

(㍀)-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。

(㍀)-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。

(ロ)-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

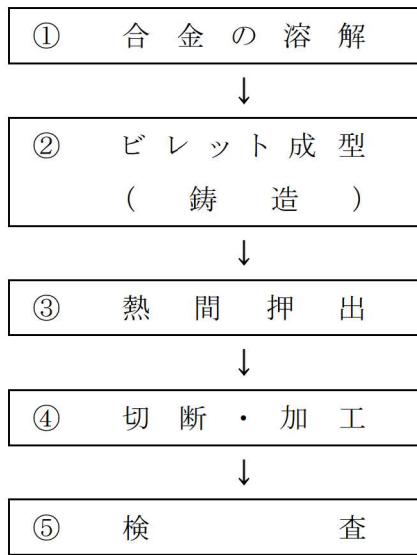
(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

(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。

(ロ)-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(ロ)-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 (I) 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).

(二)章B 熱 解 析

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。

- ・ 洞内に収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、主に洞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洞内面に伝えられる。
- ・ 洞内面に伝えられた熱は、熱伝導によって洞外面に伝えられる。
- ・ 洞外面に伝えられた熱は、主に洞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。

(□)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、(□)-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		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 <small>2)、5)</small>	<input type="text"/> <small>(注1)</small>	—	300	26.85	2.00 <small>(注2)</small>	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 <small>2)、6)</small>	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
<input type="text"/> ⁸⁾	<input type="text"/> <small>(注3)</small>	—	300	26.85	<input type="text"/>	<input type="text"/>
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
1100	826.85					
<input type="text"/> ⁸⁾	<input type="text"/>	—	300	26.85	<input type="text"/>	<input type="text"/>
			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

(注3) の値

(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 (μPa・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. 二次蓋 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。

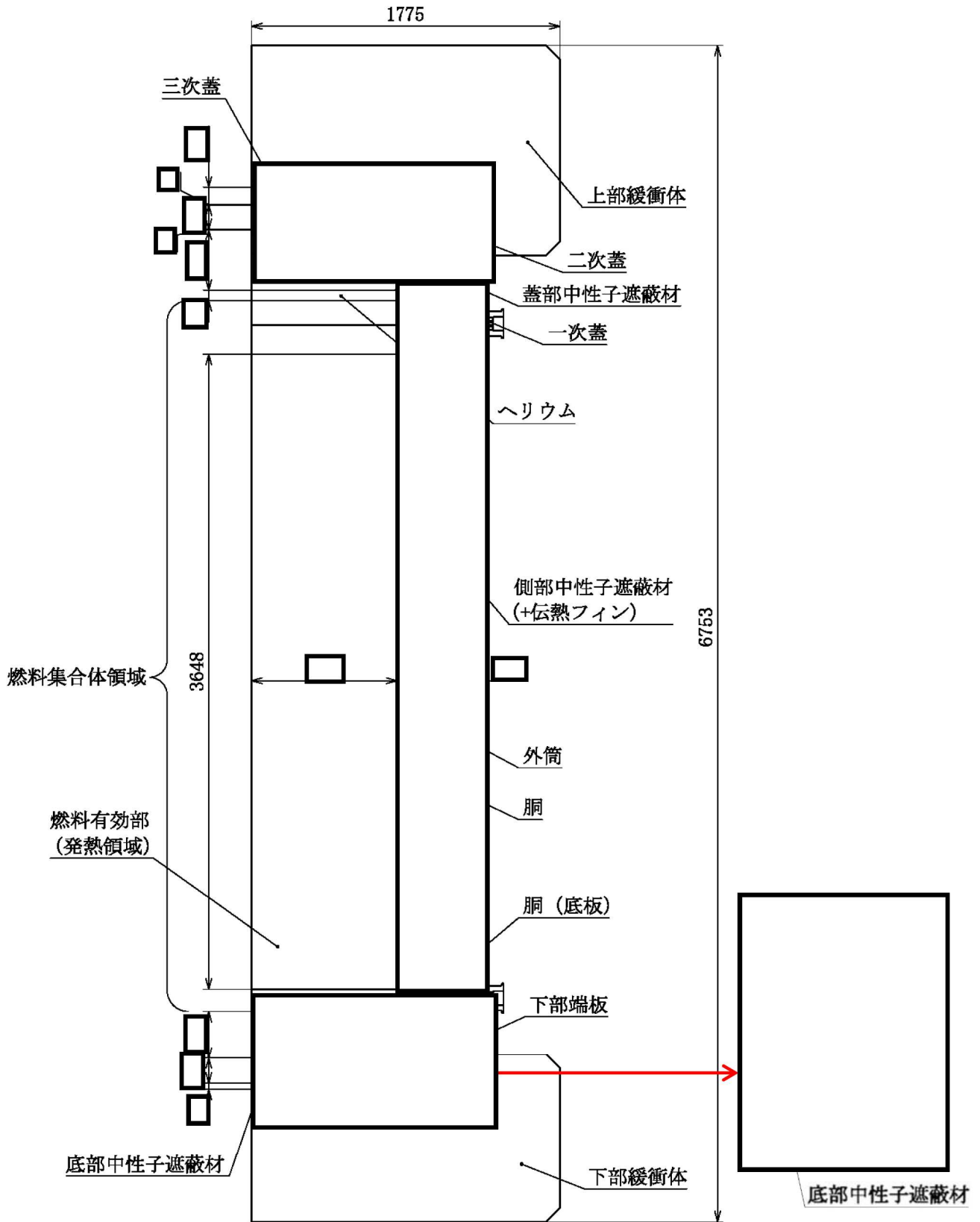
全体モデルでは、バスケット格子の内側の領域（以下「燃料集合体領域」という。）を燃料集合体構成部材（ジルカロイ、二酸化ウラン、ステンレス鋼、インコネル）及び充填気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料集合体領域の平均密度及び軸方向の平均熱伝導率は体積平均値とし、平均比熱は重量平均値とする。また、径方向の平均熱伝導率については、燃料有効部のみ燃料集合体モデルの解析結果を基に設定した等価熱伝導率とし、それ以外の領域においては体積平均値とする。

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。

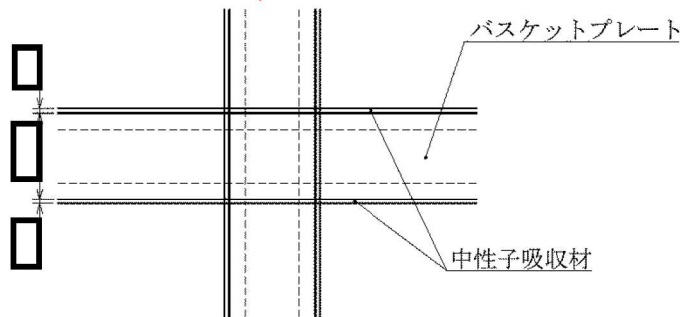
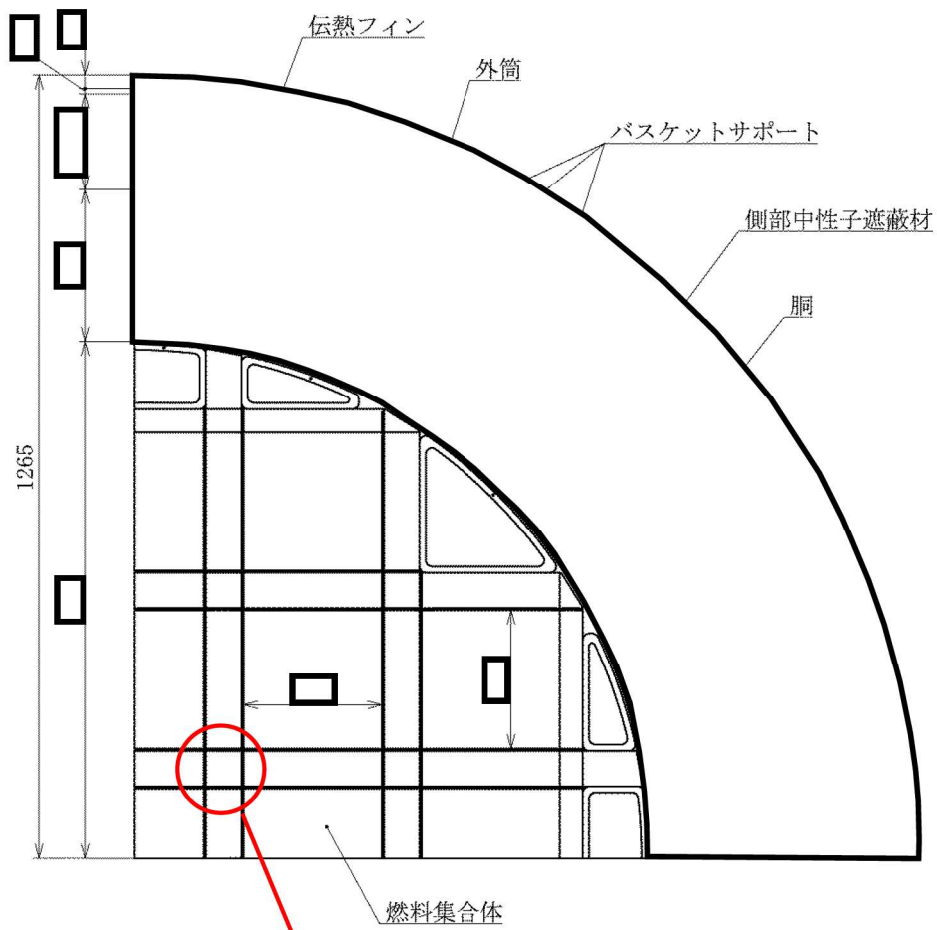
一般の試験条件のうち、水噴霧試験では輸送物に変形しないが、自由落下試験、積み重ね試験及び貫通試験では緩衝体に変形が生じる。ただし、一般の試験条件では、緩衝体に変形しないものとする方が収納物の温度及び緩衝体最高温度を高く評価できることを確認したことから、一般の試験条件の熱解析では、輸送物の変形は考慮しない。

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



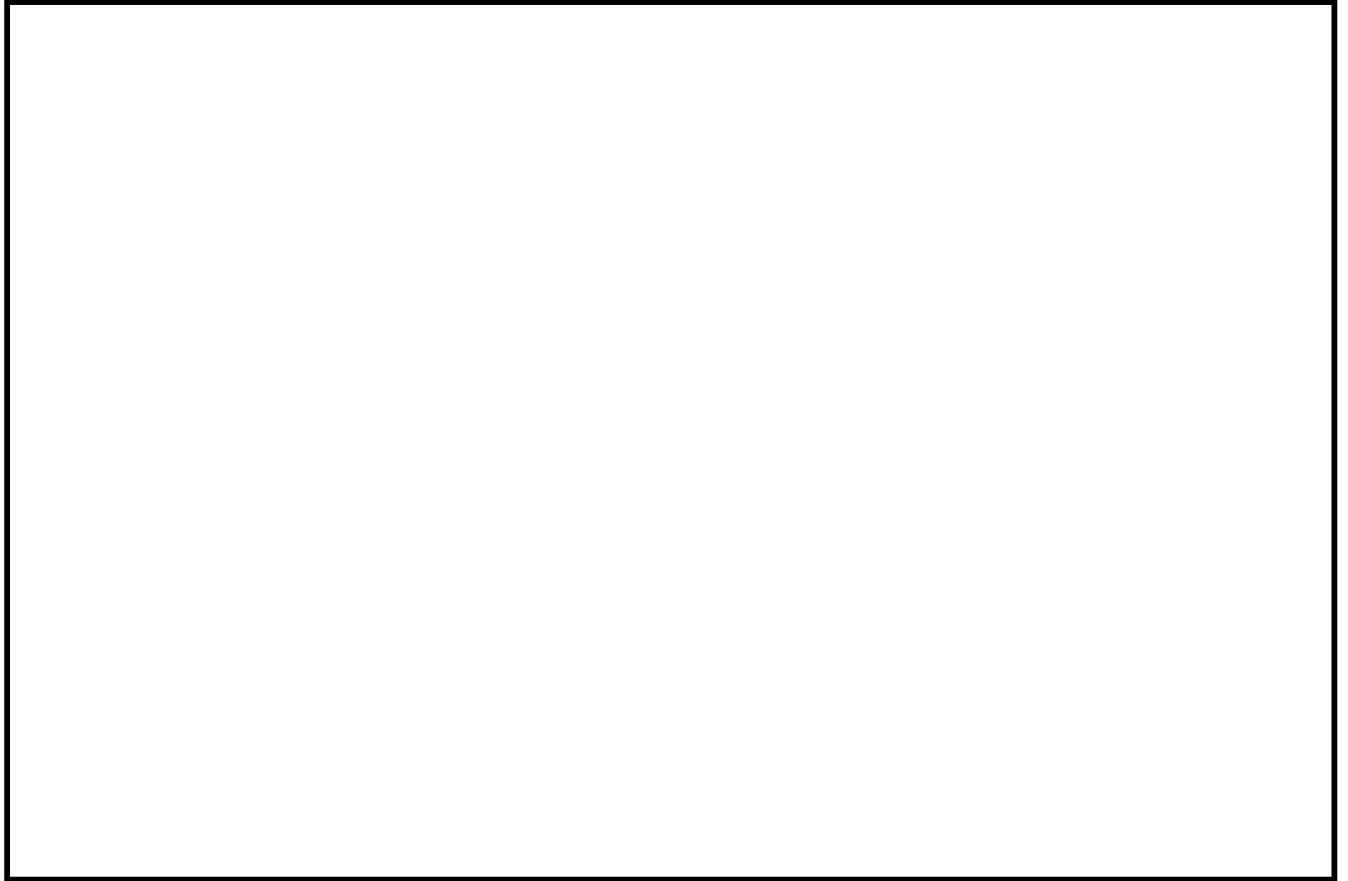
(単位：mm)

(□)-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)

(□)-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)

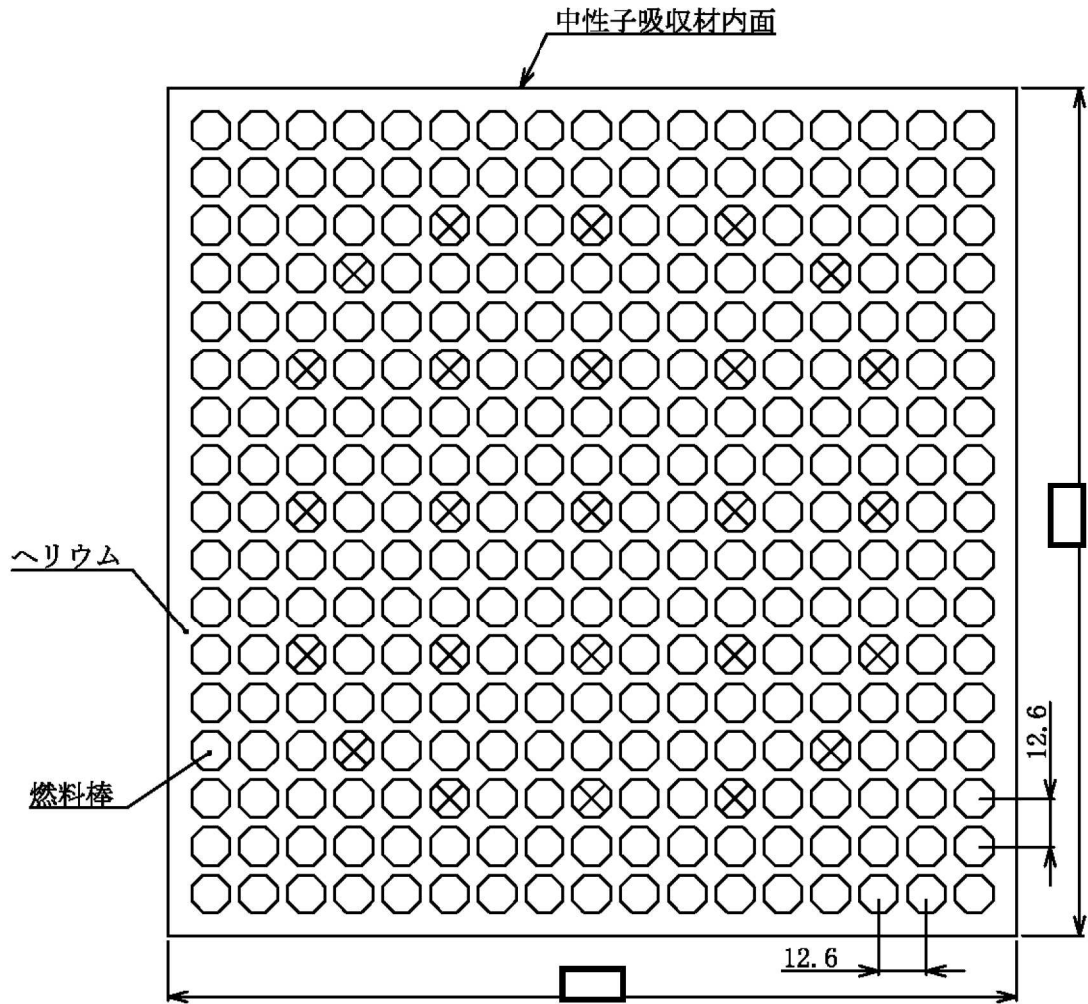


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

(□)-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。

(□)-第 B. 3 図 燃料集合体モデル形状図



(ロ)-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(□)-第 B.5 表に示す。また、太陽熱放射を(□)-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(□)-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(□)-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 °C		-20 °C
	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	—	

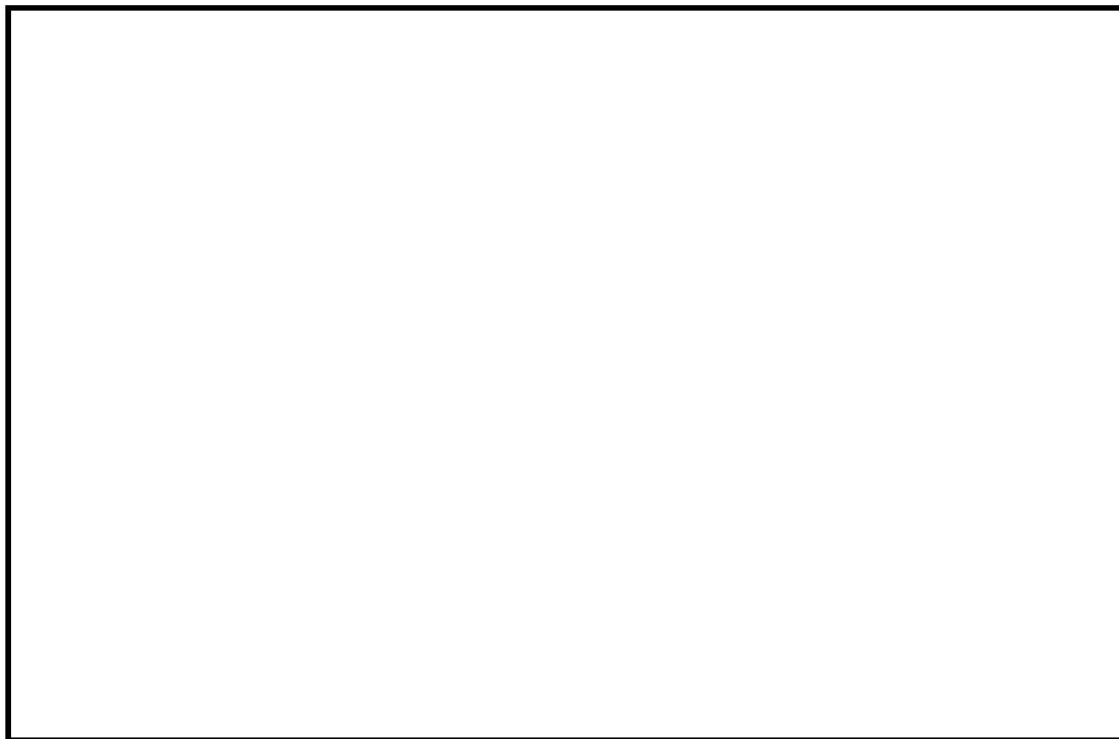
(ロ)-第 B.6 表 太陽熱放射データ

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。

輸送物 1 基あたりの崩壊熱量 (W)

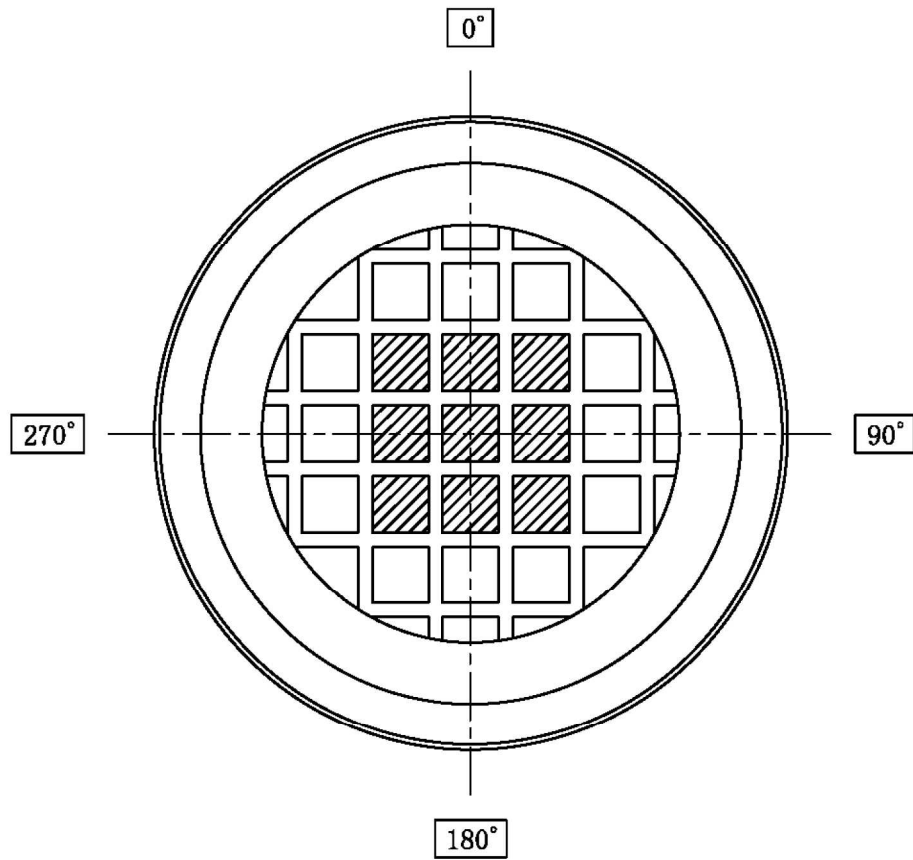



← 上部


軸方向位置

下部 →

(□)-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

(□)-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。

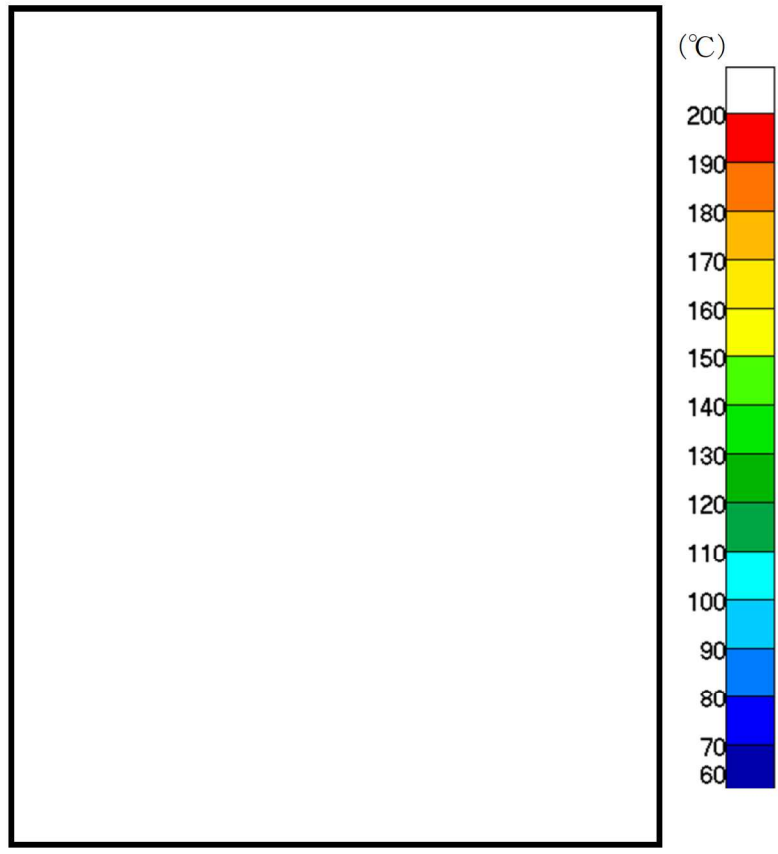
一般の試験条件において、各部の温度は B. 3 に示す使用可能温度を超えることはない。一方、太陽熱放射のない場合に人が容易に近づきうる表面としては、(□)-第 B. 7 表に示すように緩衝体表面は 80 °C であり、基準値の 85 °C 以下であるが、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 88°C 及び 99 °C であり 85 °C を超える。ただし、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網 (64°C 以下 (B. 6. 3 参照)) を取り付けて輸送するため^(注)、人が容易に近づきうる表面の温度は全て 85 °C 以下である。

(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。

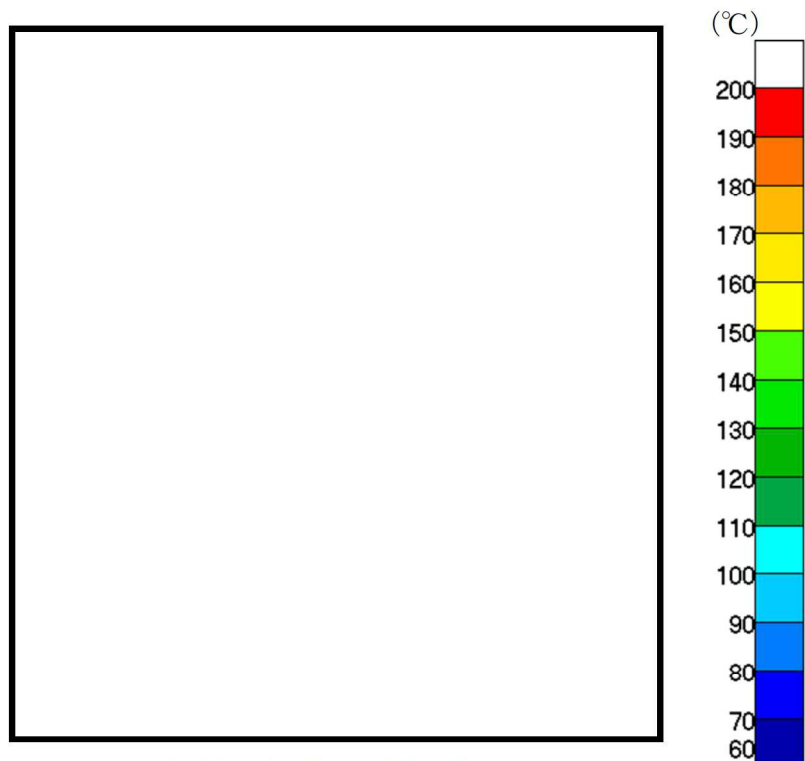
(ロ)-第B.7表 一般の試験条件における最高温度 (単位:℃)

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

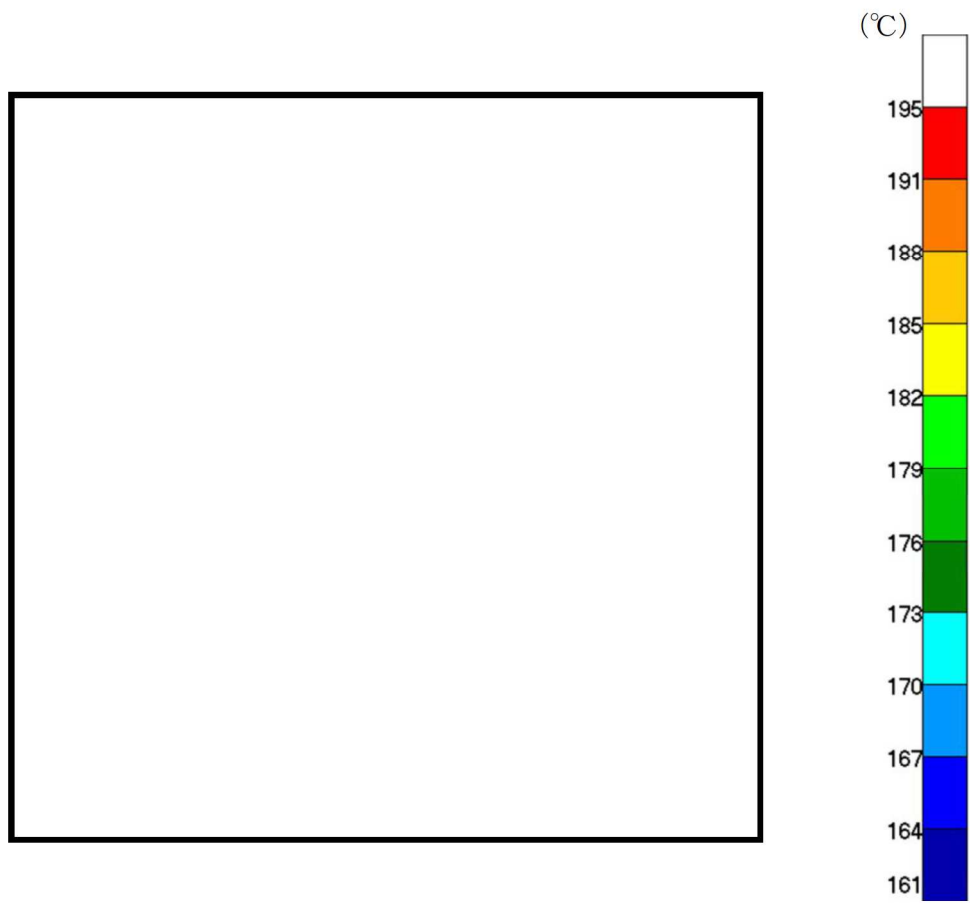


(全体)

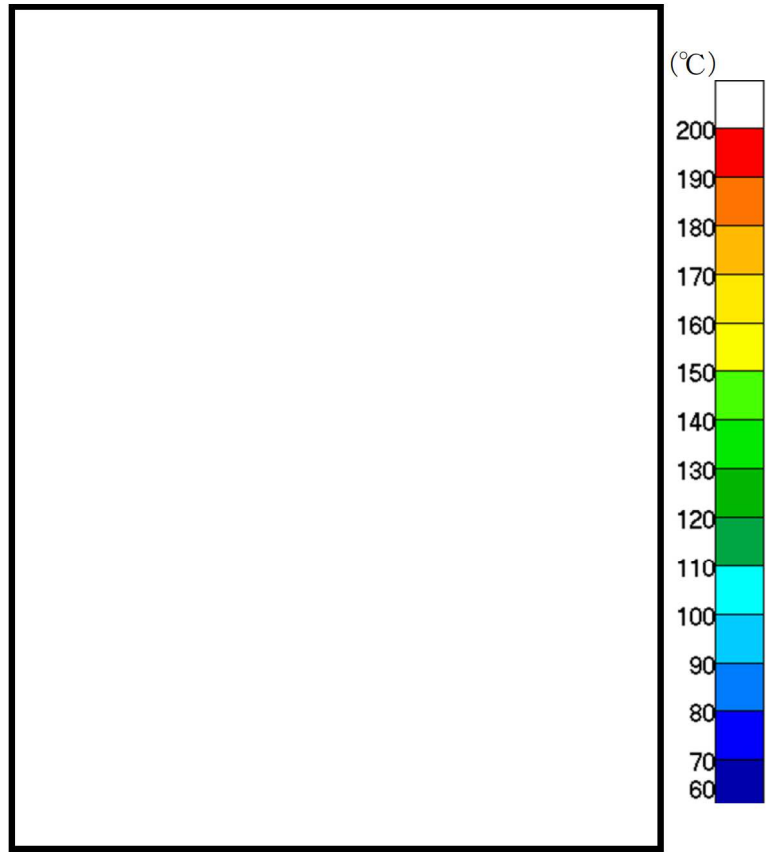


(燃料集合体最高温度位置断面)

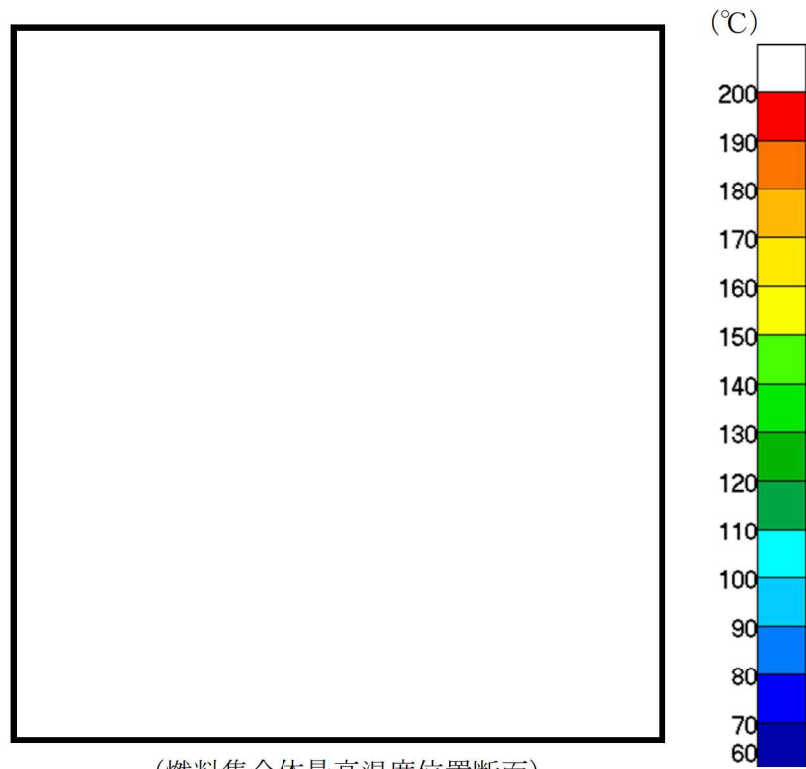
(㊦)-第 B. 7 図 一般の試験条件の全体モデル温度分布 (最高温度評価条件)



(ロ)-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、(a)-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、(a)-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。

$$P_0 = P_{c0} \frac{T_{0nor}}{T_{c0}}$$

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_{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_{c0} : 胴内ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(a)-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。

(㉓)-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(㉓)-第 B. 9 表に示す。

(㉓)-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

二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(□)-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。

(□)-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	□
二三次蓋間体積	V_2	m ³	□
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℃)
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℃)
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(□)-第 B. 11 表に示す。

(□)-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(□)-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。

(ロ)-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 ¹⁶⁾	基準値以下	構造解析では □Cを使用 ^(注1)
バスケット	164	250 ¹⁷⁾	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 ⁷⁾	基準値以下	—
一次蓋金属ガスケット	109 ^(注3)	130 ¹³⁾	基準値以下	—
二次蓋金属ガスケット	104 ^(注4)	130 ¹³⁾	基準値以下	—
三次蓋 O リング	103 ^(注5)	150 ¹¹⁾	基準値以下	—
外筒	109	350 ¹⁸⁾	基準値以下	構造解析では □Cを使用 ^(注1)
胴	127	350 ¹⁸⁾	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	胴内雰囲気がり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、(ロ)-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。

(□)-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

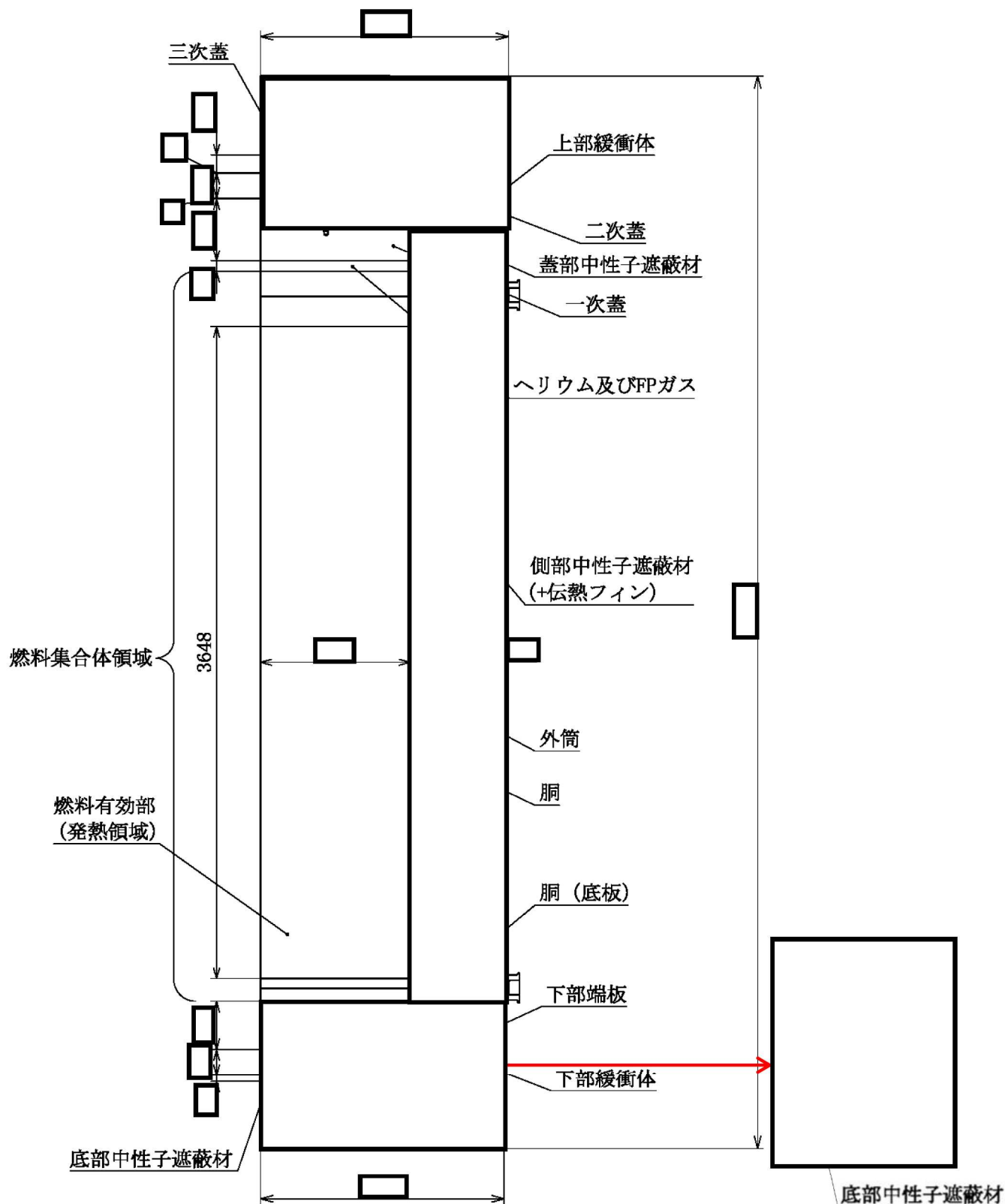
燃料集合体モデル ……… 燃料集合体

(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。

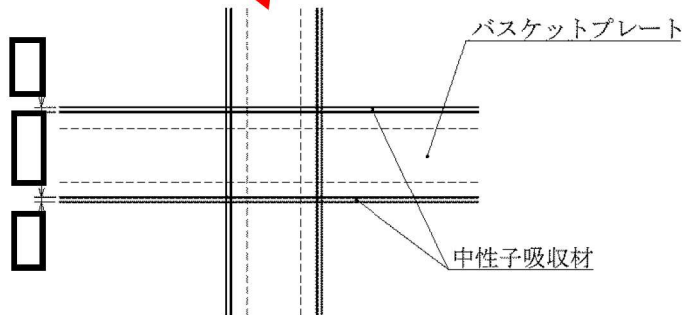
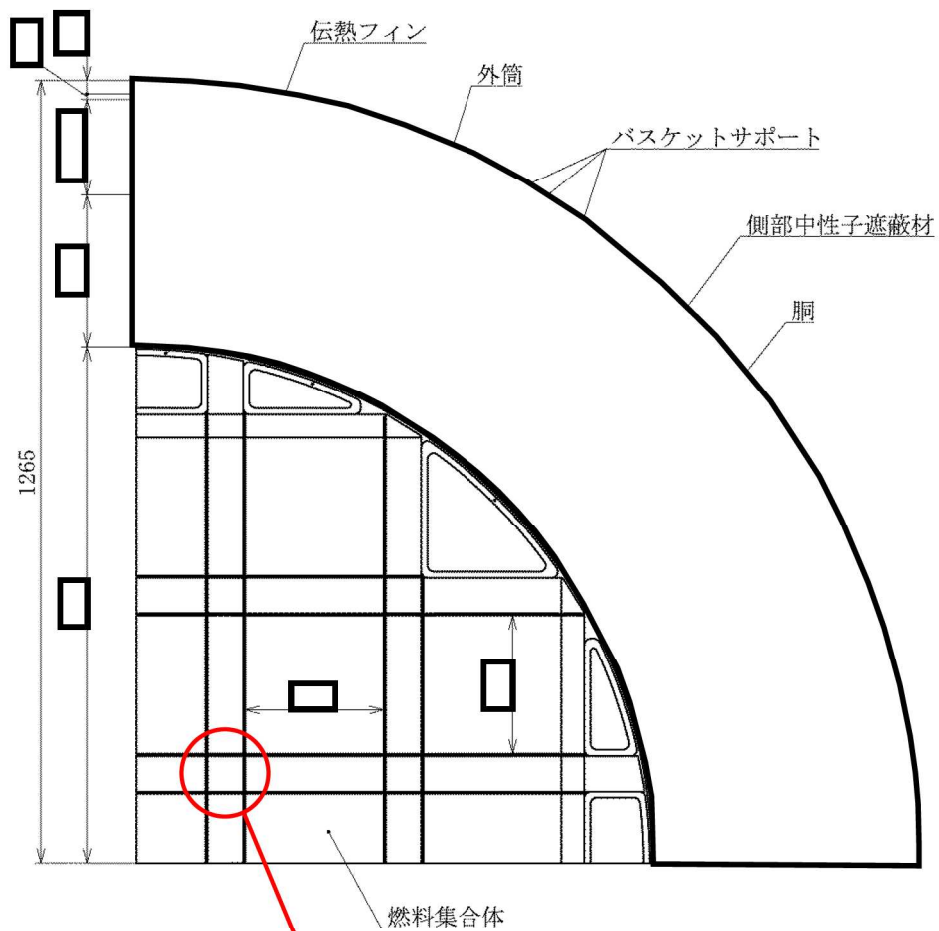
- ・ 9 m 落下試験により緩衝体が変形するため、変形後の形状をモデルに考慮した。
- ・ 1 m 貫通試験における輸送物の変形は外筒、側部中性子遮蔽材及び緩衝体に生じる変形である。外筒及び側部中性子遮蔽材には直径 150 mm の範囲の変形が生じるが、熱解析結果への影響は無視しうるものであることから、解析モデルでは外筒及び側部中性子遮蔽材が変形しないものとした。また、緩衝体に穴があく可能性があるが、局所的であり断熱効果への影響は無視しうるものであることから、解析モデルでは緩衝体の変形しないものとした。
- ・ 9 m 落下試験により全燃料棒からヘリウム及びFP ガスが放出されるものと仮定し、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(□)-第 B.10 図及び(□)-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(□)-第 B.3 図及び(□)-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。



(単位：mm)

(□)-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(□)-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(□)-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(□)-第 B. 14 表に示す。
- ・塗装は火災中に焼損するため、火災後の容器表面に鋼の酸化面の放射率を用いるとともに、火災後に延焼しないとした。
- ・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。

(□)-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 ²⁰⁾	1.0 ²¹⁾
緩衝体、 トラニオン 表面	放射率	0.15	0.8	0.15
	吸収率	0.5 ¹⁹⁾	0.8 ²⁰⁾	1.0 ²¹⁾

(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)	(°C)	
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

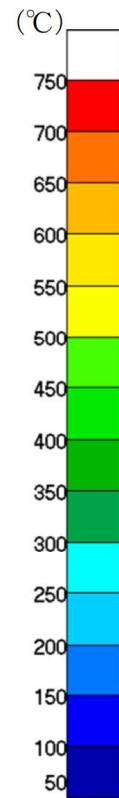
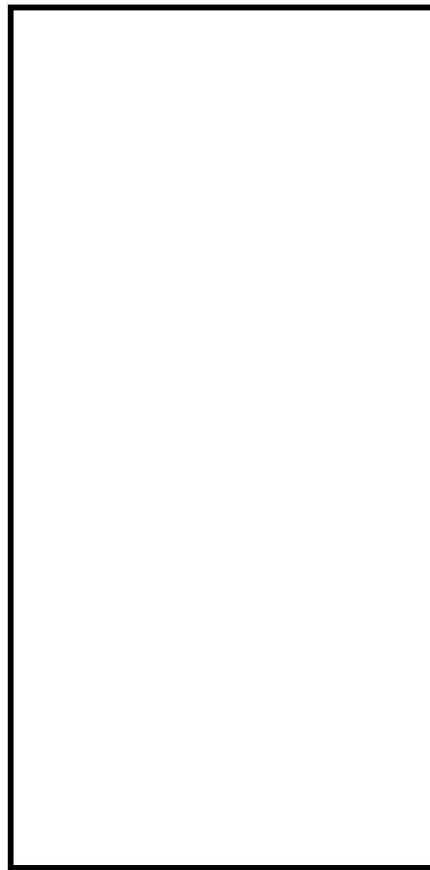
特別の試験条件における B. 5.1 に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた輸送物各部の最高温度、及び火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間を (□)-第 B. 15 表 に示す。

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。

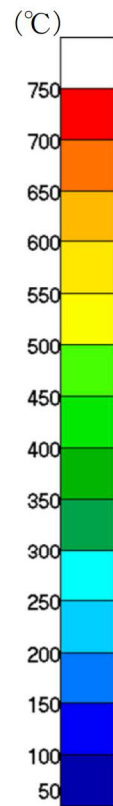
(ロ)-第 B. 15 表 特別の試験条件における最高温度

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。



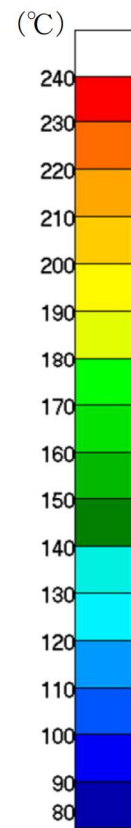
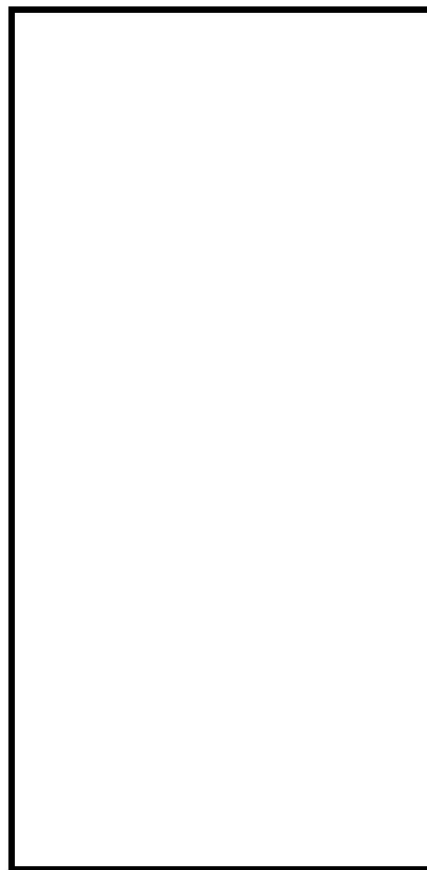
(全体)



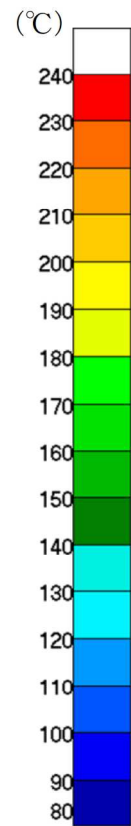
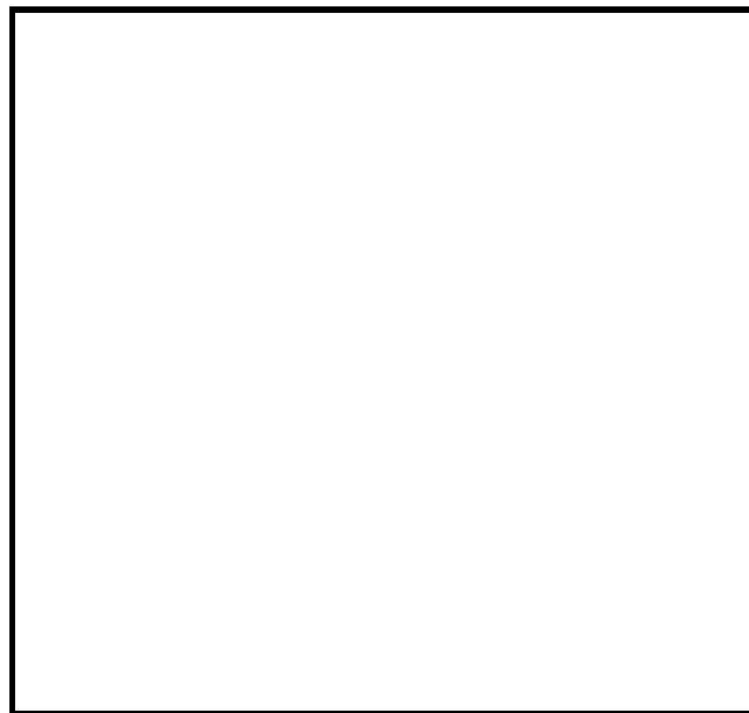
(燃料集合体最高温度位置断面)

(㊦)-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)



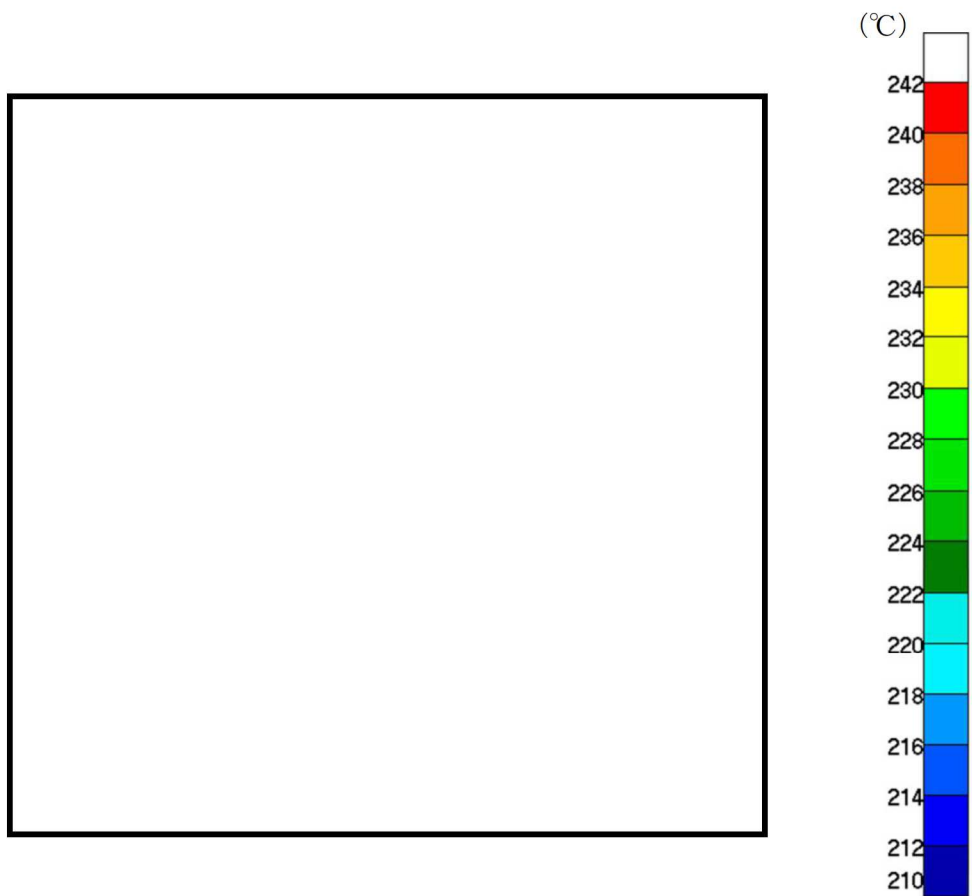
(全体)



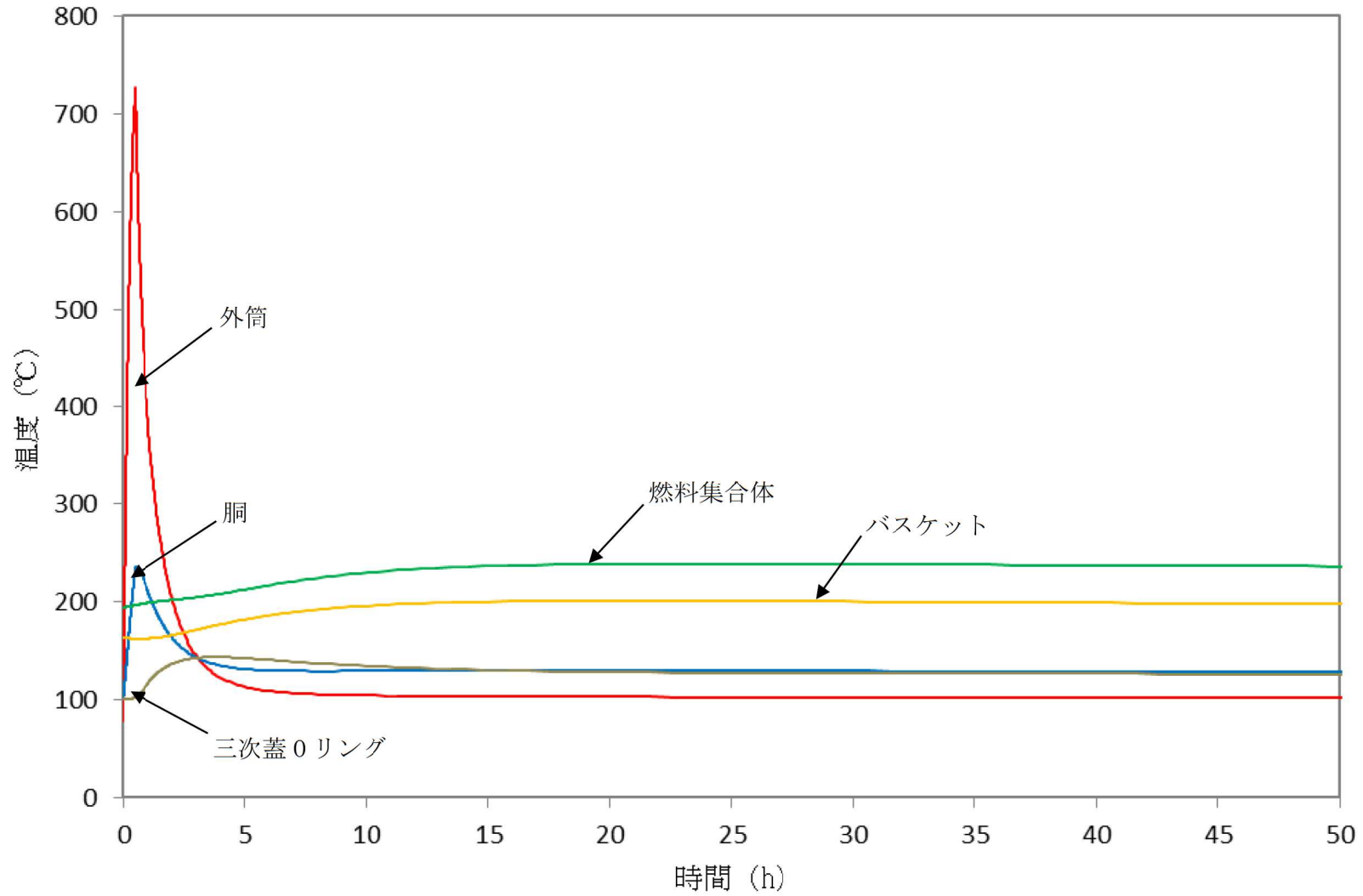
(燃料集合体最高温度位置断面)

(㊦)-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)



(ロ)-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)



(ロ)-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 (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(□)-第B.16表に示す。

(ロ)-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(ロ)-第 B. 17 表に示す。

(ロ)-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(□)-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。

(□)-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	<input type="text"/>
二三次蓋間体積	V_2	m ³	<input type="text"/>
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)
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二三次蓋間圧力	P_2'	MPa	0.353 (0.252 MPaG)

4. 二次蓋－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(□)-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_{FP}	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(□)-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、中性子吸収効果を無視し、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。

(ロ)-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、(ロ)-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。

(□)-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。

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

ただし、

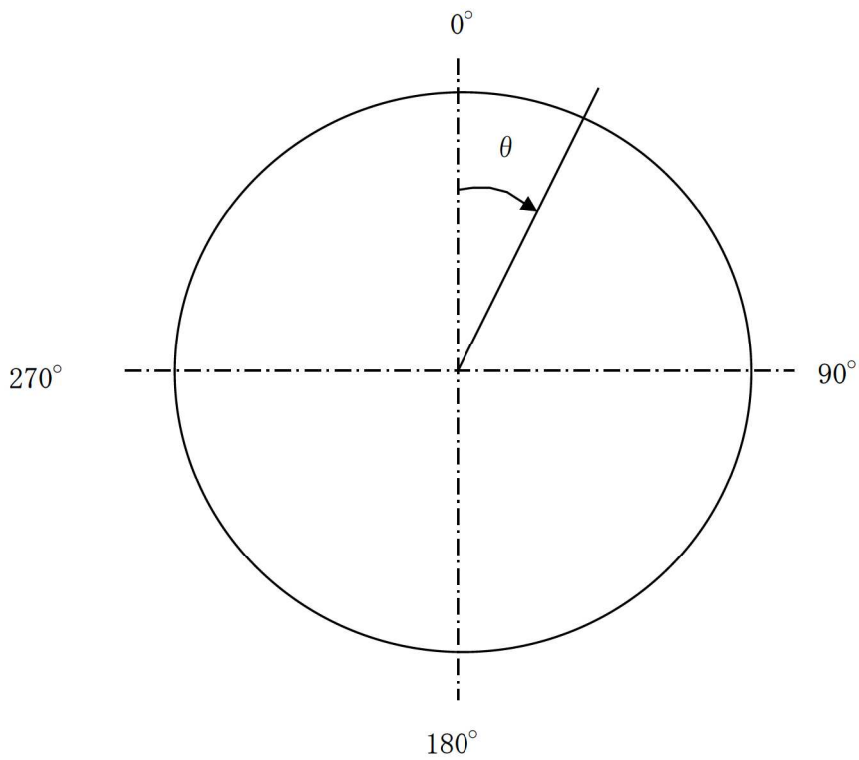
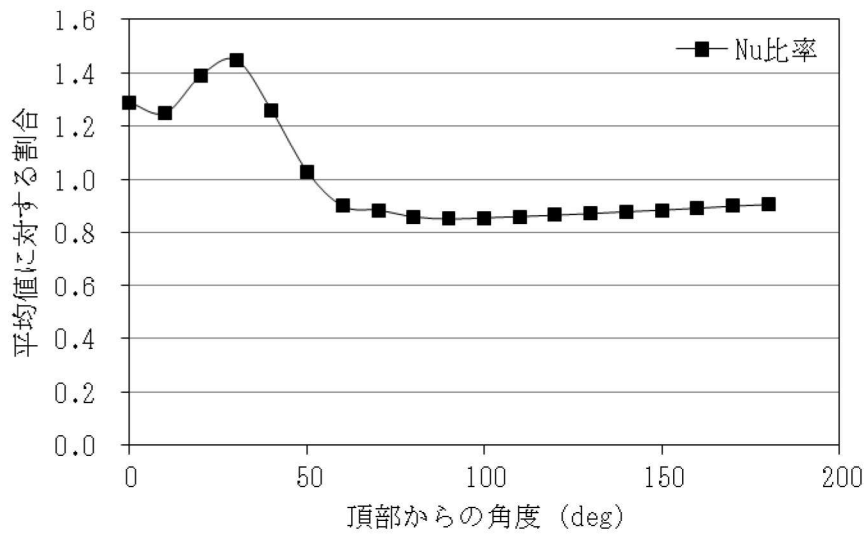
- h : 熱伝達率 (W/(m²・K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m・K))
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数
- Δt : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を(□)-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、(□)-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(□)-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(□)-第B.付1表の値を設定した。

(□)-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}



(□)-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。(□)-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、火災時に対しては入熱が多くなるように(□)-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。

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

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(□)-第 B. 付 2 表に示す。

(□)-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と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。

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

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。

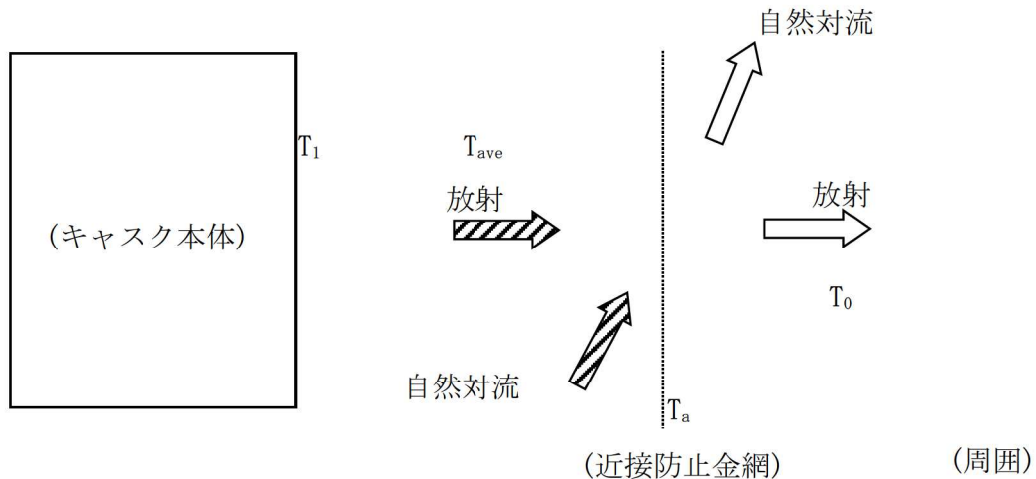
(□)-第 B. 付 3 表 胴内ガスの熱伝導率計算条件及び計算結果

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。

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

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))
((p)-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))
((p)-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_ε : 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)

(p)-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 Δ T ^{1/3}
100	1.31 Δ T ^{1/3}
200	1.11 Δ 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 (℃)		評価結果 (℃)
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, 北村健二, 「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).

(四)章 C 密 封 解 析

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エネルギーは、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。リリーフバルブは二三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值 0. 105 MPa、外気圧が大気圧の下限值 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。