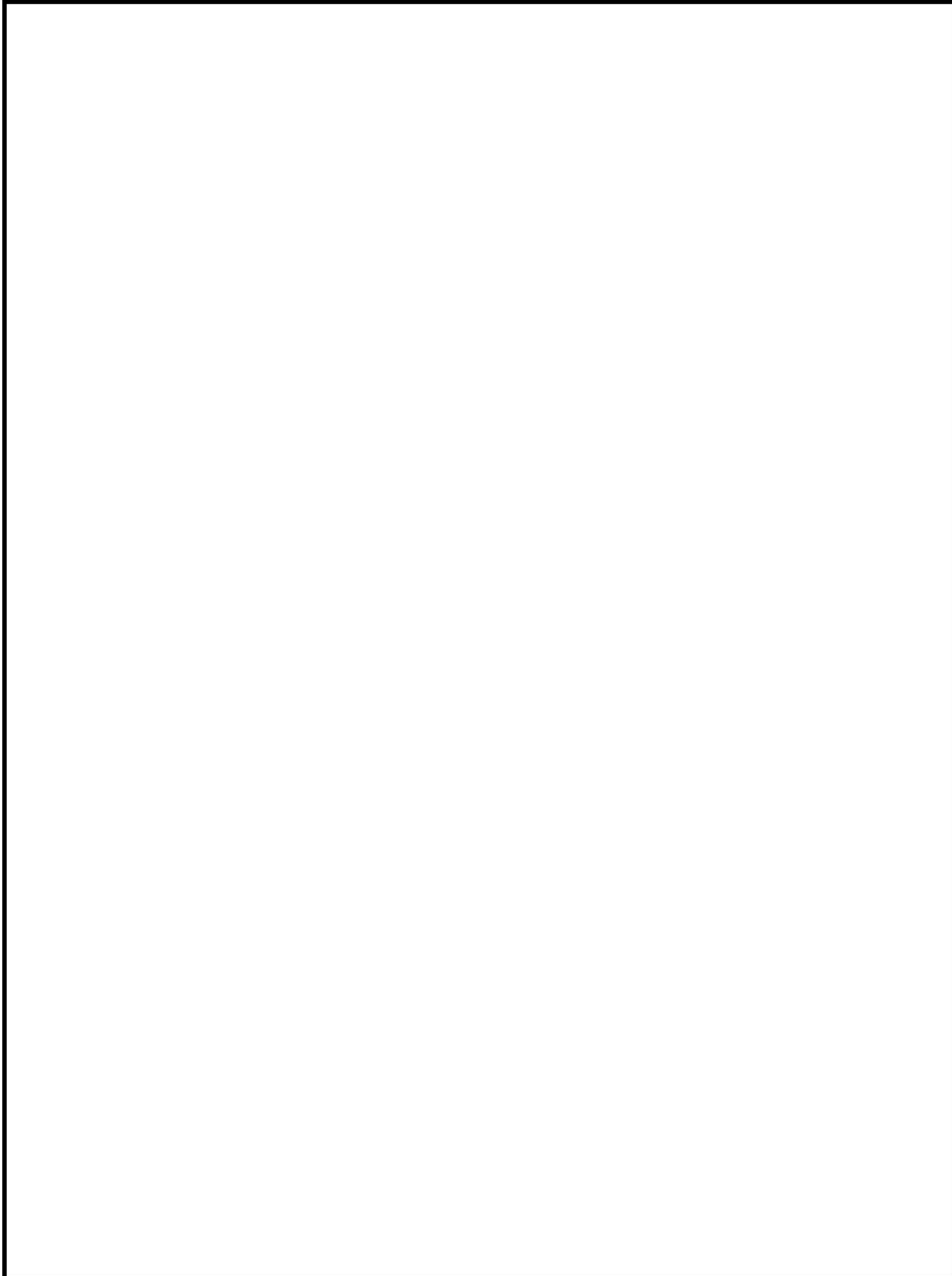
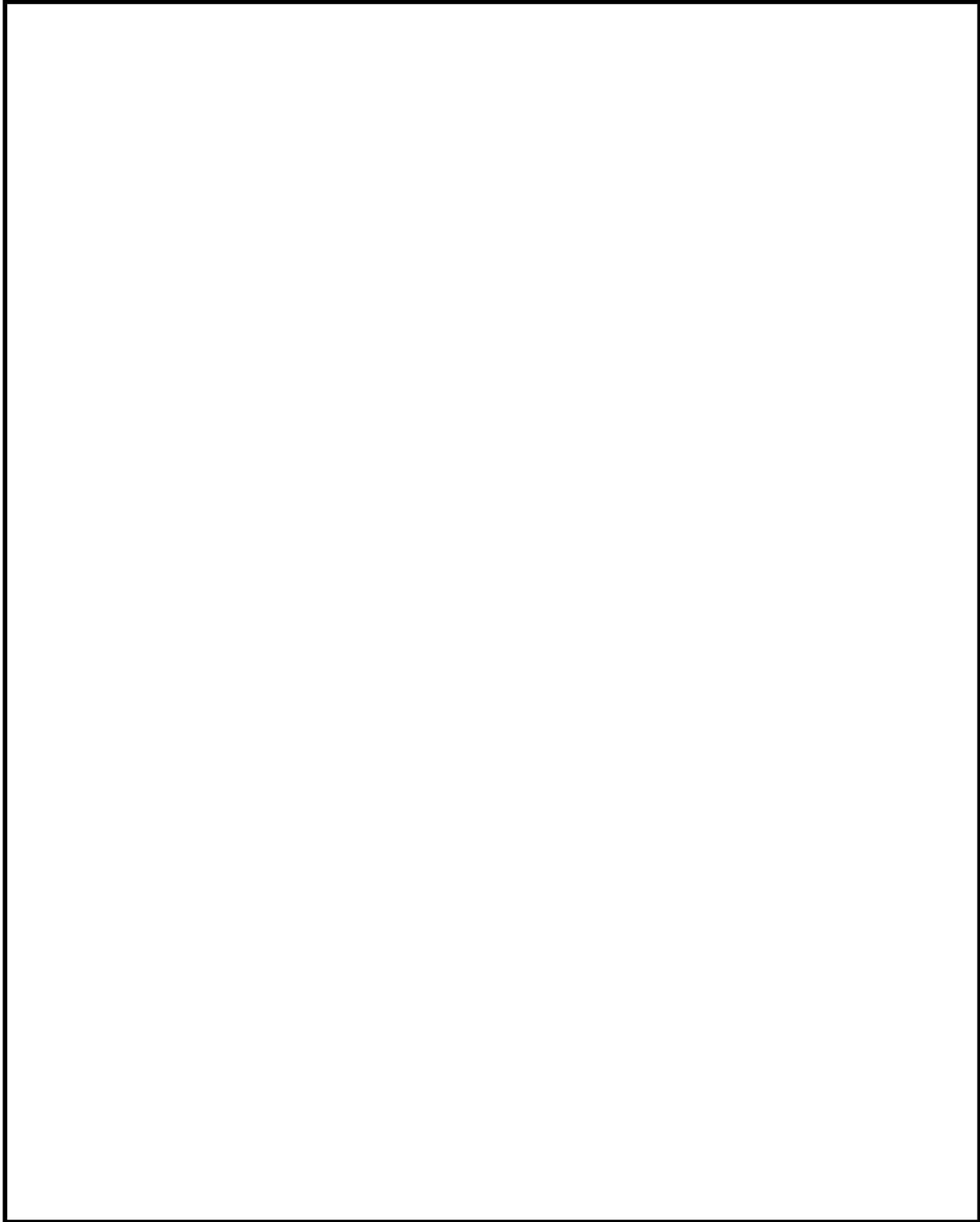


(ロ)-第 E. 2 図(d-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ最小)  
(14×14 燃料収納時)

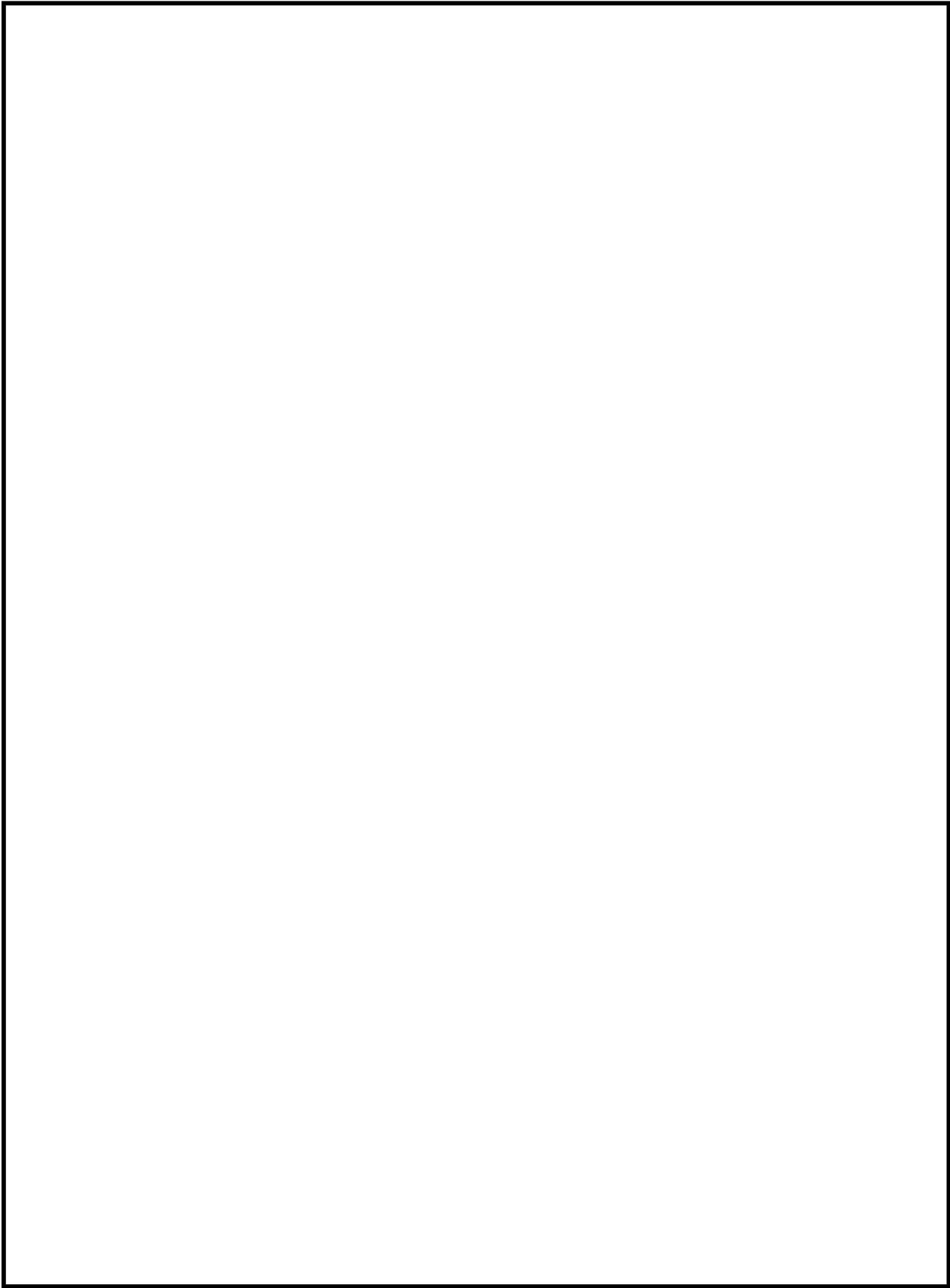


(ロ)-第 E. 2 図(d-3) 臨界計算モデル(燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ変化なし)

(14×14 燃料収納時)

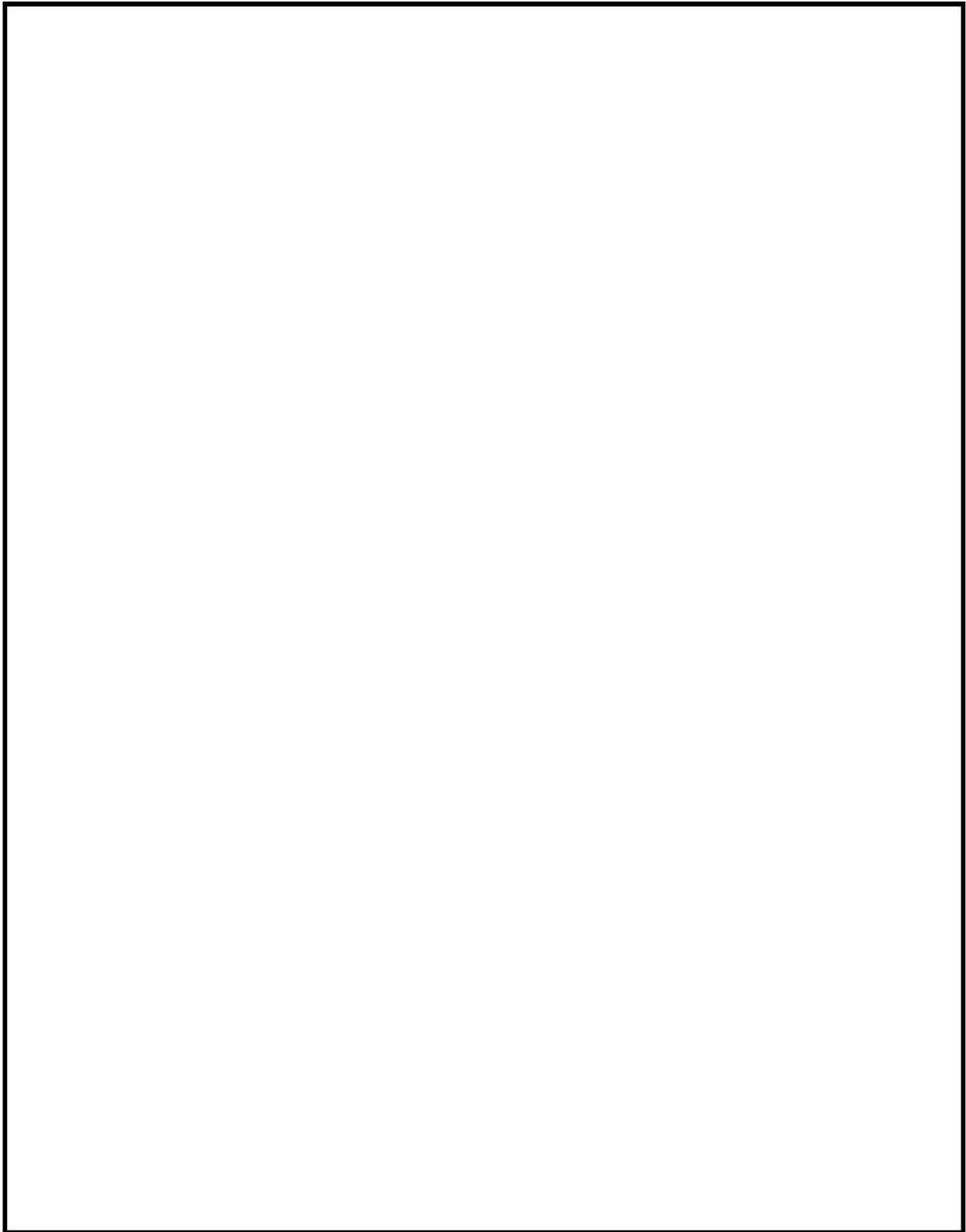


(ロ)-第 E. 2 図(d-4) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ変化なし)  
(14×14 燃料収納時)



(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(ロ)-第E.2表に示す。

(ロ)-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 <sup>3</sup> )	元素	原子個数密度 (10 <sup>24</sup> atoms/cm <sup>3</sup> )	
				17×17燃料	
				48,000MWd/t型	
				A型	
燃料領域	UO <sub>2</sub>		<sup>235</sup> U		
			<sup>238</sup> U		
			O		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr <sup>(注1)</sup>		
	胴内ガス		H		
O					
ほう素添加 アルミニウム合金			<sup>10</sup> B		
			<sup>11</sup> 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ため、この取扱いは保守的である。

(ロ)-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 <sup>3</sup> )	元素	原子個数密度 (10 <sup>24</sup> atoms/cm <sup>3</sup> )	
				14×14燃料	
				55,000MWd/t型	
				A型	
燃料領域	UO <sub>2</sub>		<sup>235</sup> U		
			<sup>238</sup> U		
			O		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr <sup>(注1)</sup>		
			H		
			O		
ほう素添加 アルミニウム合金		<sup>10</sup> B			
		<sup>11</sup> 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ので、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(α)-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 核燃料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。

- ・(α)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 cm<sup>3</sup> 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ので、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。



- ・ 浸水及び漏水を防止する特別な措置に係る品質管理及び取扱いについては、E.7.1に示す。

#### 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 SCALE<sup>1)</sup> (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(ρ)-第 E.3 図に示す。本計算コードを用い、(ρ)-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

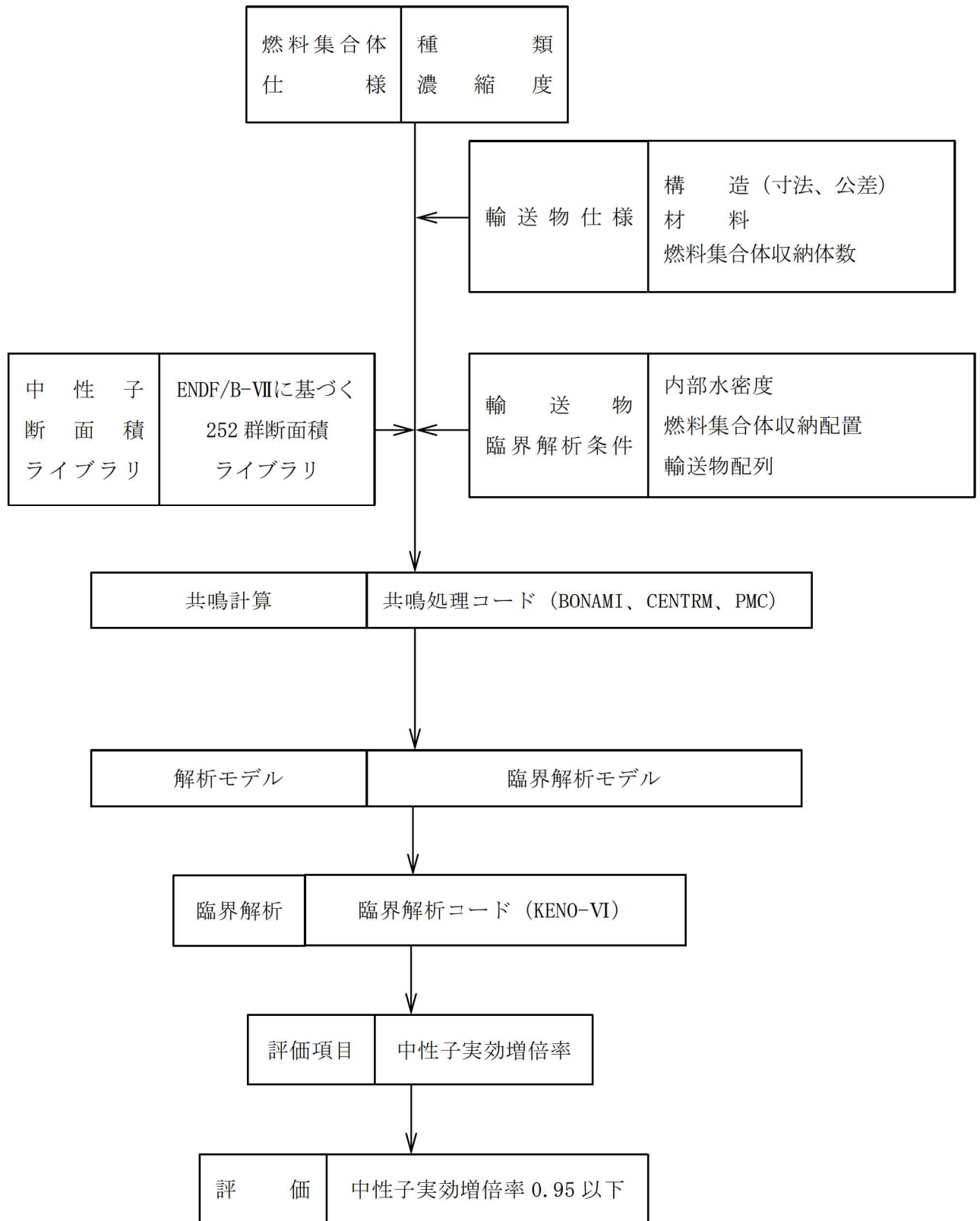
臨界解析の結果を(ρ)-第 E.3 表に示す。本計算は通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に置かれた輸送物の孤立系及び配列系の各状態と比較して安全側の計算であり、中性子実効増倍率 (keff) は標準偏差( $\sigma$ )の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(ρ)-第 E.3 表 臨界計算結果 (1/2)

	項目	keff	$\sigma$	keff+3 $\sigma$
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

(ρ)-第 E.3 表 臨界計算結果 (2/2)

	項目	keff	$\sigma$	keff+3 $\sigma$
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



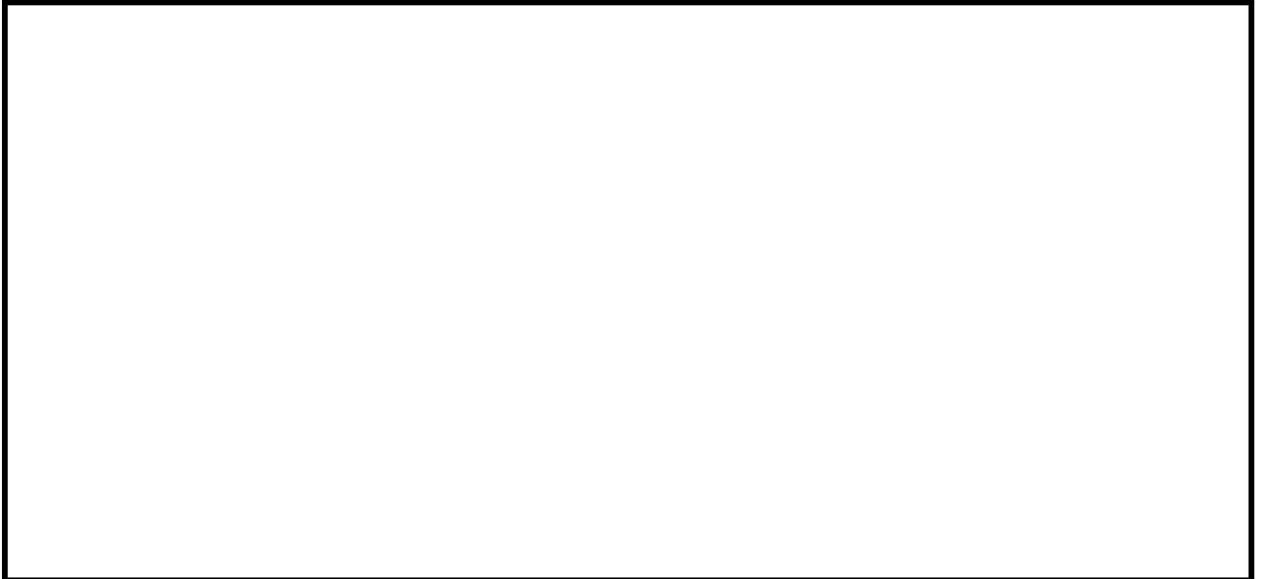
(ロ)-第 E.3 図 臨界計算の流れ

#### 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<sup>2)</sup>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

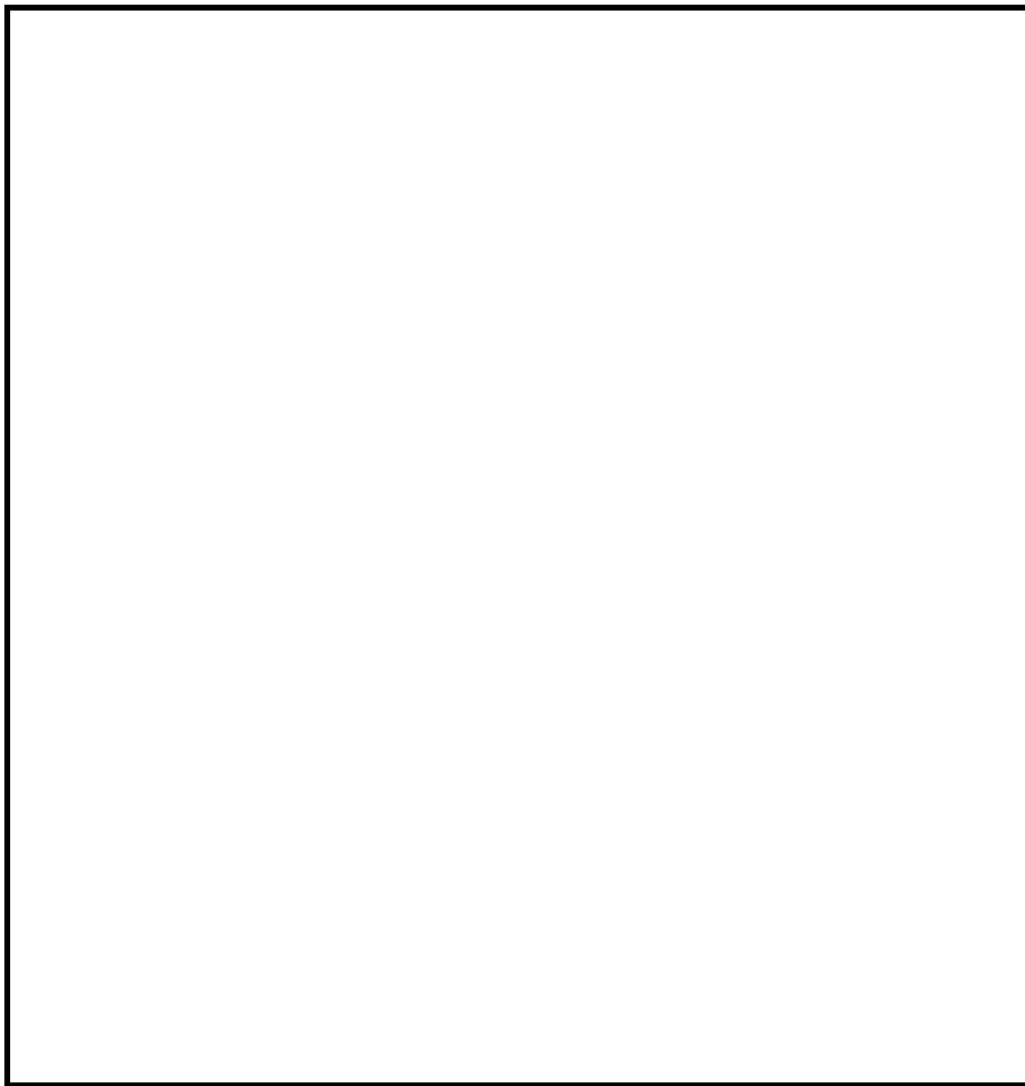
以上より、次の4つの機関により実施された臨界実験より、合計  ケースを選定した。



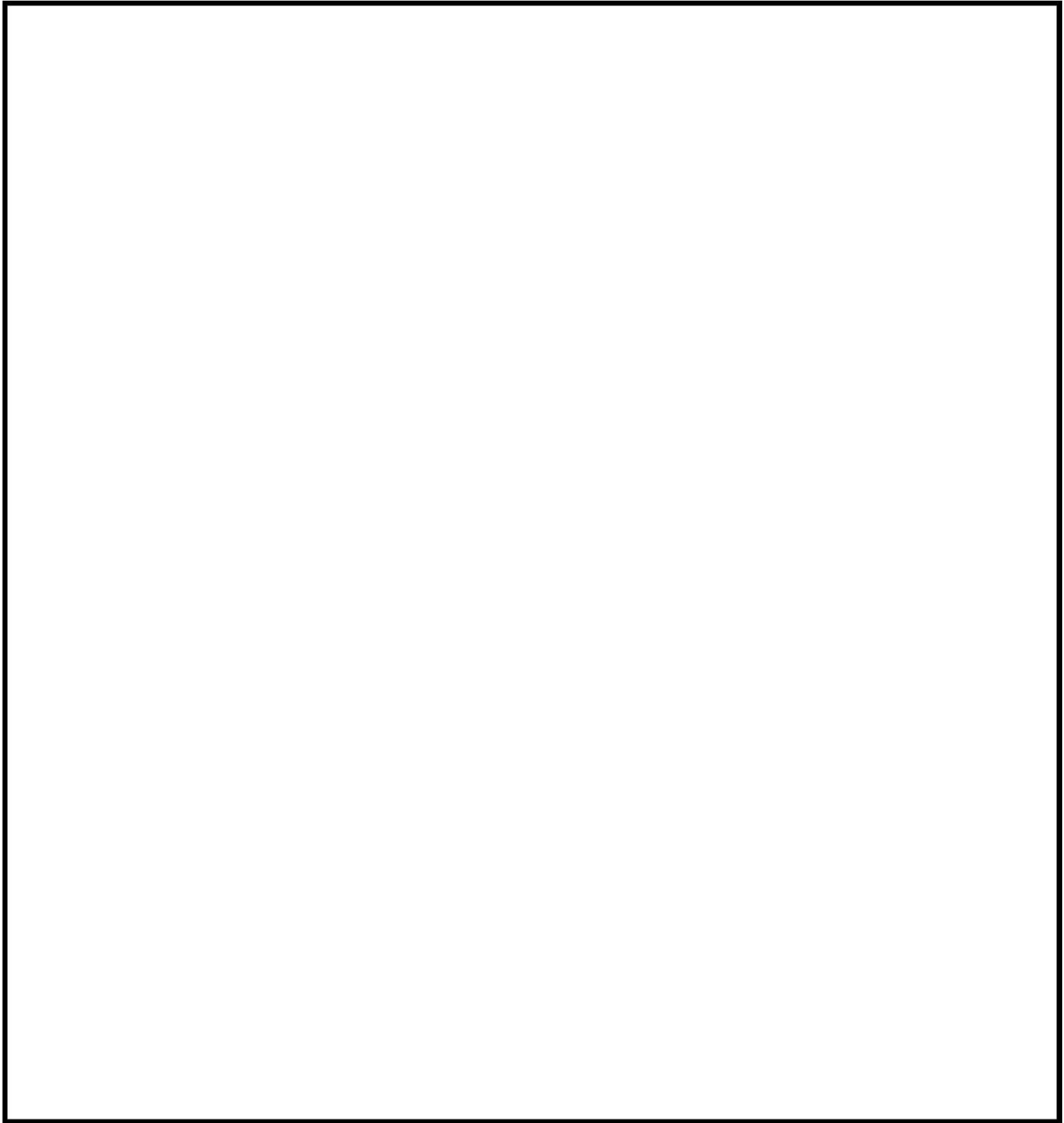
解析結果を (ロ)-第 E.4 表に示す。ベンチマーク解析の結果、本輸送物の臨界解析に用いた計算コード及び核データは妥当な結果を与えるといえる。

(㉓)-第E.4表 臨界解析結果

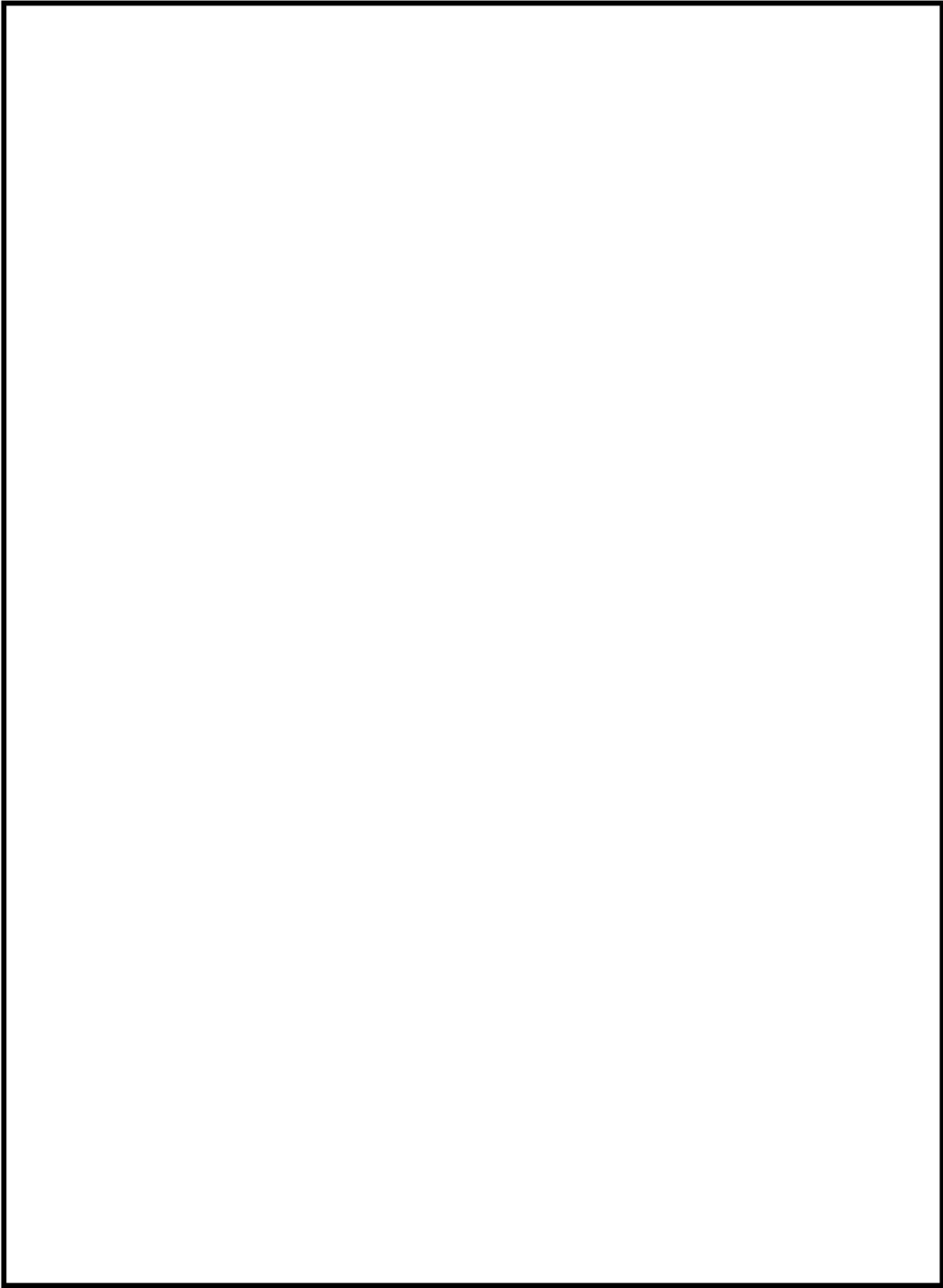
	ケース数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
臨界実験(1)		0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験(2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験(3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
臨界実験(4)		0.99514	0.00219	0.99895	0.99202
合計		0.99880	0.00332	1.01172	0.99202



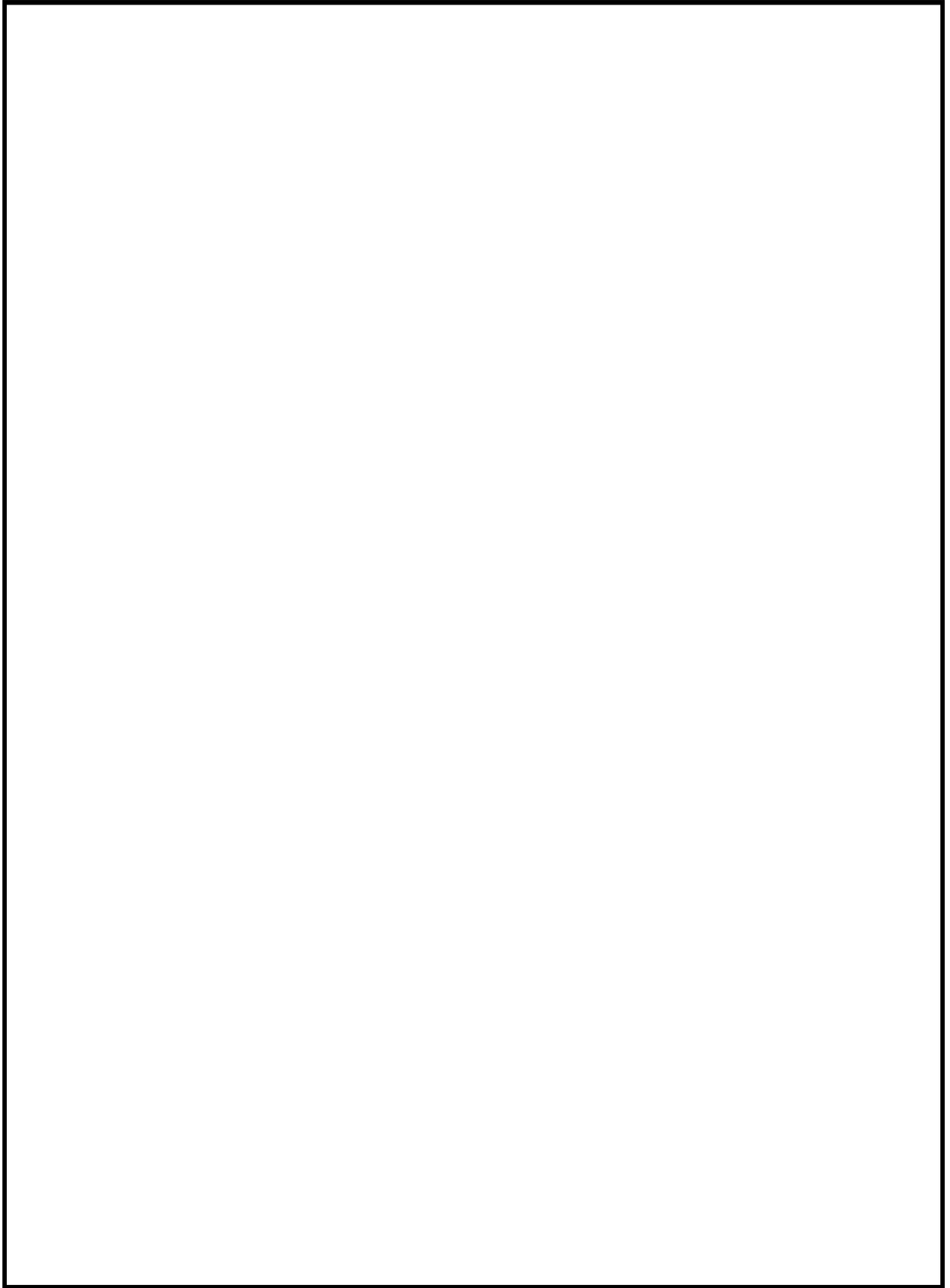
(㉓)-第E.4図(a)  臨界実験に用いた燃料棒



(㉓)-第E.4図(b)  臨界実験体系(1)

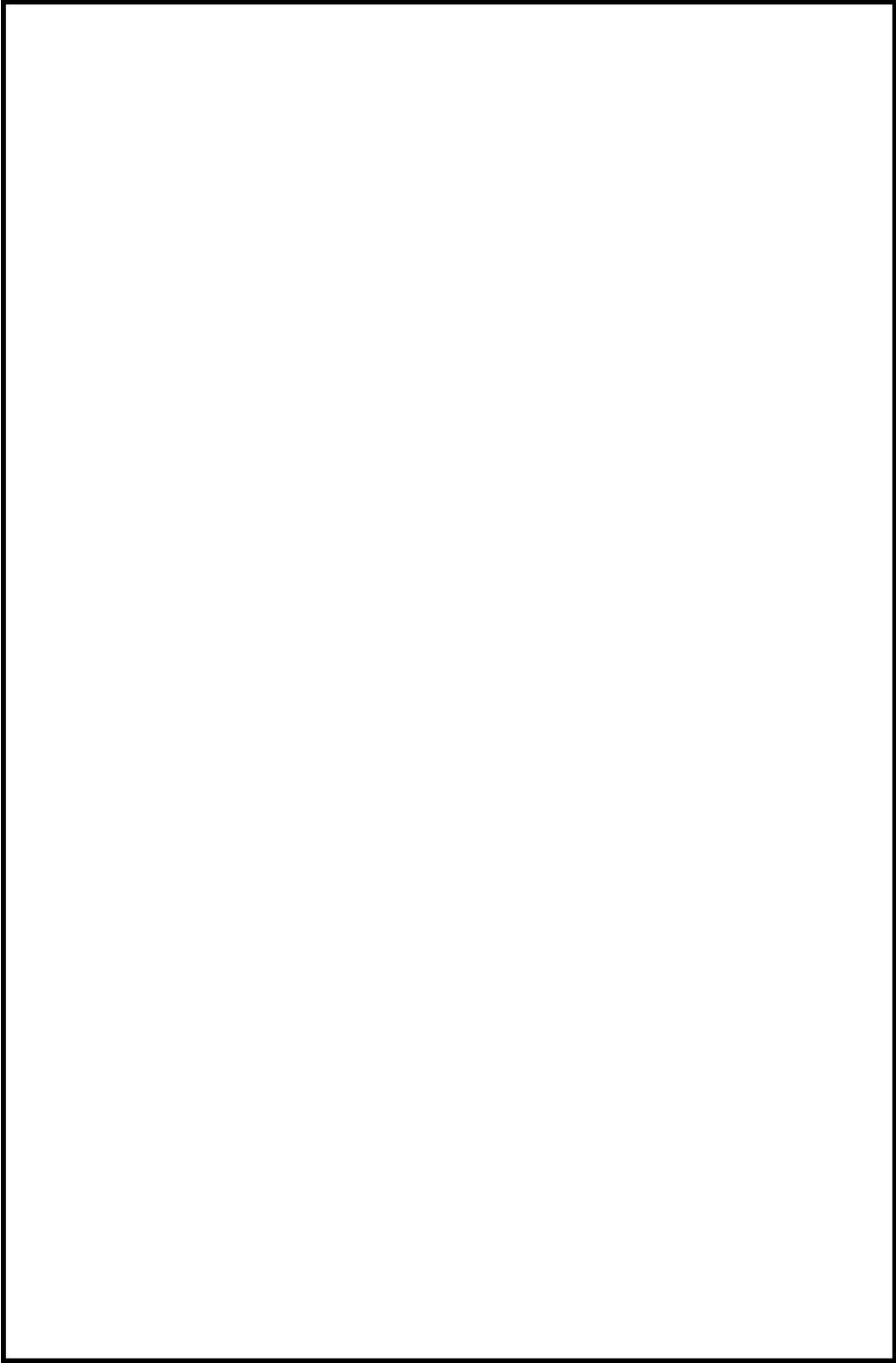


(㍀)-第E.5 図  臨界実験体系(2)

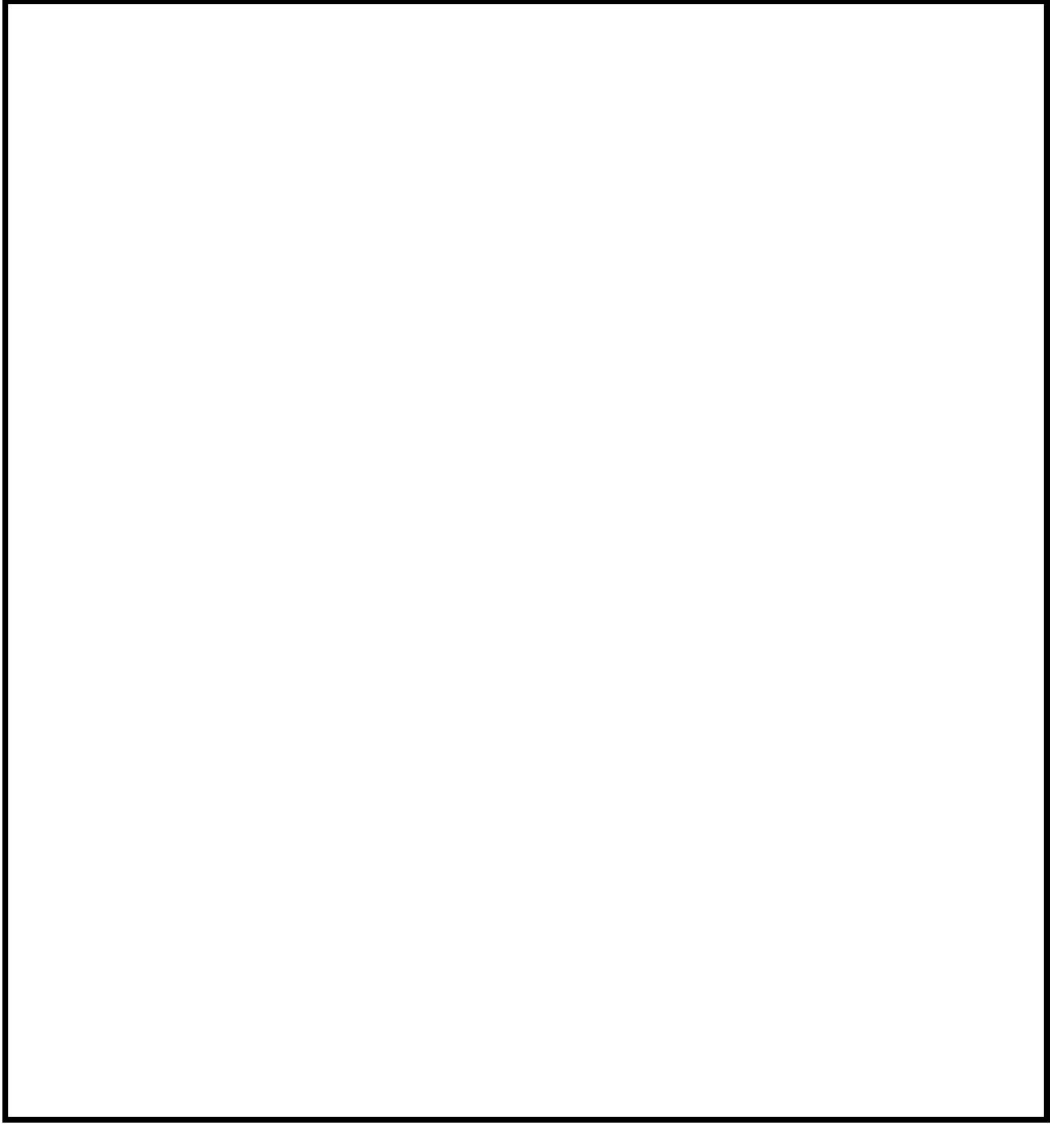


(㉓)-第E.6 図  臨界実験体系(1)

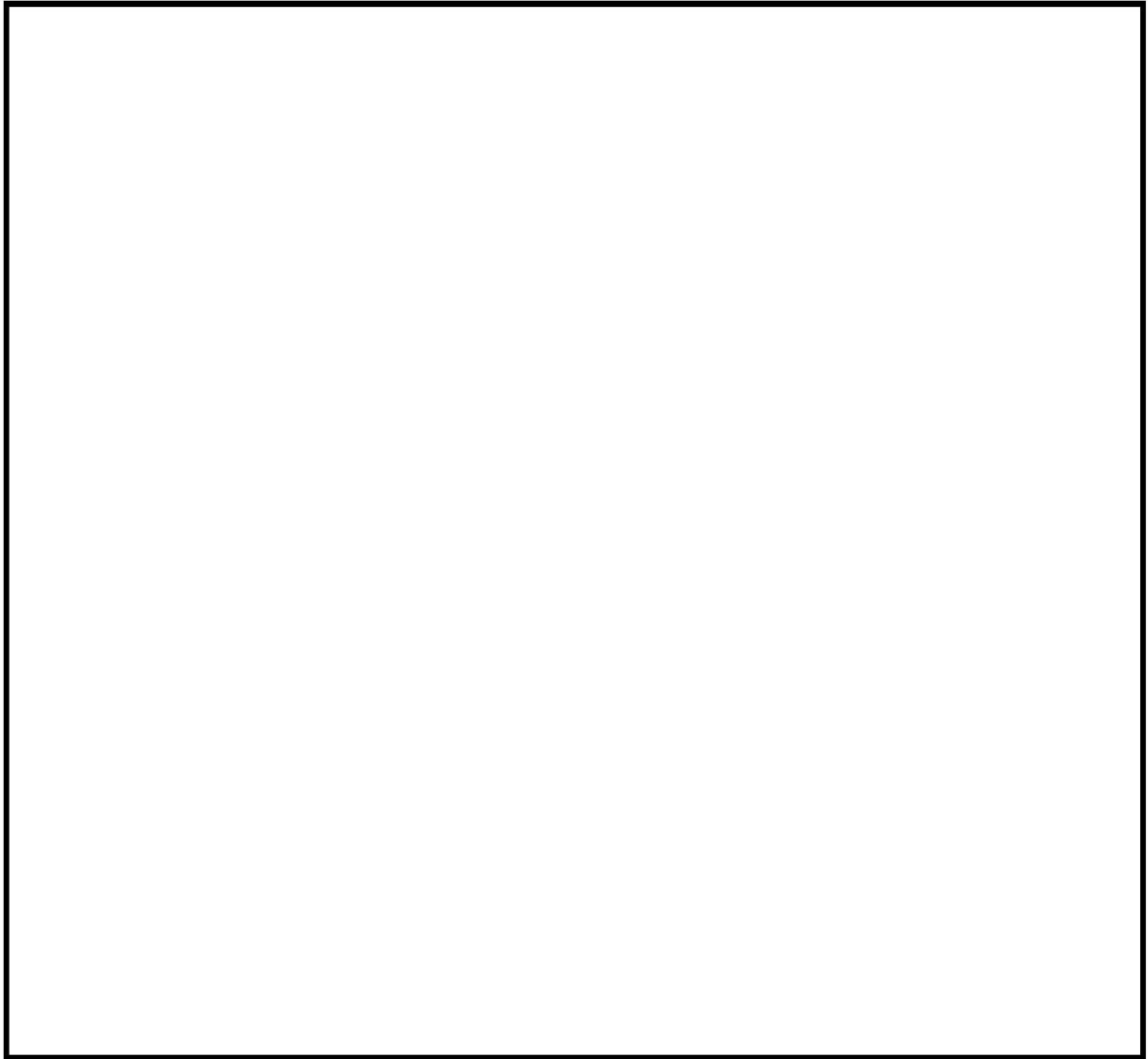




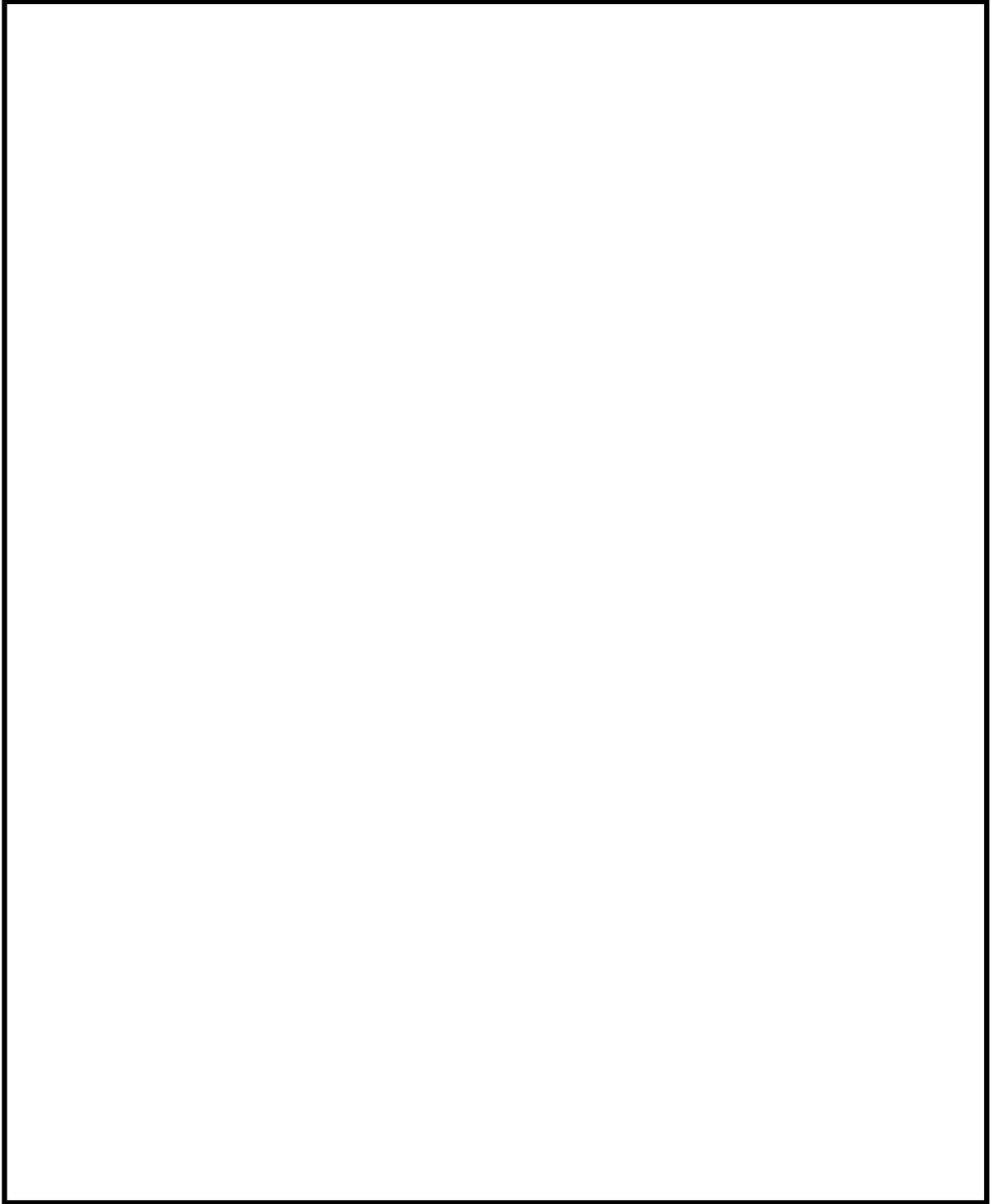
(p)-第E.7 図  臨界実験体系(2)



(a)-第E.8 図  臨界実験体系



(□)-第E.9図(a)  臨界実験体系 (水平断面)



(p)-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、保安規定に基づく品質マネジメントシステムにより品質管理が行われ、参考に示すように、製作中及び製作完了時に十分な検査が行われる。また、(ハ)章に示す保守により性能が維持される。

輸送前には、(ハ)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(ロ)-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。

(ロ)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(ロ)-第E.付2表に示す。1ヶ月間の浸水量は2000 cm<sup>3</sup>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 cm<sup>3</sup>を考慮し、この水が均一に分散していると仮定した。

(ロ)-第E.付1表 防水機能の密封性能

部位	漏えい率 (ref cm <sup>3</sup> /s)	備考
三次蓋	1×10 <sup>-3</sup>	気密漏えい試験の基準値
二次蓋	5×10 <sup>-3</sup>	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 <sup>3)</sup>

(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 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) (注3)		$7.32 \times 10^{-4}$ ( $1.90 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{月}$ )

(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

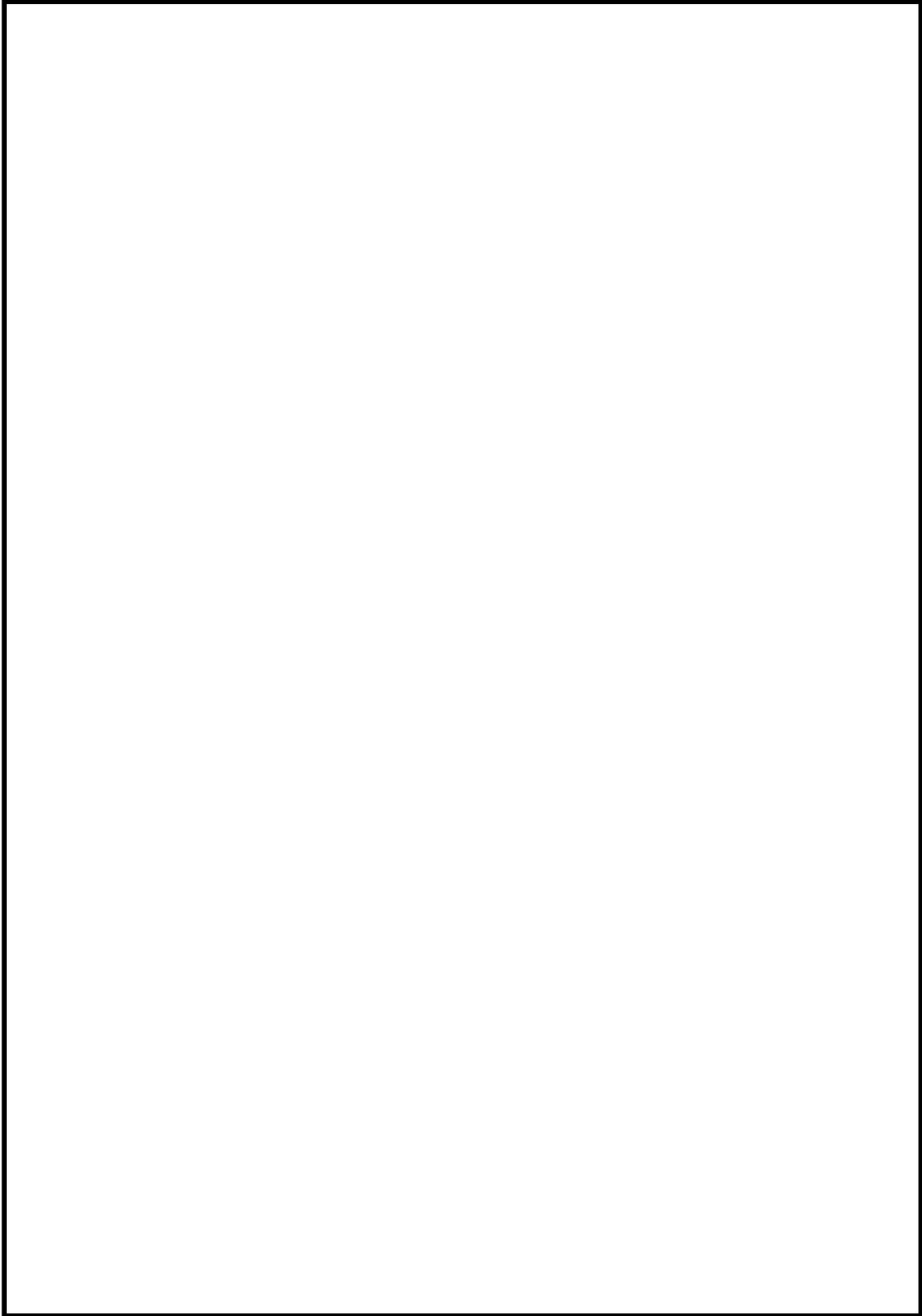
(ロ)-第 E. 付 1 図に臨界解析モデルを示す。解析モデルは安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

- ・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。

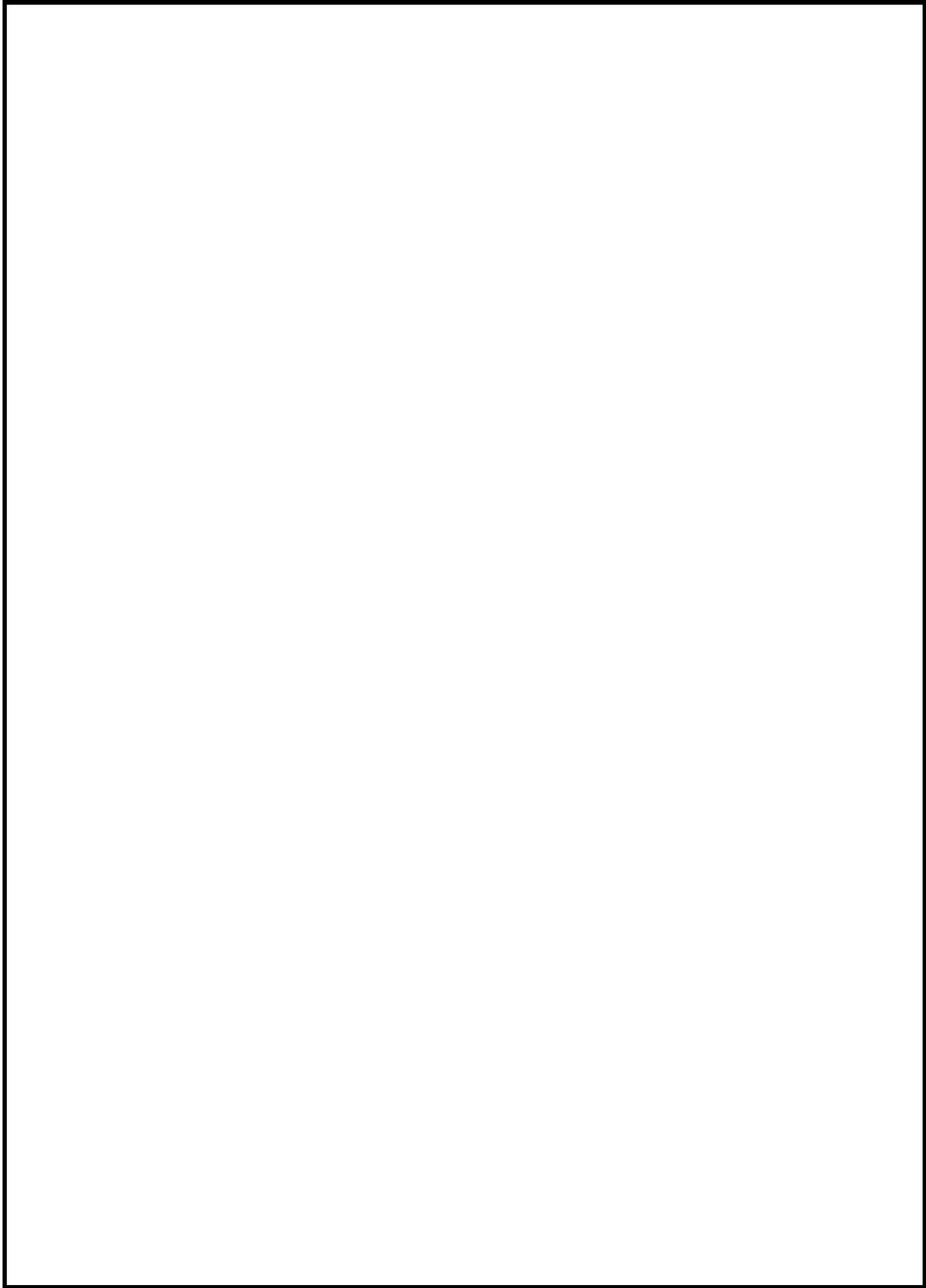
本臨界解析で用いた輸送物各領域の構成物質の原子個数密度を(ロ)-第 E. 付 3 表に示す。

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  $1.0 \text{ g/cm}^3$  とした。



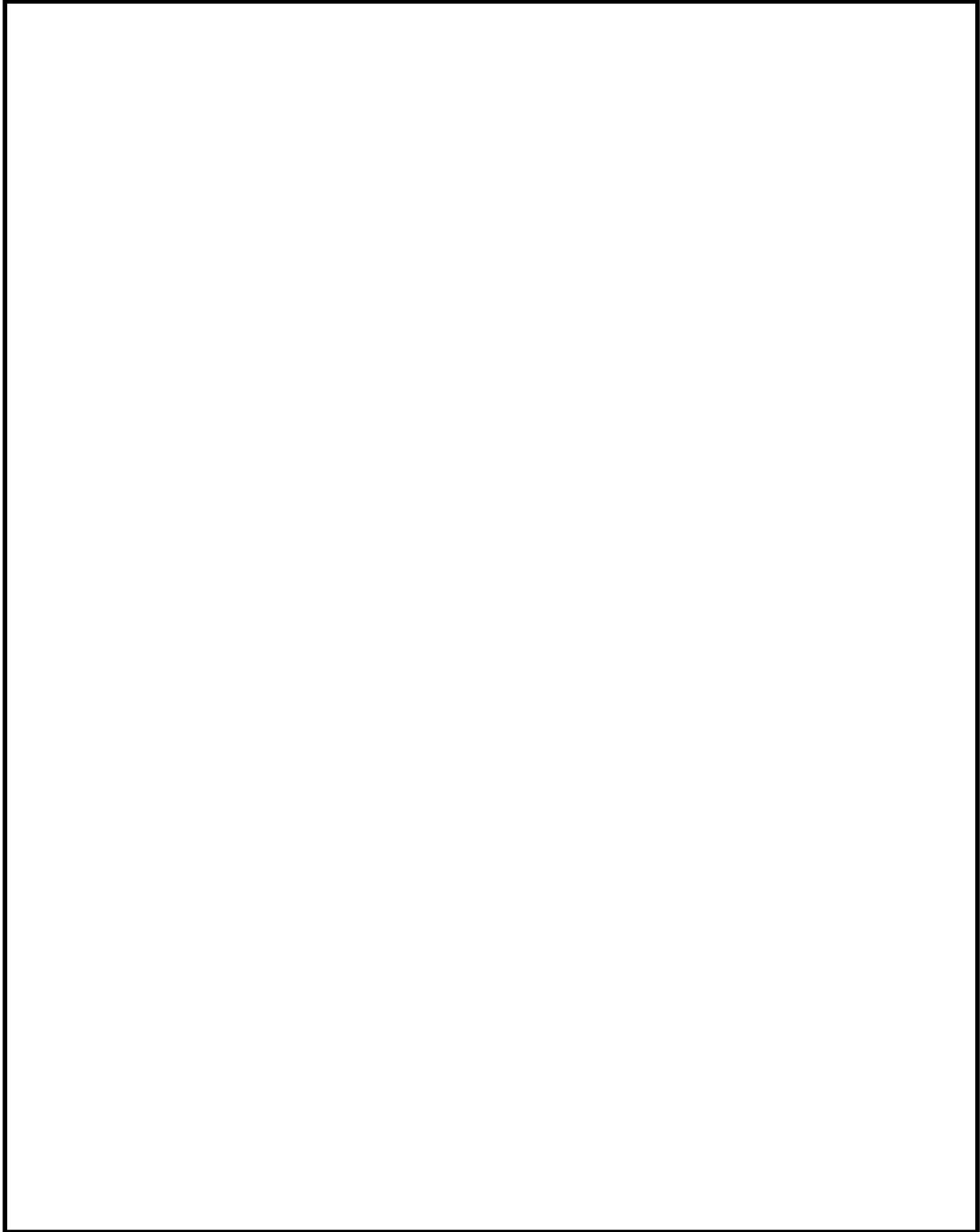


(ロ)-第 E. 付 1 図 (a) 臨界計算モデル (縦断面図) (17×17 燃料収納時)

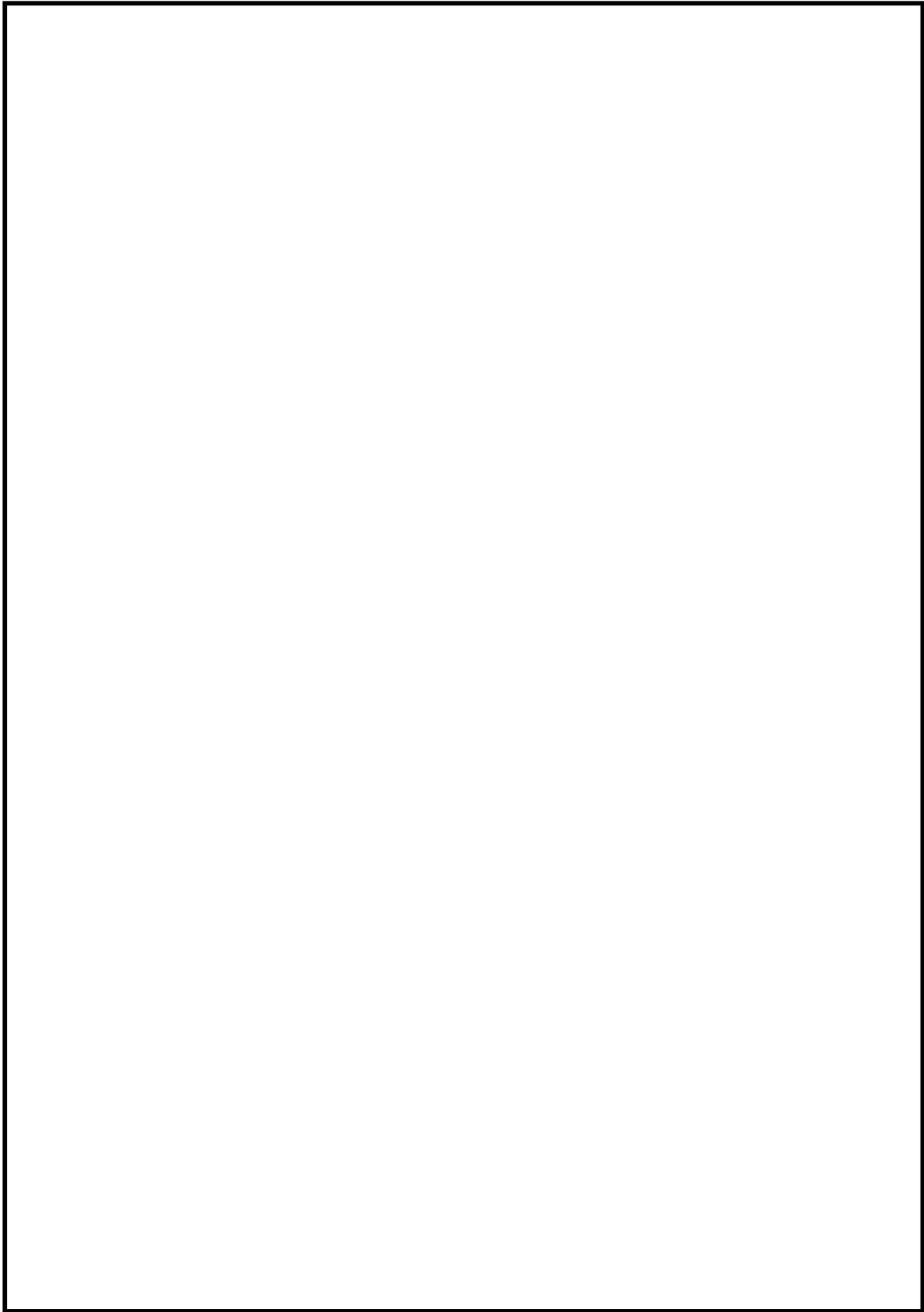


(ロ)-第 E. 付 1 図(b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図)

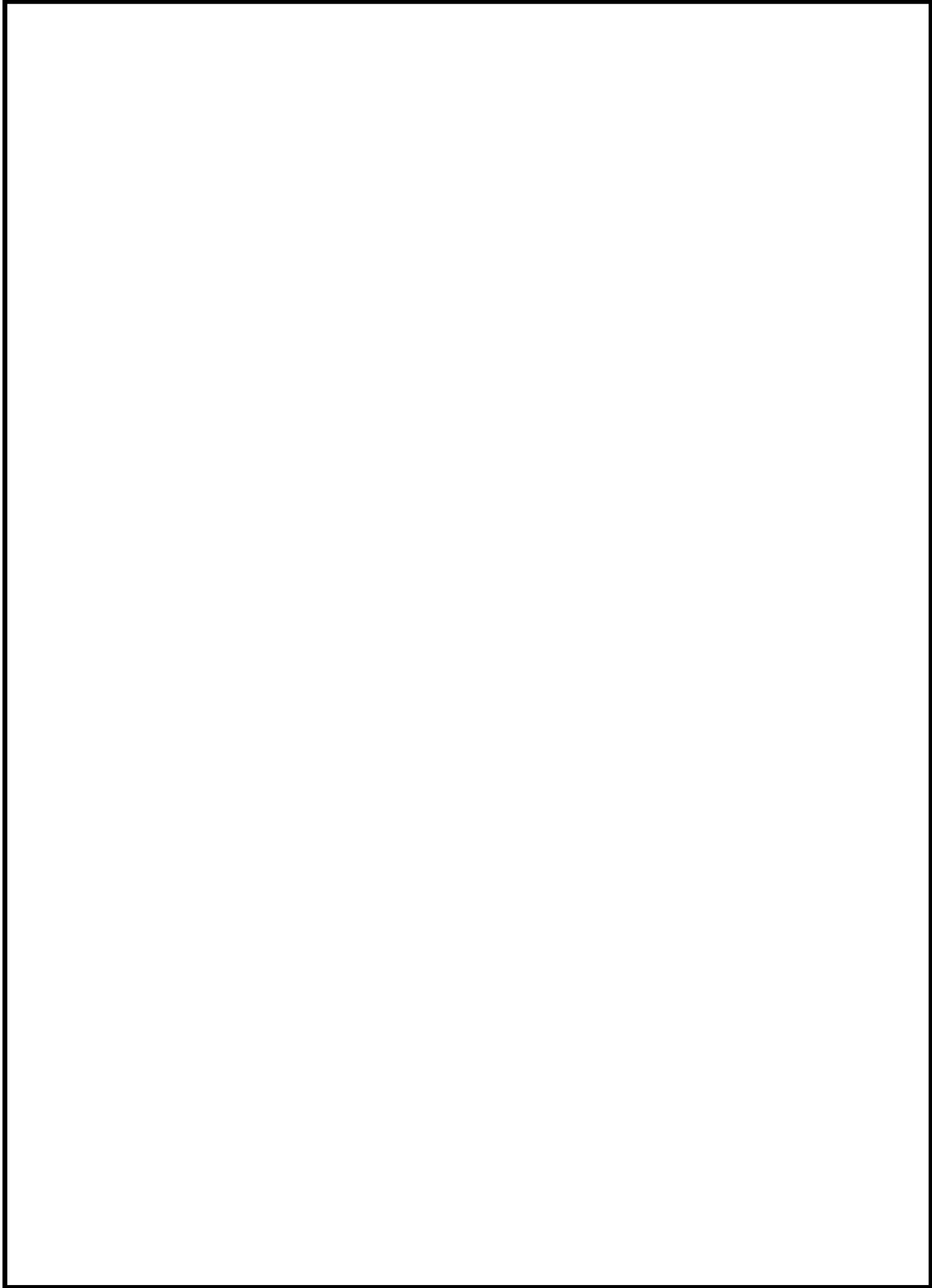
(17×17 燃料収納時)



(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)

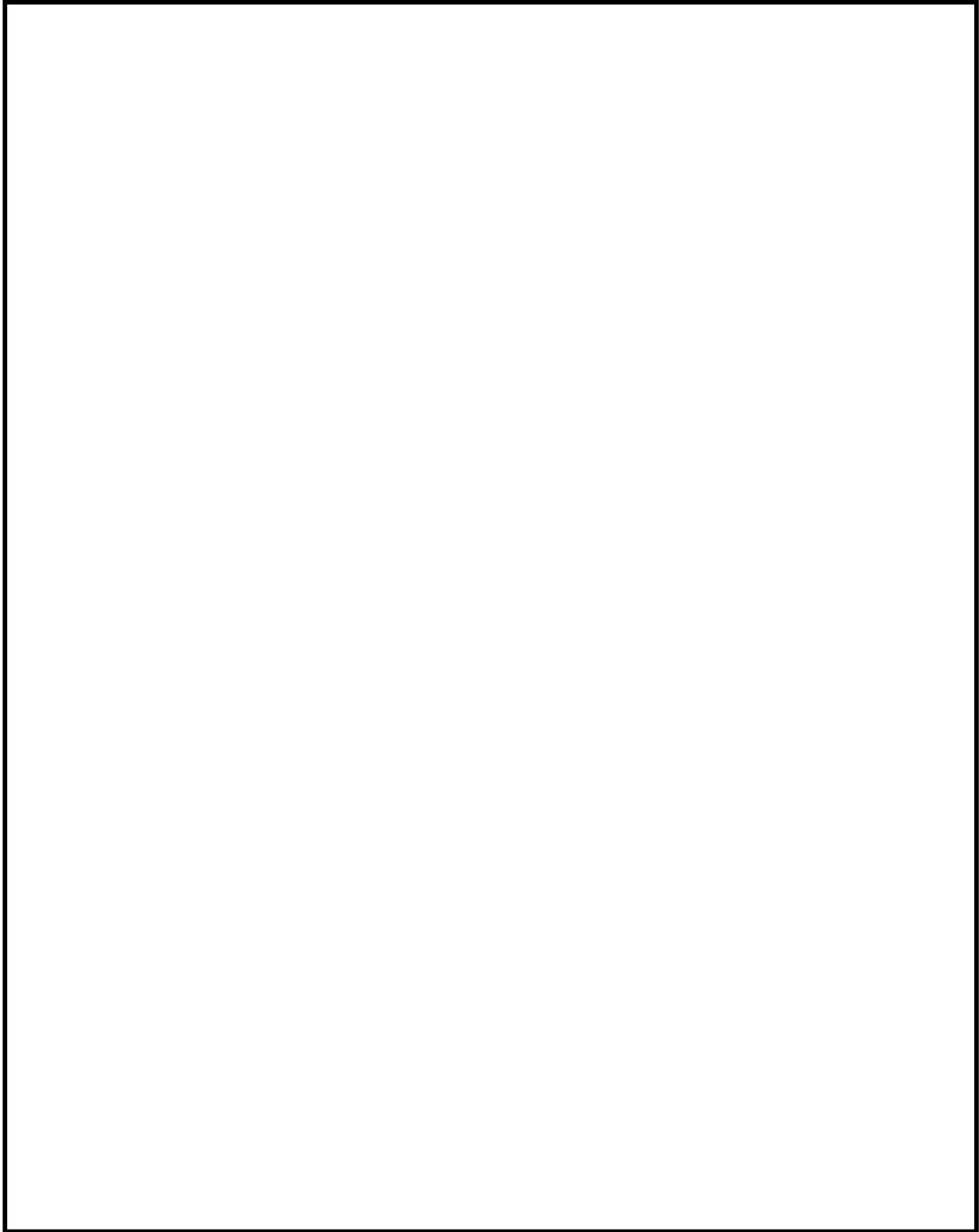


(ロ)-第 E. 付 1 図(c) 臨界計算モデル (縦断面図) (14×14 燃料収納時)



(□)-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)

(ロ)-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 <sup>3</sup> )	元素	原子個数密度 (10 <sup>24</sup> atoms/cm <sup>3</sup> )	
				17×17燃料	
				48,000MWd/t型	
				A型	
燃料領域	UO <sub>2</sub>		<sup>235</sup> U		
			<sup>238</sup> U		
			0		
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr <sup>(注1)</sup>		
			H		
			O		
ほう素添加 アルミニウム合金		<sup>10</sup> B			
		<sup>11</sup> 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 <sup>3</sup> )	元素	原子個数密度 (10 <sup>24</sup> atoms/cm <sup>3</sup> )		
				14×14燃料		
				55,000Mwd/t型		
				A型		
燃料領域	UO <sub>2</sub>	□	<sup>235</sup> U	□	□	
			<sup>238</sup> U			□
			0			
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管	□	Zr <sup>(注1)</sup>	□	□	
			水			□
	O	□				
ほう素添加 アルミニウム合金	□	<sup>10</sup> B	□	□		
		<sup>11</sup> 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  
ため、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

(□)-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 ( $\sigma$ ) の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(□)-第 E. 付 4 表 臨界計算結果 (1/2)

	$k_{eff}$	$\sigma$	$k_{eff} + 3\sigma$
17×17燃料収納時	0.89867	0.00052	0.90022

(□)-第 E. 付 4 表 臨界計算結果 (2/2)

	$k_{eff}$	$\sigma$	$k_{eff} + 3\sigma$
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).

(四)章 F 核燃料輸送物の経年変化の考慮

## F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

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、使用予定期間（60年）中の輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化について、(ロ)章の安全解析で考慮する事項について示す。

### F.1 考慮すべき経年変化要因

本核燃料輸送物において想定される使用条件（使用予定期間 60年及び使用予定回数 10回）を踏まえ、輸送容器の構成部材及び収納物に対して考慮すべき経年変化の要因を以下に示す。

#### (1) 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質量減損

#### (2) 放射線照射による劣化

中性子照射による材料組成・材料組織の変化及び強度・弾性・延性・脆性・その他物性値の変化

#### (3) 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

#### (4) 疲労による劣化

繰返し荷重の作用による疲労破壊

### F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

#### (1) 経年変化の考慮の必要性の評価条件

「F.1」において抽出した経年変化要因を踏まえ、経年変化の考慮の必要性について以下の考えで評価した。

- a. 使用予定期間中（60年）継続して使用される輸送物の各構成部材については、長期間の貯蔵に供した後、1回の事業所外運搬により再処理工場に輸送されるケースと、再利用により短期間の貯蔵と輸送を最大10回繰り返すケースを考慮して、使用予定期間中に想定される最大の温度、累積照射量、負荷の繰返し回数を用いて経年変化の影響を評価した。
- b. 輸送時のみに使用される三次蓋・緩衝体の構成部材については、以下のとおり評価した。なお、EPDM製の三次蓋Oリングは、輸送の都度交換する部材であるため、評価から除外している。

- ・ 三次蓋については、上記の使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の構成部材と同様に評価した。
  - ・ 緩衝材については、使用済燃料の輸送実績から想定される輸送容器が通常使用される条件での緩衝材の温度評価、及び過去に使用済燃料の輸送に供された輸送容器から採取した木材の試験結果を基に評価した。放射線照射による劣化、化学的劣化については、上記の使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の構成部材と同様に評価した。
- c. ドレンパイプの端部に取り付けるゴム製のシールパッキンは熱及び放射線照射によって貯蔵後の再冠水作業において硬化している可能性があるが、シールパッキンは一次蓋とドレンパイプに挟まれており、ひび割れ等の傷が生じても構造上脱落しない。また、万が一シールパッキンの脱落により閉塞が生じてもベントバルブから注水作業が行え、運用に支障が生じないことから、ドレンパイプとシールパッキンは評価から除外している。

ここで、使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の各構成部材に係る熱的劣化については、(ロ)-第 F.1 表に示すとおり貯蔵時及び輸送時（一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件）の最高温度のうち高い温度が 60 年間継続する際の影響を評価する。また、放射線照射、化学変化の評価に対しても、60 年の連続使用を考慮する。ここで、累積照射量は、保守的に放射能強度の減衰を考慮しない値を評価に使用する。

一方、疲労の評価において、上部トラニオンの使用計画回数は輸送回数（10 回）×吊上回数（20 回）の所を保守的に 2 倍の 400 回、三次蓋及び三次蓋ボルトの使用計画回数は輸送回数（80 回）×輸送時使用回数（2 回（輸送ごと））の所を保守的に 2 倍の 320 回を考慮する。

## (2) 経年変化の考慮の必要性の評価結果

経年変化を考慮する本輸送物の構成部品として、安全機能を担う構成部品とその使用材料を(ロ)-第 F.2 表に示す。

収納物の経年変化考慮の必要性を評価した結果を(ロ)-第 F.3 表に示す。また、輸送容器の構成部材のうち使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送容器の構成部材であるキャスク本体、バスケット、一次蓋及び二次蓋の経年変化考慮の必要性を評価した結果を(ロ)-第 F.4 表に、輸送時のみに使用される三次蓋及び緩衝体の経年変化考慮の必要性を評価した結果を(ロ)-第 F.5 表に示す。

(ロ)-第 F.1 表 使用予定期間中 (60 年) 継続して使用される輸送物の各構成部材における

## 貯蔵時及び輸送時の最高温度の比較

構成部材		最高温度 (°C)	
		貯蔵時	輸送時
燃料被覆管	17×17 燃料 収納時	206	196
	14×14 燃料 収納時	191	183
胴 (本体部)		132	118
胴 (フランジ部)		110	110
胴 (底板)		138	127
一次蓋		107	109
一次蓋ボルト		108	109
二次蓋		98	104
二次蓋ボルト		100	104
外筒		120	109
下部端板		122	111
蓋部中性子遮蔽材カバー		105	107
底部中性子遮蔽材カバー		120	114
トラニオン		126	114
バスケット		175	164
伝熱フィン		125	112
金属ガスケット		107	108
中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)		135	124

(ロ)-第 F.2 表 安全機能を担う構成部品とその使用材料

輸送物の構成部品	材料
燃料被覆管	ジルカロイ
胴 一次蓋 二次蓋 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー トランニオンボルト	炭素鋼
一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 三次蓋ボルト 緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼
トランニオン	析出硬化系ステンレス鋼
下部端板 底部中性子遮蔽材カバー 三次蓋	ステンレス鋼
バスケットプレート バスケットサポート バスケットスペーサ	アルミニウム合金
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金
伝熱フィン	銅
中性子遮蔽材	レジン
金属ガスケット	アルミニウム/ニッケル基合金
緩衝材	木材

(ロ)-第 F.3 表 収納物の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (1/2)

収納物 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
燃料被覆管 (ジルカロイ)	熱	<p>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<sup>1)</sup>。</p> <p>クリープひずみの進行については、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<sup>1)</sup>ことが示されており、後述する燃料被覆管中の水素化物再配向を防止する基準以内では、クリープひずみが 1 %を超えることはない。</p> <p>照射硬化の回復については、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照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は 300 °C 近傍<sup>1)</sup>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。</p> <p>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、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度及び周方向応力は、39,000MWd/t 型及び 48,000MWd/t 型燃料の場合それぞれ 275 °C 以下及び 100 MPa 以下<sup>1)</sup>、55,000MWd/t 型燃料の場合それぞれ 250 °C 以下及び 90 MPa 以下<sup>27)</sup>と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を上記基準以内に制限することによって、機械的特性の劣化を防止できる。</p> <p>上記に示すとおり、燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより、他の発生も同時に防ぐことができる。使用予定期間中の燃料被覆管の最高温度及び最高温度における周方向応力は、17×17 燃料で最も厳しい 48,000MWd/t 型の場合それぞれ 206 °C 及び 93 MPa、14×14 燃料で最も厳しい 55,000MWd/t 型の場合それぞれ 192 °C 及び 84 MPa で水素化物再配向を防止する基準以内であることから、燃料被覆管の機械的特性に影響は受けない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化を考慮する必要はない。</p>	無し



(ロ)-第 F.3 表 収納物の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (2/2)

収納物 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
燃料被覆管 (ジルカロイ)	照射	<p>使用予定期間中の累積中性子照射量が <math>1.5 \times 10^{15}</math> n/cm<sup>2</sup> であり、炉内の中性子照射量 (<math>10^{21} \sim 10^{22}</math> n/cm<sup>2</sup>) に対して十分低いことから、放射線照射による影響は無視し得る<sup>1)</sup>。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>応力腐食割れについては、燃料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ペレットから放出されたよう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<sup>1)</sup>。なお、腐食性雰囲気の整った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 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<sup>1)</sup>。</p> <p>また、残留水分が 10 wt% 以下の不活性ガス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<sup>2)</sup>ため、燃料被覆管の健全性に影響はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないか又は発生しても変動が小さいため、疲労による経年変化は発生しない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (1/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
胴 一次蓋 二次蓋 トランニオンボ ルト	熱	<p>高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、使用予定期間中の最高温度 (138℃) は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲 (融点(K)の三分の一である 300 °C以下) である。また、設計用強度・物性値が規定<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
(炭素鋼) 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト (ニッケルクロ ムモリブデン 鋼)	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>5)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は <math>6.5 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (2/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
胴 一次蓋 二次蓋 トラニオンボ ルト (炭素鋼) 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト (ニッケルクロ ムモリブデン 鋼)	化学	<p>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。一方で、炭素鋼は、淡水に完全に浸漬した条件においても腐食速度は十分に小さいことが示されている<sup>6)</sup>。したがって、残留水分(10 wt%)を考慮しても腐食の影響はない。また、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、腐食の影響はない<sup>7)</sup>。</p> <p>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)に接する部材には中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。なお、大気に触れる部分については、塗装等の防錆措置により腐食を防止する。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないか又は発生しても変動が小さいため、疲労による経年変化は発生しない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (3/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
バスケットプレート バスケットサポート バスケットスペーサ (アルミニウム合金) 中性子吸収材 (ほう素添加アルミニウム合金)	熱	アルミニウム合金は、高温環境下では組織変化による強度低下 (過時効の効果含む) が考えられる。加えて、高温環境下で応力が長期作用する場合はクリープによる変形が考えられる。このため、上記影響を考慮することとし、貯蔵開始時の温度 (175 °C) が 60 年間継続する際の材料特性を反映した設計用強度・物性値 <sup>8)</sup> を基に、構造解析を実施する。なお、貯蔵時にバスケットプレートに発生する応力は 1 MPa 未満と小さく、使用予定期間中のバスケットプレートのクリープ変形量は無視し得る。	有り
	照射	アルミニウム合金は、中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない <sup>8)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は $1.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。また、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使用予定期間中の減損割合は $10^{-5}$ 程度であり、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。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	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、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない <sup>2)、7)</sup> 。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないため、疲労による経年変化は発生しない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (4/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
トラニオン (析出硬化系ス テンレス鋼)	熱	<p>高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、使用予定期間中の最高温度 (126 °C) は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲 (融点 (K) の三分の一である 280 °C 以下) である。また、設計用強度・物性値が規定<sup>3)、4)</sup>されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{17}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>9)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は <math>6.5 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>トラニオンの内面は中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。ここで、淡水中におけるステンレス鋼は不動態膜を形成するため、全面腐食の程度が不動態膜のない炭素鋼と比較して小さく、また、塩化物を含む環境であれば局部腐食が問題となるが<sup>10)</sup>、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素及び塩化物が連続的に供給されないため腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>取扱時に荷重が負荷され繰り返し応力が発生するため、経年変化についての考慮が必要となる。</p> <p>上部トラニオンに発生する繰り返し応力を、F.2 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う ((ロ)章 A「構造解析」の A.4.4.2 参照)。</p>	有り

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (5/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
外筒及び蓋部 中性子遮蔽材 カバー (炭素鋼)	熱	<p>高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、使用予定期間中の最高温度 (120 °C) は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲 (融点 (K) の三分之一である 300 °C 以下) である。また、設計用強度・物性値が規定<sup>3)、4)</sup>されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>5)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は外筒では <math>3.5 \times 10^{12}</math> n/cm<sup>2</sup>、また、蓋部中性子遮蔽材カバーでは <math>6.5 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>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) に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。一方、炭素鋼の腐食速度は、水中に溶存した酸素濃度に比例して増大するが<sup>10)</sup>、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。また、蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面は不活性雰囲気維持されるため、腐食の影響はない。</p> <p>なお、外筒の外表面については、塗装等の防錆措置により腐食を防止する。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>内外圧差や取扱いに起因する応力は発生しても変動が小さいため、疲労による経年変化は発生しない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (6/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
下部端板 底部中性子遮 蔽材カバー (ステンレス 鋼)	熱	<p>高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、使用予定期間中の最高温度 (122 °C) は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲 (融点 (K) の三分の一である 280 °C 以下) である。また、設計用強度・物性値が規定<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{17}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>9)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は <math>1.5 \times 10^{13}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>内面は中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。ここで、淡水中におけるステンレス鋼は不動態膜を形成するため、全面腐食の程度が不動態膜のない炭素鋼と比較して小さく、また、塩化物を含む環境であれば局部腐食が問題となるが<sup>10)</sup>、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>内外圧差や取扱いに起因する応力は発生しても変動が小さいため、疲労による経年変化は発生しない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (7/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
中性子遮蔽材 (レジン)	熱	高温環境下では含有する水分が放出されることによる質量減損が生じることが考えられる。このため、上記影響を考慮することとし、貯蔵開始時の温度 (135 °C) が 60 年間継続する際の質量減損量を基に遮蔽解析を実施する。	有り
	照射	中性子照射量が $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な質量減損は見られないことが示されており <sup>11)、12)</sup> 、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は $1.5 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	熱的影響に併せて記載	有り
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないため、疲労による経年変化は発生しない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し



(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (8/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
金属ガスケット (アルミニウム /ニッケル基 合金)	熱	高温環境下ではニッケル基合金製のコイルスプリング並びにニッケル基合金及びアルミニウム製の被覆材のリラクゼーションに伴う、落下時の密封性能の低下が考えられる。このため、上記影響を考慮することとし、貯蔵開始時の温度 (107 °C) が 60 年間継続する際の密封性能の低下を考慮しても保証できる漏えい率 <sup>13)</sup> 、 <sup>14)</sup> を用いて、15 m 浸漬における 1 か月間の浸水量を基に臨界解析を実施する。	有り
	照射	アルミニウム/ニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ $10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> オーダー又は $10^{21}$ n/cm <sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない <sup>15)</sup> 、 <sup>16)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は $2.0 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	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及び二次蓋の金属ガスケットの内側は不活性雰囲気であり、腐食を考慮する必要はない。大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、約 3 年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが示されている <sup>17)</sup> 。また、10 年間海浜条件で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さが示されており、使用予定期間中の浸食深さ及び孔食深さを評価した結果、それぞれ約 0.025 mm 及び約 0.33 mm であり <sup>6)</sup> 、外被材の製造公差 <sup>(注)</sup> を含めても、板厚 0.5 mm より小さいため、閉じ込め機能に影響はない。 (注) 製造公差の例 (ノミナル寸法 : 0.5 mm、製造公差 : <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span> ) 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないため、疲労による経年変化は発生しない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第 F.4 表 使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 (9/9)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
伝熱フィン (銅)	熱	<p>高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、使用予定期間中の最高温度 (125 °C) は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲 (融点(K)の三分の一である 170 °C以下) である。また、設計用強度・物性値が規定<sup>18)</sup>されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>19)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は <math>1.5 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である<sup>10)</sup>ことから、銅は腐食することではなく、炭素鋼が選択的に腐食される。また、中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること、及び中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないことから、腐食の影響はない。</p> <p>伝熱フィン並びに胴及び外筒の接合部において、異種金属接触により胴及び外筒の腐食が促進される可能性があるが、閉鎖環境かつ淡水環境では、銅が接続された鋼の腐食速度が鋼単独の場合と同程度になる<sup>20)</sup>ことが示されている。また、中性子遮蔽材の熱的劣化により生じる水分量は限定的であることに加え、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>内外圧差や取扱いに起因する応力は発生しても変動が小さいため、疲労による経年変化は発生しない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ)-第 F.5 表 輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(1/4)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
三次蓋 (ステンレス 鋼)	熱	<p>高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、運搬中の最高温度(103 °C)は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(融点(K)の三分の一である 280 °C以下)である。また、設計用強度・物性値が規定<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{17}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>9)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は <math>1 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> を下回ることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>耐食性に優れたステンレス鋼を使用するため、実用上問題となる腐食は生じない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	疲労	<p>内外圧力差により繰り返し応力が発生するため、経年変化についての考慮が必要となる。</p> <p>内圧変化による荷重が負荷される三次蓋に発生する繰り返し応力を、F.2 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う ((ロ)章 A「構造解析」の A.5.1.4 参照)。</p>	有り

(ロ)-第 F.5 表 輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(2/4)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
三次蓋ボルト 緩衝体ボルト (ニッケルクロ ムモリブデン 鋼)	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが、運搬中の最高温度(102 °C)は、上記の中で最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲(融点(K)の三分の一である 300 °C以下)である。また、設計用強度・物性値が規定 <sup>3)</sup> 、 <sup>4)</sup> されている温度範囲において構造健全性を確認しているため、熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない <sup>5)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は $1 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> を下回ることから照射脆化の影響はない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	メッキ処理等の防錆措置を実施するため、実用上問題となる腐食は生じない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧力差により繰り返し応力が発生するため、経年変化についての考慮が必要となる。 内圧変化による荷重が負荷される三次蓋ボルトに発生する繰り返し応力を、F.2 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う ((ロ)章 A「構造解析」の A.5.1.4 参照)。	有り

(ロ)-第 F.5 表 輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(3/4)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
緩衝材 (木材)	熱	<p>高温環境下では熱による強度低下が考えられ、木材温度が 200 °C に達すると木材の熱分解が進む<sup>21)</sup>との文献が確認できたものの、直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で、緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ、本輸送容器を含め現在国内事業者が使用又は使用予定の輸送容器について、これまでの実輸送時の条件をもとに収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果、約 40～70 °C 程度であること、使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果、木材の衝撃吸収性能は健全であり、性能劣化はなかったことから、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じないと考えられる<sup>(注)</sup>。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。</p> <p>なお、輸送に際しては、都度、輸送容器の使用履歴を蓄積し、輸送前に、輸送容器の使用履歴、収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ、木材温度が、概ね実績のある温度の範囲内であることを確認した後に輸送を行う。</p>	無し
	照射	<p>中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>22)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、使用予定期間中の累積中性子照射量は <math>1 \times 10^{13}</math> n/cm<sup>2</sup> を下回ることから照射脆化の影響はない。</p> <p>よって、技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(注) 参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会合（令和 4 年 4 月 25 日） 資料 1 別紙「緩衝材（木材）の熱的劣化について」

(ロ)-第 F. 5 表 輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価(4/4)

構成部材 (材料)	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化 の考慮の 必要性
緩衝材 (木材)	化学	緩衝材の充填空間はステンレス鋼製のカバープレートに覆われた閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽しない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないため、疲労による経年変化は発生しない。 よって、技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

### F.3 安全解析における経年変化の考慮内容

(ロ)-第 F.3 表から(ロ)-第 F.5 表に示す経年劣化の考慮の必要性の評価結果に基づき、(ロ)章では、バスケット（アルミニウム合金）、中性子遮蔽材（レジン）、金属ガスケット、上部トラニオン、三次蓋及び三次蓋ボルトの経年変化を考慮する。

取扱時に荷重が負荷される上部トラニオンの疲労評価については(ロ)章 A「構造解析」の A.4.4.2 において、内圧変化による荷重が負荷される三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労評価については A.5.1.4 において実施している。

また、バスケット、中性子遮蔽材及び金属ガスケットについては、以下の通り経年変化を考慮した上で、安全解析を実施している。

#### (1) バスケット

バスケットに使用されるアルミニウム合金については、構造解析において、(ロ)章 A「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」に示す、高温での 60 年間の熱ばく露後の材料特性を反映した設計用強度・物性値を使用する。

#### (2) 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<sup>12)、23)~25)</sup>、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質量に設定する。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質量とする。したがって、空間部分の水を除くガスの物質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気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 ( ) 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 (m<sup>3</sup>)

$V_{R0}$  : 初期の中性子遮蔽材の体積 (m<sup>3</sup>)

$V_V$  : 温度  $t$  の空気の体積 (m<sup>3</sup>)

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

$\alpha$  : 温度  $t$  の中性子遮蔽材の熱膨張係数 (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(Ⅱ)-第 F.6 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。



(ロ)-第 F.6 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 <sup>3</sup> )	初期の中性子遮蔽材の体積 : V <sub>R0</sub> (m <sup>3</sup> )	中性子遮蔽材温度 : t (°C) (注 1)	温度 t の空気の体積 : V <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> )	温度 t の空気の分圧 : P <sub>G</sub> (MPa)	温度 t の飽和水蒸気圧 : P <sub>w</sub> (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 °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  を考慮する。

b. 遮蔽解析における質量減損

使用予定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。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2 \quad (11)$$

ここで、

$\Delta w$  : 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、使用予定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使用予定期間にわたり一定として質量減損率を算定する。使用予定期間初期の中性子遮蔽材の最高温度を(ロ)-第F.7表に示す。

上記を基にすれば、使用予定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<sup>12)、23)~25)</sup>。したがって、遮蔽解析においては、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。

(ロ)-第F.7表 使用予定期間初期の中性子遮蔽材の最高温度<sup>(注1)</sup>

蓋部 (°C)	側部 (°C)	底部 (°C)
107 <sup>(注2)</sup>	129 <sup>(注2)</sup>	135 <sup>(注2)</sup>

(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。

### (3) 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。

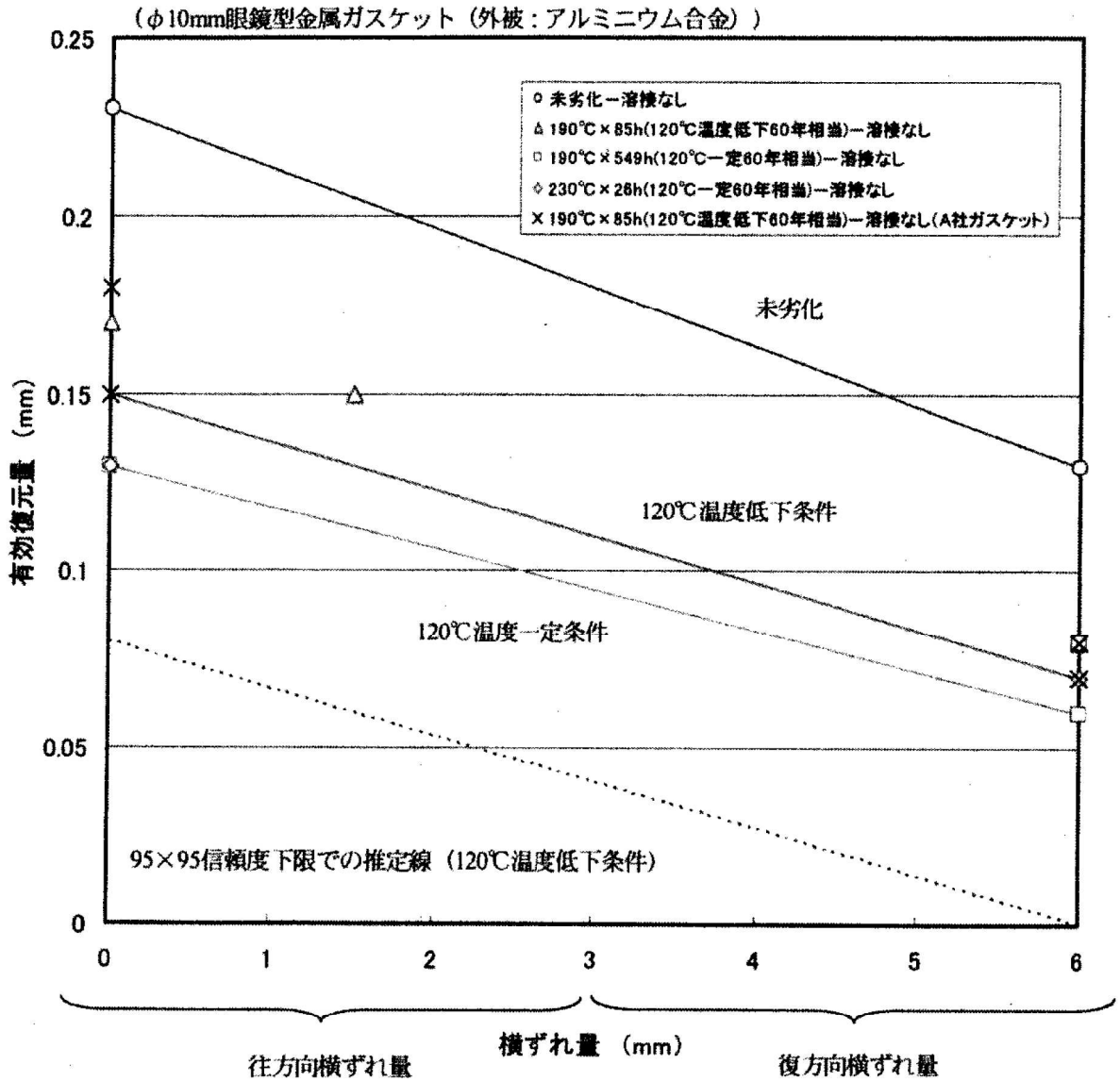
金属ガスケットについては、貯蔵後の輸送時密封性能に関する要素試験として、静的口開き試験、静的横ずれ試験、動的口開き試験、動的横ずれ試験が実施されている。当試験では静的口開きと横ずれが同時に発生した場合に、(ロ)-第 F.1 図に示す輸送時の基準漏えい率を確保するための横ずれ量と有効復元量（許容口開き量）の相関関係が得られている<sup>7)</sup>。また、落下試験を想定した動的横ずれと漏えい率の関係についてまとめられ、(ロ)-第 F.2 図に示す統計誤差を考慮した安全側の評価線が示されている<sup>26)</sup>。

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（使用予定期間（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（ $5 \times 10^{-3}$  ref cm<sup>3</sup>/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  $5 \times 10^{-3}$  ref cm<sup>3</sup>/s と設定し、ロ章 E 臨界解析 E.7 にて胴内の浸水量を評価した。

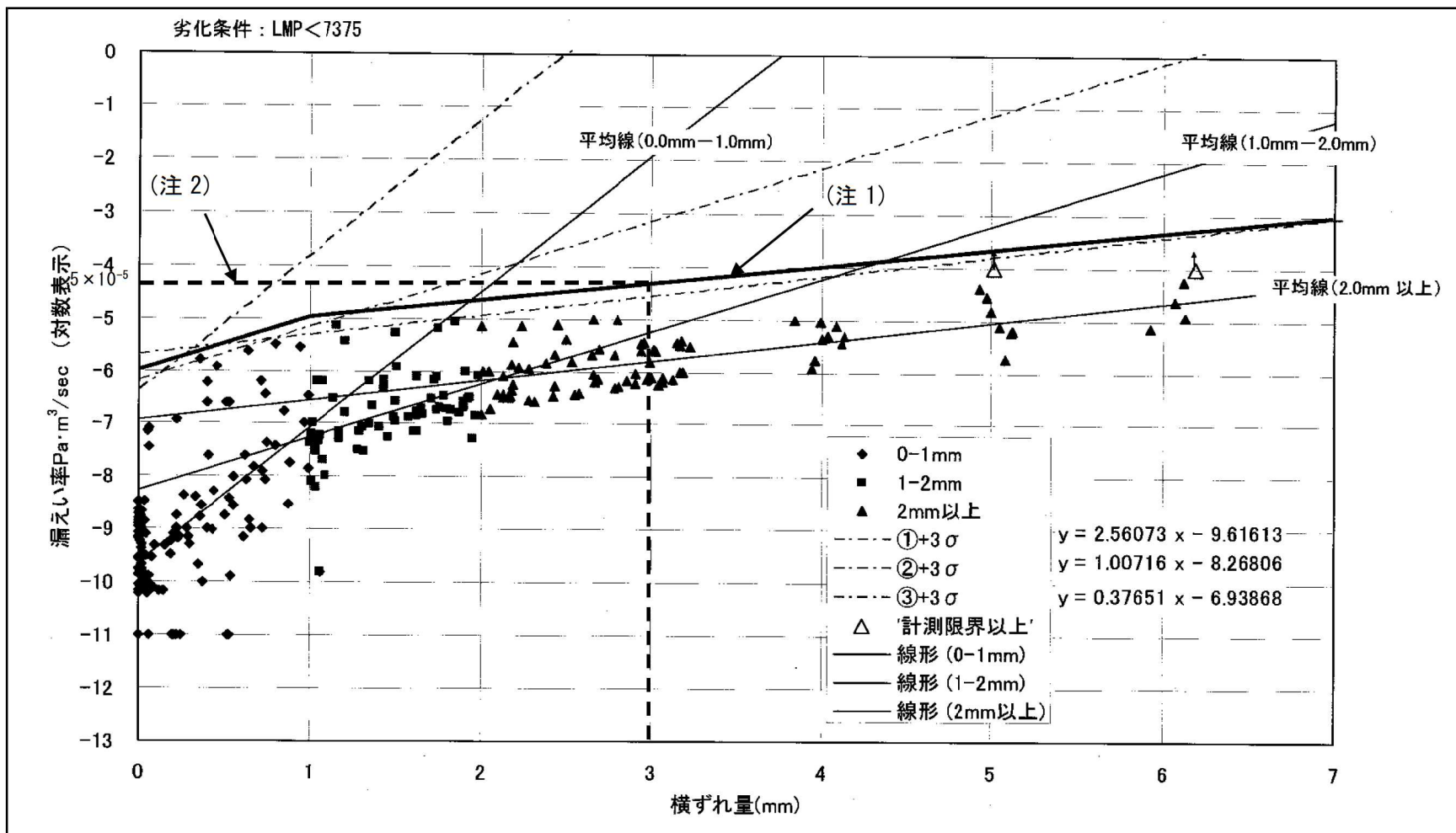


注1: 図中のラインは、横ずれ後の口開き試験を行ったデータにつき、劣化条件ごとでの下限線を示す。

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。

(ロ)-第F.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<sup>7)</sup>

(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

## F.4 付属書類

### F.4.1 参考文献

- 1) 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).
- 2) (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).
- 3) (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).
- 4) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 5) 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).
- 6) (一社)日本アルミニウム協会, 「アルミニウムハンドブック第7版」, (2007).
- 7) (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).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) (公社)腐食防食協会編, 「腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版」, 丸善(株), (2005).
- 11) (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).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) (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).

- 15) H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).
- 16) T. T. Claudson, “Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).
- 17) 小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株)日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).
- 18) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).
- 19) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).
- 20) 能登谷武紀, 「密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食」, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).
- 21) 岡野健, 祖父江信夫, 「木材科学ハンドブック」, 朝倉書店, (2006).
- 22) 三菱重工業(株), 「発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の型式証明申請書(特定兼用キャスク)本文及び添付書類の一部補正について」, (2021).
- 23) 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).
- 24) (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).
- 25) (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).
- 26) (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).
- 27) (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).

(四) 章 G 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価



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	<p>該当しない。</p> <p>該当しない。</p> <p>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。</p> <table border="1" data-bbox="651 1048 1286 1937"> <tr> <td colspan="2" rowspan="3"></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>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/MTU以下)</td> <td colspan="4" rowspan="2" style="border: 2px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>収納物平均 (MWD/MTU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> <p>(注)17×17燃料を代表として記載する。</p>			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/MTU以下)					収納物平均 (MWD/MTU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/MTU以下)																																																																			
	収納物平均 (MWD/MTU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
第3条 第2項  第3項		<p>該当しない。</p> <p>輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化を以下のとおり考慮した上で、第6条の技術上の基準に適合していることを確認している。</p> <p>a. 本輸送物に想定される使用状況及びそれに伴い考慮すべき経年変化の要因は以下のとおり。</p> <p>(1) 使用状況            構内輸送、貯蔵（保管）、再処理工場への輸送の用途で、使用予定年数を60年、使用予定回数を10回と想定する。</p> <p>(2) 経年変化の要因            熱的劣化、放射線照射による劣化、化学的劣化及び疲労による劣化とする。</p> <p>b. 「a.」を踏まえ、経年変化の考慮の必要性及び考慮の方法について、以下のとおり評価した。</p> <p>(1) 熱的劣化については、貯蔵又は輸送時における除熱解析結果（最高温度評価結果）を基に評価した結果、安全解析において以下の構成部材の熱的劣化を考慮することとした。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バスケット（アルミニウム合金）については、高温環境下では組織変化による強度低下（過時効の効果含む）が考えられるため、貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の材料特性を反映した設計用強度・物性値を基に強度評価を行う。</li> <li>・中性子遮蔽材（レジン）については、高温環境下では含有する水分が放出されることによる質量減損が考えられるため、貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の質量減損量を評価した結果、約1.9%となったことから、遮蔽解析では、保守的に2.5%の質量減損を考慮する。</li> </ul>	(ロ)-F

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第3条 第3項		<p>・金属ガスケット（アルミニウム／ニッケル基合金）については、高温環境下ではリラクゼーションによる落下時の密封性能低下が考えられるため、貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の密封性能の低下を考慮しても保証できる漏えい率を用いて15m浸漬における1か月間の浸水量を評価した結果、約2リットルとなったことから、臨界解析では、保守的に5リットルの浸水を考慮する。</p> <p>また、緩衝材として用いる木材については、実輸送時における緩衝材の温度及び使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の試験結果より、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じないと考えられる。</p> <p>その他の部材については、最高温度がクリープによる変形を考慮する必要のない温度以下である等の理由により安全解析において考慮すべき経年変化は生じない。</p> <p>(2) 放射線照射による劣化については、中性子照射による強度、弾性、脆化等の機械的性質への影響が考えられるが、使用予定期間中の累積照射量が機械的特性変化を考慮する必要のない照射量に比べて小さい等の理由により安全解析において考慮すべき経年変化は生じない。</p> <p>(3) 化学的劣化に関しては、腐食による強度の低下が考えられるが、不活性ガス雰囲気下にある、又は酸素が連続的に供給されない閉鎖環境下にある等の理由により安全解析において考慮すべき経年変化は生じない。</p> <p>(4) 疲労による劣化に関しては、上部トラニオン、三次蓋及び三次蓋ボルトに繰返し荷重が作用することによる疲労破壊が考えられるため、構造解析において影響を評価する。</p>	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>(BM 型輸送物に係る技術上の基準) 第 6 条第 1 号</p> <p>(第 5 条第 1 号)</p> <p>(第 4 条第 1 号)</p>		<p>c. 以上より、安全解析においては、上記で抽出されたバスケット（アルミニウム合金）、中性子遮蔽材（レジン）及び金属ガスケットの熱的劣化による影響並びに上部トラニオン、三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労を考慮した評価を実施し、第 6 条の技術上の基準に適合していることを確認した。</p> <p>後述のとおり第 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。</p> <p>後述のとおり第 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られており、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>(ロ)-B. 4. 6</p> <p>(ロ)-A. 5. 1. 2</p> <p>(ロ)-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>