

本資料のうち、枠囲みの内容は、
商業機密あるいは防護上の観点
から公開できません。

| | |
|-------------------|-------------|
| 伊方発電所設計及び工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | DSF-010（改1） |
| 提出年月日 | 令和3年6月10日 |

伊方発電所3号機
設計及び工事計画に係る説明資料
(使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について)
(使用済燃料乾式貯蔵施設)

令和3年6月
四国電力株式会社

資料 10～14 に係る補足説明資料

【説明する添付資料】

- 資料 10 強度に関する説明書
- 資料 11 使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書
- 資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書
- 資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書
- 資料 14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書

補足説明資料目次

1. 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納燃料の仕様に関する補足説明資料
2. 添付資料に関する補足説明資料
 - 2-1 資料10に係る補足説明資料
 - 2-2 資料11に係る補足説明資料
 - 2-3 資料12に係る補足説明資料
 - 2-4 資料13に係る補足説明資料
 - 2-5 資料14に係る補足説明資料
 - 2-6 評価内容全般に係る補足説明資料

1. 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納燃料の
仕様に関する補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
 （使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 1. 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納燃料の仕様に関する補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 (該当添付資料) |
|-----------|---------------------|----------------------------|--|
| | (名称) | (概要) | |
| 1-1 | 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納燃料の仕様 | 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納燃料の仕様の概要を示す。 | 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |

1-1 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納燃料の仕様

1. 概要

本資料は「資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書」、「資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」及び、「資料 14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」の条件として使用する使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、乾式キャスクという。）の収納燃料の仕様について説明するものである。

2. 乾式キャスクの収納物

乾式キャスク（タイプ 1）及び（タイプ 2）の収納物は、使用済燃料集合体である。

乾式キャスク（タイプ 1）及び（タイプ 2）に収納可能な PWR 燃料集合体の型式及び仕様を 1-1-1 表に示す。

燃料集合体は正方配列された燃料棒で構成され、両端及び中間部数箇所が支持格子により保持されている。燃料は低濃縮の UO_2 ペレットでジルカロイ製の被覆管の中に充填され、両端に端栓を溶接して密封されている。また、燃料には、可燃性毒物である Gd_2O_3 を含むものがある。

3. 乾式キャスクの収納配置制限

乾式キャスク（タイプ 1）及び（タイプ 2）に収納される燃料集合体は 1-1-1 図に示すとおり収納位置が制限される。乾式キャスク（タイプ 2）には、燃料集合体単独あるいは、バーナブルポイズン集合体（容器当たり最大 12 体）を挿入した状態で収納することができる。バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体は、1-1-1 図(2/2)に示す中央部に収納される。バーナブルポイズン集合体の仕様例を 1-1-2 表に示す。

また、乾式キャスク（タイプ 1）及び（タイプ 2）に収納される収納物（燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体）の燃焼条件及び冷却日数を 1-1-3 表に示す。

1-1-1 表 燃料集合体の型式及び仕様 (1/2) (乾式キャスク (タイプ1))

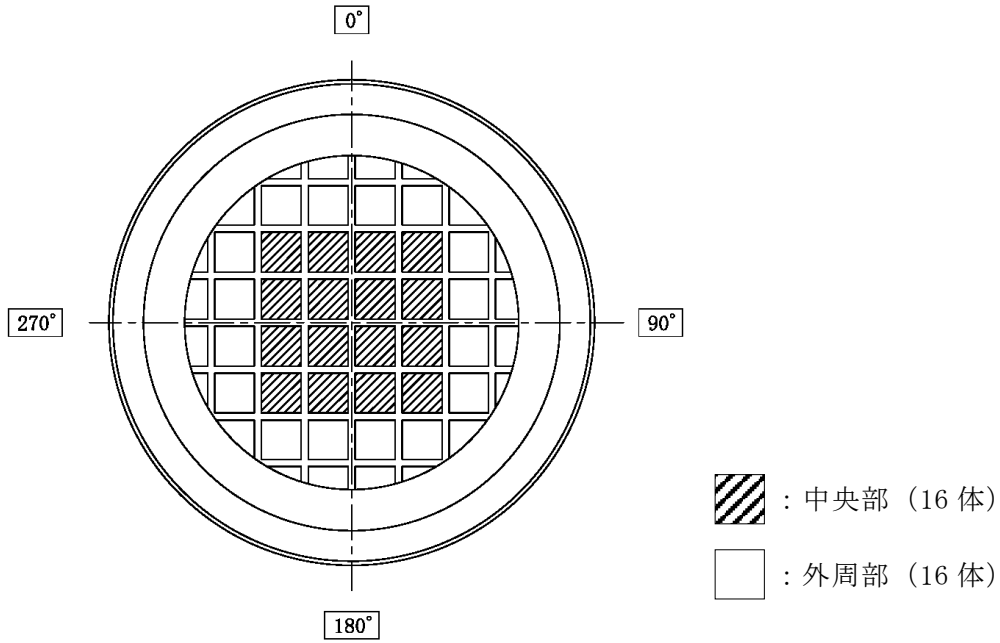
| 燃料集合体の 種類と型式 | 中央部 | | | | 外周部 | |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | 14×14 燃料 | | | | | |
| | 48,000MWd/t 型 | | 39,000MWd/t 型 | | 39,000MWd/t 型 | |
| | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 |
| 主要な燃料緒元 | | | | | | |
| 材質 | | | | | | |
| 燃料 被覆管 | UO ₂ (注) ジルカロイ-4 | UO ₂ (注) ジルカロイ-4 | UO ₂ ジルカロイ-4 | UO ₂ ジルカロイ-4 | UO ₂ ジルカロイ-4 | UO ₂ ジルカロイ-4 |
| 燃料密度 (理論密度比 %) | 約 95 | 約 95 | 約 95 | 約 95 | 約 95 | 約 95 |
| 初期濃縮度 (U-235 wt%) | 約 4.1 (集合体平均) | 約 4.1 (集合体平均) | 約 3.4 (集合体平均) | 約 3.4 (集合体平均) | 約 3.4 (集合体平均) | 約 3.4 (集合体平均) |
| 形状 | | | | | | |
| 集合体長さ (mm) | 約 4100 | 約 4100 | 約 4100 | 約 4100 | 約 4100 | 約 4100 |
| 燃料有効長 (mm) | 3642 | 3642 | 3642 | 3642 | 3642 | 3642 |
| 燃料棒直径 (mm) | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 |
| 燃料棒ピッチ (mm) | 14.1 | 14.1 | 14.1 | 14.1 | 14.1 | 14.1 |
| 集合体幅 (mm) | 197 | 197 | 197 | 197 | 197 | 197 |
| 重量 | | | | | | |
| 集合体重量 (kg) | 590 以下 | 590 以下 | 590 以下 | 590 以下 | 590 以下 | 590 以下 |
| UO ₂ 重量 (kg) | | | | | | |
| ウラン重量 (kg) | | | | | | |

(注) 可燃性毒物として Gd₂O₃ を含むものがある。

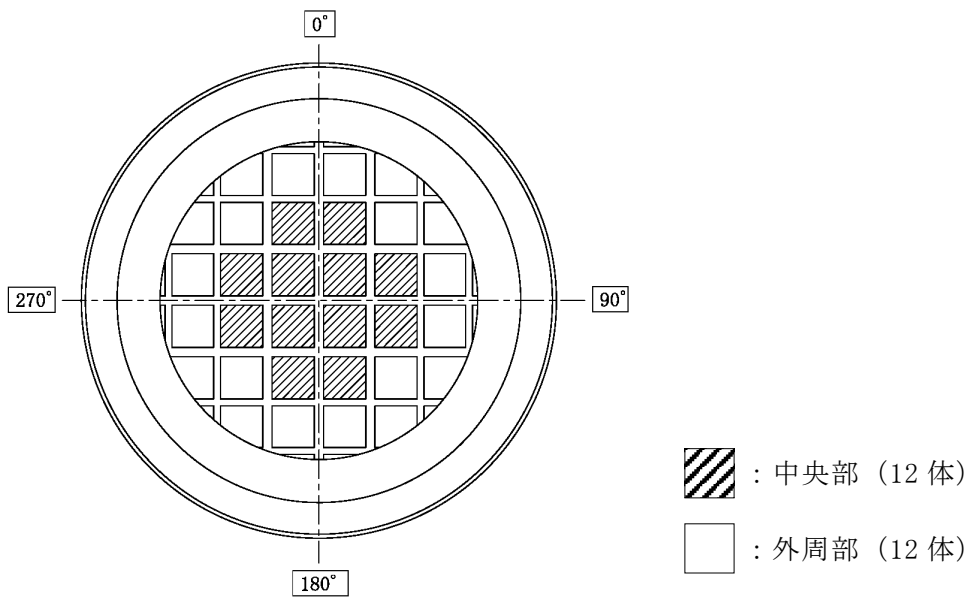
1-1-1 表 燃料集合体の型式及び仕様 (2/2) (乾式キャスク (タイプ 2))

| 燃料集合体の 種類と型式 | 17×17 燃料 | |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| | 48,000Mwd/t 型 | |
| | A 型 | B 型 |
| 主要な燃料緒元 | | |
| 材質 | | |
| 燃料 | UO ₂ (注) | UO ₂ (注) |
| 被覆管 | ジルカロイ-4 | ジルカロイ-4 |
| 燃料密度 (理論密度比 %) | 約 95 | 約 95 |
| 初期濃縮度 (U-235 wt%) | 約 4.1 (集合体平均) | 約 4.1 (集合体平均) |
| 形状 | | |
| 集合体長さ (mm) | 約 4100 | 約 4100 |
| 燃料有効長 (mm) | 3648 | 3648 |
| 燃料棒直径 (mm) | 9.5 | 9.5 |
| 燃料棒ピッチ (mm) | 12.6 | 12.6 |
| 集合体幅 (mm) | 214 | 214 |
| 重量 | | |
| 集合体重量 (kg) | 680 以下 | 680 以下 |
| UO ₂ 重量 (kg) | | |
| ウラン重量 (kg) | | |

(注) 可燃性毒物として Gd₂O₃ を含むものがある。

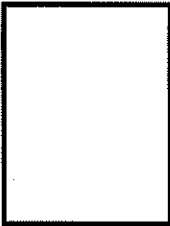


1-1-1 図 燃料集合体の収納位置 (1/2) (乾式キャスク (タイプ 1))



1-1-1 図 燃料集合体の収納位置 (2/2) (乾式キャスク (タイプ 2))

1-1-2 表 バーナブルポイズン集合体の仕様例

| 縮 元 | 型 式 |
|--|--|
| <p>①形状、全長等 バーナブルポイズン集合体 外 形 (mm) 全 長 (mm) バーナブルポイズン棒 吸収材有効長 (mm) 外 径 (mm) 内 径 (mm)</p> <p>②重 量 総重量 (kg)</p> <p>③材 料 吸収材 被覆管 シンプルプラグ ホールドダウンアセンブリ</p> | <p>17×17 燃料用</p> <p>161×161 3961</p>  <p>ホウケイ酸ガラス ステンレス鋼 ステンレス鋼 ステンレス鋼 インコネル</p> |

1-1-3 表 収納物の燃焼条件及び冷却日数 (1/2) (乾式キャスク (タイプ 1))

| 燃焼条件 | 燃料集合体の種類と型式 | | 中央部 | | | | 外周部 | |
|-----------------------------------|-------------|--|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|
| | | | 14×14 燃料 | | | | | |
| | | | 48,000MWd/t 型 | | 39,000MWd/t 型 | | 39,000MWd/t 型 | |
| | | | A 型 | B 型 | A 型 | B 型 | A 型 | B 型 |
| 最高燃焼度 ^(注 1) (MWd/t) | | | 48,000 以下 | | 39,000 以下 | | 39,000 以下 | |
| 平均燃焼度 ^(注 2) (MWd/t) | | | 45,000 以下 | | | | 33,000 以下 | |
| 平均比出力 (MW/t) | | | 34.0 | | | | | |
| 冷却日数 | | | 5,479 日以上 | | | | 9,131 日以上 | |

(注 1) 最高燃焼度は燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度は中央部及び外周部に収納する全燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

1-1-3 表 収納物の燃焼条件及び冷却日数 (2/2) (乾式キャスク (タイプ 2))

| 燃焼条件 | | 燃料集合体の種類と型式 | | 17×17 燃料 | |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|--------------------------------|---------------|-----|
| | | | | 48,000MWd/t 型 | |
| | | | | A 型 | B 型 |
| 燃料集合体 | 最高燃焼度 ^(注 1) (MWd/t) | 中央部 | 48,000 以下 | | |
| | | 外周部 | 44,000 以下 | | |
| | 平均燃焼度 ^(注 2) (MWd/t) | | 44,000 以下 | | |
| | 平均比出力 (MW/t) | | 38.4 | | |
| | 冷却日数 | | 5,479 日 ^(注 3) 以上 | 6,209 日 以上 | |
| バーナブル ポイズン 集合体 | 照射日数 | | | | |
| | 冷却日数 | | 5,479 日以上 | | |

(注 1) 最高燃焼度は燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度は収納する全燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

(注 3) 回収ウラン燃料については、放射エネルギー及び発熱量が、通常のウラン燃料と同等以下となる期間 (7,305 日以上) 冷却したものを収納する。

2. 添付資料に関する補足説明資料

2-1 資料 10 に係る補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
 （使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 2-1 資料10に係る補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 (該当添付資料) |
|-----------|----------------------------|--|--|
| | (名称) | (概要) | |
| 2-1-1 | ABAQUS解析モデル | 密封容器及び外筒等の強度計算で用いたABAQUS解析モデルの概要を示す。 | 資料10-3-2-1 密封容器の強度計算方法 資料10-3-2-4 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの強度計算方法 |
| 2-1-2 | 各計算条件の概要 | 密封容器等の強度計算における計算条件の概要を示す。 | 資料10-3 キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度に関する説明書 |
| 2-1-3 | 長期健全性に係る各部位の温度制限値について | 長期健全性に係る各部位の温度制限値を示す。 | 資料10-3 別紙1 使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について |
| 2-1-4 | アルミニウム合金の材料規定の根拠 | アルミニウム合金の材料規定の根拠を示す。 | 資料10-3 別紙2 アルミニウム合金の材料特性について |
| 2-1-5 | 金属キャスク構造規格と設計・建設規格の同等性について | 適用規格である金属キャスク構造規格について設計・建設規格との同等性について示す。 | 資料10-3 キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度に関する説明書 |
| 2-1-6 | 貯蔵架台をクラス1支持構造物とする場合の強度評価結果 | 貯蔵架台についてクラス1支持構造物の強度評価を実施した場合においても、十分な強度を有することを示す。 | 資料10-3-3-9 貯蔵架台（タイプ1）の強度計算書 資料10-3-3-10 貯蔵架台（タイプ2）の強度計算書 |

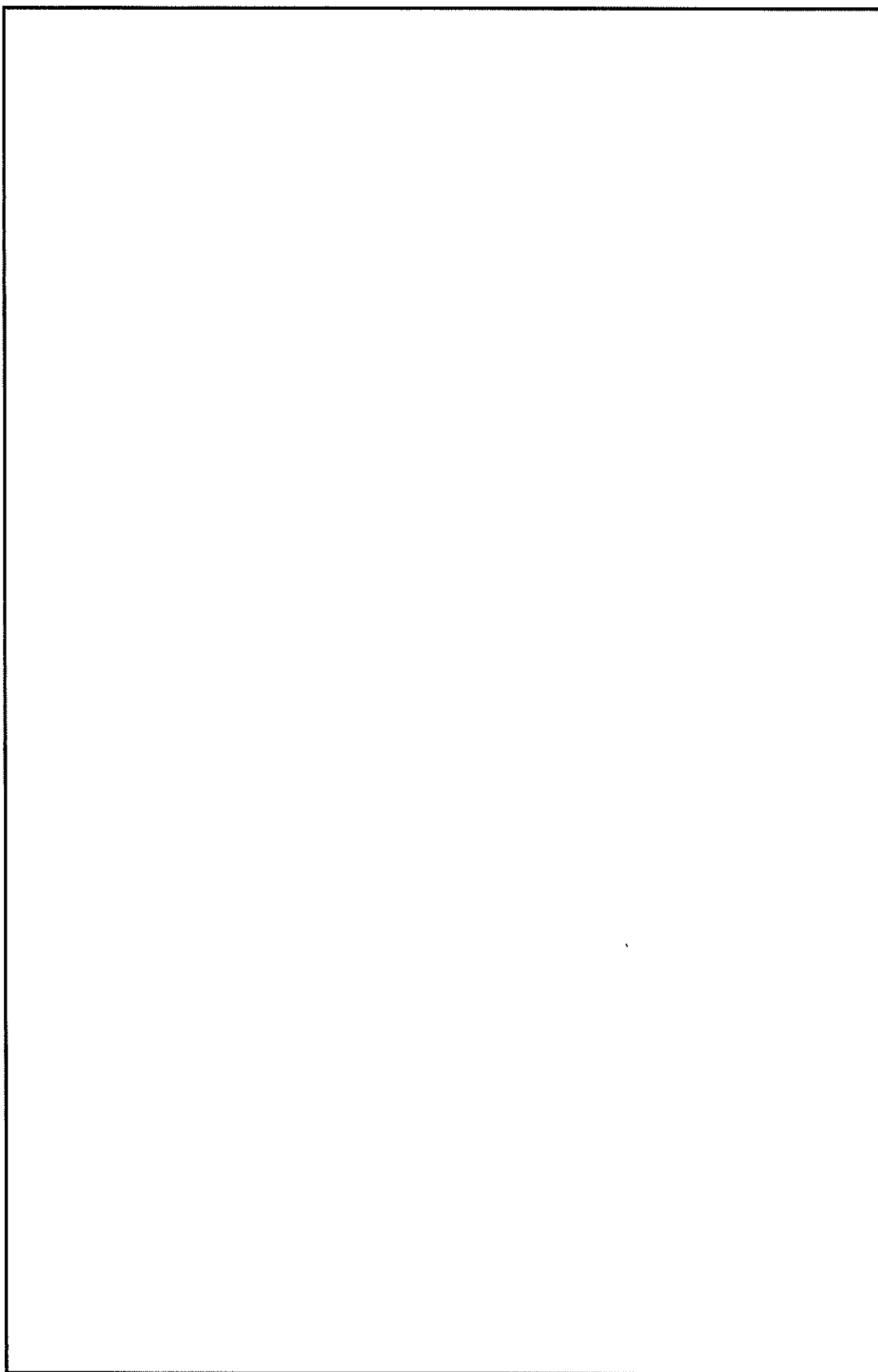
2-1-1 ABAQUS 解析モデル

1. 解析モデルの説明

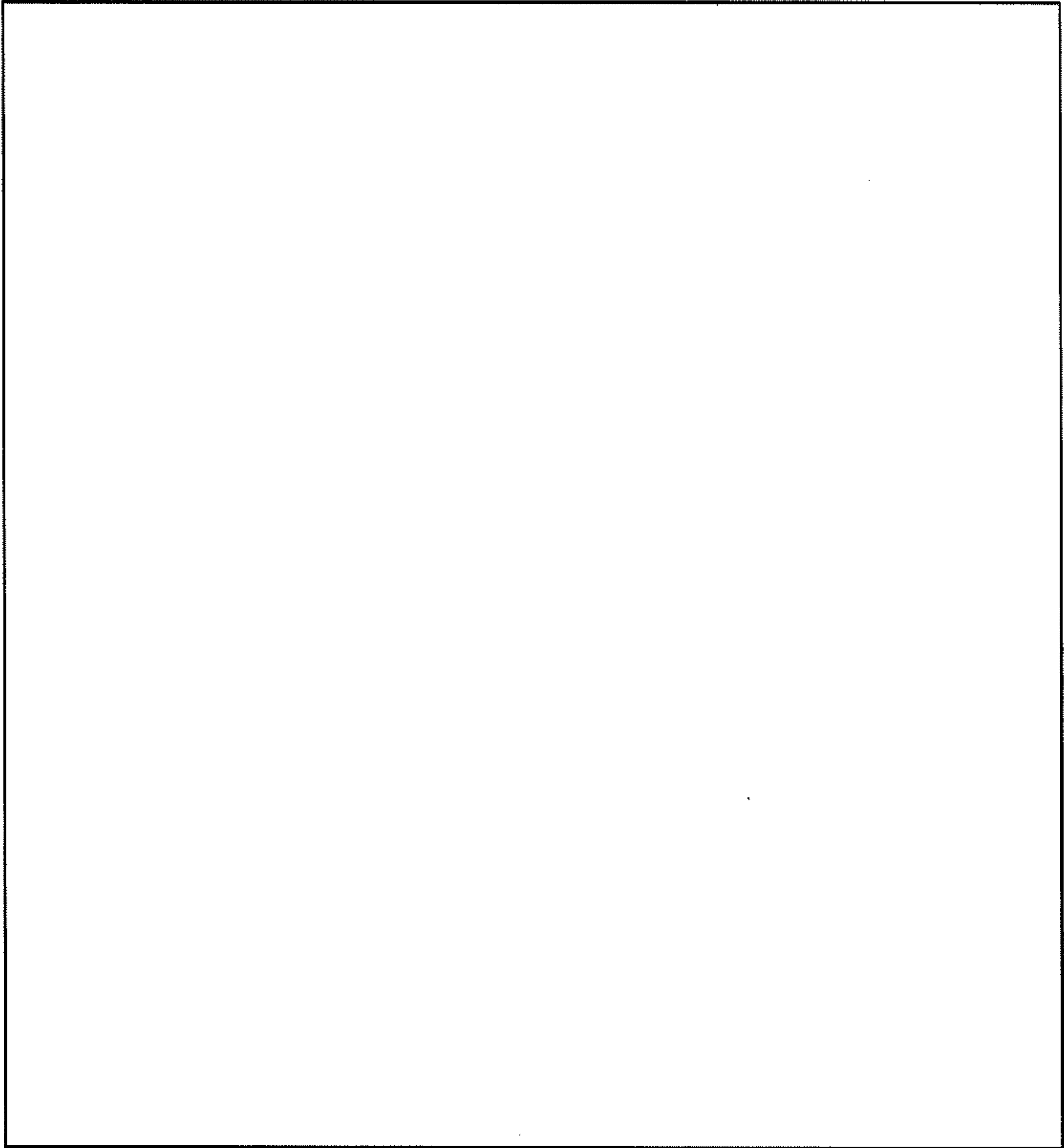
乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の密封容器並びに外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの解析は、有限要素法による構造解析コード（ABAQUS）を使用する。解析モデルを 2-1-1-1 図に示す。

解析モデルは、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋、外筒等によりモデル化される。モデル化範囲は、解析対象とした事象の各状態に応じた部位とした。各解析におけるモデル化範囲を 2-1-1-1 表に示す。乾式キャスクの貯蔵は、一次蓋及び二次蓋が取り付けられた状態（三次蓋は取り付けない状態）で行うため、設計時及び貯蔵時の解析は、三次蓋及び三次蓋ボルトをモデル化対象外とした。吊上げ時及び検査架台への衝突時は、乾式キャスクの取扱い中の事象である。乾式キャスクの取扱いは、三次蓋を取り付けた状態で行うため、2-1-1-1 表に示す全ての部位をモデル化範囲とした。乾式キャスクの耐圧試験は一次蓋が取り付けられた状態で行うため、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋及び三次蓋ボルトをモデル化対象外とした。

また、解析モデルは、三次元の 180° 対称モデルとし、三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。モデル化には公称寸法を用いた。一次蓋、二次蓋及び三次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。なお、中性子遮蔽材は慣性力による荷重が模擬できるよう質量体として考慮した。使用済燃料集合体、バスケット及び伝熱フィンモデル化せず、使用済燃料集合体及びバスケットは、胴内部に作用する荷重として考慮し、伝熱フィンは胴の質量に考慮した。



2-1-1-1 図 解析モデル 部材定義図 (1/2) (乾式キャスク (タイプ 1) の例)



2-1-1-1 図 解析モデル 部材定義図 (2/2) (乾式キャスク (タイプ1) の例)
(2-1-1-1 図 (1/2) と異なり、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及び三次蓋ボルトを
同時に示した断面表示としている)

2-1-1-1 表 各解析におけるモデル化範囲

| モデル化部位 | モデル化範囲 | | | | |
|-----------------|--------|-----|------|---------------|-----|
| | 設計時 | 貯蔵時 | 吊上げ時 | 検査架台 への衝突時 | 試験時 |
| 胴 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 胴（底板） | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 一次蓋 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 一次蓋ボルト | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 二次蓋 | ○ | ○ | ○ | ○ | — |
| 二次蓋ボルト | ○ | ○ | ○ | ○ | — |
| 三次蓋 | — | — | ○ | ○ | — |
| 三次蓋ボルト | — | — | ○ | ○ | — |
| 蓋部中性子 遮蔽材カバー | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 外筒 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 下部端板 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 底部中性子 遮蔽材カバー | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| トラニオン | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

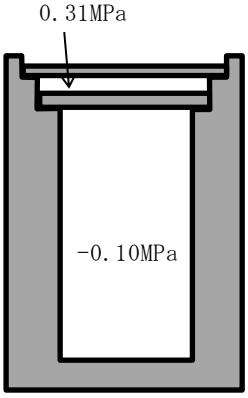
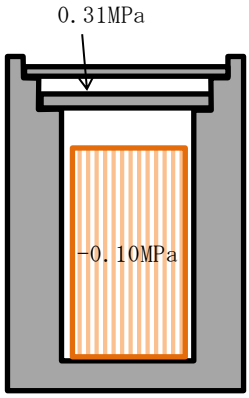
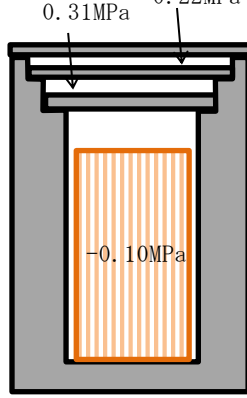
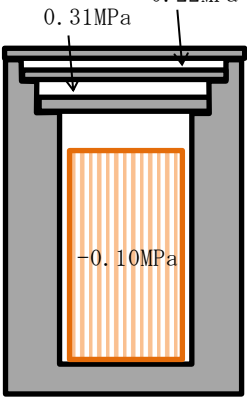
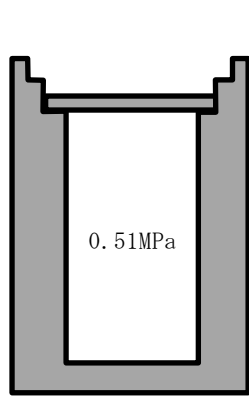
2-1-2 各計算条件の概要

1. 各計算条件の概要

乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の強度計算における計算条件の設定にあたっては、各評価事象における様態を考慮し、内圧、機械的荷重及び熱荷重を選定するとともに、各様態に応じた解析モデルを用いている。

各評価事象における計算条件の概要について、2-1-2-1表に示す。

2-1-2-1 表 各評価事象における計算条件

| 計算条件 | | 評価事象 | | | | |
|--------------------------|-----|---|--|---|---|---|
| | | 設計時 | 貯蔵時 | 吊上げ時 | 検査架台への衝突時 | 試験時 |
| 評価概要 | |  |  |  |  |  |
| モデル化 範囲 ^{※1} | 二次蓋 | ○ | ○ | ○ | ○ | — |
| | 三次蓋 | — | — | ○ | ○ | — |
| 温度分布 | | 貯蔵時 | 貯蔵時 | 輸送時 | 輸送時 | 常温 |
| 収納物 ^{※1} | | — | ○ | ○ | ○ | — |
| 荷重条件 | | 胴内圧力：-0.10MPa 一二次蓋間圧力：0.31MPa | 胴内圧力：-0.10MPa 一二次蓋間圧力：0.31MPa 自重：1g（垂直） | 胴内圧力：-0.10MPa 一二次蓋間圧力：0.31MPa 二三次蓋間圧力：0.22MPa 吊上げ荷重：1.3g （垂直） | 胴内圧力：-0.10MPa 一二次蓋間圧力：0.31MPa 二三次蓋間圧力：0.22MPa 衝突荷重：3.4g （水平） | 胴内圧力：0.51MPa 自重：1g（垂直） |

※1 凡例 ○：あり —：なし

2-1-3 長期健全性に係る各部位の温度制限値について

1. はじめに

本資料は資料 10-3 別紙 1「使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について」における各部位の温度制限値を示すものである。

2. 温度制限値

乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の主要な構成部位の温度制限値について 2-1-3-1 表に示す。

2-1-3-1 表 乾式キャスク（タイプ 1,2）の主要な構成部位の温度制限値

| 構成部材 | 材質 | 温度制限値 (°C以下) | 根拠 |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|---|
| 胴、一次蓋、二次蓋 | 炭素鋼 (GLF1) | 350 | 「(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).」において設計用強度と物性値が規定されている範囲に制限する。 |
| 外筒、 蓋部中性子遮蔽材カバー | 炭素鋼 (SGV480) | | |
| トラニオン | ステンレス鋼 (SUS630) | | |
| 一次蓋ボルト、 二次蓋ボルト | 合金鋼 (SNB23-3) | | |
| 下部端板、 底部中性子遮蔽材カバー | ステンレス鋼 (SUS304) | 425 | |
| バスケット | アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) | 250 | 「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).」において設計用強度と物性値が規定されている範囲に制限する。 |
| 伝熱フィン | 銅 (C1020) | 200 | 「(一財)日本規格協会、『圧力容器の設計(JIS B 8267:2015)』,(2015).」において設計用強度と物性値が規定されている範囲に制限する。 |
| 金属ガスケット | ニッケル基合金/ アルミニウム | 130 | 「(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).」において長期の健全性が確認されている範囲に制限する。 |
| 中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部) | 樹脂 (レジン) | 149 | 「BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).」において示されているエポキシ系レジンの使用可能温度範囲に制限する。 |
| 使用済燃料被覆管 | ジルカロイ | 275 | 「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).」において示されている機械的劣化を防止する制限温度範囲に制限する。 |

2-1-4 アルミニウム合金の材料規定の根拠

1. はじめに

本資料は資料 10-3 別紙 2「アルミニウム合金の材料特性について」におけるアルミニウム合金の強度に係る規定の設定根拠を示すものである。

2. 設定根拠

乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）に使用するアルミニウム合金（MB-A3004-H112）の強度に係る規定の設定根拠については、当該材料のデータを取得した三菱重工業(株)が同社の別型式のキャスクの型式指定申請（含む補正申請）（平成 29 年 8 月 10 日付 L5-95HU131）の添付書類 8-2-4 において設計貯蔵期間（60 年）中の熱影響を考慮した強度設定等をデータパッケージとしてまとめており、その設定が妥当であることを含め認可されている。

乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）においては、認可されているキャスクと同じアルミ材を使用し、使用環境も同等でかつ使用温度範囲内であることから、同規定が使用可能である。資料 15「外運搬規則第二十一条第二項の規定による容器の設計に関する原子力規制委員会の承認を受けたことに関する説明書」に示す核燃料輸送物設計承認においても、当該材料を使用することを含めて承認を受けている。

当該データパッケージの概要及び、アルミニウム合金 MB-A3004-H112 材の設計強度の設定の考え方を、以下に概略を示す。

①データパッケージ「バスケットプレート用材料アルミニウム合金（MB-A3004-H112）について」の概要

主に、以下の材料仕様や特性、設計強度について記載されている。

- ・材料の仕様（適合規格、化学成分、機械的性質、寸法の許容差）
- ・使用条件（適用範囲、温度範囲）
- ・製造工程及び製造条件（製造方法、熱処理、品質管理）
- ・化学成分、マクロ及びミクロ組織
- ・機械的性質（常温引張特性、靱性（初期材、時効材））
- ・高温引張特性（初期材、時効材）、低温引張試験
- ・クリープ特性
- ・耐食性
- ・設計強度（設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、許容引張応力）
- ・熱物性、弾性定数、線膨張係数、照射影響

②アルミニウム合金 MB-A3004-H112 材の設計強度の設定の考え方

設計強度は、JSME「材料規格」の新規材料採用ガイドラインに準拠し、データパッケージに記載されている製品形状材料の常温試験から得られた常温規定値に、高温試験結果等を考慮して以下の通り、各温度の設計強度（設計降伏点、設計引張強さ、設計応力強さ、許容引張応力）が算出されている。

(1) 設計降伏点

JSME 発電用原子力設備規格 材料規格新規採用ガイドラインに準拠し、規定値にトレンドカーブから算出した結果を 2-1-4-1 表に示す。

なお、当該材料では、時効による強度低下を考慮するため、時効後強度比率 A_T を乗じて、各温度の設計降伏点を算出する。

2-1-4-1 表 各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

| 項目 \ 温度(°C) | -40~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325* | 350* |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 常温の耐力規定値 S_{Y0} | 85 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 耐力比 R_T (トレンドカーブ) | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.963 | 0.901 | 0.814 | 0.705 | 0.582 | 0.459 | 0.356 | 0.298 |
| 時効後強度比率 A_T (トレンドカーブ) | 0.668 | 0.683 | 0.684 | 0.691 | 0.704 | 0.722 | 0.742 | 0.760 | 0.773 | 0.783 | 0.791 | 0.806 | 0.843 |
| $S_{Y0} \times R_T \times A_T$ (MPa) (=設計降伏点 S_y , 時効後) | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 52 | 46 | 38 | 30 | 24 | 21 |

注*：325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

R_T ：温度トレンドカーブ（1.0を超える分は1.0へ修正）

$$= 5.79491 \times 10^{-13} T^5 - 1.66013 \times 10^{-10} T^4 - 8.26469 \times 10^{-8} T^3 + 2.25276 \times 10^{-5} T^2 - 1.41233 \times 10^{-3} T + 1.02372$$

S_{Y0} ：常温の耐力規定値

時効後強度比率 A_T ：初期材に対する時効後の0.2%耐力の比（最小値トレンドカーブ）

$$= 1.12046 \times 10^{-12} T^5 - 1.01355 \times 10^{-9} T^4 + 3.26910 \times 10^{-7} T^3 - 4.40188 \times 10^{-5} T^2 + 2.62581 \times 10^{-3} T + 0.625057$$

(2) 設計引張強さ

JSME 発電用原子力設備規格 材料規格新規採用ガイドラインに準拠し、規定値にトレンドカーブから算出した結果を 2-1-4-2 表に示す。

なお、当該材料では、時効による強度低下を考慮するため、時効後強度比率 A_T を乗じて、各温度の設計引張強さを算出する。

2-1-4-2 表 各温度における設計引張強さ S_u (MPa)

| 項目 \ 温度(°C) | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325* | 350* |
|--|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 常温の引張強さ規定値 S_T | 185 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 引張強さ比 R_T (トレンドカーブ) | 1.000 | 0.999 | 1.000 | 0.983 | 0.932 | 0.852 | 0.750 | 0.636 | 0.522 | 0.421 | 0.341 | 0.284 | 0.245 |
| 時効後強度比率 A_T (トレンドカーブ) | 0.828 | 0.859 | 0.849 | 0.834 | 0.817 | 0.803 | 0.796 | 0.796 | 0.804 | 0.818 | 0.837 | 0.857 | 0.871 |
| $S_T \times R_T \times A_T$ (MPa) (=設計引張強さ S_u , 時効後) | 153 | 153 | 153 | 151 | 140 | 126 | 110 | 93 | 77 | 63 | 52 | 44 | 39 |

注* : 325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

R_T : 温度トレンドカーブ (1.0 を超える分は 1.0 へ修正)

$$= -1.95417 \times 10^{-12} T^5 + 2.10725 \times 10^{-9} T^4 - 7.74787 \times 10^{-7} T^3 + 1.06151 \times 10^{-4} T^2 - 5.69199 \times 10^{-3} T + 1.09402$$

S_T : 常温の引張強さ規定値

時効後強度比率 A_T : 初期材に対する時効後の引張強さの比 (最小値トレンドカーブ)

$$= -1.41195 \times 10^{-10} T^4 + 1.22362 \times 10^{-7} T^3 - 3.33818 \times 10^{-5} T^2 + 3.03301 \times 10^{-3} T + 0.771645$$

(3) 設計応力強さ

JSME 発電用原子力設備規格 材料規格新規採用ガイドラインに準拠し、(1)項及び(2)項の結果を引用し、算出した結果を 2-1-4-3 表に示す。

なお、2-1-4-3 表に示す $1.0/3S_T \times R_T \times A_T$ について、材料規格新規材料採用ガイドラインでは $1.1/3S_T \times R_T$ となっている。材料規格新規材料採用ガイドラインで採用している 1.1 倍について、アルミニウム合金では高温強度特性における動的ひずみ時効に伴う強度向上は確認されているが、全評価温度域において動的ひずみ時効に伴う強度向上が明確ではない。そのため、保守的な評価となるよう、本材料では 1.0 倍を採用する。また、当該材料では、時効による強度低下を考慮するため、時効後強度比率 A_T (2-1-4-1 表参照) 又は A_T (2-1-4-2 表参照) を乗じて、各温度の設計応力強さを算出する。

2-1-4-3 表 各温度における設計応力強さ S_m

| 試験温度(°C) | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325* | 350* |
|-----------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $1/3S_T$ | 61.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $1.0/3S_T \times R_T \times A_T$ | 51.1 | 52.9 | 52.4 | 50.5 | 47.0 | 42.2 | 36.8 | 31.2 | 25.9 | 21.3 | 17.6 | 15.0 | 13.1 |
| $2/3S_{Y0}$ | 56.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $2/3S_{Y0} \times R_T \times A_T$ | 37.8 | 38.7 | 38.8 | 39.1 | 39.9 | 39.4 | 37.9 | 35.0 | 30.9 | 25.8 | 20.6 | 16.3 | 14.2 |
| 最小値 | 37.8 | 38.7 | 38.8 | 39.1 | 39.9 | 39.4 | 36.8 | 31.2 | 25.9 | 21.3 | 17.6 | 15.0 | 13.1 |
| S_m (MPa) | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 36 | 31 | 25 | 21 | 17 | 14 | 13 |

注* : 325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

S_{Y0} : 常温における降伏点 (耐力) の規定値

R_T : 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)

S_T : 常温における引張強さの規定値

R_T : 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ

A_T : 引張強さの時効後強度比率 (初期材に対する時効後の引張強さの比)

A_T : 0.2%耐力の時効後強度比率 (初期材に対する時効後の 0.2%耐力の比)

(4) 許容引張応力

JSME 発電用原子力設備規格 材料規格新規採用ガイドラインに準拠し、クリープ試験、(1)項及び(2)項の結果を引用し、算出した結果を 2-1-4-4 表に示す。

なお、2-1-4-4 表に示す $1/4S_T$ 及び $1.0/4S_T \times R_T \times A_T$ について、材料規格新規材料採用ガイドラインでは $1/3.5S_T$ 及び $1.1/3.5S_T \times R_T$ となっている。材料規格新規材料採用ガイドラインで採用している 1.1 倍について、アルミニウム合金では高温強度特性における動的ひずみ時効に伴う強度向上は確認されているが、全評価温度域において動的ひずみ時効に伴う強度向上が明確ではない。また、係数 1/3.5 は、使用実績があり材料強度特性上の問題が生じていないことから定められた係数である。よって、保守的な評価となるよう、本材料では 1.0 倍及び係数 1/4 を採用する。

さらに、当該材料では、時効による強度低下を考慮するため、時効後強度比率 A_T (2-1-4-1 表参照) 又は A_T (2-1-4-2 表参照) を乗じて、各温度の許容引張応力を算出する。

2-1-4-4 表 各温度における許容引張応力 S

| 試験温度(°C) | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275* | 300* | 325* | 350* |
|-----------------------------------|------------|------|---------|--------|--------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| $1/4S_T$ | 46.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $1.0/4S_T \times R_T \times A_T$ | 38.3 | 39.7 | 39.3 | 37.9 | 35.2 | 31.7 | 27.6 | 23.4 | 19.4 | 16.0 | 13.2 | 11.2 | 9.9 |
| $2/3S_{Y0}$ | 56.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $2/3S_{Y0} \times R_Y \times A_Y$ | 37.8 | 38.7 | 38.8 | 39.1 | 39.9 | 39.4 | 37.9 | 35.0 | 30.9 | 25.8 | 20.6 | 16.3 | 14.2 |
| S_{Ravg} | - | - | 92.0 | 67.6 | 49.6 | 36.4 | 26.7 | 19.6 | 14.4 | (10.6) | (7.8) | (5.7) | (4.2) |
| S_{Rmin} | - | - | (71.2) | (51.4) | 37.1 | 26.8 | 19.3 | 13.9 | 10.1 | (7.3) | (5.2) | (3.8) | (2.7) |
| $10^{(1/n)}$ | - | - | - | - | - | - | 0.72 | - | 0.78 | - | 0.87 | - | 0.73 |
| F_{avg} | - | - | (0.67) | (0.67) | (0.67) | (0.67) | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.67 |
| $F_{avg}S_{Ravg}$ | - | - | (61.7) | (45.3) | (33.2) | (24.4) | 17.9 | 13.2 | 9.7 | (7.1) | (5.2) | (3.8) | (2.7) |
| $0.8S_{Rmin}$ | - | - | (57.0) | (41.1) | (29.7) | (21.4) | 15.5 | 11.2 | 8.1 | (5.8) | (4.2) | (3.0) | (2.2) |
| $1.0S_C$ | - | - | (129.0) | (81.6) | (51.6) | (32.7) | 20.7 | 13.1 | (8.3) | (5.2) | (3.3) | (2.1) | (1.3) |
| 最小値 | 37.8 | 38.7 | 38.8 | 37.9 | 29.7 | 21.4 | 15.5 | 11.2 | 8.1 | 5.2 | 3.3 | 2.1 | 1.3 |
| S (MPa) | 37 | 37 | 37 | 37 | 29 | 21 | 15 | 11 | 8 | 5 | 3 | 2 | 1 |

注* : 275°C、300°C、325°C、350°Cの値は最高温度での評価値であり、規定値ではない。

括弧内の数値 : クリープ試験及びクリープ破断試験を実施した温度以下又は応力以下における外挿値である。これらクリープ外挿値が引張特性に起因する諸値よりも小さな値となった場合(すなわち 150~175°C)においては、安全側の評価のためにクリープ外挿値を採用した。

S_{Ravg} : 100,000 時間での破断を生じる平均応力

S_{Rmin} : 100,000 時間での破断を生じる最小応力

S_C : 0.01% / 1,000 時間のクリープ速度を生じる応力の平均値

F_{avg} : S_{Ravg} に適用する係数。ただし、0.67 を超えない値とする。

$$F_{avg} = 10^{(1/n)}$$

n : 100,000 時間でのクリープ破断時間の対数と応力の対数との曲線の傾きで下式で表される負の値

$$n = \Delta \log(\text{クリープ破断時間}) / \Delta \log(\text{応力})$$

S_{Y0} : 常温における降伏点 (耐力) の規定値

R_Y : 当該温度での降伏点 (耐力) / 常温の降伏点 (耐力)

S_T : 常温における引張強さの規定値

R_T : 当該温度での引張強さ / 常温の引張強さ

A_T : 引張強さの時効後強度比率 (初期材に対する時効後の引張強さの比)

A_Y : 0.2%耐力の時効後強度比率 (初期材に対する時効後の 0.2%耐力の比)

2-1-5 金属キャスク構造規格と設計・建設規格の 同等性について

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第26条2項第六号ニでは、乾式キャスクが使用される条件に対して適切な材料および構造であることが要求されており、本申請においては金属キャスク構造規格に基づく評価を実施している。

金属キャスク構造規格における強度評価に係る規定については、下表のとおり各評価部位に対して比較した結果、設計・建設規格の規定に対し不足または差異が無いため、同等であることを確認した。(詳細については別紙参照)

表 金属キャスク構造規格と設計・建設規格の同等性

| 評価部位 | 金属キャスク 構造規格 適用分類 | 設計・建設規格 適用分類 | 比較結果 |
|--|------------------------|-----------------|--|
| 密封容器 (本体胴、一次蓋、二次蓋、カバープレート、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、カバープレートボルト) | 密封容器 | クラス1容器 | 同等である (密封シール部を弾性範囲に抑える等、金属キャスク構造規格が一部保守的) |
| バスケット | バスケット | 炉心支持構造物 | 同等である (アルミ合金バスケットを採用するため、追加的な評価条件を設けている) |
| トラニオン | トラニオン | クラス1支持構造物 | 同等である |
| 外筒、下部端板、 蓋部・底部レジンカバー | 中間胴 | クラス1支持構造物 | 同等である |

表(1/2) 評価基準の比較[金属キャスク構造規格と設計・建設規格]

| 計算書 | | 金属キャスク構造規格に準拠した評価基準 | | | | 設計・建設規格に準拠した評価基準 | | | | 備考 | | | | | |
|-----------|------------------|---------------------|------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|--|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| 密封容器 | ボルト以外 | 設計条件 | 一次一般膜応力強さ | MCD-1311.1(1) | $P_m \leq S_m$ | ボルト以外 | 設計条件 | | | | <p>不足なし (金属キャスク構造規格では、解説MCD-1100-1に基づき一概に包絡できる機械的荷重の組み合わせが設定できないことから、設計条件は最高使用圧力に対する評価として実施)</p> <p>差異なし (設計・建設規格では、設計条件は最高使用圧力と機械的荷重の組み合わせで評価を実施。)</p> <p>差異なし</p> <p>差異なし (金属キャスク構造規格では外面に圧力を受ける平板の評価方法が明確化されている)</p> <p>差異なし</p> <p>不足なし (金属キャスク構造規格では、一次+二次応力強さも S_y に入るよう、より厳しい基準を設定)</p> <p>不足なし (金属キャスク構造規格では、一次局部膜応力や一次膜+一次曲げ応力強さも S_y に入るよう、より厳しい基準を設定)</p> <p>差異なし</p> | | | | |
| | | | 一次局部膜応力強さ | MCD-1311.1(2) | $P_L \leq 1.5S_m$ | | | ボルト以外 | 設計条件 | | | | | | |
| | | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | MCD-1311.1(3) | $P_L + P_b \leq \alpha S_m$ | | | | | ボルト以外 | | 設計条件 | | | |
| | | 供用状態 A 及び B | 一次一般膜応力強さ | MCD-1311.1(1) | $P_m \leq S_m$ | クラス1容器 | ボルト以外 | | | | | | 供用状態 A 及び B | 一次一般膜応力強さ | PVB-3111 (1)a. |
| | | | 一次局部膜応力強さ | MCD-1311.1(2) | $P_L \leq 1.5S_m$ | | | 供用状態 A 及び B | 供用状態 A 及び B | | | | | 一次局部膜応力強さ | PVB-3111 (1)b. |
| | | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | MCD-1311.1(3) | $P_L + P_b \leq \alpha S_m$ | | | | | 供用状態 A 及び B | | 供用状態 A 及び B | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (1)c. |
| | | | 一次+二次応力強さ | MCD-1312 (1) | $P_L + P_b + Q \leq 3S_m$ | | | | | | | | 供用状態 A 及び B | 供用状態 A 及び B | 一次+二次応力強さ |
| | | | 疲労評価 | MCD-1314 (1) | $U_f \leq 1.0$ | | | 供用状態 A 及び B | 供用状態 A 及び B | | | | | | 疲労評価 |
| | | | MCD-1332(注2)(注3) | 疲労評価要否 | 供用状態 A 及び B | 供用状態 A 及び B | PVB-3140(注2) | | | 疲労評価要否 | | | | | |
| | | 平均支圧応力 | MCD-1316.1 (2) | $\sigma_p \leq S_y$ | | | 供用状態 A 及び B | | | 供用状態 A 及び B | | 平均支圧応力 | PVB-3116 (2) | $\sigma_p \leq S_y$ | |
| | | 圧縮応力 | MCD-1317 (1) | $\sigma_c \leq \text{MIN}[S_m, B]$ | | | | 供用状態 A 及び B | 供用状態 A 及び B | | | 圧縮応力 | PVB-3117 (1) | $\sigma_c \leq \text{MIN}[S_m, B]$ | |
| | | 試験状態 | 一次一般膜応力強さ | MCD-1311.4 (1) | $P_m \leq 0.9S_y$ | ボルト以外 | | | | | | 試験条件 | 一次一般膜応力強さ | PVB-3111 (4)a. | $P_m \leq 0.9S_y$ |
| | 一次局部膜応力強さ | | MCD-1311.4 (2) | $P_L \leq 1.35S_y$ | ボルト以外 | | 試験条件 | | | 一次局部膜応力強さ | PVB-3111 (4)b. | | $P_L \leq 1.35S_y$ | | |
| | 一次膜+一次曲げ応力強さ | | MCD-1311.4 (3) | $P_m + P_b \leq 1.35S_y$ | | | | ボルト以外 | 試験条件 | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (4)c. | | $P_m + P_b \leq 1.35S_y$ | | |
| | 外圧 | 外圧を受ける密封容器 | MCD-1410(1)(胴) | $P \leq P_a$ | | ボルト以外 | | | | 外圧 | 外圧を受ける容器 | PVB-3210 (1) (胴) | $P \leq P_a$ | | |
| | | | MCD-1420(平板) | MCD-1311 による | ボルト以外 | | 外圧 | | | | | 外圧を受ける容器 | PVB-3210 (1) (胴) | $P \leq P_a$ | |
| | 穴の補強 | 補強要否の評価 | MCD-1700 | 穴周辺部も上記の設計条件、供用状態 A 及び B、試験状態の基準を満足するか。 | | ボルト以外 | | 穴の補強 | 補強要否の評価 | PVB-3510 | 穴周辺部も上記の設計条件、供用状態 A 及び B、試験状態の基準を満足するか。 | | | | |
| | 密封シール部 | 供用状態 A 及び B | 一次一般膜応力強さ | MCD-1318.1 (1) | $P_m \leq S_y$ | | ボルト | 設計条件 | 一次一般膜応力強さ | PVB-3111 (1)a. | $P_m \leq S_m$ | | | | |
| | | | 一次局部膜応力強さ | MCD-1318.1 (2) | $P_L \leq S_y$ | 設計条件 | | | 一次局部膜応力強さ | PVB-3111 (1)b. | $P_L \leq 1.5S_m$ | | | | |
| | | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | MCD-1318.1 (3) | $P_L + P_b \leq S_y$ | | | | 設計条件 | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (1)c. | $P_L + P_b \leq \alpha S_m$ | | | |
| | | | 一次+二次応力強さ | MCD-1318.1 (4) | $P_L + P_b + Q \leq S_y$ | | | | | 設計条件 | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (1)c. | $P_L + P_b \leq \alpha S_m$ | | |
| | | 試験状態 | 一次一般膜応力強さ | MCD-1318.2 (1) | $P_m \leq 0.9S_y$ | | | 試験状態 | | | 一次一般膜応力強さ | PVB-3111 (4)a. | $P_m \leq 0.9S_y$ | | |
| | | | 一次局部膜応力強さ | MCD-1318.2 (2) | $P_L \leq S_y$ | 試験状態 | | | | | 一次局部膜応力強さ | PVB-3111 (4)b. | $P_L \leq 1.35S_y$ | | |
| | | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | MCD-1318.2 (3) | $P_L + P_b \leq S_y$ | | | | 試験状態 | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (4)c. | $P_L + P_b \leq 1.35S_y$ | | |
| 一次+二次応力強さ | | | MCD-1318.2 (4) | $P_L + P_b + Q \leq S_y$ | 試験状態 | | | | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (4)c. | $P_L + P_b \leq 1.35S_y$ | | | |
| ボルト | 設計条件 | 平均引張応力 | MCD-1321.1 (1) | $\sigma_m \leq S_m$ | | | ボルト | 設計条件 | | 平均引張応力 | PVB-3121 (1) | $\sigma_m \leq S_m$ | | | |
| | | 供用状態 A 及び B | 平均引張応力 | MCD-1321.1 (2) | | $\sigma_m \leq 2S_m$ | | | | 供用状態 A 及び B | 平均引張応力 | PVB-3121 (2)a. | $\sigma_m \leq 2S_m$ | | |
| | | | 平均引張応力+曲げ応力 | MCD-1321.1 (3) | | $\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$ | | | 供用状態 A 及び B | | 平均引張応力+曲げ応力 | PVB-3121 (2)b. | $\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$ | | |
| | | | 疲労評価 | MCD-1322 (1) | $U_f \leq 1.0$ | 供用状態 A 及び B | | | | | 疲労評価 | PVB-3122 | $U_f \leq 1.0$ | | |
| | MCD-1331 (3)(注4) | | 供用状態 A 及び B | PVB-3130 (3)(注4) | | | | | | | | | | | |

表(2/2) 評価基準の比較[金属キャスク構造規格と設計・建設規格]

| 計算書 | 金属キャスク構造規格に準拠した評価基準 | | | | 設計・建設規格に準拠した評価基準 | | | | 備考 | | |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|---|------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|--|
| バスケット | バスケット | 供用状態 A (貯蔵時) | 一次一般膜応力強さ | 原規規発第1709261号にて型式設計特定容器等の型式指定において指定を受けた基準 | 炉心支持構造物 | 設計条件 | | | | 不足なし (アルミニウム合金特有の基準) | |
| | | | 一次一般膜+一次曲げ応力強さ | | | | $P_m + P_b \leq K_0 S$ | | | | |
| | | | せん断応力 | | | | $\tau \leq 0.6 S$ | | | | |
| | | | 圧縮応力 | | | | $\sigma_c \leq f_c$ | | | | |
| | | 供用状態 A 及び B (短期荷重が作用する場合) | 一次一般膜応力強さ | $P_m \leq S_m$ | | 一次一般膜+一次曲げ応力強さ | $P_m + P_b \leq \alpha S_m$ | 一次一般膜応力強さ | CSS-3111 (1)a. | $P_m \leq S_m$ | 差異なし |
| | | | 一次一般膜+一次曲げ応力強さ | | | せん断応力 | $\tau \leq 0.6 S_m$ | 一次一般膜+一次曲げ応力強さ | CSS-3111 (1)b. | $P_m + P_b \leq 1.5 S_m$ | |
| | | | せん断応力 | | | 圧縮応力 | $\sigma_c \leq f_c$ | せん断応力 | CSS-3114 (1) | $\tau \leq 0.6 S_m$ | |
| | | | 圧縮応力 | | | | | 圧縮応力 | CSS-3116.2 | $\sigma_c \leq f_c$ | |
| トランニオン | トランニオン | 供用状態 A 及び B | せん断応力 (一次) | MCD-3311.1 (2) | クラス1支持構造物 | 供用状態 A 及び B | せん断応力 (一次) | SSB-3121.1 (2) | せん断応力 (一次) $\leq f_s$ | 差異なし | |
| | | | 曲げ応力 (一次) | MCD-3311.1 (4) | | | 曲げ応力 (一次) | SSB-3121.1 (4) | 曲げ応力 (一次) $\leq f_b$ | | |
| | | | 支圧応力 (一次) | MCD-3311.1 (5) | | | 支圧応力 (一次) | SSB-3121.1 (5) | 支圧応力 (一次) $\leq f_p$ | | |
| | | | 組合せ応力 (一次) | MCD-3311.1 (6) | | | 組合せ応力 (一次) | SSB-3121.1 (6) | 組合せ応力 (一次) $\leq f_t$ | | |
| | | | せん断応力 (一次+二次) | MCD-3312.1 (2) | | | せん断応力 (一次+二次) $\leq 3f_s$ | SSB-3122.1 (2) | せん断応力 (一次+二次) $\leq 3f_s$ | | |
| | | | 曲げ応力 (一次+二次) | MCD-3312.1 (3) | | | 曲げ応力 (一次+二次) $\leq 3f_b$ | SSB-3122.1 (3) | 曲げ応力 (一次+二次) $\leq 3f_b$ | | |
| | | | 支圧応力 (一次+二次) | MCD-3312.1 (4) | | | 支圧応力 (一次+二次) $\leq 1.5f_p$ | SSB-3122.1 (4) | 支圧応力 (一次+二次) $\leq 1.5f_p$ | | |
| | | | 疲労評価 | MCD-3313 | | | $U_f \leq 1.0$ | | | | 不足なし (トランニオンは繰り返し使用されるため、疲労評価の規定有り) |
| 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバ、底部中性子遮蔽材カバ | 中間胴 | 供用状態 A 及び B | 引張応力 (一次) | MCD-3721.1 | クラス1支持構造物 | 供用状態 A 及び B | 引張応力 (一次) | SSB-3121.1 (1) | 引張応力 (一次) $\leq f_t$ | 差異なし | |
| | | | せん断応力 (一次) | MCD-3721.1 | | | せん断応力 (一次) | SSB-3121.1 (2) | せん断応力 (一次) $\leq f_s$ | | |
| | | | 圧縮応力 (一次) | MCD-3721.1 | | | 圧縮応力 (一次) | SSB-3121.1 (3) | 圧縮応力 (一次) $\leq f_c$ | | |
| | | | 曲げ応力 (一次) | MCD-3721.1 | | | 曲げ応力 (一次) | SSB-3121.1 (4) | 曲げ応力 (一次) $\leq f_b$ | | |
| | | | 組合せ応力 (一次) | MCD-3721.1 | | | 組合せ応力 (一次) | SSB-3121.1 (6) | 組合せ応力 (一次) $\leq f_t$ | | |
| | | | 引張応力及び圧縮応力 (一次+二次) | MCD-3722.1 | | | 引張応力及び圧縮応力 (一次+二次) $\leq 3f_t$ | SSB-3122.1 (1) | 引張応力及び圧縮応力 (一次+二次) $\leq 3f_t$ | | |
| | | | せん断応力 (一次+二次) | MCD-3722.1 | | | せん断応力 (一次+二次) $\leq 3f_s$ | SSB-3122.1 (2) | せん断応力 (一次+二次) $\leq 3f_s$ | | |
| | | | 曲げ応力 (一次+二次) | MCD-3722.1 | | | 曲げ応力 (一次+二次) $\leq 3f_b$ | SSB-3122.1 (3) | 曲げ応力 (一次+二次) $\leq 3f_b$ | | |

(注1) 胴、一次蓋、二次蓋で使用する GLF1 については、設計・建設規格におけるクラス1容器として適用可能な材料ではないが、金属キャスク構造規格においては密封容器として適用可能な材料であり、クラス1容器の材料規定と同様に、材料検査において破壊靱性試験及び非破壊検査が要求されている。その他の部材については設計・建設規格における要求と差異はない。

(注2) MCD-1332(PVB-3140)に適合する場合は、MCD-1314(PVB-3114)に示す疲労解析を行わなくてよい。

(注3) 密封シール部も含めて、MCD-1332 に示す疲労評価要否を評価する。

(注4) MCD-1322(1)(PVB-3122)に示される疲労評価において、MCD-1331 (3)(PVB-3130 (3))の疲労強度減少係数または応力集中係数を考慮。

(補足) 密封シール部に関する規定について

密封シール部に対する金属キャスク構造規格と設計・建設規格の許容応力を表に示す。下表の通り、金属キャスク構造規格の供用状態A、Bの一次一般膜応力強さの許容応力以外は、金属キャスク構造規格の許容応力の方が厳しい要求になっている。

これは、金属キャスク構造規格における密封シール部が、乾式キャスクの4つの安全機能の内の1つである閉じ込め機能を確保する「一次蓋、胴の密封境界となる金属ガasketと接触する部分」に該当し、部分的に塑性変形してもシール機能に影響を与えることから、弾性範囲内収めることを目的とした S_y 以下を許容応力としていると考える。

一方、一次一般膜応力強さにおいては、設計・建設規格のクラス1容器の許容応力の方が $2/3S_y$ 相当と厳しくなっている。これは、クラス1容器において、一次一般膜応力が S_y を超えると崩壊限界を超えるため、1.5の安全率を見込んで設定しているものであり、乾式キャスクの圧力容器としての崩壊限界の防止は、ボルト以外の部位(密封シール部含む)の評価において、クラス1容器と同じ $2/3S_y$ 相当の基準で評価している。

表 密封シール部における金属キャスク構造規格と設計・建設規格の許容応力の比較

| 金属キャスク構造規格に準拠した評価基準(密封シール部) | | | | 設計・建設規格に準拠した評価基準(クラス1容器) | | | | 比較 |
|-----------------------------|--------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|----------------|---|----|
| 供用状態 A B | 一次一般膜応力強さ | MCD-1318.1 (1) | $P_m \leq S_y$ | 設計条件 | 一次一般膜応力強さ | PVB-3111 (1)a. | $P_m \leq S_m$ $\cong 2/3S_y^{**}$ | × |
| | 一次局部膜応力強さ | MCD-1318.1 (2) | $P_L \leq S_y$ | | 一次局部膜応力強さ | PVB-3111 (1)b. | $P_L \leq 1.5S_m$ $\cong S_y^{**}$ | ○ |
| | 一次膜+一次曲げ応力強さ | MCD-1318.1 (3) | $P_L + P_b \leq S_y$ | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (1)c. | $P_L + P_b \leq \alpha S_m$ $= 1.5S_m$ $\cong S_y^{**}$ | ○ |
| | 一次+二次応力強さ | MCD-1318.1 (4) | $P_L + P_b + Q \leq S_y$ | 供用状態 A B | 一次+二次応力強さ | PVB-3112 | $P_L + P_b + Q \leq 3S_m$ $\cong 2S_y^{**}$ | ◎ |
| 試験状態 | 一次一般膜応力強さ | MCD-1318.2 (1) | $P_m \leq 0.9S_y$ | 試験状態 | 一次一般膜応力強さ | PVB-3111 (4)a. | $P_m \leq 0.9S_y$ | ○ |
| | 一次局部膜応力強さ | MCD-1318.2 (2) | $P_L \leq S_y$ | | 一次局部膜応力強さ | PVB-3111 (4)b. | $P_L \leq 1.35S_y$ | ◎ |
| | 一次膜+一次曲げ応力強さ | MCD-1318.2 (3) | $P_L + P_b \leq S_y$ | | 一次膜+一次曲げ応力強さ | PVB-3111 (4)c. | $P_L + P_b \leq 1.35S_y$ | ◎ |
| | 一次+二次応力強さ | MCD-1318.2 (4) | $P_L + P_b + Q \leq S_y$ | | | | | ◎ |

- ◎: 金属キャスク構造規格の許容応力の方が厳しい。
- : 金属キャスク構造規格と設計・建設規格の許容応力が同等。
- ×: 設計・建設規格の許容応力が厳しい。
- ※: $1/3S_u$ と $2/3S_y$ を比較し、小さい方を記載。

2-1-6 貯蔵架台をクラス 1 支持構造物
とする場合の強度評価結果

目 次

| | 頁 |
|-----------------------|----------|
| 1. 概要 | 2-1-6-1 |
| 2. 適用基準 | 2-1-6-1 |
| 3. 設計条件 | 2-1-6-1 |
| 3.1 基本仕様 | 2-1-6-1 |
| 3.2 設計事象 | 2-1-6-2 |
| 3.3 荷重の種類とその組合せ | 2-1-6-3 |
| 4. 計算条件 | 2-1-6-4 |
| 4.1 解析対象とする事象 | 2-1-6-4 |
| 4.2 解析箇所 | 2-1-6-4 |
| 4.3 物性値 | 2-1-6-8 |
| 5. 応力解析 | 2-1-6-9 |
| 5.1 応力算出の概要 | 2-1-6-9 |
| 5.2 荷重条件の選定 | 2-1-6-10 |
| 5.3 応力計算と評価 | 2-1-6-10 |
| 6. 応力計算 | 2-1-6-16 |
| 6.1 荷重条件 | 2-1-6-16 |
| 6.2 計算方法 | 2-1-6-16 |
| 6.3 計算結果 | 2-1-6-21 |

1. 概要

貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）は、設計・建設規格のクラス3支持構造物に該当し、資料10-3-3-9「貯蔵架台（タイプ1）の強度計算書」及び資料10-3-3-10「貯蔵架台（タイプ2）の強度計算書」において、クラス3支持構造物として十分な強度を有することを確認しているが、本資料は、貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）について、設計・建設規格のクラス1支持構造物の強度評価を実施した場合においても、十分な強度を有することを説明するものである。

2. 適用基準

本資料において、貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の強度評価については、設計・建設規格のクラス1支持構造物を適用する。

3. 設計条件

貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）が、以下の設計条件に耐えることを確認する。

3.1 基本仕様

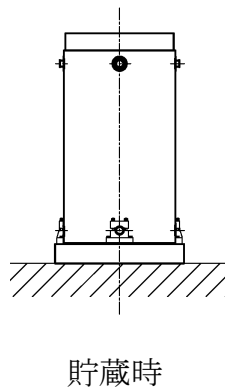
貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の基本仕様を第3-1表に示す。

第3-1表 貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の基本仕様

| | | 貯蔵架台 (タイプ1) | 貯蔵架台 (タイプ2) |
|----|-----------|----------------|----------------|
| 材質 | 貯蔵架台 | SF490A | |
| | トラニオン押さえ | SM490A | |
| | 押さえボルト | SNB23-3 | |
| | 固定装置固定ボルト | SNB23-3 | |
| | 基礎ボルト | SNB23-3 | |

3.2 設計事象

資料10-3-2-5「貯蔵架台の強度計算方法」と同様に、貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）に係る設計上考慮する事象として、燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における状態から貯蔵時を選定事象として抽出し、その様態図を第3-1図に示す。また、資料10-3-2-5「貯蔵架台の強度計算方法」と同様に、第3-2表を選定事象を金属キヤスク構造規格 解説 MGB-1300を参考として、設計事象及び供用状態に分類した結果を示す。



第3-1図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象

第3-2表 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象

| 設計事象 | 供用状態 | 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 |
|------|------|---|
| I | A | <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵（貯蔵時）（第3-1図） |

3.3 荷重の種類とその組合せ

設計・建設規格のGNR-2120を参考に、貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを第3-3表に示す。

第3-3表 貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

| 運転 状態 | 供用 状態 | 評価事象 | 荷 重 | | | | |
|----------|----------|------|---------------|-------------|------------------------|-------------------------|-------------|
| | | | ボルト 初期締付け力 | 自重 による荷重 | 乾式 キャスクの重量 による荷重 | トラニオン 押さえに よる固縛荷重 | 熱荷重 (注1) |
| I | A | 貯蔵時 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

(注1) 支持される機器の熱膨張により生じる応力に限る。

4. 計算条件

4.1 解析対象とする事象

3.2 項で示した燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象のうち、第4-1表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について評価を実施する。

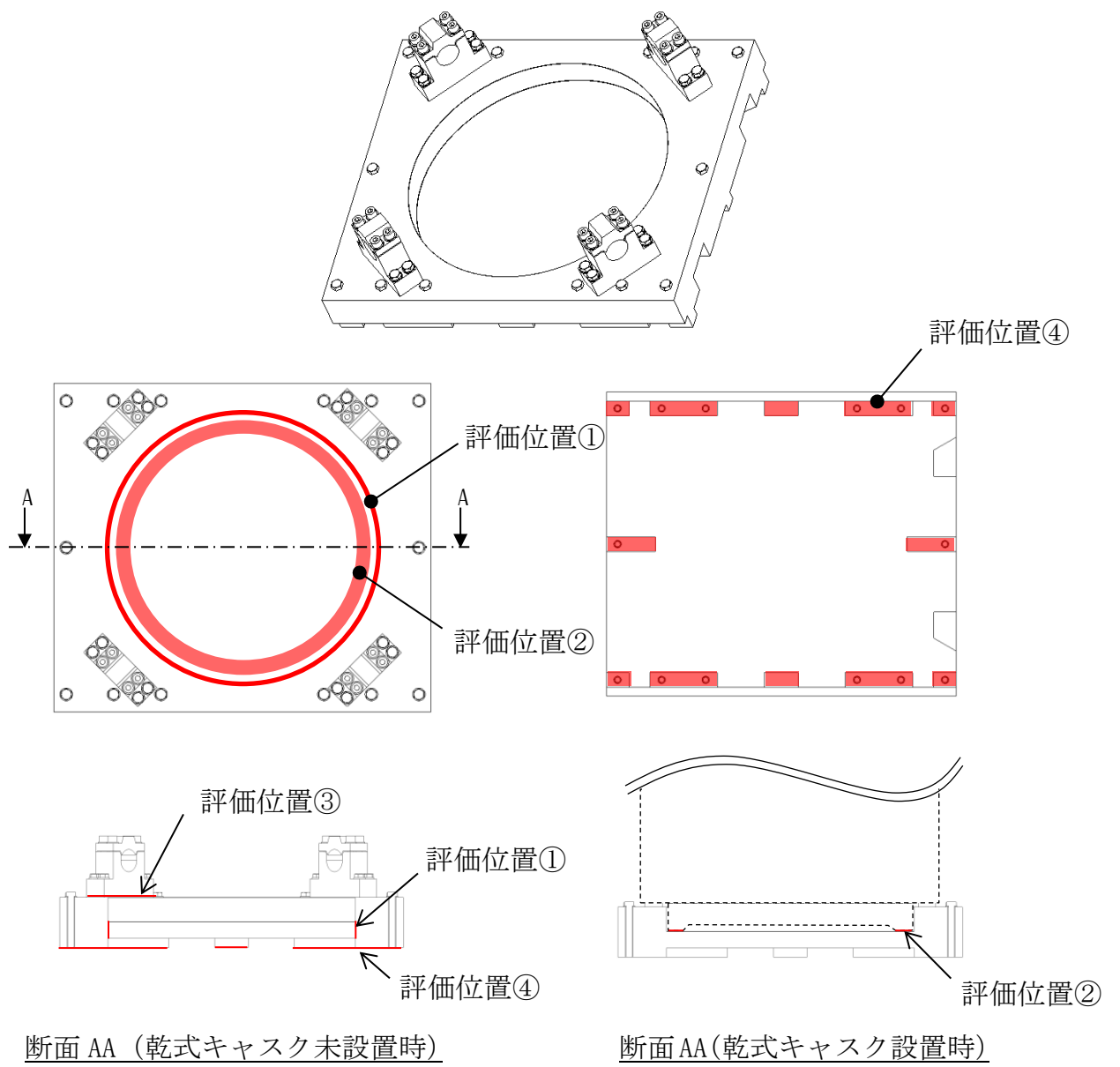
第4-1表 代表事象

| 運転状態 | 供用状態 | 代表事象 | 包絡される事象 | 荷重条件 | 備考 |
|------|------|------|---------|--|---------------------------|
| I | A | 貯蔵時 | — | <ul style="list-style-type: none">・自重・トラニオン押さえによる固縛荷重・乾式キャスクの重量・ボルトの初期締付け力・熱荷重 | 供用状態 A のうち大半の期間を占める代表的事象。 |

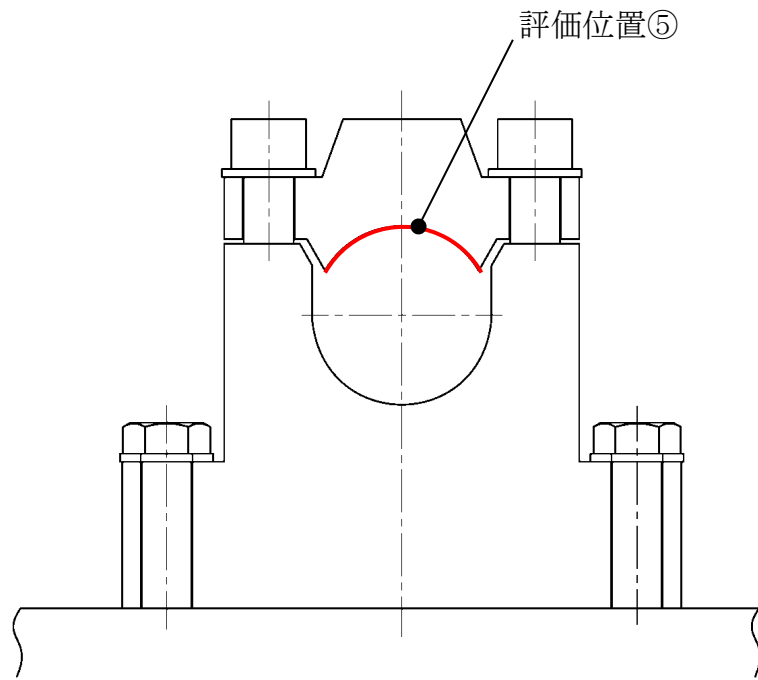
4.2 解析箇所

貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の応力評価を行う位置は、次のとおりである。応力評価位置を第4-1図から第4-3図に示す。

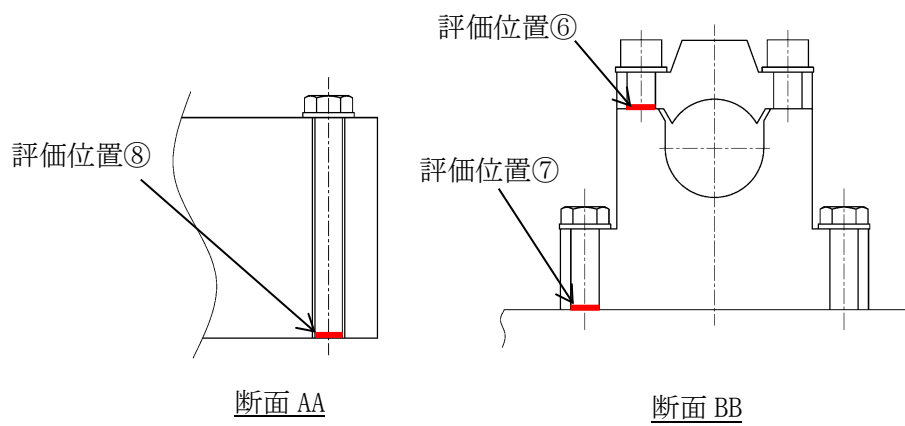
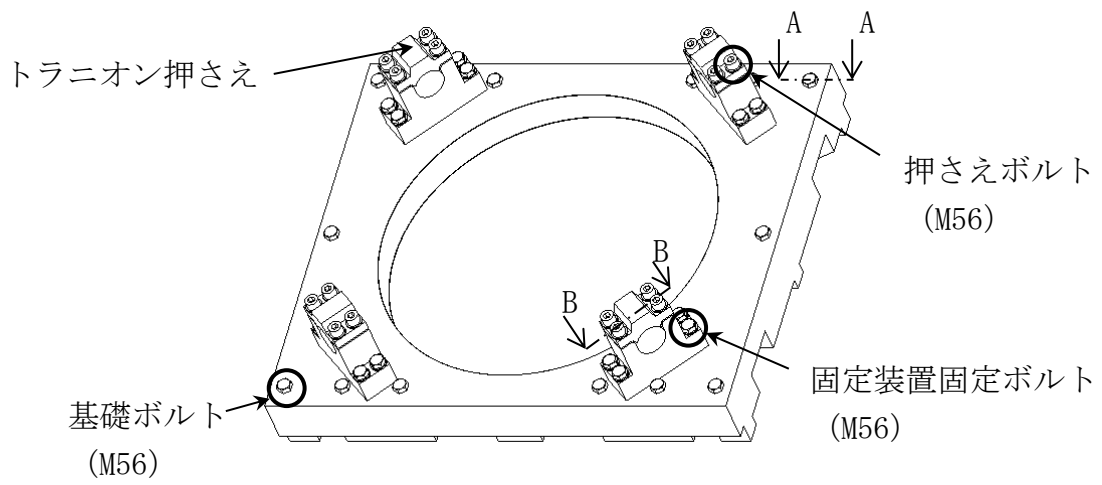
- (1) 貯蔵架台
- (2) トラニオン押さえ
- (3) 押さえボルト
- (4) 固定装置固定ボルト
- (5) 基礎ボルト



第4-1図 貯蔵架台の応力評価位置



第4-2図 トラニオン押さえの応力評価位置



第4-3図 ボルトの応力評価位置

4.3 物性値

応力評価に使用する材料の物性値を第4-2表に示す。

第 4-2 表 応力評価に使用する材料の物性値

| 部材 | 材料 | 温度 (°C) | 縦弾性係数 ^(注) (MPa) |
|------|--------|------------|-------------------------------|
| 貯蔵架台 | SF490A | 25 | 201000 |
| | | 100 | 197000 |

(注) 圧縮応力（一次応力）及び座屈応力（一次＋二次）の許容応力値の計算に使用。

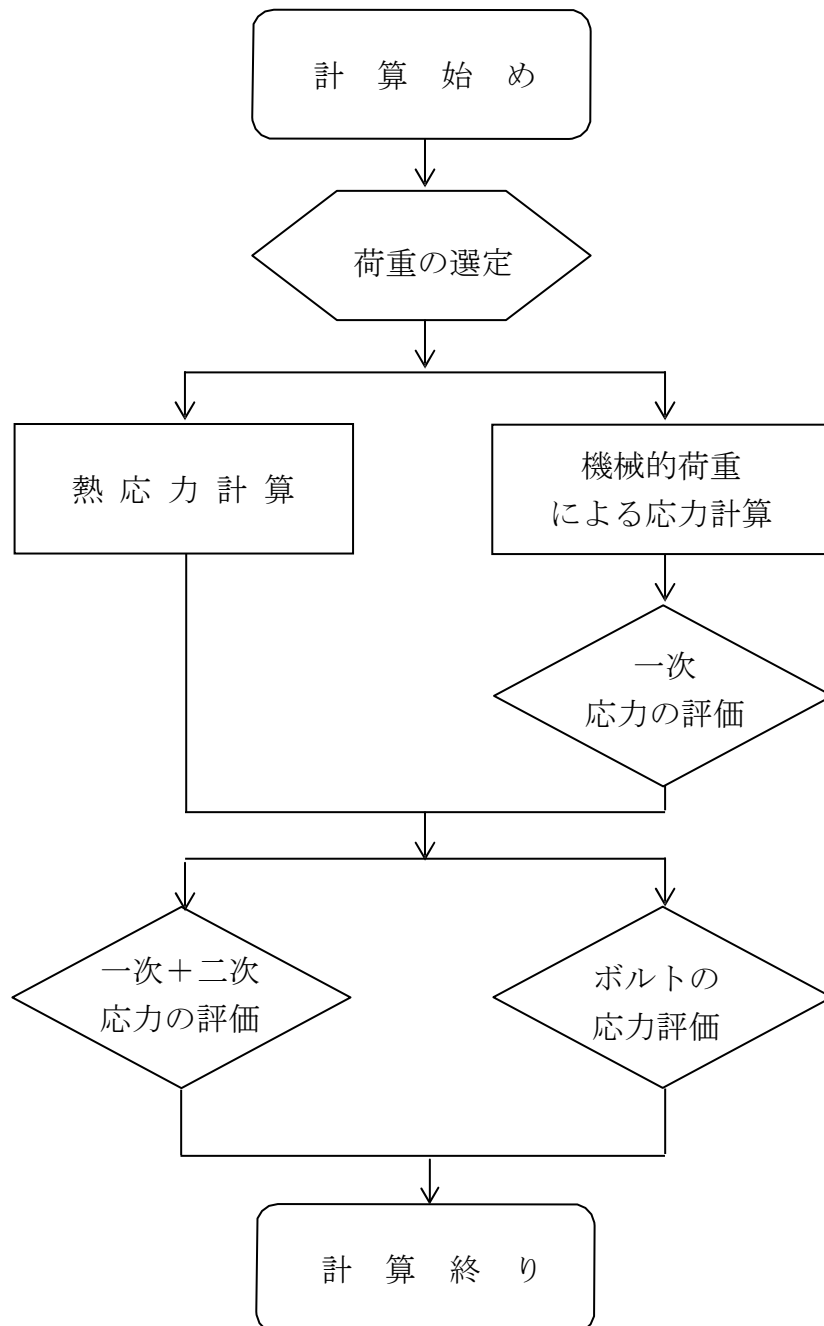
なお、計算に使用した値のみ示す。

5. 応力解析

5.1 応力算出の概要

貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の応力評価フローを第5-1図に示す。

貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の応力評価は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。



第5-1図 貯蔵架台（タイプ1及びタイプ2）の応力評価フロー

5.2 荷重条件の選定

荷重条件は3章に示しているが、各部位の応力計算においては、その部位において重要な荷重条件を選定して計算を行う。各部位において考慮した荷重は6章に示す。

5.3 応力計算と評価

5.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は以下の荷重を入力し行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重及びその他の付加荷重をいう。

b. 熱荷重

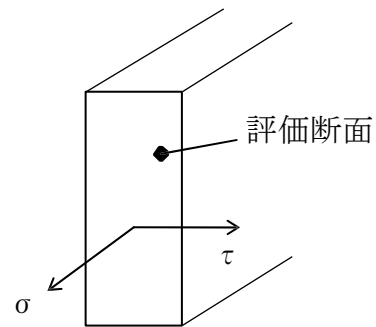
(2) 応力評価位置は、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。応力評価位置を第4-1図から第4-3図に示す。

5.3.2 応力の評価

応力の評価は応力評価式により行う。評価の詳細は、6章に示す。

応力の計算結果は、設計・建設規格GNR-2130 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の応力の評価を6章に示す。なお、応力の記号とその方向の対応関係は下記のとおりである。

- σ : 評価断面に垂直な方向の応力
 τ : せん断応力



(1) ボルト材以外の応力評価

ボルト材以外の応力評価は、設計・建設規格SSB-3120に従い、以下の項目を評価する。

a. 一次応力

設計・建設規格SSB-3121.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A]

・せん断応力（一次） $\leq f_s \left(= \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right)$

・圧縮応力（一次） $\leq f_c \left(= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu} \right)$

・支圧応力（一次） $\leq f_p \left(= 1.25F \right)$

ここで、

F : MIN[0.7S_u, S_y]により定まる値

λ : 圧縮材の有効細長比

Λ : 圧縮材の限界細長比

ν : 次の計算式により計算した値

$$1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

b. 一次＋二次応力

設計・建設規格SSB-3122.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A]

・引張応力及び圧縮応力（一次＋二次） $\leq 3f_t \left(= 3 \times \frac{F}{1.5} \right)$

・せん断応力（一次＋二次） $\leq 3f_s \left(= 3 \times \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right)$

・支圧応力（一次＋二次） $\leq 1.5f_p \left(= 1.5 \times 1.25F \right)$

・座屈応力（一次＋二次） $\leq 1.5f_c \left(= 1.5 \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu} \right)$

(2) ボルト材の応力評価

ボルト材の応力評価は、設計・建設規格SSB-3131に従い、以下の項目を評価する。

・引張応力 $\leq f_t \left(= \frac{F}{1.5} \right)$

ここで、

F : MIN[0.7S_u, S_y]により定まる値

5.3.3 許容応力

貯蔵架台(タイプ1及びタイプ2)の許容応力は、5.3.2項に示すとおり設定する。ここで、許容応力は、貯蔵架台(タイプ1及びタイプ2)と接するトラニオン及び建屋床面の条件から設定した温度に対応した値とする。各部位の許容応力値を定める温度を第5-1表及び第5-2表に示す。また、許容応力値を定める温度に対応する機械的強度を第5-3表及び第5-4表に示す。

さらに、第5-3表及び第5-4表に示す機械的強度から求められる許容応力値を第5-5表に示す。なお、許容応力は、(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」による。

第5-1表 許容応力値を定める温度(貯蔵架台(タイプ1))

| 部材 | 許容応力値を定める温度(°C) |
|-----------|-----------------|
| 貯蔵架台 | 65 |
| トラニオン押さえ | 135 |
| 押さえボルト | 135 |
| 固定装置固定ボルト | 135 |
| 基礎ボルト | 65 |

第5-2表 許容応力値を定める温度(貯蔵架台(タイプ2))

| 部材 | 許容応力値を定める温度(°C) |
|-----------|-----------------|
| 貯蔵架台 | 65 |
| トラニオン押さえ | 140 |
| 押さえボルト | 140 |
| 固定装置固定ボルト | 140 |
| 基礎ボルト | 65 |

第 5-3 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（貯蔵架台（タイプ 1））

| 部材 | 材料 | 許容応力値 の設定温度 (°C) | 設計降伏点 S_y (MPa) | 設計引張 強さ S_u (MPa) | F (MPa) |
|---------------------|------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|
| 貯蔵架台 | 炭素鋼 (SF490A) | 65 | 233 | 452 | 233 |
| トラニオン押さえ | 炭素鋼 (SM490A) | 135 | 253 | 441 | 253 |
| 押さえボルト 固定装置固定ボルト | 合金鋼 (SNB23-3) | 135 | 837 | 909 | 636 |
| 基礎ボルト | 合金鋼 (SNB23-3) | 65 | 875 | 957 | 669 |

第 5-4 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（貯蔵架台（タイプ 2））

| 部材 | 材料 | 許容応力値 の設定温度 (°C) | 設計降伏点 S_y (MPa) | 設計引張 強さ S_u (MPa) | F (MPa) |
|---------------------|------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|
| 貯蔵架台 | 炭素鋼 (SF490A) | 65 | 233 | 452 | 233 |
| トラニオン押さえ | 炭素鋼 (SM490A) | 140 | 251 | 441 | 251 |
| 押さえボルト 固定装置固定ボルト | 合金鋼 (SNB23-3) | 140 | 835 | 906 | 634 |
| 基礎ボルト | 合金鋼 (SNB23-3) | 65 | 875 | 957 | 669 |

第 5-5 表 許容応力値 (1/4)

(単位 : MPa)

| 許容応力 区分 | 応力の種類 | 貯蔵架台 | | |
|------------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------|
| | | 許容応力値 | | 許容 応力 |
| | | 貯蔵架台 (タイプ 1) | 貯蔵架台 (タイプ 2) | |
| 供用状態 A | せん断応力 (一次応力) | 89 | 89 | f_s |
| | 支圧応力 (一次応力) | 291 | 291 | f_p |
| | 圧縮応力 (一次応力) | 155 | 155 | f_c |
| | 引張及び圧縮応力 (一次+二次応力) | 466 | 466 | $3f_t$ |
| | せん断応力 (一次+二次応力) | 269 | 269 | $3f_s$ |
| | 支圧応力 (一次+二次応力) | 436 | 436 | $1.5f_p$ |
| | 座屈応力 (一次+二次応力) | 232 | 232 | $1.5f_c$ |

第 5-5 表 許容応力値 (2/4)

(単位 : MPa)

| 許容応力 区分 | 応力の種類 | トラニオン押さえ | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|
| | | 許容応力値 | | 許容 応力 |
| | | 貯蔵架台 (タイプ 1) | 貯蔵架台 (タイプ 2) | |
| 供用状態 A | 支圧応力 (一次応力) | 316 | 313 | f_p |
| | 支圧応力 (一次+二次応力) | 474 | 470 | $1.5f_p$ |

第 5-5 表 許容応力値 (3/4)

(単位：MPa)

| 許容応力 区分 | 応力の種類 | 押さえボルト 固定装置固定ボルト | | |
|------------|-------|---------------------|-----------------|----------|
| | | 許容応力値 | | 許容 応力 |
| | | 貯蔵架台 (タイプ 1) | 貯蔵架台 (タイプ 2) | |
| 供用状態 A | 引張応力 | 424 | 422 | f_t |

第 5-5 表 許容応力値 (4/4)

(単位：MPa)

| 許容応力 区分 | 応力の種類 | 基礎ボルト | | |
|------------|-------|-----------------|-----------------|----------|
| | | 許容応力値 | | 許容 応力 |
| | | 貯蔵架台 (タイプ 1) | 貯蔵架台 (タイプ 2) | |
| 供用状態 A | 引張応力 | 446 | 446 | f_t |

6. 応力計算

6.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重
- ・トラニオン押さえによる固縛荷重
- ・乾式キャスクの重量
- ・ボルトの初期締付け力
- ・熱荷重

6.2 計算方法

6.2.1 貯蔵架台

(1) 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第4-1図に示す評価位置①である。乾式キャスクの重量及び貯蔵架台の自重による荷重、及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{F_1 + F_2 \times 4}{A_1} \quad (6.1)$$

ここで、

[貯蔵架台 (タイプ1) の場合]

F_1 : 乾式キャスクの重量及び貯蔵架台 (タイプ1) の自重による荷重
($=1.344 \times 10^6$ N)

F_2 : トラニオン押さえによる固縛荷重

A_1 : 評価位置①の断面積 ($=1.050 \times 10^6$ mm²)

[貯蔵架台 (タイプ2) の場合]

F_1 : 乾式キャスクの重量及び貯蔵架台 (タイプ2) の自重による荷重
($=1.335 \times 10^6$ N)

F_2 : トラニオン押さえによる固縛荷重

A_1 : 評価位置①の断面積 ($=1.041 \times 10^6$ mm²)

(b) 支圧応力

貯蔵架台に乾式キャスクが設置される面において、応力が発生する箇所は第4-1図に示す評価位置②である。また、最大応力が発生する箇所は第4-1図に示す評価位置③である。

評価位置②において、乾式キャスクの重量による荷重及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生する支圧応力(σ_{p1})は、(6.2)式で計算される。

評価位置③において、固定装置の自重により発生する荷重及び固定装置固定ボルトの初期締付け力により発生する支圧応力(σ_{p2})は、(6.3)式で計算される。

$$\sigma_{p1} = \frac{F_3 + F_2 \times 4}{A_2} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{F_4 + F_5 \times 4}{A_3} \quad (6.3)$$

ここで、

[貯蔵架台 (タイプ1) の場合]

- F_3 : 乾式キャスク (タイプ1) の重量による荷重 ($=1.148 \times 10^6$ N)
- F_2 : 6.2.1 (1) (a) と同じ
- A_2 : 評価位置②の断面積 ($=7.403 \times 10^5$ mm²)
- F_4 : 固定装置の自重による荷重 ($=3.923 \times 10^3$ N)
- F_5 : 固定装置固定ボルトの初期締付け力
- A_3 : 評価位置③の断面積 ($=1.280 \times 10^5$ mm²)

[貯蔵架台 (タイプ2) の場合]

- F_3 : 乾式キャスク (タイプ2) の重量による荷重 ($=1.139 \times 10^6$ N)
- F_2 : 6.2.1 (1) (a) と同じ
- A_2 : 評価位置②の断面積 ($=8.254 \times 10^5$ mm²)
- F_4 : 固定装置の自重による荷重 ($=3.923 \times 10^3$ N)
- F_5 : 固定装置固定ボルトの初期締付け力
- A_3 : 評価位置③の断面積 ($=1.280 \times 10^5$ mm²)

(c) 圧縮応力

最大応力が発生する箇所は第4-1図に示す評価位置④である。乾式キャスクの重量及び貯蔵架台の自重による荷重、及び基礎ボルトの初期締付け力により発生する圧縮応力(σ_c)は、次式で計算される。

$$\sigma_c = \frac{F_1 + F_6 \times 14}{A_4} \quad (6.4)$$

ここで、

[貯蔵架台 (タイプ1) の場合]

F_1 : 6.2.1 (1) (a) と同じ

F_6 : 基礎ボルトの初期締付け力

A_4 : 評価位置④の断面積 ($=5.592 \times 10^5 \text{ mm}^2$)

[貯蔵架台 (タイプ2) の場合]

F_1 : 6.2.1 (1) (a) と同じ

F_6 : 基礎ボルトの初期締付け力

A_4 : 評価位置④の断面積 ($=5.618 \times 10^5 \text{ mm}^2$)

(2) 一次+二次応力

(a) せん断応力

支持される機器 (乾式キャスク) の熱膨張による応力は無視できるので、貯蔵架台に発生する応力は6.2.1 (1) (a)と同様に計算される。

(b) 支圧応力

支持される機器 (乾式キャスク) の熱膨張による応力は無視できるので、貯蔵架台に発生する応力は6.2.1 (1) (b)と同様に計算される。

(c) 引張及び圧縮応力

支持される機器 (乾式キャスク) の熱膨張による応力は無視できるので、貯蔵架台に発生する応力は6.2.1 (1) (c)と同様に計算される。

(d) 座屈応力

最大応力が発生する箇所は第4-1図に示す評価位置④であり、発生する応力は6.2.1 (2) (c)と同じである。

6.2.2 トラニオン押さえ

(1) 一次応力

(a) 支圧応力

支圧応力が発生する箇所は第4-2図に示す評価位置⑤である。トラニオン押さえの自重による荷重、及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生する支圧応力(σ_{p3})は、次式で計算される。

$$\sigma_{p3} = \frac{F_7 + F_2}{A_5} \quad (6.5)$$

ここで、

[貯蔵架台 (タイプ1) の場合]

F_7 : トラニオン押さえの自重による荷重 ($=9.807 \times 10^2$ N)

F_2 : 6.2.1 (1) (a) と同じ

A_5 : 評価位置⑤の断面積 ($=4.492 \times 10^4$ mm²)

[貯蔵架台 (タイプ2) の場合]

F_7 : トラニオン押さえの自重による荷重 ($=9.807 \times 10^2$ N)

F_2 : 6.2.1 (1) (a) と同じ

A_5 : 評価位置⑤の断面積 ($=4.492 \times 10^4$ mm²)

(2) 一次+二次応力

(a) 支圧応力

支持される機器 (乾式キャスク) の熱膨張による応力は無視できるので、トラニオン押さえに発生する応力は6.2.2 (1) (a) と同様に計算される。

6.2.3 押さえボルト

(1) 引張応力

引張応力が発生する箇所は第4-3図に示す評価位置⑥である。押さえボルトの初期締付け力により発生する引張応力(σ_{t1})は、次式で計算される。なお、押さえボルトの呼び径断面積は、設計・建設規格SSB-3131の規定に従い75%とする。

$$\sigma_{t1} = \frac{F_8}{A_6 \times 0.75} \quad (6.6)$$

ここで、

[貯蔵架台 (タイプ1) の場合]

F_8 : 押さえボルトの初期締付け力

A_6 : 押さえボルトの呼び径断面積 ($=2.463 \times 10^3$ mm²)

[貯蔵架台（タイプ2）の場合]

F_8 : 押さえボルトの初期締付け力

A_6 : 押さえボルトの呼び径断面積 (=2.463×10³ mm²)

6.2.4 固定装置固定ボルト

(1) 引張応力

引張応力が発生する箇所は第4-3図に示す評価位置⑦である。固定装置固定ボルトの初期締付け力により発生する引張応力(σ_{t2})は、次式で計算される。なお、固定装置固定ボルトの呼び径断面積は、設計・建設規格SSB-3131の規定に従い75%とする。

$$\sigma_{t2} = \frac{F_9}{A_7 \times 0.75} \quad (6.7)$$

ここで、

[貯蔵架台（タイプ1）の場合]

F_9 : 固定装置固定ボルトの初期締付け力

A_7 : 固定装置固定ボルトの呼び径断面積 (=2.463×10³ mm²)

[貯蔵架台（タイプ2）の場合]

F_9 : 固定装置固定ボルトの初期締付け力

A_7 : 固定装置固定ボルトの呼び径断面積 (=2.463×10³ mm²)

6.2.5 基礎ボルト

(1) 引張応力

引張応力が発生する箇所は第4-3図に示す評価位置⑧である。基礎ボルトの初期締付け力により発生する引張応力(σ_{t3})は、次式で計算される。なお、基礎ボルトの呼び径断面積は、設計・建設規格SSB-3131の規定に従い75%とする。

$$\sigma_{t3} = \frac{F_{10}}{A_8 \times 0.75} \quad (6.8)$$

ここで、

[貯蔵架台（タイプ1）の場合]

F_{10} : 基礎ボルトの初期締付け力

A_8 : 基礎ボルトの呼び径断面積 (=2.463×10³ mm²)

[貯蔵架台（タイプ2）の場合]

F_{10} : 基礎ボルトの初期締付け力

A_8 : 基礎ボルトの呼び径断面積 (=2.463×10³ mm²)

6.3 計算結果

応力評価結果を第6-1表及び第6-2表に示す。第6-1表及び第6-2表に示すとおり、発生する応力は、許容応力値以下である。

第 6-1 表 貯蔵架台（タイプ 1）の応力評価結果（貯蔵時）

（単位：MPa）

| 部位 | 評価位置 | 応力分類 | 計算値 | 許容 応力値 |
|---------------|------|-----------------------|-----|-----------|
| 貯蔵架台 | ① | せん断応力（一次応力） | 3 | 89 |
| | | せん断応力（一次＋二次応力） | 3 | 269 |
| | ② | 支圧応力（一次応力） | 4 | 291 |
| | | 支圧応力（一次＋二次応力） | 4 | 436 |
| | ③ | 支圧応力（一次応力） | 12 | 291 |
| | | 支圧応力（一次＋二次応力） | 12 | 436 |
| | ④ | 圧縮応力（一次応力） | 12 | 155 |
| | | 引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力） | 12 | 466 |
| | | 座屈応力（一次＋二次応力） | 12 | 232 |
| トラニオン 押さえ | ⑤ | 支圧応力（一次応力） | 10 | 316 |
| | | 支圧応力（一次＋二次応力） | 10 | 474 |
| 押さえボルト | ⑥ | 引張応力 | 97 | 424 |
| 固定装置 固定ボルト | ⑦ | 引張応力 | 194 | 424 |
| 基礎ボルト | ⑧ | 引張応力 | 194 | 446 |

第 6-2 表 貯蔵架台（タイプ 2）の応力評価結果（貯蔵時）

（単位：MPa）

| 部位 | 評価位置 | 応力分類 | 計算値 | 許容 応力値 |
|---------------|------|-----------------------|-----|-----------|
| 貯蔵架台 | ① | せん断応力（一次応力） | 3 | 89 |
| | | せん断応力（一次＋二次応力） | 3 | 269 |
| | ② | 支圧応力（一次応力） | 4 | 291 |
| | | 支圧応力（一次＋二次応力） | 4 | 436 |
| | ③ | 支圧応力（一次応力） | 12 | 291 |
| | | 支圧応力（一次＋二次応力） | 12 | 436 |
| | ④ | 圧縮応力（一次応力） | 12 | 155 |
| | | 引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力） | 12 | 466 |
| | | 座屈応力（一次＋二次応力） | 12 | 232 |
| トラニオン 押さえ | ⑤ | 支圧応力（一次応力） | 10 | 313 |
| | | 支圧応力（一次＋二次応力） | 10 | 470 |
| 押さえボルト | ⑥ | 引張応力 | 97 | 422 |
| 固定装置 固定ボルト | ⑦ | 引張応力 | 194 | 422 |
| 基礎ボルト | ⑧ | 引張応力 | 194 | 446 |

2-2 資料 11 に係る補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
 （使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 2-2 資料11に係る補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 (該当添付資料) |
|-----------|-------------------------------|--|---|
| | (名称) | (概要) | |
| 2-2-1 | 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価方法及び評価結果 | 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価方法及び結果の詳細を示す。 | 資料11 使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書 |
| 2-2-2 | 金属ガスケットの漏えい率の設定根拠 | 乾式キャスク（タイプ1）及び（タイプ2）に使用する金属ガスケットの漏えい率の設定根拠を示す。 | 資料11 使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書 |
| 2-2-3 | 乾式キャスク蓋間圧力の管理値及び監視頻度の設定根拠 | 乾式キャスク（タイプ1）及び（タイプ2）の蓋間圧力の運用上の管理値及び監視頻度の設定根拠を示す。 | 資料11 使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書 |

2-2-1 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の
評価方法及び評価結果

1. 概要

本資料は、資料 11「使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」において示す、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価方法及び評価結果の詳細について説明するものである。

2. 評価方法及び評価結果

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t の計算フローを 2-2-1-1 図に示す。また、漏えい率計算の概要を 2-2-1-2 図に示す。

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の基準漏えい率 Q_s は、設計貯蔵期間（60 年）経過後に、それぞれの乾式キャスク本体内部圧力の負圧が維持できるシール部の標準状態（大気圧、25°C）における漏えい率である。

基準漏えい率は、貯蔵時における乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の温度、本体内部の空間容積及び圧力等を基に、乾式キャスク本体内部の圧力が設計貯蔵期間経過後に大気圧となるように求めた漏えい孔径 D_0 を用い、標準状態における漏えい率として算出される。基準漏えい率は、設計貯蔵期間経過後に乾式キャスク本体内部の圧力が大気圧となるための漏えい率 Q_0 に比べて小さく、保守側な設定である。基準漏えい率の計算過程を以下に示す。

時間 dt の間に乾式キャスク本体内部圧力が dP_d だけ変化する漏えい率を Q とすれば、乾式キャスク本体内部の空間容積は一定であることから、乾式キャスク本体内部圧力の時間変化は、温度の違いを考慮してボイル・シャルルの法則により次式で与えられる。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{Q}{V_d} \cdot \frac{T_d}{T} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

ここで、

- dP_d : 乾式キャスク本体内部圧力の変化 (Pa)
- T_d : 乾式キャスク本体内部温度 (K)
- Q : 乾式キャスク本体内部圧力 P_d のときのシール部漏えい率 (Pa・m³/s)
- T : 漏えい気体の温度 (K)
- V_d : 乾式キャスク本体内部の空間容積 (m³)
- t : 時間 (s)

なお、漏えい率 Q は以下のクヌッセンの式で求められる⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned}
 Q &= L \cdot P_a \\
 L &= (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d) \\
 F_c &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\
 F_m &= \frac{\sqrt{2\pi R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot P_a}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

ここで、

- Q : 漏えい率 (Pa・m³/s)
- L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (m³/s)
- F_c : 連続流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))
- F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))
- P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa)
- P_d : 下流側 (乾式キャスク本体内部) の圧力 (Pa)
- D_0 : 漏えい孔径 (m)
- a : 漏えい孔長 (m)
- P_a : 流れの平均圧力 (Pa) 【 $P_a = (P_u + P_d) / 2$ 】
- μ : 漏えい気体の粘性係数 (Pa・s)
- T : 漏えい気体の温度 (K)
- M : 漏えい気体の分子量 (kg/mol)
- R_0 : ガス定数 (J/(mol・K))

②式を①式に代入すると、以下となる。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{T_d}{V_d \cdot T} \times \left\{ \frac{1}{2} F_c \cdot (P_u^2 - P_d^2) + F_m \cdot P_a \cdot (P_u - P_d) \right\} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

また、上流側の圧力 P_u を一定として、③式を時間 t で積分すれば、ある時間 t における乾式キャスク本体内部圧力 $P_d = P_d(t)$ が得られる。つまり、漏えい孔径 D_0 は、以下の④式に乾式キャスク貯蔵時環境条件として 2-2-1-1 表に示す計算条件のもと⑤、⑥式を代入し、乾式キャスク本体内部圧力 P_d が燃料破損（燃料破損率 0.1%）によるガス放出を想定した圧力上昇 P_1 を考慮しても負圧を維持できる圧力（気象変化による圧力変動を考慮した大気圧： $9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ から P_1 （補足 1 参照）を減じた圧力）となる漏えい孔径を繰り返し計算することで算出できる。2-2-1-2 表に漏えい孔径 D_0 の計算条件及び計算結果を示す。

$$P_d(t) = \frac{P_{u0} \cdot \{F_c' \cdot (P_{u0} + P_{d0}) + F_m'\} - (F_c' \cdot P_{u0} + F_m') \cdot (P_{u0} - P_{d0}) \cdot \exp\left\{-\frac{T_d \cdot (2F_c' \cdot P_{u0} + F_m')}{V_d \cdot T} \cdot t\right\}}{F_c' \cdot (P_{u0} + P_{d0}) + F_m' + F_c' \cdot (P_{u0} - P_{d0}) \cdot \exp\left\{-\frac{T_d \cdot (2F_c' \cdot P_{u0} + F_m')}{V_d \cdot T} \cdot t\right\}} \quad \dots \textcircled{4}$$

$$F_c' = \frac{1}{2} F_c = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a\mu} \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

$$F_m' = F_m \cdot P_a = \frac{\sqrt{2\pi R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{aP_a} \times P_a = \frac{\sqrt{2\pi R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a} \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

2-2-1-1 表 乾式キャスク本体内部圧力計算条件

| | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) |
|--|-----------------------------------|------------------|
| T_d : 乾式キャスク本体内部温度 (K) | 488.15 | 498.15 |
| T : 漏えい気体の温度 (K) | 248.15 | |
| V_d : 乾式キャスク本体内部の空間容積 (m ³) | | |
| P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa) | 4.1×10^5 | |
| P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa) | 8.0×10^4 | |
| a : 漏えい孔長 (m) ^(注1) | 4.56×10^{-3} | |
| D : 金属ガスケットの断面径 (m) | | |
| H : 一次蓋の金属ガスケット溝深さ (m) | | |
| μ : 漏えい気体 (ヘリウム) の粘性係数 (Pa·s) ⁽²⁾ | 1.756×10^{-5} (-25°C) | |
| M : 漏えい気体 (ヘリウム) の分子量 (kg/mol) ⁽³⁾ | 0.004002602 | |
| R_0 : ガス定数 (J/(mol·K)) ⁽³⁾ | 8.3144598 | |

(注1) $a = 2 \times \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2}$ (2-2-1-3 図参照)

である。

2-2-1-2 表 基準漏えい率の漏えい孔径の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| P_0 : 気象変化による圧力変動を考慮した大気圧 (Pa) | 9.7×10^4 | |
| P_1 : 燃料破損による圧力上昇 (Pa) | | |
| P_d (t=60年) : 乾式キャスク本体内部圧力 (Pa) | | |
| D_0 : 漏えい孔径 (m) | 5.57×10^{-6} | 5.51×10^{-6} |

漏えい孔径 D_0 を基に、クヌッセンの式 (②式) により設計貯蔵期間経過後に乾式キャスク本体内部が負圧を維持できる漏えい率 Q_{01} が得られる。2-2-1-3 表に計算条件及び計算結果を示す。

2-2-1-3 表 漏えい率の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|---|------------------------|------------------------|
| P_a : 流れの平均圧力 (Pa) (注 1) | 2.45×10^5 | |
| P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa) | 4.1×10^5 | |
| P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa) | 8.0×10^4 | |
| Q_{01} : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$) | 2.757×10^{-5} | 2.647×10^{-5} |

(注 1) P_a : 流れの平均圧力 (Pa) 【 $P_a = (P_u + P_d) / 2$ 】 である。

基準漏えい率 Q_s は、先に得られた漏えい孔径 D_0 の漏えい孔に対して、漏えい試験条件（標準状態）として 2-2-1-4 表に示す温度、圧力、気体の条件等をクヌッセンの式（②式）に代入して得られる。2-2-1-4 表に計算条件及び計算結果を示す。

2-2-1-4 表 基準漏えい率の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|---|----------------------------------|-----------------------|
| D_0 : 漏えい孔径 (m) | 5.57×10^{-6} | 5.51×10^{-6} |
| a : 漏えい孔長 (m) | 4.56×10^{-3} | |
| μ : 漏えい気体（ヘリウム）の粘性係数 (Pa·s) ⁽²⁾ | 1.985×10^{-5} (25°C) | |
| R_0 : ガス定数 (J/(mol·K)) ⁽³⁾ | 8.3144598 | |
| T : 漏えい気体の温度 (K) | 298.15 | |
| M : 漏えい気体（ヘリウム）の分子量 (kg/mol) ⁽³⁾ | 0.004002602 | |
| P_a : 流れの平均圧力 (Pa) | 5.05×10^4 | |
| P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa) | 1.01×10^5 (大気圧) | |
| P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa) | 0 (真空) | |
| Q_s : 基準漏えい率 (Pa·m ³ /s) | 2.58×10^{-6} | 2.49×10^{-6} |

次に、基準漏えい率の計算と同様の方法を用いて、リークテスト判定基準を求める。基準漏えい率とリークテスト判定基準の関係を 2-2-1-4 図に示す。

リークテスト判定基準の計算においては、乾式キャスク本体内部圧力 P_d が燃料破損（燃料破損率 0.1%）によるガス放出を想定した圧力上昇 P_1 及び設計貯蔵期間経過後の蓋間空間ガス全量の流入を想定した圧力上昇 P_2 を考慮しても負圧を維持できる圧力（気象変化による圧力変動を考慮した大気圧： 9.7×10^4 Pa から P_1 及び P_2 （補足 2 参照）を減じた圧力）となる漏えい孔径 D_0 を繰り返し計算により求める。2-2-1-5 表に計算条件及び計算結果を示す。なお、2-2-1-5 表に示さない計算条件は 2-2-2-1 表と同じである。

2-2-1-5 表 リークテスト判定基準の漏えい孔径の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|--|-----------------------|-----------------------|
| P_0 : 気象変化による圧力変動を考慮した大気圧 (Pa) | 9.7×10^4 | |
| P_1 : 燃料破損による乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 (Pa) | □ | □ |
| P_2 : 設計貯蔵期間経過後に蓋間空間ガスの流入を仮定した場合の乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 (Pa) | □ | □ |
| P_d (t=60 年) : 乾式キャスク本体内部圧力 (Pa) | □ | □ |
| D_0 : リークテスト判定基準における漏えい孔径 (m) | 4.86×10^{-6} | 4.79×10^{-6} |

漏えい孔径 D_0 を基にクヌッセンの式 (②式) により、設計貯蔵期間経過後に乾式キャスク本体内部が負圧を維持できる漏えい率 Q_{02} が得られる。2-2-1-6 表に計算条件及び計算結果を示す。

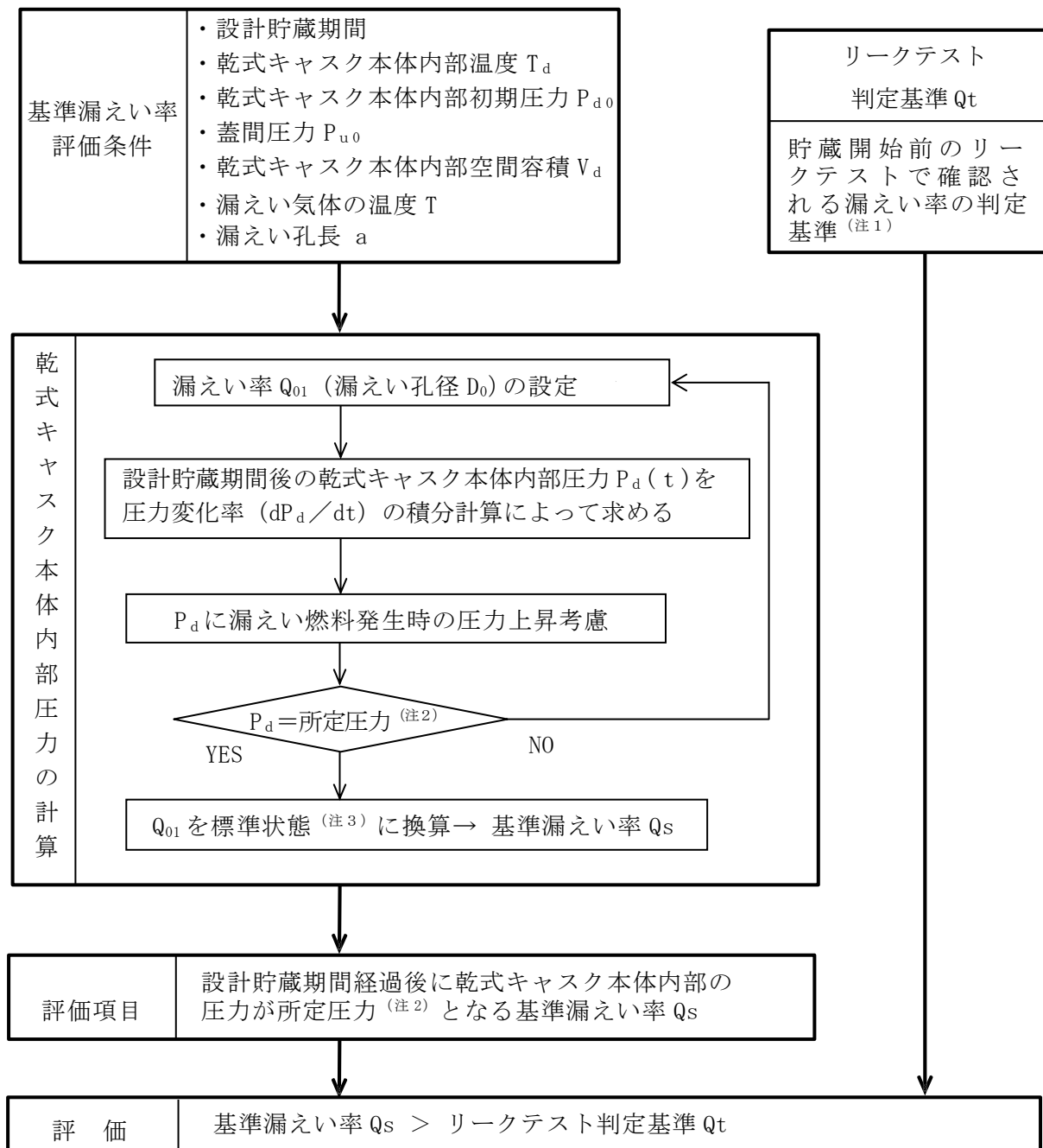
2-2-1-6 表 漏えい率の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|---|------------------------|------------------------|
| P_a : 流れの平均圧力 (Pa) | 2.45×10^5 | |
| P_u : 上流側の初期圧力 (Pa) | 4.1×10^5 | |
| P_d : 下流側の初期圧力 (Pa) | 8.0×10^4 | |
| Q_{02} : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$) | 1.629×10^{-5} | 1.544×10^{-5} |

さらに、漏えい試験条件（標準状態）における漏えい率を算出する。リークテスト判定基準 Q_t は、2-2-1-5 表に示す漏えい孔径に対して、漏えい試験条件（標準状態）として 2-2-1-4 表に示す温度、圧力、気体の条件等をクヌッセンの式（②式）に代入して得られる。2-2-1-7 表に計算条件及び計算結果を示す。

2-2-1-7 表 リークテスト判定基準 Q_t の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|--|--------------------------|-----------------------|
| P_a : 流れの平均圧力 (Pa) | 5.05×10^4 | |
| P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa) | 1.01×10^5 (大気圧) | |
| P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa) | 0 (真空) | |
| D_0 : リークテスト判定基準における 漏えい孔径 (m) | 4.86×10^{-6} | 4.79×10^{-6} |
| Q_t : リークテスト判定基準 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) | 1.60×10^{-6} | 1.52×10^{-6} |

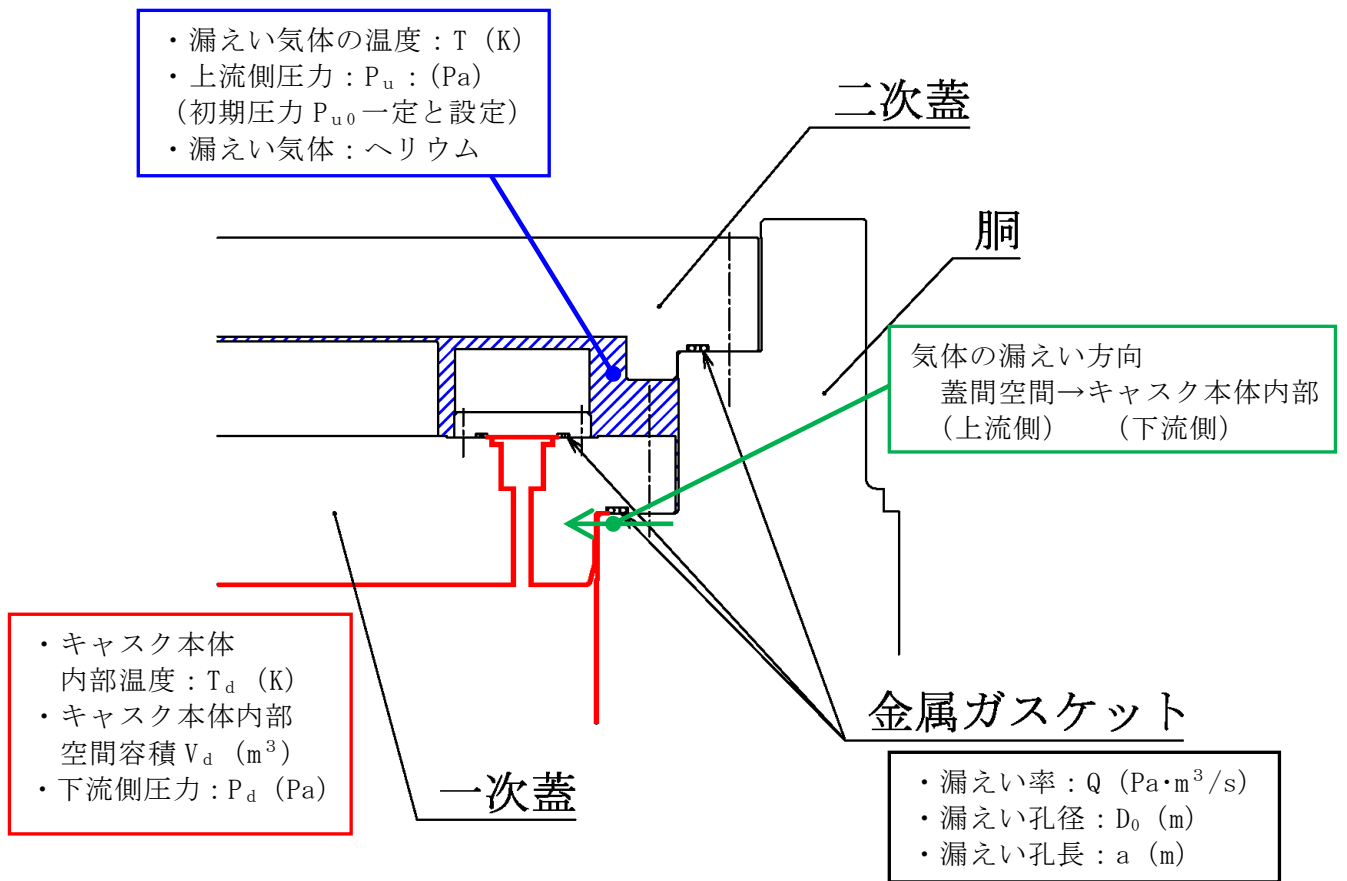


(注1) 貯蔵開始前のリークテストにおいて、一次蓋、ドレンバルブ部及びベントバルブ部の3箇所の漏えい率の合計値がリークテスト判定基準以下であることを確認する。

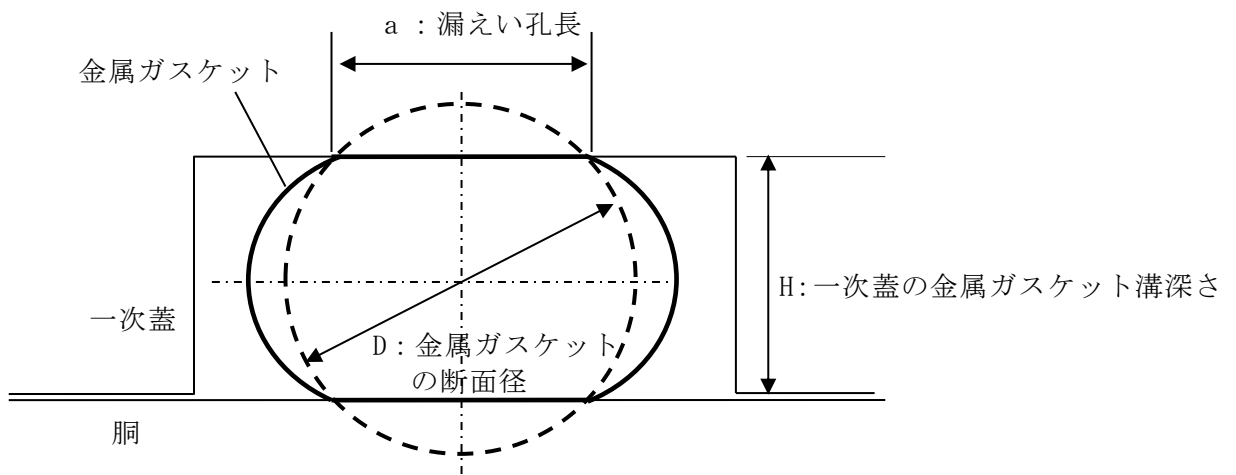
(注2) 所定圧力は、大気圧の変動を考慮する。

(注3) 周囲環境： 1.01×10^5 Pa、 25°C とする。

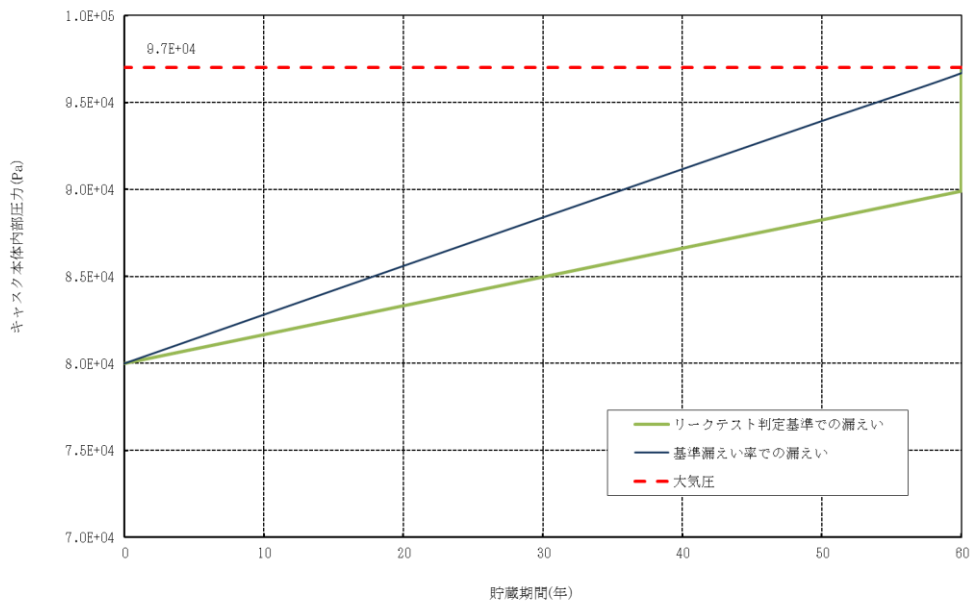
2-2-1-1 図 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の計算フロー



2-2-1-2 図 漏えい率計算の概要

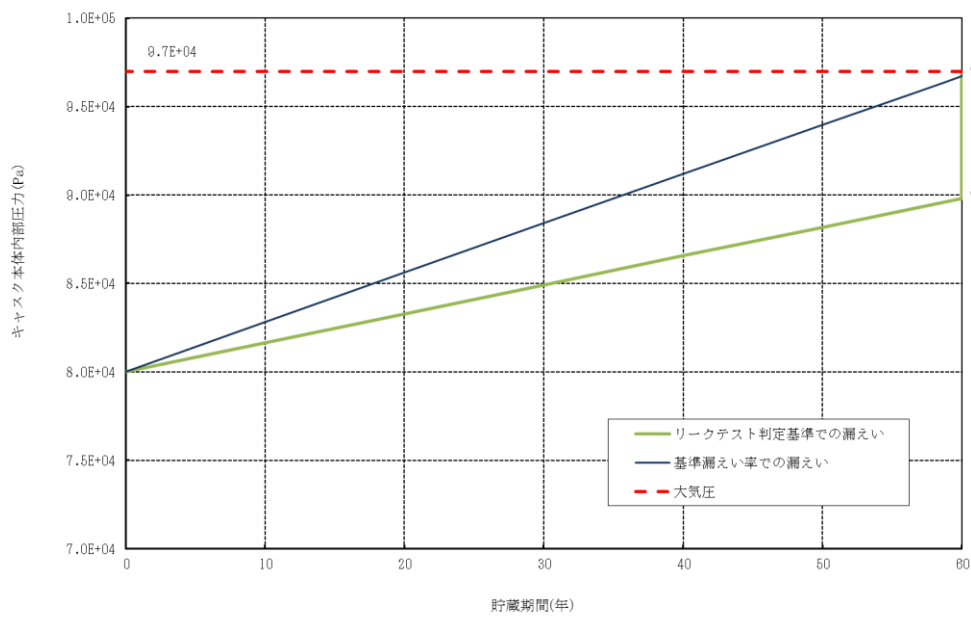


2-2-1-3 図 漏えい孔長



設計貯蔵期間経過後に蓋間空間ガス全量の流入を想定した圧力上昇を考慮

(a) 乾式キャスク (タイプ 1)



設計貯蔵期間経過後に蓋間空間ガス全量の流入を想定した圧力上昇を考慮

(b) 乾式キャスク (タイプ 2)

※基準漏えい率及びリークテスト判定基準は、標準状態に換算する前の値

2-2-1-4 図 基準漏えい率とリークテスト判定基準の関係

3. 参考文献

- (1) International Organization for Standardization, “Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages” , ISO 12807, (1996).
- (2) (一社) 日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).
- (3) 自然科学研究機構 国立天文台, 「理科年表 (平成 28 年度版)」, (2015).

(補足 1) 燃料破損による乾式キャスク本体内部圧力上昇量の計算

乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 P_1 は、以下式で算出される。2-2-1-8 表に計算条件及び計算結果を示す。

$$P_1 = (P_f \times V_p) / (V_d + V_p) \dots\dots\dots ⑦$$

2-2-1-8 表 燃料破損による乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 P_1 の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|--|-------------------|-------------------|
| P_f : 貯蔵中の燃料棒内圧力 (Pa) (注 1) | | |
| V_d : 乾式キャスク本体内部空間の容積 (m ³) | | |
| V_p : 燃料棒からの放出ガス体積 (m ³) (注 2) | | |
| V_{p0} : 燃料棒のプレナム体積 (m ³) | | |
| n : 燃料集合体 1 体あたりの燃料棒本数 (本) | 179 | 264 |
| N : キャスク 1 基あたりの燃料集合体収納体数 (体) | 32 | 24 |
| α : 燃料棒破損率 (-) | 0.001 | |
| P_1 : 乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 (Pa) | | |

(注 1) 貯蔵中の燃料棒内圧力 P_f は以下のとおり算出される。2-2-1-9 表に計算条件及び計算結果を示す。

$$P_f = P_0 \times T_0 / T_f$$

(注 2) 燃料棒からの放出ガス体積 V_p は以下の通り算出される。

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

2-2-1-9 表 貯蔵中の燃料棒内圧力 P_f の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| P_0 : 炉内寿命末期の燃料棒最大内圧 (Pa) | | |
| T_0 : 貯蔵中の燃料被覆管表面温度 (K) | 488.15 | 498.15 |
| T_f : 炉内定格出力時の燃料被覆管表面温度 (K) | | |
| P_f : 貯蔵中の燃料棒内圧力 (Pa) | | |

(補足 2) 蓋間空間ガス全量の流入による乾式キャスク本体内部圧力上昇量の計算

設計貯蔵期間経過後に蓋間空間ガス全量の流入を仮定した場合の乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 P_2 は、以下式で算出される。2-2-1-10 表に計算条件及び計算結果を示す。

$$P_2 = \frac{P_{u0} \times V_u}{V_d + V_u} \times \frac{T_d}{T} \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

2-2-1-10 表 蓋間空間ガス全量の流入による乾式キャスク本体内部の圧力上昇量 P_2 の計算条件及び計算結果

| | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|---|----------------------|----------------------|
| P_{u0} : 蓋間空間の初期圧力 (Pa) | 4.1×10^5 | |
| V_d : 乾式キャスク本体内部空間の容積 (m^3) | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| V_u : 蓋間空間の容積 (m^3) | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| T_d : 乾式キャスク本体内部の温度 (K) | 488.15 | 498.15 |
| T : 漏えい気体の温度 (K) | 248.15 | 248.15 |
| P_2 : 蓋間空間ガス全量の流入による乾式 キャスク本体内部の圧力上昇量 (Pa) | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

2-2-2 金属ガスケットの漏えい率の設定根拠

1. 概要

本資料は、資料 11 「使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」において示す、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）に使用する金属ガスケットの漏えい率の設定根拠、及びその妥当性について説明するものである。

2. 設定根拠

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）に使用する金属ガスケットの漏えい率は、金属ガスケットメーカーカタログ値として 1×10^{-9} std. cc/sec（約 1×10^{-10} Pa \cdot m³/s）の性能を有する金属ガスケットを使用する。

金属ガスケットの漏えい率については、（一財）電力中央研究所で実施された実機大のキャスク蓋部モデルによる約 19 年間の長期密封性能試験⁽²⁾が実施されており、金属ガスケットの漏えい率の実力値として、約 19 年間にわたり平均値 6.51×10^{-10} Pa \cdot m³/s（標準偏差： 3.40×10^{-10} Pa \cdot m³/s）で維持されている。

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）に使用する金属ガスケットの漏えい率としては、上記の金属ガスケットの実力値に基づき、漏えい率平均 6.51×10^{-10} Pa \cdot m³/s に標準偏差 3.40×10^{-10} Pa \cdot m³/s の 3 倍を加算した 1.67×10^{-9} Pa \cdot m³/s を、保守的に切り上げた値として、 1×10^{-8} Pa \cdot m³/s と設定した。

3. 妥当性の説明







乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の金属ガスケットの長期健全性については、（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⁽¹⁾を基に、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）に使用する金属ガスケットは長期貯蔵中における応力緩和による漏えい率への影響を考慮しても、設計貯蔵期間（60 年）を通じて初期の漏えい率が維持できることを示している。

また、上記に加え、2. 項に示す（一財）電力中央研究所で実施された実機大のキャスク蓋部モデルによる長期密封性能試験結果⁽²⁾からも金属ガスケットの漏えい率が維持できることを補足的に説明している。

これらの試験で使用した金属ガスケットと乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の金属ガスケットの仕様比較を 2-2-2-1 表に示す。2-2-2-1 表に示すとおり、断面径及び内径に相違はあるが、断面径が大きいほど金属ガスケットの密封性能は高くなる傾向にあり⁽³⁾、また、周長の違いについても密封性能への影響はないことが報告されている⁽⁴⁾。乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の金属ガスケットの長期健全性を示すにあたり、（一財）電力中央研究所の試験結果を適用することは妥当である。

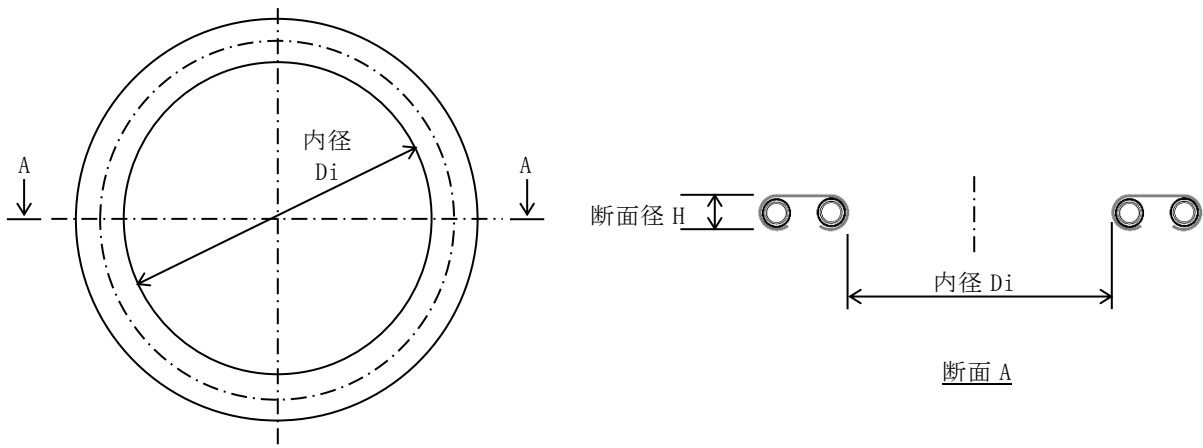
したがって、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の金属ガスケットの漏えい率（ 1×10^{-8} Pa \cdot m³/s）の設定は妥当である。

2-2-2-1 表 金属ガスケットの仕様比較

| 項目 | | (一財)電力中央研究所 長期密封性能試験 | | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) | 相違点に対する評価 |
|------------|---------------|---|--------------------------|--|---|--|
| | | 要素 試験 ⁽¹⁾ | 実規模 試験 ⁽²⁾ | | | |
| タイプ | | 二重被覆コイルスプリング型 | | | | 相違なし |
| 材質 | | 外皮材：アルミニウム 内皮材：ニッケル基合金 コイルスプリング：ニッケル基合金 | | | | |
| 断面径 (H) | 一次蓋 | φ 5.5mm | φ 6.1mm ^(注1) |  |  | <p>(一財)原子力発電技術機構で実施された金属ガスケットの密封性能試験において、断面径が大きいものほど高いLMP値まで漏れにくい傾向があることが報告されている⁽³⁾。 乾式キャスク(タイプ1)及び乾式キャスク(タイプ2)の金属ガスケット断面径は(一財)電力中央研究所の試験より大きく、乾式キャスク(タイプ1)及び乾式キャスク(タイプ2)の金属ガスケットの閉じ込め性能は(一財)電力中央研究所の試験で用いられたガスケットと同等以上である。</p> |
| | ドレン・ベントバルブカバー | | — | | | |
| 内径 (Di) | 一次蓋 | φ 176mm | φ 1767mm ^(注1) |  |  | <p>金属ガスケットの周長の違いによるクリープ変形の閉じ込め性能への影響は無いと評価されている⁽⁴⁾。したがって、内径の違いは、初期の漏えい率を長期間維持できるかという観点では影響は無い。</p> |
| | ドレン・ベントバルブカバー | | — |  |  | |

(注1) 実規模試験の断面径(H)及び内径(Di)は、漏えい率測定を実施した二次蓋の値を示す。

(2-2-2-1 図参照)



2-2-2-1 図 金属ガスケットの断面径 (H) 及び内径 (Di)

2. 参考文献

- (1) 加藤治, 伊藤千浩, 「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, (1992).
- (2) (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).
- (3) (一財) 原子力発電技術機構, 「平成 12 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(乾式キャスク貯蔵技術確証試験)報告書」, (2001).
- (4) 加藤治, 伊藤千浩, 三枝利有, 「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, (1996).

2-2-3 乾式キャスク蓋間圧力の管理値
及び監視頻度の設定根拠

1. 概要

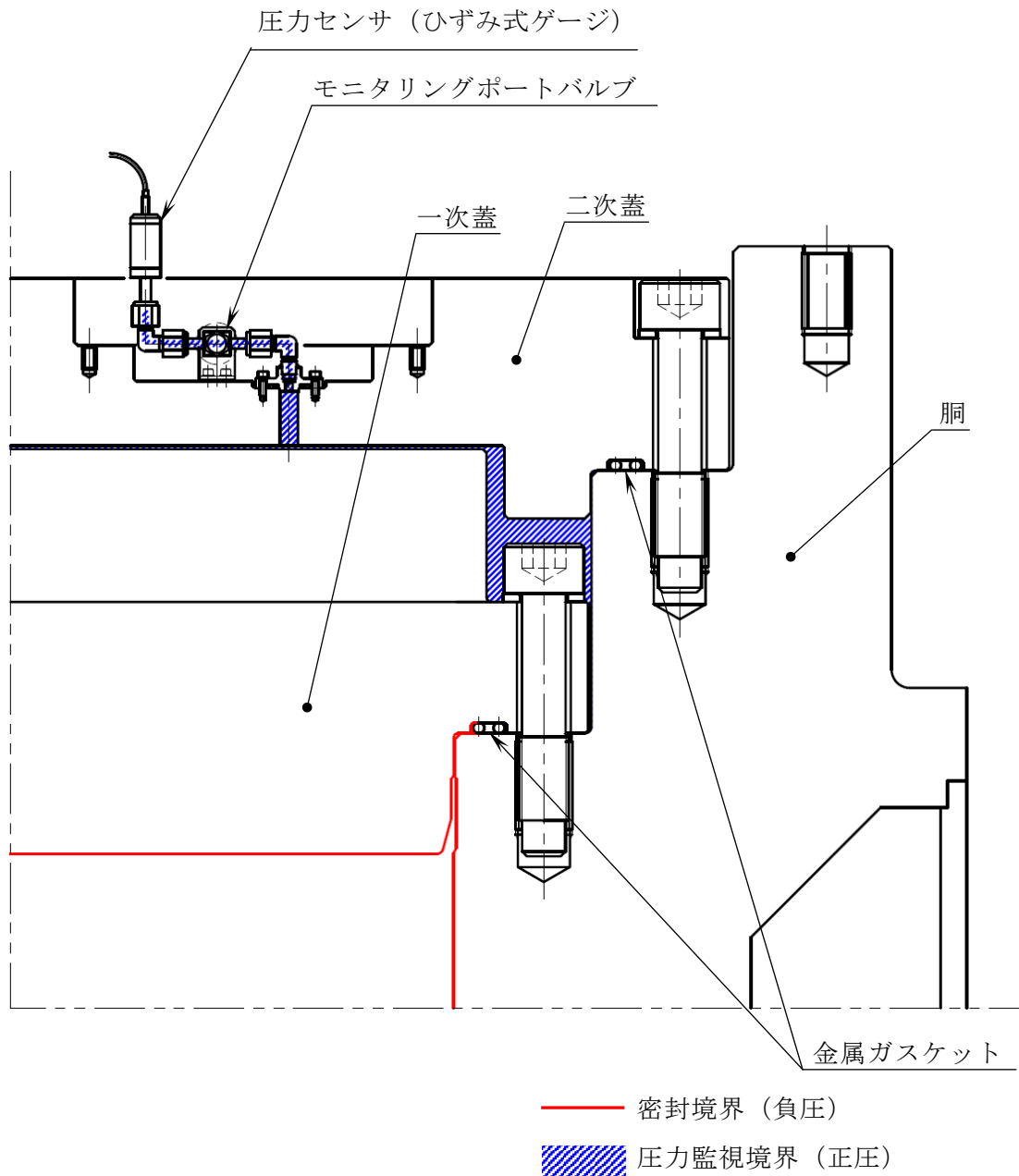
本資料は、資料 11「使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」のうち、別添 1「使用済燃料貯蔵用容器の監視頻度の妥当性に関する説明書」において示す乾式キャスク蓋間圧力の管理値及び監視頻度の設定根拠について説明するものである。

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の一次蓋－二次蓋間圧力（以下、蓋間圧力という。）の監視頻度は、以降に示す運用上の管理値を設定した上で、乾式キャスクが内包する放射性物質が乾式キャスク外部に放出される前に密封シール部の異常を検知することができる頻度とする。なお、乾式キャスクの蓋間圧力は初期設定圧力を 0.41 MPa・abs 以下とし、乾式キャスク貯蔵時には、密封シール部の異常を検知するため、運用上の管理値を設定する。

以降に示す設定根拠に基づき、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）では、運用上の管理値は約 0.161 MPa・abs（0.161325 MPa・abs / 60 kPa G）とし、3 ヶ月に 1 回の頻度で圧力監視を行うこととした。

2. 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力計の構成に関する補足

使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力計（以下「蓋間圧力計」という。）については、2-2-3-1 図に示すとおり圧力センサ（ひずみ式ゲージ）を、圧力監視境界である二次蓋の貫通部（モニタリングポート）に設けたモニタリングポートバルブに接続し、蓋間圧力に応じた電気信号を可搬型データロガーにより圧力値に変換し確認する。なお、蓋間圧力計は密封境界である一次蓋に取り付けるものではないため、密封機能に影響を与えるものではない。



2-2-3-1 図 蓋間圧力計の取付位置

3. 蓋間圧力の管理値及び監視頻度の設定

乾式キャスク蓋間空間の圧力監視に伴う管理値、及び監視頻度については、保守的に乾式キャスクの閉じ込め機能の低下を想定して、以下に示す手順で検討する。

① 蓋間圧力の初期充填圧力の検討（3.1項参照）

貯蔵中の定常状態に達した際の蓋間圧力が 0.41 MPa・abs を超えない初期蓋間圧力の最大の初期充填圧力を設定する。

② 蓋間圧力の時間変化の算出（3.2項参照）

①で設定した初期充填圧力を初期値とし、金属ガスケットの漏えい率を基準漏えい率とした場合の60年間の蓋間圧力の時間変化を算出し、蓋間圧力が大気圧に達するまでの年数を確認する。なお、蓋間圧力の時間変化は基準漏えい率が大きい乾式キャスク（タイプ1）を代表して評価する。

③ 蓋間圧力の管理値及び監視頻度の設定（3.3項参照）

②で算出した蓋間圧力の時間変化に基づき、運用上の管理値を設定し、管理値に達してから大気圧の上限に達するまでの猶予期間から圧力監視の監視頻度を設定する。

なお、本評価においては、汎用的な圧力計を使用することを想定して、電気式圧力計に加え、機械式圧力計を使用することも想定した評価条件としている。乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）では、資料11に示すとおり電気式圧力計を使用するが、機械式圧力計と比較して、電気式圧力計の方が圧力計の計器誤差（機械式：±1.6%、電気式：±0.4%）、及び圧力計の最小読取目盛（機械式：5 kPa、電気式：約 2kPa）が小さく、機械式圧力計も使用することを想定した本評価方法は保守的な評価方法となる。

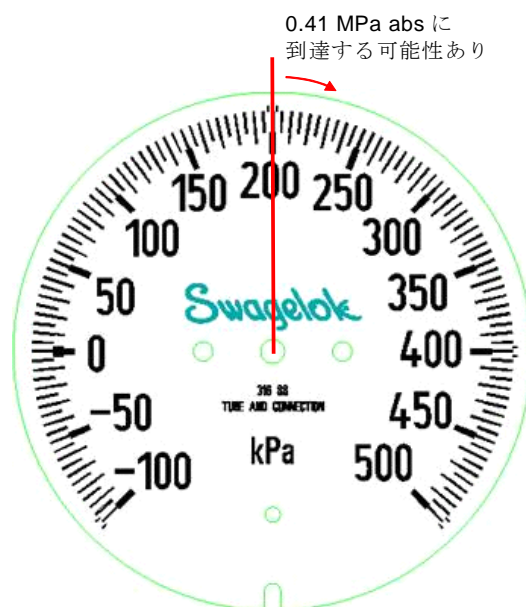
3.1 蓋間圧力の初期充填圧力の検討

初期充填圧力は、通常貯蔵中に想定される圧力変動を考慮しても、蓋の構造強度に基づく許容最大圧力 0.41 MPa・abs を超えない圧力とする必要がある。そこで、周囲環境温度、蓋間空間温度及び使用済燃料の崩壊熱量をパラメータとして、初期充填圧力を 0.301325 MPa・abs（圧力計指示値 200 kPa・G）とした場合の蓋間空間圧力を 2-2-3-2 表に示す。

同表に示す通り、10℃の環境下で初期充填圧力を 0.301325 MPa・abs とし、その後、周囲環境温度が 50℃で崩壊熱量により温度上昇した場合に蓋間圧力が最大（0.409 MPa・abs）となり、許容最大圧力 0.41 MPa・abs 以下となる。

なお、2-2-3-2 図に示す通り機械式圧力計の場合、圧力計の最小目盛が 5kPa であることから、仮に初期充填圧力を 0.306325 MPa・abs（圧力計指示値 205 kPa・G）とした場合、最大蓋間圧力は 0.416 MPa・abs となり、許容最大圧力 0.41 MPa・abs を超える結果となる（詳細は参考 1 を参照）。

以上より、蓋間圧力の初期充填圧力は 0.301325 MPa・abs とする。



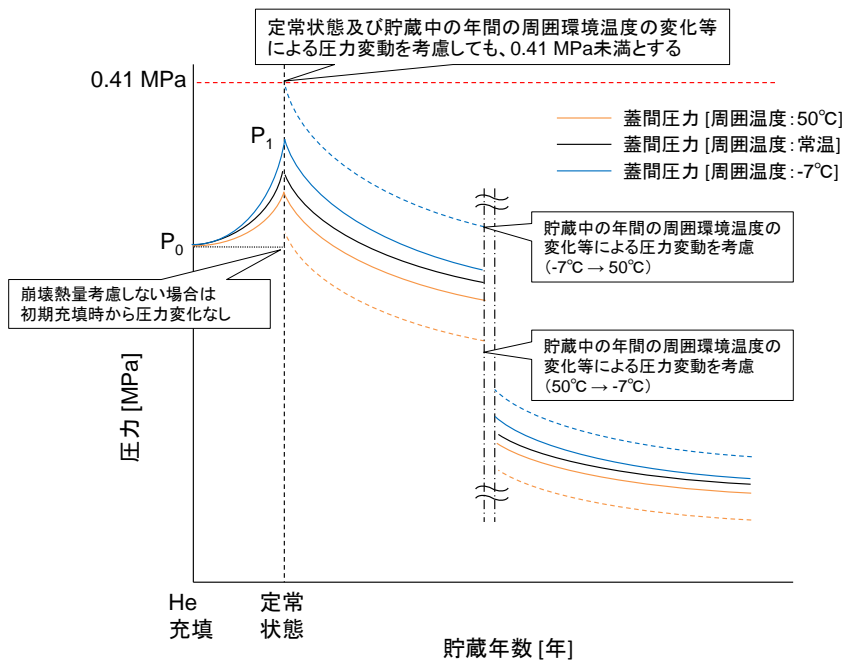
2-2-3-2 図 圧力計の目盛（機械式圧力計の場合）

2-2-3-1 表 初期充填圧力を 0.301325 MPa・abs (圧力計指示値 200 kPa・G) とした場合の蓋間圧力

| 評価例 | FH/B 条件 | | 乾式貯蔵施設条件 | | | |
|---------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| | 充填時 想定 温度 (°C) | 蓋間圧力 [充填時] (MPa・abs) | 周囲 環境 温度 (°C) | 蓋間 温度 (°C) | 蓋間圧力 ^(注2) (MPa・abs) | 蓋間圧力 [計器誤差考慮] (MPa・abs) |
| 崩壊熱量を 無視する 場合 | 40 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.311 | 0.316 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.287 | 0.287 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.256 | 0.251 [-1.6%] |
| | 常温 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.327 | 0.333 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.301 | 0.301 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.269 | 0.264 [-1.6%] |
| | 10 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.344 | 0.350 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.317 | 0.317 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.283 | 0.278 [-1.6%] |
| 崩壊熱量を 考慮する 場合 | 40 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.364 | 0.370 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.340 | 0.340 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.309 | 0.304 [-1.6%] |
| | 常温 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.382 | 0.389 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.357 | 0.357 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.325 | 0.319 [-1.6%] |
| | 10 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.402 | 0.409 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.376 | 0.376 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.342 | 0.336 [-1.6%] |

(注1) 崩壊熱量を無視する場合、蓋間温度はヘリウム充填時から変化しないため、2-2-3-3 図中の P_0 で示す圧力と同じ。

(注2) 崩壊熱量により温度上昇した後の圧力。2-2-3-3 図中の P_1 で示す圧力。



2-2-3-3 図 蓋間圧力の時間変化

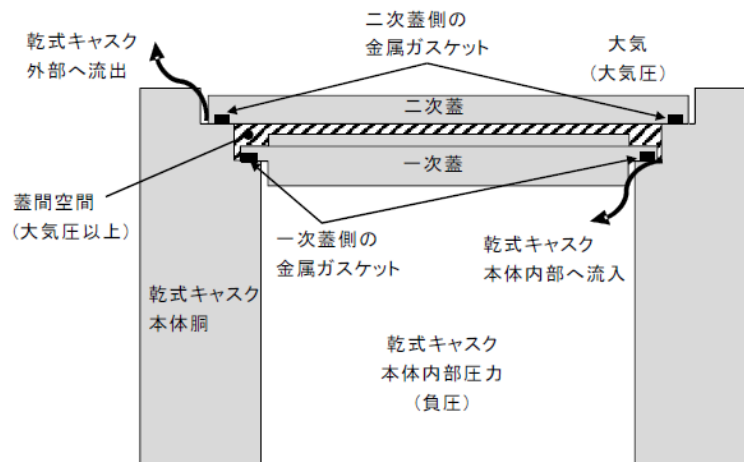
3.2 蓋間圧力の時間変化の算出

通常貯蔵中に想定される蓋間圧力の時間変化について評価する。2-2-3-4 図に蓋間空間からの漏えいの考え方を示す。蓋間圧力は以下に示す条件のもと蓋間圧力の低下を評価する。蓋間圧力及び乾式キャスク本体内部圧力の初期条件を 2-2-3-2 表及び 2-2-3-3 表に示す。ここで、同表において、蓋間圧力の時間変化の評価に適用する初期圧力を塗潰している。

<時間変化の計算条件>

- ① 金属ガスケットの漏えい率を基準漏えい率とする。
- ② 乾式キャスク蓋間空間のヘリウムガスが、一次蓋側（乾式キャスク内部）及び二次蓋側（乾式キャスク外部）の二方向から漏えいする。
- ③ ヘリウムガス充填時は、FH/B のいずれの環境温度（10～40℃）においても同じ圧力値までヘリウムガスを充填し、充填直後の蓋間温度は保守的に周囲環境温度と同じと仮定する。
- ④ 想定される全ての発熱量条件での圧力変動幅を包絡するよう、蓋間圧力は(a)崩壊熱量を見捨てる場合、(b)崩壊熱量を考慮する場合の2通りで計算する。
- ⑤ 貯蔵開始後は、周囲環境温度を-7℃～50℃の範囲で変動すると想定し、いずれの環境温度においても0.41 MPa・absを超えない圧力とする。
- ⑥ 乾式キャスク本体内部圧力は、蓋間空間からのヘリウムガス流入による圧力上昇を考慮する。
- ⑦ 圧力計の計器誤差を±1.6%とする。

上記計算条件に基づき算出した設計貯蔵期間（60年）中の蓋間圧力等の経時変化を 2-2-3-5 図に示す。2-2-3-5 図(a)は崩壊熱量を見捨てる、2-2-3-5 図(b)は崩壊熱量を考慮した場合の経時変化である。同図中の破線は、圧力計の計器誤差と周囲環境温度の変化による圧力変動を示す。2-2-3-5 図に示す通り、蓋間圧力が大気圧の上限値（0.105 MPa・abs）に最も早く到達する条件は、崩壊熱量を見捨てる場合（2-2-3-5 図(a)）で初期圧力が最も低い条件であり、貯蔵期間31年で大気圧に達する。



2-2-3-4 図 蓋間空間からの漏えいの考え方

2-2-3-2 表 蓋間圧力の初期条件 (2-2-3-1 表と同じ)

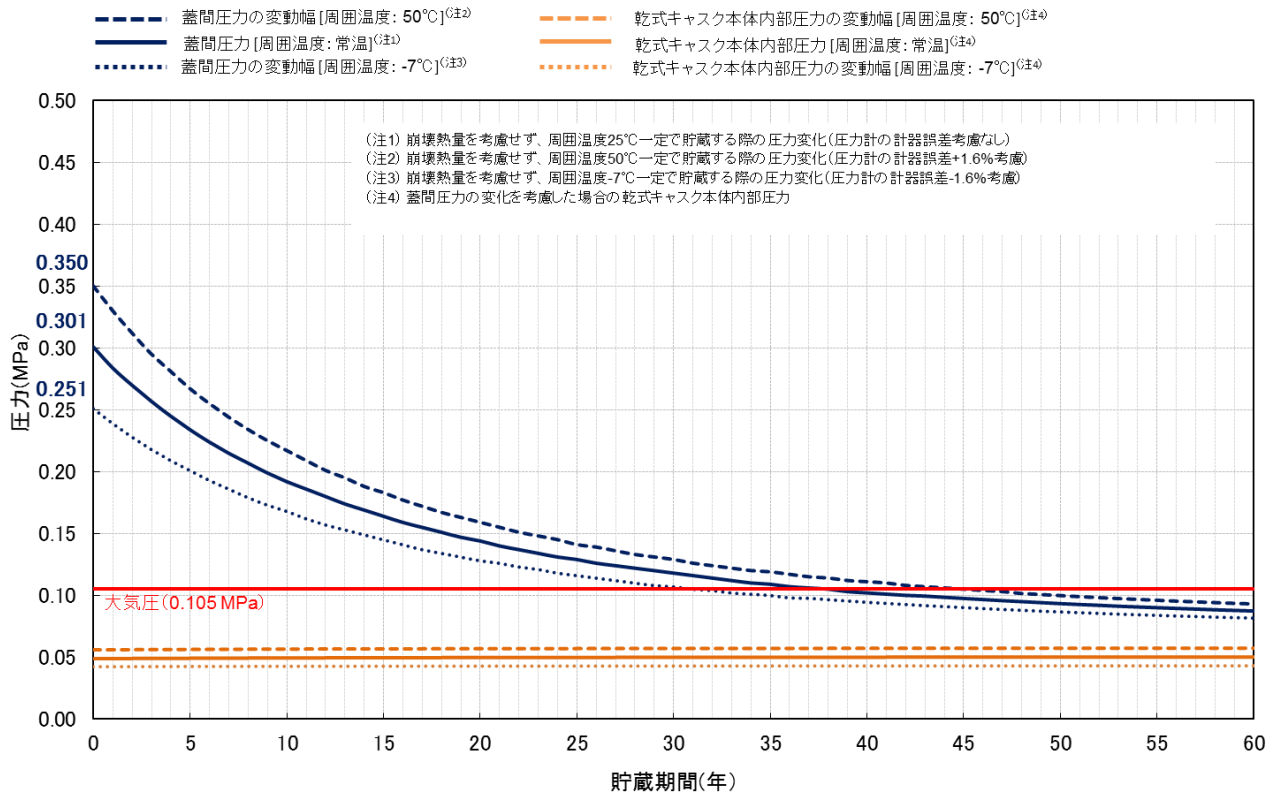
| 評価例 | FH/B 条件 | | 乾式貯蔵施設条件 | | | |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | 充填時 想定 温度 (°C) | 蓋間圧力 [充填時] (MPa・abs) | 周囲 環境 温度 (°C) | 蓋間 温度 (°C) | 蓋間圧力 ^(注2) (MPa・abs) | 蓋間圧力 [計器誤差考慮] (MPa・abs) |
| 崩壊熱量を 無視する場合 | 40 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.311 | 0.316 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.287 | 0.287 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.256 | 0.251 [-1.6%] |
| | 常温 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.327 | 0.333 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.301 | 0.301 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.269 | 0.264 [-1.6%] |
| | 10 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.344 | 0.350 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.317 | 0.317 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.283 | 0.278 [-1.6%] |
| 崩壊熱量を 考慮する場合 | 40 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.364 | 0.370 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.340 | 0.340 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.309 | 0.304 [-1.6%] |
| | 常温 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.382 | 0.389 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.357 | 0.357 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.325 | 0.319 [-1.6%] |
| | 10 | 0.301325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.402 | 0.409 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.376 | 0.376 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.342 | 0.336 [-1.6%] |

(注1) 崩壊熱量を無視する場合、蓋間温度はヘリウム充填時から変化しないため、2-2-3-3 図中の P_0 で示す圧力と同じ。

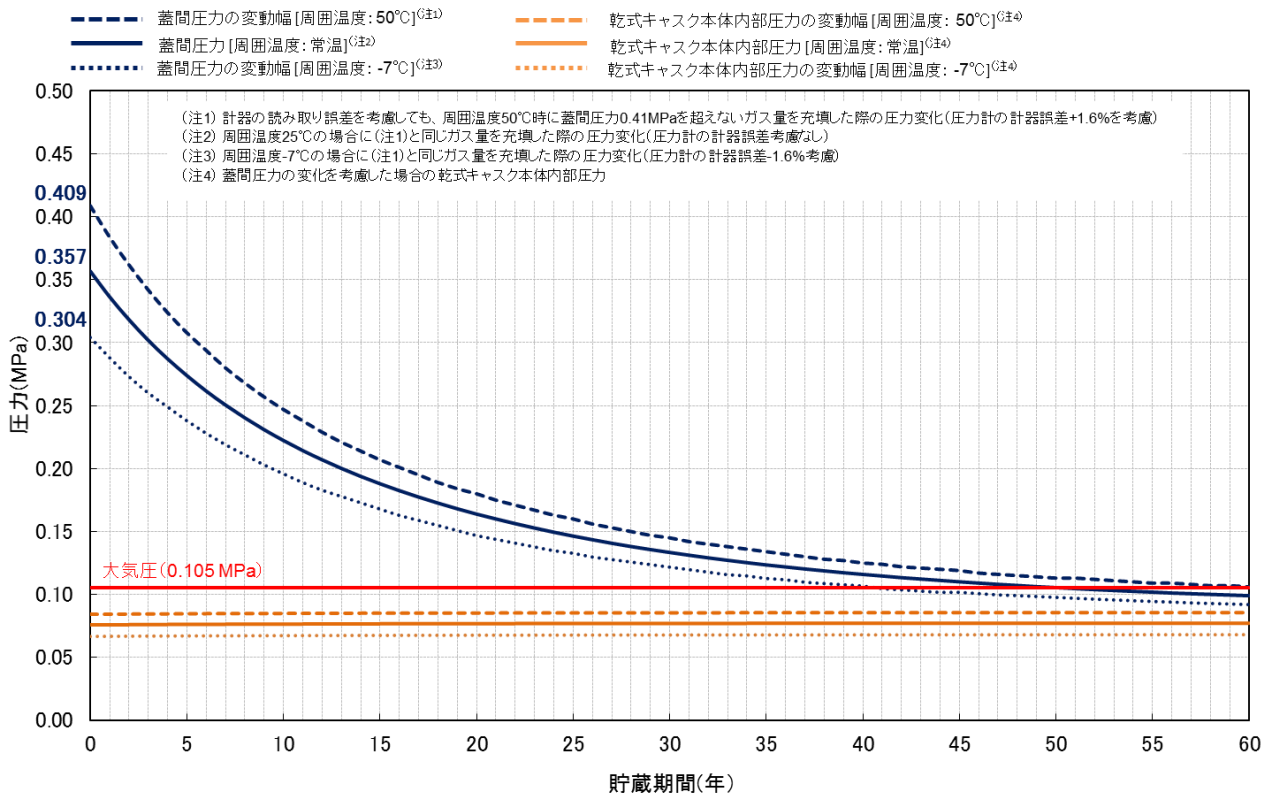
(注2) 崩壊熱量により温度上昇した後の圧力。2-2-3-3 図中の P_1 で示す圧力。

2-2-3-3 表 乾式キャスク本体内部圧力の初期条件

| 評価例 | FH/B 条件 | | 乾式貯蔵施設条件 | | |
|-----------------|-------------------------|--|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| | 充填時 想定 温度 (°C) | 乾式キャスク 本体内部圧力 [初期充填時] (MPa・abs) | 周囲 環境 温度 (°C) | 乾式キャスク 本体内部温度 (°C) | 乾式キャスク 本体内部圧力 (MPa・abs) |
| 崩壊熱量を 無視する場合 | 40 | 0.049 | 50 | 50 | 0.051 |
| | | | 常温 | 常温 | 0.047 |
| | | | -7 | -7 | 0.042 |
| | 常温 | 0.049 | 50 | 50 | 0.053 |
| | | | 常温 | 常温 | 0.049 |
| | | | -7 | -7 | 0.044 |
| | 10 | 0.049 | 50 | 50 | 0.056 |
| | | | 常温 | 常温 | 0.052 |
| | | | -7 | -7 | 0.046 |
| 崩壊熱量を 考慮する場合 | 40 | 0.049 | 50 | 215 | 0.076 |
| | | | 常温 | 190 | 0.072 |
| | | | -7 | 158 | 0.067 |
| | 常温 | 0.049 | 50 | 215 | 0.080 |
| | | | 常温 | 190 | 0.076 |
| | | | -7 | 158 | 0.071 |
| | 10 | 0.049 | 50 | 215 | 0.084 |
| | | | 常温 | 190 | 0.080 |
| | | | -7 | 158 | 0.075 |



(a) 崩壊熱量を無視した場合



(b) 崩壊熱量を考慮した場合

2-2-3-5 図 蓋間圧力の時間変化

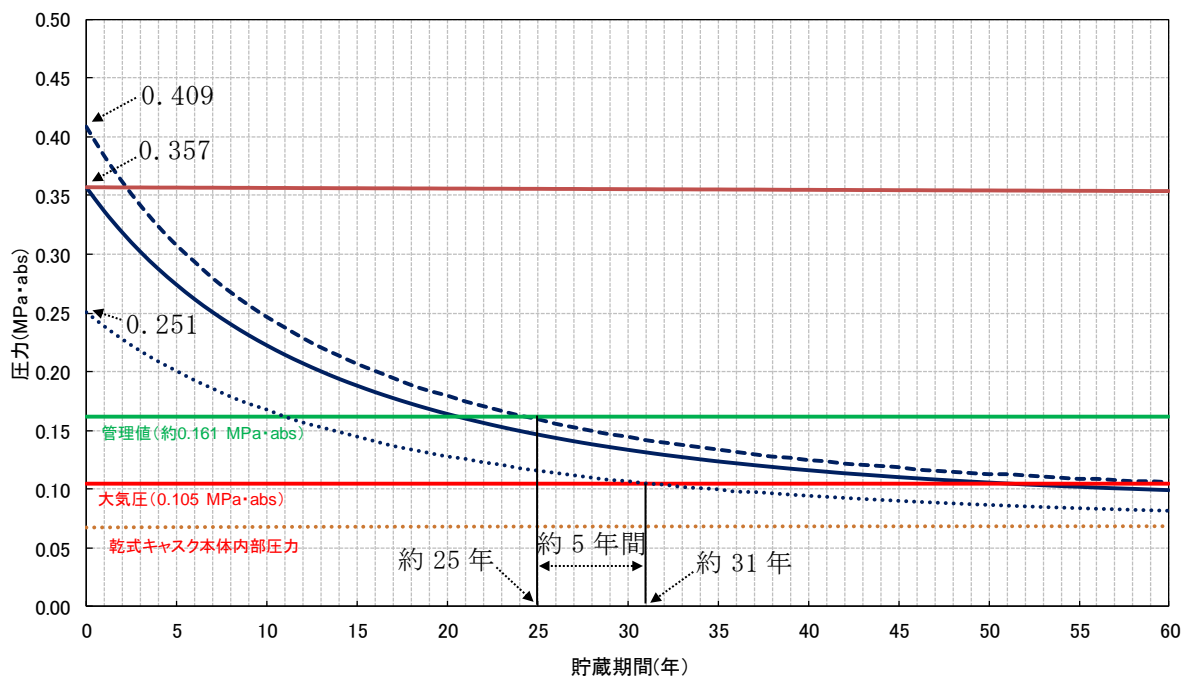
3.3 蓋間圧力の管理値及び監視頻度の設定

2-2-3-5 図の蓋間圧力の経時変化より圧力監視のための管理値を設定する。2-2-3-5 図に示す通り、周囲環境の温度変化（-7 °C～50 °C）による圧力変動を考慮すると、崩壊熱量が無視した場合（2-2-3-5 図(a)）に最も蓋間圧力は低くなり、蓋間圧力は貯蔵開始から約 31 年後に大気圧に到達する。

ここで、管理値は、仮に蓋間圧力が管理値に最も遅く到達した場合を想定しても、大気圧に到達するまでに乾式キャスクの FH/B への移送等の対応を行うまでの十分な期間として、約 5 年間を確保するものとして設定する。

2-2-3-5 図に示す経時変化に基づき、蓋間圧力が最大、及び最小となる場合を抽出した蓋間圧力の経時変化を 2-2-3-6 図に示す。このとき、大気圧到達時点から 5 年間程度の余裕を確保した場合、管理値は貯蔵期間 25 年時の蓋間圧力から設定される。貯蔵期間 25 年時で最も高い蓋間圧力は、崩壊熱量を考慮した場合で初期圧力が最も高い条件であり、0.160 MPa・abs である。そのため、圧力計の 5 kPa・G 刻みの目盛に合わせて、管理値は 0.161325 MPa・abs（圧力計指示値 60 kPa・G）と設定する（監視の観点から、圧力を高めに評価した方が、早く検知ができるため）。

なお、乾式キャスク貯蔵時に実際に使用する金属ガスケットの設計漏えい率は 1×10^{-8} Pa・m³/s であり、2-2-3-6 図に示すとおり、金属ガスケットの設計漏えい率による漏えいを考慮した場合には、設計貯蔵期間（60 年）において蓋間圧力が大気圧に到達することはない。



| 凡例 | 圧力条件 |
|-----------------------|---|
| — (solid blue) | 周囲環境温度25°C(崩壊熱量考慮、計器誤差なし) |
| - - - (dashed blue) | 周囲環境温度50°C(崩壊熱量考慮、計器誤差+1.6%、ヘリウム充填時の温度影響考慮) |
| (dotted blue) | 周囲環境温度-7°C(崩壊熱量考慮しない、計器誤差-1.6%、ヘリウム充填時の温度影響考慮) |
| — (solid red) | 金属ガスケットの設計漏えい率による現実的な評価(周囲環境温度25°C、崩壊熱量考慮、計器誤差なし) |
| — (solid green) | 管理値(約0.161MPa・abs) |
| — (solid red) | 大気圧(0.105MPa・abs) |
| (orange dotted) | 乾式キャスク本体内部圧力(周囲環境温度-7°Cの場合の乾式キャスク本体内部圧力の上昇曲線) |

2-2-3-6 図 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化（蓋間圧力が最大/最小となる場合）

<参考1>

2-2-3-4 表 初期充填圧力を 0.306325 MPa・abs (圧力計指示値 205 kPa・G) とした場合の蓋間圧力

| 評価例 | FHB 条件 | | 乾式貯蔵施設条件 | | | |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | 充填時 想定 温度 (°C) | 蓋間圧力 [充填時] (MPa・abs) | 周囲 環境 温度 (°C) | 蓋間 温度 (°C) | 蓋間圧力 ^(注2) (MPa・abs) | 蓋間圧力 [計器誤差考慮] (MPa・abs) |
| 崩壊熱量を 無視する場合 | 40 | 0.306325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.316 | 0.322 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.292 | 0.292 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.260 | 0.255 [-1.6%] |
| | 常温 | 0.306325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.332 | 0.338 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.306 | 0.306 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.273 | 0.268 [-1.6%] |
| | 10 | 0.306325 ^(注1) | 50 | 50 | 0.350 | 0.356 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 常温 | 0.323 | 0.323 [0.0%] |
| | | | -7 | -7 | 0.288 | 0.283 [-1.6%] |
| 崩壊熱量を 考慮する場合 | 40 | 0.306325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.370 | 0.376 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.345 | 0.345 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.314 | 0.308 [-1.6%] |
| | 常温 | 0.306325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.389 | 0.396 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.363 | 0.363 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.330 | 0.324 [-1.6%] |
| | 10 | 0.306325 ^(注1) | 50 | 105 | 0.409 | 0.416 [+1.6%] |
| | | | 常温 | 80 | 0.382 | 0.382 [0.0%] |
| | | | -7 | 48 | 0.347 | 0.341 [-1.6%] |

(注1) 崩壊熱量を無視する場合、蓋間温度はヘリウム充填時から変化しないため、2-2-3-3 図中の P₀ で示す圧力と同じ。

(注2) 崩壊熱量により温度上昇した後の圧力。2-2-3-3 図中の P₁ で示す圧力。

2-3 資料 12 に係る補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
 （使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 2-3 資料12に係る補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 (該当添付資料) |
|-----------|------------------------|------------------------------|--|
| | (名称) | (概要) | |
| 2-3-1 | 臨界解析詳細条件 | 臨界解析条件の詳細を示す。 | 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 |
| 2-3-2 | 臨界解析詳細結果 | 臨界解析結果の詳細を示す。 | 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 |
| 2-3-3 | 臨界解析における条件設定根拠 | 臨界解析の解析条件の設定根拠及び妥当性を示す。 | 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 |
| 2-3-4 | 臨界解析コードSCALEを用いることの妥当性 | 臨界解析コードSCALEを用いることの妥当性を示す。 | 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 |
| 2-3-5 | 水位変動による臨界解析への影響 | 乾式キャスク内部の水位変動による臨界解析への影響を示す。 | 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 |

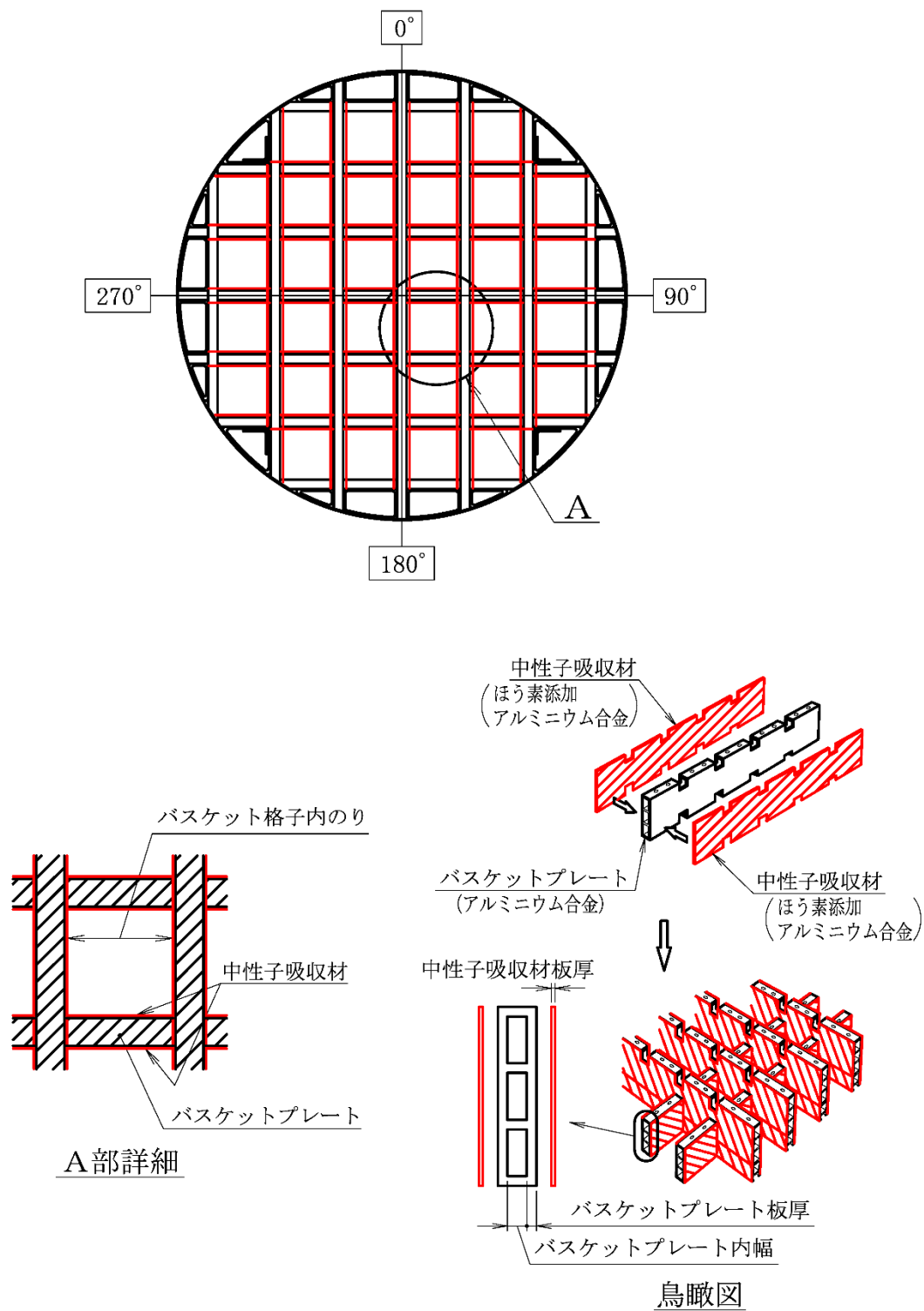
2-3-1 臨界解析詳細条件

本資料は資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書における解析条件の詳細について説明するものである。

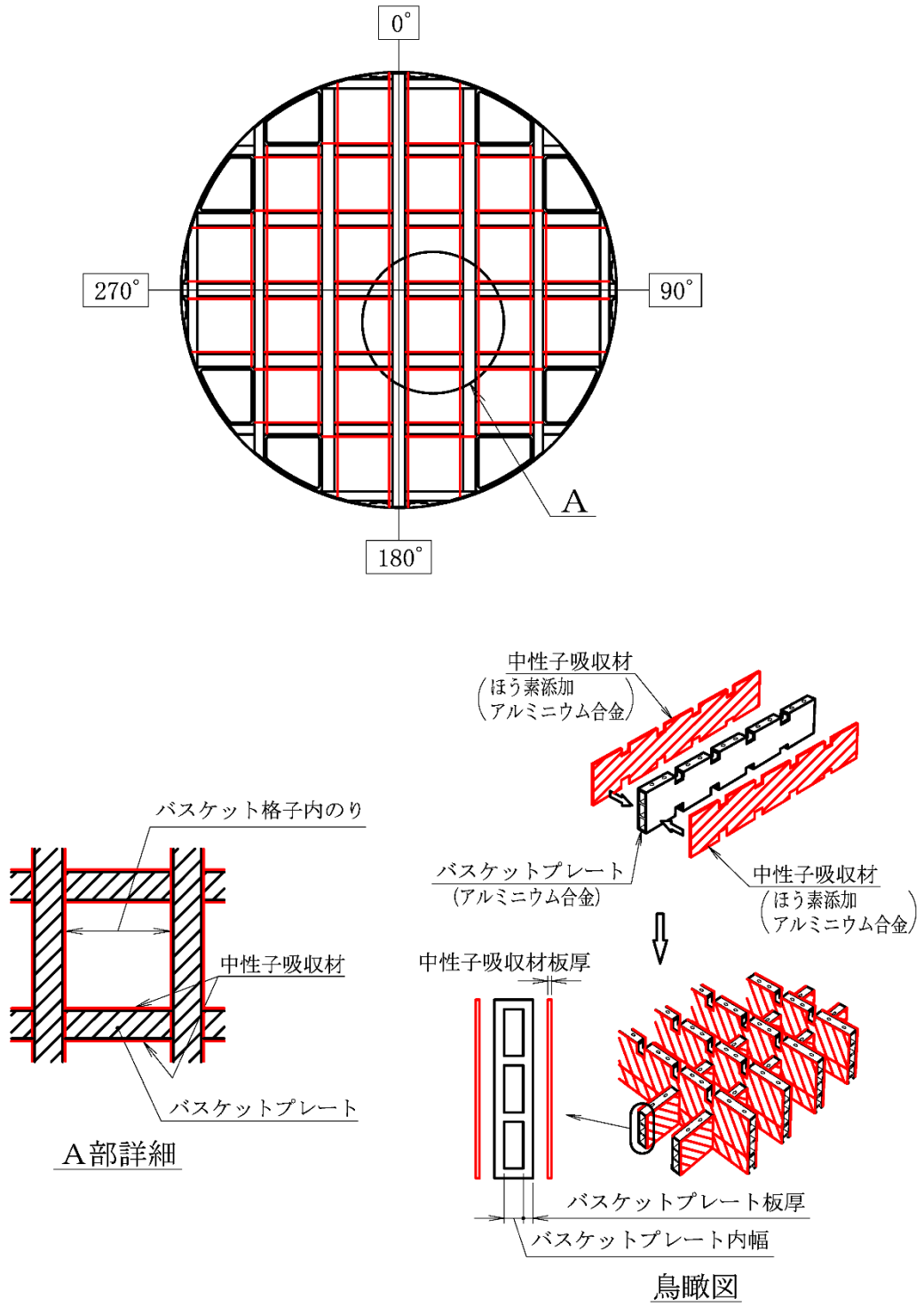
1. 臨界防止機能に関する構造

乾式キャスク（タイプ 1）及び（タイプ 2）は、臨界防止のため以下の配慮を行う。

- a. 使用済燃料集合体を収納するバスケットは格子構造とし、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットプレートは断面形状を中空とし、適切な位置に中性子を有効に吸収するように中性子吸収材であるほう素を含有したアルミニウム合金を配置する。（2-3-1-1 図及び 2-3-1-2 図参照）



2-3-1-1 図 乾式キャスク (タイプ 1) のバスケット構造図



2-3-1-2 図 乾式キャスク（タイプ2）のバスケット構造図

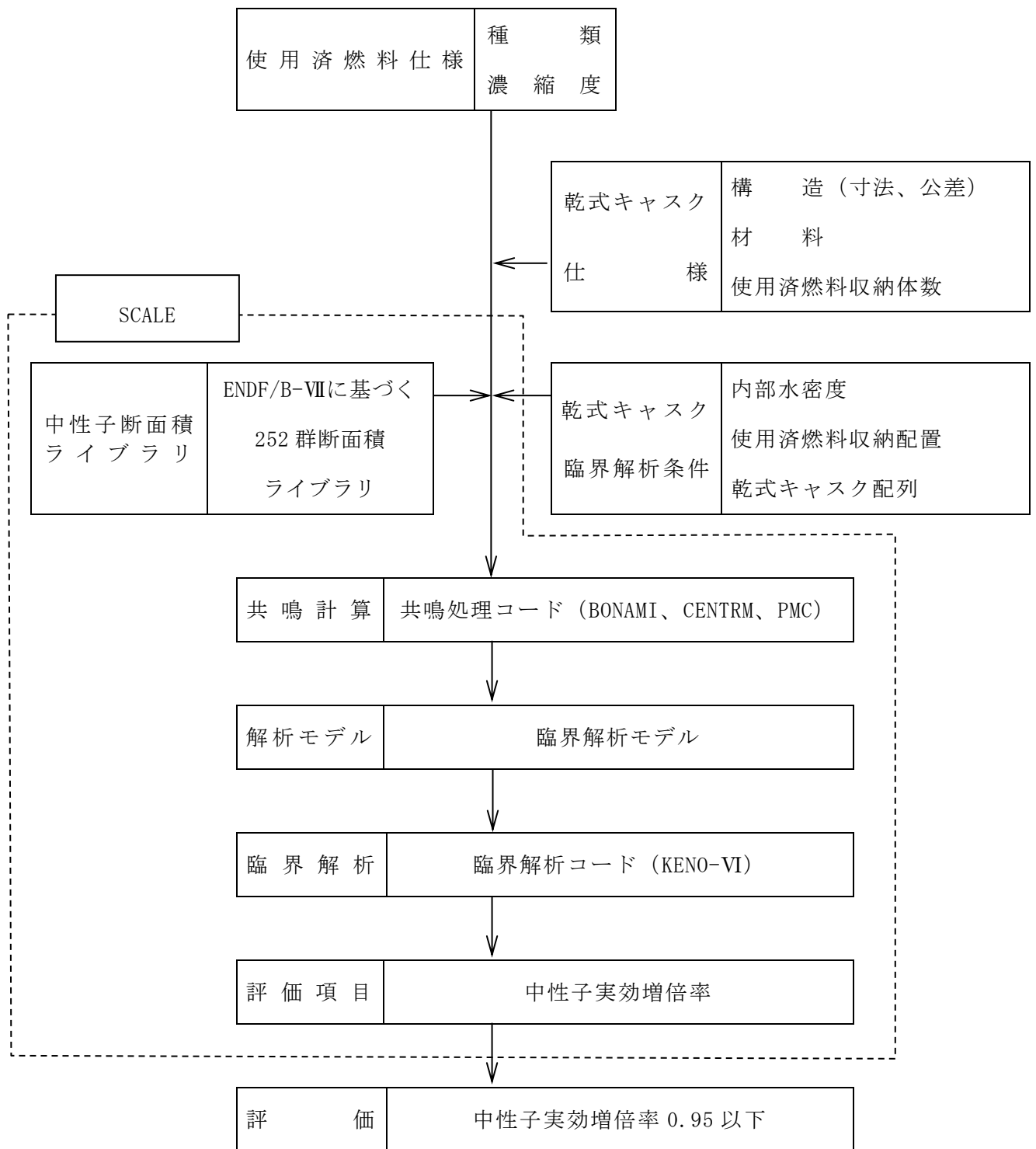
2. 臨界解析条件

2.1 設計基準

使用する臨界解析コードは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、設計基準は中性子実効増倍率 (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 ($k_{eff}+3\sigma \leq 0.95$) であることとする。

2.2 臨界解析フロー

乾式キャスクは、使用済燃料集合体を収納後に内部水が排出され、さらに真空乾燥が行われる。また、密封性能を有した複数の蓋を有しており、乾式キャスク内に水が浸入することはなく、貯蔵中において乾式キャスク内は乾燥状態である。ただし、乾式キャスクへ使用済燃料集合体を収納する際には冠水することから、乾燥状態及び冠水状態の評価を実施する。臨界解析フローを2-3-1-3図に示す。



2-3-1-3 図 臨界解析フロー図

2.3 評価対象燃料及び臨界解析条件

乾式キャスク（タイプ 1）の臨界評価に用いる使用済燃料集合体の仕様は中性子実効増倍率が最も大きくなるように、中央部へ収納する燃料集合体は 14×14 燃料 48,000MWd/t 型（A型）、外周部へ収納する燃料集合体は 14×14 燃料 39,000MWd/t 型（A型）の新燃料とする。乾式キャスク（タイプ 2）の臨界評価に用いる使用済燃料集合体の仕様は中性子実効増倍率が最も大きくなるように、17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）の新燃料とする。

また、臨界解析では収納する使用済燃料の濃縮度上限値を用いるとともに、燃焼度クレジットは採用しない。

臨界解析に用いる使用済燃料集合体の仕様を 2-3-1-1 表に、臨界解析条件を 2-3-1-2 表に示す。乾式キャスク及び使用済燃料集合体の実形状の三次元解析モデルを 2-3-1-4 図から 2-3-1-15 図に示す。

2-3-1-1 表 臨界解析用の使用済燃料集合体の仕様

| 項目 | 単位 | 乾式キャスク (タイプ 1) | | 乾式キャスク (タイプ 2) |
|-------------------|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | |
| 燃料集合体の種類 | - | 14×14 燃料 48,000MWd/t 型 A型 | 14×14 燃料 39,000MWd/t 型 A型 | 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 A型 |
| 燃料材質 | - | 二酸化ウラン | | 二酸化ウラン |
| 被覆管材質 | - | ジルカロイ-4 (注1) | | ジルカロイ-4 (注1) |
| 燃料密度 | %理論密度 | 95 | | 95 |
| 燃料棒直径 | cm | 1.072 | | 0.95 |
| ペレット直径 | cm | 0.929 | | 0.819 |
| 被覆管肉厚 | cm | 0.062 | | 0.057 |
| 燃料有効長 | cm | 364.2 | | 364.8 |
| 燃料棒配列 | - | 14×14 | | 17×17 |
| 燃料集合体当たり の燃料棒数 | 本 | 179 | | 264 |
| 燃料棒ピッチ | cm | 1.41 (注2) | | 1.26 (注2) |
| 燃料集合体の幅 | cm | 19.74 (注3) | | 21.42 (注3) |
| 初期濃縮度 | wt% | | | |

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金 (ジルカロイ-4) であるが、解析上は純度 100% のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分 (スズ等) は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいため、この取り扱いは保守的である。

(注2) 燃料棒ピッチ変化なしの場合。

(注3) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。

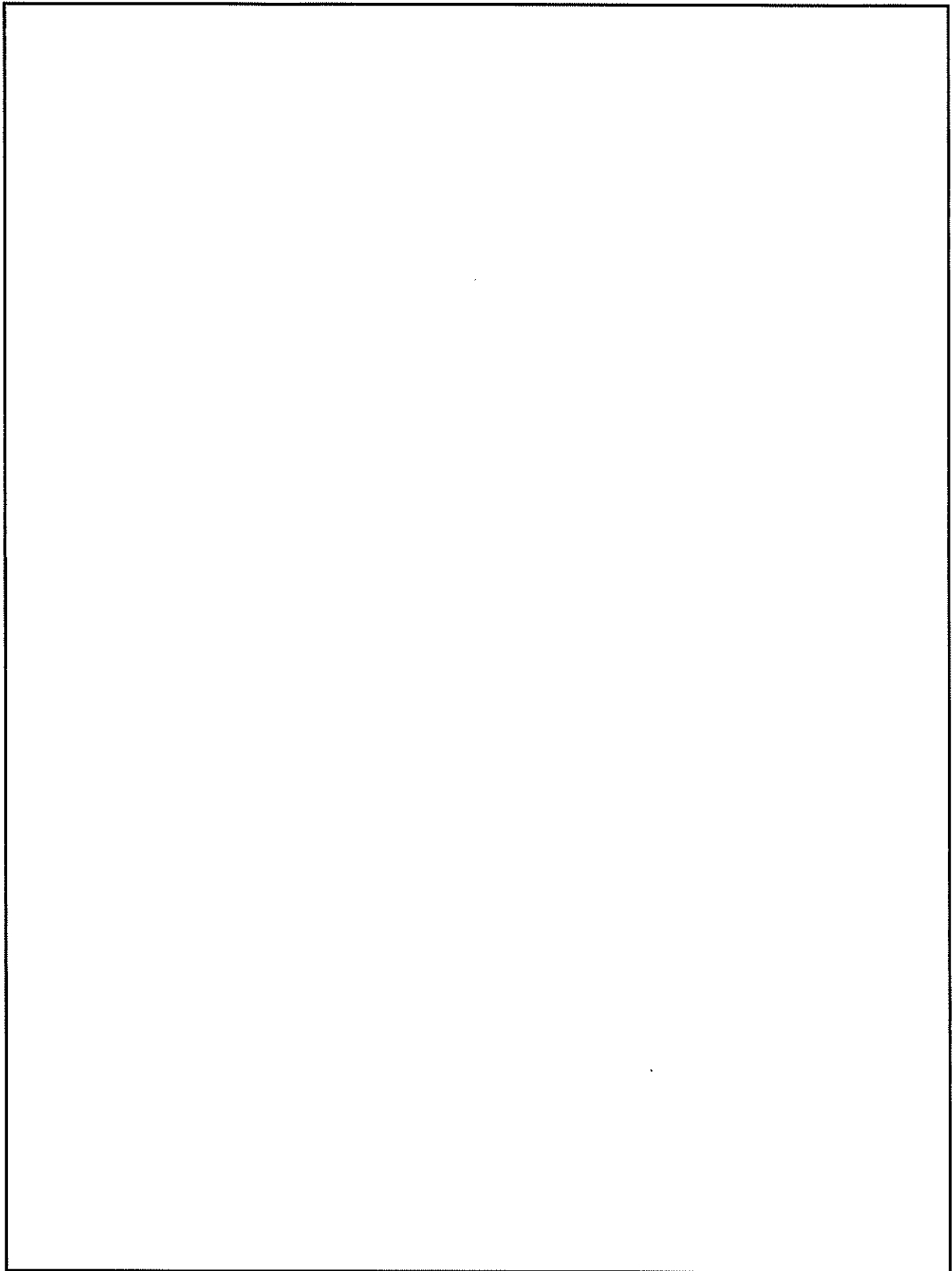
2-3-1-2 表 (1/2) 臨界解析条件

| 項目 | 内容 | |
|------------------|---|--|
| 臨界解析の方法 | 中性子実効増倍率は臨界解析コードを使用して、燃料棒単位セル計算により求まる核定数を用い、乾式キャスクの実形状をモデル化。 | |
| 解析コード | SCALE コードシステム (6.2.1) <ul style="list-style-type: none"> ・ 共鳴計算: BONAMI、CENTRM、PMC ・ 臨界解析: 臨界解析コード KENO-VI (中性子ヒストリー数 <input type="text"/>) ・ 断面積ライブラリ: SCALE コードシステムに内蔵されている ENDF/B-VII に基づいて作成された 252 群断面積ライブラリ | |
| 解 析 条 件 | 収納物 | 乾式キャスク (タイプ 1) : 14×14 燃料 乾式キャスク (タイプ 2) : 17×17 燃料 |
| | 濃縮度 | 乾式キャスク (タイプ 1) : <input type="text"/> wt% (中央部) 、 <input type="text"/> wt% (外周部) 乾式キャスク (タイプ 2) : <input type="text"/> wt% |
| | 収納体数 | 乾式キャスク (タイプ 1) : 32 体 乾式キャスク (タイプ 2) : 24 体 |
| | 燃料配置 | 乾式キャスク (タイプ 1) : 2-3-1-5 図及び 2-3-1-11 図参照 乾式キャスク (タイプ 2) : 2-3-1-8 図及び 2-3-1-14 図参照 |
| | 寸法条件 (2-3-1-4 図 ～2-3-1-15 図 参照) | バスケットプレート幅、バスケットプレート内幅、バスケット格子内のり、中性子吸収材板厚の寸法は公差を考慮、胴内径はバスケットに接するように設定。設定根拠は資料 2-3-3 参照。 なお、バスケットプレート及び中性子吸収材は中性子吸収が小さくなるように、燃料有効部の領域のみモデル化し、それ以外の部分は無視する。 |
| | キャスク内 雰囲気 | 乾燥状態: 真空 冠水状態: 水密度 1.0g/cm ³ (キャスク内の水密度 1.0g/cm ³ とした場合に中性子実効増倍率は最大となる) |
| | キャスク外 雰囲気 | 真空 (解析モデルを完全反射境界としてキャスク外部に漏れ出た中性子が減速及び吸収されることなく反射してキャスクへ戻る) |
| | キャスク配列 | 無限配列 (キャスク周囲は完全反射境界条件) |
| | 使用済燃料 集合体構造材 | 乾燥状態: 真空 冠水状態: 純水に置換 (構造材よりも中性子減速効果の高い純水とする) |
| | ほう素添加量 | ¹⁰ B 面密度 <input type="text"/> g/cm ² (中性子吸収材に含まれるほう素添加量の仕様 (¹⁰ B 面密度 <input type="text"/> g/cm ² 以上) を基に設定) なお、設計貯蔵期間 (60 年) 経過後の中性子吸収材に含まれるほう素の減損割合は安全側に全中性子束を用いて評価しても 10 ⁻⁵ 程度で無視し得る。 |
| | バーナブル ポイズン集合体 | 無し (中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体は安全側に無視) |
| | 中性子遮蔽材 | 側部・蓋部・底部中性子遮蔽材は安全側に真空に置換 |
| | 蓋 | 一次蓋及び二次蓋を考慮 |

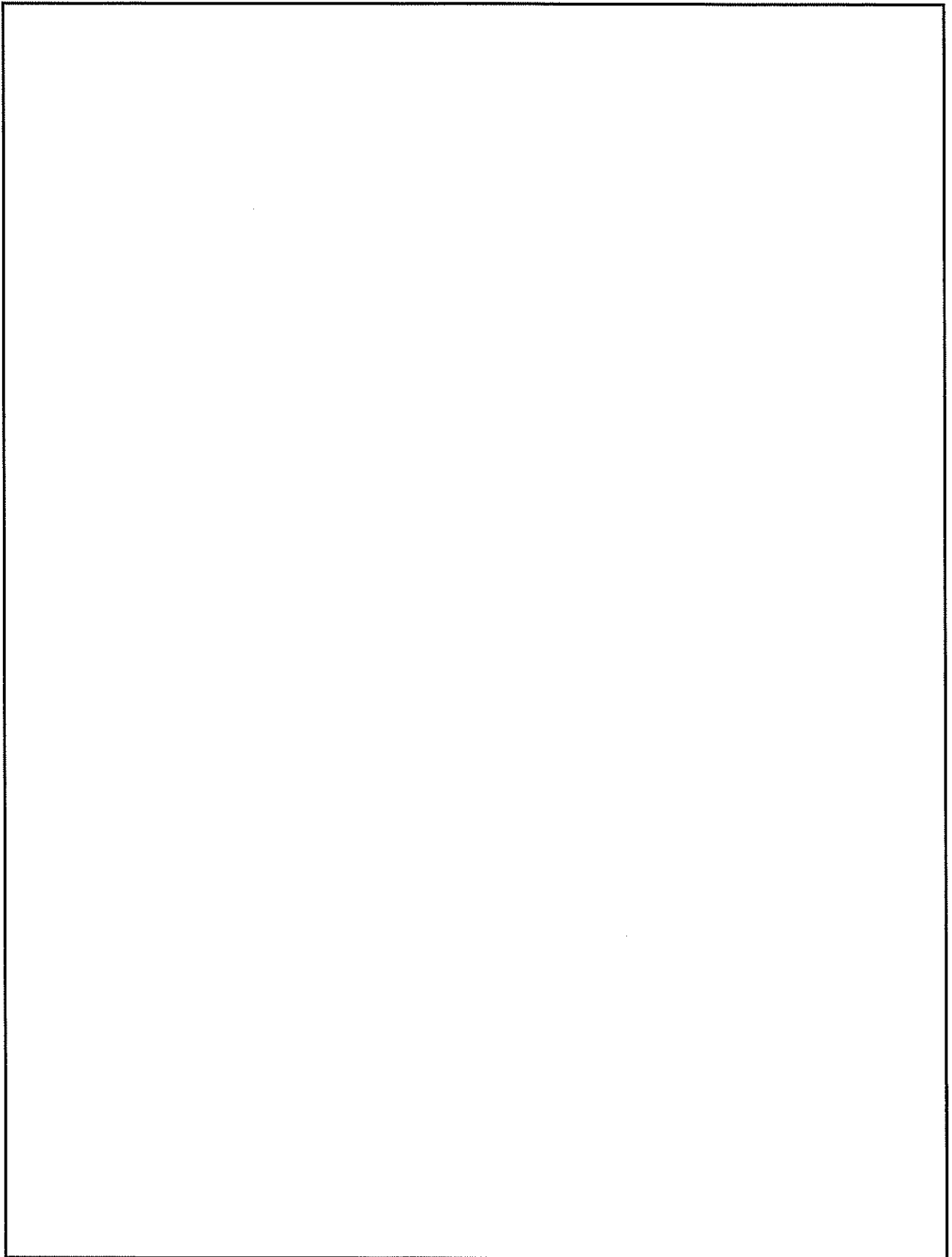
2-3-1-2 表 (2/2) 臨界解析条件

| 領域 | | 密度 (g/cm ³) | 元素 | 原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³) | | |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | | 乾式キャスク (タイプ1) | | 乾式キャスク (タイプ2) |
| | | | | 中央部 | 外周部 | |
| | | | | 14×14 燃料 48,000MWd/t 型 A型 | 14×14 燃料 39,000MWd/t 型 A型 | 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 A型 |
| 燃料 領域 | UO ₂ | 10.412 | ²³⁵ U | 9.876×10 ⁻⁴ | 8.230×10 ⁻⁴ | 9.876×10 ⁻⁴ |
| | | | ²³⁸ U | 2.224×10 ⁻² | 2.241×10 ⁻² | 2.224×10 ⁻² |
| | | | O | 4.646×10 ⁻² | 4.646×10 ⁻² | 4.646×10 ⁻² |
| | 燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管 | 6.55 | Zr ^(注1) | 4.324×10 ⁻² | | |
| 水 | | 1.0 | H | 6.686×10 ⁻² | | |
| | | | O | 3.343×10 ⁻² | | |
| ほう素添加 アルミニウム合金 | | 2.52 | ¹⁰ B | 6.683×10 ⁻³ | | |
| | | | ¹¹ B | 2.690×10 ⁻² | | |
| | | | C | 1.008×10 ⁻² | | |
| | | | Al | 3.830×10 ⁻² | | |
| 炭素鋼 | | 7.83 | Fe | 8.444×10 ⁻² | | |
| ステンレス鋼 | | 7.88 | Cr | 1.734×10 ⁻² | | |
| | | | Fe | 6.118×10 ⁻² | | |
| | | | Ni | 7.277×10 ⁻³ | | |
| アルミニウム合金 | | 2.66 | Al | 5.937×10 ⁻² | | |

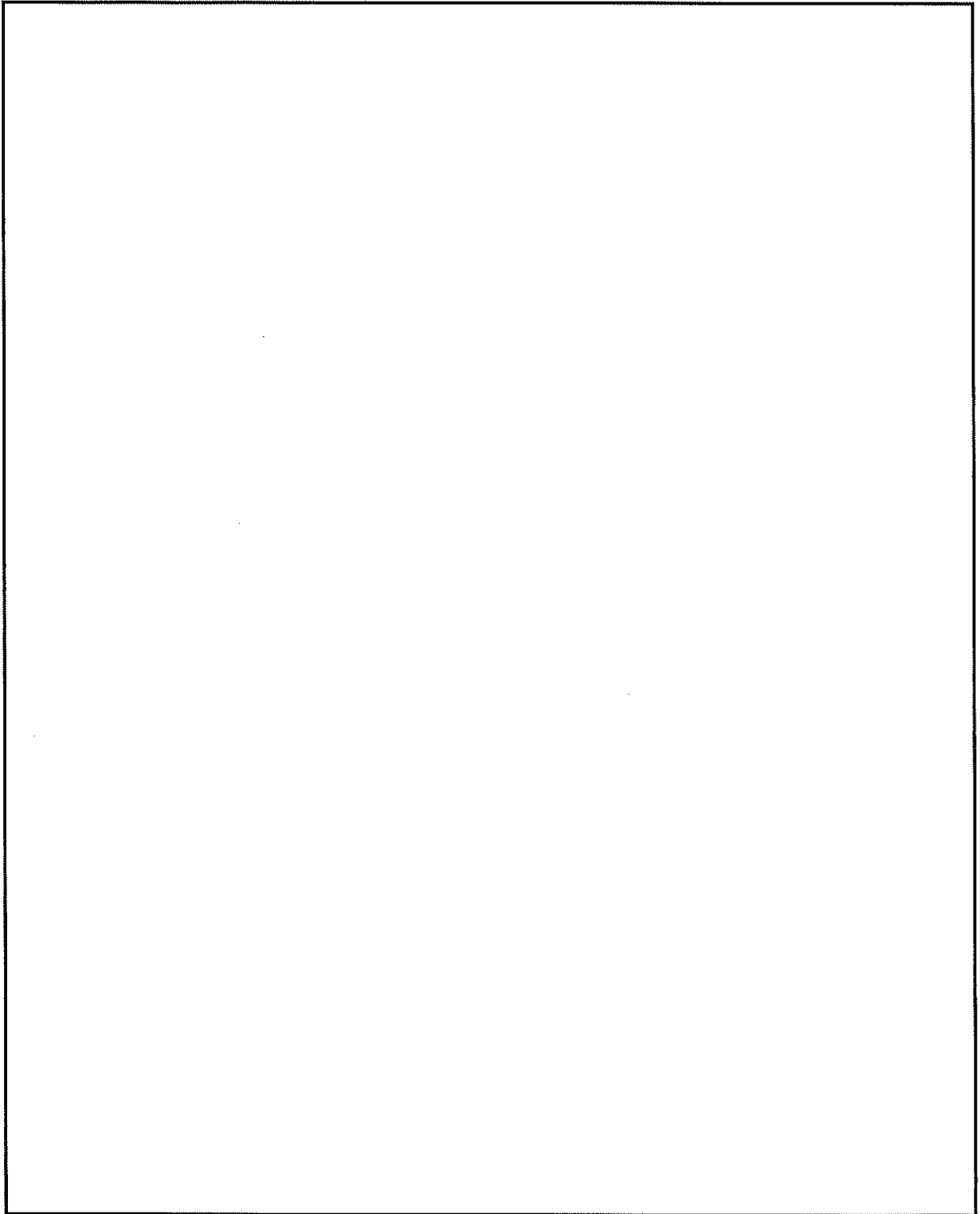
(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金 (ジルカロイ-4) であるが、解析上は純度 100% のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分 (スズ等) は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいいため、この取扱いは保守的である。



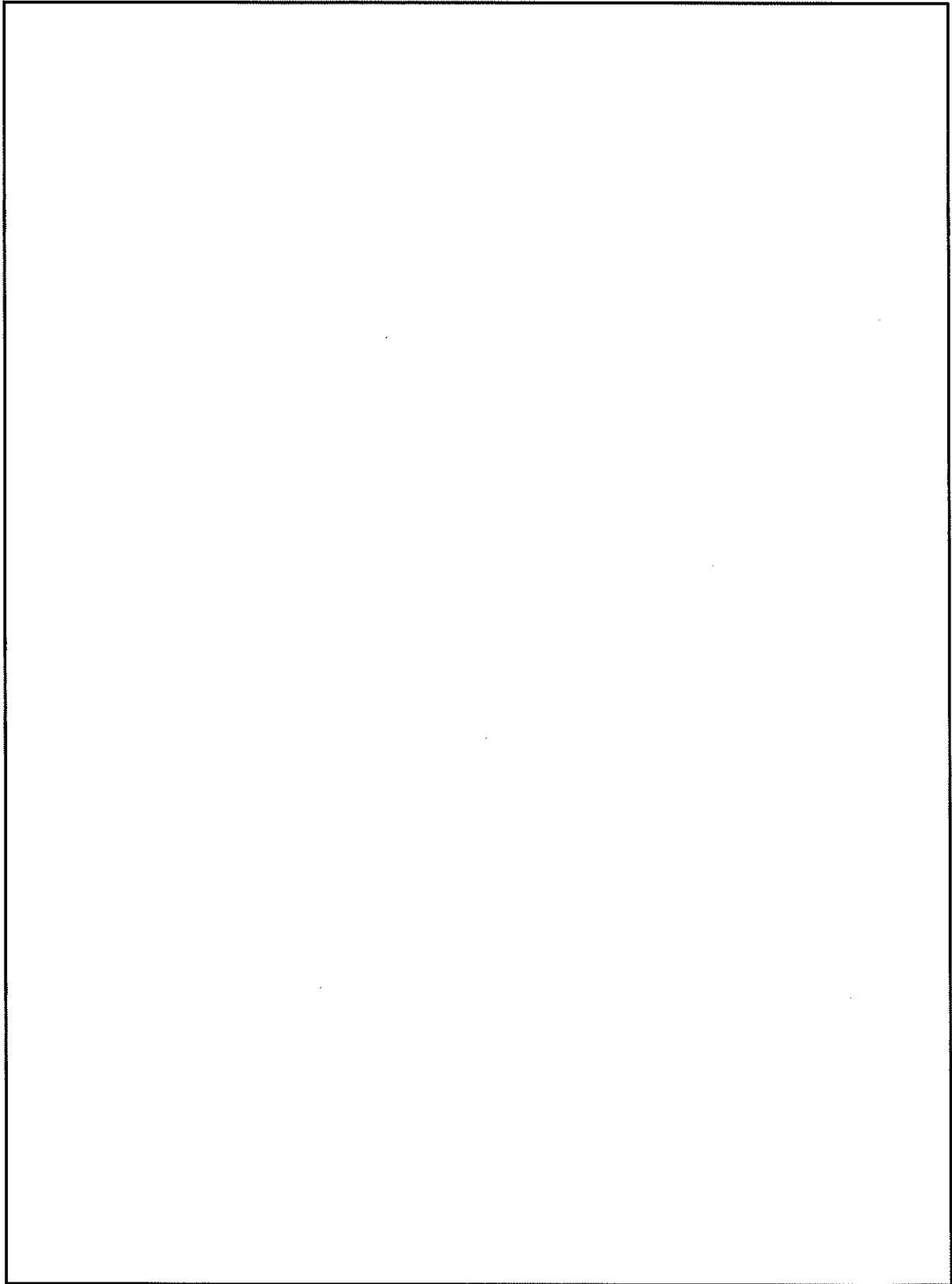
2-3-1-4 図 乾燥状態の臨界解析モデル（縦断面図）（乾式キャスク（タイプ1））



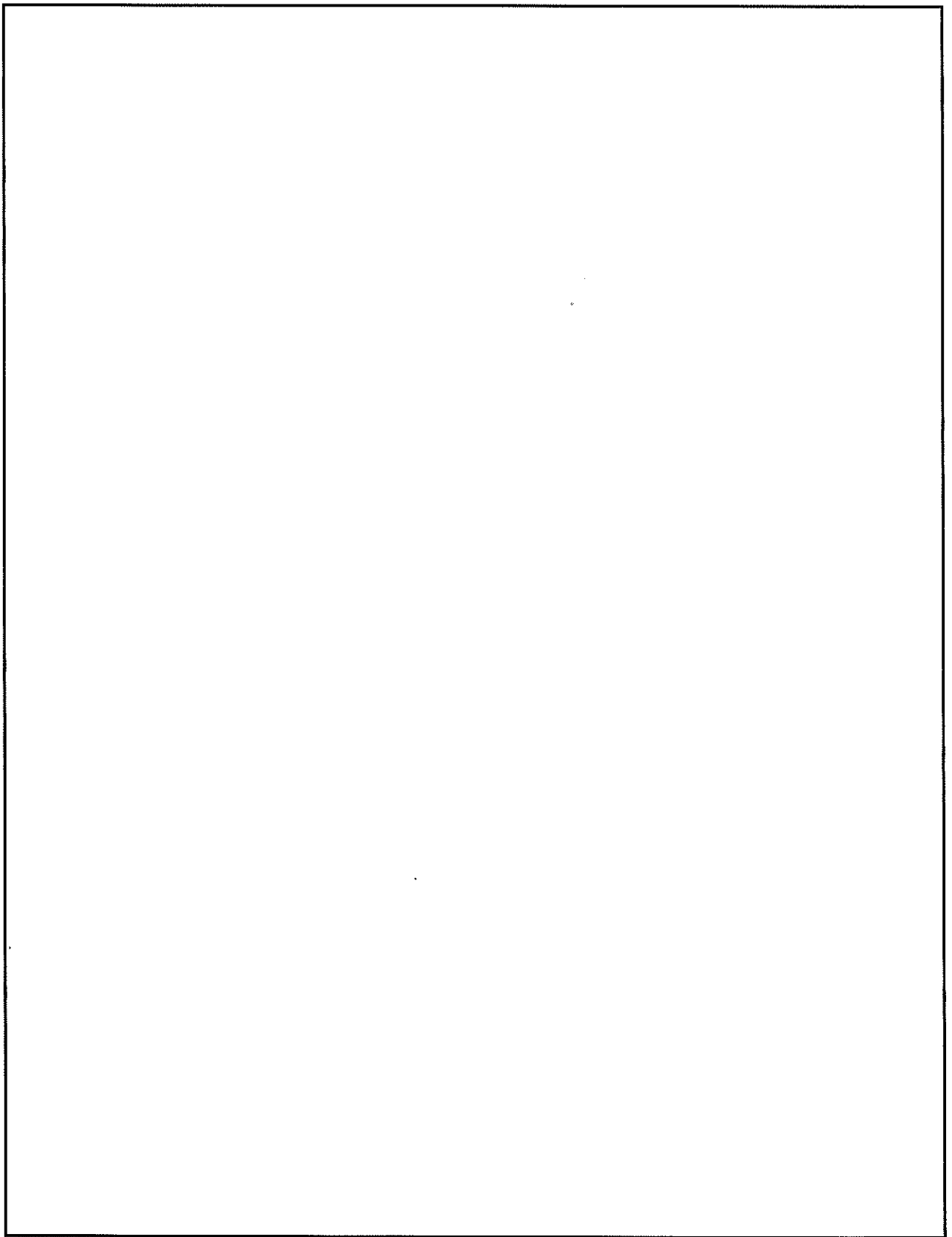
2-3-1-5 図 乾燥状態の臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（乾式キャスク（タイプ1））



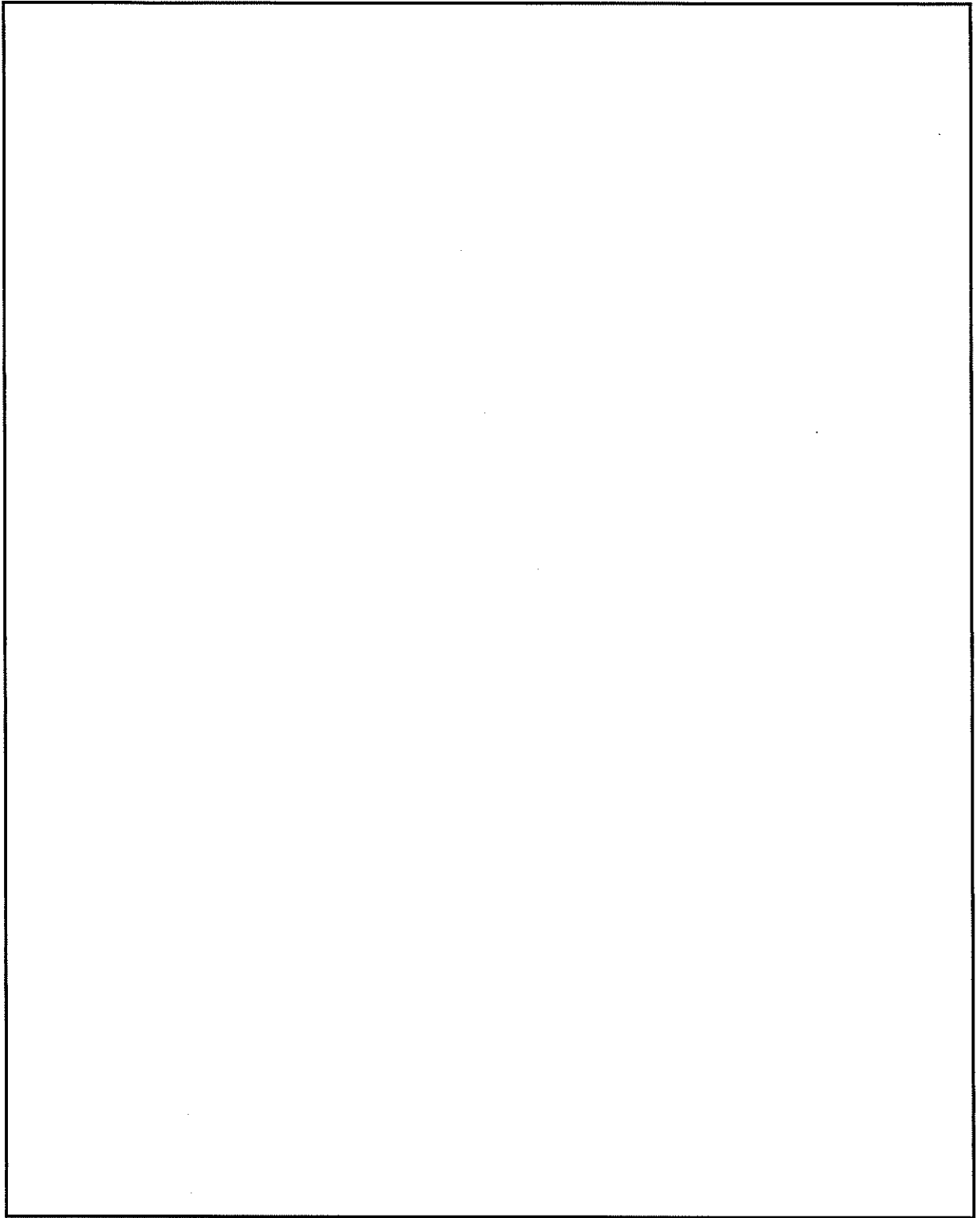
2-3-1-6 図 乾燥状態の臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（乾式キャスク（タイプ1））



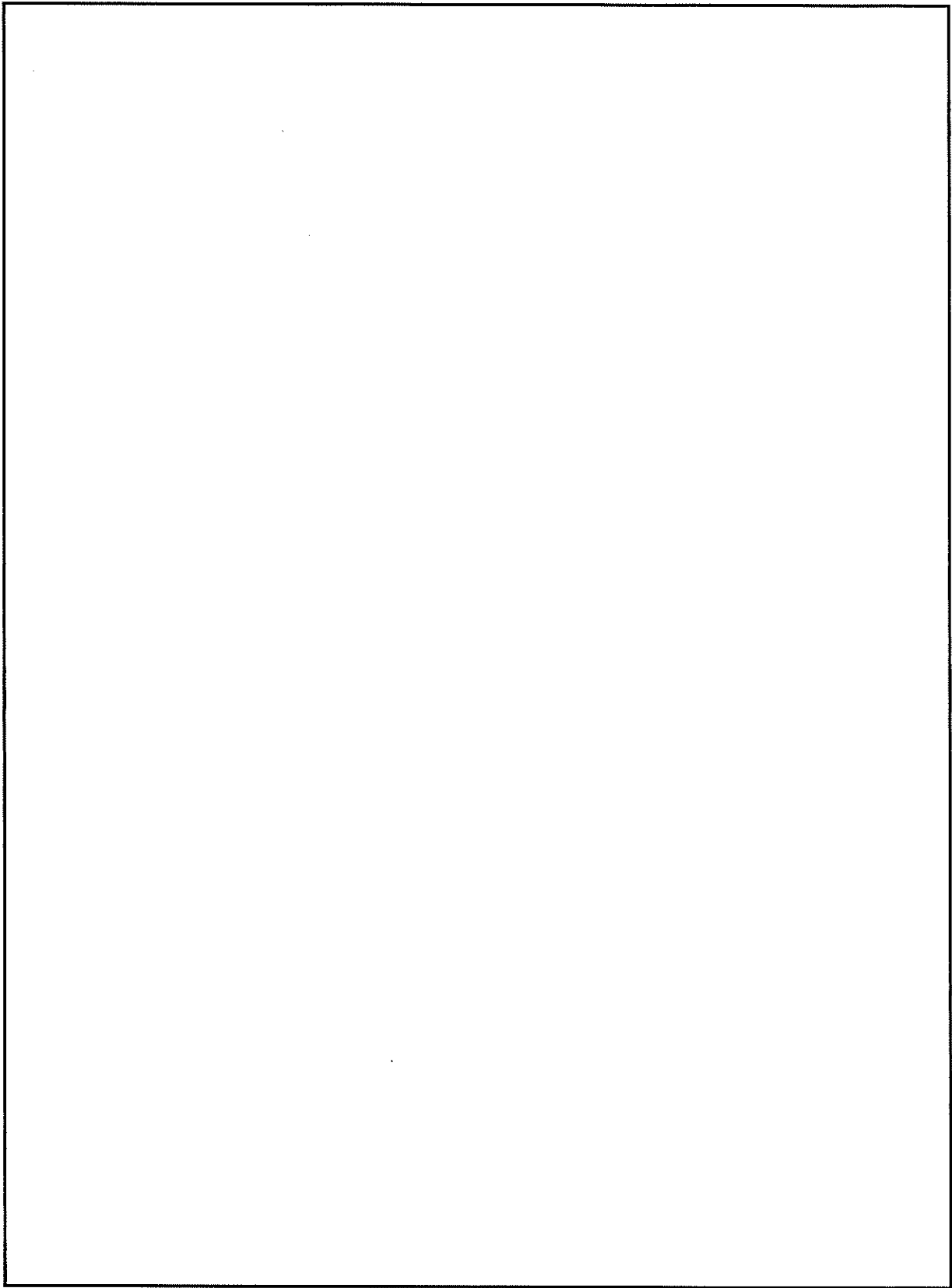
2-3-1-7 図 乾燥状態の臨界解析モデル（縦断面図）（乾式キャスク（タイプ2））



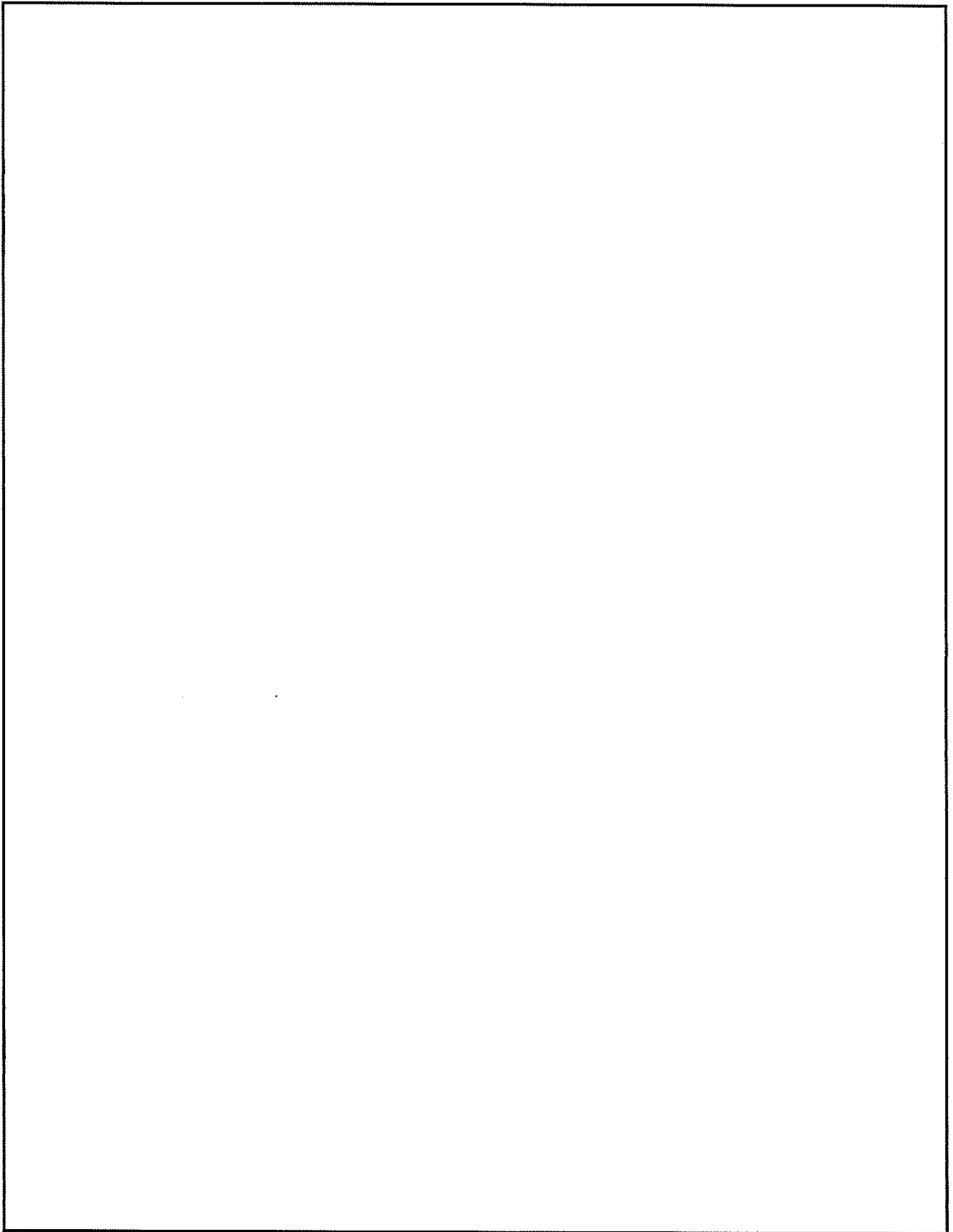
2-3-1-8 図 乾燥状態の臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（乾式キャスク（タイプ2））



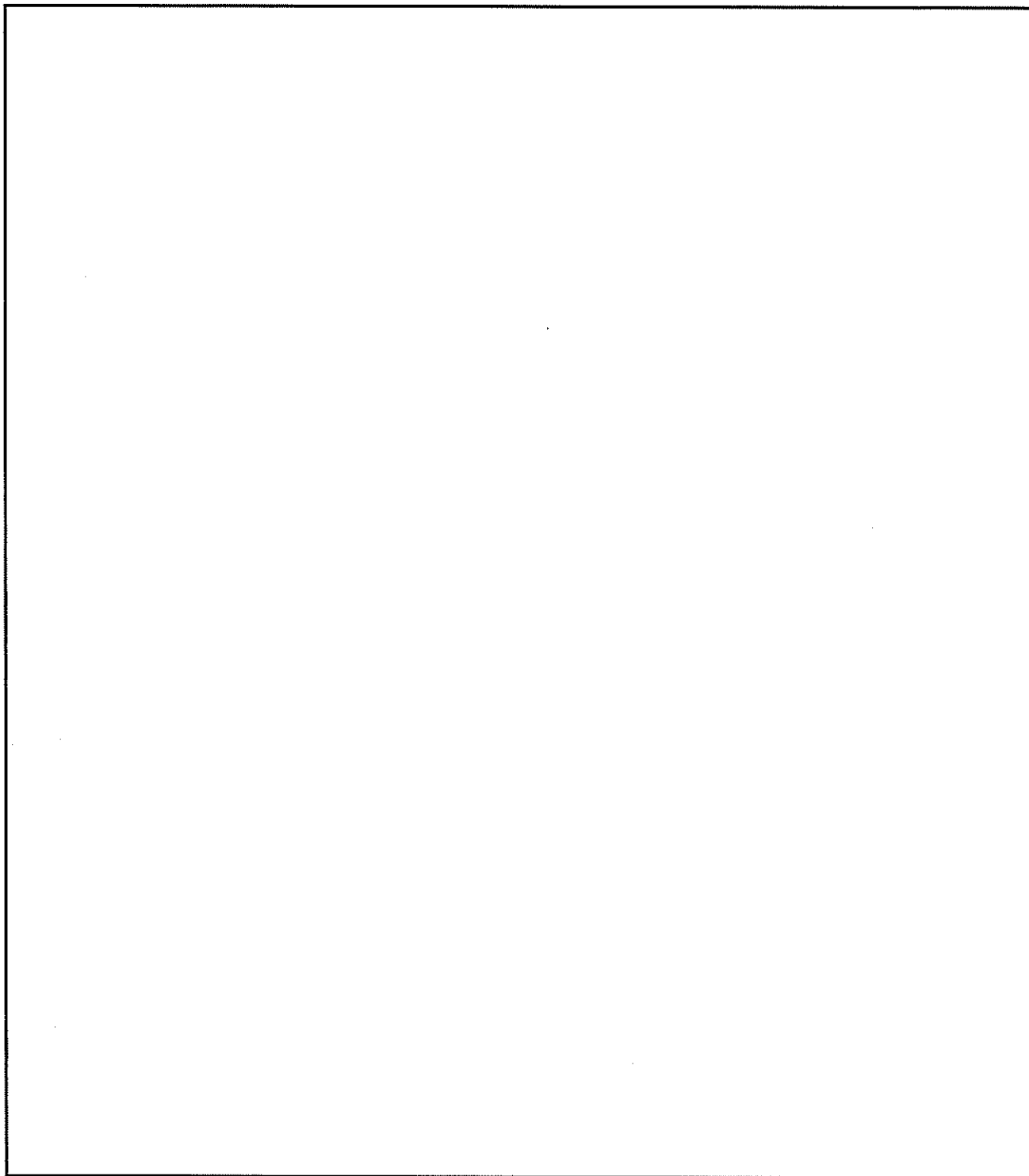
2-3-1-9 図 乾燥状態の臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（乾式キャスク（タイプ2））



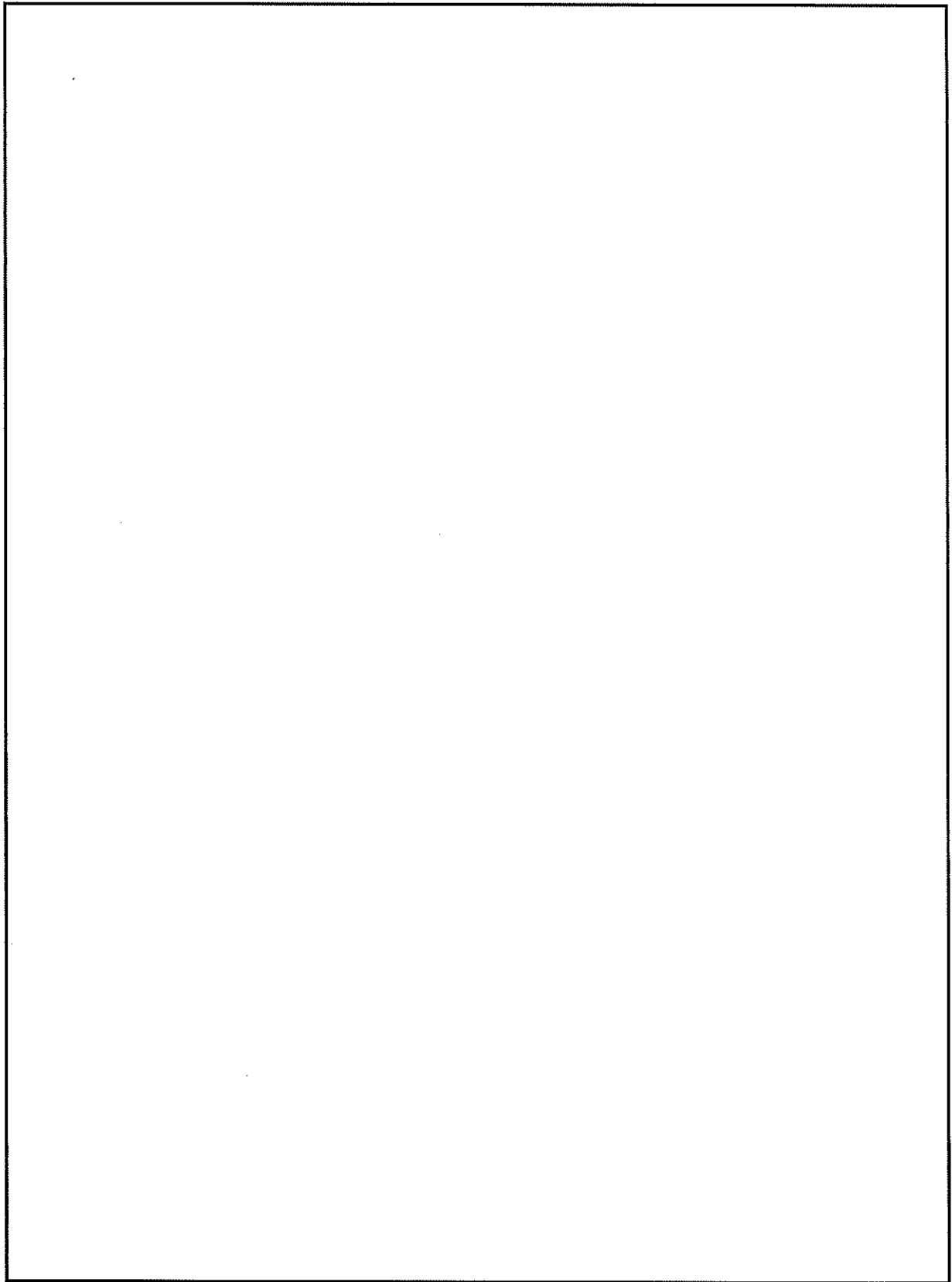
2-3-1-10 図 冠水状態の臨界解析モデル（縦断面図）（乾式キャスク（タイプ1））



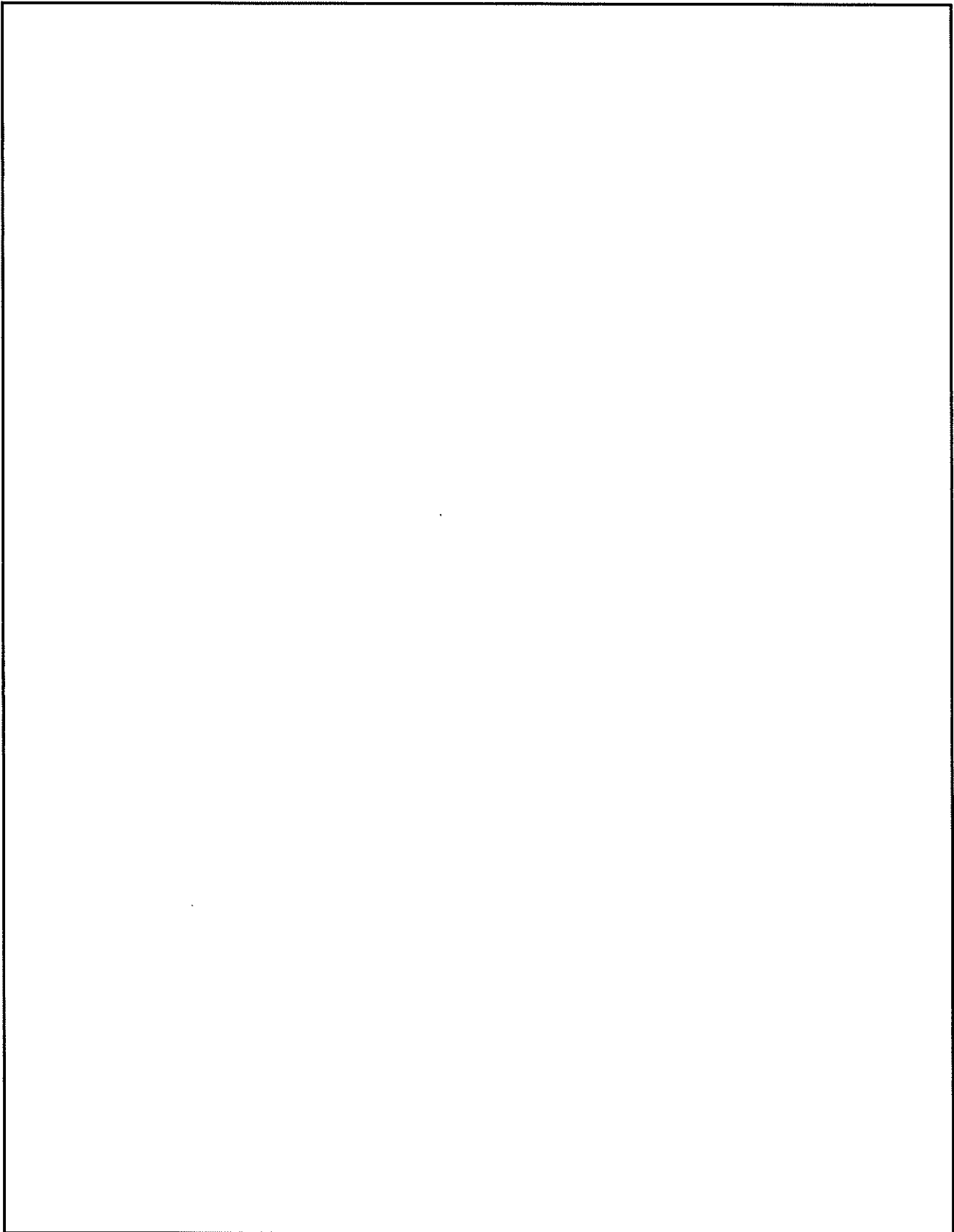
2-3-1-11 図 冠水状態の臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（乾式キャスク（タイプ1））



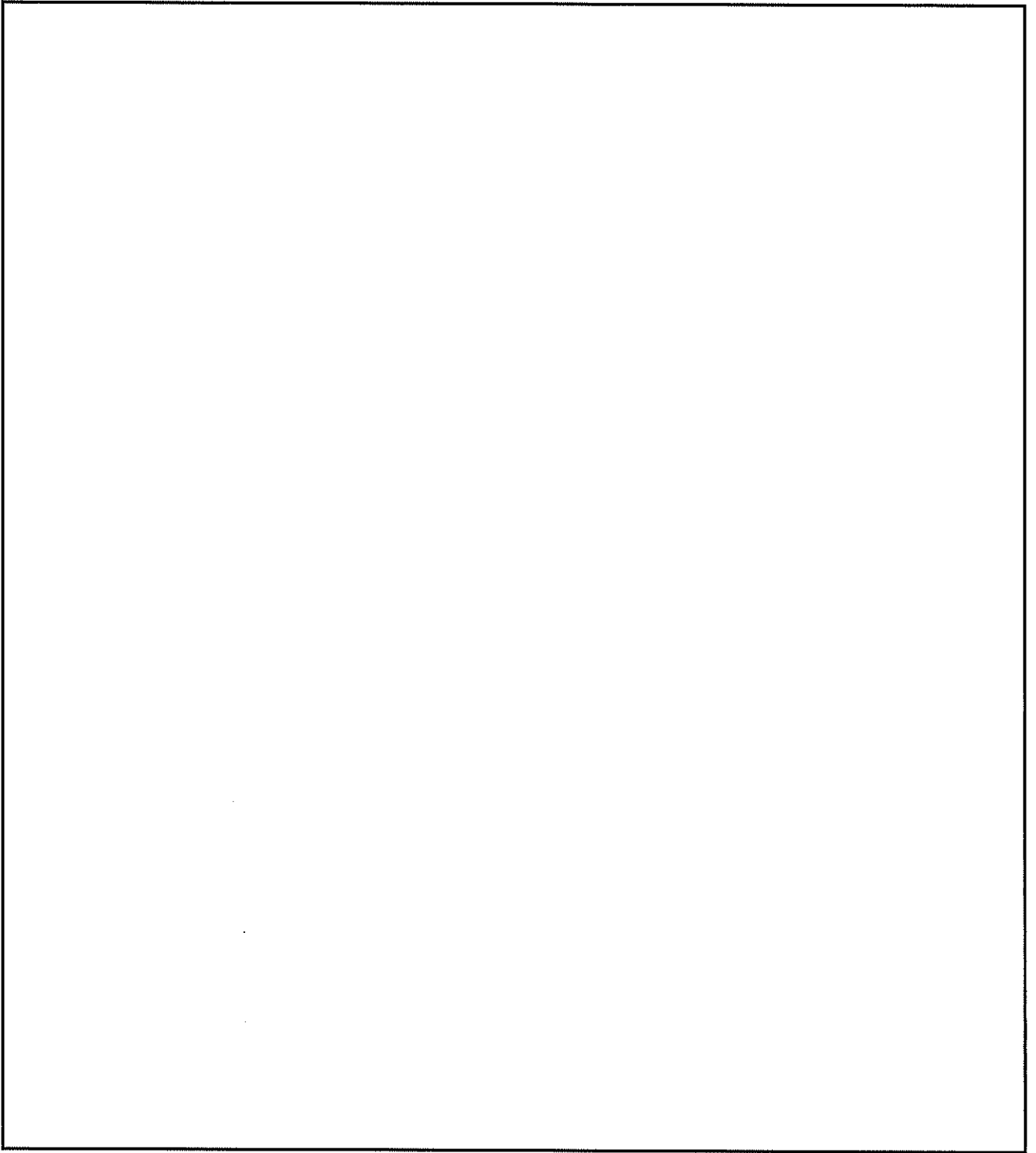
2-3-1-12 図 冠水状態の臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（乾式キャスク（タイプ1））



2-3-1-13 図 冠水状態の臨界解析モデル（縦断面図）（乾式キャスク（タイプ2））



2-3-1-14 図 冠水状態の臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（乾式キャスク（タイプ2））



2-3-1-15 図 冠水状態の臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（乾式キャスク（タイプ2））

2-3-2 臨界解析詳細結果

本資料は資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書における解析結果の詳細について説明するものである。

技術的に想定されるいかなる場合においても、2-3-2-1表に示すとおり、乾式キャスク（タイプ1）及び（タイプ2）の中性子実効増倍率は設計基準を満足している。

また、この結果は乾式キャスク（タイプ1）及び（タイプ2）はそれぞれ無限に配列した体系（完全反射）で解析した結果であり、乾式キャスク（タイプ1）及び（タイプ2）が乾式貯蔵建屋内で混在した場合でも、乾式キャスク（タイプ2）の評価結果に包絡されるため、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。

2-3-2-1 表 臨界解析詳細結果

| 項目 | | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) | 設計基準 ^(注2) |
|--------------------------|------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 中性子実効増倍率 ^(注1) | 乾燥状態 | 0.38769 (3 σ : 0.00045) | 0.38483 (3 σ : 0.00039) | 0.95 以下 ⁽¹⁾ |
| | 冠水状態 | 0.90779 (3 σ : 0.00129) | 0.91187 (3 σ : 0.00135) | |

(注1) 解析結果はモンテカルロ計算の統計誤差 (σ) の3倍を加えた値 ($k_{eff}+3\sigma$) とする。

(注2) また、文献(1)によると「十分に検証された臨界安全解析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実効増倍率が0.95以下となることを満足することにより未臨界性を判定できる。」とされている。

(参考文献)

(1) 日本原子力研究所, 「臨界安全ハンドブック第2版」, JAERI 1340, (1999).

2-3-3 臨界解析における条件設定根拠

本資料は資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書における解析条件の設定根拠及びその妥当性について説明するものである。

乾式キャスク（タイプ 1）及び（タイプ 2）の臨界解析における条件設定根拠を 2-3-3-1 表に示す。

また、以下の条件を変化させた際の感度を確認する。

- ✓ 燃料配置
- ✓ 以下の寸法条件
 - バスケットプレート幅
 - バスケットプレート内幅
 - バスケット格子内のり
 - 中性子吸収材板厚
- ✓ キャスク内/外雰囲気

感度解析の条件及び結果を 2-3-3-2 表及び 2-3-3-3 表に示す。感度解析結果より、臨界解析条件が安全側の条件であり、臨界解析条件の設定根拠は妥当である。

2-3-3-1 表 (1/2) 乾式キャスクの臨界解析における条件設定根拠

| 項目 | 乾燥状態における条件設定根拠 | 冠水状態における条件設定根拠 |
|-------|--|---|
| 初期濃縮度 | <p>[乾式キャスク (タイプ 1)] 初期濃縮度の最大値である <input type="text"/> wt%(中央部)及び <input type="text"/> wt%(外周部)としている。</p> <p>[乾式キャスク (タイプ 2)] 初期濃縮度の最大値である <input type="text"/> wt%としている。</p> | |
| 燃料配置 | <p>使用済燃料集合体が最も集中する配置となる、キャスク中心偏向配置としている。</p> | <p>[乾式キャスク (タイプ 1)] キャスクの外周バスケットプレート (資料 2-3-1 の 2-3-1-11 図 ; B-B 断面) には中性子吸収材が配置されていないが、外周部に収納される燃料がより濃縮度の高い中央部の燃料に近接するように配置するキャスク中心偏向配置としている。</p> <p>[乾式キャスク (タイプ 2)] キャスクの外周バスケットプレート (資料 2-3-1 の 2-3-1-14 図 ; C-C 断面) には中性子吸収材が配置されていないため、外周部に配置された使用済燃料集合体はキャスク外周、中央部に配置された使用済燃料集合体はキャスク中心偏向配置としている。</p> |
| 寸法条件 | <p>バスケットプレート幅 : 隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に最小としている。</p> | |
| | <p>バスケットプレート内幅 : バスケットプレートでの中性子吸収効果が小さくなるように最大としている (バスケットプレート幅を固定して内幅を最大とすることでバスケットプレート板厚が最小となる)。</p> | <p>バスケットプレート内幅 : バスケットプレート内幅領域での中性子の減速効果を小さくし、中性子吸収材での中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットプレート内幅を最小としている。</p> |
| | <p>バスケット格子内のり : 隣接燃料との距離が短くなるように最小としている。</p> | <p>バスケット格子内のり : 燃料領域での熱中性子が増加するように最大としている。</p> |

2-3-3-1 表 (2/2) 乾式キャスクの臨界解析における条件設定根拠

| 項目 | 乾燥状態における条件設定根拠 | 冠水状態における条件設定根拠 |
|--------------|--|--|
| 寸法条件 | 中性子吸収材板厚：隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に中性子吸収材板厚を最小としている。なお、中性子吸収材のほう素添加量は板厚に係わらず仕様上の下限値で一定としている。 | |
| キャスク内雰囲気 | 条件により真空としている。 | 中性子減速効果が大きくなる、水密度最大の 1.0g/cm^3 としている。 |
| キャスク外雰囲気 | 解析モデルを完全反射境界としてキャスク外部に漏れ出た中性子が減速及び吸収されることなく反射してキャスクへ戻る、真空環境としている。 | |
| キャスク配列 | 解析モデルをキャスクに外接する四角柱表面で完全反射とすることにより、キャスクが無限に並ぶ配列としている。 | |
| 使用済燃料集合体構造材 | ステンレス鋼製の上・下部ノズル部及びプレナム部は、中性子吸収効果を小さくするため、真空としている。 | ステンレス鋼製の上・下部ノズル部及びプレナム部は、中性子減速効果がある純水としている。 |
| ほう素添加量 | 中性子吸収材に含まれるほう素添加量は仕様上の下限値としている。 なお、設計貯蔵期間（60年）経過後の中性子吸収材に含まれるほう素の減損割合は安全側に全中性子束を用いて評価しても 10^{-5} 程度であり、無視し得るレベルである。 | |
| バーナブルポイズン集合体 | 中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体は安全側に無視している。 | |
| 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安全側に真空としている。 | |
| 蓋 | 貯蔵中は一次蓋及び二次蓋により密閉されるため、一次蓋及び二次蓋までをモデル化している。 | |

2-3-3-2 表 感度解析条件及び解析結果 (乾式キヤスク (タイプ1))

| 項目 | 乾燥状態 | | 感度解析結果 | | 冠水状態 | | 感度解析結果 | |
|-----------------------|------------------------------|--|-----------------|--|--|-------------|-----------------|--|
| | 感度解析条件 (注2) | | Δk (注3) | | 感度解析条件 (注2) | | Δk (注3) | |
| 燃料配置 (2-3-3-1 図参照) | ①キヤスク中心偏向配置 | | - | | ①キヤスク中心偏向配置 | | - | |
| | ②バスケット格子内中央配置 | | -0.0005 | | ②バスケット格子内中央配置 | | -0.0014 | |
| | ③キヤスク外周偏向配置 | | -0.0014 | | ③キヤスク外周偏向配置 | | -0.0084 | |
| | | | | | ④外周燃料外周偏向配置 | | -0.0009 | |
| 寸法 条件 (注1) | バスケット | ①最小 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> m) | -0.0005 | | ①最小 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | 0.0005 (注4) | | |
| | プレート幅 | ②最大 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | | | ②最大 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | | | |
| | バスケット | ①最大 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | -0.0006 | | ①最小 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | | | |
| | プレート内幅 | ②最小 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | | | ②最大 (A-A、B-B 断面 <input type="text"/> cm) | | | |
| | バスケット | ①最小 (<input type="text"/> cm) | -0.0027 | | ①最大 (<input type="text"/> cm) | | | |
| | 格子内のり | ②最大 (<input type="text"/> cm) | | | ②最小 (<input type="text"/> cm) | | | |
| | 中性子吸収材 | ①最小 (<input type="text"/> cm) | -0.0007 | | ①最小 (<input type="text"/> cm) | | | |
| | 板厚 | ②最大 (<input type="text"/> cm) | | | ②最大 (<input type="text"/> cm) | | | |
| キヤスク内雰囲気 | - | | - | | 水密度 0.0~1.0g/cm ³ | | 2-3-3-2 図参照 | |
| キヤスク外雰囲気 | 水密度 0.0~1.0g/cm ³ | | 2-3-3-3 図参照 | | 水密度 0.0~1.0g/cm ³ | | 2-3-3-4 図参照 | |

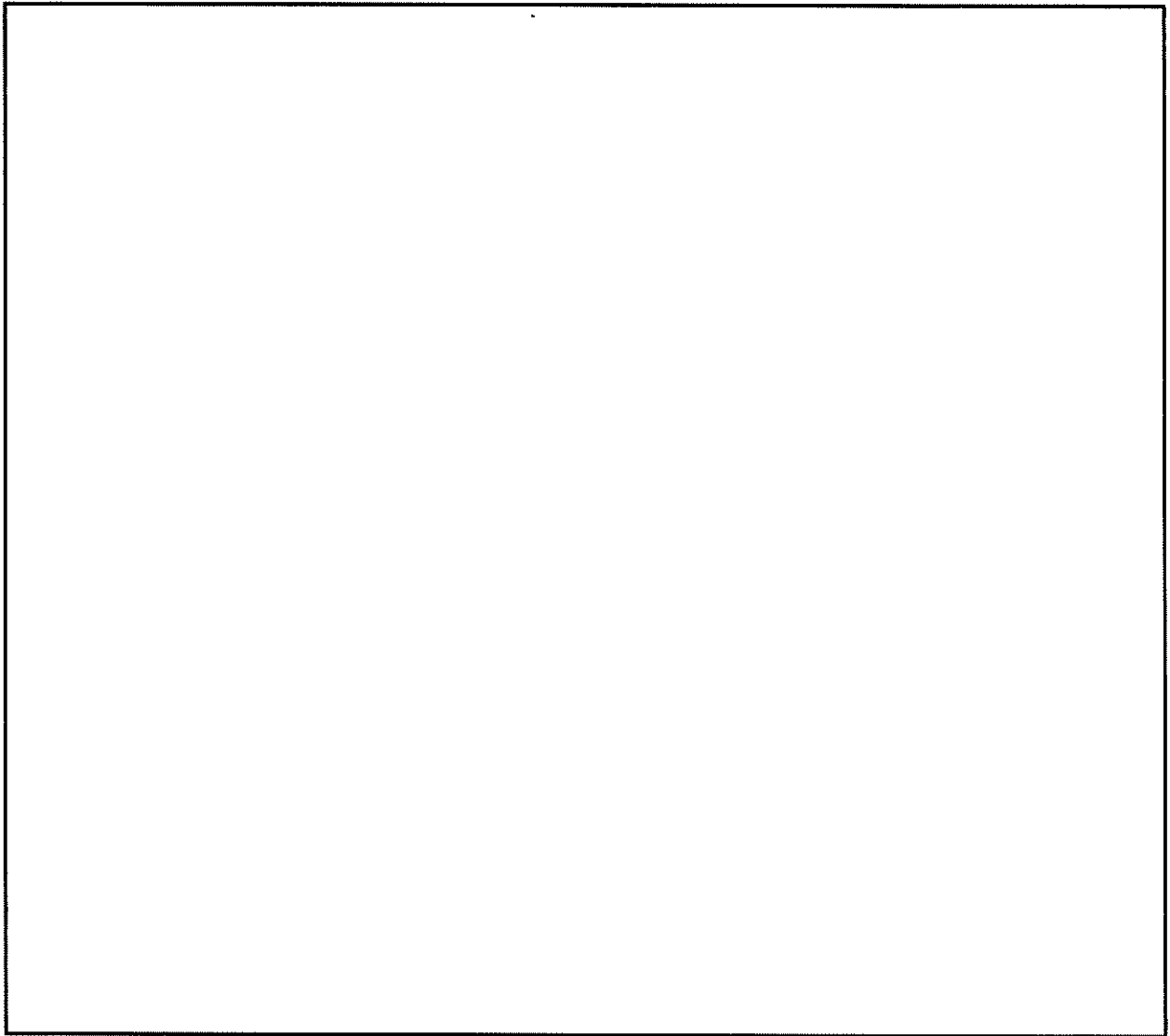
(注1) 乾燥状態は資料 2-3-1 の 2-3-1-4 図~2-3-1-6 図を、冠水状態は資料 2-3-1 の 2-3-1-10 図~2-3-1-12 図を参照。

(注2) 説明書記載の解析条件から各感度解析条件のみを変更した。各項目の①は説明書記載条件である。

(注3) 感度解析条件 (②、③及び④) での中性子実効増倍率から説明書記載の解析条件 (①) での中性子実効増倍率を差し引いた値。

(Δk = (感度解析結果) - (説明書記載結果))

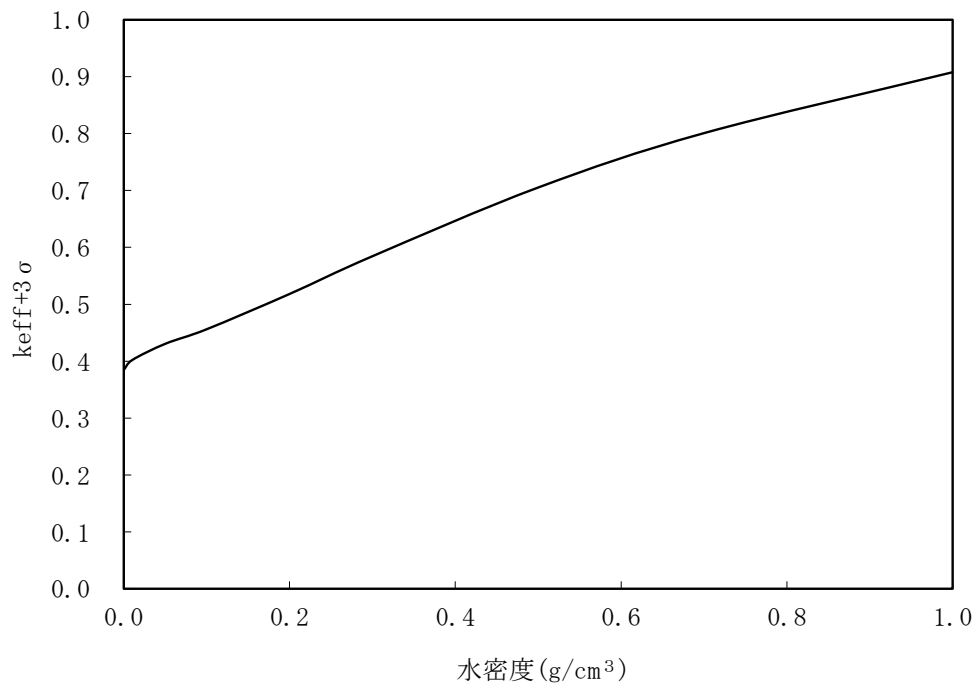
(注4) 統計誤差程度の感度であるため、バスケットプレート幅は隣接する燃料との距離が短くなるように最小を採用している。



2-3-3-1 図 燃料配置感度解析条件（乾式キャスク（タイプ1））

（注）冠水状態では体系内の中性子が減速され、中性子吸収材の中性子吸収効果が大きい。

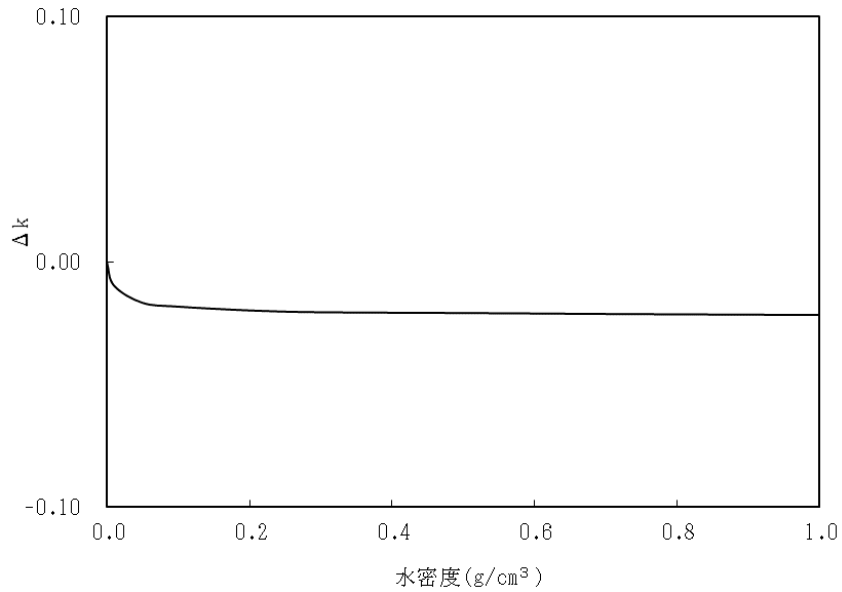
外周バスケットプレートには中性子吸収材が配置されていないため、冠水状態については外周部に配置された燃料はキャスク外周に寄せて、中央部に配置された燃料はキャスク中心偏向配置とした評価を実施した。



[補足]

水密度が上がるにつれて、中性子の減速効果が強まって熱中性子及び核分裂反応が増えて、実効増倍率が大きくなっている。

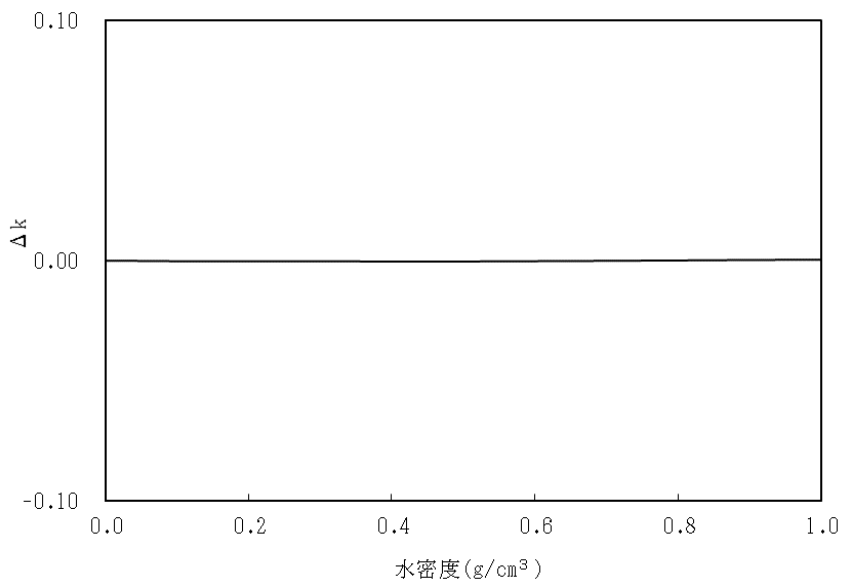
2-3-3-2 図 キャスク内雰囲気解析結果（乾式キャスク（タイプ1））



[補足]

乾燥状態ではキャスク内部での中性子の減速が弱く、キャスク外部に漏れる中性子が存在するため、水密度が上がるにつれて容器間での中性子やり取りの量が減り、実効増倍率が小さくなっている。

2-3-3-3 図 キャスク外雰囲気解析結果（乾燥状態）（乾式キャスク（タイプ 1））



[補足]

冠水状態ではキャスク内部での中性子の減速が強く、キャスク外部に漏れる中性子が少ないため、水密度が上がっても容器間での中性子やり取りの量にはほとんど影響与えないため、実効増倍率も変わっていない。

2-3-3-4 図 キャスク外雰囲気解析結果（冠水状態）（乾式キャスク（タイプ 1））

2-3-3-3 表 感度解析条件及び解析結果 (乾式キヤスク (タイプ2))

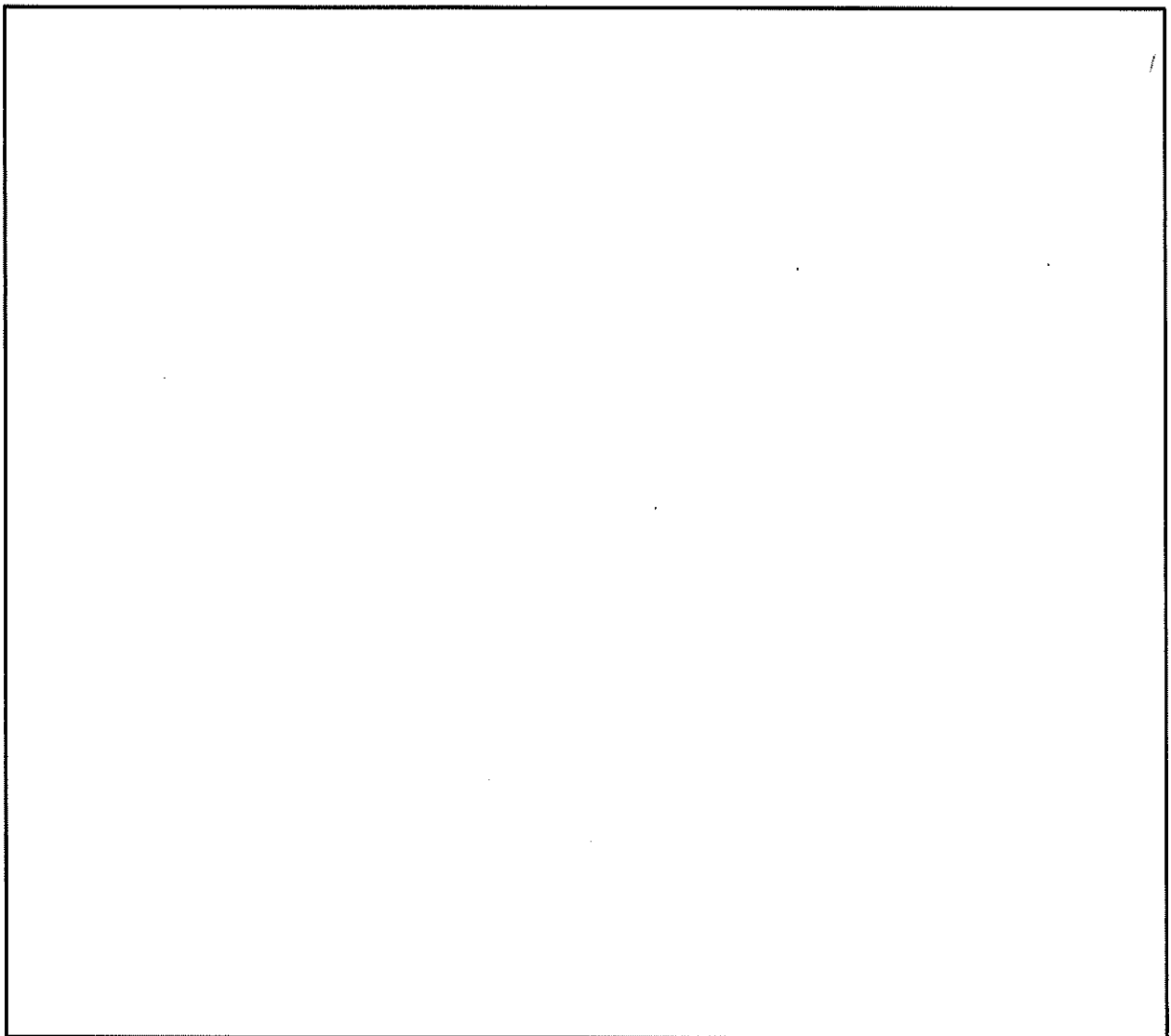
| 項目 | 乾燥状態 | | 感度解析結果 Δk (注3) | 冠水状態 | | 感度解析結果 Δk (注3) |
|-----------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|---------|---------------------------|
| | 感度解析条件 (注2) | | | 感度解析条件 (注2) | | |
| 燃料配置 (2-3-3-5 図参照) | ①キヤスク中心偏向配置 | | - | ①外周燃料外周偏向配置 | | - |
| | ②バスケット格子内中央配置 | | -0.0007 | ②キヤスク中心偏向配置 | | -0.0021 |
| | ③キヤスク外周偏向配置 | | -0.0016 | ③バスケット格子内中央配置 | | -0.0019 |
| 寸法 条件 (注1) | バスケット プレート幅 | ①最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | -0.0006 | ①最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | -0.0003 | |
| | | ②最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | | ②最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | | |
| | バスケット プレート内幅 | ①最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | -0.0004 | ①最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | -0.0029 | |
| | | ②最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | | ②最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm) | | |
| | バスケット 格子内のり | ①最小 (<input type="text"/> cm) | -0.0022 | ①最大 (<input type="text"/> cm) | -0.0055 | |
| | | ②最大 (<input type="text"/> cm) | | ②最小 (<input type="text"/> cm) | | |
| 中性子吸収材 板厚 | ①最小 (<input type="text"/> cm) | -0.0005 | ①最小 (<input type="text"/> cm) | -0.0012 | | |
| | ②最大 (<input type="text"/> cm) | | ②最大 (<input type="text"/> cm) | | | |
| キヤスク内雰囲気 | - | | - | 水密度 0.0~1.0g/cm ³ | | 2-3-3-6 図参照 |
| キヤスク外雰囲気 | 水密度 0.0~1.0g/cm ³ | | 2-3-3-7 図参照 | 水密度 0.0~1.0g/cm ³ | | 2-3-3-8 図参照 |

(注1) 乾燥状態は資料2-3-1の2-3-1-7図~2-3-1-9図を、冠水状態は資料2-3-1の2-3-1-13図~2-3-1-15図を参照。

(注2) 説明書記載の解析条件から各感度解析条件のみを変更した。各項目の①は説明書記載条件である。

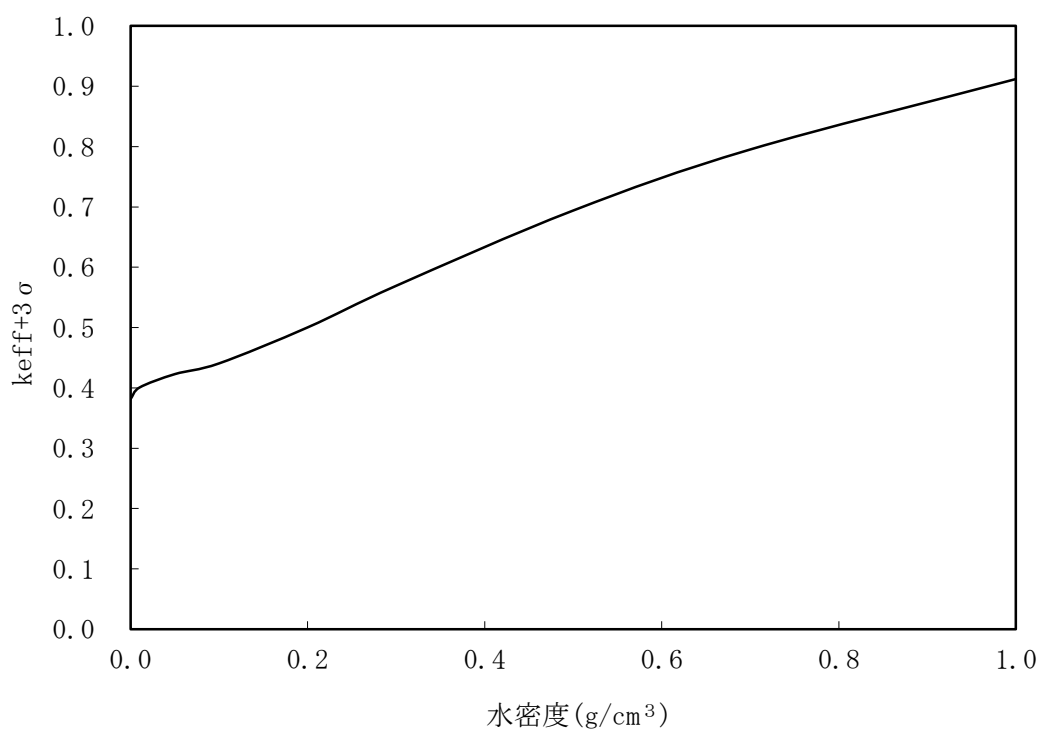
(注3) 感度解析条件(②、③及び④)での中性子実効増倍率から説明書記載の解析条件(①)での中性子実効増倍率を差し引いた値。

(Δk = (感度解析結果) - (説明書記載結果))



2-3-3-5 図 燃料配置感度解析条件（乾式キャスク（タイプ2））

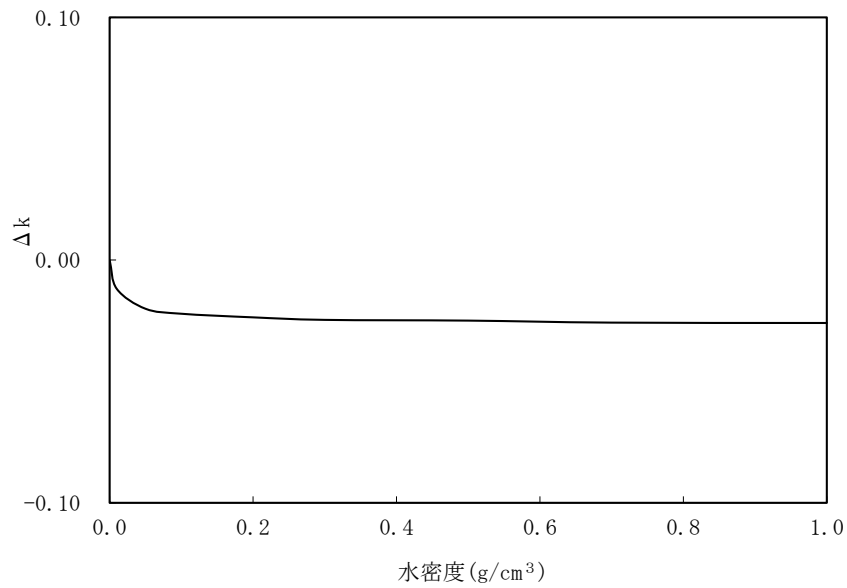
（注）冠水状態では体系内の中性子が減速され、中性子吸収材の中性子吸収効果が大きい。
外周バスケットプレートには中性子吸収材が配置されていないため、冠水状態については外周部に配置された燃料はキャスク外周に寄せて、中央部に配置された燃料はキャスク中心偏向配置とした評価を実施した。



[補足]

水密度が上がるにつれて、中性子の減速効果が強まって熱中性子及び核分裂反応が増えて、実効増倍率が大きくなっている。

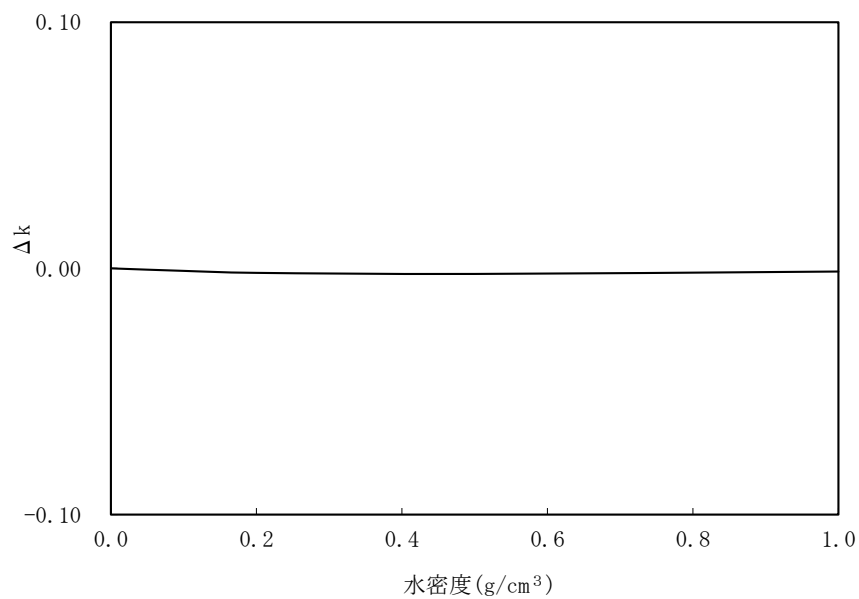
2-3-3-6 図 キャスク内雰囲気解析結果（乾式キャスク（タイプ 2））



[補足]

乾燥状態ではキャスク内部での中性子の減速が弱く、キャスク外部に漏れる中性子が存在するため、水密度が上がるにつれて容器間での中性子やり取りの量が減り、実効増倍率が小さくなっている。

2-3-3-7 図 キャスク外雰囲気解析結果（乾燥状態）（乾式キャスク（タイプ 2））



[補足]

冠水状態ではキャスク内部での中性子の減速が強く、キャスク外部に漏れる中性子が少ないため、水密度が上がっても容器間での中性子やり取りの量にはほとんど影響与えないため、実効増倍率も変わっていない。

2-3-3-8 図 キャスク外雰囲気解析結果（冠水状態）（乾式キャスク（タイプ 2））

2-3-4 臨界解析コード SCALE を用いることの妥当性

本資料は資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書において使用する臨界解析コードの機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明するものである。

a. SCALE コードシステム

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⁽¹⁾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-VI コードを用いる。

SCALE コードシステムは、米国 NRC により認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。

ii 機能

SCALE コードシステムは、臨界解析に際して以下の特徴を有している。

- ・燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から中性子実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- ・三次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

iii 解析フロー

SCALE コードシステムの解析フローを 2-3-4-1 図に示す。

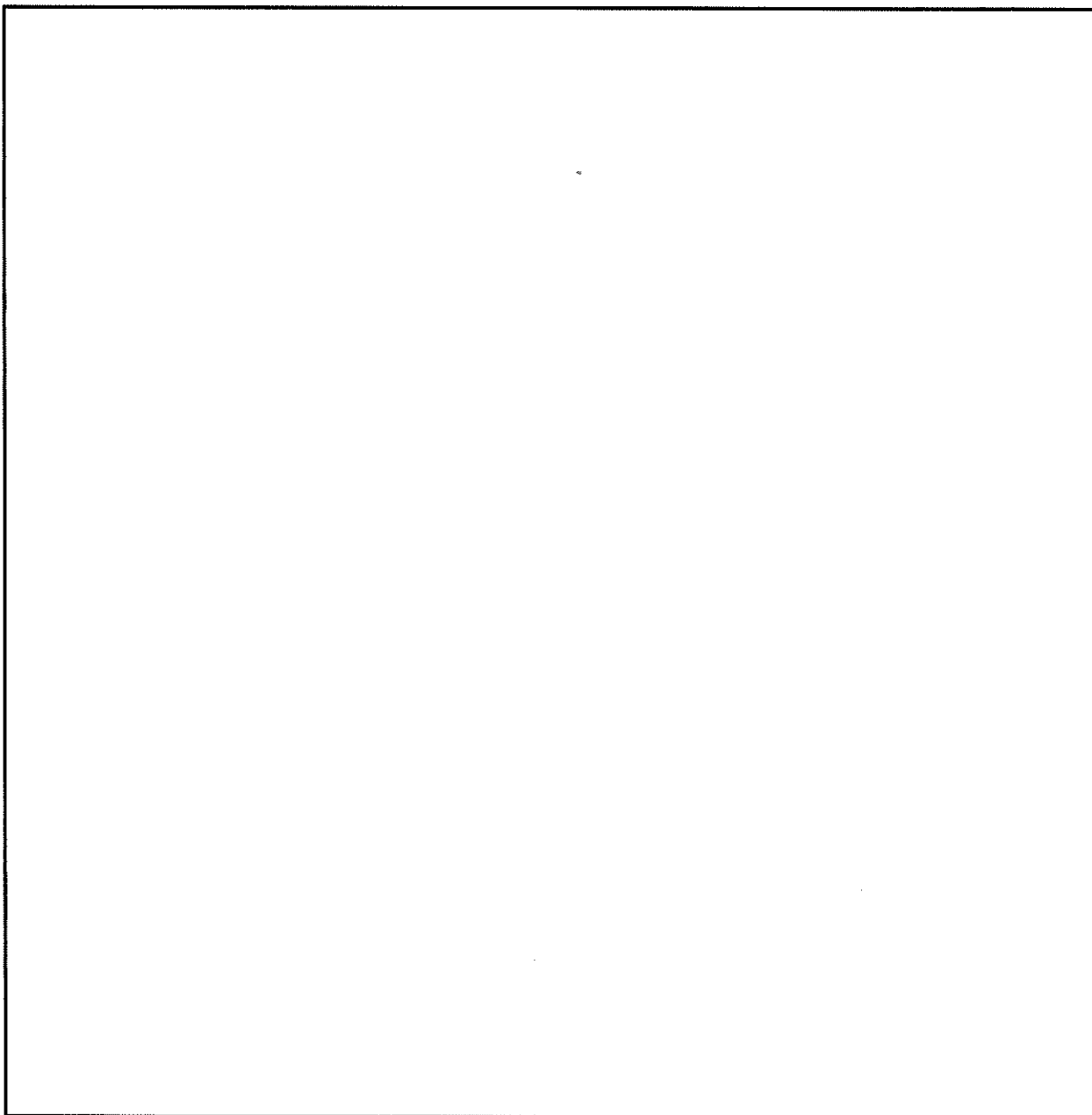
iv 使用実績及び検証

臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを構成する燃料集合体及び構造物の材質を模擬した多数の臨界実験のベンチマーク解析を実施し、その妥当性を確認している。

文献(2)に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク解析を実施する臨界実験を選定した。2-3-4-1 表に示すとおりベンチマーク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

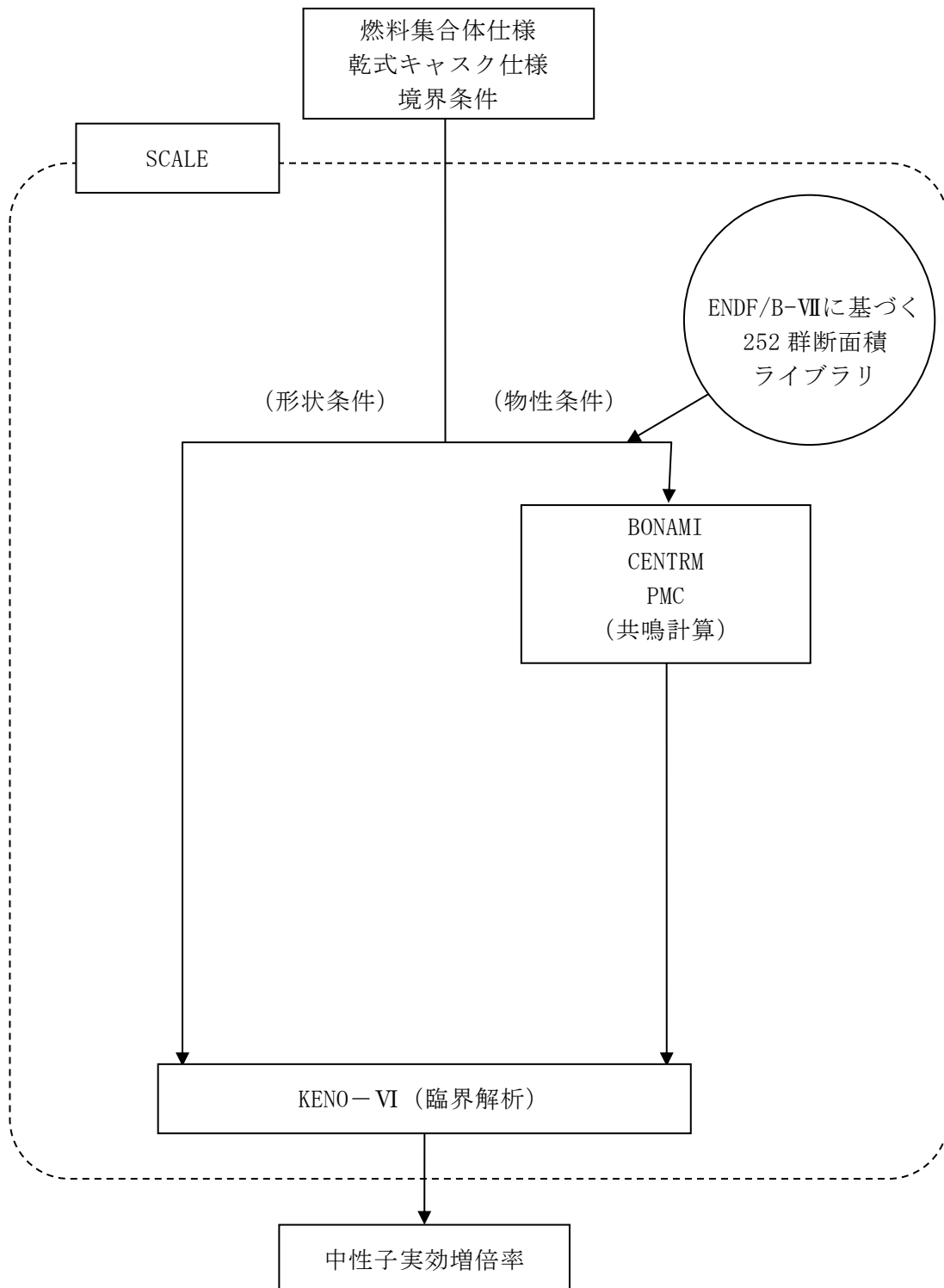
また、ベンチマーク解析対象は、次の 3 つの機関により実施された臨界実験より、合計 ケースを選定した。



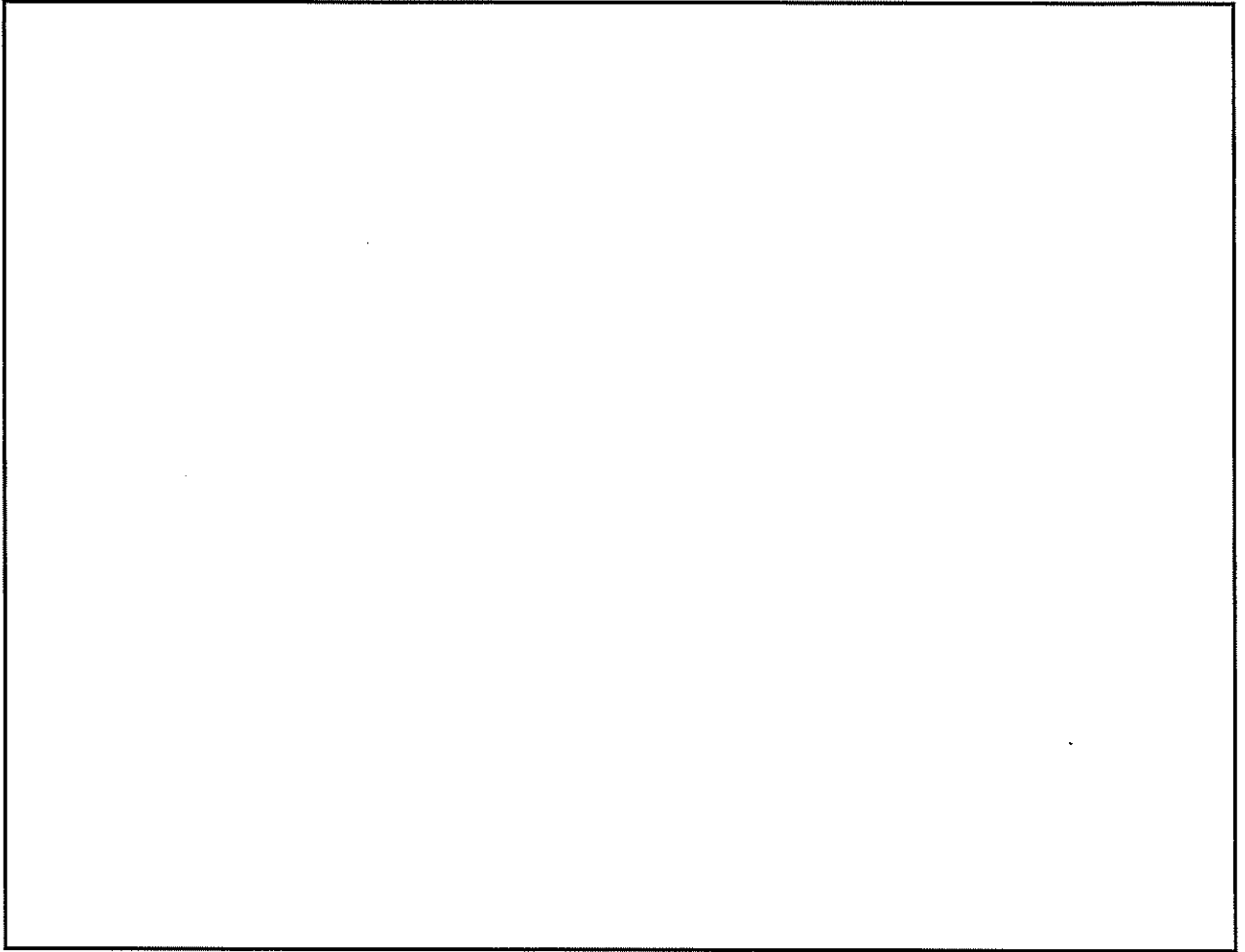
2-3-4-1表 ベンチマーク解析結果

| | ケース数 | 平均値 | 標準偏差 (注1) | 最大値 | 最小値 |
|-------------|------|---------|-----------|---------|---------|
| 臨界実験 (1) | | 0.99961 | 0.00304 | 1.01172 | 0.99651 |
| 臨界実験 (2) | | 0.99776 | 0.00264 | 1.00055 | 0.99363 |
| 臨界実験 (3) | | 1.00279 | 0.00259 | 1.00452 | 0.99981 |
| 合計 | | 0.99940 | 0.00309 | 1.01172 | 0.99363 |

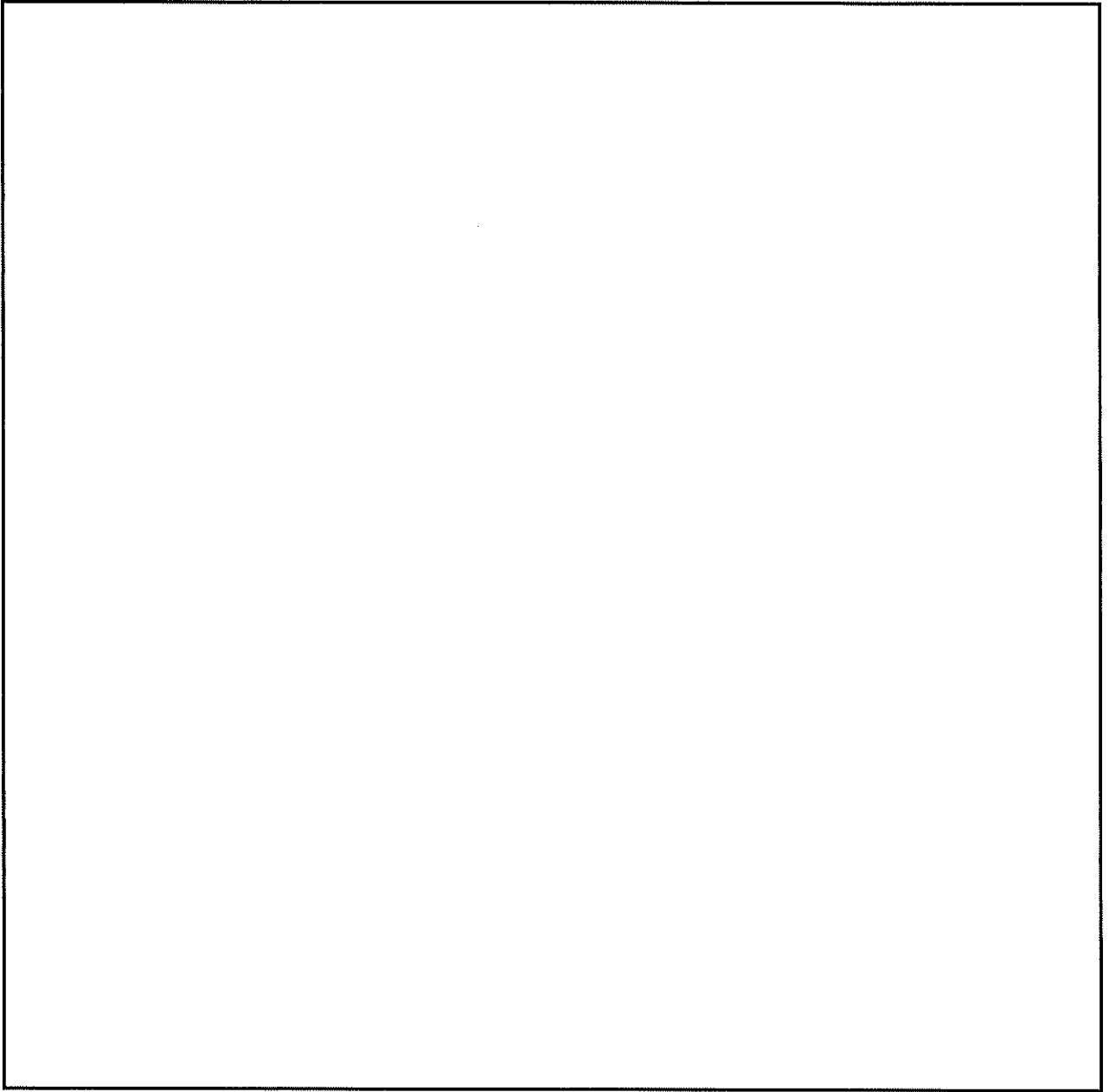
(注 1) この標準偏差は各臨界実験での複数のベンチマーク解析結果(実効増倍率)に対する標準偏差である。




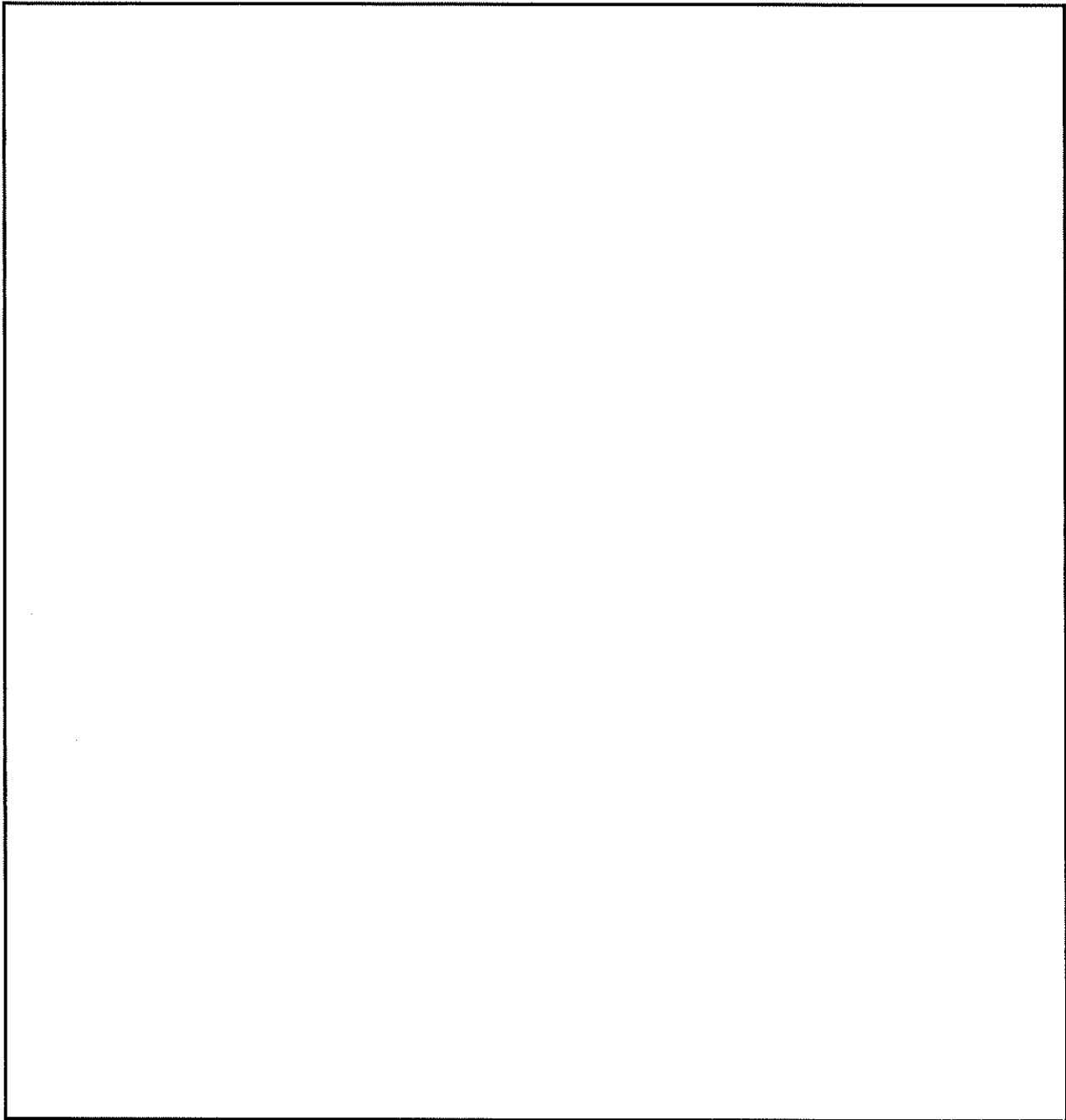
2-3-4-1 図 SCALE コードシステムの解析フロー図



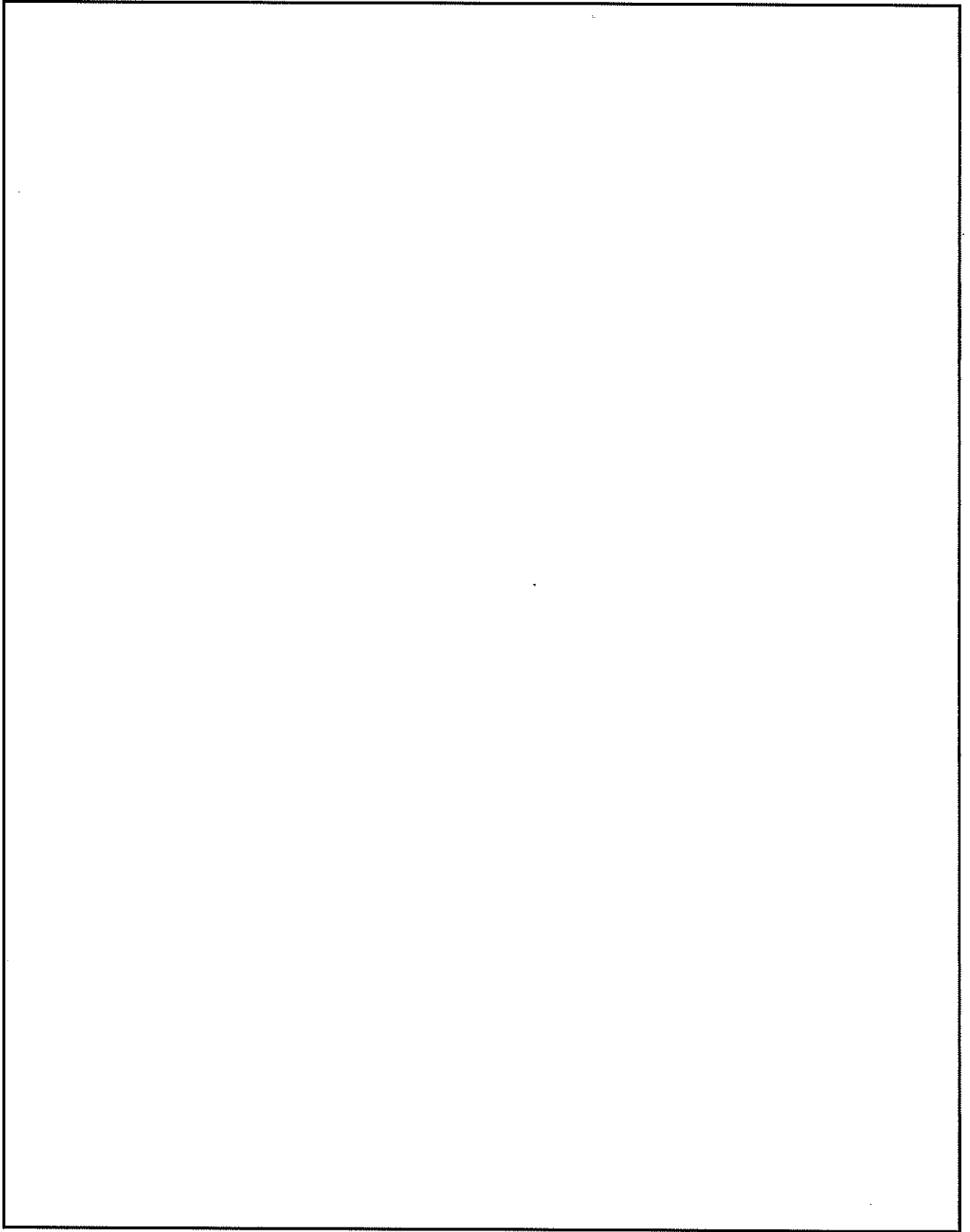
2-3-4-2 図 (1/2)  臨界実験に用いた燃料棒



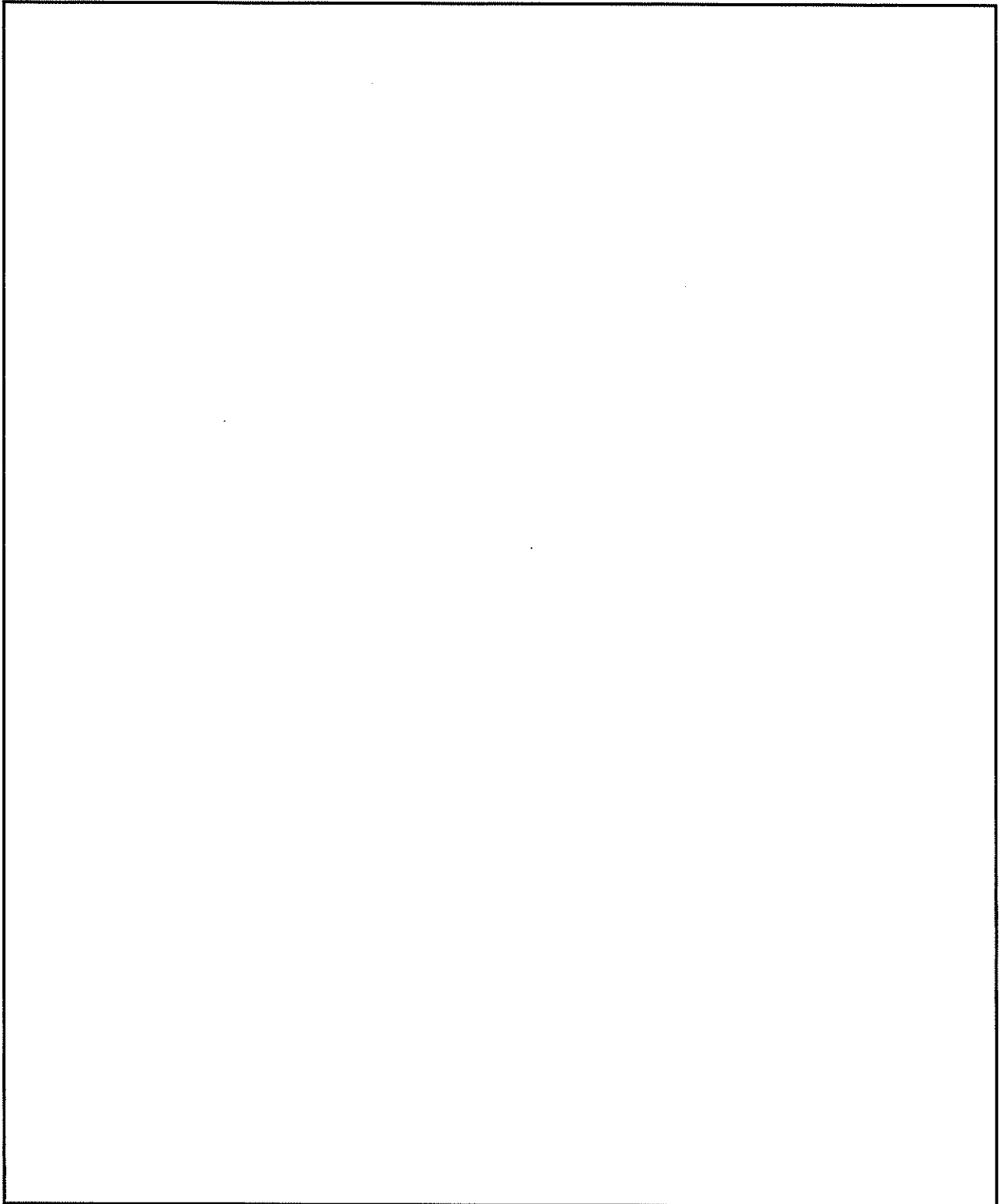
2-3-4-2 図 (2/2)  臨界実験体系 (1)



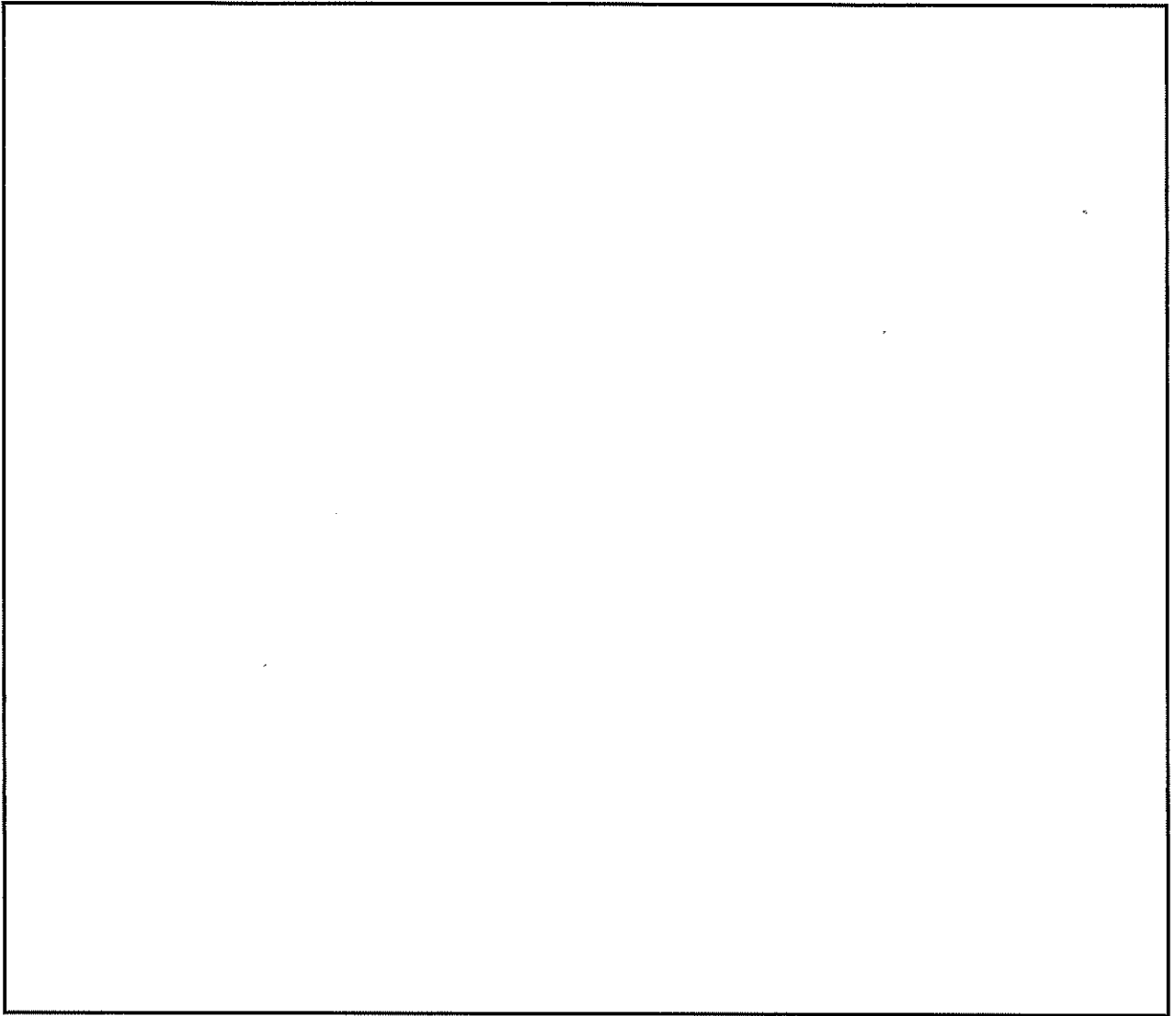
2-3-4-3 図  臨界実験体系 (2)



2-3-4-4 図  臨界実験体系 (1)



2-3-4-5 図 臨界実験体系 (2)



2-3-4-6 図



臨界実験体系



(参考文献)

- (1) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System” , ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).
- (2) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments” , NEA/NSC/DOC(95)03, (2006).

2-3-5 水位変動による臨界解析への影響

1. はじめに

本資料は乾式キャスク内部の注排水作業時に想定される水位変動による臨界解析への影響について説明するものである。

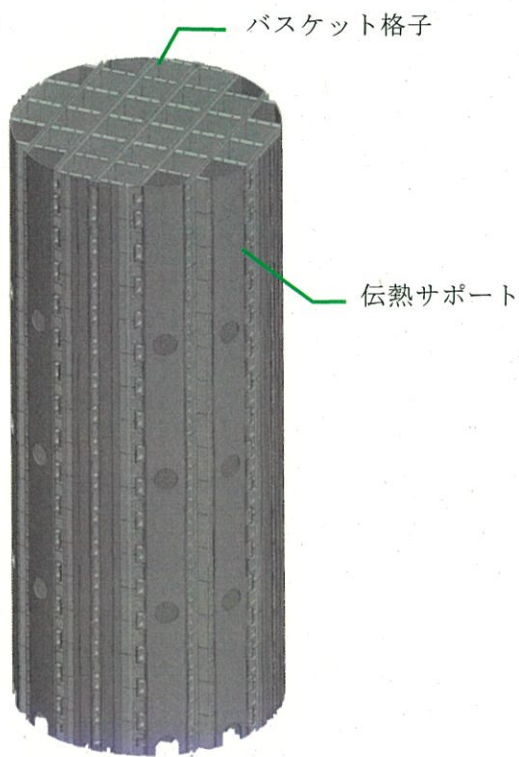
2. 水位変動時のバスケット内部の状態について

乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）のバスケットは、バスケット格子を葉子折り状に組み合わせることにより燃料集合体が収納されるセルを構成し、周辺部にキャスク本体への熱伝導を補助するため、伝熱サポートを設ける構造となっている。バスケットの構造図を 2-3-5-1 図に示す。

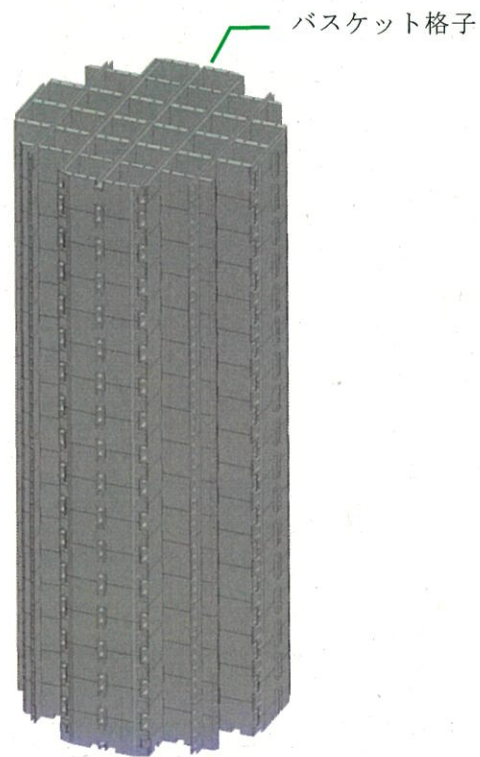
燃料集合体が収納されるバスケット格子内部及び伝熱サポートは、キャスク長手方向に空間が存在するため、注排水時に気層が局所的に留まることは無い。バスケット格子は、キャスクの長手方向に積層されるが、バスケット格子の中空構造部の水の出入りを行うために、バスケット格子の最上端から最下端まで通じた複数の通水孔が設けられており、バスケット格子の中空構造部に気層が残留しにくい構造としている。また、バスケット格子の板両端は開口しており、この部分からも水の流出入が可能な構造である。

燃料集合体を収納した状態での注排水作業は、一次蓋のドレンパイプを通じて約 1.8～2.5m³/hr 程度の非常に遅い速度で実施される。この速度では、バスケット格子 1 枚の高さ相当（約 240mm）の水位上昇（下降）には約 7～10 分を要することとなり、水位上昇（下降）速度は極めて緩慢である。

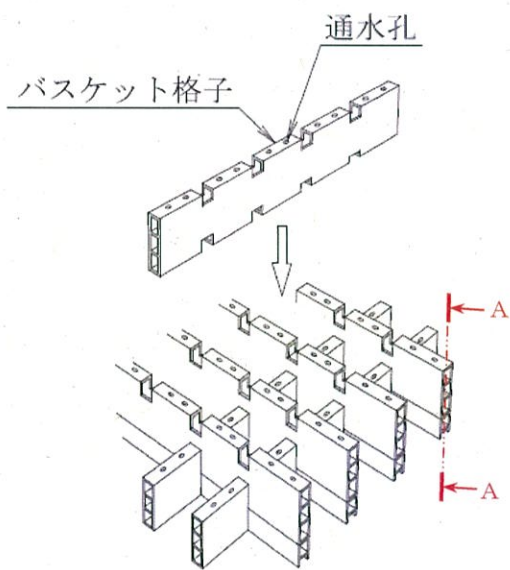
以上の通り、バスケット内外において水位差が出ないように設計上の配慮を行っていることから、バスケット内部において注水時における気層の残留または排水時における水層の残留は生じない。



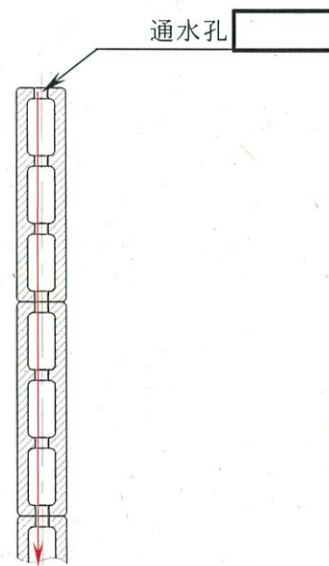
a. バスケット全体図



b. バスケット格子全体図



c. バスケット格子部分組立図

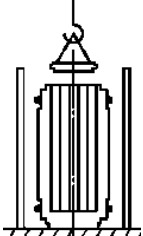
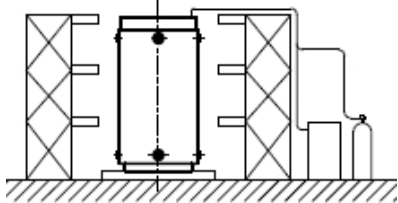
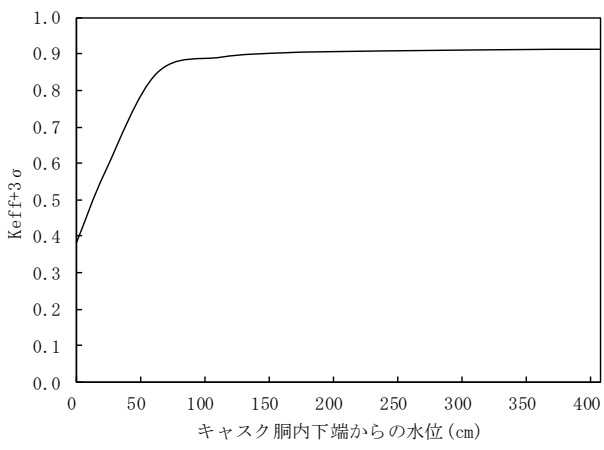
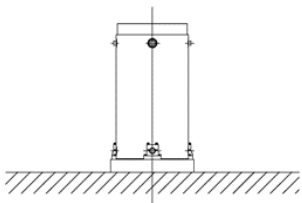


d. 通水孔詳細
(断面A-A)

2-3-5-1 図 バスケット構造 (乾式キャスク (タイプ2) の例)

3. 水位変動による臨界解析への影響について

乾式キャスク内部の水位変動に伴う実効増倍率の変化について 2-3-5-1 表に示す。水位の低下に伴い実効増倍率も低下することから、実効増倍率は冠水状態が最大である。

| No. | 取扱手順 | 実効増倍率評価結果 (3σ 込み) |
|-----|--|---|
| 1 | 燃料装荷・一次蓋取付  | (冠水状態) 0.92 |
| 2 | 排水 真空乾燥 不活性ガス充填  |  <p>「2-3-3 臨界解析における条件設定根拠」に示すとおり、冠水時において実効増倍率が最も大きくなる①外周燃料外周偏向配置モデルをもとに、キャスク内部の頂部(一次蓋下端)から水位を低下させた場合の実効増倍率評価結果</p> |
| 3 | 貯蔵  | (乾燥状態) 0.39 |

2-3-5-1 表 水位変動における実効増倍率評価結果
(乾式キャスク (タイプ 2) の例)

2-4 資料 13 に係る補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
（使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 2-4 資料13に係る補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 (該当添付資料) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | (名称) | (概要) | |
| 2-4-1 | 除熱解析の詳細条件 | 除熱解析条件の詳細を示す。 | 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 |
| 2-4-2 | 全体モデルに設定する径方向等価熱伝導率の算出について | 径方向等価熱伝導率の算出方法を示す。 | 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 |
| 2-4-3 | キャスク底部熱逃げ量の算出について | キャスク全体モデルの底面に設定する熱逃げ量の算出方法を示す。 | 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 |
| 2-4-4 | 塗装のふく射率の設定根拠について | 塗装のふく射率の設定根拠を示す。 | 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 |
| 2-4-5 | ふく射形態係数の算出について | ふく射形態係数の算出方法を示す。 | 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 |

2-4-1 除熱解析の詳細条件

1. はじめに

本資料は、「資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における除熱解析の詳細条件について説明するものである。

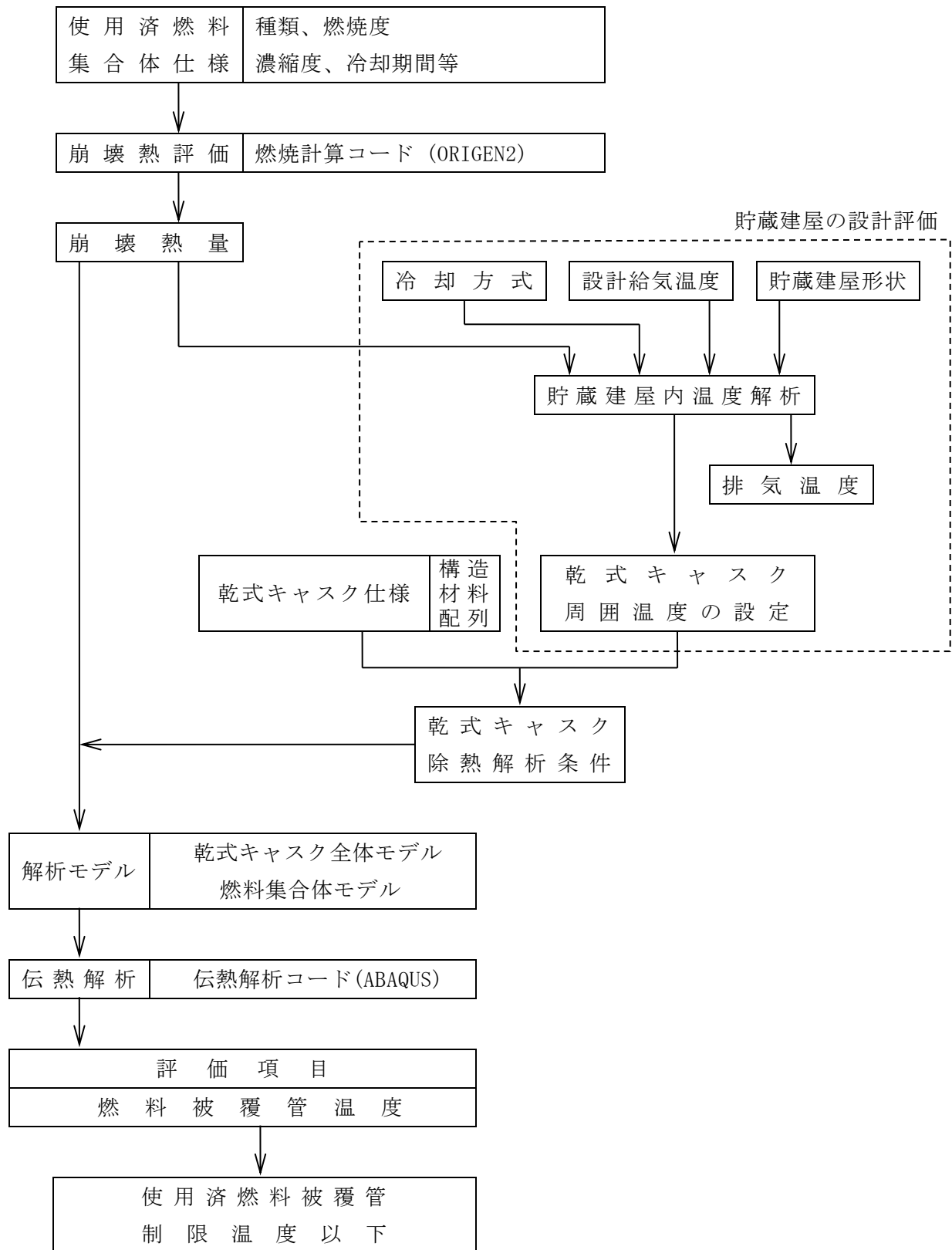
2. 除熱解析の全体フロー

乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）の除熱解析は、2-4-1-1図に示す除熱解析の全体フローに従って行う。

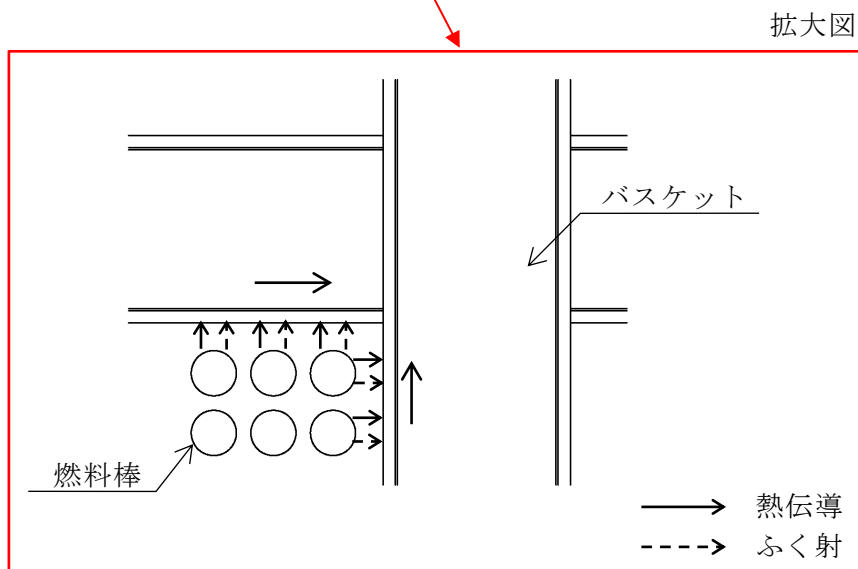
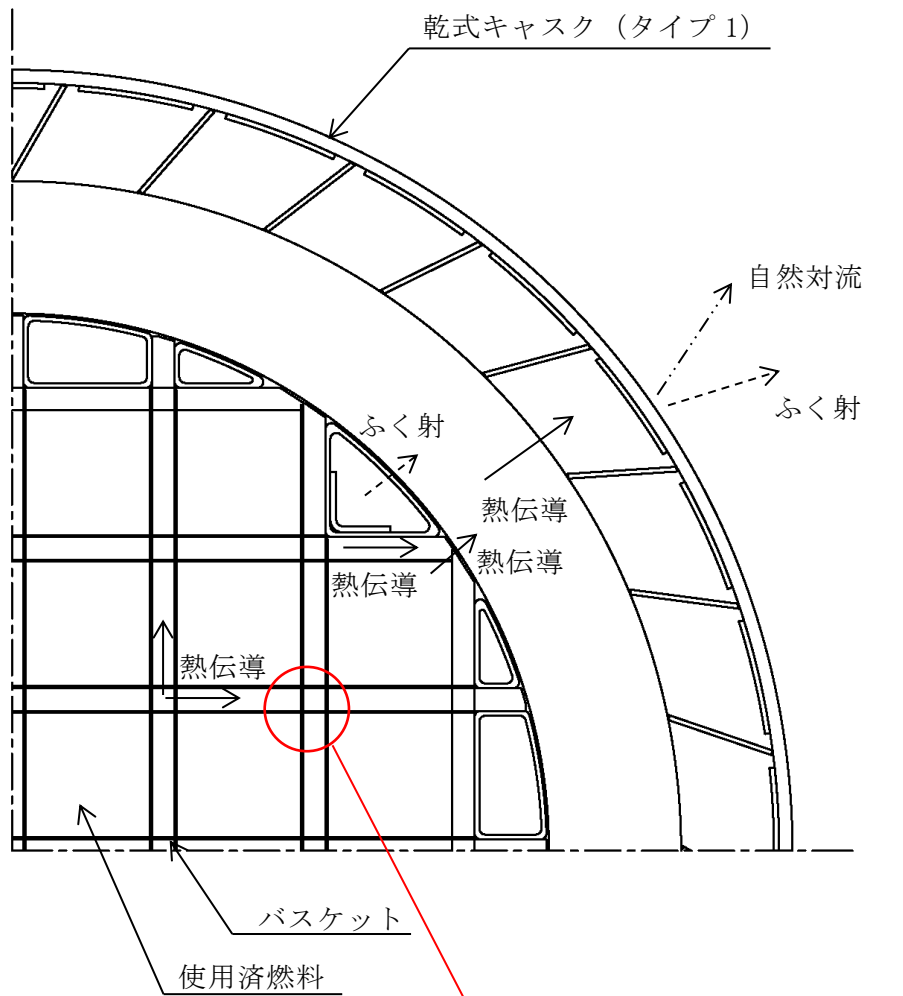
3. 伝熱形態について

乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）の伝熱形態を2-4-1-2図及び2-4-1-3図にそれぞれ示す。

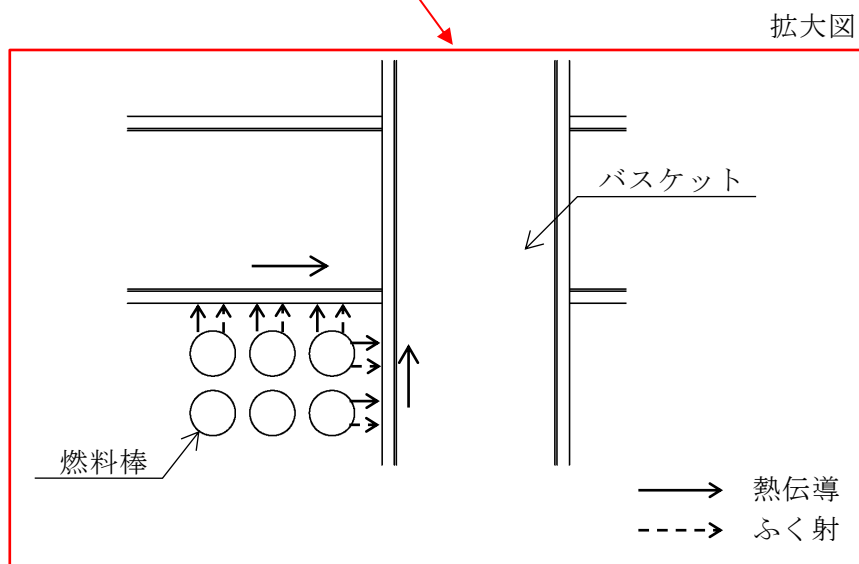
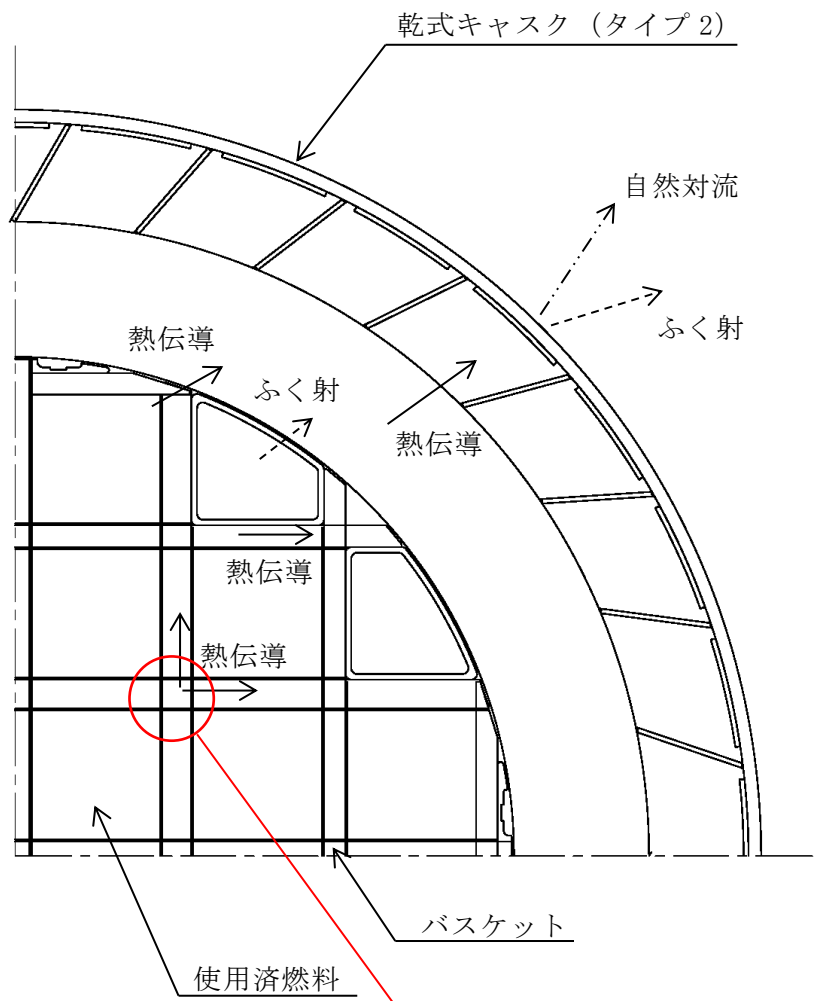
使用済燃料から発生した崩壊熱は、主に胴内に充填されたヘリウムガスの熱伝導とふく射によりバスケットに伝えられる。バスケットに伝えられた熱は、主に熱伝導によりバスケット外面に伝わり、ヘリウムガスの熱伝導とふく射により胴内面に伝えられる。続いて、胴内面に伝えられた熱は、熱伝導により胴外面に伝えられる。胴外面に伝えられた熱は、主に胴と外筒の間に設けられた銅製の伝熱フィンの熱伝導により外筒に伝えられる。外筒に伝えられた熱は、ふく射と空気の自然対流により大気に拡散される。



2-4-1-1 図 除熱解析の全体フロー図



2-4-1-2 図 乾式キャスク (タイプ 1) における伝熱形態図



2-4-1-3 図 乾式キャスク (タイプ 2) における伝熱形態図

4. 除熱解析条件

4.1 モデル化条件

除熱解析は、乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の実形状を三次元で、使用済燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法コード ABAQUS を用いて行う。使用した解析モデルは以下の 2 つのモデルである。

- ・乾式キャスク熱解析モデル

- ①三次元 180° 対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）

- ・燃料被覆管熱解析モデル

- ②燃料集合体モデル

これら 2 つの解析モデルの入出力フローを 2-4-1-4 図に示す。また、各解析モデルの概要及び解析条件を以下に示す。さらに、ふく射率の詳細を 2-4-1-1 表に示す。

(1) 全体モデル

全体モデルでは、バスケット格子の内側の領域（以下「燃料集合体領域」という。）を燃料集合体構成部材（ジルカロイ、二酸化ウラン、ステンレス鋼、インコネル）及び充填気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料集合体領域の平均密度及び軸方向の平均熱伝導率は体積平均値とし、平均比熱は重量平均値とする。また、径方向の平均熱伝導率については、燃料有効部のみ燃料集合体モデルの解析結果を基に設定した等価熱伝導率とし、それ以外の領域においては体積平均値とする（資料 2-4-2 を参照）。

全体モデルの外部境界条件を 2-4-1-2 表に示す。周囲温度を 50℃、貯蔵建屋壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面へのふく射による放熱を考慮する。なお、乾式キャスク底面については、貯蔵架台への伝熱及び貯蔵架台からの放熱を考慮して算出した熱移動量を設定する（資料 2-4-3 を参照）。

(2) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルは、使用済燃料集合体の軸方向中央断面を二次元でモデル化したものであり、燃料棒の温度を評価するためのモデルである。

燃料棒には、二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して均質化した物性値を設定する。

発熱条件には、PF^(注)最大領域の崩壊熱量となるように各燃料棒の発熱密度を設定する。また、境界条件には、全体モデルにおいて求められるバスケット内面の径方向温度分布を設定する。さらに、伝熱形態としては、径方向及び周方向の熱伝導及びふく射を考慮するものとし、軸方向への伝熱を無視し断熱とする。

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

2-4-1-1 表 材料のふく射率の詳細

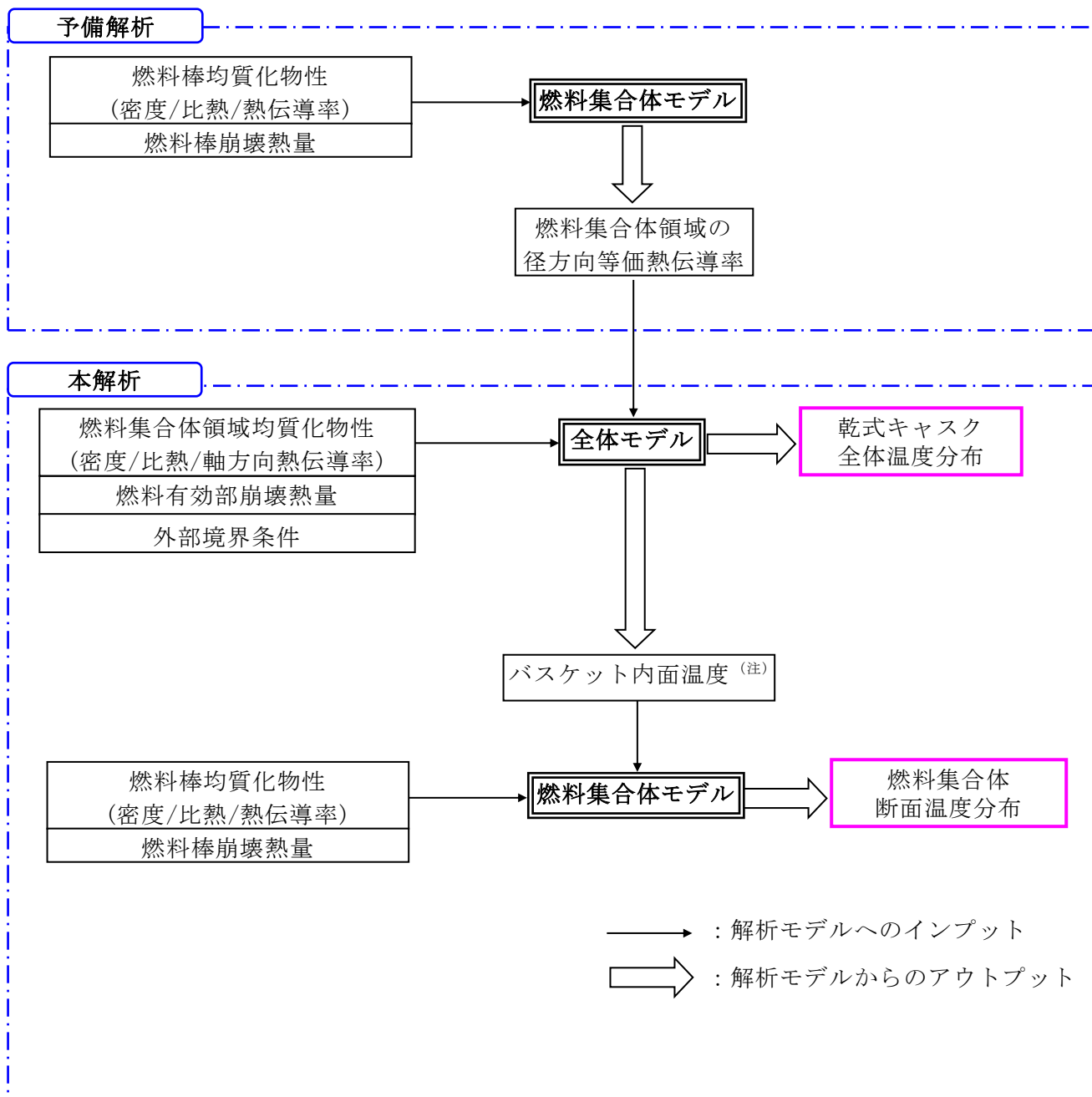
| 構成部材 | 材料 | ふく射率 |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|
| 胴（内面） | アルミニウム（溶射面） | 0.055 ⁽¹⁾ |
| 一次蓋 二次蓋 | ニッケル（めっき面） | 0.11 ⁽²⁾ |
| バスケットプレート バスケットサポート | アルミニウム合金 | 0.055 ⁽¹⁾ |
| 中性子吸収材 | ほう素添加アルミニウム合金 | 0.2 ⁽²⁾⁽³⁾ |
| 外筒（外表面） 胴（外表面） 貯蔵建屋壁面 | 塗装 | 0.8 ^{(4)(注)} |

(注) 塗装の設定根拠は資料 2-4-4 を参照。

2-4-1-2 表 全体モデルの外部境界条件

| 項目 | 境界条件 |
|------------------------------|----------------------------|
| 周囲温度 | 50℃ |
| 貯蔵建屋壁面温度 | 65℃ |
| 貯蔵建屋壁面ふく射率 | 0.8 |
| 乾式キャスク表面ふく射率 | 0.8 |
| 乾式キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数 | 0.212 ^(注) |
| 乾式キャスク表面熱伝達率 (側面、上面、下部端板) | 資料 13 の第 2-5 表及び第 3-5 表による |
| 底部熱移動 | 資料 2-4-3 による |

(注) 乾式キャスク配列ピッチ寸法を保守的に 3.5m として算出した値。算出過程は資料 2-4-5 を参照。




(注) 燃料集合体モデルの境界条件として、容器モデルの最高温度をとるバスケットセル内面(中性子吸収材)の径方向温度分布を設定する。

2-4-1-4 図 除熱解析モデルの入出力フロー図

4.2 使用済燃料の崩壊熱量の設定

使用済燃料の崩壊熱量は、使用済燃料集合体の種類、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 を使用して求められる。

ここで、構成部材の温度評価に当たっては、使用済燃料集合体の燃焼度分布を考慮して、最大崩壊熱量（乾式キャスク（タイプ1）：14.8kW、乾式キャスク（タイプ2）：15.8kW）を上回る崩壊熱量（以下「設計崩壊熱量」という。）を設定する（乾式キャスク（タイプ1）：16.9kW、乾式キャスク（タイプ2）：18.1kW）。

乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）の軸方向崩壊熱量分布を 2-4-1-5 図及び 2-4-1-6 図にそれぞれ示す。これらの図は、燃料有効部を軸方向に し、各領域（ノード）の崩壊熱量を軸方向の崩壊熱量分布として示すものである。また、乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）の設計崩壊熱量の設定方法を 10 頁及び 11 頁にそれぞれ示す。

乾式キャスク（タイプ 1）における設計崩壊熱量の設定方法は次式のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{[設計崩壊熱量]} &= \text{[中央部}^{(\text{注}1)} \text{の燃料集合体 (平均燃焼度}^{(\text{注}2)}) \text{ 1 体当たりの崩壊熱量} \\ &\quad \text{(PF}^{(\text{注}3)} \text{ 考慮有り)}] \times 1.05^{(\text{注}4)} \times \text{[中央部の収納体数]} \\ &+ \text{[外周部}^{(\text{注}1)} \text{の燃料集合体 (平均燃焼度}^{(\text{注}2)}) \text{ 1 体当たりの崩壊熱量} \\ &\quad \text{(PF}^{(\text{注}3)} \text{ 考慮有り)}] \times 1.05^{(\text{注}4)} \times \text{[外周部の収納体数]} \end{aligned}$$

使用済燃料の崩壊熱量計算から、設計崩壊熱量は以下のとおり計算される。

$$\begin{aligned} \text{[設計崩壊熱量]} &= 0.6437 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 16 \text{ (体)} + 0.3609 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 16 \text{ (体)} \\ &= 16.9 \text{ (kW)} \end{aligned}$$

(注 1) 乾式キャスク（タイプ 1）における中央部及び外周部の領域分けについては、資料 13 の第 2-5 図を参照のこと。

(注 2) 乾式キャスク（タイプ 1）における平均燃焼度とは、中央部では、中央部に収納される使用済燃料集合体 16 体分の燃焼度の平均値を示す。また、外周部では、外周部に収納される使用済燃料集合体 16 体分の燃焼度の平均値を示す。

(注 3) PF（ピーキングファクター）とは、使用済燃料集合体の軸方向燃焼度の平均値に対する燃焼度の比を包含する燃焼度分布を示す。

(注 4) ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の保守性を考慮する。

乾式キャスク（タイプ 2）における設計崩壊熱量の設定方法は次式のとおりである。

$$[\text{設計崩壊熱量}] = [\text{燃料集合体（平均燃焼度}^{(\text{注}1)}) \text{ 1 体当たりの崩壊熱量} \\ (\text{PF}^{(\text{注}2)} \text{ 考慮有り})] \times 1.05^{(\text{注}3)} \times [\text{収納体数}]$$

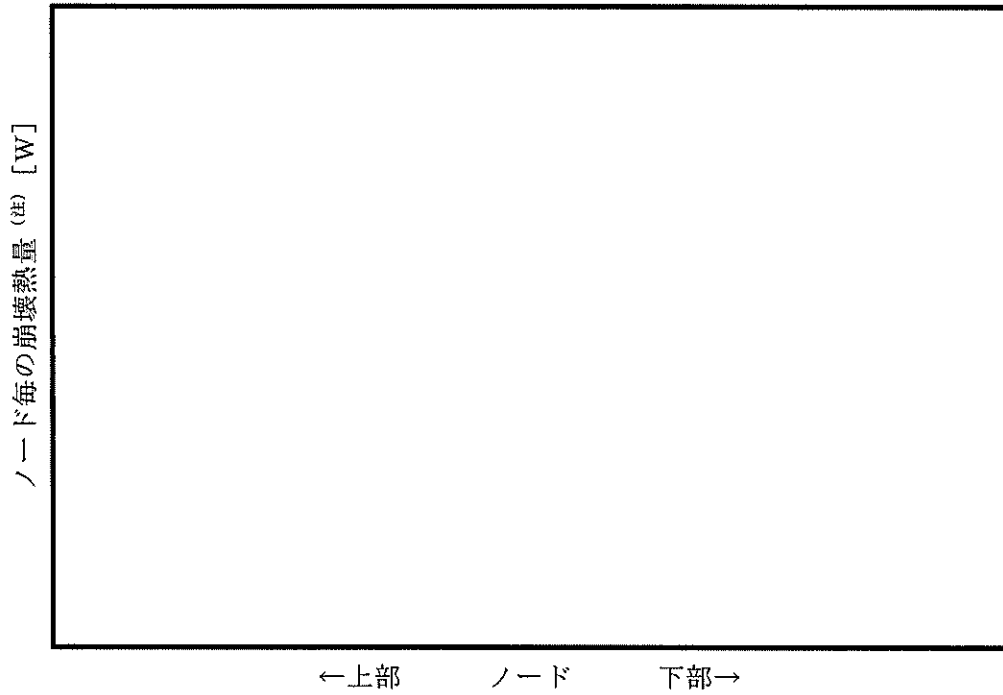
使用済燃料の崩壊熱量計算から、設計崩壊熱量は以下のとおり計算される。

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.7181 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 24 \text{ (体)} = 18.1 \text{ (kW)}$$

(注 1) 乾式キャスク（タイプ 2）における平均燃焼度とは、金属キャスク 1 基当たりに
収納される使用済燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

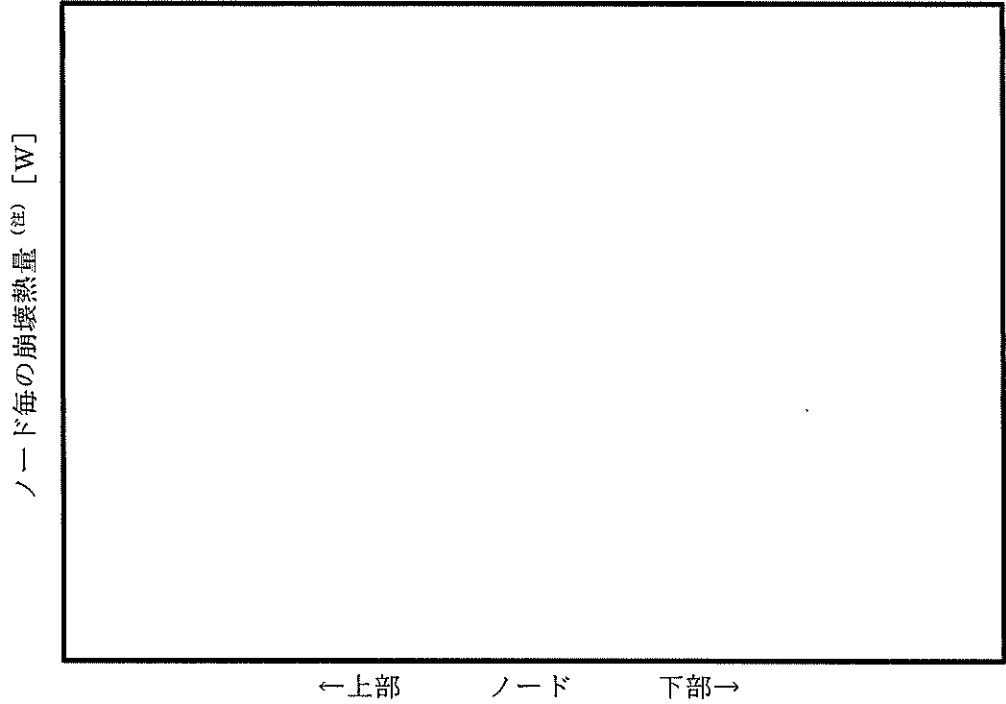
(注 2) PF（ピーキングファクター）とは、使用済燃料集合体の軸方向燃焼度の平均値に
対する燃焼度の比を包含する燃焼度分布を示す。

(注 3) ORIGEN2 コードの計算結果に 5%の保守性を考慮する。



(注) 使用済燃料集合体 32 体分の崩壊熱量を示す。

2-4-1-5 図 乾式キャスク (タイプ 1) 使用済燃料集合体 (燃料有効部) の軸方向崩壊熱量分布



(注) 使用済燃料集合体 24 体分の崩壊熱量を示す。

2-4-1-6 図 乾式キャスク (タイプ 2) 使用済燃料集合体 (燃料有効部) の軸方向崩壊熱量分布

5. 引用文献

- (1) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975).
- (2) J. R. Howell, R. Siegel, “Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition”, Taylor & Francis Group, (2011).
- (3) 中性子吸収材メーカー資料
- (4) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).

2-4-2 全体モデルに設定する
径方向等価熱伝導率の算出について

1. はじめに

本資料は、「資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の径方向等価熱伝導率の算出方法を説明するものである。算出方法の詳細を 2 章に示す。

2. 算出方法

全体モデルの燃料集合体領域に設定する熱伝導率は、軸方向に体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定しているのに対し、径方向は、燃料被覆管外面からバスケット内面までの熱伝導を正しく模擬するため、燃料集合体モデルによる予備解析結果と等価な熱伝導率を設定している。径方向等価熱伝導率の算出方法を以下に示す。また、参考として、乾式キャスク（タイプ 2）に収納する 17×17 燃料 48,000MWd/t 型における熱伝導率を 2-4-2-1 表に示す。

<径方向等価熱伝導率の算出方法>

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

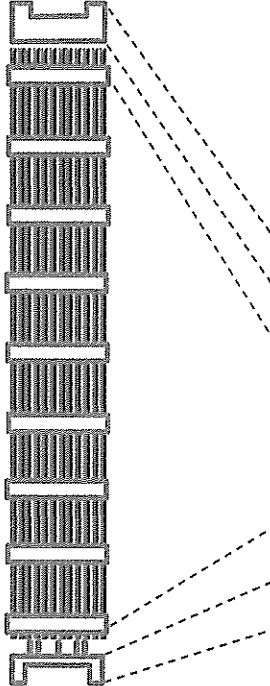
$$\lambda_f = \frac{qW^2}{K(T_1 - T_2)} \quad \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

ここで、

- λ_f : 径方向等価熱伝導率 (W/(m・K))
- q : 使用済燃料集合体の PF 最大領域における単位体積崩壊熱量 (W/m³)
- W : 燃料集合体領域外寸 (m)
- K : 係数 (-)
- T_1 : 燃料棒最高温度 (K)
- T_2 : バスケット格子又は中性子吸収材内面温度 (K)

燃料集合体モデルを用いて、 T_2 を 300K (26.85℃)、400K (126.85℃) 及び 600K (326.85℃) とした 3 ケースで T_1 を算定し、①式から温度依存性のある λ_f を設定する。

なお、各ケースで求められる λ_f の代表温度は T_1 と T_2 の平均値とし、内挿又は外挿により 300K (26.85℃)、400K (126.85℃) 及び 600K (326.85℃) における径方向等価熱伝導率を算出する。



2-4-2-1 表 全体モデルの燃料集合体領域における熱伝導率
 [乾式キャスク (タイプ 2) の例]

| 領域 | 方向 | 熱伝導率 (W/mm・K) | | |
|---------|----------------|---------------|---------|---------|
| | | 26.85℃ | 126.85℃ | 326.85℃ |
| 上部ノズル部 | 軸方向及び 径方向共通 | | | |
| 上部プレナム部 | | | | |
| 燃料有効部 | 径方向 | | | |
| | 軸方向 | | | |
| 下部ギャップ部 | 軸方向及び 径方向共通 | | | |
| 下部ノズル部 | | | | |

以上

2-4-3 キャスク底部熱逃げ量の算出について

1. はじめに

本資料は、「資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の全体モデルの底面に設定する熱逃げ量（以下、キャスク底部熱逃げ量という）の算出方法を説明するものである。算出方法の詳細を 2 章に示す。

2. キャスク底部熱逃げ量算出の詳細

キャスク底部熱逃げ量は、2-4-3-1 図に示す 2 ケースの伝熱経路において、3 章に示す参考文献[1]の式による算出値を下側に包絡した値を設定している。2 ケースの伝熱経路の詳細を以下に示す。また、伝熱経路①及び②における熱逃げ量を 2-4-3-1 表に示す。さらに、伝熱経路①及び②の熱逃げ量算出の詳細を 2.1 節及び 2.2 節にそれぞれ示す。

<伝熱経路①>

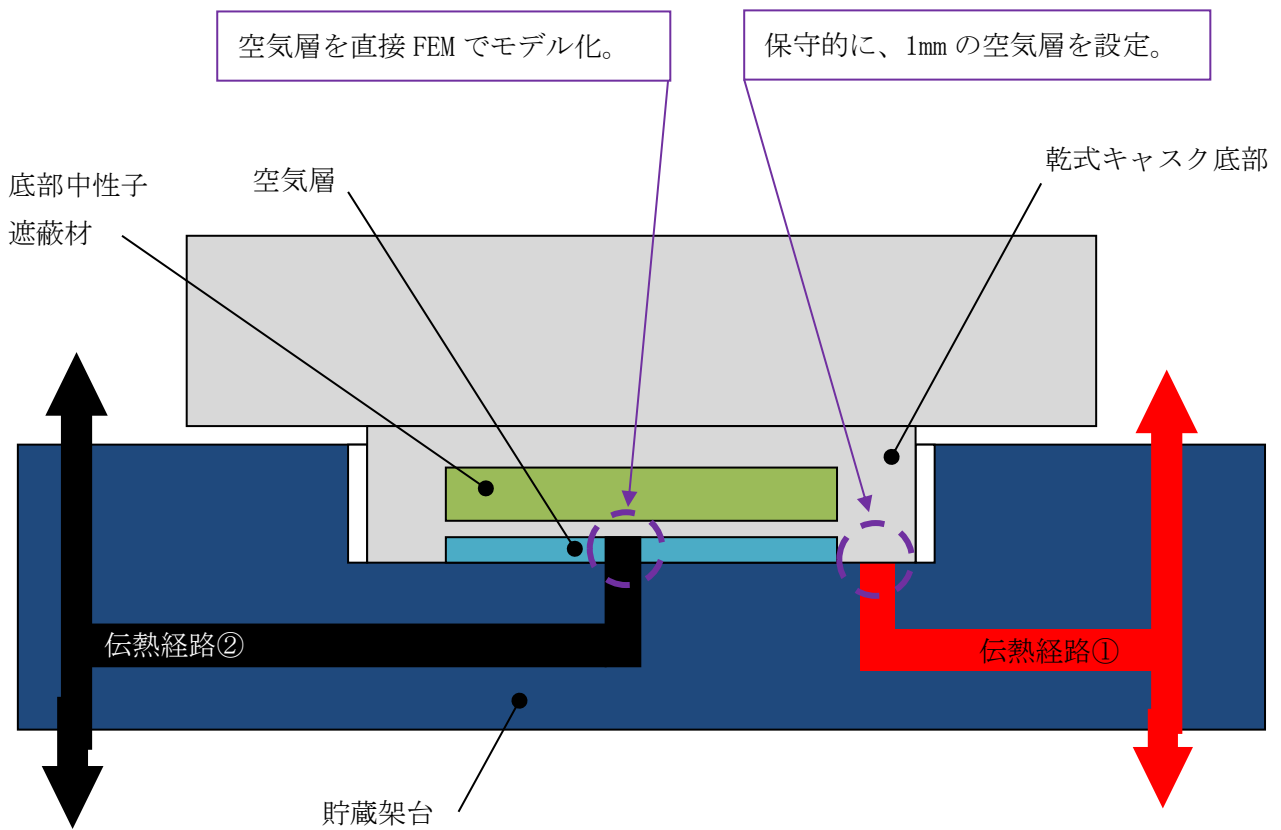
キャスク底部と貯蔵架台との接触面から熱が伝わり、貯蔵架台上下面から自然対流熱伝達により熱が大気中に逃げる経路である。なお、キャスク底部と貯蔵架台との接触面は、ほぼ完全接触に近いと考えられるが、保守的に厚さ 1mm の空気層があると仮定している。

<伝熱経路②>

底部中性子遮蔽材カバーから厚さ 10mm の空気層を介して貯蔵架台に熱が伝わり、伝熱経路①と同様に貯蔵架台上下面において自然対流熱伝達により熱が大気中に伝わる経路である。なお、三次元全体モデルにおいては、底部中性子遮蔽材カバーより下方の空気層がモデル化されており、空気層における伝熱は解析で直接解かれるため、計算では貯蔵架台の熱抵抗のみを考慮している。

2-4-3-1 表 伝熱経路①及び②における熱逃げ量

| | 伝熱経路① | 伝熱経路② |
|----------------------------|----------------------|----------------------|
| 熱逃げ量 (kW/mm ²) | 4.0×10^{-7} | 1.5×10^{-7} |



2-4-3-1 図 キャスク底部熱逃げ量の算出向けに設定した伝熱経路について

2.1 伝熱経路①の熱逃げ量算出

伝熱経路①の熱逃げ量は、保守的に設定した厚さ 1mm の空気層と貯蔵架台の熱抵抗を直列に接続した経路として算出している。算出の詳細を以下に示す。

(1) 厚さ 1mm の空気層の熱抵抗算出

厚さ 1mm の空気層の熱抵抗は、以下の式で算出できる。

$$R_1 = \frac{\delta}{\lambda \times A} \cdot \cdot \cdot (a)$$

2-4-3-2 表に、(a) 式の各記号の意味、入力値及び算出値を示す。

2-4-3-2 表 (a) 式の各記号の意味、入力値及び算出値

| 記号 | 意味 | 数値 | |
|-----|-----------|-----------------------------------|-------------------------|
| | | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
| 入力値 | δ | 空気層の厚さ (mm) | |
| | λ | 空気熱伝導率 ^(注) (W/mm・K) | |
| | A | 7.40 × 10 ⁵ | 8.25 × 10 ⁵ |
| 算出値 | R_1 | 4.34 × 10 ⁻² | 3.89 × 10 ⁻² |

(注) 熱伝導率は温度に依存して変化し、空気熱伝導率は温度が高い方が大きい。一方、熱逃げ量を考慮すると空気の温度は低下するため、評価が非保守側とならないように、熱逃げ量を考慮しても下回らない温度である 100°C の熱伝導率を設定している。

(2) 貯蔵架台の熱抵抗算出

貯蔵架台の熱抵抗は、以下の式で算出できる。

$$R_2 = \frac{1}{\sqrt{h \times P \times k \times A} \times \tanh(L \sqrt{hP/kA})} \cdot \cdot \cdot (b)$$

2-4-3-3 表に、(b) 式の各記号の意味、入力値及び算出値を示す。

2-4-3-3 表 (b)式の各記号の意味、入力値及び算出値

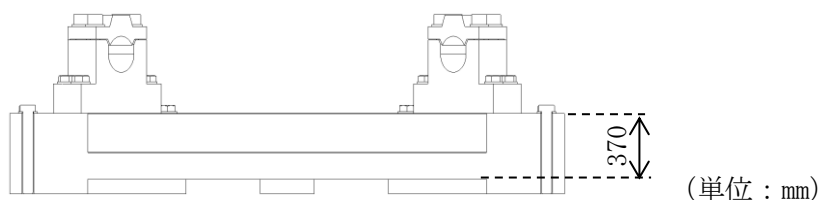
| 記号 | 意味 | 数値 | |
|-----|----------------|--|-----------------------|
| | | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) |
| 入力値 | h | 上向き水平平板の自然対流熱伝達率 ^(注1) (W/(mm ² ・K)) | |
| | P | 6961.8 | 6898.9 |
| | k | 貯蔵架台(炭素鋼)の熱伝導率 ^(注3) (W/mm・K) | |
| | A | 2.57×10 ⁶ | 2.55×10 ⁶ |
| | L | 334 | 334 |
| 算出値 | R ₂ | 8.96×10 ⁻² | 9.04×10 ⁻² |

(注1) 評価が保守側となるように、乾式キャスク底部温度 100℃、周囲温度 50℃で算出した値である。

(注2) 本周長は、検討時に計画されていたキャスク底部の面取り寸法 (C5) を除いた外径で算出している。

(注3) 伝熱工学資料第4版における炭素鋼 (S35C) の値を基に、100℃の熱伝導率を保守的に下側に丸めた値である。なお、乾式キャスクから熱が伝わることで温度が上昇すると考えられるため、貯蔵架台の温度を保守的にキャスク底部温度と同じ 100℃としている。

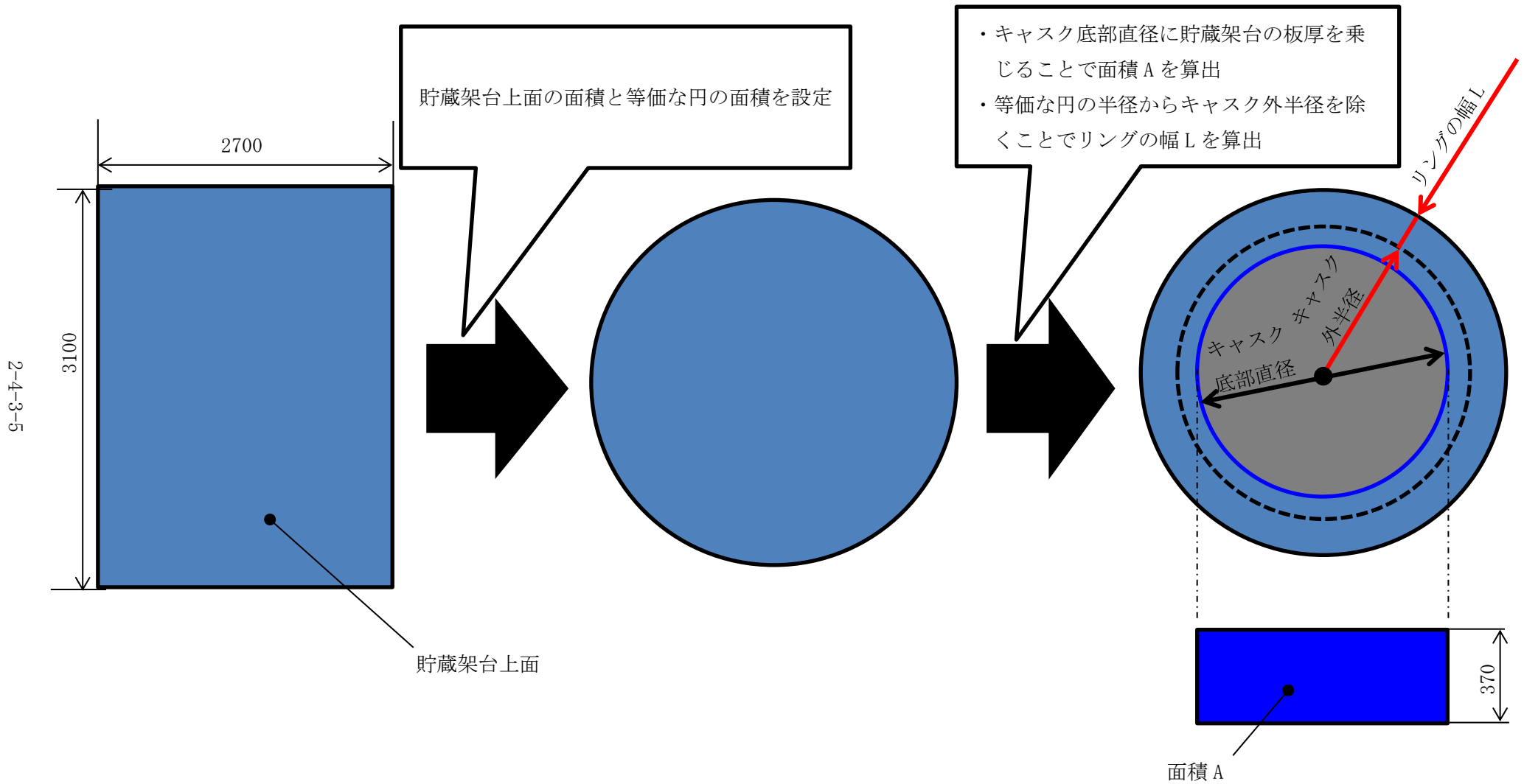
(注4) 以下の図に示す寸法である。



(注5) リングの幅は、2-4-3-2 図に示すように、貯蔵架台上面と面積が等価となる円の半径を算出した後、その縁の半径からキャスク外半径を除くことで算出する。以下に算出式を示す。

$$\text{貯蔵架台上面と面積が等価な円の半径} = \sqrt{\frac{\text{貯蔵架台長手寸法}(3100) \times \text{短手寸法}(2700)}{\pi}}$$

$$\text{リングの幅} = \text{貯蔵架台上面と面積が等価な円の半径} - \text{キャスク外半径}$$



2-4-3-2 図 面積 A 及びリングの幅 L の算出方法について

(3) 熱逃げ量算出

熱逃げ量は以下の(c)式で算出する。また、熱解析モデルには単位体積あたりの熱逃げ量を入力する。単位体積あたりの熱逃げ量は、(c)式の算出値を面積で割ることで算出した。乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）におけるキャスク底部と貯蔵架台との接触面の面積（熱逃げ量入力箇所）の面積）、熱逃げ量、単位体積あたりの熱逃げ量（熱逃げ量を面積で割った値）、及び各キャスクの算出値を下側に包絡した入力値を2-4-3-4表に示す。

$$\text{熱逃げ量(kW)} = \frac{1}{R_1+R_2} \times \Delta T \times \frac{1}{1000} \dots (c)$$

$$\Delta T = (\text{キャスク底面温度} - \text{周囲流体温度}) = (100-50) = 50 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

2-4-3-4 表 熱逃げ量の算出結果及び入力値の設定結果

| 項目 | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) | 3D 熱解析モデル への入力値 |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| キャスク底部と貯蔵架台との接触面の面積(mm ²) | 7.40×10 ⁵ | 8.25×10 ⁵ | — |
| 熱逃げ量(kW) | 0.375 | 0.386 | — |
| 単位面積あたりの熱逃げ量(kW/mm ²) | 5.06×10 ⁻⁷ | 4.67×10 ⁻⁷ | 4.00×10 ⁻⁷ |

2.2 伝熱経路②の熱逃げ量算出

伝熱経路②の熱逃げ量は、10mmの空気層が解析モデルに直接的にモデル化されていることを踏まえ、空気層の熱抵抗は考慮せず、貯蔵架台の熱抵抗のみから算出した。以下に、算出の詳細を示す。

(1) 貯蔵架台の熱抵抗算出

貯蔵架台の熱抵抗は、以下の(d)式で算出できる。

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{h \times P \times k \times A} \times \tanh(L \sqrt{hP/kA})} \dots (d)$$

2-4-3-5表に、(d)式の各記号の意味、入力値及び算出値を示す。

2-4-3-5 表 (d)式の各記号の意味、入力値及び算出値

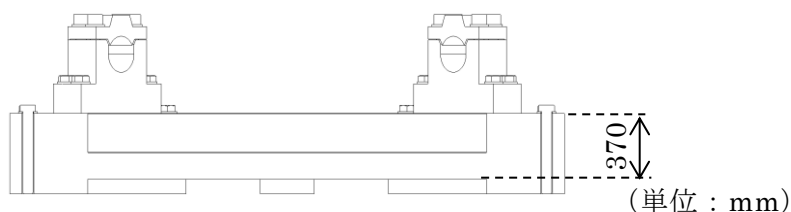
| 記号 | 意味 | 数値 | |
|-----|---|-----------------------|-----------------------|
| | | 乾式キャスク (タイプ 1) | 乾式キャスク (タイプ 2) |
| 入力値 | h 上向き水平平板の自然対流熱伝達率 ^(注1) (W/(mm ² ・K)) | 4.86×10 ⁻⁶ | |
| | P キャスク底部の周長 ^(注2) (mm) | 6961.8 | 6898.9 |
| | k 貯蔵架台(炭素鋼)の熱伝導率 ^(注3) (W/mm・K) | 0.04 | |
| | A 乾式キャスク底部の周長に貯蔵架台板厚 (370mm) ^(注4) を乗じて算出した面積(mm ²) | 2.57×10 ⁶ | 2.55×10 ⁶ |
| | L 2-4-3-2 図に示すリングの幅 ^(注5) (mm) | 334 | 334 |
| 算出値 | R ₁ 貯蔵架台の熱抵抗 (K/W) | 8.96×10 ⁻² | 9.04×10 ⁻² |

(注1) 評価が保守側となるように、乾式キャスク底部温度 100℃、周囲温度 50℃で算出した値である。

(注2) 本周長は、検討時に計画されていたキャスク底部の面取り寸法 (C5) を除いた外径で算出している。

(注3) 伝熱工学資料第 4 版における炭素鋼 (S35C) の値を基に、100℃の熱伝導率を保守的に下側に丸めた値である。なお、乾式キャスクから熱が伝わることで温度が上昇すると考えられるため、貯蔵架台の温度を保守的にキャスク底部温度と同じ 100℃としている。

(注4) 以下の図に示す寸法である。



(注5) リングの幅は、2-4-3-2 図に示すように、貯蔵架台上面と面積が等価となる円の半径を算出した後、その縁の半径からキャスク外半径を除くことで算出する。以下に算出式を示す。

$$\text{貯蔵架台上面と面積が等価な円の半径} = \sqrt{\frac{\text{貯蔵架台長手寸法}(3100) \times \text{短手寸法}(2700)}{\pi}}$$

$$\text{リングの幅} = \text{貯蔵架台上面と面積が等価な円の半径} - \text{キャスク外半径}$$

(2) 熱逃げ量算出

熱逃げ量は以下の(e)式で算出する。また、熱解析モデルには単位面積あたりの熱逃げ量を入力する。単位面積あたりの熱逃げ量の算出値は、(e)式の算出値を面積で割ることで算出し、三次元全体モデルの入力値は、単位体積あたりの熱逃げ量の算出値を下側に包絡する値を設定している。2-4-3-6表に、乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）における算出値と三次元全体モデルの入力値を示す。

$$\text{熱逃げ量(kW)} = \frac{1}{R_1} \times \Delta T \times \frac{1}{1000} \cdots (e)$$

$$\Delta T = (\text{乾式キャスク底面温度} - \text{周囲流体温度}) = (100 - 50) = 50 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

2-4-3-6表 熱逃げ量の算出結果及び入力値の設定結果

| 項目 | 乾式キャスク (タイプ1) | 乾式キャスク (タイプ2) | 三次元全体モデル の入力値 |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 乾式キャスク底部 中央の面積(mm ²) | 3.12×10 ⁶ | 2.96×10 ⁶ | — |
| 熱逃げ量(kW) | 0.558 | 0.553 | — |
| 単位面積あたりの 熱逃げ量(kW/mm ²) | 1.78×10 ⁻⁷ | 1.86×10 ⁻⁷ | 1.50×10 ⁻⁷ |

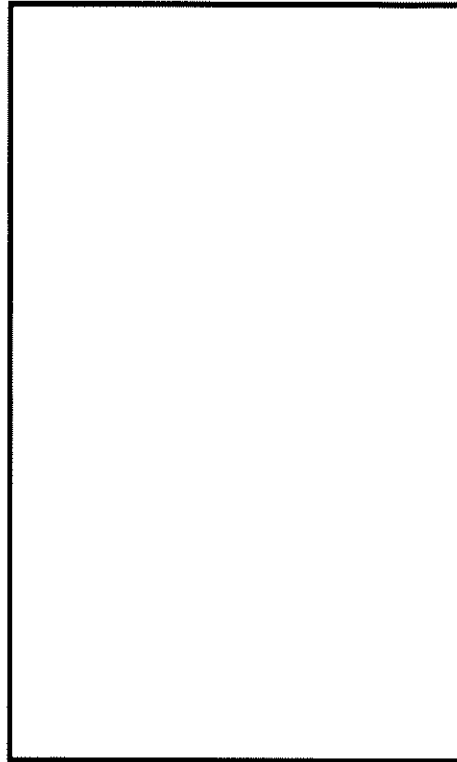
3. 設計承認申請における軸方向熱逃げ量との比較

乾式キャスクの軸方向への熱逃げについては、本評価における乾式キャスク底部から貯蔵架台への熱逃げと同様に、設計承認申請において緩衝体への熱逃げとして考慮している。

具体的には、本評価における底部熱逃げ量の設定にあたっては、燃料被覆管やキャスク各部の温度が保守的な評価となるよう、上記の通り貯蔵架台への伝熱経路としてキャスク底部の接触部の伝熱（伝熱経路①）及び底部中性子遮蔽材カバーから空気層を通じた伝熱（伝熱経路②）のみを考慮しており、キャスク底部側面からのふく射等による伝熱は考慮していない。また、貯蔵架台からの自然対流における放熱面積としては実際に外気に接する範囲の一部のみを考慮し、熱逃げ量が保守的となるように設定し、伝熱工学式を用いて評価している。

一方で、本キャスクの核燃料輸送物設計承認において、輸送時に人が近づきうる輸送物の表面温度を評価するため、2-4-3-3図に示すとおりキャスクの底部に緩衝体を取り付けた解析モデルにて除熱評価を行っており、キャスク底部から下部緩衝体に熱が伝わり、下部緩衝体から自然対流により放熱される系が模擬されている。

各評価の境界条件を2-4-3-4図に示す。



2-4-3-3 図 核燃料輸送物設計承認における除熱解析モデル

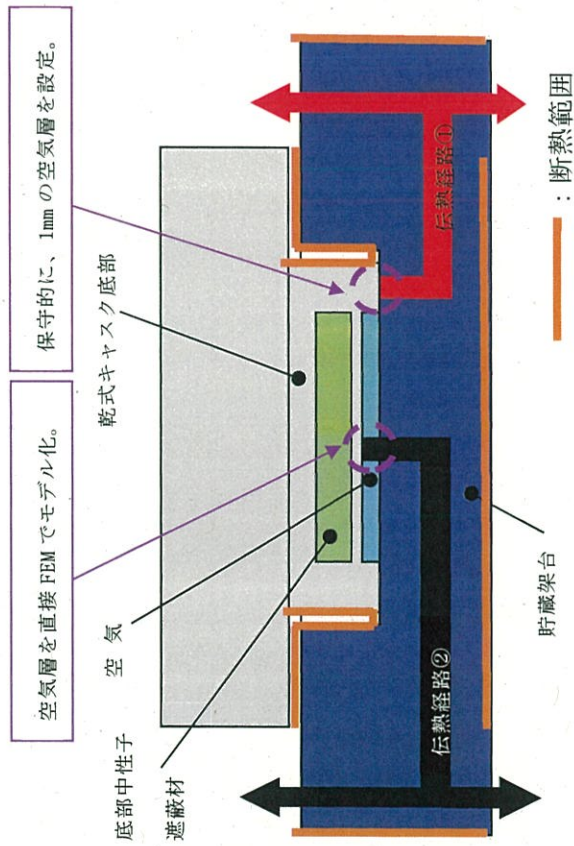
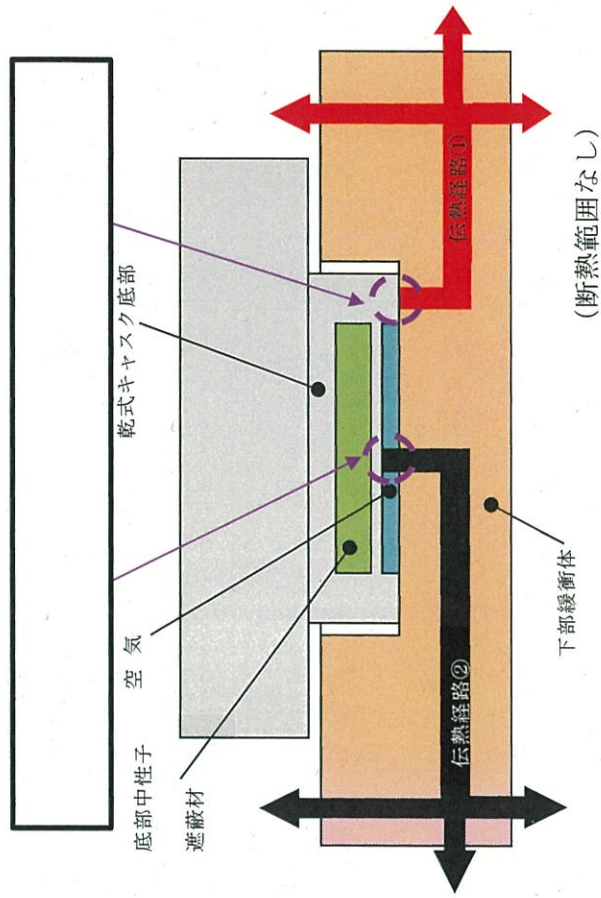
本設工認申請における伝熱工学式を用いた全放熱量に対する底部熱逃げ量の設定値及び割合と設計承認における解析モデルでの全放熱量に対する下部緩衝体からの放熱量及び割合の比較を 2-4-3-7 表に示す。

本設工認申請におけるキャスク底部熱逃げ量の設定値（伝熱効果の高い炭素鋼製の貯蔵架台からの放熱）は全放熱量のわずかに約 4%であるのに対し、設計承認における下部緩衝体（断熱効果の高い木材が充填されている）からの放熱割合（約 3%）と同程度である。

以上より、本設工認申請におけるキャスク底部熱逃げ量は、適切に考慮できている。

2-4-3-7 表 貯蔵架台及び下部緩衝体からの放熱量について
(乾式キャスク (タイプ 2) の例)

| 各部 | 貯蔵架台 | 下部緩衝体 |
|-----------|--------|--------|
| 全放熱量 | 18.1kW | 18.1kW |
| 各部からの放熱量 | 0.76kW | 0.48kW |
| 各部からの放熱割合 | 4.2% | 2.7% |



設計承認における境界条件

設工認における境界条件

2-4-3-4 図 キャスク底部の境界条件について

4. 参考文献

- [1] J. P. ホールマン, 「伝熱工学<上>」, (1993).

以上

2-4-4 塗装のふく射率の設定根拠について

1. はじめに

本資料は、「資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」において使用している塗装のふく射率の設定根拠を説明するものである。詳細を 2 章に示す。

2. 塗装のふく射率の設定根拠

塗装に適用したふく射率 0.8 は、「(一社)日本機械学会、『伝熱工学資料 改訂第 4 版』, (1986).」に示された塗料のふく射率 0.7~0.9 の最大と最小の平均値である。なお、設定の妥当性を以下に示す。

< 塗装にふく射率 0.8 を設定したことの妥当性 >

塗装のふく射率 0.8 が設定されている構成部材は、外筒（外面）及び胴（外面）である。これらの構成部材のふく射率に係る文献値、解析入力値及び実測値を 2-4-4-1 表に示す。なお、実測値は乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の表面に塗装予定である [] の値である。

ふく射率 0.8 は実測値（0.93）より小さいことから、乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の内部の温度がより高く評価される。したがって、設定は妥当である。

2-4-4-1 表 材料のふく射率

| 構成部材 | 仕様 | ふく射率 | | |
|-----------------|----|---------------|-------|------------|
| | | 文献値 | 解析入力値 | 実測値 |
| 外筒（外面） 胴（外面） | 塗装 | 0.7~0.9 (注 1) | 0.8 | 0.93 (注 2) |
| 貯蔵建屋壁面 | | | | コンクリート |

(注 1) 「(一社)日本機械学会、『伝熱工学資料 改訂第 4 版』, (1986).」に示される塗料のふく射率の最大と最小の値。

(注 2) 乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の表面に塗装予定である [] の実測値。

(注 3) 「(一社)日本機械学会、『伝熱工学資料 改訂第 4 版』, (1986).」に示される値。

以上

2-4-5 ふく射形態係数の算出について

1. はじめに

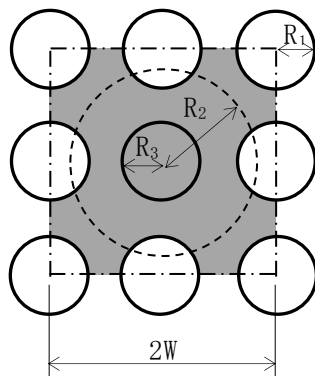
本資料は、「資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）の全体モデルに設定しているふく射形態係数の算出方法を説明するものである。

2. ふく射形態係数の算出方法

乾式キャスク表面から貯蔵建屋内壁面へのふく射形態係数は、乾式キャスク側面から貯蔵建屋の天井及び床面へのふく射形態係数として求める。以下に、このふく射形態係数の算出方法を示す。

初めに、2-4-5-1 図の乾式キャスクの貯蔵配置に示すように、中心に配置された対象の乾式キャスク（以下「対象キャスク」という。）の周囲の乾式キャスク（以下「周囲キャスク」という。）で囲まれた空間（一辺が $2W$ の正方形の空間）のうち、周囲キャスクを除く面積（2-4-5-1 図の灰色のエリア）の等価断面半径 R_2 を①式で求める。

$$R_2 = \sqrt{4W^2 / \pi - 3 \times R_1^2} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$



| | |
|-------|---------------------------|
| R_1 | : 周囲キャスクの半径 (注 1) |
| R_2 | : 等価断面半径 |
| R_3 | : 対象キャスクの半径 |
| W | : 周囲キャスクとの間隔 (3.5m) (注 2) |

(注 1) 保守的に、対象キャスクの半径よりも大きい 1.35m を設定。

(注 2) 伊方発電所の乾式貯蔵施設におけるキャスクピッチは 3.8m であるが、保守的に 3.5m に設定。

2-4-5-1 図 乾式キャスクの貯蔵配置

次に、乾式キャスク表面から貯蔵建屋内壁面へのふく射形態係数は、引用文献[1]の付属書 AT に基づき、円環フィン形状の形態係数を求める式を用いて算出する。算出式及び各ふく射面の定義をそれぞれ②式から⑤式及び 2-4-5-2 図に示す。ここで、周囲キャスクの高さを L とし、 b に R_3 を、 a に R_2 を、 c に L を代入して、2 面より 3 面への形態係数 F_{23} を求める。形態係数の算出条件及び結果を 2-4-5-1 表に示す。

以上から、乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）表面から貯蔵建屋内壁面へのふく射形態係数は、2-4-5-1 表の 2 面から 3 面への形態係数 F_{23} (0.212) となる。

$$\left\{ \begin{array}{l} A_n \cdot F_{nk} = A_k \cdot F_{kn} \\ \sum_n F_{kn} = 1.0 \end{array} \right. \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

n=1, 2, 3, ...M

ここで、

A_n : n 面の面積 (m²)

F_{kn} : k 面より n 面への形態係数 (-)

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left\{ \sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left[\frac{B}{XA} \right] + B \sin^{-1} \left[\frac{1}{X} \right] - \frac{\pi A}{2} \right\} \right] \dots \textcircled{3}$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left[\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right] - \frac{Y}{2\pi X} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left\{ \frac{4(X^2-1) + (Y^2/X^2)(X^2-2)}{Y^2 + 4(X^2-1)} \right\} - \sin^{-1} \left[\frac{X^2-2}{X^2} \right] + \frac{\pi}{2} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} - 1 \right] \right] \dots \textcircled{4}$$

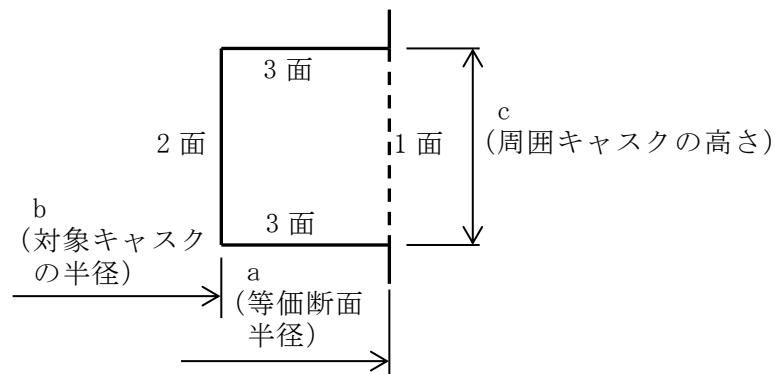
$$F_{13} = 1 - F_{12} - F_{11} \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

ここに、 $X = a/b$

$Y = c/b$

$A = X^2 + Y^2 - 1$

$B = Y^2 - X^2 + 1$



2-4-5-2 図 各ふく射面の定義

2-4-5-1 表 形態係数の算出条件及び結果

| | | | |
|------|-------------------------|---------------------|--------|
| 算出条件 | 形状 (m) | R ₁ | 1.35 |
| | | a (R ₂) | 3.183 |
| | | b (R ₃) | 1.298 |
| | | c (L) | 6 |
| | | W | 3.5 |
| | 面積 (m ²) | A ₁ | 119.99 |
| | | A ₂ | 48.93 |
| | | A ₃ | 53.06 |
| 算出結果 | 2面の形態係数 (-) | F ₂₃ | 0.212 |

3. 引用文献

- [1] 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」, (2014).

2-5 資料 14 に係る補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
 （使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 2-5 資料14に係る補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 （該当添付資料） |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------------|---|
| | （名称） | （概要） | |
| 2-5-1 | 遮蔽解析詳細条件 | 遮蔽解析条件の詳細を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-2 | 遮蔽解析詳細結果 | 遮蔽解析結果の詳細を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-3 | 燃焼計算コードORIGEN2を用いることの妥当性 | 燃焼計算コードORIGEN2を用いることの妥当性を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-4 | 二次元輸送計算コードDOT3.5を用いることの妥当性 | 二次元輸送計算コードDOT3.5を用いることの妥当性を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-5 | JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリを適用することの妥当性 | JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリを適用することの妥当性を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-6 | トラニオン部の線束接続計算の妥当性 | 本体モデルからトラニオン部モデルへの線束接続計算の妥当性を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |

| | | | |
|--------|---|---|---|
| 2-5-7 | 中性子実効増倍率の設定について | 線源強度評価に用いる中性子実効増倍率の設定方法を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-8 | 中性子源スペクトルを ²³⁹ Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性 | 中性子源スペクトルを ²³⁹ Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-9 | 三次元解析による二次元解析モデル設定の妥当性確認 | 三次元解析による二次元解析モデル設定の妥当性を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-10 | 一次蓋のドレン・ベントバルブ及び二次蓋のモニタリングポートの影響 | 一次蓋のドレン・ベントバルブ及び二次蓋のモニタリングポートの影響を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |
| 2-5-11 | 異なる燃料型式収納時の線量当量率評価 | 異なる燃料型式収納時の線量当量率評価を示す。 | 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |

2-5-1 遮蔽解析詳細条件

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、遮蔽解析条件の詳細について説明するものである。

1. 使用済燃料集合体の放射線源強度について

使用済燃料集合体の放射線源強度（以下、「線源強度」という。）は、「燃料有効部からのガンマ線及び中性子」、「使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線」に分けて計算する。

使用済燃料集合体の線源強度計算方法及び条件を 2-5-1-1 表から 2-5-1-3 表に示す。また、2-5-1-4 表に燃料集合体の種類と型式毎の線源強度を示す。

2-5-1-4 表より、乾式キャスク（タイプ 1）については構造材放射化ガンマ線源強度が高い（燃料有効部からのガンマ線及び中性子源強度は A 型と B 型で同値）14×14 燃料（B 型）を収納した場合を対象として、乾式キャスク（タイプ 2）については燃料有効部ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）を収納した場合を対象として、2-5-1-1 図に示す使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納位置を考慮して遮蔽解析を実施した。

上記の燃料に対する燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度及び中性子源スペクトルを 2-5-1-5 表及び 2-5-1-6 表に示す。

2-5-1-1 表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算方法及び条件

| 項目 | 計算方法 | 計算条件 |
|-------------------------------------|--|--|
| 燃料有効部からのガンマ線及び中性子 | 燃焼計算コード ORIGEN2.2UPJ を用い、ガンマ線及び中性子源強度を計算。使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布（以下「ピーキングファクター」という。）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：2-5-1-2 表参照（乾式キャスク（タイプ1）） 2-5-1-3 表参照（乾式キャスク（タイプ2）） 解析コード：ORIGEN2.2UPJ（資料2-5-3 参照） ライブラリ：PWRU50 ライブラリ（48,000MWd/t 型） PWRU ライブラリ（39,000MWd/t 型） ピーキングファクター：2-5-1-2 図参照 実効増倍率：0.30（資料2-5-7 参照） |
| 使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線 | 使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の 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 $A = N_0 \sigma \phi \{1 - \exp(-\lambda T_1)\} \times \exp(-\lambda T_2)$ A：放射化核種（ ⁶⁰ Co）の放射能（Bq） N ₀ ：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の（n, γ）反応断面積（cm ² ） φ：炉内照射熱中性子束（n/(cm ² ・s)） λ： ⁶⁰ Coの崩壊定数（3.6001×10 ⁻⁴ /日） T ₁ ：照射日数（日）（2-5-1-3 表参照） T ₂ ：冷却日数（日）（2-5-1-3 表参照） |

2-5-1-2 表 使用済燃料集合体の線源強度計算条件
(乾式キャスク (タイプ 1))

| 項 目 | | 14×14 燃料 48,000MWd/t 型 | | 14×14 燃料 39,000MWd/t 型 | |
|--------------------|--------------|---------------------------|-----|---------------------------|-----|
| | | A 型 | B 型 | A 型 | B 型 |
| 燃焼度 (MWd/t) | 中央部 | 48,000 | | 39,000 | |
| | 外周部 | — | | | |
| 平均比出力 (MW/t) (注 1) | | 34.0 | | | |
| 照射 日数 (日) | 使用済燃料 集合体 | 中央部 | | | |
| | | 外周部 | | | |
| 初期濃縮度 (%) (注 2) | | | | | |
| 冷却日数 (日) | | 5,479 | | 9,131 | |
| ウラン重量 (kg/体) | | | | | |
| (上部) | | | | | |
| ピーキングファクター (注 3) | | | | | |
| (下部) | | | | | |

(注 1) 比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注 2) 初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注 3) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。2-5-1-2 図参照

2-5-1-3 表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件
(乾式キャスク (タイプ 2))

| 項 目 | | | 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 | |
|--------------------|------------------|--------|---------------------------|-------|
| | | | A 型 | B 型 |
| 燃焼度 (MWd/t) | 中央部 | 48,000 | | |
| | 外周部 | 44,000 | | |
| 平均比出力 (MW/t) (注 1) | | | 38.4 | |
| 照射 日数 (日) | 使用済燃料 集合体 | 中央部 | | |
| | | 外周部 | | |
| | バーナブルポイズン 集合体 | | | |
| 初期濃縮度 (%) (注 2) | | | | |
| 冷却日数 (日) | | | 5,479 | 6,209 |
| ウラン重量 (kg/体) | | | | |
| (上部) | | | | |
| ピーキングファクター (注 3) | | | | |
| (下部) | | | | |

(注 1) 比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注 2) 初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注 3) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。2-5-1-2 図参照。

2-5-1-4 表(1/2) 燃料集合体の種類と型式毎の線源強度 (乾式キャスク (タイプ 1))

(金属キャスク 1 基当たり)

| 項目 | 14×14 燃料 ^(注 1) | |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| | A 型 | B 型 |
| 燃料有効部ガンマ線 (photons/s) | 1.043×10^{17} | 1.043×10^{17} |
| 構造材放射化ガンマ線 (⁶⁰ Co TBq) | 2.320×10^2 | 3.242×10^2 |
| 燃料有効部中性子 ^(注 2) (n/s) | 1.167×10^{10} | 1.167×10^{10} |

(注 1) 中央部 16 体の燃焼度を 48,000MWd/t、外周部 16 体の燃焼度を 39,000MWd/t とした金属キャスク 1 基当たりの線源強度である。

(注 2) 記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度である。

2-5-1-4 表(2/2) 燃料集合体の種類と型式毎の線源強度 (乾式キャスク (タイプ2))

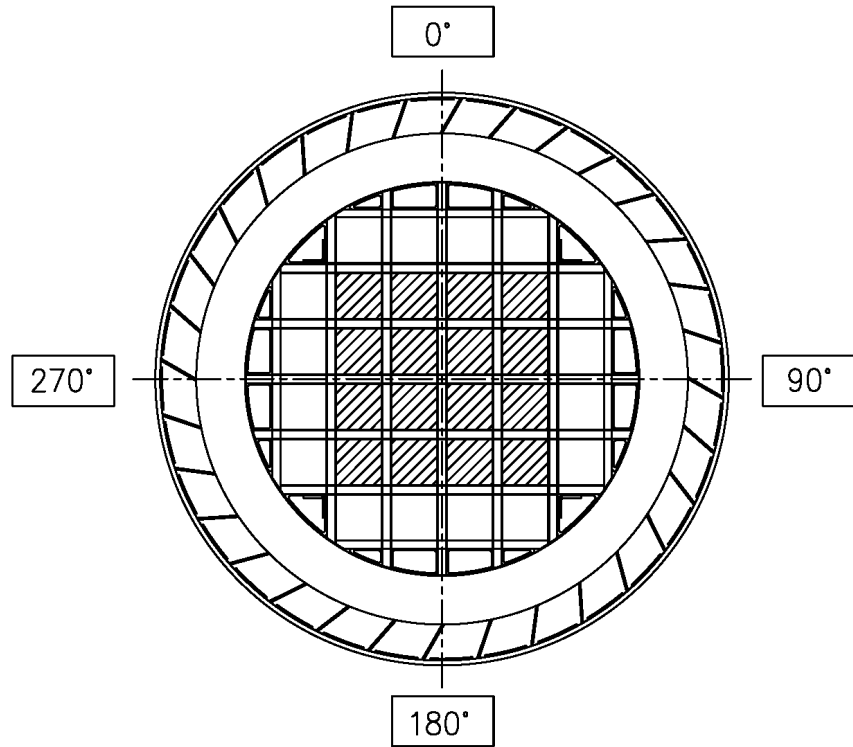
(金属キャスク 1 基当たり)


| 項目 | 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 ^(注1) | |
|---|---|------------------------|
| | A 型 | B 型 |
| 燃料有効部ガンマ線 (photons/s) | 1.073×10^{17} | 1.007×10^{17} |
| 構造材放射化ガンマ線 ^(注2) (⁶⁰ Co TBq) | 5.922×10^2 | 6.024×10^2 |
| 燃料有効部中性子 ^(注3) (n/s) | 1.205×10^{10} | 1.120×10^{10} |


(注 1) 中央部 12 体の燃焼度を 48,000MWd/t、外周部 12 体の燃焼度を 44,000MWd/t とした金属キャスク 1 基当たりの線源強度である。

(注 2) バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

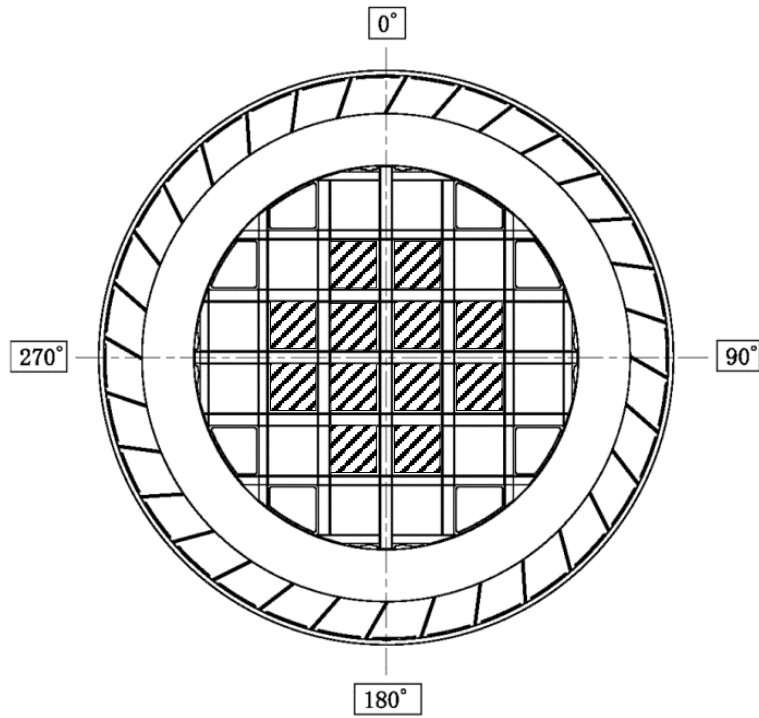
(注 3) 記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度である。





 : 燃焼度が 48,000Mwd/t の使用済燃料集合体の収納位置 (16 体)

 : 燃焼度が 39,000Mwd/t の使用済燃料集合体の収納位置 (16 体)

2-5-1-1 図(1/2) 使用済燃料集合体の収納位置条件 (乾式キャスク (タイプ 1))



-  : 燃焼度が 48,000MWd/t の使用済燃料集合体の収納位置 (12 体)
 (バーナブルポイズン集合体の挿入を考慮)
-  : 燃焼度が 44,000MWd/t の使用済燃料集合体の収納位置 (12 体)

2-5-1-1 図(2/2) 使用済燃料集合体の収納位置条件 (乾式キャスク (タイプ 2))

2-5-1-5 表(1/2) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度
(乾式キャスク (タイプ1))

(金属キャスク 1 基当たり)

| エネルギー 群数 | 平均エネルギー (MeV) | 燃料有効部 (photons/s) | | |
|-------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | 合計 |
| 1 | 0.01 | 1.657×10^{16} | 1.061×10^{16} | 2.717×10^{16} |
| 2 | 0.025 | 3.335×10^{15} | 2.099×10^{15} | 5.435×10^{15} |
| 3 | 0.0375 | 4.309×10^{15} | 2.616×10^{15} | 6.924×10^{15} |
| 4 | 0.0575 | 3.358×10^{15} | 2.263×10^{15} | 5.621×10^{15} |
| 5 | 0.085 | 1.891×10^{15} | 1.154×10^{15} | 3.044×10^{15} |
| 6 | 0.125 | 1.826×10^{15} | 9.508×10^{14} | 2.777×10^{15} |
| 7 | 0.225 | 1.574×10^{15} | 9.742×10^{14} | 2.549×10^{15} |
| 8 | 0.375 | 6.689×10^{14} | 4.021×10^{14} | 1.071×10^{15} |
| 9 | 0.575 | 2.867×10^{16} | 1.816×10^{16} | 4.683×10^{16} |
| 10 | 0.85 | 1.306×10^{15} | 3.302×10^{14} | 1.636×10^{15} |
| 11 | 1.25 | 8.923×10^{14} | 3.047×10^{14} | 1.197×10^{15} |
| 12 | 1.75 | 2.738×10^{13} | 1.009×10^{13} | 3.747×10^{13} |
| 13 | 2.25 | 1.497×10^{10} | 6.432×10^8 | 1.562×10^{10} |
| 14 | 2.75 | 7.996×10^9 | 3.954×10^9 | 1.195×10^{10} |
| 15 | 3.5 | 7.694×10^8 | 2.383×10^8 | 1.008×10^9 |
| 16 | 5.0 | 2.493×10^8 | 1.018×10^8 | 3.511×10^8 |
| 17 | 7.0 | 2.874×10^7 | 1.174×10^7 | 4.048×10^7 |
| 18 | 9.5 | 3.302×10^6 | 1.349×10^6 | 4.651×10^6 |
| 合計 | | 6.442×10^{16} | 3.987×10^{16} | 1.043×10^{17} |

2-5-1-5 表 (2/2) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度
(乾式キャスク (タイプ 2))

(金属キャスク 1 基当たり)

| エネルギー 群数 | 平均エネルギー (MeV) | 燃料有効部 (photons/s) | | |
|-------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | 合計 |
| 1 | 0.01 | 1.433×10^{16} | 1.337×10^{16} | 2.770×10^{16} |
| 2 | 0.025 | 2.888×10^{15} | 2.710×10^{15} | 5.599×10^{15} |
| 3 | 0.0375 | 3.729×10^{15} | 3.445×10^{15} | 7.174×10^{15} |
| 4 | 0.0575 | 2.903×10^{15} | 2.725×10^{15} | 5.628×10^{15} |
| 5 | 0.085 | 1.636×10^{15} | 1.528×10^{15} | 3.165×10^{15} |
| 6 | 0.125 | 1.581×10^{15} | 1.445×10^{15} | 3.027×10^{15} |
| 7 | 0.225 | 1.363×10^{15} | 1.275×10^{15} | 2.637×10^{15} |
| 8 | 0.375 | 5.802×10^{14} | 5.452×10^{14} | 1.125×10^{15} |
| 9 | 0.575 | 2.481×10^{16} | 2.278×10^{16} | 4.759×10^{16} |
| 10 | 0.85 | 1.142×10^{15} | 1.003×10^{15} | 2.145×10^{15} |
| 11 | 1.25 | 7.743×10^{14} | 6.784×10^{14} | 1.453×10^{15} |
| 12 | 1.75 | 2.373×10^{13} | 2.089×10^{13} | 4.463×10^{13} |
| 13 | 2.25 | 1.395×10^{10} | 1.289×10^{10} | 2.684×10^{10} |
| 14 | 2.75 | 6.962×10^9 | 5.818×10^9 | 1.278×10^{10} |
| 15 | 3.5 | 6.777×10^8 | 5.046×10^8 | 1.182×10^9 |
| 16 | 5.0 | 2.157×10^8 | 1.477×10^8 | 3.634×10^8 |
| 17 | 7.0 | 2.487×10^7 | 1.703×10^7 | 4.190×10^7 |
| 18 | 9.5 | 2.857×10^6 | 1.957×10^6 | 4.814×10^6 |
| 合計 | | 5.576×10^{16} | 5.152×10^{16} | 1.073×10^{17} |

2-5-1-6 表(1/5) 中性子源スペクトル

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル ^(注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 1 | 1.964×10^7 | 0.0 |
| 2 | 1.733×10^7 | 7.107×10^{-6} |
| 3 | 1.691×10^7 | 7.117×10^{-6} |
| 4 | 1.649×10^7 | 2.368×10^{-5} |
| 5 | 1.568×10^7 | 3.835×10^{-5} |
| 6 | 1.492×10^7 | 2.686×10^{-5} |
| 7 | 1.455×10^7 | 3.351×10^{-5} |
| 8 | 1.419×10^7 | 4.165×10^{-5} |
| 9 | 1.384×10^7 | 5.111×10^{-5} |
| 10 | 1.350×10^7 | 1.392×10^{-4} |
| 11 | 1.284×10^7 | 1.018×10^{-4} |
| 12 | 1.252×10^7 | 1.017×10^{-4} |
| 13 | 1.221×10^7 | 2.917×10^{-4} |
| 14 | 1.162×10^7 | 4.082×10^{-4} |
| 15 | 1.105×10^7 | 5.613×10^{-4} |
| 16 | 1.051×10^7 | 7.571×10^{-4} |
| 17 | 1.000×10^7 | 1.002×10^{-3} |
| 18 | 9.512×10^6 | 1.303×10^{-3} |
| 19 | 9.048×10^6 | 1.668×10^{-3} |
| 20 | 8.607×10^6 | 2.101×10^{-3} |
| 21 | 8.187×10^6 | 2.608×10^{-3} |
| 22 | 7.788×10^6 | 3.191×10^{-3} |
| 23 | 7.408×10^6 | 3.853×10^{-3} |
| 24 | 7.047×10^6 | 4.592×10^{-3} |
| 25 | 6.703×10^6 | 1.708×10^{-3} |
| 26 | 6.592×10^6 | 3.698×10^{-3} |
| 27 | 6.376×10^6 | 6.293×10^{-3} |
| 28 | 6.065×10^6 | 7.243×10^{-3} |
| 29 | 5.770×10^6 | 8.251×10^{-3} |
| 30 | 5.488×10^6 | 9.302×10^{-3} |
| 31 | 5.221×10^6 | 1.039×10^{-2} |
| 32 | 4.966×10^6 | 1.151×10^{-2} |
| 33 | 4.724×10^6 | 1.263×10^{-2} |
| 34 | 4.493×10^6 | 2.859×10^{-2} |
| 35 | 4.066×10^6 | 3.286×10^{-2} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

なお、本スペクトルの設定については資料 2-5-8 に示す。

2-5-1-6 表 (2/5) 中性子源スペクトル

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル ^(注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 36 | 3.679×10^6 | 3.674×10^{-2} |
| 37 | 3.329×10^6 | 1.965×10^{-2} |
| 38 | 3.166×10^6 | 2.042×10^{-2} |
| 39 | 3.012×10^6 | 2.108×10^{-2} |
| 40 | 2.865×10^6 | 2.165×10^{-2} |
| 41 | 2.725×10^6 | 2.214×10^{-2} |
| 42 | 2.592×10^6 | 2.252×10^{-2} |
| 43 | 2.466×10^6 | 1.517×10^{-2} |
| 44 | 2.385×10^6 | 3.833×10^{-3} |
| 45 | 2.365×10^6 | 3.812×10^{-3} |
| 46 | 2.346×10^6 | 7.657×10^{-3} |
| 47 | 2.307×10^6 | 1.535×10^{-2} |
| 48 | 2.231×10^6 | 2.310×10^{-2} |
| 49 | 2.123×10^6 | 2.312×10^{-2} |
| 50 | 2.019×10^6 | 2.305×10^{-2} |
| 51 | 1.921×10^6 | 2.290×10^{-2} |
| 52 | 1.827×10^6 | 2.267×10^{-2} |
| 53 | 1.738×10^6 | 2.236×10^{-2} |
| 54 | 1.653×10^6 | 2.200×10^{-2} |
| 55 | 1.572×10^6 | 2.160×10^{-2} |
| 56 | 1.496×10^6 | 2.115×10^{-2} |
| 57 | 1.423×10^6 | 2.059×10^{-2} |
| 58 | 1.353×10^6 | 2.010×10^{-2} |
| 59 | 1.287×10^6 | 1.947×10^{-2} |
| 60 | 1.225×10^6 | 1.892×10^{-2} |
| 61 | 1.165×10^6 | 1.827×10^{-2} |
| 62 | 1.108×10^6 | 3.460×10^{-2} |
| 63 | 1.003×10^6 | 1.367×10^{-2} |
| 64 | 9.616×10^5 | 1.834×10^{-2} |
| 65 | 9.072×10^5 | 1.502×10^{-2} |
| 66 | 8.629×10^5 | 1.437×10^{-2} |
| 67 | 8.209×10^5 | 1.372×10^{-2} |
| 68 | 7.808×10^5 | 1.309×10^{-2} |
| 69 | 7.427×10^5 | 1.247×10^{-2} |
| 70 | 7.065×10^5 | 1.186×10^{-2} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

なお、本スペクトルの設定については資料 2-5-8 に示す。

2-5-1-6 表 (3/5) 中性子源スペクトル

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル ^(注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 71 | 6.721×10^5 | 1.127×10^{-2} |
| 72 | 6.393×10^5 | 1.070×10^{-2} |
| 73 | 6.081×10^5 | 1.014×10^{-2} |
| 74 | 5.784×10^5 | 9.605×10^{-3} |
| 75 | 5.502×10^5 | 9.086×10^{-3} |
| 76 | 5.234×10^5 | 8.591×10^{-3} |
| 77 | 4.979×10^5 | 1.576×10^{-2} |
| 78 | 4.505×10^5 | 1.401×10^{-2} |
| 79 | 4.076×10^5 | 6.397×10^{-3} |
| 80 | 3.877×10^5 | 6.017×10^{-3} |
| 81 | 3.688×10^5 | 1.097×10^{-2} |
| 82 | 3.337×10^5 | 9.670×10^{-3} |
| 83 | 3.020×10^5 | 1.040×10^{-3} |
| 84 | 2.985×10^5 | 3.887×10^{-4} |
| 85 | 2.972×10^5 | 7.998×10^{-4} |
| 86 | 2.945×10^5 | 2.159×10^{-3} |
| 87 | 2.873×10^5 | 4.115×10^{-3} |
| 88 | 2.732×10^5 | 7.463×10^{-3} |
| 89 | 2.472×10^5 | 3.378×10^{-3} |
| 90 | 2.352×10^5 | 3.160×10^{-3} |
| 91 | 2.237×10^5 | 2.955×10^{-3} |
| 92 | 2.128×10^5 | 2.763×10^{-3} |
| 93 | 2.024×10^5 | 2.581×10^{-3} |
| 94 | 1.926×10^5 | 2.411×10^{-3} |
| 95 | 1.832×10^5 | 2.254×10^{-3} |
| 96 | 1.742×10^5 | 2.100×10^{-3} |
| 97 | 1.657×10^5 | 1.964×10^{-3} |
| 98 | 1.576×10^5 | 1.828×10^{-3} |
| 99 | 1.500×10^5 | 1.709×10^{-3} |
| 100 | 1.426×10^5 | 1.590×10^{-3} |
| 101 | 1.357×10^5 | 1.485×10^{-3} |
| 102 | 1.291×10^5 | 1.384×10^{-3} |
| 103 | 1.228×10^5 | 1.287×10^{-3} |
| 104 | 1.168×10^5 | 1.202×10^{-3} |
| 105 | 1.111×10^5 | 2.653×10^{-3} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

なお、本スペクトルの設定については資料 2-5-8 に示す。

2-5-1-6 表 (4/5) 中性子源スペクトル

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル ^(注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 106 | 9.804×10^4 | 2.219×10^{-3} |
| 107 | 8.652×10^4 | 7.446×10^{-4} |
| 108 | 8.250×10^4 | 5.458×10^{-4} |
| 109 | 7.950×10^4 | 1.324×10^{-3} |
| 110 | 7.200×10^4 | 7.861×10^{-4} |
| 111 | 6.738×10^4 | 1.744×10^{-3} |
| 112 | 5.656×10^4 | 6.216×10^{-4} |
| 113 | 5.248×10^4 | 8.958×10^{-4} |
| 114 | 4.631×10^4 | 7.457×10^{-4} |
| 115 | 4.087×10^4 | 8.384×10^{-4} |
| 116 | 3.431×10^4 | 2.982×10^{-4} |
| 117 | 3.183×10^4 | 3.831×10^{-4} |
| 118 | 2.850×10^4 | 1.659×10^{-4} |
| 119 | 2.700×10^4 | 1.020×10^{-4} |
| 120 | 2.606×10^4 | 1.347×10^{-4} |
| 121 | 2.479×10^4 | 6.373×10^{-5} |
| 122 | 2.418×10^4 | 6.142×10^{-5} |
| 123 | 2.358×10^4 | 1.712×10^{-4} |
| 124 | 2.188×10^4 | 2.461×10^{-4} |
| 125 | 1.931×10^4 | 3.741×10^{-4} |
| 126 | 1.503×10^4 | 2.577×10^{-4} |
| 127 | 1.171×10^4 | 7.100×10^{-5} |
| 128 | 1.060×10^4 | 1.066×10^{-4} |
| 129 | 9.119×10^3 | 1.222×10^{-4} |
| 130 | 7.102×10^3 | 8.411×10^{-5} |
| 131 | 5.531×10^3 | 5.787×10^{-5} |
| 132 | 4.307×10^3 | 2.564×10^{-5} |
| 133 | 3.707×10^3 | 1.416×10^{-5} |
| 134 | 3.355×10^3 | 1.219×10^{-5} |
| 135 | 3.035×10^3 | 1.050×10^{-5} |
| 136 | 2.747×10^3 | 4.685×10^{-6} |
| 137 | 2.613×10^3 | 4.348×10^{-6} |
| 138 | 2.485×10^3 | 7.778×10^{-6} |
| 139 | 2.249×10^3 | 6.696×10^{-6} |
| 140 | 2.035×10^3 | 1.294×10^{-5} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

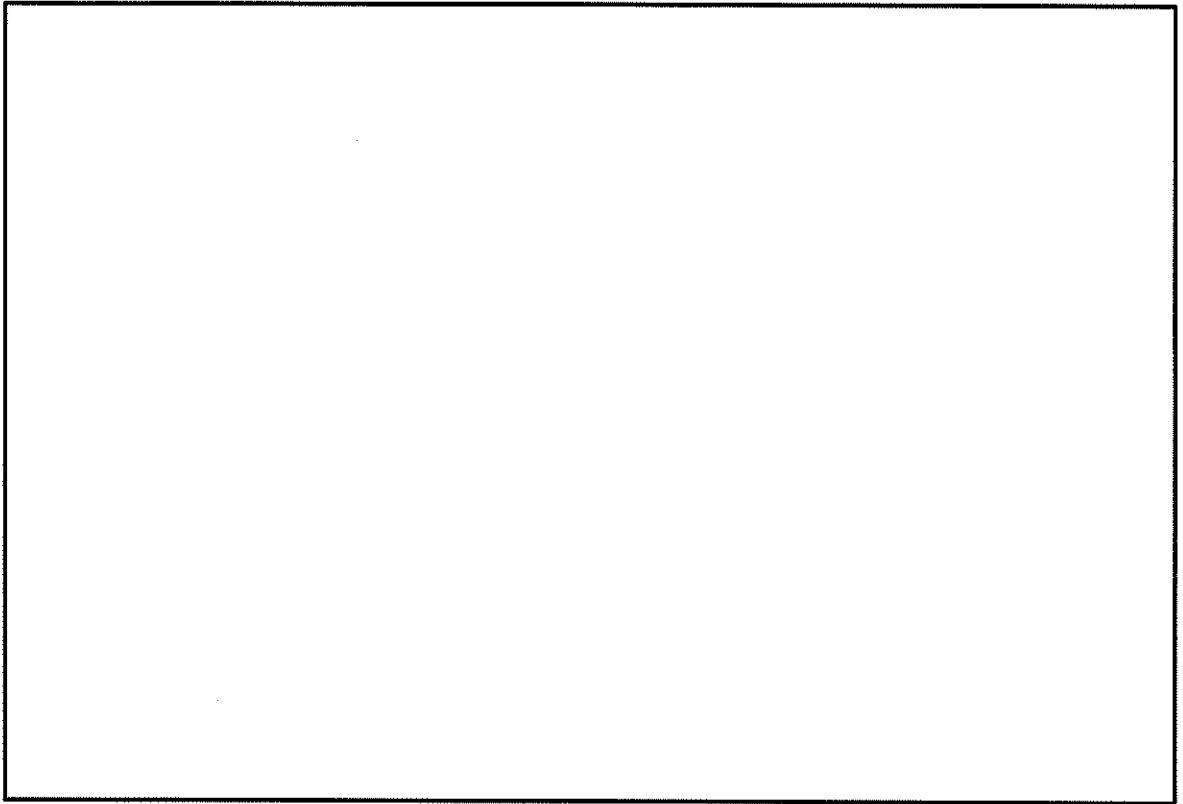
なお、本スペクトルの設定については資料 2-5-8 に示す。

2-5-1-6 表 (5/5) 中性子源スペクトル

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル (注) |
|---------|------------------------|-------------------------|
| 141 | 1.585×10^3 | 8.896×10^{-6} |
| 142 | 1.234×10^3 | 6.116×10^{-6} |
| 143 | 9.611×10^2 | 4.204×10^{-6} |
| 144 | 7.485×10^2 | 2.890×10^{-6} |
| 145 | 5.830×10^2 | 1.986×10^{-6} |
| 146 | 4.540×10^2 | 1.365×10^{-6} |
| 147 | 3.536×10^2 | 9.385×10^{-7} |
| 148 | 2.754×10^2 | 6.450×10^{-7} |
| 149 | 2.145×10^2 | 4.433×10^{-7} |
| 150 | 1.670×10^2 | 3.047×10^{-7} |
| 151 | 1.301×10^2 | 2.094×10^{-7} |
| 152 | 1.013×10^2 | 1.439×10^{-7} |
| 153 | 7.889×10^1 | 9.893×10^{-8} |
| 154 | 6.144×10^1 | 6.799×10^{-8} |
| 155 | 4.785×10^1 | 4.673×10^{-8} |
| 156 | 3.727×10^1 | 3.201×10^{-8} |
| 157 | 2.902×10^1 | 2.218×10^{-8} |
| 158 | 2.260×10^1 | 1.517×10^{-8} |
| 159 | 1.760×10^1 | 1.043×10^{-8} |
| 160 | 1.371×10^1 | 7.168×10^{-9} |
| 161 | 1.068×10^1 | 4.925×10^{-9} |
| 162 | 8.315×10^0 | 3.385×10^{-9} |
| 163 | 6.476×10^0 | 2.327×10^{-9} |
| 164 | 5.044×10^0 | 1.599×10^{-9} |
| 165 | 3.928×10^0 | 1.099×10^{-9} |
| 166 | 3.059×10^0 | 7.657×10^{-10} |
| 167 | 2.382×10^0 | 5.087×10^{-10} |
| 168 | 1.855×10^0 | 3.568×10^{-10} |
| 169 | 1.445×10^0 | 2.452×10^{-10} |
| 170 | 1.125×10^0 | 1.686×10^{-10} |
| 171 | 8.764×10^{-1} | 1.158×10^{-10} |
| 172 | 6.826×10^{-1} | 7.961×10^{-11} |
| 173 | 5.316×10^{-1} | 5.472×10^{-11} |
| 174 | 4.140×10^{-1} | 1.060×10^{-10} |
| 175 | 1.000×10^{-1} | 1.427×10^{-11} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

なお、本スペクトルの設定については資料 2-5-8 に示す。



2-5-1-2 図 ピークングファクターの設定

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析では、従来の使用済燃料輸送キャスクの遮蔽解析で実績のある二次元輸送計算コード DOT3.5 により、R-Z 体系の有限円筒モデル（以下、「本体モデル」という。）について評価している。ただし、有限円筒モデルで直接モデル化できない使用済燃料集合体、バスケット、トラニオン等は、構造上の特徴を考慮して、均質化あるいは線束接続によって評価している。なお、本体モデルは、キャスク中央付近で二分割しており、頭部評価モデルにおいては使用済燃料集合体が一次蓋に接した状態として、線源である使用済燃料集合体から評価点までの距離が短い保守的なモデルとしている。

解析に用いたモデル図を乾式キャスク（タイプ 1）については 2-5-1-3 図から 2-5-1-6 図に、乾式キャスク（タイプ 2）については 2-5-1-7 図から 2-5-1-10 図に示し、モデル化の手法を以下に示す。

(1) 燃料領域

2-5-1-11 図に示すとおり、燃料領域については、使用済燃料集合体とバスケットを均質化してモデル化している。中央部及び外周部燃料領域について、実形状と同等となるように、それぞれの燃料領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化している。

なお、均質化では留め具（ワッシャ、ボルト、ナット）は無視しており、均質化領域に空孔が存在する場合は空孔の体積も考慮して均質化している。また、バーナブルポイズン集合体は、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している。

(2) バスケット外周部

燃料領域より外側のバスケットは、円周方向に不均一な厚さとなっている構造であることから、バスケット外周部（燃料領域より外側から胴内面までの領域）の密度を密度係数で調整している。バスケット外周部の密度補正係数は、2-5-1-11 図及び 2-5-1-12 図に示すとおり、キャスク水平断面 X-Y 体系のモデルにて算出した円周方向のキャスク表面から 1 m 離れた位置の最大線量当量率と、無限円筒モデルでの最大線量当量率が同等となるように設定し、本体モデルに反映している。したがって、本体モデルにおける線量当量率は、実形状における最大線量当量率を包絡する設定となる。

(3) 胴、側部中性子遮蔽材及び外筒

2-5-1-11 図に示すとおり、胴、側部中性子遮蔽材及び外筒については、円筒としてモデル化している。

なお、側部中性子遮蔽材に伝熱フィンがある領域では、伝熱フィンは均質化している。

(4) トラニオン部の評価手法

トラニオン部については、DOT3.5 を用いて実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。

2-5-1-13 図に示すとおり、トラニオンを無視した本体モデルにて得られたトラニオン底面付近の線束を、別途モデル化した R-Z 体系のトラニオンモデルに接続している。トラニオン部は、トラニオン中心を通る断面でトラニオン底面及びキャスク本体の一部を含めモデル化している。

トラニオン部の線量当量率は、トラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルの線量当量率結果より、線種ごとの線量当量率結果の比を補正值として求め、本体モデルの線量当量率にその補正值を乗じて評価している。

トラニオン部の線束接続計算の妥当性を資料 2-5-6 に示す。

(5) 解析モデルの入力条件への不確かさの考慮について

解析モデルの入力条件への不確かさとして以下のとおり考慮している。

① 構成部材密度

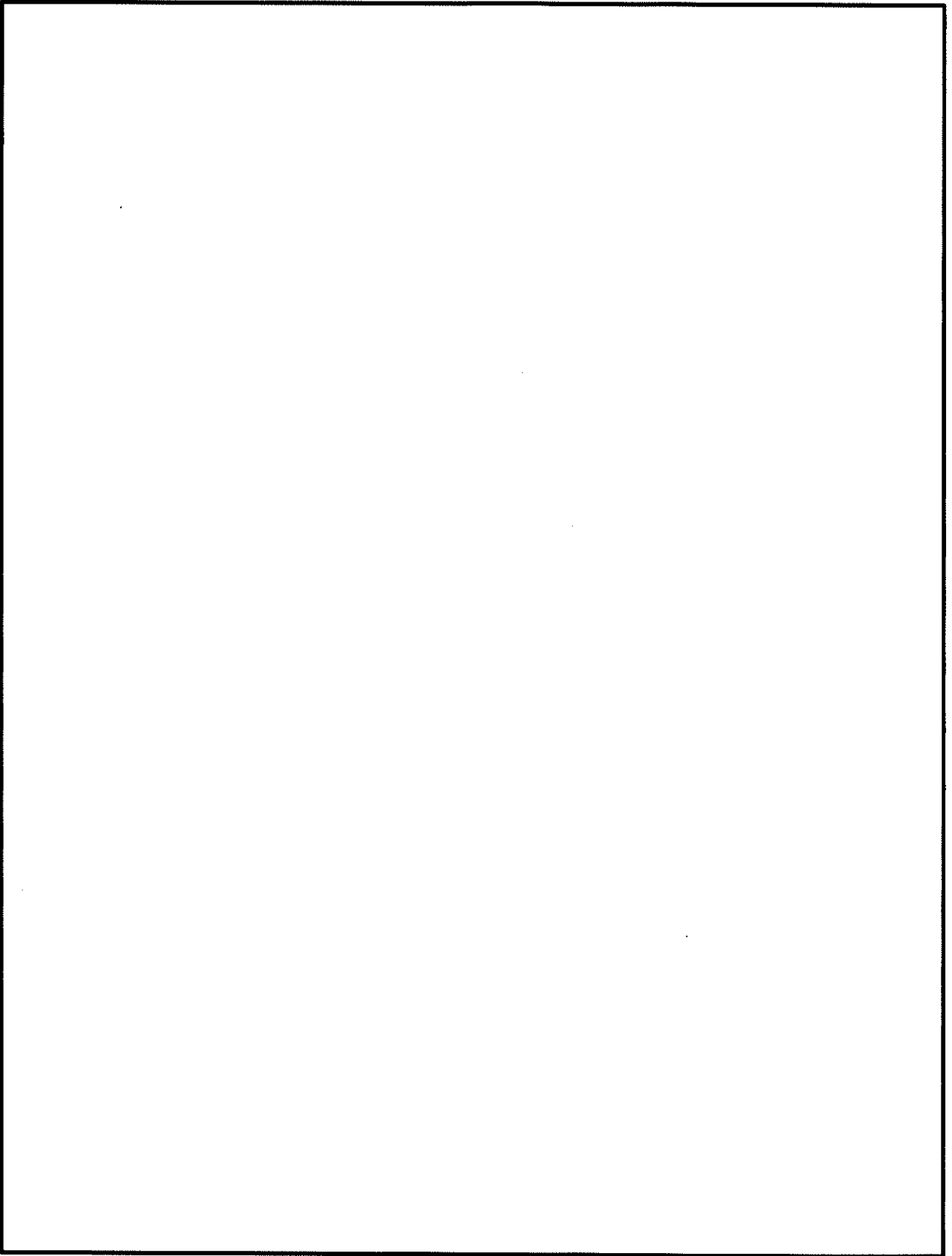
最低保証密度を使用して原子個数密度を設定。

② 寸法公差

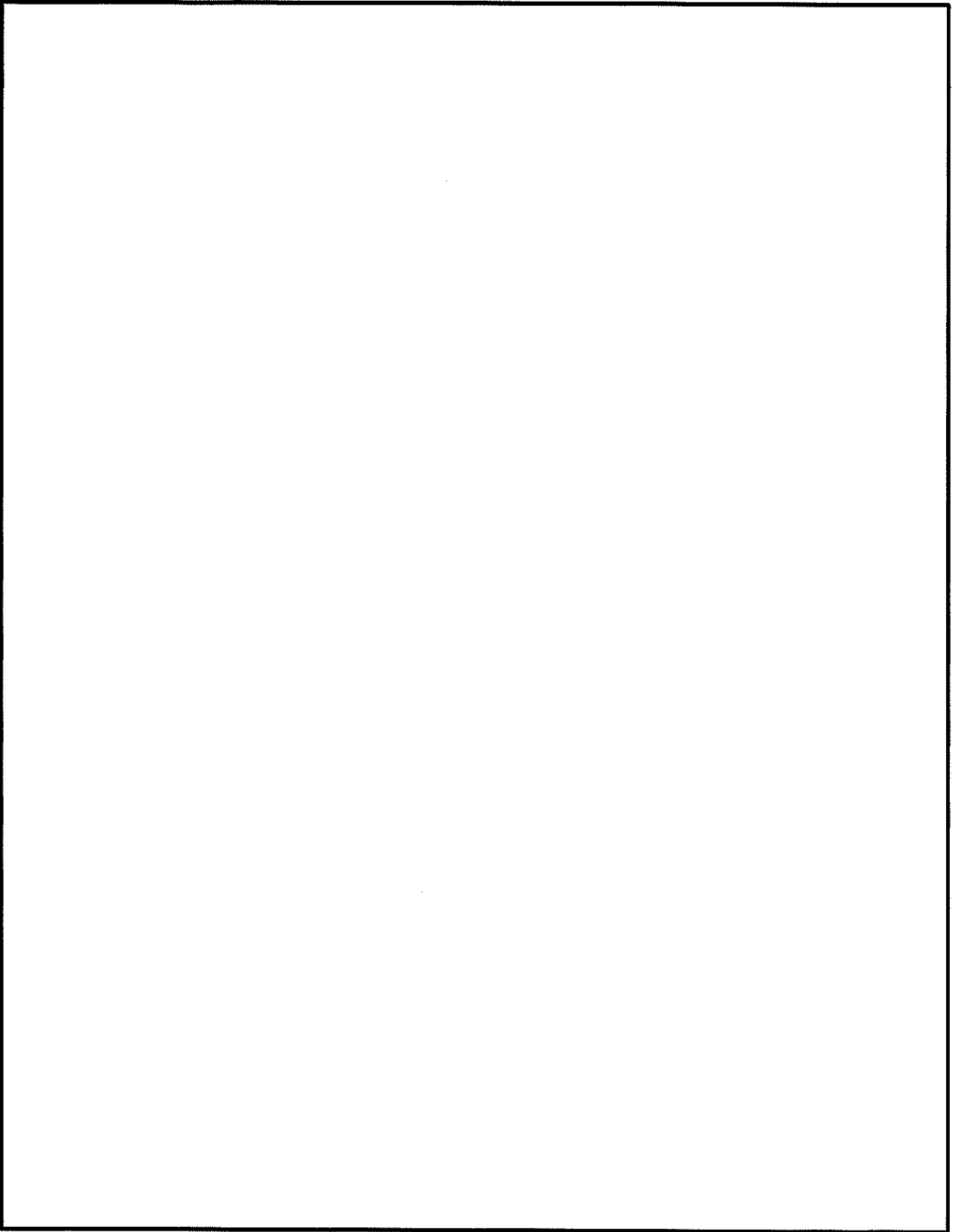
解析モデルの各種寸法は公称寸法でモデル化するが、各構成部材の寸法公差については最小厚さを密度係数（＝最小寸法／公称寸法）で考慮。

(6) モデル設定の妥当性について

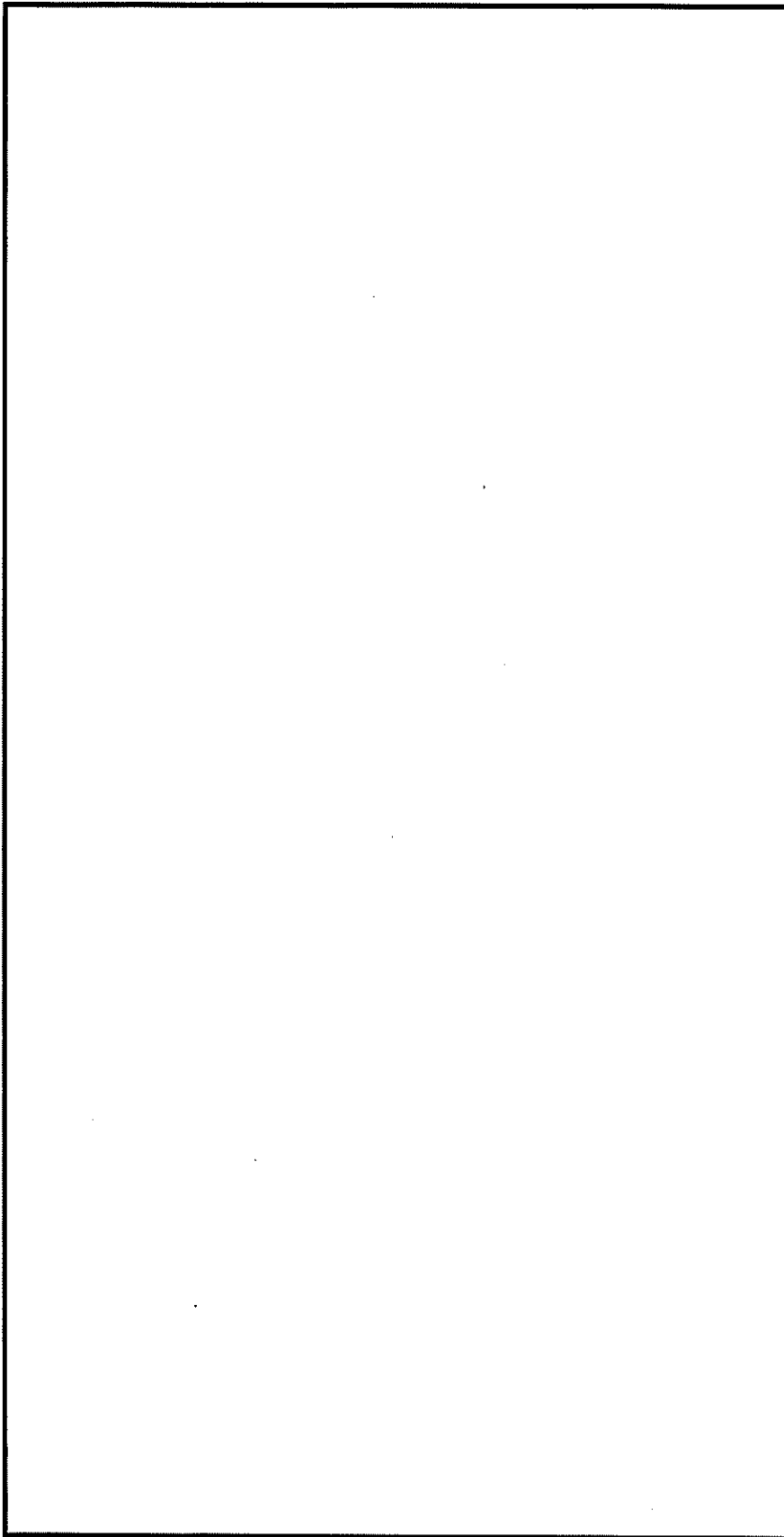
R-Z 体系の有限円筒モデル設定について、三次元モデルで入力・解析可能な解析コード MCNP5 による評価結果との比較検証を実施し、モデル設定の妥当性を確認している（資料 2-5-9 及び資料 2-5-10）。



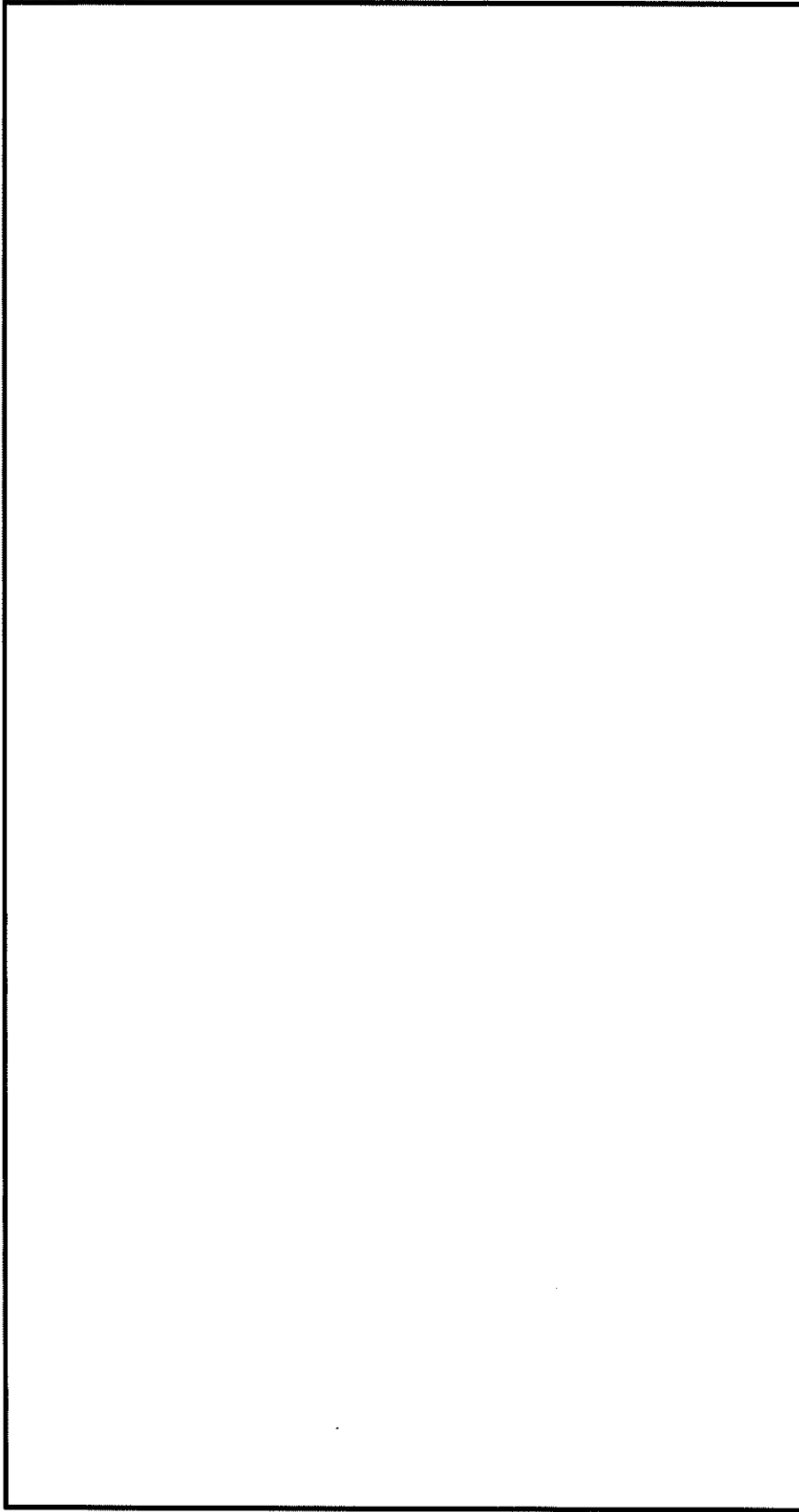
2-5-1-3 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（乾式キャスク（タイプ1））



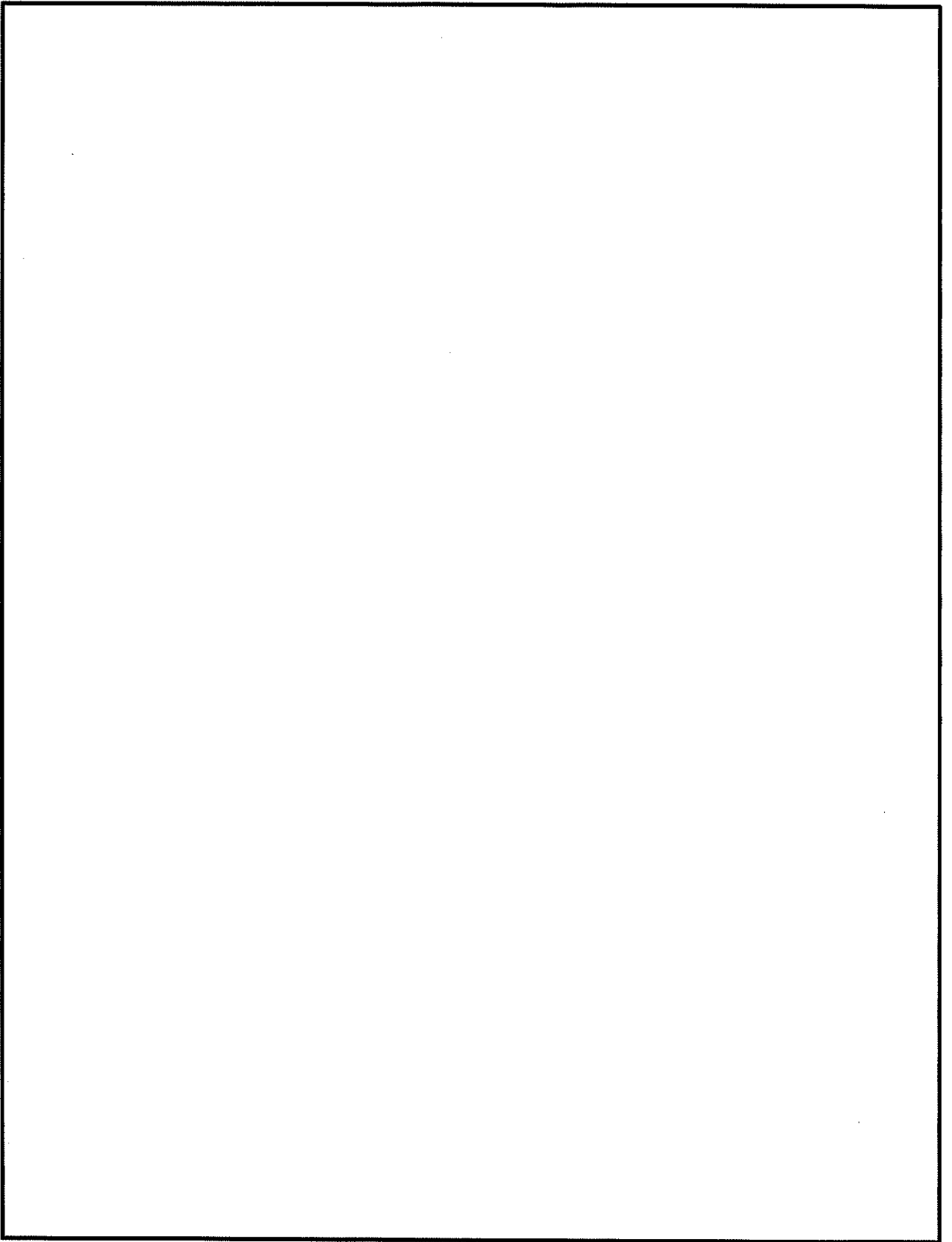
2-5-1-4 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（乾式キャスク（タイプ1））



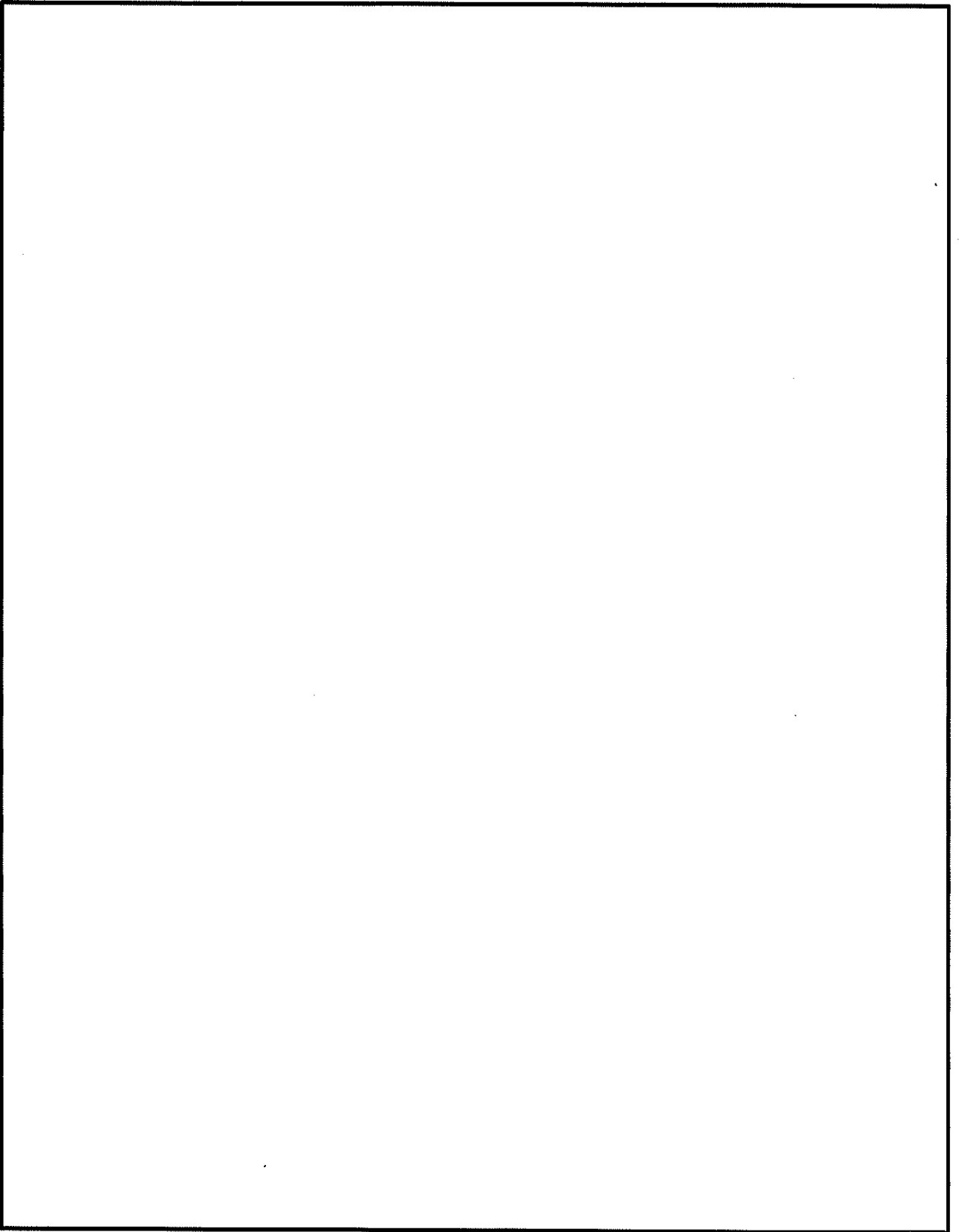
2-5-1-5 図 貯蔵時の解析モデル (上部トランニオン部) (乾式キャスク (タイプ1))



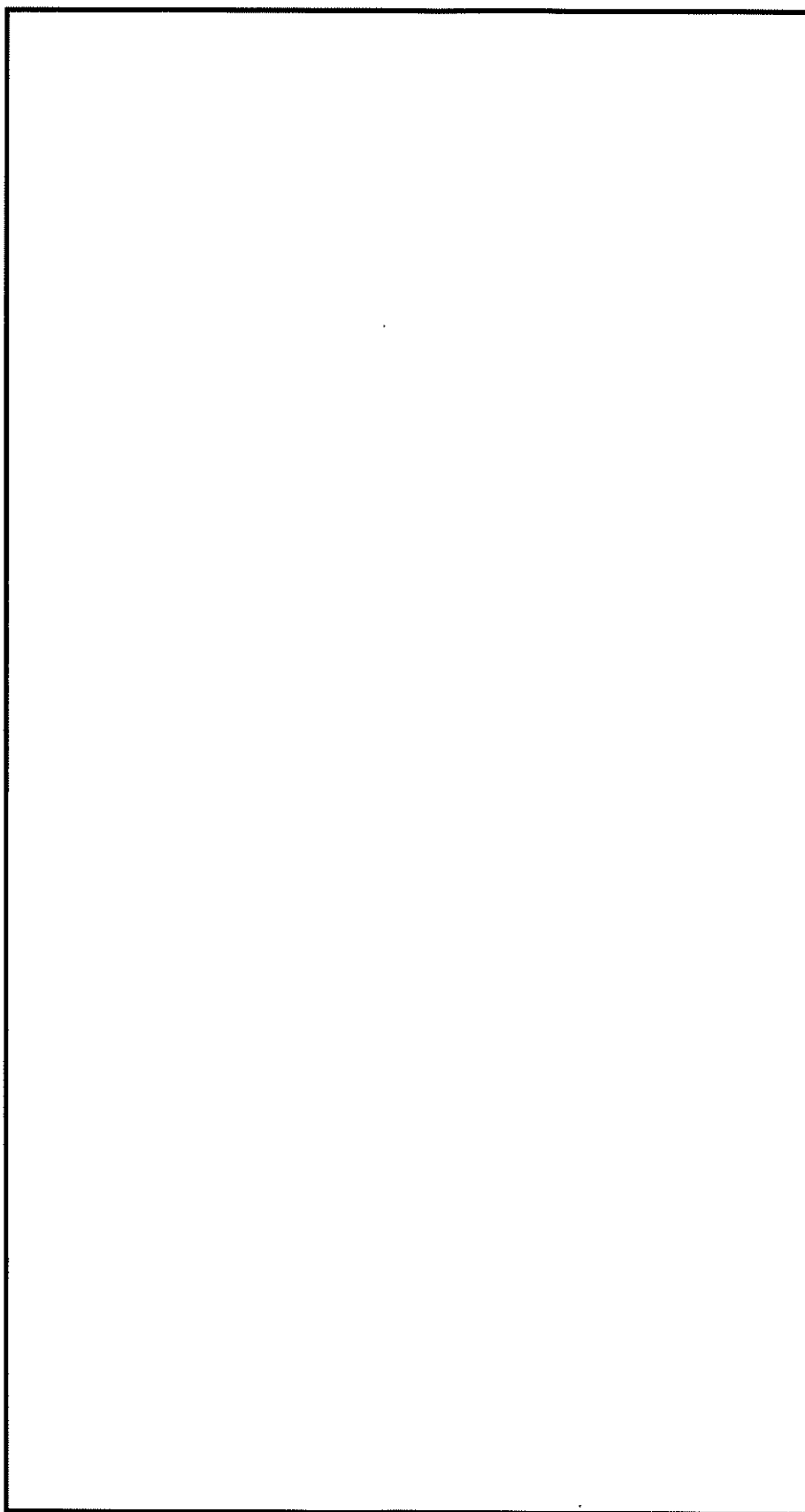
2-5-1-6 図 貯蔵時の解析モデル (下部トラニオン部) (乾式キャスク (タイプ1))



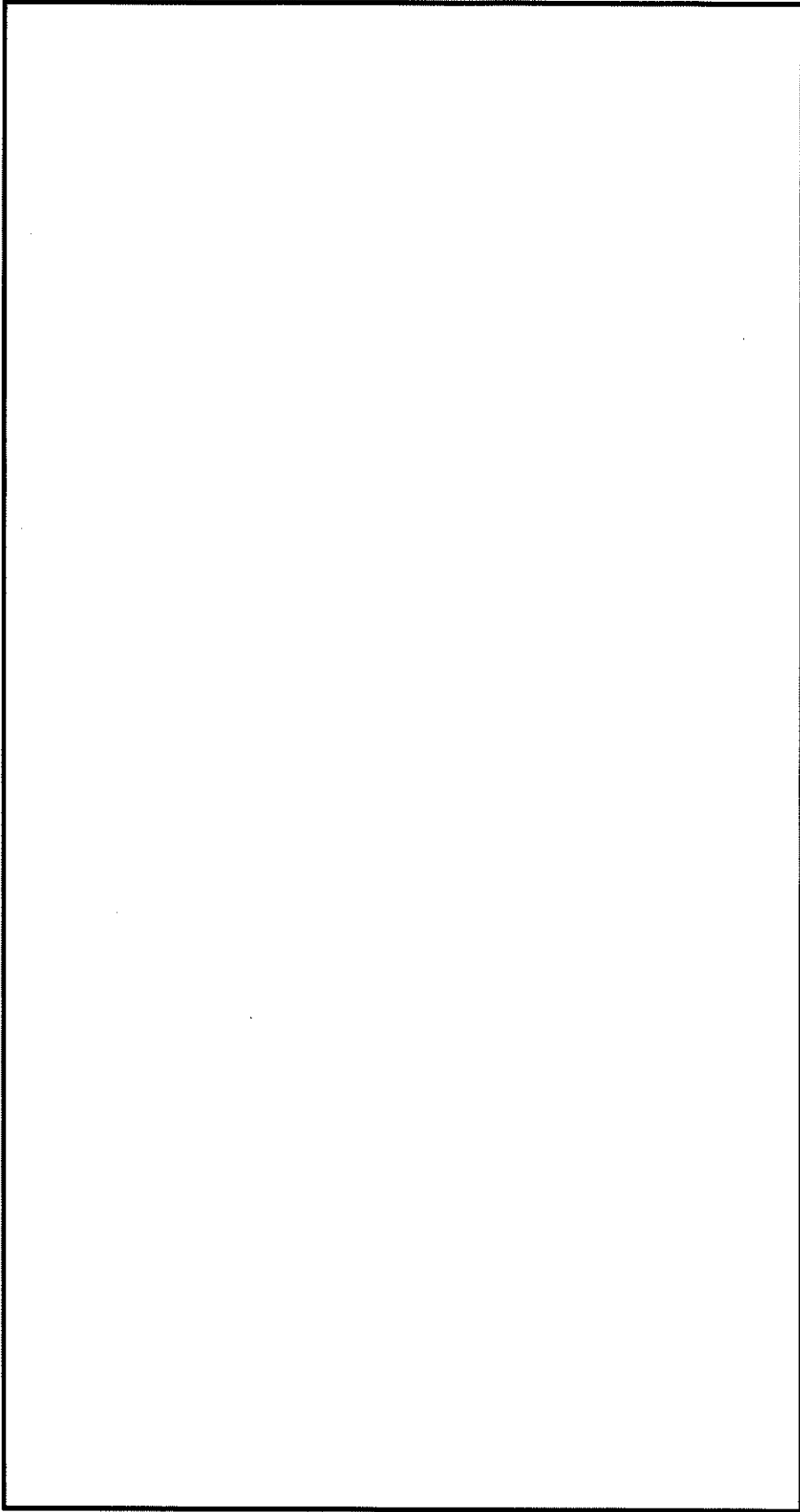
2-5-1-7 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（乾式キャスク（タイプ2））



2-5-1-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（乾式キャスク（タイプ2））

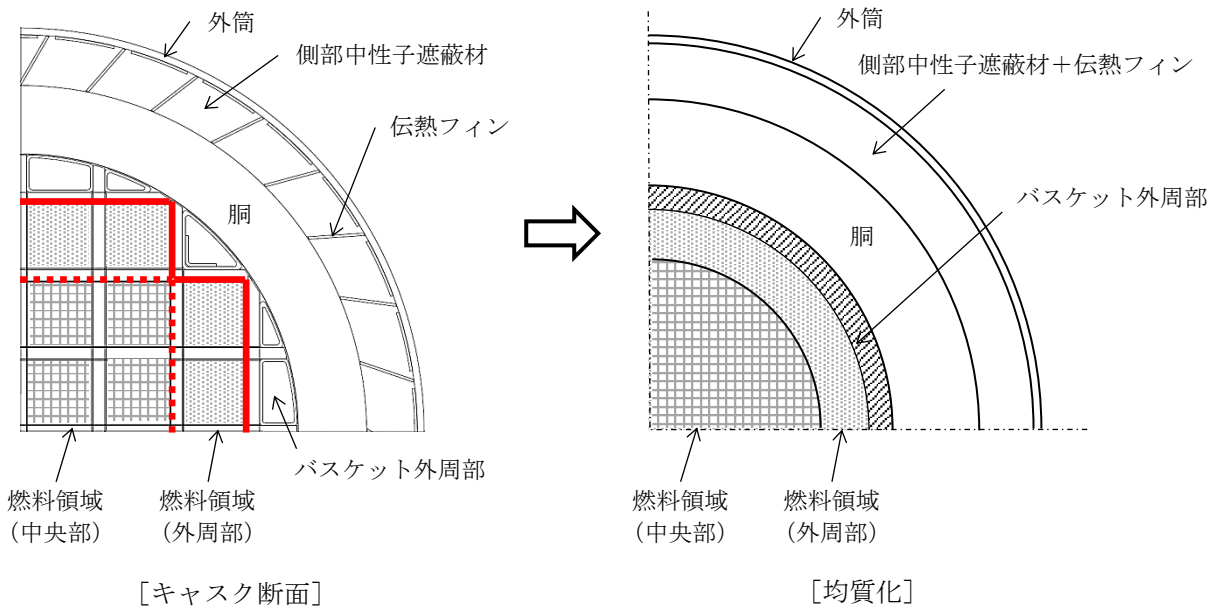


2-5-1-9 図 貯蔵時の解析モデル (上部トラニオン部) (乾式キャスク (タイプ2))

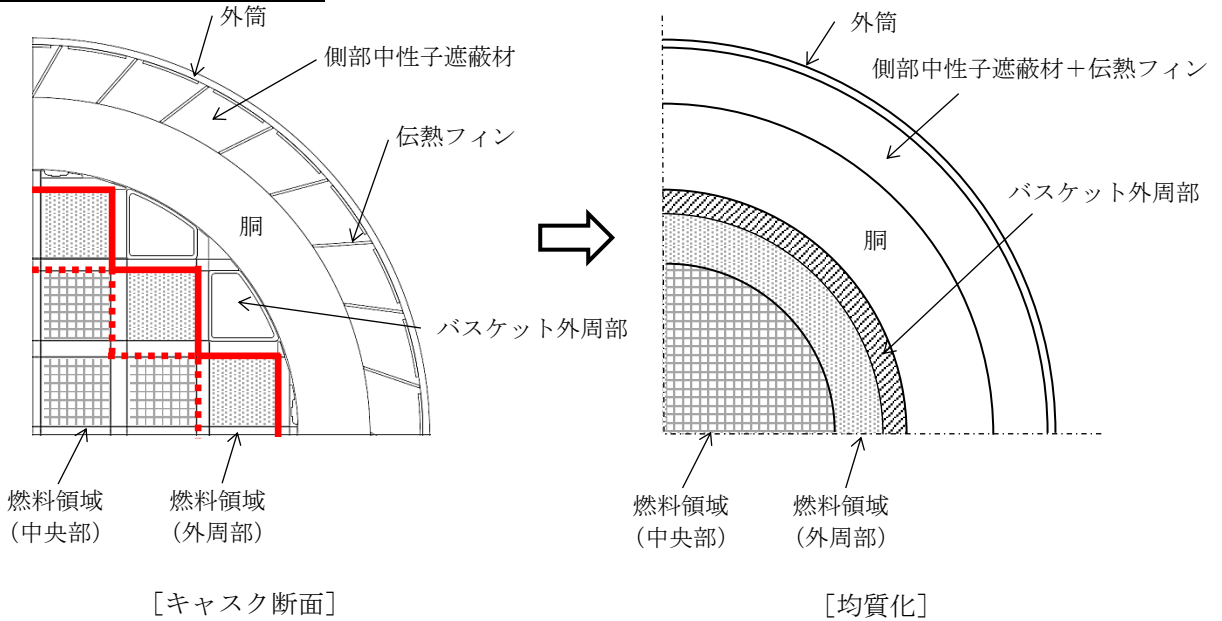


2-5-1-10 図 貯蔵時の解析モデル (下部トラニオン部) (乾式キャスク (タイプ2))

乾式キャスク (タイプ1)

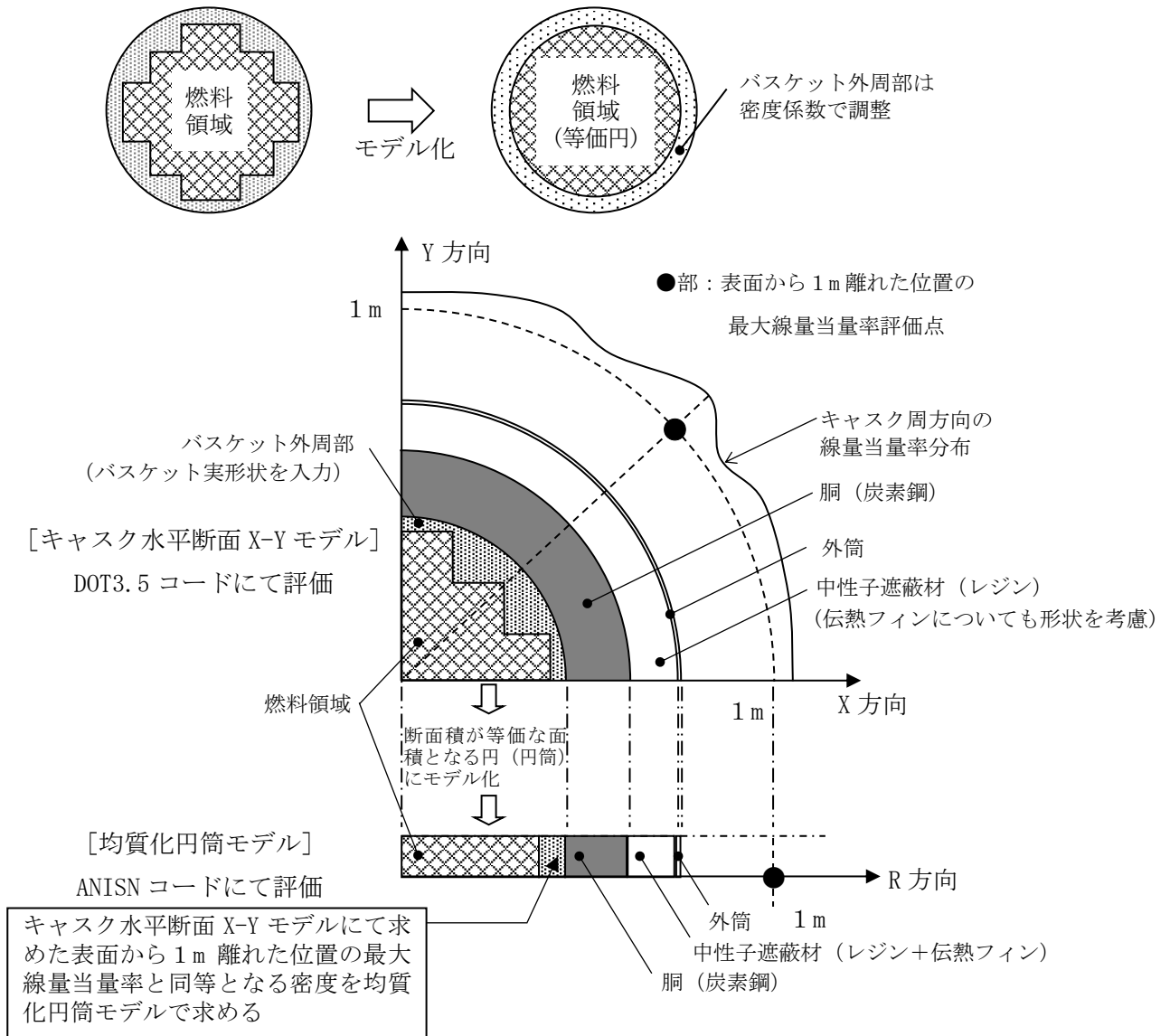


乾式キャスク (タイプ2)



遮蔽解析モデルへの入力
 本体モデルの解析では、円筒形状での入力となるため、燃料領域の断面積と等価な面積となる円 (円筒) にモデル化している。その際、燃料領域は使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定した。

2-5-1-11 図 キャスク中央断面の実形状と解析モデル



バスケット外周部の均質化

バスケット外周部は円周方向に不均一な厚さとなっている構造であることから、本体モデルでは以下に示す手法により、バスケット外周部の密度を設定している。

(i) キャスク水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

キャスク水平断面 X-Y モデルによる表面から 1m 離れた位置での最大線量当量率を算出する。

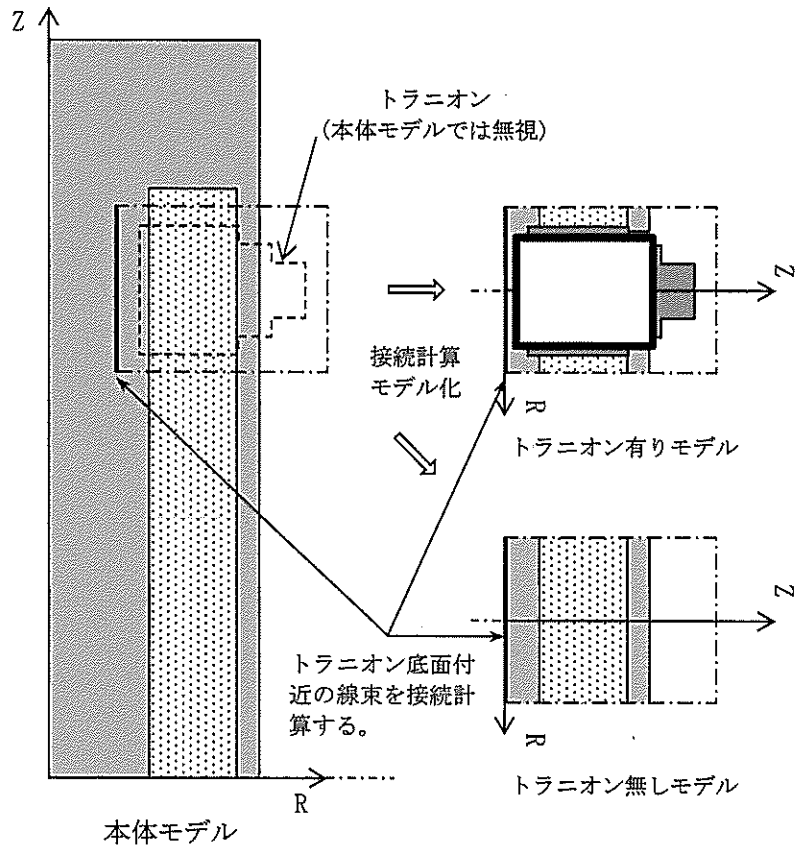
※算出位置を表面から 1m 離れた位置としているのは、表面位置に比べ、資料 14 の 2.1 設計基準に示した要求事項である基準線量当量率に対する裕度が少ないためである。

(ii) キャスク均質化円筒モデル遮蔽解析

2-5-1-11 図により設定した均質化モデルにて、表面から 1m 離れた位置での線量当量率が (i) で算出した最大線量当量率と同等となるバスケット外周部の密度係数を算出する。

(ii)にて算出したバスケット外周部の密度係数を用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ることができる。

2-5-1-12 図 バスケット外周部のモデル化について



トランニオン部の線量当量率 = (本体モデル) × (トランニオン有りモデル) / (トランニオン無しモデル)

2-5-1-13 図 トランニオン部の線束接続計算の概略図

3. 中性子遮蔽材の質量減損について

中性子遮蔽材であるレジンの長期使用による質量減損は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2 \quad 1)$$

ここで、

- Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)
- E_p : 劣化パラメータ = $T \times (77.6 + \ln(t))$
- T : 中性子遮蔽材温度 (K)
- t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)

設計貯蔵期間中の温度の低下を保守的に考慮すると、設計貯蔵期間経過時までの中性子遮蔽材の質量減損率は乾式キャスク (タイプ 1) は約 1.8 %、乾式キャスク (タイプ 2) は約 2.0 %となる。これを保守的に 2.5 %の質量減損があるとして評価した。

- 1) (財) 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 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).

4. 異なる燃料型式収納時の線量当量率評価について

2-5-1-4 表に示す遮蔽解析対象外の燃料型式について、遮蔽解析対象燃料に線源強度が包絡されるだけでなく線量当量率も包絡されることの確認を資料 2-5-11 に示す。

2-5-2 遮蔽解析詳細結果

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、遮蔽解析結果の詳細について説明するものである。

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の表面及び表面から 1 m 離れた位置の各評価点方向において、最大線量当量率となる位置を 2-5-2-1 図に示し、対応する最大線量当量率評価結果を 2-5-2-1 表に示す。また、2-5-2-1 表に対応する各評価点方向における線量当量率の分布図を 2-5-2-2 図及び 2-5-2-3 図に示す。

乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の表面及び表面から 1 m 離れた位置における線量当量率は、それぞれ 2 mSv/h 及び 100 μ Sv/h 以下となることを確認した。

2-5-2-1 表(1/2) 線量当量率評価結果 (乾式キャスク (タイプ1))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

| 評価点 | | | 頭部 | | | 側部 | 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 | ③a | ③b | | ⑤ | ⑦a | ⑦b |
| 表面 | ガンマ線 | 燃料有効部 | <0.1 | <0.1 | 4.8 | 93.0 | 3.0 | 4.0 | 8.2 |
| | | 構造材放射化 | 0.4 | 0.7 | 85.2 | 11.5 | 6.2 | 11.7 | 112.7 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.7 | 1.6 | 5.7 | 24.4 | 7.1 | 4.5 | 12.4 |
| | 中性子 | | 262.8 | 592.3 | 1022.9 | 55.1 | 1548.1 | 925.5 | 44.7 |
| | 合計 | | 264.0 | 594.7 | 1118.6 | 184.0 | 1564.4 | 945.7 | 178.0 |
| 評価点 | | | ② | ④a | ④b | ⑥ | ⑧a | ⑧b | ⑩ |
| 表面から 1m | ガンマ線 | 燃料有効部 | 0.2 | 22.3 | 21.7 | 41.4 | 8.8 | 7.3 | 2.9 |
| | | 構造材放射化 | 3.7 | 28.1 | 22.7 | 6.7 | 6.5 | 4.8 | 34.5 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.4 | 5.0 | 5.0 | 9.7 | 2.8 | 2.6 | 3.4 |
| | 中性子 | | 50.6 | 23.8 | 34.4 | 22.1 | 51.1 | 60.9 | 20.2 |
| | 合計 | | 54.9 | 79.2 | 83.8 | 79.9 | 69.2 | 75.6 | 61.0 |

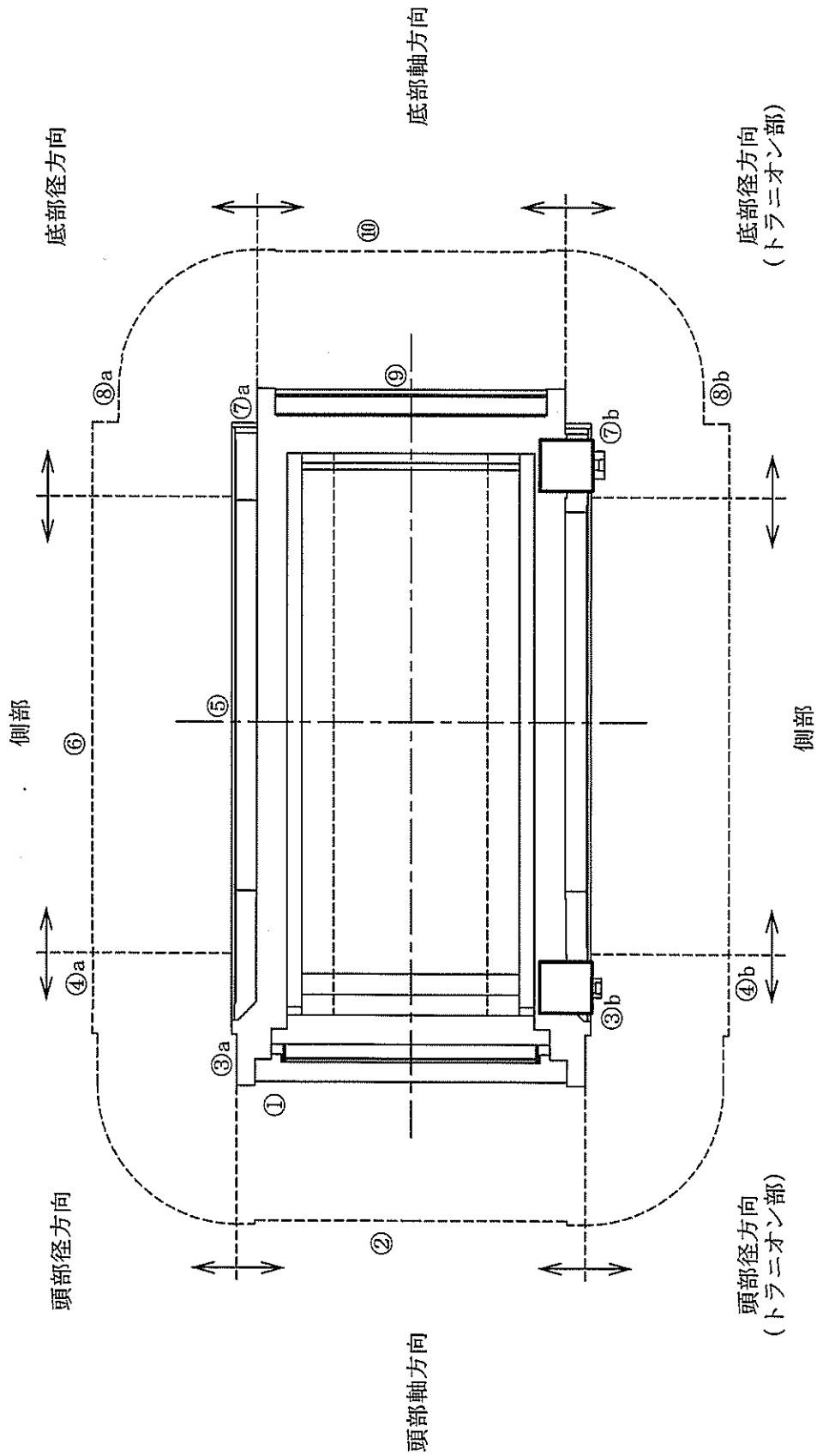
(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

2-5-2-1 表(2/2) 線量当量率評価結果 (乾式キャスク (タイプ2))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

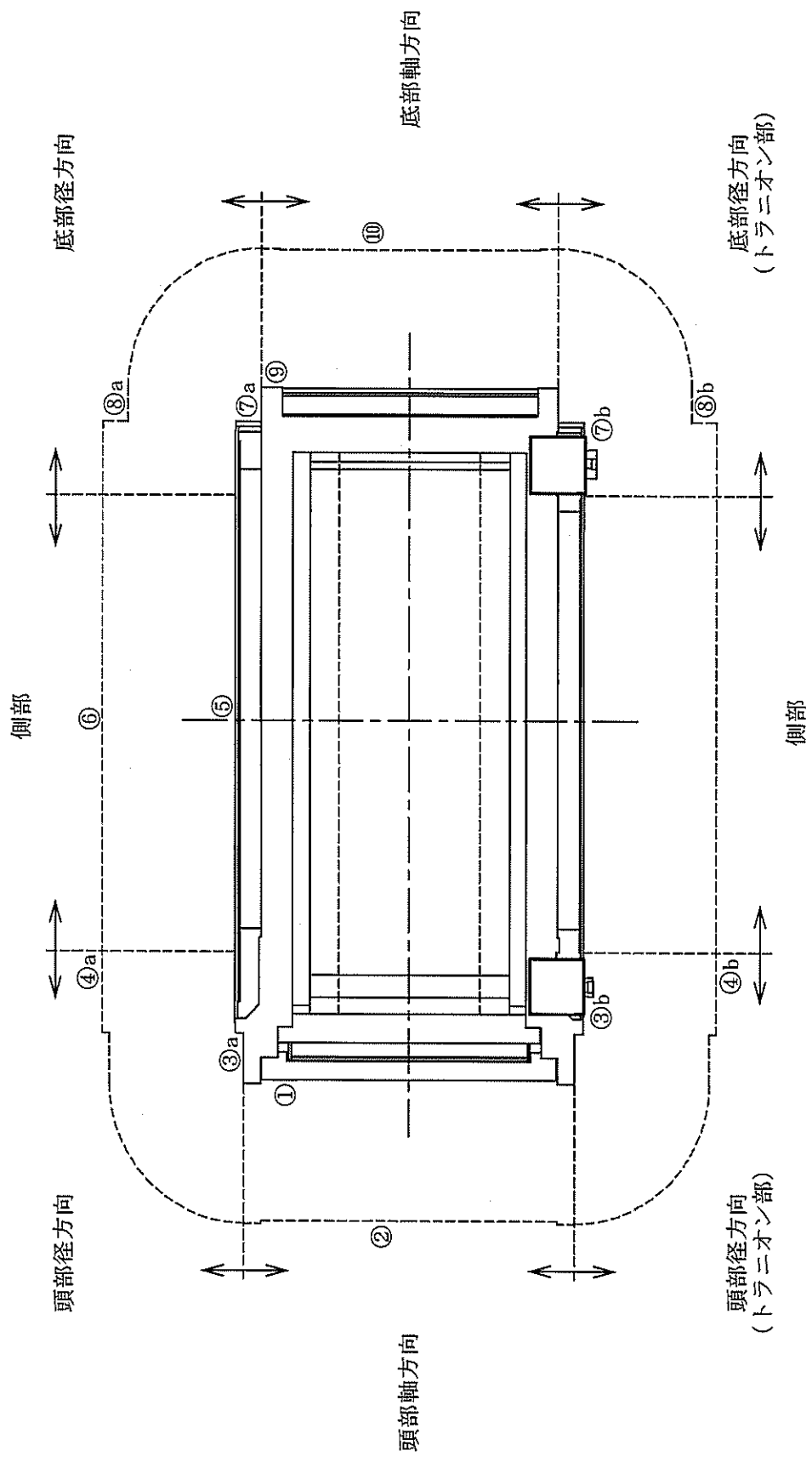
| 評価点 | | | 頭部 | | | 側部 | 底部 | | |
|-------------|------|--------|-------|-------|------------------|-------|--------|------------------|-------|
| | | | 軸方向 | 径方向 | 径方向 (トランニオン部) | | 径方向 | 径方向 (トランニオン部) | 軸方向 |
| | | | ① | ③a | ③b | | ⑤ | ⑦a | ⑦b |
| 表面 | ガンマ線 | 燃料有効部 | <0.1 | <0.1 | 8.0 | 100.7 | 4.0 | 5.4 | <0.1 |
| | | 構造材放射化 | 0.4 | 1.1 | 103.0 | 25.9 | 6.6 | 13.4 | 0.3 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.8 | 2.3 | 5.7 | 25.7 | 7.4 | 4.8 | 0.9 |
| | 中性子 | | 333.7 | 804.2 | 741.4 | 45.1 | 1807.3 | 1108.3 | 222.6 |
| | 合計 | | 335.0 | 807.7 | 858.1 | 197.4 | 1825.3 | 1131.9 | 223.9 |
| 評価点 | | | ② | ④a | ④b | ⑥ | ⑧a | ⑧b | ⑩ |
| 表面から 1 m | ガンマ線 | 燃料有効部 | 0.3 | 22.5 | 22.6 | 44.8 | 9.0 | 7.9 | 4.9 |
| | | 構造材放射化 | 3.5 | 20.1 | 20.9 | 12.5 | 7.4 | 6.1 | 28.8 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.4 | 5.4 | 5.4 | 10.4 | 3.0 | 2.8 | 3.6 |
| | 中性子 | | 64.8 | 23.2 | 32.7 | 18.3 | 56.6 | 66.3 | 23.1 |
| | 合計 | | 69.0 | 71.2 | 81.6 | 86.0 | 76.0 | 83.1 | 60.4 |

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。



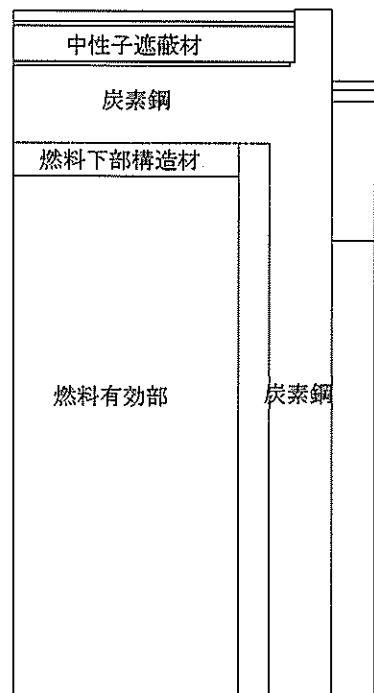
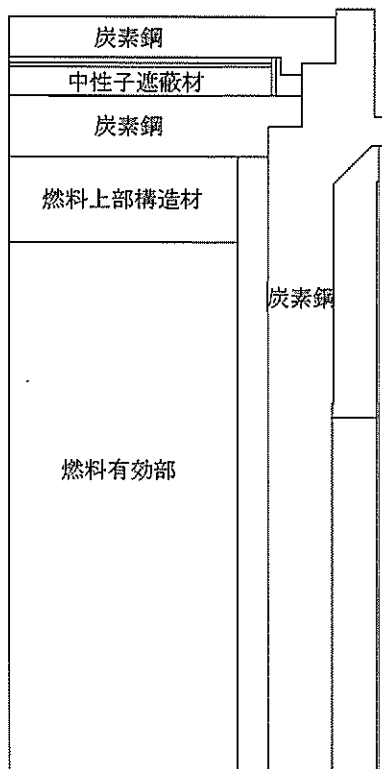
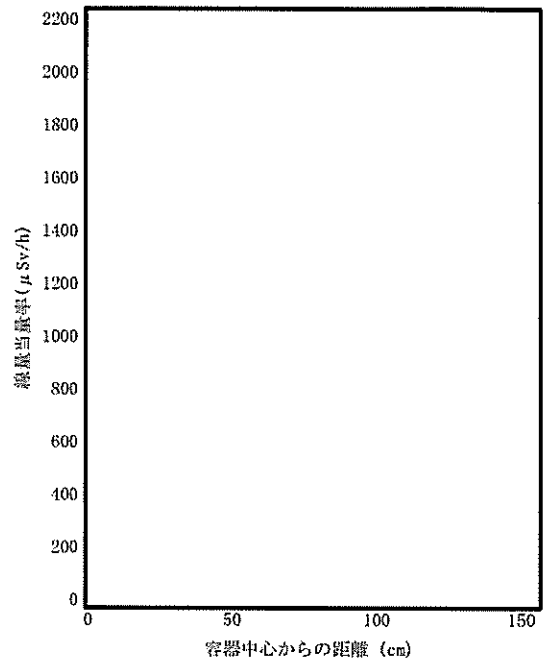
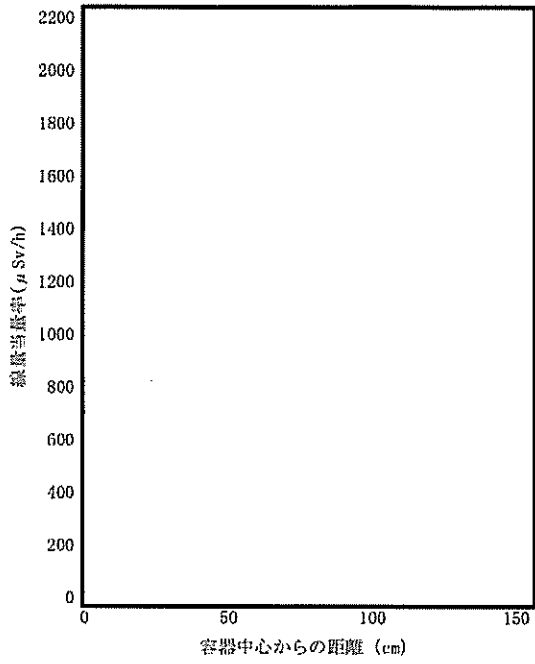
(注)①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており、その結果を2-5-2-1表(1/2)に示す。

2-5-2-1 図(1/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (乾式キャスク (タイプ1))

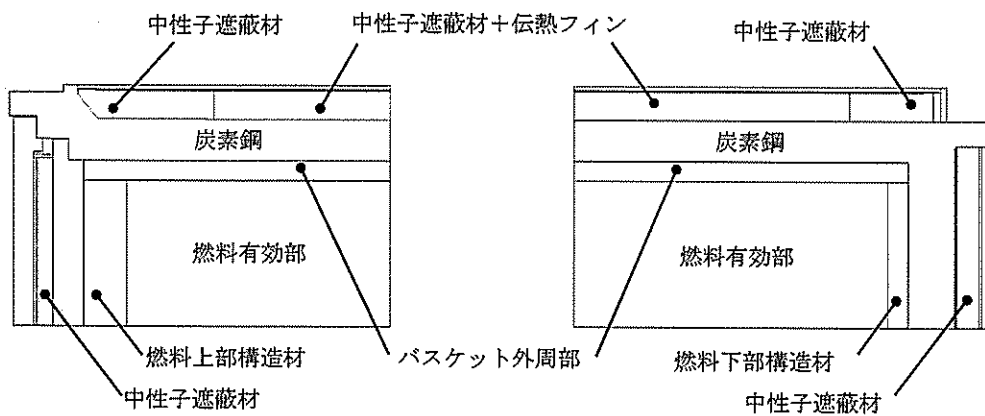
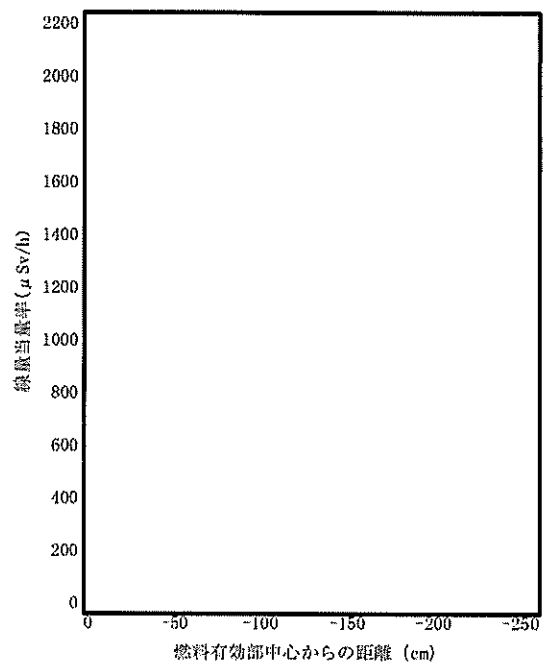
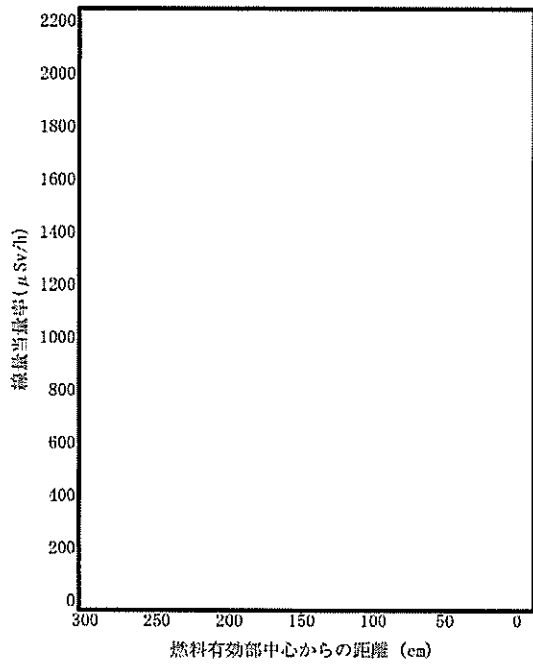


(注)①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており、その結果を2-5-2-1表(2/2)に示す。

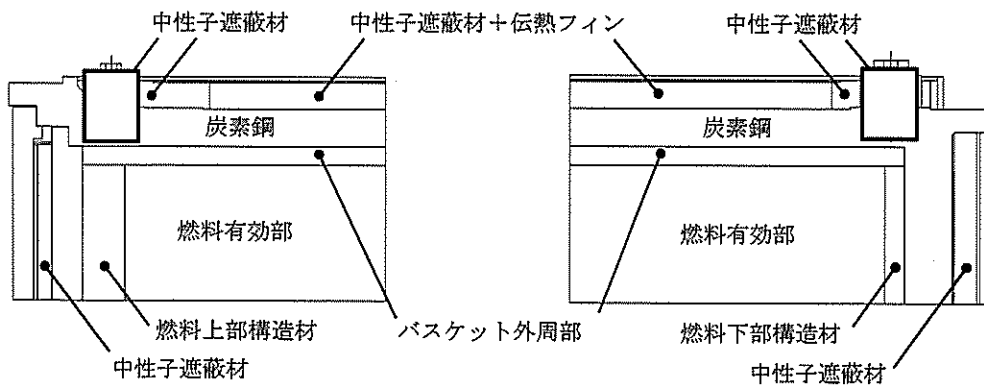
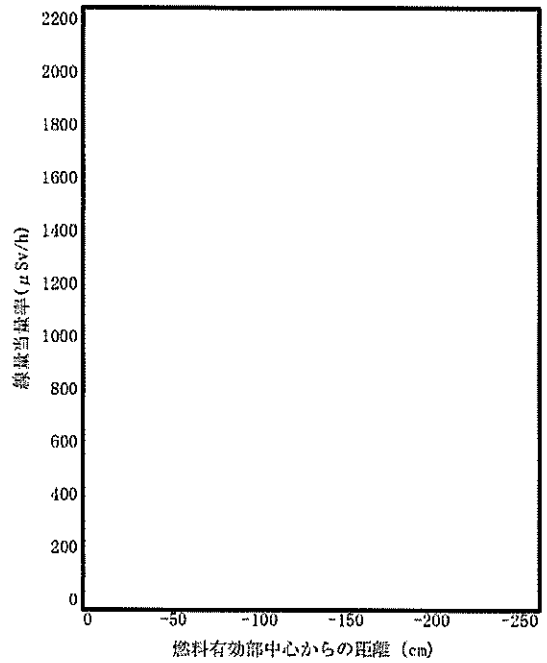
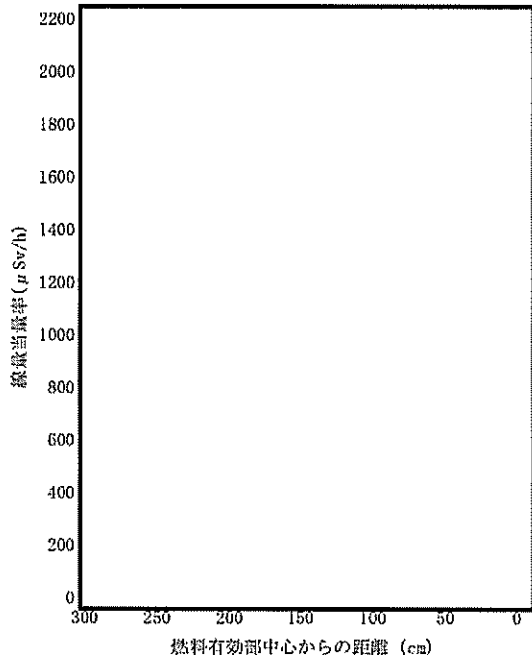
2-5-2-1 図(2/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (乾式キャスク (タイプ2))



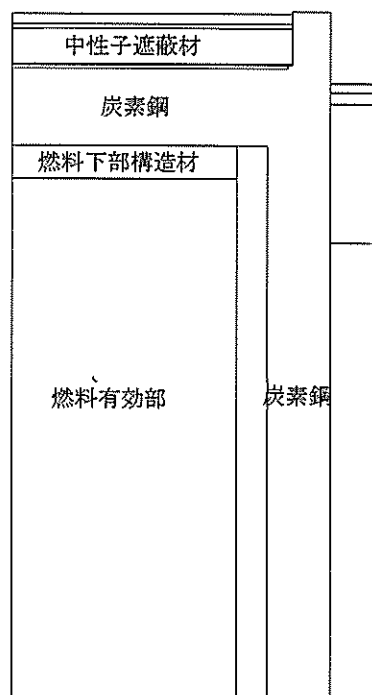
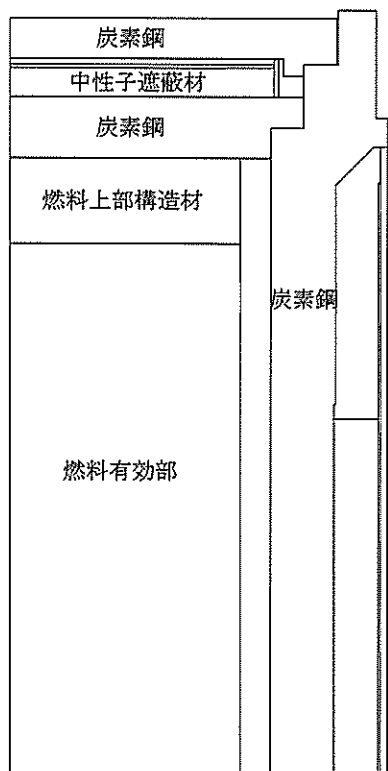
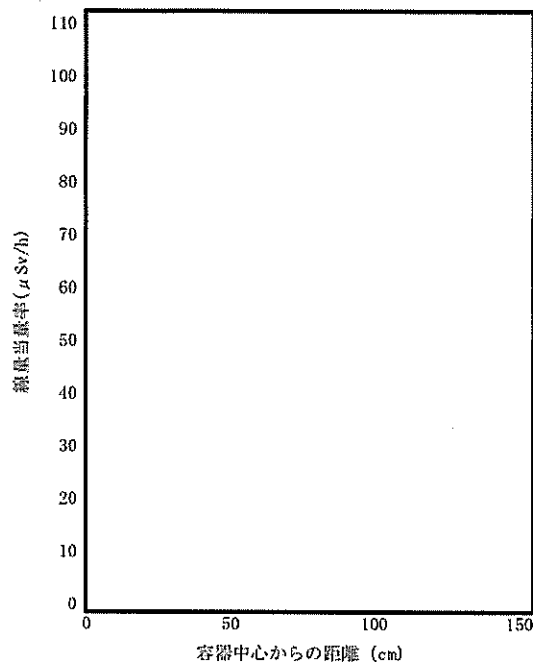
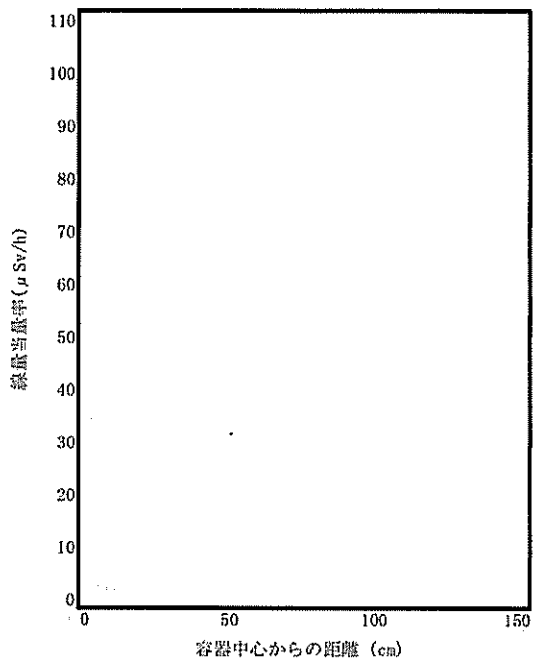
2-5-2-2 図(1/6) 表面の線量当量率分布 (頭部軸方向・底部軸方向)
(乾式キャスク (タイプ1))



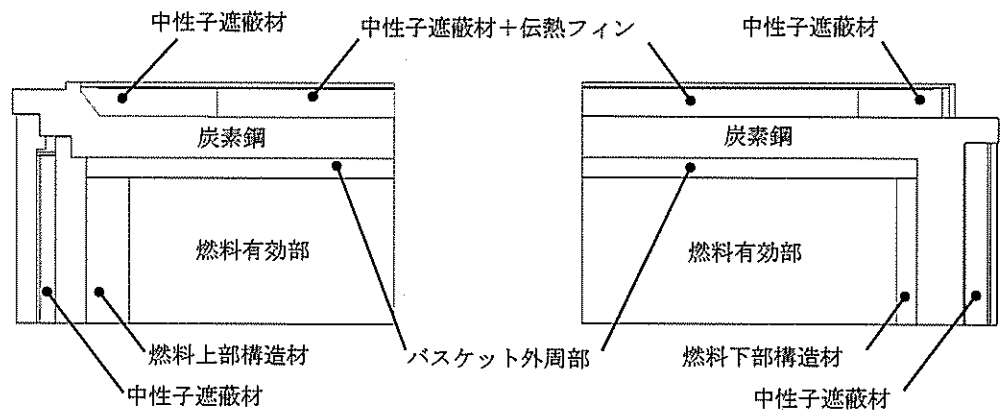
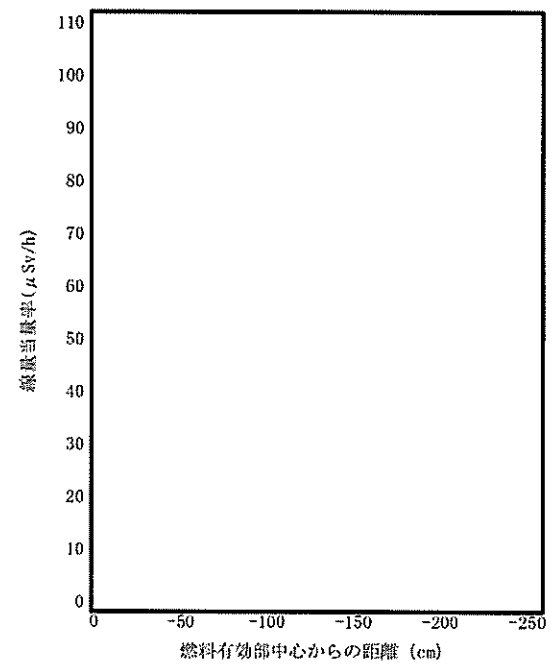
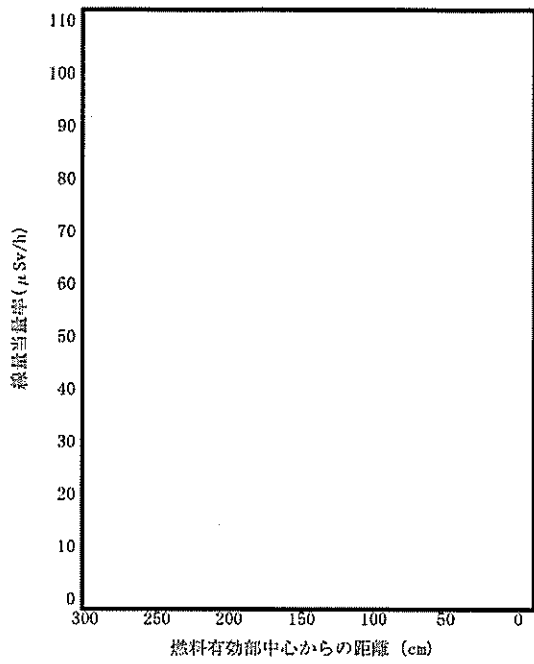
2-5-2-2 図(2/6) 表面の線量当量率分布(頭部径方向・側部・底部径方向)
(乾式キャスク(タイプ1))



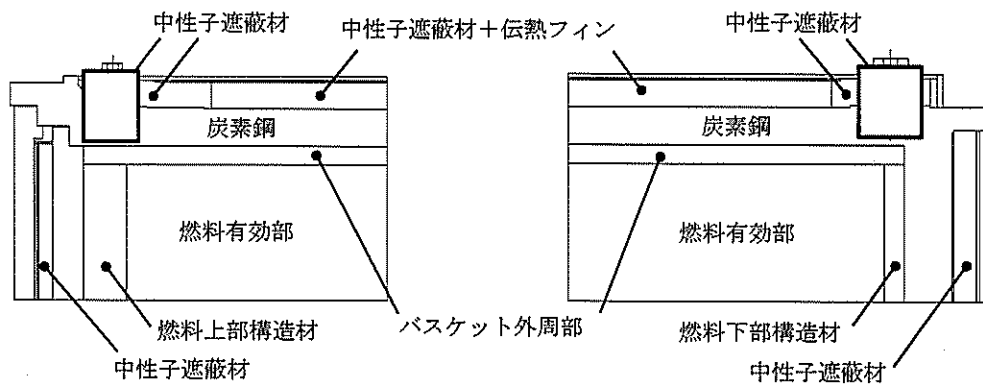
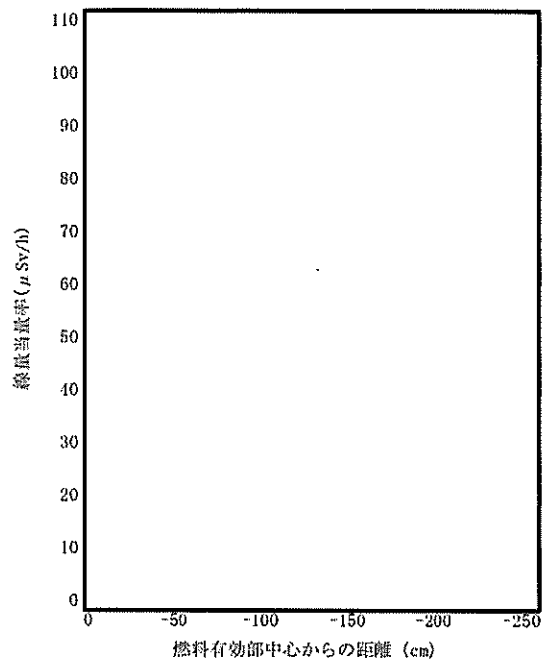
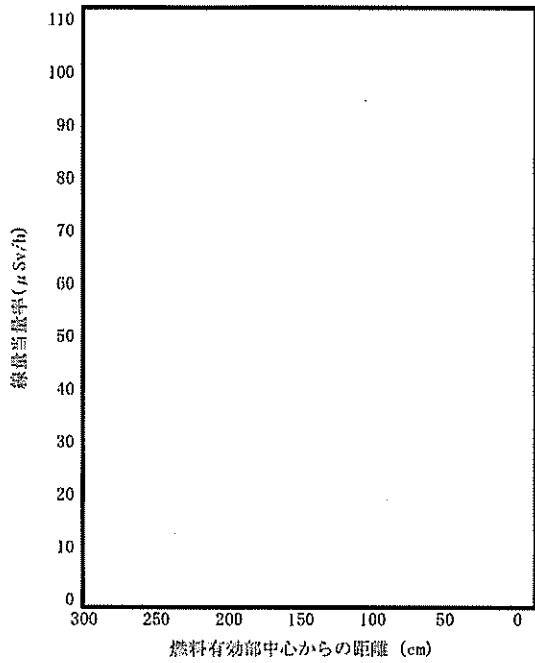
2-5-2-2 図(3/6) 表面の線量当量率分布 (トランニオン方向)
(乾式キャスク (タイプ1))



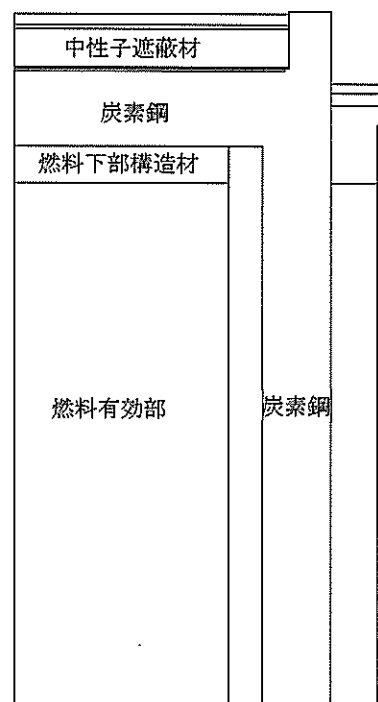
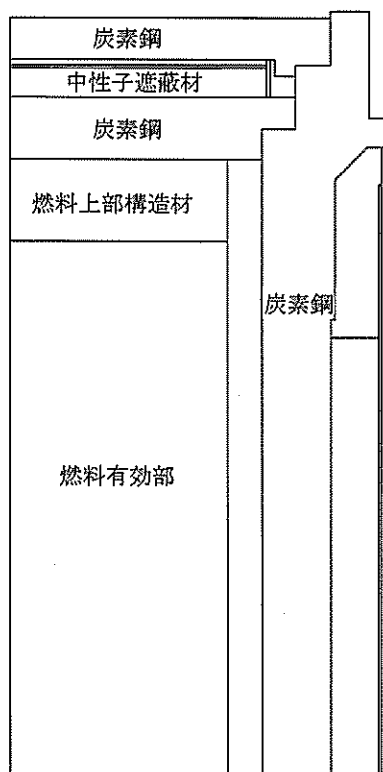
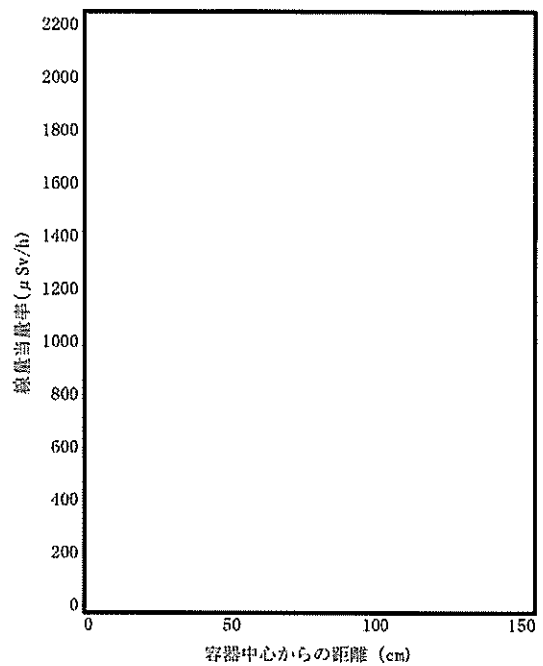
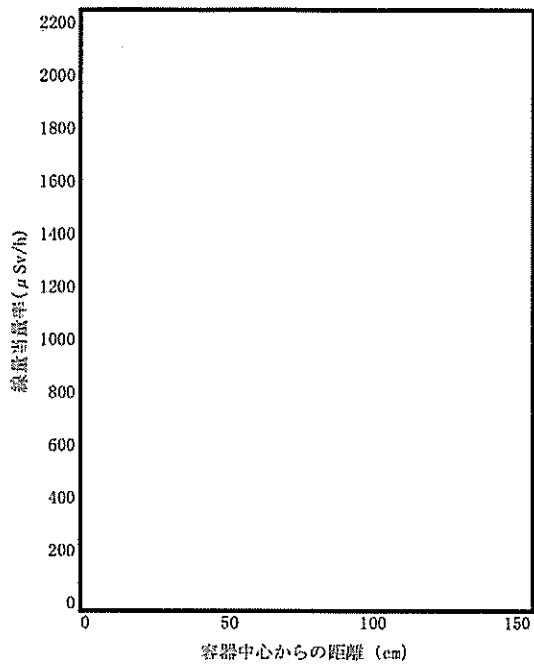
2-5-2-2 図(4/6) 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(頭部軸方向・底部軸方向)
(乾式キャスク(タイプ1))



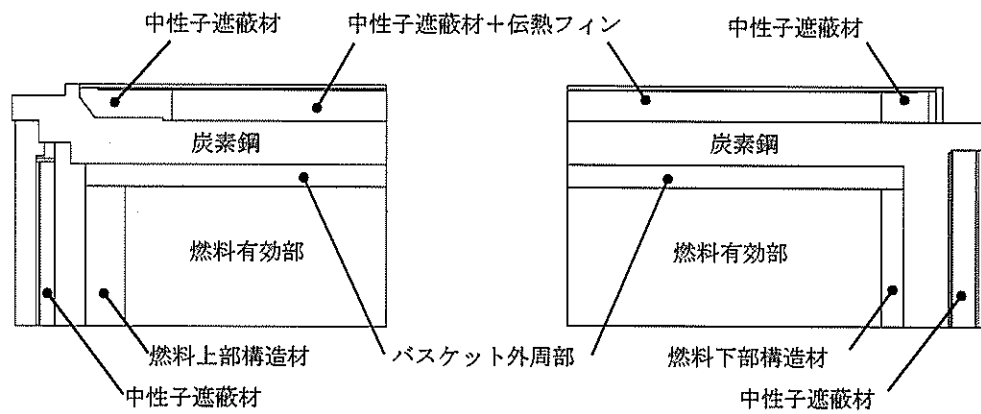
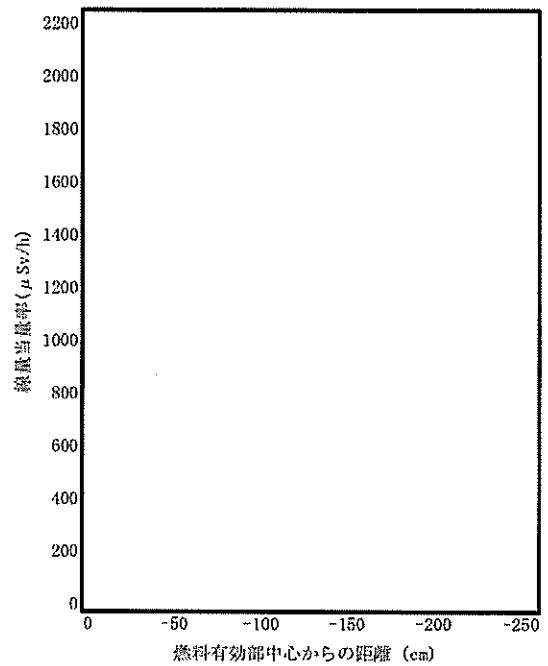
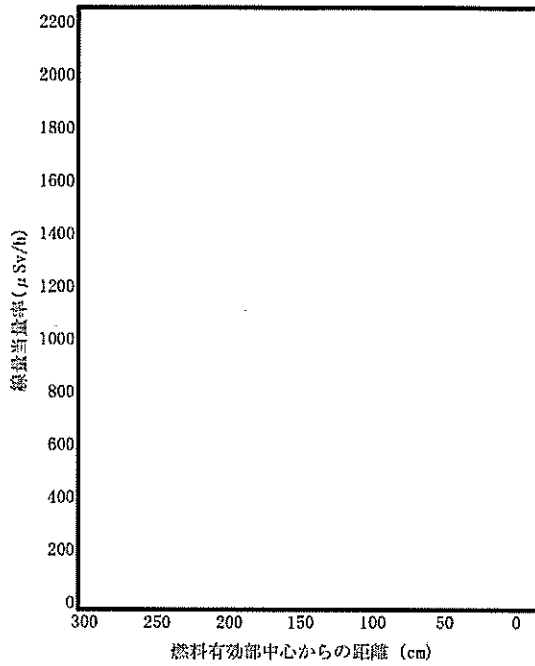
2-5-2-2 図(5/6) 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(頭部径方向・側部・底部径方向)
(乾式キャスク(タイプ1))



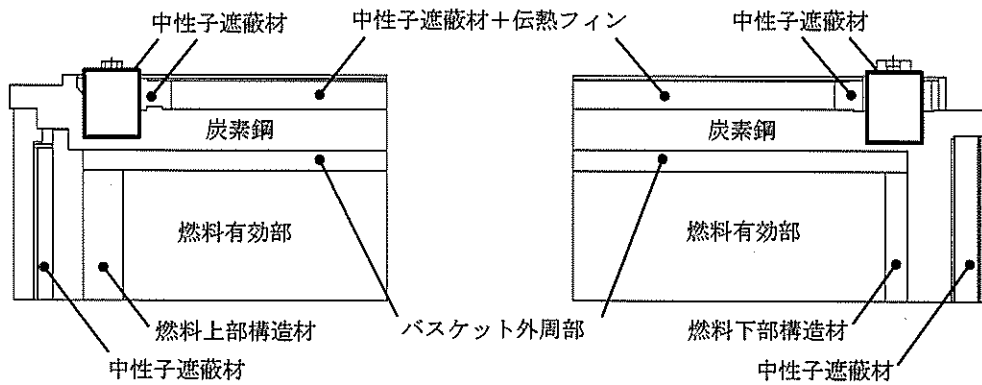
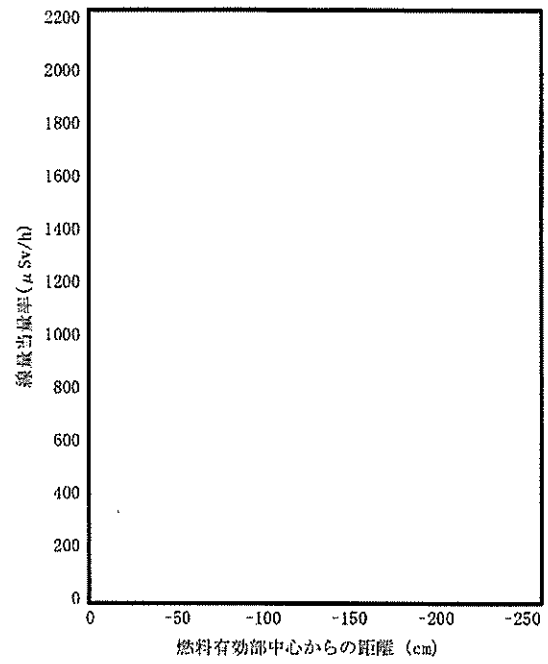
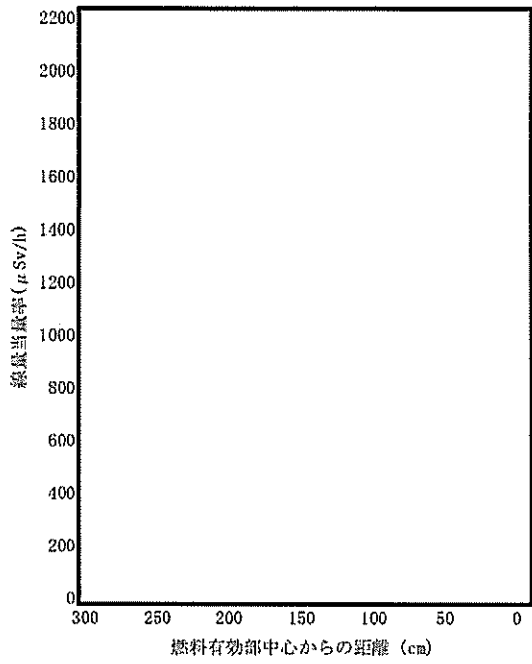
2-5-2-2 図(6/6) 表面から1m離れた位置の線量当量率分布 (トランニオン方向)
(乾式キャスク (タイプ1))



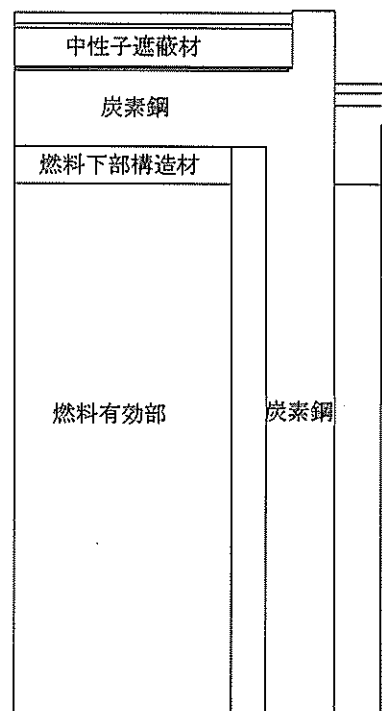
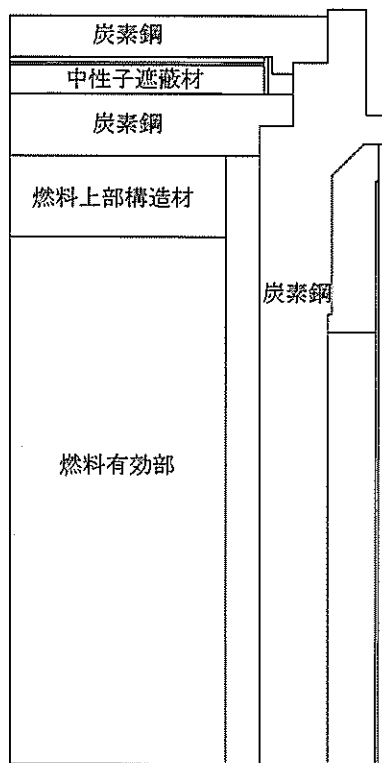
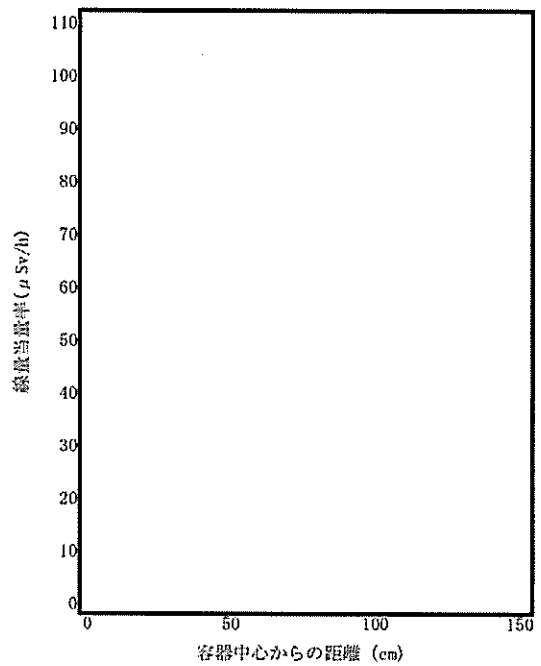
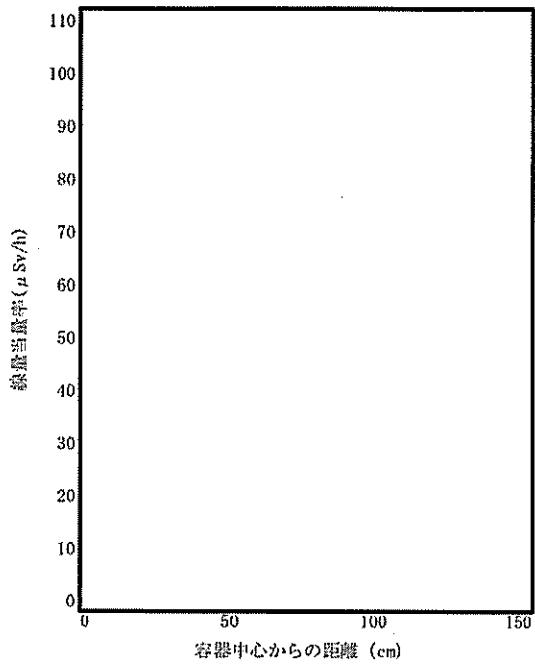
2-5-2-3 図(1/6) 表面の線量当量率分布 (頭部軸方向・底部軸方向)
(乾式キャスク (タイプ2))



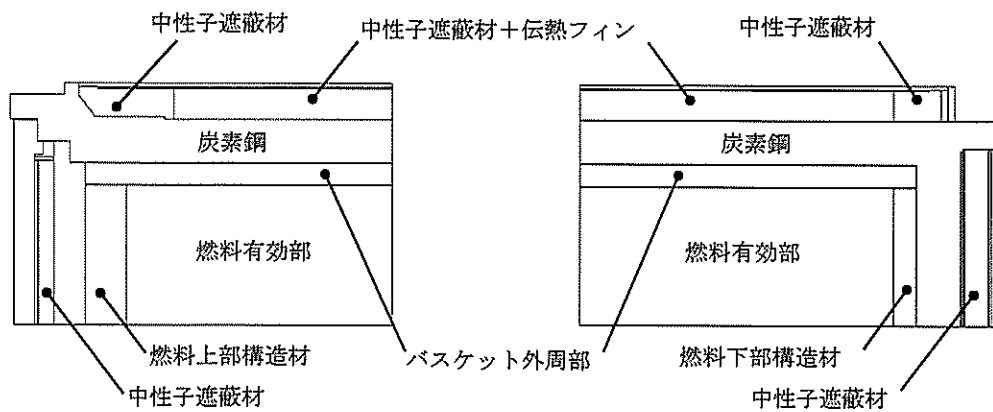
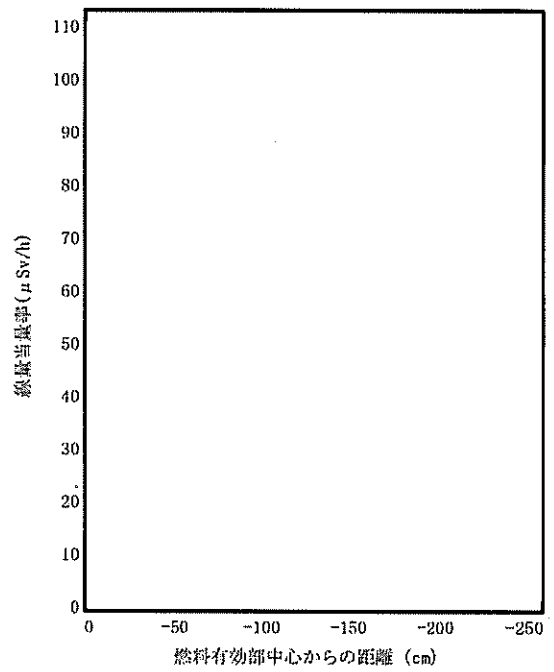
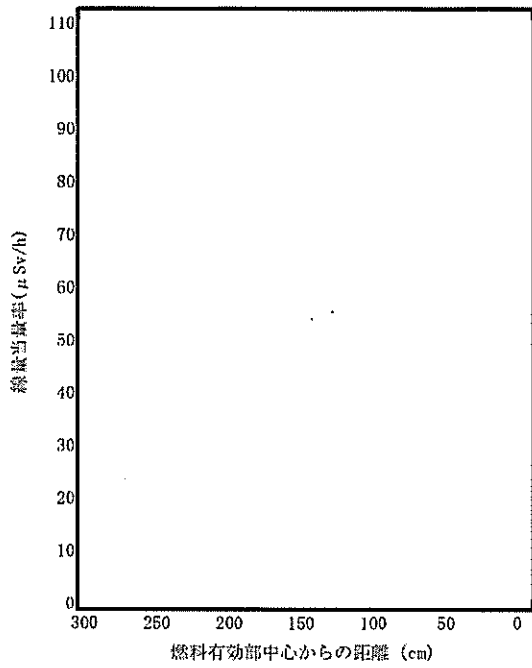
2-5-2-3 図(2/6) 表面の線量当量率分布 (頭部径方向・側部・底部径方向)
(乾式キャスク (タイプ2))



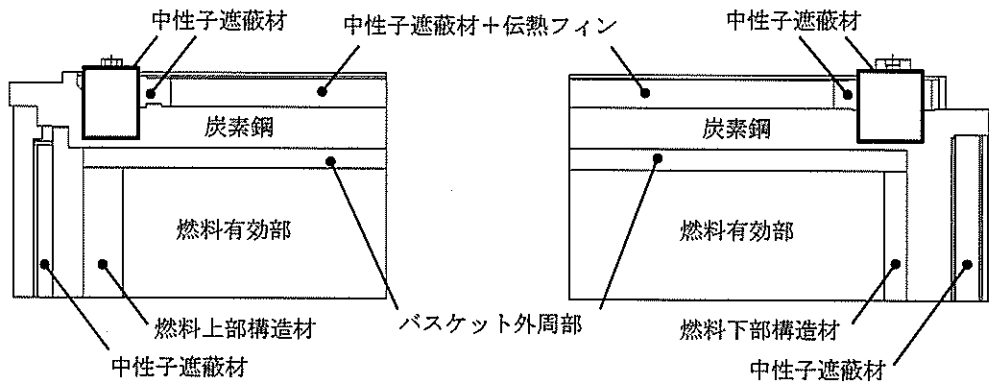
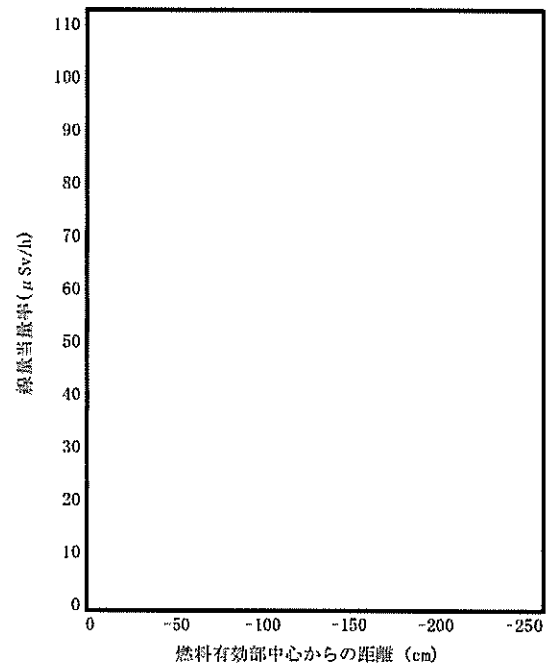
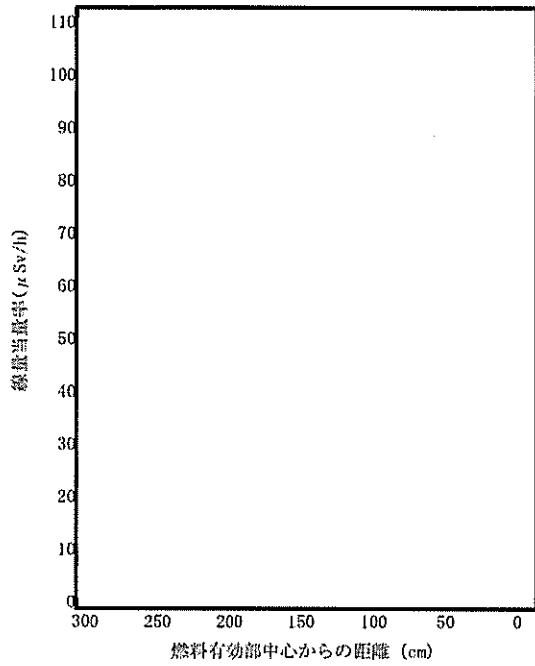
2-5-2-3 図(3/6) 表面の線量当量率分布 (トランニオン方向)
(乾式キャスク (タイプ2))



2-5-2-3 図(4/6) 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(頭部軸方向・底部軸方向)
(乾式キャスク(タイプ2))



2-5-2-3 図(5/6) 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(頭部径方向・側部・底部径方向)
(乾式キャスク(タイプ2))



2-5-2-3 図(6/6) 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(トランニオン方向)
(乾式キャスク(タイプ2))

2-5-3 燃焼計算コード ORIGEN2 を用いることの妥当性

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、燃焼計算コード ORIGEN2 を用いることの妥当性について説明するものである。

燃焼計算コード ORIGEN2 は、原子燃料施設の放射線源強度（以下、「線源強度」という。）計算及び崩壊熱計算に広く使用されており、使用済燃料輸送キャスクの線源強度計算及び崩壊熱計算等に豊富な実績がある。

ORIGEN2 の計算結果と ANS 標準崩壊熱の比較を 2-5-3-1 図に示す。2-5-3-1 図に示すように、ORIGEN2 計算値と ANS 標準崩壊熱は一致しており、ORIGEN2 を使用済燃料輸送キャスクの線源強度計算及び崩壊熱計算に適用することは妥当である。

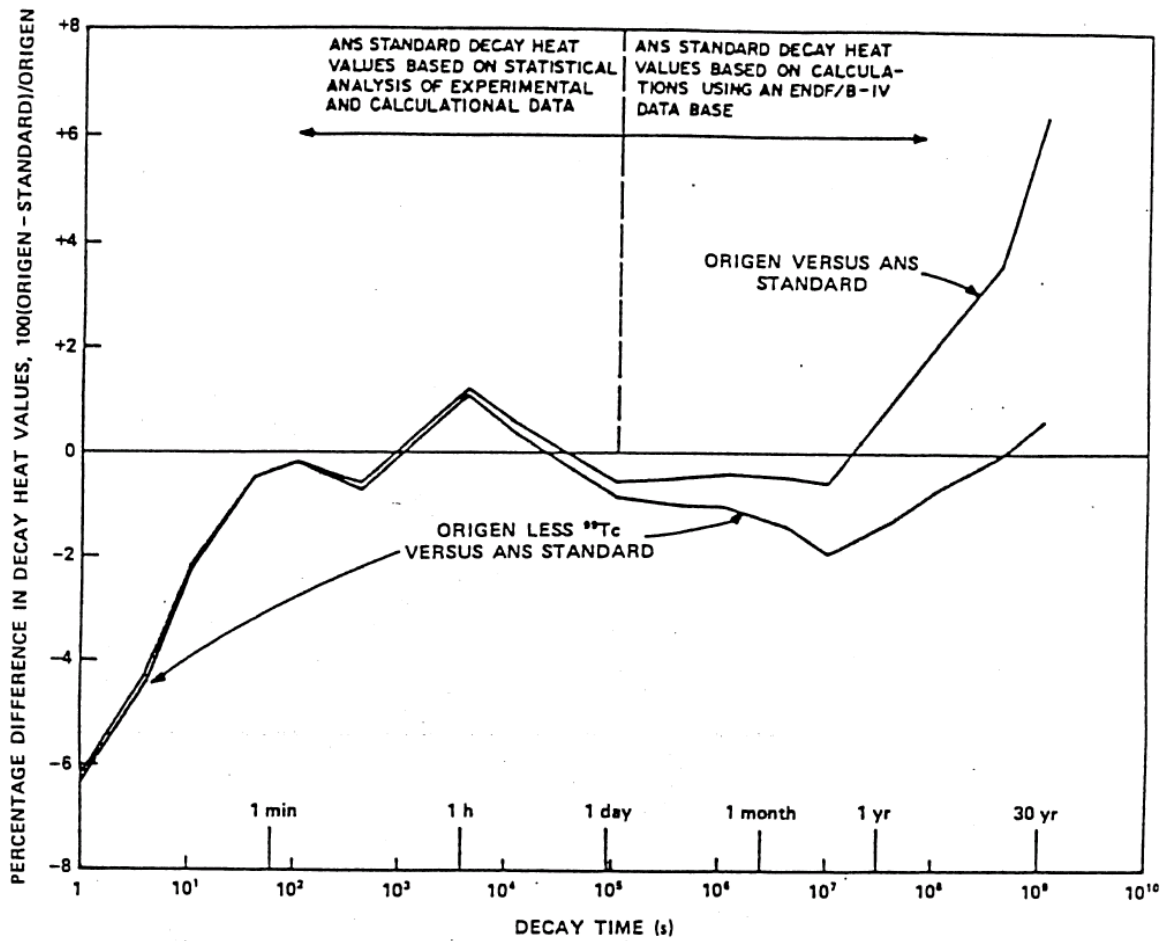


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(注)ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上（乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）に収納される使用済燃料集合体の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。したがって、 ^{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。

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

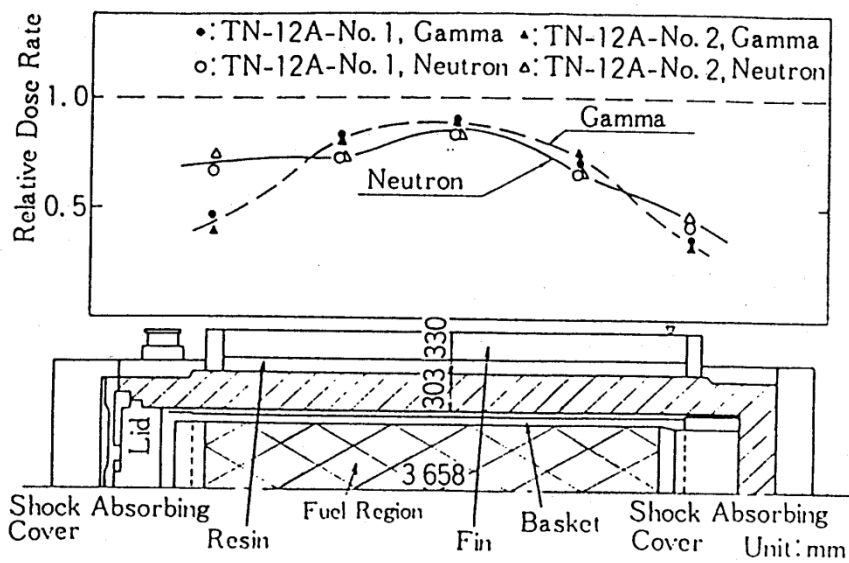
2-5-3-1 図 ORIGEN2 コードの検証例¹⁾

2-5-4 二次元輸送計算コード DOT3.5 を
用いることの妥当性

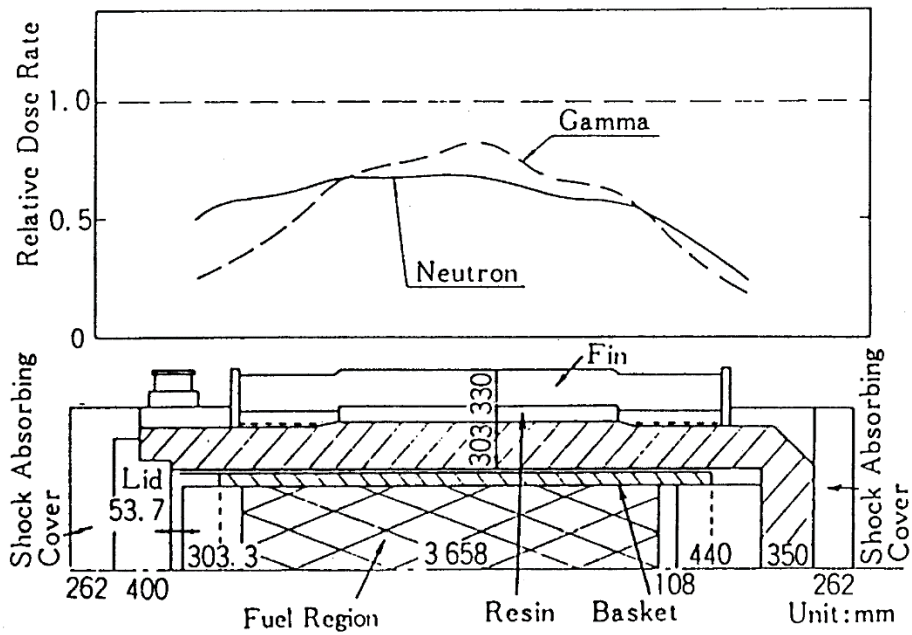
本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、二次元輸送計算コード DOT3.5 を用いることの妥当性について説明するものである。

二次元輸送計算コード DOT3.5 は、原子力施設の遮蔽解析に広く使用されており、使用済燃料輸送キャスクの遮蔽解析に豊富な実績がある。

ガンマ線及び中性子について DOT3.5 で解析した使用済燃料輸送キャスクの解析値と測定値の比較を 2-5-4-1 図及び 2-5-4-2 図に示す（解析値を 1.0 とした場合の測定値の相対比を示している）。2-5-4-1 図及び 2-5-4-2 図に示すとおり、解析値は測定値を上回っており、DOT3.5 をキャスク体系に適用することは妥当である。



2-5-4-1 図 DOT3.5 の検証例 (その1) ¹⁾



2-5-4-2 図 DOT3.5 の検証例 (その2) ¹⁾

1) (一社) 日本原子力学会, 「中性子遮蔽設計ハンドブック」, (1993).

2-5-5 JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリを
適用することの妥当性

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリを適用することの妥当性について説明するものである。

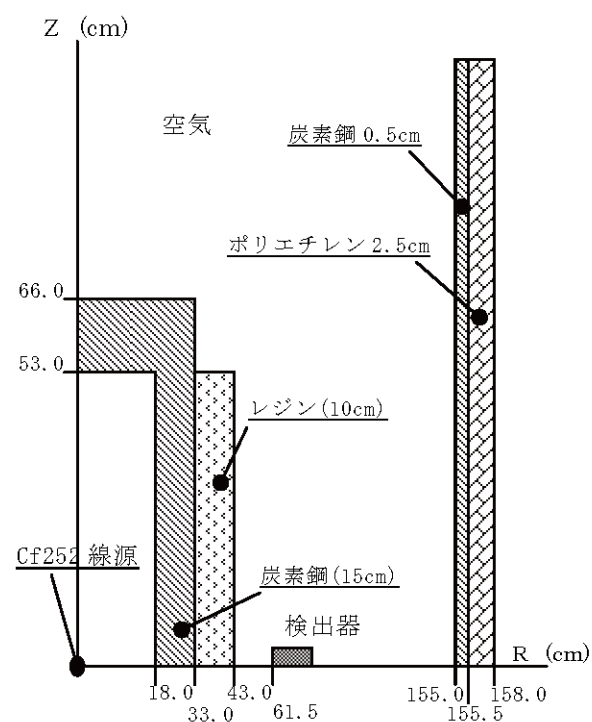
JENDL-3.3¹⁾ に基づく断面積ライブラリについては、以下に示す文献にて妥当性が確認されている。

なお、(1)及び(2)にて JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリの適用の妥当性について説明し、(3)にて本評価で用いた MATXSLIB-J33²⁾ の詳細について説明する。

(1)海上技術安全研究所（以下、「海技研」という。）によるベンチマーク計算について

海技研は評価済核データ JENDL-3.3 に基づく輸送容器遮蔽評価用断面積ライブラリ SFCX-J33 について、輸送容器体系で遮蔽透過実験を実施し、測定した線量当量率を用いたベンチマーク計算及び検証を実施している³⁾。

この検証での計算モデル及び計算結果を 2-5-5-1 図に示す。測定値と SFCX-J33 による計算値は中性子、ガンマ線共によく一致しており、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリは輸送容器体系での線量当量率評価に適合することが確認されている。



輸送容器体系ベンチマーク計算結果

| 項目 | 線量当量率 (μ Sv/h) | | | |
|-----|---------------------|-----------|--------------------------|------|
| | 中性子 | ガンマ線 | | |
| | | 2次 ガンマ | ²⁵² Cf ガンマ | 合計 |
| 測定値 | 28.4 | - | - | 2.52 |
| 計算値 | 28.8 | 2.49 | 0.19 | 2.68 |

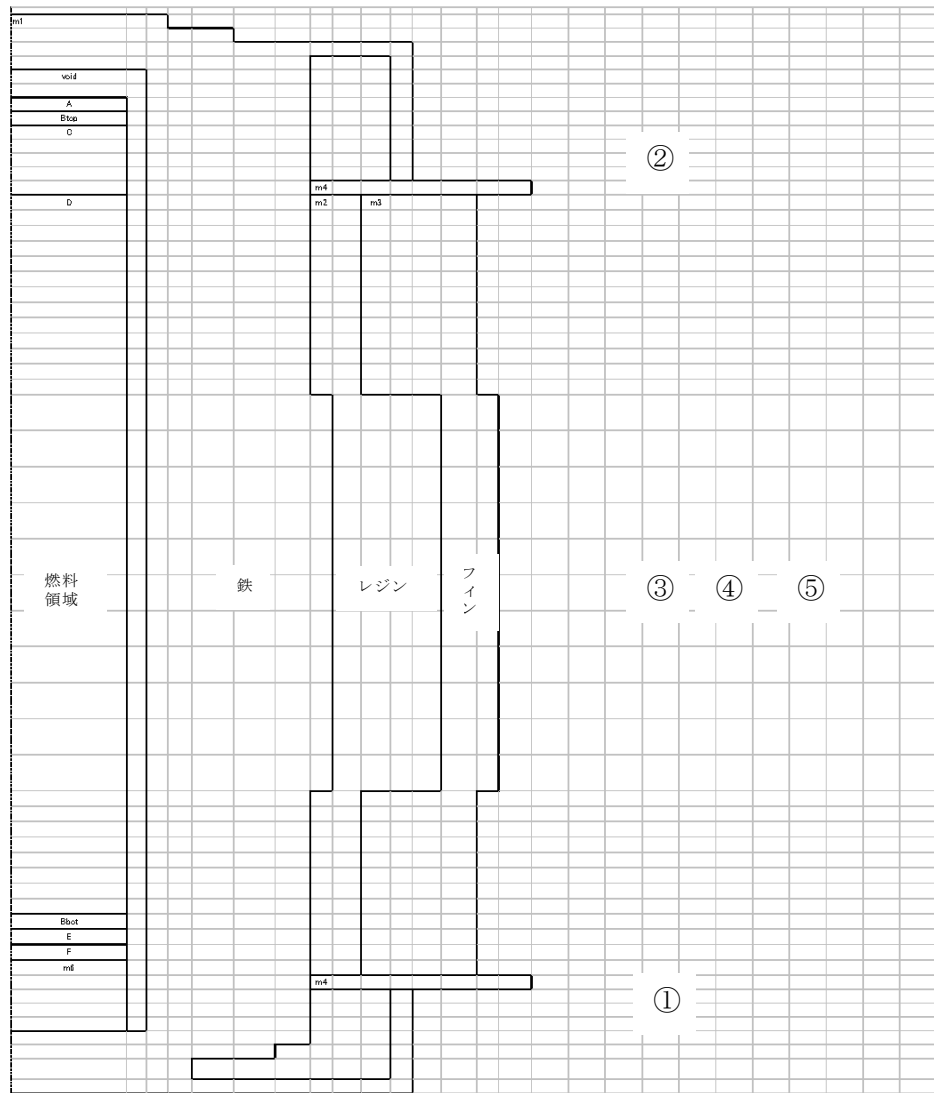
2-5-5-1 図 輸送容器体系の計算モデル及びベンチマーク計算結果

(2) TN-12 型使用済燃料輸送キャスクを用いたベンチマーク計算について

TN-12 型使用済燃料輸送キャスクに使用済燃料集合体を装荷した際の中性子及びガンマ線の線量当量率測定結果と DOT3.5 コードを用いた評価結果との比較を実施している⁴⁾。

DOT3.5 コードで用いている断面積ライブラリは SFCX-J33 である。

2-5-5-2 図に示すとおり、測定値と SFCX-J33 による計算値は使用済燃料集合体を装荷した輸送容器体系においてもよく一致しており、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリは輸送容器体系での線量当量率評価に適合することが確認されている。



(単位：μSv/h)

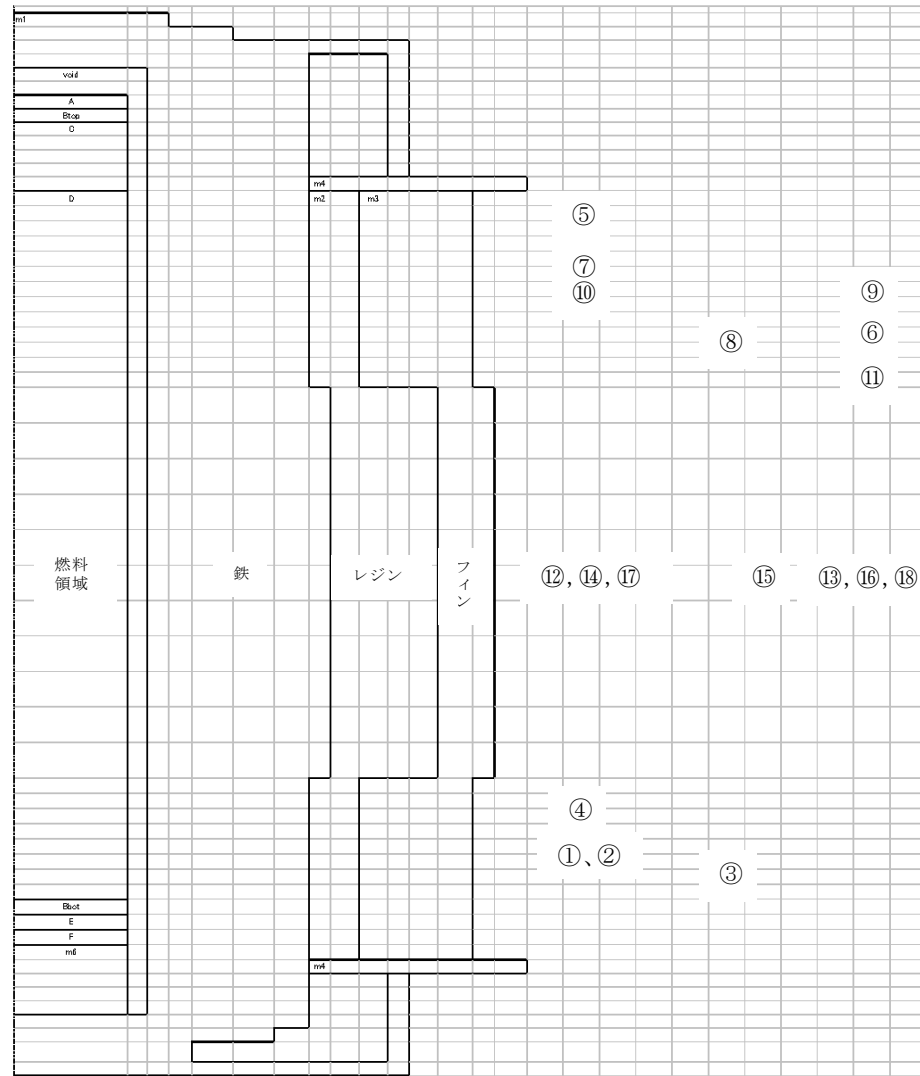
| 評価点 番号 | 測定値 | 計算値 (注) |
|-----------|------|---------|
| ① | 35.0 | 32.72 |
| ② | 59.3 | 61.42 |
| ③ | 52.9 | 78.07 |
| ④ | 28.6 | 36.14 |
| ⑤ | 19.0 | 20.97 |

(注)DOT3.5 コードの計算値はフィン効果補正を考慮。

2-5-5-2 図(1/2) 中性子計算モデル及びベンチマーク計算比較

(単位：μSv/h)

2-5-5-4



| 評価点 番号 | 測定値 | 計算値 ^(注) |
|-----------|-------|--------------------|
| ① | 150.0 | 196.41 |
| ② | 162.0 | 196.41 |
| ③ | 54.0 | 53.92 |
| ④ | 145.0 | 206.54 |
| ⑤ | 210.0 | 256.82 |
| ⑥ | 39.0 | 36.99 |
| ⑦ | 248.0 | 263.84 |
| ⑧ | 80.0 | 72.45 |
| ⑨ | 42.0 | 35.59 |
| ⑩ | 210.0 | 262.87 |
| ⑪ | 38.0 | 39.70 |
| ⑫ | 80.0 | 136.07 |
| ⑬ | 31.0 | 40.66 |
| ⑭ | 97.0 | 136.07 |
| ⑮ | 49.0 | 67.04 |
| ⑯ | 33.0 | 40.66 |
| ⑰ | 79.0 | 136.07 |
| ⑱ | 31.0 | 40.66 |

(注)DOT3.5 コードの計算値はフィン効果補正を考慮。

2-5-5-2 図(2/2) ガンマ線計算モデル及びベンチマーク計算比較

(3) MATXSLIB-J33 の詳細について

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の作成条件は 2-5-5-1 表に示すとおりであり、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15⁵⁾ 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され作成されている。

なお、TRANSX-2.15 については公開されている修正パッチ⁶⁾ を適用したものをを用いている。

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済である。

2-5-5-1 表 MATXSLIB-J33 を用いた断面積ライブラリの作成条件

| | |
|----------------------|---------------------|
| 多群ライブラリ処理コード | TRANSX-2.15 |
| エネルギー群数 | 中性子 175 群、ガンマ線 42 群 |
| 自己遮蔽因子 | 考慮 |
| transport correction | diagonal |

【参考文献】

- 1) K. Shibata, et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3:JENDL-3.3”, J. Nucl. Sci. Technol. 39,1125, (2002).
- 2) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- 3) 大西世紀 ほか, 「²⁵²Cf 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 巻 第 3 号 研究報告, (2007).
- 4) 浅見光史 ほか, 「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法ガイドライン原案の策定」, 海上技術安全研究所報告 第 13 巻 第 1 号 研究調査資料, (2013).
- 5) R. E. MacFarlane, “TRANSX2:A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes”, LA-12312-MS, (1992).
- 6) International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, “TRANSX patches”, <https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm>,

2-5-6 トラニオン部の線束接続計算の妥当性

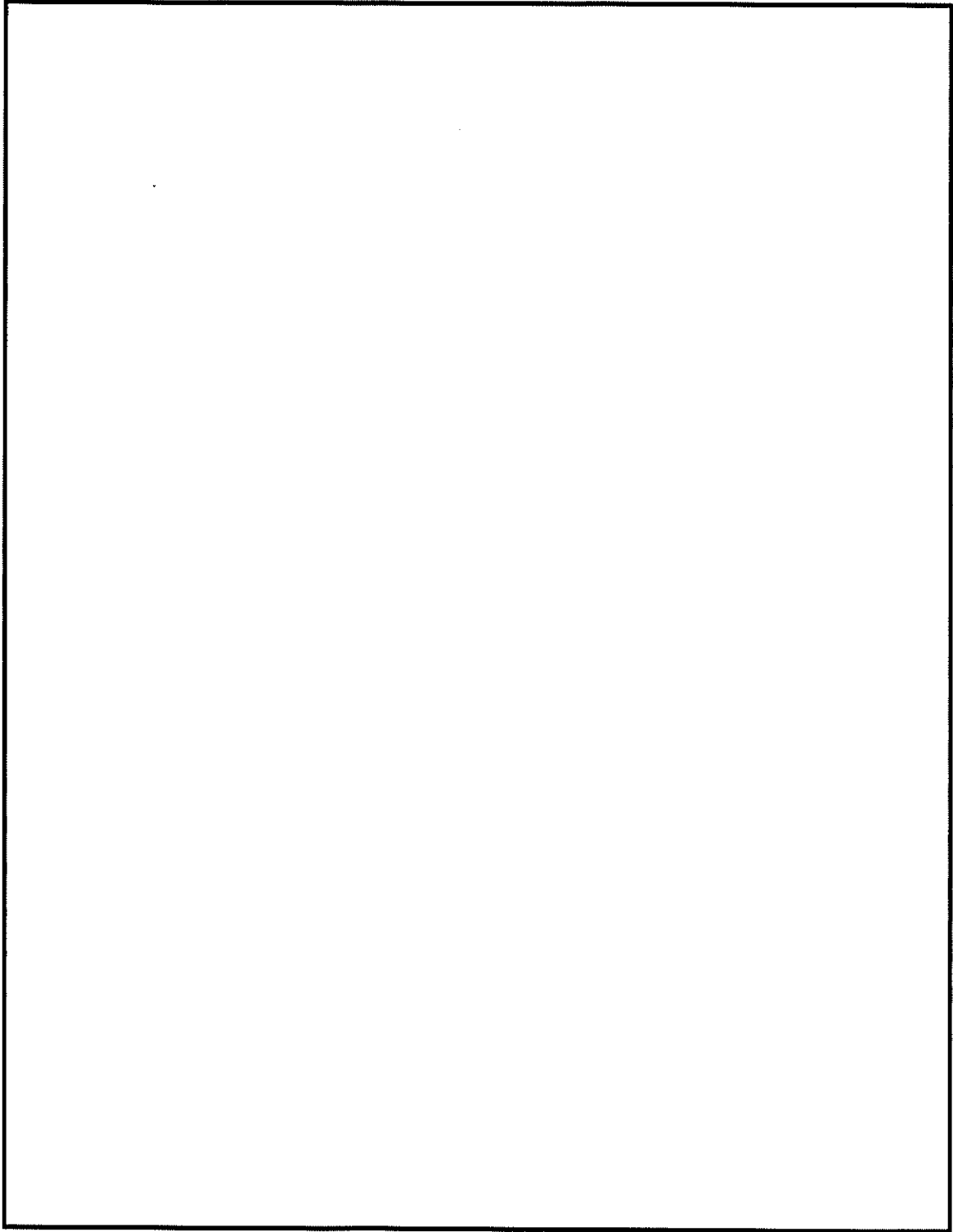
本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、本体モデルからトラニオン部モデルへの線束接続計算の妥当性について説明するものである。

1. トラニオン部の計算について

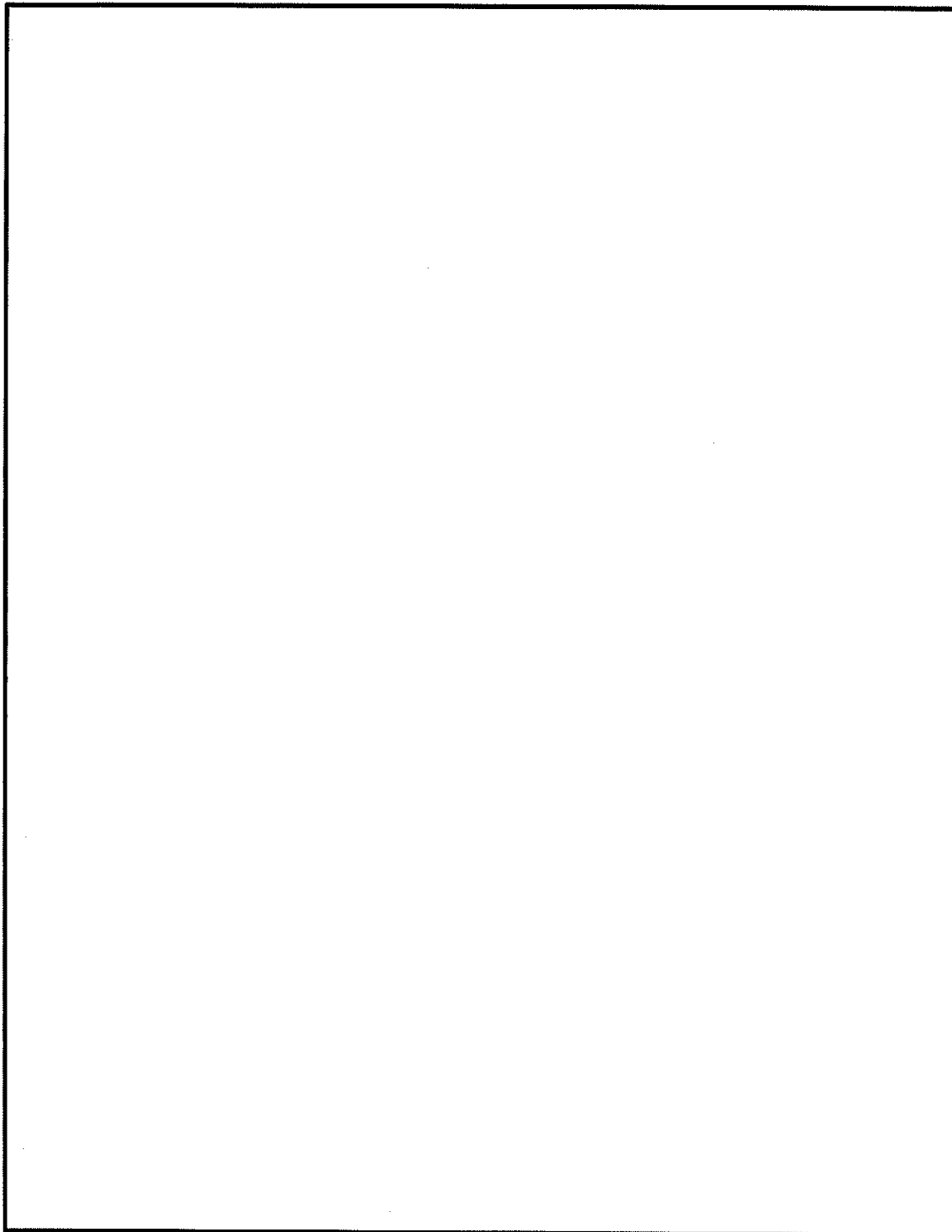
トラニオン部解析モデルの線束接続の概要については 2-5-1-13 図に示すとおりである。線束接続計算の詳細及び妥当性について以下に示す。

2. 計算条件

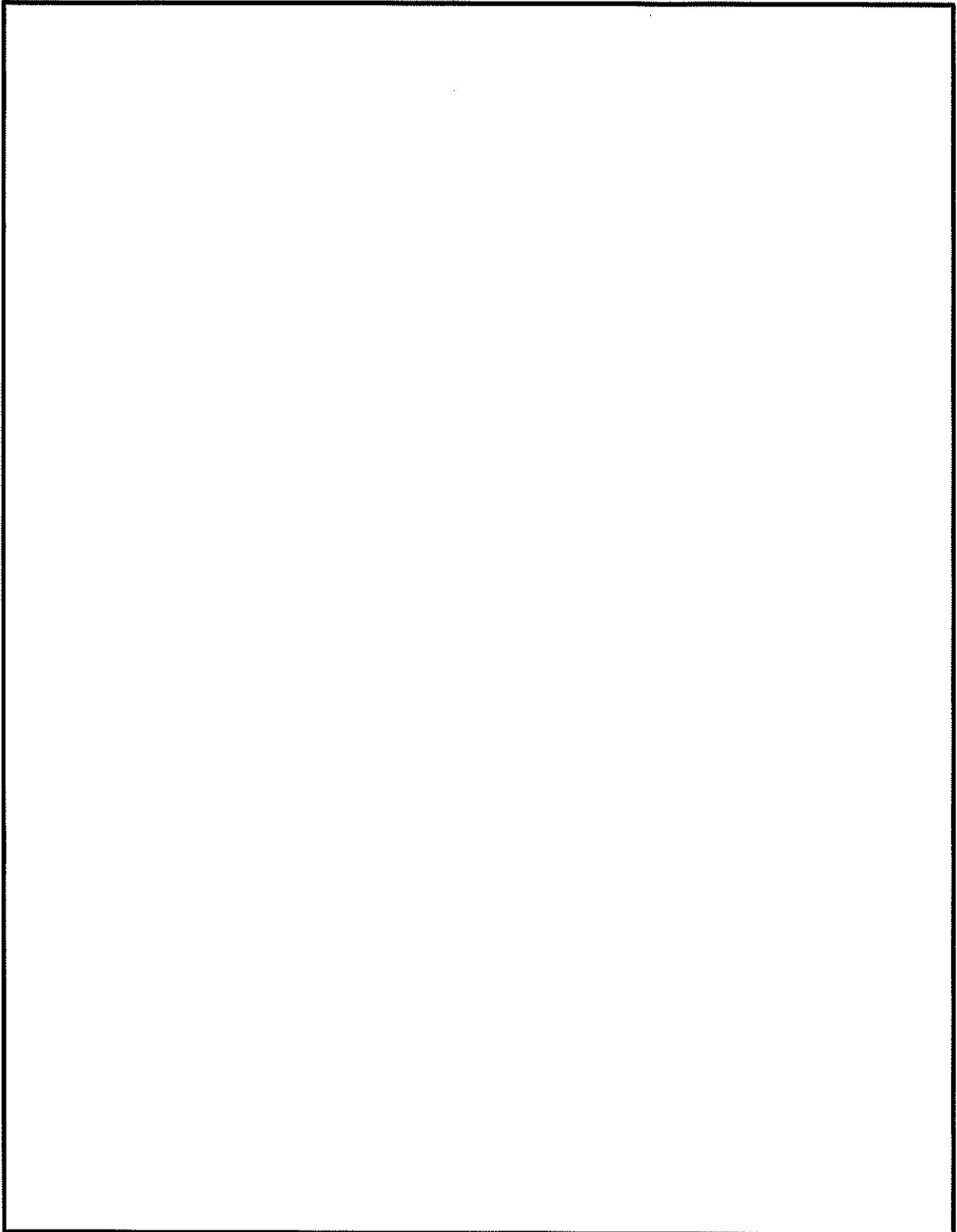
- ・本体モデルからトラニオン部への線束接続位置を 2-5-6-1 図から 2-5-6-4 図に示す。
- ・その他条件は本体モデルと同じである。



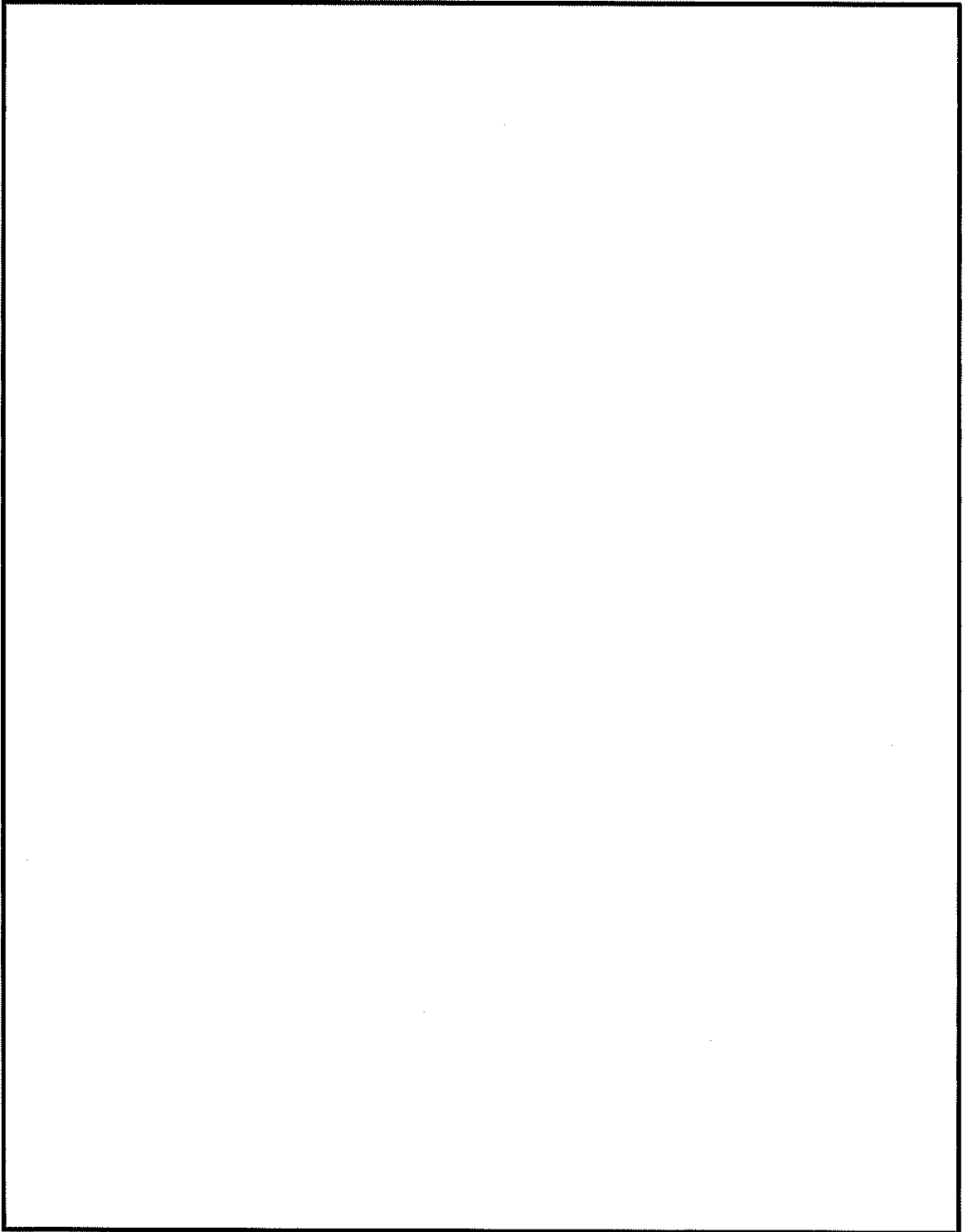
2-5-6-1 図 トラニオン線束接続位置（頭部）（乾式キャスク（タイプ1））



2-5-6-2 図 トラニオン線束接続位置（底部）（乾式キャスク（タイプ1））



2-5-6-3 図 トラニオン線束接続位置（頭部）（乾式キャスク（タイプ2））



2-5-6-4 図 トラニオン線束接続位置（底部）（乾式キャスク（タイプ2））

3. トラニオン部の線量当量率評価方法

トラニオン部の線量当量率は、本体モデルにおけるトラニオン部の線量当量率に、別途トラニオン有りモデル/無しモデルで算出した線量当量率補正値を乗じて評価している。

補正値は以下の手順で算出している。

ステップー1

トラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルを用いた線束接続計算より、表面及び表面から1m離れた位置の線量当量率を算出する。

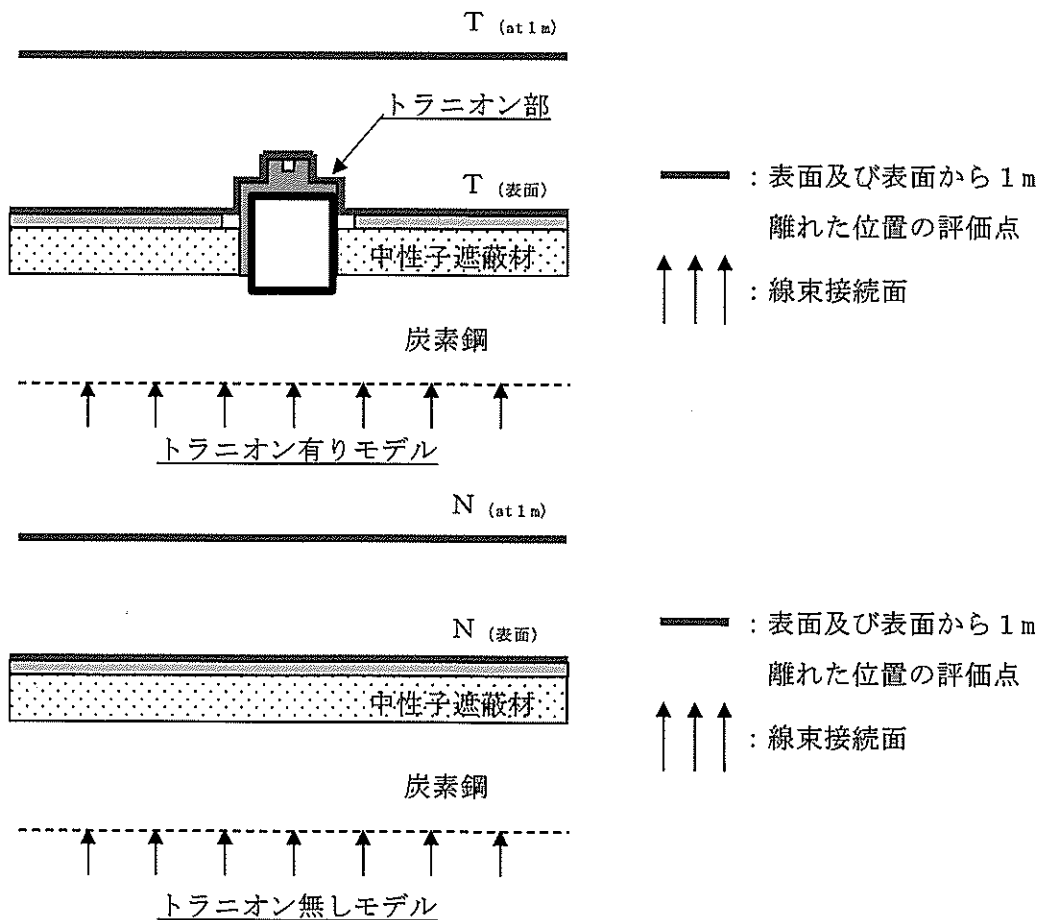
各モデル及び位置の線量当量率を2-5-6-5図に示すとおり定義する。

トラニオン有りモデル：表面の線量当量率を $T_{(表面)}$

表面から1m離れた位置の線量当量率を $T_{(at 1m)}$

トラニオン無しモデル：表面の線量当量率を $N_{(表面)}$

表面から1m離れた位置の線量当量率を $N_{(at 1m)}$



2-5-6-5 図 トラニオン部の線量当量率の定義

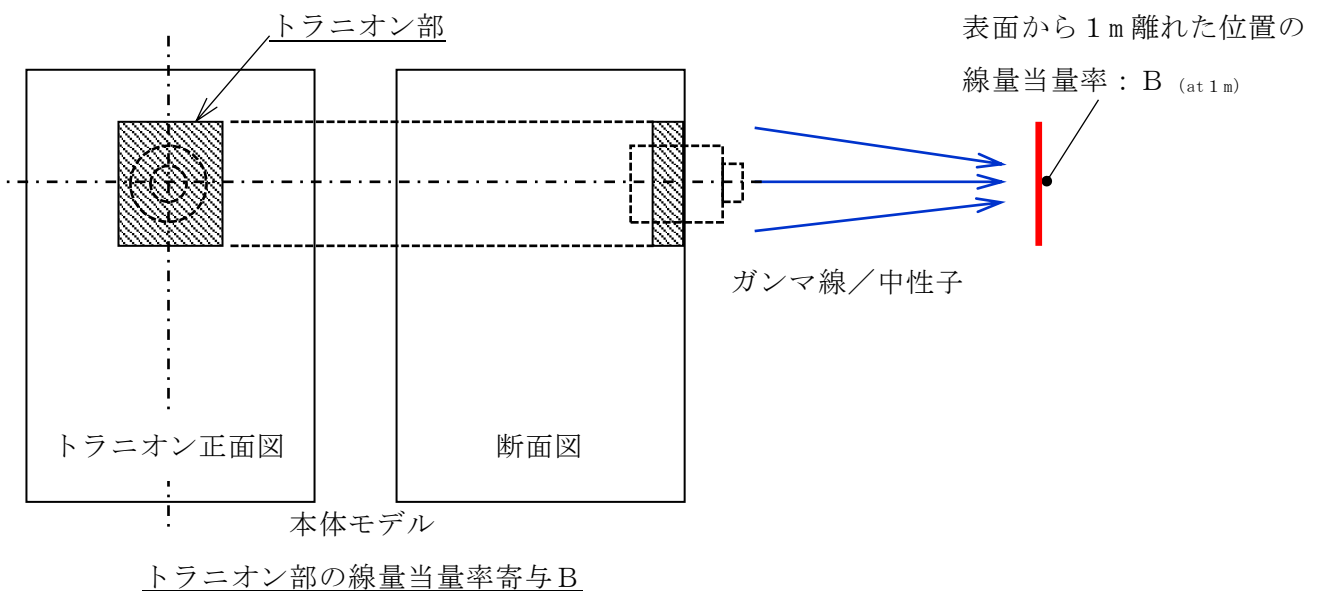
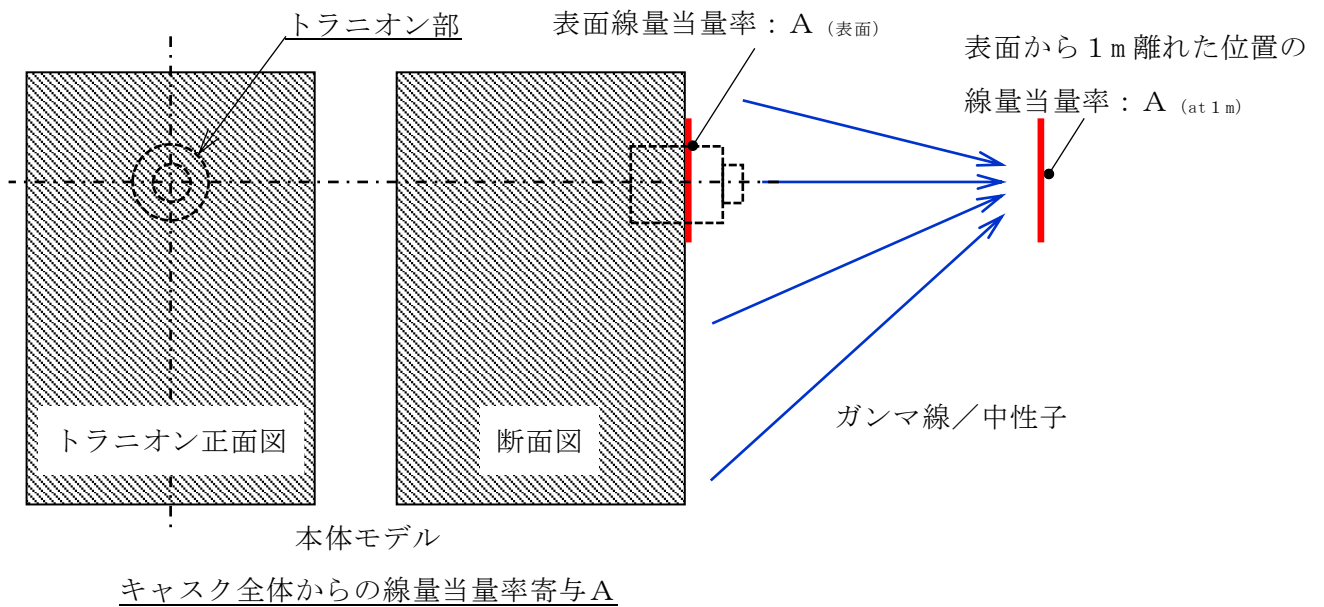
ステップ 2

本体モデルからトランニオン部の線量当量率に寄与する範囲を 2-5-6-6 図に示すとおり定義する。

本体モデルの表面の線量当量率： $A_{(表面)}$

本体モデルの表面から 1 m 離れた位置の線量当量率： $A_{(at 1m)}$

本体モデルのトランニオン範囲より寄与する表面から 1 m 離れた位置の線量当量率： $B_{(at 1m)}$



2-5-6-6 図 トランニオン部の線量当量率に寄与する範囲の定義

ステップ 3

ステップ 1、2 の結果から下式により頭部径方向（トランニオン部）及び底部径方向（トランニオン部）の線量当量率を算出する。

表面線量当量率は評価点近傍からの寄与で決まるため、以下のとおり線量当量率補正値を考慮する。

$$\text{トランニオン部表面の線量当量率} : A_{(\text{表面})} \times (T_{(\text{表面})} / N_{(\text{表面})})$$

表面から 1 m 離れた位置の線量当量率はキャスク全体からの寄与で決まるため、以下のとおり線量当量率補正値を考慮する。

トランニオン部表面から 1 m 離れた位置の線量当量率 :

$$A_{(\text{at } 1 \text{ m})} - B_{(\text{at } 1 \text{ m})} + (B_{(\text{at } 1 \text{ m})} \times (T_{(\text{at } 1 \text{ m})} / N_{(\text{at } 1 \text{ m})}))$$

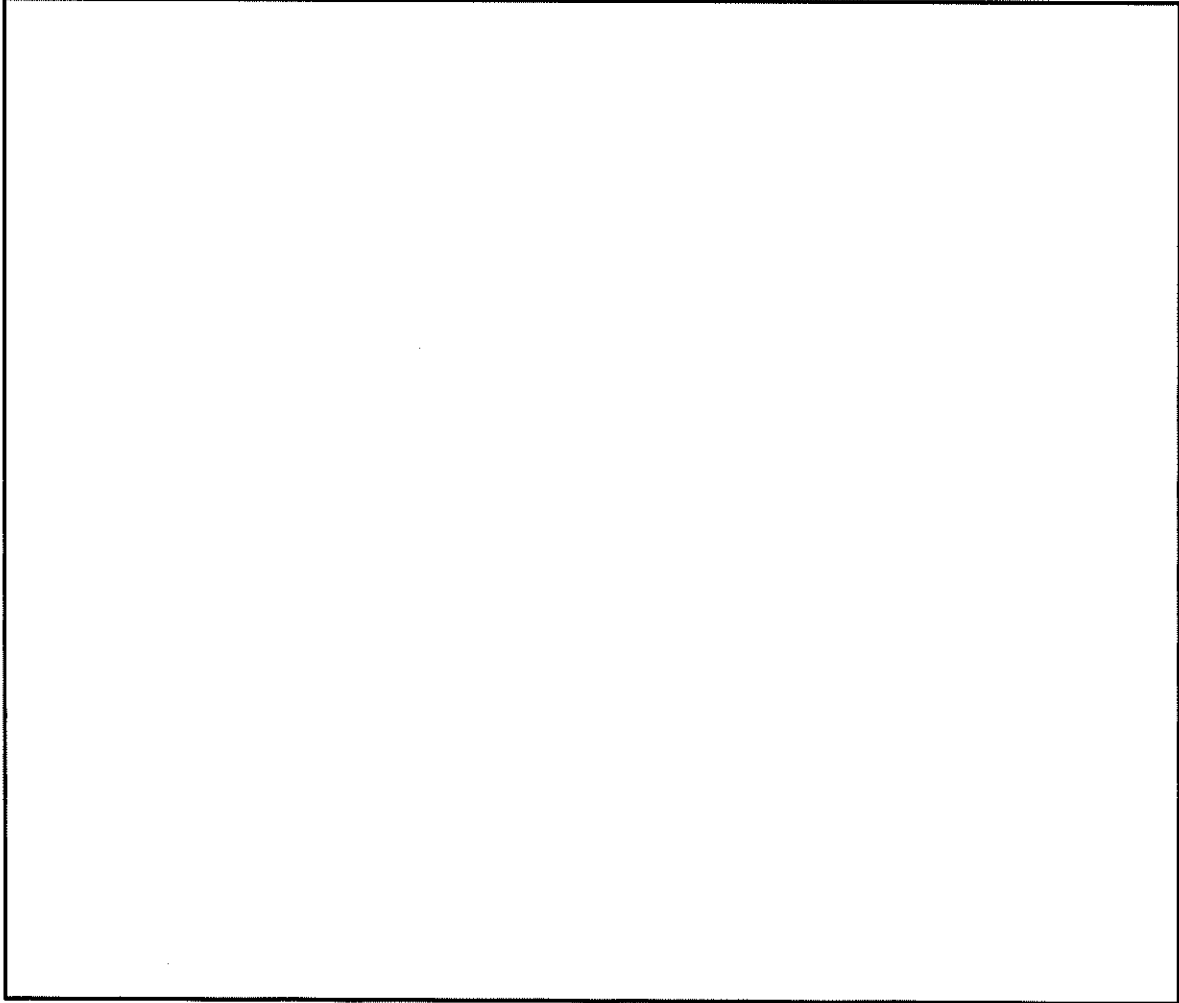
4. 線束接続計算の妥当性

トラニオン部の線束接続計算の解析モデルは、トラニオン中心位置から燃料有効部側に100cm程度の範囲までモデル化しており、線束はその範囲で接続している。本体モデル、トラニオン有りモデル、トラニオン無しモデルの線量当量率を比較することで、線束接続計算の妥当性確認を行った。線量当量率を2-5-6-7図から2-5-6-18図に示す^(注)。

下記に示すとおり、トラニオン部の線束接続計算は妥当である。

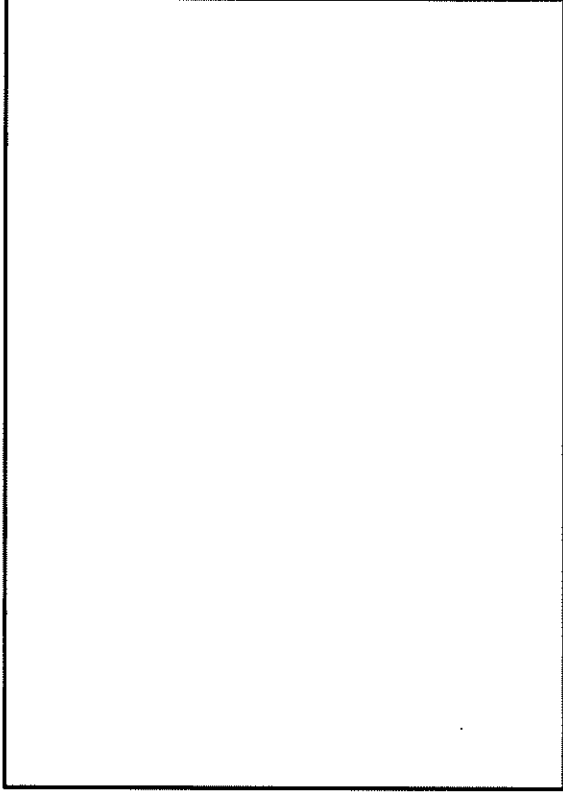
- ・2-5-6-7図から2-5-6-18図より、本体モデルの線束接続位置の線量当量率分布と、トラニオン有りモデル、トラニオン無しモデルの線束接続面の線量当量率分布が一致している。
- ・トラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルの本体胴から外筒までの線量当量率分布について、トラニオン形状による線量当量率の影響が無い範囲(トラニオン位置から離れた位置)は、線量当量率分布が一致している。(本体胴の線束接続範囲の設定は妥当)

(注)燃料有効部ガンマ線及び中性子を対象として確認結果を示す。

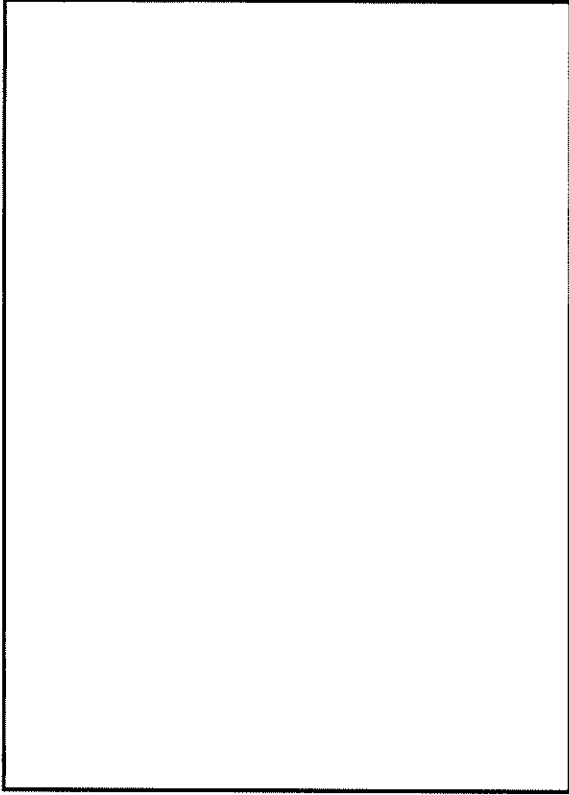


2-5-6-7 図 燃料有効部ガンマ線 本体モデル (頭部) (乾式キヤスク (タイプ1))

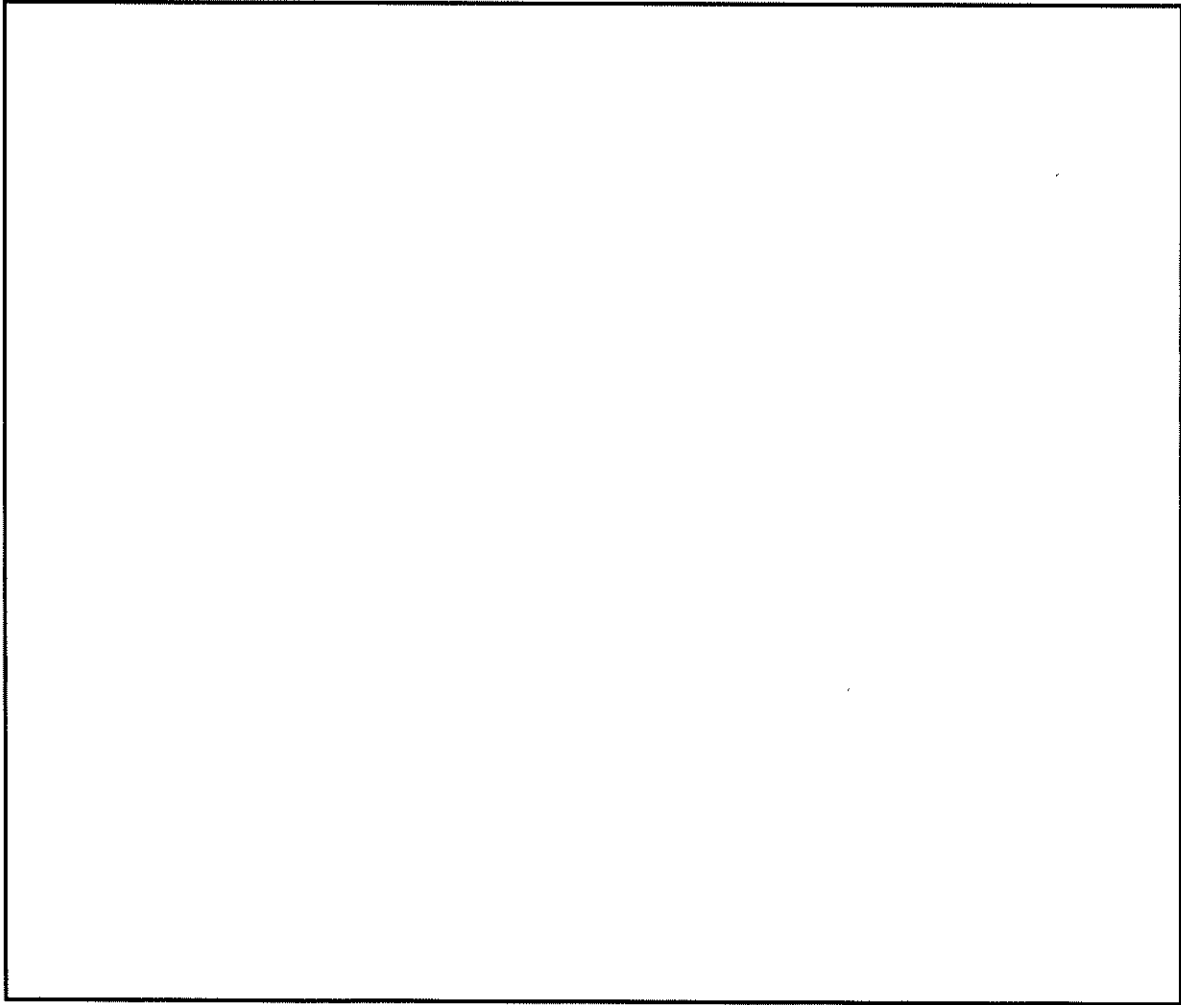
2-5-6-10



2-5-6-8 図 燃料有効部ガンマ線 トラニオン有りモデル (乾式キヤスク (タイプ1))

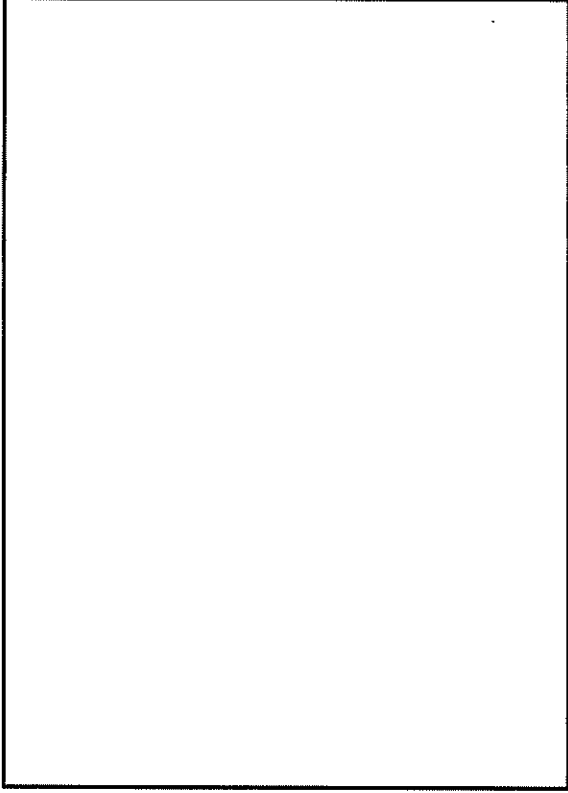


2-5-6-9 図 燃料有効部ガンマ線 トラニオン無しモデル (乾式キヤスク (タイプ1))

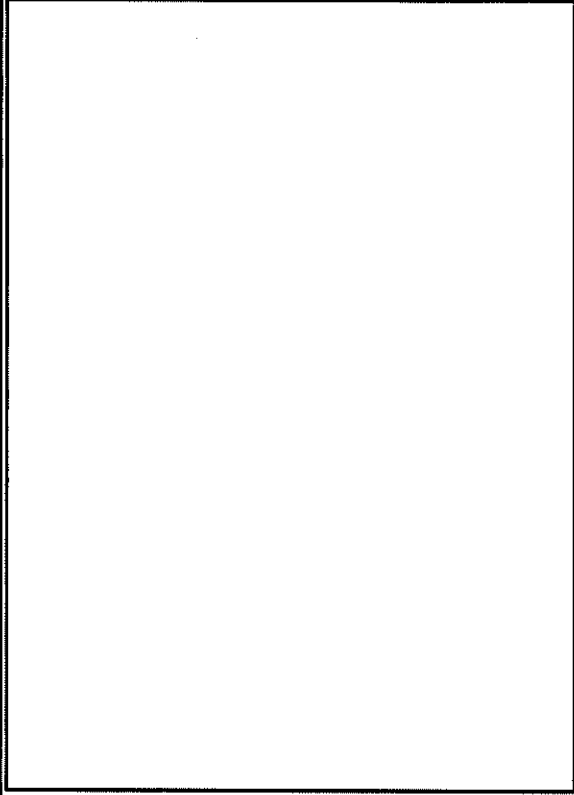


2-5-6-10 図 中性子 本体モデル (頭部) (脱式キャスク (タイプ1))

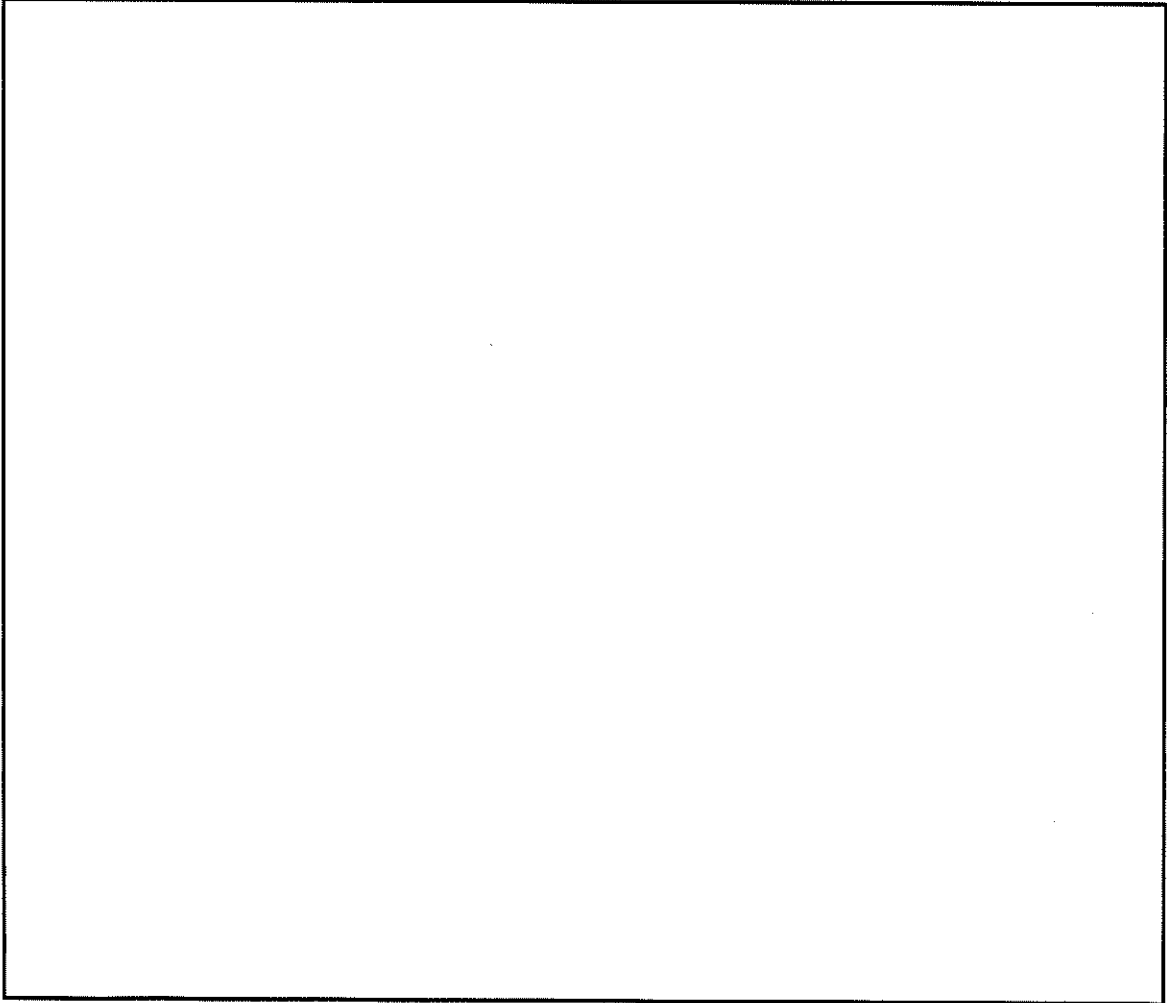
2-5-6-11



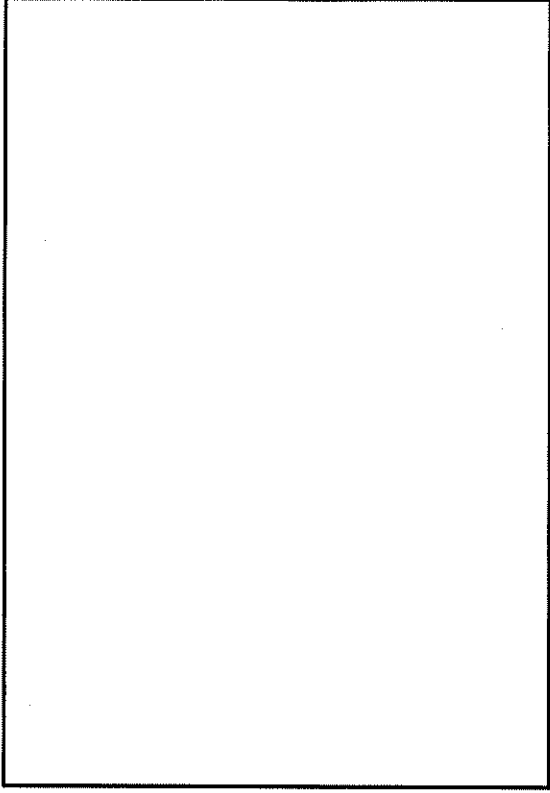
2-5-6-11 図 中性子 トラニオン有りモデル (脱式キャスク (タイプ1))



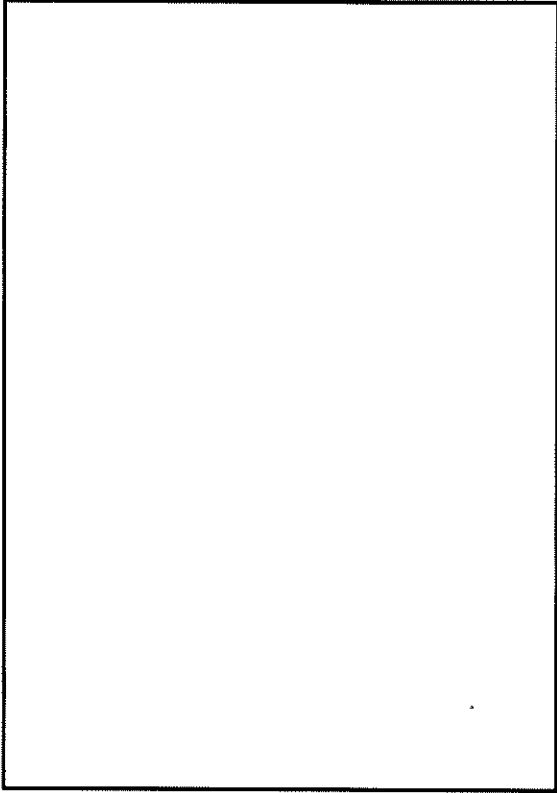
2-5-6-12 図 中性子 トラニオン無しモデル (脱式キャスク (タイプ1))



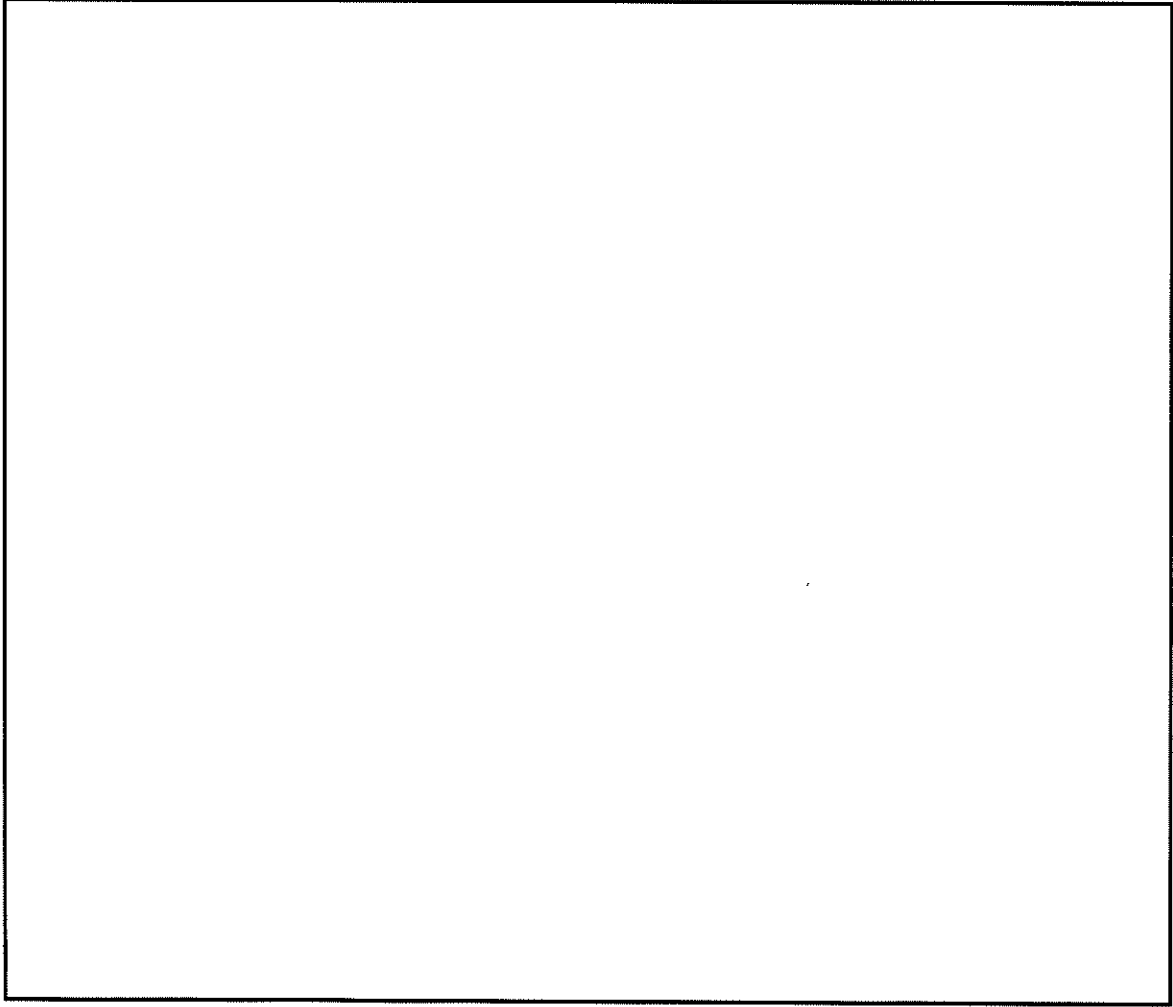
2-5-6-13 図 燃料有効部ガンマ線 本体モデル (頭部) (脱式キャスク (タイプ2))



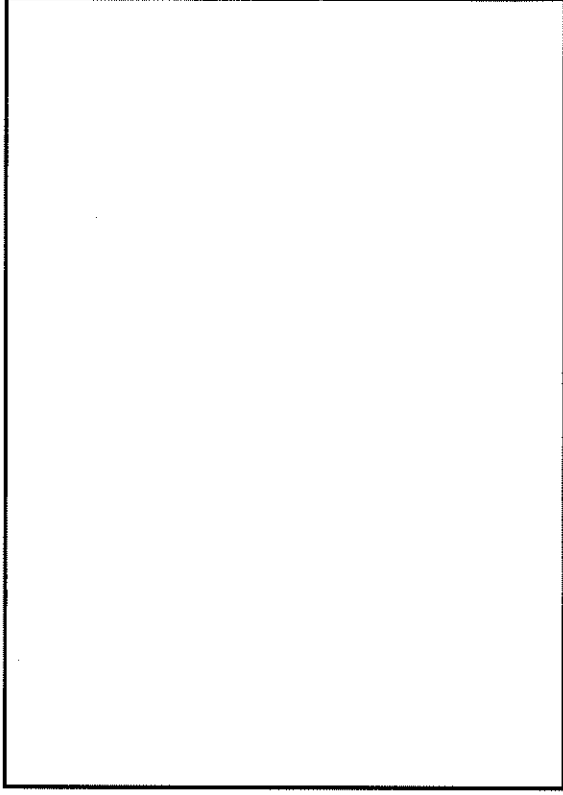
2-5-6-14 図 燃料有効部ガンマ線 トラニオン有りモデル (脱式キャスク (タイプ2))



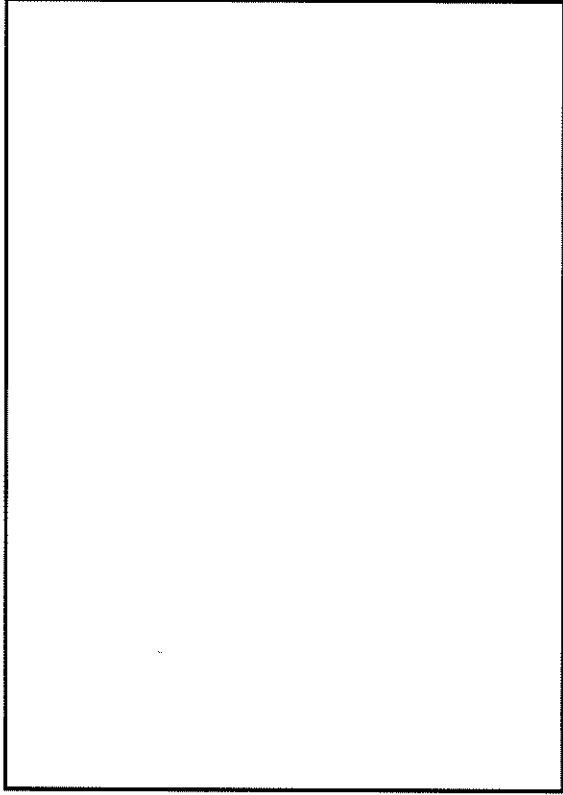
2-5-6-15 図 燃料有効部ガンマ線 トラニオン無しモデル (脱式キャスク (タイプ2))



2-5-6-16 図 中性子 本体モデル (頭部) (乾式キャスク (タイプ2))



2-5-6-17 図 中性子 トラニオン有りモデル (乾式キャスク (タイプ2))



2-5-6-18 図 中性子 トラニオン無しモデル (乾式キャスク (タイプ2))

2-5-7 中性子実効増倍率の設定について

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、線源強度評価に用いる中性子実効増倍率の設定方法について説明するものである。

中性子源強度は、体系の増倍効果を考慮して次式のとおり求める。

$$N_s = N_0 / (1 - keff)$$

ここで、

N_0 : キャスク 1 基当たりの一次中性子源強度

$keff$: 使用済燃料集合体を収納した場合のキャスクの実効増倍率

上記のとおり、乾燥状態において使用済燃料集合体を収納した場合のキャスクの実効増倍率を求め、中性子源強度に考慮した。実効増倍率の評価に用いた各使用済燃料集合体の条件、評価結果、及び線源強度設定に用いた実効増倍率を 2-5-7-1 表に示す。

なお、実効増倍率は、ORIGEN2.2UPJ コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及び中性子の吸収に対して寄与が大きな核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて、臨界解析で用いる KENO-VI コードにより求めた。なお、考慮している核種¹⁾は以下のとおりである。

アクチニド : ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu

核分裂生成物 : ^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{131}Xe , ^{133}Cs , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{147}Pm , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{153}Eu , ^{155}Gd

- 1) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 : 2013」, (2014).

2-5-7-1 表 実効増倍率評価条件及び評価結果

| 項目 | 14×14 燃料 (乾式キャスク (タイプ 1)) | 17×17 燃料 (乾式キャスク (タイプ 2)) |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ウラン重量 (kg/体) | | |
| 初期濃縮度 (%) | | |
| 燃焼度 (MWd/t) | 39,000 | 44,000 |
| 比出力 (MW/t) | | |
| 冷却日数 (日) | 9,131 | 5,479 |
| 実効増倍率 ^(注) | | |
| 遮蔽解析用実効増倍率 | 0.30 | 0.30 |

(注) 実効増倍率評価結果に統計誤差の 3 倍を足した値。

2-5-8 中性子源スペクトルを ^{239}Pu の
核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性について説明するものである。

中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性について下記に示す。

使用済燃料からの主要な中性子源としては、以下の 3 つが挙げられる。

1. 一次中性子源である自発核分裂による中性子
2. 一次中性子源である (α , n) 反応による中性子
3. 二次中性子源である核分裂反応により増倍される中性子

このうち、一次中性子源においては、2-5-8-1 図に示すとおり使用済燃料の場合、冷却期間が数十年までの間は自発核分裂による中性子が支配的である。また、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の収納使用済燃料集合体の中性子源強度は 2-5-8-1 表及び 2-5-8-2 表に示すとおりであり、2-5-8-1 図に示したとおり自発核分裂による中性子が支配的である。

2-5-8-1 表 乾式キャスク（タイプ 1）の収納使用済燃料集合体の中性子源強度
（金属キャスク 1 基当たり）

| | | 燃料有効部 | | |
|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | 合計 |
| 一次中性子源強度 No (n/s) | (α , n) 反応 | 1.094×10^8 | 7.003×10^7 | 1.794×10^8 |
| | 自発核分裂 | 5.674×10^9 | 2.314×10^9 | 7.988×10^9 |
| | 合計 | 5.783×10^9 | 2.384×10^9 | 8.167×10^9 |

2-5-8-2 表 乾式キャスク（タイプ 2）の収納使用済燃料集合体の中性子源強度
（金属キャスク 1 基当たり）

| | | 燃料有効部 | | |
|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | 合計 |
| 一次中性子源強度 No (n/s) | (α , n) 反応 | 9.369×10^7 | 7.472×10^7 | 1.684×10^8 |
| | 自発核分裂 | 4.909×10^9 | 3.360×10^9 | 8.269×10^9 |
| | 合計 | 5.003×10^9 | 3.435×10^9 | 8.437×10^9 |

よって、中性子源スペクトルの候補は下記の 3 つとなる（主要な核分裂核種）。

- ① Cm の自発核分裂反応
- ② ^{239}Pu の核分裂反応
- ③ ^{235}U の核分裂反応

ここで、Cm の自発核分裂及び ^{239}Pu ・ ^{235}U の核分裂による中性子源スペクトルの比較を 2-5-8-2 図及び 2-5-8-3 図に示す。

2-5-8-2 図に示すとおり、 ^{242}Cm 、 ^{244}Cm の自発核分裂による中性子源スペクトルに対して ^{239}Pu の核分裂による中性子源スペクトルのほうがより高エネルギー成分が多い。

また、2-5-8-3 図に示すとおり、 ^{235}U の核分裂による中性子源スペクトルに対しても ^{239}Pu の核分裂による中性子源スペクトルが高エネルギー成分が多い。

よって、中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定は保守側の設定であり妥当である。

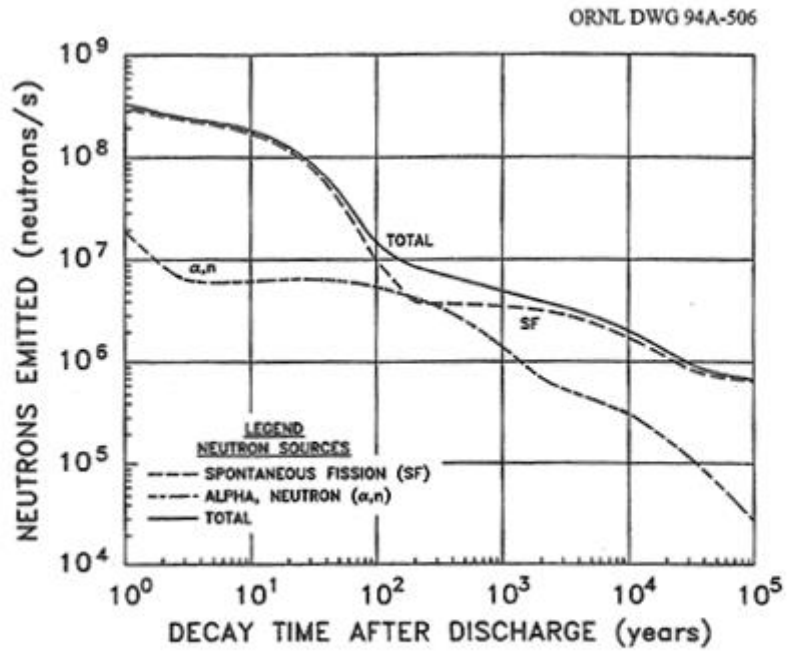


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

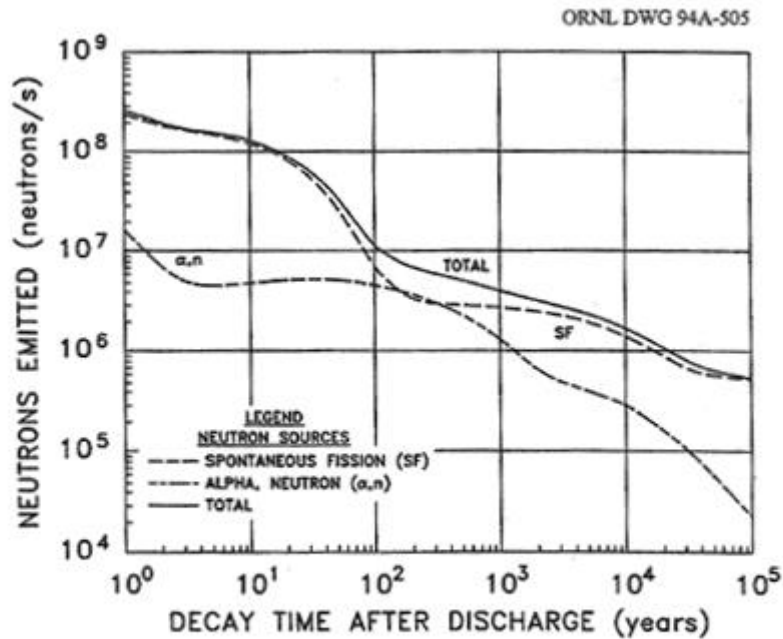
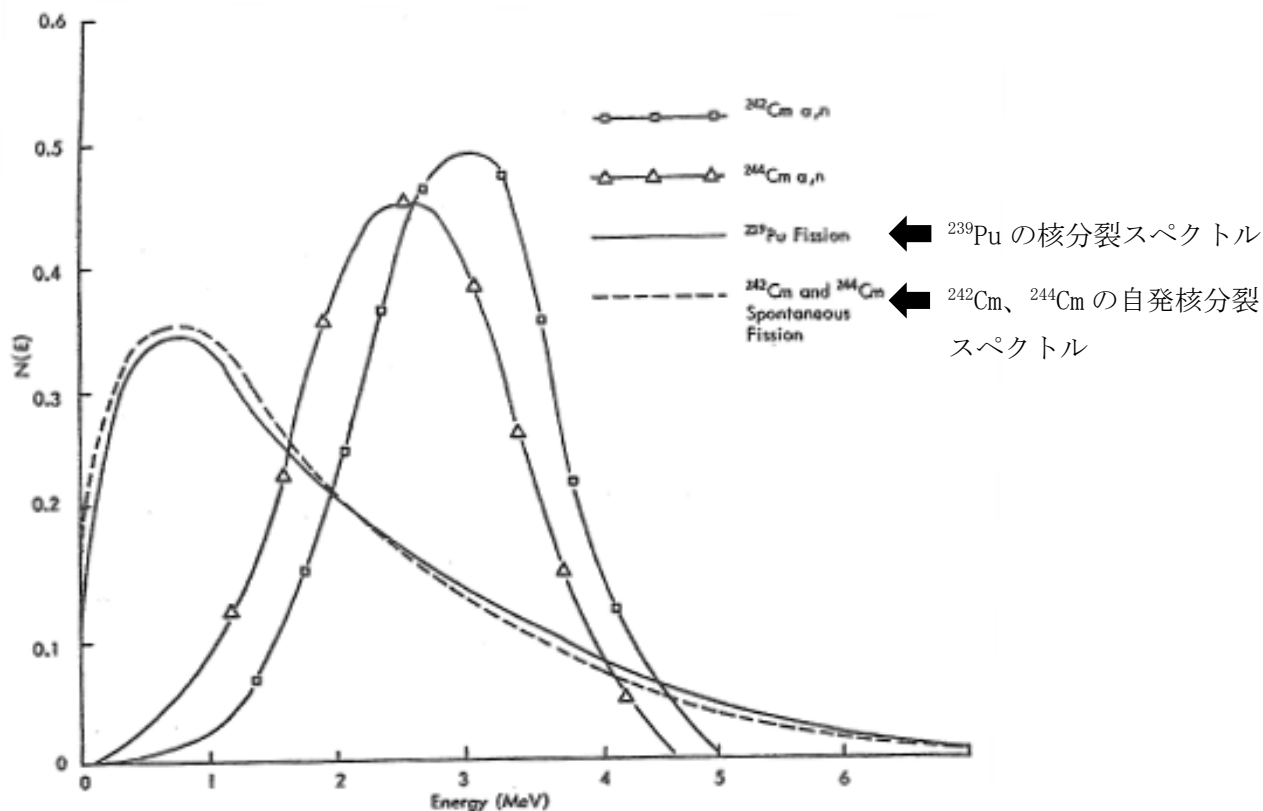


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

出典 L. B. Shappert, et al., "The Radioactive Materials Packaging Handbook",
ORNL/M-5003, Oak Ridge National Laboratory, 9-9, (1998).

2-5-8-1 図 自発核分裂及び (α, n) 反応に伴う中性子源強度と冷却期間との関係



Neutron emission spectra for several sources.

出典 H. S. Bailey, R. N. Evatt, G. L. Gyorey, et al., "Neutron Shielding Problems in the Shielding of High Burnup Thermal Reactor Fuel", Nuclear Technology, ANS, 17, 222, (1973).

2-5-8-2 図 ^{239}Pu の核分裂、Cm の自発核分裂中性子源スペクトルの比較

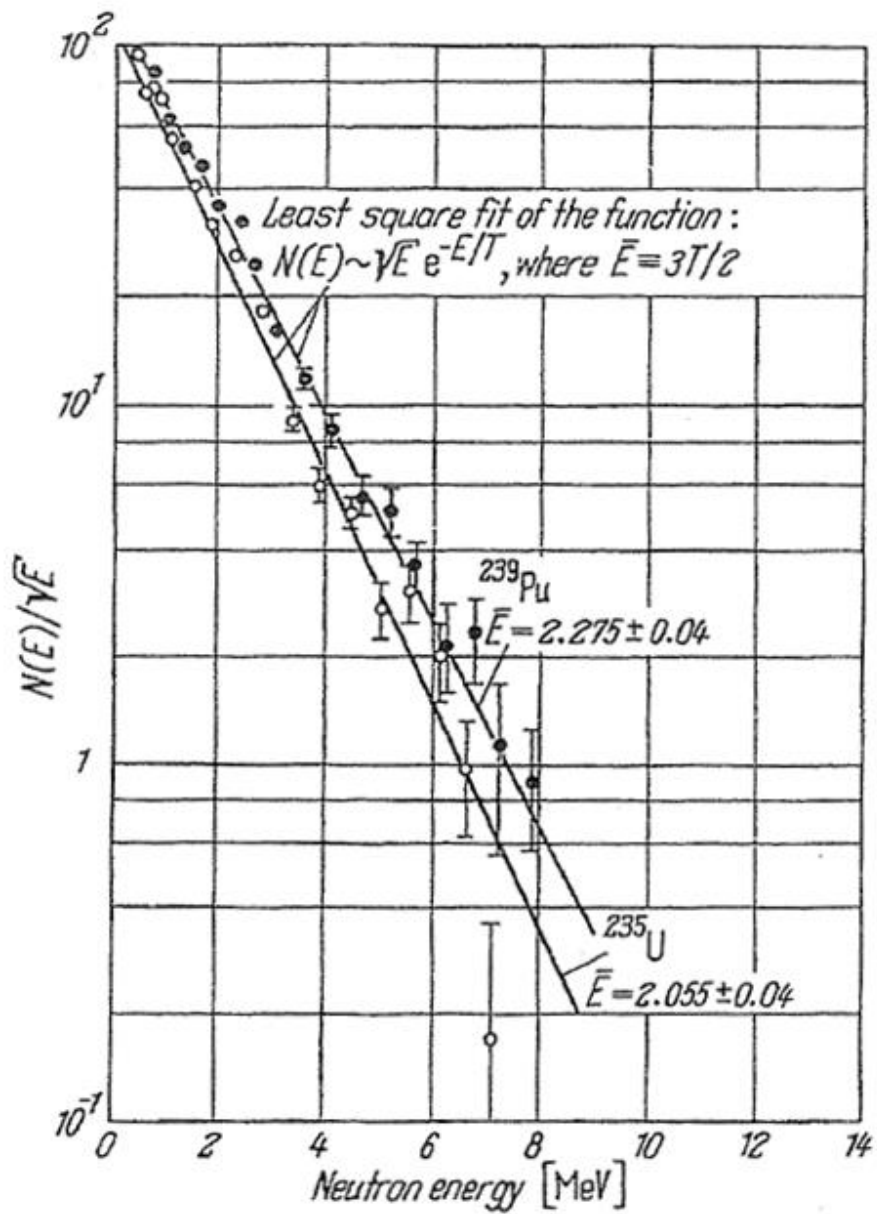


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

出典 E. D. Arnold, R. G. Jaeger, et. al., "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Volume I Shielding Fundamentals and Methods, Springer-Verlag, Germany, 69 (1968).

2-5-8-3 図 ^{239}Pu 、 ^{235}U の核分裂中性子源スペクトルの比較

2-5-9 三次元解析による二次元解析モデル設定の

妥当性確認

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、三次元解析による二次元解析モデル設定の妥当性について説明するものである。

DOT3.5 による二次元モデル解析（以下、「DOT3.5 解析」という。）の解析モデル設定の妥当性を、MCNP5 による三次元モデル解析（以下、「MCNP 解析」という。）による評価結果との比較にて確認した。

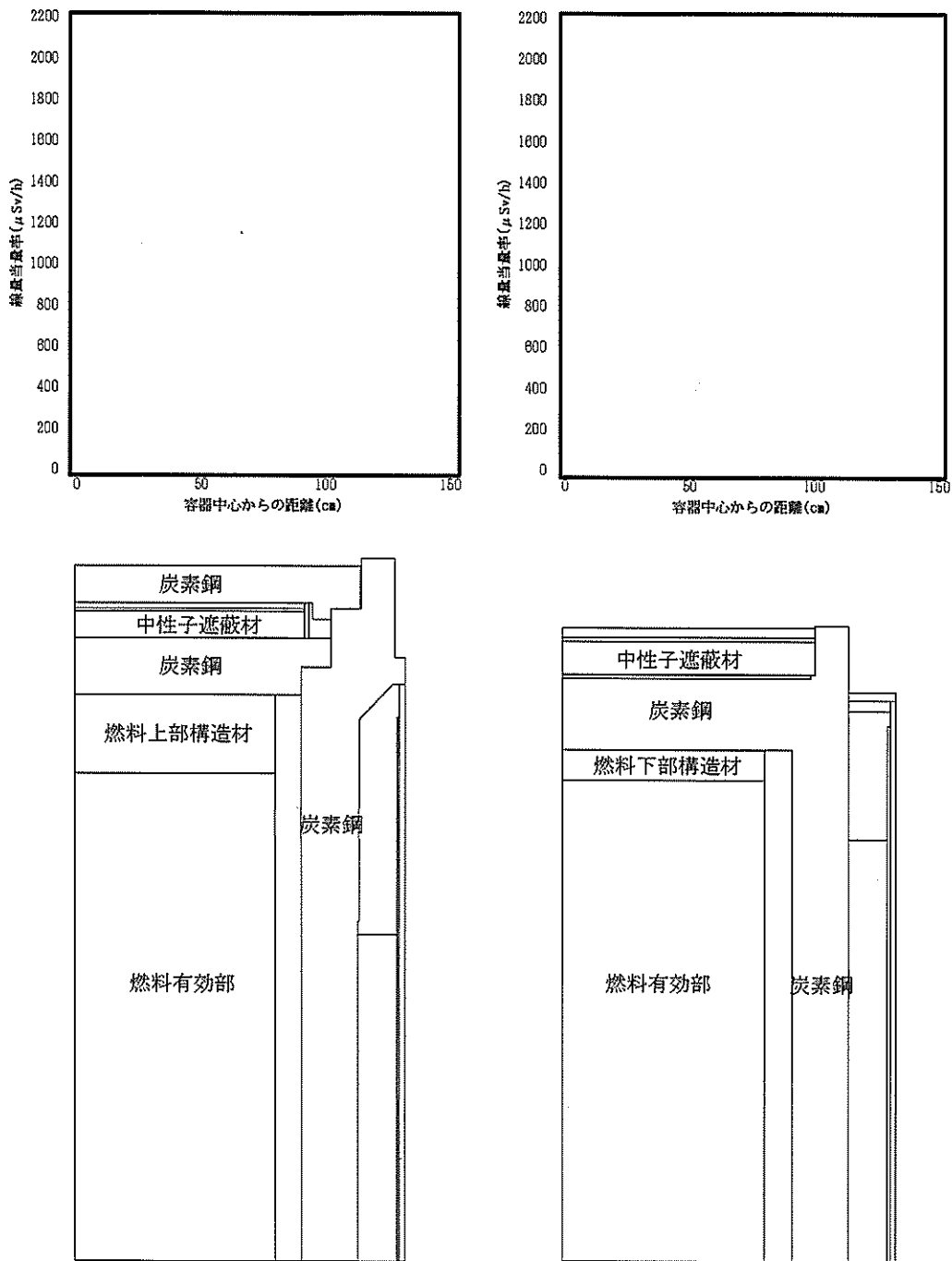
MCNP 解析の主要な評価条件は、2-5-9-1 表に示すとおりである。

DOT3.5 解析及び MCNP 解析における頭部、側部、底部方向の線量当量率分布の比較を 2-5-9-1 図から 2-5-9-8 図に示す。

2-5-9-1 図から 2-5-9-8 図に示すとおり、DOT3.5 解析結果が MCNP 解析結果を包絡する、または同等の結果であり、DOT3.5 解析結果及び解析モデル設定は妥当であることを確認した。

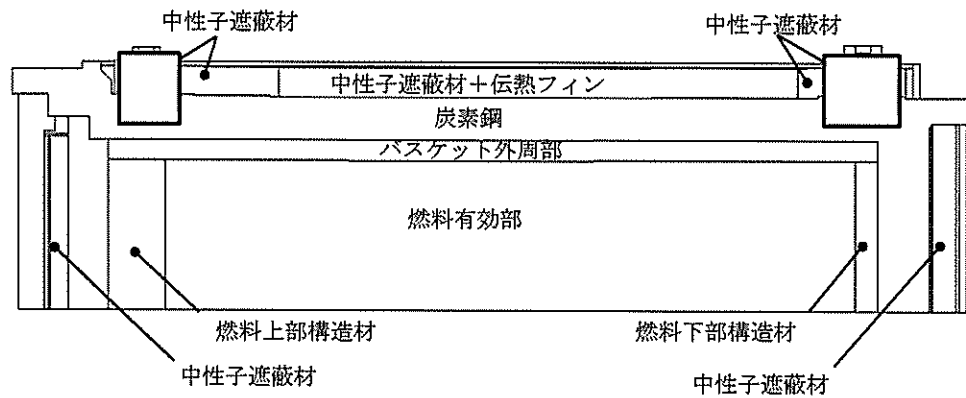
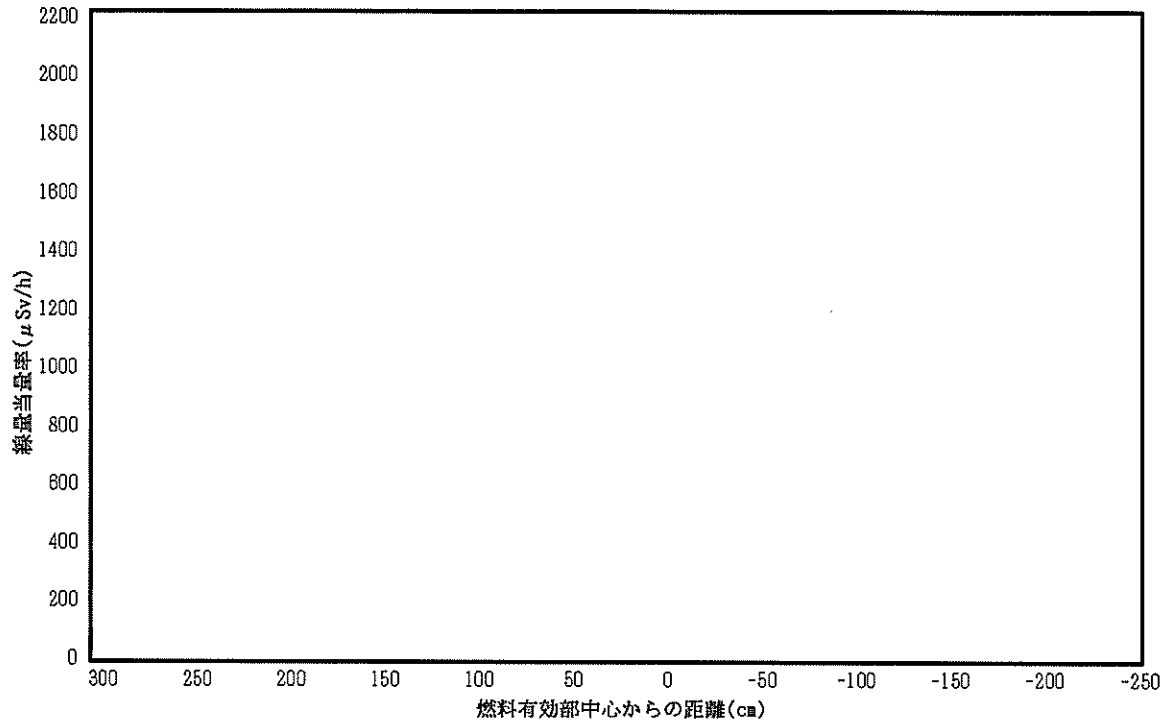
2-5-9-1 表 MCNP 解析の主要な評価条件

| 項目 | | 解析条件 |
|-------------------|-------|-------------------------------------|
| 解析コード | | MCNP5 Ver1.60 |
| 断面積ライブラリ | | FSXLIB-J33 (中性子) MCPLIB84 (ガンマ線) |
| 燃料有効部 | 群構造 | ORIGEN 群構造 (18 群) |
| ガンマ線源強度 | スペクトル | ORIGEN 評価値 |
| 構造材放射化 ガンマ線源強度 | 群構造 | 1.17MeV 1.33MeV |
| | スペクトル | 1.17MeV : 50% 1.33MeV : 50% |
| 中性子源強度 | 群構造 | 連続エネルギー |
| | スペクトル | Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトル |
| タリー | | メッシュタリー |
| 分散低減法 | | ウェイト・ウィンドウ |



(注)DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの無い方向の MCNP 解析値とした（一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの影響は資料 2-5-10 にて確認）。

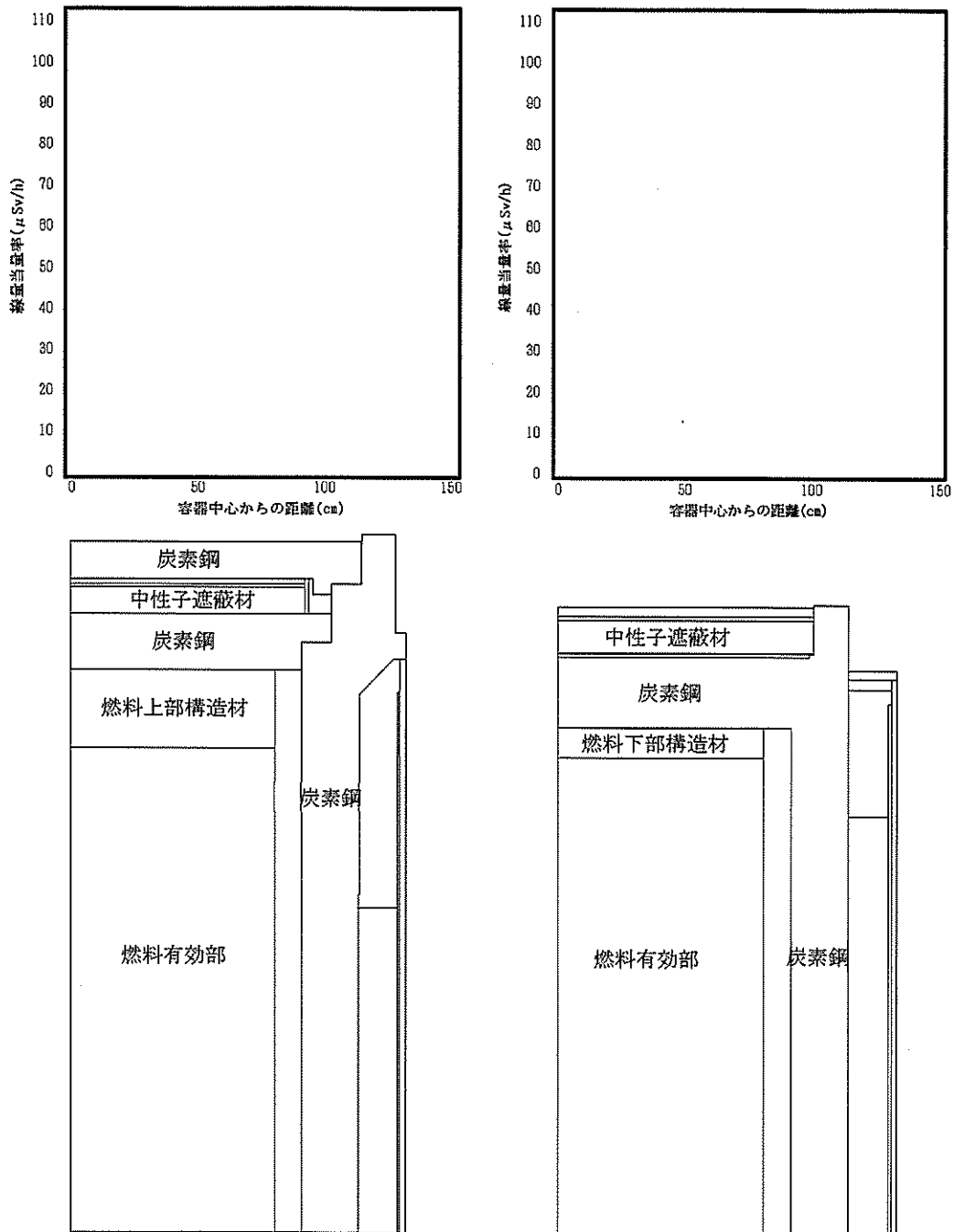
2-5-9-1 図 表面の線量当量率分布（頭部軸方向・底部軸方向）（乾式キャスク（タイプ 1））



(注1) DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、周方向の最大となる方向の MCNP 解析値とした (トランニオン方向も含まれる)。

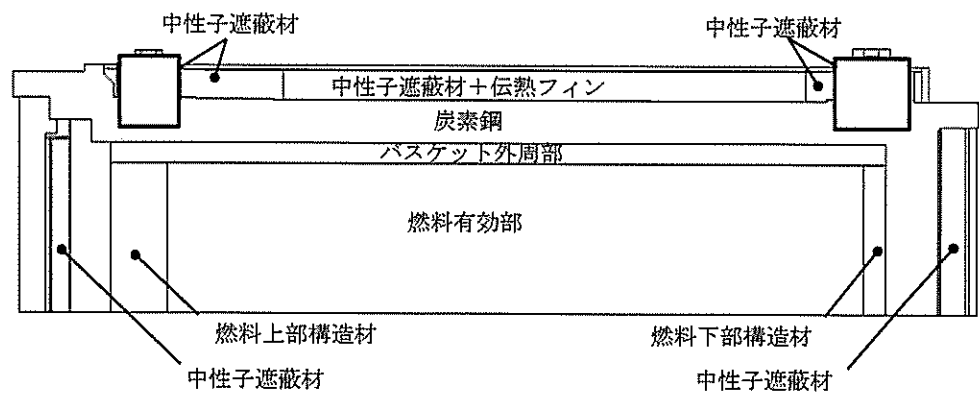
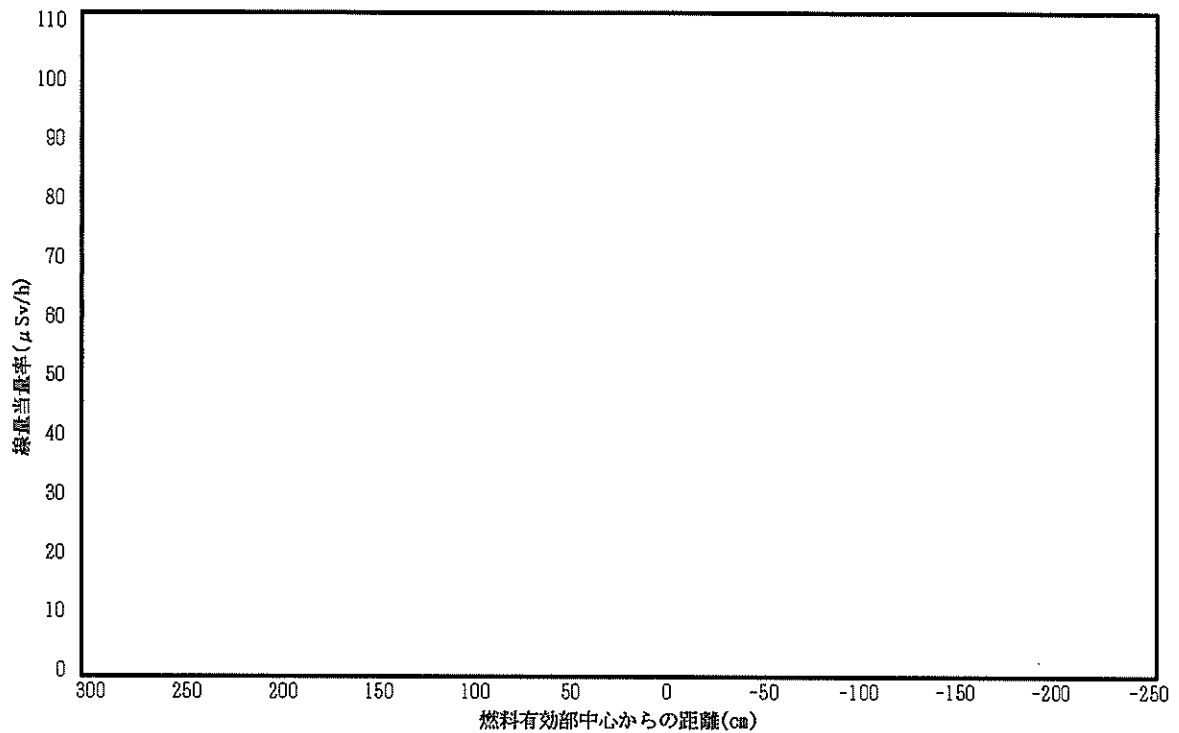
(注2) 頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトランニオン方向の分布を重ねて明示した。

2-5-9-2 図 表面の線量当量率分布
 (頭部径方向・側部・底部径方向 (トランニオン方向含む))
 (乾式キャスク (タイプ1))



(注)DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの無い方向の MCNP 解析値とした (一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの影響は資料 2-5-10 にて確認)。

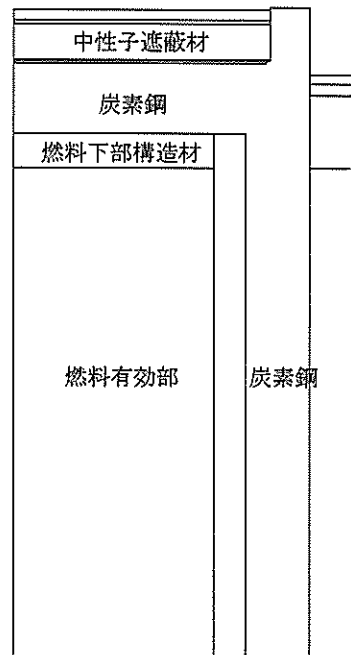
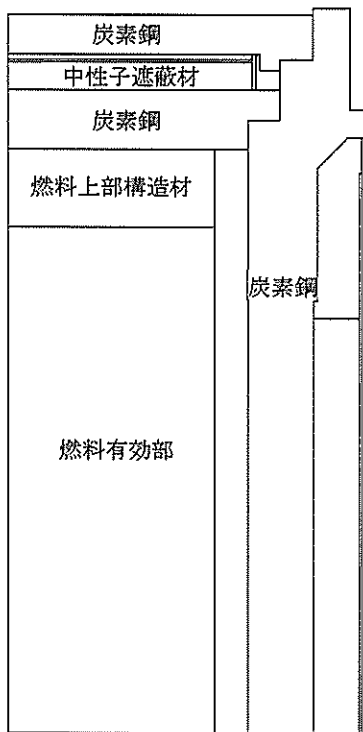
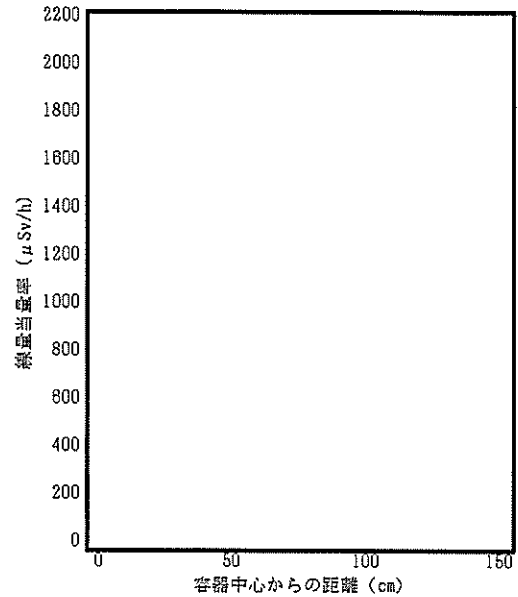
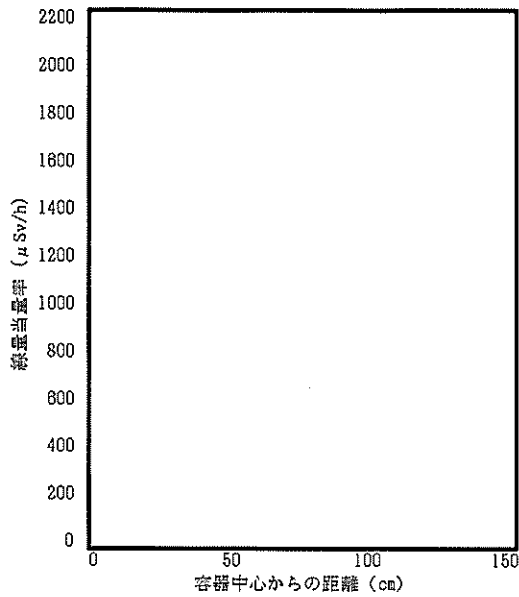
2-5-9-3 図 表面から 1m 離れた位置の線量当量率分布
(頭部軸方向・底部軸方向) (乾式キャスク (タイプ 1))



(注1) DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、周方向の最大となる方向の MCNP 解析値とした (トランニオン方向も含まれる)。

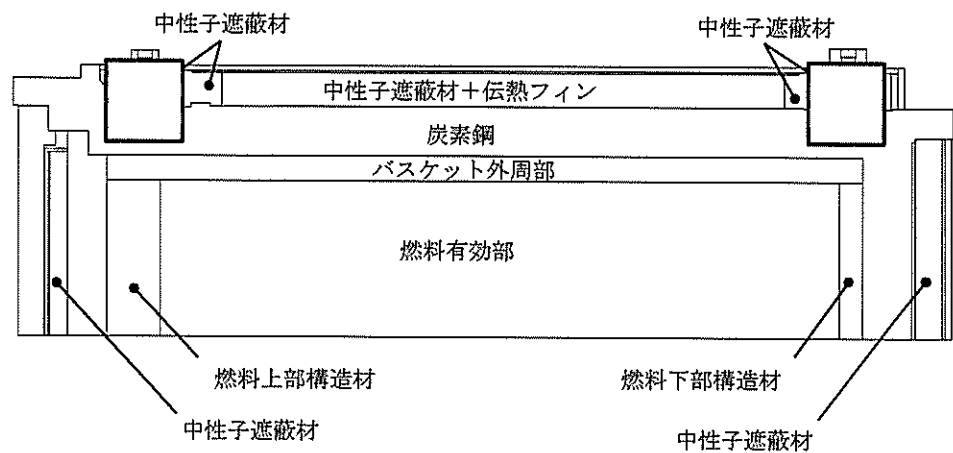
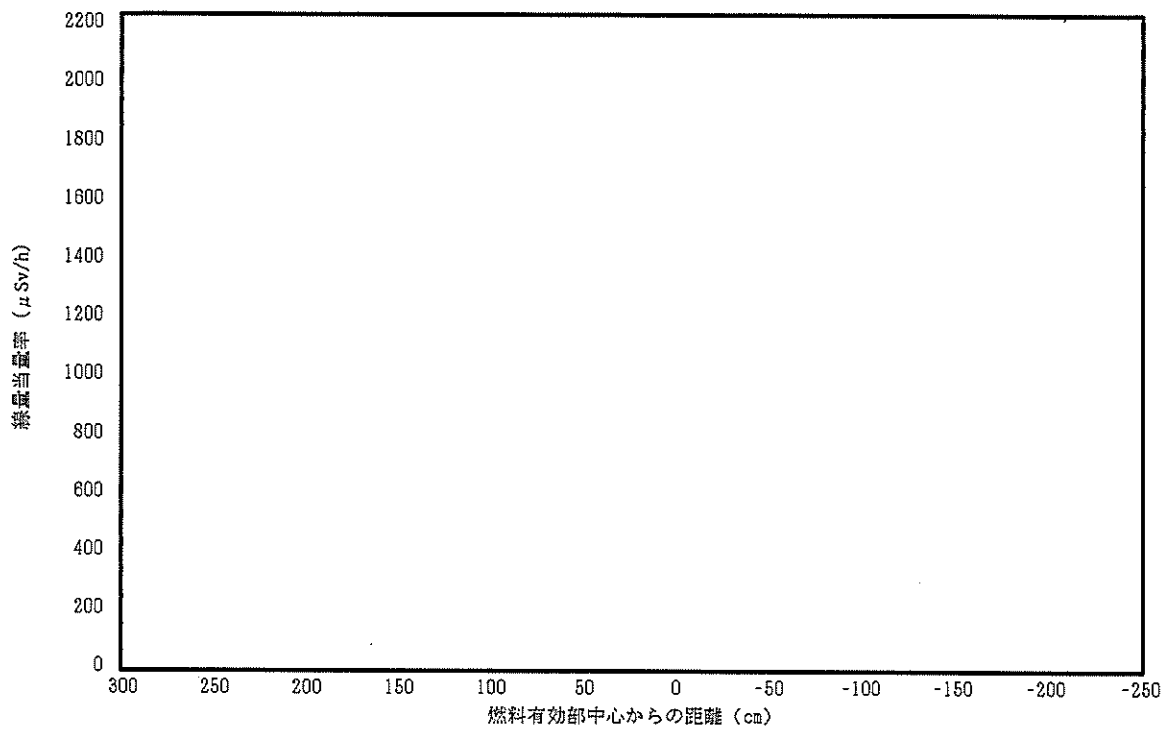
(注2) 頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトランニオン方向の分布を重ねて明示した。

2-5-9-4 図 表面から 1 m 離れた位置の線量当量率分布
(頭部径方向・側部・底部径方向 (トランニオン方向含む))
(乾式キャスク (タイプ 1))



(注) DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの無い方向の MCNP 解析値とした (一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの影響は資料 2-5-10 にて確認)。

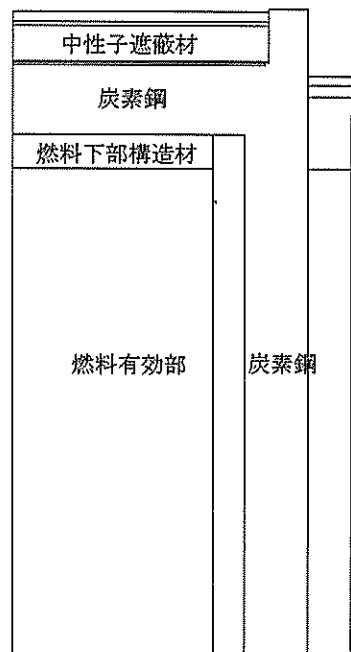
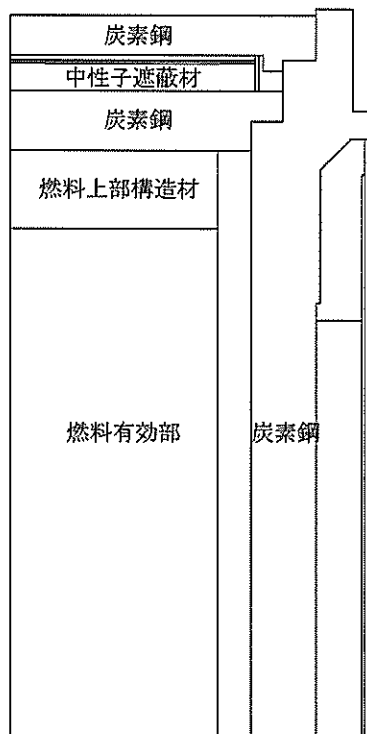
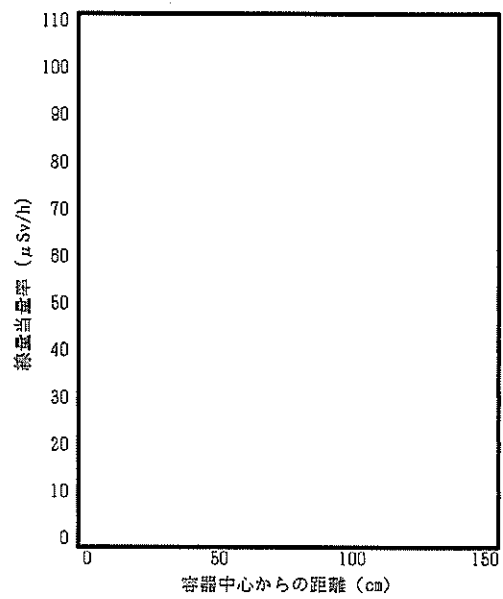
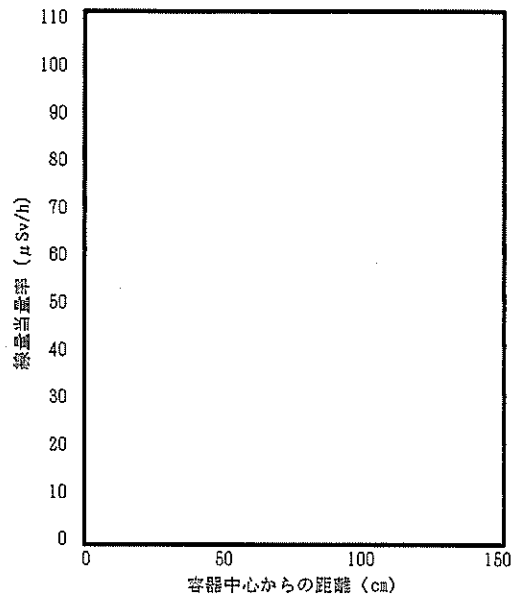
2-5-9-5 図 表面の線量当量率分布 (頭部軸方向・底部軸方向) (乾式キャスク (タイプ 2))



(注1) DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、周方向の最大となる方向の MCNP 解析値とした (トランニオン方向も含まれる)。

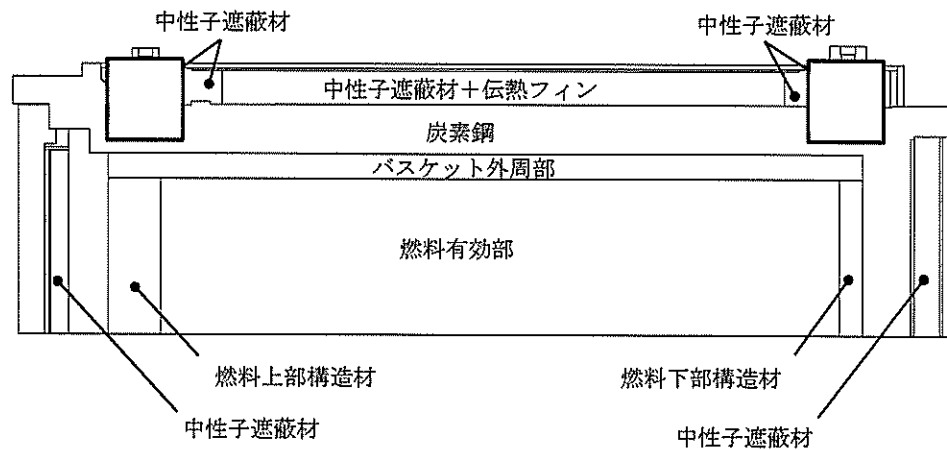
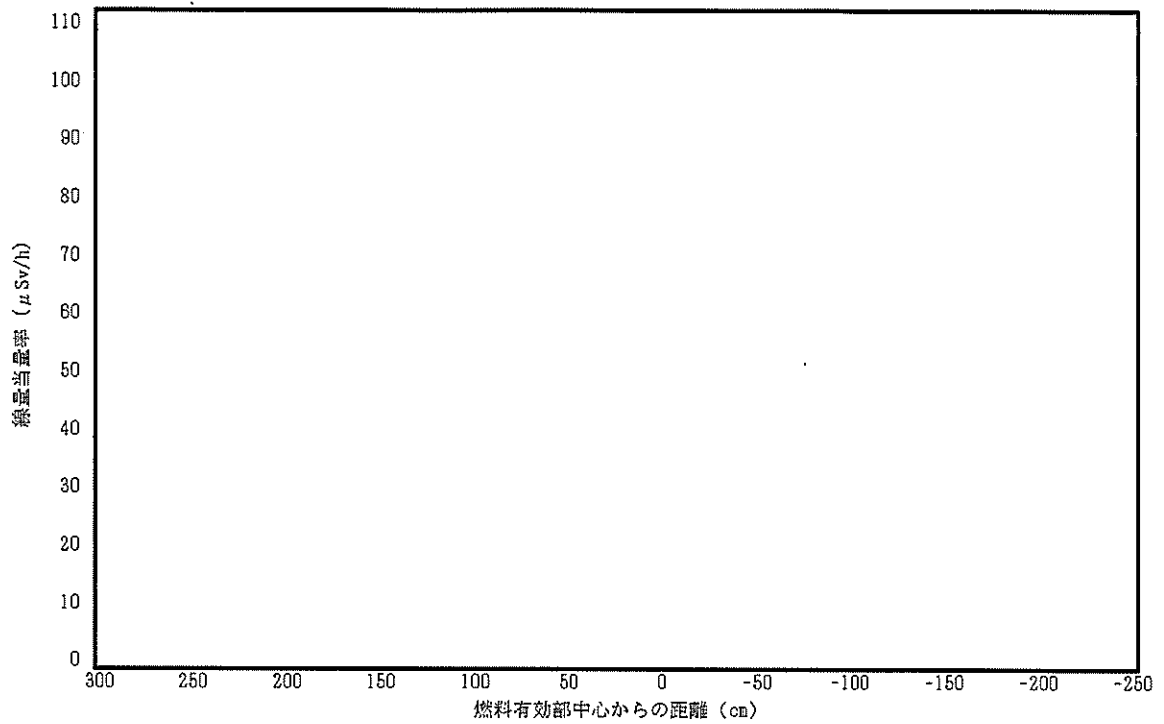
(注2) 頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトランニオン方向の分布を重ねて明示した。

2-5-9-6 図 表面の線量当量率分布
(頭部径方向・側部・底部径方向 (トランニオン方向含む))
(乾式キャスク (タイプ2))



(注)DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの無い方向の MCNP 解析値とした（一次蓋ドレン・ベントバルブ及び二次蓋モニタリングポートの影響は資料 2-5-10 にて確認）。

2-5-9-7 図 表面から 1 m 離れた位置の線量当量率分布
(頭部軸方向・底部軸方向) (乾式キャスク (タイプ 2))



(注 1) DOT3.5 解析値と MCNP 解析値の比較用に、周方向の最大となる方向の MCNP 解析値とした (トランニオン方向も含まれる)。

(注 2) 頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトランニオン方向の分布を重ねて明示した。

2-5-9-8 図 表面から 1m 離れた位置の線量当量率分布
(頭部径方向・側部・底部径方向 (トランニオン方向含む))
(乾式キャスク (タイプ 2))

2-5-10 一次蓋のドレン・ベントバルブ及び
二次蓋のモニタリングポートの影響

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、一次蓋のドレン・ベントバルブ及び二次蓋のモニタリングポートの影響について説明するものである。

一次蓋のドレン・ベントバルブ及び二次蓋のモニタリングポートの線量当量率評価結果への影響について、三次元解析コード MCNP5 を用いて確認した（DOT3.5 解析では当該形状はモデル化していない）。

ドレン・ベントバルブ及びモニタリングポートの構造図及び評価点位置を 2-5-10-1 図から 2-5-10-4 図に示す。MCNP 解析の主要な評価条件は 2-5-10-1 表に示すとおりである。

MCNP 解析と DOT3.5 解析の線量当量率評価結果の比較を 2-5-10-2 表に示す。

ドレン・ベントバルブ部においては、MCNP 解析が DOT3.5 解析の線量当量率評価結果より約 3 % 高くなるが、DOT3.5 解析の最大線量当量率結果（底部径方向）に対しては下回る。

以上より、ドレン・ベントバルブ及びモニタリングポートによる線量当量率結果への有意な影響は無い。

2-5-10-1 表 MCNP 解析の主要な評価条件

| 項目 | | 解析条件 |
|-------------------|-------|-----------------------------------|
| 解析コード | | MCNP5 Ver1.60 |
| 断面積ライブラリ | | FSXLIB-J33（中性子） MCPLIB84（ガンマ線） |
| 燃料有効部 ガンマ線源強度 | 群構造 | ORIGEN 群構造（18 群） |
| | スペクトル | ORIGEN 評価値 |
| 構造材放射化 ガンマ線源強度 | 群構造 | 1.17MeV 1.33MeV |
| | スペクトル | 1.17MeV : 50% 1.33MeV : 50% |
| 中性子源強度 | 群構造 | 連続エネルギー |
| | スペクトル | Watt 型 ²³⁹ Pu 核分裂スペクトル |
| タリー | | メッシュタリー |
| 分散低減法 | | ウェイト・ウィンドウ |

2-5-10-2 表(1/2) ドレン・ベントバルブ及びモニタリングポート位置の
線量当量率比較（乾式キャスク（タイプ1））

（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

| 評価点 | | | MCNP 解析 | | DOT3.5 解析 | |
|-----|------|--------|---------|----------------|-----------|--------|
| | | | バルブ部 | モニタリング ポート部 | 最大線量当量率 | |
| | | | | | 頭部軸方向 | 全体 |
| 表面 | ガンマ線 | 燃料有効部 | <0.1 | 1.9 | <0.1 | 3.0 |
| | | 構造材放射化 | 0.8 | 43.9 | 0.4 | 6.2 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.7 | 1.1 | 0.7 | 7.1 |
| | 中性子 | | 221.9 | 57.5 | 262.8 | 1548.1 |
| | 合計 | | 223.5 | 104.4 | 264.0 | 1564.4 |
| | 基準値 | | 2,000 | | | |

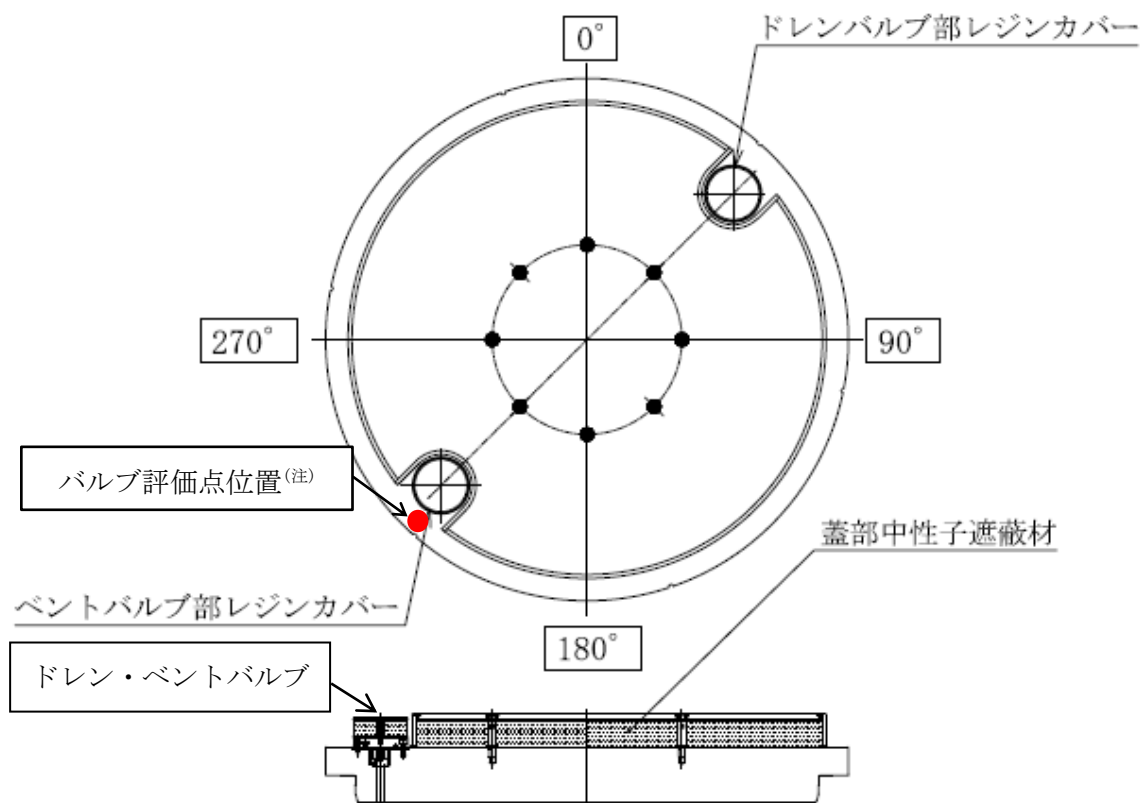
（注）0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

2-5-10-2 表(2/2) ドレン・ベントバルブ及びモニタリングポート位置の
線量当量率比較（乾式キャスク（タイプ2））

（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

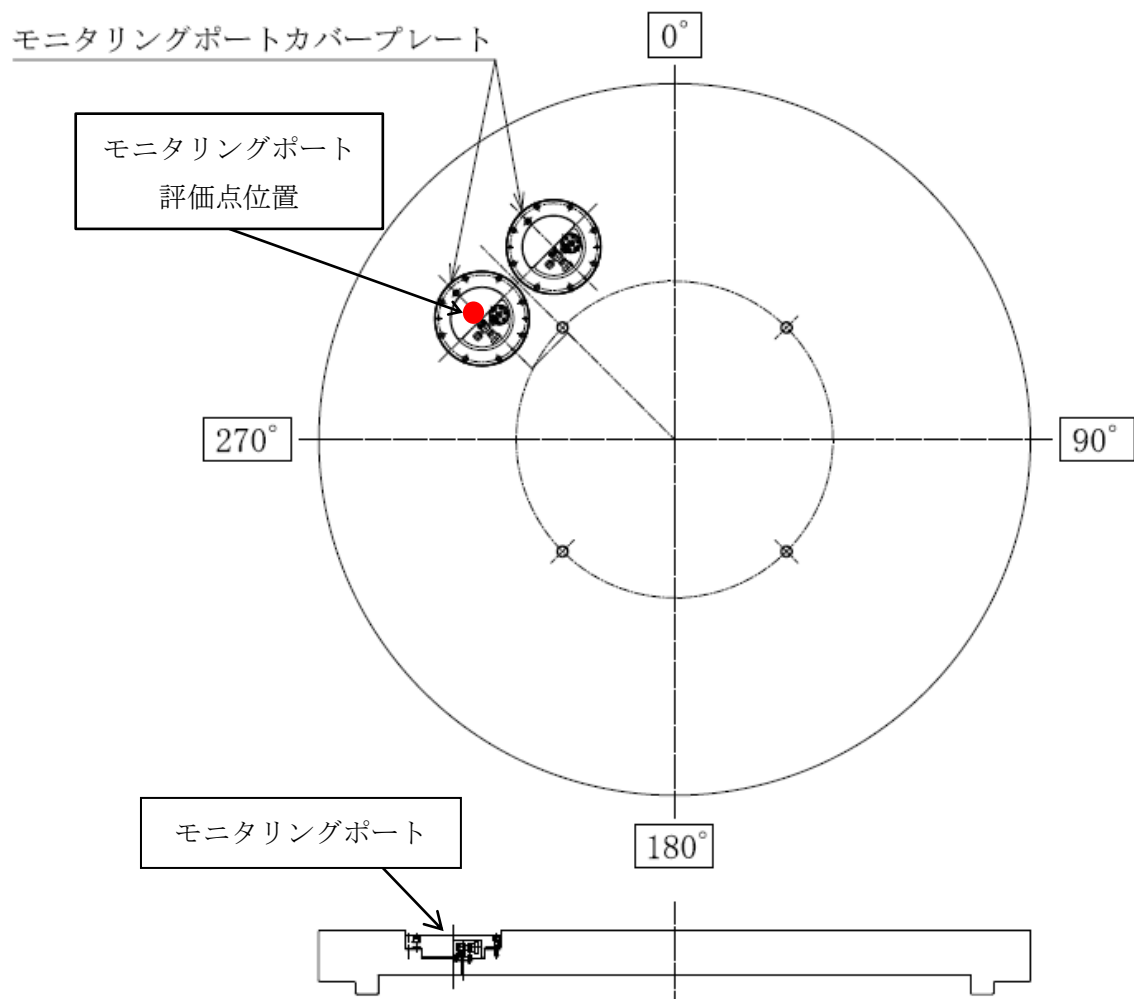
| 評価点 | | | MCNP 解析 | | DOT3.5 解析 | |
|-----|------|--------|---------|----------------|-----------|--------|
| | | | バルブ部 | モニタリング ポート部 | 最大線量当量率 | |
| | | | | | 頭部軸方向 | 全体 |
| 表面 | ガンマ線 | 燃料有効部 | <0.1 | 1.8 | <0.1 | 4.0 |
| | | 構造材放射化 | 1.1 | 25.7 | 0.4 | 6.6 |
| | | 二次ガンマ線 | 1.2 | 1.4 | 0.8 | 7.4 |
| | 中性子 | | 341.3 | 99.7 | 333.7 | 1807.3 |
| | 合計 | | 343.7 | 128.6 | 335.0 | 1825.3 |
| | 基準値 | | 2,000 | | | |

（注）0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

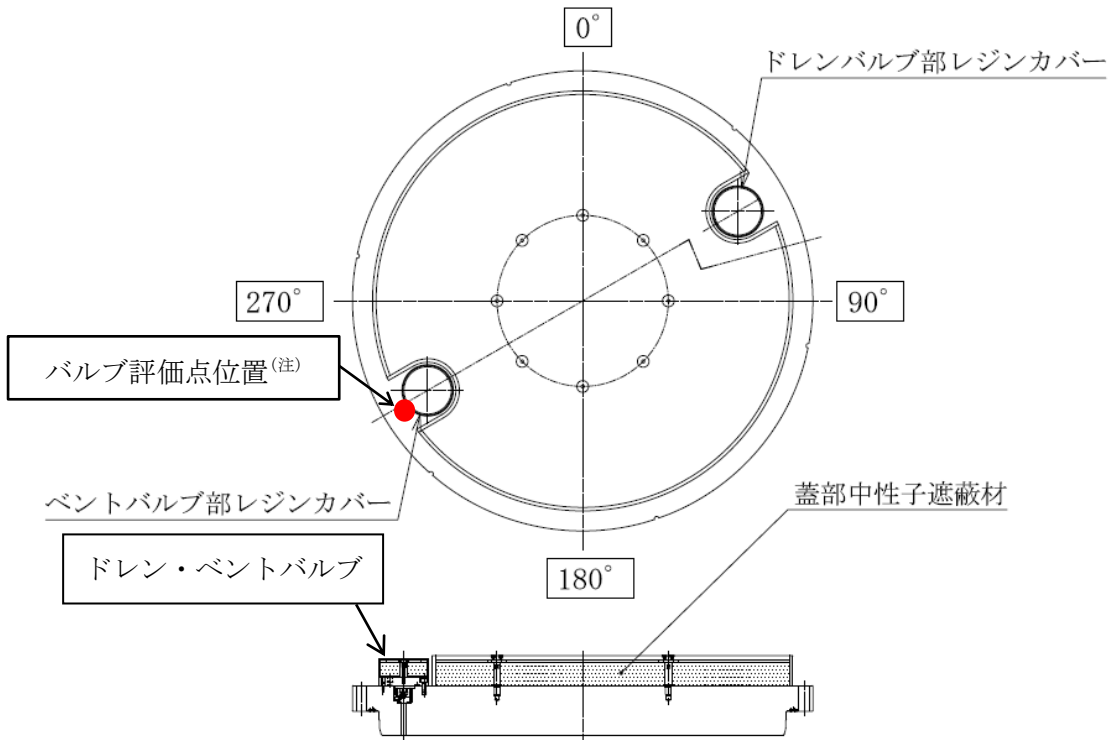


(注) 当該位置に対する表面（二次蓋外面）の評価点を指す。
ドレンバルブとベントバルブで形状は同じである。

2-5-10-1 図 一次蓋のドレン・ベントバルブ構造図及び評価点位置
(乾式キャスク (タイプ1))

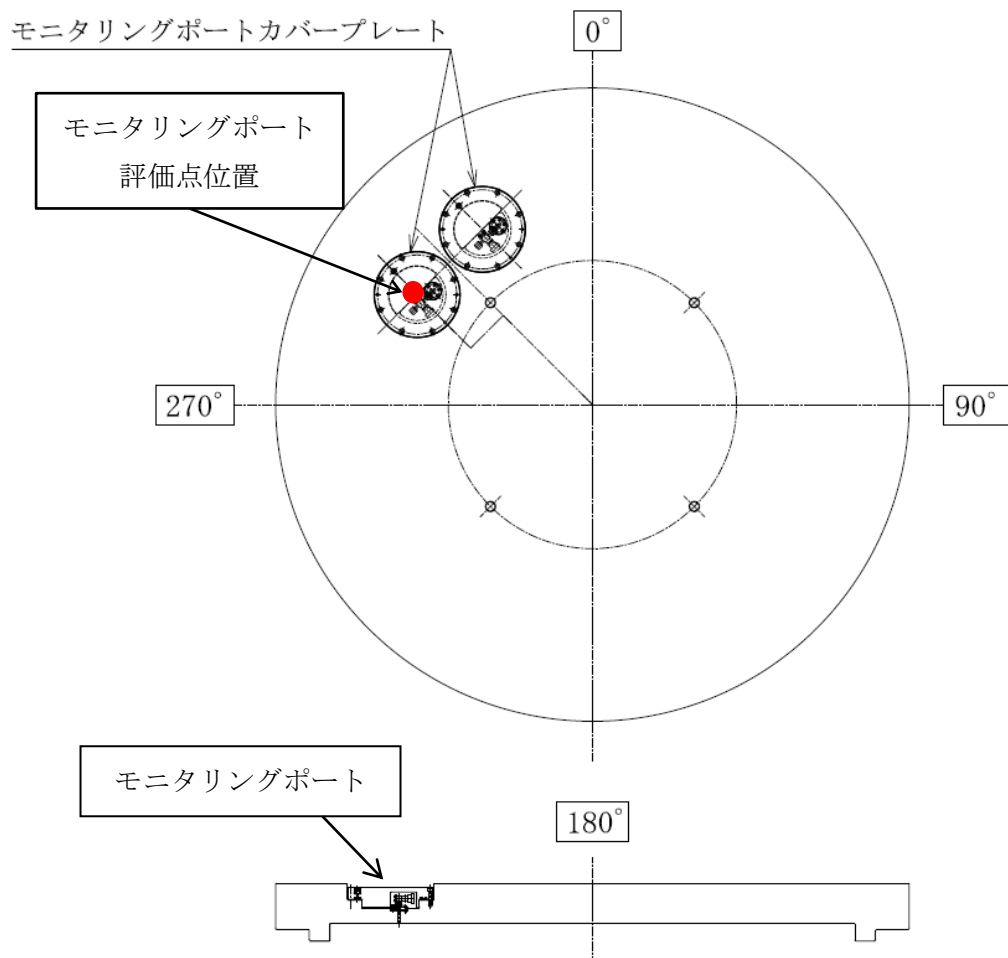


2-5-10-2 図 二次蓋のモニタリングポート構造図及び評価点位置
(乾式キャスク (タイプ1))



(注) 当該位置に対する表面（二次蓋外面）の評価点を指す。
ドレンバルブとベントバルブで形状は同じである。

2-5-10-3 図 一次蓋のドレン・ベントバルブ構造図及び評価点位置
(乾式キャスク (タイプ2))



2-5-10-4 図 二次蓋のモニタリングポート構造図及び評価点位置
(乾式キャスク (タイプ2))

2-5-11 異なる燃料型式収納時の線量当量率評価

本資料は資料 14「使用済燃料貯蔵容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に関する説明書において使用する、異なる燃料型式収納時の線量当量率評価について説明するものである。

資料 2-5-2 では、放射線源強度（以下、「線源強度」という。）の高い下記に示す使用済燃料集合体を収納した場合を対象として線量当量率評価を実施した。

乾式キャスク（タイプ 1）：14×14 燃料（B 型）

乾式キャスク（タイプ 2）：17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）

異なる燃料型式を収納した場合の線量当量率が資料 2-5-2 に示す線量当量率に包絡されることを確認するため、下記に示す使用済燃料集合体を収納した場合を対象として線量当量率評価を実施した。

乾式キャスク（タイプ 1）：14×14 燃料（A 型）

乾式キャスク（タイプ 2）：17×17 燃料 48,000MWd/t 型（B 型）

各燃料型式の最大線量当量率結果の比較を 2-5-11-1 表及び 2-5-11-2 表に示す。また、最大線量当量率となる評価点位置の概略図を 2-5-11-1 図から 2-5-11-4 図に示す。

2-5-11-1 表及び 2-5-11-2 表のとおり、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）において、異なる燃料型式収納時は、資料 2-5-2 で対象とした燃料型式収納時の表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率に包絡される。

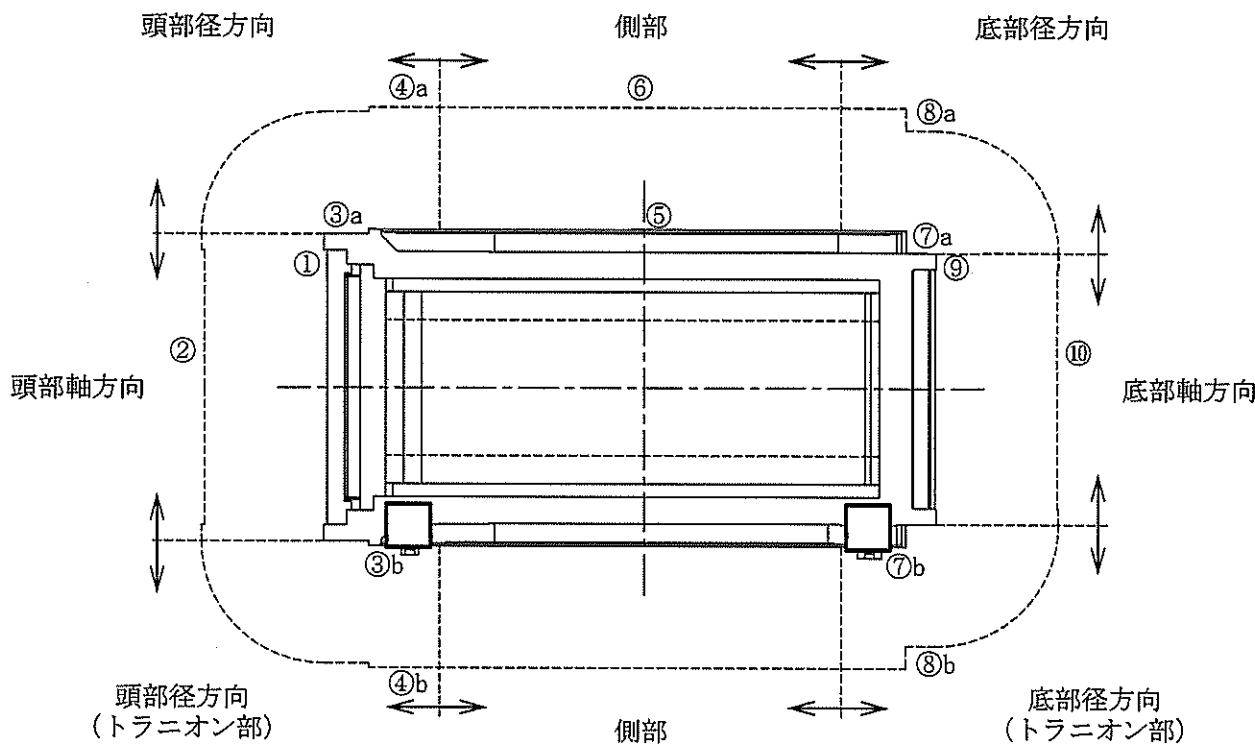
2-5-11-1 表 14×14 燃料（A型）／14×14 燃料（B型）収納時の最大線量当量率比較（乾式キャスク（タイプ1））

（単位：μSv/h）

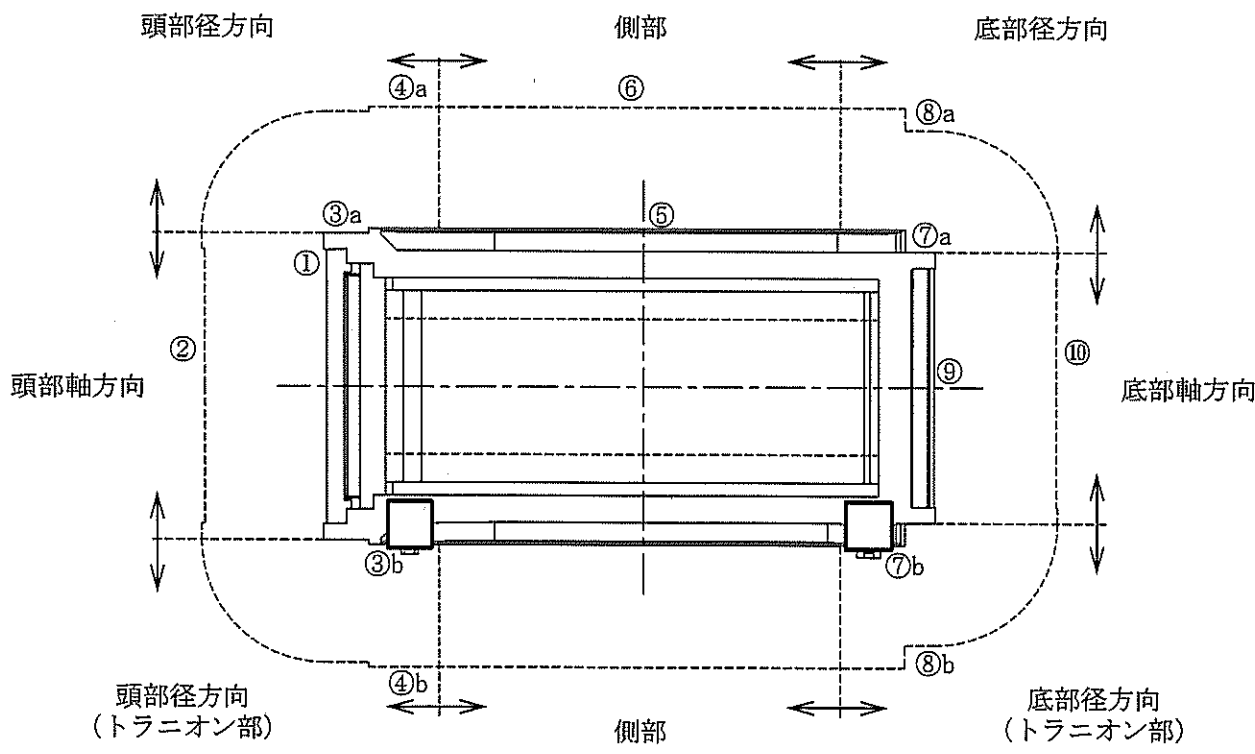
| 評価点 | | | 頭部 | | | | | 側部 | | 底部 | | | | | | |
|------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------------|-------------|-------|---------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 軸方向 | | 径方向 | | 径方向 (トランニオン部) | | | 径方向 | | 径方向 (トランニオン部) | | 軸方向 | | |
| | | | ① | | ③a | | ③b | | ⑤ | | ⑦a | | ⑦b | | ⑨ | |
| | | | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 |
| 表面 | ガンマ線 | 燃料有効部 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 5.0 | 4.8 | 91.8 | 93.0 | 3.0 | 3.0 | 4.0 | 4.0 | <0.1 | 8.2 |
| | | 構造材放射化 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 46.3 | 85.2 | 15.6 | 11.5 | 7.2 | 6.2 | 13.7 | 11.7 | 0.2 | 112.7 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.7 | 0.7 | 1.6 | 1.6 | 5.7 | 5.7 | 24.1 | 24.4 | 7.0 | 7.1 | 4.4 | 4.5 | 0.7 | 12.4 |
| | 中性子 | | 258.8 | 262.8 | 585.5 | 592.3 | 949.3 | 1022.9 | 54.6 | 55.1 | 1534.4 | 1548.1 | 922.7 | 925.5 | 167.0 | 44.7 |
| | 合計 | | 259.9 | 264.0 | 587.6 | 594.7 | 1006.3 | 1118.6 | 186.1 | 184.0 | <u>1551.6</u> | <u>1564.4</u> | 944.8 | 945.7 | 168.0 | 178.0 |
| 評価点 | | | ② | | ④a | | ④b | | ⑥ | | ⑧a | | ⑧b | | ⑩ | |
| | | | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 |
| 表面から 1m | ガンマ線 | 燃料有効部 | 0.2 | 0.2 | 22.1 | 22.3 | 21.5 | 21.7 | 40.9 | 41.4 | 7.9 | 8.8 | 6.6 | 7.3 | 3.1 | 2.9 |
| | | 構造材放射化 | 1.9 | 3.7 | 17.3 | 28.1 | 14.4 | 22.7 | 8.0 | 6.7 | 7.5 | 6.5 | 5.7 | 4.8 | 15.0 | 34.5 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.4 | 0.4 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 9.6 | 9.7 | 2.6 | 2.8 | 2.5 | 2.6 | 3.4 | 3.4 |
| | 中性子 | | 50.3 | 50.6 | 23.4 | 23.8 | 33.4 | 34.4 | 21.9 | 22.1 | 51.8 | 51.1 | 60.8 | 60.9 | 20.1 | 20.2 |
| | 合計 | | 52.8 | 54.9 | 67.8 | 79.2 | 74.2 | <u>83.8</u> | <u>80.4</u> | 79.9 | 69.8 | 69.2 | 75.6 | 75.6 | 41.6 | 61.0 |

(注)0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

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。



2-5-11-1 図 最大線量当量率評価点位置の概略図 (A型燃料) (乾式キャスク (タイプ1))



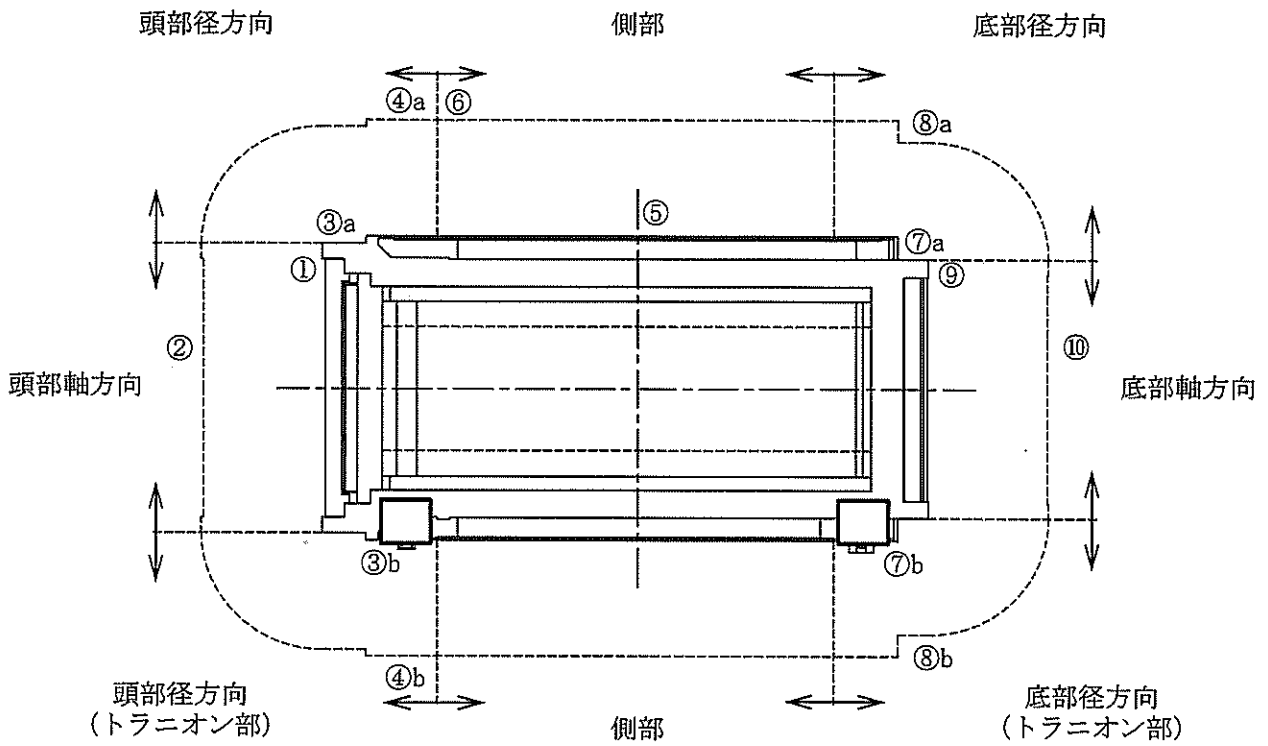
2-5-11-2 図 最大線量当量率評価点位置の概略図 (B型燃料) (乾式キャスク (タイプ1))

2-5-11-2 表 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (B型) / 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A型) 収納時の最大線量当量率比較 (乾式キャスク (タイプ 2))
(単位: μ Sv/h)

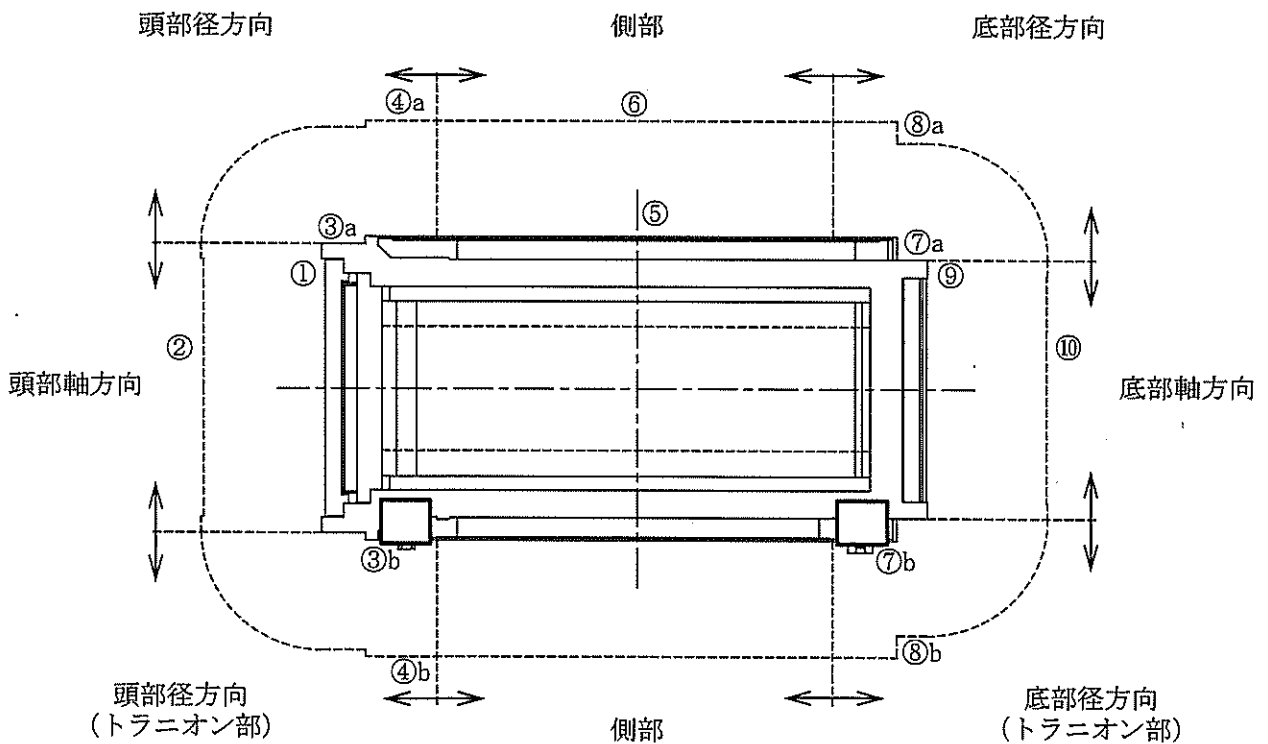
| 評価点 | | | 頭部 | | | | | 側部 | | 底部 | | | | | | |
|-------------|------|--------|-------|-------|-------|-------------|------------------|-------|-------------|---------------|---------------|------------------|--------|-------|-------|------|
| | | | 軸方向 | | 径方向 | | 径方向 (トランニオン部) | | | 径方向 | | 径方向 (トランニオン部) | | 軸方向 | | |
| | | | ① | | ③a | | ③b | | ⑤ | | ⑦a | | ⑦b | | ⑨ | |
| | | | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 |
| 表面 | ガンマ線 | 燃料有効部 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 6.3 | 8.0 | 84.8 | 100.7 | 3.4 | 4.0 | 4.7 | 5.4 | <0.1 | <0.1 |
| | | 構造材放射化 | 1.0 | 0.4 | 1.9 | 1.1 | 183.8 | 103.0 | 17.2 | 25.9 | 10.7 | 6.6 | 22.1 | 13.4 | 0.5 | 0.3 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.8 | 0.8 | 2.1 | 2.3 | 5.2 | 5.7 | 23.8 | 25.7 | 6.9 | 7.4 | 4.5 | 4.8 | 0.8 | 0.9 |
| | 中性子 | 303.6 | 333.7 | 731.3 | 804.2 | 655.5 | 741.4 | 41.9 | 45.1 | 1698.9 | 1807.3 | 1021.8 | 1108.3 | 208.5 | 222.6 | |
| | 合計 | 305.5 | 335.0 | 735.4 | 807.7 | 850.8 | 858.1 | 167.7 | 197.4 | <u>1719.9</u> | <u>1825.3</u> | 1053.1 | 1131.9 | 209.9 | 223.9 | |
| 評価点 | | | ② | | ④a | | ④b | | ⑥ | | ⑧a | | ⑧b | | ⑩ | |
| B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | |
| 表面から 1 m | ガンマ線 | 燃料有効部 | 0.2 | 0.3 | 19.0 | 22.5 | 19.2 | 22.6 | 20.4 | 44.8 | 7.6 | 9.0 | 6.6 | 7.9 | 4.3 | 4.9 |
| | | 構造材放射化 | 5.7 | 3.5 | 30.6 | 20.1 | 32.0 | 20.9 | 29.6 | 12.5 | 9.7 | 7.4 | 7.8 | 6.1 | 48.2 | 28.8 |
| | | 二次ガンマ線 | 0.4 | 0.4 | 5.1 | 5.4 | 5.0 | 5.4 | 5.3 | 10.4 | 2.7 | 3.0 | 2.6 | 2.8 | 3.3 | 3.6 |
| | 中性子 | 59.1 | 64.8 | 21.0 | 23.2 | 29.5 | 32.7 | 20.3 | 18.3 | 54.1 | 56.6 | 63.3 | 66.3 | 21.7 | 23.1 | |
| | 合計 | 65.4 | 69.0 | 75.7 | 71.2 | <u>85.7</u> | 81.6 | 75.6 | <u>86.0</u> | 74.1 | 76.0 | 80.3 | 83.1 | 77.5 | 60.4 | |

(注) 0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

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



2-5-11-3 図 最大線量当量率評価点位置の概略図 (B型燃料) (乾式キャスク (タイプ2))



2-5-11-4 図 最大線量当量率評価点位置の概略図 (A型燃料) (乾式キャスク (タイプ2))

2-6 評価内容全般に係る補足説明資料

伊方3号機（使用済燃料乾式貯蔵建屋）設計及び工事計画に係る説明資料
 （使用済燃料乾式貯蔵容器の安全性について）

■資料No. 2-6 評価内容全般に係る補足説明資料

| 資料 No. | 補足説明資料 | | 備考 (該当添付資料) |
|-----------|-----------------------------|---|---|
| | (名称) | (概要) | |
| 2-6-1 | 核燃料輸送物設計承認申請書における評価との比較について | 本申請における評価内容及び核燃料輸送物設計承認申請書における評価内容の比較を示す。 | 資料10-3 キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度に関する説明書 資料11 使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書 資料12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書 資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書 資料14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書 |

2-6-1 核燃料輸送物設計承認申請書における
評価との比較について

1. はじめに

本申請における乾式キャスク（タイプ 1 及びタイプ 2）は兼用キャスクであり、資料 15「外運搬規則第二十一条第二項の規定による容器の設計に関する原子力規制委員会の承認を受けたことに関する説明書」に示す通り、核燃料輸送物設計承認（以下「設計承認」という。）を受けている。

本資料は、本申請における資料 10～資料 14 において記載している各評価内容と設計承認申請書において輸送物の安全性を示すための評価内容との比較を示すものである。

2. 設計承認申請書における評価との比較について

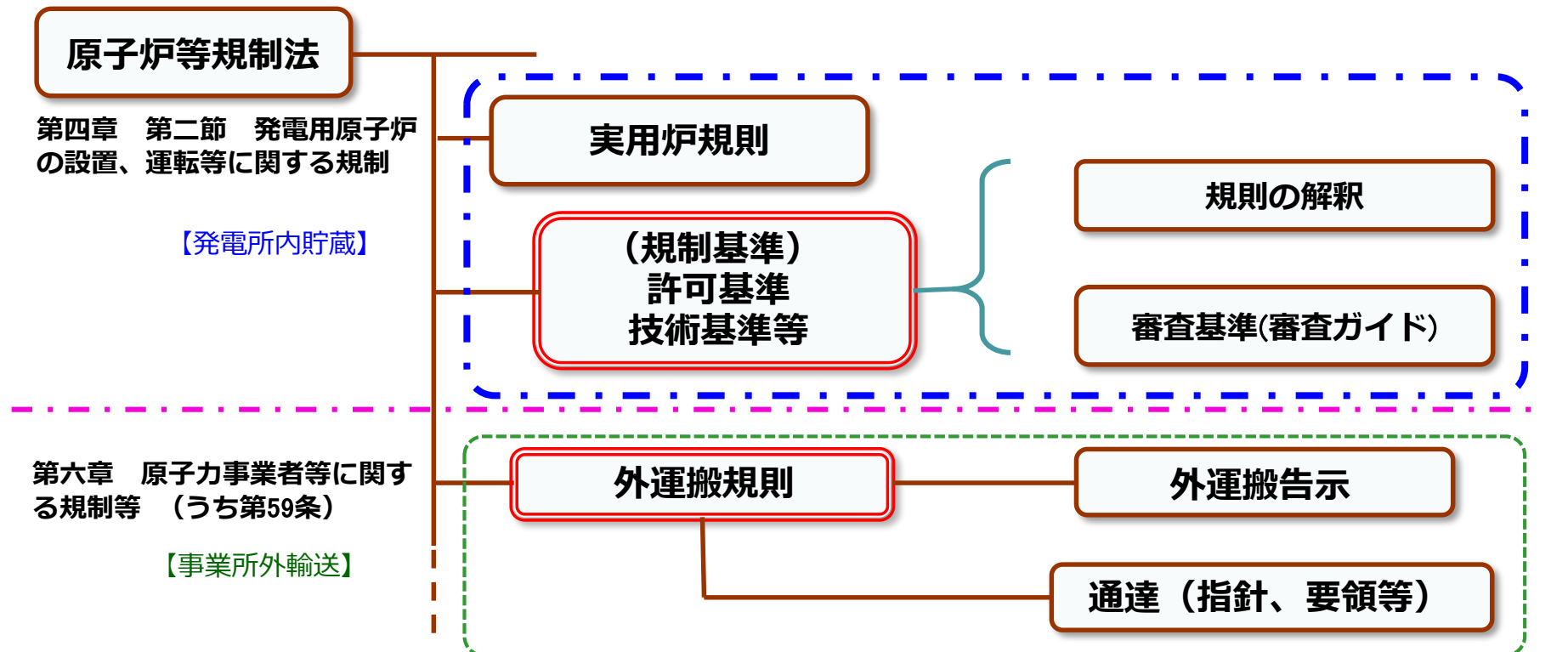
本申請における評価内容と設計承認申請書における評価内容との比較を別紙「乾式キャスク（輸送・貯蔵兼用）の許認可概要」に示す。

乾式キャスク(輸送・貯蔵兼用)の許認可概要 (設置許可・設工認／設計承認の比較について)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので
公開することはできません。

1. 乾式キャスクの許認可体系
2. 乾式キャスクの概要
3. 乾式キャスクの解析比較

1. 乾式キャスクの許認可体系



原子炉等規制法 …… 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 (昭和32年6月10日法律第166号)

实用炉規則 …… 实用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則 (昭和53年12月28日通商産業省令第77号)

規制基準 …… 实用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (平成25年6月28日原子力規制委員会規則第5号)

…… 实用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則 (平成25年6月28日原子力規制委員会規則第6号)

審査基準(審査ガイド) …… 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

(平成31年3月13日原規技発第1903131号)

外運搬規則 …… 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則 (昭和53年12月28日 総理府令 第57号)

外運搬告示 …… 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示

(平成2年11月28日 科学技術庁告示 第5号)

1. 乾式キャスクの許認可体系

【乾式キャスクの適合性説明の必要な条文】

【発電所内貯蔵】

**(規制基準)
許可基準
技術基準等**

| (略)位置、構造及び設備の基準に関する規則 | | 乾式キャスクの適合性 |
|-----------------------|-----------------|-------------------|
| 第16条 | 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設 | ○(未臨界、除熱、遮蔽、閉じ込め) |

| (略)技術基準に関する規則 | | 乾式キャスクの適合性 |
|---------------|-----------------|-----------------------|
| 第26条 | 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設 | ○(未臨界、除熱、遮蔽閉じ込め、構造強度) |

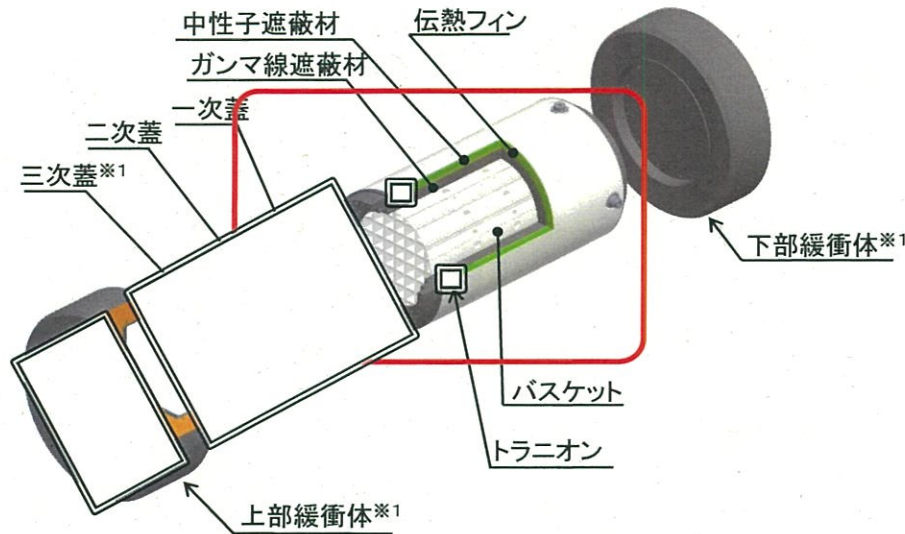
【事業所外輸送】

外運搬規則

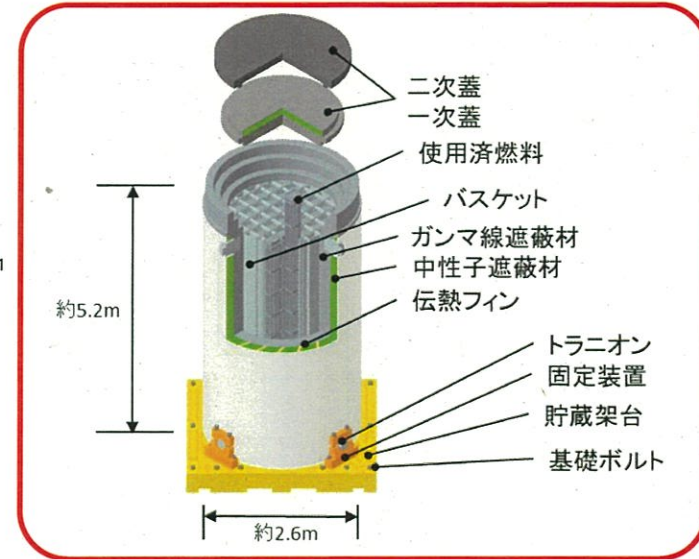
| (略)事業所の外における運搬に関する規則 | | 乾式キャスクの適合性 |
|----------------------|----------------------------------|--------------------|
| 第3条 | 核燃料輸送物として運搬できる核燃料物質等の運搬 | ○(核燃料物質の仕様) |
| 第6条 | BM型輸送物に係る技術上の基準 (⇒第5条、第4条を引用) | ○(遮蔽、閉じ込め、除熱、構造強度) |
| 第11条 | 核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準 | ○(未臨界) |

2. 乾式キャスクの概要（構成部材）

乾式キャスクの鳥かん図(タイプ1(輸送状態)の例)



乾式キャスクの鳥かん図(タイプ1(貯蔵状態)の例)



乾式キャスク構成部材の材質

| | 乾式キャスク(タイプ1) 【MSF-32P型】の材質※2 | 乾式キャスク(タイプ2) 【MSF-24P型】の材質※2 |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 銅 | 炭素鋼 | 炭素鋼 |
| 外筒 | 炭素鋼 | 炭素鋼 |
| 中性子遮蔽材 | レジン | レジン |
| 一次蓋、二次蓋 | 炭素鋼 | 炭素鋼 |
| 一次蓋、二次蓋シール | 金属ガスケット | 金属ガスケット |
| バスケット構造材 | アルミニウム合金および炭素鋼 | アルミニウム合金 |
| バスケット中性子吸収材 | ほう素添加アルミニウム合金 | ほう素添加アルミニウム合金 |
| 三次蓋※1 | ステンレス鋼 | ステンレス鋼 |
| 三次蓋シール※1 | ゴムOリング | ゴムOリング |
| 緩衝体※1 | ステンレス鋼及び木材 | ステンレス鋼及び木材 |

共通

※1 輸送時のみ装着

※2 乾式キャスク構成部材の長期健全性も含め、共通。

2. 乾式キャスクの概要 (収納条件)

収納条件(乾式キャスク(タイプ1); 14×14型燃料32体収納)

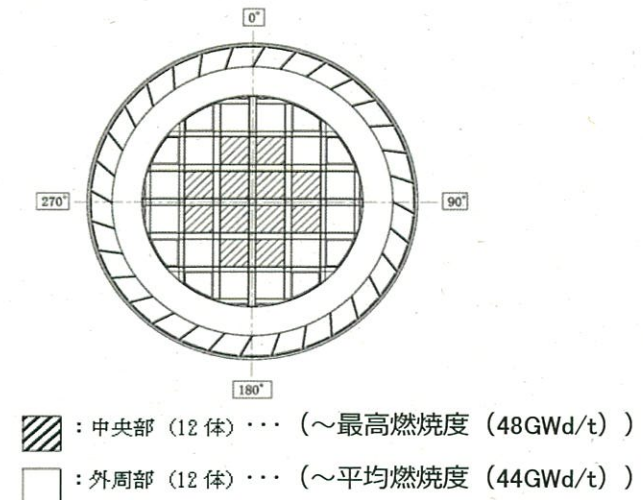
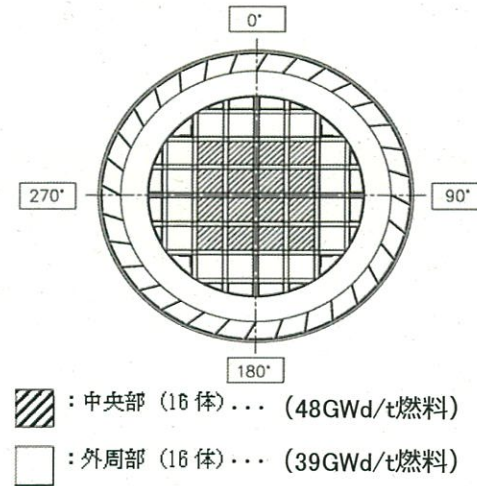
| 燃料集合体の種類と型式 | 中央部 | | | | 外周部 | |
|----------------------------------|--------------|----|--------------|----|--------------|----|
| | 14×14燃料※ | | | | | |
| | 48,000MWd/t型 | | 39,000MWd/t型 | | 39,000MWd/t型 | |
| 燃焼条件 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 |
| 最高燃焼度 ^(注1) (MWd/t) | 48,000以下 | | 39,000以下 | | 39,000以下 | |
| 平均燃焼度 ^(注2) (MWd/t) | 45,000以下 | | | | 33,000以下 | |
| 冷却日数 | 5,479日以上 | | | | 9,131日以上 | |

収納条件(乾式キャスク(タイプ2); 17×17型燃料24体収納)

| 燃料集合体の種類と型式 | | 17×17燃料※ | |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------|
| | | 48,000MWd/t型 | |
| 燃焼条件 | | A型 | B型 |
| 燃料集合体 | 最高燃焼度 ^(注1) (MWd/t) | 中央部 | 48,000以下 |
| | | 外周部 | 44,000以下 |
| | 平均燃焼度 ^(注2) (MWd/t) | 44,000以下 | |
| | 冷却日数 | 5,479日 ^(注3) 以上 | 6,209日 以上 |
| バーナブル ポイズン 集合体 | 照射日数 | 5,479日以上 | |
| | 冷却日数 | | |

※ 燃料被覆管の長期健全性も含め、共通。

共通



3. 乾式キャスクの解析比較

構造解析 (強度評価)

| 項目 | 設計承認における評価内容 | 設工認における評価内容 | |
|---------------|---|--|-----------------------|
| 解析方法 | 容器本体 胴 一次蓋 二次蓋 三次蓋 外筒 等 バスケット・ ドラニオン | 解析コードによる評価 解析コード: ABAQUS (汎用FEM) 解析モデル: 三次元180° 対称モデル ※一部評価式による評価 | 同左 |
| | 貯蔵架台 | 評価式による評価 | 同左 |
| 解析条件 (荷重計算方法) | 設計条件 | — | 設計時 (最高使用圧力) |
| | 供用状態 A | 輸送時 | 貯蔵時 吊上げ時 |
| | " B | 一般の試験条件 (0.3m落下: 解析コードによる評価) | 検査架台衝突時 (評価式による評価) |
| | " C | — | — |
| | " D | 特別の試験条件 (9m落下: 解析コードによる評価) | — |
| その他 | 200m浸漬 | 試験時 | |
| 判定基準 | 密封部: 変形を弾性域に抑えること その他: 供用状態A,Bにおいて変形を弾性域に抑えること、供用状態Dにおいて安全機能に影響がないこと <外運搬規則第4条第2号、第6条第2号、第6条第3号、第11条第2号の規定に基づく各種評価の前提となる輸送物の状態を評価するため、金属キャスク構造規格等の民間規格に基づき設定> | 同左 (供用状態Dは該当なし) <技術基準規則第26条の規定に基づく安全機能評価の前提となる乾式キャスクの状態を評価するため、金属キャスク構造規格等の民間規格に基づき設定> | |

共通

乾式キャスク (タイプ1)
応力計算解析モデル

3. 乾式キャスクの解析比較

除熱解析

| 項目 | 設計承認における評価内容 | | | 設工認における評価内容 | |
|------|---|--|-------------------|--|---------------------|
| | 輸送時 | | 特別の試験条件 (火災条件) | 貯蔵時 | |
| | 最高温度評価 | 近接表面温度評価 | | | |
| 解析方法 | 解析コード | ABAQUS(汎用FEM) | | 同左 | |
| | 各部温度 | 三次元180° 対称全体モデル | | 同左 | |
| | 燃料最高温度 | 二次元燃料集合体モデル | | 同左 | |
| 解析条件 | 収納物発熱量 | 収納対象燃料に軸方向燃焼度分布を考慮したもの 〔16.9kW(タイプ1)〕 〔18.1kW(タイプ2)〕 | | 同左 | |
| | 周囲温度 | 38℃ (太陽光あり) | 38℃ (太陽光なし) | 800℃×30分 (太陽光あり) | 50℃(施設内) (太陽光なし) |
| | 姿勢 | 横置き | | 縦置き | |
| | 緩衝体の有無 | あり | あり | あり | なし |
| | 緩衝体の変形 | なし | なし | あり | — |
| 判定基準 | 各部の熱的健全性 <外運搬規則第5条第4号、第6条第4号、第11条第3号の規定を満足するよう輸送物各部の長期健全性が担保できる温度を基準として設定> | | | 同左 <技術基準規則第26条第2項第6号二の規定を満足するよう長期健全性が担保できる温度を基準として設定> | |
| | — | 近接可能表面が 85℃以下 <外運搬規則第6条第2号ハに規定> | — | — | |

共通

乾式キャスク (タイプ1)
熱解析モデル (全体モデル)

3. 乾式キャスクの解析比較

閉じ込め解析

| 項目 | 設計承認における評価内容 | | 設工認における評価内容 | |
|------|--|---|--|--|
| | 一般の試験条件 | 特別の試験条件 | 基準漏えい率設定 | リークテスト判定基準設定 |
| 解析方法 | 評価対象部位 (密封境界) | 三次蓋 ゴムOリング | | 一次蓋 金属ガスケット |
| | 評価内容 | 放射性物質の漏えい量 | | 設計貯蔵期間(60年)中において胴内を負圧に維持するための金属ガスケットの漏えい率 |
| | 解析方法 | 共通 | | 同左 |
| | 評価対象核種 | ³ H、 ⁸⁵ Kr | | —(Heガス) |
| 解析条件 | 漏えいの経路 | 三次蓋内部から大気への漏えい | | 一二次蓋間(圧力一定)から一次蓋内部への漏えい 同左 (基準漏洩率設定の条件に加え、一二次蓋間ガスの全量流入に伴う圧力上昇分を考慮) |
| | 燃料破損率 (胴内圧上昇の考慮条件) | 0.1% | 100% | 0.1% |
| 判定基準 | 放射性物質漏洩量 A_2 値 $\times 10^{-6}/h$ 以下 <外運搬規則第6条第2号ロ、 外運搬告示第15条に規定> | 放射性物質漏洩量 A_2 値/week以下 <外運搬規則第6条第3号ロ、 外運搬告示第17条に規定> | 基準漏えい率 > リークテスト判定基準 > 金属ガスケットの性能 <技術基準規則第26条第2項第6号イ、審査ガイド2.4に規定> | |

A_2 値：核種ごとに、告示で定められる放射エネルギーの制限値

3. 乾式キャスクの解析比較

遮蔽解析

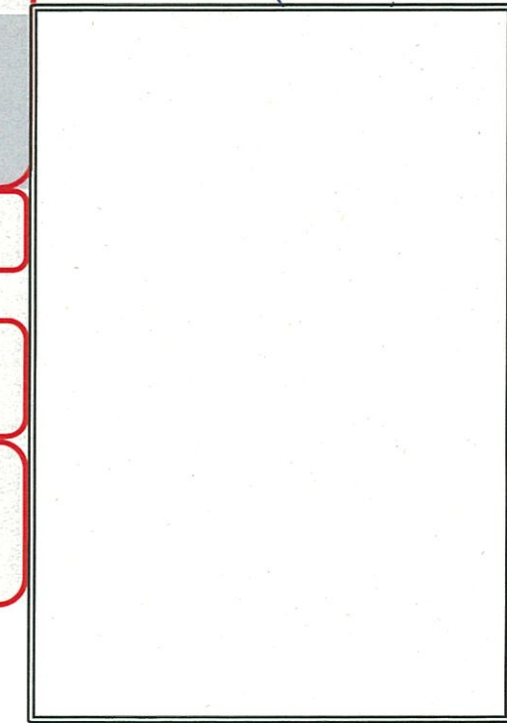
| 項目 | 設計承認における評価内容 | | | 設工認における評価内容 | |
|------|--------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | 輸送時 | 一般の試験条件 | 特別の試験条件 | 貯蔵時 | |
| 解析方法 | 解析コード | DOT3.5 | | | 同左 |
| | 解析モデル | (二次元軸対称) ①頭部1/2モデル ②底部1/2モデル ③トラニオン部詳細モデル | | | 同左 |
| 解析条件 | 緩衝体の有無 | あり (距離のみ考慮) | あり (距離のみ考慮) | なし | なし |
| | 緩衝体の変形 (中性子遮蔽体) | なし | あり | (全損) | — |
| 判定基準 | 線量当量率 (mSv/h) | 2 (@表面) 0.1 (@1m) <外運搬規則第5条第7号、第5条第8号に規定> | 2 (@表面) — <外運搬規則第5条第9号ロに規定> | — 10 (@1m) <外運搬規則第6条第3号イに規定> | 同左 (輸送時) <審査ガイド2.2に規定> |

共通

キャスク表面の位置

一般の試験条件

輸送時



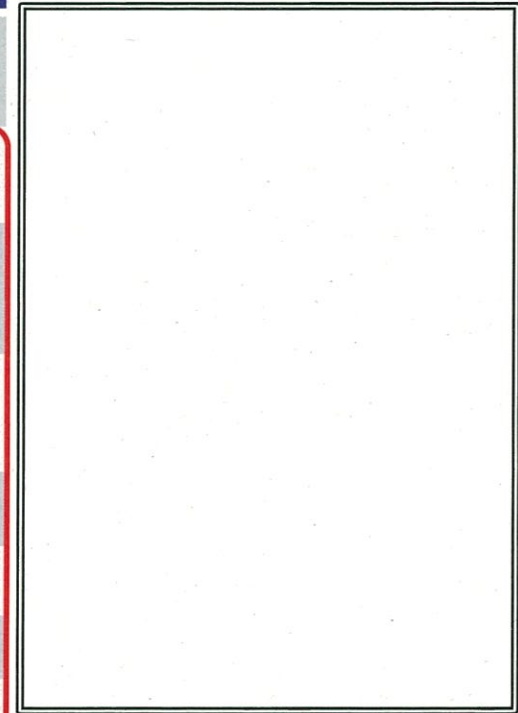
乾式キャスク (タイプ1)

遮蔽解析モデル (頭部モデル)

3. 乾式キャスクの解析比較

臨界解析

| 項目 | 設計承認における評価内容 | | 設工認における評価内容 | |
|------|---------------------------------|--|-------------|---|
| | 特別の試験条件 (輸送時・一般の 試験条件を包絡) | 取扱時※1 | 貯蔵時 | 取扱時※1 |
| 解析方法 | 解析コード | SCALEコードシステム | 同左 | 共通 |
| | 解析モデル | 三次元モデル (中性子遮蔽材、緩衝体、三次蓋を 無視) | 同左 | |
| 解析条件 | 濃縮度 | タイプ1(中央部:U濃縮度 <input type="text"/> %、 外周部:U濃縮度 <input type="text"/> %) タイプ2(U濃縮度 <input type="text"/> %) | 同左 | |
| | 燃料状態 | ①健全 ②一部変形考慮 | 健全 | 同左(健全のみ) |
| | 内部雰囲気 | 乾燥※2 | 冠水 | 同左(乾燥) 同左(冠水) |
| | 外部境界 | 無限配列 | 同左 | 同左 |
| 判定基準 | 中性子 実効増倍率 | ≤ 0.95 <外運搬規則第11条第2号の規定を満足する よう文献を基に設定> | 同左 | <技術基準規則第26条第2号第1号の規 定を満足するよう文献を基に設定> |



乾式キャスク(タイプ1)
臨界解析モデル(縦断面図)

- ※1 使用済燃料ピットエリアでの燃料装荷作業等、容器内が水で満たされた状態を想定している。
 ※2 安全側の評価として、15 m 浸漬試験による胴内への5000cm³の浸水を仮定し、この水が均一に分散している条件にて評価している。