

補足説明資料 No. 16-4

第十六条

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	3
2	要求事項への適合性	6
3	使用する解析コード	21
4	参考文献一覧	30
別紙	解析モデルの詳細	31

1 要求事項

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

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第十六条第4項第二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

b. 設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第3項

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

➤ 貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持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 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。
- 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

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、以下の様に記載されている。

【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

- 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。
- 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

- 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。
- 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a.で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

』

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

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

』

2 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

CASTOR[®] geo26JP 型の除熱機能については、以下の通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十六条第4項第二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

b. 設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第3項

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

➤ 貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持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 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。
- 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。

CASTOR[®] geo26JP 型は、使用済燃料から発生する崩壊熱を、熱伝導、対流及びふく射によって特定兼用キャスクの外表面に伝達し、周囲の空気等に伝達する。CASTOR[®] geo26JP 型の除熱構造の概要図を図1に示し、除熱構造及び伝熱形態を以下に説明する。

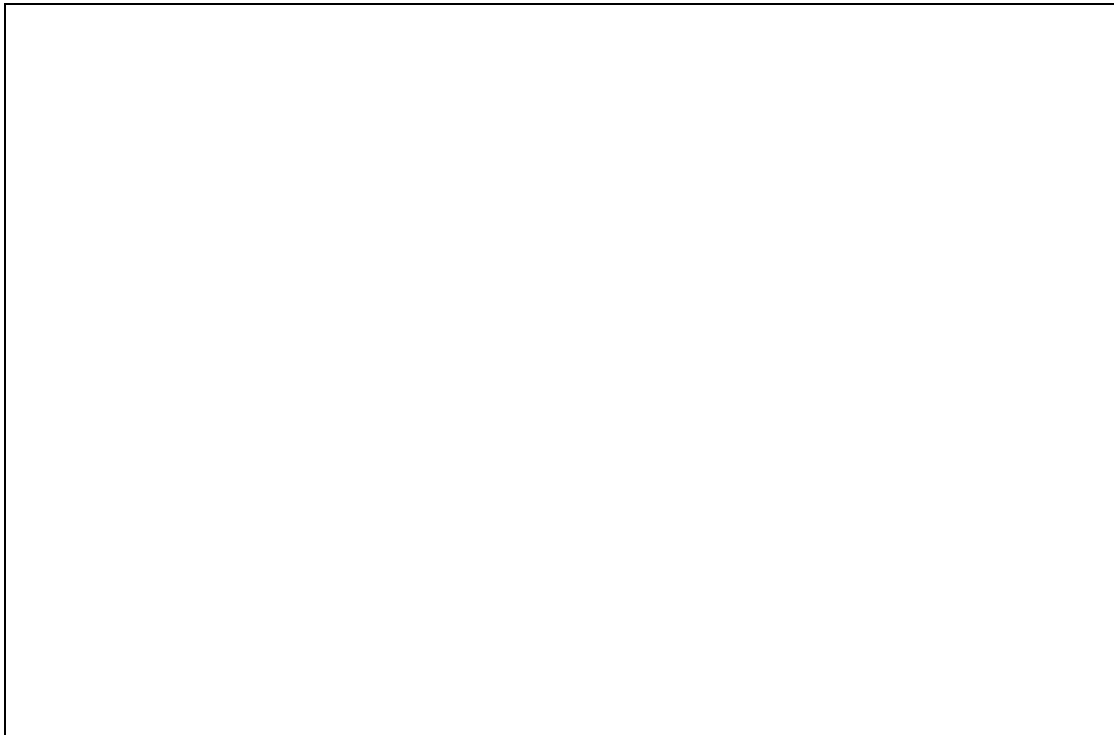


図 1 除熱構造の概要

主な除熱構造は以下の通りである。

- ・ 使用済燃料集合体を熱伝導率が高いほう素添加アルミニウム合金製の板(熱伝導及び中性子吸収材)を配置したバスケットに収納する。
- ・ 兼用キャスク内部に空気よりも熱伝導率が高いヘリウムガスを充填する。
- ・ 兼用キャスクの外表面には対流熱伝達及びふく射による放熱のためにフィンを設ける。

主な伝熱形態は以下の通りである。

- ・ 使用済燃料の崩壊熱は、ヘリウムガスを介した熱伝導及び対流並びにふく射により、被覆管表面からバスケットに伝えられる(図1の1)。
- ・ 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、H-ビーム及びバスケット底板へ伝わり、次にバスケット側板、コーナーエレメント及びエッジセグメントへ伝わり、さらにバスケット外周部へ伝えられる(図1の2)。
- ・ 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、対流及びふく射により、バスケット外表面から兼用キャスク本体内面へ伝えられる(図1の3)。
- ・ 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(図1の4)。
- ・ 兼用キャスク本体外面に伝えられた熱は、兼用キャスク本体外面の対流及びふく射により、兼用キャスク周囲の空気及び貯蔵建屋の構造物に伝えられる(図1の5)。

CASTOR® geo26JP 型の除熱機能の設計基準は以下の通りである。

- ・ 燃料棒被覆管温度の設計基準値は 275℃とする。これは被覆管の累積クリープ量が 1%を超えない温度(燃料棒被覆管材料の熔融温度の 3 分の 1 に達する約 300℃)以下であり、燃料棒被覆管の材料は水素化物の再配向による劣化が生じず、照射硬化の回復の可能性が小さい温度である[1]。
- ・ キャスク胴部、底部および蓋部の設計基準値は 350℃とする。これは金属キャスク構造規格[2]に基づき設定しており、球状黒鉛鋳鉄は 350℃まで、ステンレス鋼 425℃までの物性値が規定されているため、このうち低い温度を採用した。
- ・ 金属ガスケットの設計基準値は 125℃とする。これは、(一財)電力中央研究所で実施された実規模の金属キャスクの蓋モデルによる長期密封性能試験において銀を被覆材とする金属ガスケットの長期健全性について評価している参考文献 [3、4] に基づき設定した。
- ・ 中性子遮蔽材料の設計基準値は 130/135℃(ポリエチレン)とする。設定根拠は 1024-TR-00005「補足説明資料 第 4 条地震による損傷の防止 第 5 条津波による損傷の防止 第 6 条外部からの衝撃による損傷の防止 第 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」に示す。
- ・ バスケット(H-ビーム)の設計基準値は 250℃とする。これは構造強度の維持が期待できる温度であり、1024-TR-00002「第四条 地震による損傷の防止 地震に対する安全機能維持に関する説明資料」、1024-TR-00003「第五条 津波による損傷の防止 津波に対する安全機能維持に関する説明資料」、1024-TR-00004「第六条 外部からの衝撃による損傷の防止 竜巻に対する安全機能維持に関する説明資料」において上限温度に設定されている。

CASTOR® geo26JP 型は、キャスク表面温度を適切な頻度で監視できる設計とする。

貯蔵事業許可基準規則解釈第6条第1項第三号、第四号及び同第17条第1項第二号については、型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請にて確認を受ける事項とする。

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。

CASTOR[®] geo26JP 型の設計貯蔵期間は 60 年とする。

CASTOR[®] geo26JP 型の構成材料は、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ものを選定し、その必要とされる除熱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。詳細については、1024-TR-00011「第十六条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設 材料・構造健全性(長期健全性)に関する説明資料」に示す。

(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、CASTOR[®] geo26JP 型の除熱機能については、以下の通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。

除熱機能に関する評価

CASTOR[®] geo26JP 型の除熱評価フローについて図 2 に示す。

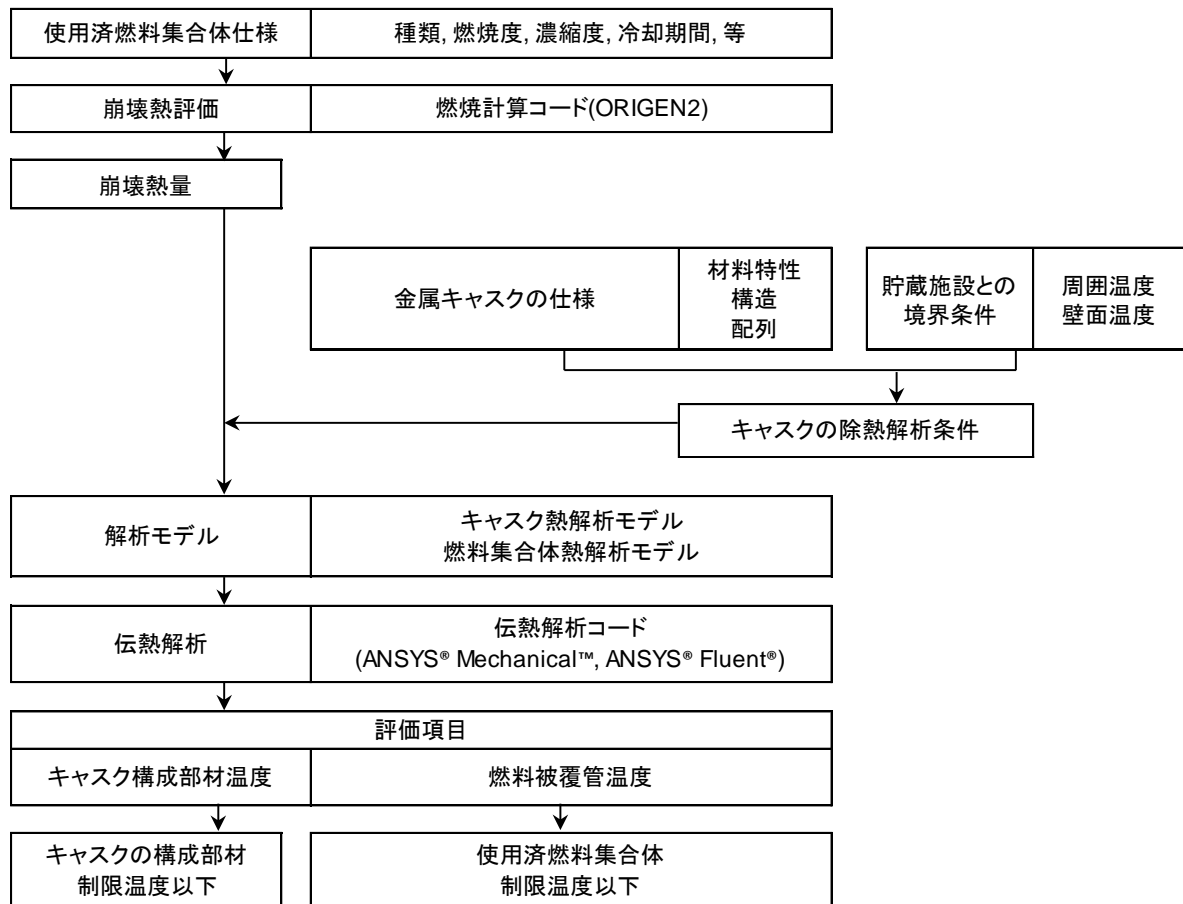


図 2 除熱評価のフロー

CASTOR® geo26JP 型の使用済燃料集合体の仕様は、表 1 に示すとおりである。

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、燃料集合体の型式、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に検証され適用性が確認された燃焼計算コード ORIGEN2 を用いて求められる。(詳細は「3. 解析コード」にて述べる。)なお、ORIGEN2 の計算結果に対しては、 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		17×17 燃料		15×15 燃料
		A 型	B 型	—
形状	集合体幅	約 214 mm		約 214 mm
	全長	約 4100 mm		約 4100 mm
質量		約 680 kg		約 670 kg
燃料集合体 1体の仕様	初期濃縮度	4.2 wt%以下		4.1 wt%以下
	最高燃焼度 ^{注1}	48,000 MWd/t 以下		48,000 MWd/t 以下
	冷却期間	12 年以上		12 年以上
特定兼用キャスク 1基当たりの 仕様	収納体数	26 体		
	平均燃焼度 ^{注2}	48,000 MWd/t 以下		
	最大崩壊熱量	18.0 kW 以下		

注1 最高燃焼度とは、収納する燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

注2 平均燃焼度とは、収納する全燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

貯蔵する燃料集合体は最高燃焼度 48,000 MWd/t の 15x15 型と 17x17 型であり、設計上の最大崩壊熱量は次のとおり求める。

$$\begin{aligned}
 \text{[最大崩壊熱量]} &= \text{[使用済燃料(平均燃焼度) 1体あたりの崩壊熱量]} \times \boxed{} \times \text{[収納体数]} \\
 &= \boxed{} \times 26 \text{ (燃料集合体)} \\
 &= 18 \text{ (kW)}
 \end{aligned}$$

(注)表1の燃料仕様は除熱解析のための境界条件である。もし、他の燃料仕様に対する除熱解析が必要な場合には、本解析の改訂が必要となる。

CASTOR[®]geo26JP 型における温度評価のための使用済核燃料集合体の配置には、図3に示す2つの場合を考慮している。

- 除熱解析モデル A は、キャスクに収納するすべての燃料集合体の発熱量を $\boxed{}$ とし、キャスク 1 基あたりの崩壊熱量を最大の値とする場合である。(図3の左側)
この場合の燃料集合体 1 体あたりの崩壊熱量は $\boxed{}$ W であり、キャスク 1 基あたりの崩壊熱量は 18 kW である。この除熱解析モデルは CASTOR[®]geo26JP 型の最大崩壊熱量であり、密封境界部品やキャスク本体の温度評価を目的としたものである。
- 除熱解析モデル B は、キャスク中心部に崩壊熱量が高い燃料集合体を、外周部に崩壊熱量が低い燃料集合体を配置した場合である。(図3の右側)

この場合、キャスク 1 基あたりの崩壊熱量は kW である。
この除熱解析モデルをもとに、キャスク各部の温度評価を行う。



図 3 除熱解析モデルの使用済燃料の最大崩壊熱量

なお、兼用キャスクの各部の温度評価に際しては、使用済燃料集合体における軸方向燃焼度分布（ピーキングファクター）を考慮し、最大崩壊熱量（18 kW）を超える発熱量（18.5 kW = × 26）を設定した。考慮したピーキングファクターを図 4 に示す。ここで、 はピーキングファクターの平均値である。

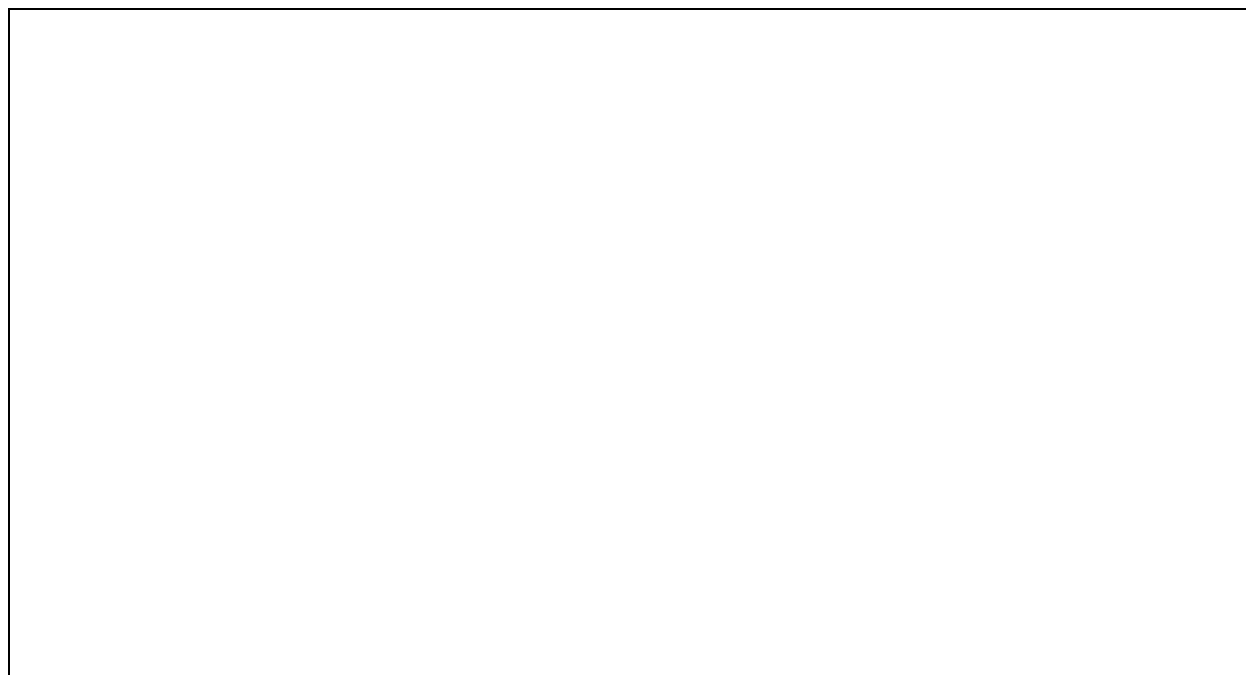
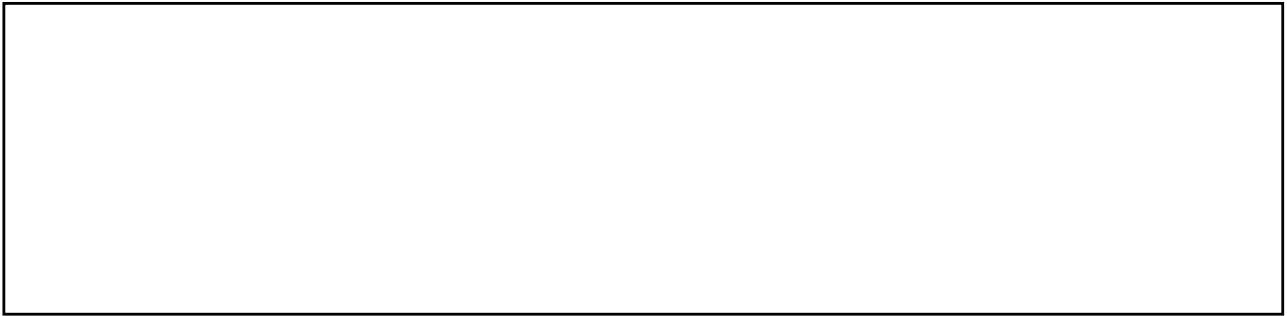


図 4 ピーキングファクター

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

除熱解析は、CASTOR[®] geo26JP 型の実形状を 3 次元でモデル化し、検証され適用性が確認された有限要素解析コード ANSYS[®][5、6]を用いて実施する。(詳細は「3. 解析コード」にて述べる。)

解析モデルには、以下の 2 通りのモデルを用いる。



上記の両方のモデルを評価した結果、15×15 型および 17×17 型燃料集合体の型式別の計算は不要となった。

貯蔵状態のキャスクモデルを図 5 に示す。また、17×17 型および 15×15 型の燃料集合体モデルを図 6 に示す。

CASTOR[®] geo26JP 型の貯蔵状態における周囲環境としては、以下の条件を使用する。

周囲温度:	50 °C
貯蔵建屋壁面温度:	65 °C
貯蔵姿勢:	たて置き

なお、解析モデルの詳細は別紙に示す。

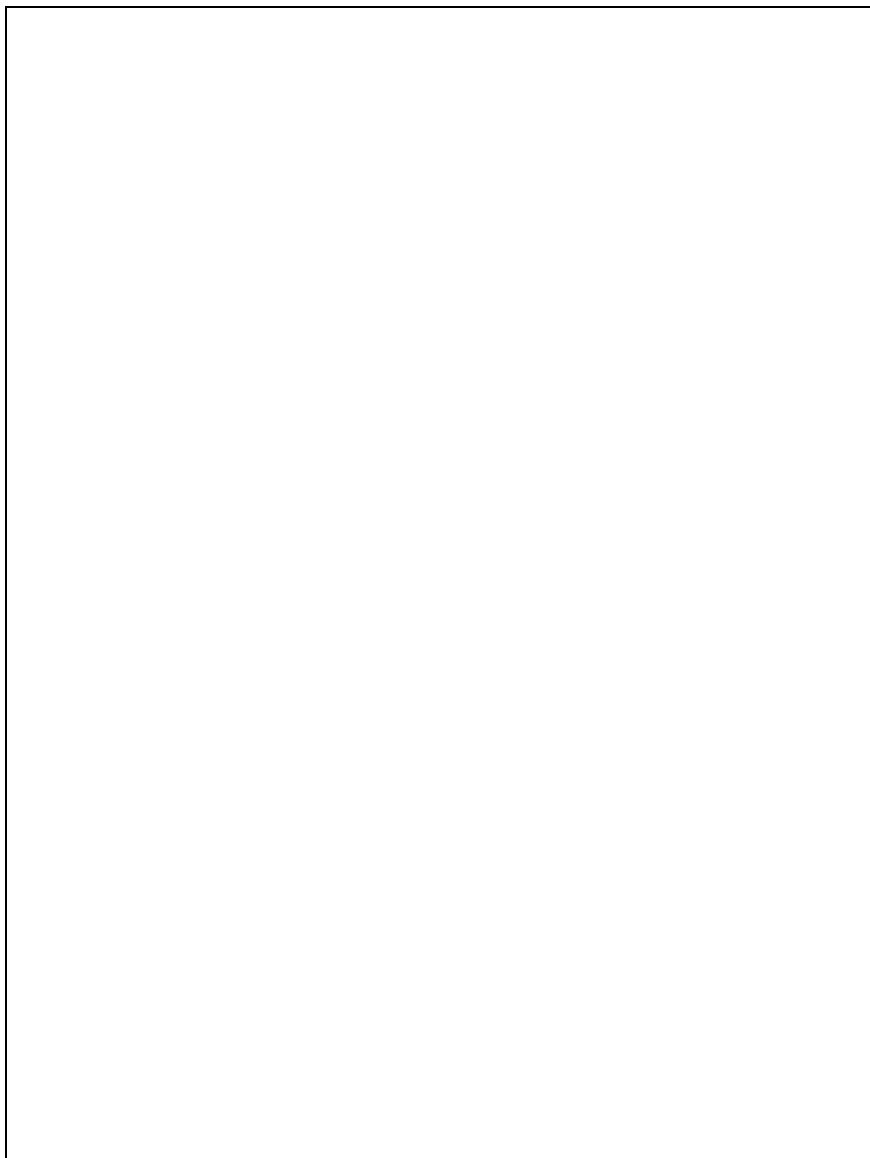


図 5 キャスクモデル図

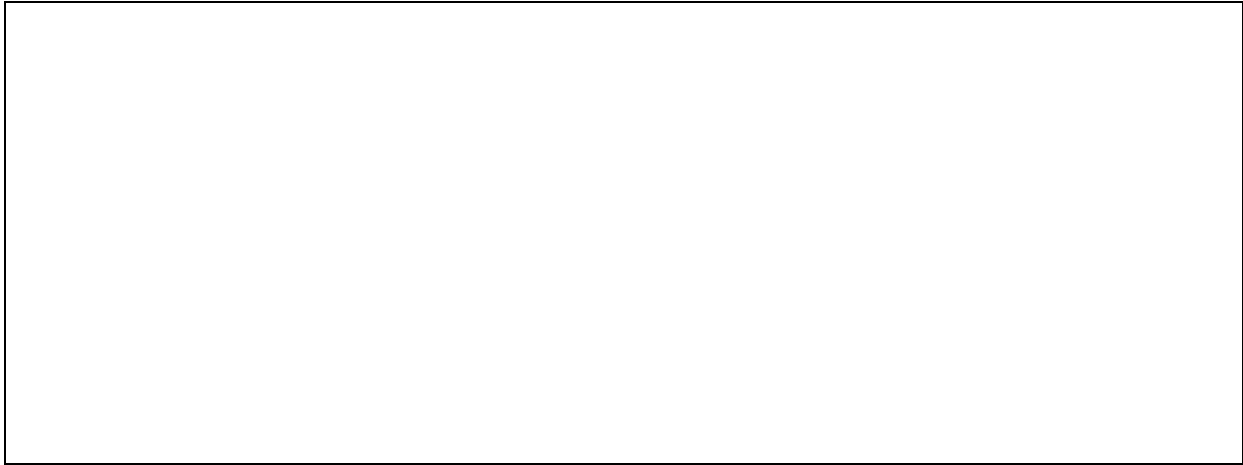


図 6 17×17 型及び 15×15 型 燃料集合体モデル図

c. 評価結果

CASTOR[®] geo26JP 型での除熱解析結果を表 2、図 7 及び図 8 に示す。

燃料棒被覆管の最高温度は 265°C であり、設計基準である 275°C を下回っていることから、燃料棒被覆管が損なわれることはないことが分かった。

以上の除熱解析の結果、燃料棒被覆管の温度及び兼用キャスクの各部の温度は型式証明申請書表 1-4 [1] に示された設計基準を満足し、CASTOR[®] geo26JP 型は使用済核燃料集合体から発生する熱を適切に除去できる設計であることが確認された。また、CASTOR[®] geo26JP 型は、想定される境界条件下において、実用発電炉施設の安全性に影響を与えないことが確認された。

表 2 除熱解析結果

	部材	計算結果 [°C]		評価結果 ^{注2} [°C]	設計基準 ^{注3} [°C]
		除熱解析 モデル A ^{注1}	除熱解析 モデル B ^{注1}		
キャスク 本体	胴	114	109	120	350
	中性子遮蔽材 (棒状)(内列/外列)	113/108	108/104	120/115	135 / 130
	中性子遮蔽材 (円板状)(底部)	116	113	120	135
	遮蔽棒(側部中性子遮蔽体 部 封止材)(内列/外列)	109/106	105/102	110	371
	トラニオンボルト	101	99	105	350
蓋部	一次蓋、二次蓋	106	103	120	425
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	94	91	100	350
	中性子遮蔽材 (円板状)(蓋部)	82	80	120	135
	金属ガasket	94	91	100	125
バスケット	底板	111	107	120	425
	H-ビーム	238	234	245	425 / 350
	熱伝導及び中性子吸収材	238	234	245	250
	鋼製エッジセグメント、 コーナーエレメントおよび バスケット側板	165	158	170	425
	エッジセグメント	138	132	145	250
使用済燃料	燃料棒被覆管	255	251	265	275

注1 熱解析モデル A と B はどちらも、15x15 型 と 17x17 型 の燃料について個別に解析されており、各部材の温度はほとんど同じになる(違いは小数点以下のみ)。つまり、熱的な観点から見ると、温度は解析モデルのみに依存し、燃料の種類には依存しない。

注2 除熱解析で得られた温度を切り上げて設定

注3 補足説明資料「燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設 16-1」(1024-TR-00005)参照

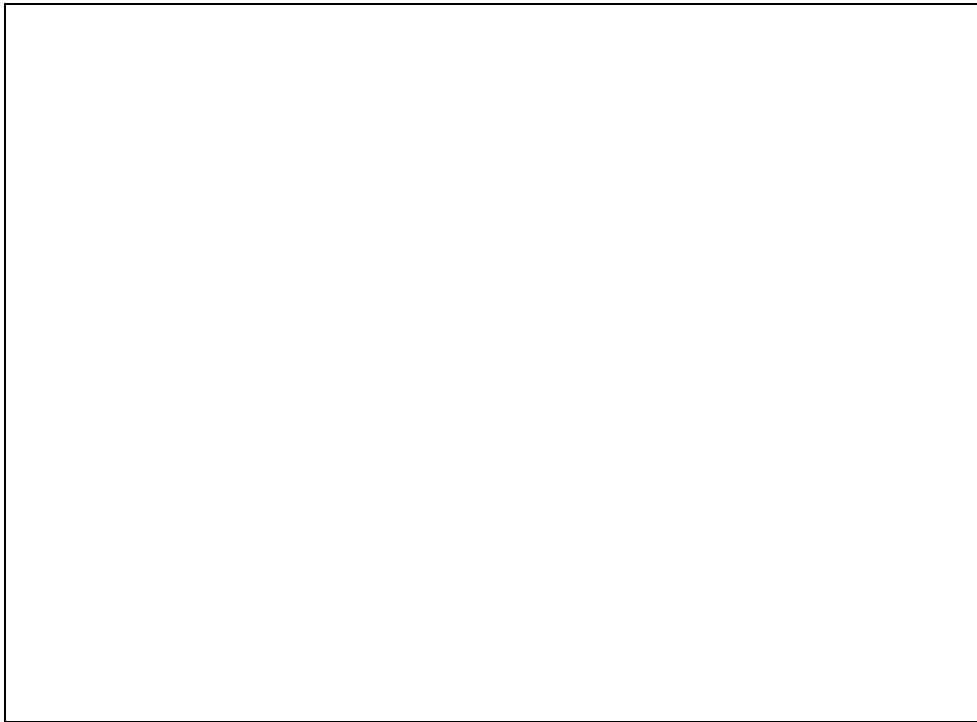


図 7 キャスクモデルにおける温度分布（除熱解析モデル A）

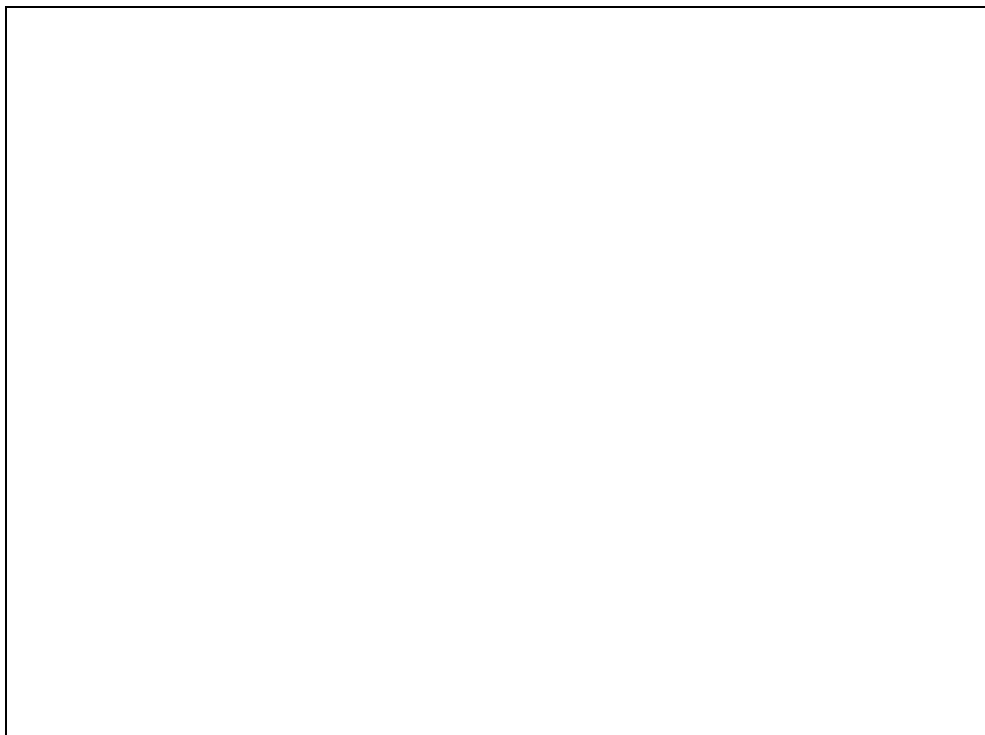


図 8 キャスクモデルにおける温度分布（除熱解析モデル B）

また、補足説明資料「地震に対する安全機能維持に関する説明資料」、「津波に対する安全機能維持に関する説明資料」、「竜巻に対する安全機能維持に関する説明資料」での構造強度評価で用いる各部品の温度について表 3 に示す。

表 3 構造強度評価に用いる温度

部品	温度
キャスク本体溝部	90 °C
胴	120 °C
一次蓋、	120 °C
一次蓋ボルト一次蓋密封シール部	110 °C
バスケット(H-ビーム、バスケット側板、コーナーエレメント)	250 °C

[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、本型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。

[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、本型式証明の審査範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。

3 使用する解析コード

本章では、CASTOR[®] geo26JP 型の除熱評価に使用した解析コードについて説明する。

3.1 ORIGIN 2 コード

1) 概要

ORIGIN 2 コードは、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。ORIGIN 2 コードは公開コードであり輸送貯蔵兼用キャスクの崩壊熱計算等に広く用いられている。

2) 機能

ORIGIN 2 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、原子炉からの燃料取り出し後の減衰を計算し、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線強度及び各核種の放射エネルギーを求める。
- b) 原子炉の炉型と燃料の組み合わせに対し、中性子エネルギースペクトルの違いに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、アクチニドおよび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、自発各分裂と 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) 計算フロー

ORIGIN2 コードの計算フローを図 9 に示す。

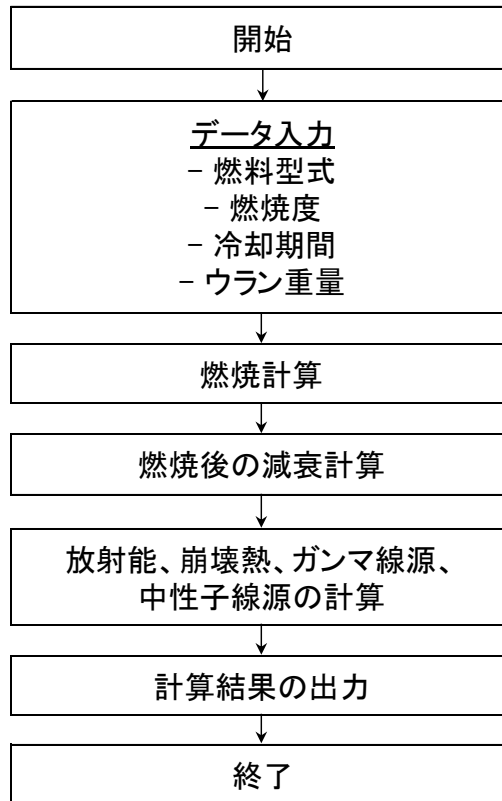


図 9 ORIGEN2 コードの計算フロー

4) 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、核燃料の崩壊熱を計算するため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。ORIGEN2 コードの検証例を図 10[7] に示す。

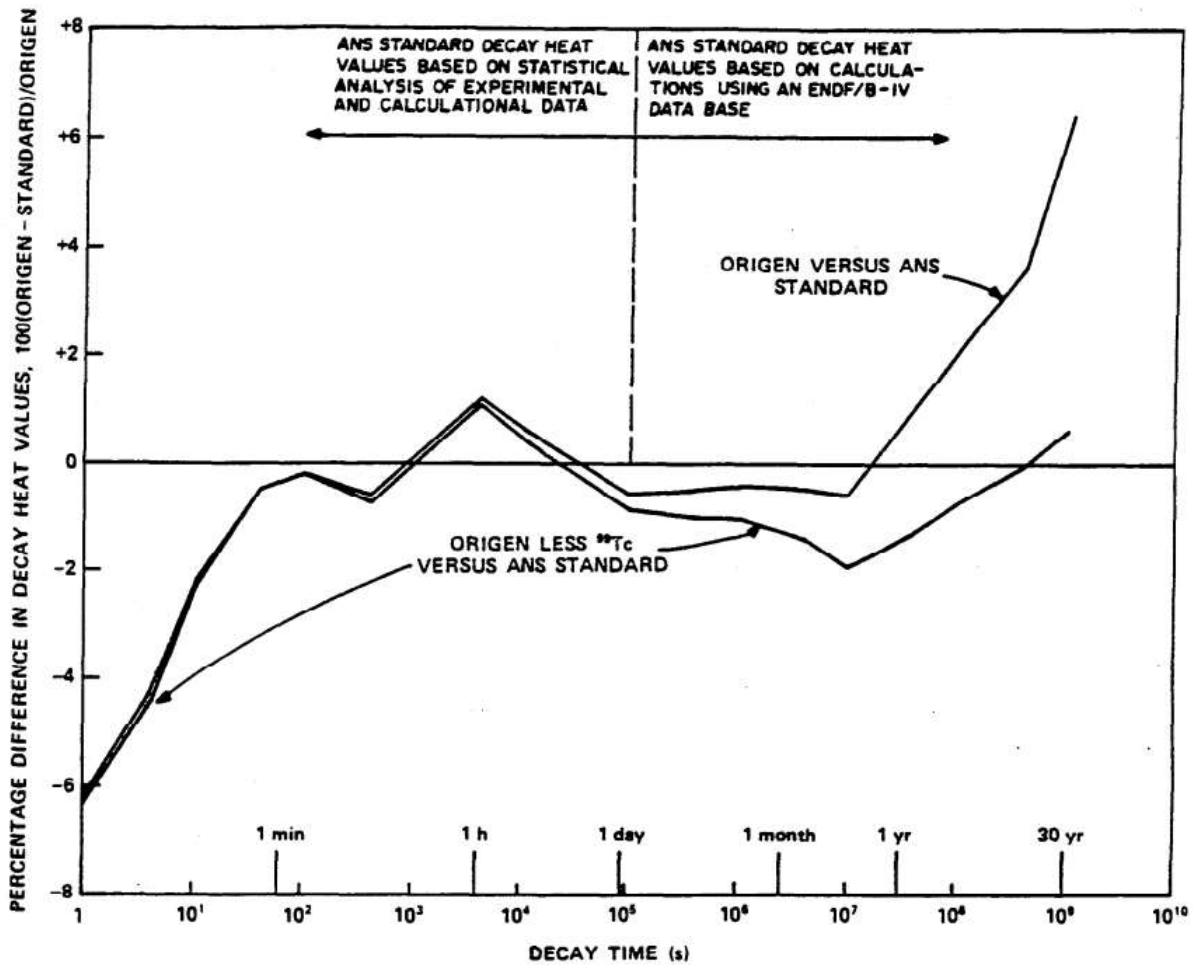


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上 (CASTOR[®] geo26JP 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。

図 10 ORIGEN2 コードの検証例 [7]

3.2 ANSYS®コード

1) 概要

ANSYS®コード [5、6] は、有限要素法(Finite Element Method:FEM)および有限体積法 (Finite Volume Method:FVM) に基づく伝熱解析等のための汎用解析コードである。

2) 機能

ANSYS®コードには、除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) 2次元(平面または軸対称)または3次元のモデルを構築することができる。
- c) 初期条件(温度)は要素毎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) 伝導、対流、ふく射による熱輸送が考慮されている。
- e) 境界条件として、時間に依存する熱流束、(周囲) 温度、熱伝導、対流、ふく射が考慮できる。
- f) 熱伝導率の温度依存が可能である。
- g) 構成材料の相変化が考慮できる。

3) 計算フロー

代表的な解析フローを図 11 に示す。

4) 使用実績及び経験

ANSYS®コードは、国際的に輸送貯蔵兼用キャスクの除熱解析に多く用いられてきた。解析コードそのものは、品質保証プロセスの一環として、ANSYS® Inc.によって広範に渡って検証され、妥当性が確認されている。

また、使用するプログラムの各バージョンは、今回の兼用キャスクの除熱解析へ適用するために、GNSによって妥当性が確認されている。

また、兼用キャスクの除熱解析のために、幾つかの例を用いて、GNSによって計算方法の妥当性を確認している。なお、この妥当性確認には、解析結果と測定結果との比較も含まれる。

a. 文献値と ANSYS®コード計算値との比較による妥当性確認

図 12 に ANSYS®コードの妥当性確認の一例を示す。

記載されている例は、Sandia National Laboratories (SNL)によって 1988 年に公表されている 2 つの報告書 [8、9] からのものである。これらは放射性物質の輸送貯蔵兼用キャスクにおける典型的な伝熱プロセスを含むものとして国際的に認められているものである。

図 12 には、内部熱源からの熱伝導及び対流による2層構造円柱キャスクモデルによる熱輸送評価(タスク US-1)、また、多層構造円柱キャスクモデル(タスク Model B)、多層構造円柱モデルのバリエーションとして鉄道貨車や近接防止金網を想定した鉄板を置いたモデル(タスク Model C)、平滑面とフィン付き面における熱ふく射を考慮したモデル(タスク UK-2)において、定常状態(A)、加熱終了段階(B)、冷却状態(C)の非定常状態も含めた検証を示している。図 12 で示されているバー(緑)は SNL 報告書で実施されている各種計算コードによる計算値の標準偏差範囲を示し、点(黒)は ANSYS®コードによる計算値を示している。

これらの妥当性確認例は、輸送貯蔵兼用キャスクでの輸送における一般の試験条件及び特別の試験条件下で曝される条件に対応している。

また、3次元での熱解析の妥当性確認として、半径 r の円柱から距離 a においた長方形板へのふく射モデル(タスク Model S)による熱影響も確認した。(図 13) ここでは、ANSYS®コードで利用可能な2種類のふく射モデル(Radiation matrix method、Radiosity method)を使用した。

ANSYS® 17.2を用いた計算の結果は実測値との良い相関が得られており、妥当性は確認できている。

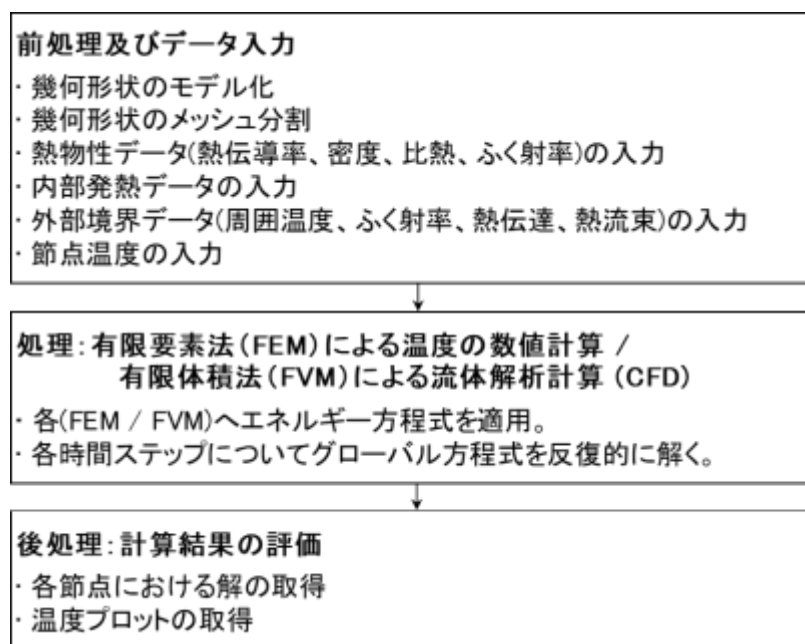


図 11 ANSYS®コードの解析フロー

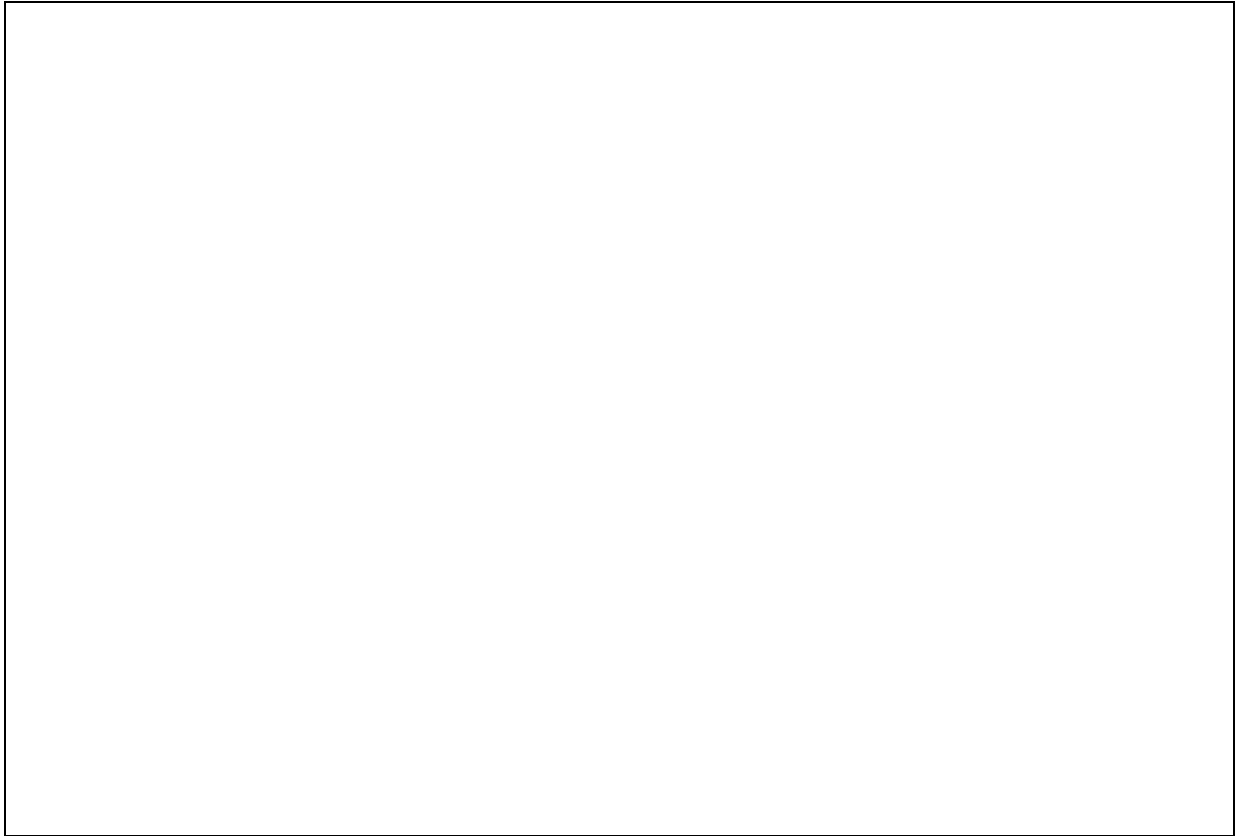


図 12 ANSYS®コードでの計算値と文献値における最高温度の比較

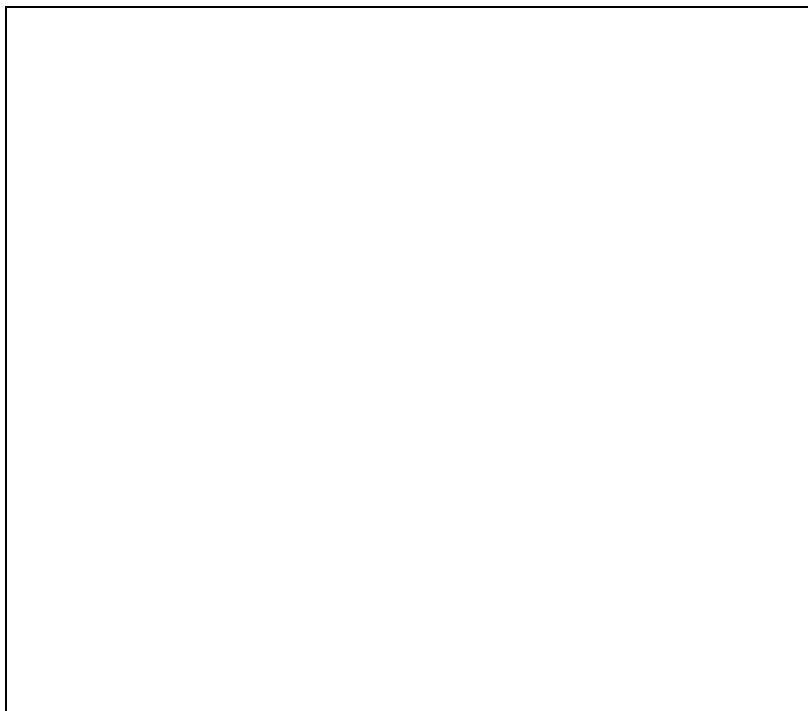


図 13 タスク Model S におけるマスク本体温度の計算値と解析値の比較

b. キャスク表面温度の測定値と計算値との比較による妥当性確認

図 14 に別の計算例を示す。これらの計算は、計算方法の妥当性を確認する目的で実施した。

これは Gorleben (ドイツ) の輸送貯蔵兼用キャスクの貯蔵施設で定期的に行われる温度測定に対して、解析結果との比較をおこなったものである。

なお、有限要素解析の妥当性を確認した上で、有限要素解析では考慮されていない局所的な影響を評価するために、流体解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD) も行っている。この解析結果および測定結果は、公開されている[10]。

図 14 は、貯蔵キャスク (CASTOR[®] HAW 20/28 CG シリーズ 18 本) のサーモグラフィ画像と、有限要素解析及び CFD 法で計算したキャスク表面の温度分布の対応する図を示している。

比較の結果、表面温度の測定値と数値計算結果は非常によく一致しており、最大偏差は 1K~3K (有限要素解析計算) または 0K~2K (CFD 法) であることがわかる。

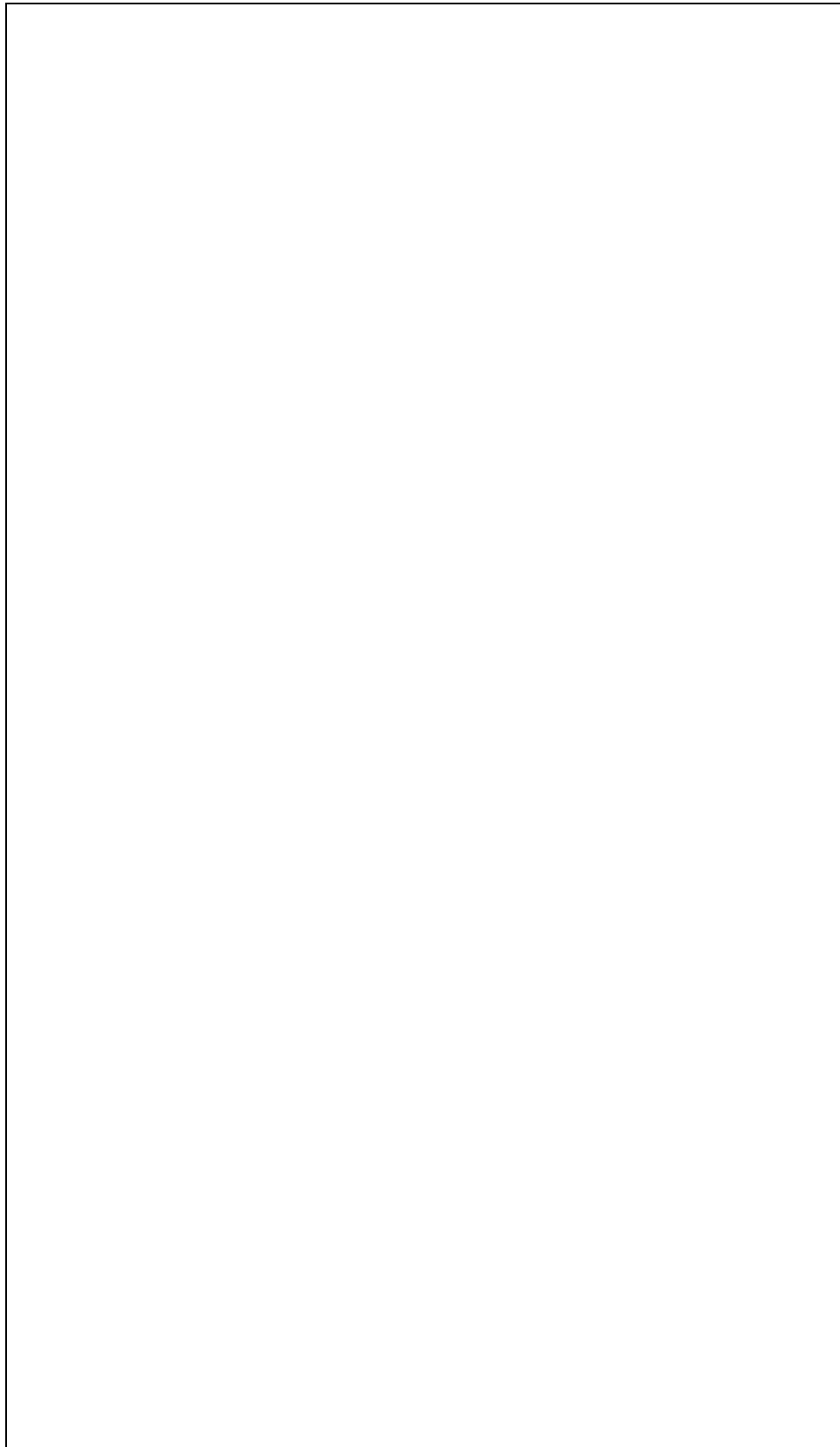


図 14 2003 年 6 月 30 日の測定結果と計算結果の比較 - キャスク表面温度

図 15 は、TN-32B 高燃焼度燃料試験キャスク内部の燃料集合体の温度測定値と ANSYS®コードによる温度計算値を比較したものである。被覆管温度の実測値と計算値がよく一致していることが分かる。

この報告書で紹介した ANSYS®コードによる燃料集合体のモデリングとキャスク内の燃料棒の被覆温度を決定する方法は、国際的に長年にわたり最先端の技術として使用されているものである。このため、燃料棒の温度は体系的に過大評価されている。熱輸送の本質的な効果(熱接触と対流)が無視されているため、燃料棒温度は常に過大評価される。詳細は添付資料に示す。

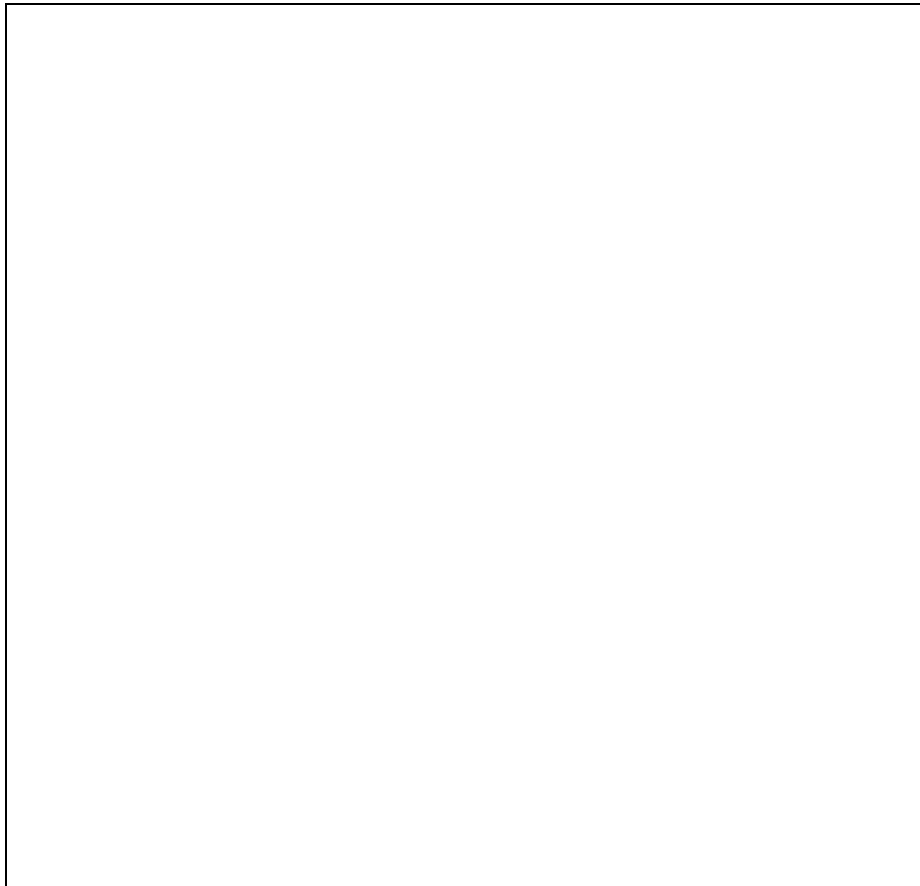


図 15 TN 32B 高燃焼度燃料試験キャスクの燃料棒温度の計算値と実測値の比較

4 参考文献一覧¹

- [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] (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)
- [3] 電力中央研究所、使用済燃料貯蔵の基礎(ERC 出版)(2015)
- [4] M. Wataru et al., paper No. 5026: Ageing of HELICOFLEX[®] metallic gasket for spent fuel cask: Results of sealing performances of a 100,000h campaign, Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2016, September 18-23, 2016, Kobe, Japan
- [5] ANSYS[®] Mechanical[™]
Release 17.2 UP20160718, © 2016 SAS IP Inc.
- [6] ANSYS[®] Fluent[®]
Release 17.2 UP20160718, © 2016 SAS IP Inc.
- [7] A. G. Croff, “ORIGEN2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials”, Nuclear Technology, Vol. 62 (1983)
- [8] Robert E. Glass
Standard Thermal Problem Set for the Evaluation
of Heat Transfer Codes Used in the Assessment of Transportation Packages
SAND88-0380, Sandia National Laboratories
Albuquerque, New Mexico, August 1988
- [9] Robert E. Glass
Sample Problem Manual For Benchmarking of Cask Analysis Codes
SAND88-0190, Sandia National Laboratories
Albuquerque, New Mexico, February 1988
- [10] H. Greza, M. Heck, U. Varias
Wärmeabfuhr aus dem Transportbehälterlager Gorleben – Validierung eines numerischen
Berechnungsverfahrens anhand von CFD-Berechnungen und Temperaturmessungen –
Proceedings of the Annual Meeting on Nuclear Technology, 2007
H. Greza, M. Heck, U. Varias
*Heat removal from Gorleben transport cask storage facility – Validation of a numerical
calculation method carried out by means of CFD calculations and temperature measurements –
Proceedings of the Annual Meeting on Nuclear Technology, 2007*

¹ 改訂インデックスが与えられない場合、引用された文書の最新バージョンが考慮される。

別紙 解析モデルの詳細

(1) 解析モデルの説明

CASTOR[®] geo26JP 型は、縦置き（地面に垂直）で貯蔵される。

ANSYS[®]コードは、特に輸送貯蔵兼用キャスクの除熱解析に多く用いられてきた。解析コードそのものは、品質保証プロセスの一環として、ANSYS[®] Inc.によって広範に渡って検証され、妥当性が確認されている[5、6]。また、使用するプログラムの各バージョンは、今回の兼用キャスクの除熱解析へ適用するために、GNS によって妥当性が確認された。

また、兼用キャスクの除熱解析のために、いくつかの例を用いて、GNS によって計算方法の妥当性を確認した。なお、この妥当性確認には、解析結果と測定結果との比較も含まれる。



貯蔵状態のキャスクモデルは図 5 に示すとおりである。

燃料集合体は燃料格子の中心に配置、バスケットはキャスクキャビティの中心に配置した状態としている。このため、燃料集合体とバスケットの間及びバスケットとキャスク胴内表面の間に接触は無いものとしている。そのため、保守的な温度評価が行われる。

なお、キャスク内部では対流熱伝達を無視している。充填ガスはヘリウムであり、水蒸気量として 5vol%を考慮している。水蒸気はヘリウムと比較して熱伝導率が低いため、燃料集合体及びバスケットの構成部材について温度を高く評価できる。

キャスクモデルでは、燃料集合体の詳細なモデルは用いていない。その代わりに、有効な材料特性を与えた均質化した解析モデルを用いている。なお、各燃料集合体の詳細評価は、燃料集合体モデルを用いて評価する。

15 × 15 型燃料集合体の燃料集合体モデル例は図 6 に示すとおりである。なお、図 A1 に示すように、燃料集合体モデルとキャスクモデルの燃料集合体均質化領域の最高温度は等しくなる。

なお、キャスクモデルでは、底部の貯蔵架台及び固定装置は無視している。

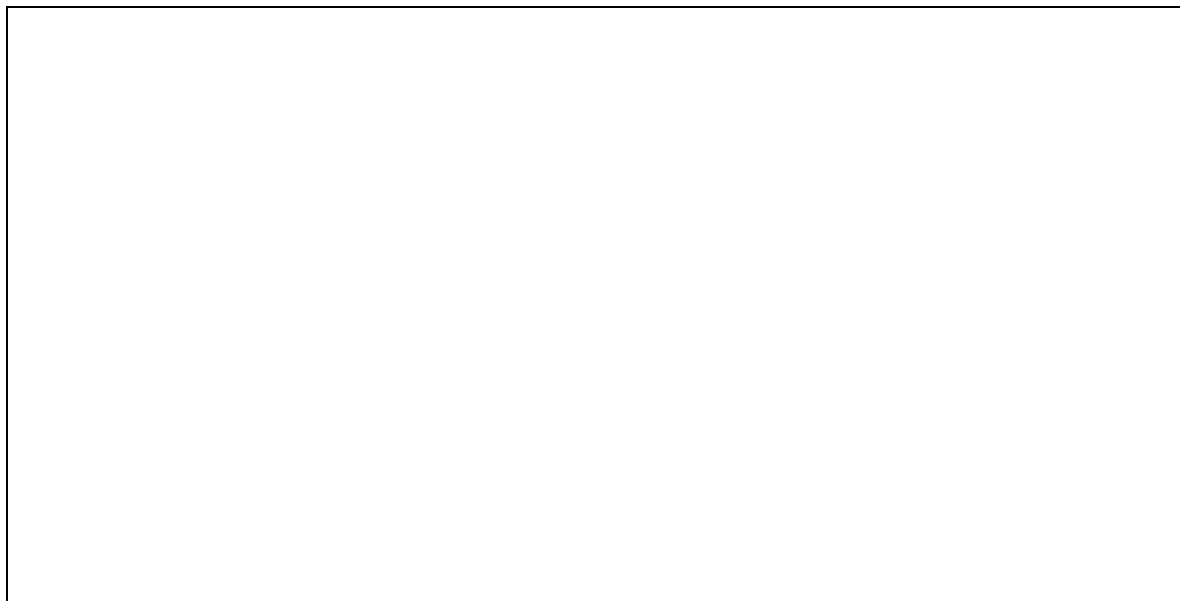


図 A1 燃料集合体モデルと、キャスクモデルの燃料集合体均質化領域の温度分布の比較

(2) 境界条件

CASTOR[®] geo26JP 型の貯蔵状態における周囲環境として、以下の条件を使用する:

- 周囲温度: 50 °C
- 貯蔵建屋壁面温度: 65 °C
- 貯蔵姿勢: たて置き

CASTOR[®] geo26JP 型は、これらの条件下で使用済核燃料の崩壊熱を自然対流による冷却により安全に除去し、商用原子炉施設の安全に影響を及ぼさないよう設計されている。

表 A1 に境界条件の概要を示す。

塗装表面のふく射率 0.93 は、過去のサーモグラフィー測定によって得られた実績に基づく値である。

なお、実条件では、兼用キャスクは、貯蔵施設内で他の兼用キャスクによって取り囲まれている。周囲の兼用キャスクの影響を考慮するために、ふく射による除熱については形態係数 0.212 を適用する。

また、兼用キャスクの底部は、保守的に断熱としている。側部の垂直面上の対流熱伝達には、IAEA 安全基準助言文書 SSG26 による Nusselt 法則 [11] を使用した。水平上向き面である兼用キャスクの蓋側の除熱については、一定の実効熱伝達率として \square W/(m²K) を用いた。なお、この実効熱伝達率は、対流による部分 (\square W/(m²K)) とふく射による部分 (\square W/(m²K)) からなる。

CASTOR[®] geo26JP 型は、側面部に伝熱フィンを有する。有限要素解析 (FE) モデルでは、伝熱フィンの形状はモデル化していないが、フィン形状を考慮した実効表面増倍係数 (フィン係数) は 2.4 と計算される。保守性を考慮し、FE モデルではフィン係数を 2.0 としている。

竜巻や津波などの自然現象で事故時にフィン領域が局所的に変形した場合の、局所的な熱除去能力の低下についても、フィン係数の保守性により十分に考慮されている。

表 A1 計算に用いた境界条件

項目		境界条件
燃料集合体のピーキングファクターの最大値		1.15 <input type="text"/>
燃料集合体の装填形態		各々の崩壊熱の量 図 3 に示す除熱解析モデル
仕 稼 貯 蔵	周囲温度	50 °C
	貯蔵建屋の周囲表面の温度	65 °C
	貯蔵建屋のコンクリート表面のふく射率	0.8
	キャスク表面のふく射率	0.93 ^注
	キャスク表面から貯蔵建屋周辺面への形態係数	0.212
	垂直面のヌッセルト則	<input type="text"/>
	水平上向き面(蓋部)熱伝達率	<input type="text"/>
	底部熱伝達	<input type="text"/>

注 塗装面

Nu: ヌッセルト数 (-)

g: 重力加速度 (m/s²)

β : 熱膨張係数 (1/K)

ν : 動粘性率 (m²/s)

Pr: Prandtl 数 (-)

Δt : 外気と外キャスク表面の温度差 (K)

L: 特性長さ (m)

(3) 除熱計算に用いた熱物性値

表 A2～表 A4 に、有限要素解析に使用した熱物性値を示す。これらの数値は、補足説明資料 1024-TR-00005「第4条 地震による損傷の防止 第5条 津波による損傷の防止 第6条 外部からの衝撃による損傷の防止 第16条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」から引用している。

表 A2 キャスクの熱物性値

部品	材料名	温度 [°C]	熱伝導率 [W/(m·K)]
キャスク本体	FCD 300 LT	50	38.50
		100	39.73
		150	40.45
一次蓋、二次蓋	SUS F347 又は SUS F316	100	24.8
		200	25.0
中性子遮蔽材 (胴側部 2 重配置の外側)	ポリエチレン 	100	0.34
		150	0.25
中性子遮蔽材 (胴側部 2 重配置の内側 並びに 蓋部及び底部)	ポリエチレン 	100	0.34
		150	0.25
キャスク底板	SUS 304	50	16.2
		100	17.0
		150	17.9

表 A3 バスケットの熱物性値

部品	材料名	温度 [°C]	熱伝導率 [W/(m·K)]
熱伝導及び中性子吸収板	Al-B4C (ボロン添加 アルミニウム合金)	-	110
H-ビーム		100	15.4
		150	16.1
		200	16.8
		250	17.6
バスケット側板、 エッジセグメント(鋼)、 コーナーエレメント		50	16.2
		100	17.0
		150	17.9
		200	18.6
エッジセグメント (アルミニウム合金)		50	168.6
		100	171.7
		150	174.1
		200	176.2
バスケット底板		50	16.2
		100	17.0
		150	17.9

表 A4 燃料集合体均質化領域及びガス成分の熱物性値

部品	材料名	温度 [°C]	熱伝導率 [W/(m·K)]
燃料集合体均質化領域			
キャビティ内充填ガス	ヘリウム・水蒸気混 合物	100	0.1676
		200	0.1982
キャスク底 - キャスク底板間のガス、 一次蓋と二次蓋の間のガス ^注	空気	100	0.0314
		200	0.0380

^注 実際はヘリウム

参考文献

- [11] IAEA Safety Standards No. SSG-26
Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material
(2012 Edition), Specific Safety Guide
International Atomic Energy Agency
Vienna, 2014