

補足説明資料 26-3

26 条

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備

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 | 34 |
| 4. 参考文献 | 42 |

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

別紙3 型式証明申請及び先行設工認における除熱評価との差異について

1. 要求事項

型式設計特定機器の型式指定申請において、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) 技術基準規則要求事項

a. 技術基準規則第 26 条第 2 項二号

燃料体等を貯蔵する設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。

二 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。

b. 技術基準規則解釈第26条第10項

第 2 項第 2 号に規定する「燃料体等が溶融しないものであること」とは、設計計算により、燃料が溶融しないことを確認された冷却能力を有すること。

(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) 技術基準規則への適合性

MSF-24P(S)型の除熱機能については、以下のとおり技術基準規則に適合している。

a. 技術基準規則第26条第2項二号

燃料体等を貯蔵する設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。

二 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。

b. 技術基準規則解釈第26条第10項

第2項第2号に規定する「燃料体等が溶融しないものであること」とは、設計計算により、燃料が溶融しないことを確認された冷却能力を有すること。

MSF-24P(S)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伝導、対流、ふく射により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。

MSF-24P(S)型内部のバスケットは、アルミニウム合金製のバスケットプレート、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材等により構成され、必要な伝熱性能を確保する。側部中性子遮蔽材部には除熱を促進するための銅製の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。

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-24P(S)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-24P(S)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

MSF-24P(S)型の除熱機能に関する評価は、収納する使用済燃料の種類、燃焼度、冷却期間等の条件を基に、除熱評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで求めた使用済燃料の崩壊熱量及び使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納配置を考慮する。

さらに、MSF-24P(S)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-24P(S)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、以下に示す事項については、型式指定申請の範囲外（設工認時に別途確認）である。

- ・MSF-24P(S)型に使用済燃料集合体を収納するに当たっては、特定兼用キャスクの臨界防止機能に関する評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないような措置、並びに、特定兼用キャスクの遮蔽機能及び除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないような措置が講じられること。
- ・MSF-24P(S)型を貯蔵建屋内で貯蔵する場合において、貯蔵建屋は、特定兼用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。
- ・MSF-24P(S)型を貯蔵する場合において、特定兼用キャスク周囲温度が、45℃以下であること。また、貯蔵建屋内で貯蔵する場合において、貯蔵建屋壁面温度が、65℃以下であること。さらに、貯蔵建屋内の周囲温度が異常に上昇しないことを監視できること。

(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-24P(S)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

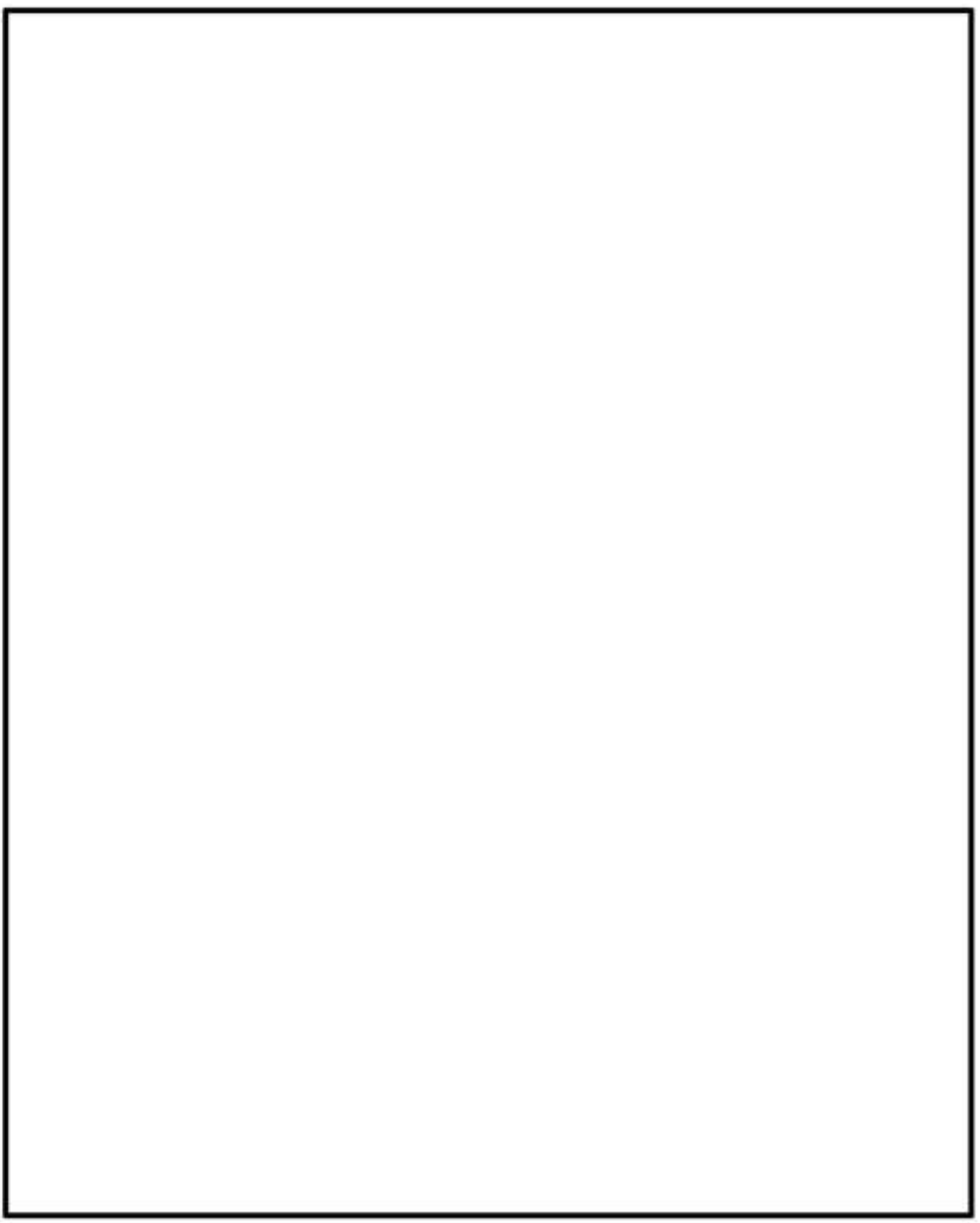
MSF-24P(S)型は、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により MSF-24P(S)型の外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。特定兼用キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いられているため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。MSF-24P(S)型の除熱構造図を第1図に示す。

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）。

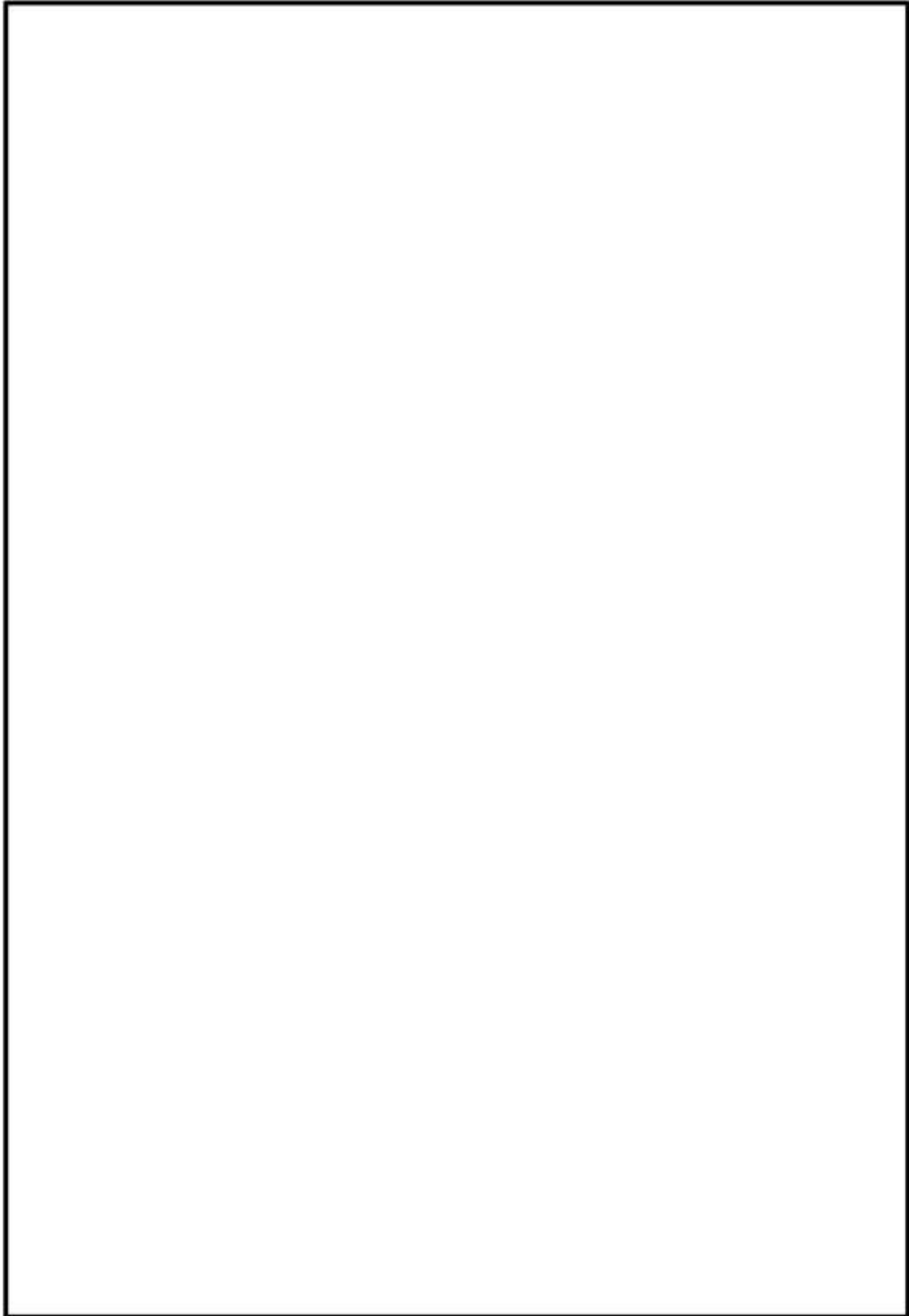
- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射によりバスケット

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伝えられる。また、貯蔵建屋内で貯蔵する場合は、特定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"> ・ 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 : アルミニウム合金 ・ 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 |

第1図 MSF-24P(S)型の除熱構造



第 2 図 MSF-24P(S) 型の伝熱形態

(2) 除熱機能に関する評価

MSF-24P(S)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)。

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

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) 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) 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(S)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、MSF-24P(S)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) | | | | | | | | |
| | 冷却期間 (年以上) | | | | | | | | |
| 特定兼用キャスク1基当たりの仕様 | 収納体数 (体) | 24 | | | | 24 | | | |
| | 平均燃焼度 (MWd/t 以下) | | | | | | | | |
| | 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) | [Redacted] | | | |
| | 平均燃焼度 (MWD/t) | | | | |
| | 比出力 (MW/t) | | | | |
| | 照射期間 (日) | | | | |
| | 濃縮度 (%) (注1) | | | | |
| | 冷却期間 (年) | | | | |
| | ウラン質量 (kg) | | | | |
| | (上部) | | | | |
| ピーキングファクター (注2) | | | | | |
| (下部) | | | | | |
| 計算結果 | 使用済燃料集合体 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 | | | |
| | 特定兼用キャスク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


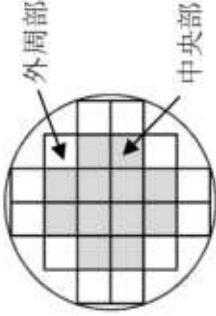
| 使用済燃料集合体の種類 | | 15×15 燃料 | | | |
|-----------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 48,000Mwd/t 型 | | 39,000Mwd/t 型 | |
| | | A型 | B型 | A型 | B型 |
| 計算条件 | 最高燃焼度 (MWD/t) | [Blank Box] | | | |
| | 平均燃焼度 (MWD/t) | | | | |
| | 比出力 (MW/t) | | | | |
| | 照射期間 (日) | | | | |
| | 濃縮度 (%) (注1) | | | | |
| | 冷却期間 (年) | | | | |
| | ウラン質量 (kg) | | | | |
| | (上部) | | | | |
| ピーキングファクター (注2) | | | | | |
| (下部) | | | | | |
| 計算結果 | 使用済燃料集合体 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 | | | |
| | 特定兼用キャスク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 | |
| 収納物仕様 | 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) 48,000MWd/t型 (A型) | |
| | 燃料集合体 1体の仕様 | 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) | ≤4.2 | |
| | バーナブル ポイズン集合体 の仕様 | 冷却期間 (年) |  | |
| | | 最高燃焼度 (GWd/t) | | |
| | 冷却期間 (年) | | | |
| 平均燃焼度 (GWd/t) | | | | |
| 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、MSF-24P(S)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。

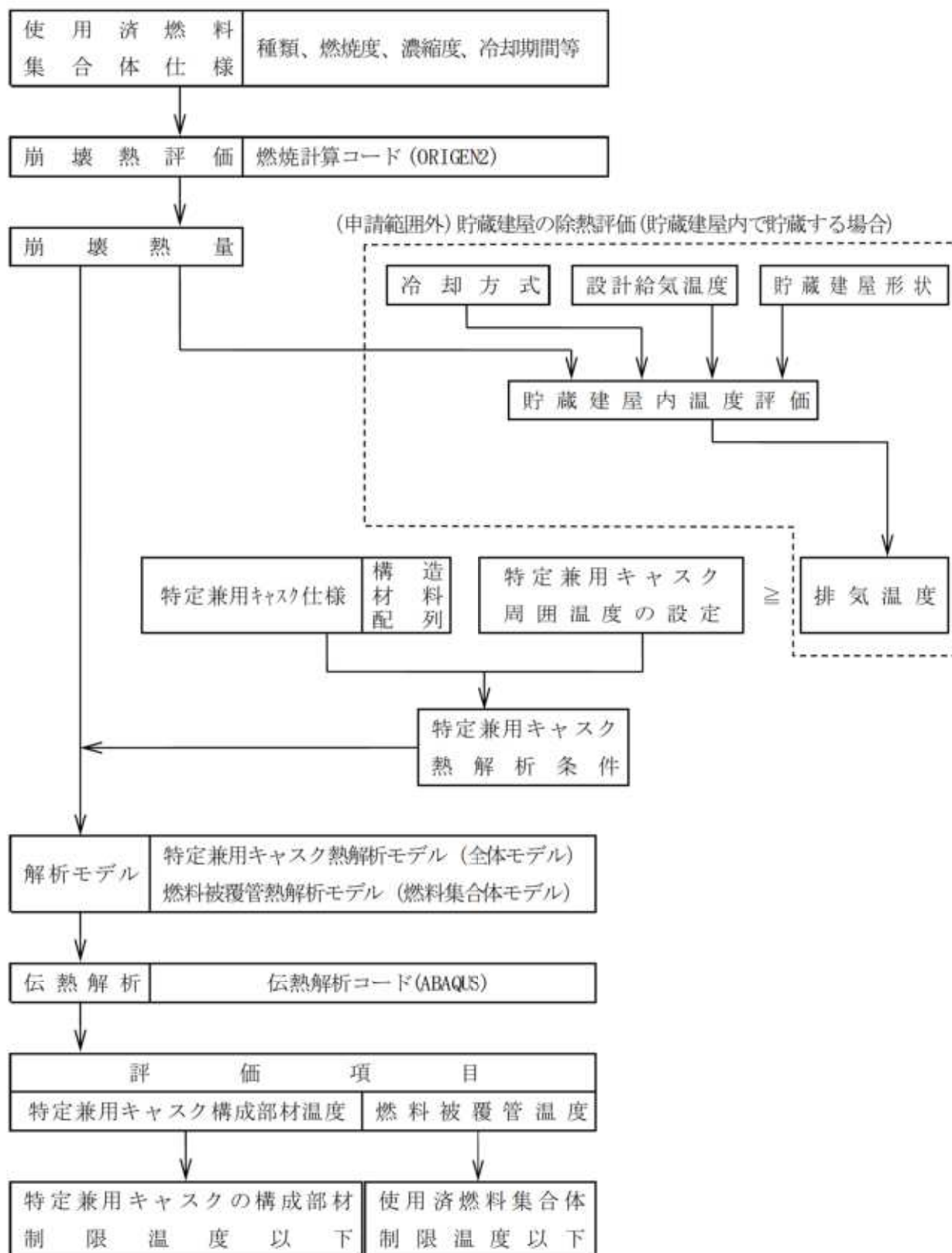
第3表(2/2) 除熱解析における収納物条件概要

| 項目 | | 15×15 燃料 | | |
|-------|-------------------------|---|--|-----|
| | | キヤスク収納位置制限 | 解析条件 | |
| | | 中央部 | 外周部 | |
| 収納物仕様 | 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) | |
| | 燃料集合体 1体の仕様 | 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) 冷却期間 (年) | 48,000MWd/t型 (A型) 48,000MWd/t型 (A型) | |
| | バーナブル ボイズン集合体 の仕様 | 最高燃焼度 (GWd/t) | [] | [] |
| | | 冷却期間 (年) | | |
| | | 平均燃焼度 (GWd/t) | | |
| | MSF-24P(S)型 1基当たりの仕様 | 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、MSF-24P(S)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) バーナブルボ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. 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-24P(S)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。

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燃料及び15×15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。貯蔵用緩衝体は申請範囲外であるが、特定兼用キャスク及び使用済燃料の温度を保守的に評価するために、特定兼用キャスクの上部及び下部には、型式指定申請書 添付書類13「外運搬規則第六条若しくは第七条及び第十一条に定める技術上の基準（容器に係るものに限る。）への適合性に関する説明書」の「(ロ)章B 熱解析」に示す熱解析モデルにおいてモデル化した、原子力発電所から再処理工場に輸送する時に装着する輸送用の緩衝体をモデル化する。

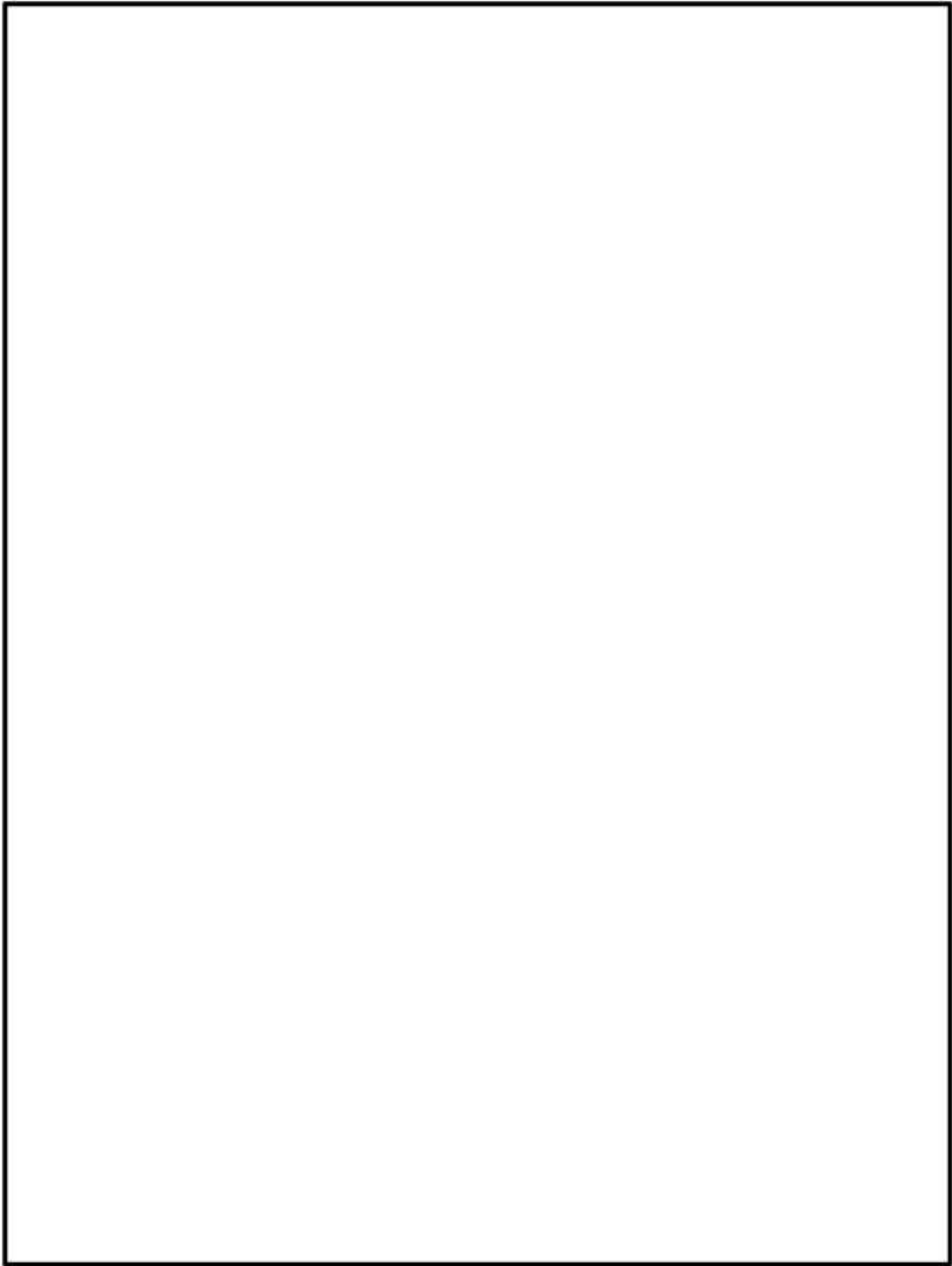
各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

- ・ 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

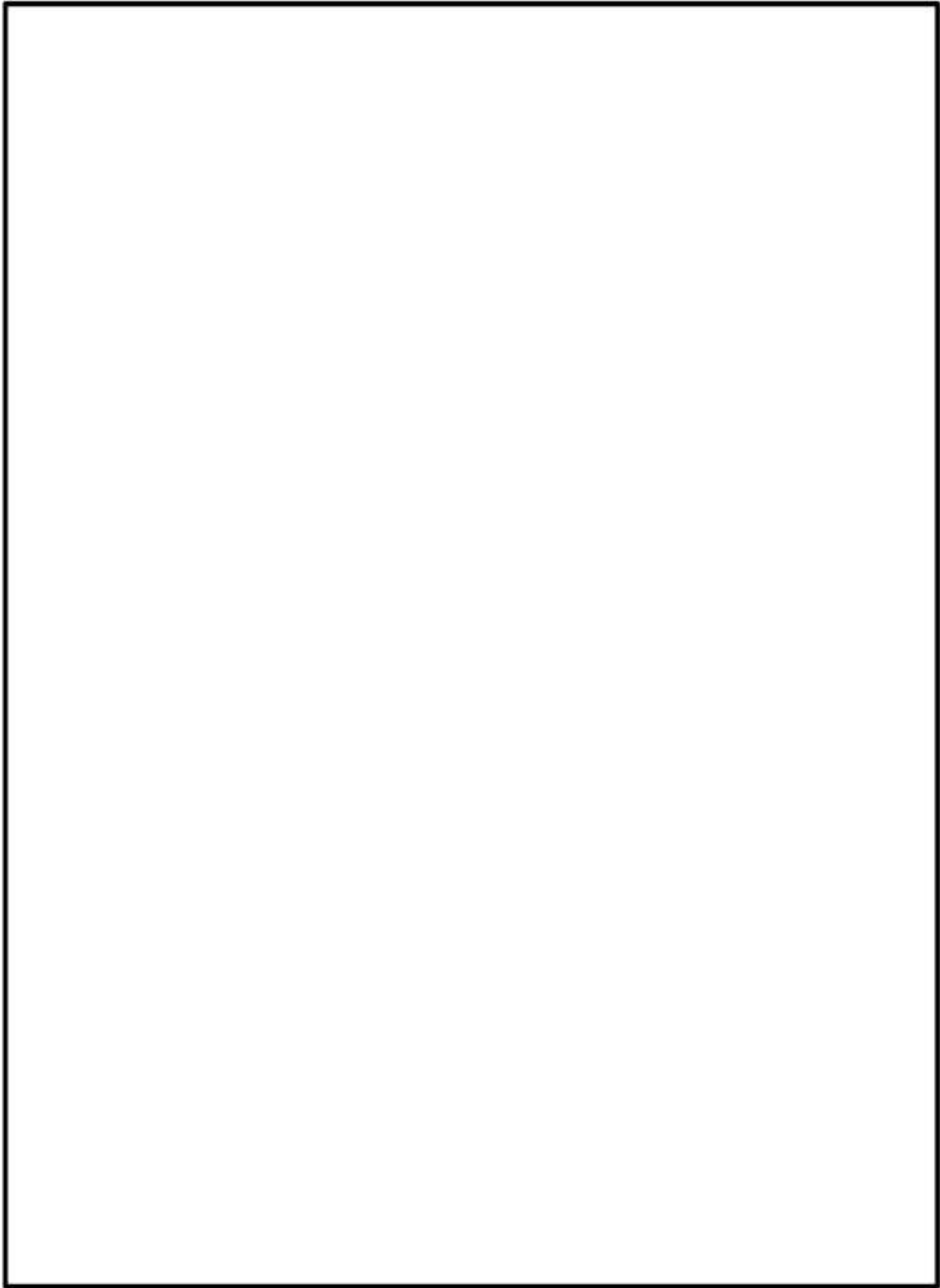
MSF-24P(S)型周囲の環境として、以下の条件を用いる。

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



(単位: mm)

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



(単位: mm)

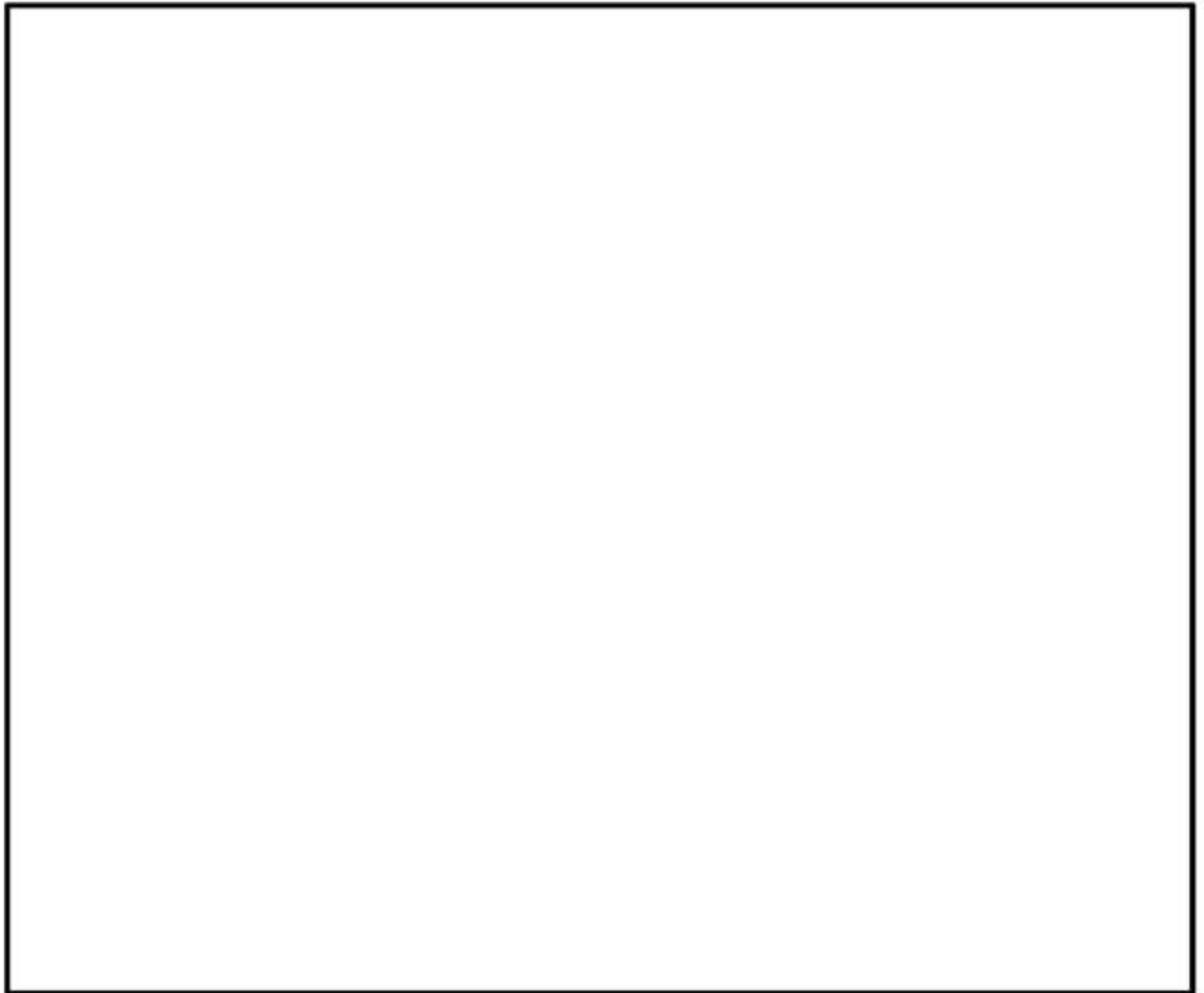
第 5 図 (2/2) MSF-24P(S) 型全体モデル形状図 (縦断面図)
(15×15 燃料収納時)



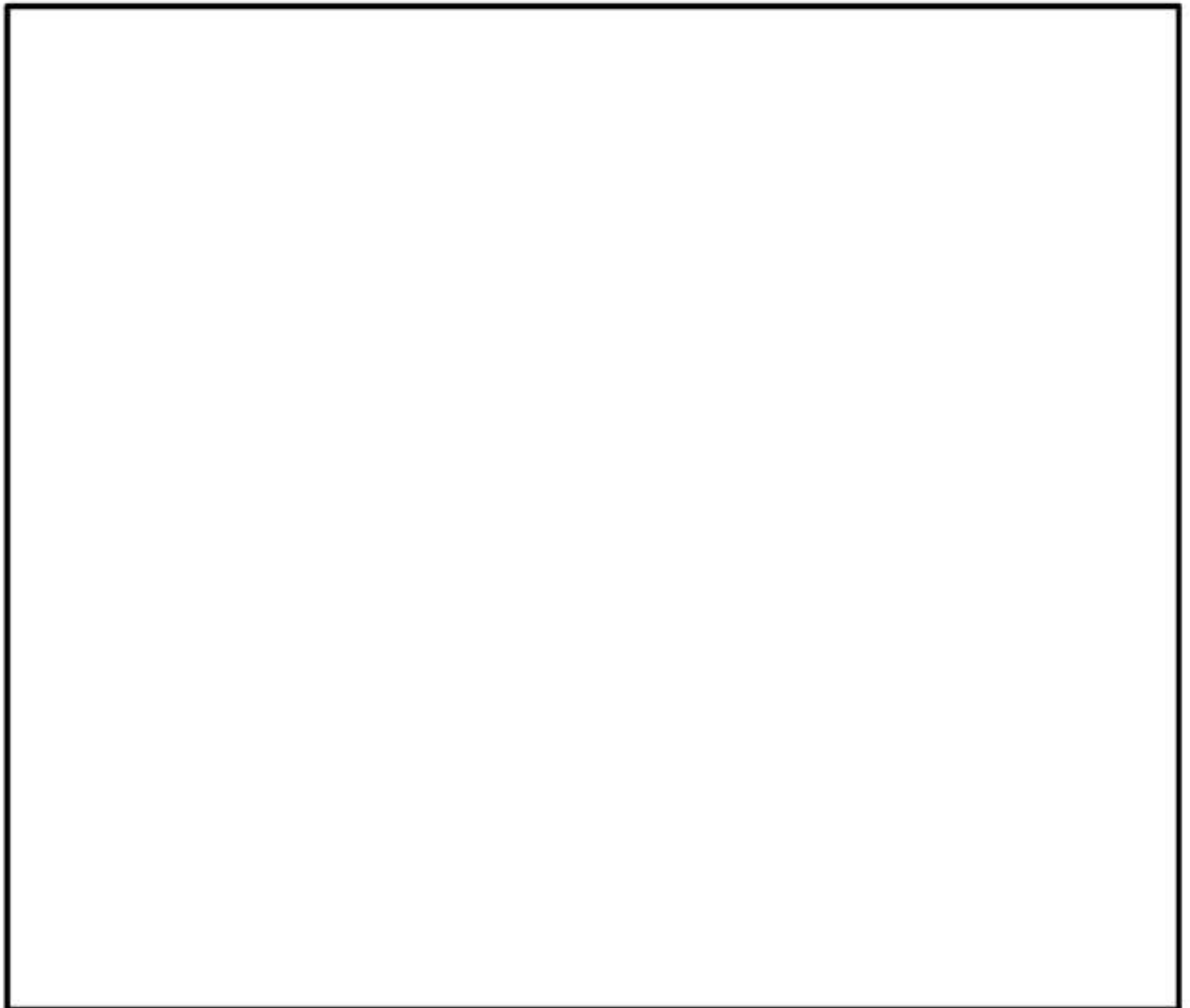
(単位：mm)

(注) 17×17 燃料収納時と 15×15 燃料収納時に差異はない。

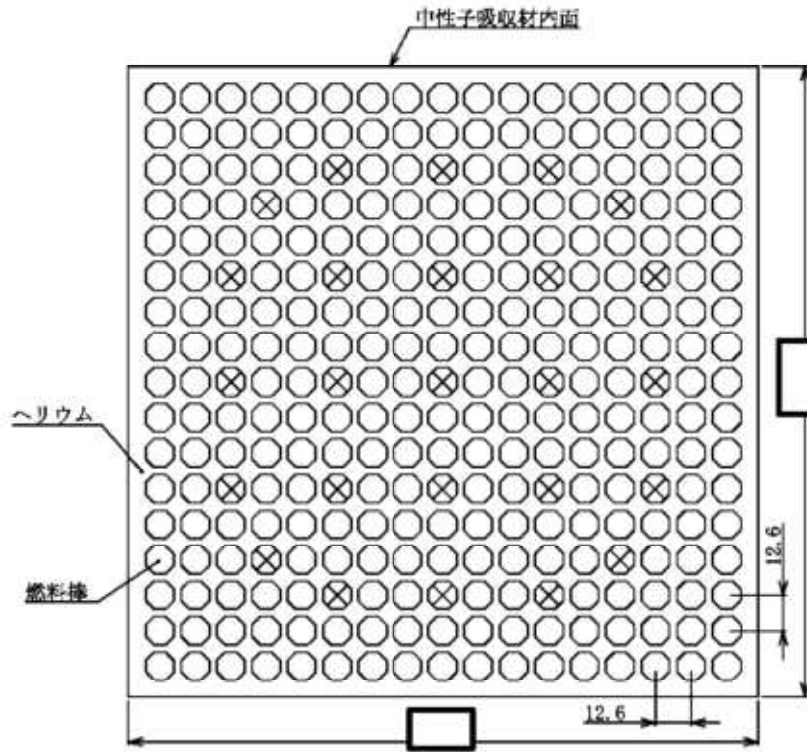
第 6 図 MSF-24P(S)型全体モデル形状図 (横断面図)



第7図(1/2) MSF-24P(S)型全体モデル要素分割図
(17×17 燃料収納時)



第7図(2/2) MSF-24P(S)型全体モデル要素分割図
(15×15燃料収納時)



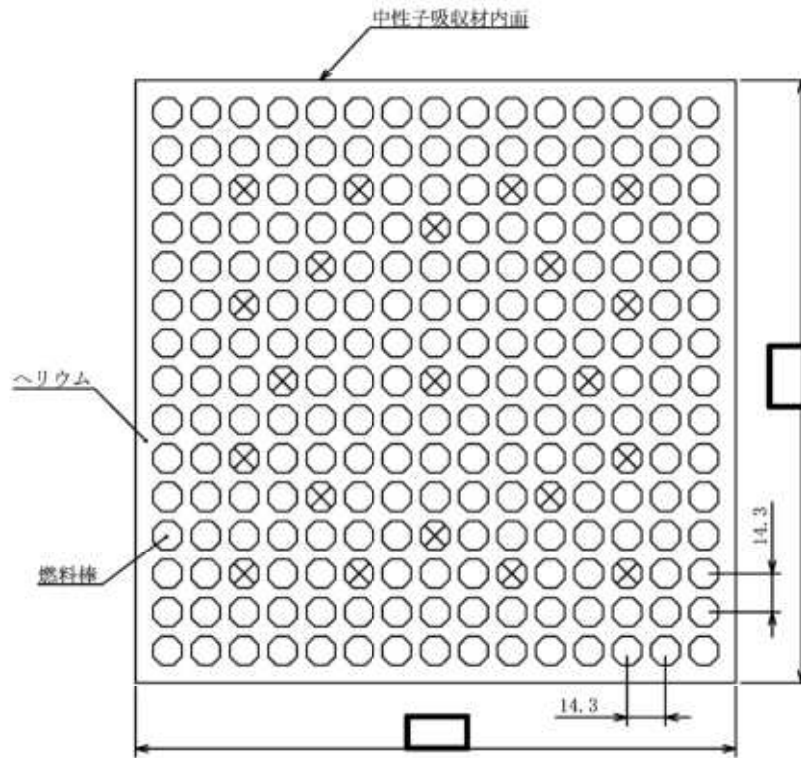
(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。
(形状図)

(単位：mm)



(要素分割図)

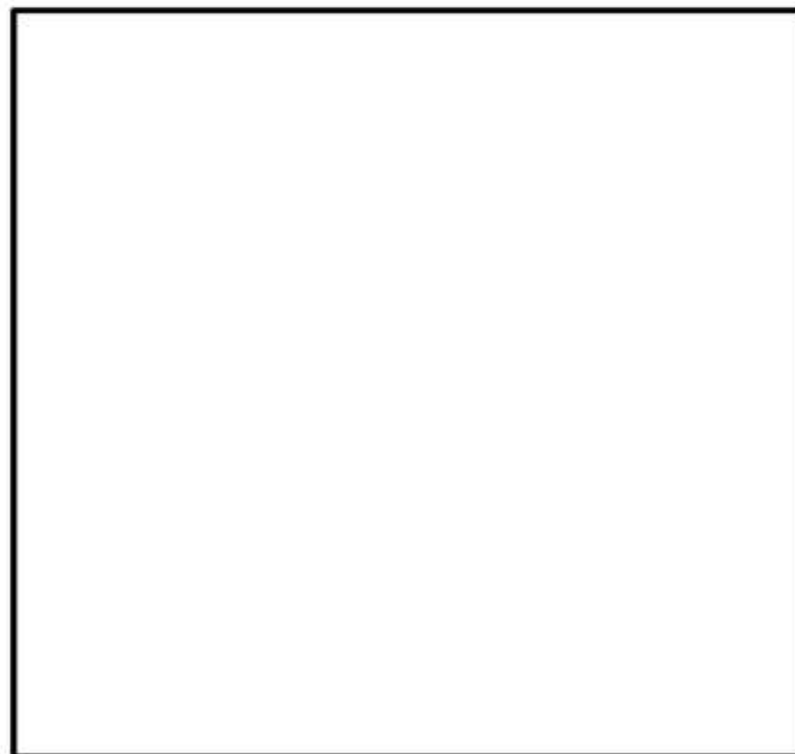
第8図(1/2) MSF-24P(S)型燃料集合体モデル形状図・要素分割図
(17×17 燃料)



(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

(単位：mm)

(形状図)



第 8 図 (2/2) MSF-24P(S)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(S)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-24P(S)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

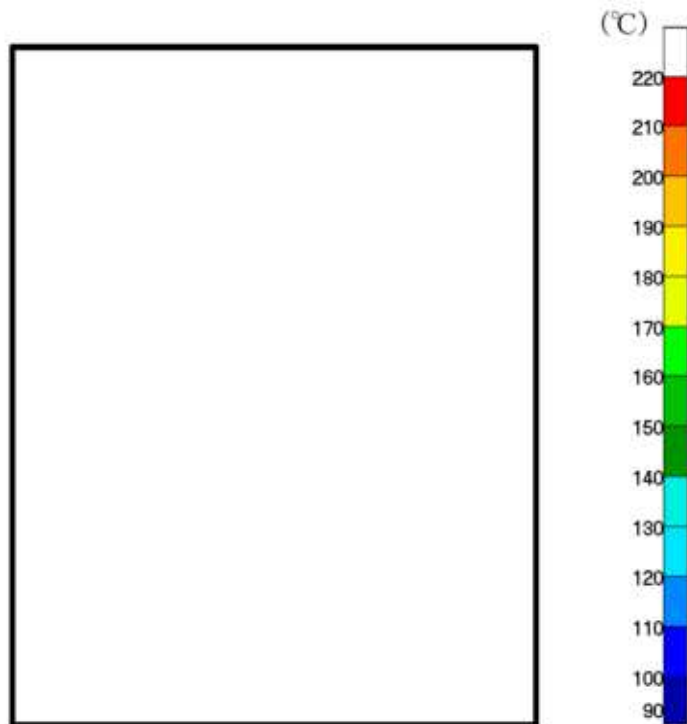
| 対象となる部位 | | 評価結果 (°C) | | 設計基準値 (°C) (注1~6) |
|----------------------|-------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| | | 17×17 燃料 収納時 | 15×15 燃料 収納時 | |
| 燃料被覆管 | | 215 | 215 | 275 ⁽¹⁾ |
| 特定兼用 キャスク | 胴 (本体部) | 132 | 132 | 350 ⁽²⁾ |
| | 胴 (フランジ部) | 119 | 119 | 350 ⁽²⁾ |
| | 胴 (底板) | 142 | 142 | 350 ⁽²⁾ |
| | 一次蓋 | 118 | 118 | 350 ⁽²⁾ |
| | 一次蓋ボルト | 118 | 118 | 350 ⁽²⁾ |
| | 二次蓋 | 112 | 112 | 350 ⁽²⁾ |
| | 二次蓋ボルト | 112 | 112 | 350 ⁽²⁾ |
| | 貯蔵用三次蓋 | 110 | 110 | 350 ⁽²⁾ |
| | 貯蔵用三次蓋ボルト | 110 | 110 | 350 ⁽²⁾ |
| | 外筒 | 123 | 123 | 350 ⁽²⁾ |
| | 下部端板 | 123 | 123 | 425 ⁽²⁾ |
| | 蓋部中性子遮蔽材カバー | 116 | 116 | 350 ⁽²⁾ |
| | 底部中性子遮蔽材カバー | 124 | 124 | 425 ⁽²⁾ |
| | トラニオン | 127 | 127 | 350 ⁽²⁾ |
| | バスケット | 187 | 188 | 250 ⁽³⁾ |
| | 伝熱フィン | 126 | 126 | 200 ⁽⁴⁾ |
| | 金属ガスケット | 118 (注7) | 118 (注7) | 130 ⁽⁵⁾ |
| 中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部) | 135 (注8) | 135 (注8) | 149 ⁽⁶⁾ | |

※注記を次頁に示す。

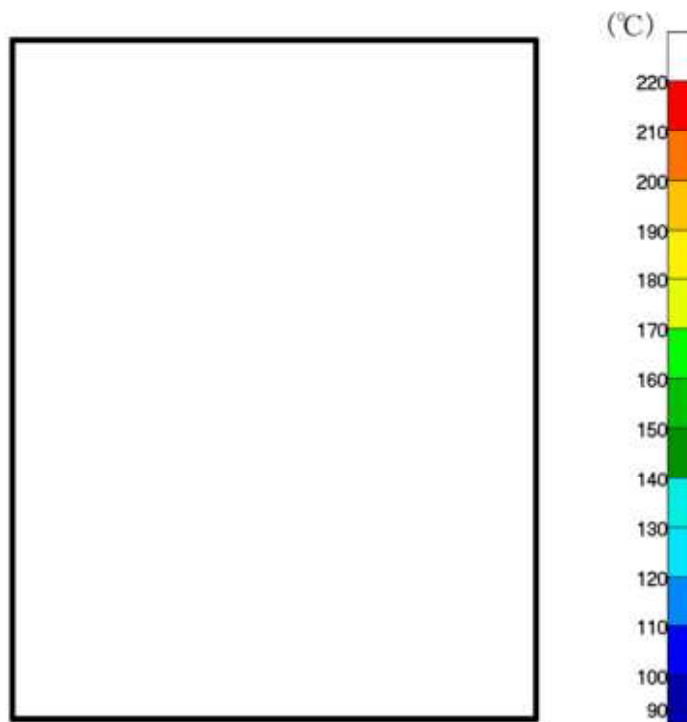
- (注1) 参考文献(1)に燃料被覆管の累積クリープひずみが1%を超えない温度、また、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度、さらに、水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度が示されており、燃料被覆管の設計基準値は、これら全ての温度を下回る水素化物再配向が防止可能な温度を設定している。なお、参考文献(1)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注2) 参考文献(2)に炭素鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼、ステンレス鋼及び析出硬化系ステンレス鋼の設計用強度が示されており、構造強度部材であり、且つ、安全機能の担保に必要な構成部材は、構造強度評価が可能な温度として、参考文献(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2を参照。
- (注3) 参考文献(3)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(3)の温度範囲の上限を設定している。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(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(5)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注6) 参考文献(6)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(6)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注7) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。
- (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。

第5表 設計温度

| 対象となる部位 | | 設計温度 (°C) |
|--------------|----------------------|--------------|
| 燃料被覆管 | | |
| 特定兼用 キャスク | 胴 (本体部) | |
| | 胴 (フランジ部) | |
| | 胴 (底板) | |
| | 一次蓋 | |
| | 一次蓋ボルト | |
| | 二次蓋 | |
| | 二次蓋ボルト | |
| | 貯蔵用三次蓋 | |
| | 貯蔵用三次蓋ボルト | |
| | 外筒 | |
| | 下部端板 | |
| | 蓋部中性子遮蔽材カバー | |
| | 底部中性子遮蔽材カバー | |
| | トラニオン | |
| | バスケット | |
| | 伝熱フィン | |
| | 金属ガスケット | |
| | 中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部) | |



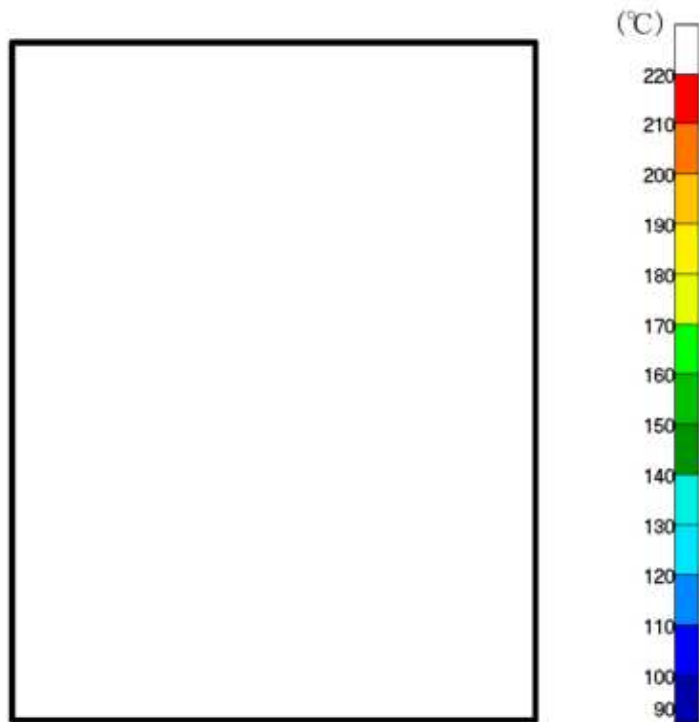
(全体)



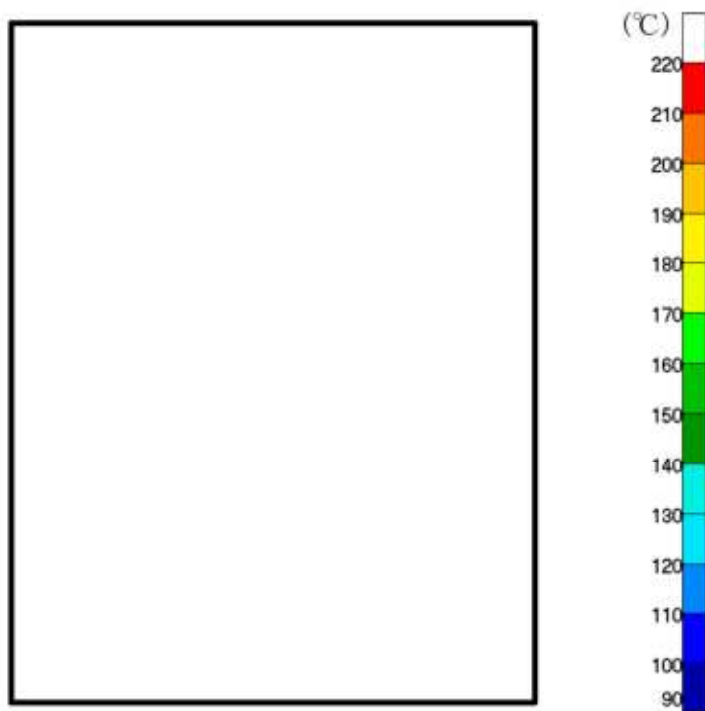
(燃料集合体最高温度位置断面)

第9図(1/2) MSF-24P(S)型除熱解析結果(全体モデル)

(17×17燃料収納時)



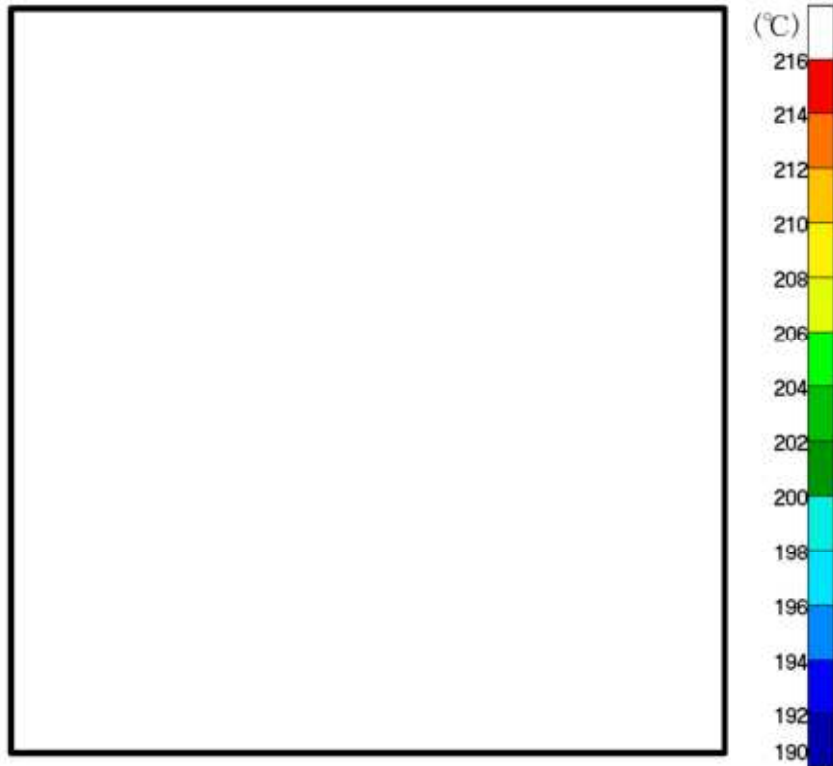
(全体)



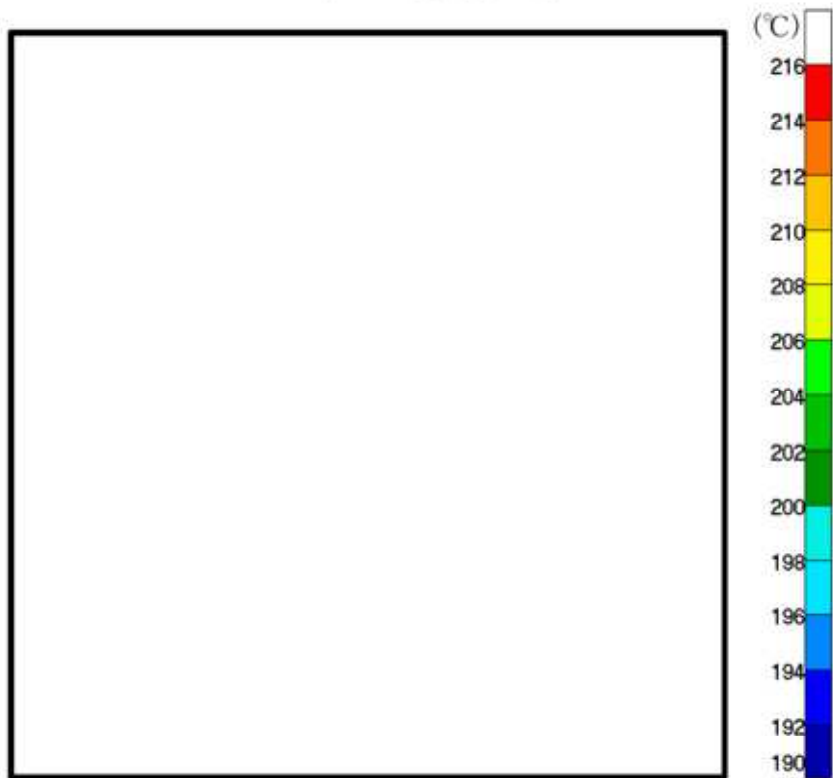
(燃料集合体最高温度位置断面)

第9図(2/2) MSF-24P(S)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(S)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。

貯蔵建屋の除熱評価は型式指定申請の範囲外（設工認時に別途確認）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、型式指定の審査範囲外（設工認に別途確認）である。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

MSF-24P(S)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、アクチノイド、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。

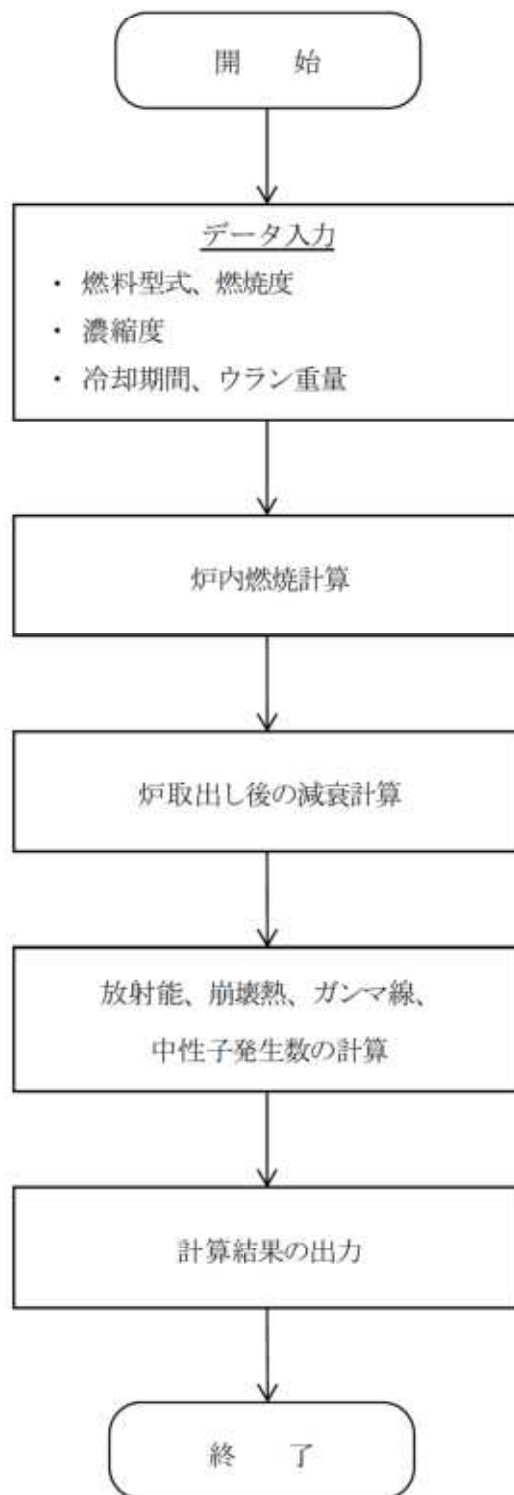
iii 計算フロー

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)

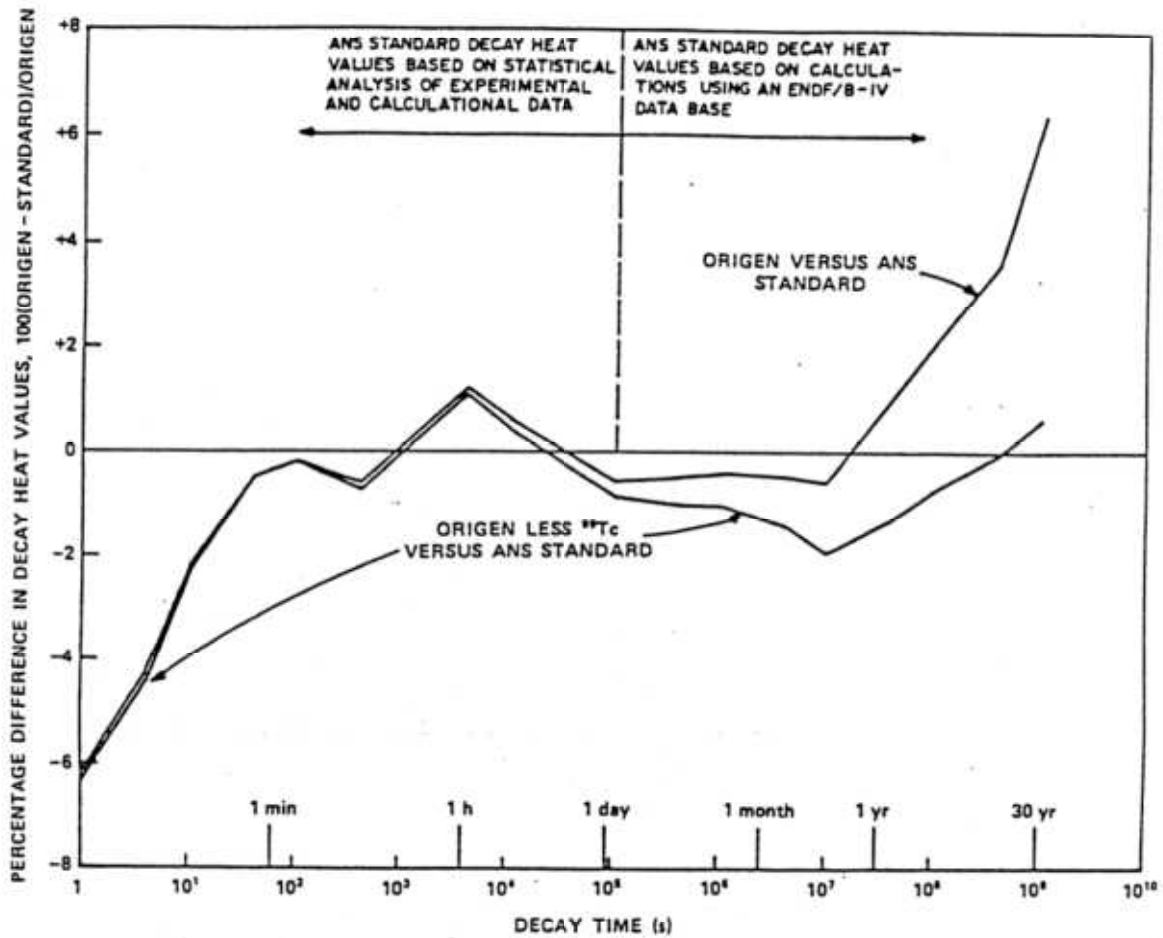


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(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(S)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 ^{99}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 ^{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。

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。

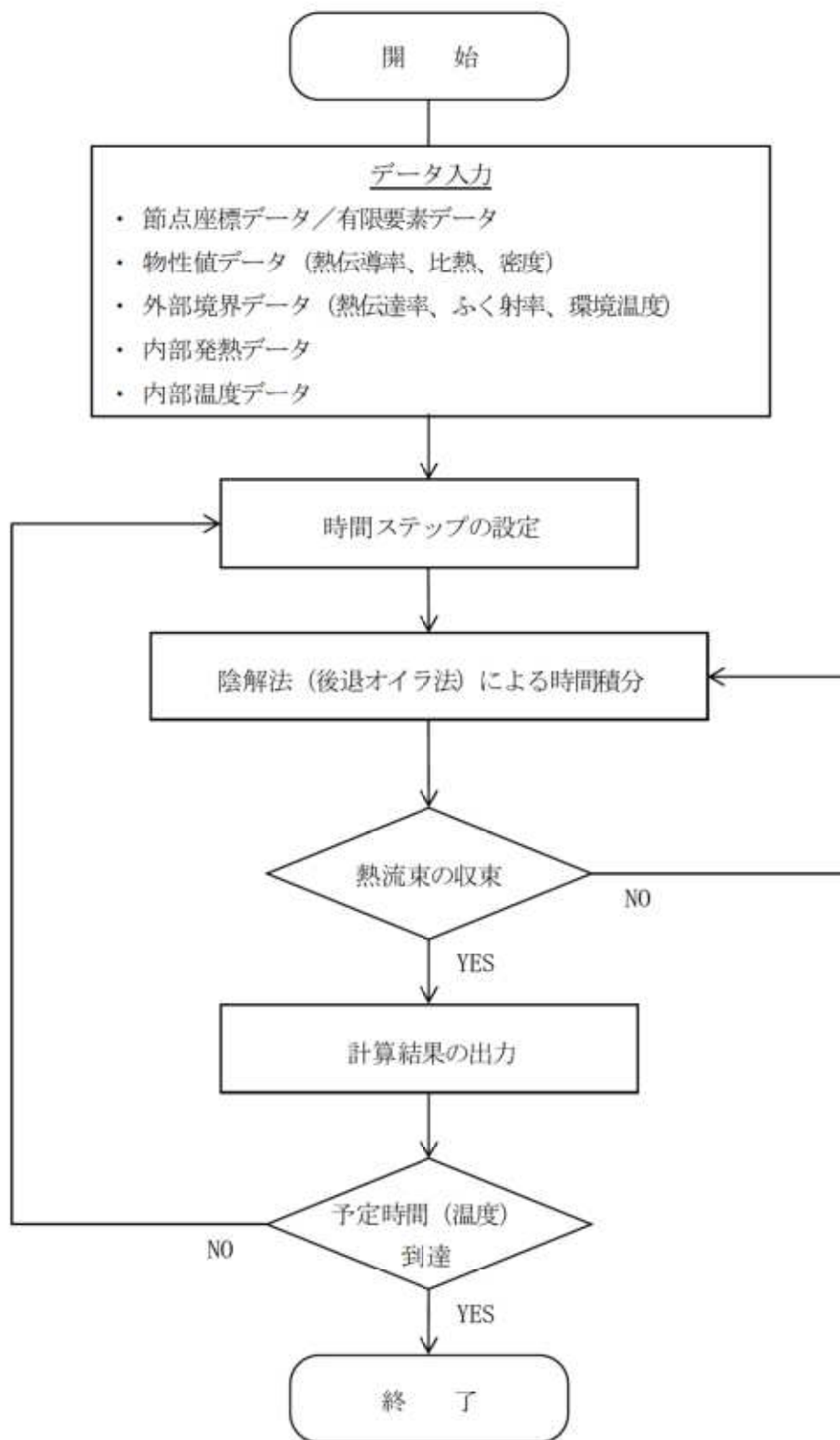
- a) 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b) 一次元から三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c) 初期条件 (温度) は要素ごとに变化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d) 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、熱伝導、対流及びびく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析 (構造強度解析) を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を变化させることができる。
- e) 構成物質の相変態が考慮できる。

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

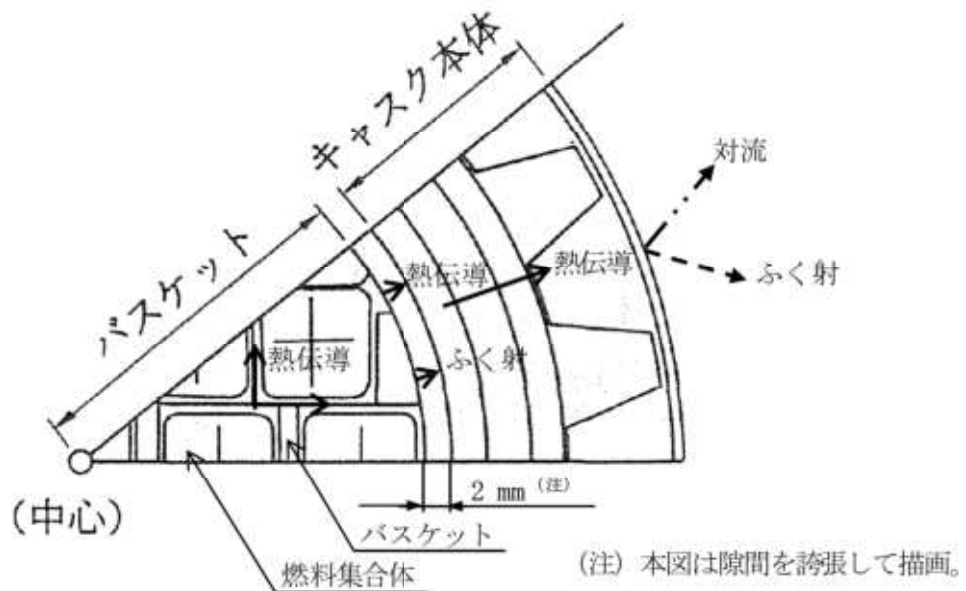
ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、第 13 図及び第 6 表に示すように、MSF-24P(S)型と同等の伝熱形態であり、且つ、類似仕様の兼用キャスクの定常伝熱試験に対して、ABAQUS による解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUS コードの妥当性が検証されている⁽¹⁰⁾。ABAQUS コードの検証例を第 14 図に示す。



第 12 図 ABAQUS コードの解析フロー図



MSF-24P(S)型



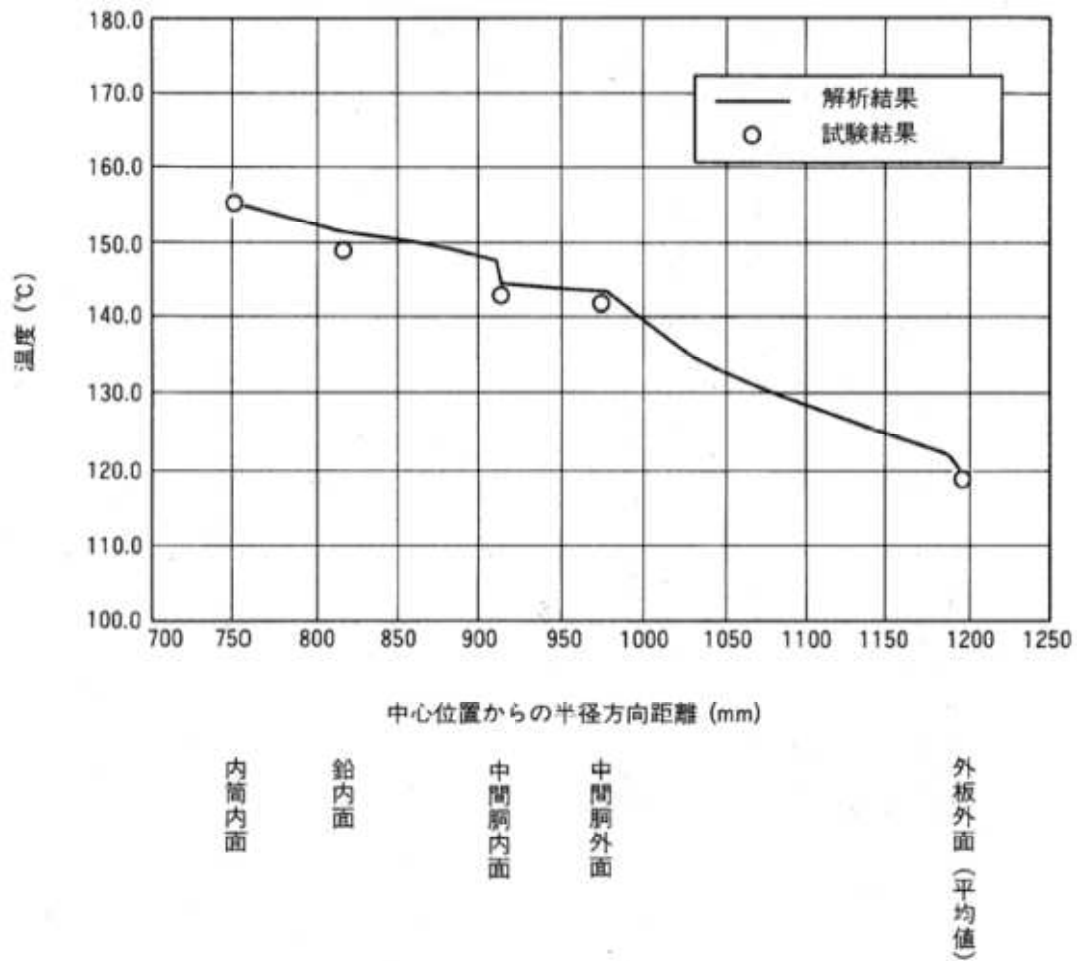
定常伝熱試験に適用した兼用キャスク⁽¹⁰⁾

第13図 伝熱形態の比較

第6表 MSF-24P(S)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(S)型 | 定常伝熱試験に適用した兼用キャスク ⁽¹⁰⁾ |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 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 ^(注) （kW） | 18.1 | 23 |
| 外径（mm） | 2596 | 2400 |
| 容器の材質 | 炭素鋼 <input type="text"/> | 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(S)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) 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).
- (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 SFA1-2007)」, (2007).
- (3) 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).
- (4) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計(JIS B 8267:2015)」, (2015).
- (5) (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).
- (6) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- (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, 小崎明朝, 「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(S)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 燃料及び 15×15 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-24P(S)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(S)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 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、中央部には最高燃焼度の崩壊熱量を設定し、外周部には、特定兼用キャスク 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 \square の使用済燃料を配置し、外周部 12 体は、特定兼用キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 \square 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

－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。

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 | 炭素鋼 □ | 26.85 | 51.6 |
| | | 326.85 | 47.8 |
| | | 526.85 | 38.2 |
| 外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー | 炭素鋼 □ | 26.85 | 43.0 |
| | | 226.85 | 38.6 |
| | | 526.85 | 27.7 |
| 下部端板 底部中性子遮蔽材カバー | ステンレス鋼 □ | 26.85 | 16.0 |
| | | 126.85 | 16.5 |
| | | 326.85 | 19.0 |
| | | 526.85 | 22.5 |
| | | 726.85 | 25.7 |
| 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 |
| | | 325 | 22.2 |
| | | 425 | 23.3 |
| | | 525 | 23.9 |
| | | 625 | 24.5 |
| 700 | 25.1 | | |

(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(2)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)) |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 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) | 20 125 200 | 162.1 170.1 173.6 |
| 中性子吸収材 | ほう素添加 アルミニウム合金 | — | |
| 伝熱フィン | 銅 (C1020) | 26.85 326.85 526.85 | 398 383 371 |
| 貯蔵用緩衝体 緩衝材 | | 26.85 126.85 226.85 | |
| | | 26.85 126.85 226.85 | |
| | | 26.85 126.85 226.85 | |
| 内部気体 | ヘリウム | 26.85 126.85 226.85 326.85 | 0.1527 0.1882 0.2212 0.2523 |
| 周囲気体 | 空気 | 26.85 126.85 226.85 | 0.02614 0.03305 0.03951 |

(注1) レジンは引用文献(3)、アルミニウム合金は引用文献(2)、ほう素添加アルミニウム合金は引用文献(4)、は引用文献(5)、銅、ヘリウム及び空気は引用文献(1)を参照。

別紙 1-2 表 MSF-24P(S)型外表面の熱伝達率

| 部位 | 形状 | 温度 (K) | 温度 (℃) | 熱伝達率 ^(注1) (W/(m ² ·K)) |
|---|------|--------|--------|---|
| MSF-24P(S)型外表面 (水平面) ^(注2) | 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(S)型外表面 (垂直面) ^(注2) | 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⁽⁶⁾を用いて計算する。

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

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

- 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)

(注2) MSF-24P(S)型外表面 (水平面及び垂直面) の位置を下図に示す。なお、水平面及び垂直面に該当しない面には、保守側に熱伝達率が小さくなるよう水平面と同じ熱伝達率を設定する。



別紙1-3表 ふく射率

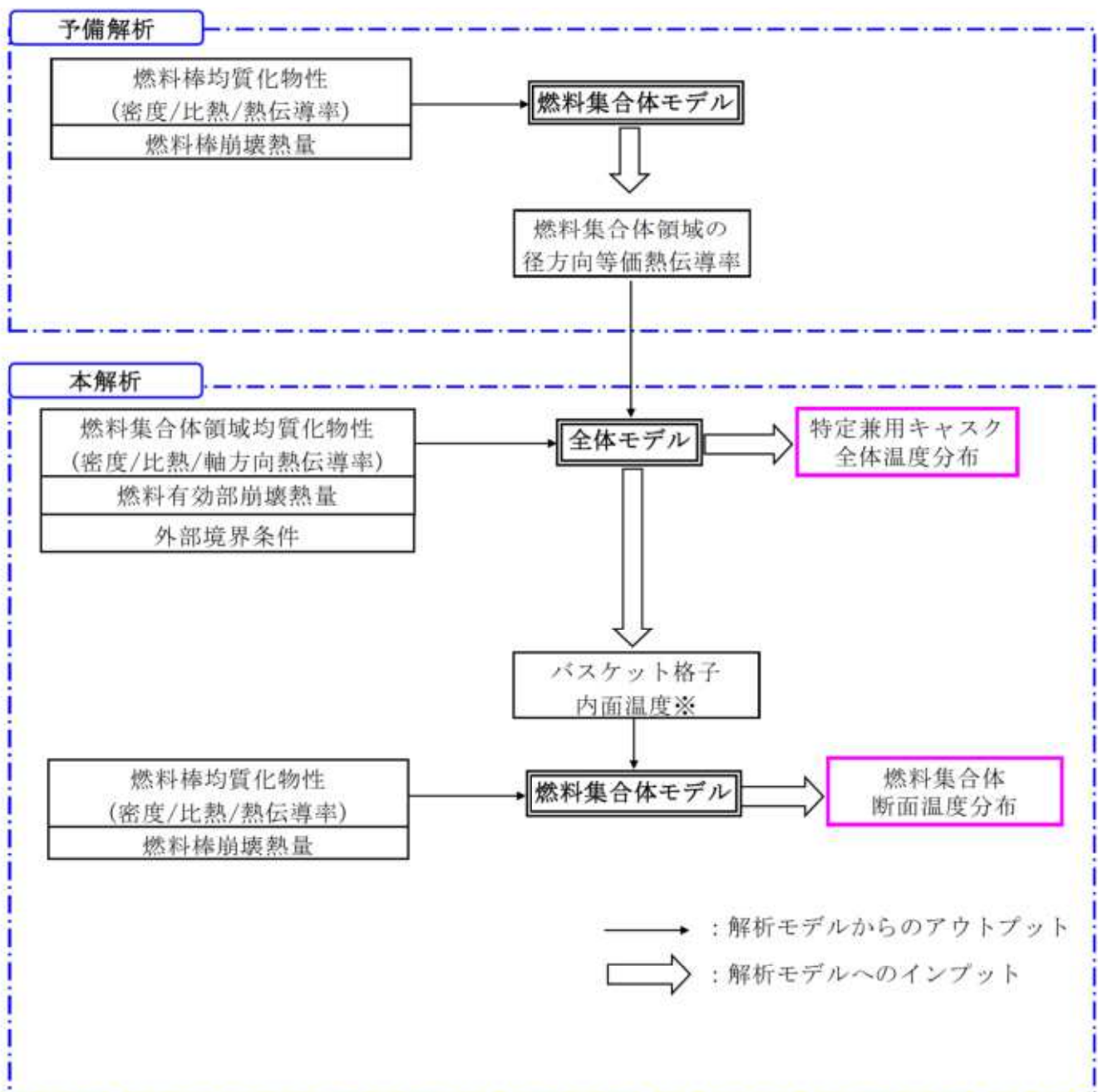
| 構成部材 | 材料 | ふく射率 |
|--|-----------------------------|-------------------------|
| 胴（内面） | アルミニウム <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| 一次蓋 二次蓋 | <input type="text"/> | |
| バスケットプレート バスケットサポート | アルミニウム合金 | 0.055 ⁽⁷⁾ |
| 中性子吸収材 | ほう素添加アルミニウム合金 | 0.2 ⁽⁴⁾⁽⁸⁾ |
| 外筒（外表面） 胴（外表面） 貯蔵用三次蓋（外表面） 貯蔵建屋壁面 | 塗装 | 0.8 ⁽¹⁾ (注1) |
| 貯蔵用緩衝体 （外表面） | ステンレス鋼 | 0.15 ⁽⁷⁾ |

(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

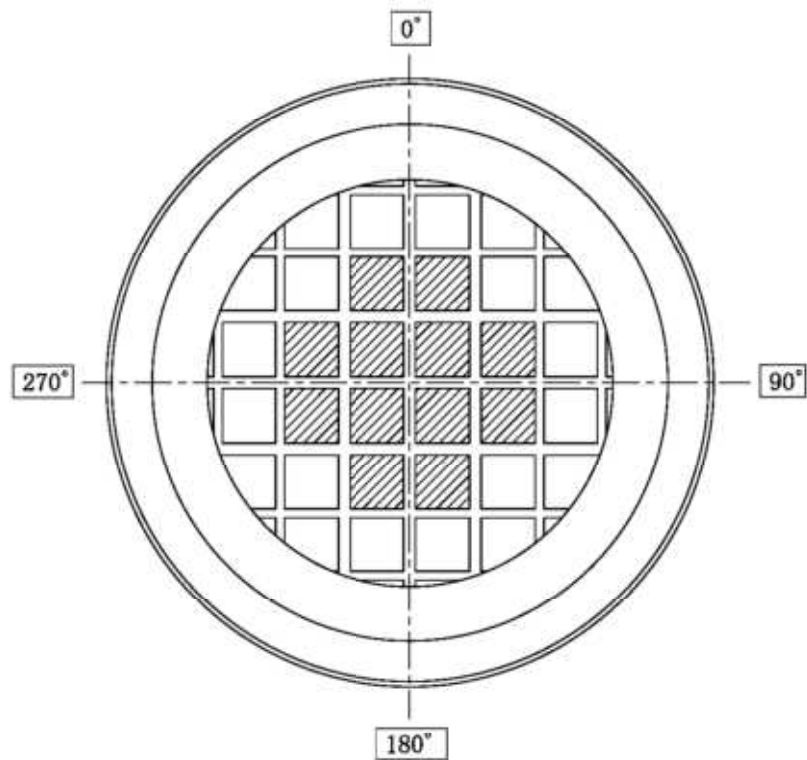
| 項目 | 境界条件 |
|---|---|
| 周囲温度 | 45℃ |
| 貯蔵建屋壁面温度 | 65℃ |
| MSF-24P(S)型表面から貯蔵建屋壁面 への形態係数 ^(注1) | 外筒（水平円筒面） : 0.692 貯蔵用緩衝体（水平円筒面） : 0.637 貯蔵用緩衝体（垂直面） : 0 |
| MSF-24P(S)型表面及び貯蔵建屋壁面 ふく射率 | 別紙 1-3 表による |
| MSF-24P(S)型表面熱伝達率 (側面、上面、下部端板) | 別紙 1-2 表による |



(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3参照）。



※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



-  : 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) American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)”, (2010).
- (3) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- (4) 中性子吸収材メーカー資料
- (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) (一社)日本原子力学会, 『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(AESJ-SC-F006:2013)』, (2014).
- (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”, Taylor & Francis Group, (2011).

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_r 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。

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

ここで、

- λ_r : 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_r を設定する。

なお、各ケースで求められる λ_r 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「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「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(S) 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(S) 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 ⁽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-24P(S) 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。

形態係数の算出過程

別紙 1-4 表「全体モデルの境界条件」において設定している、MSF-24P(S)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 3-1 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-24P(S)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 3-2 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 3-1 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。

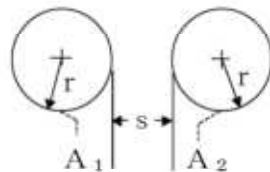
$$F_{12} = \frac{1}{\pi} \left[\sqrt{X^2 - 1} + \sin^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - X \right] \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

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）

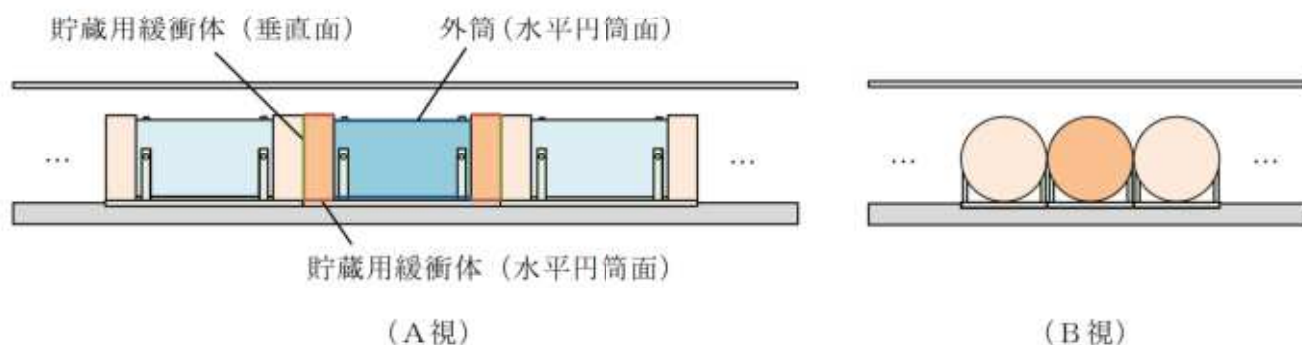
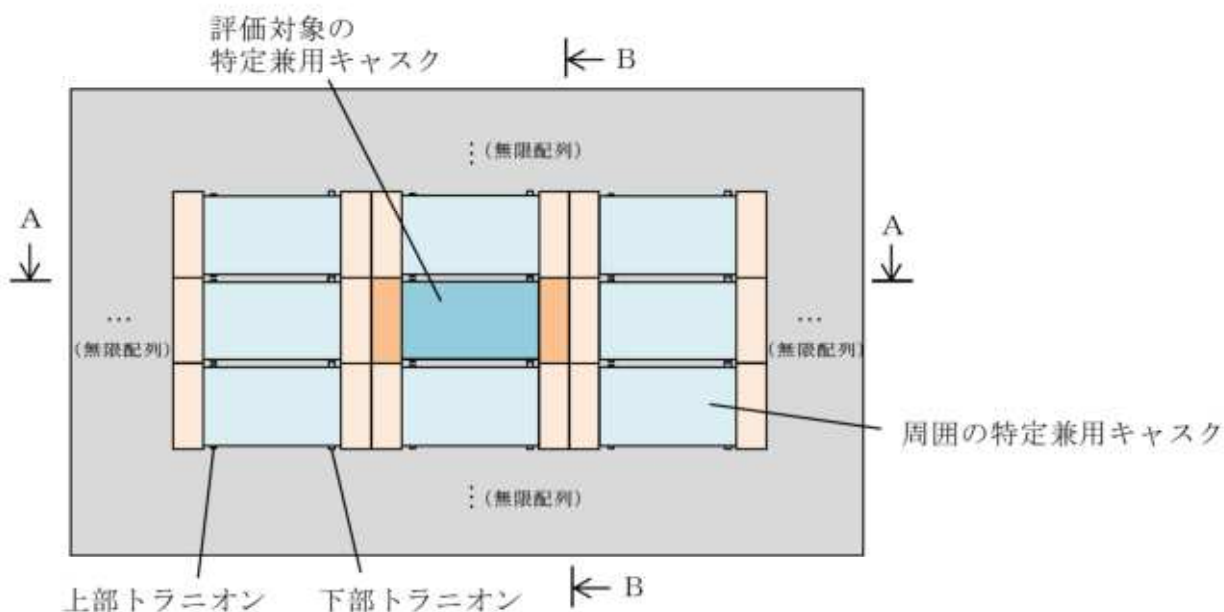


(注) 出典は以下による。

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

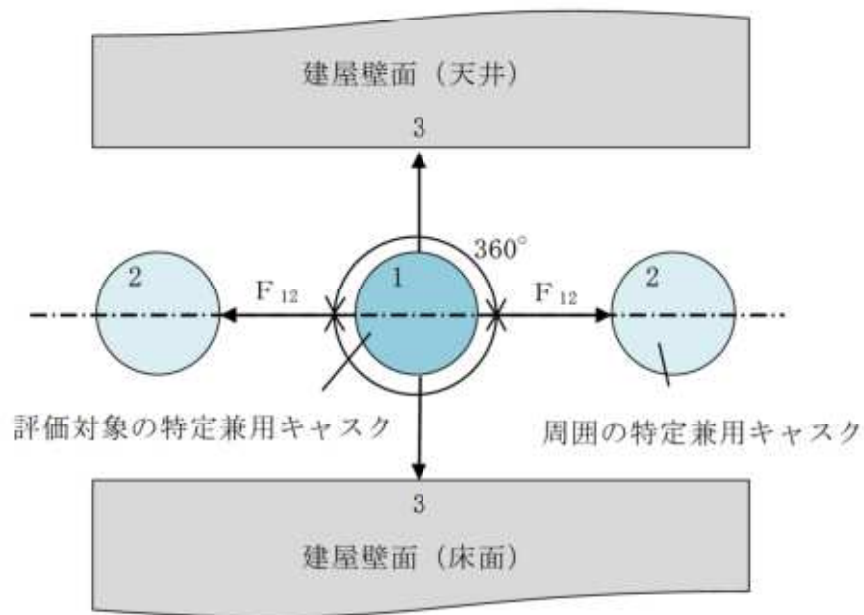
(2) 貯蔵用緩衝体（垂直面）

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 3-1 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-24P(S)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 3-1 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 3-2 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 3-1 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 | 330 |
| | | r | 1298 |
| | 係数 (-) | X | 1.127 |
| | | F_{12} | 0.1541 |
| 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

| 番号 | 文献名 (国際規格/研究機関論文等) | 参考文献 | 文献概要 |
|----|--|--|------|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> 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、「金属製乾式キャスタッ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タッ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コイド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。 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、高温条件下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。 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。 | |
| 2 | <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 金属キャスタック構造規格 (2007年版) (JSME S FAI-2007)」, (2007). | <ul style="list-style-type: none"> 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。 〔外筒、蒸留中性子遮蔽材カバー〕〔炭素鋼〕 〔下部端板、底部遮蔽材カバー、カバープレート・リップ〕〔ステンレス鋼〕 〔SUS630 (トラニオン) 析出硬化系ステンレス鋼〕 〔筒、一次蓋、二次蓋〕〔炭素鋼〕 〔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〕 〔貯蔵用三次蓋〕〔炭素鋼〕 | |
| 3 | <ul style="list-style-type: none"> 三菱重工(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). | <ul style="list-style-type: none"> 三菱重工製の乾式キャスタック (MSF-2IF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。 | |
| 4 | <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). | <ul style="list-style-type: none"> -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。 | |
| 5 | <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、内被材及びビコイルスプリング: ニッケル合金) 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。 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。 | |
| 6 | <ul style="list-style-type: none"> BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1988). | | |

型式証明申請及び先行設工認における除熱評価との差異について

1. 概要

本別紙では、型式指定申請の除熱評価について、以下(1)及び(2)との除熱解析条件及び解析結果の差異を示す。

(1) 型式証明申請 (MSF-24P(S)型)

(2) 伊方発電所 3号機 使用済燃料乾式貯蔵施設の設置工事に係る設計及び工事計画認可申請 (原規規発第 2107076 号 令和 3 年 7 月 7 日認可) (以下「先行設工認」という。) における使用済燃料乾式貯蔵容器 (タイプ 2、MSF-24P 型)

2. 型式証明申請における除熱評価との差異

2.1 型式証明申請における除熱評価との差異

型式指定申請と型式証明申請との除熱解析条件の差異を別紙3-1表に、除熱解析結果(17×17燃料収納時)の比較を別紙3-2表に示す。型式証明申請における除熱評価では、屋外貯蔵条件を代表例として評価を実施している。

別紙3-1表に示す解析条件の差異が温度に与える影響は次のとおりであり、これら条件の差異により、別紙3-2表に示す特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の温度は、型式証明申請の結果に対し、全体的に高くなっている。

<除熱解析条件の差異が温度に与える影響>

(1) 解析モデルの差異(貯蔵用三次蓋の形状・材質)

型式指定申請では、詳細設計を反映し、貯蔵用三次蓋の形状及び材質を別紙3-1図のとおり変更しており、除熱解析モデルに反映している。蓋部の熱の流れは別紙3-2図に示すとおりであり、蓋部まで伝わった熱は、主に熱抵抗の小さい径方向(本体胴側)に流れる。蓋間空間及び蓋部中性子遮蔽材の断熱効果により熱抵抗の大きい軸方向(貯蔵用上部緩衝体側)へは流れにくく、貯蔵用三次蓋へ伝わる熱量は少ないため、貯蔵用三次蓋の材料変更による熱特性及び形状の差異が温度に与える影響は小さい。

(2) 境界条件の差異

型式指定申請と型式証明申請では、貯蔵場所(貯蔵建屋内又は屋外)が異なるため、境界条件(対流、ふく射及び太陽熱放射)が異なる。以下に示す対流、ふく射及び太陽熱放射の差異による温度増減の積算により、型式証明申請と比べて温度は上昇する傾向となる。

① 対流の差異

熱伝達率の計算式に差異はないが、型式指定申請(貯蔵建屋内)では型式証明申請(屋外)に対して周囲温度が高い(型式指定申請:45℃、型式証明申請:38℃)ため、温度は上昇する傾向となる。

② ふく射の差異

型式証明申請では、ふく射形態係数の設定において、周囲キャスクの存在を未考慮としていたが、型式指定申請では、別紙1の別添3に示すように、周囲キャスクの存在を考慮し、ふく射形態係数を設定している。型式指定申請の方が、ふく射形態係数が小さく(型式指定申請:0.692(外筒)、型式証明申請:1)、基準温度も高いため、温度は上昇する傾向となる。

③ 太陽熱放射の差異

型式指定申請では、太陽熱放射が無く、太陽熱放射が有る型式証明申請の条件に比べて温度は低下する傾向となる。

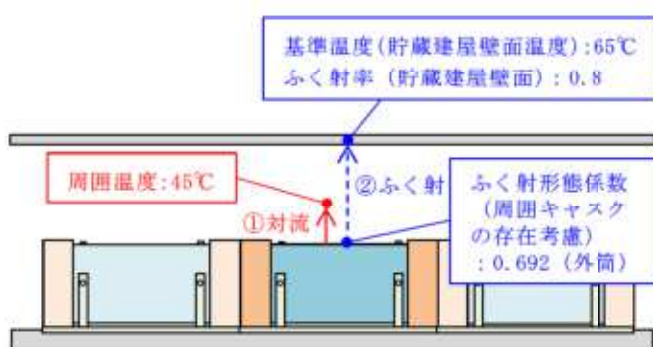
別紙3-1表 型式指定申請と型式証明申請との除熱解析条件の差異

| 項目 | | 型式指定申請 (貯蔵建屋内貯蔵) | 型式証明申請 (屋外貯蔵 ^(注1)) | |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|--|--------------------|
| 解析コード | | ABAQUS | 同左 | |
| 解析モデル | | 貯蔵用三次蓋の詳細設計構造を反映 (別紙3-1図参照) | 貯蔵用三次蓋は詳細設計前の構造 (別紙3-1図参照) | |
| 崩壊熱 | 崩壊熱量 | 18.1kW (設計崩壊熱量) | 同左 | |
| | 燃料集合体の軸方向崩壊熱量分布 | 第4図のとおり | | |
| | 燃料集合体の収納配置 | 別紙1-2図のとおり | | |
| 境界条件 ^(注2) | ①対流 | 周囲温度 | 45℃ | 38℃ |
| | | 外表面の熱伝達率 | 別紙1-2表のとおり | 同左 |
| | ②ふく射 | 基準温度 | 65℃ (貯蔵建屋壁面温度) | 38℃ (周囲温度) |
| | | 貯蔵建屋壁面ふく射率 | 0.8 | 1 (周囲空気) |
| | | 外表面ふく射率 | 別紙1-3表のとおり | 同左 |
| | | 外表面からのふく射形態係数 | 外筒(水平円筒面): 0.692 貯蔵用緩衝体(水平円筒面): 0.637 貯蔵用緩衝体(垂直面): 0 | 1(全面) |
| | ③太陽熱放射 | | 考慮不要 | 考慮 ^(注3) |

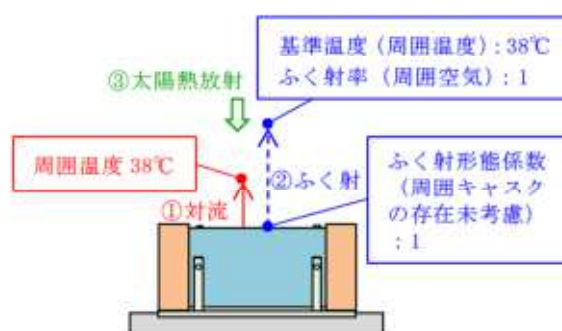
(注1) 型式証明申請における除熱評価では、屋外貯蔵条件を代表例として評価を実施。

(注2) 主要な放熱面となる外筒外面の境界条件の比較図を下図に示す。

(注3) 横置き状態における垂直面には200 W/m²、その他の表面には400W/m²の常時入熱を考慮。



(型式指定申請: 貯蔵建屋内貯蔵)



(型式証明申請: 屋外貯蔵 [評価代表例])

別紙3-2表 型式指定申請と型式証明申請との除熱解析結果の比較

(17×17 燃料収納時)

| 対象となる部位 | | 評価結果 (°C) | |
|----------------------|-------------|-----------|----------|
| | | 型式指定申請 | 型式証明 |
| 燃料被覆管 | | 215 | 206 |
| 特定兼用 キャスク | 胴 (本体部) | 132 | 121 |
| | 胴 (フランジ部) | 119 | 111 |
| | 胴 (底板) | 142 | 133 |
| | 一次蓋 | 118 | 110 |
| | 一次蓋ボルト | 118 | 109 |
| | 二次蓋 | 112 | 105 |
| | 二次蓋ボルト | 112 | 105 |
| | 貯蔵用三次蓋 | 110 | 103 |
| | 貯蔵用三次蓋ボルト | 110 | 103 |
| | 外筒 | 123 | 114 |
| | 下部端板 | 123 | 115 |
| | 蓋部中性子遮蔽材カバー | 116 | 108 |
| | 底部中性子遮蔽材カバー | 124 | 117 |
| | トラニオン | 127 | 118 |
| | バスケット | 187 | 177 |
| | 伝熱フィン | 126 | 115 |
| | 金属ガスケット | 118 (注1) | 110 (注1) |
| 中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部) | 135 (注2) | 127 (注2) | |

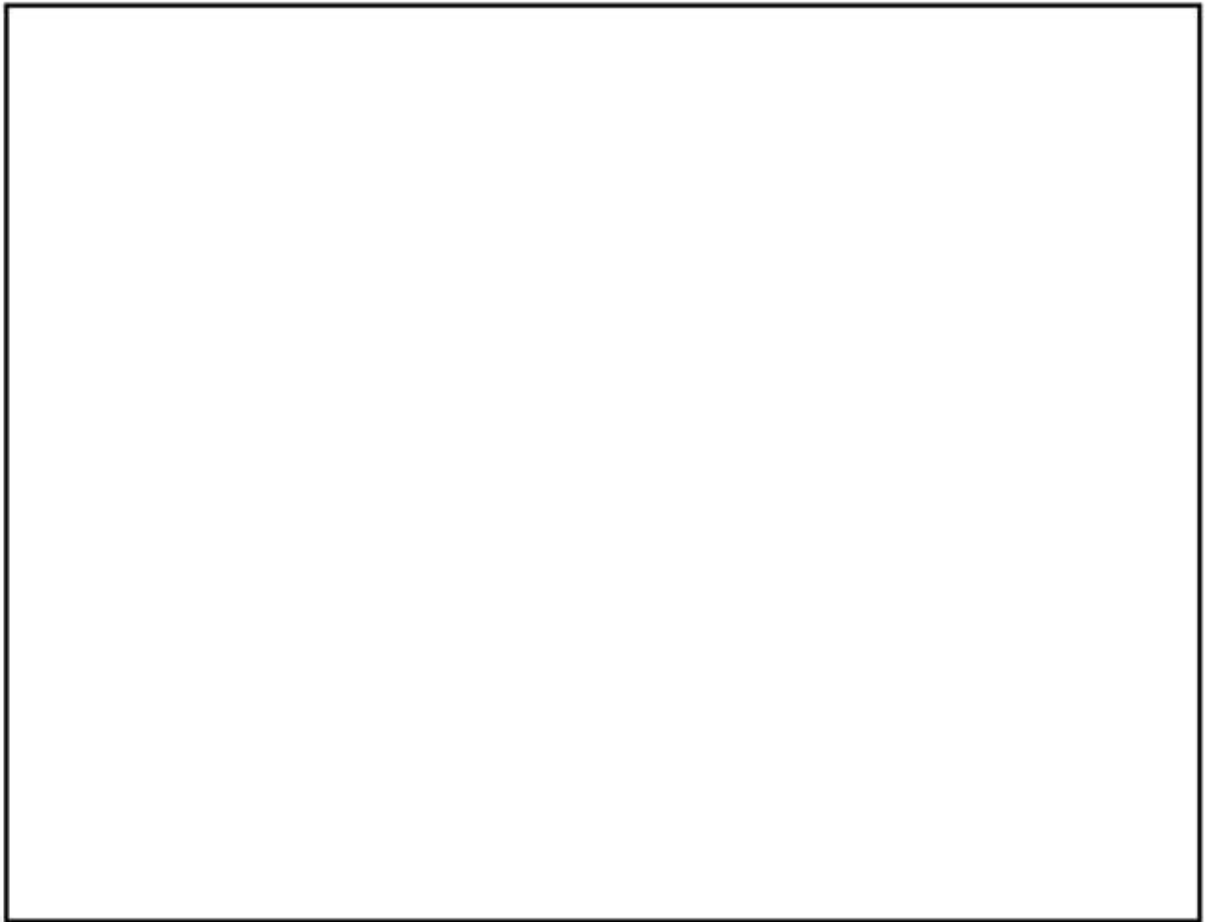
(注1) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

(注2) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度である。

| | | |
|--------|--------|--|
| 型式証明申請 | 型式指定申請 | |
|--------|--------|--|

別紙3-1 図 貯蔵用三次蓋の構造比較

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 3 - 2 図 蓋部の熱の流れ概略図

2.2 他の安全評価への影響

除熱解析結果により得られる特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の温度は、別紙3-3表に示すとおり、他の安全評価の評価条件として適用される。

したがって、型式証明申請における安全評価に対して、別紙3-3表に示す安全解析については、型式指定申請における除熱解析結果を反映した再評価を実施している。

別紙3-3表 除熱解析結果の他の安全評価への適用について

| 安全評価 | 除熱解析結果の適用 |
|---------------------|---|
| 臨界防止 | 適用なし |
| 遮蔽 | ・中性子遮蔽材（レジン）の質量減損量の算定において、除熱解析により得られる中性子遮蔽材温度を適用。 |
| 閉じ込め | ・基準漏えい率及びブリークテスト判定基準の算定条件となる特定兼用キャスク本体内部温度に除熱解析により得られる使用済燃料（燃料被覆管）の温度を適用。 |
| 長期健全性 | ・特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の設計貯蔵期間中の熱による影響評価において、除熱解析により得られる特定兼用キャスク各構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の温度を適用。 |
| 構造強度 ^(注) | ・特定兼用キャスク構成部材の構造強度計算の計算条件となる材料物性値（縦弾性係数、熱膨張係数）及び構造強度評価の評価基準（設計応力強さ、設計降伏点等）の算定において、除熱解析により得られる特定兼用キャスク各構成部材の温度を適用。 |

(注) 地震、津波、竜巻時の構造強度評価を含む。

3. 先行設工認における除熱評価との差異

型式指定申請と先行設工認との除熱解析条件の差異を別紙3-4表に、除熱解析結果(17×17燃料収納時)の比較を別紙3-5表に示す。

別紙3-4表に示す解析条件の差異が温度に与える影響は次のとおりであり、これら条件の差異により、別紙3-5表に示す特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の温度は、先行設工認の結果に対し、蓋部及び胴(フランジ部)で高く、それ以外の部位で低くなっている。

<除熱解析条件の差異が温度に与える影響>

(1) 解析モデルの差異(貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体の有無)

型式指定申請では、貯蔵用三次蓋及び貯蔵用上部緩衝体の装着により、蓋部及び胴(フランジ部)の断熱効果が大きくなるため、蓋部及び胴(フランジ部)の温度は、先行設工認に比べて上昇する傾向となる。底部については、先行設工認において、キャスク底面から貯蔵架台への放熱条件を厳しく(熱が逃げにくく)設定しており、貯蔵用下部緩衝体の装着による断熱効果に比べ、先行設工認の方が、断熱効果が大きくなる。そのため、型式指定申請における底部の温度は先行設工認に比べて低下する傾向となる。

(2) 境界条件の差異

型式指定申請と先行設工認では、貯蔵姿勢(横置き又はたて置き)が異なるため、境界条件(対流及びふく射)が異なる。上記(1)の影響を受ける蓋部、胴(フランジ部)及び底部以外の温度は、以下に示す対流及びふく射の差異による温度増減の積算により、先行設工認と比べて温度は低下する傾向となる。

① 対流の差異

型式指定申請(横置き)の主要な放熱面となる外筒外面の自然対流熱伝達率係数は先行設工認(たて置き)に比べ小さくなる(型式指定申請: $1.02 \times \Delta t^{1/3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ @100°C、先行設工認: $1.31 \times \Delta t^{1/3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ @100°C)が、周囲温度も下がる(型式指定申請:45°C、先行設工認:50°C)。ため、温度への影響は同等になる。

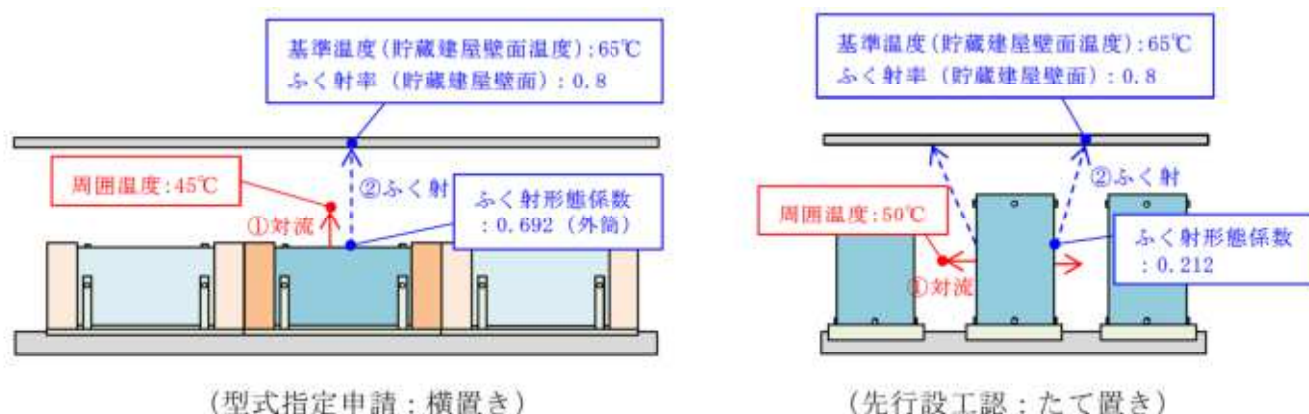
② ふく射の差異

型式指定申請では、先行設工認に比べ、主要な放熱面となる外筒外面のふく射形態係数が大きくなる(型式指定申請:0.692、先行設工認:0.212)。よって、先行設工認の条件に比べて温度は低下する傾向となる。

別紙3-4表 型式指定申請と先行設工認との除熱解析条件の差異

| 項目 | | 型式指定申請 (貯蔵建屋内横置き貯蔵) | 先行設工認 (貯蔵建屋内たて置き貯蔵) | |
|---------------------|---------------------|--------------------------|--|-------------|
| 解析コード | | ABAQUS | 同左 | |
| 解析モデル | | ・貯蔵用三次蓋を装着 ・貯蔵用緩衝体を装着 | ・貯蔵用三次蓋なし ・貯蔵用緩衝体なし | |
| 崩壊熱 | 崩壊熱量 | 18.1kW (設計崩壊熱量) | 同左 | |
| | 燃料集合体の軸方向 崩壊熱量分布 | 第4図のとおり | | |
| | 燃料集合体の収納配置 | 別紙1-2図のとおり | | |
| 境界条件 ^(注) | ① 対流 | 周囲温度 | 45℃ | 50℃ |
| | | 外表面の熱伝達率 | 別紙1-2表のとおり | 別紙3-5表のとおり |
| | ② ふく射 | 基準温度 | 65℃ (貯蔵建屋壁面温度) | 同左 |
| | | 貯蔵建屋壁面ふく射率 | 0.8 | 同左 |
| | | 外表面ふく射率 | 別紙1-3表のとおり | 同左 |
| | | 外表面からの ふく射形態係数 | 外筒 (水平円筒面) : 0.692 貯蔵用緩衝体 (水平円筒面) : 0.637 貯蔵用緩衝体 (垂直面) : 0 | 0.212 (全面) |
| | 貯蔵架台への放熱 | | — | 貯蔵架台への放熱を考慮 |

(注) 主要な放熱面となる外筒外面の境界条件の比較図を下図に示す。



別紙3-5表 先行設工認における外表面の熱伝達率

| 部位 | 形状 | 温度 (K) | 温度 (°C) | 熱伝達率 ^(注1) (W/(m ² ·K)) |
|-------------------------------------|-------------|--------|---------|---|
| 兼用キャスク外表面 (側面) ^(注2) | 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 | $1.11 \times \Delta t^{1/3}$ |
| 兼用キャスク外表面 (上面) ^(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 | $1.12 \times \Delta t^{1/3}$ |
| 兼用キャスク外表面 (下部端板) ^(注2) | 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 | $0.860 \times \Delta t^{1/5}$ |

(注1) 熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

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

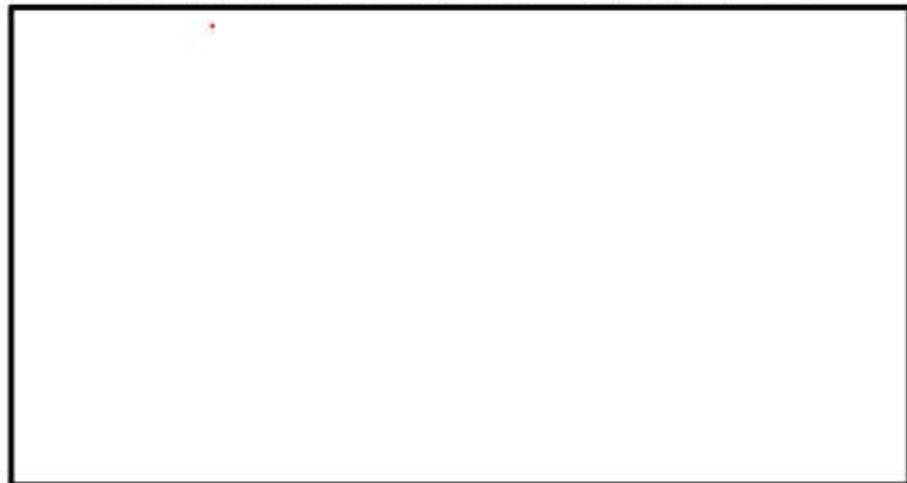
$$h = 0.13\lambda \left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/3} \quad (\text{上向き水平平板})$$

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

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 : 周囲気体 (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) 兼用キャスク外表面 (側面、上面及び下部端板) の位置を下図に示す。



別紙3-6表 型式指定申請と先行設工認との除熱解析結果の比較

(17×17 燃料収納時)

| 対象となる部位 | | 評価結果 (°C) | |
|----------------------|-------------|-----------|----------|
| | | 型式指定申請 | 先行設工認 |
| 燃料被覆管 | | 215 | 219 |
| 兼用 キャスク | 胴 (本体部) | 132 | 137 |
| | 胴 (フランジ部) | 119 | 112 |
| | 胴 (底板) | 142 | 147 |
| | 一次蓋 | 118 | 109 |
| | 一次蓋ボルト | 118 | 110 |
| | 二次蓋 | 112 | 99 |
| | 二次蓋ボルト | 112 | 101 |
| | 貯蔵用三次蓋 | 110 | — |
| | 貯蔵用三次蓋ボルト | 110 | — |
| | 外筒 | 123 | 129 |
| | 下部端板 | 123 | 129 |
| | 蓋部中性子遮蔽材カバー | 116 | 106 |
| | 底部中性子遮蔽材カバー | 124 | 126 |
| | トラニオン | 127 | 132 |
| | バスケット | 187 | 191 |
| | 伝熱フィン | 126 | 131 |
| | 金属ガスケット | 118 (注1) | 109 (注1) |
| 中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部) | 135 (注2) | 136 (注2) | |

(注1) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

(注2) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度である。