

補足説明資料 16-2

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	32
4. 参考文献	40

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 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

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、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」及び「4.自然現象等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、適切な頻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、設計貯蔵期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

MSF-28P 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。

- 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。

MSF-28P 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ブ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ブひずみが 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の種類ごとに以下の制限を設ける。

- ・ 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型及びB型) 275℃以下
- ・ 17×17 燃料 39,000MWd/t 型 (A型及びB型) 275℃以下
- ・ 15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型及びB型) 275℃以下
- ・ 15×15 燃料 39,000MWd/t 型 (A型及びB型) 275℃以下

また、MSF-28P 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、MSF-28P 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、MSF-28P 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、MSF-28P 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。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及び冷却期間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、最大崩壊熱を上回る崩壊熱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条三号に示される貯蔵建屋の除熱設計、同第6条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2号に示される貯蔵建屋内の雰囲気温度(周囲温度)温度の監視については型式証明申請の範囲外(設計(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。

MSF-28P型の設計貯蔵期間は60年である。また、補足説明資料16-4「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95LC216）」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、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-28P 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

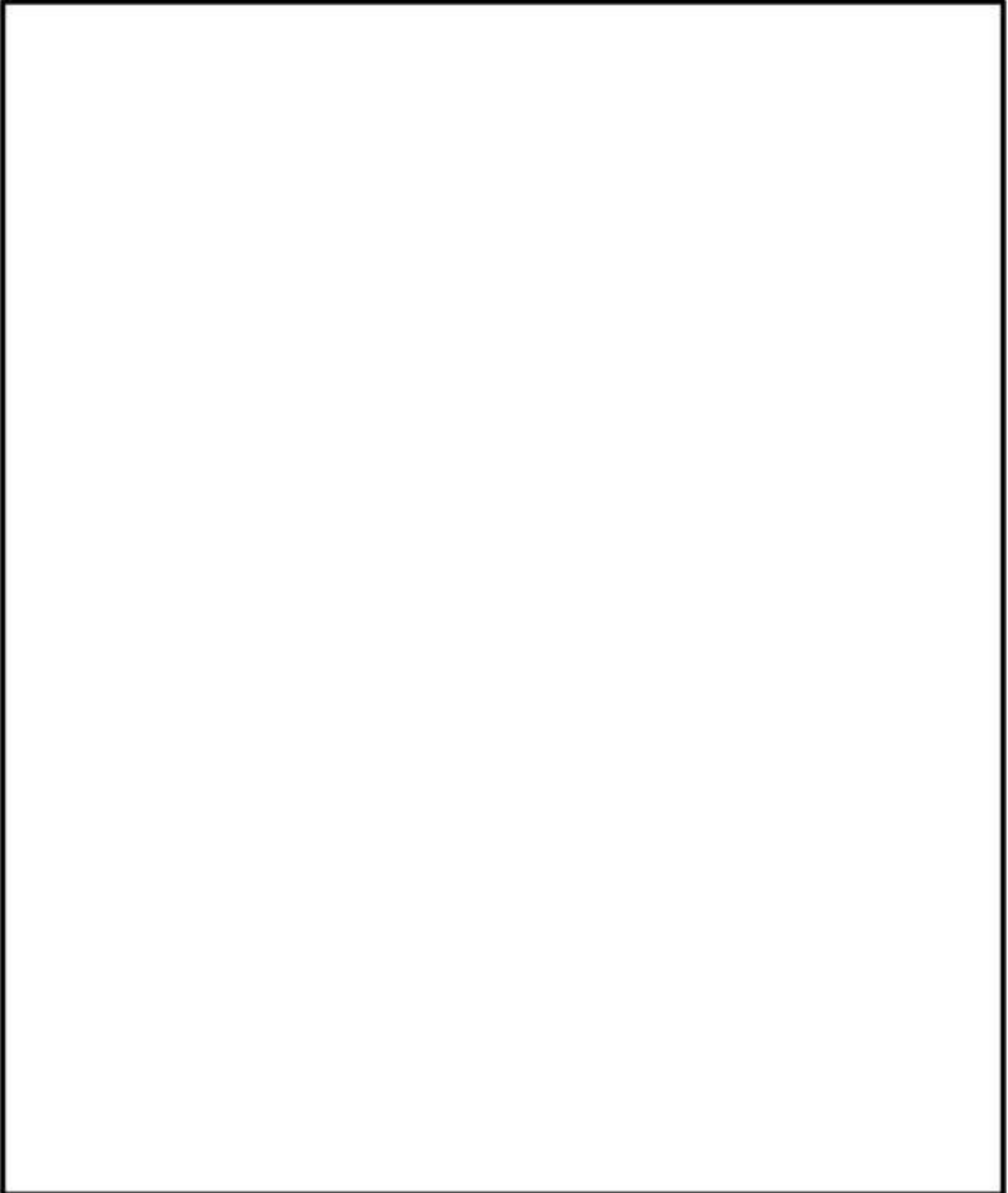

MSF-28P 型は、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により MSF-28P 型の外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。特定兼用キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンが用いられているため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。MSF-28P 型の除熱構造図を第 1 図に示す。

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（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

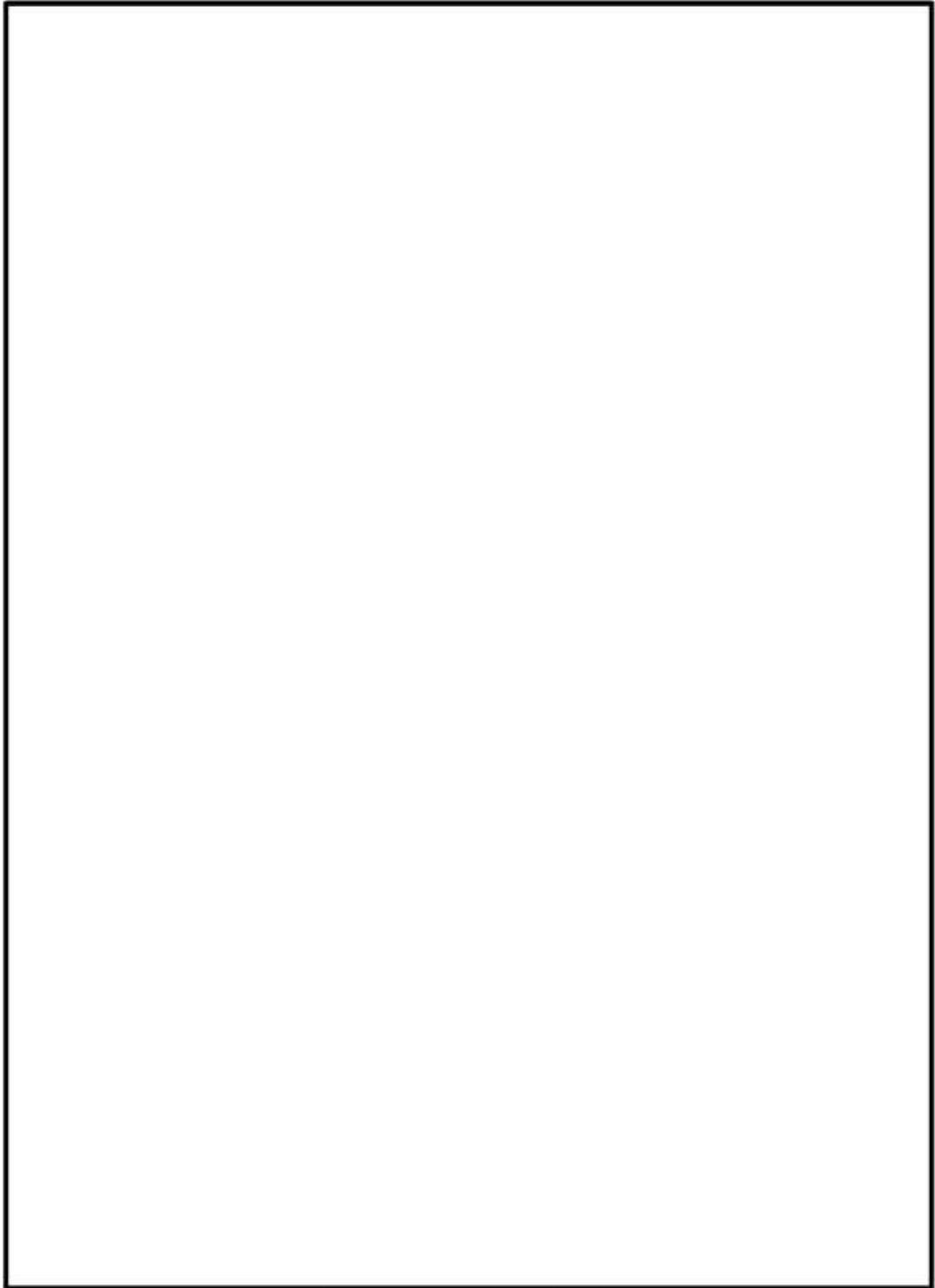
へ伝えられる。

- 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ふく射により特定兼用キャスク本体内面へ伝えられる。
- d) 特定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) 特定兼用キャスク本体外面へ伝えられた熱は、特定兼用キャスク本体外面の対流により特定兼用キャスク周囲の空気へ、特定兼用キャスク本体外面のふく射により貯蔵建屋へ伝えられる。

概 要 図	
主 な 材 料	<ul style="list-style-type: none"> ・ 胴 : 炭素鋼 ・ 外筒 : 炭素鋼 ・ バスケットプレート : アルミニウム合金 ・ バスケットサポートA  ・ バスケットサポートB ・ バスケットサポートC ・ 中性子吸収材 : ほう素添加アルミニウム合金 ・ 中性子遮蔽材 : レジン ・ 伝熱フィン : 銅

(注1) 

第1図 MSF-28P型の除熱構造



第2図 MSF-28P型の伝熱形態

(2) 除熱機能に関する評価

MSF-28P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(15.7kW)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)。

[設計崩壊熱量]

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。なお、39,000Mwd/t型は48,000Mwd/t型より燃焼度が低く、崩壊熱量が48,000Mwd/t型より小さくなるため、第2表には、

48,000Mwd/t型の計算結果のみを示す。また、B型燃料は

、A型より崩壊熱量が小さくなるため、第2表にはA型の計算結果のみ示す。

第2表より、燃料集合体の収納位置 ごとに燃料集合体1体当たりの崩壊熱量の最も高い燃料を選定し、除熱解析における収納物条件とした。

MSF-28P型の除熱解析における収納物条件を第3表に示す。

(注1) 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。

第1表 使用済燃料集合体の仕様

種類	17×17燃料		15×15燃料	
	48,000 MWd/t型	39,000 MWd/t型	48,000 MWd/t型	39,000 MWd/t型
形状	約214			
燃料集合体幅 (mm)	約4,100			
全長 (mm)	約680			
質量 (kg)	約680		約670	
初期濃縮度 (wt%以下)	4.2	3.7	4.1	3.5
特定兼用 キャスク 1基当たり の仕様	収納体数 (体)			
	崩壊熱量 (kW以下)	15.7		

種類	17×17燃料 48,000MWd/t型		17×17燃料 39,000MWd/t型	
	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)
	A型	B型	A型	B型

種類	15×15燃料 48,000MWd/t型		15×15燃料 39,000MWd/t型	
	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)
	A型	B型	A型	B型

第2表 崩壊熱量計算条件及び結果

種類	計算条件						計算結果 使用済燃料集合体 1体当たりの 崩壊熱量(W)
	燃焼度 (MWd/t)	冷却期間 (年)	比出力 (MW/t)	照射期間 (日)	濃縮度 ^(注1) (%)	ウラン重量 (kg)	
							723.7
							673.2
							632.6
							592.0
							503.9
							502.5
							474.9
							471.3

(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) ピーキングファクターは下表のとおりとする。なお、ノードは燃料有効部を軸方向に48分割したものである。

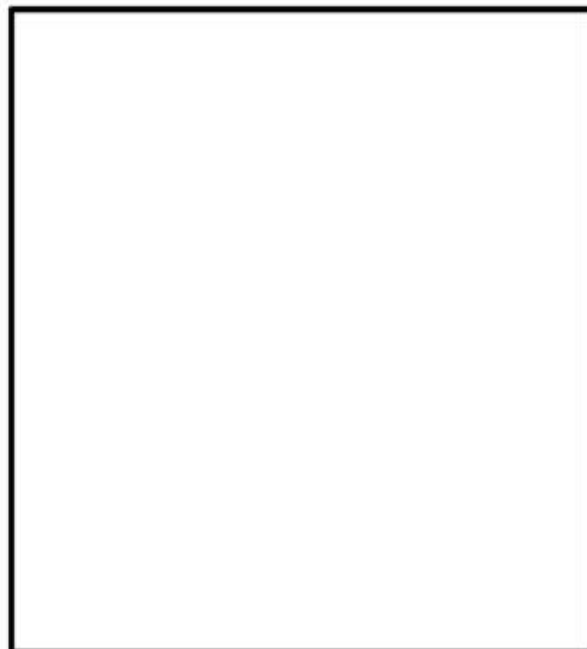
種類	17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型)
(上部)	
ピーキング ファクター	
(下部)	

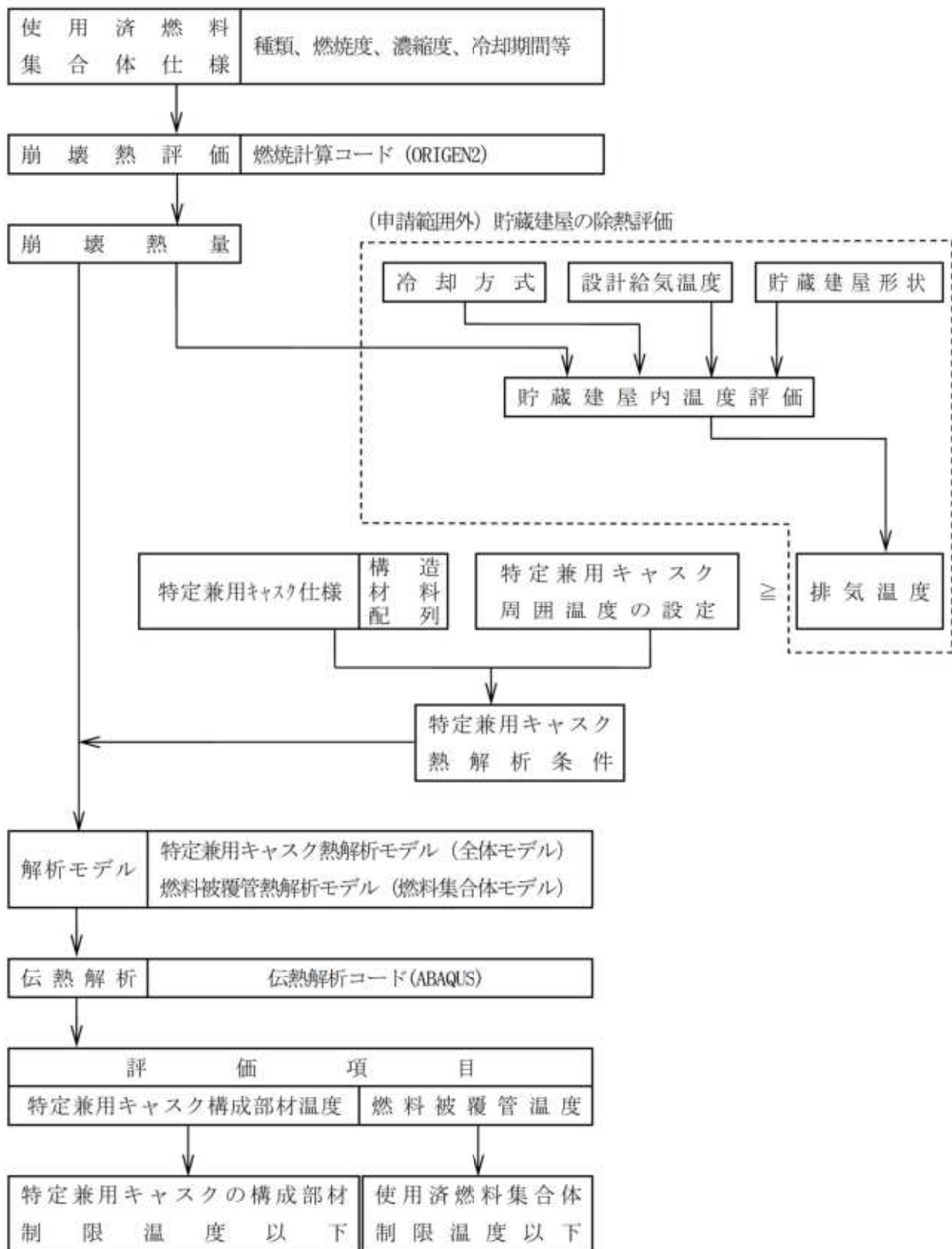
第3表 除熱解析における収納物条件概要

項目	種類	燃料集合体1体の仕様		燃料集合体 1体当たりの 崩壊熱量(W)	収納体数 (体)	特定兼用 キャスク 1基当たりの 設計崩壊熱量 ^(注1) (kW)
		燃焼度 (MWd/t)	冷却期間 (年)			
解析条件 ^(注2)						18.0

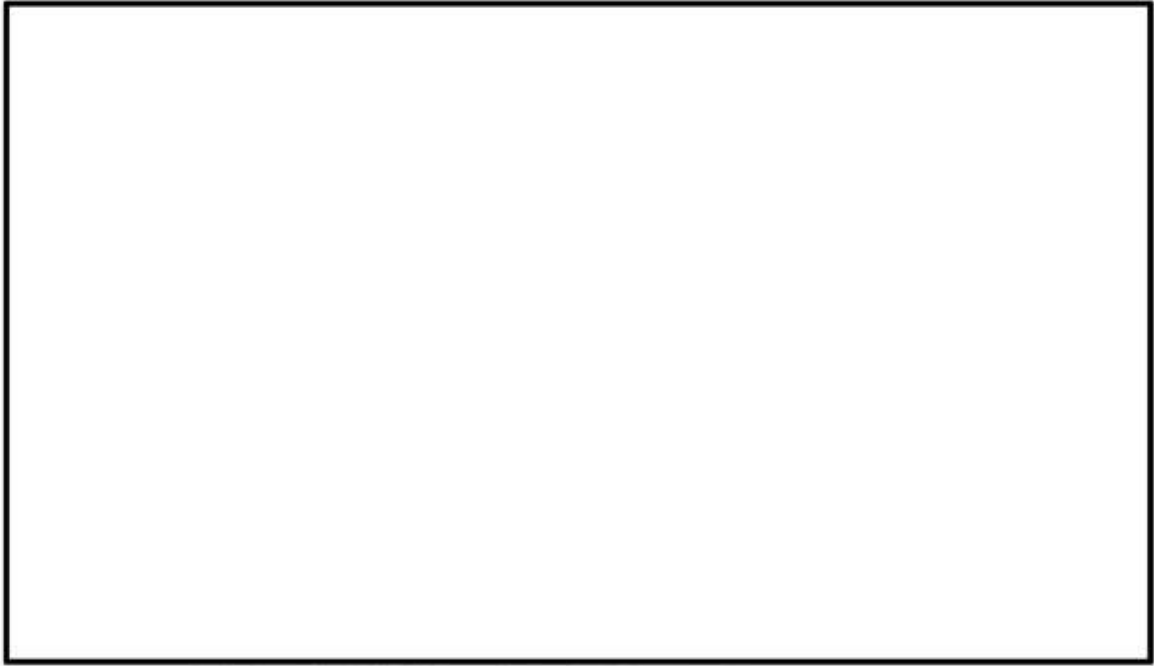
(注1) 除熱解析では、ピーキングファクターを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。

(注2) 配置を下図に示す。なお、バーナブルボ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。





第3図 除熱解析フロー



(注) 使用済燃料集合体 28 体分の崩壊熱量を示す。

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. 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、外部からの入熱及び周囲温度等を条件として、MSF-28P 型の実形状を三次元でモデル化（バスケットの非対称性を解析モデルとして考慮）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。基礎等に固定する設置方法（たて置き）（以下、「たて置き」という。）及び蓋部が金属部へ衝突しない設置方法（横置き）（以下、「横置き」という。）における評価を行う。

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。

- ・特定兼用キャスク熱解析モデル
：三次元 180° 対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）
- ・燃料被覆管熱解析モデル
：燃料集合体モデル（17×17 燃料）

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
- ・燃料集合体モデル…燃料被覆管

②境界条件

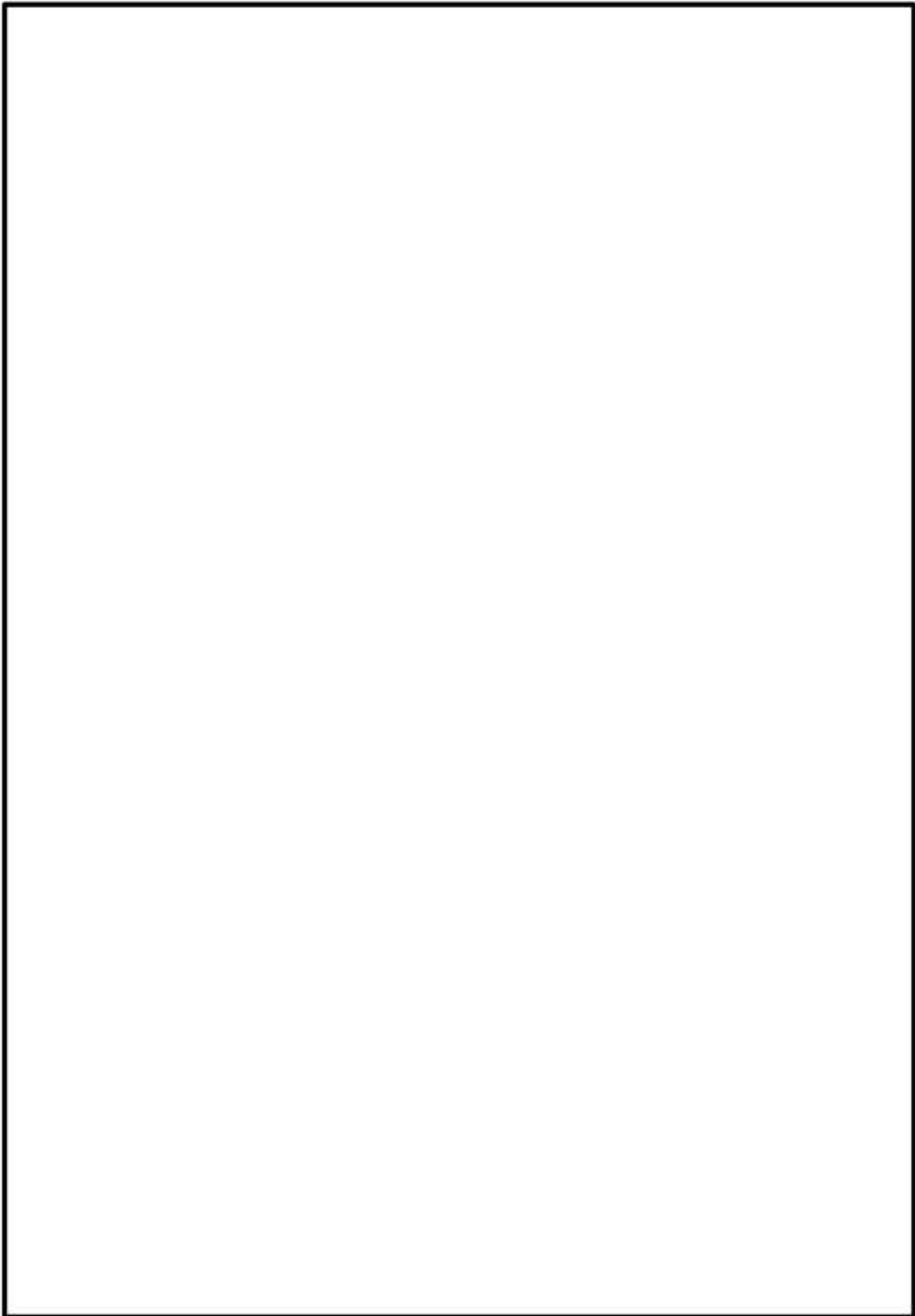
MSF-28P 型周囲の環境として、以下の条件を用いる。

<たて置き>

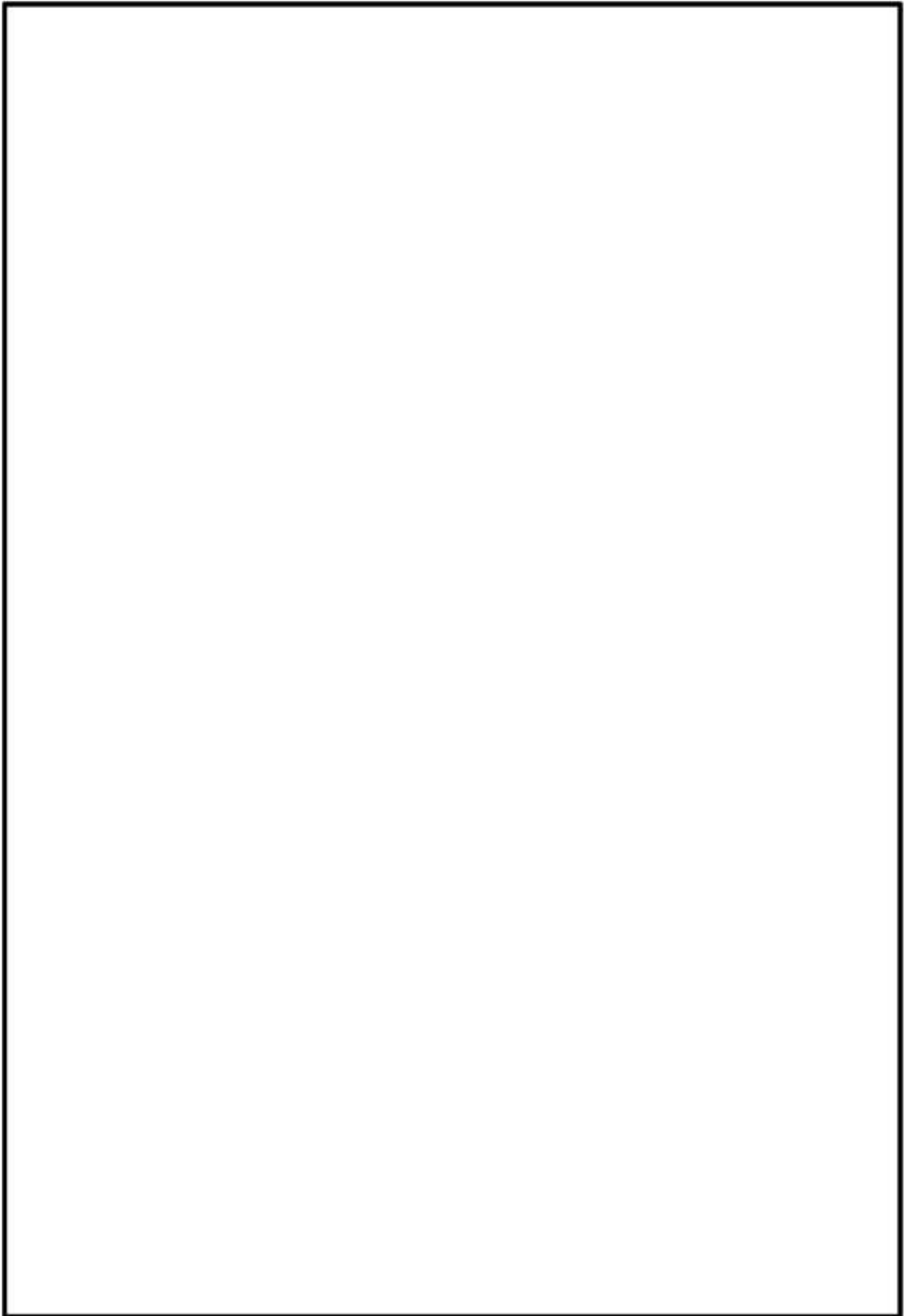
- ・貯蔵姿勢・場所 : たて置き・貯蔵建屋内貯蔵
- ・周囲温度 : 50°C
- ・環境条件 : 貯蔵建屋壁面温度 65°C

<横置き>

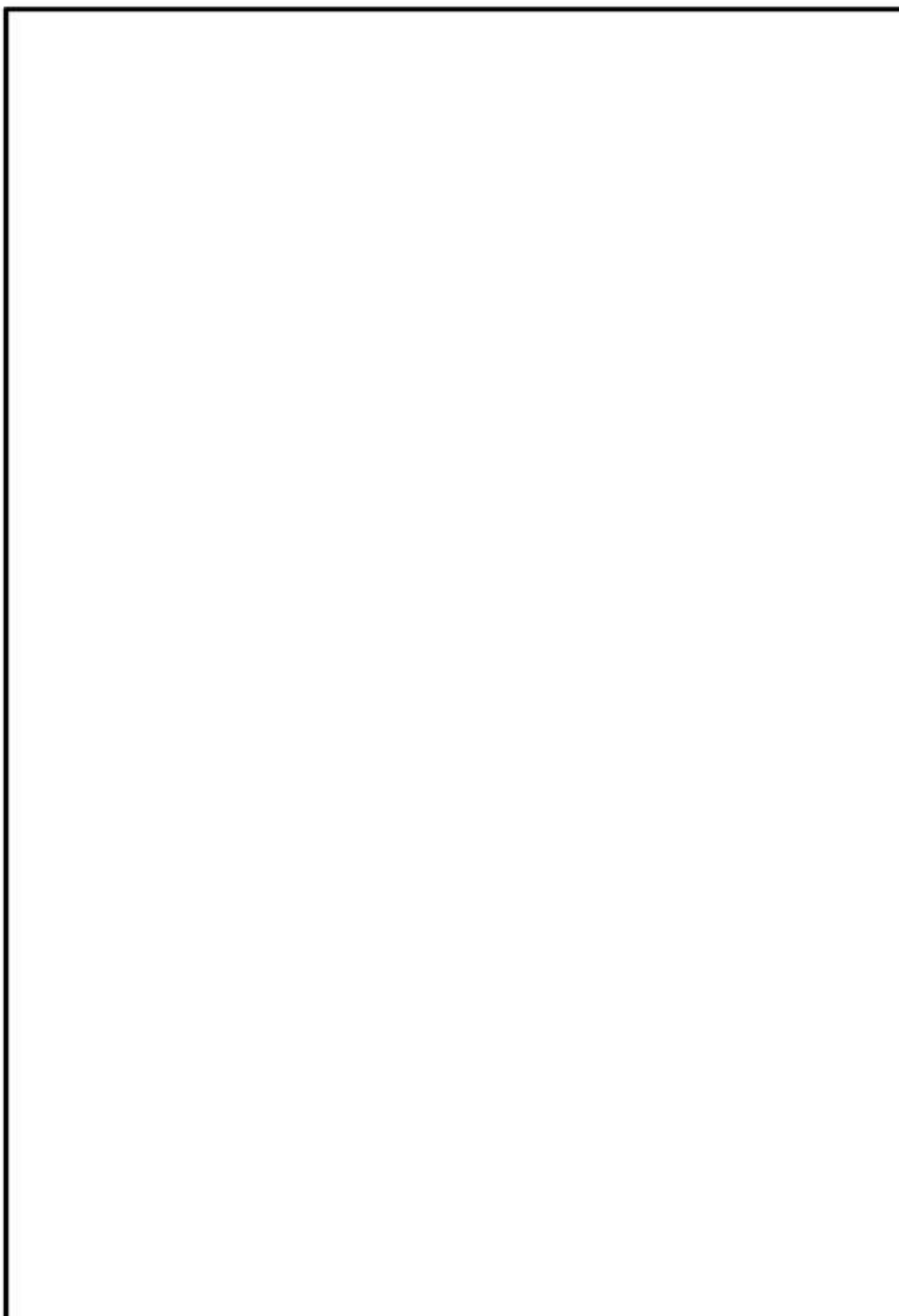
- ・貯蔵姿勢・場所 : 横置き・貯蔵建屋内貯蔵
- ・周囲温度 : 45°C
- ・環境条件 : 貯蔵建屋壁面温度 65°C



第5図(1/2) MSF-28P 型全体モデル形状図 (縦断面図)
(たて置き時)

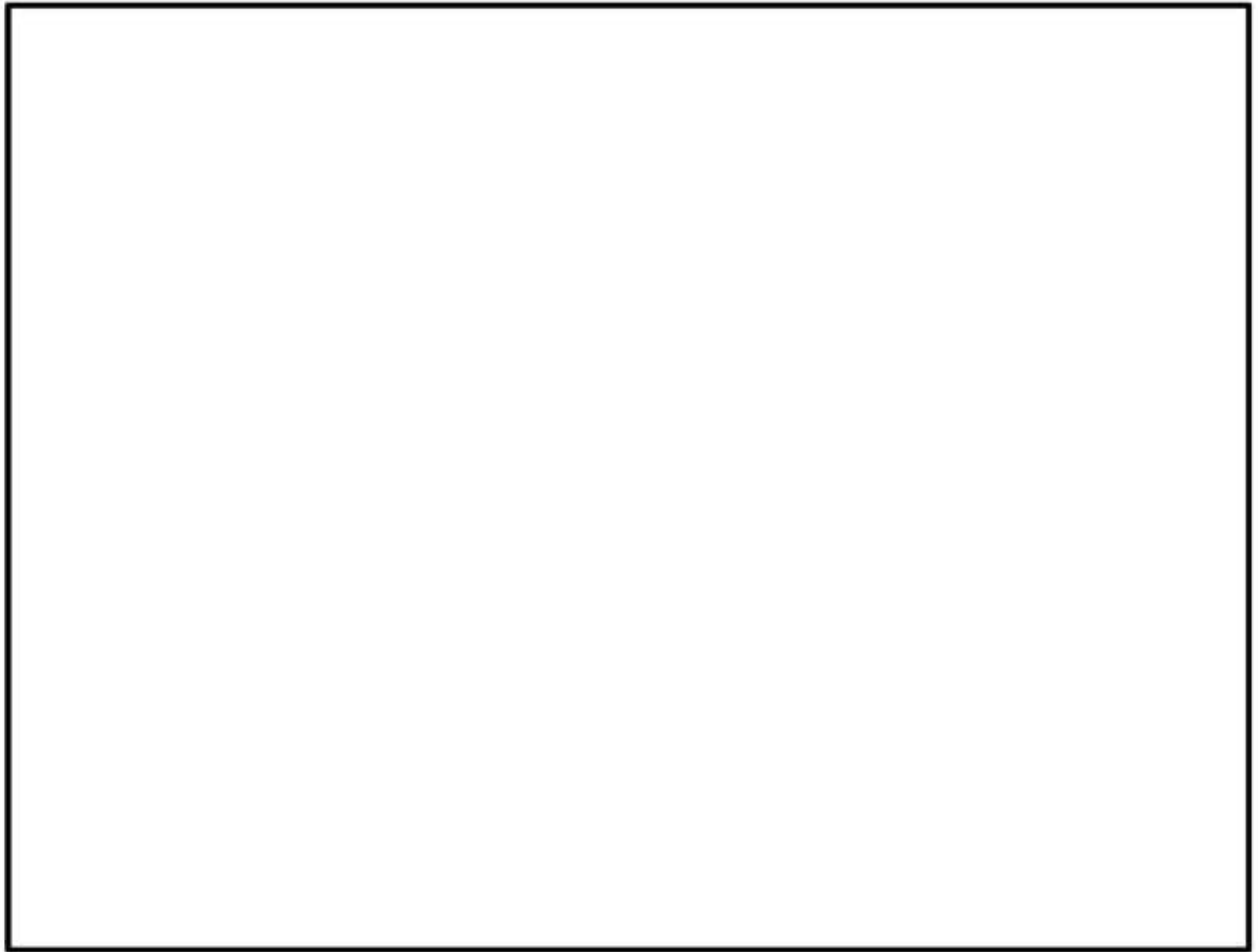


第5図(2/2) MSF-28P 型全体モデル形状図 (縦断面図)
(横置き時)

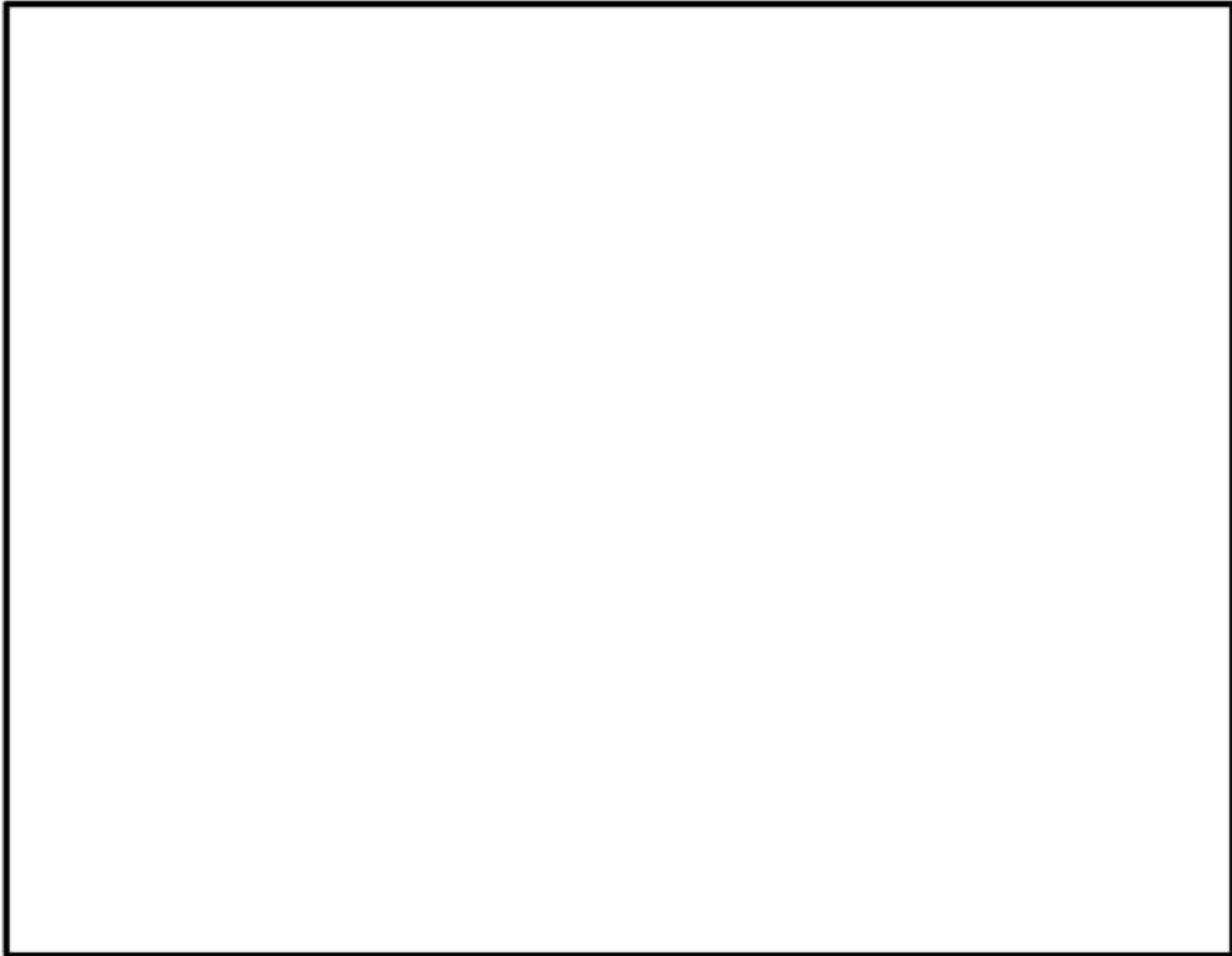


(注) 横断面図はたて置き時と横置き時に差異はない。

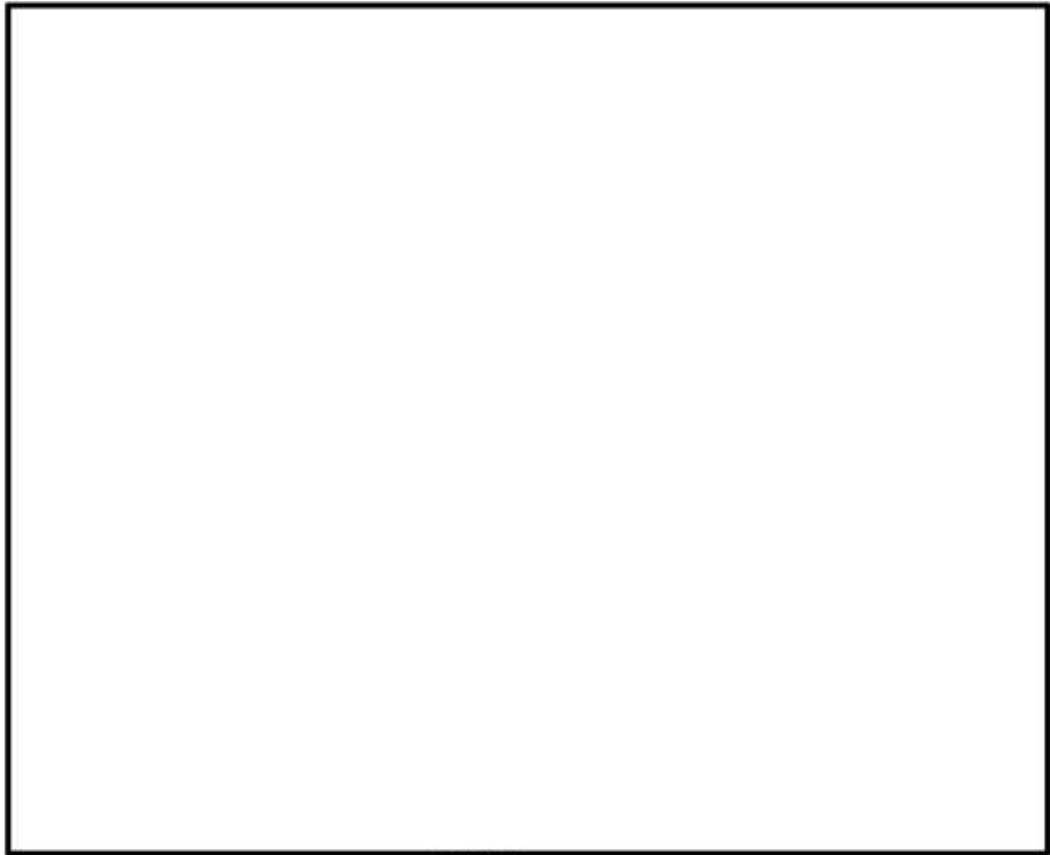
第6図 MSF-28P 型全体モデル形状図 (横断面図)



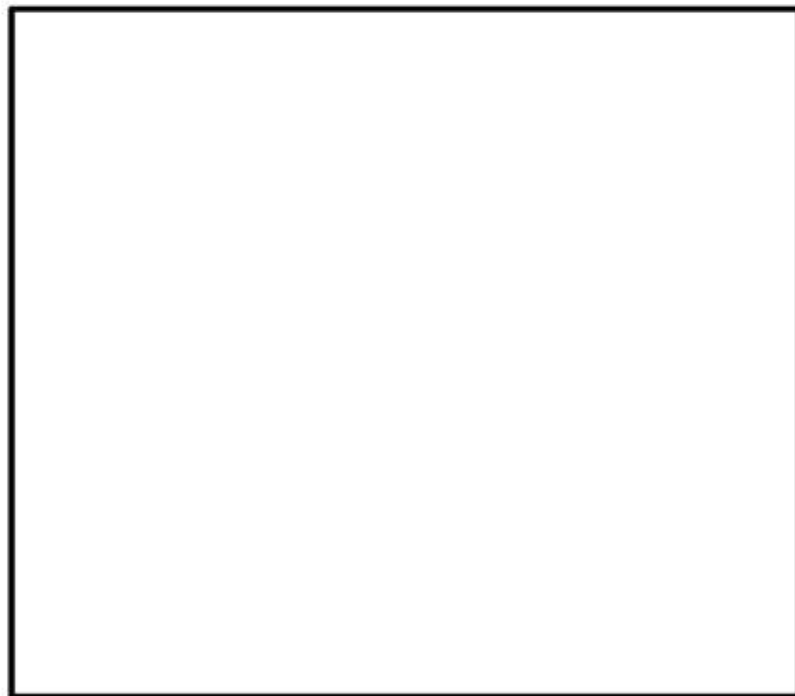
第7図(1/2) MSF-28P 型全体モデル要素分割図
(たて置き)



第7図(2/2) MSF-28P 型全体モデル要素分割図
(横置き)



(形状図)



(要素分割図)

第8図 MSF-28P型燃料集合体モデル形状図・要素分割図

(17×17燃料)

c. 評価結果

MSF-28P 型の除熱解析結果として、特定兼用キャスク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、特定兼用キャスク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-28P 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特定兼用キャスク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)
		たて置き時	横置き時	
特定兼用 キャスク	胴 (本体部)	135	127	350 ⁽¹⁾
	胴 (フランジ部)	108	103	350 ⁽¹⁾
	胴 (底板)	140	130	350 ⁽¹⁾
	外筒	122	115	350 ⁽¹⁾
	底部中性子遮蔽材カバー	117	102	425 ⁽¹⁾
	下部端板	118	108	425 ⁽¹⁾
	一次蓋	107	103	350 ⁽¹⁾
	蓋部中性子遮蔽材カバー	104	99	350 ⁽¹⁾
	二次蓋	97	93	350 ⁽¹⁾
	貯蔵用三次蓋	—	87	350 ⁽¹⁾
	一次蓋ボルト	106	101	350 ⁽¹⁾
	二次蓋ボルト	98	94	350 ⁽¹⁾
	貯蔵用三次蓋ボルト	—	88	350 ⁽¹⁾
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	137 ^(注7)	127	149 ⁽²⁾
	金属ガスケット	107 ^(注8)	103	130 ⁽³⁾
	バスケット	187	180	250 ⁽⁴⁾
	トラニオン	124	116	350 ⁽¹⁾
	伝熱フィン	129	121	200 ⁽⁵⁾
燃料被覆管		212	205	275 ⁽⁶⁾

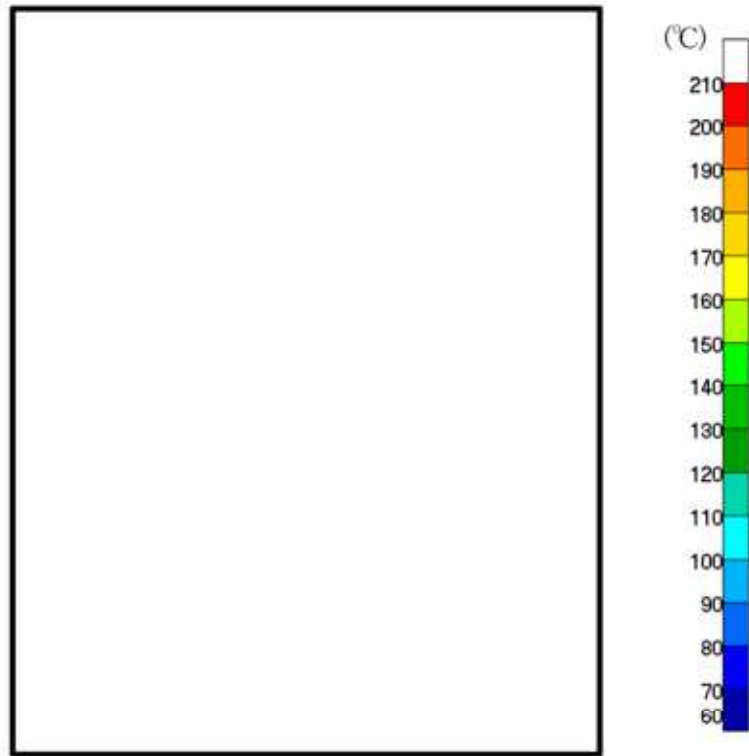
※注記を次頁に示す。

- (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2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2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2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2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2を参照。
- (注6) 参考文献(6)に燃料被覆管の累積クリープひずみが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2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) 一次蓋の最高温度とする。

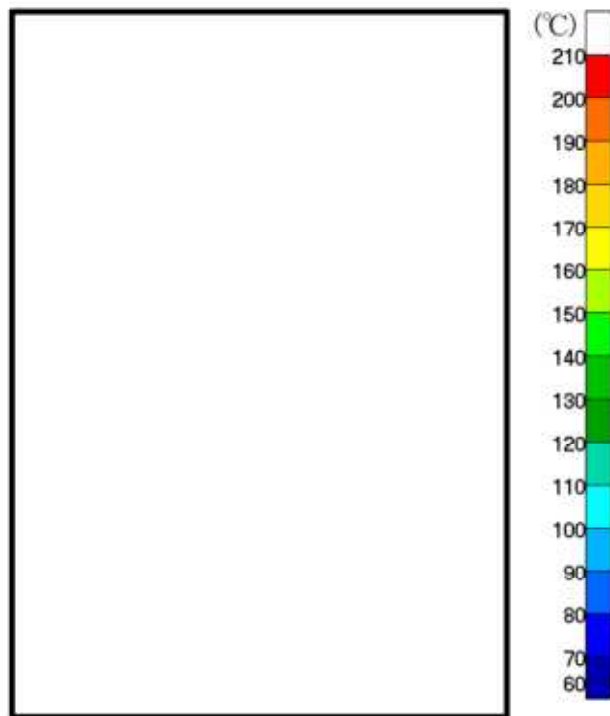
第5表 設計温度

対象となる部位		設計温度 (°C)	
		たて置き時	横置き時
特定兼用 キャスク	胴 (本体部)	140	— (注1)
	胴 (フランジ部)	115	
	胴 (底板)	145	
	外筒	130	
	底部中性子遮蔽材カバー	125	
	下部端板	125	
	一次蓋	115	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	110	
	二次蓋	105	
	一次蓋ボルト	115	
	二次蓋ボルト	105	
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	145	
	金属ガスケット	115	
	バスケット	195	
	トラニオン	130	
伝熱フィン	135		
燃料被覆管		220	210

(注1) 特定兼用キャスクの設計温度は、各部位の温度が高いたて置き時の評価結果を基に設定する。



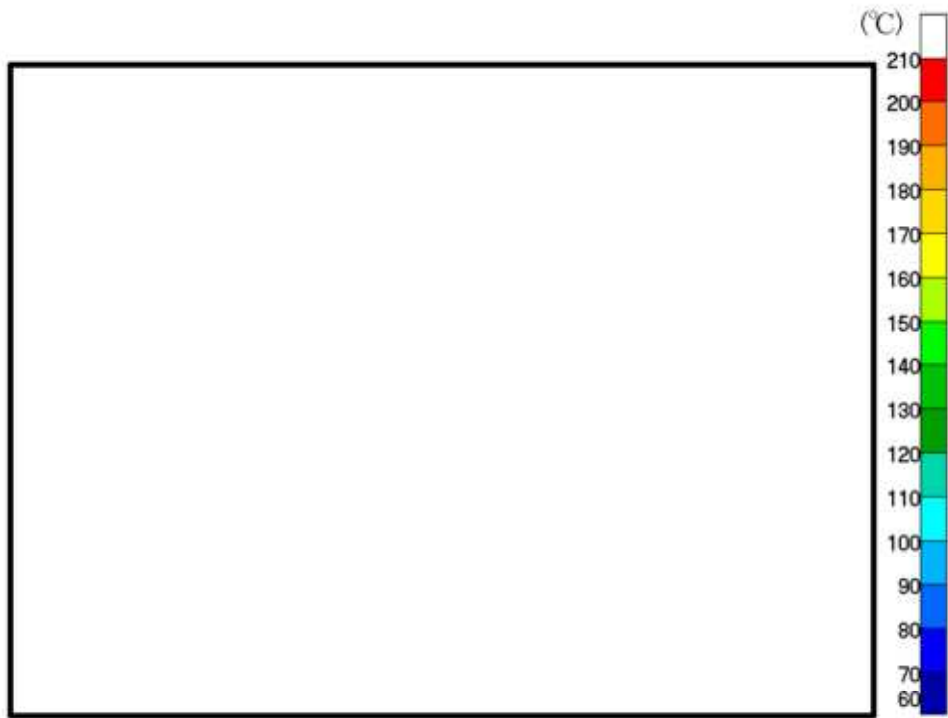
(全体)



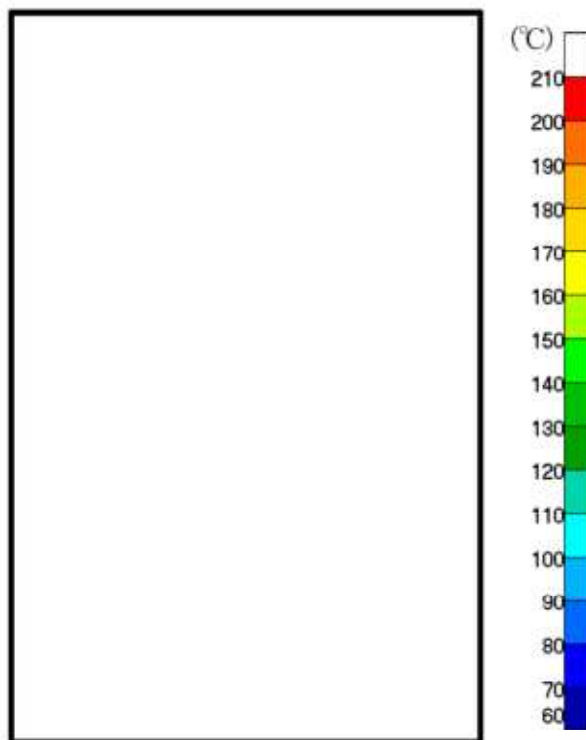
(燃料集合体最高温度位置断面)

第9図(1/2) MSF-28P 型除熱解析結果(全体モデル)

(たて置き時)

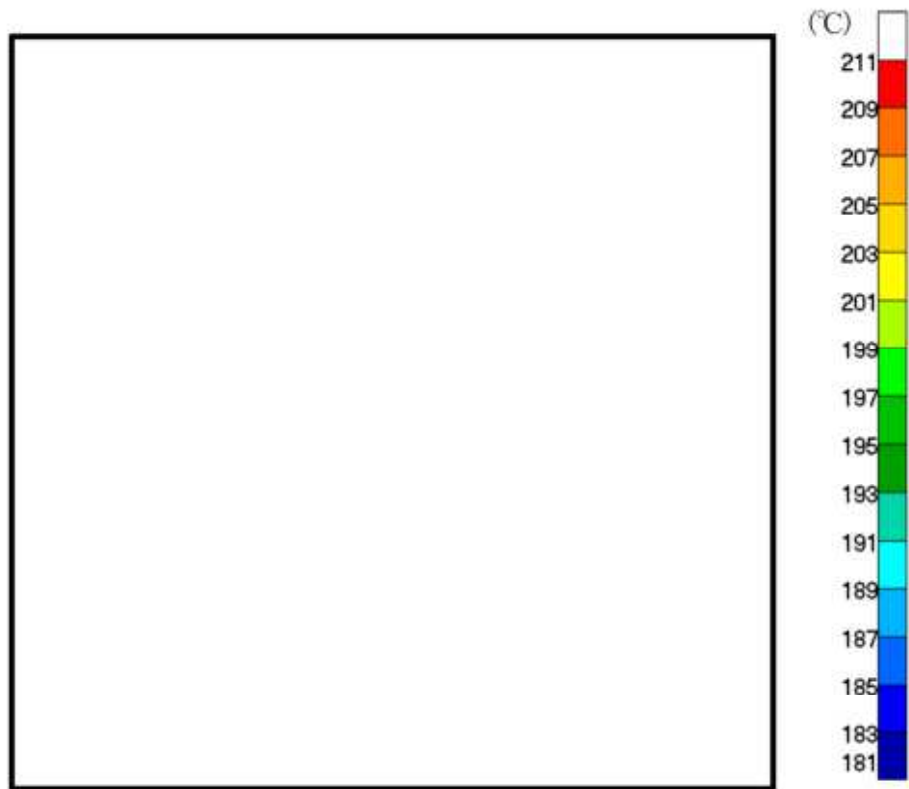


(全体)

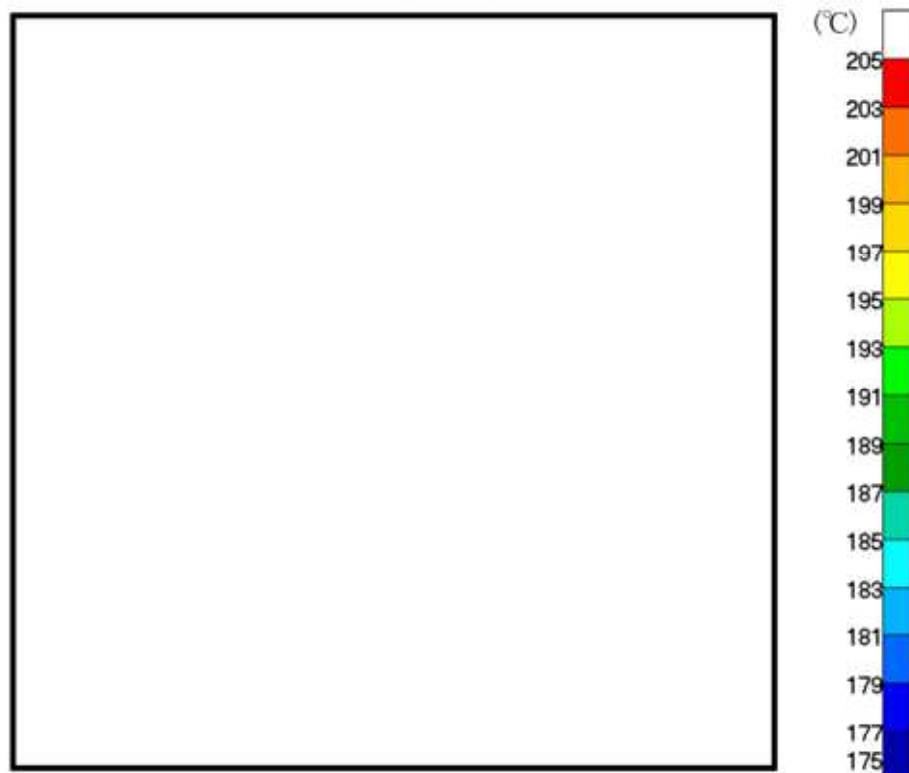


(燃料集合体最高温度位置断面)

第9図(2/2) MSF-28P 型除熱解析結果(全体モデル)
(横置き時)



(たて置き時)



(横置き時)

第 10 図 MSF-28P 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。

[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、設計貯蔵期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、型式証明の審査範囲外（設置（変更）許可時に別途確認）である。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

MSF-28P 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。

①ORIGEN2 コード

i 概要

ORIGEN2 コード⁽⁷⁾ 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 (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。

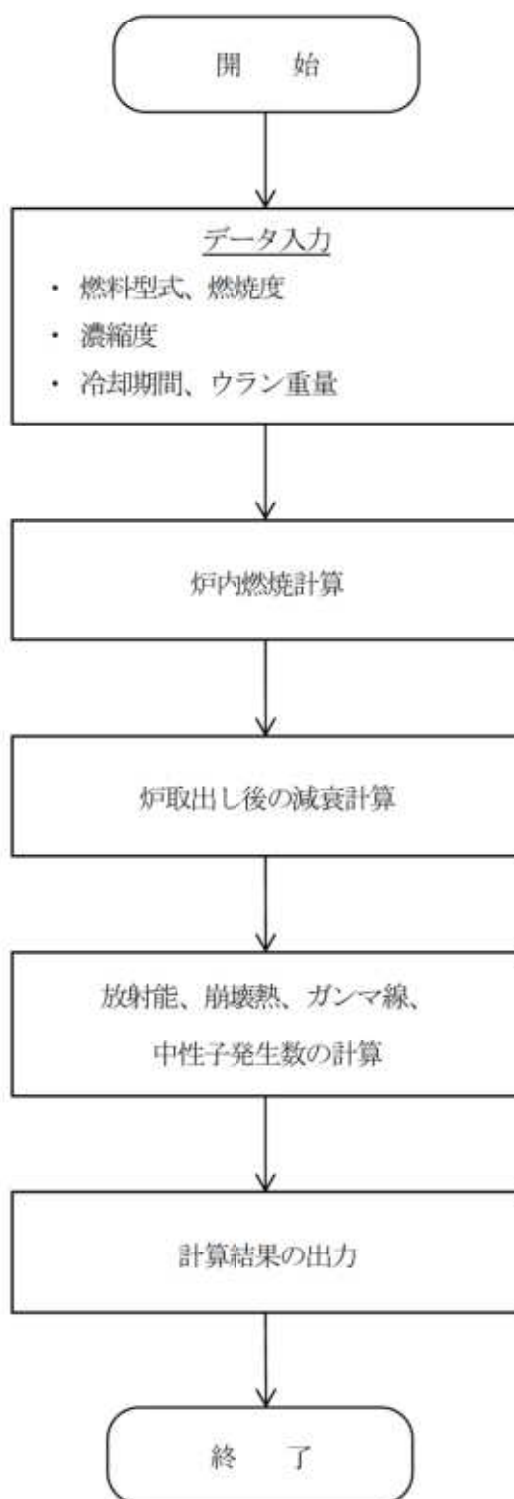
iii 計算フロー

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⁽⁸⁾。

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)

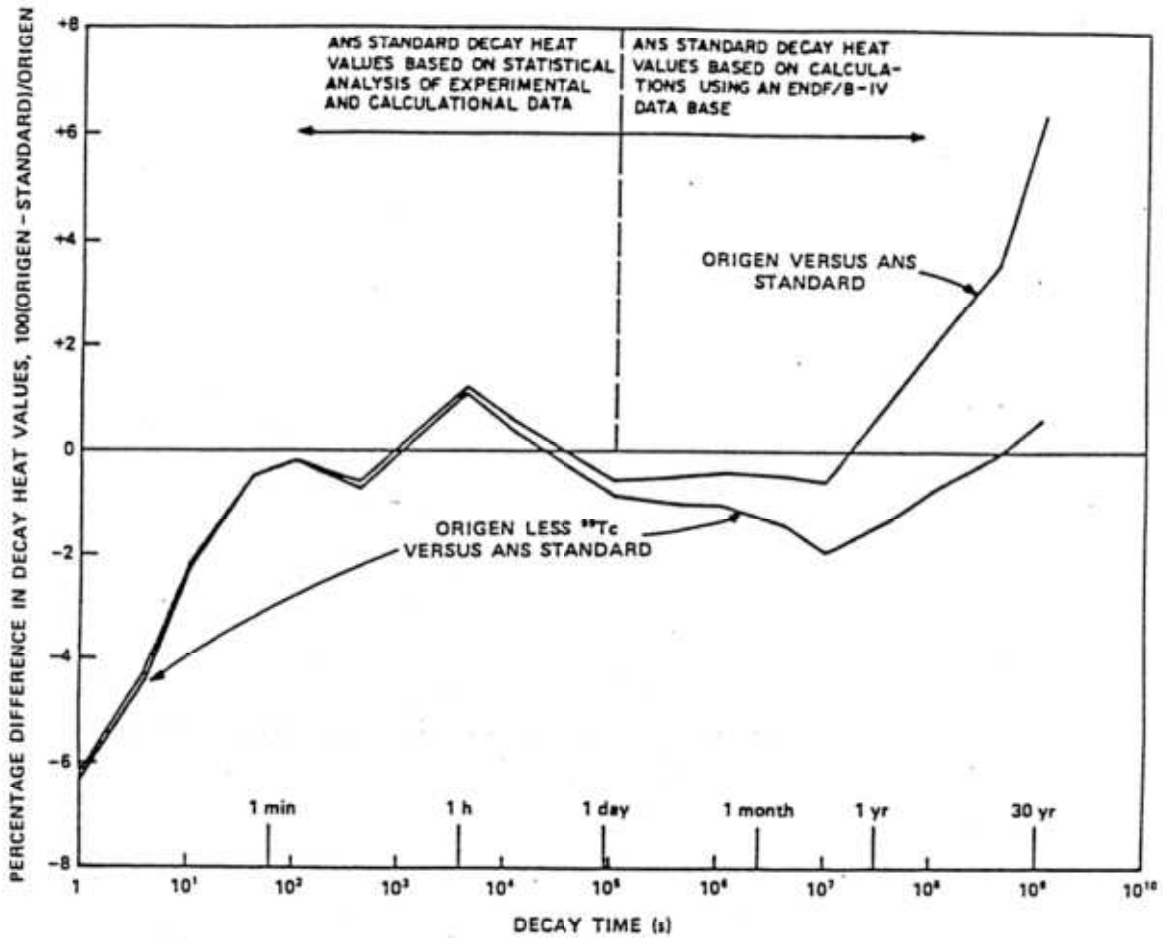


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(注)ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、20 年以上 (MSF-28P 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 ⁹⁹Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ⁹⁹Tc 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⁽⁸⁾)

②ABAQUS コード

i 概要

ABAQUS コード⁽⁹⁾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。

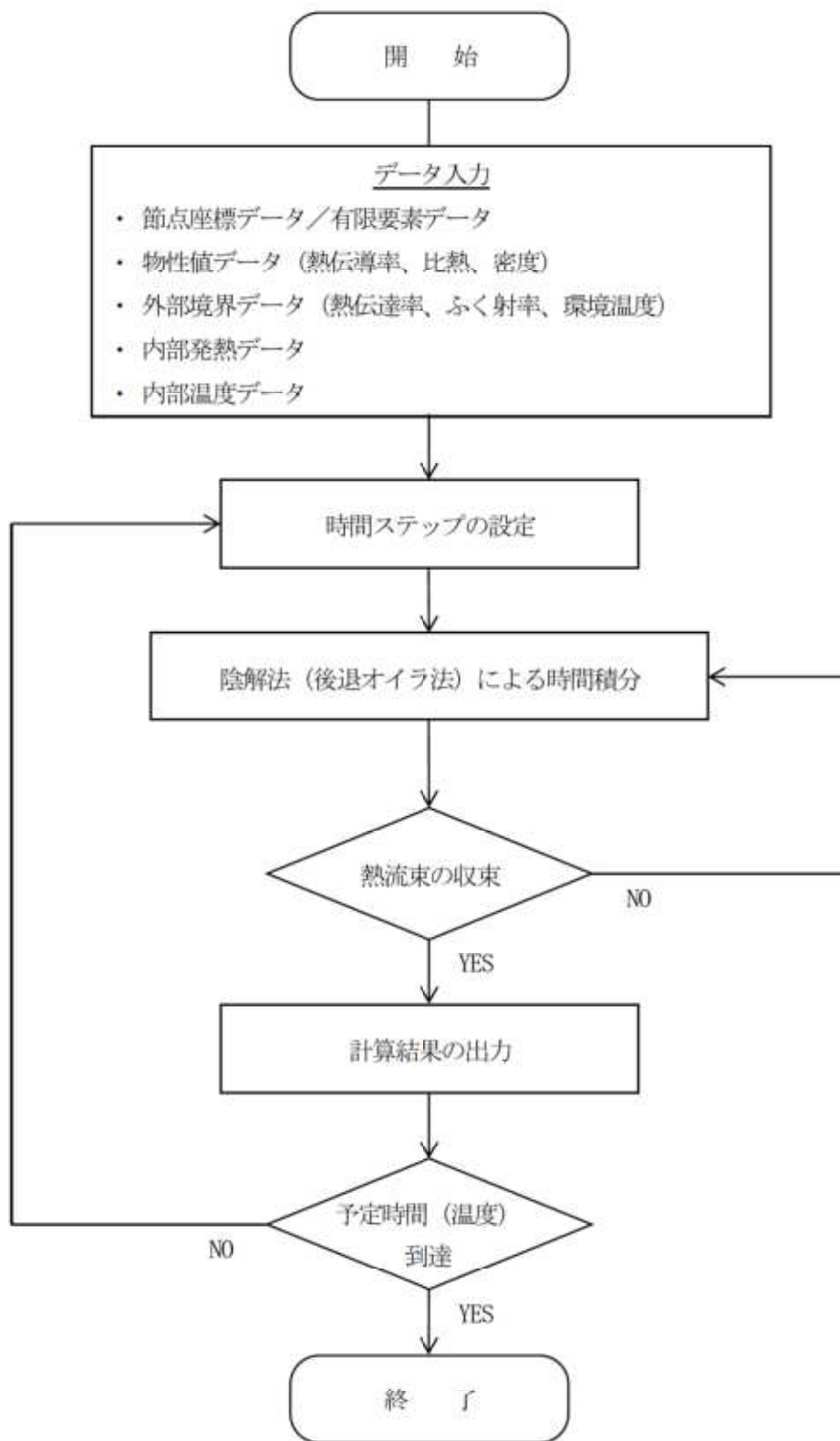
- a) 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b) 一次元から三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c) 初期条件(温度)は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d) 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、熱伝導、対流及びふく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析(構造強度解析)を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。
- e) 構成物質の相変態が考慮できる。

iii 解析フロー

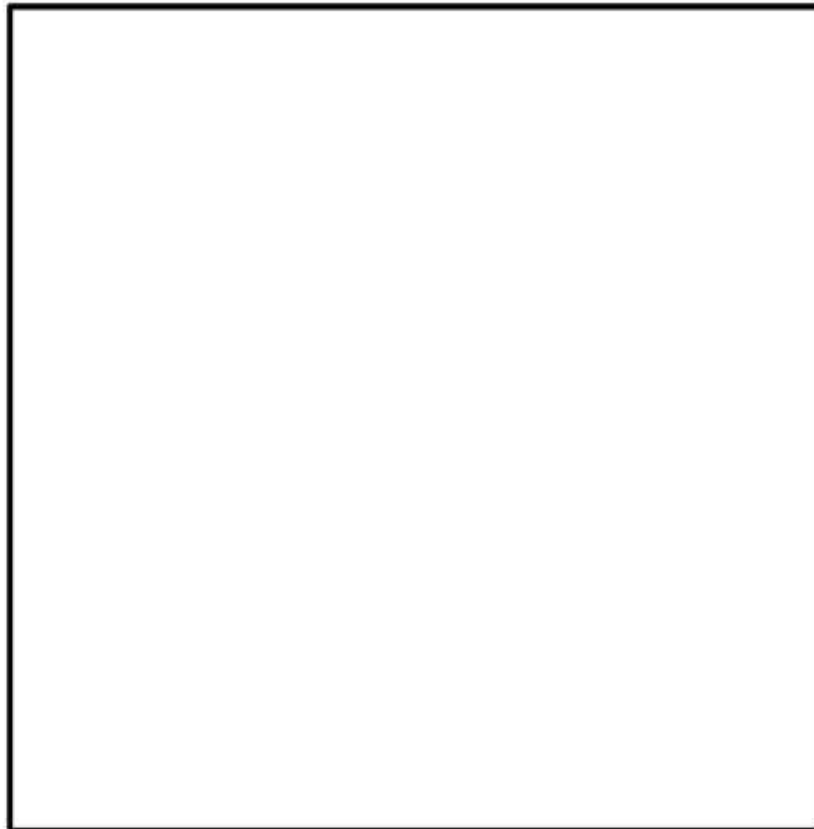
代表的な解析フローを第12図に示す。

iv 使用実績及び検証

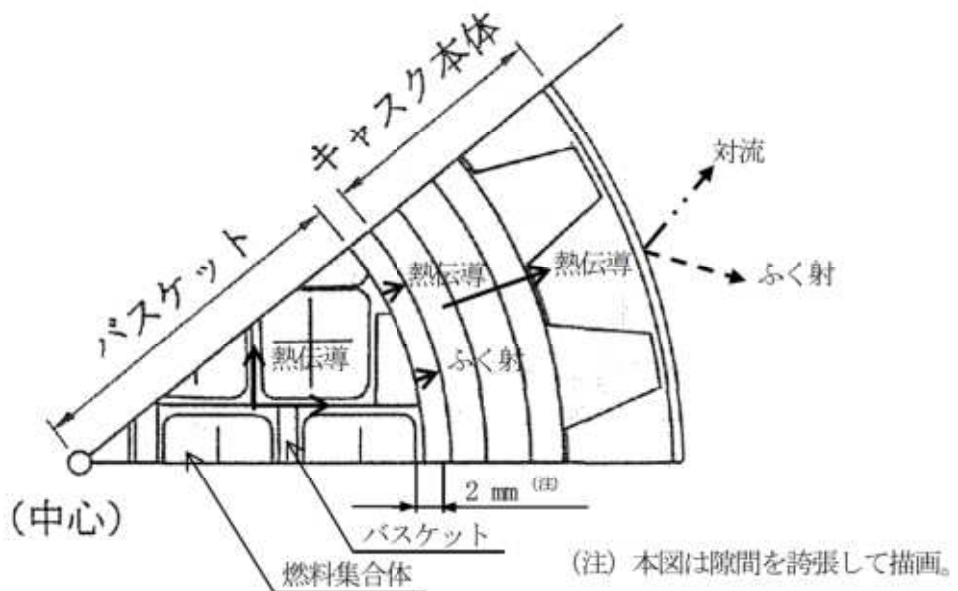
ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、第13図及び第6表に示すように、MSF-28P型と同等の伝熱形態であり、且つ、類似仕様の兼用キャスクの定常伝熱試験に対して、ABAQUSによる解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUSコードの妥当性が検証されている⁽¹⁰⁾。ABAQUSコードの検証例を第14図に示す。



第 12 図 ABAQUS コードの解析フロー図



MSF-28P 型



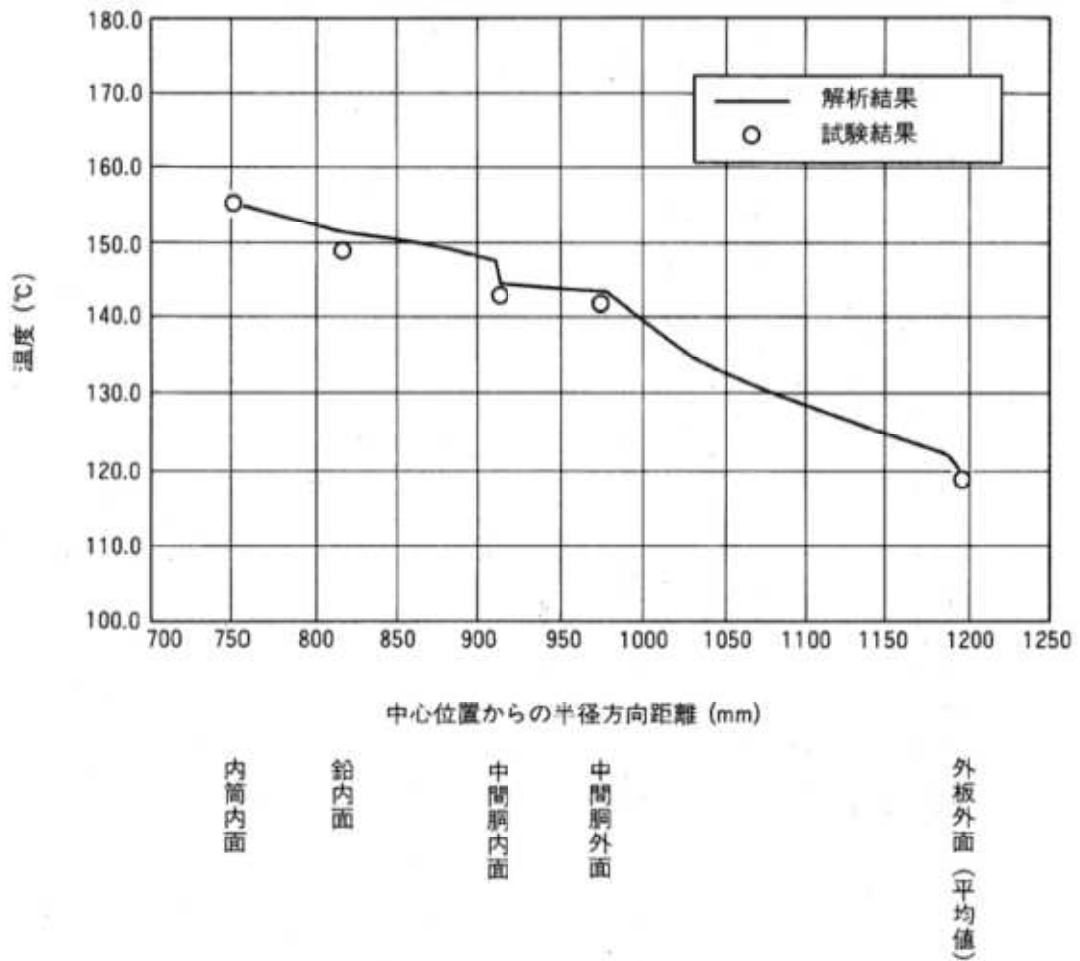
定常伝熱試験に適用した兼用キャスク⁽¹⁰⁾

第 13 図 伝熱形態の比較

第6表 MSF-28P 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-28P 型	定常伝熱試験に適用した兼用キャスク ^(注)
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)	28	21
崩壊熱量 ^(注) (kW)	18.0	23
外径 (mm)	2610	2400
容器の材質	炭素鋼 	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-28P 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, “SIMULIA User Assistance 2018”.
- (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-28P 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。

- ・ 特定兼用キャスク熱解析モデル

- 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（17×17 燃料）

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-28P 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-28P 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。たて置き時には、周囲温度を 50℃、貯蔵建屋壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面へのふく射による放熱を考慮する。また、横置き時には、周囲温度を 45℃、貯蔵建屋壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面へのふく射による放熱を考慮する。

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、

(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最高温度をとるバスケットセル内面の径方向温度分布を設定する。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% (17×17 燃料) 及び $4.0 \pm \square$ wt% (15×15 燃料) を保守的に \square wt% 及び \square wt% とする。

・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。

－横置き時において、外筒外表面の熱伝達率に係数 0.87 (別添 2 を参照) を乗じる。

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 □	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
貯蔵用三次蓋 ^(注2) 外筒	炭素鋼 □	26.85	51.6
		226.85	47.8
		526.85	38.2
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	アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	20	162.1
		125	170.1
		200	173.6
バスケットサポートA	□		
バスケットサポートB			
バスケットサポートC			
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。

(注2) 横置き時のみモデル化する。

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))
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
貯蔵用緩衝体 ^(注2)	—	—	<input type="text"/>
貯蔵架台 ^(注3) ^(注5)	炭素鋼	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
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) 引用文献(1)を参照。ただし、析出硬化系ステンレス鋼は引用文献(4)を参照。


(注2) 横置き時のみモデル化する。

(注3) たて置き時のみモデル化する。

(注4) 熱伝導率の小さい方が、貯蔵用緩衝体からの放熱量が小さくなり、保守側の評価となる。保守側の評価となるよう、貯蔵用緩衝体設計例の熱伝導率を下回る値として設定。

(注5) 熱伝導率の小さい方が、貯蔵架台からの放熱量が小さくなり、保守側の評価となるため、引用文献(1)に記載される炭素鋼（工具鋼を除く）のうち最も熱伝導率の小さい値を設定。

別紙1-2表 MSF-28P型外表面の熱伝達率(1/2) (たて置き時)

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 ^(注1) (W/(m ² ·K))
MSF-28P型外表面 (側面)	垂直円筒	293.15	20	$1.55 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$
MSF-28P型外表面 (上面)	上向き 水平平板	293.15	20	$1.57 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.32 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.12 \times \Delta t^{1/3}$
MSF-28P型外表面 (下部端板)	下向き 水平平板	293.15	20	$0.898 \times \Delta t^{1/5}$
		373.15	100	$0.879 \times \Delta t^{1/5}$
		473.15	200	$0.860 \times \Delta t^{1/5}$
貯蔵架台表面  (注2)	上向き 水平平板	293.15	20	$1.57 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.32 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.12 \times \Delta t^{1/3}$

(注1) 熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

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

$$h = 0.13 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/3} \quad (\text{上向き水平平板})^{(1)}$$

$$h = 0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times D^3 \times Pr \right)^{1/5} \quad (\text{下向き水平平板})^{(1)}$$

- 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)
 D : 代表長さ (m)
 Pr : プラントル数 (-)
 ν : 動粘性係数 (m²/s)

(注2)

別紙 1-2 表 MSF-28P 型外表面の熱伝達率 (2/2) (横置き時)

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 (注1) (W/(m ² ·K))
MSF-28P 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-28P 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	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$
貯蔵用緩衝体外表面 (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	$0.863 \times \Delta t^{1/3}$
貯蔵用緩衝体外表面 (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。

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

$$h = 0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \text{Pr} \right)^{1/3} \quad (\text{垂直平板}) \quad (5)$$

- 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)

別紙1-3表 ふく射率

構成部材	材料	ふく射率 ^(注3)
胴 (内面)	アルミニウム (酸化面)	0.33 ⁽⁶⁾
一次蓋 二次蓋	ニッケル (めっき面)	0.11 ⁽⁶⁾
バスケットプレート	アルミニウム合金	0.055 ⁽⁷⁾
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	0.2 ⁽³⁾⁽⁶⁾
外筒 (外表面) 胴 (外表面) 貯蔵建屋壁面 貯蔵用三次蓋 ^(注1)	塗装	0.8 ^{(1)(注2)}
貯蔵用緩衝体 (外表面) ^(注1)	ステンレス鋼	0.15 ⁽⁷⁾
バスケットサポートA		
バスケットサポートB		
バスケットサポートC		

(注1) 横置き時において使用する。

(注2) 塗装のふく射率の設定根拠は別添3を参照。

(注3)

別紙 1-4 表 全体モデルの境界条件 (1/2) (たて置き時)

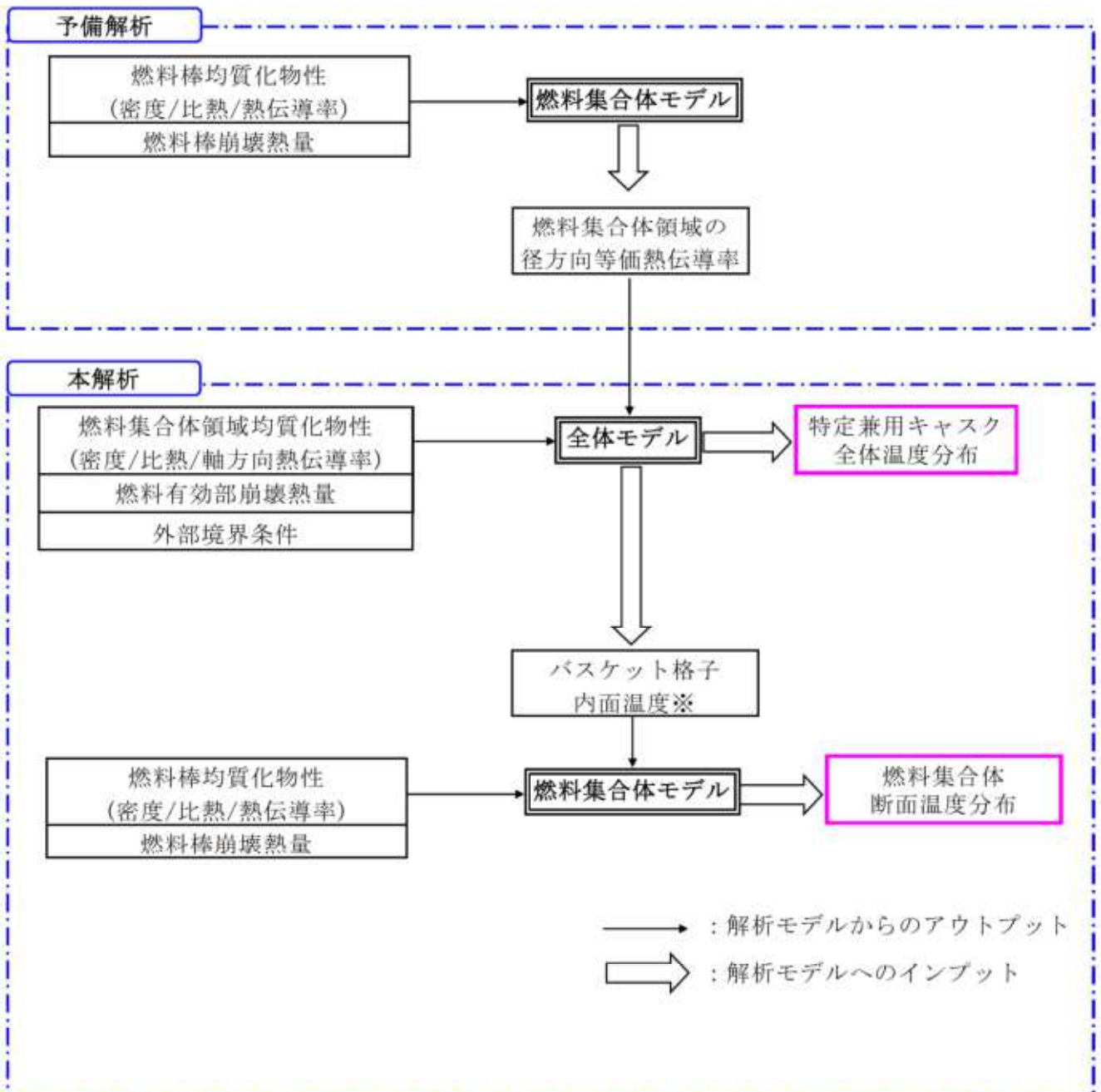
項目	境界条件
周囲温度	50℃
貯蔵建屋壁面温度	65℃
MSF-28P 型表面から貯蔵建屋内壁面 への形態係数 ^(注1)	0.211
MSF-28P 型表面及び貯蔵建屋壁面 ふく射率	別紙 1-3 表による
MSF-28P 型表面熱伝達率 (側面、上面、下部端板)	別紙 1-2 表による
底部熱移動	貯蔵架台への伝熱及び貯蔵架台 からの放熱を考慮

(注1) 特定兼用キャスク配列ピッチ寸法 3.5m から算出される値 (別添 4 参照)。

別紙 1-4 表 全体モデルの境界条件 (2/2) (横置き時)

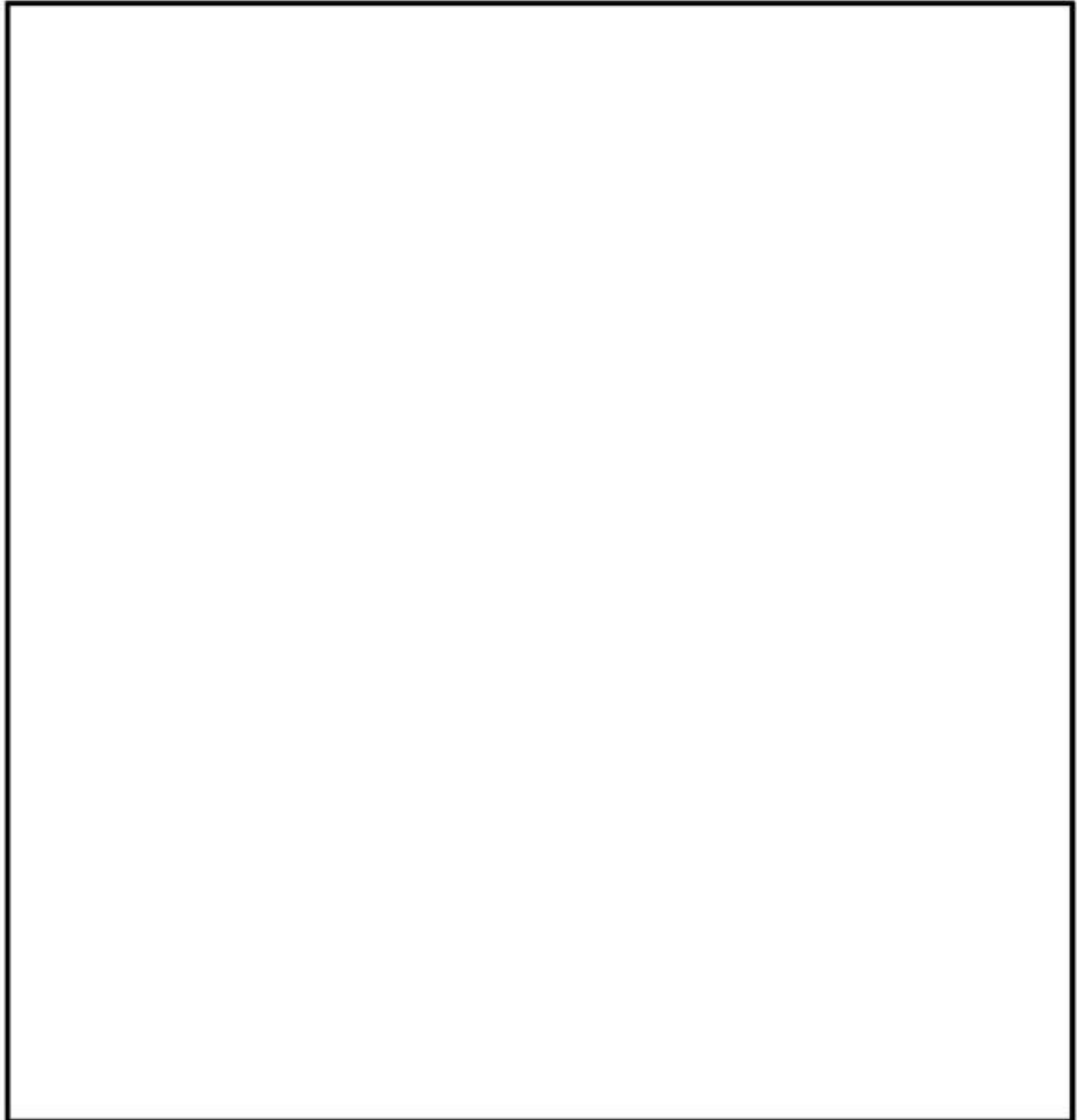
項目	境界条件
周囲温度	45℃
貯蔵建屋壁面温度	65℃
MSF-28P 型表面から貯蔵建屋内壁面 への形態係数 ^(注1)	外筒 (水平円筒面) : 0.676 貯蔵用緩衝体 (水平円筒面) : 0.637 貯蔵用緩衝体 (垂直面) : 0
MSF-28P 型表面及び貯蔵建屋壁面 ふく射率	別紙 1-3 表による
MSF-28P 型表面熱伝達率 (側面、上面、下部端板)	別紙 1-2 表による

(注1) 貯蔵建屋内に複数の特定兼用キャスクが設置されることを想定し、保守的に
特定兼用キャスク同士が最も接近するとして算出した値 (別添 5 参照)。



※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



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) M. Jakob, “Heat Transfer. Volume 1”, John Wiley & Sons, Inc., (1949).
- (6) J. R. Howell, R. Siegel, “Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition”, Taylor & Francis Group, (2011).
- (7) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975).

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 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。

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

ここで、

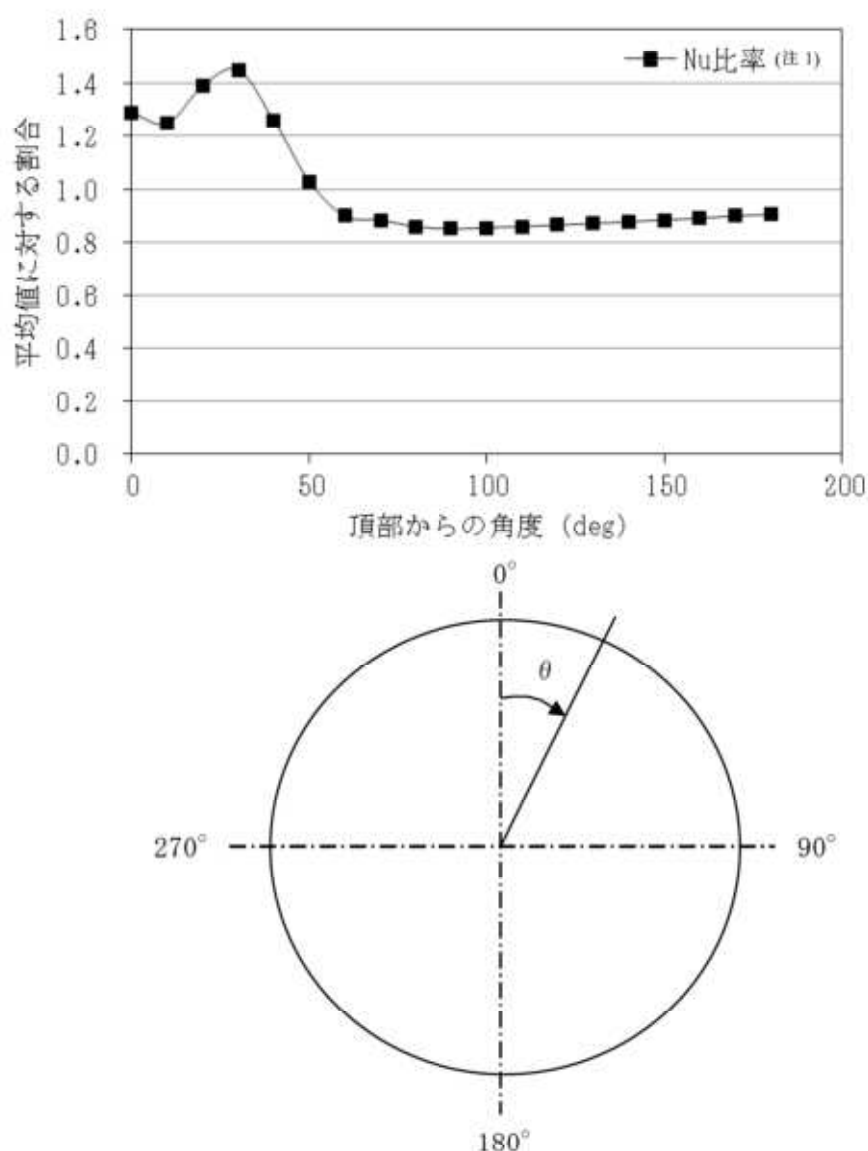
- λ_f : 径方向等価熱伝導率 (W/(m・K))
- q : 使用済燃料集合体の PF 最大領域における単位体積崩壊熱量 (W/m³)
- W : 燃料集合体領域外寸 (m)
- K : 係数 (-)
- T_1 : 燃料棒最高温度 (K)
- T_2 : バスケットプレート又は中性子吸収材内面温度 (K)

燃料集合体モデルを用いて、 T_2 を 300.15K (27℃)、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。

水平円筒の自然対流熱伝達率に乗じる係数

別紙 1-2 表「MSF-28P 型外表面の熱伝達率 (2/2)」に示す水平円筒の自然対流熱伝達率には、別添 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（別添 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。



別添 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）。

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）、胴（外表面）及び貯蔵用三次蓋である。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 3-1 表に示す。なお、実測値は MSF-28P 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-28P 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 3-1 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 ⁽¹⁾ （注 1）	0.8	0.93 ^(注 2)

（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-28P 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。

形態係数（たて置き時）の算出過程

別紙 1-4 表「全体モデルの境界条件(1/2)」において設定している、たて置き時の特定兼用キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数は、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る。以下に、この形態係数の算出過程を示す。

はじめに、別添 4-1 図の兼用キャスクの貯蔵配置に示すように、中心に配置された対象の特定兼用キャスク（以下「対象キャスク」という。）の周囲の兼用キャスク（以下「周囲キャスク」という。）で囲まれた空間（一辺が 2W の正方形の空間）のうち、周囲キャスクを除く面積（別添 4-1 図の灰色のエリア）の等価断面半径 R_2 を①式で求める。

$$R_2 = \sqrt{4W^2 / \pi - 3 \times R_1^2} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$



別添 4-1 図 兼用キャスクの貯蔵配置

続いて、兼用キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数を算出する。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基準:2013」の付属書 AT に基づき、円環フィン形状の形態係数を求める式を適用する。算出式及び各ふく射面の定義をそれぞれ②式から⑧式及び別添 4-2 図に示す。ここで、周囲キャスクの長さを L とし、b に R_3 を、a に R_2 を、c に L を代入して、2 面より 3 面への形態係数 F_{23} を求める。形態係数の算出条件及び結果を別添 4-1 表に示す。

$$\begin{cases} A_n \cdot F_{nk} = A_k \cdot F_{kn} \\ \sum_n F_{kn} = 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots ②$$

n=1, 2, 3, …M

ここで、

A_n : n 面の面積 (m²)

F_{kn} : k 面より n 面への形態係数 (-)

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left\{ \sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left[\frac{B}{XA} \right] + B \sin^{-1} \left[\frac{1}{X} \right] - \frac{\pi A}{2} \right\} \right] \dots\dots ③$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left[\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right]$$

$$- \frac{Y}{2\pi X} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left\{ \frac{4(X^2-1) + (Y^2/X^2)(X^2-2)}{Y^2 + 4(X^2-1)} \right\} \right.$$

$$\left. - \sin^{-1} \left[\frac{X^2-2}{X^2} \right] + \frac{\pi}{2} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} - 1 \right] \right] \dots\dots\dots ④$$

$$F_{13} = 1 - F_{12} - F_{11} \dots\dots\dots ⑤$$

$$F_{21} = F_{12} \times \frac{A_1}{A_2} \dots\dots\dots ⑥$$

$$F_{22} = 0 \dots\dots\dots ⑦$$

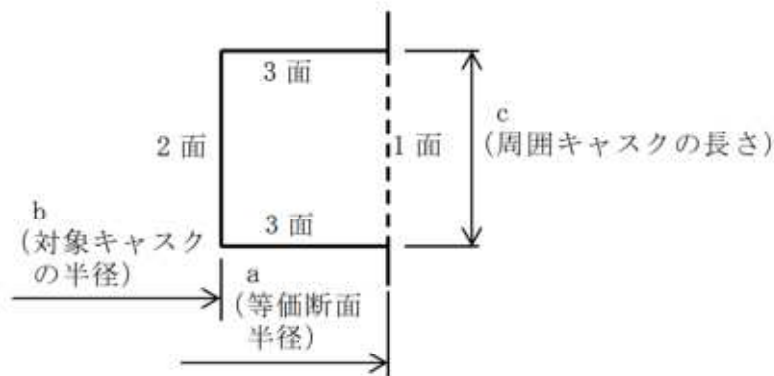
$$F_{23} = 1 - F_{21} - F_{22} \dots\dots\dots ⑧$$

ここに、 $X = a/b$

$$Y = c/b$$

$$A = X^2 + Y^2 - 1$$

$$B = Y^2 - X^2 + 1$$



別添 4-2 図 各ふく射面の定義

別添 4-1 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)	3.183
		b (R_3)	1.305
		c (L)	6
		W	3.5
	係数 (-)	X	2.44
		Y	4.60
		A	26.09
		B	16.19
	面積 (m ²)	A_1	119.99
		A_2	49.20
	算出結果	1面の形態係数 (-)	F_{11}
F_{12}			0.324
F_{13}			0.309
2面の形態係数 (-)		F_{21}	0.789
		F_{22}	0.000
		F_{23}	0.211

形態係数（横置き時）の算出過程

別紙 1-4 表「全体モデルの境界条件(2/2)」において設定している、MSF-28P 型表面から貯蔵建屋壁面への形態係数の算出過程を以下に示す。

1. 特定兼用キャスクの貯蔵配置条件

形態係数算出における特定兼用キャスクの貯蔵配置条件は、限定せず汎用性を持たせるため、最も保守側の評価となるよう、別添 5-1 図に示すとおり、特定兼用キャスク同士が最も接近する配置条件とした。

2. 形態係数の算出

MSF-28P 型表面を外筒（水平円筒面）、貯蔵用緩衝体（水平円筒面）及び貯蔵用緩衝体（垂直面）の領域に分け、各面から建屋壁面への形態係数を算出した。

(1) 外筒（水平円筒面）及び貯蔵用緩衝体（水平円筒面）

別添 5-2 図の概念図に示すとおり、特定兼用キャスク 1 の水平円筒面からのふく射全量のうち、両隣の特定兼用キャスク 2 へのふく射量を除いた分が建屋壁面（天井及び床面）3 へのふく射量となるため、外筒（水平円筒面）及び貯蔵用緩衝体（水平円筒面）から建屋壁面への形態係数は、式①を用いて算出した。算出条件及び結果を別添 5-1 表に示す。

$$F_{13} = 1 - 2 \times F_{12} \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

ここで、

F_{13} : 外筒（水平円筒面）又は貯蔵用緩衝体（水平円筒面）から建屋壁面への形態係数。

F_{12} : 外筒（水平円筒面）又は貯蔵用緩衝体（水平円筒面）から周囲の特定兼用キャスクへの形態係数。平行に配置された円柱（ A_1 、 A_2 ）間の形態係数の式（式②）^(注)より算出。

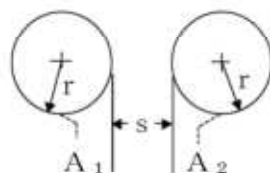
$$F_{12} = \frac{1}{\pi} \left[\sqrt{X^2 - 1} + \sin^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - X \right] \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

ここで、

$$X = 1 + \frac{s}{2r} \quad \dots \dots \textcircled{3}$$

s : 評価対象の特定兼用キャスクと周囲の特定兼用キャスクとの間隔（mm）

r : 評価対象の特定兼用キャスク及び周囲の特定兼用キャスクの円筒面半径（mm）

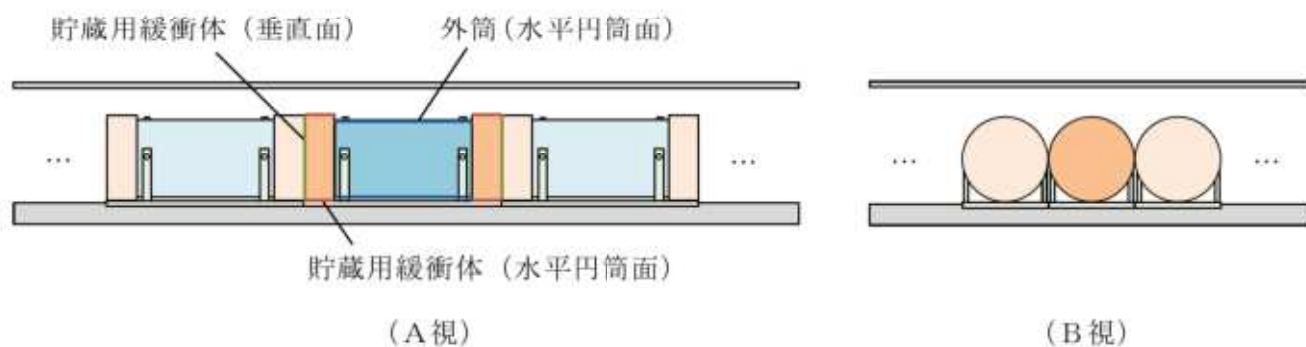
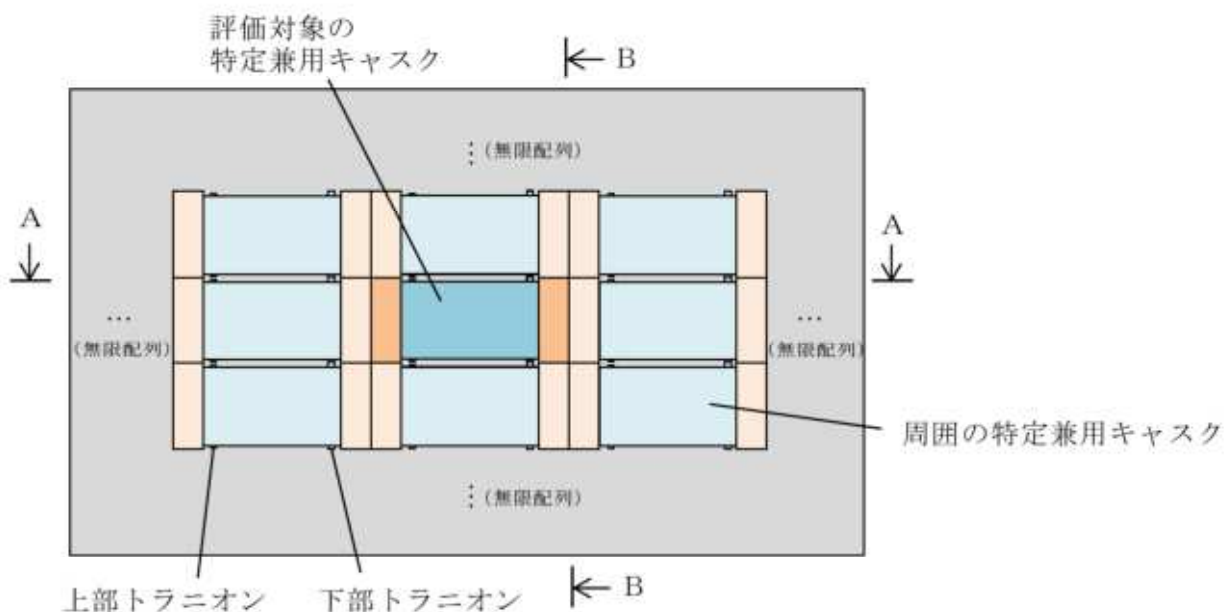


(注) 出典は以下による。

J. R. Howell, and R. Siegel, "THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER FIFTH EDITION", Taylor & Francis Group, (2011).

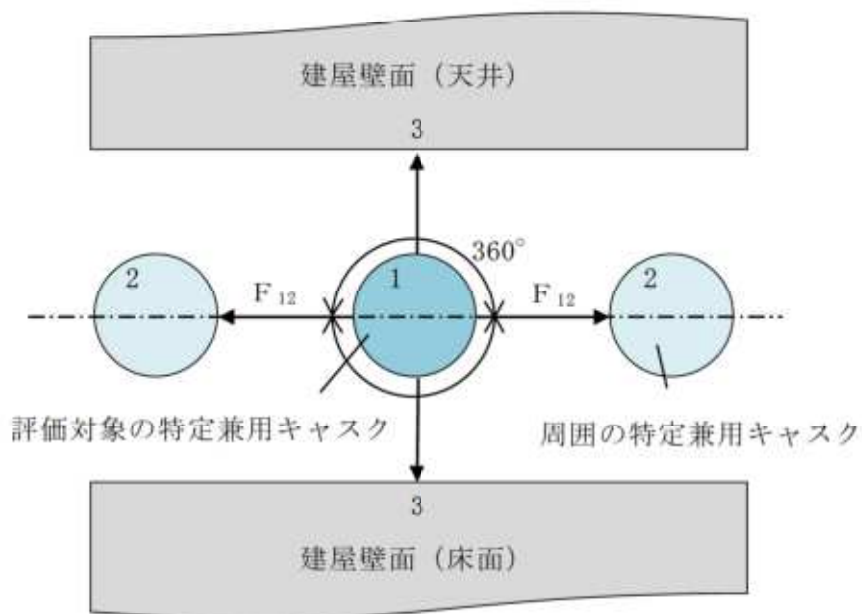
(2) 貯蔵用緩衝体（垂直面）

貯蔵用緩衝体（垂直面）から建屋壁面への形態係数は、貯蔵用緩衝体（垂直面）が周囲の特定兼用キャスクと完全に接する配置条件（別添5-1図参照）としているため、0とした。



注) 貯蔵施設において、特定兼用キャスク同士は間隔をあけて設置されるが、本申請では配置条件を限定しない。そこで、本図に示すとおり、外筒（水平円筒面）の形態係数算出時には、特定兼用キャスク同士が最も接近する（下部トラニオンが接触する）条件とし、また、貯蔵用緩衝体（水平円筒面）及び貯蔵用緩衝体（垂直面）の形態係数算出時には、貯蔵用緩衝体同士が接触する条件とした。MSF-28P 型同士の配置がこれ以上接近することはなく、形態係数算出において本条件が最も保守側となる。

別添 5-1 図 形態係数算出における特定兼用キャスクの貯蔵配置条件



別添5-2図 特定兼用キャスク水平円筒面から建屋壁面への形態係数概念図

別添5-1表 形態係数の算出条件及び結果

項目		外筒 (水平円筒面)	貯蔵用緩衝体 (水平円筒面)
算出条件	形状 (mm)	s	220
		r	1305
	係数 (-)	X	1.084
		F_{12}	0.1619
算出結果		F_{13}	0.637

(注) 式③において、sを0とするため、貯蔵用緩衝体半径 (r) によらず、Xの値は一定 (X=1) となる。

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 2-1 表に示す。

別紙 2-1 表 設計基準値における引用文献の記載内容 (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	<ul style="list-style-type: none"> ・(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). 	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<input type="checkbox"/> (蓋部中性子遮蔽材カバー) [炭素鋼] ・<input type="checkbox"/> (外筒、貯蔵用三次蓋) [炭素鋼] ・<input type="checkbox"/> (下部端板、底部遮蔽材カバー) [ステンレス鋼] ・SUS630 (トラニオン) [析出硬化系ステンレス鋼] ・<input type="checkbox"/> (胴、一次蓋、二次蓋) [炭素鋼] ・<input type="checkbox"/> (蓋ボルト) [ニッケルクロムモリブデン鋼]
2	<ul style="list-style-type: none"> ・BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1986). 	<p>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。</p>
3	<ul style="list-style-type: none"> ・(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). 	<ul style="list-style-type: none"> ・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。
4	<ul style="list-style-type: none"> ・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). 	<p>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 (MB-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。</p>
5	<ul style="list-style-type: none"> ・(一財)日本規格協会,「圧力容器の設計 (JIS B 8267:2015)」, (2015). 	<p>-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。</p>

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	
	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
6	<p>・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)。</p>	<p>・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。</p> <p>・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。</p> <p>・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。</p>