

破損燃料用輸送容器（2体）に係る遮へい評価書

1. 基本的考え方

収納した使用済燃料から発生する放射線を遮へいするための破損燃料用輸送容器(2体)の遮へい設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- 使用済燃料から発生するガンマ線及び中性子を遮へいするために、破損燃料用輸送容器（2体）はガンマ線遮へいと中性子遮へいの機能を有するものとする
- 主要なガンマ線遮へい材は、胴及び底板の低合金鋼、外筒の炭素鋼、蓋のステンレス鋼とする
- 主要な中性子遮へい材は、内水及び胴と外筒間、底板底部のレジンとする

遮へい機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、破損燃料用輸送容器（2体）表面及び表面から1mにおける線量当量率を評価する。

ただし、破損燃料用輸送容器（2体）の構成部材はバスケットを除いて3号機構内用輸送容器と同一である。また、線源条件について、冷却期間は3号機構内用輸送容器の条件よりも長く、収納体数は3号機構内用輸送容器の7体より少ないため、「添付資料-2-1-2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.6. 遮へい機能」の評価に包絡されることを確認する。

収納燃料は3号機構内用輸送容器と同一であるため、軸方向の燃焼度分布も同一である。

従って、軸方向の燃焼度分布が最大となる高さにおける水平断面の径方向の線量分布が3号機構内用輸送容器に包絡されていれば、いずれの高さ方向における評価点位置についても包絡されていることがわかる。一方、径方向については、バスケットの形状が7体から変更になるため、遮へいに寄与する水領域や中性子遮へい材内の伝熱フィンとの幾何学的配置も変わる。以上から、径方向の線量評価を行う。

2. 評価条件

2. 1 遮へい厚さ

破損燃料用輸送容器（2体）の遮へい厚さを表1に示す。

表1 遮へい厚さ (単位：cm)

	低合金鋼・炭素鋼	ステンレス鋼	レジン
側面方向	約 25	—	約 10
上部方向	—	約 23	—
下部方向	約 27	—	約 10

2. 2 線源条件

遮へい評価の線源条件は表 1 に示す 3 号機使用済燃料プールに保管されている燃料の条件を包絡する条件とする。線源条件を表 2 に示す。

表 2 線源条件

項目	線源条件
燃料タイプ	9×9 燃料
平均燃焼度 (MWd/t)	52,000
冷却期間※ ¹ (日)	3,207
収納体数 (体)	2

※ 1 : 2019 年 3 月 31 日時点での冷却期間

2. 3 線源強度及びエネルギー

① ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表 3 に示す。また、構造材の放射化によるガンマ線源強度は次式で計算する。破損燃料用輸送容器 (2 体) では、3 号機構内用輸送容器より冷却期間が長く、収納体数は少ないため、構造材の放射化によるガンマ線源強度は包絡される。

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

ここで、A : 放射化核種 (⁶⁰Co) の放射能 (Bq)

N₀ : ターゲット核種 (⁵⁹Co) の個数 (atoms)

σ : 2200m/s の中性子による (⁵⁹Co) の (n, γ) 反応断面積 (cm²)

φ : 炉内照射熱中性子束 (n/(cm²・s))

λ : ⁶⁰Co の崩壊定数 (/日)

T₁ : 照射期間 (日)

T₂ : 冷却期間 (日)

表3 ガンマ線源強度
(容器1基あたり)

光子エネルギー群		集合体2体あたり (ph/s/2体)
群	代表エネルギー(MeV)	
1	1.00E-02	1.3E+15
2	2.50E-02	2.6E+14
3	3.75E-02	3.6E+14
4	5.75E-02	2.4E+14
5	8.50E-02	1.5E+14
6	1.25E-01	1.7E+14
7	2.25E-01	1.2E+14
8	3.75E-01	5.8E+13
9	5.75E-01	2.6E+15
10	8.50E-01	3.6E+14
11	1.25E+00	1.1E+14
12	1.75E+00	3.0E+12
13	2.25E+00	8.6E+10
14	2.75E+00	6.8E+09
15	3.50E+00	9.6E+08
16	5.00E+00	5.6E+07
17	7.00E+00	6.4E+06
18	9.50E+00	7.4E+05

② 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 4 に示す。また、評価に用いる中性子エネルギースペクトルは Pu-239 の核分裂スペクトルとし、表 5 に示す。

表 4 中性子線源強度

(容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)
1 次中性子源	自発核分裂によるもの	1.3×10^9
	(α , n) 反応によるもの	1.5×10^7
実効増倍率		0.95
実効増倍効果を考慮した全中性子線源強度		2.6×10^{10}

表 5 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル *
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

* : エネルギー群構造に対応するそれぞれの割合

2. 4 計算モデル

遮へい評価のモデルを図1, 2に示す。計算モデルは、破損燃料用輸送容器(2体)の実形状を模擬して図2の2次元R- θ 体系で評価する。

計算モデルは以下の条件を考慮する。

- ・ 輸送容器の胴より外側(本体胴, 中性子遮へい体, 蓋等)の遮へい体の厚さは, 製造公差を考慮した最小値とする。(遮へい材が薄い方が厳しいため保守的な設定となる)
- ・ 輸送容器の胴より内側のバスケット及び燃料領域は, 公称値とする。(ガンマ線および中性子線のどちらにとっても適切な評価となるように設定した)
- ・ 燃料有効部のうち軸方向燃焼分布(ピーキング係数)が1.3の高さにおける水平断面の径方向モデルで行っている。
- ・ 燃料有効部は, チャンネルボックス板枠外側までの領域に対して, 密度を均質化して組成設定する。

表6 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
外筒厚さ(mm)			
中性子遮へい体厚さ(mm)			
胴厚さ(mm)			
本体胴内径(mm)			

表7 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚(mm)			
内のり(mm)			

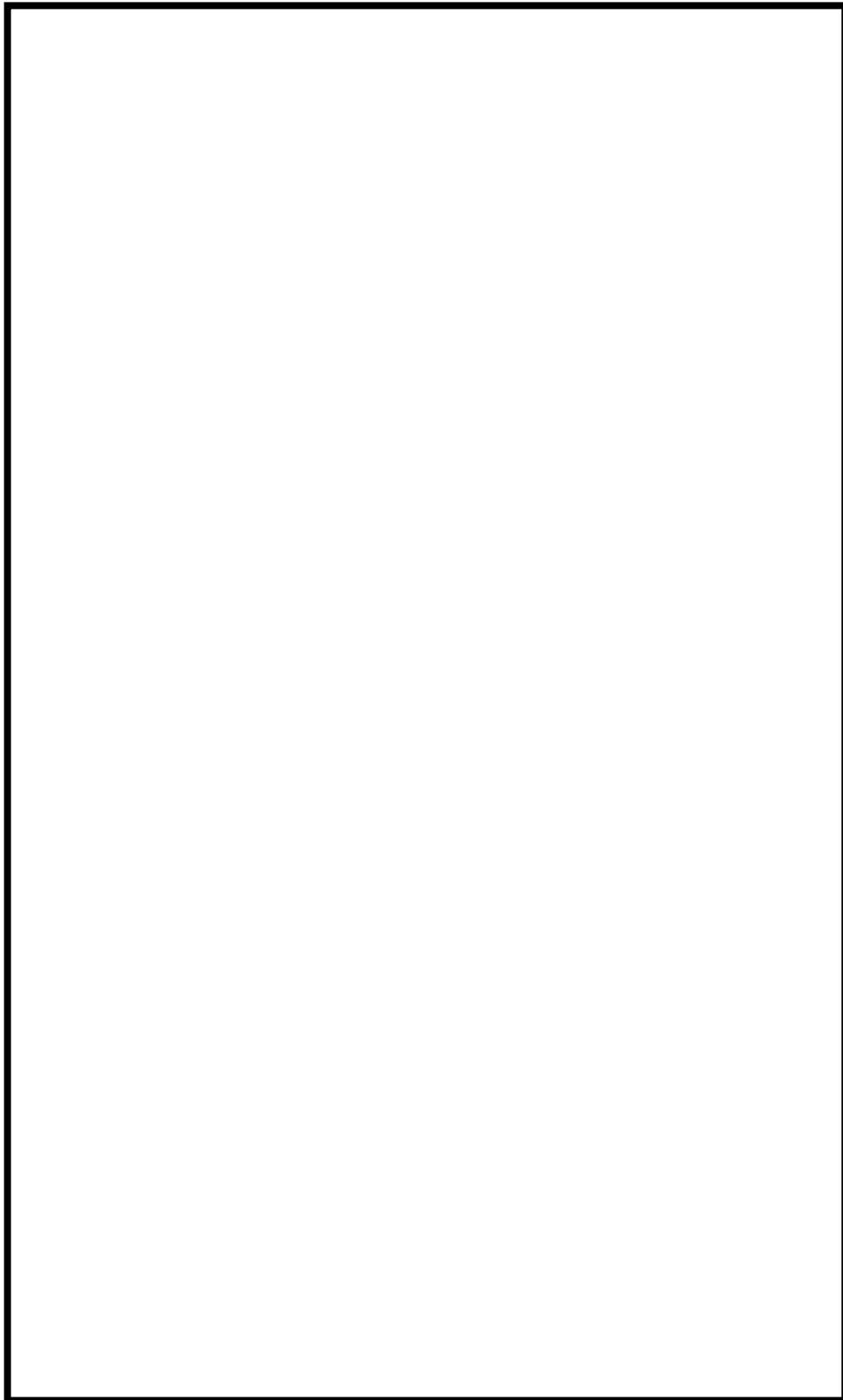


図1 遮へい解析モデル（全体 R-Z 体系）

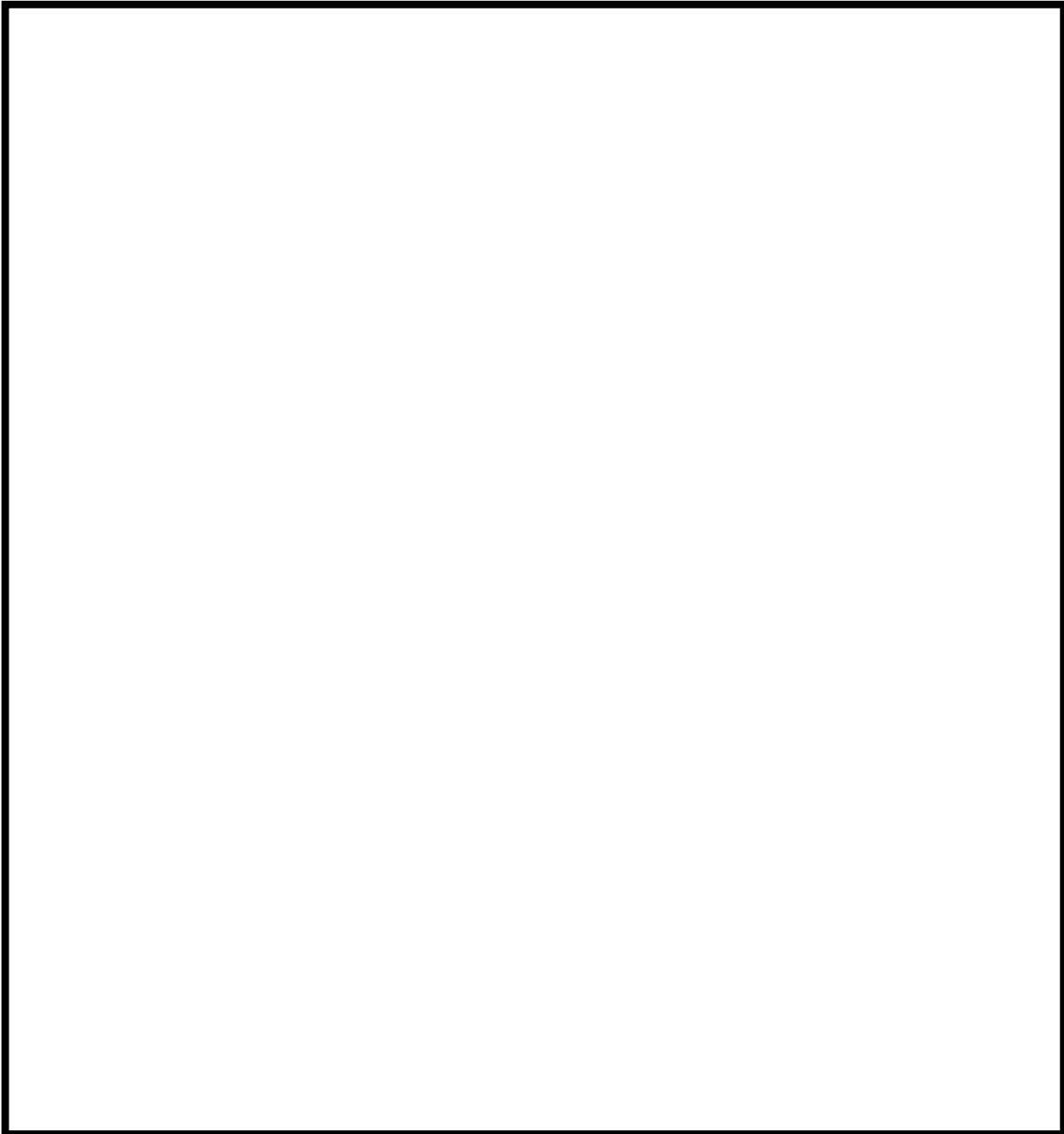


図2 遮へい解析モデル (全体 $R-\theta$ 体系)

3. 評価方法

遮へい計算は、ガンマ線、中性子共に DOT3.5 コードを用いて計算し、破損燃料用輸送容器（2 体）表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に基づく 1cm 線量当量率への換算係数を用いる。

4. 評価結果

破損燃料用輸送容器（2 体）の容器側面における評価結果を表 8 に示す。評価結果から、3 号機構内用輸送容器（7 体収納）に包絡されることを確認できる。

また、容器側面以外の評価点（容器上部、上部中性子遮へい体欠損部、下部中性子遮へい体欠損部、容器下部、上部トランニオン、下部トランニオン）についても、破損燃料用輸送容器（2 体）の構成部材はバスケットを除いて同一であり、遮へい効果も同じとなるため線量の大小関係は変わらず、容器側面と同様に 3 号機構内用輸送容器（7 体収納）の評価結果に包絡される。

3 号機構内用輸送容器と同様に、容器取扱時には追加遮へい体設置等の放射線業務従事者の被ばく低減対策を講じる計画としている。

表 8 最大線量当量率の評価結果（容器側面）

（単位：mSv/h）

	2 体収納	（参考）7 体収納
表面	8.5E-1	1.5
表面から 1 m	1.6E-1	3.4E-1

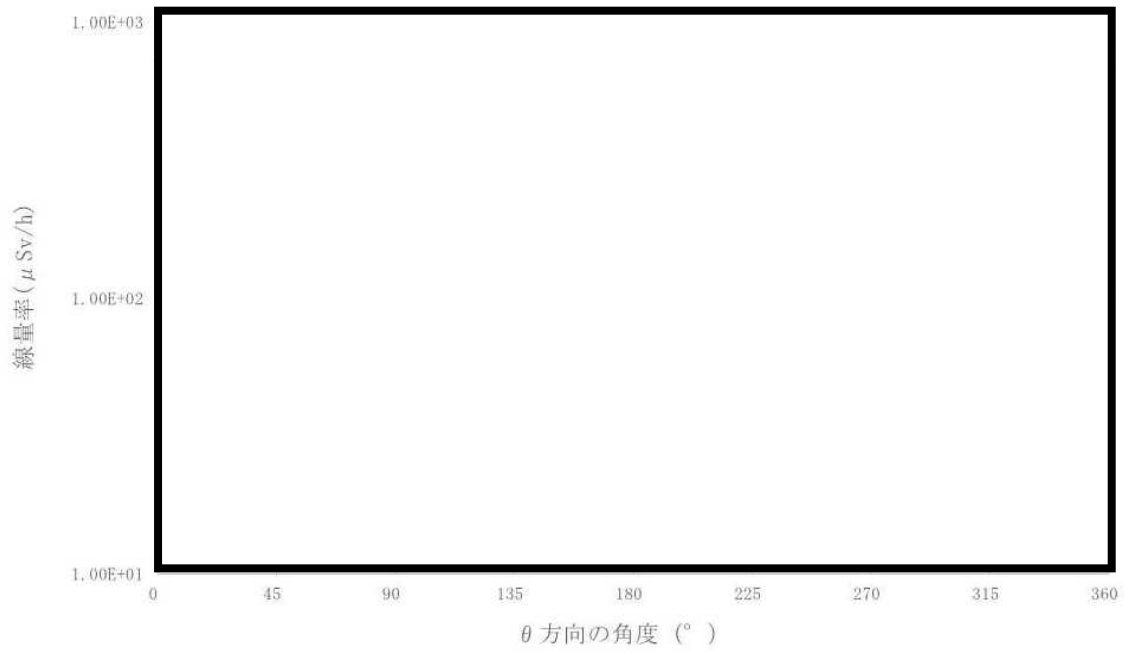


図3 評価結果（容器表面位置）

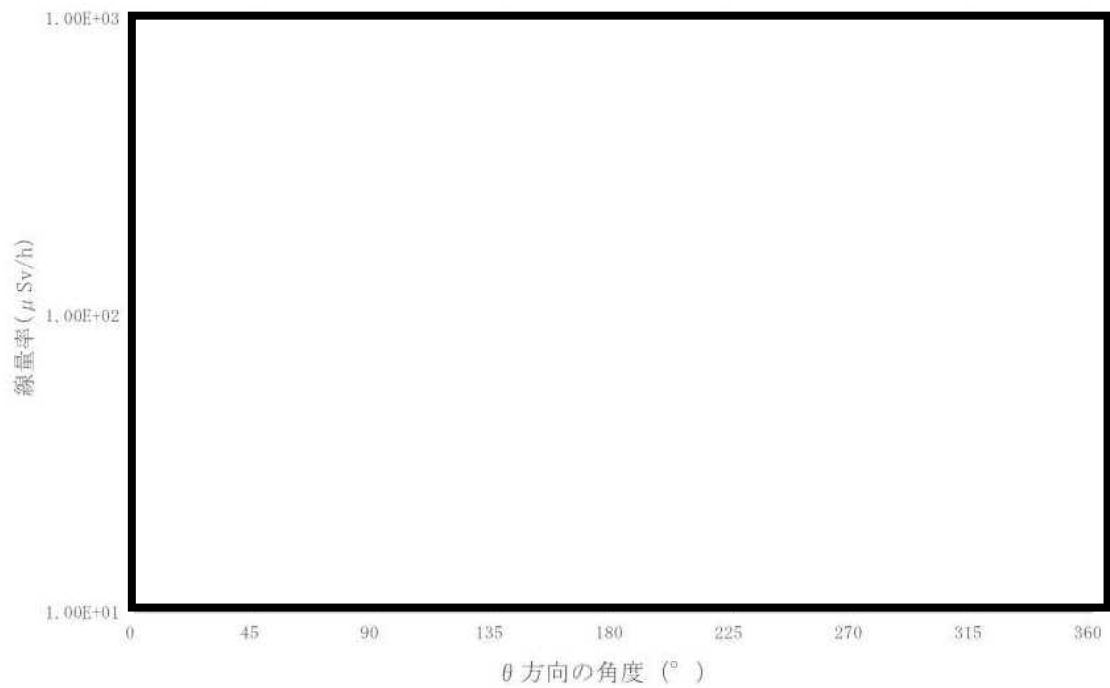


図4 評価結果（容器表面から 1m 離れた位置）

破損燃料用輸送容器（2体）に係る除熱評価書

1. 基本的考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び破損燃料用輸送容器（2体）の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、容器内に充填した水及び空気の自然対流及び熱伝導により胴に伝える。
- b. 胴に伝えられた熱は主として中性子遮へい部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝える。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒から大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、自然冷却により冷却されるものとして、キャスク側面への太陽放射熱により除熱条件が厳しくなる横姿勢（輸送時）の各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

ただし、バスケットを除く構成部材は3号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は3号機構内用輸送容器の7体より少ないため崩壊熱量は小さい。また、軸方向の評価対象部位であるOリング及び蓋については、3号機構内用輸送容器の評価において、軸方向の評価対象部位を安全側に評価されるようにバスケット等の内部構造の熱伝導率を最も保守的な条件を仮定して評価しているため、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.4. 除熱機能」の評価に包絡される。

従って、径方向の評価対象部位である燃料、バスケット、胴、中性子遮へい体の各部の温度を評価する。

2. 設計基準

設計基準を表 1 に示す。

表 1 設計基準

対象部位	材質	設計基準	設計基準温度 (°C)	備考
中性子遮へい材	レジン	使用可能温度	149	
胴	低合金鋼	構造強度が確保される制限温度	350	
バスケット	ステンレス鋼	構造強度が確保される制限温度	425	
燃料被覆管	ジルカロイ-2	照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下となる温度*1, *2	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムラ付燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

*1 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認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

3. 燃料仕様および崩壊熱量

3号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を包絡する条件で崩壊熱量を ORIGEN2 コードにより評価する。燃料条件及び崩壊熱量を表 2 に示す。

表 2 燃料条件及び崩壊熱量

燃料タイプ	9×9 燃料
燃焼度(MWd/t)	52,000
冷却期間(日) ※1	3,207
収納体数(体)	2
崩壊熱量(kW)	1.18

*1 : 2019 年 3 月 31 日時点での冷却期間

4. 評価条件

破損燃料用輸送容器(2 体)の除熱評価は輪切り断面モデルを用いて行う。輪切り断面モデル形状図を図 1 に示す。また、評価条件を表 3 に示す。

表3 評価条件

項目		横姿勢 (輸送時)
収納体数	(体)	2
崩壊熱量	(kW)	1.18
周囲温度	(°C)	38
太陽熱放射 (W/m ²) *1	水平に輸送される表面 (曲面)	400*2

*1: 太陽熱放射は1日につき12時間ごと、7日間受ける。また、輸送時は水平面に対して7°傾斜しているが傾斜角が緩いため、太陽放射熱は角度0°として取り扱う。

*2: 「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別記第四」に基づき設定する。

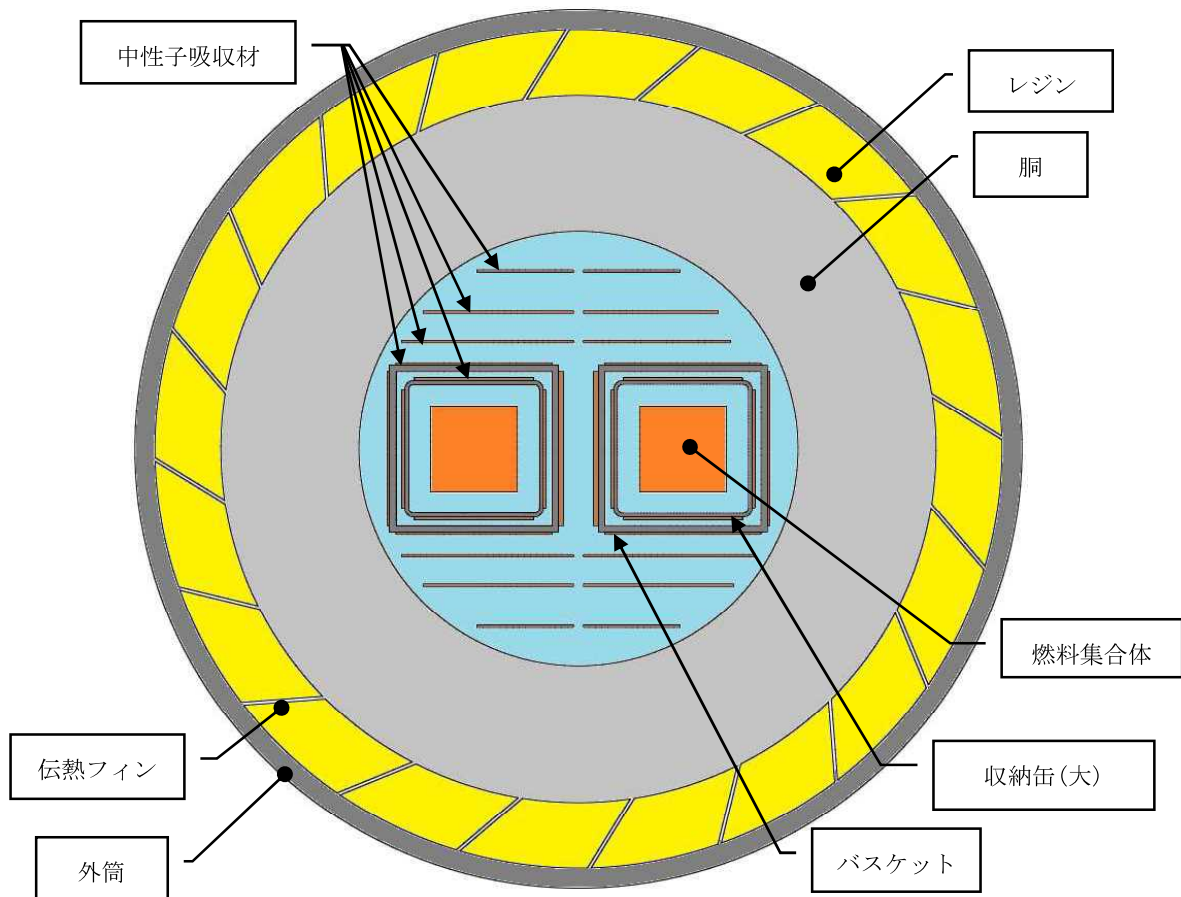


図1 輪切り断面モデル形状図

4. 1 伝熱形態

輸送容器における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は以下とする。

- ① 崩壊熱は、燃料被覆管からチャンネルボックスへ水の熱伝導および放射により伝わる。
- ② チャンネルボックス表面に伝わった熱は、収納缶へ水の熱伝導で伝わる。
- ③ 収納缶表面に伝わった熱は、バスケットへ水の熱伝導で伝わる。
- ④ バスケット表面に伝わった熱は、容器の本体胴内面へ水の熱伝導で伝わる。
- ⑤ 本体胴内面に伝わった熱は、本体胴外面へ熱伝導により伝わる。
- ⑥ 本体胴外面に伝わった熱は、外筒へ伝熱フィンの熱伝導により伝わる。
- ⑦ 外筒に伝わった熱は、周囲の空気との自然対流および放射により除熱する。

4. 2 境界条件

屋外の輸送を考慮し、境界条件は以下のとおりとする。

- ・ 環境温度：38℃*1（太陽放射熱を考慮）
- ・ 運用姿勢：水平面に対して7° 傾斜
- ・ 周辺環境：輸送数は1基とし、周囲に他の発熱体が無いものとし、外表面からの放射を考慮する

太陽放射熱は、輸送法令に定められる一般の試験条件を考慮する。外気温度38℃の大気中において1日につき12時間ごとに太陽放射を7日間受ける。輸送容器表面に負荷する太陽放射熱を図2*1に示す。

* 1：「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 別記第四」に基づき設定する。

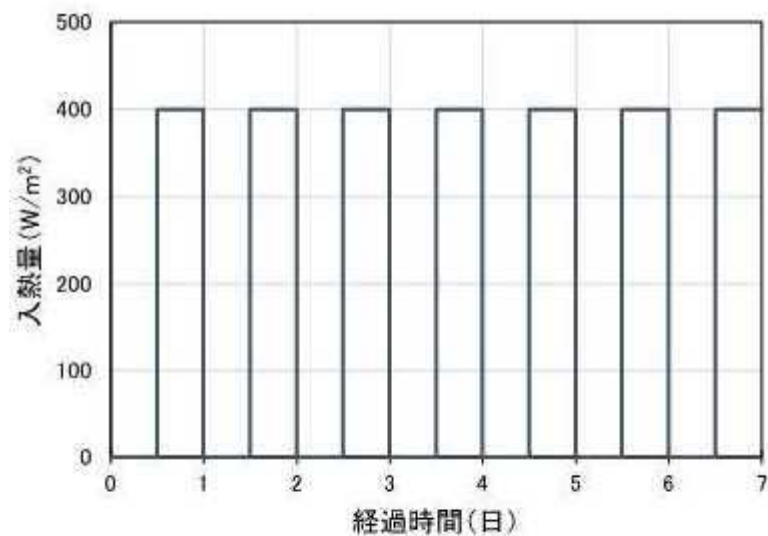


図2 太陽放射入熱量の時刻歴

4. 3 計算モデル

バスケットを除く構成部材は3号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は3号機構内用輸送容器の7体より少ないため崩壊熱量は小さい。また、軸方向の評価対象部位であるOリング及び蓋については、3号機構内用輸送容器の評価において、軸方向の評価対象部位の安全側に評価されるようにバスケット等の内部構造の熱伝導率を安全側に包絡する最も保守的な条件を仮定して評価しているため、3号機構内用輸送容器（7体）の評価に包絡される。

従って、計算モデルは径方向の評価対象を評価する輪切り断面モデルを使用する。輪切り断面モデルは最も発熱量が高い断面について、燃料集合体、収納缶、バスケット、胴体、レジン、伝熱フィンおよび外筒をモデル化したものである。計算モデルを図3に示す。

計算モデルは以下の条件を考慮する。

- ・ 輸送容器、バスケット、収納缶の寸法は、公称値とする。（除熱解析では、伝熱経路が評価で重要となるため、除熱解析では通例、公称値を用いて評価を行う。保守性については、崩壊熱量や軸方向分布などのその他の条件で確保している。）ただし、評価基準値に対して余裕のない部位や隣接部材間のギャップなどわずかな寸法の相違が温度計算結果に影響を与える場合は、安全側の設定とする。
- ・ 発熱量は、燃焼分布を考慮して中央断面位置に相当する発熱量を用いる。
- ・ 容器外表面からの大気自然対流による熱伝達率を考慮する。
- ・ 燃料集合体については、燃料集合体断面モデルで求めた等価物性を有する、均一モデルでモデル化を行っている。

表 2 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
外筒厚さ (mm)		
中性子遮へい体厚さ (mm)		
胴厚さ (mm)		
本体胴内径 (mm)		

表 3 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
板厚 (mm)		
内のり (mm)		

表 4 使用済燃料収納缶 (大) の主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
板厚 (mm)		
内のり (mm)		
中性子吸収材 カバー厚さ (mm)		
ボロン添加アルミニウム 合金板厚 (mm) ※1		

※1 : 1 枚あたりの厚さ

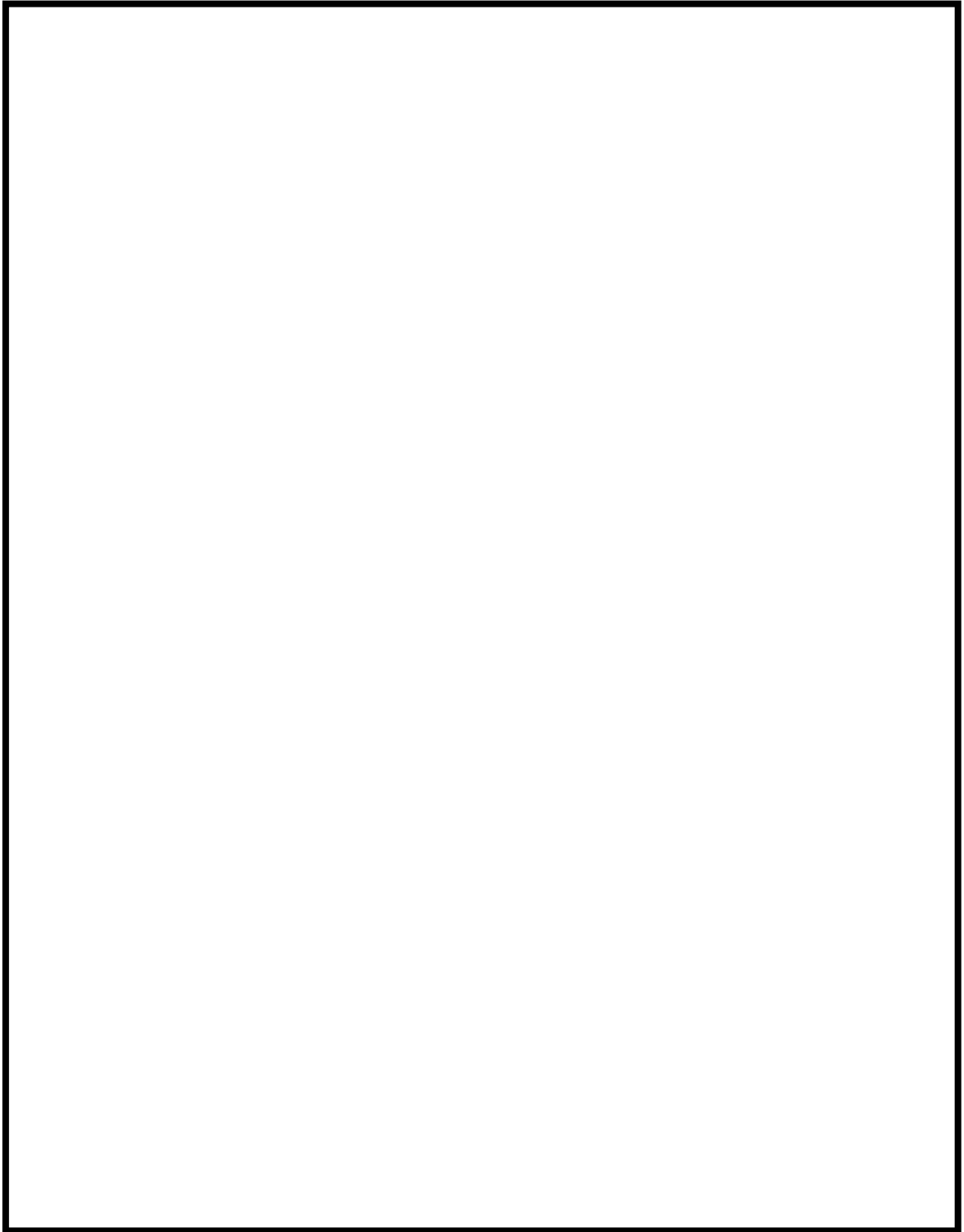


図3 除熱解析モデル（輪切り断面モデル）

5. 評価方法

輪切り断面モデルで容器中央部断面の燃料、バスケット、胴、中性子遮へい体の温度を評価する。解析にはABAQUSコードを用いる。

6. 評価結果

評価結果を表5に示す。表5に示すとおり、破損燃料用輸送容器（2体）を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており、熱的健全性は維持される。

また、燃料被覆管の温度は110℃であり、水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており、燃料の健全性は維持される。

破損燃料用輸送容器（2体）と構内用輸送容器（7体）を比較すると、構内用輸送容器（7体）で169℃であった燃料中心の温度が本評価では110℃と大幅に低下した。これは同程度の発熱密度の燃料集合体が7体から2体に減少しているためである。

よって、破損燃料輸送容器（2体）は構内用輸送容器（7体）の評価に包絡される。

表5 評価結果（各部温度）

対象部位	材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
中性子遮へい材	レジン	72	149	
胴	低合金鋼	71	350	
バスケット	ステンレス鋼	89	425	
燃料被覆管	ジルカロイ-2	110	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

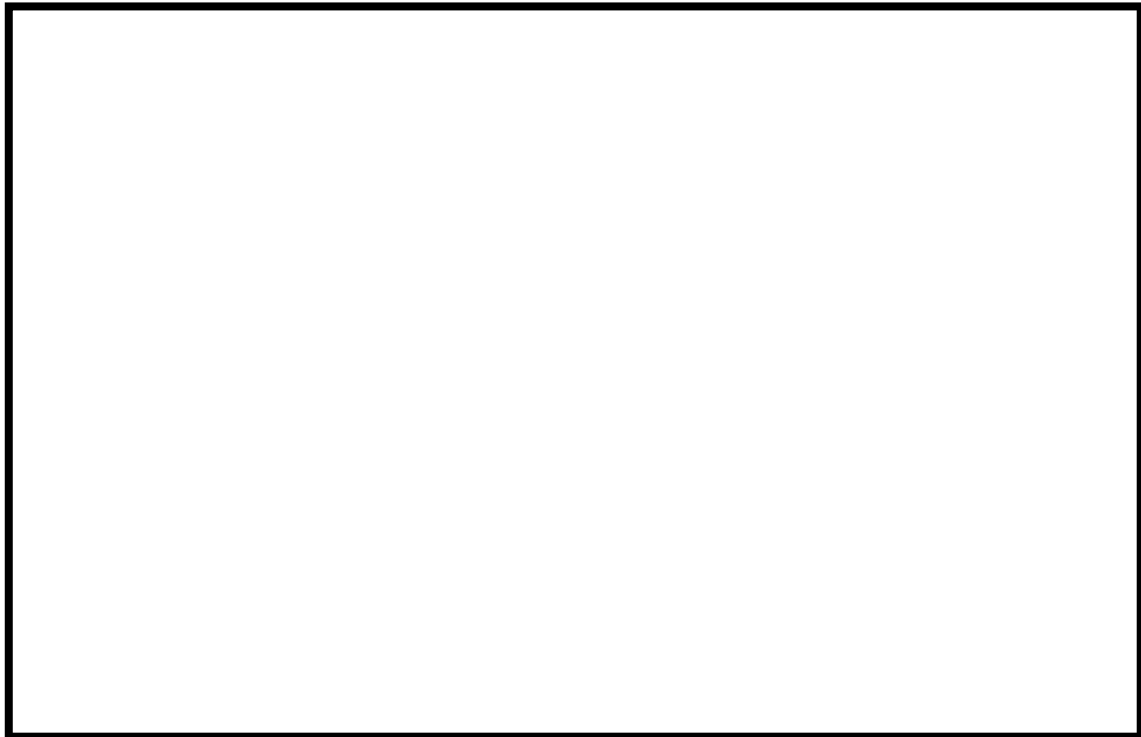


図3 各部の温度評価

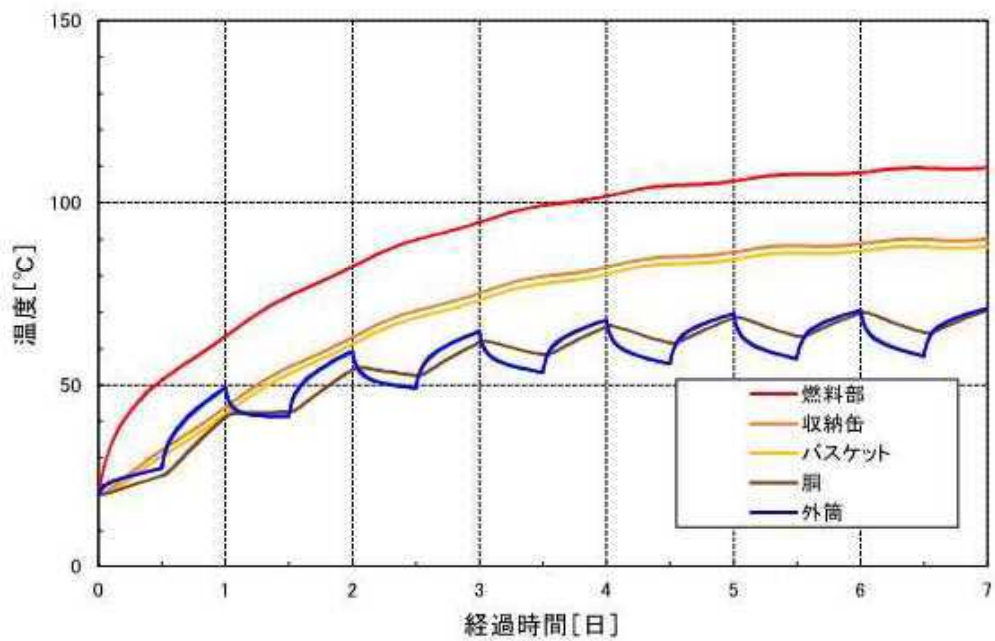


図4 各部の温度評価 (時刻歴)