

資料 2-5

Doc No. GK04-SC-B01 Rev.2

2023 年 8 月 24 日

日立造船株式会社

補足説明資料 16-4

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

除熱機能に関する説明資料

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	4
3. 参考文献	54

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参考文献の記載内容について

別紙 3 貯蔵建屋の除熱評価について

別紙 4 貯蔵施設における Hitz-B69 型の取扱上の安全性について

別紙 5 除熱解析に使用する解析コードについて

別紙 6 設計貯蔵期間中の中性子遮蔽材温度について

1. 要求事項

発電用原子炉施設に係る特定機器の型式証明申請において、特定兼用キャスクの除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第16条第4項第二号

使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項

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

▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

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

▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項

第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。

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

c. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第5項

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

及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。

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

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

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、以下のよう記載されている。

【審査における確認事項】

『

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

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

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

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

3) 燃料被覆管の温度評価

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

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

』

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な温度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

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

』

2. 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

Hitz-B69 型の除熱機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

- a. 設置許可基準規則第16条第4項第二号
- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。
- b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項
- ・第16条第4項第二号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号（貯蔵建屋を設置する場合に限る。）及び第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。
 - ▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

 - 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
 - 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持される値以下に維持できる設計であること。
 - 三 貯蔵建屋（使用済燃料貯蔵施設において金属キャスク等を収納する建物をいう。以下同じ。）は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の吸排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。
 - 四 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。 - ▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項

第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。

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

Hitz-B69型は、動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を特定兼用キャスクの外表面に伝え、周囲空気等に伝達することにより除熱する設計とし、使用済燃料の健全性及び特定兼用キャスクの安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度を制限される値以下に維持する方針とする。

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

超えない温度、照射硬化の回復により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度、及び水素化物の再配向により燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下とするため、貯蔵する使用済燃料に以下の制限を設ける。

・ 8×8 燃料	30,000MWd/t	200℃以下
・ 新型 8×8 燃料	38,000MWd/t	200℃以下
・ 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	40,000MWd/t	300℃以下
・ 高燃焼度 8×8 燃料	48,000MWd/t	300℃以下

また、Hitz-B69 型は、特定兼用キャスクの安全機能を維持する観点から、特定兼用キャスクの温度を構成部材の健全性が維持される温度以下に制限する設計とし、Hitz-B69 型の主要な構成部材の温度は、以下の制限を設ける。

・ 胴、外筒及び二次蓋	375℃以下
・ 一次蓋	425℃以下
・ 中性子遮蔽材	149℃以下
・ 金属ガスカート	130℃以下
・ バスケット	350℃以下

さらに、Hitz-B69 型は、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために、特定兼用キャスク外表面の温度を測定できる設計とする。

2. (2) 審査ガイドへの適合性 [確認内容] 1)から 3)への説明に示すとおり、特定兼用キャスクの構成部材の温度は、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び周囲温度等を条件として、Hitz-B69 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、貯蔵事業許可基準規則解釈第 6 条第三号に示される貯蔵建屋の除熱設計、同第 6 条第四号に示される使用済燃料の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること、及び同第 17 条第 1 項第二号に示される貯蔵建屋内の雰

囲気温度（周囲温度）の監視については型式証明申請の範囲外（設置（変更）許可時に別途確認）である。

c. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

Hitz-B69 型の設計貯蔵期間は 60 年である。また、補足説明資料 16-6「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（GK04-SC-F01）」に示すとおり、特定兼用キャスクの構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、特定兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、Hitz-B69 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。

(A) 除熱機能に関する構造

Hitz-B69 型は、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及び放射により特定兼用キャスクの外表面に伝え、対流及び放射により周囲の空気等に伝達する。特定兼用キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低い樹脂（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。

特定兼用キャスク貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである（図 1-1 から図 1-5 参照）。

- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及び放

射によりバスケット内面へ伝えられる。

- b) バスケット内面に伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導及び放射によりバスケット外周部へ伝えられる。
- c) バスケット外周部に伝えられた熱は、ヘリウムガスを介した熱伝導及び放射により特定兼用キャスク胴内面へ伝えられる。
- d) 特定兼用キャスク胴内面に伝えられた熱は、熱伝導により特定兼用キャスク胴外面へ伝えられる。
- e) 特定兼用キャスク胴外面に伝えられた熱は、伝熱フィン熱伝導により外筒内面へ伝えられる。
- f) 外筒内面に伝えられた熱は、熱伝導により外筒外面へ伝えられる。
- g) 外筒外面に伝えられた熱は、特定兼用キャスク外面の対流により周囲の空気へ、放射により貯蔵施設へ、それぞれ伝えられる。
- h) 特定兼用キャスク周囲の空気及び貯蔵施設に伝えられた熱は、貯蔵施設の自然換気により施設外環境へ放出される。



(注) 詳細は図 1-2 から図 1-5 に示す。

図 1-1 Hitz-B69 型の伝熱形態 (1/5)

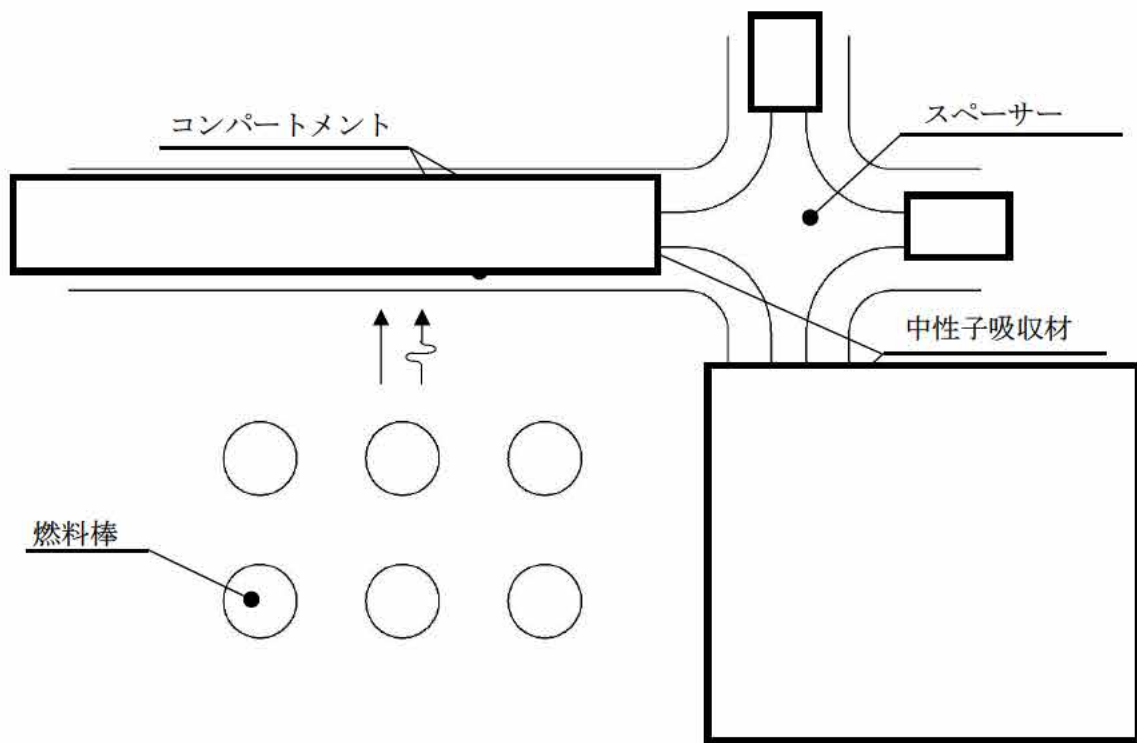


図 1-2 Hitz-B69 型の伝熱形態 (2/5)

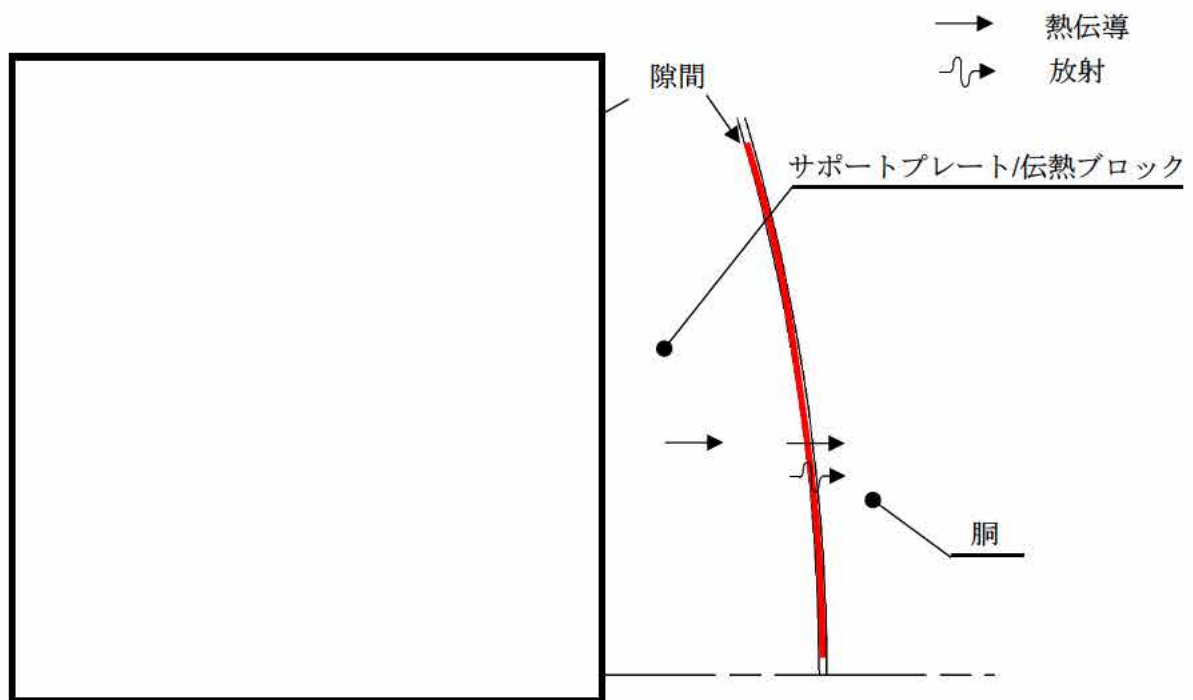


図 1-3 Hitz-B69 型の伝熱形態 (3/5)

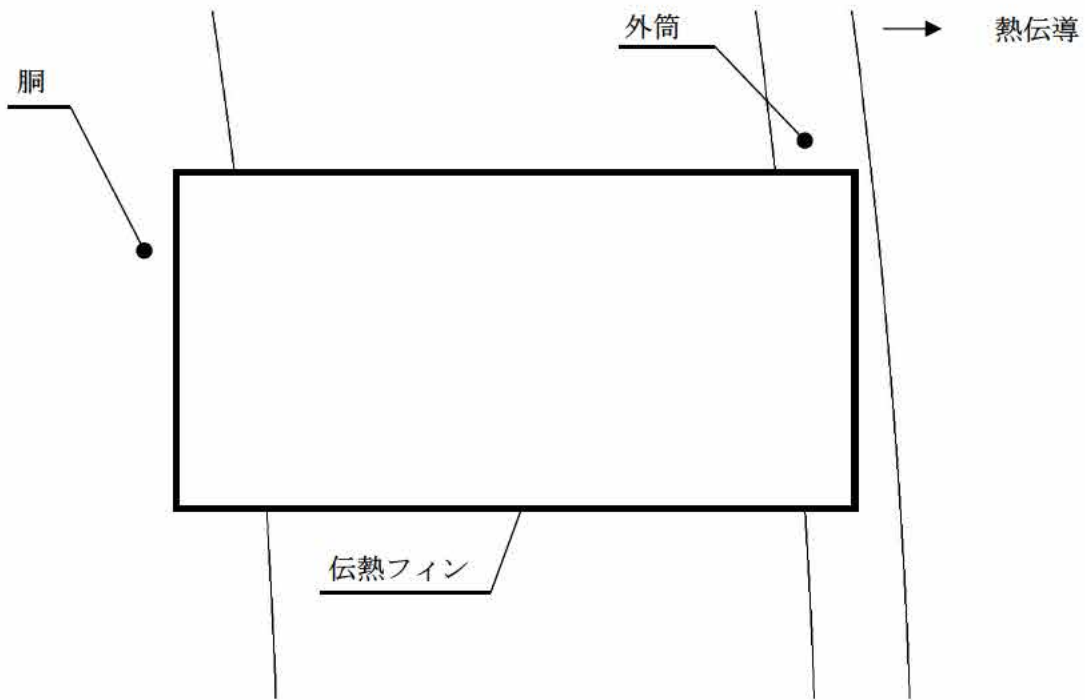


図 1-4 Hitz-B69 型の伝熱形態 (4/5)



※軸方向のみの熱の移動を示す。

図 1-5 Hitz-B69 型の伝熱形態 (5/5)

(B) 除熱機能に関する評価

Hitz-B69 型の除熱解析は図 2 に示す除熱解析フローに従って行う。なお、除熱解析に用いるコードは別紙 5 に示すとおり検証され、適用性が確認されている。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

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

崩壊熱量を求めるにあたり、使用済燃料集合体の燃焼度分布を考慮しない場合の崩壊熱量を使用済燃料の収納制限として、以下「最大崩壊熱量」とする。

一方、除熱解析に使用する崩壊熱量として、収納対象とする使用済燃料集合体の燃焼度を包絡する燃焼度分布を考慮することで、これは前述の最大崩壊熱量を上回ることになる。この崩壊熱量を、以下「設計崩壊熱量」という。

最大崩壊熱量及び設計崩壊熱量を次のとおり設定する(図 3-1 から図 3-4 参照)。

$$\begin{aligned} \text{[最大崩壊熱量]} &= \text{[燃料集合体 1 体当たりの崩壊熱量 (PF (注1) を考慮しない)]} \\ &\quad \times 1.05 \text{ (注2)} \times \text{[収納体数]} \end{aligned}$$

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

使用済燃料の崩壊熱量計算に用いる計算条件及び計算結果を表 2-1 から表 2-4 に示す。

Hitz-B69 型は、種類の異なる使用済燃料の効率的な運用を行うために混載を行うが、対象となる使用済燃料は、組み合わせによっては中央部と外周部に燃料被覆管温度制限が異なるものを配置することになるため、補足説明資料 16-1「燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設 (Doc. No. GK04-SC-Z01)」の別紙 4 に示す基本方針に従って、4 種類の配置制限を設けることとしている。

各配置で収納する使用済燃料の種類を選択できる場合があるが、除熱解析では、崩壊熱量が大きくなるものを代表として評価を行う。

Hitz-B69 型の除熱解析における収納物条件を表 3-1 から表 3-4 に示す。

(注 1) PF (ピーキングファクタ) とは、使用済燃料集合体の軸方向燃焼度の平均値に対する燃焼度の比を包含する燃焼度分布を示す。

(注 2) ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の不確かさを考慮する。

表 1 使用済燃料集合体の仕様

項 目		仕 様			
使用済燃料 集合体の種類		8×8 燃料	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	約 134 mm	約 134 mm	約 134 mm	約 134 mm
	全 長	約 4,470 mm	約 4,470 mm	約 4,470 mm	約 4,470 mm
質 量		約 280 kg	約 270 kg	約 270 kg	約 270 kg
(注 1) 初 期 濃 縮 度		約 2.8 wt%	約 3.1 wt%	約 3.1 wt%	約 3.7 wt%
(注 2) 最 高 燃 焼 度		30,000 MWd/t	38,000 MWd/t	40,000 MWd/t	48,000 MWd/t
(注 3) 最 短 冷 却 期 間		34 年	34 年	28 年	20 年

(注 1) 代表的な仕様を示す。

(注 2) 収納する使用済燃料集合体 1 体の燃焼度の平均値の最大値を示す。

(注 3) 収納する使用済燃料集合体の最短の冷却期間を示す。

表 2-1 崩壊熱量計算条件及び結果 (1/4) (配置(1))

項 目		8×8 燃料	新型 8×8 燃料	
計算 条件	燃 焼 度 (MWd/t)	30,000	38,000	
	比 出 力 (MW/t)			
	照射 期間 (日)			使用済燃料集合体 チャンネル ボックス
	濃 縮 度 (wt%) (注1)			
	冷 却 期 間 (年)			34
	ウ ラ ン 重 量 (kg)			
	(上部)			
ピーキングファクタ (注2)				
(下部)				
計算 結果	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PFを考慮しない) (W)	126.6	126.6	
	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PF考慮) (W)	157.9	165.2	
収納体数 (体)		32	37	
Hitz-B69型1基当たりの 最大崩壊熱量 (kW)		8.8		
Hitz-B69型1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		11.3		

(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) ノードは燃料有効部を軸方向に 24 分割したものである。

(注 3) 除熱解析では、ピーキングファクタを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。この設計崩壊熱量は崩壊熱量計算結果に 5%の保守性を考慮する。

表 2-2 崩壊熱量計算条件及び結果 (2/4) (配置(2))

項 目		新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料		
計算 条件	燃 焼 度 (MWd/t)	35,000	40,000	
	比 出 力 (MW/t)			
	照射 期間 (日)			使用済燃料集合体 チャンネル ボックス
	濃 縮 度 (wt%) (注1)			
	冷 却 期 間 (年)			30
	ウ ラ ン 重 量 (kg)			
	(上部)			
ピーキングファクタ (注2)				
(下部)				
計算 結果	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PFを考慮しない) (W)	151.4	151.4	
	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PF考慮) (W)	174.6	207.6	
収納体数 (体)		32	37	
Hitz-B69型1基当たりの 最大崩壊熱量 (kW)		10.5		
Hitz-B69型1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		13.3		

(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) ノードは燃料有効部を軸方向に 24 分割したものである。

(注 3) 除熱解析では、ピーキングファクタを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。この設計崩壊熱量は崩壊熱量計算結果に 5%の保守性を考慮する。

表 2 崩壊熱量計算条件及び結果 (3/4) (配置(3))

項 目		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		
計算 条件	燃 焼 度 (MWd/t)	30.000	35.000	48.000		
	比 出 力 (MW/t)					
	照射 期間 (日)				使用済燃料集合体 チャンネル ボックス	
	濃 縮 度 (wt%) (注1)					
	冷 却 期 間 (年)				34	30
	ウ ラ ン 重 量 (kg)					
	(上部)					
ピ ー キ ン グ フ ァ ク タ (注2)						
(下部)						
計算 結果	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PFを考慮しない) (W)	114.4	146.3	224.5		
	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PF考慮) (W)	133.2	174.6	298.9		
収納体数 (体)		24	8	37		
Hitz-B69型1基当たりの 最大崩壊熱量 (kW)		12.4				
Hitz-B69型1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		15.7				

(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 24 分割したものである。

(注 3) 除熱解析では、ピーキングファクタを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。この設計崩壊熱量は崩壊熱量計算結果に 5%の保守性を考慮する。

表 2 崩壊熱量計算条件及び結果 (4/4) (配置(4))

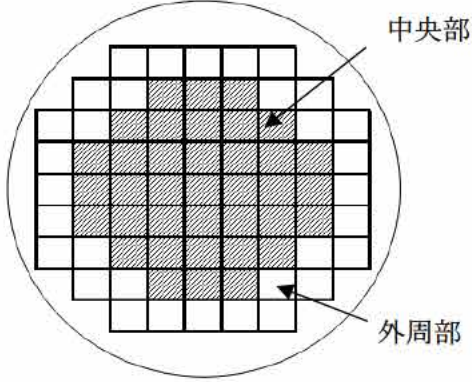
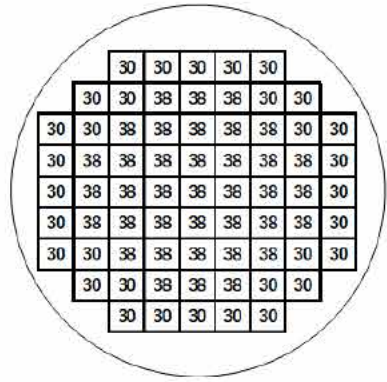
項 目		新型 8×8 ジルコニウム ムライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料		
計算 条件	燃 焼 度 (MWd/t)	35,000	48,000		
	比 出 力 (MW/t)				
	照射 期間 (日)			使用済燃料集合体 チャンネル ボックス	
	濃 縮 度 (wt%) (注1)				
	冷 却 期 間 (年)			30	20
	ウラン重量 (kg)				
	(上部)				
ピーキングファクタ (注2)					
(下部)					
計算 結果	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PFを考慮しない) (W)	136.5	224.5		
	燃料集合体1体当たりの崩壊熱 量 (PF考慮) (W)	174.6	298.9		
収納体数 (体)		32	37		
Hitz-B69型1基当たりの 最大崩壊熱量 (kW)		12.8			
Hitz-B69型1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		16.7			

(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 24 分割したものである。

(注 3) 除熱解析では、ピーキングファクタを考慮した崩壊熱量から計算し設計崩壊熱量を用いる。この設計崩壊熱量は崩壊熱量計算結果に 5%の保守性を考慮する。

表 3-1 除熱解析における収納物条件概要 (配置(1))

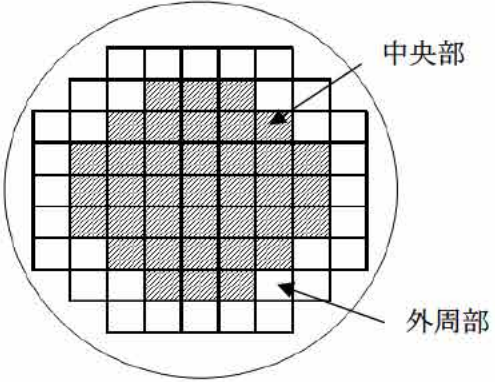
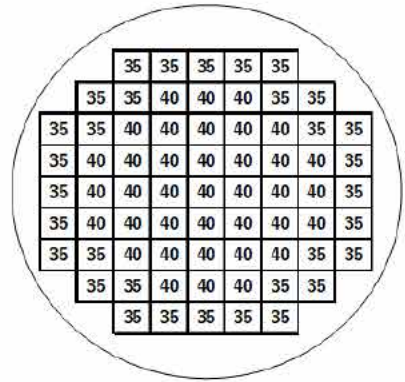
項目		特定兼用キャスク収納位置制限		解析条件		
		中央部	外周部 (注3)	中央部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	種類	新型 8×8 燃料	8×8 燃料	新型 8×8 燃料	8×8 燃料
		初期濃縮度 (wt%) (注1)				
		ウラン重量 (kg)				
		燃焼度 (GWd/t)				
			冷却期間 (年)	≧34	≧34	34
	Hitz-B69 型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≦35		35	
配置 (注2)						

(注1) 保守的に最小値とする。

(注2) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注3) 新型 8×8 燃料 (燃焼度 30GWd/t、冷却期間 34 年以上) も収納可能とする。なお、崩壊熱量が新型 8×8 燃料を上回る、8×8 燃料を解析条件とする。

表 3-2 除熱解析における収納物条件概要 (配置(2))

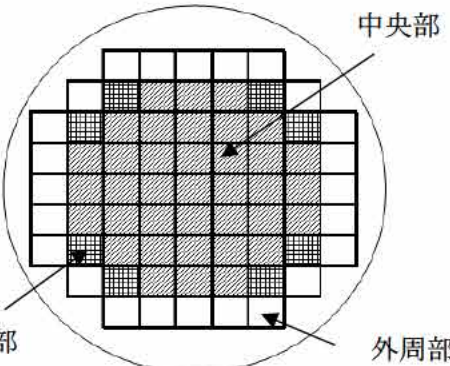
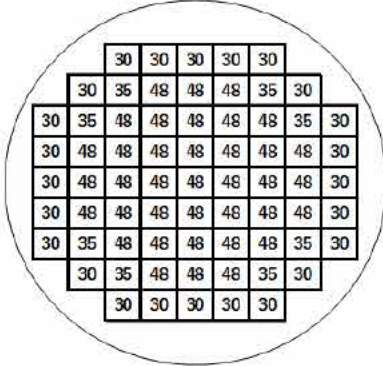
項目			特定兼用キャスク収納位置制限		解析条件	
			中央部	外周部 (注3)	中央部	外周部
収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	種類	新型8×8 ジルコニウムライナ 燃料	新型8×8 ジルコニウムライナ 燃料	新型8×8 ジルコニウムライナ 燃料	新型8×8 ジルコニウムライナ 燃料
		初期濃縮度 (wt%) (注1)				
		ウラン重量 (kg)				
		燃焼度 (GWd/t)				
		冷却期間 (年)	≧28	≧30	28	30
Hitz-B69 型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≦35		35		
配置 (注2)						

(注1) 保守的に最小値とする。

(注2) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注3) 新型8×8燃料 (燃焼度35GWd/t、冷却期間34年以上) も収納可能とする。なお、崩壊熱量が新型8×8燃料を上回る、新型8×8ジルコニウムライナ燃料を解析条件とする。

表 3-3 除熱解析における収納物条件概要 (配置(3))

項目		特定兼用キャスク収納位置制限			解析条件			
		中央部 (注4)	中間部	外周部	中央部	中間部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	種類	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウム ライナ燃料	新型 8×8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	新型 8×8燃料
		初期濃縮度 (wt%) (注1)						
		ウラン重量 (kg)						
		燃焼度 (GWd/t)	≤48	≤35	≤30	48	35	30
	冷却期間 (年)	≥20	≥30	≥34	20	30	34	
Hitz-B69型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t) (注3)	≤38			38			
配置 (注2)								

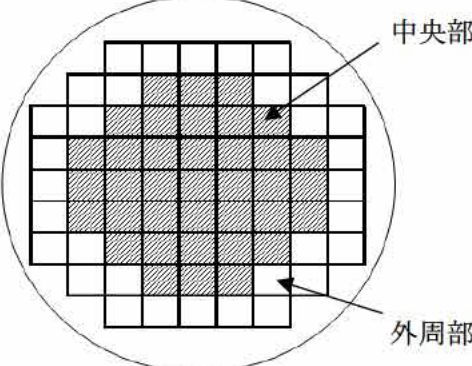
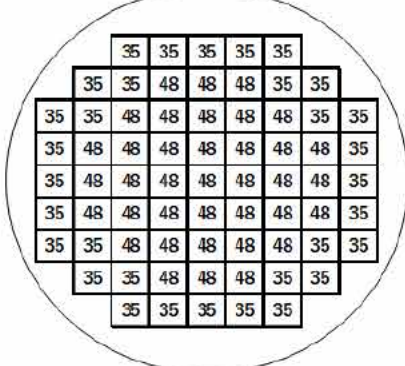
(注1) 保守的に最小値とする。

(注2) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注3) 高燃焼度 8×8 燃料の平均燃焼度を 44GWd/t 以下とする。

(注4) 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 (燃焼度 40GWd/t、冷却期間 28 年以上) も収納可能とする。なお、崩壊熱量が新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を上回る、高燃焼度 8×8 燃料を解析条件とする。

表 3-4 除熱解析における収納物条件概要 (配置(4))

項目		特定兼用キャスク収納位置制限		解析条件		
		中央部 (注4)	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	種類	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 ジルコニウムライナ燃料
		初期濃縮度 (wt%) (注1)				
		ウラン重量 (kg)				
		燃焼度 (GWd/t)				
			冷却期間 (年)	≧20	≧30	20
	Hitz-B69 型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t) (注3)	≦39		39	
配置 (注2)						

(注1) 保守的に最小値とする。

(注2) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注3) 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の平均燃焼度を 33GWd/t 以下、高燃焼度 8×8 燃料の平均燃焼度を 44GWd/t 以下とする。

(注4) 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 (燃焼度 40GWd/t、冷却期間 28 年以上) も収納可能とする。なお、崩壊熱量が新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を上回る、高燃焼度 8×8 燃料を解析条件とする。

内は商業機密のため、非公開とします。

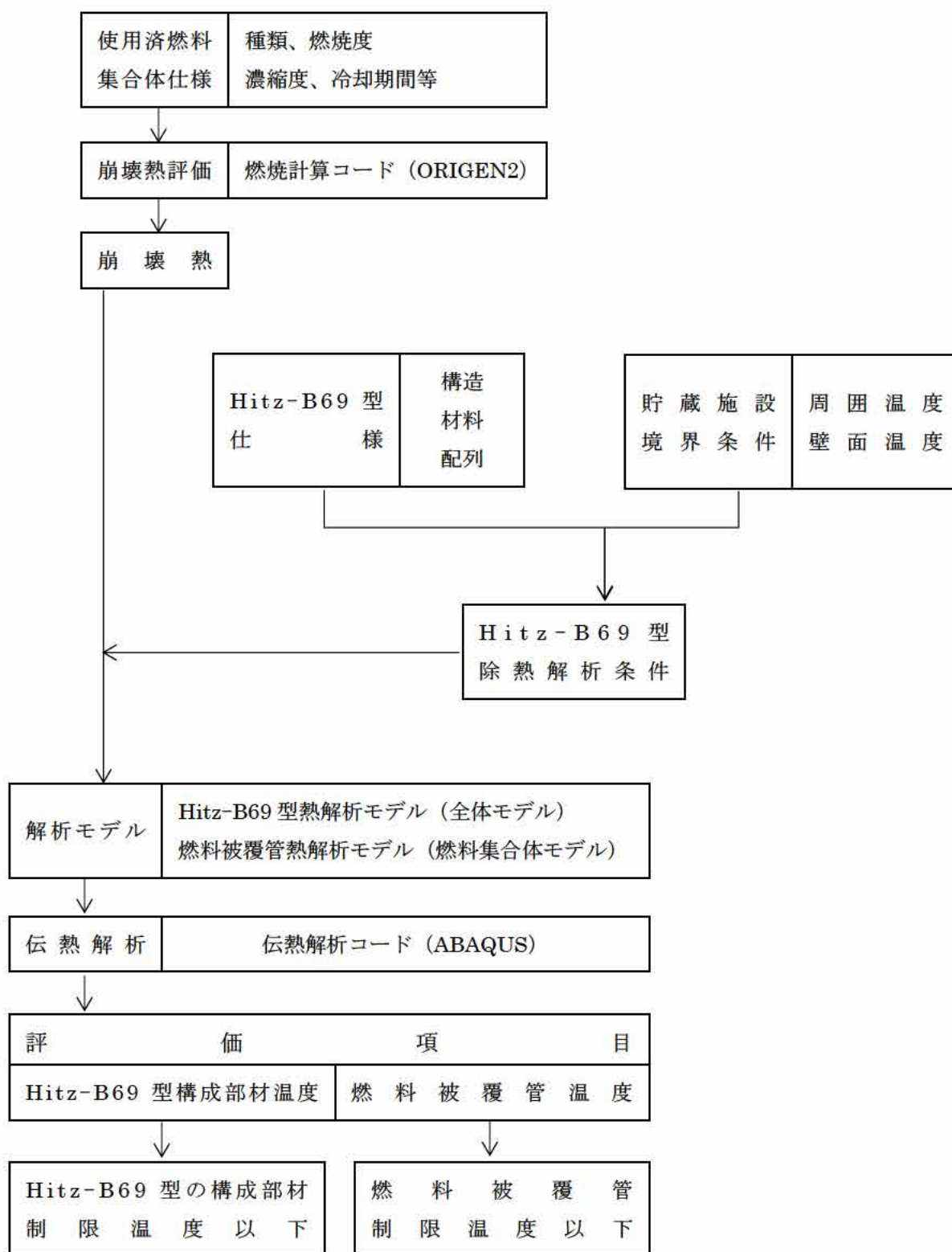
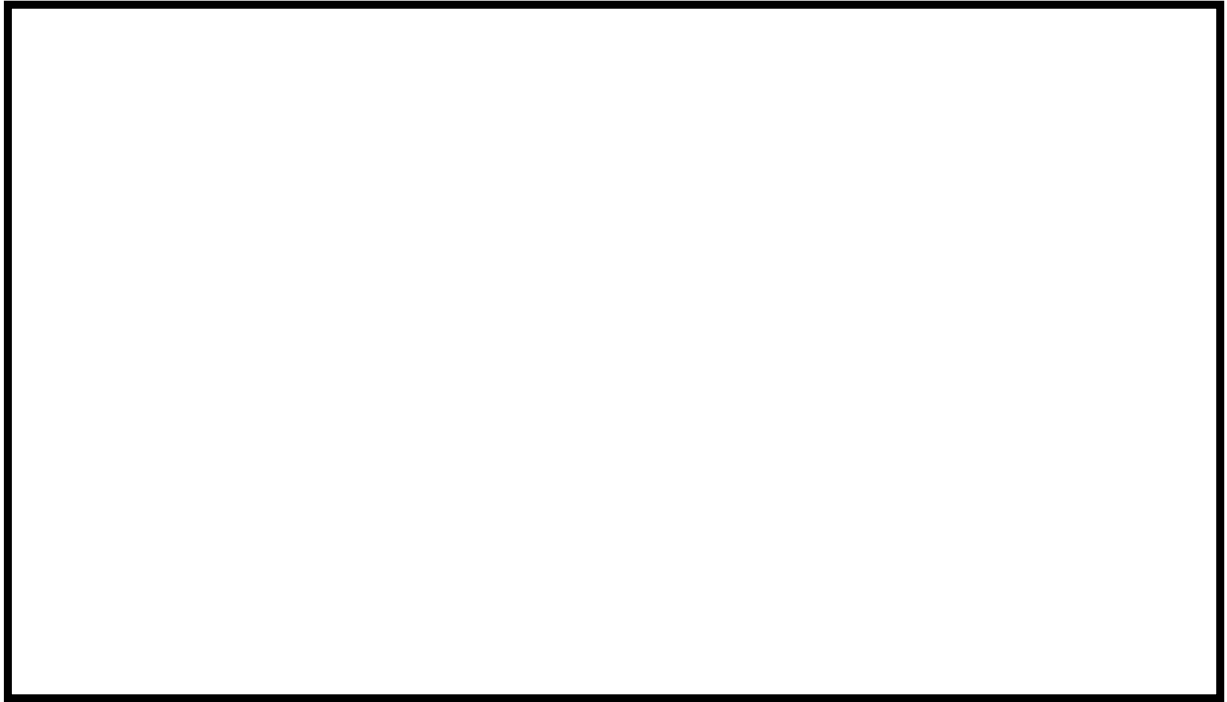


図2 除熱解析フロー



(注 1) 使用済燃料集合体 1 体分の崩壊熱量を示す。

(注 2) 中央部—新型 8×8 燃料 (38GWd/t)、外周部—8×8 燃料 (30GWd/t)

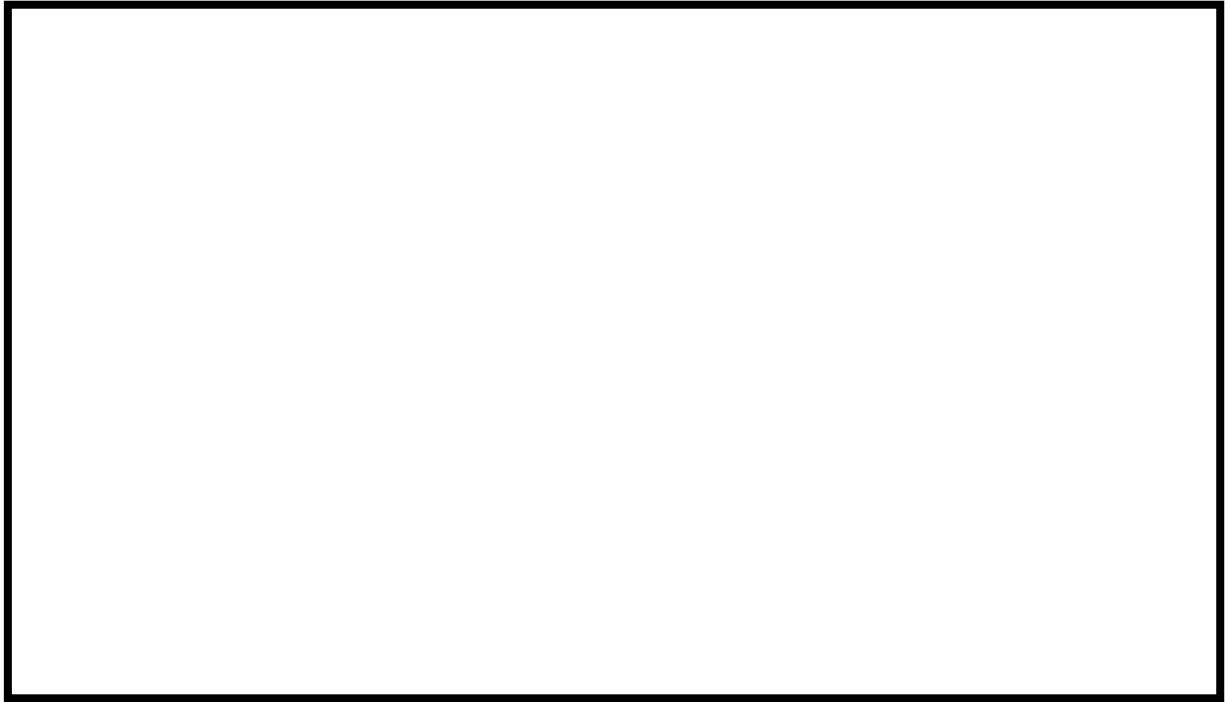
図 3-1 使用済燃料集合体 (燃料有効部) の軸方向崩壊熱量分布 (1/4) (配置(1))



(注 1) 使用済燃料集合体 1 体分の崩壊熱量を示す。

(注 2) 中央部—新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 (40GWd/t)、外周部—新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 (35GWd/t)

図 3-2 使用済燃料集合体 (燃料有効部) の軸方向崩壊熱量分布 (2/4) (配置(2))



(注 1) 使用済燃料集合体 1 体分の崩壊熱量を示す。

(注 2) 中央部－高燃焼度 8×8 燃料 (48GWd/t)、中間部－新型 8×8 ジルコニウムライ
ナ燃料 (35GWd/t)、外周部－新型 8×8 燃料 (30GWd/t)

図 3-3 使用済燃料集合体 (燃料有効部) の軸方向崩壊熱量分布 (3/4) (配置(3))



(注 1) 使用済燃料集合体 1 体分の崩壊熱量を示す。

(注 2) 中央部—高燃焼度 8×8 燃料 (48GWd/t)、中間部—新型 8×8 ジルコニウムライ
ナ燃料 (35GWd/t)

図 3-4 使用済燃料集合体 (燃料有効部) の軸方向崩壊熱量分布 (4/4) (配置(4))

b. 特定兼用キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

特定兼用キャスク構成部材の各部温度は、使用済燃料の崩壊熱及び周囲温度等を条件として、Hitz-B69 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（コンパートメント）の温度を条件として、燃料集合体の径方向断面の二次元モデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。

除熱解析の詳細を別紙 1 に示す。蓋部が金属部へ衝突しない方法（横置き）（以下、「横置き」という。）における評価を行うこととし、貯蔵施設内における横置き貯蔵時を対象とする。

① 解析モデル

温度評価に当たっては、以下の 2 種類の熱解析モデルを用いる。

- ・ Hitz-B69 型熱解析モデル
：三次元全体モデル（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

Hitz-B69 型における各解析モデルの形状図及び要素分割図を図 4 から図 9 に示す。

各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

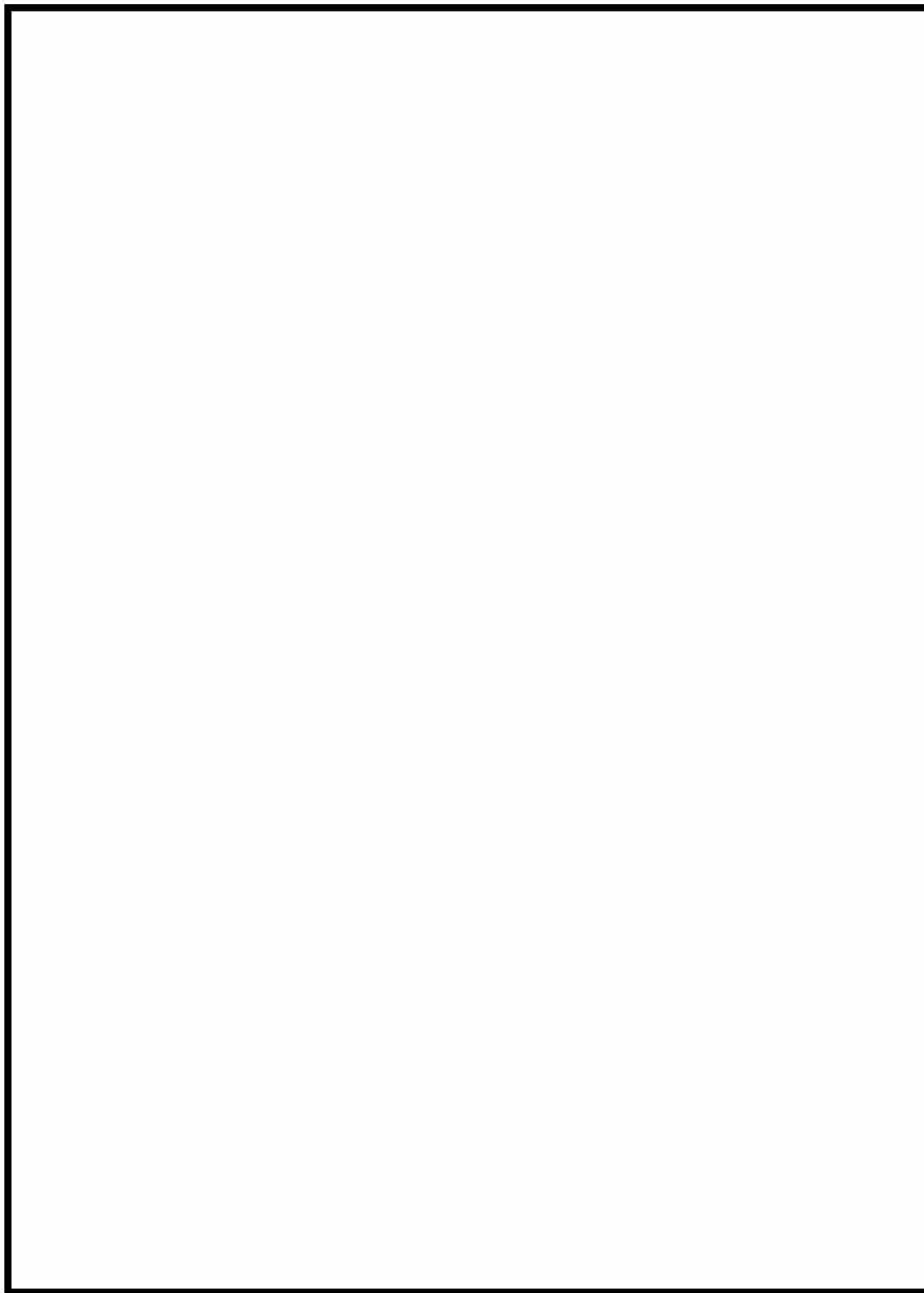
- ・ 全体モデル.....胴、底板、外筒、下部中性子遮蔽材カバー、一次蓋、二次蓋、一次蓋金属ガスケット、二次蓋金属ガスケット、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、伝熱フィン、バスケット
- ・ 燃料集合体モデル...燃料被覆管

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

② 境界条件

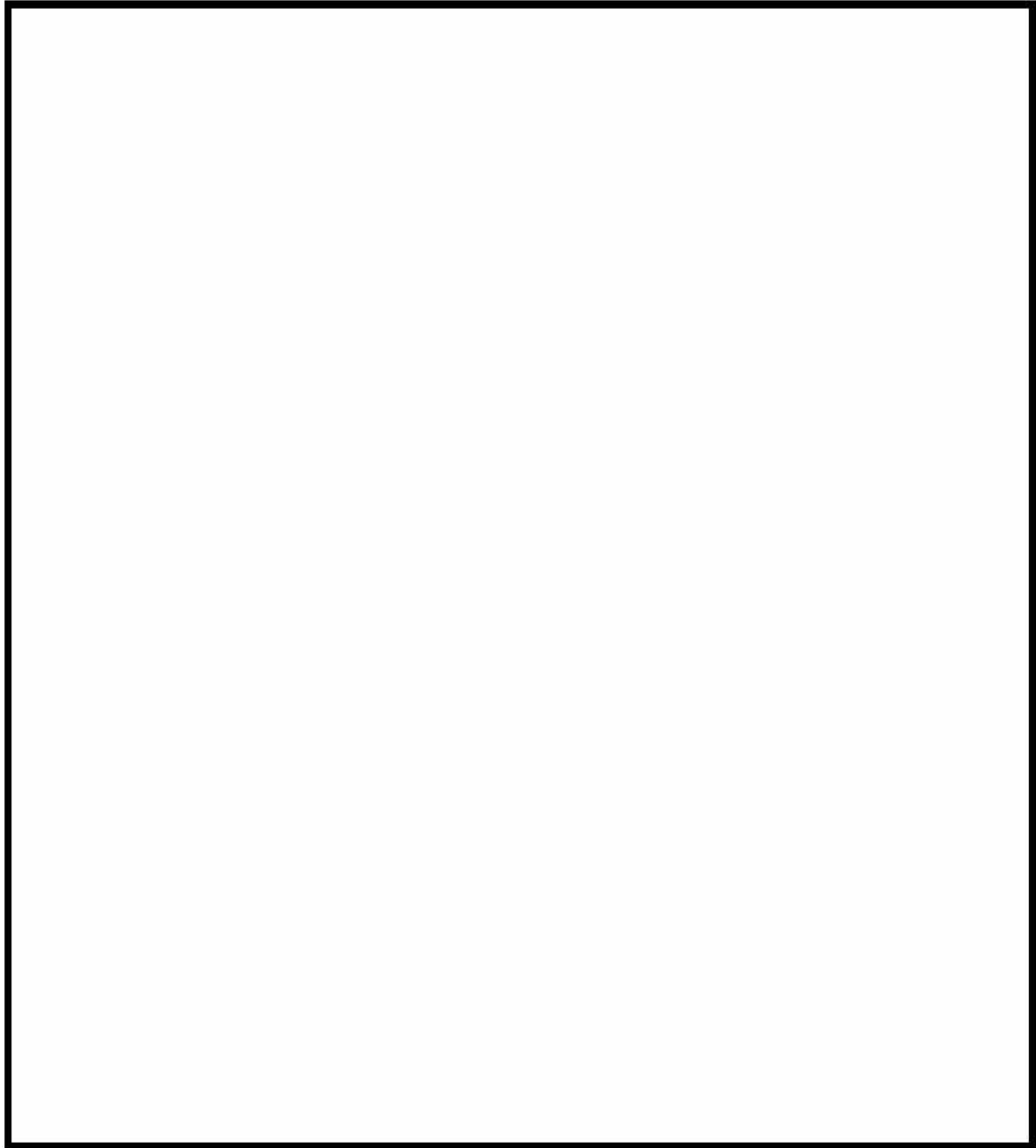
Hitz-B69 型周囲の環境として、以下の条件を用いる。

- ・ 貯蔵姿勢 ：横置き・貯蔵施設内
- ・ 周囲空気温度 ：50℃
- ・ 放射環境温度 ：65℃



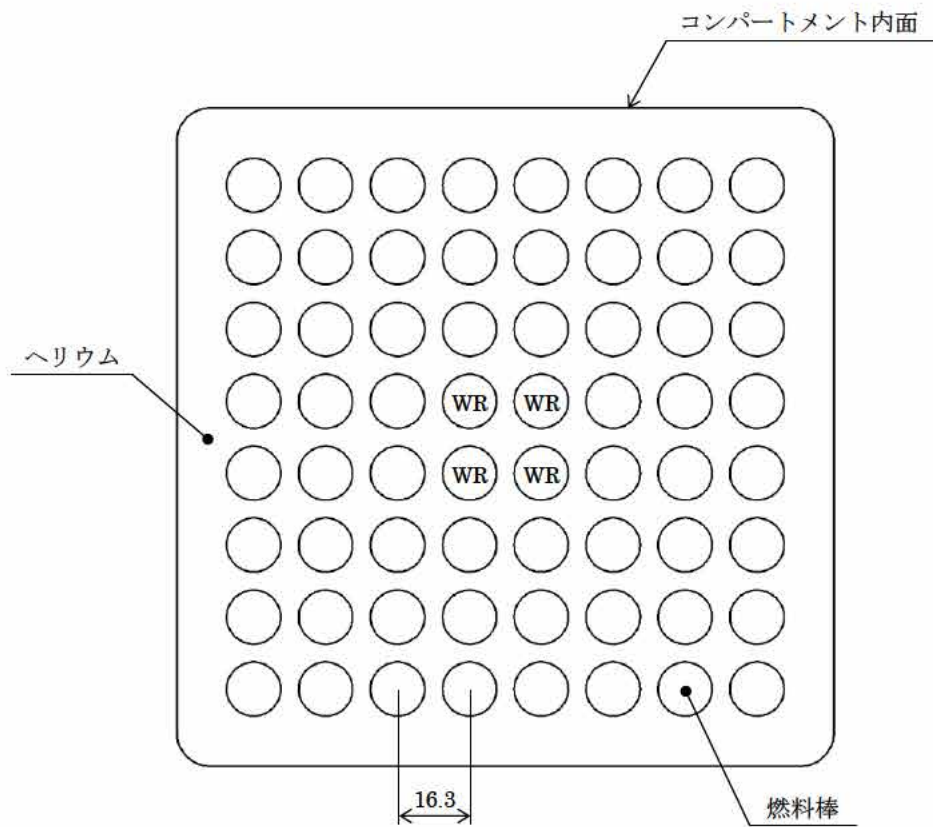
(単位：mm)

図4 Hitz-B69型全体モデル形状図(縦断面)



(単位：mm)

図 5 Hitz-B69 型全体モデル形状図 (中央断面)



注) ただし、WR はウォーターロッドであり、発熱はない。

(単位 : mm)

図 6 Hitz-B69 型燃料集合体モデル形状図

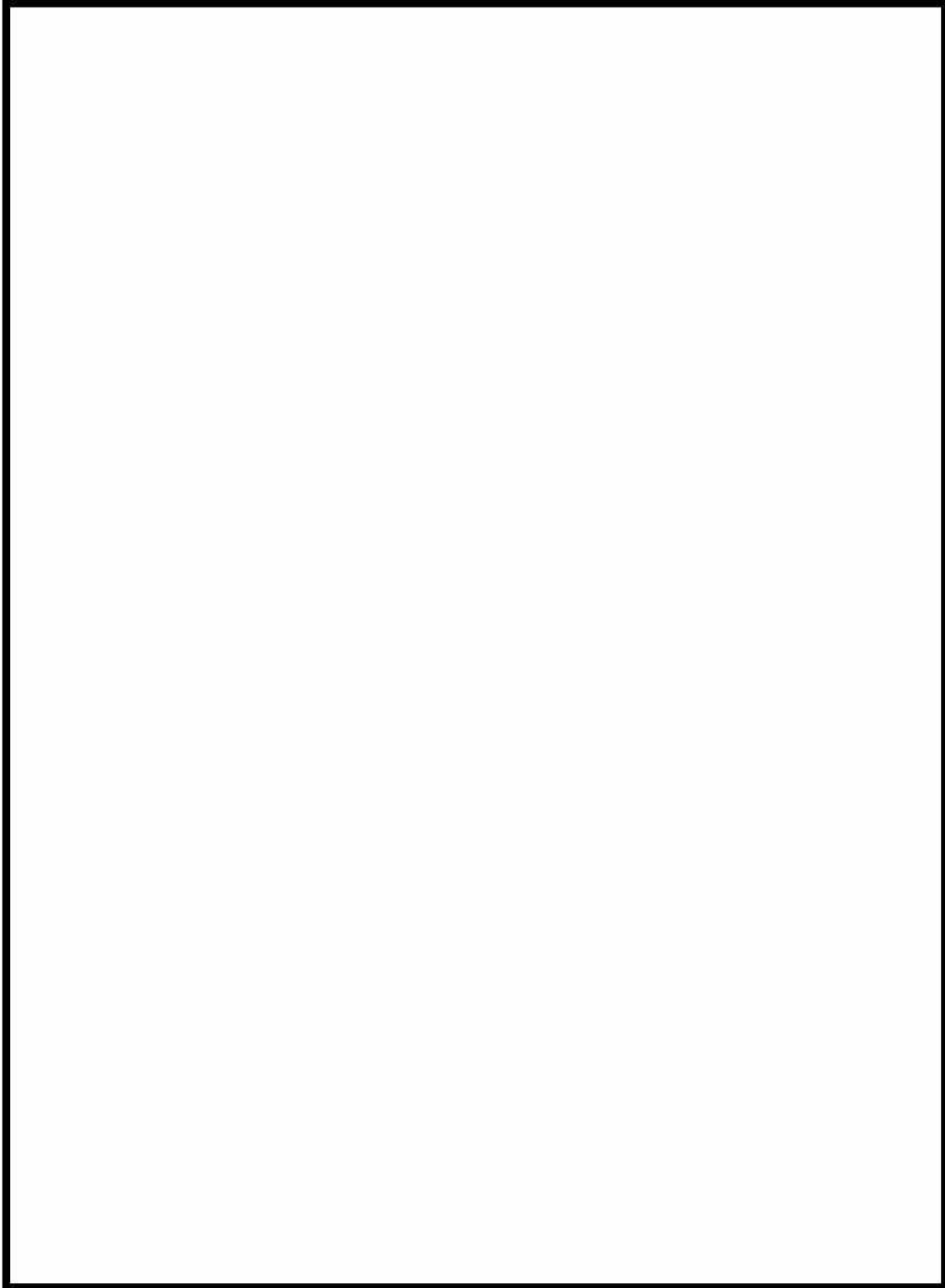


図 7 Hitz-B69 型全体モデル要素分割図（全体鳥瞰図）

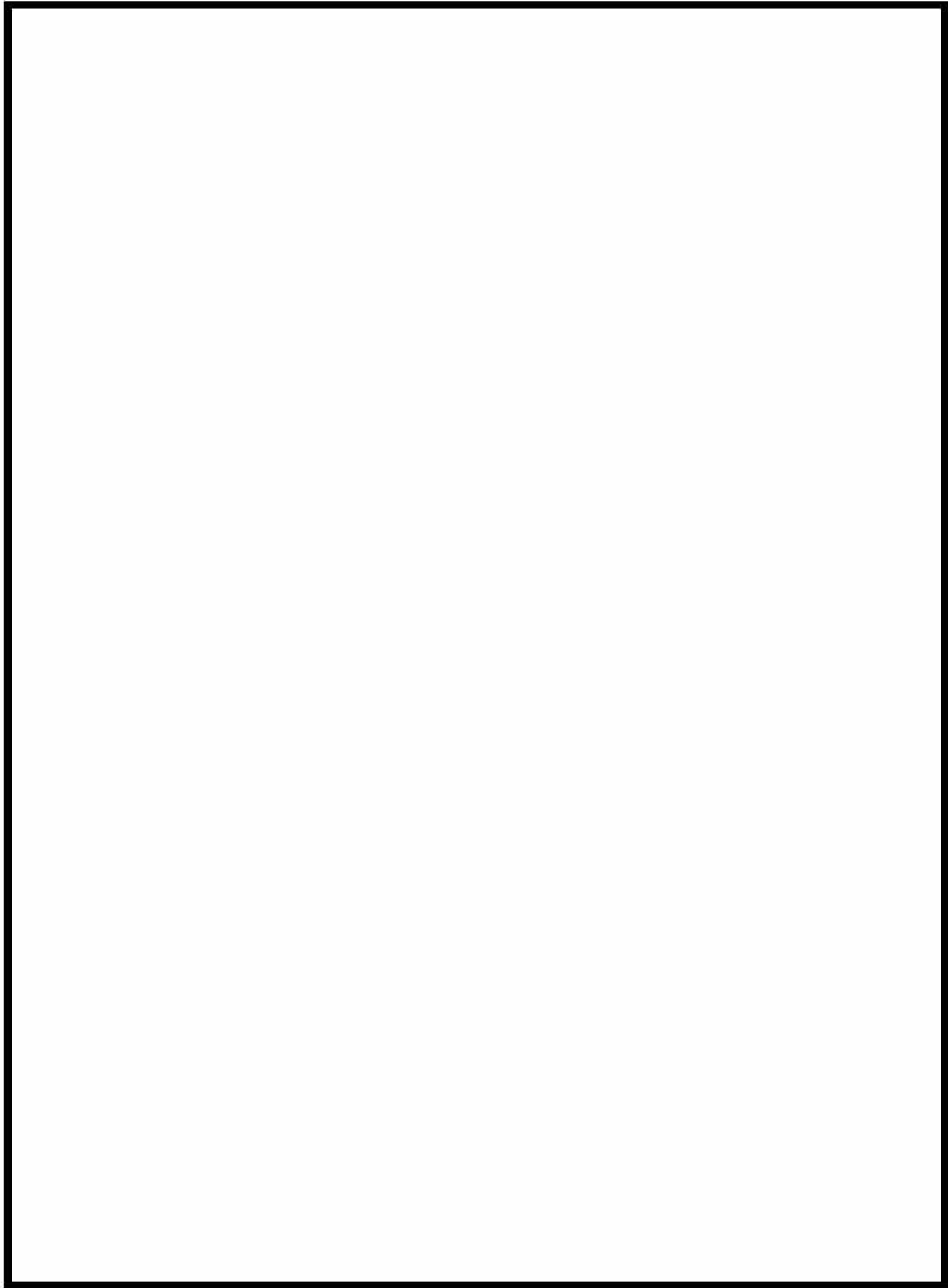


図 8 Hitz-B69 型全体モデル要素分割図（中央断面図）

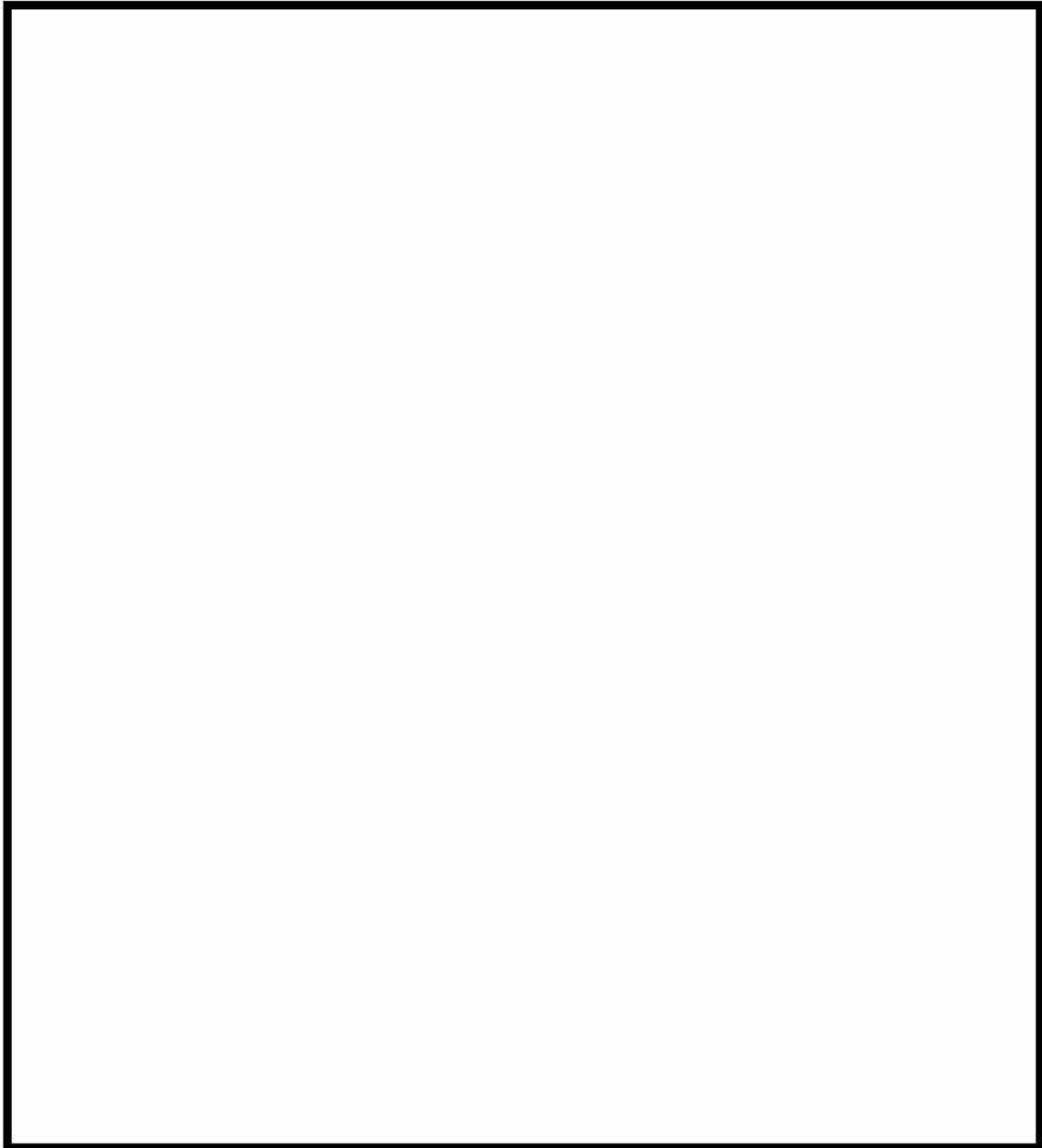


図9 Hitz-B69型燃料集合体モデル要素分割図

c. 評価結果

Hitz-B69 型の除熱解析結果として、Hitz-B69 型の安全機能を担保する部位、構造強度部材の温度分布図を図 10-1 から図 10-4 に、燃料被覆管の温度分布図を表 5 及び図 11-1-1 から図 11-4-2 に示す。

Hitz-B69 型の各部位、構造強度部材の温度は、各配置条件で実施した解析の中で、温度が最も高くなる配置(4)の結果を表 4 に示す。燃料被覆管の温度は、各配置条件で解析した結果を表 5 に示す。

解析の結果、Hitz-B69 型の各部位の温度及び燃料被覆管の温度は設計基準値を満足しており、Hitz-B69 型は、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計となっていることが確認された。

また、除熱解析結果を基に設定した Hitz-B69 型の各部位及び使用済燃料の設計温度を表 6 に示す。

表 4 除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (°C)	設計基準値 (°C) (注 1~4)
Hitz-B69 型	胴	134	375 (1)
	底板	142	375 (1)
	外筒	123	375 (1)
	底部中性子遮蔽材カバー	139	375 (1)
	下部中性子遮蔽材カバー	125	375 (1)
	一次蓋	118	425 (1)
	蓋部中性子遮蔽材カバー	117	425 (1)
	二次蓋	109	375 (1)
	一次蓋ボルト	111	350 (1)
	二次蓋ボルト	108	350 (1)
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	132 (注 5)	149 (2)
	トラニオン	129	350 (1)
	一次蓋金属ガスケット	111	130 (3)
	二次蓋金属ガスケット	108	130 (3)
	バスケット (コンパートメント)	265	350 (注 6)
	バスケット (サポートプレート)	157	425 (1)
伝熱フィン	130	200 (1)	
燃料被覆管		表 5 に示す	

※注記は、表 4 及び表 5 でまとめたものを次々頁に示す。

表 5 除熱解析結果（燃料被覆管）

配置		対象となる使用済燃料	評価結果 (°C)	設計基準値 (°C) (注 7)
配置(1)	外周部	8×8 燃料	171	200 (4)
	中央部	新型 8×8 燃料	196	200 (4)
配置(2)	外周部	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	191	200 (4) (注 8)
	中央部	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	225	300 (4)
配置(3)	外周部	新型 8×8 燃料	197	200 (4)
	中間部	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	218	300 (4)
	中央部	高燃焼度 8×8 燃料	272	300 (4)
配置(4)	外周部	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	224	300 (4)
	中央部	高燃焼度 8×8 燃料	278	300 (4)

※注記は、表 4 及び表 5 でまとめたものを次頁に示す。

- (注 1) 参考文献 (1) に炭素鋼、合金鋼 (ニッケルクロムモリブデン鋼)、ステンレス鋼及び析出硬化系ステンレス鋼の設計用強度が示されており、構造強度部材であり、かつ、安全機能の担保に必要な構成部材は、構造強度評価が可能な温度として、参考文献 (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 (1) 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、伝熱機能が維持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 5) 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 6) バスケット (コンパートメント) を適用するために設定した炭素鋼 (JIS G 3116 SG295) に対して、材料規定で定めた温度範囲の上限を、構造強度評価が可能な温度として設定している。
- (注 7) 参考文献 (4) 及び (5) に燃料被覆管の累積クリープ量が 1%を超えない温度、また、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度、さらに、水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度が示されており、燃料被覆管の設計基準値は、これら全ての温度を下回る水素化物再配向が防止可能な温度を設定しており、ライナ有り燃料 (高燃焼度 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料) の場合は 300℃、ライナ無し燃料 (新型 8×8 燃料及び 8×8 燃料) の場合は 200℃となる。
なお、参考文献 (4) 及び (5) の記載内容の詳細は別紙 2 を参照。
- (注 8) 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の設計基準値は 300℃であるが、外周部には新型 8×8 燃料も収納可能としていることから、新型 8×8 燃料の設計基準値である 200℃としている。

表 6 設計温度

対象となる部位		設計温度 (°C)
Hitz-B69 型	胴	135
	底板	145
	外筒	125
	底部中性子遮蔽材カバー	140
	下部中性子遮蔽材カバー	130
	一次蓋	120
	蓋部中性子遮蔽材カバー	120
	二次蓋	110
	一次蓋ボルト	115
	二次蓋ボルト	110
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	135
	トラニオン	130
	一次蓋金属ガスケット	120 (注 1)
	二次蓋金属ガスケット	110
	バスケット	270
	燃料被覆管	8×8 燃料、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		280

(注 1) 保守側の評価として、一次蓋と同じとする。

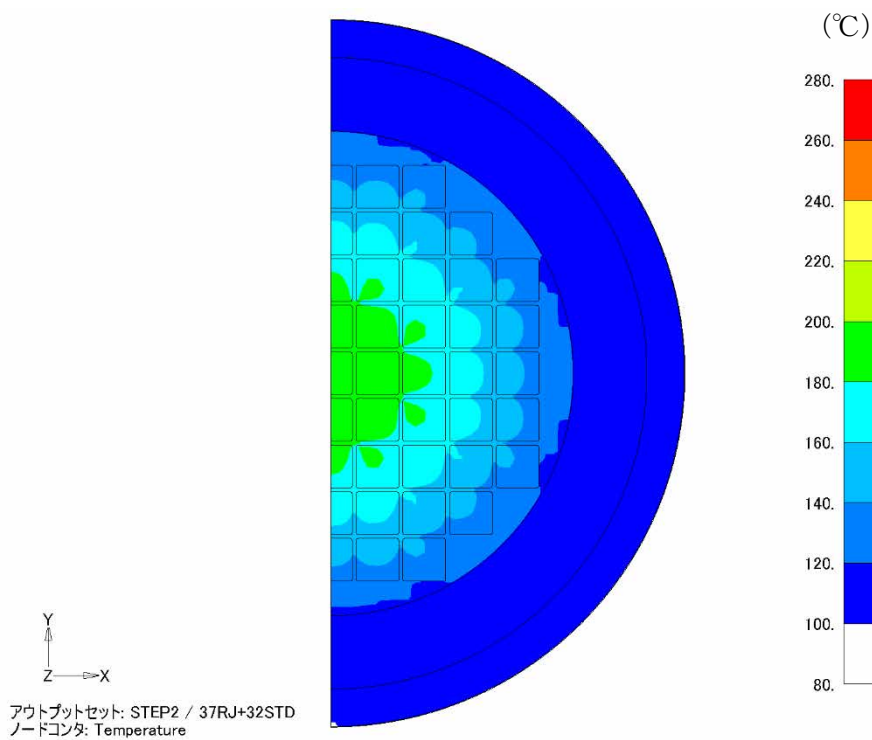
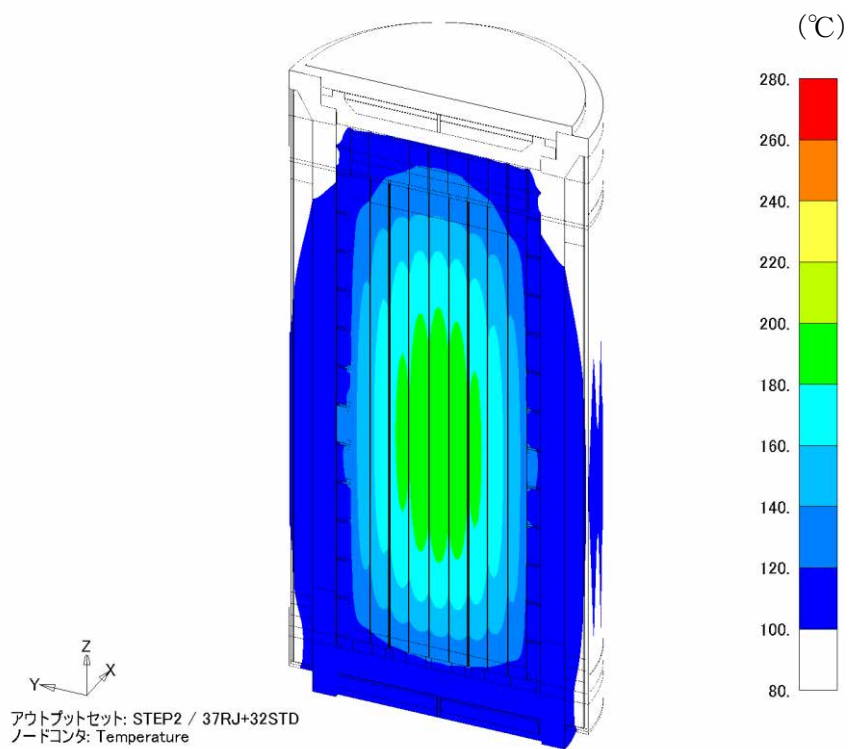


図 10-1 Hitz-B69 型除熱解析結果（全体モデル，配置(1)）

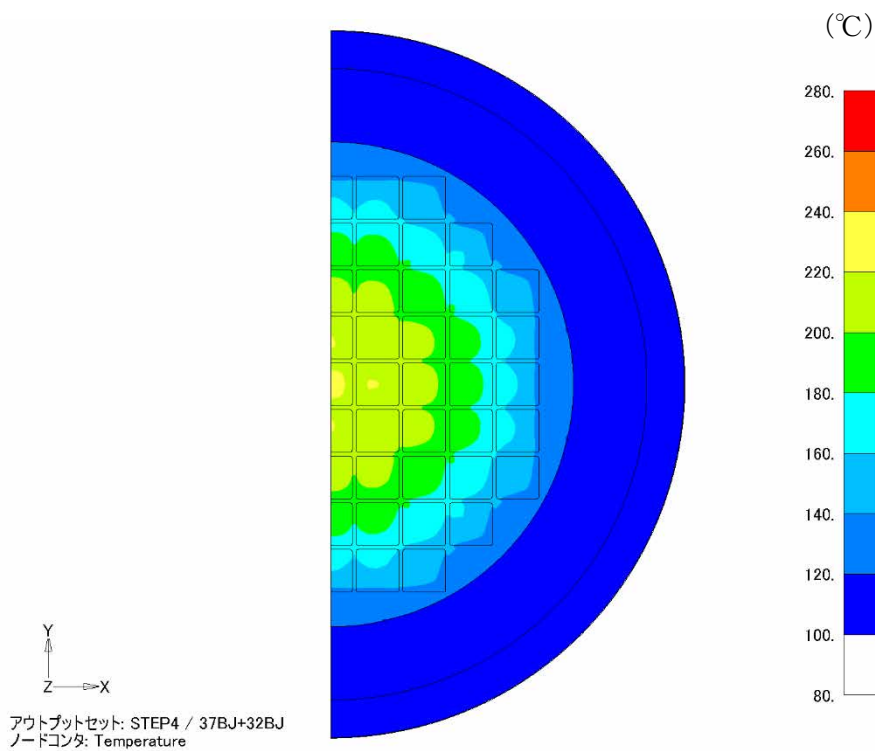
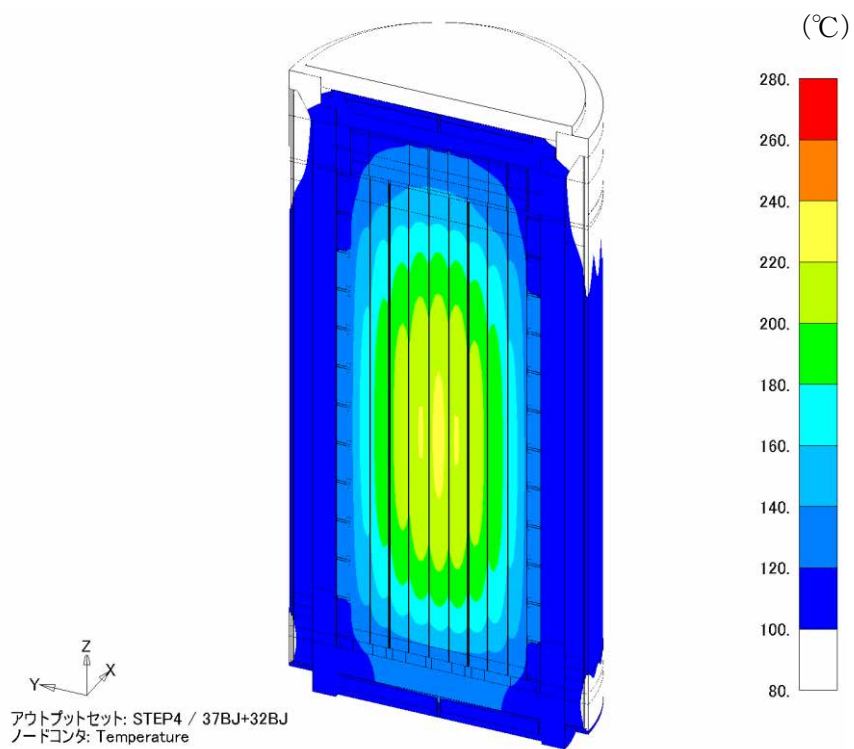


図 10-2 Hitz-B69 型除熱解析結果 (全体モデル, 配置(2))

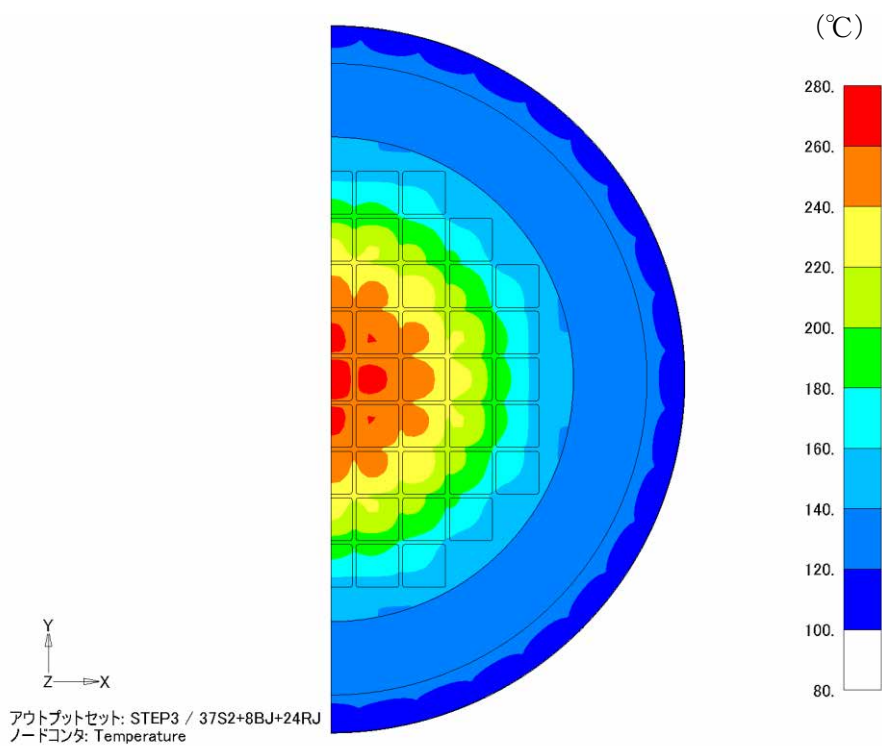
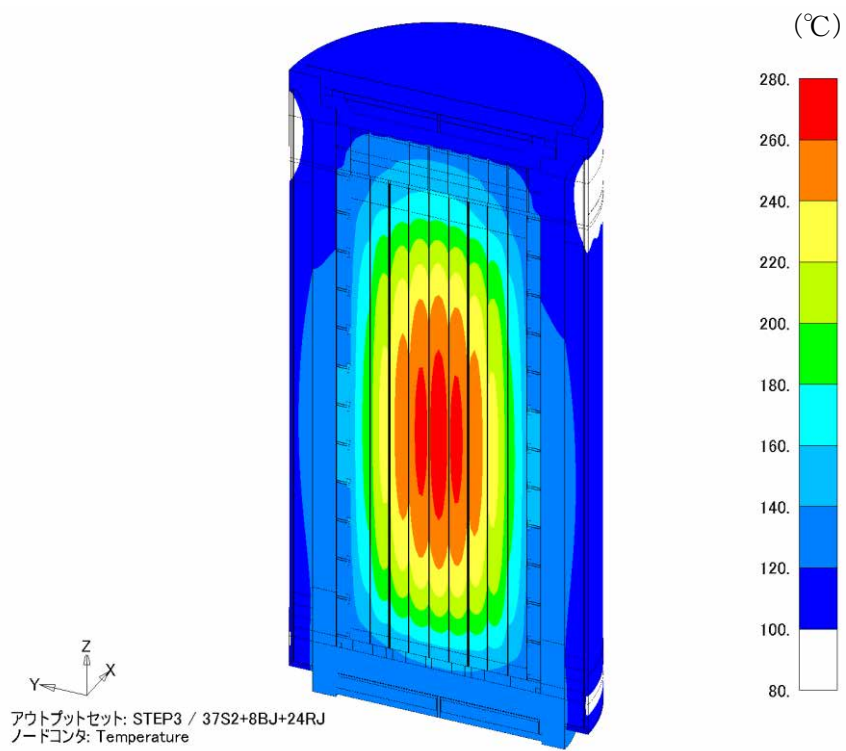


図 10-3 Hitz-B69 型除熱解析結果 (全体モデル, 配置(3))

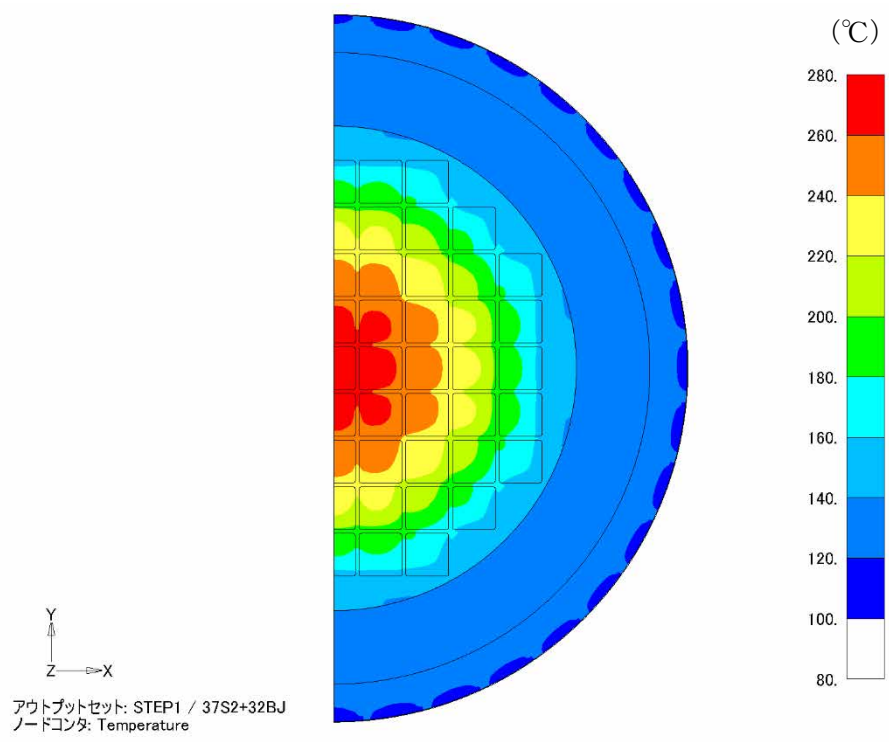
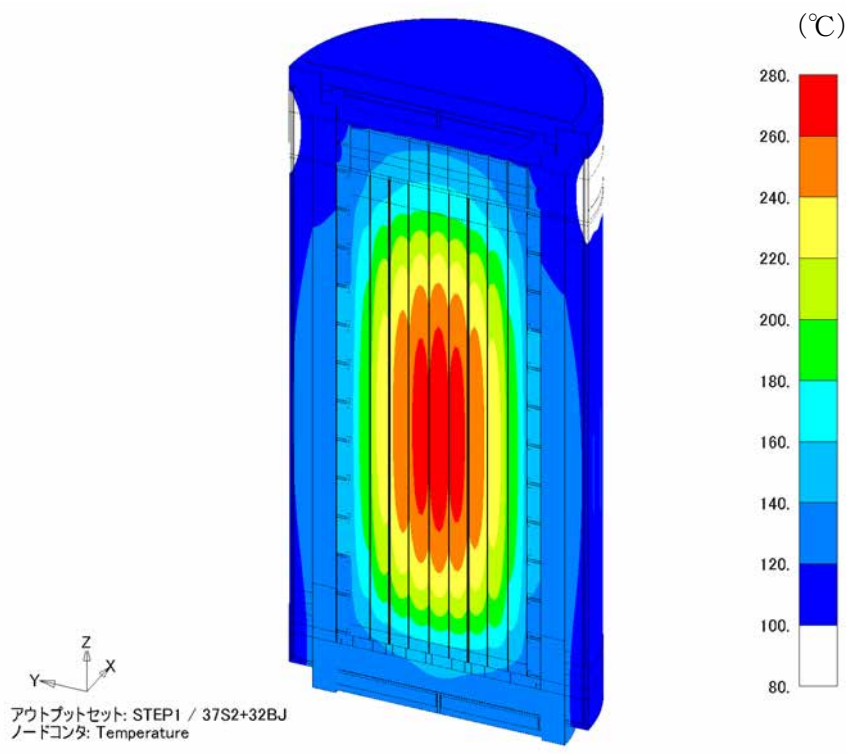


図 10-4 Hitz-B69 型除熱解析結果 (全体モデル, 配置(4))

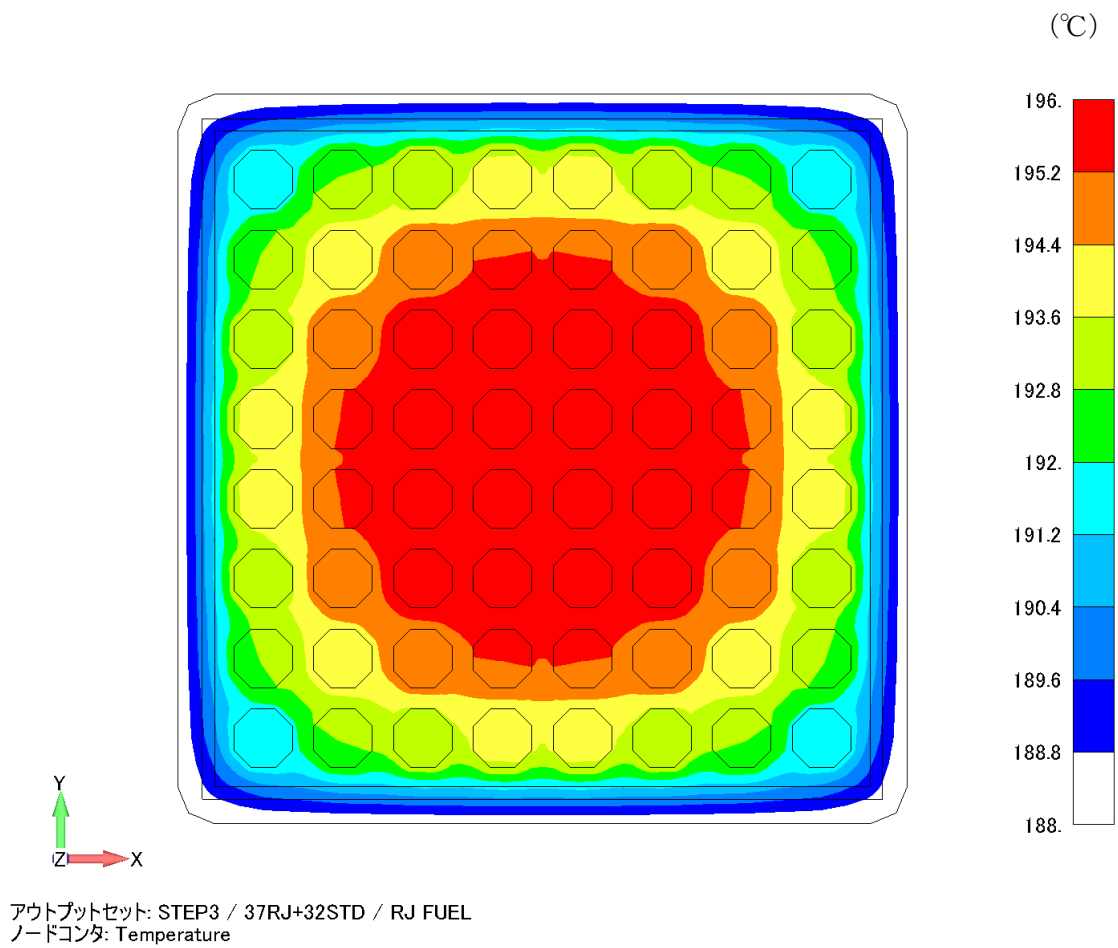


図 11-1-1 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(1), 中央部, 新型 8×8 燃料)

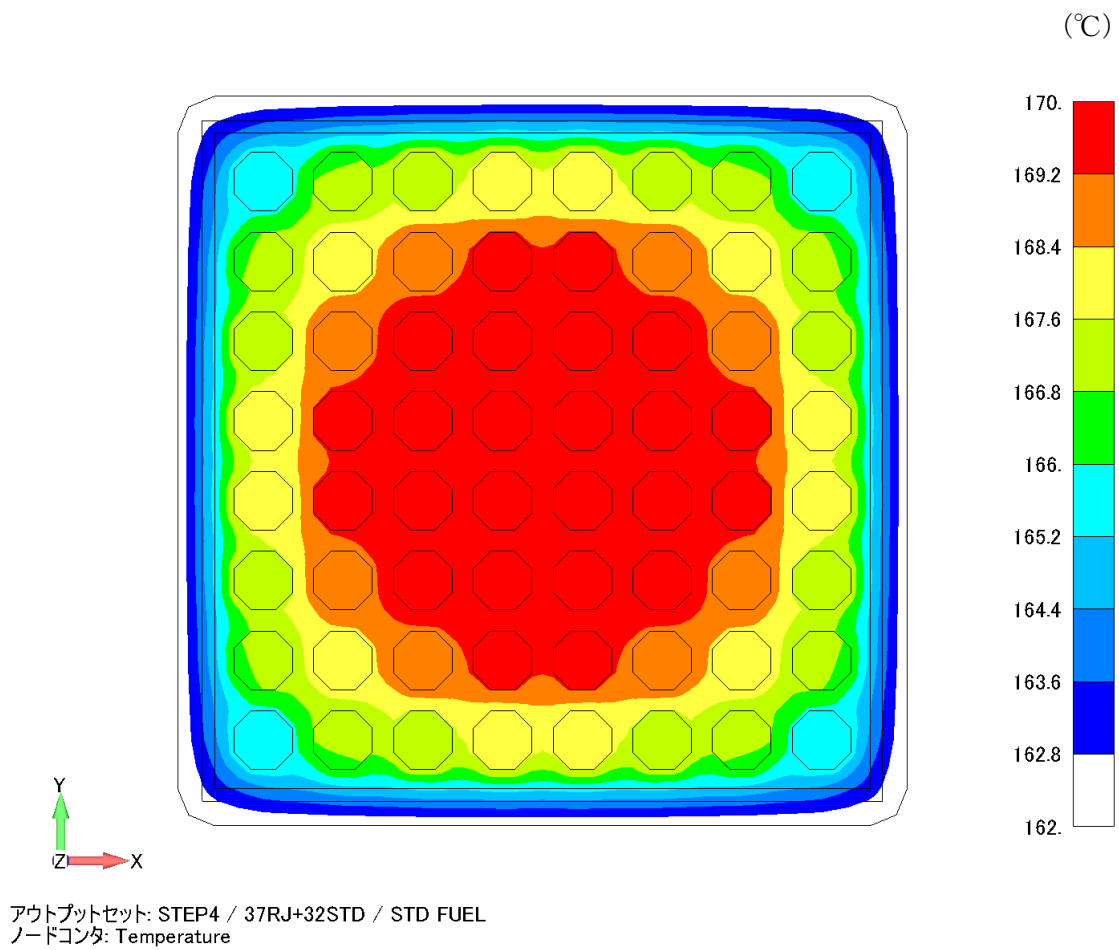


図 11-1-2 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(1), 外周部, 8×8 燃料)

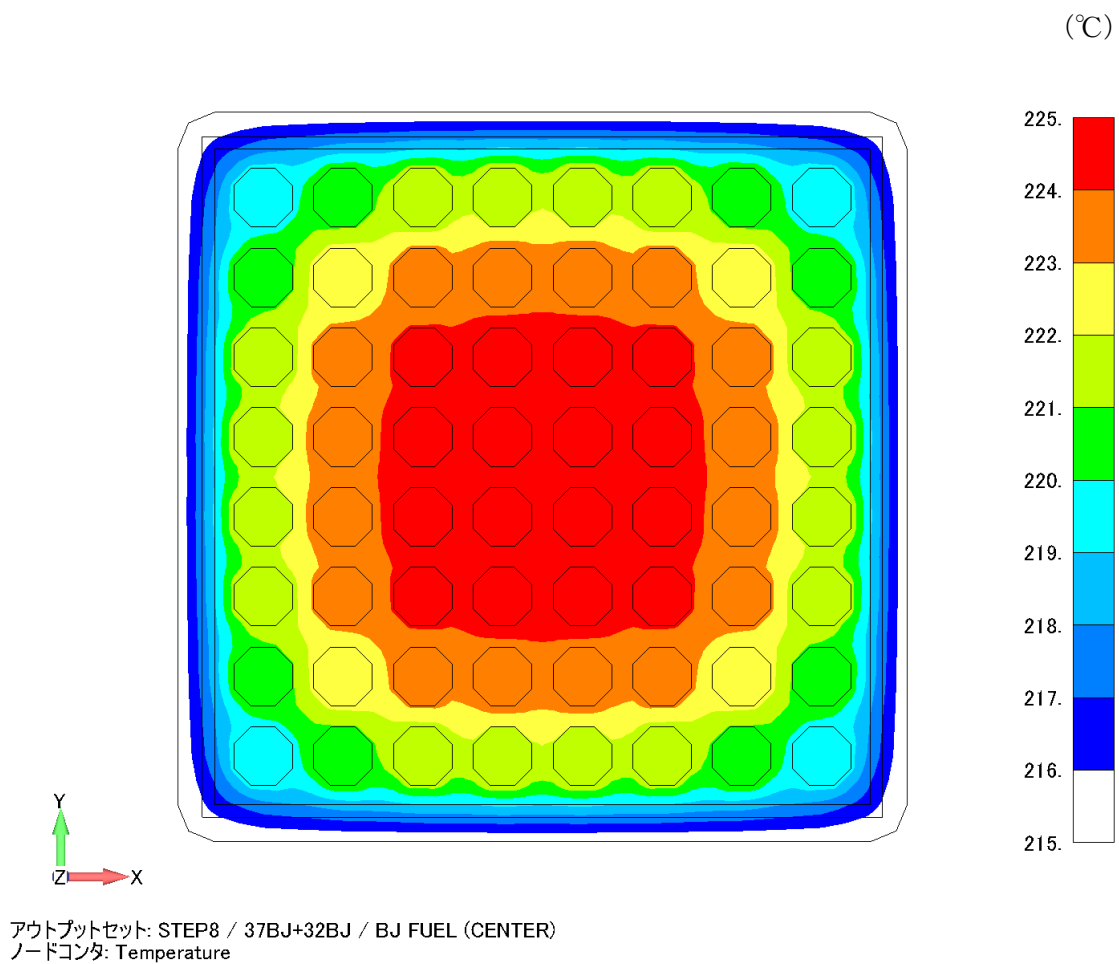


図 11-2-1 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(2), 中央部, 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料)

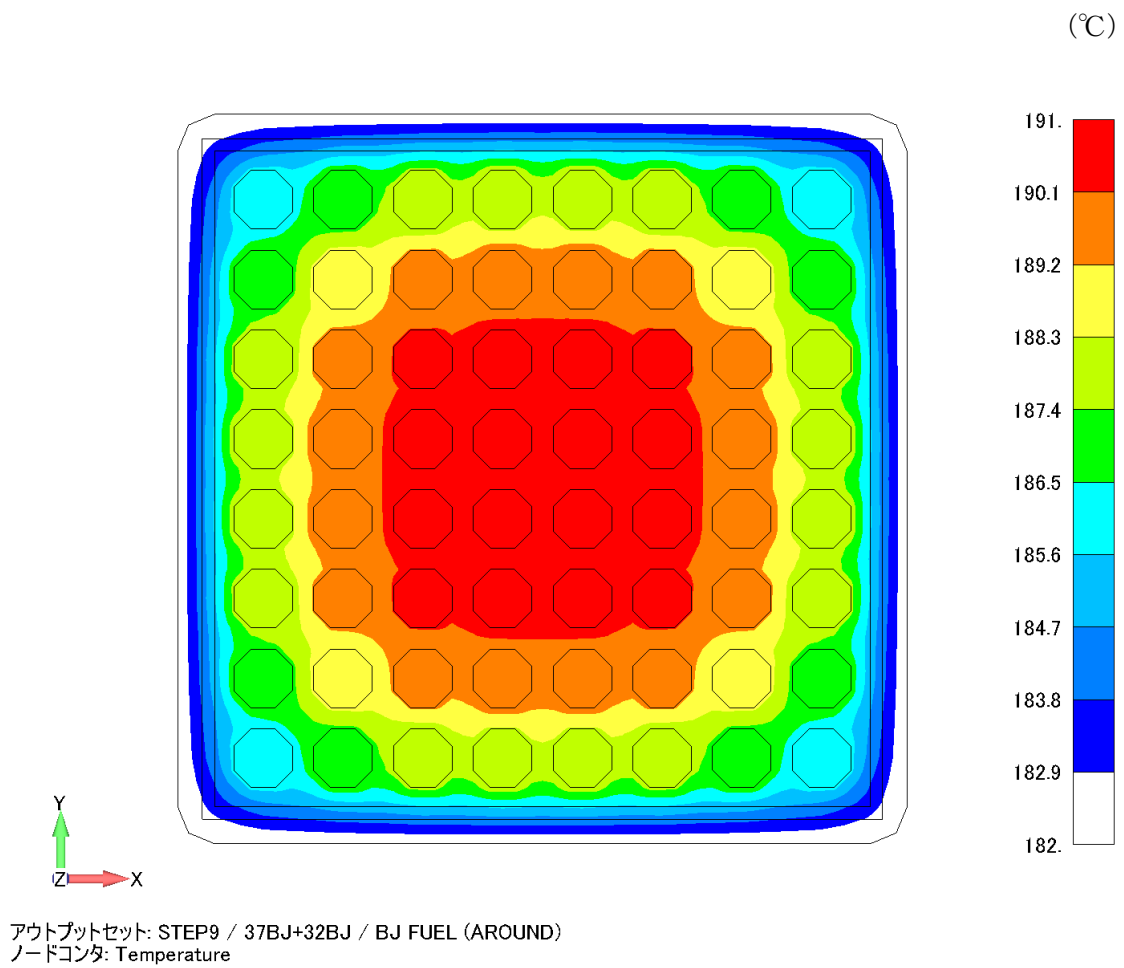


図 11-2-2 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(2), 外周部, 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料)

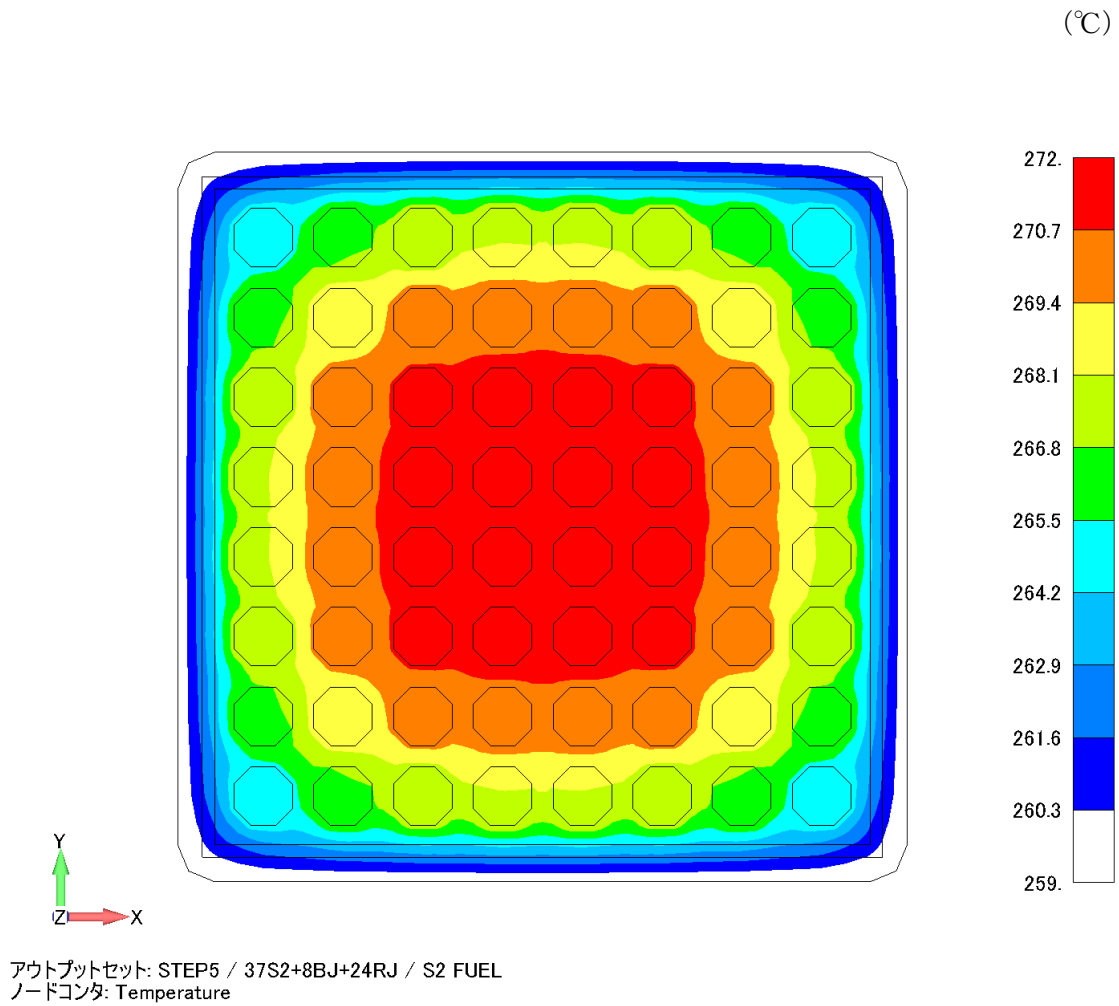


図 11-3-1 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(3), 中央部, 高燃焼度 8×8 燃料)

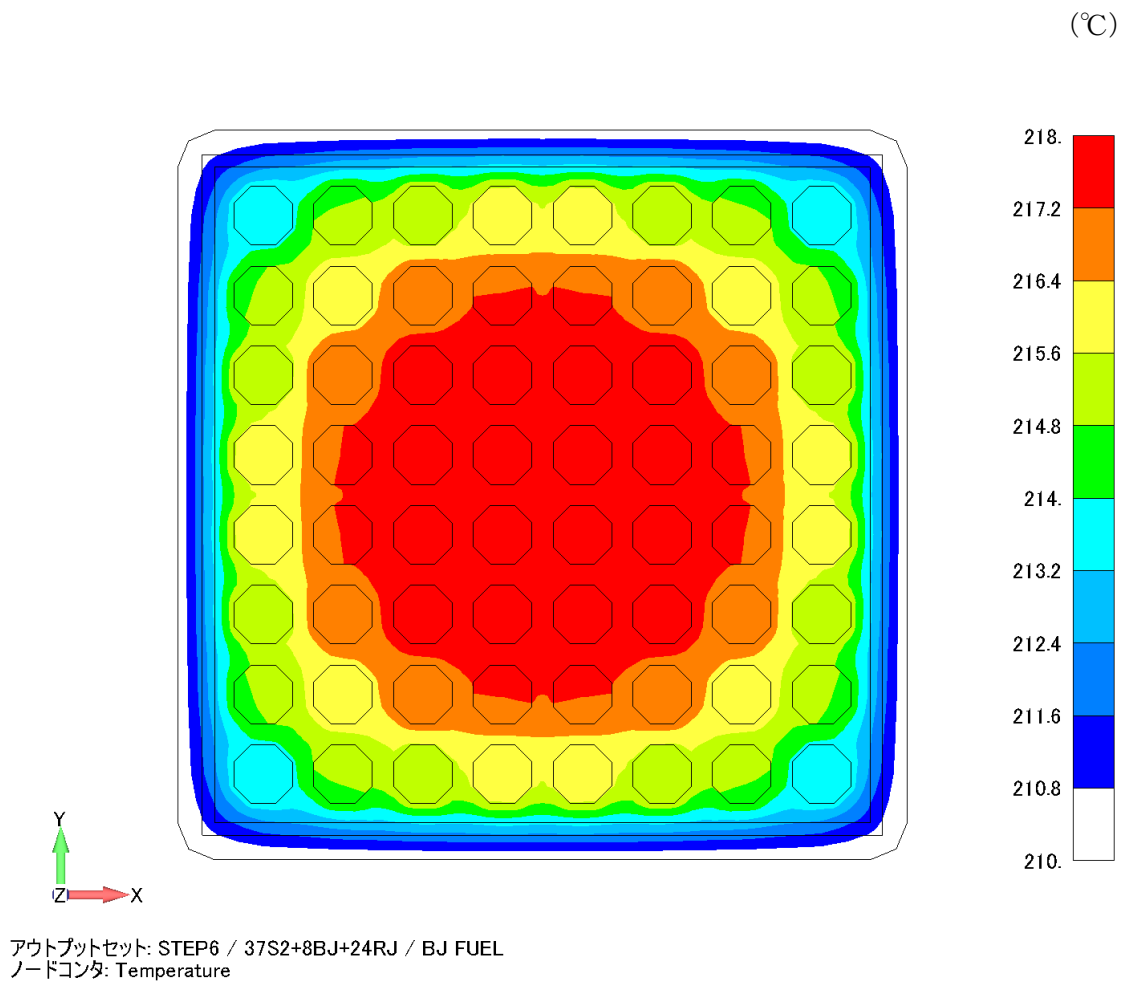


図 11-3-2 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(3), 中間部, 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料)

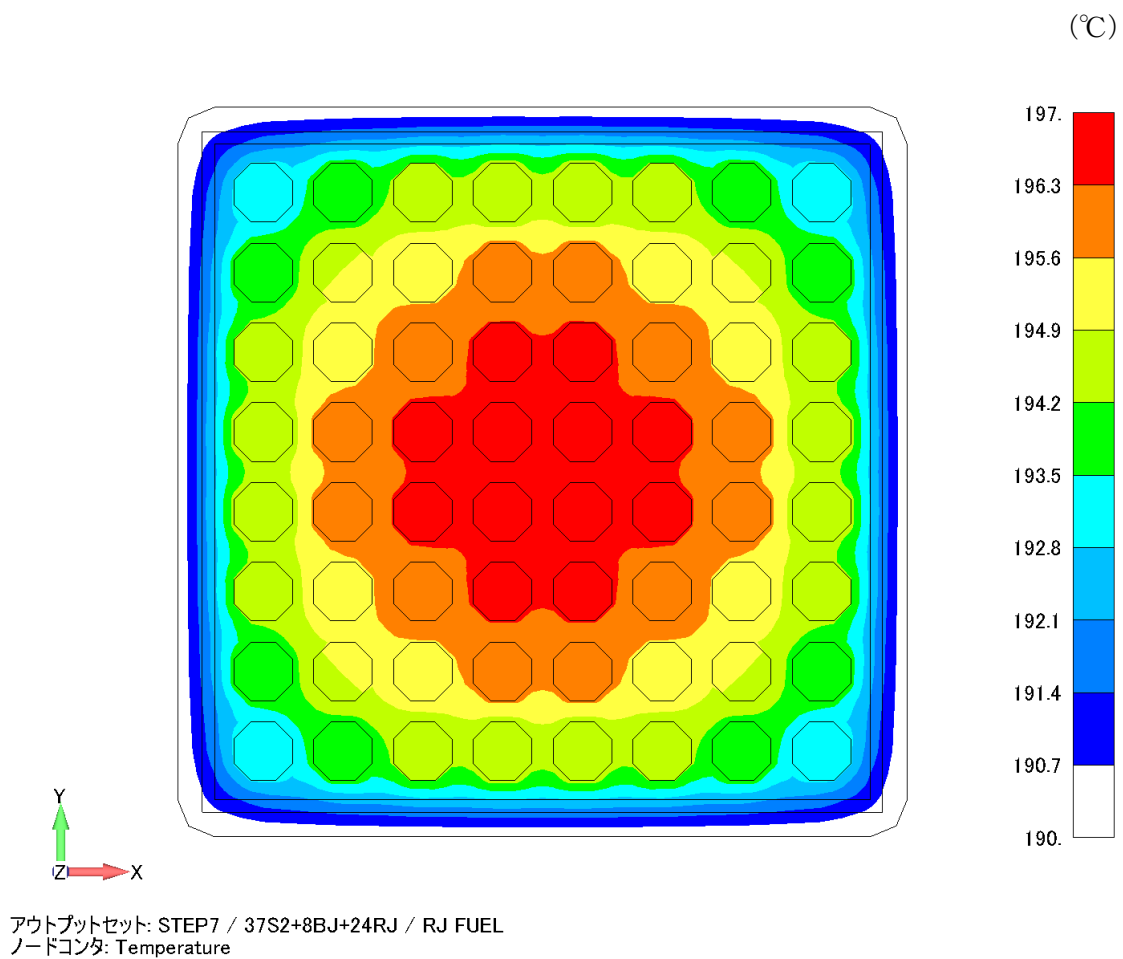


図 11-3-3 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(3), 外周部, 新型 8×8 燃料)

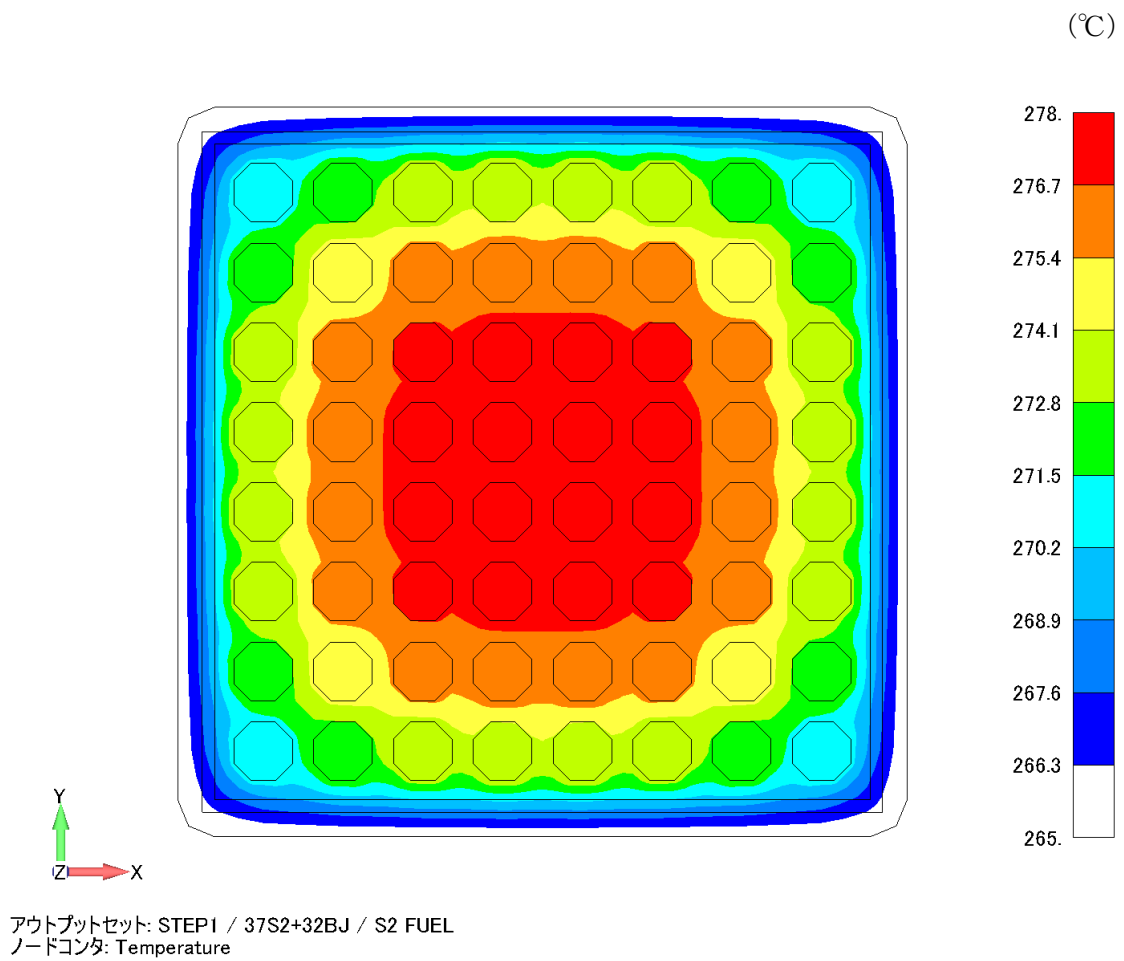


図 11-4-1 Hitz-B69 型除熱解析結果
(燃料集合体モデル, 配置(4), 中央部, 高燃焼度 8×8 燃料)

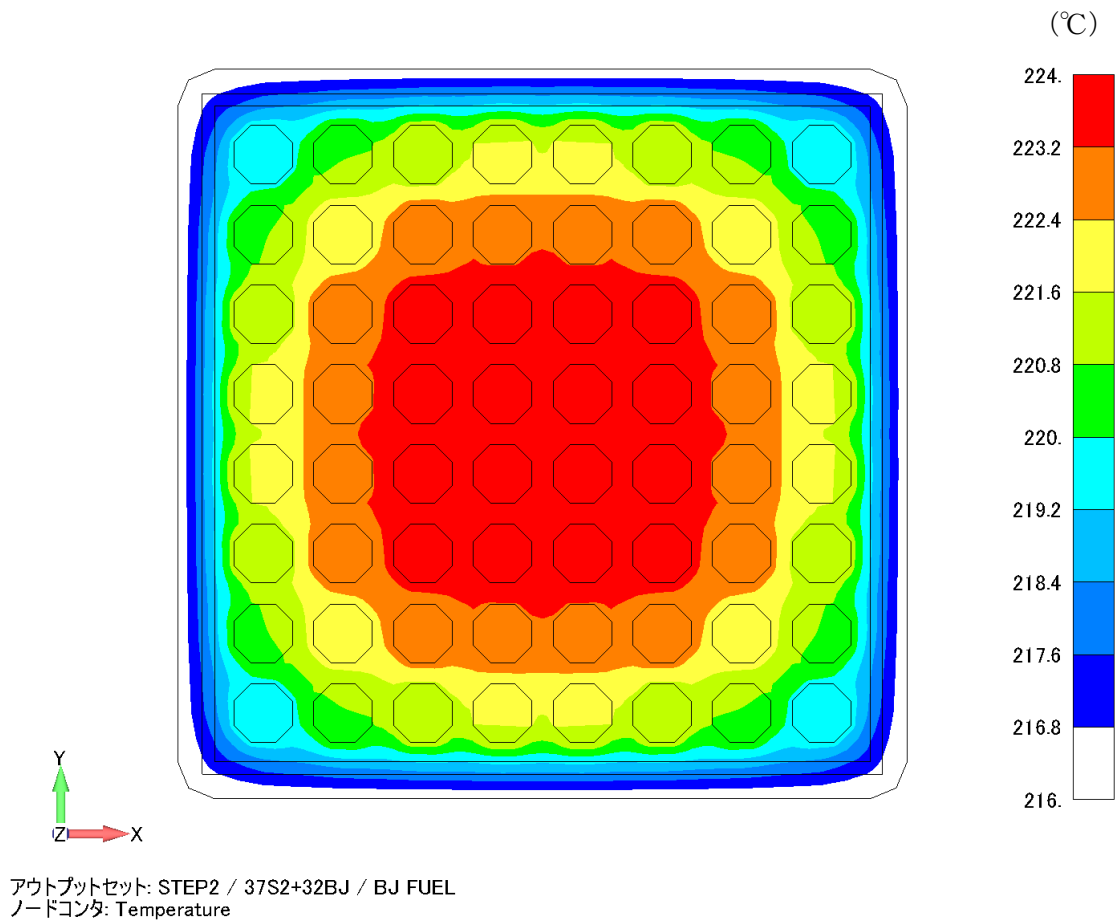


図 11-4-2 Hitz-B69 型除熱解析結果
 (燃料集合体モデル, 配置(4), 外周部, 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料)

[確認内容]

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

貯蔵建屋は型式証明申請の範囲外(設置(変更)許可時に別途確認)である。設置(変更)許可申請において実施する貯蔵建屋の除熱評価(貯蔵建屋を設置する場合)の概要(一例)を別紙 3 に示す。

[確認内容]

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

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

3. 参考文献

- (1) (一社) 日本機械学会、「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版 (2013 年追補版含む)) (JSME S NJ1-2012/2013)」、(2013)
- (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) 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)
- (5) (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)」、(2008)

除熱解析のモデル化及び解析条件について

1. 除熱解析のモデル化

除熱解析は、Hitz-B69 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。

- ・ Hitz-B69 型熱解析モデル
 - ① 三次元全体モデル（以下「全体モデル」という。）
- ・ 燃料被覆管熱解析モデル
 - ② 燃料集合体モデル

これら 2 つの解析モデルの入出力フローを別紙 1-1 図に示す。また、各解析モデルの概要及び解析条件を以下に示す。解析に使用する物性値を別紙 1-1 表に、Hitz-B69 型外表面の熱伝達率を別紙 1-2 表に、放射率を別紙 1-3 表に示す。

(1) 全体モデル

全体モデルは、Hitz-B69 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解析モデルである。

バスケットの格子内側領域（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、平均比重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。外部境界条件として、周囲温度を 50℃、貯蔵施設壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵施設壁面への放射による放熱を考慮する。また、別紙 1-3 図に示す使用済燃料集合体の各収納配置に対して、各条件で燃料集合体最高温度を高め算出するために、中央部には燃焼度の高い燃料の崩壊熱量を設定し、外周部にも、外周部に収納する燃料の中で、最も崩壊熱量が高くなる条件（種類、燃焼度、冷却年数）のものを設計条件とすることで、Hitz-B69 型の最大貯蔵能力として規定した最大崩壊熱量に対し、保守的な設定とする。

(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。また、ヘリウムの対流による熱伝達は考慮せず、径方向及び周方向の伝導及び放射を考慮する。

別紙 1-1 表 材料の物性値 (1/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 (注1) (W/(m·K))
一次蓋 蓋部中性子遮蔽材カバー バスケット (サポートプレート、バスケット上部格子枠、クランプ等)	ステンレス鋼 (SUS304, SUSF304)	26.85 126.85 326.85 526.85	16.0 16.5 19.0 22.5
二次蓋 外筒 下部中性子遮蔽材カバー 底部中性子遮蔽材カバー バスケット (スペーサー)	炭素鋼 (SGV480)	26.85 226.85 526.85	43.0 38.6 27.7
胴 二次蓋	炭素鋼 (JSME-N4 GLF1)	26.85 226.85 526.85	43.0 38.6 27.7
蓋部中性子遮蔽材 側部中性子遮蔽材 底部中性子遮蔽材	レジン (NS-4-FR)	—	0.98
伝熱フィン	銅 (C1020)	26.85 326.85 526.85	398 383 371

(注1) 引用文献 (1) を参照。ただし、レジンは引用文献 (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))
バスケット (伝熱ブロック)	アルミニウム (A1100)	26.85	237
		326.85	232
		526.85	220
バスケット (コンパートメント)	炭素鋼 (SG295)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
中性子吸収材	ほう素添加 アルミニウム合金	23.0	80
		100.0	81
		200.0	81
		250.0	80
断熱材	—	—	0.070
内部気体	ヘリウム	26.85	0.1527
		126.85	0.1882
		226.85	0.2212
		326.85	0.2523
周囲気体 レジン部隙間等	空気	26.85	0.02614
		126.85	0.03305
		226.85	0.03951
		326.85	0.04560

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

別紙 1-2 表 Hitz-B69 型外表面の熱伝達率

貯蔵場所	部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 (注 1,2) (W/ (m ² ·K))
貯蔵 施設内	Hitz-B69 型	水平円筒面	293.15	20	0.87×1.20×Δt ^{1/3}
	外表面		373.15	100	0.87×1.02×Δt ^{1/3}
	(側面)		473.15	200	0.87×0.863×Δt ^{1/3}
	Hitz-B69 型	垂直平板	キャスク蓋部・底部は断熱条件		
	外表面	(垂直面)			

(注 1) 熱伝達率は以下の式を用いて計算する。

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

ここで、h : 熱伝達率 (W/ (m²·K))

λ : 熱伝導率 (W/ (m·K))

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

β : 体積膨張係数 (1/K)

Δt : 周囲空気と外表面の温度差 (K)

Pr : プラントル数 (-)

ν : 動粘性係数 (m²/s)

(注 2) 水平円筒部表面における、自然対流熱伝達率の周方向分布を考慮し、別添 2 に示す熱伝達率の低減係数 0.87 を考慮する。⁽⁵⁾

別紙 1-3 表 材料の放射率

構成部材	材料	放射率
バスケット (コンパートメント、スペーサー)	ニッケルメッキ	0.11
バスケット (サポートプレート、バスケット上 部格子枠他)	ステンレス	0.15
バスケット (伝熱ブロック)	<input type="text"/>	0.652
バスケット (中性子吸収材)	温水酸化面	0.652
胴内面 底板内面 二次蓋 (内面)	<input type="text"/>	0.5
胴内面 (フランジ部) 二次蓋 (フランジ部)	ステンレスクラッド	0.15
外筒 (外表面) 胴 (外表面) 底板 (外表面) 下部中性子遮蔽材カバー (外表面) 二次蓋 (外表面) 貯蔵施設 (内面)	塗装	0.8

(注 1) ニッケルメッキは引用文献 (6)、ステンレス及びステンレスクラッドは引用文献 (7)、は引用文献 (8)、は引用文献 (9)、塗装は引用文献 (1) を参照。

内は商業機密のため、非公開とします。

2. 解析条件

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

(1) 全体モデル

全体モデルでは、本文図 3-1 から図 3-4 に示したとおり、燃料集合体の軸方向の崩壊熱量分布を考慮するために燃料有効部の範囲を 24 領域に分割する。

また、別紙 1-3 図に示す使用済燃料集合体の各収納配置に対して、各条件で燃料集合体最高温度を高め算出するために、中央部には燃焼度の高い燃料の崩壊熱量を設定し、外周部にも、外周部に収納する燃料の中で、最も崩壊熱量が高くなる条件（種類、燃焼度、冷却年数）のものを設計条件とすることで、Hitz-B69 型の最大貯蔵能力として規定した最大崩壊熱量に対し、保守的な設定とする。

貯蔵施設内貯蔵における全体モデルの外部境界条件として、周囲温度を 50℃、貯蔵施設壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵施設壁面への放射による放熱を考慮する。容器蓋部には、三次蓋シール部を保護するための貯蔵用緩衝体アダプタ及び貯蔵用緩衝体が、容器底部には貯蔵用緩衝体に取り付けられると仮定し、取付箇所を断熱条件とする。断熱条件とした範囲を別紙 1-2 図に示す。

(2) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルには、PF 最大領域の崩壊熱量となるように各燃料棒の発熱密度を設定する。また、軸方向への伝熱を無視し断熱とする。

燃料集合体モデルの境界条件には、全体モデルにおいて求められるバスケット（コンパートメント）の最高温度を設定する。

別紙 1-4 表 外部境界条件

項目		境界条件
対流環境温度		50℃
放射環境温度		65℃
放射率	特定兼用キャスク側面	0.8 ⁽¹⁾
	貯蔵モジュール天井・床面・壁面	0.8 ⁽¹⁾
特定兼用キャスク側面の放射形態係数		0.650 ^(注1)
特定兼用キャスク表面熱伝達率（側面）		別紙 1-2 表による

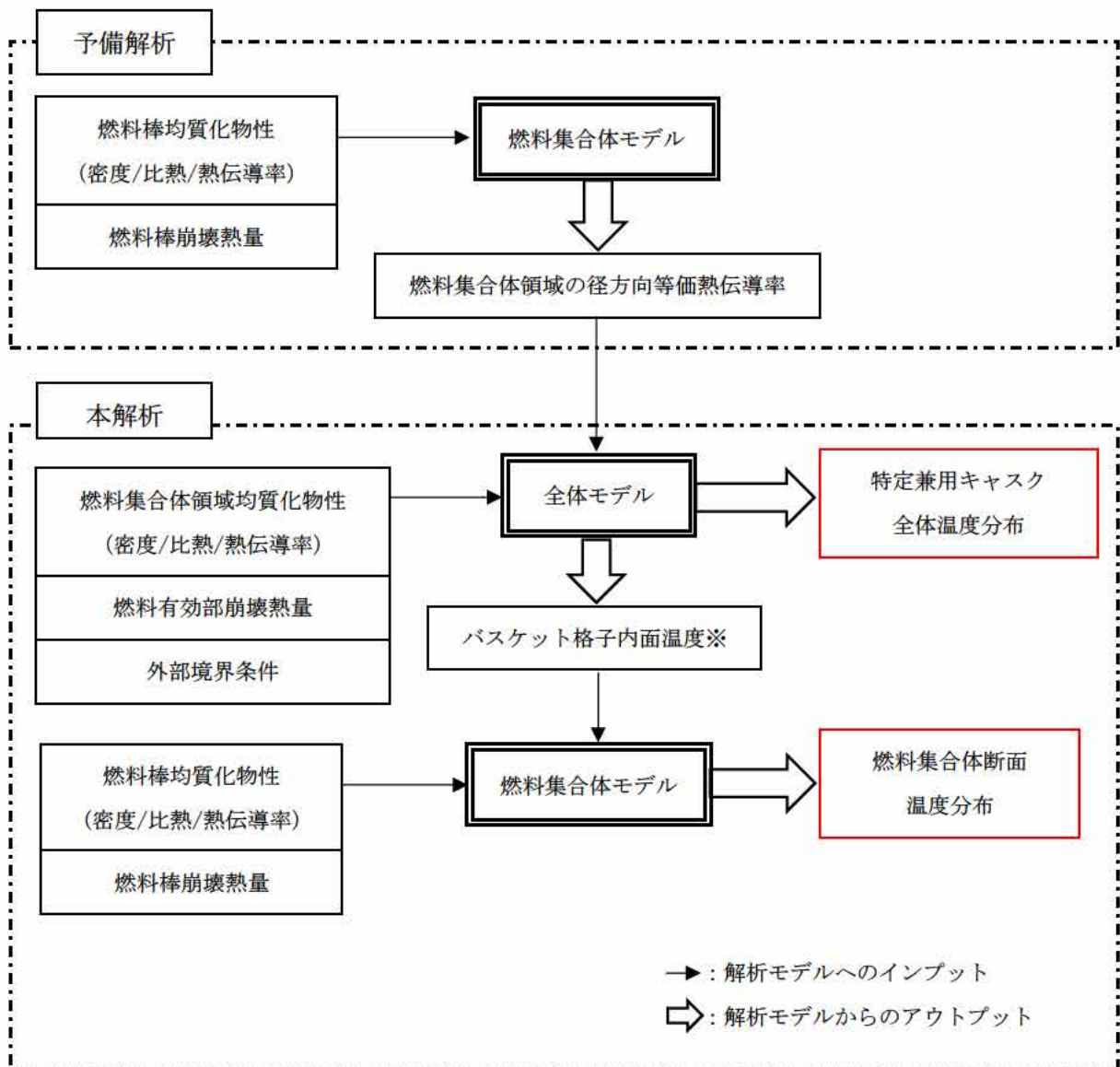
(注1) 貯蔵モジュール内においてキャスクが 4.33m 間隔（キャスク中心間距離、最小値として仮定）で一列に配置された場合を仮定しており、周囲キャスクを考慮したキャスク側面（放射率 0.8）と天井・床面・壁面（放射率 0.8）との形態係数を考慮。

周囲キャスクとは表面温度が等しいため、相互の放射熱伝達はなく、温度差がある天井との放射熱伝達を考慮する。その際、隣接キャスクに対しては、天井に対する遮蔽効果を考慮し、放射伝熱の低減を考慮する。その際、横置き状態での側面の形態係数は周方向に変化するため、その最小値を特定兼用キャスク側面の放射形態係数として全周に設定している。

3. 除熱解析の保守性

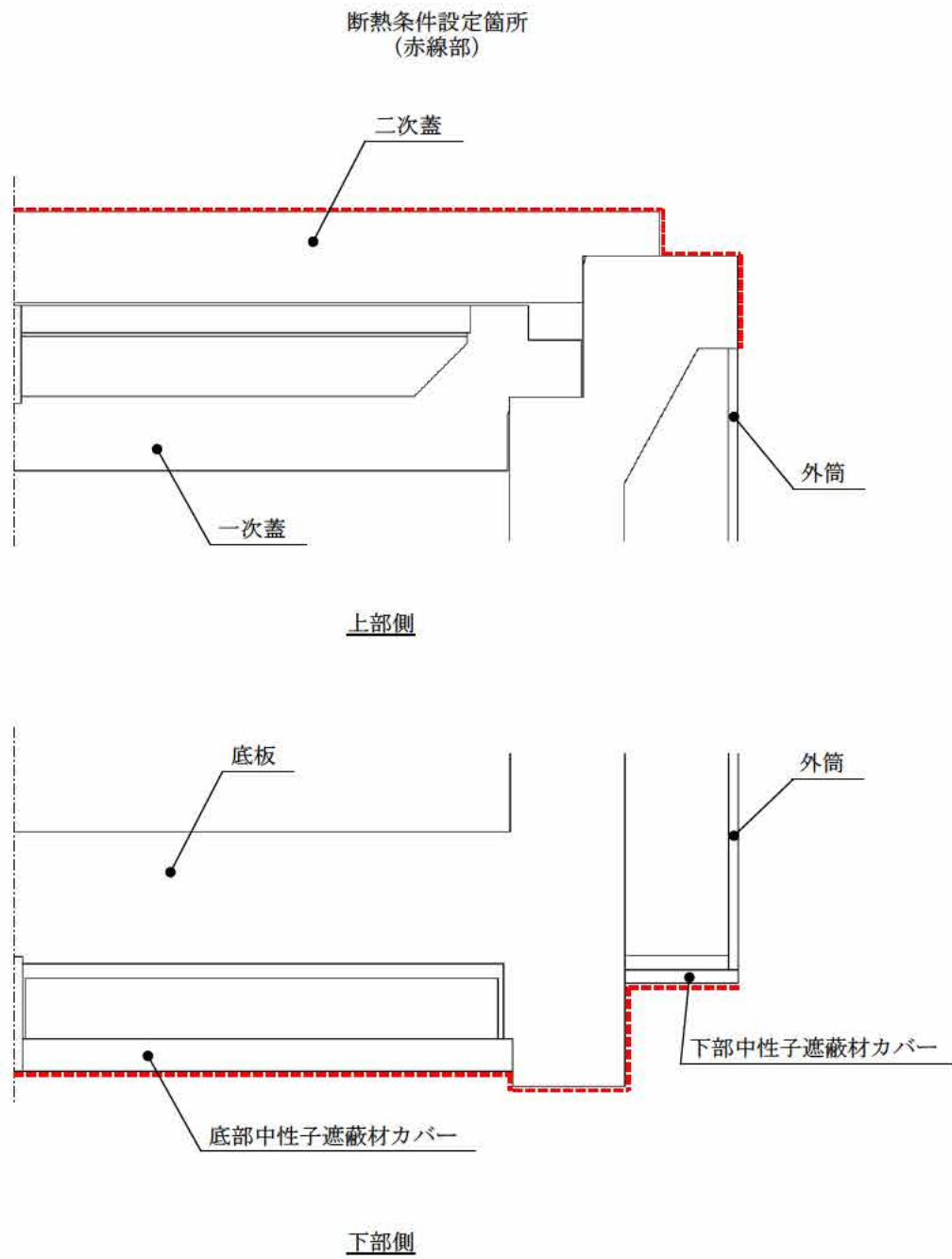
除熱解析は、以下の点について保守性を有している。

- 収納制限に対する解析条件の保守性
 - －崩壊熱量を保守的に高めに算出するためにウラン濃縮度を低めに設定する。
 - －燃料集合体最高温度を高めに算出するために、中央部には燃焼度の高い燃料の崩壊熱量を設定し、外周部にも、外周部に収納する燃料の中で、最も崩壊熱量が高くなる条件（種類、燃焼度、冷却年数）のものを設計条件とすることで、Hitz-B69 型の最大貯蔵能力として規定した最大崩壊熱量に対し、保守的な設定とする。
- 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、横置きの場合、コンパートメント下面での使用済燃料とバスケットの接触による熱伝導が行われるが、燃料集合体の温度を高めに評価するため、その影響を排除するように、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。
 - －全体モデルにおいて、径方向の熱移動量設定時は保守的に、コンパートメントとスペーサー、コンパートメントと伝熱ブロック等とのギャップを考慮する。
 - －貯蔵用緩衝体取付部は、熱の移動を無視し、保守的に断熱条件とする。
 - －横置き時において、外筒外表面の熱伝達率に、別添 2 に示す低減係数 0.87 を乗じる。
 - －Hitz-B69 型側面の放射形態係数は周方向に変化するが、その最小値 0.650 を全周に設定している。
- 崩壊熱量の保守性
 - －使用済燃料の崩壊熱量を設定する際には、最大崩壊熱量を上回る収納対象とする使用済燃料集合体の燃焼度を包絡する燃焼度分布を考慮した「設計崩壊熱量」を使用する。

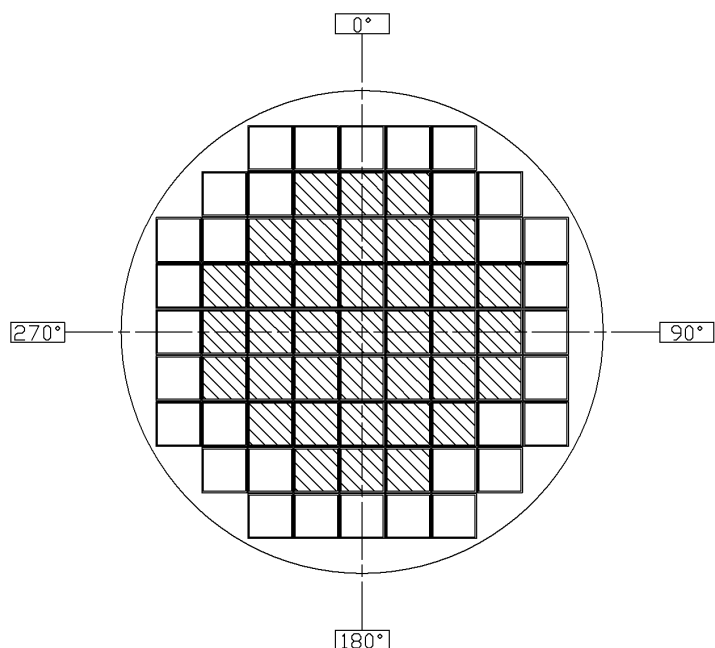


※燃料集合体モデルの境界条件として、全体モデルにおいて求められるバスケット（コンパートメント）の最高温度を設定する。

別紙 1-1 図 除熱解析モデルの入出力フロー図

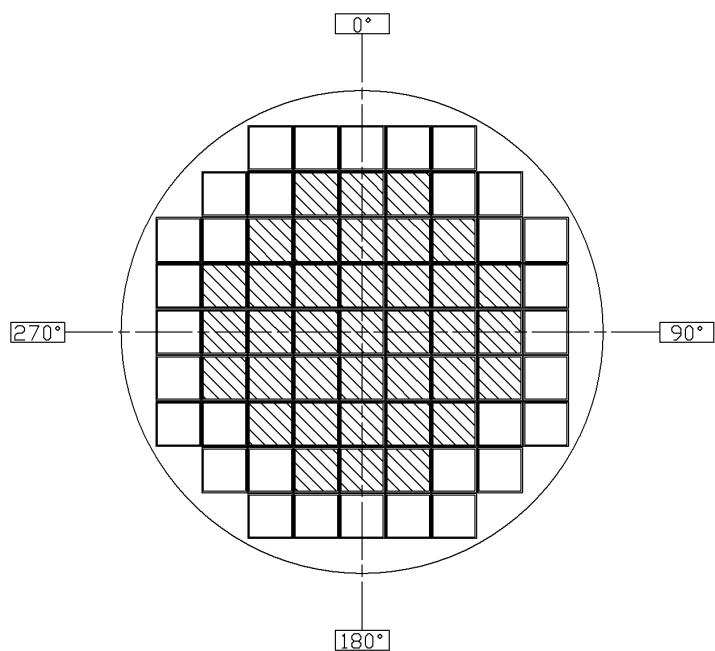




別紙 1-2 図 貯蔵モジュール内貯蔵時の全体モデルの断熱条件設定範囲
(貯蔵用緩衝体の取付箇所)



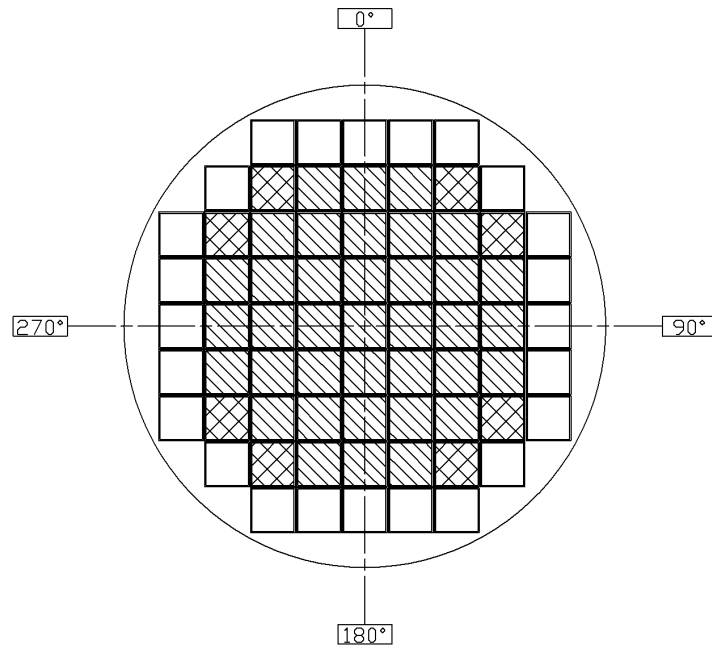
- 燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 38,000MWd/t
 冷却期間 : 34 年
- 燃料種類 : 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 30,000MWd/t
 冷却期間 : 34 年




別紙 1-3 図 使用済燃料集合体の径方向発熱分布 (1/4) (配置(1))
(8×8 燃料及び新型 8×8 燃料を収納する場合)



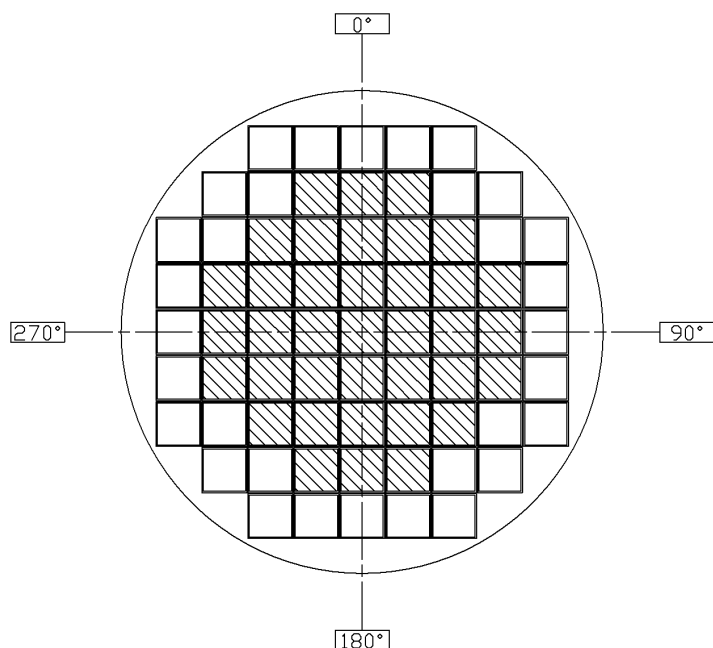
-  燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 40,000MWd/t
 冷却期間 : 28 年
-  燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 35,000MWd/t
 冷却期間 : 30 年



別紙 1-3 図 使用済燃料集合体の径方向発熱分布 (2/4) (配置(2))
 (新型 8×8 燃料及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納する場合)



- 
 燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 48,000MWd/t
 冷却期間 : 20 年 (高燃焼度 8×8 燃料)
- 
 燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
 収納体数 : 8 体
 燃焼度 : 35,000MWd/t
 冷却期間 : 30 年
- 
 燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 24 体
 燃焼度 : 30,000MWd/t
 冷却期間 : 34 年

別紙 1-3 図 使用済燃料集合体の径方向発熱分布 (3/4) (配置(3))
 (新型 8×8 燃料、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 : 高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 48,000MWd/t (高燃焼度 8×8 燃料)
 冷却期間 : 20 年 (高燃焼度 8×8 燃料)
-  燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 35,000MWd/t
 冷却期間 : 30 年

別紙 1-3 図 使用済燃料集合体の径方向発熱分布 (4/4) (配置(4))
 (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)

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) (財) 原子力発電技術機構 平成12年度リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(金属キャスク貯蔵技術確証試験)
- (3) メーカー資料
- (4) メーカー資料
- (5) 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)”, 論文 No.98-1098, 日本機械学会論文集(B論), 65巻 631号, (1999)
- (6) J. R. Howell, R. Siegel, "Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition", Hemisphere Publishing Corp., (1981)
- (7) (一社) 日本機械学会、「伝熱工学資料 改訂第3版」、(1975)
- (8) 「アルミニウム表面機能化便覧」編集委員会, アルミニウム表面機能化便覧、(2008)
- (9) 機械技術研究所所報 Vol.35 (1981) No.6, 高温伝熱面のふく射率評価 (U.D.C. 535.231.6)、(1981)

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>

(1) 全体モデルのバスケット格子内部

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

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

ここで、

λ_f : 径方向等価熱伝導率 (W/ (m・K))

q : 単位体積崩壊熱量 (W/m³)

W : 燃料集合体領域外寸 (m)

K : 係数 (13.57) (－)

T_1 : 燃料棒最高温度 (K)

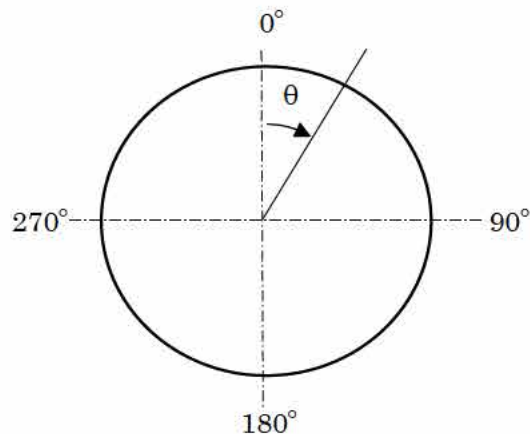
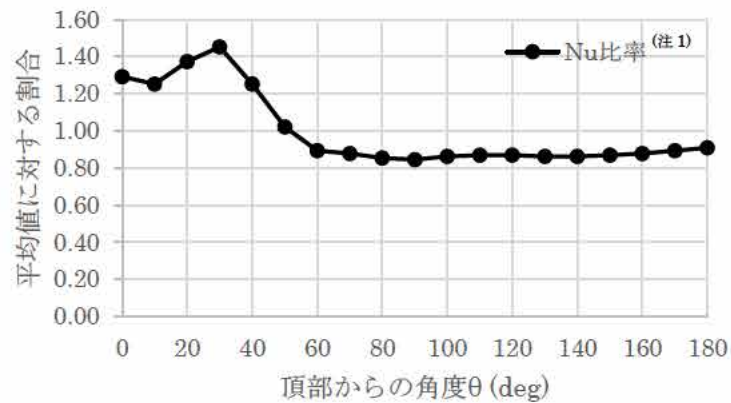
T_2 : バスケット格子内面温度 (K)

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「Hitz-B69 型外表面の熱伝達率」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。



別紙 1-2-1 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。

参考文献：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）

記載内容の詳細は次頁参照。

別紙 1-2-1 表 参考文献の記載内容

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	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)	<p>加熱された水平な円柱周方向の局所熱伝達率の測定結果(図5)が示されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・等熱流束条件で加熱された水平円柱周りに発生する自然対流の流動、伝熱について実験的検討を加えたものであり、試験流体として実用上重要な空気を用い、円柱に沿う流れが乱流へ遷移するような特に高レーレー数域の伝熱、流動機構の詳細を、煙による流れの可視化及び局所熱伝達率の測定により明らかにした。 ・円柱まわりの流動状況を把握するため、円柱の直径を種々変化させた場合について、煙による流れの可視化を行った。 ・流れの可視化結果を参考にして、円柱周方向の局所熱伝達率を測定した。円柱径、伝熱面熱流束を系統的に変化させた実験を行っているが、代表的な結果として、伝熱面熱流束を一定 $q_w=100\text{W/m}^2$ に保ち、円柱径を $D=200\sim 1200\text{mm}$ の間で6段階変化させた場合について、図5に示している。図5の縦軸には局所ヌッセルト数 Nu_θ を修正レーレー数 Ra_D^* の $1/5$ 乗で割った値をとり、横軸には円柱下端からの角度 θ をとっている。

塗装の放射率の設定根拠

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

< 塗装に放射率 0.8 を設定したことの妥当性 >

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

放射率 0.8 は実測値（0.94）より小さいことから、Hitz-B69 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 材料の放射率

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

(注 1) 参考文献 (1) に示される塗料の放射率の最大と最小の値

(注 2) エポキシ樹脂系塗料（白）に対して 3 回測定した実測値

除熱解析の設計基準値における参考文献の記載内容について

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

別紙 2-1 表 設計基準値における参考文献の記載内容 (1/2)

番号	参考文献	
	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
1	(一社) 日本機械学会、「発電用原子力設備規格材料規格 (2012 年版 (2013 年追補版含む)) (JSME S NJ1-2012/2013)」、(2013)	<p>炭素鋼は-30℃～375℃での温度範囲において、ステンレス鋼は-30℃～425℃の温度範囲において、合金鋼 (ニッケルクロムモリブデン鋼) は-30℃～350℃の温度範囲において、析出硬化系ステンレス鋼は-30℃～350℃の温度範囲において、銅は-30℃～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> <ul style="list-style-type: none"> ・ GLF1 (胴、底板) [炭素鋼] ・ SGV480 (外筒、底部中性子遮蔽材カバー、下部中性子遮蔽材カバー、二次蓋) [炭素鋼] ・ SUS304 (一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、バスケット (サポートプレート)) [ステンレス鋼] ・ SNB23-2 (一次蓋ボルト、二次蓋ボルト) [合金鋼 (ニッケルクロムモリブデン鋼)] ・ SUS630 (トラニオン) [析出硬化系ステンレス鋼] ・ C1020 (銅フィン) [銅]
2	BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma shielding Material", (1986)	エポキシ系レジンの使用可能温度の上限 149℃が示された文献である。
3	(一財) 電力中央研究所、「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」、(2010)	<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。

別紙 2-1 表 設計基準値における参考文献の記載内容 (2/2)

番号	参考文献	
	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
4	総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」、(2009)	<ul style="list-style-type: none"> ・クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ 2 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、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。BWR 燃料に関する照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、約 270℃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おり、また、約 300℃及び約 330℃の結果も示されていることから、被覆管の健全性評価では、これらの結果を用いて適切に考慮する必要がある。 ・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 300℃以下（ライナ有り）及び 200℃（ライナ無し）、周方向応力を 70MPa 以下（ライナ有り、無し）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。
5	(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）」、(2008)	<ul style="list-style-type: none"> ・水素化物再配向 使用済燃料被覆管水素化物配向等の影響について、以下の条件では、水素化物再配向の影響がなかったことを試験で確認した。 ライナ有り燃料については、再配向及び機械特性として 300℃以下、かつ 70MPa 以下。 ライナ無し燃料については、再配向及び機械特性として 200℃以下、かつ 70MPa 以下。

除熱建屋の除熱評価について

1. 概要

設置(変更)許可申請において実施する貯蔵建屋の除熱評価(貯蔵建屋を設置する場合)の概要(一例)を示す。

2. 貯蔵建屋を設置する場合の要求事項

設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項では、「貯蔵建屋は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。」の要求があり、また、審査ガイド2.3 除熱機能の確認内容において、「貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。」の要求が示されている。Hitz-B69型の除熱設計は、貯蔵建屋内でのHitz-B69型周囲温度が50℃以下であることを条件としているため、設置(変更)許可申請では、Hitz-B69型の除熱評価において貯蔵施設側で確認する事項として設定している「Hitz-B69型周囲温度が貯蔵建屋内で50℃以下であることを。」の確認を行う。

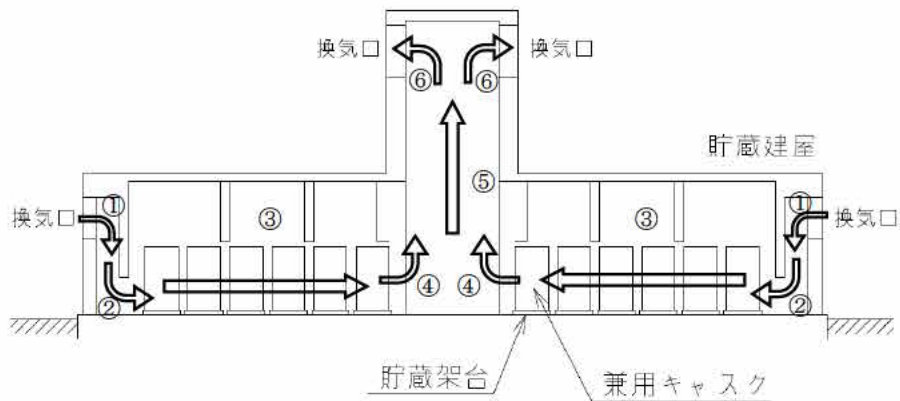
なお、Hitz-B69型の除熱評価と貯蔵建屋の除熱評価相互の関係は本書の本文図2のとおりである。

3. 貯蔵建屋の除熱評価例

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

(1) 評価方法

貯蔵建屋の流路(例)を別紙3-1図に示す。貯蔵建屋の除熱評価は、特定兼用キャスク表面に伝えられた使用済燃料の崩壊熱全てが周囲空気に移行するものとして、貯蔵建屋の給気口から排気口までの流路をモデル化し、排気温度が特定兼用キャスクの除熱評価で適用している周囲温度条件以下となることを示すことである。



別紙 3-1 図 貯蔵建屋の熱の流路 (例)

(2) 排気温度の計算

排気温度は、別紙 3-1 表に示す貯蔵建屋の給気温度、特定兼用キャスクの崩壊熱量等を条件として、乾式貯蔵建屋内の空気と外気との密度差により生じる駆動力 H_{th} と、貯蔵建屋内を空気が流れることによって生じる圧力損失 ΔP (別紙 3-1 図の①～⑥の箇所) の総和) がバランスする点を算出することで算出される。

1) 駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) の計算

駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

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

ここで、

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

2) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

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

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

ここで、

- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- ξ_i : 圧力損失係数 (—)
- W_i : 通過風量 (質量流量) (kg/s)
- ρ_i : 通風路の空気密度 (kg/m³)
- A_i : 通風路の断面積 (m²)
- q : 特定兼用キャスクの崩壊熱量 (kW/基)
- n : 特定兼用キャスクの基数 (基)
- C_p : 空気の比熱 (kJ/(kg·°C))
- T_{out} : 排気温度 (°C)
- T_{in} : 給気温度 (°C)

別紙 3-1 表 貯蔵建屋の除熱評価条件 (例)

項目	条件	備考
特定兼用キャスクの崩壊熱量 (q)	12.8kW/基	設置する特定兼用キャスクの崩壊熱量により設定される
給気温度 (T_{in})	30°C	設置する貯蔵建屋の気温等により設定される
目標排気温度 (T_{out})	貯蔵建屋：50°C以下	特定兼用キャスクの除熱評価条件(周囲温度)に適用される温度以下になることを確認する

貯蔵施設における Hitz-B69 型の取扱上の安全性について

1. 貯蔵施設における取扱上の安全性に対する設計上の配慮

Hitz-B69 型は、設計貯蔵期間中を通して安全機能を維持するとともに、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して信頼性を有する材料及び構造とすることで使用済燃料の健全性を確保する設計としており、貯蔵中に Hitz-B69 型の安全機能維持の監視のために蓋間圧力及び表面温度を適切な頻度で確認することを除けば、貯蔵中、Hitz-B69 型近傍で行う作業を特段要しない設計としている。

Hitz-B69 型の外面温度は高温となる可能性があるが、貯蔵施設での Hitz-B69 型の取扱いにおいて、人が Hitz-B69 型の外面に触れる場合には、保護具の装着により防護することが可能であり、安全上問題はないと判断している。詳細を以下に示す。

2. Hitz-B69 型の外面温度

貯蔵施設内貯蔵における Hitz-B69 型の最高温度を別紙 4-1 表に示す。

なお、除熱解析では、崩壊熱量の他に、別紙 1 の 3. に示すその他の保守性を有しており、現実的には、別紙 4-1 表に示す温度以下となる。

別紙 4-1 表 Hitz-B69 型外面の温度 (注 1)

Hitz-B69 型の外面 (注 2)	最高温度 (°C)
外筒外面	122
二次蓋外面	109

(注 1) Hitz-B69 型 1 基あたりの崩壊熱量を本書本文の 2. (2) に示す除熱解析の入力 16.7kW (設計崩壊熱量) として解析した場合の温度。

(注 2) Hitz-B69 型の外面のうち、人が接触し得る表面。

3. Hitz-B69 型の周囲温度

Hitz-B69 型の周囲温度は、50℃（貯蔵施設内貯蔵）として設定している。

4. 貯蔵施設における Hitz-B69 型の取扱いフロー

Hitz-B69 型を貯蔵施設に搬入してから貯蔵するまでの取扱いフロー及び作業内容を別紙 4-2 表に示す。ここで、貯蔵後の貯蔵施設からの Hitz-B69 型の搬出フローは、搬入から貯蔵までの手順と逆手順であり、フロー及び作業内容は同一であることから記載を省略している。

なお、実運用での取扱いフロー及び作業内容は事業者の運用により異なる可能性があり、別紙 4-2 表に示す内容は一例である。

5. 貯蔵施設における Hitz-B69 型の取扱いに対する安全性評価

3.に示したとおり、Hitz-B69 型を貯蔵するにあたっての周囲温度の最高温度は 50℃であり、取扱いを行う上で人が Hitz-B69 型の周囲に近づくことに問題はない。

また、2.に示したとおり、Hitz-B69 型の外面温度は、高温となる可能性があるが、別紙 4-2 表に示すとおり、Hitz-B69 型の外面に人が触れる可能性がある作業は、表面温度の計測、蓋間圧力の測定に係る圧力計の取付け及び圧力計の保守である。本作業では、保護具の装着により防護することが可能であり、安全上問題はないと判断している。

別紙 4-2 表 Hitz-B69 型の取扱いフロー及び作業内容 (例)

No.	取扱い手順	作業内容	作業者の Hitz-B69 型への接触有無
1	Hitz-B69 型の貯蔵施設への搬入	・ 搬入	(なし)
2	トレーラからの貯蔵場所への吊り降ろし	・ 水平吊具のトラニオンへの取付け	・ 水平吊具はトラニオンに触れることなく取付けが可能である。
3	貯蔵前準備・貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋間圧力の測定 (測定頻度例 : 1 回/3 カ月) ・ 表面温度の測定 (測定頻度例 : 1 回/3 カ月) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋間圧力の測定に係る圧力計の取付け及び保守を行う際に二次蓋外面又は外筒外面に一時的に触れる可能性があるが、保護具の装着により防護可能。 ・ 外筒外面 (例) の温度測定時に一時的に触れる可能性はあるが、保護具の装着により防護可能。また、可搬式の非接触式温度計を使用すれば、Hitz-B69 型外面に触れることなく測定が可能。

除熱解析で使用する解析コードについて

Hitz-B69 型の除熱設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

1. ORIGEN2 コード

(1) 概要

ORIGEN2 コード⁽¹⁾は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

(2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

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

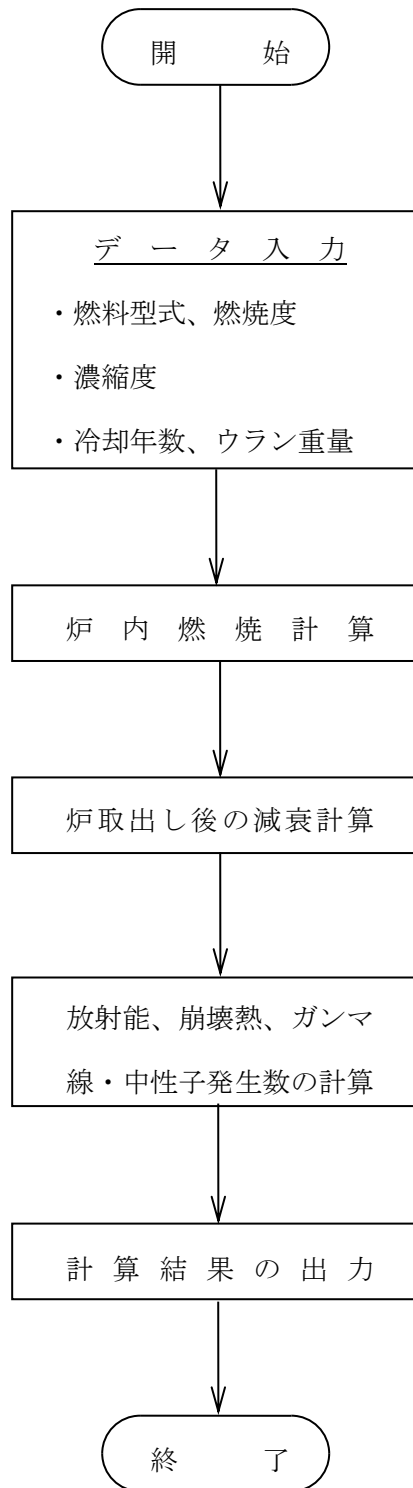
(3) 解析フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを別紙 5-1 図に示す。

(4) 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している⁽²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を別紙 5-2 図に示す。



別紙 5-1 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

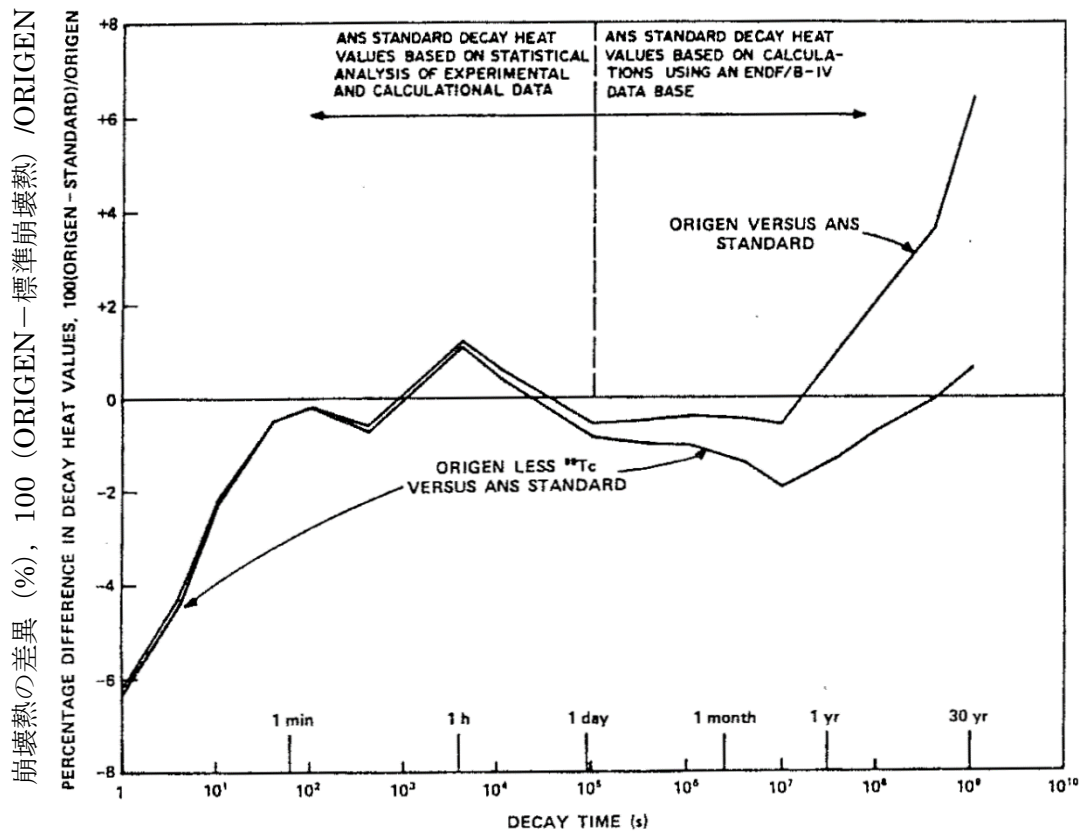


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{11} -s irradiation of ^{235}U .

(注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上 (HitZ-B69 型に収納される燃料の冷却期間) の冷却年数に対して高めの値を示している。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。したがって、ORIGEN2 の解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

別紙 5-2 図 ORIGEN2 コードの検証例

2. ABAQUS コード

(1) 概要

ABAQUS コード⁽³⁾は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在 Dassault Systèmes 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。

(2) 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

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

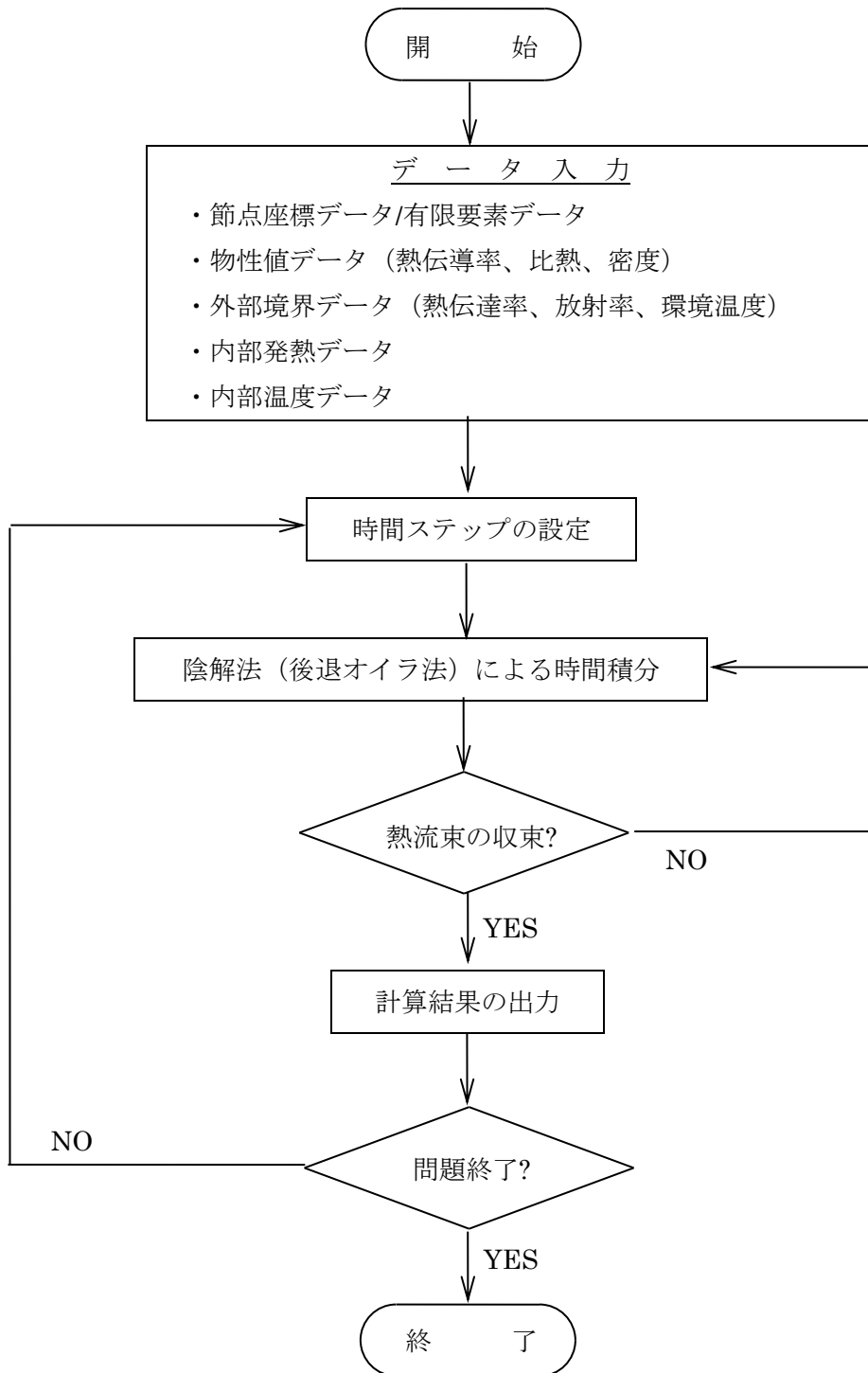
(3) 解析フロー

代表的な解析フローを別紙 5-3 図に示す。

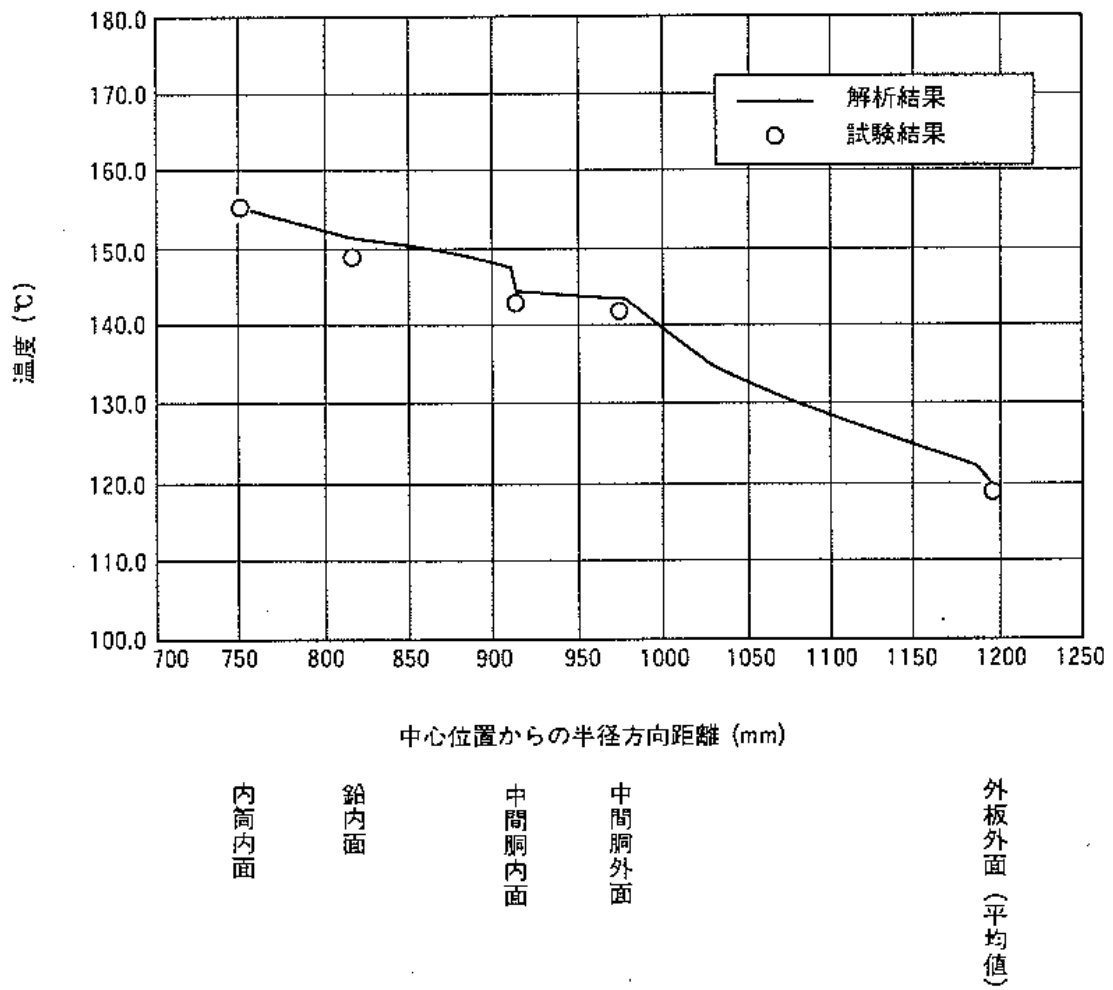
(4) 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、特定兼用キャスクの定常伝熱試験に対して、ABAQUS による解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUS コードの妥当性が検証されている⁽⁴⁾。

ABAQUS コードの検証例を別紙 5-4 図に示す



別紙 5-3 図 ABAQUS コードの解析フロー図



別紙 5-4 図 ABAQUS コードの検証例
 (定常伝熱試験の解析結果と試験結果の比較) (4)

3. 参考文献

- (1) M. Ishikawa et al., "ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006)
- (2) A. G. Croff, "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983)
- (3) Dassault Systèmes, "ABAQUS 2016 Analysis User's Guide", (2016)
- (4) 山川秀次、五味義雄、尾崎幸男、小崎明朗、「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」、(一財) 電力中央研究所、(1993)

ORIGEN2.2UPJ と ORIGEN2-82 の比較

1. はじめに

Hitz-B52 型（2019 年 8 月型式証明申請）設計時に使用した ORIGEN2 コードは、従来実績のある ORIGEN2-82 である。一方で、ORNL の ORIGEN2 コードの最新（最終）版は ORIGEN2.2（2002 年リリース）であり、ORIGEN2-82 にライブラリやサブルーチンの追加・修正が加えられたものである。さらに、ORIGEN2.2 から派生した ORIGEN2.2-UPJ は、JENDL ベースのライブラリの追加やバグ修正等が施されている。

ORIGEN2-82 から ORIGEN2.2-UPJ に使用コードを変更するにあたり、ORIGEN2-82 から ORIGEN2.2-UPJ の間に施されたバグ修正、ライブラリやサブルーチンの追加・修正による計算結果への影響を確認しておく必要がある。そこで、同一ライブラリ（BWR-U）を指定した場合の計算結果への影響を以下のように確認した。

2. 計算条件

ORIGEN2-82 を用いて計算した実績のある STEP2 燃料の燃焼計算条件を基に、表 1 に示す燃焼計算条件を設定した。

表 1 燃焼計算条件

項目	ケース A	ケース B	単位
U 重量	175		kg
初期ウラン濃度	3.3		wt%
燃焼度	43000		MWd/ t
比出力	26.0		MW/t
照射期間※1	1654		日
冷却期間	3～30 年（3 年間隔）		年
照射ステップ数	10		
燃焼計算コード	ORIGEN2-82	ORIGEN2.2-UPJ	
ライブラリ	BWR-U		

※1：平均燃焼度÷比出力を整数位に切り上げ。

3. 計算結果

発熱量に着目し、アクチノイド (ACT)、核分裂生成物 (FP) 毎の照射期間中の発熱量変化を図 1 に、冷却期間中発熱量変化を図 2 に示す。また、ORIGEN2-82 の出力値に対する ORIGEN2.2-UPJ 出力値の比を各グラフの第 2 軸に示した。

照射期間中の ACT による発熱量は両コードでほぼ一致している。FP の発熱量は、燃焼が進むにつれて ORIGEN2.2-UPJ の出力値の方が大きくなっていく傾向があり、燃焼後期において最大 0.2% 程度の差である。ACT と FP では FP が発熱量に大きく寄与していることから、合計発熱量においても FP と同様の傾向である。

冷却期間中の ACT による発熱量は、冷却開始初期において ORIGEN2.2-UPJ の方が ACT の発熱量を 0.3% 程度大きく評価しているが、冷却期間が増加するにつれてその差が小さくなり、30 年では 0.1% 程度の差になっている。FP の発熱量は、冷却 10 年程度まで徐々に ORIGEN2.2-UPJ による発熱量の方が大きくなり、0.2% 程度の差でピークとなる。その後、冷却期間が増加するにつれてその差が小さくなり、30 年では 0.1% 程度の差となっている。合計発熱量も冷却期間 5~15 年程度では ORIGEN2.2-UPJ の方が 0.2% 程度発熱量を大きく評価し、30 年では 0.1% 程度の差となっている。

したがって、コードの違いが発熱量評価に与える影響は軽微である。

4. まとめ

同一のライブラリ (BWR-U) を使用して ORIGEN2-82 及び ORIGEN2.2-UPJ によって燃焼計算を行い、両コードの出力する発熱量を比較した。両コードによる発熱量の差は 0.1~0.3% 程度であり、軽微であった。

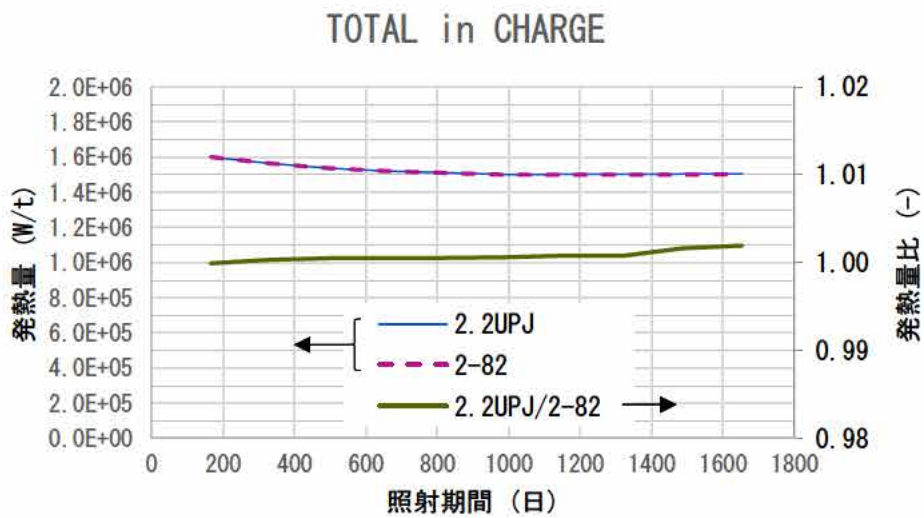
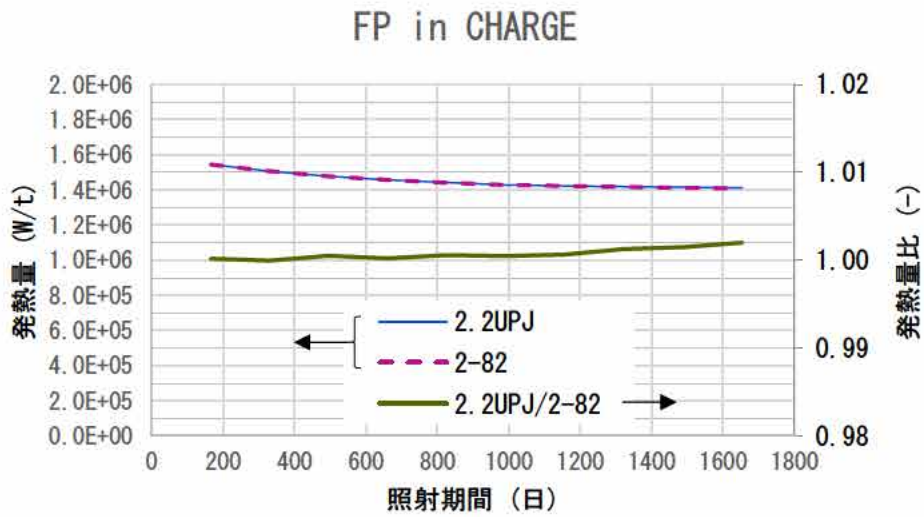
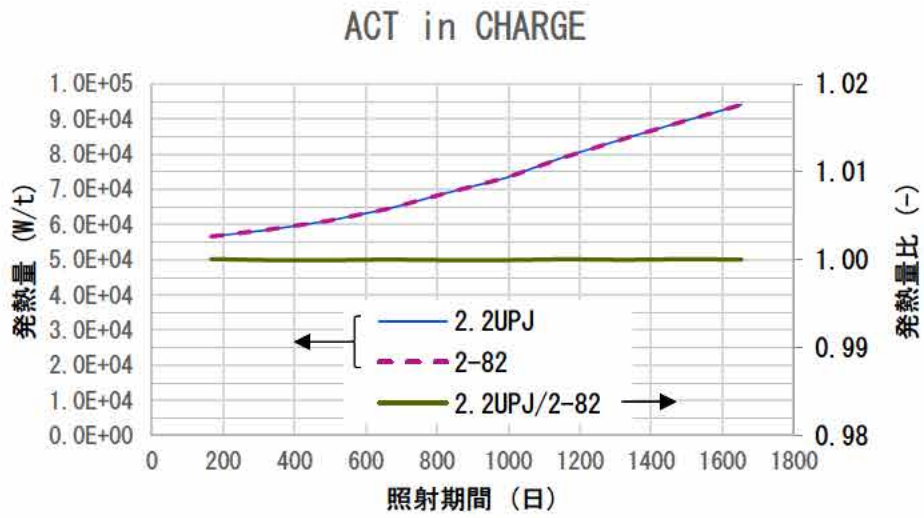


図1 照射期間中の発熱量

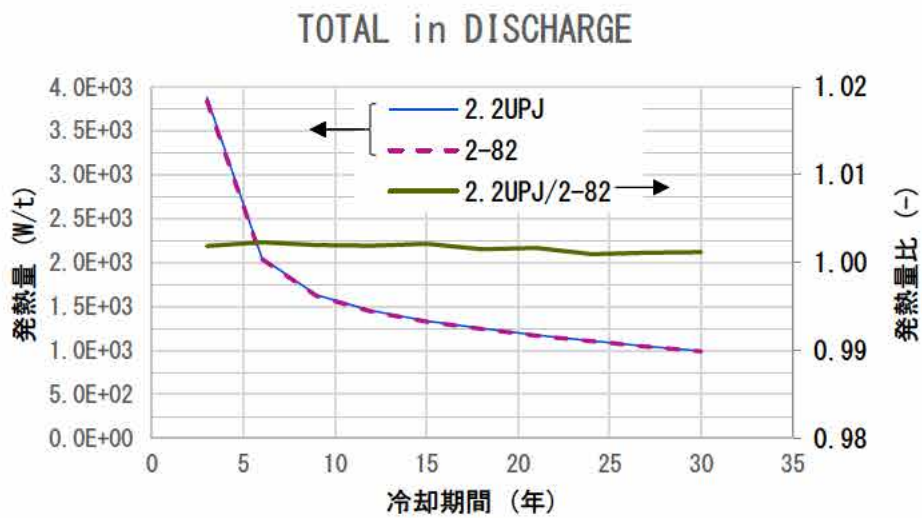
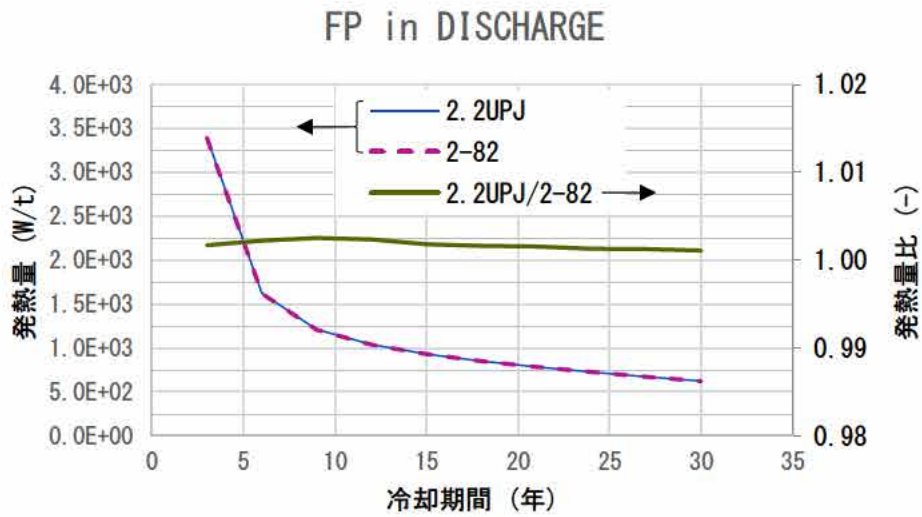
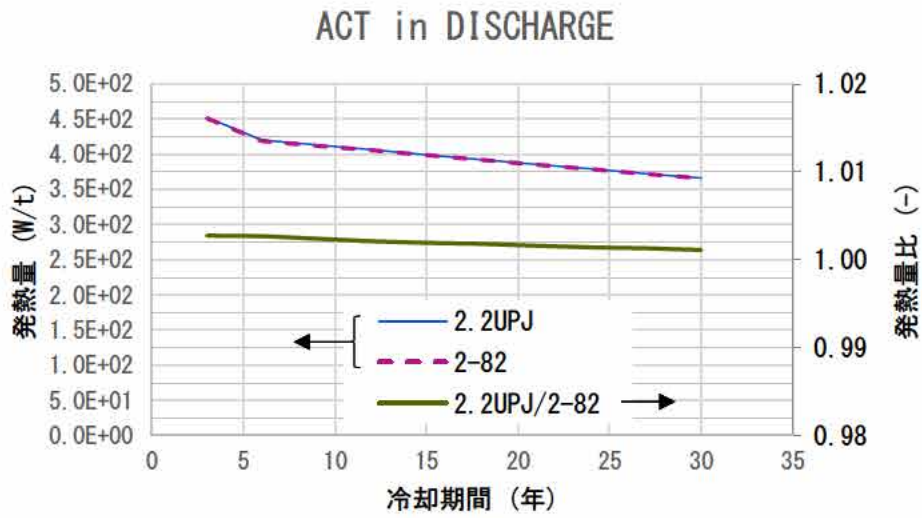


図2 冷却期間中の発熱量

5. ORIGEN2-82 と ORIGEN2.2-UPJ で確認した相違点とその影響の考察

- 1) 数値の出力： 2-82 → 指数表記 仮数部表示桁数 4 桁
UPJ → 同 6 桁
→ 計算自体は基本的に倍精度実数として行われるため、本質的な影響はない。
- 2) 壊変データライブラリ：
 - Be-8 の半減期調整（オーバーフロー対策）
 - Fe-59、Ni-63、W-185 の Q 値修正→ UO₂ 燃料軽水炉を対象とする場合、通常影響は極軽微。
- 3) 断面積ライブラリ：

UPJ で追加されたライブラリがあるものの、従来ライブラリには変更無し。

→ 影響なし。
- 4) サブルーチン、関数の追加修正（一部のみ記載）：
 - FLUXO サブルーチンの修正(Am-241 等の核分裂収率が収納されていない核種の核分裂収率の補正を行うサブ
ルーチンであり、UO₂ 燃料に対する計算では通常ほとんど影響はない。[1])

参考文献

- [1] 須山 賢也, ORIGEN2.2 コードの核分裂収率を取り扱うルーチンの問題, 核データニ
ュース, No.83, 2006.

設計貯蔵期間中の中性子遮蔽材温度について

1.概要

設計貯蔵期間 60 年間の中性子遮蔽材温度について解析を実施し、中性子吸収材各部の貯蔵期間中に変化する温度を確認する。

2.解析条件

除熱解析は、中性子遮蔽材温度が最高となる配置(4)にて実施する。

解析モデルは別紙 1 で説明した三次元全体モデルにて実施する。このモデルの評価対象は、頭部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材とし、側部中性子遮蔽材については、伝熱フィンが存在する領域を中央部、蓋部側の伝

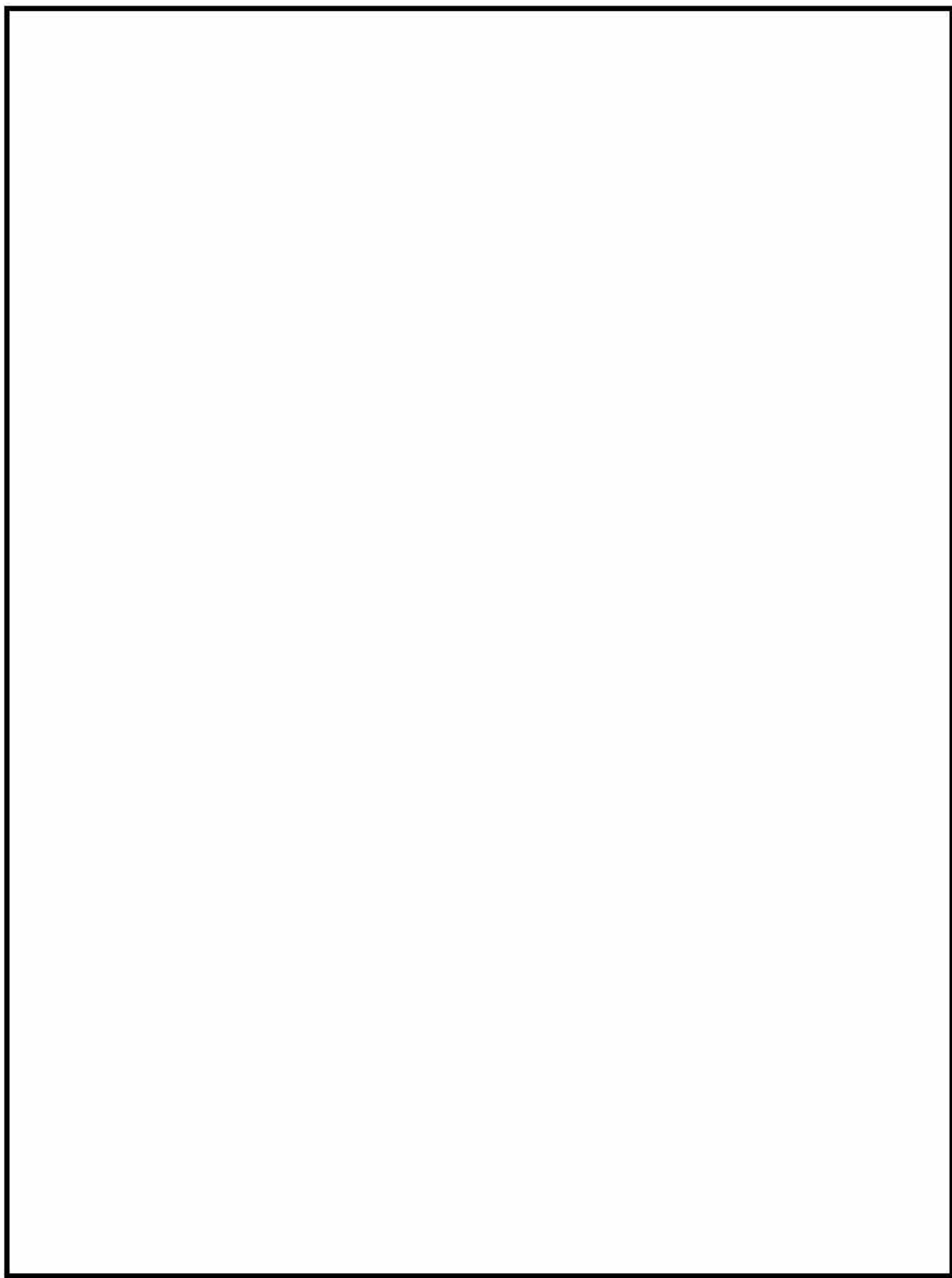
熱フィンが存在しない領域を上部、底部側の伝熱フィンが存在しない領域を下部とする。この解析モデルを別紙 6-1 図に示す。

次に、解析条件として材料物性値、外表面の熱伝達係数、材料の放射率及び外部境界条件は別紙 1 に示すとおりであるが、貯蔵開始から貯蔵期間 60 年間に使用済燃料の発熱量は段階的に低下するものとし、この貯蔵期間中の使用済燃料の発熱量を、ORIGEN2 コードを用いて計算する。

この計算結果を、別紙 6-1 表に示す。

別紙 6-1 表 貯蔵期間中の使用済燃料発熱量

貯蔵期間 (年)	発熱量 (kW/基)		
	中央部	外周部	全体：69 体
	高燃焼度 8×8 燃料：37 体	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料：32 体	
0	11.1	5.6	16.7
5	10.0	5.2	15.2
20	7.5	4.1	11.6
40	5.4	3.1	8.5
60	4.1	2.4	6.5



別紙 6-1 図 Hitz-B69 型全体モデル形状図（縦断面）

3.結果

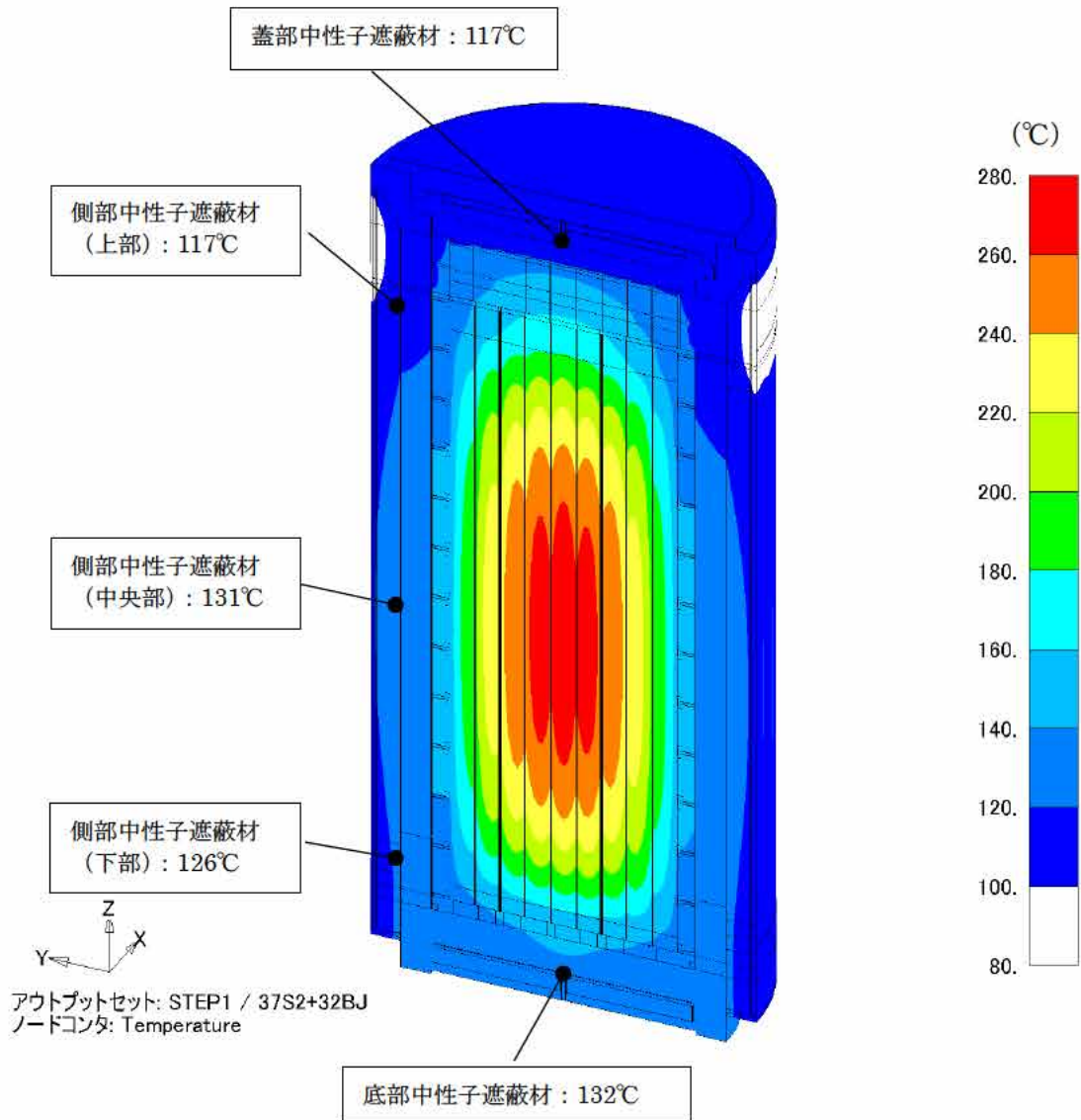
除熱解析の結果を別紙 6-2 表に示す。また解析結果の代表例として、貯蔵期間 0 年の温度コンター図を別紙 6-2 図に示す。

この評価結果を、別途遮蔽解析における中性子遮蔽材の質量減損の評価に用いることとする。なお、遮蔽解析での質量減損評価においては、解析結果の温度をそのまま使用する。

別紙 6-2 表 設計貯蔵期間中の中性子遮蔽材の最高温度

貯蔵期間 (年)	側部中性子遮蔽材 ⁽¹⁾			蓋部中性子 遮蔽材	底部中性子 遮蔽材
	上部	中央部	下部		
0	117	131	126	117	132
5	112	125	121	113	126
20	101	111	108	101	112
40	91	98	96	91	99
60	85	90	89	85	91

注記(1)：伝熱フィンが存在する領域を中央部、蓋部側の伝熱フィンが存在しない領域を上部、底部の伝熱フィンが存在しない領域を下部とする。



別紙 6-2 図 温度コンター図 (貯蔵期間 0 年)