

資料1-5

Doc No. 22-180-I-104 Rev. 1

2023年5月29日

トランスニュークリア株式会社

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

本資料のうち、枠囲みについては商業機密のため非公開とします。

目 次

1. 要求事項.....	1
2. 要求事項への適合性.....	4
3. 参考文献.....	32

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TK-26型の取扱上の安全性について

別紙5 使用する解析コードについて

1. 要求事項

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

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第16条第4項第二号

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 2.3 除熱機能」及び「4.自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.4 監視機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

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

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

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

2) 兼用キャスク各部の温度評価

- a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。
- b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、

設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

」

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

- (1) 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。
- (2) 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

TK-26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。

- | |
|---|
| <p>a. 設置許可基準規則第16条第4項第二号</p> <ul style="list-style-type: none">・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。 |
| <p>b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項</p> <ul style="list-style-type: none">・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 <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">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。 <ul style="list-style-type: none">✓ 貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項 <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">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。 |

TK-26型は、動力を用いずに使用済燃料集合体の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料集合体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、使用済燃料集合体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、使用済燃料集合体及び特定兼用キャスクの温度を制限される値以下とする。

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集合体に以下の制限を設ける。

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

また、TK-26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、TK-26型の主要な構成部材の温度は、以下の制限を設ける。

- ・胴、底板、外筒及び蓋部 350℃以下
- ・中性子遮蔽材 150℃以下
- ・金属ガスケット 130℃以下
- ・バスケット格子材 250℃以下

さらに、TK-26型は、使用済燃料集合体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、使用済燃料集合体の崩壊熱、外部からの入熱及び周囲温度等を条件として、TK-26型の実形状を二次元でモデル化し、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、使用済燃料集合体の崩壊熱とバスケットの温度を条件として、使用済燃料集合体の軸直角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。使用済燃料集合体の崩壊熱は、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、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、使用済燃料集合体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。

TK-26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」に示すとおり、TK-26型は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集合体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、TK-26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

TK-26型は、使用済燃料集合体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。

特定兼用キャスク貯蔵施設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(図1参照)。

- ① 崩壊熱は、使用済燃料集合体の被覆管表面からヘリウムを介した熱伝導及び放射によりバスケット格子内面へ伝えられる。
- ② バスケット格子内面に伝えられた熱は、バスケット格子内の熱伝導によりバス

ケット格子外周部へ伝えられる。

- ③ バスケット格子外周部に伝えられた熱は、ヘリウムを介した熱伝導及び放射により胴内面へ伝えられる。
- ④ 胴内面に伝えられた熱は、熱伝導により胴外面へ伝えられる。
- ⑤ 胴外面に伝えられた熱は、伝熱フィンの熱伝導により外筒内面へ伝えられる。
- ⑥ 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。
- ⑦ 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、放射により貯蔵建屋へ、それぞれ伝えられる。
- ⑧ 特定兼用キャスク周囲の空気及び貯蔵建屋に伝えられた熱は、貯蔵建屋の自然換気により建屋外環境へ放出される。

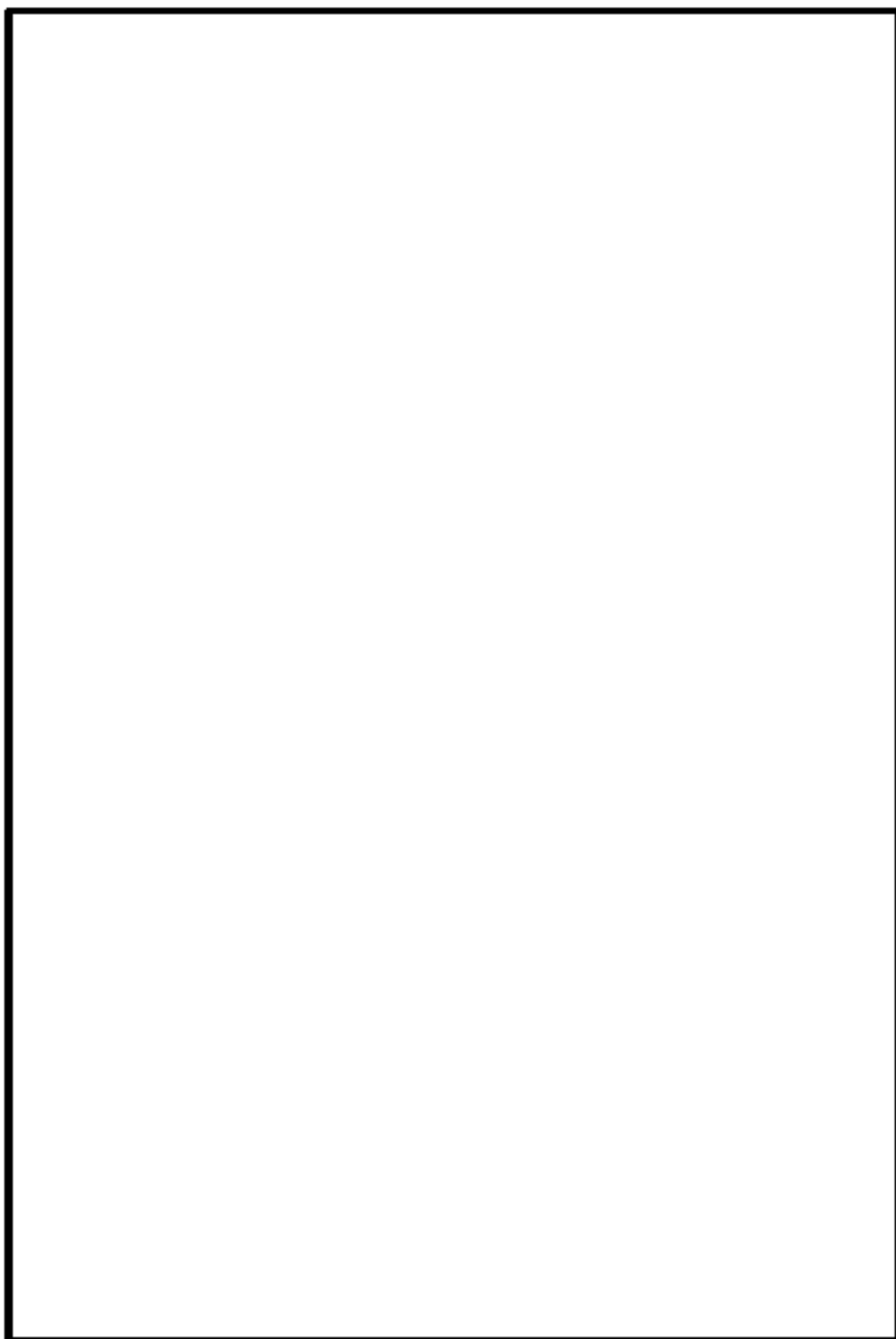


図1 TK-26型の伝熱形態

b. 除熱機能に関する評価

TK-26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) 使用済燃料集合体の崩壊熱評価方法

使用済燃料集合体の崩壊熱量(以下「発熱量」という。)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。

ここで、使用済燃料集合体の燃焼度分布を考慮して、特定兼用キャスク1基あたりの最大発熱量(17.2kW)を上回る発熱量(以下「設計発熱量」という。)を次のとおり設定する(図3参照)。

$$[\text{設計発熱量}] = [\text{使用済燃料集合体(平均燃焼度}^{(注1)}) \text{1体当たりの発熱量 (軸方向燃焼度分布を考慮}^{(注2)})] \times 1.05^{(注3)} \times [\text{収納体数}]$$

- (注1) 平均燃焼度とは、TK-26型1基あたりに収納される使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。
- (注2) 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(ピーキングファクター(以下「PF」という。))を考慮する。PFは、収納する使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を包絡するように設定する。
- (注3) ORIGEN2コードの計算結果に5%の保守性を考慮する。

収納対象の使用済燃料集合体は、17×17燃料48,000MWd/t型(A型、B型)、39,000MWd/t型(A型、B型)、15×15燃料48,000MWd/t型(A型、B型)、39,000MWd/t型(A型、B型)である。このうち、除熱解析として発熱量の最も高い17×17燃料48,000MWd/t型(A型)を対象とする。

使用済燃料集合体の発熱量計算に用いる計算条件及び計算結果を表2に示す。使用済燃料集合体の発熱量計算から、設計発熱量は以下のとおり計算される。

$$[\text{設計発熱量}] = \boxed{\quad} \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 26 \text{ (体)} = \boxed{\quad} \text{ (kW)}$$

TK-26型の除熱解析における収納物条件を表3に示す。

表1 使用済燃料集合体の仕様

項目		仕様			
種類		17×17燃料 48,000MWd/t型		15×15燃料 48,000MWd/t型	
		A型	B型	A型	B型
形状	集合体幅	約214mm			
	全長	約4100mm			
質量		約680kg		約670kg	
初期濃縮度		4.2wt%以下		4.1wt%以下	
最高燃焼度 ^(注1)		48,000MWd/t以下		47,000MWd/t以下	
冷却期間		15年以上	20年以上	15年以上	20年以上
収納体数		26体 ^(注2)			

項目		仕様			
種類		17×17燃料 39,000MWd/t型		15×15燃料 39,000MWd/t型	
		A型	B型	A型	B型
形状	集合体幅	約214mm			
	全長	約4100mm			
質量		約680kg		約670kg	
初期濃縮度		3.7wt%以下		3.5wt%以下	
最高燃焼度 ^(注1)		39,000MWd/t以下		39,000MWd/t以下	
冷却期間		20年以上		20年以上	
収納体数		26体 ^(注2)			

(注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。

(注2)収納体数は、48,000MWd/t型燃料と39,000MWd/t型燃料を混載する場合がある。


表2 発熱量計算条件及び結果

種類			17×17燃料		15×15燃料				
			A型	B型	A型	B型			
計算条件	最高燃焼度 (MWd/t)		48,000		47,000				
	平均燃焼度 (MWd/t)		44,000		43,000				
	比出力 (MW/t)								
	照射 期間(日)	使用済燃 料集合体					最高燃焼度		
							平均燃焼度		
	初期濃縮度 (wt%) (注1)						15		20
	冷却期間(年)		15		20				
	ウラン質量(kg)								
	軸方向PF								
	上部								
下部									
計算結果	使用済燃料集合体(平均燃焼度) 1体当たりの発熱量 (PF考慮) (W)								

(注1) 収納される使用済燃料集合体に対する最小値を用いる。

(注2) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

表3 除熱解析における収納物条件概要

項目	17×17燃料		解析条件	
	キヤスク収納位置制限		中央部	外周部
収納物仕様	種類	中央部	外周部	48, 000MWd/t型 (A型)
	初期濃縮度 (wt%)	48, 000MWd/t型 (A型・B型)	48, 000MWd/t型 (A型)	
	ウラン質量 (kg)	39, 000MWd/t型 (A型・B型)		
	最高燃焼度 (GWd/t) (使用済燃料集合体平均)	≤48	≤44	48
	冷却期間 (年)	48, 000MWd/t型 A型 : ≥15, B型 : ≥20 39, 000MWd/t型 A型 : ≥20, B型 : ≥20		15
バーナブルポイズン 集合体の仕様	照射期間 (日)			— (注2)
	冷却期間 (年) (注3)	48, 000MWd/t型 : ≥15, 又は ≥20 39, 000MWd/t型 : ≥20		— (注2)
TK-26型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		44
配置 (注4)				

(注1) 本値は外周部の使用済燃料集合体における燃焼度の相当値である。外周部に入力する崩壊熱量は、TK-26型の総崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量×収納体数(26体)となるように調整した値である。

(注2) バーナブルポイズン集合体は伝熱体となるため、装荷しない場合を想定しモデル化しない。

(注3) バーナブルポイズン集合体が挿入される使用済燃料集合体タイプの冷却期間による。

(注4) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

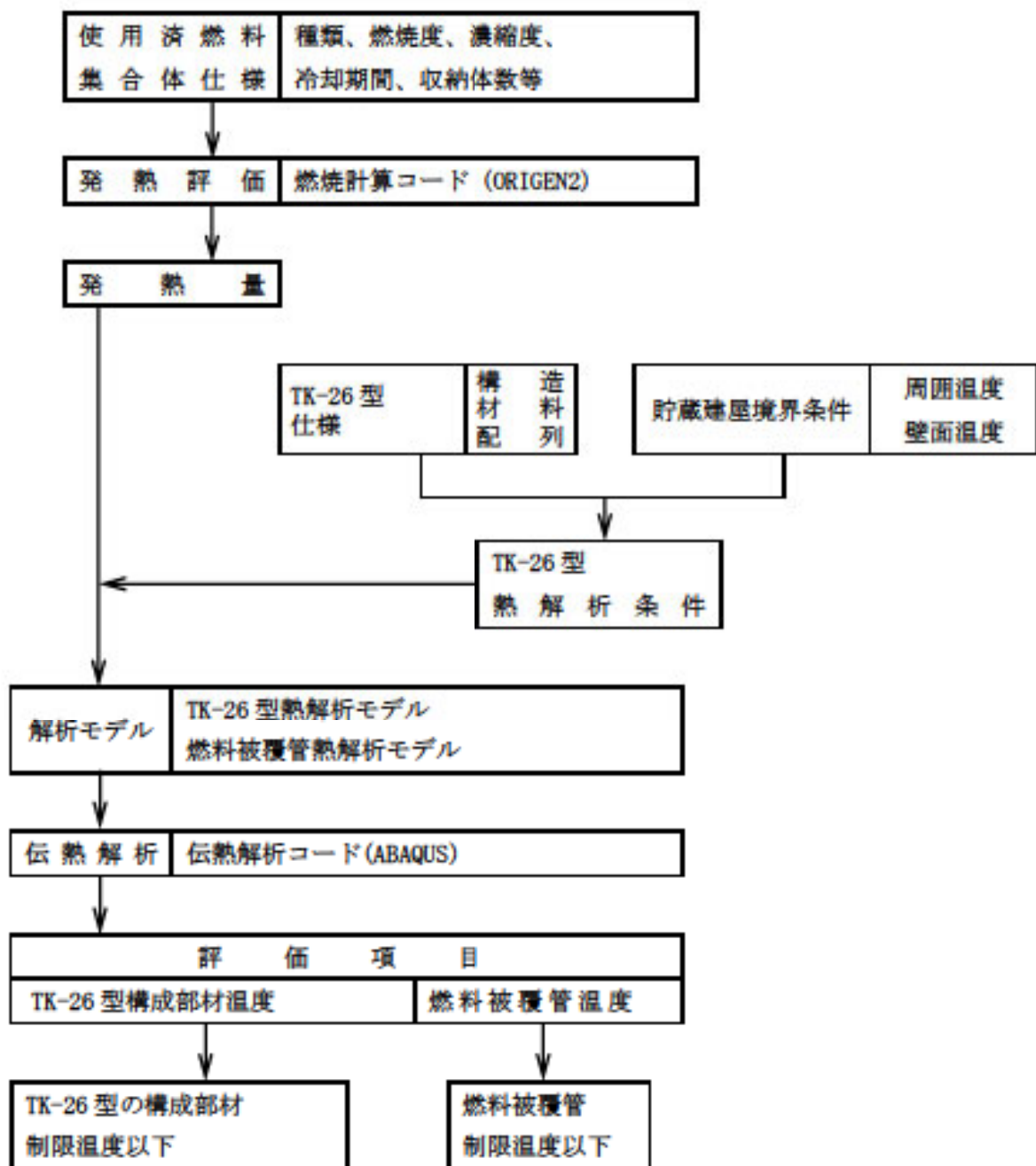
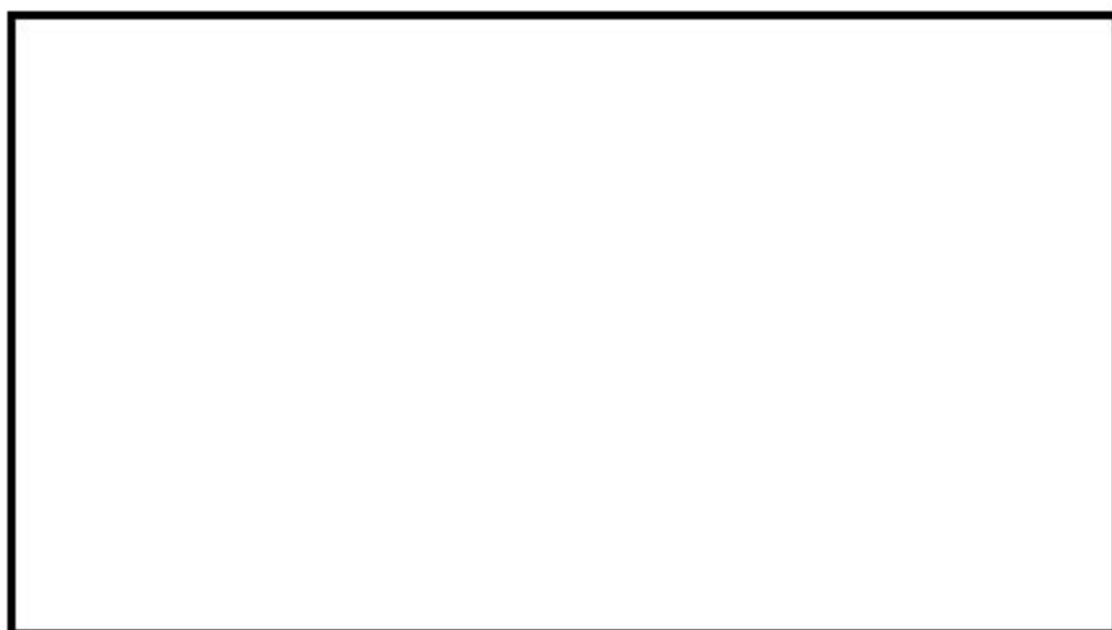


図2 除熱解析フロー



(注1)使用済燃料集合体26体分の発熱量を示す。

図3 使用済燃料集合体(燃料有効部)の設計発熱量軸方向分布

(b) 特定兼用キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

特定兼用キャスク構成部材の各部温度は、使用済燃料集合体の崩壊熱及び周囲温度等を条件として、TK-26型の実形状をモデル化し、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、使用済燃料集合体の崩壊熱とバスケット格子材の温度を条件として、使用済燃料集合体の軸直交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。貯蔵建屋内における縦置き貯蔵時を対象として評価する。

i. 解析モデル

温度評価に当たっては、以下の3種類の熱解析モデルを用いる。

- ・軸方向二次元軸対称全体モデル(以下「全体モデル」という。)
- ・軸直交方向輪切りモデル(以下「輪切りモデル」という。)
- ・燃料集合体モデル

TK-26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。別添3に解析モデルと実形状の図を比較して示す。

- ・全体モデル : 底板、上下部端板、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、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
- ・輪切りモデル : 外筒、伝熱フィン、側部中性子遮蔽材、胴、バスケット格子材
- ・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内面温度とする。

ii. 境界条件

TK-26型周囲の環境として、以下の条件を用いる。

- ・貯蔵姿勢 : 縦置き 貯蔵建屋内
- ・周囲空気温度 : 50°C
- ・放射環境温度 : 65°C



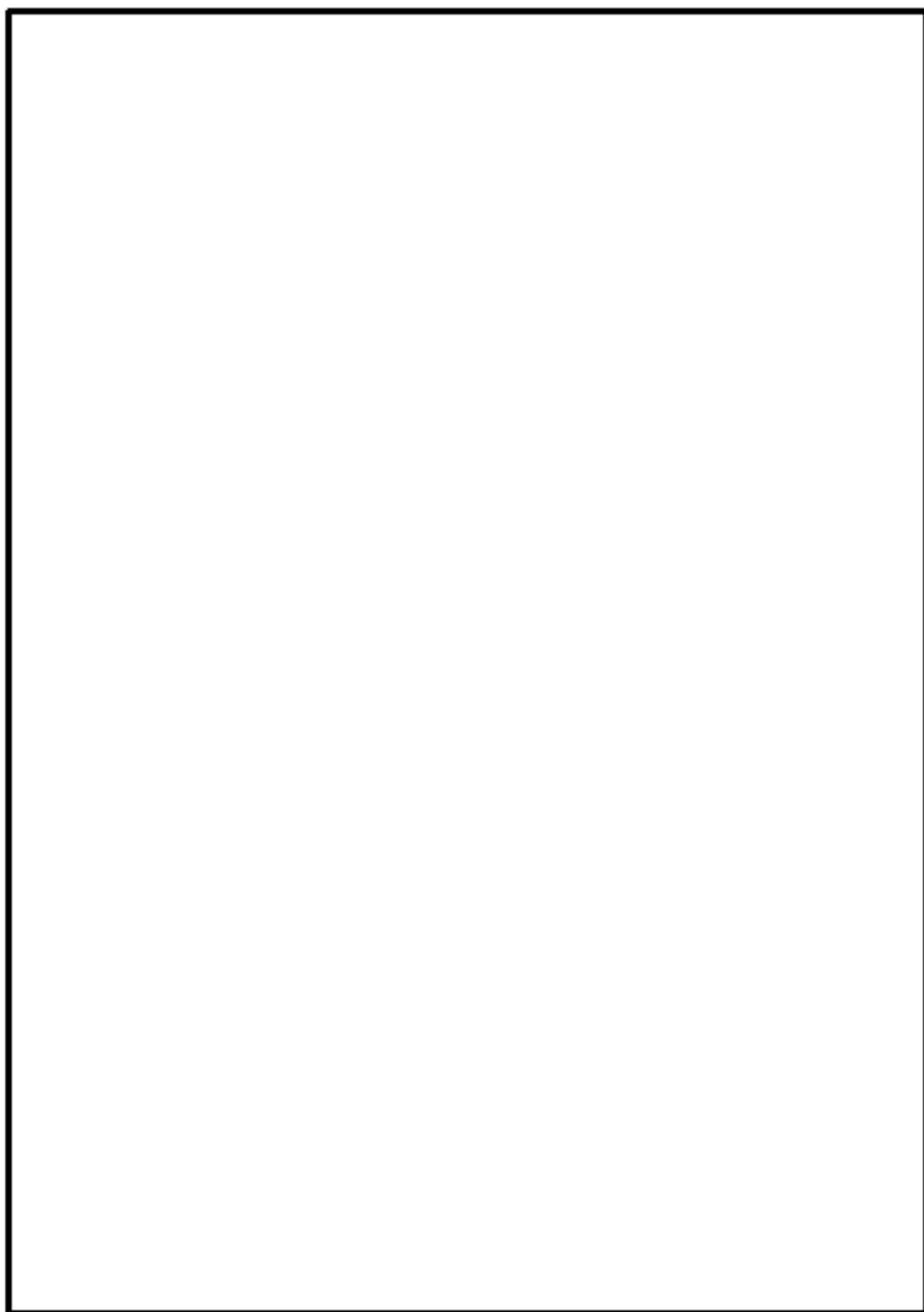


図4 全体モデル形状図



図5 全体モデル要素分割図

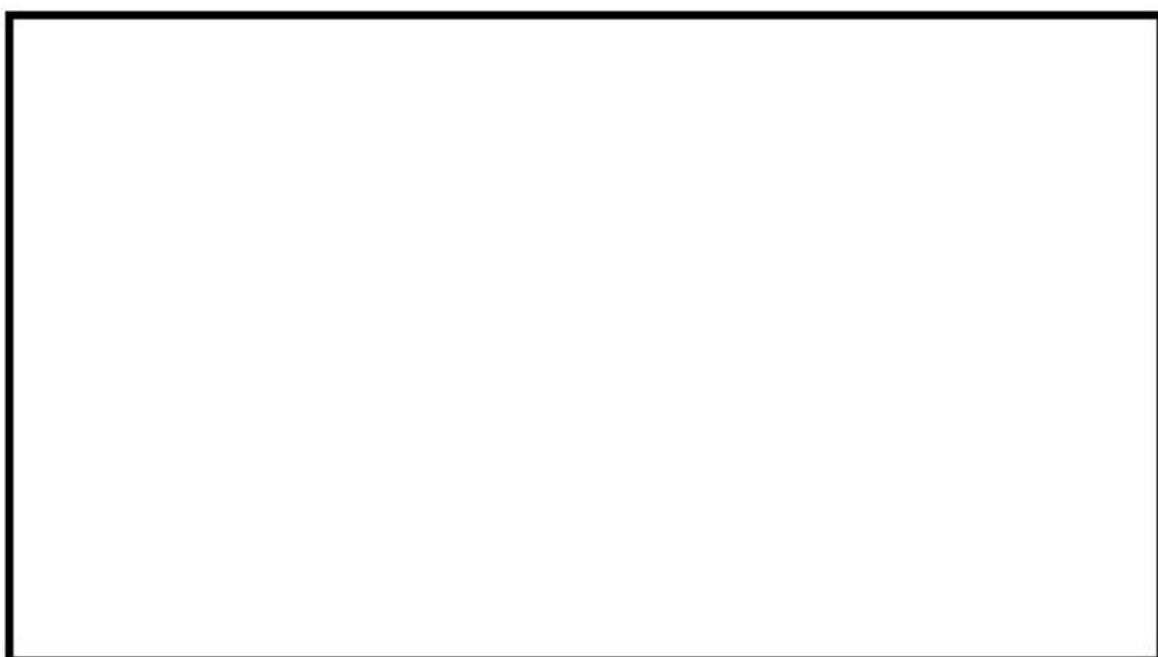
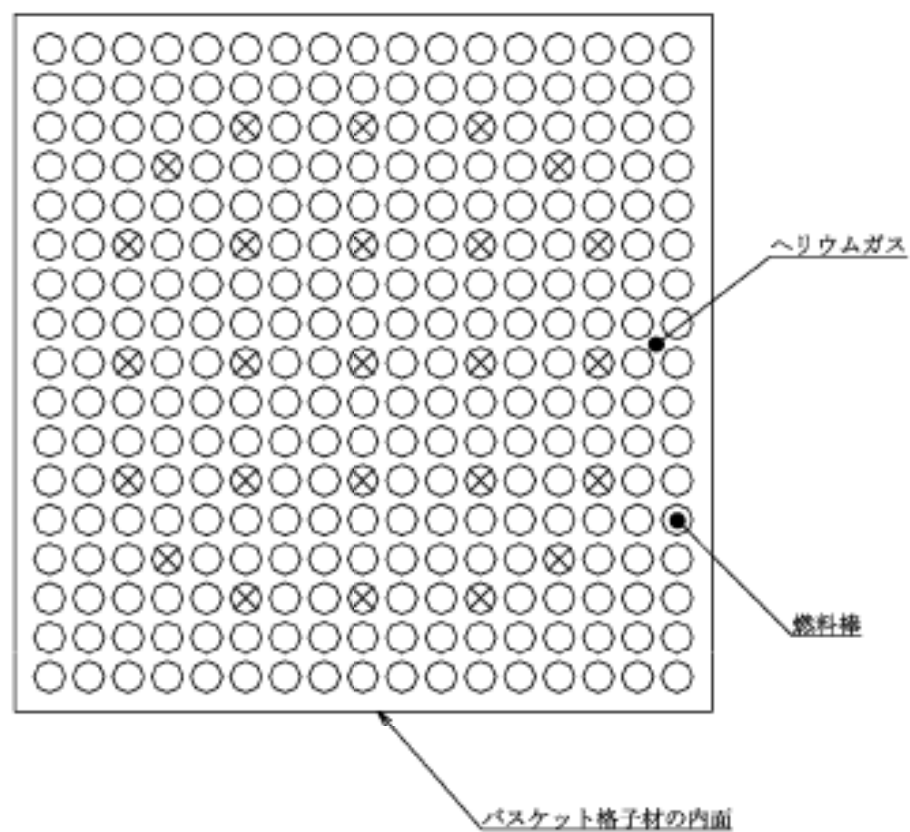


図6 輪切りモデル形状図



図7 輪切りモデル要素分割図



⊗ : 制御棒案内シンプル等であり、発熱はない

図8 燃料集合体モデル形状図



図9 燃料集合体モデル要素分割図

(c) 評価結果

TK-26型の除熱解析結果として、TK-26型の安全機能を担保する部位、構造強度部材及び燃料被覆管の温度、及び温度分布図を表4、図10から図12に示す。

解析の結果、TK-26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、TK-26型は使用済燃料集合体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TK-26型の各部位及び使用済燃料集合体の設計温度を表4に示す。

表4 除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (℃)	設計基準値 (℃) (注1～注6)
TK-26型	胴	151	350 ⁽¹⁾
	底板	146	350 ⁽¹⁾
	外筒	127	350 ⁽¹⁾
	上下部端板 ^(注7)	122	350 ⁽¹⁾
	一次蓋	107	350 ⁽¹⁾
	二次蓋	102	350 ⁽¹⁾
	中性子遮蔽材(蓋部、底部、側部)	143 ^(注8)	150 ⁽²⁾
	蓋部中性子遮蔽材カバー	95	350 ⁽¹⁾
	底部中性子遮蔽材カバー	133	350 ⁽¹⁾
	トラニオン	151 ^(注9)	350 ⁽¹⁾
	金属ガスケット	106 ^(注10)	130 ⁽³⁾
	バスケット格子材	225	250 ⁽⁴⁾
	伝熱フィン	141	200 ⁽⁵⁾
燃料被覆管		255	275 ⁽⁶⁾

※注記を次頁に示す。

- (注1) 参考文献(1)に炭素鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼、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)に中性子遮蔽材の主材であるエチレンプロピレン系ゴムの使用可能温度が示されており、安全機能の担保に必要な構成部材である中性子遮蔽材は、この温度を設計基準値に設定している。なお、参考文献(2)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注3) 参考文献(3)に金属ガスケットの長期密封試験結果が示されており、安全機能の担保に必要な構成部材である金属ガスケットは、この長期密封試験結果において密封機能が設計貯蔵期間維持可能と評価された温度を下回る温度を設計基準値に設定している。なお、参考文献(3)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注4) 参考文献(4)に熱ばく露による強度低下を適切に模擬したほう素添加アルミニウム合金の設計用強度が示されており、構造強度部材であり、かつ、安全機能の担保に必要な構成部材であるバスケット格子材は、構造強度評価が可能な温度として、参考文献(4)の温度範囲の上限を設定している。
- (注5) 参考文献(5)に銅の設計用強度が規定されており、安全機能の担保に必要な構成部材である伝熱フィンは、伝熱機能が維持可能な温度として参考文献(5)の温度範囲の上限を設定している。なお、参考文献(5)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注6) 参考文献(6)に燃料被覆管の累積クリープひずみが1%を超えない温度、また、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度、さらに、水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度が示されており、燃料被覆管の設計基準値は、これら全ての温度を下回る水素化物の再配向が防止可能な温度を設定している。なお、参考文献(6)の記載内容の詳細は別紙2を参照。
- (注7) 上下部端板のうちの最も高い温度を示す。
- (注8) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度である。
- (注9) 保守側に評価するため、胴の最高温度とする。
- (注10) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

表5 設計温度

対象となる部位		設計温度(°C)
TK-26型	胴	160
	底板	160
	外筒	130
	一次蓋	120
	二次蓋	120
	中性子遮蔽材(蓋部、底部、側部)	150
	蓋部中性子遮蔽材カバー	120
	底部中性子遮蔽材カバー	160
	トラニオン	160
	金属ガスケット	110
	バスケット格子材	230
	伝熱フィン	160
燃料被覆管		260

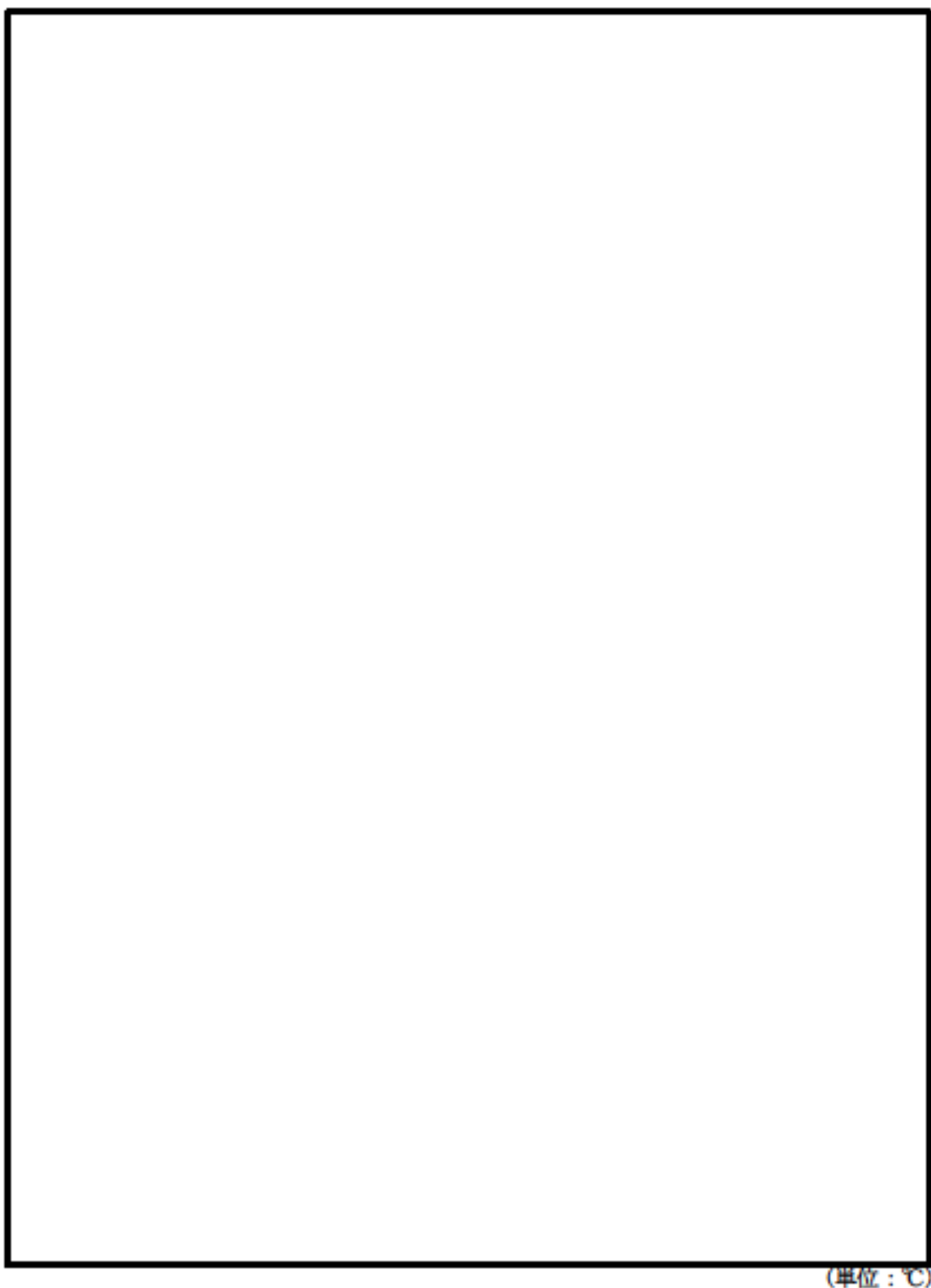


図10 除熱解析結果(全体モデル)



(単位：℃)

図11 除熱解析結果(輪切りモデル)



(単位：℃)

図12 除熱解析結果(燃料集合体モデル)

【確認内容】

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

貯蔵建屋は型式証明申請の範囲外(設置(変更)許可時に別途確認)である。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、確認事項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、「使用済燃料貯蔵施設規格金属キャスク構造規格(2007年版)」、JSME S FA1-2007、(2007)
- (2) (一社)日本ゴム協会編、「新版 ゴム技術の基礎 改訂版」、(2014)
- (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)報告書、(2010)
- (4) トランスニュークリア(株)、(株)神戸製鋼所、「補足説明資料 1-7 バスケット用ほう素添加アルミニウム合金(1B-A3J04-0)について」、18-180-I-017 Rev.3、(2021)
- (5) (一財)日本規格協会、「圧力容器の設計 JIS B 8267:2015」、(2015)
- (6) 総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」、(2009)

除熱解析のモデル化及び解析条件について

1. 伝熱形態について

TK-26型の伝熱形態を別紙1-1図に示す。

使用済燃料集合体から発生した崩壊熱は、主に胴内に充填されたヘリウムの伝導と放射により、バスケット格子材内面に伝えられる。バスケット格子材内面に伝えられた熱は、主に伝導によりバスケット格子材外周部に伝わり、さらにバスケット格子材外周部からヘリウムの伝導と放射により胴内面に伝えられる。続いて、胴内面に伝えられた熱は、伝導によりTK-26型の表面に伝えられ、放射と空気の自然対流によりTK-26型の周囲の大気に拡散される。なお、側部中性子遮蔽材領域では、主に銅製の伝熱フィンの伝導により熱が伝えられる。

2. 除熱解析のモデル化及び解析条件

除熱解析は、TK-26型の実形状を軸方向断面、軸直交方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を軸直交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3つのモデルである。

- ① 軸方向二次元軸対称全体モデル(以下「全体モデル」という。)
- ② 軸直交方向輪切りモデル(以下「輪切りモデル」という。)
- ③ 燃料集合体モデル

これら3つの解析モデルの入出力フローを別紙1-2図に示す。また、各部位及び均質化領域の物性値をそれぞれ、別紙1-1表及び別紙1-2表に、各部材の放射率を別紙1-3表に示す。各解析モデルの概要及び解析条件を以下に示す。

(1) 全体モデル

全体モデルは、TK-26型全体を二次元の軸対称体としてモデル化したものであり蓋部及び底部の温度を評価するためのモデルである。全体モデルの形状図を別紙1-3図に示す。

全体モデルは二次元モデルであるため、燃料集合体-バスケット領域及び側部中性子遮蔽材領域については、材料の存在比を考慮し均質化した熱伝導率を軸方向及び軸直交方向のそれぞれについて設定する。軸方向は領域内に存在する各材料の体積存在比に基づいて均質化した物性値を設定する。軸直交方向は、燃料集合体-バスケット領域については、輪切りモデルを用いた予備解析から求められる等価な熱伝導率を、側部中性子遮蔽材領域については、胴から外筒までを多層円筒の一部と考え

て輪切りモデルを用いた予備解析から求められる等価な熱伝導率をそれぞれ設定する(別添1参照)。

次に、発熱条件として、軸方向の発熱分布を考慮した設計発熱量となるように燃料有効部の発熱密度を設定する。

外表面の境界条件を別紙1-4表に示す。周囲温度を50℃、貯蔵建屋壁面温度を65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面への放射による放熱を考慮する。なお、TK-26型底面から貯蔵架台への伝熱は保守側に断熱とする。

(2) 輪切りモデル

輪切りモデルは、使用済燃料集合体が最高温度となるTK-26型の軸直交方向断面を二次元でモデル化したものであり、中性子遮蔽材(側部)、胴、バスケット格子材等の温度を評価するためのモデルである。輪切りモデルの形状図を別紙1-4図に示す。

輪切りモデルの燃料集合体領域には、燃料集合体モデルから求められる等価熱伝導率(別添1参照)を設定する。

使用済燃料集合体の配置を別紙1-5図に示す。

中央部には、最高燃焼度となる使用済燃料集合体のPF最大領域の発熱量に相当する発熱密度を設定する。一方、外周部には、断面内発熱量の合計が平均燃焼度燃料のPF最大領域の発熱量26体分と等しくなるように発熱密度を設定する。

その際、全体モデルにおける軸方向への熱の移動を輪切りモデルに反映するために、外周部の使用済燃料集合体の領域には、全体モデルの解析における燃料集合体-バスケット領域での軸方向熱移動量を差し引いた発熱密度を設定する。また、胴内面及び外筒外面の温度が全体モデルの温度と等しくなるように、胴内面及び外筒外面に吸熱を与えて、輪切りモデル内の熱移動量を調整する。この熱移動に関する概念を別紙1-6図に示す。

輪切りモデルに設定した発熱条件及び熱移動量をそれぞれ別紙1-6表及び別紙1-7表に示す。

また、外表面の境界条件を別紙1-4表に示す。周囲空気温度を50℃、貯蔵建屋壁面温度を65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達、貯蔵建屋壁面への放射による放熱を考慮する。

(3) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルは、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、燃料被覆管の温度を評価するためのモデルである。燃料棒は正八角形でモデル化し、断面積等価となるように寸法を設定する。燃料集合体モデルの形状図を別紙1-7図に示す。

燃料棒には、二酸化ウラン、ヘリウム及びジルカロイの体積存在比を考慮して均

質化した熱伝導率を設定する。

発熱条件として、PF 最大領域の発熱量に相当する発熱密度を設定する。

燃料集合体モデルの境界条件として、バスケット格子材の内面に、輪切りモデルにおいて求められる最高温度を設定する。

また、燃料集合体モデルの伝熱形態として伝導及び放射を考慮するものとし、軸方向への伝熱を無視することで保守的な設定としている。

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最小値である

□ (17×17燃料)及び□ (15×15燃料)とする。

—使用済燃料集合体の最高温度を保守的に高めに算出するために、別紙1-5図のとおり中央部12体に最高燃焼度(17×17燃料：48GWd/t)の使用済燃料集合体を配置し、外周部14体は、特定兼用キャスク全体の発熱量が平均燃焼度(17×17燃料：44GWd/t)を26体収納した場合と等しくなるように調整した発熱量を設定する。

・モデル化の保守性

—特定兼用キャスク本体内のバスケット格子材及びバスケット格子内の使用済燃料集合体は、その温度を高めに評価するように、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。

—使用済燃料集合体とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

—全体モデルにおいて、下部温度を保守的に評価するために、底板から貯蔵架台への熱移動を無視し断熱条件とする。

—輪切りモデルにおいて、燃料集合体領域の軸方向への熱移動は外周部燃料のみ考慮し、中央部燃料の軸方向への熱移動は無視する。

4. 参考文献

- (1) (一社)日本機械学会、「伝熱工学資料 改訂第4版」、(1986)
- (2) (一社)日本原子力学会、「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013(AESJ-SC-F006:2013)」、(2014)
- (3) Vedat S. Arpaci, “CONDUCTION HEAT TRANSFER”, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY (1966)
- (4) 理工学社、「機械工学基礎講座 伝熱学」、(1982)

別紙1-1表 各部位の物性値

部位	材料	温度 (°C)	熱伝導率 (W/(m·K))
胴 底板 一次蓋 二次蓋 外筒	炭素鋼 ⁽¹⁾	26.85 226.85 526.85	43.0 38.6 27.7
中性子遮蔽材 (蓋部/側部/底部)	レジン (エチレンプロピレン系ゴム) ^(注1)	20	
		100	
		125	
		150	
バスケット格子材	ほう素添加アルミニウム合金 ^(注2)	25	
		100	
		150	
バスケットサポート	ほう素添加アルミニウム合金 又はアルミニウム合金 ^(注3)	200	
		250	
伝熱フィン	銅 ⁽¹⁾	26.85	398
		326.85	383
		526.85	371
内部気体	ヘリウム	26.85	0.1527
		126.85	0.1882
		226.85	0.2212
周囲気体	空気	26.85	0.02614
		126.85	0.03305
		226.85	0.03951

(注1)メーカー自社データ

(注2)メーカー自社データ

(注3)ほう素添加アルミニウム合金と同じ値とする。

別紙1-2表 均質化領域の物性値

解析モデル	均質化領域		温度 (°C)	熱伝導率 (W/(m·K))	
				軸直交方向	軸方向
全体モデル	燃料集合体 -バスケット 領域 ^(注1)	上部ノズル部	26.85 126.85 326.85		
		上部プレナム部	26.85 126.85 326.85		
		燃料有効部	26.85 126.85 326.85		
		下部ギャップ部	26.85 126.85 326.85		
		下部ノズル部	26.85 126.85 326.85		
	側部中性子遮蔽材領域	26.85 126.85 326.85			
輪切り モデル	燃料集合体領域		26.85 126.85 326.85		
燃料集合体 モデル	燃料棒		26.85 126.85 326.85 526.85		

(注1)使用済燃料集合体及びバスケットが収納される領域

別紙1-3表 各部材の放射率

部材	表面性状	放射率
胴(内面) 一次蓋(側面) 二次蓋(側面)		
バスケット格子材 バスケットサポート		
胴(外表面) 一次蓋(外表面) 二次蓋(外表面) 外筒(外表面) 底板(外表面)	白色塗装	0.8 ^(注3)

(注1) メーカー自社データ

(注2) メーカー自社データ

(注3) 参考文献(1)参照。白色塗装面の放射率0.7～0.9の平均値を採用した。

塗装の放射率の設定根拠は別紙2のとおり。

別紙1-4表 外表面境界条件

項目	境界条件
周囲温度	50℃
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貯蔵建屋 内壁面への形態係数	0.214 ^(注1)
特定兼用キャスク表面熱伝達率 (側面、上向き面、下向き面)	別紙1-5表による

(注1) 特定兼用キャスク配列ピッチ寸法3.5mから算出される値。

別紙1-5表 TK-26型外表面の熱伝達率

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 ^(注1) (W/(m ² ・K))
TK-26型 外表面 (側面)	垂直平板	293.15	20	$1.55 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$
TK-26型 外表面 (上向き面)	水平上向面	293.15	20	$1.57 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.32 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.12 \times \Delta t^{1/3}$
TK-26型 外表面 (下向き面)	水平下向面	293.15	20	$9.77 \times D^{-2/5} \Delta t^{1/5}$
		373.15	100	$9.56 \times D^{-2/5} \Delta t^{1/5}$
		473.15	200	$9.35 \times D^{-2/5} \Delta t^{1/5}$

(注1)熱伝達率は以下の式を用いて計算する。

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

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

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

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)

D : 代表長さ (=0.318 m)

別紙1-6表 輪切りモデルの発熱条件

対象	収納体数	発熱量(kW) (注1)(注2)	
		軸方向への熱移動考慮前	軸方向への熱移動考慮後
中央部に収納される使用済燃料集合体	12体		
外周部に収納される使用済燃料集合体	14体		
合計	26体		

(注1) 輪切りモデルの評価対象断面であるPF最大領域 [] (mm) の発熱量を燃料有効長 [] (mm) 当たりに換算した値。なお、表中の数値は、端数処理した値であるため、合計値が一致しない場合がある。

(注2) 評価対象断面はPF最大領域なので、軸方向への熱移動考慮前における発熱量の合計値は設計発熱量 [] (kW) を上回る。

別紙1-7表 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動量

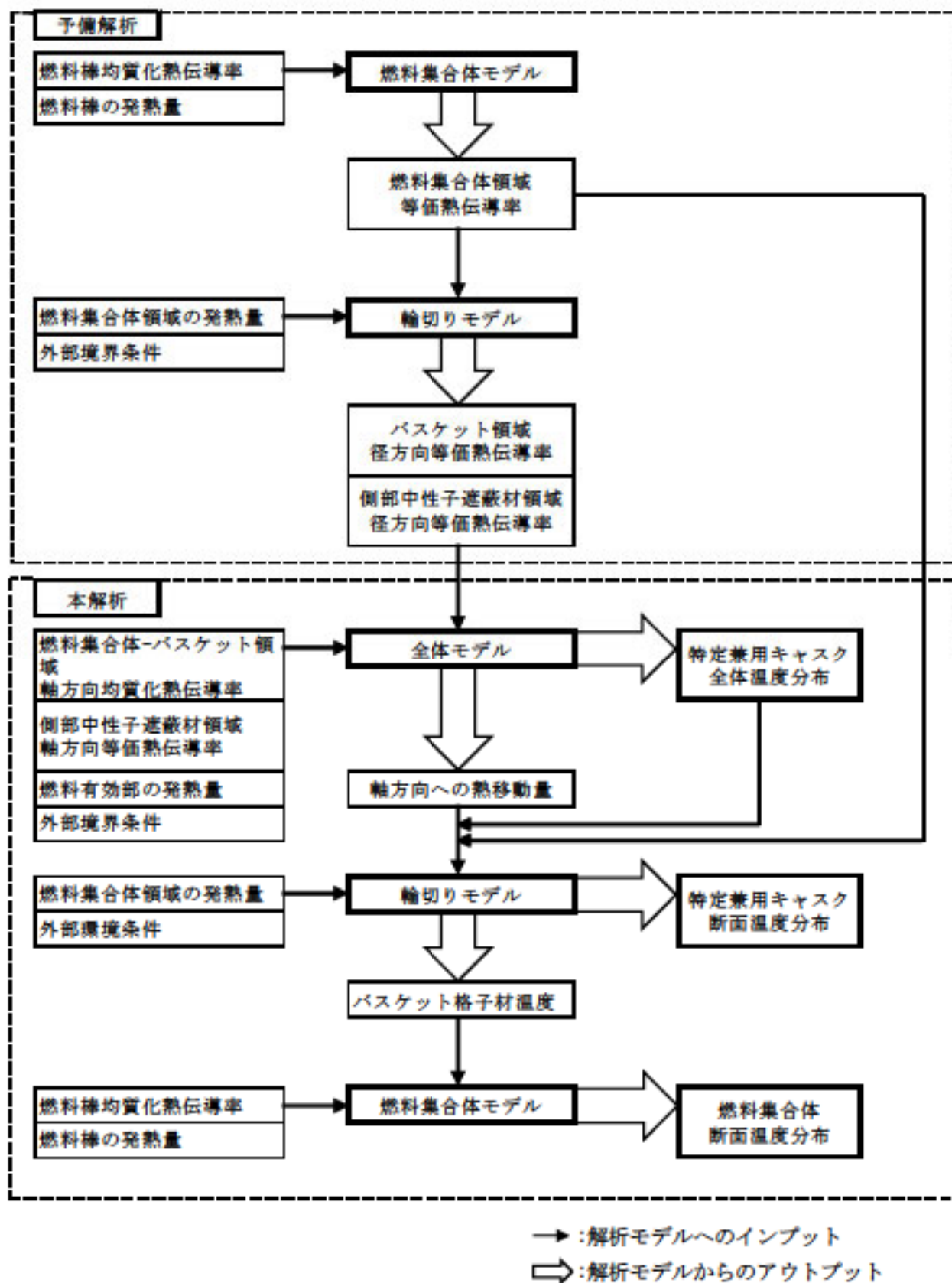
部位	軸方向への熱移動量(kW) (注1)
中央部に収納される使用済燃料集合体(12体)	
外周部に収納される使用済燃料集合体(14体)	
胴	
伝熱フィン、中性子遮蔽材(側部)	
外筒	

(注1) 輪切りモデルの評価対象断面であるPF最大領域 [] (mm) の熱移動量を燃料有効長 [] (mm) 当たりに換算した値

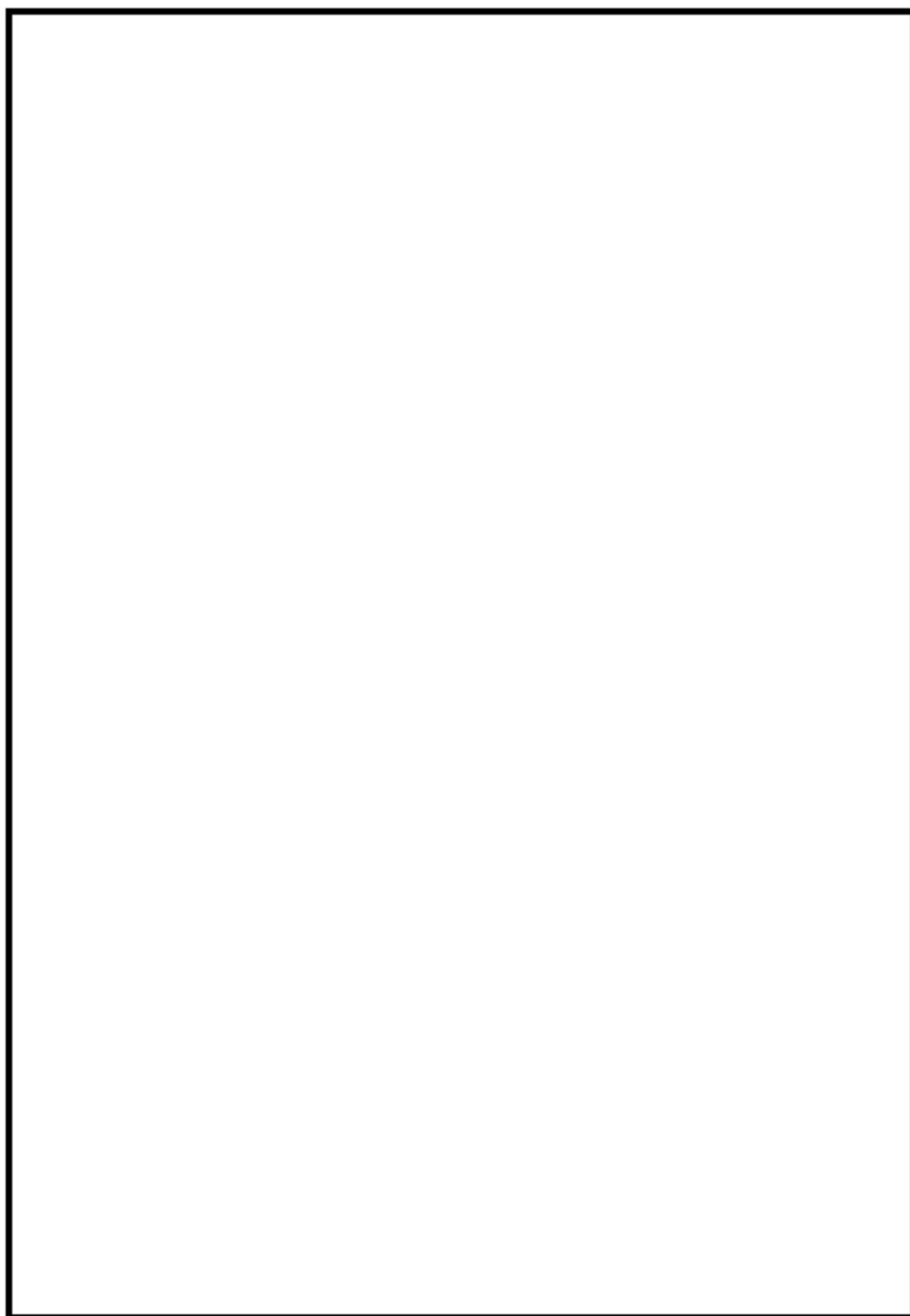


別紙1-1図 伝熱形態図

別紙1-10



別紙1-2図 除熱解析モデルの入出力フロー図

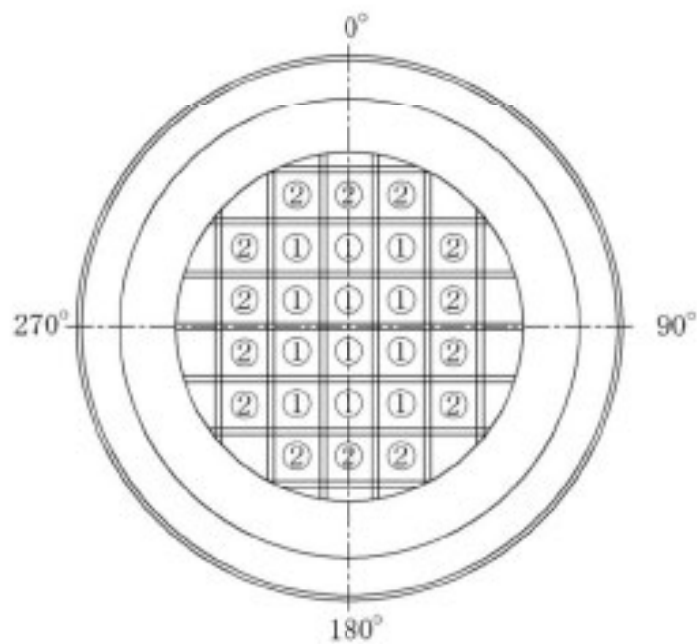


別紙1-3図 全体モデル形状図

別紙1-12

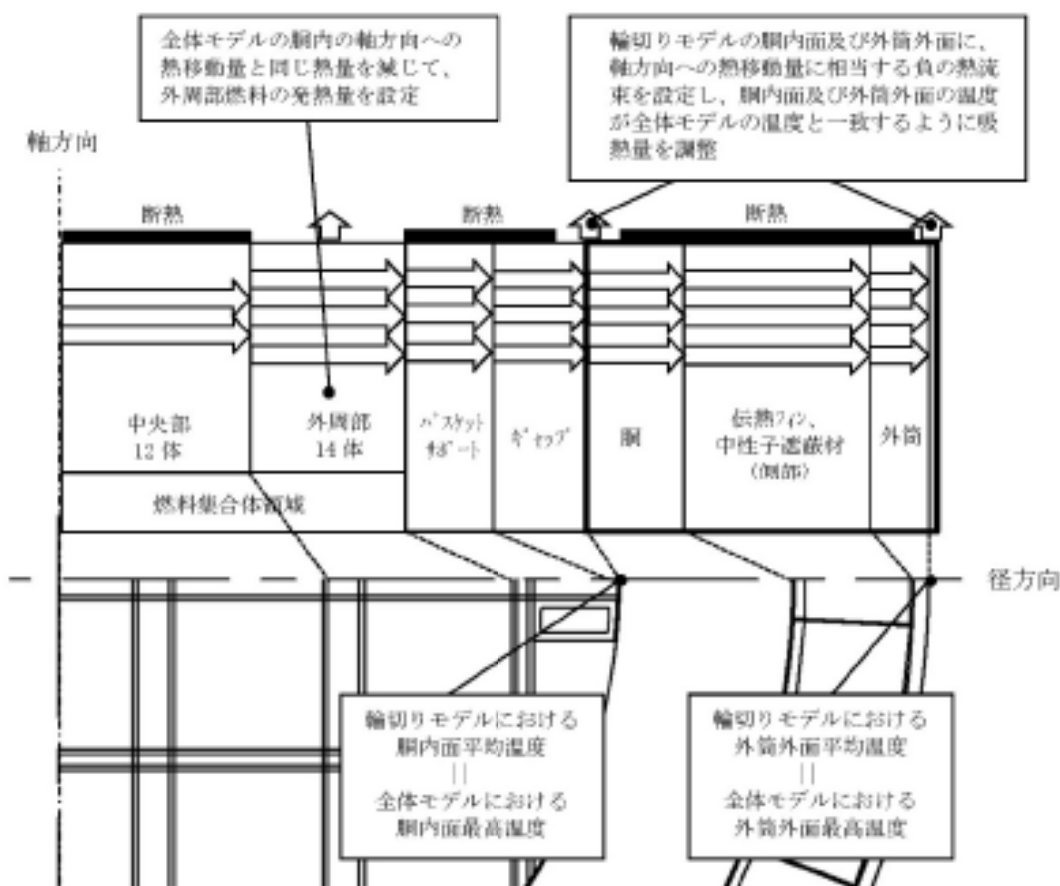


別紙1-4図 輪切りモデル形状図

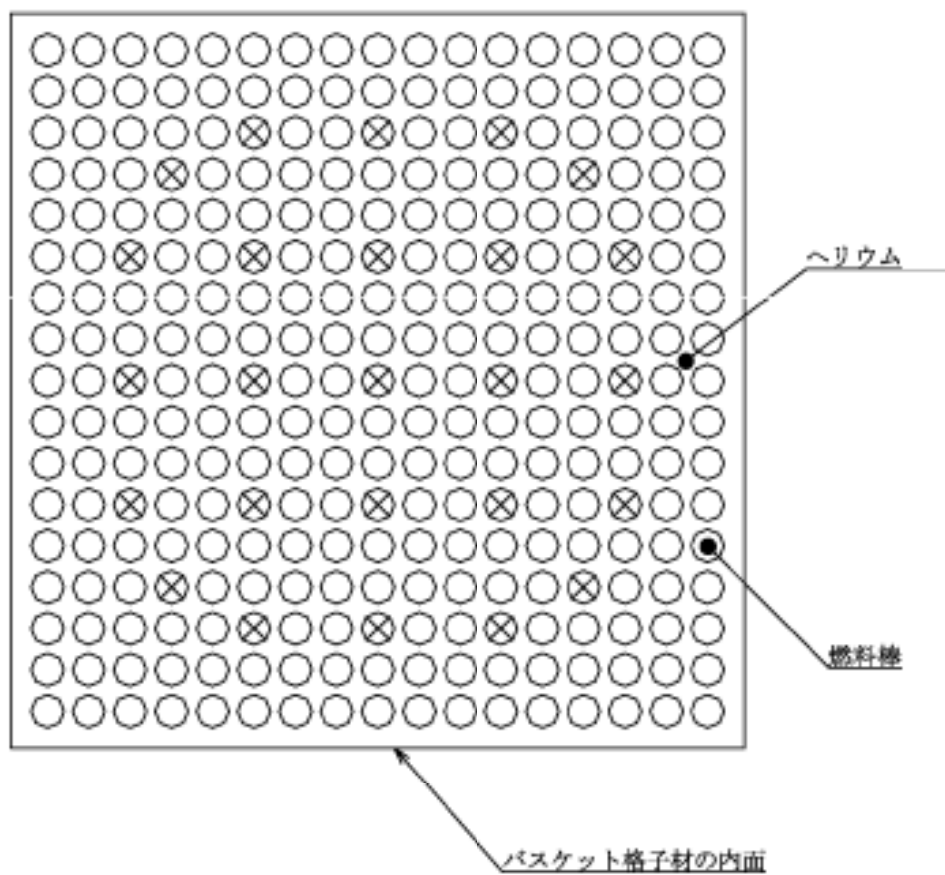


- ①：最高燃焼度に相当する発熱量
- ②：合計発熱量が、設計発熱量(平均燃焼度に相当する発熱量(26体分))となるように、最高燃焼度燃料(①12体分)の発熱量を差し引いた発熱量。ただし、軸方向への熱の移動を考慮する。

別紙1-5図 使用済燃料集合体の収納配置



別紙1-6図 輪切りモデルの軸方向熱移動モデル化概念図



⊗ : 制御棒案内シンプル等であり、発熱はない

別紙1-7図 燃料集合体モデル形状図

燃料集合体モデル及び輪切りモデルを用いた予備解析について

輪切りモデルの燃料集合体領域に設定する等価熱伝導率は、燃料集合体モデルを用いた予備解析により求められる。また、全体モデルの燃料集合体-バスケット領域及び側部中性子遮蔽材領域に設定する等価熱伝導率は、輪切りモデルを用いた予備解析により求められる。

各等価熱伝導率の算出方法を以下に示す。

1. 輪切りモデルの燃料集合体領域の等価熱伝導率

燃料集合体領域の等価熱伝導率は、燃料モデルを用いた円柱状発熱体の伝熱評価式を基に正方形角柱形状に当てはめた評価式により求められる。

$$\lambda_f = \frac{q_f W^2}{K(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

ここで、

- λ_f : 燃料集合体領域の等価熱伝導率(W/(m·K))
- q_f : 燃料集合体領域の単位体積発熱量(W/m³)
- W : 燃料集合体領域外形寸法(m)
- K : 係数(13.57)⁽³⁾(-)
- T_1 : 燃料集合体領域最高温度(K)
- T_2 : バスケット格子内面温度(K)

燃料集合体モデルで軸方向を断熱条件とし、境界条件であるバスケット格子内面温度を 300K(26.85℃)、400K(126.85℃)、600K(326.85℃)とした 3 ケースの予備解析により T_1 及び T_2 を求め、式(1)から等価熱伝導率 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。

2. 全体モデルの燃料集合体-バスケット領域の等価熱伝導率

(1) 軸直交方向

燃料集合体-バスケット領域の軸直交方向等価熱伝導率は、円柱状発熱体の伝熱評価式⁽⁴⁾により求められる。

$$\lambda_{r1} = \frac{qR^2}{4(T_3 - T_4)} \quad (2)$$

ここで、

- λ_{r1} : 燃料集合体-バスケット領域の軸直交方向等価熱伝導率(W/(m·K))
- q : 単位体積発熱量(W/m³)

- R : 燃料集合体-バスケット領域外半径(m)
- T₃ : 燃料集合体-バスケット領域最高温度(K)
- T₄ : 燃料集合体-バスケット領域外面平均温度(K)

輪切りモデルで軸方向を断熱条件とし、周囲環境温度を-25℃、38℃、100℃とした3ケースの予備解析によりT₃及びT₄を求め、式(2)を用いて等価熱伝導率λ_{r1}を設定する。なお、各ケースで求められるλ_{r1}の代表温度は、T₃とT₄の平均値とする。

(2) 軸方向

燃料集合体-バスケット領域の軸方向等価熱伝導率は、構成部材の体積存在比を考慮して式(3)を用いて設定する。

$$\lambda = \frac{\sum(V_i \cdot \lambda_i)}{V} \quad (3)$$

ここで、

- λ : 燃料集合体-バスケット領域の軸方向等価熱伝導率(W/(m・K))
- V_i : 各構成部材の体積(m³)
- λ_i : 各構成部材の熱伝導率(W/(m・K))
- V : 均質化した領域の体積(m³)

このとき、バスケットの軸方向の材料不連続性を考慮する。上下のバスケット格子材同士は接触するが、製造公差を考慮してギャップが存在すると仮定してバスケット格子材の軸方向熱伝導率を与える。バスケットサポートについても同様に計算する。

3. 全体モデルの側部中性子遮蔽材領域の等価熱伝導率

側部中性子遮蔽材領域の軸直交方向の等価熱伝導率は、円管の熱通過の評価式⁽⁴⁾により求められる。

$$\lambda_{r2} = \frac{\ln(R_3/R_2)}{a} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{K} - \frac{\ln(R_2/R_1)}{\lambda_1} - \frac{\ln(R_4/R_3)}{\lambda_2}$$

$$K = \frac{Q}{2\pi(T_5 - T_6)}$$

ここで、

- λ_{r2} : 側部中性子遮蔽材領域の軸直交方向等価熱伝導率(W/(m・K))
- Q : 軸方向単位長さ当たりの発熱量(W/m)
- T₅ : 胴内面平均温度(K)

T_6	: 外筒外面平均温度 (K)
λ_1	: T_5 における胴の熱伝導率 (W/(m·K))
λ_2	: T_6 における外筒の熱伝導率 (W/(m·K))
R_1	: 胴内面の半径 (m)
R_2	: 胴外面の半径 (m)
R_3	: 外筒内面の半径 (m)
R_4	: 外筒外面の半径 (m)

輪切りモデルで軸方向を断熱条件とし、周囲環境温度を -25°C 、 38°C 、 100°C とした3ケースの予備解析により T_5 及び T_6 を算定し、式(4)から等価熱伝導率 λ_{e2} を設定する。なお、各ケースで求められる λ_{e2} の代表温度は、 T_5 と T_6 の平均値とする。

4. 燃料集合体モデルの燃料棒領域の等価熱伝導率

燃料集合体モデルは、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、燃料被覆管の温度を評価するためのモデルである。燃料棒は正八角形でモデル化し、断面積等価となるように寸法を設定する。

燃料棒の熱伝導率は、二酸化ウラン、ヘリウム及びジルカロイの体積存在比を考慮して式(3)により均質化した値を設定する。

発熱条件は、最高燃焼度燃料の PF 最大領域の発熱量に相当する発熱密度を設定する。

境界条件は、輪切りモデル解析で最高温度となるバスケット格子内面の温度を設定する。また、伝熱形態として伝導及び放射を考慮し、軸方向への伝熱は無視し断熱とする。

塗装の放射率の設定根拠

別紙1-3表に示す各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。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表のうち、塗装の放射率0.8が設定されている構成部材は、胴(外表面)、一次蓋(外表面)、二次蓋(外表面)、外筒(外表面)、及び底板(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2-1表に示す。なお、実測値はウレタン樹脂系塗料(白)の値である。

放射率0.8は実測値(□)より小さいことから、TK-26型の内部の温度がより高く評価される。したがって、設定は妥当である。

別添2-1表 材料の放射率

構成部材	仕様	放射率		
		文献値	解析入力値	実測値
胴(外表面) 外筒(外表面) 一次蓋(外表面) 二次蓋(外表面) 底板(外表面)	塗装	0.7~0.9 ^(注1)	0.8	□ ^(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

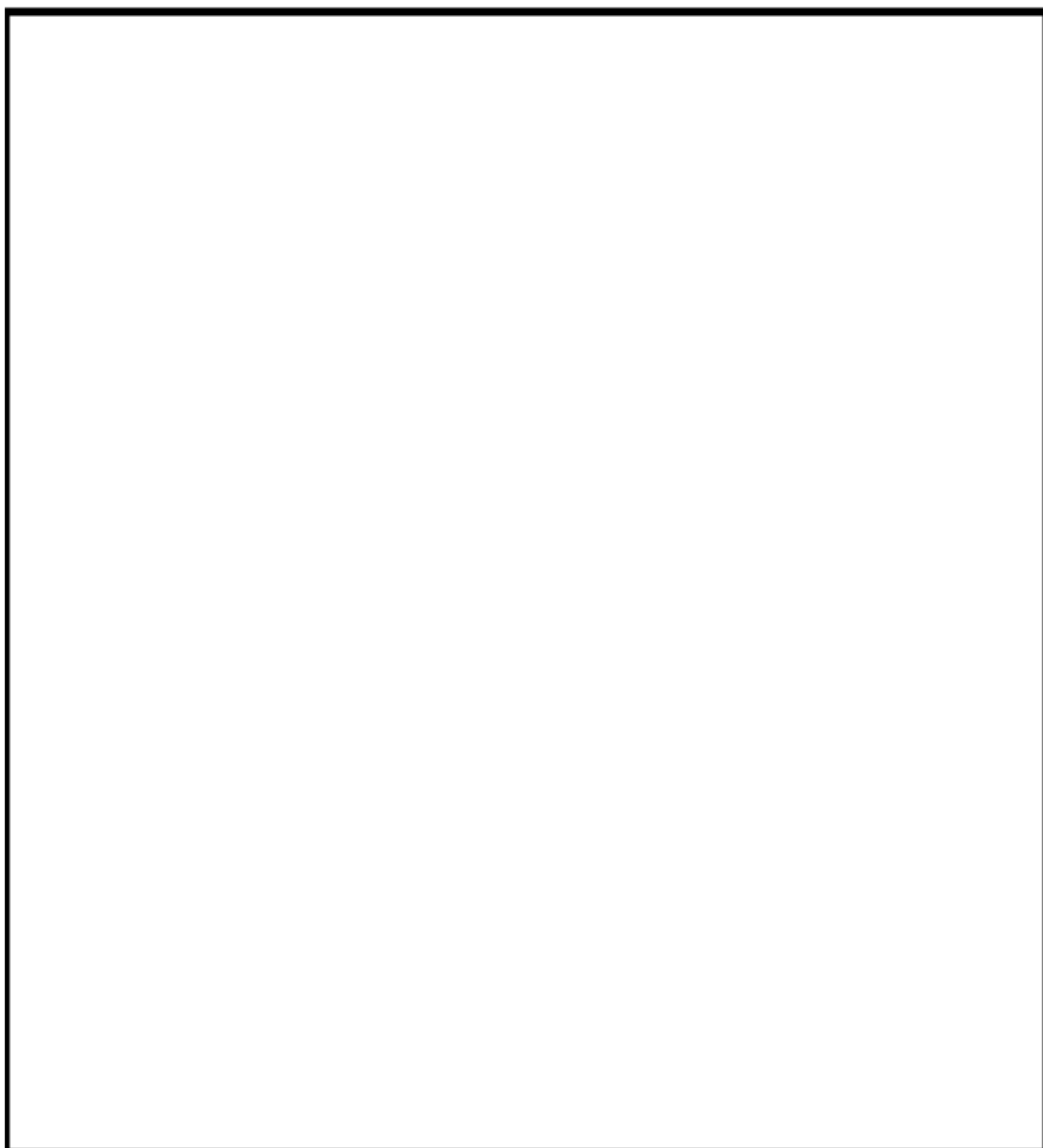
(注2) ウレタン樹脂系塗料(白)に対して3回測定した実測値

解析モデルと実形状の比較

TK-26型の除熱解析では、本補足説明資料の図4に示す全体モデル、図6に示す輪切りモデルを用いている。別添3-1図及び別添3-2図に解析モデルと実形状の図を比較して示す。解析モデルは、実形状を適切に考慮したモデル化を行っている。



別添3-1図 解析モデル（全体モデル）と実形状（縦断面）



1

別添3-2図 解析モデル（輪切りモデル）と実形状（横断面）

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関す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 設計基準値に関する参考文献の記載内容(1/2)

参考文献		
番号	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、「使用済燃料貯蔵施設規格金属キャスク構造規格(2007年版)(JSM E S FA1-2007)」、(2007)	炭素鋼は-30℃～350℃の温度範囲において、ステンレス鋼は-30℃～425℃の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は-30℃～300℃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設計用強度と物性値が規定されている。以下に主な部材の材質を示す。 <ul style="list-style-type: none"> • GLF1又はGLF1相当材(SA-350M Gr. LF1) (胴、底板、一次蓋、二次蓋) [炭素鋼] • SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、上下部端板) [炭素鋼] • SUS304 (バスケット補助遮蔽プレート) [ステンレス鋼] • SNE23-1 (一次蓋ボルト、二次蓋ボルト) [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]
2	(一社)日本ゴム協会編、「新版 ゴム技術の基礎 改訂版」、(2014)	TR-26型に使用している中性子遮蔽材の主材であるエチレンプロピレン系ゴムの使用可能温度の上限150℃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)	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(ランソン・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。

別添2-1表 設計基準値に関する参考文献の記載内容(2/2)

参考文献		
番号	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
4	トランスニユークリア(株)、(株)神戸製鋼所、「補足説明資料1-7 バスケッット用ほう素添加アルミニウム合金(1B-A3J04-0)について」、18-180-I-017 Rev.3、(2021)	TK-26型のバスケット格子材に用いるほう素添加アルミニウム合金(1B-A3J04-0)の許容応力及び物性値が、-40℃～250℃の温度範囲において規定されている。一般的にアルミニウム合金は熱による強度低下を考慮する必要があるが、本ほう素添加アルミニウム合金は、設計貯蔵期間60年間の熱ばく露条件を模擬した条件での材料試験により材料特性を適切に評価して許容応力が設定されている。
5	(一財)日本規格協会、「圧力容器の設計 JIS B 8267:2015」、(2015)	40℃以下～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。
6	総合資源エネルギー調査会 原子力安全 保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」、(2009)	<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4被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することが確認されている。設計貯蔵期間中には温度を420℃以下に制限することによりクリープひずみが1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射硬化が徐々に回復する。約300℃では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を275℃以下、周方向応力を100MPa以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。

貯蔵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、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条の規定が参照され、「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。TK-26型の除熱設計は、貯蔵建屋内でのTK-26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、TK-26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「TK-26型周囲温度が貯蔵建屋内で50℃以下であること。」の確認を行う。

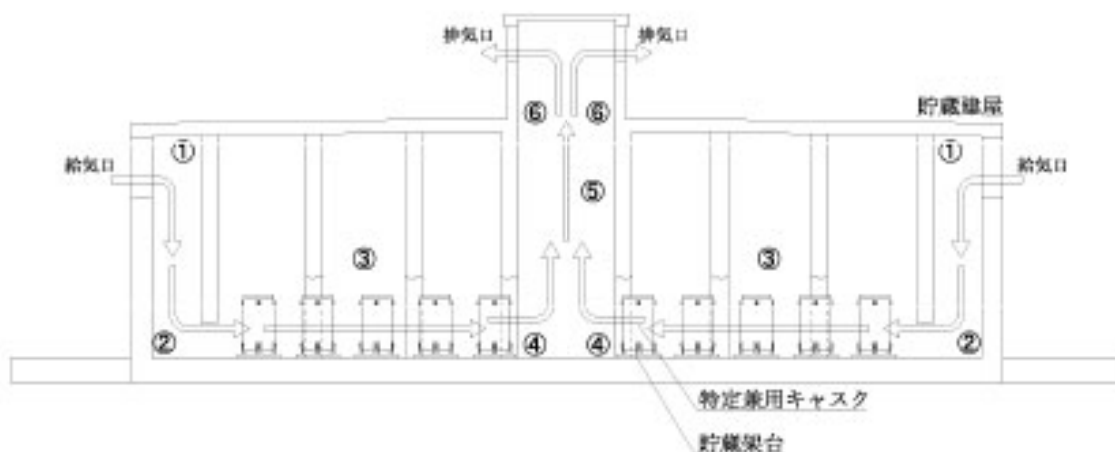
なお、TK-26型の除熱評価と貯蔵建屋の除熱評価相互の関係は本書本文の図2のとおりである。

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集合体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により評価される。

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。

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

ここで、

- H_{th} : 熱ドラフト力 (Pa)
- p_{in} : 外気の密度 (kg/m³)
- p_{out} : 排気の密度 (kg/m³)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- 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。

$$\Delta P = \sum_l \frac{\xi_l W_l^2}{2\rho_l A_l^2}$$

$$W_l = \frac{qn}{C_p(T_{out} - T_{in})}$$

ここで、

- ΔP : 圧力損失(Pa)
- ξ_l : 圧力損失係数(-)
- W_l : 通過風量(質量流量)(kg/s)
- ρ_l : 通風路の空気密度(kg/m³)
- A_l : 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・℃))
- T_{out} : 排気温度(℃)
- T_{in} : 給気温度(℃)

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)	17.2kW/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℃	設置する貯蔵建屋の外気温等により設定される。
目標排気温度(T_{out})	貯蔵建屋：50℃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TK-26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

TK-26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TK-26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、TK-26型近傍で行う作業を特段要しない設計としている。

TK-26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TK-26型の取扱いにおいて、人がTK-26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. TK-26型の外面温度

貯蔵建屋内貯蔵におけるTK-26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 TK-26型外面の温度

TK-26型の外面 ^(注1)	最高温度(℃)
外筒外面	125
底板外面	122

(注1) TK-26型の外面のうち、人が接触し得る表面。

3. TK-26型の周囲温度

TK-26型の周囲温度は、50℃(貯蔵建屋内貯蔵)として設定している。

4. 貯蔵施設におけるTK-26型の取扱いフロー

TK-26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TK-26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TK-26型の取扱いに対する安全性評価

3. に示したとおり、TK-26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TK-26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、TK-26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、TK-26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、蓋開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 TK-26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TK-26型への接触有無
1	TK-26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、TK-26型外面に触れることなく測定が可能。

使用する解析コードについて

TK-26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。

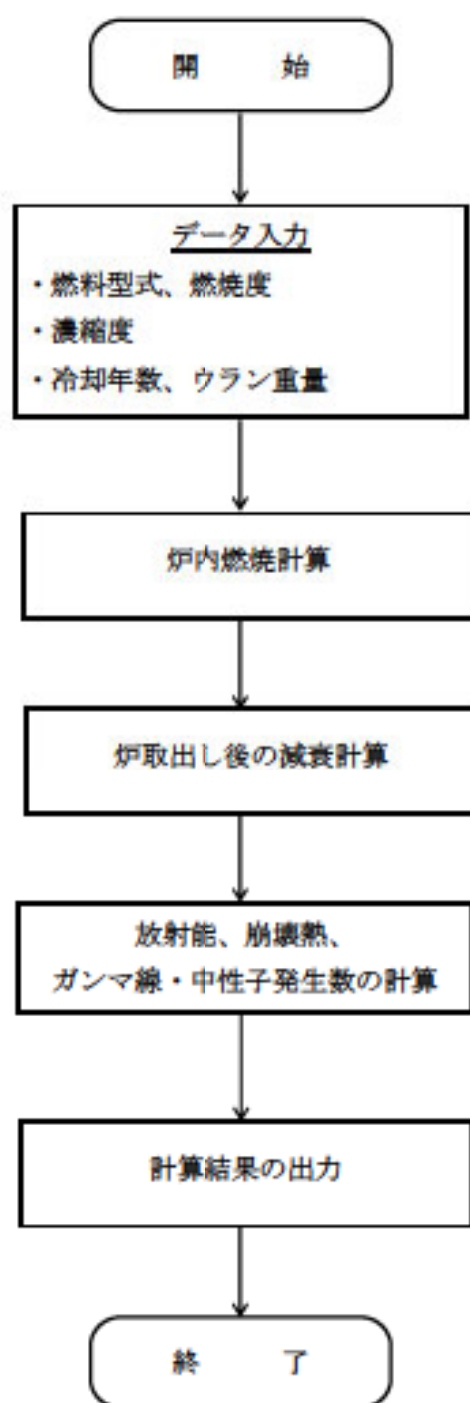
(3) 解析フロー

ORIGEN2コードの計算フローを別紙5-1図に示す。

(4) 使用実績および検証

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

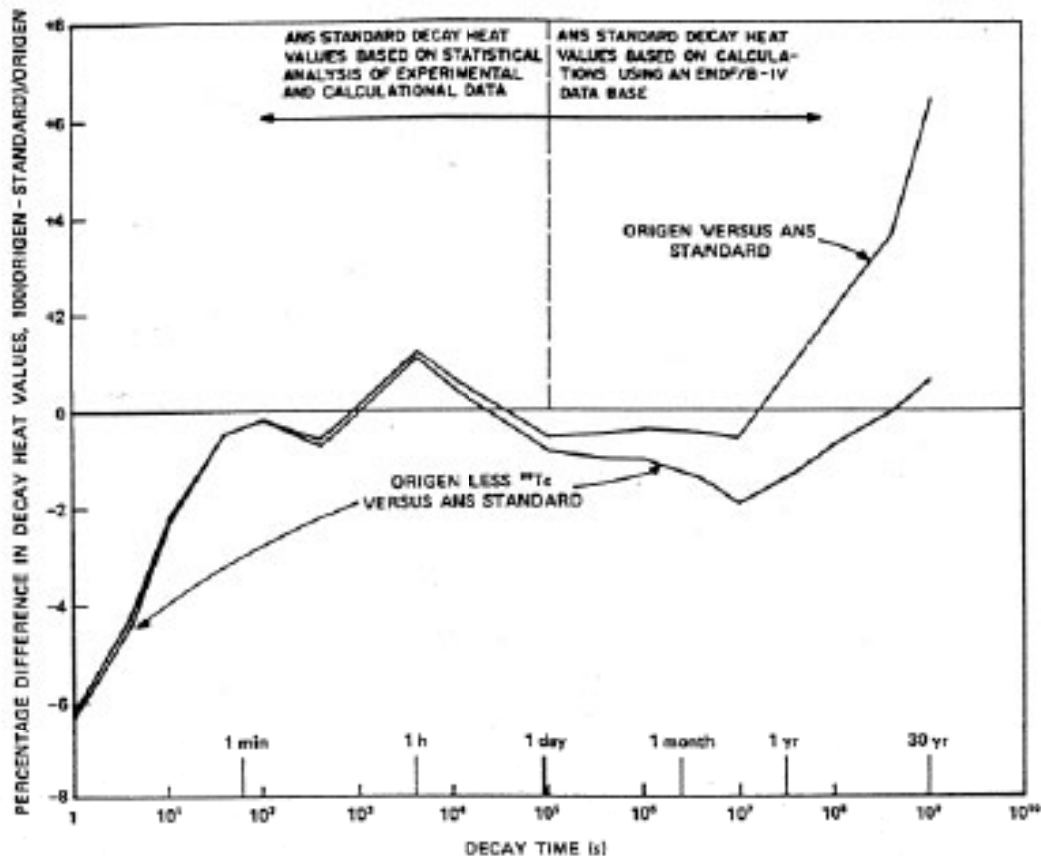


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{15} -s irradiation of ^{235}U .

(注)ORIGEN2の崩壊熱は、ANS標準崩壊熱と比較して、15年以上(TK-26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

別紙5-3

2. ABAQUSコード

(1) 概要

ABAQUSコード⁽³⁾は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在、Dassault Systemes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。熱伝達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

代表的な計算フローを別紙5-3図に示す。

(4) 使用実績および検証

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。

(5) TK-26型への適用性

TK-26型と上記の定常伝熱試験で用いた供試体(以下「定常伝熱試験用供試体」という。)の主要な構造及び収納物仕様の比較を別紙5-1表に示す。また、定常伝熱試験用供試体の構造を別紙5-5図に示す。さらに、TK-26型と定常伝熱試験用供試体の主要な伝熱形態の比較を別紙5-2表及び別紙5-6図に示す。

TK-26型と定常伝熱試験用供試体の主要な構造及び収納物仕様は、以下に示すとお

り同等である。

- ・乾式容器であり本体胴内部にはヘリウムが充填されている。
- ・収納燃料はPWR用燃料であり外径が同等である。
- ・本体胴が円筒容器であり外径が同等である。
- ・蓋が二重構造である。
- ・中性子遮蔽材が側部・蓋部・底部に設けられており、側部中性子遮蔽材部には伝熱用のフィンが設けられている。

TK-26型と定常伝熱試験用供試体の主要な伝熱形態は、構成部材（鋼材）の熱伝導、内部気体（ヘリウム）による熱伝導、構成部材間の放射、周囲空気への放射及び対流であり、同じである。

材質の違い及び構成部材間の隙間位置の違い等はあるが、TK-26型の伝熱評価に用いられる熱伝導、対流及び放射の基礎式は、以下に示すとおり、定常伝熱試験用供試体と同じである。

- ・熱伝導の基礎式（平板の場合）

$$q = k(T_1 - T_2)/d$$

- ・対流の基礎式

$$q = h(T_1 - T_2)$$

- ・放射の基礎式

$$q = \{f/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)\}\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

ここで、

q : 熱流束 (W/m²)

k : 熱伝導率 (W/m/K)

T₁, T₂ : 温度 (K)

d : 厚さ (m)

h : 熱伝達率 (W/m²/K)

f : 形態係数 (-)

ε₁, ε₂ : 放射率 (-)


σ : ステファンボルツマン定数

このため、定常伝熱試験用供試体の伝熱解析に使用された熱伝導率、熱伝達率及び放射率をTK-26型の使用材質を踏まえてそれぞれ適切な値に変更することにより、

TK-26型にABAQUSコードを適用可能である。

なお、TK-26型の伝熱解析に使用した熱伝導率、熱伝達率及び放射率はそれぞれ別紙1-1表、別紙1-2表及び別紙1-3表に示すとおりであり、根拠を明確にした適切な値である。基本的に既に型式証明を取得したキャスクでも使用実績のある平均的な値を使用しているが、ほう素添加アルミニウム合金の放射率及び塗装面の放射率などは各部温度が保守的になるように設定している。

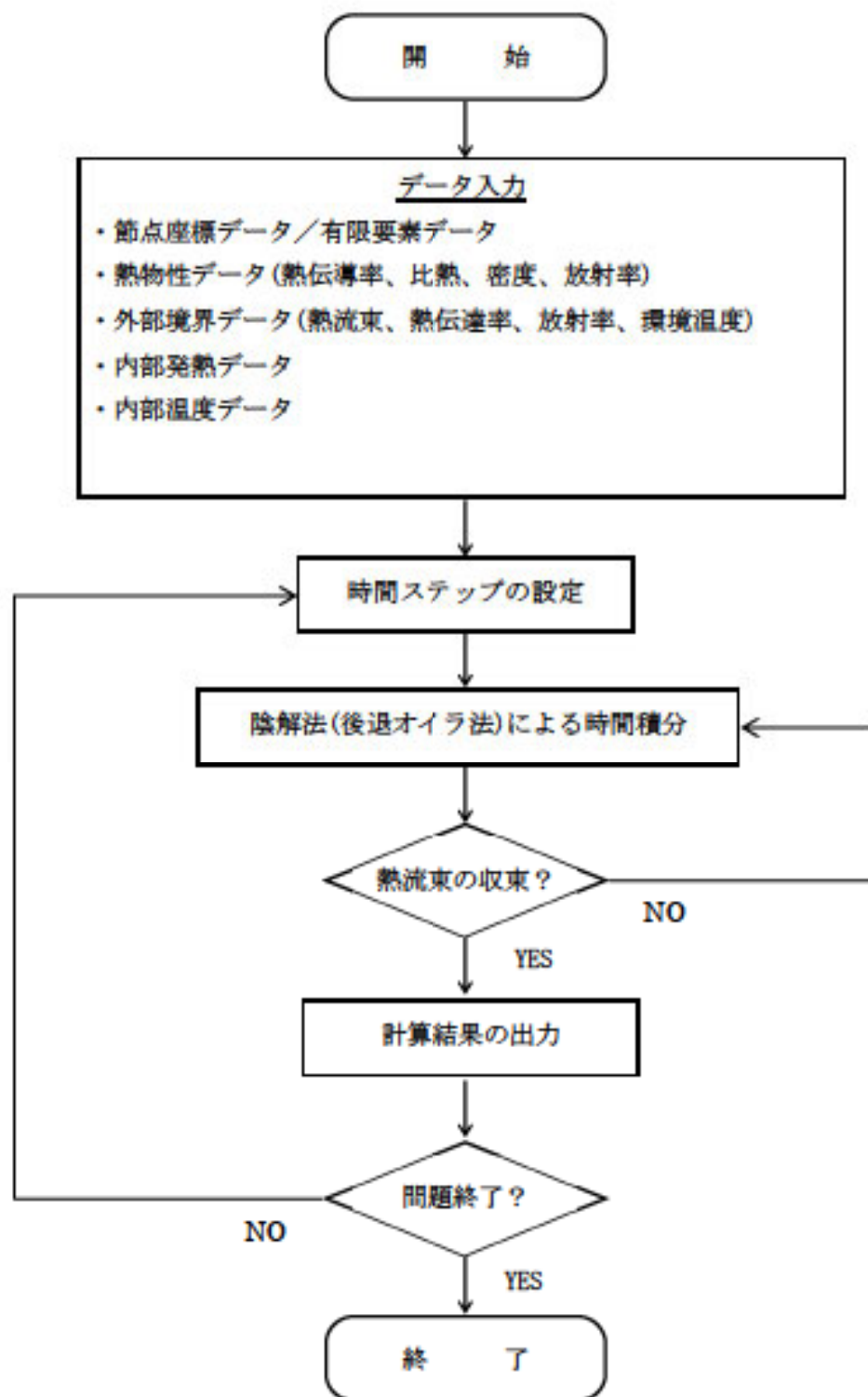
別紙5-1表 TK-26型と定常伝熱試験用供試体の主要な構造及び収納物仕様の比較

項目	TK-26型	定常伝熱試験用供試体 (構造は別紙5-5図参照)
本体胴内雰囲気	乾式（ヘリウム充填）	乾式（ヘリウム充填）
収納燃料型式	PWR用燃料 (17×17型、15×15型)	PWR用燃料 (17×17型)
収納体数（体）	24	21
崩壊熱量（kW）		23
外径（mm）	2630	2400
容器の材質	炭素鋼	ステンレス鋼
バスケットの材質	ほう素添加アルミニウム合金	ステンレス鋼

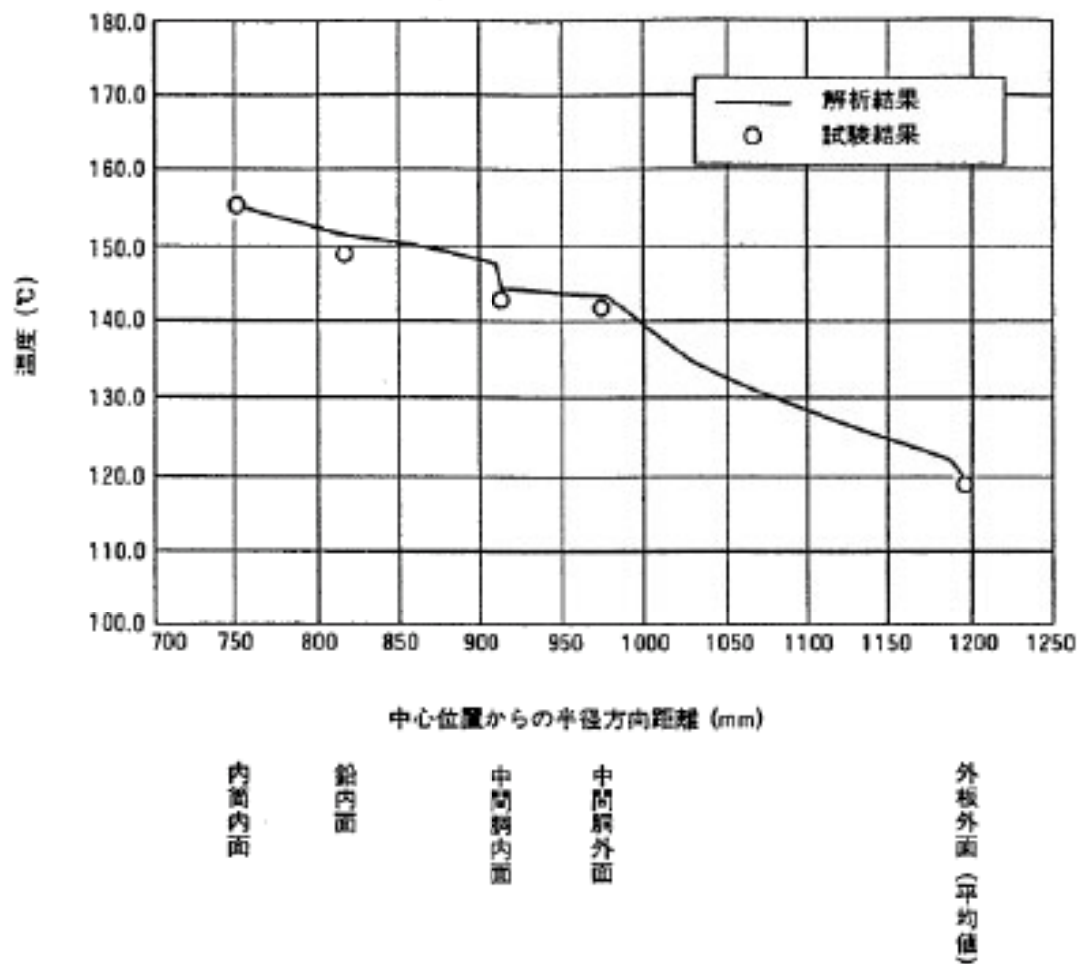
別紙5-2表 TK-26型と定常伝熱試験用供試体の伝熱形態の比較

TK-26型		定常伝熱試験用供試体	
伝熱経路	伝熱形態	伝熱経路	伝熱形態
燃料集合体 →バスケット	伝導（ヘリウム） 及び放射	燃料集合体 →バスケット	伝導（ヘリウム） 及び放射
バスケット	伝導	バスケット	伝導
バスケット外側部 →本体胴内面	伝導（ヘリウム） 及び放射	バスケット外側部 →内筒内面 （隙間）	伝導（ヘリウム） 及び放射
本体胴	伝導	内筒、 γ 線遮蔽体 ^(注)	伝導
		γ 線遮蔽体 →中間胴（隙間）	伝導（空気）及び 放射
		中間胴	伝導
伝熱フィン	伝導	内部フィン	伝導
外筒	伝導	外板	伝導
外筒外面 →周囲の空気、 貯蔵建屋	対流、放射	外板外面 →周囲の空気、 貯蔵建屋	対流、放射

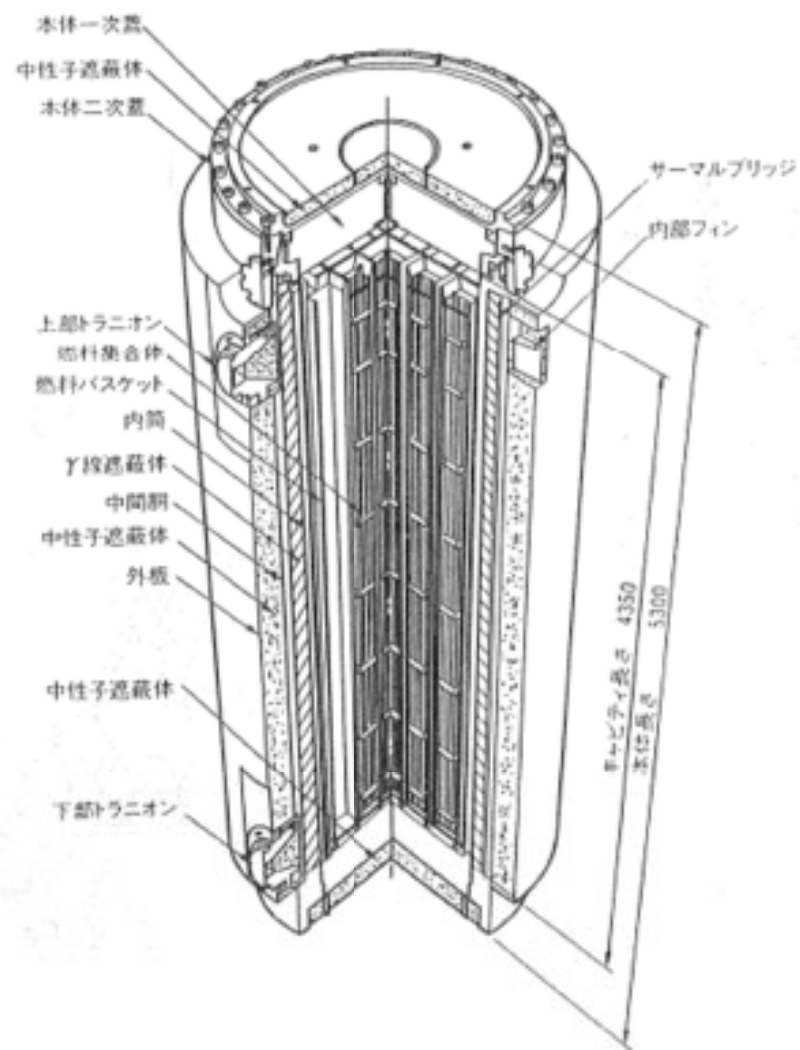
(注)内筒と γ 線遮蔽体の隙間は考慮していない。



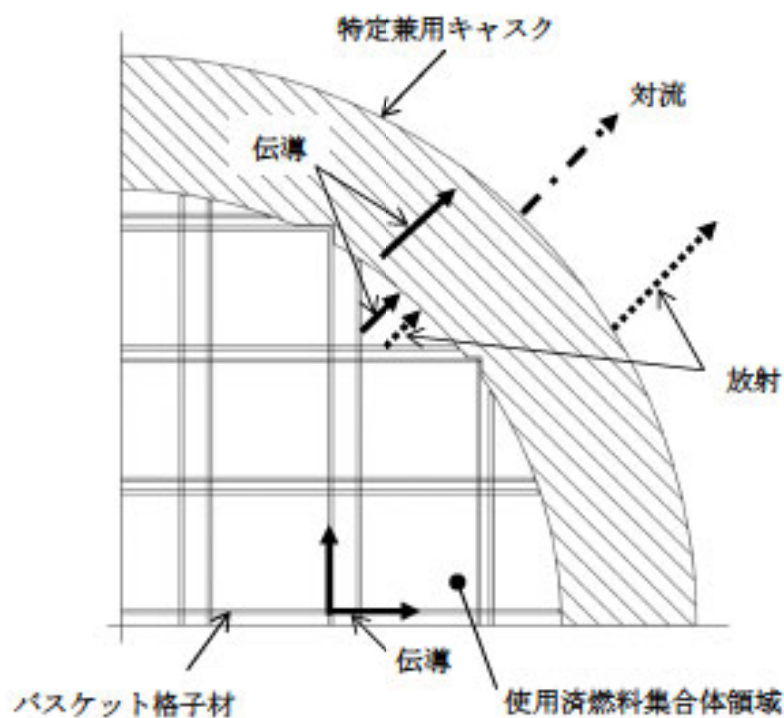
別紙5-3図 ABAQUSコードの計算フロー図



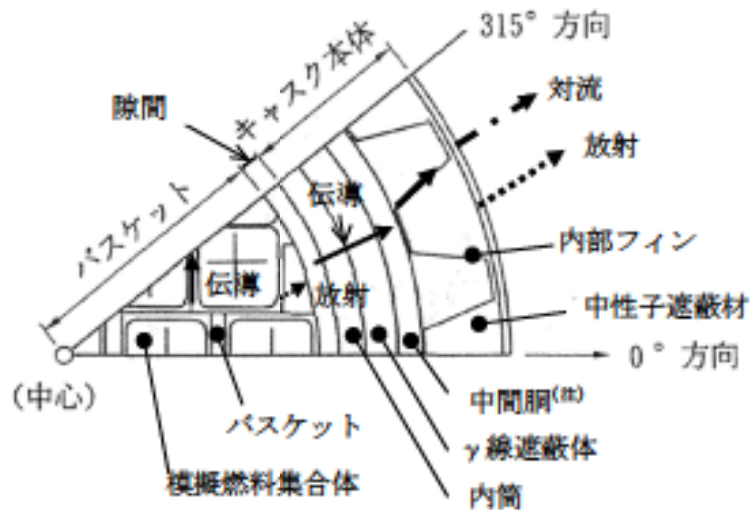
別紙5-4図 ABAQUSコードの検証例
 (定常伝熱試験の解析結果と試験結果の比較)⁽⁴⁾



別紙5-5図 定常伝熱試験用供試体⁽⁴⁾



(a) TK-26型



(注)中間隙とγ線遮蔽体間の隙間は伝導と放射

(b) 定常伝熱試験用供試体

別紙5-6図 TK-26型と定常伝熱試験用供試体の伝熱形態の比較

3. 参考文献

- (1) A. G. Croff, " A User' s Manual for the ORIGEN2 Computer code" , ORNL/TM-7175, Oak Ridge National Laboratory, (1980)
- (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 Systemes, "ABAQUS 2016 Analysis User' s Guide" , (2016)
- (4) 山川秀次、五味義雄、尾崎幸男、小崎明朝、「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」、(一財)電力中央研究所、(1993)