

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
(HDP-69BCH(B)型の臨界防止機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合
5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の場合
6. 参考文献

【参考資料】

- 参考 1 輸送時の臨界評価

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型の臨界防止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2項1号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第1項

- ・第16条第2項第1号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第5項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という。）第3条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3条第1項1号

使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクは単体として、使用済燃料を収納した条件下で、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する設計であること。

・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項2号

金属キャスク内部のバスケット（金属キャスク内に収納される使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するための構造物をいう。以下同じ。）が臨界防止機能の一部を構成する場合には、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計であること。

・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項4号

臨界評価において、以下の事項を含め、未臨界性に有意な影響を与える因子が考慮されていること

① 配置・形状

貯蔵エリア内の金属キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において適切な安全裕度を考慮すること。

金属キャスクが滑動する可能性がある場合には、滑動等による金属キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮されていること。

事故時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形（損傷）する可能性がある場合には、臨界解析においてもこの変形（損傷）が適切に考慮されていること。

② 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下の事項等が適切な安全裕度をもって考慮されていること。

a. 製造公差（濃度、非均等性、寸法等）

b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

③ 減速材（水）の影響

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たり当該使用済燃料が冠水することが、設計上適切に考慮されていること。

④ 燃焼度クレジット

燃焼度クレジット（臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。）を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。

a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度

b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理

・ 貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項五号

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、臨界評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

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. 適合性について

設置（変更）許可に係る審査で確認される兼用キャスクの有する 4 つの安全機能（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本型式証明申請で確認する。HDP-69BCH(B)型の臨界防止機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

① 配置・形状

貯蔵エリア内の金属キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において適切な安全裕度を考慮すること。

金属キャスクが滑動する可能性がある場合には、滑動等による金属キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮されていること。

事故時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形（損傷）する可能性がある場合には、臨界解析においてもこの変形（損傷）が適切に考慮されていること。

HDP-69BCH(B)型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び HDP-69BCH(B)型に使用済燃料を収納する際の冠水状態において、技術的に想定されるいかなる場合でも、臨界を防止する設計とするため、乾式キャスクの判定基準^{*1}である中性子実効増倍率が 0.95 を上回らないことを基準とする。

HDP-69BCH(B)型は、使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するためのバスケット格子構造、及びバスケットプレートに添加された中性子吸収材により、臨界に達することを防止する設計とする（図 2.4.1-1 のとおり）。

バスケットプレートは、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するために必要な構造健全性を保つ設計とする。詳細は、本文 2.5 の「HDP-69BCH(B)型の長期健全性について」に示す。

なお、HDP-69BCH(B)型が無限に並ぶ配列と等価となるように、解析モデルを完全反射境界として解析しており、滑動等による兼用キャスクの配置が変化しても中性子実効増倍率の増加はない。

HDP-69BCH(B)型は、兼用キャスクを基礎等に固定する方法では、通常貯蔵時において、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。一方、緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法では、バスケットの塑性変形が生じても未臨界が維持される設計とする。

注記*1：原子力安全委員会内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について

（平成 4 年 8 月 27 日原子力安全委員会了承）

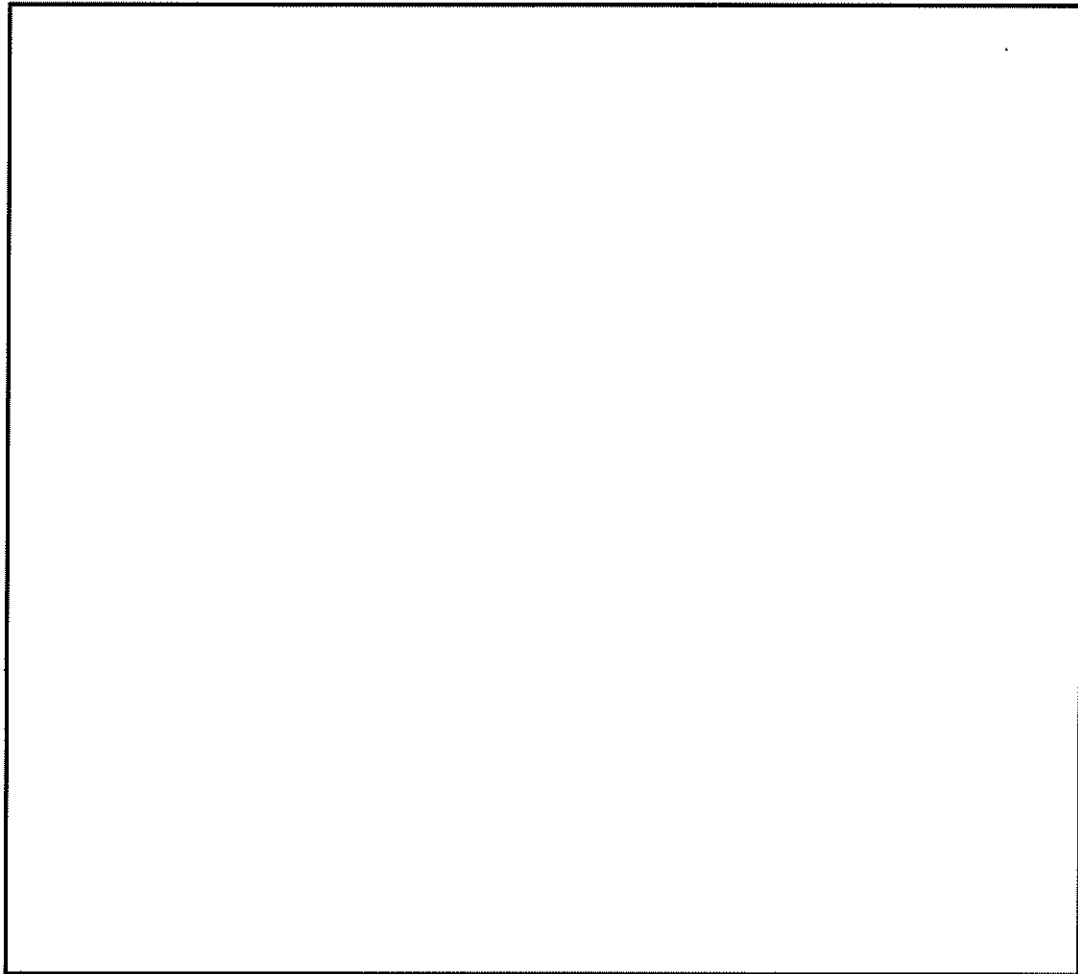


図 2.4.1-1 HDP-69BCH(B)型のバスケット構造

内は商業機密のため、非公開とします。

② 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下の事項等が適切な安全裕度をもって考慮されていること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

③ 減速材（水）の影響

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たり当該使用済燃料が冠水することが、設計上適切に考慮されていること。

④ 燃焼度クレジット

燃焼度クレジット（臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。）を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。

乾燥時臨界解析用の使用済燃料の燃料仕様を表2.4.1-1に、冠水時臨界解析用の使用済燃料の燃料仕様を表2.4.1-2に、解析条件及び設定根拠を表2.4.1-3に、兼用キャスクの臨界解析フロー図を図2.4.1-2に示す。

表2.4.1-3に示すように、中性子吸収材が添加されたバスケットプレートは製造公差を考慮している。また、本文2.5に示すように、設計貯蔵期間60年におけるバスケットプレートに含まれるほう素の減損割合は無視できるほど小さく、臨界解析ではほう素の減損は考慮しない。

乾燥時の臨界解析モデルを図2.4.1-3及び図2.4.1-4に、BWR燃料の反応度特性を図2.4.1-5に、冠水時の臨界解析モデルを図2.4.1-6及び図2.4.1-7に、兼用キャスク内外の水密度と中性子実効増倍率の関係を図2.4.1-8に示す。

貯蔵施設での貯蔵中において、技術的に想定されるいかなる場合にも臨界に達することを防止する設計とする。なお、乾燥状態の臨界解析に加え、兼用キャスク内は使用済燃料を収納する際に冠水状態となることを考慮し、水密度範囲0.0～1.0 g/cm³で解析した結果（図2.4.1-8(1/3)）、中性子実効増倍率は水密度1.0g/cm³で最も大きくなる。なお、周囲の水密度を変化させた解析の結果（図2.4.1-8(2/3)、図2.4.1-8(3/3)）、中性子実効増倍率は周囲に水がない場合に包含できる。

本文2.2のHDP-69BCH(B)型の収納条件に記載しているとおり、臨界評価では、代表として最も反応度の高い高燃焼度8×8燃料が69体収納された状態とし、乾燥状態の解析では初期濃縮度3.66 wt%で評価を実施する。冠水状態の解析では、ガドリニアによる燃焼初期の反応度抑制効果を考慮して（図2.4.1-5）、濃縮度の異なる2種類の燃料棒を用い、炉心装荷冷温状態での燃料の無限増倍率が1.3となる燃料モデル（モデルバンドル）を仮定する。なお、燃焼度クレジットは採用しない。

臨界解析では、兼用キャスク及び燃料集合体を三次元でモデル化し、解析コードとしてSCALEコードシステムを用いる。

解析コードがモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、解析コードの精度等を考慮して、中性子実効増倍率 (k_{eff}) の平均値に統計誤差 (σ) の3倍 (3σ) を加味した値が0.95以下 ($k_{\text{eff}} + 3\sigma \leq 0.95$) であることとする。

本評価においては、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

- 代表として最も反応度の高い高燃焼度8×8燃料が69体収納された条件とする。兼用キャスクに収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、乾燥状態の解析では、燃焼度0GWd/tの減損していない新燃料のウラン濃縮度3.66 wt%とする。
- 冠水状態では、保守的に炉心装荷状態での無限増倍率が1.3となる燃料モデルを用いる。

・ モデル化の保守性

- 乾燥状態の解析では、兼用キャスクが無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、兼用キャスクの臨界防止上の配置制限は必要なく、兼用キャスク相互の中性子干渉を包含する評価となる。また、冠水状態の解析においても、使用済燃料を収納する際に他の兼用キャスクが冠水状態で隣接する状態も想定し、冠水状態の兼用キャスクが無限に配列した体系とする。
- 兼用キャスクの底面及び二次蓋表面部で完全反射する条件とする。緩衝体及び三次蓋を考慮すると、これらの材料による中性子の減速の効果が大きくなり、使用済燃料以外の領域で吸収される中性子が多くなるため、実効増倍率を小さくする方向に寄与することから、緩衝体及び三次蓋を考慮しない。これにより、兼用キャスク設置時の緩衝体及び三次蓋の装着の有無に臨界防止上の制限は必要ない。
- バスケット格子内で使用済燃料が偏ることにより実行増倍率が変化するため、バスケット内の使用済燃料の配置は実効増倍率が最も大きくなる配置とする。具体的には、外周部及び中心部の使用済燃料共に中心偏向配置とする。これにより、兼用キャスク内の使用済燃料の配置状態に影響する兼用キャスクの設置姿勢（たて置き又はよこ置き）に臨界防止上の制限は必要ない。
- バスケットプレートは表2.4.1-3に示すとおり、ほう素添加量は使用上の下限値とする。
- バスケットプレートは、中性子の吸収が小さくなるように、燃料有効部に相当する部分のみモデル化することとし、それ以外の部分は水又は真空に置換する。

- 兼用キャスク周囲の水の有無の影響については、水密度範囲0.0～1.0 g/cm³で解析した結果（図2.4.1-8）、水密度0.0g/cm³で実効増倍率が最も大きくなることから、兼用キャスク周囲は乾燥状態とする。これにより、兼用キャスク内部が乾燥状態である場合の兼用キャスク周囲の条件に、運用の観点で臨界防止上の制限は必要ない。
- 中性子遮蔽材については、上記の兼用キャスク周囲の水の影響の評価によって、兼用キャスク周囲での中性子の散乱及び減速の効果は、実効増倍率を低減するように働くことが確認されたため、中性子遮蔽材は、水と同様に中性子の散乱及び減速の効果を持ち、かつ中性子吸収の効果も持つことから、無視することとする。

表 2.4.1-1 乾燥時臨界解析用の使用済燃料（高燃焼度 8×8 燃料）の仕様

項目	単位	仕様
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-2 *1
燃料密度	%理論密度	
燃料棒外径	mm	
燃料ペレット直径	mm	
被覆管肉厚	mm	
燃料有効長	mm	
燃料棒配列	—	
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	60
燃料棒ピッチ	mm	
使用済燃料の幅	mm	
濃縮度	wt%	3.66

注記*1：実際の仕様はジルコニウム合金（被覆管はジルカロイ-2、チャンネルボックスはジルカロイ-4又はジルカロイ-2）であるが、臨界解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。

*2：（燃料棒ピッチ）×（燃料棒配列）＝ × (8) = mmを臨界解析上の使用済燃料の幅とした。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.1-2 冠水時臨界解析用の使用済燃料（高燃焼度 8×8 燃料）の仕様

項目	単位	仕様	
燃料材質	—	二酸化ウラン	
被覆管材質	—	ジルカロイ-2 *1	
燃料密度	%理論密度		
燃料棒直径	mm		
燃料ペレット直径	mm		
被覆管肉厚	mm		
燃料有効長	mm		
燃料棒配列	—		8×8
燃料集合体当たり の燃料棒数	本		60
燃料棒ピッチ	mm		
使用済燃料の幅	mm		
濃縮度	wt%	高濃縮度 4.9	
		低濃縮度 2.1	
チャンネルボックス材質	—	ジルカロイ *1	
チャンネルボックス全幅	mm		
チャンネルボックス厚さ	mm		

注記*1：実際の仕様はジルコニウム合金（被覆管はジルカロイ-2、チャンネルボックスはジルカロイ-4又はジルカロイ-2）であるが、臨界解析上は純度 100%のジルコニウムとして扱う。

*2：(燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列) = × (8) = mm を臨界解析上の使用済燃料の幅とした。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.1-3 (1/2) 臨界解析条件及び設定根拠

項目	乾燥時臨界解析	冠水時臨界解析
収納物	濃縮度が高く、燃料ペレットの理論密度や直径が大きく、反応度が最も高い高燃焼度8×8燃料を対象とした。	
濃縮度	ガドリニアの存在を無視し、平均初期濃縮度の最大値である3.66 wt%とした。	炉心装荷冷温状態における無限増倍率が1.3となるモデルバンドルとした。
燃料配置	中性子実効増倍率が最大となる HDP-69BCH (B) 型中心偏向配置とした。	
寸法条件	バスケットプレート板厚:バスケットプレート材に含まれる中性子吸収材(天然ほう素)の量が少なくなり、かつ隣接する使用済燃料までの距離が短くなる板厚最小とした。	
	伝熱プレート板厚:隣接する使用済燃料までの距離が短くなる板厚最小とした。	
	バスケット格子内のり:隣接する使用済燃料までの距離が短くなるバスケット格子内のり最小とした。	
HDP-69BCH (B) 型内雰囲気	雰囲気ガスの中性子吸収効果を見捨てる真空とした。	中性子減速効果が最大となる水密度最大の1.0 g/cm ³ とした。
HDP-69BCH (B) 型外雰囲気	HDP-69BCH (B) 型の周囲における中性子の散乱や減速の効果は中性子実効増倍率を低減するように働くことから、解析モデルを完全反射境界とし、HDP-69BCH (B) 型の外部に漏れ出た中性子が散乱や吸収されることなく反射してHDP-69BCH (B) 型へ戻る真空とした。	
中性子遮蔽材領域の条件	上記の周囲の雰囲気条件と同様に、使用済燃料収納領域から漏れ出た中性子が散乱や吸収されることなく反射して使用済燃料収納領域へ戻る真空とした。	
HDP-69BCH (B) 型配列	緩衝体等を見捨てる、解析モデルをHDP-69BCH (B) 型に外接する四角柱表面で完全反射とした。(HDP-69BCH (B) 型が無限に並ぶ配列と等価)	
ほう素添加量	中性子吸収材に含まれる天然ほう素量は、仕様上の下限値 <input type="text"/> とした(ほう素量の減損は2.5参照)。	

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.1-3 (2/2) 臨界解析条件及び設定根拠

項目	乾燥時臨界解析	冠水時臨界解析
使用済燃料の構造材	ステンレス鋼製の上・下部タイププレート部及びプレナム部は、中性子吸収効果が小さい真空に置換した。	ステンレス鋼製の上・下部タイププレート部及びプレナム部は、中性子減速効果がある水に置換した。
チャンネルボックス	隣接する使用済燃料までの距離が短くなるチャンネルボックスなしとした。	水からチャンネルボックスに置換することで、減速効果及び中性子吸収効果がともに小さくなる。しかし、吸収効果の減少の影響が減速効果の減少の影響より大きいため、チャンネルボックスありとした。
中性子遮蔽材	中性子吸収効果のある側部、蓋部、及び底部中性子遮蔽材は真空とした。	
蓋部	貯蔵中は、一次蓋及び二次蓋により密封されるため蓋部をモデル化した。	

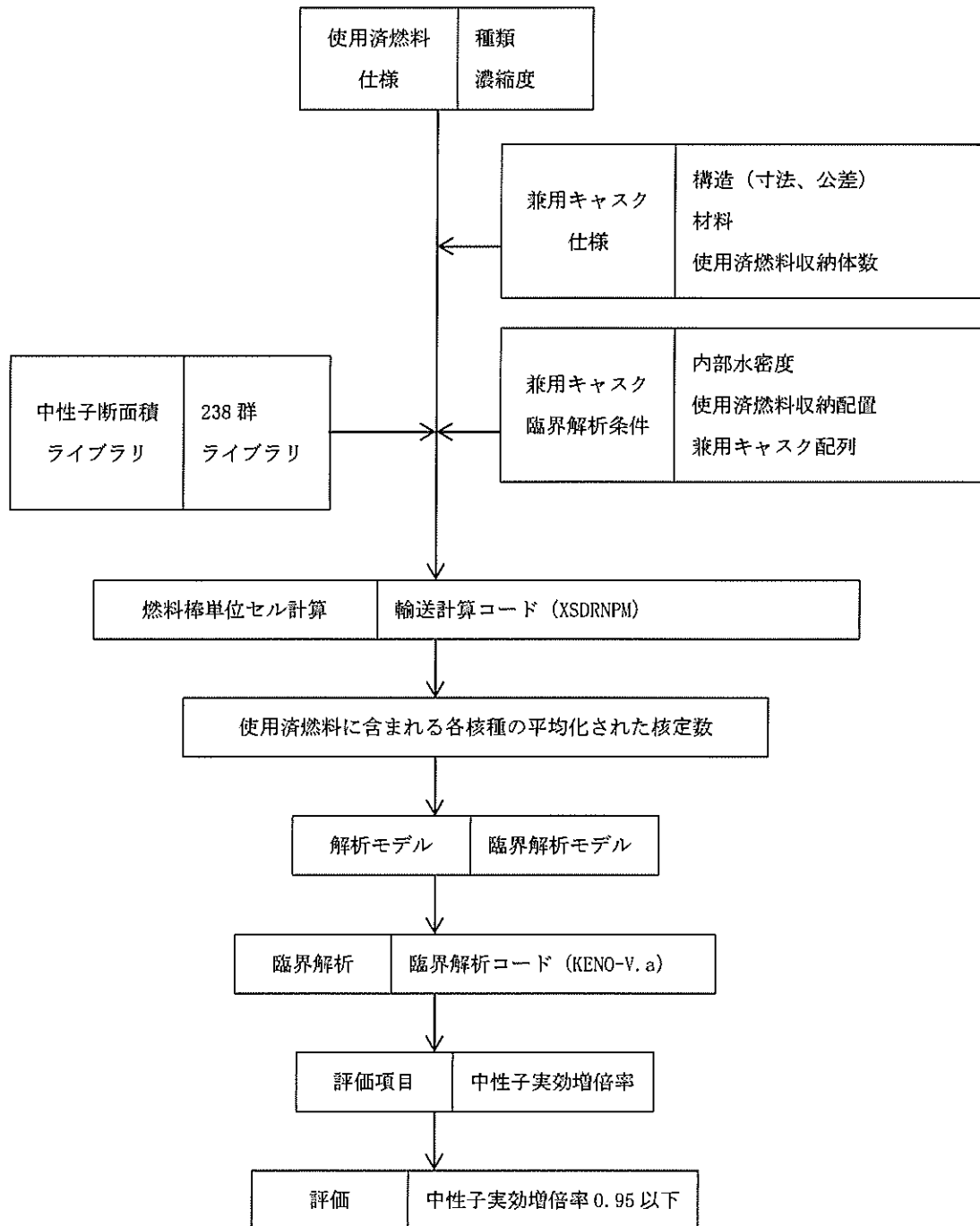
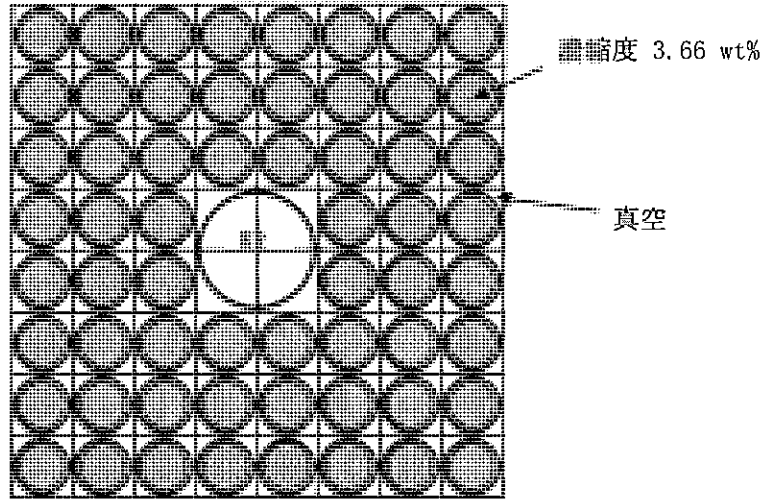


図 2.4.1-2 臨界解析フロー図



W : ウォータロッド

図 2.4.1-3 乾燥時臨界解析における燃料棒配置 (高燃焼度 8×8 燃料)

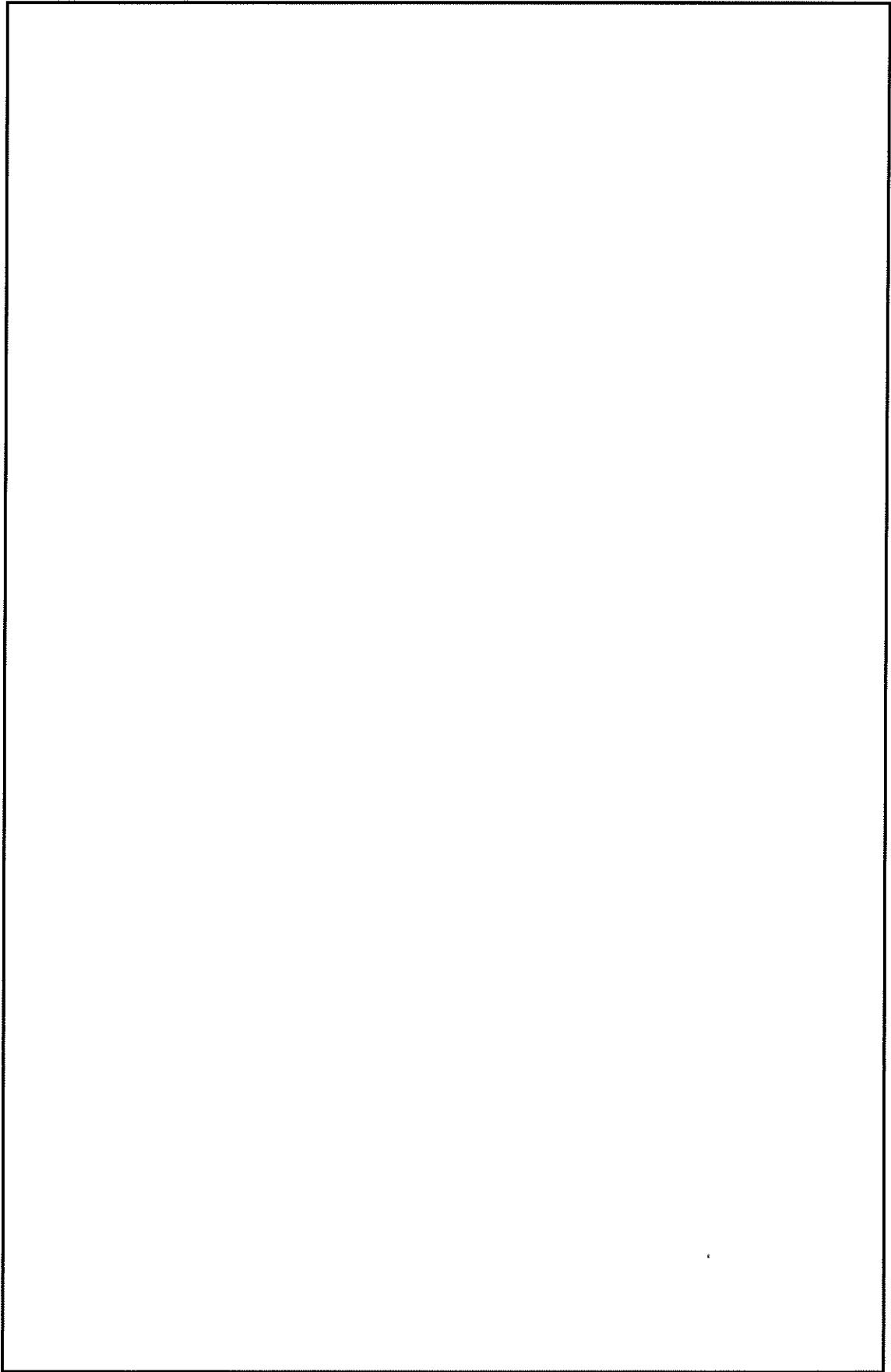


図 2.4.1-4 乾燥時臨界解析モデル

16 条-別添 1 (臨界防止)-13

内は商業機密のため、非公開とします。

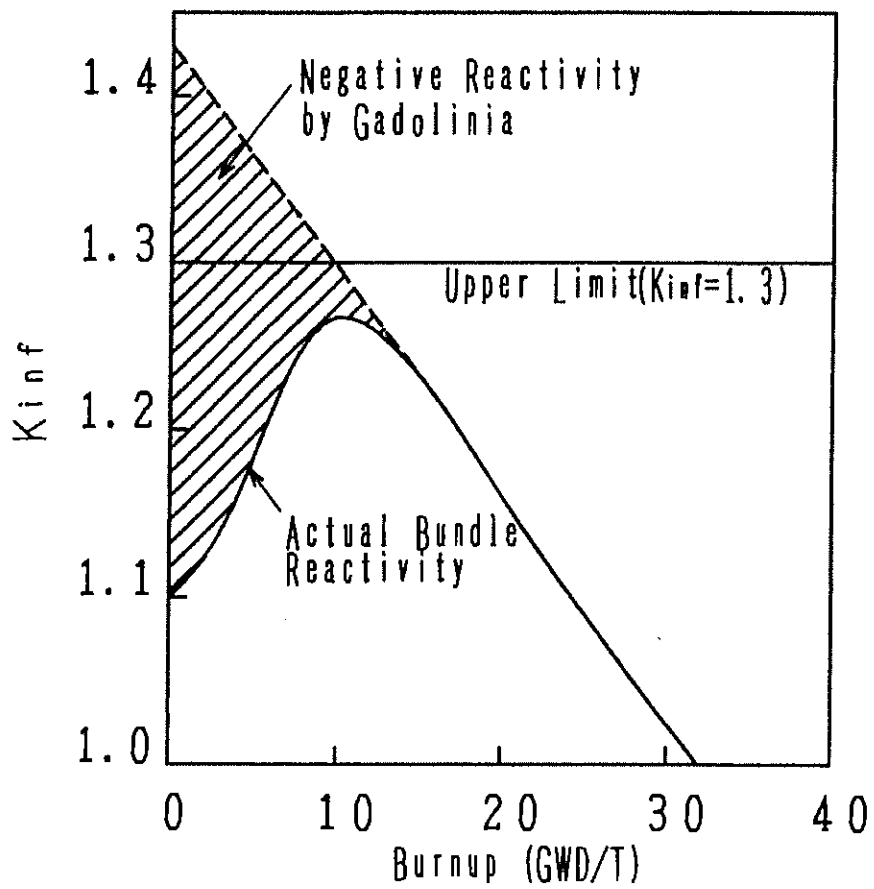
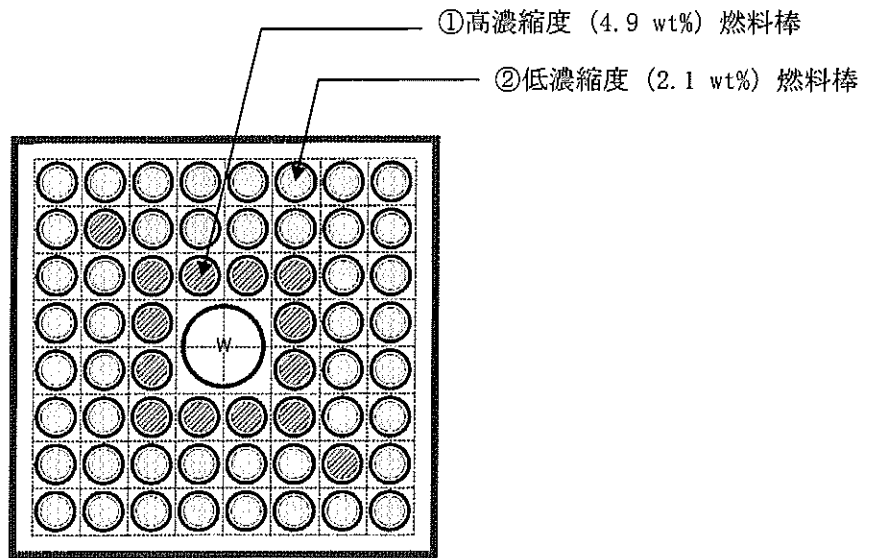


図 2.4.1-5 BWR 燃料の反応度特性⁽¹⁾



①高濃縮度燃料棒：14 本

②低濃縮度燃料棒：46 本

W：ウォータロッド

図 2.4.1-6 冠水時臨界解析における燃料棒配置（高燃焼度 8×8 燃料モデルバンドル）

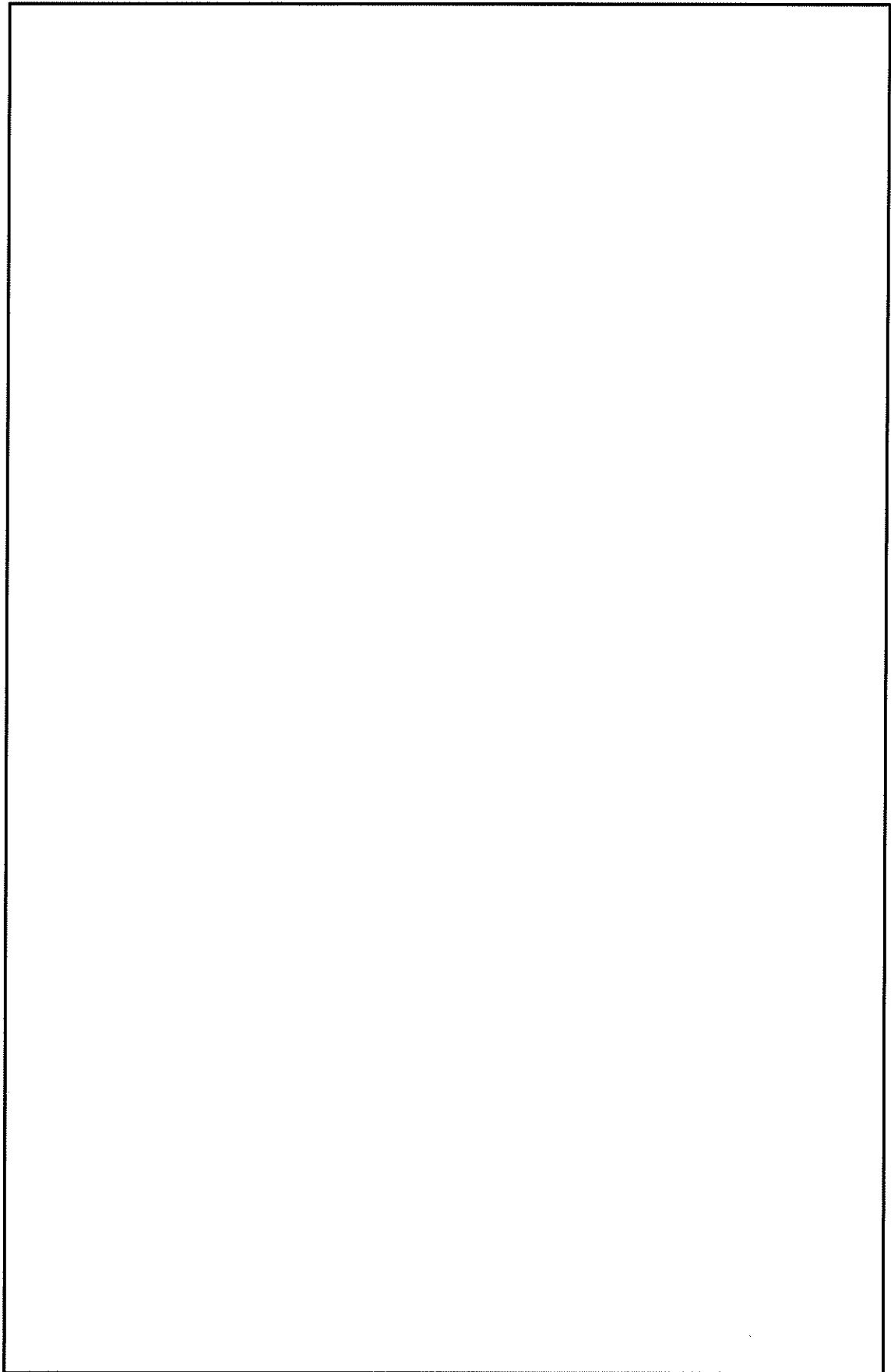


図 2.4.1-7 冠水時臨界解析モデル

16 条-別添 1 (臨界防止)-16

内は商業機密のため、非公開とします。

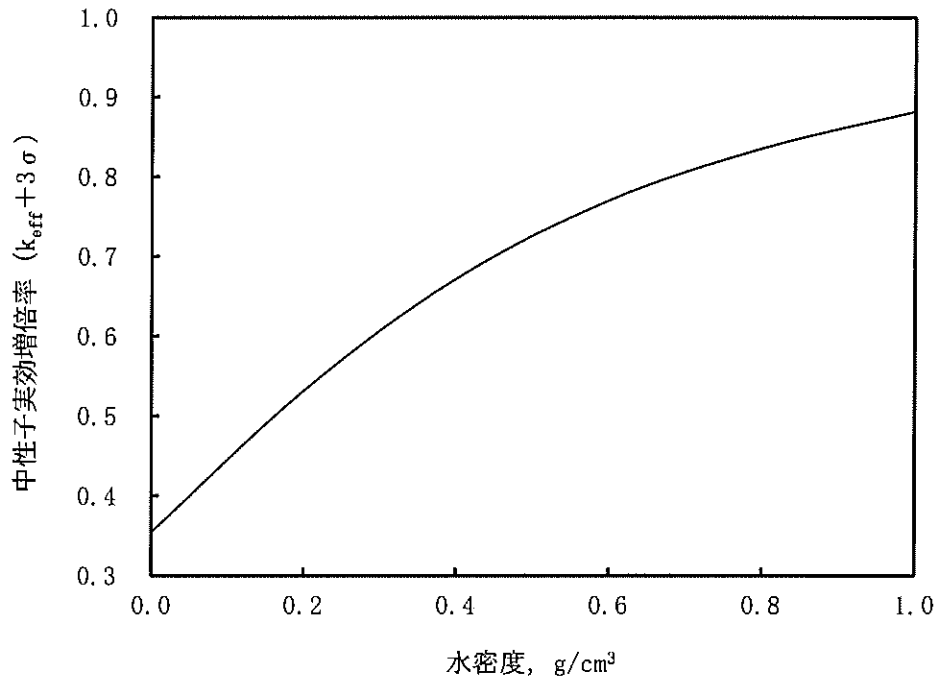


図 2.4.1-8(1/3) 兼用キャスク内部の水密度と中性子実効増倍率の関係

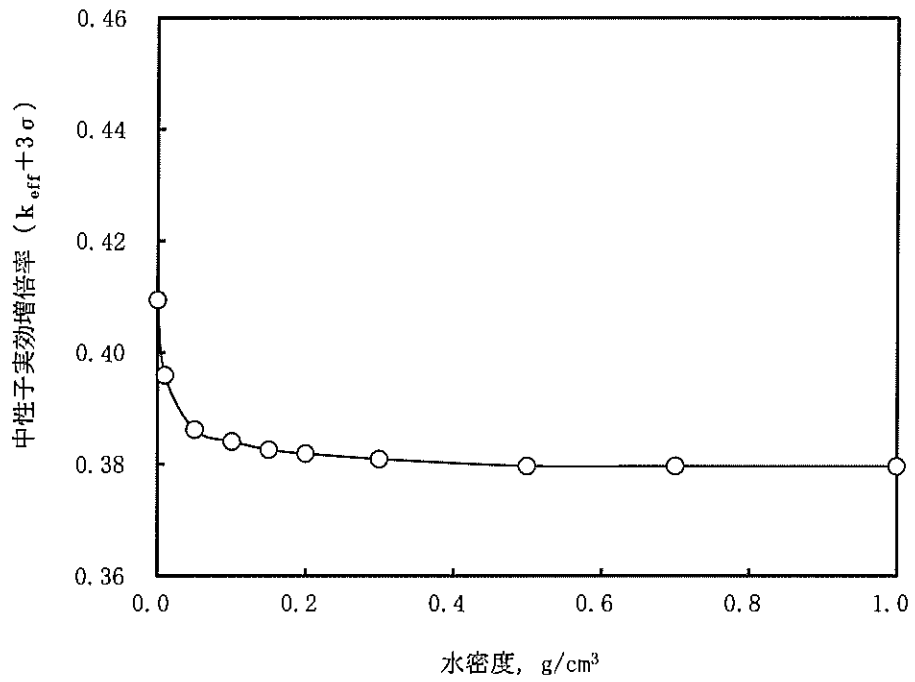


図 2.4.1-8(2/3) 兼用キャスク外部の水密度と中性子実効増倍率の関係
(乾燥時臨界解析)

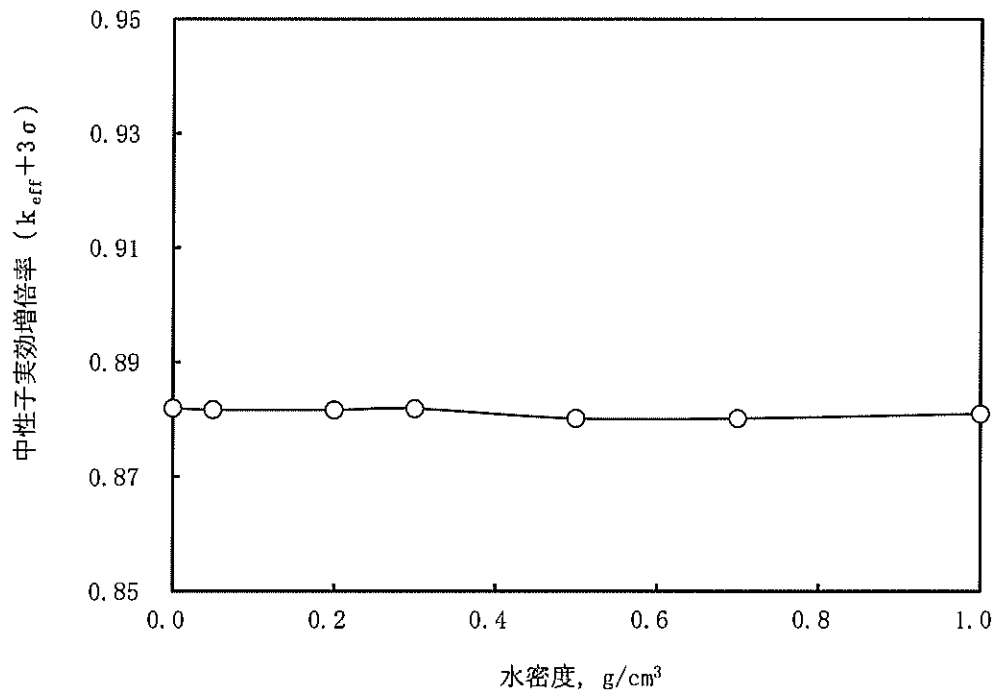


図 2.4.1-8(3/3) 兼用キャスク外部の水密度と中性子実効増倍率の関係
(冠水時臨界解析)

技術的に想定されるいかなる場合においても、表 2.4.1-4 に示すとおり、評価基準を満たしている。

評価結果は、HDP-69BCH(B)型を無限に配列した体系（完全反射）で解析した結果であり、貯蔵施設内での兼用キャスクの配置制限は不要である。

表 2.4.1-4 評価結果

項目		評価結果	評価基準	備考
中性子 実効増倍率	乾燥状態	0.410 ($\sigma : <0.001$)	0.95 以下	なお、SCALE コードシステムはモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、本評価結果では解析コードの精度等を考慮して、統計誤差(σ)の3倍(3σ)を加味した値である。
	冠水状態	0.882 ($\sigma : <0.001$)		

3. 使用する解析コード

(1) 概要

臨界解析には、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された公開の SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステム⁽²⁾を用い、中性子実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれる KENO-V. a コードを用いた。

KENO-V. a コードは、モンテカルロ法に基づく臨界解析コードであり、輸送及び貯蔵キャスクの臨界解析等に広く用いられている。

(2) 機能

KENO-V. a コードは、臨界解析に関して以下の機能を有している。

- a. 実際に中性子が出会う物理現象は、確率理論を用いて模擬するため、どのような体系にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- b. 3次元の複雑な幾何形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

SCALE コードシステムの解析フローを図 2.4.1-9 に示す。

均質化燃料領域以外の領域の群定数計算には共鳴計算処理コード NITAWL-II⁽²⁾を、均質化燃料領域の群定数計算には共鳴処理コード BONAMI⁽²⁾、NITAWL-II 及び一次元輸送計算コード XSDRNPM⁽²⁾を用い、核データライブラリは SCALE コードシステムの内蔵ライブラリデータの一つである 238GROUPPDF5 ライブラリデータを用いた。

燃料領域の均質化の方法としては、単位燃料棒の形状を一次元円柱モデルで近似し、XSDRNPM コードを用いて 238 群の中性子束分布を求め、それを重みとして燃料の均質化領域の 238 群定数を算出した。この 238 群定数及び KENO-V. a コードを用いて臨界解析を行った。

(4) 使用実績及び検証

臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、軽水炉燃料の輸送及び貯蔵キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

米国 PNL で行われた臨界実験⁽³⁾を対象としたベンチマーク解析を実施した。ベンチマーク解析対象とした PNL-3602 臨界実験の体系は、鉄の反射体に挟まれた 3つのクラスタ(低濃縮ウラン燃料棒を正方格子に配列した体系)の間に中性子吸収材を設置したものであり、中性子吸収材の種類、板厚、水ギャップ幅及び燃料濃縮度等、輸送及び貯蔵キャスクの臨界解析で重要と考えられる要因に関し、数種類の異なる体系で実施されている。

実験体系の概要を図 2.4.1-10 に示す。この臨界実験体系は周囲を炭素鋼製の厚い胴に囲まれ、各燃料の間にバスケットのほう素添加ステンレス鋼による中性子吸収材を有す

る HDP-69BCH(B)型の臨界解析体系と類似している。

ベンチマーク解析は 238GROUPNDF5 ライブラリを用い SCALE コードシステムで行った。表 2.4.1-5 にベンチマーク臨界計算の結果を示す。ベンチマーク解析の結果、臨界解析に用いた計算コード及び核データは妥当な結果を与える。

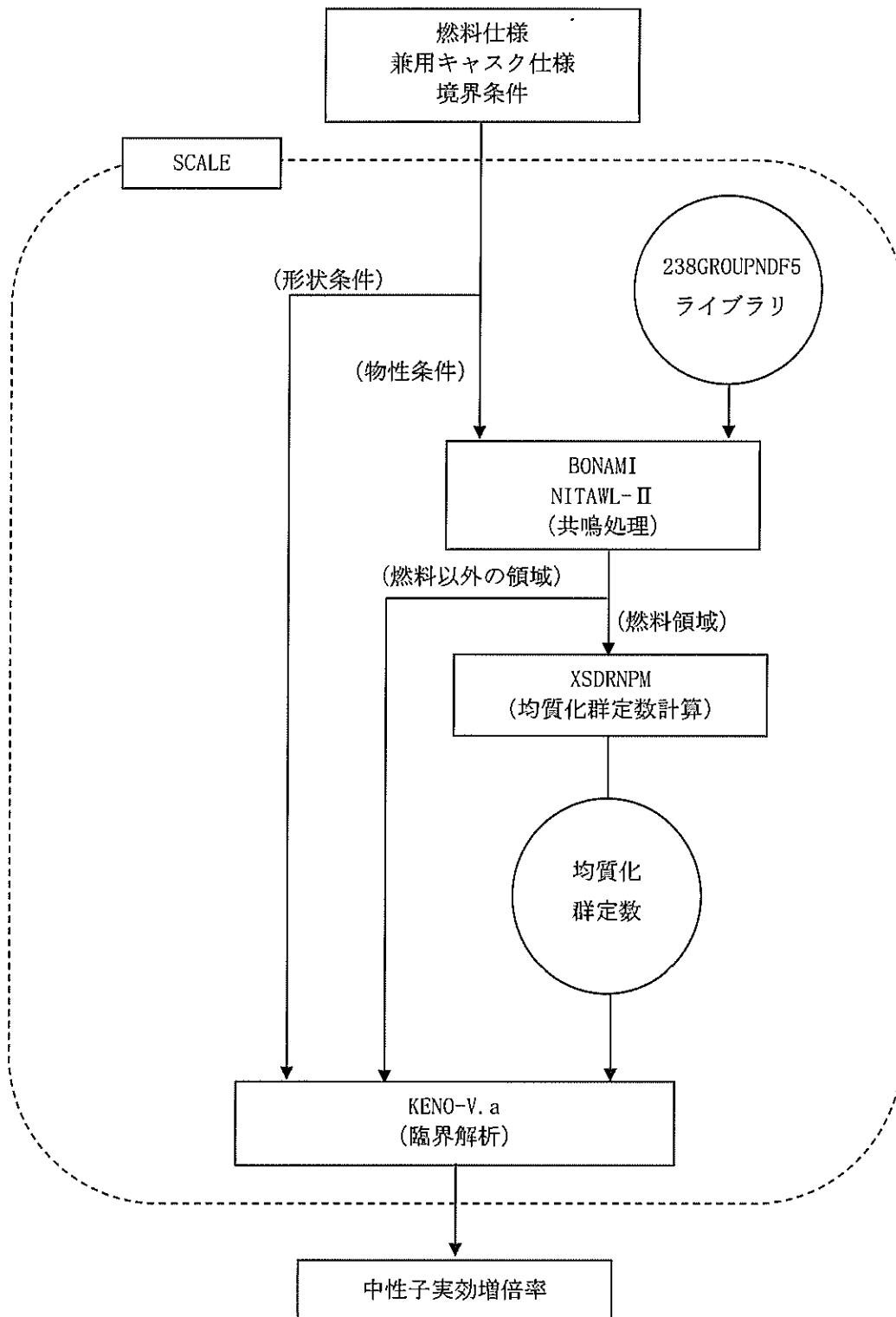


図2.4.1-9 臨界解析フロー

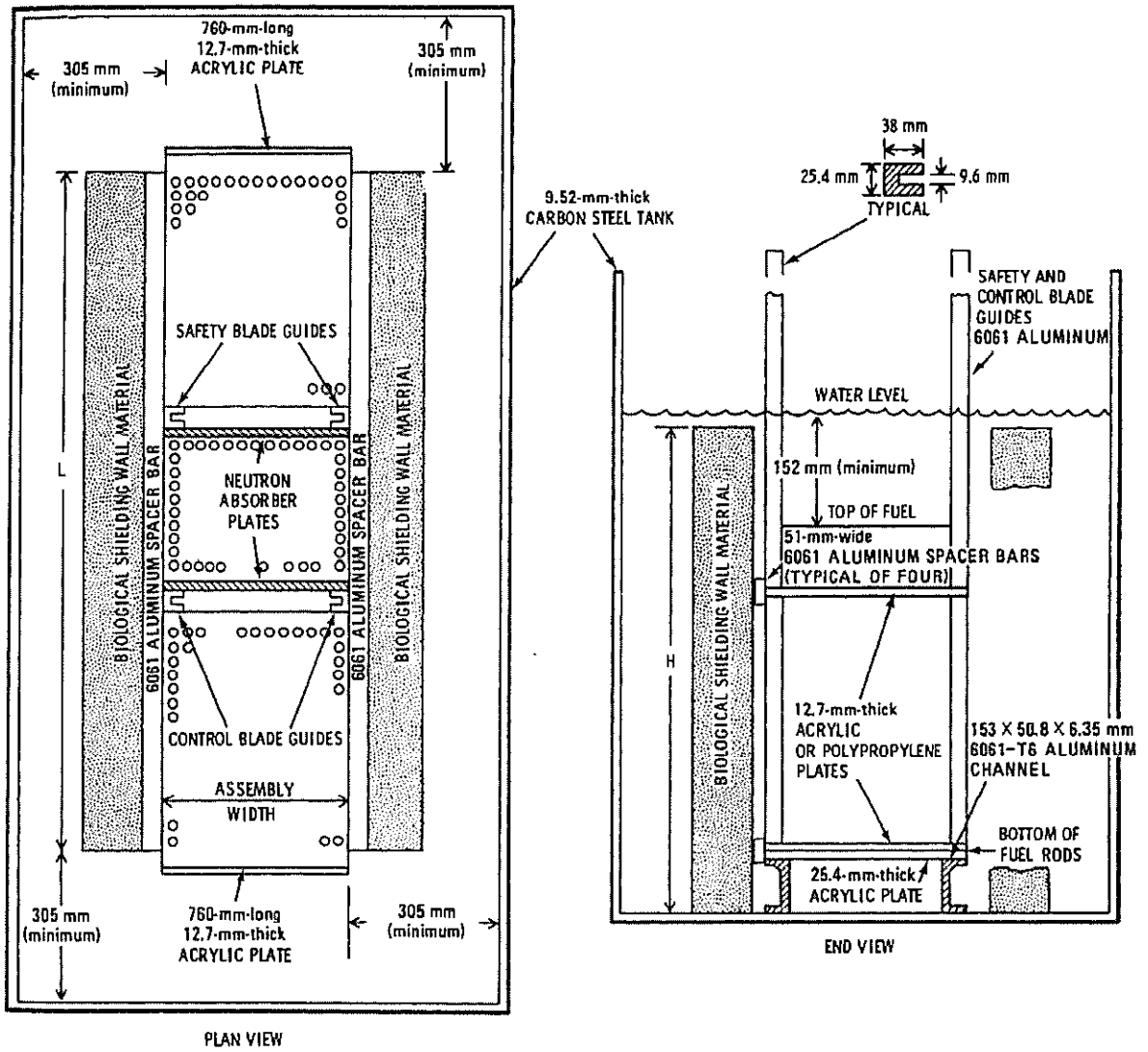


図2.4.1-10 PNL-3602の臨界実験体系⁽³⁾

表 2.4.1-5 ベンチマーク 臨界解析結果

項 目	解析結果等
解析ケース数	16
平均値	0.99794
標準偏差	0.00191
最小値	0.99470
最大値	1.00105

4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合

表 2.4.1-3、図 2.4.1-4 及び図 2.4.1-7 に示す、解析モデル、解析条件及びその保守性は、たて置き、よこ置きの貯蔵姿勢によらない。したがって、よこ置きの場合でも表 2.4.1-4 に示す評価結果を上回ることはない。

5. 緩衝体等により蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の場合

表 2.4.1-3、図 2.4.1-4 及び図 2.4.1-7 に示す、解析モデル、解析条件及びその保守性は、たて置き、よこ置きの貯蔵姿勢によらない。また、貯蔵用緩衝体等を考慮した場合、中性子は燃料体以外の兼用キャスク各部に吸収されやすくなり、反応度が増加することはなく、表 2.4.1-4 に示す評価結果を上回ることはない。また、参考 1 の輸送時の臨界評価に示すように、バスケットプレートの塑性変形を仮定しても未臨界を維持することができる。

6. 参考文献

- (1) K. Kawakami, M. Matsumoto, H. Asano, T. Takakura, T. Matsumoto, T. Mochida, M. Yamaguchi, "The Use of Gadolinia Credit for Criticality Evaluation of a Spent-Fuel Cask," The 11th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM '95), December 3-8, 1995, Las Vegas, USA (1995).
- (2) "SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation," Vols. 1-3, NUREG/CR-0200, U. S. Nuclear Regulatory Commission (originally issued July 1980).
- (3) S. R. Bierman and E. D. Clayton, "Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ^{235}U Enriched UO_2 Rods in Water with Steel Reflecting Walls," NUREG/CR-1784(PNL-3602), U. S. Nuclear Regulatory Commission (1981).

輸送時の臨界評価

1. 概要

HDP-69BCH(B)型は、輸送時の臨界評価⁽¹⁾でバスケットプレートの塑性変形を考慮しても未臨界を維持できることを確認している。以下に詳細を示す。

2. 収納条件

表 2.4.1-1 と同じ高燃焼度 8×8 燃料を 69 体収納する条件としている。なお、HDP-69BCH(B)型は、輸送時に三次蓋を含めて密封性能を有した複数の蓋を有しており、容器内部に水の浸入はないため、初期濃縮度は 3.66 wt で評価する。

3. 評価方法

2.と同様に臨界解析には、SCALE コードシステムに含まれる KENO-V. a コードを用いた。

4. 評価条件

輸送時の臨界解析モデルを図 1 に示す。図 2.4.1-4 からの変更点として、9m 落下時のバスケット格子内のり の塑性変形()を仮定し でモデル化している。また、保守的な評価となるように以下の条件を仮定する。

- ・ 胴内には の水が均一に分散していると仮定している。
- ・ 図 2 に示すように、燃料集合体の変形状態を想定し、スペーサ 1 スパン間の燃料棒ピッチを縮小/拡大させている。

5. 評価結果

輸送時の臨界評価結果を表 1 に示す。塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持される。

内は商業機密のため、非公開とします。

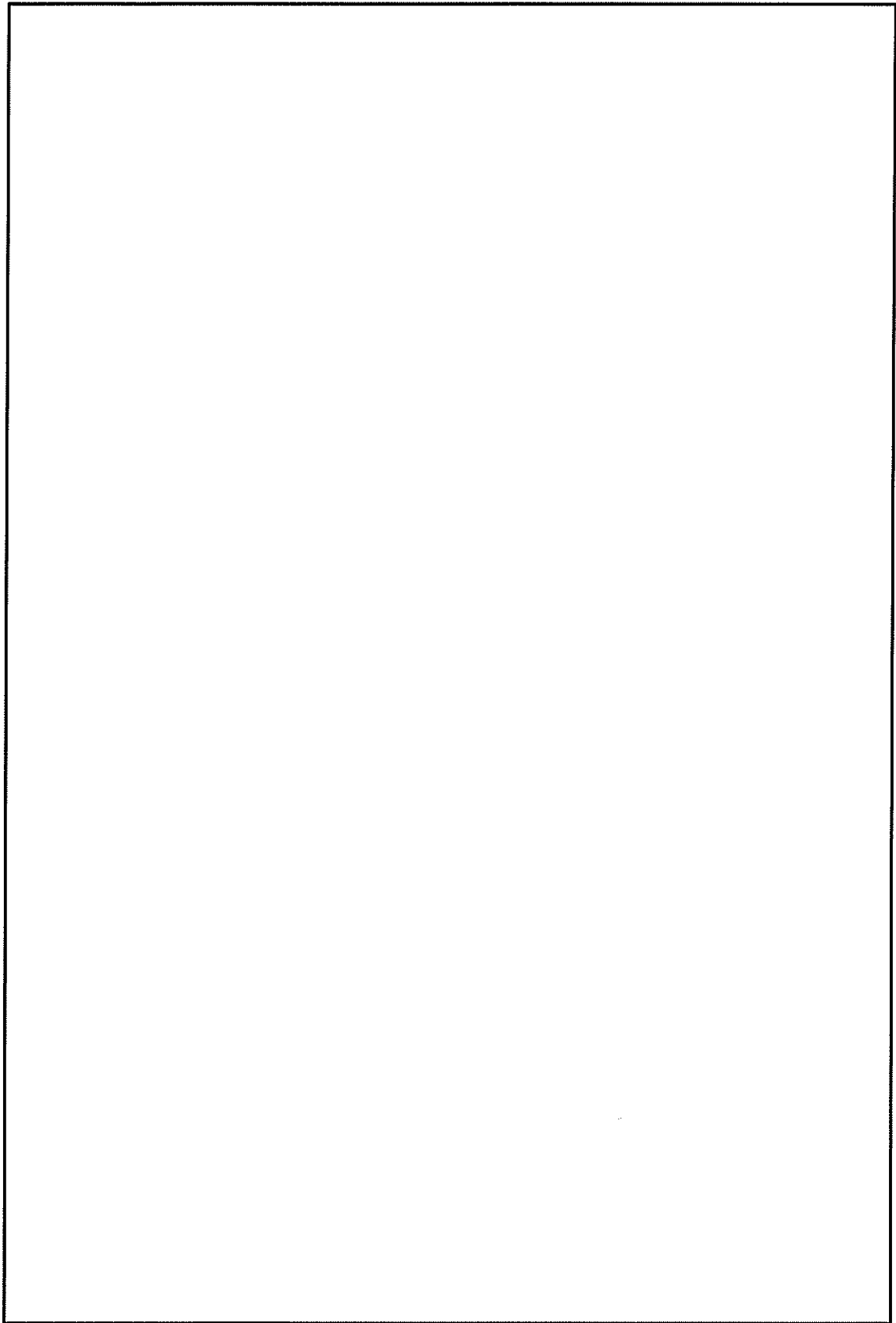


図 1(1/2) 臨界計算モデル (縦断面図)

16 条-別添 1 (臨界防止)-参考 1-2

内は商業機密のため、非公開とします。

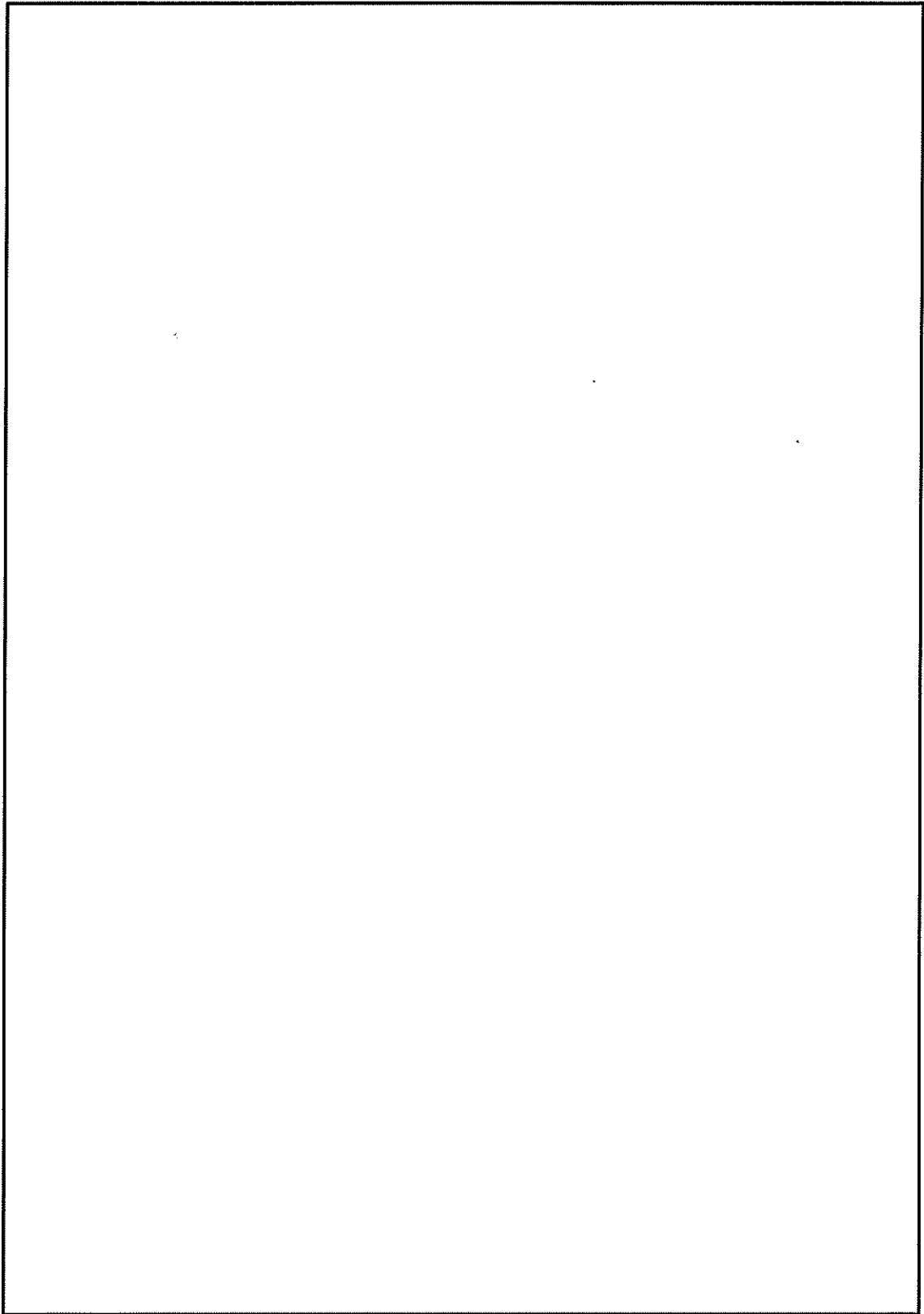
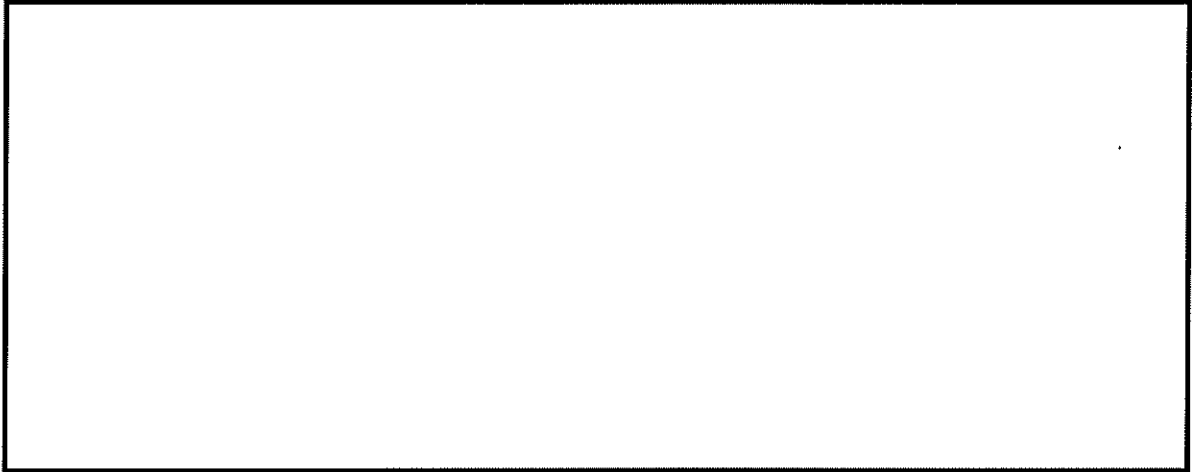


図 1(2/2) 輸送時の臨界解析モデル (燃料領域横断面図)

16 条-別添 1 (臨界防止)-参考 1-3

内は商業機密のため、非公開とします。



燃料棒ピッチ=最小(燃料棒直径) 燃料棒ピッチ=変化なし 燃料棒ピッチ=均一拡大

図 2 輸送時の燃料集合体モデル(ピッチ変化部位)

表 1 輸送時の臨界評価結果

項 目	評価結果	評価基準
燃料棒ピッチ最小	0.413 (σ : <0.001)	0.95 以下
燃料棒ピッチ変化なし	0.412 (σ : <0.001)	
燃料棒ピッチ均一拡大	0.412 (σ : <0.001)	

内は商業機密のため、非公開とします。

6. 参考文献

- (1) HDP-69BCH 型 設計承認申請書別紙 口章 E

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(HDP-69BCH(B)型の遮蔽機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法(よこ置き)の場合
5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の場合
6. 参考文献

【参考資料】

- 参考 1 燃焼度分布の設定について

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型の遮蔽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 項一号

- ・使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条第 2 項

第 16 条第 4 項第 1 号に規定する「適切な遮蔽能力を有する」とは、第 5 項に規定するもののほか、以下をいう。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項第 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。

・貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項三号

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽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当該使用済燃料の燃焼度に応じた当該使用済燃料の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ていること。

- ・兼用キャスク表面から 1 メートル離れた位置における線量当量率が 1 時間当たり 2 ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から 1 メートル離れた位置における線量当量率が 1 時間当たり 100 マイクロシーベルト以下であること。
- ・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。なお、当該貯蔵建屋が損傷したときからその遮蔽機能の応急の復旧が完了するまでの間は、第 29 条に規定する「通常運転等」には当たらない。

c. 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 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. 適合性について

設置（変更）許可に係る審査で確認される兼用キャスクの有する4つの安全機能（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本型式証明申請で確認する。HDP-69BCH(B)型の遮蔽機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

- ・ 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽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当該使用済燃料の燃焼度に応じた当該使用済燃料の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ていること。
- ・ 兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における線量当量率が1時間当たり2ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における線量当量率が1時間当たり100マイクロシーベルト以下であること。

HDP-69BCH(B)型の遮蔽解析フローを図2.4.2-1に示す。

a. 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の線源強度計算条件を表2.4.2-1に、収納配置条件を図2.4.2-2に示す。使用済燃料の線源強度は、収納する使用済燃料の種類、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コードORIGEN2を使用して求める。また、貯蔵対象とする使用済燃料の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比（以下「ピーキングファクター」という。参考1参照）を調査し、貯蔵対象の使用済燃料のピーキングファクターを包絡するようなピーキングファクターを別途設定した上で、当該ピーキングファクターに平均燃焼度を乗じることで算出される軸方向の燃焼度分布を、使用済燃料の収納条件として線源強度の計算条件とする。

使用済燃料の構造材については、照射期間、中性子束、冷却期間等を条件に放射化計算式を用いて線源強度を求める。

使用済燃料の線源強度計算方法を表2.4.2-2に、評価した兼用キャスク1基当たりの線源強度を表2.4.2-3に示す。

なお、後述の「b. 兼用キャスクの遮蔽機能評価方法」では、線源強度評価の結果（表2.4.2-3）より、線源強度の大きい新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料を混載した収納配置(i)、(ii)を対象として評価を実施する。

b. 兼用キャスクの遮蔽機能評価方法

HDP-69BCH(B)型の線量当量率は、HDP-69BCH(B)型の実形状を軸方向断面で二次元でモデル化し、表2.4.2-3に示した線源強度に基づき、二次元輸送計算コードDOT3.5(DLC-23/CASKライブラリ)を使用して求める。

兼用キャスク表面から線量当量率の評価位置である1mの位置までの評価にはレイエ

フェクトを平準化するためDOT3.5の補助コードであるSPACETRAN-IIIを用いる。

HDP-69BCH(B)型のモデル化の概要を図 2.4.2-3 に、解析モデル図を図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 に示す。遮蔽機能評価においては以下の要求事項を満足する設計とする。

- ・表面における最大線量当量率が 2mSv/h を超えないこと。
- ・表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率が $100\mu\text{Sv/h}$ を超えないこと。

なお、本評価においては、以下の保守性を有している(表 2.4.2-4 参照)。

・モデル化の保守性

- 燃料領域より外側のバスケットは、バスケット最外周の最小板厚の円環としてモデル化した。燃料領域より外側のバスケットの物量よりも円環としてモデル化したバスケットの物量は少ない設定とした。
- 伝熱フィンのような小さいものが比較的多く配置されている中性子遮蔽体領域では、レジンと伝熱フィンを均質化したモデルとしている。この均質化において、伝熱フィンが占有する面積については、伝熱フィンの密度をゼロとして、中性子遮蔽体としてのレジンの均質化密度を安全側に低下させている。これによって、ガンマ線遮蔽体としての寄与を無視している。
- トラニオン有りのモデルとトラニオン無しのモデルで線種ごとに線量当量率を求め、トラニオン有りのモデルが大きい場合は、本体モデルの計算結果にその差分を加算するが、トラニオン有りのモデルが小さい場合は、その低下は無視している。
- 貯蔵時は使用済燃料が底に接し、蓋と燃料の間は接していないが、頭部評価モデルにおいては使用済燃料が蓋に接した位置でモデル化することで頭部の評価を保守的に実施する。これにより、兼用キャスク軸方向の使用済燃料の配置状態に影響する兼用キャスクの設置姿勢(たて置き又はよこ置き)に遮蔽機能上の制限はない。
- 貯蔵時に緩衝体及び三次蓋を装着しない場合の方が、緩衝体及び三次蓋の遮蔽体としての寄与が無いため線量等量率が大きくなることから、緩衝体及び三次蓋を無視する。これにより、兼用キャスクの設置方法における緩衝体及び三次蓋の装着に対して、遮蔽機能上の制限は必要ない。
- チャンネルボックスは、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果を無視する保守的な組合せを仮定する。

c. 遮蔽機能評価結果

兼用キャスクの遮蔽機能評価結果を表 2.4.2-5 に示す。兼用キャスク表面での線量当量率及び表面から 1m の位置における線量当量率は全て評価基準を満たしている。

表 2.4.2-1(1/2) 使用済燃料の線源強度計算条件

燃料種類		新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料		高燃焼度 8×8 燃料		新型 8×8 燃料	
使用済燃料の 収納配置条件*1		配置 (i)				配置 (iii)	
燃焼度 (Mwd/t)		34000	40000	34000	40000	29000	34000
比出力 (MW/t)		25.3	同左	26.2	同左	25.3	同左
照射 期間 (日)	燃料集合体	1344	1582	1298	1527	1147	1344
	チャンネル ボックス						
濃縮度 (wt%)		2.88	同左	3.35	同左	2.88	同左
冷却期間 (年)		18	同左	18	同左	28	同左
ウラン重量 (kg)		177	同左	174	同左	177	同左

注記*1 ; 図 2.4.2-2 参照

表 2.4.2-1(2/2) 使用済燃料の線源強度計算条件

燃料種類		新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料		高燃焼度 8×8 燃料	
使用済燃料の 収納配置条件*1		配置 (ii)			
燃焼度 (Mwd/t)		40000	40000	48000	
比出力 (MW/t)		25.3	26.2	同左	
照射 期間 (日)	燃料集合体	1582	1527	1833	
	チャンネルボックス				
濃縮度 (wt%)		2.88	3.35	同左	
冷却期間 (年)		22	22	20	
ウラン重量 (kg)		177	174	同左	

注記*1 : 図 2.4.2-2 参照

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.2-2 使用済燃料の線源強度計算方法

項目	計算方法	計算条件
燃料有効部のガンマ線及び中性子	燃料計算コードORIGEN2を用い、ガンマ線及び中性子源強度を計算。使用済燃料のピーキングファクターを考慮。また、中性子については実効増倍率を考慮。	燃料条件：表 2.4.2-1 参照 ライブラリ：BWR-U ライブラリ 中性子実効増倍率の考慮 $N_s = N_o / (1 - k_{eff})$ N_s ：全中性子線源強度 N_o ：一次中性子線源強度 k_{eff} ：使用済燃料貯蔵時における実効増倍率
使用済燃料構造材及びチャンネルボックス構造材の放射化によるガンマ線	構造材の ^{59}Co 含有量に従い、放射化計算式に基づき ^{59}Co から ^{60}Co への放射化量を計算。	放射化計算式 $A = N_o \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$ A ：放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq) N_o ：ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms) σ ：2200m/s の中性子による ^{59}Co 反応断面積 (cm^2) ϕ ：炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) λ ： ^{60}Co の崩壊定数 (1/日) T_1 ：照射期間 (日) (表 2.4.2-1 参照) T_2 ：冷却期間 (日) (表 2.4.2-1 参照)

表 2.4.2-3 兼用キャスク 1 基当たりのガンマ線及び中性子の線源強度

使用済燃料の種類		新型 8×8 シルコウムライ付燃料 及び 高燃焼度 8×8 燃料		新型 8×8 燃料
使用済燃料の 収納配置条件		配置 (i)	配置 (ii)	配置 (iii)
濃縮度 (wt%)		2.88 (新型 8×8 シルコウムライ付燃料) 3.35 (高燃焼度 8×8 燃料)		2.88
燃焼度 (MWd/t)	外周部	34,000	40,000	29,000
	中央部	40,000	48,000	34,000
冷却年数 (年)		18	22 (外周) 20 (中央)	28
使用済燃料の燃料有効部の ガンマ線の線源強度 (photons/s)		8.9×10^{16}	8.9×10^{16}	6.0×10^{16}
使用済燃料構造材の放射化 によるガンマ線の線源強度 (^{60}Co :Bq)		1.3×10^{14}	1.1×10^{14}	3.1×10^{13}
使用済燃料の燃料有効部の 中性子の線源強度 (n/s)*1		1.4×10^{10}	1.5×10^{10}	5.0×10^9

注記*1：中性子実効増倍率の効果を考慮した値である。

表 2.4.2-4 遮蔽解析の保守性

項目	内容
キャスクのモデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・バスケット外周領域：燃料領域より外側のバスケットは、バスケット最外周の最小板厚の円環としてモデル化。燃料領域より外側のバスケットの物量よりも円環としてモデル化したバスケットの物量は少ない設定とした。 ・側部中性子遮蔽体領域：伝熱フィンのような小さいものが比較的多く配置されている中性子遮蔽体領域では、レジンと伝熱フィンを均質化したモデルとしている。伝熱フィンが占有する面積については<u>伝熱フィンの密度をゼロとして、中性子遮蔽体としてのレジンの均質化密度を安全側に低下させている。</u>これによって、ガンマ線遮蔽体としての寄与を無視している。 ・トラニオン部：<u>トラニオン有り</u>のモデルと<u>トラニオン無し</u>のモデルで線種ごとに線量当量率を求め、<u>トラニオン有り</u>のモデルが大きい場合は、本体モデルの計算結果にその差分を加算するが、<u>トラニオン有り</u>のモデルが小さい場合は、その低下は無視している。 ・<u>貯蔵時に緩衝体及び三次蓋を装着しない場合の方が、緩衝体及び三次蓋の遮蔽体としての寄与が無い</u>ため線量等量率が大きくなることから、<u>緩衝体及び三次蓋を無視する。</u>
燃料集合体のモデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時は燃料が底に接し、蓋と燃料との間は接していないが、頭部評価モデルにおいて燃料が蓋に接した位置でモデル化することで頭部の評価を保守的に実施。 ・チャンネルボックスは、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果は無視する保守的な組合せを仮定。
線源強度	<ul style="list-style-type: none"> ・中央部に最高燃焼度*1の燃料、外周部に平均燃焼度*2の燃料を配置している。 ・収納燃料全数の冷却期間は、最短冷却期間*3と仮定。
劣化評価	<ul style="list-style-type: none"> ・レジン系中性子遮蔽材の経年劣化評価試験結果等の知見を踏まえて、加熱に伴う熱分解によるレジンの質量減損分を遮蔽体として考慮しないこととしており、中性子遮蔽材について減損分を含まない原子個数密度を線量当量率計算に用いている。

注記*1：HDP-69BCH (B)型に収納可能な使用済燃料の燃焼度の上限。

*2：HDP-69BCH (B)型に収納する使用済燃料の燃焼度の平均値の上限。

*3：HDP-69BCH (B)型に収納する使用済燃料の最短の冷却期間。

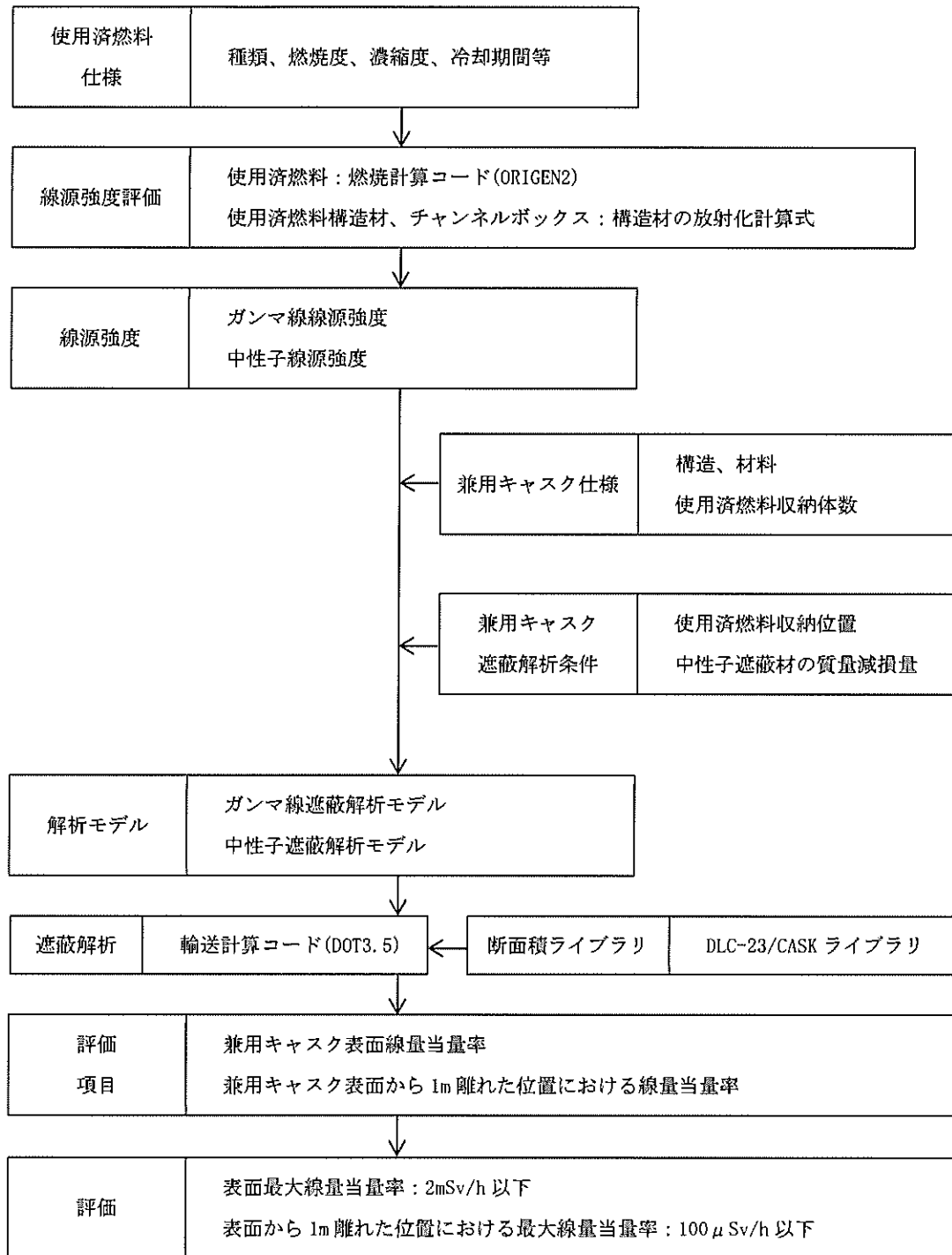
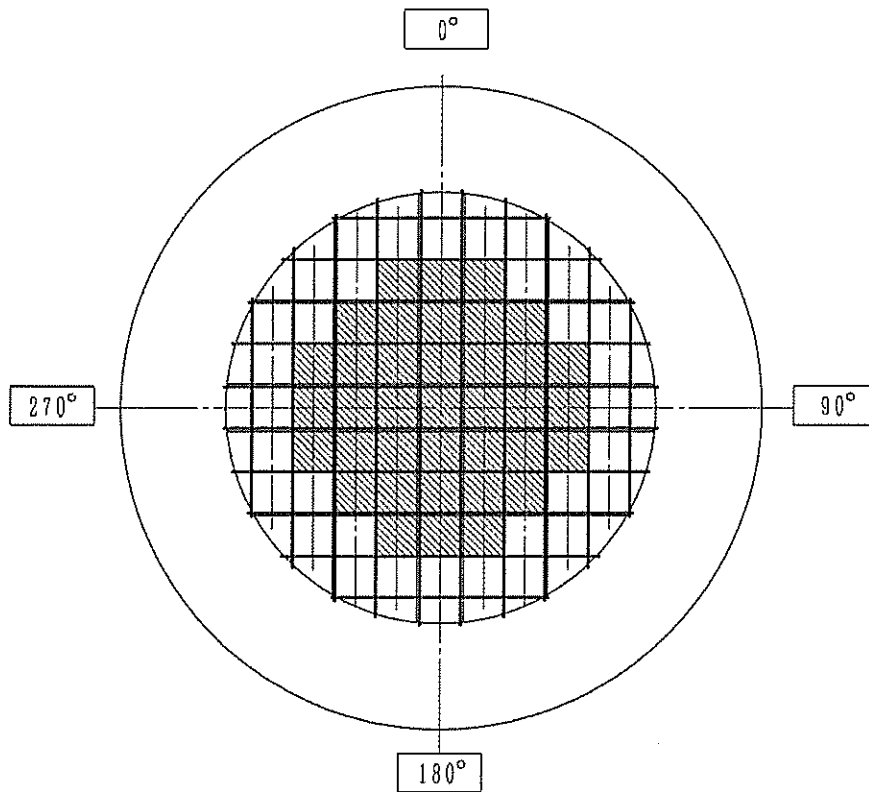


図 2.4.2-1 遮蔽解析フロー図

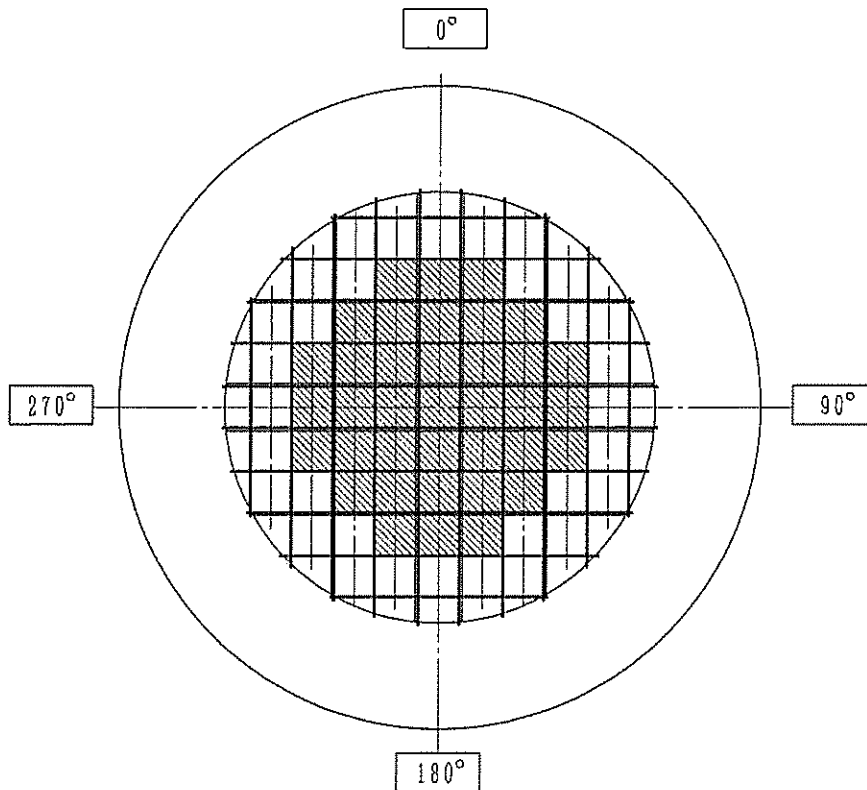


- | | | |
|---|------|-------------------------------|
| □ | 燃料種類 | : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料 |
| | 収納体数 | : 32体 |
| | 燃焼度 | : 34,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 18年以上 |
| | | |
| ▨ | 燃料種類 | : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料 |
| | 収納体数 | : 37体 |
| | 燃焼度 | : 40,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 18年以上 |

キャスク1基当たりの平均燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下

キャスク1基当たりの崩壊熱量 : 12.1 kW 以下

図 2.4.2-2(1/3) 使用済燃料の収納配置条件(配置(i))
(新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料を混載収納する場合)



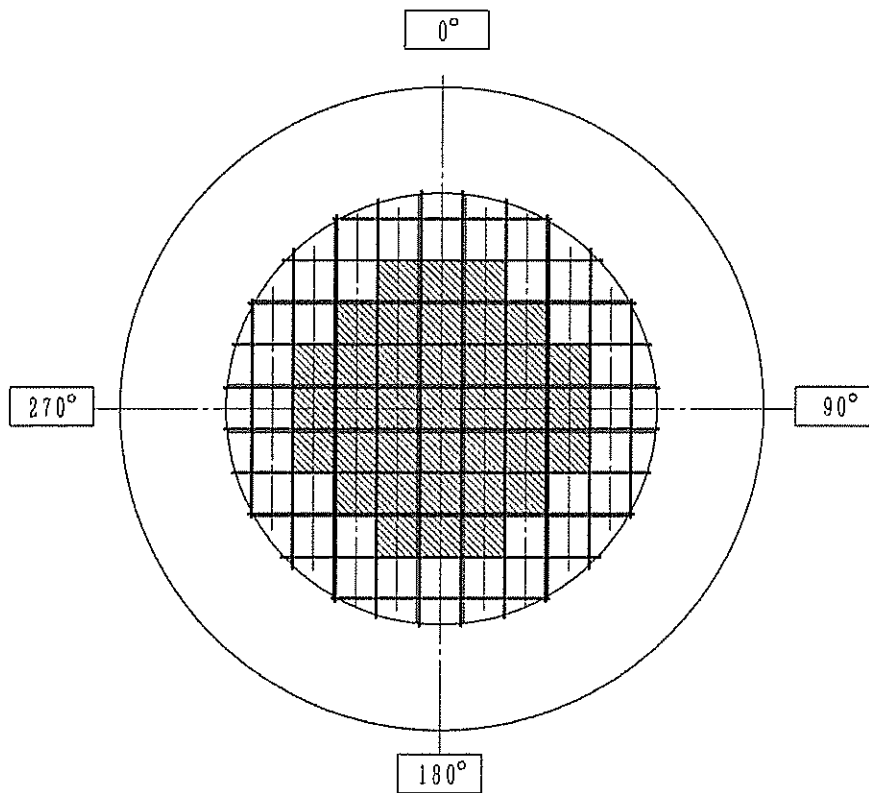
燃料種類 : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料
 収納体数 : 32体
 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 22年以上

燃料種類 : 高燃焼度8×8燃料
 収納体数 : 37体
 燃焼度 : 48,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 20年以上

キャスク1基当たりの平均燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下

キャスク1基当たりの崩壊熱量 : 13.8 kW 以下

図 2.4.2-2(2/3) 使用済燃料の収納配置条件(配置(ii))
 (新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料を混載収納する場合)



- | | | |
|---|------|-------------------|
| □ | 燃料種類 | : 新型 8×8 燃料 |
| | 収納体数 | : 32 体 |
| | 燃焼度 | : 29,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 28 年以上 |
| | | |
| ▨ | 燃料種類 | : 新型 8×8 燃料 |
| | 収納体数 | : 37 体 |
| | 燃焼度 | : 34,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 28 年以上 |

キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下

キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 8.4 kW 以下

図 2.4.2-2(3/3) 使用済燃料の収納配置条件(配置(iii))
(新型 8×8 燃料のみを収納する場合)

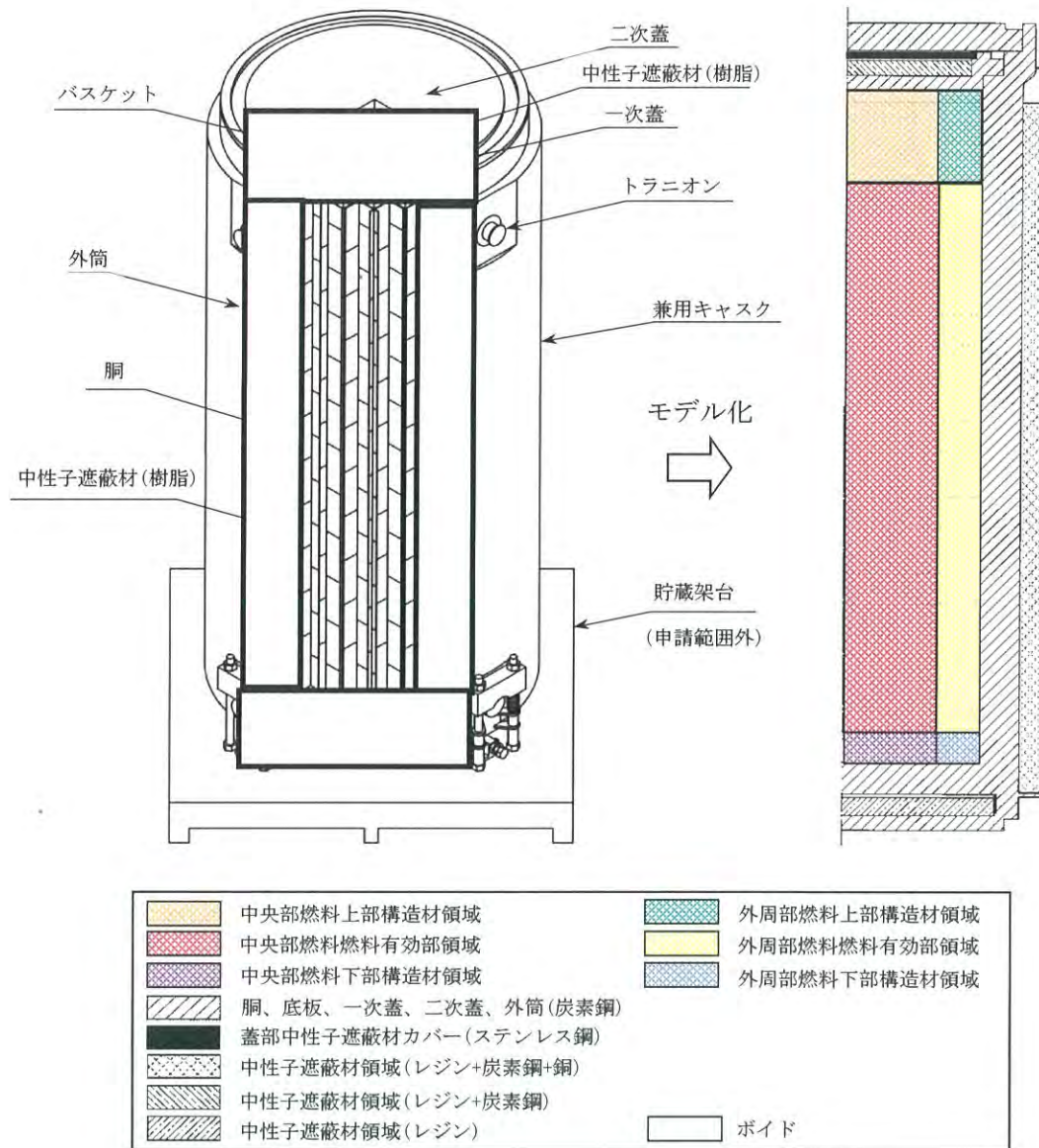
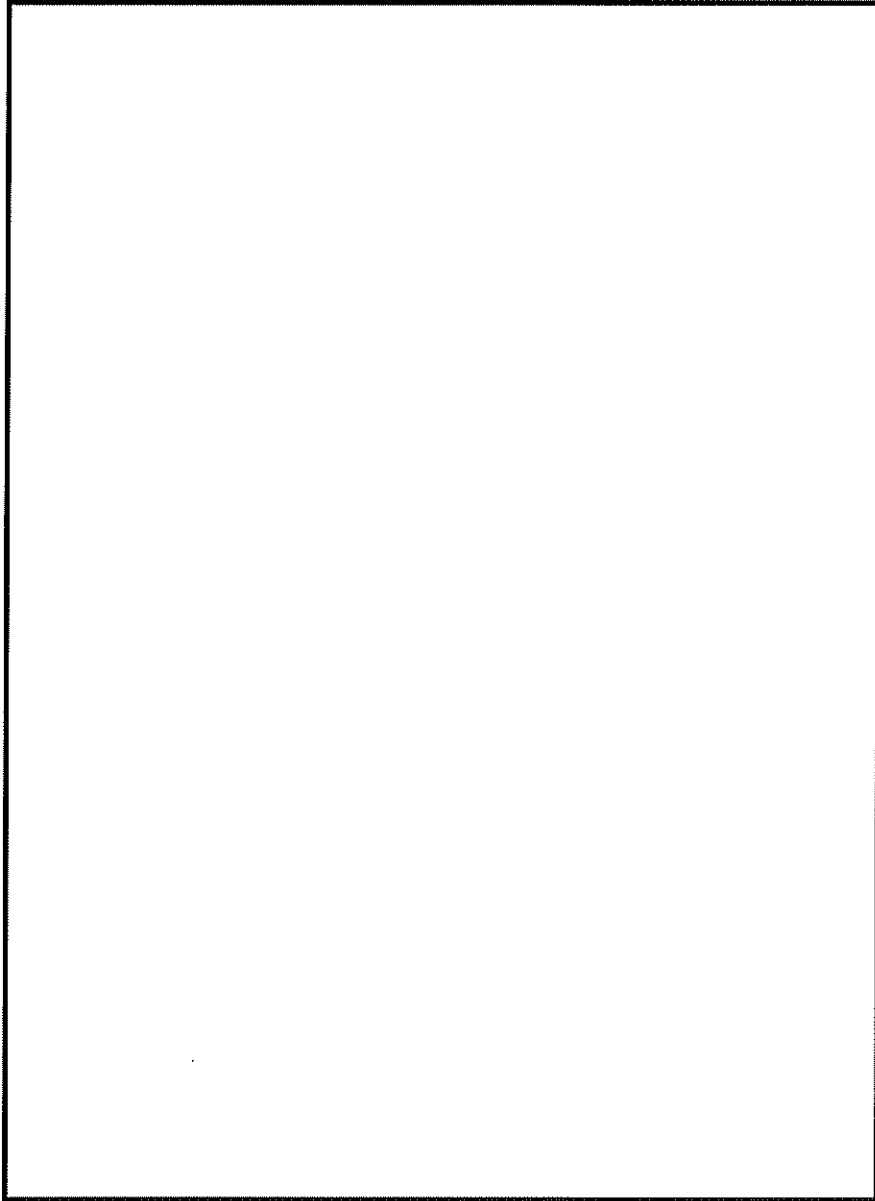


図 2.4.2-3 HDP-69BCH(B)型の遮蔽解析モデル化の概要

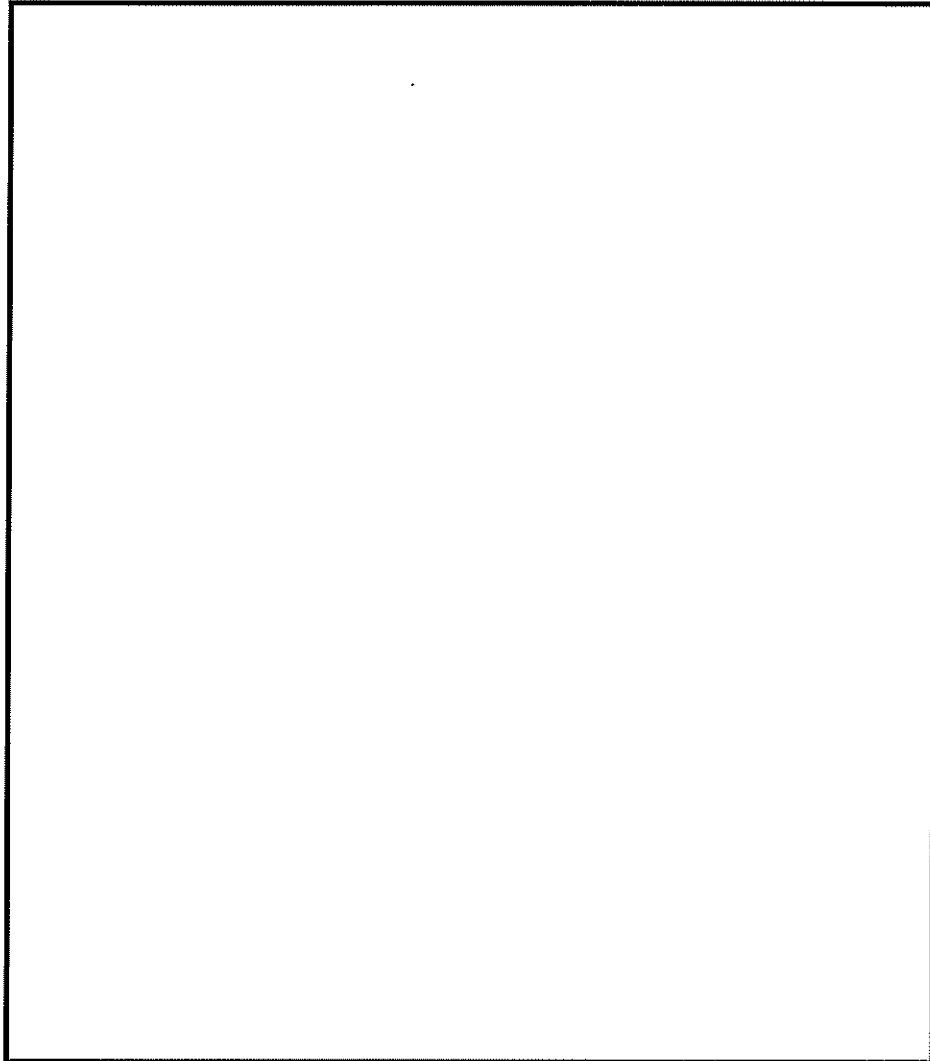
内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)

図 2.4.2-4 貯蔵時の解析モデル (頭部)

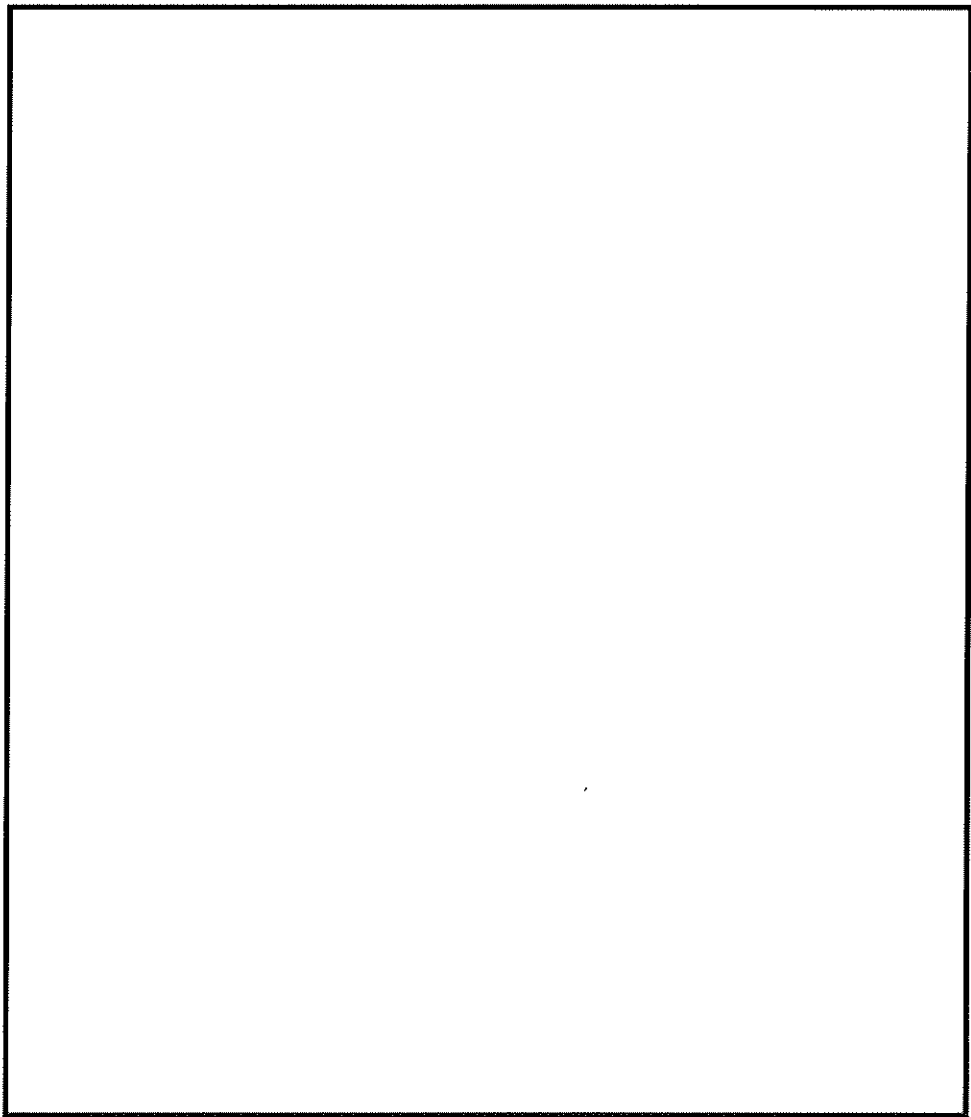
□ 内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)

図 2.4.2-5 貯蔵時の解析モデル（底部）

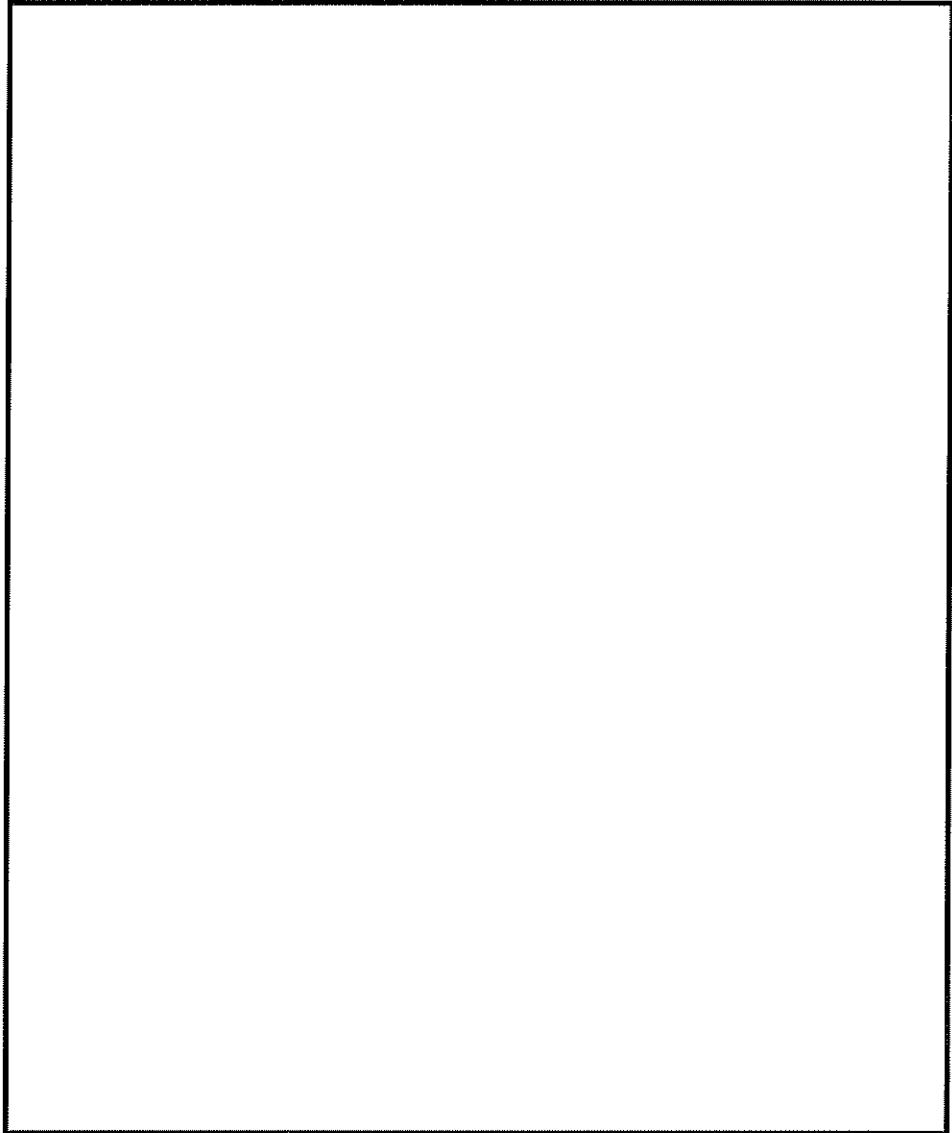
内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)

図 2.4.2-6 貯蔵時の解析モデル (上部トランニオン)

内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)

図 2.4.2-7 貯蔵時の解析モデル（下部トラニオン）

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.2-5 評価結果

項目	評価結果		評価基準	備考
	配置(i)	配置(ii)		
表面線量当量率	1.1 mSv/h	0.90 mSv/h	2mSv/h 以下	各部位の評価結果は、 表 2.4.2-6 に示す。 出力位置は、 図 2.4.2-8 に示す。
表面から 1 m の 位置における線 量当量率	81 μ Sv/h	75 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

表 2.4.2-6(1/2) 線量当量率評価結果(配置(i))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部 中	底部		
	軸方向	径方向	径方向		径方向 (トランニオン部)	径方向 (トランニオン部)	軸方向
		③a	③b				
表面	①			⑤		⑨	
	燃料有効部	0.1	0.5	95.8	1.3	26.8	3.0
	構造材放射化	4.9	132.5	< 0.1*1	12.8	61.7	19.1
	二次ガンマ線	0.7	2.0	26.9	4.6	8.2	2.3
中性子	188.2	253.9	522.0	72.7	706.9	974.8	265.9
合計	193.9	388.9	635.0	195.5	725.6	1071.5*2	290.3
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	0.5	13.3	40.5	21.6	21.6	3.9
	構造材放射化	45.6	24.1	24.1	8.2	8.2	59.3
	二次ガンマ線	0.2	3.2	3.2	5.3	5.4	0.9
	中性子	28.7	17.0	20.8	26.2	13.6	26.9
合計	75.0	57.6	61.4	77.9	48.8	62.1	80.3*2

注記*1: “<0.1” の値は、“0.1” として合計値に合算した。

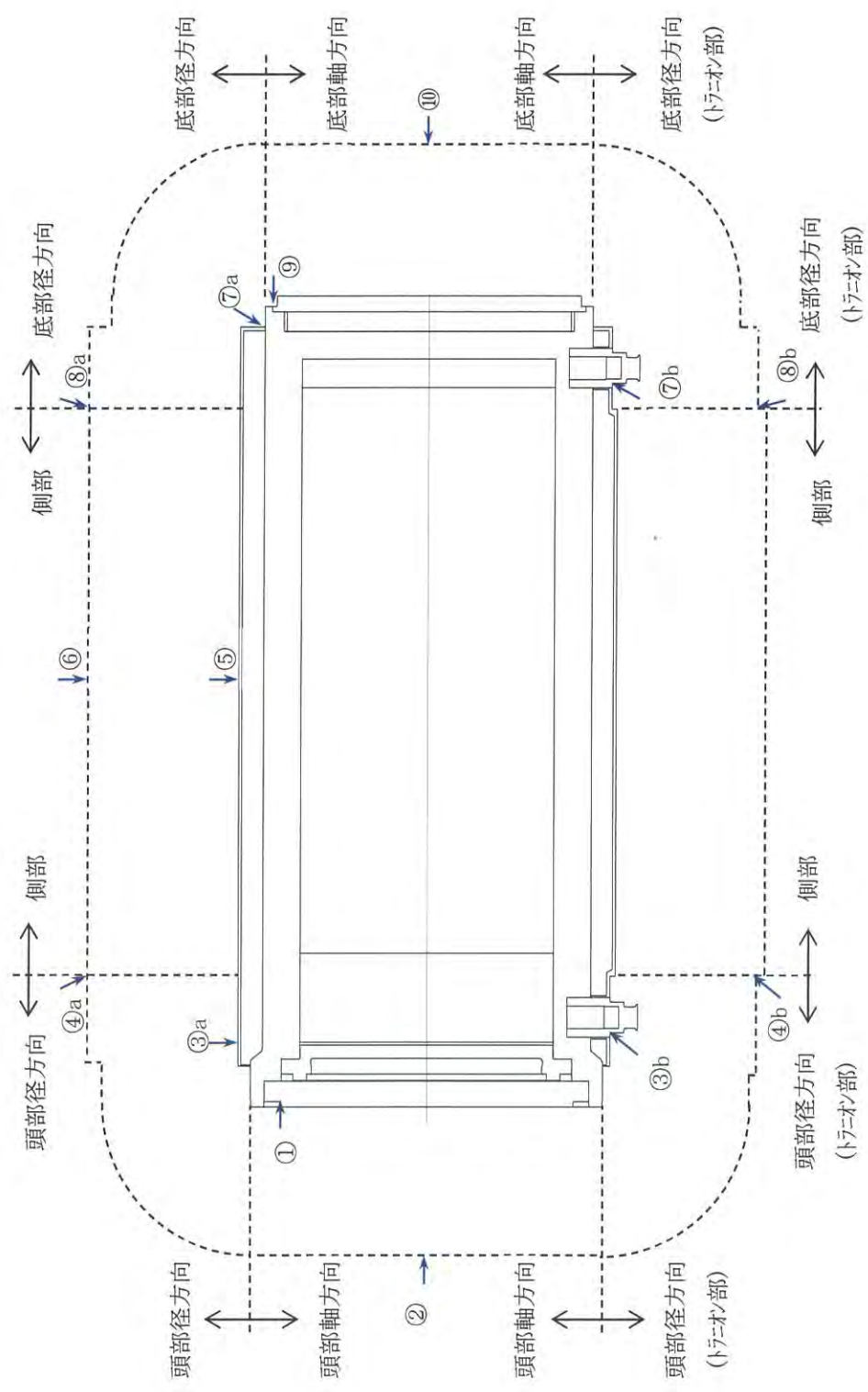
*2: 下線で示す値は、表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率の最大値である。

表 2.4.2-6(2/2) 線量当量率評価結果(配置(ii))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側中部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
								①
表面	ガンマ線	0.1	0.4	0.4	80.9	0.7	16.4	1.7
	燃料有効部	3.7	100.1	83.5	< 0.1 ^{*1}	8.7	42.4	13.0
	構造材放射化	0.8	2.5	2.6	29.4	3.9	7.1	1.9
	二次ガンマ線	230.2	313.2	645.5	81.7	587.3	829.9	221.0
合計	234.8	416.2	732.0	192.1	600.6	895.8	237.6	
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
表面から 1 m	ガンマ線	0.3	11.8	11.8	33.1	16.8	16.8	2.1
	燃料有効部	38.4	18.6	18.6	1.5	5.7	5.7	48.1
	構造材放射化	0.2	4.0	4.0	10.9	5.2	5.2	0.7
	二次ガンマ線	34.6	20.8	25.6	28.7	12.8	24.1	13.0
合計	73.5	55.2	60.0	74.2	40.5	51.8	63.9	

注記*1: “<0.1” の値は、“0.1” として合計値に合算した。



注記*1：①～⑩は評価方向ごとの最大線量当量率位置を示しており、評価結果を第2.4.2-6表に示す。
 第2.4.2-8図 線量当量率評価位置(配置(i)、(ii))

なお、以下の内容は、本型式証明の申請範囲外とする。

(申請範囲外)

- ・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

3. 使用する解析コード

(a) 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 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、炉取り出し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、各核種の放射能量等が求められる。
- 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. 燃料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) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 2.4.2-9 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 コードの検証例を図 2.4.2-10 に示す。

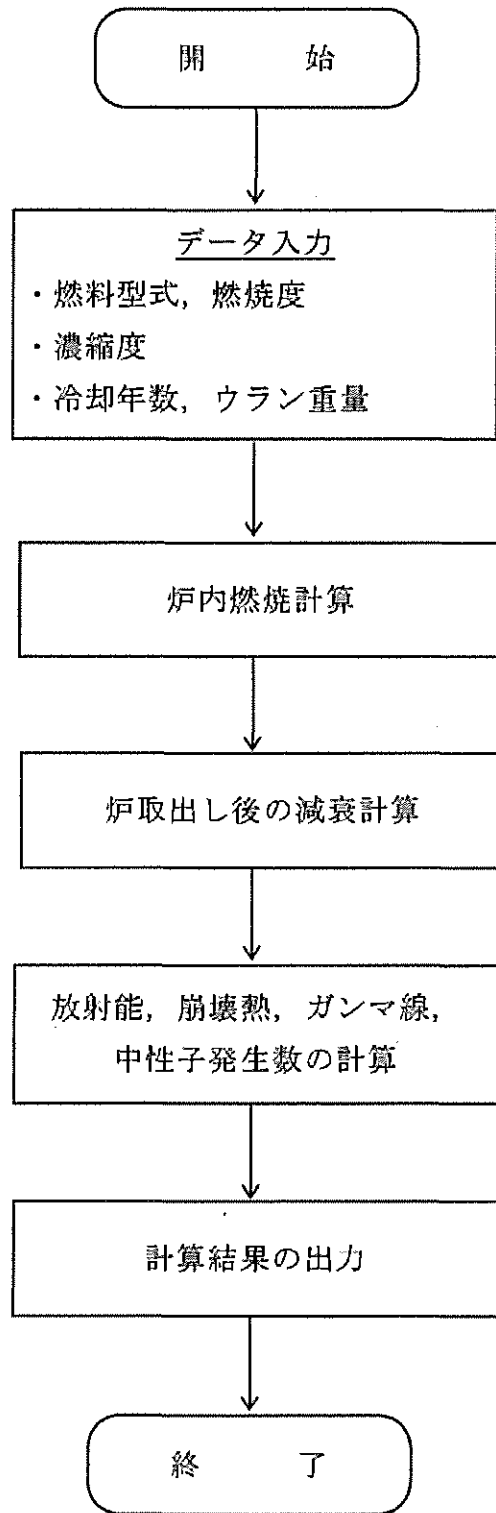


図 2.4.2-9 ORIGEN2 コードの計算フロー図

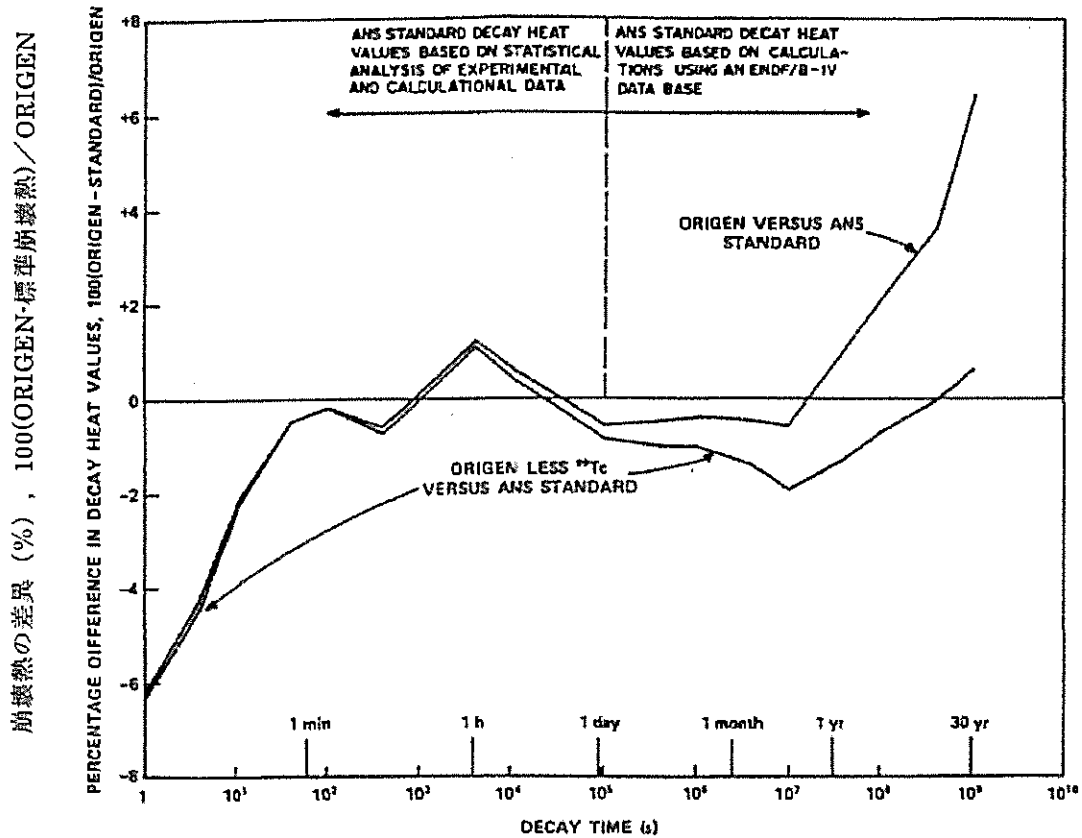


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、7 年以上（貯蔵容器に収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値をしている。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。

図 2.4.2-10 ORIGEN2 コードの検証例

出典：A. G. Croff, "ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol. 62 p335, (1983)

(b) DOT3.5 コード

(1) 概要

DOT 3.5 コード⁽³⁾(以下「DOT コード」という。)は二次元輸送コードであり、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された輸送コードである。

(2) 機能

DOT コードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- a. ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解法であり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- b. DOT コードは、2次元の体系を扱うことができる。

(3) 計算フロー

DOT コードの解析フローを図 2.4.2-11 に示す。

(4) 使用実績及び検証

DOT コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値を図 2.4.2-12 に示す。測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している⁽⁴⁾。

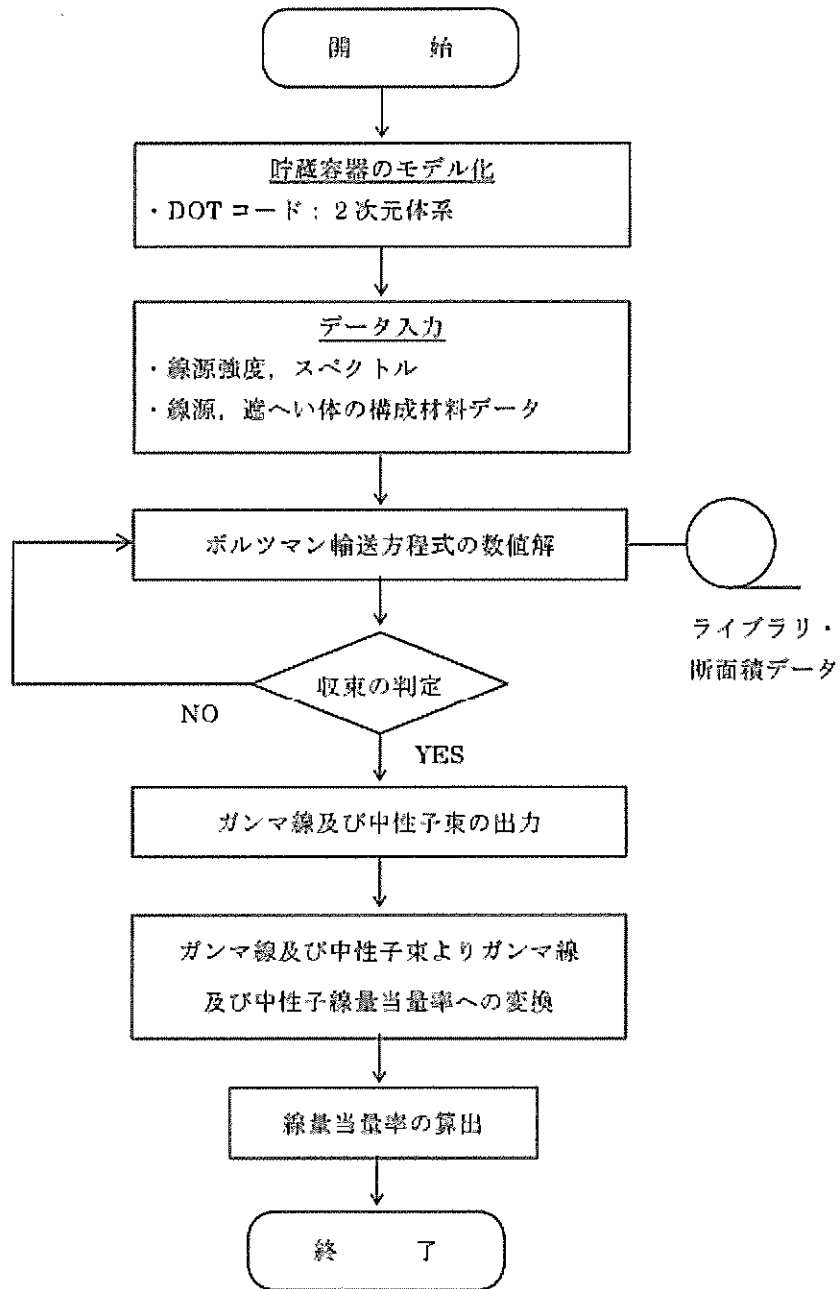
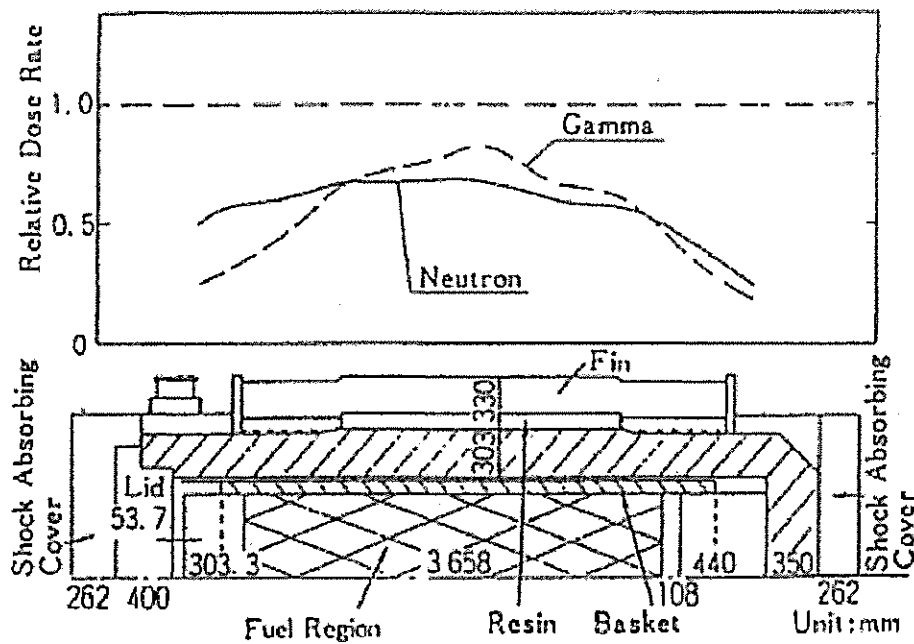


図 2.4.2-11 DOT コードの解析フロー図



注) 中性子を DOT、二次ガンマ線を ANISN(一次元輸送コードで計算法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD(点減衰核積分法によるもので、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、建屋の遮蔽解析の豊富な実績がある。)の各コードで解析した結果である。

第 2.4.2-12 図 DOT コードの検証例

出典: 松田文夫、他, "TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性(I) 線量率" 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」, C17 (1981)

4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法(よこ置き)の場合
緩衝体等を装着しないよこ置きの場合、図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 の解析モデルと同じ条件であることから、表 2.4.2-5 に示す評価結果も変わらない。
5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の場合
緩衝体等を見做し、緩衝体等による遮蔽効果を考慮しないモデル化とすることで、図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 の解析モデルと同じとなるため、表 2.4.2-5 に示す評価結果も変わらない。
6. 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, p335, (1983)
 - (3) ORNL-RSIC, "DOTill : A Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code", CCC-209, 1973年6月
 - (4) 松田文夫、他, "TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性(I)線量率", 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」、C17(1981)

燃焼度分布の設定について

燃焼度分布の設定について

1. 燃焼度分布の設定について

HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料の線源強度を算出する際に用いるピーキングファクター(以下「PF」という。)は、HDP-69BCH(B)型が収納対象とする使用済燃料の軸方向の燃焼度を想定して設定したものである。表1及び図1に配置(i)、(iii)及び(ii)で、収納対象とする使用済燃料ごとに設定したPFを示す。

表1及び図1に示すPFは、HDP-69BCH(B)型に使用済燃料を収納するための条件であり、収納する使用済燃料の軸方向燃焼度分布が本PFに包含されることは、設置(変更)許可申請において確認されるものとする。なお、包含されない使用済燃料については、HDP-69BCH(B)型の収納対象外とする。

2. 配置(i)及び(ii)のPFについて

(1) 配置(i)のPFについて

PFは使用済燃料の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比であり、次式で表される。

$$(\text{各ノードのPF}) = (\text{各ノードの燃焼度}) \div (\text{燃料の平均燃焼度})$$

配置(i)のPFは、貯蔵対象となる燃料が装荷された国内プラントについて、炉型毎に代表プラントを選定し、各プラントの燃焼度の高い燃料上位10体及びPFの高い燃料上位10体のPFを包含できるように設定したものである。図2に新型8×8ジルコニウムライナ燃料のPF設定例を示す。

図2に示す一部のノードでPFが高い燃料は、図3に示すように全体的に燃焼度が低い。PFが比較的フラットな燃料は、軸方向にフラットに燃焼しているため、全体的に燃焼度が高くなる傾向にある。配置(i)のPFは、一部のノードでPFが高い燃料も、PFが比較的フラットな燃料も、全て包含できるように設定したことから、図3に示すように、配置(i)の収納対象とする燃料の軸方向燃焼度分布に対して、配置(i)のPFに平均燃焼度を乗じて算出した軸方向燃焼度分布(以下「PF相当の軸方向燃焼度分布」という。)は十分な余裕がある。

(2) 配置(ii)のPFについて

a. 設定の考え方

配置(ii)のPFは、貯蔵対象とする燃料の軸方向の燃焼度分布を包含できるように設定したものである。

b. 貯蔵対象燃料の調査

貯蔵対象となる燃料が装荷された国内プラントについて、代表プラント(前記2.(1)項のプラントを含む)を選定し、プラント毎に、各ノードの燃焼度が最も高い燃料を調

査した。対象プラントには、燃料の平均燃焼度が 48 GWd/t を超える高燃焼度 8×8 燃料が少数存在するが、HDP-69BCH(B)型の貯蔵対象外であるため、調査対象から除いた。

c. PF の設定

図 4～図 6 に示すように、貯蔵対象とする燃料の軸方向燃焼度分布を包含するような軸方向燃焼度分布を求め、収納条件としている平均燃焼度(40 及び 48 GWd/t)で除することによって PF を設定した。なお、HDP-69BCH(B)型の設計崩壊熱量 15.34 kW/基を超えないように PF を設定するために、一部の燃料は収納対象から除外している。したがって、配置(ii)に燃料を収納する際には、燃料毎に軸方向燃焼度が配置(ii)の条件を満たしていることを確認する必要がある。

(3) 配置(i)と(ii)で PF を変えることについて

HDP-69BCH(B)型は、設計崩壊熱量 15.34kW で設計されており、同一の設計崩壊熱量に対して、燃焼度と冷却期間の組合せが複数存在する。

配置(i)は、平均燃焼度が低く、冷却期間が比較的短い使用済燃料が貯蔵されているプラントで、配置(ii)は、平均燃焼度が高く、冷却期間が比較的長い使用済燃料が貯蔵されているプラントで使用される場合を想定している。

配置(i)の PF は、収納対象とする使用済燃料に対して、PF の高い燃料及び軸方向燃焼度の高い燃料のどちらも包含するように PF を設定している。これにより、実際の燃料の軸方向燃焼度分布を余裕を持って上回るような設定となっており、収納時に使用済燃料の軸方向燃焼度分布の確認を必要としない。一方、配置(ii)の PF は、収納対象とする燃料の軸方向燃焼度分布を包含するように設定しているため、収納時に軸方向燃焼度分布を確認する必要があるものの、設計崩壊熱量の制限内でより広い範囲の燃料を収納することができる。

以上のように、HDP-69BCH(B)型では事業者の利便性の拡大のため、配置(i)と(ii)で異なる PF を設定することで、配置(i)と(ii)を適宜選択できるようにしている。

(4) ノード分割の違いについて

配置(i)の PF のノード分割は 分割、配置(ii)の PF のノード分割は 分割としている。燃料の燃焼度は ノードで計算されるが、配置(i)では、軸方向燃焼度の変化が大きい端部の PF をより細かく設定するために、 分割としている。

3. 配置(ii)の場合に事業者が確認すべき事項について

配置(ii)の使用済燃料の収納位置条件を図 7 を示す。また、確認のフローを図 8 に示す。型式証明申請書における配置(ii)に対しては、事業者が確認する軸方向燃焼度を記載している。

内は商業機密のため、非公開とします。

4. 軸方向燃焼度の算出過程における計算誤差について

燃焼度の算出に用いられる SIMULATE-3 コードの計算誤差について、参考文献⁽¹⁾に、コード開発元の Studsvik 社より SIMULATE-3 コードの解析値とガンマスキャンデータの比較が示されている。SIMULATE-3 コードは、世界各国の多数の電力会社において、取替炉心設計(熱的制限値、原子炉停止余裕、炉心安定性)及び運転中炉心管理(起動、制御棒パターン調整、運転計画)等に適用されている。例えば、東京電力 HD 殿⁽²⁾では、BWR の 13 プラントで、累計 140 サイクル以上での使用実績がある。参考文献⁽¹⁾では、ガンマスキャンデータとの比較から計算誤差(RMS 誤差)は 4.5 %と評価されており、燃焼度の誤差についても同程度と推定される。また、本文献には、TIP による測定値との比較も示されており、計算誤差(RMS 誤差)は 3.0 %とされている。よって、ガンマスキャンデータとの比較の方が誤差が大きいため、燃焼度の算出過程における計算誤差として 4.5 %を考慮する。

配置(ii)において、燃焼度の算出過程における計算誤差を 4.5 %とした場合の影響を以下に示す。

除熱機能については、収納条件として設定している崩壊熱量(最大崩壊熱量)ではなく、収納対象燃料の軸方向燃焼度分布を包含するように保守的に設定した配置(ii)の PF を考慮した設計崩壊熱量を用いて除熱評価を行っているため、実際に収納される燃料よりも燃料 1 体当たりの平均燃焼度が高い燃料が収納される条件で評価を行っている。配置(ii)の評価では、燃料 1 体当たりの崩壊熱量が大きい高燃焼度 8×8 燃料の値を用いて設計崩壊熱量を設定している。表 2 に配置(ii)の各燃料の PF の平均値を示す。表 2 に示すように燃焼度が 40GWd/t の高燃焼度 8×8 燃料の PF の平均値は であり、燃焼度で約 %の保守性を持った条件で発熱量を評価している。また、表 1 に示す配置(i)の新型 8×8 ジルコニウライナ燃料、高燃焼度 8×8 燃料の PF の平均値は、 であり、燃焼度で約 %の保守性を有しており、配置(ii)の燃焼度に対して保守性を持つ。

遮蔽機能については、キャスク中央部に最高燃焼度(48 GWd/t)の燃料 37 体、外周部に平均燃焼度(40 GWd/t)の燃料 32 体を配置する条件で遮蔽解析を行っており、以下に示すように、キャスク 1 基当たりの燃焼度で約 %の保守性を持った条件で線源強度を評価している。

$$\frac{(48\text{GWd/t} \times 37 \text{体} + 40\text{GWd/t} \times 32 \text{体})}{40\text{GWd/t} \times 69 \text{体}} = 1.107$$

また、軸方向燃焼度分布については、配置(ii)の PF を考慮して線源強度を評価しているため、表 2 に示すように、燃料 1 体当たりの平均燃焼度で約 %の保守性をもった条件で線源強度を評価している。

以上のように、燃焼度の計算誤差は、評価上の保守性に包含されると考えられる。

5. 参考文献

- (1) Sten-Örjan Lindahl, Tamer Bahadir, “EVALUATION OF GAMMA SCANNING IN OSKARSHAMN2 WITH SIMULATE-5” ,PHYSOR 2010, (2010)
- (2) 東電ソフトウェア株式会社、「BWR 定常炉心解析手法について」、TCMO-96001、(平成 8 年 9 月)

内は商業機密のため、非公開とします。

表 1(1/2) 使用済燃料のピーキングファクター

燃料種類	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料				高燃焼度 8×8 燃料				新型 8×8 燃料			
	配置 (i)								配置 (iii)			
使用済燃料の 収納配置条件	配置 (i)								配置 (iii)			
燃焼度 (MWd/t)	34,000		40,000		34,000		40,000		29,000		34,000	
冷却期間 (年)	18		同左		18		同左		28		同左	
ピーキング ファクター *1	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF
(下部)												

注記*1：ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 1(2/2) 使用済燃料のピーキングファクター

燃料種類	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	
使用済燃料の 収納配置条件	配置 (ii)		
燃焼度 (MWd/t)	40,000	40,000	48,000
冷却期間 (年)	22	22	20
ピーキングファクター *1 (上部)			
(下部)			

注記 *1 : ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

内は商業機密のため、非公開とします。

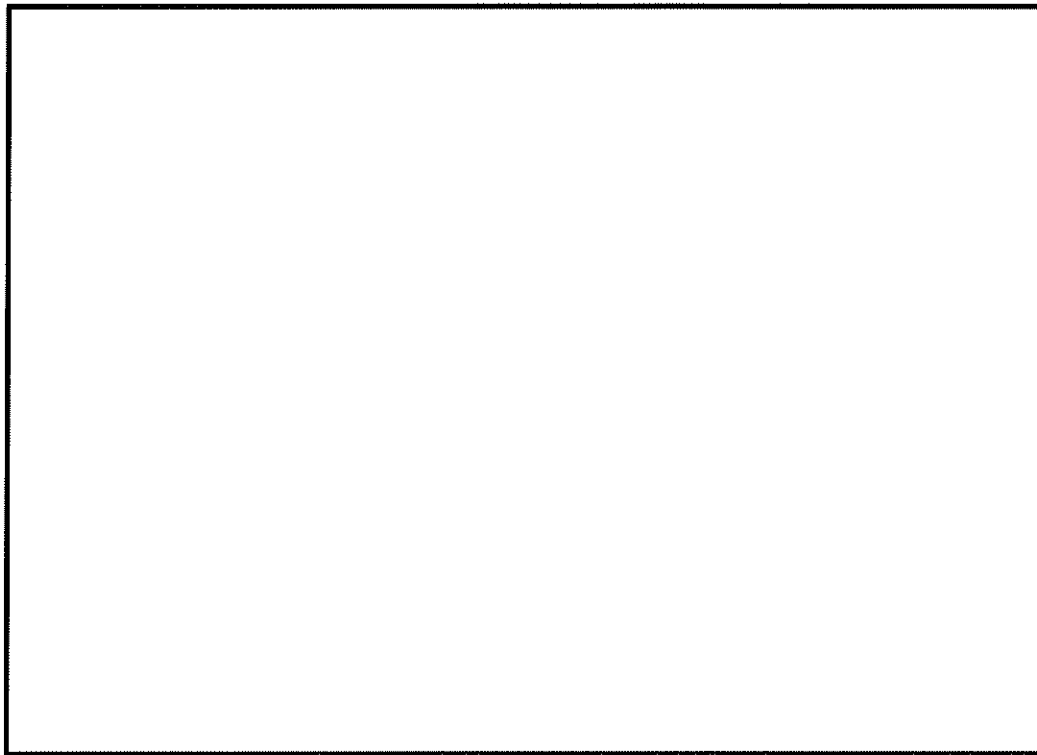


図 1(1/2) 使用済燃料のピーキングファクター(配置(i)、(iii))

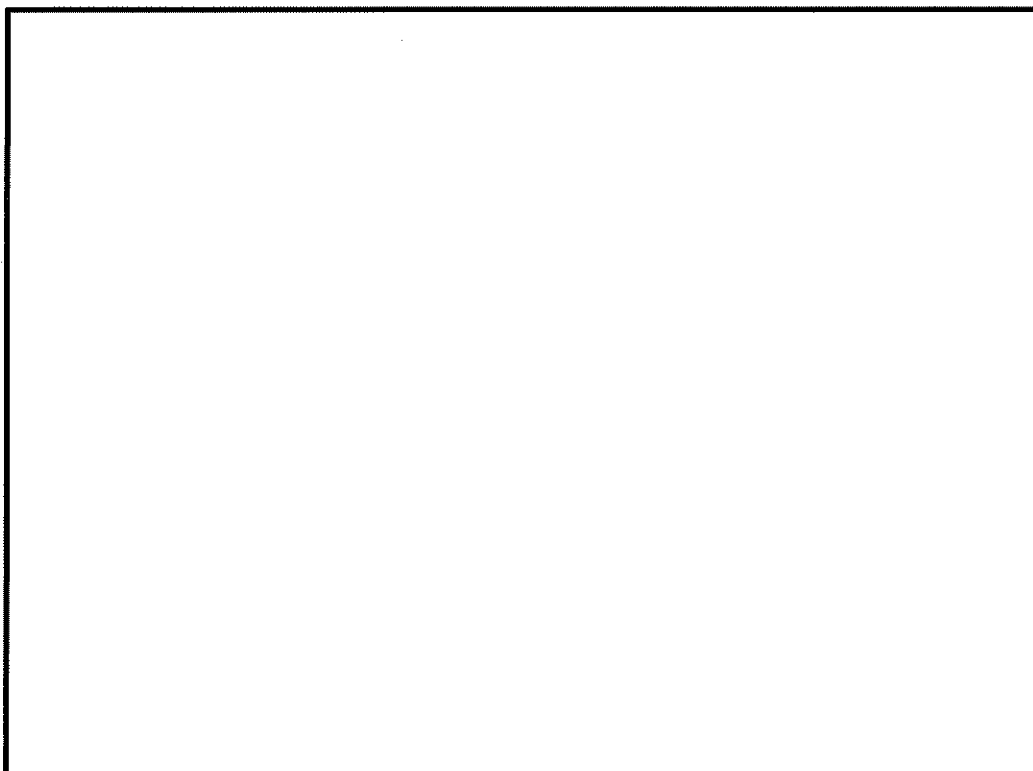


図 1(2/2) 使用済燃料のピーキングファクター(配置(ii))

内は商業機密のため、非公開とします。

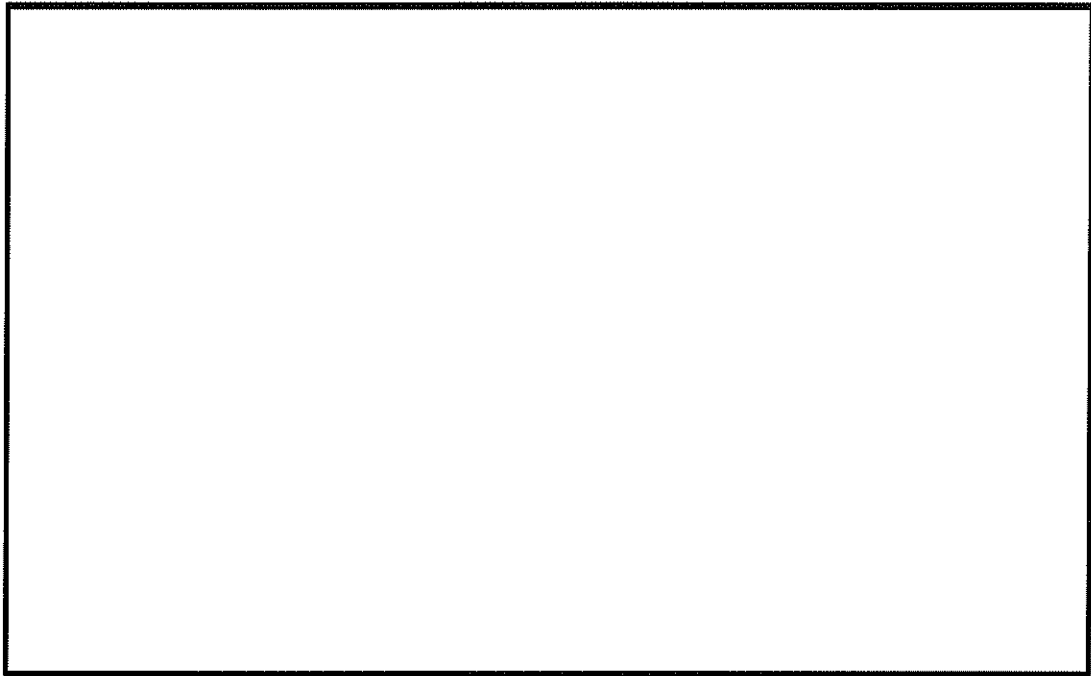



図2 新型8×8ジルコニウムライナ燃料のPF分布



図3 新型8×8ジルコニウムライナ燃料の軸方向燃焼度分布

 内は商業機密のため、非公開とします。

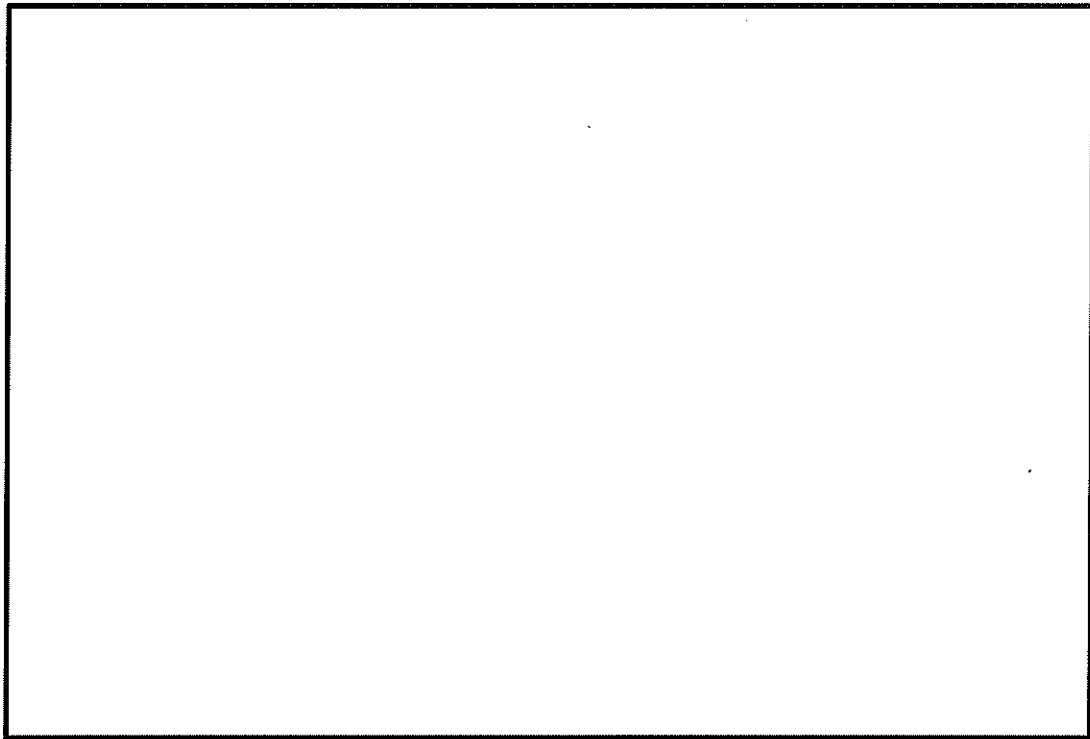


図4 新型8×8ジルコニウムライナ燃料(平均燃焼度 0~40 GWd/t)の軸方向燃焼度分布

内は商業機密のため、非公開とします。

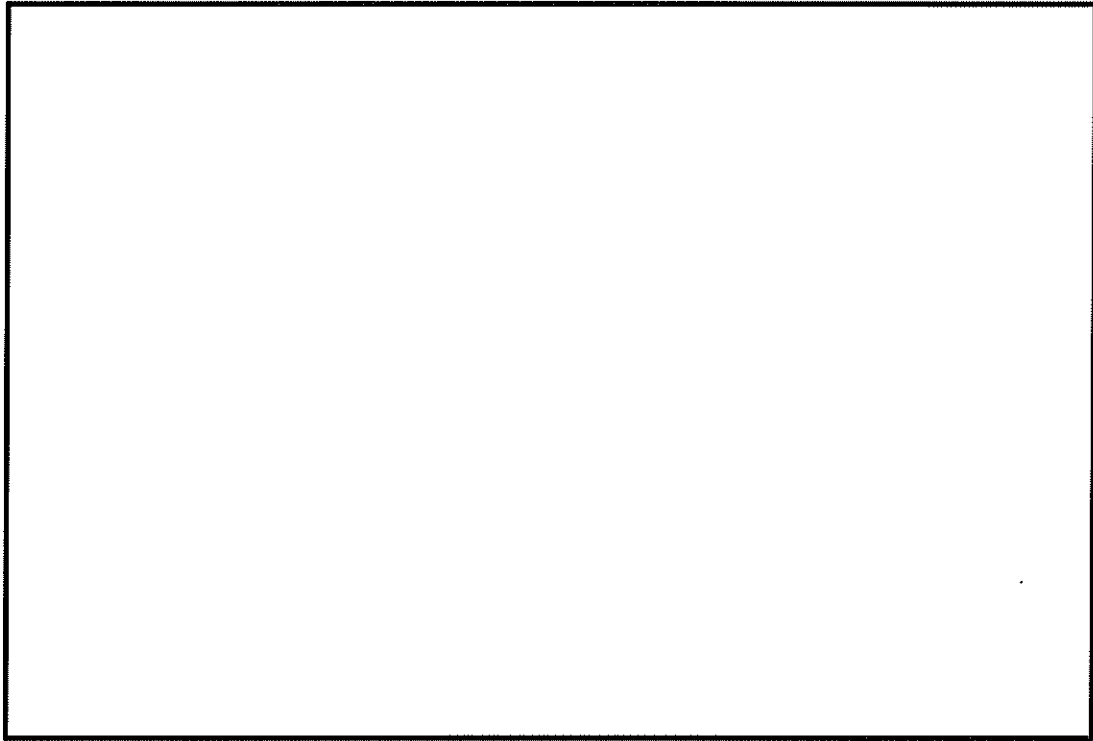


図 5 高燃焼度 8×8 燃料(平均燃焼度 0~40 GWd/t)の軸方向燃焼度分布

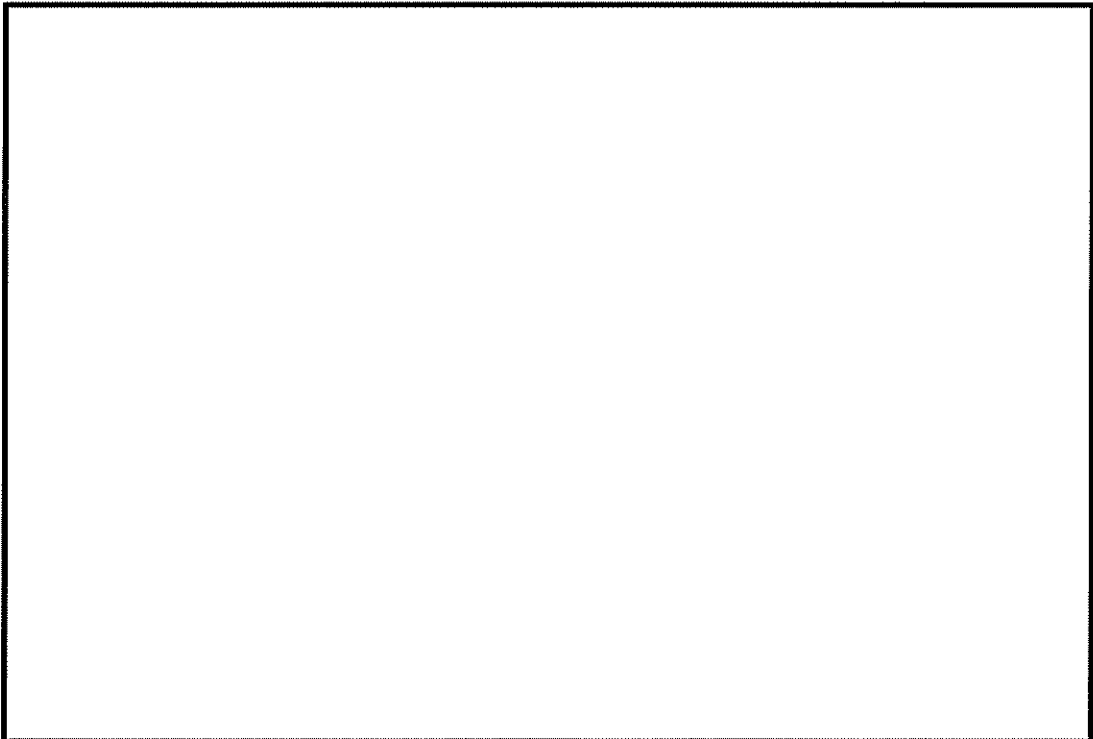
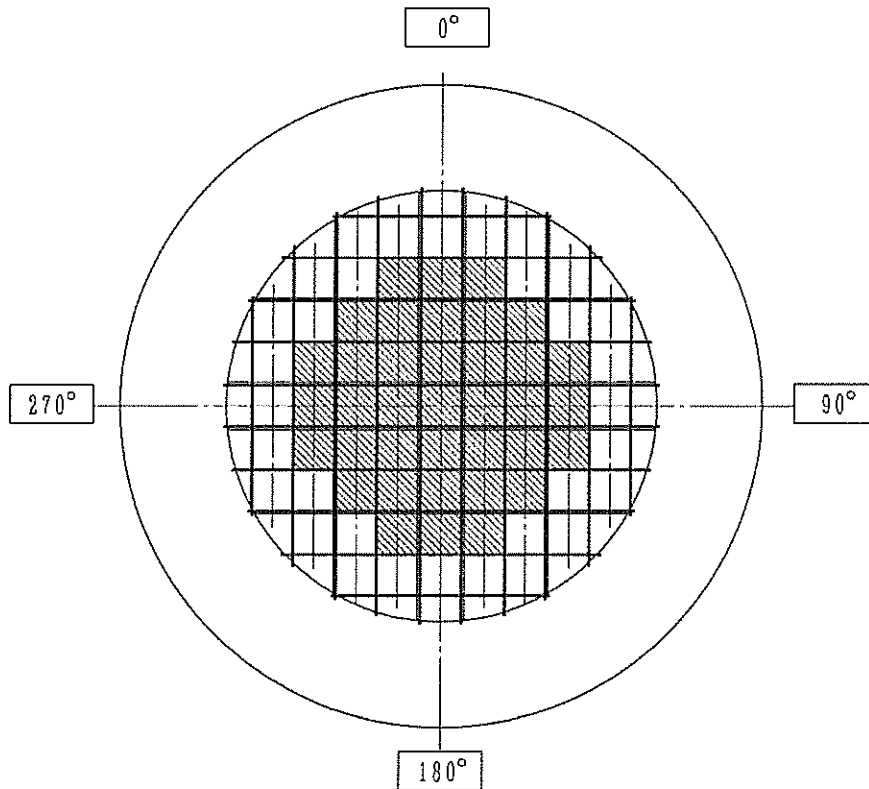


図 6 高燃焼度 8×8 燃料(平均燃焼度 0~48 GWd/t)の軸方向燃焼度分布

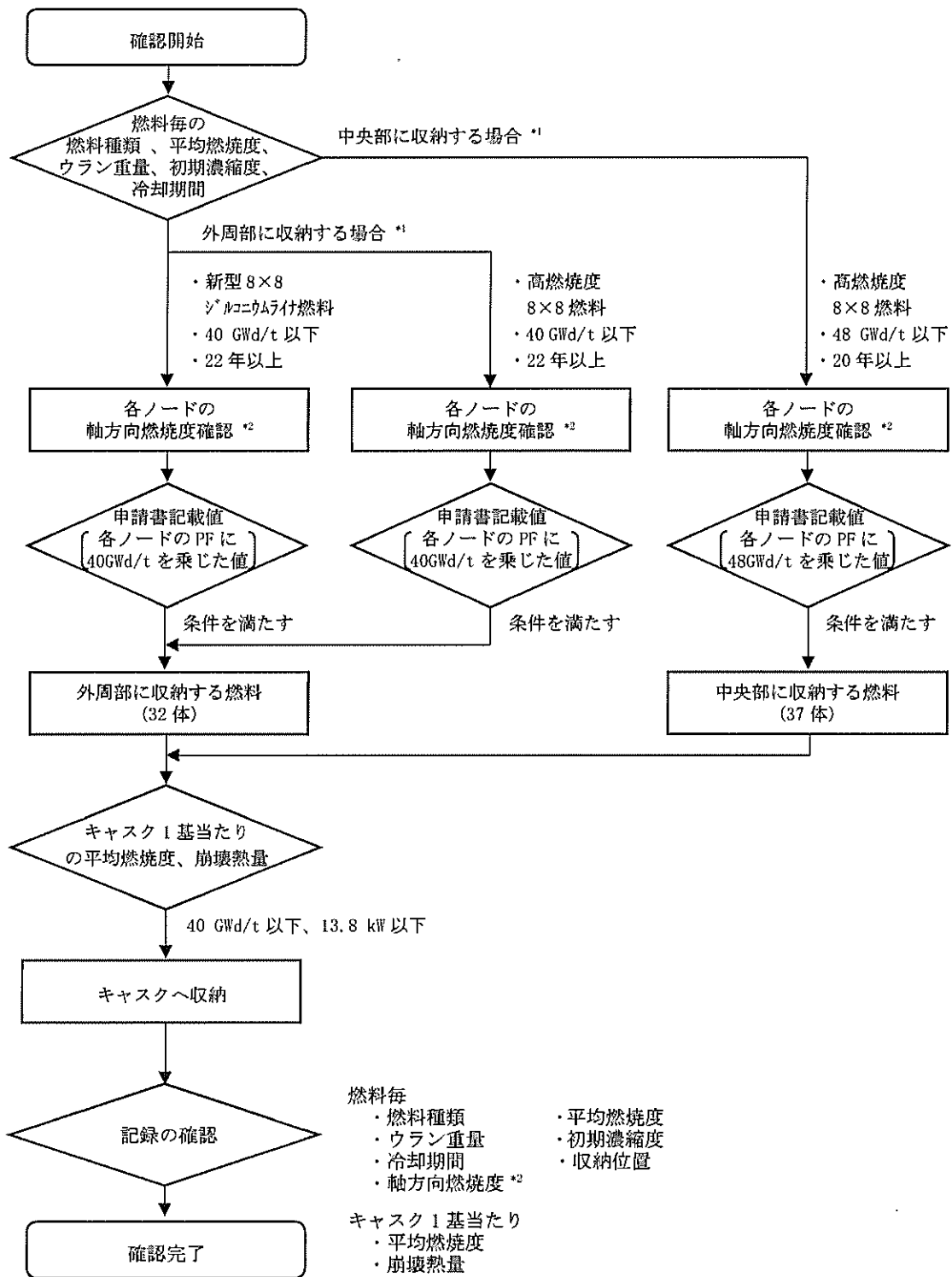
内は商業機密のため、非公開とします。



- | | |
|---|---|
| □ | 燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
収納体数 : 32 体
燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
冷却期間 : 22 年以上 |
| ▨ | 燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料
収納体数 : 37 体
燃焼度 : 48,000 MWd/t 以下
冷却期間 : 20 年以上 |

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

図 7 使用済燃料の収納位置条件(配置(ii))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載収納する場合)



注記*1：平均燃焼度が 40 GWd/t 以下の高燃焼度 8×8 燃料は、外周部及び中央部どちらにも収納可能。
 *2：配置 (i) では軸方向燃焼度の確認を必要としない。
 *3：上記フローにおいて、いずれの収納位置条件も満たせない燃料は配置 (ii) の収納対象外とする。

図 8 配置 (ii) に使用済燃料を収納する場合の事業者の確認フロー

表 2 配置(ii)のPFの平均値

燃料種類	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料		
使用済燃料の 収納配置条件	配置(ii)			
燃焼度(MWd/t)	40,000	40,000	48,000	
冷却期間(年)	22	22	20	
ピーキングファクター*1 (上部)				
(下部)				
PFの平均値*1		1.05	1.11	1.08

注記*1：小数第3位を切り捨て

内は商業機密のため、非公開とします。

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(HDP-69BCH(B)型の除熱機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合
5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の場合
6. 参考文献

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型の除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の放射線熱を適切に除去できるものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項

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

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

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

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項

第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。

二 貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。

三 使用済燃料及び金属キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために必要なデータを測定等により取得できること。

c. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第5項

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

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

2. 適合性について

設置（変更）許可に係る審査で確認される兼用キャスクの有する 4 つの安全機能（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本型式証明申請で確認する。HDP-69BCH(B)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。

- ・ 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- ・ 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- ・ 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

HDP-69BCH(B)型は、使用済燃料の健全性及び安全機能を有する兼用キャスク構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計とする。

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

HDP-69BCH(B)型の伝熱形態図を図 2.4.3-1 に示す。兼用キャスク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。

- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射によりバスケットへ伝えられる。
- b) バスケットに伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導によりバスケット外周部へ伝えられる。
- c) バスケット外周部に伝えられた熱は、バスケット外表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射により兼用キャスク本体内面へ伝えられる。
- d) 兼用キャスク本体内面に伝えられた熱は、熱伝導により兼用キャスク本体外面へ伝えられる。
- e) 兼用キャスク本体外面へ伝えられた熱は、兼用キャスク本体外面の対流により兼用キャスク周囲の空気へ伝えられる。また、兼用キャスク本体外面のふく射により貯蔵建屋等に伝えられる。

兼用キャスクの除熱解析フローを図 2.4.3-2 に示す。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

HDP-69BCH(B)型に収納される使用済燃料の収納配置は配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)の3つである。これら収納配置における使用済燃料の配置条件をそれぞれ図 2.4.3-3～図 2.4.3-5 に示す。HDP-69BCH(B)型に収納される使用済燃料の仕様を表 2.4.3-1 に示す。使用済燃料の崩壊熱量は、燃料集合体の種類、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求める。使用済燃料の崩壊熱量の計算に用いる計算条件及び計算結果を表 2.4.3-2 に示す。

除熱解析に使用する兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量（以下「設計崩壊熱量」という。）は、使用済燃料の軸方向燃焼度分布を考慮して次式のとおり設定する（図 2.4.3-6 参照）。

$$[\text{設計崩壊熱量}] = [\text{使用済燃料 (平均燃焼度}^{\ast 1}) \text{ 1 体当たりの崩壊熱量 (軸方向燃焼度分布を考慮}^{\ast 2})] \times 1.05^{\ast 3} \times [\text{収納体数}]$$

注記*1：平均燃焼度とは、兼用キャスク 1 基当たりに収納される使用済燃料に対する燃焼度の平均値を表す。

*2：使用済燃料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。))を用いて考慮する。PF は、収納する使用済燃料の軸方向燃焼度分布を包含するように設定している（表 2.4.3-3 及び表 2.4.3-4 参照）。

*3：ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の保守性を考慮する。

表 2.4.3-3 及び表 2.4.3-4 に示す PF を用いて崩壊熱量を評価すると、使用済燃料 1 体当たりの崩壊熱量は配置(i)では新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料、配置(ii)では高燃焼度 8×8 燃料の値が大きいため、これらの値を用いて配置(i)及び配置(ii)の設計崩壊熱量を設定する。

配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)の設計崩壊熱量は、以下のとおり。

(配置(i)：新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納した場合)

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.2118 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 69 \text{ (体)} = 15.34 \text{ (kW)}$$

(配置(ii)：高燃焼度 8×8 燃料を収納した場合)

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.2116 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 69 \text{ (体)} = 15.33 \text{ (kW)}$$

(配置(iii)：新型 8×8 燃料を収納した場合)

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.1432 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 69 \text{ (体)} = 10.37 \text{ (kW)}$$

以上より、本評価においては、以下の保守性を有している。

- ・使用済燃料の最高温度を保守的に評価するため、収納制限における最大崩壊熱量（配置(i) : 12.1kW、配置(ii) : 13.8kW、配置(iii) : 8.4kW）よりも大きい設計崩壊熱量で評価を行っている。

b. 兼用キャスク各部及び燃料被覆管の温度評価

除熱解析は、HDP-69BCH(B)型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法による伝熱解析コード(ABAQUS)を使用して求める。使用した解析モデルは以下の3つである。

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

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

各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

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

また、HDP-69BCH(B)型周囲の環境として、以下の条件とする。

- ・貯蔵姿勢 : たて置き
- ・周囲温度 : 45℃
- ・貯蔵建屋壁面温度 : 65℃

なお、本評価においては、以下の保守性を有している。

- ・全体モデル解析では、平均燃焼度の使用済燃料が 69 体収納されている条件 (発熱量の総量が設計崩壊熱量となる。) としている。輪切りモデル解析では、中央部の 37 体の使用済燃料は最高燃焼度の崩壊熱量とし、発熱量の総量が設計崩壊熱量となるように外周部の発熱量を調整している。設計崩壊熱量は、収納する使用済燃料の軸方向燃焼度分布を包絡するように設定した軸方向燃焼度分布を使用し、ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の保守性を考慮して算出していることから、実際に収納される使用済燃料の崩壊熱量に対して保守的な値としている。燃料集合体モデル解析では最高燃焼度の崩壊熱量を用いている。
- ・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、温度を高めめに評価するよう、空間の中央に配置し、実際には兼用キャスク本体とバスケット及びバスケットと使用済燃料が接触することで部材間の直接の伝熱が存在すると考えられるが、これを無視する。これにより、兼用キャスク内の使用済燃料

の配置状態に影響する兼用キャスクの設置姿勢（たて置き又はよこ置き）に除熱上の制限はない。

- ・燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。

c. 評価結果

HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価基準を表 2.4.3-5 に、HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価結果を表 2.4.3-6 及び図 2.4.3-14～図 2.4.3-22 に示す。解析の結果、燃料被覆管の温度及び兼用キャスク各部位の温度は表 2.4.3-5 に示す評価基準を満足しており、HDP-69BCH(B)型は使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計となっている。

表 2.4.3-1 使用済燃料の仕様

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

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

*2：最短冷却期間とは、収納する使用済燃料の最短の冷却期間を示す。

表 2.4.3-2 使用済燃料の崩壊熱量計算条件及び結果

種類		配置(i)		配置(ii)		配置(iii)	
		新型8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8燃料		
計算条件	平均燃焼度*1 (MWd/t)	34,000	34,000	40,000	40,000	29,000	
	最高燃焼度*2 (MWd/t)	40,000	40,000	—	48,000	34,000	
	比出力 (MW/t)	25.3	26.2	25.3	26.2	25.3	
	照射期間	燃料集合体 (平均燃焼度*1)		1,344	1,298	1,527	1,147
	(日)	燃料集合体 (最高燃焼度*2)		1,582	1,527	1,833	1,344
	初期濃縮度*3 (%)			2.88	3.35	2.88	2.88
	冷却期間 (年)			18	18	22 / 20*4	28
	ウラン質量 (kg)			177	174	177	177
	ピーキングファクター			表 2.4.3-3		表 2.4.3-4	表 2.4.3-3
	使用済燃料1体当たりの	平均燃焼度	211.8	201.3	207.4	211.6	143.2
	崩壊熱量 (PF考慮) (W)	最高燃焼度	266.9	251.8	—	275.1	174.4
収納体数 (体)		69					
HDP-69BCH(B)型1基当たりの設計崩壊熱量*5 (kW)		15.34		15.33		10.37	

注記*1：平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料に対する使用済燃料の種類ごとの燃焼度の平均値を示す。

*2：最高燃焼度とは、収納する使用済燃料1体の燃焼度の最大値を示す。

*3：収納される使用済燃料の種類ごとの最小値を用いる。

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

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

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

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

注記*1：ノードは燃料有効部を軸方向に [] したものである。

*2：ピーキングファクター

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.3-4 使用済燃料の軸方向燃焼度分布 (配置(ii))

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

注記*1: ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

*2: ピーキングファクター

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.3-5 除熱機能の設計基準

対象となる部位		設計基準値 (°C)	設計基準値の考え方
燃料 被覆管	新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料	300 ⁽¹⁾⁽²⁾	燃料被覆管の累積クリープ量が 1% を超えない温度、照射硬化回復現象 により燃料被覆管の機械的特性が 著しく低下しない温度及び水素化 物の再配向による燃料被覆管の機 械的特性の低下が生じない温度以 下とする。
	高燃焼度 8×8 燃料		
	新型 8×8 燃料	200 ⁽¹⁾⁽²⁾	
兼用 キャスク	胴、外筒及び蓋部	350 ⁽³⁾	安全機能及び構造強度の維持が必 要な構成部材は、健全性が維持でき る温度以下とする。
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	150 ⁽⁴⁾	
	金属ガスケット	130 ⁽⁵⁾	
	バスケットプレート (ほう素添加 ステンレス鋼)	300 ⁽⁶⁾	
	トラニオン	350 ⁽³⁾	

表 2.4.3-6 除熱解析結果

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

注記*1：燃料棒の最高温度とした。なお、燃料棒には二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して均質化した物性値を設定している。

*2：照射硬化回復試験の結果、BWR 燃料では、約 270°Cでは照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている⁽⁷⁾。

*3：配置(iii)における解析結果を示す。

*4：蓋部、底部、側部中性子遮蔽材のうち、最も高い温度を示す。

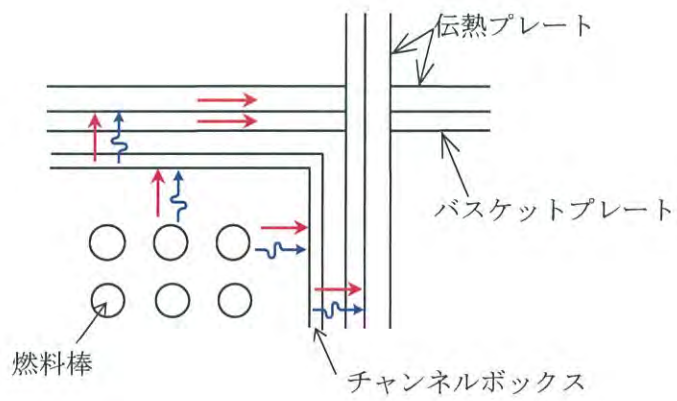
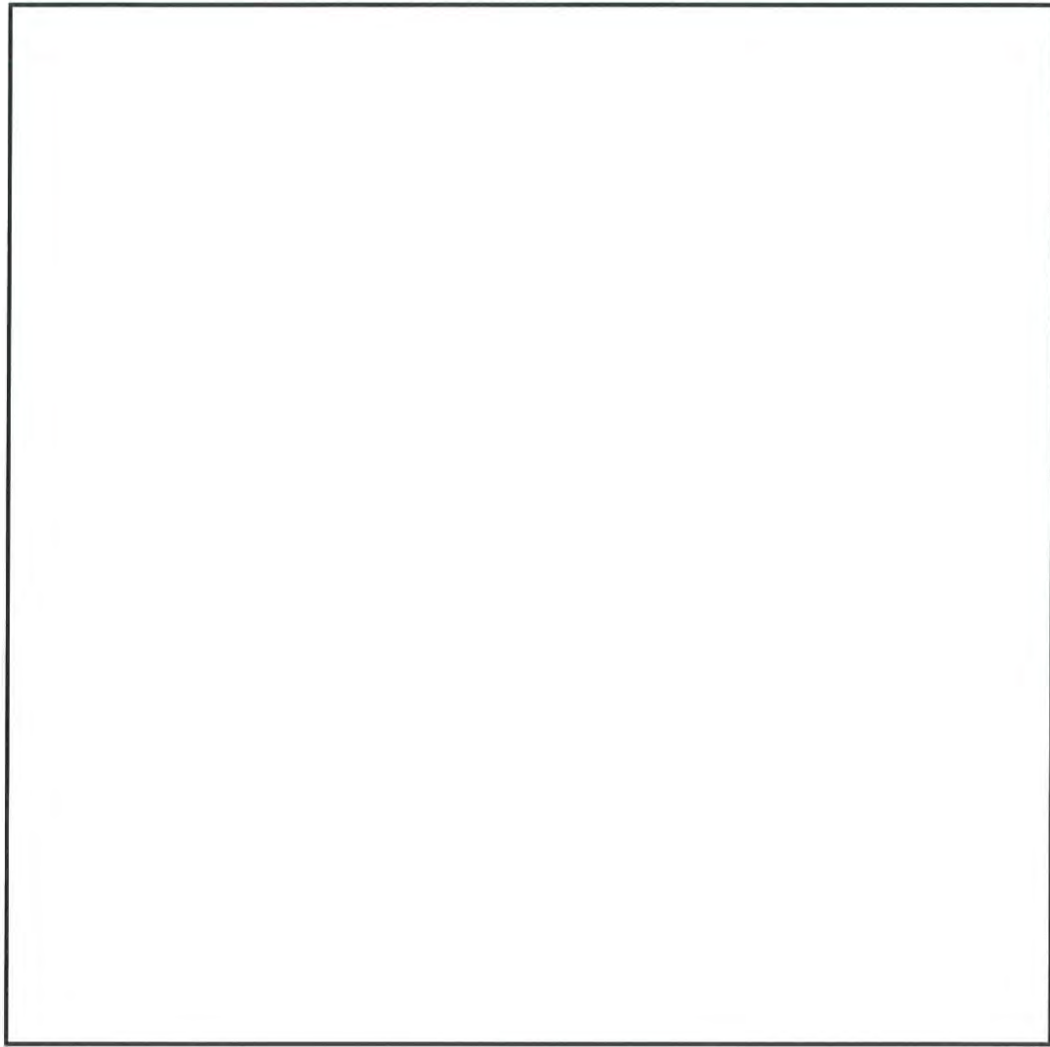


図 2.4.3-1 HDP-69BCH(B)型の伝熱形態図

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

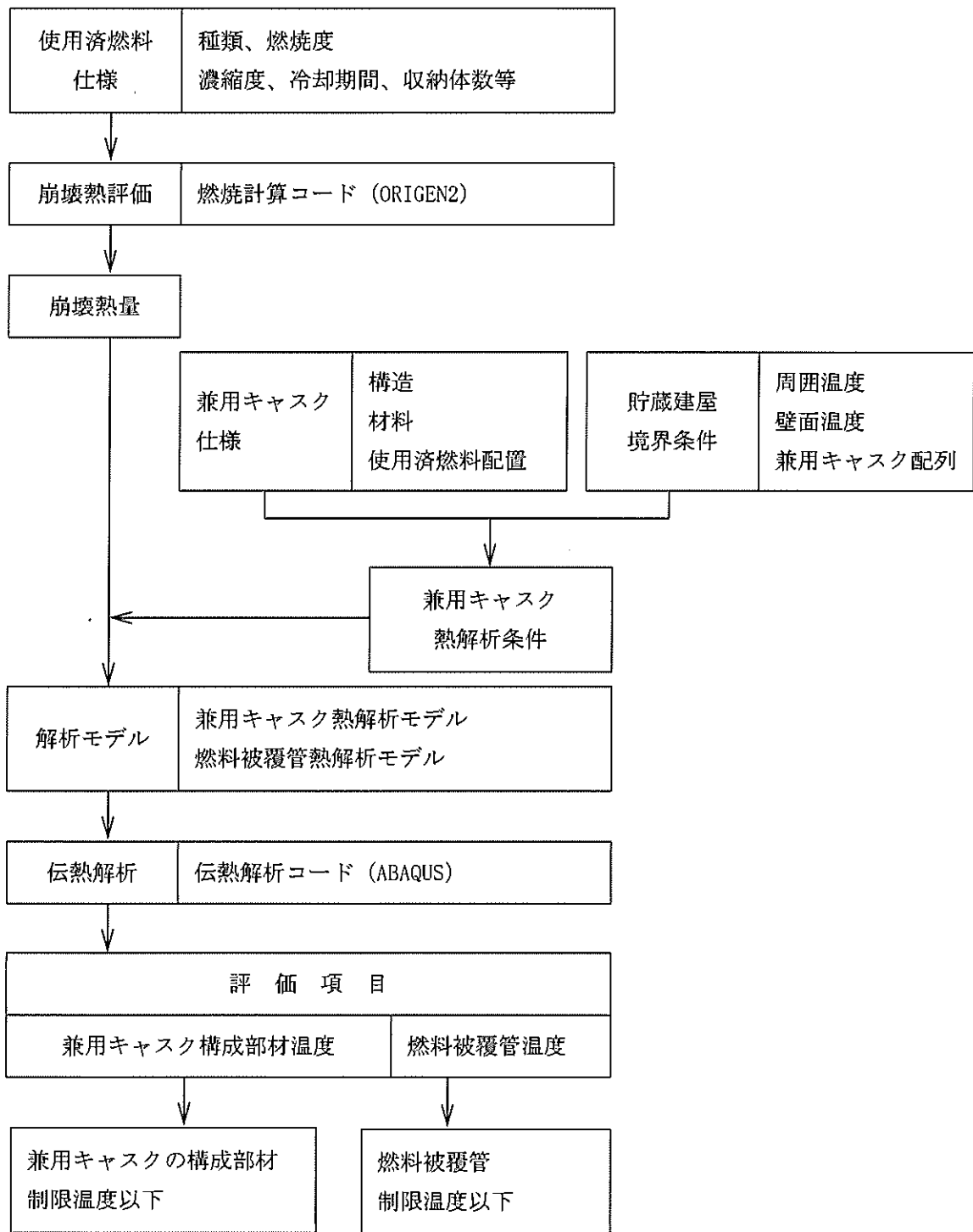
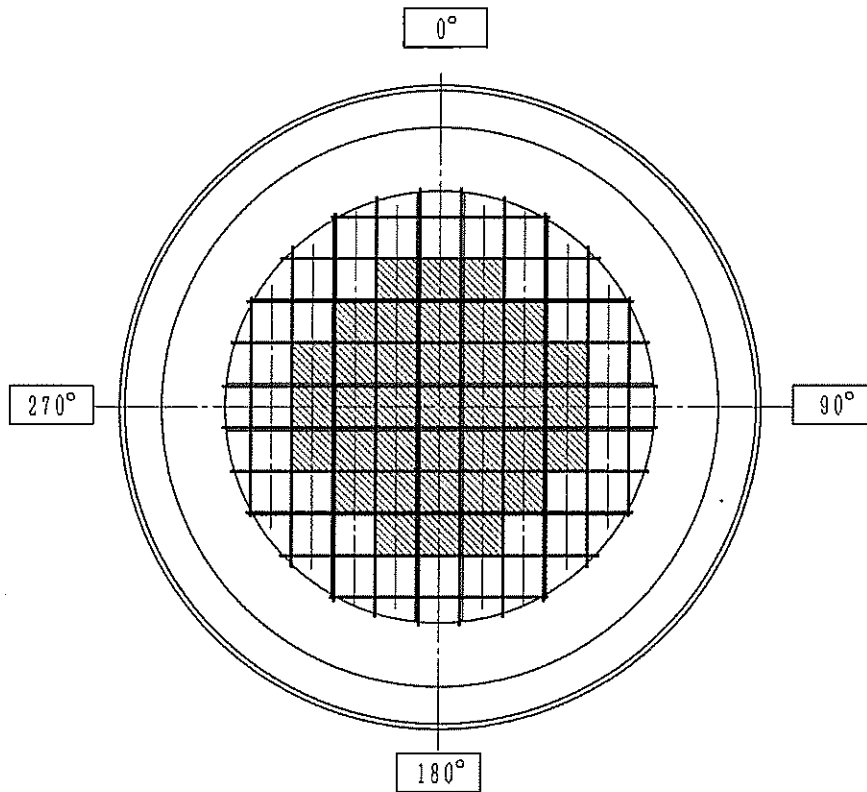


図 2.4.3-2 除熱解析フロー図



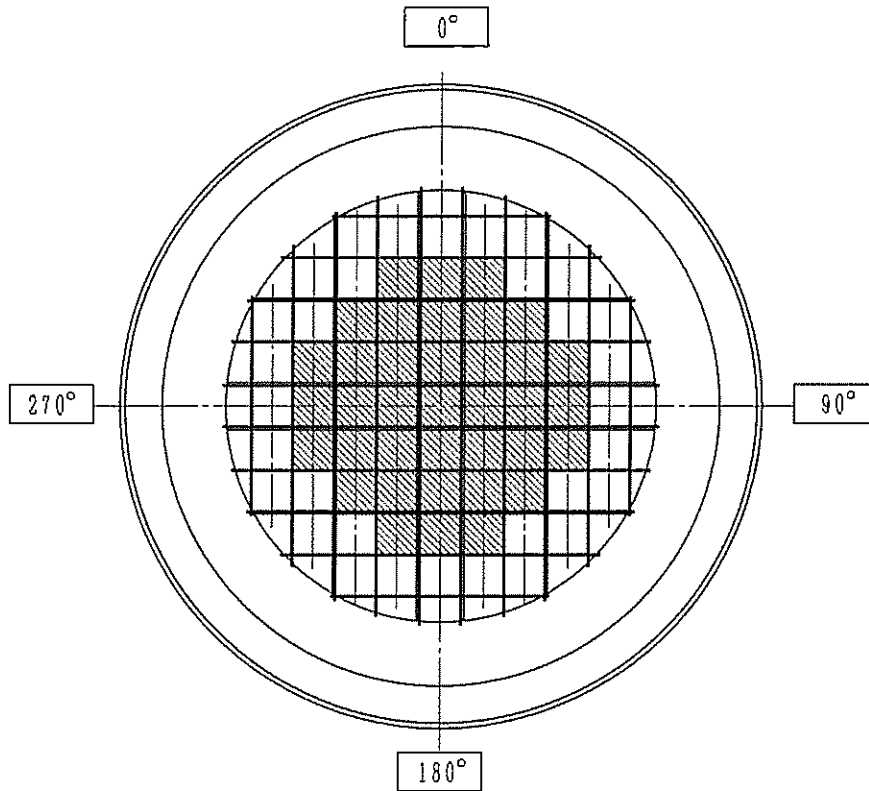
- | | | |
|---|------|-------------------------------|
| □ | 燃料種類 | : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料 |
| | 収納体数 | : 32体 |
| | 燃焼度 | : 34,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 18年以上 |
| | | |
| ▨ | 燃料種類 | : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料 |
| | 収納体数 | : 37体 |
| | 燃焼度 | : 40,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 18年以上 |

キャスク1基当たりの平均燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下

キャスク1基当たりの崩壊熱量 : 12.1 kW^{*1} 以下

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

図 2.4.3-3 使用済燃料の収納配置条件 (配置(i))
(新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料を混載収納する場合)



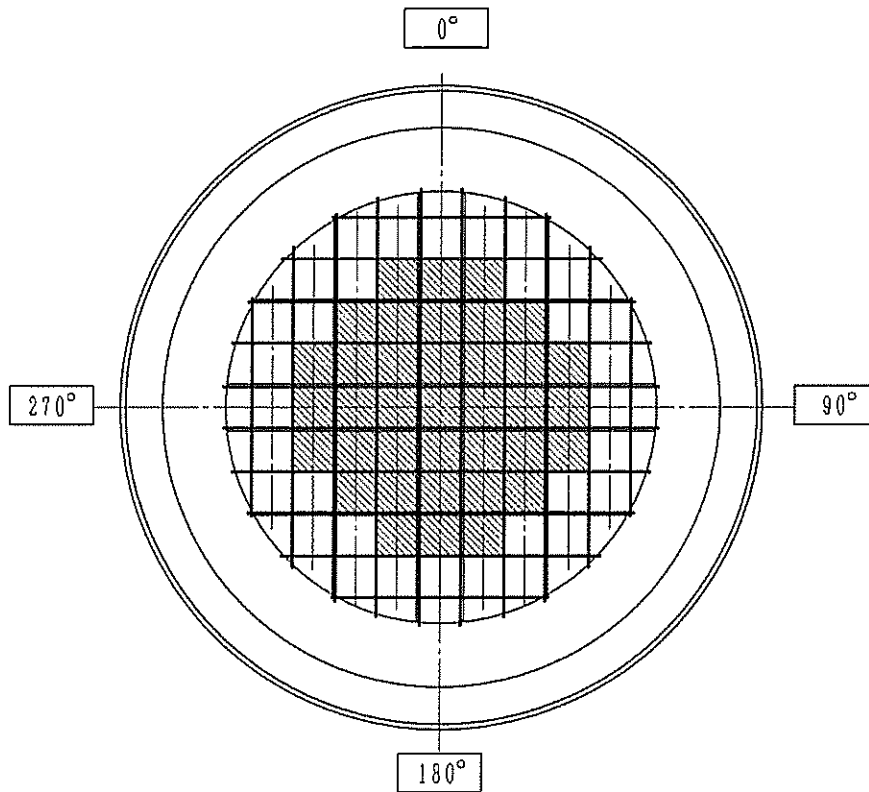
- | | | |
|---|------|-------------------------------|
| □ | 燃料種類 | : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料 |
| | 収納体数 | : 32体 |
| | 燃焼度 | : 40,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 22年以上 |
| | | |
| ▨ | 燃料種類 | : 高燃焼度8×8燃料 |
| | 収納体数 | : 37体 |
| | 燃焼度 | : 48,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 | : 20年以上 |

キャスク1基当たりの平均燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下

キャスク1基当たりの崩壊熱量 : 13.8 kW*1 以下

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

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



- | | |
|---|-----------------------|
| □ | 燃料種類 : 新型 8×8 燃料 |
| | 収納体数 : 32 体 |
| | 燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 : 28 年以上 |
| | |
| ▨ | 燃料種類 : 新型 8×8 燃料 |
| | 収納体数 : 37 体 |
| | 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 : 28 年以上 |

キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下

キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 8.4 kW*1 以下

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

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

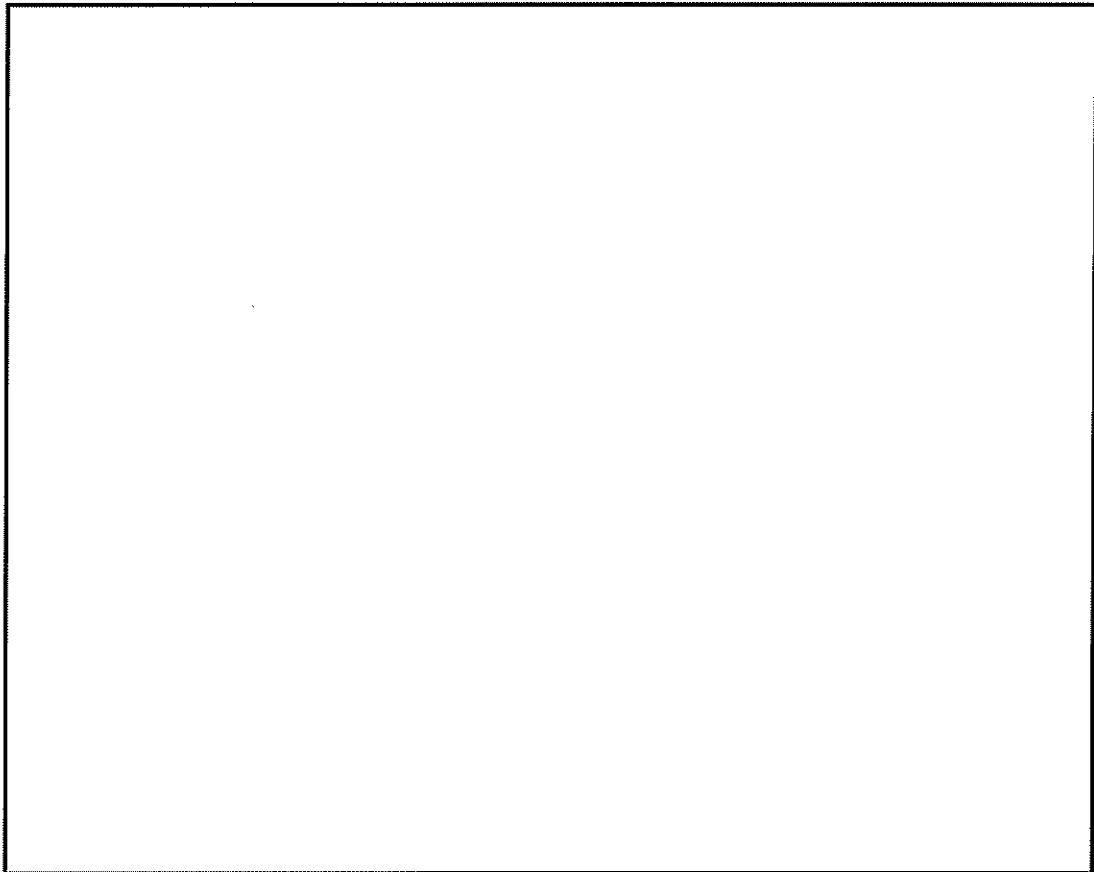


図 2.4.3-6 HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料の設計崩壊熱量軸方向分布
(使用済燃料 69 体分の設計崩壊熱量を示す。)

内は商業機密のため、非公開とします。

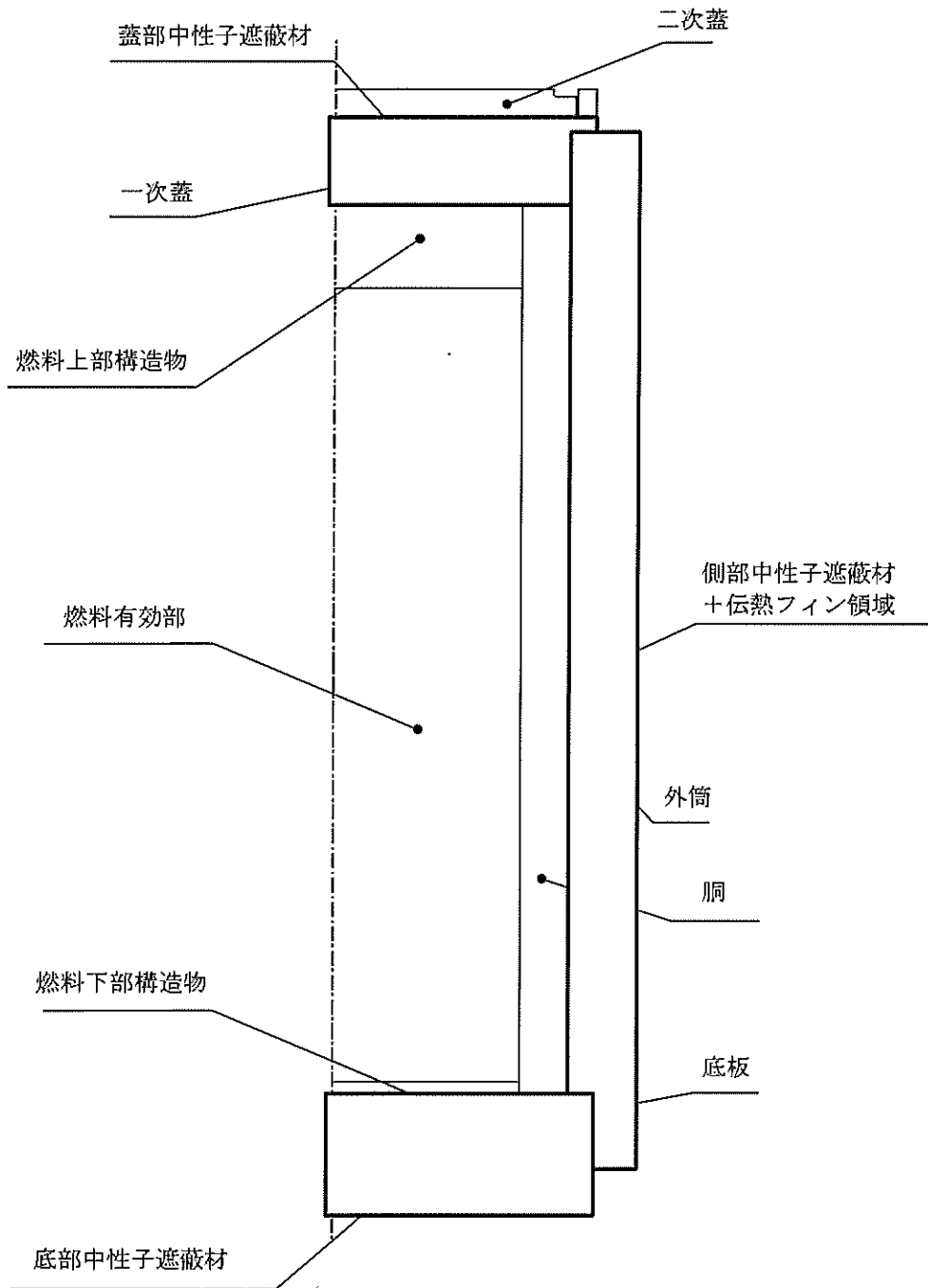


図 2.4.3-7 全体モデル形状図

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

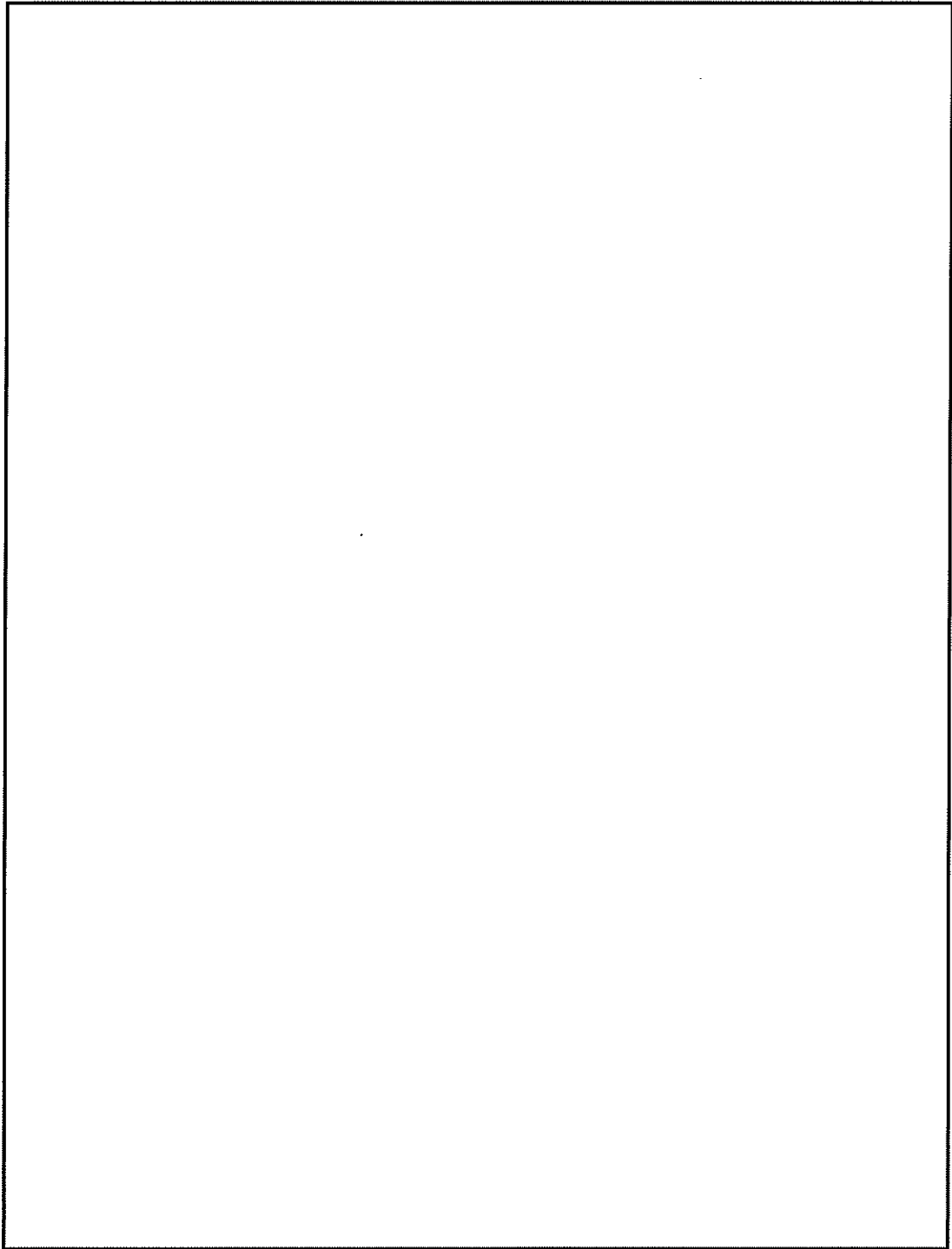


図 2.4.3-8 全体モデル要素分割図

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

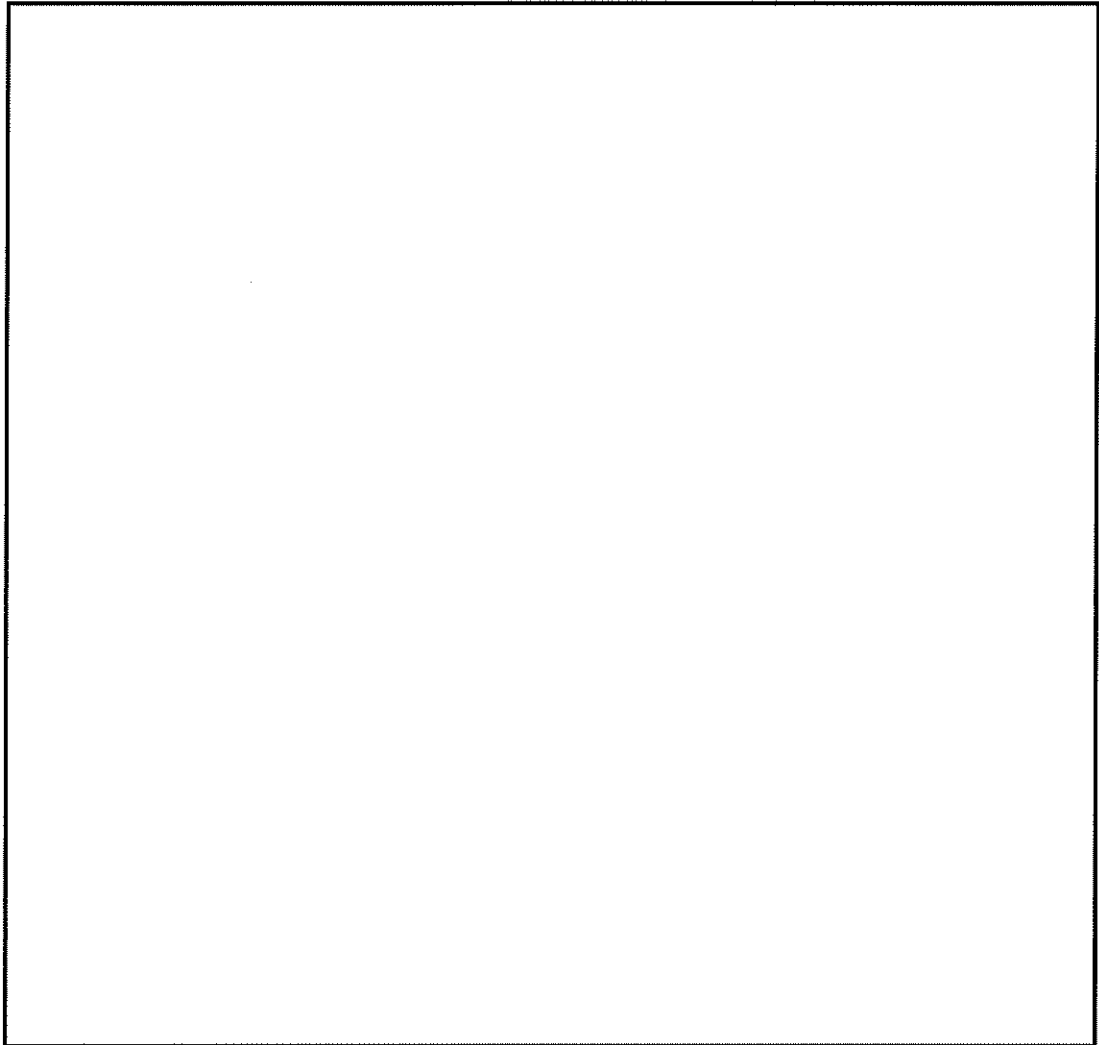


図 2.4.3-9 輪切りモデル形状図

内は商業機密のため、非公開とします。

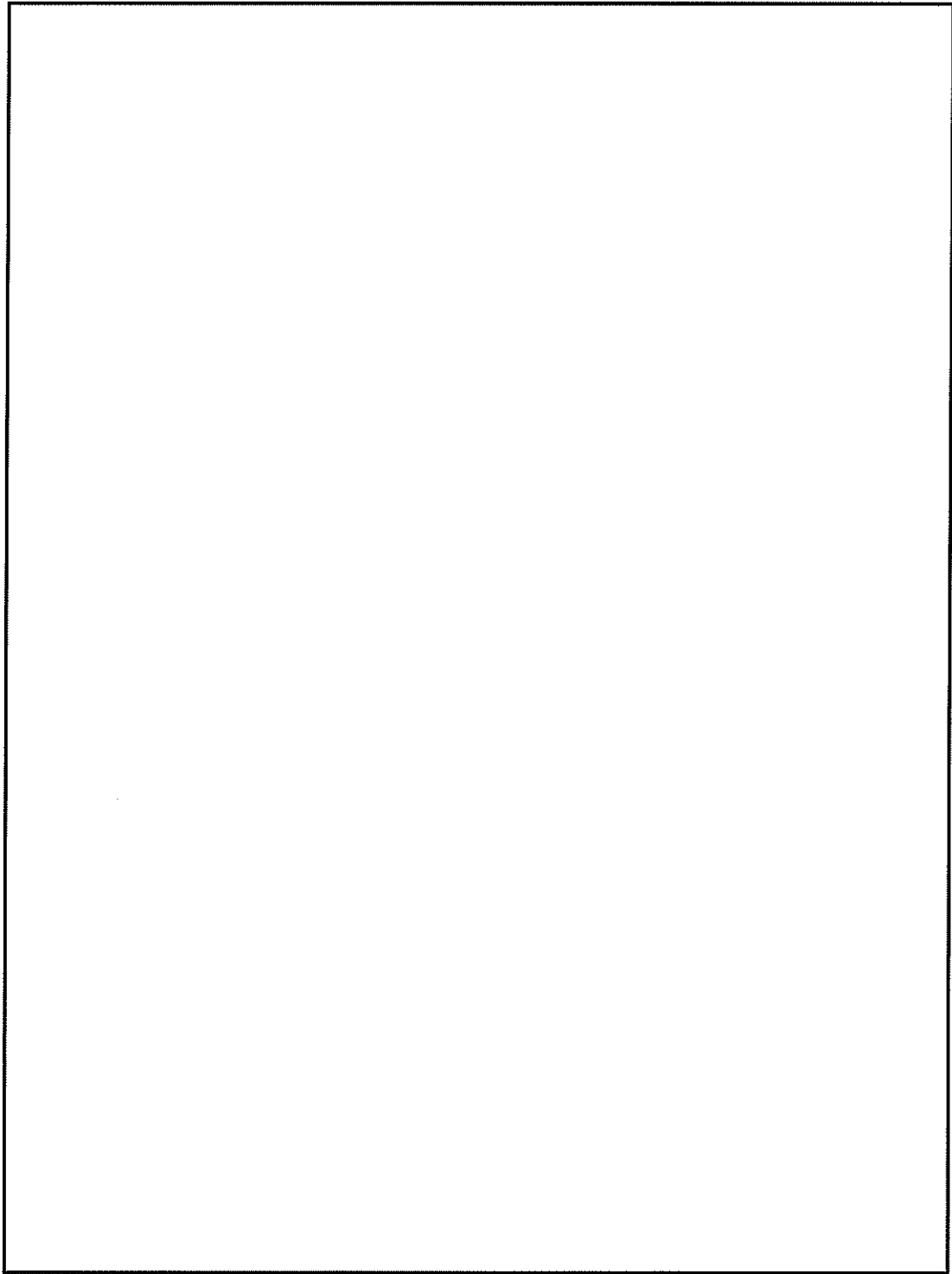
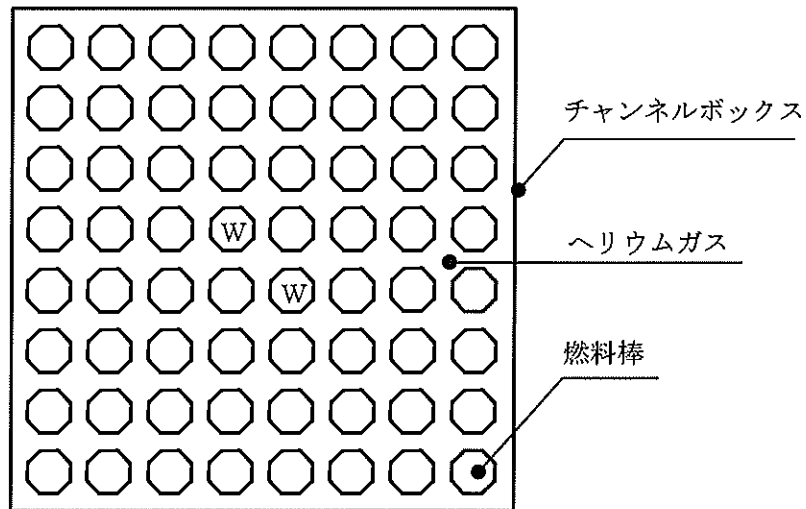


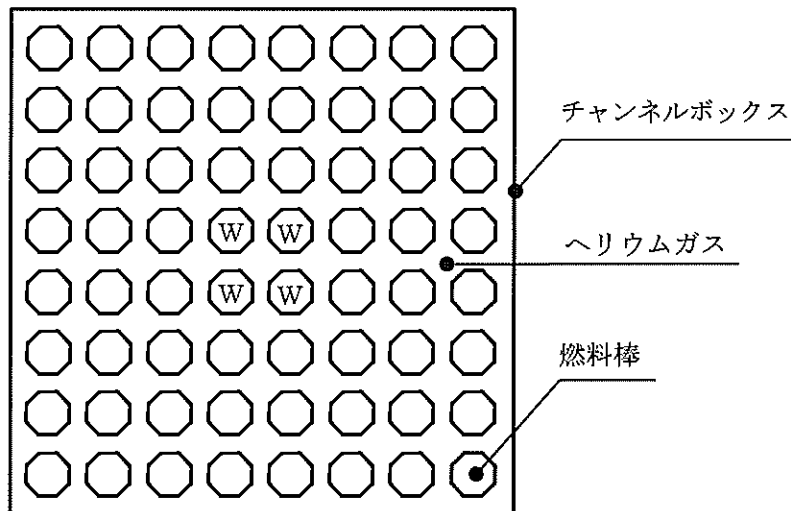
図 2.4.3-10 輪切りモデル要素分割図

□ 内は商業機密のため、非公開とします。



注記：Wはウォーターロッドであり、発熱はない。

図 2. 4. 3-11 燃料集合体モデル形状図
(新型 8×8 燃料、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の場合)



注記：Wはウォーターロッドであり、発熱はない。

図 2. 4. 3-12 燃料集合体モデル形状図
(高燃焼度 8×8 燃料の場合)

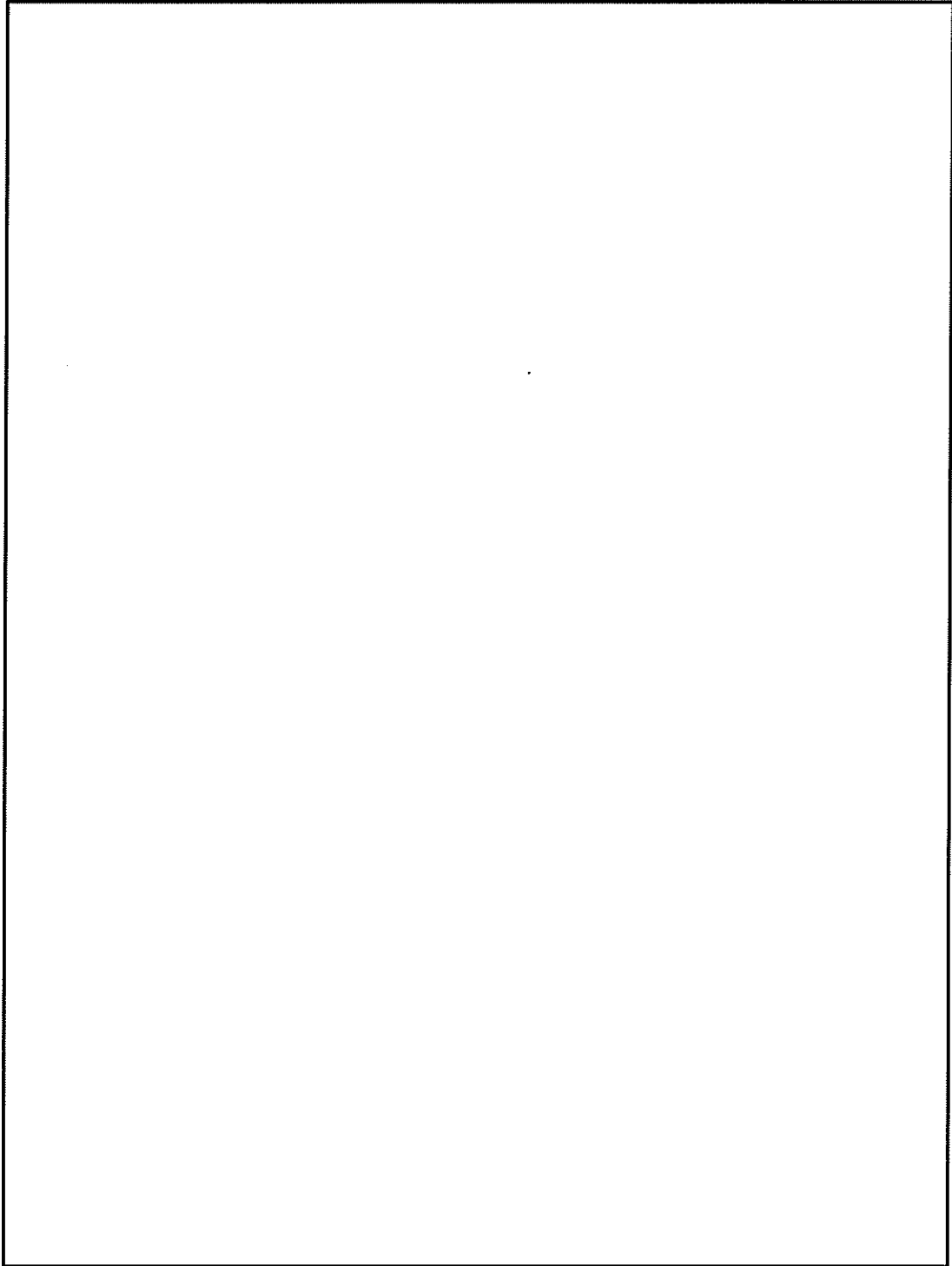


図 2.4.3-13 燃料集合体モデル要素分割図

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

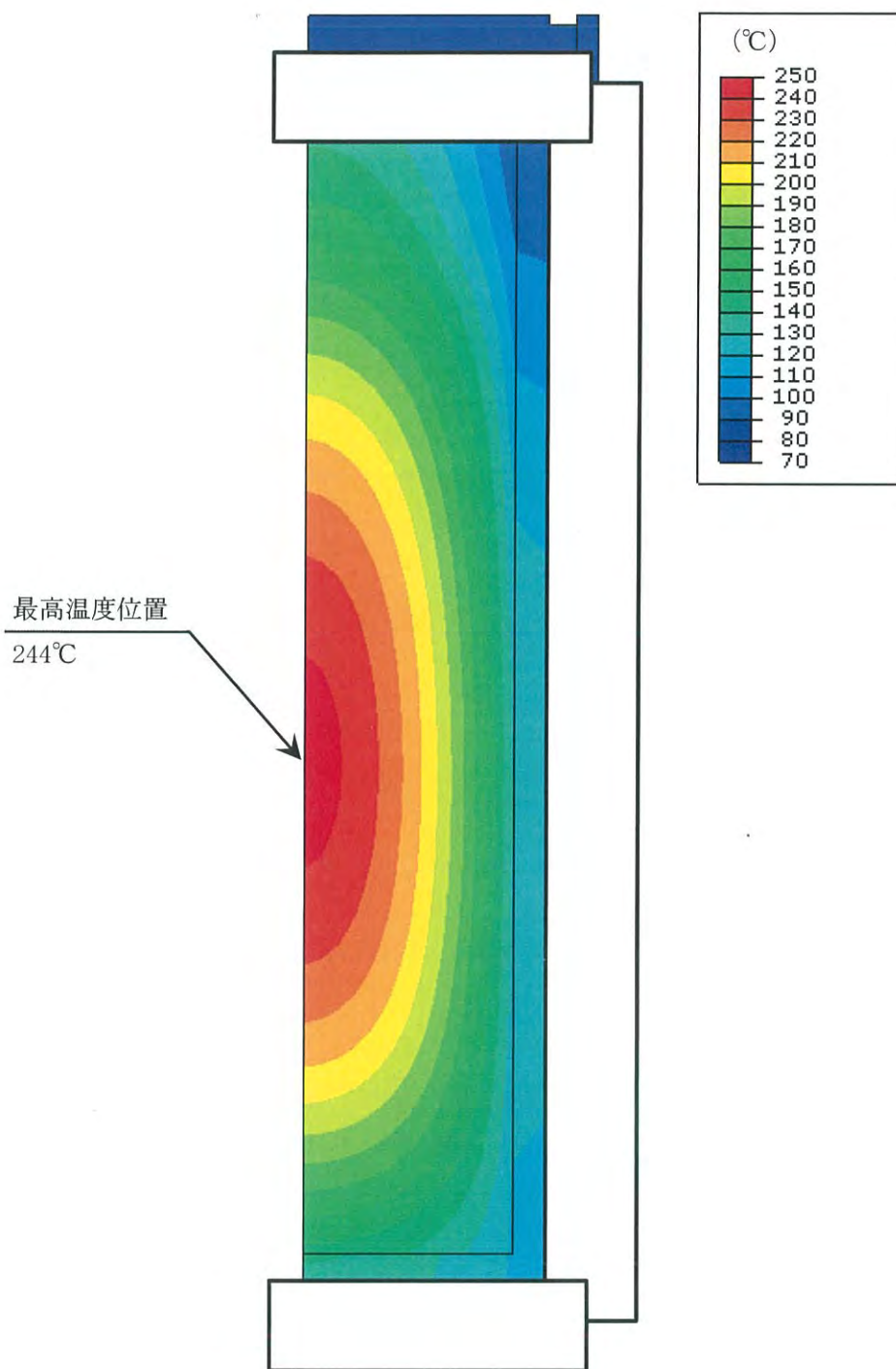


図 2.4.3-14 配置(i)の除熱解析結果 (全体モデル)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

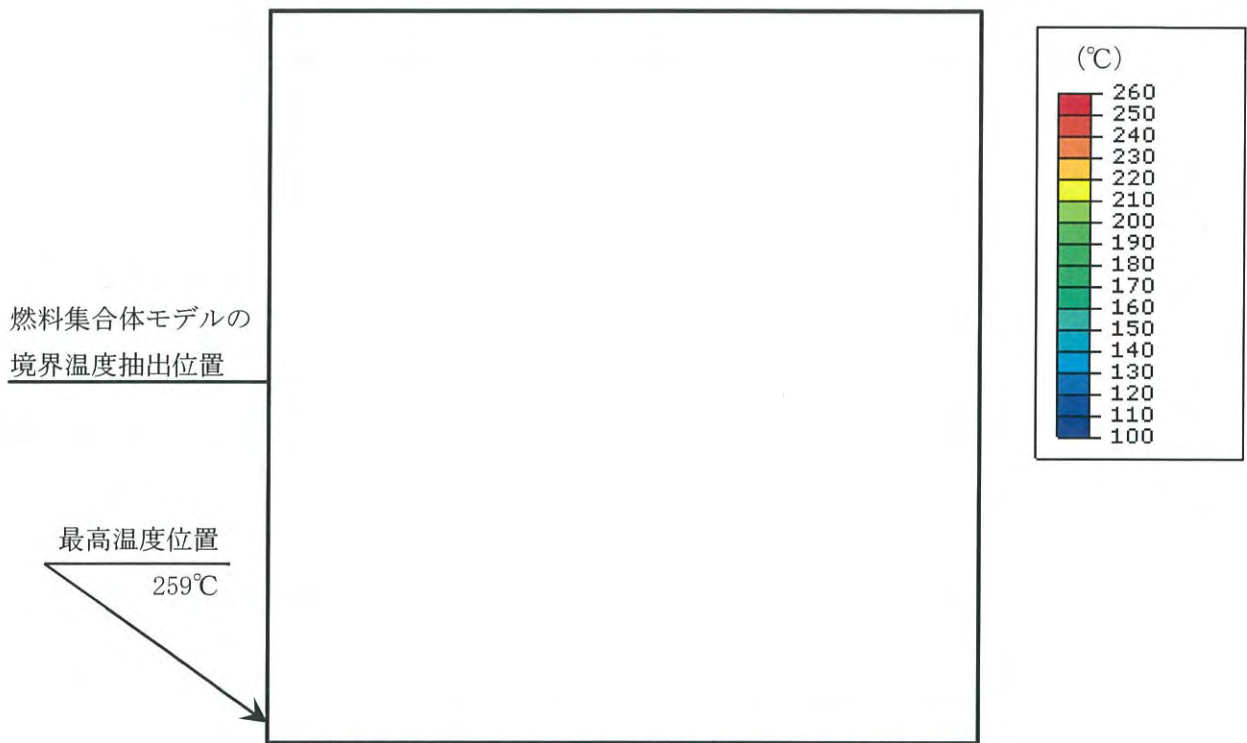


図 2.4.3-15 配置(i)の除熱解析結果(輪切りモデル)

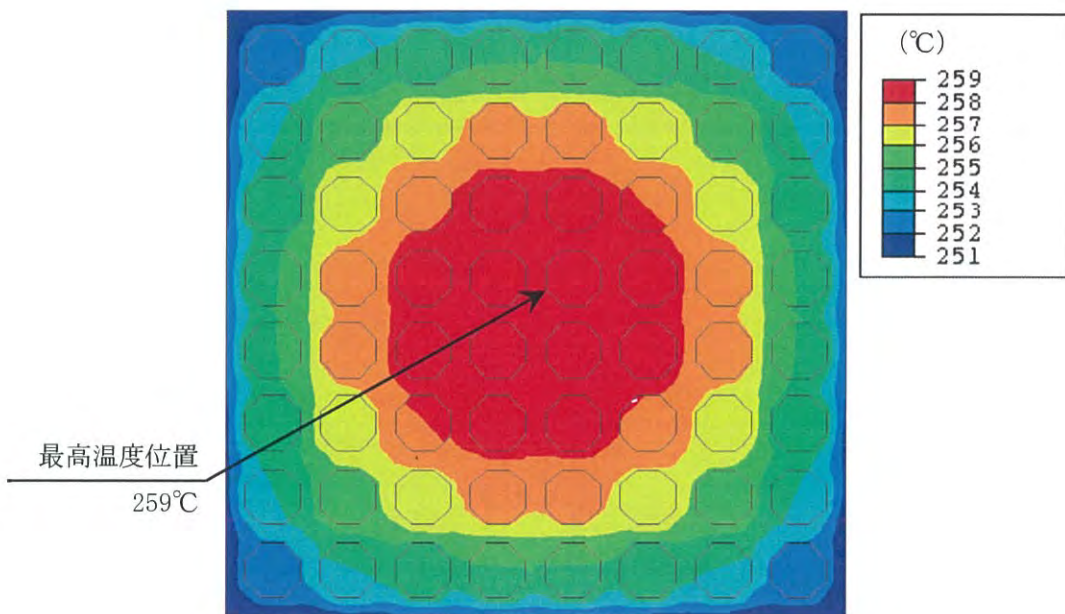


図 2.4.3-16 配置(i)の除熱解析結果(燃料集合体モデル)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

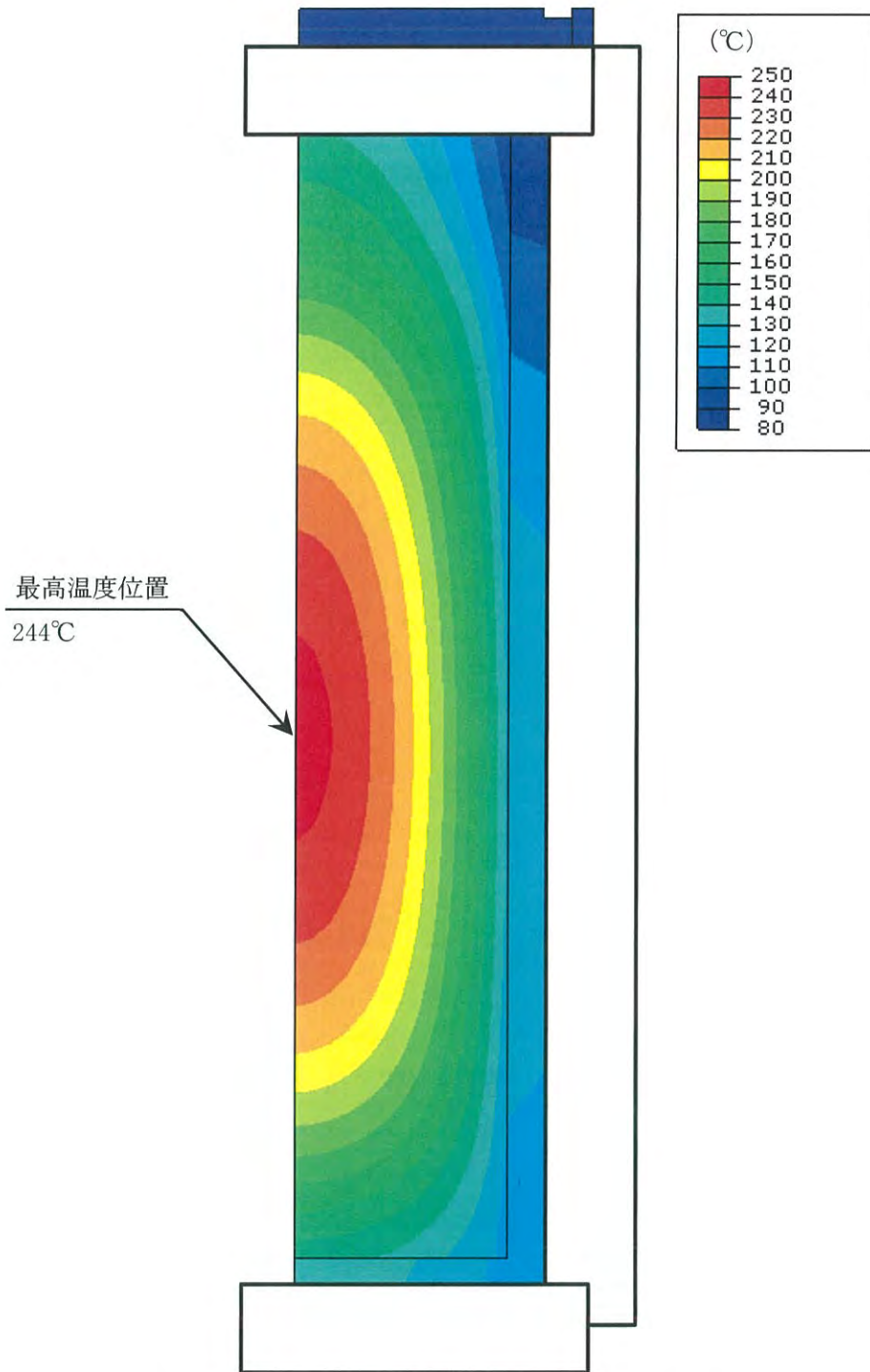


図 2.4.3-17 配置(ii)の除熱解析結果 (全体モデル)

内は商業機密のため、非公開とします。

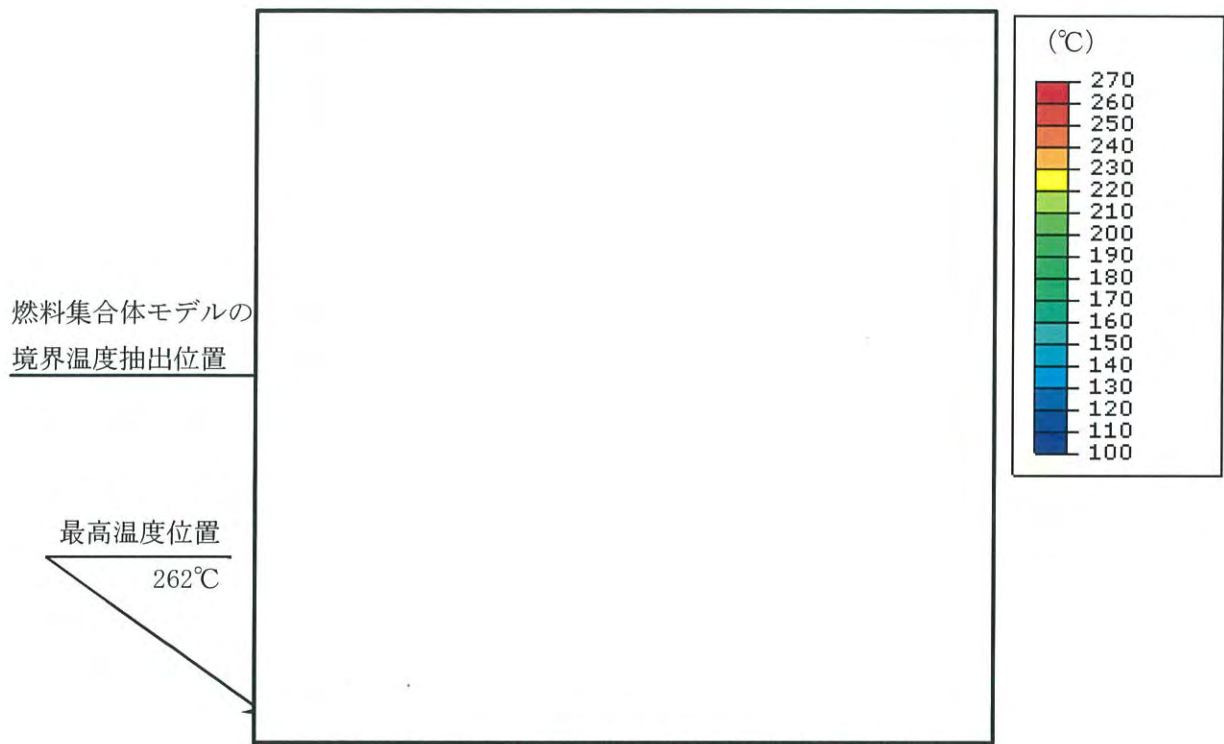


図 2.4.3-18 配置(ii)の除熱解析結果(輪切りモデル)

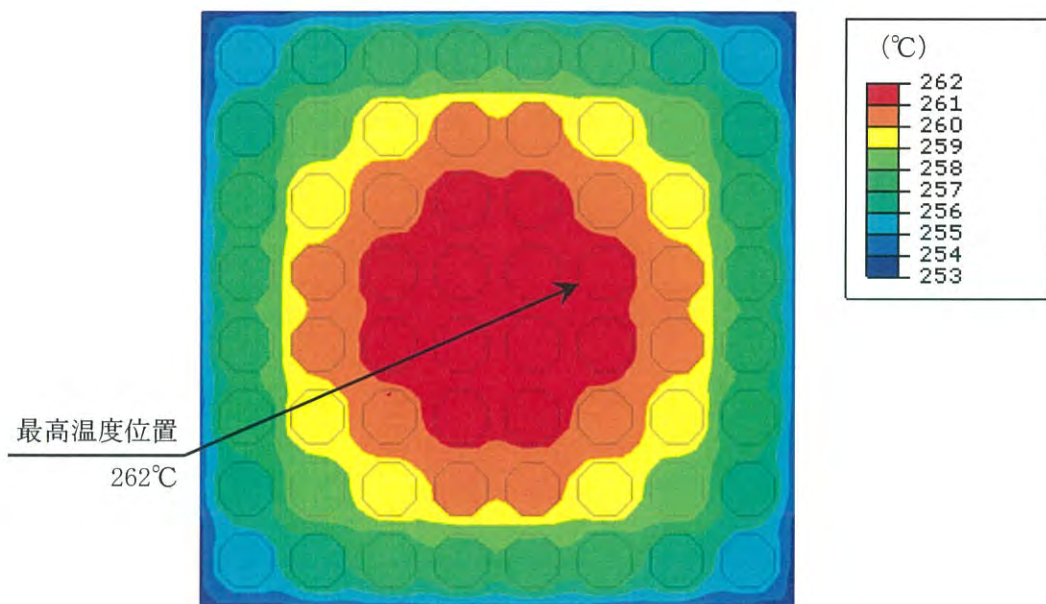


図 2.4.3-19 配置(ii)の除熱解析結果(燃料集合体モデル)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

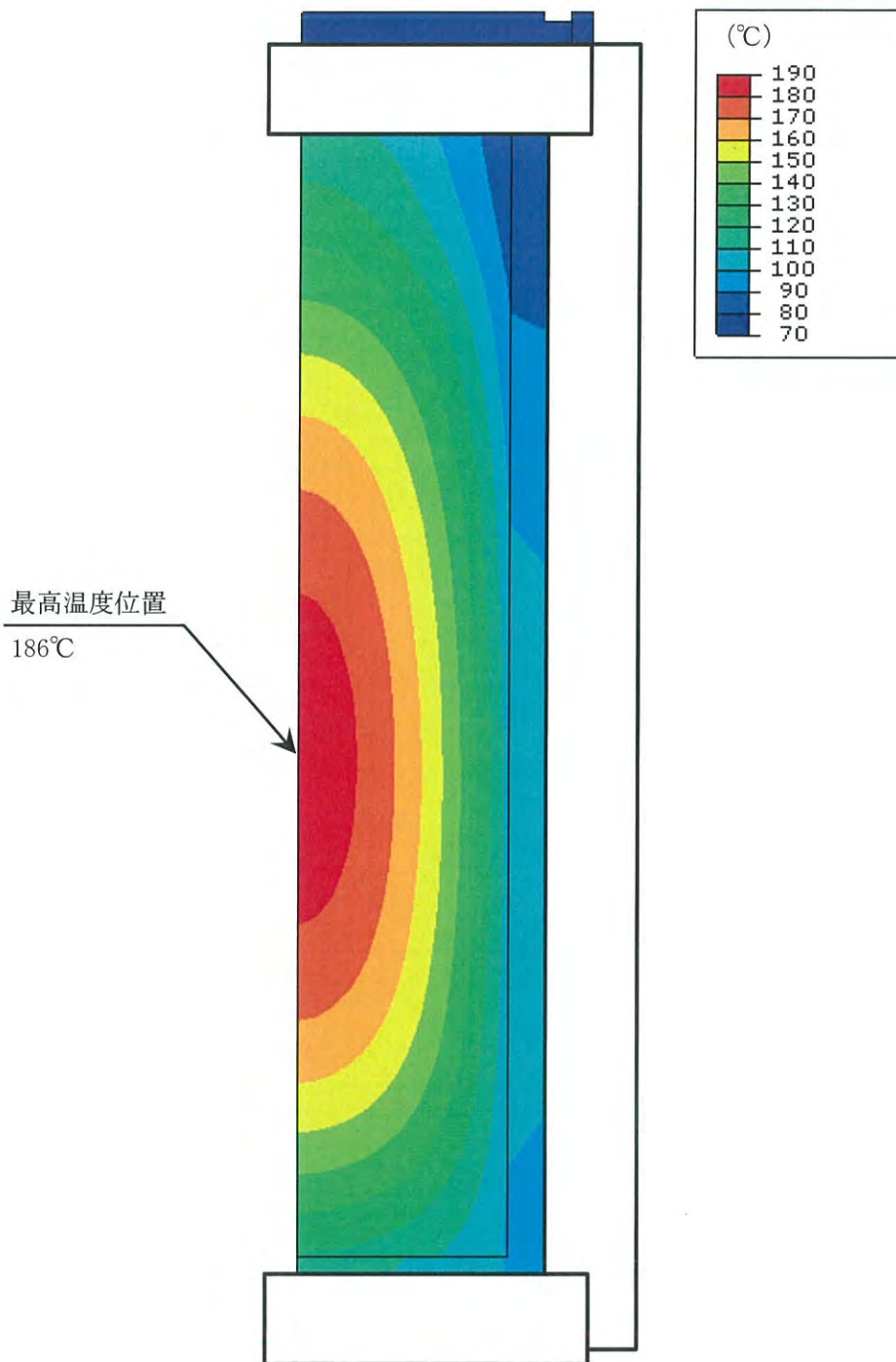


図 2.4.3-20 配置(iii)の除熱解析結果 (全体モデル)

内は商業機密のため、非公開とします。

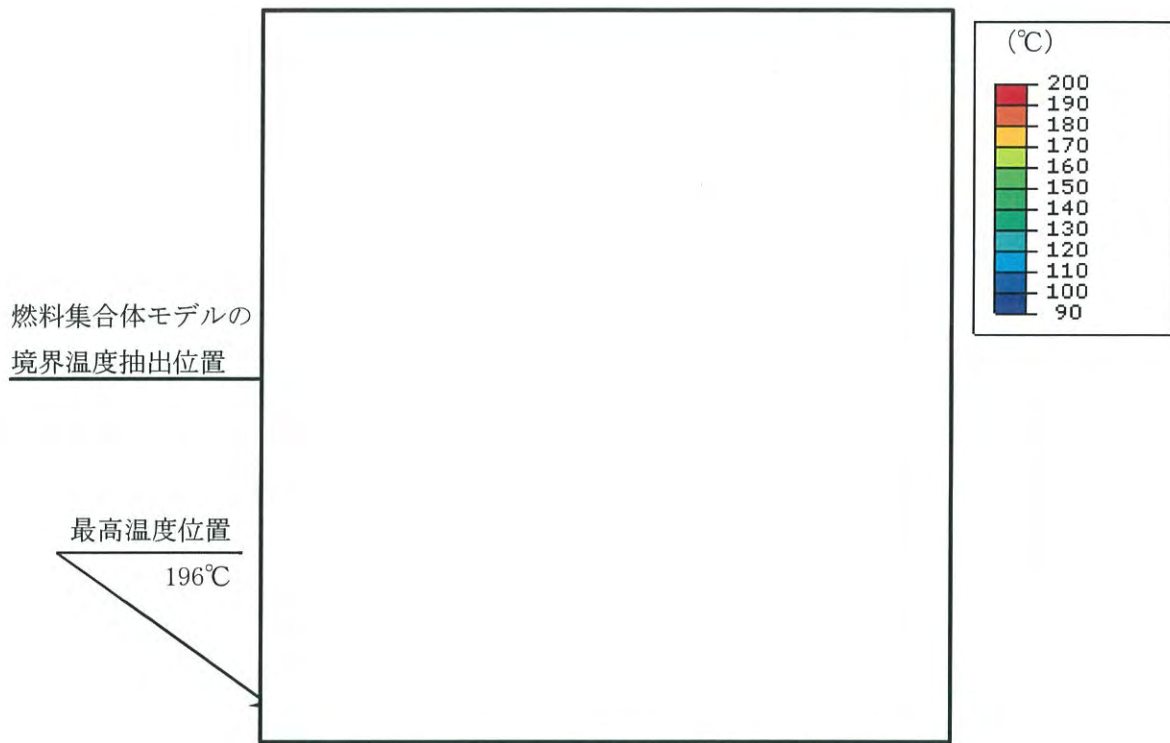


図 2.4.3-21 配置(iii)の除熱解析結果 (輪切りモデル)

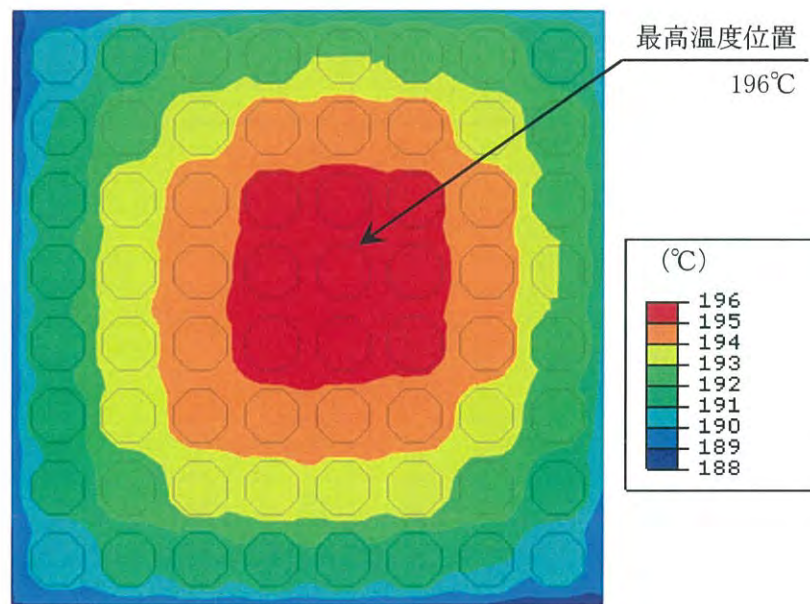


図 2.4.3-22 配置(iii)の除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

なお、以下の内容は、本型式証明の申請範囲外とする。

(申請範囲外)

- ・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、貯蔵建屋の経排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。
- ・貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。
- ・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。

3. 使用する解析コード

(1) 概要

ABAQUS コード^{(8), (9)}は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。

(2) 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- a. 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b. 1～3次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c. 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d. 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及びふく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析（構造強度解析）を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。
- e. 構成物質の相変態が考慮できる。

(3) 解析フロー

代表的な解析フローを図 2.4.3-23 に示す。

(4) 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、貯蔵容器の定常伝熱試験に対して ABAQUS による解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている⁽¹⁰⁾。

ABAQUS コードの検証例を図 2.4.3-24 に示す。

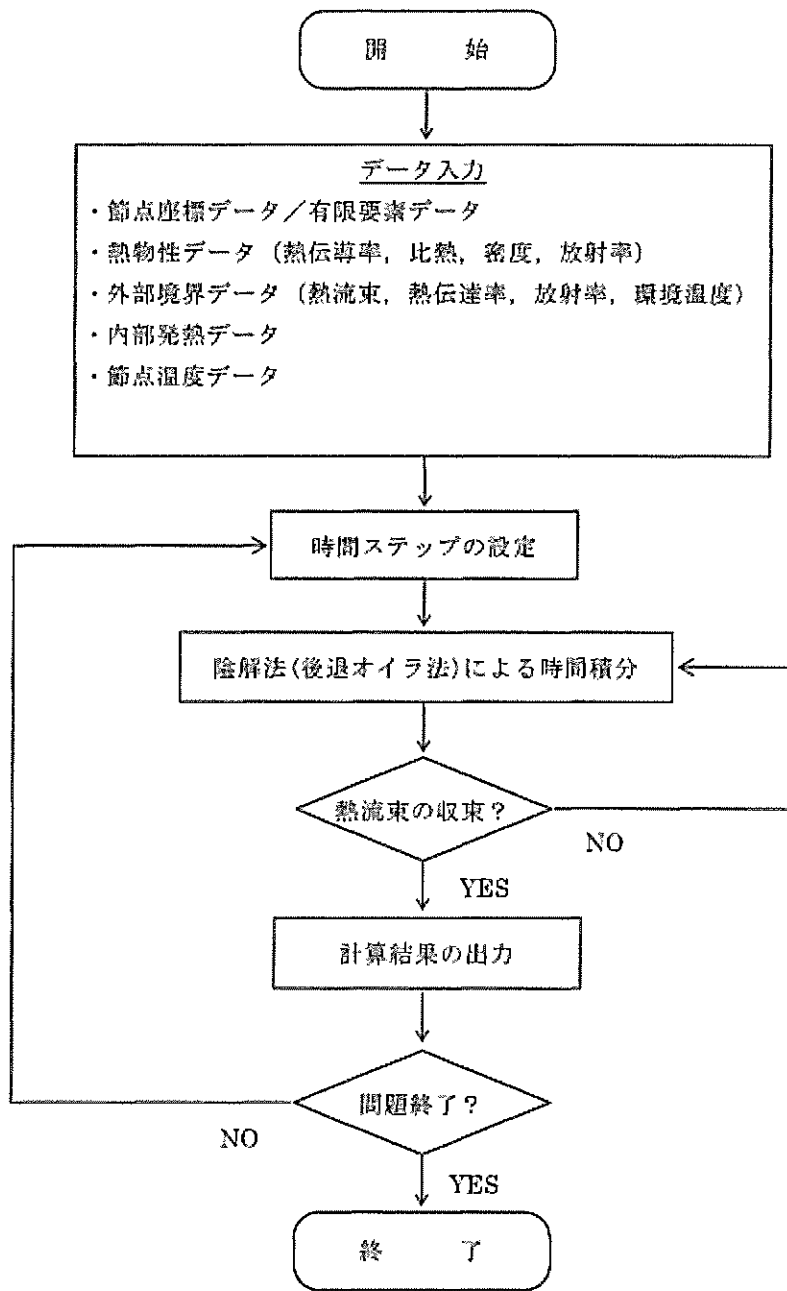


図 2.4.3-23 ORIGIN2 コードの計算フロー図

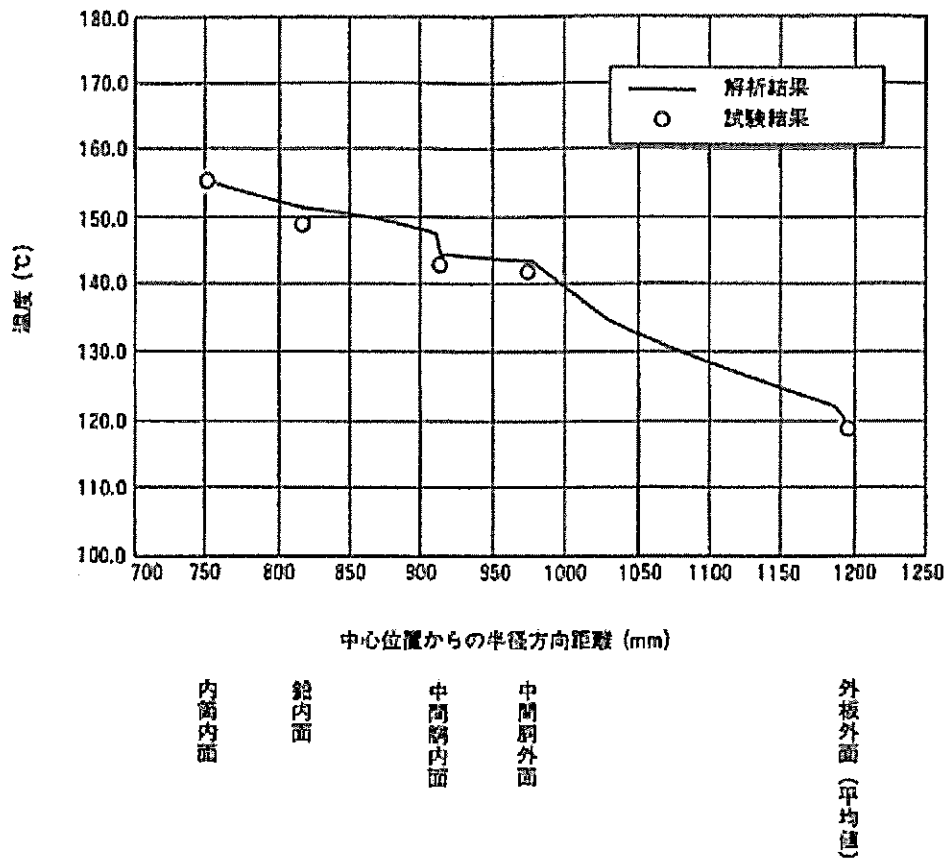


図 2.4.3-24 ORIGEN2 コードの検証例

4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合

兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）として、緩衝体等を装着しない状態でのよこ置きの除熱機能の評価結果⁽¹¹⁾を以下に示す。

a. 評価基準

評価基準は表 2.4.3-5 と同様である。

b. 使用済燃料の収納配置

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

c. 使用済燃料の崩壊熱量設定

配置(i)の設計崩壊熱量 15.34 kW を使用する。

d. 解析モデル

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

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

e. 境界条件

HDP-69BCH(B)型周囲の環境として、以下の条件とする。

- ・貯蔵姿勢 : よこ置き
- ・周囲温度 : 45°C
- ・コンクリートモジュール
内面温度 : 65°C

f. 評価結果

HDP-69BCH(B)型の除熱機能の評価結果を表 2.4.3-7 に示す。解析の結果、燃料被覆管の温度及び兼用キャスク各部位の温度は、表 2.4.3-6 に示すたて置きの場合の温度よりも低いことが確認された。

表 2.4.3-7 よこ置きとたて置きの除熱解析結果の比較

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

注記*1：表 2.4.3-6 を抜粋。

5. 緩衝体等を装着した蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の場合
緩衝体等を装着した蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の評価を行い、兼用キャスク各部及び燃料被覆管の温度を確認する。*1

注記*1：詳細は今後ご提示する。

6. 参考文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構,「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」(平成 19 年 3 月)
- (2) (独)原子力安全基盤機構,「平成 19 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」(平成 20 年 3 月)
- (3) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007 年版) JSME S FA1-2007」(2007 年 12 月)
- (4) N. Kumagai, et al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. 15th Int. Symp. on PATRAM(2007)
- (5) (一財)電力中央研究所,「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書」(2010 年 3 月)
- (6) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007 年版) JSME S FA1-2007, 事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定(JSME S FA-CC-004)」(2009)
- (7) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ,「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」(平成 21 年 6 月 25 日)
- (8) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., “ABAQUS USER’S MANUAL (Version 4.8)”, 1989 年
- (9) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., “ABAQUS EXAMPLE PROBLEMS MANUAL (Version 4.8)”, 1989 年
- (10) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明郎, 「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」, 電中研報告書, U92038 (1993 年 1 月)
- (11) 東京電力ホールディングス株式会社「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.13 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備」

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
(HDP-69BCH(B)型の閉じ込め機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合
4. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の場合
5. 参考文献

【参考資料】

資料 1 貯蔵時と輸送時の解析条件等の比較

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型の閉じ込め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

① 設置許可基準規則第 16 条第 4 項三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

② 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条第 4 項

- ・第 16 条第 4 項第 3 号に規定する「放射性物例を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができる」とは、次項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第 5 条第 1 項第 1 号及び第 2 号並びに第 17 条第 1 項第 1 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 5 条第 1 項
第 5 条に規定する「限定された区域に適切に閉じ込めることができるもの」とは、以下の設計をいう。
 - 一 金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。
 - 二 金属キャスクは、多重の閉じ込め構造を有する蓋部により、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。
- ・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。

③ 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. 適合性について

設置(変更)許可に係る審査で確認される兼用キャスクの有する4つの安全機能(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本型式証明申請で確認する。HDP-69BCH(B)型の閉じ込め機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

- ・金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。
- ・金属キャスクは、多重の閉じ込め構造を有する蓋部により、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。

HDP-69BCH(B)型の閉じ込め構造を図2.4.4-1に、シール部詳細を図2.4.4-2、金属ガスケット構造を図2.4.4-3に示す。

HDP-69BCH(B)型は、兼用キャスク本体及び一次蓋により使用済燃料を封入する空間を設計貯蔵期間(60年)を通じて負圧に維持する。兼用キャスクは、一次蓋と二次蓋の蓋間をあらかじめ正圧とし圧力障壁を形成することにより、放射性物質を兼用キャスク内部に閉じ込める。蓋及び蓋貫通孔のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から金属ガスケットを使用し、金属ガスケットは、設計貯蔵期間中に兼用キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率(以下「基準漏えい率」という。)を満足するものを使用する。

一次蓋と二次蓋との蓋間圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できる設計とする。

貯蔵施設内では、HDP-69BCH(B)型の閉じ込め境界を有する一次蓋は開放せず、内包する放射性物質の閉じ込めをHDP-69BCH(B)型のみで担保する設計とする。

使用済燃料を限定された区域に閉じ込めるため、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を封入する空間を負圧に維持する設計とする。

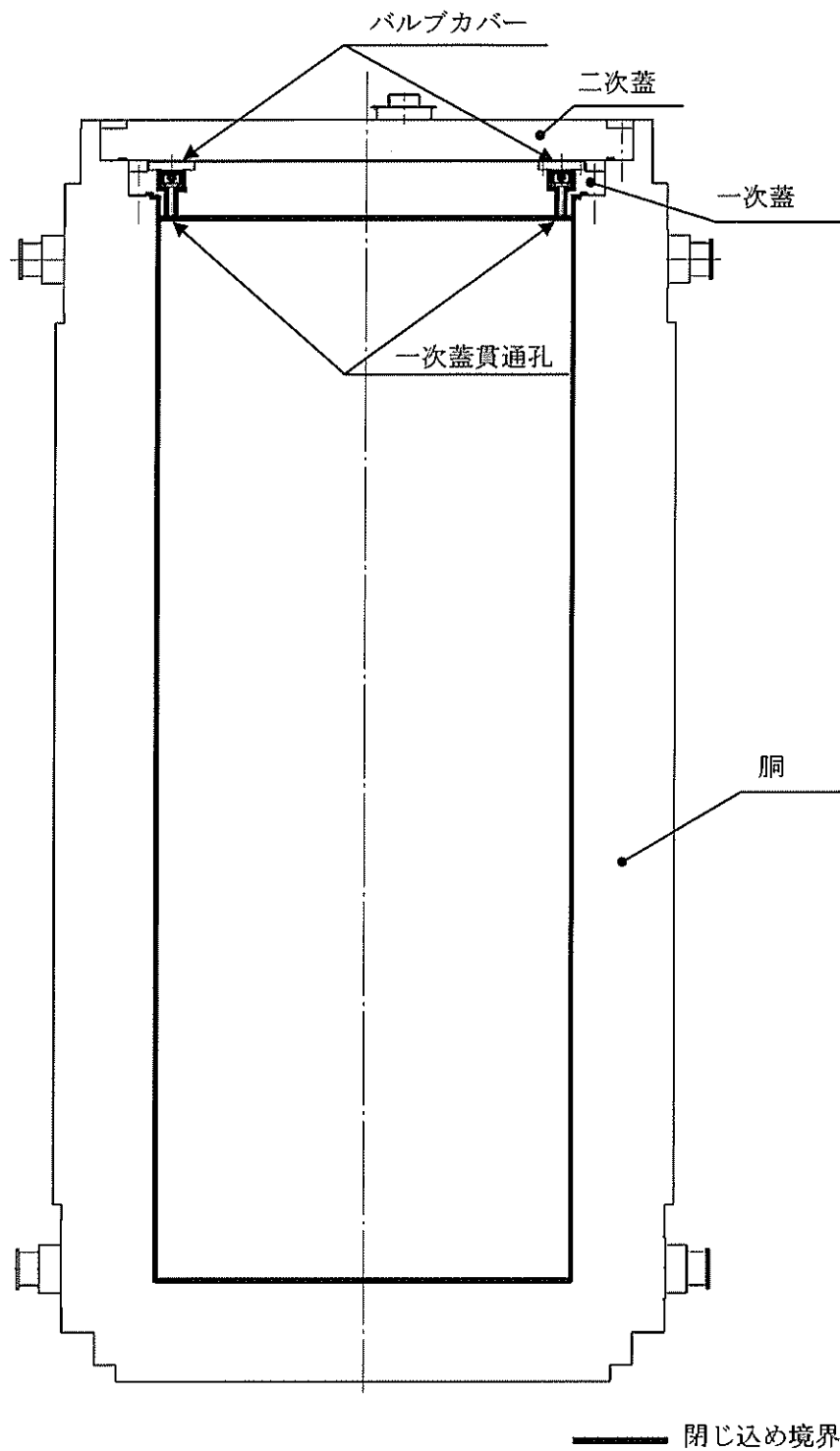


図 2.4.4-1 HDP-69BCH(B)型の閉じ込め構造

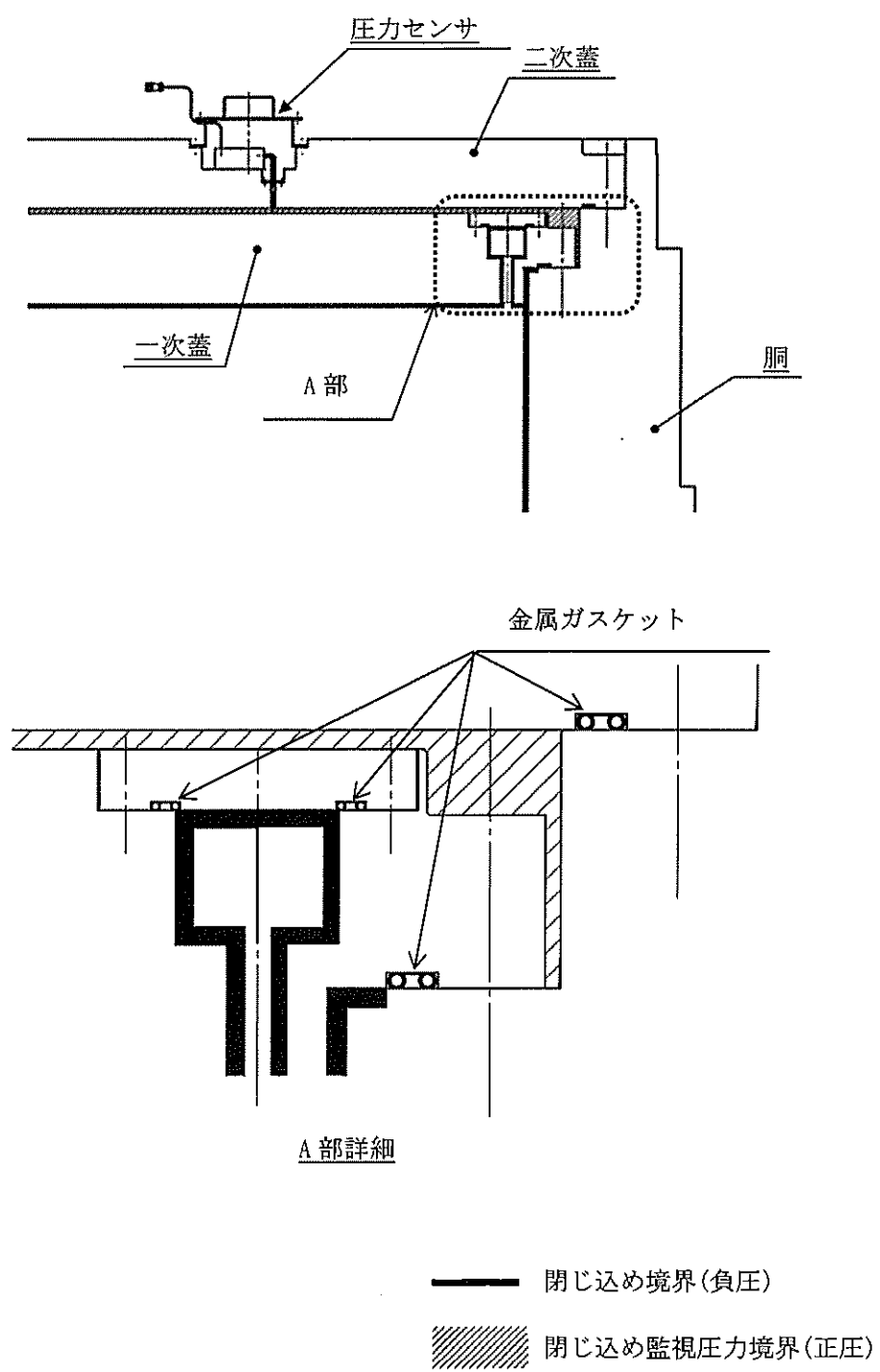
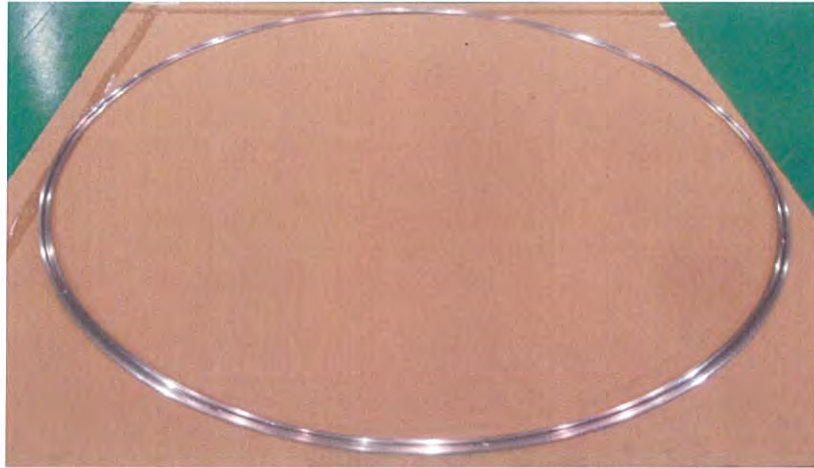
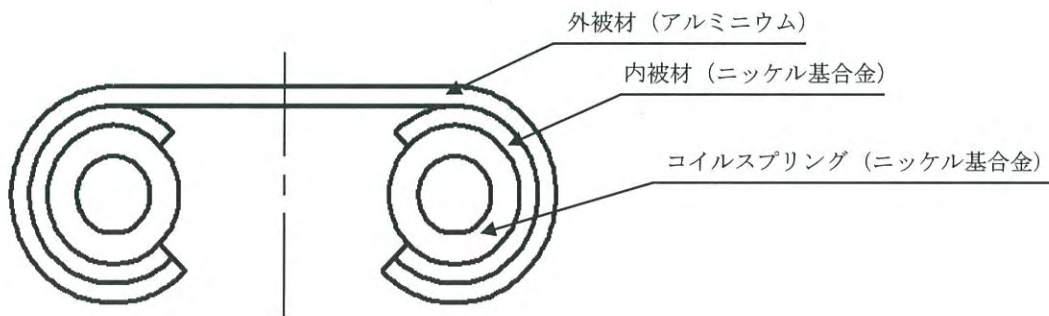


図 2.4.4-2 HDP-69BCH(B)型のシール部詳細

16 条-別添 4(閉じ込め)-4



(a) 外観



(b) 内部構造図

図 2.4.4-3 金属ガスケット構造 (ばね入りメタルCリング、眼鏡型)

兼用キャスク漏えい率の考え方を図 2.4.4-4、閉じ込め評価フローを図 2.4.4-5、漏えい率計算の概要を図 2.4.4-6、閉じ込め評価に係る構造図を図 2.4.4-7 に示す。

閉じ込め評価では、基準漏えい率を求め、基準漏えい率よりも漏えい率の小さい金属ガスケットを使用する。

基準漏えい率は、設計貯蔵期間中に乾式キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率、リークテスト判定基準は、貯蔵開始前の気密漏えい検査で確認される漏えい率の判定基準である。

基準漏えい率は、蓋間圧力と乾式キャスク内部圧力の圧力差のもとで、シール部を通して乾式キャスク内部へ流入する気体の漏えい率を積分することによって、兼用キャスク内部圧力が大気圧となるまでの圧力変化を求めた際の漏えい率として計算する。

基準漏えい率を求めるにあたっては、蓋間圧力は保守的に初期圧力で一定とし、蓋間空間のガスは兼用キャスク内部側にのみ漏えいするものとして漏えい計算を行う。また、大気圧は、気象変化による圧力変動を保守的に考慮した値⁽¹⁾として 9.7×10^1 Pa とする。兼用キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損率として、米国の使用済燃料の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率 (約 0.01 %) ⁽¹⁾、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率 (約 0.01 %以下) ⁽¹⁾ を考慮し、保守的な値として 0.1 % を想定する。

リークテスト判定基準は、リークテスト判定基準 Q_t としては、0.1 % の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇及び設計貯蔵期間経過後にさらに蓋間空間ガス全量の兼用キャスク本体内部への流入を仮定した圧力上昇を考慮しても負圧を維持できるように Pa とする。

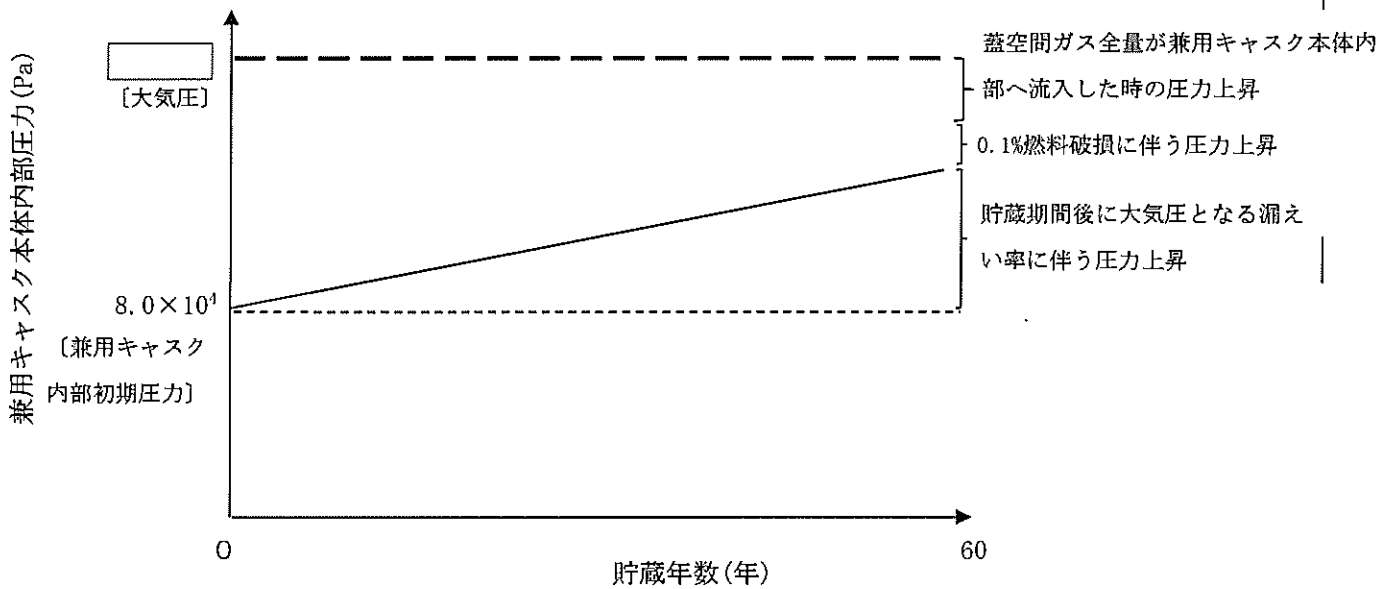


図 2.4.4-4 兼用キャスク漏えい率の考え方

a. 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価方法

兼用キャスク本体内部圧力の変化は、ボイル・シャルルの法則に基づき、以下のよう
に求める。

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Q}{Vd} \cdot \frac{Td}{T} \quad \text{①}$$

ここで、

dPd : 兼用キャスク本体内部圧力の変化 (Pa)

Td : 兼用キャスク本体内部代表温度 (K)

Q : 兼用キャスク本体内部圧力Pdのときのシール部の漏えい率 (Pa・m³/s)

T : シール部の代表温度 (=漏えいガスの温度) (K)

Vd : 兼用キャスク本体内部空間容積 (m³)

dt : 時間の変化 (s)

また、漏えい率 Q は以下のクヌッセンの式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot Pa \\ L &= (Fe + Fm) \cdot (Pu - Pd) \\ Fe &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ Fm &= \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot Pa} \end{aligned} \right\} \quad \textcircled{2}$$

ここで、

- Q : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
- L : 流れの平均圧力 Pa における体積漏えい率 (m^3/s)
- Fe : 連続流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- Fm : 自由分子流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- Pu : 上流側の圧力 (Pa)
- Pd : 下流側の圧力 (Pa)
- D_0 : 漏えい孔径 (m)
- a : 漏えい孔長 (m)
- Pa : 流れの平均圧力 (Pa)、 $Pa = (Pu + Pd)/2$
- μ : 漏えいガスの粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- T : シール部の代表温度 (=漏えいガスの温度) (K)
- M : 漏えいガスの分子量 (kg/mol)
- R_0 : 気体定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

式②を式①に代入すると、

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Td}{Vd \cdot T} \times \left\{ \frac{1}{2} Fe \cdot (Pu^2 - Pd^2) + Fm \cdot Pa \cdot (Pu - Pd) \right\} \quad \textcircled{3}$$

蓋間圧力 (上流側の圧力) Pu (Pa) を一定として、式③を時間 t で積分すれば、ある時間 t における兼用キャスク本体内部圧力 (下流側の圧力) $Pd = Pd(t)$ が得られる。つまり、

$$Pd(t) = \frac{Pu \cdot \{Fe' \cdot (Pu + Pd_0) + Fm'\} - (Fe' \cdot Pu + Fm') \cdot (Pu - Pd_0) \cdot \exp\left\{-\frac{Td \cdot (2Fe' \cdot Pu + Fm')}{Vd \cdot T} \cdot t\right\}}{Fe' \cdot (Pu + Pd_0) + Fm' + Fe' \cdot (Pu - Pd_0) \cdot \exp\left\{-\frac{Td \cdot (2Fe' \cdot Pu + Fm')}{Vd \cdot T} \cdot t\right\}} \quad \text{④}$$

ここで、

$$Fe' = \frac{1}{2} Fe = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu}$$

$$Fm' = Fm \cdot Pa = \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot Pa} \times Pa = \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a}$$

である。

上記を基に、一次蓋シール部で漏えいする場合の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t は、以下のように計算される。

式④に、HDP-69BCH(B)型の一次蓋シール部について、

T_d : 兼用キャスク内部代表温度 (K) (535.15 K(262 °C) : 評価値 (内部ガス最高温度))

T : シール部の代表温度 (K) (250.75 K(-22.4 °C) : 設計値 (最低気温))

V_d : 兼用キャスク本体内部空間容積 (m^3) (m^3 : 設計値)

P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa) (4.1×10^5 Pa : 設計値 (初期圧力一定))

P_{d_0} : 下流側 (兼用キャスク本体内部) の初期圧力 (Pa) (8.0×10^4 Pa : 設計値)

a : 一次蓋シール部の漏えい孔長 (m) (m)、

$$a = 2 \times \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2}$$

D : 一次蓋金属ガスケットの断面径 (mm) (10 mm : 設計値)

H : 一次蓋の金属ガスケット溝深さ (mm) (mm : 設計値)

μ : Heの粘性係数 (Pa·s) (1.77×10^{-5} Pa·s : 文献値⁽²⁾ (-22.4 °Cの値))

M : Heの分子量 (kg/mol) (4.002602×10^{-3} kg/mol : 文献値⁽³⁾)

R_0 : 気体定数 (J/(mol·K)) (8.314472 J/(mol·K) : 文献値⁽⁴⁾)

t : 設計貯蔵期間 (60年 = $60 \times 365.25 \times 24 \times 60 \times 60$ s = 1.893456×10^9 s)

を代入して、兼用キャスク本体内部圧力 P_d が 0.1 %の燃料破損⁽¹⁾によるガス放出を想定した圧力上昇を考慮しても負圧を維持できる圧力となる漏えい孔径を繰り返し計算により求める。

ここで、0.1 %の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇 ΔP は、次のとおり求められる。

$$\Delta P = P_{He} + P_{FP}$$

ここで、

P_{He} : 使用済燃料内の初期封入ガス分圧 (Pa)

P_{FP} : FPガス分圧 (Pa)

兼用キャスク本体内部空間の初期封入ガス分圧 P_{He} 、FPガス分圧 P_{FP} は次のとおり求められる。

$$P_{He} = P_0 \times \frac{V_p}{V_d + V_p} \times \frac{T_d}{T_0}$$

$$P_{FP} = \frac{m \times R_0 \times T_d}{V_d}$$

ここで、

新型8×8燃料、新型8×8ジルコニウムライナ燃料を例にすると、

P_0 : 燃料棒初期内圧 (Pa) (Pa : 設計値)

V_p : 放出ガス体積 (m^3)

$$V_p = V_{p0} \times n \times N \times \alpha$$

V_{p0} : 燃料棒プレナム体積 (m^3 /本) (m^3 /本 : 設計値)

n : 燃料集合体1体当たりの燃料棒本数 (本) (62本 : 設計値)

N : 兼用キャスク1基当たりの燃料集合体収納体数 (体) (69体 : 設計値)

α : 燃料棒破損率 (—) (0.001 : 原子力学会標準⁽¹⁾)

V_d : 兼用キャスク本体内部空間容積 (m^3) (m^3 : 設計値)

T_d : 兼用キャスク内部代表温度 (K)

(535.15 K (262 °C) : 評価値 (内部ガス最高温度))

T_0 : 燃料棒初期封入時温度 (K) (K (°C) : 設計値)

m : 放出FPガス量 (mol)

$$m = M_g \times N \times \alpha \times \beta$$

M_g : ガス生成量 (mol/体) (mol/体 : 燃焼計算コードORIGEN2による評価値)

β : ガス放出率 (—) (0.3 : 原子力学会標準⁽⁴⁾)

R_0 : 気体定数 (J/(mol·K)) (8.314472 J/(mol·K) : 文献値⁽³⁾)

0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇は約 kPa (Pa を丸め) となる。同様に、高燃焼度 8×8 燃料で 0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇を求めると約 kPa (Pa を丸め) となる。

漏えい孔径を繰り返し計算により求めると、漏えい孔径 D_0 は以下のとおりとなる。

$$Pd(t=60 \text{ 年}) = 9.7 \times 10^4 - \text{} \times 10^3 \text{ Pa} = \text{} \times 10^4 \text{ Pa} \text{ のとき、} D_0 = \text{} \text{ m}$$

また、リークテスト判定基準 Q_t としては、0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇及び設計貯蔵期間経過後にさらに蓋間空間ガス全量の金属キャスク本体内部への流入を仮定した圧力上昇を考慮した許容圧力 (MPa) においても負圧を維持できる値とする。基準漏えい率と同様に計算すると、以下のようになる。

$$Pd(t=60 \text{ 年}) = \text{} \text{ Pa} \text{ のとき、漏えい孔径 : } D_0 = \text{} \text{ m}$$

次に、標準大気圧における基準漏えい率 Q_s とリークテスト判定基準 Q_t を算出する。標準状態の算出条件を表 2.4.4-1 に示す。

基準漏えい率 Q_s は、先に得られた漏えい孔径 $D_0 = \text{} \text{ m}$ の漏えい孔に対して、表 2.4.4-1 の条件をクヌッセンの式 (式②) に代入することで求められる。

また、リークテスト判定基準 Q_t も同様に、漏えい孔径 $D_0 = \text{} \text{ m}$ の漏えい孔に対して、表 2.4.4-1 の条件をクヌッセンの式 (式②) に代入することで求められる。

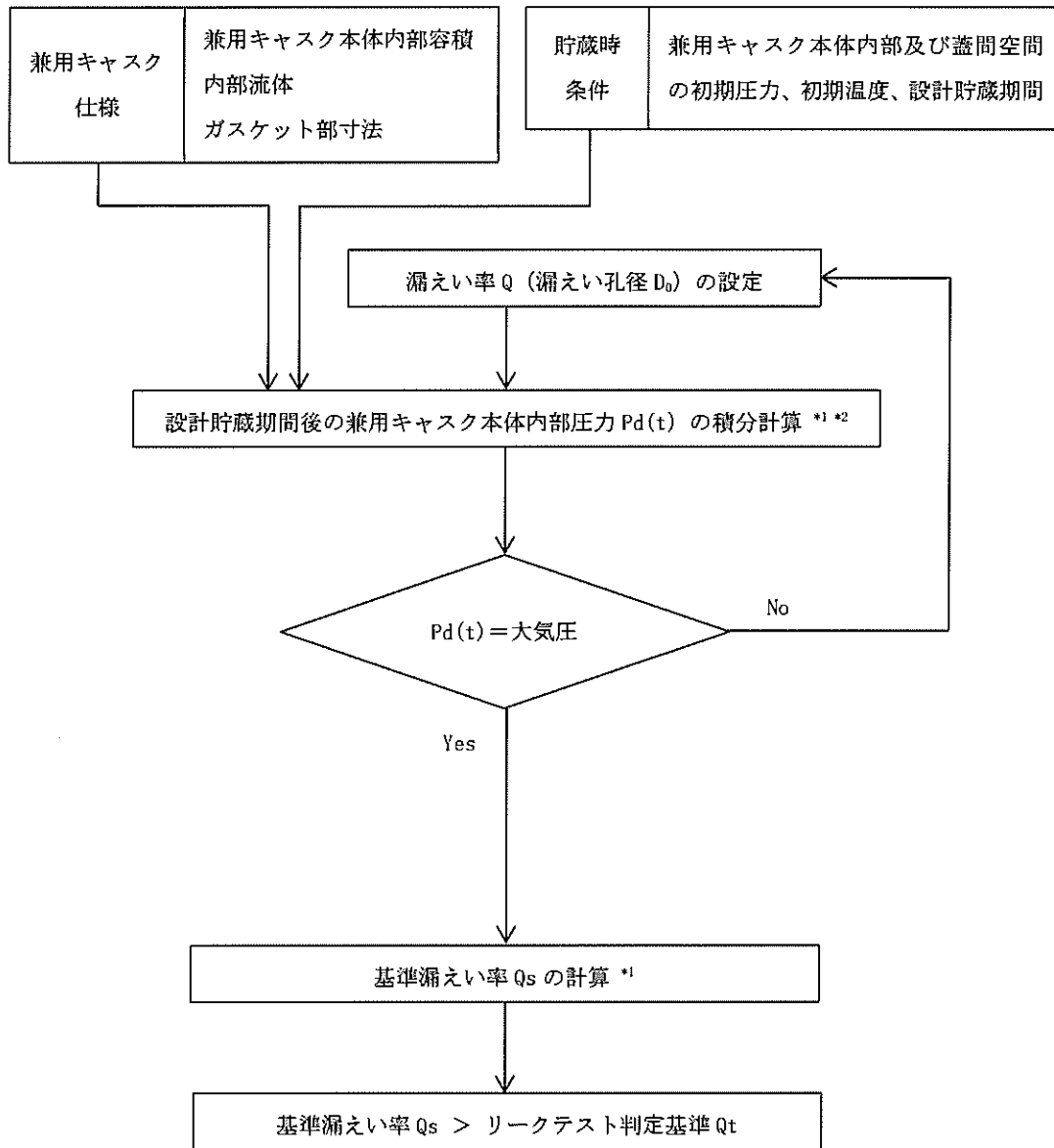
一方、バルブカバーシール部で漏えいする場合についても、金属ガスケットの断面径 $D = 5.6 \text{ mm}$ 及び金属ガスケット溝深さ $H = \text{} \text{ mm}$ を用いて上記と同じ計算を実施することによって基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t が評価される。

b. 評価の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

- ・設計貯蔵期間中において使用済燃料の崩壊熱は低下していくが、使用済燃料の崩壊熱低下による兼用キャスク本体内部温度の温度低下を考慮せず、兼用キャスク本体内部温度は初期温度で一定とする。
- ・設計貯蔵期間中において上流側 (蓋間) の圧力は漏えいにより低下していくが、漏えい

による圧力低下を考慮せず、初期圧力で一定とする。



注記*1：クヌッセンの式に基づく計算

*2：ボイル・シャルルの法則に基づく計算

図 2.4.4-5 基準漏えい率の計算フロー図

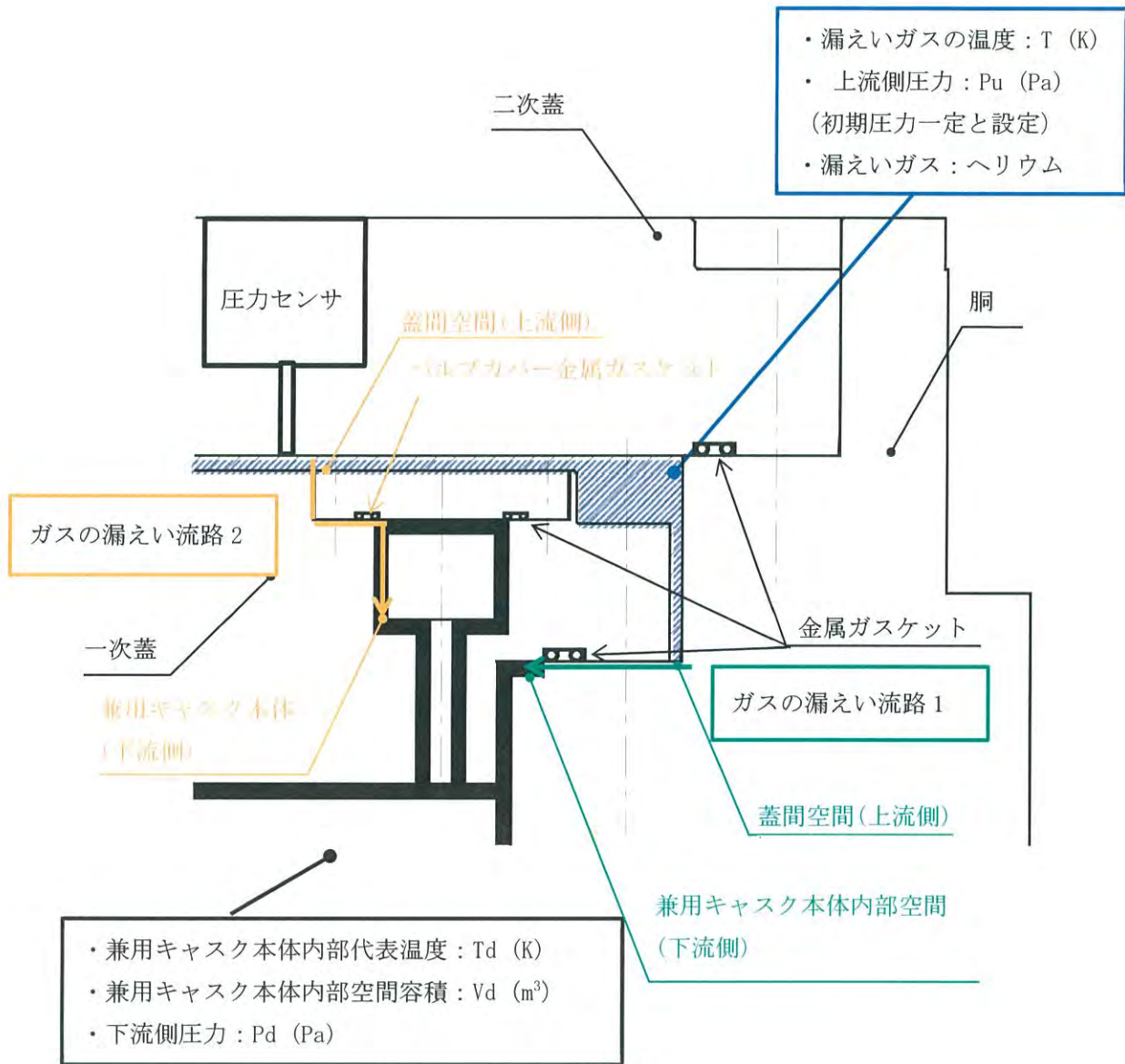


図 2.4.4-6 漏えい率計算の概要

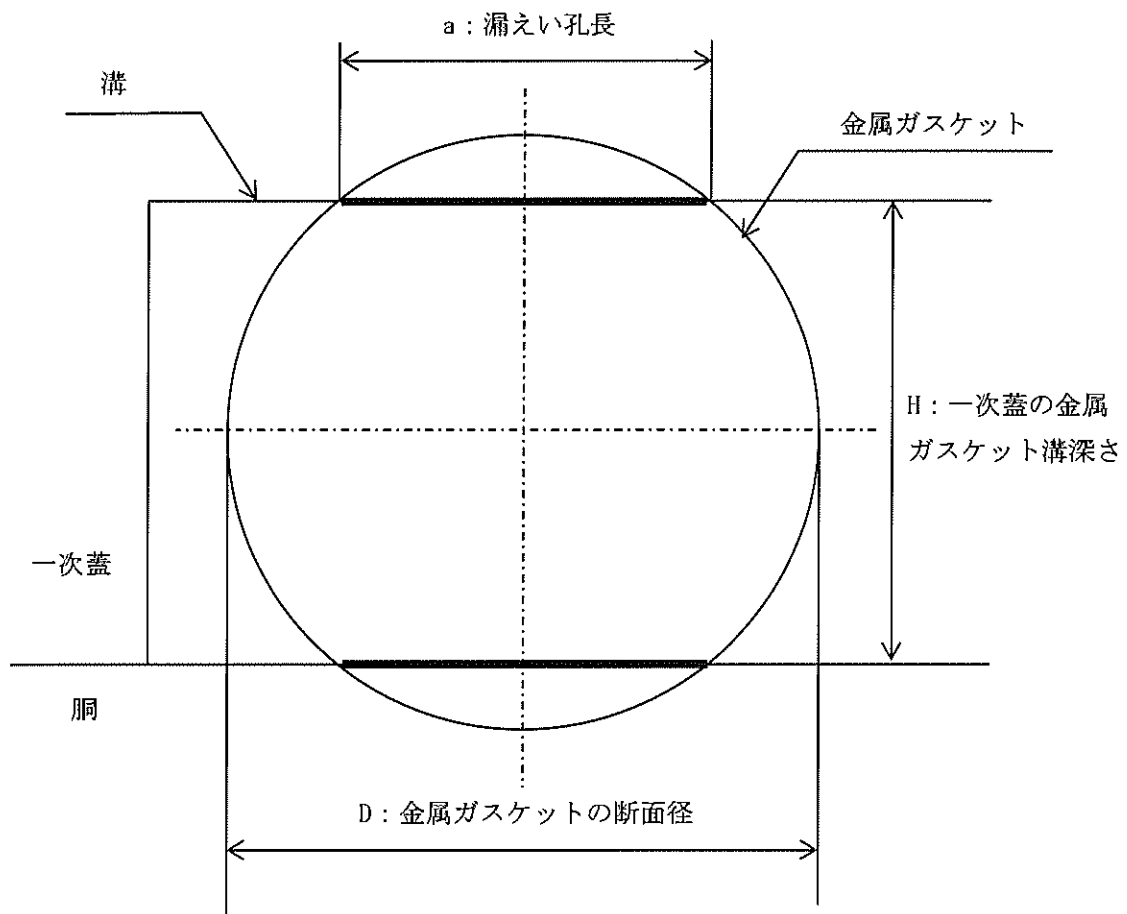


図 2.4.4-7 閉じ込め評価に係る構造図






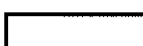


表2.4.4-1 標準状態の算出条件


項目	評価条件	備考
圧力	上流側圧力 : 0.101 MPa 下流側圧力 : 0 MPa	大気圧
温度	25 °C	
内部流体	ヘリウム 分子量 : 4.002602×10^{-3} kg/mol 粘性係数 : 1.98×10^{-5} Pa·s (25 °C)	

c. 評価結果

閉じ込め設計の評価結果を表 2.4.4-2 に示す。一次蓋の金属ガスケットからの流路 1 と、一次蓋貫通孔のバルブカバー（二か所）の金属ガスケットからの流路 2 がある。この二つの漏えい流路は金属ガスケットの仕様が異なるため、それぞれの金属ガスケット仕様を用いて個別に評価を行い、リークテスト判定基準が基準漏えい率より小さいことを確認した。

表 2.4.4-2 閉じ込め評価結果

	一次蓋シール部で 漏えいした場合	バルブカバーシール部で 漏えいした場合
金属ガスケットの断面径	10 mm	5.6 mm
金属ガスケット溝深さ	 mm	 mm
漏えい孔長	 m	 m
基準漏えい率 Q_s における 漏えい孔径	 m	 m
基準漏えい率 Q_s	2.4×10^{-6} Pa·m ³ /s	2.5×10^{-6} Pa·m ³ /s
リークテスト判定基準 Q_t における漏えい孔径	 m	 m
リークテスト判定基準 Q_t	1.6×10^{-6} Pa·m ³ /s	1.7×10^{-6} Pa·m ³ /s

 内は商業機密のため、非公開とします。

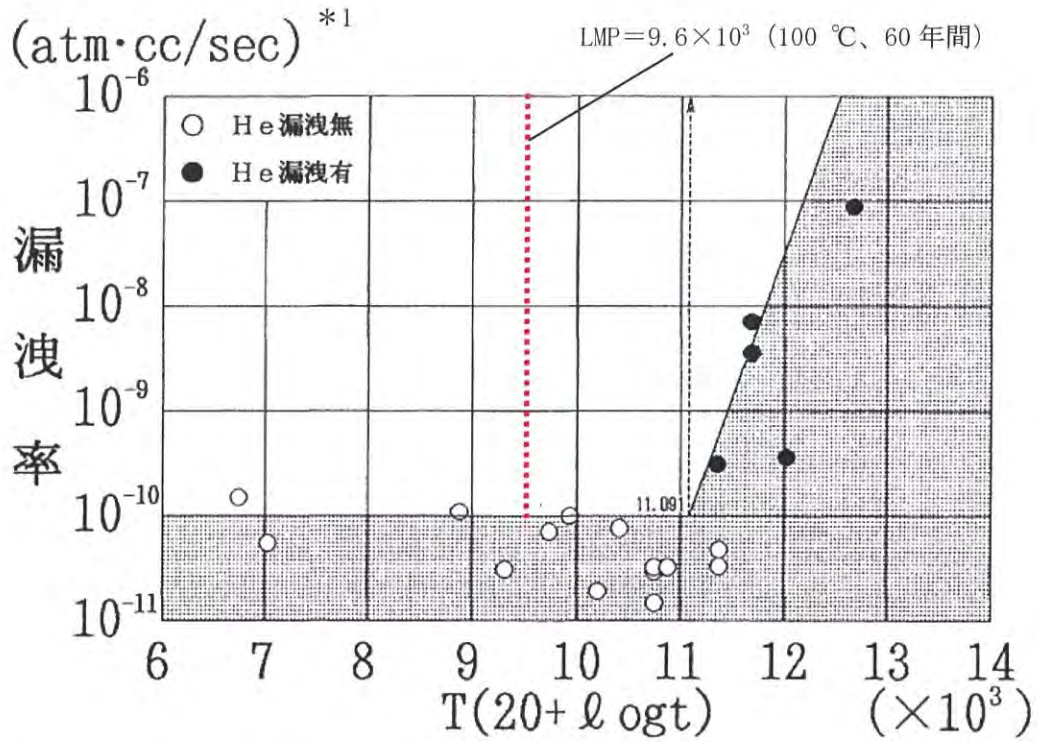
金属ガスケットの性能は、兼用キャスクのシール部が比較的高温下にあるため、長期貯蔵中のクリープによる応力緩和を考慮した上で評価する必要がある。応力緩和による漏えい率への影響については、ラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」という。）の考え方を用いて評価する。ここで、（一財）電力中央研究所で実施された長期密封性能試験結果においては LMP の定数 C を 20⁽⁶⁾ 又は 16⁽⁶⁾ とした場合が報告されている。一方、原子力安全基盤機構における金属ガスケットの密封性能試験等では LMP の定数 C を 14⁽⁷⁾ とした場合が報告されている。LMP と漏えい率の関係は定数 C が 20 の場合は図 2.4.4-8⁽⁵⁾ に、14 の場合は図 2.4.4-9⁽⁸⁾ に示すとおり整理されている。ここで LMP の定数 C を 20 及び 14 とした場合に対し、それぞれの金属ガスケットの LMP が約 11×10^3 及び 8.0×10^3 を超えないように設計すれば、応力緩和を考慮しても初期の漏えい率が維持され、設計貯蔵期間を通じて 10^{-10} Pa・m³/s 以下を確保できることが示されている。

HDP-69BCH(B)型の除熱評価の結果から、金属ガスケット部の温度は 100 °C 以下である。この温度から設計貯蔵期間（60 年間）に相当する LMP を算出すると LMP の定数 C=20 の場合は約 9.6×10^3 、C=14 の場合は約 7.4×10^3 となり、設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率が維持されると判断される。また、図 2.4.4-8 及び図 2.4.4-9 の LMP 計算式に示すとおり LMP の算出において定数 C に関しては単調増加し、C=16 の場合は C=14 と C=20 に包絡される。

また、図 2.4.4-10 に示す（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部モデルによる長期密封性能試験結果において、試験開始から 19 年以上（平成 2 年 10 月から平成 22 年 1 月）が経過した二次蓋閉じ込め部の漏えい率に変化はなく、金属ガスケットは試験開始時と同等の閉じ込め性能を保持することが確認されている⁽⁹⁾。

さらに、日本原子力発電株式会社東海第二発電所で行われた乾式貯蔵容器の調査において、約 7 年間経過した金属ガスケットの一次蓋シール部の漏えい率は、貯蔵初期と同程度（約 10^{-10} Pa・m³/s）に維持されているとの知見が得られている⁽¹⁰⁾。

以上より、HDP-69BCH(B)型で使用する金属ガスケットの設計漏えい率 Q_n は、使用環境を考慮しても表 2.4.4-2 のリークテスト判定基準 Q_t (1.6×10^{-6} Pa・m³/s) を満足する。



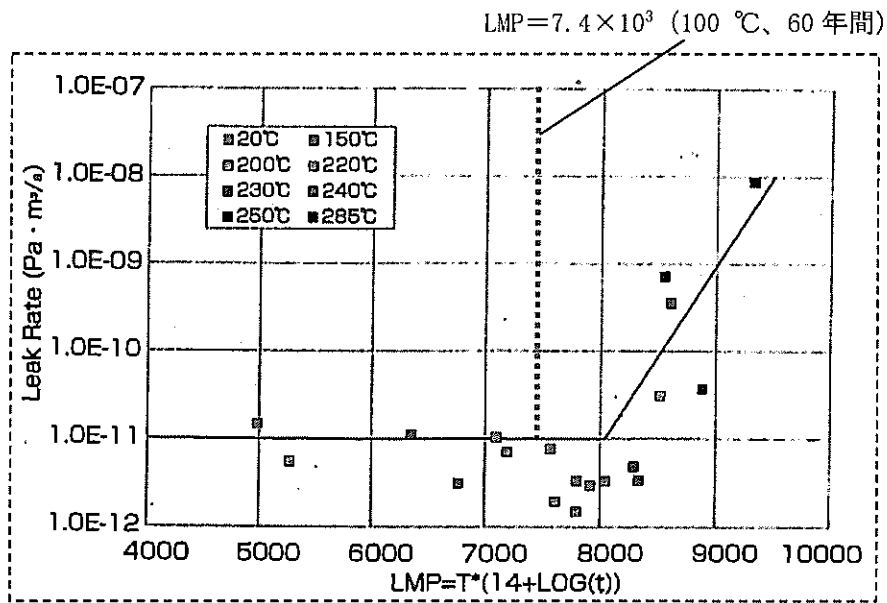
注記*1 : 1 atm·cc/sec ≒ 1 × 10⁻¹ Pa·m³/s

$$LMP = T \cdot (20 + \log t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

図 2.4.4-8 LMP の定数 C=20 における漏えい率と LMP⁽⁵⁾



$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

図 2.4.4-9 LMP の定数 C=14 における漏えい率と $LMP^{(B)}$

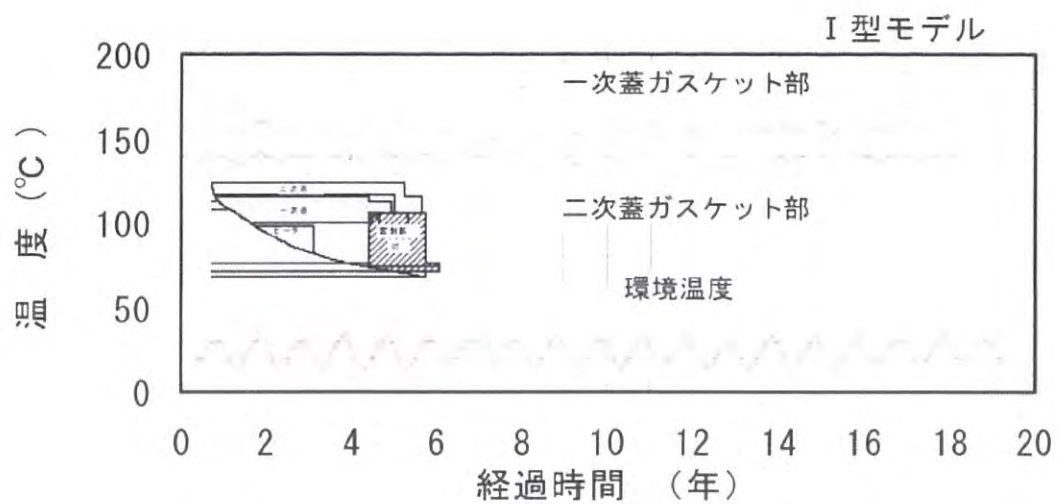
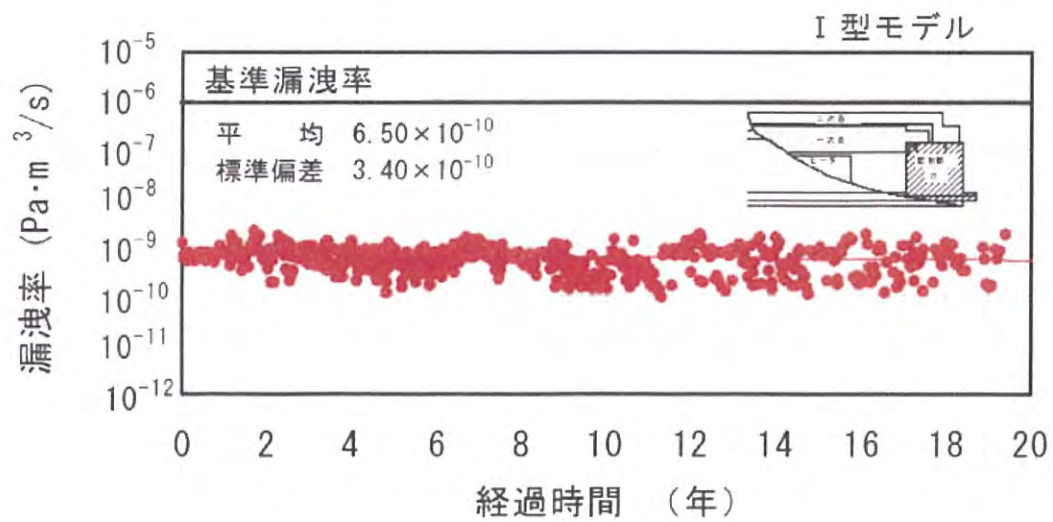


図 2.4.4-10 金属ガスケット（二次蓋）の長期密封性能試験結果（眼鏡型）⁽⁹⁾

なお、以下の内容は、本型式証明の申請範囲外とする。

(審査範囲外)

- ・ 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

3. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合

2. に示したように、基礎等に固定する方法（たて置き）の兼用キャスク内部代表温度は262℃である。別添3の4. に示すように、兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合の兼用キャスク内部代表温度は249℃であり、たて置きの方が兼用キャスク内部代表温度が大きく、よこ置きの場合の閉じ込め機能の評価は、たて置きの場合の評価で代表される。

4. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の場合

緩衝体等を装着した蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の除熱評価を行い、兼用キャスク内部代表温度を確認する*1。

注記*1：詳細は今後ご提示する。

5. 参考文献

- (1) (一社)日本原子力学会、「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010(AESJ-SC-F002：2010)」(2010年7月)
- (2) (一社)日本機械学会、「伝熱工学資料 改訂第4版」
- (3) 「国立天文台編 理科年表 平成19年」、丸善(株)(2006)
- (4) (一社)日本原子力学会、「日本原子力学会標準 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013」(AESJ-SC-F006：2013)(2014年11月)
- (5) 加藤治、伊藤千浩、「電力中央研究所報告 使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」、(一財)電力中央研究所、U92009(平成4年7月)
- (6) (一財)電力中央研究所、「平成23年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備長期健全性等試験)報告書」(平成24年3月)
- (7) (独)原子力安全基盤機構、「平成15年度金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書」(平成16年6月)
- (8) (一財)電力中央研究所、「使用済核燃料貯蔵の基礎」、株式会社ERC出版(2014年4月20日)
- (9) (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年3月)
- (10) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」(平成21年6月25日)

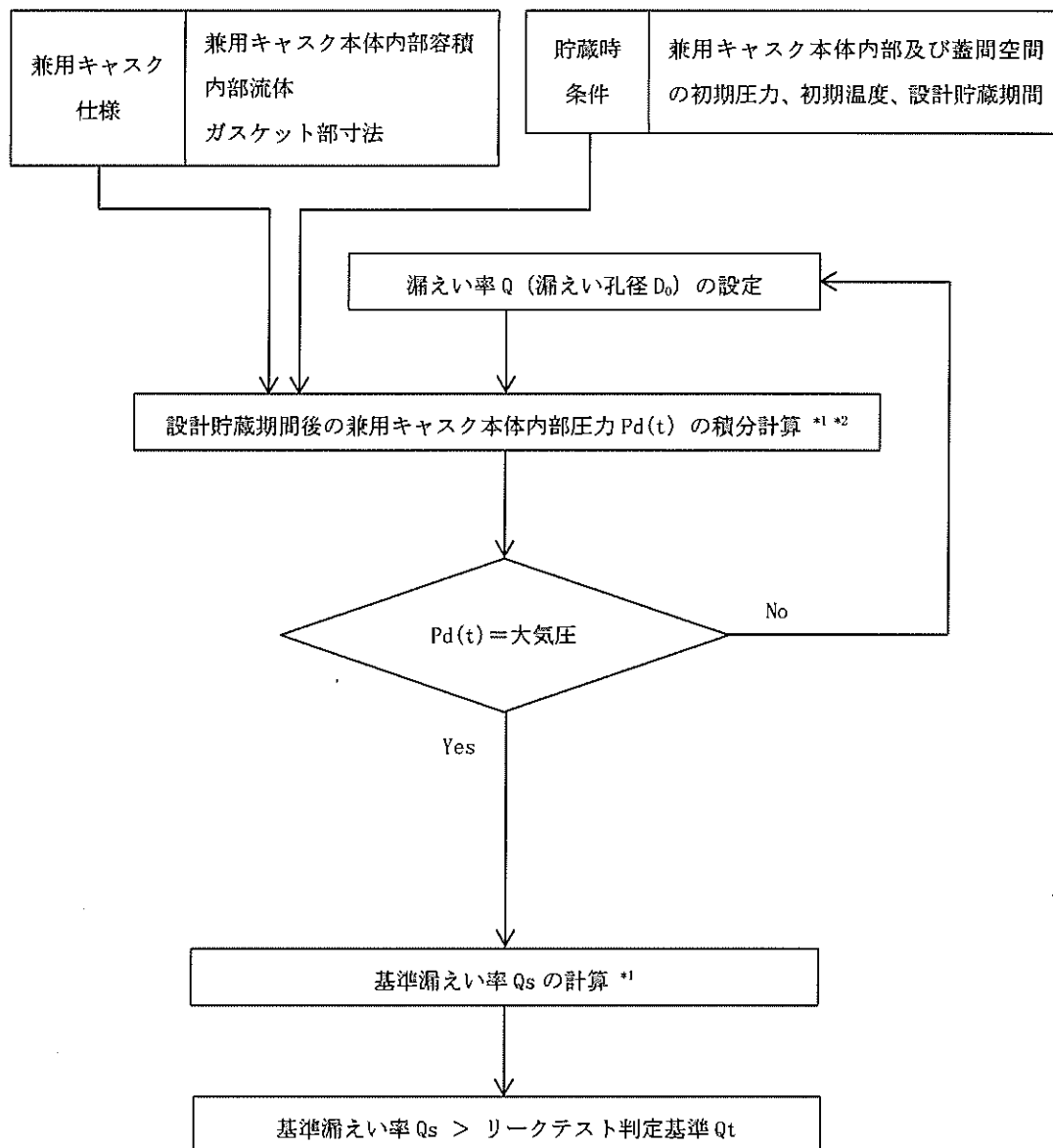
貯蔵時と輸送時の解析条件等の比較

表 1 (1/2) 貯蔵時と輸送時の閉じ込めの評価手法や評価条件の比較

項目	貯蔵時	輸送時		輸送時との相違
		一般の試験条件	特別の試験条件	
評価方法	<p>一次蓋-二次蓋間に充填されたヘリウムガスが胴内に漏れやすい計算を行い、キャピラリー内圧が負圧を維持できる基準漏えい率を計算。その基準漏えい率を満足するように、金属ガスケットを使用する設計</p>	<p>兼用キヤスク内部の核分裂性ガスが外部に漏れやすい計算を行い、放射性物質の漏えい率が輸送法令に規定された判定基準値以下であることを確認 その判定基準値以下を満足するように、ゴムOリングを使用する設計</p>	同左	<p>輸送時には外部への漏えい、貯蔵時には内部への漏えいを仮定</p>
評価フロー	図 1 及び図 2 参照	図 3 及び図 4 参照		
評価式	クヌッセンの式 ポイル・シヤルルの式	同左	同左	
密封境界	一次蓋 (金属ガスケット)	三次蓋 (ゴムOリング)	同左	貯蔵時の密封境界には長期使用を考慮して金属ガスケットを使用

表 1 (2/2) 貯蔵時と輸送時の閉じ込めの評価手法や評価条件の比較

項目	貯蔵時	輸送時		輸送時との相違
		一般の試験条件	特別の試験条件	
燃料破損率	0.1%	0.1%	100%	
圧力 条件	一次蓋-二次蓋間： 初期充填圧	兼用キヤスク内部： 大気圧上限	兼用キヤスク内部： FP ガス放出を考慮した 圧力	
	兼用キヤスク内部： 初期充填圧	兼用キヤスク外部： 大気圧下限	兼用キヤスク外部： 大気圧下限	
評価期間	設計貯蔵期間	1 時間当たり	1 週間当たり	
評価結果	基準漏えい率は、金属ガスケ ットが確保可能な閉じ込め機 能及び貯蔵開始前の気密漏え い検査の判定基準として確認 可能な漏えい率（リークテス ト判定基準）を上回る	放射線物質の漏えい率は一 般の試験条件の判定基準値 以下	放射線物質の漏えい率は特 別の試験条件の判定基準値 以下	



注記*1：クヌッセンの式に基づく計算

*2：ポイル・シャルルの法則に基づく計算

図1 基準漏えい率の閉じ込め評価フロー図(貯蔵時の閉じ込め計算)

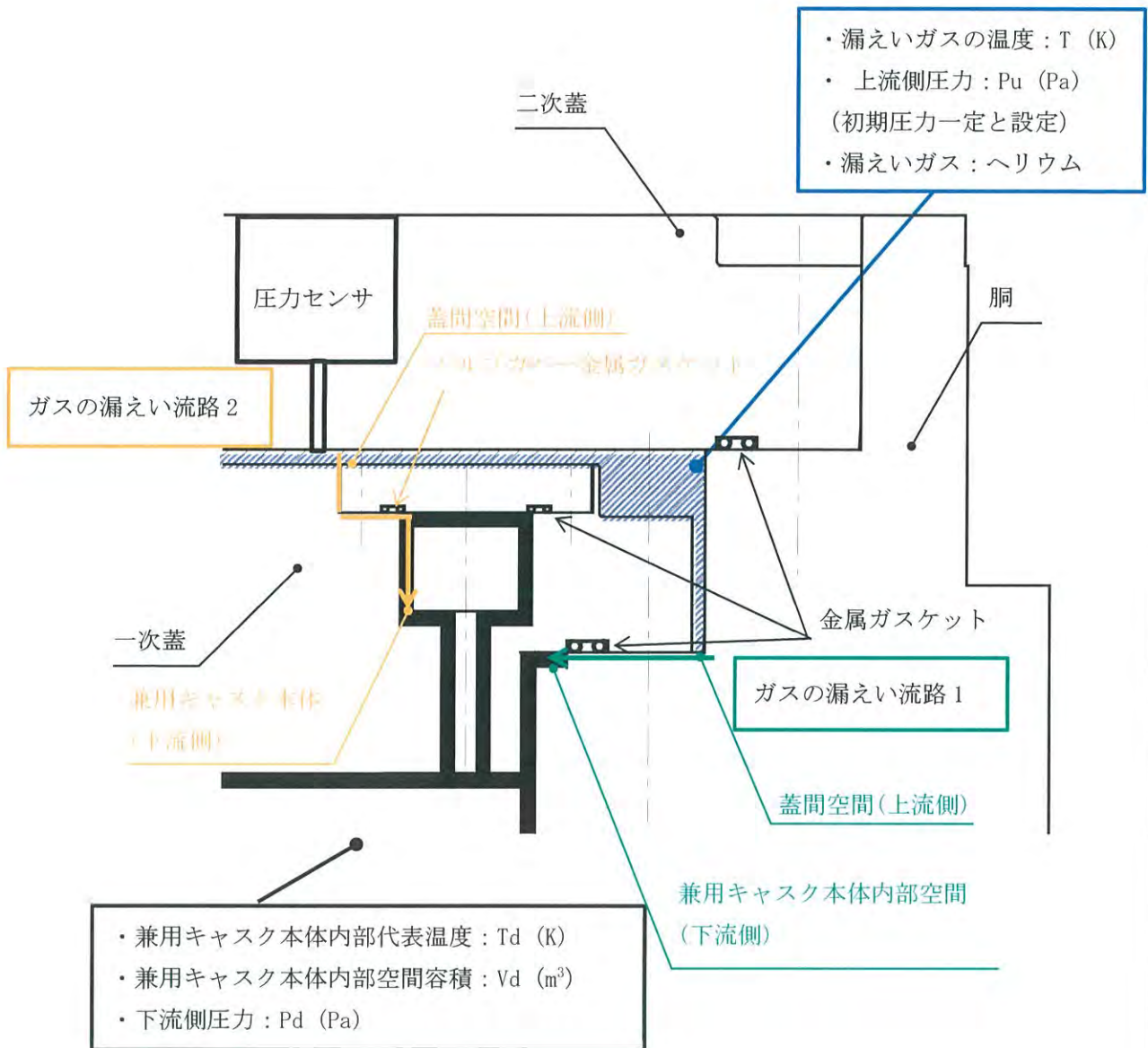


図2 閉じ込め評価に係る構造図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

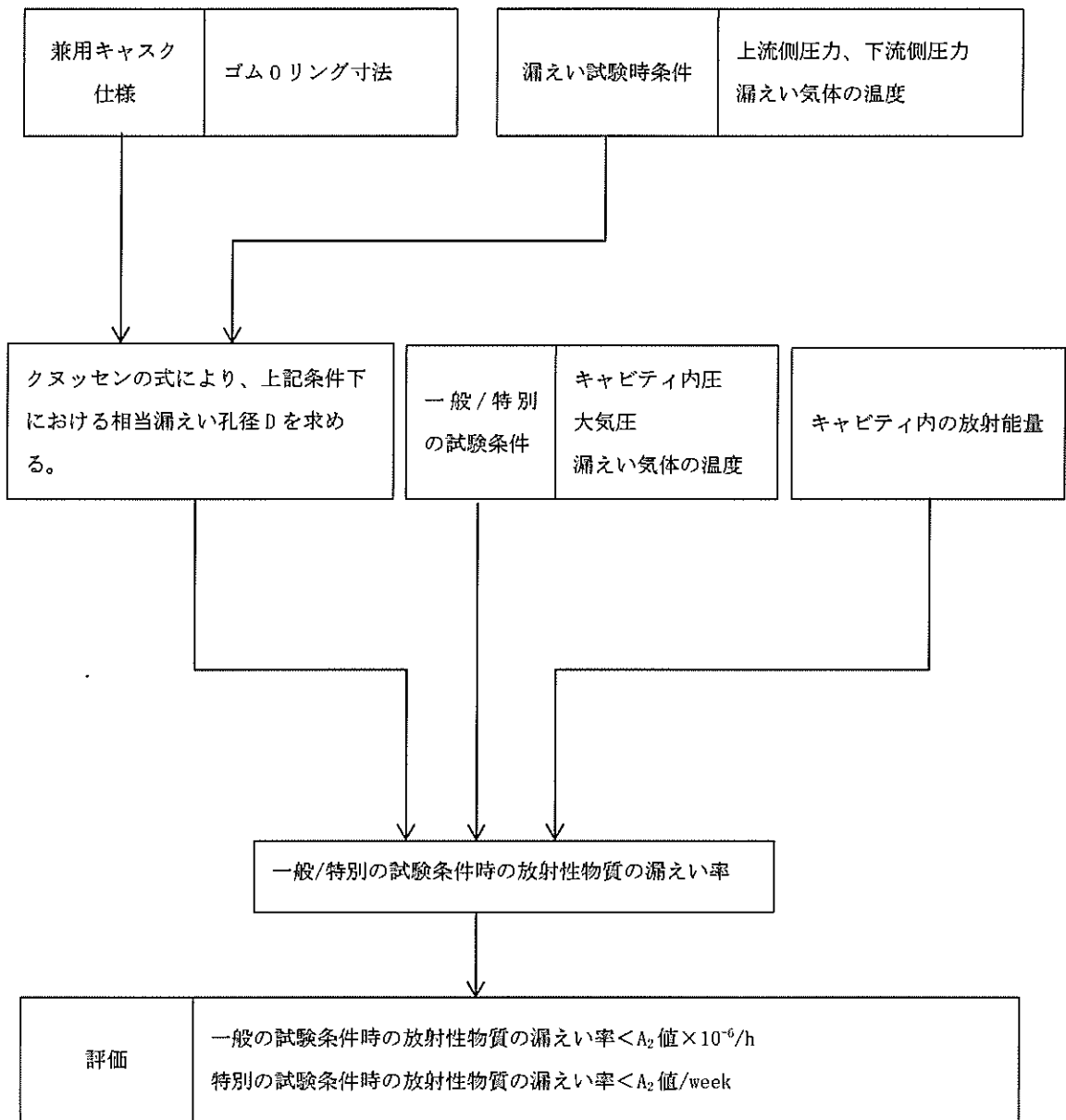


図3 放射性物質の漏えい率の評価フロー図(輸送時の閉じ込め計算)

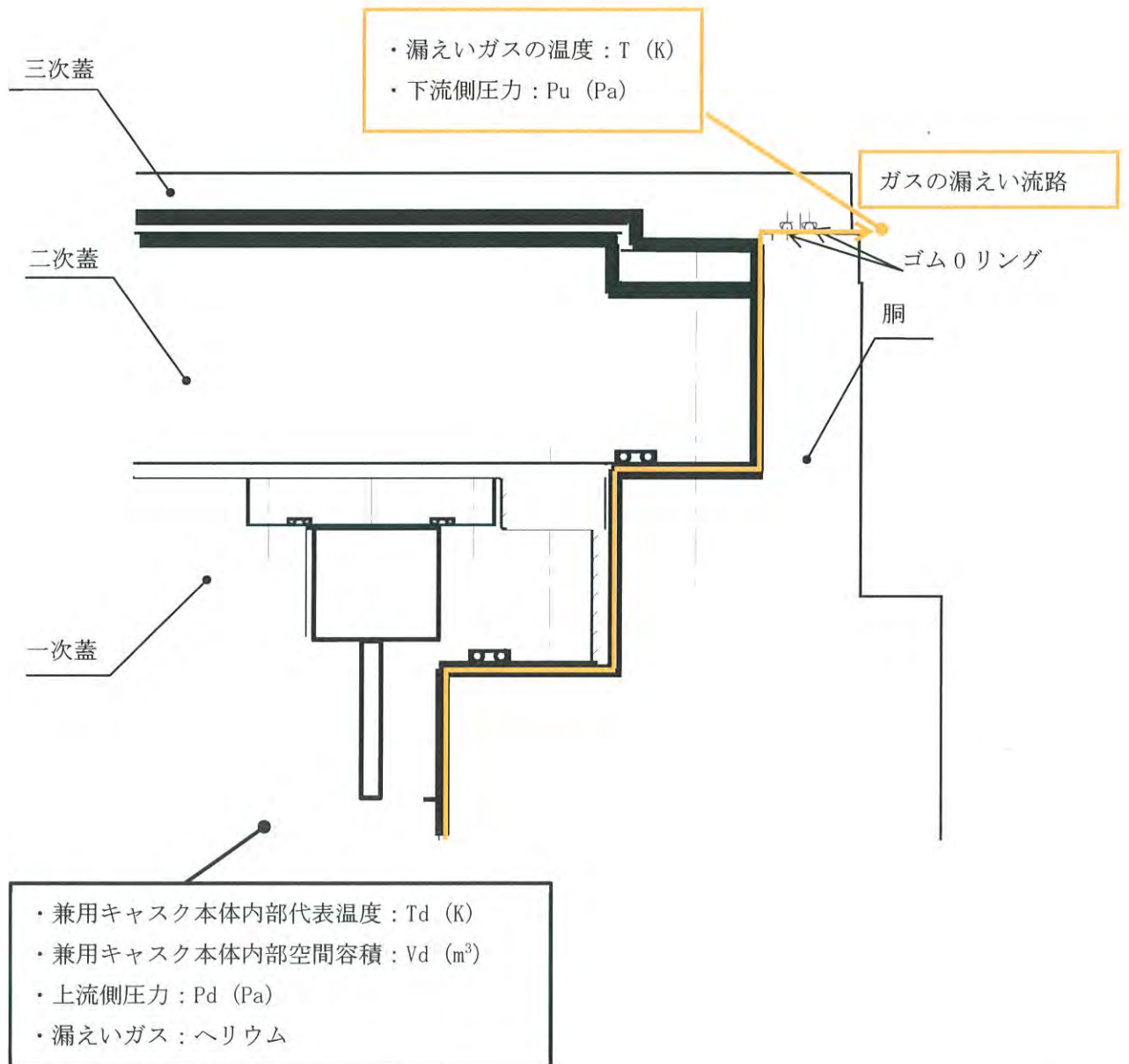


図4 閉じ込め評価に係る構造図(輸送時の閉じ込め計算)