

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(HDP-69BCH(B)型の除熱機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 基礎等に固定する設置方法（横置き）の場合
5. 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法（横置き）の場合
6. 参考文献

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型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てい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 2.2 除熱機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

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

』

【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、燃焼型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

3) 燃料被覆管の温度評価

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

と。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

』

2. 適合性について

HDP-69BCH(B)型の除熱機能については、審査ガイドの確認内容を考慮した上で、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

〔設置許可基準規則〕

- ・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。
- ・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。
- ・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。
- ・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。

〔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。

HDP-69BCH(B)型は、使用済燃料集合体の健全性及び安全機能を有する特定兼用キャスク構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料集合体の被覆管及び特定兼用キャスク各部に温度の制限値を設定し、各部の温度が制限値以下となる設計とする。

HDP-69BCH(B)型は、使用済燃料集合体の崩壊熱を熱伝導、対流、ふく射により HDP-69BCH(B)型の外表面に伝え、周囲の空気等に伝達する。特定兼用キャスクの内部には、強度部材のバスケットプレート（ほう素添加ステンレス鋼）と熱伝導率の高い伝熱プレート（アルミニウム合金）で構成されたバスケットを設け、その中に使用済燃料集合体を収納する。また、使用済燃料集合体を収納する空間には、熱伝導率の高いヘリウムガスを充填する。さらに、特定兼用キャスク側部の中性子遮蔽材（熱伝導率の低いレジン）の内部には、炭素鋼及び銅からなる伝熱フィンを設け、熱伝導性能を向上させる。

HDP-69BCH(B)型の伝熱形態図を図 2.4.3-1 に示す。特定兼用キャスクにおける使用済燃料集合体の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

- a) 崩壊熱は、使用済燃料集合体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チャンネルボックスに伝えられ、さらにチャンネルボックスから同様の形態で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、熱伝導により特定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兼用キャスク周囲の空気へ伝えられる。また、特定兼用キャスク本体外面のふく射により貯蔵建屋等に伝えられる。

特定兼用キャスクの除熱解析フローを図 2.4.3-2 に示す。

a. 使用済燃料集合体の崩壊熱評価方法

HDP-69BCH(B)型に収納される使用済燃料集合体の収納配置は配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)の3つである。これら収納配置における使用済燃料集合体の配置条件をそれぞれ図 2.4.3-3～図 2.4.3-5 に示す。HDP-69BCH(B)型に収納される使用済燃料集合体の仕様を表 2.4.3-1 に示す。使用済燃料集合体の崩壊熱量は、燃料集合体の種類、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求

める。使用済燃料集合体の崩壊熱量の計算に用いる計算条件及び計算結果を表 2.4.3-2 に示す。

図 2.4.3-3～図 2.4.3-5 中に示す特定兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度は、69 体の使用済燃料集合体のバンドル燃焼度*1 の平均値を示し、その平均値の使用済燃料が 69 体収納された場合の崩壊熱量が、キャスク 1 基当たりの崩壊熱量である。この崩壊熱量を使用済燃料集合体の収納制限として、以下「最大崩壊熱量」という。

一方、除熱解析に使用する崩壊熱量には、収納対象とする全使用済燃料集合体の軸方向燃焼度を包絡する燃焼度分布を考慮する。この軸方向燃焼度分布は、仮想的な軸方向燃焼度分布であり（表 2.4.3-3 及び表 2.4.3-4 参照）、前述の最大崩壊熱量よりも大きな値となる。除熱解析に使用する特定兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量を以下「設計崩壊熱量」という（図 2.4.3-6 参照）。最大崩壊熱量及び設計崩壊熱量はそれぞれ次式のとおり設定する。

$$[\text{最大崩壊熱量}] = [\text{使用済燃料集合体 (平均燃焼度) 1 体当たりの崩壊熱量}] \times 1.05^{*2} \times [\text{収納体数}]$$

$$[\text{設計崩壊熱量}] = [\text{使用済燃料集合体 (平均燃焼度) 1 体当たりの崩壊熱量 (仮想的な軸方向燃焼度分布を考慮)}] \times 1.05^{*2} \times [\text{収納体数}]$$

注記*1：軸方向の平均。

*2：ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の保守性を考慮する。

配置(i)及び配置(ii)の最大崩壊熱量を設定するにあたり、使用済燃料集合体の軸方向のノード当たりの燃焼度が一律に使用済燃料集合体 1 体当たりの平均燃焼度に等しい場合 (PF*3 を考慮しない場合) で、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度 8×8 燃料の崩壊熱量を比較すると、いずれも新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の値が大きい。したがって、配置(i)及び配置(ii)の最大崩壊熱量は新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の崩壊熱量を基に設定する。一方、設計崩壊熱量を設定するにあたり、PF を考慮した場合で新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度 8×8 燃料の崩壊熱量を比較すると、配置(i)では新型ジルコニウムライナ燃料、配置(ii)では高燃焼度 8×8 燃料の値がそれぞれ大きい。したがって、配置(i)の設計崩壊熱量は新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料、配置(ii)の設計崩壊熱量は高燃焼度 8×8 燃料の崩壊熱量を基に設定する。これらの値を用いて配置(i)及び配置(ii)の最大崩壊熱量及び設計崩壊熱量を設定する。

注記*3：ピーキングファクター(PF)の略であり、使用済燃料集合体 1 体当たりの平均燃焼度に対する軸方向燃焼度の比。

【最大崩壊熱量の算出過程】

配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)の最大崩壊熱量は、以下のとおり。

(配置(i) : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納した場合)
[最大崩壊熱量] = 0.1670 (kW/体) × 1.05 × 69 (体) = 12.10 (kW)

(配置(ii) : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納した場合)
[最大崩壊熱量] = 0.1900 (kW/体) × 1.05 × 69 (体) = 13.77 (kW)

(配置(iii) : 新型 8×8 燃料を収納した場合)
[最大崩壊熱量] = 0.1158 (kW/体) × 1.05 × 69 (体) = 8.39 (kW)

【設計崩壊熱量の算出過程】

配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)の設計崩壊熱量は、以下のとおり。

(配置(i) : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納した場合)
[設計崩壊熱量] = 0.2118 (kW/体) × 1.05 × 69 (体) = 15.34 (kW)

(配置(ii) : 高燃焼度 8×8 燃料を収納した場合)
[設計崩壊熱量] = 0.2116 (kW/体) × 1.05 × 69 (体) = 15.33 (kW)

(配置(iii) : 新型 8×8 燃料を収納した場合)
[設計崩壊熱量] = 0.1432 (kW/体) × 1.05 × 69 (体) = 10.37 (kW)

以上より、本評価においては、以下の保守性を有している。

- ・使用済燃料集合体の最高温度を保守的に評価するため、収納制限における最大崩壊熱量よりも大きい設計崩壊熱量で評価を行っている。

b. 特定兼用キャスク各部及び燃料被覆管の温度評価

除熱解析は、HDP-69BCH(B)型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、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、有限要素法による伝熱解析コード(ABAQUS)を使用して求める。使用した解析モデルは以下の3つである。

- ・ 特定兼用キャスク熱解析モデル
 - ①軸方向全体モデル (以下「全体モデル」という。)
 - ②径方向輪切りモデル (以下「輪切りモデル」という。)
- ・ 燃料被覆管熱解析モデル
 - ③燃料集合体モデル

各解析モデルの形状図及び要素分割図を図 2.4.3-7～図 2.4.3-13 に示す。

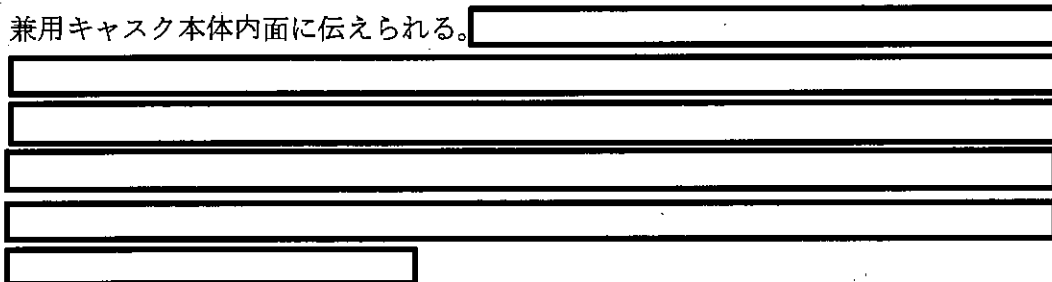
各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

- ①全体モデル : 胴 (底板)、金属ガスケット、中性子遮蔽材 (蓋部、底部)、蓋部、トラニオン
- ②輪切りモデル : バスケット、胴、中性子遮蔽材 (側部)、外筒
- ③燃料集合体モデル : 燃料被覆管

また、HDP-69BCH(B)型周囲の環境として、以下の条件とする。

- ・ 貯蔵姿勢 : たて置き
- ・ 周囲温度 : 45℃
- ・ 貯蔵建屋壁面温度 : 65℃
- ・ 貯蔵建屋壁面放射率 : 0.8
- ・ 特定兼用キャスク表面放射率 : 0.8
- ・ 特定兼用キャスク表面から壁面への形態係数 : 0.232

図 2.4.3-1 に示すように、バスケット外周部に伝えられた使用済燃料集合体の崩壊熱は、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に伝えられる。



なお、本評価においては、以下の保守性を有している。

- ・ 全体モデル解析では、平均燃焼度の使用済燃料集合体が 69 体収納されている条件 (発熱量の総量が設計崩壊熱量となる。) としている。輪切りモデル解析では、

中央部の 37 体の使用済燃料集合体は最高燃焼度の崩壊熱量とし、発熱量の総量が設計崩壊熱量となるように外周部の発熱量を調整している。設計崩壊熱量は、収納する使用済燃料の軸方向燃焼度分布を包絡するように設定した軸方向燃焼度分布を使用し、ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の保守性を考慮して算出していることから、実際に収納される使用済燃料集合体の崩壊熱量に対して保守的な値としている。燃料集合体モデル解析では最高燃焼度の崩壊熱量を用いている。

- ・ 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集合体は、温度を高め評価するよう、空間の中央に配置し、実際には特定兼用キャスク 本体とバスケット及びバスケットと使用済燃料集合体が接触することで部材間の直接の伝熱が存在すると考えられるが、これを無視する。これにより、特定兼用キャスク 内の使用済燃料集合体の配置状態に影響する特定兼用キャスク の設置姿勢（たて置き又は横置き）に除熱上の制限はない。
- ・ 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。

d. 評価基準

HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価基準を表 2.4.3-5 に示す。燃料被覆管の基準値は、旧 JNES の試験報告書等の文献に基づき、燃料被覆管の累積クリープ量が 1%を超えない温度、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による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。また、特定兼用キャスク の構造強度部材は、基本的安全機能を維持する観点から、金属キャスク構造規格に規定される規格値により構造強度設計が可能となる温度を上限とする。中性子遮蔽材と金属ガスケットは、文献値からそれぞれ遮蔽設計と閉じ込め設計が可能となる温度を上限とする。伝熱フィンは、文献値から除熱設計に影響を及ぼさない温度を上限とする。

e. 評価結果

HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価結果を表 2.4.3-6 及び図 2.4.3-14～図 2.4.3-22 に示す。解析の結果、燃料被覆管の温度及び特定兼用キャスク 各部位の温度は表 2.4.3-5 に示す評価基準を満足しており、HDP-69BCH(B)型は使用済燃料被覆管及び特定兼用キャスク 各部の温度は、設定した制限値以下となる設計となっている。

f. 経年変化の防止、取り扱い上の安全性について

HDP-69BCH(B)型は、表面に経年変化を防止するための塗装を施す設計とし、塗装面は、長期使用を考慮して 130 °C 以下を設計目標とし、表 2.4.3-6 に示すように、外筒、蓋部は 130 °C 以下となることを確認している。

HDP-69BCH(B)型を貯蔵施設内に貯蔵する場合、周囲温度の最高温度は45℃であり、取り扱いを行う上で人がHDP-69BCH(B)型の周囲に近づくことに問題はない。表2.4.3-6に示すように、HDP-69BCH(B)型の表面は使用済燃料の実際の収納条件によっては、高温となる可能性がある。貯蔵期間中にHDP-69BCH(B)型の外面に人が接触する可能性がある作業は、表面温度の計測、蓋間圧力の測定又は表面温度の測定があるが、これらは防具により保護することが可能であり、安全上問題にはならないと考えられる。

g. 特定兼用キャスクの温度測定について

温度検出器の構成図を図2.4.3-23に示す。HDP-69BCH(B)型は、表2.4.3-5に示す温度以下であることを測定できるように、HDP-69BCH(B)型の表面に温度検出器を設置できる設計としている。なお、温度検出器は、ステンレス鋼のような設計貯蔵期間(60年)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必要な耐食性のある材料を用いると共に保守及び交換が可能な構造とする。

表 2.4.3-1 使用済燃料集合体の仕様

項目		仕様		
種類		新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
形状	集合体幅 (mm)	約 132 又は約 134		
	全長 (mm)	約 4,350 又は約 4,470		
質量 (kg)		約 270		
初期濃縮度 (wt%)		3.1 以下	3.1 以下	3.7 以下
最高燃焼度*1 (Mwd/t)		34,000 以下	40,000 以下	48,000 以下
最短冷却期間*2 (年)		28	18	18
収納体数 (体)		69		

注記*1：最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体1体の燃焼度の最大値を示す。

*2：最短冷却期間とは、収納する使用済燃料集合体の最短の冷却期間を示す。

表 2.4.3-2 使用済燃料集合体の崩壊熱量計算条件及び結果

使用済燃料集合体の収納配置条件		配置(i)		配置(ii)		配置(iii)
種類	種類	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	新型 8×8 燃料
		平均燃焼度*1 (MWd/t)	34,000	34,000	40,000	40,000
最高燃焼度*2 (MWd/t)	40,000	40,000	40,000	40,000	34,000	
比出力 (MW/t)	25.3	26.2	25.3	26.2	25.3	
照射期間 (日)	燃料集合体 (平均燃焼度*1)	1,344	1,298	1,582	1,527	1,147
	燃料集合体 (最高燃焼度*2)	1,582	1,527	—	1,833	1,344
初期濃縮度*3 (%)	2.88	3.35	2.88	3.35	2.88	
冷却期間 (年)	18	18	22	22 / 20*4	28	
ウラン質量 (kg)	177	174	177	174	177	
ピーキングファクター	表 2.4.3-3	表 2.4.3-3	表 2.4.3-3	表 2.4.3-4	表 2.4.3-3	
計算結果	使用済燃料 1 体当たりの崩壊熱量 (PF を考慮しない) (W)	167.0	160.8	190.0	181.5	115.8
	使用済燃料 1 体当たりの崩壊熱量 (PF 考慮) (W)	205.8	196.5	同上	240.8	139.2
	設計崩壊熱量*5 (kW)	211.8	201.3	207.4	211.6	143.2
	最大崩壊熱量 (kW)	266.9	251.8	同上	275.1	174.4
収納体数 (体)	69					
HDP-69BCH(B) 型 1 基当たりの最大崩壊熱量 (kW)	12.1		13.8		8.4	
HDP-69BCH(B) 型 1 基当たりの設計崩壊熱量*5 (kW)	15.34		15.33		10.37	

注記*1：平均燃焼度とは、特定兼用キャスクに収納する全使用済燃料集合体に対する使用済燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

*2：最高燃焼度とは、特定兼用キャスクに収納する使用済燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

*3：収納される使用済燃料集合体の種類ごとの最小値を用いる。

*4：燃焼度 40,000 MWd/t 時の冷却期間は 22 年、燃焼度 48,000 MWd/t 時の冷却期間は 20 年である。

*5：除熱解析に用いる設計崩壊熱量算出時は、崩壊熱量計算結果に 5%の保守性を考慮する。

表 2.4.3-3 使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布 (配置(i)及び(iii))

種類	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料		高燃焼度 8×8 燃料		新型 8×8 燃料		
	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	
使用済燃料集合体の 収納配置条件	配置(i)						配置(iii)
燃焼度 (MWd/t)	34,000	40,000	34,000	40,000	29,000	34,000	
	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	
(上部)							ノード*1
(下部)							PF*2

注記*1: ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

*2: ピーキングファクター

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.3-4 使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布 (配置(ii))

種類	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料		高燃焼度 8×8 燃料			
使用済燃料集合体の 収納配置条件	配置(ii)					
燃焼度 (MWd/t)	40,000		40,000		48,000	
	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2
(上部)						
(下部)						

注記*1: ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

*2: ピーキングファクター

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.3-5 除熱機能の設計基準

対象となる部位		設計基準値 (°C)	参考文献	設計基準値の考え方
燃料被覆管	新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料	300	JNES 報告書 ⁽¹⁾⁽²⁾	左記の文献に基づき、燃料被覆管の累積クリープ量が 1%を超えない温度、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による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。
	高燃焼度 8×8 燃料			
	新型 8×8 燃料	200		
特定兼用 キャスク	胴、外筒及び蓋部*1	350	金属キャスク構造規格 ⁽³⁾	左記の文献に基づき、安全機能及び構造強度の維持が必要な構成部材は、健全性及び性能が維持できる*1温度以下とする。
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	150	製造メーカー文献 ⁽⁴⁾	
	金属ガスケット	130	電中研報告書 ⁽⁵⁾	
	バスケットプレート (ほう素添加ステンレス鋼)	300	金属キャスク構造規格 ⁽⁶⁾	
	トランニオン	350	金属キャスク構造規格 ⁽³⁾	
	伝熱フィン	300	ステンレス鋼便覧 ⁽⁷⁾ 、金属便覧 ⁽⁸⁾	

注記*1: 構造強度部材は、金属キャスク構造規格に規定される規格値により構造強度設計が可能となる温度を上限とする。中性子遮蔽材と金属ガスケットは、文献値からそれぞれ遮蔽設計と閉じ込め設計が可能となる温度を上限とする。伝熱フィンは、文献値から除熱設計に影響を及ぼさない温度を上限とする。

表 2.4.3-6 除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (°C)		設計基準値 (°C)
		最高温度	配置 (i) 配置 (ii)	
燃料 被覆管*1	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 高燃焼度 8×8 燃料	262*2	259 262	300
	新型 8×8 燃料	196*3	—	200
特定兼用 キャスク	胴	135	135 134	350
	胴 (底板)	142	142 139	350
	外筒	113	113 113	350
	一次蓋	97	96 97	350
	二次蓋	86	85 86	350
	一次蓋ボルト	90	89 90	350
	二次蓋ボルト	86	85 86	350
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	128*4	128*4 128*4	150
	金属ガスケット	90	89 90	130
	バスケットプレート (ほう素添加ステンレス鋼)	251	248 251	300
	トラニオン	120	120 118	350
	伝熱フィン*5	135	135 134	300

注記*1：燃料棒の最高温度とした。なお、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している。

*2：照射硬化回復試験の結果、BWR 燃料では、約 270°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⁽⁹⁾。

- *3：配置(iii)における解析結果を示す。
- *4：蓋部、底部、側部中性子遮蔽材のうち、最も高い温度を示す。
- *5：胴の温度で代表する。

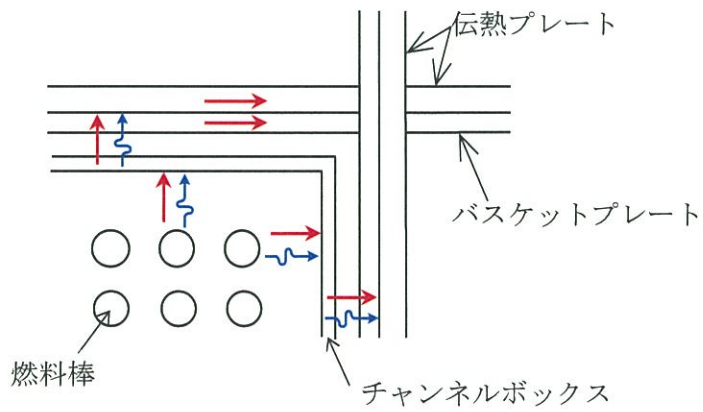
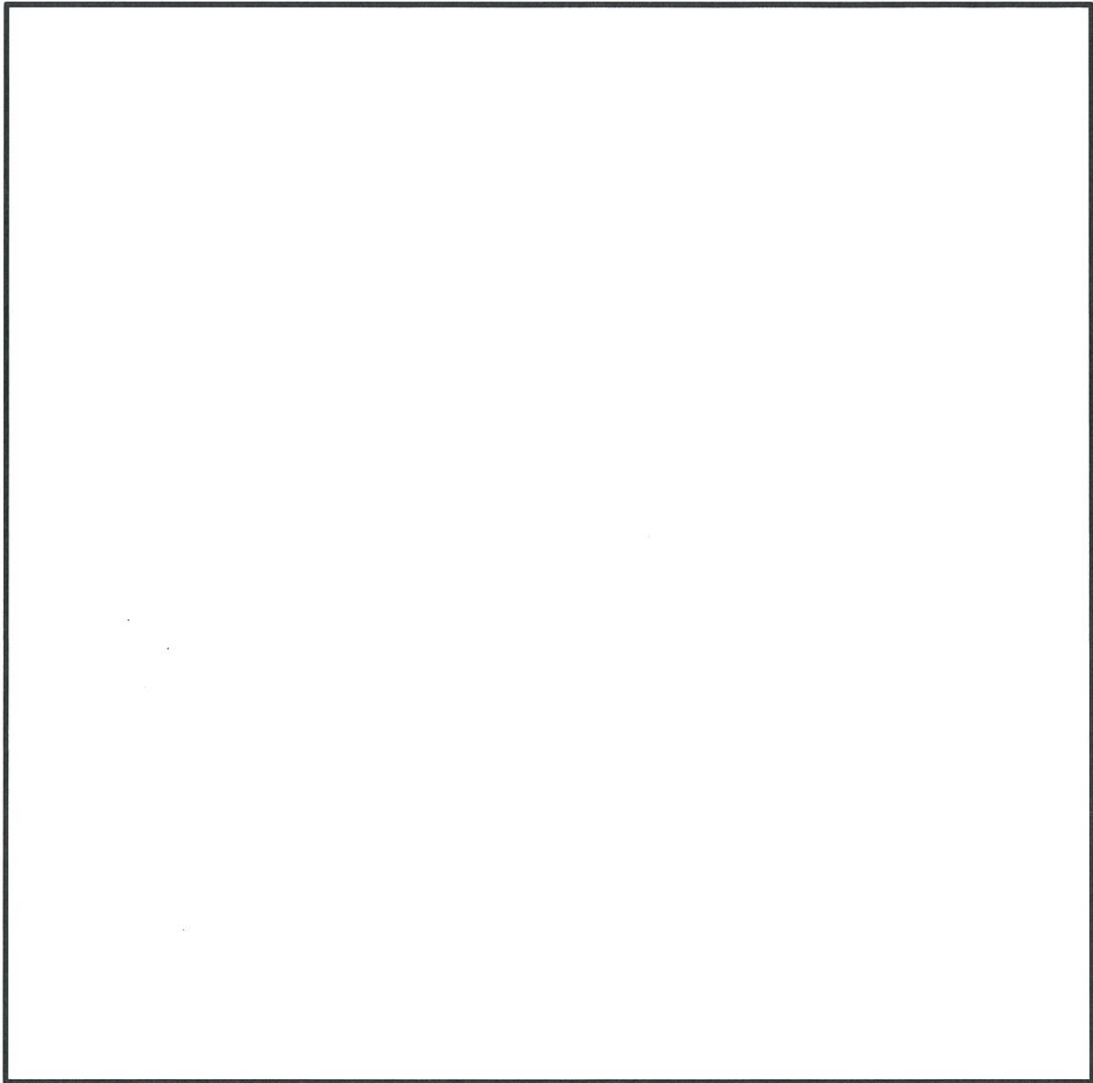


図 2.4.3-1 HDP-69BCH(B)型の伝熱形態図

内は商業機密のため、非公開とします。

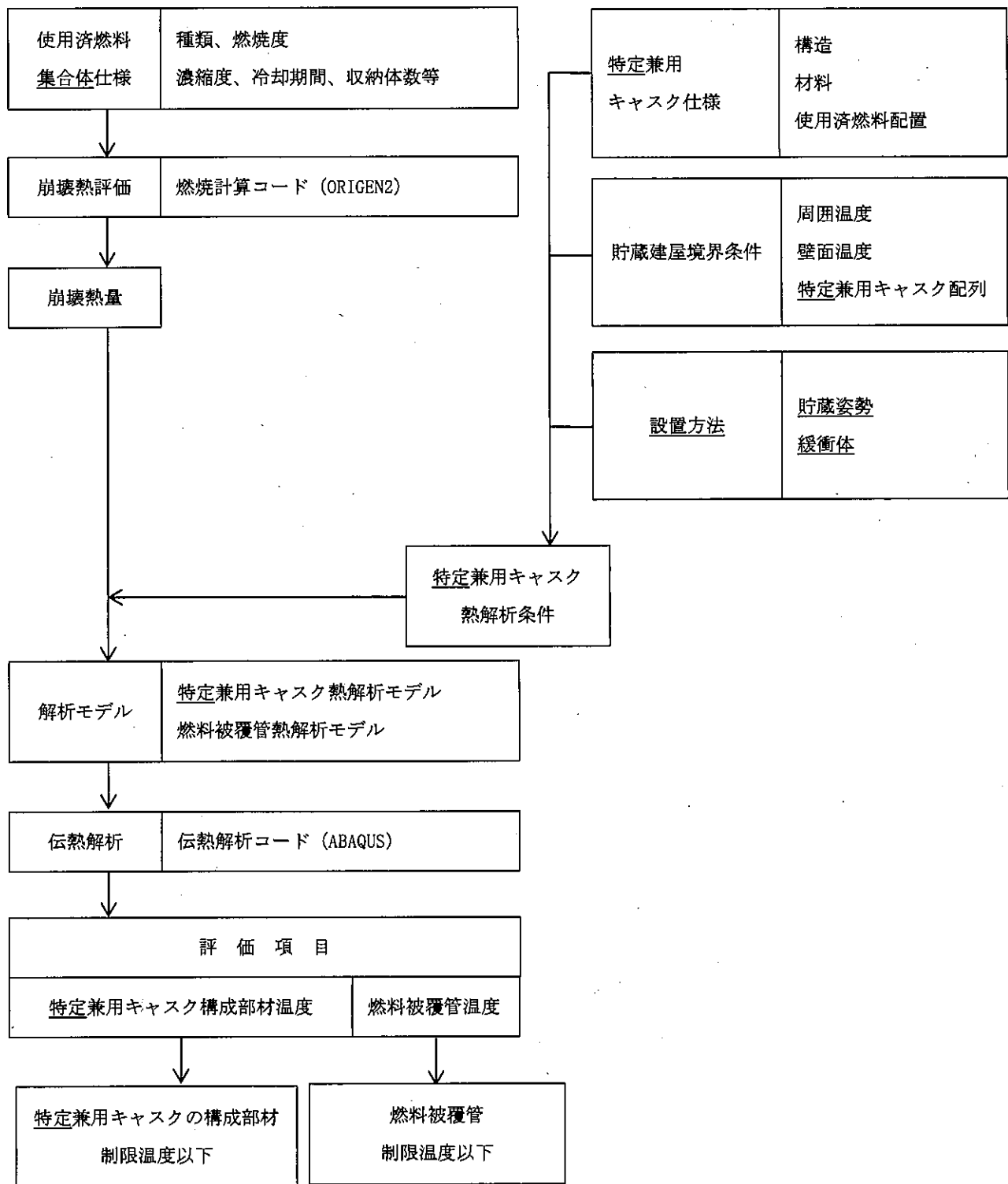
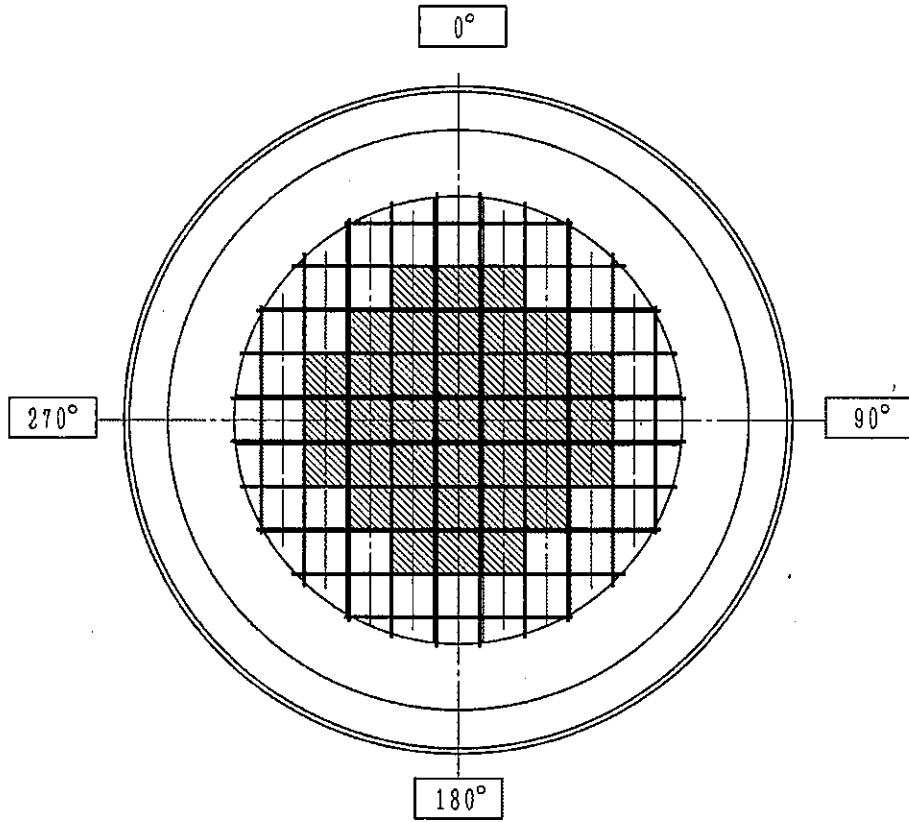


図 2.4.3-2 除熱解析フロー図



- | | |
|---|---|
| <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin-bottom: 5px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px);"></div> | <p>燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 18 年以上</p> <p>燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 18 年以上</p> |
|---|---|

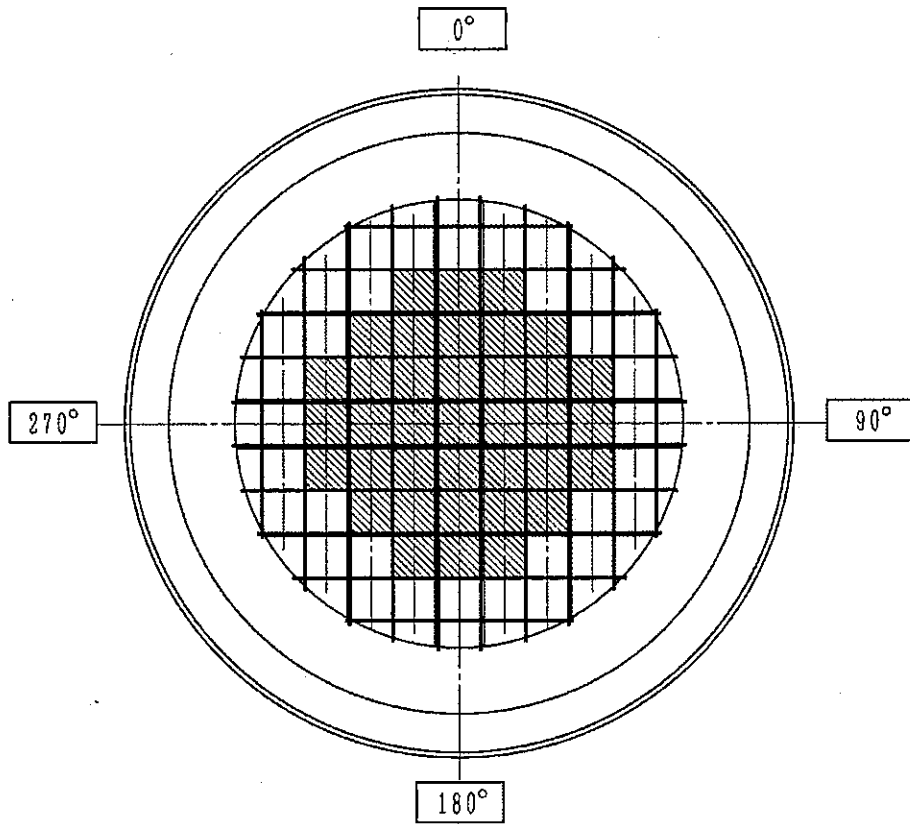
特定兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下

特定兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 12.1 kW*1 以下

注記*1 : 使用済燃料集合体 1 体当たりの軸方向燃焼度の平均値を用いた (PF=1 とした) 値。

図 2.4.3-3 使用済燃料集合体の収納配置条件 (配置(i))

(新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を収納する場合)

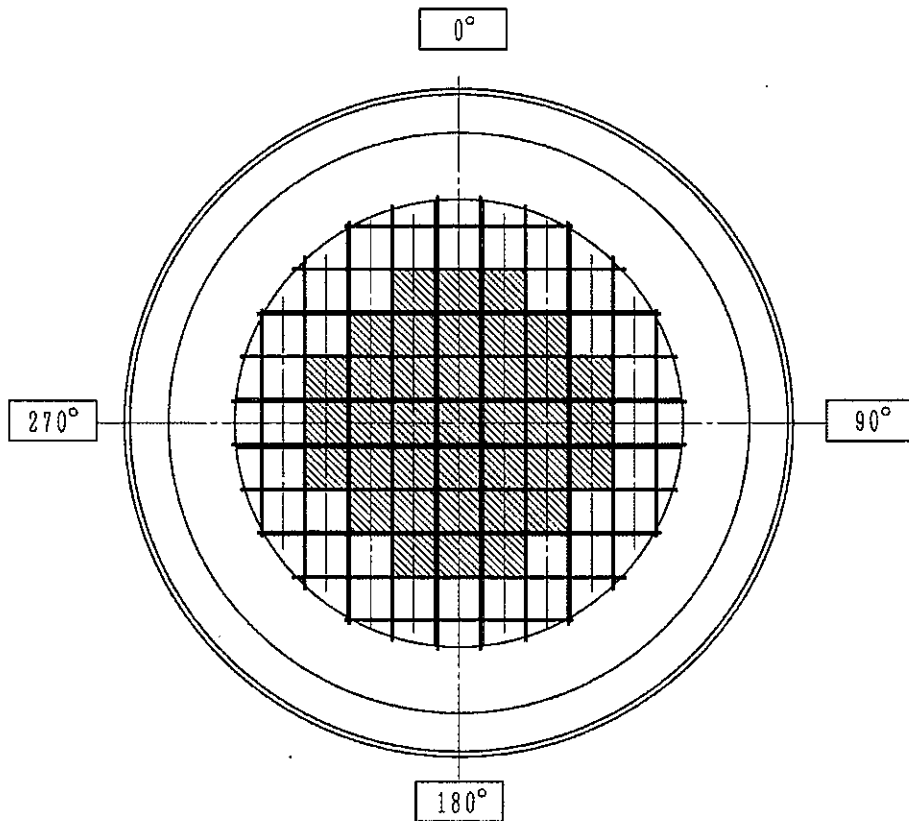


- | | |
|---|---|
| <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); margin-bottom: 5px;"></div> | <p>燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 22 年以上</p> <p>燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 48,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 20 年以上</p> |
|---|---|

特定兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 特定兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 13.8 kW*1 以下

注記*1 : 使用済燃料集合体 1 体当たりの軸方向燃焼度の平均値を用いた (PF=1 とした) 値。

図 2.4.3-4 使用済燃料集合体の収納配置条件 (配置(ii))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を収納する場合)



燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 28 年以上

燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 28 年以上

特定兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下
 特定兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 8.4 kW*1 以下

注記*1 : 使用済燃料集合体 1 体当たりの軸方向燃焼度の平均値を用いた (PF=1 とした) 値。

図 2.4.3-5 使用済燃料集合体の収納配置条件 (配置(iii))
 (新型 8×8 燃料のみを収納する場合)

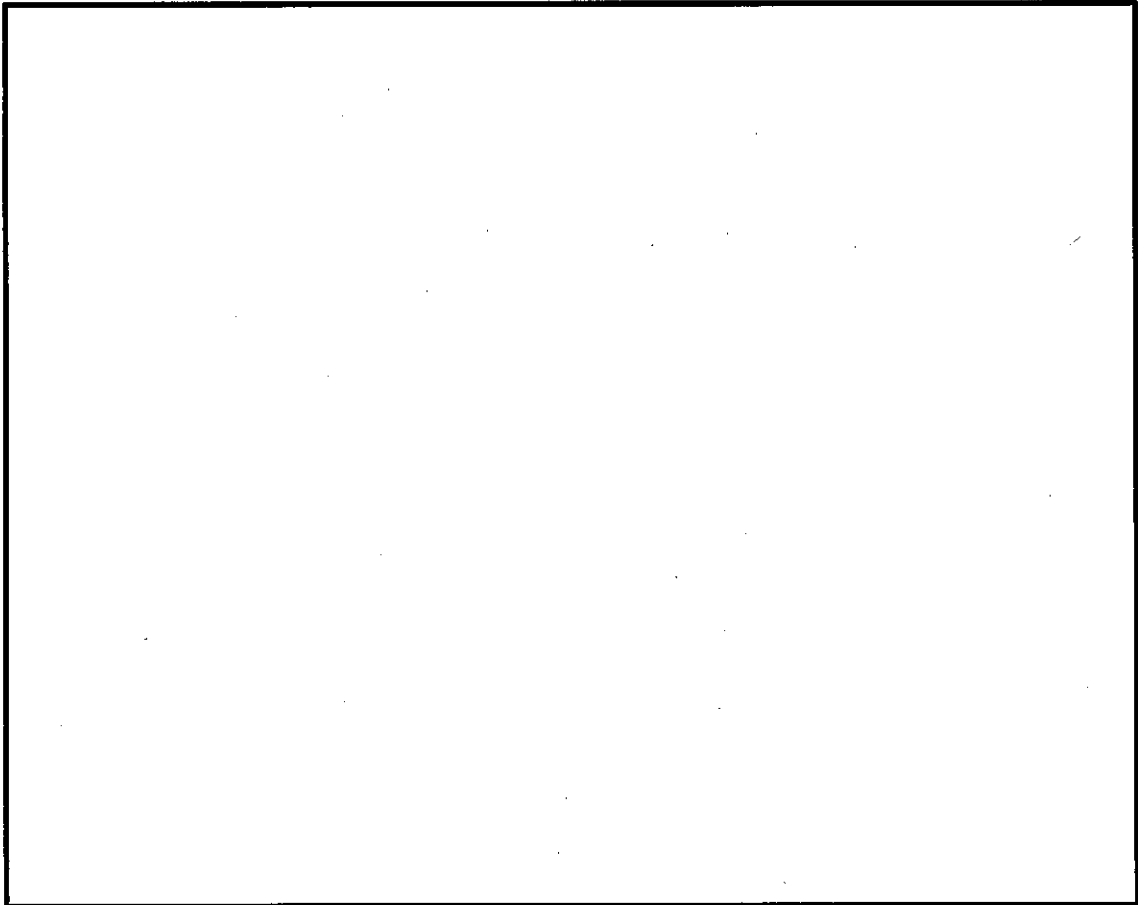


図 2.4.3-6 HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料集合体の設計崩壊熱量軸方向分布
(使用済燃料集合体 69 体分の設計崩壊熱量を示す。)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

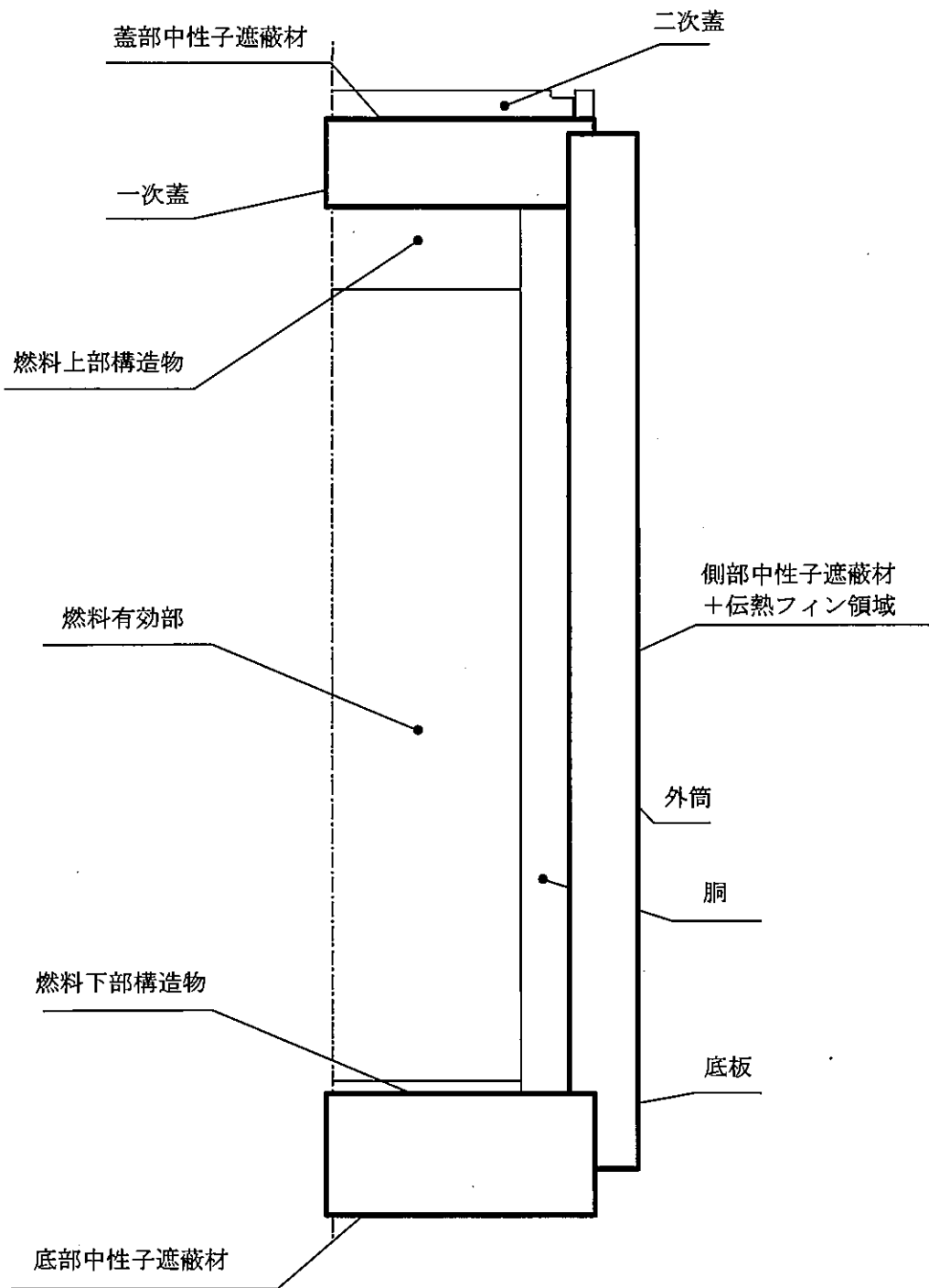


図 2.4.3-7 全体モデル形状図

内は商業機密のため、非公開とします。

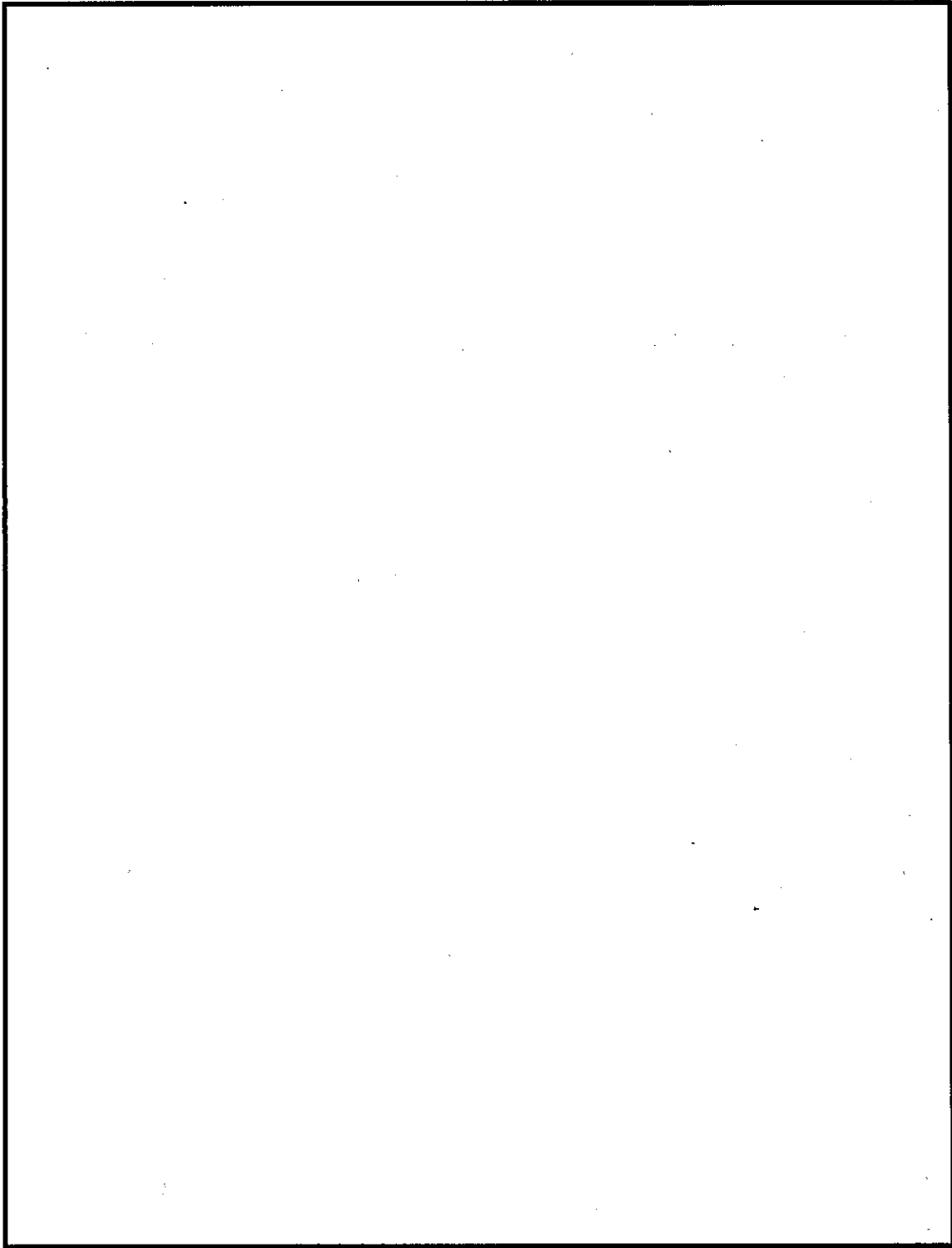



図 2.4.3-8 全体モデル要素分割図

内は商業機密のため、非公開とします。

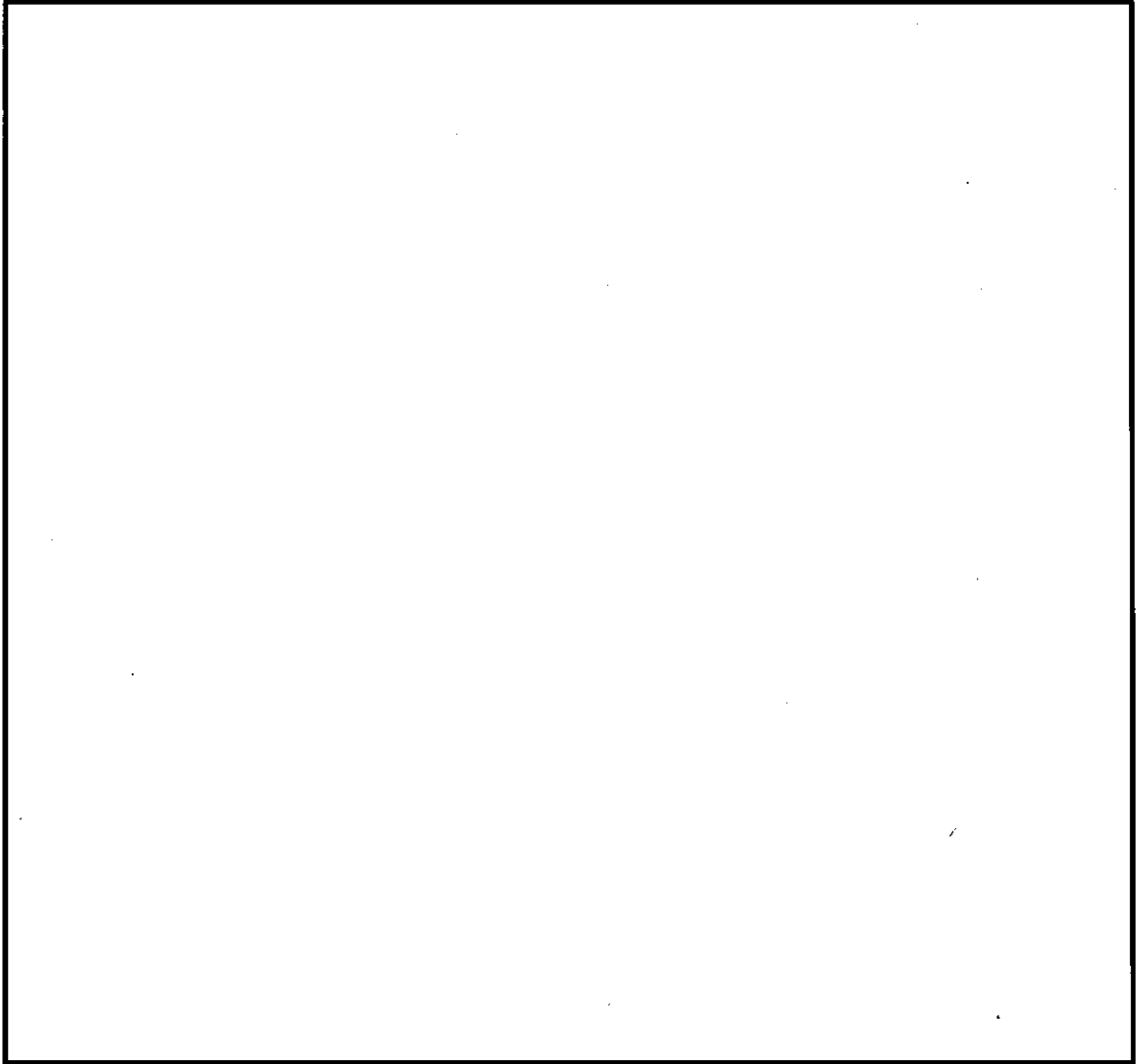



図 2.4.3-9 輪切りモデル形状図

 内は商業機密のため、非公開とします。

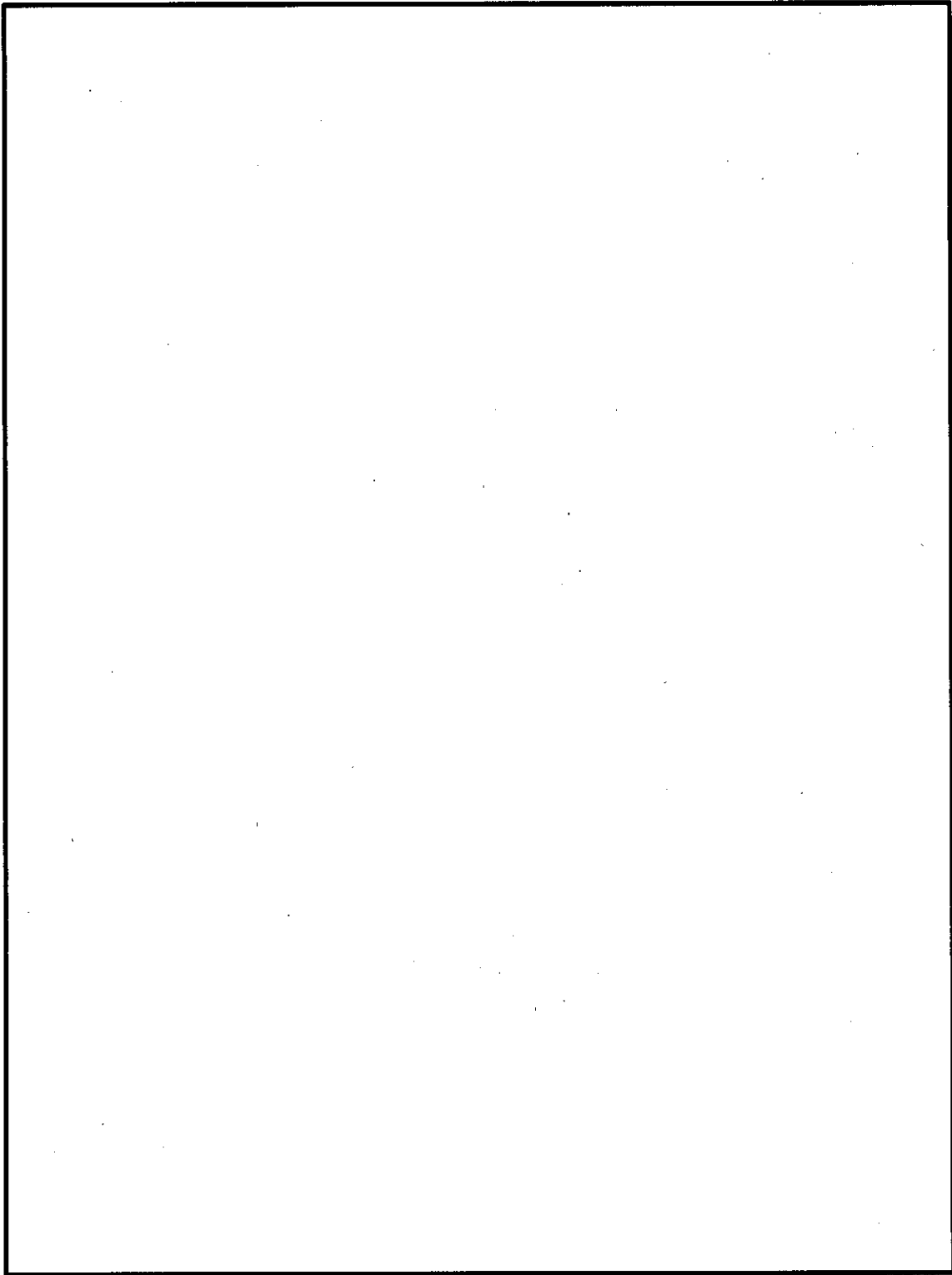

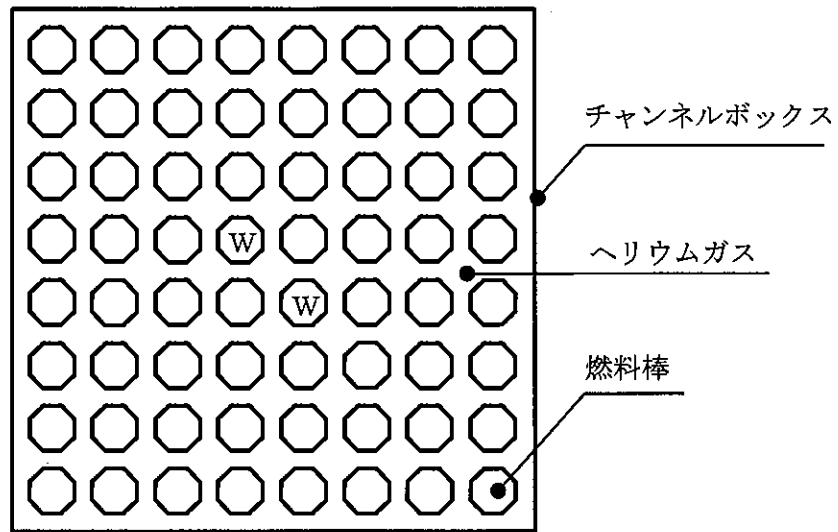


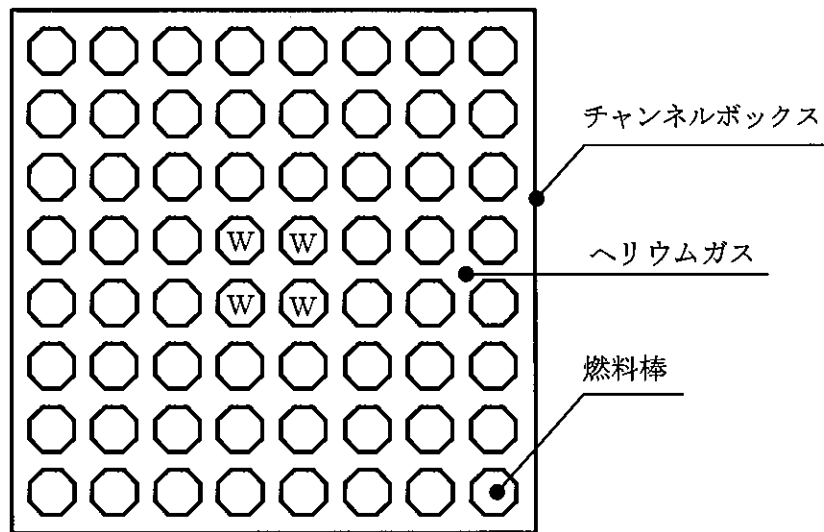
図 2.4.3-10 輪切りモデル要素分割図

 内は商業機密のため、非公開とします。



注記：Wはウォーターロッドであり、発熱はない。

図 2.4.3-11 燃料集合体モデル形状図
(新型 8×8 燃料、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の場合)



注記：Wはウォーターロッドであり、発熱はない。

図 2.4.3-12 燃料集合体モデル形状図
(高燃焼度 8×8 燃料の場合)

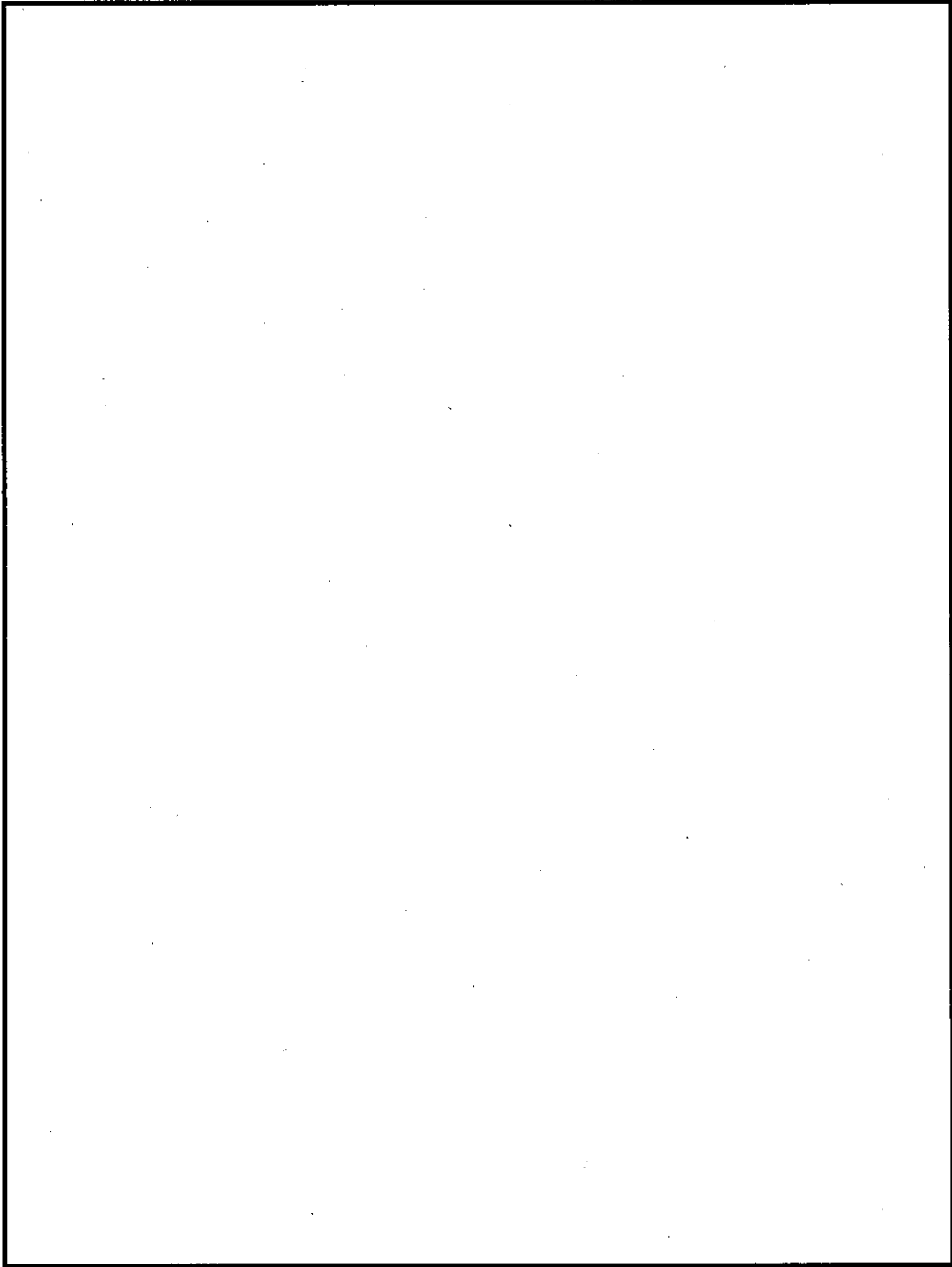


図 2.4.3-13 燃料集合体モデル要素分割図

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

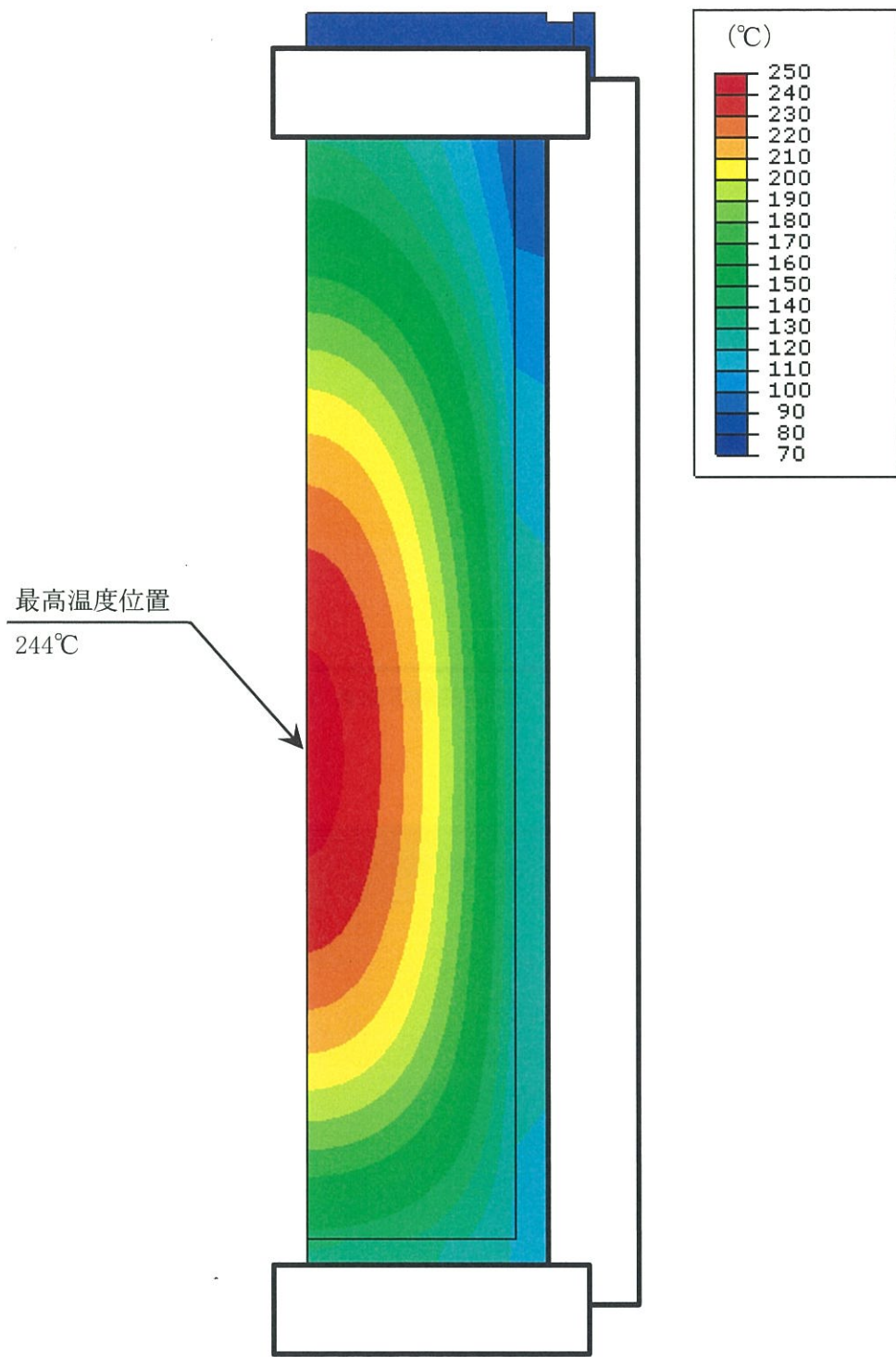


図 2.4.3-14 配置(i)の除熱解析結果(全体モデル)

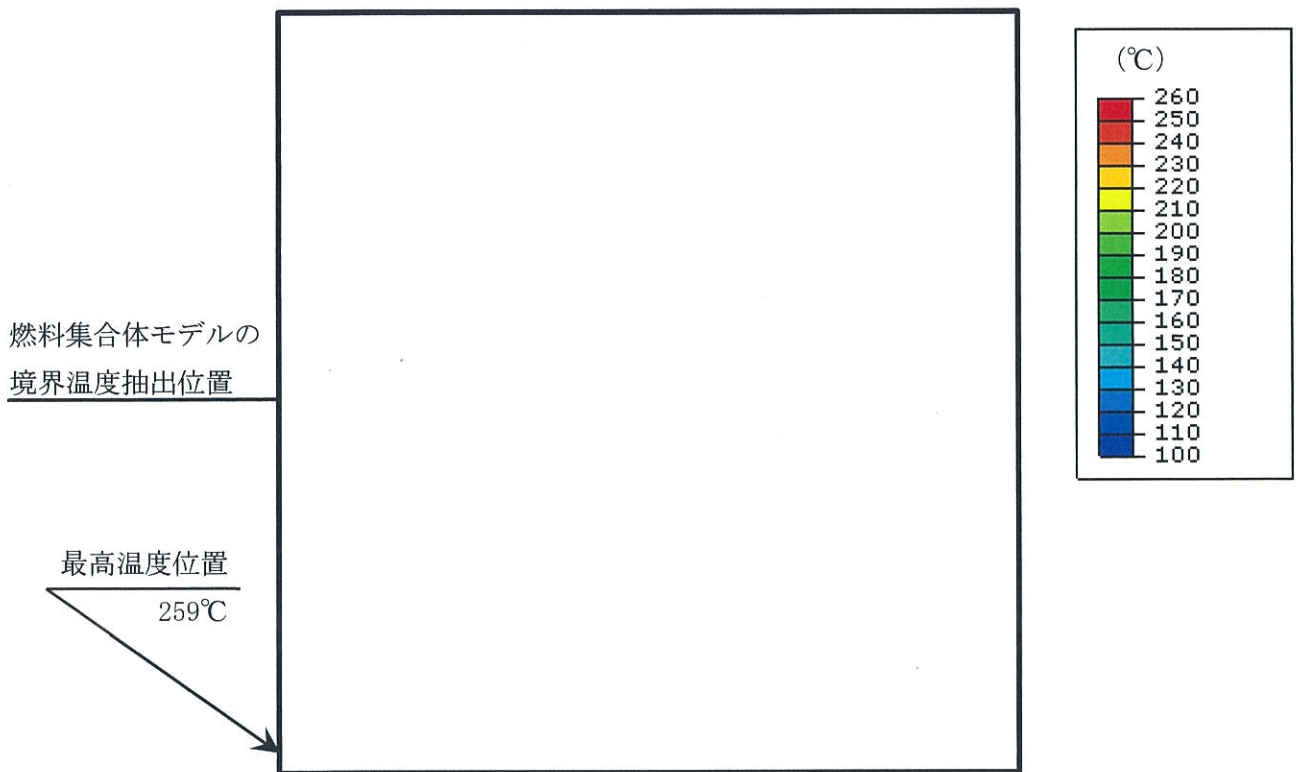


図 2. 4. 3-15 配置(i)の除熱解析結果(輪切りモデル)

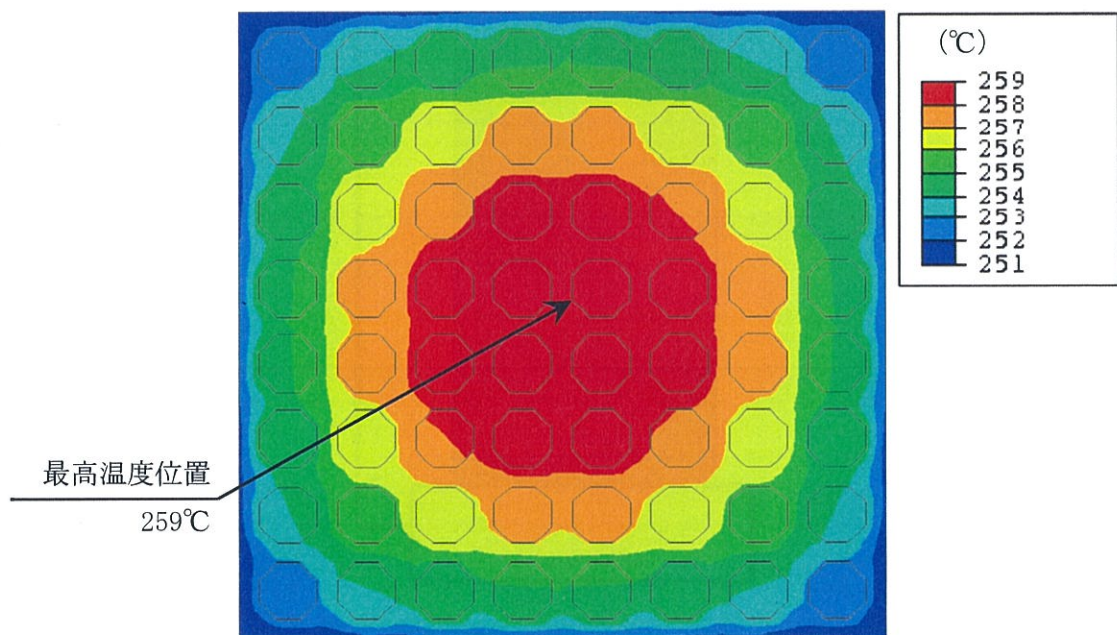


図 2. 4. 3-16 配置(i)の除熱解析結果(燃料集合体モデル)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

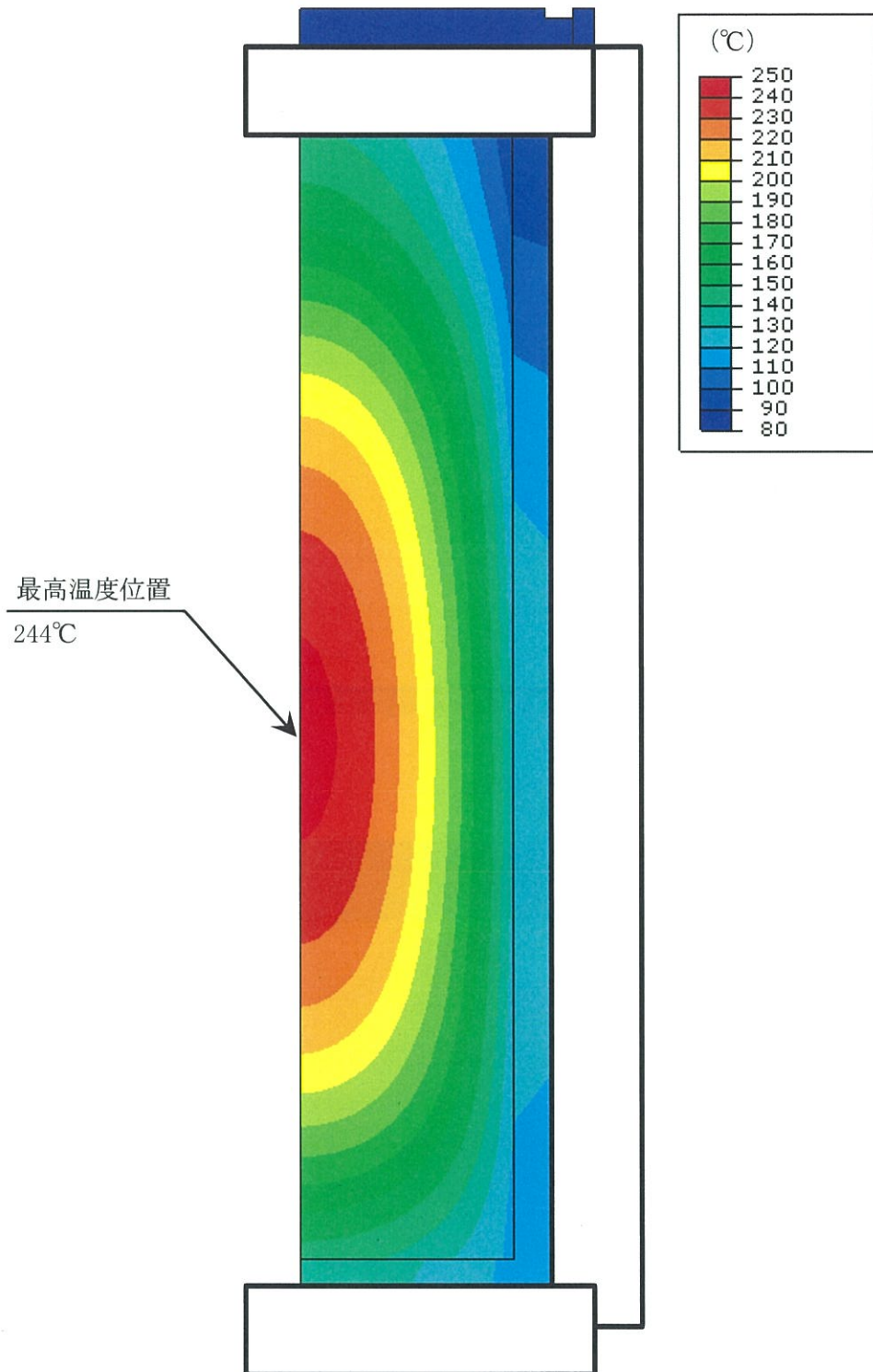


図 2.4.3-17 配置(ii)の除熱解析結果 (全体モデル)

内は商業機密のため、非公開とします。

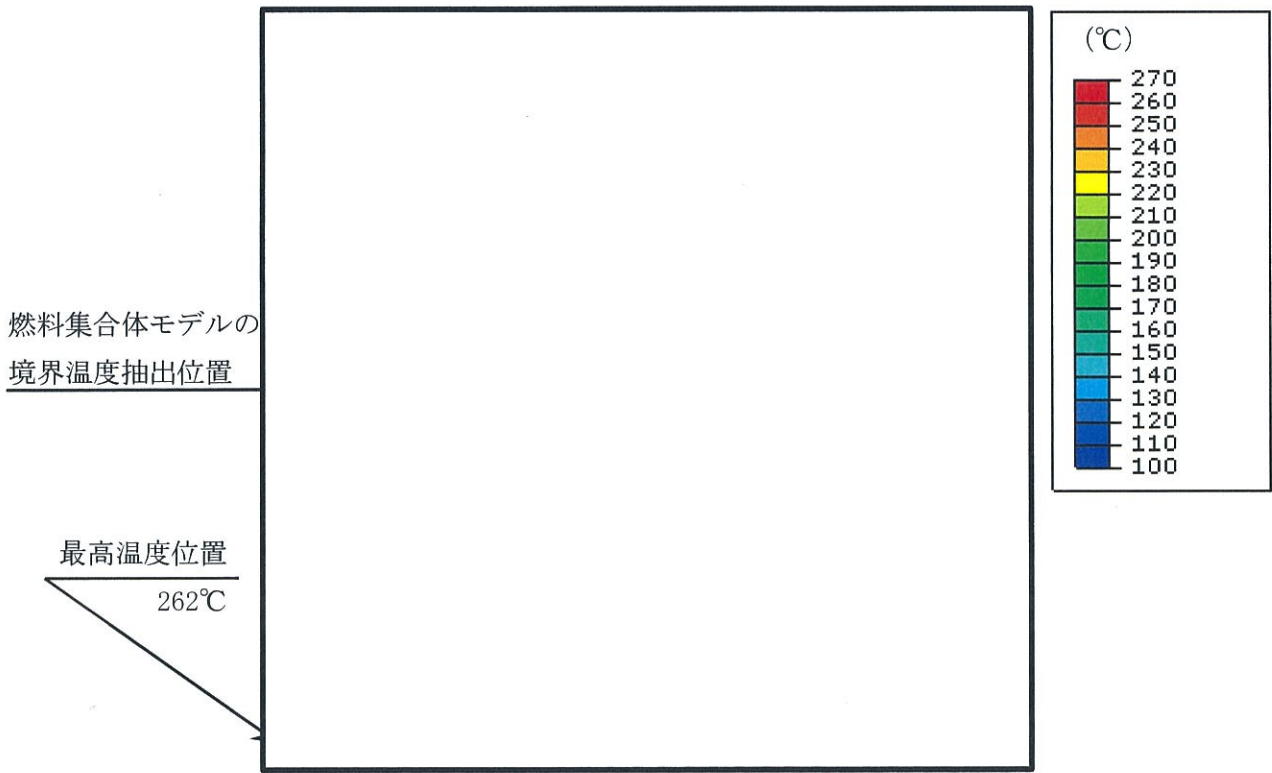


図 2. 4. 3-18 配置(ii)の除熱解析結果(輪切りモデル)

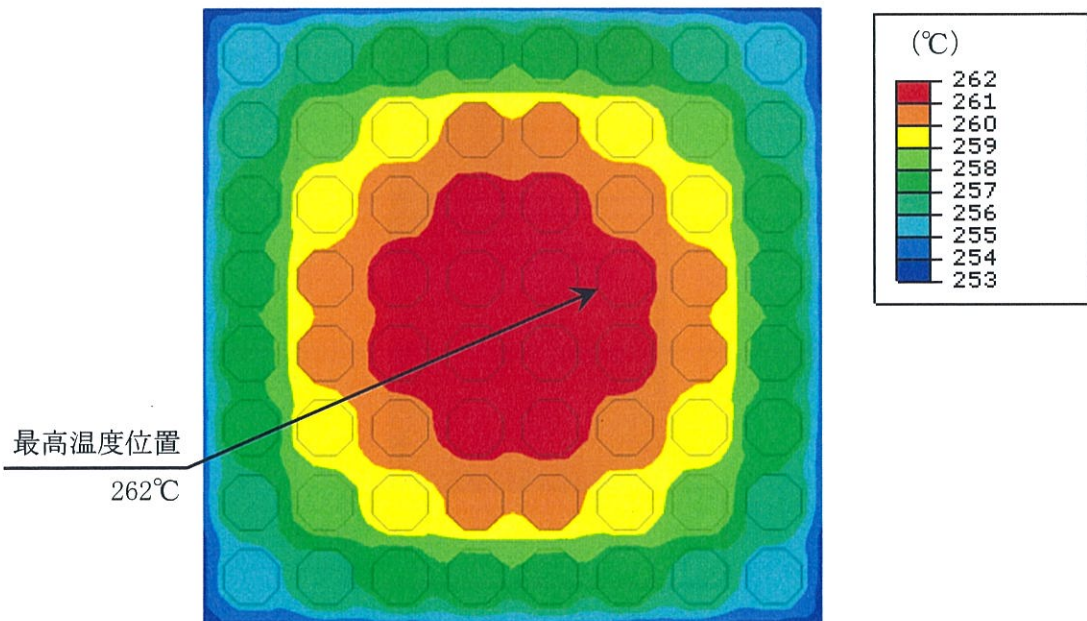


図 2. 4. 3-19 配置(ii)の除熱解析結果(燃料集合体モデル)

□内は商業機密のため、非公開とします。

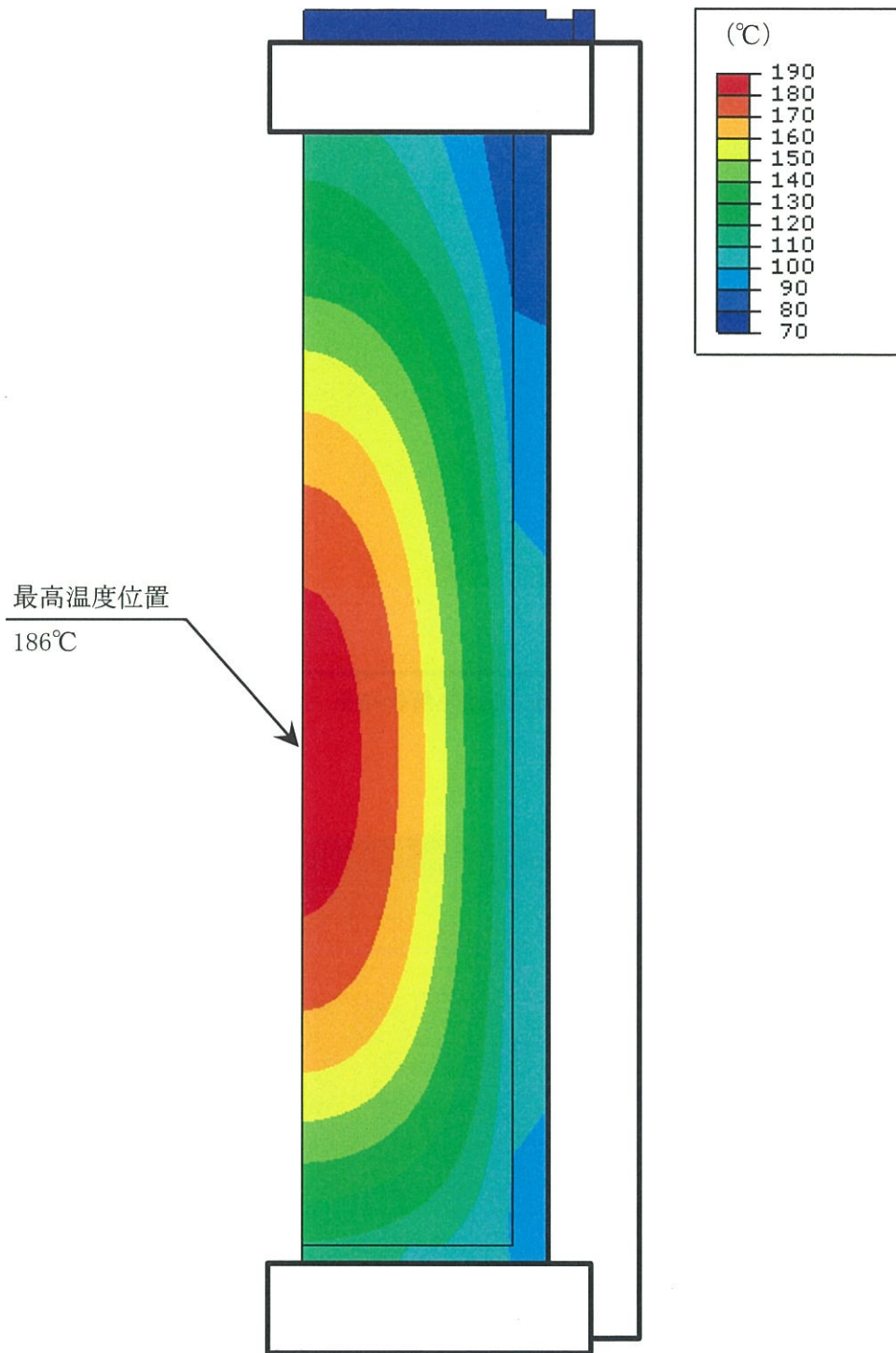


図 2.4.3-20 配置 (iii) の除熱解析結果 (全体モデル)

内は商業機密のため、非公開とします。

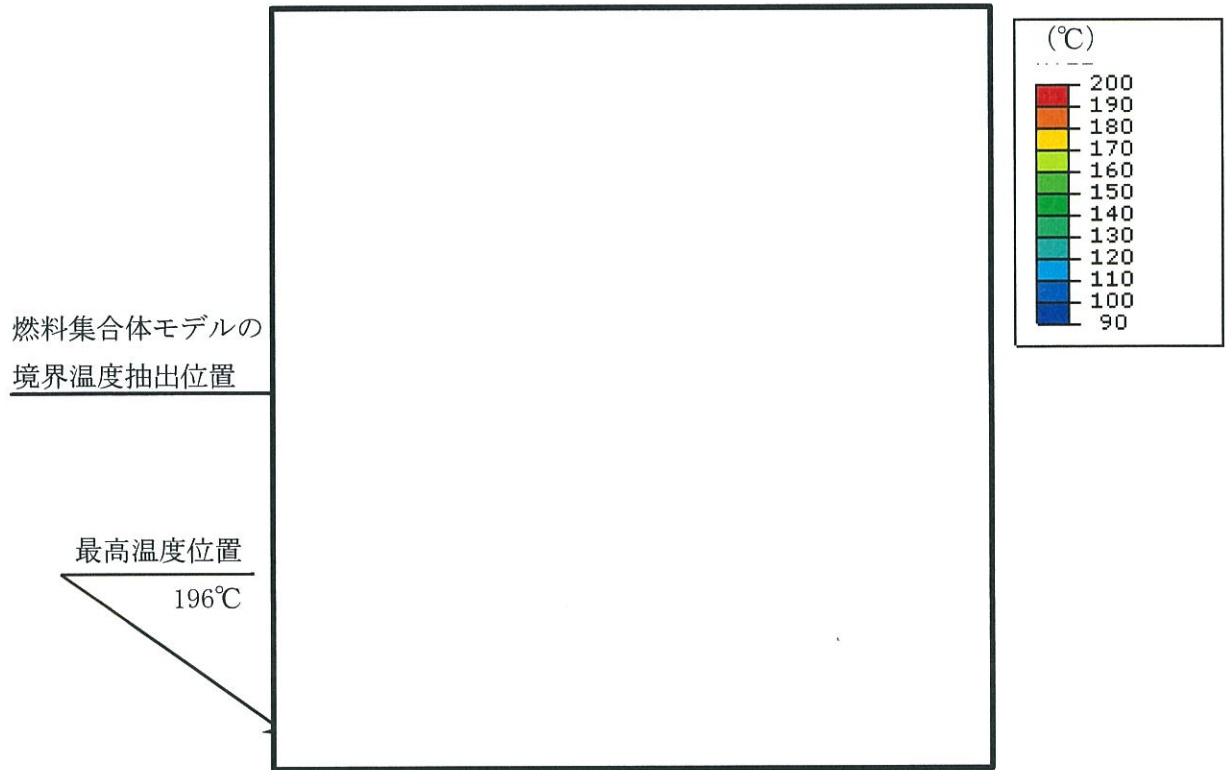


図 2. 4. 3-21. 配置 (iii) の除熱解析結果 (輪切りモデル)

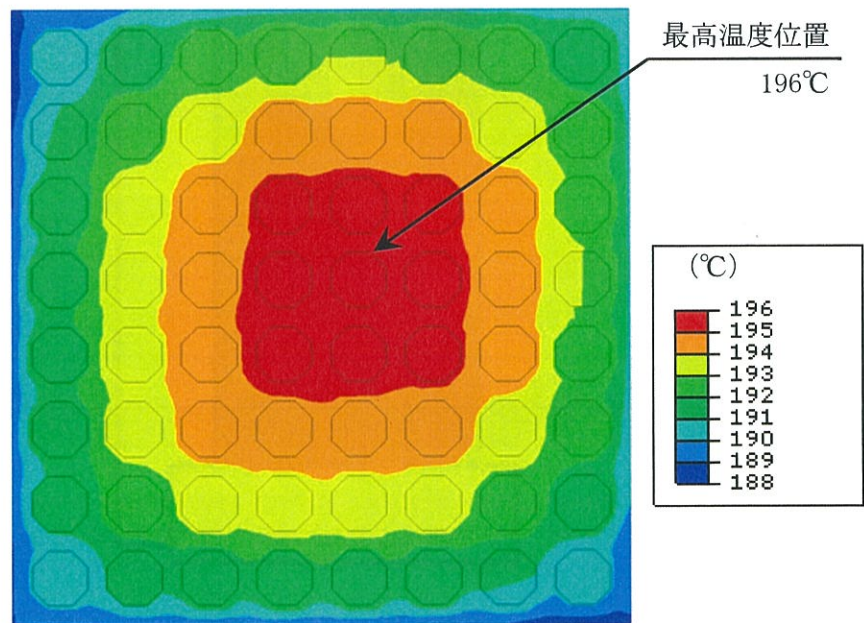


図 2. 4. 3-22 配置 (iii) の除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

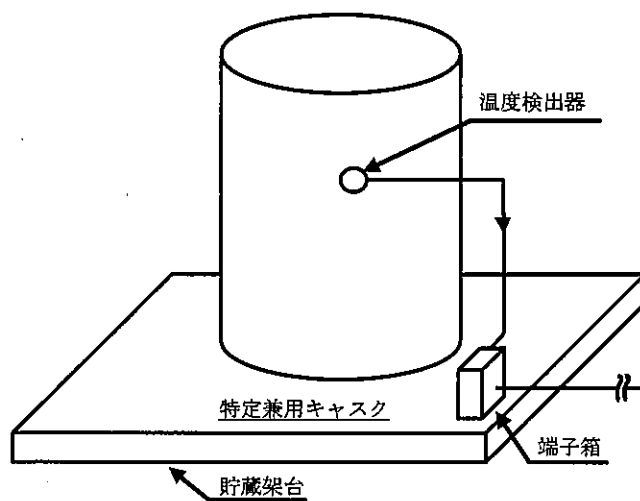


図 2.4.3-23 温度監視装置の構成図
 (基礎等に固定する設置方法(たて置き)の例)

なお、以下の内容は、本型式証明の申請範囲外とする。

〔設置許可基準規則〕

- ・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。
- ・貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。

〔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。

3. 使用する解析コード

(1) 概要

ABAQUS コード^{(10),(11)}は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (HKS 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。

(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. 1~3 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、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図 2.4.3-24 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、貯蔵容器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、本コードの妥当性が検証されている⁽¹²⁾。

ABAQUS コードの検証例を図 2.4.3-25 に示す。解析結果と試験結果がよく一致している。

また、金属キャスクの伝熱試験結果の例と解析結果の比較を図 2.4.3-26 に示す⁽¹³⁾。図 2.4.3-26 の伝熱試験結果の例は、過去に HDP-69B 型で測定した結果である。胴部の測定値と解析結果の差異は、0.5℃程度であり、よく一致している。一方、バスケット中心の温度は、解析結果の方が高く、保守的な結果を得られることを確認している。

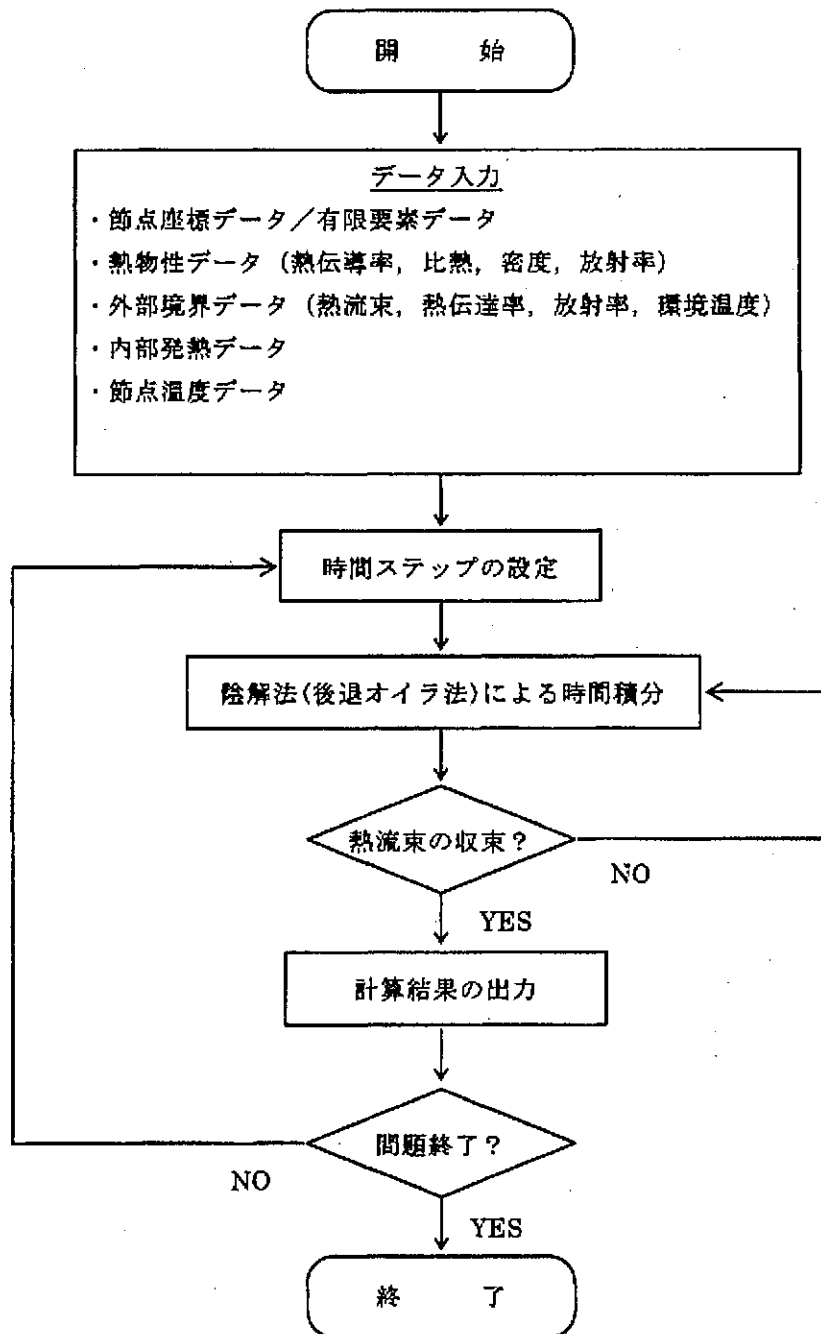


図 2.4.3-24 ABAQUS コードの計算フロー図

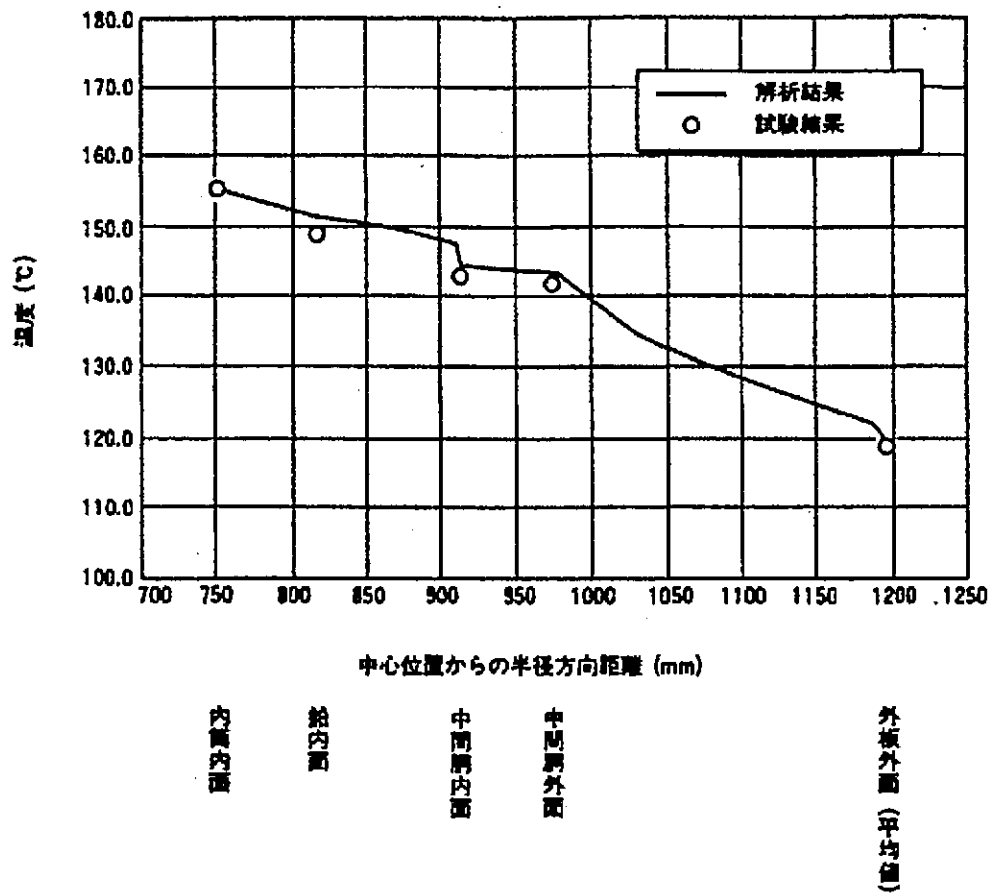


図 2.4.3-25 ABAQUS コードの検証例

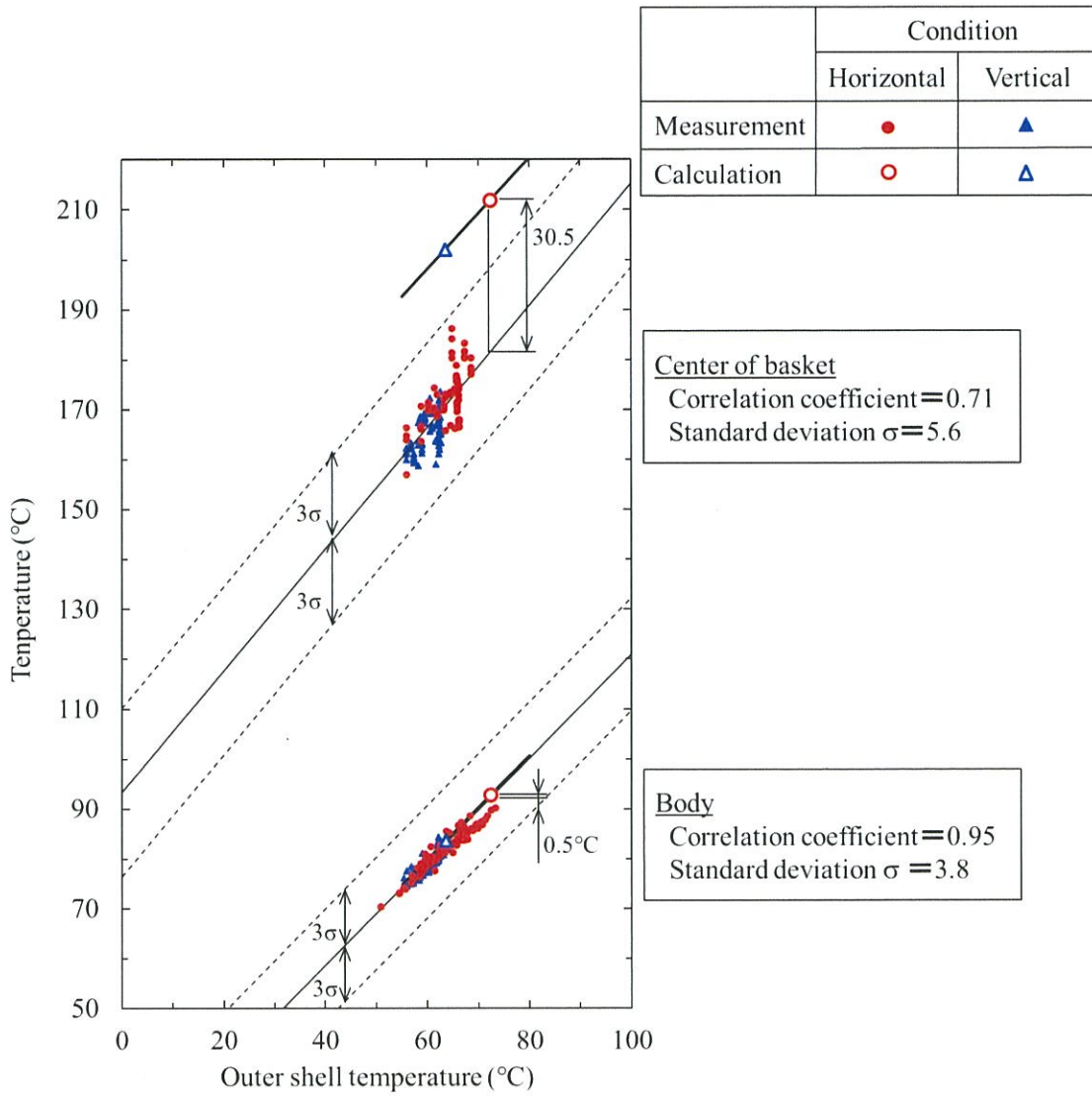


図 2.4.3-26 金属キャスクの温度測定結果の例と解析結果の比較

4. 基礎等に固定する設置方法（横置き）の場合

基礎等に固定する設置方法（横置き）として、緩衝体等を装着しない状態での横置きの除熱機能の評価結果⁽¹⁴⁾を以下に示す。

a. 評価基準

評価基準は表 2.4.3-5 と同様である。

b. 使用済燃料集合体の収納配置

HDP-69BCH(B)型に収納される使用済燃料集合体の収納配置は配置(i)で評価する。

c. 使用済燃料集合体の崩壊熱量設定

配置(i)の設計崩壊熱量 15.34 kW を使用する。

d. 解析モデル

2. と同様に、HDP-69BCH(B)型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化する。

有限要素法による伝熱解析コード(ABAQUS)を用いて伝熱解析を実施する。使用する熱解析モデル(全体モデル、輪切りモデル及び燃料集合体モデル)も2.と同様の熱解析モデルを用いる(図2.4.3-7、図2.4.3-8、図2.4.3-10、図2.4.3-13参照)。

e. 境界条件

HDP-69BCH(B)型周囲の環境として、以下の条件とする。

- ・貯蔵姿勢 : 横置き
- ・周囲温度 : 45℃
- ・コンクリート壁面内面温度 : 65℃
- ・コンクリートモジュール壁面放射率 : 0.9
- ・特定兼用キャスク表面放射率 : 0.8
- ・特定兼用キャスク表面から壁面への形態係数 : 1.0

f. 評価結果

HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価結果を表 2.4.3-7 に示す。燃料被覆管の温度及び特定兼用キャスク各部位の温度は、表 2.4.3-6 に示すたて置きの場合の温度よりも低いことが確認できる。たて置きの場合の評価は、周囲に同じ特定兼用キャスクが隣接する条件で実施しているが、横置きの場合、貯蔵建屋やコンクリートモジュール等のコンクリート製の構造物内に、隣接する特定兼用キャスクがない状態で保管された条件としている。したがって、横置きの場合、周囲の特定兼用キャスクからのふく射の効

果がないことと、HDP-69BCH(B)型からコンクリート壁面へのふく射放熱の効果によって、たて置きの場合よりも胴部等の温度が低下したものと考えられる。なお、蓋部、金属ガスケットの温度の差が小さいが、これは、たて置きと横置きでふく射の条件が同様（同じコンクリート壁面）であるためと考えられる。

表 2.4.3-7 横置きとたて置きの除熱解析結果の比較

対象となる部位		評価結果 (°C)		設計基準値 (°C)
		横置き	たて置き*1 (参考)	
燃料 被覆管*1	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	249	259	300
特定兼用 キャスク	胴*2	123	142	350
	二次蓋	83	85	350
	中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）	117	128	150
	金属ガスケット	86	89	130
	バスケットプレート （ほう素添加ステンレス鋼）	238	248	300

注記*1：表 2.4.3-6 の配置 (i) の評価結果を抜粋。

注記*2：胴(底板)を含めて最も高い温度。

5. 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法(横置き)の場合

蓋部が金属部へ衝突しない設置方法(横置き)の除熱機能の評価結果を以下に示す。

a. 評価基準

評価基準は表 2.4.3-5 と同様である。

b. 使用済燃料集合体の収納配置

HDP-69BCH(B)型に収納される使用済燃料集合体の収納配置は配置(i)で評価する。

c. 使用済燃料集合体の崩壊熱量設定

配置(i)の設計崩壊熱量 15.34 kW を使用する。

d. 解析モデル

2. と同様に、HDP-69BCH(B)型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元でモデル化する。また、緩衝体として輸送用緩衝体も同様に二次元でモデル化する。

有限要素法による伝熱解析コード(ABAQUS)を用いて伝熱解析を実施する。使用する熱解析モデル(全体モデル)も2.と同様の熱解析モデルを用いる(図2.4.3-7及び図2.4.3-8参照)。

e. 境界条件

HDP-69BCH(B)型周囲の環境として、以下の条件とする。

- ・貯蔵姿勢 : 横置き
- ・周囲温度 : 45°C
- ・コンクリート壁面内面温度 : 65°C
- ・コンクリートモジュール壁面放射率 : 0.9
- ・特定兼用キャスク表面放射率 : 0.8
- ・特定兼用キャスク表面から壁面への形態係数 : 1.0

f. 評価結果

HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価結果を表2.4.3-8に示す。特定兼用キャスク各部位の温度は、表2.4.3-6に示す緩衝体のない基礎等に固定する設置方法(たて置き)の場合の温度よりも高いが、同様に緩衝体を装着した外運搬時の評価結果とほぼ同じ結果である。なお、全体モデルの最高温度は、緩衝体のない基礎等に固定する設置方法(たて置き)の場合の温度より低く、緩衝体を装着した横置き貯蔵時の燃料被覆管やバスケットの温度が緩衝体のない基礎等に固定する設置方法(たて置き)の場合より低いことを示すものである。

表 2.4.3-8 緩衝体を装着した場合の除熱解析結果の比較

対象となる部位		評価結果 (°C)			設計基準値 (°C)
		緩衝体を装着 した横置き 貯蔵	緩衝体を装着 した外運搬時 (参考)	緩衝体のない たて置き*1 (参考)	
特定兼用 キャスク	一次蓋	106	105	96	350
	二次蓋	98	97	85	350
	一次蓋ボルト	98	97	89	350
	二次蓋ボルト	96	95	85	350
	金属ガスケット	98	97	89	130
	胴 (底板)	136	134	142	350
	全体モデルの 最高温度	240	238	244	—

注記*1 : 表 2.4.3-6 の配置 (i) の評価結果。

6. 参考文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構,「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」(平成 19 年 3 月)
- (2) (独)原子力安全基盤機構,「平成 19 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」(平成 20 年 3 月)
- (3) (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 年 12 月)
- (4) N. Kumagai, et al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. 15th Int. Symp. on PATRAM(2007)
- (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報告書」(2010 年 3 月)
- (6) (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 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定(JSME S FA-CC-004)」(2009)
- (7) ステンレス協会,「ステンレス鋼便覧(第 3 版)」,日刊工業新聞社(1995),P. 216, 1428
- (8) (一社)日本機械学会,「金属便覧(改訂 6 版)」,丸善(株)(平成 12 年),P. 475
- (9) 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」(平成 21 年 6 月 25 日)
- (10) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., “ABAQUS USER’S MANUAL(Version 4.8)”, 1989 年
- (11) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., “ABAQUS EXAMPLE PROBLEMS MANUAL(Version 4.8)”, 1989 年
- (12) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明郎, 「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」, 電中研報告書, U92038 (1993 年 1 月)
- (13) Y. Aramaki, et al., “Confirmation of heat removal performance of spent fuel storage and transport metal cask HDP-69B by heat transfer inspection”, Proc. 19th Int. Symp. on PATRAM(2019)
- (14) 東京電力ホールディングス株式会社「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.13 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備」