

補足説明資料 16-4

16条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

除熱機能に関する説明資料

## 目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	4
3. 使用する解析コード	31
4. 参考文献	39
別紙 1 除熱解析のモデル化及び解析条件について	
別紙 2 蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法（横置き）の除熱解析における貯蔵場所の影響について	
別紙 3 除熱解析の設計基準値における引用文献の記載内容について	
別紙 4 貯蔵建屋の除熱評価について（設置（変更）許可申請に対する引継ぎ事項）	
別紙 5 貯蔵施設における MSF-24P 型の取扱上の安全性について	

## 1. 要求事項

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において、兼用キャスクの除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

### (1) 設置許可基準規則要求事項

#### a. 設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

#### b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条3項

- ・第16条第4項第2号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号（貯蔵建屋を設置する場合に限る。）及び第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。

##### ▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 三 貯蔵建屋（使用済燃料貯蔵施設において金属キャスク等を収納する建物をいう。以下同じ。）は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。
- 四 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

##### ▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項

第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。

- 二 貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇しないことを監視できること。
- 三 使用済燃料及び金属キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために必要なデータを測定等により取得できること。

#### c. 設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設

計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。

- ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
- ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

## (2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド（以下、「審査ガイド」という）の確認事項として、「2.安全機能の確保 2.3 除熱機能」には、以下のように記載されている。

### 【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができること。

』

### 【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

#### 1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

#### 2) 兼用キャスク各部の温度評価

a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

- a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。
- b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

- ① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。  
また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。
- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、その実施に係る体制を適切に整備すること。

』

## 2. 要求事項への適合性

P.2 で定義する審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、MSF-24P 型の除熱機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

### 〔確認内容〕

#### 1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

#### 2) 兼用キャスク各部の温度評価

- a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。
- b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

#### 3) 燃料被覆管の温度評価

- a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。
- b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

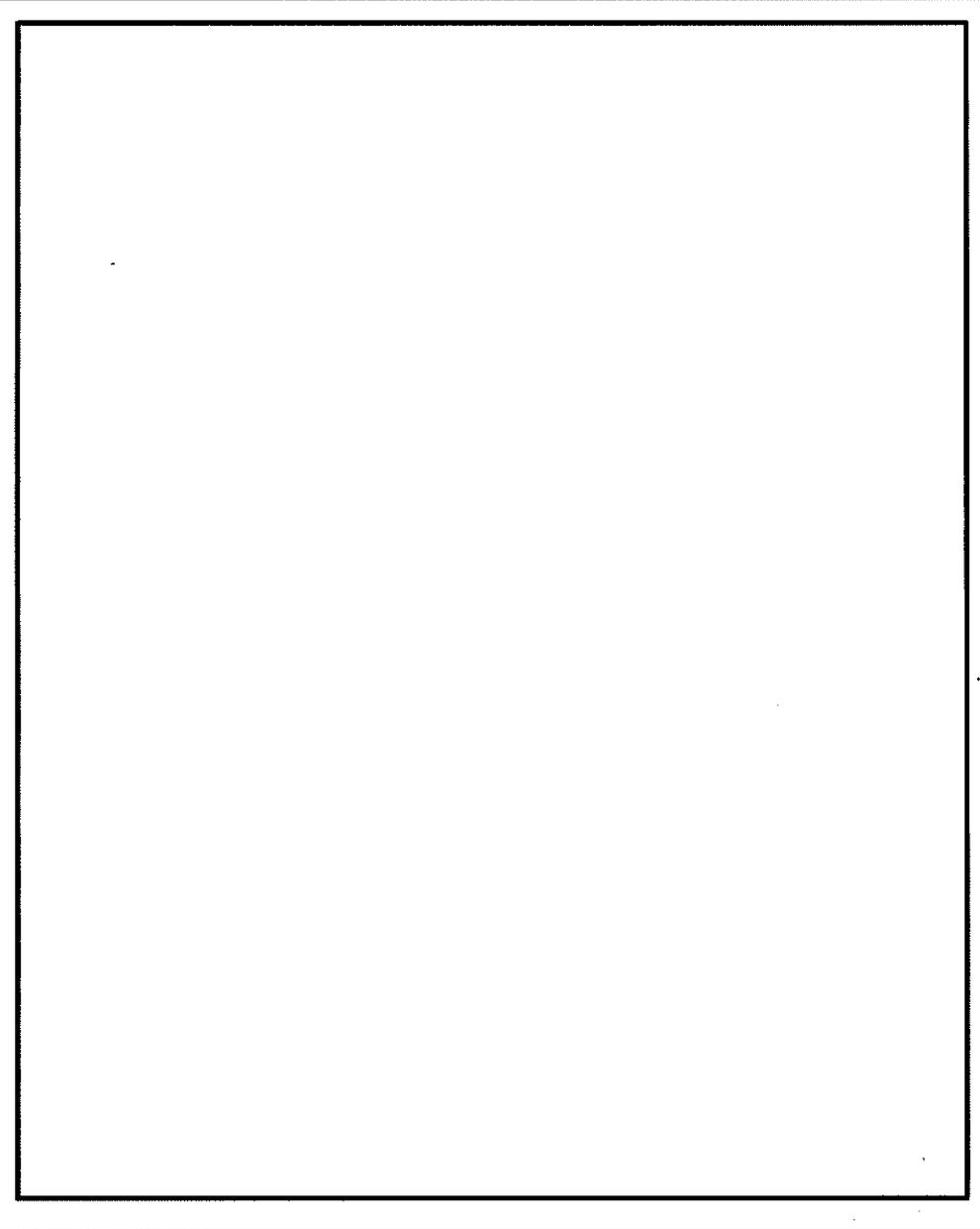
### (1) 除熱機能に関する構造

MSF-24P 型は、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びびふく射により兼用キャスクの外表面に伝え、対流及びびふく射により周囲の空気等に伝達する。MSF-24P 型の除熱構造図を第 1 図に示す。

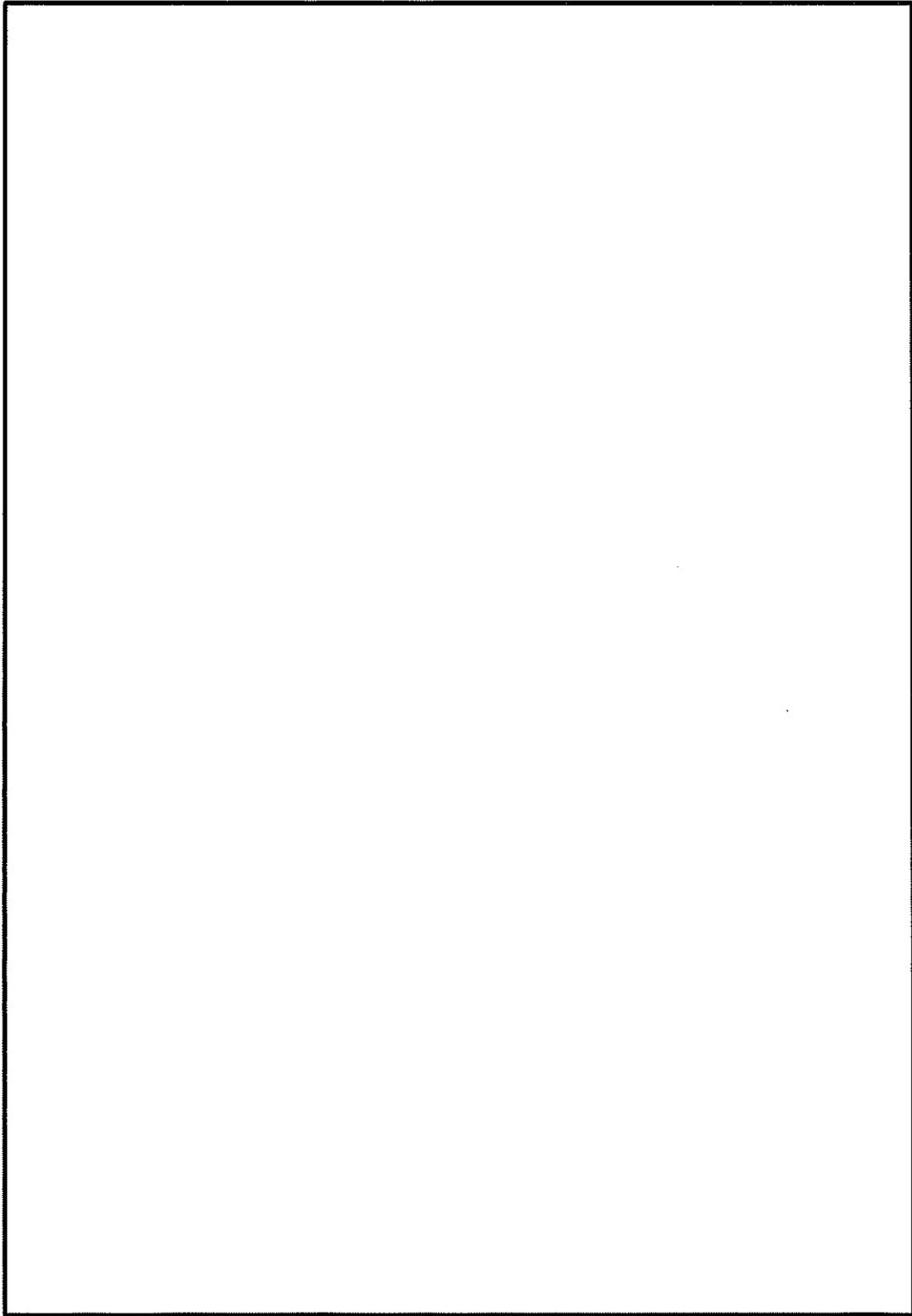
兼用キャスク貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである（第 2 図参照）。

- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びびふく射によりバスケットへ伝えられる。
- b) バスケットに伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導によりバスケット外周部へ伝えられる。
- c) バスケット外周部に伝えられた熱は、バスケット外表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びびふく

- 射により兼用キャスク本体内面へ伝えられる。
- d) 兼用キャスク本体内面に伝えられた熱は、熱伝導により兼用キャスク本体外面へ伝えられる。
  - e) 兼用キャスク本体外面へ伝えられた熱は、兼用キャスク本体外面の対流により兼用キャスク周囲の空気へ伝えられる。また、貯蔵建屋内で貯蔵する場合は、貯蔵兼用キャスク本体外面のふく射により貯蔵建屋に伝えられる。

<p>概要図</p>	
<p>主な材料</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 胴 : 炭素鋼</li> <li>・ 外筒 : 炭素鋼</li> <li>・ バスケットプレート : アルミニウム合金</li> <li>・ バスケットサポート : アルミニウム合金</li> <li>・ 中性子吸収材 : ほう素添加アルミニウム合金</li> <li>・ 中性子遮蔽材 : レジン</li> <li>・ 伝熱フィン : 銅</li> </ul>

第1図 MSF-24P型の除熱構造



第2図 MSF-24P型の伝熱形態

## (2) 除熱機能に関する評価

MSF-24P 型の除熱解析は第 3 図に示す除熱解析フローに従って行う。なお、除熱解析に用いる解析コードは 3. に示すとおり検証され、適用性が確認されている。

### a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

使用済燃料の崩壊熱量は、第 1 表に示す使用済燃料集合体の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求められる。

ここで、使用済燃料集合体の燃焼度分布を考慮して、最大崩壊熱量 (15.8kW) を上回る崩壊熱量 (以下「設計崩壊熱量」という。) を次のとおり設定する (第 4 図参照)。

$$\begin{aligned} \text{[設計崩壊熱量]} &= \text{[燃料集合体 (平均燃焼度 (注1)) 1 体当たりの崩壊熱量} \\ &\quad \text{(PF (注2) 考慮有り)]} \times 1.05 \text{ (注3)} \times \text{[収納体数]} \end{aligned}$$

使用済燃料の崩壊熱量計算に用いる計算条件及び計算結果を第 2 表に示す。第 2 表より、17×17 燃料及び 15×15 燃料のそれぞれについて、崩壊熱量の最も高い 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) を評価対象とする。

17×17 燃料 39,000MWd/t 型 (A型/B型) の最大崩壊熱量は、17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) の平均燃焼度 (44,000MWd/t) に対する崩壊熱量より低いため、17×17 燃料 39,000MWd/t 型の収納位置に制限を設けない。

15×15 燃料 39,000MWd/t 型 (A型/B型) の最大崩壊熱量は、15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) の平均燃焼度 (44,000MWd/t) に対する崩壊熱量より低いため、15×15 燃料 39,000MWd/t 型の収納位置に制限を設けない。

MSF-24P 型の除熱解析における収納物条件を第 3 表に示す。

---

(注 1) 平均燃焼度とは、兼用キャスク 1 基当たりに収納される使用済燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

(注 2) PF (ピーキングファクター) とは、使用済燃料集合体の軸方向燃焼度の平均値に対する燃焼度の比を包含する燃焼度分布を示す。

(注 3) ORIGEN2 コードの計算結果に 5% の不確かさを考慮する。

第1表 使用済燃料集合体の仕様

項目		仕様							
種類		17×17 燃料				15×15 燃料			
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
形状	燃料集合体幅 (mm)	約 214				約 214			
	全長 (mm)	約 4,100				約 4,100			
質量 (kg)		約 680				約 670			
燃料集合体1体の仕様	初期濃縮度 (wt%以下)	4.2		3.7		4.1		3.5	
	最高燃焼度 (MWd/t 以下)	48,000		39,000		48,000		39,000	
	冷却期間 (年以上)	15	17	15	17	15	17	15	17
MSF-24P型1基当たりの仕様	収納体数 (体)	24				24			
	平均燃焼度 (MWd/t 以下)	44,000				44,000			
	崩壊熱量 (kW 以下)	15.8				15.8			

第2表(1/2) 崩壊熱量計算条件及び結果

使用済燃料集合体の種類		17×17 燃料			
		48,000Mwd/t 型		39,000Mwd/t 型	
		A型	B型	A型	B型
計算条件	最高燃焼度 (MWD/t)	48,000		39,000	
	平均燃焼度 (MWD/t)	44,000			
	比出力 (MW/t)	[Redacted]			
	照射期間 (日)				
	濃縮度 (%) (注1)				
	冷却期間 (年)	15	17	15	17
	ウラン質量 (kg)	[Redacted]			
	(上部)				
ピーキングファクター (注2)					
(下部)					
計算結果	燃料集合体 1体当たりの崩壊熱量 (W)	754.0 (平均燃焼度)	719.2 (平均燃焼度)	657.4 (最高燃焼度)	627.2 (最高燃焼度)
	収納体数 (体)	24			
	MSF-24P 型1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)	18.1			

(注1) 収納される使用済燃料集合体の最小値を用いる。

(注2) ノードは燃料有効部を軸方向に48分割したものである。

(注3) 除熱解析では、ピーキングファクターを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。

第2表(2/2) 崩壊熱量計算条件及び結果

使用済燃料集合体の種類		15×15 燃料			
		48,000Mwd/t 型		39,000Mwd/t 型	
		A型	B型	A型	B型
計算条件	最高燃焼度 (MWD/t)	48,000		39,000	
	平均燃焼度 (MWD/t)	44,000			
	比出力 (MW/t)	[Redacted]			
	照射期間 (日)				
	濃縮度 (%) (注1)				
	冷却期間 (年)	15	17	15	17
	ウラン質量 (kg)	[Redacted]			
	(上部)				
ピーキングファクター (注2)					
(下部)					
計算結果	燃料集合体 1 体当たりの崩壊熱量 (W)	755.0 (平均燃焼度)	720.3 (平均燃焼度)	656.1 (最高燃焼度)	626.1 (最高燃焼度)
	収納体数 (体)	24			
	MSF-24P 型 1 基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)	18.1			

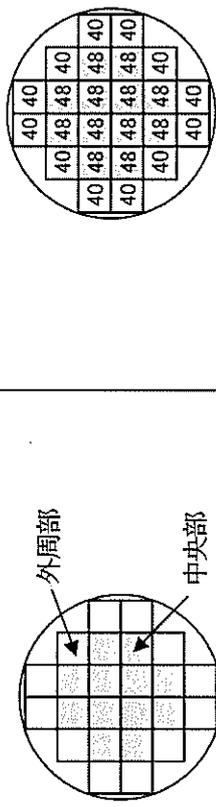
(注1) 収納される使用済燃料集合体の最小値を用いる。

(注2) ノードは燃料有効部を軸方向に48分割したものである。

(注3) 除熱解析では、ピーキングファクターを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。

第3表(1/2) 除熱解析における収納物条件概要

項目	17×17 燃料				
	キヤスク収納位置制限		解析条件		
	中央部	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型)	
	燃料集合体 1体の仕様	39,000MWd/t型 (A型・B型)	39,000MWd/t型 (A型・B型)		
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.2			
	ウラン重量 (kg)				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	48	40 <sup>(注1)</sup>
冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17		15		
バーナブル ポイズン集合体 の仕様	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	— <sup>(注2)</sup>	—
	冷却期間 (年)	≥15	—	— <sup>(注2)</sup>	—
MSF-24P型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		44	
配置 <sup>(注3)</sup>					



(注1) 本値は外周部の燃料集合体における燃焼度の相当値である。外周部に入力する崩壊熱量は、MSF-24P型の総崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量×収納体数(24体)となるように調整した値である。

(注2) バーナブルポイズン集合体は伝熱体となるため、装荷しない場合を想定しモデル化しない。

(注3) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

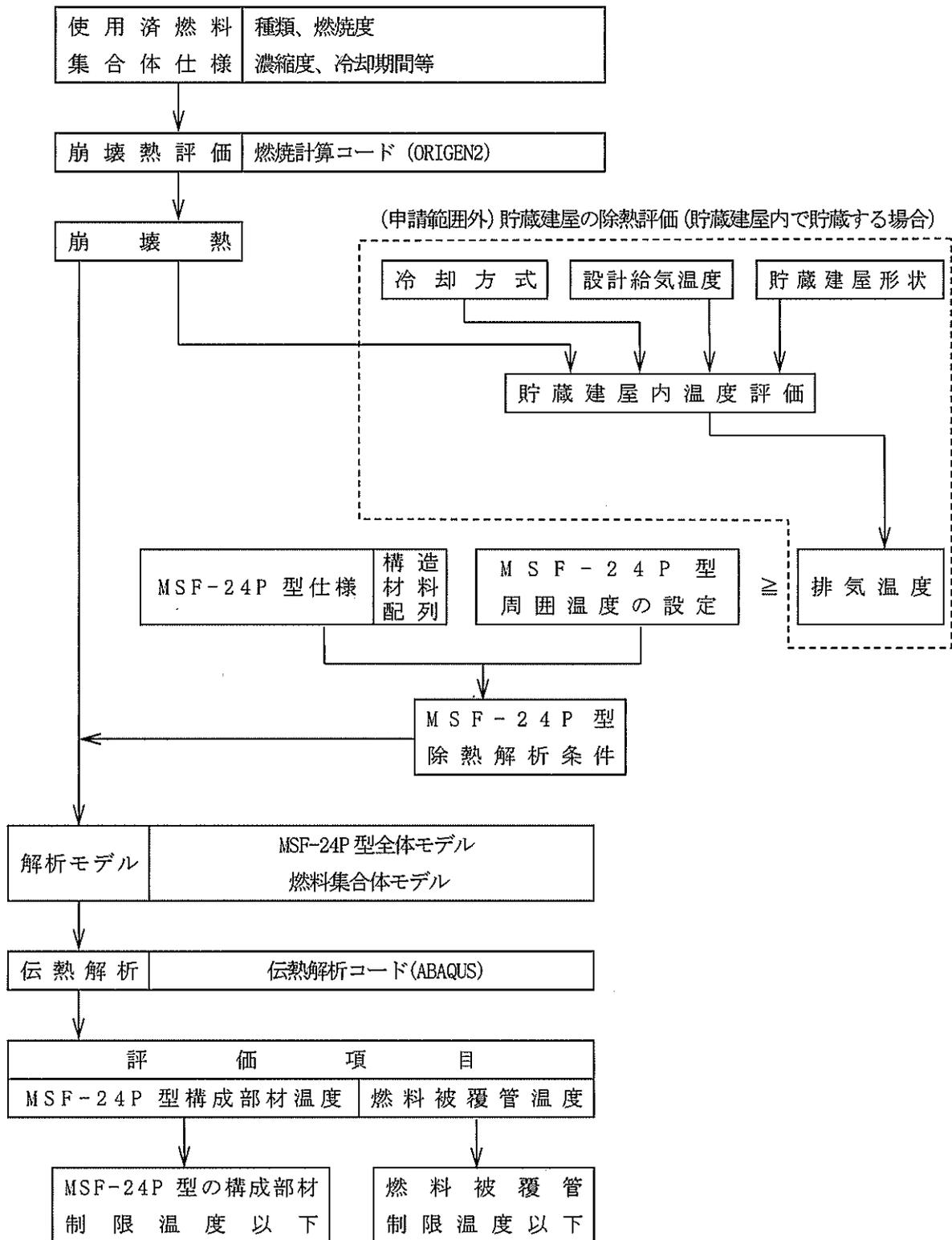
第3表(2/2) 除熱解析における収納物条件概要

項目	15×15 燃料		解析条件	
	キヤスク収納位置制限	外周部	中央部	外周部
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型) 39,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型) 39,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型)
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.1		
	ウラン重量 (kg)			
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	48 (注1)
	冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17		15
バーナブル ポイズン集合体 の仕様	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	— (注2)	—
	冷却期間 (年)	≥15	— (注2)	—
MSP-24P型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		44
配置 (注3)				

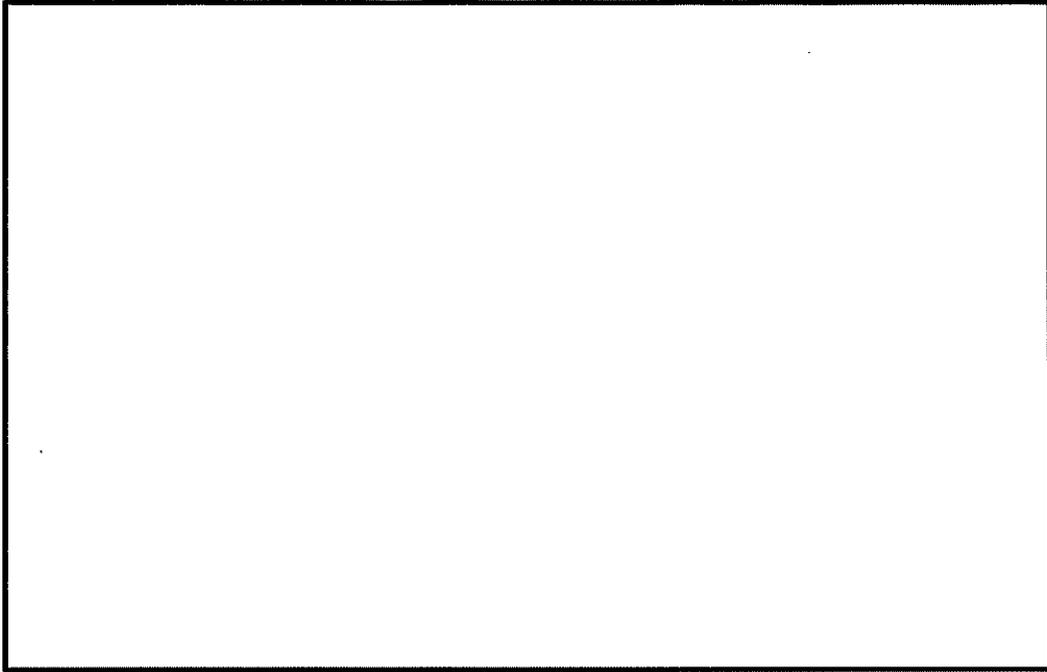
(注1) 本値は外周部の燃料集合体における燃焼度の相当値である。外周部に入力する崩壊熱量は、MSP-24P型の総崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量×収納体数(24体)となるように調整した値である。

(注2) バーナブルポイズン集合体は伝熱体となるため、装荷しない場合を考慮しモデル化しない。

(注3) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

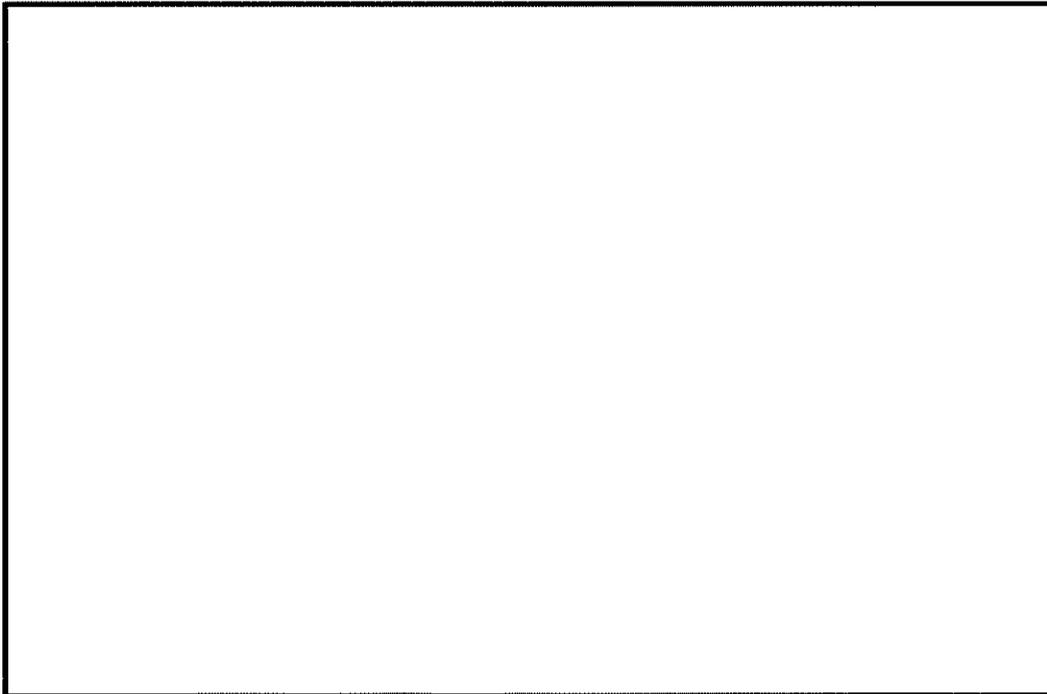


第3図 除熱解析フロー



(注) 使用済燃料集合体 24 体分の崩壊熱量を示す。

(17×17 燃料)



(注) 使用済燃料集合体 24 体分の崩壊熱量を示す。

(15×15 燃料)

第 4 図 使用済燃料集合体（燃料有効部）の軸方向崩壊熱量分布

b. 兼用キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

MSF-24P 型の構成部材の各部温度は、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び周囲温度等を条件として、MSF-24P 型の実形状を三次元でモデル化し、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。

燃料被覆管の温度は、使用済燃料の崩壊熱とバスケットの温度を条件として、燃料集合体の径方向断面の二次元モデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。

除熱解析の詳細を別紙 1 に示す。“蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法（横置き）”（以下、「横置き」という。）を対象とし、屋外貯蔵時の条件を代表として評価する。なお、横置きにおける貯蔵場所（屋外又は貯蔵建屋内）の影響は別紙 2 に示すとおり小さい。

①解析モデル

除熱解析モデルは以下の 2 つのモデルである。

- ・ MSF-24P 型除熱解析モデル  
：三次元 180° 対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）
- ・ 燃料被覆管除熱解析モデル  
：燃料集合体モデル（17×17 燃料及び 15×15 燃料）

MSF-24P 型における各解析モデルの形状図及び要素分割図を第 5 図～第 8 図に示す。

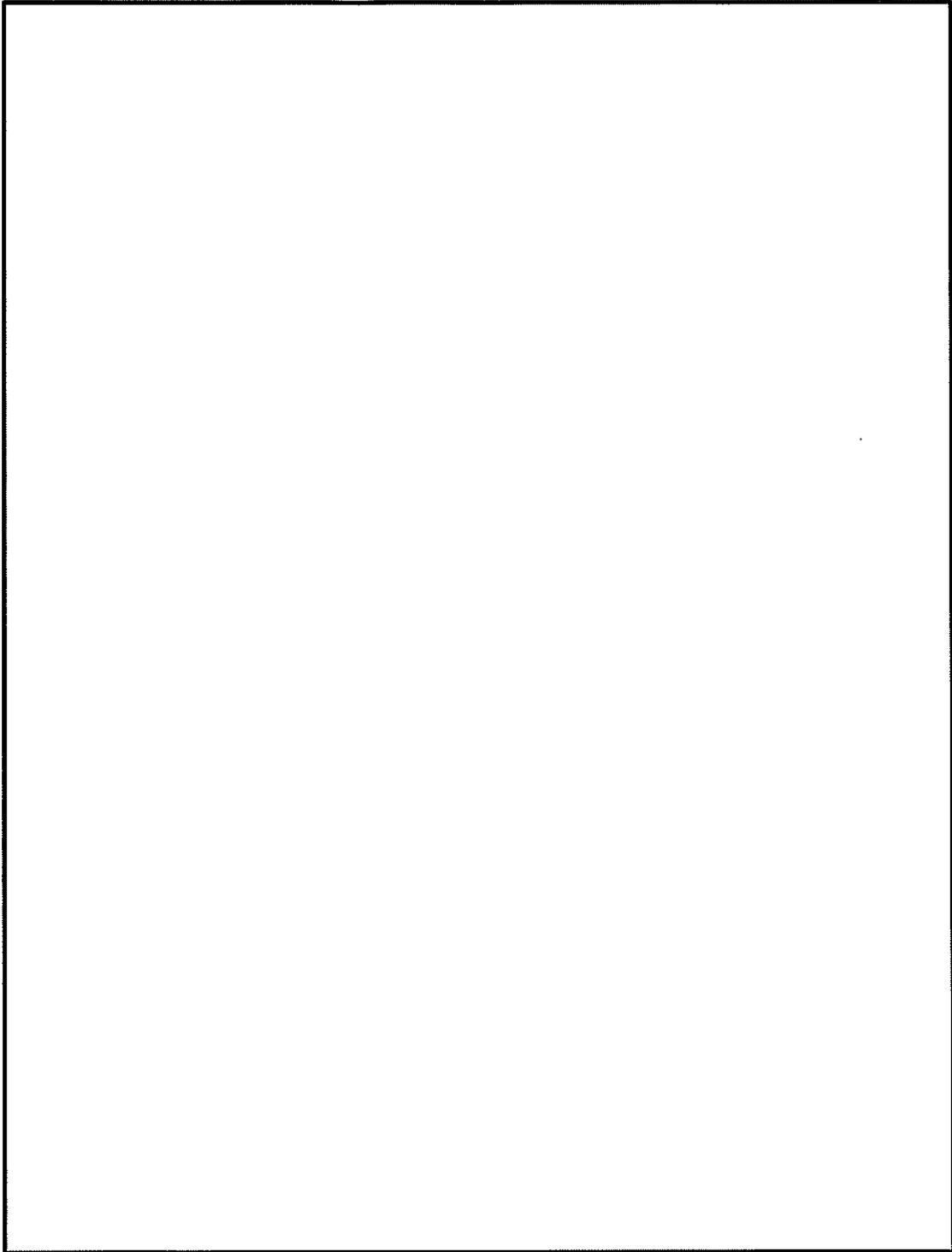
各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

- ・ 全体モデル……………胴、外筒、蓋部、中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）、  
金属ガスケット、バスケット、トラニオン、緩衝体
- ・ 燃料集合体モデル…燃料被覆管

②境界条件

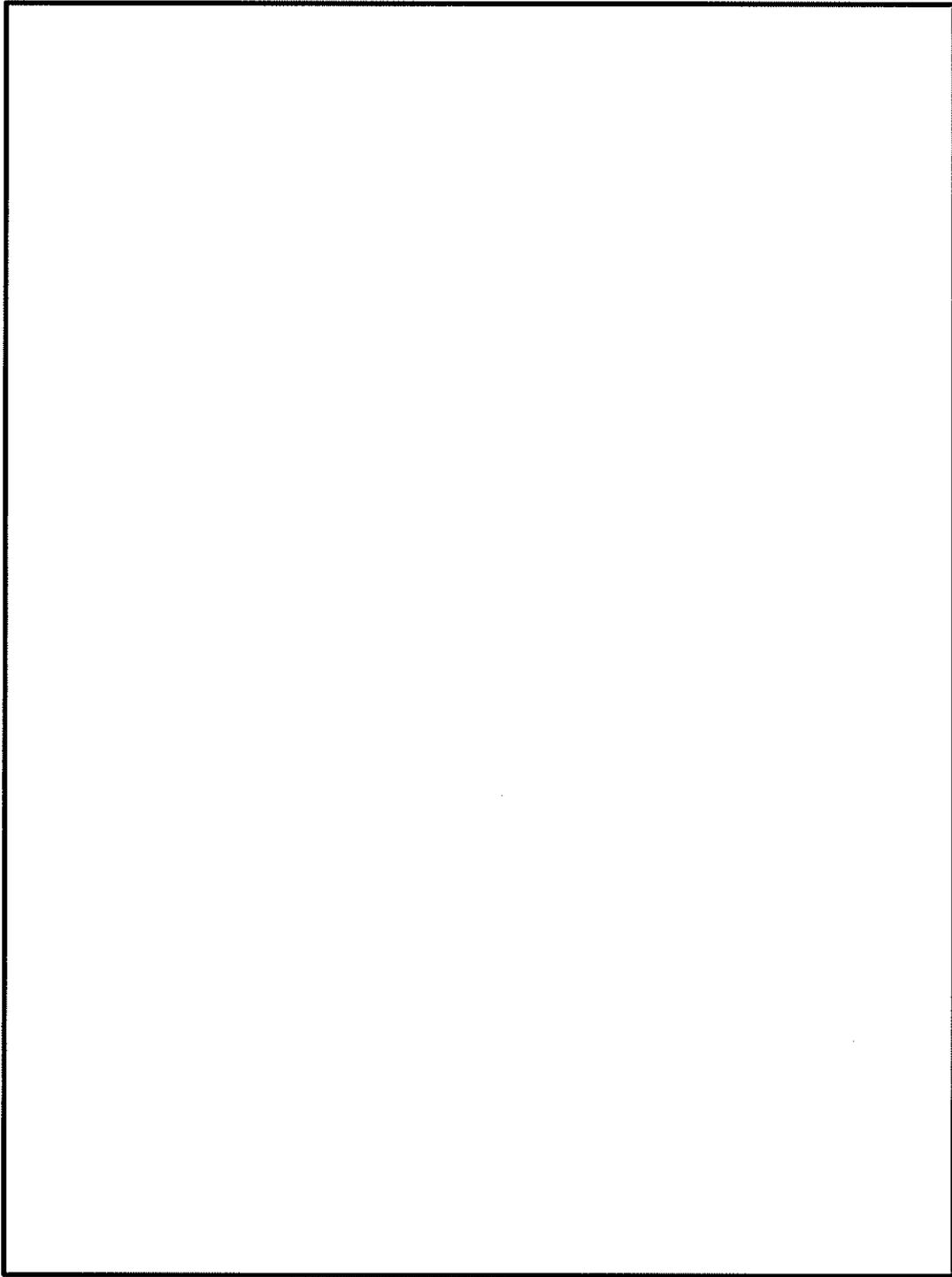
MSF-24P 型周囲の環境として、以下の条件を用いる。

- ・ 貯蔵姿勢・場所 : 横置き・屋外貯蔵
- ・ 周囲温度 : 38°C
- ・ 環境条件 : 太陽熱放射あり



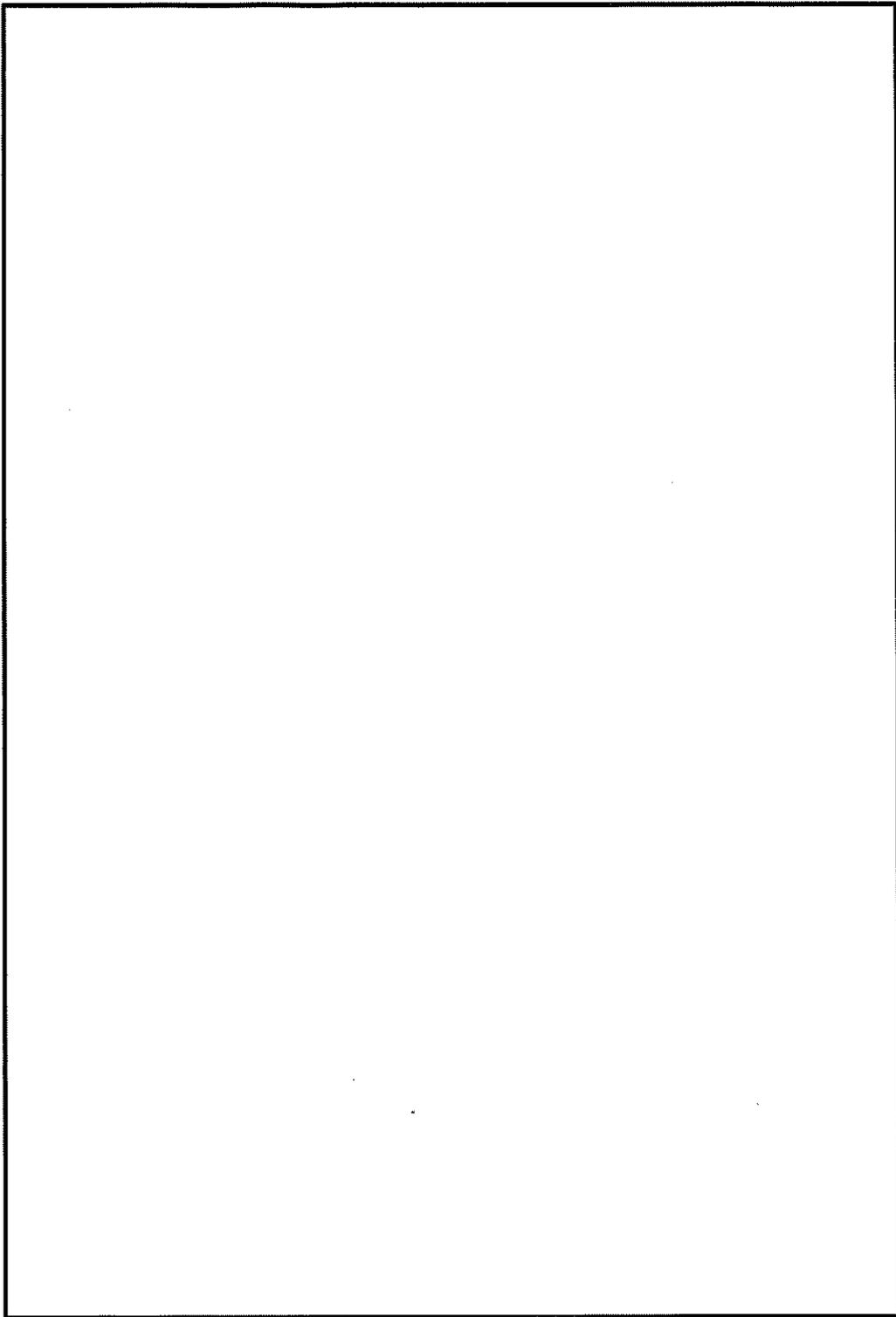
(単位 : mm)

第5図(1/2) MSF-24P型全体モデル形状図(縦断面図)  
(17×17燃料収納時)



(単位：mm)

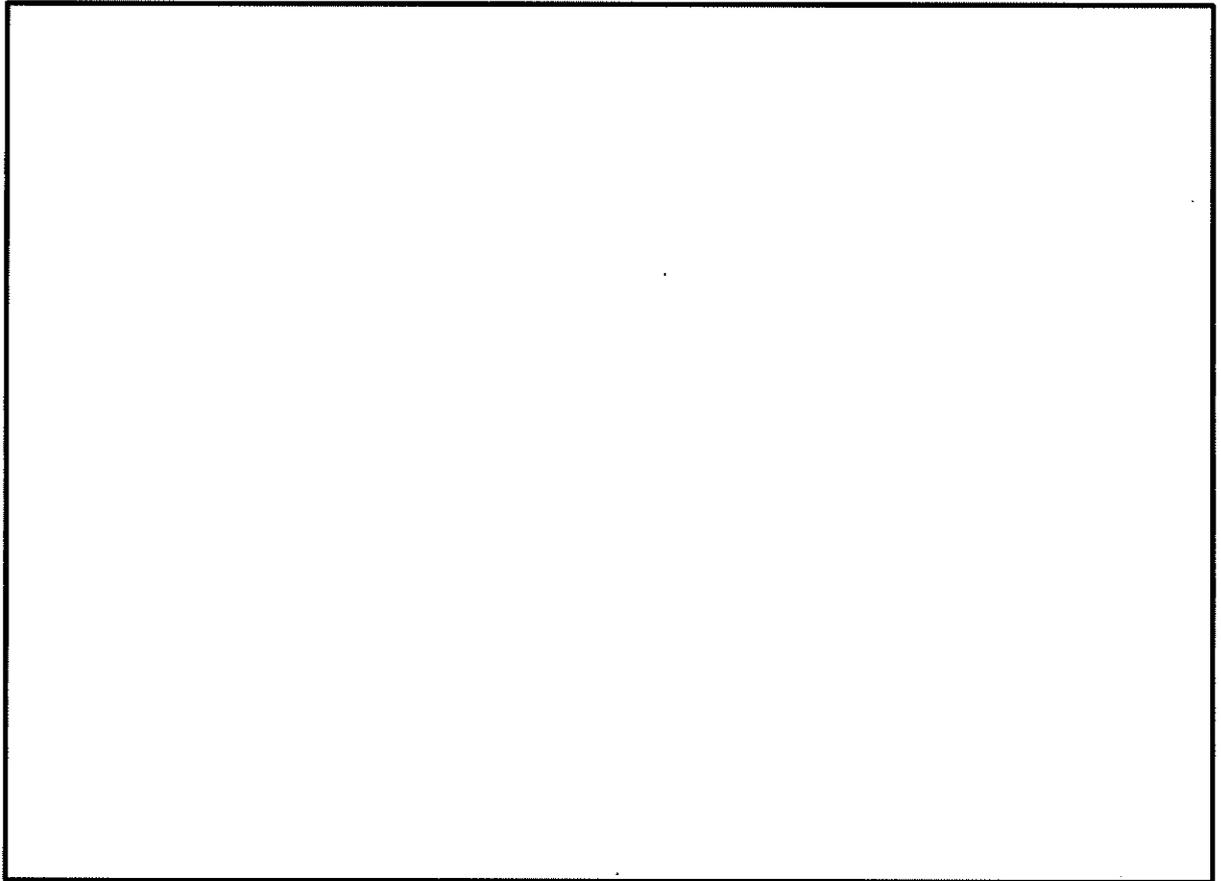
第5図(2/2) MSF-24P型全体モデル形状図(縦断面図)  
(15×15燃料収納時)



(単位：mm)

(注) 横断面図は 17×17 燃料収納時と 15×15 燃料収納時に差異はない。

第 6 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (横断面図)

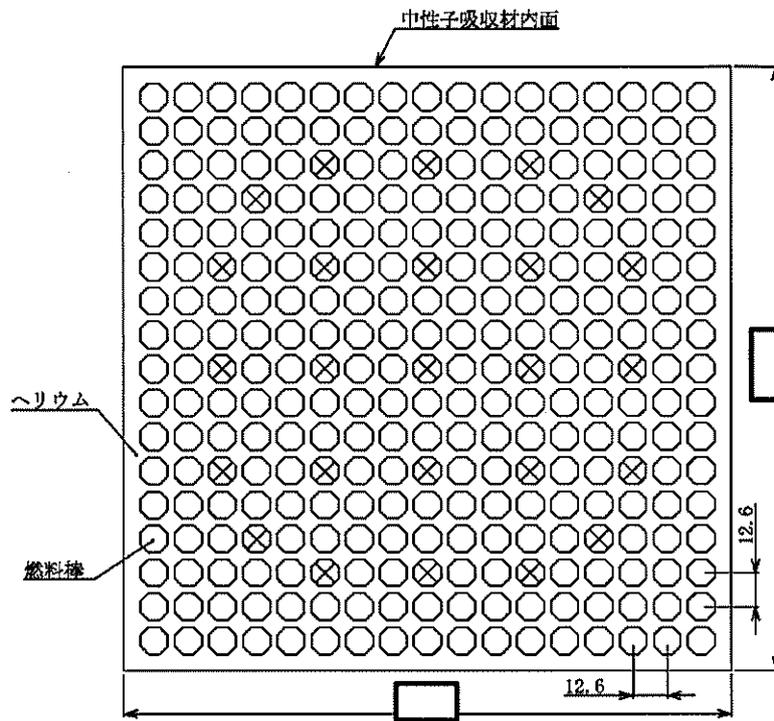


(モデル全体)

(バスケット)

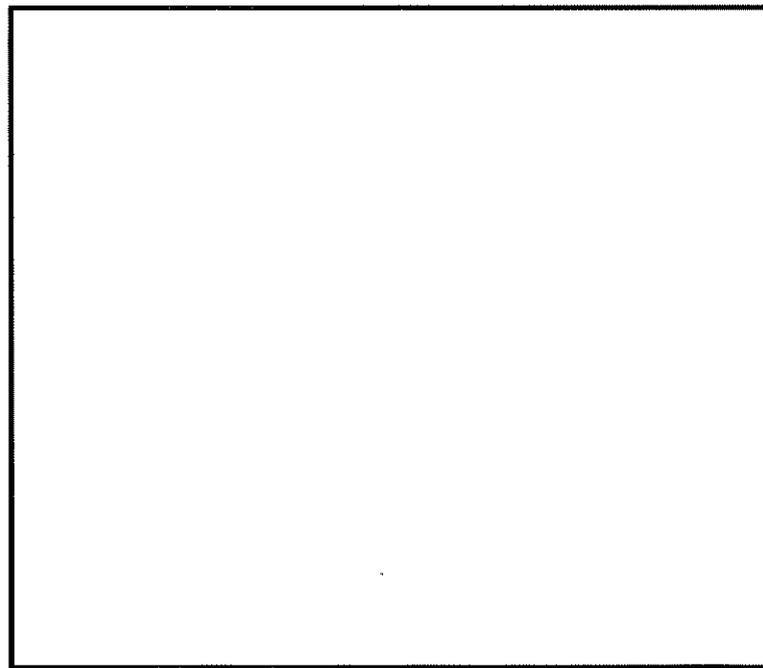
(燃料集合体領域)

第7図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図  
(17×17 燃料収納時の例)



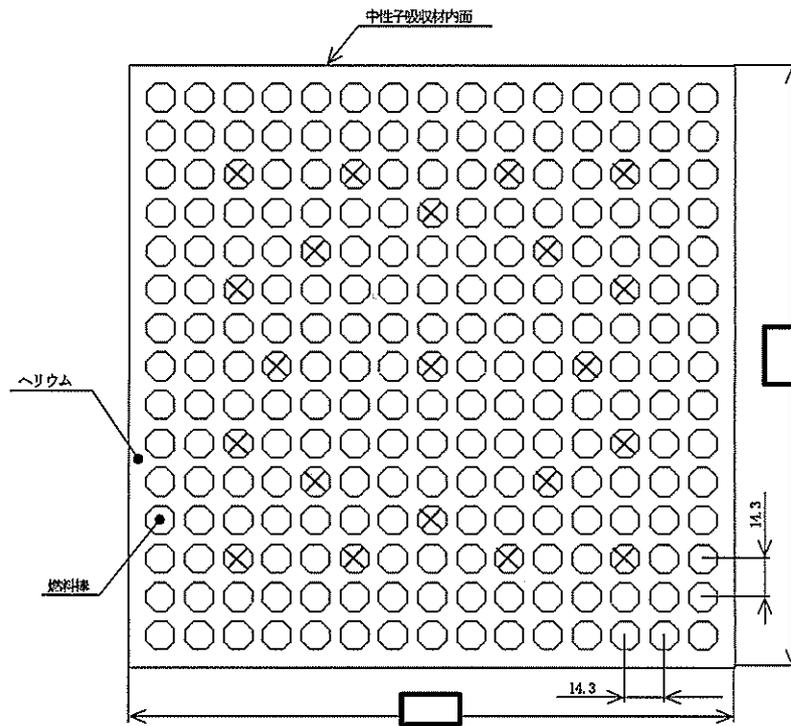
(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。  
(形状図)

(単位：mm)



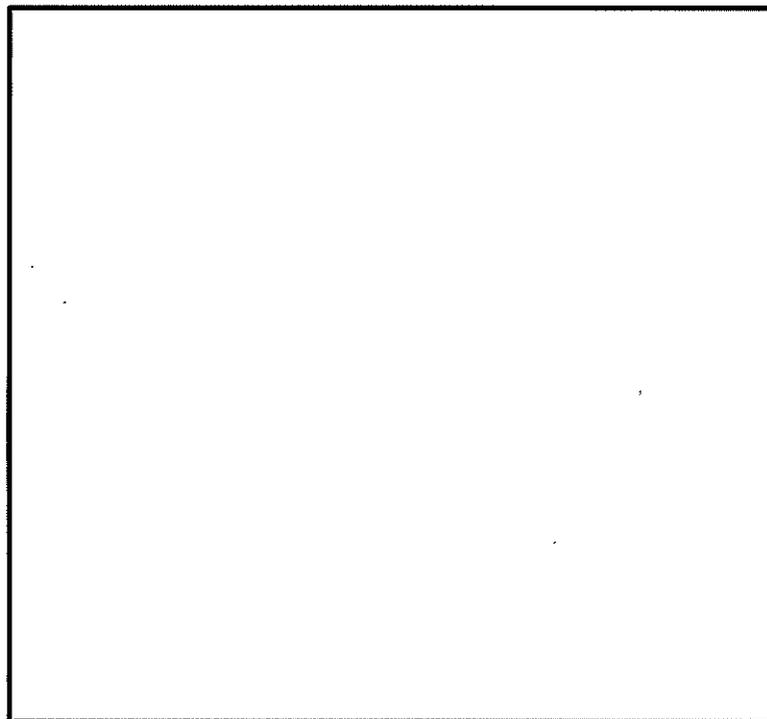
(要素分割図)

第8図(1/2) MSF-24P型燃料集合体モデル形状図・要素分割図  
(17×17燃料)



(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。  
(形状図)

(単位 : mm)



第8図(2/2) MSF-24P型燃料集合体モデル形状図・要素分割図  
(15×15燃料)

c. 評価結果

MSF-24P 型の除熱解析結果として、MSF-24P 型の安全機能を担保する部位、構造強度部材及び燃料被覆管の温度及び温度分布図を第 4 表、第 9 図及び第 10 図に示す。

解析の結果、MSF-24P 型の各部位の温度及び燃料被覆管の温度は設計基準値を満足しており、MSF-24P 型は、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計となっていることが確認された。

また、除熱解析結果を基に設定した MSF-24P 型の各部位及び使用済燃料の設計温度を第 5 表に示す。

第4表 除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (°C)		設計基準値 (°C) (注1~6)
		17×17 燃料 収納時	15×15 燃料 収納時	
MSF-24P 型	胴 (本体部)	121	121	350 <sup>(1)</sup>
	胴 (フランジ部)	111	111	350 <sup>(1)</sup>
	胴 (底板)	133	133	350 <sup>(1)</sup>
	外筒	114	114	350 <sup>(1)</sup>
	底部中性子遮蔽材カバー	117	117	425 <sup>(1)</sup>
	下部端板	115	115	425 <sup>(1)</sup>
	一次蓋	110	110	350 <sup>(1)</sup>
	蓋部中性子遮蔽材カバー	108	108	350 <sup>(1)</sup>
	二次蓋	105	105	350 <sup>(1)</sup>
	貯蔵用三次蓋	103	103	350 <sup>(1)</sup>
	一次蓋ボルト	109	110	350 <sup>(1)</sup>
	二次蓋ボルト	105	105	350 <sup>(1)</sup>
	貯蔵用三次蓋ボルト	103	103	350 <sup>(1)</sup>
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	127 (注7)	126 (注7)	149 <sup>(2)</sup>
	金属ガスケット	109 (注8)	109 (注8)	130 <sup>(3)</sup>
	カバープレート・リブ	114	114	425 <sup>(1)</sup>
	貯蔵用緩衝体ボルト	115	115	350 <sup>(1)</sup>
	バスケット	177	178	250 <sup>(4)</sup>
	トラニオン	118	118	350 <sup>(1)</sup>
	伝熱フィン	115	115	200 <sup>(5)</sup>
燃料被覆管		206	206	275 <sup>(6)</sup>

※注記を次頁に示す。

- (注1) 参考文献(1)に炭素鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼、ステンレス鋼及び析出硬化系ステンレス鋼の設計用強度が示されており、構造強度部材であり、且つ、安全機能の担保に必要な構成部材は、構造強度評価が可能な温度として、参考文献(1)の温度範囲の上限を設定している。なお、参考文献(1)の記載内容の詳細は別紙3を参照。
- (注2) 参考文献(2)に中性子遮蔽材の使用可能温度が示されており、安全機能の担保に必要な構成部材である中性子遮蔽材は、この温度を設計基準値に設定している。なお、参考文献(2)の記載内容の詳細は別紙3を参照。
- (注3) 参考文献(3)に金属ガスケットの長期密封試験結果が示されており、安全機能の担保に必要な構成部材である金属ガスケットは、この長期密封試験結果において密封機能が設計貯蔵期間維持可能と評価された温度を下回る温度を設計基準値に設定している。なお、参考文献(3)の記載内容の詳細は別紙3を参照。
- (注4) 参考文献(4)に熱ばく露による強度低下を適切に模擬したアルミニウム合金の設計用強度が示されており、構造強度部材であり、且つ、安全機能の担保に必要な構成部材であるバスケットは、構造強度評価が可能な温度として、参考文献(4)の温度範囲の上限を設定している。なお、参考文献(4)の記載内容の詳細は別紙3を参照。
- (注5) 参考文献(5)に銅の設計用強度が規定されており、安全機能の担保に必要な構成部材である伝熱フィンには、伝熱機能が維持可能な温度として参考文献(5)の温度範囲の上限を設定している。なお、参考文献(5)の記載内容の詳細は別紙3を参照。
- (注6) 参考文献(6)に燃料被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度、また、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、さらに、水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度が示されており、燃料被覆管の設計基準値は、これら全ての温度を下回る水素化物再配向が防止可能な温度を設定している。なお、参考文献(6)の記載内容の詳細は別紙3を参照。
- (注7) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度である。
- (注8) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

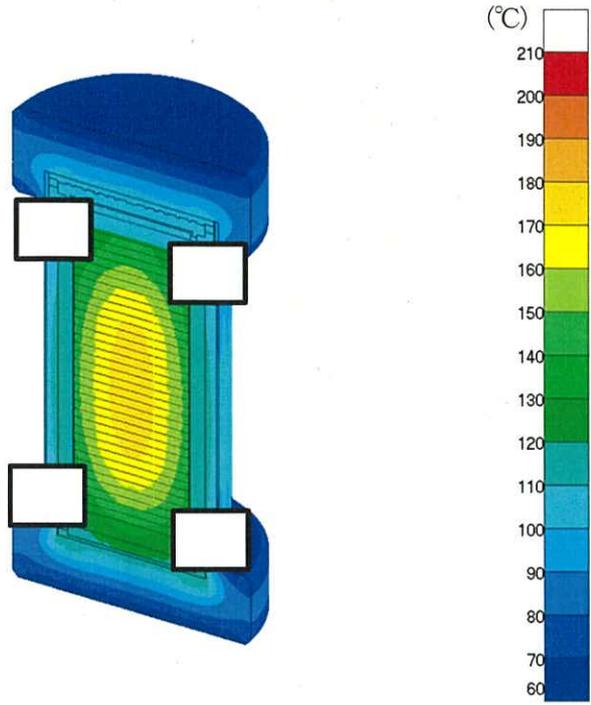
第5表 設計温度

対象となる部位		設計温度 (°C)
MSF-24P 型	胴 (本体部)	130
	胴 (フランジ部)	120
	胴 (底板)	140
	外筒	120
	底部中性子遮蔽材カバー	125
	下部端板	120
	一次蓋	115
	蓋部中性子遮蔽材カバー	115
	二次蓋	110
	貯蔵用三次蓋	110
	一次蓋ボルト	115
	二次蓋ボルト	110
	貯蔵用三次蓋ボルト	110
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	135
	金属ガスケット	115
	緩衝材	120 <sup>(注)</sup>
	カバープレート・リブ	120
	貯蔵用緩衝体ボルト	120
	バスケット	185
	トランニオン	125
伝熱フィン	120	
燃料被覆管		215

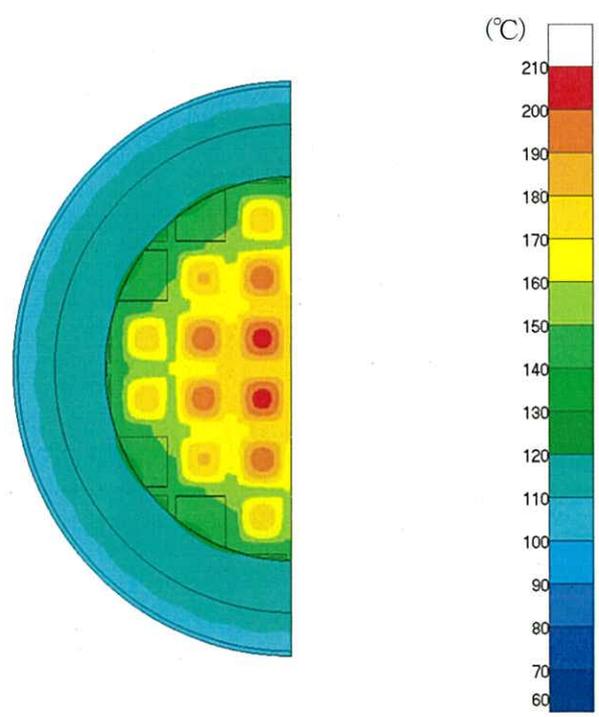
(注) 除熱解析で算出した以下の最高温度から設定。

17×17 燃料収納時 : 113 °C

15×15 燃料収納時 : 113 °C

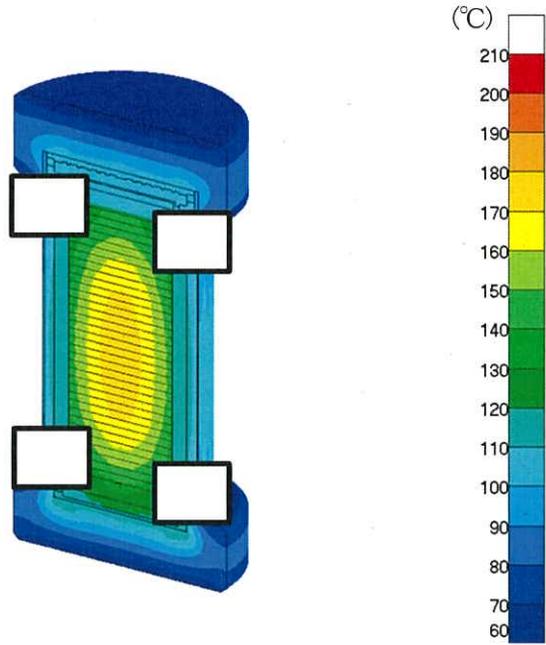


(全体)

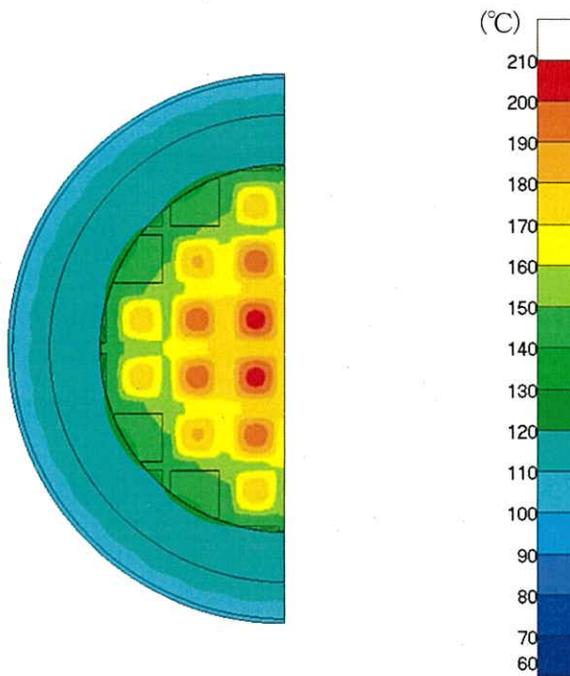


(燃料集合体最高温度位置断面)

第9図(1/2) MSF-24P 型除熱解析結果(全体モデル)  
(17×17 燃料収納時)



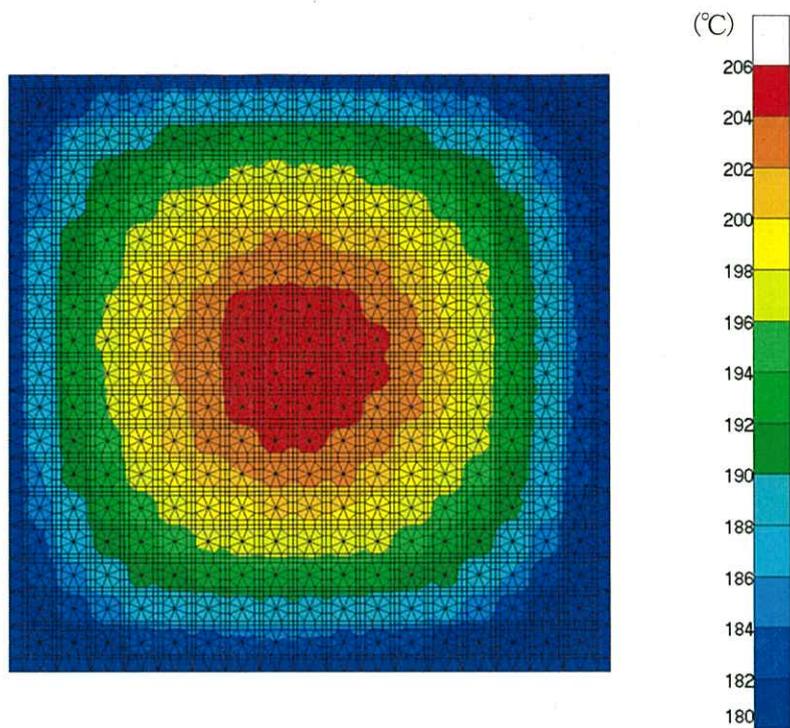
(全体)



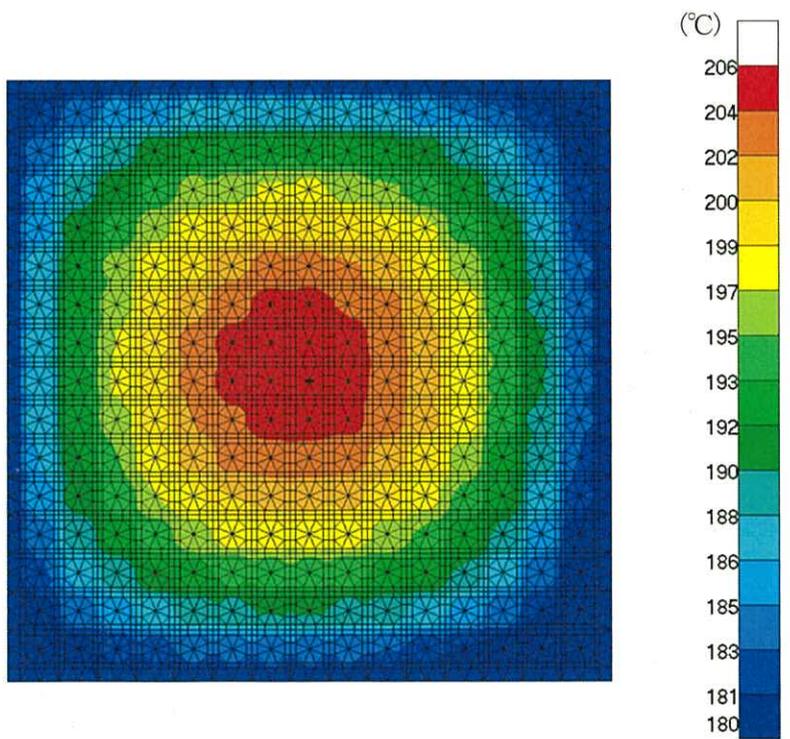
(燃料集合体最高温度位置断面)

第9図(2/2) MSF-24P型除熱解析結果(全体モデル)

(15×15燃料収納時)



(17×17燃料収納時)



(15×15燃料収納時)

第 10 図 MSF-24P 型除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

【確認内容】

4) 貯蔵建屋の除熱評価

- ① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。
- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、その実施に係る体制を適切に整備すること。

貯蔵建屋は型式証明申請の範囲外である。別紙4に設置（変更）許可申請に対する引継ぎ事項を示す。

### 3. 使用する解析コード

#### a. 解析コード

MSF-24P 型の除熱安全設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

#### ①ORIGEN2 コード

##### i 概要

ORIGEN2 コード<sup>(7)</sup> は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

##### ii 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

- a) 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b) 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- c) 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- d) 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ (崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と  $(\alpha, n)$  反応により発生する中性子源強度等) は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

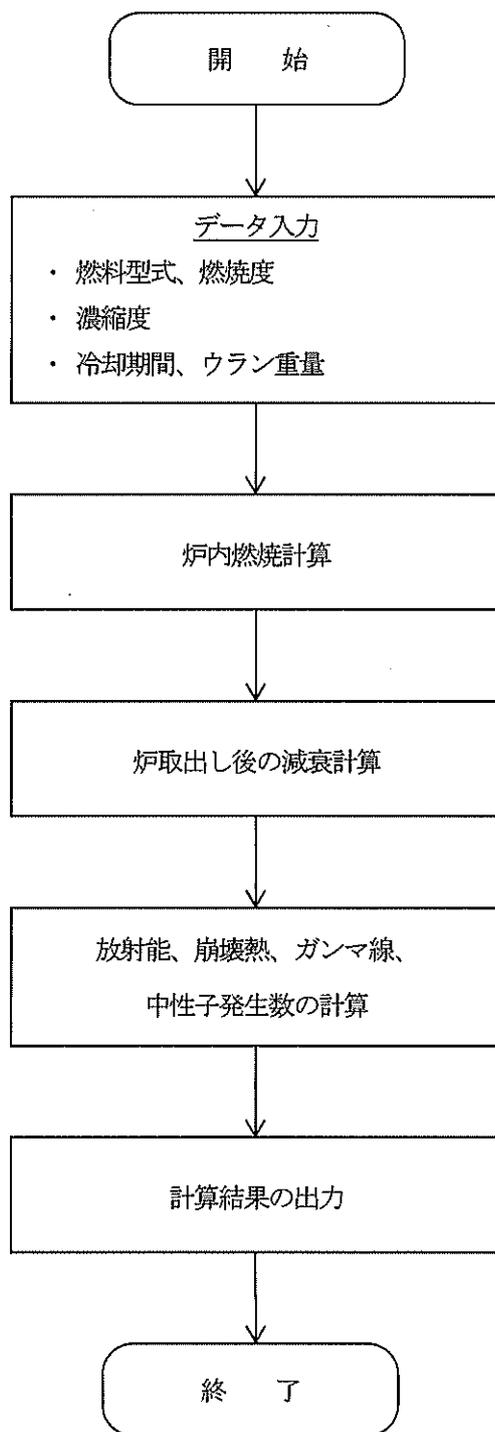
##### iii 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 11 図 (1/2) に示す。

##### iv 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している<sup>(8)</sup>。

ORIGEN2 コードの検証例を第 11 図 (2/2) に示す。



第 11 図 (1/2) ORIGEN2 コードについて (計算フロー図)

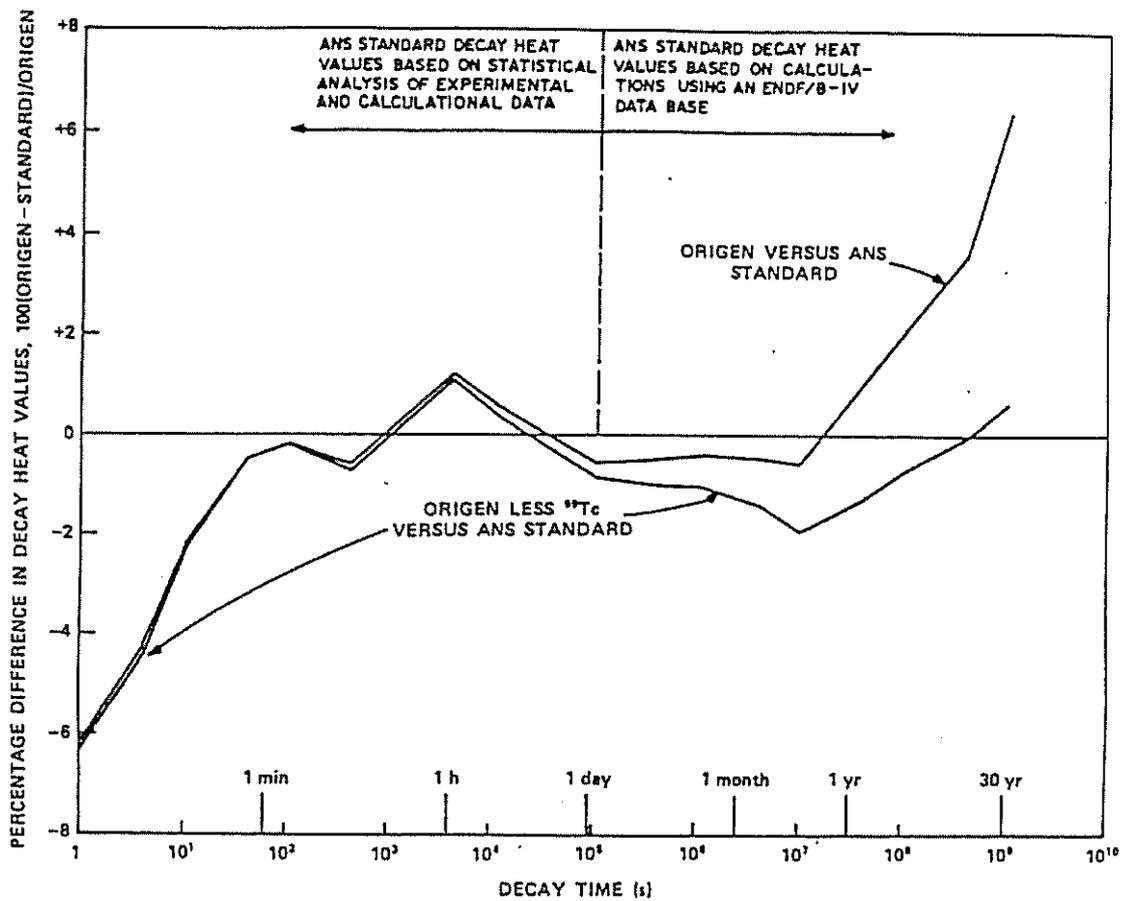


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10<sup>13</sup>-s irradiation of <sup>235</sup>U.

(注)ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上 (MSF-24P 型に収納される燃料の冷却期間) の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は <sup>99</sup>Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より <sup>99</sup>Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第 11 図 (2/2) ORIGEN2 コードについて (検証例<sup>(8)</sup>)

## ②ABAQUS コード

### i 概要

ABAQUS コード<sup>(9)</sup>は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在はDassault Systèmes社)で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。

### ii 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

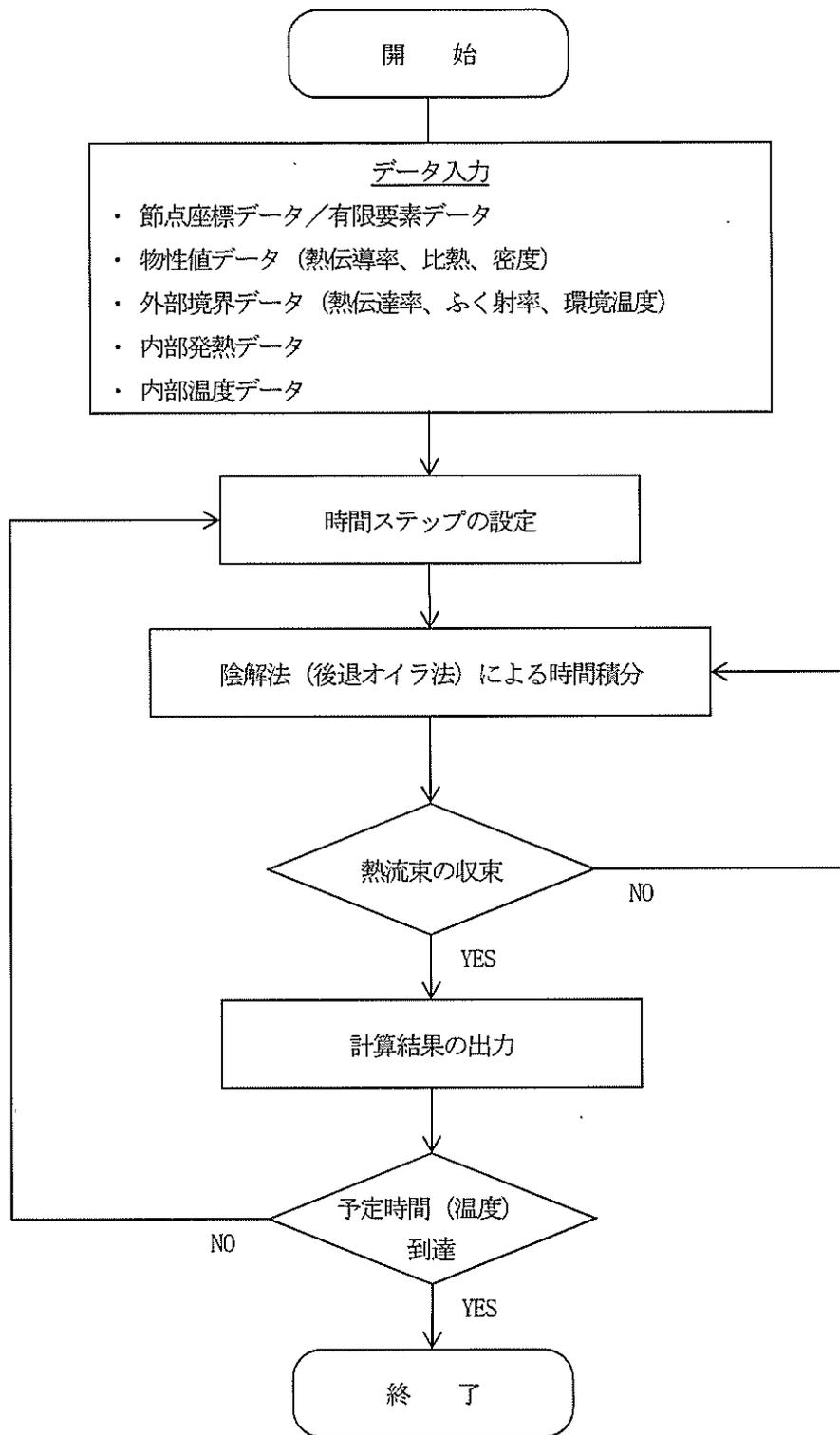
- a) 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b) 一次元から三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c) 初期条件(温度)は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d) 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、熱伝導、対流及びふく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析(構造強度解析)を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。
- e) 構成物質の相変態が考慮できる。

### iii 解析フロー

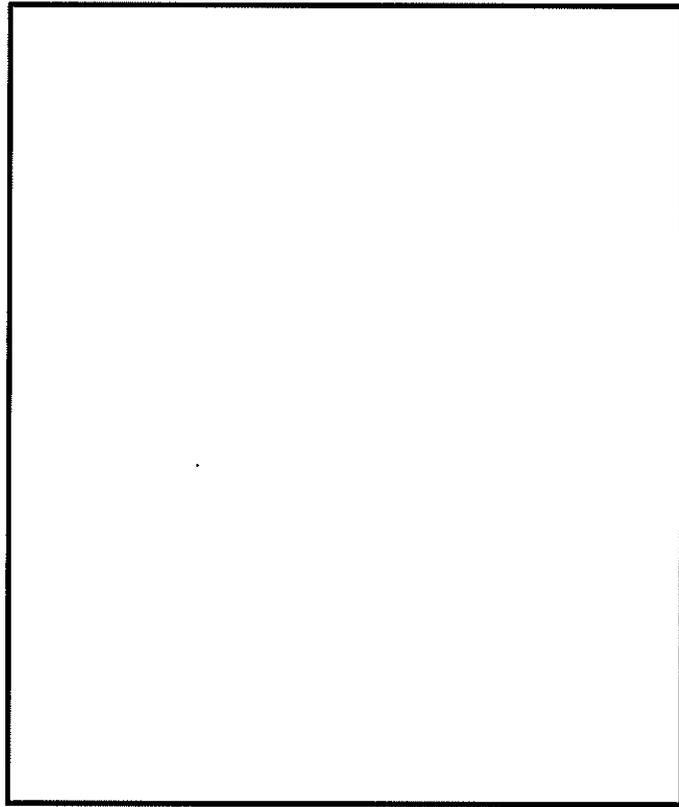
代表的な解析フローを第12図に示す。

### iv 使用実績及び検証

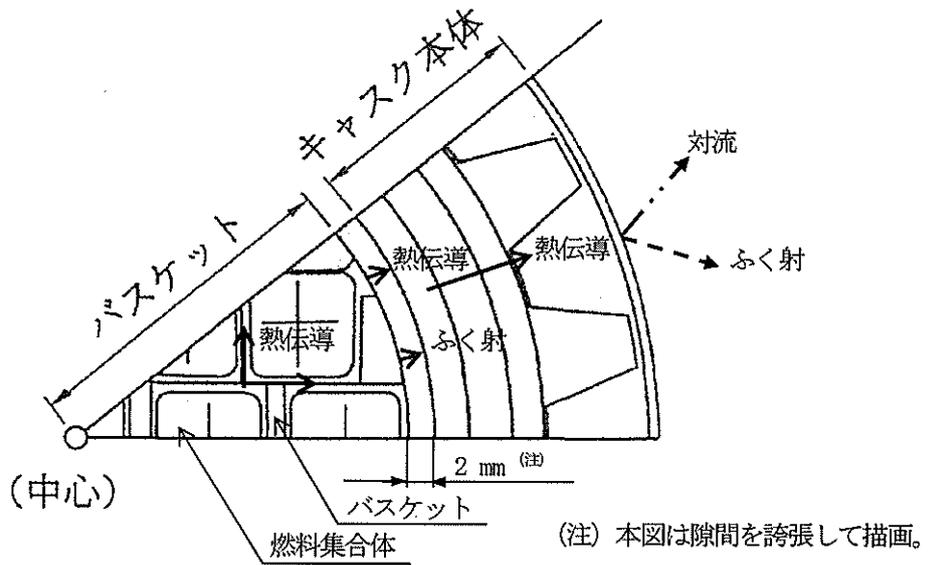
ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、第13図及び第6表に示すように、MSF-24P型と同等の伝熱形態であり、且つ、類似仕様の兼用キャスクの定常伝熱試験に対して、ABAQUSによる解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUSコードの妥当性が検証されている<sup>(10)</sup>。ABAQUSコードの検証例を第14図に示す。



第 12 図 ABAQUS コードの解析フロー図



MSF-24P 型



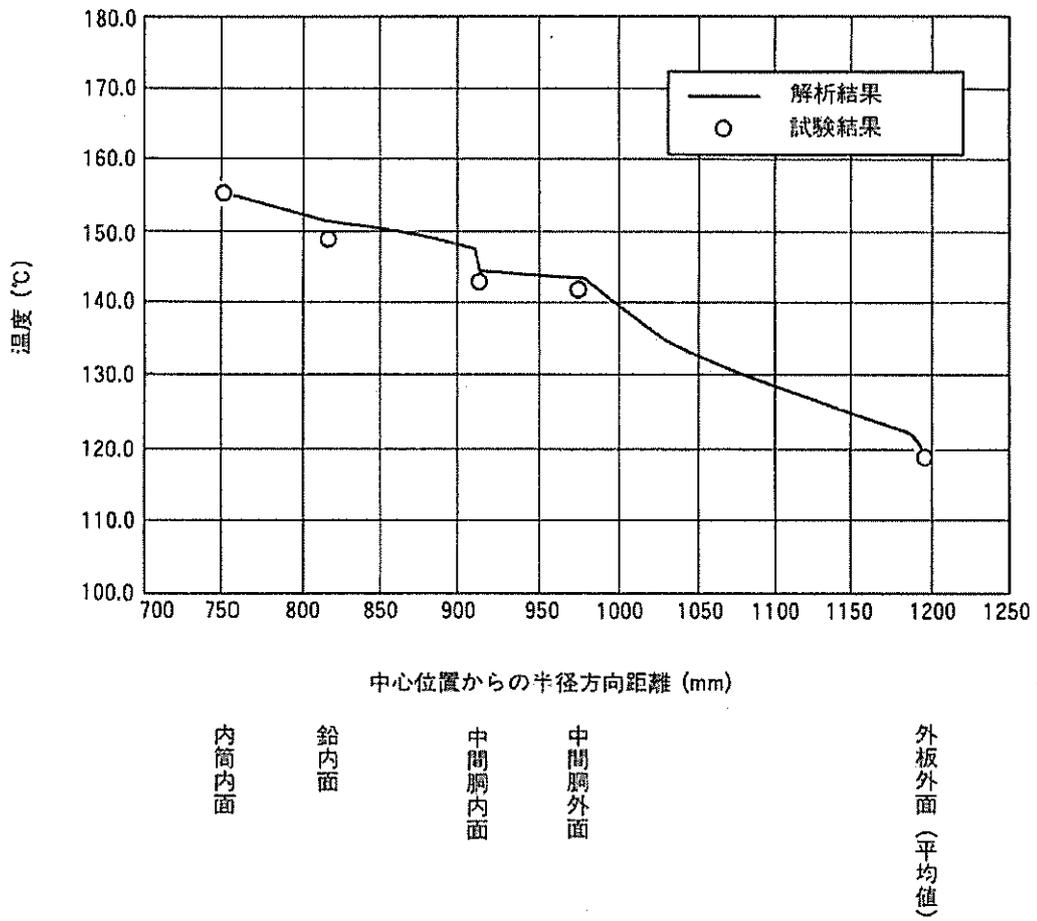
定常伝熱試験に適用した兼用キャスク<sup>(10)</sup>

第 13 図 伝熱形態の比較

第6表 MSF-24P型及び定常伝熱試験に適用した兼用キャスクの仕様

項目	MSF-24P型	定常伝熱試験に適用した兼用キャスク <sup>(10)</sup>
胴内雰囲気	乾式（ヘリウム充填）	乾式（ヘリウム充填）
収納燃料型式	PWR用燃料 （17×17燃料及び15×15燃料）	PWR用燃料（17×17燃料）
収納体数（体）	24	21
崩壊熱量 <sup>(注)</sup> （kW）	18.1	23
外径（mm）	2596	2400
容器の材質	炭素鋼（GLF1）	ステンレス鋼（SUS304）
バスケットの材質	アルミニウム合金（MB-A3004-H112）	ステンレス鋼（SUS304）

(注) MSF-24P型は除熱解析に適用している設計崩壊熱量を記載。一方、定常伝熱試験に適用した兼用キャスクは定常伝熱試験及びABAQUSコードによる伝熱解析に適用した崩壊熱量を記載。



第 14 図 ABAQUS コードの検証例 (定常伝熱試験の解析結果と試験結果の比較) (10)

#### 4. 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 (2007年版) (JSME S FA1-2007)」, (2007).
- (2) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- (3) (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 (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」, (2010).
- (4) 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).
- (5) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).
- (6) 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).
- (7) 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”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).
- (8) A. G. Croff, “ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol. 62, (1983).
- (9) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual (6.12)”, (2012).
- (10) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明朗, 「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」, (一財)電力中央研究所, (1993).

## 除熱解析のモデル化及び解析条件について

### 1. 除熱解析のモデル化及び解析条件

除熱解析は、MSF-24P 型の実形状を三次元で、使用済燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法コード ABAQUS を用いて行う。使用した解析モデルは以下の 2 つのモデルである。

- ・ MSF-24P 型熱解析モデル

- ①三次元 180° 対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）

- ・ 燃料被覆管熱解析モデル

- ②燃料集合体モデル

これら 2 つの解析モデルの入出力フローを別紙 1-1 図に示す。また、各解析モデルの概要及び解析条件を以下に示す。解析に使用する物性値を別紙 1-1 表に、MSF-24P 型外表面の熱伝達率を別紙 1-2 表に、ふく射率を別紙 1-3 表に示す。

#### (1) 全体モデル

全体モデルは、MSF-24P 型全体を三次元でモデル化したものであり、燃料被覆管を除く評価部位の温度を評価するためのモデルである。

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を用いた予備解析結果（別添 1 を参照）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。

全体モデルの外部境界条件を別紙 1-4 表に示す。周囲温度を 38℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達、ふく射による放熱及び太陽熱放射を考慮する。

また、別紙 1-2 図に示す使用済燃料集合体の収納配置を考慮しつつ、燃料集合体最高温度を高め算出するために、中央部には最高燃焼度の崩壊熱量を設定し、外周部には、MSF-24P 型 1 基の総崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量 24 体分となるように調整した崩壊熱量を設定する。

## (2) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルは、使用済燃料集合体の軸方向中央断面を二次元でモデル化したものであり、燃料棒の温度を評価するためのモデルである。

燃料棒には、二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して均質化した物性値を設定する。

発熱条件には、PF 最大領域の崩壊熱量となるように各燃料棒の発熱密度を設定する。また、境界条件には、全体モデルにおいて求められる中性子吸収材の最高温度を設定する。さらに、伝熱形態としては、径方向及び周方向の伝導及びふく射を考慮するものとし、軸方向への伝熱を無視し断熱とする。

## 2. 除熱解析の保守性

除熱解析は、以下の点について保守性を有している。

### ・ 収納制限に対する解析条件の保守性

－ウラン濃縮度  $4.1 \pm \square$  wt% 及び  $4.0 \pm \square$  wt% を保守的に  $\square$  wt% 及び  $\square$  wt% とする。

－使用済燃料の最高温度を保守的に高めに算出するために、別紙 1-2 図のとおり中央部 12 体に燃焼度が 48GWd/t の使用済燃料を配置し、外周部 12 体は、兼用キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 44GWd/t に相当するよう中央部の崩壊熱量を差し引いて外周部の 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。

### ・ モデル化の保守性

－兼用キャスク本体内のバスケット及びバスケット内の使用済燃料は、燃料集合体の温度を高めに評価するよう、空間の中央に配置する。

－燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。

－使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

－外筒外表面の熱伝達率に係数 0.87 を乗じる。

－貯蔵場所が“屋外”の除熱解析において、太陽熱放射を常時作用させる。

－貯蔵場所が“屋外”の除熱解析において、MSF-24P 型の全曲面に対して  $400\text{W/m}^2$  の放射熱を作用させる。

別紙 1-1 表 材料の物性値 (1/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 (注1) (W/(m・K))
胴 一次蓋 二次蓋	炭素鋼 (GLF1)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
貯蔵用三次蓋	ステンレス鋼 (SUSF304)	26.85	16.0
		326.85	19.0
		526.85	22.5
外筒	炭素鋼 (SGV480)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
蓋部中性子遮蔽材 底部中性子遮蔽材 側部中性子遮蔽材	レジン	—	0.646
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 (MB-A3004-H112)	20	162.1
		125	170.1
		200	173.6
中性子吸収材	ほう素添加 アルミニウム合金	—	110 (長手方向) 70 (板厚方向)
伝熱フィン	銅 (C1020)	26.85	398
		326.85	383
		526.85	371

(注1) 引用文献(1)を参照。ただし、レジンは引用文献(2)、ほう素添加アルミニウム合金は引用文献(3)、アルミニウム合金は引用文献(4)を参照。

別紙1-1表 材料の物性値 (2/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 <sup>(注1)</sup> (W/(m·K))
トラニオン	析出硬化系 ステンレス鋼 (SUS630)	20	17.3
		125	18.9
		225	20.7
緩衝体木材	オーク材	26.85	0.290
		126.85	0.374
		226.85	0.459
	バルサ材	26.85	0.0933
		126.85	0.176
		226.85	0.259
	米スギ材	26.85	0.168
		126.85	0.291
		226.85	0.414
内部気体	ヘリウム	26.85	0.1527
		126.85	0.1882
		226.85	0.2212
		326.85	0.2523
周囲気体	空気	26.85	0.02614
		126.85	0.03305
		226.85	0.03951

(注1) 析出硬化系ステンレス鋼は引用文献(3)、オーク材、バルサ材及び米スギ材は引用文献(5)、ヘリウム及び空気は引用文献(1)を参照。

別紙 1-2 表 MSF-24P 型外表面の熱伝達率

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 (注1) (W/(m <sup>2</sup> ·K))
MSF-24P 型外表面 (水平面)	水平円筒	293.15	20	$1.20 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.02 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$0.863 \times \Delta t^{1/3}$
MSF-24P 型外表面 (垂直面)	垂直平板	293.15	20	$1.55 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$
緩衝体外表面 (水平面)	水平円筒	293.15	20	$1.20 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.02 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$0.863 \times \Delta t^{1/3}$
緩衝体外表面 (側面)	垂直平板	293.15	20	$1.55 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$

(注1) 熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

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

$$h = 0.129 \lambda \left( \frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \text{Pr} \right)^{1/3} \quad (\text{垂直平板}) \quad (6)$$

- ここで、h : 熱伝達率 (W/(m<sup>2</sup>·K))  
 λ : 熱伝導率 (W/(m·K))  
 g : 重力加速度 (=9.80665 m/s<sup>2</sup>)  
 β : 体積膨張係数 (1/K)  
 Δt : 周囲空気と外表面の温度差 (K)  
 Pr : プラントル数 (-)  
 ν : 動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s)

別紙1-3表 材料のふく射率

構成部材	材料	ふく射率
胴（内面）	アルミニウム（酸化面）	0.33 <sup>(7)</sup>
一次蓋 二次蓋	ニッケル（めっき面）	0.11 <sup>(7)</sup>
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	0.055 <sup>(8)</sup>
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	0.2 <sup>(3)(7)</sup>
外筒（外表面） 胴（外表面）	塗装	0.8 <sup>(1)(注1)</sup>
緩衝体（外表面）	ステンレス鋼	0.15 <sup>(8)</sup>

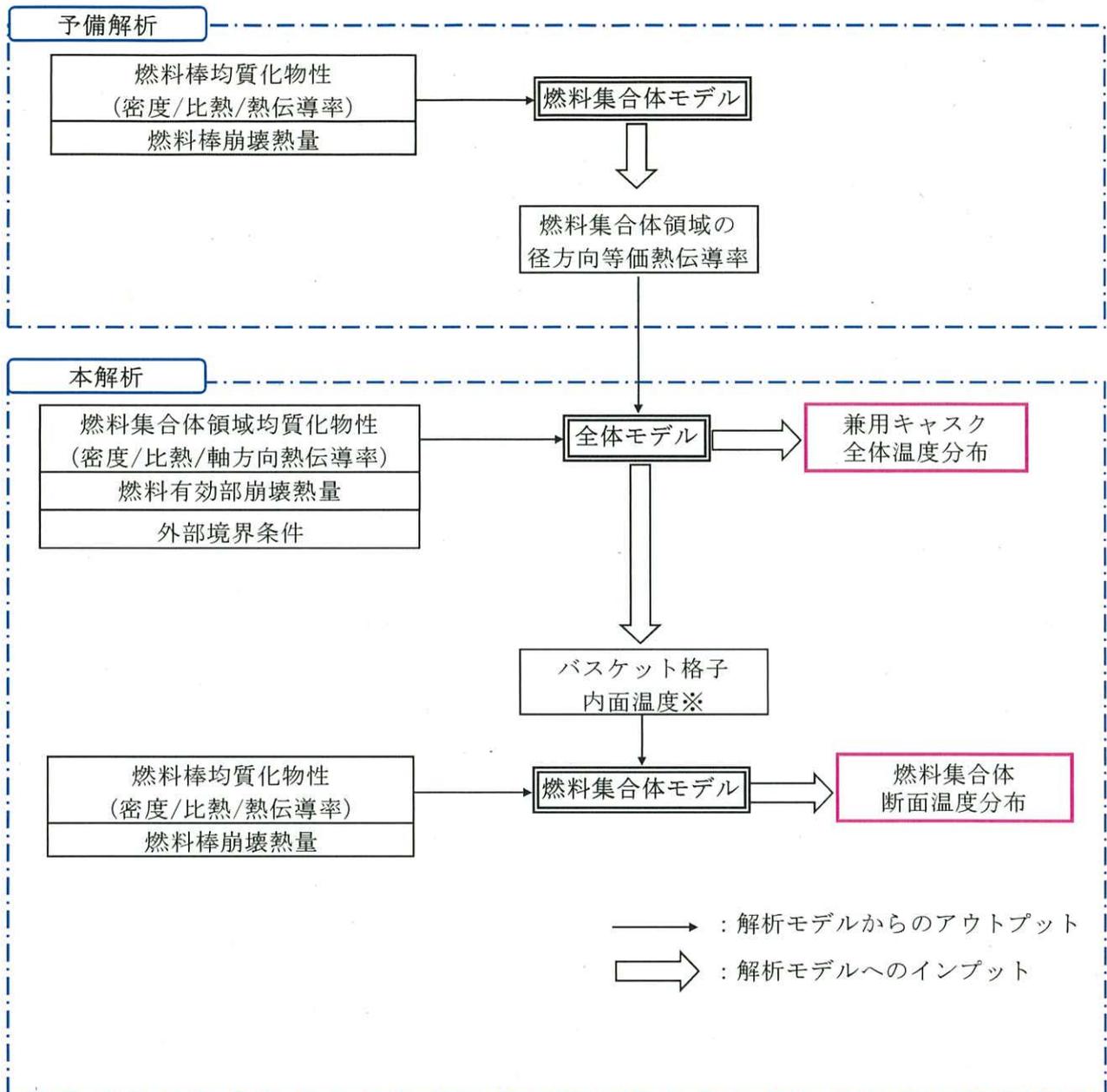
（注1）塗装のふく射率の設定根拠は別添2を参照。

別紙 1-4 表 全体モデルの境界条件

項目		境界条件
周囲温度		38℃
周囲吸収率		1.0
MSF-24P 型 表面ふく射率	外筒（外表面） 胴（外表面）	0.8
	緩衝体（外表面） トラニオン（外表面）	0.15
兼用キャスク表面熱伝達率 （側面、上面、下部端板）		別紙 1-2 表による
太陽熱放射 <sup>(注1)</sup>	垂直に輸送される表面	200 <sup>(9)</sup> W/m <sup>2</sup>
	その他の表面（曲面） <sup>(注2)</sup>	400 <sup>(9)</sup> W/m <sup>2</sup>

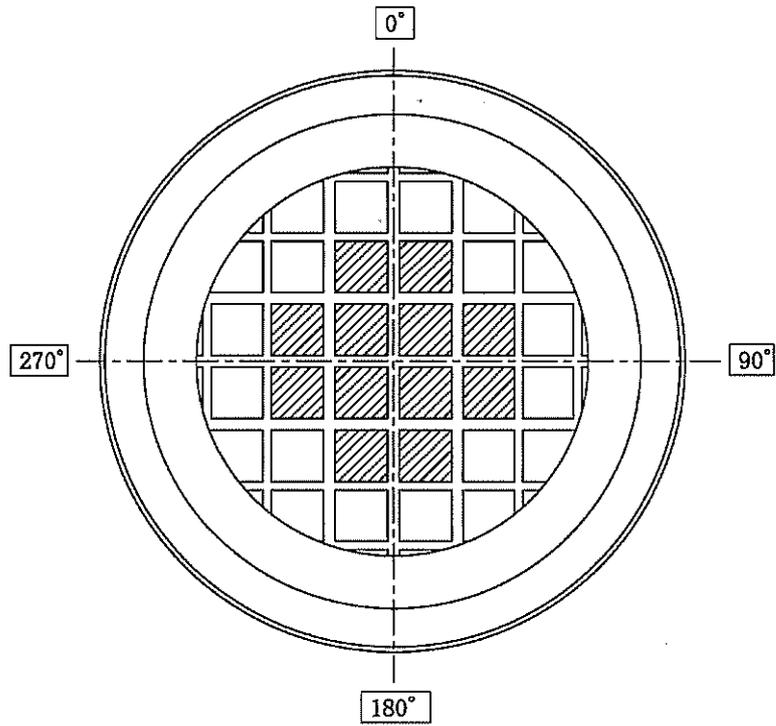
(注 1) 告示<sup>(9)</sup>上は一日につき 12 時間の負荷であるが、解析上は連続照射とする。

(注 2) 告示<sup>(9)</sup>上は「水平に輸送されない下向きの表面」に対しては 200 W/m<sup>2</sup>であるが、解析上は安全側にすべての曲面に対して 400 W/m<sup>2</sup>とする。



※燃料集合体モデルの境界条件として、全体モデルの最高温度をとるバスケットセル内面(中性子吸収材)の径方向温度分布を設定する。

別紙1-1図 除熱解析モデルの入出力フロー図



 : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)

 : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体) 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

別紙 1-2 図 使用済燃料集合体の収納配置

### 3. 引用文献

- (1) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).
- (2) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material” , (1986).
- (3) 日軽金アクト株式会社, 日軽新潟株式会社, 「中性子吸収材データ」, (2018).
- (4) American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)” , (2010).
- (5) 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).
- (6) M. Jakob, “Heat Transfer. Volume 1” , John Wiley & Sons, Inc., (1949).
- (7) J. R. Howell, R. Siegel, “Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition” , Taylor & Francis Group, (2011).
- (8) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975).
- (9) 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」.

燃料集合体モデルを用いた予備解析について

全体モデルの燃料集合体領域に設定する径方向等価熱伝導率は、燃料集合体モデルを用いた予備解析により求められる。

径方向等価熱伝導率の算出方法を以下に示す。

<径方向等価熱伝導率の算出方法>

全体モデルの燃料集合体領域に設定する径方向等価熱伝導率 $\lambda_f$ は、燃料集合体モデルを用いたパラメータサーベイの結果から、円柱形状の内部発熱体の伝熱基礎式を基に正方形直角柱形状に当てはめた①式により求められる。

$$\lambda_f = \frac{qW^2}{K(T_1 - T_2)} \quad \dots \dots \dots \text{①}$$

ここで、

- $\lambda_f$  : 径方向等価熱伝導率 (W/(m·K))
- $q$  : 使用済燃料集合体の PF 最大領域における単位体積崩壊熱量 (W/m<sup>3</sup>)
- $W$  : 燃料集合体領域外寸 (m)
- $K$  : 係数 (-)
- $T_1$  : 燃料棒最高温度 (K)
- $T_2$  : バスケットプレート又は中性子吸収材内面温度 (K)

燃料集合体モデルを用いて、 $T_2$  を 300.15K (27°C)、400.15K (127°C)、600.15K (327°C) とした 3 ケースで  $T_1$  を算定し、①式から温度依存性のある  $\lambda_f$  を設定する。

なお、各ケースで求められる  $\lambda_f$  の代表温度は、 $T_1$  と  $T_2$  の平均値とする。

### 塗装のふく射率の設定根拠

別紙 1-3 表「材料のふく射率」において、塗装に設定したふく射率 0.8 は、引用文献(1)に示された塗料のふく射率 0.7~0.9 の最大と最小の平均値である。なお、設定の妥当性を以下に示す。

#### < 塗装にふく射率 0.8 を設定したことの妥当性 >

別紙 1-3 表「材料のふく射率」のうち、塗装のふく射率 0.8 が設定されている構成部材は、外筒（外表面）及び胴（外表面）である。これらの構成部材のふく射率に係る文献値、解析入力値及び実測値を別添 2-1 表に示す。なお、実測値は MSF-24P 型の表面に塗装予定である大日本塗料株式会社の「エポニックス#3100GH（白、淡彩色）」の値である。

ふく射率 0.8 は実測値（0.93）より小さいことから、MSF-24P 型の内部の温度がより高く評価される。したがって、設定は妥当である。

別添 2-1 表 材料のふく射率

構成部材	仕様	ふく射率		
		文献値	解析入力値	実測値
外筒（外面） 胴（外面）	塗装	0.7~0.9 <sup>(1)</sup> （注 1）	0.8	0.93 <sup>(注 2)</sup>

（注 1）引用文献(1)に示される塗料の熱放射率の最大と最小の値

（注 2）MSF-24P 型の表面に塗装予定である大日本塗料株式会社の「エポニックス#3100GH（白、淡彩色）」の実測値。

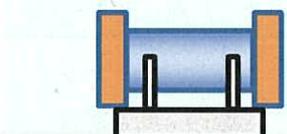
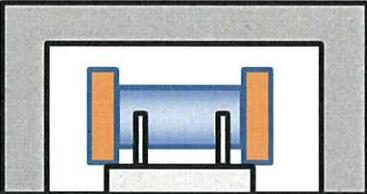
蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法（横置き）の  
除熱解析における貯蔵場所の影響について

1. 横置き貯蔵時の貯蔵場所

横置き貯蔵時の貯蔵場所は、別紙 2-1 表に示す屋外又は貯蔵建屋内である。

本別紙では、貯蔵場所の違いによる除熱解析への影響を示す。

別紙 2-1 表 貯蔵姿勢及び貯蔵場所

貯蔵場所 貯蔵姿勢	屋外貯蔵	貯蔵建屋内貯蔵
横置き		

別紙 2 で示す  
除熱解析への影響

2. 貯蔵場所の違いによる除熱解析条件の相違

横置き状態における貯蔵場所による除熱解析条件の相違点を別紙2-2表に示す。

なお、別紙2-2表に示す条件以外の諸条件は、本文及び別紙1に示す条件と同じである。

別紙2-2表 貯蔵場所による除熱解析条件の相違点（横置き）

熱解析条件	屋外	貯蔵建屋内
自然対流	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水平円筒の自然対流<sup>(注1)</sup></li> <li>    (係数 0.87 を乗じる<sup>(注2)</sup>)</li> <li>・ 基準温度：38℃</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水平円筒の自然対流<sup>(注1)</sup></li> <li>    (係数 0.87 を乗じる<sup>(注2)</sup>)</li> <li>・ 基準温度：45℃</li> </ul>
ふく射	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 基準温度：38℃</li> <li>・ ふく射形態係数：1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 基準温度：65℃</li> <li>・ ふく射形態係数：1 未満</li> </ul>
太陽熱放射	考慮要	考慮不要

(注1) 自然対流熱伝達率の比較を別添1に示す。

(注2) 水平円筒の自然対流熱伝達率に乗じる係数の詳細を別添2に示す。

3. 貯蔵場所の差異による除熱解析条件の相違

横置きでの屋外貯蔵と貯蔵建屋内貯蔵の除熱解析結果の比較（17×17 燃料を収納する場合）を別紙2-3表に示す。

屋外貯蔵と貯蔵建屋内貯蔵の燃料被覆管及び兼用キャスクの各部位における最高温度の温度差は最大でも1℃であり、貯蔵場所による除熱解析への影響は小さい。

別紙 2-3 表 最高温度の比較 (17×17 燃料収納時)

対象となる部位		最高温度 (°C)		温度差 (①-②)
		屋外 <sup>(注1)</sup> (①)	貯蔵建屋内 (②)	
MSF-24P 型	胴 (本体部)	121	122	-1
	胴 (フランジ部)	111	111	0
	胴 (底板)	133	133	0
	外筒	114	114	0
	底部中性子遮蔽材カバー	117	116	1
	下部端板	115	115	0
	一次蓋	110	110	0
	蓋部中性子遮蔽材カバー	108	108	0
	二次蓋	105	104	1
	貯蔵用三次蓋	103	102	1
	一次蓋ボルト	109	109	0
	二次蓋ボルト	105	104	1
	貯蔵用三次蓋ボルト	103	102	1
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	127	126	1
	金属ガスケット	109	108	1
	緩衝材	113	112	1
	カバープレート・リブ	114	114	0
	緩衝体ボルト	115	114	1
	バスケット	177	178	-1
	トラニオン	118	118	0
伝熱フィン	115	116	-1	
燃料被覆管 <sup>(注2)</sup>		205	206	-1

(注 1) 屋外貯蔵時は、本文に示す解析結果と同一である。

(注 2) 燃料被覆管温度は、全体モデルで算出した温度である。

### 水平円筒及び垂直平板の自然対流熱伝達率の比較

MSF-24P 型の除熱解析モデルに設定する水平円筒及び垂直平板の自然対流熱伝達率を別紙 2-4 表に示す。 $\Delta t^{1/3}$  に乗じる数値は全ての温度で水平円筒の方が小さいことから、水平円筒の自然対流を設定する方が除熱効果の小さい条件となる。

なお、評価では、水平円筒の自然対流に別添 2 に示す係数 0.87 を乗じることから、垂直平板との差はさらに大きくなる。

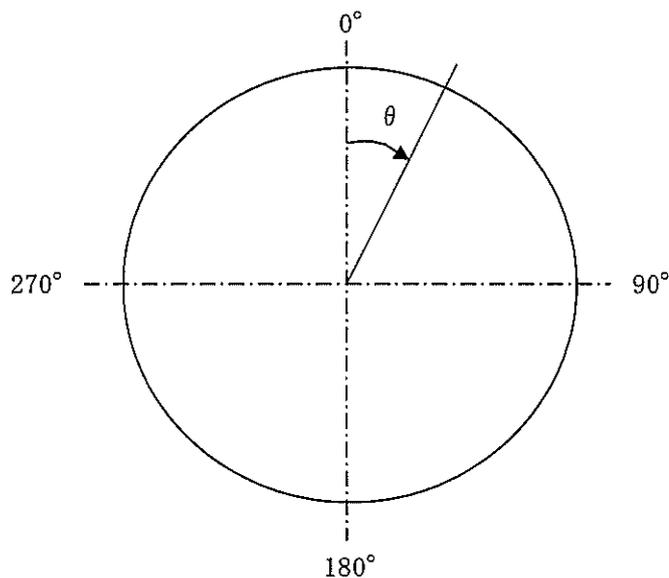
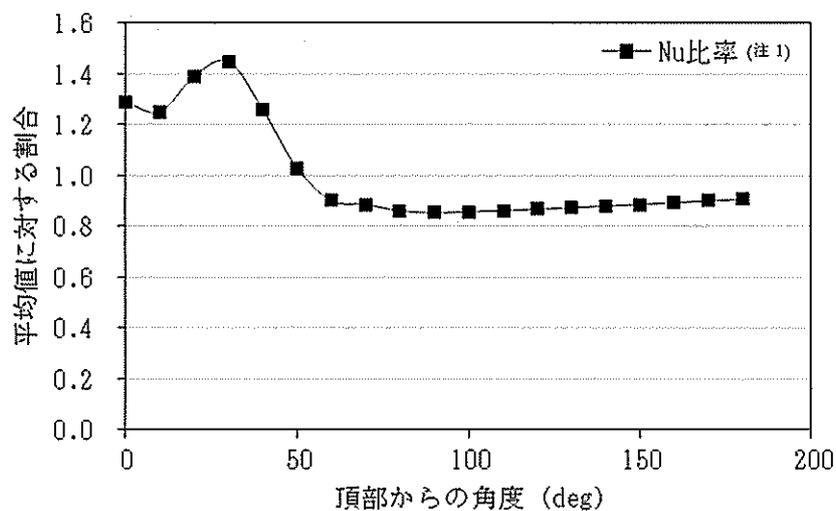
別紙 2-4 表 水平円筒及び垂直平板の自然対流熱伝達率 (注)

温度 (°C)	水平円筒の自然対流熱伝達率 (W / (m <sup>2</sup> · K))	垂直平板の自然対流熱伝達率 (W / (m <sup>2</sup> · K))
-20	$1.33 \Delta t^{1/3}$	$1.72 \Delta t^{1/3}$
0	$1.26 \Delta t^{1/3}$	$1.63 \Delta t^{1/3}$
20	$1.20 \Delta t^{1/3}$	$1.55 \Delta t^{1/3}$
100	$1.02 \Delta t^{1/3}$	$1.31 \Delta t^{1/3}$
200	$8.63 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$	$1.11 \Delta t^{1/3}$
300	$7.60 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$	$9.80 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$
400	$6.82 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$	$8.80 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$
600	$5.77 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$	$7.44 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$
800	$5.00 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$	$6.45 \times 10^{-1} \Delta t^{1/3}$

(注)  $\Delta t$  は、基準温度と外表面の温度差である。

水平円筒の自然対流熱伝達率に乗じる係数

別添 1 に示す水平円筒の自然対流熱伝達率には、別紙 2-1 図に示す水平円筒外表面の周方向分布を考慮し、0° から 180° の平均値に対する割合（別紙 2-1 図のグラフを参照）のうち、90° から 180° の割合を平均化して算出した係数（0.87）を乗じる。



別紙 2-1 図 外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布

(注 1) “各点の Nu (ヌッセルト) 数 / 全点の Nu 数の平均値” より算出。なお、Nu 数は以下の文献に示す試験で計測した局所熱伝達率から算出。

出典：三角利之，鈴木幸治，北村健三，「大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱（空気の場合）」，（一社）日本機械学会，（1999）。

除熱解析の設計基準値における引用文献の記載内容について

本別紙は、除熱解析の設計基準値における引用文献の記載内容を示すものである。各引用文献の記載内容を別紙 3-1 表に示す。

別紙 3-1 表 設計基準値における引用文献の記載内容 (1/2)

番号	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
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 (2007年版) (JSME S FAI-2007)」, (2007).	炭素鋼は-30℃~350℃の温度範囲において、ステンレス鋼は-30℃~425℃の温度範囲において、析出硬化系ステンレス鋼は-30℃~350℃の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は-30℃~350℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SCV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバナー) [炭素鋼] ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバナー、貯蔵用三次蓋、カバナープレート・リブ) [ステンレス鋼] ・SUS630 (トラニオン) [析出硬化系ステンレス鋼] ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) [炭素鋼] ・SNB23-3 (蓋ボルト、貯蔵用緩衝体ボルト) [ニッケルクロムモリブデン鋼]
2	・BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1986).	エポキシ樹脂の使用可能温度の上限 149℃が示された文献である。
3	・(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).	・金属ガスケット (外蔽材:アルミニウム、内蔽材及びコイルスプリング:ニッケル基合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 130℃から 140℃の範囲で一一定し、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過 (ラーソン・ミラー・パラメータ (LMP) =7942) しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認されている。 ・本試験結果では LMP=7942 まで健全性が示されており、貯蔵期間を 60 年とした場合に LMP=7942 となる金属ガスケットの初期温度は 134℃となり、この温度以下にすれば密封性能が維持される。
4	・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).	三菱重工業製の乾式キャスク (MSF-21P 型) のバスケットに用いるアルミニウム合金 (NB-A3004-H112) の設計用強度及び物性値、並びに強度設計における設計基準の設定根拠がまとめられている。アルミニウム合金は設計貯蔵期間中の強度低下を考慮する必要があるが、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡し、設計貯蔵期間中の熱ばく露を適切に考慮した設計用強度を規定している。
5	・(一財)日本規格協会,「圧力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015).	-40℃~200℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。

参考文献

別紙 3-1 表 設計基準値における引用文献の記載内容 (2/2)

番号	参考文献	文献概要
6	<p>文献名 (国際規格/研究機関論文等)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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 中間貯蔵ワーカーキンググループ 輸送ワーカーキンググループ、「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取納物の長期健全性について」,(2009).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ 4 被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することが確認されている。設計貯蔵期間中には温度を 420℃以下に制限することによりクリープひずみが 1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。</li> <li>・ 照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約 300℃では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。</li> <li>・ 水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を 275℃以下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。</li> </ul>

貯蔵建屋の除熱評価について  
(設置(変更)許可申請に対する引継ぎ事項)

## 1. 概要

設置(変更)許可申請において実施する貯蔵建屋の除熱評価(貯蔵建屋を設置する場合)の概要を示す。

## 2. 貯蔵建屋を設置する場合の要求事項

設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 3 項では、「貯蔵建屋は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。」の要求があり、また、審査ガイド 2.3 除熱機能の確認内容において、「貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。」の要求が示されている。MSF-24P 型の除熱設計は、貯蔵建屋内での MSF-24P 型周囲温度が 45℃以下であることを条件としているため、設置(変更)許可申請では、MSF-24P 型の除熱評価において貯蔵施設側で確認する事項として設定している「MSF-24P 型周囲温度が 45℃以下であること。」の確認を行う。

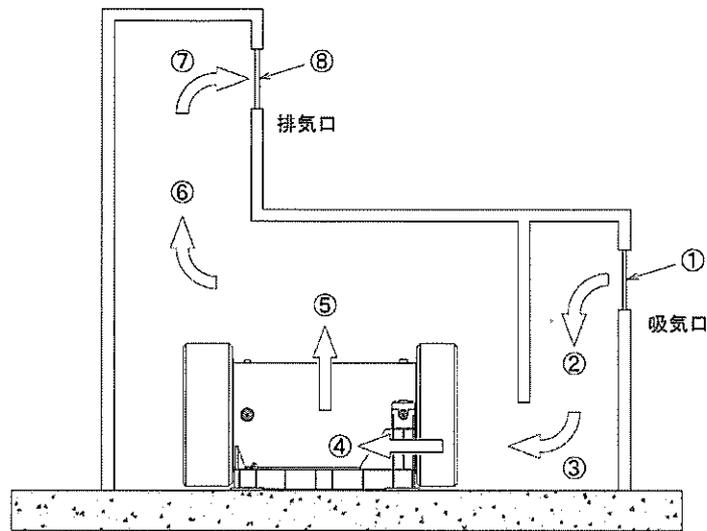
なお、兼用キャスクの除熱評価と貯蔵建屋の除熱評価相互の関係は本書の本文第 3 図のとおりである。

## 3. 貯蔵建屋の除熱評価例

貯蔵建屋の設計例として、給気口と排気口を有する構造とし、自然対流冷却により、貯蔵建屋内に設置された兼用キャスク表面から兼用キャスクの周囲の空気に伝えられた熱を、その熱量に応じて生じる空気の通風力を利用して貯蔵建屋外へ放散する設計での除熱評価例を示す。

## (1) 評価方法

貯蔵建屋の流路(例)を別紙 4-1 図に示す。貯蔵建屋の除熱評価は、兼用キャスク表面に伝えられた使用済燃料の崩壊熱全てが周囲空気に移行するものとして、貯蔵建屋の給気口から排気口までの流路をモデル化し、排気温度が兼用キャスクの除熱評価で適用している周囲温度条件以下となることを示すことである。



別紙 4-1 図 貯蔵建屋の熱の流路 (例)

## (2) 排気温度の計算

排気温度は、別紙 4-1 表に示す貯蔵建屋の給気温度、兼用キャスクの崩壊熱量等を条件として、乾式貯蔵建屋内の空気と外気との密度差により生じる駆動力  $H_{th}$  と、貯蔵建屋内を空気が流れることによって生じる圧力損失  $\Delta P$  (別紙 4-1 図の①～⑧の箇所の総和) がバランスする点を算出することで算出される。

### 1) 駆動力 $H_{th}$ (熱ドラフト力) の計算

駆動力  $H_{th}$  (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

$$H_{th} = (\rho_{in} - \rho_{out}) \times g \times h$$

ここで、

- $H_{th}$  : 熱ドラフト (Pa)
- $\rho_{in}$  : 外気の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\rho_{out}$  : 排気の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $g$  : 重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
- $h$  : ドラフト高さ (m)

2) 圧力損失  $\Delta P$  の計算

圧力損失  $\Delta P$  は、以下の式で表される。

$$\Delta P = \sum_i \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2}$$

$$W_i = \frac{q \cdot n}{C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}$$

ここで、

- $\Delta P$  : 圧力損失 (Pa)
- $\zeta_i$  : 圧力損失係数 (-)
- $W_i$  : 通過風量 (質量流量) (kg/s)
- $\rho_i$  : 通風路の空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $A_i$  : 通風路の断面積 (m<sup>2</sup>)
- $q$  : 兼用キャスクの崩壊熱量 (kW/基)
- $n$  : 兼用キャスク基数 (基)
- $C_p$  : 空気の比熱 (kJ/kg・°C)
- $T_{out}$  : 排気温度 (°C)
- $T_{in}$  : 給気温度 (°C)

別紙 4-1 表 貯蔵建屋の除熱評価条件 (例)

項目	条件	備考
兼用キャスクの崩壊熱量 (q)	15.8kW/基	設置する兼用キャスクの崩壊熱量により設定される
給気温度 ( $T_{in}$ )	30°C	設置する貯蔵建屋の気温等により設定される
目標排気温度 ( $T_{out}$ )	45°C以下	兼用キャスクの除熱評価条件 (周囲温度) に適用される温度以下となることを確認する

(3) 設置（変更）許可申請への引継ぎ事項

前述の貯蔵建屋の除熱評価に必要な事項として、以下に示す事項を設置（変更）許可申請に引継ぐ。

・ MSF-24P 型の寸法（通風路の断面積算出に使用）

MSF-24P 型の全長：6783mm

MSF-24P 型のキャスク本体外径：Φ2596mm

MSF-24P 型の緩衝体外径：Φ3550mm

・ MSF-24P 型の最大崩壊熱量：15.8kW

### 貯蔵施設における MSF-24P 型の取扱上の安全性について

#### 1. 貯蔵施設における取扱上の安全性に対する設計上の配慮

MSF-24P 型は、設計貯蔵期間中を通して安全機能を維持するとともに、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して信頼性を有する材料及び構造とすることで使用済燃料の健全性を確保する設計としており、貯蔵中に MSF-24P 型の安全機能維持の監視のために蓋間圧力及び表面温度を適切な頻度で確認することを除けば、貯蔵中、MSF-24P 型近傍で行う作業を特段要しない設計としている。

MSF-24P 型の外面温度は高温となる可能性があるが、貯蔵施設での MSF-24P 型の取扱いにおいて、人が MSF-24P 型の外面に触れる場合には、保護具の装着により防護することが可能であり、安全上問題はないと判断している。詳細を以下に示す。

#### 2. MSF-24P 型の外面温度

屋外貯蔵及び貯蔵建屋内貯蔵における MSF-24P 型の崩壊熱量を現実的な設定として実施した除熱解析による MSF-24P 型外面の最高温度を別紙 5-1 表に示す。

なお、除熱解析では、崩壊熱量の他に、別紙 1 の 2. に示すその他の保守性を有しており、現実的には、別紙 5-1 表に示す温度以下となる。

別紙 5-1 表 MSF-24P 型外面の温度<sup>(注 1)</sup>

MSF-24P 型の外面 <sup>(注 2)</sup>	最高温度 (°C)	
	屋外貯蔵	貯蔵建屋内貯蔵
外筒外面	100	101
トラニオン外面	104	101
緩衝体外面	87	84

(注 1) MSF-24P 型 1 基あたりの崩壊熱量を本書本文の 2. (2) に示す除熱解析の入力 18.1kW (設計崩壊熱量) から仕様上の最大となる 15.8kW (最大崩壊熱量) として解析した場合の温度 (17×17 燃料収納時と 15×15 燃料収納時で温度差は殆どないため、17×17 燃料収納時の温度で代表)。

(注 2) MSF-24P 型の外面のうち、人が接触し得る表面。

### 3. MSF-24P 型の周囲温度

MSF-24P 型の周囲温度は、38℃（屋外貯蔵）及び 45℃（貯蔵建屋内貯蔵）として設定している。

### 4. 貯蔵施設における MSF-24P 型の取扱いフロー

MSF-24P 型を貯蔵施設に搬入してから貯蔵するまでの取扱いフロー及び作業内容を別紙 5-2 表に示す。ここで、貯蔵後の貯蔵施設からの MSF-24P 型の搬出フローは、搬入から貯蔵までの手順と逆手順であり、フロー及び作業内容は同一であることから記載を省略している。

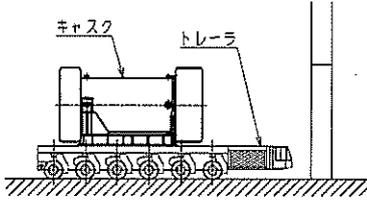
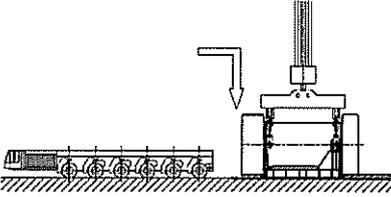
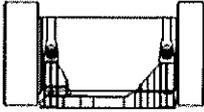
なお、実運用での取扱いフロー及び作業内容は事業者の運用により異なる可能性があり、別紙 5-2 表に示す内容は一例である。

### 5. 貯蔵施設における MSF-24P 型の取扱いに対する安全性評価

3. に示したとおり、MSF-24P 型を貯蔵するにあたっての周囲温度の最高温度は 38℃又は 45℃であり、取扱いを行う上で人が MSF-24P 型の周囲に近づくことに問題はない。

また、2. に示したとおり、MSF-24P 型の外面温度は、高温となる可能性があるが、別紙 5-2 表に示すとおり、MSF-24P 型の外面に人が触れる可能性がある作業は、表面温度の計測、蓋間圧力の測定に係る圧力計の取付け及び圧力計の保守である。本作業では、保護具の装着により防護することが可能であり、安全上問題はないと判断している。

別紙 5-2 表 MSF-24P 型の取扱いフロー及び作業内容 (例)

No.	取扱い手順	作業内容	作業者の MSF-24P 型への接触有無
1	MSF-24P 型の貯蔵施設への搬入 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 搬入</li> </ul>	(なし)
2	トレーラからの貯蔵場所への吊り降ろし 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水平吊具のトラニオンへの取付け</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水平吊具はトラニオンに触れることなく取付けが可能である。</li> </ul>
3	貯蔵前準備・貯蔵 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 蓋間圧力の測定 (測定頻度例 : 1 回/3 カ月)</li> <li>・ 表面温度の測定 (測定頻度例 : 1 回/3 カ月)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <input type="text"/> 圧力計の取付け及び保守を行う際に緩衝体外面又は外筒外面に一時的に触れる可能性があるが、保護具の装着により防護可能。</li> <li>・ 外筒外面 (例) の温度測定時に一時的に触れる可能性はあるが、保護具の装着により防護可能。また、可搬式の非接触式温度計を使用すれば、MSF-24P 型外面に触れることなく測定が可能。</li> </ul>