

資料 1-4

Doc No. MA035B-SC-B01 Rev.4

2023 年 6 月 2 日

日立造船株式会社

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. 参考文献	31

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 真空乾燥時の除熱評価について

別紙 3 除熱解析の設計基準値における参考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

別紙 5 貯蔵施設における Hitz-P24 型の取扱上の安全性について

別紙 6 除熱解析に使用する解析コードについて

1. 要求事項

発電用原子炉施設に係る特定機器の型式証明申請において、特定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項第二号

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条第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、被覆管のクリーブ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。

- 一 （略）
- 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条第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

「2.安全機能の確保 2.3 除熱機能」及び「4. 自然現象に対する兼用キャスクの設計 4.4 監視機能」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。

』

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な温度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

- 5) 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵時間中の兼用キャスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。
- 6) 兼用キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。

』

2. 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

Hitz-P24 型の除熱機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

- a. 設置許可基準規則第 16 条第 4 項第二号
- ・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 条第 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、貯蔵建屋の吸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。

Hitz-P24 型は、動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を特定兼用キャスクの外表面に伝え、周囲空気等に伝達することにより除熱する設計とし、使用済燃料の健全性及び特定兼用キャスクの安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度を制限される値以下に維持する方針とする。

燃料被覆管の温度は、設計貯蔵期間を通じて、燃料被覆管のクリープ破損及び燃料被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から、燃料被覆管の累積クリープひずみが 1% を

超えない温度、照射硬化の回復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り燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下とするため、貯蔵する使用済燃料に以下の制限を設ける。

- ・ 17×17 燃料 48,000MWd/t (A 型及び B 型) 275℃以下

また、Hitz-P24 型は、特定兼用キャスクの安全機能を維持する観点から、特定兼用キャスクの温度を構成部材の健全性が維持される温度以下に制限する設計とし、Hitz-P24 型の主要な構成部材の温度は、以下の制限を設ける。

- ・ 胴、外筒及び蓋部 350℃以下
- ・ 中性子遮蔽材 149℃以下
- ・ 金属ガスケット 130℃以下
- ・ バスケットプレート 250℃以下

さらに、Hitz-P24 型は、使用済燃料及び特定兼用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、特定兼用キャスク外表面の温度を測定できる設計とする。

2. (2) 審査ガイドへの適合性 [確認内容] 1)から 3)への説明に示すとおり、特定兼用キャスクの構成部材の温度は、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、Hitz-P24 型の実形状を二次元でモデル化し、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。また、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。使用済燃料の崩壊熱は、使用済燃料の型式、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、使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納位置を入力条件として、燃料被覆管及び主要な構成部材の温度を評価する。構成部材の温度評価に当たっては、使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮して、最大崩壊熱量を上回る崩壊熱量を設定するとともに、燃料被覆管の温度評価に当たっては、軸方向を断熱条件とするなど、十分な保守性を見込むこととする。上記条件に基づく解析の結果、燃料被覆管及び構成部材の温度は制限温度以下となることを確認した。

なお、貯蔵事業許可基準規則解釈第 6 条第三号に示される貯蔵建屋の除熱設計、同第 6 条第四号に示される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、及び同第 17 条第 1 項第二号に示される貯蔵建屋内の雰囲気温度(周囲温度)の監視については型式証明申請の範囲外(設置(変更)許可時に別途確認)である。

c. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第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。

Hitz-P24 型の設計貯蔵期間は 60 年である。また、補足説明資料 16-6「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（MA035B-SC-F01）」に示すとおり、特定兼用キャスクの構成部材について、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、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、特定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、Hitz-P24 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

Hitz-P24 型は、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及び放射により特定兼用キャスクの外表面に伝え、対流及び放射により周囲の空気等に伝達する。

特定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（図 1 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放射によりバスケット内側部の格子内面へ伝えられる。
- b) バスケット内側部の格子内面に伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導及び

放射によりバスケット外側部へ伝えられる。

- c) バスケット外側部に伝えられた熱は、ヘリウムガスを介した熱伝導及び放射により胴内面へ伝えられる。
- d) 胴内面に伝えられた熱は、熱伝導により胴外面へ伝えられる。
- e) 胴外面に伝えられた熱は、伝熱フィン伝導により外筒内面へ伝えられる。
- f) 外筒内面に伝えられた熱は、熱伝導により外筒外面へ伝えられる。
- g) 外筒外面に伝えられた熱は、特定兼用キャスク外面の対流により周囲の空気へ、放射により貯蔵建屋へ、それぞれ伝えられる。
- h) 特定兼用キャスク周囲の空気及び貯蔵建屋に伝えられた熱は、貯蔵建屋の自然換気により建屋外環境へ放出される。

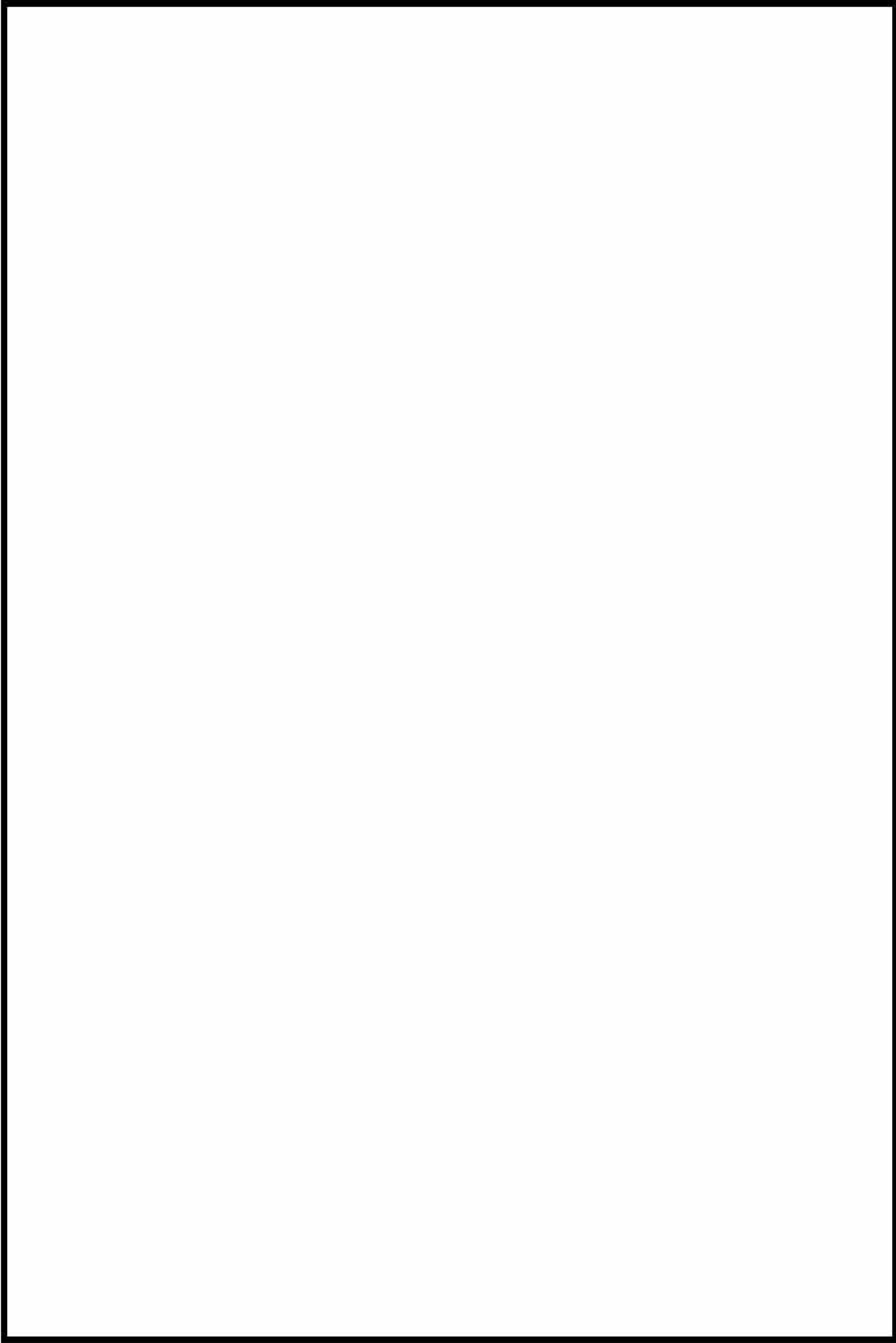


図1 Hitz-P24 型の伝熱形態

(2) 除熱機能に関する評価

Hitz-P24 型の除熱解析は図 2 に示す除熱解析フローに従って行う。なお、除熱解析に用いるコードは別紙 6 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、表 1 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 (15.9kW) 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 (図 3 参照)。

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

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表 2 に示す。表 2 より、17×17 燃料について、燃焼計算で使用する燃料仕様は冷却期間を除き A 型と B 型で同じであり、除熱解析では冷却期間が短く発熱量が大きい A 型を対象として評価するため、A 型の値で代表する。

Hitz-P24 型の除熱解析における収納物条件を表 3 に示す。

(注 1) 平均燃焼度とは、Hitz-P24 型 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) 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。

表 1 燃料集合体の仕様

項目		仕様	
種類		17×17 燃料	
		A 型	B 型
形状	燃料集合体幅 (mm)	約 214	
	全長 (mm)	約 4100	
質量 (kg)		約 680	
燃料集合体 1 体の仕様	初期濃縮度 (wt%)		
	最高燃焼度 (MWd/t)	48,000 以下	
	冷却期間 (年)	15 以上	17 以上
Hitz-P24 型 1 基当たりの仕様	収納体数 (体)	24	
	平均燃焼度 (MWd/t)	44,000 以下	
	崩壊熱量 (kW)	15.9 以下	

表 2 崩壊熱量計算条件及び結果

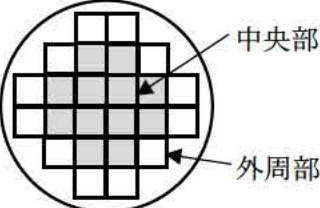
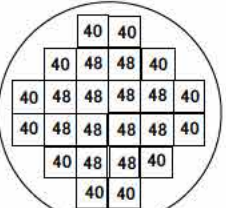
使用済燃料集合体の種類		17×17 燃料			
		A 型	B 型		
計算 条件	最高燃焼度 (MWd/t)	48,000			
	平均燃焼度 (MWd/t)	44,000			
	比出力 (MW/t)				
	照射期間 (日)			最高燃焼度	
				平均燃焼度	
	濃縮度 (%) (注 1)				
	冷却期間 (年)	15	17		
	ウラン重量 (kg)	470			
ピーキングファクタ (注 2)					
計算 結果			燃料集合体 1 体当たりの崩壊熱量 (W) 753.6 (平均燃焼度)		
収納体数 (体)			24		
Hitz-P24 型 1 基当たりの 設計崩壊熱量 (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。

表3 除熱解析における収納物条件概要

項目		特定兼用キャスク収納位置制限		解析条件		
		中央部	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	種類	17×17型 (A型・B型)		17×17型 (A型)	
		初期濃縮度 (wt%)				
		ウラン重量 (kg)				
		最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	48	(40) (注2)
		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)				
		冷却期間 (年)				
Hitz-P24型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		44		
配置 (注5)						

(注1) 保守的に最小値とする。

(注2) 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、Hitz-P24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3) 組み合わせる使用済燃料集合体の冷却期間以上とする。

(注4) 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5) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

 内は商業機密のため、非公開とします。

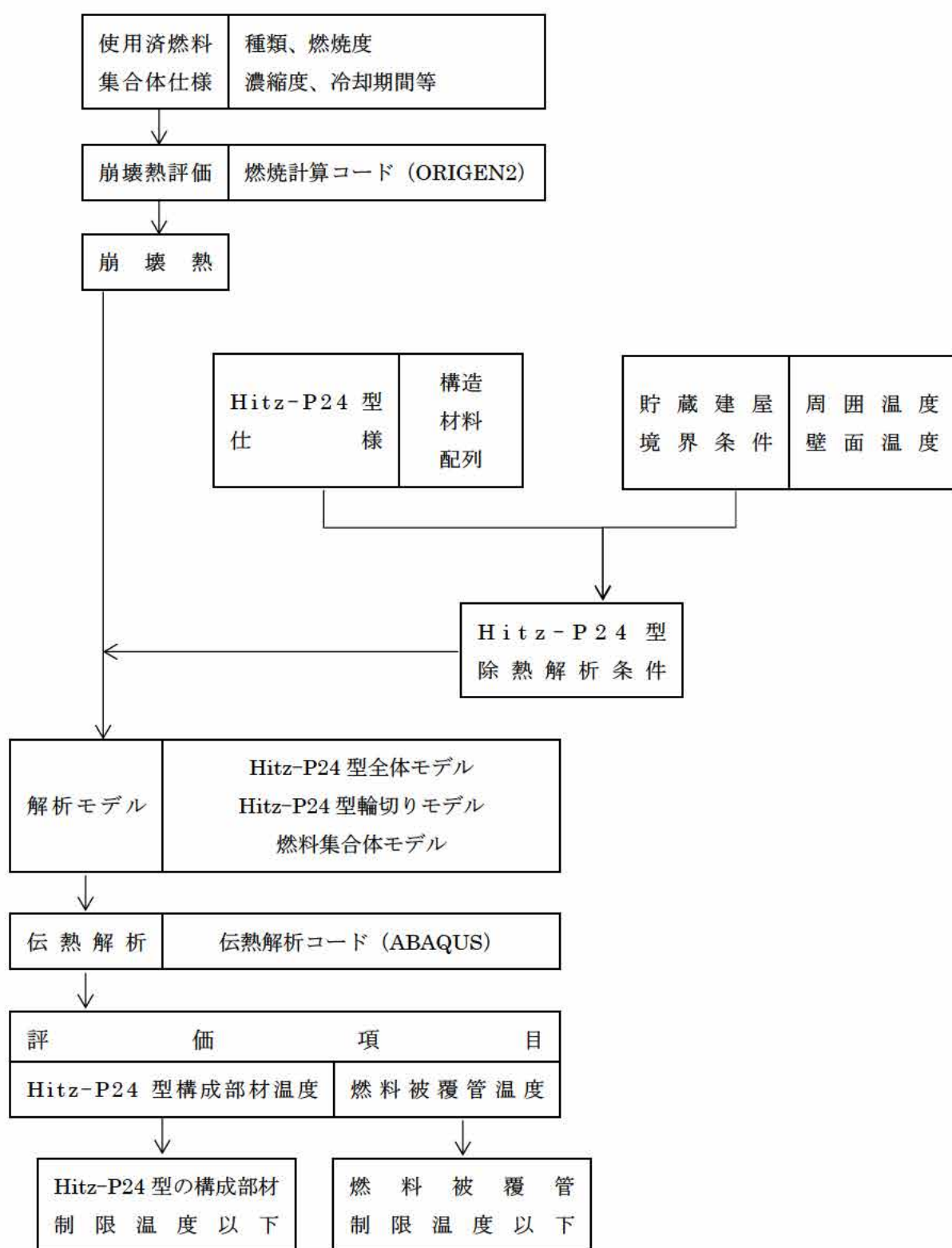


図2 除熱解析フロー



(注) 使用済燃料集合体 24 体分の崩壊熱量を示す。

図 3 使用済燃料集合体（燃料有効部）の軸方向崩壊熱量分布

b. 特定兼用キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

特定兼用キャスク構成部材の各部温度は、使用済燃料の崩壊熱及び周囲温度等を条件として、Hitz-P24 型の実形状をモデル化し、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。貯蔵建屋内における縦置き貯蔵時を対象として評価する。

① 解析モデル

温度評価に当たっては、以下の 3 種類の熱解析モデルを用いる。

- ・ 軸方向二次元軸対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）
- ・ 半径方向輪切りモデル（以下「輪切りモデル」という。）
- ・ 燃料集合体モデル

Hitz-P24 型における各解析モデルの形状図及び要素分割図を図 4 から図 9 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。

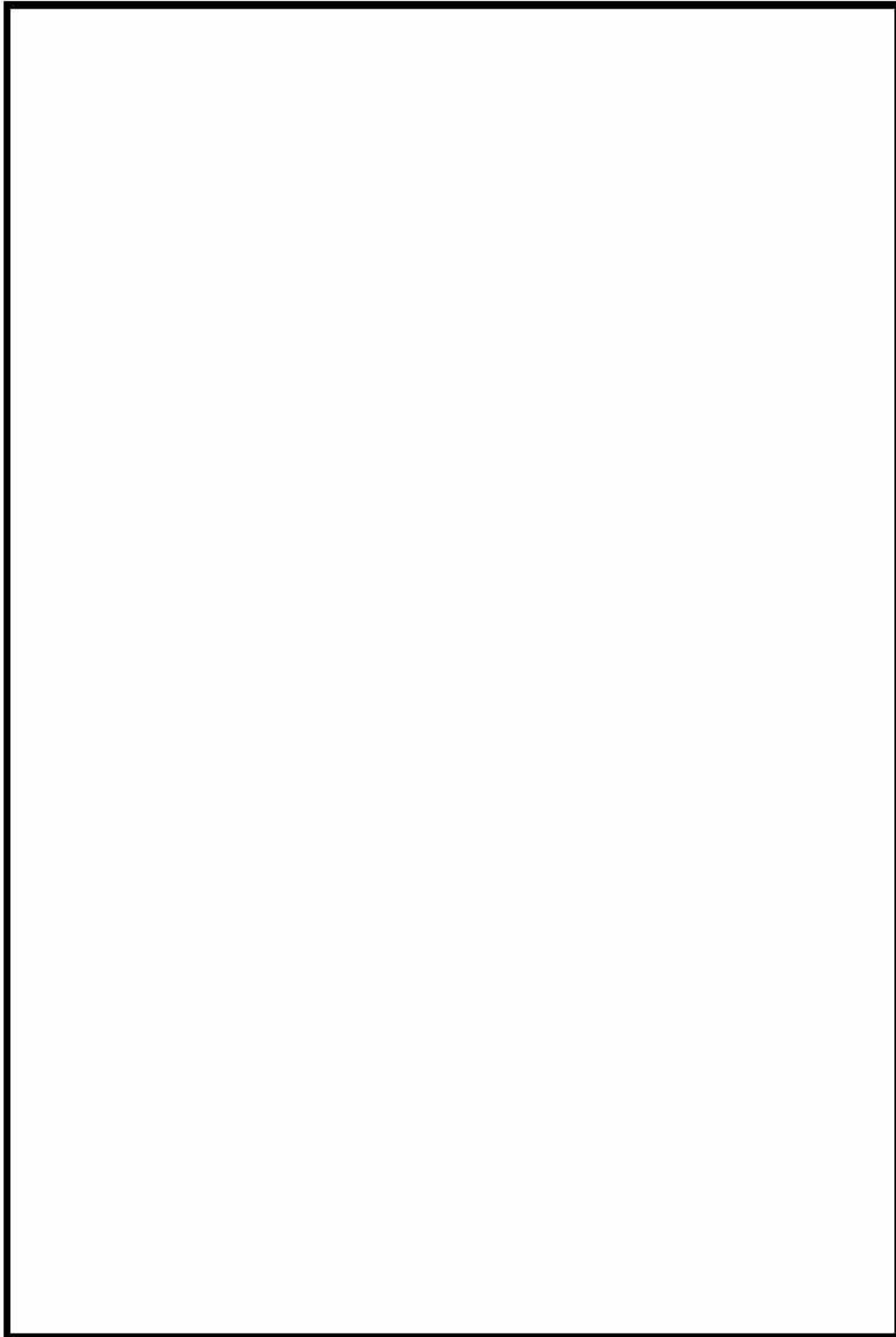
- ・ 全体モデル.....底板、下部端板、一次蓋、二次蓋、一次蓋金属ガスケット、二次蓋金属ガスケット、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー
- ・ 輪切りモデル.....外筒、伝熱フィン、側部中性子遮蔽材、胴、バスケット
- ・ 燃料集合体モデル...燃料被覆管

なお、全体モデルではトラニオンはモデル化しないが、トラニオン温度は保守的に胴外面温度とする。

② 境界条件

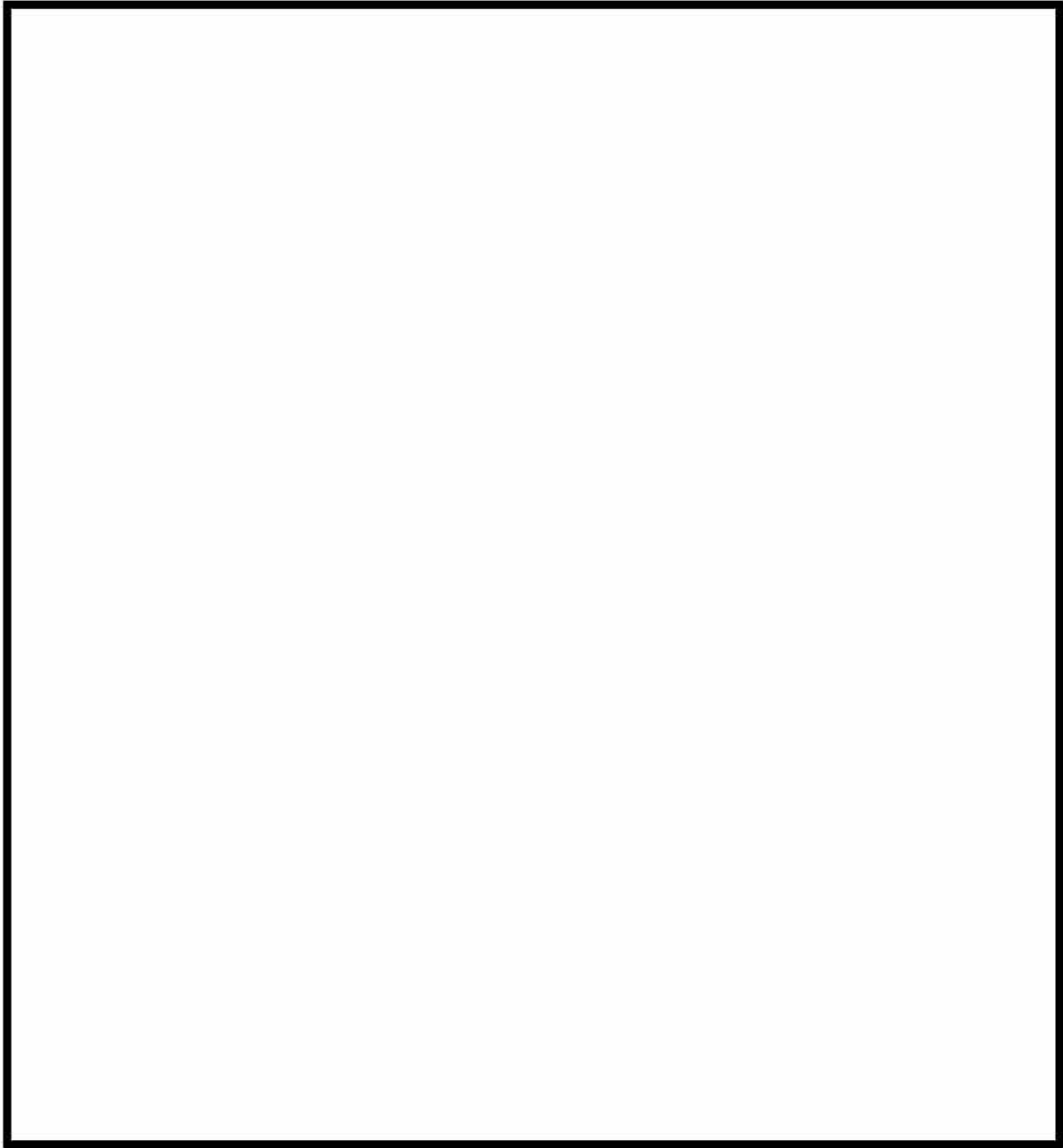
Hitz-P24 型周囲の環境として、以下の条件を用いる。

- ・ 貯蔵姿勢 : 縦置き・貯蔵建屋内
- ・ 周囲空気温度 : 50°C
- ・ 放射環境温度 : 65°C



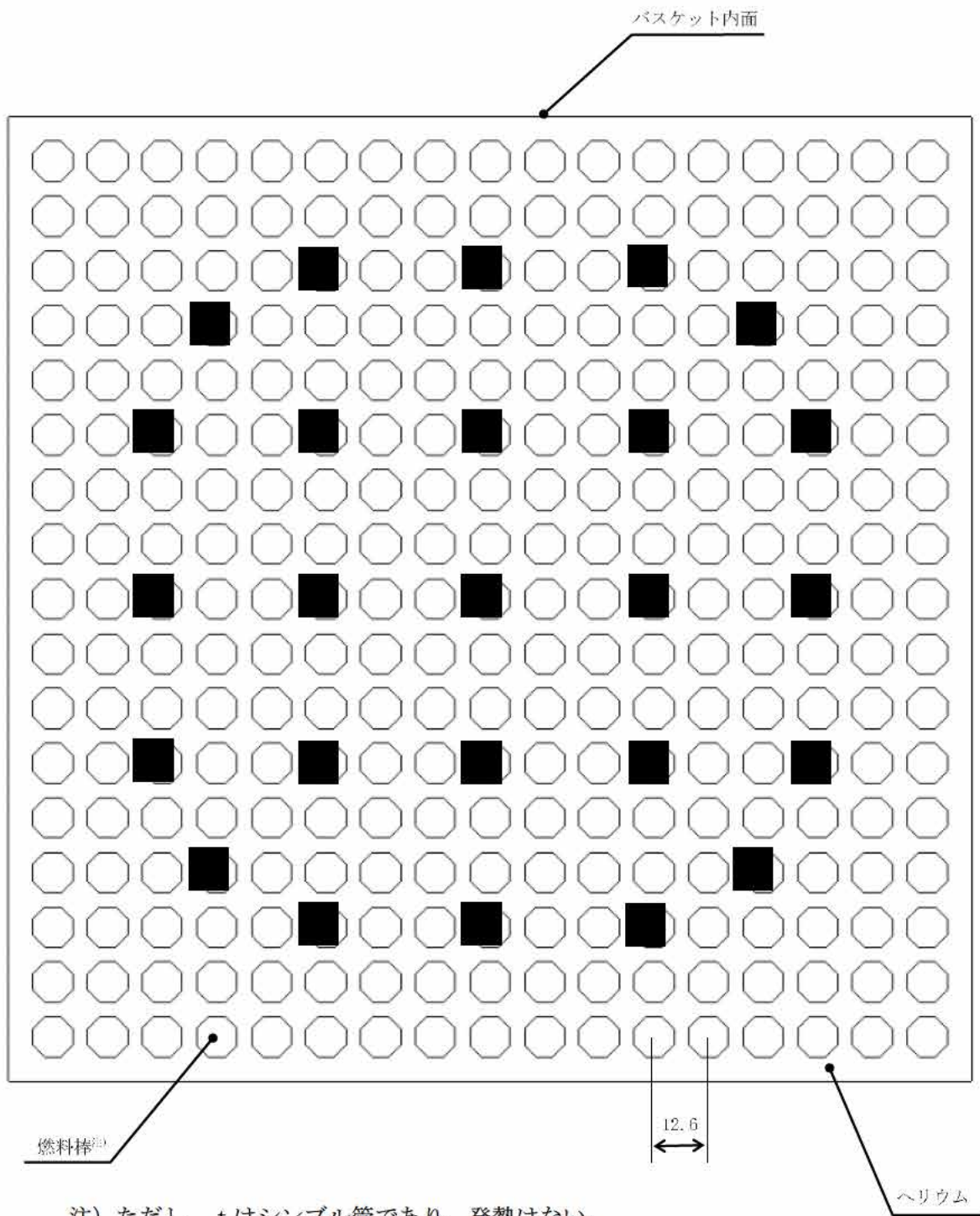
(単位：mm)

図 4 Hitz-P24 型全体モデル形状図



(単位 : mm)

図 5 Hitz-P24 型輪切りモデル形状図



(単位 : mm)

図 6 Hitz-P24 型燃料集合体モデル形状図

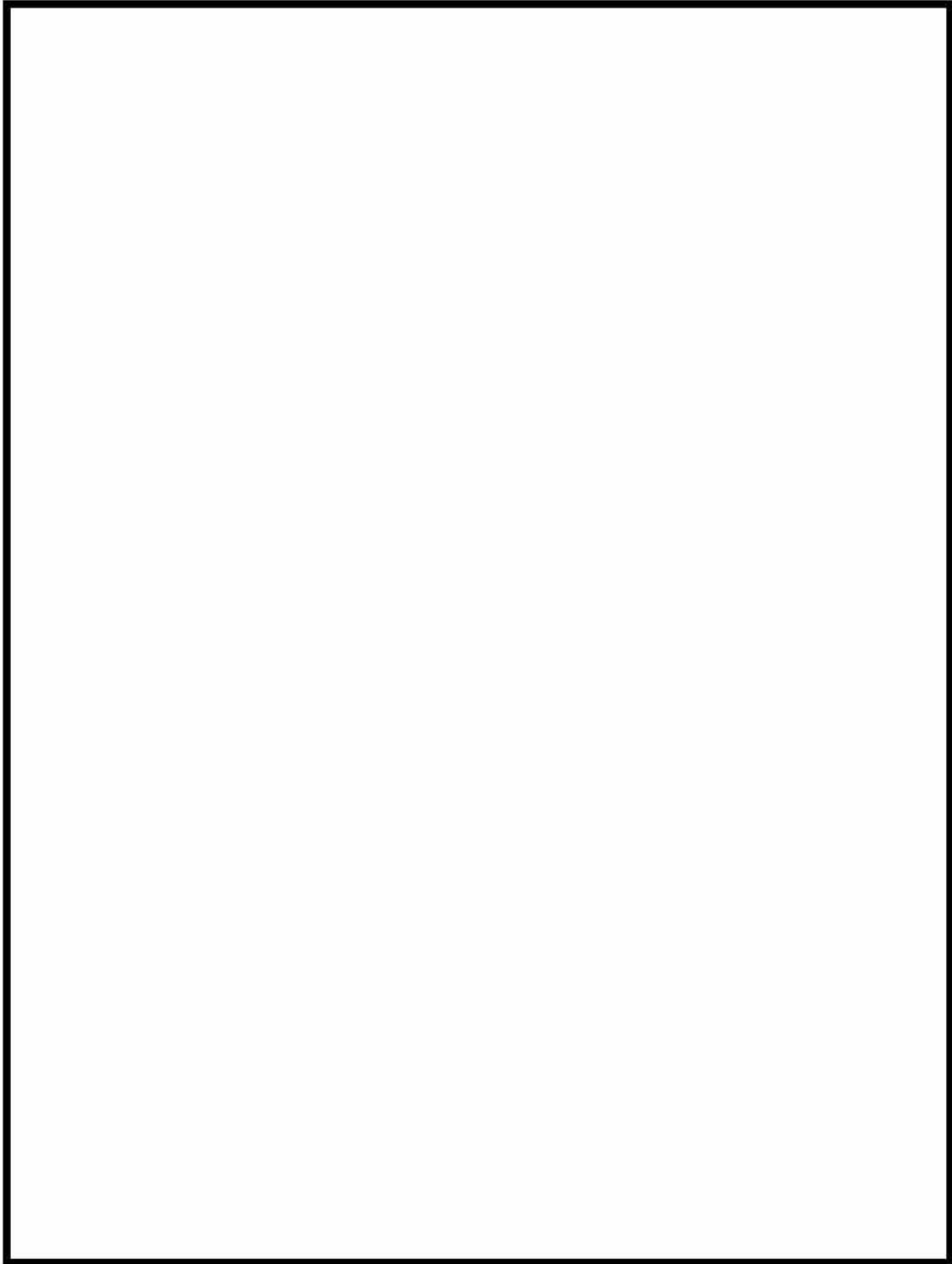


図 7 Hitz-P24 型全体モデル要素分割図

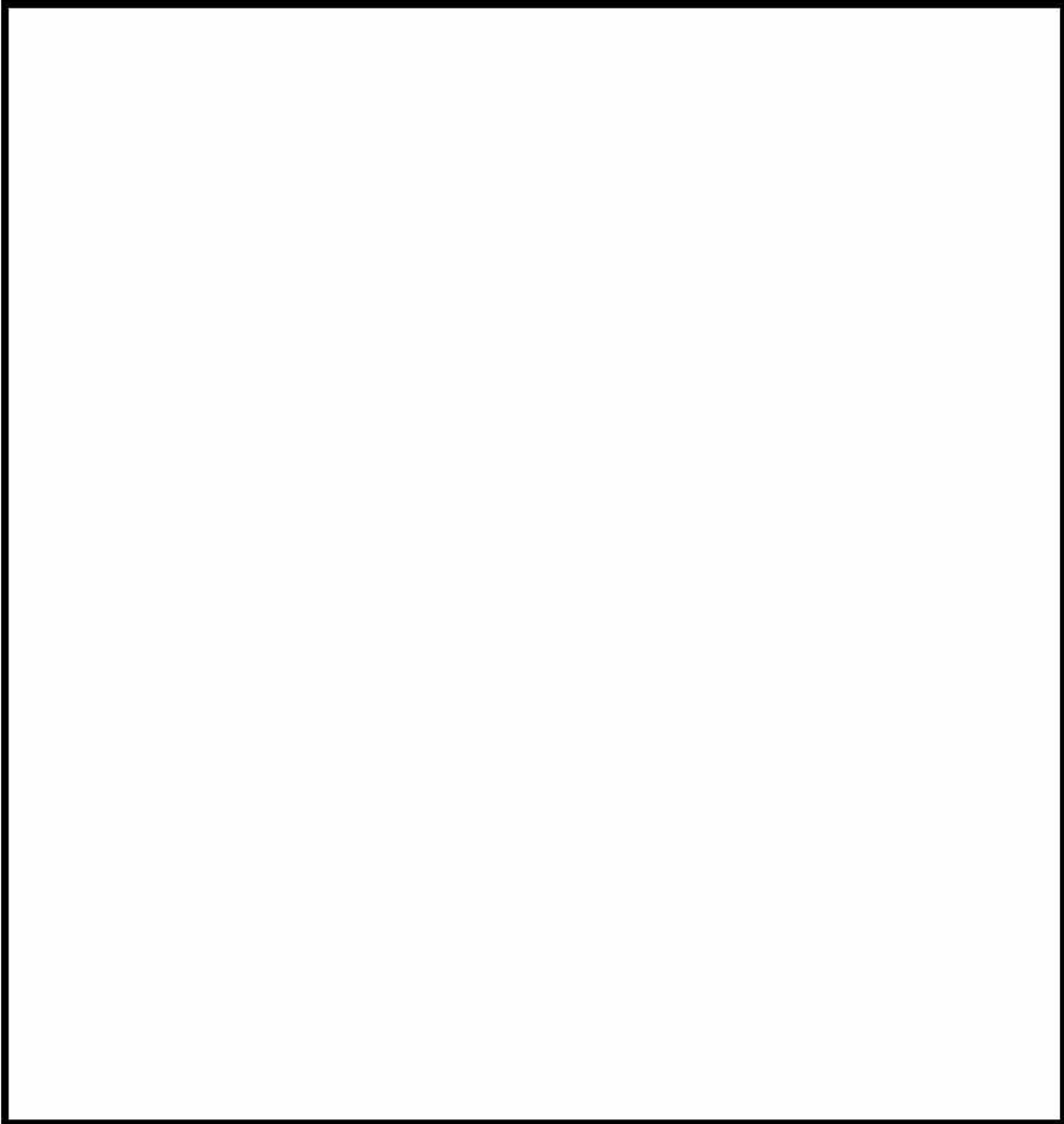


図 8 Hitz-P24 型輪切りモデル要素分割図

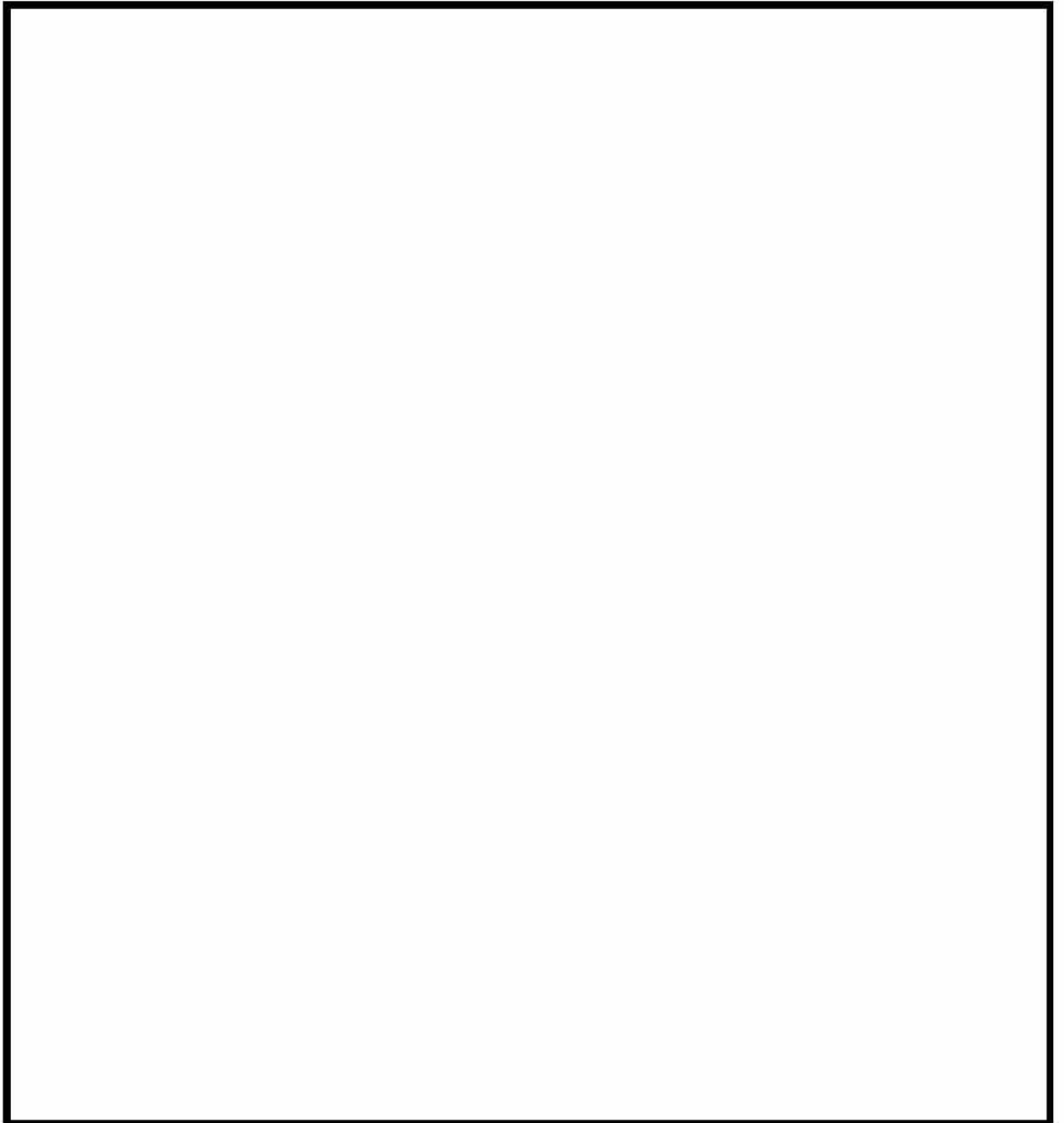


図9 Hitz-P24 型燃料集合体モデル要素分割図

c. 評価結果

Hitz-P24 型の除熱解析結果として、Hitz-P24 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表 4、図 10 から図 12 に示す。

解析の結果、Hitz-P24 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、Hitz-P24 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 Hitz-P24 型の各部位及び使用済燃料の設計温度を表 5 に示す。

表 4 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 1~7)
Hitz-P24 型	胴	132	375 (1)
	底板	156	375 (1)
	外筒	121	350 (2)
	底部中性子遮蔽材カバー	130	425 (2)
	下部端板	122	350 (2)
	一次蓋	124	375 (1)
	蓋部中性子遮蔽材カバー	103	425 (2)
	二次蓋	102	375 (1)
	一次蓋ボルト	108	350 (2)
	二次蓋ボルト	102	350 (2)
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	138 (注 8)	149 (3)
	トラニオン	129	350 (2)
	金属ガスカート	107 (注 9)	130 (4)
	バスケット ^{注)}	171	250
	伝熱フィン	129	200 (5)
燃料被覆管 ^{注)}		203	275 (6)

注) 貯蔵開始前に実施する真空乾燥時に本体胴内部が貯蔵時と比べて除熱機能が低下することから、本体胴内部の温度が貯蔵時より高くなる可能性がある。真空乾燥時の燃料被覆管及びバスケットの温度評価例を別紙 2 に示す。

※注記を次頁に示す。

- (注 1) 参考文献 (1) に低合金鋼の設計用強度が示されており、構造強度部材であり、かつ、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、かつ、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 (2) の温度範囲の上限を設定している。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 (3) の記載内容の詳細は別紙 3 を参照。
- (注 4) 参考文献 (4) 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 (4) の記載内容の詳細は別紙 3 を参照。
- (注 5) 補足説明資料 1-1 「バスケット用アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112)」 (MA035B-SC-Z01) 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強度が示されており、構造強度部材であり、かつ、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、同資料の温度範囲の上限を設定している。
- (注 6) 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 7) 参考文献 (6) に燃料被覆管の累積クリープ量が 1%を超えない温度が、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 8) 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 9) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

表 5 設計温度

対象となる部位		設計温度 (°C)
Hitz-P24 型	胴	140
	底板	160
	外筒	130
	底部中性子遮蔽材カバー	140
	下部端板	130
	一次蓋	130
	蓋部中性子遮蔽材カバー	110
	二次蓋	110
	一次蓋ボルト	110
	二次蓋ボルト	110
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	140
	トラニオン	130
	金属ガスケット	110
	バスケット	180
燃料被覆管		210

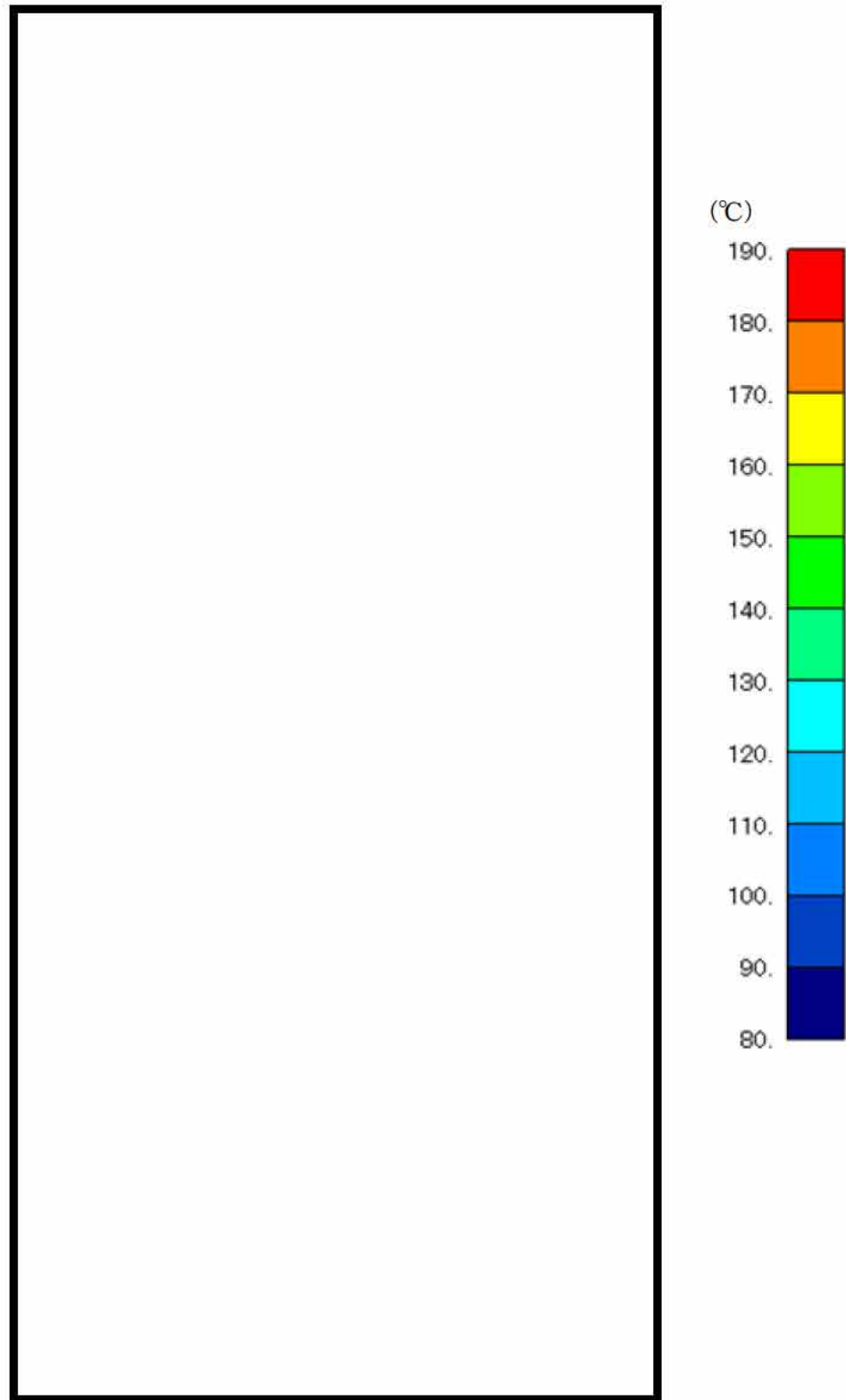


図 10 Hitz-P24 型除熱解析結果 (全体モデル)

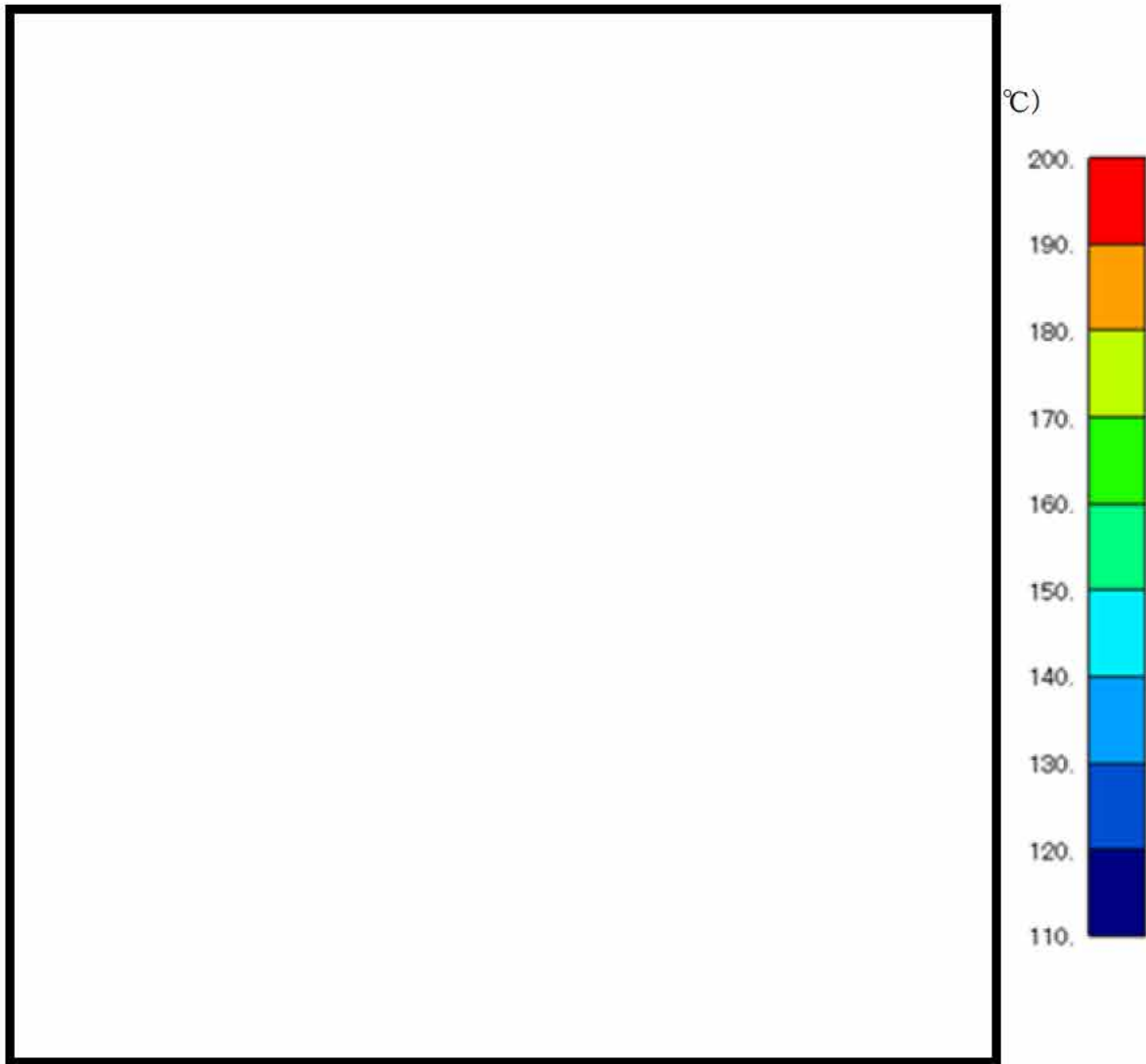


図 11 Hitz-P24 型除熱解析結果（輪切りモデル）

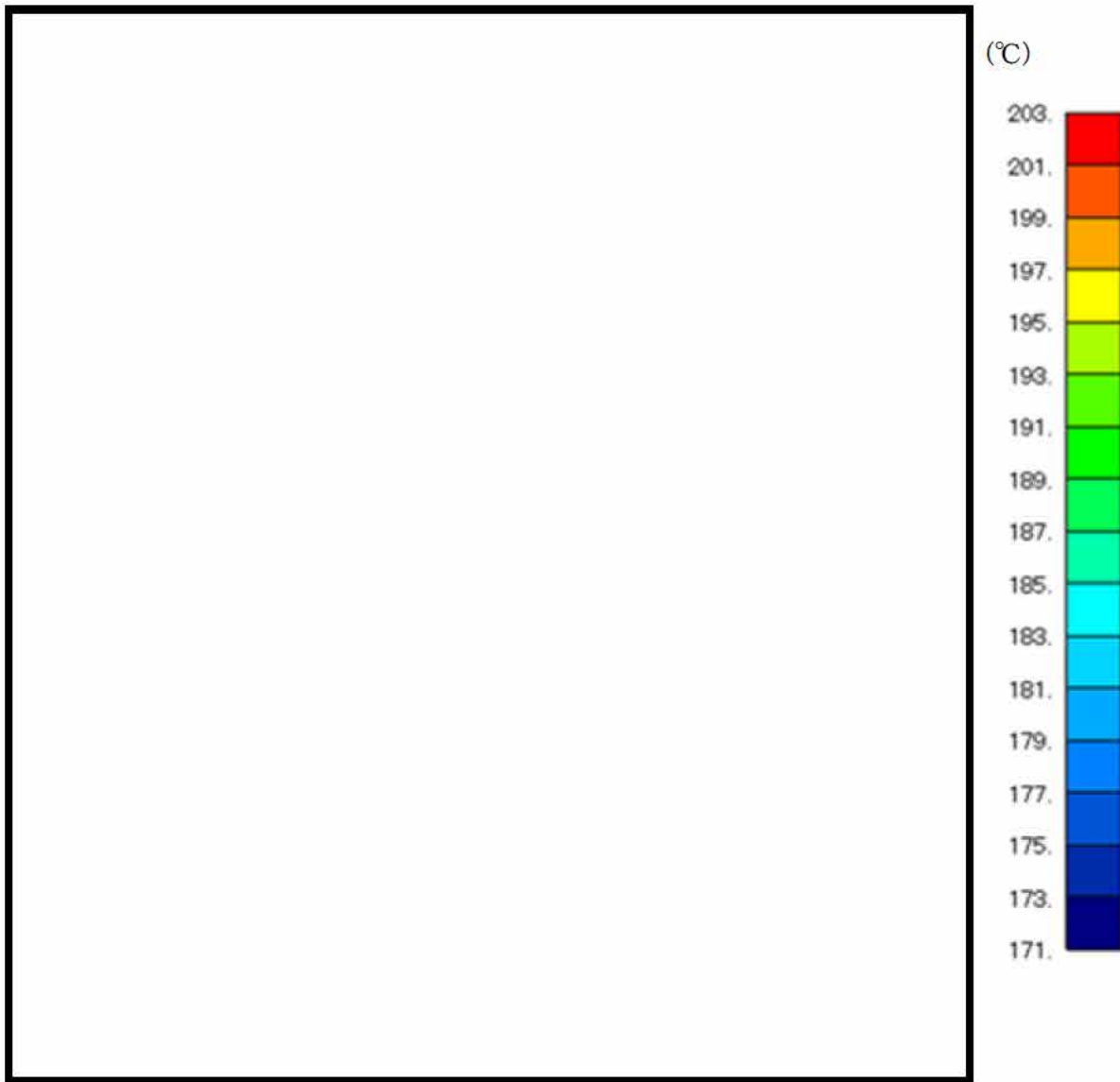


図 12 Hitz-P24 型除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

[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(設置(変更)許可時に別途確認)である。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(一例)を別紙 4 に示す。

[確認内容]

- 5) 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵時間中の兼用キャスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。
- 6) 兼用キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。

確認内容 5)は、閉じ込め機能の監視に係る確認事項である。また、確認内容 6)については、除熱機能の監視頻度に関する確認事項であり、型式証明の範囲外(設置(変更)許可時に別途確認)である。

3. 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)、【事例規格】低温用合金鋼鍛鋼品 ASME SA-350M Gr.LF3 に関する規定(JSME S FA-CC-007)」、(2011)
- (2) (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)
- (3) BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1986)
- (4) (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)
- (5) (一財) 日本規格協会、「圧力容器の設計」(JIS B 8265 : 2017)」、(2017)
- (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)

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

除熱解析は、Hitz-P24 型及び使用済燃料集合体の実形状をモデル化し、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 3 つのモデルである。

- ・ 軸方向二次元軸対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）
- ・ 半径方向輪切りモデル（以下「輪切りモデル」という。）
- ・ 燃料集合体モデル

これら 3 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、Hitz-P24 型外表面の熱伝達率を別紙 1-2 表に、放射率を別紙 1-3 表に示す。

なお、各解析モデルで評価する部位の最高温度に有意な影響を与えない部材（スペーサ等）については、簡略化を行っている。

(1) 全体モデル

全体モデルは、Hitz-P24 型の軸方向温度評価のための解析モデルである。

全体モデルでは、バスケットより内側の領域（以下「燃料集合体領域」という。）を燃料集合体及びバスケットの均質な領域であると近似し、ジルカロイ、二酸化ウラン、ヘリウム、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及びほう素添加ステンレス鋼が均一に混合されていると仮定する。燃料集合体領域の軸方向の平均熱伝導率は体積平均値とし、径方向の平均熱伝導率は輪切りモデルと等価になるように値を定める。なお、軸方向の平均熱伝導率の設定においては、端部温度を保守的に評価するため、バスケットプレート間のギャップを考慮していない。ただし、軸方向の熱移動量設定時は保守的にバスケットプレート間のギャップを考慮する。

全体モデルにおいて側部中性子遮蔽部はレジンと伝熱フィンの均質な領域であると近似し、レジンと銅が均一に混合されていると仮定する。側部中性子遮蔽部の軸方向の平均熱伝導率は体積平均値とし、径方向の平均熱伝導率は、輪切りモデルと等価になるように値を定める。

(2) 輪切りモデル

輪切りモデルは、全体モデルで均質化している胴より内側の部位の温度を評価するためのモデルである。

輪切りモデルにおいては、バスケットの格子内側は一体ずつの独立した均質な領域であると近似し、二酸化ウラン、ジルカロイ、ステンレス鋼、インコネル及びヘリウムが均一に混合されていると仮定する。均質化する燃料集合体の平均熱伝導率に関しては、燃料集合体モデルと等価になるように値を定める。

(3) 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。また、ヘリウムの対流による熱伝達は考慮せず、伝導と放射のみを考慮する。

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	低合金鋼 (A350 LF3)	26.85	36.6
		226.85	38.6
		526.85	34.2
蓋部中性子遮蔽材カバー 底部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304)	26.85	16.0
		326.85	19.0
		526.85	22.5
外筒 下部端板	炭素鋼 (SM520B)	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 (NS-4-FR)	—	0.645
中性子吸収材	ほう素添加 アルミニウム合金	—	85
バスケットプレート	アルミニウム合金 (HZ-A3004-H112)	20	162.1
		125	170.1
		200	173.6
伝熱フィン	銅 (C1020)	26.85	398
		326.85	383
		526.85	371

(注 1) 参考文献 (1) を参照。ただし、レジンは参考文献 (2)、ほう素添加アルミニウム合金は参考文献 (3)、アルミニウム合金は参考文献 (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 (注 1) (W/ (m·K))
断熱材	—	—	0.070
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) 断熱材は参考文献 (5)、ヘリウム及び空気は参考文献 (1) を参照。

別紙 1-2 表 Hitz-P24 型外表面の熱伝達率

貯蔵場所	部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 (注 1) (W/ (m ² ·K))
貯蔵建屋	Hitz-P24 型 外表面 (側面)	垂直平板	293.15	20	1.55×Δt ^{1/3}
			373.15	100	1.31×Δt ^{1/3}
			473.15	200	1.11×Δt ^{1/3}
	Hitz-P24 型 外表面 (上向面)	水平上向面	293.15	20	1.57×Δt ^{1/3}
			373.15	100	1.32×Δt ^{1/3}
			473.15	200	1.12×Δt ^{1/3}
	Hitz-P24 型 外表面 (下向面)	水平下向面	293.15	20	0.617×D ^{-2/5} Δt ^{1/5}
			373.15	100	0.603×D ^{-2/5} Δt ^{1/5}
			473.15	200	0.590×D ^{-2/5} Δt ^{1/5}

(注 1) 熱伝達率は以下の式を用いて計算する。

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

$$h = 0.13\lambda \left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2} Pr \right)^{1/3} \quad (\text{加熱水平上向面}) \quad (1)$$

$$h = 0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2} D^3 Pr \right)^{1/5} \quad (\text{加熱水平下向面}) \quad (1)$$

- ここで、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 (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 (m²/s)
 D : 代表長さ (=0.346 m)

別紙 1-3 表 材料の放射率

構成部材	材料	放射率
胴（内面）	アルミニウム溶射	0.055 ⁽⁷⁾
一次蓋 （アルミ溶射又は肉盛溶接面） 二次蓋 （アルミ溶射又は肉盛溶接面）	アルミニウム（酸化面） 又は ステンレス	0.33 ⁽⁸⁾ 又は 0.15 ⁽⁸⁾
バスケットプレート	アルミニウム合金又は アルミニウム（酸化面） （注 1）	0.055 ⁽⁷⁾ 又は 0.33 ⁽⁸⁾
底板	低合金鋼（研磨面）	0.1 ⁽¹⁾
外筒（外表面） 胴（外表面） 底板（外表面） 二次蓋（外表面）	塗装	0.8 ⁽⁸⁾ （注 2）
断熱材	—	0.8 ⁽⁷⁾

（注 1） 軸方向温度を保守的に評価するため、一次蓋との対向面ではアルミニウム（酸化面）の値を用い、胴との対向面ではアルミニウム合金の値を用いる。

（注 2） 塗装の放射率の設定根拠は別添 2 を参照。

2. 解析条件

外部境界条件を別紙 1-4 表に示す。また、各モデルの崩壊熱量及び境界条件を以下に示す。

(1) 全体モデル

全体モデルでは、本文図 4 に示したとおり、燃料集合体の軸方向の崩壊熱分布を考慮するために燃料有効部の範囲を 48 領域に分割する。

貯蔵建屋内貯蔵における全体モデルの境界条件には、三次蓋シール部を保護するための保護カバーが取り付けられると仮定し、取付箇所を断熱条件とする。断熱条件とした範囲を別紙 1-2 図に示す。また、底板は貯蔵架台と接していると仮定し、底板及び底部中性子遮蔽材カバー底面全体を断熱条件とする。

(2) 輪切りモデル

輪切りモデルでは、径方向崩壊熱分布を考慮して、中央に最高燃焼度燃料に対応した崩壊熱量の燃料集合体を配置し、断面崩壊熱量がトータルで軸方向中央部の平均燃焼度燃料と等しくなるように外周には低い崩壊熱量の燃料集合体を配置する。径方向の崩壊熱分布を別紙 1-3 図及び別紙 1-5 表に示す。

輪切りモデルにおいては、全体モデルの結果に基づいて軸方向への熱の移動を考慮する。全体モデルの胴内の軸方向への熱の逃げ量と一致するように燃料集合体領域の崩壊熱密度を低減する。また、胴内面と外筒外面の温度が全体モデルの胴内面と外筒外面の温度と一致するように、外筒外面に負の熱流束を与える。これらの軸方向への熱の逃げのモデル化概念図を別紙 1-4 図に示す。また、実際に用いた軸方向への熱移動量を別紙 1-6 表に示す。

(3) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルには、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、軸方向への伝熱を無視し断熱とする。

燃料集合体モデルの境界条件には、輪切りモデルにおいて求められるバスケットの最高温度を設定する。


別紙 1-4 表 外部境界条件

項目		境界条件
対流環境温度		50℃
放射環境温度		65℃
放射率	特定兼用キャスク表面	0.8 (8)
	貯蔵建屋天井、床面	0.8 (8)
特定兼用キャスク側面の放射形態係数		0.142 (注 1)
特定兼用キャスク端面 (蓋) の放射形態係数		0.667 (注 1)
特定兼用キャスク表面熱伝達率 (側面、上面、下面)		別紙 1-2 表による

(注 1) 正方格子状に稠密に特定兼用キャスクが 3.5m 間隔 (キャスク中心間) で配置された場合を仮定しており、周囲キャスクを考慮したキャスク側面 (放射率 0.8) と床/天井 (放射率 0.8) との形態係数を考慮 (別添 3 参照)


別紙 1-5 表 輪切りモデルにおける径方向発熱量分布の値

部位	燃料集 合体数	発熱量 (kW) (注 1)			
		軸方向への熱の逃げ考慮前		軸方向への熱の逃げ考慮後	
		1 体 当たり	合計	1 体 当たり	合計
中央部周辺に 収納される 燃料集合体	12 体	0.898	10.78	0.898	10.78
外周に 収納される 燃料集合体	12 体	0.694	8.32	0.366	4.39
合計	24 体	—	19.1	—	15.2

(注 1) 輪切りモデルにおける評価断面、すなわち本文図 4 における発熱量最大の領域
 を燃料有効長 (3648mm) 当たりに換算した値

別紙 1-6 表 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動量

部位	軸方向への熱移動量 (kW) (注 1)
中央部周辺に収納される 燃料集合体 (12 体)	0.0
外周に収納される 燃料集合体 (12 体)	3.93
外筒外面	1.26

(注 1) 輪切りモデルにおける評価断面、すなわち本文図 4 における発熱量最大の領域
 を燃料有効長 (3648mm) 当たりに換算した値

3. 除熱解析の保守性

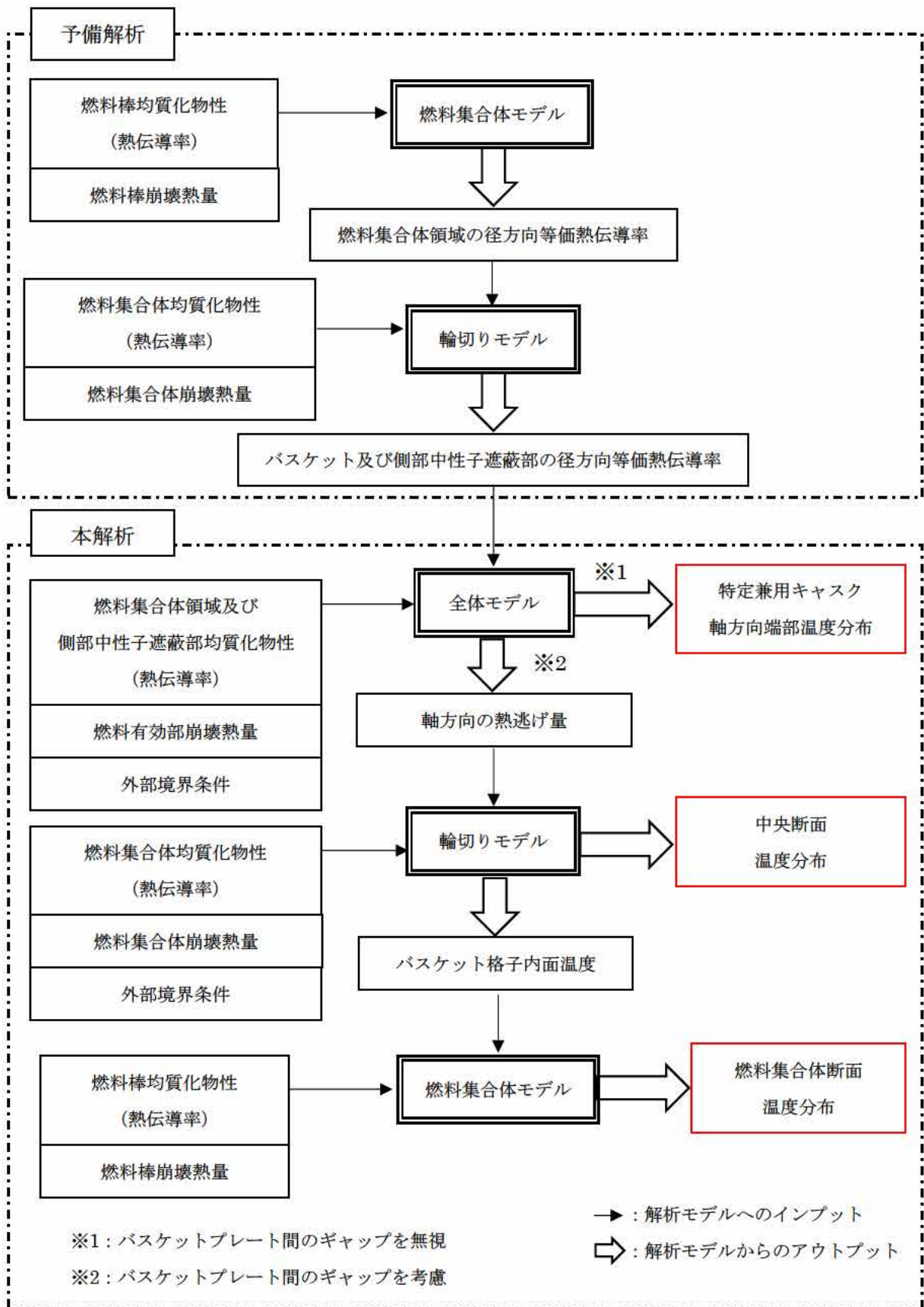
除熱解析における、収納制限に対する解析条件及びモデル化の保守性について、別紙 1-7 表に示す。なお、これらの保守性については、定性的な評価及びこれまでの設計経験を踏まえて設定している。

別紙 1-7 表 除熱解析の保守性 (1/2)

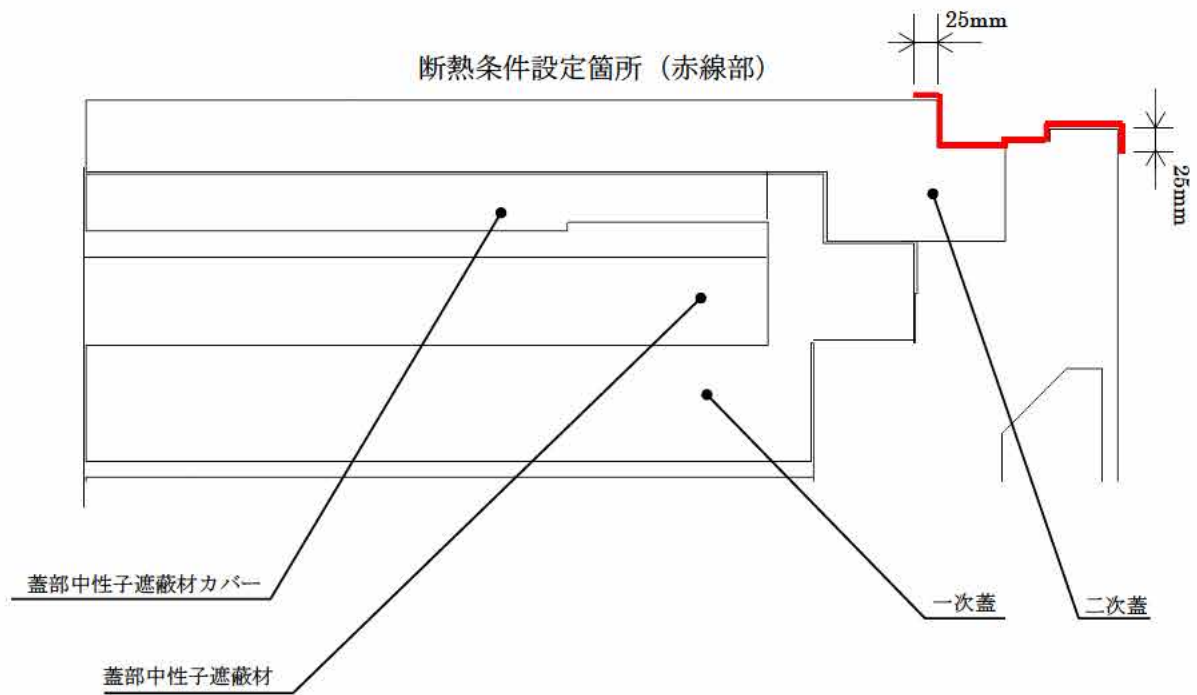
項目	保守性の内容	保守的となる理由
収納制限に対する解析条件の保守性	ウラン濃縮度を最小値である <input type="checkbox"/> とする。	濃縮度が小さい方が核分裂性核種 (U235) が少なく、同じ出力を得るためにはより多くの中性子を照射しなければならないことから、U238 等の中性子吸収量が増加して超ウラン元素の生成量が増加し、崩壊熱量が高くなるため。
	別紙 1-3 図に示すように中央部 12 体の使用済燃料は最高燃焼度 (48GWd/t) の崩壊熱量とし、外周部 12 体は、特定兼用キャスク全体の総崩壊熱量が平均燃焼度 (44GWd/t) 燃料を 24 体収納した場合と等しくなるように調整した崩壊熱量を設定する。	崩壊熱はキャスク中央部からキャスク外表面へ伝達されることから、中央部の使用済燃料の崩壊熱量を高くすることにより、燃料集合体及びバスケットの最高温度を高めに評価するため。
モデル化の保守性	特定兼用キャスク本体内のバスケット内側部及びバスケット内の使用済燃料は、空間の中央に配置する。	バスケット内側部と外側部、バスケットと燃料集合体の接触による部材間の直接の伝熱がない方が燃料集合体の最高温度を高めに評価するため。
	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。	伝熱方向 (面積) が限定される方が燃料集合体の最高温度を高めに評価するため。
	バーナブルポイズン集合体はモデル化しない。	バーナブルポイズン集合体は伝熱体となるため、無視することにより熱伝導性が低下し燃料集合体の最高温度を高めに評価するため。

別紙 1-7 表 除熱解析の保守性 (2/2)

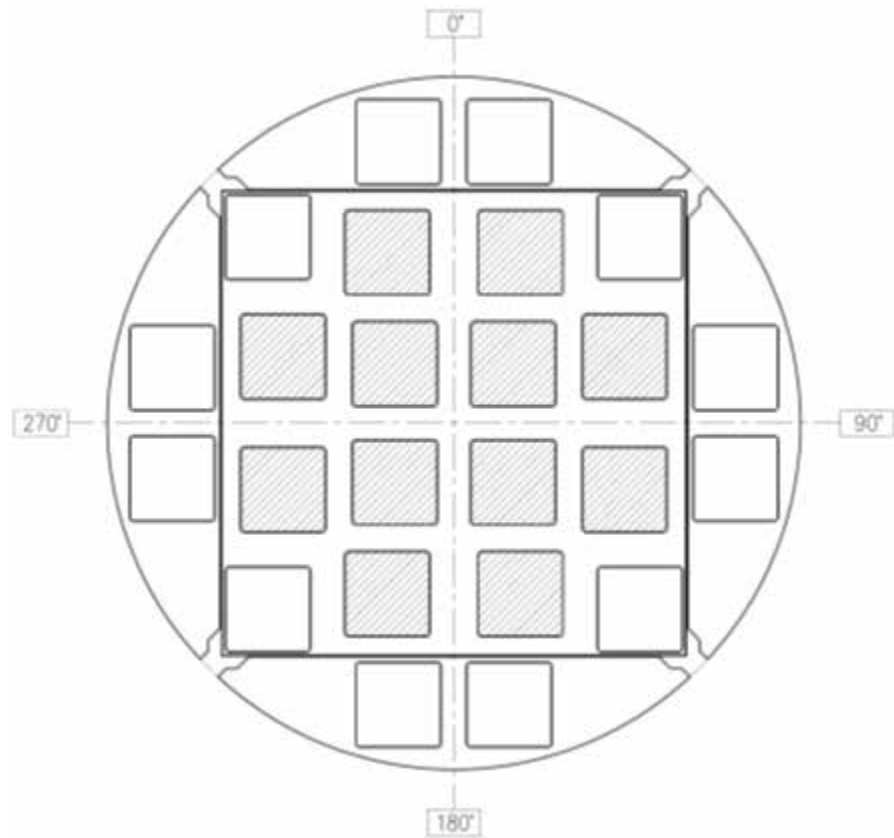
項目	保守性の内容	保守的となる理由
モデル化の保守性	<p>別紙 1-4 図に示すように輪切りモデルは、燃料集合体領域で軸方向への熱移動を考慮するのは外周部に収納される燃料集合体 12 体分の領域のみであり、それ以外の燃料集合体領域の軸方向への熱の流れを無視する。</p>	<p>崩壊熱はキャスク中央部からキャスク外表面へ伝達されることから、燃料集合体及びバスケットの最高温度は中央部で最も高くなる。実際には別紙 1-4 図の外周部に収納される燃料集合体以外の領域でも軸方向への熱の流れがあるが、伝熱方向（面積）が径方向のみに限定される方が燃料集合体及びバスケットの最高温度を高め評価するため。</p>
	<p>全体モデルにおいて、軸方向端部温度評価時は燃料とバスケットの均質化領域の軸方向の平均熱伝導率の設定において、バスケットプレート間のギャップを考慮しない。</p>	<p>ギャップを考慮しない方が軸方向の平均熱伝導率が大きくなり、軸方向に熱が伝わりやすくなり軸方向端部温度を高め評価するため。</p>
	<p>輪切りモデルにおいて用いる軸方向の熱移動量を全体モデルで評価する時は、燃料とバスケットの均質化領域の軸方向の平均熱伝導率の設定において、バスケットプレート間のギャップを考慮する。</p>	<p>ギャップを考慮した方が軸方向の平均熱伝導率が小さくなり、軸方向の熱移動量が小さくなることから燃料集合体及びバスケットの最高温度を高め評価するため。</p>



別紙 1-1 図 除熱解析モデルの入出力フロー図



別紙 1-2 図 貯蔵建屋内貯蔵時の全体モデルの断熱条件設定範囲
(保護カバー取付箇所)

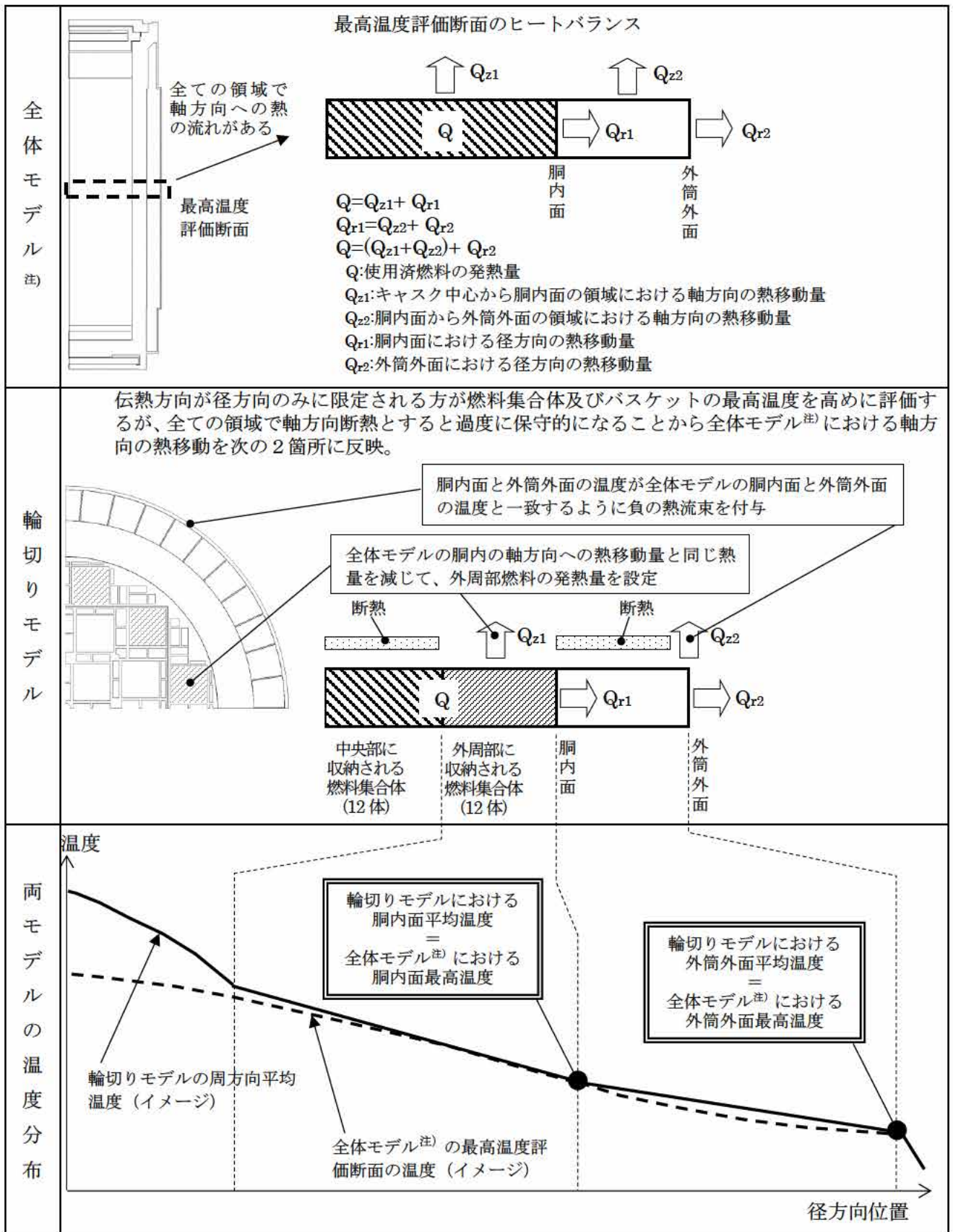


: 最高燃焼度燃料（軸方向中央部）の発熱量
（中央に収納される燃料集合体（12 体））



: 総発熱量が平均燃焼度燃料を 24 体収納した場合と等しくなるように調整した発熱量（外周に収納される燃料集合体（12 体））

別紙 1-3 図 使用済燃料集合体の径方向発熱分布



注) 燃料とバスケットの均質化領域の軸方向の平均熱伝導率の設定において、バスケットプレート間のギャップを考慮したモデル。(軸方向の熱移動量設定用)

別紙 1-4 図 軸方向への熱の逃げのモデル化概念図

3. 参考文献

- (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) メーカー資料
- (4) 米国機械学会, “ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section II Materials Part D Properties (Metric) ”, (2019)
- (5) メーカー資料
- (6) M. Jakob, "Heat Transfer. Volume 1", John Wiley & Sons, Inc., (1949)
- (7) (一社) 日本機械学会、「伝熱工学資料 改訂第3版」、(1975)
- (8) J. R. Howell, R. Siegel, "Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition", Hemisphere Publishing Corp., (1981)

燃料集合体モデル及び輪切りモデルを用いた予備解析について

輪切りモデルのバスケットの格子内側、全体モデルの燃料集合体領域及び側部中性子遮蔽部に設定する径方向熱伝導率は、それぞれ燃料集合体モデル及び輪切り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>

(1) 輪切りモデルのバスケット内部

輪切りモデルのバスケット内部に設定する径方向等価熱伝導率 λ_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、

λ_f : 径方向等価熱伝導率 (W/ (m・K))

q : 単位体積崩壊熱量 (W/m³)

W : 燃料集合体領域外寸 (m)

K : 係数 (13.57) (—)

T_1 : 燃料棒最高温度 (K)

T_2 : バスケットプレート内面温度 (K)

燃料集合体モデルを用いて、 T_2 を 300.15K (27℃)、400.15K (127℃)、600.15K (327℃) 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 λ_f を設定する。

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

(2) 全体モデルの燃料集合体領域

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 λ_f は、輪切り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当てはめた②式により求められる。

$$\lambda_f = \frac{qR^2}{K(T_1 - T_2)} \quad \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

ここで、

- λ_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/m³)
- R : バスケット外半径 (m)
- K : 係数 (4) (—)
- T_1 : 燃料集合体領域最高温度 (K)
- T_2 : バスケット外面平均温度 (K)

輪切りモデルを用いて、周囲温度を 248.15K (-25°C)、311.15K (38°C)、373.15K (100°C) とした 3 ケースで T_1 及び T_2 を算定し、②式から温度依存性のある λ_f を設定する。

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

(3) 全体モデルの側部中性子遮蔽部

全体モデルの側部中性子遮蔽部に設定する径方向等価熱伝導率 λ_f は、輪切りモデルを用いたパラメータサーベイの結果から、熱通過を伴う多層体の評価式を当てはめた③及び④式により求められる。

$$Q = 2\pi K(T_1 - T_2) \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{\ln(R_2/R_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(R_3/R_2)}{\lambda_f} + \frac{\ln(R_4/R_3)}{\lambda_2} \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

ここで、

- Q : 単位体積崩壊熱量 (W/m³)
- K : 熱通過率 (W/ (m · K))
- T₁ : 胴内面平均温度 (K)
- T₂ : 外筒外面平均温度 (K)
- λ_1 : T₁における胴の熱伝導率 (W/ (m · K))
- λ_f : 側部中性子遮蔽部の等価熱伝導率 (W/ (m · K))
- λ_2 : T₂における外筒の熱伝導率 (W/ (m · K))
- R₁ : 胴内面半径 (m)
- R₂ : 胴外面半径 (m)
- R₃ : 外筒内面半径 (m)
- R₄ : 外筒外面半径 (m)

輪切りモデルを用いて、周囲温度を 248.15K (-25°C)、311.15K (38°C)、373.15K (100°C) とした 3 ケースで T₁ 及び T₂ を算定し、③及び④式から温度依存性のある λ_f を設定する。

なお、各ケースで求められる λ_f の代表温度は、T₁ と T₂ の平均値とする。

塗装の放射率の設定根拠

別紙 1-3 表「材料の放射率」において、塗装に設定した放射率 0.8 は、参考文献 (1) に示された塗料の放射率 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。

< 塗装に放射率 0.8 を設定したことの妥当性 >

別紙 1-3 表「材料の放射率」のうち、塗装の放射率 0.8 が設定されている構成部材は、外筒（外表面）、胴（外表面）、底板（外表面）及び二次蓋（外表面）である。これらの構成部材の放射率に係る文献値、解析入力値及び実測値を別添 2-1 表に示す。なお、実測値はエポキシ樹脂系塗料（白）の値である。

放射率 0.8 は実測値（0.94）より小さいことから、Hitz-P24 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 材料の放射率

構成部材	仕様	放射率		
		文献値	解析入力値	実測値
外筒（外表面） 胴（外表面） 底板（外表面） 二次蓋（外表面）	塗装	0.7~0.9 ⁽¹⁾ (注 1)	0.8	0.94 ^(注 2)

(注 1) 参考文献 (1) に示される塗料の放射率の最大と最小の値

(注 2) エポキシ樹脂系塗料（白）に対して 3 回測定した実測値

放射形態係数の算出過程

「別紙 1-4 表 外部境界条件」において設定している特定兼用キャスク側面及び端面から貯蔵建屋壁面への放射形態係数は、以下の式より求めた。

$$F_{\varepsilon} = \frac{f}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

ここで、 F_{ε} ：放射形態係数

f ：形態係数

ε_1 ：特定兼用キャスク表面の放射率(=0.8)

ε_2 ：貯蔵建屋壁面の放射率(=0.8)

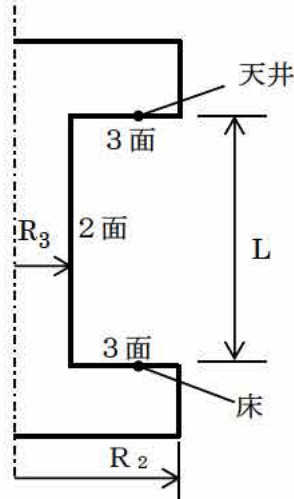
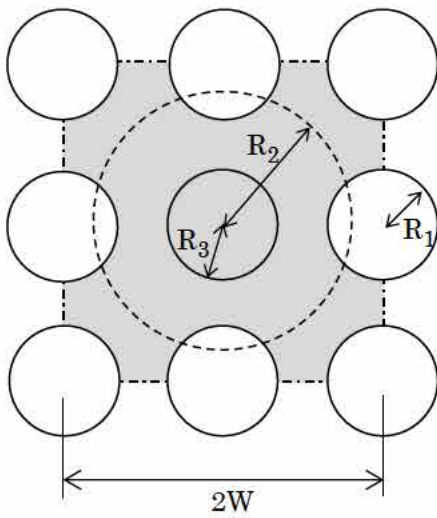
この内、側面の形態係数 f については、特定兼用キャスク側面から貯蔵建屋の天井及び床面への形態係数として求めた。以下に、この形態係数の算出過程を示す。なお、特定兼用キャスク端面の f は特定兼用キャスク端面と天井/床面の関係が十分に大きい面積の平行平板間と考え、1 とした。

はじめに、別添 3-1 図の特定兼用キャスクの貯蔵位置に示すように、中心に配置された対象キャスクの周囲のキャスクで囲まれた空間（一辺が $2W$ の正方形の空間）のうち、周囲のキャスクを除く面積（別添 3-1 図の灰色のエリア）の等価半径 R_2 を以下の式で求めた。

$$R_2 = \sqrt{\frac{4W^2}{\pi} - 3R_1^2}$$

続いて、特定兼用キャスク側面及び端面から貯蔵建屋壁面への形態係数は、日本原子力学会標準「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標準：2013」の附属書 AT に基づき、円環フィン形状の形態係数を求める式⁽¹⁾から算出した。特定兼用キャスク長さを L とし、同附属書図 AT.1 の b を R_3 、 a を R_2 、 c を L とし、2 面から 3 面への形態係数 F_{23} を求めた。形態係数の算出条件及び結果を別添 3-1 表に示す。

(1) “*Handbook of Heat Transfer*”, W.M.Rohsenow, J.P.Hartnett, McGRAW-HILL BOOK Company.



2面：特定兼用キャスク側面
3面：床と天井面

- W：キャスク貯蔵ピッチ=3.5m
- R₁：周辺キャスクの外半径
- R₂：キャスク間空気層の等価半径
- R₃：中心キャスク（Hitz-P24型）の外半径
- L：キャスク全長

別添 3-1 図 特定兼用キャスクの貯蔵位置

別添 3-1 表 形態係数の算出条件及び結果

算出条件	形状(m)	R ₁	1.35*
		a(R ₂)	3.1827
		b(R ₃)	1.3295
		c(L)	5.890*
		W	3.5
算出結果	形態係数	F ₂₃	0.2124

※形態係数が小さくなるように Hitz-P24 型よりも大きい値を設定

真空乾燥時の除熱評価について

1. 概要

特定兼用キャスクを貯蔵する前に本体胴内部にヘリウムを充填するため、本体胴内部を真空乾燥する。真空乾燥時の本体胴内部は貯蔵時と比べて除熱性能が低下することから本体胴内部の温度は一時的に貯蔵時よりも高くなる可能性がある。真空乾燥時の燃料被覆管及びバスケットの温度評価の概要(一例)を示す。

2. 真空乾燥時の除熱評価例

(1) 評価方法

バスケットの温度は、貯蔵時と同様に、使用済燃料の崩壊熱及び周囲温度等を条件として、輪切りモデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。

また、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、燃料集合体モデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。

(2) 評価条件

Hitz-P24 型の周囲温度等の条件は以下の条件を用いる。

- ・容器姿勢：縦置き・ピット内
- ・周囲温度：
- ・プール水温度：

また、真空乾燥工程を別紙 2-1 図に示すとおりに仮定し、非定常解析の時間条件として用いる。

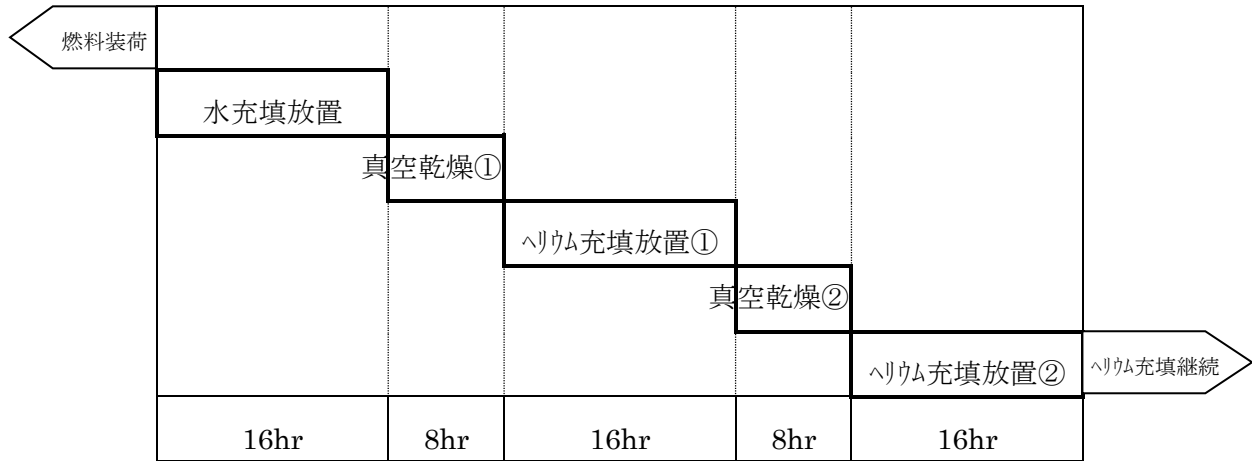
(3) 評価結果

Hitz-P24 型の除熱解析結果として、真空乾燥時のバスケット及び燃料被覆管の最高温度を別紙 2-1 表に、バスケット及び燃料被覆管の温度時刻歴を別紙 2-2 図に示す。

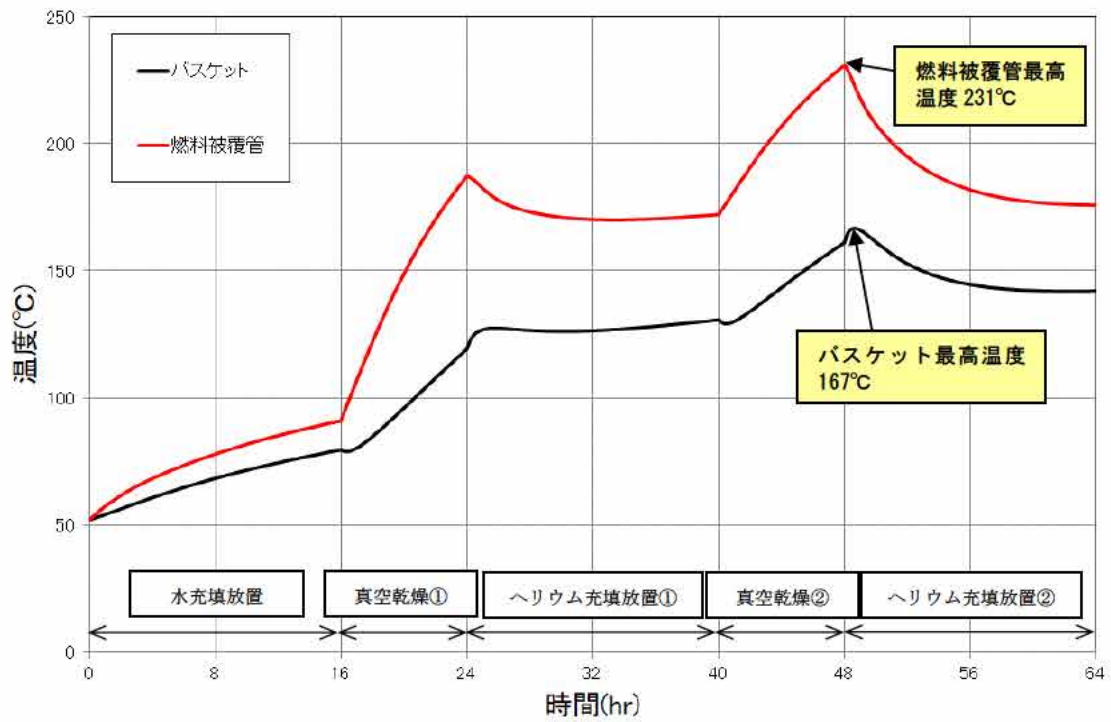
解析の結果、Hitz-P24 型のバスケットの温度及び燃料被覆管の温度は設計基準値を満足しており、Hitz-P24 型は、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計となっていることが確認された。

別紙 2-1 表 真空乾燥時の除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (°C)	設計基準値 (°C)
Hitz-P24 型	バスケット	167	250
燃料被覆管		231	275



別紙 2-1 図 解析で考慮した真空乾燥工程



別紙 2-2 図 バスケット及び燃料被覆管の温度時刻歴

除熱解析の設計基準値における参考文献の記載内容について

本別紙、除熱解析の設計基準値における参考文献の記載内容を示すものである。各参考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参考文献の記載内容 (1/2)

番号	参考文献	
	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 FA1-2007)、【事例規格】低温用合金鋼鍛鋼品 ASME SA-350M Gr.LF3に関する規定 (JSME S FA-CC-007)」、(2011)	低合金鋼は-30℃～375℃で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。 ・ A350 LF3 (胴、底板、一次蓋、二次蓋) [低合金鋼]
2	(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)	炭素鋼は-30℃～350℃で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、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、析出硬化系ステンレス鋼は-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。 ・ SM520B (外筒、下部端板) [炭素鋼] ・ SUS304 (蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー) [ステンレス鋼] ・ SNB23-2 (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] ・ SUS630 (トラニオン) [析出硬化系ステンレス鋼]
3	BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma shielding Material", (1986)	エポキシ系レジンの使用可能温度の上限 149℃が示された文献である。
4	(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 (外被材: アルミニウム、内被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℃の範囲で一定とし、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。

別紙 3-1 表 設計基準値における参考文献の記載内容 (2/2)

番号	参考文献	
	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
5	(一財)日本規格協会、「圧力容器の設計」(JIS B 8265 : 2017)」、(2017)	-40°C~200°C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。
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)	<ul style="list-style-type: none"> ・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°C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。 ・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°C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。 ・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°C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。

除熱建屋の除熱評価について

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(一例)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条第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。Hitz-P24型の除熱設計は、貯蔵建屋内でのHitz-P24型周囲温度が50℃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、Hitz-P24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「Hitz-P24型周囲温度が貯蔵建屋内で50℃以下であることを。」の確認を行う。

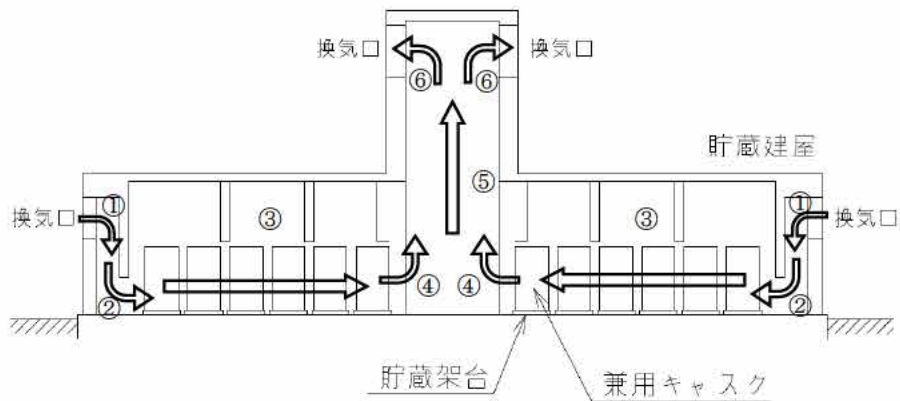
なお、Hitz-P24型の除熱評価と貯蔵建屋の除熱評価相互の関係は本書の本文図2のとおりである。

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特定兼用キャスク表面から特定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、特定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、排気温度が特定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、特定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 ΔP (別紙 4-1 図の①～⑥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} : 熱ドラフト力 (Pa)
- ρ_{in} : 外気の密度 (kg/m^3)
- ρ_{out} : 排気の密度 (kg/m^3)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h : ドラフト高さ (m)

2) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

$$P = \sum_i \frac{\xi_i W_i^2}{2\rho_i A_i^2}$$

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

ここで、

- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- ξ_i : 圧力損失係数 (—)
- W_i : 通過風量 (質量流量) (kg/s)
- ρ_i : 通風路の空気密度 (kg/m³)
- A_i : 通風路の断面積 (m²)
- q : 特定兼用キャスクの崩壊熱量 (kW/基)
- n : 特定兼用キャスクの基数 (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
特定兼用キャスクの崩壊熱量 (q)	15.9kW/基	設置する特定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})	貯蔵建屋：50°C以下	特定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になることを確認する

貯蔵施設における Hitz-P24 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

Hitz-P24 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 Hitz-P24 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、Hitz-P24 型近傍で行う作業を特段要しない設計としている。

Hitz-P24 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 Hitz-P24 型の取扱いにおいて、人が Hitz-P24 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. Hitz-P24 型の外面温度

貯蔵建屋内貯蔵における Hitz-P24 型の最高温度を別紙 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 3. 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 Hitz-P24 型外面の温度 (注 1)

Hitz-P24 型の外面 (注 2)	最高温度 (°C)
外筒外面	121
底板外面	122

(注 1) Hitz-P24 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) として解析した場合の温度。

(注 2) Hitz-P24 型の外面のうち、人が接触し得る表面。

3. Hitz-P24 型の周囲温度

Hitz-P24 型の周囲温度は、50℃（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 Hitz-P24 型の取扱いフロー

Hitz-P24 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 Hitz-P24 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 Hitz-P24 型の取扱いに対する安全性評価

3.に示したとおり、Hitz-P24 型を貯蔵するにあたっての周囲温度の最高温度は 50℃であり、取扱いを行う上で人が Hitz-P24 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、Hitz-P24 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、Hitz-P24 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 Hitz-P24 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 Hitz-P24 型への接触有無
1	Hitz-P24 型の貯蔵施設への搬入	・ 搬入	(なし)
2	トレーラからの貯蔵場所への吊り降ろし	・ 水平吊具のトラニオンへの取付け	・ 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。
3	貯蔵前準備・貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋間圧力の測定 (測定頻度例 : 1 回/3 カ月) ・ 表面温度の測定 (測定頻度例 : 1 回/3 カ月) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋間圧力の測定に係る圧力計の取付け及び保守を行う際に二次蓋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。 ・ 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、Hitz-P24 型外面に触れることなく測定が可能。

除熱解析で使用する解析コードについて

Hitz-P24 型の除熱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。

1. ORIGEN2 コード

(1) 概要

ORIGEN2 コード⁽¹⁾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。

(2) 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 (α, 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。

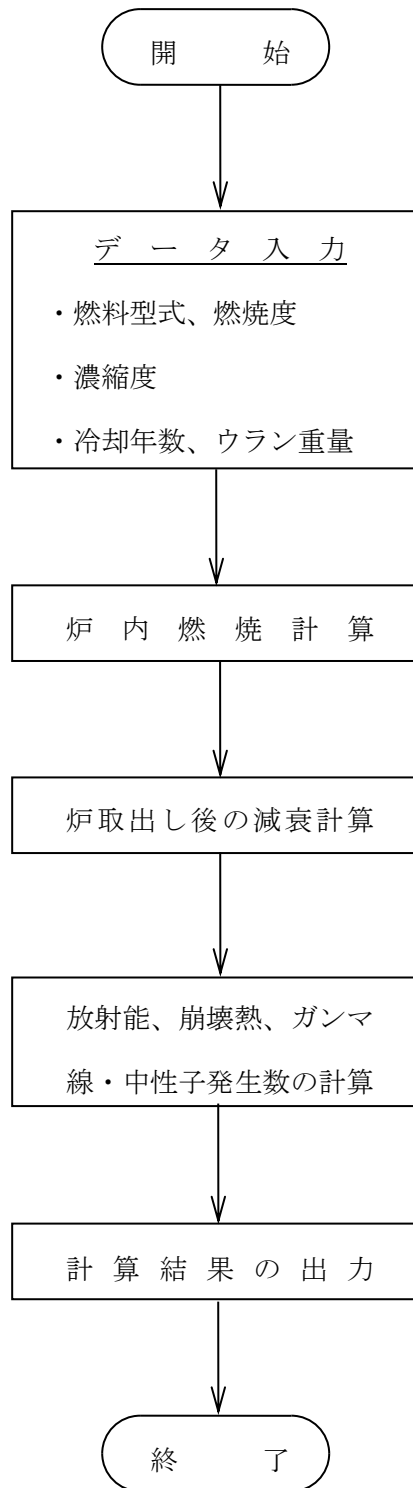
(3) 解析フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを別紙 6-1 図に示す。

(4) 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⁽²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を別紙 6-2 図に示す。



別紙 6-1 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

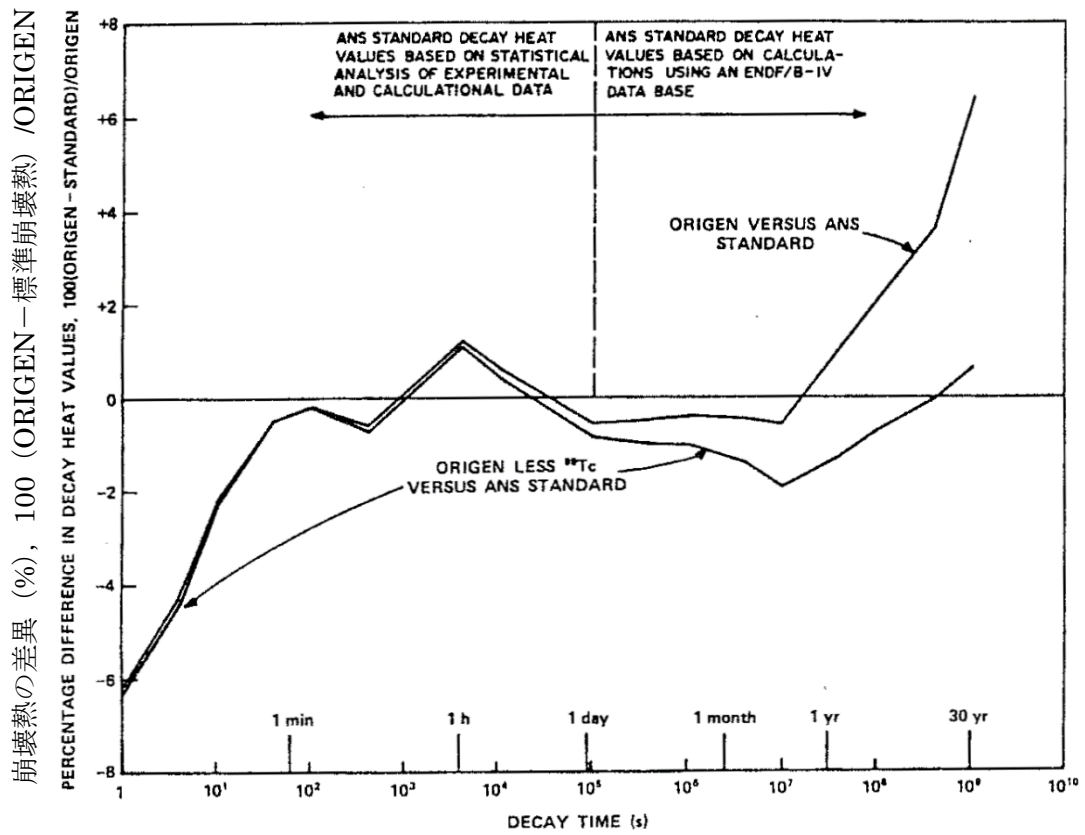


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{11} -s irradiation of ^{235}U .

(注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上 (Hitz-P24 型に収納される燃料の冷却期間) の冷却年数に対して高めの値を示している。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。したがって、ORIGEN2 の解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

別紙 6-2 図 ORIGEN2 コードの検証例

2. ABAQUS コード

(1) 概要

ABAQUS コード⁽³⁾は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.（現在 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。

(2) 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、対流及び放射が考慮できる。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。

(3) 解析フロー

代表的な解析フローを別紙 6-3 図に示す。

(4) 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、特定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⁽⁴⁾。

ABAQUS コードの検証例を別紙 6-4 図に示す

(5) Hitz-P24 型への適用性

Hitz-P24 型と上記の定常伝熱試験で用いた供試体（以下「定常伝熱試験用供試体」という）の主要な構造及び収納物仕様の比較を別紙 6-1 表及び別紙 6-5 図に示す。また、Hitz-P24 型と定常伝熱試験用供試体の主要な伝熱形態の比較を別紙 6-2 表及び別紙 6-6 図に示す。

Hitz-P24 型と定常伝熱試験用供試体の主要な構造及び収納物仕様は、以下に示すとおり同等である。

- ・乾式容器であり本体胴内部にはヘリウムが充填されている。

- ・ 収納燃料は PWR 用燃料であり収納体数及び崩壊熱量は同等である
- ・ 本体胴が円筒容器であり外径が同等である。
- ・ 蓋が二重蓋構造である。
- ・ 中性子遮蔽材が側部・蓋部・底部に設けられており、側部中性子遮蔽材部には伝熱用のフィンが設けられている。

Hitz-P24 型と定常伝熱試験用供試体の主要な伝熱形態は、構成部材（鋼材）の熱伝導、内部気体（ヘリウム）による熱伝導、構成部材間の放射、周囲空気への放射及び対流であり、同じである。

材質の違い及び構成部材間の隙間位置の違い等はあるが、Hitz-P24 型の伝熱評価に用いられる熱伝導、対流及び放射の基礎式は、以下に示すとおり、定常伝熱試験用供試体と同じである。

- ・ 熱伝導の基礎式（平板の場合）

$$q=k(T_1-T_2)/d$$

- ・ 対流の基礎式

$$q=h(T_1-T_2)$$

- ・ 放射の基礎式

$$q=\{f/(1/\varepsilon_1+1/\varepsilon_2-1)\}\sigma(T_1^4-T_2^4)$$

ここで、

q：熱流束(W/m²)

k：熱伝導率(W/m/K)

T₁, T₂：温度(K)

d：厚さ(m)

h：熱伝達率(W/m²/K)

f：形態係数(-)

ε₁, ε₂：放射率(-)

σ：ステファンボルツマン定数

このため、定常伝熱試験用供試体の伝熱解析に使用された熱伝導率、熱伝達率及び放射率を Hitz-P24 型の使用材質を踏まえてそれぞれ適切な値に変更することにより、Hitz-P24 型に ABAQUS コードを適用可能である。

なお、Hitz-P24 型の伝熱解析に使用した熱伝導率、熱伝達率及び放射率はそれぞれ別紙 1-1 表、別紙 1-2 表及び別紙 1-3 表に示すとおりであり、根拠を明確にした適

切な値である。基本的に既に型式証明を取得したキャスクでも使用実績のある平均的な値を使用しているが、アルミニウム合金の放射率及び塗装面の放射率などは各部温度が保守的になるように設定している。

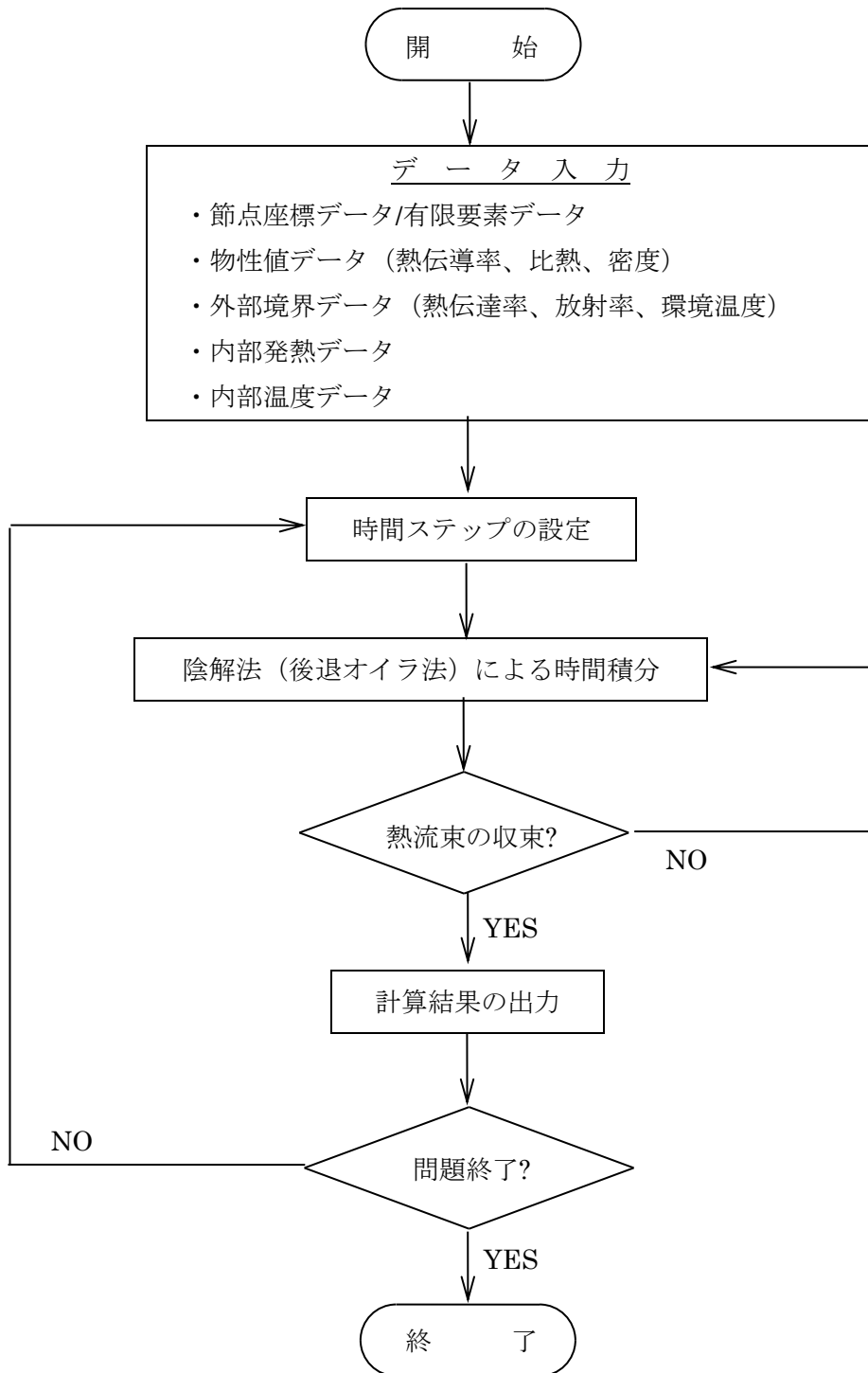
別紙 6-1 表 Hitz-P24 型と定常伝熱試験用供試体の主要な構造及び収納物仕様の比較

項目	Hitz-P24 型	定常伝熱試験用 供試体 (構造は別紙 6-5 図参照)
本体胴内雰囲気	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 型)	PWR 用燃料 (17×17 型)
収納体数(体)	24	21
崩壊熱量(kW)	18.1	23
外径(mm)	2659	2400
容器の材質	低合金鋼	ステンレス鋼
バスケットの材質	アルミニウム合金	ステンレス鋼

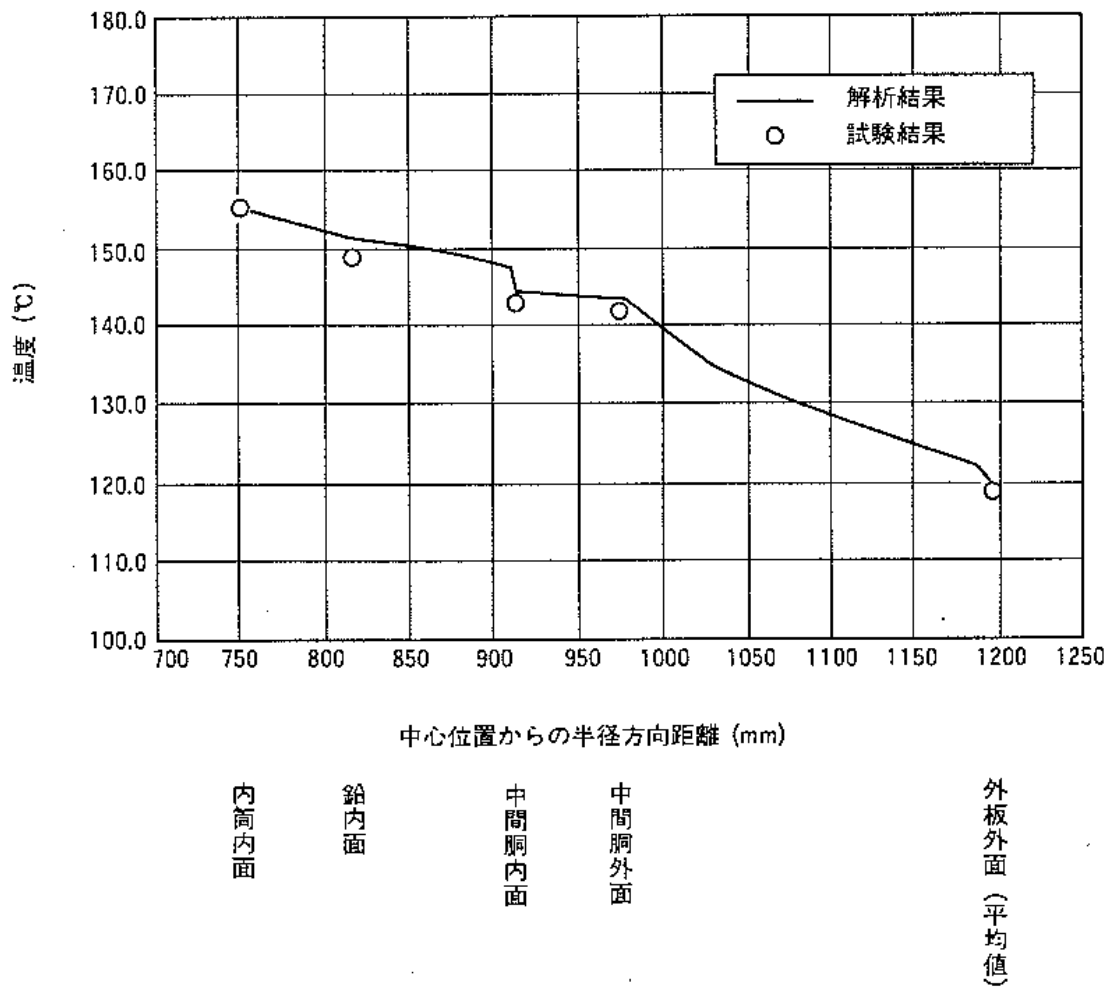
別紙 6-2 表 Hitz-P24 型と定常伝熱試験用供試体の伝熱形態の比較

Hitz-P24 型		定常伝熱試験用供試体	
伝熱経路	伝熱形態	伝熱経路	伝熱形態
燃料集合体→バスケット	伝導（ヘリウム）及び放射	燃料集合体→バスケット	伝導（ヘリウム）及び放射
バスケット	伝導	バスケット	伝導
バスケット内側部→バスケット外側部（隙間）	伝導（ヘリウム）及び放射	バスケット外側部→内筒内面（隙間）	伝導（ヘリウム）及び放射
バスケット外側部→本体胴内面	伝導（ヘリウム）及び放射		
本体胴	伝導	内筒、 γ 線遮蔽体（注）	伝導
		γ 線遮蔽体→中間胴（隙間）	伝導（空気）及び放射
		中間胴	伝導
伝熱フィン	伝導	内部フィン	伝導
外筒	伝導	外板	伝導
外筒外面→周囲の空気、貯蔵建屋	対流、放射	外板外面→周囲の空気、貯蔵建屋	対流、放射

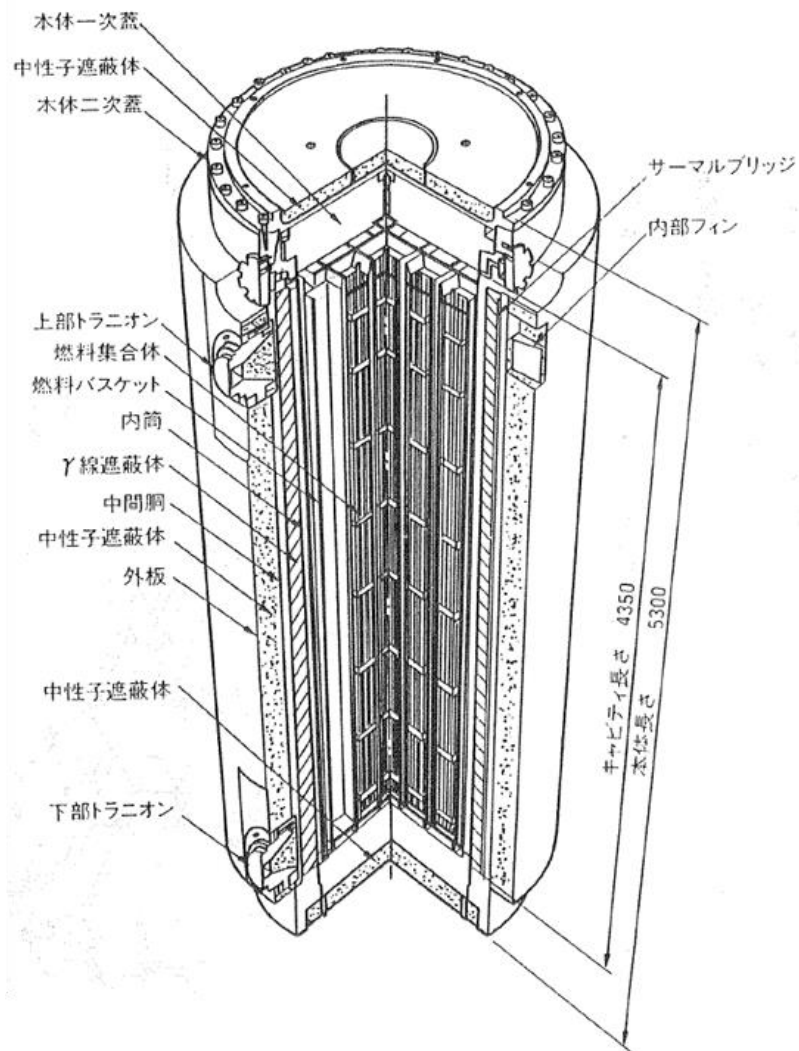
（注）内筒と γ 線遮蔽体の隙間は考慮していない。



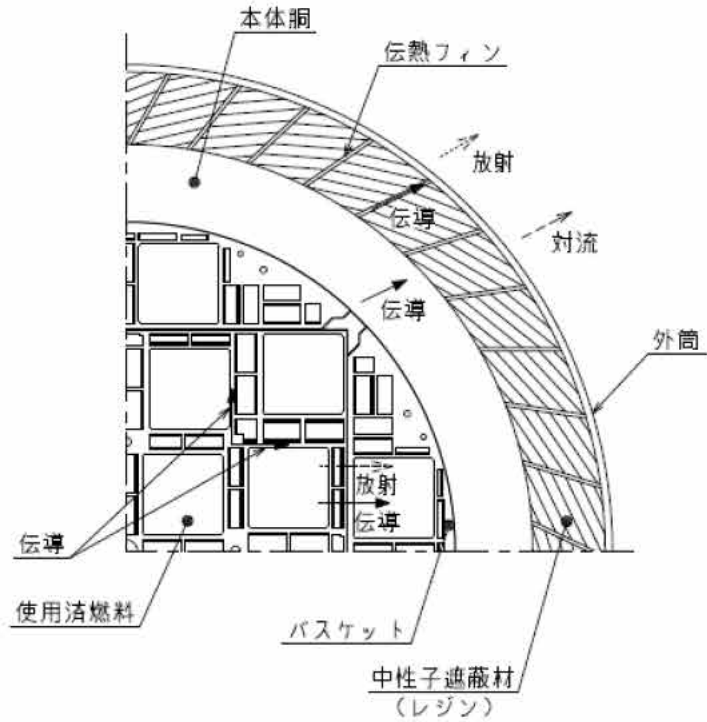
別紙 6-3 図 ABAQUS コードの解析フロー図



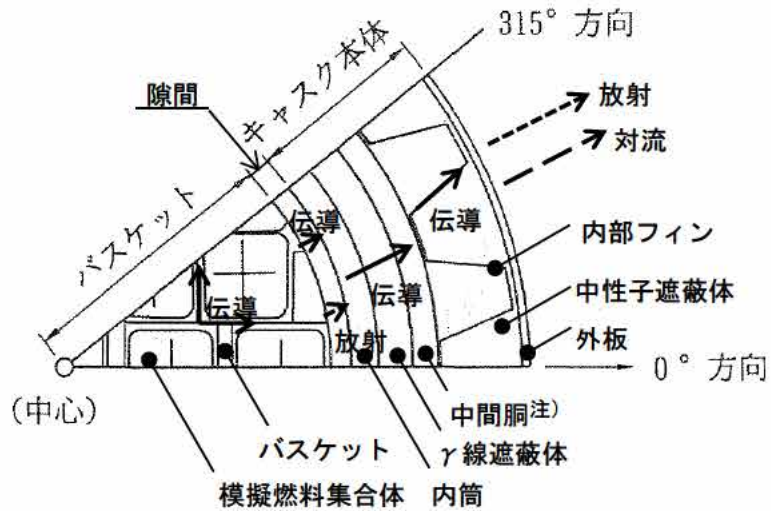
別紙 6-4 図 ABAQUS コードの検証例
 (定常伝熱試験の解析結果と試験結果の比較) (4)



別紙 6-5 図 定常伝熱試験用供試体 (4)



(a) Hitz-P24 型



注) 中間胴と γ 線遮蔽体間の隙間は伝導と放射

(b) 定常伝熱試験用供試体

別紙 6-6 図 Hitz-P24 型と定常伝熱試験用供試体の伝熱形態の比較

3. 参考文献

- (1) M. Ishikawa et al., "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)
- (2) A. G. Croff, "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983)
- (3) Dassault Systèmes, "ABAQUS 2016 Analysis User's Guide", (2016)
- (4) 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)