全体モデルで算出したバスケット内面温度を境界温度とした。また、崩壊熱量については、燃料棒における単位体積あたりの崩壊熱量を設定した。

(ロ)-第 B. 5 表 一般の試験条件の熱解析条件

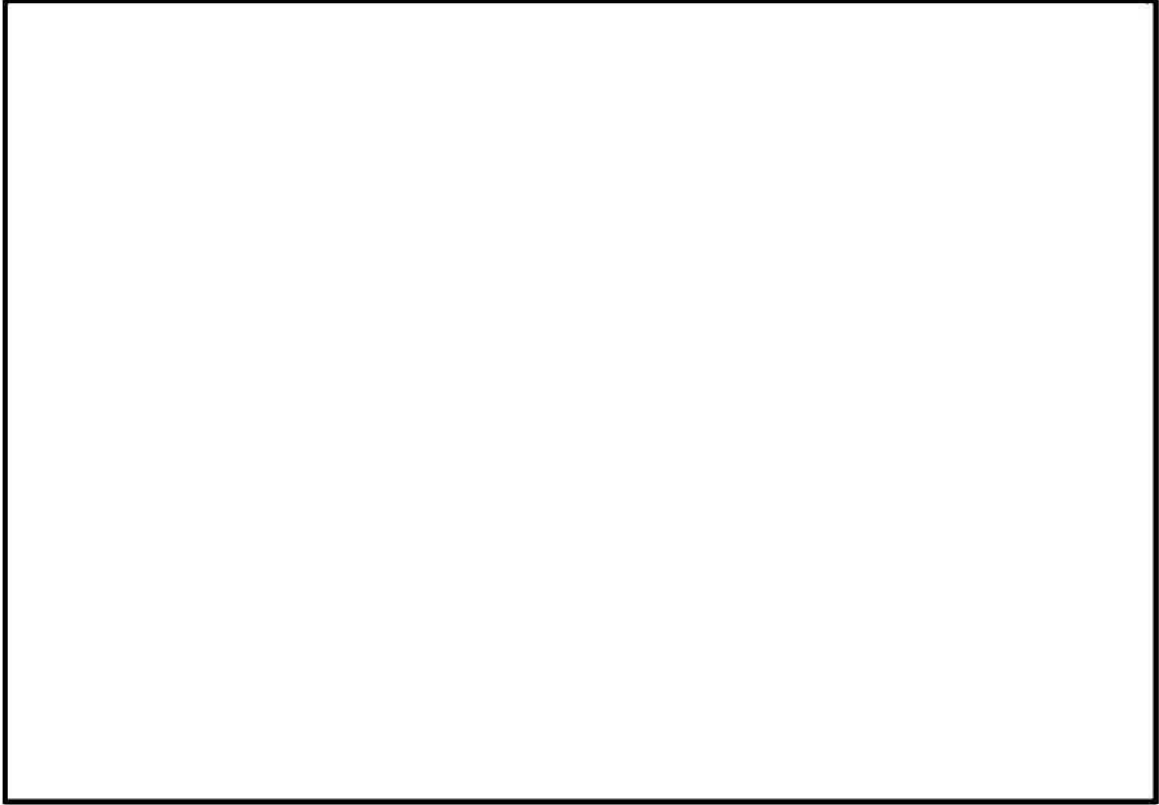
項目		最高温度 評価条件	人の近づきうる 表面の最高温度 評価条件	最低温度 評価条件
設計崩壊熱量	全体 モデル	中央部		0 W/体
		外周部		0 W/体
	燃料集合体モデル			0 W/mm ³ /本
環境条件	周囲温度	38 ℃		-20 ℃
	太陽熱放射	あり	なし	
	周囲吸収率	1.0		
輸送容器 表面	放射率	0.8		
	吸収率	0.5	—	
緩衝体、 トランニオン 表面	放射率	0.15		
	吸収率	0.5	—	

(ロ)-第 B. 6 表 太陽熱放射データ

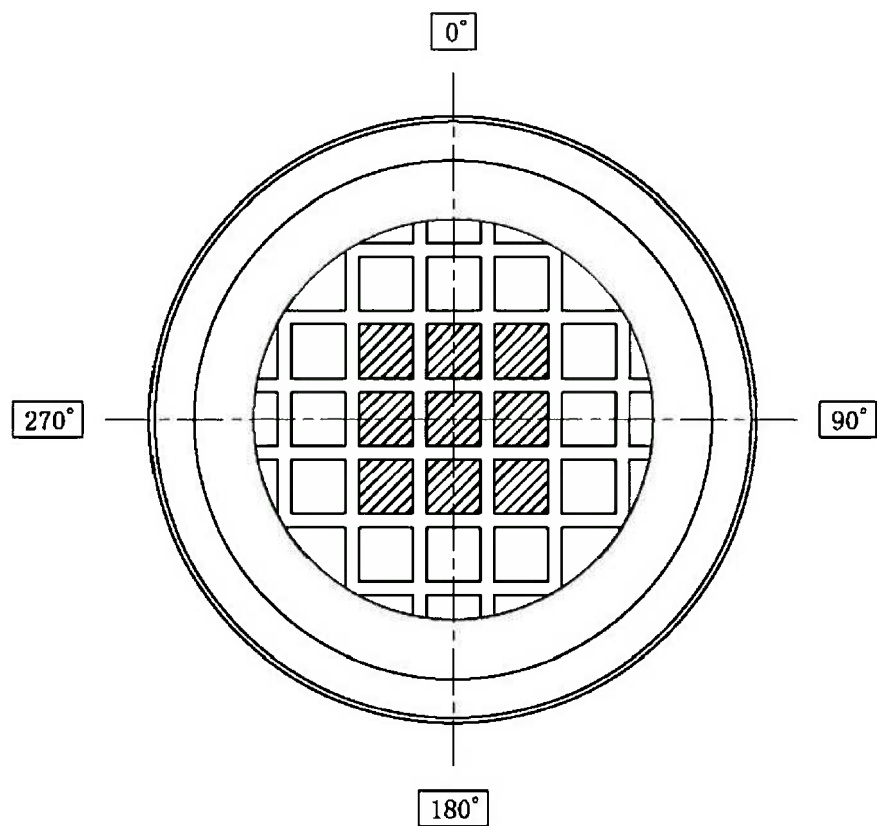
表面の形状及び位置の区分	太陽の熱放射 ^(注1) (W/m ²)
垂直に輸送される表面	200
その他の表面 (曲面) ^(注2)	400


(注1)技術基準上は一日につき 12 時間の負荷であるが、解析上は連続照射とする。


(注2)技術基準上は「水平に輸送されない下向きの表面」に対しては 200 W/m²であるが、解析上は安全側にすべての曲面に対して 400 W/m²とする。



(p)-第 B. 5 図 燃料集合体 21 体当りの軸方向崩壊熱量分布



 : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 9 体)

 : 平均燃焼度の崩壊熱量 (21 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (9 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

(a)-第 B. 6 図 径方向の崩壊熱量設定

B. 4. 1. 2 試験モデル

該当なし。

B. 4. 2 最高温度

一般の試験条件における、B. 4. 1 に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた輸送物各部の最高温度を(□)-第 B. 7 表に示す。

また、一般の試験条件において太陽熱放射のある場合の輸送物とその収納物の各部の温度分布を(□)-第 B. 7 図及び(□)-第 B. 8 図に示す。さらに、太陽熱放射のない場合の輸送物各部の温度分布を(□)-第 B. 9 図に示す。

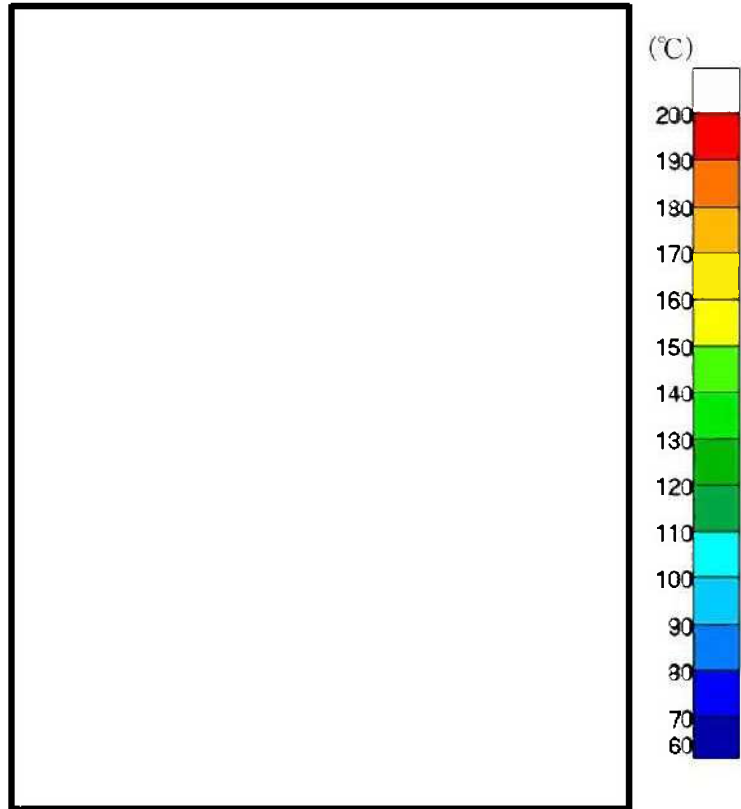
一般の試験条件において、各部の温度は B. 3 に示す使用可能温度を超えることはない。一方、太陽熱放射のない場合に人が容易に近づきうる表面としては、(□)-第 B. 7 表に示すように緩衝体表面は 80 °C であり、基準値の 85 °C 以下であるが、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 88°C 及び 99 °C であり 85 °C を超える。ただし、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網 (64°C 以下 (B. 6. 3 参照)) を取り付けて輸送するため^(注)、人が容易に近づきうる表面の温度は全て 85 °C 以下である。

(注) 輸送中の衝撃等により近接防止金網の脱落等が生じた場合、再取付けをする等の対策を施した上で、輸送に供するものとする。

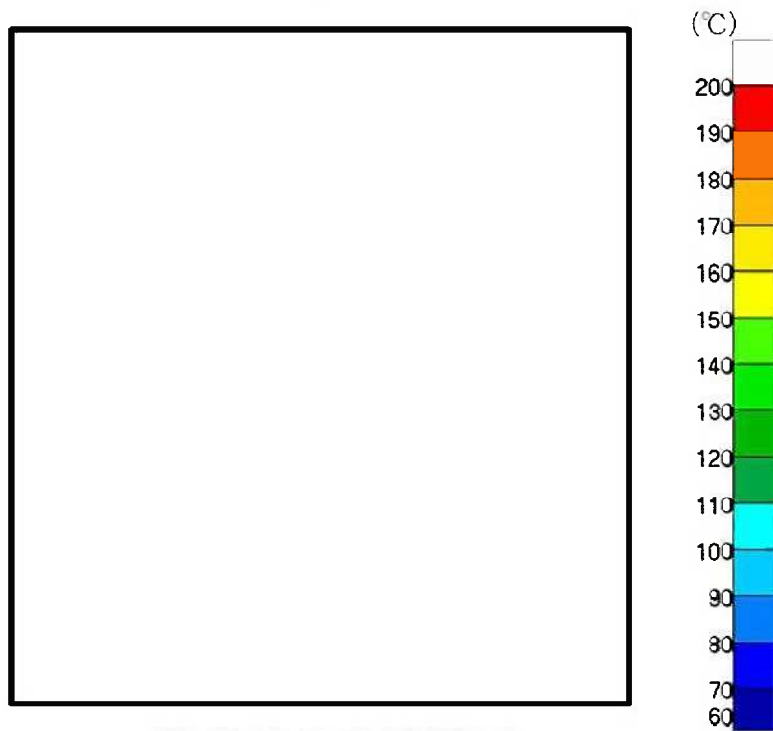
(ロ)-第B.7表 一般の試験条件における最高温度 (単位: °C)

部位	最高温度評価条件 (太陽熱放射あり)	人の近づきうる表面の 最高温度評価条件 (太陽熱放射なし)
緩衝体表面	96	80
外筒	109	88 (注)
下部端板	111	96
伝熱フィン	112	96
側部中性子遮蔽材	116	100
蓋部中性子遮蔽材	109	93
底部中性子遮蔽材	124	109
胴 (底板)	127	111
胴 (本体部)	118	103
胴 (フランジ部)	110	94
一次蓋	109	93
二次蓋	104	88
三次蓋	103	86
一次蓋ボルト	109	93
二次蓋ボルト	104	88
三次蓋ボルト	102	86
一次蓋金属ガスケット	108	92
二次蓋金属ガスケット	104	87
三次蓋Oリング	102	85
蓋部中性子遮蔽材カバー	107	91
底部中性子遮蔽材カバー	114	98
トラニオン	114	99
バスケット	164	149
燃料集合体	196	182

(注) 外筒外面の最高温度

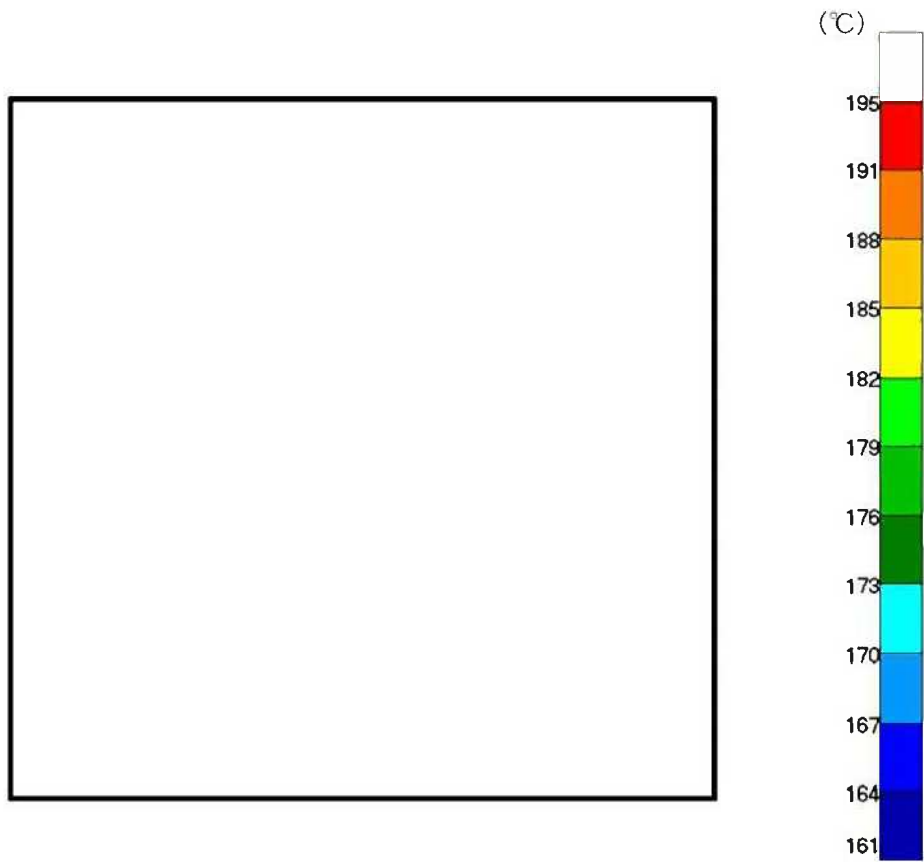


(全体)

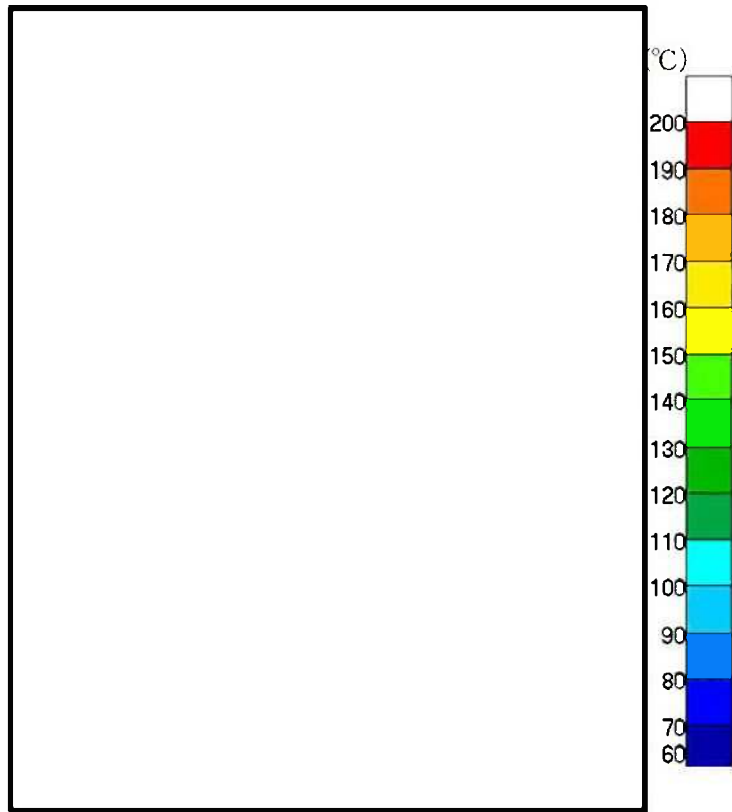


(燃料集合体最高温度位置断面)

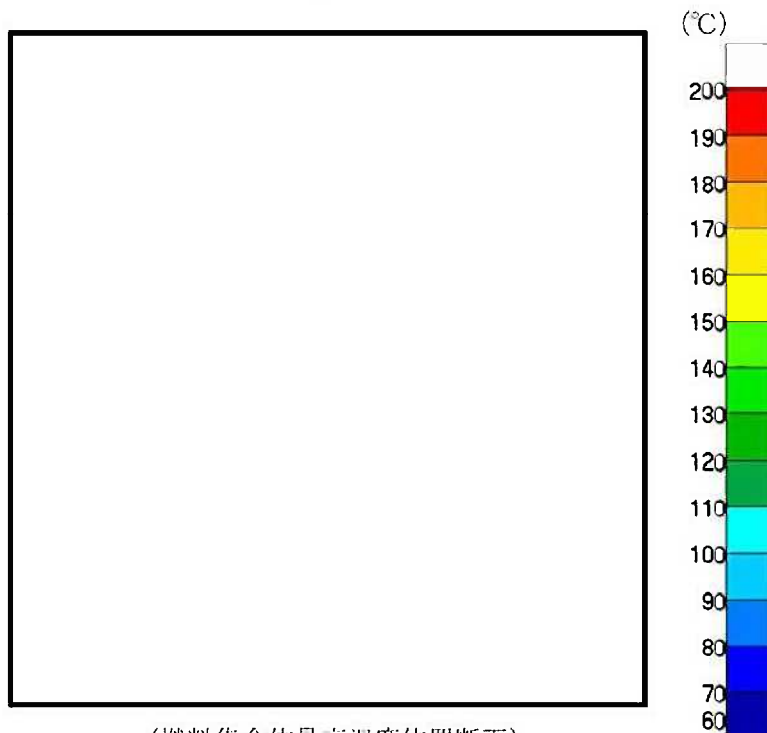
(㊦)-第 B. 7 図 一般の試験条件の全体モデル温度分布 (最高温度評価条件)



(㊦)-第 B. 8 図 一般の試験条件の燃料集合体モデル温度分布 (最高温度評価条件)



(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

(□)-第 B.9 図 一般の試験条件における全体モデル温度分布
(人の近づきうる表面の最高温度評価条件)

B.4.3 最低温度

本輸送物の最低温度評価条件は、(p)-第 B.5 表で示したとおり、周囲温度が-20 °Cであり、また、太陽熱放射がなく崩壊熱量が 0 kW であるため、輸送物の全部位が-20 °Cに達するが、輸送物の健全性に問題はない。また、本輸送物は乾式であり、胴内はヘリウムが充填されるため凍結することはない。

B.4.4 最大内圧

一般の試験条件において輸送物に最大内圧が生じる条件は、(p)-第 B.5 表で示した最高温度評価条件であり、この条件における一次蓋と胴で構成される空間の圧力（以下「胴内圧」という。）、一次蓋と二次蓋で構成される空間の圧力（以下「一二次蓋間圧力」という。）、二次蓋と三次蓋で構成される空間の圧力（以下「二三次蓋間圧力」という。）、及び三次蓋と胴で構成される密封装置の圧力（以下「三次蓋-胴内圧力」という。）の計算方法及び計算結果を以下に示す。

なお、A.5 にて述べたように、燃料棒は一般の試験条件において破損しないため、燃料棒の破損による圧力上昇はない。

1. 胴内圧

輸送物の内部には、輸送に先立ち燃料集合体を収納した後、所定の圧力となるまでヘリウムが充填される。一般の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に燃料集合体最高温度とすると、胴内圧は以下のとおり求められる。

$$P_0 = P_{c0} \frac{T_{0ner}}{T_{c0}}$$

ここで、

P_0 : 一般の試験条件における胴内圧 (MPa)

P_{c0} : 胴内ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{0ner} : 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度 (燃料集合体最高温度) (K)

T_{c0} : 胴内ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B.8 表に示す。なお、設計評価期間における一二次蓋間ヘリウムの胴内への漏えいは十分に小さいため、漏えいを考慮しても胴内圧は負圧が維持される。

(p)-第 B. 8 表 一般の試験条件における胴内圧計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
胴内ヘリウムの初期充填圧力	P_{c0}	MPa	0.0489
一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度	T_{0nor}	K	469.15 (196 °C)
胴内ヘリウムの初期温度	T_{c0}	K	293.15 (20 °C)
一般の試験条件における胴内圧	P_0	MPa	0.0783 (-0.0230 MPaG)

2. 一二次蓋間圧力

一次蓋と二次蓋の間には、二次蓋取付け後、所定の圧力となるまでヘリウムが充填される。一般の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に一二次蓋間ヘリウムの最高温度とすると、一二次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_1 = P_{10} \frac{T_{1nor}}{T_{10}}$$

ここで、

P_1 : 一般の試験条件における一二次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{1nor} : 一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B. 9 表に示す。

(p)-第 B. 9 表 一般の試験条件における一二次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1nor}	K	380.15 (107 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 °C)
一般の試験条件における一二次蓋間圧力	P_1	MPa	0.389 (0.288 MPaG)

3. 二三次蓋間圧力

三次蓋取付け時における二三次蓋間の雰囲気は常温、大気圧の空気とし、一般の試験条件における空気の温度は、保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また、保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると、二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2 = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{1nor}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{1nor}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで、

- P_2 : 一般の試験条件における二三次蓋間圧力 (MPa)
- P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)
- P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)
- V_1 : 一二次蓋間体積 (m³)
- V_2 : 二三次蓋間体積 (m³)
- T_{1nor} : 一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)
- T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)
- T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ρ)-第 B. 10 表に示す。なお、この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に-20℃であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 2%増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(ρ)-第 B. 10 表 一般の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0. 300
二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧)	P_{20}	MPa	0. 101325
一二次蓋間体積	V_1	m ³	<input type="text"/>
二三次蓋間体積	V_2	m ³	<input type="text"/>
一般の試験条件における 一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1nor}	K	380. 15 (107 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293. 15 (20 °C)
三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293. 15 (20 °C)
一般の試験条件における 二三次蓋間圧力	P_2	MPa	0. 329 (0. 228 MPaG)

4. 三次蓋－胴内圧力

保守側に一次蓋及び二次蓋の密封性が失われ、一二次蓋間に充填されたヘリウム及び二三次蓋間空気が胴内に漏えいすると仮定すると、三次蓋－胴内圧力は、以下のとおり求められる。

$$P_3 = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{0nor}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{0nor}}{T_{20}} + P_{c0}V_c \frac{T_{0nor}}{T_{c0}}}{V_1 + V_2 + V_c}$$

ここで、

P_3 : 一般の試験条件における三次蓋－胴内圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)

P_{c0} : 胴内ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

V_1 : 一二次蓋間体積 (m³)

V_2 : 二三次蓋間体積 (m³)

V_c : 胴内体積 (m³)

T_{0nor} : 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度(燃料集合体最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

T_{c0} : 胴内ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B. 11 表に示す。

(p)-第 B.11 表 一般の試験条件における三次蓋-胴内圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧)	P_{20}	MPa	0.101325
胴内ヘリウムの初期充填圧力	P_{c0}	MPa	0.0489
一二次蓋間体積	V_1	m^3	<input type="text"/>
二三次蓋間体積	V_2	m^3	<input type="text"/>
胴内体積	V_c	m^3	<input type="text"/>
一般の試験条件における 胴内ヘリウムの温度	T_{0nor}	K	469.15 (196 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 °C)
三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15 (20 °C)
胴内ヘリウムの初期温度	T_{c0}	K	293.15 (20 °C)
一般の試験条件における 三次蓋-胴内圧力	P_3	MPa	0.0825 (-0.0188 MPaG)

B.4.5 最大熱応力

一般の試験条件においては輸送物に熱応力が生じるが、A.5.1 に示すようにいずれも評価基準を下回る。

B. 4. 6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価を(p)-第 B. 12 表に示す。本輸送物は以下のとおり一般の試験条件の基準を満足している。

- ・最高温度評価条件において、三次蓋 O リングの最高温度は 103 °C であり、使用可能温度 150 °C を超えることはない。
- ・最高温度評価条件において、一次蓋金属ガスケット及び二次蓋金属ガスケットの最高温度はそれぞれ 109 °C 及び 104 °C であり、使用可能温度 130 °C を超えることはない。
- ・最高温度評価条件において、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材、及び底部中性子遮蔽材の最高温度は 124 °C であり、使用可能温度である 149 °C を超えることはない。
- ・最高温度評価条件において、上記を除く構成材料についても、健全性に悪影響を及ぼすような温度には到達しない。
- ・人が近づきうる表面の最高温度評価条件において、容易に人が近づきうる部位としての緩衝体表面の最高温度は 80 °C であり、基準値の 85 °C を超えることはない。一方、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 88 °C 及び 99 °C であり 85 °C を超えているが、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網を取り付けて輸送するため、人が容易に近づきうる表面の温度は 85 °C 以下である。
- ・最低温度評価条件において、周囲温度が -20 °C で、太陽熱放射がなく崩壊熱量が 0 kW であるため、すべての部位が -20 °C に達するが、輸送物の健全性に問題はない。

(p)-第 B. 12 表 一般の試験条件の熱解析結果の要約及びその評価 (1/2)

項目	結果 [°C]	基準値 [°C]	評価結果	他の解析への条件
最高温度				
燃料集合体	196	275 ^(注1)	基準値以下	構造解析では □°Cを使用 ^(注1)
バスケット	164	250 ^(注1)	基準値以下	構造解析では □°Cを使用 ^(注1)
中性子遮蔽材	124 ^(注2)	149 ^(注1)	基準値以下	—
一次蓋金属ガスケット	109 ^(注3)	130 ^(注1)	基準値以下	—
二次蓋金属ガスケット	104 ^(注4)	130 ^(注1)	基準値以下	—
三次蓋 O リング	103 ^(注5)	150 ^(注1)	基準値以下	—
外筒	109	350 ^(注1)	基準値以下	構造解析では □°Cを使用 ^(注1)
胴	127	350 ^(注1)	基準値以下	構造解析では □°Cを使用 ^(注1)
近接表面 ^(注6)	80 ^(注7)	85	基準値以下	—
最低温度	輸送物の全部位 が-20 °C	胴内の凍結 なし	胴内雰囲気はヘ リウムであるた め凍結しない	—

(注1) 構造解析における熱応力算出では、容器全体の温度分布を入力するが、(p)-第 B. 12 表には、許容値及び内圧計算に使用する温度を代表として示している。なお、この温度は熱解析結果に裕度をみて設定した温度である。

(注2) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度。

(注3) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

(注4) 保守側に評価するため、二次蓋の最高温度とする。

(注5) 保守側に評価するため、三次蓋の最高温度とする。

(注6) 一般の試験条件のうち、人が近づきうる表面の最高温度評価条件における評価結果である。

なお、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 88 °C 及び 99 °C であり 85 °C を超えているが、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網 (64°C 以下 (B. 6. 3 参照)) を取り付けて輸送するため、人が容易に近づきうる表面の温度は 85 °C 以下である。

(注7) 緩衝体表面の最高温度。

(p)-第 B. 12 表 一般の試験条件の熱解析結果の要約及びその評価 (2/2)

項目	結果 [MPa]	基準値 [MPa]	評価	他の解析への条件
最大内圧				
胴内圧	0.0783 (-0.0230 MPaG)	—	設計評価期間中の ヘリウムの内部へ の漏えいを考慮し ても 0.097 MPa ^(注) 未満	構造解析では -0.101325 MPaG を 使用
一二次蓋間圧力	0.389 (0.288 MPaG)	—	—	構造解析では 0.31 MPaG を使用
二三次蓋間圧力	0.329 (0.228 MPaG)	—	—	構造解析では 0.30 MPaG を使用
三次蓋—胴内圧力	0.0825 (-0.0188 MPaG)	—	設計評価期間中の ヘリウムの内部へ の漏えいを考慮し ても 0.097 MPa ^(注) 未満	—

(注) 気象変化による圧力変動(±0.004 MPa)を考慮した大気圧。

B.5 特別の試験条件

B.5.1 熱解析モデル

輸送物の熱解析は、ABAQUS コードを用いた有限要素法により行った。以下に解析に用いるモデル及び解析条件について示す。

B.5.1.1 解析モデル

1. 解析に用いる各モデル

一般の試験条件と同様に、本輸送物の各部位の温度を算出するために、解析モデルとして以下の2種類のモデルを適用した。

- ・全体モデル
- ・燃料集合体モデル

各解析モデルにおける温度算出部位は次のとおりである。

全体モデル …………… 上・下部緩衝体表面、胴、外筒、下部端板、一次蓋、二次蓋、三次蓋、一次蓋金属ガスケット、二次蓋金属ガスケット、三次蓋Oリング、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、三次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、バスケット^(注)、伝熱フィン、トラニオン

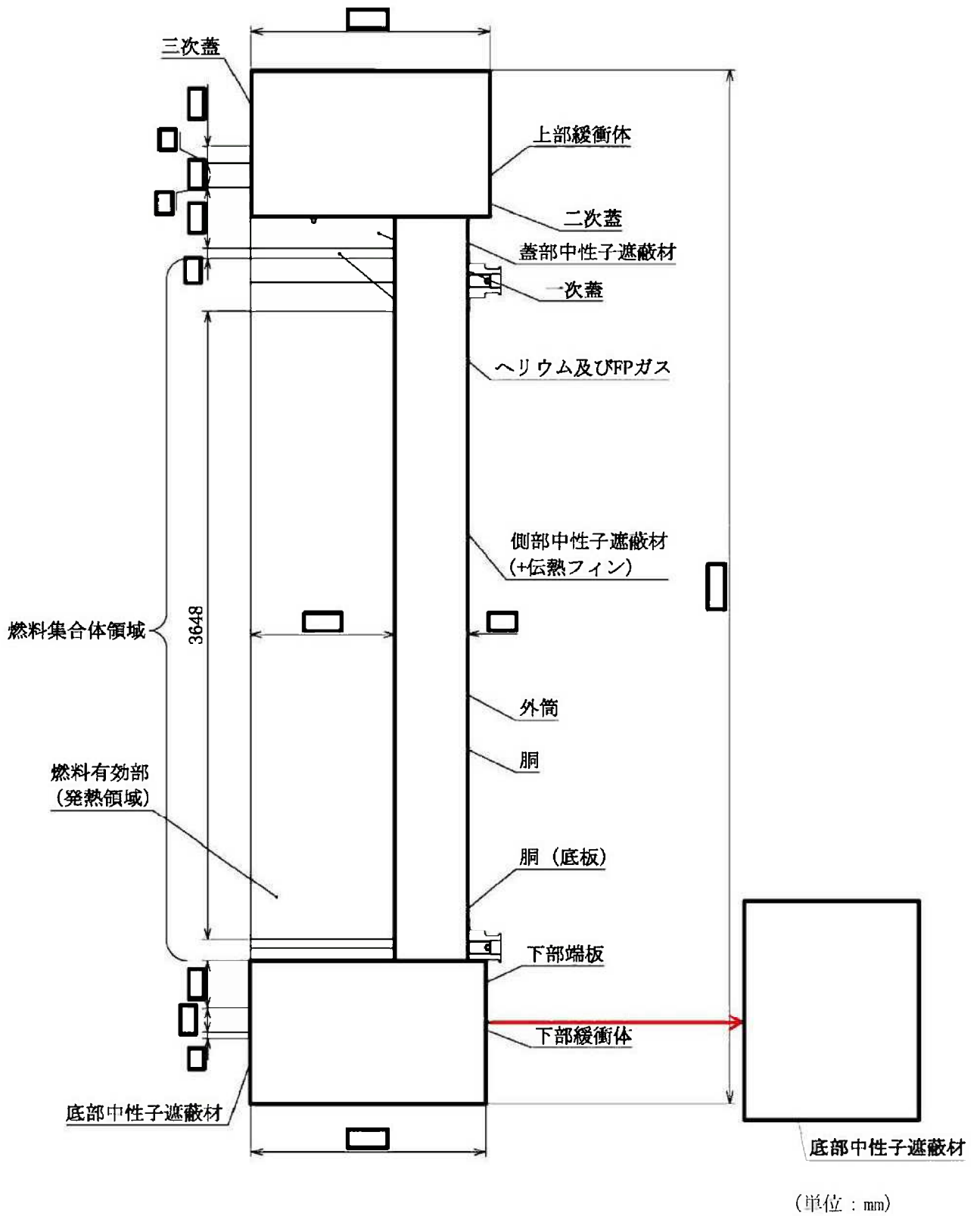
燃料集合体モデル ……… 燃料集合体

(注)バスケットは、アルミニウム合金製のバスケットプレート、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材、アルミニウム合金製のバスケットサポートで構成される。本評価におけるバスケットの最高温度は、これらの構成部材の最高温度とする。

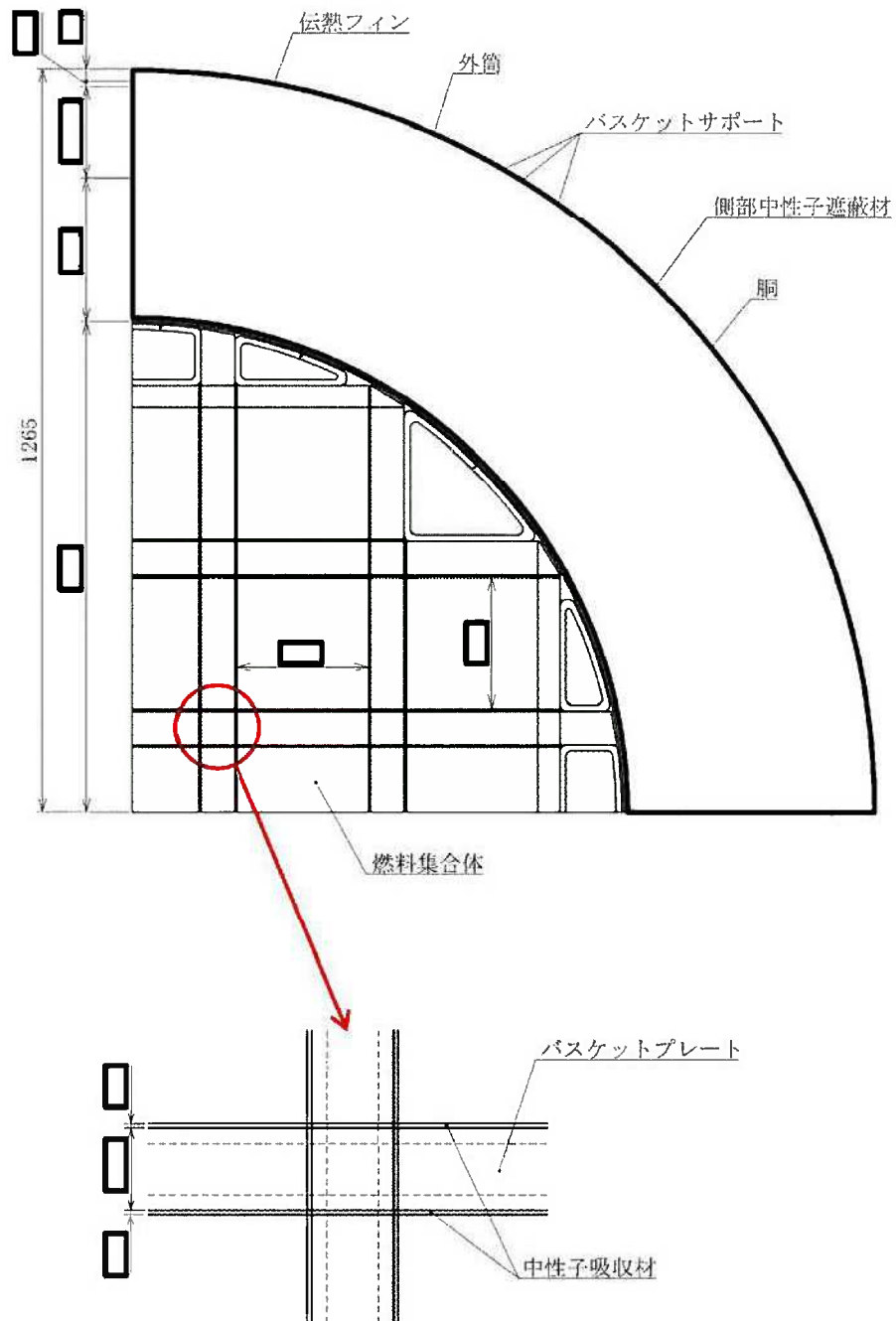
特別の試験条件の熱解析は、輸送物が強度試験（9 m 落下試験及び1 m 貫通試験）条件に引き続いて、火災事故条件下におかれるものとし、落下試験等の影響を以下のように考慮した。

- ・ 9 m 落下試験により緩衝体が変形するため、変形後の形状をモデルに考慮した。
- ・ 1 m 貫通試験における輸送物の変形は外筒、側部中性子遮蔽材及び緩衝体に生じる変形である。外筒及び側部中性子遮蔽材には直径 150 mm の範囲の変形が生じるが、熱解析結果への影響は無視するものであることから、解析モデルでは外筒及び側部中性子遮蔽材が変形しないものとした。また、緩衝体に穴があく可能性があるが、局所的であり断熱効果への影響は無視するものであることから、解析モデルでは緩衝体の変形しないものとした。
- ・ 9 m 落下試験により全燃料棒からヘリウム及びFP ガスが放出されるものと仮定し、胴内ガスの熱伝導率の低下を考慮した。

以上の条件を考慮した特別の試験条件における、全体モデルの形状及び要素分割図を(ρ)-第 B. 10 図及び(ρ)-第 B. 11 図にそれぞれ示す。また、燃料集合体モデルの形状及び要素分割図を(ρ)-第 B. 3 図及び(ρ)-第 B. 4 図にそれぞれ示す。なお、燃料集合体モデルにおけるバスケットセル内の充填気体は、全体モデルと同様にヘリウムと FP ガスの混合気体である。

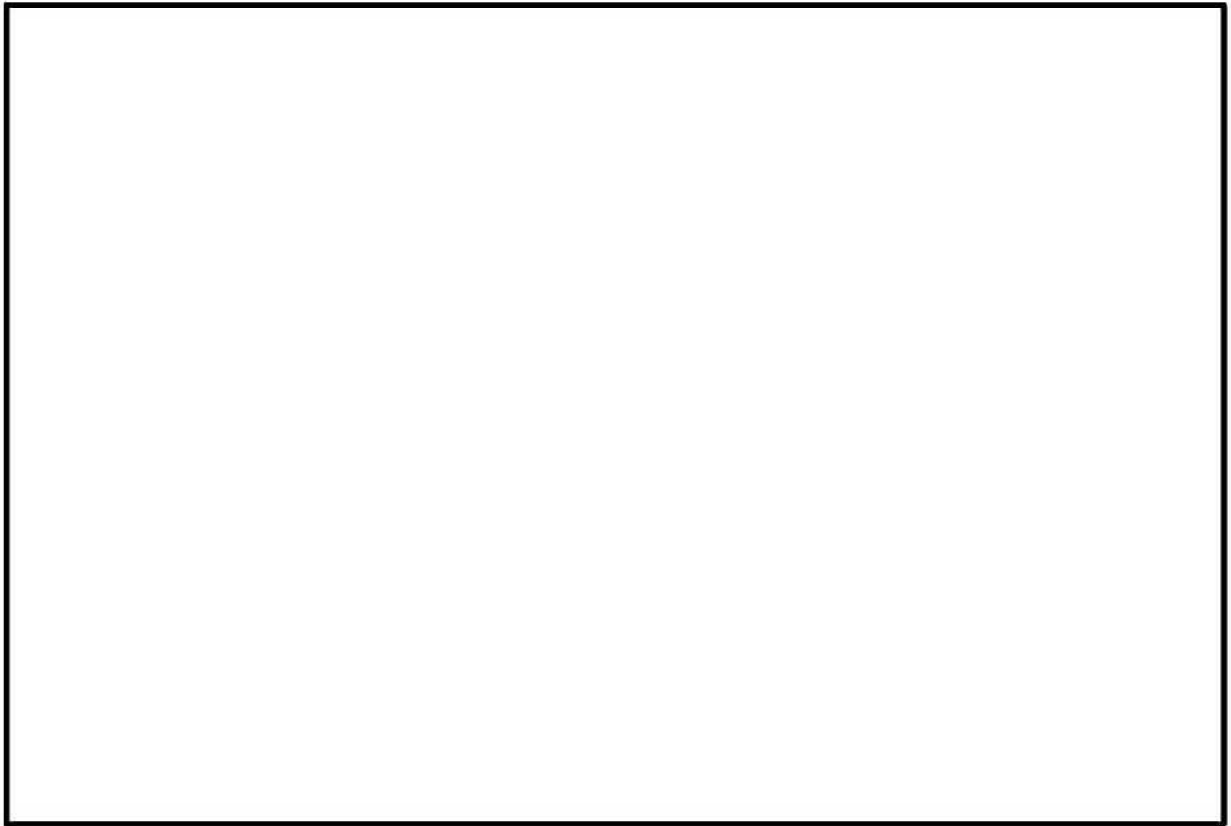


(B)-第 B.10 図 特別の試験条件の全体モデル形状図 (1/2) (縦断面図)



(単位 : mm)

(□)-第 B. 10 図 特別の試験条件の全体モデル形状図 (2/2) (横断面図)



(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

(ロ)-第 B. 11 図 特別の試験条件の全体モデル要素分割図

2. 解析条件

特別の試験条件における熱解析条件を(ロ)-第 B. 13 表に示す。火災時は火炎の放射による入熱が主となる。また、太陽熱放射の条件は(ロ)-第 B. 6 表に示したとおりである。さらに、各モデルにおいて考慮した解析条件は次のとおりである。

- ・特別の試験条件における胴内ガス（ヘリウム及びFP ガス）の熱伝導率は、FP ガス放出後の胴内のヘリウム及びFP ガスのモル分率を考慮して、混合気体の熱伝導率の計算式²⁾を用いて算出した。特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率を(ロ)-第 B. 14 表に示す。
- ・各モデルのその他の解析条件は一般の試験条件と同じである。

(ロ)-第 B. 13 表 特別の試験条件における熱解析条件

項目		火災前	火災時	火災後
設計崩壊熱量	全体モデル			
	中央部			
	外周部			
	燃料集合体モデル			
環境条件	周囲温度	38 °C	800 °C (30 分間)	38 °C
	太陽熱放射	あり	あり	あり
	周囲吸収率	1.0	0.9 (注)	1.0
容器表面	放射率	0.8	0.8	0.64
	吸収率	0.5	0.8 ²⁾	1.0 ²⁾
緩衝体、 トラニオン 表面	放射率	0.15	0.8	0.15
	吸収率	0.5 ¹⁾	0.8 ²⁾	1.0 ²⁾

(注) 火炎の放射率を示す。

(ロ)-第 B.14 表 特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率

温度		熱伝導率 (W/(m・K))
(K)	(℃)	
300	26.85	0.0942
400	126.85	0.116
500	226.85	0.135
600	326.85	0.154

B.5.1.2 試験モデル

該当なし。

B.5.2 輸送物の評価条件

9 m 落下試験における輸送物の変形は緩衝体に生じる変形である。解析においては、垂直落下、水平落下及びコーナ落下の変形後の形状を包絡する以下の変形量にて緩衝体をモデル化した。

- ・ 頭部垂直落下 : mm
- ・ 底部垂直落下 : mm
- ・ 頭部水平落下 : mm
- ・ 底部水平落下 : mm
- ・ 頭部コーナ落下 : mm
- ・ 底部コーナ落下 : mm

1 m 貫通試験における輸送物の変形は緩衝体、外筒及び側部中性子遮蔽材に生じる変形である。緩衝体は落下時に穴があく可能性があるが、局所的であるため、断熱効果に大きな変化はない。

外筒及び側部中性子遮蔽材の最大変形は直径 150 mm の範囲の変形である。この変形は局所的であるため、輸送物の熱的性能に影響を及ぼすことはない。

B. 5. 3 輸送物温度

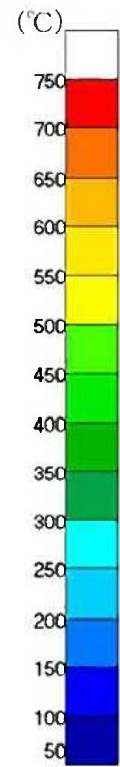
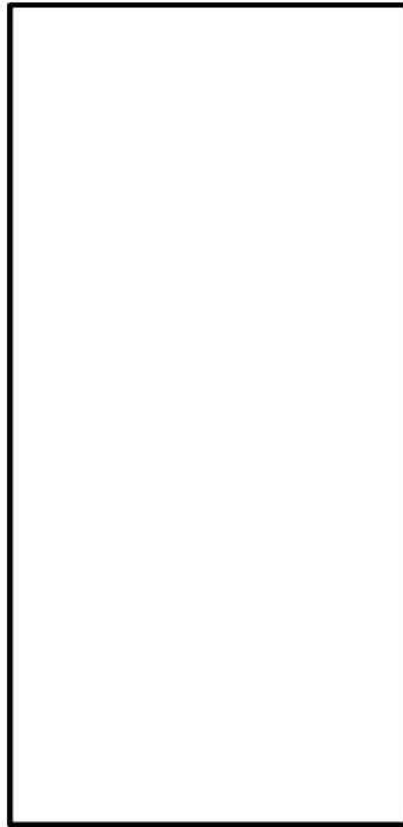
特別の試験条件における B. 5. 1 に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた輸送物各部の最高温度、及び火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間を(□)-第 B. 15 表に示す。

火災事故発生から 30 分後の輸送物各部の温度分布を(□)-第 B. 12 図に示す。また、燃料集合体温度が最も高くなる火災事故発生から 23. 7 時間後における温度分布を(□)-第 B. 13 図及び(□)-第 B. 14 図に、さらに、時刻歴温度変化を(□)-第 B. 15 図に示す。

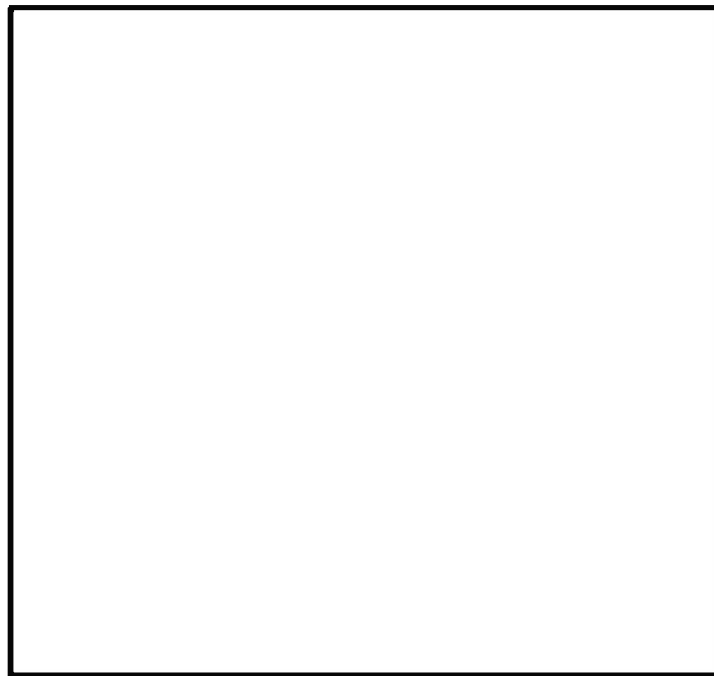
(ロ)-第 B.15 表 特別の試験条件における最高温度

部位	温度(°C)	最高温度算出時間(h) (注)
緩衝体表面	784	0.500
外筒	727	0.500
下部端板	660	0.500
伝熱フィン	579	0.502
側部中性子遮蔽材	709	0.502
蓋部中性子遮蔽材	135	37.7
底部中性子遮蔽材	156	22.7
胴 (底板)	168	1.99
胴 (本体部)	237	0.501
胴 (フランジ部)	211	0.516
一次蓋	136	37.7
二次蓋	134	4.26
三次蓋	172	1.71
一次蓋ボルト	136	1.81
二次蓋ボルト	134	2.74
三次蓋ボルト	148	3.43
一次蓋金属ガスケット	135	27.7
二次蓋金属ガスケット	132	6.35
三次蓋Oリング	144	3.76
蓋部中性子遮蔽材カバー	134	29.7
底部中性子遮蔽材カバー	156	3.09
トラニオン	743	0.500
バスケット	202	20.7
燃料集合体	241	23.7

(注) 火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間である。



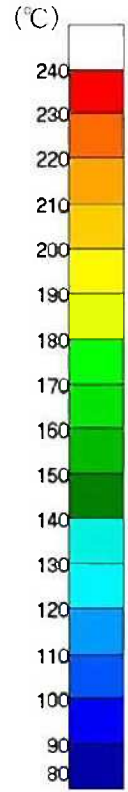
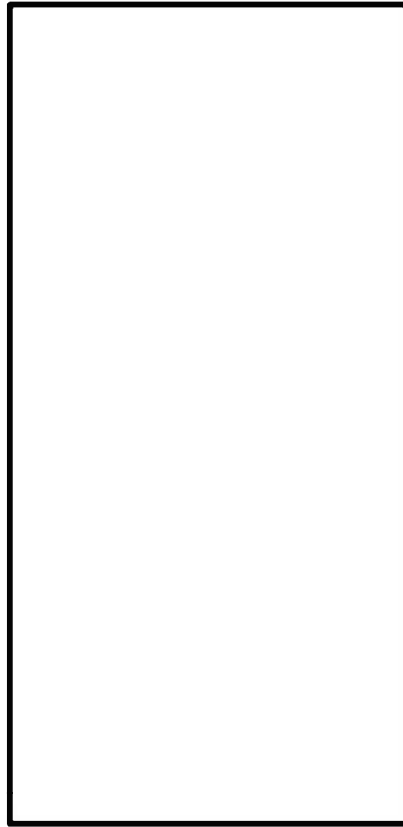
(全体)



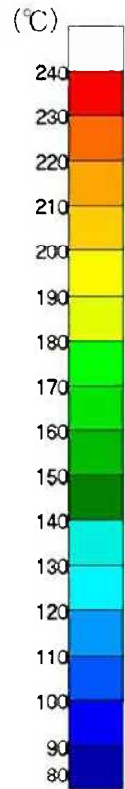
(燃料集合体最高温度位置断面)

(a)-第 B. 12 図 特別の試験条件の全体モデル温度分布 (火災事故発生から 30 分後)

(燃料最高温度位置断面)



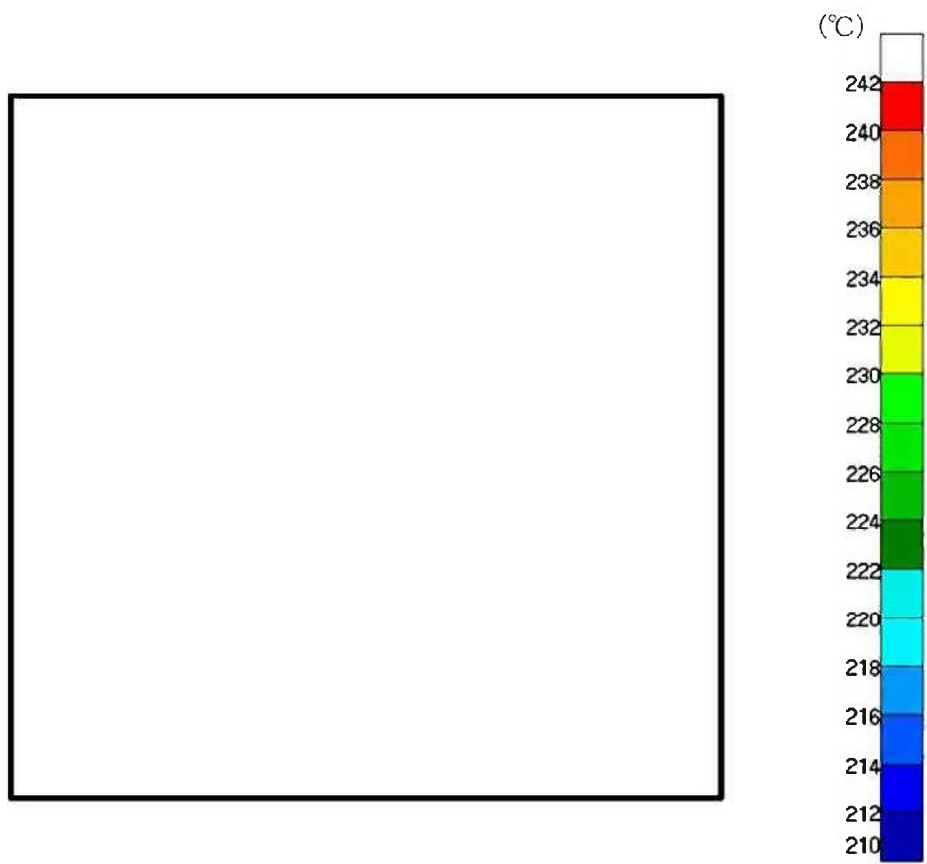
(全体)



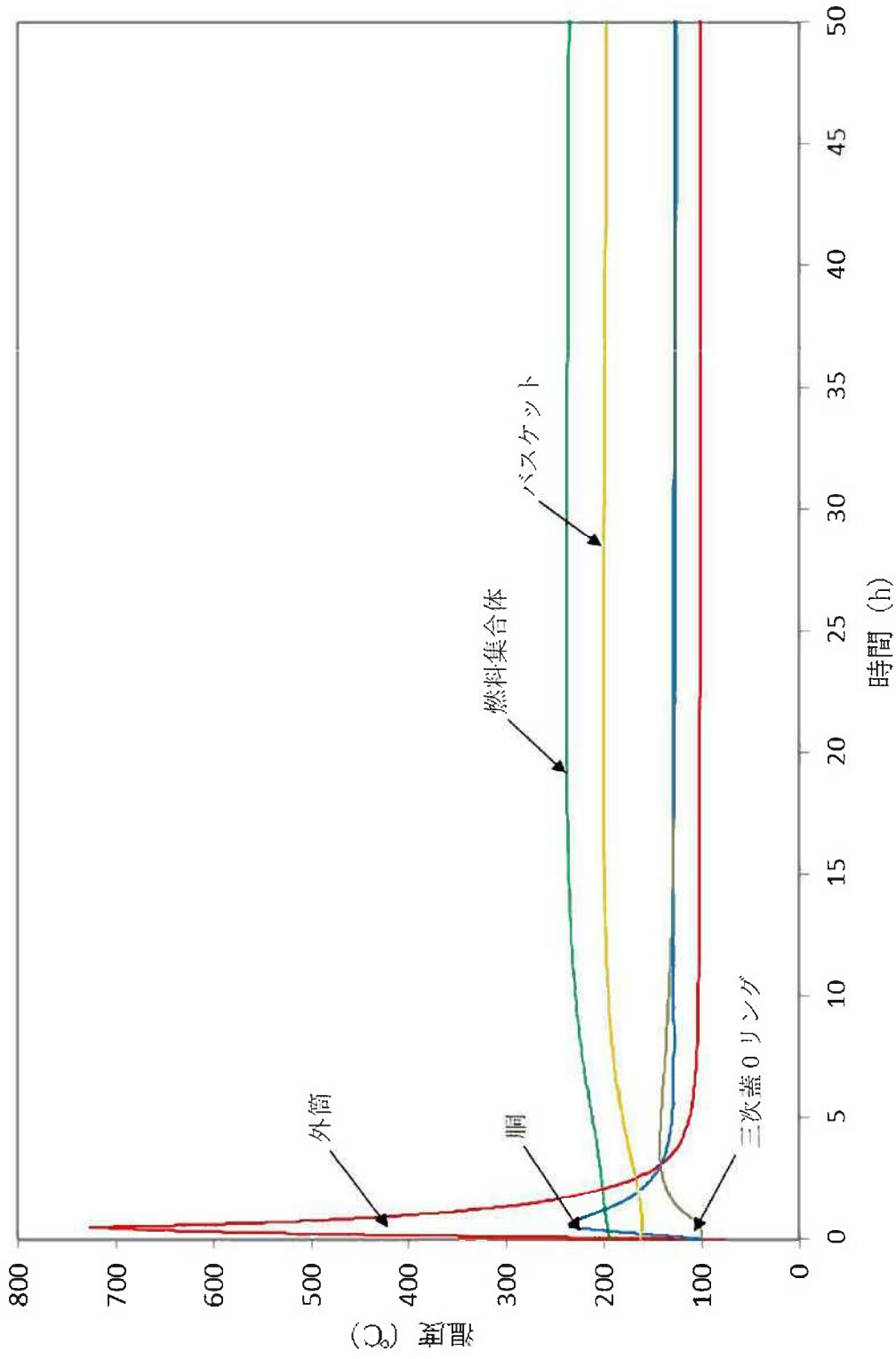
(燃料集合体最高温度位置断面)

(□)-第 B.13 図 特別の試験条件の全体モデル温度分布 (火災事故発生から 23.7 時間後)

(燃料最高温度位置断面)



(□)-第 B. 14 図 特別の試験条件の燃料集合体モデルの温度分布 (火災事故発生から 23.7 時間後)



(B)-第 B. 15 図 特別の試験条件の時刻歴温度変化

B. 5. 4 最大内圧

輸送物の熱解析から、特別の試験条件における輸送物の胴内圧は、胴内のヘリウム及びFP ガスの温度が最高となる時、つまり燃料集合体の温度が最高となる火災事故発生から23.7時間後に最大となる。また、一二次蓋間圧力は、一二次蓋間ヘリウムの温度が最高となる火災発生時から2.53時間後に最大となる。さらに、二三次蓋間圧力は、二三次蓋間空気の温度が最高となる火災発生時から4.05時間後に最大となる。胴内圧、一二次蓋間圧力、二三次蓋間圧力及び三次蓋-胴内圧力の計算方法及び計算結果を以下に示す。

1. 胴内圧

胴内圧の算出には、全燃料棒の密封機能が失われたと仮定して、燃料棒内に封入されていたヘリウム及びFP ガス放出による圧力上昇を考慮する。特別の試験条件におけるヘリウム及びFP ガスの温度を保守側に燃料集合体最高温度とすると、胴内圧は、以下のとおり求められる。

$$P_0' = \frac{P_0 V_c \frac{T_{0acc}}{T_{0nor}}}{V_c + V_p} + P_{FP}$$

ここで、

P_0' : 特別の試験条件における胴内圧力 (MPa)

P_0 : 一般の試験条件における胴内圧力 (MPa)

P_{FP} : 胴内に放出されたヘリウム及びFP ガス圧力 (MPa)

V_c : 胴内体積 (m³)

V_p : 全燃料棒内部の体積 (m³)

T_{0acc} : 特別の試験条件における胴内ガス温度 (燃料集合体最高温度) (K)

T_{0nor} : 一般の試験条件における胴内ガス温度 (燃料集合体最高温度) (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B. 16 表に示す。

(p)-第 B. 16 表 特別の試験条件における胴内圧計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一般の試験条件における胴内圧力	P_0	MPa	0.0783
胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力	P_{FP}	MPa	0.208
胴内体積	V_c	m^3	<input type="text"/>
全燃料棒内部の体積	V_p	m^3	<input type="text"/>
特別の試験条件における胴内ガス温度	T_{0acc}	K	514.15 (241 °C)
一般の試験条件における胴内ガス温度	T_{0nor}	K	469.15 (196 °C)
特別の試験条件における胴内圧力	P_0'	MPa	0.293 (0.192 MPaG)

2. 一二次蓋間圧力

特別の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に一二次蓋間ヘリウムの最高温度とすると、一二次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_1' = P_{10} \frac{T_{1acc}}{T_{10}}$$

ここで、

P_1' : 特別の試験条件における一二次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{1acc} : 特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B. 17 表に示す。

(p)-第 B. 17 表 特別の試験条件における一二次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
特別の試験条件における 一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1acc}	K	408.15 (135 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 °C)
特別の試験条件における一二次蓋間圧力	P_1'	MPa	0.418 (0.317 MPaG)

3. 二三次蓋間圧力

特別の試験条件における空気の温度を保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また、一般の試験条件と同様に、保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると、二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2' = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{1acc}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{1acc}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで、

- P_2' : 特別の試験条件における二三次蓋間圧力 (MPa)
- P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)
- P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)
- V_1 : 一二次蓋間体積 (m³)
- V_2 : 二三次蓋間体積 (m³)
- T_{1acc} : 特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)
- T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)
- T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ρ)-第 B. 18 表に示す。なお、この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に-20℃であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 1%増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(ρ)-第 B. 18 表 特別の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0. 300
二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧)	P_{20}	MPa	0. 101325
一二次蓋間体積	V_1	m ³	
二三次蓋間体積	V_2	m ³	
特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1acc}	K	408. 15 (135 ℃)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293. 15 (20 ℃)
三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293. 15 (20 ℃)
特別の試験条件における二三次蓋間圧力	P_2'	MPa	0. 353 (0. 252 MPaG)

4. 三次蓋－胴内圧力

密封解析に使用する三次蓋－胴内圧力は、設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮して一般の試験条件の胴内圧を 0.0970 MPa と仮定し、また、全燃料棒の密封機能が失われたと仮定して、燃料棒内に封入されていたヘリウム及び FP ガス放出による圧力上昇を考慮する。さらに、一次蓋及び二次蓋の密封性が失われたと仮定し、特別の試験条件における胴内ガスの温度上昇に伴う圧力上昇を考慮すると、三次蓋－胴内圧力は、以下のとおり求められる。

$$P_3' = \frac{P_{10} V_1 \frac{T_{0acc}}{T_{10}} + P_{20} V_2 \frac{T_{0acc}}{T_{20}} + \left(P_c \frac{T_{0acc}}{T_{0nor}} + P_{FP} \right) (V_c + V_p)}{V_1 + V_2 + V_c + V_p}$$

ここで、

- P_3' : 特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力 (MPa)
- P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)
- P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)
- P_c : 設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮した一般の試験条件の胴内圧 (MPa)
- P_{FP} : 胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力 (MPa)
- V_1 : 一二次蓋間体積 (m^3)
- V_2 : 二三次蓋間体積 (m^3)
- V_c : 胴内体積 (m^3)
- V_p : 全燃料棒内部の体積 (m^3)
- T_{0acc} : 特別の試験条件における胴内ヘリウム及び FP ガスの温度 (燃料集合体最高温度) (K)
- T_{0nor} : 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度 (燃料集合体最高温度) (K)
- T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)
- T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (p)-第 B. 19 表に示す。

(ロ)-第 B. 19 表 特別の試験条件における三次蓋-胴内圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値等
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧)	P_{20}	MPa	0.101325
設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮した 一般の試験条件胴内圧	P_c	MPa	0.0970
胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力	P_{FF}	MPa	0.208
一二次蓋間体積	V_1	m^3	<input type="text"/>
二三次蓋間体積	V_2	m^3	<input type="text"/>
胴内体積	V_c	m^3	<input type="text"/>
全燃料棒内部の体積	V_p	m^3	<input type="text"/>
特別の試験条件における胴内ヘリウム及び FP ガスの温度	T_{0acc}	K	514.15 (241 °C)
一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度	T_{0nor}	K	469.15 (196 °C)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 °C)
三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15 (20 °C)
特別の試験条件における 三次蓋-胴内圧力	P_3'	MPa	0.316 (0.215 MPaG)

B. 5. 5 最大熱応力

特別の試験条件において輸送物に生じる熱応力は、A. 6. 3 で説明したように容器各部位が熱膨張を拘束しあうことで生じ、最大熱応力については、温度差が最大になる火災事故発生時から 30 分後に生じる。

ただし、A. 6. 3 で示したとおり、容器に生じる最大熱応力は小さく、容器の構造健全性に問題はない。

B.5.6 結果の要約及びその評価

特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価を (p)-第 B.20 表に示す。本輸送物の状態は以下のとおりであり、損傷については他の解析に反映している。

- ・密封境界となる三次蓋 O リングの最高温度は 172 °C であり、使用限度 48 時間における使用可能温度である 300 °C を超えることはない。したがって、特別の試験条件において密封性能が失われることはない。
- ・蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度はそれぞれ 135 °C 及び 156 °C であり、使用可能温度 180 °C を超えることはない。一方、側部中性子遮蔽材の最高温度は 709 °C であり、使用可能温度を超えるが全て失われることはない。
- ・遮蔽解析においては、中性子遮蔽材の欠損を密度減少量として考慮する。なお、側部中性子遮蔽材だけでなく、蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材についても密度減少を考慮している。
- ・臨界解析においては、外筒までをモデル化し、中性子遮蔽材は全て失われるとしてモデル化しないことにより、中性子吸収効果を見逃し、保守側の解析を行う。
- ・その他の構成材料については、輸送物の健全性に対し悪影響を及ぼす温度には到達しない。

(p)-第 B. 20 表 特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価 (1/2)

項目	結果 [°C]	基準値 [°C]	評価	他の解析への条件
最高温度				
燃料集合体	241	—	—	—
バスケット	202	250 ¹⁷⁾	基準値以下	—
中性子遮蔽材	709 ^(注1)	180 ¹⁵⁾	蓋部、底部：基準値以下 ^(注2) 側部：基準値を超過 ^(注2)	遮蔽解析では密度減少量として考慮 臨界解析では保守側にモデル化しない
二次蓋金属ガスケット	134 ^(注3)	190 ¹⁴⁾	基準値以下	—
三次蓋 O リング	172 ^(注4)	300 ¹²⁾	基準値以下	—
胴	237	350 ¹⁸⁾	基準値以下	構造解析では □ °C を使用 ^(注5)

(注 1) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度。

(注 2) 蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度はそれぞれ 135 °C 及び 156 °C であり、使用可能温度 180 °C を超えることはない。一方、側部中性子遮蔽材の最高温度は 709 °C であり、使用可能温度を超えるが全て失われることはない。

(注 3) 保守側に評価するため、二次蓋の最高温度とする。

(注 4) 保守側に評価するため、三次蓋の最高温度とする。

(注 5) 構造解析における熱応力算出では、容器全体の温度分布を入力するが、(p)-第 B. 20 表には、許容値及び内圧計算に使用する温度を代表として示している。

(p)-第 B. 20 表 特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価 (2/2)

項目	結果 [MPa]	基準値 [MPa]	評価	他の解析への条件
最大内圧				
胴内圧	0.293 (0.192 MPaG)	—	—	構造解析では 0.240 MPaG を使用
一二次蓋間圧力	0.418 (0.317 MPaG)	—	—	構造解析では 0.350 MPaG を使用
二三次蓋間圧力	0.353 (0.252 MPaG)	—	—	構造解析では 0.360 MPaG を使用
三次蓋-胴内圧力	0.316 (0.215 MPaG)	—	—	密封解析では 0.316 MPa を使用

B.6 付属書類

B.6.1 解析に用いた対流熱伝達率について

B.6.1.1 全体モデルに用いた対流熱伝達率

1. 輸送物表面と周囲の熱伝達率

(1) 外筒表面の自然対流熱伝達率

外筒表面の自然対流熱伝達率は、水平円筒表面の自然対流熱伝達率を表わす次の Schutz の式²⁾を用いる。

$$h = 0.1 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t \text{Pr}}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

ただし、

h : 熱伝達率 (W/(m²・K))

λ : 熱伝導率 (W/(m・K))

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

β : 体積膨張係数 (K⁻¹)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

Pr : プラントル数

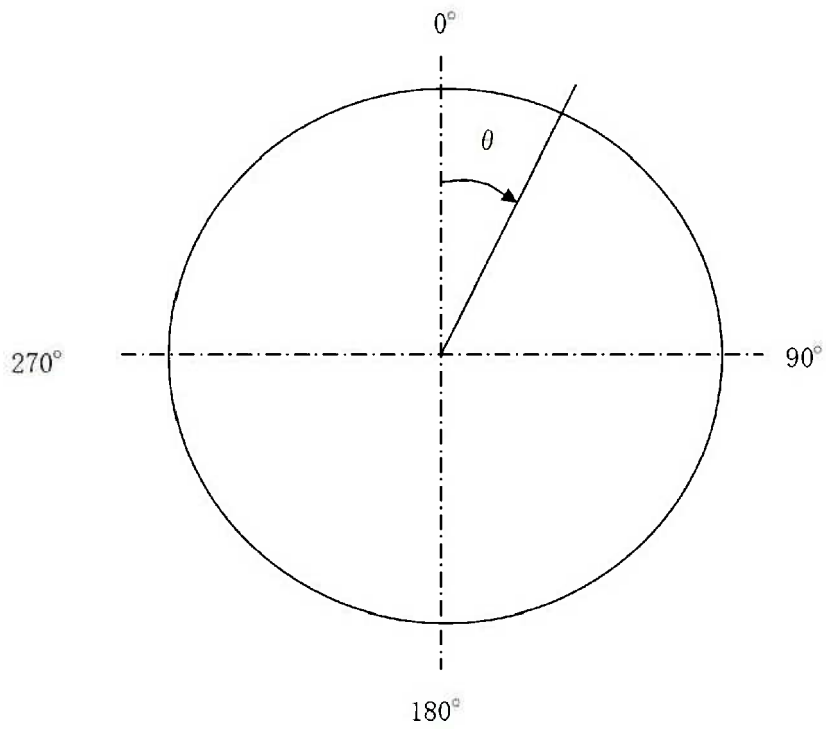
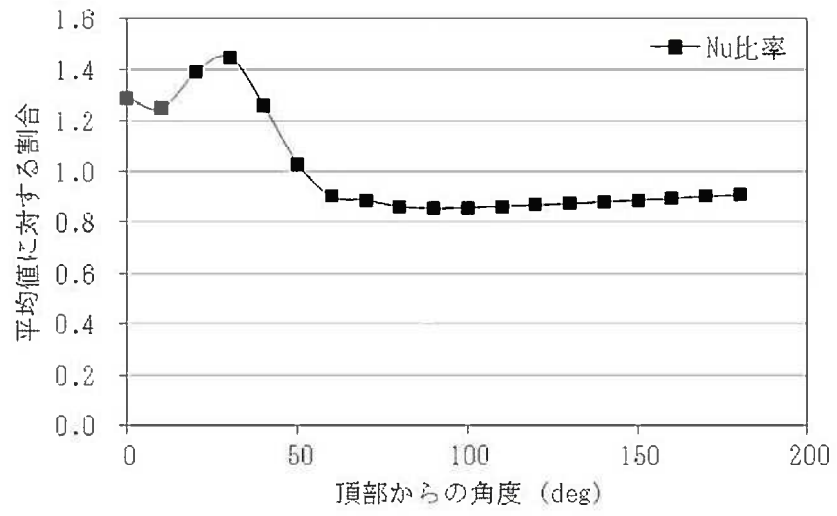
Δt : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を(ρ)-第B.付1表に示す。

ここで、実際に用いた熱伝達率としては、(ρ)-第B.付1図に示される水平円筒外表面の周方向分布を考慮して、0°～180°の平均値に対する割合のうち、90°～180°の割合を平均化して算出した係数(0.87)を(ρ)-第B.付1表の値に乗じた値を保守側に設定した。ただし、火災時に対しては入熱が多くなるよう(ρ)-第B.付1表の値を設定した。

(ρ)-第B.付1表 外筒表面の自然対流熱伝達率

温度(°C)	熱伝達率(W/(m ² ・K))
-20	1.33 Δt ^{1/3}
0	1.26 Δt ^{1/3}
20	1.20 Δt ^{1/3}
100	1.02 Δt ^{1/3}
200	0.863 Δt ^{1/3}
300	0.760 Δt ^{1/3}
400	0.682 Δt ^{1/3}
600	0.577 Δt ^{1/3}
800	0.500 Δt ^{1/3}



(p)-第 B. 付 1 図 外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布²²⁾

(2) 緩衝体円筒表面の自然対流熱伝達率

緩衝体円筒面に対しては外筒表面の自然対流熱伝達率にて使用した Schutz の式を用いる。(p)-第 B. 付 1 表に示す値に周方向分布を考慮した係数 0.87 を乗じて保守的な値を設定した。ただし、火災時に対しては人熱が多くなるように (p)-第 B. 付 1 表の値を設定した。

(3) 緩衝体垂直面の自然対流熱伝達率

緩衝体垂直表面の自然対流熱伝達率は、垂直平板に対する次の Jakob の式²³⁾を用いる。

$$h = 0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t_p}{\nu^2 \text{Pr}} \right)^{1/3}$$

ただし、

- h : 熱伝達率 (W/(m²・K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m・K))
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数
- Δt : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を (p)-第 B. 付 2 表に示す。

(p)-第 B. 付 2 表 垂直面の自然対流熱伝達率

温度(°C)	熱伝達率(W/(m ² ・K))
-20	1.72 Δt ^{1/3}
0	1.63 Δt ^{1/3}
20	1.55 Δt ^{1/3}
100	1.31 Δt ^{1/3}
200	1.11 Δt ^{1/3}
300	0.980 Δt ^{1/3}
400	0.880 Δt ^{1/3}
600	0.744 Δt ^{1/3}
800	0.645 Δt ^{1/3}

(4) 緩衝体と輸送容器本体との間の熱伝達

緩衝体と輸送容器本体の間には取合いの関係上ギャップがあり、この間の熱伝達は空気の熱伝導及び放射によるものとした。

B. 6. 2 混合気体の熱伝導率の計算式について

特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率は、ヘリウム及びFP ガス放出後の胴内のヘリウム及びFP ガスのモル分率を考慮して、混合気体の熱伝導率の計算式²⁾を用いて算出する。なお、FP ガスは生成量の多いキセノンとした。

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1}{1 + \phi_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + \phi_{21} \frac{x_1}{x_2}}$$
$$\phi_{12} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\eta_1 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{3/4} \left(1 + \frac{S_1}{T} \right)^{-1/2}}{\eta_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{3/4} \left(1 + \frac{S_2}{T} \right)} \right]^2 \right\} \left(\frac{1 + \frac{S_{12}}{T}}{1 + \frac{S_1}{T}} \right)$$

ここで、

- λ_m : 混合ガスの熱伝導率 (W/m/K)
- λ_1 : ヘリウムの熱伝導率 (W/m/K)
- λ_2 : 核分裂生成ガスの熱伝導率 (W/m/K)
- x_1 : ヘリウムの分圧 (MPa abs)
- x_2 : 核分裂生成ガスの分圧 (MPa abs)
- η_1 : ヘリウムの粘性率 (Pa·s)
- η_2 : 核分裂生成ガスの粘性率 (Pa·s)
- M_1 : ヘリウムの分子量 (-)
- M_2 : 核分裂生成ガスの分子量 (-)
- S : Sutherland 定数

計算条件及び計算結果を(ロ)-第B. 付3表に示す。

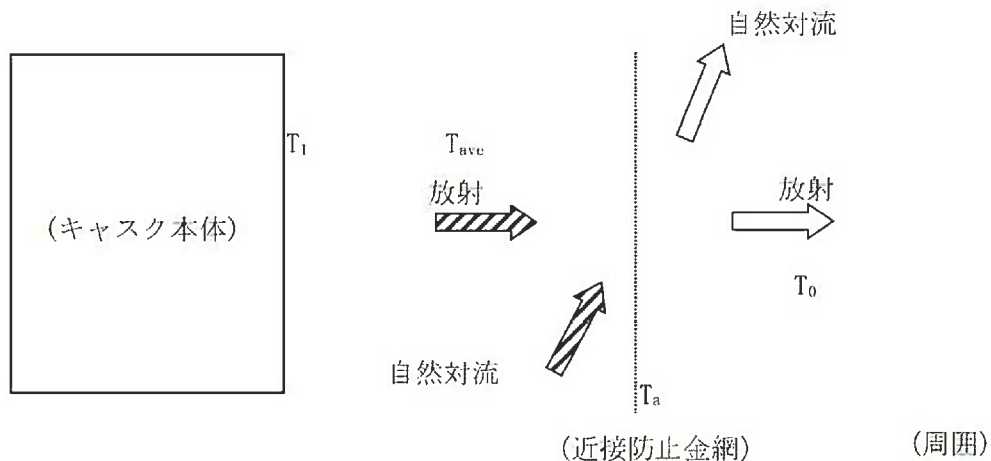
(㉓)-第 B. 付 3 表 胴内ガスの熱伝導率計算条件及び計算結果

項目		記号	単位	T : 温度 (K)			
				300	400	500	600
熱伝導率	ヘリウム	λ_1	W/(m·K)	0.1527	0.1882	0.2212	0.2523
	キセノン	λ_2	W/(m·K)	0.00562	0.00728	0.00881	0.01025
モル分率	ヘリウム	x_1	-	0.842			
	キセノン	x_2	-	0.158			
粘性係数	ヘリウム	η_1	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	19.93	24.29	28.36	32.21
	キセノン	η_2	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	23.30	30.29	36.80	42.81
分子量	ヘリウム	M_1	g/mol	4.002602			
	キセノン	M_2	g/mol	131.293			
標準沸点	ヘリウム	Tb_1	K	4.21			
	キセノン	Tb_2	K	164.1			
混合気体の熱伝導率		λ_m	W/(m·K)	0.0942	0.116	0.135	0.154

B. 6.3 近接防止金網の温度評価について

以下の考え方にに基づき近接防止金網の温度を評価した。(□)-第B.付2図参照)

- ①近接防止金網温度に対応する規則要件は 38℃の日陰における近接可能な容器表面最高温度を 85℃以下とすることであるから、太陽熱放射を考慮しない。
- ②近接防止金網は、当該輸送容器を架台上に設置した際に近接可能な外筒領域及びトラニオン領域を覆うように取り付けられている。
- ③近接防止金網は容器周りに垂直平板状に設けられているため、厚さを持たない板として考える。
- ④近接防止金網は輸送容器と周囲の自然対流を阻害しない形状とすることにより熱伝達を干渉しないものと仮定する。したがって、近接防止金網温度を求めるために使用する輸送容器表面の温度は一般の試験条件（人の近づきうる表面の最高評価条件）で得られた結果を用いる。
- ⑤温度を求めるに当たっては、自然対流と放射を考慮する。自然対流熱伝達率は垂直平板の自然対流熱伝達率を用いて評価する。これらを考慮して、容器から近接防止金網への入熱量と近接防止金網から大気への放熱量がつりあうように近接防止金網温度を定める。
- ⑥容器と近接防止金網間にある空気は自然対流の評価において、容器と近接防止金網の間の空気の温度は近接防止金網温度と容器表面温度の平均温度とする。



(□)-第B.付2図 近接防止金網周りの伝熱モデル

以上より、キャスク本体から近接防止金網への入熱量 Q_{in} 及び近接防止金網から大気への放熱量 Q_{out} は、それぞれ以下の式で表わされ、近接防止金網温度 T_a は、 $Q_{in}=Q_{out}$ を満たす T_a を求める。

$$\begin{cases} Q_{in}=h_1(T_{ave}-T_a)+\sigma F_r\{(T_1+273.15)^4-(T_a+273.15)^4\} \\ Q_{out}=h_0(T_a-T_0)+\sigma \varepsilon_2\{(T_a+273.15)^4-(T_0+273.15)^4\} \\ F_r=1/\{(1/\varepsilon_1)+(1/\varepsilon_2)-1\} \end{cases}$$

ただし、

- Q_{in} : 近接防止金網への入熱量 (W/m²)
- Q_{out} : 近接防止金網から大気への放熱量 (W/m²)
- h_1 : 入熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m²・K))
(□)-第 B. 付 4 表参照
- h_0 : 放熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m²・K))
(□)-第 B. 付 4 表参照
- T_1 : キャスク本体外表面温度 (99 °C)
(キャスク本体外表面において最も温度が高いトラニオンの温度)
- T_{ave} : キャスク本体外表面と近接防止金網の平均温度 (°C)
- T_a : 近接防止金網温度 (°C)
- T_0 : 周囲温度 (38 °C)
- σ : ステファン・ボルツマン定数 (5.670367×10⁻⁸ W/(m²・K⁴))
- F_r : 形態係数
- ε_1 : キャスク本体外表面の放射率 (0.8)
- ε_2 : 近接防止金網の放射率 (0.33 : アルミニウムの酸化面)

(□)-第 B. 付 4 表 垂直平板の自然対流熱伝達率

境界膜温度 (°C)	垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m ² ・K))
20	1.55 $\Delta T^{1/3}$
100	1.31 $\Delta T^{1/3}$
200	1.11 $\Delta T^{1/3}$

入熱の境界膜温度 : T_{ave}

放熱の境界膜温度 : $(T_a+T_0)/2$

容器表面各部位近傍に設けられた近接防止金網温度を(□)-第 B. 付 5 表に示す。容器表面に設けられた近接防止金網の温度は基準値(85℃)より低い。

(□)-第 B. 付 5 表 近接防止金網の温度評価結果

評価条件 (°C)		評価結果 (°C)
キャスク本体外表面温度 (T ₁)	周囲温度 (T ₀)	近接防止金網温度 (T _a)
99	38	64

B. 6. 4 参考文献

- 1) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual (6.12)”, (2012).
- 2) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).
- 3) American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)”, (2010).
- 4) 中性子吸収材メーカー資料
- 5) (公財)原子力安全研究協会, 「軽水炉燃料のふるまい 改訂第5版」, (2013).
- 6) D. L. Hagrman, G. A. Reymann, R. E. Mason, “MATPRO-Version 11(Rev.2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior,” EG&G Idaho Inc., (1981).
- 7) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- 8) 木材工業ハンドブック編集委員会, 「木材工業ハンドブック 改訂3版」, (1982).
- 9) (公社)日本化学会, 「化学便覧 基礎編 改訂5版」, (2004).
- 10) 三菱重工業(株), 「化学試験報告書 エポキシ系樹脂の熱特性測定結果」, (2006).
- 11) 産業技術センター, 「複合材料技術集成」, (1976).
- 12) (一財)電力中央研究所, 「輸送キャスク密封装置の耐熱限界性能の評価」, (1998).
- 13) (一財)電力中央研究所, 「平成20年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査)報告書」, (2009).
- 14) (独)原子力安全基盤機構, 「金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 1/3 最終報告」, (2004).
- 15) Y. Momma, et al., “Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask”, The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (1998).
- 16) (独)原子力安全基盤機構, 「平成18年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」, (2007).
- 17) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 18) (一社)日本機械学会, 「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(JSME S FA1-2007)」, (2007).
- 19) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Third Edition”, John Wiley & Sons, Inc., (1990).
- 20) 平成二年十一月二十八日科学技術庁告示第五号, 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示」.

- 21) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975).
- 22) 三角利之, 鈴木幸治, 北村健三, 「大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱 (空気の場合)」, (一社)日本機械学会, (1999).
- 23) M. Jakob, “Heat Transfer. Volume 1”, John Wiley & Sons, Inc., (1949).

C. 密封解析


C.1 概要

本輸送物は、B. 4. 6 に示すように一般の試験条件において密封境界の内部は負圧である。したがって、一般の試験条件における放射性物質の漏えいはないが、仮に密封境界の内部の圧力が大気圧になる場合を想定し、漏えい試験によって求めた密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し、その漏えい率が一般の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。また、特別の試験条件においては、密封境界の内部が正圧になる可能性があるため、同様に、漏えい試験によって求めた密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し、その漏えい率が特別の試験条件下における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。なお、(イ)-第 D. 4 表に示すとおり、17×17 型燃料と 14×14 型燃料では、17×17 型燃料の方が輸送容器 1 基当たりの ^3H と ^{85}Kr の放射能強度は大きいことから、密封解析は 17×17 型燃料で代表する。

なお、本評価における収納放射能量は、ORIGEN2. 2UPJ コードを用いて求めた。また、データライブラリは PWRU50 ライブラリを用いた。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

輸送容器の密封境界を構成する密封装置は、(イ)-第 C. 4 図に示すように収納物を収納する胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートから構成される。また、密封装置の材質は(イ)-第 C. 1 表に示すとおりである。なお、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートは、共に上部緩衝体で覆われているため、不用意に取り外されることはない。また、緩衝体の取付部には  を施すことができるようになっている。

C.2.2 密封装置の貫通部

密封装置には、(イ)-第 C. 13 図に示すように、三次蓋にリリーフバルブを設けるための貫通部が設けられている。リリーフバルブは二次蓋間と外部との圧力を同圧にするために用いられる。

C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

1. ガスケット

三次蓋及びリリーフバルブカバープレートには、(イ)-第 C. 12 図及び(イ)-第 C. 13 図に示すように EPDM 製の O リングが同心円状に設けられている。ガスケットの寸法は(イ)-第 C. 2 表に示すとおりである。

ガスケットは輸送容器の製作中に気密漏えい試験を行ってその健全性が確認される。

EPDM 製の O リングは、その耐熱性 (B. 4. 6 及び B. 5. 6) 及び耐寒性 (A. 4. 2) により、一般及び特別の試験条件並びに最低使用温度でも蓋の密封性を保つことができる。

2. 溶接部 (胴と底板を溶接する場合)

密封境界に係る溶接部は、胴と底板である。胴と底板は、金属キャスク構造規格等に準拠して実施した溶接施工法確認試験に合格した施工法に従って溶接施工される。

溶接部は製作中に放射線透過試験又は浸透探傷試験等を行ってその健全性が確認される。

C. 2. 4 蓋

三次蓋には、一般及び特別の試験条件の温度、圧力に耐える強度を備え、かつ、密封性を保つことができる O リングを設けている。三次蓋の密封性を保つため、蓋ボルトを適切なトルクで締付ける。

C. 3 一般の試験条件

一般の試験条件において密封装置の構造強度が維持され機能が損なわれないことは A. 5 により確認している。また、B. 4. 6 に示すように一般の試験条件における三次蓋と胴で構成される密封容器の圧力 (以下「三次蓋-胴内圧力」という。) は、0. 0825 MPa であり、設計評価期間中のヘリウムの内部への漏えいを考慮しても 0. 097 MPa 未満である。したがって、一般の試験条件において密封装置の加圧を考慮しても三次蓋-胴内圧力は負圧である。また、一般の試験条件において密封装置は健全であり漏えいはない。このように漏えいはないが、仮に密封境界の内部の圧力が大気圧の上限値 0. 105 MPa、外気圧が大気圧の下限値 0. 097 MPa であると仮定し、一般の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを確認する。

C. 3. 1 放射性物質の漏えい

1. 核分裂生成ガス

一般の試験条件において燃料棒の破損がないことは A. 5 により確認されているが、ここでは全収納物の 0. 1 % の燃料棒の密封性が失われたとし、燃料が有する放射性物質が (p)-第 C. 1 表に示す割合及び量で三次蓋-胴内雰囲気中に放出されると仮定する。なお、密封解析の対象とする燃料は、(i)-第 D. 4 表に示す放射能強度とする。

(ロ)-第 C.1 表 放射性物質の放出率

主要核種	収納放射能量 (TBq)	破損率 (%)	放出率 (%)	A ₂ 値 (TBq)	放出放射能量 (A ₂ 値比)	放射性物質濃度 ^(注1) (A ₂ 値比/ref cm ³)
³ H	□	0.1	10 ⁻¹¹	40	□	8.12×10 ⁻¹¹
⁸⁵ Kr				10		4.77×10 ⁻⁹
合計		—	—	—		4.85×10 ⁻⁹

(注1) 三次蓋一胴内ガス体積は □ ref cm³ である。

2. 一般の試験条件におけるガス漏えい率

一般の試験条件におけるガス漏えい率は、漏えい試験における許容漏えい率 L_{Rt} に基づいて求める。

(1) 漏えい試験における許容漏えい率

密封解析の設計基準として設定した許容漏えい率 L_{Rt} は、輸送容器の三次蓋の被検査部の漏えい率として(ロ)-第 C.2 表に示す値とする。なお、表中の各項目の添え字の 0 は、漏えい試験条件を示す。

(ロ)-第 C.2 表 許容漏えい率及び漏えい試験条件

項目		密封境界 (三次蓋及びリリーフバルブカバープレート)
L _{Rt} : 許容漏えい率 (ref cm ³ /s)		2×10 ⁻³
圧力条件	P _{u,0} : 上流側圧力 (MPa・abs)	0.760
	P _{d,0} : 下流側圧力 (MPa・abs)	0.101 (大気圧)
T ₀ : 温度 (K)		298.15
L _{u,0} : 漏えい試験時のガス漏えい率 (cm ³ /s, P _{u,0} , T ₀)		2.66×10 ⁻⁴

(2) 一般の試験条件におけるガス漏えい率

密封装置の漏えい孔径は、許容漏えい率に基づいて、以下の漏えい計算式により求める。なお、(1)～(6)式中の添え字の i は試験条件を表し、i=0 : 漏えい試験条件、i=1 : 一般の試験条件を表す。

$$L_{u,i} = (F_{c,i} + F_{m,i}) (P_{u,i} - P_{d,i}) \left(\frac{P_{a,i}}{P_{u,i}} \right)^{2.5} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

L_{u,i} : 圧力 P_{u,i} における漏えい率 (cm³/s at P_{u,i}, T_i)

F_{c,i} : 連続流の流動伝導係数 (cm³/(MPa・s))

$$F_{c,i} = \frac{\pi}{128} \times \frac{D_i^4}{a_i \mu_i} \dots \dots \dots (2)$$

$F_{m,i}$: 自由分子流の流動伝導係数 (cm³/(MPa・s))

$$F_{m,i} = \frac{\sqrt{2\pi R_0}}{6} \times \frac{D_i^3 \sqrt{\frac{T_i}{M}}}{a_i P_{a,i}} \dots \dots \dots (3)$$

$P_{u,i}$: 上流側の圧力 (MPa)

$P_{d,i}$: 下流側の圧力 (MPa)

$$P_{a,i} = \frac{1}{2}(P_{u,i} + P_{d,i}) \dots \dots \dots (4)$$

$P_{a,i}$: 流れの平均圧力 (MPa)

ただし、

D_i : 漏えい孔径 (cm)

a_i : 漏えい孔長 (cm)

μ_i : 粘性係数 (MPa・s)

R_0 : 気体定数 (8.3144598×10⁷ erg/(mol・K))⁴⁾

T_i : 流体の温度 (K)

M : 流体の分子量

また、漏えい試験条件において、 $L_{u,i}$ は次式で与えられる。

$$L_{u,i} = L_{RT} \left(\frac{P_s T_i}{P_{u,i} T_s} \right) \dots \dots \dots (5)$$

ここで、

L_{RT} : 許容漏えい率(2箇所) (ref cm³/s)

P_s : 基準圧力 (0.101 MPa)

T_s : 基準温度 (298.15 K)

一般の試験条件におけるガス漏えい率は、漏えい孔が漏えい試験時の漏えい孔径を維持するとして、上記の漏えい計算式により求める。

また、次式により上記のガス漏えい率 ($L_{u,i}$) を 25 °C、0.101 MPa (1 atm) の標準状態における漏えい率 $L_{x,i}$ に換算する。

$$L_{x,i} = L_{u,i} \left(\frac{P_{u,i} T_s}{P_s T_i} \right) \dots \dots \dots (6)$$

一般の試験条件におけるガス漏えい率を (v)-第C.3表 に示す。

(p)-第 C. 3 表 一般の試験条件におけるガス漏えい率

項目(注1)	部位	密封境界	
		三次蓋	リリースバルブ カバープレート
$P_{u,1}$: 上流側圧力	(MPa)	0.105	
$P_{d,1}$: 下流側圧力	(MPa)	0.097	
T_1 : 流体の温度	(K)	383.15 (注2)	
a_1 : 漏えい孔長	(cm)	<input type="text"/> (注3)	<input type="text"/> (注3)
D_1 : 漏えい孔径	(cm)	<input type="text"/>	
$L_{u,1}$: 一般の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,1}$, T_1)		5.95×10^{-6}	6.50×10^{-6}
$L_{s,1}$: 一般の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at 0.101 MPa, 25 °C)		4.82×10^{-6} ($1.73 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{h}$)	5.26×10^{-6} ($1.89 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{h}$)

(注1)各項目の添え字の1は、一般の試験条件 ($i=1$) を示す。

(注2)三次蓋ガスケット部温度

(注3)Oリングの断面直径を採用

3. 一般の試験条件における放射性物質の漏えい率

一般の試験条件における放射性物質の漏えい率は、(p)-第 C. 1 表に示す密封装置内にガス状で存在する核種の放射性物質濃度と前項で求めた一般の試験条件におけるガス漏えい率 ($L_{s,i}$) を乗じて求められる。

なお、ここでは保守的に漏えい率の大きいリリースバルブカバープレートにおけるガス漏えい率を用いて評価する。

一般の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めたガス中の放射性物質の漏えい率、基準値 A_2 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$ 及び漏えい率と基準値との比率を (p)-第 C. 4 表に示す。密封装置からの放射性物質の1時間当たりの漏えい量と各核種の基準値 A_2 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$ との比率の合計は1よりも小さい。

(p)-第 C. 4 表 一般の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

核種	放射性物質漏えい率 (Bq/h)	基準値 : A_2 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$ (Bq/h)	比率
^3H	6.15×10^1	4×10^7	1.54×10^{-6}
^{85}Kr	9.04×10^2	1×10^7	9.04×10^{-5}
		合計	9.19×10^{-5}

C. 3. 2 密封装置の加圧

密封装置の加圧は、密封装置内のガスの温度上昇及び設計評価期間中の一次蓋と二次蓋間に充填されているヘリウムのキャスク本体内部への漏えいにより生じる。さらに、全取

納物の 0.1 %の燃料棒の密封機能が失われ核分裂生成ガスがキャスク本体内部に放出されたと仮定しても、三次蓋と胴で構成される密封装置内の圧力は負圧に維持される。

C. 3.3 冷却材汚染

輸送容器は、冷却水を用いない乾式タイプであり、冷却材は使用しない。

C. 3.4 冷却材損失

輸送容器は、冷却水を用いない乾式タイプであり、冷却材は使用しない。したがって、冷却材の損失はない。また、密封装置にはベント装置はない。

C. 4 特別の試験条件

特別の試験条件において密封装置の構造強度が維持され機能が損なわれないことは A. 6 により確認している。また、B. 5. 6 に示すように特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力は、0.316 MPa である。

C. 4.1 核分裂生成ガス

特別の試験条件において、安全側に全燃料棒の密封性が失われたと仮定し、燃料が有する放射性物質が (□)-第 C. 5 表に示す割合及び量で三次蓋－胴内雰囲気中に放出されると仮定する。

(□)-第 C. 5 表 放射性物質の放出率

主要核種	収納放射能量 (TBq)	放出率 (%)	A ₂ 値 ^(注 1) (TBq)	放出放射能量 (A ₂ 値比)	放射性物質濃度 ^(注 2) (A ₂ 値比/ref cm ³)
³ H	□	10 ¹⁾	40	□	2.95×10 ⁻⁸
⁸⁵ Kr			100		1.74×10 ⁻⁷
合計		—	—		2.03×10 ⁻⁷

(注 1) ⁸⁵Kr については A₂ 値の 10 倍である。

(注 2) 三次蓋－胴内ガス体積は □ ref cm³ である。

C. 4.2 放射性物質の漏えい

1. 特別の試験条件におけるガス漏えい率

特別の試験条件におけるガス漏えい率は、(1)～(6)式に特別の試験条件下の圧力、温度条件、ガス物性値及び漏えい孔寸法を代入して求められる。

特別の試験条件におけるガス漏えい率を (□)-第 C. 6 表に示す。

(u)-第 C. 6 表 特別の試験条件におけるガス漏えい率

項目(注1)	部位	密封境界	
		三次蓋	リリースバルブ カバープレート
$P_{u,2}$: 上流側圧力	(MPa)	0.316	
$P_{d,2}$: 下流側圧力	(MPa)	0.097	
T_2 : 流体の温度	(K)	453.15 (注2)	
a_2 : 漏えい孔長	(cm)	<input type="text"/> (注3)	<input type="text"/> (注3)
D_2 : 漏えい孔径	(cm)	<input type="text"/>	
$L_{u,2}$: 特別の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,2}$, T_2)		8.70×10^{-5}	9.21×10^{-5}
$L_{x,2}$: 特別の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at 0.101 MPa, 25 °C)		1.79×10^{-4} ($1.08 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{week}$)	1.90×10^{-4} ($1.15 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{week}$)

(注1)各項目の添え字の2は、特別の試験条件(i=2)を示す。

(注2)三次蓋ガスケット部温度

(注3)Oリングの断面直径を採用

2. 特別の試験条件における放射性物質の漏えい率

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率は、(u)-第 C. 5 表に示す密封装置内にガス状で存在する核種の放射性物質濃度と前項で求めた特別の試験条件におけるガス漏えい率($L_{x,2}$)を乗じて求められる。

なお、ここでは保守的に漏えい率の大きいリリースバルブカバープレートにおけるガス漏えい率を用いて評価する。

特別の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めたガス中の放射性物質の漏えい率、基準値 A_2 値/week 及び漏えい率と基準値との比率を(u)-第 C. 7 表に示す。密封装置からの放射性物質の1週間当りの漏えい量と各核種の基準値 A_2 値/week との比率の合計は1よりも小さい。

(u)-第 C. 7 表 特別の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

核種	放射性物質漏えい率 (Bq/week)	基準値 : A_2 値/week (Bq/week)	比率
^3H	1.36×10^8	4×10^{13}	3.40×10^{-6}
^{85}Kr	1.99×10^9	1×10^{14}	1.99×10^{-5}
		合計	2.33×10^{-5}

C.5 結果の要約及びその評価

密封解析の評価結果は以下に示すとおりであり、輸送容器の密封性能は規則及び告示に定められる BM 型輸送物に係る技術上の基準に適合する。

1. 密封装置

輸送容器の主な密封装置は、胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートで構成されている。この密封装置は、一般及び特別の試験条件に対して十分な強度を有し、また、ガスケットの密封機能が損なわれることはない。

2. 一般の試験条件

(1) 放射性物質の漏えい

輸送物は一般の試験条件では負圧を維持するため、放射性物質の環境への漏えいはないが、三次蓋－胴内圧力が大気圧上限値まで上昇し、その後大気圧下限値の環境下に置かれたとしても、一般の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は最大 9.19×10^{-5} であり、放射性物質の漏えい率は基準値 A_2 値 $\times 10^{-6}/h$ を満足する。

(2) 密封装置の加圧

密封装置の加圧は、主に密封装置の内部ガスの温度上昇による。A.5 に示したようにこの加圧により密封機能が損なわれるような変形は生じない。

3. 特別の試験条件

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は最大 2.33×10^{-5} であり、放射性物質の漏えい率は基準値 A_2 値/week を満足する。

C.6 付属書類

C.6.1 参考文献

- 1) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準: 2013」, (2014).
- 2) American National Standards Institute, Inc., “American National Standard for Radioactive Materials - Leakage Tests on Packages for Shipment”, ANSI N14.5-2014, (2014).
- 3) International Organization for Standardization, “Safe transport of radioactive materials - Leakage testing on packages”, ISO 12807, (1996).
- 4) 自然科学研究機構 国立天文台, 「理科年表(平成28年度版)」, (2015).

D. 遮蔽解析

D.1 概要

本輸送容器の主要なガンマ線遮蔽材は、(イ)-第 C. 5 図及び(イ)-第 C. 6 図に示すとおり、側部方向には胴及び外筒の炭素鋼であり、軸方向には胴（底部）及び蓋の炭素鋼等である。主要な中性子遮蔽材は、側部方向の胴と外筒間のレジンであり、軸方向の底部及び蓋部のレジンである。また、側部方向の胴及び外筒の炭素鋼、軸方向の胴（底部）及び蓋の炭素鋼等もその役目をする。

線源としては核分裂生成物、アクチノイドによる線源及び構造材の放射化による線源を考えた。線源強度は、ORIGEN2.2UPJ コード¹⁾及び放射化計算式により連続照射を仮定して求めた。また、ORIGEN2.2UPJ コードによる線源強度計算で用いるライブラリは、ORIGEN2.2UPJ コード内蔵の PWRU50 及び PWRU のデータを使用した。

一般の試験条件下及び特別の試験条件下においては、想定される輸送容器及び収納物の状態を考慮して線量当量率を評価した。

線量当量率の計算には、DOT3.5 コード²⁾を用いた。また、線量当量率評価で用いる断面積ライブラリは、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ MATXSLIB-J33（以下、「MATXSLIB-J33」という。）のデータ³⁾を使用した。

これらの計算から得られた線量当量率は、規則及び告示で定められた基準を満足する。

D.2 線源仕様

線源強度の計算に用いる燃焼度、照射日数、初期濃縮度及び冷却日数を(ロ)-第 D.1 表に示す。

線源強度の計算は(ロ)-第 D.1 表に示した平均比出力で連続照射したものとして行った。

なお、バーナブルポイズン集合体は中央部 9 体に挿入されているものとした。

(ロ)-第 D.2 表に燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度を示す。(ロ)-第 D.2 表より構造材放射化ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い下記に示す使用済燃料集合体を収納した場合を対象として遮蔽解析を実施した。

中央部：14×14 燃料 55,000MWd/t 型（B 型）

外周部：14×14 燃料 48,000MWd/t 型（B 型）

(ロ)第D.1表 収納物の線源計算条件(1/2)

燃料集合体の種類と型式		中央部						外周部							
		14×14 燃料													
条件:	燃焼度 (MWd/t)	55,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		55,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		55,000MWd/t 型	
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
照射	使用済燃料集合体														
日数 (日)	バーナブルポイズン集合体														
平均比出力 ^(注1) (MW/t)		33.7		34.0		34.0		33.7		33.7		34.0		34.0	
冷却	初期濃縮度 ^(注2) (wt%)														
	使用済燃料集合体														
日数 (日)	バーナブルポイズン集合体														
ウラン重量 (kg/体)															

(注1)比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注2)初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(ロ) 第 D.1 表 収納物の線源計算条件(2/2)

燃料集合体の種類と型式		中央部			外周部				
		17×17 燃料							
条件	燃焼度 (MWd/t)	48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
	使用済燃料集合体	A 型		B 型		A 型		B 型	
	バーナブルポイズン集合体	B 型		A 型		B 型		A 型	
照射日数 (日)	平均比出力 (注 1) (MW/t)	38.4							
冷却日数 (日)	初期濃縮度 (注 2) (wt%)								
照射日数 (日)	使用済燃料集合体	38.4							
冷却日数 (日)	バーナブルポイズン集合体								
ウラン重量 (kg/体)	ウラン重量 (kg/体)	38.4							

(注 1) 比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注 2) 初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(e)-第D.2表 燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度

(輸送物1基当たり)

燃料集合体の種類と型式 放射線種類	14×14 燃料 55,000MWd/t 型 / 48,000MWd/t 型 (注1)		14×14 燃料 39,000MWd/t 型 (注2)		17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (注3)		17×17 燃料 39,000MWd/t 型 (注4)	
	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	9.112×10 ¹⁶	9.112×10 ¹⁶	7.064×10 ¹⁶	7.064×10 ¹⁶	9.334×10 ¹⁶	8.044×10 ¹⁶	7.934×10 ¹⁶	6.849×10 ¹⁶
構造材放射化ガンマ線 (注5) (⁶⁰ Co TBq)	3.169×10 ²	4.802×10 ²	3.890×10 ²	4.117×10 ²	4.309×10 ²	2.817×10 ²	4.282×10 ²	2.460×10 ²
燃料有効部中性子 (注6) (n/s)	1.164×10 ¹⁰	1.164×10 ¹⁰	6.601×10 ⁹	6.601×10 ⁹	1.027×10 ¹⁰	8.540×10 ⁹	7.356×10 ⁹	6.121×10 ⁹

(注1) 中央部9体の燃焼度を MWd/t、外周部12体の燃焼度を MWd/tとした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注2) 中央部9体及び外周部12体の燃焼度を全て MWd/tとした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注3) 中央部9体の燃焼度を MWd/t、外周部12体の燃焼度を MWd/tとした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注4) 中央部9体及び外周部12体の燃焼度を全て MWd/tとした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注5) バーナブルボイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注6) 記載値は実効増倍率 keff を考慮した全中性子源強度とした。

D. 2. 1 ガンマ線源

1. 燃料有効部のガンマ線源

燃料有効部のガンマ線源は、核分裂生成物及びアクチノイドによるものである。ガンマ線源強度の計算は、ORIGEN2. 2UPJ コードを用いて行った。計算においては、付属書類 D. 6. 1 に示す軸方向の燃焼度分布を考慮した。

燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度を (a)-第 D. 3 表に示す。

(ロ)-第D.3表 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度

(輸送物1基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.104×10^{16}	1.252×10^{16}	2.356×10^{16}
2	0.025	2.215×10^{15}	2.524×10^{15}	4.740×10^{15}
3	0.0375	2.847×10^{15}	3.249×10^{15}	6.096×10^{15}
4	0.0575	2.216×10^{15}	2.542×10^{15}	4.758×10^{15}
5	0.085	1.260×10^{15}	1.429×10^{15}	2.689×10^{15}
6	0.125	1.214×10^{15}	1.374×10^{15}	2.588×10^{15}
7	0.225	1.050×10^{15}	1.191×10^{15}	2.241×10^{15}
8	0.375	4.441×10^{14}	5.065×10^{14}	9.507×10^{14}
9	0.575	1.878×10^{16}	2.158×10^{16}	4.037×10^{16}
10	0.85	8.691×10^{14}	9.734×10^{14}	1.842×10^{15}
11	1.25	5.899×10^{14}	6.650×10^{14}	1.255×10^{15}
12	1.75	1.810×10^{13}	2.042×10^{13}	3.852×10^{13}
13	2.25	8.889×10^9	1.129×10^{10}	2.018×10^{10}
14	2.75	5.651×10^9	5.881×10^9	1.153×10^{10}
15	3.5	5.208×10^8	5.502×10^8	1.071×10^9
16	5.0	1.761×10^8	1.751×10^8	3.512×10^8
17	7.0	2.030×10^7	2.020×10^7	4.050×10^7
18	9.5	2.332×10^6	2.320×10^6	4.652×10^6
合計		4.254×10^{16}	4.858×10^{16}	9.112×10^{16}

2. 放射化線源

燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源のうち、容器外部の線量当量率に寄与するものは、構造材中に含まれる⁵⁹Coの(n, γ)反応により生じる⁶⁰Coが大部分である。⁶⁰Coの放射化線源強度は次式を用いて求めた。

$$A = N_0 \sigma \phi \{1 - \exp(-\lambda T_1)\} \times \exp(-\lambda T_2)$$

ここで、

A : 放射化核種 (⁶⁰Co) の放射能 (Bq)

N₀ : ターゲット核種 (⁵⁹Co) の個数 (atoms)

σ : 2200 m/s の中性子による⁵⁹Coの(n, γ)反応断面積 (cm²)
(37.2 barn = 37.2 × 10⁻²⁴ cm²)^(注)

φ : 炉内照射熱中性子束 (n / (cm² · s))^(注)

λ : ⁶⁰Coの崩壊定数 (3.6001 × 10⁻⁴ / 日)

T₁ : 照射日数 (日)

T₂ : 冷却日数 (日)

線源強度の計算にあたって、燃料集合体構造材のガンマ線源強度は、上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部プレナム部及び下部ノズル部の5領域に分けて求める。

⁶⁰Coの放射化線源強度計算結果を(□)-第D.4表に示す。

なお、⁶⁰Coは1崩壊で1.17MeVと1.33MeVのガンマ線を1個ずつ放出するものとした。

(注) 炉設計コードによる炉心計算で求められた軸方向炉内中性子束分布の典型例により放射化評価部位での熱中性子束を求めた。

(ロ)-第 D.4 表 燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度

(輸送物 1 基当たり)

モデル化領域	燃料集合体構造材の線源強度 (^{60}Co TBq)		
	中央部 (注)	外周部	合計
上部ノズル部	1.055×10^1 (2.552×10^0)	5.257×10^0	1.581×10^1 (2.552×10^0)
上部プレナム部	6.264×10^1 (2.793×10^0)	7.531×10^1	1.380×10^2 (2.793×10^0)
燃料有効部	1.681×10^2 (9.570×10^1)	9.311×10^1	2.612×10^2 (9.570×10^1)
下部プレナム部	9.245×10^0	1.244×10^1	2.169×10^1
下部ノズル部	1.906×10^1	2.454×10^1	4.360×10^1

(注)燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度の合計値 () 内はバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度)

D.2.2 中性子源

燃料中には中性子源となるアクチノイドが生成される。これらの核種から中性子が発生する反応は、自発核分裂及び (α, n) 反応である。一次中性子源強度の計算は、ORIGEN2.2UPJコードを用いて行った。計算においては、付属書類D.6.1に示す軸方向の燃焼度分布を考慮した。

体系の増倍効果を考慮した全中性子源強度 (N_s) は次式で求めた。

$$N_s = N_o / (1 - k_{eff})$$

ここで、

N_o : 輸送物1基当りの一次中性子源強度

k_{eff} : 使用済燃料を収納した場合の輸送物の実効増倍率

ここでは乾燥状態において使用済燃料を収納した場合の輸送物の k_{eff} を考慮した。

解析に用いた中性子源強度を(Ⅱ)-第D.5表に示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源及び増倍による ^{235}U 及び ^{239}Pu の核分裂線源であり、 (α, n) 反応による線源はわずかである。

そこで、計算に用いる線源のエネルギースペクトルは、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとした。計算に使用する ^{239}Pu の核分裂スペクトルを(Ⅱ)-第D.6表に示す。

(Ⅱ)-第D.5表 中性子源強度

(輸送物1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 N_o (n/s)	(α, n) 反応	7.490×10^7	7.956×10^7	1.545×10^8
	自発核分裂	4.010×10^9	3.986×10^9	7.996×10^9
	合計	4.085×10^9	4.066×10^9	8.150×10^9
輸送物の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.30		
全中性子源強度 N_s (n/s)		5.836×10^9	5.808×10^9	1.164×10^{10}

(注)ORIGEN2.2UPJコードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法(KENO-VIコード)により評価して得られた値である。

(ロ)-第 D. 6 表 中性子源スペクトル (1/5)

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
1	1.964×10^7	0.0
2	1.733×10^7	7.107×10^{-6}
3	1.691×10^7	7.117×10^{-6}
4	1.649×10^7	2.368×10^{-5}
5	1.568×10^7	3.835×10^{-5}
6	1.492×10^7	2.686×10^{-5}
7	1.455×10^7	3.351×10^{-5}
8	1.419×10^7	4.165×10^{-5}
9	1.384×10^7	5.111×10^{-5}
10	1.350×10^7	1.392×10^{-4}
11	1.284×10^7	1.018×10^{-4}
12	1.252×10^7	1.017×10^{-4}
13	1.221×10^7	2.917×10^{-4}
14	1.162×10^7	4.082×10^{-4}
15	1.105×10^7	5.613×10^{-4}
16	1.051×10^7	7.571×10^{-4}
17	1.000×10^7	1.002×10^{-3}
18	9.512×10^6	1.303×10^{-3}
19	9.048×10^6	1.668×10^{-3}
20	8.607×10^6	2.101×10^{-3}
21	8.187×10^6	2.608×10^{-3}
22	7.788×10^6	3.191×10^{-3}
23	7.408×10^6	3.853×10^{-3}
24	7.047×10^6	4.592×10^{-3}
25	6.703×10^6	1.708×10^{-3}
26	6.592×10^6	3.698×10^{-3}
27	6.376×10^6	6.293×10^{-3}
28	6.065×10^6	7.243×10^{-3}
29	5.770×10^6	8.251×10^{-3}
30	5.488×10^6	9.302×10^{-3}
31	5.221×10^6	1.039×10^{-2}
32	4.966×10^6	1.151×10^{-2}
33	4.724×10^6	1.263×10^{-2}
34	4.493×10^6	2.859×10^{-2}
35	4.066×10^6	3.286×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(v)-第 D. 6 表 中性子源スペクトル (2/5)

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
36	3.679×10^6	3.674×10^{-2}
37	3.329×10^6	1.965×10^{-2}
38	3.166×10^6	2.042×10^{-2}
39	3.012×10^6	2.108×10^{-2}
40	2.865×10^6	2.165×10^{-2}
41	2.725×10^6	2.214×10^{-2}
42	2.592×10^6	2.252×10^{-2}
43	2.466×10^6	1.517×10^{-2}
44	2.385×10^6	3.833×10^{-3}
45	2.365×10^6	3.812×10^{-3}
46	2.346×10^6	7.657×10^{-3}
47	2.307×10^6	1.535×10^{-2}
48	2.231×10^6	2.310×10^{-2}
49	2.123×10^6	2.312×10^{-2}
50	2.019×10^6	2.305×10^{-2}
51	1.921×10^6	2.290×10^{-2}
52	1.827×10^6	2.267×10^{-2}
53	1.738×10^6	2.236×10^{-2}
54	1.653×10^6	2.200×10^{-2}
55	1.572×10^6	2.160×10^{-2}
56	1.496×10^6	2.115×10^{-2}
57	1.423×10^6	2.059×10^{-2}
58	1.353×10^6	2.010×10^{-2}
59	1.287×10^6	1.947×10^{-2}
60	1.225×10^6	1.892×10^{-2}
61	1.165×10^6	1.827×10^{-2}
62	1.108×10^6	3.460×10^{-2}
63	1.003×10^6	1.367×10^{-2}
64	9.616×10^5	1.834×10^{-2}
65	9.072×10^5	1.502×10^{-2}
66	8.629×10^5	1.437×10^{-2}
67	8.209×10^5	1.372×10^{-2}
68	7.808×10^5	1.309×10^{-2}
69	7.427×10^5	1.247×10^{-2}
70	7.065×10^5	1.186×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第 D. 6 表 中性子源スペクトル (3/5)

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
71	6.721×10^5	1.127×10^{-2}
72	6.393×10^5	1.070×10^{-2}
73	6.081×10^5	1.014×10^{-2}
74	5.784×10^5	9.605×10^{-3}
75	5.502×10^5	9.086×10^{-3}
76	5.234×10^5	8.591×10^{-3}
77	4.979×10^5	1.576×10^{-2}
78	4.505×10^5	1.401×10^{-2}
79	4.076×10^5	6.397×10^{-3}
80	3.877×10^5	6.017×10^{-3}
81	3.688×10^5	1.097×10^{-2}
82	3.337×10^5	9.670×10^{-3}
83	3.020×10^5	1.040×10^{-3}
84	2.985×10^5	3.887×10^{-4}
85	2.972×10^5	7.998×10^{-4}
86	2.945×10^5	2.159×10^{-3}
87	2.873×10^5	4.115×10^{-3}
88	2.732×10^5	7.463×10^{-3}
89	2.472×10^5	3.378×10^{-3}
90	2.352×10^5	3.160×10^{-3}
91	2.237×10^5	2.955×10^{-3}
92	2.128×10^5	2.763×10^{-3}
93	2.024×10^5	2.581×10^{-3}
94	1.926×10^5	2.411×10^{-3}
95	1.832×10^5	2.254×10^{-3}
96	1.742×10^5	2.100×10^{-3}
97	1.657×10^5	1.964×10^{-3}
98	1.576×10^5	1.828×10^{-3}
99	1.500×10^5	1.709×10^{-3}
100	1.426×10^5	1.590×10^{-3}
101	1.357×10^5	1.485×10^{-3}
102	1.291×10^5	1.384×10^{-3}
103	1.228×10^5	1.287×10^{-3}
104	1.168×10^5	1.202×10^{-3}
105	1.111×10^5	2.653×10^{-3}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第 D. 6 表 中性子源スペクトル (4/5)

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
106	9.804×10^4	2.219×10^{-3}
107	8.652×10^4	7.446×10^{-4}
108	8.250×10^4	5.458×10^{-4}
109	7.950×10^4	1.324×10^{-3}
110	7.200×10^4	7.861×10^{-4}
111	6.738×10^4	1.744×10^{-3}
112	5.656×10^4	6.216×10^{-4}
113	5.248×10^4	8.958×10^{-4}
114	4.631×10^4	7.457×10^{-4}
115	4.087×10^4	8.384×10^{-4}
116	3.431×10^4	2.982×10^{-4}
117	3.183×10^4	3.831×10^{-4}
118	2.850×10^4	1.659×10^{-4}
119	2.700×10^4	1.020×10^{-4}
120	2.606×10^4	1.347×10^{-4}
121	2.479×10^4	6.373×10^{-5}
122	2.418×10^4	6.142×10^{-5}
123	2.358×10^4	1.712×10^{-4}
124	2.188×10^4	2.461×10^{-4}
125	1.931×10^4	3.741×10^{-4}
126	1.503×10^4	2.577×10^{-4}
127	1.171×10^4	7.100×10^{-5}
128	1.060×10^4	1.066×10^{-4}
129	9.119×10^3	1.222×10^{-4}
130	7.102×10^3	8.411×10^{-5}
131	5.531×10^3	5.787×10^{-5}
132	4.307×10^3	2.564×10^{-5}
133	3.707×10^3	1.416×10^{-5}
134	3.355×10^3	1.219×10^{-5}
135	3.035×10^3	1.050×10^{-5}
136	2.747×10^3	4.685×10^{-6}
137	2.613×10^3	4.348×10^{-6}
138	2.485×10^3	7.778×10^{-6}
139	2.249×10^3	6.696×10^{-6}
140	2.035×10^3	1.294×10^{-5}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第 D. 6 表 中性子源スペクトル (5/5)

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
141	1.585×10^3	8.896×10^{-6}
142	1.234×10^3	6.116×10^{-6}
143	9.611×10^2	4.204×10^{-6}
144	7.485×10^2	2.890×10^{-6}
145	5.830×10^2	1.986×10^{-6}
146	4.540×10^2	1.365×10^{-6}
147	3.536×10^2	9.385×10^{-7}
148	2.754×10^2	6.450×10^{-7}
149	2.145×10^2	4.433×10^{-7}
150	1.670×10^2	3.047×10^{-7}
151	1.301×10^2	2.094×10^{-7}
152	1.013×10^2	1.439×10^{-7}
153	7.889×10^1	9.893×10^{-8}
154	6.144×10^1	6.799×10^{-8}
155	4.785×10^1	4.673×10^{-8}
156	3.727×10^1	3.201×10^{-8}
157	2.902×10^1	2.218×10^{-8}
158	2.260×10^1	1.517×10^{-8}
159	1.760×10^1	1.043×10^{-8}
160	1.371×10^1	7.168×10^{-9}
161	1.068×10^1	4.925×10^{-9}
162	8.315×10^0	3.385×10^{-9}
163	6.476×10^0	2.327×10^{-9}
164	5.044×10^0	1.599×10^{-9}
165	3.928×10^0	1.099×10^{-9}
166	3.059×10^0	7.657×10^{-10}
167	2.382×10^0	5.087×10^{-10}
168	1.855×10^0	3.568×10^{-10}
169	1.445×10^0	2.452×10^{-10}
170	1.125×10^0	1.686×10^{-10}
171	8.764×10^{-1}	1.158×10^{-10}
172	6.826×10^{-1}	7.961×10^{-11}
173	5.316×10^{-1}	5.472×10^{-11}
174	4.140×10^{-1}	1.060×10^{-10}
175	1.000×10^{-1}	1.427×10^{-11}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

遮蔽解析モデルは二次元 (R-Z) モデルとし、トラニオンのない方向の断面をモデル化した。

各試験条件下におけるモデル化は以下に示す条件を考慮した。

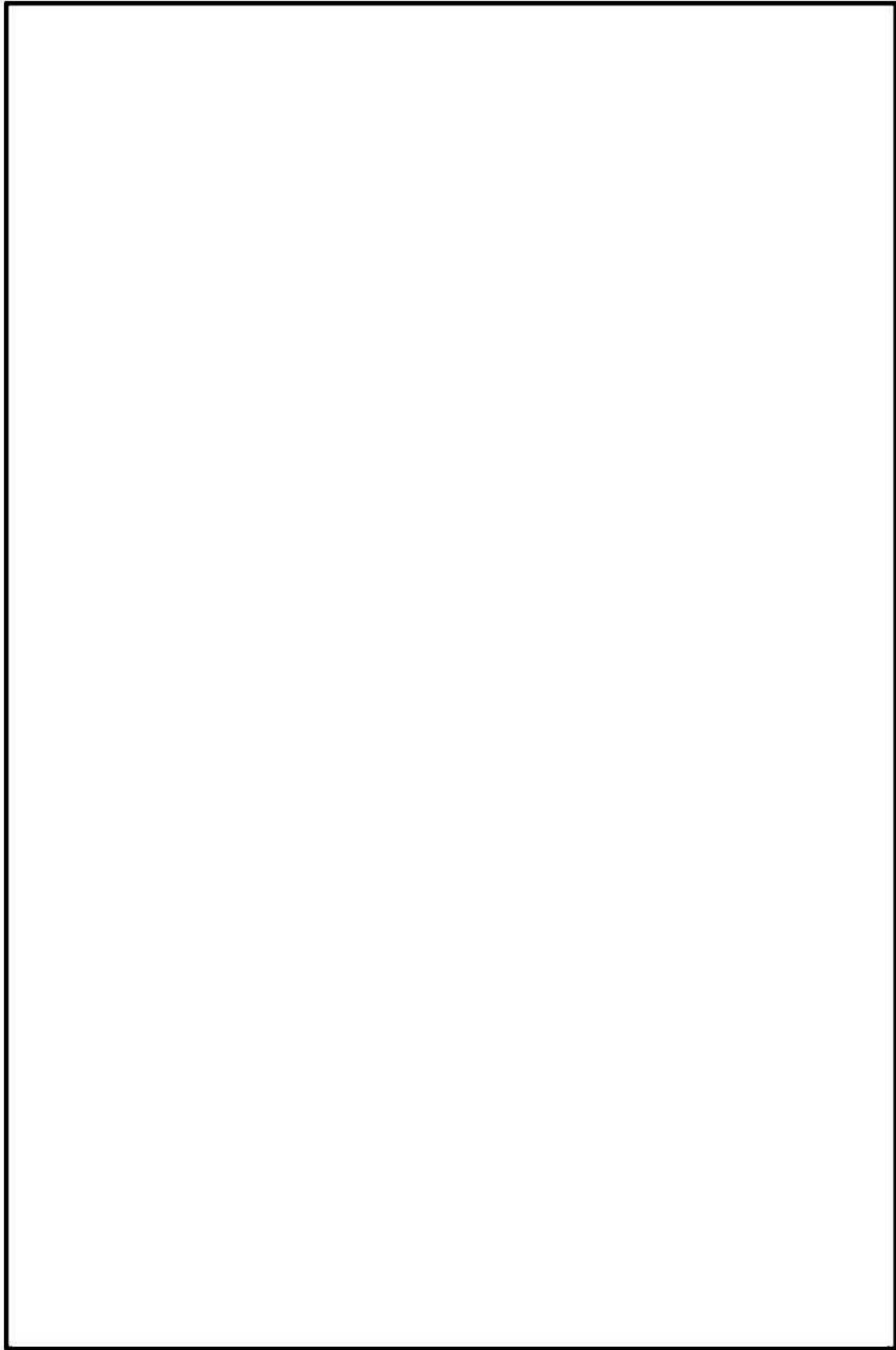
1. 通常輸送時及び一般の試験条件下

通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルは、一般の試験条件下において 0.3 m 落下における緩衝体の変形を考慮すること以外は同一とし、以下の条件とした。

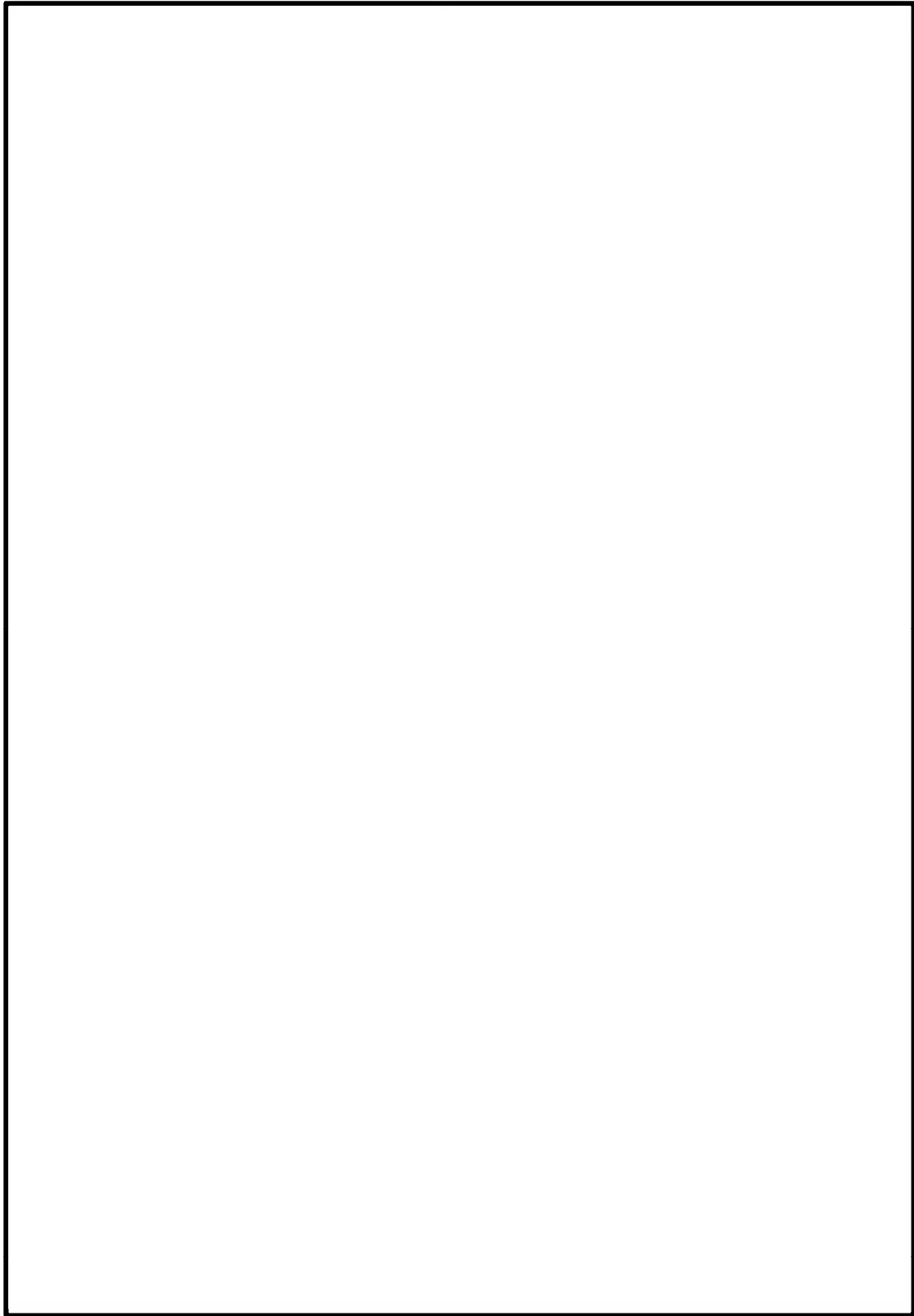
解析モデルを (ロ)-第 D.1 図に示す。

- ① 胴内での燃料集合体の軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとした。
- ② 緩衝体は、安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮した。
- ③ 各部寸法はノミナル値とし、寸法公差は密度係数として考慮した。
- ④ 蓋部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材については保守側の仮定として、中性子遮蔽材の 2.5 % の質量減損を考慮した。
- ⑤ 燃料はバスケットと均質化した。ただし、上部ノズル部の上側についてはバスケット上端より露出するため、バスケットと均質化しない。
- ⑥ バスケットの外周部は均質化した。
- ⑦ バーナブルポイズン集合体の物性値は安全側に考慮しないモデルとした。

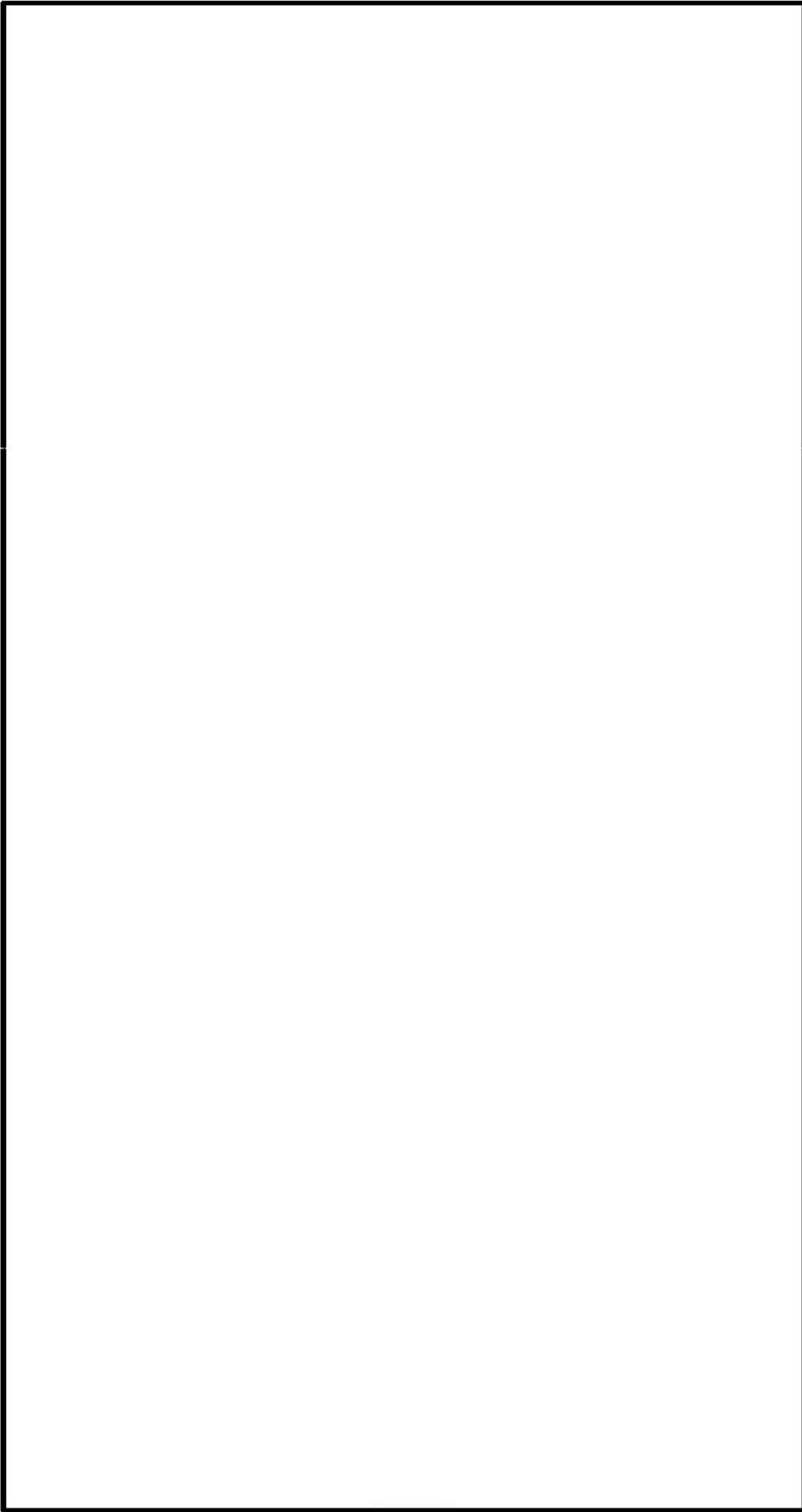
本輸送容器では、上部、下部トラニオンが燃料有効部近傍にあり、中性子ストリーミング箇所となっている。この箇所は上述のモデルに含まれないため、頭部及び底部モデルの当該部近傍の線束を用いて、トラニオン部を模擬したモデルとの線束接続計算により解析を行った。トラニオン部モデルを (ロ)-第 D.2 図に示す。



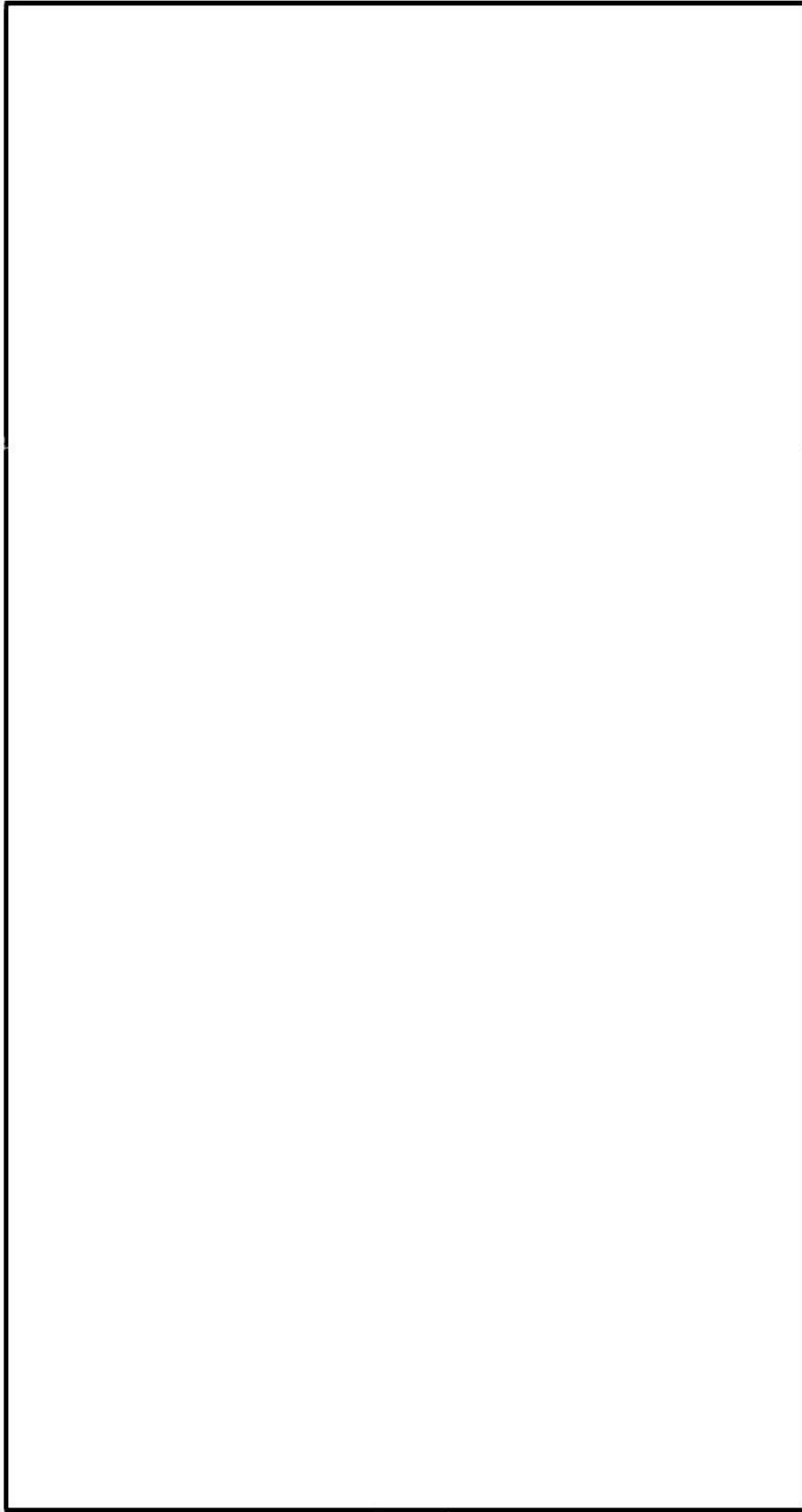
(□)-第D.1(a)図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (頭部)



(ロ)-第D.1(b)図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (底部)



(ロ)第 D. 2(a) 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (上部トラニオン部)

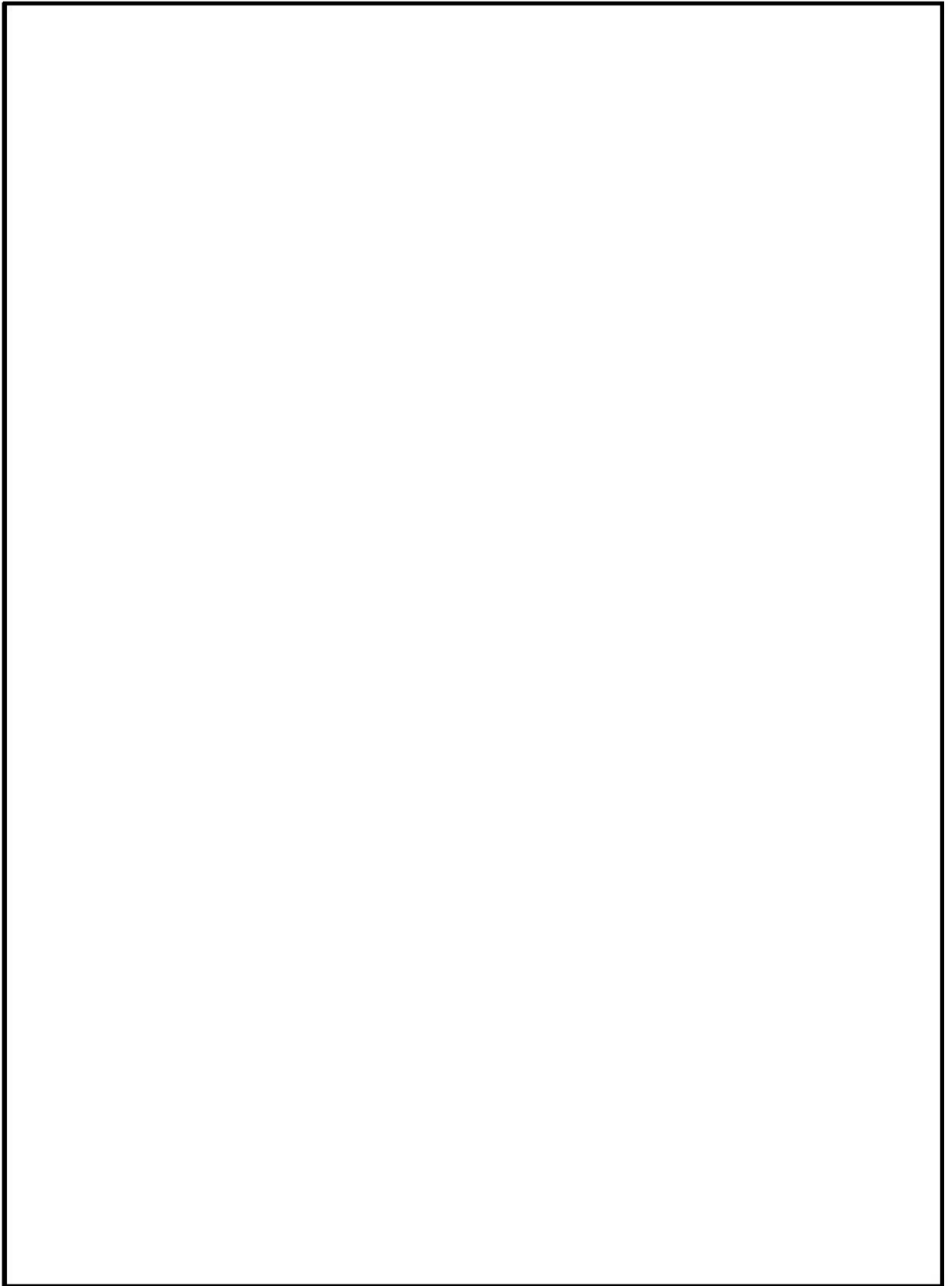


(p)-第 D. 2 (b) 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (下部トラニオン部)

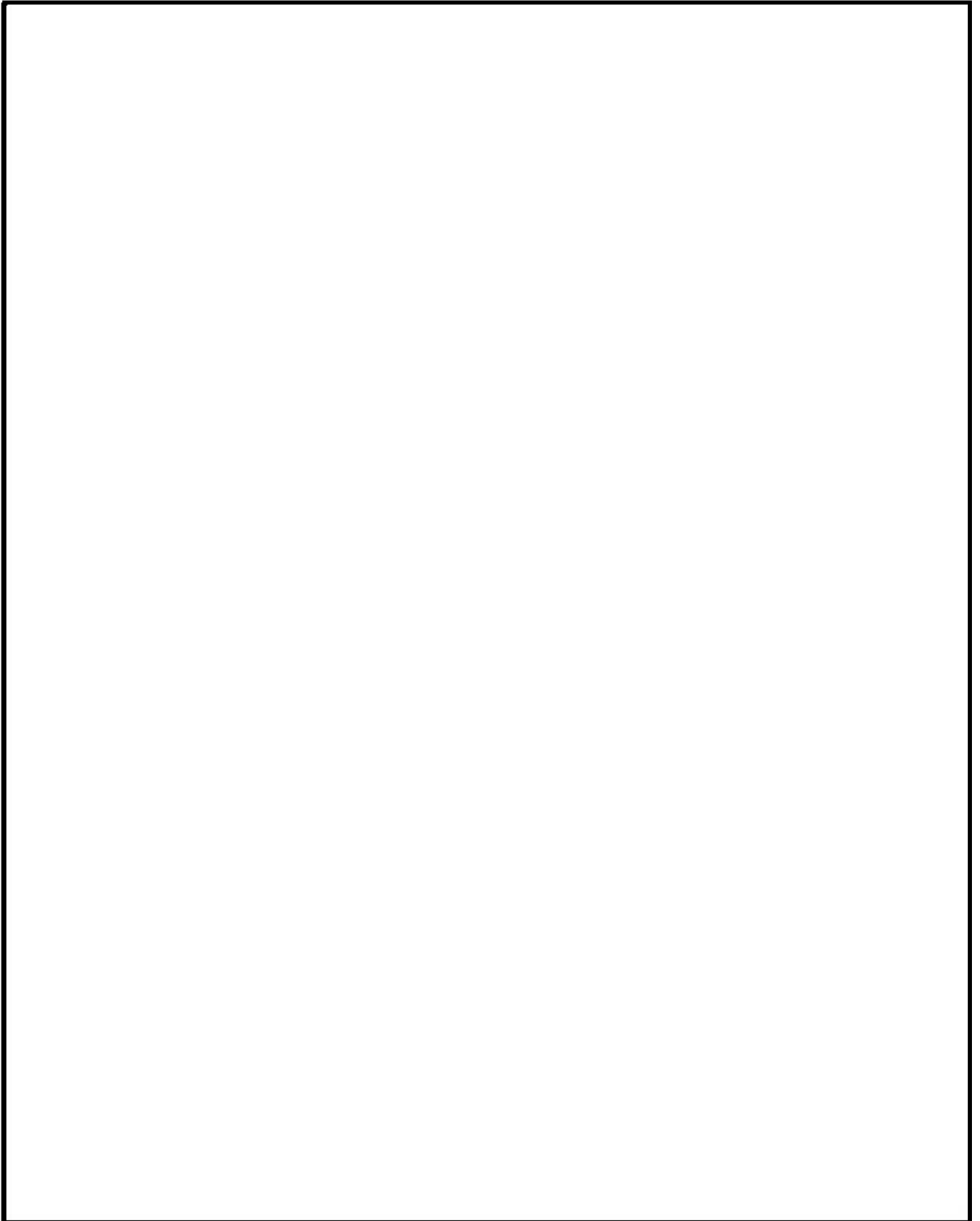
2. 特別の試験条件下

特別の試験条件下における解析モデルは一般の試験条件下の場合と次の点で異なる。
解析モデルを (ロ)-第 D. 3 図に示す。

- ① 熱解析の結果では耐火試験により蓋部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及びトランニオン部中性子遮蔽材が著しく焼損することはないが、安全側にその密度が半分に減少するものとした。
- ② 1 m 貫通試験により外筒、側部中性子遮蔽材が部分的に変形することが考えられるので、安全側に貫通すると仮定して外筒、側部中性子遮蔽材に貫通孔を模擬した。
- ③ 落下試験により緩衝体は大幅に変形するので、無視するものとした。



(ロ)-第 D. 3(a) 図 特別の試験条件下の解析モデル (頭部)



(a)-第 D. 3(b) 図 特別の試験条件下の解析モデル (底部)

D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽解析に用いた均質化領域の構成物質体積比を(□)-第 D.7 表に示す。また、遮蔽解析に用いた各領域の原子個数密度を(□)-第 D.8 表に、各部位の材料密度と密度係数を(□)-第 D.9 表に示す。

(ロ)-第D.7表 解析に用いた均質化領域の構成物質体積比 (1/2)

領域 構成物質		均質化領域					
		燃料領域 (中央部)					
		上部ノズル部 (上側)	上部ノズル部 (下側)	上部 プレナム部	燃料有効部	下部 プレナム部	下部 ノズル部
燃料 集合体	UO ₂	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
	Zr						
	ステンレス鋼						
	インコネル						
バスケット	アルミニウム合金						
	ほう素添加 アルミニウム合金						
中性子遮蔽材 (レジン)		-	-	-	-	-	-
伝熱フィン (銅)		-	-	-	-	-	-
ボイド		[Redacted]					

(ロ)-第D.7表 解析に用いた均質化領域の構成物質体積比 (2/2)

領域 構成物質		均質化領域						レンジ + 伝熱フィン	
		燃料領域 (外周部)							
		上部ノズル部 (上側)	上部ノズル部 (下側)	上部 ブレナム部	燃料有効部	下部 ブレナム部	下部 ノズル部		
燃料 集合体	UO ₂	[Redacted]						-	-
	Zr							-	-
	ステンレス鋼							-	-
	インコネル							-	-
	アルミニウム合金							-	-
バスケット	ほう素添加 アルミニウム合金	-	-	-	-	-	-	-	
	中性子遮蔽材 (レジン)	-	-	-	-	-	-	[Redacted]	
	伝熱フィン (銅)	-	-	-	-	-	-	-	
	ボ イ ド	[Redacted]						-	

(ロ)-第 D. 8 表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (1/3)

(単位 : 10^{24} atoms/cm³)

領域	均質化領域					
	燃料領域 (中央部)					
元素	上部ノズル部 (上側)	上部ノズル部 (下側)	上部プレナム部	燃料有効部	下部プレナム部	下部ノズル部
H						
¹⁰ B						
C						
N						
O						
Al						
Cr						
Fe						
Ni						
Cu						
Zr						
²³⁵ U						
²³⁸ U						

(ロ)-第 D. 8 表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (2/3)

(単位 : 10^{24} atoms/cm³)

領域	均質化領域					
	燃料領域 (外周部)					
元素	上部ノズル部 (上側)	上部ノズル部 (下側)	上部プレナム部	燃料有効部	下部プレナム部	下部ノズル部
H						
¹⁰ B						
C						
N						
O						
Al						
Cr						
Fe						
Ni						
Cu						
Zr						
²³⁵ U						
²³⁸ U						

(ロ)-第 D. 8 表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (3/3)

領域 元素		(単位 : 10^{21} atoms/cm ³)					
		バスケット 外周部	ステンレス鋼	析出硬化系 ステンレス鋼	炭素鋼	中性子遮蔽材 レジン + 伝熱フィン レジン	空気
H							
¹⁰ B							
C							
N							
O							
Al							
Cr							
Fe							
Ni							
Cu							

(注) () 内は特別の試験条件下の値である。

(a)-第D.9表 各部位の材料密度と密度係数 (1/2)

部位	材質	材料密度 (g/cm ³)	密度係数
胴	炭素鋼		
胴 (底部)			
胴 (フランジ部)			
外筒			
一次蓋			
蓋部中性子遮蔽材カバー (蓋板)			
蓋部中性子遮蔽材カバー (側板)			
二次蓋			
下部端板	ステンレス鋼		
底部中性子遮蔽材カバー			
三次蓋			
トラニオン	析出硬化系 ステンレス鋼		
側部中性子遮蔽材	レジン		
底部中性子遮蔽材			
蓋部中性子遮蔽材			
トラニオン部中性子遮蔽材			
伝熱フィン	銅		
バスケット (バスケット外周部)	アルミニウム合金		
	ほう素添加 アルミニウム合金		

(ロ)-第D.9表 各部位の材料密度と密度係数 (2/2)

部位	材質	材料密度 (g/cm ³)	密度係数
燃料領域	UO ₂		—
	Zr		—
	ステンレス鋼		—
	インコネル		—
	アルミニウム合金		—
	ほう素添加 アルミニウム合金		—

(注 1) 14×14 燃料 55,000MWd/t 型の UO₂ 密度

(注 2) 14×14 燃料 48,000MWd/t 型の UO₂ 密度

D.4 遮蔽評価

輸送物の外部の指定場所でガンマ線線量当量率、中性子線量当量率を評価するために使用した基本手法とコードについて以下に説明する。

1. 基本手法

遮蔽計算はガンマ線、中性子ともに DOT3.5 コードを用いて行った。

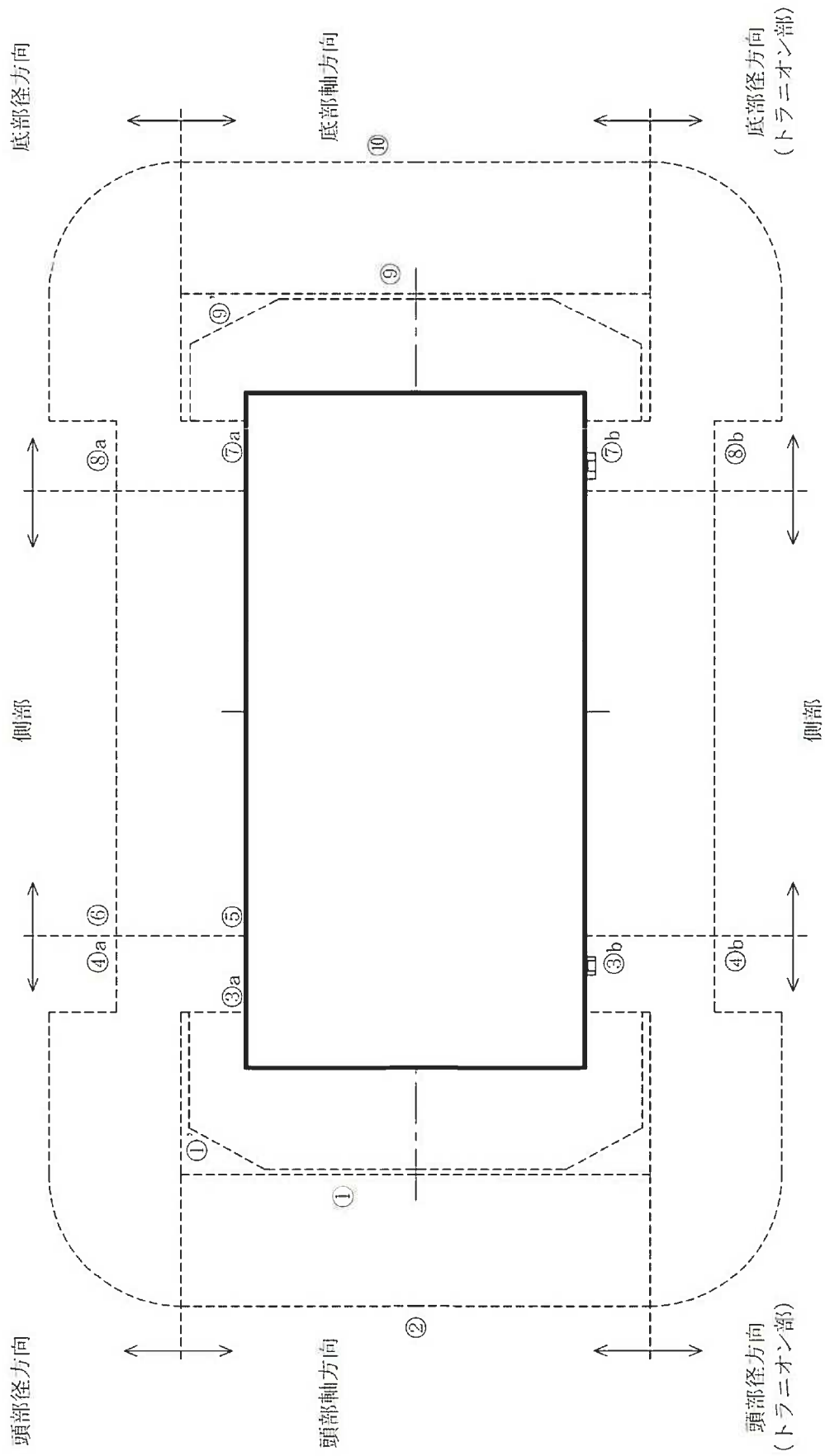
線束から線量当量率への変換係数は ICRP Pub. 74⁵⁾ の 1 cm 線量当量率変換係数に基づく MATXSLIB-J33 の中性子 175 群、ガンマ線 42 群構造に対する値を用いた。

2. 計算結果

各モデルにおける主要部位でのガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率の計算結果を (p)-第 D. 4 図、(p)-第 D. 5 図及び (p)-第 D. 10 表～(p)-第 D. 12 表に示す。

ここでは、頭部、側部及び底部の各エリアにおいて、輸送物表面及び表面から 1 m で線量当量率が最大となる位置での線量当量率の合計値及びその内訳を記載している。

また、(p)-第 D. 10 表及び (p)-第 D. 11 表に示すように一般の試験条件下に置かれた輸送物表面の最大線量当量率は、著しく増加することはない。



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており、その結果を(ρ)-第D.10表及び(ρ)-第D.11表に示す。

(ρ)-第D.4図 通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ) 第 D.10 表 通常輸送時の線量当量率

(単位：μSv/h)

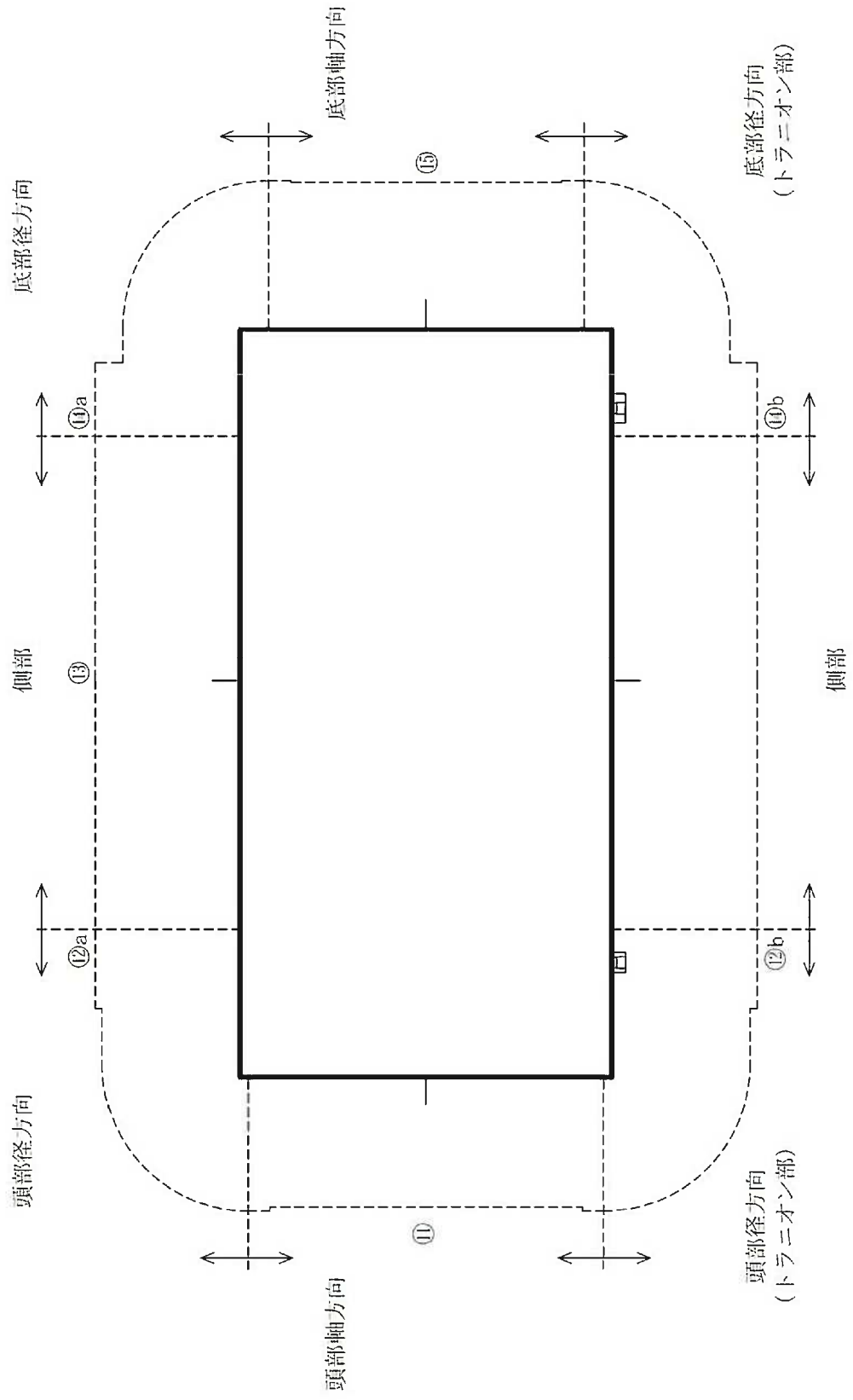
評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トラニオン部)		径方向	径方向 (トラニオン部)	軸方向	
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨	
ガンマ線	燃料有効部	<0.1	0.4	10.0	34.3	3.7	3.0	4.9
	構造材放射化	<0.1	7.2	41.7	107.0	16.2	11.9	52.1
	二次ガンマ線	0.2	3.1	9.7	10.9	4.6	5.3	4.9
中性子	29.6	253.8	581.0	18.1	264.2	1067.8	29.6	
合計	30.0	264.5	642.4	170.3	288.7	1088.0	91.5	
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
ガンマ線	燃料有効部	<0.1	15.5	15.0	17.5	10.9	9.8	2.1
	構造材放射化	<0.1	25.6	17.7	25.3	10.4	6.6	21.0
	二次ガンマ線	<0.1	5.7	5.6	6.2	4.6	4.6	1.7
中性子	14.8	21.3	31.7	20.4	26.3	41.1	18.1	
合計	15.1	68.1	70.0	69.4	52.2	62.1	42.9	

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

(ロ)-第D.11表 一般の試験条件下の線量当量率

(単位：μSv/h)

評価点	頭部				側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トラニオン部)	径方向		径方向 (トラニオン部)	軸方向	
	①'	③a	③b	⑦a		⑦b	⑨'	
ガンマ線	燃料有効部	0.4	0.4	10.0	34.3	3.7	3.0	0.9
	構造材放射化	1.0	7.2	41.7	107.0	16.2	11.9	2.6
	二次ガンマ線	0.4	3.1	9.7	10.9	4.6	5.3	1.3
中性子	30.8	253.8	581.0	18.1	264.2	1067.8	95.8	
合計	32.6	264.5	642.4	170.3	288.7	1088.0	100.6	



(注)①～⑮の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており、その結果を(ρ)-第D.12表に示す。

(ρ)-第D.5図 特別の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ)-第D.12表 特別の試験条件下の線量当量率

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トラネオン部)		径方向	径方向 (トラネオン部)	軸方向	
	①	②a	②b		③a	③b	④	
ガンマ線	燃料有効部	<0.1	29.3	28.4	81.7	29.8	28.1	6.4
	構造材放射化	0.2	47.4	32.8	17.2	23.2	16.1	69.0
	二次ガンマ線	0.3	12.2	12.0	23.2	13.4	13.2	7.0
中性子	51.6	135.5	144.9	688.6	139.3	149.8	122.1	
合計	52.2	224.4	218.1	810.7	205.7	207.2	204.5	

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

D.5 結果の要約及びその評価

通常輸送時、一般及び特別の試験条件下の遮蔽解析条件の要約を(ロ)-第 D.13 表に示す。

また、計算から得られた最大線量当量率の要約は(ロ)-第 D.14 表に示すとおりであり、規則及び告示で定められた基準を満足する。

(ロ)-第 D.13 表 遮蔽解析条件の要約

項目		条件		
		通常輸送時	一般の試験条件下	特別の試験条件下
線源		軸方向の移動を考慮し、頭部方向評価モデルでは蓋方向に、底部方向評価モデルでは底方向に移動した状態を模擬した。		
遮蔽体	本体	胴、蓋、外筒、中性子遮蔽材		同左 ただし、外筒、側部中性子遮蔽材（レジンの）貫通孔を考慮。 また、中性子遮蔽材密度については半分とする。
	緩衝体	空気に置換し、距離のみ考慮	変形を考慮した上で、空気に置換し、距離のみ考慮	無視

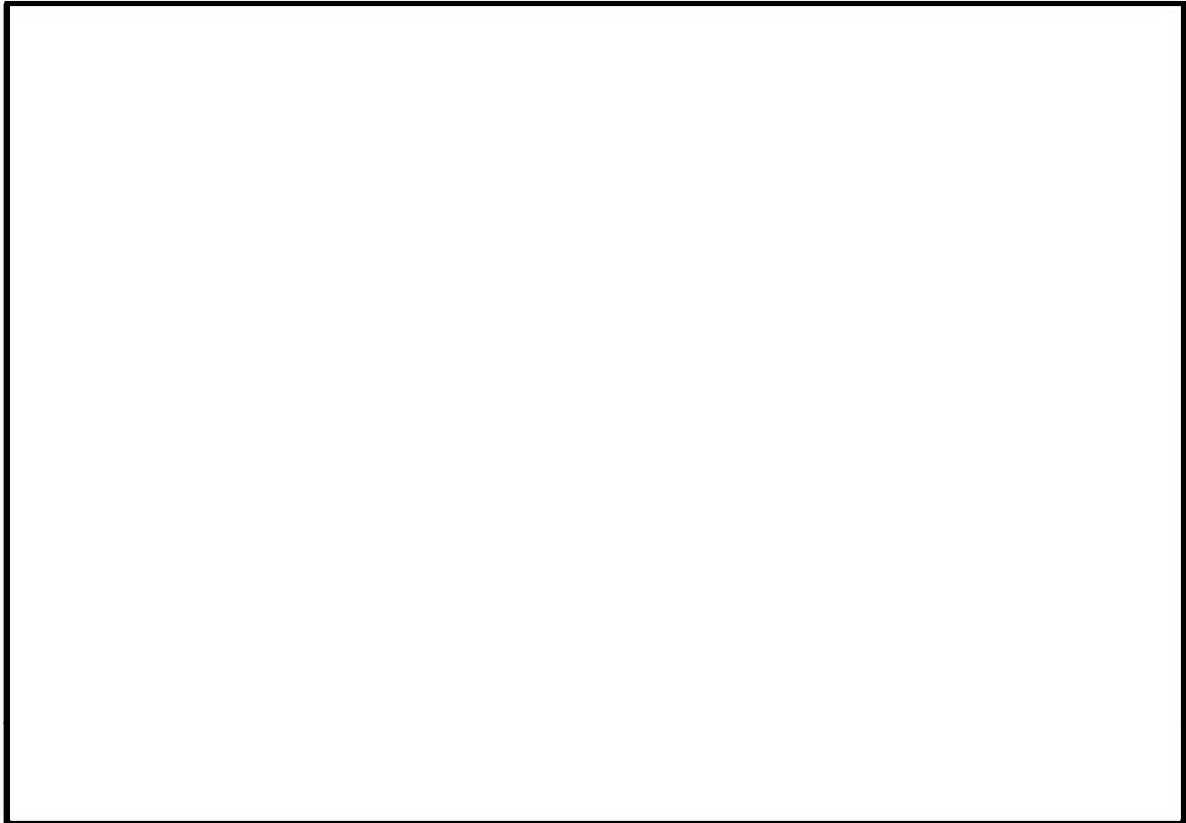
(e)-第 D. 14 表 最大線量当量率の要約

項目	部位		輸送物表面 ($\mu\text{Sv/h}$)					表面から 1 m ($\mu\text{Sv/h}$)				
			頭部		側部	底部		頭部		側部	底部	
	軸方向	径方向	径方向	軸方向		軸方向	径方向	径方向	軸方向			
通常輸送時												
ガンマ線	0.4	61.4	152.2	20.2	61.9	0.3	38.3	49.0	21.0	24.8		
中性子	29.6	581.0	18.1	1067.8	29.6	14.8	31.7	20.4	41.1	18.1		
合計	30.0	642.4	170.3	1088.0	91.5	15.1	70.0	69.4	62.1	42.9		
一般の試験条件下												
ガンマ線	1.8	61.4	152.2	20.2	4.8							
中性子	30.8	581.0	18.1	1067.8	95.8							
合計	32.6	642.4	170.3	1088.0	100.6							
特別の試験条件下												
ガンマ線						0.6	88.9	122.1	57.4	82.4		
中性子						51.6	135.5	688.6	149.8	122.1		
合計						52.2	224.4	810.7	207.2	204.5		
基準値												
通常輸送時			2000					100				
一般の試験条件下			2000					—				
特別の試験条件下			—					10000				

D. 6 付属書類

D. 6. 1 線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布

線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布を(ロ)-第 D. 付 1 図に示す。



(ロ)-第 D. 付 1 図 軸方向燃焼度分布

D. 6. 2 中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度と製造時の確認

(p)-第 D. 8 表に記載の解析に用いる中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度は、中性子遮蔽材の元素組成と、製品仕様として中性子遮蔽材の密度、水素及び B₄C 含有量の最低値から算出した。

製造時には、中性子遮蔽材の元素組成については、中性子遮蔽材が所定の銘柄又はその相当品であることを確認し、中性子遮蔽材の密度、水素及び B₄C 含有量については、サンプルによる中性子遮蔽材の密度測定記録及び成分分析記録を確認する。

D. 6. 3 参考文献

- 1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3” , OECD/NEA Databank, (2006).
- 2) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code” , CCC-276, (1977).
- 3) K. Kosako, N. Yamano, T. Fukahori, K. Shibata and A. Hasegawa, “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3” , JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- 4) Brookhaven National Laboratory, “Neutron Cross Sections” , BNL-325 Third Edition, (1973).
- 5) ICRP, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation” , ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3-4), (1996).

E. 臨界解析

E.1 概要

本輸送容器のバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の燃料集合体が輸送容器の所定の位置に収納される。本輸送容器へ 14×14 燃料を収納する場合には、バスケット格子内へバスケットスペーサが設置される。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造としている。

本輸送容器は燃料集合体を収納後、内部水が排出され、さらに真空乾燥が行われる。また、密封性能を有した複数の蓋を有しており、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下においても胴内に水が浸入することはない。したがって、胴内を告示第 25 条第 1 号のただし書きに記載されている「浸水及び漏水を防止する特別な措置が講じられた部分」とし、胴内を水で満たさない条件で臨界解析を行うこととする。

本臨界解析では、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における輸送容器及び燃料集合体の変形を考慮し、境界条件として完全反射を仮定することにより、以下の条件より厳しい評価とする。

- ① 通常輸送時
- ② 輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ③ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ④ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ⑤ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合
- ⑥ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

臨界解析には、SCALE コードシステム¹⁾を用い、中性子実効増倍率 (keff) の計算は多群モンテカルロ法による KENO-VIコード¹⁾を用いて行った。その結果、keff は標準偏差(σ)の 3 倍を加えても十分未臨界である。

したがって、本輸送物は上記①～⑥のいずれの条件においても未臨界である。

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送容器には PWR 燃料集合体を 21 体収納する。

本輸送容器に収納する燃料集合体の型式と仕様は(イ)-第 A.1 表に示したとおりであり、17×17 燃料及び 14×14 燃料のそれぞれを全数収納した場合の臨界解析を実施する。臨界解析の対象燃料は、中性子実効増倍率が最も大きくなる 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A 型) 及び 14×14 燃料 55,000Mwd/t 型 (A 型) とする。燃料集合体の仕様を(ロ)-第 E.1 表に示す。また、14×14 燃料は、バスケットスペーサが設置されたバスケット格子内へ収納される。

本輸送容器に収納する燃料集合体は照射済のものであるが、²³⁵U濃縮度は未照射のままの減損していない値をとり、安全側の仮定とする。また、燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、ガドリニウムの存在を無視する。さらに、燃料集合体はバーナブルポイズン集合体を挿入した状態で収納される場合があるが、バーナブルポイズン集合体を無視する。

また、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、輸送容器に収納される全燃料集合体について支持格子 1 スパン間の燃料棒ピッチの変化を仮定する。燃料棒ピッチ変化の中性子実効増倍率への影響を確認するため、燃料棒ピッチが変形前のピッチである場合に加えて、燃料棒ピッチが最小（燃料棒直径と等しい）の場合及び燃料棒がバスケット格子内（17×17 燃料の場合）またはバスケットスパーサ内（14×14 燃料の場合）で均一に広がった場合について評価する。(ロ)-第 E.1 図にピッチ変化部位の燃料モデルを示す。

(ロ)-第 E.1 表 臨界解析に用いる燃料集合体の仕様 (1/2)

項目	単位	17×17 燃料
		48,000Mwd/t 型
		A型
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-4
燃料密度	%理論密度	95
燃料棒直径	cm	0.95
ペレット直径	cm	0.819
被覆管肉厚	cm	0.057
燃料有効長	cm	364.8
燃料棒配列	—	17×17
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	264
燃料棒ピッチ	cm	1.26 ^(注1)
燃料集合体の幅	cm	21.42 ^(注2)
初期濃縮度	wt%	4.2

(注1) 燃料棒ピッチ変化なしの場合

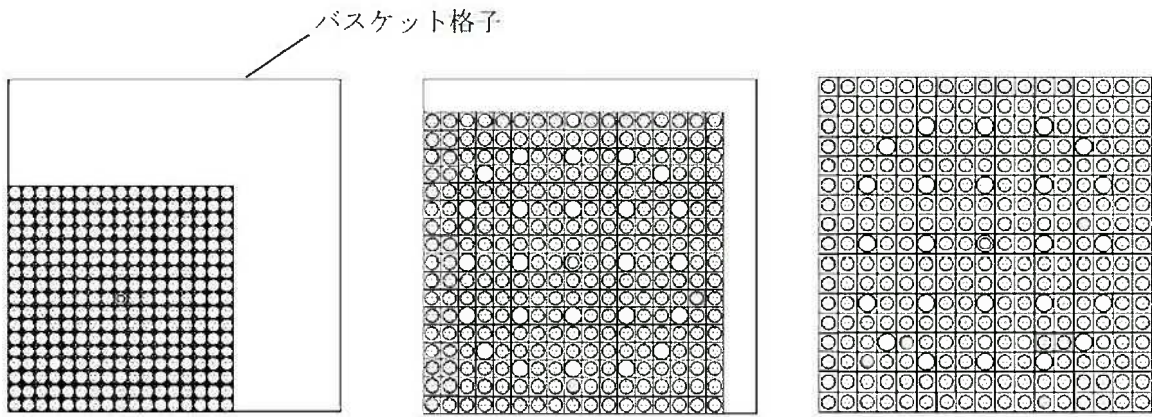
(注2) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。

(ロ)-第 E.1 表 臨界解析に用いる燃料集合体の仕様 (2/2)

項目	単位	14×14 燃料
		55,000Mwd/t 型
		A型
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	MDA/ZIRLO
燃料密度	%理論密度	97
燃料棒直径	cm	1.072
ペレット直径	cm	0.929
被覆管肉厚	cm	0.062
燃料有効長	cm	364.2
燃料棒配列	—	14×14
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	179
燃料棒ピッチ	cm	1.41 ^(注1)
燃料集合体の幅	cm	19.74 ^(注2)
初期濃縮度	wt%	4.9

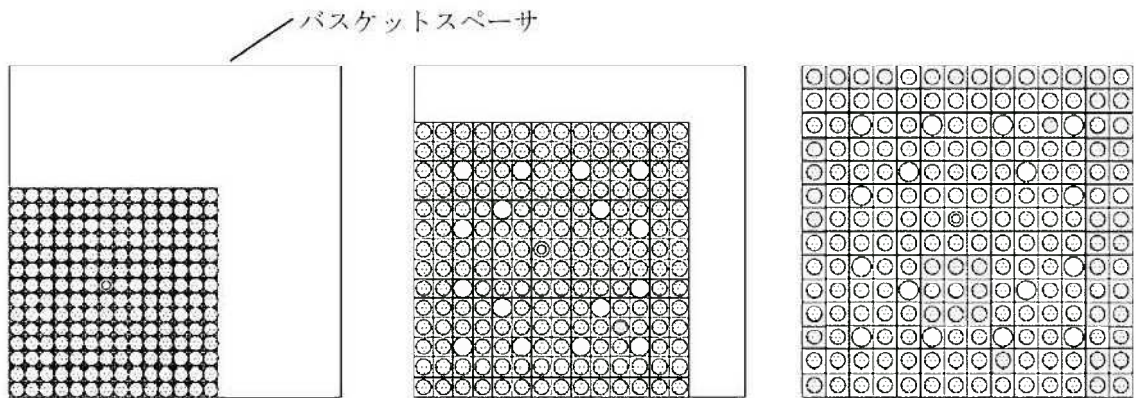
(注1) 燃料棒ピッチ変化なしの場合

(注2) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。



燃料棒ピッチ=最小（燃料棒直径） 燃料棒ピッチ=変化なし 燃料棒ピッチ=均一拡大

(ロ)-第 E. 1 図(a) 燃料モデル（ピッチ変化部位）（17×17 燃料収納時）



燃料棒ピッチ=最小（燃料棒直径） 燃料棒ピッチ=変化なし 燃料棒ピッチ=均一拡大

(ロ)-第 E. 1 図(b) 燃料モデル（ピッチ変化部位）（14×14 燃料収納時）

E. 2. 2 輸送容器

輸送容器本体の形状は、(イ)-第 C. 2 図等に示すとおりである。

本輸送容器は(ロ)章 A. 9 に示すとおり核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下において、臨界評価に影響する構造物の形状変化は生じない。

また、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において、臨界評価に影響するものとして、外筒が 1 m 貫通試験により損傷し、熱的試験において側部中性子遮蔽材のレジンの一部が焼損するが、臨界解析では中性子遮蔽材を無視している。

E. 2. 3 中性子吸収材

(イ)-第 C. 14 図にバスケットの構造を示す。

バスケットプレートは、アルミニウム合金製であり、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材が併せて配置される。ほう素添加アルミニウム合金の原子個数密度を E. 3. 2 に示す。

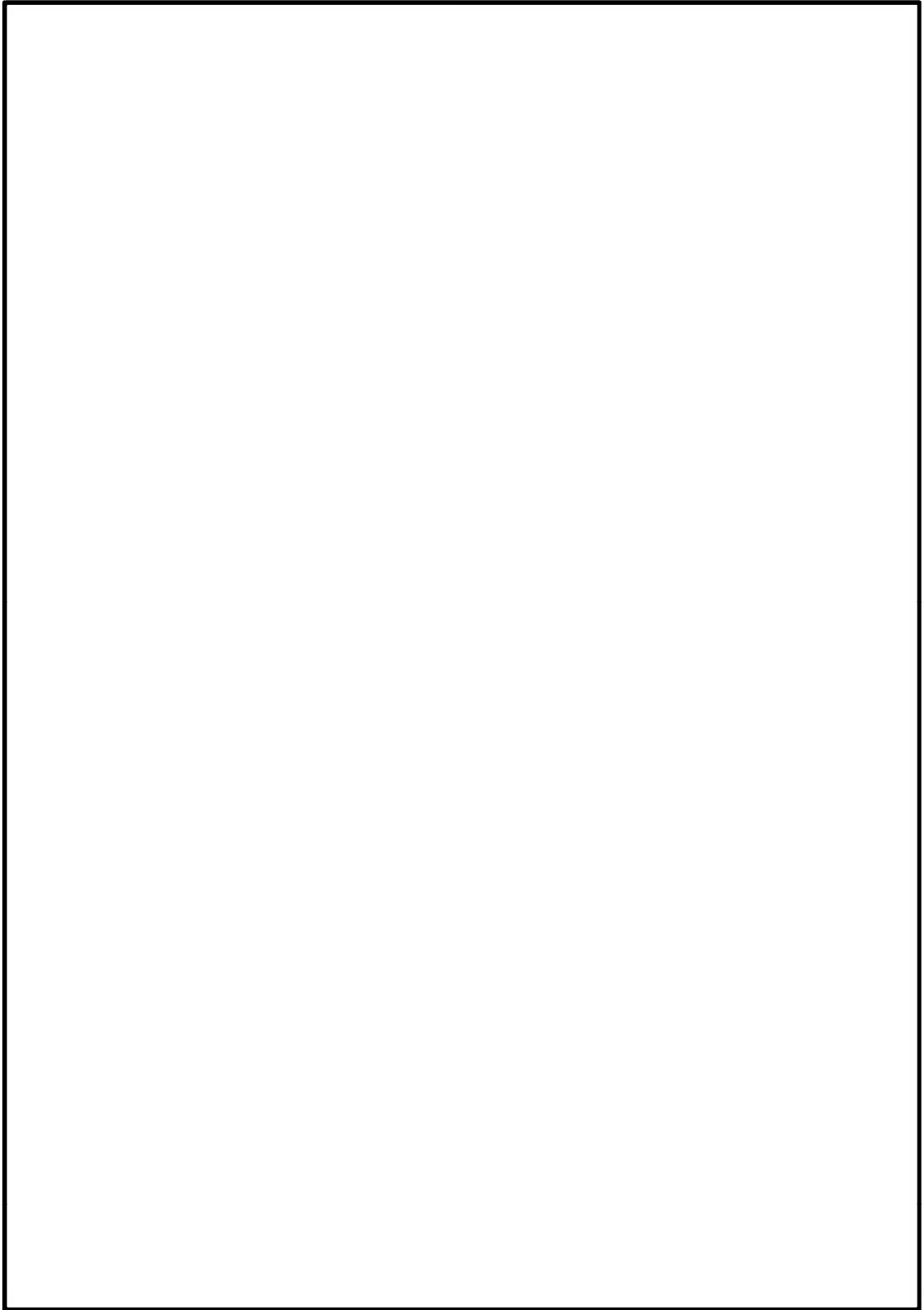
核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において、バスケットプレートは変形しないため、中性子吸収材の配置に変化はない。

E.3 モデル仕様

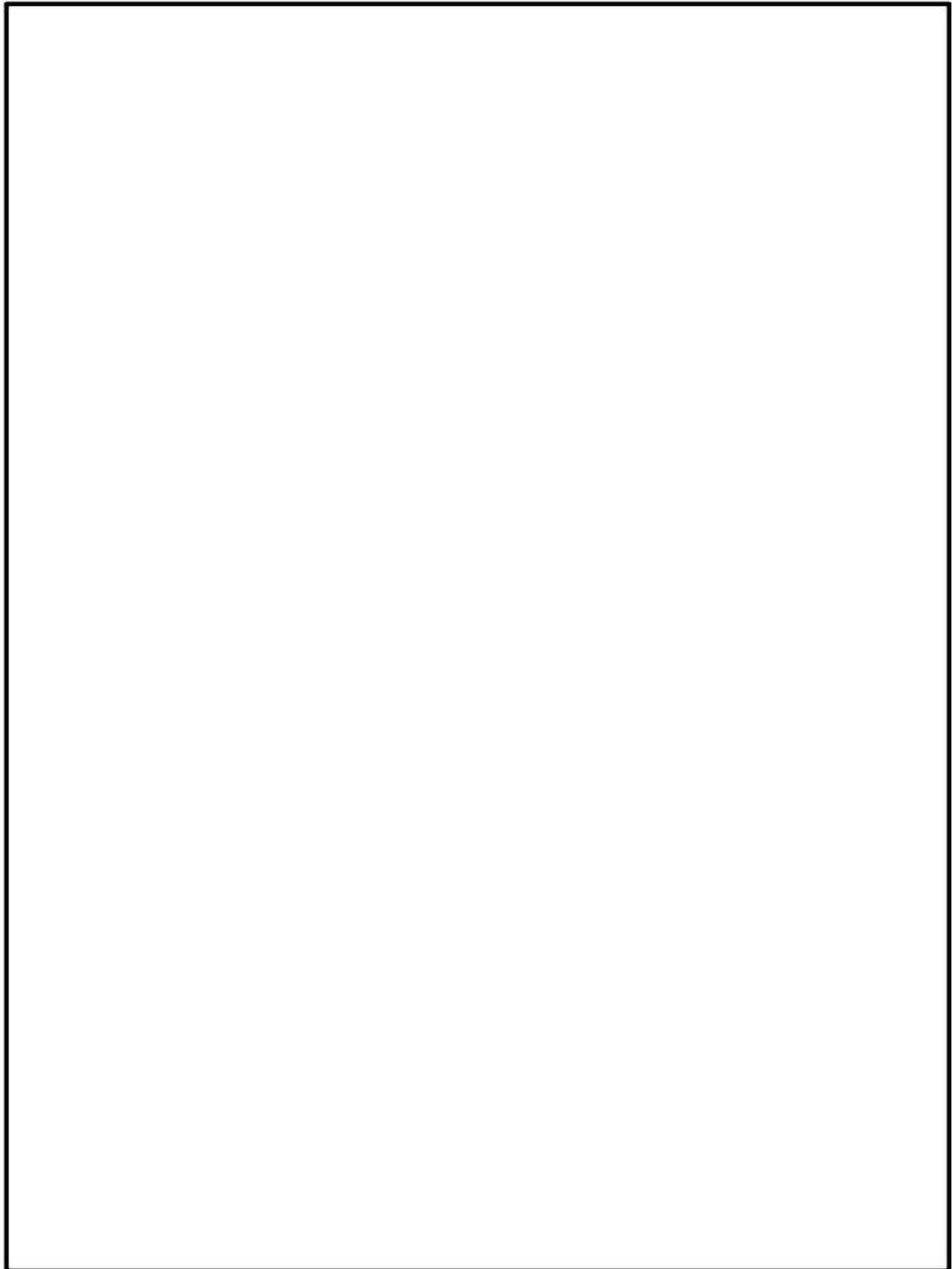
E.3.1 解析モデル

(ロ)-第 E.2 図に臨界解析モデルを示す。解析モデルは安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

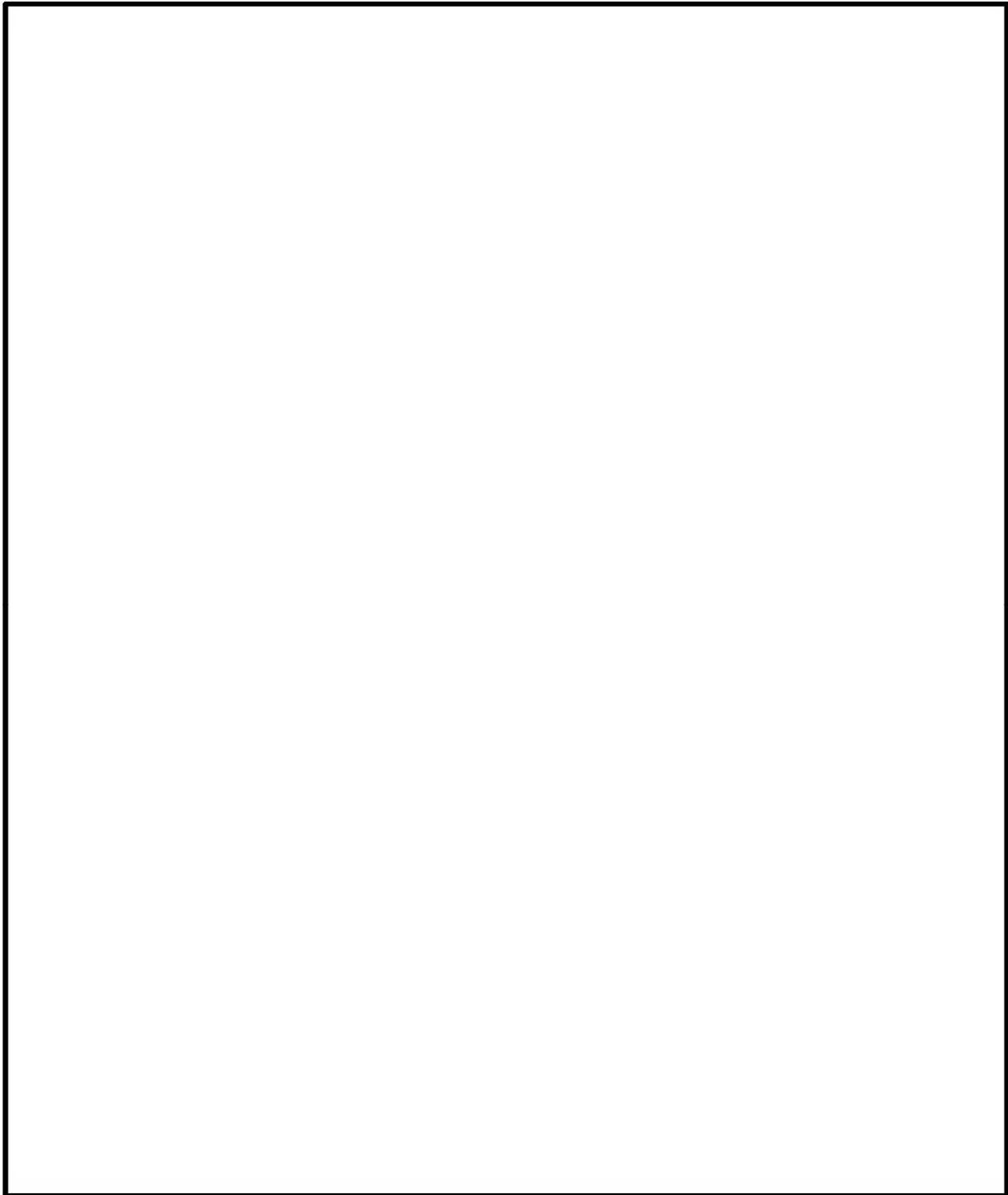
- ・輸送物が無限に配列している体系とする。
- ・中性子遮蔽材を無視する。
- ・緩衝体及び三次蓋を無視する。
- ・中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート板厚、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚、バスケット格子内のり及びバスケットスペーサの公差を考慮する。
- ・バスケット格子内の燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるように配置する。
(燃料棒ピッチを拡大しない場合)
- ・支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの変化を考慮する。
- ・安全側に胴内には5000 cm³の水が均一に分散していると仮定する。
- ・バスケットプレート、中性子吸収材及びバスケットスペーサは、中性子の吸収が小さくなるように、実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し、それ以外の部分は無視する。



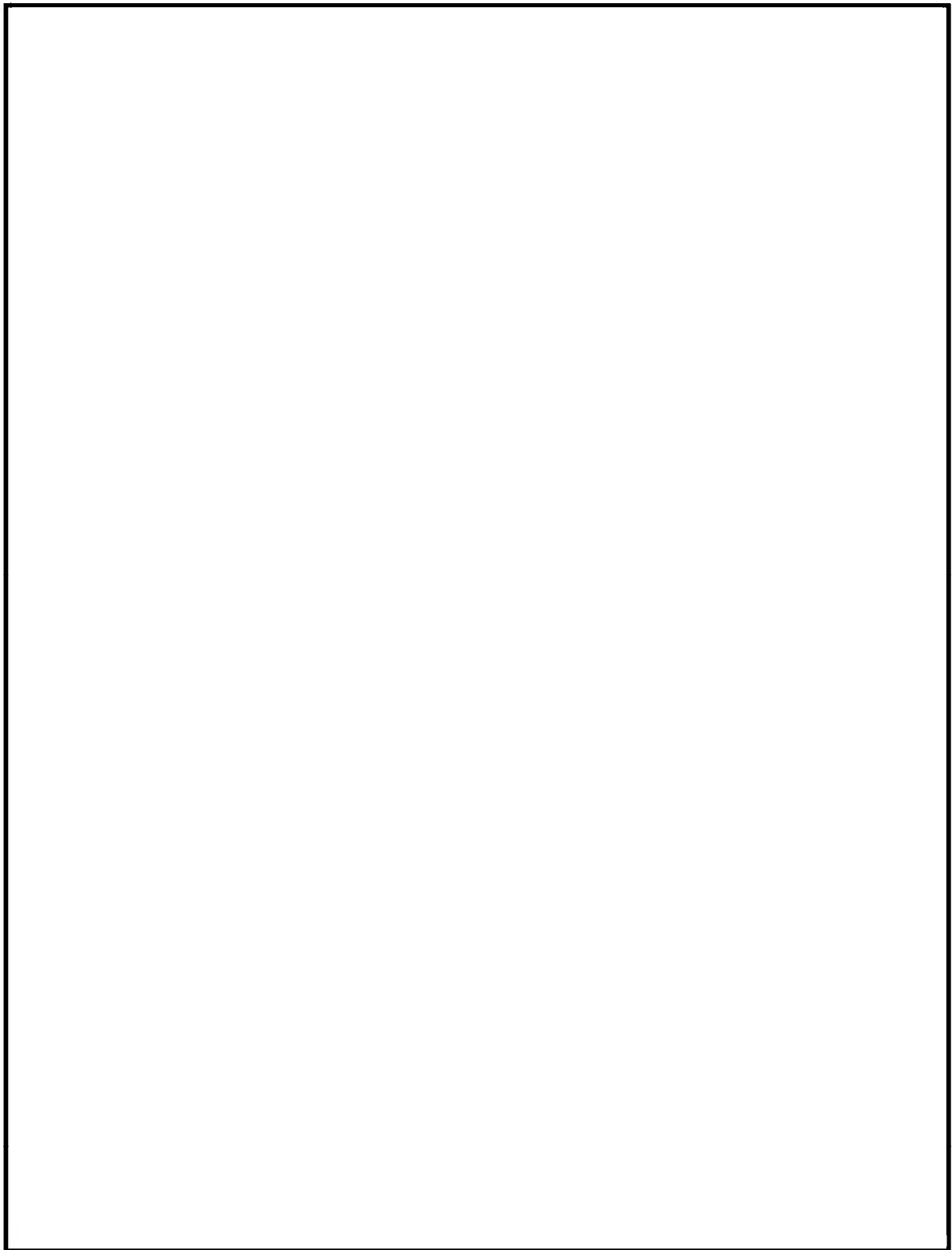
(ロ)-第 E. 2 図(a) 臨界計算モデル (縦断面図) (17×17 燃料収納時)



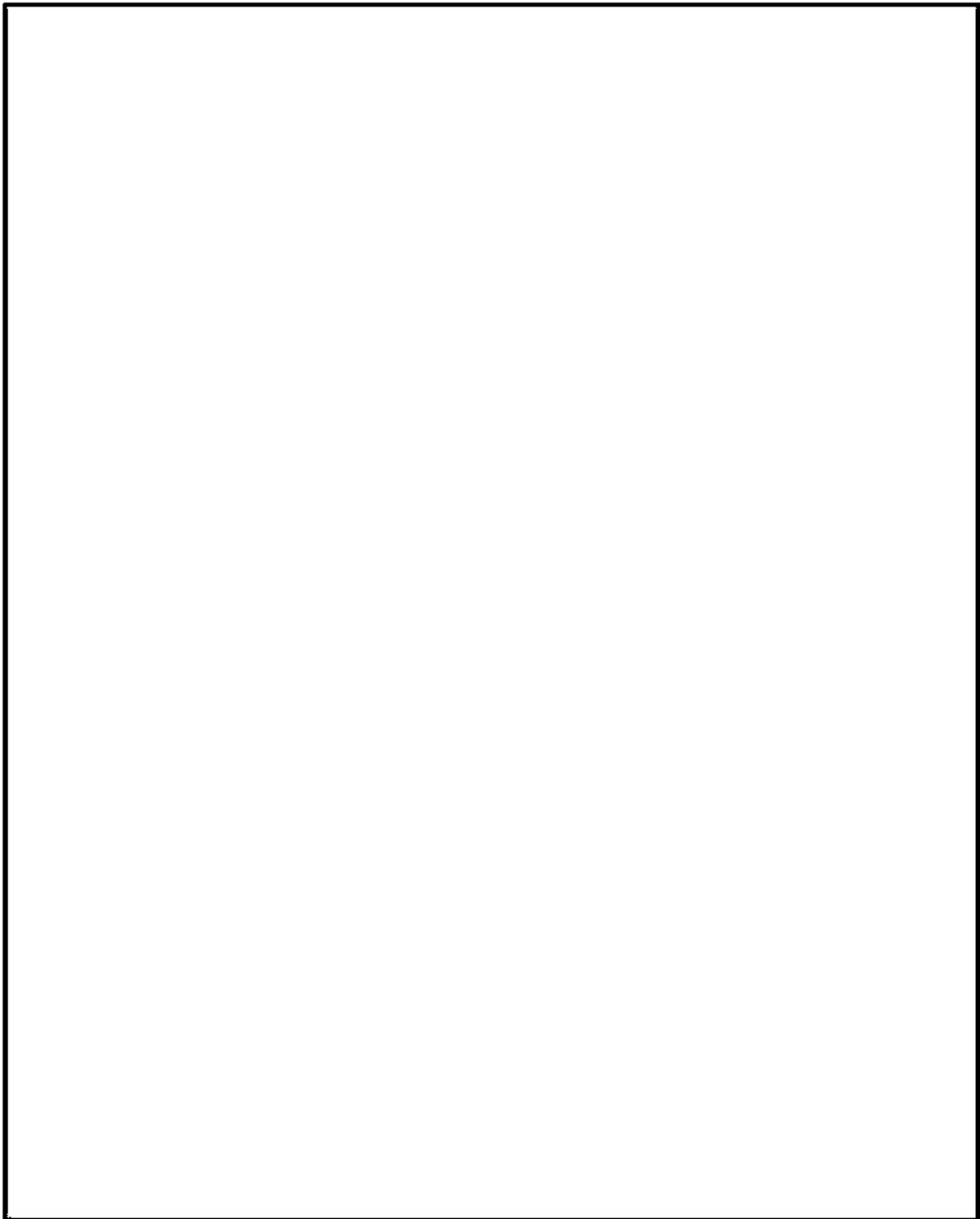
(ロ)-第 E. 2 図(b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ最小)
(17×17 燃料収納時)



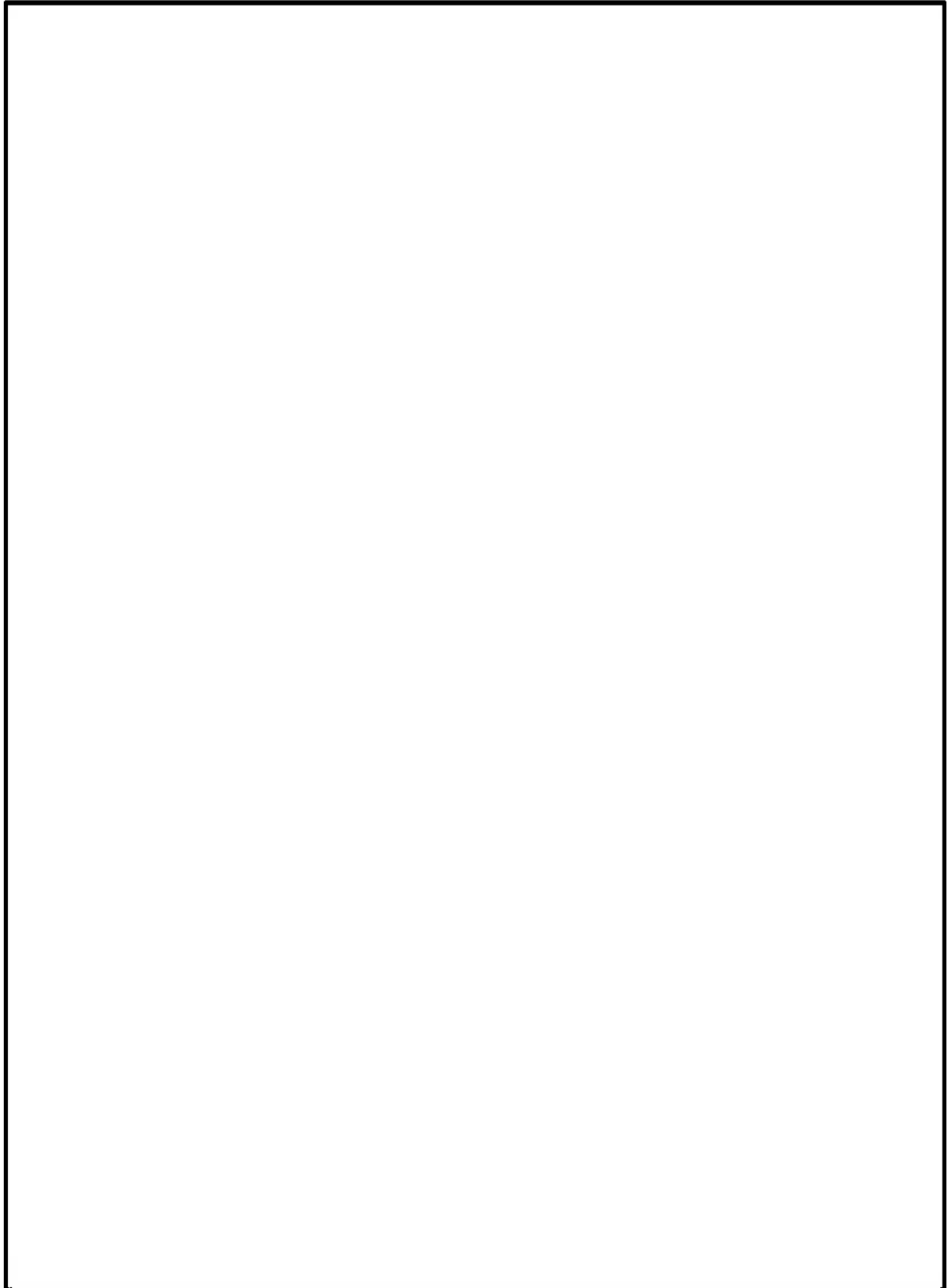
(ロ) 第 E. 2 図(b-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ最小)
(17×17 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(b-3) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ変化なし)
(17×17 燃料収納時)

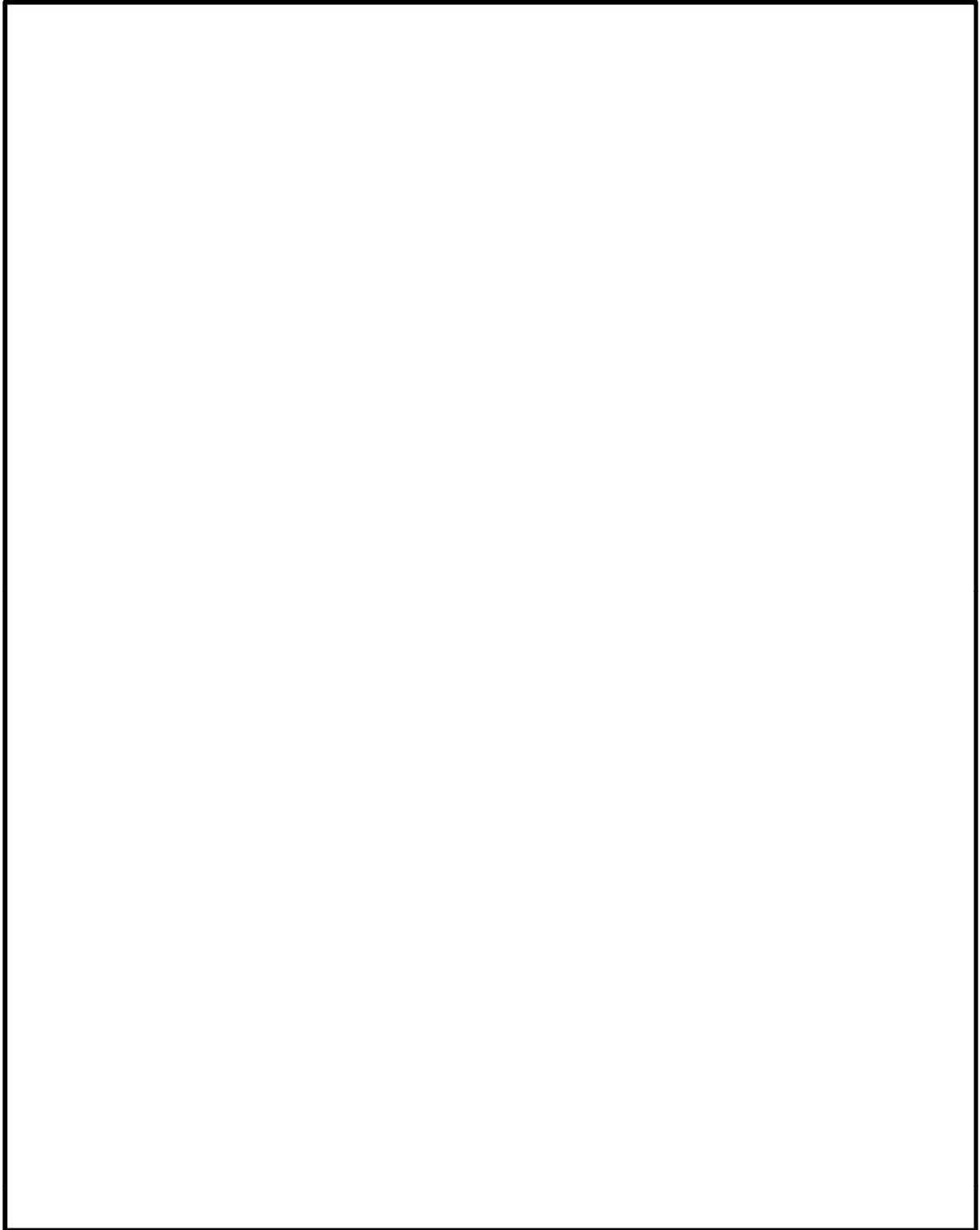


(ロ)-第 E. 2 図(b-4) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ変化なし)
(17×17 燃料収納時)

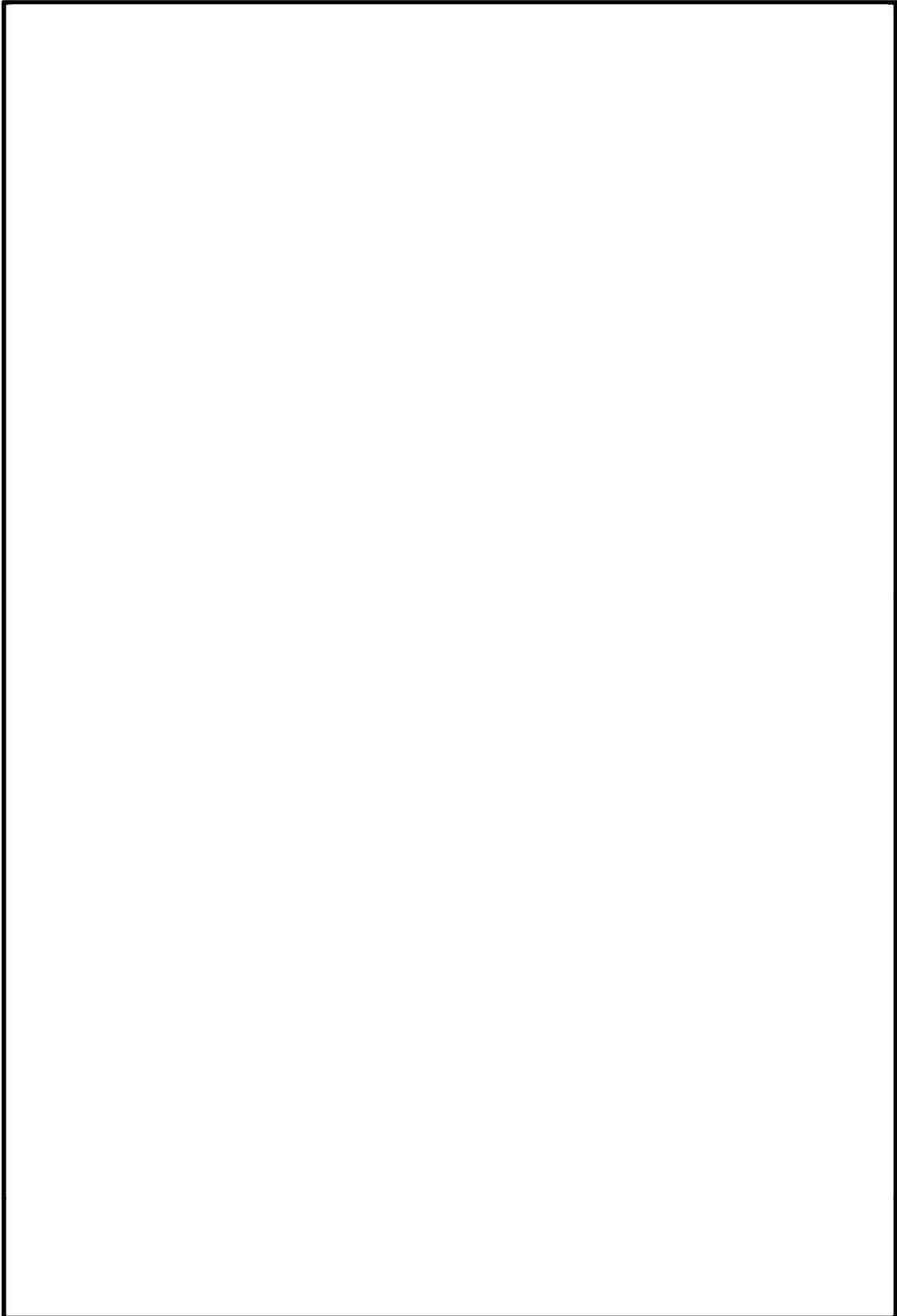


(ロ)-第 E. 2 図(b-5) 臨界計算モデル(燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ均一拡大)

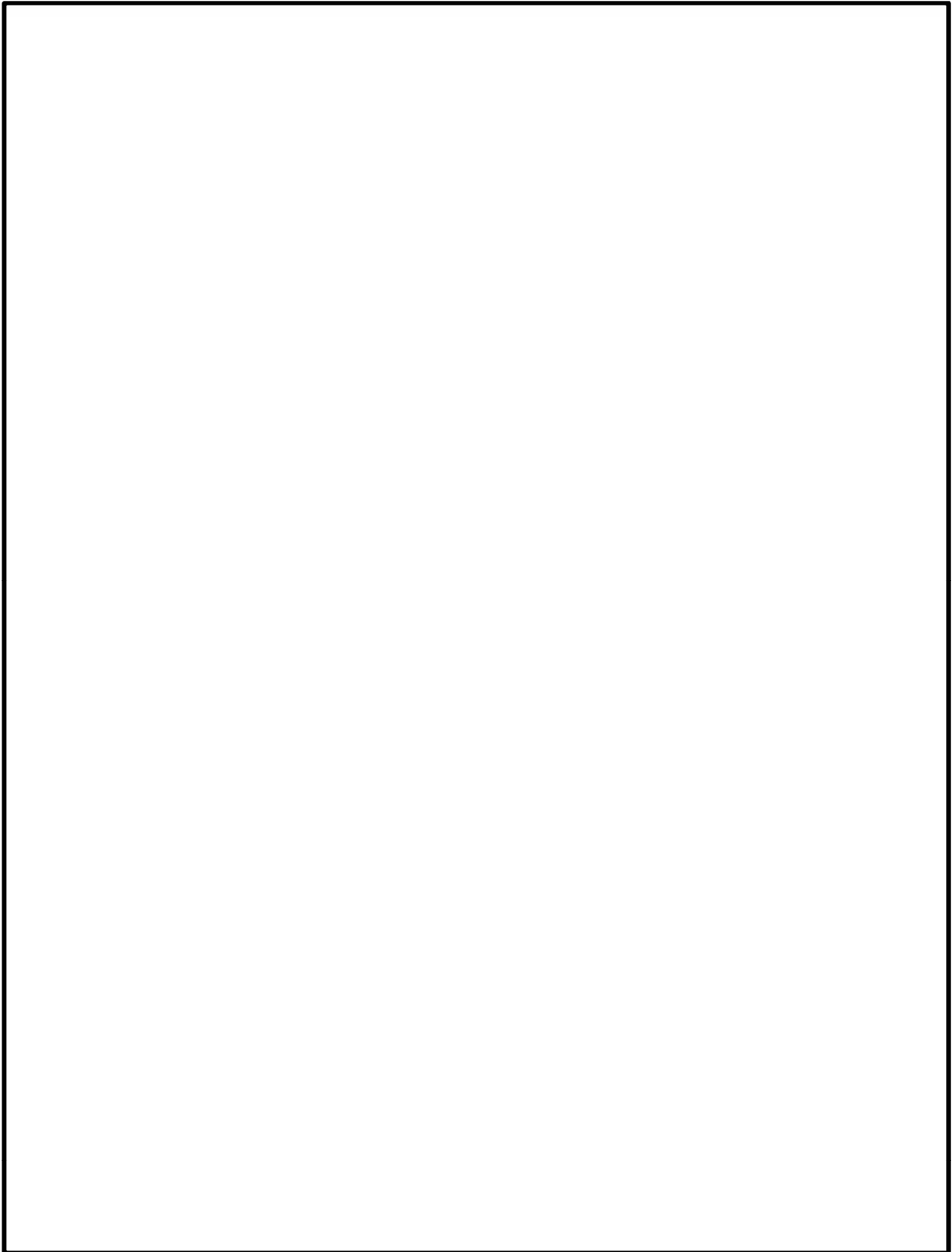
(17×17 燃料収納時)



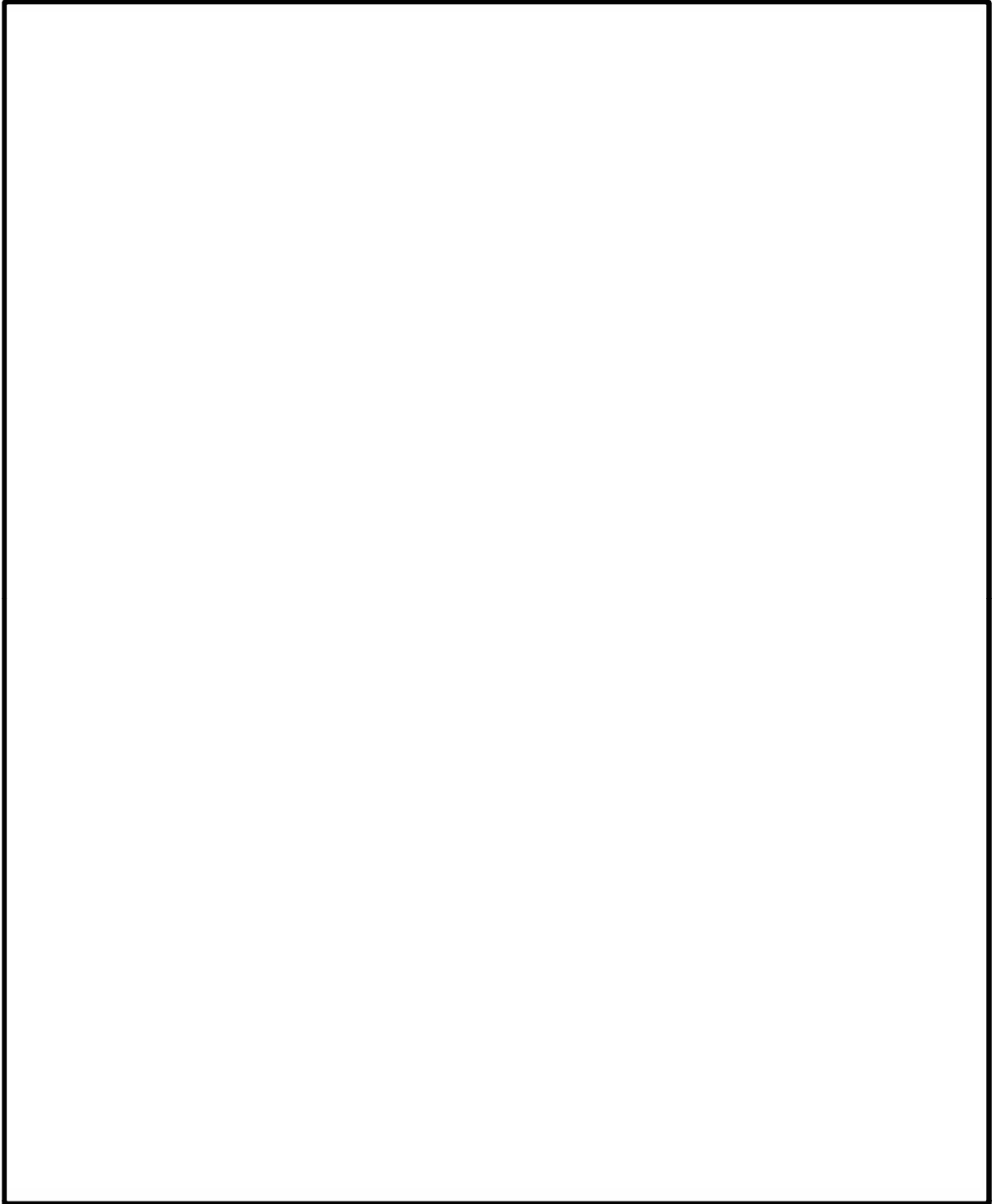
(ロ)-第 E. 2 図(b-6) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ均一拡大)
(17×17 燃料収納時)



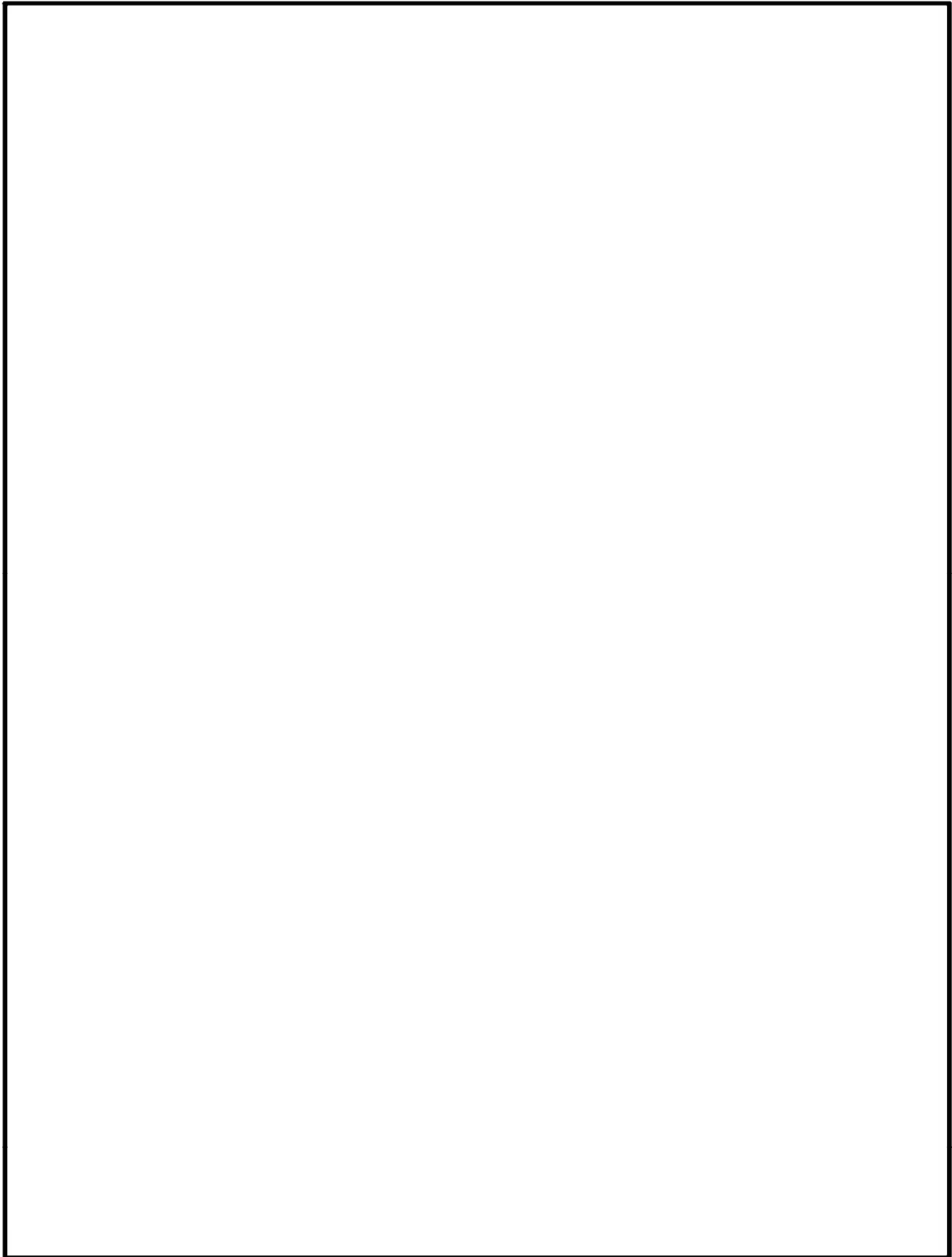
(ロ)-第 E. 2 図(c) 臨界計算モデル (縦断面図) (14×14 燃料収納時)



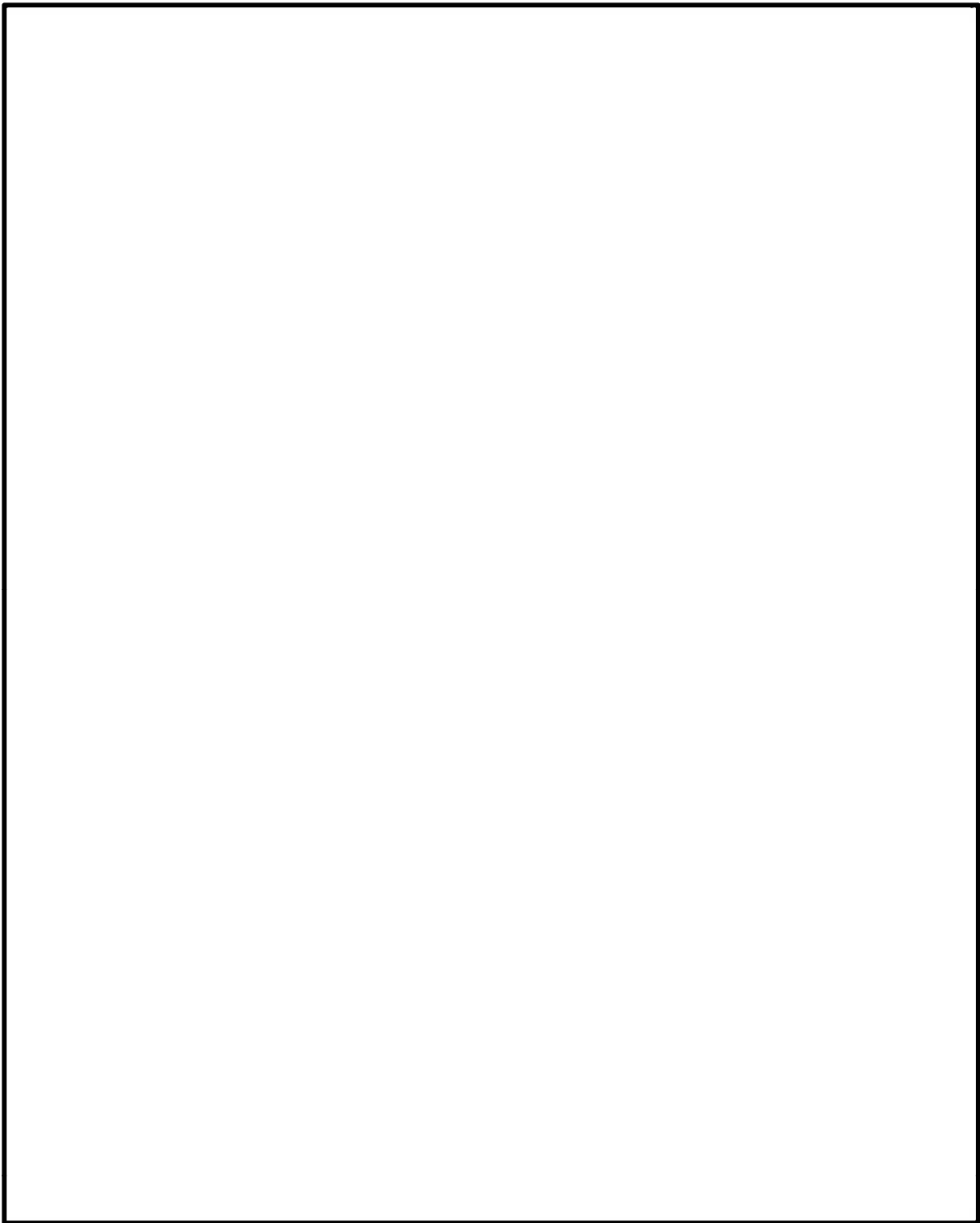
(ロ)-第 E. 2 図(d-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ最小)
(14×14 燃料収納時)



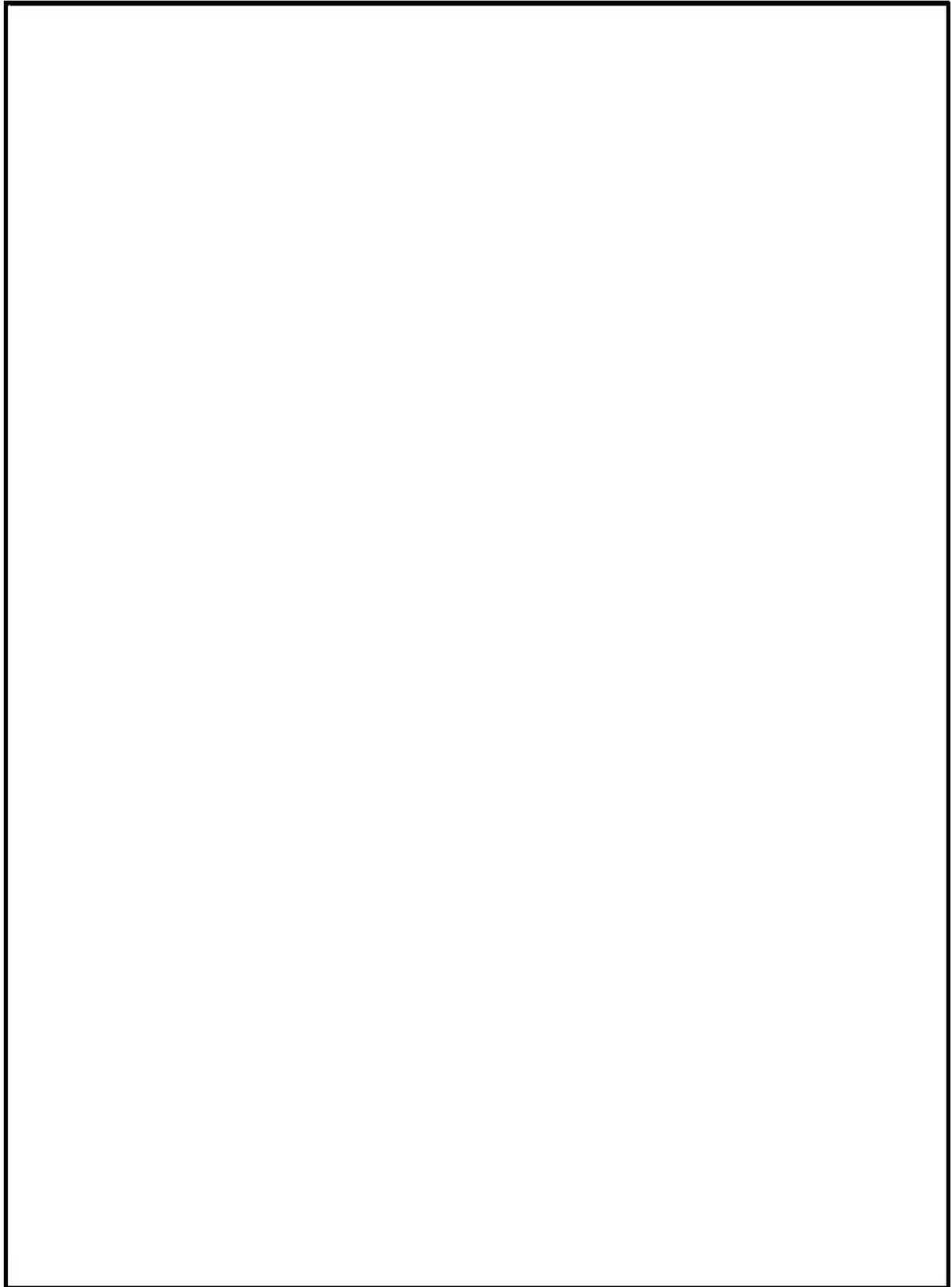
(ロ)-第 E. 2 図(d-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ最小)
(14×14 燃料収納時)



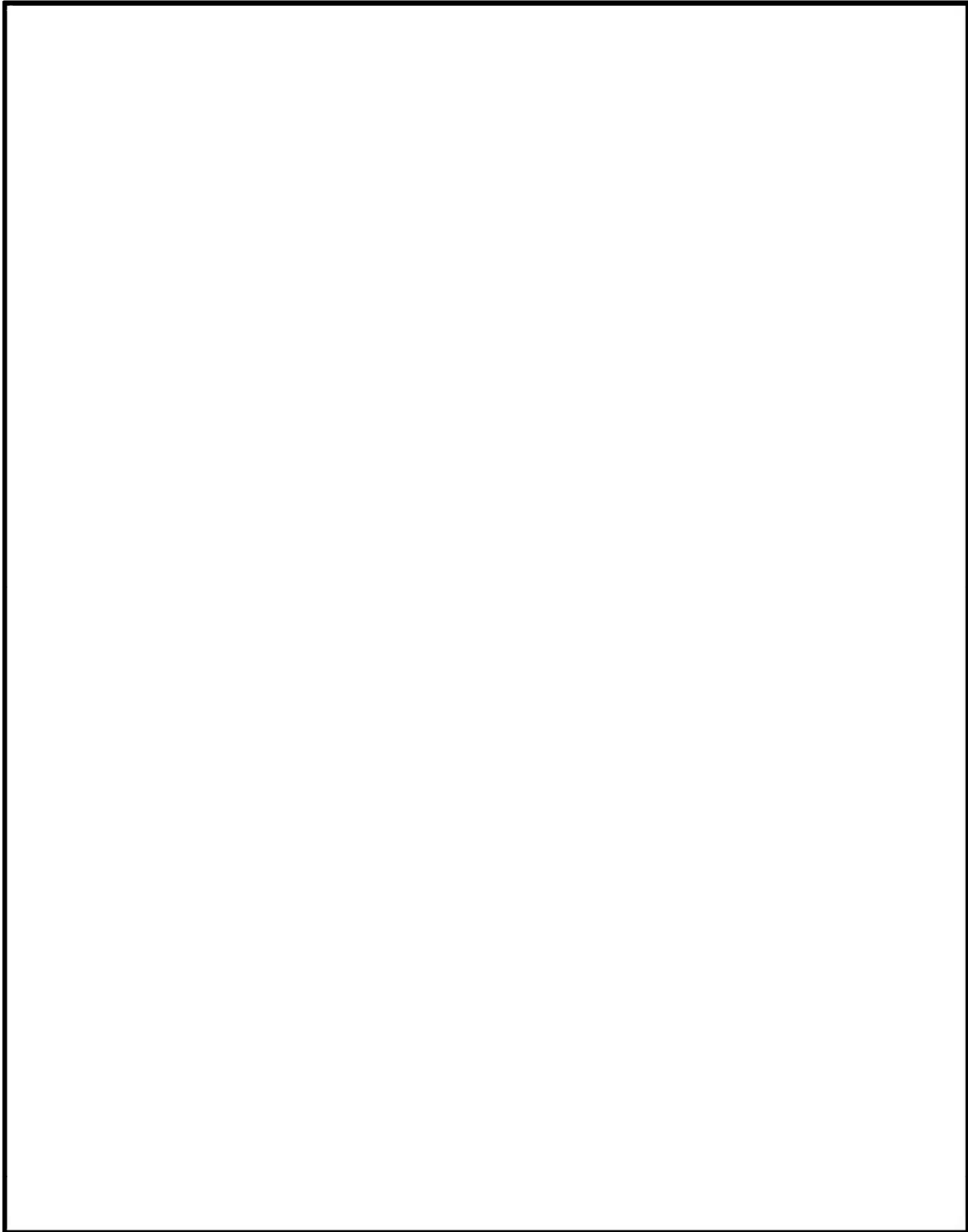
(ロ)-第 E. 2 図(d-3) 臨界計算モデル(燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ変化なし)
(14×14 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(d-4) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ変化なし)
(14×14 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(d-5) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ均一拡大)
(14×14 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(d-6) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ均一拡大)
(14×14 燃料収納時)

E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

本臨界解析で用いた輸送物各領域の構成物質の原子個数密度を(α)-第E.2表に示す。

(α)-第E.2表 輸送物各領域の原子個数密度 (1/2)

領域		密度 (g/cm ³)	元素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)	
				17×17燃料	
				48,000MWd/t型	
				A型	
燃料領域	UO ₂		²³⁵ U		
			²³⁸ U		
			O		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr ^(注1)		
			H		
			O		
ほう素添加 アルミニウム合金		¹⁰ B			
		¹¹ B			
		C			
		Al			
炭素鋼		Fe			
ステンレス鋼		Cr			
		Fe			
		Ni			
アルミニウム合金		Al			

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金（ジルカロイ-4）であるが、解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分（スズ等）は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいいため、この取扱いは保守的である。

(u)-第 E. 2 表 輸送物各領域の原子個数密度 (2/2)

領域		密度 (g/cm ³)	元素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)	
				14×14燃料 55,000Mwd/t型 A型	
燃料領域	UO ₂	□	²³⁵ U	□	□
			²³⁸ U		
			O		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管	□	Zr ^(注1)	□	□
			洞内ガス		
			O		
ほう素添加 アルミニウム合金		□	¹⁰ B	□	□
			¹¹ B		
			C		
			Al		
炭素鋼		□	Fe	□	□
ステンレス鋼		□	Cr	□	□
			Fe		
			Ni		
アルミニウム合金		□	Al	□	□

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金 (MDA/ZIRLO) であるが、解析上は純度 100% のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分 (スズ等) は中性子吸収効果がジルコニウムより大きい場合、この取扱いは保守的である。

E.4 未臨界評価

E.4.1 計算条件

1. 収納物

解析の対象とした(ρ)-第 E.1 表に示す燃料仕様は E.2.1 に示すとおり中性子実効増倍率が最も大きくなる仕様である。

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、支持格子 1 スパン間の燃料棒ピッチを縮小及び拡大させている。

なお、中性子実効増倍率が最大となるように、バスケット格子内の燃料集合体配置を考慮している。(燃料棒ピッチを拡大しない場合)

2. 輸送容器

本臨界解析では、安全側に緩衝体及び三次蓋が存在しないモデルとし、輸送容器の外側で完全反射境界条件とする。

また、胴内には核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても浸水はないため水が存在しないが、安全側に浸水量を仮定し、水は胴内に均一に存在するものとする。

3. 中性子吸収材

本臨界解析では、中性子吸収材に含まれるほう素添加量を仕様上の下限値としている。また、胴内中性子束が小さいのでほう素添加アルミニウム合金が使用期間中に中性子を吸収して効果を失うことはない。

E.4.2 輸送物への水の浸入等

輸送物への水の浸入等に関しては次のとおりである。

- ・(ρ)章 A.9 に示したように核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても密封装置の健全性及び二次蓋の防水性能は保たれるので、輸送物内部への水の浸入はない。ただし、臨界解析モデルでは 15 m 浸漬における浸水量に基づいて安全側に胴内の水量を 5000 cm³ とし、この水が均一に分散していると仮定した。
- ・本臨界解析では緩衝体を無視し、輸送容器の外側で完全反射境界条件としているので、輸送物の配列変化による接近により中性子実効増倍率がより大きくなることはない。
- ・燃料集合体は最も中性子実効増倍率が大きくなるようにバスケット格子内に配置しているため、収納物の再配列により中性子実効増倍率がより大きくなることはない。
- ・本臨界解析では輸送容器の外側で完全反射境界条件としているので、水中又は雪中への浸漬によって中性子実効増倍率がより大きくなることはない。
- ・本臨界解析では胴内の水量を上述のように仮定しているため、温度変化の水密度への影響はなく、中性子実効増倍率への影響はない。

E. 4.3 計算方法

臨界計算には、米国オークリッジ国立研究所で、原子力関連許認可評価用に開発された SCALE¹⁾ (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステムを用いた。中性子実効増倍率の計算には、KENO-VIコードを用いた。各領域の群定数計算には共鳴処理コード BONAMI、CENTRM 及び PMC を用い、核データライブラリは SCALE コードシステムの内蔵ライブラリデータの一つである ENDF/B-VIIに基づく 252 群断面積ライブラリを用いた。計算の流れを(ロ)-第 E.3 図に示す。本計算コードを用い、(ロ)-第 E.2 図のモデルに対して臨界計算を行った。

E. 4.4 計算結果

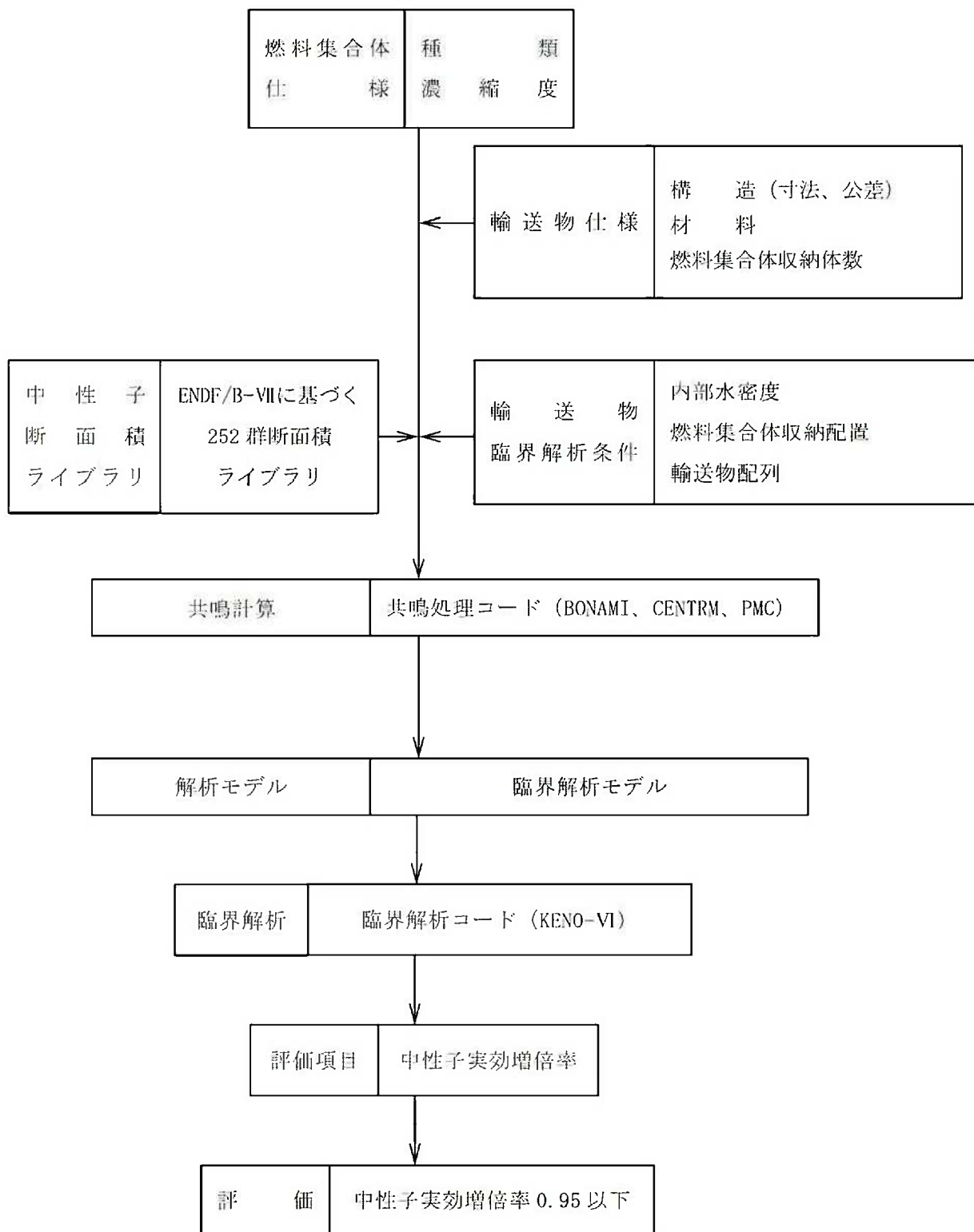
臨界解析の結果を(ロ)-第 E.3 表に示す。本計算は通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に置かれた輸送物の孤立系及び配列系の各状態と比較して安全側の計算であり、中性子実効増倍率 (keff) は標準偏差(σ)の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(ロ)-第 E.3 表 臨界計算結果 (1/2)

	項目	keff	σ	keff+3 σ
17×17燃料 収納時	燃料棒ピッチ最小	0.37800	0.00015	0.37844
	燃料棒ピッチ変化なし	0.37787	0.00014	0.37828
	燃料棒ピッチ均一拡大	0.37810	0.00013	0.37848

(ロ)-第 E.3 表 臨界計算結果 (2/2)

	項目	keff	σ	keff+3 σ
14×14燃料 収納時	燃料棒ピッチ最小	0.38813	0.00012	0.38850
	燃料棒ピッチ変化なし	0.38769	0.00014	0.38812
	燃料棒ピッチ均一拡大	0.38743	0.00014	0.38784



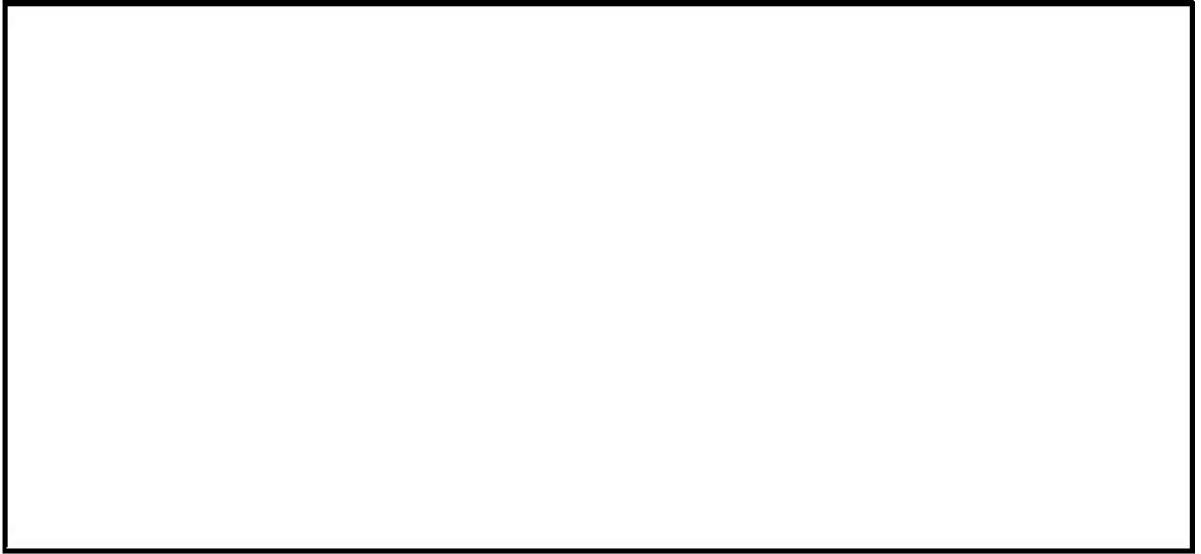
(ロ)-第 E. 3 図 臨界計算の流れ

E.5 ベンチマーク試験

本輸送物の臨界解析に用いた計算方法及び核データの妥当性を確認するため、OECD/NEAにて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース²⁾から、収納対象である燃料集合体の仕様並びに下記の輸送時の取扱いに関わる条件を考慮し、臨界解析を行う臨界実験を選定する。

- ① 燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合
- ② 複数の集合体が近接して配列する場合
- ③ この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材（ほう素）を含む板が存在する場合
- ④ 集合体に近接して反射体（鋼板、鉛）を配置した場合
- ⑤ 水中に中性子吸収材（ほう素）が溶解している場合
- ⑥ 乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合

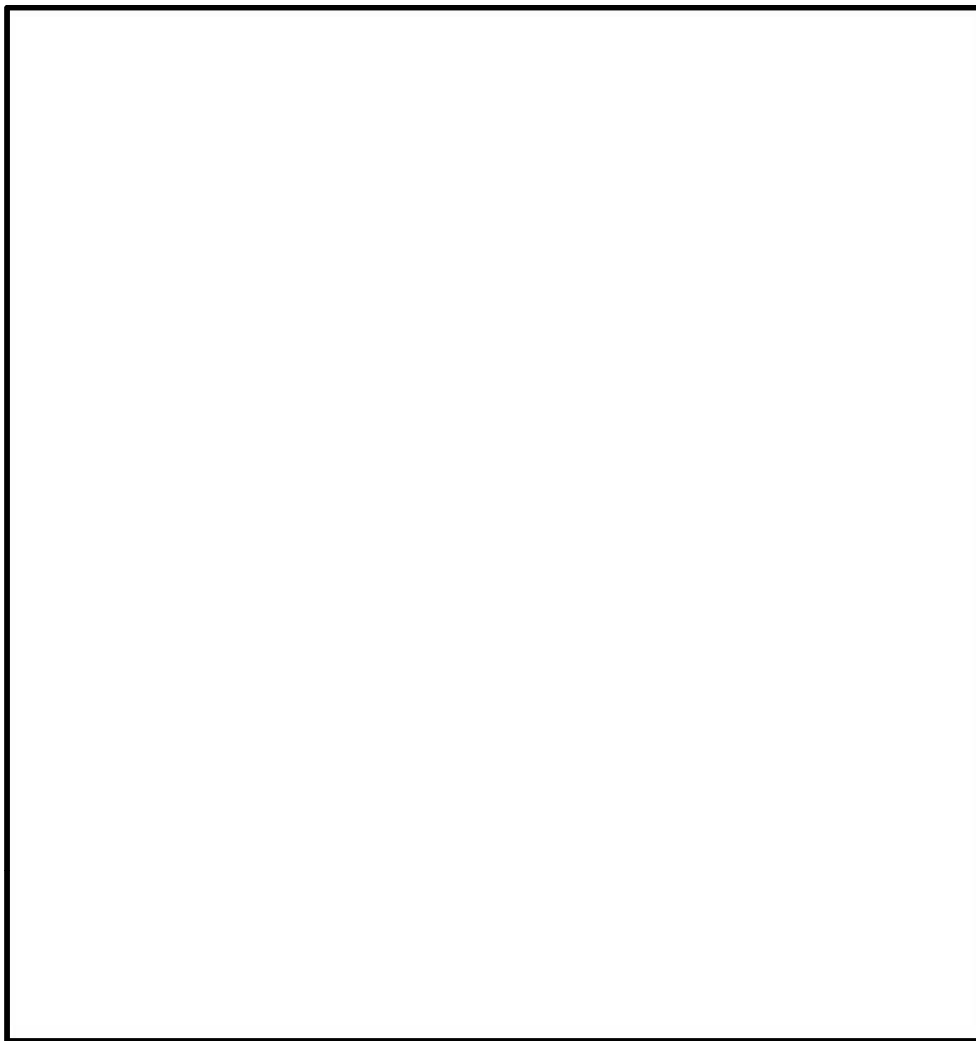
以上より、次の4つの機関により実施された臨界実験より、合計 ケースを選定した。



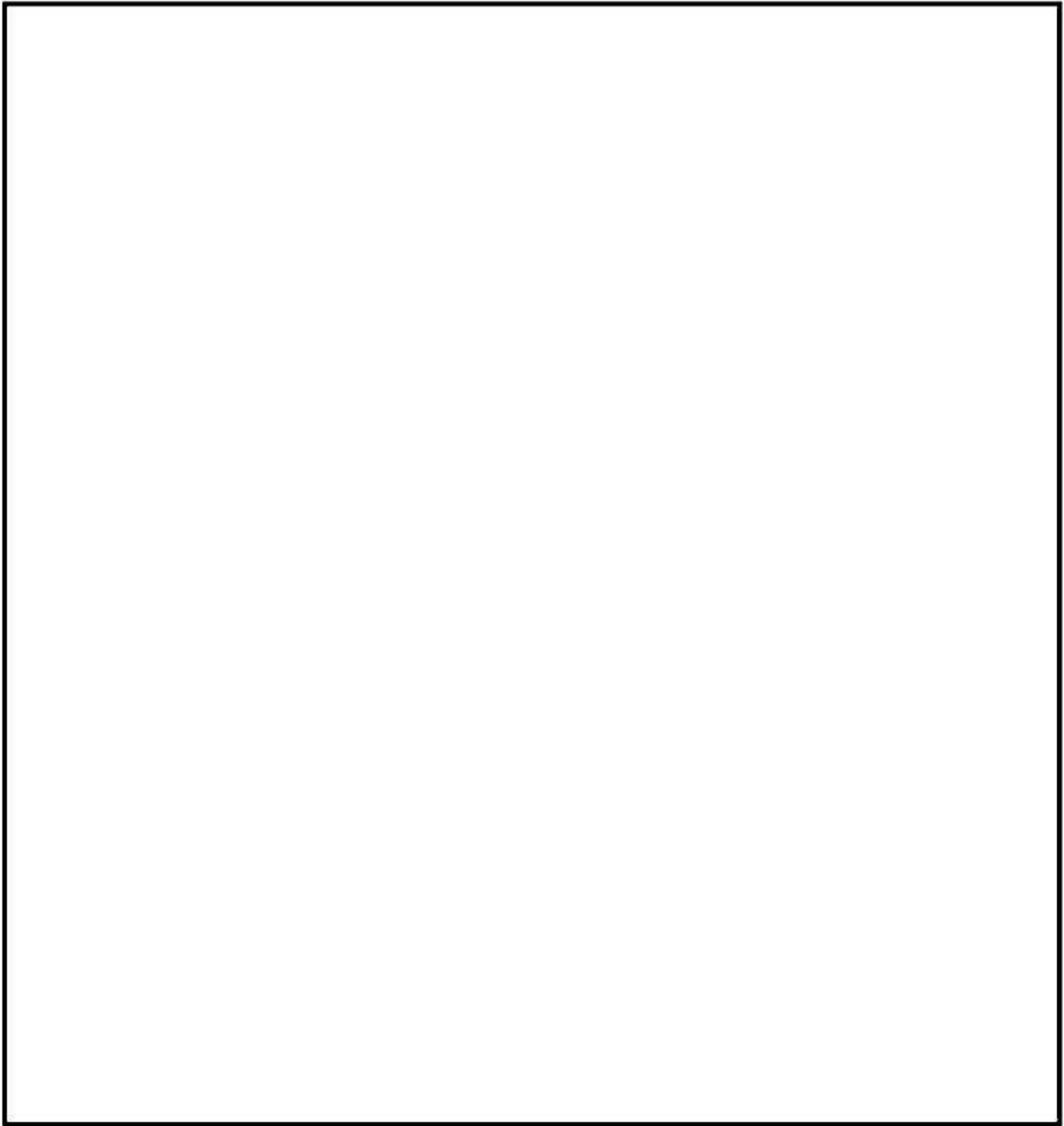
解析結果を (ロ)-第 E.4 表に示す。ベンチマーク解析の結果、本輸送物の臨界解析に用いた計算コード及び核データは妥当な結果を与えるといえる。

(ウ)-第E.4表 臨界解析結果

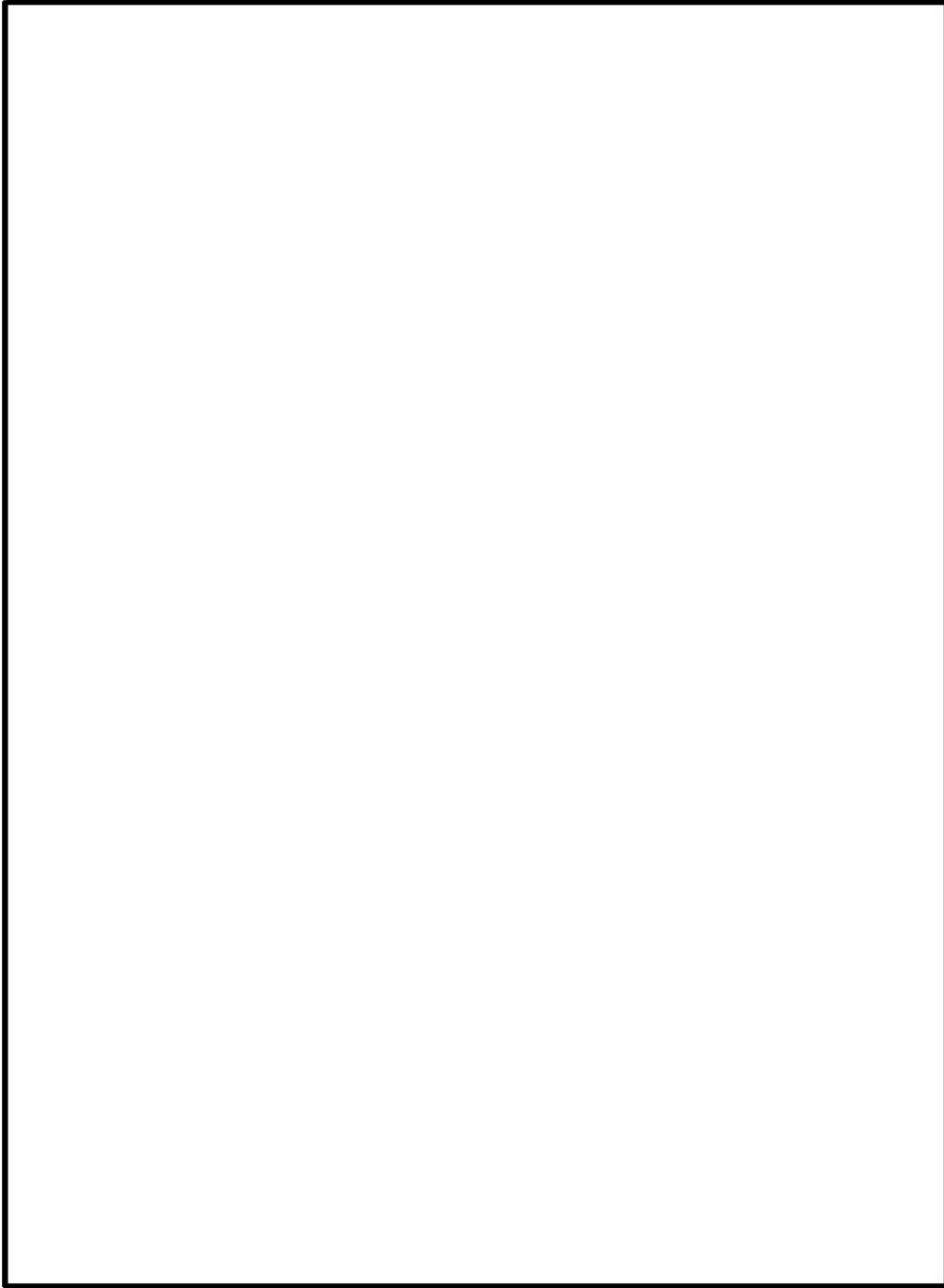
	ケース数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
臨界実験(1)		0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験(2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験(3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
臨界実験(4)		0.99514	0.00219	0.99895	0.99202
合計		0.99880	0.00332	1.01172	0.99202



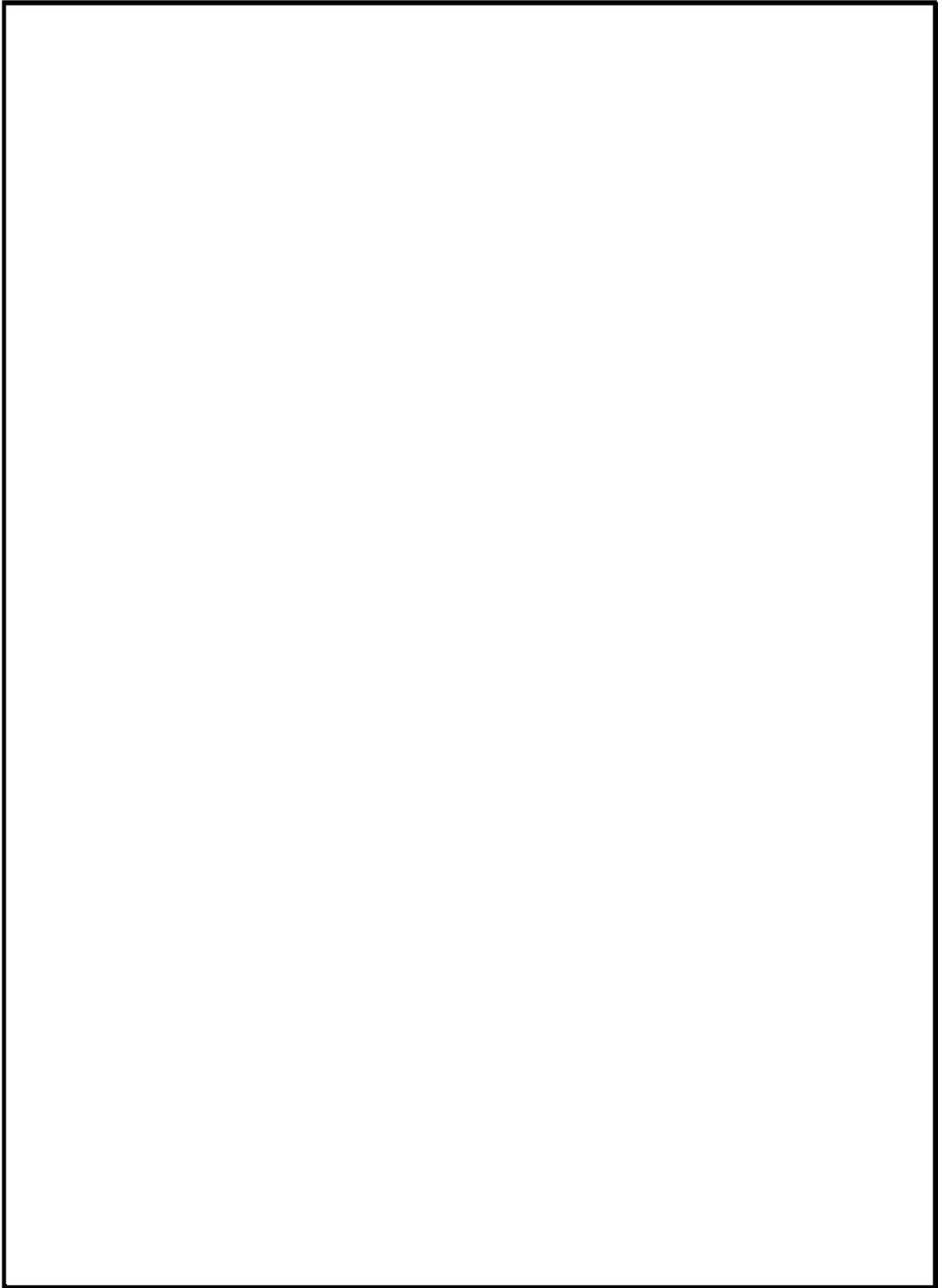
(ウ)-第E.4図(a)  臨界実験に用いた燃料棒



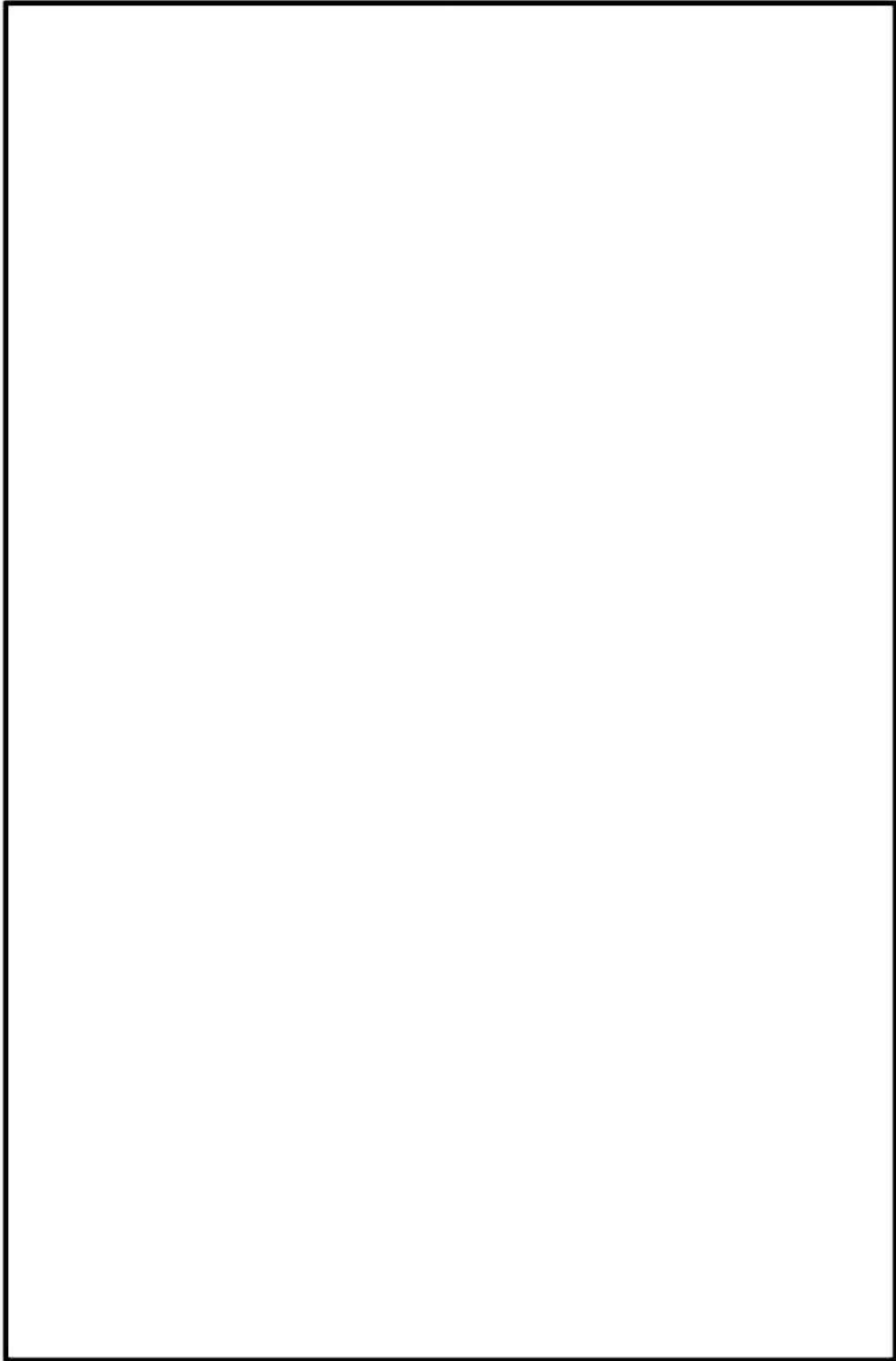
(v)-第E.4図(b) 臨界実験体系(1)



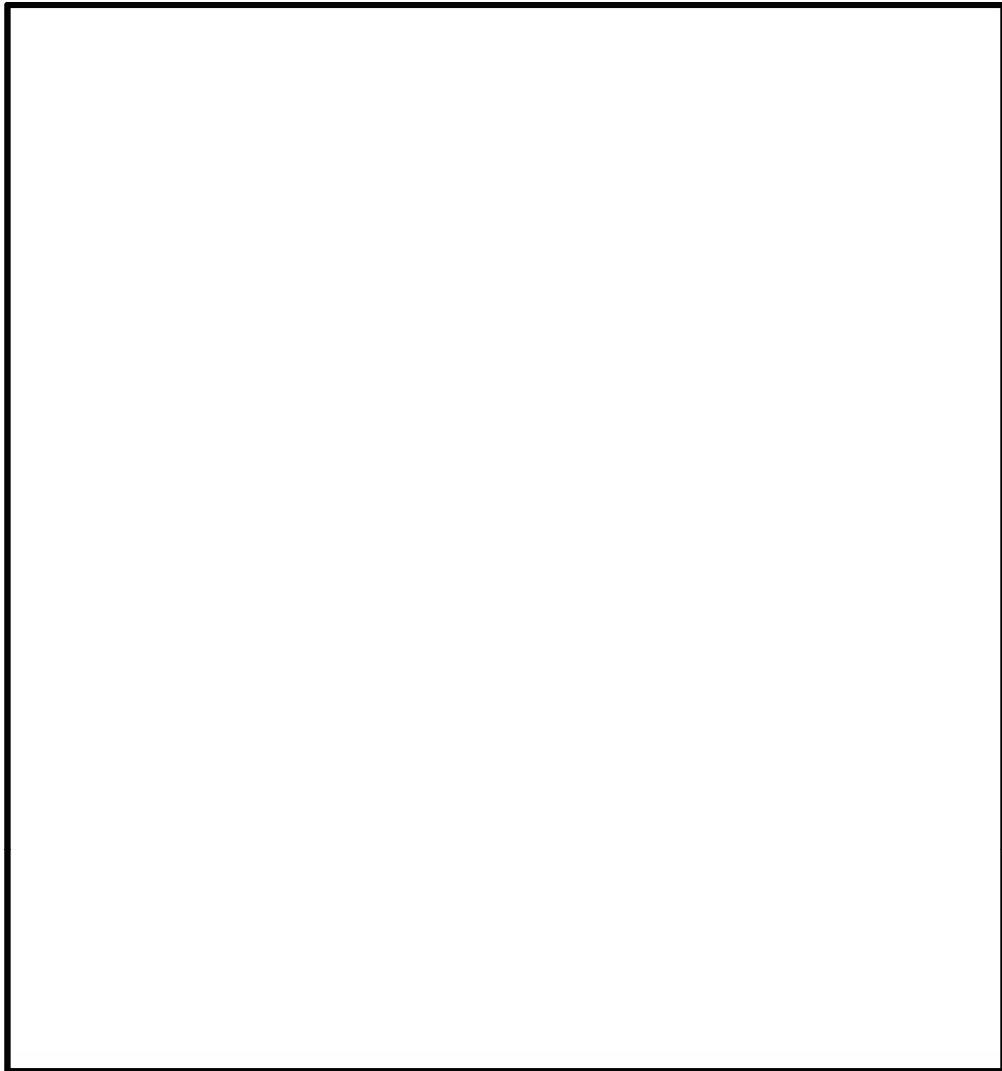
(ロ)-第E.5図 臨界実験体系(2)



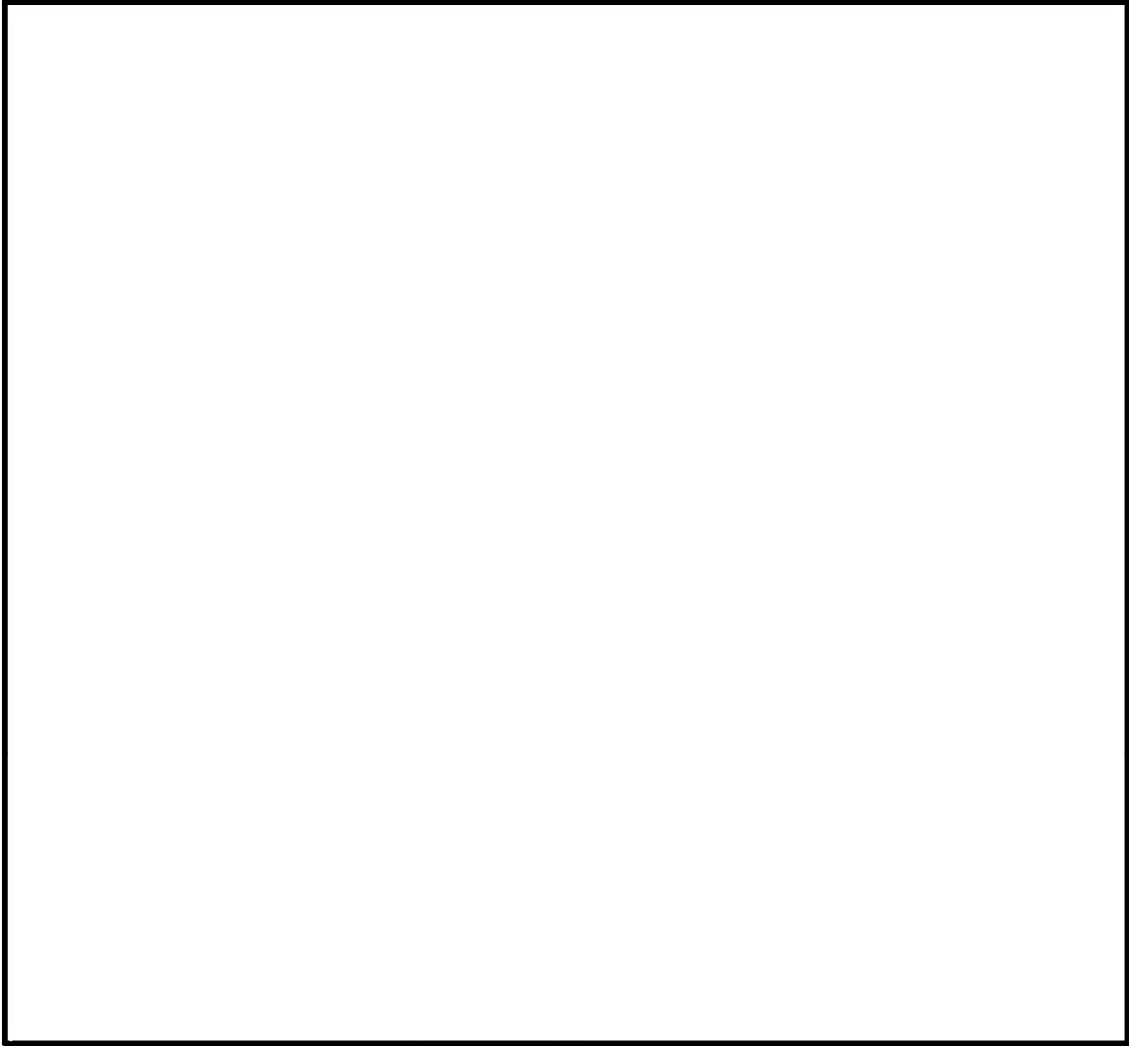
(a)-第E.6图  臨界実験体系(1)



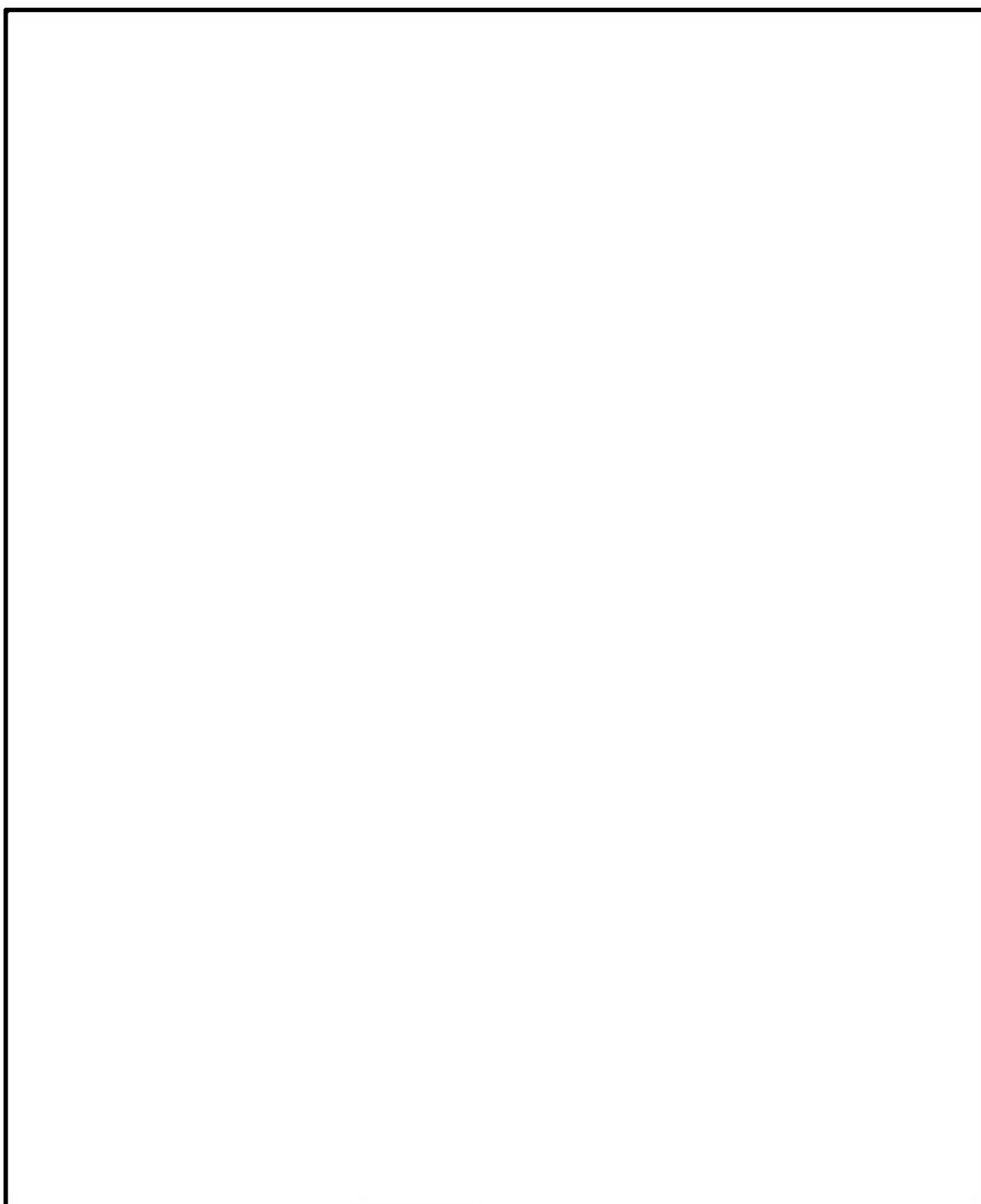
(v)-第E.7図 臨界実験体系(2)



(v)-第E.8図 臨界実験体系



(a)-第E.9図(a) 臨界実験体系 (水平断面)



(v)-第E.9図(b) 臨界実験体系（垂直断面）

E.6 結果の要約及びその評価

本輸送容器のバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の燃料集合体が輸送容器内部の所定の位置に収納される。本輸送容器へ 14×14 燃料を収納する場合には、バスケット格子内へバスケットスペーサが設置される。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造としている。

本輸送物の臨界解析は、通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に置かれた輸送物の孤立系及び配列系のいずれの条件より厳しい条件で行い、結果は十分未臨界であった。したがって、上記のいずれの条件においても未臨界が維持される。

E.7 付属書類

E.7.1 輸送容器の品質管理及び輸送前の密封性能の確認

本輸送容器については、(h)章に示す品質マネジメントの基本方針に基づいて高度の品質管理が行われ、参考¹⁾に示すように、製作中及び製作完了時に十分な検査が行われる。また、(i)章に示す保守により性能が維持される。

輸送前には、(i)章に示すように発送前検査において三次蓋及び二次蓋の気密漏えい試験が実施され密封性能が確認される。

E.7.2 胴内の浸水量

本輸送容器は燃料集合体を収納後、内部水が排出され、さらに真空乾燥が行われる。また、A.9.2の2.に示すように、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても、輸送容器の三次蓋及び二次蓋は密封性能を維持し、二重の防水機能が維持されるため、胴内が水で満たされることはない。しかし、ここでは仮想的に、胴内への浸水としては、浸漬試験において胴内に浸入する水を仮定する。

本輸送容器の防水機能である三次蓋及び二次蓋の密封性能は(ρ)-第E.付1表に示すとおりである。胴内への浸水量を、三次蓋の密封性を安全側に無視して、二次蓋に対して15 m浸漬の水圧がかかったとして評価する。

(ρ)章Cに示した手法により二次蓋のガスケットからの浸水率を求めた結果を(ρ)-第E.付2表に示す。1ヶ月間の浸水量は2000 cm³程度である。

上記の15 m浸漬における浸水量に基づいて安全側に胴内の水量としては5000 cm³を考慮し、この水が均一に分散していると仮定した。

(ρ)-第E.付1表 防水機能の密封性能

部位	漏えい率 (ref cm ³ /s)	備考
三次蓋	1×10 ⁻³	気密漏えい試験の基準値
二次蓋	5×10 ⁻³	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の影響を考慮した金属ガスケットの漏えい率 ³⁾

(ロ)-第E.付2表 15 m浸漬の水圧による浸水率

項目	部位	密封境界 (蓋部)
P_u : 上流側圧力 (MPa)		0.251325
P_d : 下流側圧力 (MPa)		0.0
T : 流体の温度 (K)		383.15 (注1)
a : 漏えい孔長 (cm)		
D : 漏えい孔径 (cm)		
L : 15 m浸漬の水圧による浸水率 (cm ³ /s) (注3)		7.32×10 ⁻⁴ (1.90×10 ³ cm ³ /月)

(注1) ガasket部温度

(注2) ガasketの接触幅を採用

(注3) 水の計算においては(ロ)章Cの(1)式に替えて次式で求めた。

$$L = F_c \times (P_u - P_d) \quad (4)$$

E.7.3 取扱い時の臨界解析

輸送物の取扱い時においては、胴内に水が満たされる。ここでは、胴内に水が満たされる場合の臨界解析を行う。

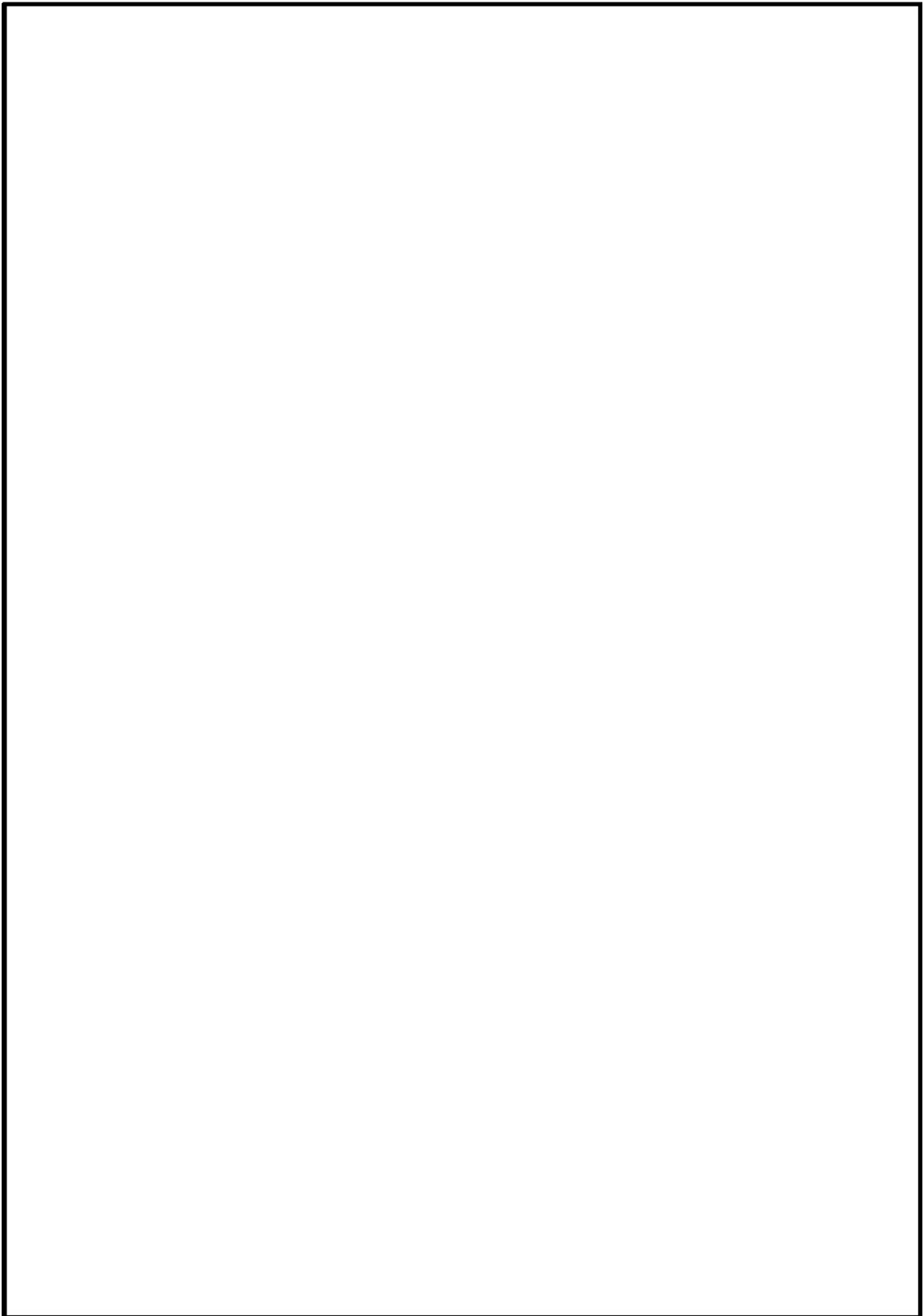
1. 解析モデル

(ロ)-第 E. 付 1 図に臨界解析モデルを示す。解析モデルは安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

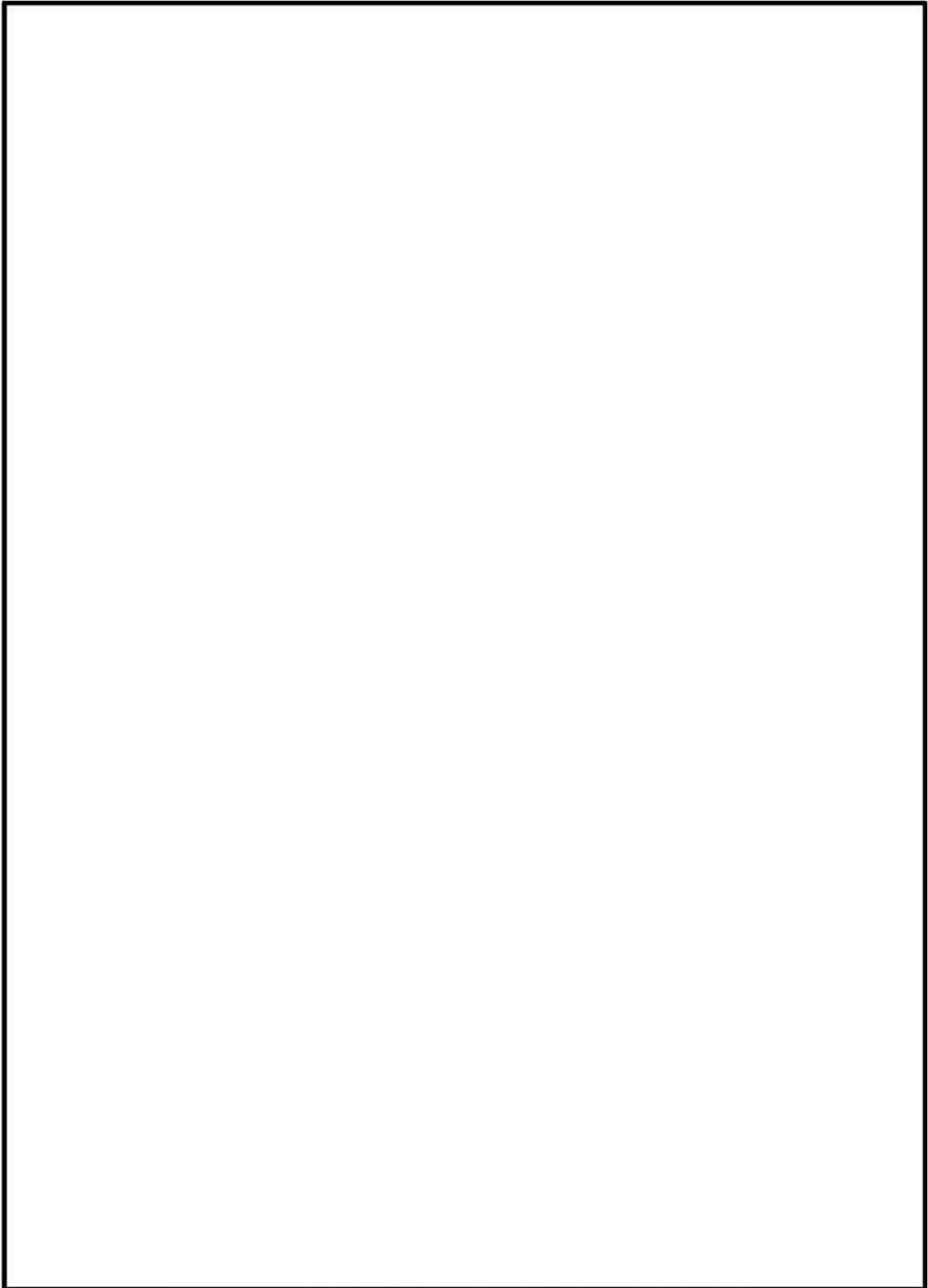
- ・輸送物が無限に配列している体系とする。
- ・中性子遮蔽材を無視する。
- ・緩衝体及び三次蓋を無視する。
- ・中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート板厚、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚、バスケット格子内のり及びバスケットスペーサの公差を考慮する。
- ・バスケット格子内の燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるように配置する。
- ・胴内には水が存在するものとする。
- ・バスケットプレート、中性子吸収材及びバスケットスペーサは、実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し、それ以外の部分は水に置き換える。

本臨界解析で用いた輸送物各領域の構成物質の原子個数密度を(ロ)-第 E. 付 3 表に示す。

輸送物の中性子実効増倍率を最も大きく評価するために、胴内の水の密度は 1.0 g/cm^3 とした。

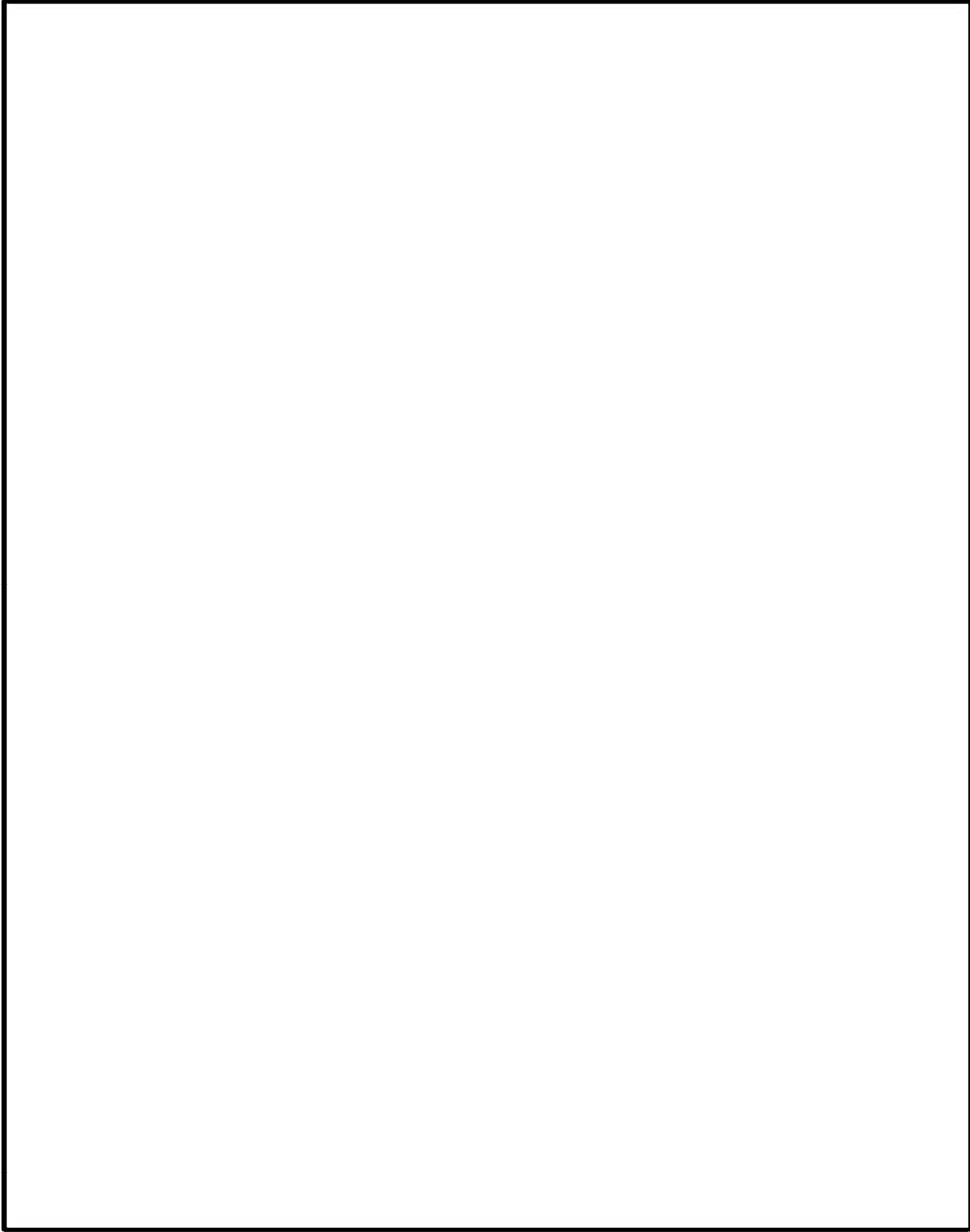


(ロ)-第 E. 付 1 図(a) 臨界計算モデル (縦断面図) (17×17 燃料収納時)

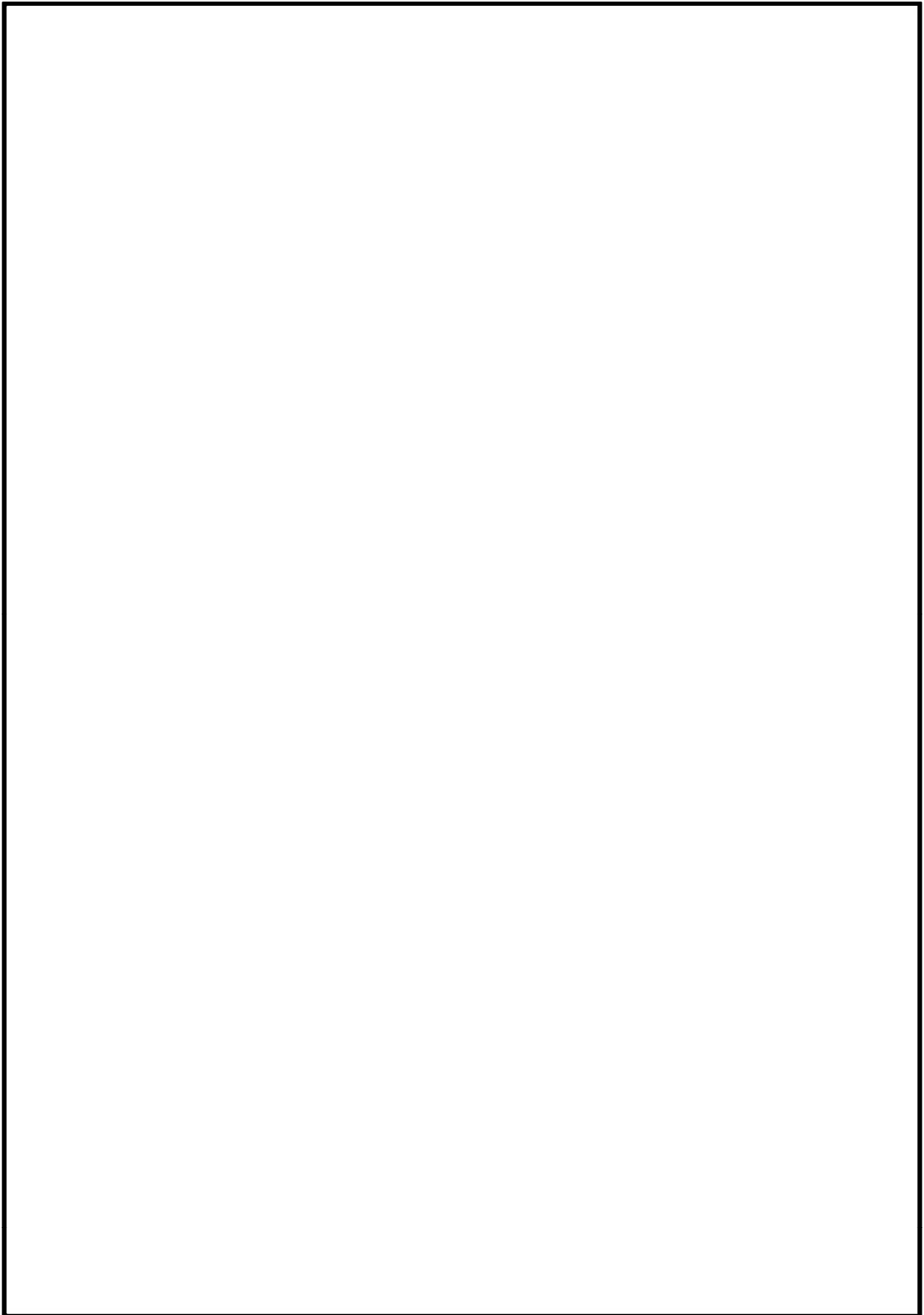


(ロ)-第 E. 付 1 図(b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図)

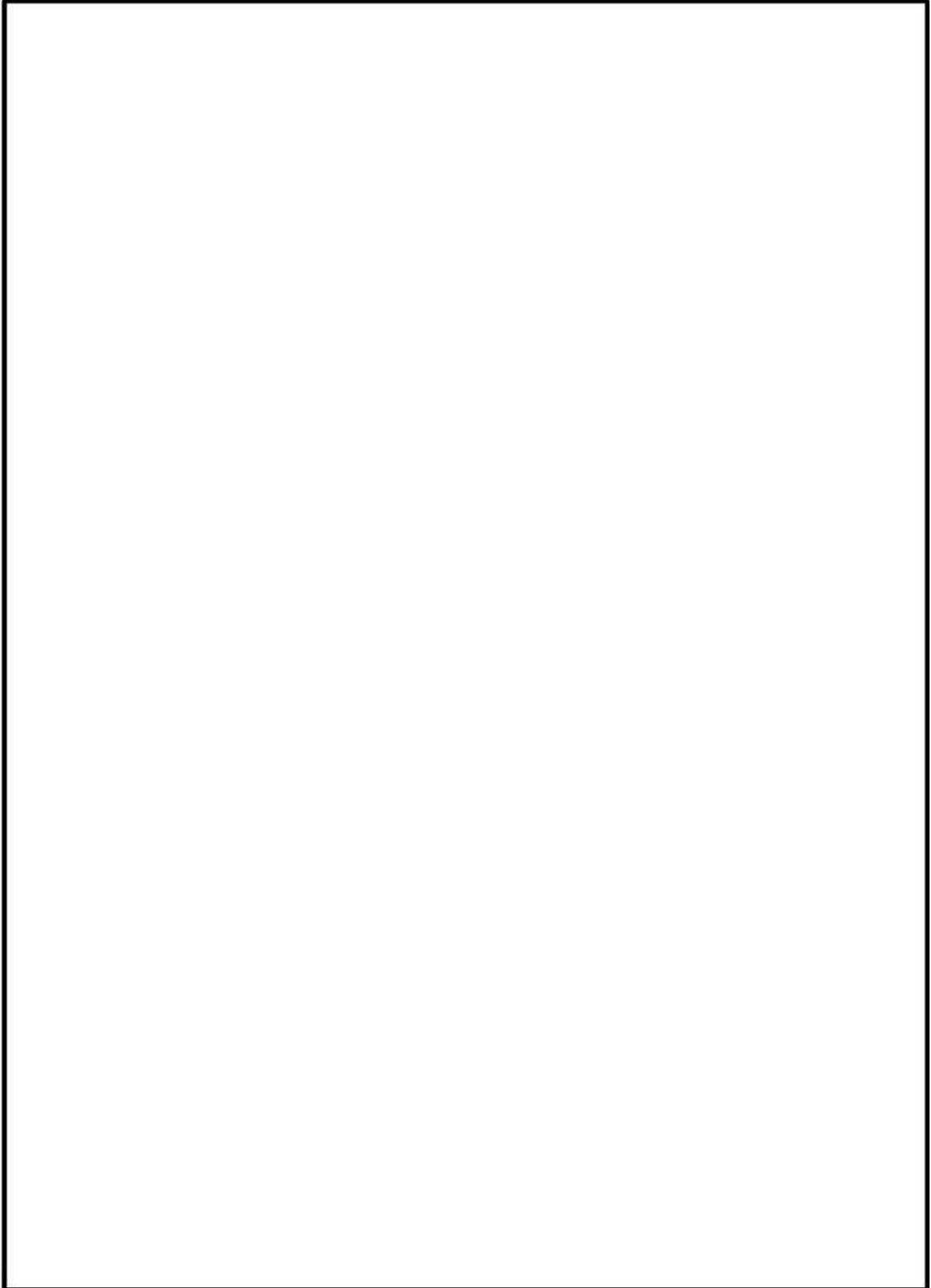
(17×17 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 付 1 図(b-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図)
(17×17 燃料収納時)

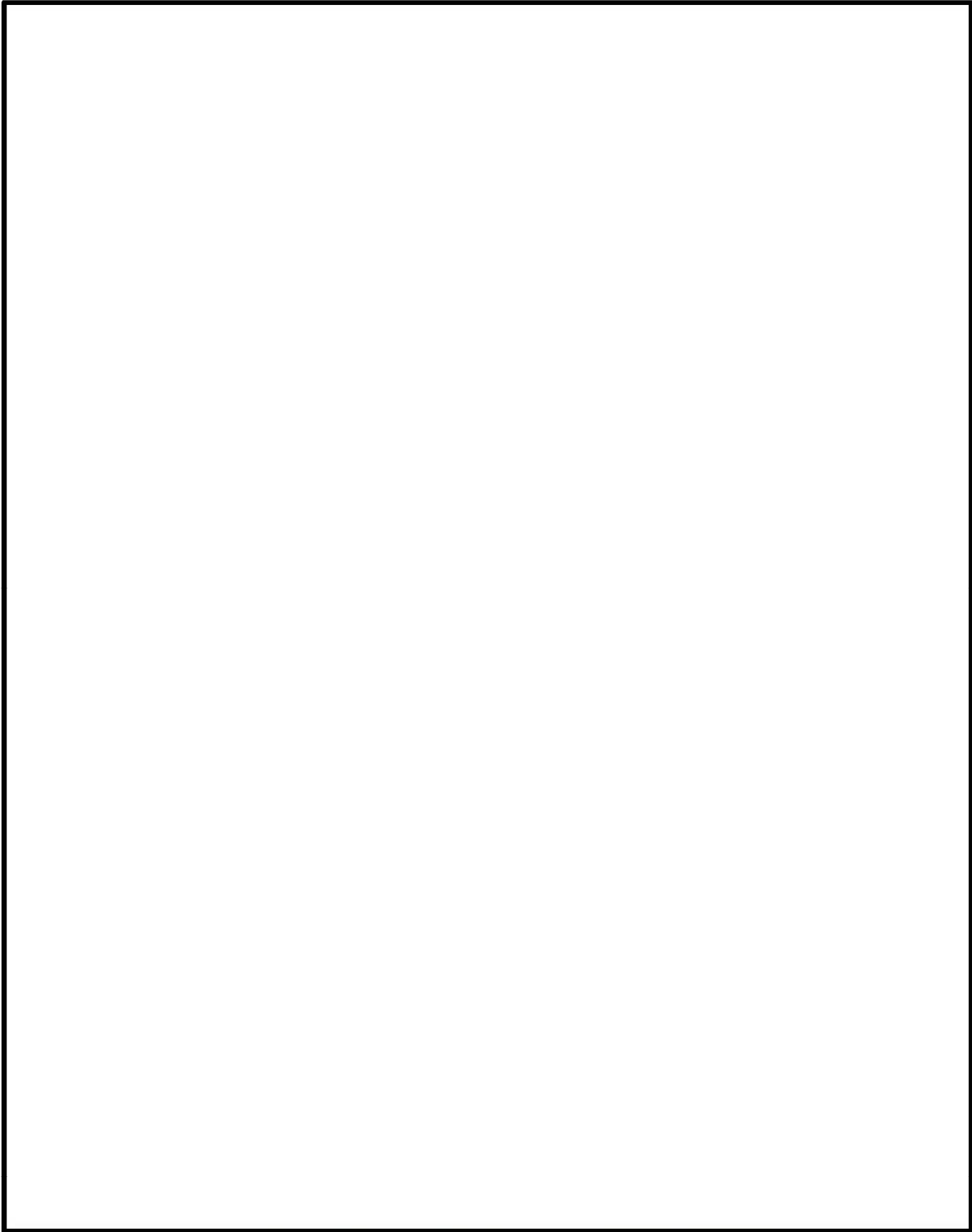


(ロ)-第 E. 付 1 図(c) 臨界計算モデル (縦断面図) (14×14 燃料収納時)



(ロ) 第 E. 付 1 図(d-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図)

(14×14 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 付 1 図(d-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図)
(14×14 燃料収納時)

(a)-第 E. 付 3 表 輸送物各領域の原子個数密度 (1/2)

領域		密度 (g/cm ³)	元素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)	
				17×17燃料 48,000Mwd/t型 A型	
燃料領域	UO ₂	□	²³⁵ U	□	□
			²³⁸ U		
			O		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管	□	Zr ^(注1)	□	□
	水	□	H	□	□
O					
ほう素添加 アルミニウム合金	□	¹⁰ B	□	□	
		¹¹ B			
		C			
		Al			
炭素鋼	□	Fe	□	□	
ステンレス鋼	□	Cr	□	□	
		Fe			
		Ni			
アルミニウム合金	□	Al	□	□	

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金（ジルカロイ-4）であるが、解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分（スズ等）は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいいため、この取扱いは保守的である。

(ロ)-第 E. 付 3 表 輸送物各領域の原子個数密度 (2/2)

領域		密度 (g/cm ³)	元素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)	
				14×14燃料 55,000Mwd/t型 A型	
燃料領域	UO ₂	□	²³⁵ U	□	□
			²³⁸ U		
			O		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管	□	Zr ^(注1)	□	□
	水	□	H	□	□
O					
ほう素添加 アルミニウム合金	□	¹⁰ B	□	□	
		¹¹ B			
		C			
		Al			
炭素鋼	□	Fe	□	□	
ステンレス鋼	□	Cr	□	□	
		Fe			
		Ni			
アルミニウム合金	□	Al	□	□	

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金 (MDA/ZIRLO) であるが、解析上は純度 100% のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分 (スズ等) は中性子吸収効果がジルコニウムより大きい場合、この取扱いは保守的である。

2. 計算方法

臨界計算には、E. 4. 3 と同様に SCALE コードシステムを用いた。

3. 計算結果

(v)-第 E. 付 4 表に臨界計算の結果を示す。本計算は E. 4. 4 に示した臨界計算結果より中性子実効増倍率 (k_{eff}) が大きくなるが、標準偏差(σ)の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(v)-第 E. 付 4 表 臨界計算結果 (1/2)

	k_{eff}	σ	$k_{eff}+3\sigma$
17×17燃料収納時	0. 89867	0. 00052	0. 90022

(v)-第 E. 付 4 表 臨界計算結果 (2/2)

	k_{eff}	σ	$k_{eff}+3\sigma$
14×14燃料収納時	0. 88168	0. 00040	0. 88288

E. 7. 4 参考文献

- 1) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System”, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).
- 2) “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments.”, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006).
- 3) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 16 年度 中間貯蔵施設健全性評価手法等調査 最終報告」, (2005).
- 4) American National Standards Institute, Inc., “American National Standard for Radioactive Materials – Leakage Tests on Packages for Shipment”, ANSI N14.5-2014, (2014).

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目																																																																			
(核燃料輸送物としての核燃料物質等の運搬) 第 3 条 第 1 項第 1 号 第 2 号 第 3 号	(L 型輸送物として運搬できる核燃料物質等) 第 3 条 (A 型輸送物として運搬できる核燃料物質等の放射能の量の限度) 第 4 条	該当しない。 該当しない。 本輸送物の収納物は下記のとおりであり、原子力規制委員会の定める量を超える量の放射能を有する核燃料物質等に該当するので BM 型輸送物として輸送する。 <table border="1" data-bbox="655 1048 1265 1899"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2"></td> <td colspan="2">中央部</td> <td colspan="2">外周部</td> </tr> <tr> <td colspan="4">17×17 燃料</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>A 型</td> <td>B 型</td> <td>A 型</td> <td>B 型</td> </tr> <tr> <td colspan="2">燃料集合体の種類</td> <td colspan="4">軽水炉 (PWR) 使用済燃料</td> </tr> <tr> <td colspan="2">性状</td> <td colspan="4">固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ウラン重量 (kg 以下)</td> <td colspan="4" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">放射能の量 (PBq 以下)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">初期濃縮度 (wt% 以下)</td> <td colspan="4">4.2</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃 焼 度</td> <td>収納物最高 (MWd/t 以下)</td> <td colspan="4" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>収納物平均 (MWd/t 以下)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">発熱量 (kW 以下)</td> <td colspan="4">13.9</td> </tr> <tr> <td colspan="2">冷却日数 (日以上)</td> <td colspan="4" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">収納体数 (体以下)</td> <td colspan="2">9</td> <td colspan="2">12</td> </tr> </table> (注) 17×17 燃料を代表として記載する。			中央部		外周部		17×17 燃料						A 型	B 型	A 型	B 型	燃料集合体の種類		軽水炉 (PWR) 使用済燃料				性状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)				ウラン重量 (kg 以下)						放射能の量 (PBq 以下)		初期濃縮度 (wt% 以下)		4.2				燃 焼 度	収納物最高 (MWd/t 以下)					収納物平均 (MWd/t 以下)	発熱量 (kW 以下)		13.9				冷却日数 (日以上)						収納体数 (体以下)		9		12		(イ)-A、 (イ)-D
		中央部			外周部																																																																	
		17×17 燃料																																																																				
		A 型	B 型	A 型	B 型																																																																	
燃料集合体の種類		軽水炉 (PWR) 使用済燃料																																																																				
性状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)																																																																				
ウラン重量 (kg 以下)																																																																						
放射能の量 (PBq 以下)																																																																						
初期濃縮度 (wt% 以下)		4.2																																																																				
燃 焼 度	収納物最高 (MWd/t 以下)																																																																					
	収納物平均 (MWd/t 以下)																																																																					
発熱量 (kW 以下)		13.9																																																																				
冷却日数 (日以上)																																																																						
収納体数 (体以下)		9		12																																																																		

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(L型輸送物に係る技術上の基準) 第4条第1号		<p>本輸送物は、以下に示すように容易に、かつ、安全に取扱うことができる。</p> <p>a. 輸送物は、キャスク本体にトラニオンがあり、吊上げ、吊下しは専用吊具を用い、クレーンを使用して容易に行える。また、輸送物は専用の輸送架台を用いて車輛又は船舶に強固に積付けられる等、安全に取り扱えるものである。</p> <p>b. 輸送物の吊上装置であるトラニオンは、公式を用いた計算により、取扱時を考慮して安全係数を3とし、収納物の最大収納体数を考慮した輸送物の吊上げ荷重の負荷時にも設計降伏点を下回るよう設計しており、急激な吊上げに耐えられるものである。</p> <p>c. 輸送物には、トラニオンを除いて輸送物を吊上げるおそれのある吊手はない。 また、輸送物は、専用吊具によって容易に、かつ、安全に取り扱うことができる。</p> <p>d. 輸送物の表面は滑らかに仕上げており、雨水が溜らない構造となっている。</p>	<p>(イ)-C</p> <p>(ロ)-A. 4. 4</p> <p>(イ)-C</p> <p>(イ)-C</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第4条第2号		<p>本輸送物は、以下に示すように運搬中に予想される温度（-20℃～38℃）及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p> <p>a. 運搬中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-20℃とし、最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度 38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件の下で、軸方向燃焼度分布を考慮した上で、収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 15.8 kW として輸送物各部の温度を ABAQUS コードを用いて解析評価している。収納物の最高温度は 196℃であり、制限温度 275℃より低いため、燃料被覆管の機械的特性に影響はない。</p> <p>本輸送物の主要な中性子遮蔽材であるレジンの温度は 124℃であり、使用可能温度 149℃より低いため、遮蔽性能が低下することはない。また、二次蓋金属ガスケット温度は 104℃であり、金属ガスケットの使用可能温度 130℃より低く、三次蓋 Oリング温度は 103℃であり、Oリングの使用可能温度 150℃より低いため、密封性能が低下することはない。</p> <p>b. 運搬中に予想される温度の変化に対して、輸送物は周囲温度-20℃～38℃の温度の範囲において、各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分小さく、部品同士の干渉が生じないため、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、発生する熱応力に対しても、耐える強度をもつことから、構造健全性は維持される。</p> <p>c. 運搬中に予想される内圧の変化に対して、輸送物の運搬中に予想される最大内圧は胴内圧が 0.078MPa、一二次蓋間が 0.39MPa、二三次蓋間が 0.33MPa であり、構造解析ではその圧力条件を上回る差圧を胴内、一二次蓋空間及び二三次蓋空間に設定した条件で、熱応</p>	<p>(□)-B. 4. 6</p> <p>(□)-A. 5. 1. 2</p> <p>(□)-A. 5. 1</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第4条第2号		<p>力を含めた各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価している。また、中性子遮蔽材充填空間においても温度上昇に伴う圧力上昇を考慮している。運搬中の温度変化により予想される容器本体各部の温度差による熱応力や内圧の変化による荷重が負荷されても各部が設計応力強さ等基準値を下回り、構造健全性が維持され、き裂、破損等の生じるおそれはない。また、三次蓋の口開き変形量は O リングの初期締め付け代より小さく、密封性を損なうことはない。</p> <p>d. 本輸送物の胴内は、真空置換によりヘリウムを充填するため残留水はなく、水の放射線分解によってガスが発生しないため、内圧を高めることはなく、密封性を損なうことはない。</p> <p>e. 三次蓋は輸送時の振動等により緩まないよう、三次蓋ボルトにより強固に締付けられており、運搬中の温度及び内圧の変化を考慮しても、開くことはない。また、輸送物のキャスク本体と三次蓋の接合部の密封境界には O リングを設けており、密封を保っている。</p> <p>f. 固縛装置であるトラニオンは、公式を用いた計算により、輸送物最大重量を考慮したうえで、輸送中発生する上下及び前後方向加速度 2 g 並びに左右方向加速度 1 g の負荷時にも設計降伏点を下回るように設計されているため、構造健全性は維持される。また、本輸送物は固有振動数 (242 Hz) と輸送による振動数 (10 Hz) の差が大きく、励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく、輸送中の振動による荷重は 0.3m 落下事象に包絡される。よって、輸送物は予想される振動等によって、き裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	<p>(□)-B. 4. 4</p> <p>(□)-A. 4. 7、 (□)-A. 5. 1 (□)-C. 2. 4</p> <p>(□)-A. 4. 5、 (□)-A. 4. 7</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第4条第3号</p> <p>第4号</p> <p>第5号</p> <p>第6号</p> <p>第7号</p>		<p>輸送物表面には、取扱い時に使用するトランニオン以外には不要な突起物がなく、また、輸送物表面はステンレス鋼もしくは塗装を施した炭素鋼面であり、滑らかに仕上げていることから、除染は容易である。</p> <p>本輸送物には、炭素鋼、ステンレス鋼等化学的に安定した材料を使用しており、以下に示すように各々の材料相互の間及び収納物との間では、危険な物理的作用又は化学反応を起こすおそれはない。</p> <p>a. 構成部品同士の熱膨張による干渉はないことから、材料相互の接触による、き裂、破損等を生じるおそれはない。</p> <p>b. レジンを外筒等に密閉する、また、胴内をヘリウム雰囲気にする等、材料相互で腐食等が生じない設計としている。</p> <p>c. レジン及びOリングは金属と接触しても化学反応を起こすおそれはない。</p> <p>d. 伝熱フィンと胴及び外筒の接合部は、異種金属接触による電気的な腐食促進の影響は小さい。</p> <p>三次蓋に設置されるリリーフバルブにはリリーフバルブカバープレートを設け、運搬中は覆われる設計としており、誤って操作されることはない。</p> <p>該当しない。</p> <p>該当しない。</p>	<p>(イ)-C</p> <p>(ロ)-A. 5. 1. 2</p> <p>(ロ)-A. 4. 1</p> <p>(ロ)-A. 4. 1</p> <p>(ロ)-A. 4. 1</p> <p>(ロ)-A. 4. 3</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目						
第4条第8号	(表面密度限度) 第9条	<p>本輸送物の表面の放射性物質の密度は、発送前に表面密度限度以下であることを確認したうえで、発送される。</p> <table border="1" data-bbox="703 512 1230 732"> <thead> <tr> <th data-bbox="703 512 965 586">放射性物質の区分</th> <th data-bbox="965 512 1230 586">密度 (Bq/cm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="703 586 965 658">アルファ線を放出する放射性物質</td> <td data-bbox="965 586 1230 658">0.4</td> </tr> <tr> <td data-bbox="703 658 965 732">アルファ線を放出しない放射性物質</td> <td data-bbox="965 658 1230 732">4</td> </tr> </tbody> </table>	放射性物質の区分	密度 (Bq/cm ²)	アルファ線を放出する放射性物質	0.4	アルファ線を放出しない放射性物質	4	(二)-A
放射性物質の区分	密度 (Bq/cm ²)								
アルファ線を放出する放射性物質	0.4								
アルファ線を放出しない放射性物質	4								
第9号		該当しない。							
第10号		<p>本輸送物には、収納物以外のものが収納されていないことを確認したうえで蓋をするので、本輸送物の安全性を損なうおそれのあるものを収納することはない。</p>	(二)-A						

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(A型輸送物に係る技術上の基準) 第5条第1号 第2号 第3号 第4号 第5号 第6号		<p>前述のとおり前条(第4条)第1号～第5号、第8号及び第10号に定める基準に適合している。</p> <p>本輸送容器の仕様は外径 3550mm、長さ 6753mm の円筒型容器であり、外接する直方体の各辺は 10 cm 以上である。</p> <p>本輸送物の三次蓋は、三次蓋ボルトで強固に締め付けられており、輸送の際には上部緩衝体で覆われるため、不用意に三次蓋ボルトが外されることはない。また、上部緩衝体は取付後 <input type="checkbox"/> されるので、開放された場合はそれが明らかとなる。</p> <p>本輸送物は、周囲温度 -20℃～38℃ で使用する。本輸送容器の構成部品は、-20℃ から運搬中に予想される最高温度の範囲で脆化、著しい強度の低下等、材料強度への影響はなく、構成部品にき裂、破損等を生じるおそれはない。</p> <p>本輸送物の密封装置は、周囲圧力が 60 kPa の場合を考慮した差圧を胴内及び二三次蓋空間に設定した解析により、密封装置の健全性を損なうことがないことを規則第4条第2号の熱解析及び構造解析において ABAQUS コードを用いて確認しているため、放射性物質の漏えいはない。</p> <p>該当しない。</p>	 (イ)-C (ロ)-C. 2、 (ニ)-A (ロ)-A. 3 (ロ)-A. 4. 2、 (ロ)-B. 4. 6 (ロ)-A. 4. 6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第5条第7号		<p>本輸送物は、以下を考慮して保守的な条件を設定し、DOT3.5コードにて解析した結果、通常輸送時の輸送物表面の最大線量当量率は1088.0 μSv/hであり、基準値の2 mSv/hを超えることはない。</p> <p>a. 線源として保守的に中央部に全てバーナブルポイズン集合体を装荷した最高燃焼度の燃料9体を、外周部に全て平均燃焼度の燃料12体を収納するとしている。</p> <p>b. 燃料の燃焼条件を包絡する軸方向燃焼度分布を考慮している。</p> <p>c. 燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の放射化を考慮している。</p> <p>d. 解析モデルについては遮蔽材の最小寸法を使用し、中性子遮蔽材の質量が2.5%減損したとしている。</p>	(㍀)-D.4、 (㍀)-D.5
第8号		<p>本輸送物は、上記と同じ条件にて解析した結果、通常輸送時の輸送物の表面から1m離れた位置における最大線量当量率は70.0 μSv/hであり、基準値の100 μSv/hを超えることはない。</p>	(㍀)-D.4、 (㍀)-D.5
第9号		該当しない。	
第10号		該当しない。	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(BM 型輸送物に係る技術上の基準) 第 6 条第 1 号		前述のとおり前条(第 5 条)第 1 号～第 8 号までに定める基準に適合している。ただし、第 6 号に定められる要件は該当しない。	
第 2 号	(BM 型輸送物に係る一般の試験条件) 第 14 条 別記第 4 第 1 号	一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として、規則第 4 条第 2 号 a. の熱解析において、周囲温度 38 °C 及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し、各部が使用可能温度を超えないことを確認している。続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ ABAQUS コードによる構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため、輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。	(□)-B. 4. 1. 1、 (□)-A. 5. 1
	第 2 号	以下のとおり別記第 3 第 1 号の条件の下に置いて評価している。	
	別記第 3 第 1 号	一般の試験条件 イ. 水噴霧試験 本輸送物の表面はステンレス鋼もしくは塗装を施した炭素鋼面であり、水切りは極めてよく、本試験の実施によっても輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。	(□)-A. 5. 2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 6 条第 2 号	第 14 条 別記第 3 第 1 号	<p>□. (1) 自由落下</p> <p>本輸送物の重量は 131.2 トン以下であるため、落下高さは 0.3メートルであり、落下時に輸送物が最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナーの各姿勢について CRUSH コードを用いて、緩衝体を除いた輸送物と落下試験台を剛体とし、緩衝体の変形量及び落下試験との比較検証により得られた負荷係数 1.2 を考慮して衝撃荷重を解析し、保守的な設計加速度を設定している。緩衝体の最大変形量は底部コーナー落下時における 337 mm である。</p> <p>また、この時の容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケット及び燃料被覆管については公式を用いた計算により評価している。容器本体、バスケット及び燃料被覆管は、自由落下による衝撃力が負荷されても各部が設計応力強さ等基準値を下回り、容器本体、バスケット及び燃料被覆管の構造健全性並びに容器本体の密封性を損なうことはない。</p> <p>(2) 該当しない。</p> <p>(3) 積み重ね試験</p> <p>自重の 5 倍に相当する荷重は 6.434×10^6 N であり、鉛直投影面積に 13 kPa を乗じて得た値に相当する荷重より大きいので、これを解析している。</p> <p>解析は、公式を用いた計算により、輸送物の垂直方向の圧縮強度及び水平方向の曲げ強度について行っており、本試験の実施によっても設計降伏点を下回り、容器本体の構造健全性を損なうことはなく、密封部の健全性が維持される。</p> <p>なお、輸送物を積み重ねた場合、緩衝体部分が積み重なるので、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、遮蔽解析に影響する破損は生じない。</p>	<p>(□)-A. 5. 3</p> <p>(□)-A. 5. 4</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第2号	第14条 別記第3第1号	<p>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。</p> <p>(4) 貫通試験</p> <p>貫通試験は重量 6 kg、直径 3.2 cm の棒を輸送物の最も弱い部分に 1m の高さから落下させたとしている。試験棒は軟鋼とし、衝撃荷重は輸送物が受け持つものとして公式を用いた計算を行った結果、本試験の実施によっても棒の落下エネルギーは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のせん断エネルギーよりも小さいため、容器本体の構造健全性を損なうことはない。</p> <p>また、遮蔽解析に影響する破損も生じない。</p>	(ロ)-A. 5. 5
イ	第2号	<p>該当しない。</p> <p>本輸送物を一般の試験条件下に置いた場合、緩衝体に変形が生じることを踏まえ、第5条第7号の通常輸送時の評価条件に基づき、CRUSH コードにより得られた緩衝体の各落下方向の変形を重量させた保守的なモデルを用いて、DOT3.5 コードにて解析した結果、一般の試験条件下の輸送物表面の最大線量当量率は 1088.0 μSv/h であり、基準値の 2 mSv/h を超えることはない。</p> <p>なお、この緩衝体の変形を考慮しても、通常輸送時に比べ本輸送物の最大線量当量率の著しい増加はない。</p>	(ロ)-D. 4、 (ロ)-D. 5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第6条第2号</p> <p>□</p>	<p>(BM型輸送物に係る一般の試験条件の下における漏えい量)</p> <p>第15条</p>	<p>本輸送物は、一般の試験条件下に置いた場合でも、規則第6条第2号のABAQUSコードを用いた熱解析で三次蓋Oリングの健全性を、また、同号の構造解析で蓋密封部の健全性が確認されており、密封性を損なうことはない。本輸送物は、一般の試験条件下では負圧を維持するため、放射性物質の環境への漏えいはないが、全燃料棒の0.1%の燃料棒の密封性が失われ、核分裂生成ガスが胴内に放出されたうえで、胴内圧が大気圧上限値まで上昇し、その後大気圧下限値の環境下に置かれたと仮定して公式を用いた放射性物質(³H及び⁸⁵Kr)の漏えい計算をしても、1時間当りの漏えい量と各核種の基準値$A_2 \times 10^{-6}$ Bq/hとの比率の合計は、9.19×10^{-5}で、1より小さく、基準値$A_2 \times 10^{-6}$ Bq/hを超えることはない。</p>	<p>(□)-C.3.1</p>
<p>ハ</p>		<p>本輸送物は、専用積載として運搬する。収納物の最大崩壊熱量に余裕をみた15.8kWを収納したとして、一般の試験条件下に置いた場合の輸送物の温度を高く評価する条件のもとで周囲温度38℃の日陰に置いた場合の輸送物の表面温度をABAQUSコードを用いて解析した結果、外筒外面及びトランニオン温度が85℃を超えるが、必要に応じて近接防止金網を取り付けて輸送するとともに、上記を除いた部位の最高表面温度は緩衝体表面の80℃となることから、輸送中に人が容易に接近し得る部分の最高温度は日陰において基準値の温度85℃を超えることはない。(近接防止金網の温度は64℃以下)</p>	<p>(□)-B.4.1、 (□)-B.4.6</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 6 条第 2 号 ニ 第 3 号	第 9 条 (BM 型輸送物に係 る特別の試験条 件) 第 16 条 別記第 5 第 1 号	<p>本輸送物は、一般の試験条件下に置いた場合でも密封性を損なうことはないことを規則第 6 条第 2 号の ABAQUS コード等を用いた構造解析の結果より確認している。また、輸送物表面の放射性物質の密度を発送前検査においても測定により確認するため、表面密度限度を超えることはない。</p> <p>強度試験</p> <p>4. 落下試験 I</p> <p>本輸送物は、一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう、垂直、水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に 9 m 高さから落下するとして CRUSH コードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また、この時の容器本体各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価し、バスケットについては公式を用いた計算により評価している。容器本体及びバスケットは、落下試験 I による衝撃力（内部収納物には、加速度割増係数として垂直落下時 2.6、水平落下時 1.2 を考慮）が負荷されても容器本体各部が設計引張強さ等基準値を下回り、バスケットが塑性変形することはないことから、容器本体は破損せず密封性を損なうことはなく、バスケットは構造健全性を損なうことはない。</p> <p>さらに、本輸送物が傾斜落下するとして、蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果、本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落下試験モデルに比べて小さいことから、傾斜落下時に容器本体の密封性を損なうことはない。</p>	(ロ)-A. 5. 1、 (ロ)-C. 3. 1 (ニ)-A (ロ)-A. 6. 1、 (ロ)-A. 10. 3

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号	第16条 別記第5第1号	<p>ロ. 落下試験II</p> <p>9m 落下試験に引き続いて、以下のように1m 貫通試験が起こるとした場合、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、公式を用いた計算により、蓋部、底部及び胴にせん断が生じないことを確認しているため、容器本体に破損が生じることはなく、密封性を損なうことはない。</p> <p>i. 本輸送物は、最大損傷を受けるよう、垂直方向及び水平方向に輸送物の重心が軟鋼棒直上となる1mの高さから落下するとして解析している。</p> <p>ii. 軟鋼棒の長さは、輸送物に最大の破損を与えるように十分長いものとして解析している。</p> <p>また、三次蓋のリリーフバルブカバープレート及び三次蓋シール部への垂直方向又は水平方向落下に対しても、密封性能維持が確認された落下試験モデルと同じ緩衝体内部構造を適用しており、密封性を損なうことはない。</p>	(ロ)-A.6.2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 6 条第 3 号	第 16 条 別記第 5 第 2 号	<p>熱的試験(火災試験)</p> <p>i. 本輸送物は、落下試験 I、II の落下順序を考慮して火災による入熱量を大きく評価するように、落下試験 I の緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルで解析している。</p> <p>ii. これらの試験は、最大崩壊熱量に余裕をみた 15.8 kW の設計崩壊熱量があるという条件で ABAQUS コードを用いて輸送物各部の温度を解析している。</p> <p>iii. 解析の結果、一部の側部中性子遮蔽材は使用可能温度を超えるが著しく焼損することはない。また、密封境界の三次蓋 O リングやその他の構成部材の温度は、使用可能温度を下回り、熱的健全性及び密封性を損なうことはない。</p> <p>iv. また、この時の各部の応力を ABAQUS コードを用いて解析評価している。容器本体は火災による胴内圧及び熱応力が負荷されても各部が設計引張強さ等基準値を下回り、容器本体は破損しない。</p>	(㉓)-A. 6. 3、 (㉓)-B. 5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第6条第3号</p> <p style="text-align: center;">4</p>	<p>第16条 別記第5第3号</p>	<p>浸漬試験(15 m)</p> <p>本輸送物は、より厳しい強化浸漬試験に対して評価し、胴、底板及び三次蓋に破損はないことを確認している。また、三次蓋については、公式を用いた計算により 0.251325 MPa の差圧を負荷しても発生する応力は設計降伏点を下回ることを確認している。容器本体に破損が生じることはなく、また、外圧が蓋を押し付ける方向に作用することから Oリングの密封性能は維持されることから、本輸送物の密封性を損なうことはない。</p> <p>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 <input type="text"/> MPa G 及び <input type="text"/> 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、遮蔽解析に影響する破損も生じない。</p> <p>本輸送物は、特別の試験条件下に置いた場合、構造解析の結果から緩衝体に変形、中性子遮蔽材に貫通変形及び、燃料集合体に変形が生じる可能性がある。そのため、緩衝体の全部及び中性子遮蔽材の一部をモデルから除いて DOT3.5 コードにて遮蔽解析を行っている。また、熱解析で一部の中性子遮蔽材が使用可能温度を超えることから、その密度が保守的に半減するものとしている。なお、燃料集合体の変形は遮蔽解析結果に有意な影響を与えないため考慮していない。その場合でも輸送物の表面から 1 m 離れた位置での最大線量当量率は 810.7 μ Sv/h であり、基準値の 10 mSv/h を超えることはない。</p>	<p>(㍀)-A. 6. 4</p> <p>(㍀)-D. 4、 (㍀)-D. 5</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第6条第3号 □	(BM型輸送物に係る特別の試験条件の下における漏えい量) 第17条	本輸送物は、特別の試験条件下に置いた場合、緩衝体及び中性子遮蔽材に変形が生じるが、密封装置は健全であり、火災試験を経た後も輸送容器の密封性は保持できる。ここで安全側に一次蓋、二次蓋及び全燃料棒の密封性が失われたと仮定し、燃料が有するヘリウム及び核分裂生成ガスが三次蓋-胴内雰囲気中に放出されると仮定している。この条件で、公式を用いた放射性物質 (^3H 及び ^{85}Kr) の漏えい計算をしても、1週間当りの漏えい量と各核種の基準値 A_2 Bq/week との比率の合計は、 2.33×10^{-5} で、1より小さく、基準値 A_2 Bq/week を超えることはない。	(□)-C.4
第4号		本輸送物は、周囲温度 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上で使用する。本輸送容器の材料は、 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ の低温下においても機械的性能が低下することはない。また、規則第4条第2号 a. の熱解析において、周囲温度 $38\text{ }^\circ\text{C}$ で収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 15.8 kW のときの輸送物の各部温度を評価している。続いて、上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回り、輸送物の構造健全性を損なうことがないことを確認している。なお、落下解析においては、低温時の木材の強度上昇及び高温時の木材の強度低下の影響を考慮している。したがって、本輸送物は $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $38\text{ }^\circ\text{C}$ までの運搬中に予想される温度変化に対してもき裂、破損等の生じるおそれはない。	(□)-A.4.2、 (□)-A.5.1、 (□)-A.10.4、 (□)-B.4.6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第 5 号</p> <p>第 7 条～第 10 条</p>	<p>(原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る試験条件)</p> <p>第 18 条 別記第 6</p>	<p>強化浸漬試験(200 m)</p> <p>本輸送物の収納物は、使用済燃料であり、最大放射能量は A_2 値の 10 万倍を超える。公式を用いた計算により 2.101325 MPa の水圧下に置かれたとしても、胴、底板及び三次蓋は許容外圧や設計引張強さ等の基準を下回るので、密封装置は破損しない。</p> <p>該当しない。</p>	<p>(ロ)-A. 7</p>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
(核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準) 第 11 条	第 23 条第 1 号	<p>本輸送物に収納する核分裂性物質量は、^{235}U が約 <input type="text" value=""/> kg であり、本輸送物は核分裂性輸送物として輸送する。</p> <p>本輸送物は、規則第 11 条第 2 号で後述するように SCALE コードシステムを用い、収納する燃料の条件として新燃料条件の初期濃縮度の適用、及び、三次蓋、緩衝体、中性子遮蔽材を無視する等、核的に安全側のモデルを仮定し、無限個の任意配列の場合にも中性子実効増倍率は 0.38812 となり未臨界である。なお、上記の解析では、中性子実効増倍率が最も大きく評価できるよう、バスケット格子内のり寸法の公差及び燃料集合体の配置を設定している。</p>	(イ)-A、 (イ)-B、 (ロ)-E. 4. 4
第 1 号	(核分裂性輸送物に係る一般の試験条件) 第 24 条 別記第 11	<p>本輸送物は、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた場合、規則第 6 条第 2 号の構造解析により 0.3 m 落下及び積み重ね試験では緩衝体の変形が生じるが、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。また、他の試験条件も含めそれ以外の部位に損傷はない。以上より、構造部に一辺が 10 cm の立方体を包含するようなくぼみを生じることはなく、かつ外接する直方体の各辺は 10 cm 以上である。</p>	(ロ)-A. 9. 1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 11 条第 2 号 イ、ロ、ハ、ニ、ホ	(核分裂性輸送物に係る孤立系の条件) 第 25 条 第 1、2、3 号 (核分裂性輸送物に係る特別の試験条件) 第 26 条 別記第 12 (核分裂性輸送物に係る配列系の条件) 第 27 条	<p>規則第 6 条第 2 号の熱解析及び、負荷係数 1.2 を考慮した衝撃加速度に対し保守的な設計加速度を設定することで、0.3m 落下後の 9m 落下の衝撃力をも考慮できている規則第 6 条第 3 号の構造解析の結果より、本輸送容器は、落下試験等においても臨界解析モデルに影響を与えるような物理的・化学的变化はなく、胴内への浸水もないが、燃料集合体は落下試験において変形する可能性がある。臨界解析では、保守的に、三次蓋の存在を無視した上で、特別の試験条件の影響を考慮した二次蓋からの微量の浸水を考慮するとともに、燃料集合体の下部側支持格子 1 スパン間の拡大／縮小変形を考慮したモデルで解析を行った。また、燃料のウラン濃縮度は保守的に減損していない未照射の値とし、一部の燃料に添加されているガドリニウムや収納する可能性のあるバーナブルポイズンの効果は考慮しない条件で評価している。収納物の温度は常温(20℃)とし、収納物は容器中央に最も近接して配置した。また、中性子遮蔽材、三次蓋及び上・下部緩衝体が存在しない保守的なモデルで、周囲が完全反射の条件で評価している。</p> <p>以上のモデルは規則第 11 条第 2 号のイ、ロ、ハ、ニ及びホに要求される評価条件のいずれよりも厳しい条件とした保守的なモデルであり、SCALE コードシステムを用いた解析の結果、中性子実効増倍率は 0.38850 で未臨界である。したがって、いずれの評価条件に置かれた場合にも臨界に達しない。</p>	(ロ)-E. 2. 2、 (ロ)-E. 3. 1、 (ロ)-E. 4. 1、 (ロ)-E. 4. 2、 (ロ)-E. 4. 4、 (ロ)-E. 6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第 11 条第 3 号		<p>本輸送物は、周囲温度-20°C以上で使用する。本輸送容器の材料は、-20°Cの低温下においても機械的性能が低下することはない。また、規則第 4 条第 2 号 a. にて前述するように、周囲温度 38°C で収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 15.8 kW のときの輸送物の各部温度の評価結果及び、同じく前述する構造解析において、各部が設計応力強さ等基準値を下回り、輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。なお、落下解析においては、低温時の木材の強度上昇及び高温時の木材の強度低下の影響を考慮している。したがって、本輸送物は、$-20^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$までの運搬中に予想される温度変化に対してもき裂、破損等の生じるおそれはない。</p>	<p>(□)-A. 9、 (□)-B. 4. 6、 (□)-A. 5. 1、 (□)-A. 10. 4</p>

別紙 (ハ) 章の一部補正

別紙 (ハ) 章を以下のとおり補正する。

頁*	行	補正前	補正後
(ハ)-1 ～ (ハ)-12		(記載変更)	別紙 1 に変更する。

※平成 31 年 1 月 22 日付け原発本第 269 号で申請の頁を示す。

(ハ) 章 品質マネジメントの基本方針

A. 品質マネジメントシステム

当社における品質保証活動は、原子力の安全を確保するために、設置変更許可申請書本文十一号の「発電用原子炉の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の整備に関する事項」並びに「原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則及び同解釈」に基づき、原子炉施設保安規定（以下「保安規定」という。）第3条（品質マネジメントシステム計画）を定め、この品質マネジメントシステム計画に定める要求事項を含んだ「原子力発電所品質マニュアル（要則）」（以下「品質マニュアル（要則）」という。）を定め、品質マネジメントシステム（健全な安全文化を育成し、及び維持する活動、関係法令の遵守に係る活動を含む。）を確立し、実施するとともに、その実効性を維持するため、その改善を継続的に行っている。

本申請に係る設計及び製造発注並びに取扱い及び保守（以下、「設計及び保守等」という。）の各段階における品質保証活動は、この品質マネジメントシステムに基づき品質保証活動を行う体制を適切に構築し、実施する。

なお、設計及び保守等に係る品質保証活動のうち、令和2年3月31日迄の活動については、「原子力発電所における安全のための品質保証規程（JEAC4111-2009）」及び「実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の設計及び工事に係る品質管理の方法及びその検査のための組織の技術基準に関する規則」に基づく品質マネジメントシステムに従い実施している。

1. 経営者のコミットメント

社長は、品質マネジメントシステムの構築及び実施、並びにその有効性を継続的に改善することに対するコミットメントの証拠を、次の事項によって示す。

- (1) 法令・規制要求事項^{註1}を満たすことは当然のこととして、原子力安全の重要性を保安に関する組織内に周知する。
- (2) 品質方針を設定する。
- (3) 品質目標が設定されることを確実にする。
- (4) マネジメントレビューを実施する。
- (5) 資源が使用できることを確実にする。
- (6) 安全文化を醸成するための活動を促進する。

2. 原子力安全の重視

社長は、原子力施設の保護（財産保護）よりも、原子力安全を最優先に位置付け、業務・原子力施設に対する要求事項が決定され、満たされていることを確実にする。

3. 品質方針

社長は、品質方針について、次の事項を確実にする。

- (1) 保安に関する組織の目的に対して適切である。
- (2) 要求事項への適合及び品質マネジメントシステムの有効性の継続的な改善に対するコミットメントを含む。
- (3) 品質目標の設定及びレビューのための枠組みを与える。
- (4) 保安に関する組織全体に伝達され、理解される。
- (5) 適切性の持続のためにレビューされる。

(6) 組織運営に関する方針と整合がとれている。

4. 品質目標

- (1) 社長は、保安に関する組織内のしかるべき部門及び階層で、業務・原子力施設に対する要求事項を満たすために必要なものを含む品質目標が設定されていることを確実にする。
- (2) 品質目標は、その達成度が判定可能で、品質方針との整合がとれるものとする。

5. 品質マニュアル

- (1) 保安に関する組織は、品質マニュアル作成し、維持する。
- (2) 品質マニュアルには、次の事項を含める。
 - a. 品質マネジメントシステムの実施に係る組織に関する事項及び適用範囲
 - b. 品質マネジメントシステムの計画、実施、評価、改善に関する事項
 - c. 品質マネジメントシステムについて確立された規定文書又はそれらを参照できる情報
 - d. 品質マネジメントシステムのプロセス間の相互関係

6. 文書管理

保安に関する組織は、品質マネジメントシステムで必要とされる文書を遵守するために、文書管理に係る社内規定を定め、保安活動の重要度に応じて管理する。

7. 内部監査

監査部門は、客観的な評価を行う組織として、品質マネジメントシステムの次の事項が満たされているか否かを明確にするために、あらかじめ定められた間隔で内部監査を実施する。

- (1) 品質マネジメントシステムが、業務の計画に適合しているか、JEAC4111の要求事項に適合しているか、及び保安に関する組織が決めた品質マネジメントシステム要求事項に適合しているか。
- (2) 品質マネジメントシステムが効果的に実施され、維持されているか。

8. 検査及び試験

- (1) 原子力部門は、輸送容器の要求事項が満たされていることを検証するために、検査及び試験に係る社内規定を定め、これに基づき輸送容器を検査及び試験する。検査及び試験は、計画に従って適切な段階で実施する。検査及び試験の合否判定基準への適合の証拠を維持する。
- (2) 検査及び試験要員の独立の程度を定める。
- (3) 原子力部門は、リリース（次工程への引渡し）を正式に許可した人を、記録する。
- (4) 原子力部門は、計画で決めた検査及び試験が完了するまでは、当該輸送容器の使用を行わない。

注) 本輸送容器の設計及び製造において、適合することが求められている法令・規制要求事項はいかのおりである。

①核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律

- ②核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令
- ③核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則
- ④核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示
- ⑤工場又は事業所の外において運搬される核燃料輸送物の確認等に関する事務手続きについて（原子力安全・保安院通達）
- ⑥車両運搬確認申請書、容器承認申請書及び核燃料輸送物設計設計承認申請書に添付する説明書の記載要領について（原子力安全・保安院通達）
- ⑦輸送容器の製作に係る品質マネジメント指針について（原子力安全・保安院通達）

B. 申請者の責任

1. 品質方針

社長はトップマネジメントとして品質方針を定めている。この品質方針は品質マネジメントシステムに関する方針に関係法令の遵守に関する方針及び安全文化を醸成するための活動に関する方針を含んだものである。品質方針を「(ハ) 第 B. 1 図：品質方針」に示す。

2. 組織

品質マネジメントシステム遂行に係る申請者、輸送容器設計者等の組織について、責任体制に係る関係を「(ハ) 第 B. 2 図：輸送容器の設計等に係る関係」に示す。また、当社の品質マネジメントシステムを遂行する保安に関する組織を「(ハ) 第 B. 3 図：品質保証体系図」に示す。

3. 管理責任者

- (1) 社長は、原子力発電本部長を本店組織及び発電所組織の管理責任者、原子力監査室長を監査部門の管理責任者として任命する。
- (2) 管理責任者は、与えられている他の責任とかかわりなく、次に示す責任及び権限をもつ。
 - a. 品質マネジメントシステムに必要なプロセスの確立、実施及び維持を確実にする。
 - b. 品質マネジメントシステムの成果を含む実施状況及び改善の必要性の有無について、社長に報告する。
 - c. 所管している組織全体にわたって、関係法令の遵守及び原子力安全についての認識を高めることを確実にする。

C. 教育・訓練

1. 力量、教育・訓練及び認識

保安に関する組織は、保安規定に基づき教育・訓練に係る社内規定を定め、次の事項を実施する。

- (1) 原子力安全の達成に影響がある業務に従事する要員に必要な力量を明確にする。
- (2) 該当する場合には（必要な力量が不足している場合には）、その必要な力量に到達することができるように教育・訓練を行うか、又は他の処置をとる。
- (3) 教育・訓練又は他の処置の有効性を評価する。
- (4) 保安に関する組織の要員が、原子力安全に対する自らの活動のもつ意味及び重要性を認識し、品質目標の達成に向けて自らがどのように貢献できるかを認識することを確実にする。
- (5) 教育、訓練、技能及び経験について該当する記録を維持する。

D. 設計管理

輸送容器の設計が設計要求事項に適合することを確実にするため、原子力部門は、保安規定に基づき設計・開発に係る社内規定を定め、次の事項を実施する。

1. 設計・開発の計画

- (1) 原子力部門は、輸送容器の設計・開発の計画を策定し、管理する。
- (2) 原子力部門は、設計・開発の計画において、次の事項を明確にする。
 - a. 設計・開発の段階
 - b. 設計・開発の各段階に適したレビュー、検証及び妥当性確認
 - c. 設計・開発に関する責任（品質マネジメントシステムに基づく活動の内容について説明する責任を含む。）及び権限
- (3) 原子力部門は、効果的なコミュニケーション並びに責任及び権限の明確な割当てを確実にするために、設計・開発に関与するグループ間のインタフェースを運営管理する。
- (4) 原子力部門は、設計・開発の進行に応じて、策定した計画を適切に更新する。

2. 設計・開発へのインプット

- (1) 原子力部門は、輸送容器の要求事項に関連するインプットを明確にし、記録を維持する。インプットには、次の事項を含める。
 - a. 機能及び性能に関する要求事項
 - b. 適用される法令・規制要求事項
 - c. 適用可能な場合には、以前の類似した設計から得られた情報
 - d. 設計・開発に不可欠なその他の要求事項
- (2) 原子力部門は、輸送容器の要求事項に関連するインプットについては、その適切性をレビューし、承認する。要求事項は、漏れがなく、あいまい(曖昧)でなく、相反することがないものとする。

3. 設計・開発からのアウトプット

- (1) 原子力部門は、設計・開発のアウトプットについて、設計・開発へのインプットと対比した検証を行うのに適した形式とする。また、リリースの前に、承認を行う。
- (2) 原子力部門は、設計・開発からのアウトプットを、次の状態とする。
 - a. 設計・開発へのインプットで与えられた要求事項を満たす。
 - b. 調達、業務の実施（輸送容器の使用を含む。）に対して適切な情報を提供する。
 - c. 関係する検査及び試験の合否判定基準を含むか、又はそれを参照している。
 - d. 安全な使用及び適正な使用に不可欠な輸送容器の特性を明確にする。

4. 設計・開発のレビュー

- (1) 原子力部門は、設計・開発の適切な段階において、次の事項を目的として、計画されたとおり

に体系的なレビューを行う。

- a. 設計・開発の結果が、要求事項を満たせるかどうかを評価する。
- b. 問題を明確にし、必要な処置を提案する。

(2) 原子力部門は、レビューへの参加者には、レビューの対象となっている設計・開発段階に関連する部門を代表する者及び当該設計・開発に係る専門家を含める。このレビューの結果の記録、及び必要な処置があればその記録を維持する。

5. 設計・開発の検証

(1) 原子力部門は、設計・開発からのアウトプットが、設計・開発へのインプットで与えられている要求事項を満たしていることを確実にするために、計画されたとおりに検証を実施する。この検証の結果の記録、及び必要な処置があればその記録を維持する。

(2) 設計・開発の検証は、原設計者以外の者又はグループが実施する。

6. 設計・開発の妥当性確認

(1) 原子力部門は、結果として得られる輸送容器が、指定された用途又は意図された用途に応じた要求事項を満たし得ることを確実にするために、計画した方法に従って、設計・開発の妥当性確認を実施する。

(2) 原子力部門は、実行可能な場合にはいつでも、輸送容器の使用前に、妥当性確認を完了する。

(3) 原子力部門は、妥当性確認の結果の記録、及び必要な処置があればその記録を維持する。

7. 設計・開発の変更管理

(1) 原子力部門は、設計・開発の変更を明確にし、記録を維持する。

(2) 原子力部門は、変更に対して、レビュー、検証及び妥当性確認を適切に行い、その変更を実施する前に承認する。

(3) 原子力部門は、設計・開発の変更のレビューには、その変更が、当該の輸送容器を構成する要素及び関連する輸送容器に及ぼす影響の評価（当該輸送容器を構成する材料又は部品に及ぼす影響の評価を含む。）を含める。

(4) 原子力部門は、変更のレビューの結果の記録、及び必要な処置があればその記録を維持する。

E. 輸送容器の製造発注

輸送容器の製造が調達要求事項に適合することを確実にするため、保安に関する組織は、保安規定に基づき調達管理に係る社内規定を定め、次の事項を実施する。

1. 輸送容器製造者の評価

- (1) 保安に関する組織は、輸送容器製造者が保安に関する組織の要求事項に従って調達製品を供給する能力を判断の根拠として、輸送容器製造者を評価し、選定する。選定、評価及び再評価の基準を定める。
- (2) 保安に関する組織は、評価の結果の記録、及び評価によって必要とされた処置があればその記録を維持する。

2. 輸送容器製造者への調達要求事項（品質マネジメントシステム要求事項を含む。）

- (1) 保安に関する組織は、輸送容器の製造に関する調達要求事項で調達製品に関する要求事項を明確にし、次の事項のうち該当するものを含める。
 - a. 製品、手順、プロセス及び設備の承認に関する要求事項
 - b. 要員の適格性確認に関する要求事項
 - c. 品質マネジメントシステムに関する要求事項
 - d. 不適合の報告及び処理に関する要求事項
 - e. 安全文化を醸成するための活動に関する必要な要求事項
- (2) 保安に関する組織は、輸送容器製造者に伝達する前に、規定した調達要求事項が妥当であることを確実にする。
- (3) 保安に関する組織は、輸送容器を受領する場合には、輸送容器製造者に対し、調達要求事項への適合状況を記録した文書を提出させる。

3. 輸送容器の製作に係る検査及び品質監査による検証

保安に関する組織は、輸送容器が、規定した調達要求事項を満たしていることを確実にするために、必要な検査又はその他の活動（供給者に対する品質保証監査を含む。）を定めて、実施する。

F. 取扱い及び保守

当社は、(二)章に示す輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いについて、保安規定に基づき、それぞれ実施要領書等を策定し、実施する。

(ハ) 第 B.1 図：品質方針

品質方針

原子力安全の取り組みに終わりはない。現状に満足することなく、常に考え問いかける姿勢をもって自ら率先して行動するとともに、誠実かつ高い倫理観をもちコンプライアンスを十分に意識した上で、以下の方針に基づく業務運営に不断に取り組み、更なるパフォーマンス向上を図っていくことにより、地域・社会の皆さまに信頼され、安心され続ける原子力発電所を目指します。

1 原子力安全を最優先とする文化を醸成し続けます

原子力安全を達成するための品質マネジメントシステムに基づく保安活動を的確に実施し、現場を第一として継続的改善に取り組んでいくとともに、原子力のもつ様々なリスクに対する意識を高め、安全文化の更なる醸成を図っていきます。

2 自主的・継続的に安全性・信頼性を向上させます

当社の持つ経験に加え、国内外の最新の知見や教訓、社内外の第三者の視点も活かしながら、より高みを目指した原子力発電所の安全性・信頼性並びに技術力の向上に自主的・継続的に取り組んでいきます。

3 原子力発電所のリスクマネジメントを確実に実施します

原子力安全のためのリスク分析・管理を確実に実施していくとともに、あらゆる事態に的確に対応できるよう実効的な教育訓練に継続的に取り組み、危機管理能力の維持・向上を図っていきます。

4 積極的な情報公開を行い説明責任を果たします

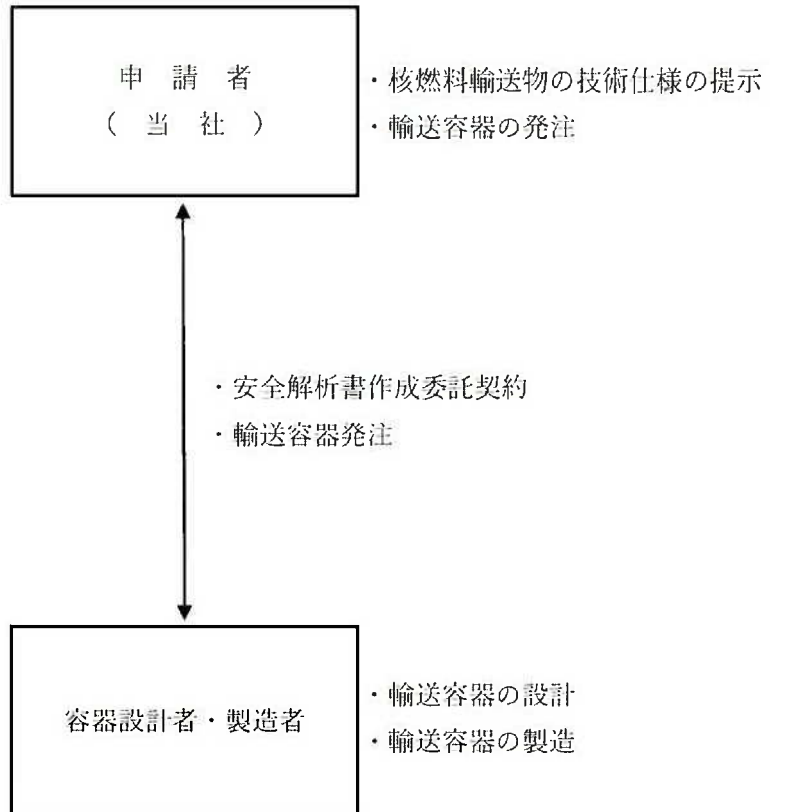
地域・社会の皆さまの声を真摯に受けとめ、当社に都合の悪い情報も含め、相手の立場に立った正確かつ分かりやすい情報を迅速に発信していきます。

5 社内や協会社との風通しの良い組織風土をつくります

フェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーションを基本とし、立場を越えて何でも言い合え、協力し合える関係をつくっていきます。

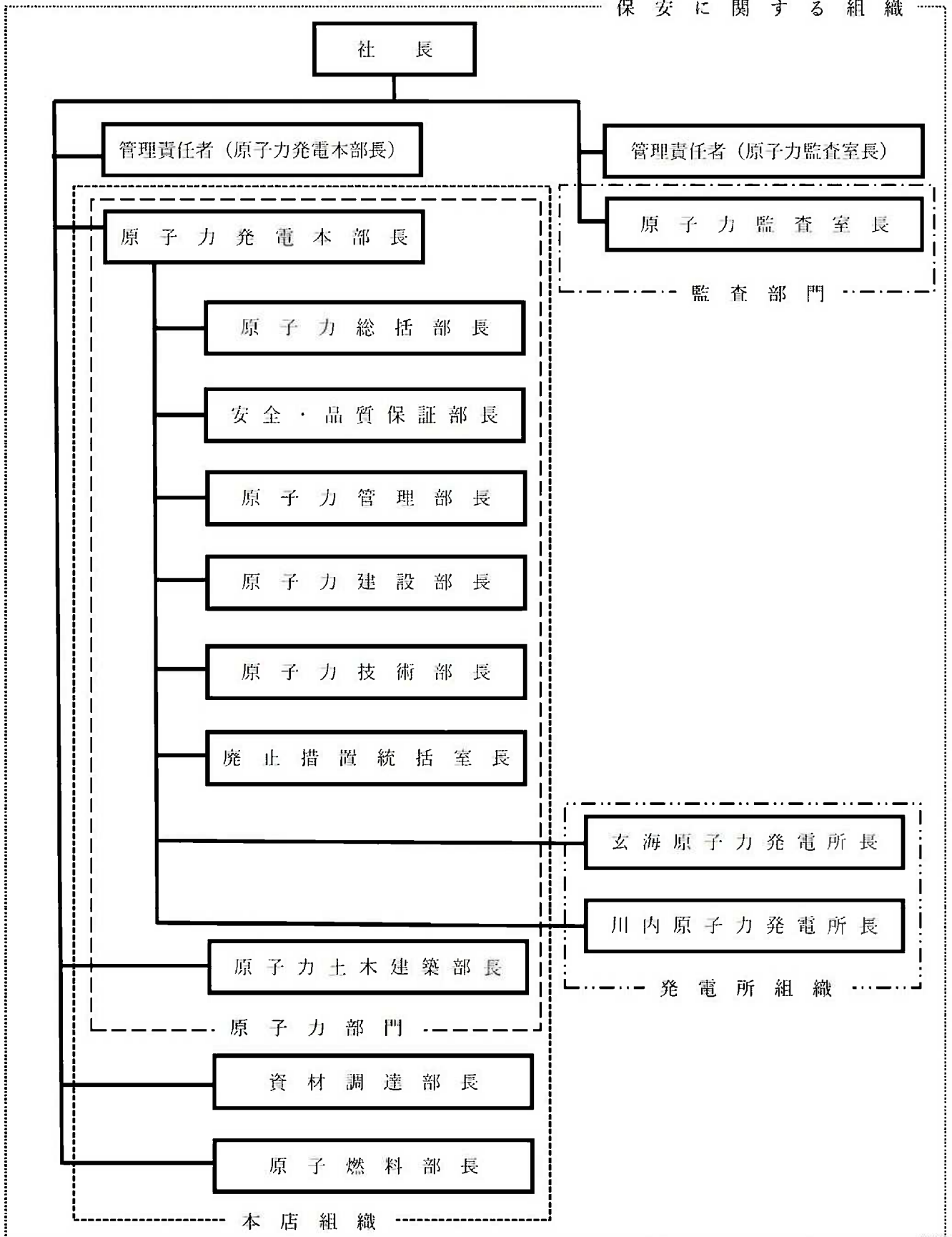
平成30年 6月28日
九州電力株式会社
代表取締役社長執行役員
池 辺 和 弘

(ハ) 第 B.2 図：輸送容器の設計等に係る関係



(ハ) 第B.3図：品質保証体系図

保安に関する組織



別紙 (二) 章の一部補正

別紙 (二) 章を以下のとおり補正する。

頁*	行	補正前	補正後
(二)-1 ～ (二)-20		(記載変更)	別紙 1 に変更する。

※平成 31 年 1 月 22 日付け原発本第 269 号で申請の頁を示す。

(二)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法

輸送物の安全設計に合致した標準的な取扱い方法について記述するとともに、保守条件を記述する。

A. 輸送物の取扱い方法

輸送物の標準的な取扱いは、以下の方法により行われる。輸送物の取扱いの流れの例を(二)-第 A.1 図に示す。

A.1 装荷方法

輸送容器への燃料装荷は、以下の方法により行われる。

A.1.1 発電所での空容器受取・燃料装荷準備作業

輸送容器は、建屋内作業場に移動し、蓋を取り外して、クレーンにより燃料プールに吊り下ろし、燃料装荷準備を行う。

(1) 水切作業

岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送容器を運搬船から吊り上げ輸送車両上に固縛する。

(2) 搬入作業

- a. 輸送車両を建屋内に搬入する。
- b. 上・下部緩衝体を取り外す。

(3) 除染場への移動

- a. クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器をたて起こす。
- b. 輸送容器を吊り上げ、除染場へ移動してたて置き設置する。

(4) 燃料プールへの移動

- a. クレーン及び蓋吊具を用いて、一次蓋、二次蓋及び三次蓋を取り外す。
- b. 輸送容器のフランジ面に異常がないこと及びバスケットに異常がないこと（未臨界検査）かつ、異物がないことを確認する。
- c. 燃料プール入水のための養生を行う。
- d. 輸送容器に純水を入れる。
- e. クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を吊り上げ、燃料プール上に移動する。
- f. 輸送容器を燃料プールに吊り下ろす。

A. 1. 2 燃料装荷作業・構内輸送準備作業

燃料取扱装置を用いて、輸送容器に使用済燃料集合体を1体ずつバスケット内へ装荷する。装荷燃料の収納配置の確認を行う。

使用済燃料を装荷後、輸送容器に一次蓋取付け、胴内の真空乾燥、胴内のヘリウム充填、二次蓋及び三次蓋の取付け、輸送容器表面の除染を行う。その後、建屋内作業場より移動し、上・下部緩衝体を取り付ける。

(1) 蓋取付け及び輸送容器除染場への移動

- a. クレーン及び垂直吊具を用いて、一次蓋を吊り上げ、一次蓋を燃料プール上に移動する。
- b. 一次蓋を吊り下ろし、輸送容器に取り付ける。
- c. 輸送容器を除染場に移動する。

(2) 除染場内作業

- a. 一次蓋ボルトを規定トルクにて取り付ける。
- b. 燃料プール入水のための養生を取り外し輸送容器の仮除染を行う。
- c. 胴内水の排水を行う。
- d. 排水後、真空乾燥を行い、胴内の湿度が規定値以下であることを確認する。
- e. 胴内にヘリウムを規定量充填する。
- f. 一次蓋密封部の漏えい率を測定する。
- g. 一次蓋の除染を行う。
- h. 二次蓋を輸送容器に取り付ける。
- i. 一二次蓋間にヘリウムを規定量充填する。
- j. 二次蓋密封部の漏えい率を測定する。
- k. 三次蓋を輸送容器に取り付ける。
- l. 三次蓋密封部の漏えい率を測定する。
- m. 輸送容器の除染を行う。

(3) 搬出作業

- a. クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を移動し、輸送車両上の輸送架台へ設置し、固縛する。
- b. 上・下部緩衝体を取り付ける。
- c. 輸送容器に□を施す。
- d. 近接防止金網を取り付ける。
- e. 輸送車両を建屋外に搬出し、輸送物を使用済燃料乾式貯蔵施設（以下「乾式貯蔵施設」

という。)まで構内輸送する。

A.2 貯蔵方法

A.2.1 乾式貯蔵施設での取扱い

(1) 乾式貯蔵施設での輸送物の受取

乾式貯蔵施設での輸送物の受け取りは、以下の方法により行われる。

- a. 輸送物から□を解き、上・下部緩衝体を取り外した後、建屋内検査場に移動し、三次蓋を取り外す。
- b. 輸送容器へ監視計器を取り付け、貯蔵エリアに移動する。
- c. 輸送容器を所定の貯蔵場所に据え付ける。

(2) 乾式貯蔵施設での輸送物の発送前準備

乾式貯蔵施設での貯蔵後、輸送物の発送前準備は、以下の方法により行われる。

- a. 取扱いエリアの建屋内検査場に移動し、輸送容器から監視計器を撤去する。
- b. 三次蓋を取り付け、気密漏えい検査を行う。
- c. 輸送容器を横倒し、上・下部緩衝体を取り付けた後、□を施す。

A.2.2 再処理工場への輸送

輸送物は、輸送車両又は専用運搬船に積み付け、再処理工場まで輸送される。

(1) 再処理工場への輸送

- a. 輸送物を輸送車両に積み込む。
- b. 輸送車両によって、岸壁まで輸送する。
- c. 近接防止金網を取り外す。
- d. 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送物を吊り上げ、指定船倉内に積み込む。
- e. 船内にて輸送物を固縛する。
- f. 近接防止金網を取り付ける。
- g. 専用運搬船によって、再処理工場まで輸送する。

A.3 取出し方法

輸送容器からの使用済燃料の取出しは、以下の方法により行われる。

A.3.1 再処理工場での輸送物の受取・燃料取出し準備作業

(1) 水切作業

- a. 近接防止金網を取り外す。

- b. 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて、輸送物を専用運搬船から吊り上げ、輸送車両上に固縛する。
- c. 近接防止金網を取り付ける。

(2) 輸送物受入・保管

- a. 輸送容器管理建屋内のトレーラエリアに、輸送車両により輸送物を搬入する。
- b. 近接防止金網を取り外す。
- c. クレーン及び水平吊具を用いて、輸送物を輸送車両より吊り上げ、輸送容器受入エリア内移送台車上に設置する。
- d. 移送台車にて、輸送物を輸送容器保管エリアの所定の保管場所へ移送し、保管する。

(3) 輸送容器搬送室への移送

- a. 移送台車にて、輸送物を輸送容器保管エリアより輸送容器搬送室に移送する。
- b. 近接防止金網を取り外す。
- c. 輸送容器に取り付けられている□を解除する。
- d. 上・下部緩衝体を取り外す。
- e. クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器をたて起こす。
- f. 輸送容器を吊り上げ、燃料取出準備室に移送し、所定の位置に設置する。

(4) 燃料取出準備室内作業

- a. 三次蓋及び二次蓋を取り外す。
- b. 輸送容器内を再冠水する。
- c. 燃料プール入水のための養生を行う。
- d. 一次蓋ボルトを取り外す。

(5) 燃料取出し準備

- a. クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を燃料取出準備室より燃料取出ピット上へ移送する。
- b. クレーン及び吊具を用いて、輸送容器を燃料取出ピット中の燃料取出し位置に吊り下ろす。
- c. クレーン及び蓋吊具を用いて、一次蓋を取り外す。
- d. 一次蓋を蓋置場へ移動し、除染を行った後仮置きする。

A.3.2 燃料取出し作業

燃料取出装置を用いて、輸送容器から使用済燃料集合体を取り出し、所定の燃料ラックに収納する。

A.3.3 後作業

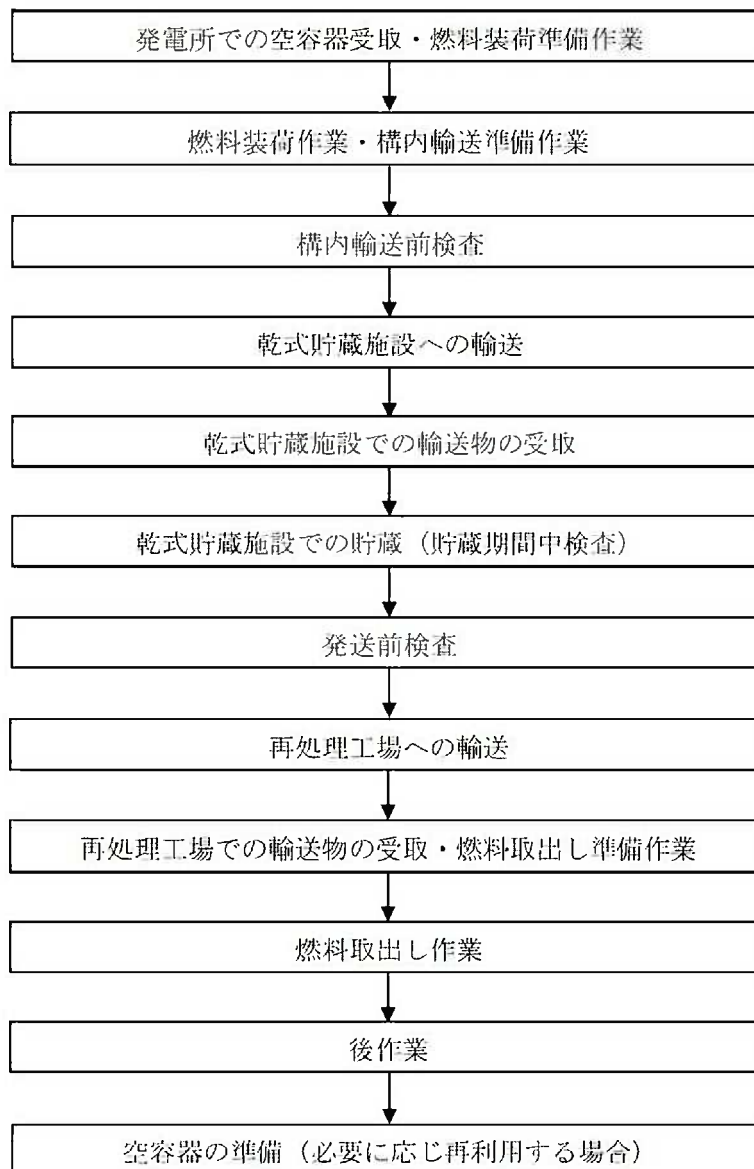
燃料取出し後、輸送容器を燃料取出ピットから吊り出し、輸送容器の除染を行う。

(1) 後作業

- a. クレーン及び吊具を用いて、輸送容器を燃料取出ピットから吊り上げる。
- b. クレーン及び垂直吊具を用いて、輸送容器を空容器返却準備室へ移送する。
- c. 燃料プール入水のための養生等を取り外す。
- d. 一次蓋を取り付ける。
- e. 輸送容器内水の排水を行う。
- f. クレーン及び蓋吊具を用いて、二次蓋及び三次蓋を取り付ける。
- g. 三次蓋密封部の漏えい率を測定する。
- h. 輸送容器の除染を行う。

A.4 空容器の準備

燃料取出し後の輸送容器を再使用する場合は、次の輸送のために適切に保管し、空容器搬出前には適切に発送準備を行い、発電所まで輸送する。



(二)-第 A. 1 図 標準的な輸送物の取扱いの流れ

A.5 輸送物の発送前検査

A.5.1 発送前検査

乾式貯蔵施設から再処理工場へ輸送物を発送する前に(二)-第A.1表に示す輸送物の発送前検査を行う。

(二)-第 A.1 表 発送前検査の項目、検査方法及び合格基準 (1/2)

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送物の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷のないこと。 輸送物の□が施されていること。
2	吊上検査	輸送物を吊り上げた後の状態において、トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷、変形又は損傷のないこと。
3	重量検査	輸送容器及び収納物の合計重量を、製造時の重量検査記録及び構内輸送前検査の収納物検査記録により確認する。	131.2 トン以下であること。
4	表面密度検査	スミヤ法により輸送物の表面密度を測定する。	α 線を放出する放射性物質：0.4 Bq/cm ² α 線を放出しない放射性物質：4 Bq/cm ² をそれぞれ超えないこと。
5	線量当量率検査	輸送物の表面及び表面から 1 m の距離におけるガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定する。	ガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率の合計が 表面：2 mSv/h 表面から 1 m の距離：100 μ Sv/h をそれぞれ超えないこと。
6	未臨界検査	構内輸送前検査及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の未臨界検査 ^(注1) 記録並びに発送前検査の外観検査記録を確認する。	① 貯蔵期間中に臨界防止機能が維持されていること。 ② 臨界防止機能に影響する輸送容器の変形又は破損がないこと。
7	収納物検査	構内輸送前検査及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の収納物検査 ^(注2) 記録並びに発送前検査の外観検査記録を確認する。	① 使用済燃料集合体の仕様、数量及び収納配置が輸送認可条件のとおりであること。 ② 貯蔵期間中に使用済燃料集合体の健全性が維持されていること。 ③ 使用済燃料集合体の健全性に影響する輸送容器の変形又は破損がないこと。

(二)-第 A.1 表 発送前検査の項目、検査方法及び合格基準 (2/2)

No.	検査項目	検査方法	合格基準
8	温度測定検査	温度計により輸送物の表面温度を測定し、周囲温度 38 °C での値に補正する。	輸送中人が容易に近づくことができる表面の温度が日陰において 85 °C を超えないこと。
9	気密漏えい検査	① 三次蓋密封部の漏えい率を加圧法又は真空法により測定する。 ② 二次蓋密封部の漏えい率をヘリウムリーク試験、加圧法又は真空法により測定する。	① 三次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。 ② 二次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。
10	圧力測定検査	① 残留水分：構内輸送前検査の圧力測定検査記録により確認する。 ② ガス成分及び充填量：構内輸送前検査の圧力測定検査記録により確認する。 ③ 圧力：輸送容器内部圧力は構内輸送前検査の圧力測定検査記録により確認する。また、二重蓋間圧力は貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査 ^(注3) 記録により確認する。 ④ 上記①～③が貯蔵期間中維持されていることを、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査 ^(注3) 記録により確認する。	① 輸送容器内部は、残留水分が 10 % 以下となるよう検査要領書に規定する真空度又は湿度を超えないこと。二重蓋間については、水分が除去されていること。 ② 充填ガスが純度 99 % 以上のヘリウムであり、内部ガス充填量が検査要領書に規定する充填量範囲にあること。 ③ 輸送容器内部圧力及び二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあること。 ④ 上記①～③の状態が維持されていること。

(注 1) 構内輸送前検査の未臨界検査記録によりバスケットに臨界防止機能に影響する変形又は破損が生じていないこと、構内輸送前検査の収納物検査記録により収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により輸送容器の密封機能が健全であり、バスケットの腐食防止環境が維持されていること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の表面温度検査記録によりバスケットの形状、寸法及び強度に影響する輸送容器の表面温度の異常がないこと、及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録によりバスケットの形状、寸法及び強度に影響する輸送容器の変形又は破損がないことを確認する。

(注 2) 構内輸送前検査の収納物検査記録により収納前の使用済燃料が健全であること、貯蔵期間中

検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により輸送容器の密封機能が健全であり使用済燃料が腐食防止環境にあること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録及び表面温度検査記録により、設計仕様書で規定する異常事象を超える外力及び外部からの熱の作用がないことを確認する。

（注3）二重蓋間圧力のモニタリング記録により測定値が検査要領書に規定する圧力範囲にあることを確認する。

A.5.2 構内輸送前及び貯蔵期間中に実施する検査

本輸送容器は、乾式貯蔵施設における使用済燃料の貯蔵後の輸送に使用することから、発送前検査に先立ち、(ニ)-第 A.2 表に示す検査を実施する。また、輸送に係る検査の詳細は以下のとおり。

(1) 構内輸送前検査

燃料収納後、乾式貯蔵施設まで輸送する前に(ニ)-第 A.3 表に示す構内輸送前検査を行う。

(2) 貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）

貯蔵期間中に、輸送時に必要な基本的な安全機能及び構造強度を維持していることを確認するために(ニ)-第 A.4 表に示す貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）を定期的に行う。

(ニ)-第 A.2 表 兼用キャスクに係る検査の一覧

確認項目	検査 検査で確認する機能 検査項目	構内輸送前 検査	貯蔵前 検査	貯蔵期間中 検査 [※]		発送前検査
		構内運搬	貯蔵	貯蔵	輸送	輸送
全般	外観検査	◎	◎	◎	○	◎
密封	気密漏えい検査	◎	○		○	◎
	圧力測定検査	◎	○			○
	二重蓋間圧力検査		◎	○		
遮蔽	遮蔽性能検査			□	○	
	線量当量率検査	◎	◎			◎
臨界	未臨界検査	◎	○	○	○	○
除熱	熱検査			□	○	
	温度測定検査	◎	◎			◎
	表面温度検査		◎	◎		
構造 強度	吊上検査	◎	◎		○	◎
	重量検査	○	○			○
	据付検査		◎			
その 他	収納物検査	◎	○	○		○
	表面密度検査	◎	◎			◎

◎：直接確認するもの □：代表容器にて直接確認するもの ○：記録確認によるもの

※ 貯蔵期間中検査については、貯蔵機能に係る検査（貯蔵機能維持確認検査）及び輸送機能に係る検査（輸送機能維持確認検査）を実施する。

(二)-第 A.3 表 構内輸送前検査の項目、検査方法及び合格基準 (1/2)

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送物の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷のないこと。輸送物の□が施されていること。
2	吊上検査	輸送物を吊り上げた後の状態において、トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷、変形又は損傷のないこと。
3	重量検査	輸送容器及び収納物の合計重量を製造時の重量検査記録及び構内輸送前検査の収納物検査記録により確認する。	131.2 トン以下であること。
4	表面密度検査	スミヤ法により輸送物の表面密度を測定する。	α線を放出する放射性物質：0.4 Bq/cm ² α線を放出しない放射性物質：4 Bq/cm ² をそれぞれ超えないこと。
5	線量当量率検査	輸送物の表面及び表面から 1 m の距離におけるガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定する。	ガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率の合計が 表面：2 mSv/h 表面から 1 m の距離：100 μSv/h をそれぞれ超えないこと。
6	未臨界検査	使用済燃料集合体を装荷する前の状態において、輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視により検査する。	臨界防止機能に影響するバスケットの変形又は破損がないこと。
7	収納物検査	① 使用済燃料集合体の仕様、数量及び収納配置を原子炉での運転中のデータ及び燃料装荷作業記録により検査する。 ② 使用済燃料集合体の健全性を目視及び真空乾燥時における漏えいモニタリングにより検査する。	① 使用済燃料集合体の仕様、数量及び収納配置が輸送認可条件のとおりであること。 ② 使用済燃料集合体の外観に異常がなく、燃料被覆管からの漏えいがないこと。

(二)-第 A.3 表 構内輸送前検査の項目、検査方法及び合格基準 (2/2)

No.	検査項目	検査方法	合格基準
8	温度測定 検査	温度計により輸送物の表面温度を測定し、周囲温度 38 ℃での値に補正する。	輸送中人が容易に近づくことができる表面の温度が日陰において 85 ℃を超えないこと。
9	気密漏えい 検査	① 三次蓋密封部の漏えい率を加圧法又は真空法により測定する。 ② 二次蓋密封部の漏えい率をヘリウムリーク試験、加圧法又は真空法により測定する。	① 三次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。 ② 二次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。
10	圧力測定 検査	① 残留水分: 輸送容器内部の真空乾燥後の真空度又は内部ガス充填後の湿度を、二重蓋間については脱水されていることを輸送容器仕立て作業記録により確認する。 ② ガス成分及び充填量: 内部ガス、二重蓋間ガスの種類、純度及び充填量を輸送容器仕立て作業記録により確認する。 ③ 圧力: 圧力計による実測結果又はガス充填量と充填部体積に基づく計算結果を、輸送容器仕立て作業記録により確認する。	① 輸送容器内部は、残留水分が 10 %以下となるよう検査要領書に規定する真空度又は湿度を超えないこと。二重蓋間については、水分が除去されていること。 ② 充填ガスが純度 99 %以上のヘリウムであり、内部ガス充填量が検査要領書に規定する充填量範囲にあること。 ③ 輸送容器内部圧力及び二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあること。

(二)-第 A. 4 表 貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の項目、検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録を確認する。	輸送容器に、基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷がないこと。
2	気密漏えい検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査 ^(注1) 記録を確認する。	二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあること。
3	遮蔽性能検査	代表容器の貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の遮蔽性能検査 ^(注2) 記録を確認する。	代表容器が遮蔽機能を維持していること。
4	未臨界検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の未臨界検査 ^(注3) 記録を確認する。	バスケットの外観、寸法に影響する輸送容器の異常がないこと。また、収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること。
5	熱検査	代表容器の貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の熱検査 ^(注4) 記録を確認する。	代表容器が除熱機能を維持していること。
6	吊上検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録により、トラニオン部に異常がないことを確認する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷、変形又は損傷のないこと。

(注1) 二重蓋間圧力のモニタリング記録により測定値が検査要領書に規定する圧力範囲にあることを確認する。

(注2) 代表容器の表面におけるガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定し、代表容器の収納物仕様及び貯蔵期間に基づいた線量当量率解析値と測定値を比較し、測定値が解析値と比較して妥当であることを確認する。

(注3) 構内輸送前検査の未臨界検査記録によりバスケットに臨界防止機能に影響する変形又は破損が生じていないこと、構内輸送前検査の収納物検査記録により収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により輸送容器の密封機能が健全であり、バスケットの腐食防止環境が維持されていること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の表面温度検査記録によりバスケットの形状、寸法及び強度に影響する輸送容器の表面温度の異常がないこと、及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録によりバスケットの形状、寸法及び強度に影響する輸送容器の変形又は破損がないことを確認する。

(注4) 代表容器について温度計にて各部温度を測定するか又は貯蔵期間中の表面温度検査記録を確認し、代表容器の収納物仕様、貯蔵期間及び貯蔵環境に基づいた表面温度解析値と比較し、測定値が解析値と比較して妥当であることを確認する。

A. 5. 3 乾式貯蔵施設において貯蔵を行わない場合に実施する発送前検査

乾式貯蔵施設において貯蔵を行わず、燃料装荷後に再処理工場へ直接搬出する場合は、輸送物を発送する前に(ニ)-第A. 3表に示す構内輸送前検査と同様の輸送物の発送前検査を行う。

A.6 使用済燃料の長期健全性に関する状況調査

本輸送容器に収納した使用済燃料は、乾式貯蔵施設において長期の貯蔵を行った後に輸送することとなる。

乾式貯蔵施設から輸送物を発送する前に行う輸送物の発送前検査の収納物検査については、一次蓋及び二次蓋を開放して使用済燃料の外観を目視等にて検査することなく、記録の確認によって行うことから、国内海外で実施されている以下のような使用済燃料の長期健全性に関する試験の実施状況を調査し、知見の蓄積を図る。

(1) 米国の貯蔵試験

米国アイダホ国立研究所において、使用済 PWR 燃料の 15 年乾式貯蔵後の試験結果（INEEL/EXT-01-001837 Revision 1, NUREG/CR-6831）等のレポートがある。同研究所における使用済燃料の長期健全性の調査は、乾式貯蔵容器の内部ガスのサンプリングにより、漏えい燃料の有無を確認している。判定において着目する核種は⁸⁵Krとしている。また、過去調査では、使用済燃料の外観確認、抜き取った燃料 1 体に対するクリープ、水素化物再配向、照射硬化回復等に関する詳細調査を実施している。

米国アイダホ国立研究所では、15×15 型 PWR 燃料を貯蔵している。貯蔵している使用済燃料について(二)-第 A.5 表に示す。

(2) 国内の貯蔵試験

国内研究施設においても使用済燃料の中間貯蔵期間中の状態を模擬した使用済 PWR 燃料の貯蔵試験の計画が発表されている（N Irie, et. al “Demonstration Test Program for Long-term Dry Storage of PWR Spent Fuel”, PATRAM 2016, Kobe, #5047）。同試験においては試験容器の内部ガスのサンプリングにより、漏えい燃料の有無を米国試験と同様に⁸⁵Krに着目して確認する計画とされている。同試験に使用される使用済燃料の仕様等について(二)-第 A.6 表に示す。

(二)-第 A. 5 表 米国アイダホ国立研究所で乾式貯蔵されている使用済燃料 (注1) (注2)

	アイダホ国立研究所 (サリー2号炉燃料)
燃料タイプ	15×15型 PWR 燃料
貯蔵燃料の燃焼度	～約 35,700 MWd/t
冷却期間	約 2～4 年
貯蔵期間 (注3)	約 32 年
被覆管の材質	ジルカロイ-4

(注1) 貯蔵後 10 年目 (1995 年度) の測定でクリプトンガスが検出されているが、サンプル容器の汚染又は分析準備中の汚染が原因とされている。

(注2) 燃料被覆管温度 (ベンチマーク試験時/貯蔵初期/状況調査時) は、約 415 °C /約 344 °C/約 155 °Cである。

(注3) 貯蔵期間は、貯蔵開始 (1985 年) から 2018 年 2 月時点での経過年数を示す。

(二)-第 A. 6 表 国内での貯蔵試験に使用する使用済燃料

	高浜 3 号機燃料
燃料タイプ	17×17型 PWR 燃料
冷却期間	約 24 年
貯蔵燃料の燃焼度	約 42,800 MWd/t
被覆管の材質	ジルカロイ-4

(注)既に PIE 試験に供した燃料であり、燃料棒が 15 本程度抜き取られた状態で試験に供されている。

B. 保守条件

貯蔵中の輸送容器の健全性の維持については、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）により確認する。

B.1 外観検査

貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録を確認し、輸送容器に、基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷がないことを確認する。

B.2 耐圧検査

貯蔵中に発生する応力レベルは低く、かつ、変動がほとんどないことから、供用期間中に耐圧検査を実施する必要はなく、該当しない。

B.3 気密漏えい検査

貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録を確認し、二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあることを確認する。

B.4 遮蔽検査

代表容器の貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の遮蔽性能検査記録を確認し、代表容器が遮蔽機能を維持していることを確認する。

B.5 未臨界検査

貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の未臨界検査記録を確認し、バスケットの外観、寸法に影響する輸送容器の異常がないこと、また、収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であることを確認する。

B.6 熱検査

代表容器の貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の熱検査記録を確認し、代表容器が除熱機能を維持していることを確認する。

B.7 吊上検査

貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録により、トラニオン部に異常がないことを確認し、トラニオン部の性能に影響を与えるような汚れ、傷、変形又は損傷のないことを確認する。

B. 8 作動確認検査

弁はなく該当しない。

B. 9 補助系の保守

補助系はなく該当しない。

B. 10 密封装置の弁、ガスケット等の保守（定期保守）

三次蓋用 O リングは、(二)-第 B. 1 表に示す交換頻度に従い使用する。

(二)-第 B. 1 表 部品交換頻度

部品名	交換頻度	備考
三次蓋用 O リング	実使用期間（燃料装荷期間）の合計で 1年に1回以上	密封境界に係る部位とする

B. 11 輸送容器の保管

使用済燃料が装荷されていない保管中の輸送容器は、内部に不活性ガスを充填する等の腐食防止措置を講じ、屋内に保管するか、又は屋外に保管する場合には養生を行う。

B. 12 記録の保管

製造時検査記録、構内輸送前検査記録、貯蔵前検査記録、貯蔵期間中検査記録、発送前検査記録及び定期自主検査記録（補修記録や部品交換履歴を含む）は、当該輸送容器存続中保存する。

B. 13 その他

(1) 乾式貯蔵施設での貯蔵中の定期自主検査

乾式貯蔵施設で貯蔵中の輸送容器については(二)-第 B. 2 表に示す定期自主検査を1年に1回以上実施する。

(二)-第 B. 2 表 乾式貯蔵施設で貯蔵中の輸送容器の定期自主検査の項目、
検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査 ^(注1)	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録を確認する。	輸送容器に、基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷がないこと。
2	気密漏えい検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査 ^(注2) 記録を確認する。	二重蓋間圧力が検査要領書で規定する圧力範囲にあること。
3	未臨界検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の未臨界検査 ^(注3) 記録を確認する。	バスケットの外観、寸法に影響する輸送容器の異常がないこと。また、収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること。
4	吊上検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録により、トラニオン部に異常がないことを確認する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷、変形又は損傷のないこと。

(注1) 緩衝体及び三次蓋については、保管期間中検査として、1年に1回以上の頻度で目視により外観検査を行い、異常のないことを確認する。また、これらの使用に当たっては、使用開始検査として目視により外観検査を行い、異常のないことを確認する。なお、緩衝材の充填空間はカバープレートに覆われた閉鎖環境であること、また、緩衝体は常温環境下に保管するため劣化環境にないことから、緩衝材に有意な経年劣化は生じない。

(注2) 二重蓋間圧力のモニタリング記録により測定値が検査要領書に規定する圧力範囲にあることを確認する。

(注3) 構内輸送前検査の未臨界検査記録によりバスケットに臨界防止機能に影響する変形又は破損が生じていないこと、構内輸送前検査の収納物検査記録により収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により輸送容器の密封機能が健全であり、バスケットの腐食防止環境が維持されていること、貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の表面温度検査記録によりバスケットの形状、寸法及び強度に影響する輸送容器の表面温度の異常がないこと、及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録によりバスケットの形状、寸法及び強度に影響する輸送容器の変形又は破損がないことを確認する。

(2) 使用済燃料を装荷したことのある輸送容器の定期自主検査

使用済燃料を装荷したことのある輸送容器については、(二)-第 B.3 表に示す定期自主検査を1年に1回以上実施する。

(二)-第 B.3 表 使用済燃料を装荷したことのある輸送容器の定期自主検査の項目、
検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送容器の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷のないこと。
2	気密漏えい検査	①三次蓋密封部の漏えい率を加圧法又は真空法により測定する。 ②二次蓋密封部の漏えい率をヘリウムリーク試験、加圧法又は真空法により測定する。	①三次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。 ②二次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。
3	未臨界検査	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	臨界防止機能に影響するバスケットの変形又は破損がないこと。
4	吊上検査	輸送容器を吊り上げた後の状態において、トラニオンの外観を目視で検査する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷、変形又は損傷のないこと。

(3) 保管中の輸送容器の定期自主検査

a. 使用済燃料を装荷したことの無い輸送容器の定期自主検査

使用済燃料を装荷したことの無い輸送容器については、内部に不活性ガスを充填する等の腐食防止措置を講じ、屋内に保管するか、又は屋外に保管する場合には養生を行い、(ニ)-第 B.4 表に示す定期自主検査を 1 年に 1 回以上実施する。

当該輸送容器の保管が終了し、使用済燃料を装荷する前には、(ニ)-第 B.3 表と同じ検査を実施する。

(ニ)-第 B.4 表 使用済燃料を装荷したことの無い輸送容器の定期自主検査の項目、

検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送容器の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ、傷、変形又は損傷のないこと。

b. 使用済燃料を装荷したことの有る輸送容器の定期自主検査

使用済燃料を装荷したことの有る輸送容器については、保管する前に(ニ)-第 B.3 表と同じ検査を実施する。

保管にあたっては、内部に不活性ガスを充填する等の腐食防止措置を講じ、屋内に保管するか、又は屋外に保管する場合には養生を行い、(ニ)-第 B.4 表に示す定期自主検査を 1 年に 1 回以上実施する。

当該輸送容器の保管が終了し、使用済燃料を装荷する前には、(ニ)-第 B.3 表と同じ検査を実施する。

別紙 (ホ) 章の一部補正

別紙 (ホ) 章を以下のとおり補正する。

頁*	行	補正前	補正後
(ホ)-1 ～ (ホ)-14		(記載変更)	別紙 1 に変更する。

※平成 31 年 1 月 22 日付け原発本第 269 号で申請の頁を示す。

(ホ)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

本輸送物の安全設計、安全輸送に関する特記事項は以下のものとする。

1. 近接防止金網の装着

本輸送物は発送前の温度測定検査で、太陽熱放射のない条件において輸送中人が容易に近づくことができる表面温度が 85 °C を超える場合は、近接防止金網を装着して輸送するものとする。

2. 三次蓋及び緩衝体の取扱いについて

本輸送物の三次蓋及び緩衝体は同型式の輸送容器間で共用する。

3. 安全設計において自主的に考慮した事項（輸送容器及び収納される使用済燃料の経年変化について）

本輸送容器は、使用済燃料乾式貯蔵施設における貯蔵後の輸送にも用いられる。ここでは、設計評価期間を 60 年とし、輸送容器の各部材及び使用済燃料の経年変化について、(ロ)章の安全解析で自主的に考慮する事項について示す。

(1) 経年変化の考慮の必要性の評価

a. 考慮すべき経年変化要因

輸送容器の構成部材及び使用済燃料に関して考慮すべき経年変化の要因、並びに必要に応じて安全解析において考慮すべき事項を以下に示す。

(a) 熱的劣化

高温での材料組成・材料組織の変化、強度・延性・脆性・クリープ・その他物性値の変化及び重量減少

(b) 放射線照射による劣化

ガンマ線及び中性子照射による材料組成・材料組織の変化、並びに強度・延性・脆性・その他物性値の変化

(c) 化学的劣化

全面腐食、応力腐食割れ、異種材料接触部の化学的反応及び燃料被覆管材料における水素吸収・酸化

b. 経年変化に対する評価結果

輸送容器の構成部材について、経年変化考慮の必要性を評価した結果を (a)～(h) に示す。また、使用済燃料被覆管について経年変化考慮の必要性を評価した結果を (i) に示す。

これらの評価結果に基づき、(ロ)章では、中性子遮蔽材（レジン）及び金属ガスケットの経年変化を考慮した評価を行っている。

(a) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及び合金鋼については、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁾ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及び合金鋼は、設計用強度・物性値が規定^{2)、3)}されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。

輸送容器の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、使用済燃料を貯蔵する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、腐食の影響はなく、残留水分（10 wt%）を考慮しても実用上問題となる腐食はない。また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及び合金鋼は、使用済燃料貯蔵時の温度条件において、仮に燃料破損率 1 %相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、実用上問題となる腐食はない。⁴⁾

一次蓋と二次蓋の間の空間部（以下「蓋間空間」という。）には不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、不活性雰囲気が維持されるため、腐食の影響はない。また、中性子遮蔽材（レジン）に接する部材には実用上問題となる腐食はない。なお、大気に触れる部分については、塗装等の防錆措置や定期的な外観検査等により状態を確認し、必要に応じて補修を行い、腐食を防止する。

(b) バスケット

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁵⁾ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{16} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計評価期間中の減損割合は 10^{-5} 程度であり、ほう素の減損割合は無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定⁵⁾されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。なお、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用

強度は、設計評価期間中の熱ばく露条件を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、設計評価期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している。⁵⁾

バスケットが置かれた空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、使用済燃料を貯蔵する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、腐食の影響はなく、残留水分（10 wt%）を考慮しても実用上問題となる腐食はない。

(c) トラニオン

トラニオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁶⁾ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定^{2), 3)}されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。

トラニオンについては、定期的な外観検査等により状態を確認し、必要に応じて防錆措置を行い、腐食を防止する。

(d) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁾ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は外筒では 10^{13} n/cm² を超えず、また、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定^{2), 3)}されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。

外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接するが実用上問題となる腐食はない。また、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面は不活性雰囲気は維持されるため、腐食の影響はない。

なお、外筒の外表面については、塗装等の防錆措置や定期的な外観検査等により状態を確認し、必要に応じて補修を行い、腐食を防止する。

(e) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁶⁾ことが示されて

おり、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{14} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用する材料は、設計用強度・物性値が規定^{2)、3)}されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。

下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接するが、実用上問題となる腐食はない。

(f) 中性子遮蔽材

中性子遮蔽材（レジン）は、熱と照射の影響評価が行われ、使用済燃料貯蔵時の照射量による照射の影響は熱に比べ無視し得る^{7)、8)}ことが確認されているため、熱による経年変化のみ考慮するものとする。中性子遮蔽材の温度は、設計基準温度(149 °C)を下回っており、中性子遮蔽材は設計評価期間中使用可能である。ただし、中性子遮蔽材は、設計評価期間中の経年変化により質量減損が発生⁷⁾するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 %の質量減損を考慮する。

(g) 金属ガスケット

金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm² 又は 10^{21} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない^{9)、10)}ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。また、高温時の健全性についてラーソン・ミラー・パラメータ (LMP) で評価すると 150 °Cでは 100 年以上閉じ込め機能を維持できる¹¹⁾。さらに、使用済燃料貯蔵時の温度条件において長期密封性能試験（19 年以上）が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている¹²⁾。

蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、その圧力を監視する設計としている。一次蓋の金属ガスケットは不活性雰囲気であり、腐食を考慮する必要はない。また、二次蓋の金属ガスケットは、内側が不活性雰囲気、外側が大気となっているが、必要に応じて保守が可能であり、輸送時の水密境界としての健全性は維持される。

なお、構造解析では、設計評価期間（60 年間）における健全性を考慮し設定した基準に対し、二次蓋の金属ガスケット部の口開き及び横ずれの影響評価を行っている。

(h) 伝熱フィン

伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹³⁾ ことが示されており、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量は 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。

銅は、使用済燃料貯蔵時の温度条件において、設計用強度・物性値が規定¹⁴⁾ されており、その温度範囲で使用するため、熱による経年変化を考慮する必要はない。

伝熱フィンは、中性子遮蔽材（レジン）に接するが、実用上問題となる腐食はない。

(i) 使用済燃料被覆管

燃料被覆管に使用するジルコニウム合金は、使用済燃料貯蔵時の中性子照射量が 10^{16} n/cm² を超えず、炉内の中性子照射量 (10^{21} ～ 10^{22} n/cm²) に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る¹⁵⁾。

熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある¹⁵⁾。

クリープひずみの進行については、クリープ予測式に基づく累積クリープひずみが 1 % 以下となるよう制限することで防止できる¹⁵⁾ ことが示されており、燃料被覆管の設計評価期間における累積クリープひずみ量はその範囲内である。

照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射された照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は 270～300 °C 近傍¹⁵⁾ であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さく、燃料被覆管の温度を制限することにより防止できる。

燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 250～275 °C 以下、周方向応力が 90～100 MPa 以下^{15)、16)} と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止できる。

応力腐食割れについては、燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されたヨウ素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない¹⁵⁾。なお、腐食性雰囲気のある条件下での応力腐食割れ試験でジルコニウム合金の応力腐食割れのしきい応力は 150～200 MPa であ

り、使用済燃料貯蔵時の応力はこれに比べて十分低い¹⁵⁾。

また、残留水分が 10 wt%以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい¹⁷⁾ため、健全性に影響はない。

(2) 安全解析における経年変化の考慮

a. 中性子遮蔽材

(a) 構造解析における中性子遮蔽材部の圧力上昇

蓋部、側部及び底部中性子遮蔽材部には、レジンが充填されており、その空間部には空気が大気圧で封入されている。側部中性子遮蔽材部及び底部中性子遮蔽材部には可溶栓が設置されており、輸送前にはそれらの交換などの容器保守で一時的に圧力が開放されるが、通常は大気と遮断された環境にある。また、蓋部中性子遮蔽材部は、圧力が解放されることはなく、常時閉鎖されている。

中性子遮蔽材に用いるエポキシ系レジンについて、貯蔵期間を考慮した経年劣化評価試験が実施されており^{6)、18)~20)}、長期貯蔵後の中性子遮蔽材部の気相部分の成分は主に水、二酸化炭素及び窒素と考えられる。

水については、水の存在による圧力上昇を飽和水蒸気圧として考慮する。二酸化炭素については、初期に空間部分に存在する酸素によるレジンの酸化反応により発生するため、二酸化炭素は初期に存在した酸素と同量の物質に設定する。また、窒素は、不活性ガスであることからレジンへの吸収がないものとし、初期に存在した物質とする。したがって、空間部分の水を除くガスの物質量は変化しないものとし、初期に存在する空気として評価する。

構造解析では中性子遮蔽材部の気相部分の圧力上昇として、空気温度の上昇、レジンの熱膨張による空气体積の減少及び飽和水蒸気圧を考慮した。

中性子遮蔽材部の圧力 P (MPa) は、以下のとおり求められる。なお、外筒内面の膨張吸収材 () が取り付けられる面には以下式によって求めた中性子遮蔽材部圧力に、膨張吸収材の圧縮による圧力 () MPa を加えて圧力を設定した。

$$P = P_w + P_G$$

ここで、

P_w : 温度 t の飽和水蒸気圧 (MPa)

P_G : 温度 t の空気の分圧 (MPa)

$$P_G = P_0 \times \frac{t + 273.15}{20 + 273.15} \times \frac{V - V_{R0}}{V_V}$$

P_0 : 大気圧 (0.101325 MPa)

t : 一般または特別の試験条件における中性子遮蔽材温度 (°C)

V : 中性子遮蔽材部の全容積 (m³)

V_{R0} : 初期の中性子遮蔽材の体積 (m³)

V_V : 温度 t の空気の体積 (m³)

$$V_V = V - V_{R0} \times (1 + \alpha(t - 20))^3$$

α : 温度 t の中性子遮蔽材の線膨張係数 (m/m°C)

一般の試験条件及び特別の試験条件における中性子遮蔽材部圧力の計算条件及び計算結果を(ホ)-第1表に示す。なお、特別の試験条件において、側部中性子遮蔽材部の圧力は可溶栓によって開放される。

(ホ)-第1表 中性子遮蔽材充填部圧力の計算条件及び計算結果

部位	試験条件	中性子遮蔽材部の全容積 : V (m^3)	初期の中性子遮蔽材の体積 : V_{R0} (m^3)	中性子遮蔽材温度 : t ($^{\circ}C$) ^(注1)	温度 t の空気 の体積 : V_v (m^3)	温度 t の空気 の分圧 : P_g (MPa)	温度 t の飽和 水蒸気圧 : P_w (MPa)	中性子遮蔽材部 圧力 : P (MPa)
蓋部	一般							
	特別							
側部	一般 (注3)							
	特別 (注4)							
底部	一般 (注3)							
	特別 (注5)							

(注1) 一般の試験条件又は特別の試験条件における平均温度

(注2) 20 $^{\circ}C$ における体積

(注3)

(注4) 特別の試験条件において、下部端板に設けられた可溶栓が熱により溶融し、側部中性子遮蔽材部は大気圧となるが、一般の試験条件と同じ圧力とする。

(注5) 底部中性子遮蔽材部の特別の試験条件における計算においては、飽和水蒸気圧に加え、一般の試験条件における圧力に対し、空気温度の上昇及びレジンの熱膨脹による空気体積の減少による圧力上昇を考慮する。

(注6) 一般の試験条件での中性子遮蔽材温度（平均温度）における体積

(注7) 外筒内側の膨張吸収材（）が取り付けられている面には、表中に記載の圧力に加えて膨張吸収材の圧縮による圧力 MPa を考慮する。

(b) 遮蔽解析における質量減損

設計評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。

質量減損率は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2^{7)}$$

ここで、

Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)

E_p : 劣化パラメータ

$$E_p = T \times (77.6 + \ln(t))$$

T : 中性子遮蔽材温度 (K)

t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)

貯蔵中は、使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い、中性子遮蔽材の温度も低下するが、設計評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率算定においては、保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度が設計評価期間にわたり一定として質量減損率を算定する。設計評価期間初期の中性子遮蔽材の最高温度を(ホ)-第2表に示す。

上記を基にすれば、設計評価期間経過後の劣化パラメータは、温度の高い底部中性子遮蔽材で約 38000 となり、質量減損率は約 1.9 % と算定される。遮蔽解析ではこれを切り上げて 2.5 % の質量減損があるとして評価する。

なお、中性子遮蔽材から放出される成分は水が支配的であり、水よりも水素含有率が高いガス成分はわずかである^{8)、18)~20)}。したがって、遮蔽解析においては、中中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため、中性子遮蔽材の質量減損の成分を全て水とし、この質量減損分を遮蔽体として無視している。

(ホ)-第2表 設計評価期間初期の中性子遮蔽材の最高温度^(注1)

蓋部 (°C)	側部 (°C)	底部 (°C)
107 ^(注2)	129 ^(注2)	135 ^(注2)

(注1) 最高温度の主な算出条件を以下に示す。

- ・キャスクの貯蔵方式：縦置き貯蔵
- ・環境温度：50°C
- ・キャスクのピッチ：3.5 m

(注2) 14×14 燃料 55,000MWd/t 型よりも温度が高い 17×17 燃料 48,000MWd/t 型の温度である。

b. 金属ガスケット

(a) 金属ガスケットの横ずれ／口開き量と漏洩率の関係性

高温で長期間使用する金属ガスケットについては、構造解析において、これまでの知見に基づき経年変化を考慮した金属ガスケットの横ずれ基準値を設定する。

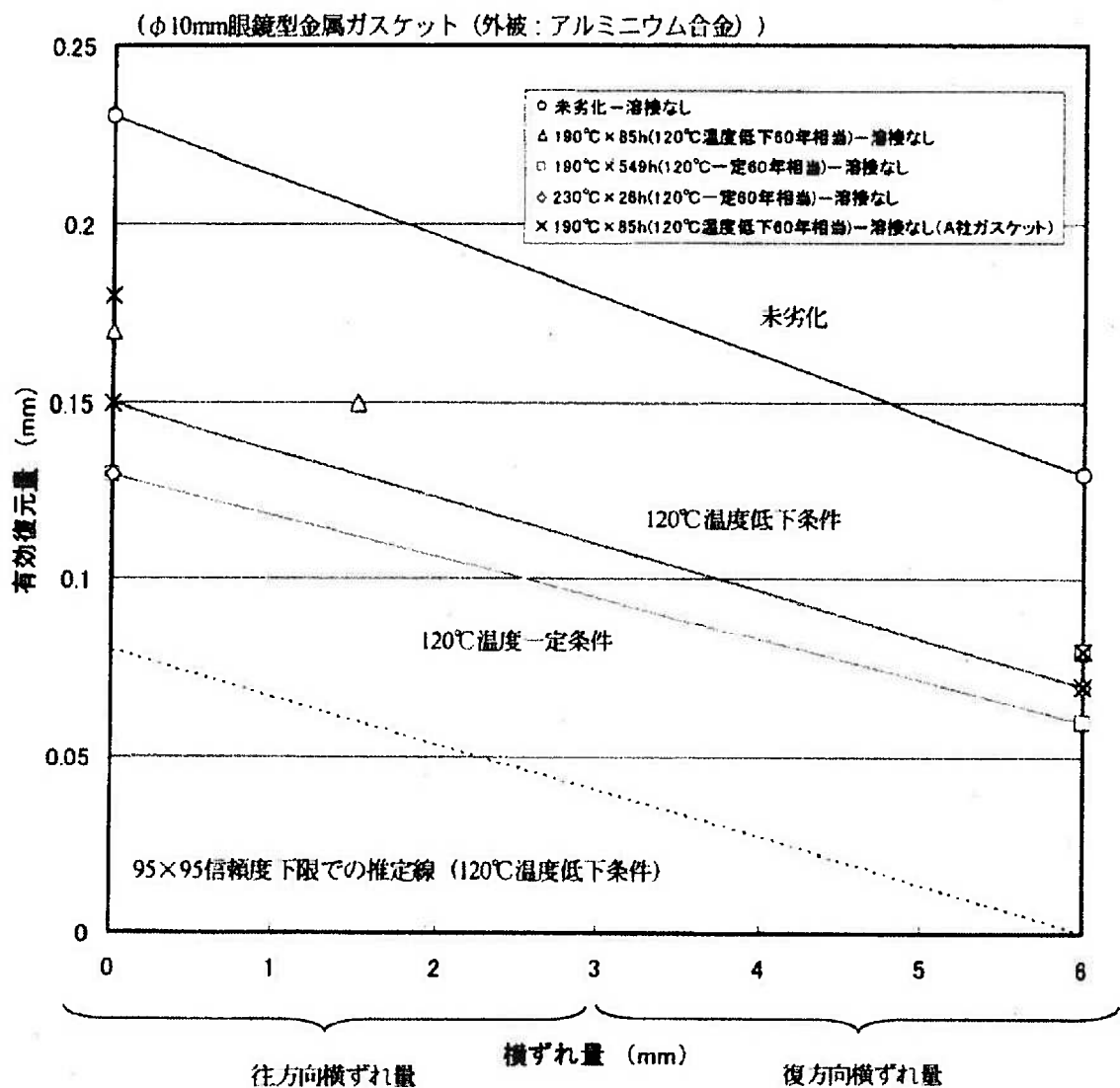
金属ガスケットについては、貯蔵後の輸送時密封性能に関する要素試験として、静的口開き試験、静的横ずれ試験、動的口開き試験、動的横ずれ試験が実施されている。当試験では静的口開きと横ずれが同時に発生した場合に、(ホ)-第1図に示す輸送時の基準漏えい率を確保するための横ずれ量と有効復元量(許容口開き量)の相関関係が得られている²¹⁾。また、落下試験を想定した動的横ずれと漏えい率の関係についてまとめられ、(ホ)-第2図に示す統計誤差を考慮した安全側の評価線が示されている²¹⁾。

本輸送容器で使用する金属ガスケットは上述の試験に用いられたものと、外被、内被及びコイルスプリングの材料は同等であり、断面径も10 mmと等しい。また、貯蔵終了時(設計評価期間(60年))のラーソン・ミラー・パラメータ(LMP)は7320であり、上述の試験に用いられた試験体のLMP 7375を下回っているため、上述の試験以上の密封性能が期待できる。ただし、本輸送容器で使用する金属ガスケットのフープ径は上述の試験の約10倍であるため、漏えい率は試験における漏えい率の10倍として評価する。

上述の試験に基づき、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件に対しては、十分な防水機能が得られる密封性能(5×10^{-3} ref cm^3/s)となるよう、構造解析の基準値を、横ずれ量と有効復元量(許容口開き量)の関係より静的横ずれに対して3 mm、動的横ずれと漏えい率の関係より動的横ずれに対して3 mmと設定した。

(b) 漏水量評価に使用する二次蓋金属ガスケットの密封性能

構造解析において、(a)で定めた基準を満たすことを確認できたことから、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件における二次蓋金属ガスケットの密封性能を 5×10^{-3} ref cm^3/s と設定し、口章E 臨界解析 E.7にて胴内の浸水量を評価した。

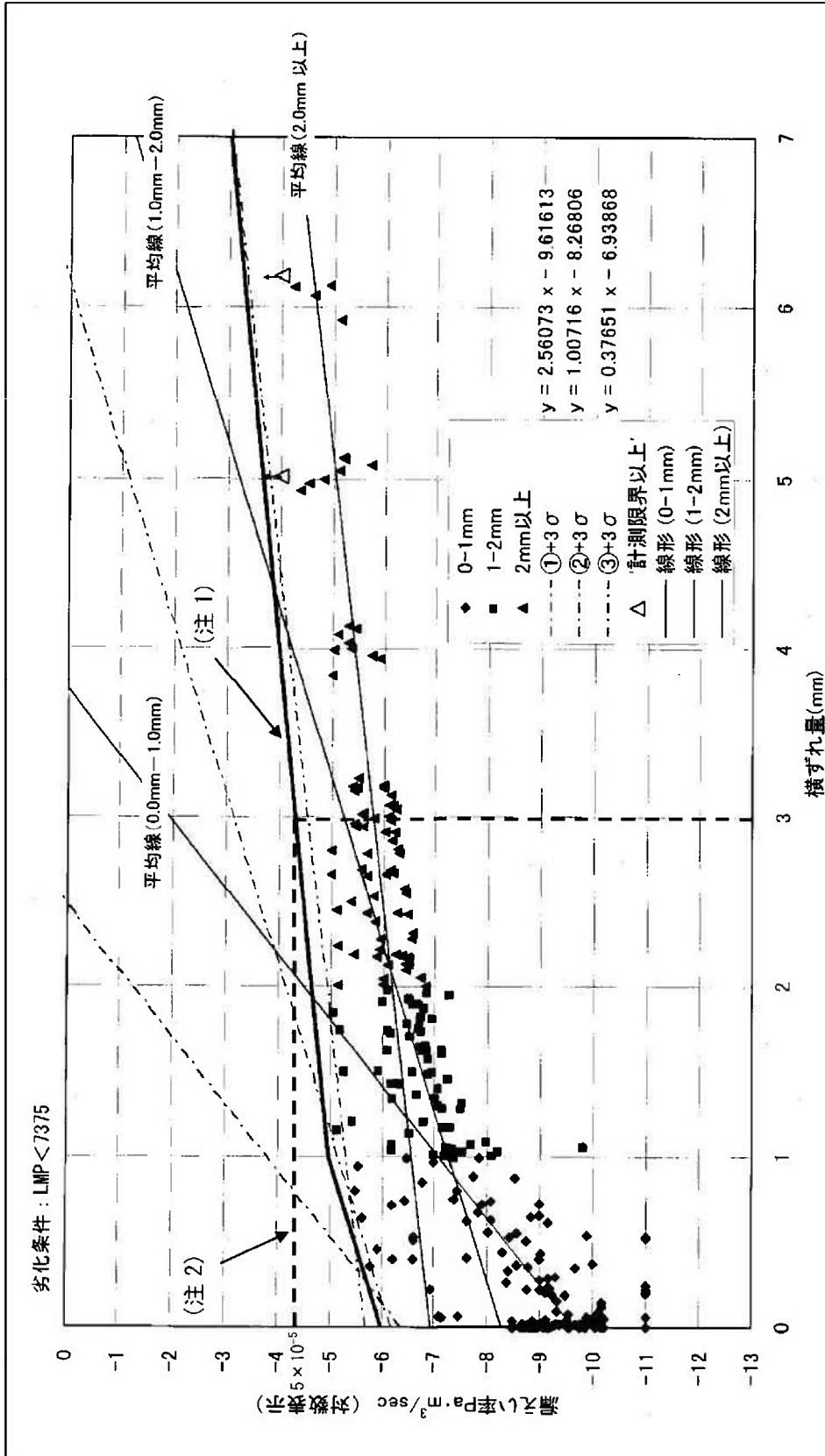


注1: 図中のラインは、横ずれ後の口開き試験を行ったデータにつき、劣化条件ごとでの下限線を示す。

注2: 破線で示す値及びラインは全データでの95×95信頼度下限値の値(0.08mm)と120°C温度低下条件下での下限ラインと平行に引いた場合の想定線である。

(ホ)-第1図 静的横ずれ変位と口開き変位が同時に起こった場合の許容量推定図⁴⁾

(基準漏えい率に対する有効復元量)



(注1) 試験データのばらつき (3σ) を考慮して設定した漏えい率評価のための上限
 (注2) 元図に横ずれ 3 mm のときの漏えい率読み取り補助線等を追記

(ホ) 第2図 金属ガスケット動的横ずれの整理²⁾

4. 参考文献

- 1) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 210, (1994).
- 2) (一社)日本機械学会, 「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」, (2007).
- 3) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版) <第 I 編 軽水炉規格> (JSME S NC1-2005 (2007年追補版含む))」, (2007).
- 4) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告」, (2004).
- 5) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 6) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響 -」, (一財)電力中央研究所, (1997).
- 7) (財)原子力発電技術機構, 「平成 14 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
- 8) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, *Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, (2007).
- 9) H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, *Proc. Jpn. Congr. Mater. Res.*, Vol. 24, (1981).
- 10) T. T. Claudson, “Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).
- 11) 加藤治, 伊藤千浩, 三枝利有, 「使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発」, *日本原子力学会誌*, Vol. 38, No. 6, (1996).
- 12) (一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書」, (2010).
- 13) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, *ASTM STP888*, (1986).
- 14) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).

- 15) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (2009).
- 16) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 20 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」, (2009).
- 17) (一社)日本原子力学会標準委員会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010 (AESJ-SC-F002: 2010)」, (2010).
- 18) 原燃輸送(株), 「使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱評価試験」, NFT-TR-97001, (1997).
- 19) (財)原子力発電技術機構, 「平成 13 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2002).
- 20) (財)原子力発電技術機構, 「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
- 21) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 16 年度 中間貯蔵施設健全性評価手法等調査報告書 (1/2) 最終報告」, (2005).