

(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		—

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。

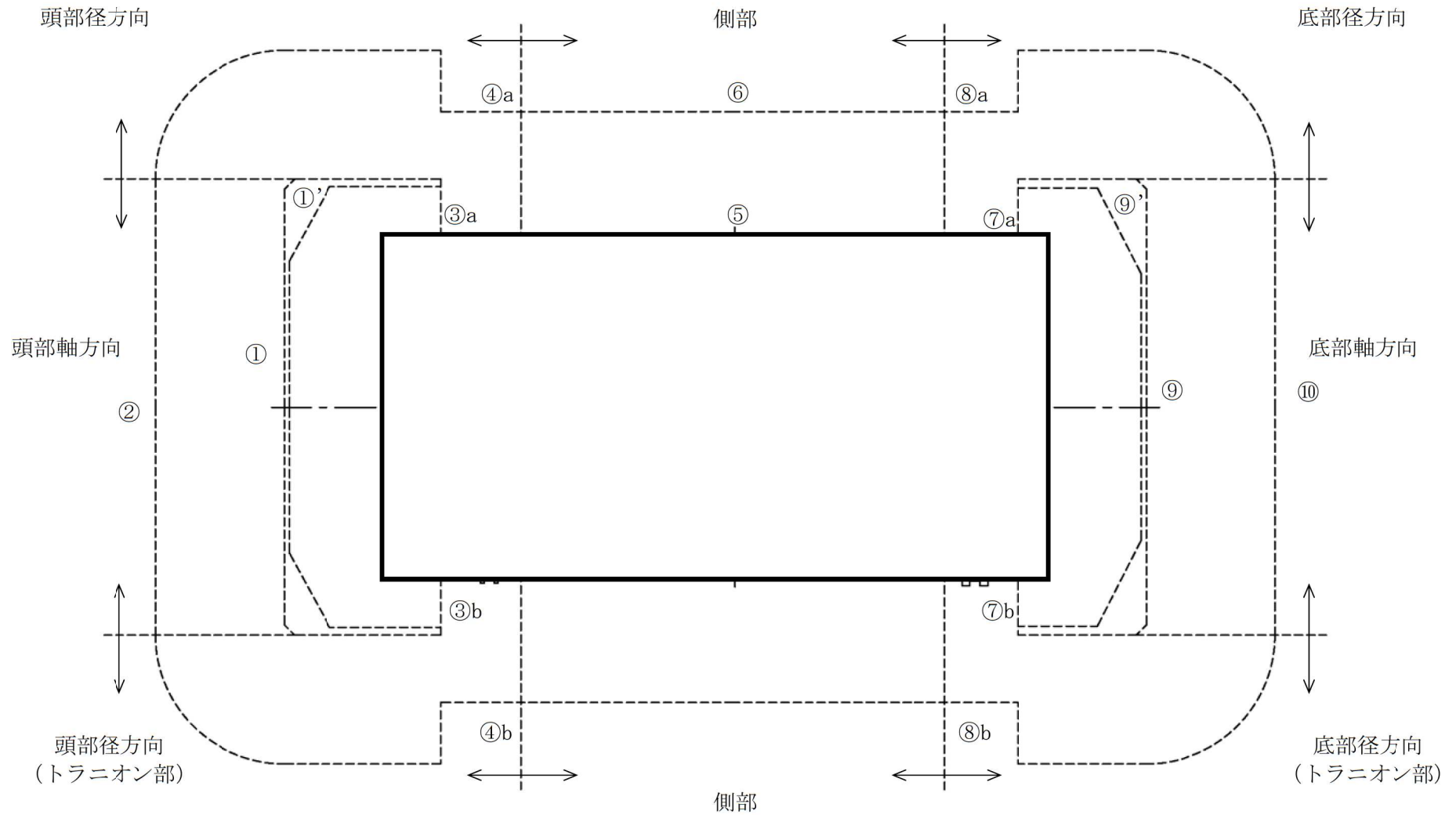
線束から線量当量率への変換係数は ICRP Pub. 74⁵⁾ の 1 cm 線量当量率変換係数に基づく MATXSLIB-J33 の中性子 175 群、ガンマ線 42 群構造に対する値を用いた。

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 (a)-第 D. 4 図、(a)-第 D. 5 図 及び (a)-第 D. 10 表～(a)-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、(a)-第 D. 10 表及び (a)-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(D)-第D.10表及び(D)-第D.11表に示す。

(D)-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 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
			①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1	8.0	100.7	5.9	5.4	6.0
		構造材放射化	0.2	0.6	103.0	25.9	15.0	13.4	35.9
		二次ガンマ線	0.2	1.1	5.7	25.7	4.4	4.8	4.6
	中性子		41.7	389.3	753.8	45.1	258.6	1108.3	25.2
	合計		42.2	391.1	870.5	197.4	283.9	1131.9	71.7
評価点			②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	22.5	22.6	44.8	25.8	25.1	2.6
		構造材放射化	<0.1	20.1	20.9	12.5	14.6	12.8	14.8
		二次ガンマ線	<0.1	5.4	5.4	10.4	5.8	5.7	1.7
	中性子		20.9	24.5	34.0	18.4	15.2	26.3	15.8
	合計		21.2	72.5	82.9	86.1	61.4	69.9	34.9

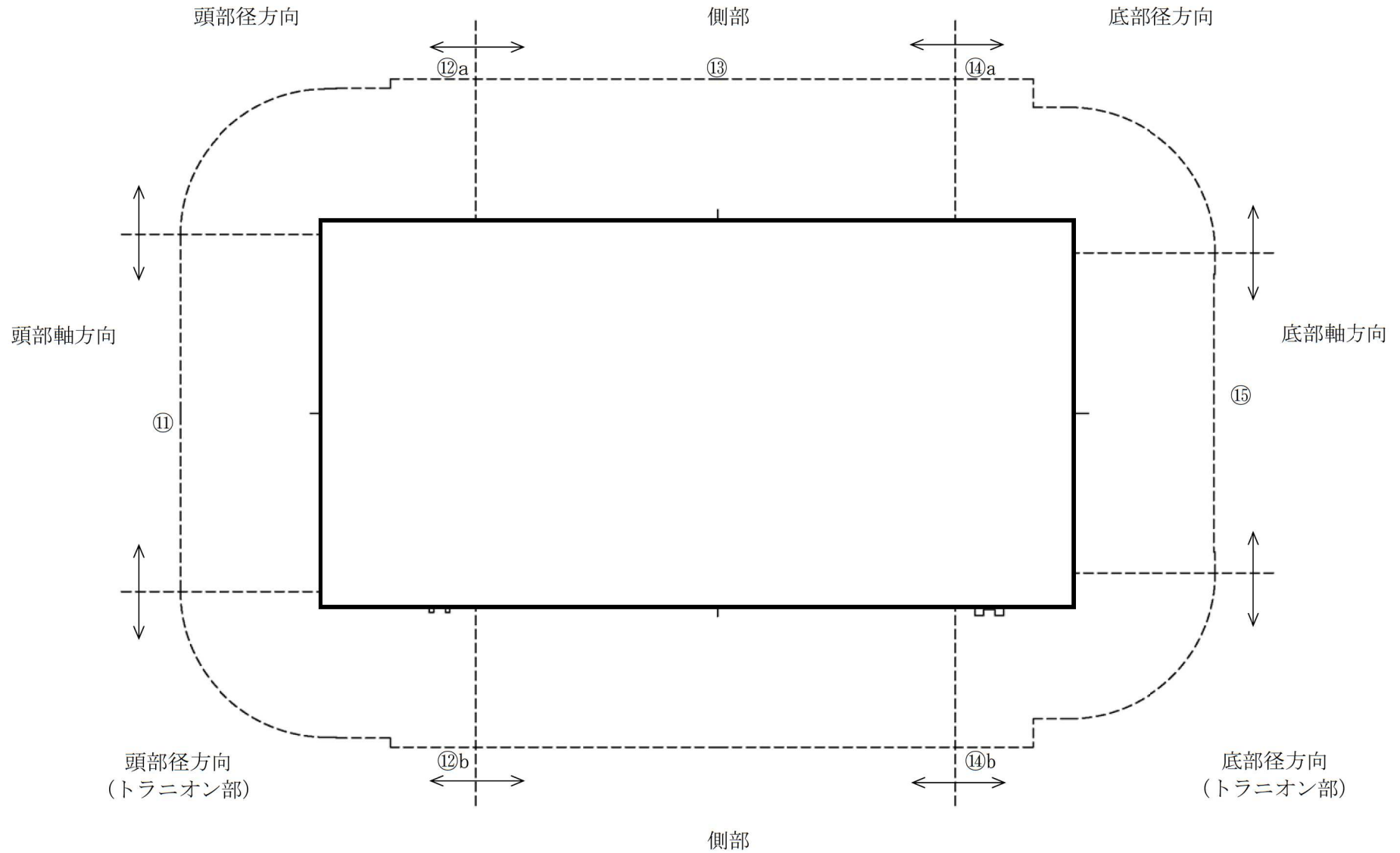
(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

(ロ)第 D. 11 表 一般の試験条件下の線量当量率

(単位： μ Sv/h)

評価点		頭部			側部	底部			
		軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
		①'	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b	⑨'
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.5	<0.1	8.0	100.7	5.9	5.4	1.5
		構造材放射化	0.6	0.6	103.0	25.9	15.0	13.4	2.2
		二次ガンマ線	0.4	1.1	5.7	25.7	4.4	4.8	1.2
	中性子		43.3	389.3	753.8	45.1	258.6	1108.3	93.9
	合計		44.8	391.1	870.5	197.4	283.9	1131.9	98.8

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。



(注)⑪～⑮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(㍀)-第D.12表に示す。

(㍀)-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 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
		⑪	⑫a	⑫b		⑬	⑭a	⑭b	⑮
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	44.1	44.3	137.1	50.6	48.8	8.3
		構造材放射化	0.3	37.9	38.2	36.5	28.5	24.1	50.1
		二次ガンマ線	0.5	12.0	11.9	21.7	13.1	12.9	6.9
	中性子		77.2	135.4	143.9	681.3	132.3	142.1	116.9
	合計		78.1	229.4	238.3	876.6	224.5	227.9	182.2

(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(□)-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(□)-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。

(□)-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）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

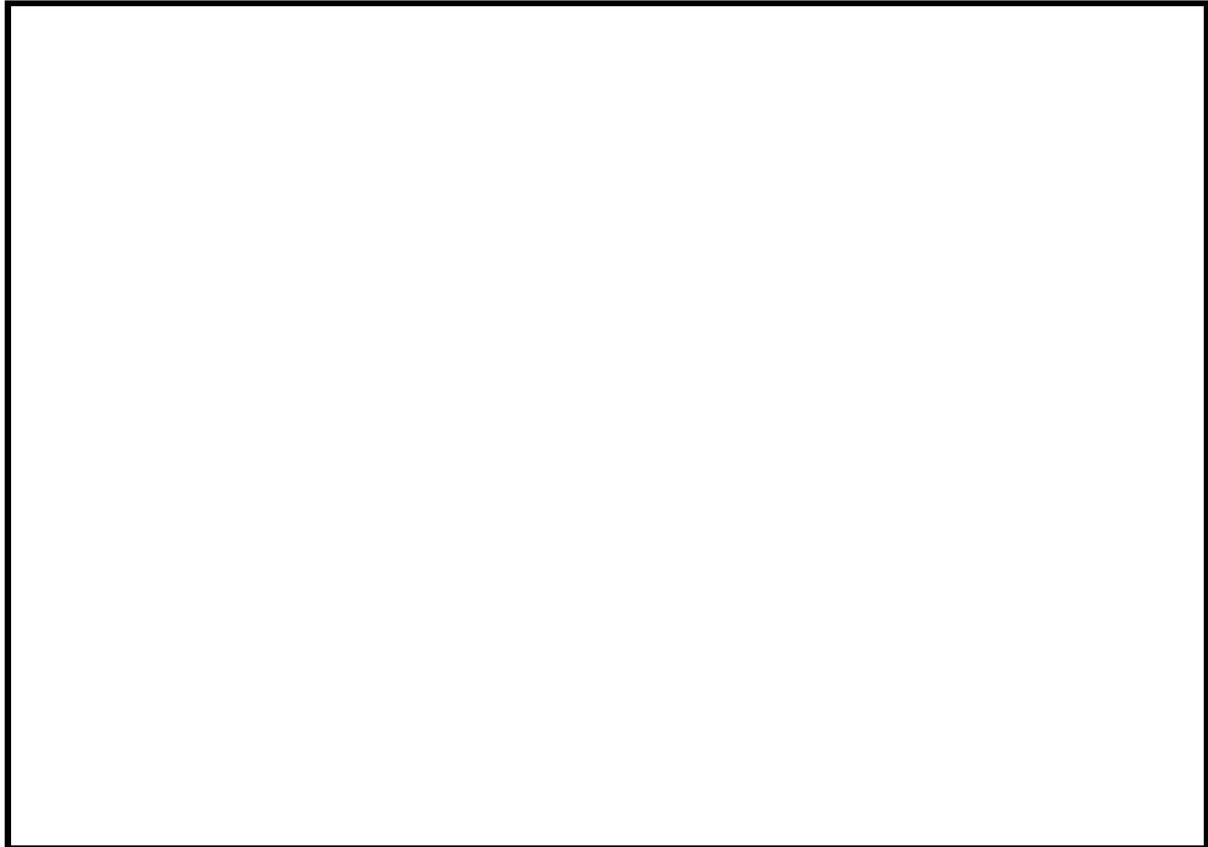
(ロ)-第D.14表 最大線量当量率の要約

項目	部位		輸送物表面 (μ Sv/h)				表面から 1 m (μ 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	0.5	116.7	152.3	23.6	46.5	0.3	48.9	67.7	43.6	19.1	
中性子	41.7	753.8	45.1	1108.3	25.2	20.9	34.0	18.4	26.3	15.8	
合計	42.2	870.5	197.4	1131.9	71.7	21.2	82.9	86.1	69.9	34.9	
一般の試験条件下						/					
ガンマ線	1.5	116.7	152.3	23.6	4.9						
中性子	43.3	753.8	45.1	1108.3	93.9						
合計	44.8	870.5	197.4	1131.9	98.8						
特別の試験条件下	/										
ガンマ線						0.9	94.4	195.3	85.8	65.3	
中性子						77.2	143.9	681.3	142.1	116.9	
合計	78.1	238.3	876.6	227.9	182.2						
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 (□)-第 D. 付 1 図 に示す。



(□)-第 D. 付 1 図 軸方向燃焼度分布

D.6.2 均質化モデルの妥当性について

遮蔽解析における二次元(R-Z)モデルで採用している均質化モデルの妥当性を示す。

(1) 径方向

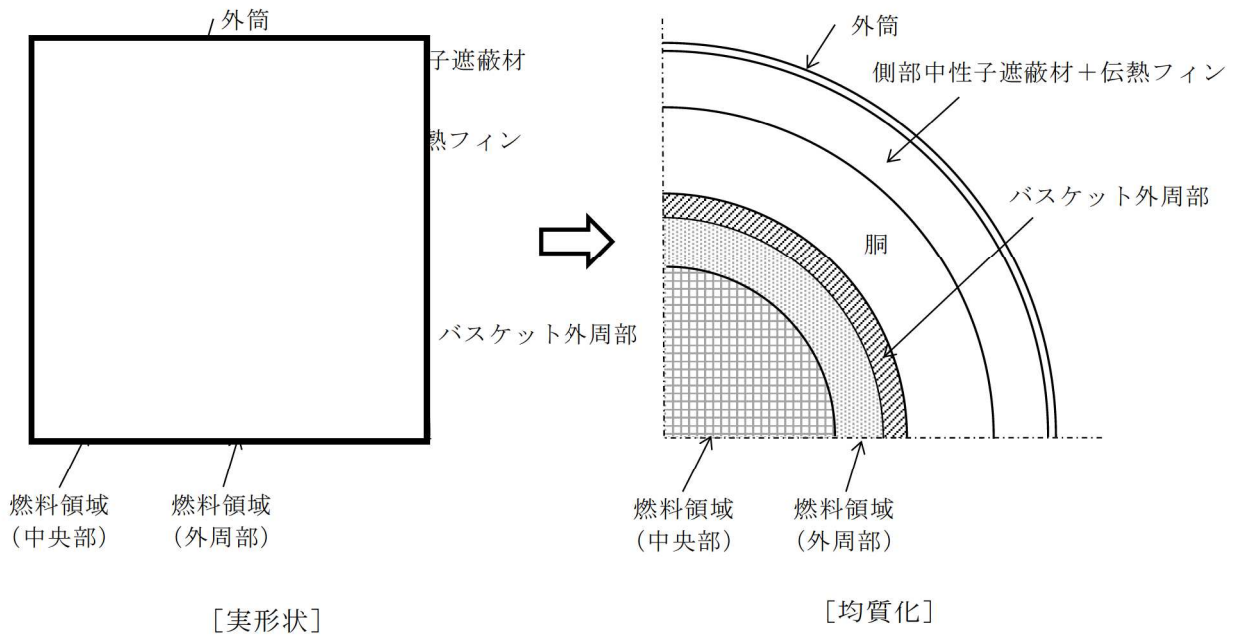
本輸送容器の円筒形状を考慮し、許認可実績のある二次元輸送計算コードでモデル化している。円筒形状での入力として、燃料領域については等価な断面積となる円(円筒)でモデル化し、使用済燃料集合体とバスケット、側部中性子遮蔽材(レジン)と伝熱フィン(銅)を均質化した物性値を設定している。側部中性子遮蔽材部は、レジンと伝熱フィンのノミナル値に寸法公差を考慮して遮蔽材密度が小さくなるよう設定している。バスケット外周部は、円周方向に不均一な厚さとなっており、バスケット外周部の密度を密度係数で調整している((図)-第D.付2図)。

バスケット外周部の円筒形状での均質化にあたって、表面から1m位置の線量当量率が、表面位置に比べ、基準値に対して裕度が小さいため、水平断面X-Yモデルにて円周方向の表面から1m離れた位置での最大線量当量率を算出し、円周方向の最大線量当量率を包絡するよう、均質化円筒モデルの密度係数を設定している((図)-第D.付3図)。この密度係数を遮蔽解析で用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ている。また、参考文献6)にてMSF-24P型に対してMCNP5での実形状を模擬した三次元モデル解析(以下、「MCNP解析」という。)とDOT3.5での二次元モデル解析(以下、「DOT3.5解析」という。)の結果比較が実施されている。側部中央周方向の表面についてDOT3.5解析の解析結果がMCNP解析の解析結果を包絡していることを確認((図)-第D.付4図)しており、径方向に対する均質化モデルは妥当である。

(2) 軸方向

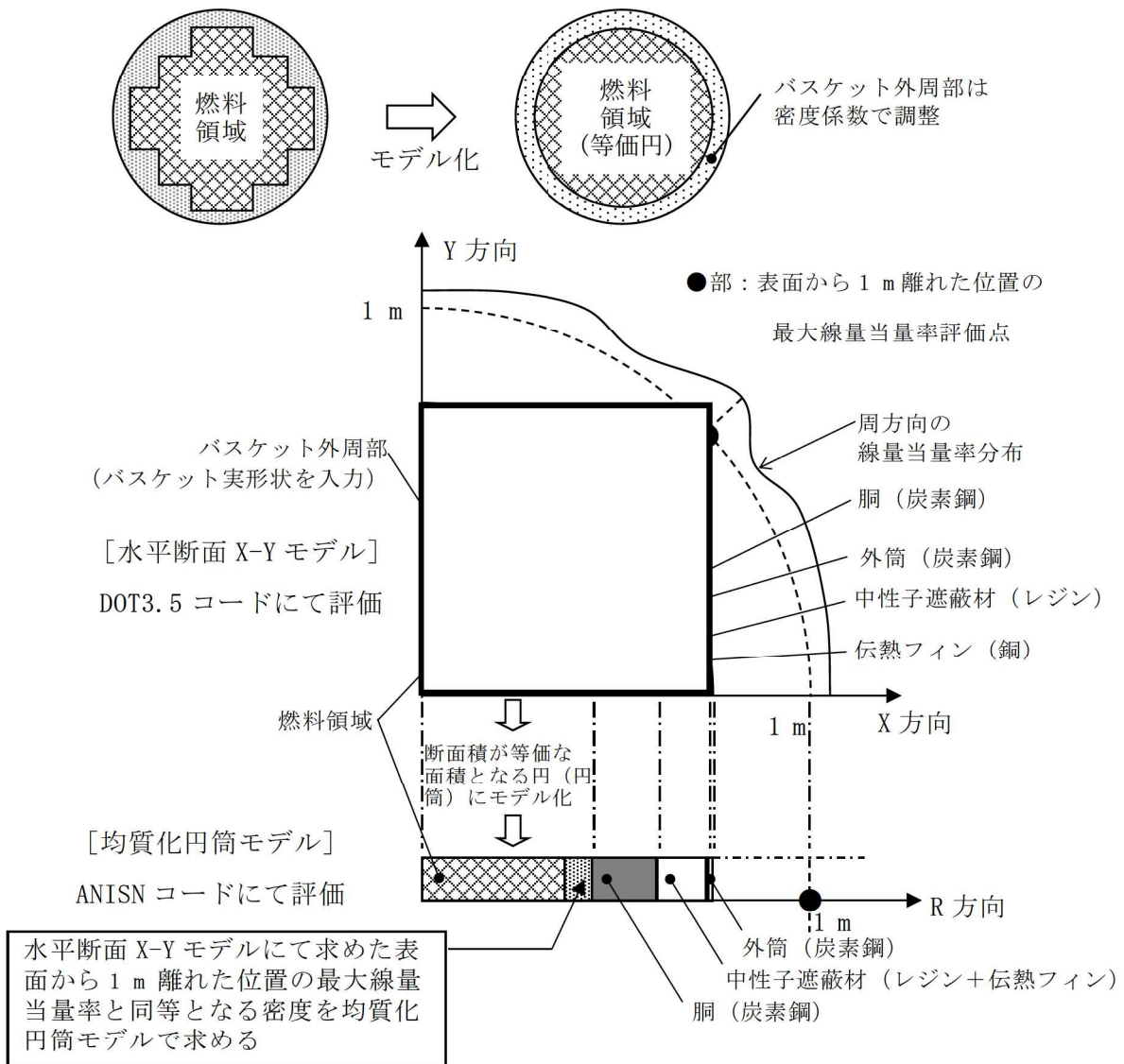
本輸送容器の円筒形状を考慮し、許認可実績のある二次元輸送計算コードでモデル化している。燃料集合体領域は軸方向に複数の領域に分けて均質化している。参考文献7)では、MSF-24P(S)型を対象に、燃料集合体ごとにモデル化(以下、「詳細モデル」という。)し、三次元モンテカルロコードMCNP5を用いて軸方向の線量当量率を評価した結果と本モデルと同様の均質化モデルに対して二次元輸送計算コードで軸方向の線量当量率を評価した結果の比較が(図)-第D.付5図のとおり示されている。比較の結果、均質化モデルと詳細モデルは同等であり、均質化モデルは妥当である。

なお、本遮蔽解析モデルでは、蓋部方向付近の線源であるバーナブルポイズン集合体は放射化線源強度のみを考慮して、構造材としての遮蔽効果は無視しているため保守的な設定となっており、線源位置についても、(図)-第D.1図に示すとおり、使用済燃料集合体は蓋部及び底部に接した状態でのモデルとしており、線源である使用済燃料集合体から線量当量率評価点までの距離が近い保守的なモデルとなっている。



遮蔽解析モデルへの入力
 二次元モデルの解析では、円筒形状での入力となるため、燃料領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化している。その際、燃料領域は使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定した。

(ロ)-第D.付2図 燃料領域のモデル化（水平断面）



径方向の均質化 (バスケット外周部、中性子遮蔽材部)

バスケット外周部は円周方向に不均一な厚さの構造であり、中性子遮蔽材部はレジンと伝熱フィンが存在する不均質な構造であることから、本体モデルでは下記に示す手法により、径方向の密度を設定している。

中性子遮蔽材部：

レジンと伝熱フィンそれぞれの寸法 (ノミナル値、寸法公差) を考慮して密度を設定する。

バスケット外周部：

(i) 水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

水平断面 X-Y モデルによる表面から 1 m 離れた位置での最大線量当量率を算出する。

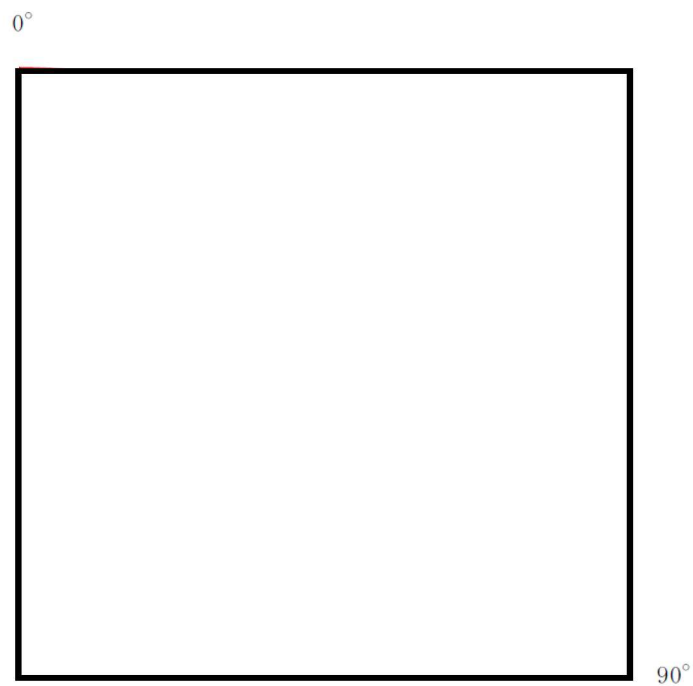
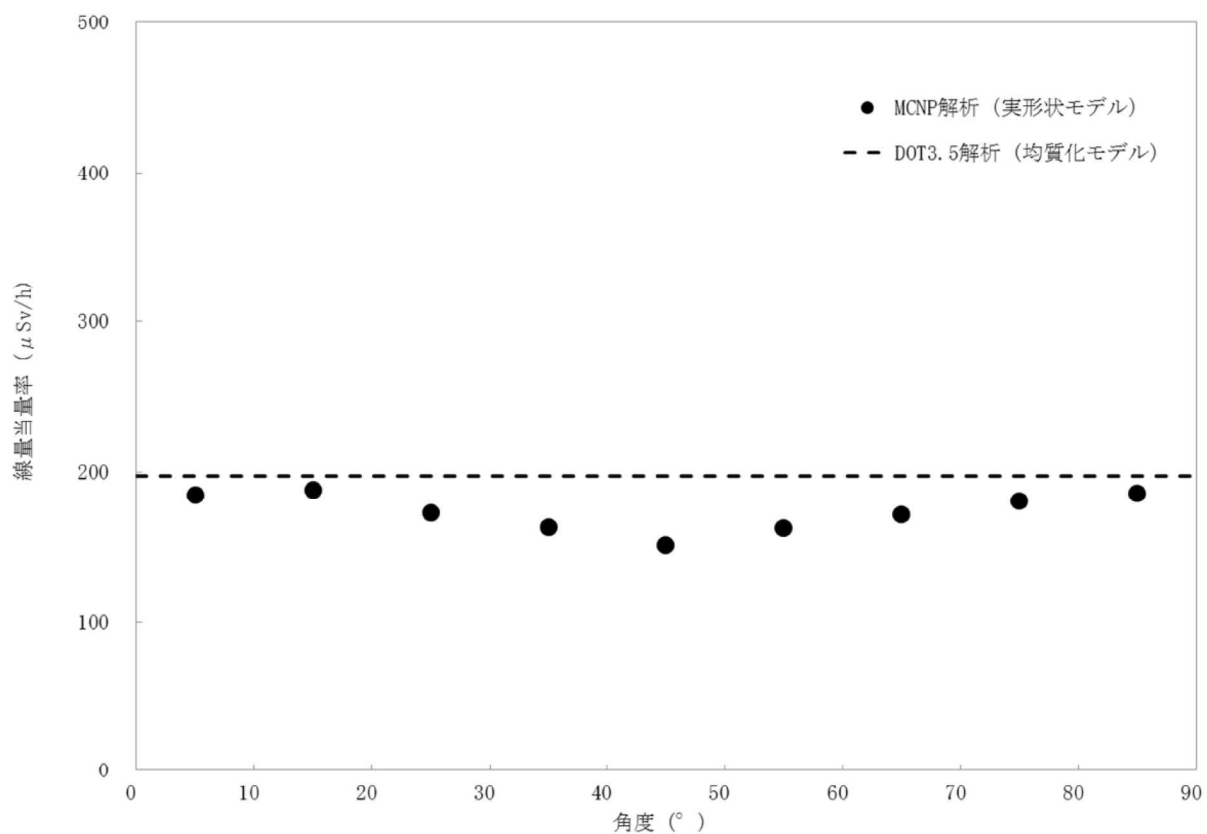
※算出位置を表面から 1 m 離れた位置としているのは、表面位置に比べ、基準線量当量率に対する余裕が少ないためである。

(ii) 均質化円筒モデル遮蔽解析

均質化モデルにて、表面から 1 m 離れた位置での線量当量率が (i) で算出した最大線量当量率と同等となるバスケット外周部の密度係数を算出する。

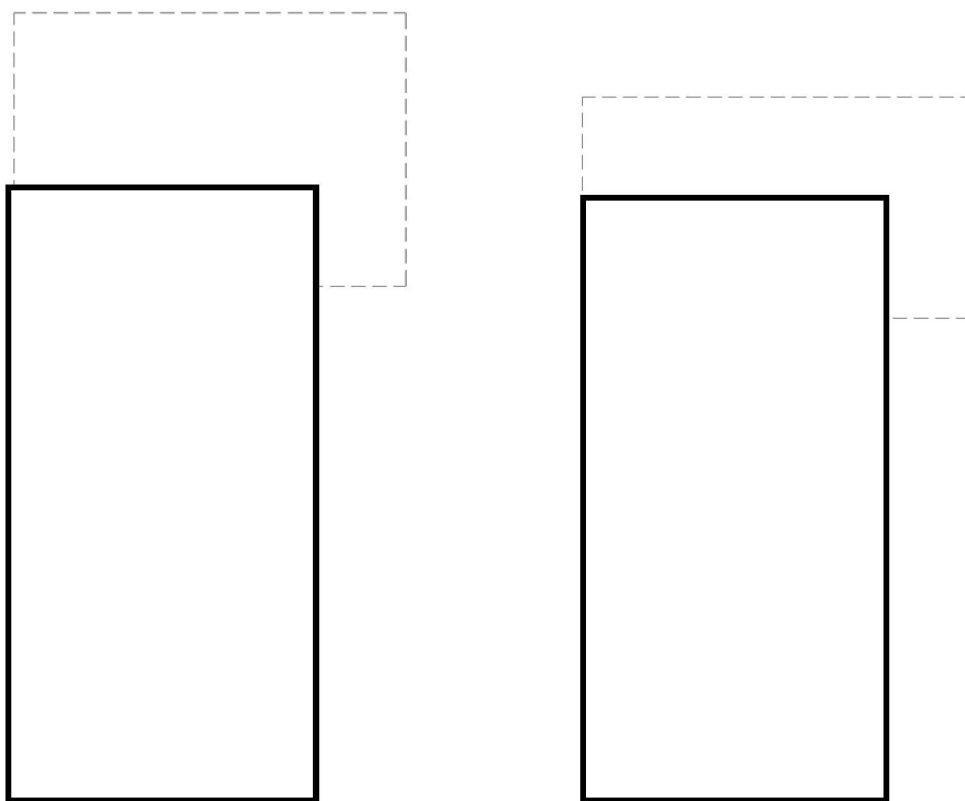
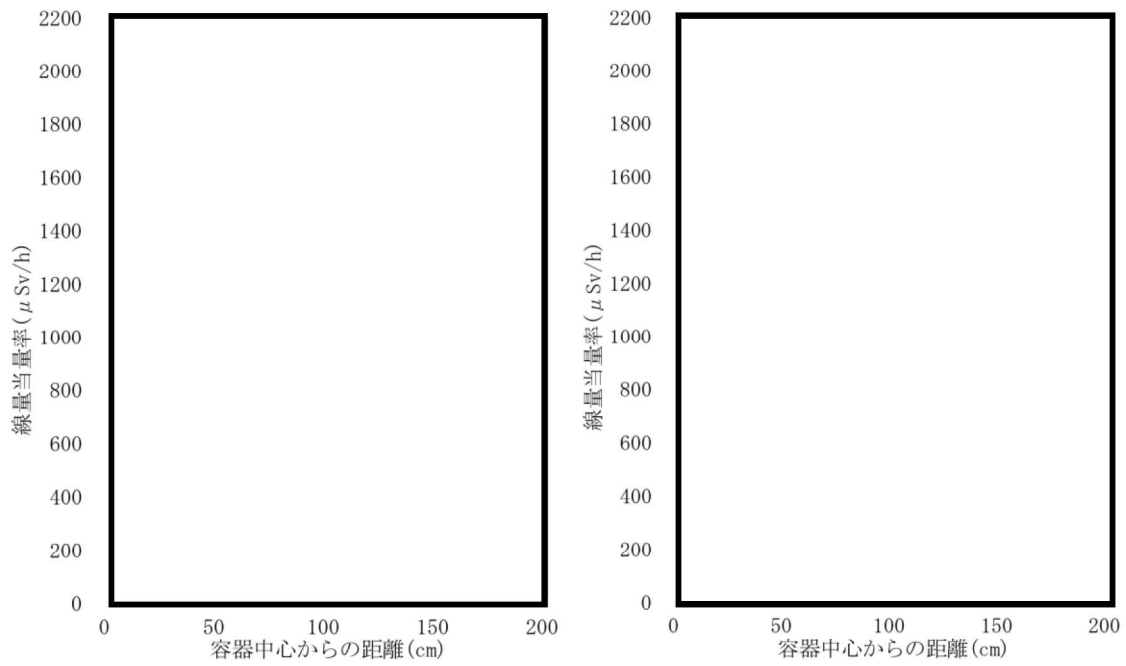
中性子遮蔽材部の密度係数に加え、(ii) にて算出したバスケット外周部の密度係数を用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ることができる。

(ロ)-第 D. 付 3 図 燃料領域及び側部中性子遮蔽材と伝熱フィン領域のモデル化の詳細



(注) 赤色部は評価点位置を示す。

(D)-第D.付4図 側部中央周方向の線量当量率分布比較 (MSF-24P型)



(ロ)-第 D. 付 5 図 均質化モデル (DOT3.5) と詳細モデル (MCNP5) 表面の線量当量率分布の比較
(頭部軸方向・底部軸方向)

D.6.3 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

(ロ)-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、製品仕様としての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.6.4 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).
- 6) 四国電力株式会社, 「安全解析等に関するコメント回答」, 平成 30 年 10 月 17 日, <https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000114087/000251262.pdf>.
- 7) 三菱重工業株式会社, 「補足説明資料 26-2 26 条 燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備 遮蔽機能に関する説明資料」, L5-95KV262R6, 2023 年 4 月 3 日.

(v) 章 E 臨 界 解 析

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。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 (k_{eff}) 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、 k_{eff} 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 24 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) とする。燃料集合体の仕様を(ロ)-第 E.1 表に示す。

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、 ^{235}U 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。

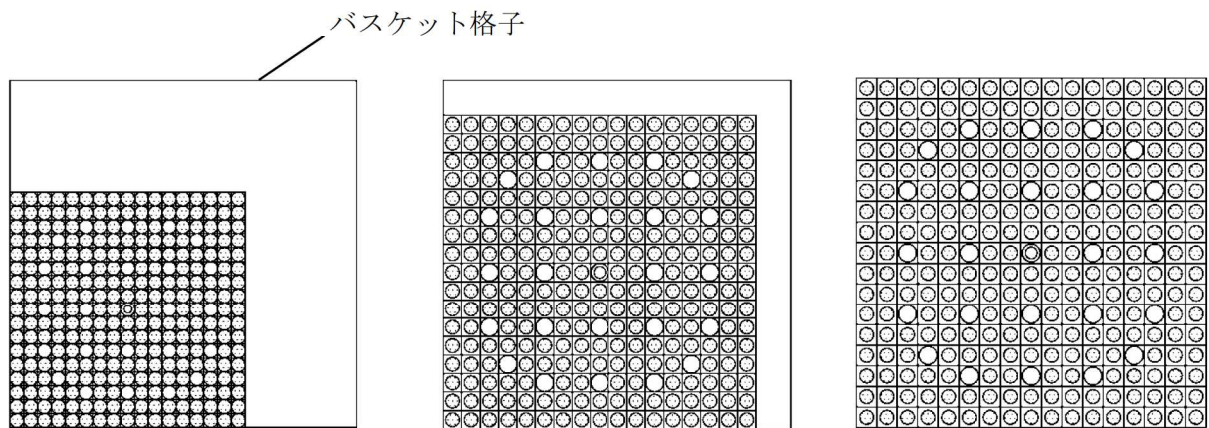
また、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、輸送容器に収納される全燃料集合体について支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの変化を仮定する。燃料棒ピッチ変化の中性子実効増倍率への影響を確認するため、燃料棒ピッチが変形前のピッチである場合に加えて、燃料棒ピッチが最小（燃料棒直径と等しい）の場合及び燃料棒がバスケット格子内で均一に広がった場合について評価する。(ロ)-第E.1図にピッチ変化部位の燃料モデルを示す。

(ロ)-第E.1表 臨界解析に用いる燃料集合体の仕様

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。



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 燃料モデル（ピッチ変化部位）

E.2.2 輸送容器

輸送容器の形状は、(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。

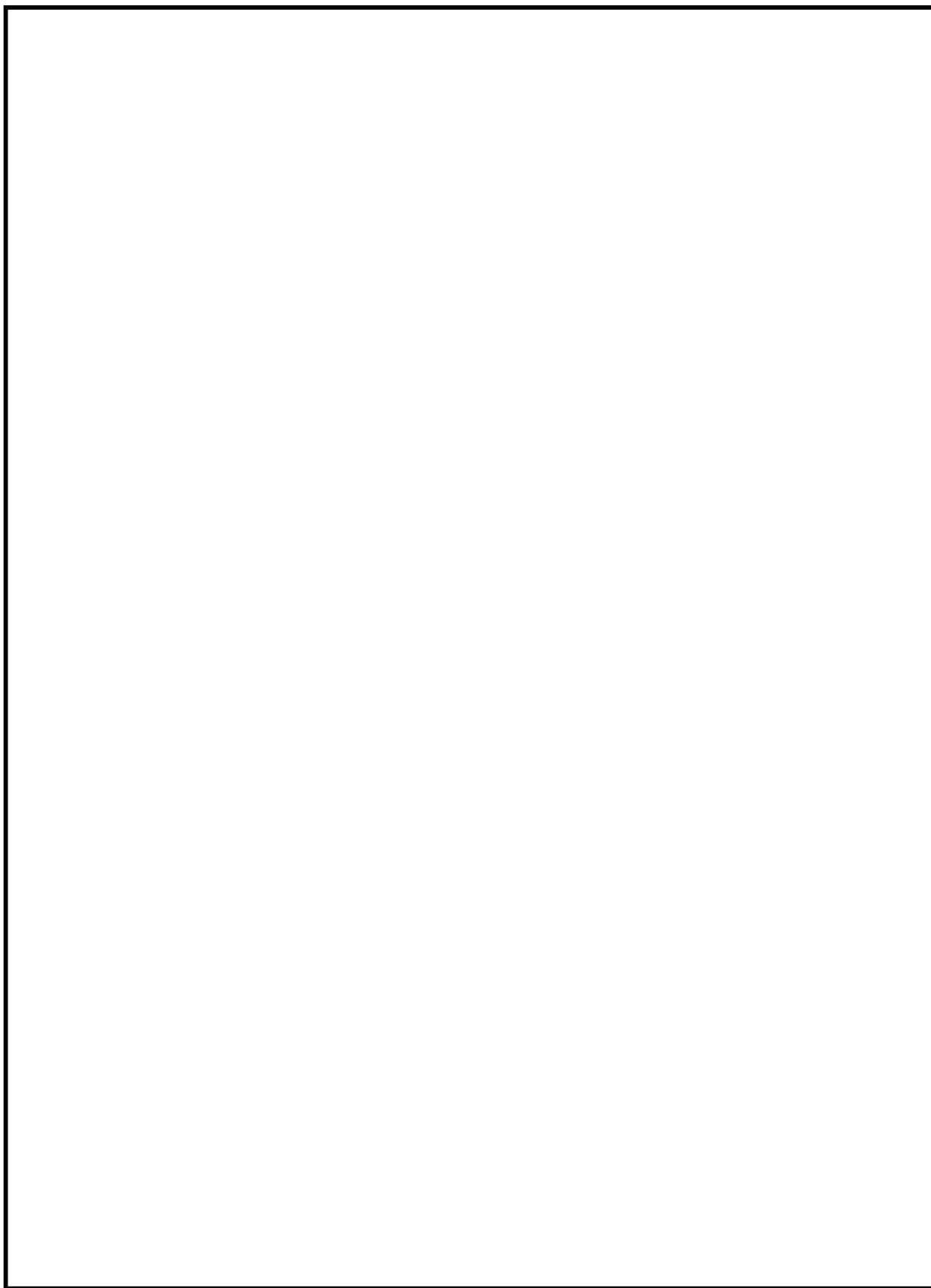
核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において、バスケットプレートは変形しないため、中性子吸収材の配置に変化はない。

E.3 モデル仕様

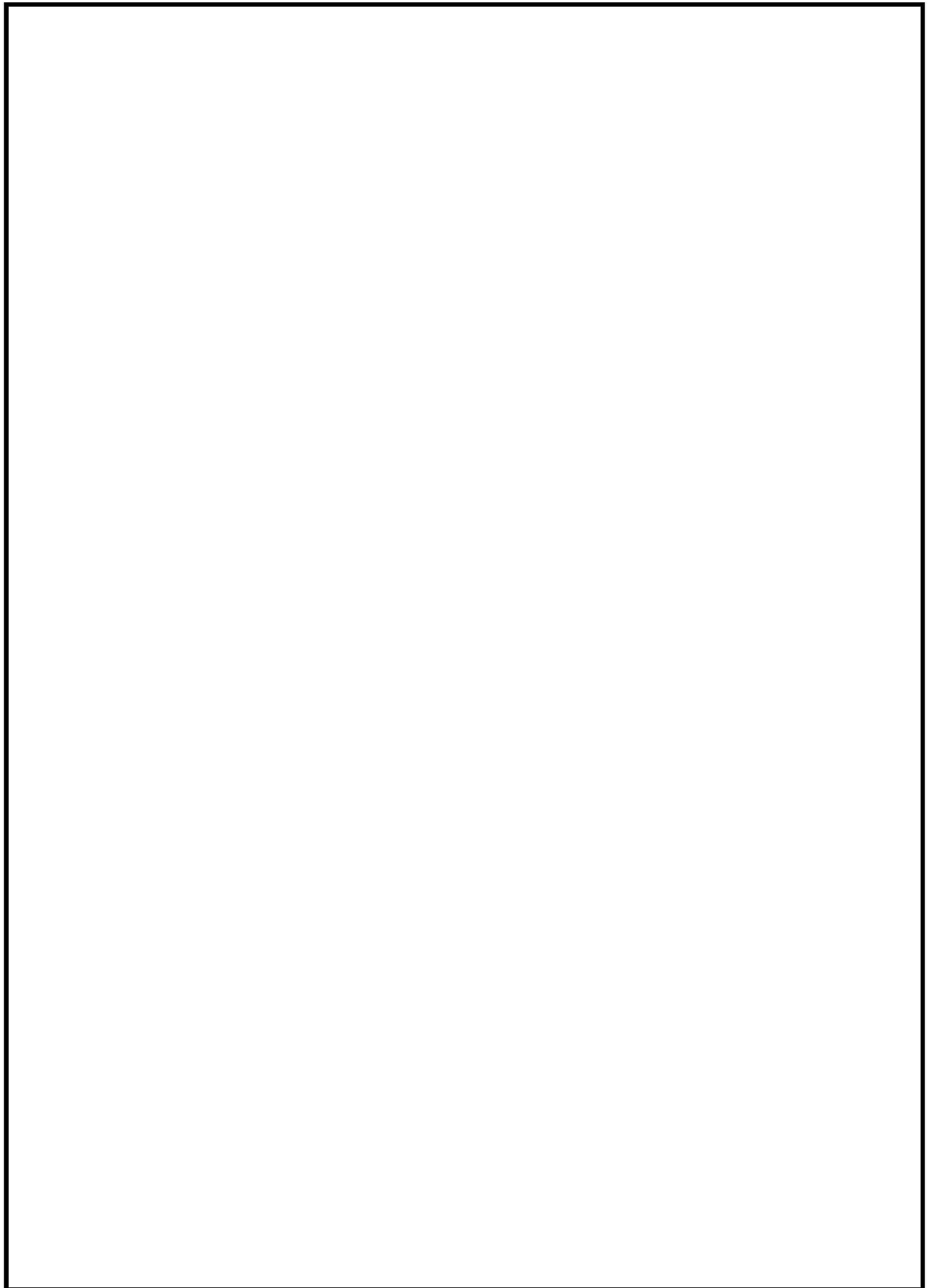
E.3.1 解析モデル

(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。

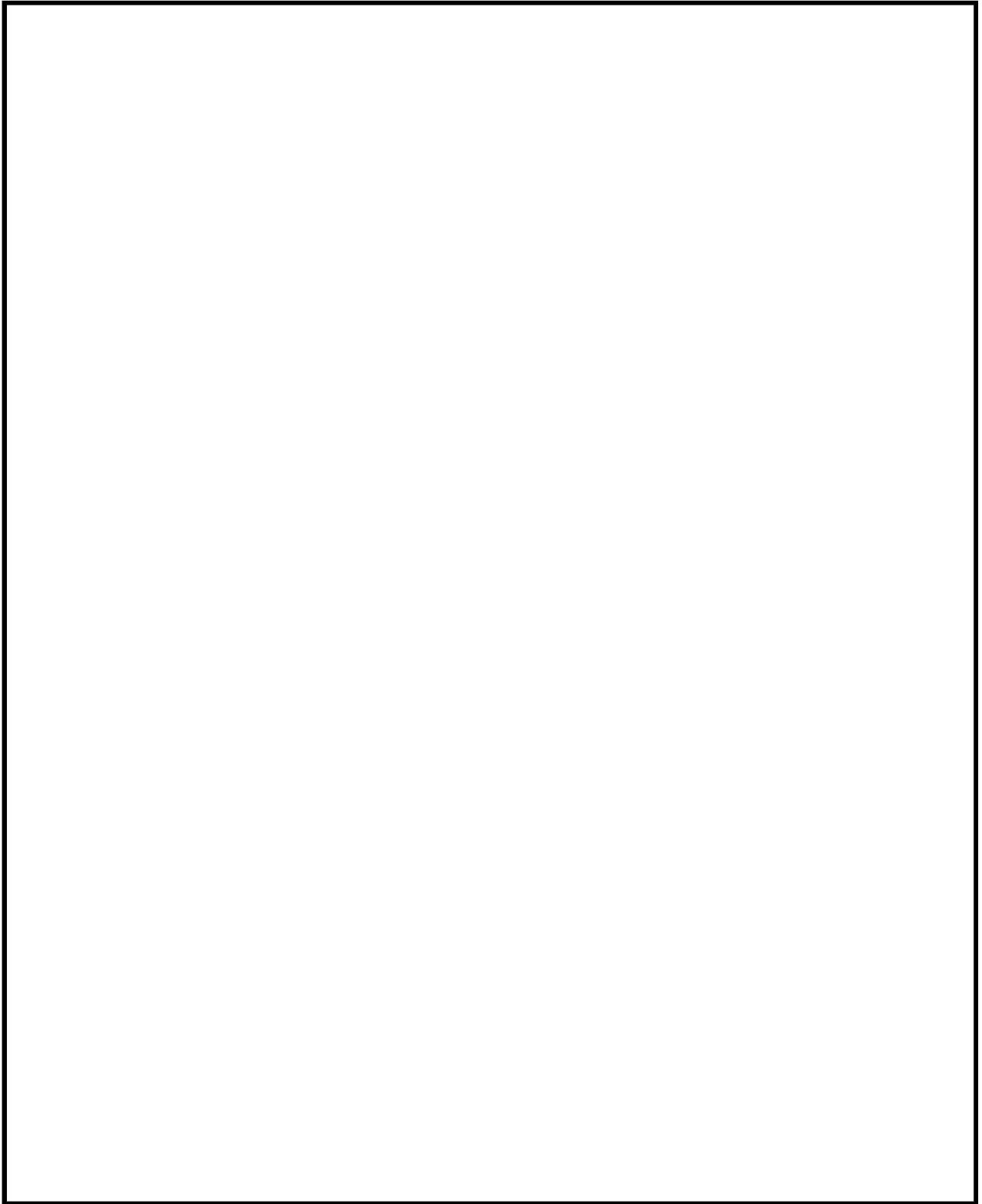
- ・輸送物が無限に配列している体系とする。
- ・中性子遮蔽材を無視する。
- ・緩衝体及び三次蓋を無視する。
- ・中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート板厚、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚及びバスケット格子内のりの公差を考慮する。
- ・バスケット格子内の燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるように配置する。
(燃料棒ピッチを拡大しない場合)
- ・支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの変化を考慮する。
- ・安全側に胴内には5000 cm³の水が均一に分散していると仮定する。
- ・バスケットプレート及び中性子吸収材は、中性子の吸収が小さくなるように、実在する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



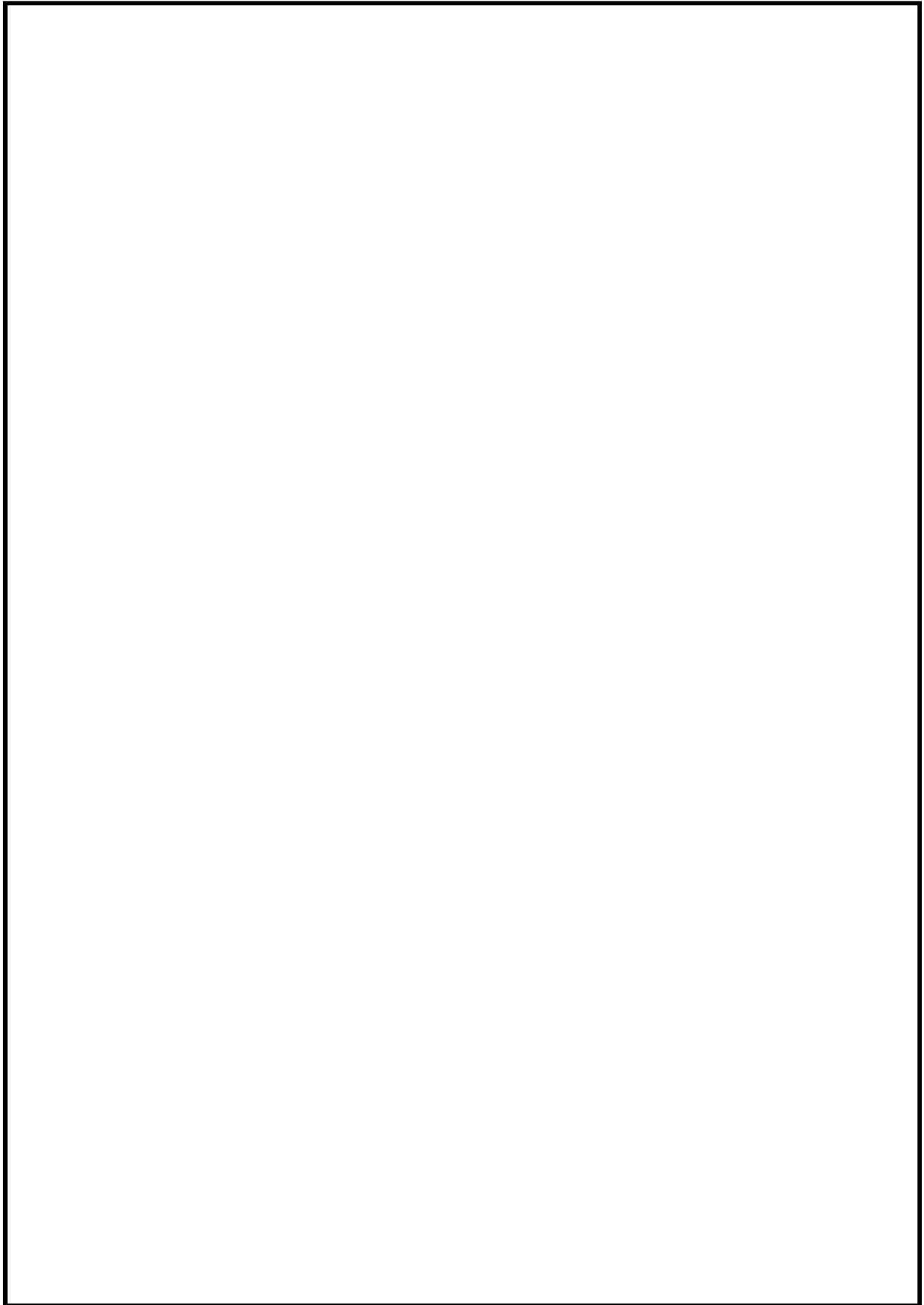
(㊦)-第E.2図(a) 臨界計算モデル (縦断面図)



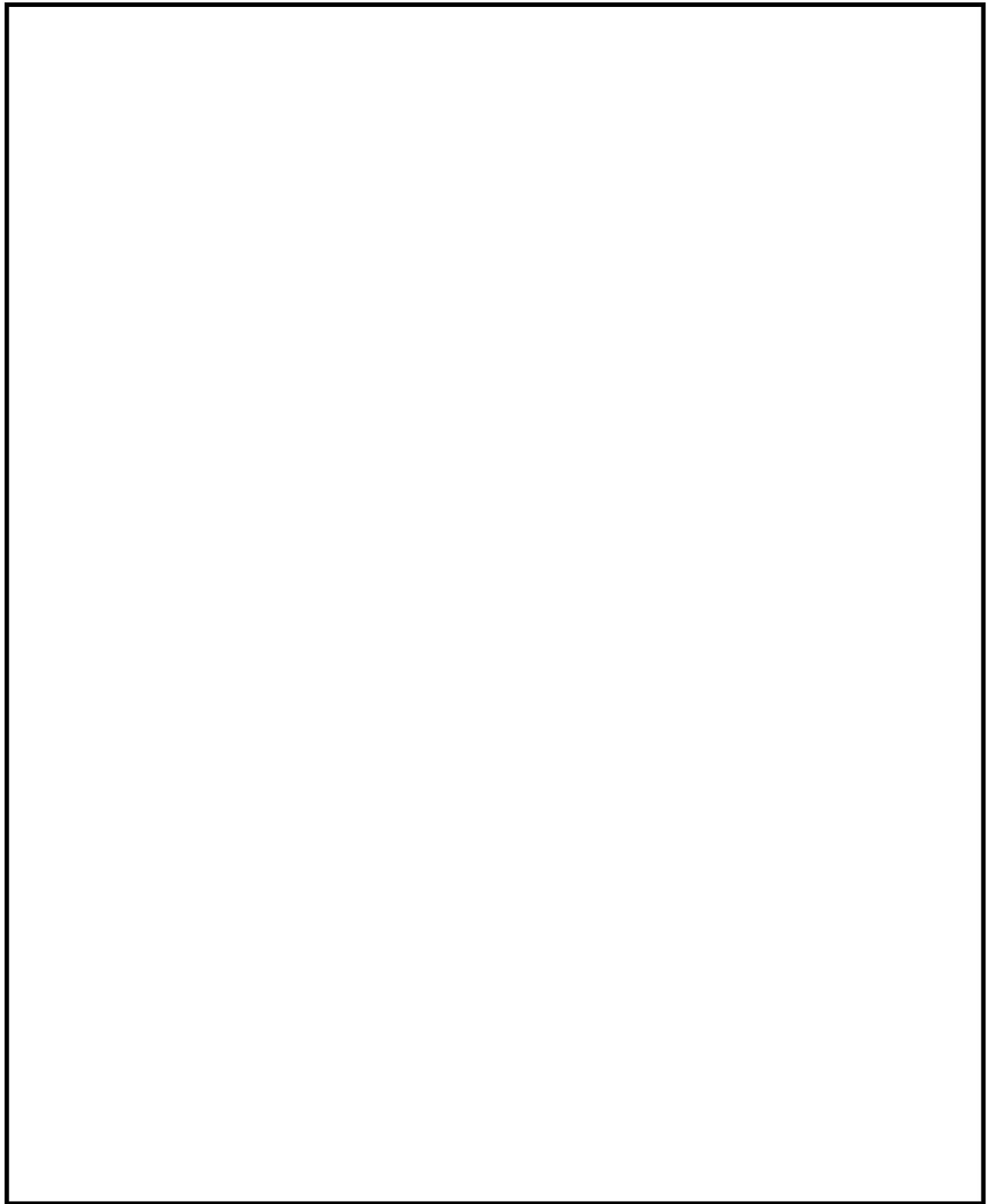
(ロ)-第 E. 2 図(b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ最小)



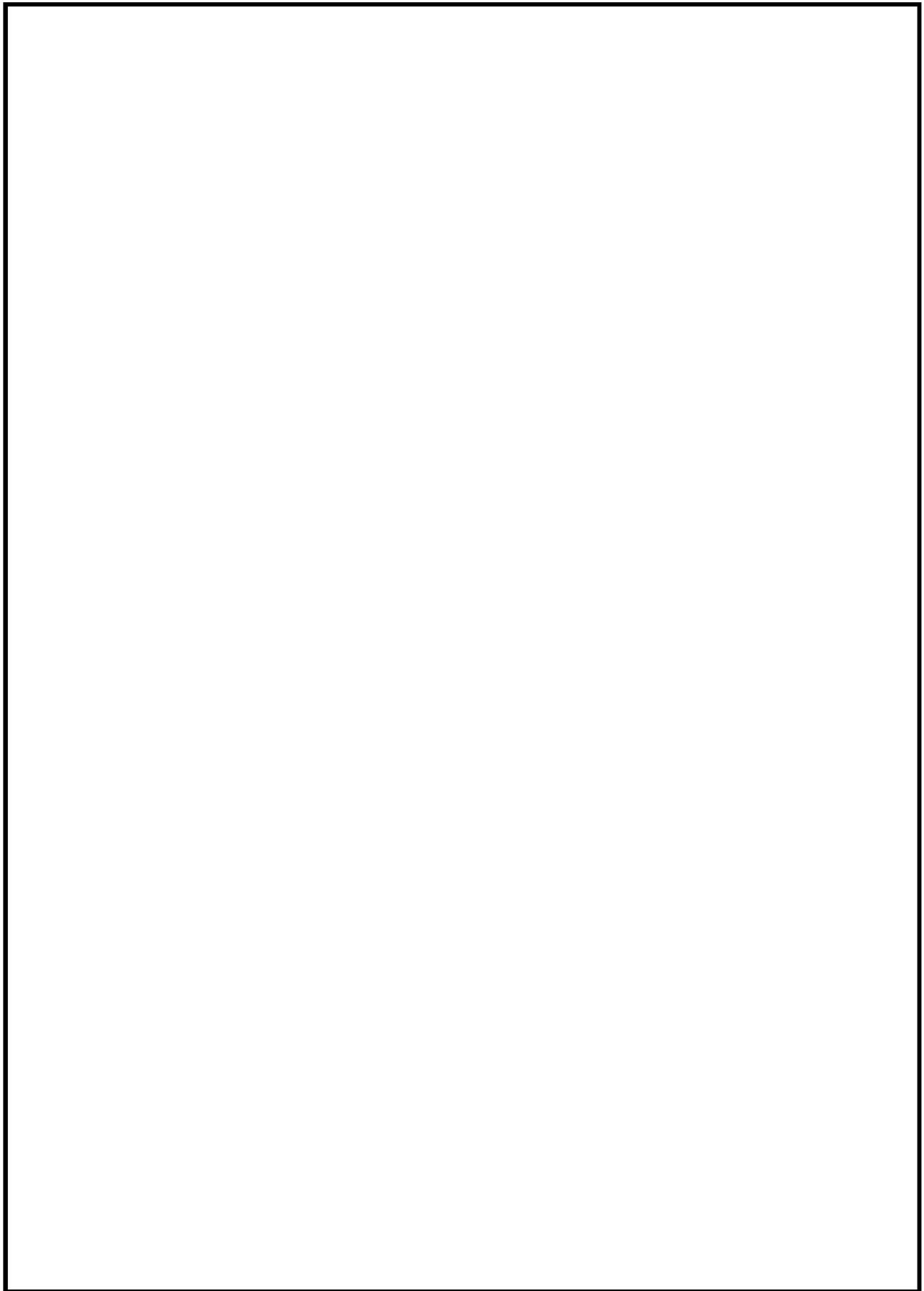
(ロ)-第 E. 2 図 (b-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ最小)



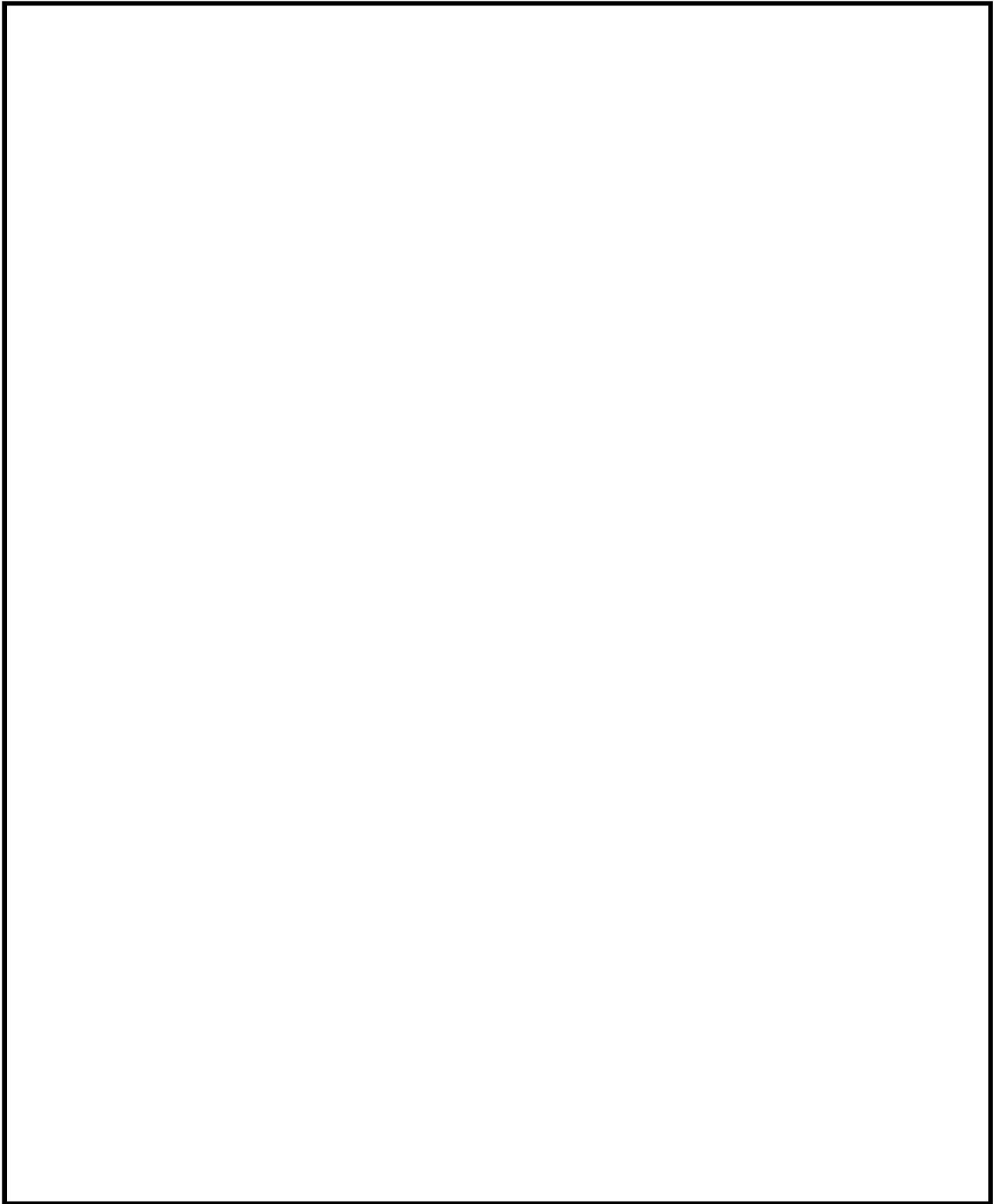
(㊦)-第 E. 2 図(b-3) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ変化なし)



(㊦)-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)



(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)



(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)

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

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			0
			0			
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr ^(注1)			
			H			
	胴内ガス		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（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(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值としている。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 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

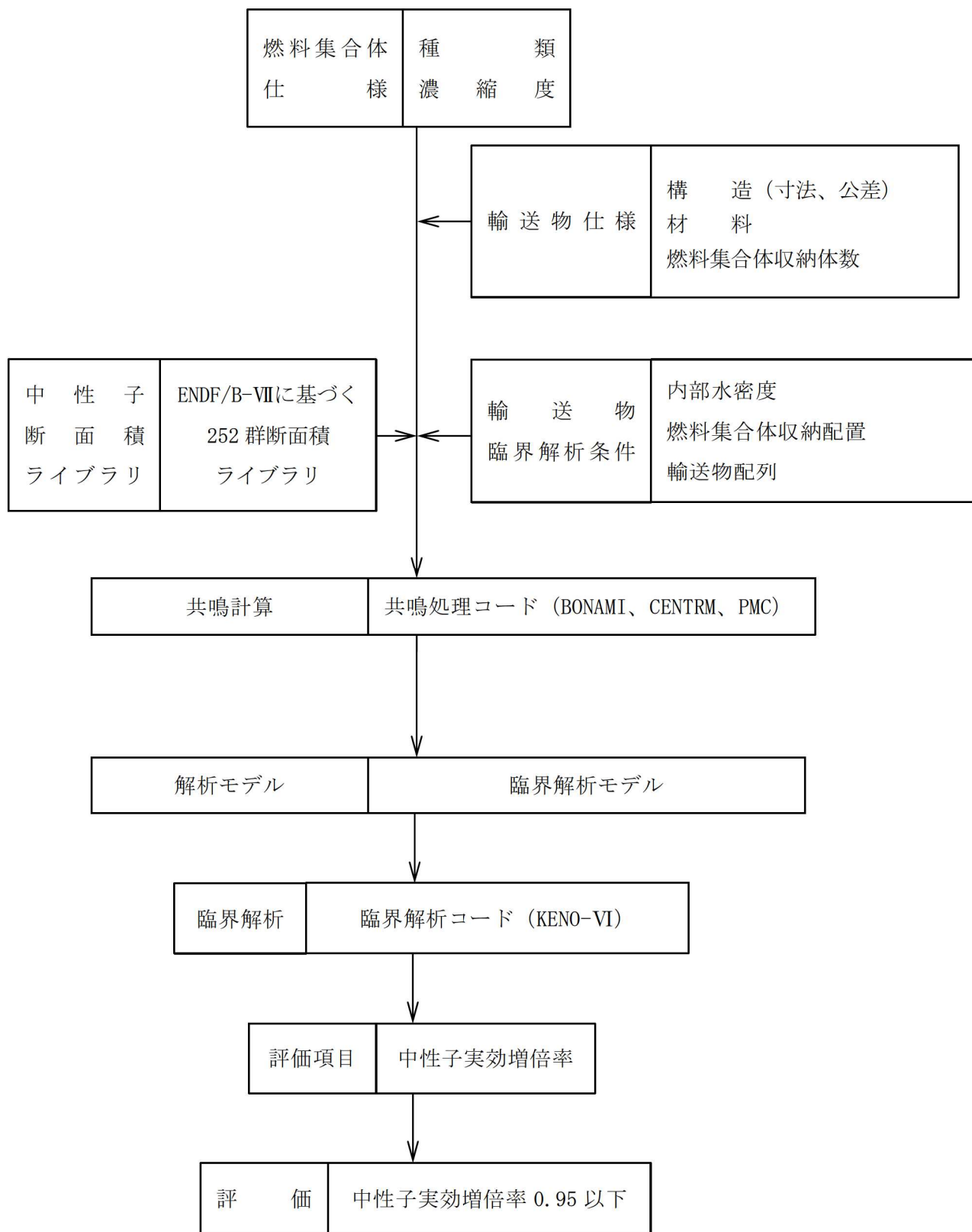
臨界計算には、米国オークリッジ国立研究所で、原子力関連許認可評価用に開発された SCALE¹⁾ (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステムを用いた。中性子実効増倍率の計算には、KENO-VIコードを用いた。各領域の群定数計算には共鳴処理コード BONAMI、CENTRM 及び PMC を用い、核データライブラリは SCALE コードシステムの内蔵ライブラリデータの一つである ENDF/B-VIIに基づく 252 群断面積ライブラリを用いた。計算の流れを(□)-第 E. 3 図に示す。本計算コードを用い、(□)-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(□)-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 (k_{eff}) は標準偏差 (σ) の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(□)-第 E. 3 表 臨界計算結果

項目	k_{eff}	σ	$k_{eff} + 3\sigma$
燃料棒ピッチ最小	0. 38706	0. 00013	0. 38745
燃料棒ピッチ変化なし	0. 38666	0. 00013	0. 38704
燃料棒ピッチ均一拡大	0. 38646	0. 00015	0. 38689



(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

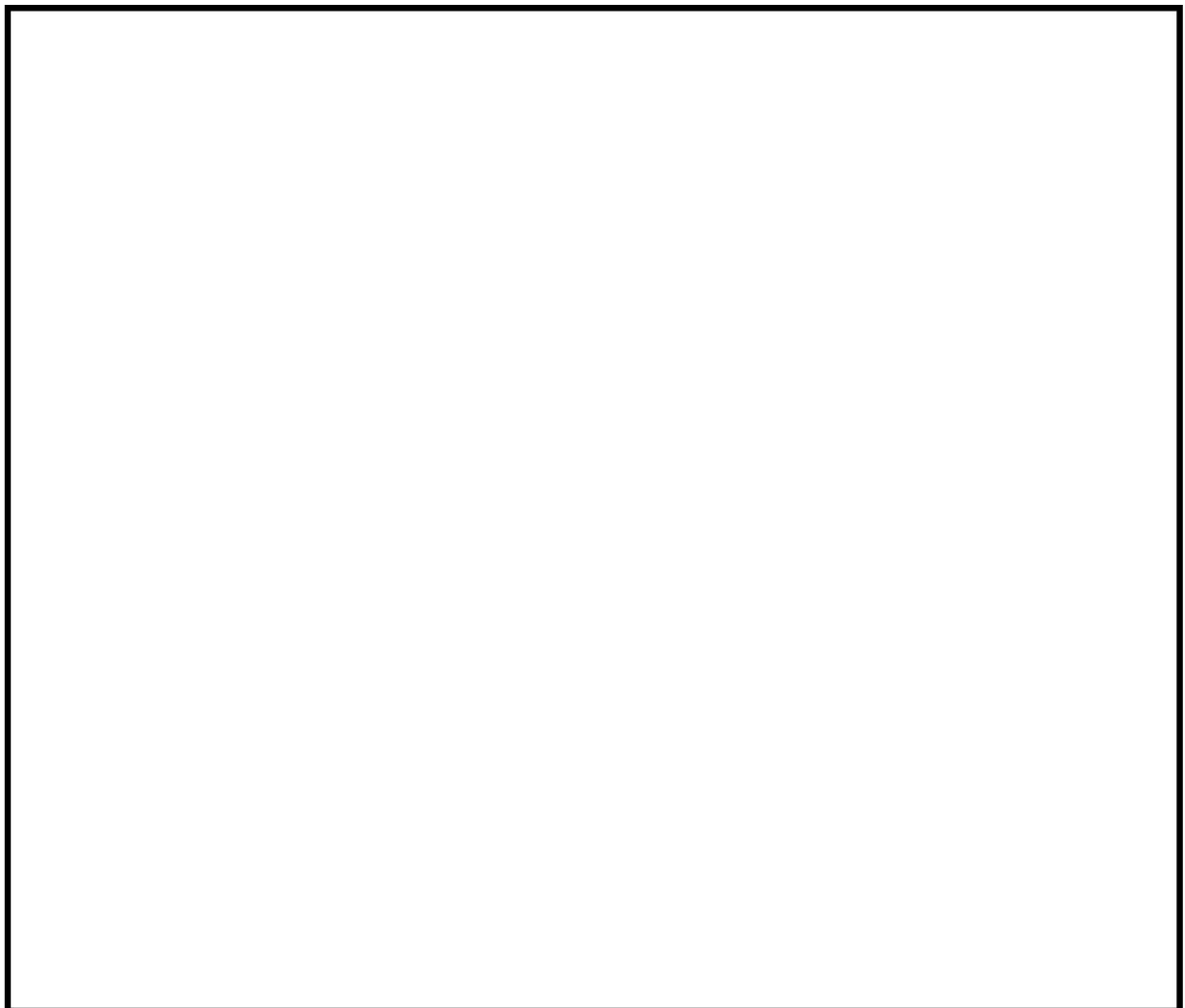
以上より、次の3つの機関により実施された臨界実験より、合計 ケースを選定した。



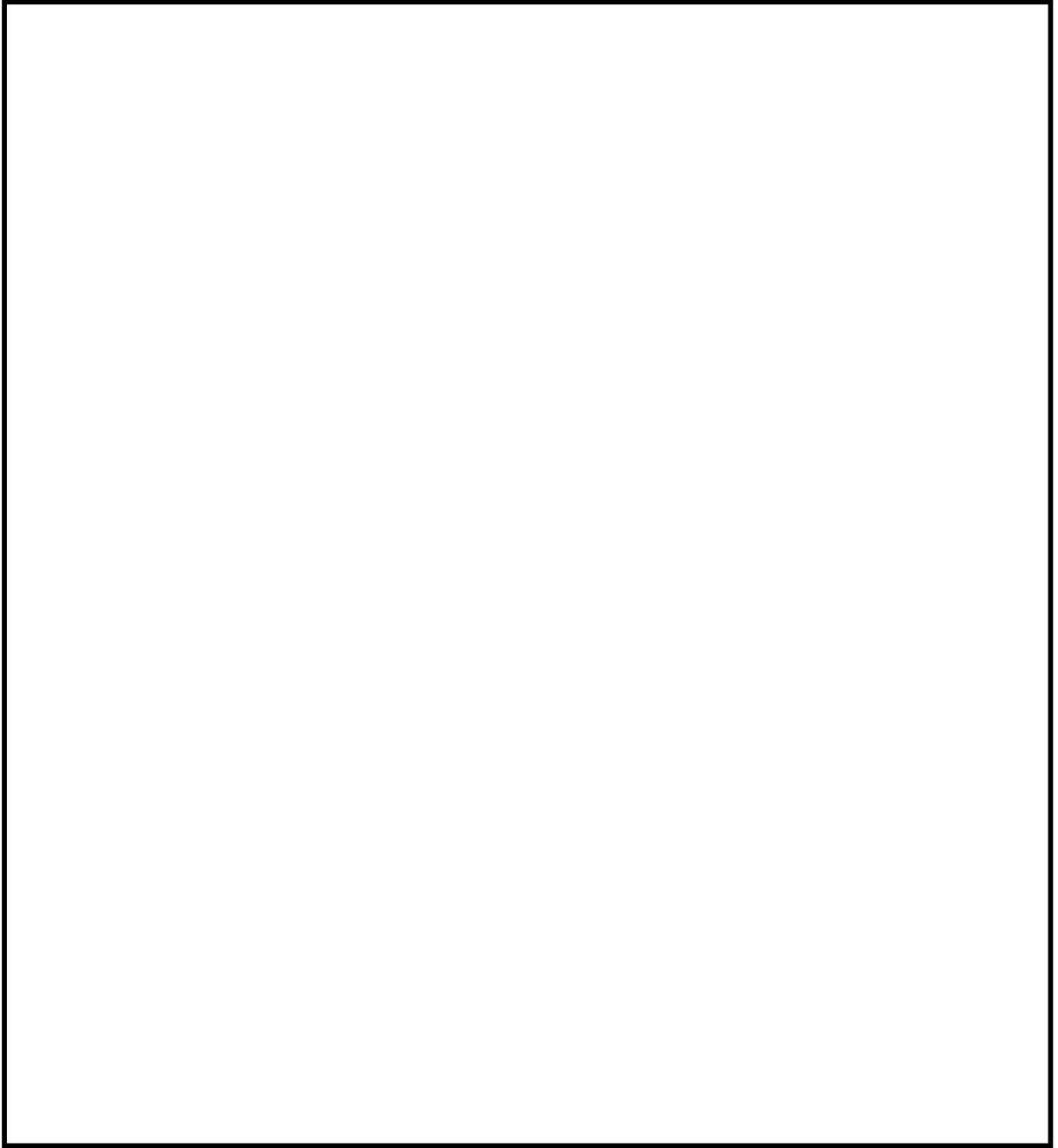
解析結果を (ロ)-第 E. 4 表に示す。ベンチマーク解析の結果、本輸送物の臨界解析に用いた計算コード及び核データは妥当な結果を与えるといえる。

(㉓)-第 E. 4 表 臨界解析結果

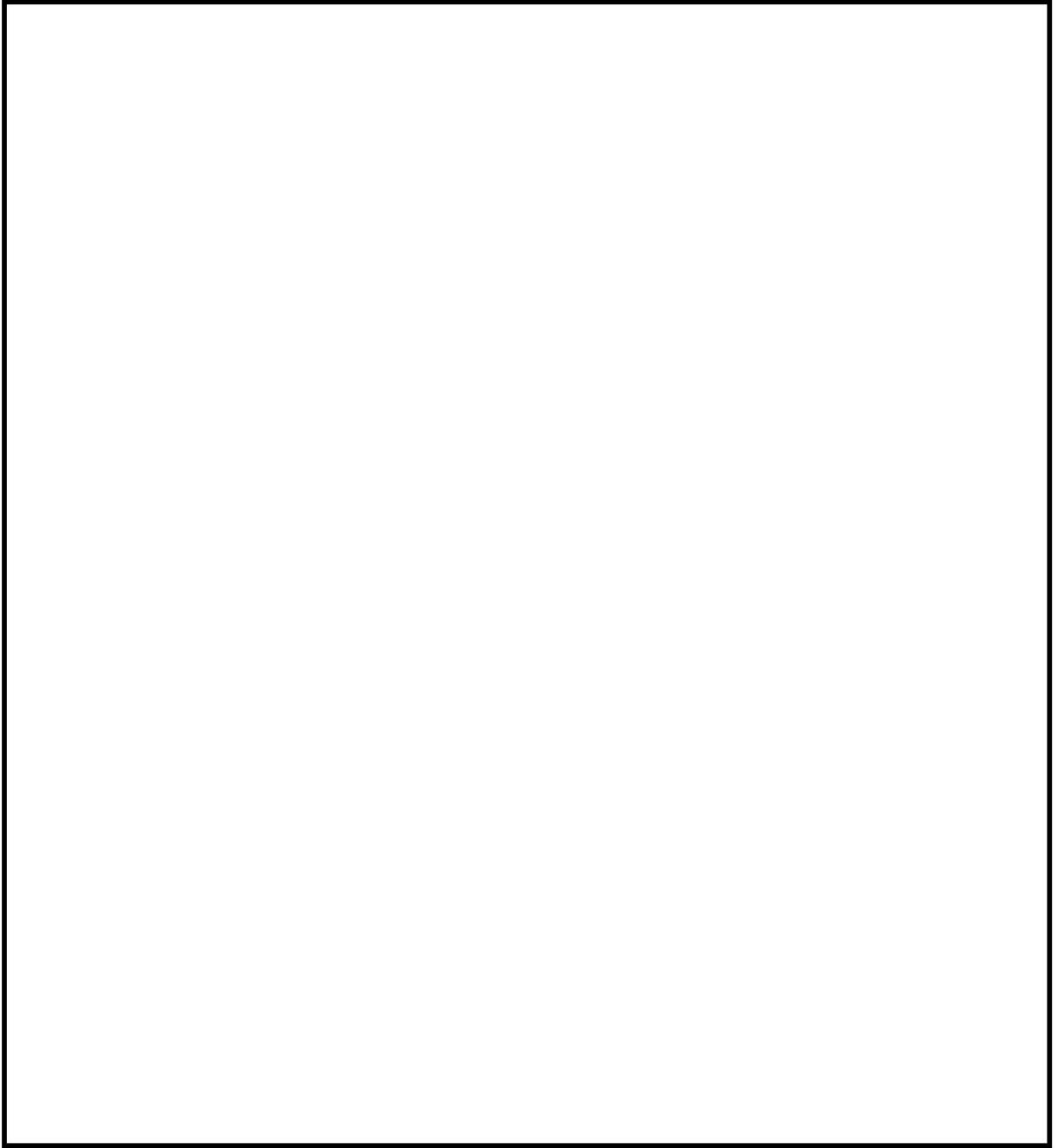
	ケース数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
臨界実験(1)		0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験(2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験(3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
合計		0.99940	0.00309	1.01172	0.99363



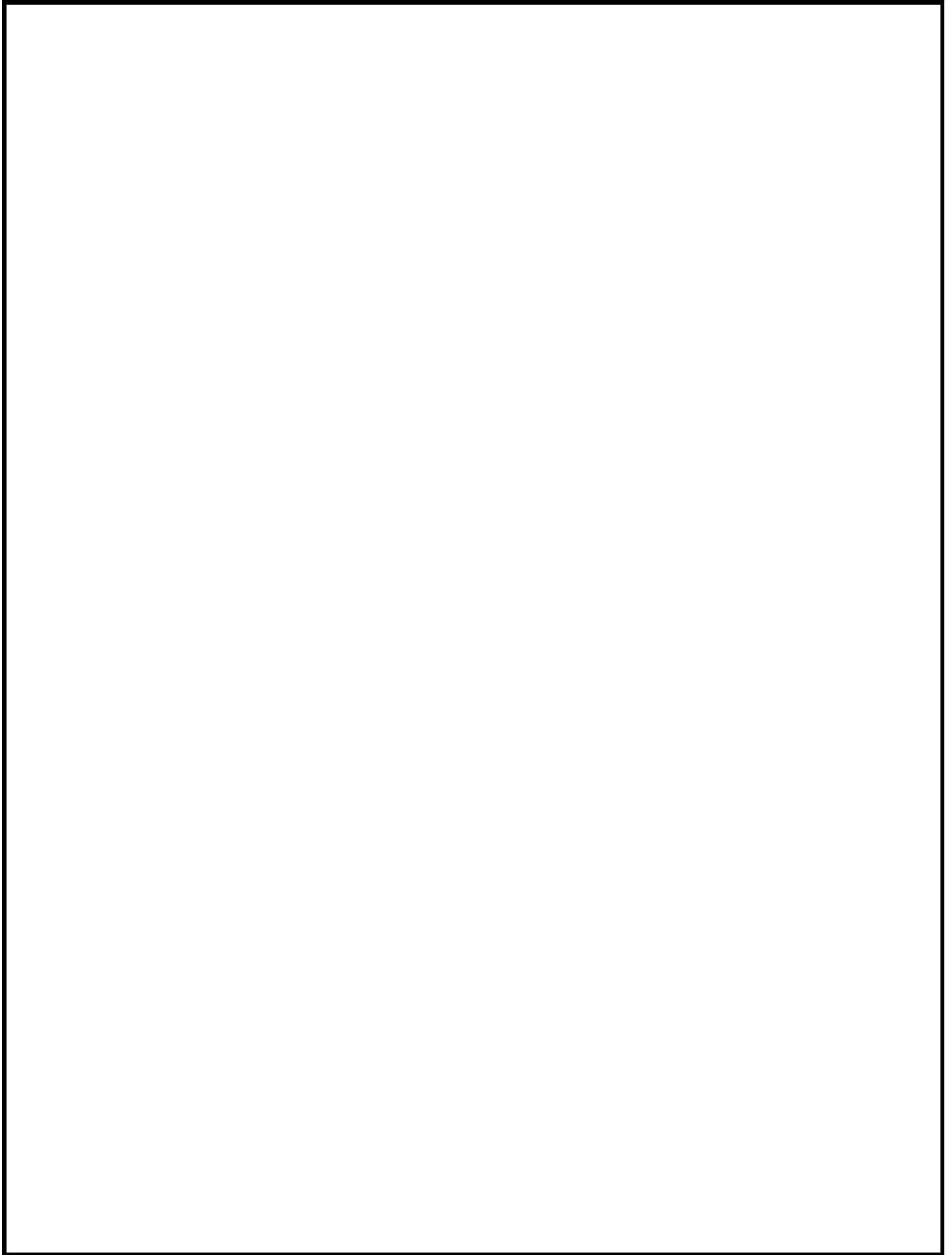
(㉓)-第 E. 4 図(a)  臨界実験に用いた燃料棒



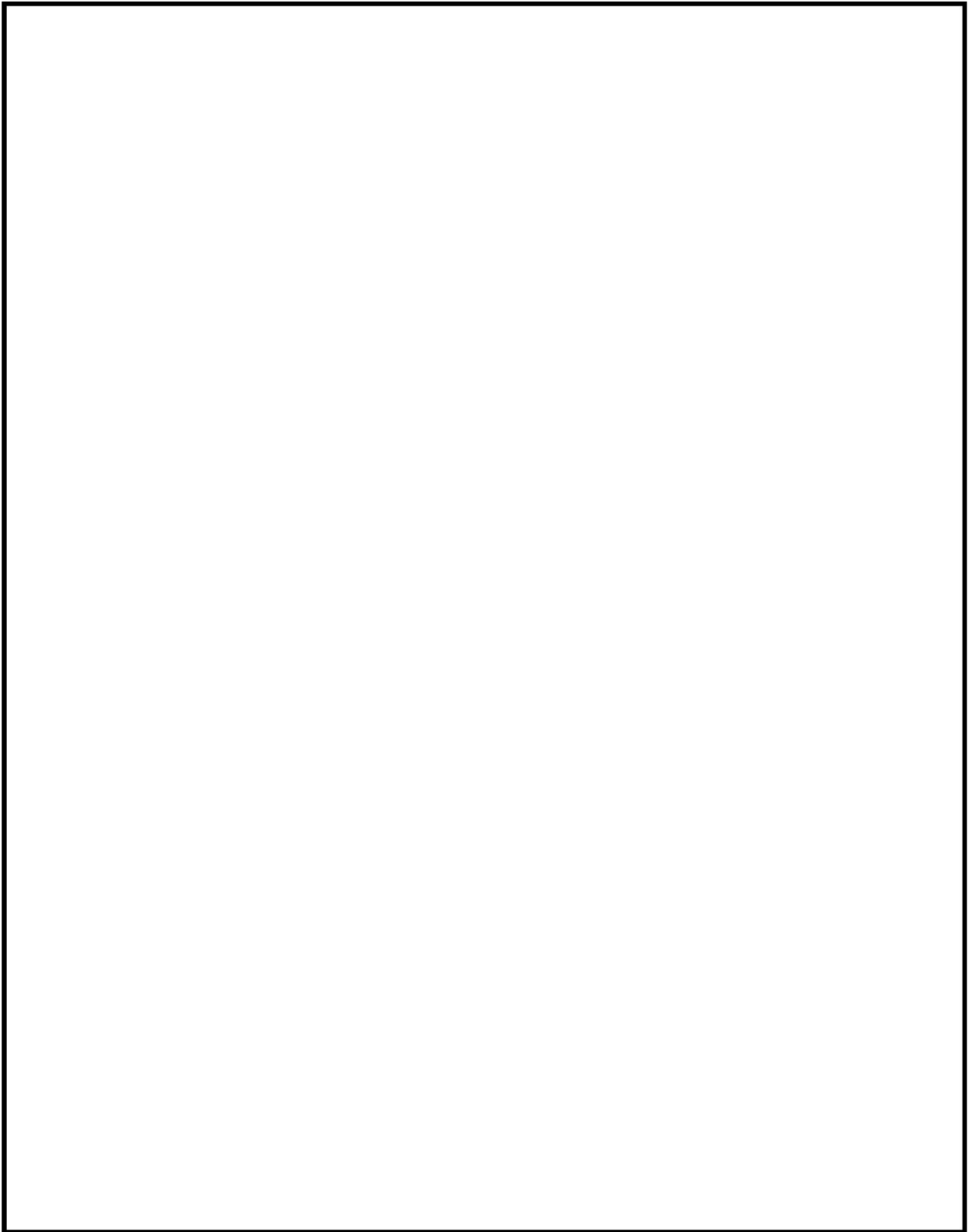
(a)-第E.4図(b) 臨界実験体系(1)



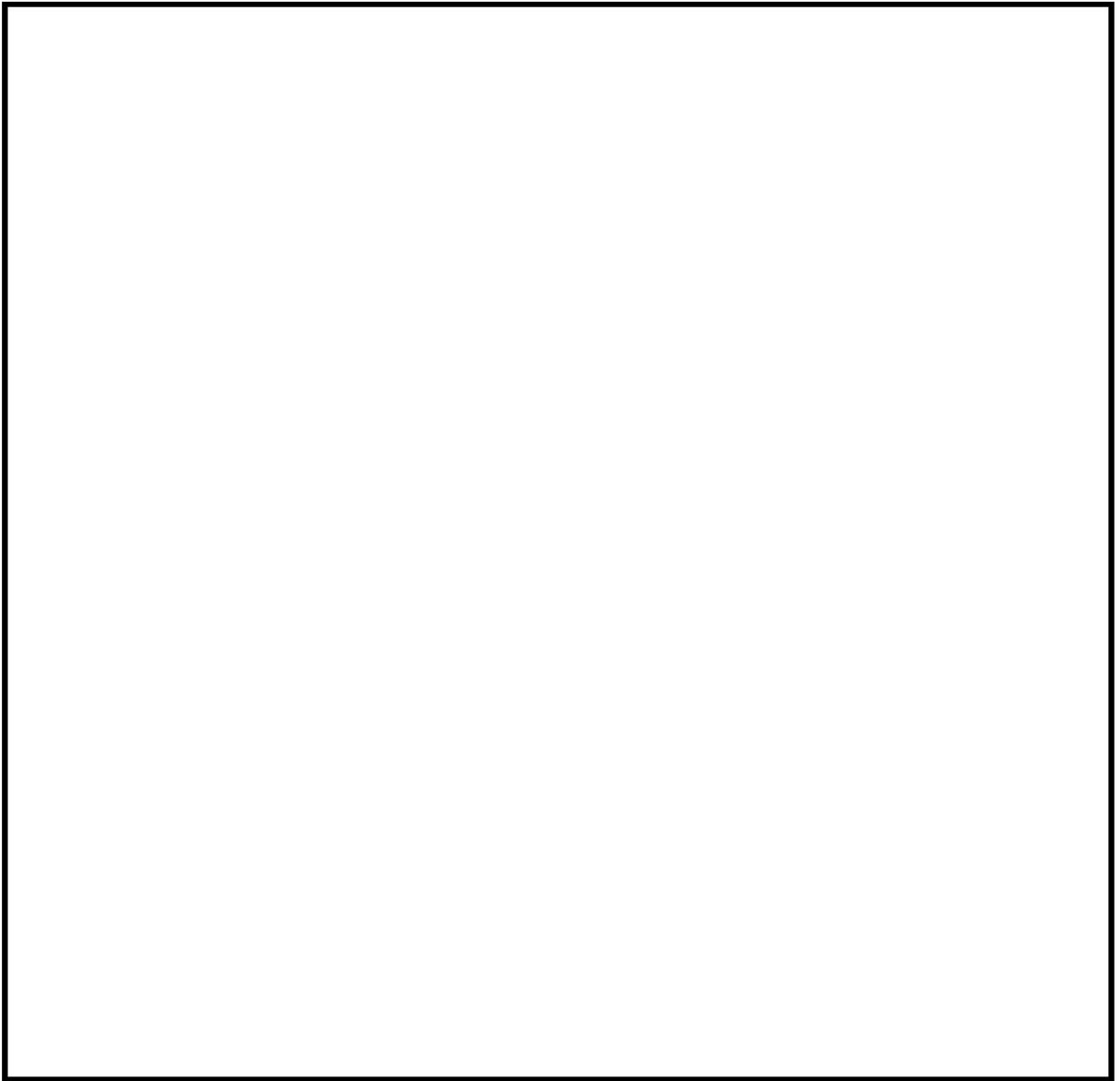
(□)-第E.5 図 臨界実験体系(2)



(㉔)-第E.6図 臨界実験体系(1)



(ロ)-第E.7図 臨界実験体系(2)



(㉓)-第E.8 図 臨界実験体系

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。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 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。

(ロ)-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。

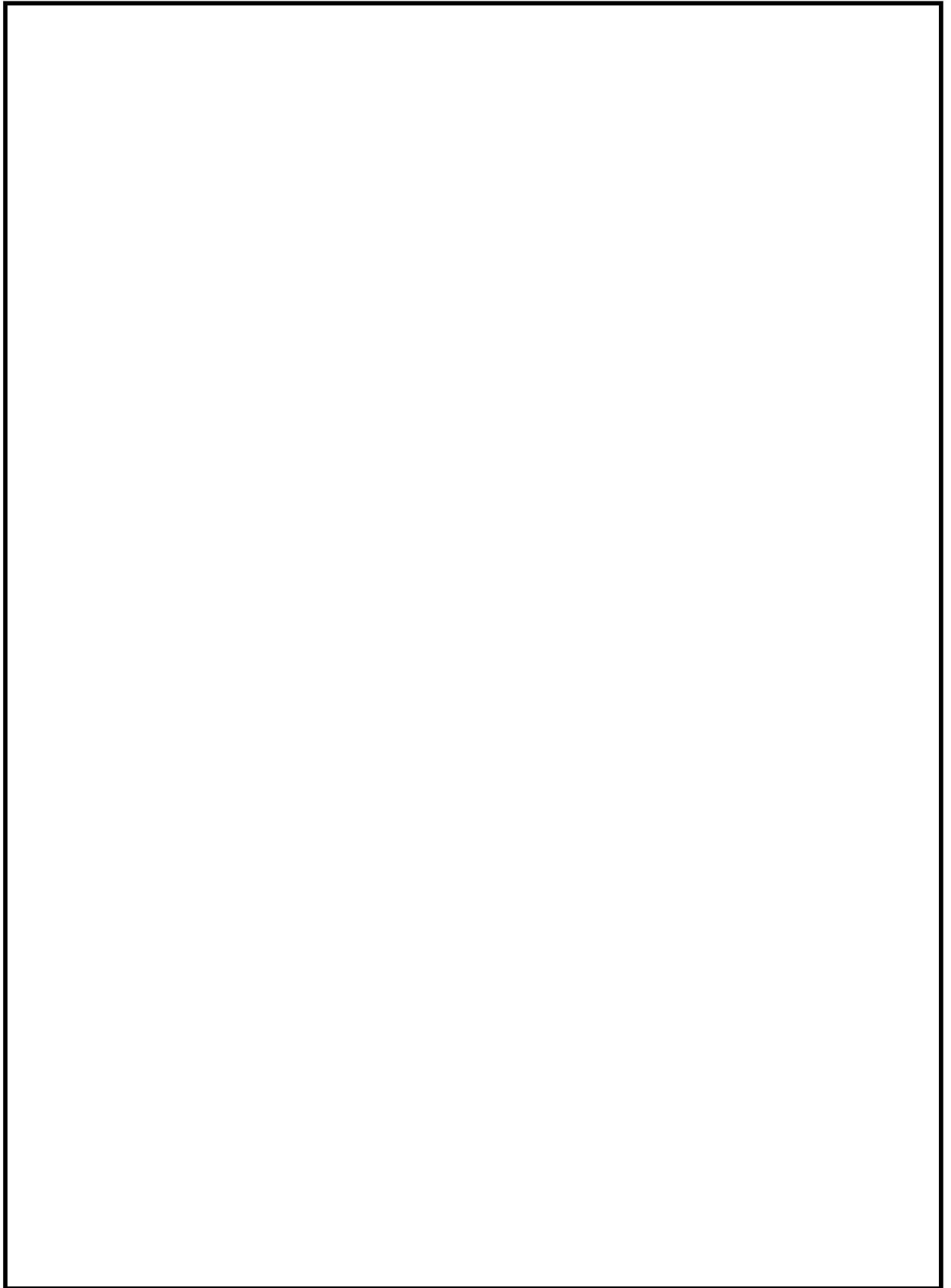
1. 解析モデル

(a)-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。

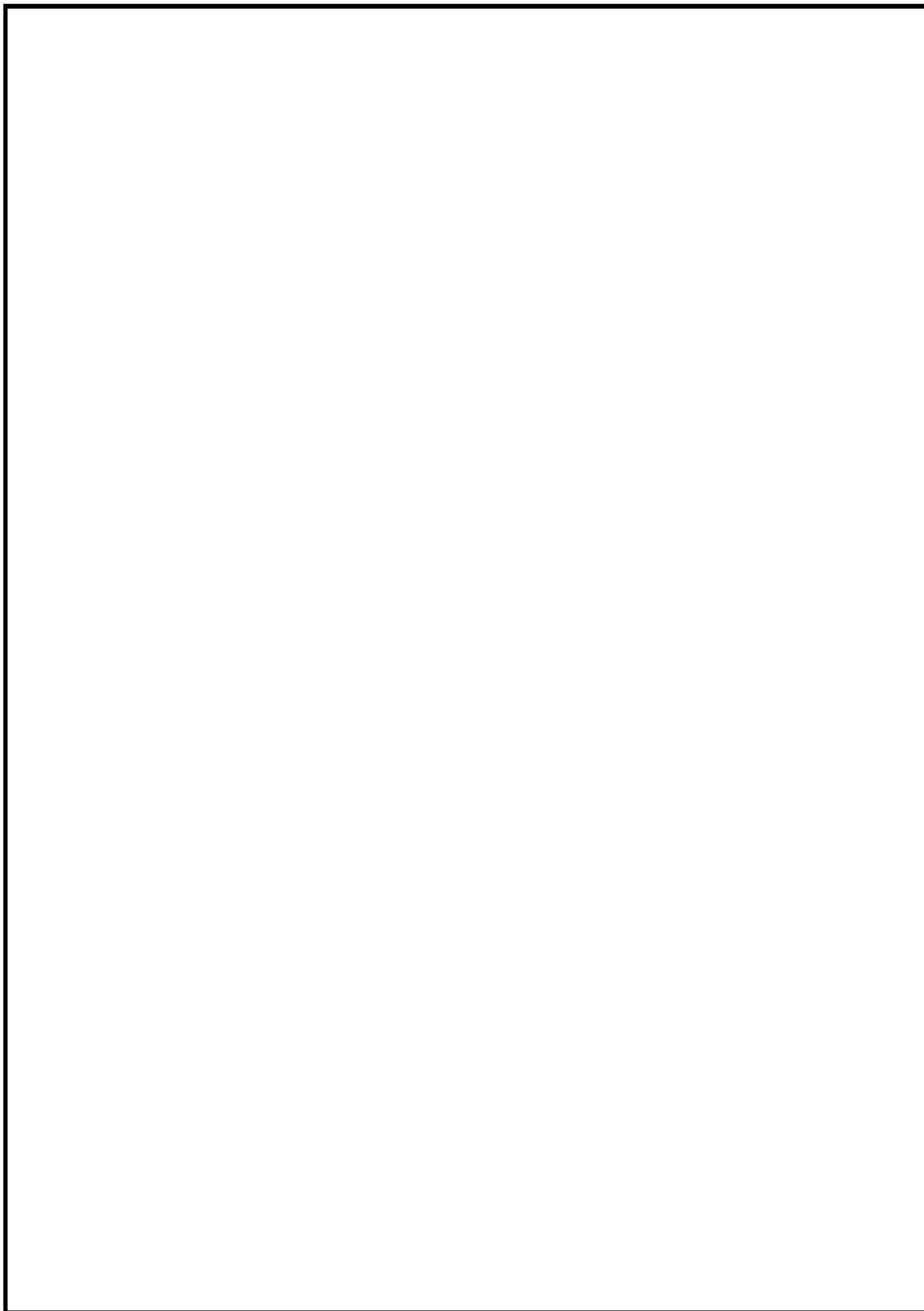
- ・輸送物が無限に配列している体系とする。
- ・中性子遮蔽材を無視する。
- ・緩衝体及び三次蓋を無視する。
- ・中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート板厚、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚及びバスケット格子内のりの公差を考慮する。
- ・バスケット格子内の燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるように配置する。
- ・胴内には水が存在するものとする。
- ・バスケットプレート及び中性子吸収材は、実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し、それ以外の部分は水に置き換える。

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(a)-第 E. 付 3 表に示す。

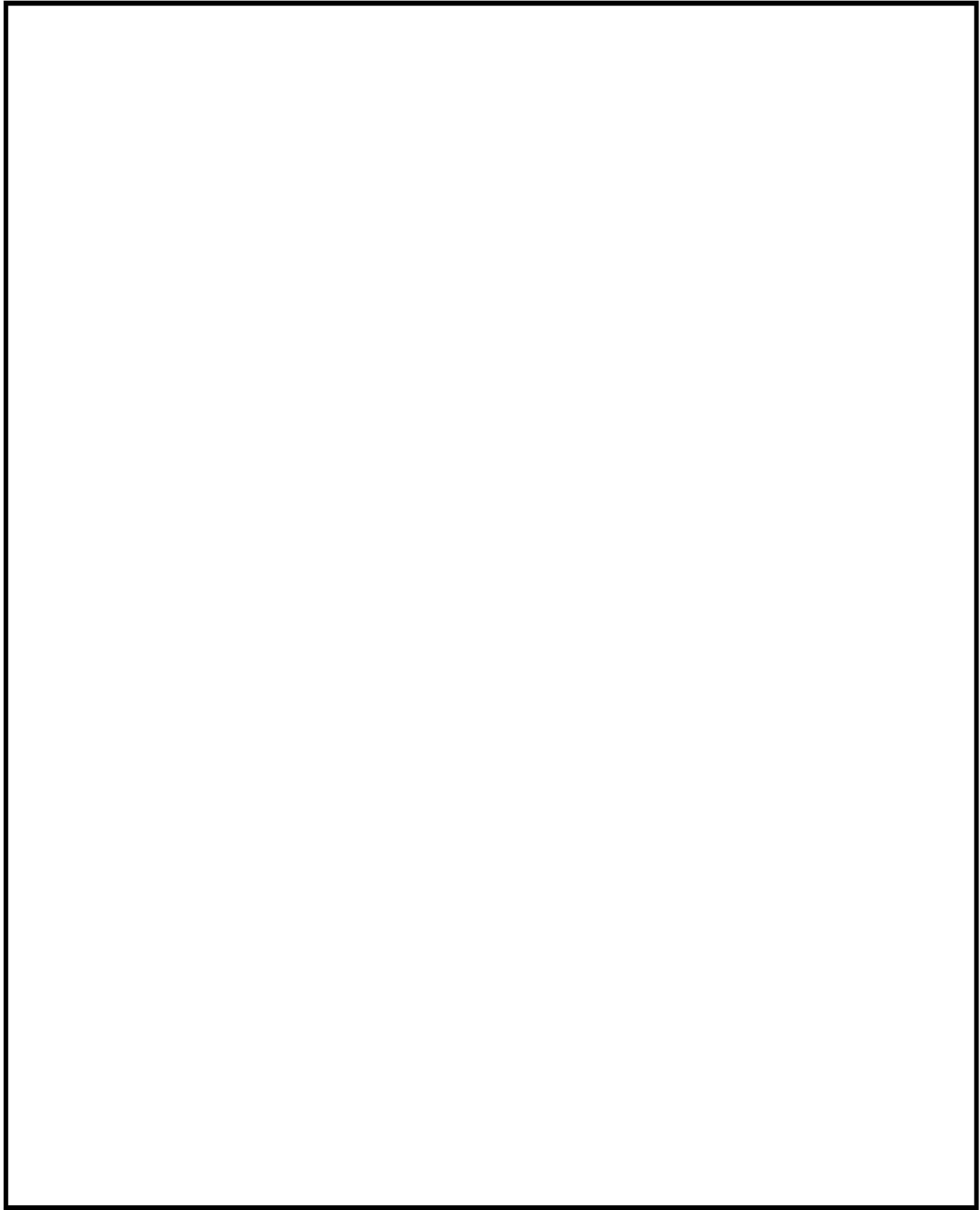
輸送物の中性子実効増倍率を最も大きく評価するために、胴内の水の密度は 1.0 g/cm^3 とした。



(ロ)-第 E. 付 1 図(a) 臨界計算モデル (縦断面図)



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



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

(ロ)-第 E. 付 3 表 輸送物各領域の原子個数密度

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

(a)-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 (keff) 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。

(a)-第 E. 付 4 表 臨界計算結果

	keff	σ	keff + 3 σ
24体収納時	0. 91053	0. 00045	0. 91187

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	219	206
胴 (本体部)	137	121
胴 (フランジ部)	112	111
胴 (底板)	147	133
一次蓋	109	110
一次蓋ボルト	110	109
二次蓋	99	105
二次蓋ボルト	101	105
外筒	129	114
下部端板	129	115
蓋部中性子遮蔽材カバー	106	108
底部中性子遮蔽材カバー	126	117
トラニオン	132	118
バスケット	191	177
伝熱フィン	131	115
金属ガスケット	109	109
中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	136	127

(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	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¹⁾。</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¹⁾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¹⁾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が 275 °C以下、周方向応力が 100 MPa 以下¹⁾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、219 °C及び 94 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、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 1.5×10^{15} n/cm² であり、炉内の中性子照射量 ($10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm²) 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¹⁾。</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¹⁾。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¹⁾。</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²⁾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 (147 °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³⁾、⁴⁾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 10^{16} n/cm² オーダーまでは、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、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 5.9×10^{14} n/cm² 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⁶⁾。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⁷⁾。</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 (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（191℃）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 ⁸⁾ 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1MPa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 ² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない ⁸⁾ 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 1.5×10^{15} n/cm ² 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（10wt%）を考慮しても腐食の影響はない ^{2)、7)} 。 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 (132 °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^{3)、4)}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 10^{17} n/cm² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない⁹⁾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 5.9×10^{14} n/cm² 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¹⁰⁾、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 (129 °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³⁾、⁴⁾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 10^{16} n/cm² オーダーまでは、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、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 3.3×10^{12} n/cm²、また、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 5.9×10^{14} n/cm²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¹⁰⁾、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 (129 °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³⁾・⁴⁾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 10^{17} n/cm² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない⁹⁾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 8.2×10^{13} n/cm² 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¹⁰⁾、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 (136 °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 ² 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 ^{11)、12)} 、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 1.6×10^{14} n/cm ² 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 (109 °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 ^{13)、14)} 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 ² オーダー又は 10^{21} n/cm ² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない ^{15)、16)} 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 2.0×10^{14} n/cm ² 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 ¹⁷⁾ 。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 ⁶⁾ 、外被材の製造公差 ^(注) 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 :) 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 (131 °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¹⁸⁾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 10^{16} n/cm² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁹⁾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 1.6×10^{14} n/cm² 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¹⁰⁾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²⁰⁾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℃)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℃以下)である。また、設計用強度・物性値が規定³⁾、⁴⁾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10^{17} n/cm² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない⁹⁾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1×10^{14} n/cm²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	<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 300 °C以下)である。また、設計用強度・物性値が規定³⁾、⁴⁾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 10^{16} n/cm² オーダーまでは、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、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 1×10^{14} n/cm² 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>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。</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)。</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(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²¹⁾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^(注)。</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 10^{16} n/cm² オーダーまでは、顕著な機械的特性変化は見られない²²⁾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 1×10^{13} n/cm² 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-24P 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^{12)、23)~25)}、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 (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 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 (°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 °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、

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、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 2.0 %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^{12)、23)~25)}。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^(注)

蓋部 (°C)	側部 (°C)	底部 (°C)
109	133	136

(注) 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