

[確認内容]

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

兼用キャスクが敷地境界に近い場所に設置される場合等に、使用済燃料から放出される中性子の敷地境界線量への寄与が大きくなる可能性があることを適切に考慮した上で、通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線（ガンマ線及び中性子）による実効線量について評価すること。

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が  $100 \mu\text{Sv/h}$  となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。なお、モンテカルロコードを用いる場合は、相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。

④ 通常貯蔵時の線量

通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で  $50 \mu\text{Sv/y}$  以下となることを目標に、線量限度 ( $1\text{mSv/y}$ ) を十分下回る水準とすること。

なお、兼用キャスク以外の施設の線量は、既評価の空気カーマ ( $\text{Gy/y}$ ) を実効線量 ( $\text{Sv/y}$ ) へ換算し、又は新たに実効線量 ( $\text{Sv/y}$ ) を評価するものとする。換算に当たっては、係数を 1 とすること。

敷地境界における実効線量評価については、設置許可基準第 29 条まとめ資料において説明する。

〔確認内容〕

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度（1mSv/y）を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

設計上考慮すべき自然現象において、貯蔵建屋等の損壊が生じない設計であることについて、地盤審査及び4条、5条、6条まとめ資料で説明することとし、遮蔽機能が著しく低下しない設計とする。

### 3. 使用する解析コード

#### a. 解析コード

乾式キャスクの遮蔽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。

#### (a) ORIGEN2 コード

##### i 概要

ORIGEN2 コード<sup>1)</sup>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。

##### ii 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  $(\alpha, n)$  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。

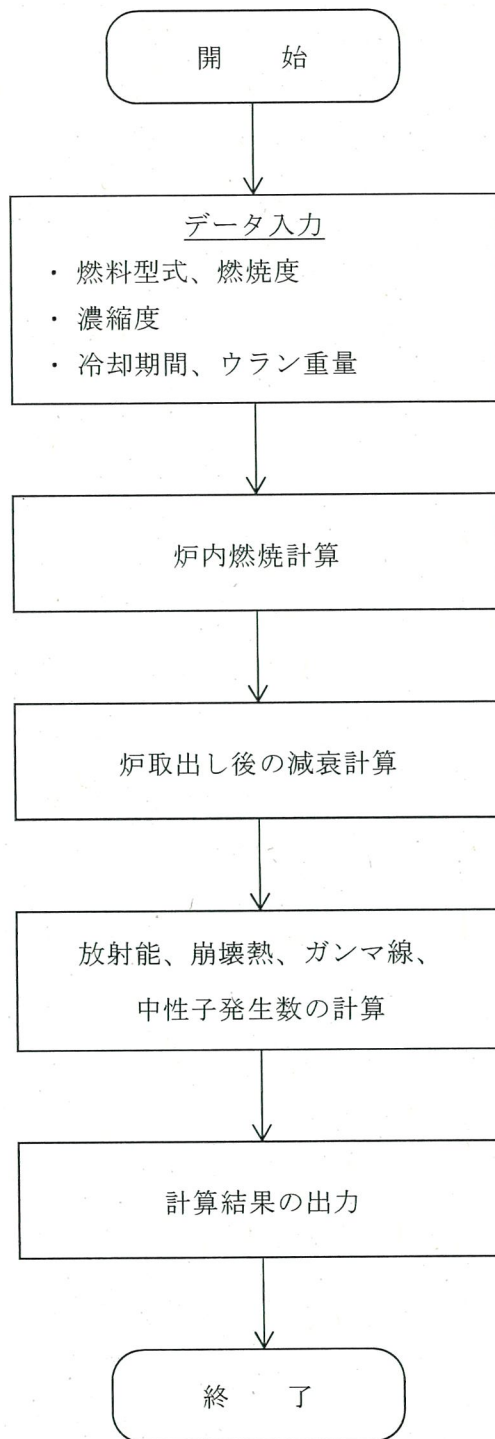
##### iii 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 2.5.3-16 図に示す。

##### iv 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<sup>2)</sup>。

ORIGEN2 コードの検証例を第 2.5.3-17 図に示す。



第 2.5.3-16 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

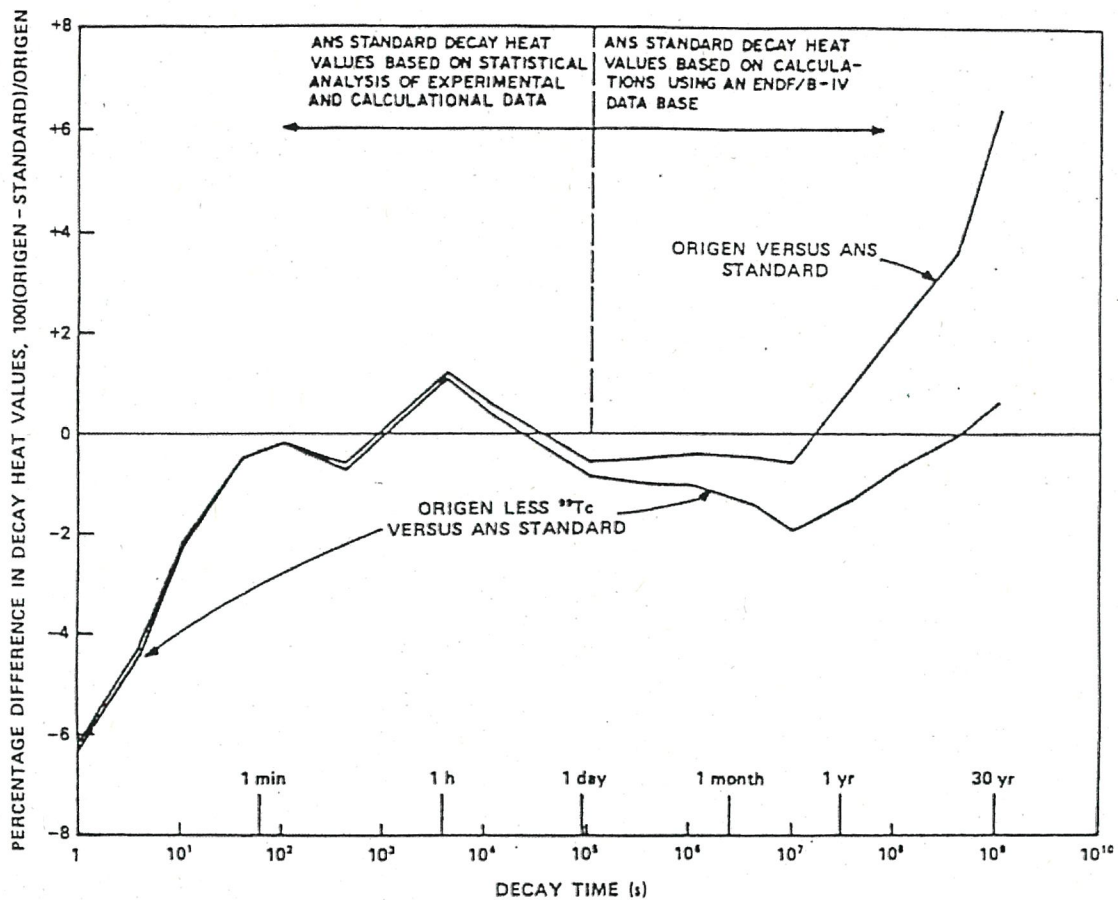


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for  $10^{13}$ -s irradiation of  $^{235}\text{U}$ .

(注) ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上（乾式キャスクに収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は  $^{99}\text{Tc}$  を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より  $^{99}\text{Tc}$  を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第 2.5.3-17 図 ORIGEN2 コードの検証例<sup>2)</sup>

(b) DOT3.5 コード

i. 概要

DOT3.5 コード<sup>3)</sup> (以下「DOT コード」という。)は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された二次元輸送コードである。

ii. 機能

DOT コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

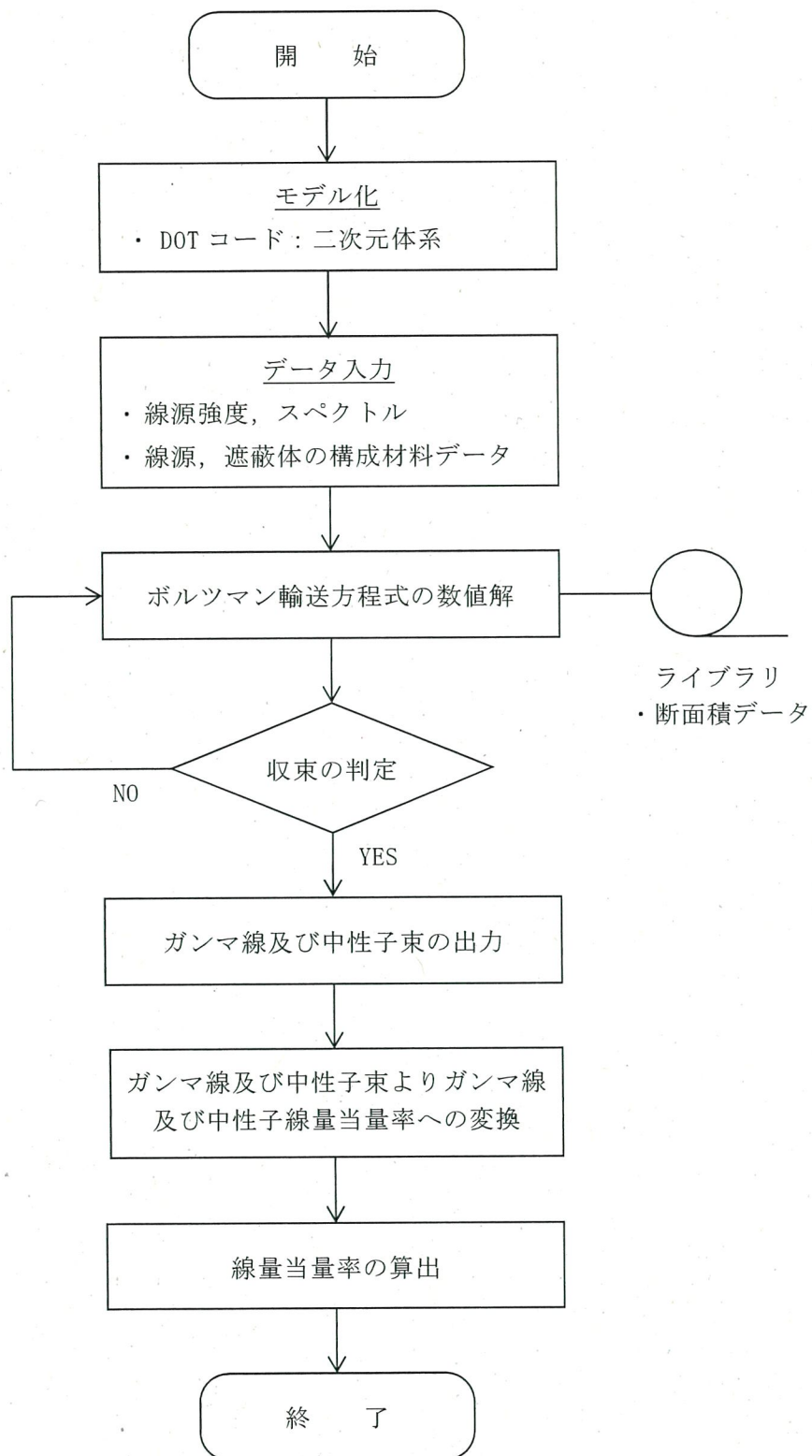
- a) ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii. 解析フロー

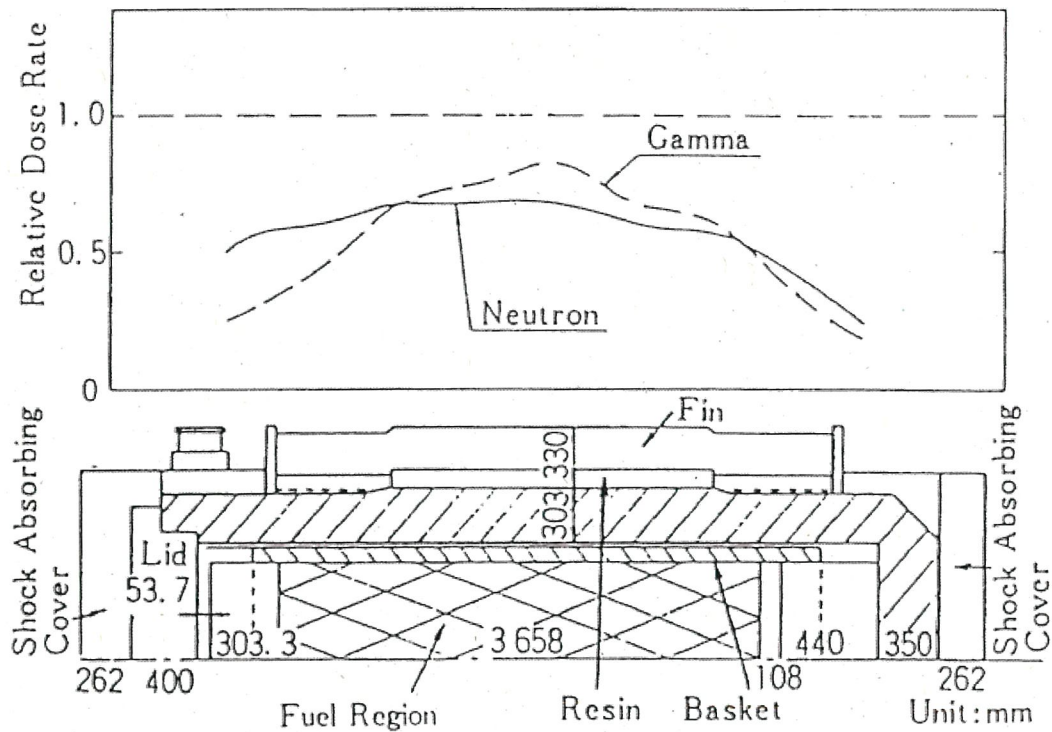
DOT コードの解析フローを第 2.5.3-18 図に示す。

iv. 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第 2.5.3-19 図に示す。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<sup>4)</sup>。



第 2.5.3-18 図 DOT コードの解析フロー図



(注) 中性子および二次ガンマ線を DOT および 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 2.5.3-19 図 DOT コードの検証例<sup>4)</sup>

v. 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33 は、DOT3.5 等の輸送計算コード用に、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリとして、日本原子力研究所にて整備されたものである。MATXSLIB-J33 を用いた断面積ライブラリは、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15 を用いて、輸送計算コード用に中性子 175 群、ガンマ線 42 群のエネルギー群構造に変換し作成している。

JENDL-3.3 の信頼性は遮蔽性能に関するベンチマーク解析で確認されている<sup>5)</sup>。



#### 4. 参考文献

- 1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).
- 2) A. G. Croff, “ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol. 62, (1983).
- 3) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1977).
- 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」, (一社) 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」, C17, (1981).
- 5) 大西世紀 ほか, 「 $^{252}\text{Cf}$  核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第 7 卷 第 3 号 研究報告, (2007).

## 伊方発電所 3 号炉

### 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(使用済燃料乾式貯蔵容器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. 参考文献

## 1. 要求事項

乾式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

#### ①設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去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3項

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

##### ・貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

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

#### ③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) 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」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ブ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、その実施に係る体制を適切に整備すること。

』

## 2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、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確認することが定められており、乾式キャスク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。

#### 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。

貯蔵時の使用済燃料及び乾式キャスクの基本的安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、乾式キャスクは使用済燃料の崩壊熱を除去する設計とする。

乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

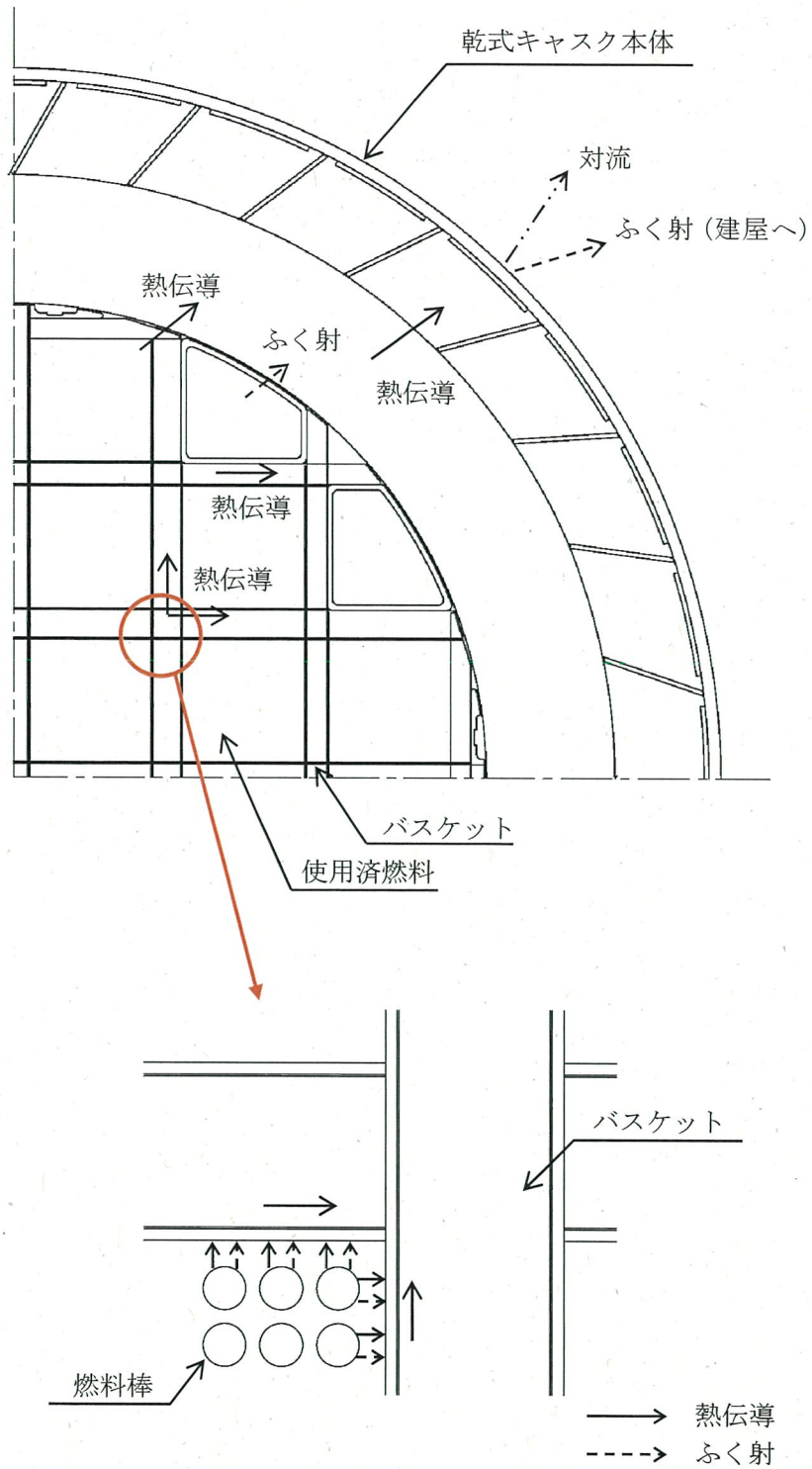
乾式貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

(第 2.5.4-1 図参照)

- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及び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乾式キャスク本体内部内面へ伝えられる。
- d) 乾式キャスク本体内部内面に伝えられた熱は、熱伝導により乾式キャスク本体外面へ伝えられる。
- e) 乾式キャスク本体外面へ伝えられた熱は、乾式キャスク本体外面の対流により乾式キャスク周囲の空気へ伝えられる。また、乾式キャスク本体外面のふく射により建屋に伝えられる。

使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という）は、乾式キャスクを配置するとともに、給気口と排気口を有する構造とし、自然対流冷却により、乾式キャスクの除熱機能を阻害しない設計とする。





第 2.5.4-1 図 乾式キャスクの伝熱形態 (MSF-24P 型の例)

乾式キャスク及び乾式貯蔵建屋の除熱解析フローを第 2.5.4-2 図に示す。

解析条件は第 2.5.4-1 表及び第 2.5.4-2 表のとおり。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく崩壊熱を計算する。

b. 乾式キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

乾式キャスク構成部材の各部温度は、使用済燃料の崩壊熱、周囲の乾式キャスクからの輻射熱及び乾式キャスク周囲温度等を条件として、乾式キャスクの実形状を三次元でモデル化し、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。(第 2.5.4-3 図～第 2.5.4-5 図及び第 2.5.4-8 図～第 2.5.4-10 図参照)

使用済燃料被覆管の温度は、使用済燃料の崩壊熱とバスケットの温度を条件として、燃料集合体の径方向断面の二次元モデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。(第 2.5.4-6 図、第 2.5.4-7 図、第 2.5.4-11 図及び第 2.5.4-12 図参照)

なお、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

－ウラン濃縮度  $4.1 \pm \square$  wt% 及び  $3.4 \pm \square$  wt% を保守的に  $\square$  wt% 及び  $\square$  wt% とする。

－使用済燃料の最高温度を保守的に高めに算出するために、MSF-24P 型では、第 2.5.4-13 図のとおり中央部 12 体に燃焼度が 48Gwd/t の使用済燃料を配置し、外周部 12 体は、乾式キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 44Gwd/t に相当するよう中央部の崩壊熱量を差し引いて外周部の 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。MSF-32P 型では、第 2.5.4-14 図のとおり中央 16 体の燃料集合体のうち中心 4 体には 48Gwd/t の使用済燃料を配置し、中心 4 体を除く 12 体には、中央部 16 体の崩壊熱が平均燃焼度 45Gwd/t に相当するよう中心 4 体の崩壊熱量を差し引いて残りの 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。さらに、外周 16 体には 33Gwd/t の使用済燃料を配置する。

－使用済燃料は、使用済燃料ごとに軸方向の燃焼度分布に基づく発熱量分布を有するが、発熱量計算にあたっては、軸方向燃焼度分布を第 2.5.4-15 図のとおりとし、実際の燃焼度分布より保守的に計算しており、その結果、発熱量は、収納制限における最大崩壊熱量 (MSF-24P 型 : 15.8kW、MSF-32P 型 : 14.8kW) を 14% 程度上回る崩壊熱量となる。

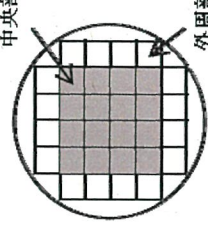
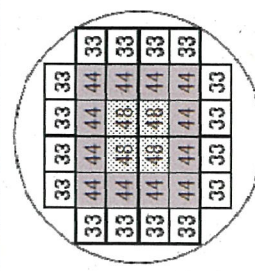
・ モデル化の保守性

－乾式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、温度を高めに評価するよう、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。

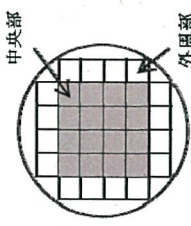
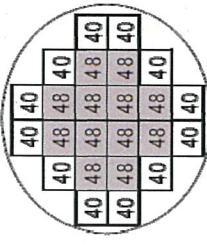
—MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

第 2.5.4-1 表 1, 2 号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

収納物仕様	燃料集合体 1 体の仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック		解析条件	
		中央部	外周部	中央部	外周部	中心	外周
燃料タイプ		14×14 型 (A/B 型)		14×14 型 (A/B 型)		14×14 型 (A 型)	
初期ウラン濃度 (wt%)		≤ 4.2	≤ 3.5	4.1	3.4		
ウラン重量 (kg)							
最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)		≤ 48	≤ 39	≤ 48	≤ 39	48	33
SFP での冷却期間 (年)		≥ 15	≥ 25			15	25
キャスク 1 基あたり		≤ 45	≤ 33		—	45	33
配置※1				—			

※：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す

第2.5.4-2表 3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

収納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペース	解析条件	
		中央部	外周部		中央部	外周部
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	17×17型(A/B型)		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1		
	ウラン重量(kg)					
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	48	40
	SFPでの冷却期間(年)	A型: ≥15 <sup>※1</sup> B型: ≥17		—	15	
ハブ ポ イ ン	最高燃焼度 ((GWd/t))	≤90		—	—	
	SFPでの冷却期間(年)	≥15		—	—	
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		—	44	
キャスク 1基あたり						
	配置 <sup>※2</sup>			—		

※1: 回収ウラン燃料については、15年冷却した通常ウラン燃料と放射能及び発熱量が同程度以下となるよう20年以上冷却した後、収納する。

※2: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

乾式貯蔵建屋の流路を一次元でモデル化し、第 2.5.4-3 表のとおり、給気温度、乾式キャスクの発熱量等を評価条件として、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、乾式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  $\Delta P$  がバランスする点を算出し、乾式キャスクの周囲温度を評価する。なお、乾式キャスクの周囲温度は、乾式貯蔵建屋内で最も温度が高くなる排気温度で評価する。(第 2.5.4-16 図及び第 2.5.4-17 図参照)

第 2.5.4-3 表 除熱評価の代表的な評価条件

項目	条件	備考
乾式キャスクの発熱量(q)	16kW/基	
給気温度 ( $T_{in}$ )	33°C	冷暖房設計用乾球温度・露点温度における TAC2.5%温度*の最高温度 (空気調和・衛生工学便覧[第 14 版])
目標排気温度 ( $T_{out}$ )	50°C以下	乾式キャスクの除熱機能に関する評価条件

\* TAC2.5%温度とは、夏季(6~9月)のうち高温側 2.5%(約 73 時間)は、その温度を超過することを許容する温度である。

a) 駆動力  $H_{th}$  (熱ドラフト力) の計算

駆動力  $H_{th}$  (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

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

ここで、

$H_{th}$  : 熱ドラフト (Pa)

$\rho_{in}$  : 外気の密度 (1.112) (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{out}$  : 排気の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (9.81) (m/s<sup>2</sup>)

$h$  : ドラフト高さ (18.1) (m)

b) 圧力損失  $\Delta P$  の計算

圧力損失  $\Delta P$  は、以下の式で表される。

$$\Delta P = \sum_i \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2}$$

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

ここで、

$\Delta P$  : 圧力損失 (Pa)

- $\zeta_i$  : 圧力損失係数 (-)
- $W_i$  : 通過風量 (質量流量) (kg/s)
- $\rho_i$  : 通風路の空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $A_i$  : 通風路の断面積 (m<sup>2</sup>)
- $q$  : キャスク発熱量(16) (kW/基)
- $n$  : 評価領域のキャスク基数 (基)
- $C_p$  : 空気の比熱(1.007) (kJ/kg・°C)
- $T_{out}$  : 排気温度 (°C)
- $T_{in}$  : 給気温度(33) (°C)

貯蔵建屋の一次元除熱評価で得られた結果を第2.5.4-4表に示す。貯蔵建屋の排気温度 $T_{out}$ は45°Cとなり、目標排気温度 (50°C) 以下となる。

第 2.5.4-4 表 貯蔵建屋除熱評価の結果

排気温度 $T_{out}$ (°C)	熱ドラフト $H_{th}$ (Pa)	圧力損失 $\Delta P$ (Pa)
約 45	約 7.1	約 7.1

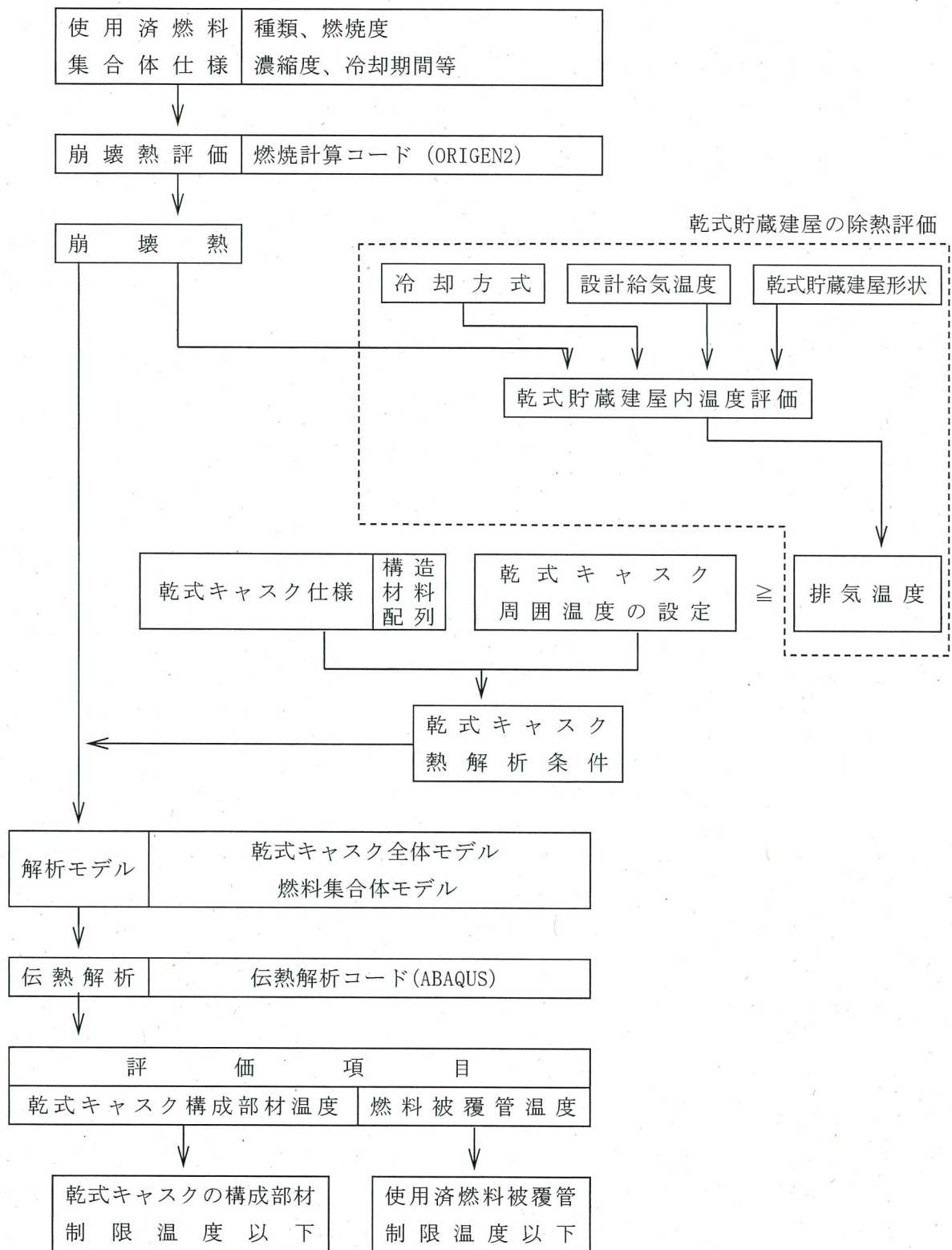
なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

- ・設定条件の保守性

- 乾式キャスクの発熱量は、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の発熱量を包絡する発熱量を使用している。

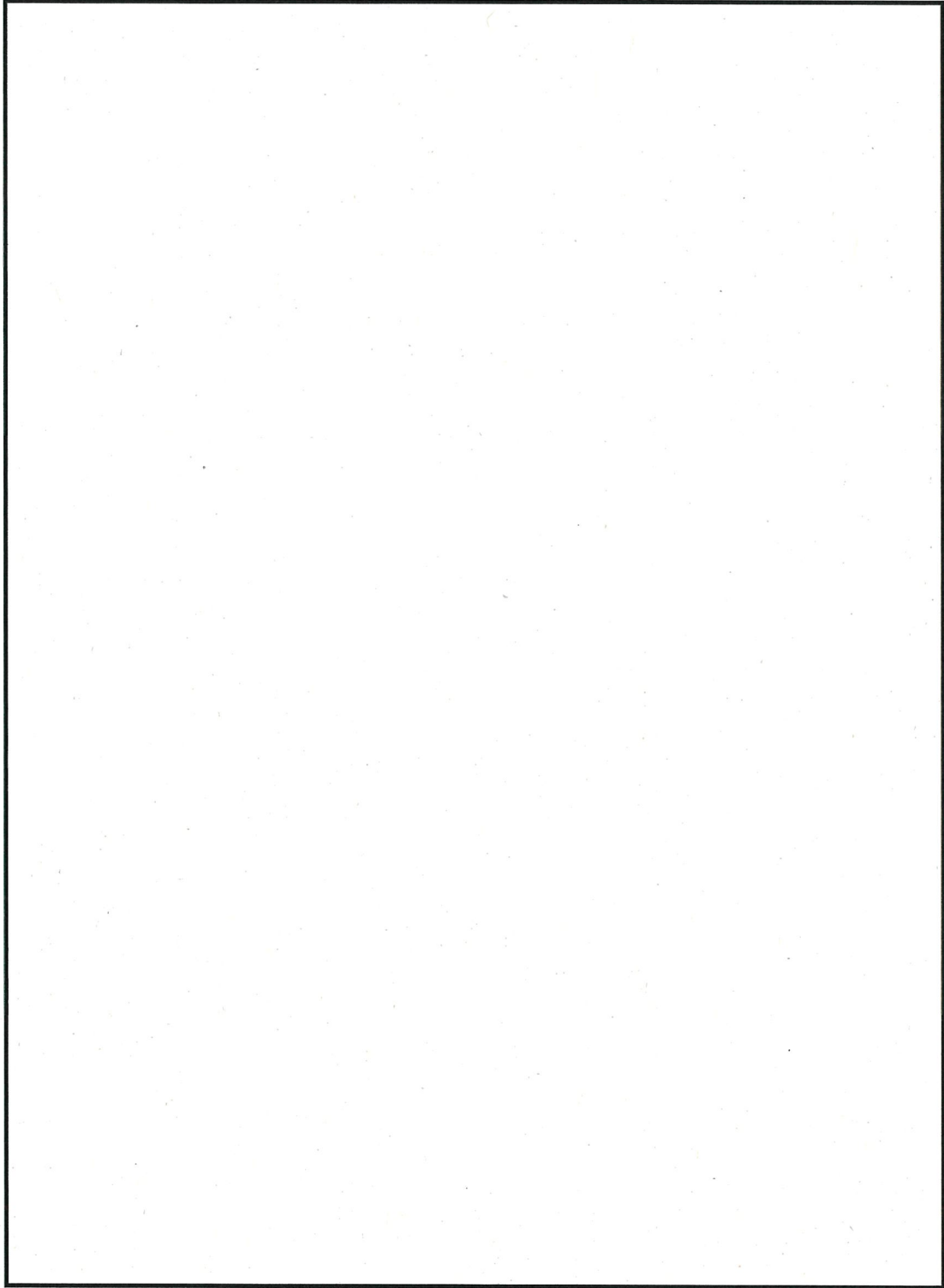
- 乾式キャスクの発熱量は、すべて空気によって除熱されると考え、建屋コンクリート等を通して大気や地中に逃げる熱は考慮しない。また、通風路各部の圧力損失を計算する際に、圧力損失係数が高くなる様に設定する。

なお、太陽輻射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は 1m 以上のコンクリートであり、太陽輻射熱により貯蔵建屋の壁内面 (貯蔵建屋内表面) の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが保守的な評価となる。

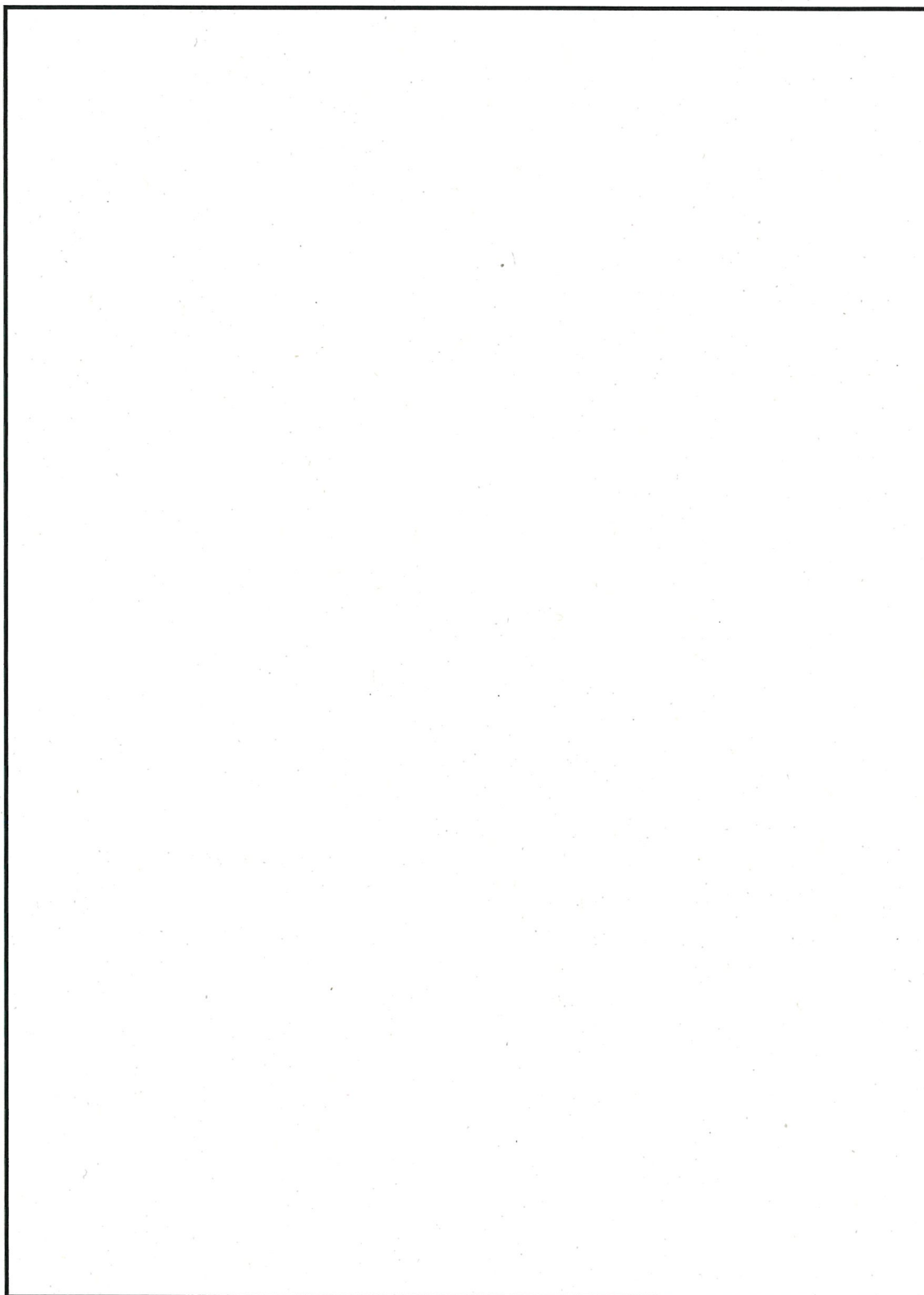


第 2.5.4-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー

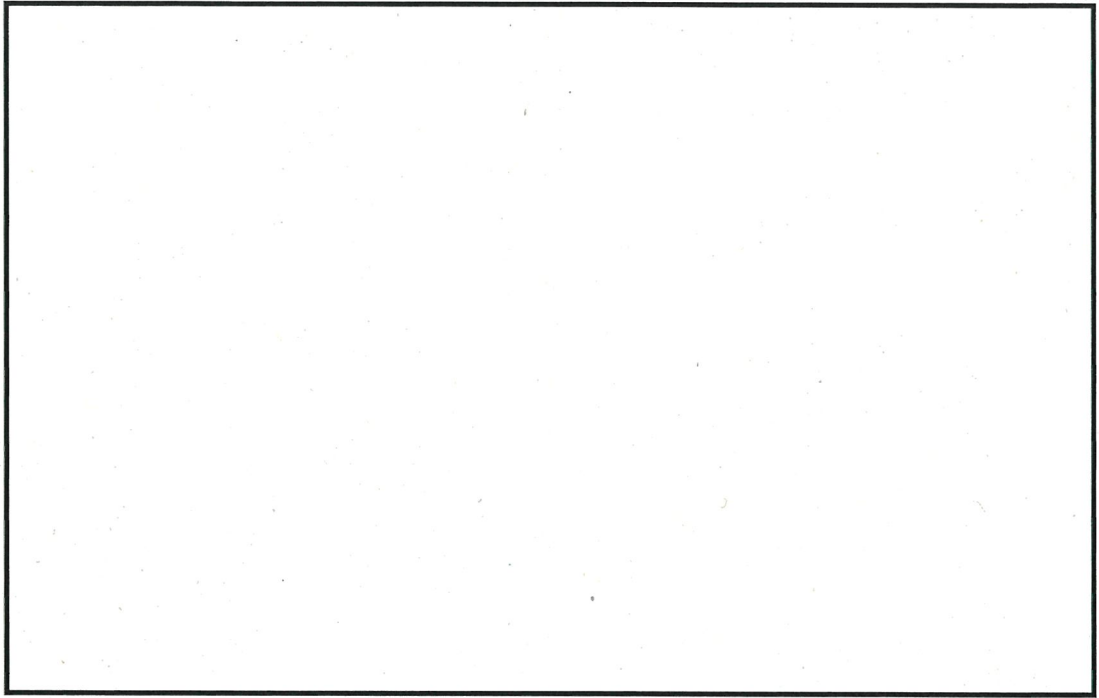




第 2.5.4-3 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (縦断面図)



第 2.5.4-4 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (横断面図)

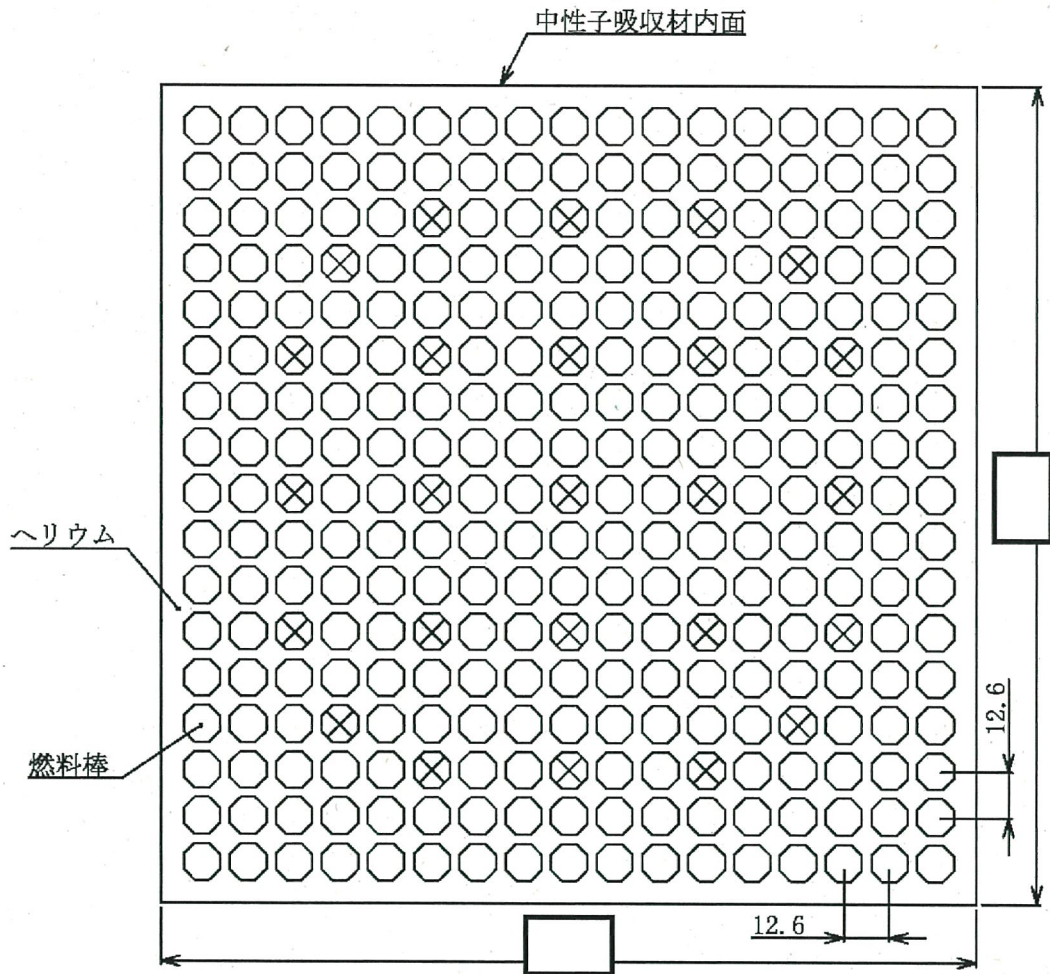


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

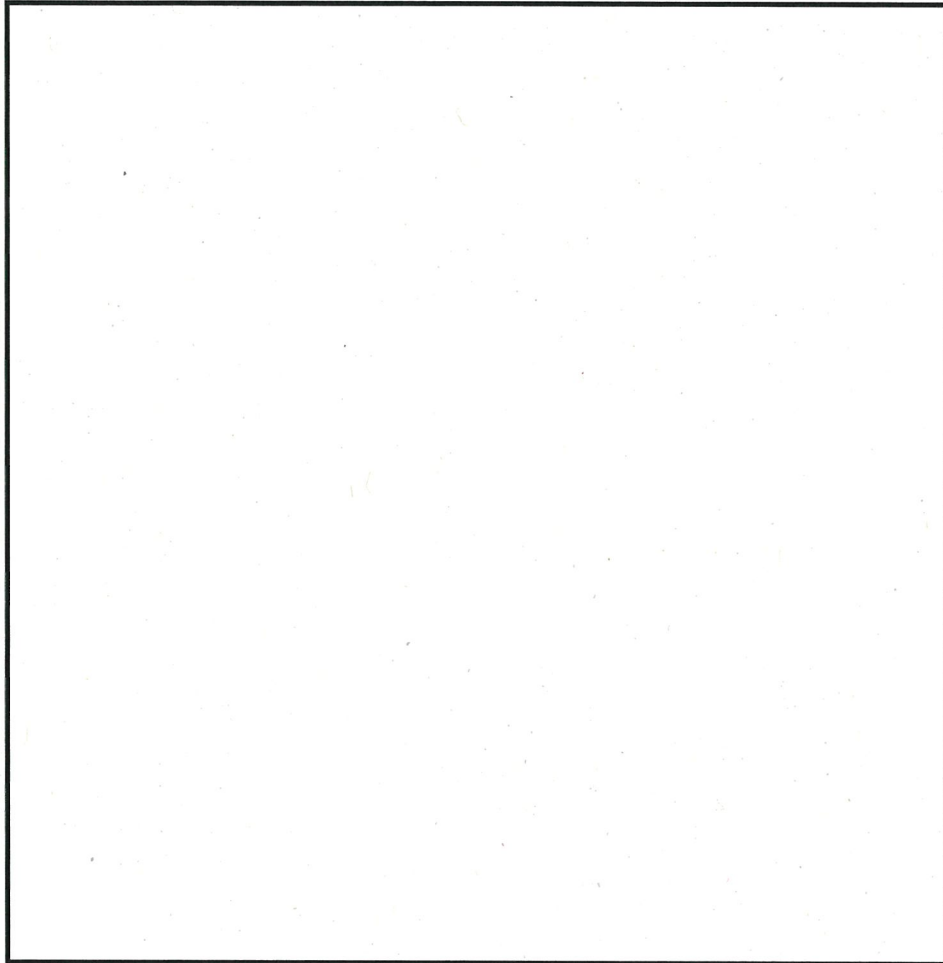
第 2.5.4-5 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図



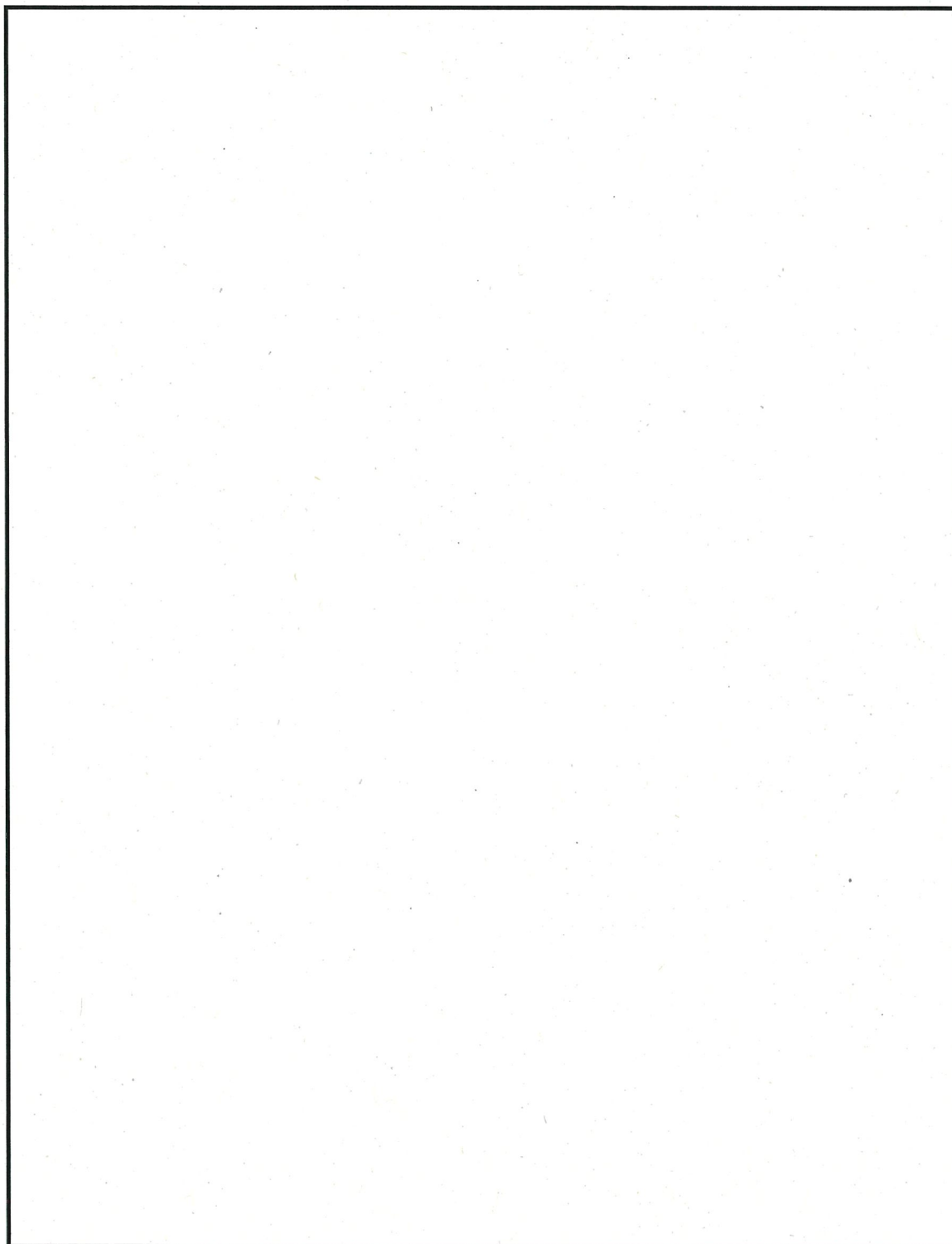
(単位：mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

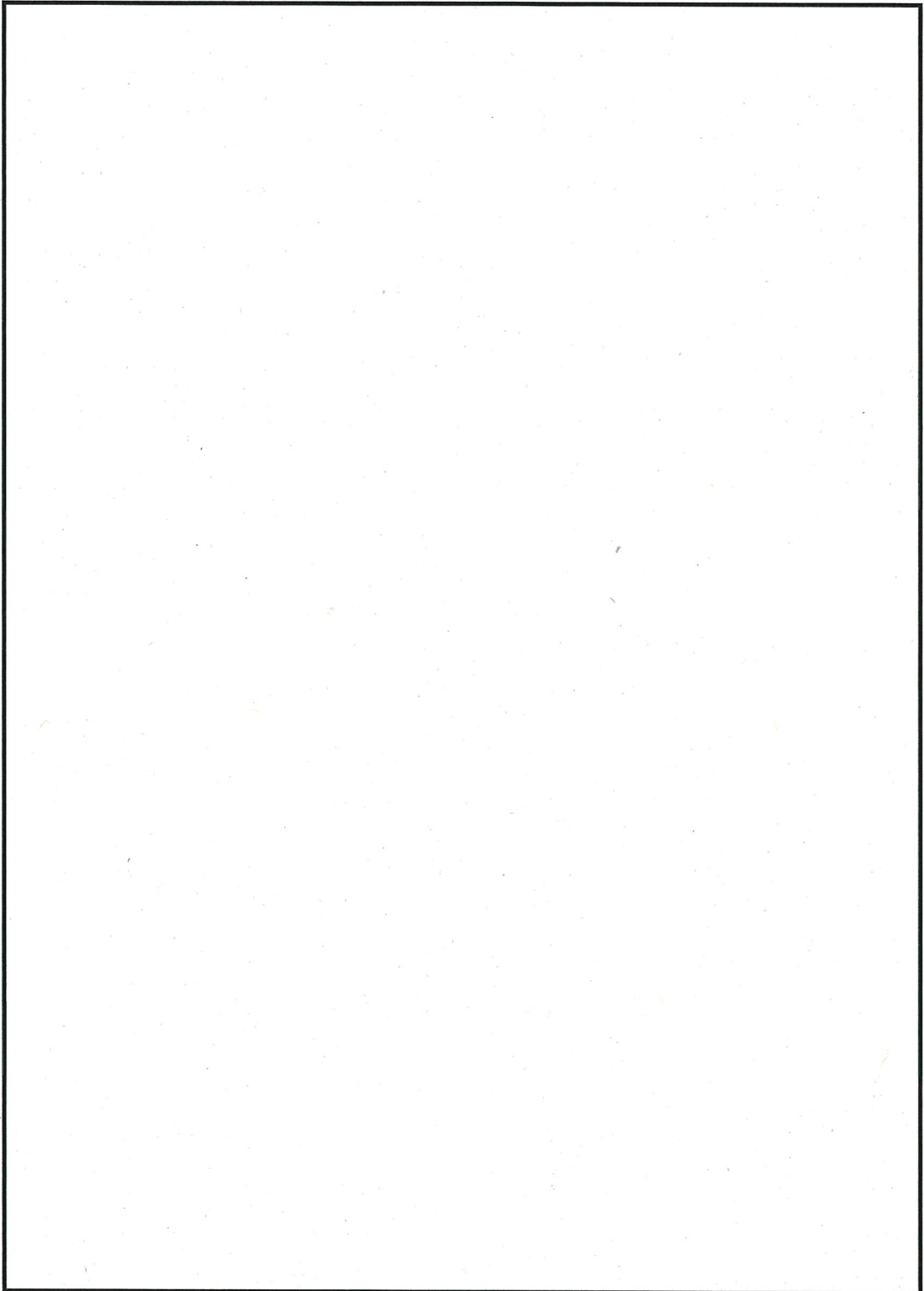
第 2.5.4-6 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図



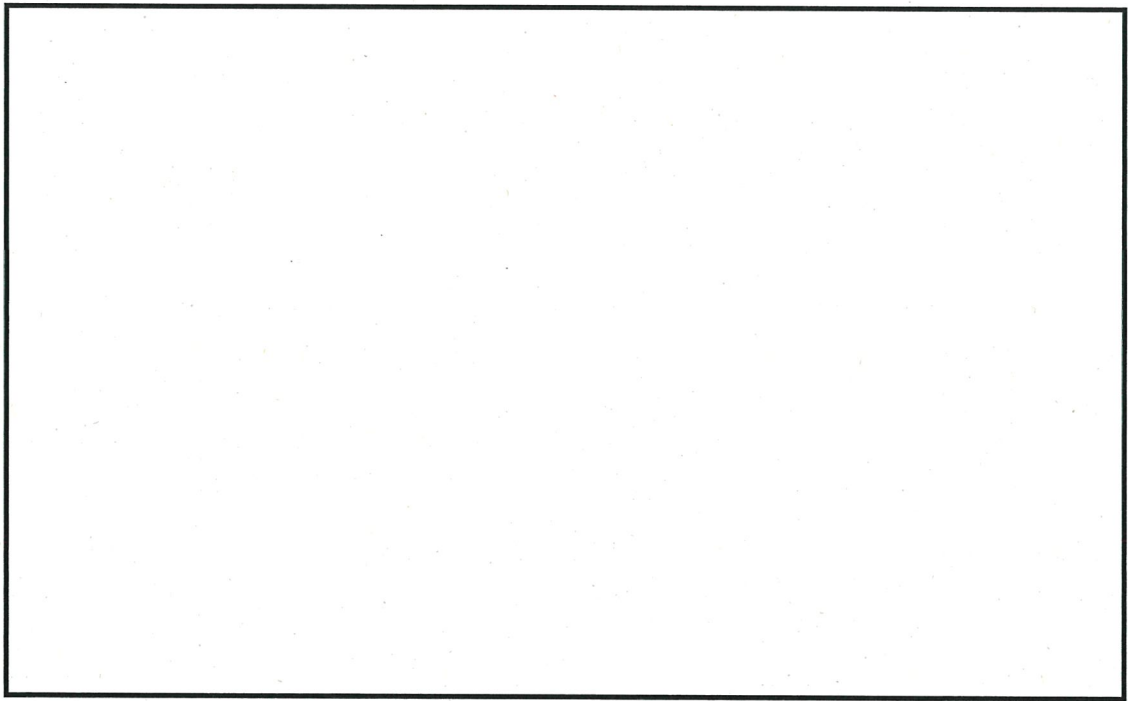
第 2.5.4-7 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図



第 2.5.4-8 図 MSF-32P 型全体モデル形状図（縦断面図）



第 2.5.4-9 図 MSF-32P 型全体モデル形状図（横断面図）



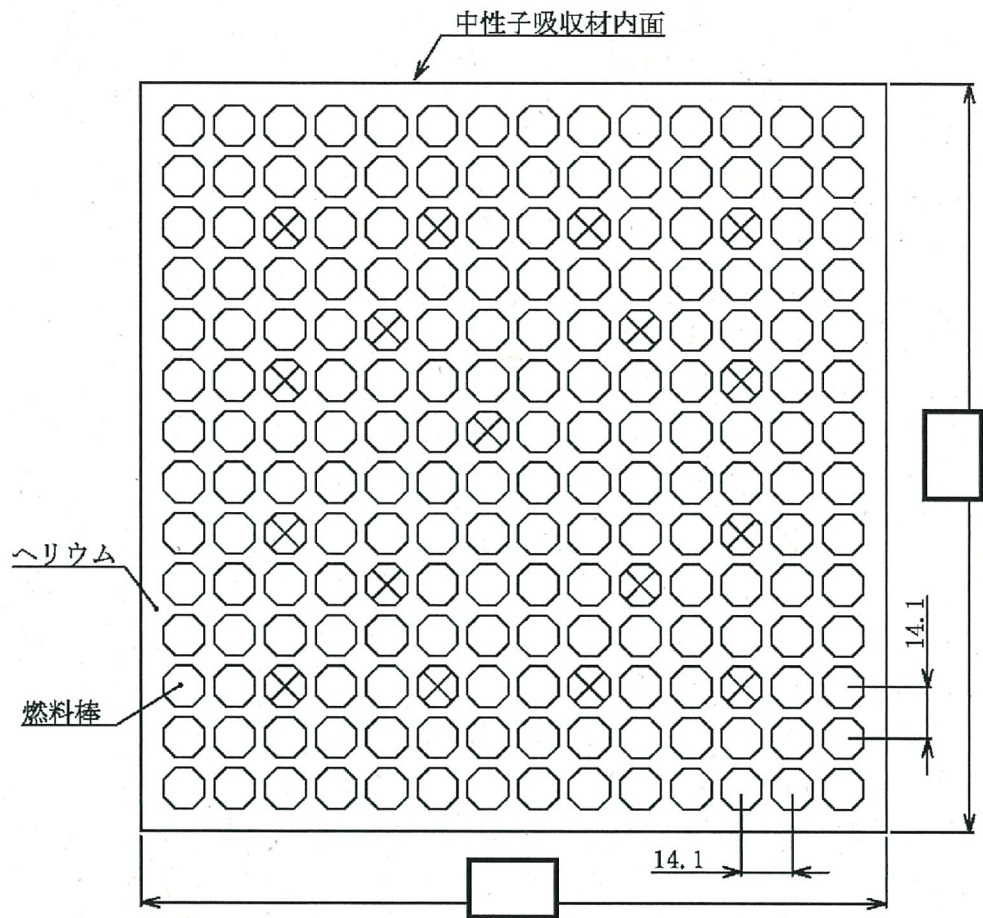
(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

第 2.5.4-10 図 MSF-32P 型全体モデル要素分割図

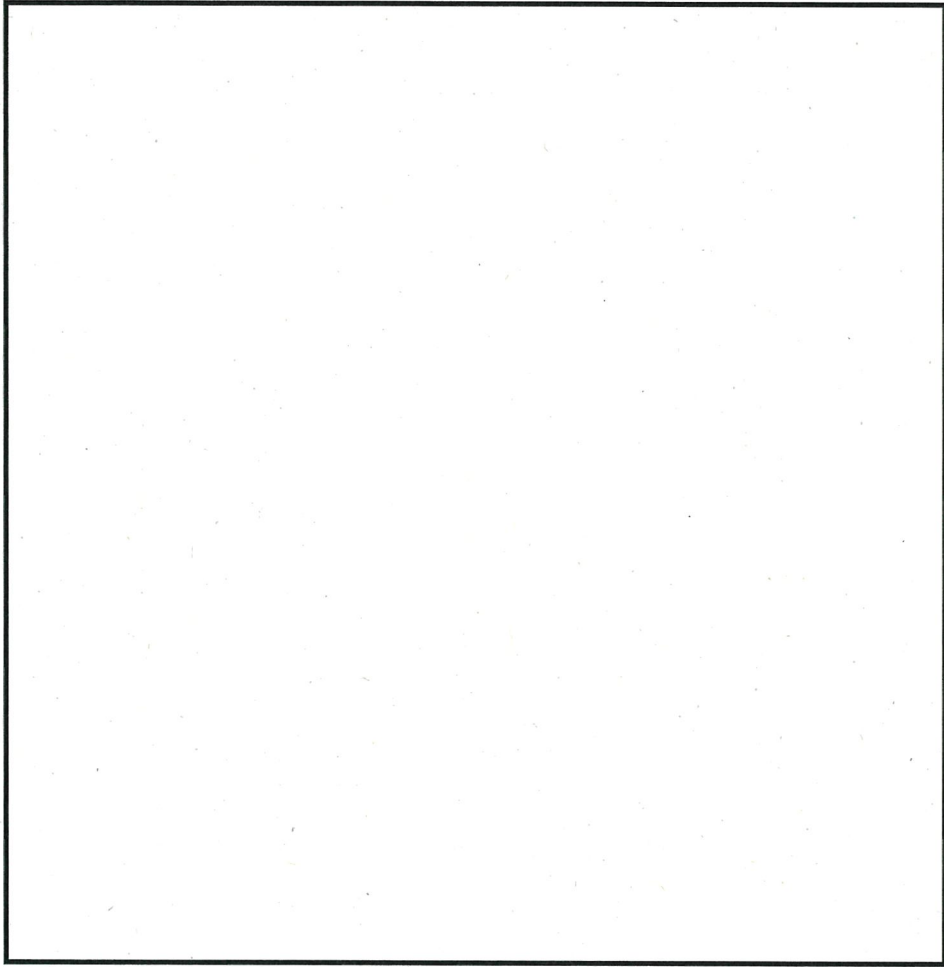




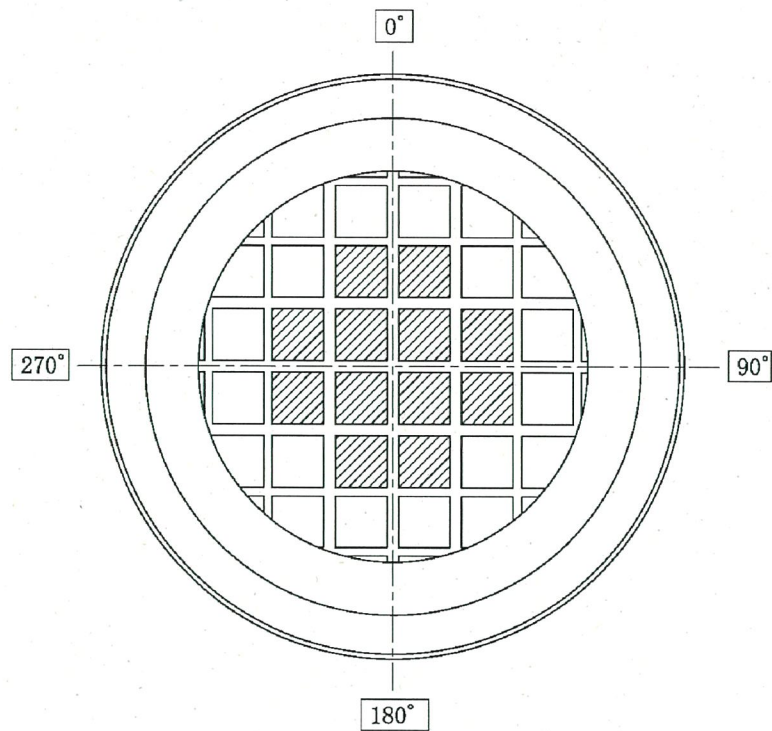
(単位 : mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンブル等であり、発熱はない。


第 2.5.4-11 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル形状図



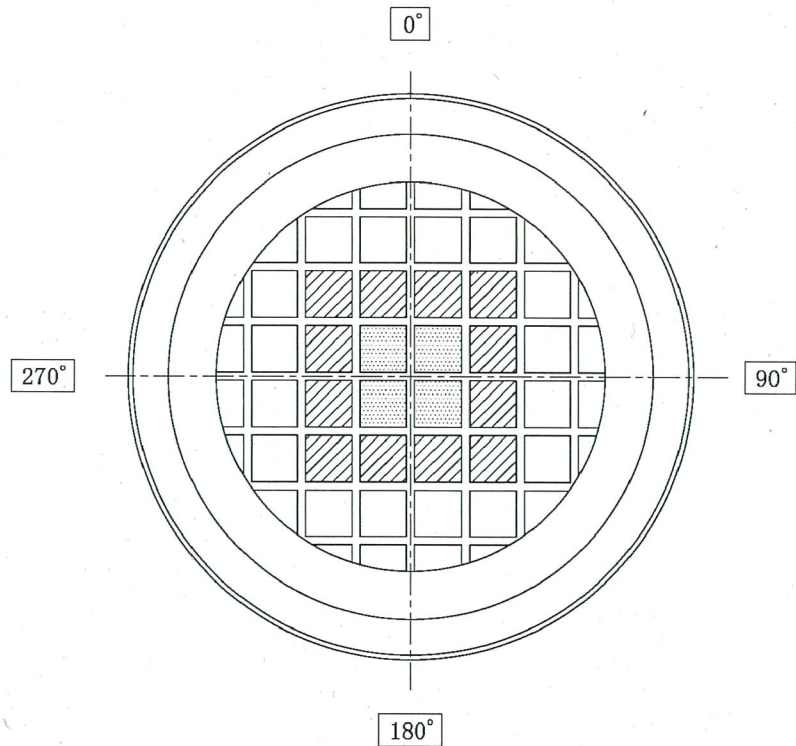
第 2.5.4-12 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル要素分割図






 : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)

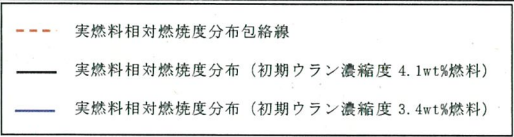
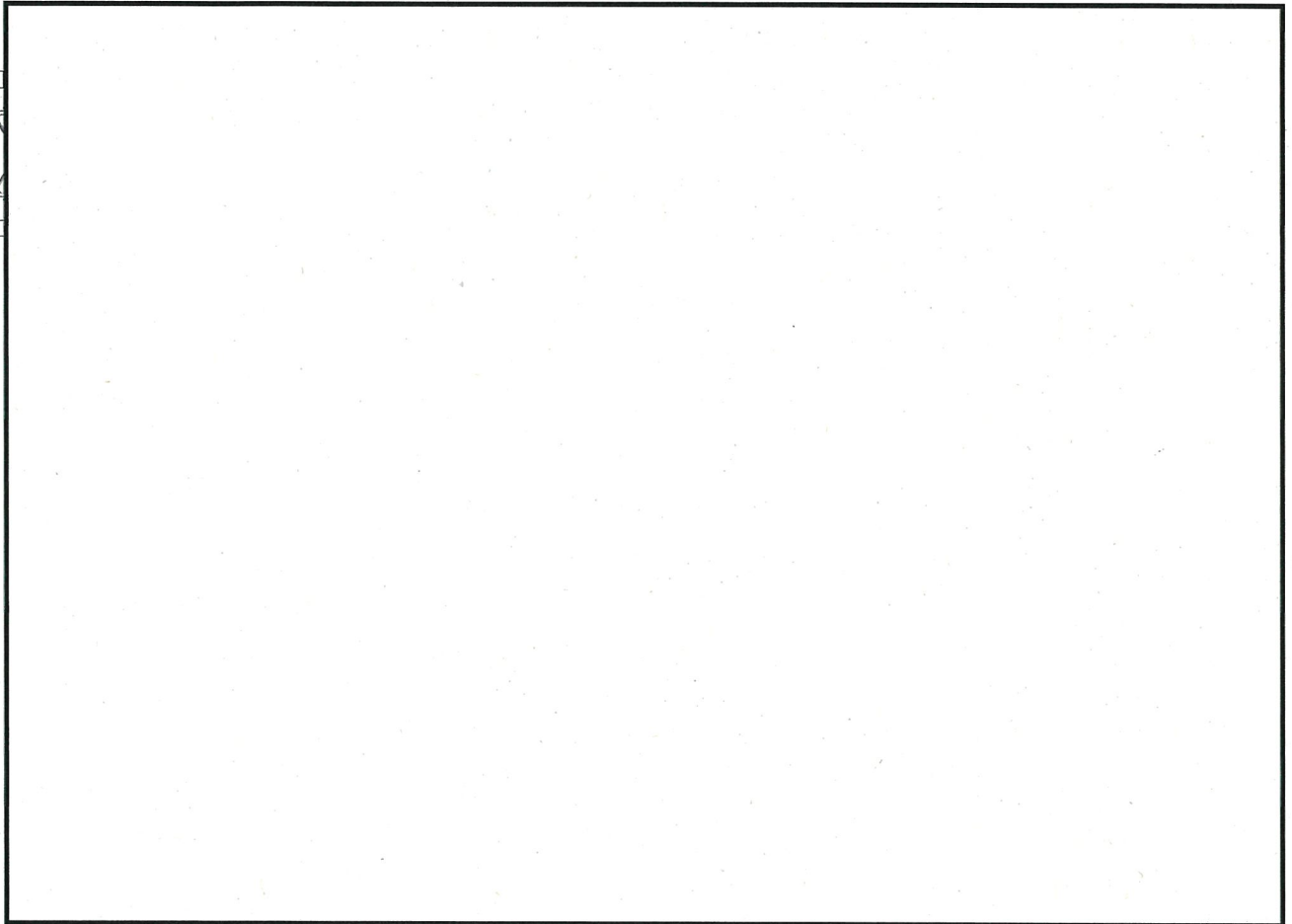
 : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

第 2.5.4-13 図 MSF-24P 型の除熱解析における使用済燃料集合体の収納条件



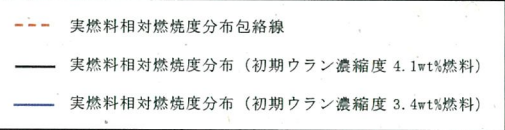
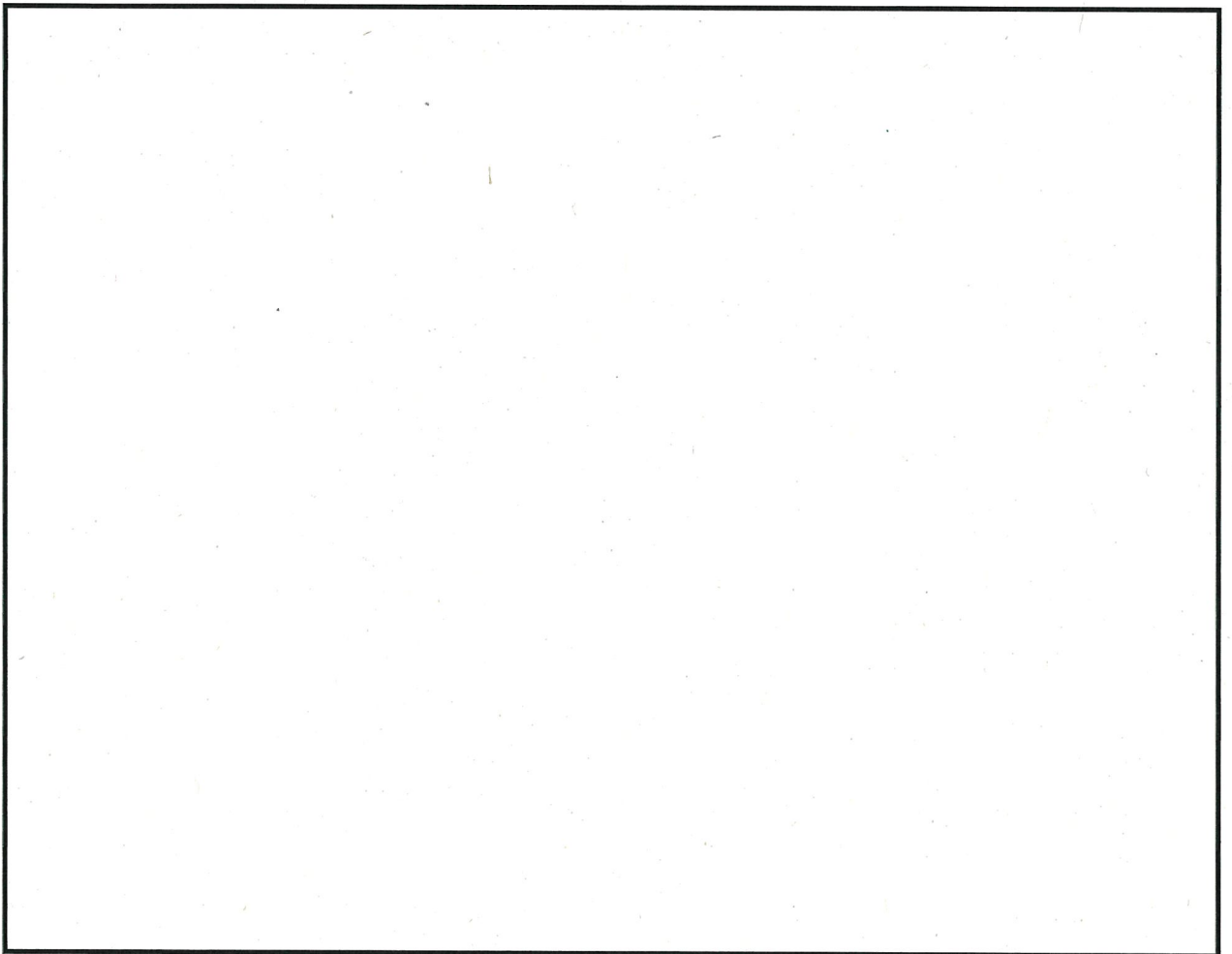
-  : 14×14 型 48GWd/t 燃料における最高燃焼度の崩壊熱量  
 (中央部 16 体のうち中心 4 体)
-  : 中央部 16 体の崩壊熱量が 14×14 型 48GWd/t 燃料における  
 平均燃焼度の崩壊熱量 16 体分となるように調整した崩壊熱量  
 (中央部 16 体のうち中心 4 体を除く 12 体)
-  : 14×14 型 39GWd/t 燃料における平均燃焼度の崩壊熱量  
 (外周部 16 体)

第 2.5.4-14 図 MSF-32P 型の除熱解析における使用済燃料集合体の収納条件



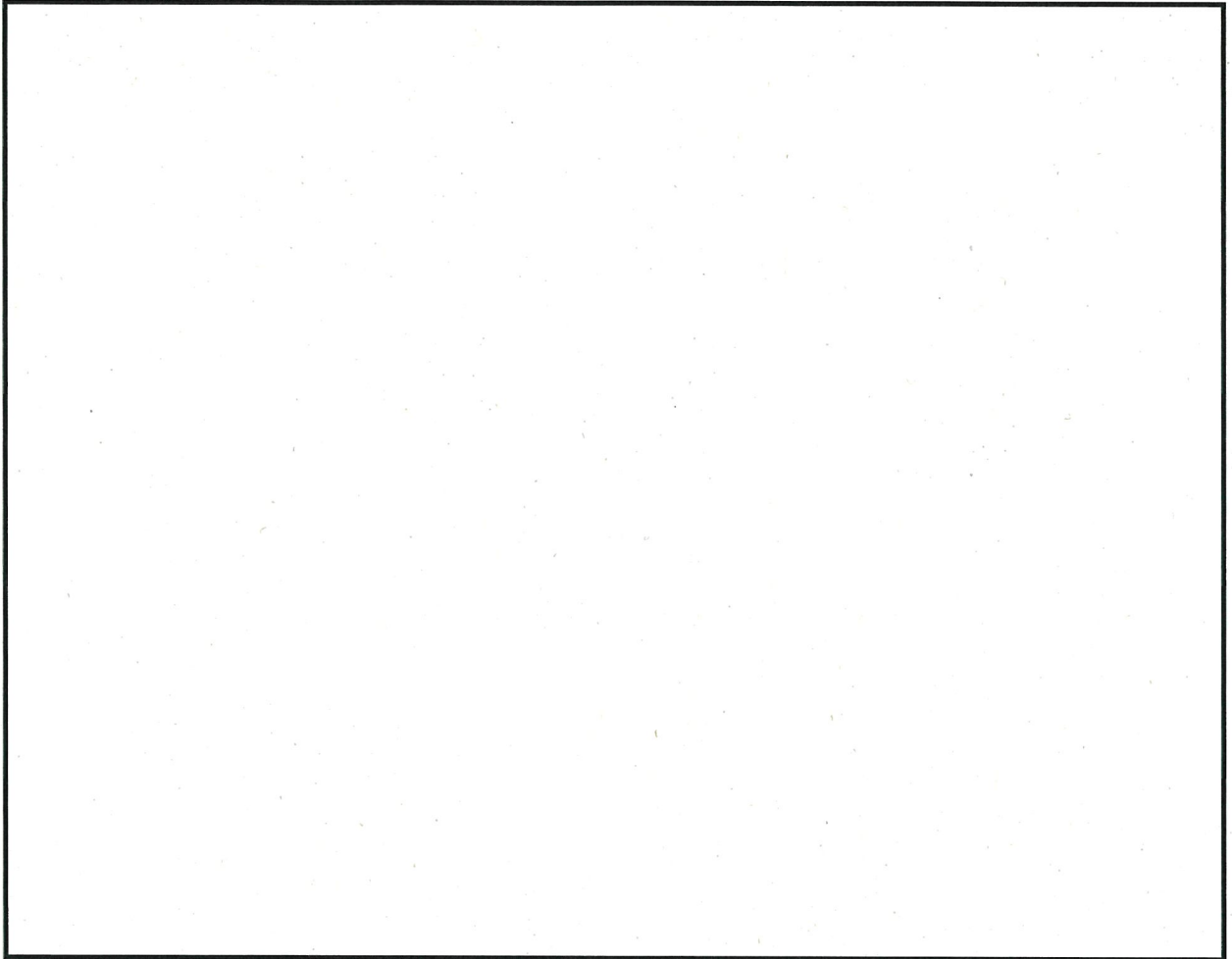
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 1 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (1/3)



補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 2 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (2/3)

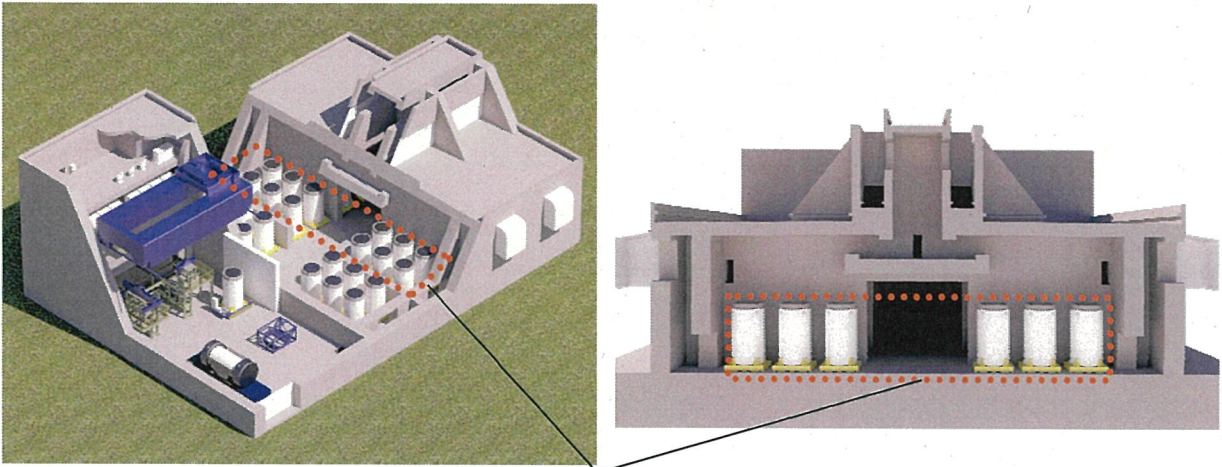


— 実燃料相対燃焼度分布包絡線  
— 実燃料相対燃焼度分布

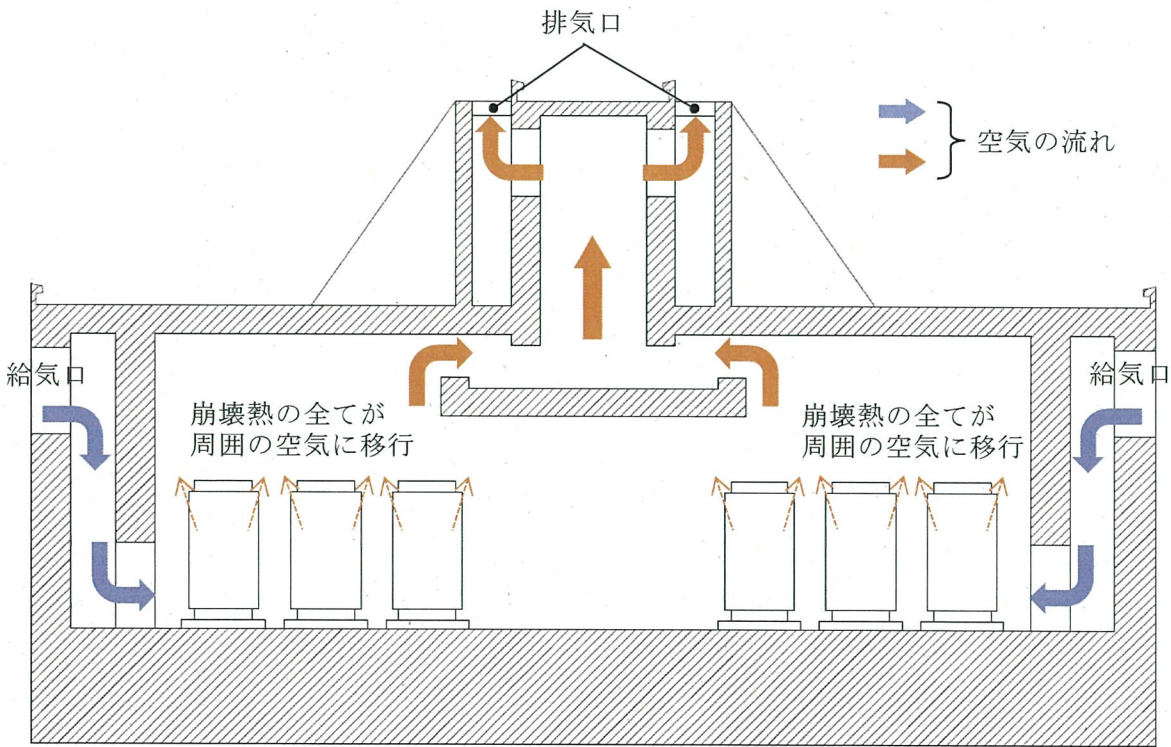
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 3 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (3/3)

乾式貯蔵建屋のイメージ図

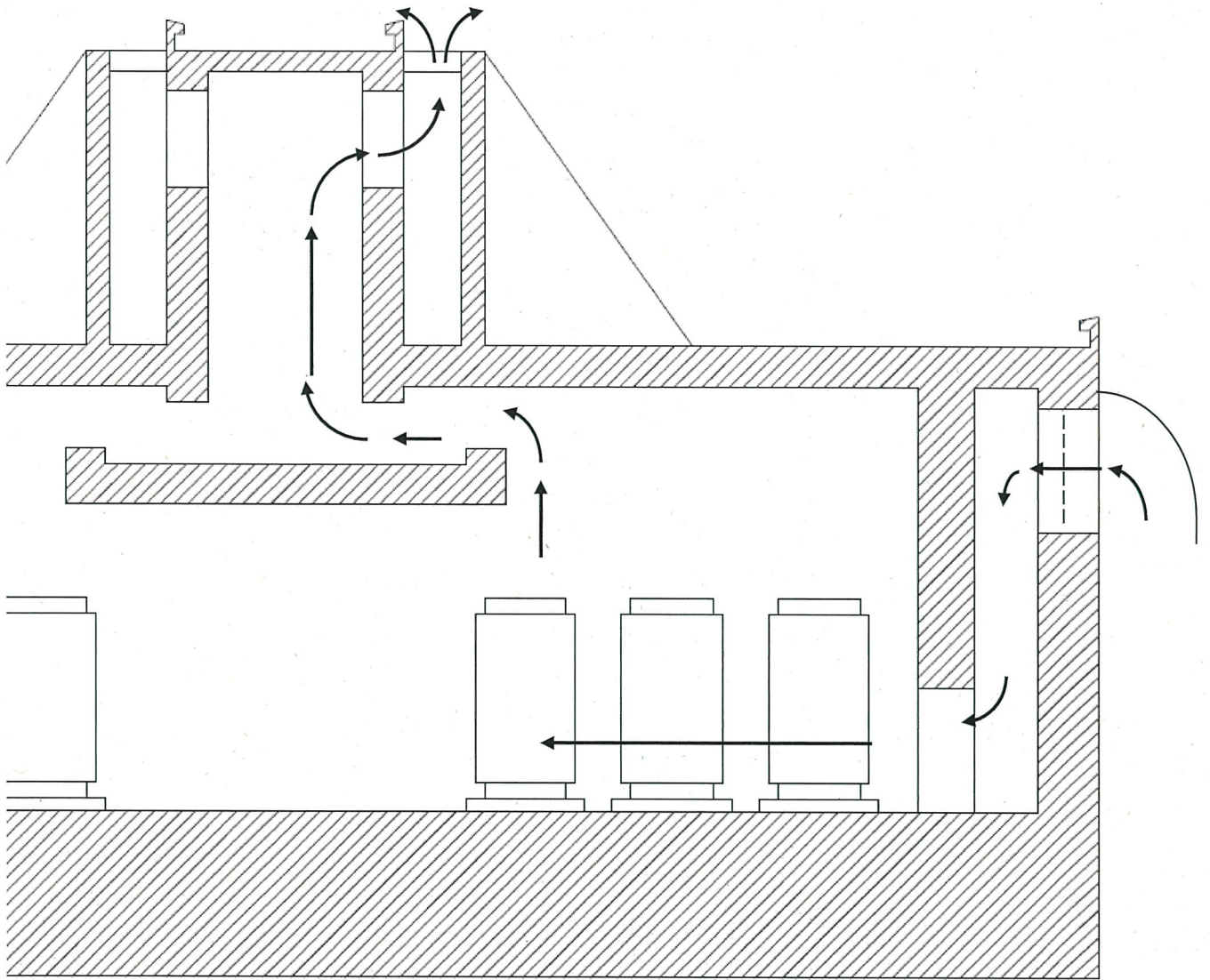


評価断面



第 2.5.4-16 図 乾式貯蔵建屋内の空気の流れイメージ図 (評価断面図)





第 2.5.4-17 図 乾式貯蔵建屋の除熱評価で想定する流路（モデル範囲）

乾式キャスクの除熱機能の評価基準は、以下のとおりとする。

a. 使用済燃料被覆管

使用済燃料被覆管の温度は、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、制限される値以下に維持できること。

b. 乾式キャスク構成部材

基本的安全機能及び構造強度の維持が必要な部材は、健全性を保つ温度範囲に収まること。

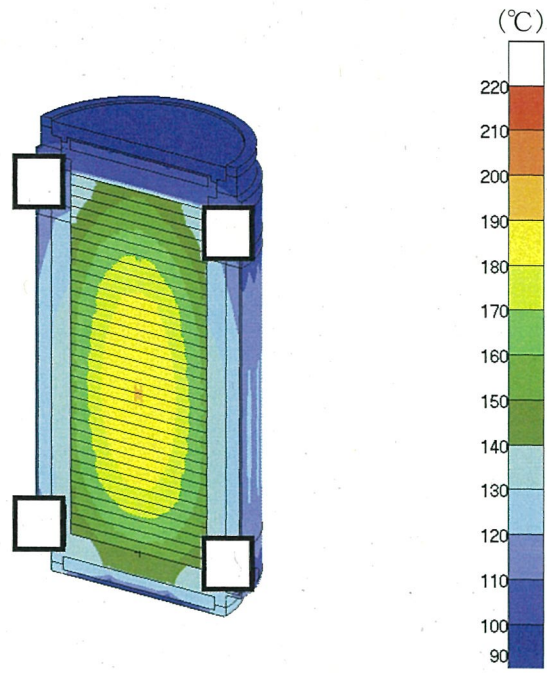
c. 乾式貯蔵建屋

乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度以下であること。

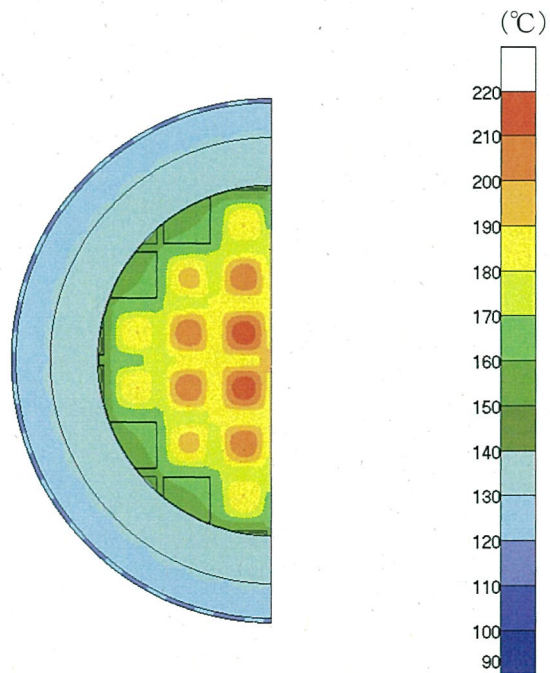
第 2.5.4-13 図及び第 2.5.4-14 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.4-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-24P 型：15.8kw、MSF-32P 型：14.8kw）を包絡する 16kW の条件で評価していることから、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスクの配置制限は不要である。

第 2.5.4-5 表 評価結果

項 目	評 価 結 果		評価基準	備 考	
	MSF-24P 型	MSF-32P 型			
乾式キャスク各部	胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	約 150 ℃	約 150 ℃	350 ℃以下 <sup>1)</sup>	構造強度が確保される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
	中性子遮蔽材 (レジン)	約 140 ℃	約 140 ℃	149 ℃以下 <sup>2)</sup>	中性子遮蔽材の性能が維持される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
	金属ガスケット	約 110 ℃	約 110 ℃	130 ℃以下 <sup>3)</sup>	閉じ込め機能が維持される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
	バスケット	約 200 ℃	約 190 ℃	250 ℃以下 <sup>4)</sup>	構造強度が確保される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
使用済燃料被覆管		約 220 ℃	約 210 ℃	275 ℃以下 <sup>5)</sup>	燃料被覆管健全性が維持される制限温度 (第 2.5.4-19 図及び第 2.5.4-21 図)
乾式貯蔵建屋	乾式キャスクの周囲温度	約 45℃		50℃以下	乾式キャスクの除熱評価で設定している温度

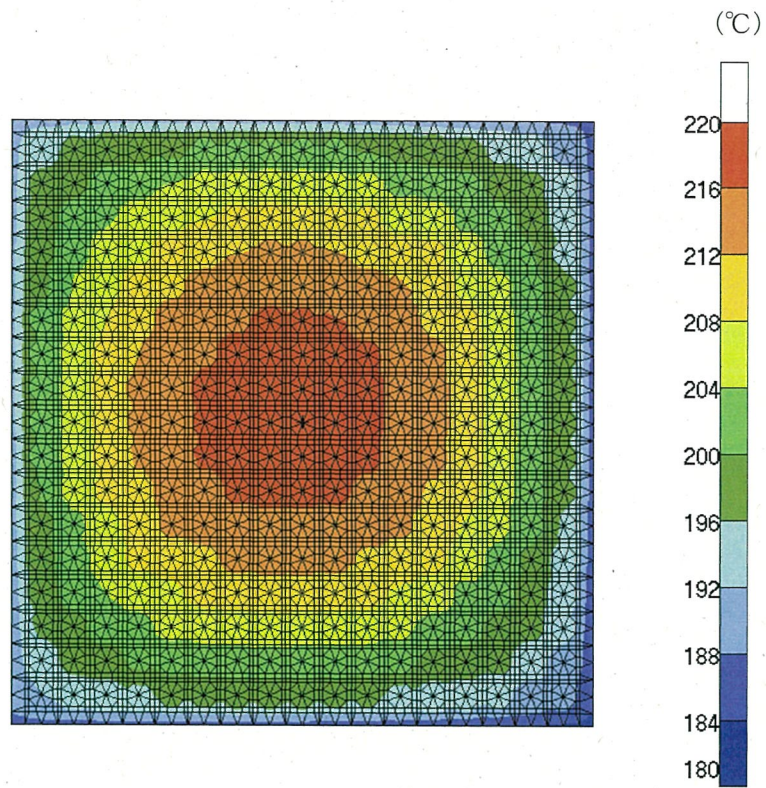


(全体)

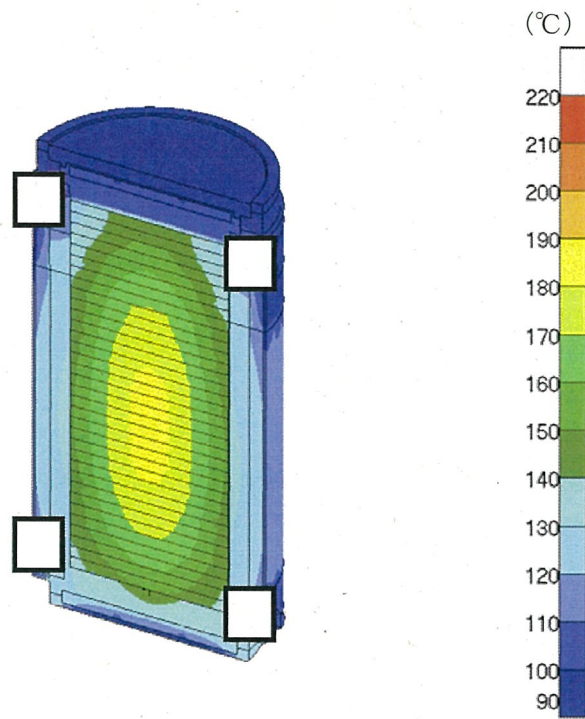


(燃料集合体最高温度位置断面)

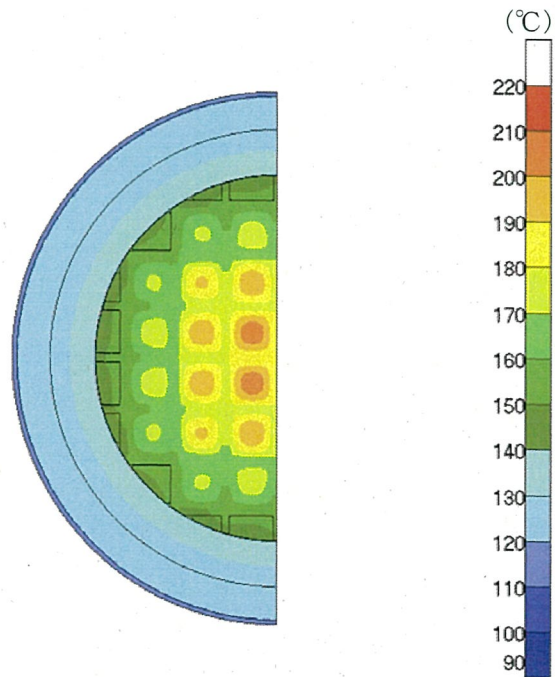
第 2.5.4-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果(全体モデル)



第 2.5.4-19 図 MSF-24P 型除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

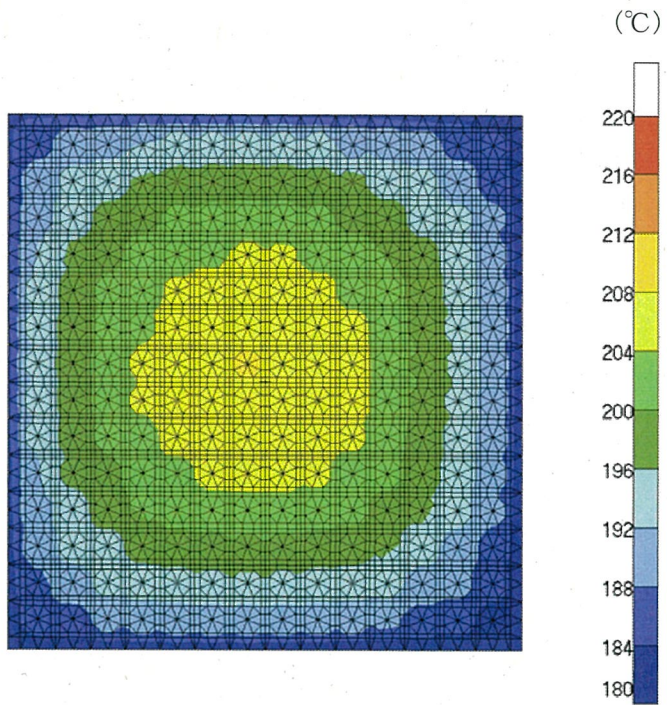


(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

第 2.5.4-20 図 MSF-32P 型除熱解析結果(全体モデル)



第 2.5.4-21 図 MSF-32P 型除熱解析結果(燃料集合体モデル)

〔確認内容〕

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計とする。(詳細は、6条で説明する。)

また、設計上考慮すべき自然現象に対しては、貯蔵建屋等の損壊が生じず、除熱機能は損なわれない設計とし、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しない設計とする。(詳細は4,5,6条で説明する。なお、地盤及び周辺斜面の安定性に関しては地盤審査において確認されている。)

特に、以下の貯蔵建屋等の損壊モードについても、想定されない設計とする。

＜兼用キャスクの埋没状態＞

貯蔵建屋等(貯蔵建屋(兼用キャスク、兼用キャスク取扱設備等を収納する建物)及び遮蔽壁)は、地震(4条)、津波(5条)、外部からの衝撃(6条)による損傷の防止が図られ、損壊しないため、兼用キャスクは埋没しない。また、地盤(3条)及び周辺斜面(4条)も基準地震動に対して、安定であるため、兼用キャスクは埋没しない。

＜貯蔵建屋給排気口の損傷状態＞

貯蔵建屋給排気口は、貯蔵建屋の一部からなり、地震(4条)、津波(5条)、外部から衝撃(6条)による損傷の防止が図られるため、損壊しない。

### 3. 使用する解析コード

#### a. 解析コード

乾式キャスクの除熱安全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。

##### (a) ORIGEN2 コード

別添 3 の「伊方発電所 3 号炉燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（使用済用済燃料乾式貯蔵容器の遮蔽機能について）」6. (a) で説明した内容と同じ。

##### (b) ABAQUS コード

###### i 概要

ABAQUS コード<sup>6)</sup> は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在は Dassault Systèmes 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。

###### ii 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。

###### iii 解析フロー

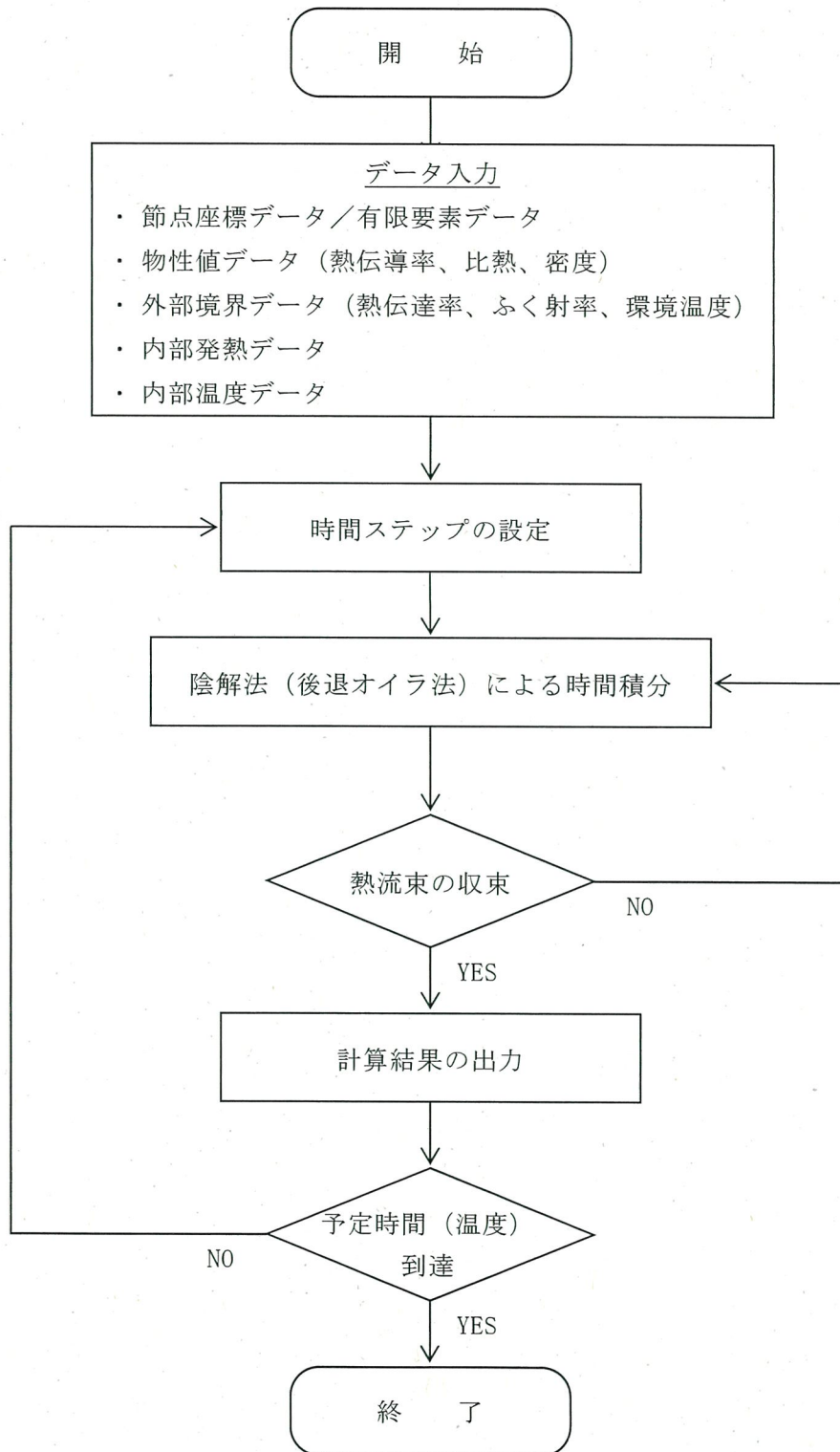
代表的な解析フローを第 2.5.4-22 図に示す。

###### iv 使用実績及び検証

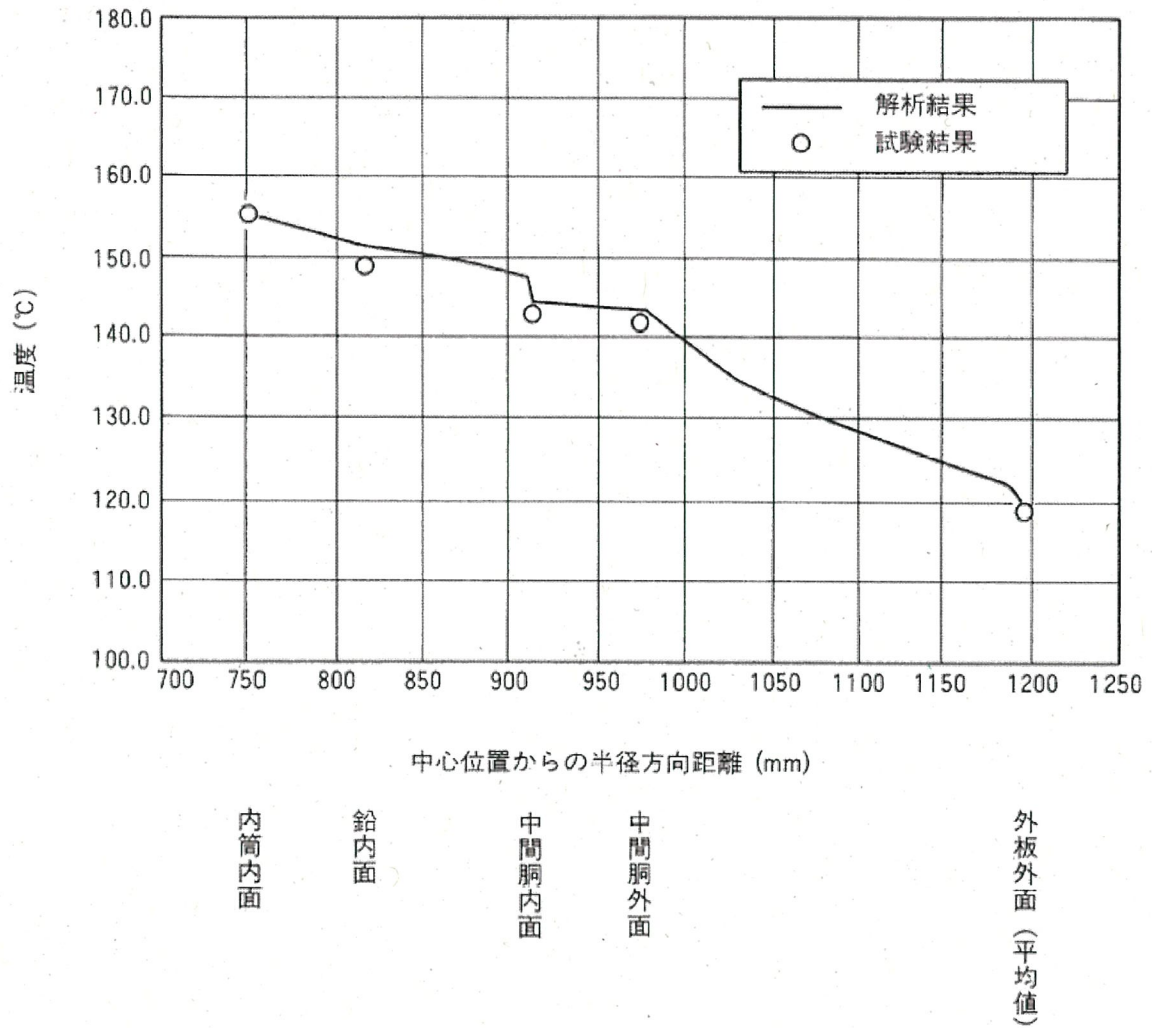
ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、乾式キャスクの定常伝熱試験に対して ABAQUS による解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUS コードの妥当性が検証されている<sup>7)</sup>。

ABAQUS コードの検証例を第 2.5.4-23 図に示す。





第 2.5.4-22 図 ABAQUS コードの解析フロー図



第 2.5.4-23 図 ABAQUS コードの検証例<sup>7)</sup>

#### 4. 参考文献

- 1) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 2) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- 3) (一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).
- 4) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 5) 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).
- 6) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual (6.12)”, (2012).
- 7) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明朗, 「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」, (一財)電力中央研究所, (1993).

# 参 考

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で  
引用している文献の記載内容について

《別添1：閉じ込め》

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することの妥当であることと考 えている。)
1	別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	安全審査資料	<16条-別添1(閉じ込め)-7ページ> 乾式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%)、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)を考慮し、保守的な値として0.1% <sup>3)</sup> を想定する。	(一社)日本原子力学会、「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)。(2010)。	米国の使用済燃料乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)と国内の軽水炉における漏えい燃料発生率(約0.01%)を考慮し、漏えい率を0.1%と想定する。	本文献に示される米国の漏えい燃料発生率は、乾式キャスクと同じ乾式貯蔵での実績、及び乾式貯蔵に比べ漏えい条件下にある乾式貯蔵(国内)における漏えい燃料発生率を考慮した上で保守的に設定しており、参考文献として妥当である。	
2	別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	安全審査資料	<16条-別添1(閉じ込め)-8ページ> また、ここで漏えい率Qは、以下のクヌッセンの式 <sup>3)</sup> で求められる。	International Organization for Standardization, "Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages", ISO 12807, (1986)。	本文献は放射性物質輸送容器の密封性能評価方法(気体の漏えい率から放射性物質の放出率を評価)を示すISO規格である。気体の漏えい率は、リーク孔として円管を仮定し、流路モデルとして粘性流(漏えい率Qの式の第1項)と分子流(漏えい率Qの式の第2項)が適用される。	乾式キャスクの蓋部空間にはベリウムが充填される。本文献に示されるクヌッセンの式は、乾式キャスクの蓋部空間の気体の漏えい状態として想定される流れの状態(粘性流、分子流)が考慮されている。また、クヌッセンの式を用いた漏えい評価は乾式キャスクの閉じ込め機能評価に多くの実績を有しており、妥当である。	
3	別添1 2.適合性について 第2.5.1.1表 閉じ込め評価条件及び評価結果	安全審査資料	<16条-別添1(閉じ込め)-12ページ> 金属ガスケットの漏えい率 <sup>3),4)</sup> $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下	"METAL SEALS TECHNICAL CATALOG", Technetics Group., (2017)。	金属ガスケットのシール性能(カタログ値)は、ベリウムガスを用いた場合、 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 程度を達成可能である。	本文献は、MSF-24P型及びMSF-32P型に用いる金属ガスケットのメーカーカタログであり、参考文献として妥当である。なお、参考文献4の電中研報告を考慮し、メーカーカタログ値( $1 \times 10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ )から保守的に金属ガスケットの性能を $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ と設定している。	
4	別添1 2.適合性について 第2.5.1.1表 閉じ込め評価条件及び評価結果	安全審査資料	<16条-別添1(閉じ込め)-12ページ> 金属ガスケットの漏えい率 <sup>3),4)</sup> 平成21年度の(一財)電力中央研究所研究において、金属ガスケットの長期密封性能について試験を実施し、試験と解析で得られた乾式キャスクの温度と時間をラーソン・ミラー・パラメータ(以下「LMP」という。)により長期密封性能について検討を行っている <sup>4)</sup> 。第2.5.1.6図は当該試験結果の二次蓋ガスケット温 度から得られたLMPを示しており、LMPが7942以下であれば密封性は健全であることが示されている。また、第2.5.1.7図に は、LMP=7942となる場合の、蓋初期温度と評価年数の関係が示されており、評価年数(貯蔵期間)を60年とすると、その期 間健全性を担保するためには、初期温度を134℃以下にすればよ いことが示されている <sup>4)</sup> 。	(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年以上経過(ラーソン・ミラー・パラメータ(LMP) = 7942)しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。 ・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。	本文献での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約130℃~140℃)は、乾式キャスクの貯蔵時の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度(約110℃)より高い。したがって、乾式キャスク貯蔵時の二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスク貯蔵時の二次蓋用金属ガスケットに対してより厳しい条件下で得られた結果である。以上より、参考文献として妥当である。 なお、電中研試験結果を踏まえ、金属ガスケットの性能としては、参考文献3のカタログ値より保守的な $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ と設定している。	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《臨界防止》		安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性	
番号	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格研究機関論文等)	文献概要	(以下の観点から、適用することの妥当性を考 えている。)		
1	別添2 2.適合性について 第2.5.2-4表 評価結果	<16条-別添2(臨界防止)-25ページ> i 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コードシステム <sup>iv</sup> を用い、実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれるKENO-VIコードを用いる。	「臨界安全ペンダラム」第2版 <sup>i</sup> 、日本原子力研究所 JAEERI 1340、(1999)  SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39 Version 6.2.1 (2016).	十分に検証されたコードシステムを用いる場合には、そのコードシステムによって算出された中性子増倍率 $k_{eff}$ が次式を満足することにより未臨界であると判定できると記載されている。 $k_{eff} \leq 0.95$	臨界防止設計における未臨界判定基準の考え方及びその判定基準が記載されており、参考文献として妥当である。		
2	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	<16条-別添2(臨界防止)-26ページ> iv 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、乾式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。 文献(3)に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕舞及び下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。第2.5.2.5表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材(ほう素)を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体(鋼板、鉛)を配置した場合 ⑤水中に中性子吸収材(ほう素)が溶解している場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合	International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, (2006)	OECD/NEAにて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース(International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006))は、下記①～⑥の条件を満たす臨界実験が記載されている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材(ほう素)を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体(鋼板、鉛)を配置した場合 ⑤水中に中性子吸収材(ほう素)が溶解している場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合	本解析に使用するSCALEコードシステム(KENO-VIを含む)が妥当な結果を与えることを確認するため、のベンチマーク試験解析に適した臨界実験が記載されており、参考文献として妥当である。		
3	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	<16条-別添2(臨界防止)-26ページ> iv 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、乾式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。 文献(3)に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕舞及び下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。第2.5.2.5表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材(ほう素)を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体(鋼板、鉛)を配置した場合 ⑤水中に中性子吸収材(ほう素)が溶解している場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合	International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, (2006)	OECD/NEAにて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース(International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006))は、下記①～⑥の条件を満たす臨界実験が記載されている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材(ほう素)を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体(鋼板、鉛)を配置した場合 ⑤水中に中性子吸収材(ほう素)が溶解している場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合	本解析に使用するSCALEコードシステム(KENO-VIを含む)が妥当な結果を与えることを確認するため、のベンチマーク試験解析に適した臨界実験が記載されており、参考文献として妥当である。		

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《連載》 番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することの妥当であるかを考 えている。)
1	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	安全審査資料	<16条-別添3(連載)-28ページ> i.概要 ORIGEN2コードは、米国のオークリッジ国立 研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードで ある。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。	・ "ZZ-ORIGEN2.2-UPI, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank. (2006)	ー (使用マニュアルのため、省略)	本解析に使用する ORIGEN2 コードが適切に検証さ れていることを示す文献であり、参考文献として妥当 である。	参考文献として (以下の観点から、適用することの妥当であるかを考 えている。)
2	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	安全審査資料	<16条-別添3(連載)-28,30ページ> iv.使用実績及び検証 ORIGEN2コードは、輸送キヤスク、原子燃料施 設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、輸 送容器の崩壊熱計算と比較し、ORIGEN2 コ ードの妥当性を検証している <sup>2)</sup> 。	・ "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Vol.62, (1983).	PWR 燃料を対象に ORIGEN2 コードにより計算した崩壊熱と、ANS 標準値を比 較した結果は、よく一致している。	本解析に使用する ORIGEN2 コードが適切に検証され ていることを示す文献であり、参考文献として妥当 である。	参考文献として (以下の観点から、適用することの妥当であるかを考 えている。)
3	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	安全審査資料	<16条-別添3(連載)-31ページ> i.概要 DOT3.5コード <sup>3)</sup> (以下「DOTコード」という。) は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で 開発された二次元輸送コードである。	・ Oak Ridge National Laboratory, "DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", CCC-276, (1977).	ー (使用マニュアルのため、省略)	本解析に使用する DOT コードが適切に検証されてい ることを示す文献であり、参考文献として妥当であ る。	参考文献として (以下の観点から、適用することの妥当であるかを考 えている。)
4	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	安全審査資料	<16条-別添3(連載)-31,33ページ> iv.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、輸送キヤ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 値を第2.5.3-19図に示す。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 <sup>4)</sup> 。	・ 「TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽 特性(1)線量率」, (一社)日本原子 力学会「昭和56年秋の分科会」, C17, (1981).	TN-12 型輸送容器 (PWR 燃料を 12 体収納) について、DOT3.5 コードを使用し た計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央 (セデラ化の影響が小さい) ではよく一致している。複雑形状部 (端部) は計算値が数+%高い値となっている。 全体的に計算値と測定値はよく一致している。	本解析に使用する DOT コードが適切に検証されてい ることを示す文献であり、参考文献として妥当であ る。	参考文献として (以下の観点から、適用することの妥当であるかを考 えている。)
5	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	安全審査資料	<16条-別添3(連載)-33ページ> v.断面積ライブラリ MATXSLLIB-J33 MATXSLLIB-J33 は、DOT3.5 等の輸送計算コード 用に、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリとし て、日本原子力研究所にて整備されたものであ る。MATXSLLIB-J33 を用いた断面積ライブラリ は、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15 を 用いて、輸送計算コード用に中性子 175 群、ガン マ線 42 群のエネルギープ群構造に変換し作成して いる。 JENDL-3.3 の信頼性は遮蔽性能に関するベンチ マーク解析で確認されている <sup>5)</sup> 。	・ 「 <sup>235</sup> Cf 核分裂中性子源を用いた遮 へい透過実験及び二次元離散源標 計算コードによる輸送容器散逸用 断面積セット SFCX-I33 の適用性 に関する研究」, 海上技術安全研究 所報告 第 7 巻 第 3 号 研究報告, (2007).	輸送容器体系内部に <sup>235</sup> Cf 純源設置したモデルについて、JENDL-3.3 に基づく断 面積ライブラリ SFCX-J33 を使用した DOT3.5 コードによる解析結果と、ガンマ 線及び中性子線量率を測定した結果はよく一致している。	本解析は、JENDL-3.3 の各データを基に作成した断 面積ライブラリ SFCX-J33 を用いた DOT3.5 コード による解析のベンチマークを示した文献である。乾式 キヤスク評価に用いる断面積ライブラリ MATXSLLIB- J33 は、JENDL-3.3 の各データを基に作成されてお り、JENDL-3.3 の各データを基に作成された断面積 ライブラリを使用した解析の妥当性が示されており、 参考文献として妥当である。	参考文献として (以下の観点から、適用することの妥当であるかを考 えている。)



使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することの妥当であること考 えられている。)											
1	別添4 2.適合性について 第2.5.4.5表 評価結果	安全審査資料	<16条-別添4(除熱)-31ページ> 第2.5.4.5表 評価結果 <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>評価基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>胴、外筒、一次蓋及び二次蓋</td> <td>350 °C以下<sup>1)</sup></td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽材(レジン)</td> <td>149 °C以下<sup>2)</sup></td> </tr> <tr> <td>金属ガスケット</td> <td>130 °C以下<sup>3)</sup></td> </tr> <tr> <td>バスケット</td> <td>250 °C以下<sup>4)</sup></td> </tr> <tr> <td>使用済燃料被覆管</td> <td>275 °C以下<sup>5)</sup></td> </tr> </tbody> </table>	項目	評価基準	胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	350 °C以下 <sup>1)</sup>	中性子遮蔽材(レジン)	149 °C以下 <sup>2)</sup>	金属ガスケット	130 °C以下 <sup>3)</sup>	バスケット	250 °C以下 <sup>4)</sup>	使用済燃料被覆管	275 °C以下 <sup>5)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・(一社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) (JSME S-NJ1-2012)」, (2012).</li> <li>・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー)</li> <li>・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー)</li> <li>・SUS630 (トナリオール)</li> <li>・GLFI (胴、一次蓋、二次蓋)</li> <li>・SNB23-3 (蓋ポルト)</li> </ul>	<p>炭素鋼は-30°C~-375°Cの温度範囲において、ステンレス鋼は、-30°C~-425°Cの温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、-30°C~-350°Cの温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。</p> <p>・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー)</p> <p>・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー)</p> <p>・SUS630 (トナリオール)</p> <p>・GLFI (胴、一次蓋、二次蓋)</p> <p>・SNB23-3 (蓋ポルト)</p> <p>エポキシ系レジンの使用可能温度が示された文献である。</p>	<p>○本文献は、乾式キャスクで使用する中性子遮蔽材と同等の組成であるエポキシ系レジンの使用可能温度であり、参考文献として妥当である。</p>
項目	評価基準																	
胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	350 °C以下 <sup>1)</sup>																	
中性子遮蔽材(レジン)	149 °C以下 <sup>2)</sup>																	
金属ガスケット	130 °C以下 <sup>3)</sup>																	
バスケット	250 °C以下 <sup>4)</sup>																	
使用済燃料被覆管	275 °C以下 <sup>5)</sup>																	
2				<ul style="list-style-type: none"> <li>・BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4 FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1989).</li> </ul>	<p>金属ガスケット(外被材:アルミニウム、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°C~140°Cで保持し、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から19年以上が経過しても密封部の漏えい率は変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。</p>	<p>○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面の外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約130°C~140°C)は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度(約110°C)より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の電圧より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。</p>												
3				<ul style="list-style-type: none"> <li>・三菱重工(株)「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).</li> </ul>	<p>三菱重工製の乾式キャスク(MSP-21P型)のバスケットに用いるアルミニウム合金(MB-A3004-H112)の設計用強度及び物性値、並びに強度設計における設計基準の設定根拠がまとめられている。アルミニウム合金は設計貯蔵期間中の強度低下を考慮する必要があるが、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包摂し、設計貯蔵期間中の熱ばく露を適切に考慮した設計用強度を規定している。</p>	<p>○本文献には、乾式キャスクのバスケットに用いるアルミニウム合金と同じ材料であり、同じ設計貯蔵期間が考慮された設計用強度及び物性値が示されている。アルミニウム合金の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包摂しており、参考文献として妥当である。</p>												
4				<ul style="list-style-type: none"> <li>・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).</li> </ul>	<p>貯蔵期間中の中性子照射量は<math>10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-2}</math>程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量<math>10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-2}</math>に比べて無視できるものであり、貯蔵期間中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。</p> <p>・クリープ</p> <p>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。</p> <p>・照射硬化</p> <p>被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約300°Cでは照射硬化の回復の可能性があることが確認されている。</p> <p>・水素化物再配向</p> <p>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°C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。</p> <p>・応力腐食割れ</p> <p>腐食性雰囲気が増った条件におけるジルカロイ4のSCC発生のしきい応力は200MPa程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCCは発生しない。</p>	<p>○本文献には、乾式キャスクのバスケットに用いるアルミニウム合金と同じ材料であり、同じ設計貯蔵期間が考慮された設計用強度及び物性値が示されている。アルミニウム合金の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包摂しており、参考文献として妥当である。</p>												
5				<ul style="list-style-type: none"> <li>・Dassault Systemes, "ABAQUS Analysis User's Manual(6.12)", (2012).</li> </ul>	<p>&lt;16条-別添4(除熱)-37ページ&gt; i 概要 ABAQUSコードは、米国 Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在は Dassault Systemes</p>	<p>一 (使用マニュアルのため、省略)</p>												

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

7	<p>別添 4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード</p>	<p>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、輸送キヤスクの伝熱解析などに広く利用されている。</p> <p>iv 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、乾式キヤ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<sup>2)</sup>。</p>	<p>・(使用済燃料キヤスク貯蔵技術の確立ーキヤスクの伝熱特性評価ーJ(一財)電力中央研究所(1999)。</p>	<p>使用済燃料の模擬物を取納した基準キヤスクの伝熱試験(貯蔵時)に対して、ABAQUSコードを用いた計算結果(キヤスク各部温度及び燃料被覆管温度)が測定結果とよく一致した。</p>	<p>本解析に使用する ABAQUS コードが適切に検証されていることを示す文献であり、参考文献として妥当である。</p>
---	--	--	---	---	---

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することの妥当であると考えられている。)
1	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p>&lt;16条-39~42ページ&gt;                      (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト                      【照射影響】                      胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼については、中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> まで、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>1), 2)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は <math>5.9 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。                      (2) バスケット                      【照射影響】                      バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポータに使用する炭素鋼 (MSP-32P 型) は、中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> まで顕著な機械的特性変化は見られない<sup>1), 2)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は <math>1.5 \times 10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。                      (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー                      【照射影響】                      外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> までは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>1), 2)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では <math>3.3 \times 10^{12}</math> n/cm<sup>2</sup>、蓋部中性子遮蔽材カバーでは <math>5.9 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p>	<p>「An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys」, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).</p>	<p>様々な組成の鋼及び合金鋼の照射材を用いたシャトルピッチ試験の結果、中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> 以下までは、未照射材の機械的特性(遷移温度)との有意な差はみられない。</p>	<p>参考文献としてこの妥当性(以下の観点から、適用することの妥当であると考えられている。)</p> <p>○炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼と同等の組成の鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (<math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup>) を上回る中性子照射量 (<math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup>) と遷移温度変化の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p>	
2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p>&lt;16条-39~42ページ&gt;                      (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト                      【熱的影響】                      胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計用強度・物性値が規定<sup>2)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。                      (2) バスケット                      【熱的影響】                      バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポータに使用する炭素鋼 (MSP-32P 型) は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定<sup>2)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。                      (3) トラニオン                      【熱的影響】                      トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定<sup>2)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。                      (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー                      【熱的影響】                      外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定<sup>2)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。                      (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー                      【熱的影響】                      下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、設計用強度・物性値が規定<sup>2)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。</p>	<p>(一社)日本機械学会、「発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S N01-2012)」, (2012).</p>	<p>炭素鋼は-30℃~375℃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℃~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。                      ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー)                      ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー)                      ・SUS630 (トラニオン)                      ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋)                      ・SNB23-3 (蓋ボルト)</p>	<p>○本文献は、乾式キャスク各部位の設計用強度及び物性値の規格値、文献概要欄に示す各材料の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料	記載箇所	記載内容	参考文献		文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えられている。)
				文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要		
3	安全審査資料	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-40ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスを封入し、貯蔵する設計としている。したがって、不活性雰囲気維持されるため、残留水分(10wt%)を考慮しても腐食の影響はない。 <16条-43ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 また、10年間海浜条件下で露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さを、設計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約0.025mm及び約0.33mmであり、外被材の製造公差差を含めても、板厚0.5mmより小さいため、閉じ込め機能に影響はない。	(国)原子力安全基盤機構、平成15年度 金属キャスク貯蔵技術検証試験報告書 最終報告書、(2004)。	アルミニウム (A1100) の性能について、10年間海浜条件下で大気ばく露させた試験における平均浸食深さ及び最大孔食深さは、 ・平均浸食深さ：0.0041mm/10年 ・最大孔食深さ：0.18mm/10年	○本文結果は、炭素鋼の試験片を淡水の湖に完全に浸漬した条件のもとで得られた結果である。乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境は、残留水分が限られていることに加え、酸素が連続的に供給されないことから、より厳しい条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。	
4	安全審査資料	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-40,41ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない。 (2) パスケット 【化学的影響】 また、MSF-32P型のバスケットサポータに使用する炭素鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件下において、仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない。	(脚)原子力安全基盤機構、平成15年度 金属キャスク貯蔵技術検証試験報告書 最終報告書、(2004)。	アルミニウム (A1100) の性能について、10年間海浜条件下で大気ばく露させた試験における平均浸食深さ及び最大孔食深さは、 ・平均浸食深さ：0.0041mm/10年 ・最大孔食深さ：0.18mm/10年	○本文結果は、炭素鋼の試験片を淡水の湖に完全に浸漬した条件のもとで得られた結果である。乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境は、残留水分が限られていることに加え、酸素が連続的に供給されないことから、より厳しい条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。	
5	安全審査資料	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-40,41ページ> (2) パスケット 【放射的影響】 バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポータに使用する炭素鋼 (MSF-32P型) は、中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> まで顕著な機械的特性変化は見られない。① ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は $1.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。 【熱的影響】 バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポータに使用する炭素鋼 (MSF-32P型) は、貯蔵状態における温度において、設	三菱重工(株)「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」(2017)。	アルミニウム合金は、中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> までは未照射材との機械的特性変化の有意な差は見られない。 ・アルミニウム合金は、40℃～250℃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。	○バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献であり、本文献には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量(10 <sup>16</sup> n/cm <sup>2</sup> )を上回る中性子照射量と機械的特性との関係が示されており、機械的特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。 ○本文献は、バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定値、設計用強度は、設計貯蔵期間中の	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

6	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>計用強度、物性値が規定<sup>9)</sup>され、その温度範囲で使用するため、低温度性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。</p> <p>(2) バスケット 【照射影響】 また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10<sup>-5</sup> 程度であり無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。</p> <p>※：以下のとおり算出。 B-10 減損割合 = <math>\sigma \times \phi \times t</math> (n) ここで、 <math>\sigma</math> : B-10 の熱中性子吸収断面積 (3840barn = 3.840 × 10<sup>-21</sup> (cm<sup>2</sup>))<sup>10)</sup> B-10 の反応断面積(熱中性子領域 (0.025eV)) <math>\phi</math> : 中性子束 7.977 × 10<sup>9</sup> [MSP-24P 型](n/cm<sup>2</sup>/s) 7.613 × 10<sup>5</sup> [MSP-32P 型](n/cm<sup>2</sup>/s) 減損解析結果(燃料集合体領域の最大値)。保守的に貯蔵初期の値を 60 年一定とする。</p> <p>t : 照射期間 (60 年間 = 1.9 × 10<sup>9</sup> (s))</p>	<p>「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」、軽金属、第 68 巻 第 12 号、(2018)。</p> <p>(一社)日本原子力学会標準委員会、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属バスケットの安全設計及び検査基準：2010 (AESJ/SC-F002：2010)。(2010)。</p> <p>[304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱弱酸化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-]、(一財)電力中央研究所、(1997)。</p>	<p>「Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.3」、JAERI-Data/Code 2002-020。(2002)。</p> <p>B-10 (ほう素 10) の熱中性子領域 (0.025eV) における全断面積が示された文献。</p>	<p>熟びく露条件 (250°C) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するよう設定しており、設計貯蔵期間中の熟びく露による強度低下を適切に考慮している。また、温度範囲 (-40°C ~ 250°C) は乾式キャスク設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献は中性子吸収材に含まれる B-10 の全断面積であり、吸収に加えて散乱を含むものであり、保守的な断面積を選定しており、参考文献として妥当である。</p>
7	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>&lt;16 条 - 40.41 ページ&gt; (2) バスケット 【照射影響】 また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10<sup>-5</sup> 程度であり無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。</p> <p>※：以下のとおり算出。 B-10 減損割合 = <math>\sigma \times \phi \times t</math> (n) ここで、 <math>\sigma</math> : B-10 の熱中性子吸収断面積 (3840barn = 3.840 × 10<sup>-21</sup> (cm<sup>2</sup>))<sup>10)</sup> B-10 の反応断面積(熱中性子領域 (0.025eV)) <math>\phi</math> : 中性子束 7.977 × 10<sup>9</sup> [MSP-24P 型](n/cm<sup>2</sup>/s) 7.613 × 10<sup>5</sup> [MSP-32P 型](n/cm<sup>2</sup>/s) 減損解析結果(燃料集合体領域の最大値)。保守的に貯蔵初期の値を 60 年一定とする。</p> <p>t : 照射期間 (60 年間 = 1.9 × 10<sup>9</sup> (s))</p>	<p>「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」、軽金属、第 68 巻 第 12 号、(2018)。</p> <p>(一社)日本原子力学会標準委員会、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属バスケットの安全設計及び検査基準：2010 (AESJ/SC-F002：2010)。(2010)。</p> <p>[304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱弱酸化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-]、(一財)電力中央研究所、(1997)。</p>	<p>アルミニウム合金の強度は高温保持によって低下するたため、設計強度は、この低下の影響を適切に反映する必要がある。キャスクのバスケット用構造材料である A3004-H112 材合金の引張特性に及ぼす熱処理条件の影響、各強化因子の引張特性への寄与を確認し、設計強度の設定に必要な長時間加熱と焼きなまし条件を見出した。</p>	<p>○本文献は、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定するための適切な試験条件を示している。本文献で対象とした材料は乾式キャスクと同じ材料であり、また、温度条件は乾式キャスクの温度を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>
8	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>&lt;16 条 - 41 ページ&gt; (2) バスケット 【化学的影響】 バスケットが置かれた空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない。<sup>9), 10)</sup></p> <p>&lt;16 条 - 45 ページ&gt; (9) 使用済燃料被覆管 【化学的影響】 残留水分が 10 wt% 以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及びほう素吸収量は無視し得るほど小さい<sup>9)</sup>ため、健全性に影響はない。</p>	<p>(一社)日本原子力学会標準委員会、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属バスケットの安全設計及び検査基準：2010 (AESJ/SC-F002：2010)。(2010)。</p> <p>[304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱弱酸化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-]、(一財)電力中央研究所、(1997)。</p>	<p>・残留水分が 10% (質量) 以下の不活性ガス雰囲気にあるアルミニウム合金、ほう素添加アルミニウム合金は、腐食を考慮する必要はない。</p> <p>・金属キャスク内部の残留水分を 10% (質量) 以下に制限すれば、燃料被覆管のほう素量やほう素吸収量はわずかなとなり、被覆管の健全性に影響を与えない。</p>	<p>○本文献結果は、乾式キャスクと同じ真空乾燥後の状態を基にした結果であるため、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p>
9	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>&lt;16 条 - 41.42 ページ&gt; (3) トラネオン 【照射影響】 トラネオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10<sup>17</sup> n/cm<sup>2</sup> までは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>9)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9 × 10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>(5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバナー 【照射影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバナーに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10<sup>17</sup> n/cm<sup>2</sup> までは、顕著な機械的特性変化は見られない<sup>9)</sup>ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 8.2 × 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。</p>	<p>[304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱弱酸化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-]、(一財)電力中央研究所、(1997)。</p>	<p>ステンレス鋼の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10<sup>17</sup> n/cm<sup>2</sup> 以下では未照射材に対する機械的特性 (0.2% 耐力及び一様伸び) の有意な差はみられない。</p>	<p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p>

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

10	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>&lt;16条-41.42ページ&gt; (3) トラニオン 【化学的影響】 トラニオンの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。<sup>10)</sup> (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【化学的影響】 外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。<sup>10)</sup> (5) 下部強板及び底部中性子遮蔽材カバー 【化学的影響】 下部強板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。<sup>10)</sup></p>	<p>(公社)腐食防食協会編、「腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版」,丸善(株), (2005).</p>	<p>淡水中における炭素鋼の腐食における酸化剤は水中に溶解した酸素である。水中の炭素鋼の腐食速度は溶解酸素濃度に比例して増大する。ステンレス鋼については、全面腐食のほか、局部腐食（孔食他）がある。局部腐食が通常問題となるのは特に塩化物を含む環境である。淡水中ではステンレス鋼は不動態膜を形成するため炭素鋼に比べ全面腐食の程度は小さい。</p>	<p>○炭素鋼及びステンレスの淡水環境での腐食影響を示した文献である。中性子遮蔽材の熱劣化で生じる水分と同じ淡水環境での腐食影響を示すものであり、参考文献として妥当である。</p>
----	--	--	---	---	--

番号	記載箇所	安全審査資料	文献名	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
1 1	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器 の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>＜16条-42.43 ページ＞ (6) 中性子遮蔽材 【照射影響】 中性子遮蔽材（レジン）は、中性子照射量が <math>10^{15} \text{ n/cm}^2</math> までは、顕著な 質量減損は見られないことが示されており<sup>10, 11</sup>、最も中性子照射量が高 くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は <math>1.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2</math> であることから照射脆化の影響はない。 【熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中の熱的（化学的）影響により質量減損 (2%程度) が発生<sup>12</sup> するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 % の質量減損 を考慮する。</p>	(国)原子力発電技術機構 「平成 14 年度 リサイクル 燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キヤスク貯蔵技術確 証試験) 報告書」, (2003).	<p>閉鎖系環境でのエポキシ系レジン の加熱試験及び照射試験により、エポ キシ系レジン の質量減損量は温度及び加熱時間を 基に劣化パラメータを用いた整理に よる以下の式で評価ができる。 <math>\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2</math> <math>\Delta w</math> : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%) <math>E_p</math> : 劣化パラメータ <math>= T \times t</math> (77.6+ln(t)) <math>T</math> : 中性子遮蔽材温度 (K) <math>t</math> : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)</p>	<p>参考文献として の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)</p> <p>○本文献での試験は、乾式キヤスクの中性子遮蔽 材と同じエポキシ系レジンを用い、乾式キヤスク と同じ閉鎖系条件で行われている。また、本文献 の結果に示される質量減損の式に含まれる劣化パラ メータの範囲 (約 38000) は、乾式キヤスクの設 計貯蔵期間における劣化パラメータ (24P : 37140.32P : 36777) を包絡しており、参考文献と して妥当である。 ○評価式による計算結果は以下の通りとなる。 24P : <math>5.69 \times 10^{-4} \times (136+273) \times (77.6+\ln(24 \times 365 \times</math> <math>60)) - 19.2</math> 与 2.0 % 32P : <math>5.69 \times 10^{-4} \times (132+273) \times (77.6+\ln(24 \times 365 \times</math> <math>60)) - 19.2</math> 与 1.8 %</p> <p>これを踏まえ、レジンは保守的に 2.5%減損する こととして遮蔽評価を実施している。</p>	
1 2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器 の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>＜16条-43 ページ＞ (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子 照射量がそれぞれ <math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math> 又は <math>10^{14} \text{ n/cm}^2</math> までは、顕著な機械的特性 変化は見られない<sup>13, 14</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くな る箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は <math>2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2</math> であ ることから照射脆化の影響はない。</p>	“Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment” Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).	<p>閉鎖系環境でのエポキシ系レジン の照射材 (中性子照射量 <math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math>) 及び未照射材の加熱試験の結果、照射材と未照射材に対する照射による劣化は有意 な差は認められなかった。以上のことから、照射による劣化は有意では なく、熱的劣化が支配的である。</p>	<p>○本文献での試験は、乾式キヤスクの中性子遮蔽 材と同じ閉鎖系条件で行われている。中性子照 射量は、乾式キヤスクの貯蔵中と同等であり、 参考文献として妥当である。</p>	
1 3	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器 の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>＜16条-43 ページ＞ (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子 照射量がそれぞれ <math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math> 又は <math>10^{14} \text{ n/cm}^2</math> までは、顕著な機械的特性 変化は見られない<sup>13, 14</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くな る箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は <math>2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2</math> であ ることから照射脆化の影響はない。</p>	“Reactor Irradiation Effects on Al 1100” Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).	<p>金属ガスケットに使用するアルミニウムの照射材を用いた引張試験の 結果、中性子照射量が <math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math> 以下では未照射材に対する照射による機械的 特性 (引張強さ及び伸び) の有意な差はみられない。</p>	<p>○金属ガスケットに使用されているアルミニウム に対する、中性子照射による機械的特性への影 響を示した文献である。本文献には、乾式キヤ スクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (<math>10^{16} \text{ n/cm}^2</math>) と <math>\text{n/cm}^2</math>) を上回る中性子照射量 (<math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math>) と 機械的特性の関係を示されており、機械的特性 への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための 参考文献として妥当である。</p>	
1 4	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器 の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p>＜16条-43 ページ＞ (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子 照射量がそれぞれ <math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math> 又は <math>10^{14} \text{ n/cm}^2</math> までは、顕著な機械的特性 変化は見られない<sup>13, 14</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くな る箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は <math>2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2</math> であ ることから照射脆化の影響はない。</p>	“Cladding and Structural Materials Semr Annual Progress Report”, HEDL-TIME 75- 77, (1975).	<p>金属ガスケットに使用するニッケル基合金の照射材を用いた引張試験 の結果、中性子照射量が <math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math> 以下では未照射材に対する照射による機械的 特性 (引張強さ及び降伏応力) の有意な差はみられない。</p>	<p>○金属ガスケットに使用されているニッケル基合 金に対する、中性子照射による機械的特性への 影響を示した文献である。本文献には、乾式キ ヤスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (<math>10^{16} \text{ n/cm}^2</math>) と <math>\text{n/cm}^2</math>) を上回る中性子照射量 (<math>10^{19} \text{ n/cm}^2</math>) と 機械的特性の関係を示されており、機械的特性 への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための 参考文献として妥当である。</p>	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えられている。)
15	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43ページ> (7) 金属ガスクケット 【熱的影響】 また、高温時の健全性についてラーション・ミラー・パラメータ (LMP) で評価すると、150℃では100年以上閉じ込め機能を維持できる <sup>10)</sup> 。	<16条-43ページ> (7) 金属ガスクケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期健全性試験(19年以上)が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている <sup>10)</sup> 。	(国際規格研究機関論文等) 「使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.6, (1996).	・金属ガスクケット(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)の応力緩和による漏えい率の影響について、金属ガスクケットの漏えい率とLMPの関係が示されており、金属ガスクケットのLMPが約 $11.0 \times 10^4$ を超えなければ貯蔵初期の漏えい率が維持される。 ・LMPは以下の式のとおり示され、LMP= $11.0 \times 10^4$ 、温度 150℃ LMP=T (20×log(t)) T: 温度 (K) t: 時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスクケットと同じ材料で行われている。また、試験に用いた金属ガスクケットの断面の外径(φ5.6mm)は、乾式キャスクの一次蓋のカバープレート用金属ガスクケットの断面外径(φ5.6mm)と同等である一方、一次蓋及び二次蓋のガスクケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。したがって、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて、パルプカバール用金属ガスクケットに対しては同等の条件下で得られた結果であり、一次蓋及び二次蓋用金属ガスクケットに対してはより厳しい条件下で得られた結果である。さらに、乾式キャスクの設計貯蔵期間を上回る金属ガスクケットのLMPと漏えい量の関係が示されており、参考文献として妥当である。
16	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43ページ> (7) 金属ガスクケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期健全性試験(19年以上)が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている <sup>10)</sup> 。	<16条-43ページ> (7) 金属ガスクケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期健全性試験(19年以上)が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている <sup>10)</sup> 。	(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報告書」, (2010).	金属ガスクケット(外被材:アルミニウム、コイルスプリング; ニッケル基合金)の性能について、ガスクケット部の温度を約160℃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た。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスクケットと同じ材料で行われている。また、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスクケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスクケット部の温度(約130℃～140℃)は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスクケット部温度(約110℃)より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスクケットにおいて、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
17	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43ページ> (7) 金属ガスクケット 【放射影響】 大気と接触する二次蓋金属ガスクケットの外側については、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている <sup>17)</sup> 。	<16条-43ページ> (7) 金属ガスクケット 【放射影響】 大気と接触する二次蓋金属ガスクケットの外側については、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている <sup>17)</sup> 。	小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株)日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).	金属ガスクケット(外被材:アルミニウム、コイルスプリング; ニッケル基合金)の性能について、実機より厳しい環境である塩水噴霧環境において3年間漏えい率に変化がないことを確認している。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスクケットと同じ材料で行われている。また、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい塩水噴霧環境下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
18	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43ページ> (8) 伝熱フィン 【放射影響】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> までは、顕著な機械的特性変化は見られない <sup>18)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は $1.6 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。	<16条-43ページ> (8) 伝熱フィン 【放射影響】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> までは、顕著な機械的特性変化は見られない <sup>18)</sup> ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は $1.6 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> であることから照射脆化の影響はない。	“Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).	銅の照射材を用いた硬さ試験の結果、中性子照射量が $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> 以下では未照射材に対する機械的特性(ビッカース硬さ)の有意な差はみられない。	○本文献は、伝熱フィンに使用している銅への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量(10 <sup>16</sup> n/cm <sup>2</sup> )を上回る中性子照射量(10 <sup>16</sup> n/cm <sup>2</sup> )とビッカース硬さの関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
19	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43ページ> (8) 伝熱フィン 【放射影響】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 <sup>19)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。	<16条-43ページ> (8) 伝熱フィン 【放射影響】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 <sup>19)</sup> されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。	(一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267:2015)」, (2015).	-40℃～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。	○本文献は、銅の設計用強度及び物性値の規格値、この温度範囲(-40℃～200℃)は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。
20	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43,44ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である <sup>20)</sup> ことから、銅は腐食することなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	<16条-43,44ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である <sup>20)</sup> ことから、銅は腐食することなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	(公社)腐食防食協会編, 「材料環境学入門」, 丸善(株), (1998).	銅の電極電位は炭素鋼(鉄)に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である。	○本文献は、金属の熱力学的費率を示す基礎データであり、参考文献として妥当である。



使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		記載内容	文献名 (国際規格研究機関論文等) 記載内容	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
	記載箇所	記載内容				
2.1	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-43.44ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 伝熱フィンと筒及び外筒の接合部において種金属接触による腐食促進の可能性があるが、密閉静止した淡水環境における銅が接続した鋼の腐食試験において銅単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されている <sup>29)</sup> 。	密閉した水道水において銅を接続した鋼の腐食試験の結果、銅の腐食速度は1週間以内に約2桁減少した。銅を接続した鋼の腐食速度は、比液量、表面積比、溶液の電気伝導度などに依存するが、腐食反応に伴う溶存酸素の消費により、銅の腐食速度は短時間に大幅に減少する。	国際規格研究機関論文等 能登谷武紀, 密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食, 伸縮技術研究会誌 33巻, (1994).	本文献には、乾式キャスクの伝熱フィン及び筒又は外筒と同じ材料である銅及び炭素鋼を用いた腐食試験の結果が示されている。本試験は、貯蔵期間中の伝熱フィンと同じ淡水条件(中性子遮蔽材により生じる水分に相当)・密閉環境であるため、参考文献として妥当である。	
2.2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-44.45ページ> 【放射影響】 燃料被覆管に使用するジルカロイは、設計貯蔵期間中の中性子照射量が $1.5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ であり、炉内の中性子照射量( $10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2$ )に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る <sup>29)</sup> 。 【熱的影響】 熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化合物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある <sup>29)</sup> 。 クリープひずみの進行については、予測式に基づき累積クリープひずみが1%以下となるよう制限することによって防止できる <sup>29)</sup> ことが示されており、燃料被覆管中の水素化合物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが1%を超えることはない。 照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射されたPWR照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は300℃近傍 <sup>29)</sup> であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さいため、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。 燃料被覆管中の水素化合物再配向については、国内の軽水炉で照射されたPWR燃料の燃料被覆管を用いた水素化合物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない。燃料被覆管の温度が275℃以下、周方向応力が100MPa以下 <sup>29)</sup> と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止する。 応力腐食割れについては、燃料棒ベレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ベレットから放出されたヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない <sup>29)</sup> 。なお、腐食性雰囲気での応力腐食試験でジルカロイ-4の応力腐食割れのしきい応力は200MPaであり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて十分低い <sup>29)</sup> 。	・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{16} \sim 10^{17} \text{ n/cm}^2$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量は $10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。 ・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制限することによりクリープひずみが1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。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。 ・水素化合物再配向 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合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。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気を整った条件におけるジルカロイ4のSCC発生のはっきりしたしきい応力は200MPa程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCCは発生しない。	○本文献には、乾式キャスクに収納するPWR393GWd/炉および48GWd/炉燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づき、詳細結果を示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。		

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名	参考文献	文献概要	参考文献としての特長性 (以下の観点から、適用することの妥当性と考えている。)																																									
1	2.7 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について 2.7.3 通常取扱い時に想定するべき事象の評価	安全審査資料	<p>&lt;16条-101ページ&gt; 第2.7-17表 使用済燃料集合体の応力評価結果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>想定事象における衝撃加速度</th> <th>0.3m落下における衝撃加速度</th> <th>0.3m落下における発生応力</th> <th>解析基準</th> <th>解析基準値 (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a. 検査架台への衝突</td> <td>3.3g<sup>(a)</sup></td> <td>21.4g<sup>(b)</sup> (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>b. 貯蔵架台への衝突</td> <td>3.1g<sup>(a)</sup></td> <td>28.6g<sup>(b)</sup> (頭部垂直落下)</td> <td>118 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>d. 横倒し時の衝突</td> <td>1.1g<sup>(a)</sup></td> <td>21.4g<sup>(b)</sup> (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>e. 二次釜の衝突</td> <td>1g<sup>(a)</sup></td> <td>28.0g<sup>(b)</sup> (頭部垂直落下)</td> <td>118 MPa</td> <td>SF</td> <td>595 MPa<sup>(1)</sup> (2/300F-4, 205°C)</td> </tr> <tr> <td>f. 燃料体(上部)の衝突</td> <td>1g<sup>(a)</sup></td> <td>21.4g<sup>(b)</sup> (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>g. 燃料体(下部)の衝突</td> <td>1g<sup>(a)</sup></td> <td>21.4g<sup>(b)</sup> (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	項目	想定事象における衝撃加速度	0.3m落下における衝撃加速度	0.3m落下における発生応力	解析基準	解析基準値 (MPa)	a. 検査架台への衝突	3.3g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa			b. 貯蔵架台への衝突	3.1g <sup>(a)</sup>	28.6g <sup>(b)</sup> (頭部垂直落下)	118 MPa			d. 横倒し時の衝突	1.1g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa			e. 二次釜の衝突	1g <sup>(a)</sup>	28.0g <sup>(b)</sup> (頭部垂直落下)	118 MPa	SF	595 MPa <sup>(1)</sup> (2/300F-4, 205°C)	f. 燃料体(上部)の衝突	1g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa			g. 燃料体(下部)の衝突	1g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa			<p>“ Proving Test on the Reliability of PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan”, Proceeding of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20, (1998).</p>	<p>国内高燃燃度 PWR 燃料被覆管のパンクチャータ試験やベレットのガス放出率、酸化膜厚等の各種照射後試験結果を記載している。その中で、照射後の燃料被覆管の機械特性について、中性子照射量と温度をパラメータとして、引張強度、0.2%耐力及び伸びのグラフが示されている。</p>	<p>参考文献としての特長性 (以下の観点から、適用することの妥当性と考えている。)</p> <p>○国内の照射後の PWR 燃料の被覆管に対して取得された 0.2%耐力を含む機械特性データであり、左記の値を用いることは妥当である。</p>
項目	想定事象における衝撃加速度	0.3m落下における衝撃加速度	0.3m落下における発生応力	解析基準	解析基準値 (MPa)																																											
a. 検査架台への衝突	3.3g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa																																													
b. 貯蔵架台への衝突	3.1g <sup>(a)</sup>	28.6g <sup>(b)</sup> (頭部垂直落下)	118 MPa																																													
d. 横倒し時の衝突	1.1g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa																																													
e. 二次釜の衝突	1g <sup>(a)</sup>	28.0g <sup>(b)</sup> (頭部垂直落下)	118 MPa	SF	595 MPa <sup>(1)</sup> (2/300F-4, 205°C)																																											
f. 燃料体(上部)の衝突	1g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa																																													
g. 燃料体(下部)の衝突	1g <sup>(a)</sup>	21.4g <sup>(b)</sup> (水平落下)	200 MPa																																													
1	2.7 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について 2.7.3 通常取扱い時に想定するべき事象の評価	安全審査資料	<p>&lt;16条-102,105ページ&gt; (1) 検査架台への衝突 検査架台への衝突時には、第2.7-23図に示す2枚の足場板の梁が圧縮変形するとして検査架台衝突部のばね剛性 <math>K_1</math> は次式<sup>(2)</sup>より算出する。 (3) 横倒し時の衝突 横倒し時の衝突時には、第2.7-25図に示すたて起こし架台の脚受け部が圧縮変形するとして輸送架台衝突部のばね剛性 <math>K_2</math> は次式<sup>(2)</sup>より算出する。</p>	<p>(株)培風館, 材料力学の基礎, (1991)</p>	<p>断面が一樣な棒の両端に力 <math>W</math> が作用した際の変形量 <math>\lambda</math> は、以下の関係である。 <math display="block">\lambda = \frac{\theta}{EA} W</math> ここで、<math>\lambda</math> : 変形量、<math>\theta</math> : 棒の長さ、<math>E</math> : 縦弾性係数、<math>A</math> : 断面積</p>	<p>○左記の式は、一樣断面の構造物に力が作用した場合の式である。ここで、ばね剛性 <math>K_1, K_2</math> の算出においては、検査架台又はたて起こし架台の一部を一樣断面な構造物とみなして計算を行うっており、左記の式を用いることは妥当である。 ここで、左記の式を変形すると、 <math display="block">W = \frac{EA}{\theta} \lambda</math> と表される。 また、<math>W = K\lambda</math> であることから、 <math display="block">K = \frac{EA}{\theta}</math> で求められる。</p>																																										

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《監視》

番号	安全審査資料		文献名 (国際規格・研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えられている。)
	記載箇所	記載内容				
1	2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力等の監視について 2.8.2 適合性について	<16条-119ページ> b. 海外事例及び文献を踏まえた考察 ・サリール発電所における密封異常 (アメリカ) <sup>1)</sup>	資源エネルギー庁、「使用済燃料乾式貯蔵施設 (中間貯蔵施設) に係る技術検討報告書」, (2000).	サリール発電所 (アメリカ) で貯蔵中の TN-38 キヤスクにおいて、2000年5月31日に、加圧している2重の金属ガスケット間の圧力が低下したため、Heリークテストを実施した結果、2次側の金属ガスケットがリークしていた。1次側の金属ガスケットにはリークはなかった。原因は、防護カバーを貫通している電気ケーブル周囲の金属シール部分から雨水が防護カバー内に入り、蓋部の金属ガスケット外側が腐食したためである。	OTN-32に用いられている金属ガスケットと乾式キヤスクで使用される金属ガスケットは同じ材料である。また、金属ガスケットの厚みや周囲気体 (大気) は同等と考えられることから、本文献を参考とすることは妥当である。	
2	2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力等の監視について 2.8.2 適合性について	<16条-120ページ> b. 海外事例及び文献を踏まえた考察 ・航空機エンジンの衝突における評価 (電力中央研究所) <sup>2)</sup>	(一財) 電力中央研究所、「航空機エンジンの水平衝突荷重に対する金属キヤスクの密封性能評価」, (2010)	使用済燃料貯蔵施設に民間航空機エンジンが貫入した場合を想定し、水平方向から衝撃荷重を受ける金属キヤスクの密封性能を検証を目的に水平衝突試験を実施した。25 縮尺キヤスクに、高速飛来物を 57.3m/s で水平衝突させ、キヤスク内部からの He 漏洩率を測定した。漏洩率は衝突直後に $4.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ まで上昇したが、試験後 20 時間経過時点では約 $1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に収束した。本結果を用いて実物大キヤスクの漏洩率を評価すると $3.5 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となり、衝突後、直ちに密封性能に影響を与えることはないものと推察される。	○本文献での試験は、乾式キヤスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面外径 ( $\phi 4\text{mm}$ ) だが、漏洩率は実機大 ( $\phi 10\text{mm}$ ) の値に換算されている。さらに、試験に用いられた金属キヤスク蓋及び胴フランジの形状は乾式キヤスクと同様の構造及び材料であることから、本文献の試験結果を参考とすることは妥当である。	
3	2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力等の監視について 2.8.2 適合性について	<16条-120ページ> b. 海外事例及び文献を踏まえた考察 ・乾式キヤスク落下時の漏えい評価 (電力中央研究所) <sup>3)</sup>	(一財) 電力中央研究所、「金属キヤスク落下時瞬時漏えい評価」, (2006)	貯蔵施設内での事故を想定して、コンクリート床板上への高さ 1m からの水平落下試験及び後部トラニオンを回転中心とした水平状態高さ 1m からの回転衝突試験を実施した。落下試験時の最大漏洩率 (試験前: 一次蓋・二次蓋との約 $10^{10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ) は、水平落下試験の一次蓋で $2.4 \times 10^{10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、二次蓋で $2.9 \times 10^{10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、回転衝突試験の一次蓋で $3.9 \times 10^{10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、二次蓋で $8.4 \times 10^{10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、いずれも貯蔵時の基準漏洩率 $10^{10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を上回るものとはなかった。また、漏洩率は、24 時間以内に初期値に回復することを確認した。	○本文献での試験は、乾式キヤスクで使用される金属ガスケットと同じ材料、断面外径 ( $\phi 10\text{mm}$ ) で行われている。さらに、試験に用いられた金属キヤスクの重量、構造及び材質は乾式キヤスクと同等であることから、本文献の試験結果を参考とすることは妥当である。	

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密または防護上の機密に属しますので公開できません。

参考 2

伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る  
原子力規制委員会の審査方針を踏まえた  
影響評価

## 伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る原子力規制委員会の審査方針を踏まえた影響評価

第8回原子力規制委員会で示された以下の審査方針

- ① キャスクのみで地震や竜巻等の外力に対して、安全機能が維持可能であることを確認する。
  - ② 敷地境界における実効線量評価について、建屋が無い状態で過度の保守性を排した現実的な評価により、建屋としての遮へい機能の必要性を確認する。
  - ③ キャスクのみで、安全機能が維持可能であり、また、建屋としての遮へい機能が必要ないことが確認できれば、審査上、建屋の安全上の機能、性能は考慮せず、建屋が損壊したとしても、キャスクの安全機能への波及的影響を及ぼさないことのみを確認する。
- を踏まえ、以下の図1に示すフローに従い、乾式キャスクに対する影響評価を示す。

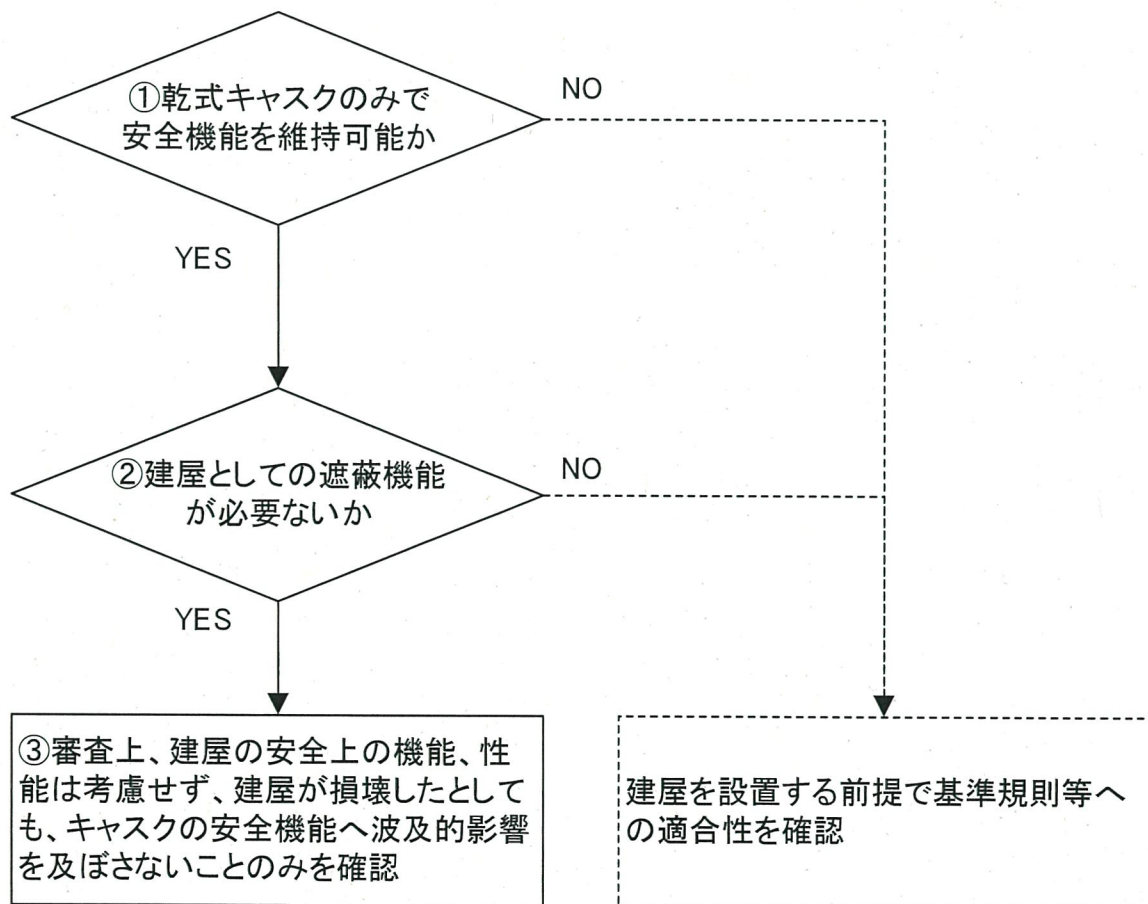


図1. 第8回 原子力規制委員会の審査方針で示された内容のフロー

## 1. 乾式キャスクのみでの外力に対する安全機能維持について

乾式キャスクのみで地震や竜巻等の外力に対して、安全機能が維持可能であることを確認するため、建屋のない状態で乾式キャスクを貯蔵架台に設置した状態を仮定\*し、地震・竜巻・外部火災による乾式キャスクに対する影響評価を行う。（詳細は、地震は4条まとめ資料、竜巻、外部火災は別紙1-1～1-3参照。）この評価結果を表1にまとめる。

\*竜巻の影響評価は、乾式キャスクに作用する荷重を保守的に評価するよう乾式キャスクと貯蔵架台は剛結合と仮定して行う。

表1. 地震・竜巻・外部火災による乾式キャスクに対する影響評価結果

	評価結果
地震	地震時に乾式キャスクに生じる荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における0.3m落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部材が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。
竜巻	竜巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに生じる衝撃荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における0.3m落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部材が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。 なお、乾式キャスクに設計飛来物が直接衝突するため、衝突箇所（外部）は局所的に変形する可能性があるが、直ちに安全機能に影響を与えない。
外部火災	外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の火災の入熱量の1/2以下であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。

以上より、乾式キャスクのみで地震や竜巻等の外力に対して、安全機能が維持可能である（直ちに安全機能に影響を与えない）。他の外部事象に対しては、想定される事象を選定したうえで影響評価を行い、安全機能が維持可能であることを確認する。（詳細は、別紙1-4参照。）

## 2. 建屋としての遮蔽機能の必要性について

建屋としての遮蔽機能の必要性を確認するために、建屋のない状態を仮定し、保守性を排除した現実的な評価で、敷地境界線量において年間 $50\mu\text{Sv}$ を満足するかどうかを確認する。（詳細は、別紙2参照。）この評価結果を表2にまとめる。

表2. 伊方発電所敷地境界の年間線量試算結果（乾式貯蔵建屋なし）

評価地点 (乾式貯蔵施設からの距離)	年間線量[ $\mu\text{Sv}$ ]（現実的な評価）		
	乾式貯蔵施設	既設建屋	合算
B点 <sup>(注1)</sup> (420 m)	約180 <sup>(注2)</sup>	3.9	約190

(注1) 伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点

(注2) ガンマ線  $43\mu\text{Sv}$  + 中性子線  $135\mu\text{Sv}$  = 約  $180\mu\text{Sv}$

表2のとおり、建屋なしで評価条件を現実的に見直した場合の敷地境界線量（試算）は、年間約 $190\mu\text{Sv}$ となることから、目標値である年間 $50\mu\text{Sv}$ を満足するためには遮蔽機能を有する建屋が必要である。

### 3. まとめ

以上の結果から、乾式キャスク単体での外力に対する安全機能維持は確認できたものの、敷地境界線量が年間 $50\mu\text{Sv}$ を満足するためには貯蔵建屋が必要となることから、貯蔵建屋を設置する前提で、基準規則等への適合性を示す。

以上

乾式キャスク単体の安全機能 (原子力規制委員会での審査方針を踏まえた対応) 【影響評価】

【電巻】 影響評価として、乾式キャスク単体の安全機能を確認するため、以下のとおり、電巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに負荷される荷重と、核燃料輸送物設計承認申請書における一般の試験条件 (乾式キャスクの 0.3m 落下) の荷重を比較した。

MSF-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書

乾式キャスクは頑丈な構造の金属製の静的機器であることから剛体とし、乾式キャスクを 1 質点とみなして、0.3m 落下時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算し、有限要素法及びび工学式により乾式キャスク各部 (容器本体、バスケット及び燃料集合体) の応力計算を行い、弾性範囲内であることを確認した。

【衝撃荷重の計算方法】 落下時の衝撃荷重 (F) は、CRUSH コードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを 1 質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー (E<sub>0</sub>) が全て吸収されるものとした。(緩衝体を除いた輸送物及び落下試験台 (床面) を剛体とし、落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視する。)

【衝撃荷重の計算結果】 0.3m 落下時の衝撃荷重 (F) の計算結果は右表のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 F を輸送物質量で除して算出。

輸送物	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)
質量 m(kg)	0.3m 頭部垂直	F <sub>V1</sub> : 3.672×10 <sup>7</sup>	27.6
1355500	0.3m 水平	F <sub>H1</sub> : 2.830×10 <sup>7</sup>	21.3

【応力計算方法】 (1) 容器本体 上記の加速度に一定の余裕をみた加速度 (設計加速度) による慣性力が作用する場合の容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(2) バスケット及び燃料集合体 設計加速度をもとに工学式を用いた応力評価を行う。

【応力計算結果】

項目	解析結果 (MPa)		解析基準値 (MPa)
	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	
安全機能	44	68	1.5S <sub>m</sub>
遮蔽・除熱	50	86	f <sub>b</sub>
遮蔽*	54	58	S <sub>y</sub>
閉じ込め	7	11	S <sub>m</sub>
臨界	118	200	σ <sub>y</sub>
臨界	595	595	σ <sub>y</sub>

(参考) S<sub>y</sub>=設計降伏応力 (規格値)、S<sub>m</sub>=設計応力強さ (規格値) (S<sub>m</sub>=S<sub>y</sub>/1.5)、f<sub>b</sub>=S<sub>y</sub>/1.5、σ<sub>y</sub>=降伏応力 (文獻値) ※構造解析上は、外筒の健全性をもって中性子遮蔽材が保持されることを確認している。

飛来物と被衝突体の接触時間を設定し、飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重による力積が等しいとして衝撃荷重を計算する。飛来物による衝撃荷重を大きく見積もるため乾式キャスクを床に剛結合した剛体とする。

【衝撃荷重の計算結果】 衝撃荷重 (W<sub>M</sub>) の計算結果は以下のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 W<sub>M</sub> を乾式キャスクの貯蔵時質量 (117.0ton) で除して算出。

飛来物	衝撃荷重 W <sub>M</sub> (N)	加速度 (G)
鋼製材	2.20×10 <sup>6</sup>	2
乗用車	3.16×10 <sup>6</sup>	3

【結論】 以上のとおり、電巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに生じる衝撃荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における 0.3m 落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部材が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。なお、乾式キャスクに設計飛来物が直接衝突するため、衝突箇所 (外部) は局所的に変形する可能性があるが、直ちに安全機能に影響を与えない。



【外部火災】

影響評価として、乾式キャスク単体の安全機能を確認するため、以下のとおり、外部火災時の乾式キャスクへの入熱と、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件 (800℃で30分の火災) による入熱を比較した。

<p>MSF-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが800℃で30分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (併用状態D相当) の温度基準以内であることにより、各部位の安全機能が確保されることが確認された。(短期健全性)</p>	<p>発電用原子炉設置変更許可申請書 (影響評価)</p> <p>貯蔵状態 (緩衝体なし、縦置き) の乾式キャスクが、遠隔の外部火災に対して、輻射による入熱に建屋等の遮蔽物が無い状態曝されることを想定し、最大の入熱量を計算した。</p> <p>この入熱量が、左記の評価条件 (800℃で30分の火災) における入熱量を下回ることに伴い、同様に各部位の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>																																										
<p>【計算方法】</p> <p>伊方発電所における外部火災事象としては、森林火災、近隣産業施設の火災爆発、船舶火災、航空機落下及び重量火災等が考えられる。</p> <p>既許可の評価において、これらの外部火災事象のうち、最も厳しい条件となるのは、航空機落下と重油タンクの重量火災時であり、離隔距離の関係から入熱量が最大となる原子炉補助建屋に対する値を以下の通り計算する。</p> <p>【計算結果】</p> <p>受熱面輻射強度と時間の積で計算される。受熱面輻射強度は「原子炉発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づく計算を実施する。計算式は以下の通り。</p>	<p>【計算方法】</p> <p>ABAQUS コードを用いた有限要素法により伝熱解析 (時刻歴解析) を行った。解析モデル及び解析条件は以下。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>解析モデル: 乾式キャスク各部と使用済燃料の温度算出のため、2種類の解析モデルを使用。</li> <li>全体モデル (三次元) ・ 燃料集合体モデル (二次元)</li> </ul> <p>解析条件: 熱解析条件は以下の通り。</p> <table border="1"> <tr> <td>項目</td> <td>火災前</td> <td>火災時</td> <td>火災後</td> </tr> <tr> <td>設計崩壊熱量</td> <td></td> <td>16.9 kW</td> <td></td> </tr> <tr> <td>環境条件</td> <td>38 °C</td> <td>800°C (30 分間)</td> <td>38 °C</td> </tr> </table> <p>【計算結果】</p> <p>火災事象発生時を基準とした最高温度算出時間を下表に示す。また、燃料集合体温度が最も高くなる火災事象発生から 24.8 時間後における温度分布を右図に示す。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>安全機能</th> <th>部位</th> <th>最高温度算出時間(h)</th> <th>温度(°C)</th> <th>基準値(°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>胴</td> <td>0.508</td> <td>249</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>遮蔽</td> <td>中性子遮蔽材</td> <td>0.502</td> <td>687</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>一次蓋金属ガスケット</td> <td>20.8</td> <td>136</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>境界</td> <td>バスケット</td> <td>22.8</td> <td>209</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>境界</td> <td>燃料集合体</td> <td>24.8</td> <td>241</td> <td>275*</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 一般の試験条件基準</p> <p>各部温度評価結果から、各部位の安全機能が確保されることを確認した。</p> <p>なお、側部中性子遮蔽材は基準値 (使用可能温度) を超えるが、別途実施した燃焼試験結果をもとに特別の試験条件における遮蔽評価 (燃焼試験の結果より中性子遮蔽材が2割減損するため、保守的に5割減損として評価) を行い、事業所外運搬規則に定める BM 型核分裂性輸送物に対する基準 (表面から 1m の位置における線量当量率: 10mSv/h 以下*) を満たすことを確認した。</p> <p>※ 特別の試験条件のうち 9m 落下、丸棒上への落下、800℃30 分火災時の表面から 1m の位置における線量当量率は、MSF-32P 型は 781.1 μSv/h、MSF-24P 型では 876.6 μSv/h である。</p> <p>&lt;入熱量&gt;</p> <p>上述の熱解析では、燃料集合体の崩壊熱量及び乾式キャスク環境温度 800℃を入力として各部温度の時刻歴解析を実施しており、以下のとおり輻射を考慮して評価した結果、入熱量は、800℃で30分の入熱量 (単位面積当たり) は 62.9MJ/m<sup>2</sup> となる。</p>	項目	火災前	火災時	火災後	設計崩壊熱量		16.9 kW		環境条件	38 °C	800°C (30 分間)	38 °C	安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)	遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350	遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	687	180	閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	20.8	136	190	境界	バスケット	22.8	209	250	境界	燃料集合体	24.8	241	275*
項目	火災前	火災時	火災後																																								
設計崩壊熱量		16.9 kW																																									
環境条件	38 °C	800°C (30 分間)	38 °C																																								
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)																																							
遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350																																							
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	687	180																																							
閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	20.8	136	190																																							
境界	バスケット	22.8	209	250																																							
境界	燃料集合体	24.8	241	275*																																							
<p>【計算式】</p> $\phi = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{m}{(R^2 - 1)} \right) \left( \frac{A - 2n}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} - \frac{1}{n} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right)$ $m = \frac{H}{R} = 3, n = \frac{L}{R}, A = (L+n)^2 + m^2, B = (L-n)^2 + m^2$ $E = R \cdot \phi$ <p>RF: 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]          φ: 円筒火災モデルの形係数 [-]          L: 火災と受熱面までの距離[m]          R: 燃焼半径 [m]          H: 火災の高さ [m] (H=3R、評価ガイド)          E: 受熱面輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]</p>	<p>【計算式】</p> $Q = (q_1 + q_2) / 2 \cdot t$ $q_1 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot \{ (273 + T_0)^4 - (273 + T_n)^4 \}$ <p>Q: 火災による入熱量 (単位面積) (J/m<sup>2</sup>)          q<sub>1</sub>: 火災による熱流束 (単位面積) (初期 n=1, 終期 n=2) (W/m<sup>2</sup>)          t: 火災時間 (30 分=1800s)          A: 容器表面積 (単位面積) (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)          F: 表面輻射率 (総輻射率) F=1/(1/ε<sub>1</sub> + 1/ε<sub>2</sub>) = 0.735 (ε<sub>1</sub>: キャスク表面 (0.8), ε<sub>2</sub>: 火災面 (0.9))          σ: ステファン・ボルツマン定数 = 5.66961 × 10<sup>-8</sup> (W/m<sup>2</sup>・K<sup>4</sup>)          T<sub>0</sub>: 雰囲気温度 (周囲空気: 800°C)          T<sub>n</sub>: 容器表面温度 (初期 n=1: 113°C, 終期 n=2: 715°C)</p>																																										
<p>【結果】</p> <p>以上通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の入熱量の1/2以下 (29.9MJ/m<sup>2</sup> &lt; 62.9MJ/m<sup>2</sup>) であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価では、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSF-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けた際の、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSF-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>	<p>【結果】</p> <p>以上通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の入熱量の1/2以下 (29.9MJ/m<sup>2</sup> &lt; 62.9MJ/m<sup>2</sup>) であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価では、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSF-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けた際の、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSF-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>																																										
<p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への輻射による受熱面輻射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m<sup>2</sup> (=2900(W/m<sup>2</sup>) × 1.67(h) + 460(W/m<sup>2</sup>) × 7.58(h)) となる。</p> <p>本評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m<sup>2</sup>) で、仮に遮蔽物がない状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>	<p>航空機落下と重油タンクの重量火災による熱影響評価結果</p> <table border="1"> <tr> <td>項目</td> <td>航空機</td> <td>重油タンク</td> </tr> <tr> <td>燃焼継続時間 (τ)</td> <td>1.67 h</td> <td>7.58 h</td> </tr> <tr> <td>受熱面輻射強度 (E)</td> <td>2900 W/m<sup>2</sup></td> <td>460 W/m<sup>2</sup></td> </tr> </table>	項目	航空機	重油タンク	燃焼継続時間 (τ)	1.67 h	7.58 h	受熱面輻射強度 (E)	2900 W/m <sup>2</sup>	460 W/m <sup>2</sup>																																	
項目	航空機	重油タンク																																									
燃焼継続時間 (τ)	1.67 h	7.58 h																																									
受熱面輻射強度 (E)	2900 W/m <sup>2</sup>	460 W/m <sup>2</sup>																																									

核燃料輸送物設計承認申請書における解析結果一覧 (キャスタイクタイプによる差異)

MSF-32P 型 核燃料輸送物設計承認申請書

MSF-24P 型 核燃料輸送物設計承認申請書

輸送物質量 m(kg)	重力加速度 g(m/s <sup>2</sup> )	落下高さ H(m)
135500	9.80665	0.3

輸送物質量 m(kg)	重力加速度 g(m/s <sup>2</sup> )	落下高さ H(m)
134400	9.80665	0.3

落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)
0.3m 頭部垂直	3.672×10 <sup>7</sup>	27.6
0.3m 底部垂直	3.439×10 <sup>7</sup>	25.9
0.3m 水平	2.830×10 <sup>7</sup>	21.3

落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)
0.3m 頭部垂直	3.555×10 <sup>7</sup>	27.0
0.3m 底部垂直	3.417×10 <sup>7</sup>	25.9
0.3m 水平	2.686×10 <sup>7</sup>	20.4

安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)		
					0.3m 頭部垂直	0.3m 底部垂直	0.3m 水平
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S <sub>m</sub>	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	68
遮蔽	容器本体 外筒	f <sub>b</sub>	156	120	50	36	86
閉じ込め	容器本体 一次蓋シール部	S <sub>y</sub>	185	120	54	37	58
臨界	バスケット	S <sub>m</sub>	36	180	7	-*3	11
臨界	燃料集合体	σ <sub>y</sub>	595	205	118	-*3	200

安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)		
					0.3m 頭部垂直	0.3m 底部垂直	0.3m 水平
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S <sub>m</sub>	186 (183)*2	120 (140)*2	43	30	66
遮蔽	容器本体 外筒	f <sub>b</sub>	156	120	45	39	87
閉じ込め	容器本体 一次蓋シール部	S <sub>y</sub>	185	115	48	36	57
臨界	バスケット	S <sub>m</sub>	36	185	7	-*3	12
臨界	燃料集合体	σ <sub>y</sub>	589	215	105	-*3	141

\*1: SAR ロ草 B 一般熱的試験の除熱解析結果から設定した値  
 \*2: 頭部垂直及び水平は胴側部の値。底部垂直は胴底板の値(( )内の値)  
 \*3: 0.3m 頭部垂直落下の結果に包絡される

\*1: SAR ロ草 B 一般熱的試験の除熱解析結果から設定した値  
 \*2: 頭部垂直及び水平は胴側部の値。底部垂直は胴底板の値(( )内の値)  
 \*3: 0.3m 頭部垂直落下の結果に包絡される

安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)
遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	687	180
閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	20.8	136	190
臨界	バスケット	22.8	209	250
臨界	燃料集合体	24.8	241	275*

安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)
遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	701	180
閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	19.1	137	190
臨界	バスケット	22.1	218	250
臨界	燃料集合体	25.1	254	275*

※一般の試験条件基準

※一般の試験条件基準

構造解析 (一般の試験条件)

熱解析 (特別の試験条件)

## 貯蔵建屋なしの場合の外部事象による乾式キャスクの安全機能への影響

## 1. 伊方発電所において想定される自然現象及び人為事象の選定結果

設置許可基準規則 第6条に該当する「設計基準において想定される自然現象」及び「設計基準において想定される人為事象」については、伊方発電所の敷地及び敷地周辺の自然環境等を基に以下のとおり選定<sup>※</sup>している。

## (自然現象：12 事象)

- ・洪水
- ・風（台風）
- ・竜巻
- ・凍結
- ・降水
- ・積雪
- ・落雷
- ・地滑り
- ・火山
- ・生物学的事象
- ・森林火災
- ・高潮

## (人為事象：7 事象)

- ・飛来物
- ・ダムの崩壊
- ・爆発
- ・近隣工場等の火災
- ・有毒ガス
- ・船舶の衝突
- ・電磁的障害

※ 平成 27 年 7 月 15 日付け原規規発第 1507151 号をもって設置変更許可を受けた設置変更許可申請に係る安全審査資料「伊方発電所 3 号炉 設置許可基準規則等への適合性について（設計基準対象施設）」(DB-8-22 改 38) を参照。

## 2. 外部事象による乾式キャスクに対する影響評価について

乾式キャスクのみで 1. の外部事象に対して、安全機能が維持可能であるかを確認するため、建屋のない状態で乾式キャスクを貯蔵架台に設置した状態を仮定し、想定される自然現象及び人為事象による乾式キャスクに対する影響評価を行った。評価結果を第 1 表にまとめる。なお、乾式キャスクは建屋内に貯蔵し、外部事象に対して外郭にて防護することから、第 1 表に示す長期的な安全機能維持のための運用は不要である。

第1表 外部事象による乾式キヤスクに対する影響評価結果

		影響	評価結果
竜巻	別紙1-1参照。		
	堆積荷重		乾式キヤスクは輸送容器としての強化浸漬試験（水深200m相当の荷重 $2.1 \times 10^6 \text{N/m}^2$ ）に対して耐えられるように設計されており、降下火砕物の（湿潤状態）の堆積荷重 $2,205 \text{N/m}^2$ （積雪を含む場合 $2,345 \text{N/m}^2$ ）を考慮しても、乾式キヤスクの構造健全性を損なうおそれはない。
	火山	除熱機能への影響	乾式キヤスクの高さ5.2mに対して降下火砕物の層厚は0.15mと小さいため、乾式キヤスクの短期的な安全機能を損なうおそれはない。なお、除灰を行うことも可能である。
		腐食	乾式キヤスクに降下火砕物が付着した際に懸念される腐食については、金属腐食研究の結果より、降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食を生じないが、外装の塗装等によって短期での腐食により乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。なお、長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修等で対応可能である。
外部火災※	別紙1-2参照。		
洪水	浸水		敷地付近は、地形及び表流水の状況から判断して、洪水による被害は考えられない。
風（台風）	風圧力による転倒 飛来物の衝突		敷地付近で観測された最大瞬間風速は、宇和島特別地域気象観測所（2005年9月まで宇和島測候所）での観測記録（1951～2012年）によれば、 $72.3 \text{m/s}$ （1964年9月25日）である。風（台風）の風圧力による荷重 $51.7 \text{kN}$ は、竜巻の影響評価（別紙1-1参照）で示す飛来物による衝撃荷重（鋼製材： $2,200 \text{kN}$ 、乗用車 $3,160 \text{kN}$ ）より小さいため、乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。
凍結	低温脆性		宇和島特別地域気象観測所での観測記録（1951～2012年）によれば、最低気温は $-6.2^\circ \text{C}$ （1977年2月19日）である。これに対し、十分低い温度においても鋼製部材のき裂、破損等を生じることのない材料選定を含めた乾式キヤスク設計を行うことから、低気温により乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。
降水	浸水		宇和島特別地域気象観測所での観測記録（1951～2012年）によれば、日最大1時間降水量は $76.5 \text{mm}$ （2011年6月20日）である。これに対し、観測記録を上回る降雨強度の排水能力を有する構内排水路で集水し海域へ排出を行うことから、降水により乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。

評価結果	
影響	評価結果
積雪	敷地付近の積雪記録（1857～1963年）及び宇和島特別地域気象観測所での観測記録（1951～2005年9月）によれば、最大積雪量は52cm（1960年12月29日～1961年1月4日）である。火山の影響評価では、この堆積荷重を上回る降下火砕物と積雪の組み合わせ荷重を想定しているため、火山の影響評価に含まれる。
落雷	金属製の静的機器である乾式キャスクは、落雷による電気的影響を受けない。
地滑り	乾式キャスクは、地滑りが発生するおそれのない位置に設置するため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。
生物学的 事象	乾式キャスクは金属製の静的機器であるため、小動物による損傷の影響を受けず、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。
高潮	発電所周辺海域の潮位については、発電所から北東約20km地点に位置する長浜港における潮位を設計潮位とする。本地点の潮位は、既往最高潮位(H.H.W.L.)EL.+2.88m（昭和29年9月13日台風12号時に観測）、湖望平均満潮位(H.W.L)EL.+1.62mである。これに対し、敷地の整地レベルをEL.+10mとしているため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。
飛来物	使用済燃料乾式貯蔵施設に対する航空機落下確率は約 $5.4 \times 10^{-8}$ 回/炉・年であり、防護設計の要否判断の基準である $10^{-7}$ 回/炉・年を超えない。乾式キャスクの場合、その標的面積は使用済燃料乾式貯蔵施設全体の標的面積を下回り、実際の航空機落下確率はさらに低くなるため、航空機落下による防護については設計上考慮する必要はない。また、本発電所敷地周辺の社会環境からみて、発電所周辺での爆発等に起因する飛来物により、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。
ダムの 崩壊	発電所前面海域へ流入する河川はないことから、ダムの崩壊による影響を考慮する必要はない。
有毒ガス	乾式キャスクに対して人員を常駐させる必要はないため、有毒ガスによる影響を受けない。
船舶の 衝突	乾式キャスクは、船舶の衝突による影響を受けないEL.+25mの位置に設置するため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。
電磁的 障害	乾式キャスクは動力を用いずに自然換気により除熱を行い静的に貯蔵する設備であることから、電磁的障害による電気的影響を受けず、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。

※ 森林火災、爆発及び近隣工場等の火災をまとめて「外部火災」とする。