

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

伊方発電所 3 号炉
設置許可基準規則等への適合性について
(使用済燃料乾式貯蔵施設)

令和元年 1 1 月
四国電力株式会社

目 次

4条 地震による損傷の防止

5条 津波による損傷の防止

6条 外部からの衝撃による損傷の防止

－外部事象

－竜巻

－外部火災

－火山

7条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止

8条 火災による損傷の防止

9条 溢水による損傷の防止

11条 安全避難通路等

12条 安全施設

16条 燃料体の取扱施設及び貯蔵施設

今回説明範囲

29条 工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護

30条 放射線からの放射線業務従事者の防護

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

<目 次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項に対する適合性
 - (1) 位置、構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.2 気象等
 - 1.3 設備等

2. 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
 - 2.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の貯蔵容量について
 - 2.2 使用済燃料乾式貯蔵容器の構造について
 - 2.3 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納条件について
 - 2.4 使用済燃料貯蔵容器の設計貯蔵期間について
 - 2.5 使用済燃料乾式貯蔵容器の4つの安全機能について
 - 2.5.1 使用済燃料乾式貯蔵容器の閉じ込め機能について
 - 2.5.2 使用済燃料乾式貯蔵容器の臨界防止機能について
 - 2.5.3 使用済燃料乾式貯蔵容器の遮蔽機能について
 - 2.5.4 使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について
 - 2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について
 - 2.7 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について
 - 2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力等の監視について

3. 自然現象等に対する使用済燃料乾式貯蔵施設の設計方針
 - 3.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の設備の分類及び担保すべき機能について
 - 3.2 兼用キャスク及び周辺施設の設計方針

【参考資料】

- 参考1 使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について
- 参考2 伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る原子力規制委員会の審査方針を踏まえた影響評価
- 参考3 使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る詳細な確認範囲について
- 参考4 貯蔵中の乾式キャスクの転倒防止（エアパレット搬送時含む）について
- 参考5 解析条件等の比較（核燃料輸送物設計承認申請／設置変更許可申請）

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

五 発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

(i) 本発電用原子炉施設は、「(1)耐震構造」、「(2)耐津波構造」に加え、以下の基本方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(k) 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下「燃料体等」という。）の取扱施設（安全施設に係るものに限る。）は、燃料体等を取り扱う能力を有し、燃料体等が臨界に達するおそれがなく、崩壊熱により燃料体等が溶融せず、使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有し燃料体等の取扱中における燃料体等の落下を防止できる設計とする。

燃料体等の貯蔵施設（安全施設に属するものに限る。）は、燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納でき、放射性物質の放出を低減できる設計とする。また、燃料体等を必要に応じて貯蔵することができる容量を有するとともに、燃料体等が臨界に達するおそれがない設計とする。

使用済燃料の貯蔵施設は、使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有し、貯蔵された使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料が崩壊熱により溶融しないものであって、最終ヒートシンクへ熱を輸送できる設備及びその浄化系を有し、使用済燃料ピットから放射性物質を含む水があふれ、又は漏れないものであって、使用済燃料ピットから水が漏れいした場合において、水の漏れいを検知することができる設計とする。

使用済燃料の貯蔵施設は、燃料体等の取扱中に想定される燃料体等の落下時及び重量物の落下時においてもその機能が損なわれない設計とすることとし、使用済燃料ピットの機能に影響を及ぼす重量物については落下しない設計とする。

使用済燃料ピットの水位及び水温並びに燃料取扱場所の放射線量の異常を検知し、それを中央制御室に伝えるとともに、外部電源が使用できない場合においても非常用所内電源からの電源供給により、使用済燃料ピットの水位及び水温並びに放射線量を監視することができる設計とする。

使用済燃料乾式貯蔵施設は、使用済燃料から放出される放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により十分に遮蔽することができる設計とするとともに、自然冷却によって収納した使用済燃料の崩壊熱を外部に放出できる設計とする。また、使用済燃料乾式貯蔵容器は、貯蔵容量最大に燃料集合体を収納し、貯蔵容器

内の燃料位置等について想定される最も厳しい状態を仮定しても臨界に達するおそれのない設計とするとともに、適切に放射性物質を閉じ込めることができ、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

二 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備

(1) 核燃料物質取扱設備の構造

核燃料物質取扱設備（燃料取扱設備）は、燃料取替クレーン、使用済燃料ピットクレーン（1号、2号及び3号炉共用）、燃料取扱棟クレーン（1号、2号及び3号炉共用）、燃料移送装置等で構成する。

ウラン新燃料は、燃料取扱設備により、燃料取扱棟内において、ウラン新燃料の輸送容器から新燃料貯蔵設備又は使用済燃料貯蔵設備に移し、原子炉格納容器内に搬入する。ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料は、燃料取扱設備により、燃料取扱棟内において、ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の輸送容器から使用済燃料貯蔵設備に移し、原子炉格納容器内に搬入する。燃料取替は、原子炉上部の原子炉キャビティに水張りし、燃料取扱設備を用いてほう酸水中で行う。

使用済燃料は、遮へいに必要な水深を確保した状態で、燃料取扱設備を用いてほう酸水中で燃料取扱棟内に移送し、同棟内の使用済燃料貯蔵設備（1号、2号及び3号炉共用）のほう酸水中に貯蔵する。

また、2号炉又は3号炉の使用済燃料貯蔵設備にて貯蔵する使用済燃料のうち、十分に冷却した使用済燃料は、必要に応じて使用済燃料乾式貯蔵施設へ運搬し、貯蔵する。

燃料取扱設備は、燃料取扱時において燃料が臨界に達することのない設計とするとともに、燃料集合体の落下を防止する設計とする。

なお、使用済燃料の1号炉又は2号炉使用済燃料貯蔵設備から3号炉使用済燃料貯蔵設備への運搬には使用済燃料輸送容器を使用する。使用済燃料の2号炉又は3号炉の使用済燃料貯蔵設備から使用済燃料乾式貯蔵施設、あるいは使用済燃料乾式貯蔵施設から3号炉の使用済燃料貯蔵設備への運搬には使用済燃料乾式貯蔵容器を使用する。使用済燃料の再処理工場への搬出には、使用済燃料輸送容器又は使用済燃料乾式貯蔵容器を使用する。

(2) 核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力

(i) 新燃料貯蔵設備

a. 構造

新燃料貯蔵設備は、ウラン新燃料を新燃料ラックに挿入して貯蔵するものであり、燃料取扱棟内に設置する。

新燃料貯蔵設備は、想定されるいかなる状態においても燃料が臨界に達することのない設計とする。

b. 貯蔵能力

全炉心燃料の約 100%相当分

(ii) 使用済燃料貯蔵設備

a. 構造

使用済燃料貯蔵設備（1号、2号及び3号炉共用）は、使用済燃料及び新燃料をほう酸水中の使用済燃料ラックに挿入して貯蔵する鉄筋コンクリート造、ステンレス鋼内張りの水槽（使用済燃料ピット）であり、燃料取扱棟内に設ける。

使用済燃料ピットは、燃料体等の上部に十分な水深を確保する設計とするとともに、使用済燃料ピット水位、水温及び使用済燃料ピット水の漏えい並びに燃料取扱棟内の放射線量率を監視する設備を設け、さらに、万一漏えいを生じた場合には、ほう酸水を補給できる設計とする。

使用済燃料貯蔵設備は、想定されるいかなる状態においても燃料が臨界に達することのない設計とする。

使用済燃料貯蔵設備は、燃料体等の取扱中に想定される落下時にも著しい使用済燃料ピット水の減少を引き起こすような損傷を避けるよう設計する。

使用済燃料ピットは、使用済燃料ピットの冷却機能喪失、使用済燃料ピットの注水機能喪失、使用済燃料ピット水の小規模な漏えいが発生した場合において、燃料の貯蔵機能を確保できる設計とする。

また、使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、スプレイや蒸気条件下でも臨界にならないよう配慮したラック形状及び燃料配置によって、臨界を防止することができる設計とする。

b. 貯蔵能力

全炉心燃料の約 1,150%相当分（1号、2号及び3号炉共用）

(iii) 使用済燃料乾式貯蔵施設

a. 構造

使用済燃料乾式貯蔵施設は、使用済燃料乾式貯蔵容器、使用済燃料乾式貯蔵容器を保管する使用済燃料乾式貯蔵建屋（1号、2号及び3号炉共用）等からなる。

使用済燃料乾式貯蔵施設は、使用済燃料から放出される放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により十分に遮蔽する設計とするとともに、自然冷却によって収納した使用済燃料の崩壊熱を外部に放出できる設計とする。また、使用済燃料乾式貯蔵容器は、貯蔵容量最大に燃料集合体を収納し、貯蔵容器内の燃料位置等について想定される最も厳しい状態を仮定しても臨界に達するおそれのない設計とするとともに、適切に放射性物質を閉じ込めることができ、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

b. 貯蔵能力

全炉心燃料の約 760%相当分（1号、2号及び3号炉共用）

(2) 安全設計方針

該当なし

(3) 適合性説明

(燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設)

第十六条

- 2 発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、燃料体等の貯蔵施設（安全施設に属するものに限る。以下この項において同じ。）を設けなければならない。
- 一 燃料体等の貯蔵施設は、次に掲げるものであること。
 - イ 燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする。
 - ロ 燃料体等を必要に応じて貯蔵することができる容量を有するものとする。
 - ハ 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。
- 4 キャスクを設ける場合には、そのキャスクは、第二項第一号に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならない。
- 一 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。
 - 二 使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。
 - 三 使用済燃料が内包する放射性物質を閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

適合のための設計方針

2 について

- 一 燃料体等の貯蔵設備は、以下のように設計する。
 - イ 使用済燃料乾式貯蔵施設内では、使用済燃料乾式貯蔵容器の蓋部を開放することなく、かつ、内包する放射性物質の閉じ込めを使用済燃料乾式貯蔵容器のみで担保する設計とする。
 - ロ 使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の貯蔵設備は、使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵分も含めて、全炉心燃料及び1回の燃料取替えに必要な燃料集合体数並びにウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料集合体数に十分余裕を持たせた貯蔵容量を有する設計とする。
 - ハ 使用済燃料乾式貯蔵容器はSクラスの耐震性を有する設計とし、使用済燃料乾式貯蔵容器内のバスケットは、適切な燃料集合体間隔を保持することにより、燃料集合体が相互に接近しないようにする。また、貯蔵容量最大に燃料集合体を収納し、使用済燃料乾式貯蔵容器内の燃料位置等について想定される最も厳しい状態を仮定しても実効増倍率が0.95（解析上の不確定さを含む。）以下となる設計とする。

4 について

- 一 使用済燃料乾式貯蔵容器は、使用済燃料から放出される放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により十分に遮蔽する設計とする。
- 二 使用済燃料乾式貯蔵容器は、自然冷却によって収納した使用済燃料の崩壊熱を外部

に放出できる設計とする。

三 使用済燃料乾式貯蔵容器は、適切に放射性物質を閉じ込めることができ、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

1.2 気象等

該当なし

1.3 設備等

4. 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設

4.1 燃料取扱及び貯蔵設備

4.1.1 通常運転時等

4.1.1.1 概要

燃料取扱及び貯蔵設備は、新燃料を発電所内に搬入してから使用済燃料を発電所外に搬出するまでの燃料取扱い及び貯蔵を安全かつ確実に行うものである。

燃料取扱設備の配置を第4.1.1図及び第4.1.2図に示す。

発電所に搬入したウラン新燃料は、受入検査後、燃料取扱棟内の新燃料貯蔵庫又は使用済燃料ピットに貯蔵する。これらのウラン新燃料は、再装荷燃料等とともに炉心へ装荷するが、新燃料貯蔵庫に貯蔵したウラン新燃料は、炉心へ装荷する前に通常使用済燃料ピットに一時的に保管する。発電所に搬入したウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料は、受入検査後、使用済燃料ピットに貯蔵した後、炉心へ装荷する。

炉心への装荷の手順は、以下に示す燃料の取出しとほぼ逆の手順によって行う。

原子炉停止後、原子炉より取り出す使用済燃料は、燃料取替クレーン、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン等を使用して、ほう酸水を張った原子炉キャビティ、燃料取替用キャナル及び燃料移送管を通して使用済燃料ピットへ移動する。

これらの使用済燃料の移送は、遮蔽及び冷却のため、すべて水中で行う。

使用済燃料は、使用済燃料ピットに貯蔵するが、必要に応じて使用済燃料ピット内で別に用意した容器に入れて貯蔵する。

使用済燃料は、使用済燃料ピット内で通常1年間以上冷却し、冷却を終えた使用済燃料は、使用済燃料ピットクレーン等を使用して水中で使用済燃料輸送容器に入れ再処理工場へ搬出する。

なお、使用済燃料のうち、十分に冷却した使用済燃料は、必要に応じ使用済燃料乾式貯蔵容器に入れ使用済燃料乾式貯蔵施設に運搬し、貯蔵した後、再処理工場へ搬出する。

使用済燃料ピットの水位及び水温並びに燃料取扱場所の放射線量は中央制御室で監視できるとともに、異常時は中央制御室に警報を発信する。

また、使用済燃料乾式貯蔵容器の一次蓋と二次蓋との間の圧力を監視できる

ものとする。

4.1.1.2 設計方針

燃料取扱及び貯蔵設備は、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱い及び貯蔵を安全かつ確実にを行うことができるよう以下の方針により設計する。

- (1) 燃料取扱及び貯蔵設備のうち安全上重要な機器は、適切な定期的試験及び検査ができる設計とする。
- (2) 貯蔵設備は、適切な格納性と空気浄化系を有する区画として設計する。
- (3) 新燃料貯蔵設備は、1回の燃料取替えに必要とする燃料集合体数に十分余裕を持たせた貯蔵容量を有する設計とする。また、使用済燃料の貯蔵設備は、使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵分も含めて、全炉心燃料及び1回の燃料取替えに必要とする燃料集合体数並びにウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料集合体数に十分余裕を持たせた貯蔵容量を有する設計とする。
- (4) 燃料取扱設備は、移送操作中の燃料体等の落下を防止するためワイヤロープ二重化等の適切な落下防止措置を有する設計とする。
- (5) 使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の取扱及び貯蔵設備は、放射線業務従事者の線量を合理的に達成できる限り低くする設計とする。
- (6) 使用済燃料貯蔵設備は、使用済燃料ピット水浄化冷却設備を有する設計とする。使用済燃料ピット水浄化冷却設備は、使用済燃料ピット水を冷却して使用済燃料ピットに貯蔵した使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料からの崩壊熱を十分除去できるとともに、使用済燃料ピット水を適切な水質に維持できる設計とする。

使用済燃料乾式貯蔵施設は、自然冷却によって使用済燃料の崩壊熱を外部に放出できる設計とする。

- (7) 使用済燃料ピットは、冷却用の使用済燃料ピット水の保有量が著しく減少することを防止するため、十分な耐震性を有する設計とするとともに、使用済燃料ピットに接続する配管は、使用済燃料ピット水の減少を引き起こさない設計とする。

また、使用済燃料ピットの水位計は、水位の異常な低下及び上昇を監視できる計測範囲を有し、中央制御室で監視できるとともに、水位の異常な低下又は上昇時に警報を発信する設計とする。使用済燃料ピットの水温度計は、ピット水の過熱状態を監視できる計測範囲を有し、中央制御室で監視できるとともに、異常な温度上昇時に警報を発信する設計とする。燃料取扱場所の線量当量率計は、管理区域境界における線量当量率限度から設置区域における立入り制限値を包絡する計測範囲を有し、中央制御室で監視できるとともに、異常時に警報を発信する設計とする。さらに、使用済燃料ピット内張りからの漏えい検知のための装置を有する設計とする。

外部電源が利用できない場合においても、非常用所内電源からの給電により使用済燃料ピットの水位及び水温並びに放射線量が監視可能な設計とす

る。

さらに、万一漏えいが生じた場合には、燃料取替用水タンクからほう素濃度 4,400ppm 以上のほう酸水を補給できる設計とする。

使用済燃料乾式貯蔵施設は、使用済燃料から放出される放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により十分に遮蔽する設計とする。

(8) 使用済燃料貯蔵設備は、燃料体等の取扱中に想定される燃料体等の落下時においても著しい使用済燃料ピット水の減少を引き起こすような損傷が生じない設計とする。

(9) 使用済燃料貯蔵設備は、ほう素濃度 4,400ppm 以上のほう酸水で満たし、定期的にほう素濃度を分析する。また、設備容量分の燃料収容時に純水で満たされた場合を想定しても実効増倍率は 0.98 以下で十分な未臨界性を確保できる設計とする。

新燃料貯蔵設備は、浸水することのないようにするが、設備容量分の燃料収容時に純水で満たされた場合を想定しても実効増倍率は 0.95 以下で十分な未臨界性を確保できる設計とする。さらに、いかなる密度の水分雰囲気でも満たされたと仮定しても未臨界性を確保できる設計とする。

使用済燃料乾式貯蔵容器は S クラスの耐震性を有する設計とし、使用済燃料乾式貯蔵容器内のバスケットは、適切な燃料集合体間隔を保持することにより、燃料集合体が相互に接近しないようにする。また、貯蔵容量最大に燃料集合体を収納し、使用済燃料乾式貯蔵容器内の燃料位置等について想定される最も厳しい状態を仮定しても実効増倍率が 0.95 以下で十分な未臨界性を確保できる設計とする。

(10) 1号及び2号炉の使用済燃料を収納する使用済燃料ピット及びラックは、S クラスの耐震性を有する設計とし、地震時においても、1号及び2号炉の使用済燃料の健全性を損なわない設計とする。

(11) 落下時に使用済燃料ピットの機能に影響を及ぼす重量物については、使用済燃料ピット周辺の状況、現場における作業実績、図面等にて確認することにより、落下時のエネルギーを評価し、気中落下試験時の燃料集合体の落下エネルギー (39.3kJ) 以上となる設備等を抽出する。抽出された設備等については、地震時にも落下しない設計とする。

床面や壁面へ固定する重量物については、使用済燃料ピットからの離隔を確保するため、使用済燃料ピットへ落下するおそれはない。

a. 燃料取扱棟

燃料取扱棟の屋根を支持する鉄骨梁は、基準地震動に対する発生応力が終局耐力を超えず、使用済燃料ピット内に落下しない設計とする。また、屋根は鋼板の上に鉄筋コンクリート造の床を設け、地震による剥落のない構造とする。

また、下層部の鉄筋コンクリート壁は、基準地震動に対して健全性が確保される設計とする。上層部の壁を構成する鋼板や鋼材は、基準地震動に対して耐震性を有する支柱や間柱に溶接又はボルトで接続された一

体構造とし、地震により使用済燃料ピット内に落下しない設計とする。

b. 使用済燃料ピットクレーン

使用済燃料ピットクレーンは、基準地震動による地震荷重に対し、クレーン本体の健全性評価及び転倒落下防止評価を行い、使用済燃料ピットへの落下物とならないよう、以下を満足する設計とする。

(a) クレーン本体の健全性評価においては、保守的に吊荷ありの条件で、脚部等に発生する地震荷重が許容応力以下であること。

(b) 転倒落下防止評価においては、走行レール頭部を抱き込む構造をしたクレーンの浮上り防止爪について、保守的に吊荷なしの条件で、地震時の発生応力が、浮上り防止爪、取付けボルト等の許容応力以下であること。

(c) 走行レールの健全性評価においては、走行方向、走行直角方向及び鉛直方向について、地震時に基礎ボルトに発生する荷重が、許容応力以下であること。

また、使用済燃料ピットクレーンは、ワイヤロープ二重化、フック部外れ止め及び動力電源喪失時保持機能により、落下防止対策を講じた設計とする。

c. 燃料取扱棟クレーン

燃料取扱棟クレーンは、使用済燃料ピットの上部に走行レールが無く、仮に脱落したとしても建屋の構造上、クレーン本体及び吊荷が使用済燃料ピットへの落下物とならない設計とする。仮に落下後の移動を想定しても、使用済燃料ピットとの間に燃料取替用チャンネルがあるため、クレーン本体及び吊荷が使用済燃料ピットへの落下物となることはない。

(12) 使用済燃料乾式貯蔵容器はSクラスの耐震性を有する設計とし、閉じ込め機能を担保する部位の構造強度を維持する。また、使用済燃料乾式貯蔵施設内では、使用済燃料乾式貯蔵容器の蓋部を開放することなく、かつ、内包する放射性物質の閉じ込めを使用済燃料乾式貯蔵容器のみで担保する設計とする。

4.1.1.3 主要設備の仕様

燃料取扱及び貯蔵設備の主要設備の仕様を第4.1.1表に示す。

4.1.1.4 主要設備

(1) 新燃料貯蔵庫

新燃料貯蔵庫は、燃料取扱棟内の独立した区画に設け、キャン型のラックにウラン新燃料を1体ずつ挿入する構造とし、乾燥状態で貯蔵する。

新燃料貯蔵庫は、万一純水で満たされたとしても実効増倍率が0.95以下になるよう設計する。さらに、いかなる密度の水分雰囲気でも満たされたと仮定しても臨界未満となるよう設計する。

貯蔵容量は全炉心燃料の約100%相当分とする。

新燃料貯蔵庫は浸水することのない構造とし、さらに、排水口を設ける。また、水消火設備は設けない。

(2) 使用済燃料ピット

使用済燃料ピット（1号、2号及び3号炉共用）は、燃料取扱棟内に設け鉄筋コンクリート造とし、耐震設計Sクラスの構造物で、壁は遮へいを考慮して十分厚くする。使用済燃料ピット内面は、漏水を防ぎ保守を容易にするために、ステンレス鋼板で内張りした構造とする。

使用済燃料ピット水の減少防止のために、使用済燃料ピット水浄化冷却設備の取水のための配管は使用済燃料ピット上部に取り付け、また、注水のための配管にはサイホンブレーカを取り付ける。さらに、使用済燃料ピット底部には排水口は設けない。

使用済燃料ピットのステンレス鋼板内張りから、万一漏えいが生じた場合に漏えい水の検知ができるように漏えい検知装置を設置し、燃料取替用水タンクからほう素濃度4,400 ppm以上のほう酸水を補給できる設計とする。また、使用済燃料ピットには水位及び温度警報装置を設けて、水位高、水位低及び温度高の警報を中央制御室に発する。

使用済燃料ピット内には、原子炉容器から取り出した使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料を鉛直に保持し、ほう素濃度4,400ppm以上のほう酸水中に貯蔵するためのキャン型の使用済燃料ラックを配置する。使用済燃料ラックは、各ラックのセルに1体ずつ燃料集合体を挿入する構造で、耐震設計Sクラスとし、ラック中心間隔は、たとえ設備容量分の新燃料を貯蔵し、純水で満たされた場合を想定しても実効増倍率は0.98以下になるように決定する。

使用済燃料ピットには、バーナブルポイズン、使用済制御棒クラスタ等を貯蔵保管するとともに、ウラン新燃料を一時的に保管することもある。さらに、使用済燃料輸送容器及び使用済燃料乾式貯蔵容器を置くためにキャスクピットを設ける。

貯蔵容量は、全炉心燃料の約1,150%相当分（1号、2号及び3号炉共用）とする。

(3) 除染場ピット

除染場ピット（1号、2号及び3号炉共用）は、キャスクピットに隣接して設け、使用済燃料輸送容器及び使用済燃料乾式貯蔵容器の除染を行う。

(4) 原子炉キャビティ及び燃料取替用チャネル

原子炉キャビティは原子炉容器上方に設け、燃料取替時にほう酸水を満たすことにより燃料取扱時に必要な遮へいが得られるようにする。

原子炉容器と原子炉キャビティ底面のすきまは、水張りに先立ってシールリングによってシールする。

原子炉キャビティは、鉄筋コンクリート造で、内面はステンレス鋼板で内張りし、炉心構造物及びその他の必要な工具を置くことができる十分な広さを持たせる。

燃料取替用チャンネルは、原子炉キャビティと燃料取扱棟の間で燃料集合体を移送するための水路である。この水路は原子炉格納容器を貫通する燃料移送管を介して、燃料取扱棟内チャンネル（1号、2号及び3号炉共用）と原子炉格納容器内チャンネルに分かれる。

原子炉格納容器内チャンネルの側壁の高さ及び内張材料は原子炉キャビティと同じとし、燃料取替時に原子炉キャビティとつながるプールを形成する。

(5) 燃料取替クレーン

燃料取替クレーンは、原子炉キャビティと原子炉格納容器内チャンネルの上に設けたレール上を水平に移動する架台と、その上を移動する移送台車よりなるブリッジクレーンである。

移送台車には、運転台及び燃料集合体をつかむためのグリッパチューブを内蔵したマストチューブアセンブリがあり、燃料集合体は、マストチューブ内に入った状態で原子炉キャビティ及び原子炉格納容器内チャンネルの適当な位置に移動することができる。

グリッパチューブは二重ワイヤで保持するとともに、その下部にあるグリッパを空気作動式とし、燃料集合体をつかんだ状態で空気が喪失しても、安全側に働いて燃料集合体を落とすことのない構造とする。

架台及び移送台車の駆動並びにグリッパチューブの昇降を安全かつ確実に行うために、各装置にはインターロックを設ける。

燃料取替クレーンは、地震時にも転倒することがないように設計し、さらに、走行部はレールを抱え込む構造とする。

(6) 使用済燃料ピットクレーン

使用済燃料ピットクレーン（1号、2号及び3号炉共用）は、使用済燃料ピット上を移動するブリッジクレーンであり、使用済燃料ピット内での3号炉の燃料集合体の移動は、架台上のホイスト、3号炉燃料用取扱工具等によって行う。また、1号炉及び2号炉の燃料集合体の移動は、架台上のホイスト、1号炉及び2号炉燃料用取扱工具等によって行う。

本クレーンは、駆動源の喪失に対しフェイル・アズ・イズの設計とするとともに、フックは二重ワイヤで保持し、各々の取扱工具は、燃料取扱中に燃料集合体が外れて落下することのないような機械的インターロックを設ける。また、本クレーンは、燃料取扱事故が発生した場合、燃料集合体落下信号を発信するように設計する。

なお、1号炉及び2号炉燃料用取扱工具は、3号炉の燃料集合体をつかめない構造とし、3号炉燃料用取扱工具は、1号炉及び2号炉の燃料集合体をつかめない構造とすることにより誤操作を防止する。

本クレーンは、地震時にも転倒することがないように設計し、さらに、走行部はレールを抱え込む構造とする。

(7) 燃料取扱棟クレーン

燃料取扱棟クレーン（1号、2号及び3号炉共用）は、新燃料輸送容器、使用済燃料輸送容器、**使用済燃料乾式貯蔵容器**及び新燃料の移動を安全か

つ確実に行う天井走行形クレーンである。

燃料取扱棟クレーンは、フックを二重ワイヤで保持し新燃料輸送容器、使用済燃料輸送容器、**使用済燃料乾式貯蔵容器**及び新燃料の落下を防止するとともに、地震時にも落下することがないように設計とし、その移動範囲を重量物の落下により使用済燃料ピットに影響を及ぼすことがないように限定する。

(8) 新燃料エレベータ

新燃料エレベータは、1体の燃料集合体を載せることのできる箱型エレベータで、燃料取扱棟クレーンから使用済燃料ピットクレーンに新燃料を受渡しする装置である。新燃料エレベータは、駆動源の喪失に対しフェイル・アズ・イズの設計とするとともに二重ワイヤにより燃料集合体の落下を防止する構造とする。

(9) 燃料移送装置

燃料移送装置は、燃料移送管を通して燃料を移送するために、水中でレール上を走行する移送台車及び燃料移送管の両端のトラックフレームに燃料集合体の姿勢を変えるリフティング機構を設ける。

移送台車及びリフティング機構には、燃料集合体の受渡しを安全かつ確実にできるようにインターロックを設ける。

燃料取替時以外は、移送台車を使用済燃料ピット側に納め、燃料移送管の隔離弁を閉止し、閉止ふたを閉じる。

(10) ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料取扱装置

ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料取扱装置は、ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の把持及び昇降機能を持ち、遮へい等放射線防護上の措置を講じた装置であり、燃料取扱棟クレーンに吊り下げて使用する。

本装置の吊り下げには、落下防止のため、二重ワイヤを使用する。

また、本装置のグリッパは、ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の落下防止のため、燃料集合体昇降機能の駆動部に二重ワイヤを使用するとともに、グリッパを空気作動式とし、ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料をつかんだ状態で空気が喪失しても、安全側に働いてウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料を落とすことのない構造とする。

なお、本装置は、操作員の被ばく低減の観点から、ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料から適切な距離を保って操作する。

(11) 使用済燃料ピット水位

使用済燃料ピット水位は、通常水位からの水位の低下及び上昇を監視できる計測範囲を有し、中央制御室で監視できるとともに、異常を検知した場合は警報を発する。

(12) 使用済燃料ピット温度

使用済燃料ピット温度は、ピット水の水温を監視できる計測範囲を有し、中央制御室で監視できるとともに、異常を検知した場合は警報を発する。

(13) 使用済燃料ピットエリアモニタ

使用済燃料ピットエリアモニタは、使用済燃料ピット周辺の放射線量を監視できる計測範囲を有し、中央制御室で監視できるとともに、異常を検知した場合は警報を発する。

(14) 使用済燃料乾式貯蔵施設

使用済燃料乾式貯蔵施設は、使用済燃料を収納する使用済燃料乾式貯蔵容器、これらを保管する使用済燃料乾式貯蔵建屋（1号、2号及び3号炉共用）等で構成する。

使用済燃料乾式貯蔵容器は、貯蔵容器本体、蓋、バスケット等で構成され、これらの部材は、設計貯蔵期間（50年）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年劣化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持し、必要な安全機能を失うことのないようにする。

使用済燃料乾式貯蔵施設は、1号及び2号炉用燃料を収納する容器と3号炉用燃料を収納する容器を合計45基配置できる容量とする。

また、使用済燃料乾式貯蔵容器には、使用済燃料ピット内で使用済燃料を収納し、排水後内部にヘリウムガスを封入する。

使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）

ウラン燃料

燃料集合体中の燃料棒配列 14×14燃料（1号及び2号炉用）

ウラン235濃縮度 約4.1wt%以下

燃料集合体最高燃焼度 48,000Mwd/t以下

冷却年数 15年以上

使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）

ウラン燃料

燃料集合体中の燃料棒配列 17×17燃料（3号炉用）

ウラン235濃縮度 約4.1wt%以下

燃料集合体最高燃焼度 48,000Mwd/t以下

冷却年数 15年以上

使用済燃料乾式貯蔵容器は、容器表面の線量当量率が2mSv/h以下及び容器表面から1m離れた位置における線量当量率が100 μ Sv/h以下となるよう、収納される使用済燃料の放射能強度を考慮して十分に遮蔽できる構造とする。

使用済燃料乾式貯蔵施設は、設計貯蔵期間において、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去し、安全機能を担保する各部位及び使用済燃料が、構造健全性及び性能を維持できる構造とする。

使用済燃料乾式貯蔵容器はSクラスの耐震性を有する設計とし、個々の

使用済燃料を使用済燃料乾式貯蔵容器内部の所定の位置に収納するためのバスケットは、適切な燃料集合体間隔を保持することにより燃料集合体は相互に接近しない構造とする。また、使用済燃料を全容量収納し、容器内の燃料位置等について想定されるいかなる場合でも、実効増倍率を0.95以下に保ち、使用済燃料の臨界を防止できる構造とする。

使用済燃料乾式貯蔵容器はSクラスの耐震性を有する設計とし、貯蔵容器本体、蓋部及び金属ガスケットにより漏えいを防止し、設計貯蔵期間中の貯蔵容器内部圧力を負圧に維持できる構造とする。

4.1.1.5 試験検査

燃料取扱及び貯蔵設備は、機器の使用に先立って機能試験、検査を実施する。また、使用済燃料ピットのほう素濃度は定期的に分析する。

4.1.1.6 手順等

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設は、以下の内容を含む手順を定め、適切な管理を行う。

- (1) 使用済燃料ピットへの重量物落下防止対策
 - a. 使用済燃料ピット周辺に設置する設備や取扱う吊荷については、予め定めた評価フローに基づき評価を行い、使用済燃料ピットに影響を及ぼす落下物となる可能性が考えられる場合は落下防止措置を実施する。
 - b. 日常作業等において使用済燃料ピット周辺に持ち込む物品については、必要最低限に制限するとともに落下防止措置を実施する。
 - c. 使用済燃料ピット上で作業を行う使用済燃料ピットクレーンについては、クレーン等安全規則に基づき、定期点検及び作業開始前点検を実施するとともに、クレーンの運転、玉掛けは有資格者が実施する。

第4.1.1表 燃料取扱及び貯蔵設備の設備仕様

(1) 新燃料貯蔵庫

個数	1
ラック容量	燃料集合体約150体分 (全炉心燃料の約100%相当分)
ラック材料	ステンレス鋼

(2) 使用済燃料ピット（1号、2号及び3号炉共用）

個数	2
ラック容量	燃料集合体1,800体分 (全炉心燃料の約1,150%相当分)
ラック材料	ボロン添加(0.95~1.05wt%)ステンレス鋼 ⁽²⁾ 及び ステンレス鋼(ボロン添加(0.95~1.05wt%) ステンレス鋼板付き)

ライニング材料 ステンレス鋼

- (3) 除染場ピット（1号，2号及び3号炉共用）

個 数 1

- (4) 原子炉キャビティ及び燃料取替用チャンネル

個 数 1

（燃料取替用チャンネルのうち燃料取扱棟内
チャンネルは1号，2号及び3号炉共用）

ライニング材料 ステンレス鋼

- (5) 燃料取替クレーン

台 数 1

- (6) 使用済燃料ピットクレーン（1号，2号及び3号炉共用）

台 数 1

- (7) 燃料取扱棟クレーン（1号，2号及び3号炉共用）

台 数 1

- (8) 新燃料エレベータ

台 数 1

- (9) 燃料移送装置

台 数 1

- (10) ウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料取扱装置

台 数 1

- (11) 使用済燃料ピット水位

個 数 2

計 測 範 囲 NWL-20cm～+20cm
(EL. +31.66～32.06m)

種 類 浮力式水位検出器

- (12) 使用済燃料ピット温度

個 数 2

計 測 範 囲 0～100℃

種 類 测温抵抗体

- (13) 使用済燃料ピットエリアモニタ

個 数 1

計 測 範 囲 1～10⁵ μSv/h

種 類 半導体式検出器

- (14) 使用済燃料乾式貯蔵施設

個 数 1

貯 蔵 能 力 全炉心燃料の約760%相当分

（使用済燃料乾式貯蔵容器45基分）

種 類 使用済燃料乾式貯蔵建屋

使用済燃料乾式貯蔵容器

・タイプ1 最大収納体数 32

主要寸法 全長 約 5.2m

外径 約 2.6m

・タイプ2 最大収納体数 24

主要寸法 全長 約 5.2m

外径 約 2.6m

2. 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

2.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の貯蔵容量について

貯蔵容量に関する要求事項は以下のとおりである。

①設置許可基準規則第16条第2項一号ロ

- ・燃料体等を必要に応じて貯蔵することができる容量を有するものとする。

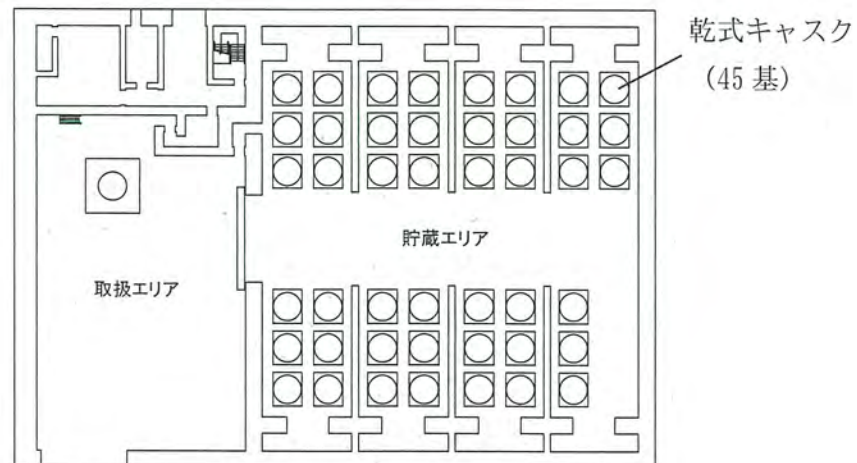
使用済燃料乾式貯蔵施設（以下、「乾式貯蔵施設」という）は、全炉心燃料の約760%相当分とする。

使用済燃料の貯蔵設備は、使用済燃料ピット（全炉心燃料の約1,150%）において全炉心燃料（①）及び1回の燃料取替え（②）に必要な貯蔵容量を確保することとしており、使用済燃料ピット及び使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という）貯蔵分を含めて、全炉心燃料及び1回の燃料取替えに必要な貯蔵容量に十分余裕（③）を持たせた貯蔵容量（①+②+③）とする設計とする。

なお、取扱中の乾式キャスク内の燃料を取り出す容量は貯蔵余裕（③）において確保している。



第2.1-1図 貯蔵容量の考え方



第2.1-2図 乾式貯蔵施設（平面図）

2.2 使用済燃料乾式貯蔵容器の構造について

(1) 乾式キャスクの概要

乾式キャスクとは、使用済燃料を乾式貯蔵施設へ搬入し、貯蔵終了後、再処理工場にそのまま搬出することが可能な輸送貯蔵兼用容器である。

乾式キャスクは、14×14型燃料（1号及び2号炉用）を収納するタイプ1（MSF-32P型）及び17×17型燃料（3号炉用）を収納するタイプ2（MSF-24P型）の2タイプである。

乾式キャスクは、乾式キャスク本体、蓋部、バスケット等で構成し、乾式貯蔵施設内に基礎ボルトで基礎に固定された貯蔵架台（支持構造物）に設置する。乾式キャスクの構造を第2.2-1図～第2.2-4図、乾式キャスク仕様を第2.2-1表に示す。

(a) 乾式キャスク本体

乾式キャスク本体は、胴、レジン及び外筒等で構成する。

胴及び外筒は炭素鋼製でガンマ線遮蔽材であり、レジンは中性子遮蔽材である。

乾式キャスク本体の取り扱いのために、上部トラニオン及び下部トラニオンを取り付ける。

(b) 蓋部

蓋部は、一次蓋及び二次蓋で構成する。

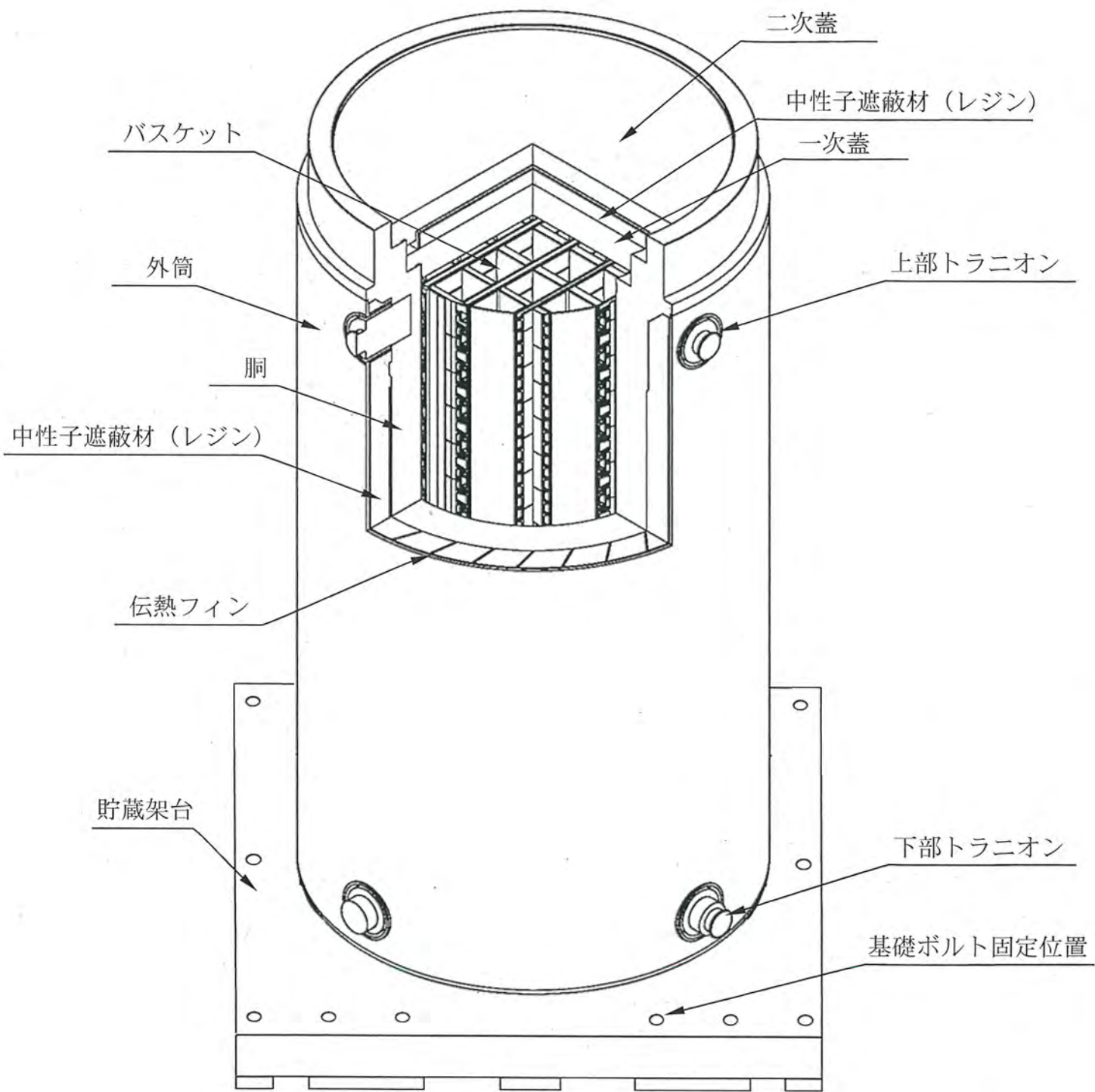
一次蓋は炭素鋼製であり、ボルトで乾式キャスク本体上面に取り付け、閉じ込め境界を構成する。一次蓋に充填するレジンが中性子遮蔽材、一次蓋の炭素鋼はガンマ線遮蔽材である。

二次蓋は炭素鋼製であり、ボルトで乾式キャスク本体上面に取り付ける。

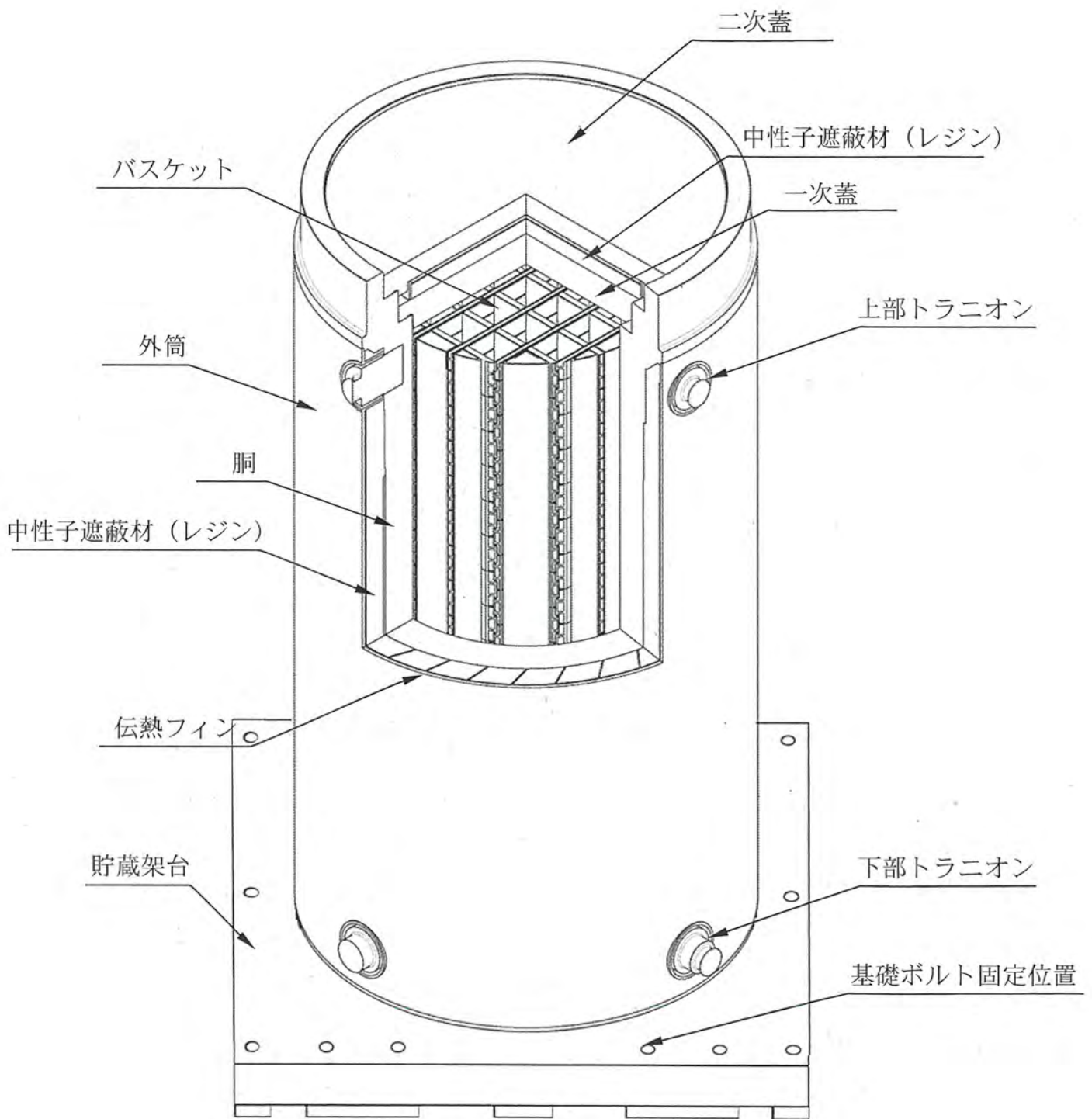
一次蓋のシール部には長期にわたって閉じ込め機能を維持するため、また、二次蓋のシール部には圧力監視境界を設けて閉じ込め監視境界を形成するために金属ガスケットを取り付ける。

(c) バスケット

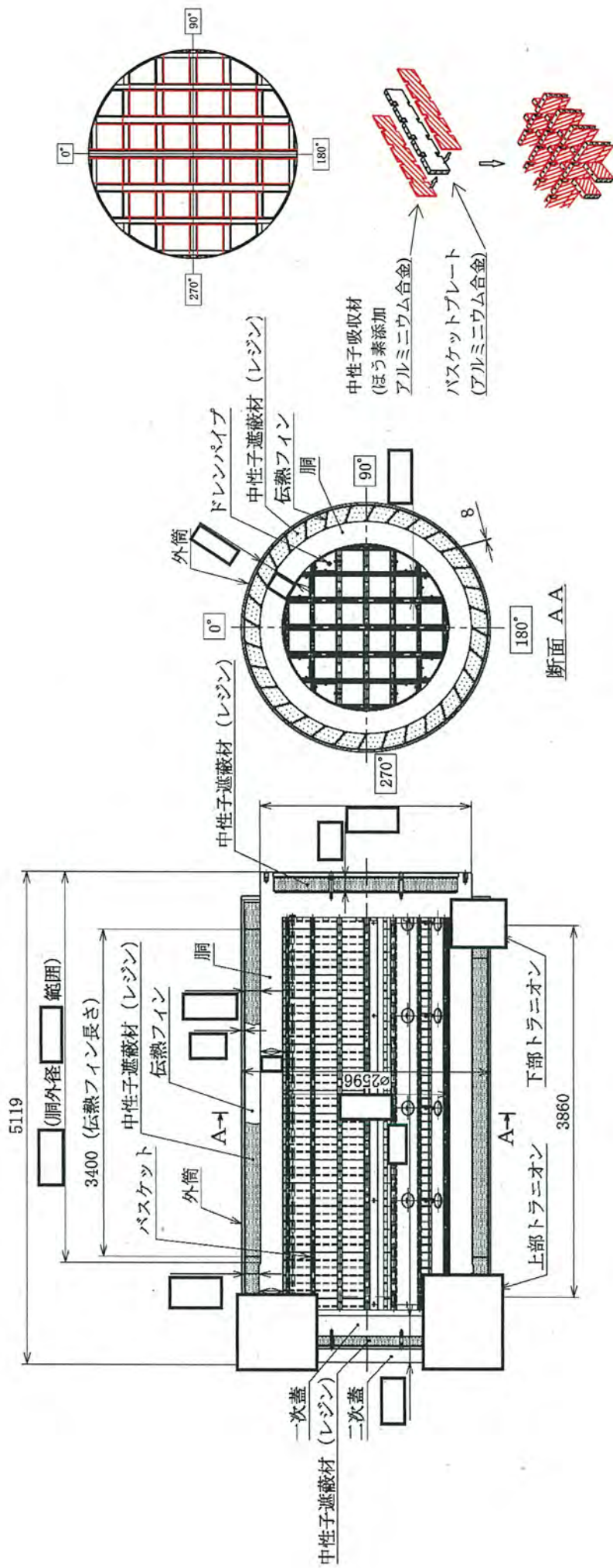
バスケットは断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成する格子構造とし、個々の使用済燃料を乾式キャスク本体内部に配置されたバスケットの所定の格子内に収納する。また、使用済燃料の未臨界性を維持するために、中性子吸収材を併せて配置する。



第 2. 2-1 図 乾式キャスクの構造 (MSF-24P 型)



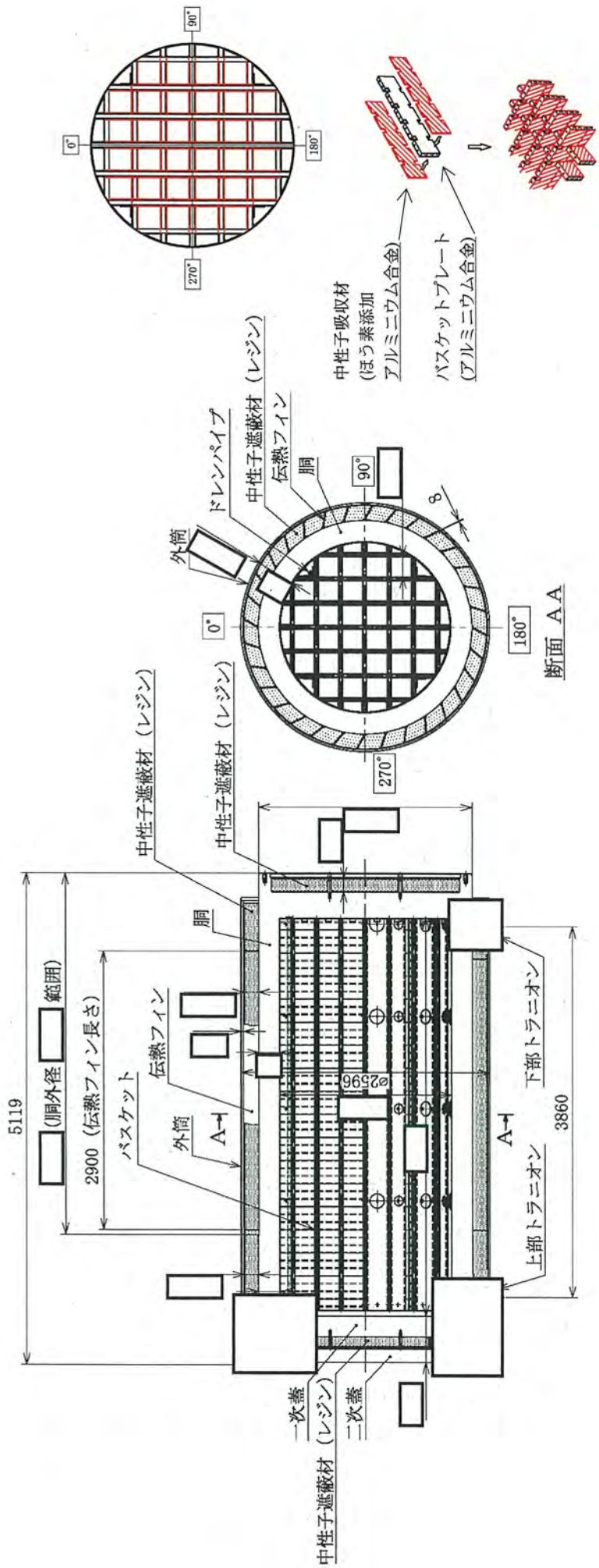
第 2. 2-2 図 乾式キャスクの構造 (MSF-32P 型)



【バスケット構造図】

(単位:mm)

第 2.2-3 図 乾式キャスク断面図 (MSF-24P 型)



(単位: mm)

第 2.2-4 図 乾式キャスク断面図 (MSF-32P 型)

第 2.2-1 表 乾式キャスク仕様

項 目		仕 様	
乾式キャスク型式		MSF-24P 型	MSF-32P 型
全質量 (使用済燃料集合体を含む)		約 117 t	約 117 t
寸 法	全 長	約 5.2 m	約 5.2 m
	外 径	約 2.6 m	約 2.6 m
最 大 収 納 体 数		24 体	32 体
主 要 材 質	乾式キャスク本体		
	胴 (ガンマ線遮蔽材)	炭素鋼	炭素鋼
	外筒 (ガンマ線遮蔽材)	炭素鋼	炭素鋼
	ト ラ ニ オ ン	ステンレス鋼	ステンレス鋼
	中 性 子 遮 蔽 材	レジン	レジン
	伝 熱 フ ィ ン	銅	銅
	蓋 部		
	一 次 蓋	炭素鋼	炭素鋼
	二 次 蓋	炭素鋼	炭素鋼
	蓋 ボ ル ト	ニッケルクロムモリブデン鋼	ニッケルクロムモリブデン鋼
バ ス ケ ッ ト	アルミニウム合金 (中性子吸収材を配置)	アルミニウム合金* (中性子吸収材を配置)	
内 部 充 填 ガ ス		ヘリウムガス	ヘリウムガス
シ ー ル 材		金属ガスケット	金属ガスケット

※：バスケットサポートの一部に炭素鋼を使用している。

2.3 使用済燃料乾式貯蔵容器の収納条件について

乾式キャスクへ収納する使用済燃料仕様を第 2.3-1 表及び第 2.3-2 表に、使用済燃料に挿入して収納することができるバーナブルポイズン集合体仕様を第 2.3-3 表に示す。また、使用済燃料の収納配置を第 2.3-1 図及び第 2.3-2 図に示す。

なお、運転中のデータ、 SHIPPING 検査等により健全であることを確認した使用済燃料を収納する。

また、MSF-24P 型には、回収ウラン燃料も収納するが、回収ウラン燃料については、15 年冷却した通常ウラン燃料と比較して、放射エネルギーは同程度以下であるが、発熱量は比較的高いため、発熱量が同程度以下となるよう 20 年以上冷却した後、収納する。

乾式キャスクへの使用済燃料の装荷にあたっては、次頁以降に示す収納条件を満足することを確認したうえで装荷する。

第 2.3-1 表 使用済燃料仕様 (MSF-24P 型)

項 目		仕 様			
		中 央 部		外 周 部	
燃料集合体の種類		17×17 燃料			
		A 型	B 型	A 型	B 型
形 状	集 合 体 幅 (m m)	約 214			
	全 長 (m m)	約 4,100			
質 量 (k g 以下)		約 680			
燃料集合体 1 体の仕様	初 期 濃 縮 度 (w t % 以下)	約 4.1		約 4.1	
	最 高 燃 焼 度 (G W d / t 以下) (燃料集合体平均)	48		44	
	冷 却 期 間 (年 以 上)	15 ^{**}	17	15	17
乾 式 キ ャ ス ク 1 基 当 た り の 平 均 燃 焼 度 (G W d / t 以下)		44			

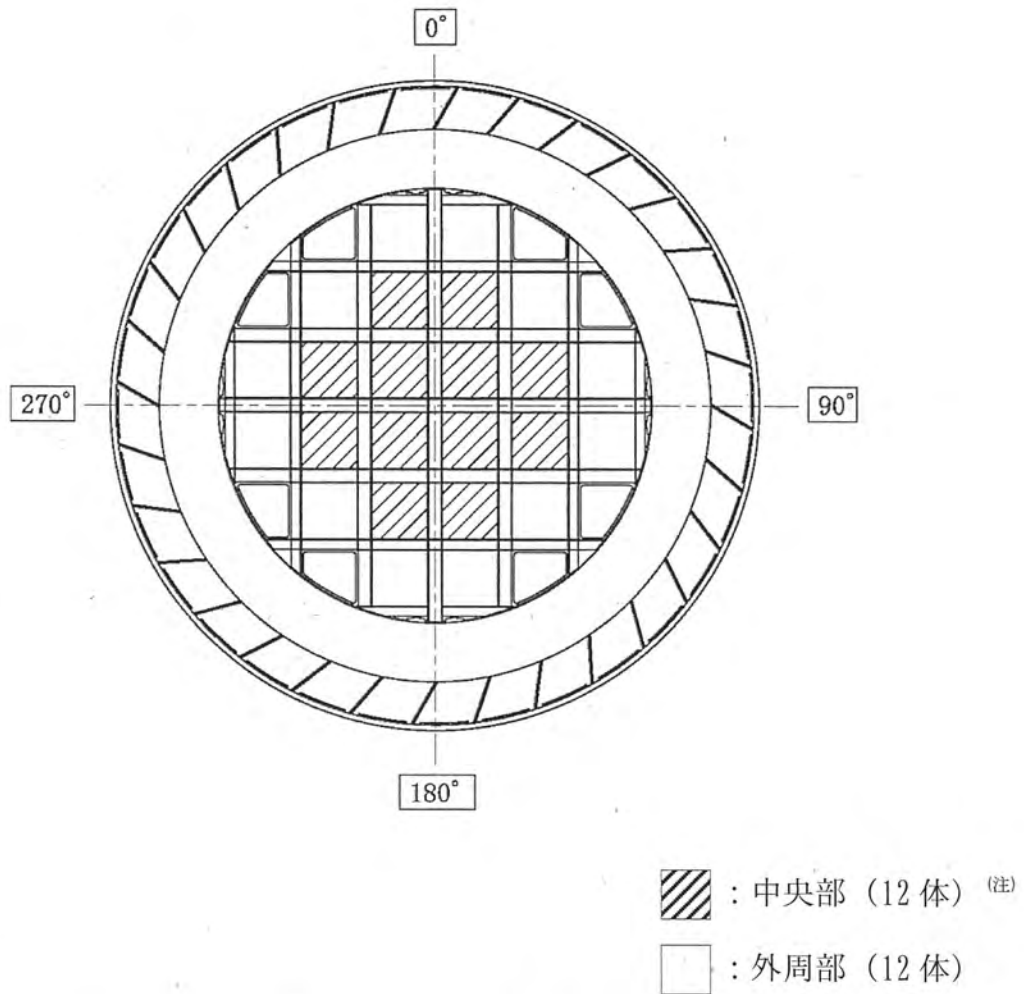
※：回収ウラン燃料については、15 年冷却した通常ウラン燃料と放射エネルギー及び発熱量が同程度以下となるよう 20 年以上冷却した後、収納する。

第 2.3-2 表 使用済燃料仕様 (MSF-32P 型)

項 目		評 価 条 件					
燃料集合体の種類		中 央 部				外 周 部	
		14×14 燃料					
		A型	B型	A型	B型	A型	B型
形 状	集 合 体 幅 (m m)	約 197					
	全 長 (m m)	約 4,100					
質 量 (kg 以下)		約 590					
燃料集合体1体の仕様	初 期 濃 縮 度 (w t % 以下)	約 4.1		約 3.4			
	最 高 燃 焼 度 (GWd/t 以下) (燃料集合体平均)	48		39			
	冷 却 期 間 (年 以 上)	15				25	
乾 式 キ ャ ス ク 1 基 当 た り の 平 均 燃 焼 度 (G W d / t 以下)		45				33	

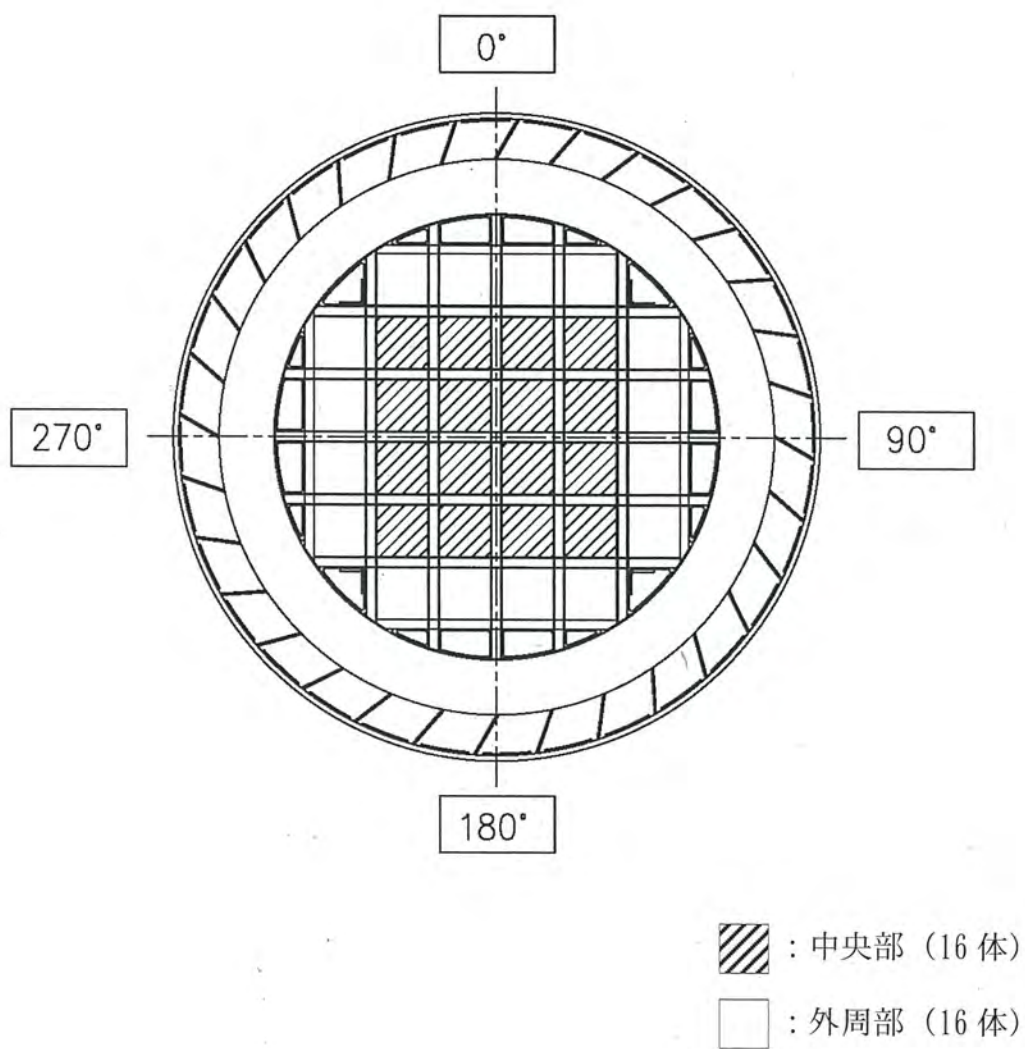
第 2.3-3 表 バーナブルポイズン集合体仕様 (MSF-24P 型のみ)

項 目		仕 様	
バーナブルポイズン 集合体の種類		17×17 燃料用	
		A 型	B 型
形 状	集 合 体 幅 (m m)	約 161	
	全 長 (m m)	約 4,000	
質 量 (k g 以下)		約 29	
照 射 期 間 (日 以下)		2,344 (約 90GWd/t 相当)	
冷 却 期 間 (年 以上)		15	



(注) 中央部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を挿入した状態で乾式キャスクに収納することができる。

第 2. 3-1 図 使用済燃料集合体の収納配置 (MSF-24P 型)



第 2.3-2 図 使用済燃料集合体の収納配置 (MSF-32P 型)

2.4 使用済燃料乾式貯蔵容器の設計貯蔵期間について

2.4.1 要求事項

乾式キャスクの設計貯蔵期間に関する要求事項は以下のとおりである。

- (1) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.6 設計貯蔵期間」には以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

設計貯蔵期間は、設置（変更）許可申請書で明確にされていること。

』

【確認内容】

『

設計貯蔵期間は、当該設計貯蔵期間中の兼用キャスクの安全機能を評価するに当たり、材料及び構造の経年変化の考慮を行うための前提条件となるため、設置（変更）許可申請書で明確にされていること。

』

2.4.2 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの設計貯蔵期間については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

設計貯蔵期間は、当該設計貯蔵期間中の兼用キャスクの安全機能を評価するに当たり、材料及び構造の経年変化の考慮を行うための前提条件となるため、設置（変更）許可申請書で明確にされていること。

乾式キャスクの設計貯蔵期間は60年とし、設置（変更）許可申請書で明確にする。

また、設計貯蔵期間中の乾式キャスクの材料及び構造の健全性については、2.6項で説明する。

2.5 使用済燃料乾式貯蔵容器の4つの安全機能について

2.3項の使用済燃料の収納条件を踏まえ、MSF-32P型及びMSF-24P型の各解析条件の概要を第2.5-1表及び第2.5-2表に示す。

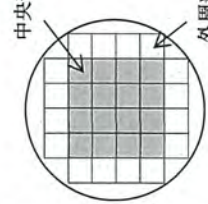
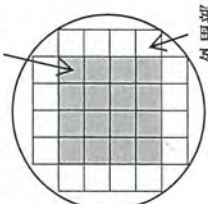
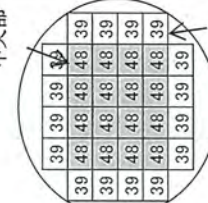
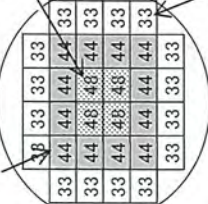
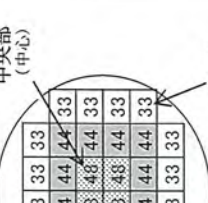
1, 2, 3号との使用済燃料を、専用の乾式キャスク（MSF-32P型、MSF-24P型）にて貯蔵することで、4つの安全機能（閉じ込め、臨界防止、遮へい、除熱）が確保できる設計とする。また、1, 2, 3号炉の使用済燃料を貯蔵した場合でも、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という）が乾式キャスク（MSF-32P型、MSF-24P型）の除熱機能を阻害しない設計とする。

本項では、乾式キャスクの通常貯蔵時※のうち、乾式キャスクを静置している状態における4つの安全機能について説明し、通常取り扱い時の評価は2.7項で説明する。

なお、乾式キャスク収納条件、配置条件に適合する使用済燃料であることを確認のうえ、乾式キャスクへ収納する。

※：発電所敷地内において兼用キャスクを通常に取り扱い、又は静置している状態をいう。

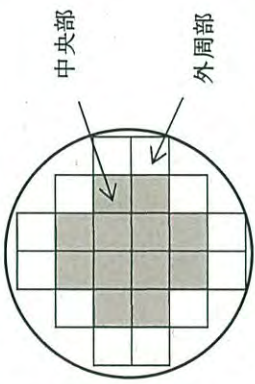
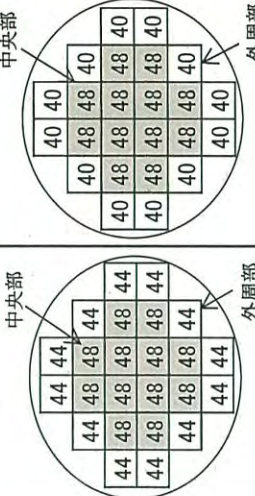
第 2.5-1 表 1, 2 号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

	キャスク収納制限 配置制限	燃料スペース		解析条件						
		燃料スペース		臨界		遮蔽		除熱		
		中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	中心	外周	
燃料タイプ	14×14型 (A/B型)	中央部	外周部	14×14型 (A型)	14×14型 (B型)	14×14型 (A型)		14×14型 (A型)		
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	≤3.5	3.4							
ウラン重量 (kg)										
燃料集合体 1体の 仕様	≤48	≤39	≤48	0	48	39	48	44 ※1	33	
最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≥15	≥25	-	-	15	25	15	15	25	
SFPでの冷却期間 (年)	≤45	≤33	-	0	-	-	-	45	33	
平均燃焼度 (GWd/t)										
キャスク 1基あたり										
収納物仕様	配置※2		中央部		外周部		中央部 (外周)		中央部 (中心)	
										

※1：中央部16体のうち中心4体を除く12体は、中央部16体の燃焼度が平均45GWd/tになるよう44GWd/tとしている。

※2：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

第 2.5-2 表 3 号炉用燃料 乾式キヤスク解析条件の概要

燃料集合体の仕様	キヤスク収納制限 配置制限		燃料スペース	解析条件		
	中央部	外周部		臨界	遮蔽	除熱
燃料タイプ	17×17型 (A/B型)		17×17型 (A/B型)	17×17型 (A型)		
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≦ 4.2		4.1			
ウラン重量 (kg)						
最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≦ 48	≦ 44	≦ 48	48	44	48
SFPでの冷却期間 (年)	A 型: ≧ 15 ※1 B 型: ≧ 17	A 型: ≧ 15 B 型: ≧ 17	—	15	15	15
最高燃焼度 (GWd/t)	≦ 90	—	—	90	—	—
SFPでの冷却期間 (年)	≧ 15	—	—	15	—	—
平均燃焼度 (GWd/t)	≦ 44		—	0	—	44
キヤスク 1 基あたり						
配置※3						

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

※ 2 : 外周部 12 体は、乾式キヤスク全体の燃焼度が平均 44GWd/t になるよう 40GWd/t としている。

※ 3 : 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

なお、各解析については、第 2.5-3 表及び第 2.5-4 表のとおり、三菱重工業株が型式設計特定容器等の型式指定を受けた MSF-21P 型での設計で使用した解析コード及びライブラリと同等のものを使用しており、特殊性及び新規性はない。

第 2.5-3 表 解析コード（ライブラリ含む）比較

評価項目	解析コード	
	MSF-21P 型	MSF-32P 型及び MSF-24P 型
臨界	SCALE 4.4a (KENO-V. a) ／ (燃料領域均質化) (断面積ライブラリ： ENDF/B-V 238 群)	SCALE 6.2.1 (KENO-VI) ／ (燃料ピンモデル化) (断面積ライブラリ： ENDF/B-VII 252 群)
遮蔽	ORIGEN2 DOT3.5 (断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33)	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) DOT3.5 (断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33)
除熱	ORIGEN2 ABAQUS	ORIGEN2 (ORIGEN2.2UPJ) ABAQUS

第 2.5-4 表 解析における変更箇所

	変更項目	MSF-21P 型	MSF-32P 型及び MSF-24P 型
臨界	・コード ／モデル化 ・断面積 ライブラリ	SCALE 4.4a (KENO-V. a) ／ (燃料領域均質化) ENDF/B-V 238 群	SCALE 6.2.1 (KENO-VI) ／ (燃料ピンモデル化) ENDF/B-VII 252 群
遮蔽	・断面積 ライブラリ	MATXSLIB-J33	MATXSLIB-J33
除熱	・解析モデル	2D モデル (モデル検証に 3D モデルを適用)	3D モデル

- 2.5.1 使用済燃料乾式貯蔵容器の閉じ込め機能について
乾式キャスクの閉じ込め機能を別添1に示す。
- 2.5.2 使用済燃料乾式貯蔵容器の臨界防止機能について
乾式キャスクの臨界防止機能を別添2に示す。
- 2.5.3 使用済燃料乾式貯蔵容器の遮蔽機能について
乾式キャスクの遮蔽機能を別添3に示す。
- 2.5.4 使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について
乾式キャスクの除熱機能を別添4に示す。

2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について

2.6.1 要求事項

材料・構造健全性に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第2項一号イ

- ・燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする。

②設置許可基準規則第16条第2項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

③設置許可基準規則第16条第4項一号

- ・使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

④設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

⑤設置許可基準規則第16条第4項三号

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

⑥設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.5 材料・構造健全性」には以下のよう
に記載されている。

【審査における確認事項】

『

設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での兼用キャスクの経年変化に対して十分な信頼性を有する材料及び構造であること。また、貯蔵建屋を設置しない場合は、雨水等により兼用キャスクの安全機能が喪失しないよう対策が講じられていること。輸送荷姿等の緩衝体を装着した状態で貯蔵を行う場合は、緩衝体の経年変化についても考慮していること。

』

【確認内容】

『

- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

』

2.6.2 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの材料・構造健全性については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

【確認内容】

- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

乾式キャスクの主要な構成部材は、設計貯蔵期間中（60年間）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持する。これらの経年変化要因に対する乾式キャスクの主要な構成部材及び使用済燃料被覆管の健全性評価を以下に示す。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

- ・評価に適用する中性子照射量は、減衰を考慮せず初期の照射量が60年間継続する条件で算出している。（乾式キャスク各部材の中性子照射量は第2.6-1表のとおり。）

(1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト

【照射影響】

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼については、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入し、貯蔵する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分（10 wt%）を考

慮しても腐食の影響はない³⁾。また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない⁴⁾。

一次蓋と二次蓋の間の空間部（以下「蓋間空間」という。）には不活性ガスであるヘリウムを封入し、不活性雰囲気は維持されるため、腐食の影響はない。また、胴外面及び一次蓋は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。なお、大気に触れる部分については、塗装等の防食措置により腐食を防止する。

(2) バスケット

【照射影響】

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポートに使用する炭素鋼(MSF-32P型)は、中性子照射量が 10^{16} n/cm²まで顕著な機械的特性変化は見られない^{1)、5)}ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.5×10^{15} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10^{-5} 程度であり無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。

【熱的影響】

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポートに使用する炭素鋼(MSF-32P型)は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定^{2)、5)}されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

なお、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件(250℃)を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している^{5)、6)}。

【化学的影響】

バスケットが置かれた空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分(10 wt%)を考慮しても腐食の影響はない。

また、MSF-32P型のバスケットサポートに使用する炭素鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない⁴⁾。

(3) トラニオン

【照射影響】

トラニオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁷⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

トラニオンの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。

(4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー

【照射影響】

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では 3.3×10^{12} n/cm²、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。また、蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面は不活性雰囲気維持されるため、腐食の影響はない。なお、外筒の外表面については、塗装等の防食措置により腐食を防止する。

(5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー

【照射影響】

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、中性子照射量

が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない⁷⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 8.2×10^{13} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。

(6) 中性子遮蔽材

【照射影響】

中性子遮蔽材（レジン）は、中性子照射量が 10^{15} n/cm² までは、顕著な質量減損は見られないことが示されており^{8)、9)}、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響、化学的影響】

中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中の熱的（化学的）影響により質量減損（2%程度）が発生⁸⁾ するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 %の質量減損を考慮する。

(7) 金属ガスケット

【照射影響】

金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm² 又は 10^{21} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない^{10)、11)} ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 2.0×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

また、高温時の健全性についてラーソン・ミラー・パラメータ（LMP）で評価すると、150 °Cでは 100 年以上閉じ込め機能を維持できる¹²⁾。さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験（19 年以上）が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている¹³⁾。

【化学的影響】

蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、その圧力を監視する設計としている。閉じ込め境界である一次蓋の金属ガスケット及び圧力監視境界である二次蓋の金属ガスケットの内側は不活性雰囲気であり、腐食を考慮する必要はない。

大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている¹⁴⁾。また、10年間海浜条件で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さ³⁾を用い、設計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約0.025mm及び約0.33mmであり、外被の板厚0.5mmより小さいため、閉じ込め機能に影響はない。

(8) 伝熱フィン

【照射影響】

伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られない¹⁵⁾ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定¹⁶⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である¹⁷⁾ことから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。また、中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること、及び中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。

伝熱フィンと胴及び外筒の接合部において異種金属接触による腐食促進の可能性があるが、密閉静止した淡水環境における銅が接続した鋼の腐食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されている¹⁸⁾。また、中性子遮蔽材の熱劣化により生じる水分量は限定的であり、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。

(9) 使用済燃料被覆管

【照射影響】

燃料被覆管に使用するジルカロイは、設計貯蔵期間中の中性子照射量が 1.5×10^{15} n/cm²であり、炉内の中性子照射量($10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm²)に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る¹⁹⁾。

【熱的影響】

熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照

射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある¹⁹⁾。

クリープひずみの進行については、予測式に基づく累積クリープひずみが1%以下となるよう制限することで防止できる¹⁹⁾ことが示されており、燃料被覆管中の水素化物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが1%を超えることはない。

照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射されたPWR照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は300℃近傍¹⁹⁾であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さいため、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。

燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射されたPWR燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が275℃以下、周方向応力が100MPa以下¹⁹⁾と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止する。

応力腐食割れについては、燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されたヨウ素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない¹⁹⁾。なお、腐食性雰囲気での応力腐食割れ試験でジルカロイ-4の応力腐食割れのしきい応力は200MPaであり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて十分低い¹⁹⁾。

上記に示す通り、燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより、他の発生も同時に防ぐことができる。設計貯蔵期間中の燃料被覆管の温度及び周方向応力は、275℃及び100MPaを超えないことから、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

残留水分が10wt%以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい²⁰⁾ため、健全性に影響はない。

第 2.6-1 表 乾式キャスク主要な構成部位の中性子照射量

	構造材中最大となる 全中性子照射量 (n/cm ²) ※1		判定基準 (n/cm ²)
	MSF-32P型	MSF-24P型	
(1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト※2	4.8×10^{14}	5.9×10^{14}	$< 10^{16}$
(2) バスケット※3	1.5×10^{15}	1.5×10^{15}	$< 10^{16}$
(3) トラニオン※2	4.8×10^{14}	5.9×10^{14}	$< 10^{17}$
(4) 外筒	3.1×10^{12}	3.3×10^{12}	$< 10^{16}$
(4) 蓋部中性子遮蔽材カバー※2	4.8×10^{14}	5.9×10^{14}	$< 10^{16}$
(5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー	7.4×10^{13}	8.2×10^{13}	$< 10^{17}$
(6) 中性子遮蔽材※4	1.3×10^{14}	1.6×10^{14}	$< 10^{15}$
(7) 金属ガスケット	1.8×10^{14}	2.0×10^{14}	$< 10^{19}$
(8) 伝熱フィン※4	1.3×10^{14}	1.6×10^{14}	$< 10^{16}$
(9) 使用済燃料被覆管	1.5×10^{15}	1.5×10^{15}	$< 10^{21 \sim 22}$

※1：遮蔽解析結果から得られた中性子束が 60 年間一定であると仮定して算出した値。

※2：最大となる胴領域の値を記載。

※3：最大となるキャビティ内領域（使用済燃料領域）の値を記載。

※4：最大となる側部中性子遮蔽材領域の値を記載。

2.6.3 参考文献

- 1) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, "An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 210, (1994).
- 2) (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).
- 3) 日本アルミニウム協会, 「アルミニウムハンドブック第7版」, (2007).
- 4) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告」, (2004).
- 5) 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).
- 6) 前口貴治、川原慶幸、山本隆一、崎間公久、玉置廣紀、「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」, *軽金属*, 第 68 卷 第 12 号, (2018).
- 7) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響 -」, (一財)電力中央研究所, (1997).
- 8) (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).
- 9) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, "Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment", *Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, (2007).
- 10) H. Yoshida, et al., "Reactor Irradiation Effects on Al 1100", *Proc. Jpn. Congr. Mater. Res.*, Vol. 24, (1981).
- 11) T. T. Claudson. "Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report", HEDL-TME 75-77, (1975).
- 12) 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*, Vol. 38, No. 6, (1996).
- 13) (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).
- 14) 小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株)日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).
- 15) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, "Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV

Neutron Irradiated Copper Alloys” , ASTM STP888, (1986).

- 16) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015) 」, (2015).
- 17) (公社)腐食防食協会編, 「材料環境学入門」, 丸善 (株), (1993).
- 18) 能登谷武紀, 密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).
- 19) 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).
- 20) (一社)日本原子力学会標準委員会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準 : 2010 (AESJ-SC-F002 : 2010) 」, (2010).

2.7 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について

2.7.1 燃料取扱棟内及び乾式貯蔵施設内での取扱いフロー

燃料取扱棟（以下、「FH/B」という）内及び乾式貯蔵施設内での乾式キャスクの取扱いについて説明する。

乾式キャスクをFH/B内に搬入後、緩衝体取外しから燃料装荷、搬出までの取扱いフローを第2.7-1図に示す。また、乾式貯蔵施設内に搬入後、緩衝体取外しから貯蔵までの取扱いフローを第2.7-2図に、貯蔵から緩衝体取付、搬出までの取扱いフローを第2.7-3図に示す。

参考として、使用済燃料運搬用容器（以下、「輸送キャスク」という）をFH/B内に搬入後、緩衝体取外しから燃料装荷、搬出までの取扱いフローを第2.7-4図に示す。ここで、乾式キャスクと輸送キャスクの取扱いについては、キャスクの内部雰囲気（乾式、湿式）が異なることから、乾式キャスクでは水抜き・真空乾燥作業が追加となるが、基本的な様態や取扱作業は共通である。

また、乾式キャスクを取扱うFH/Bクレーン、乾式貯蔵建屋天井クレーン及び搬送台車については、「3.自然現象等に対する使用済み燃料乾式貯蔵施設の設計方針」にて説明しているとおり、クレーン構造規格等に基づき、一般産業施設や公衆施設と同等の安全性を有していることから、通常取扱い時において想定すべき事象としては、作業員の誤操作を想定する。

以上を踏まえ、設計上想定される事象に関連する様態を作業毎に抜粋したフローをそれぞれ第2.7-5図～第2.7-7図に示す。

(1) FH/B内での取扱いフロー

以下に第2.7-5図の番号に対応して各取扱いフローを説明する。

1-1：燃料装荷、一次蓋取付

キャスクピットにて乾式キャスクに使用済燃料を装荷し、一次蓋を取付ける。

1-2：容器吊上げ・移動・吊下げ

FH/Bクレーンを用いて乾式キャスクを使用済燃料プールから吊上げ、フロアに設置した仮設架台まで移動して吊下げ、設置する。

1-3：排水・真空乾燥・不活性ガス充填・一次蓋密封確認

仮設架台において乾式キャスクの排水・真空乾燥・不活性ガス充填・一次蓋の密封確認を行う。

1-4：二次蓋取付・一次二次蓋間圧力調整・二次蓋密封確認

FH/Bクレーンを用いて二次蓋を取付け、一次-二次蓋間の圧力を調整した後、二次蓋の密封性能を確認する。

1-5：三次蓋取付・三次蓋密封確認

FH/B クレーンを用いて三次蓋を取付け後、三次蓋の密封性能を確認する。

1-6：トレーラエリアへの移動

FH/B クレーンを用いて乾式キャスクをトレーラエリアへ移動する。

1-7：トレーラ上へ横倒し

1-6に引き続き、FH/B クレーンを用いて乾式キャスクをトレーラ上の輸送架台に横倒す。

1-8：緩衝体取付

FH/B クレーンを用いて乾式キャスクに緩衝体を取り付ける。

(2) 乾式貯蔵施設内での取扱いフロー

以下に第2.7-6図の番号に対応して各取扱いフローを説明する。なお、貯蔵後、乾式キャスクを貯蔵施設から搬出する場合は、同図に示すNo. 2-1～No. 2-7の逆手順（第2.7-7図 No. 3-1～No. 3-6の手順）にて取り扱う。

2-1：緩衝体取外し

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクに取り付けられた緩衝体を取り外す。

2-2：キャスク立起こし

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクを立起こす。

2-3：検査架台への移送

搬送台車を用いて乾式キャスクを検査架台へ移送する。

2-4：貯蔵架台上への設置

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて乾式キャスクを検査架台内に設置した貯蔵架台（搬送台車上に設置）に吊り降ろす。

2-5：三次蓋取外し・監視装置取付

乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いて三次蓋を取外し、監視装置を取り付ける。

2-6：貯蔵エリアへの移動

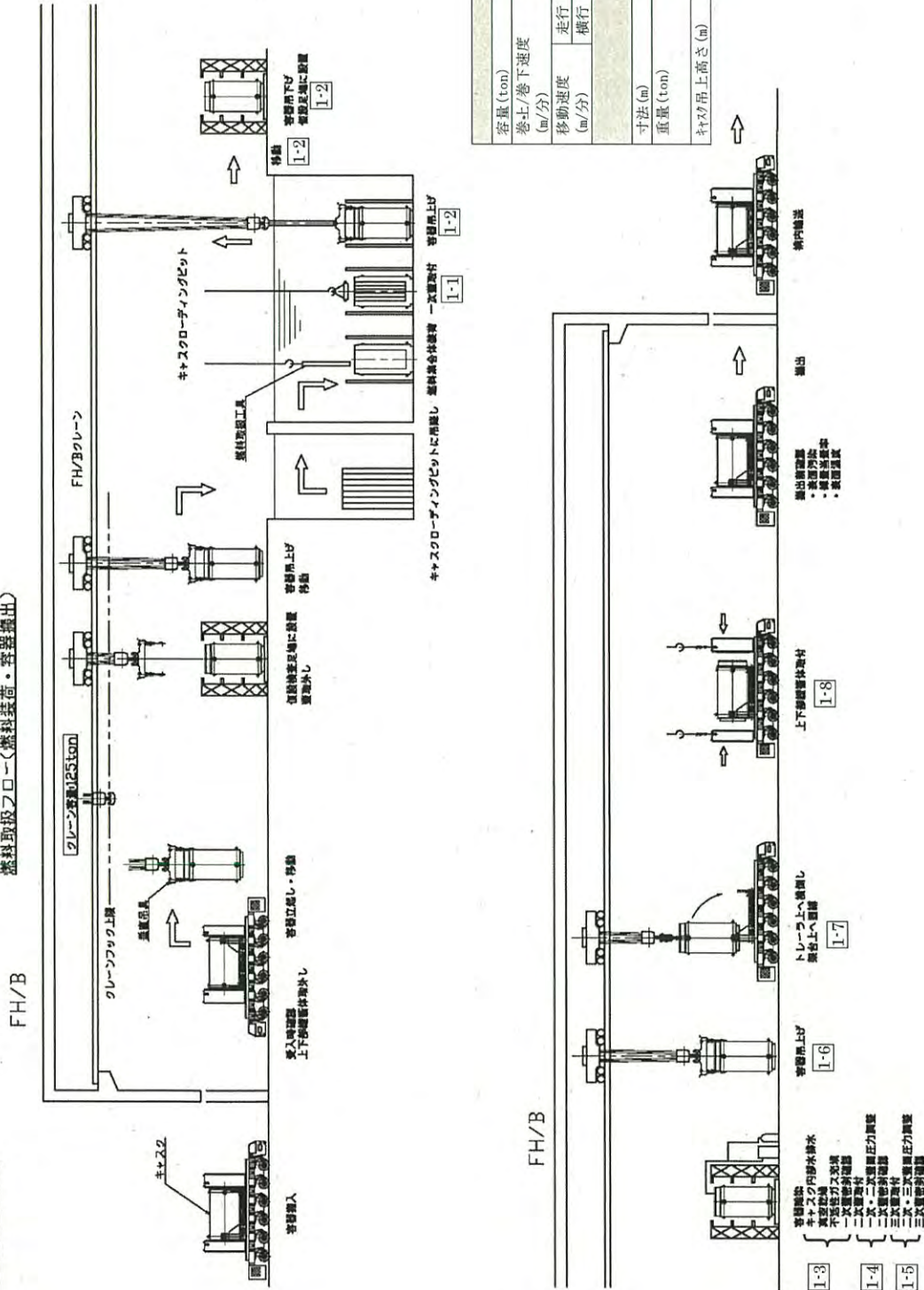
搬送台車を用いて乾式キャスクを貯蔵エリアへ移動する。

2-7：乾式キャスク貯蔵

所定の位置にて貯蔵架台を乾式貯蔵施設の床面にボルトで固縛する。

伊方3号機フロー図

使用済燃料乾式貯蔵容器
燃料取扱フロー(燃料受荷・容器搬出)

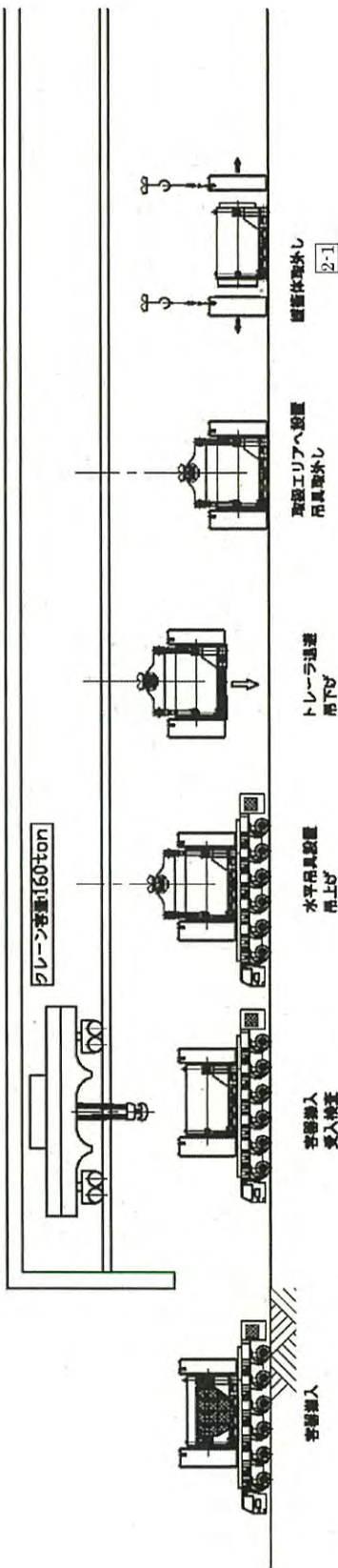


FH/Bクレーン		評価で使用する値
容量 (ton)	主巻: 125	—
巻上/巻下速度 (m/分)	低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	巻き下げ最大速度 の 1.2 m/分を適用
移動速度 (m/分)	走行 0.9 / 6.0 / 18	走行最大速度の 18 m/分を適用
	横行 0.6 / 1.5 / 6.0	—
寸法 (m)	乾式キャスク MSF-24P型 MSF-32P型	—
重量 (ton)	φ 2.6 × 5.2 (緩衝体無) 約 123 (吊具含む)	—
キャスク吊上高さ (m)	約 4 (車両積付時)	重量の大きい 32P を 適用

第 2.7-1 図 伊方 3 号機 FH/B 内の乾式キャスク運用手順 (除染ピットを使用しない場合)

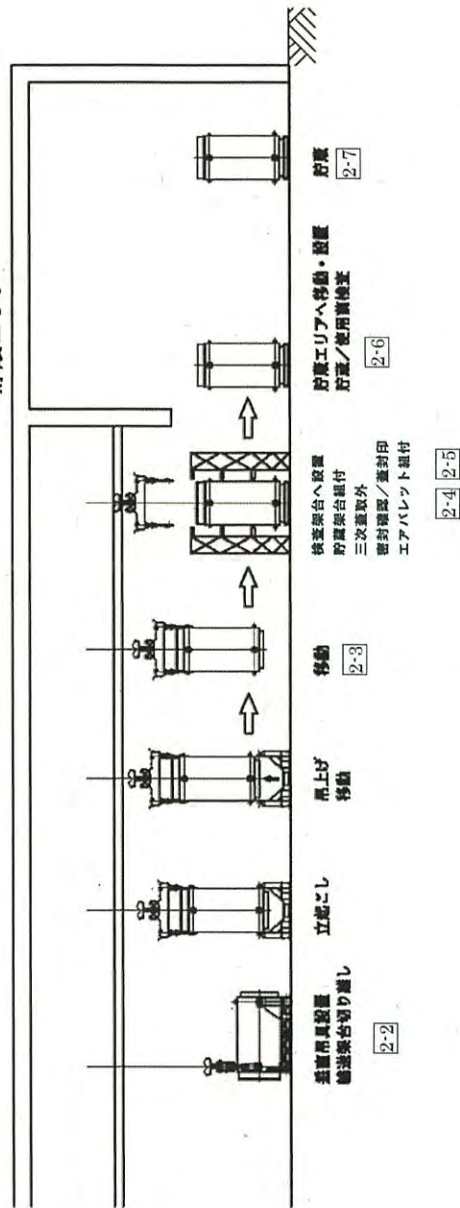
乾式貯蔵建屋フロー図（受入）

取扱エリア



乾式貯蔵建屋天井クレーン		評価で使用する値
容量 (ton)	主巻: 160	—
巻上/巻下速度 (m/分)	低速 / 中速 / 高速	巻き下げ最大速度の 1.2 m/分を適用
	0.12 / 0.6 / 1.2	—
移動速度 (m/分)	走行	走行最大速度の 18 m/分を適用
	横行	—
容量 (ton)	搬送設備	—
移動速度 (m/分)	低速/高速 (空)	—
	0.6 / 2 (6)	—
乾式キヤスク		
寸法 (m)	MSP-24P 型 MSF-32P 型	—
重量 (ton)	φ 3.6 × 6.8 (総衝体含む)	—
	約 149 (吊具、緩衝体含む)	重量の大きい 32P を適用
キヤスク吊上高 (m)	搬送	約 137 (架台含む)
	垂直	約 2 (繰起し時)
	水平	約 2 (車両積降し時)

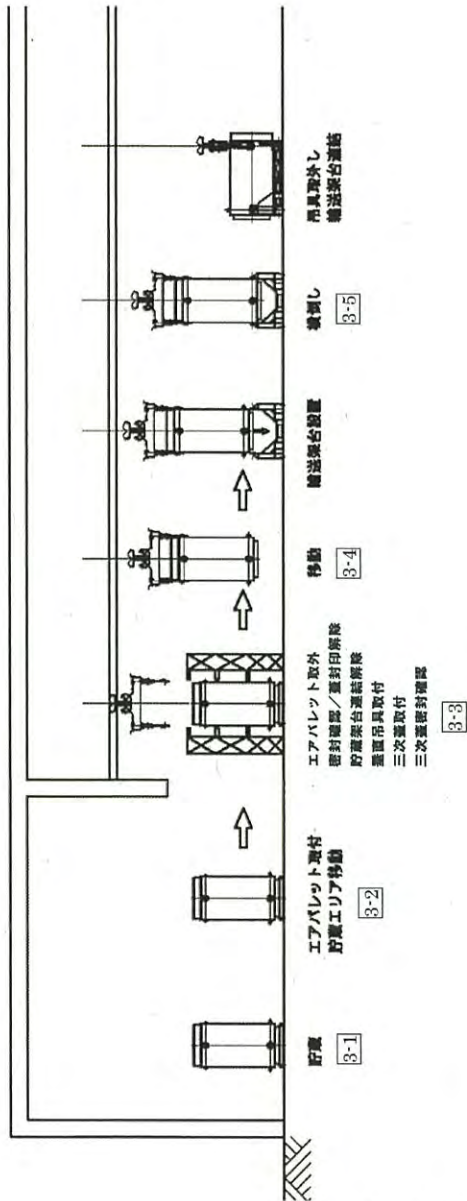
貯蔵エリア



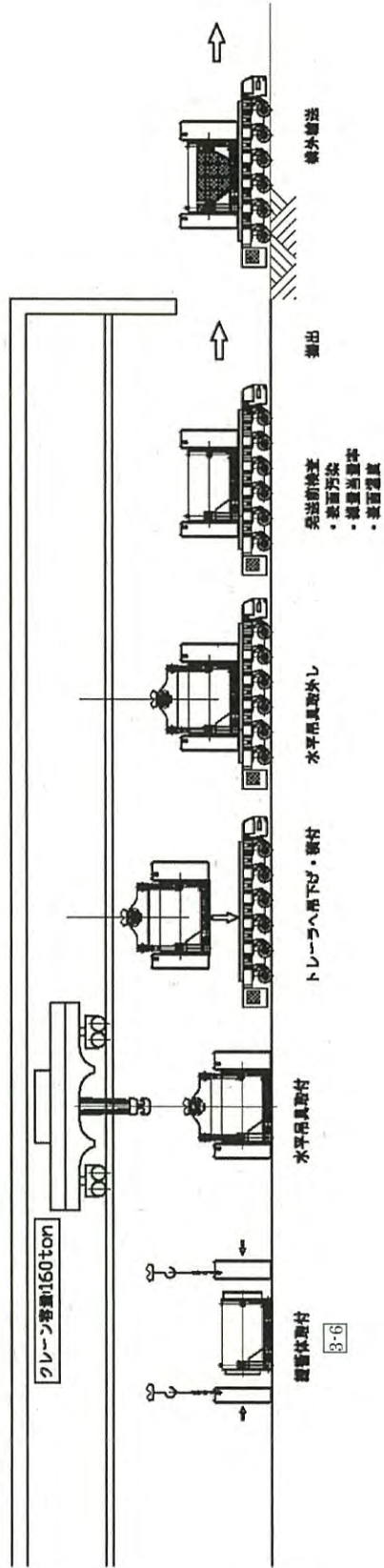
第 2.7-2 図 乾式キヤスク取扱いは時及び貯蔵時の運用手順（受入）

乾式貯蔵建屋フロー図（搬出）

貯蔵エリア 取扱エリア



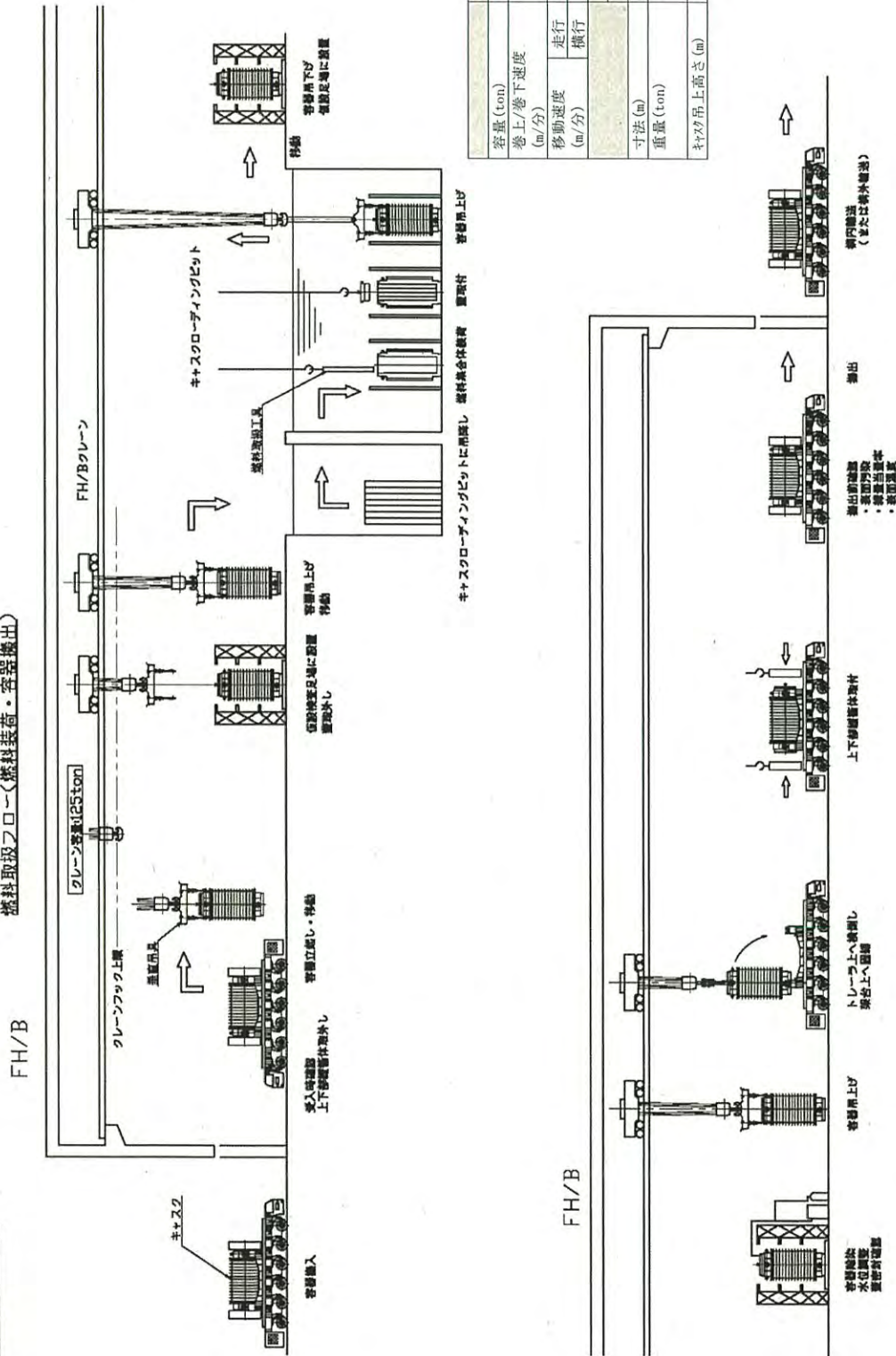
容量 (ton)	乾式貯蔵建屋天井クレーン 主巻：160	評価で使用する値
巻上/巻下速度 (m/分)	低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	巻き下げ最大速度の 1.2 m/分を適用
移動速度 (m/分)	走行 0.9 / 6.0 / 18	走行最大速度の 18 m/分を適用
	横行 0.6 / 1.5 / 6.0	
容量 (ton)	搬送設備 160	
移動速度 (m/分)	低速/高速(空) 0.6 / 2. (6)	
寸法 (m)	乾式キャスク MSF-24P 型	
重量 (ton)	MSF-24P 型 MSF-32P 型 φ 3.6×6.8 (緩衝体含む)	
	吊上 約 149 (吊台含む)	重量の大きい 32P を 適用
キャスク吊上高さ (m)	搬送 約 137 (吊台含む)	
	垂直 約 2 (横倒し時)	
	水平 約 2 (車両積付時)	



第 2.7-3 図 乾式キャスク取扱の運用手順 (搬出)

伊方3号機フロー図

使用済燃料運搬用容器
燃料取扱フロー(燃料装荷・容器搬出)



FH/Bクレーン		評価で使用する値
容量 (ton)	主巻: 125	—
巻上/巻下速度 (m/分)	低速 / 中速 / 高速 0.12 / 0.6 / 1.2	—
移動速度 (m/分)	走行 0.9 / 6.0 / 18	—
	横行 0.6 / 1.5 / 6.0	—
寸法 (m)	輸送キヤスク	
重量 (ton)	NFT-14P 型 φ 2.6×5.3 (総衝体無) 約 120 (吊具含む)	— 重量の大きい 32P を 適用
キヤスク吊上高さ (m)	約 4 (車両積付時)	—

第 2.7-4 図 伊方 3 号機 FH/B 内の輸送キヤスク運用手順 (除染ピットを使用しない場合)

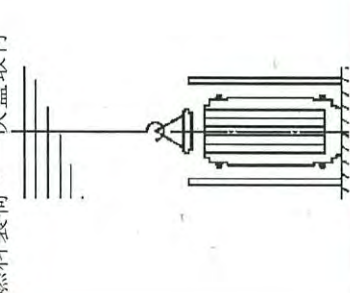
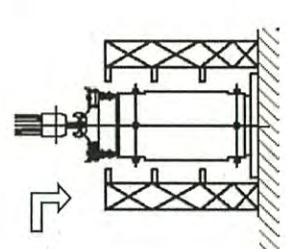
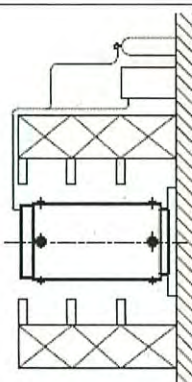
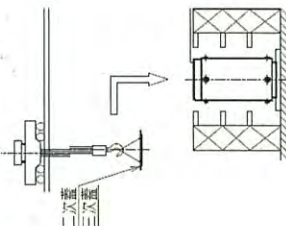
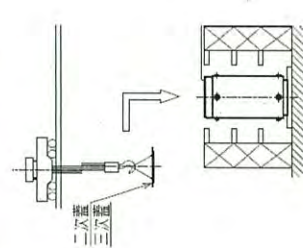
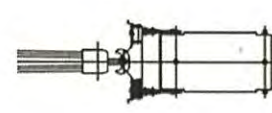
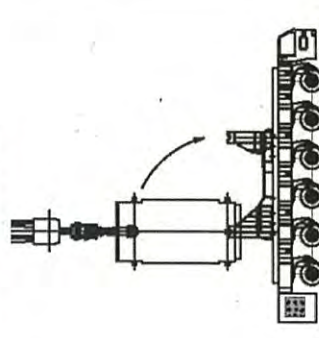
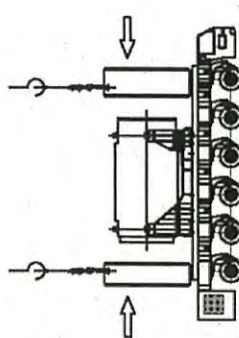
第 2.7-1 表 評価で使用する設備の重量

設備	部材	重量 (トン)	
		MSF-32P 型	MSF-24P 型
乾式キャスク	①本体	81.0	83.7
	②一次蓋	5.9	5.6
	③二次蓋	4.7	4.5
	④三次蓋	3.5	3.3
	⑤バスケット	6.5	5.6
緩衝体	⑥上部緩衝体	8.7	8.7
	⑦下部緩衝体	6.2	6.2
	⑧燃料集合体	18.9	16.7
関連工具類	⑨垂直吊具	約 4	約 4
	⑩水平吊具	約 8	約 8
	⑪貯蔵架台	約 20	約 20
	⑫輸送架台	約 5	約 5
FH/B 容器吊り上げ重量 (①②③④⑤⑧⑨)		約 125	約 123
乾式貯蔵施設 容器吊り上げ重量 (①②③④⑤⑥⑦⑧⑩⑫)		約 149	約 148
乾式貯蔵施設 搬送重量 (①②③⑤⑧⑪)		約 137	約 136

第 2.7-2 表 評価で使用する設備の仕様

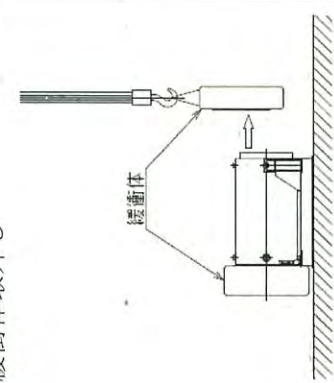
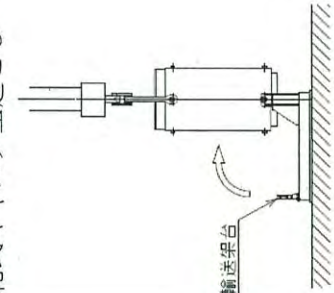
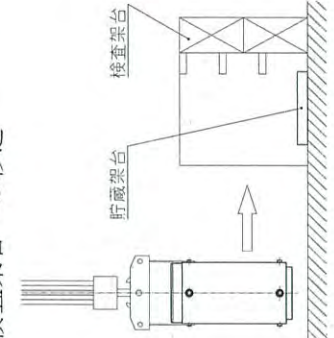
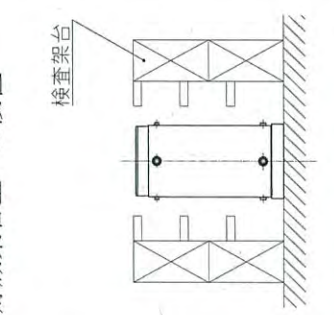
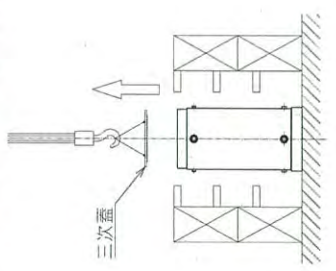
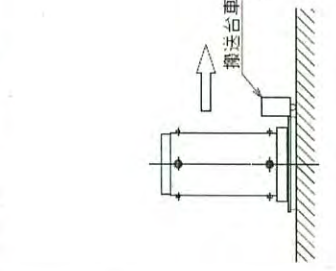
		FH/B クレーン	乾式貯蔵建屋 天井クレーン
容量 (ton) : 主巻		125	160
巻上/巻下速度 (m/分)		1.2	1.2
移動速度 (m/分)	走行	18	18

＜乾式キヤスクの燃料装荷～緩衝体取付＞

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード
1-1	燃料装荷・一次蓋取付 	1-2	容器吊上げ・移動・吊下げ 	1-3	排水・真空乾燥・不活性ガス充填・一次蓋密封確認 	1-4	二次蓋取付・一次二次蓋間圧力調整・二次蓋密封確認 
想定 事象	—	想定 事象	検査架台への衝突 (第2.7-8図(a)) 貯蔵架台への衝突 (第2.7-8図(b))	想定 事象	—	想定 事象	二次蓋の衝突 (第2.7-8図(e))
1-5	三次蓋取付・三次蓋密封確認 	1-6	トレーラエリアへの移動 	1-7	トレーラ上へ横倒し 	1-8	緩衝体取付け 
想定 事象	三次蓋の衝突	想定 事象	—	想定 事象	横倒し時の衝突 (第2.7-8図(d))	想定 事象	緩衝体の衝突 (第2.7-8図(f))

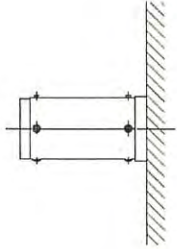
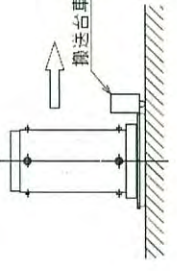
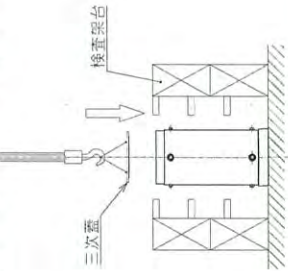
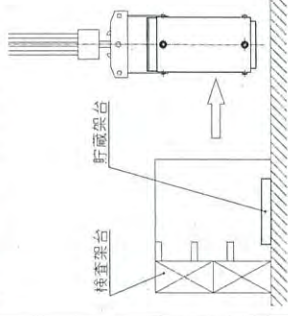
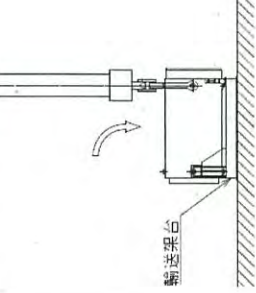
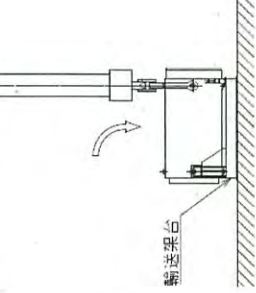
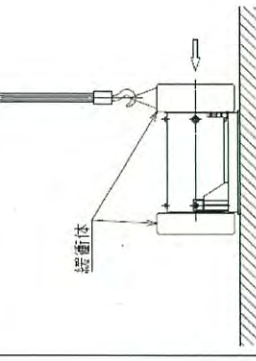
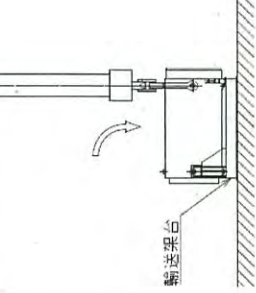
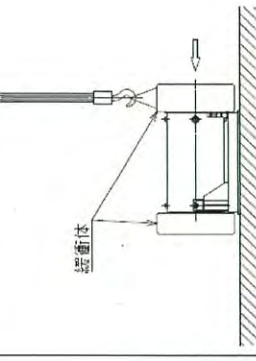
第2.7-5図 FH/B内での取扱いフロー（燃料装荷～緩衝体取付け）

＜乾式キヤスクの緩衝体取外し～貯蔵＞

No. 2-1	取扱いモード 緩衝体取外し 	No. 2-2	取扱いモード 乾式キヤスク立起こし 	No. 2-3	取扱いモード 検査架台への移送 	No. 2-4	取扱いモード 貯蔵架台上への設置 
想定 事象	—	想定 事象	—	想定 事象	想定 事象	想定 事象	貯蔵架台への衝突 (第 2.7-8 図 (b))
2-5	三次蓋取外し・監視装置取付け 	2-6	貯蔵エリアへの移動 	2-7	—	—	—
想定 事象	—	想定 事象	—	想定 事象	—	—	—
想定 事象	三次蓋の衝突	想定 事象	搬送台車で搬送中の衝突 (第 2.7-8 図 (c))	想定 事象	—	—	—

第 2.7-6 図 乾式貯蔵施設内での取扱いフロー（緩衝体取外し～貯蔵）

＜乾式キヤスクの貯蔵～緩衝体取付＞

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード		
3-1	乾式キヤスク貯蔵 	3-2	検査架台へ移動 	3-3	監視装置取外し・三次蓋取付け 	3-4	取扱いモード 作業エリアへの移送 	想定 事象	検査架台への衝突 (第 2.7-8 図 (a))
3-2	想定 事象	3-3	想定 事象	3-4	想定 事象	3-5	乾式キヤスク横倒し 	想定 事象	緩衝体の衝突 (第 2.7-8 図 (c))
3-3	想定 事象	3-4	想定 事象	3-5	乾式キヤスク横倒し 	3-6	緩衝体取付け 	想定 事象	緩衝体の衝突 (第 2.7-8 図 (f))
3-4	想定 事象	3-5	乾式キヤスク横倒し 	3-6	緩衝体取付け 	3-7	緩衝体の衝突 (第 2.7-8 図 (d))	想定 事象	横倒し時の衝突 (第 2.7-8 図 (d))

第 2.7-7 図 乾式貯蔵施設内での取扱いフロー (貯蔵～緩衝体取付)

2.7.2 通常取扱い時に想定すべき事象の抽出

第2.7-1図～第2.7-7図の取扱いフローを踏まえ、通常取扱い時において想定すべき事象を第2.7-3表に示す。

第2.7-3表 通常取扱い時において想定すべき事象

原因	想定事象	作業エリア	具体的な想定
作業員の誤操作	a. 検査架台への衝突 (第2.7-8図(a))	FH/B	乾式キャスクを吊上げ移送中に、クレーン走行速度(18m/分)で仮設の検査架台に衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクを吊上げ移送中に、クレーン走行速度(18m/分)で検査架台に衝突する。
	b. 貯蔵架台への衝突 (第2.7-8図(b))	FH/B	乾式キャスクを仮設の貯蔵架台へ設置時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で貯蔵架台に衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクを貯蔵架台へ設置時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で貯蔵架台に衝突する。
	c. 搬送台車で搬送中の衝突 (第2.7-8図(c))	FH/B	搬送台車による作業はない。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスク搬送中に、搬送台車が建屋壁及び他の乾式キャスク貯蔵架台等へ衝突した場合においても、搬送中の乾式キャスクは幾何学的に傾き角度を制限しており、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない。
	d. 横倒し時の衝突 (第2.7-8図(d))	FH/B	乾式キャスクをトレーラー上で輸送架台へ横倒しする際に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で輸送架台に衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクを輸送架台へ横倒しする際に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で輸送架台に衝突する。
	e. 蓋の衝突 (第2.7-8図(e))	FH/B	乾式キャスクへの二次蓋及び三次蓋取付け作業時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で二次蓋(4.7t)が乾式キャスクに衝突する(注1)。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクへの三次蓋取付け作業時に、クレーン巻き下げ速度(1.2m/分)で三次蓋(3.5t)が乾式キャスクに衝突する(注1)。
	f. 緩衝体の衝突 (第2.7-8図(f))	FH/B	乾式キャスクへ緩衝体取付け作業時にクレーン走行速度(18m/分)で乾式キャスクに衝突する。
		乾式貯蔵施設	乾式キャスクへ緩衝体取付け作業時にクレーン走行速度(18m/分)で乾式キャスクに衝突する。

(注1) 二次蓋及び三次蓋の異常衝突時は、胴フランジ上端が一次蓋及び二次蓋上面より高い位置にあることから、二次蓋及び三次蓋は胴フランジ上端に衝突することを想定。

第 2.7-3 表のとおり抽出した事象のうち、以下の理由から評価対象事象を第 2.7-4 表のとおりとし、評価条件を第 2.7-5 表に示す。

- ・ FH/B クレーンと乾式貯蔵建屋天井クレーンの仕様速度（走行・横行及び巻き上げ・巻き下げ）が同じであることから、乾式貯蔵施設での事象を代表事象とする。
- ・ FH/B では検査架台は仮設とするため、乾式貯蔵施設の検査架台（常設）のほうが剛構造であるため、乾式貯蔵施設の評価に包絡される。
- ・ 乾式キャスク横倒し作業については、立起こし架台が設置される床条件は、床を剛体とし、乾式貯蔵施設及び FH/B の床条件（輸送車両上）に依らず包絡する条件としている。
- ・ 蓋の衝突については、乾式キャスク胴フランジ部に衝突し、密封境界部へ荷重が付加される挙動は二次蓋及び三次蓋でも同じであり、影響度合いは荷重に概ね比例するため、重量の大きい二次蓋（4.7t）の衝突を評価事象とする。

第 2.7-4 表 通常取扱い時において想定すべき事象の抽出結果

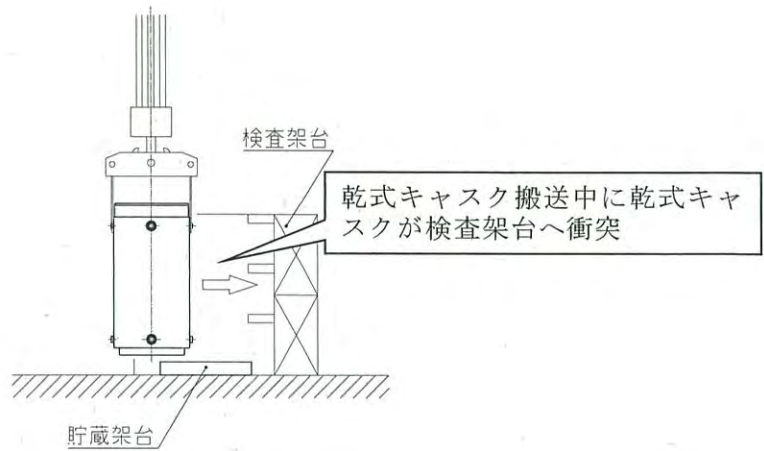
原因	想定事象	具体的な想定	
作業員の誤操作	キャスクの衝突	a. 検査架台への衝突 (第 2.7-8 図(a))	乾式キャスクを吊上げ移送中に、乾式貯蔵建屋天井クレーン走行速度（18m/分）で検査架台に衝突する。
		b. 貯蔵架台への衝突 (第 2.7-8 図(b))	乾式キャスクを貯蔵架台へ設置時に、乾式貯蔵建屋天井クレーン巻き下げ速度（1.2m/分）で貯蔵架台に衝突する。
		c. 搬送台車で搬送中の衝突 (第 2.7-8 図(c))	乾式キャスク搬送中に、搬送台車が建屋壁及び他の乾式キャスク貯蔵架台等へ衝突した場合においても、搬送中の乾式キャスクは幾何学的に傾き角度を制限しており、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない。
		d. 横倒し時の衝突 (第 2.7-8 図(d))	乾式キャスクの横倒し時に、乾式貯蔵建屋天井クレーン巻き下げ速度（1.2m/分）で輸送架台に衝突する。
	キャスクへの衝突	e. 二次蓋の衝突 (第 2.7-8 図(e))	乾式キャスクへの二次蓋取付け作業時に、FH/B クレーン巻き下げ速度（1.2m/分）で二次蓋が乾式キャスクに衝突する ^(注1) 。
		f. 緩衝体の衝突 (第 2.7-8 図(f))	乾式キャスクへ緩衝体取付作業時に乾式貯蔵建屋天井クレーン走行速度（18m/分）で乾式キャスクに衝突する。

(注1) 二次蓋の異常衝突時は、胴フランジ（二次蓋部）が一次蓋上面より高い位置にあることから、二次蓋は胴フランジ上端に衝突することを想定。

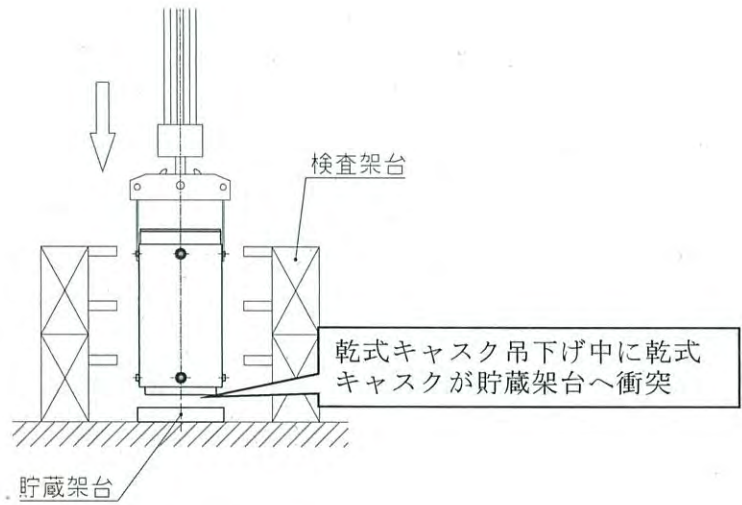
第 2.7-5 表 想定事象の評価条件

想定事象 ^(注1)	被衝突物	衝突物	評価で使用する 衝突物の仕様	
			質量	速度
a. 検査架台への衝突	検査架台	乾式キャスク	120.5ton	18 m/分
b. 貯蔵架台への衝突	貯蔵架台	乾式キャスク	120.5ton	1.2 m/分
d. 横倒し時の衝突	輸送架台	乾式キャスク	120.5ton	1.2 m/分
e. 二次蓋の衝突	乾式キャスク	二次蓋	4.7ton	1.2 m/分
f. 緩衝体の衝突	乾式キャスク	上部緩衝体	8.7ton	18 m/分
		下部緩衝体	6.2ton	18 m/分

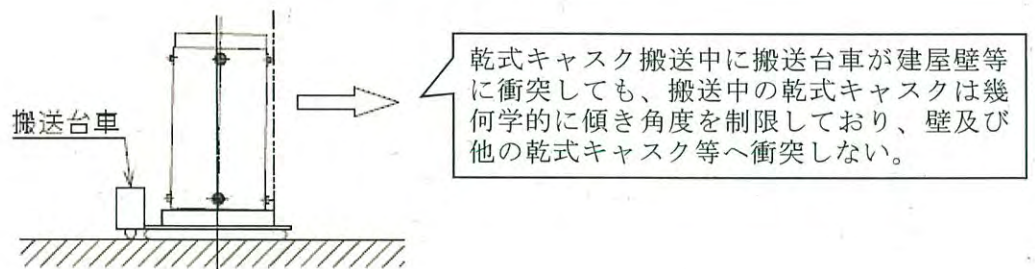
(注1) c. 搬送台車で搬送中の衝突は、幾何学的に傾き角度が制限され、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しないため、除外する。



(a) 検査架台への衝突

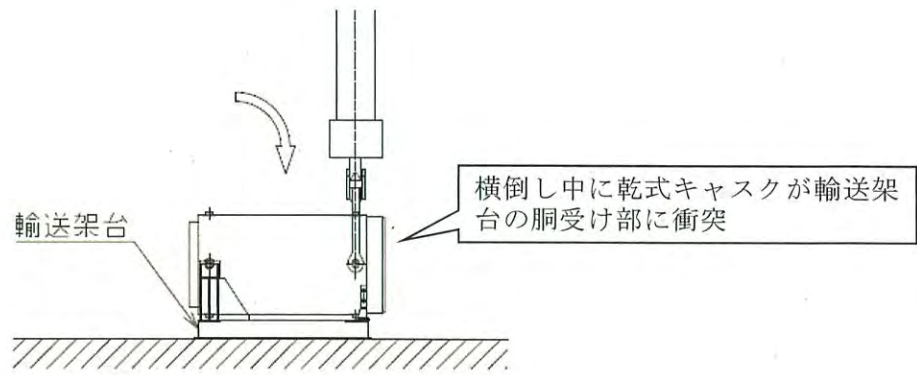


(b) 貯蔵架台への衝突

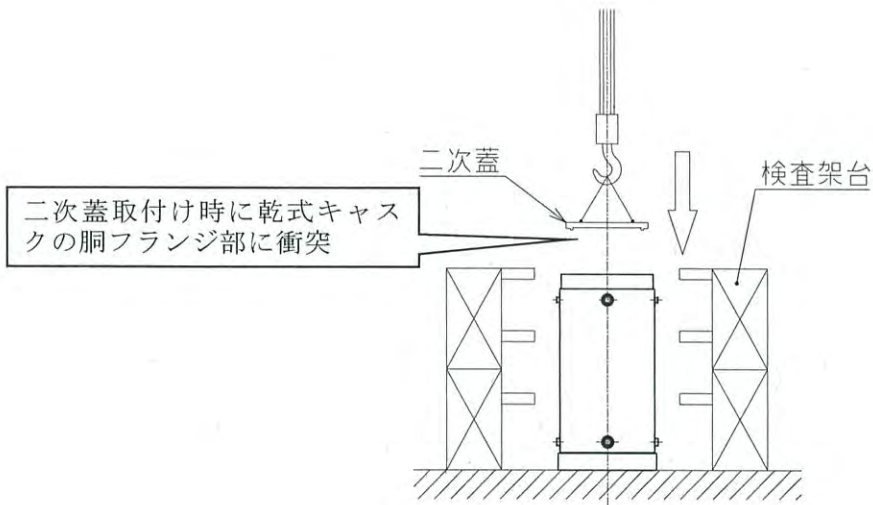


(c) 搬送台車で搬送中の衝突

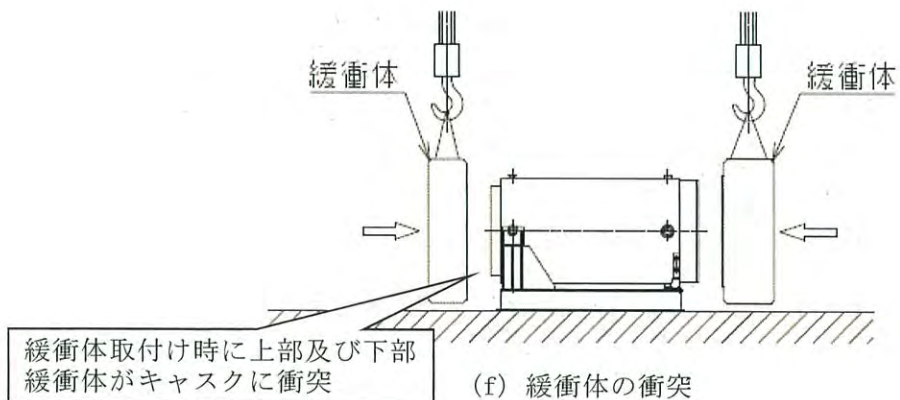
第 2.7-8 図 想定される事象の衝撃荷重の算出体系 (1/2)



(d) 横倒し時の衝突



(e) 二次蓋の衝突



第2.7-8図 想定される事象の衝撃荷重の算出体系 (2/2)

2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力等の監視について

2.8.1 設置許可基準規則要求事項および原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

(1) 設置許可基準規則要求事項

使用済燃料乾式貯蔵容器に関する要求事項は、以下のとおりである。

①設置許可基準規則第16条第4項第三号

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

②設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項

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

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

使用済燃料乾式貯蔵容器に関する要求事項は、以下のとおりである。

「2. 安全機能の確保 2.4 閉じ込め機能」には以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、兼用キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。

』

【確認内容】

『

- (1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

』

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

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

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

』

(3) 要求事項および確認事項の整理

監視項目	基準規則等における要求事項	審査ガイドにおける確認事項	審査ガイドにおける確認内容
蓋間圧力	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料が内包する放射線物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができ、かつ、そのこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計上想定される状態において、兼用キヤスクが内包する放射線物質を適切に閉じ込めることができると。 蓋間圧力及び兼用キヤスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。 	<ul style="list-style-type: none"> 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できると。 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の兼用キヤスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。
兼用キヤスク表面温度	-	<ul style="list-style-type: none"> 蓋間圧力及び兼用キヤスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。 	<ul style="list-style-type: none"> 兼用キヤスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キヤスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。
貯蔵建屋内の雰囲気温度	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。 	-	-

2.8.2 適合性について

(1) 審査ガイド

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの監視機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[確認内容]

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

伊方発電所の使用済燃料乾式貯蔵施設に貯蔵する乾式キャスク（タイプ1：MSF-24P及びタイプ2：MSF-32P）の一次蓋および二次蓋間の圧力（以下、「蓋間圧力」という。）および乾式キャスク表面温度について、適切な頻度で監視する。詳細は、2.8.2.1および2.8.2.2参照。

(2) 設置許可基準規則等

設置許可基準規則解釈別記4第16条第3項で規定される貯蔵建屋内の雰囲気温度の監視については、以下のとおり要求事項に適合している。

[要求事項]

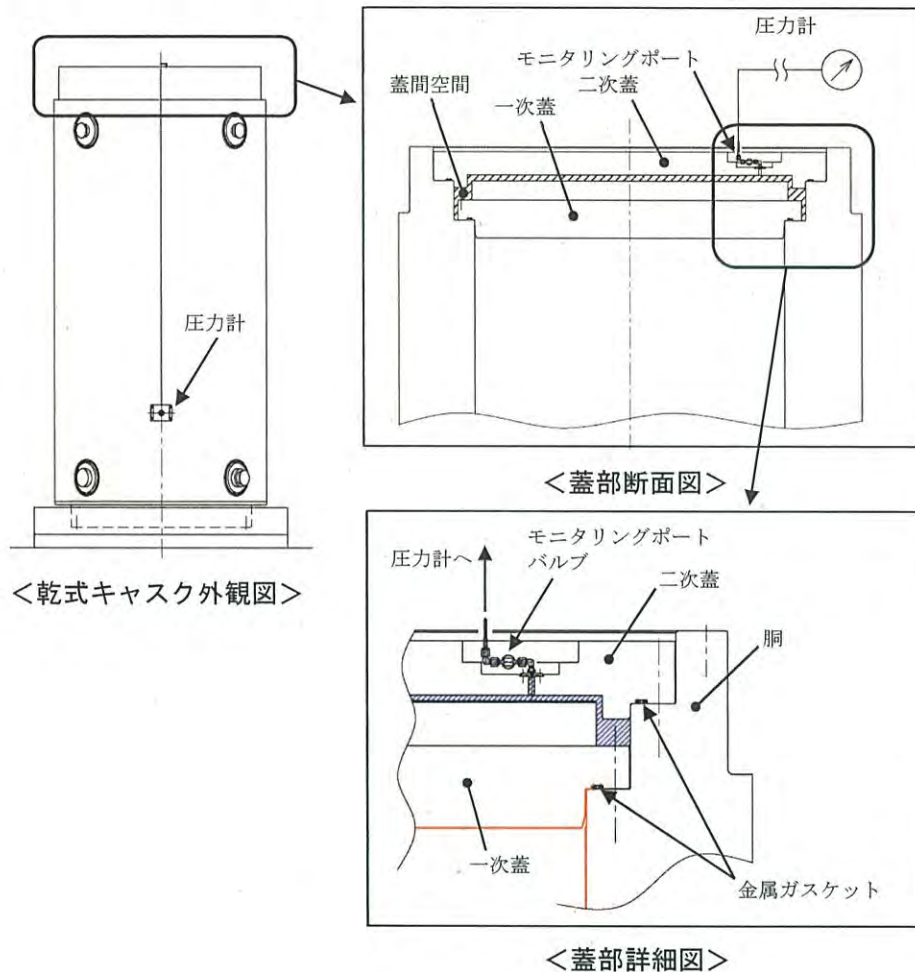
貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。

貯蔵建屋内に温度計を設置し、雰囲気温度を監視することで、雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できる設計とする。詳細は、2.8.2.3参照。

2.8.2.1 乾式キャスク蓋間圧力

(1) 監視方法

乾式キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができていることを監視するために、乾式キャスクの蓋間圧力を監視する。蓋間圧力は、第2.8-1図に示すとおり、乾式キャスクの二次蓋に貫通部を設け、蓋間空間の圧力を圧力計により監視できる設計とする。



第2.8-1図. 乾式キャスク蓋間圧力の監視方法 (イメージ図)

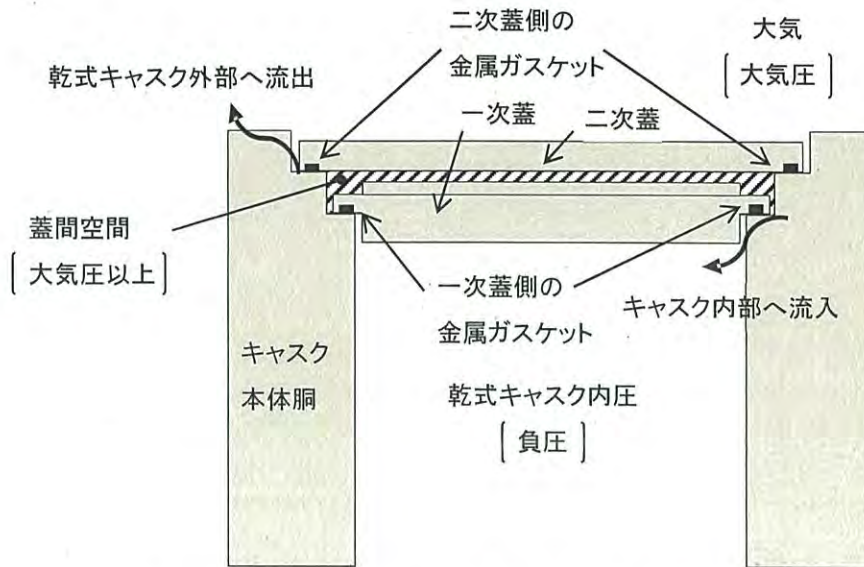
ここで、第2.8-2図に示すように、一次蓋側の金属ガスケットから漏えいが生じた場合は、蓋間のヘリウムガスが乾式キャスク内部に流入し、蓋間圧力は低下するとともに、乾式キャスク内部の圧力(乾式キャスク内圧)は次第に上昇し、大気圧以下で均圧する。

また、二次蓋側の金属ガスケットから漏えいが生じた場合は、蓋間のヘリウムガスが外部へ流出するとともに、蓋間圧力は次第に低下し、大気圧となる。

よって、一次蓋側、二次蓋側の金属ガスケットからの漏えいによらず、蓋間圧力が大気圧以上の間は、蓋間空間からヘリウムガスがアウトリークする。

以上より、乾式キャスクの蓋間圧力が大気圧以上であることを監視することで、

乾式キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができていることを監視できる。



第 2.8-2 図 乾式キャスク蓋間空間からの漏えい（イメージ）

(2) 監視頻度

蓋間圧力の監視頻度を定めるため、次のとおり保守的に閉じ込め機能の低下を想定する。（蓋間圧力が最も早く低下する想定とする。）

- ① 金属ガスケットの漏えい率を基準漏えい率とする。
- ② 乾式キャスクの蓋間空間のヘリウムガスが、一次蓋側（キャスク内部）および二次蓋側（キャスク外部）の二方向から漏えいする。
- ③ 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、蓋間圧力は崩壊熱量を考慮する場合*と崩壊熱量を考慮しない場合（崩壊熱量 0 kW の場合）を想定する。
- ④ 貯蔵開始後は、周囲環境温度が $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で変動すると想定する。
- ⑤ 圧力計の計器誤差を $\pm 1.6\%$ とする。

*：MSF-32P 型キャスクの収納制限最大の発熱量となる場合

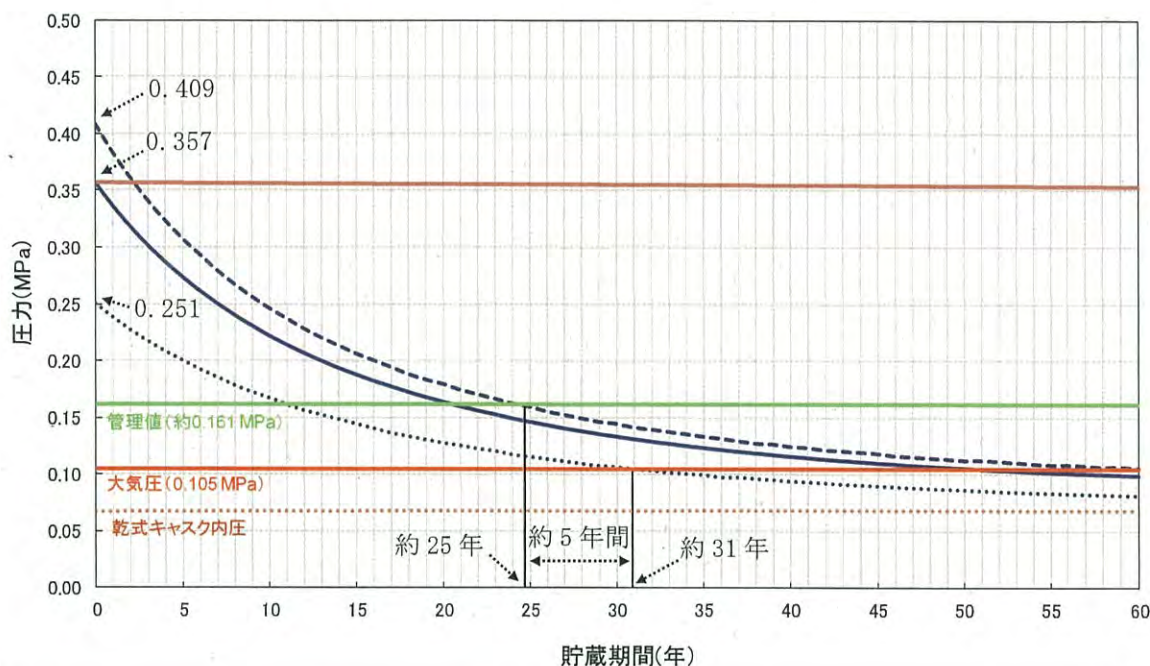
上記想定での設計貯蔵期間（60 年）中の蓋間圧力の経時変化を第 2.8-3 図に示す。

ここで、以下の理由から設計貯蔵期間中において、金属ガスケットの漏えい率は、基準漏えい率を上回ることはない。

- ・ 乾式キャスクは、設計貯蔵期間中（60 年間）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持するため、乾式キャスクの閉じ込め機能を担保している金属ガスケットの漏えい率に影響を与えない。
- ・ 乾式キャスクは輸送時の落下事象に耐える堅牢性を有しており、設計貯蔵期

間中に想定される基準地震動 S_s に対しても安全機能を維持できることから、乾式キャスクの閉じ込め機能を担保している金属ガスケットの漏えい率に影響を与えない。

- 乾式キャスクを頑健な建屋内に貯蔵し、外郭防護することで、貯蔵中に想定される外部事象に対しても乾式キャスクの閉じ込め機能を担保している金属ガスケットの漏えい率に影響を与えない。



凡例	圧力条件
—	周囲環境温度25°C(崩壊熱量考慮、計器誤差なし)
- - -	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)
.....	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)
—	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)
—	管理値(約0.161MPa)
—	大気圧(0.105MPa)
.....	乾式キャスク内圧(周囲環境温度-7°Cの場合の乾式キャスク内圧の上昇曲線)

第 2.8-3 図 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化 (二方向からの漏えいを考慮)

第 2.8-3 図に示すとおり、周囲環境の温度変化 ($-7^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$) による圧力変動を考慮すると、周囲環境が -7°C で崩壊熱量を考慮しない場合 (崩壊熱量 0 kW の場合) 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 ($0.105\text{ MPa}\cdot\text{abs}$) に到達する。ここで、蓋間圧力は、管理値 (約 $0.161\text{ MPa}\cdot\text{abs}$) を設定し、管理値に到達した場合は、ヘリウムガスを充填することとするため、管理値に最も遅く到達した場合 (約 25 年) でも大気圧に至るまでは、約 5 年間時間がかかる。

よって、管理値 (約 $0.161\text{ MPa}\cdot\text{abs}$) を定め、1 年に 1 回の圧力監視を行うことで、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ものの、3 ヶ月に 1 回の頻度で圧力監視を

行う。

2.8.2.2 乾式キャスク表面温度

(1) 監視方法

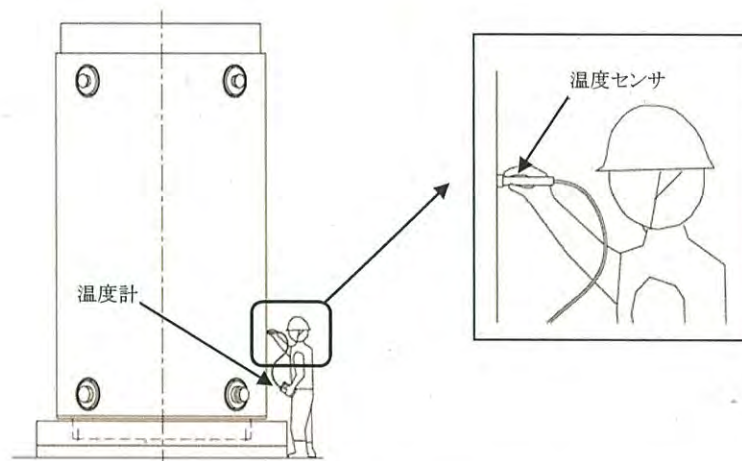
乾式キャスク内の使用済燃料の崩壊熱が適切に除去できていることを監視するために、乾式キャスクの表面温度を監視する。

乾式キャスクの表面温度は、第2.8-4図に示すとおり、温度センサを乾式キャスク外筒の外表面に接触させ、外筒外表面の温度を温度計により監視できる設計とする。

ここで、別添4「伊方発電所3号炉燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（使用済用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について）」における乾式キャスクの除熱解析に示すとおり、外筒外表面の温度が設計温度[※]以下であれば、乾式キャスクおよび燃料被覆管が健全であることが確認できる。

以上より乾式キャスク表面温度が設計温度[※]以下であることを監視することで、乾式キャスクおよび燃料被覆管が健全であり、乾式キャスク内の使用済燃料の崩壊熱が適切に除去できていることが監視できる。

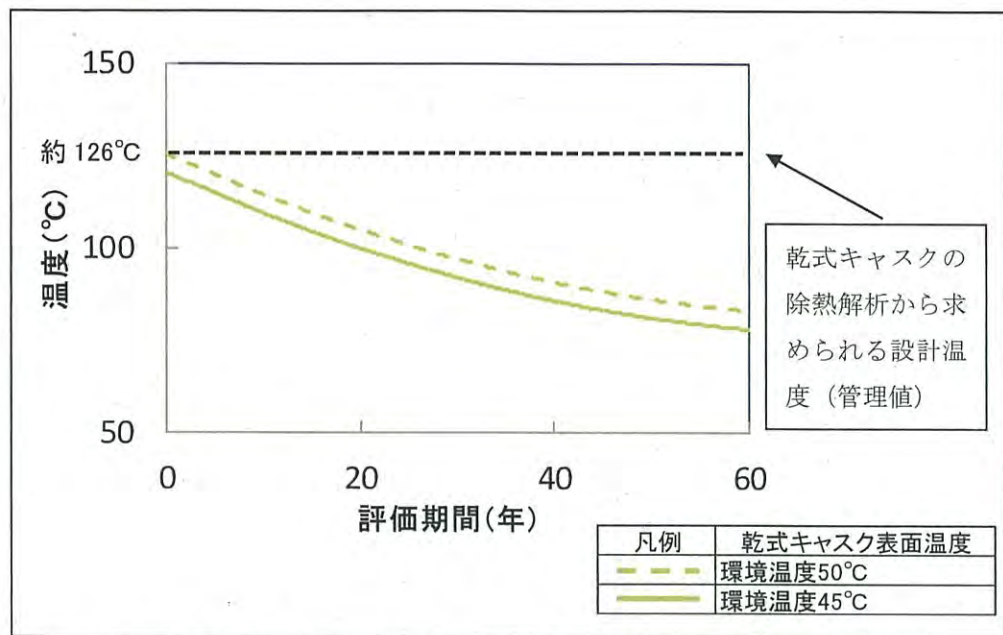
※ MSF-24P 型：129℃， MSF-32P 型：126℃



第2.8-4図 乾式キャスク表面温度の監視方法（イメージ図）

(2) 監視頻度

乾式キャスク表面温度の監視頻度を定めるため、設計貯蔵期間（60年）中の表面温度の経時変化を第2.8-5図に示す。



第 2.8-5 図 乾式キャスク表面（外筒）温度の変化（MSF-32P 型の例）

第 2.8-5 図に示すとおり、乾式キャスク表面温度は、貯蔵開始直後が最も高く、使用済燃料の発熱量低下とともに乾式キャスクの表面温度は低下する。

ここで、以下の理由から設計貯蔵期間中において、乾式キャスクの除熱機能は低下しない。

- ・ 乾式キャスクは、設計貯蔵期間中（60 年間）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持するため、乾式キャスクの除熱機能は低下しない。
- ・ 乾式キャスクは輸送時の落下事象に耐える堅牢性を有しており、貯蔵中に想定される基準地震動 S_s に対しても安全機能を維持できることから、乾式キャスクの除熱機能は低下しない。
- ・ 乾式キャスクを頑健な建屋内に貯蔵することで、貯蔵中に想定される外部事象に対しても乾式キャスクの除熱機能は低下しない。なお、乾式貯蔵建屋の給排気口は、積雪等により閉塞しないことから、乾式貯蔵建屋の除熱機能は低下しない。

以上より、乾式キャスク内の使用済燃料の崩壊熱が適切に除去できていることは、設計貯蔵期間の 60 年間にわたり維持できるものの、蓋間圧力を 3 ヶ月に 1 回の頻度で監視することとしており、これに合わせて乾式キャスク表面温度を 3 ヶ月に 1 回の頻度で監視する。

2.8.2.3 貯蔵建屋内雰囲気温度

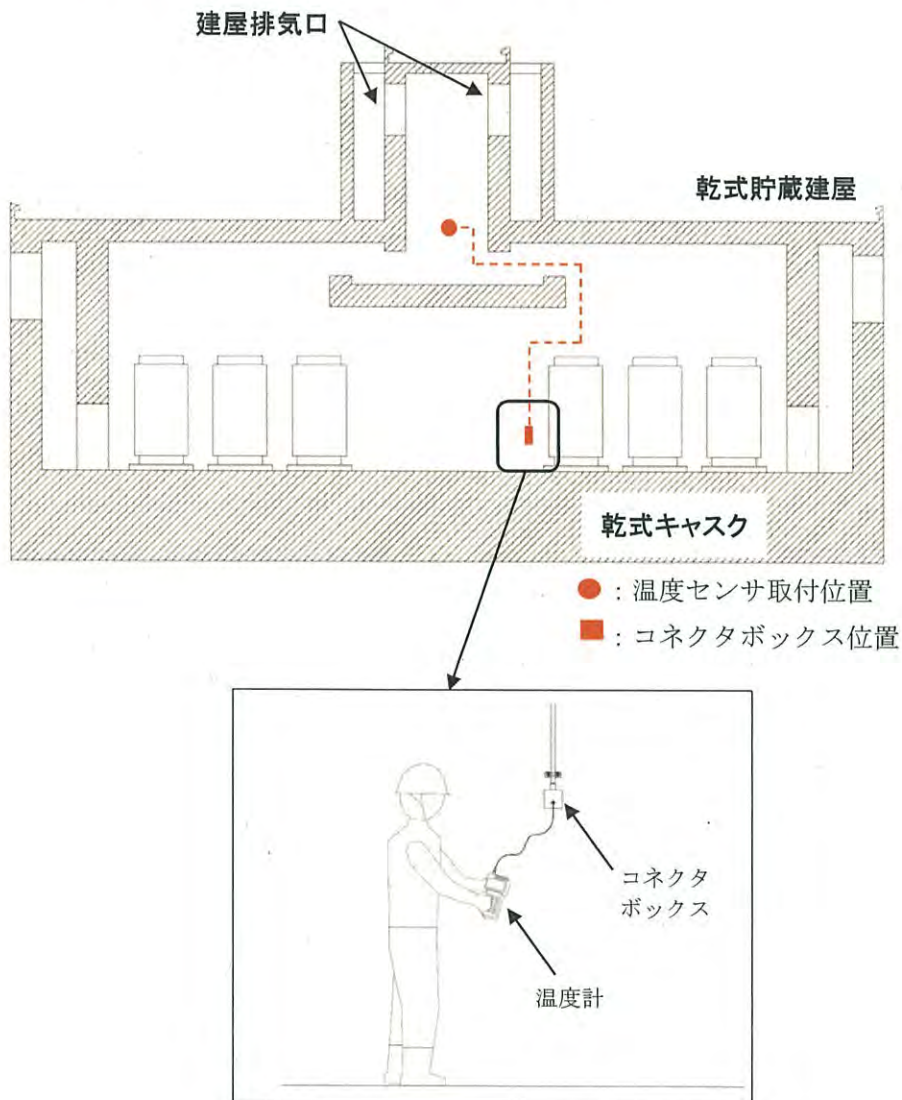
(1) 監視方法

貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視するため、建屋内の雰囲気温度が最も高くなる建屋排気口付近の温度（建屋排気温度）を監視する。

建屋排気温度は、第 2.8-6 図に示すとおり、温度センサを貯蔵エリアの 4 つの区画（乾式キャスク 12 基分）の排気口付近に 1 箇所ずつ（計 4 箇所）設置し温度を監視できる設計とする。

ここで、別添 4「伊方発電所 3 号炉燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（使用済用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について）」における乾式キャスクの除熱解析において、貯蔵建屋内雰囲気温度を最高 50℃と設定し、評価しているため、貯蔵建屋内の雰囲気温度が 50℃以下であれば、乾式キャスクの健全性は担保される。

以上より、建屋排気温度が 50℃以下であることを監視することで、貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視する。



第 2.8-6 図 貯蔵建屋内雰囲気温度の監視方法（イメージ図）

(2) 監視頻度

2.8.2.2 で示したように設計貯蔵期間の 60 年間に於いて、乾式キャスクの除熱機能は維持されることおよび別添 4 「伊方発電所 3 号炉燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（使用済用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について）」における乾式貯蔵建屋の除熱評価に示すように、乾式キャスク 45 基を貯蔵した場合においても、貯蔵建屋内雰囲気温度は 50℃を超えないことから、設計貯蔵期間の 60 年間に於いて、貯蔵建屋内雰囲気温度は 50℃を超えないものの、乾式キャスク表面温度の監視に合わせて、貯蔵建屋内雰囲気温度を 3 ヶ月に 1 回の頻度で監視する。

3. 自然現象等に対する使用済燃料乾式貯蔵施設の設計方針

兼用キャスクの安全機能の喪失及びそれに続く公衆への放射線による影響を防止する観点から、使用済燃料乾式貯蔵施設の設備ごとの設計方針を示す。

3.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の設備の分類及び担保すべき機能について

乾式貯蔵施設は、兼用キャスク及び周辺施設等から構成されるため、乾式貯蔵施設を構成する設備を以下の考えに基づき第3-1表のとおり分類するとともに、兼用キャスクの安全機能を維持するために、各設備が担保すべき機能をまとめる。

ここで、地盤及び周辺斜面については、兼用キャスクに影響を及ぼさないよう第3条2項、3項及び第4条第7項に基づき、安定な地盤及び周辺斜面に乾式貯蔵施設を設置する設計とする。詳細については、地盤に係る安全審査資料に示す。

兼用キャスクは、安全機能を維持するために、それ自体で以下の必要な機能を有しており、乾式キャスクが該当する。

- ・ 兼用キャスクを地震による損傷の防止（第4条第1項、第2項、第6項及び第7項）
- ・ 兼用キャスクを火災による損傷の防止（第8条第1項）
- ・ 兼用キャスクを溢水による損傷の防止（第9条第1項）
- ・ 兼用キャスクの安全機能の維持（第16条第2項及び第4項）

周辺施設は、兼用キャスクである乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な機能を有するものと考えられることから、

- | | |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ・ 兼用キャスクを地震による損傷から防止するもの
（兼用キャスクと相まって耐震性を確保するもの）
（第4条第1項、第2項、第6項及び第7項） | ： 貯蔵架台、基礎ボルト、基礎、
貯蔵建屋 ^{※1} |
| ・ 兼用キャスクを津波による損傷から防護するもの
（第5条第2項） | ： 貯蔵建屋 |
| ・ 兼用キャスクを外部からの衝撃による損傷から防護
するもの（第6条第1項及び第3項） | ： 貯蔵建屋 |
| ・ 兼用キャスクを火災による損傷から防護するもの
（第8条第1項） | ： 貯蔵建屋 |
| ・ 兼用キャスクの安全機能の維持を監視するもの
（第16条第4項） | ： 乾式キャスク圧力計、
乾式キャスク表面温度計、
貯蔵建屋内雰囲気温度計 |
| ・ 兼用キャスクの遮蔽機能を補完するもの
（第29条第1項、第30条第1項～第3項） | ： 貯蔵建屋 |
| ・ 兼用キャスクを通常に取扱うために必要なもの
（第16条第2項） | ： 貯蔵建屋天井クレーン、
乾式キャスク搬送台車 |

が該当する。

※1 乾式キャスクに波及的影響を及ぼさないよう設計とするもの

ここで、周辺施設のうち、貯蔵架台、基礎ボルト及び基礎は、乾式キャスクの直接支持構造物及び間接支持構造物として、基準地震動 S_s による地震力に対して乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように、特段の機能を有する設備^{※2}として設計する。また、貯蔵建屋についても、基準地震動 S_s による地震力に対して、貯蔵中の乾式キャスクへ波及的影響を防止するように、特段の機能を有する設備^{※2}として設計する。

一方、周辺施設のうち、乾式キャスク圧力計、乾式キャスク表面温度計、貯蔵建屋内雰囲気温度計、貯蔵建屋天井クレーン及び乾式キャスク搬送台車は、乾式キャスクの安全機能を維持するために、特段の機能を要しないことから、一般産業施設や公衆施設と同等の設計とする。

なお、周辺施設へのユーティリティ設備は、周辺施設へ電気・圧縮空気等を供給する設備であり、乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な設備ではない。また、点検用架台は、乾式キャスクの点検等に用いる足場であり、乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な設備ではない。よって、周辺施設へのユーティリティ設備及び点検用架台は、周辺施設に該当しない。

※2 特段の機能を有する設備： 乾式キャスクの安全機能を維持するために、一般産業施設や公衆施設以上の耐震性を有する設備

また、乾式キャスク及び貯蔵建屋は、1、2、3号炉の使用済燃料を貯蔵した場合でも乾式キャスクの安全機能を損なわない設計とするとともに、安全施設（第12条第1、3、4、5、7項）に適合する設計とする。

さらに、貯蔵建屋は、発電用原子炉施設であるため、発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止（第7条）を講じ、安全避難通路等（第11条第1項）を設ける設計とする。

3.2 兼用キャスク及び周辺施設の設計方針

兼用キャスク及び周辺施設について、乾式キャスクの安全機能を維持するために、各設備が担保すべき機能を確保できるよう、第3-1表に示す設置許可基準規則の条項の要求を満足するように設計する。具体的な設計方針を以下に示す。

3.2.1 兼用キャスクの設計方針

兼用キャスクの設計方針を次の項目ごとに示す。

3.2.1.1 地震

兼用キャスクである乾式キャスクは、第4条第6項に規定する地震力[※]に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスク（支持部及び基礎を含む）は、耐震重要度分類をSクラスとして分類し、基準地震動 S_s による地震力に対して乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。詳細については、第4条に係る安全審査資料に示す。

※ 基準地震動による地震力

3.2.1.2 津波

兼用キャスクである乾式キャスクは、津波による作用力^{*}に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスクを津波防護対象設備として分類し、乾式キャスクを設置する貯蔵建屋を浸水防護重点化範囲に設定する。詳細については、第5条に係る安全審査資料に示す。

※ 基準津波による作用力（荷重）

3.2.1.3 竜巻

兼用キャスクである乾式キャスクは、竜巻による作用力^{*}に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスクを竜巻防護施設として分類し、貯蔵建屋にて防護する設計とする。詳細については、第6条に係る安全審査資料に示す。

※ 設計竜巻による作用力（荷重）

3.2.1.4 その他の外部事象

兼用キャスクである乾式キャスクは、第6条第1項及び第3項において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）及び想定される人為事象に対して安全機能が損なわれない設計とする。

具体的には、乾式キャスクを「設計対象施設（降下火砕物の影響を設計に考慮すべき施設）」、「クラス1及びクラス2に属する外部火災防護施設」等に分類し、貯蔵建屋にて防護する設計とする。詳細については、第6条に係る安全審査資料に示す。

3.2.1.5 内部火災

兼用キャスクである乾式キャスクは、火災により乾式キャスクの安全機能が損なわれないよう、火災発生防止の措置を講じる設計とする。

具体的には、乾式キャスクは不燃性材料を使用した設計とする。詳細については、第8条に係る安全審査資料に示す。

3.2.1.6 溢水

兼用キャスクである乾式キャスクは、乾式貯蔵施設内における溢水が発生した場合においても、安全機能を損なわない設計とする。具体的には、乾式キャスクを防護対象設備

とし、溢水事象を想定しても安全機能を損なわない単純で頑丈な構造の金属製の静的機器（容器）で、外部からの動力の供給を必要としない設計とする。詳細については、第9条に係る安全審査資料に示す。

3.2.2 周辺施設の設計

周辺施設の設計方針を次の設備ごとに示す。

3.2.2.1 機器・配管系（兼用キャスクの支持部、計装設備及びクレーン類）

機器・配管系のうち計装設備（乾式キャスク蓋間圧力計、乾式キャスク表面温度計及び貯蔵建屋内雰囲気温度計）及びクレーン類（貯蔵建屋天井クレーン及び乾式キャスク搬送台車）は、一般産業施設や公衆施設と同等の静的地震力に対して、必要な機能が維持される設計とする。

具体的には、耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とするとともに、以下の一般産業規格等に基づいた一般産業品を用いる設計とする。

表 計装設備及びクレーン類に適用する一般産業規格等※

設備名	一般産業規格等
乾式キャスク蓋間圧力計	JIS B7505（アネロイド型圧力計 ブルドン管圧力計） 等
乾式キャスク表面温度計	JIS C1602（熱電対）
貯蔵建屋内雰囲気温度計	JIS C1605（シース熱電対） 等
貯蔵建屋天井クレーン	クレーン等安全規則、クレーン構造規格 等
乾式キャスク搬送台車	JIS G3101（一般構造用圧延鋼材） 鋼板工業㈱カタログ品 E19-0048（エアベアリング） 等

※ JIS規格等の国内規格類に基づいた部材、部品およびカタログ品により構成される一般産業品を用いる。

機器・配管系のうち乾式キャスク支持部（貯蔵架台及び基礎ボルト）については、乾式キャスクを含めて耐震重要度分類をSクラスとして分類し、基準地震動 S_s による地震力に対して、乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。詳細については、第4条に係る安全審査資料に示す。

3.2.2.2 貯蔵建屋等（貯蔵建屋）

貯蔵建屋の設計方針を次の項目ごとに示す。

(1) 地震

貯蔵建屋は、耐震重要度分類Cクラス施設として分類し、地震力に十分耐えることができる設計とする。また、乾式キャスクに波及的影響を及ぼさない設計とする。

詳細については、第4条に係る安全審査資料に示す。

(2) 津波

津波防護対象設備である乾式キャスクを設置する貯蔵建屋の設置された敷地において、基準津波による遡上波を地上部から到達又は流入させない設計とし、浸水防護重点化範囲である貯蔵建屋は、津波による影響を受けない位置に設置する設計とする。詳細については、第5条に係る安全審査資料に示す。

(3) 竜巻

竜巻防護施設である乾式キャスクを内包する貯蔵建屋により、乾式キャスクを防護し構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。詳細については、第6条に係る安全審査資料に示す。

(4) その他の外部事象

周辺施設である貯蔵建屋は、内包する乾式キャスクをその他の外部事象から防護するとともに、乾式キャスクの安全機能を阻害しない設計とする。詳細については、第6条に係る安全審査資料に示す。

(5) 内部火災

貯蔵建屋は、放射性物質の貯蔵機能のみを有する構築物、系統及び機器を設置する火災区域として設定する設計とする。詳細については、第8条に係る安全審査資料に示す。

(6) 遮蔽機能

<工場等周辺における直接線等からの防護>

貯蔵建屋は、乾式キャスクの遮蔽機能と相まって、既設を含めた原子炉施設からの直接線及びスカイシャイン線による敷地周辺の空間線量率を合理的に達成できる限り小さい値となるように設計する。具体的には、年間50マイクロシーベルトを超えない設計とする。詳細については、第29条に係る安全審査資料に示す。

<放射線からの放射線業務従事者の防護>

貯蔵建屋は、乾式キャスクの遮蔽機能と相まって、放射線業務従事者の受ける放射線量を低減できるよう、遮蔽、乾式キャスクの配置等放射線防護上の措置を講じた設計とする。詳細については、第30条に係る安全審査資料に示す。

第3-1表 乾式貯蔵施設の設備の分類及び担保すべき機能

設備	名称	分類	特段の機能		地震による 損傷防止		津波に よる損 傷防止	外部からの 衝撃による 損傷防止	火災に よる損 傷防止	溢水に よる損 傷防止	兼用キャスクの 安全機能維持及 び監視		遮蔽機能を補完		設計 基準 対象 施設	安全施設	備考
			有無	具体的 な機能	第4条 第1項 第2項 第7項	第4条 第6項 第7項					第9条 第1項	第16条 ^{※8} 第2項 第4項	第29条 第1項	第30条 第1項~ 第3項			
兼用キャスク	使用済燃料乾式貯蔵容器 (乾式キャスク)	兼用 キャスク	-	S ^{※1}	○	○	-	-	○	○	○	○	○				乾式キャスクは、1、2、3号炉の使用済燃料を貯蔵した場合でも乾式キャスクの安全機能を損なわない設計とする。
兼用キャスク支持部	・貯蔵架台 ・基礎ボルト	周辺施設	○	S ^{※1}	○ ^{※6}	○ ^{※6}	-	-	-	-	-	-	-	○	PS-2		
基礎(兼用キャスクの間接支持構造物)	基礎	周辺施設	○	- ^{※2}	○ ^{※6}	○ ^{※6}	-	-	-	-	-	-	-	-			
貯蔵建屋等	使用済燃料乾式貯蔵建屋 (遮蔽壁及び火災区画構造物含む)	周辺施設	○	C ^{※3}	○	○	-	-	○	○	○ ^{※7}	○	○	○	PS-3		・第7条及び第11条第1項についても適合させる設計とする。 ・貯蔵建屋は、1、2、3号炉の使用済燃料を貯蔵した場合でも乾式キャスクの除熱機能を阻害しない設計とする。
計装設備	・乾式貯蔵容器蓋開圧力計 ・乾式貯蔵容器表面温度計 ・乾式貯蔵容器内部温度計 ・乾式貯蔵建屋内雰囲気温度計	周辺施設	×	- ^{※4}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
クレーン類	・天井クレーン ・エアパレット	周辺施設	×	- ^{※4}	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-			
周辺施設へのエアーリリーイ設備	・乾式貯蔵建屋電源設備 ・搬送台車用コンプレッサ、圧縮空気供給配管等 ・乾式貯蔵建屋給排気ファン																
点検用架台	・点検用歩廊 ・検査架台		×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

※1: 耐震重要度分類Sクラス施設として分類し、基準地震動Ssによる地震力に対して乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。
 ※2: 耐震重要度分類Sクラス施設の同接支持構造物として分類し、基準地震動Ssによる地震力に対して乾式キャスクの支持機能を維持できる設計とする。
 ※3: 耐震重要度分類Cクラス施設として分類し、乾式キャスクに波及的影響を及ぼさない設計とする。
 ※4: 耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とする。
 ※5: 乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な機能を有していないもの。(乾式キャスクに直接関与しないもの)
 ※6: 乾式キャスクに貯蔵架台、基礎ボルト及び基礎を含めて適合性を確認する。
 ※7: 乾式キャスクは、十分余裕を持たせた使用済燃料貯蔵容量を有する設計とする。
 ※8: 設計上想定される状態における兼用キャスクの安全機能維持、監視機能、材料、構造健全性及び設計貯蔵期間については、2章設計方針に記載する。

上表以外の設備として、屋内消火栓等については、プラントと同様の設計とする。

別 添

伊方発電所 3 号炉
燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
(使用済燃料乾式貯蔵容器の閉じ込め機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの閉じ込め機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第2項一号イ

- ・燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする。

②設置許可基準規則第16条第4項三号

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

③設置許可基準規則解釈別記4第16条第4項

- ・第16条第4項第3号に規定する「放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができる」とは、次項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という）第5条第1項第1号及び第2号並びに第17条第1項第1号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。
- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第5条第1項
第5条に規定する「限定された区域に適切に閉じ込めることができるもの」とは、以下の設計をいう。
 - 一 金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。
 - 二 金属キャスクは、多重の閉じ込め構造を有する蓋部により、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。
- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項
第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。
 - 一 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

④設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

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

料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。

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

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2. 安全機能の確保 2.4 閉じ込め機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、兼用キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。
- (2) 密封境界部は、設計上想定される衝撃力に対して、おおむね弾性範囲内にとどまること。
- (3) 閉じ込め機能の異常に対して、その修復性が考慮されていること。

』

【確認内容】

『

- (1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。
- (2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。
- (3) 密封境界部の漏えい率は、(2)を満たすものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。
- (4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。）、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。

(5) 兼用キャスクの衝突評価

1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき

① 転倒モードの設定

兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力（設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。）を入力し、兼用キャスクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した転倒等による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。

2) 貯蔵建屋等を設置するとき

① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定

損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。

3) 使用済燃料の再取出性の評価

a. 兼用キャスクに収納される使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放できること。

b. 使用済燃料の燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。

(6) 閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料貯蔵槽への移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの閉じ込め機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

- (1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

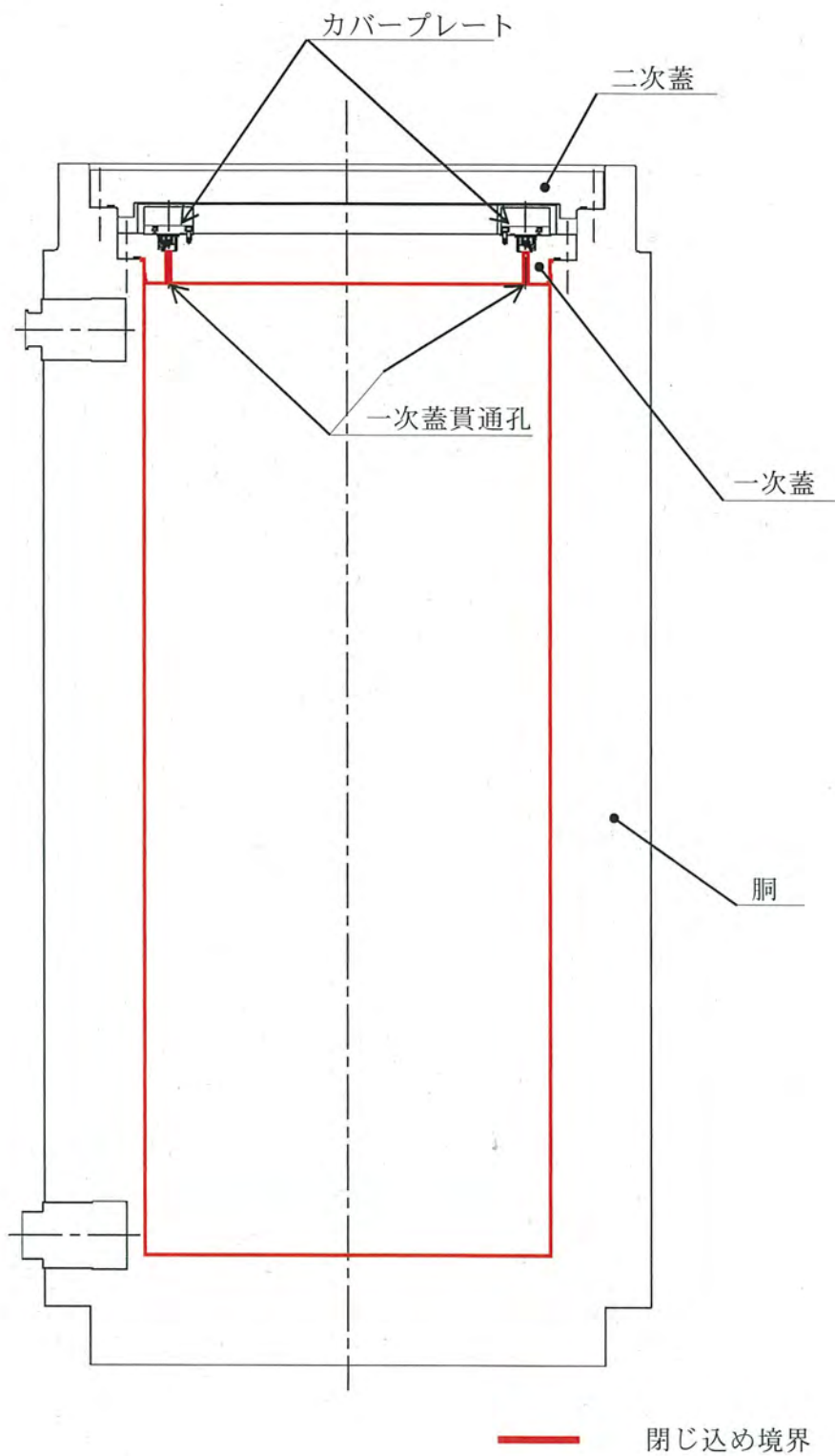
乾式キャスクの閉じ込め構造を第 2.5.1-1 図に、シール部詳細を第 2.5.1-2 図に示す。

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

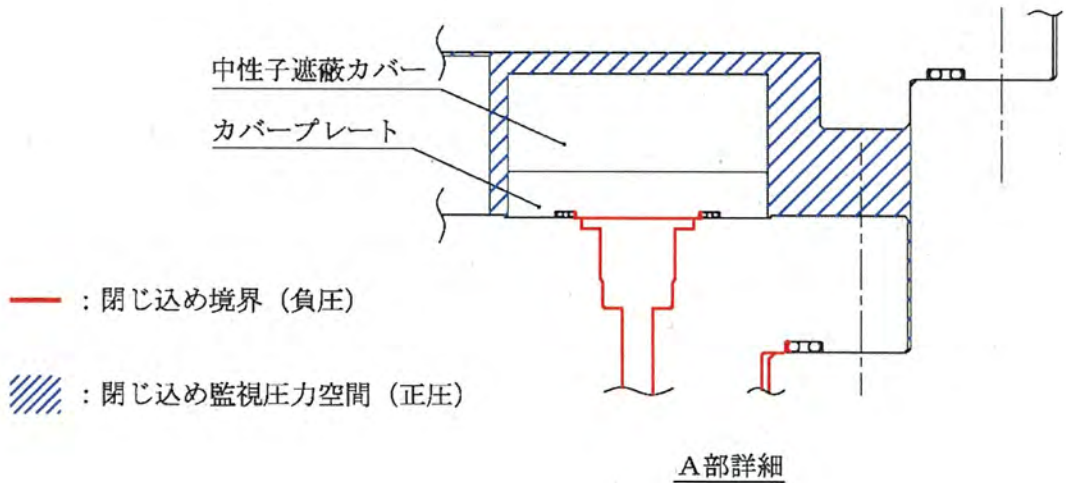
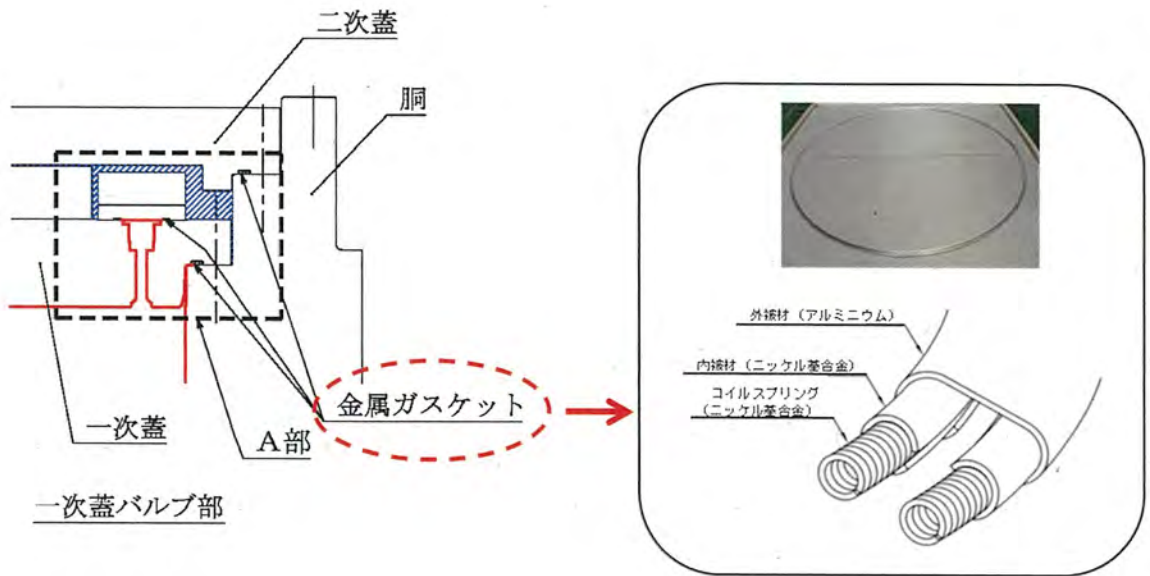
一次蓋と二次蓋との蓋間圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できる設計とする。

乾式貯蔵施設内では、乾式キャスクの閉じ込め境界を有する一次蓋は開放せず、内包する放射性物質の閉じ込めを乾式キャスクのみで担保する設計とする。

使用済燃料を限定された区域に閉じ込めるため、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を封入する空間を負圧（ 9.7×10^4 Pa）に維持する設計とする。



第 2.5.1-1 図 乾式キャスクの閉じ込め構造



第 2.5.1-2 図 乾式キャスクのシール部詳細

[確認内容]

- (2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。
- (3) 密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できるものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。
- (4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。）、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。

乾式キャスク漏えい率の考え方を第 2.5.1-3 図、閉じ込め評価フローを第 2.5.1-4 図、閉じ込め評価に係る構造図を第 2.5.1-5 図に示す。

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

基準漏えい率は、設計貯蔵期間中に乾式キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率である。

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

なお、基準漏えい率を求めるにあたっては、蓋間圧力は保守的に初期圧力で一定とし、蓋間空間のガスは乾式キャスク内部側にのみ漏えいするものとして漏えい計算を行う。また、大気圧は、気象変化による圧力変動を保守的に考慮した値として 9.7×10^4 Pa とする。乾式キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損率として、米国の使用済燃料の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率（約 0.01 %）、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率（約 0.01 % 以下）を考慮し、保守的な値として 0.1 %¹⁾を想定する。

a. 基準漏えい率の計算

- a) 乾式キャスク本体内部圧力の変化は、ボイル・シャルルの法則に基づき、以下のよう求める。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{Q}{V_d} \times \frac{T_d}{T} \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで、

P_d : 乾式キャスク本体内部圧力 (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 のときのシール部の漏えい率
($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
- 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 (m^3)
(乾式キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積)
- t : 時間 (s)

また、ここで漏えい率 Q は、以下のクヌッセンの式²⁾で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot P_a \\ L &= (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d) \\ F_c &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ F_m &= \frac{\sqrt{2 \pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot P_a} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.2)$$

ここで、

- Q : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
- L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (m^3/s)
- F_c : 連続流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- 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 : 相当漏えい孔径 (m)
- a : 漏えい孔長 (m)
- P_a : 流れの平均圧力 (Pa)
- $$P_a = \frac{P_u + P_d}{2}$$
- μ : 漏えい気体の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- 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 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

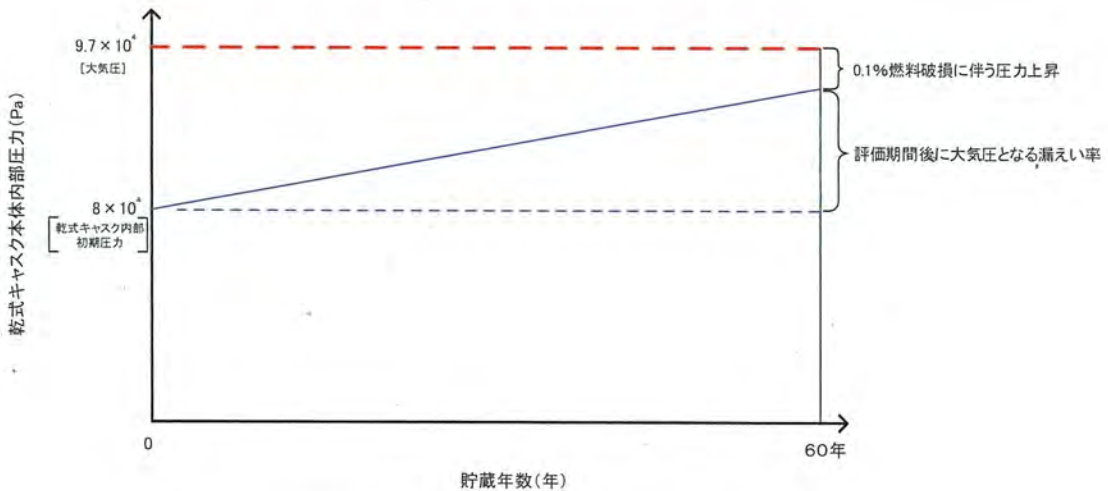
- b) 漏えい孔径 D_0 を設定し (3.2) の式により漏えい率 Q を求める。Q を (3.1) の式に入力し、時間 t で積分することにより、設計貯蔵期間経過後の乾式キャ

スク本体内部圧力 P_d を求める。

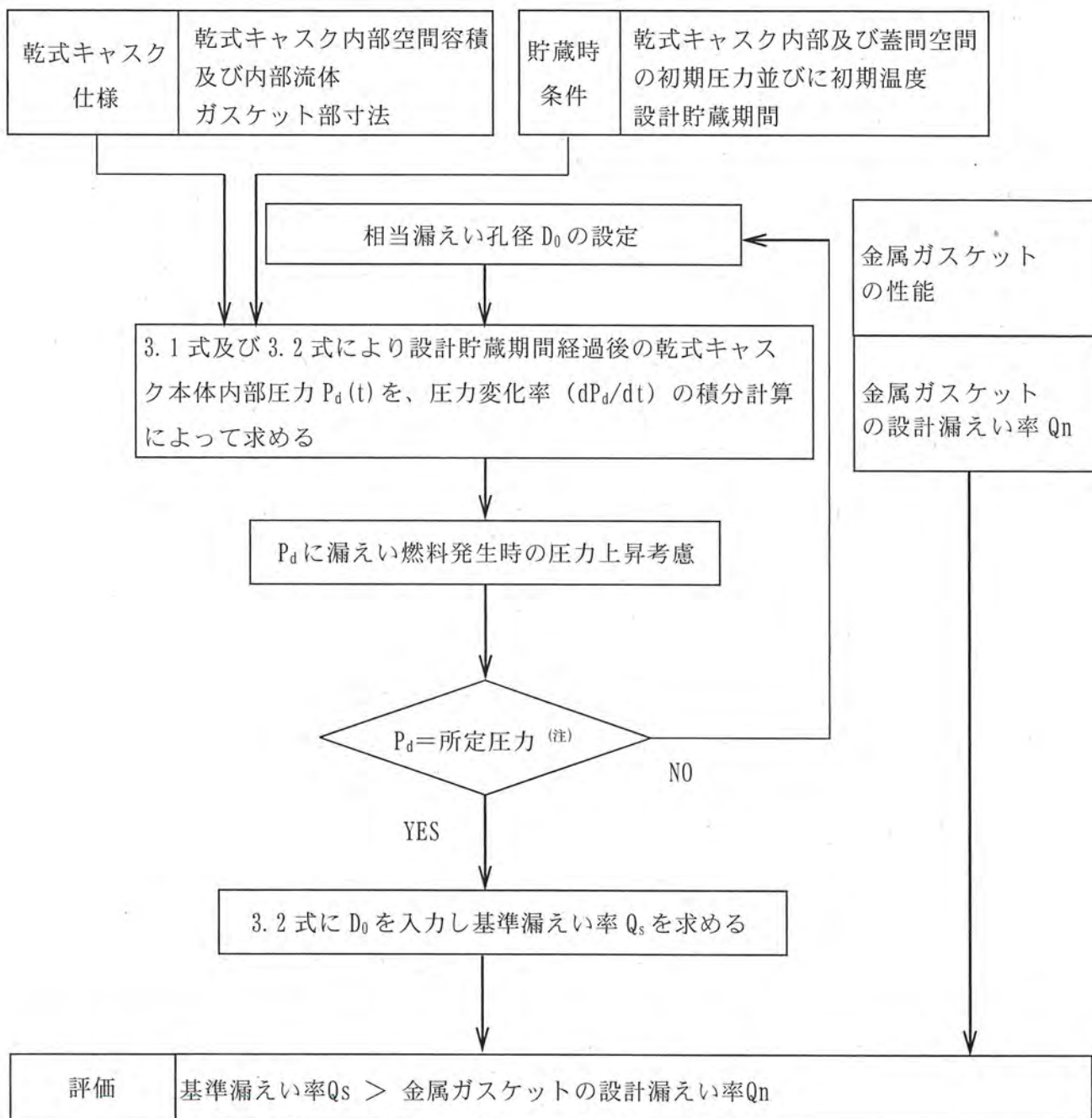
- c) b) により求めた P_d が正圧の場合はより小さな漏えい孔径 D_0 を、負圧の場合はより大きい漏えい孔径 D_0 を設定して、a) ~ b) を繰り返し、 P_d が大気圧 (9.7×10^4 Pa) となる漏えい孔径 D_0 を求める。
- d) 判定基準である金属ガスケットの漏えい率と比較するため、c) により求めた D_0 を固定し、(3.2) の式に金属ガスケットの漏えい率を求めた試験条件 ($P_u = 1.01 \times 10^5$ Pa、 $P_d = 0$ Pa、 $T = 298.15$ K) を入力し、基準漏えい率 Q_s を求める。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

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

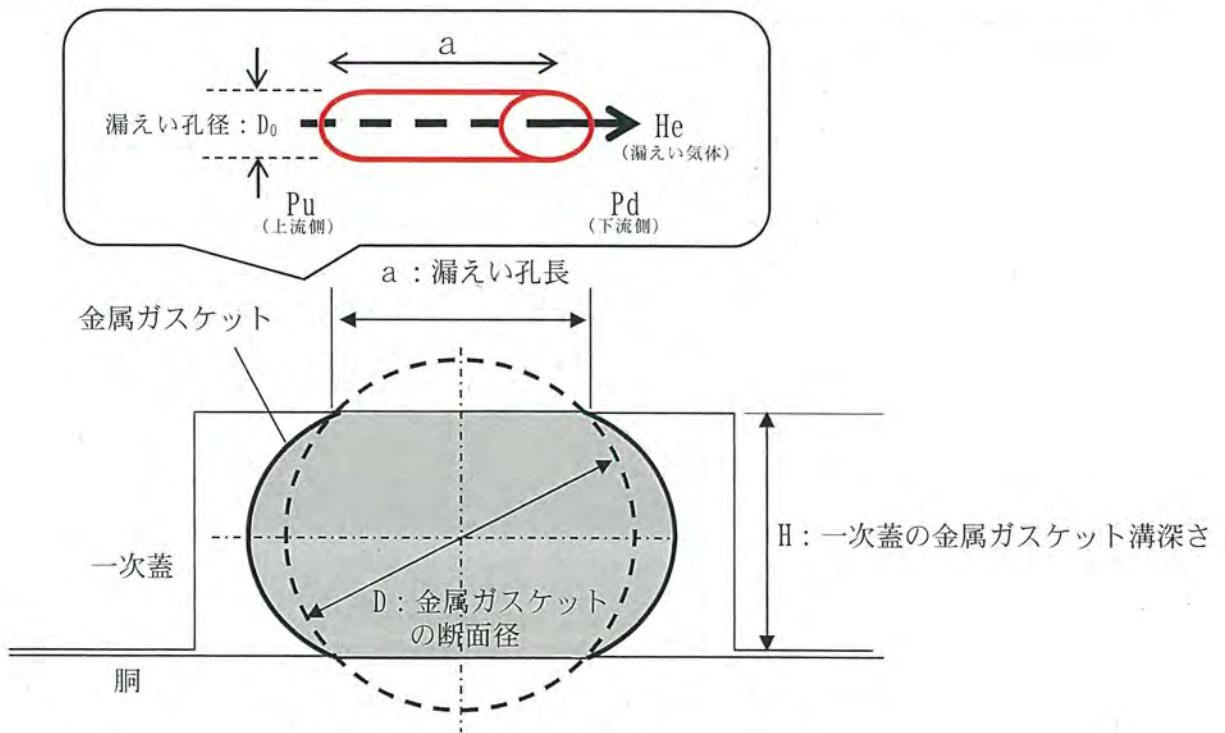
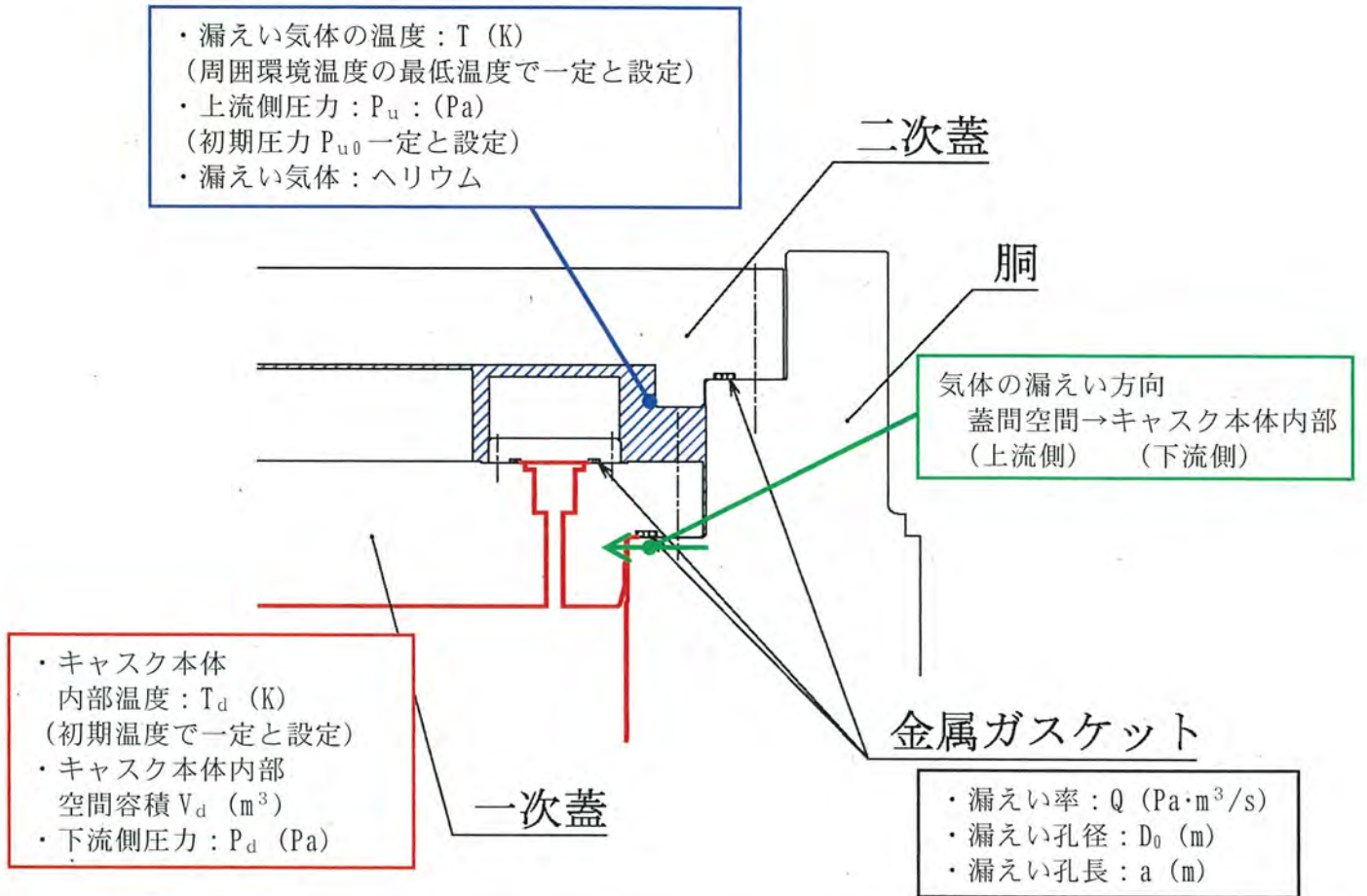


第 2.5.1-3 図 乾式キャスク漏えい率の考え方



(注) 所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 Pa とする。

第 2.5.1-4 図 基準漏えい率の計算フロー図



第 2. 5. 1-5 図 閉じ込め評価に係る構造図

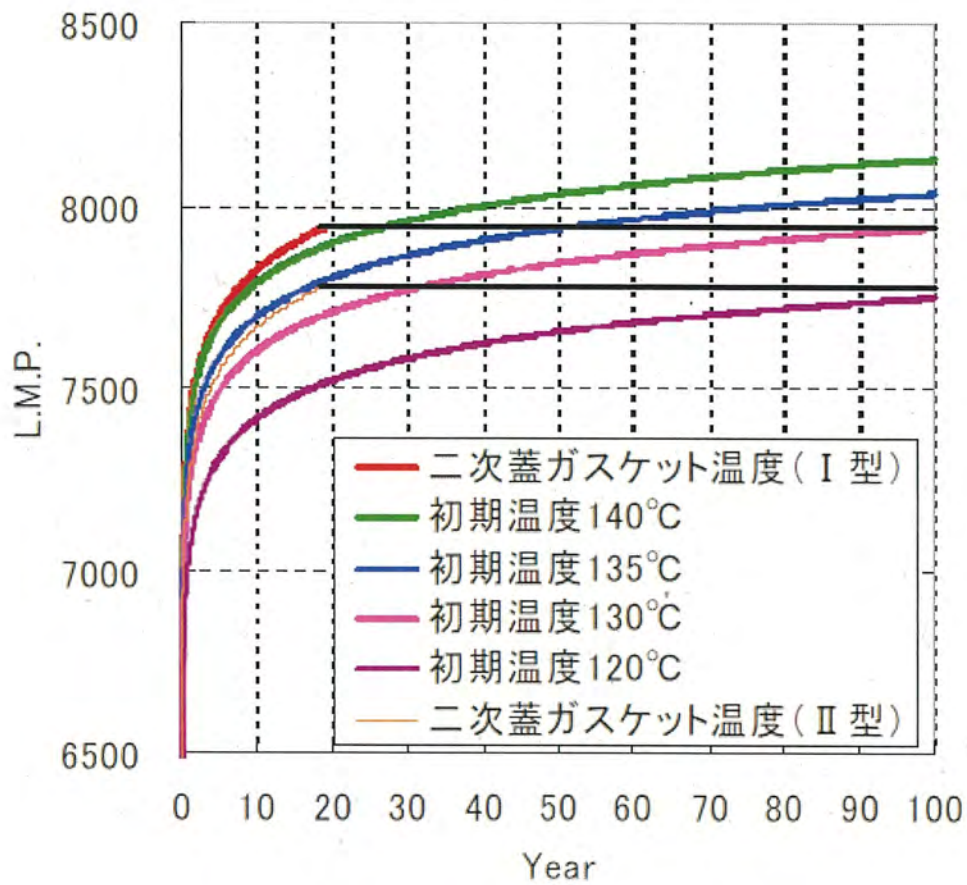
閉じ込め設計の評価条件及び評価結果を第 2.5.1-1 表に示す。使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認した。

第 2.5.1-1 表 閉じ込め評価条件及び評価結果

	MSF-24P 型	MSF-32P 型
D_0 : 漏えい孔径 (m)	5.51×10^{-6}	5.57×10^{-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)	1.985×10^{-5} (25℃)	
R_0 : ガス定数 (J/(mol·K))	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)	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)	2.49×10^{-6}	2.58×10^{-6}
金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)}	1×10^{-8} Pa·m ³ /s 以下	

平成 21 年度の (一財) 電力中央研究所研究において、金属ガスケットの長期密封機能について試験を実施し、試験と解析で得られた乾式キャスクの温度と時間をラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) により長期密封性能について検討を行っている⁴⁾。第 2.5.1-6 図は当該試験結果の二次蓋ガスケット温度から得られた LMP を示しており、LMP が 7942 以下であれば密封性は健全であることが示されている。また、第 2.5.1-7 図には、LMP = 7942 となる場合の、蓋初期温度と評価年数の関係が示されており、評価年数 (貯蔵期間) を 60 年とすると、その期間健全性を担保するためには、初期温度を 134℃ 以下にすればよいことが示されている⁴⁾。

MSF-24P 型及び MSF-32P 型の除熱評価の結果から、金属ガスケット部の温度はそれぞれ約 110℃ であるため、金属ガスケットは設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率を維持できると判断される。

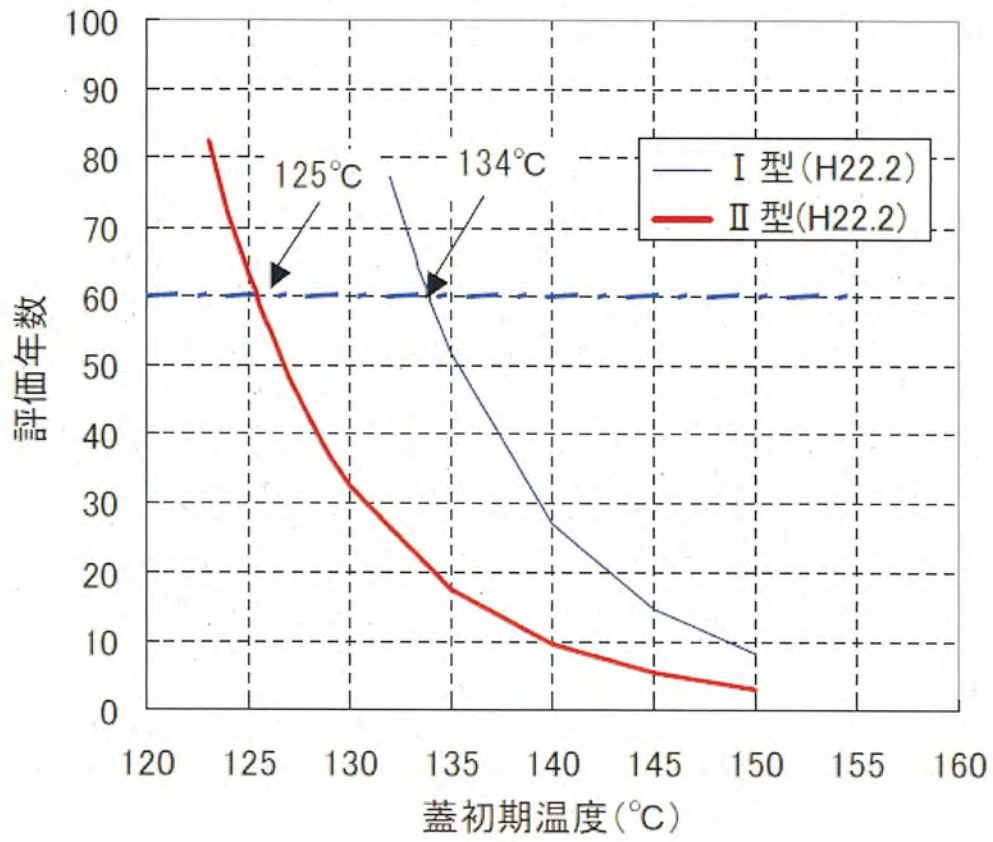


$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

第 2.5.1-6 図 蓋部温度をもとに計算した LMP ⁴⁾



第 2.5.1-7 図 蓋初期温度と評価年数の関係 ⁴⁾

〔確認内容〕

(5) 兼用キャスクの衝突評価

1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき

① 転倒モードの設定

兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力（設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。）を入力し、兼用キャスクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した転倒等による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。

2) 貯蔵建屋等を設置するとき

① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定

損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。

3) 使用済燃料の再取出性の評価

a. 兼用キャスクに収納される使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放できること。

b. 使用済燃料の燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。

乾式キャスクは床等に固定して設置する設計とする。

貯蔵建屋等（貯蔵建屋（兼用キャスク、兼用キャスク取扱設備等を収納する建物）又は遮蔽壁）は、地震（4条）、津波（5条）、外部からの衝撃（6条）による損傷の防止が図られ、損壊しない設計とする。詳細は、4条、5条、6条まとめ資料で説明する。

また、地盤（3条）及び周辺斜面（4条）も基準地震動に対して、安定性が確保されることから、貯蔵建屋等は損壊しない。なお、地盤及び周辺斜面の安定性に関しては地盤審査において確認されている。

[確認内容]

(6) 閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料貯蔵槽への移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。

閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料ピットへの移送を行うこと等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮する設計とする。

なお、貯蔵中の乾式キャスク閉じ込め機能異常時の対応フローを第 2.5.1-8 図に示す。

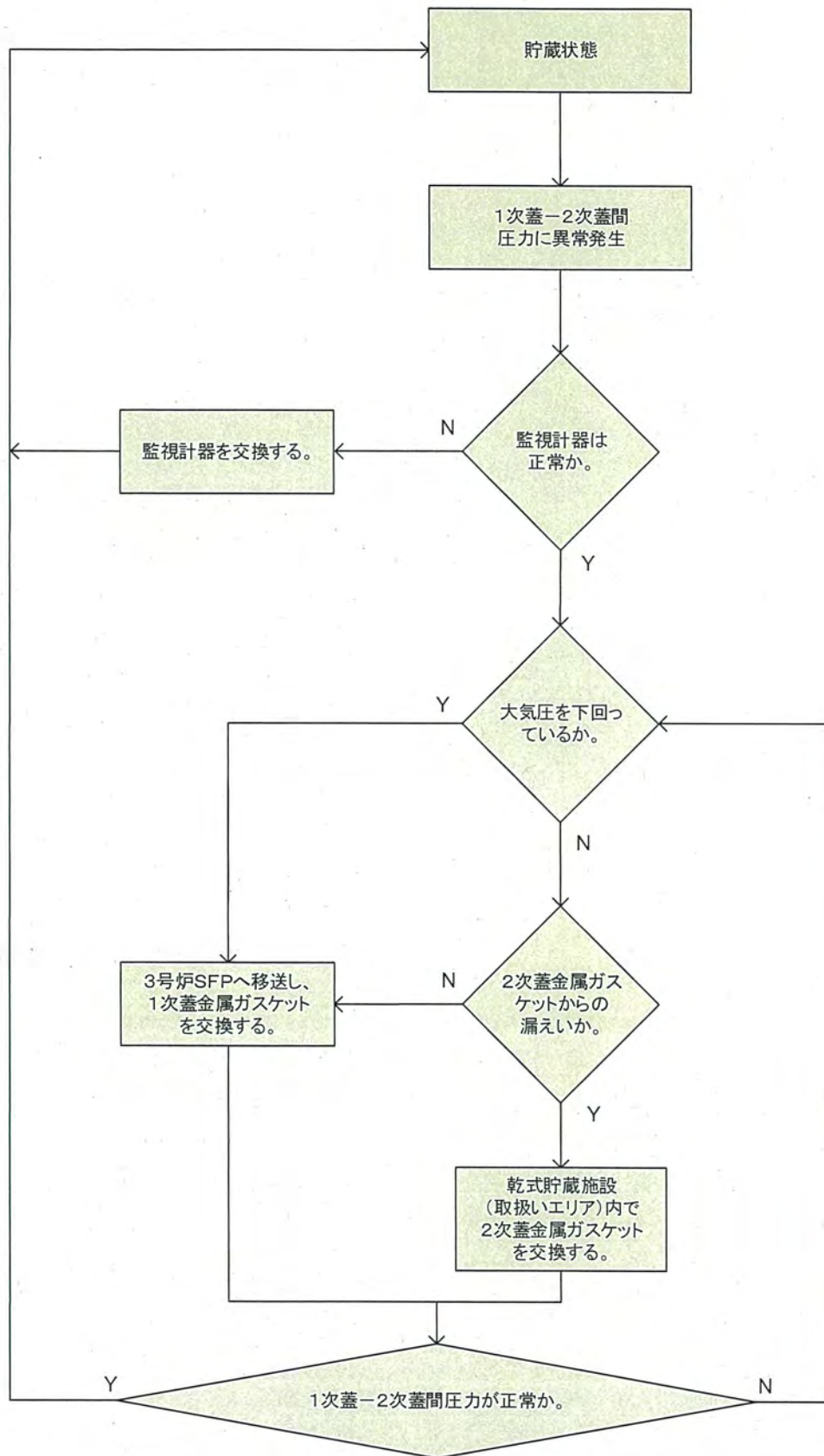
蓋間圧力が管理値を下回っている場合、まず、監視計器の確認を行い、監視計器異常の場合には監視計器を交換し、貯蔵を再開する。

監視計器異常ではない場合、一次蓋金属ガスケットの漏えいの場合は、乾式キャスク内部を負圧管理しているため、蓋間圧力は負圧まで低下する可能性がある。二次蓋金属ガスケットの漏えいの場合は、蓋間のヘリウムガスが大気へ放出され、大気圧までしか低下しない。このため、蓋間圧力が大気圧を下回っているかの確認を行うことにより、一次蓋金属ガスケット又は二次蓋金属ガスケットの漏えいであるかの判断を行う。

蓋間圧力が大気圧を下回っていない場合は、二次蓋金属ガスケットの漏えい確認を実施し、二次蓋金属ガスケットからの漏えいが認められた場合は、取扱エリアにて二次蓋を開放して二次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで貯蔵を再開する。このとき、仮に一次蓋金属ガスケットが漏えいしていた場合でも、乾式キャスク内部を負圧管理していることから、乾式キャスク内部へインリークするため、放射性物質が外部へ漏えいする恐れはない。二次蓋金属ガスケットからの漏えいが認められない場合は、乾式キャスクを 3 号炉使用済燃料ピットエリアのキャスクローディングピットへ移送し、一次蓋を開放して一次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで、乾式貯蔵建屋へ移送し、貯蔵を再開する。

蓋間圧力が大気圧を下回っている場合は、乾式キャスクを 3 号炉使用済燃料ピットエリアのキャスクローディングピットへ移送し、一次蓋を開放して一次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで、乾式貯蔵建屋へ移送し、貯蔵を再開する。

なお、3 号炉使用済燃料ピットにおける乾式キャスクの取扱い時には、既存の設備を使用して乾式キャスクを取扱う。



第 2. 5. 1-8 図 乾式キャスク閉じ込め機能異常時の対応フロー

3. 参考文献

- 1) (一社) 日本原子力学会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010」, (2014).
- 2) International Organization for Standardization, “Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages”, ISO 12807, (1996).
- 3) “METAL SEALS TECHNICAL CATALOG”, Technetics Group. , (2017).
- 4) (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)

伊方発電所 3 号炉

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(使用済燃料乾式貯蔵容器の臨界防止機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの臨界防止機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第2項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条1項

- ・第16条第2項第1号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第3条に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。

・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項四号

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

④ 燃焼度クレジット

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

a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度

b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理

・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項五号

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

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

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

- ・設計貯蔵期間を明確にしていること。

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

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2. 安全機能の確保 2.1 臨界防止機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料が臨界に達するおそれがないこと。
- (2) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合は、設計上想定される状態において、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ臨界防止設計が妥当であること。

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

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

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの臨界防止機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

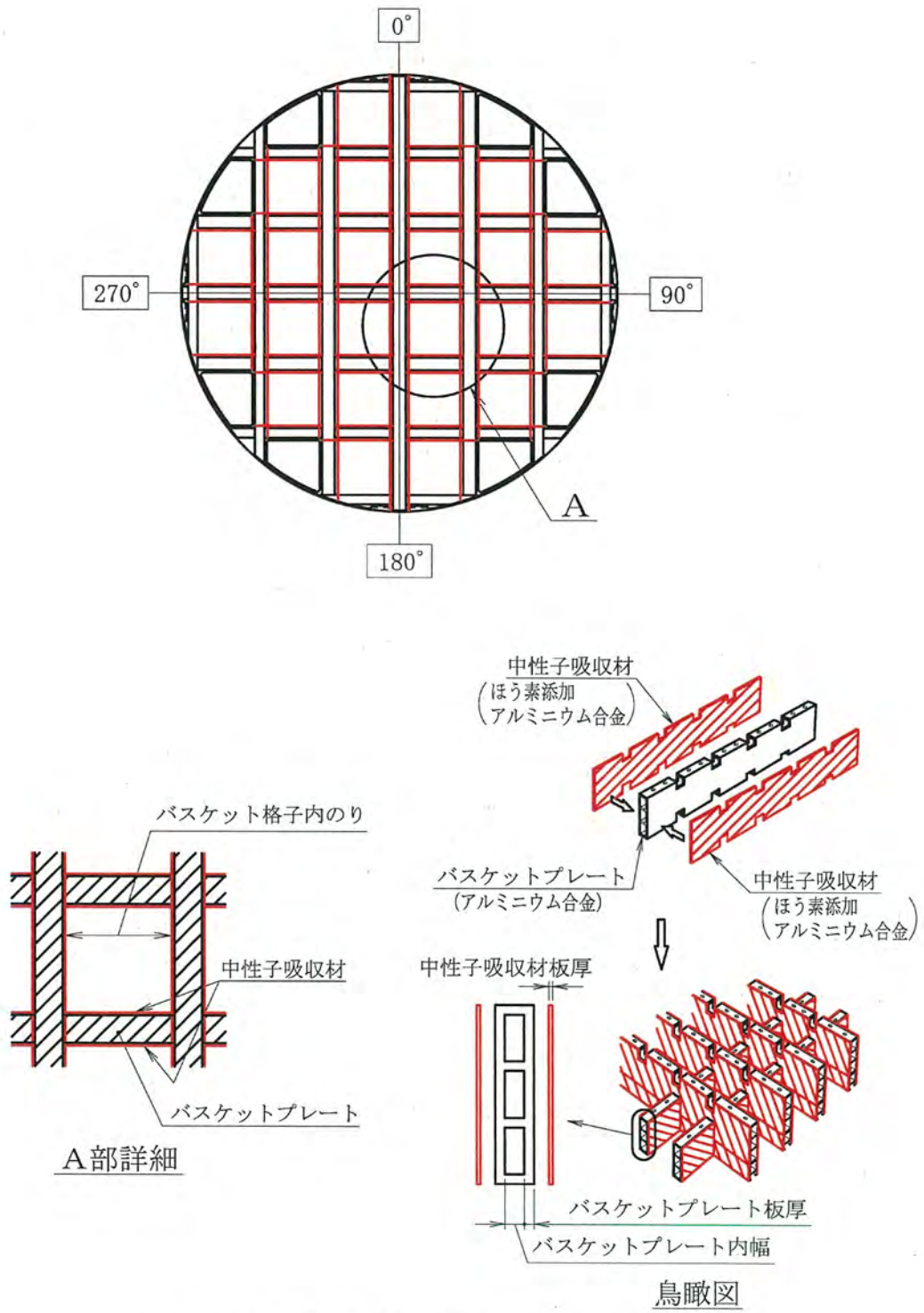
兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

乾式キャスクの乾式貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び乾式キャスクに使用済燃料を収納する際の冠水状態において、技術的に想定されるいかなる場合でも、臨界を防止する設計とする。

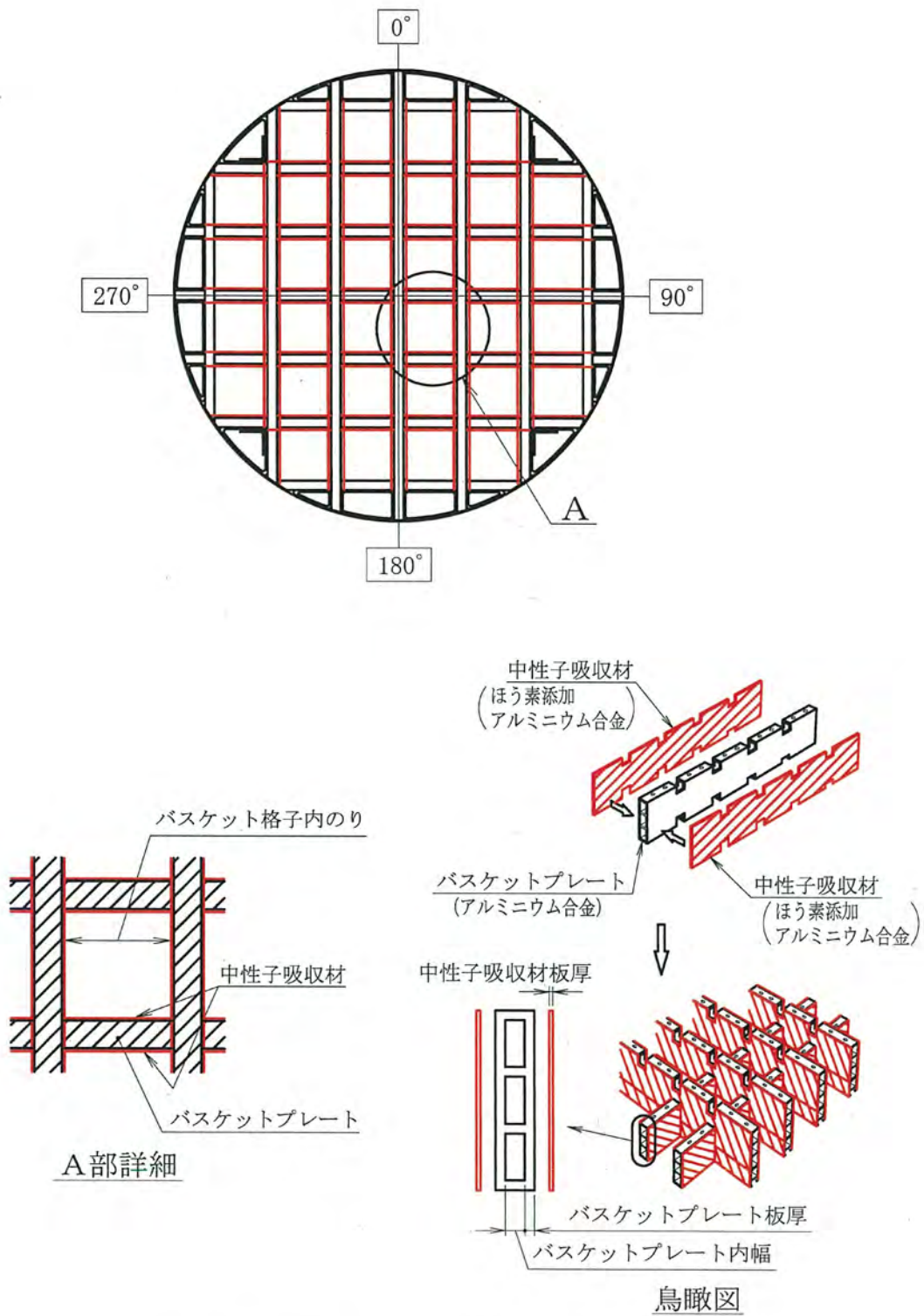
乾式キャスクのバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の使用済燃料を乾式キャスク本体内部の所定の位置に収納する。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造とする。（第2.5.2-1図、第2.5.2-2図参照）

また、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性を維持する設計とする。詳細は本文2.6項の「使用済燃料乾式貯蔵容器長期健全性について」に示す。

なお、乾式キャスクは床等に固定するため、滑動等しない設計としており、乾式キャスクの配置の変化はない。



第 2. 5. 2-1 図 MSF-24P 型のバスケット構造図



第 2.5.2-2 図 MSF-32P 型のバスケット構造図

[確認内容]

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

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

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

解析条件は第 2.5.2-1 表及び第 2.5.2-2 表のとおりとする。

乾式キャスクの臨界解析フローを第 2.5.2-3 図に示す。

臨界解析では、乾式キャスク及び燃料集合体の実形状を三次元でモデル化し（第 2.5.2-4 図～第 2.5.2-15 図参照）、解析コードとして SCALE コードシステムを用いる。

なお、乾燥状態での臨界解析に加え、乾式キャスク内は使用済燃料を収納する際の冠水状態を考慮し、実効増倍率が最も大きくなる水密度を 1.0 g/cm^3 とした解析を行う。

また、本文 2.4 項の使用済燃料乾式貯蔵容器の収納条件に記載しているとおり、臨界評価では、収納する使用済燃料は濃縮度 4.1wt% の燃料の濃縮度上限値を用いて臨界評価を実施しており、燃焼度クレジットは採用しない。

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

－ 乾式キャスクに収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、燃焼度 0Gwd/t の減損していない新燃料のウラン濃縮度 $4.1 \pm \square \text{ wt} \%$ 及び $3.4 \pm \square \text{ wt} \%$ を保守的に $\square \text{ wt} \%$ 及び $\square \text{ wt} \%$ とする。

－ 収納する使用済燃料には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、中性子吸収効果のあるガドリニウムの存在を無視し、すべて通常のウラン新燃料とする。

－ MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体を無視する。

・ モデル化の保守性

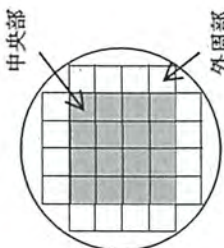
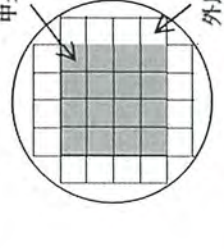
－ 乾式キャスクが無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、建屋内の乾式キャスクの配置制限は必要ない。

－ バスケット格子内で使用済燃料が偏ることにより実効増倍率が変化するため、バスケット内の使用済燃料の配置は実効増倍率が最も大きくなる配置とする。

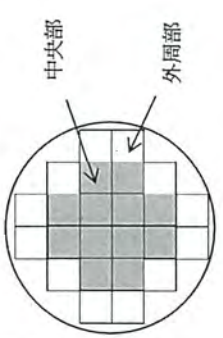
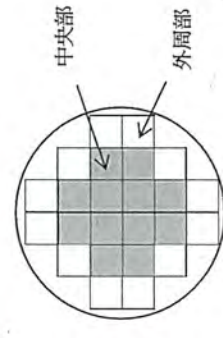
具体的には、MSF-24P 型は、乾燥状態では、外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とし、冠水状態で、外周部の使用済燃料は外周、中央部の使用済燃料は中心偏向配置とする。MSF-32P 型は、乾燥状態及び冠水状態いずれの場合においても外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とする。

- バスケットプレート及び中性子吸収材は第 2.5.2-3 表に示す通り、製作公差を考慮し、実効増倍率が最も大きくなる寸法とする。
- 中性子吸収材中のほう素の均質性は製造管理により担保し、ほう素添加量は仕様上
の下限值とする。
- 中性子遮蔽材は無視する。
- バスケットプレート及び中性子吸収材は、中性子の吸収が小さくなるように、燃料有効部に相当する部分のみモデル化することとし、それ以外の部分は水または真
空に置換する。

第2.5.2-1表 1,2号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

	キャスク収納制限 配置制限		燃料スベック		解析条件	
	中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部
燃料タイプ	14×14型(A/B型)		14×14型(A/B型)		14×14型(A型)	
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	≤3.5	4.1	3.4		
ウラン重量(kg)						
最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤39	≤48	≤39	0	0
SFPでの冷却期間(年)	≥15	≥25	-	-	-	-
平均燃焼度(GWd/t)	≤45	≤33	-	-	0	
燃料集合体 1体の仕様						
キャスク 1基あたり						
収納物仕様						
配置			-			

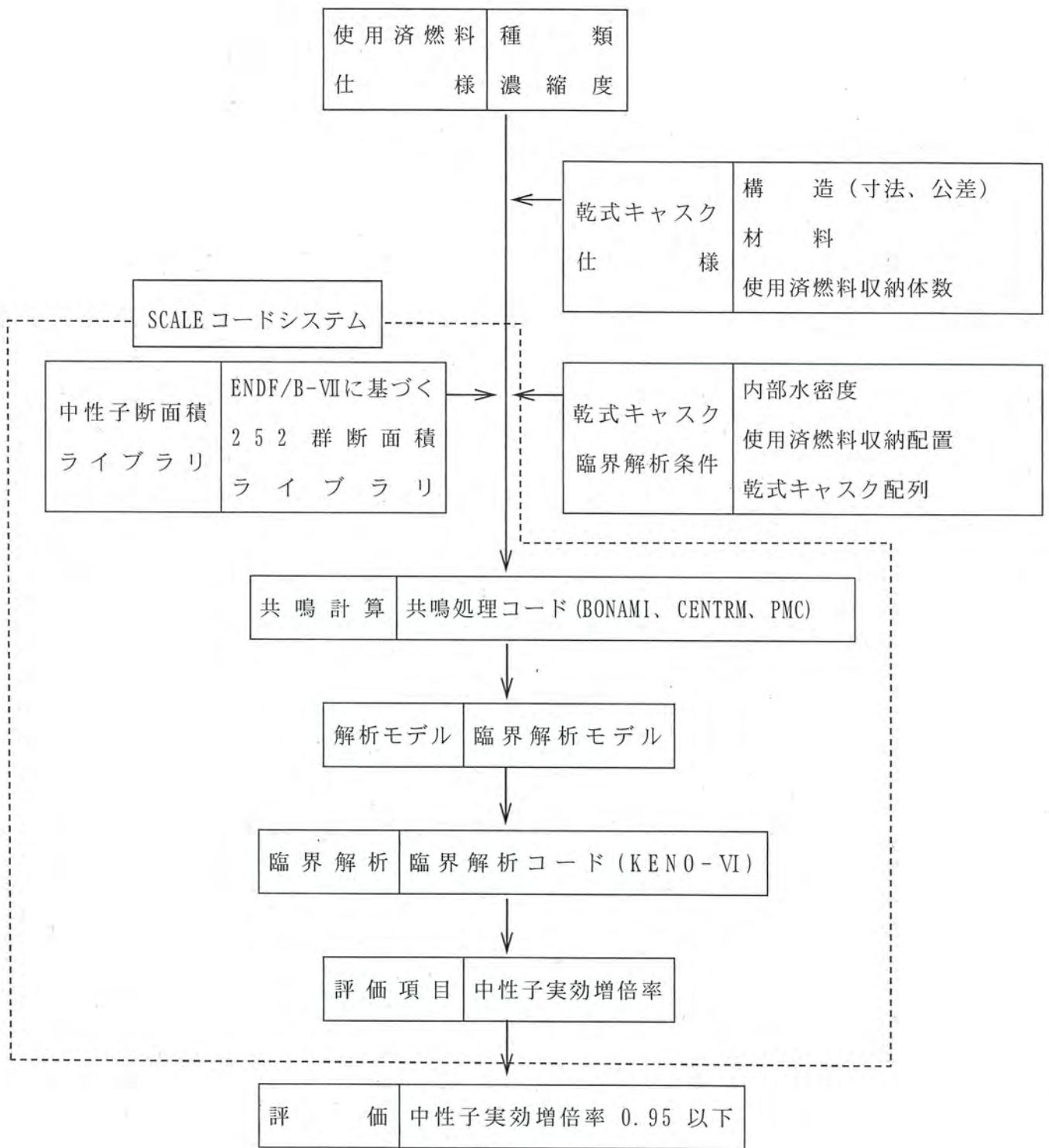
第2.5.2-2表 3号炉用燃料 乾式キャスタク解析条件の概要

燃料タイプ	キャスタク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
	中央部	外周部		中央部	外周部
燃料タイプ	17×17型(A/B型)		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1		
ウラン重量(kg)					
最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	0	
SFPでの冷却期間(年)	A型: ≥15 ^{※1} B型: ≥17		—	—	
最高燃焼度(GWd/t)	≤90	—	—	—	
SFPでの冷却期間(年)	≥15	—	—	—	
平均燃焼度(GWd/t)	≤44		—	0	
燃料集合体1体の仕様	 <p>配置</p>		—		
バーナブル ポイズン				—	
キャスク 1基あたり				—	
収納物仕様					

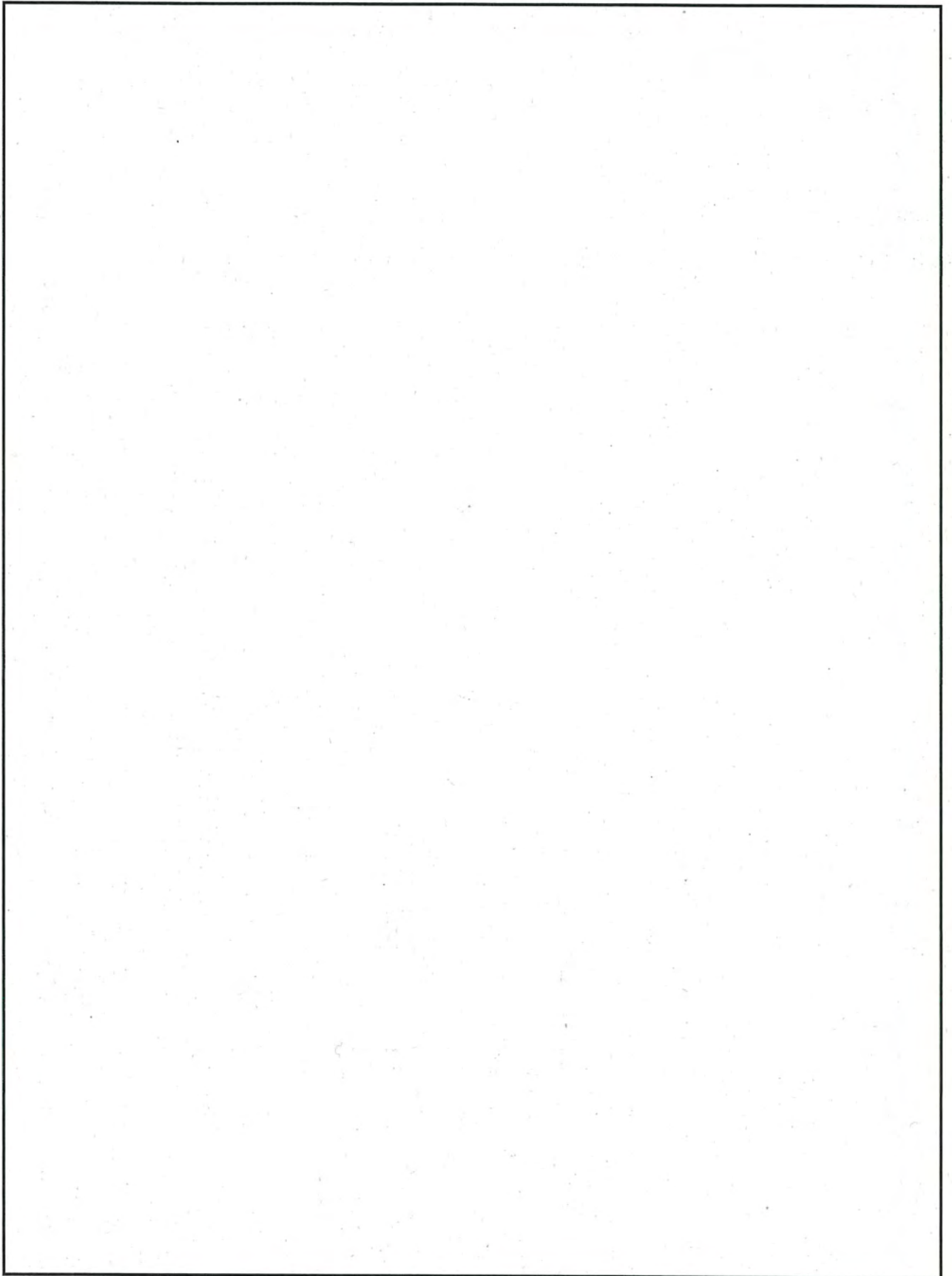
※1: 回収ウラン燃料については、15年冷却した通常ウラン燃料と放射エネルギー及び発熱量が同程度以下となるよう20年以上冷却した後、収納する。

第 2.5.2-3 表 乾式キャスク臨界解析モデル寸法条件

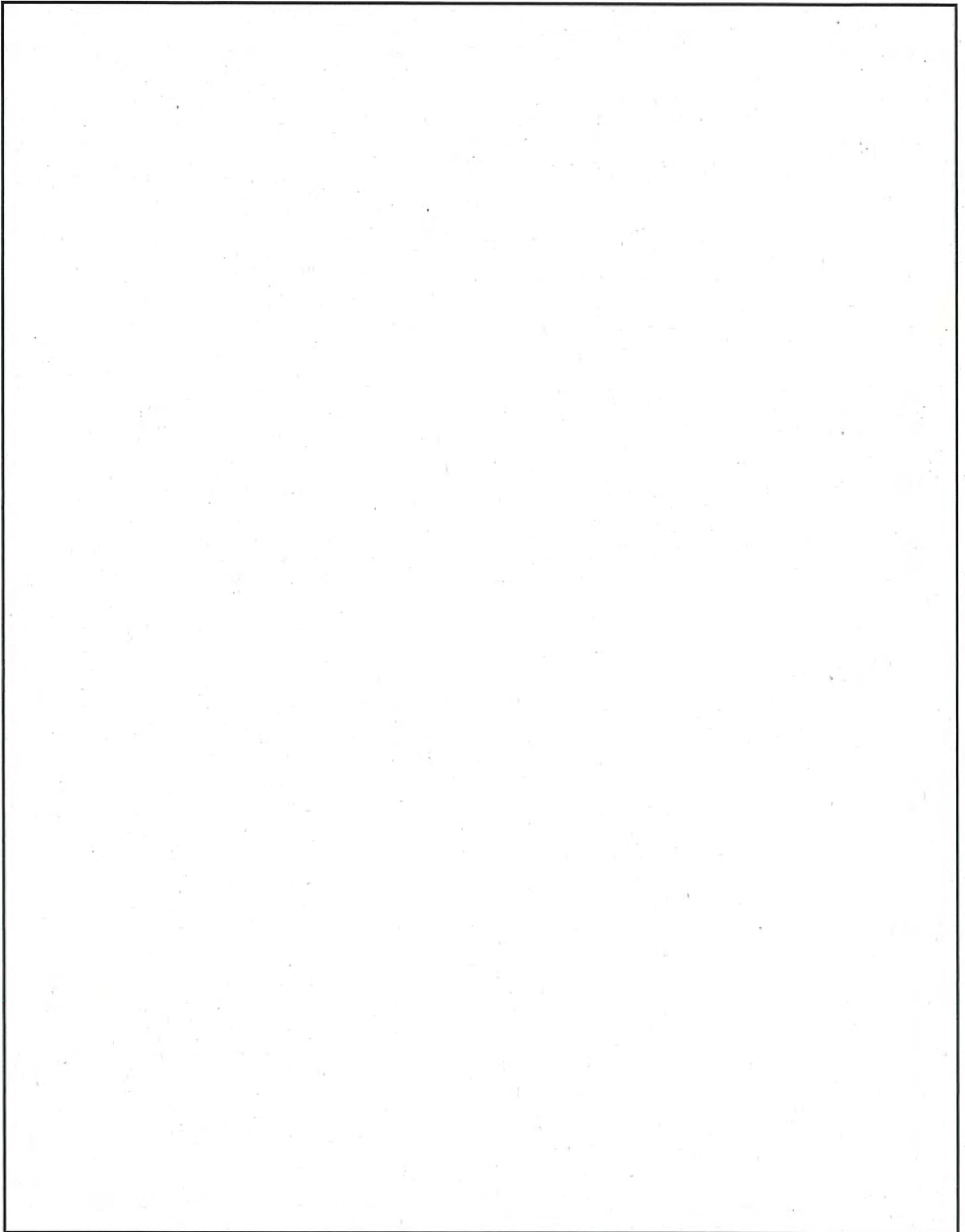
	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケットプレート幅 (アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に最小としている。
バスケットプレート内幅 (アルミニウム合金)	最大	最小	・乾燥状態ではバスケットプレートでの中性子吸収効果が小さくなるように最大としている（バスケットプレート幅を固定して内幅を最大とすることでバスケットプレート板厚が最小となる）。 ・冠水状態ではバスケットプレート内幅領域での中性子の減速効果を小さくし、中性子吸収材での中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットプレート内幅を最小としている。
バスケット格子内のり	最小	最大	・乾燥状態では隣接燃料との距離が短くなるように最小としている。 ・冠水状態では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。
中性子吸収材板厚 (ほう素添加アルミニウム合金)	最小	最小	・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。



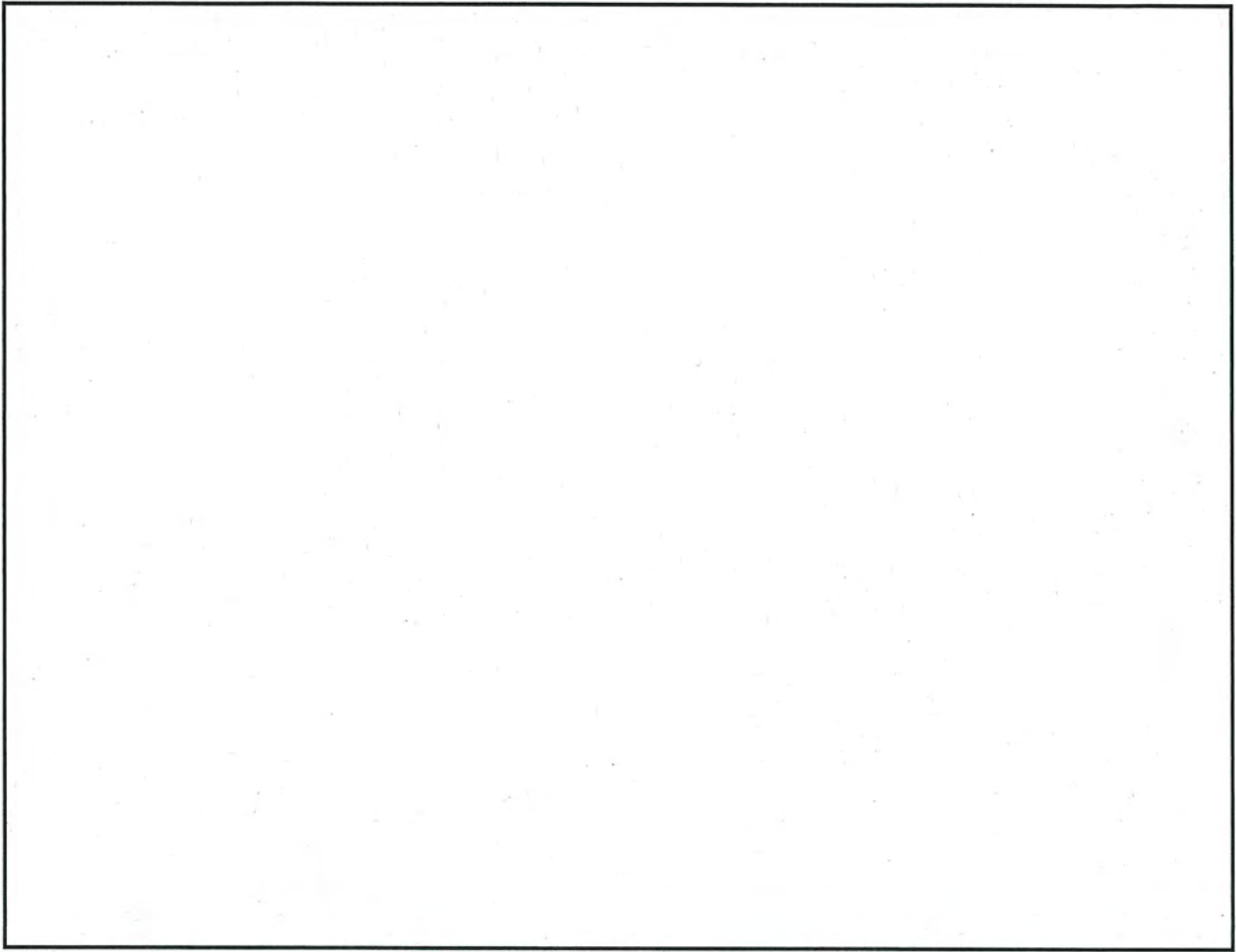
第 2.5.2-3 図 乾式キャスクの臨界解析フロー図



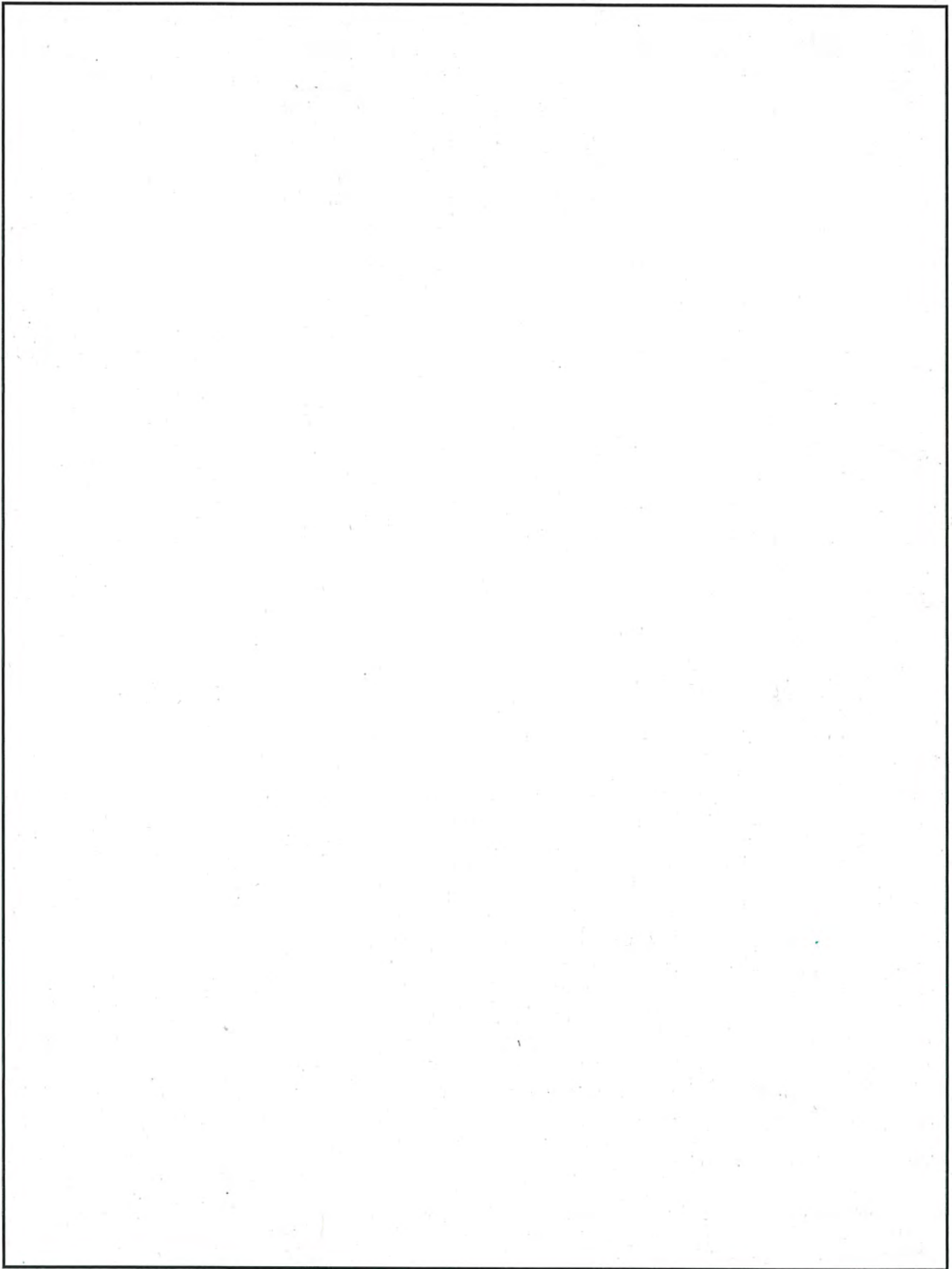
第 2.5.2-4 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



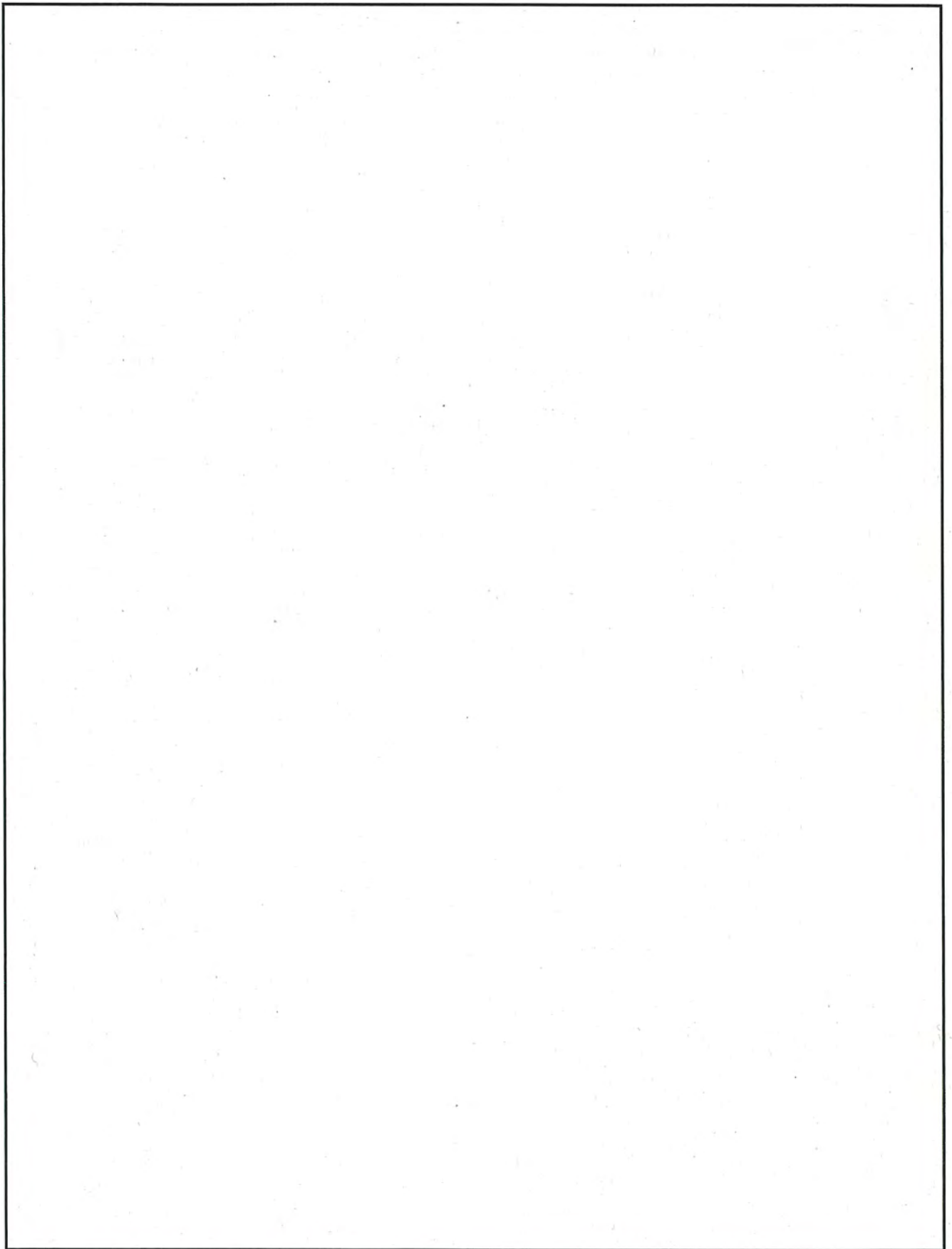
第 2.5.2-5 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



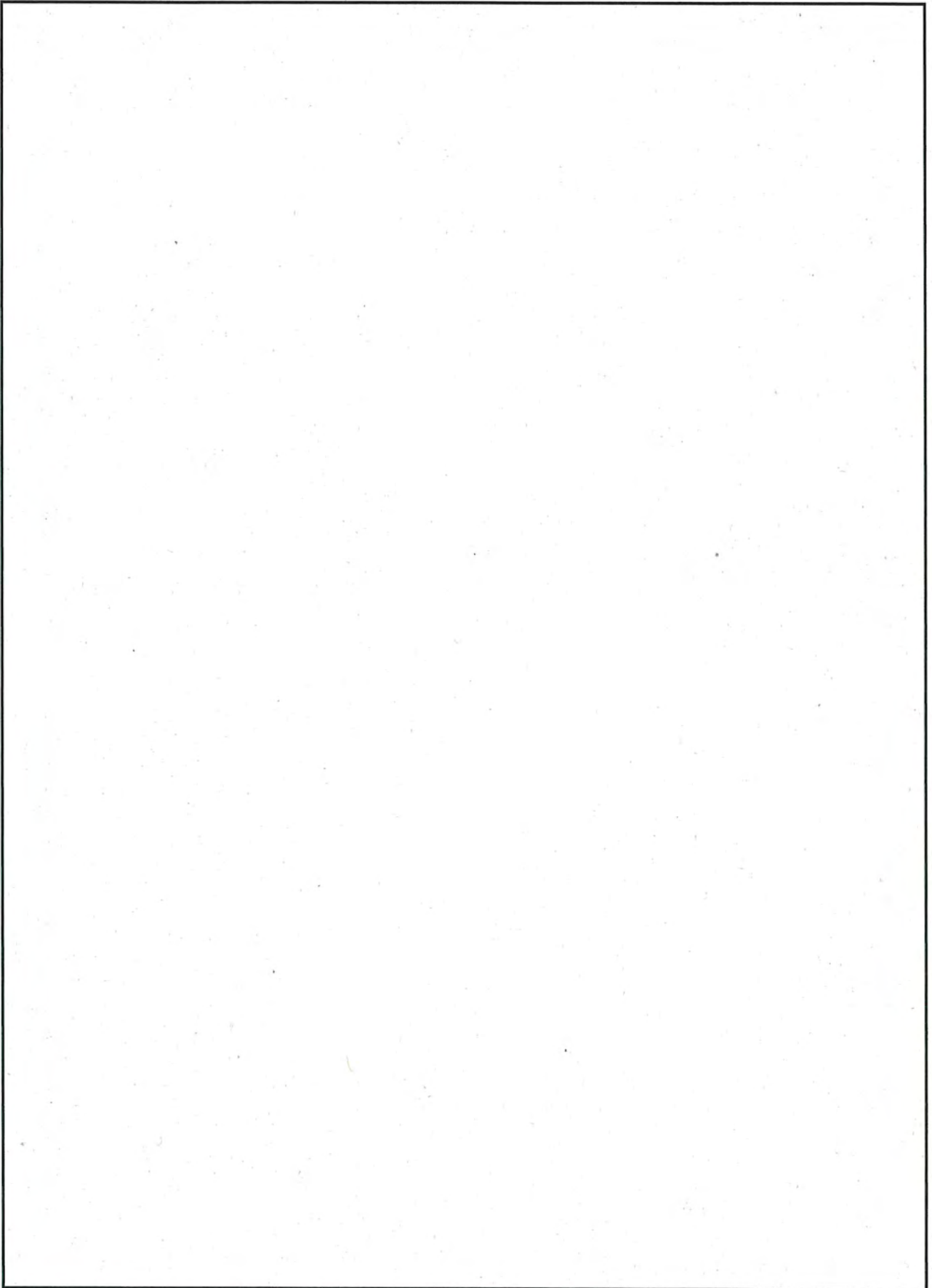
第 2.5.2-6 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



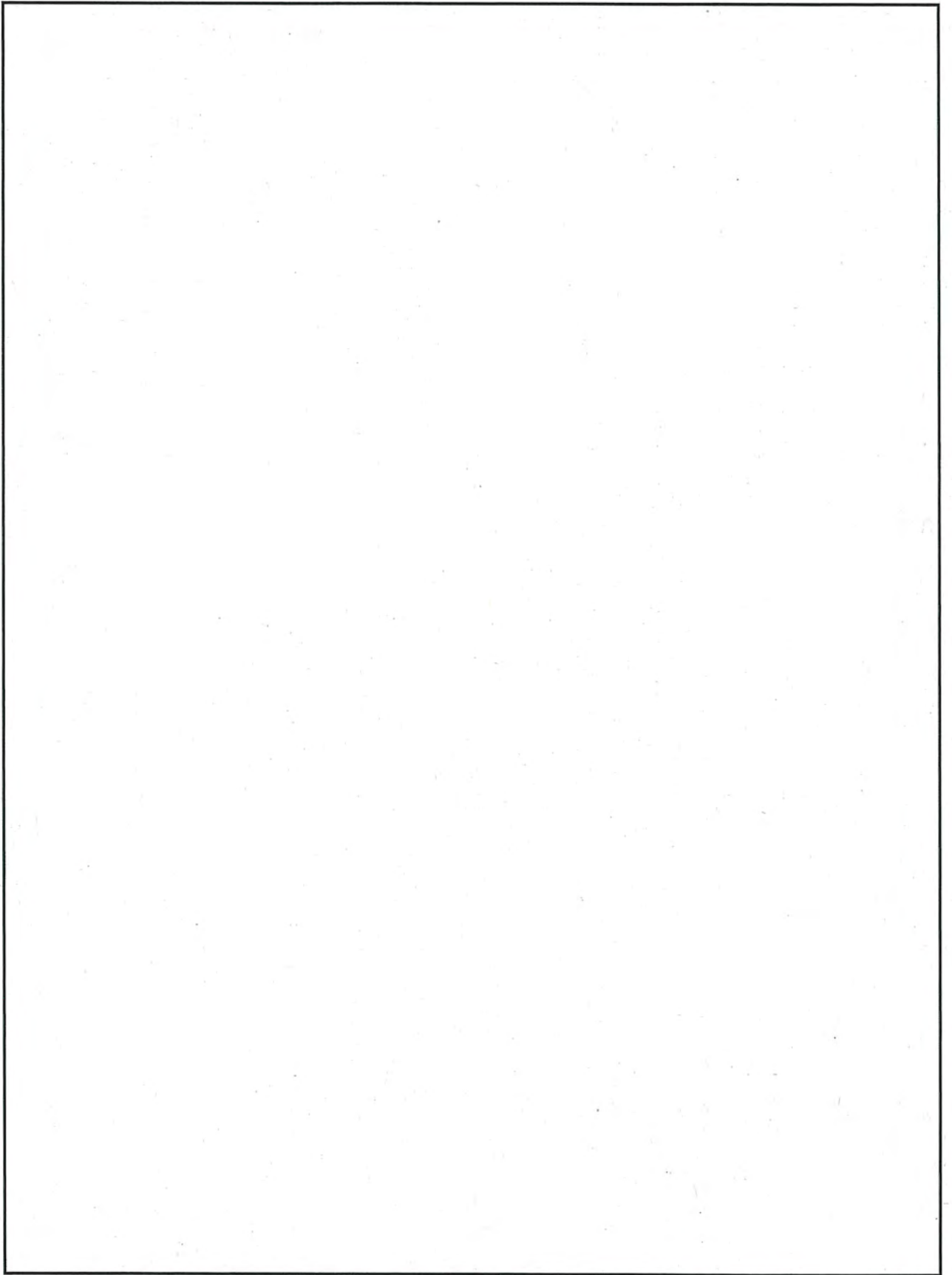
第 2.5.2-7 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



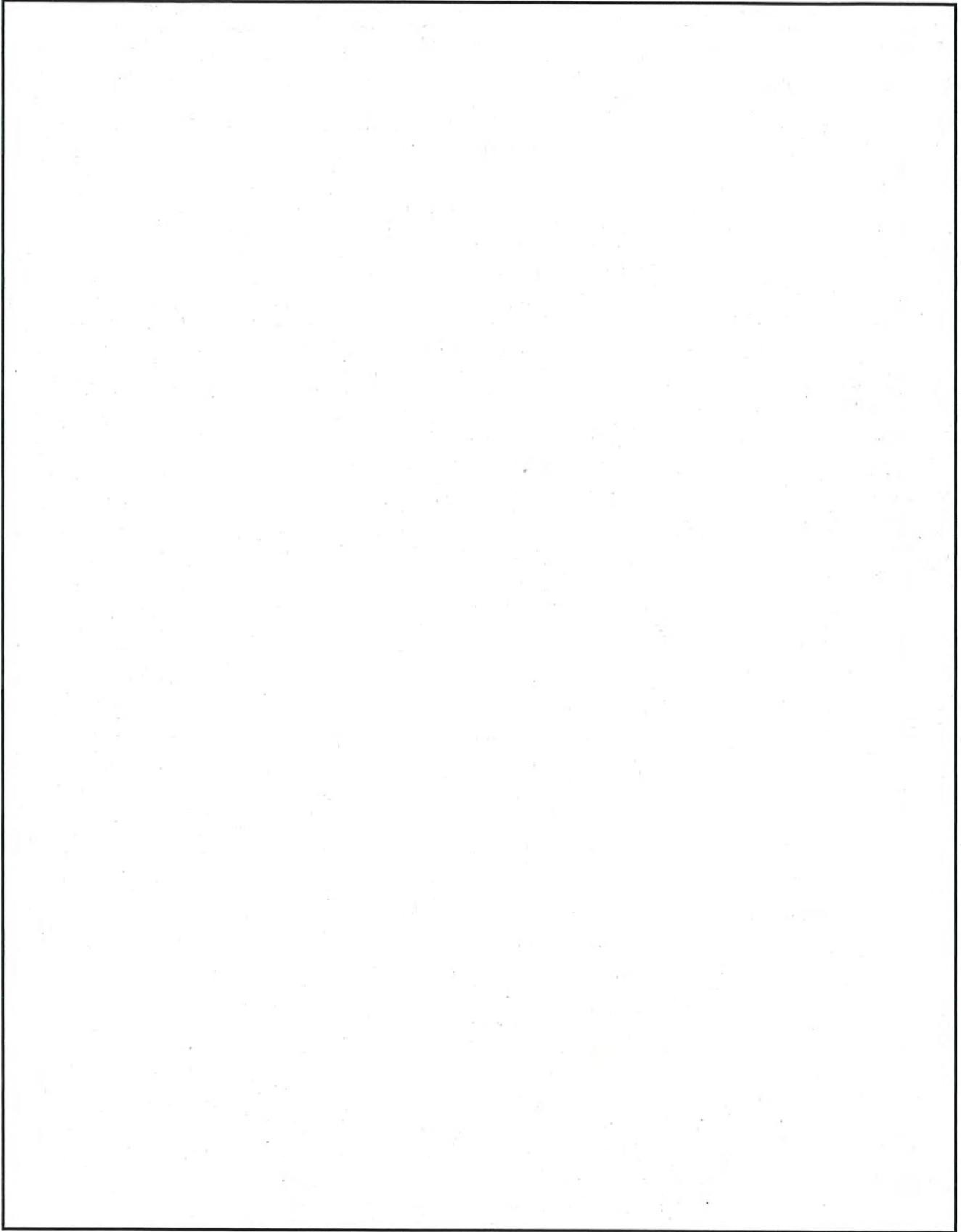
第 2.5.2-8 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



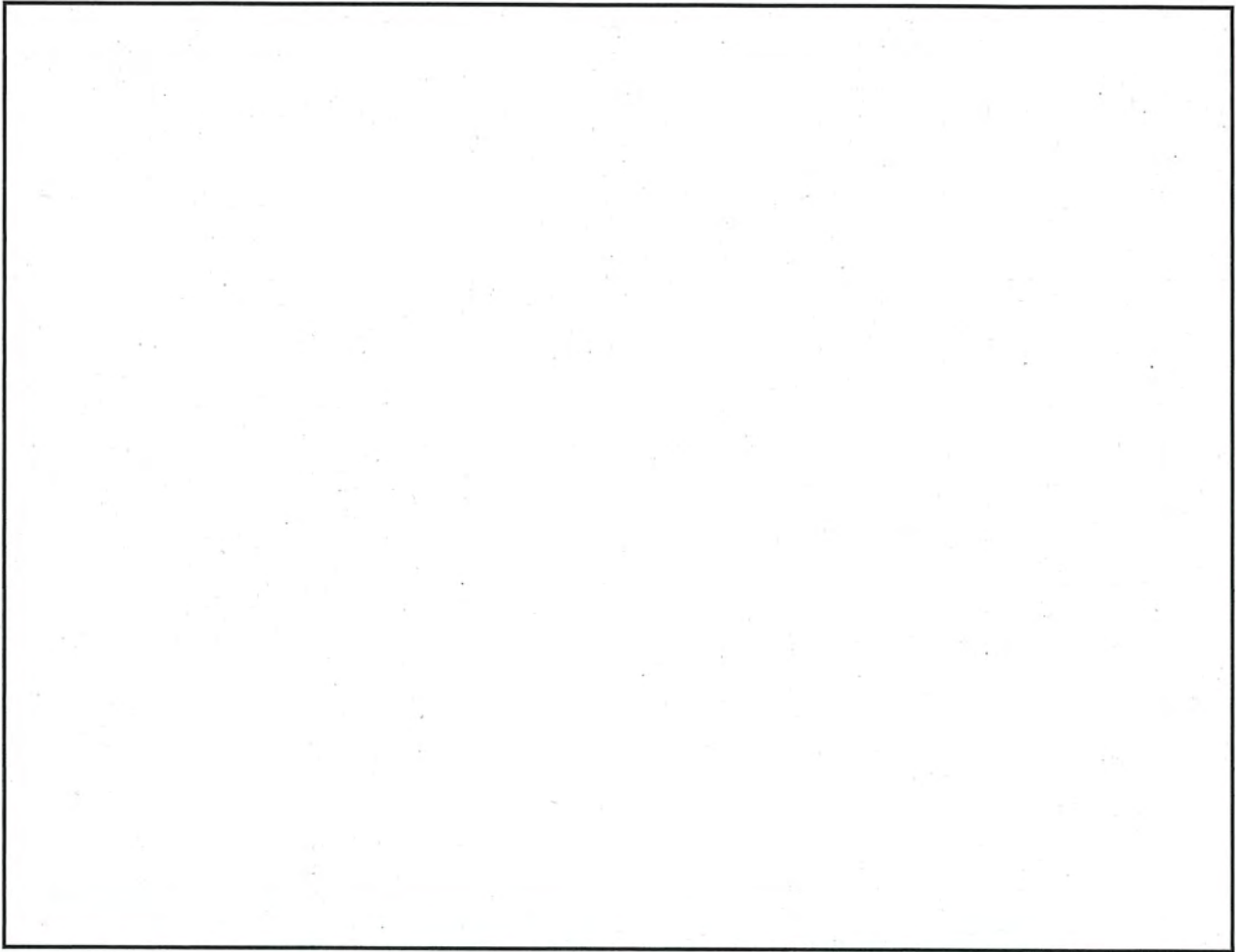
第 2.5.2-9 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



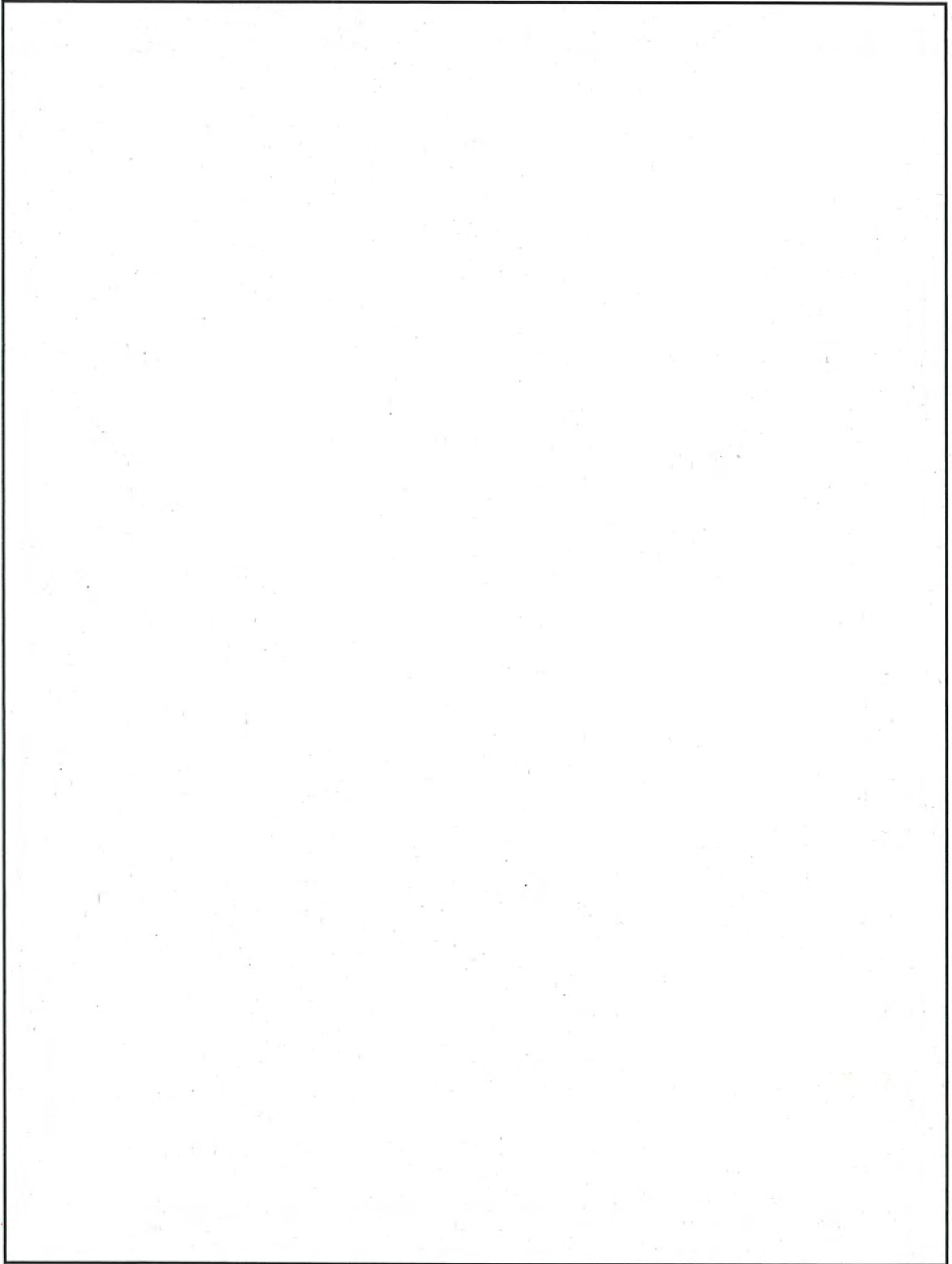
第 2.5.2-10 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



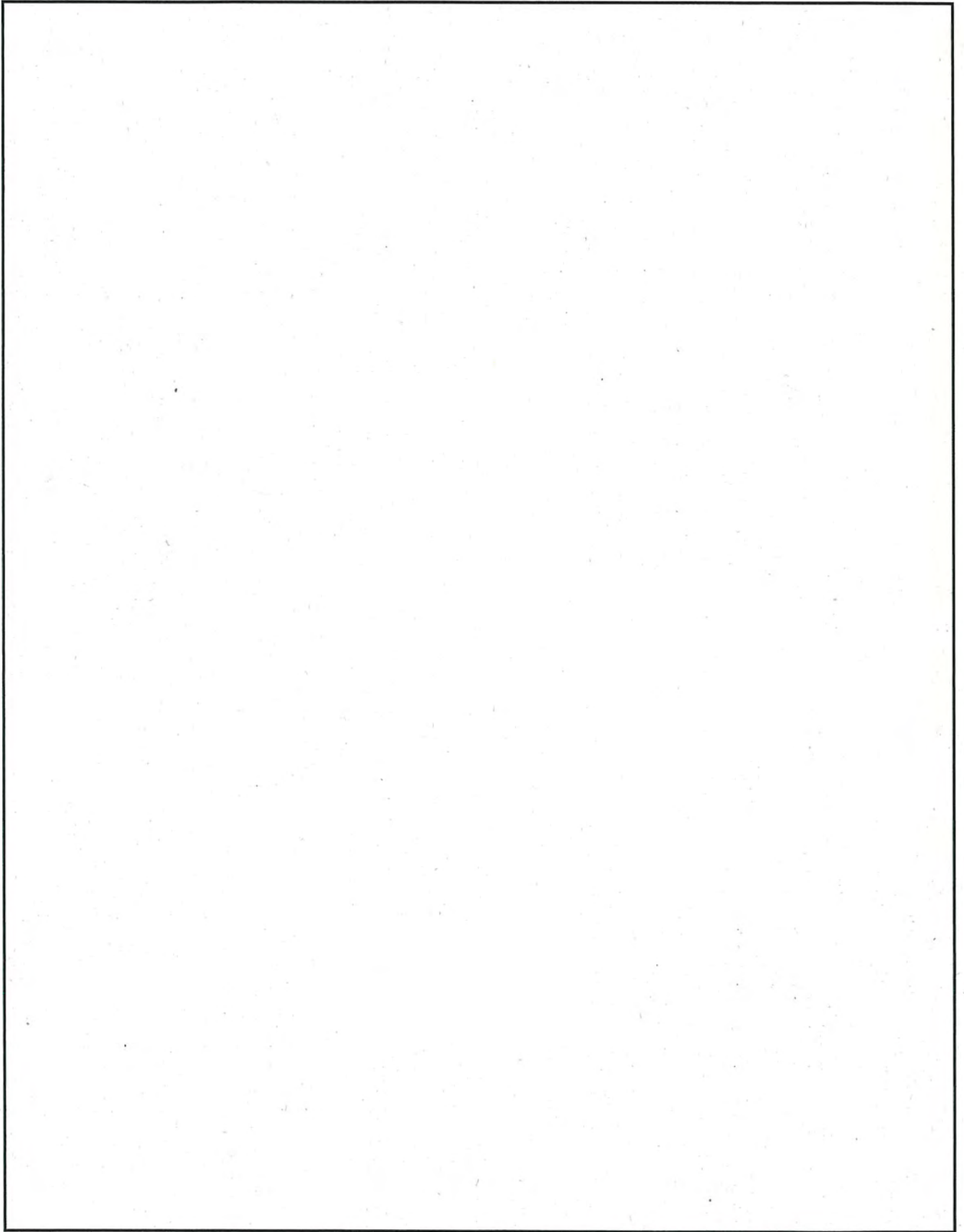
第 2. 5. 2-11 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



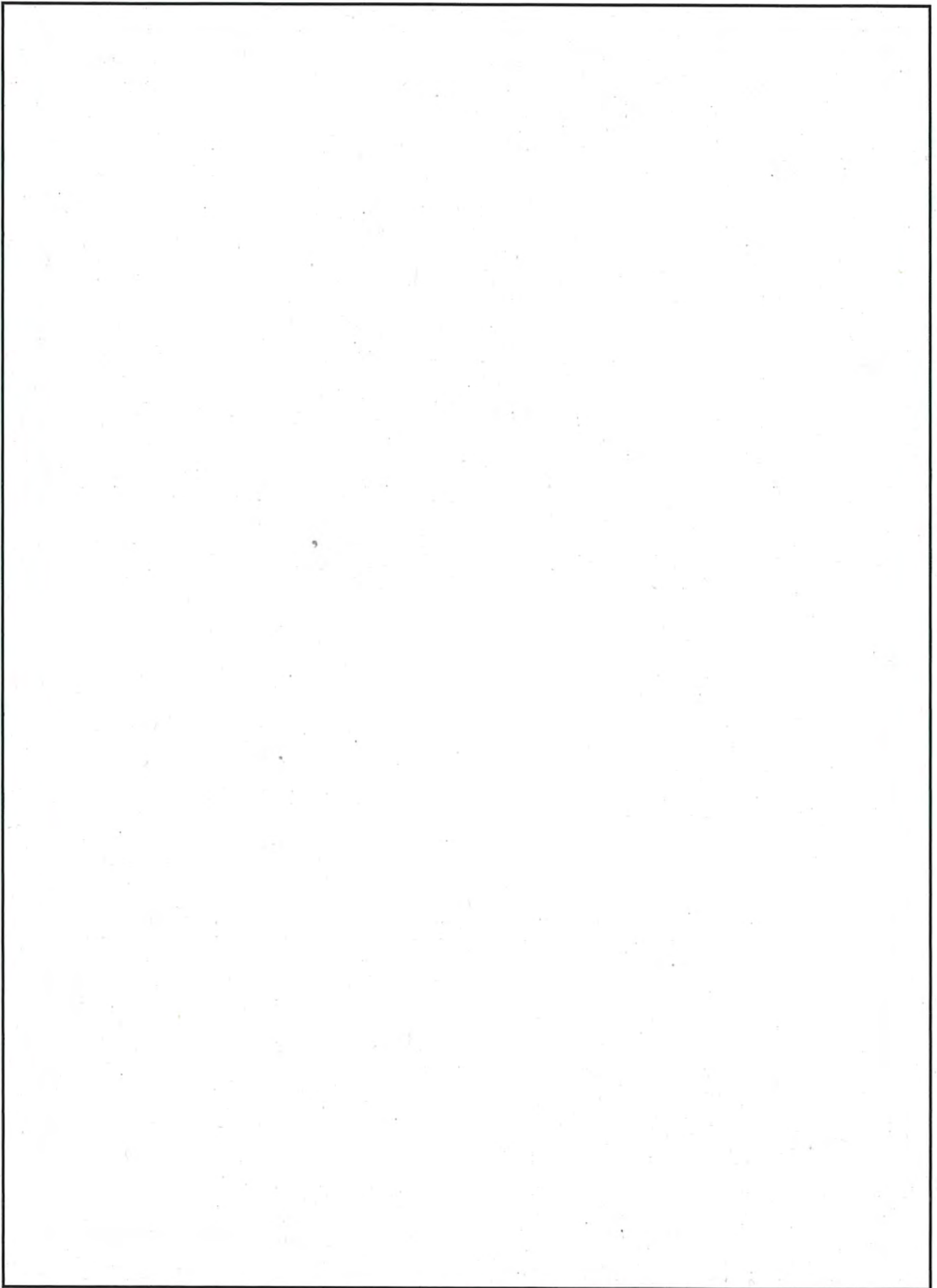
第 2.5.2-12 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



第 2.5.2-13 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）



第 2. 5. 2-14 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）



第 2.5.2-15 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）

技術的に想定されるいかなる場合においても、第 2.5.2-4 表に示すとおり、評価基準を満たしている。

評価結果は、MSF-24P 型と MSF-32P 型の乾式キャスクそれぞれを無限に配列した体系（完全反射）で解析した結果であり、MSF-24P 型と MSF-32P 型の乾式キャスクが乾式貯蔵建屋内で混在した場合でも、MSF-24P 型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。

第 2.5.2-4 表 評価結果

項	目	評 価 結 果		評 価 基 準	備 考
		MSF-24P 型	MSF-32P 型		
中 性 子 実 効 増 倍 率	冠水状態	0.92 (3 σ :0.00135)	0.91 (3 σ :0.00129)	0.95 以下 ¹⁾	なお、SCALE コードシステムはモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、本評価結果は解析コードの精度等を考慮して、統計誤差(σ)の3倍(3 σ)を加味した値である。
	乾燥状態	0.39 (3 σ :0.00039)	0.39 (3 σ :0.00045)		

〔確認内容〕

- 5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

本文 2.7 項「使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合に設計上想定される事象について」に示すとおり、乾式キャスク通常貯蔵時において、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。

また、設計上考慮すべき自然現象において、乾式貯蔵建屋等の損傷及び兼用キャスクの転倒が生じない設計とし、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。詳細は設置許可基準第 4 条及び 6 条まとめ資料で説明する。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの臨界防止設計に用いる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) 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²⁾を用い、実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれる KENO-VIコードを用いる。

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。

- a) 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、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- b) 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第 2.5.2-16 図に示す。

iv 使用実績及び検証

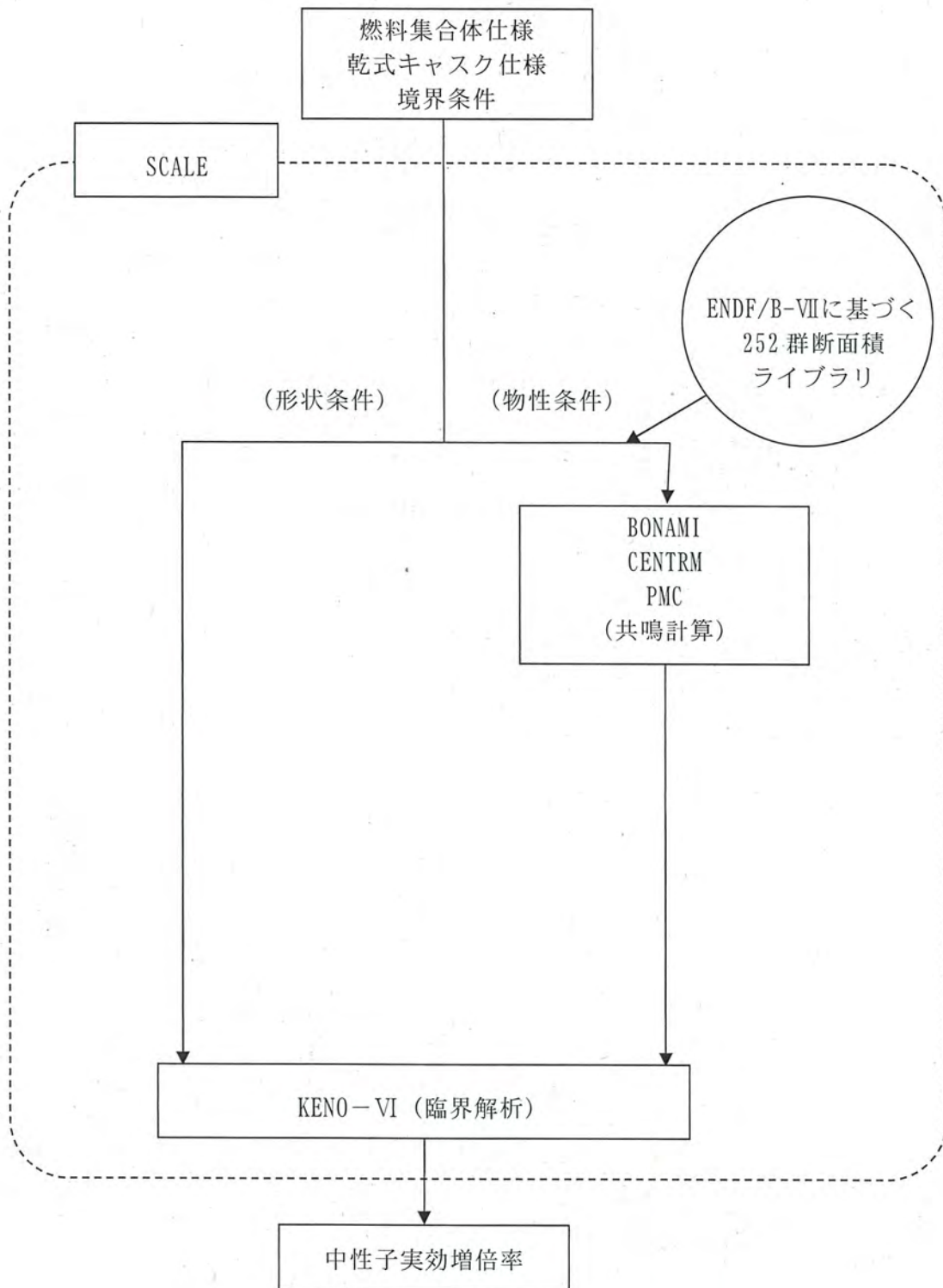
臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

文献 3) に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。第 2.5.2-5 表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。

- ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合
- ②複数の集合体が近接して配列する場合
- ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材（ほう素）を含む板が存在する場合
- ④集合体に近接して反射体（鋼板、鉛）を配置した場合
- ⑤水中に中性子吸収材（ほう素）が溶解している場合
- ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合

第 2.5.2-5 表 ベンチマーク試験解析結果

	ケース数	平均値	標準偏差	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



第 2.5.2-16 図 SCALE コードシステムの解析フロー図

4. 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) 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).
- 3) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, NEA/NSC/DOC (95) 03, (2006).

伊方発電所 3 号炉

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(使用済用済燃料乾式貯蔵容器の遮蔽機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの遮蔽機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第4項一号

- ・使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条2項

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

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第4条第1項第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすこと。
- ・兼用キャスク表面の線量当量率が1時間当たり2ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における線量当量率が1時間当たり100マイクロシーベルト以下であること。
- ・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

なお、当該貯蔵建屋が損傷したときからその遮蔽機能の応急の復旧が完了するまでの間は、第29条に規定する「通常運転時」には当たらない。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2.安全機能の確保 2.2 遮蔽機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽機能を有すること。
- (2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下とすること。
- (3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で 50 μ Sv/y 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。
- (4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び 1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。

b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下とすること。

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

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

② ソースターム

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

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度

(1mSv/y) を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの遮蔽機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

- a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。
- b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

使用済燃料からの放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とする。

また、乾式キャスクは、事業所外運搬に使用する輸送容器の機能を持つため、「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」（以下「外運搬規則」という。）に示される要求事項を満足する設計とする。

乾式キャスクは、使用済燃料からの放射線を乾式キャスク本体及び蓋部により遮蔽する。ガンマ線遮蔽材には、鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材には、水素を多く含有するレジンを用いる。

乾式キャスクの遮蔽解析フローを第 2.5.3-1 図に示す。解析条件は第 2.5.3-1 表及び第 2.5.3-2 表のとおりとし、遮蔽解析モデル化の概要を第 2.5.3-2 図、解析モデル図を第 2.5.3-3～第 2.5.3-10 図に示す。

a. 使用済燃料の線源強度評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度（集合体平均）、濃縮度及び冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく線源強度を計算する。

b. 乾式キャスクの線量当量率評価方法

乾式キャスクの線量当量率は、乾式キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の線源強度を条件として、遮蔽解析コード DOT3.5 を使用して求める。線量当量率の算定

にあたっては、設計貯蔵期間（60 年）中における熱による中性子遮蔽材の遮蔽性能の低下を考慮する。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

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

－遮蔽評価においては、局所的な表面線量を評価する必要があるため、使用済燃料の燃焼度（集合体平均）は中央部、外周部共に当該配置の収納制限の最高燃焼度を設定している。

－使用済燃料は、使用済燃料ごとに軸方向の燃焼度分布に基づく線源強度分布を有するが、線源強度計算にあたっては、軸方向燃焼度分布を第 2.5.3-11 図～第 2.5.3-13 図のとおりとし、実際の燃焼度分布より保守的に計算している。

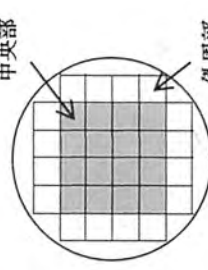
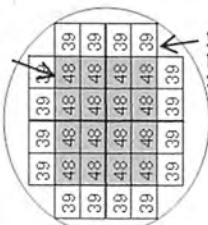
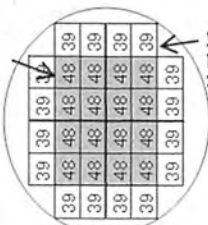
・ モデル化の保守性

－中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（2%程度）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 % の質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。

－使用済燃料について胴内での軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。

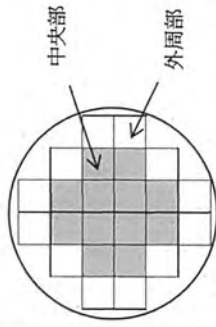
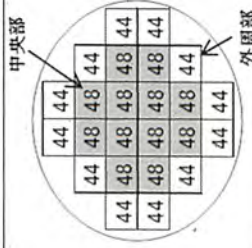
－バーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

第2.5.3-1表 1,2号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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

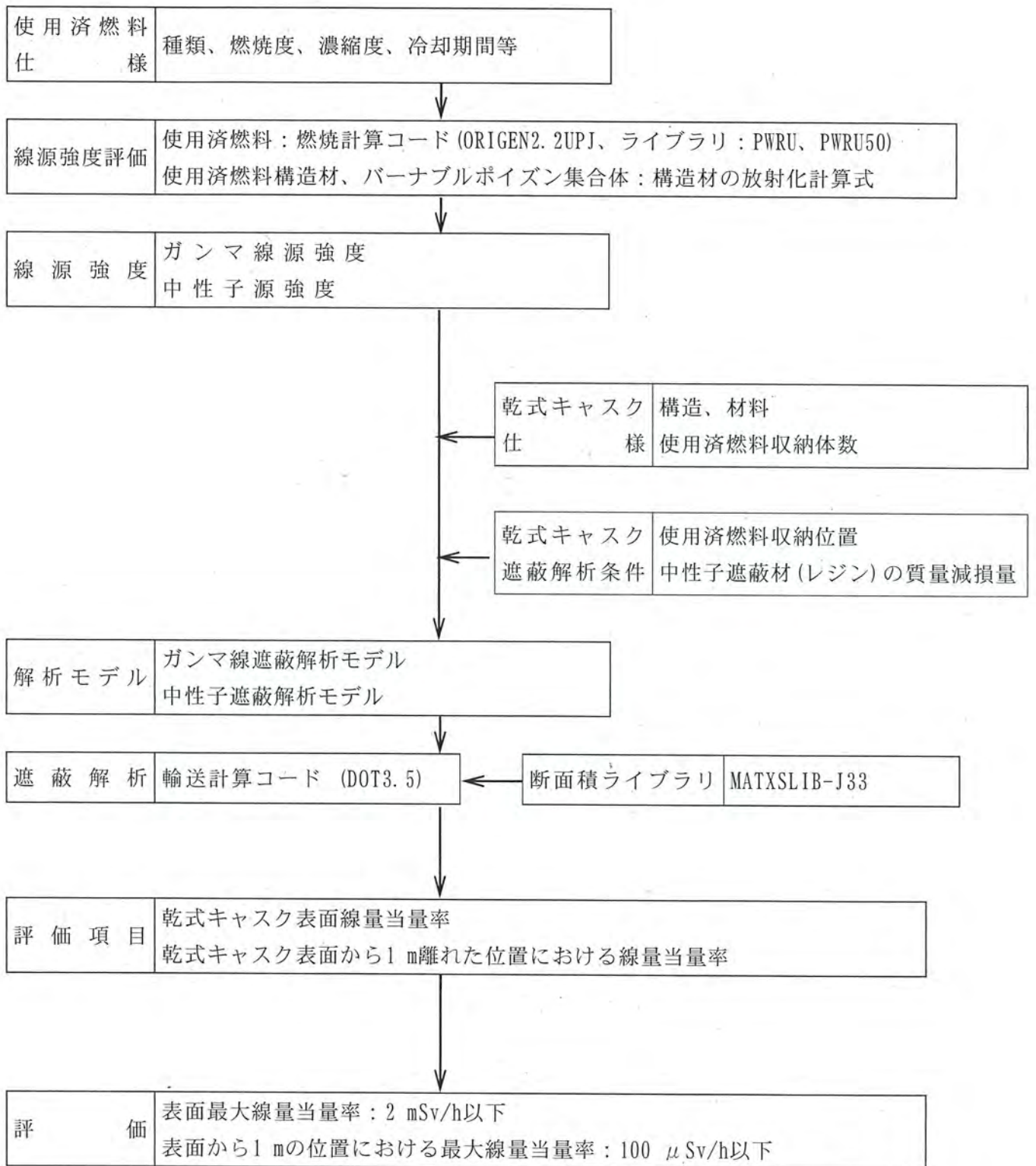
※1: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

第 2.5.3-2 表 3号炉用燃料 乾式キャスク収納条件の概要

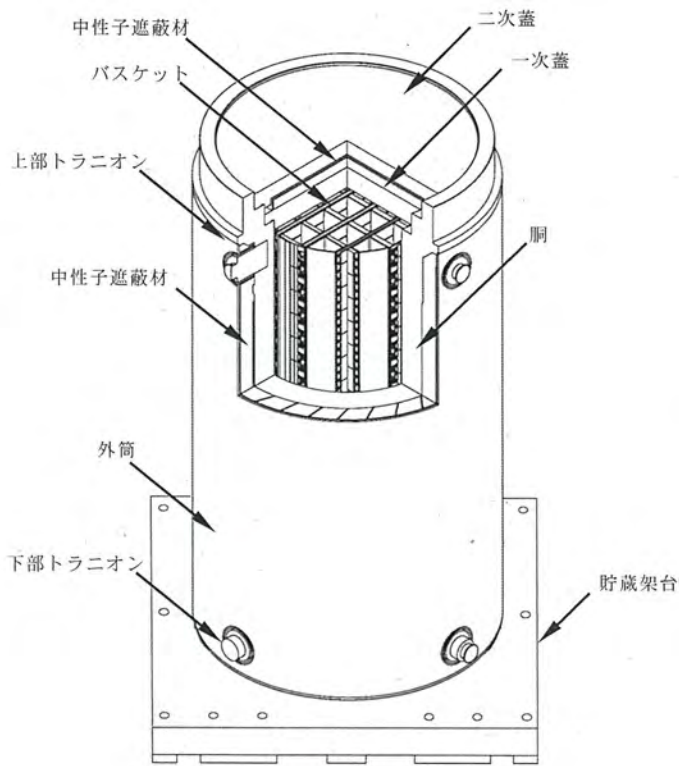
収納物仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
	中央部	外周部		中央部	外周部
燃料タイプ	17×17型(A/B型)		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1		
ウラン重量(kg)					
最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	48	44
SFPでの冷却期間(年)	A型: ≥15 ^{※1} B型: ≥17		—	15	
最高燃焼度(GWd/t)	≤90	—	—	90	—
SFPでの冷却期間(年)	≥15	—	—	15	—
平均燃焼度(GWd/t)	≤44		—	—	
配置 ^{※2}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

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

※2: 数値は燃焼度(GWd/t)を示す。

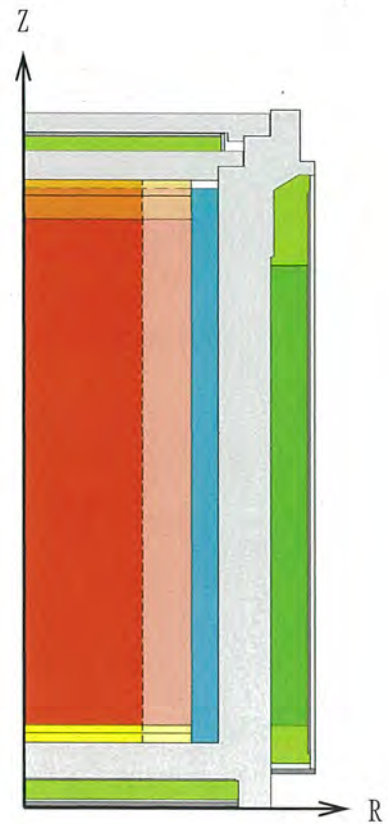
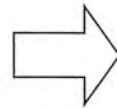


第 2.5.3-1 図 乾式キャスクの遮蔽解析フロー図













[実形状]

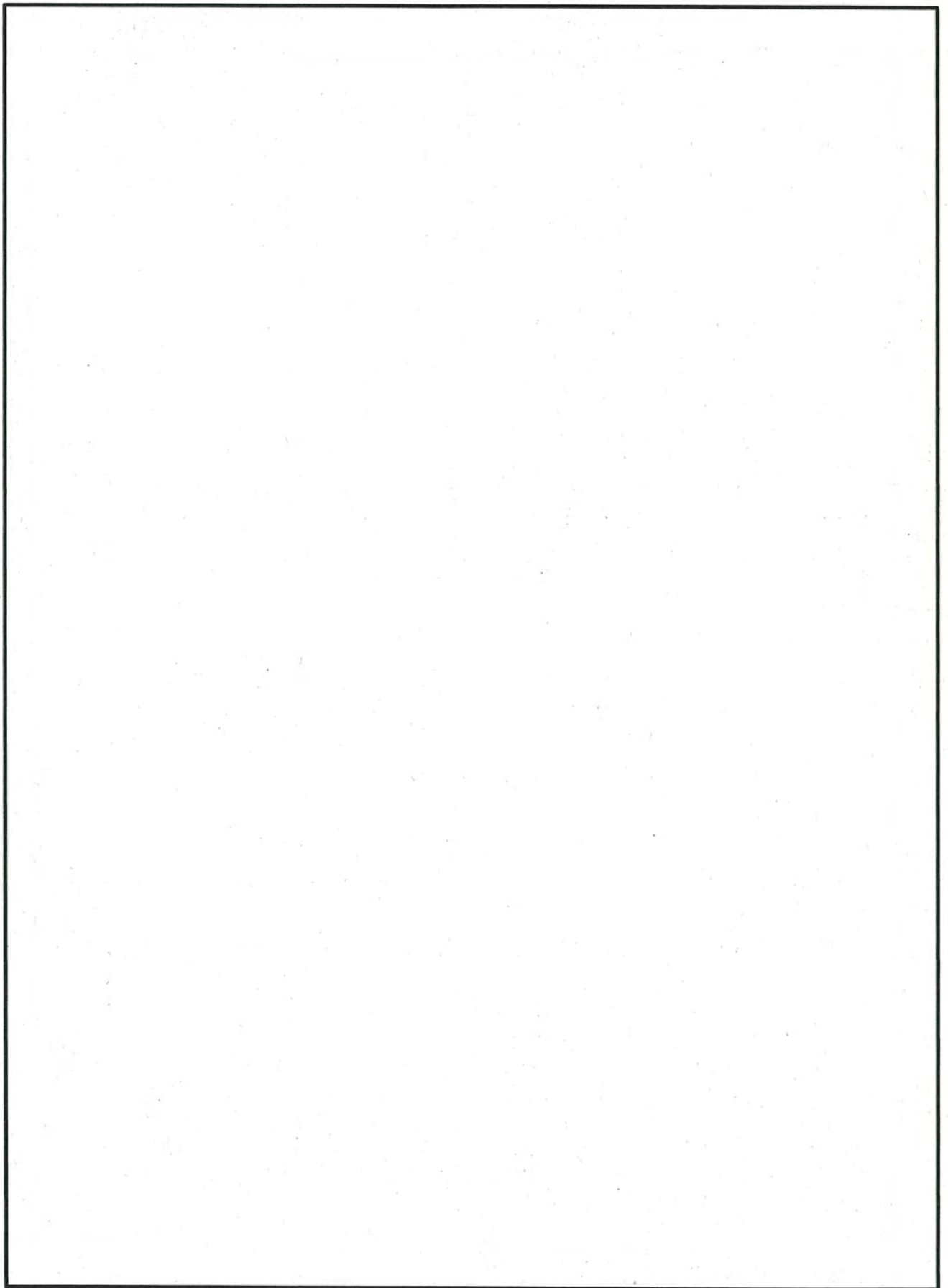
モデル化



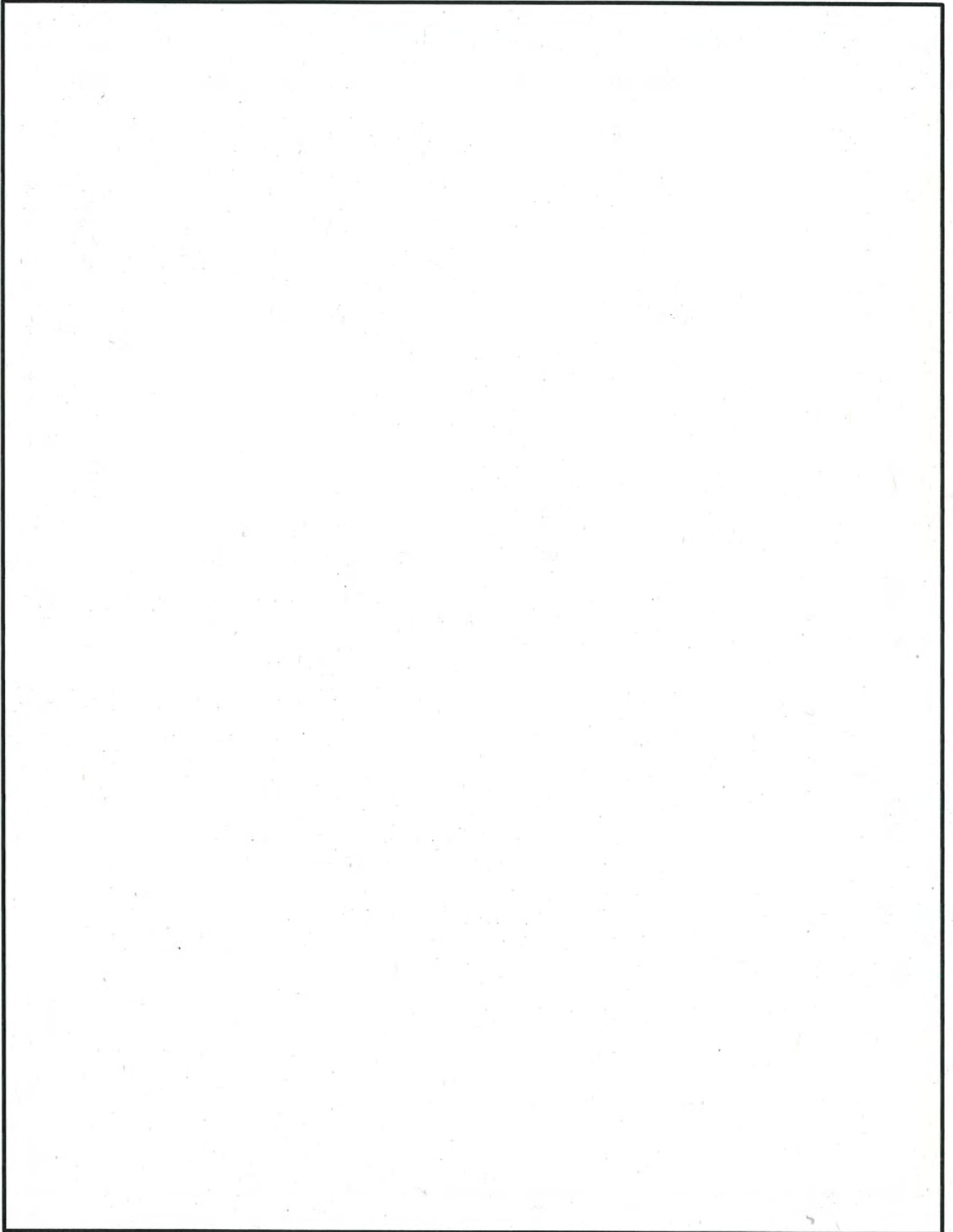
[二次元モデル化 (R-Z 体系)]

 燃料有効部中央+バスケット均質化領域	 燃料有効部外周+バスケット均質化領域
 燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域	 燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
 燃料上部構造材中央	 燃料上部構造材外周
 燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域	 燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
 バスケット外周部	 胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー領域
 中性子遮蔽材領域	 底部中性子遮蔽材カバー、下部端板領域
 中性子遮蔽材+伝熱フィン均質化領域	 真空

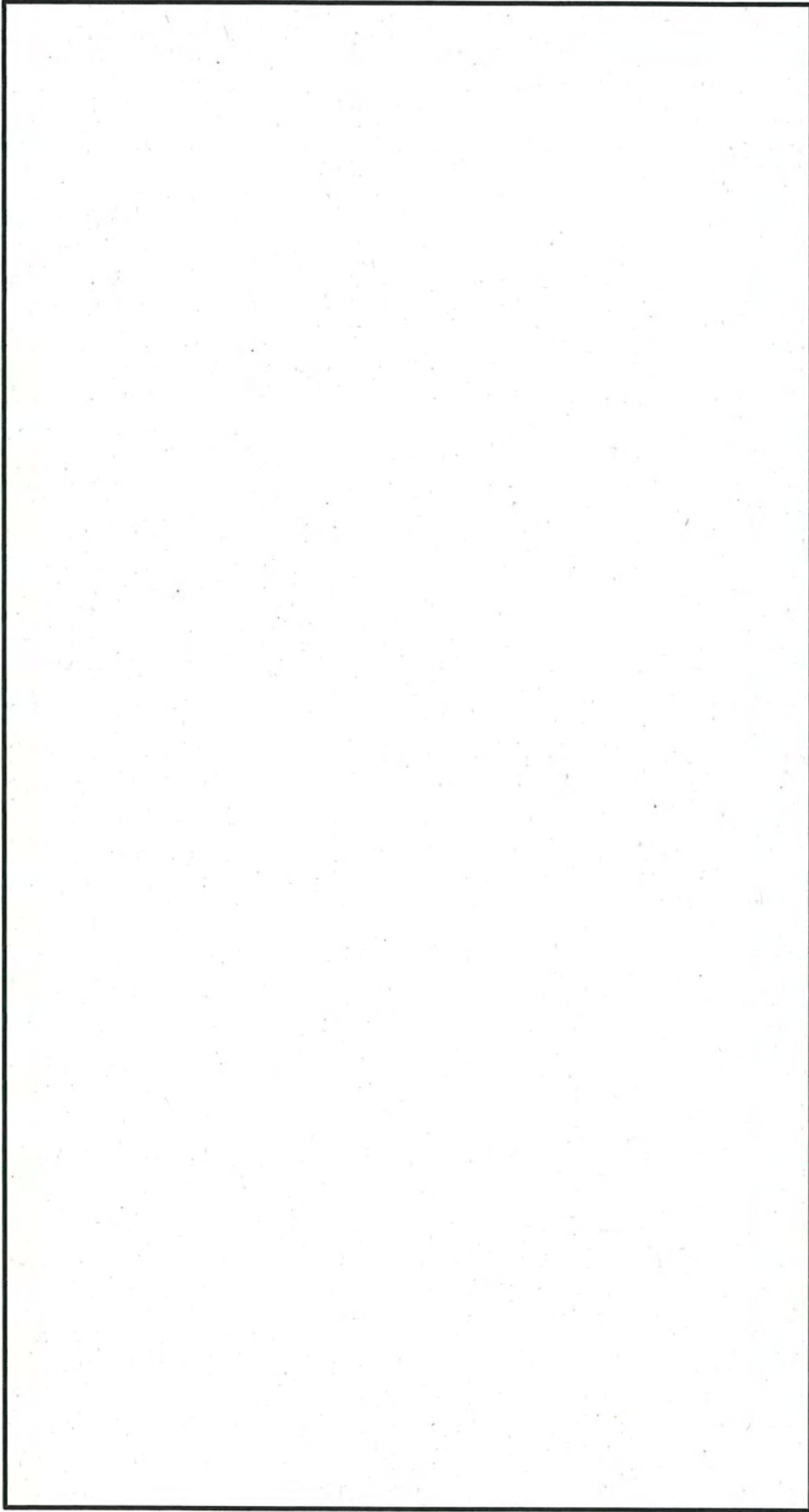
第 2.5.3-2 図 遮蔽解析モデル化の概要 (MSF-24P 型の例)



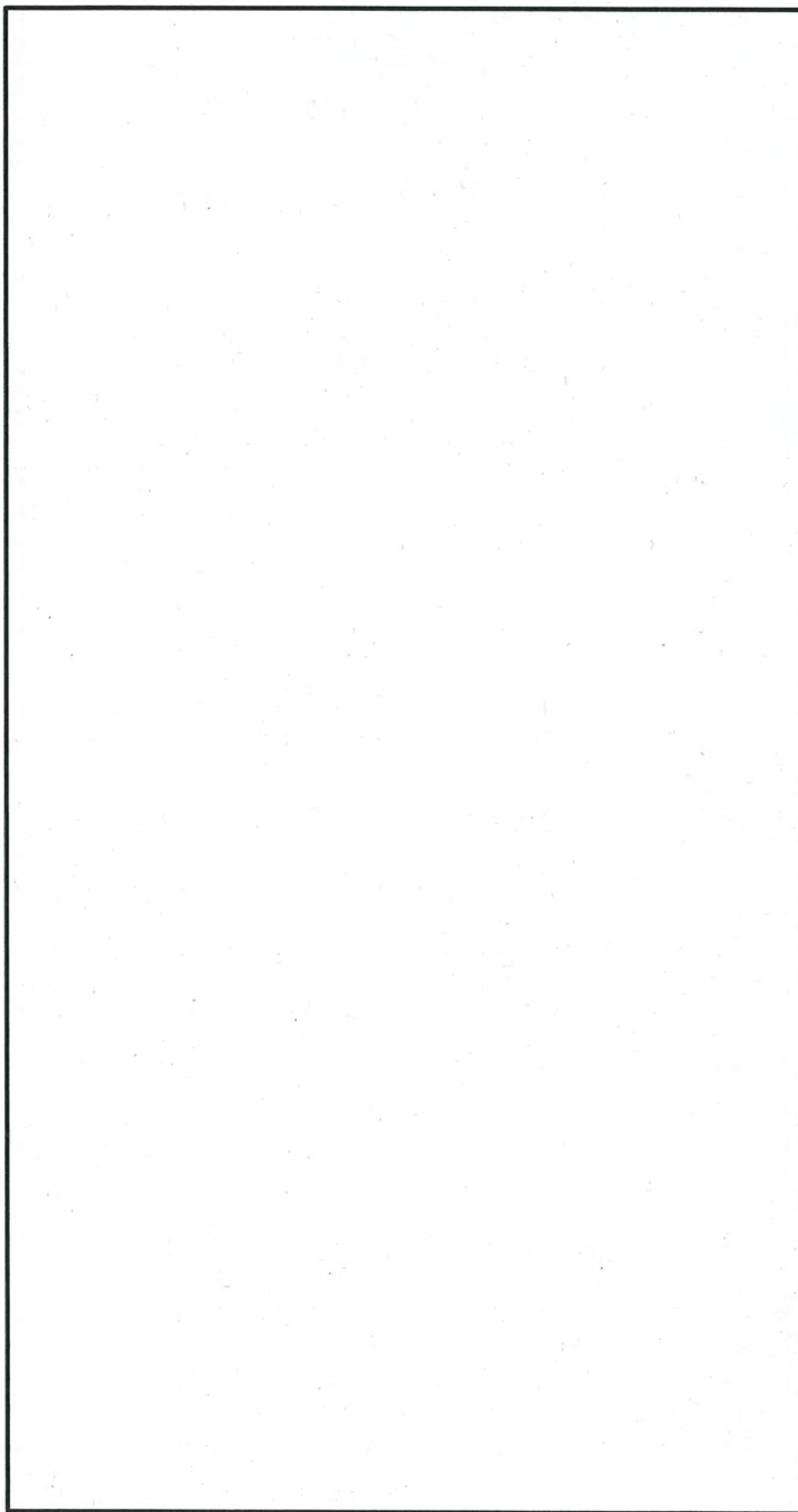
第 2.5.3-3 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-24P 型）



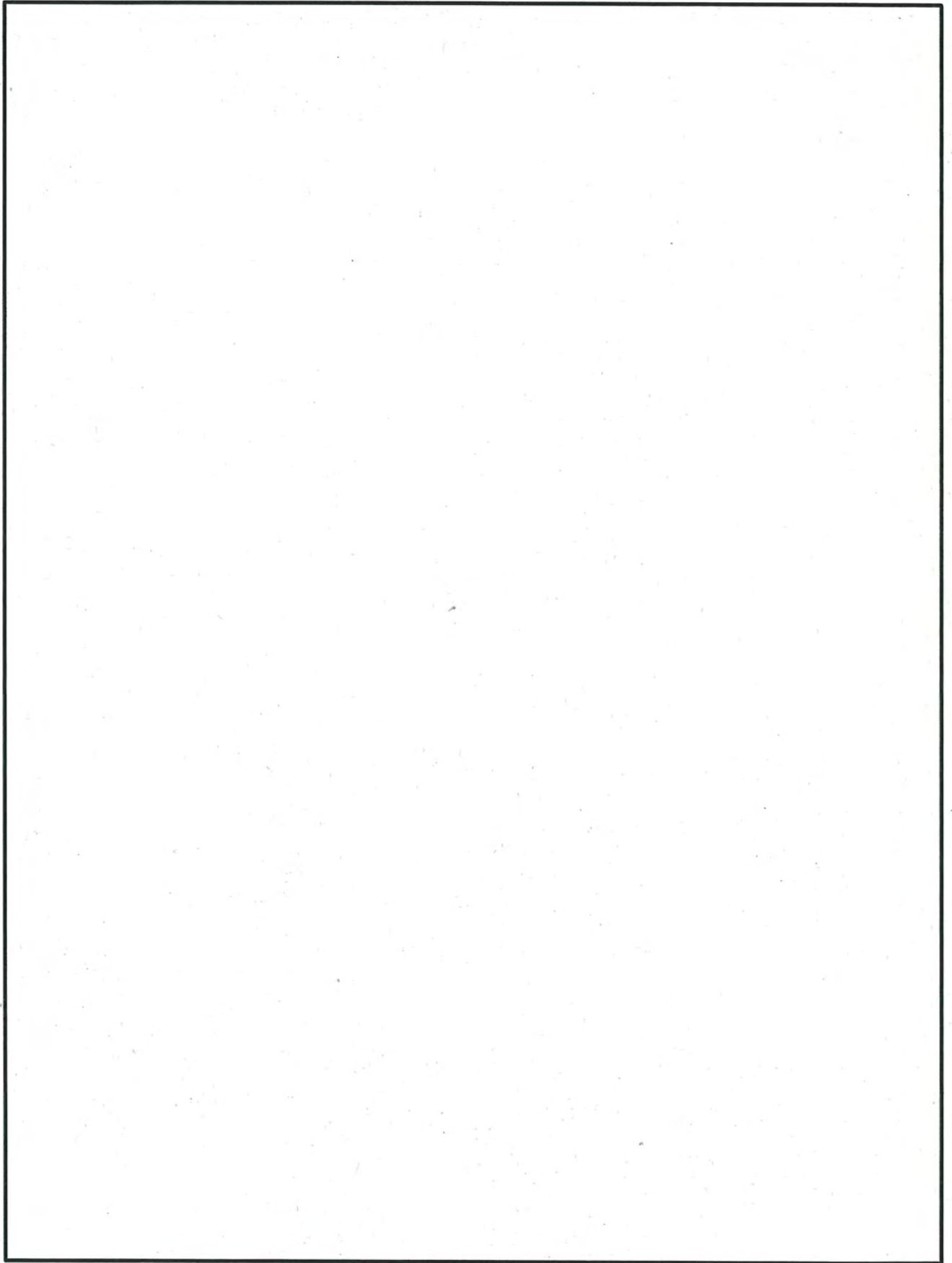
第 2.5.3-4 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-24P 型）



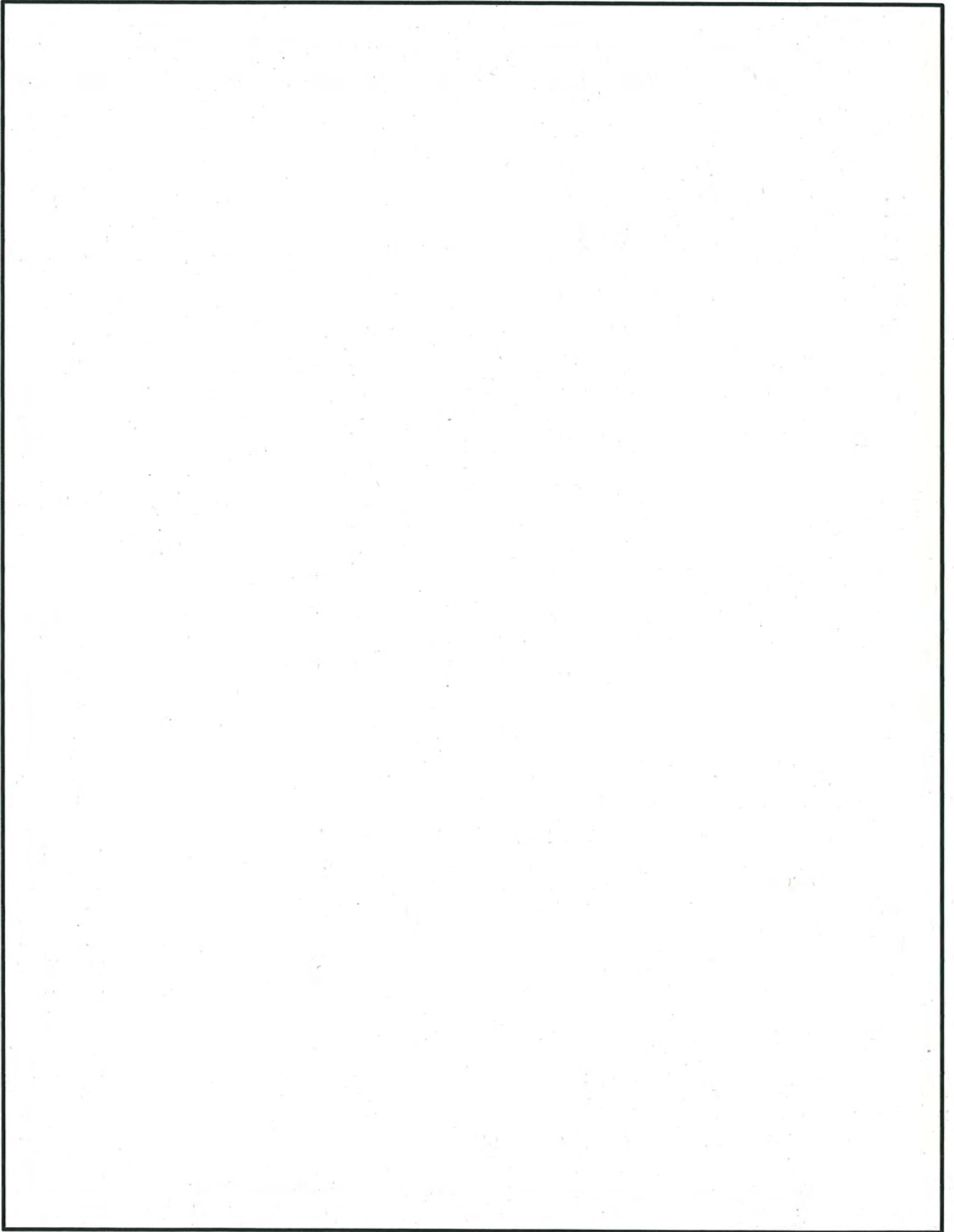
第2.5.3-5図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-24P型）



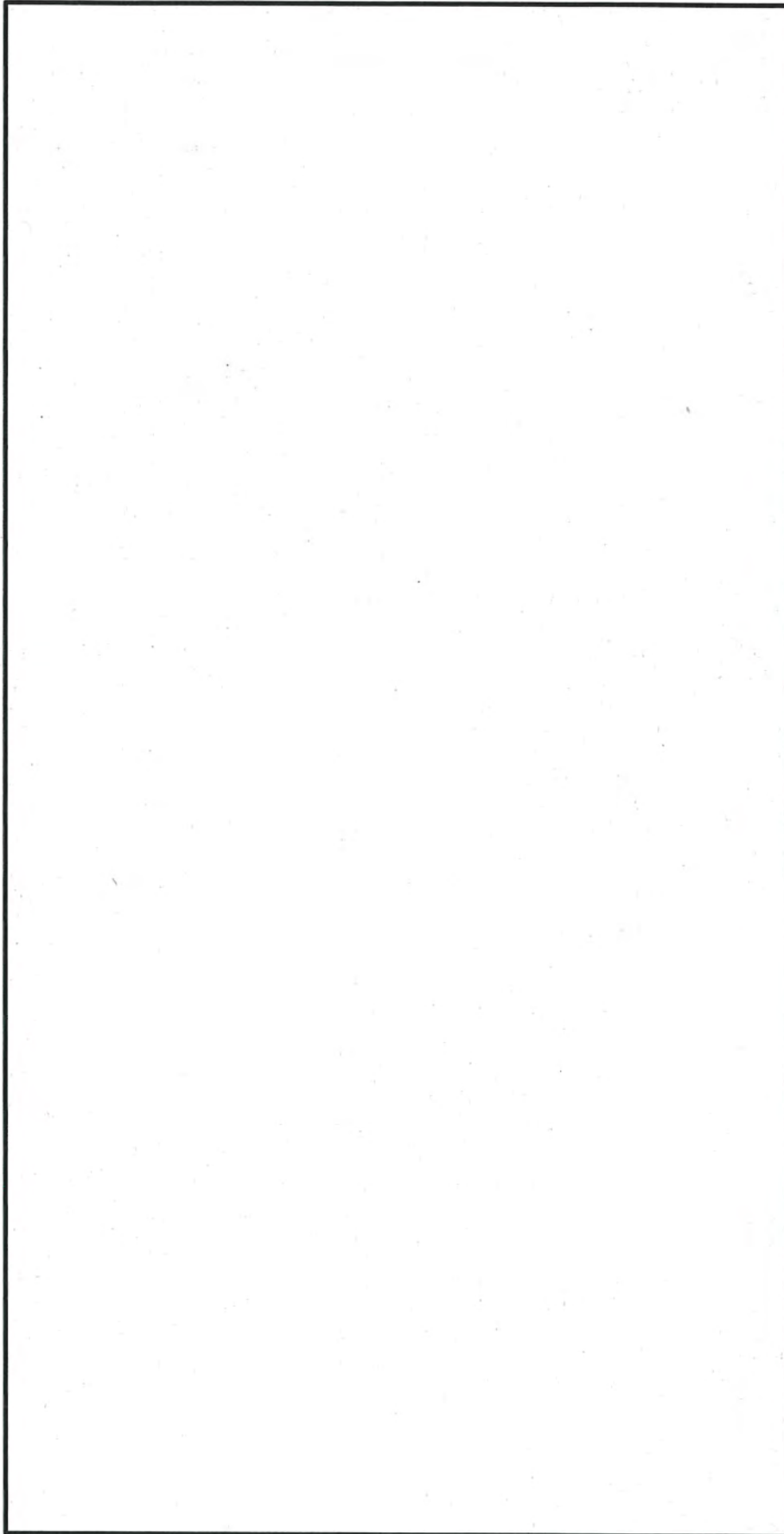
第2.5.3-6 図 貯蔵時の解析モデル (下部トランニオン部) (MSF-24P 型)



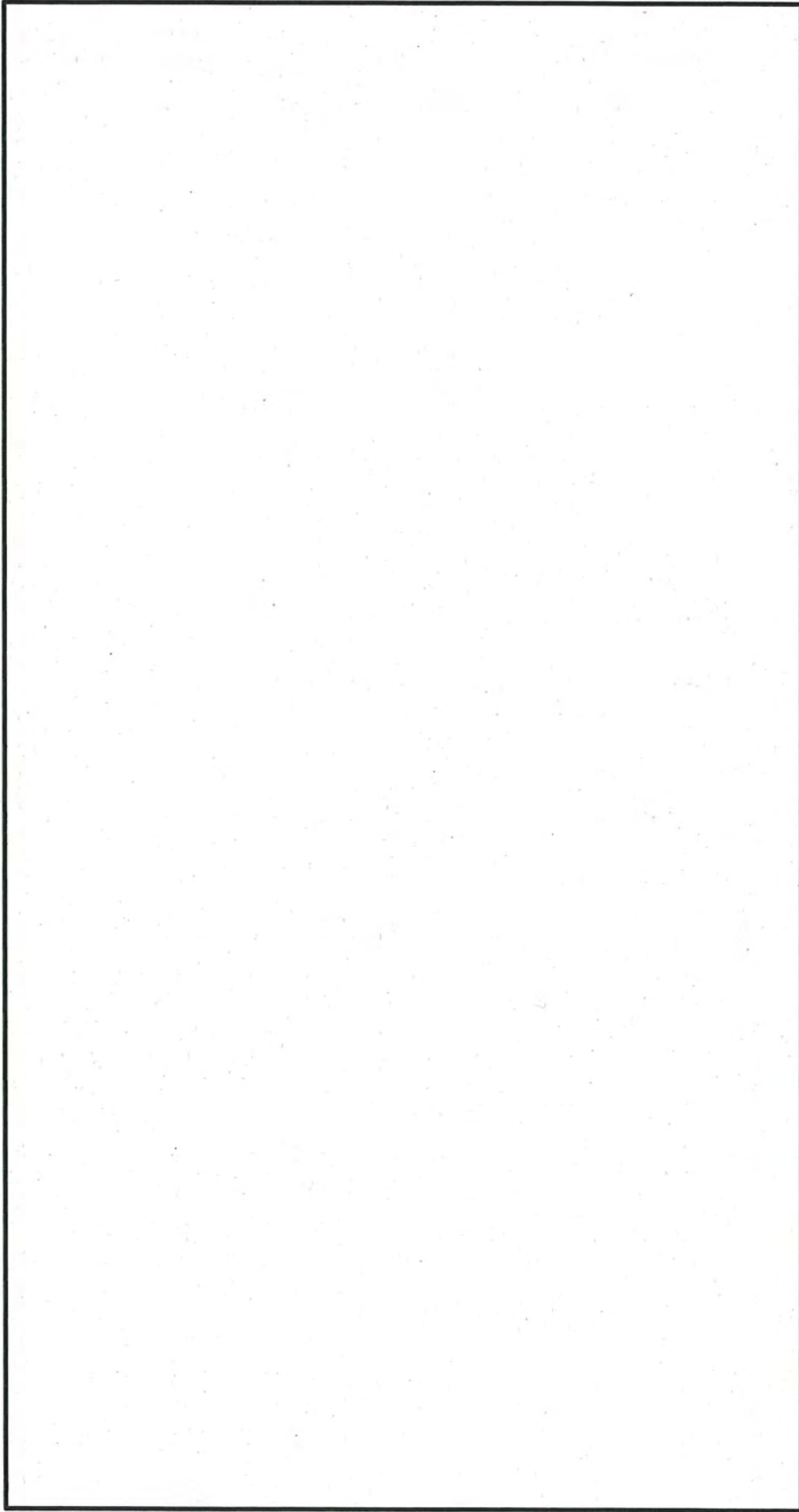
第 2. 5. 3-7 図 貯蔵時の解析モデル (頭部) (MSF-32P 型)



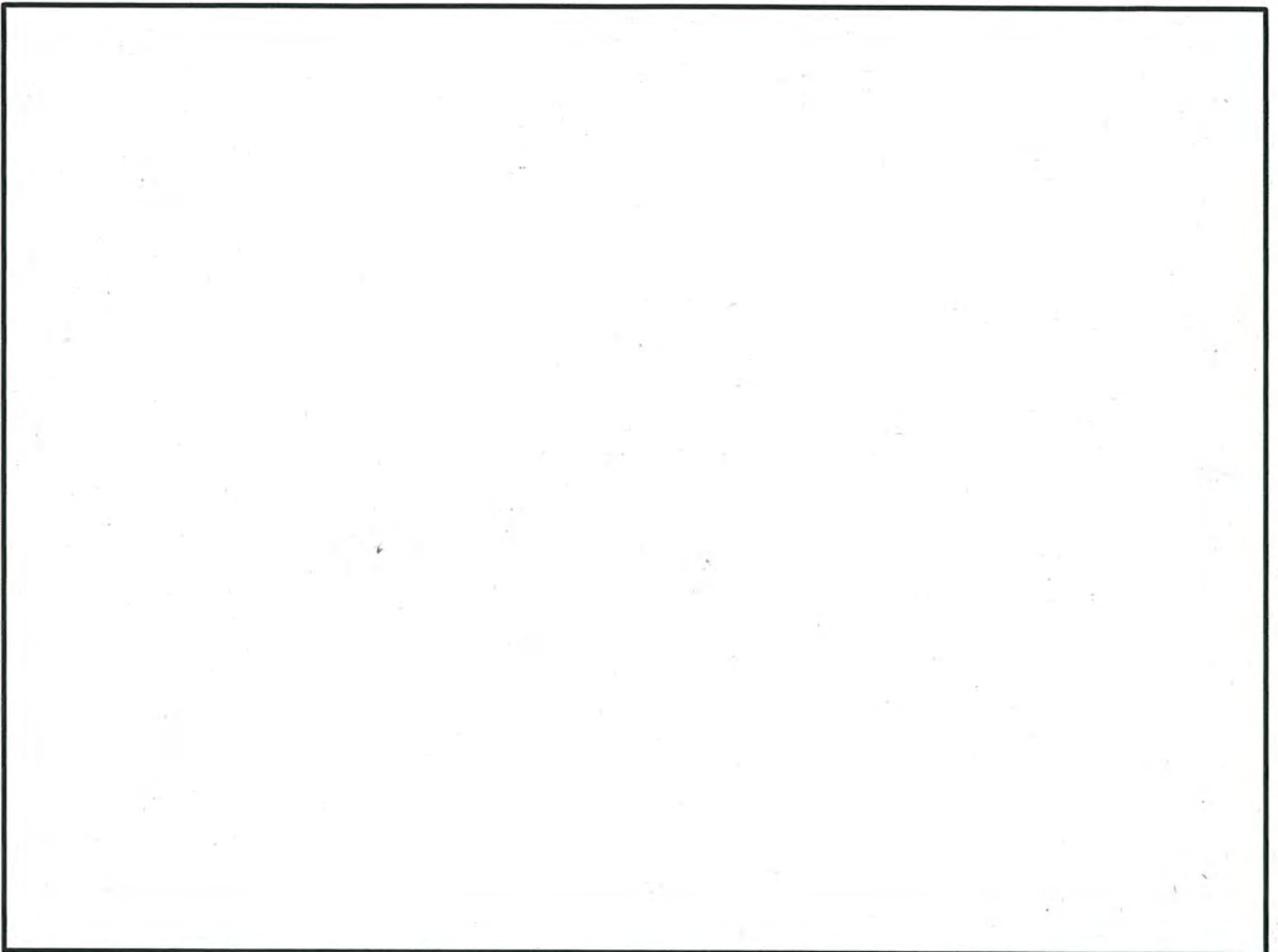
第 2.5.3-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-32P 型）



第2.5.3-9 図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-32P 型）



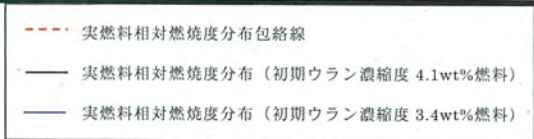
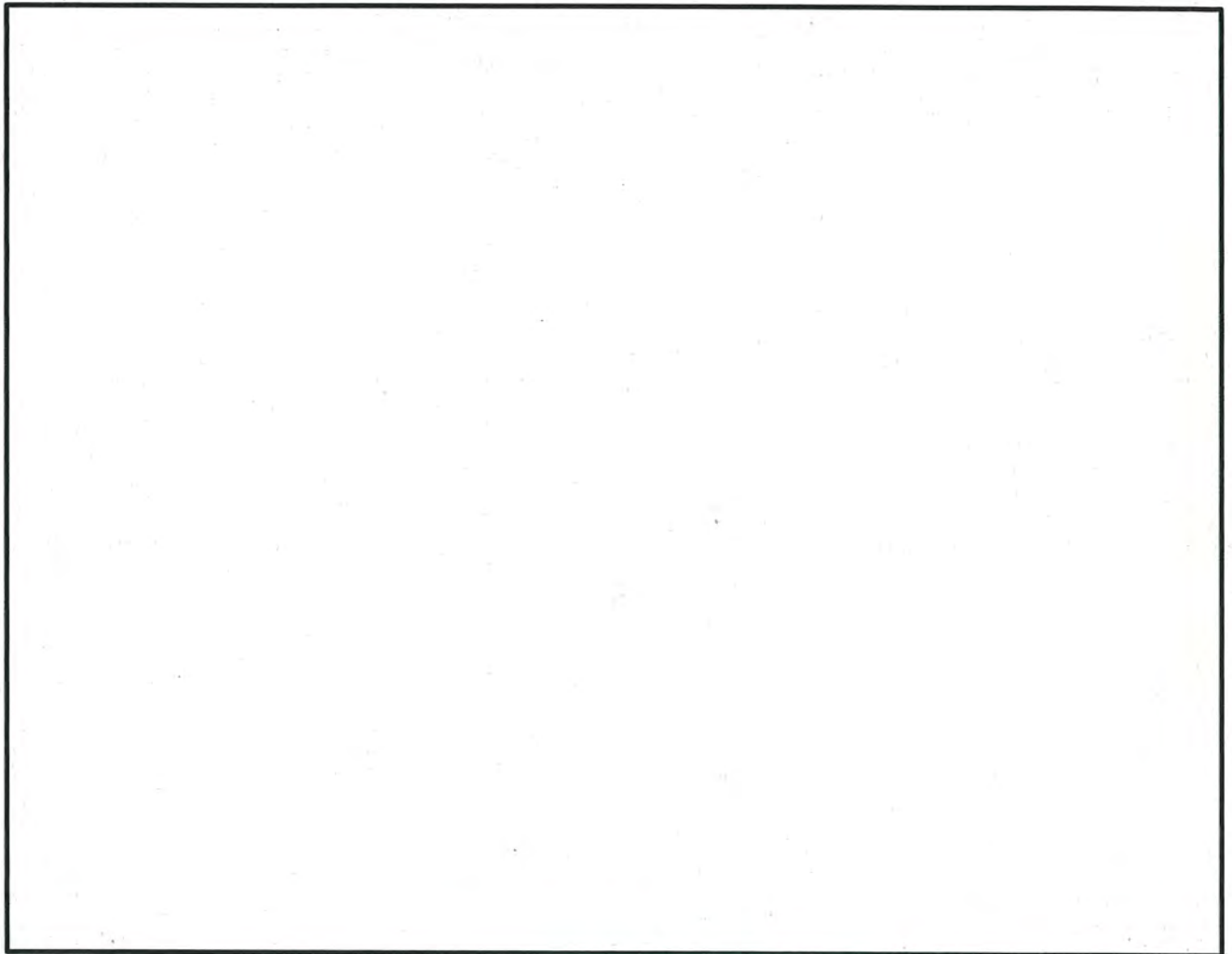
第2.5.3-10 図 貯蔵時の解析モデル（下部トラニオン部）（MSF-32P 型）



----- 実燃料相対燃焼度分布包絡線
—— 実燃料相対燃焼度分布（初期ウラン濃縮度 4.1wt%燃料）
—— 実燃料相対燃焼度分布（初期ウラン濃縮度 3.4wt%燃料）

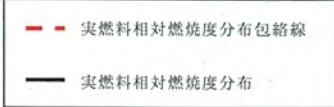
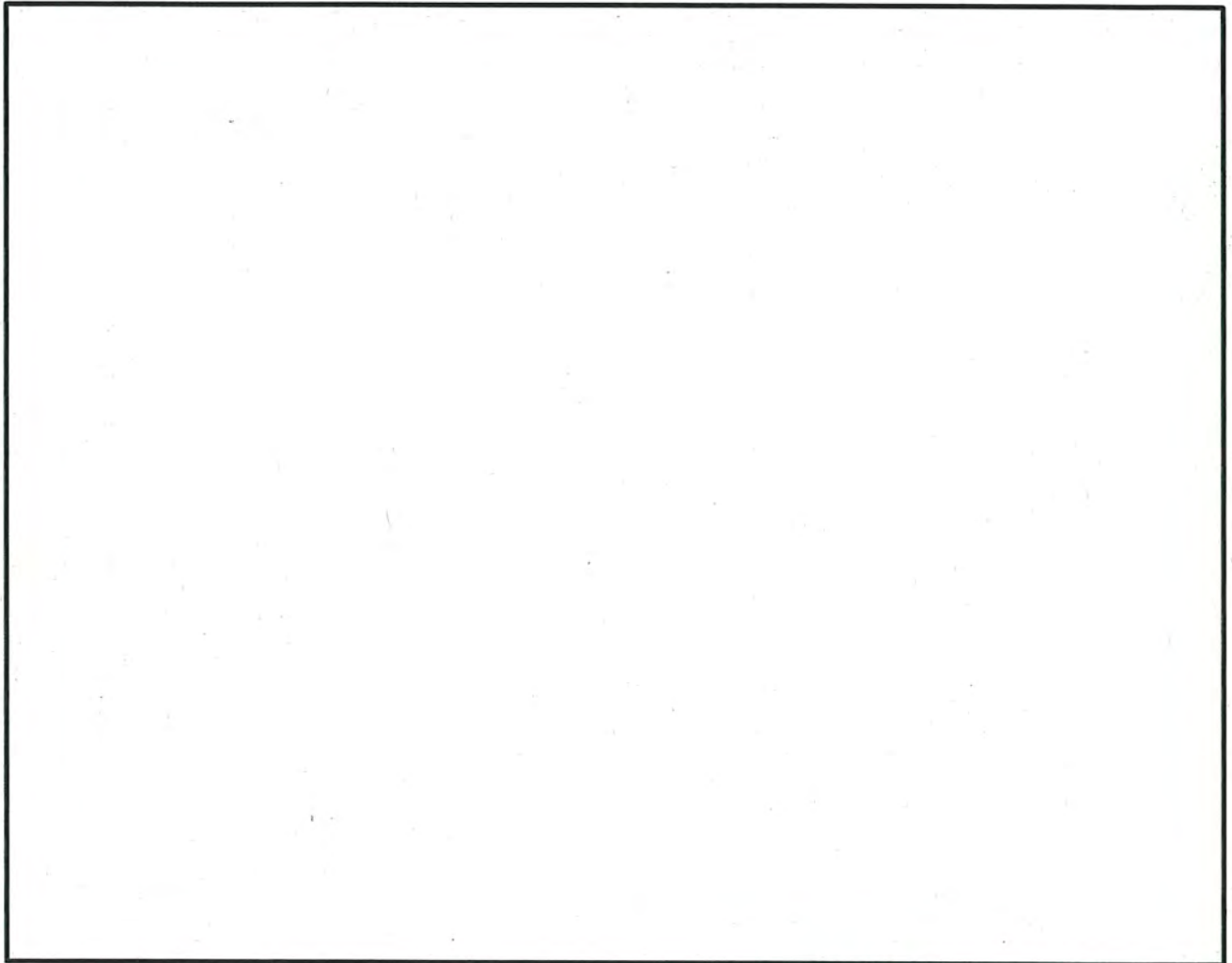
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.3-11 図 1号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定



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

第 2.5.3-12 図 2 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定



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

第 2.5.3-13 図 3 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定

最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.3-3 表に示すとおり評価基準を満たしている。

第 2.5.3-3 表 評価結果

項目	評価結果		評価基準	備考
	MSF-24P 型	MSF-32P 型		
表面線量当量率	1.83 mSv/h	1.57 mSv/h	2 mSv/h 以下	各部位の評価結果は、 第 2.5.3-4 表及び 第 2.5.3-5 表に示す。 出力位置は、 第 2.5.3-14 図及び 第 2.5.3-15 図に示す。
表面から 1 m の 位置における 線量当量率	86 μ Sv/h	84 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第 2.5.3-4 表 線量当量率評価結果 (MSF-24P 型)

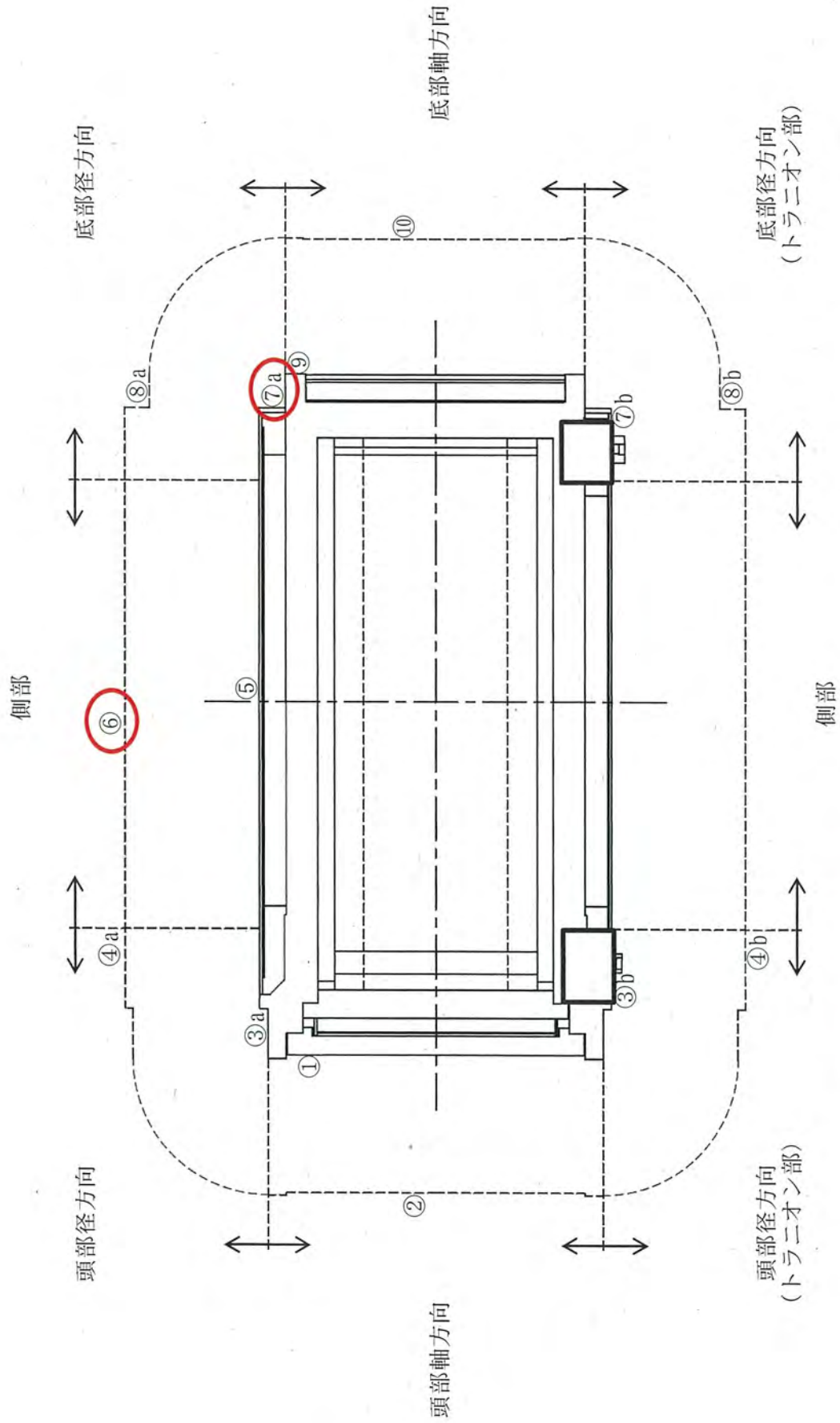
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部				
	軸方向	径方向	径方向 (トラニオン部)		径方向	径方向 (トラニオン部)	軸方向		
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	<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
表面	ガンマ線	中性子	333.7	741.4	45.1	1807.3	1108.3	222.6	
		合計	335.0	807.7	858.1	197.4	<u>1825.3</u>	1131.9	223.9
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	②	④a	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
		構造材放射化	0.3	22.5	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
		二次ガンマ線	3.5	20.1	20.9	12.5	7.4	6.1	28.8
表面から 1 m	ガンマ線	中性子	0.4	5.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6
		合計	64.8	23.2	32.7	18.3	56.6	66.3	23.1
合計		69.0	71.2	81.6	<u>86.0</u>	76.0	83.1	60.4	

第 2.5.3-5 表 線量当量率評価結果 (MSF-32P 型)

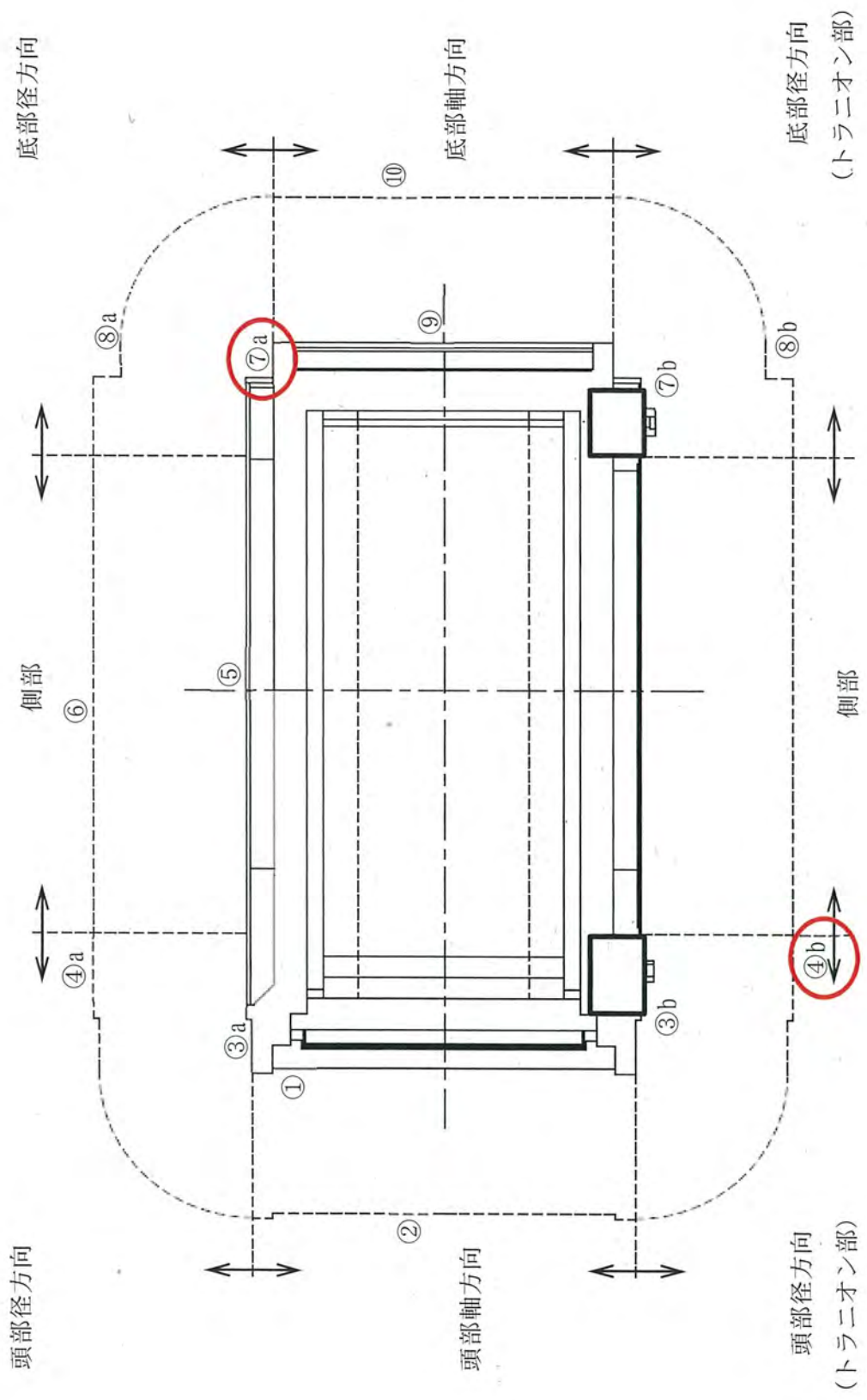
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部		底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トラネオン部)	径方向	径方向 (トラネオン部)	径方向	径方向 (トラネオン部)	軸方向	
	①	③a	③b	⑤	⑦a	⑦b	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	4.8	93.0	3.0	4.0	8.2	
		構造材放射化	0.4	85.2	11.5	6.2	11.7	112.7	
		二次ガンマ線	0.7	5.7	24.4	7.1	4.5	12.4	
表面	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	<u>1564.4</u>	945.7	178.0	
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	②	④a	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
		構造材放射化	0.2	22.3	21.7	41.4	8.8	7.3	2.9
		二次ガンマ線	3.7	28.1	22.7	6.7	6.5	4.8	34.5
表面から 1 m	中性子	0.4	5.0	5.0	9.7	2.8	2.6	3.4	
	合計	50.6	23.8	34.4	22.1	51.1	60.9	20.2	
合計		54.9	79.2	<u>83.8</u>	79.9	69.2	75.6	61.0	



(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いる。

第 2.5.3-14 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-24P 型)



(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いる。

第 2.5.3-15 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-32P 型)

[確認内容]

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

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

② ソースターム

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

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

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

〔確認内容〕

4) 応急復旧

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

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

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの遮蔽設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) ORIGEN2 コード

i 概要

ORIGEN2 コード¹⁾は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

ii 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

- a) 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b) 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- c) 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- d) 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ（崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α, n) 反応により発生する中性子源強度等）は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

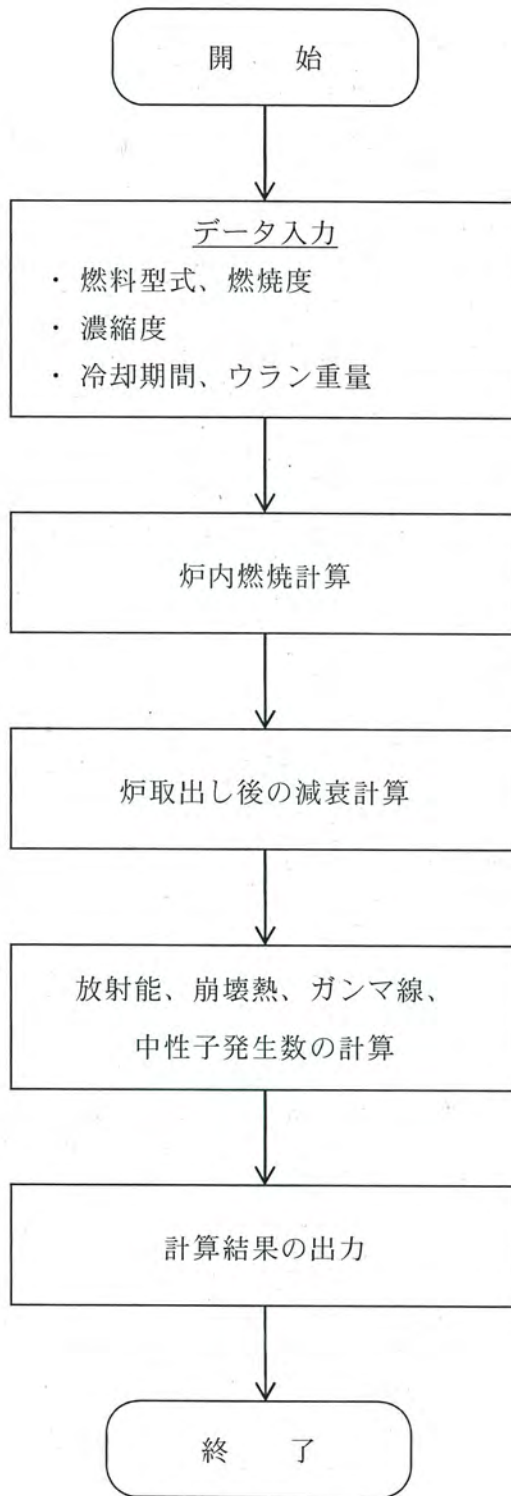
iii 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 2.5.3-16 図に示す。

iv 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を第 2.5.3-17 図に示す。



第 2. 5. 3-16 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

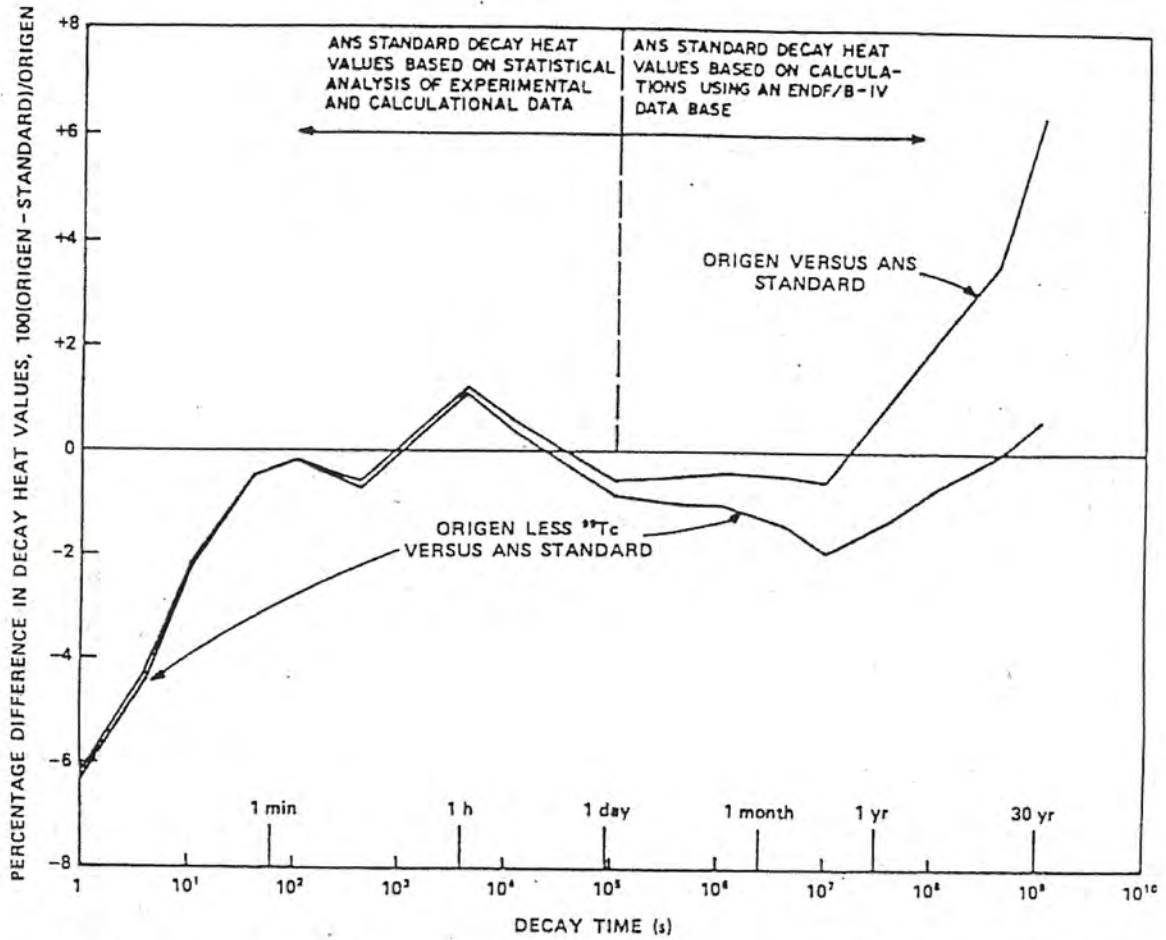


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

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

第 2. 5. 3-17 図 ORIGEN2 コードの検証例²⁾

(b) DOT3.5 コード

i. 概要

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

ii. 機能

DOT コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

a) ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を S_n 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。

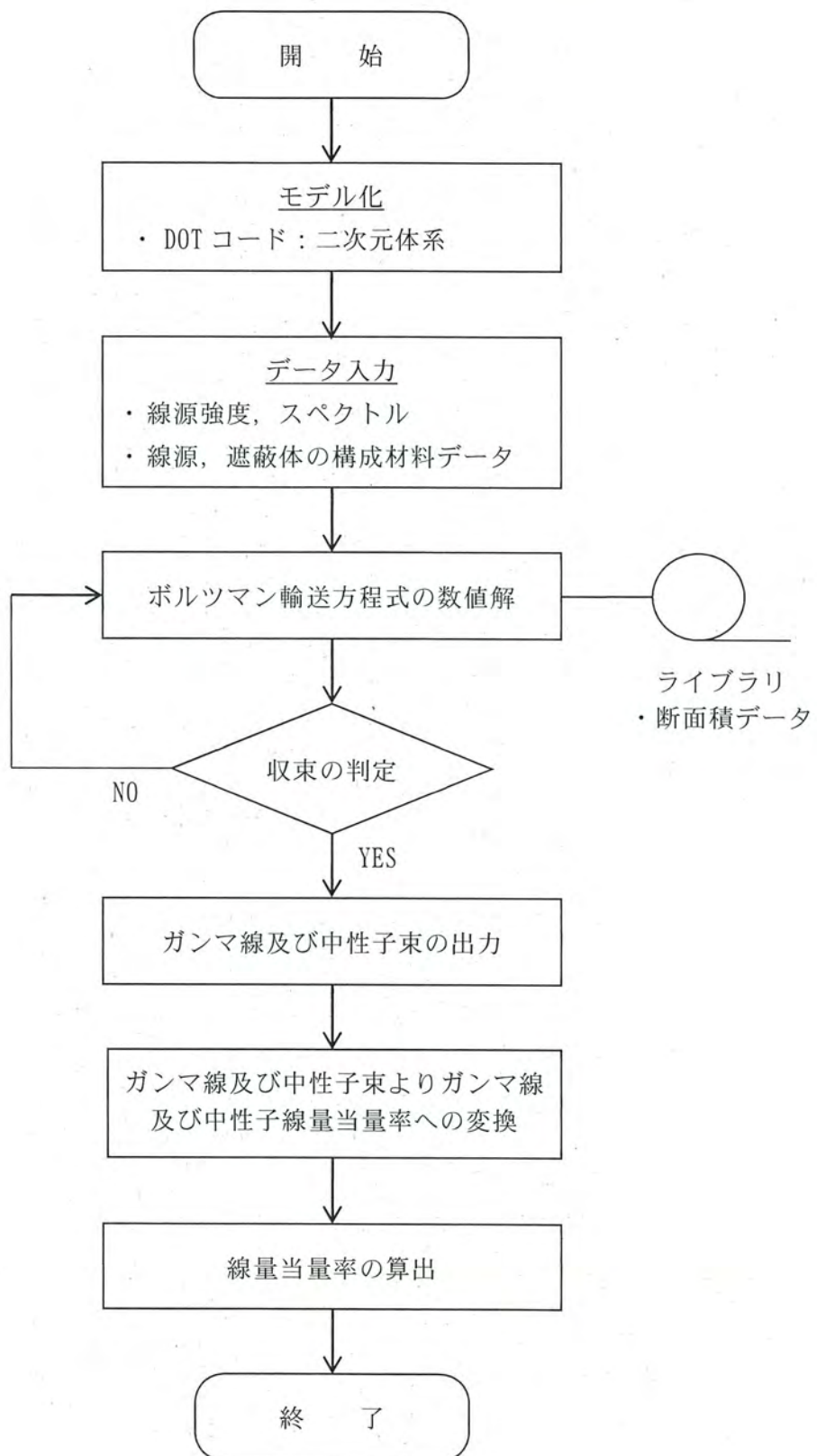
b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii. 解析フロー

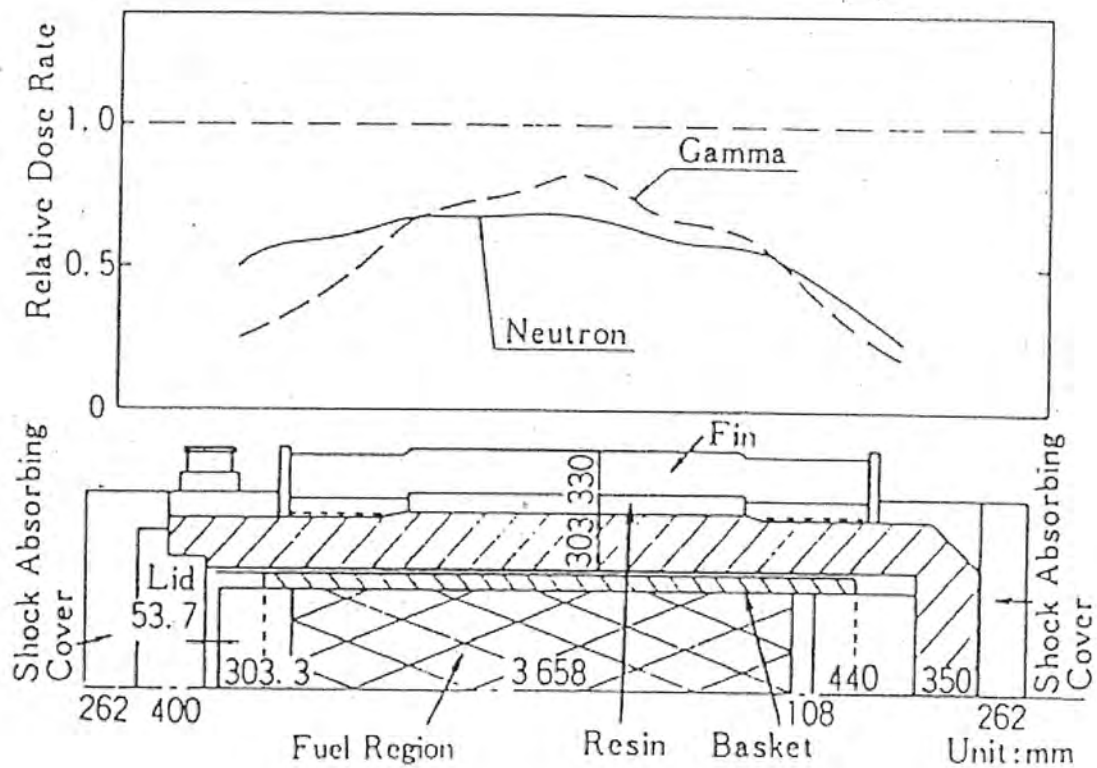
DOT コードの解析フローを第 2.5.3-18 図に示す。

iv. 使用実績及び検証

DOT コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値を第 2.45.3-19 図に示す。測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している⁴⁾。



第 2. 5. 3-18 図 DOT コードの解析フロー図



(注) 中性子および二次ガンマ線を DOT および ANISN (一次元輸送コードで計算法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD (点減衰核積分法によるもので、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、建屋の遮蔽解析の豊富な実績がある。) の各コードで解析した結果である。

第 2.5.3-19 図 DOT コードの検証例⁴⁾

v. 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

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

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

4. 参考文献

- 1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).
- 2) A. G. Croff, “ORIGEN2:A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol. 62, (1983).
- 3) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1977).
- 4) 松田文夫他, 「TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性 (I) 線量率」, (一社) 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」, C17, (1981).
- 5) 大西世紀 ほか, 「 ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第 7 卷 第 3 号 研究報告, (2007).

伊方発電所 3号炉

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条3項

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

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

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

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

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

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

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2.安全機能の確保 2.3 除熱機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

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

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

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

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

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

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

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

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの除熱機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

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

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

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

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

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

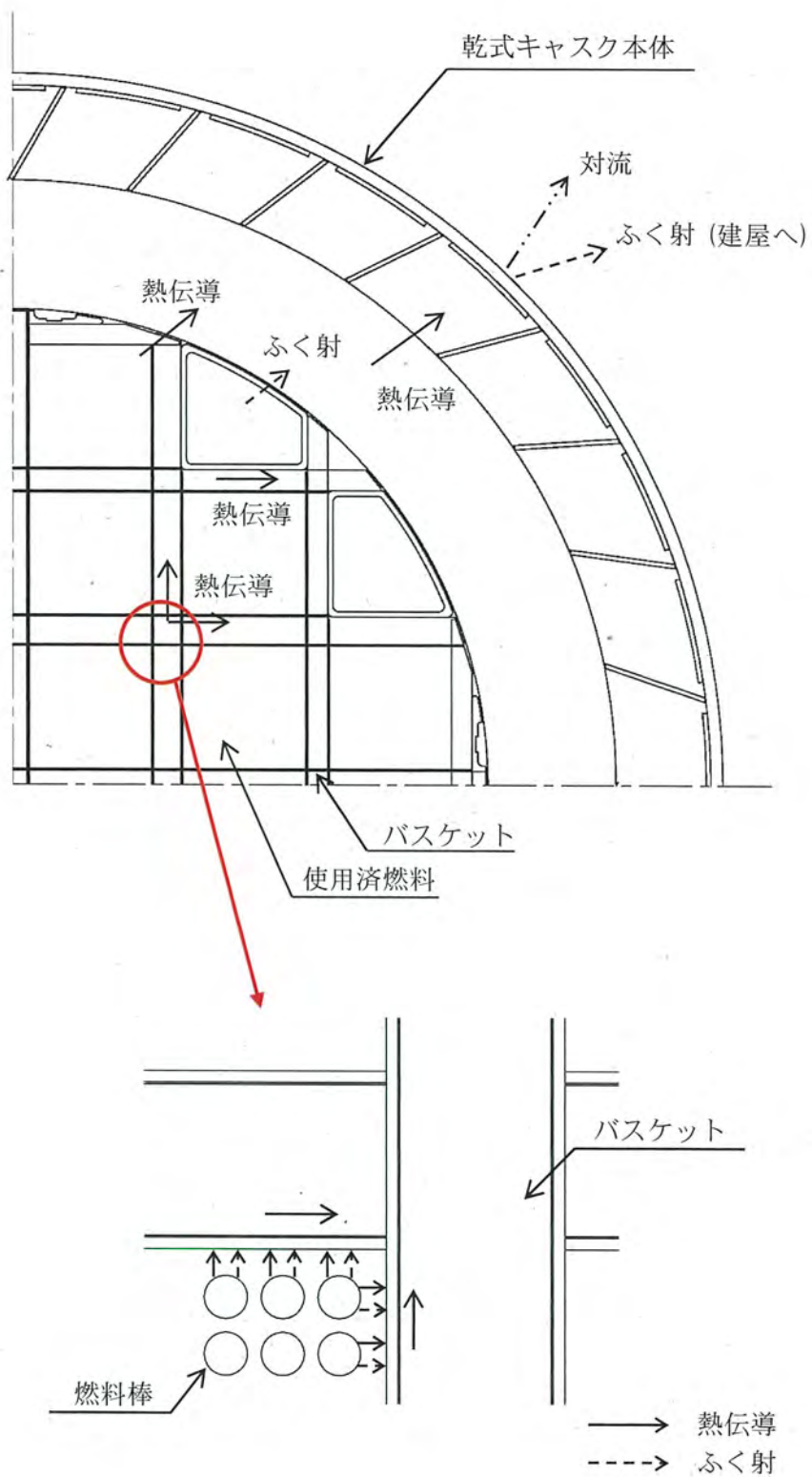
乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

乾式貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

(第 2.5.4-1 図参照)

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

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



第 2. 5. 4-1 図 乾式キャスクの伝熱形態 (MSF-24P 型の例)

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

解析条件は第 2.5.4-1 表及び第 2.5.4-2 表のとおり。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

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

b. 乾式キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

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

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

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

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

－使用済燃料の最高温度を保守的に高めに算出するために、MSF-24P 型では、第 2.5.4-13 図のとおり中央部 12 体に燃焼度が 48Gwd/t の使用済燃料を配置し、外周部 12 体は、乾式キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 44Gwd/t に相当するよう中央部の崩壊熱量を差し引いて外周部の 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。MSF-32P 型では、第 2.5.4-15 図のとおり中央 16 体の燃料集合体のうち中心 4 体には 48Gwd/t の使用済燃料を配置し、中心 4 体を除く 12 体には、中央部 16 体の崩壊熱が平均燃焼度 45Gwd/t に相当するよう中心 4 体の崩壊熱量を差し引いて残りの 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。さらに、外周 16 体には 33Gwd/t の使用済燃料を配置する。

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

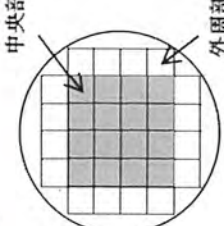
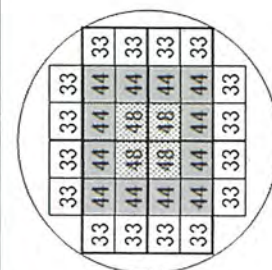
・ モデル化の保守性

－乾式キャスク本体内のバスケット及びバスケット内の使用済燃料は、温度を高めに評価するよう、空間の中央に配置する。

－燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。

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

第2.5.4-1表 1,2号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

収納物仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック		解析条件	
	中央部	外周部	中央部	外周部	中心	外周
燃料タイプ	14×14型 (A/B型)		14×14型 (A/B型)		14×14型 (A型)	
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	≤3.5	4.1	3.4		
ウラン重量 (kg)						
燃料集合体1体の仕様	≤48	≤39	≤48	≤39	48	44
最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)						33
キャスク1基あたり	≥15	≥25			15	25
平均燃焼度 (GWd/t)	≤45	≤33		-	45	33
配置※1			-			

※：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す

第 2.5.4-2 表 3号炉用燃料 乾式キャスク収納条件の概要

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

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

※2: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

乾式貯蔵建屋の流路を一次元でモデル化し、第 2.5.4-3 表のとおり、給気温度、乾式キャスクの発熱量等を評価条件として、乾式貯蔵建屋内の空気と外気との密度差により生じる駆動力 H_{th} と、乾式貯蔵建屋内を空気が流れることによって生じる圧力損失 ΔP がバランスする点を算出し、乾式キャスクの周囲温度を評価する。なお、乾式キャスクの周囲温度は、乾式貯蔵建屋内で最も温度が高くなる排気温度で評価する。(第 2.5.4-16 図及び第 2.5.4-17 図参照)

第 2.5.4-3 表 除熱評価の代表的な評価条件

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

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

a) 駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) の計算

駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

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

ここで、

H_{th} : 熱ドラフト (Pa)

ρ_{in} : 外気の密度 (1.112) (kg/m³)

ρ_{out} : 排気の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (9.81) (m/s²)

h : ドラフト高さ (18.1) (m)

b) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

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

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

ここで、

ΔP : 圧力損失 (Pa)

- ζ_i : 圧力損失係数 (-)
- W_i : 通過風量 (質量流量) (kg/s)
- ρ_i : 通風路の空気密度 (kg/m³)
- A_i : 通風路の断面積 (m²)
- q : キャスク発熱量 (16) (kW/基)
- n : 評価領域のキャスク基数 (基)
- C_p : 空気の比熱 (1.007) (kJ/kg・°C)
- T_{out} : 排気温度 (°C)
- T_{in} : 給気温度 (33) (°C)

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

第 2.5.4-4 表 貯蔵建屋除熱評価の結果

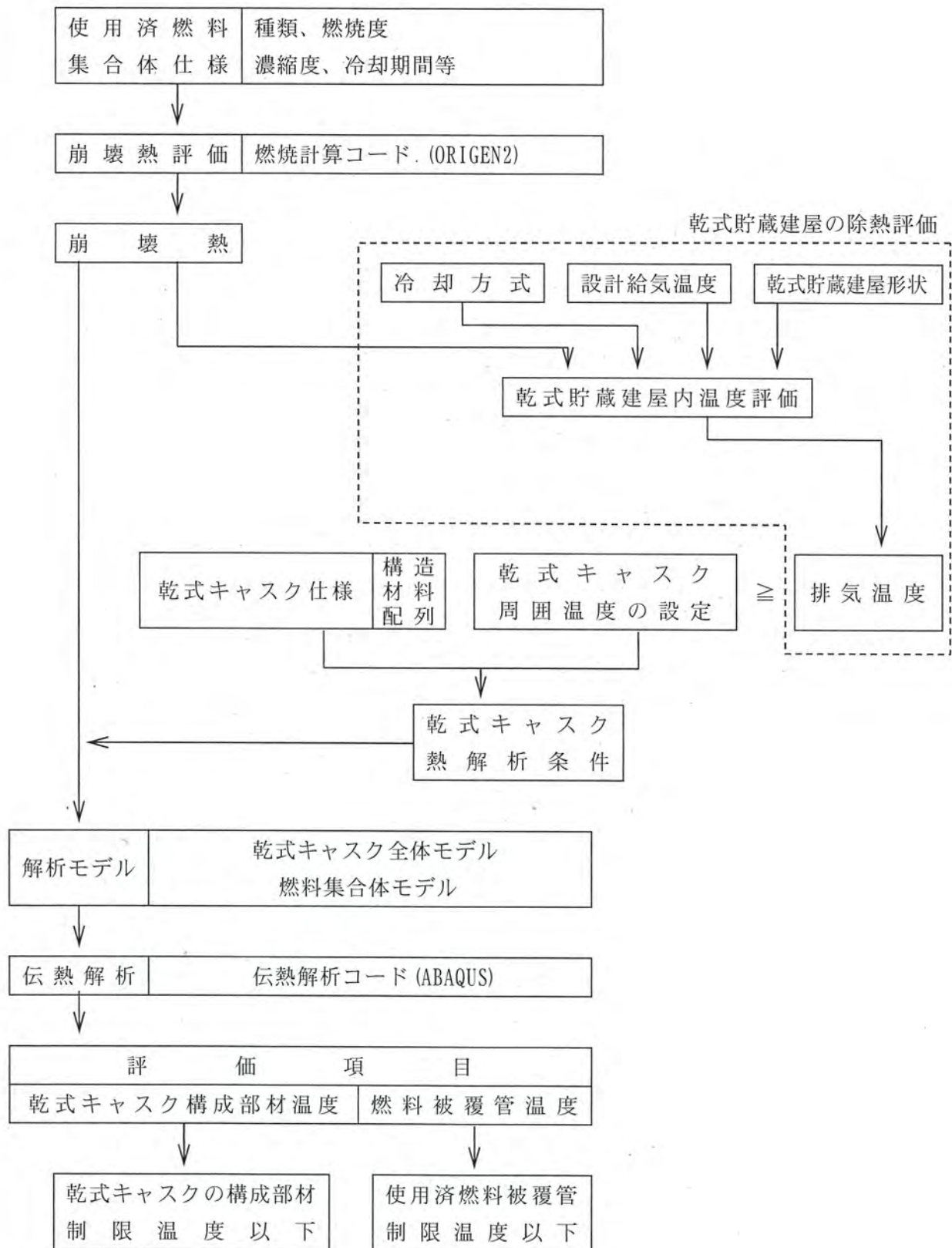
排気温度 T_{out} (°C)	熱ドラフト H_{th} (Pa)	圧力損失 ΔP (Pa)
約 45	約 7.1	約 7.1

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

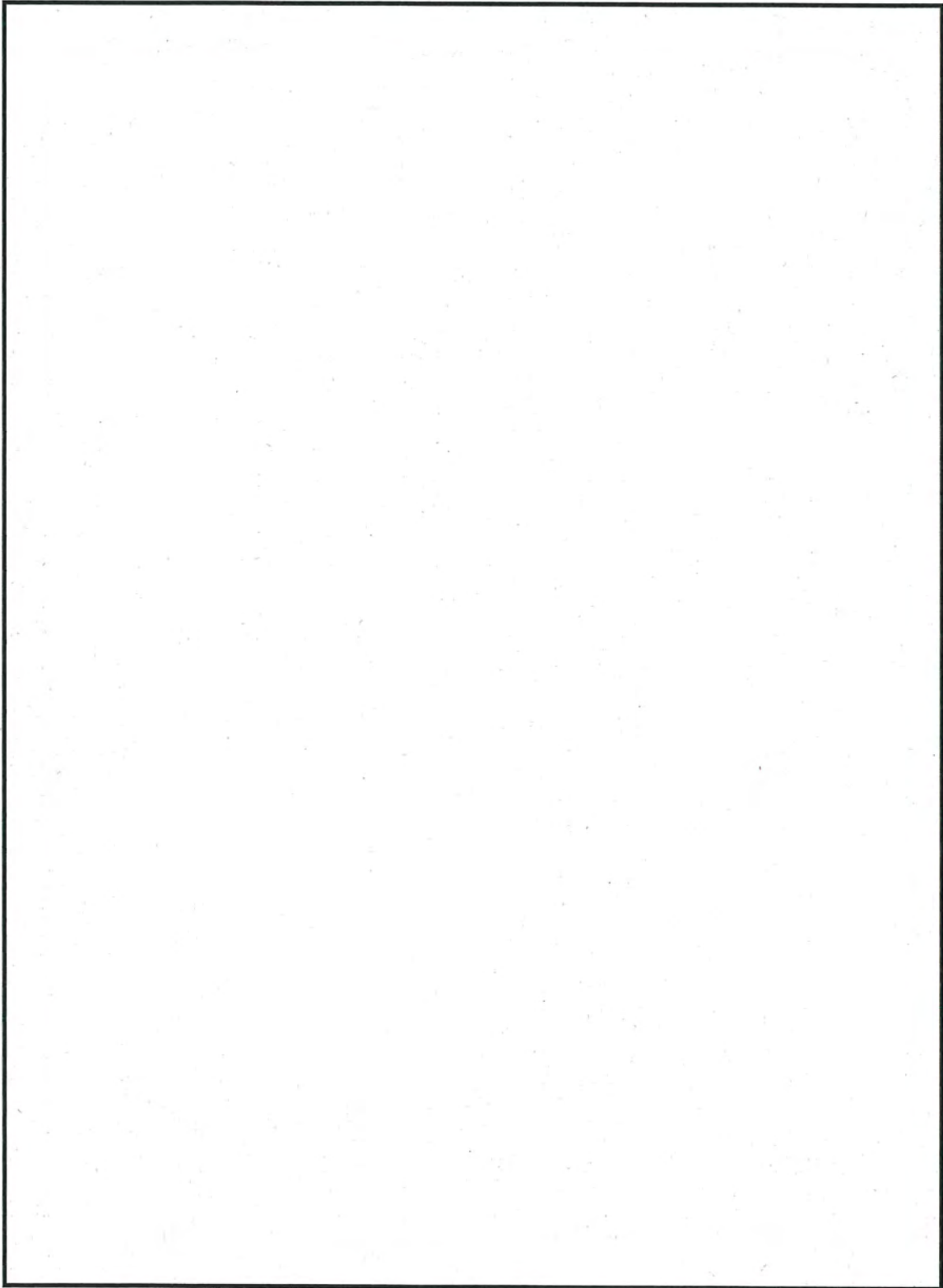
- ・ 設定条件の保守性

- 乾式キャスクの発熱量は、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の発熱量を包絡する発熱量を使用している。
- 乾式キャスクの発熱量は、すべて空気によって除熱されると考え、建屋コンクリート等を通して大気や地中に逃げる熱は考慮しない。また、通風路各部の圧力損失を計算する際に、圧力損失係数が高くなる様に設定する。

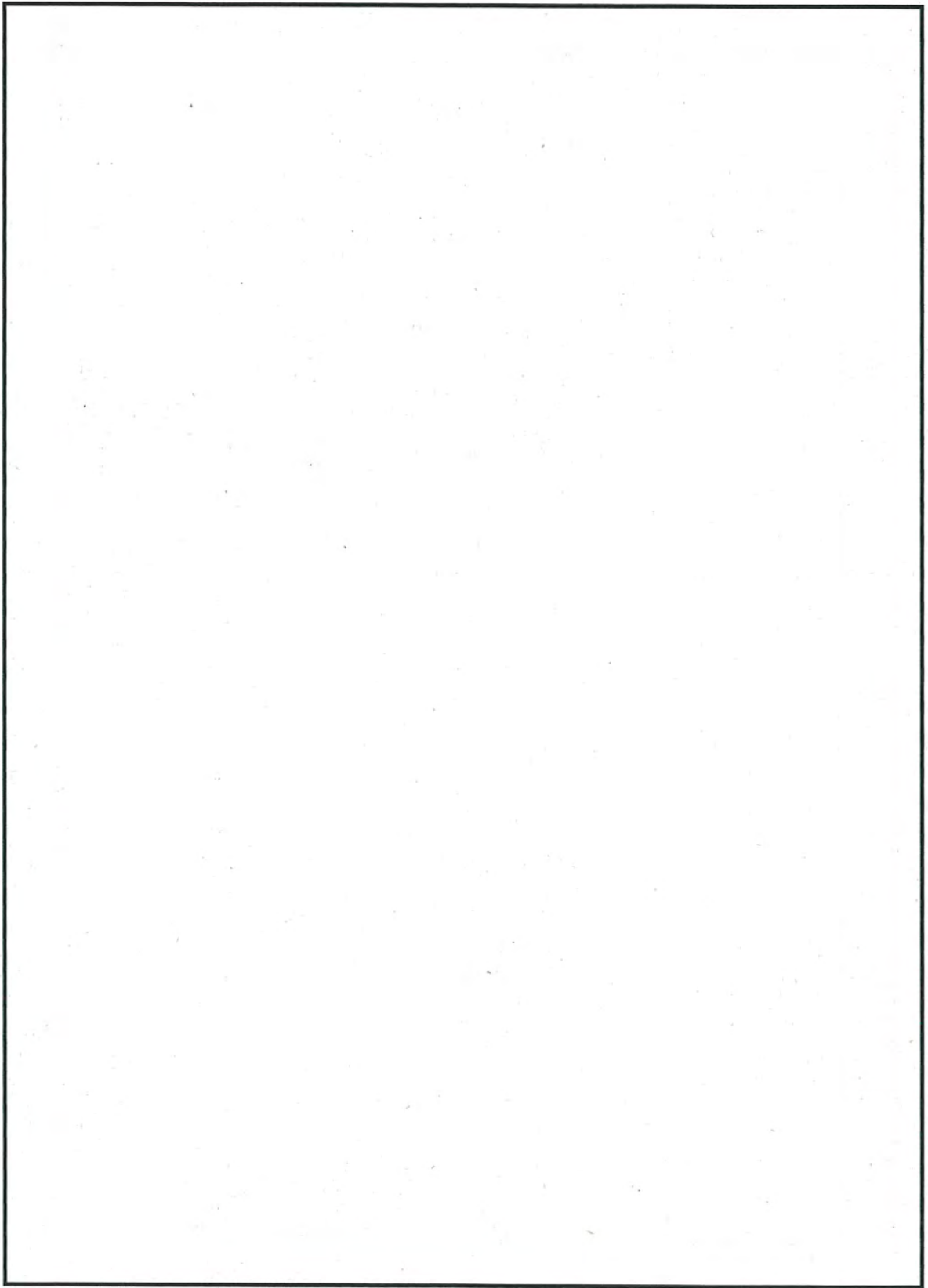
なお、太陽輻射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は 1m 以上のコンクリートであり、太陽輻射熱により貯蔵建屋の壁内面 (貯蔵建屋内表面) の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが保守的な評価となる。



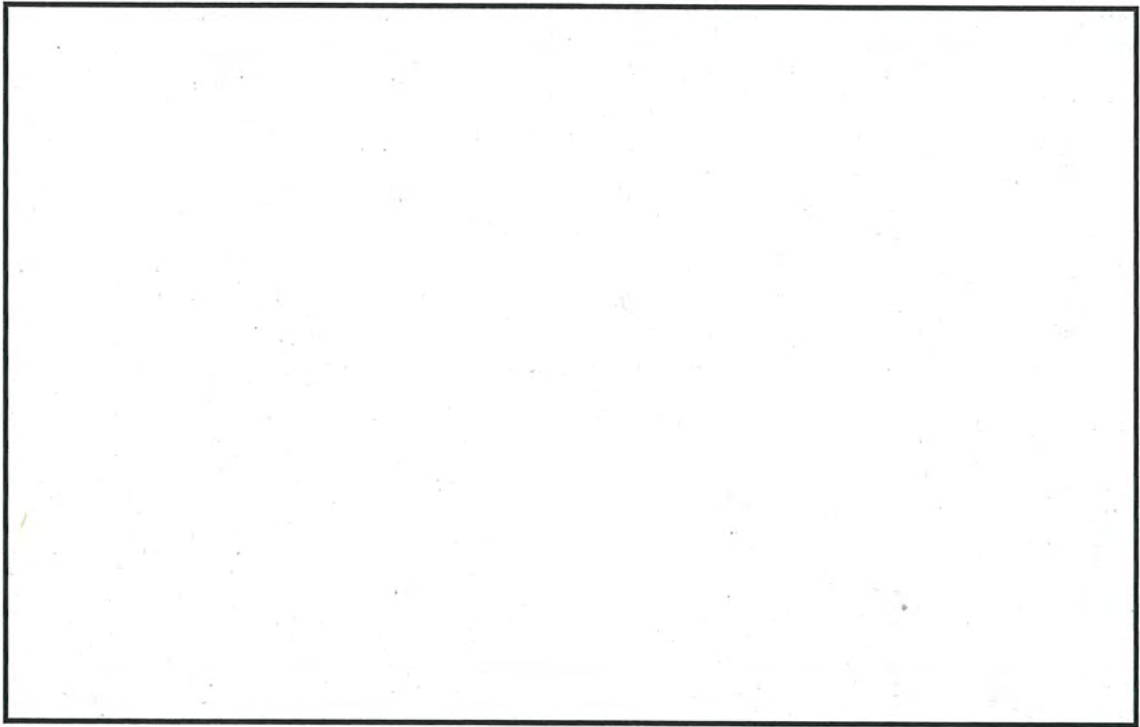
第 2.5.4-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー



第 2.5.4-3 図 MSF-24P 型全体モデル形状図（縦断面図）



第 2.5.4-4 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (横断面図)

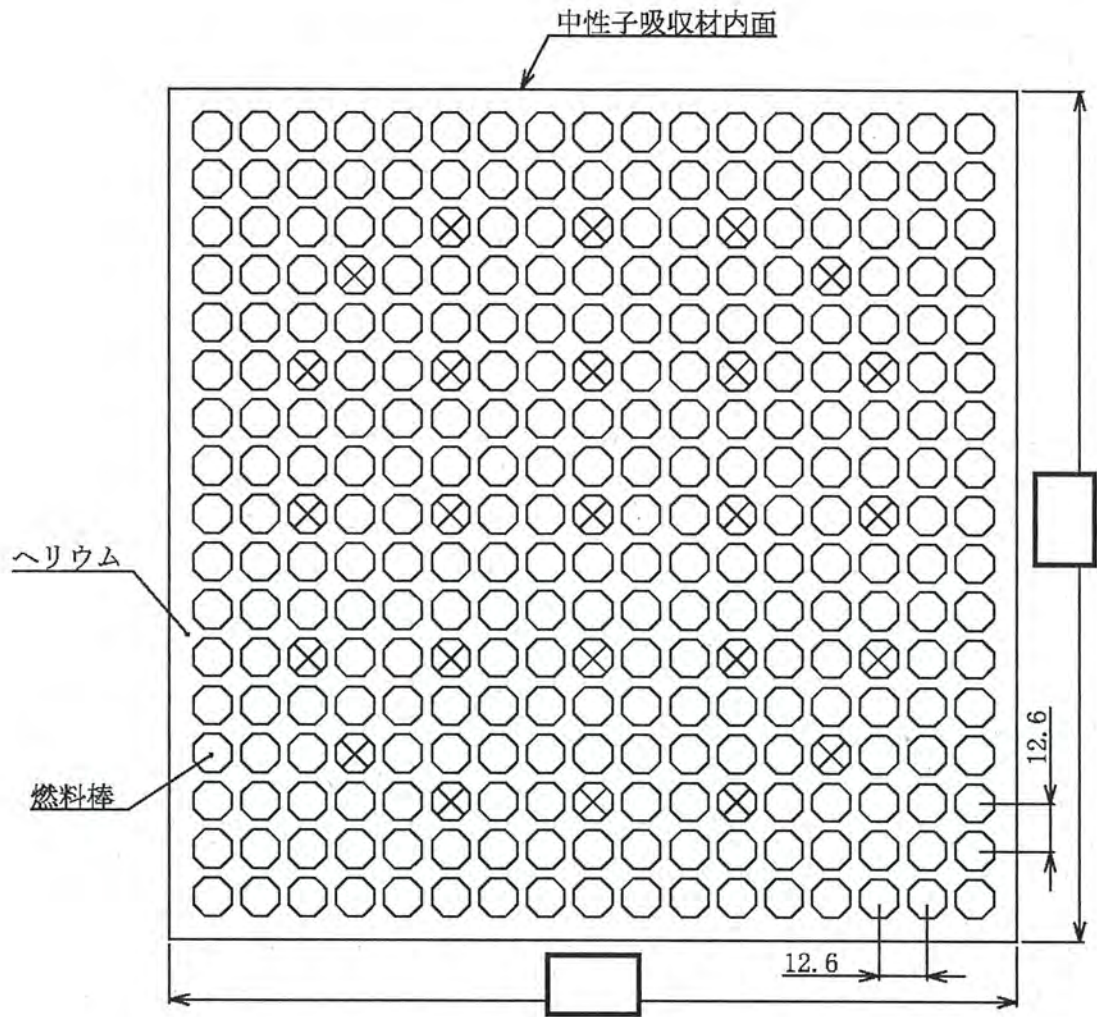


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

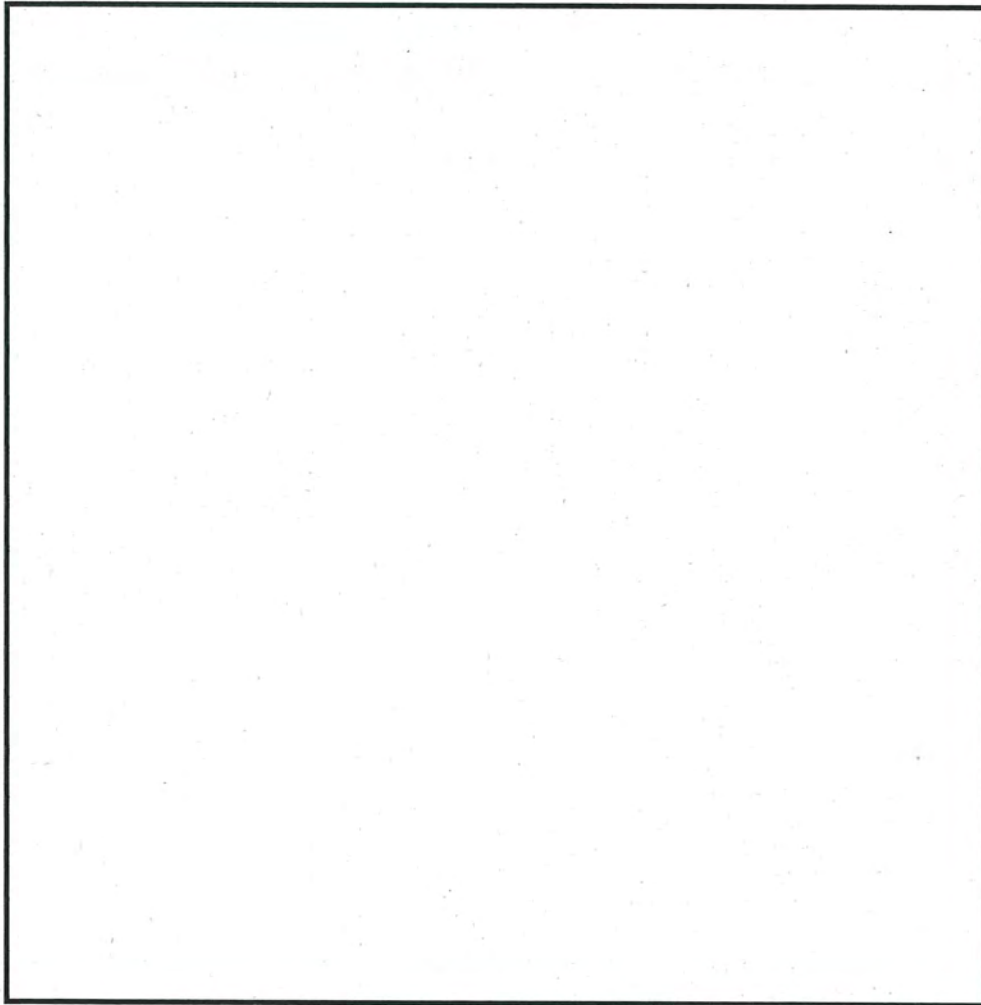
第 2.5.4-5 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図



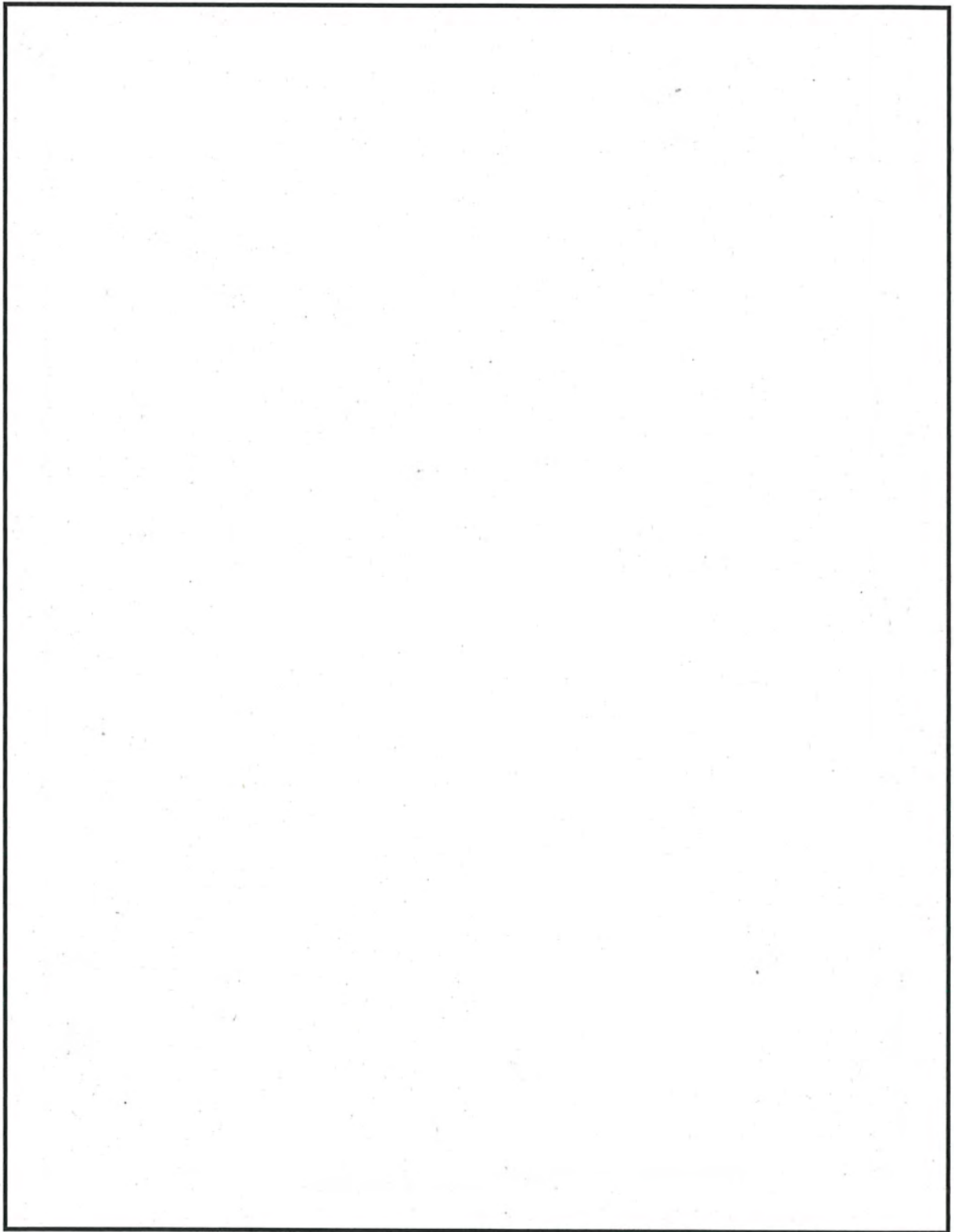
(単位：mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

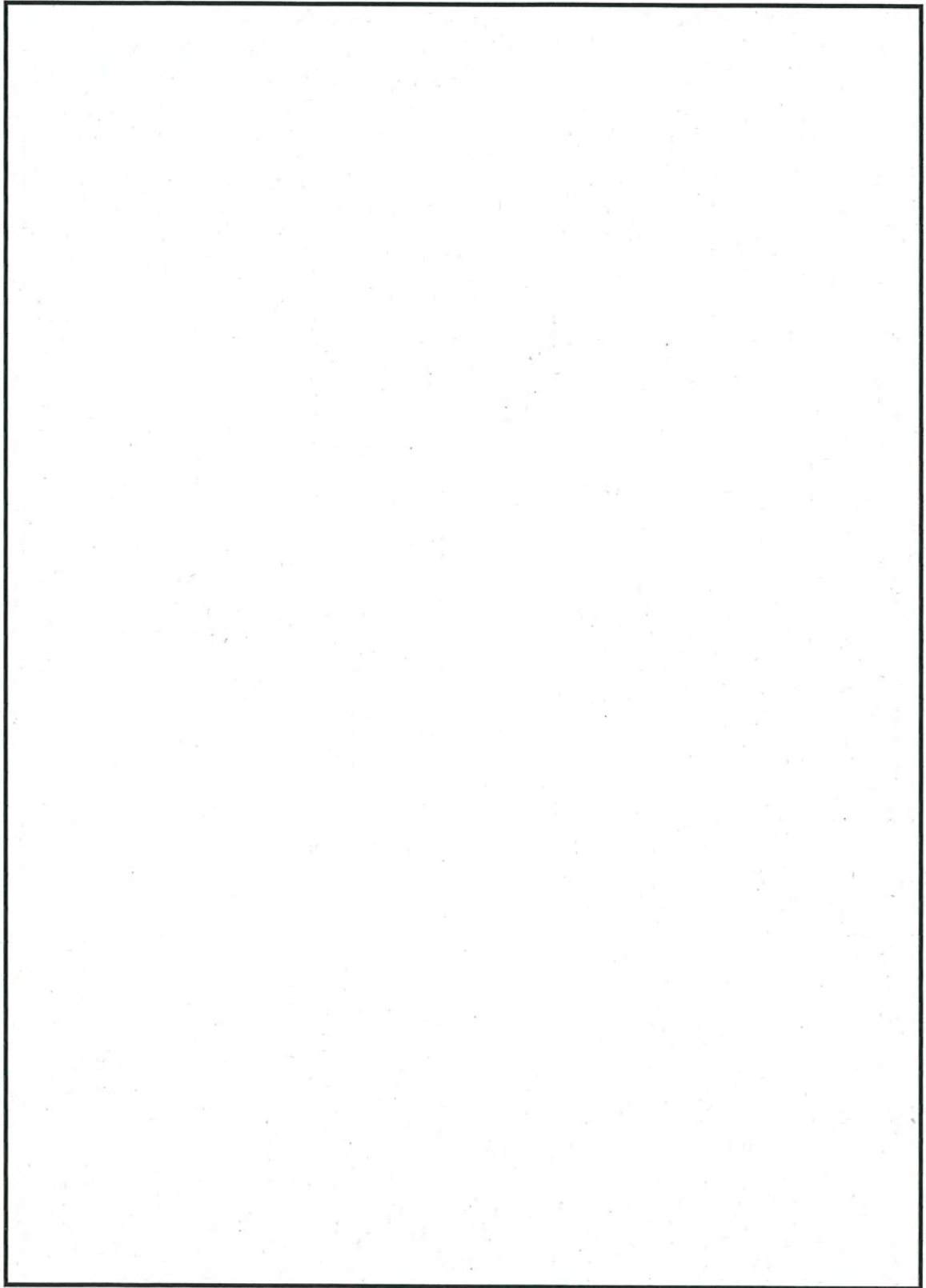
第 2.5.4-6 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図



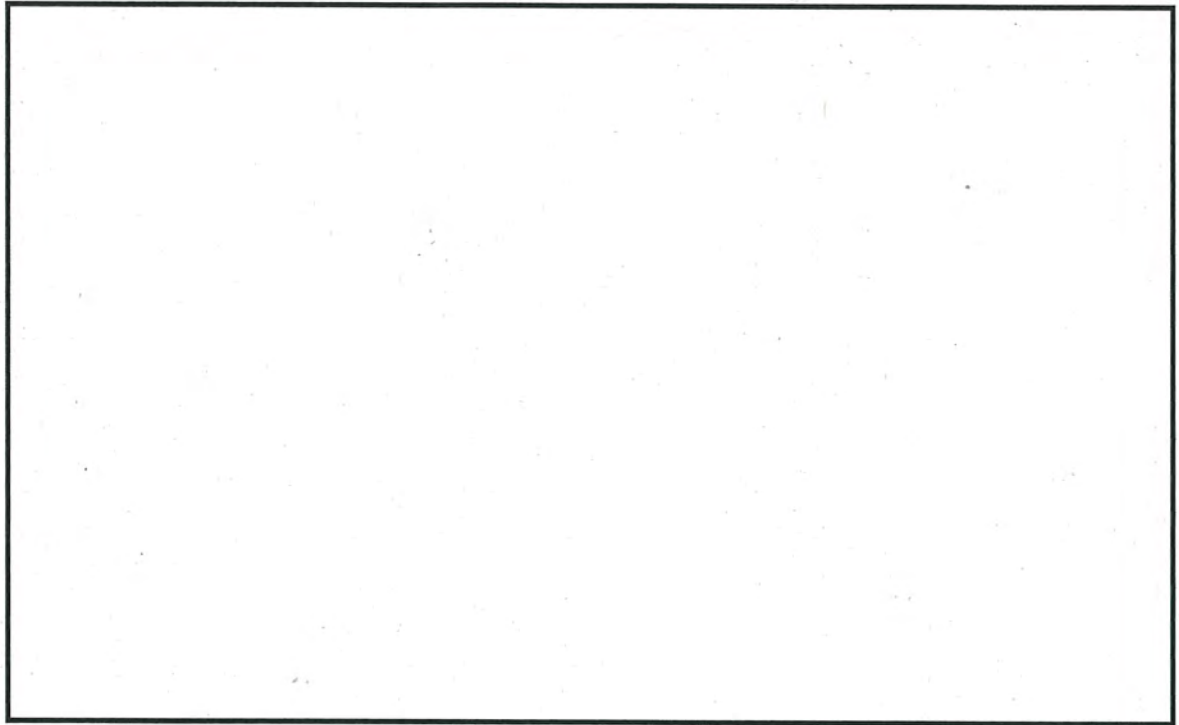
第 2. 5. 4-7 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図



第 2. 5. 4-8 図 MSF-32P 型全体モデル形状図 (縦断面図)



第 2. 5. 4-9 図 MSF-32P 型全体モデル形状図 (横断面図)

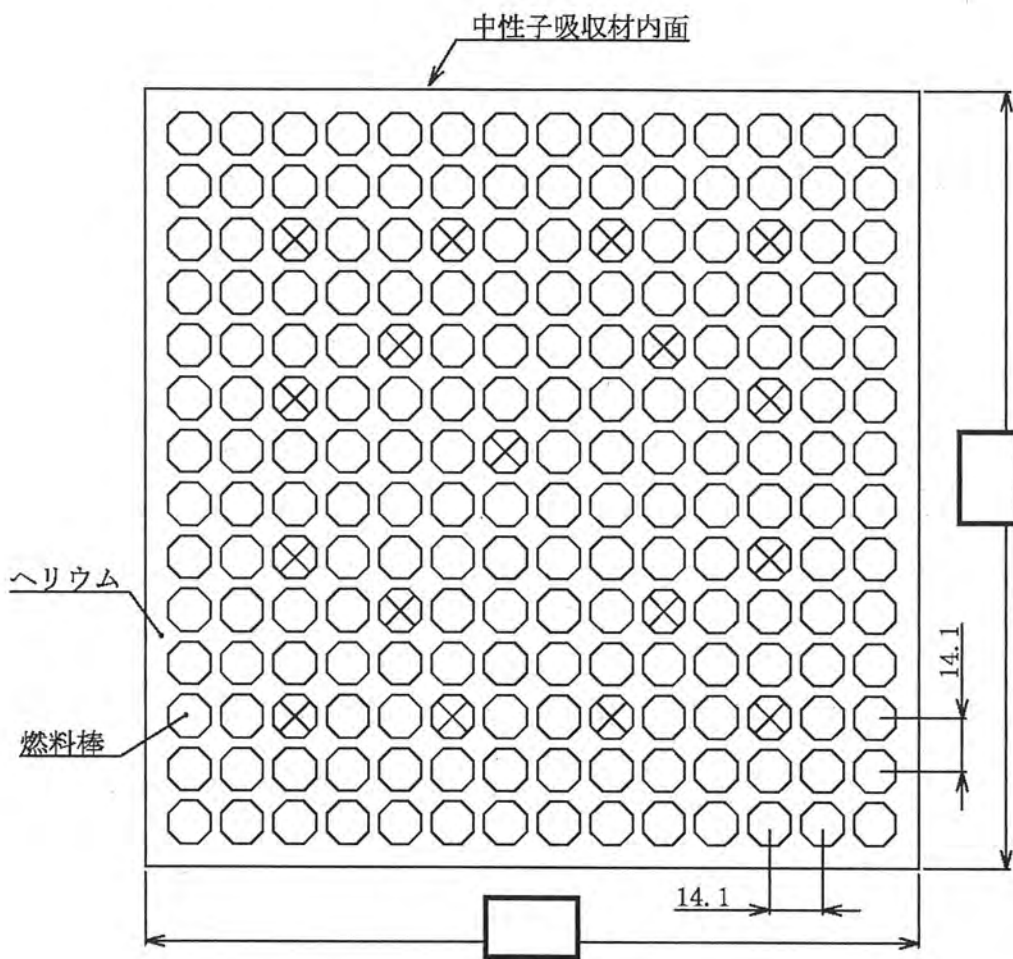


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

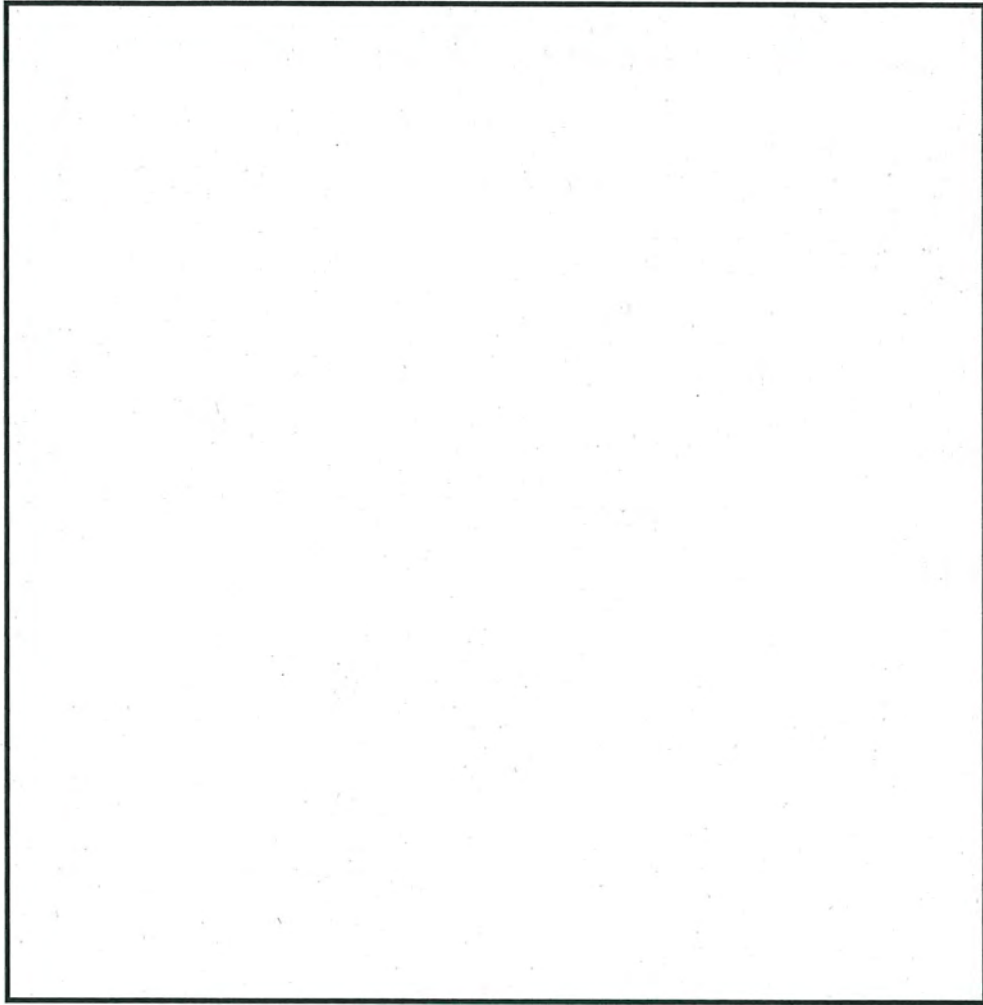
第 2.5.4-10 図 MSF-32P 型全体モデル要素分割図



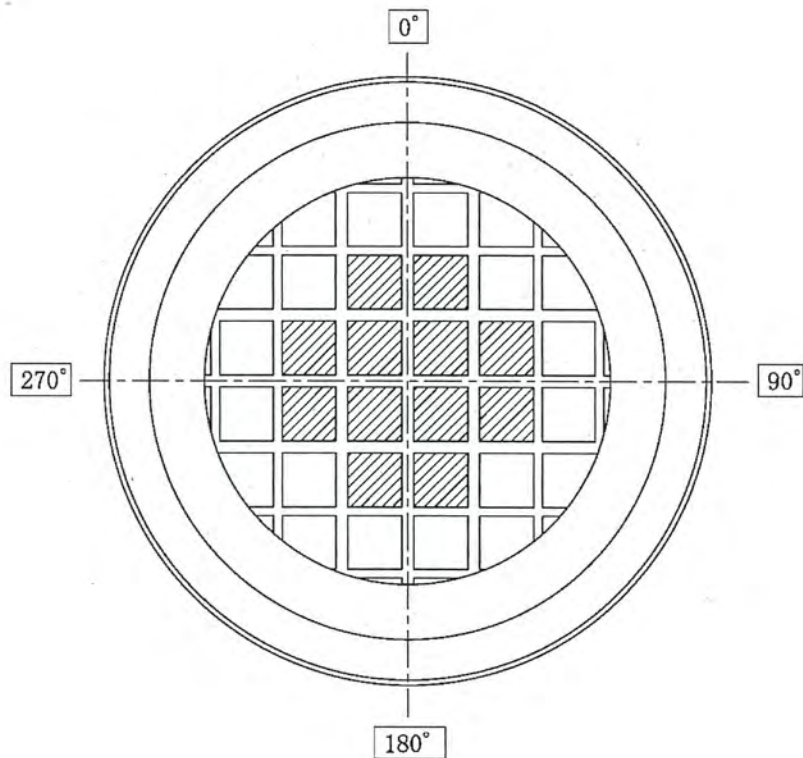
(単位：mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

第 2.5.4-11 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル形状図



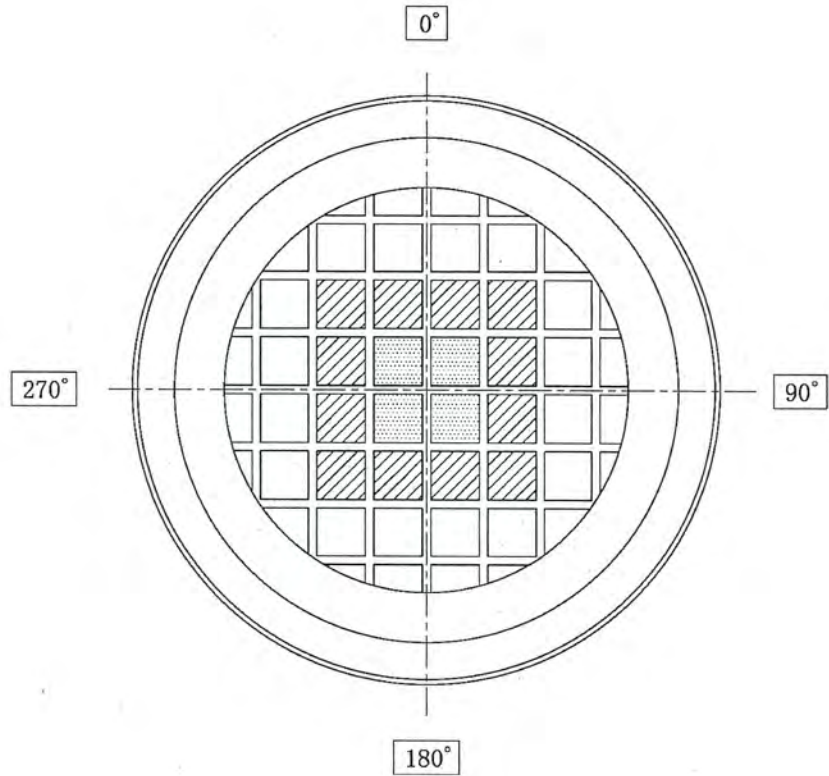
第 2.5.4-12 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル要素分割図






- : 最高燃焼度の崩壊熱量 (中央部 12 体)

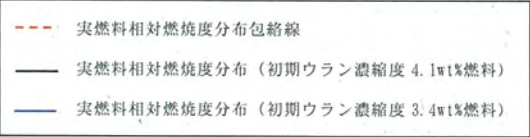
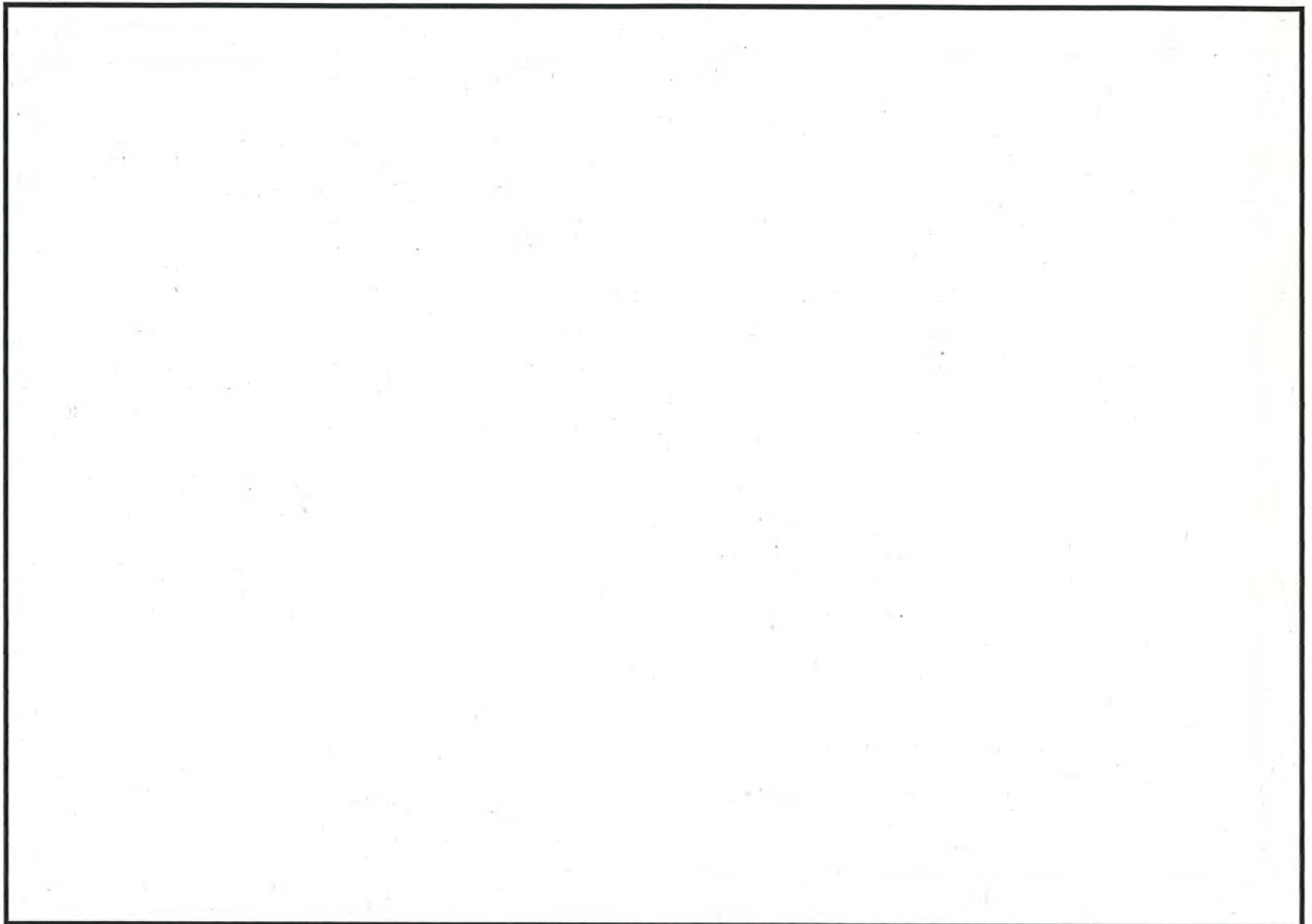
- : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

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



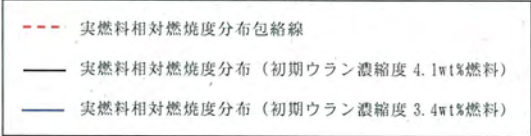
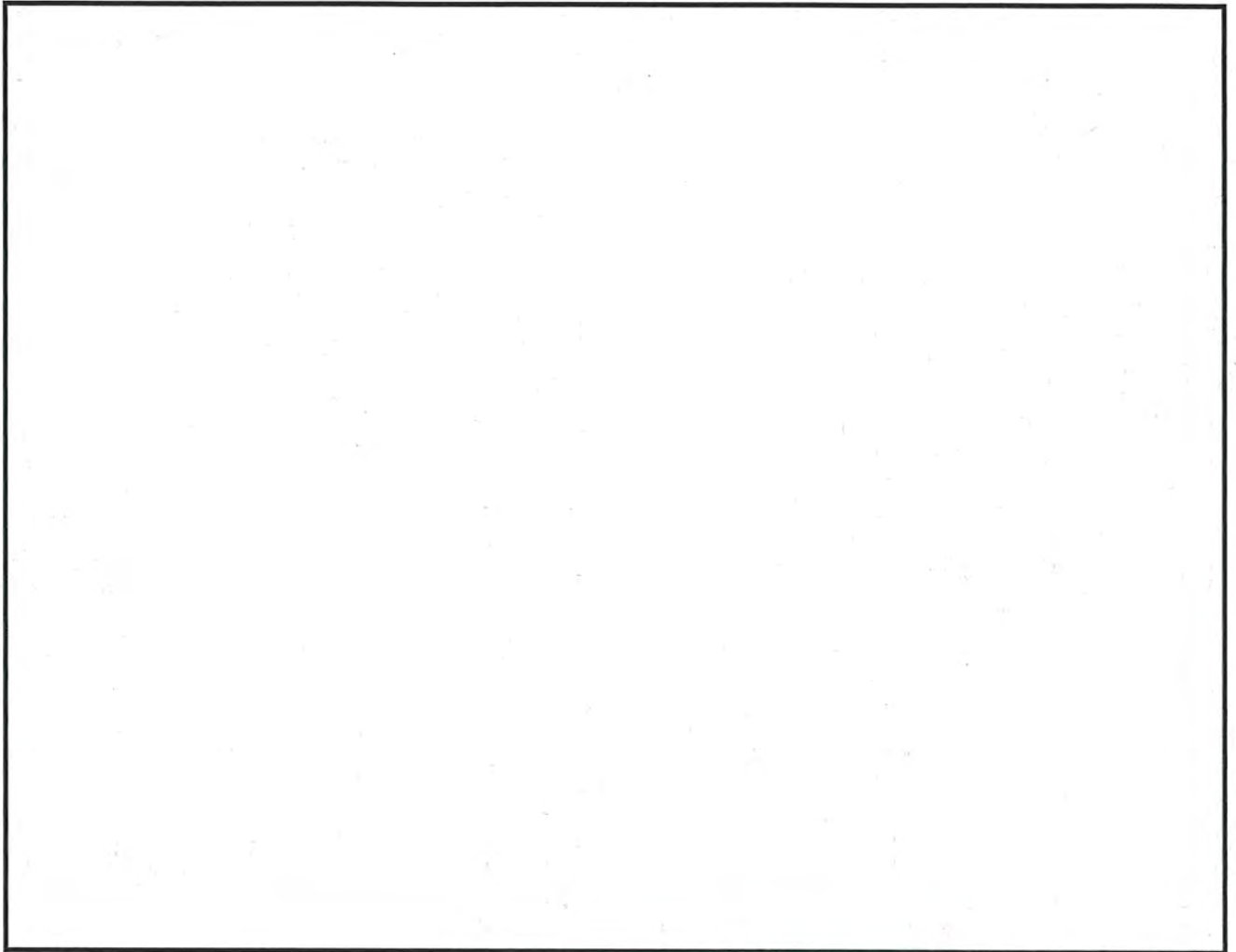
-  : 14×14 型 48GWd/t 燃料における最高燃焼度の崩壊熱量
(中央部 16 体のうち中心 4 体)
-  : 中央部 16 体の崩壊熱量が 14×14 型 48GWd/t 燃料における
平均燃焼度の崩壊熱量 16 体分となるように調整した崩壊熱量
(中央部 16 体のうち中心 4 体を除く 12 体)
-  : 14×14 型 39GWd/t 燃料における平均燃焼度の崩壊熱量
(外周部 16 体)

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



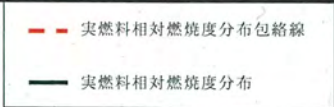
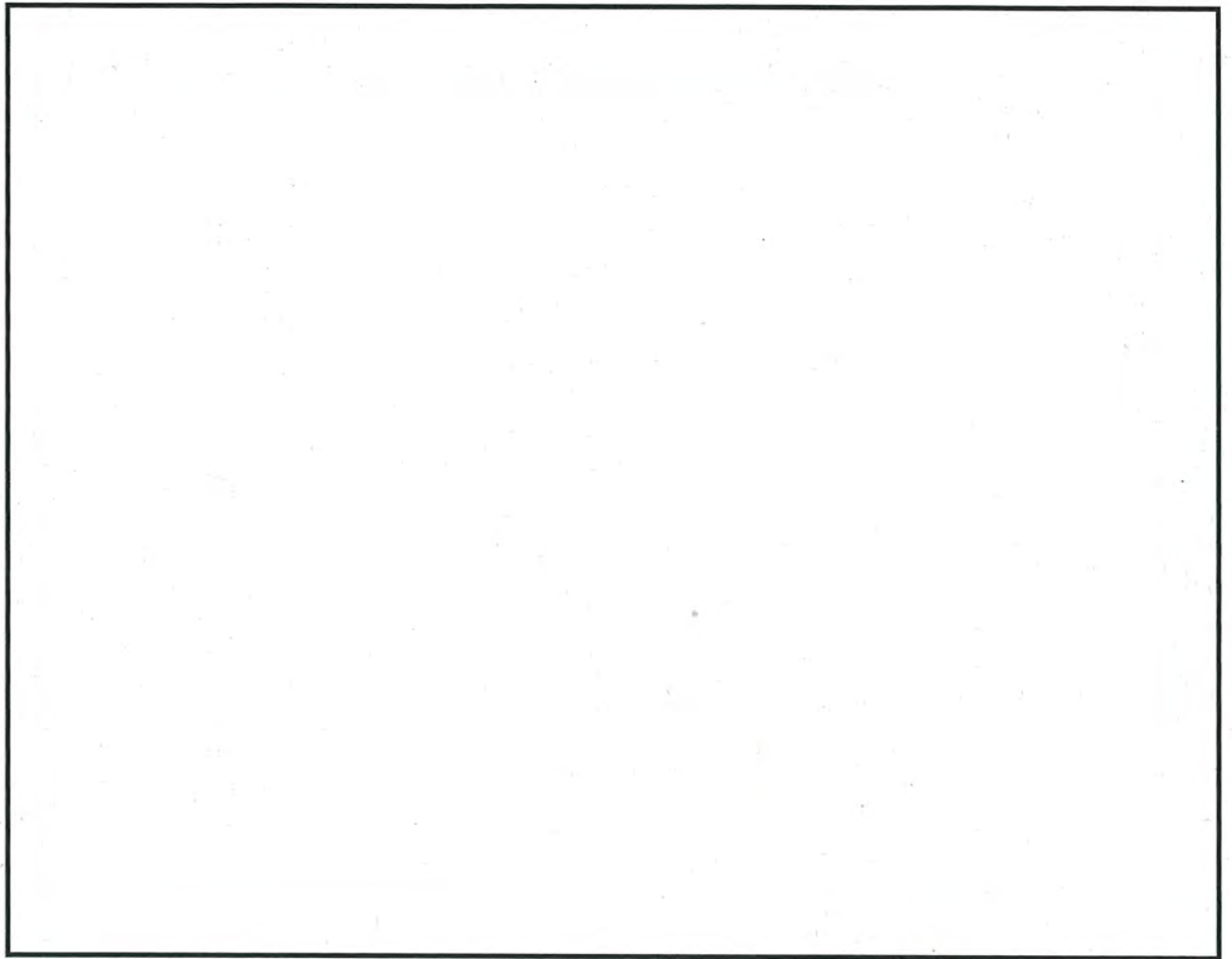
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 1号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定（1/3）



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

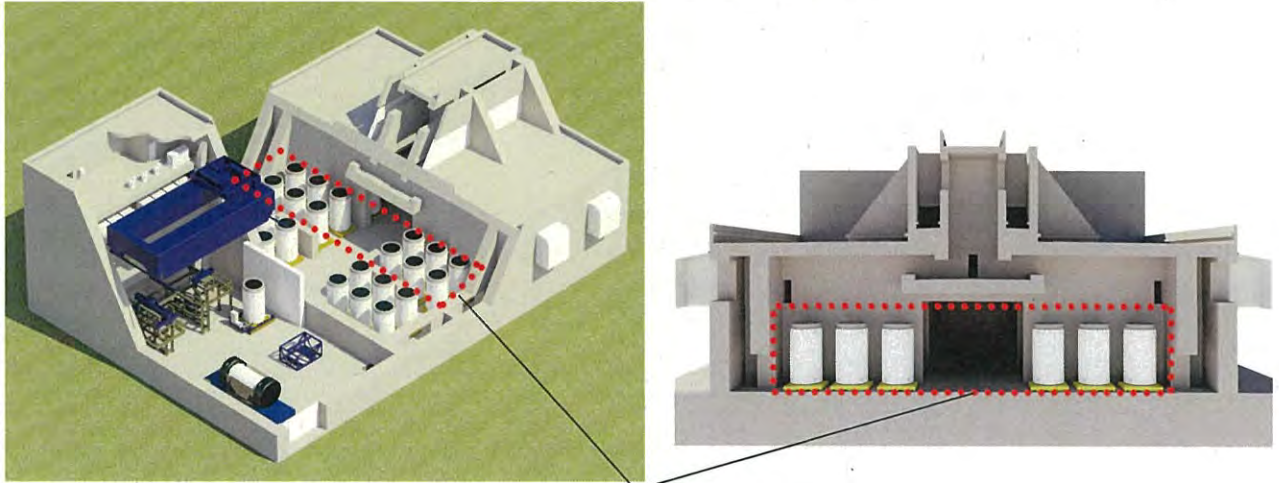
第 2.5.4.-15 図 2号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (2/3)



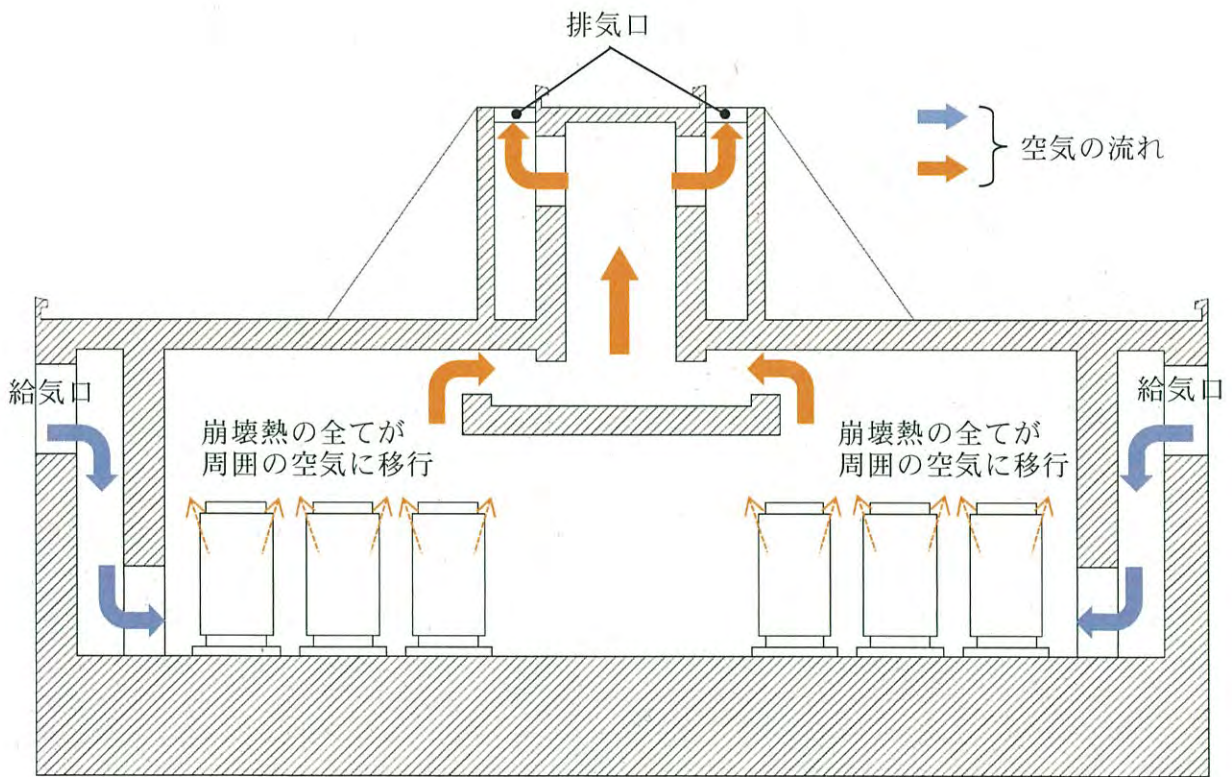
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 3 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (3/3)

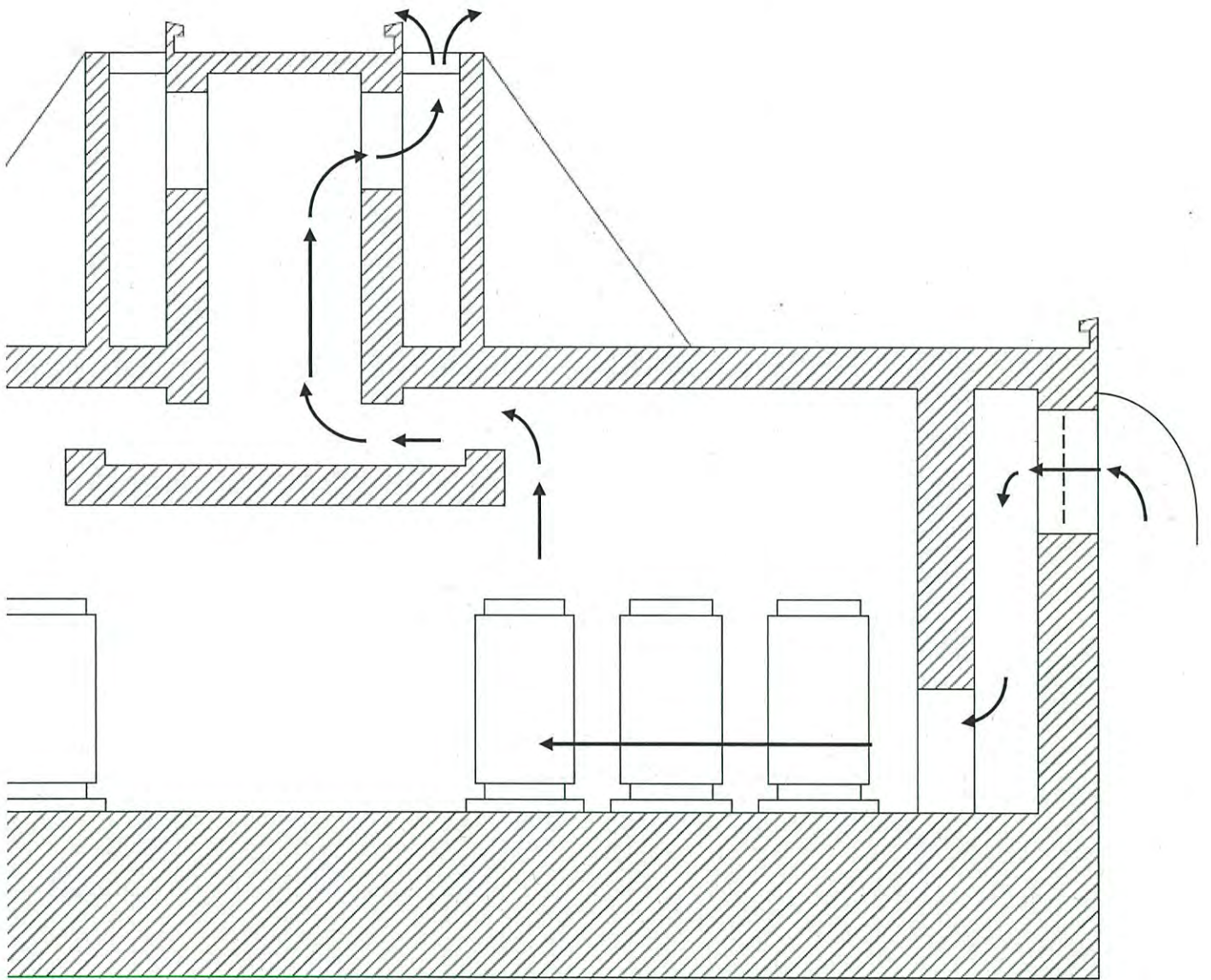
乾式貯蔵建屋のイメージ図



評価断面



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



第 2. 5. 4-17 図 乾式貯蔵建屋の除熱評価で想定する流路（モデル範囲）

乾式キャスクの除熱機能の評価基準は、以下のとおりとする。

a. 使用済燃料被覆管

使用済燃料被覆管の温度は、燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、制限される値以下に維持できること。

b. 乾式キャスク構成部材

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

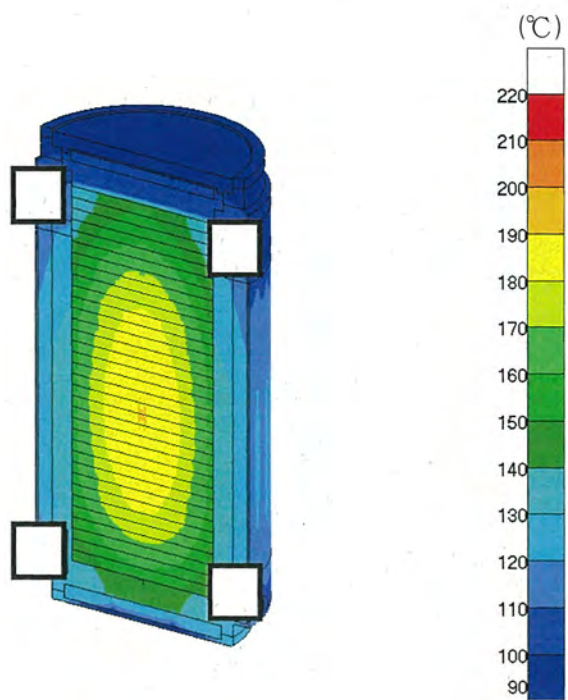
c. 乾式貯蔵建屋

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

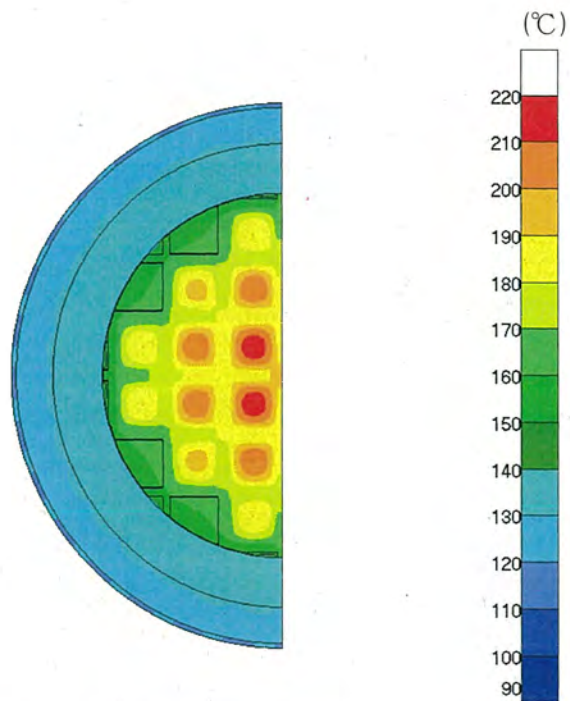
第 2.5.4-13 図及び第 2.5.4-14 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.4-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-24P 型：15.8kw、MSF-32P 型：14.8kw）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

第 2.5.4-5 表 評価結果

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

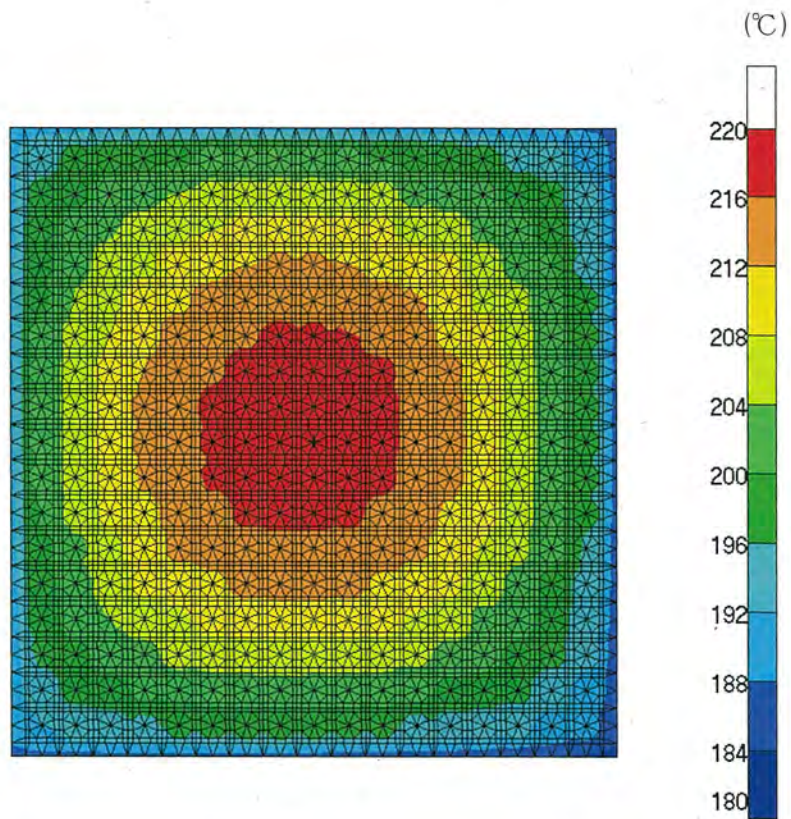


(全体)

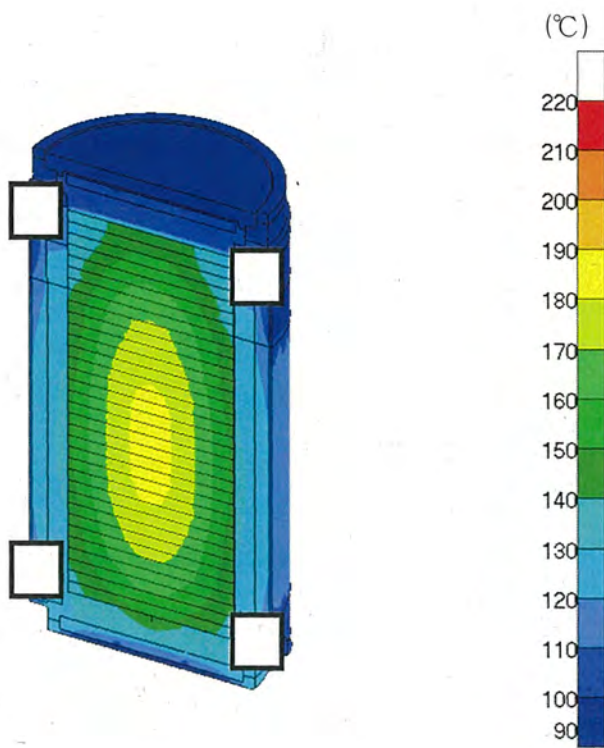


(燃料集合体最高温度位置断面)

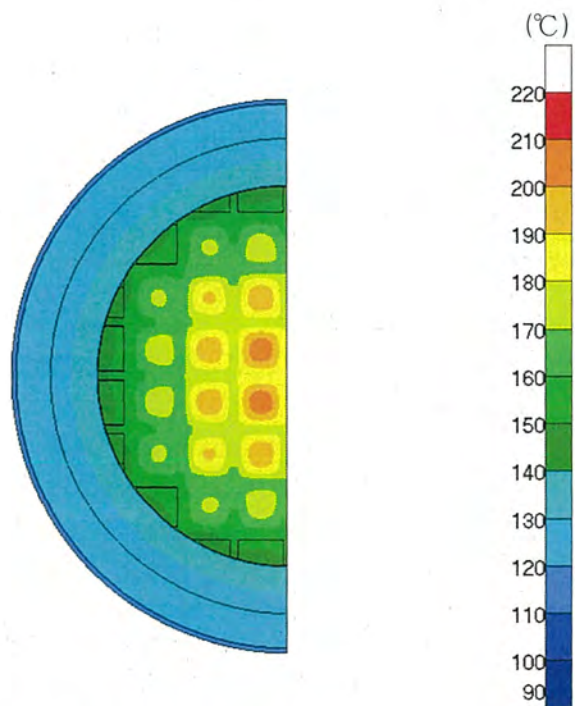
第 2. 5. 4-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果 (全体モデル)



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

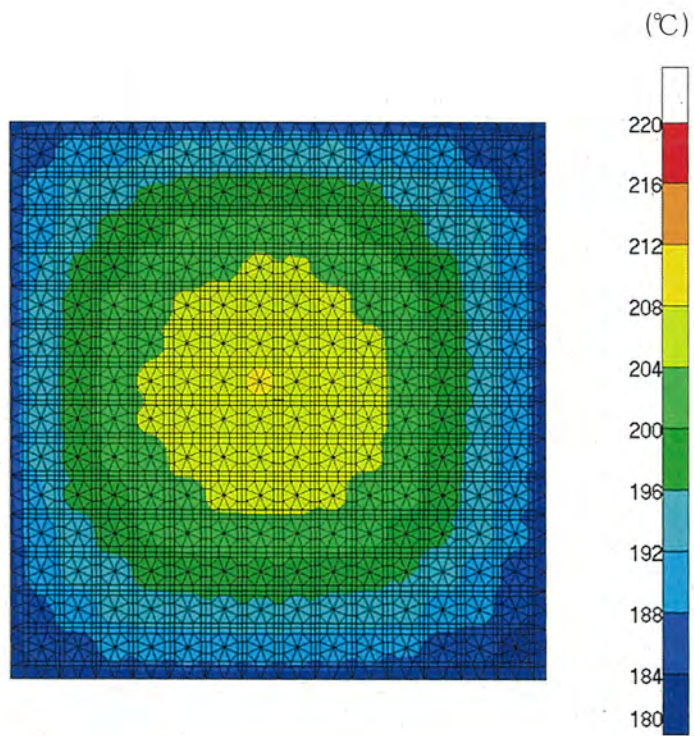


(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

第 2. 5. 4-20 図 MSF-32P 型除熱解析結果(全体モデル)



第 2. 5. 4-21 図 MSF-32P 型除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

〔確認内容〕

4) 貯蔵建屋の除熱評価

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

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

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

特に、以下の貯蔵建屋等の損壊モードについても、想定されない設計とする。

<兼用キャスクの埋没状態>

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

<貯蔵建屋給排気口の損傷状態>

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

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの除熱安全設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) ORIGEN2 コード

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

(b) ABAQUS コード

i 概要

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

ii 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- a) 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b) 一次元から三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c) 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d) 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、熱伝導、対流及びふく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析（構造強度解析）を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。
- e) 構成物質の相変態が考慮できる。

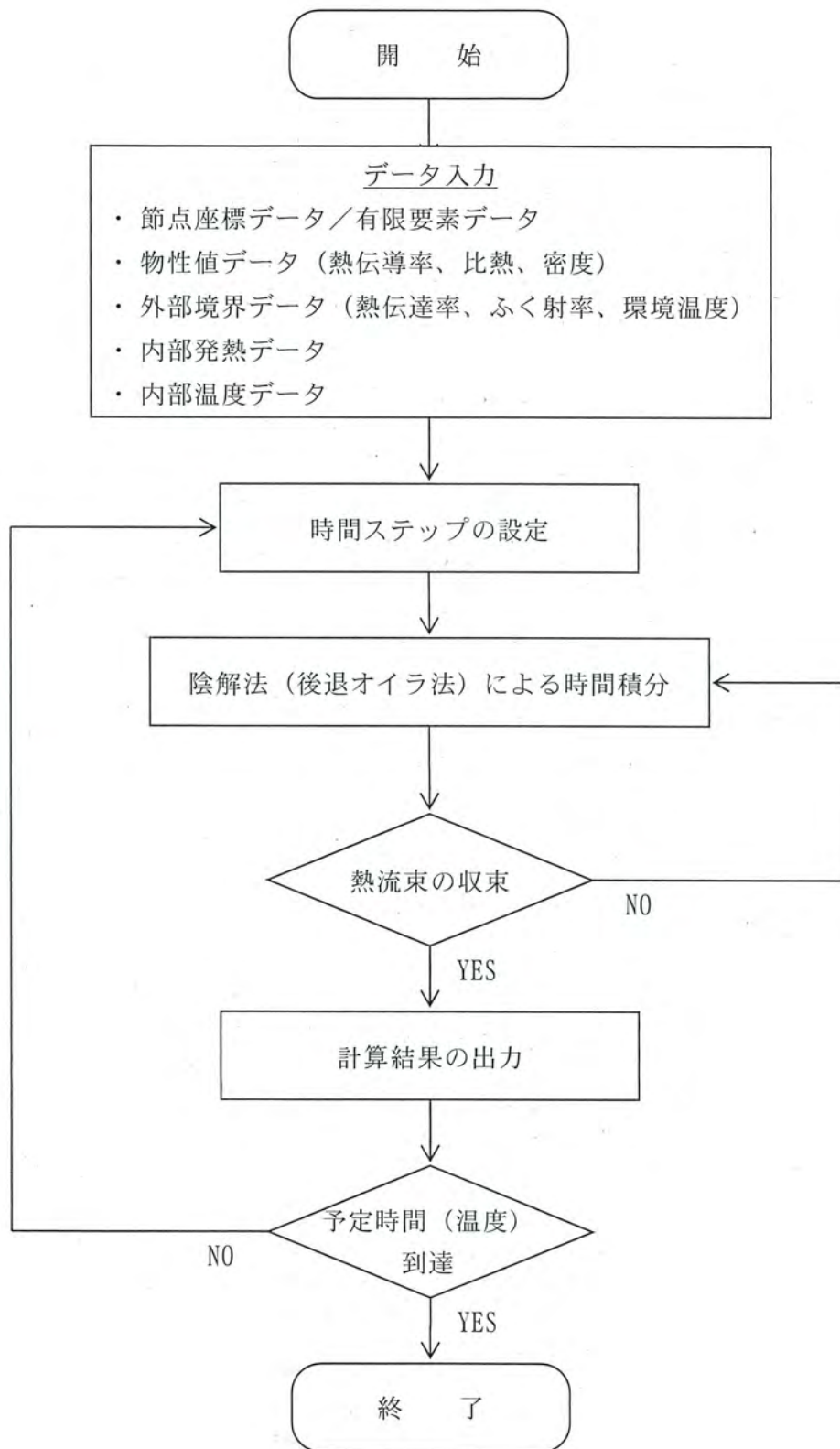
iii 解析フロー

代表的な解析フローを第 2.5.4-22 図に示す。

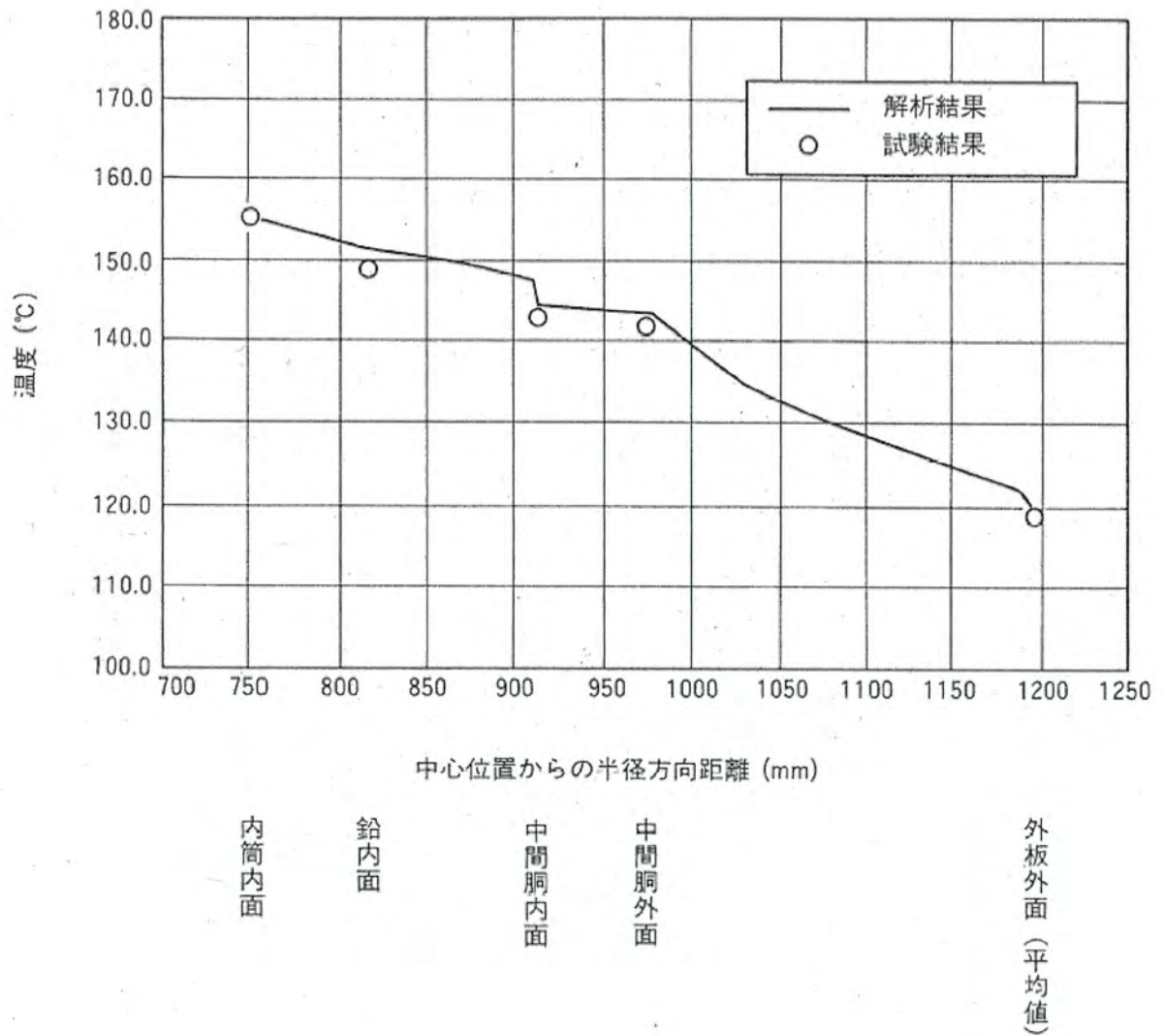
iv 使用実績及び検証

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

ABAQUS コードの検証例を第 2.5.4-23 図に示す。



第 2.5.4-22 図 ABAQUS コードの解析フロー図



第 2. 5. 4-23 図 ABAQUS コードの検証例 ⁷⁾

4. 参考文献

- 1) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 2) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- 3) (一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).
- 4) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 5) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (2009).
- 6) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual (6.12)”, (2012).
- 7) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明朗, 「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」, (一財)電力中央研究所, (1993).

参 考

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で
引用している文献の記載内容について

使用済燃料乾式貯蔵容器的設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《別添1：閉じ込め》

番号	安全審査資料		文献名 (国際規格研究機関論文等)	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容			
1	別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	<16条-別添1(閉じ込め)-7ページ> 乾式キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損率として、米国の使用済燃料の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率(約0.01%以下)を考慮し、保守的な値として0.1%を想定する。	International Organization for Standardization, "Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages", ISO 12807, (1996).	米国の使用済燃料乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)と国内の軽水炉における漏えい燃料発生率(約0.01%)を考慮し、漏えい率を0.1%と想定する。	参考文献として、適用することが妥当であると考 えている。 本文に示される米国の漏えい燃料発生率は、乾式キャスクと同様貯蔵での実績、及び乾式貯蔵に比べ厳し い条件下にある軽水炉(国内)における漏えい燃料発生率を考 慮した上で保守的に設定しており、参考文献として妥当で ある。
2	別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	<16条-別添1(閉じ込め)-8ページ> また、ここで漏えい率 Q は、以下のクヌッセンの式 ³⁾ で求められ る。	International Organization for Standardization, "Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages", ISO 12807, (1996).	本文は放射能物質輸送容器の密封性能評価方法(気体の漏えい率から放射性物質の放出率を評価)を示すISO規格である。気体の漏えい率は、リーク孔として円管を仮定し、流路モデルとして粘性流(漏えい率 Q の式の第1項)と分子流(漏えい率 Q の式の第2項)が適用される。	乾式キャスクの蓋間空間にはヘリウムが充填される。本文 に示されるクヌッセンの式は、乾式キャスクの蓋シール 部の気体の漏えい状態として想定される流れの状態(粘性 流、分子流)が考慮されている。また、クヌッセンの式を 用いた漏えい評価は乾式キャスクの閉じ込め機能評価に多 くの実績を有しており、妥当である。
3	別添1 2.適合性について 第2.5.1-1表 閉じ込め評価条件及び評価結果	<16条-別添1(閉じ込め)-12ページ> 金属ガスケットの漏えい率 ^{3),4)} $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下	"METAL SEALS TECHNICAL CATALOG", Technetics Group, (2017).	金属ガスケットのシール性能(カタログ値)は、ヘリウムガスをを用いた場合、 $1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度を達成可能である。	本文は、MSF-24P型及びMSF-22P型に用いる金属ガス ケットのメーカーカタログであり、参考文献として妥当であ る。 なお、参考文献4の電中研報告を考慮し、メーカーカ タログ値($1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)から保守的に金属ガスケットの性能を $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。
4	別添1 2.適合性について 第2.5.1-1表 閉じ込め評価条件及び評価結果	<16条-別添1(閉じ込め)-12,13,14ページ> ・金属ガスケットの漏えい率 ^{3),4)} ・平成21年度の(一財)電力中央研究所研究において、金属ガス ケットの長期密封性能について試験を実施し、試験と解析で得ら れた乾式キャスクの温度と時間をラウン・ミラー・バラメータ (以下「LMP」という)により長期密封性能について検討を行 っている ⁴⁾ 。第2-6図は当該試験結果の二次蓋ガスケット温度か ら得られたLMPを示しており、LMPが7042以下であれば密封 性は健全であることが示されている。また、第2-7図には、LMP =7042となる場合の、蓋初期温度と評価年数の関係が示され ており、評価年数(貯蔵期間)を60年とすると、その期間健全性 を担保するためには、初期温度を134℃以下にすればよいことが 示されている ⁴⁾ 。	(一財)電力中央研究所、平成21年 度リサイクル燃料資源貯蔵技 術調査等 報告書、(2010)	・金属ガスケット(外被材:アルミニウム、内被材及びコイルスプリング;ニッケル基金金)の性能について、ガスケット部の温度を約130℃から140℃の範囲で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から19年以上が経過(ラウン・ミラー・バラメータ(LMP)=7942)しても密封部の漏えい率の変化は小さく、良好な密封性能を保持していることが確認された。 ・本試験結果ではLMP=7942まで健全性が示されており、貯蔵期間を60年とした場合にLMP=7942となる金属ガスケットの初期温度は134℃となり、この温度以下にすれば密封性能が維持される。	本文は、乾式キャスクで使用される金属ガスケッ トと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面 外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋の ガスケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試 験におけるガスケット部の温度(約130℃~140℃)は、乾 式キャスクの貯蔵時の熱解析結果で得られた金属ガスケッ ト部温度(約110℃)より高い。したがって、一次蓋及び二 次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスク貯蔵時の温 度と比べて、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに對して より厳しい条件下で得られた結果である。以上より、参考 文献として妥当である。 なお、電中研試験結果を踏まえ、金属ガスケットの性能と しては、参考文献3のカタログ値より保守的な $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

安全審査資料		参考文献		
番号	記載箇所	文献名 (国際規格研究機関論文等)	文献概要	
1	別添2 2.適合性について 第2.5.2.4表 評価結果	<16条-別添2(臨界防止)-24ページ> 「臨界安全ハンドブック第2版」,日本原子力研究所 JAERI 1340, (1999)	十分に検証されたコードシステムを用いる場合には, そのコードシステムによって算出された中性子増倍率 k_{eff} が次式を満足することにより未臨界であると判定できると記載されている。 $k_{eff} \leq 0.95$	参考文献としての妥当性 (以下の観点から, 適用することが妥当であると考 えられている。) 臨界防止設計における未臨界判定基準の考え方及び その判定基準が記載されており, 参考文献として妥 当である。
2	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39 Version 6.2.1, (2016).	— (使用マニュアルのため, 省略)	— (使用マニュアルのため, 省略)
3	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEANS/DOC(95)03, (2006)	OECD/NEA にて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEANS/DOC(95)03 (2006)) は, 下記①~⑥の条件を満たす臨界実験が記載されている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板, 中性子吸収材 (ほう素) を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体 (銅板, 鉛) を配置した場合 ⑤水中に中性子吸収材 (ほう素) が溶解している場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し, 減速材を用いない場合	本解析に使用する SCALE コードシステム (KENO-VIを含む) が妥当な結果を与えることを確認するためのベンチマーク試験解析に適した臨界実験が記載されており, 参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《選載》 番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	<16条-別添3(選載)-28ページ> i 概要 ORIGEN2コードは、米国のオークリッジ国立 研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードで ある。ORIGEN2コードは公開コードであり、輸 送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。	・ "ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).	- (使用マニュアルのため、省略)	参考文献として の妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
2	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	<16条-別添3(選載)-28,30ページ> iv 使用実績及び検証 ORIGEN2コードは、輸送キャスク、原子燃料施 設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、 ORNLではORIGEN2コードの崩壊熱計算結果 をANS標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2コ ードの妥当性を検証している。	・ "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983).	本解析に使用する ORIGEN2 コードが適切に検証さ れていることを示す文献であり、参考文献として妥当 である。	参考文献として の妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
3	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	<16条-別添3(選載)-31ページ> i. 概要 DOT3.5コード ³⁾ (以下「DOTコード」という。)は、 米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で 開発された二次元輸送コードである。	・ Oak Ridge National Laboratory, "DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", CCC-276, (1977).	- (使用マニュアルのため、省略)	参考文献として の妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
4	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	<16条-別添3(選載)-31,33ページ> iv. 使用実績及び検証 DOTコードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用い られており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実 績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定 値を第3-4図に示す。測定値はすべて解析値より も低い値を示しており、解析コードが信頼できる ことを示している。	・ TN-12 型輸送容器 (PWR 燃料を 12 体収納) について、DOT3.5 コードを使用し た計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央 (モデル化の影響が少ない) では良く一致している。複雑形状部 (端部) は計算値が数%高い値となっている。 全体的に計算値と測定値は良く一致している。	本解析に使用する DOT コードが適切に検証されてい ることを示す文献であり、参考文献として妥当であ る。	参考文献として の妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
5	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	<16条-別添3(選載)-33ページ> v 断面積ライブラリ MATXS-LIB-33 MATXS-LIB-33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。MATXS-LIB-33を用いた断面積ライブラリ を用いて、輸送計算コードTRANSX-2.15を 用いて、輸送計算コード用に中性子175群、ガン マ線42群のエネルギー群構造に変換し作成して いる。 JENDL-3.3の信頼性は遮蔽性能に関するベンチ マーク解析で確認されている ³⁾ 。	・ [1]CF 核分裂中性子源を用いた遮 へい透過実験及び二次元遮蔽標準 計算コードによる輸送容器評価用 断面積セットSFOX-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).	本文献は、JENDL-3.3の各データを基に作成した断 面積ライブラリ SFOX-J33を用いた DOT3.5 コード による解析のベンチマークを示した文献である。乾式 キャスク評価に用いる断面積ライブラリ MATXS-LIB- J33は、JENDL-3.3の各データを基に作成されてお り、JENDL-3.3の各データを基に作成された断面積 ライブラリを使用した解析の妥当性が示されており、 参考文献として妥当である。	参考文献として の妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)											
1	別添4 2.適合性について 第2.5.4.5表 評価結果	安全審査資料 別添4(除熱) - 31 ページ> 第2.5.4.5表 評価結果	<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>評価基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>胴、外筒、一次蓋及び二次蓋</td> <td>350 °C以下^{d)}</td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽材(レジン)</td> <td>149 °C以下^{a)}</td> </tr> <tr> <td>金属ガスケット</td> <td>130 °C以下^{a)}</td> </tr> <tr> <td>バスケット</td> <td>250 °C以下^{a)}</td> </tr> <tr> <td>使用済燃料被覆管</td> <td>275 °C以下^{a)}</td> </tr> </tbody> </table>	項目	評価基準	胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	350 °C以下 ^{d)}	中性子遮蔽材(レジン)	149 °C以下 ^{a)}	金属ガスケット	130 °C以下 ^{a)}	バスケット	250 °C以下 ^{a)}	使用済燃料被覆管	275 °C以下 ^{a)}	(国際規格研究機関論文等) ・(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) (JSMPS S NJ1-2012)」, (2012). ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・SUS630 (トラネオン) ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNE23-3 (蓋ホルト)	炭素鋼は30°C~375°Cの温度範囲において、ステンレス鋼は、-30°C~425°Cの温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、-30°C~350°Cの温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・SUS630 (トラネオン) ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNE23-3 (蓋ホルト)	○本文献は、乾式キャスク各部材の設計用強度及び物性値の規格値、文献概要欄に示す各材料の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。
項目	評価基準																	
胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	350 °C以下 ^{d)}																	
中性子遮蔽材(レジン)	149 °C以下 ^{a)}																	
金属ガスケット	130 °C以下 ^{a)}																	
バスケット	250 °C以下 ^{a)}																	
使用済燃料被覆管	275 °C以下 ^{a)}																	
2				・BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1986).	エポキシ系レジンの使用可能温度が示された文献である。	○本文献は、乾式キャスクで使用する中性子遮蔽材と同等の組成であるエポキシ系レジンの使用可能温度であり、参考文献として妥当である。												
3				・(一財)電力中央研究所,「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査報告書	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 130°C~140°Cで保持し、定期的に密封性を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面の外径 (φ6.1mm) は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ10mm) よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度 (約 130°C~140°C) は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の燃解折結果で得られた金属ガスケット部温度 (約 110°C) より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。												
4				・三菱重工業(株),「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).	三菱重工業製の乾式キャスク (MSP-21P 型) のバスケットに用いるアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の設計用強度及び物性値、並びに強度設計における設計基準の設定根拠がまとめられている。アルミニウム合金は設計貯蔵期間中の強度低下を考慮する必要があるが、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件を模擬した条件下で材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡し、設計貯蔵期間中の熱ばく露を適切に考慮した設計用強度を規定している。	○本文献には、乾式キャスクのバスケットに用いるアルミニウム合金と同じ材料であり、同じ設計貯蔵期間が考慮された設計用強度及び物性値が示されている。アルミニウム合金の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。												
5				・総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (2009).	・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^2$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^2$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ 4 被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することが確認されている。設計貯蔵期間中には温度を制限することによりクリープひずみが 1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件下で長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約 300°Cでは照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を 275°C以下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気蒸った条件におけるジルカロイ 4 の SCC 発生のおよび応力は 200MPa 程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCC は発生しない。	○本文献には、乾式キャスクに収納する PWR39CWRdt および 48CWRdt 燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づき評価結果である。また、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。												
6	別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUS コード	安全審査資料 別添4(除熱) - 37 ページ> i 概要 ABAQUS コード ^{d)} は、米国 Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在は Dassault Systemes		・Dassault Systemes, "ABAQUS Analysis User's Manual(6.12)", (2012).	ー (使用マニユアルのため、省略)	ー (使用マニユアルのため、省略)												

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

7	別添 4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード	社)で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。 <16条-別添4(除熱)-37.39ページ> iv 使用実績及び検証 ABAQUSコードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、乾式キャスクの定常伝熱試験に対してABAQUSによる解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUSコードの妥当性が検証されている。	「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立—キャスクの伝熱特性評価—」(一財)電力中央研究所(1993)。	使用済燃料の模擬物を収納した真寸大キャスクの伝熱試験(貯蔵時)に対して、ABAQUSコードを用いた計算結果(キャスク各部温度及び燃料被覆管温度)が測定結果とよく一致した。	本解析に使用する ABAQUS コードが適切に検証されていることを示す文献であり、参考文献として妥当である。
---	-------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------

使用済燃料乾式貯蔵容器的設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	《長期健全性》	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することの妥当であると考えている。)
1	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-37~39ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【照射影響】 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼については、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない。ことが示されており、最も中性子照射量が 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。 (2) バスケット 【照射影響】 バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポートに使用する炭素鋼 (MSF-32P 型) は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² まで顕著な機械的特性変化は見られない。ことが示されており、最も中性子照射量が 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。 (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【照射影響】 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない。ことが示されており、最も中性子照射量が 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。 【熱的影響】 設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では 3.3×10^{15} n/cm²、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p>	<p>"An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).</p>	<p>様々な組成の鋼及び合金鋼の照射材を用いたシャルピー衝撃試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/cm² 以下までは、未照射材の機械的特性 (遷移温度) との有意な差はみられない。</p>	<p>○炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼と同等の組成の鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{16} n/cm²) を上回る中性子照射量 (10^{16} n/cm²) と遷移温度変化の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p>
2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-37~40ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【熱的影響】 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温度脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (2) バスケット 【熱的影響】 バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポートに使用する炭素鋼 (MSF-32P 型) は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定²⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温度脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (3) トラニオン 【熱的影響】 トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定²⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温度脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【熱的影響】 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温度脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【熱的影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、設計用強度・物性値が規定²⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温度脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。</p>	<p>(一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (JSMB S NJT-2012)」, (2012).</p>	<p>炭素鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim -375^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、ステンレス鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim -425^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim -350^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト)</p>	<p>○本文献は、乾式キャスク各荷材の設計用強度及び物性値の規格値、文献概要欄に示す各材料の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包摂しており、参考文献として妥当である。</p>

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えている。)
3	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p><16 条-38 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ポルト 【化学的影響】 乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入し、貯蔵する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない。</p> <p><16 条-41 ページ> (7) 金属ガスケケット 【化学的影響】 また、10 年間貯蔵条件下で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さ (3) を用い、設計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約 0.025mm 及び約 0.33mm であり、外板の厚板 0.5mm より小さいため、閉じ込め機能に影響はない。</p>	(国際規格/研究機関論文等) 日本アルミニウム協会、「アルミニウムハンドブック第 7 版」, (2007).	炭素鋼の試験片を淡水に完全に浸漬した条件において 16 年間の浸漬試験の結果、腐食速度は 18 μm/年である。	参考文献として、適用することが妥当であると考えている。 ○本文記載結果は、炭素鋼の試験片を淡水の湖に完全に浸漬した条件のもと得られた結果である。乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境は、残留水分が限られていることに加え、酸液が連続的に供給されないことから、より厳しい条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。
4	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p><16 条-38 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ポルト 【化学的影響】 また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ポルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率 1% 相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない。</p> <p>(2) バスケケット 【化学的影響】 また、MSP-32P 型のバスケケットサポータに使用する炭素鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率 1% 相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない。</p>	(独)原子力安全基盤機構、「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術検証試験報告書 最終報告」, (2004).	<p>アルミニウム (A1100) の性能について、10 年間浸食条件下で大気ばく露させた試験における平均浸食深さ及び最大孔食深さの計測結果が記載されている。</p> <p>・平均浸食深さ: 0.0041mm/10 年 ・最大孔食深さ: 0.18mm/10 年</p>	<p>○各材料において、6ヶ月間の腐食試験により腐食量を評価し、60 年間 (キャスク安全評価期間) の腐食量を算出し、設計寸法に対して影響がないことを示して、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文記載結果は、設計上の燃料破損率 0.1% に対して 1% 破損の条件、キャスク内部の最高温度 (燃料集合体最高温度、MSP-24P 型約 220°C、MSP-32P 型約 210°C) に対して試験温度が 270°C の条件のもと得られた結果であり、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて厳しい条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p>
5	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p><16 条-38 ページ> (2) バスケケット 【照射影響】 バスケケットプレート及びバスケケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケケットサポータに使用する炭素鋼 (MSP-32P 型) は、中性子照射量が 10¹⁶ n/cm² まで顕著な機械的特性変化は見られない。b. c) ことが示されており、最も中性子照射量が最も高い照射箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.5 × 10¹⁶ n/cm² であることから照射腐化の影響はない。</p> <p>【熱的影響】 バスケケットプレート及びバスケケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケケットサポータに使用するアルミニウム合金への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献であり、本文記載は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10¹⁶ n/cm²) を上回る中性子照射量と機械的特性への関係が示されており、機械的特性への影響が中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p>	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).	<p>○バスケケットプレート及びバスケケットサポータに使用するアルミニウム合金への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献であり、本文記載は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10¹⁶ n/cm²) を上回る中性子照射量と機械的特性への関係が示されており、機械的特性への影響が中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p> <p>○本文は、バスケケットプレート及びバスケケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度及</p>	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価について

<p>6</p> <p>2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について</p> <p>2.6.2 適合性について</p>	<p>＜16条-38ページ＞</p> <p>(2) バスケット</p> <p>【熱的影響】</p> <p>なお、バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱びくろびくろを考慮して、クリープによる設計貯蔵期間中の熱びくろびくろによる強度低下を適切に考慮している。</p>	<p>「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」、軽金属、第68巻 第12号、(2018)。</p>	<p>アルミニウム合金の強度は高温保持によって低下するたため、設計強度は、この低下の影響を適切に反映する必要がある。バスケットのバスケット用構造材料であるA3004-H112 材合金の引張特性に及ぼす熱処理条件の影響、各強化因子の引張特性への寄与を確認し、設計強度の設定に必要な長時間加熱と焼きなまし条件を見出した。</p>	<p>ひ物性の規定値、設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱びくろびくろを考慮した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するよう設定しており、設計貯蔵期間中の熱びくろびくろによる強度低下を適切に考慮している。また、温度範囲(−40℃～250℃)は乾式キャスク設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献は、バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度及びひ物性の規定するための適切な試験条件を示している。本文献で対象とした材料は乾式キャスクと同じ材料であり、また、温度条件は乾式キャスクの温度を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>
<p>7</p> <p>2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について</p> <p>2.6.2 適合性について</p>	<p>＜16条-39ページ＞</p> <p>(3) トラニオン</p> <p>【照射影響】</p> <p>トラニオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>(5) 下部強板及び底部中性子遮蔽材カバ</p> <p>【照射影響】</p> <p>下部強板及び底部中性子遮蔽材カバに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が 8.2×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p>	<p>「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その2) - 熱脆化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響-1」、(一財)電力中央研究所、(1997)。</p>	<p>ステンレス鋼の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{17} n/cm² 以下では未照射材に対する機械的性質 (0.2%耐力及び一様伸び) の有意な差はみられない。</p>	<p>○ステンレス鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{16} n/cm²) を上回る中性子照射量 (10^{18} n/cm²) と 0.2%耐力及び一様伸びの関係が示されており、機械的性質への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p>

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することゝ妥当であること 考えている。)
8	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<16条-40ページ> (6) 中性子遮蔽材 【照射影響、熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材（レジン）は、顕著な質量減損は見られないことが示されており、最も中性子照射量が 10^{15} n/cm^2 である箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は $1.6 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ であることから照射脆化の影響はない。 【熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中の熱的（化学的）影響により質量減損（2%程度）が発生し、評価上、保守的に2.5%の質量減損を考慮する。	(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（金属キヤスタック貯蔵技術確証試験）報告書J, (2003).	閉鎖系環境でのエボキシ系レジンの加熱試験及び照射試験により、エボキシ系レジンの質量減損量は温度及び加熱時間を基に劣化パラメータを用いた整理による以下の式で評価ができる。 $\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$ 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)	○本文献での試験は、乾式キヤスタックの中性子遮蔽材と同じエボキシ系レジンを用い、乾式キヤスタックと同じ閉鎖系条件で行われている。また、本文献結果に示される質量減損の式に含まれる劣化パラメータの範囲（約38000）は、乾式キヤスタックの設計貯蔵期間における劣化パラメータ（24P : 37140.32P : 36777）を包絡しており、参考文献として妥当である。 ○評価式による計算結果は以下の通りとなる。 24P : $5.69 \times 10^{-4} \times \{(136+273) \times (77.6 + \ln(24 \times 365 \times 60))\} - 19.2 \approx 2.0 \%$ 32P : $5.69 \times 10^{-4} \times \{(132+273) \times (77.6 + \ln(24 \times 365 \times 60))\} - 19.2 \approx 1.8 \%$ これらを踏まえ、レジンは保守的に2.5%減損することとして遮蔽評価を実施している。
9	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について			"Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment", Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).	閉鎖系環境でのエボキシ系レジンの照射材（中性子照射量 10^{15} n/cm^2 ）及び未照射材の加熱試験の結果、照射材と未照射材で質量減損率に有意な差は認められなかった。以上のことから、照射による劣化は有意ではなく、熱的影響が支配的である。	○本文献での試験は、乾式キヤスタックの中性子遮蔽材と同じエボキシ系レジンを用い、乾式キヤスタックと同じ閉鎖系条件で行われている。中性子照射量は、乾式キヤスタックの貯蔵中と同等であり、参考文献として妥当である。
10	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について		<16条-40ページ> (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ 10^{16} n/cm^2 又は 10^{15} n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は見られない。10, 11) が示されており、最も中性子照射量が $2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ である箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は $2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ であることから照射脆化の影響はない。	"Reactor Irradiation Effects on Al 1100", Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).	金属ガスケットに使用するアルミニウムの照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性（引張強さ及び伸び）の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用されているアルミニウムに対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、乾式キヤスタックの設計貯蔵期間中の中性子照射量（ 10^{15} n/cm^2 ）を上回る中性子照射量（ 10^{16} n/cm^2 ）と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
11	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について			"Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report", HEDL-TME 75-77, (1975).	金属ガスケットに使用するニッケル基合金の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{14} n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性（引張強さ及び伸び）の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用されているニッケル基合金に対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、乾式キヤスタックの設計貯蔵期間中の中性子照射量（ 10^{15} n/cm^2 ）を上回る中性子照射量（ 10^{14} n/cm^2 ）と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格・研究機関論文等)	文献概要	参考文献として (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
1.2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-40ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 また、高温時の健全性についてラズン・ミラー・パラメータ (LMP) で評価すると 150℃では100年以上閉じ込め機能を維持できる ⁽¹²⁾ 。	<16条-40ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験 (19年以上) が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている ⁽¹³⁾ 。	「使用済燃料貯蔵キヤスケットの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.6, (1996).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、内被材及びコイルスプリング: ニッケル基合金) の応力緩和による漏えい率の影響について、金属ガスケットの LMP が約 11.0×10^3 を超えなければ貯蔵初期の漏えい率が維持される。 LMP は以下の式のとおり示され、LMP = $11.0 \times 10^3 + 273.15 + 150(K)$ とすると、時間 t は約 190年となる。 $LMP = T (20 \times \log(t))$ T: 温度 (K) t: 時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キヤスケッドで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、試験に用いた金属ガスケット断面の外径 (φ5.5mm) は、乾式キヤスケッドの一次蓋のカバープレート用金属ガスケットの断面外径 (φ5.6mm) と同等である。方、一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ10mm) よりも小さい。したがって、乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間中の環境に比べて、バルブカバー用金属ガスケットに対しては同等の条件下で得られた結果であり、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対してはより厳しい条件下で得られた結果である。さらに、乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間を回る金属ガスケットの LMP と漏えい量の関係が示されており、参考文献として妥当である。
1.3	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-40ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験 (19年以上) が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている ⁽¹³⁾ 。	<16条-40ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験 (19年以上) が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている ⁽¹³⁾ 。	「(一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃 料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 150℃で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化は小さく、良好な密封性能を保持していることが確認された。	○本文献での試験は、乾式キヤスケッドで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面の外径 (φ6.1mm) は、乾式キヤスケッドの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ10mm) よりも小さい。したがって、試験におけるガスケット部の温度 (約 130℃ ~ 140℃) は、乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度 (約 110℃) より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
1.4	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-41ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外周については、約 3 年間の塩水噴霧試験を実施し、実際の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている ⁽¹⁴⁾ 。	<16条-41ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外周については、約 3 年間の塩水噴霧試験を実施し、実際の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている ⁽¹⁴⁾ 。	小嶋明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に因する海外動向他」, (株) 日本原子力情報センター 主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、実機より厳しい環境である塩水噴霧環境において 3 年間漏えい率に変化がないことを確認している。	○本文献での試験は、乾式キヤスケッドで使用される金属ガスケットと同じ材料相当で行われている。また、乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間中の環境より厳しい塩水噴霧環境下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
1.5	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-41ページ> (8) 伝熱フィン 【照射影響】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ⁽¹⁵⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。	<16条-41ページ> (8) 伝熱フィン 【照射影響】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ⁽¹⁵⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。	"Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys", ASTM STP888, (1986).	銅の照射材を用いた硬さ試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² 以下では未照射材に対する機械的特性 (ヒツカーズ硬さ) の有意な差はみられない。	○本文献は、伝熱フィンに使用している銅への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間中の中性子線量 (10^{16} n/cm ²) を上回る中性子線量 (10^{18} n/cm ²) とヒツカーズ硬さの関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
1.6	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-41ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 ⁽¹⁶⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。	<16条-41ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 ⁽¹⁶⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。	「(一財)日本規格協会, 「压力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015).	-40℃ ~ 200℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。	○本文献は、鋼の設計用強度及び物性値の規格値、この温度範囲 (-40℃ ~ 200℃) は乾式キヤスケッドの設計貯蔵期間中の温度範囲を包括しており、参考文献として妥当である。
1.7	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16条-41ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属であることから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	<16条-41ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属であることから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	(公社)腐食防食協会編, 「材料探字入門」, 丸善 (株), (1993).	銅の電極電位は炭素鋼 (鉄) に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である。	○本文献は、金属の熱力学的費率を示す基礎データであり、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格研究機関論文)	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えている。)
1.8	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 41 ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 伝熱フィンと鋼及び外筒の接合部において異種金属接触による腐食促進の可能性があるが、密閉静止した淡水環境における鋼が接続した鋼の腐食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されている 99。	(国際規格研究機関論文) 能登谷武記, 密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食, 伸鋼技術研究会誌, 33 巻, (1994).	密閉した水道水において鋼を接続した鋼の腐食試験の結果、鋼の腐食速度は 1 週間以内に約 2 桁減少した。鋼を接続した鋼の腐食速度は、比流量、表面積比、溶液の電気伝導率などに依存するが、腐食反応に伴う溶存酸素の消費により、鋼の腐食速度は短時間に大幅に減少する。	○本文献には、乾式キャスクの伝熱フィン及び外筒又は外筒と同じ材料である鋼及び炭素鋼を用いた腐食試験の結果が示されている。本試験は、貯蔵期間中の伝熱フィンと同じ淡水条件(中性子遮蔽材により生じる水分に相当)・密閉環境であるため、参考文献として妥当である。
1.9	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 41, 42 ページ> (9) 使用済燃料被覆管 【照射影響】 燃料被覆管に使用するジルカロイは、設計貯蔵期間中の中性子照射量が $1.5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ であり、炉内の中性子照射量 ($10^{16} \sim 10^{17} \text{ n/cm}^2$) に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る 99。 【熱的影響】 熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある 99。 クリープひずみの進行については、予測式に基づく累積クリープひずみが 1% 以下となるよう制限することで防止できる 99。ことが示されており、燃料被覆管中の水素化物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが 1% を超えることはない。 照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射された PWR 照射被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は 300℃ 近傍 99。であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さいため、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。 燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 275℃ 以下、周方向応力が 100MPa 以下 99。と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止する。	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取納物の長期健全性について」, (2009).	貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{16} \sim 10^{17} \text{ n/cm}^2$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ 4 被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1% 以上の変形能力を有することが確認されている。 設計貯蔵期間中には温度を制限することによりクリープひずみが 1% 以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件下に長時間保持されると照射効果が徐々に回復している。約 300℃ では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験を行い、被覆管温度を 275℃ 以下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気条件におけるジルカロイ 4 の SCC 発生のしきい応力は 200MPa 程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCC は発生しない。	○本文献には、乾式キャスクを対象として PWR39GWd/t および 48GWd/t 燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づく評価結果である。また、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。
2.0	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> 【化学的影響】 残留水分が 10 wt% 以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい 99。ため、健全性に影響はない。	(一社)日本原子力学会標準委員会、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属製キャスクの安全設計及び検査基準: 2010 (AESJ-SC-F002: 2010)」, (2010).	金属製キャスク内部の残留水分を 10% (質量) 以下に制限すれば、燃料被覆管の酸化量や水素吸収量はわずかとなり、被覆管の健全性に影響を与えない。	○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属製キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。

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

参考 2

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

伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る原子力規制委員会の審査方針を踏まえた影響評価

第8回原子力規制委員会で示された以下の審査方針

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

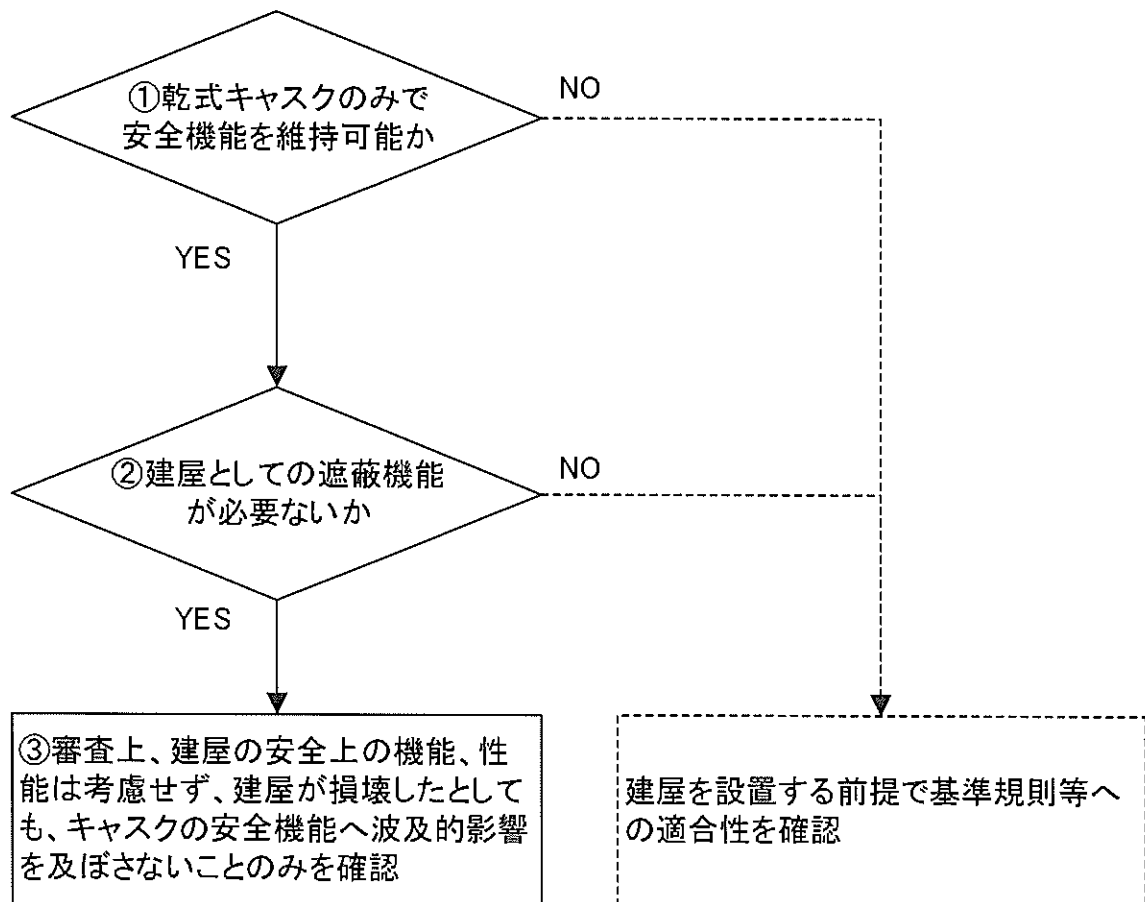


図1. 第8回 原子力規制委員会の審査方針で示された内容のフロー

1. 乾式キャスクのみでの外力に対する安全機能維持について

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

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

表1. 地震・竜巻・外部火災による乾式キャスクに対する影響評価結果

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

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

2. 建屋としての遮蔽機能の必要性について

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

表2. 伊方発電所敷地境界の年間線量試算結果（乾式貯蔵建屋なし）

評価地点 (乾式貯蔵施設からの距離)	年間線量[μ Sv]（現実的な評価）		
	乾式貯蔵施設	既設建屋	合算
B点 ^(注1) (420 m)	約180 ^(注2)	3.9	約190

(注1) 伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点

(注2) ガンマ線43 μ Sv+中性子線135 μ Sv=約180 μ Sv

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

3. まとめ

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

以 上

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

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

<p>評価概要</p> <p>MSP-32P型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>乾式キャスクは頑丈な構造の金属製の静的機器であることから剛体とし、乾式キャスクを1質点とみなして、落下時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算し、有限要素法及び工学式により乾式キャスク各部(容器本体、バスケット及び燃料集合体)の応力計算を行い、弾性範囲内であることを確認した。</p>	<p>発電用原子炉設置変更許可申請書(影響評価)</p> <p>乾式キャスクは頑丈な構造の金属製の静的機器であることから剛体とし、乾式キャスクを1質点とみなして、電巻による設計飛来物衝突時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算した。その衝撃荷重(乗用車 3.16×10⁶N)が0.3m落下評価時に生じる衝撃荷重(0.3m頭部垂直 3.672×10⁷N、水平落下 2.830×10⁷N)を下回るため、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。</p>
<p>評価内容</p> <p>【衝撃荷重の計算方法】</p> <p>落下時の衝撃荷重(F)は、CRUSHコードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー(E_R)が全て吸収されるものとした。(緩衝体を除いた輸送物及び落下試験石(床面)を剛体とし、落下エネルギーの振動及び加熱等への消費を無視する。)</p>	<p>【衝撃荷重の計算方法】</p> <p>設計飛来物(鋼製材、乗用車)による衝撃荷重(W_M)は、「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」で例示されている飛来物の圧潰挙動を無視したRieraの式を用いて適用する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして、電巻による設計飛来物衝突時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算する。</p> <p>$W_M = F_m \cdot m \cdot V/t = m \cdot V^2/L$</p> <p>ここで、 F_m: 静的な値として計算した飛来物による衝撃荷重(N) m: 飛来物の質量(kg) V: 衝突速度(m/s) t: t=L/V (飛来物と被衝突体の接触時間)(s) L: 飛来物の最も短い辺の全長(m)</p>
<p>落下時の衝撃荷重(F)は、CRUSHコードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー(E_R)が全て吸収されるものとした。(緩衝体を除いた輸送物及び落下試験石(床面)を剛体とし、落下エネルギーの振動及び加熱等への消費を無視する。)</p>	<p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <p>0.3m落下時の衝撃算定(F)の計算結果は右表のとおり。なお、加速度は衝撃荷重Fを輸送物質量で除して算出。</p> <p>【応力計算方法】</p> <p>(1) 容器本体 上記の加速度に一定の余裕をみた加速度(設計加速度)による慣性力が作用する場合の容器本体の解析を有限要素法によるABAQUSコードにより行う。 (2) バスケット及び燃料集合体 設計加速度をもとに工学式を用いた応力評価を行う。</p> <p>【応力計算結果】</p>
<p>落下時の衝撃荷重(F)は、CRUSHコードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー(E_R)が全て吸収されるものとした。(緩衝体を除いた輸送物及び落下試験石(床面)を剛体とし、落下エネルギーの振動及び加熱等への消費を無視する。)</p>	<p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <p>衝撃荷重 W_M(N) 飛来物 2.20×10⁶ 鋼製材 3.16×10⁶ 乗用車</p> <p>加速度 (G) 飛来物 0.2 鋼製材 1.4</p>
<p>落下時の衝撃荷重(F)は、CRUSHコードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重(加速度)を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー(E_R)が全て吸収されるものとした。(緩衝体を除いた輸送物及び落下試験石(床面)を剛体とし、落下エネルギーの振動及び加熱等への消費を無視する。)</p>	<p>【結論】</p> <p>以上のとおり、電巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに生じる衝撃荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における0.3m落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部品が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。なお、乾式キャスクに設計飛来物が直接衝突するため、衝突箇所(外部)は局所的に変形する可能性があるが、直ちに安全機能に影響を与えない。</p>

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

評価概要	MSP-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書	発電用原子炉設置変更許可申請書 (影響評価)
<p>評価内容</p> <p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが 800℃で 30 分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (供用状態 D 相当) の温度基準以内であることにより、各部位材の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>	<p>MSF-24P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが 800℃で 30 分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (800℃で 30 分の火災) における入熱量を下回ることにより、同様に各部位の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>	<p>貯蔵状態 (緩衝体なし、統置き) の乾式キャスクが、遠隔の外部火災に対して、輻射による入熱に建屋等の遮蔽物が無い状態で曝されることを想定し、最大の入熱量を計算した。</p> <p>この入熱量が、左記の評価条件 (800℃で 30 分の火災) における入熱量を下回ることにより、同様に各部位の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>
<p>【計算方法】</p> <p>伊方発電所における外部火災事象としては、森林火災、近隣産業施設の火災爆発、船舶火災、航空機落下及び重量火災等が考えられる。</p> <p>既許可の評価において、これらの外部火災事象のうち、最も厳しい条件となるのは、航空機落下と重油タンクの重量火災時であり、離隔距離の関係から入熱量が最大となる原子炉補助建屋に対する値を以下の通り計算する。</p> <p>【計算結果】</p> <p>入熱量は、受熱面輻射強度と時間の積で計算される。受熱面輻射強度は「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づき計算を実施する。計算式は以下の通り。</p>	<p>計算式</p> $\phi = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1 \cos \theta_1}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_3 \cos \theta_3}{r^2}$ $m = \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \frac{m_3}{r_3}$ $E = R \cdot \phi$ <p> R: 輻射強度 [W/m²] φ: 可動火災モデルの形態係数 [—] L: 火災と受熱面までの距離 [m] R: 燃焼半径 [m] H: 火災の高さ [m] (H=3R, 評価ガイド) E: 受熱面輻射強度 [W/m²] </p>	<p>計算式</p> $\phi = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1 \cos \theta_1}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_3 \cos \theta_3}{r^2}$ $m = \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \frac{m_3}{r_3}$ $E = R \cdot \phi$ <p> R: 輻射強度 [W/m²] φ: 可動火災モデルの形態係数 [—] L: 火災と受熱面までの距離 [m] R: 燃焼半径 [m] H: 火災の高さ [m] (H=3R, 評価ガイド) E: 受熱面輻射強度 [W/m²] </p>
<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への輻射による受熱面輻射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²)×1.67(h)+460(W/m²)×7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>	<p>計算式</p> $\phi = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1 \cos \theta_1}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_3 \cos \theta_3}{r^2}$ $m = \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \frac{m_3}{r_3}$ $E = R \cdot \phi$ <p> R: 輻射強度 [W/m²] φ: 可動火災モデルの形態係数 [—] L: 火災と受熱面までの距離 [m] R: 燃焼半径 [m] H: 火災の高さ [m] (H=3R, 評価ガイド) E: 受熱面輻射強度 [W/m²] </p>	<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への輻射による受熱面輻射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²)×1.67(h)+460(W/m²)×7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>
<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への輻射による受熱面輻射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²)×1.67(h)+460(W/m²)×7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>	<p>計算式</p> $\phi = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1 \cos \theta_1}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} + \frac{1}{4\pi} \frac{A_3 \cos \theta_3}{r^2}$ $m = \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \frac{m_3}{r_3}$ $E = R \cdot \phi$ <p> R: 輻射強度 [W/m²] φ: 可動火災モデルの形態係数 [—] L: 火災と受熱面までの距離 [m] R: 燃焼半径 [m] H: 火災の高さ [m] (H=3R, 評価ガイド) E: 受熱面輻射強度 [W/m²] </p>	<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への輻射による受熱面輻射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²)×1.67(h)+460(W/m²)×7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>
<p>【結論】</p> <p>以上の通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の入熱の入熱量の 1/2 以下 (29.9MJ/m² < 62.9MJ/m²) であるため、乾式キャスク各部位の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の熱的影響については、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSP-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSP-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>	<p>【結論】</p> <p>以上の通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の入熱の入熱量の 1/2 以下 (29.9MJ/m² < 62.9MJ/m²) であるため、乾式キャスク各部位の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の熱的影響については、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSP-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSP-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>	<p>【結論】</p> <p>以上の通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の入熱の入熱量の 1/2 以下 (29.9MJ/m² < 62.9MJ/m²) であるため、乾式キャスク各部位の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の熱的影響については、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSP-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSP-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>
<p>【外部火災】</p> <p>影響評価として、乾式キャスク単体の安全機能を確認するため、以下のとおり、外部火災時の乾式キャスクへの入熱と、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件 (800℃で30分の火災) による入熱を比較した。</p>	<p>MSF-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが 800℃で 30 分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (供用状態 D 相当) の温度基準以内であることにより、各部位材の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>	<p>MSF-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが 800℃で 30 分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (800℃で 30 分の火災) における入熱量を下回ることにより、同様に各部位の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>

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

MSF-32P 型 核燃料輸送物設計承認申請書	MSF-24P 型 核燃料輸送物設計承認申請書																																																																																																
<table border="1"> <tr> <td>輸送物質量 m(kg)</td> <td>135500</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	135500	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	<table border="1"> <tr> <td>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																				
輸送物質量 m(kg)	135500	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																												
輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																												
<table border="1"> <tr> <td>落下姿勢</td> <td>衝撃荷重 F(N)</td> <td>加速度 (G)</td> </tr> <tr> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>3.672×10⁷</td> <td>27.6</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>3.439×10⁷</td> <td>25.9</td> </tr> <tr> <td>0.3m 水平</td> <td>2.830×10⁷</td> <td>21.3</td> </tr> </table>	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)	0.3m 頭部垂直	3.672×10 ⁷	27.6	0.3m 底部垂直	3.439×10 ⁷	25.9	0.3m 水平	2.830×10 ⁷	21.3	<table border="1"> <tr> <td>落下姿勢</td> <td>衝撃荷重 F(N)</td> <td>加速度 (G)</td> </tr> <tr> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>3.555×10⁷</td> <td>27.0</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>3.417×10⁷</td> <td>25.9</td> </tr> <tr> <td>0.3m 水平</td> <td>2.686×10⁷</td> <td>20.4</td> </tr> </table>	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)	0.3m 頭部垂直	3.555×10 ⁷	27.0	0.3m 底部垂直	3.417×10 ⁷	25.9	0.3m 水平	2.686×10 ⁷	20.4																																																																								
落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)																																																																																															
0.3m 頭部垂直	3.672×10 ⁷	27.6																																																																																															
0.3m 底部垂直	3.439×10 ⁷	25.9																																																																																															
0.3m 水平	2.830×10 ⁷	21.3																																																																																															
落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)																																																																																															
0.3m 頭部垂直	3.555×10 ⁷	27.0																																																																																															
0.3m 底部垂直	3.417×10 ⁷	25.9																																																																																															
0.3m 水平	2.686×10 ⁷	20.4																																																																																															
<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">安全機能</th> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">解析基準</th> <th rowspan="2">解析基準値 (MPa)</th> <th rowspan="2">設計温度 (°C)*1</th> <th colspan="2">解析結果(MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 水平</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td>容器本体 胴</td> <td>1.5S_m</td> <td>186 (183)*2</td> <td>120 (140)*2</td> <td>44</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>容器本体 外筒</td> <td>f_b</td> <td>156</td> <td>120</td> <td>50</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td>容器本体 一次蓋シェル部</td> <td>S_y</td> <td>185</td> <td>120</td> <td>54</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td>容器本体 一次蓋シェル部</td> <td>S_m</td> <td>36</td> <td>180</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td>バスケット</td> <td>S_m</td> <td>36</td> <td>180</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>燃料集合体</td> <td>σ_y</td> <td>595</td> <td>205</td> <td>118</td> <td>118</td> </tr> </table> <p>*1 : SAR ロ章 B 一般熱的試験の除熱解析結果から設定した値 *2 : 頭部垂直及び水平は胴側部の値。底部垂直は胴底板の値(()内の値) *3 : 0.3m 頭部垂直落下の結果に包絡される</p>	安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)		0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	120	54	37	容器本体 一次蓋シェル部	S _m	36	180	7	7	臨界	バスケット	S _m	36	180	7	7	燃料集合体	σ _y	595	205	118	118	<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">安全機能</th> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">解析基準</th> <th rowspan="2">解析基準値 (MPa)</th> <th rowspan="2">設計温度 (°C)*1</th> <th colspan="2">解析結果(MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 水平</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td>容器本体 胴</td> <td>1.5S_m</td> <td>186 (183)*2</td> <td>120 (140)*2</td> <td>44</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>容器本体 外筒</td> <td>f_b</td> <td>156</td> <td>120</td> <td>50</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td>容器本体 一次蓋シェル部</td> <td>S_y</td> <td>185</td> <td>120</td> <td>54</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td>容器本体 一次蓋シェル部</td> <td>S_m</td> <td>36</td> <td>180</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td>バスケット</td> <td>S_m</td> <td>36</td> <td>180</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>燃料集合体</td> <td>σ_y</td> <td>589</td> <td>215</td> <td>105</td> <td>105</td> </tr> </table> <p>*1 : SAR ロ章 B 一般熱的試験の除熱解析結果から設定した値 *2 : 頭部垂直及び水平は胴側部の値。底部垂直は胴底板の値(()内の値) *3 : 0.3m 頭部垂直落下の結果に包絡される</p>	安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)		0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	120	54	37	容器本体 一次蓋シェル部	S _m	36	180	7	7	臨界	バスケット	S _m	36	180	7	7	燃料集合体	σ _y	589	215	105	105
安全機能						項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1		解析結果(MPa)																																																																																						
	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平																																																																																															
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32																																																																																											
	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36																																																																																											
閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	120	54	37																																																																																											
	容器本体 一次蓋シェル部	S _m	36	180	7	7																																																																																											
臨界	バスケット	S _m	36	180	7	7																																																																																											
	燃料集合体	σ _y	595	205	118	118																																																																																											
安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)																																																																																												
					0.3m 頭部垂直	0.3m 水平																																																																																											
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32																																																																																											
	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36																																																																																											
閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	120	54	37																																																																																											
	容器本体 一次蓋シェル部	S _m	36	180	7	7																																																																																											
臨界	バスケット	S _m	36	180	7	7																																																																																											
	燃料集合体	σ _y	589	215	105	105																																																																																											
<table border="1"> <tr> <th>安全機能</th> <th>部位</th> <th>最高温度算出時間(h)</th> <th>温度 (°C)</th> <th>基準値 (°C)</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td>胴</td> <td>0.508</td> <td>249</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽材</td> <td>0.502</td> <td>687</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td>一次蓋金属カセット</td> <td>20.8</td> <td>136</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>バスケット</td> <td>22.8</td> <td>209</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>24.8</td> <td>241</td> <td>275**</td> </tr> </table> <p>* 一般の試験条件基準</p>	安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)	遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350	中性子遮蔽材	0.502	687	180	閉じ込め	一次蓋金属カセット	20.8	136	190	バスケット	22.8	209	250	臨界	燃料集合体	24.8	241	275**	<table border="1"> <tr> <th>安全機能</th> <th>部位</th> <th>最高温度算出時間(h)</th> <th>温度 (°C)</th> <th>基準値 (°C)</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td>胴</td> <td>0.524</td> <td>224</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽材</td> <td>0.502</td> <td>701</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td>一次蓋金属カセット</td> <td>19.1</td> <td>137</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>バスケット</td> <td>22.1</td> <td>218</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>25.1</td> <td>254</td> <td>275**</td> </tr> </table> <p>* 一般の試験条件基準</p>	安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)	遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350	中性子遮蔽材	0.502	701	180	閉じ込め	一次蓋金属カセット	19.1	137	190	バスケット	22.1	218	250	臨界	燃料集合体	25.1	254	275**																																								
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)																																																																																													
遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350																																																																																													
	中性子遮蔽材	0.502	687	180																																																																																													
閉じ込め	一次蓋金属カセット	20.8	136	190																																																																																													
	バスケット	22.8	209	250																																																																																													
臨界	燃料集合体	24.8	241	275**																																																																																													
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)																																																																																													
遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350																																																																																													
	中性子遮蔽材	0.502	701	180																																																																																													
閉じ込め	一次蓋金属カセット	19.1	137	190																																																																																													
	バスケット	22.1	218	250																																																																																													
臨界	燃料集合体	25.1	254	275**																																																																																													
構造解析 (一般の試験条件)	熱解析 (特別の試験条件)																																																																																																

貯蔵建屋なしの場合の外部事象による乾式キャスクの安全機能への影響

1. 伊方発電所において想定される自然現象及び人為事象の選定結果

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

(自然現象：12 事象)

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

(人為事象：7 事象)

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

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

2. 外部事象による乾式キャスクに対する影響評価について

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

第1表 外部事象による乾式キヤスクに対する影響評価結果

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

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

※ 森林火災、爆発及び近隣工場等の火災をまとめて「外部火災」とする。

伊方発電所 3 号炉
使用済燃料乾式貯蔵施設設置に伴う
敷地境界線量の影響評価について

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵施設（以下「乾式貯蔵施設」という。）の設置に伴う、伊方発電所敷地境界における通常貯蔵時の線量については、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）に基づき、乾式キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう線源強度を規格化したソースタームを用いて評価を行っている。

現在、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「乾式貯蔵建屋」という。）による遮蔽により、年間 $50 \mu\text{Sv}$ 以下を満足する設計としているが、今回、乾式貯蔵建屋がない条件で、線源強度等の評価条件を現実的に見直した場合の敷地境界線量を評価した。

なお、評価にあたって、乾式貯蔵建屋なしの条件下では、既設建屋に比べて乾式貯蔵施設からの寄与が大きいため、伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点（B点）を評価対象とした。

2. 評価方法

敷地境界線量は、乾式キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率をもとに、遮蔽解析コードを用いて評価地点での線量を評価している。

具体的には、乾式キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率について、申請評価においては、審査ガイドに基づき、 $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう規格化しているが、現実的な評価（影響評価）では、燃料収納条件をもとに、燃料の線源強度を計算後、乾式キャスク内部から、表面から1 m離れた位置の線量当量率を計算した。また、乾式キャスク基数は45基として評価を行った。

評価地点までの遮蔽計算については、乾式キャスク1基分による線量を算定後、評価地点に寄与する乾式キャスクの数量を乗じることにより評価した。影響評価にあたっては、寄与する乾式キャスクの数量を最大配置可能な数量にした。

遮蔽計算に使用した評価モデルを図1～図3に示す。

3. 評価条件

ガンマ線及び中性子線各々に対する、評価パラメータの条件設定と申請評価ベースに対する影響比を表1、2に示す。

ここで、影響評価として実施する現実的な評価の評価条件設定の考え方を示す。

(1) 乾式キャスク型式

乾式キャスク型式は、申請している MSF-24P と MSF-32P のうち、外面の線量率が大きい MSF-24P を代表とし選定する。

なお、線源として MSF-24P を代表として評価するため、今後別型式の乾式キャスクを採用する場合には、外面の線量率が異なることで、影響評価結果を超える可能性がある。

(2) 線源強度・スペクトル・自己遮蔽

乾式キャスク外面の線量率は、乾式キャスクの外面部位ごとに中性子線及びガンマ線の内訳が異なることから、乾式キャスク全体に占める割合が最も大きい部位であり、中性子線とガンマ線の合計値が最も大きくなる側部中央の値を代表とするとともに、当該部位のスペクトルを用いる。ここで、乾式キャスク外面の線量当量率やスペクトルについては、乾式キャスクの自己遮蔽を考慮して得られた評価値であるため、これらを設定することで自己遮蔽効果は現実的な効果として考慮済みである。

(3) 相互遮蔽

相互遮蔽効果（他の乾式キャスクが遮蔽体として寄与する効果）を次のように設定する。

a. ガンマ線

ガンマ線については、直進性が強く、散乱減衰が大きい特徴を有することから他の乾式キャスクが遮蔽体として寄与することによる相互遮蔽が敷地境界線量に与える影響が大きい。

よって、相互遮蔽効果が最大限見込まれる条件として、評価点Bから見た最外周乾式キャスクより内側列の乾式キャスク線量が全て最外周乾式キャスクで遮蔽されるとした場合を仮定し評価（乾式キャスク6基を評価対象）する。（図5参照）

なお、現実的には内側列乾式キャスクを直視可能な評価点の相互位置関係となる場合は相互遮蔽効果が小さくなること、上方等の隣接する乾式キャスクとの相互遮蔽が期待できない方向への線量については、相互遮蔽効果は期待できないことを考慮すると、実際の敷地境界評価点の評価値が影響評価結果を超える可能性がある。

b. 中性子線

中性子線については、ガンマ線に比べ、直進性が低く回り込みやすい性状のため、他の乾式キャスクによって十分に遮蔽されず、評価点Bに到達しやすいことから、隣接する他の乾式キャスクによる相互遮蔽による低減効果は小さい。

表1 主要な評価条件とその影響比（ガンマ線）

項目	申請評価ベース	現実的な評価	影響比	
	乾式貯蔵建屋なし	乾式貯蔵建屋なし		
① 線源強度	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率をガンマ線 100 μ Sv/h で規格化	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率をガンマ線 67.7 μ Sv/h で評価 ○算定条件 型式：MSF-24P 濃縮度： <input type="text"/> 燃焼度 48 GWd/t（中央） 44 GWd/t（外周） 冷却期間 15 年 線量率：側部中央を代表（別紙 1， 2 参照）	0.68	
② スペクトル	包絡スペクトル	固有スペクトル （MSF-24P 乾式キャスクの側部中央の解析値）	0.78	
③ 自己遮蔽	考慮	考慮	-	
④ 相互遮蔽	未考慮 （キャスク 48 基分の寄与を試算） ^(注1)	最外周乾式キャスクで考慮しうる最大効果を見込んだ 6 基による寄与割合を算出（別紙 3 参照）	0.14	
⑤ 線源配置	未考慮 （建屋中心に点線源を設定）	45 基分の線源位置を個別に設定しても、平均すれば建屋中心となるため、影響は小さい。	影響小	
⑥ 周辺環境（地形）	考慮 （線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。）	考慮 （線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。）	-	
⑦ 評価コード	燃料の線源強度評価	-	ORIGEN2 コード	-
	乾式キャスク表面 1 m までの輸送評価	-	DOT コード	-
	評価点までの遮蔽評価	QAD コード	ANISN コード	②の影響比含まれる
合計	583 μ Sv/y	43 μ Sv/y	0.073	

(注1) 建屋ありの評価に合わせて 48 基とした

表2 主要な評価条件とその影響比（中性子線）

項目	申請評価ベース	現実的な評価	影響比	
	乾式貯蔵建屋なし	乾式貯蔵建屋なし		
①線源強度	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率を中性子線 100 μ Sv/h で規格化	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率を中性子 18.3 μ Sv/h で評価 ○算定条件 型式：MSF-24P 濃縮度： <input type="text"/> 燃焼度 48 GWd/t (中央) 44 GWd/t (外周) 冷却期間 15 年 線量率：側部中央を代表 (別紙 1, 2 参照)	0.18	
②スペクトル	包絡スペクトル	固有スペクトル (MSF-24P 乾式キャスクの側部中央の解析値)	0.71	
③自己遮蔽	考慮	考慮	-	
④相互遮蔽	未考慮 (乾式キャスク 48 基分の寄与を試算) (注1)	計算手法上、考慮できないものの、上方に放射される中性子が支配的となるため、影響は小さい。 評価対象を 45 基とする影響はあり。	0.94	
⑤線源配置	未考慮 (建屋中心に点線源を設定)	45 基分の線源位置を個別に設定しても、平均すれば建屋中心となるため、影響は小さい。	影響小	
⑥周辺環境 (地形)	考慮 線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。	考慮 線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。	-	
⑦評価コード	燃料の線源強度評価	-	ORIGEN2 コード	-
	乾式キャスク表面 1 m までの輸送評価	-	DOT コード	-
	評価点までの遮蔽評価	ANISN コード	ANISN コード	-
合計	1,100 μ Sv/y	135 μ Sv/y	0.12	

(注1) 建屋ありの評価に合わせて 48 基とした

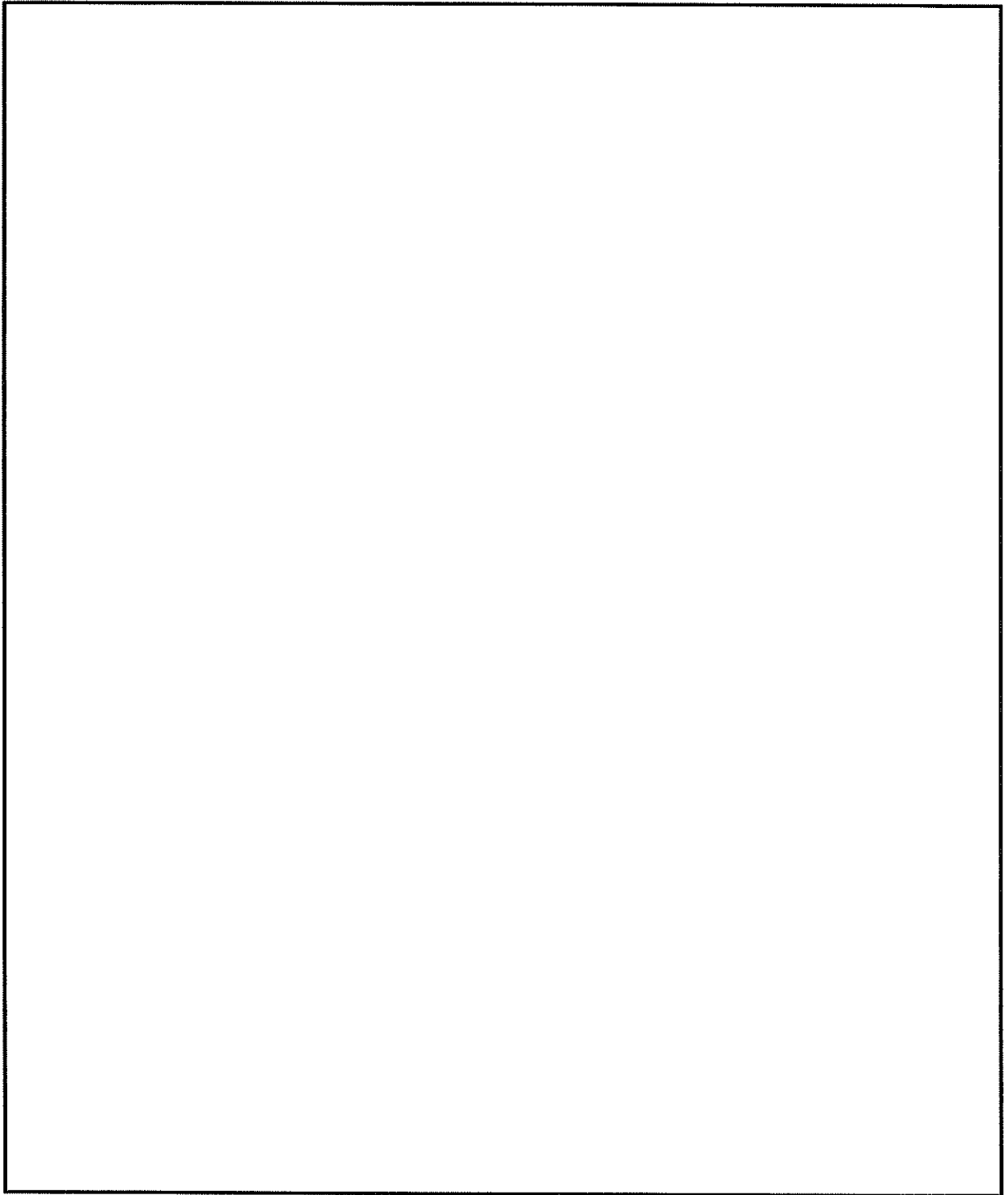
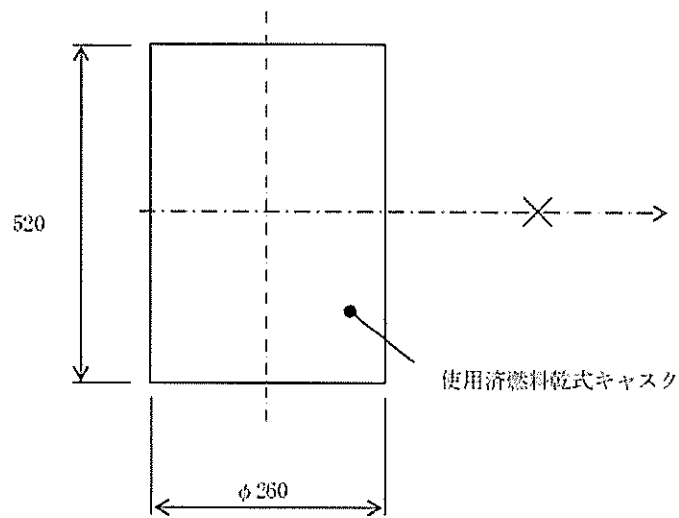


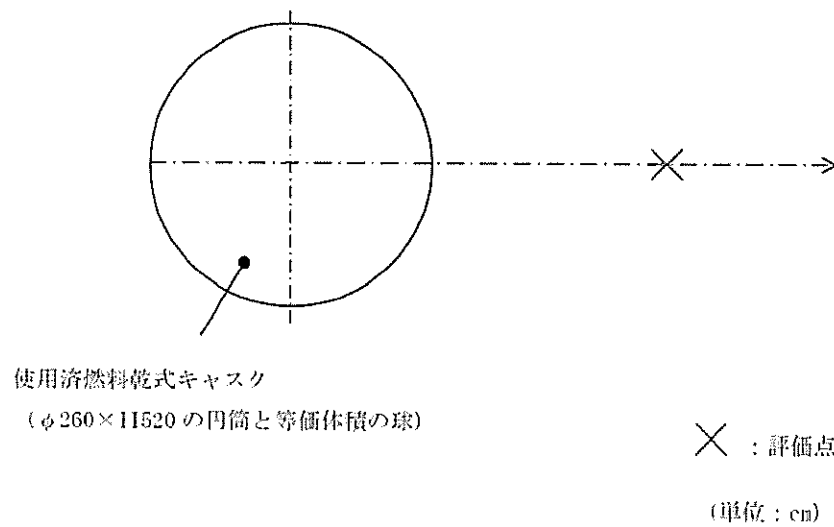
図1 乾式キャスク遮蔽評価モデル (MSF-24P)



× : 評価点

(単位: cm)

図2 敷地境界におけるガンマ線評価 (申請評価ベース)



× : 評価点

(単位: cm)

図3 敷地境界におけるガンマ線評価 (現実的な評価) および中性子評価 (申請評価ベース・現実的な評価)

4. 評価結果

3. の評価条件をもとに敷地境界線量を試算した結果を表3に示す。

表3のとおり、乾式貯蔵建屋なしで評価条件を現実的に見直した場合の敷地境界線量(試算)は、年間約190 μ Svとなり、1mSvを下回るものの、目標値となる50 μ Svを上回る結果となった。

表3 伊方発電所敷地境界の年間線量試算結果(乾式貯蔵建屋なし)

評価地点 (乾式貯蔵施設 からの距離)	年間線量(μ Sv)					
	申請評価ベース			現実的な評価 ^(注1)		
	乾式貯蔵 施設 ^(注2)	既設建屋	合算	乾式貯蔵 施設 ^(注3)	既設建屋	合算
B点 ^(注4) (420m)	約1,100	3.9	約1,110	約180	3.9	約190

(注1) 概算値のため有効数字2桁に切上げた値

(注2) 評価値の大きい中性子100%の評価結果で代表

(注3) ガンマ線43 μ Sv+中性子線135 μ Sv=約180 μ Sv

(注4) 伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点

(参考)

表4 伊方発電所敷地境界の年間線量(乾式貯蔵建屋ありの場合)

評価地点	年間線量(μ Sv)			
	乾式貯蔵建屋 ^(注1)	既設建屋	合算	目標値
A点 ^(注2)	0.16	5.1	5.2	≤50
B点	0.27	3.9	4.2	

(注1) 評価値の大きいガンマ線100%の評価結果で代表

(注2) 申請評価地点

4. まとめ

敷地境界線量の目標値である年間50 μ Svを満足するためには、乾式貯蔵建屋を設置することにより、放射線量を低減する必要がある。

また、乾式貯蔵建屋なしの場合は、図4に示すように、発電所構内で広範囲(乾式貯蔵施設から半径約80m)にわたり管理区域を設定する必要があり、作業員の被ばく線量の増加や発電所の運用に支障が生じる。

そのため、伊方発電所乾式貯蔵施設では、建屋としての遮蔽機能が必要であり、当社は乾式貯蔵建屋を設置する設計としている。

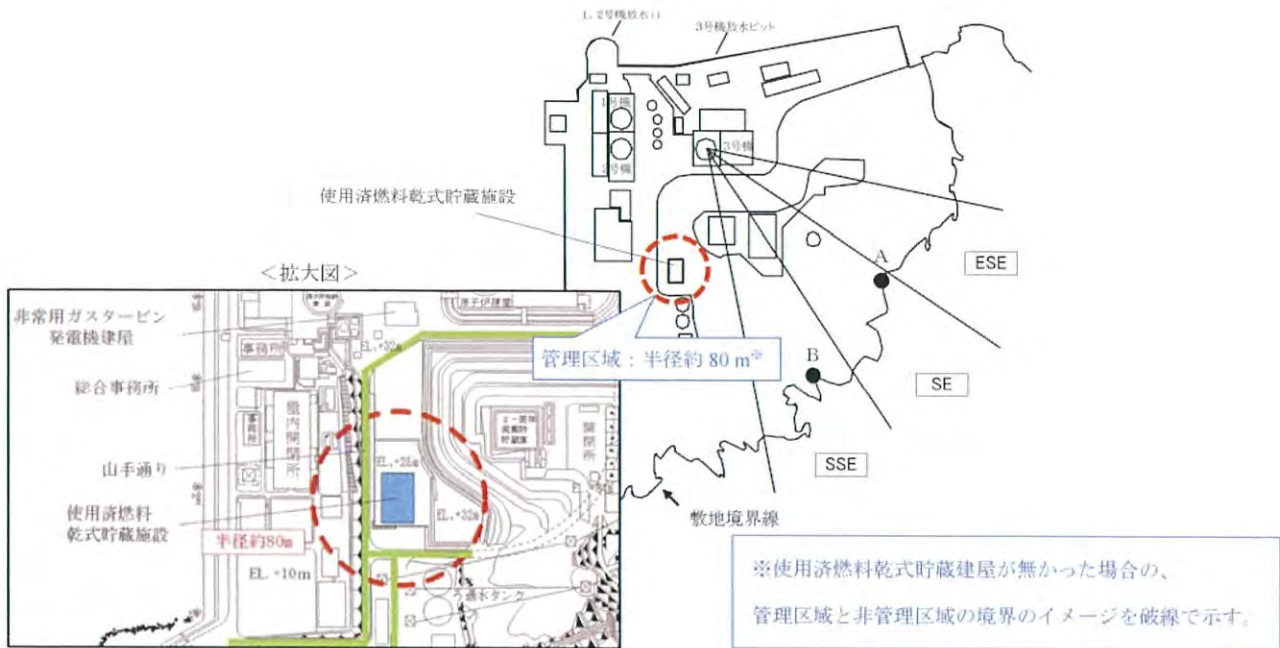


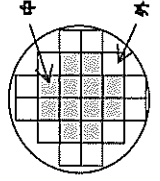
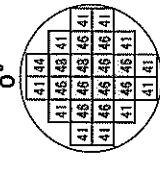
図4 乾式貯蔵施設と評価地点

以上

伊方3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

下表のとおり、各収納制限に対する解析条件の保守性にについて整理した結果、前述の「現実的な評価」結果に与える影響は小さい（以下すべてを考慮した場合でも、影響程度は約40%程度である）ことを確認した。

- ①：解析条件の簡素化のために考慮している保守性
- ②：運用上必要な保守性
- ③：設計上必要な保守性

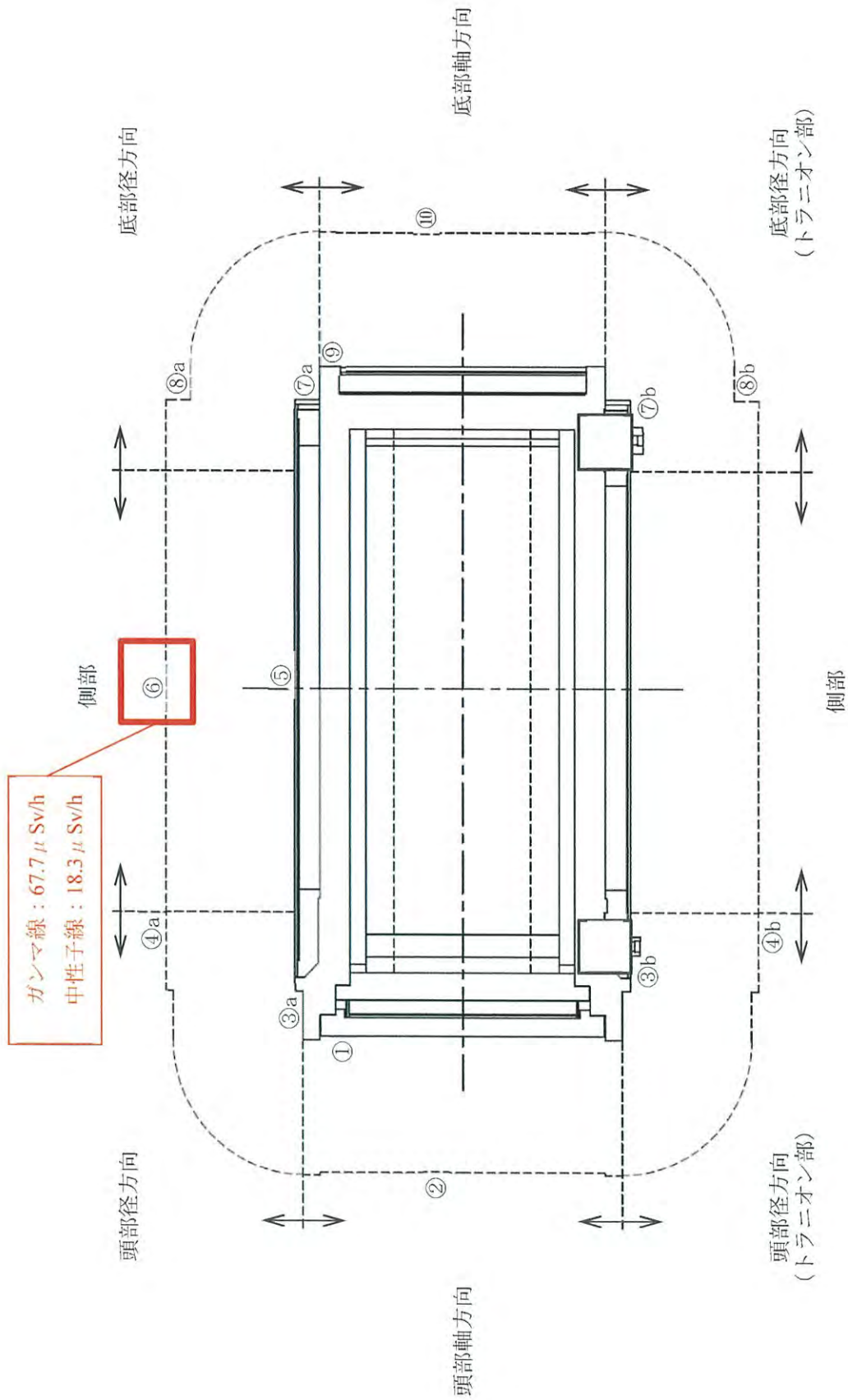
取納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納条件 配置条件		燃料スペース		解析条件		影響程度
		中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	
燃料 集合体 1体の 仕様	初期ウラン濃縮度 (wt%)	17×17型		17×17型		17×17型		濃縮度が0.05%の差異がなく、純濃縮度への影響は軽微(1%未満) ① 純濃縮度は重量に比例するため、影響は軽微(2%程度) ① 配置欄に記載のとおり 配置欄に記載のとおり 純濃縮度として考慮しており、装荷しない場合の構造材放射ガンマ線による乾式キャスク側部への影響は軽微(5%程度) ② 濃縮材として考慮していないが、遮蔽効果を考慮した場合でも影響は軽微(1%未満) ② 配置欄に記載のとおり、局所的に高くなる場合があるため、遮蔽解析では考慮していない。 実運用として乾式キャスク全体では44GWd/t以下となるよう取納するが、乾式キャスクのある方向(0°方向など)において中央部48GWd/t/外周部44GWd/t、冷却期間15年 ^{※2} の配置となる可能性があるため、解析モデル(RZ体系の二次元モデル)において中央部48GWd/t/外周部44GWd/t、冷却期間15年と設定している。③
	ウラン重量(kg)	≤4.2		17×17型		17×17型		
	最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48 ^{※1}	≤44 ^{※1}	≤48	48	44		
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17	A型: ≥15 B型: ≥17	-	15	-		
	最高燃焼度(GWd/t) SFPでの冷却期間 (年)	≤90 ≥15	- -	- -	90 15	- -		
キャスク 1基あたり	平均燃焼度(GWd/t)	≤44 ^{※1}		-		-		
配置(例)								
解析結果 ^{※3}		-		-		表面から1m: 1.83 mSv/h 表面から1m: 86 μSv/h		
判定基準		-		-		表面から1m: 2 mSv/h以下 表面から1m: 100 μSv/h以下		

※1：使用済燃料ヒット貯蔵中燃料のうち、乾式キャスク貯蔵対象燃料を効率的に収納できるような設定

※2：キャスク1基あたりの平均燃焼度を踏まえ、仮に収納燃料の燃焼度を全数44GWd/tとした場合、影響は約10%程度 ③

※3：使用済燃料貯蔵量推移イメージ(3基貯蔵/年)では貯蔵開始から15年間で45基貯蔵となるため、収納燃料の冷却期間を仮に15～30年の平均22.5年とした場合、影響は約25%程度 ②

※4：設計上必要となる公差(材料密度や部材厚さ)等に係る保守性は考慮している ③



(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、その結果が表1と対応する。

図1. 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-24P)

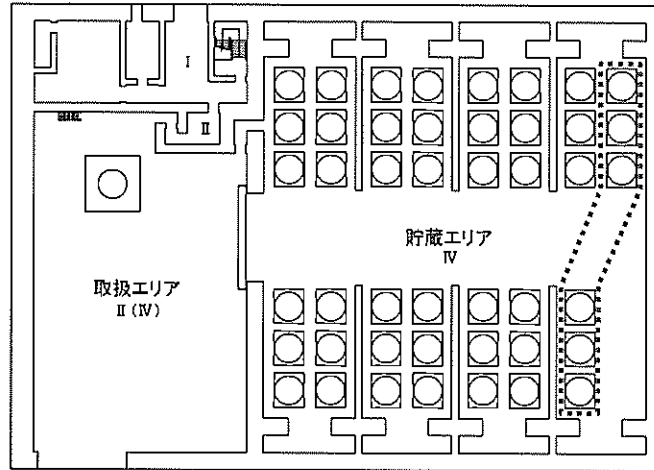
表 1. 線量当量率評価結果 (MSF-24P)

(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		⑦a	⑦b	⑨
表面	ガンマ線	<0.1	8.0	100.7	4.0	5.4	<0.1
	燃料有効部	0.4	103.0	25.9	6.6	13.4	0.3
	構造材放射化	0.8	2.3	25.7	7.4	4.8	0.9
二次ガンマ線	333.7	804.2	741.4	45.1	1807.3	1108.3	222.6
中性子線	335.0	807.7	858.1	197.4	1825.3	1131.9	223.9
合計	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
評価点	0.3	22.5	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
表面から 1 m	3.5	20.1	20.9	12.5	7.4	6.1	28.8
ガンマ線	0.4	5.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6
燃料有効部	64.8	23.2	32.7	18.3	56.6	66.3	23.1
構造材放射化	69.0	71.2	81.6	86.0	76.0	83.1	60.4
二次ガンマ線							
中性子線							
合計							

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

相互遮蔽を見込む乾式キャスクについて



×
評価点

図 5 相互遮蔽を見込む乾式キャスクについて

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可
に係る詳細な確認範囲について

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る詳細な確認範囲について

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る詳細な確認範囲を明確にするため、既設建屋（燃料取扱棟）において、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）へ使用済燃料集合体を装荷する作業から、乾式キャスクを使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という。）内に貯蔵し、貯蔵後に構外輸送するまでの全体プロセスを整理した結果を表1に示す。このうち、既設建屋における使用済燃料ピットクレーン（以下、「SFP クレーン」という。）および燃料取扱棟クレーン（以下、「FH/B クレーン」という。）での新燃料（輸送容器含む）、使用済燃料、使用済燃料輸送容器および乾式キャスクの取扱いについて、下表に示す。

表 SFP クレーンおよびFH/B クレーンの取扱い設備

	SFP クレーン	FH/B クレーン
新燃料（輸送容器含む）	×	○
使用済燃料	○	×
使用済燃料輸送容器	×	○
乾式キャスク	×	○

○：取扱う、×：取扱わない

1. SFP クレーンでの取扱いについて

SFP クレーンでの使用済燃料の取扱いについては、燃料取扱設備として許可を受けている。ここで、SFP クレーンについては、今回取扱う使用済燃料が、既許可と同一であることから、既許可に包絡される。詳細は添付資料参照。

2. FH/B クレーンでの取扱いについて

FH/B クレーンについては、新燃料（輸送容器含む）を取扱うことから燃料取扱設備として許可を受けているとともに、使用済燃料輸送容器を取扱う設備としても許可を受けている。ここで、FH/B クレーンにより今回新たな乾式キャスクを取扱うこととなるが、表2に示すとおり、FH/B クレーンの容量（吊荷重）以下であることから、当該クレーンの既設設備の改造は伴わず使用することができ、既許可に包絡される。

3. 運搬モードについて

乾式キャスクの運搬モードについては、既に許可を受けている発電所内の構内輸送に用いる使用済燃料輸送容器と同様であり、乾式キャスクについては「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」で要求される事項を満足することを核燃料輸送物設計承認申請において説明している。なお、核燃料輸送物設計承認申請では、乾式キャスクへの燃料装荷作業中において、乾式キャスクが冠水する際の未臨界性についても説明している。

以上のとおり、運搬モード（既設建屋における乾式キャスクの取扱いを含む）については、既許可または別途審査に包絡されることから、乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る審査においては、乾式キャスクの通常貯蔵様態（乾式貯蔵建屋内での取扱モードおよび貯蔵モード）を審査頂きたいと考えている。

以 上

表1. 乾式キヤスクのモード、運用管理及び確認範囲に関する整理表 (2/2) (参考)

場所	乾式貯蔵建屋								
	構外	構内	取扱区域			貯蔵区域			
項目	構外輸送 (岸壁→輸送先)	構内輸送 (乾式貯蔵→岸壁)	乾式キヤスク搬送	發送仕立て② (緩衝体取付・車両積付)	取扱区域内搬送 (天井クレーン搬送)	發送仕立て作業① (監視設備取外し・三次蓋取付)	取扱区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵指定位置解除 (アンカ解除)
状態	輸送状態 (緩衝体、三次蓋取付)	緩衝体、三次蓋	緩衝体	搬送台車	通常貯蔵状態				
モード	運搬モード (外運搬)	取扱モード	取扱モード	貯蔵モード					
設計	運搬モード (外運搬)	貯蔵中の兼用キヤスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キヤスクへの波及的影響なし	乾式貯蔵に係る詳細な確認範囲	貯蔵中の兼用キヤスクへの波及的影響 確認範囲				

構外搬出ルート

表2. 既設設備、使用済燃料輸送容器および乾式キャスクの仕様

既設設備		使用済燃料輸送容器 重量 (NFT-14P 型)	乾式キャスク重量		備考
名称	仕様		MSF-24P 型	MSF-32P 型	
FH/B クレーン	容量 (吊荷重) 125 (t)	約 114 (t)	約 123 (t)	約 124 (t)	乾式キャスク重量は、FH/B クレーンの容量 (吊荷重) の範囲内

乾式キャスクへの燃料装荷時想定事象と設計基準事故（燃料集合体の落下）との比較について

乾式キャスクへ使用済燃料集合体を装荷する作業時に想定される事象が、既許可の設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡されていることを示す。

乾式キャスクは、既設建屋において、使用済燃料ピット（以下、「SFP」という。）およびキャスクピットで使用済燃料集合体の装荷作業を行う。なお、当該作業には既設設備を用い、新たに追加、仕様変更等を伴う設備はない。

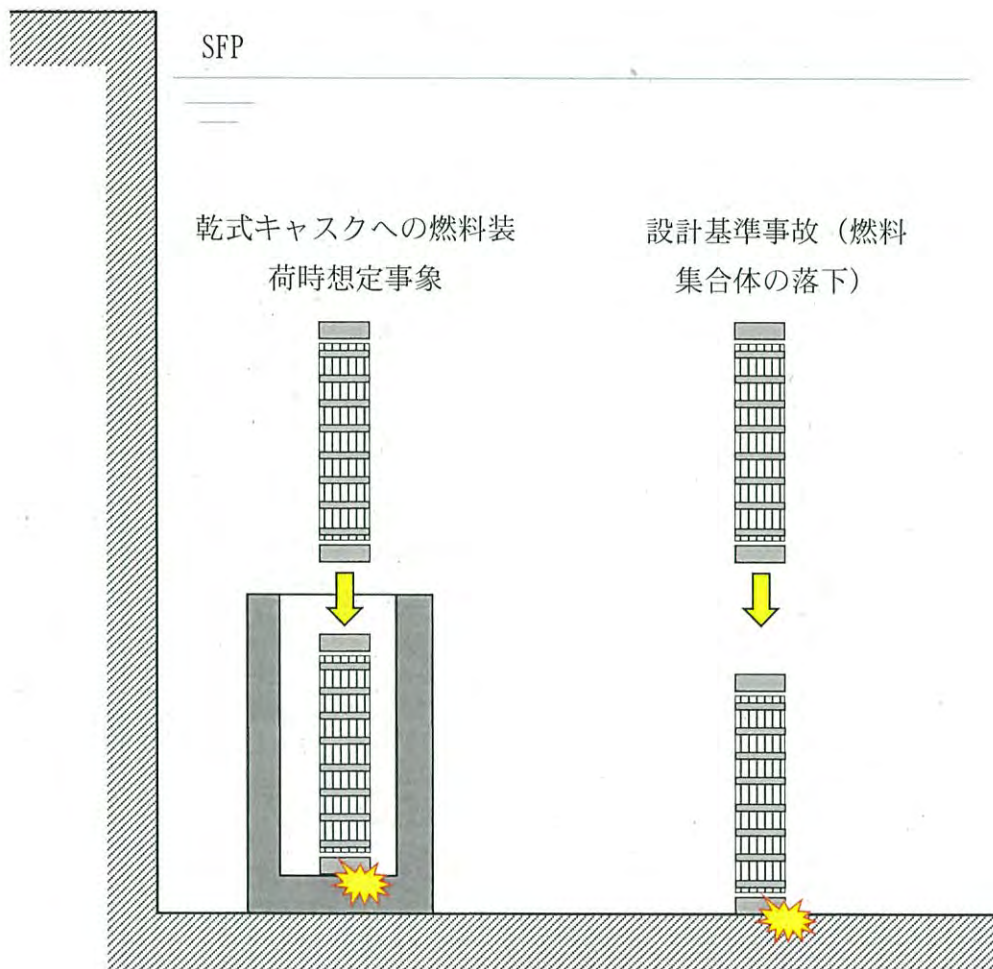
ここで、キャスクピットに据付けられた乾式キャスクに使用済燃料集合体を装荷する作業において想定される事象と、既許可において想定している事象を比較整理した結果を表1に示す。また、これらの事象について、SFPにおける燃料取扱時の高さ関係を図1に示す。

表1に示すとおり、燃料仕様、燃焼度、冷却時間（年数）および落下想定高さが、既許可の設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡されており、乾式キャスクを運用する上で既許可への影響はなく、新たに審査される項目はないことを確認した。

表1 乾式キャスクへの燃料装荷時想定事象と設計基準事故（燃料集合体の落下）との比較

			乾式キャスクへの 燃料装荷時想定事 象	設計基準事故（燃 料集合体の落下）	比較
評価条件	燃料仕様	型	17×17 型 48GWd/t	17×17 型 55GWd/t	燃料に係る評価条件は、設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡される。
		燃焼度	48GWd/t	55GWd/t	同上
		冷却時間	131,496 時間 (15 年)	100 時間	同上
	評価場所		SFP [※]	SFP [※]	—
	落下場所		乾式キャスク底部	SFP 床 [※]	落下高さは、設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡される。

※ 伊方3号炉 SFP における比較

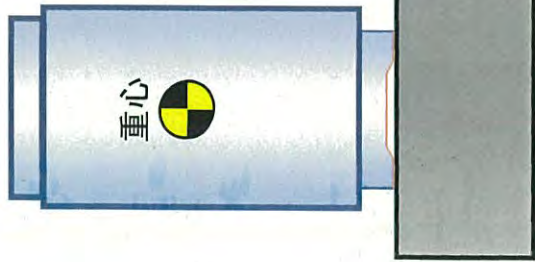


(注) 比較のため SFP とキャスクピットの区画等は省略

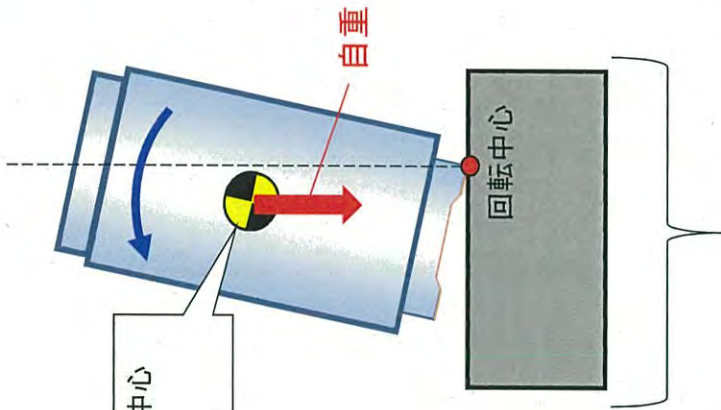
図1 SFP における燃料取扱時の高さ関係

貯蔵中の乾式キャスクの転倒防止 (エアパレット搬送時含む) について

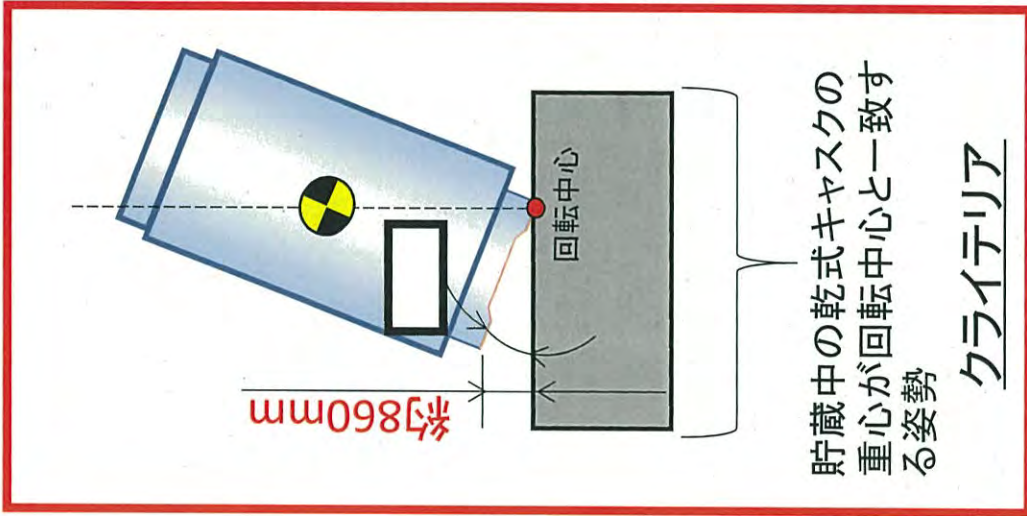
1. 貯蔵中の乾式キャスクの転倒に対するクライテリア(MSF-32P)



重心位置が回転中心位置を超えない
⇒転倒しない



自重が貯蔵中の乾式キャスクの姿勢を復元する方向に作用するため、貯蔵中の乾式キャスクは転倒しない



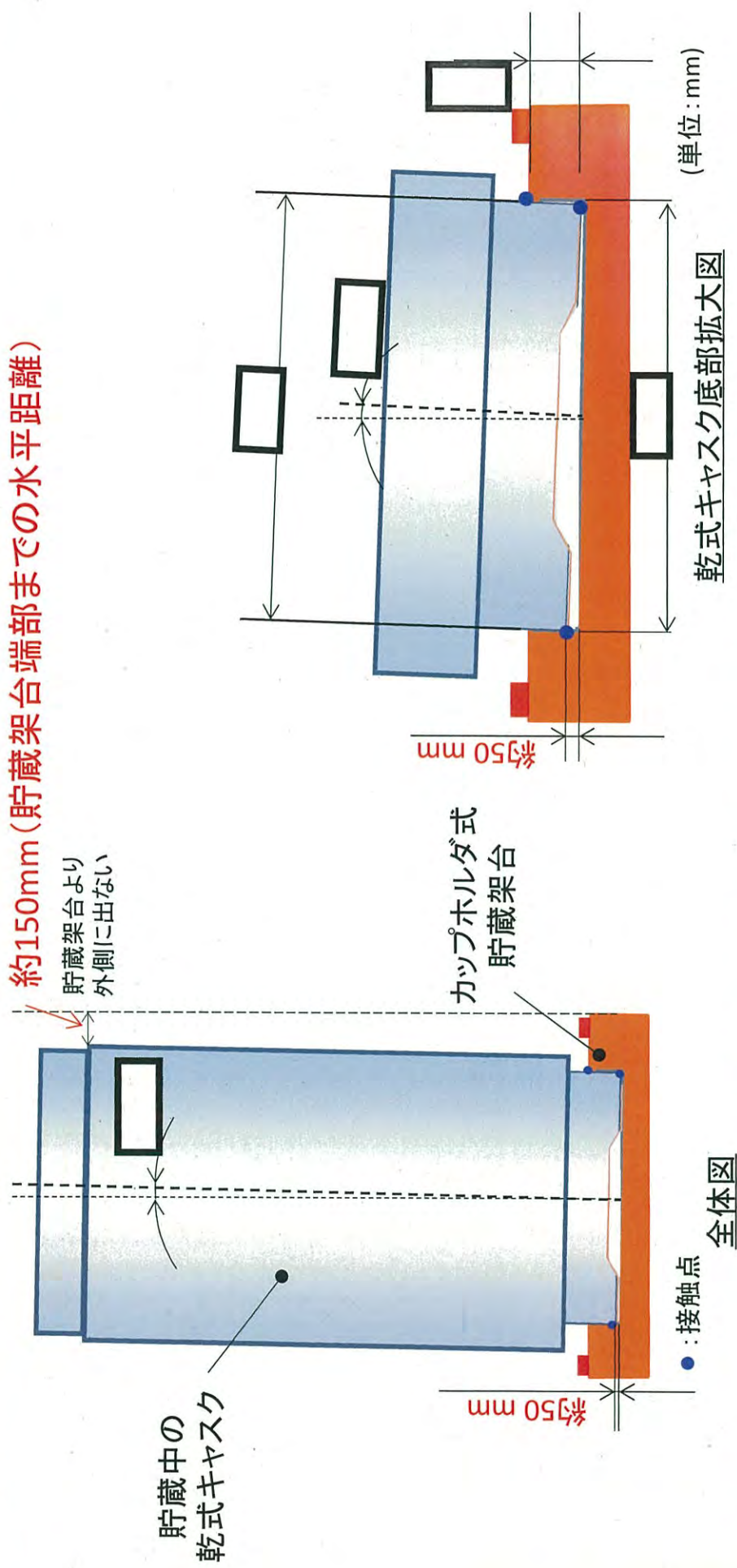
貯蔵中の乾式キャスクの重心が回転中心と一致する姿勢

クライテリア

貯蔵中の乾式キャスクは片側浮き上がり量が約860 mmとなるまで転倒しない

$$\left[\text{キャスク底面の外径} \times \sin(\text{キャスク傾き角}) = \boxed{} (\text{mm}) \times \sin(\boxed{}) \right] \approx \text{約}860 (\text{mm})$$

2. 貯蔵中の乾式キヤスク(カップホルダ式貯蔵架台設置時)の片側浮き上がり量



乾式キヤスクをカップホルダ式貯蔵架台に設置することで片側浮き上がり量を抑制

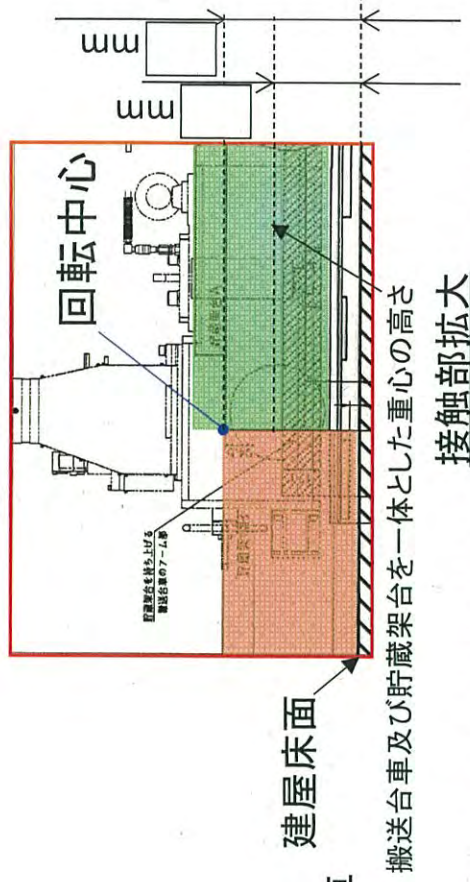
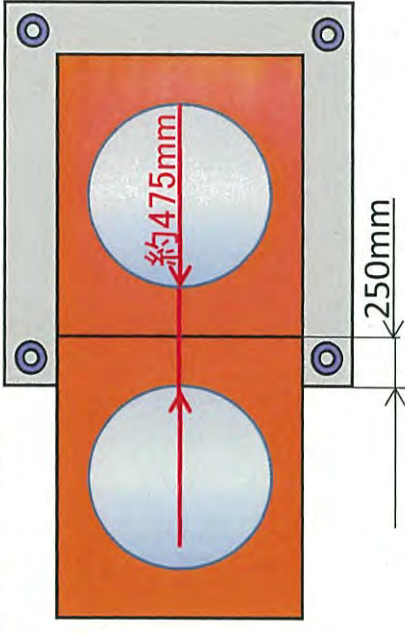
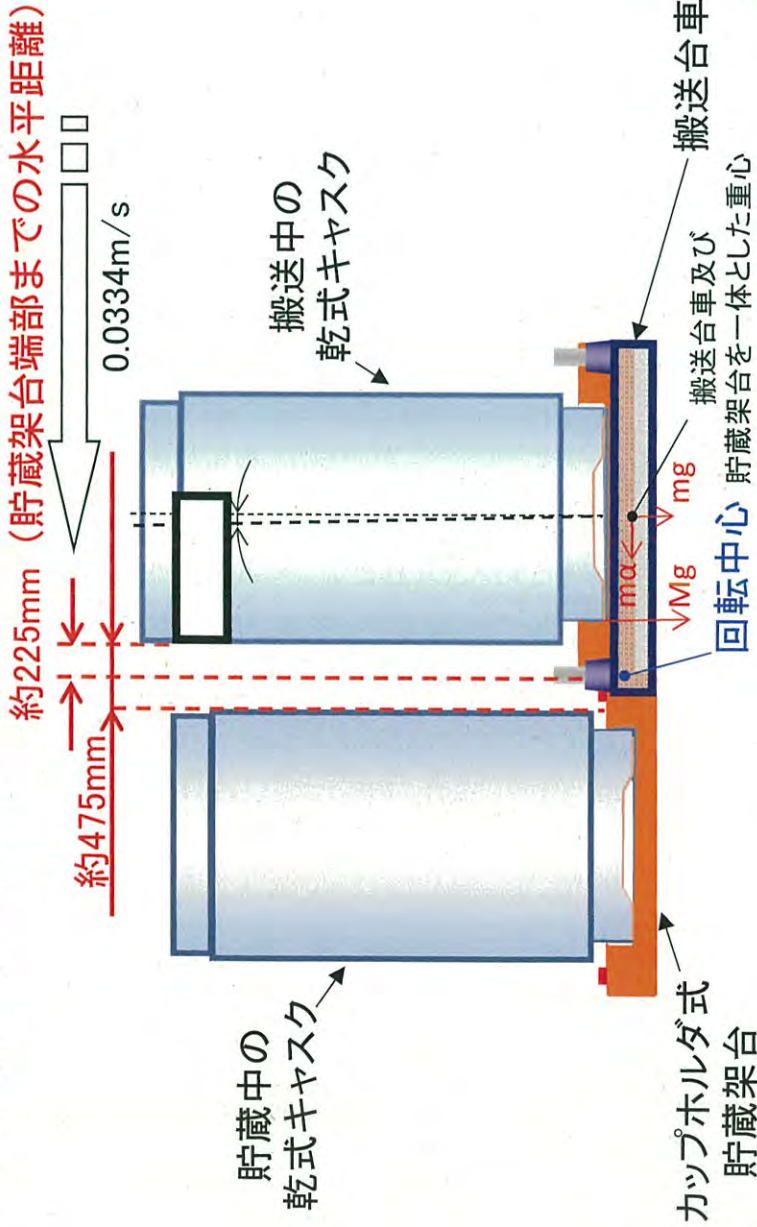
貯蔵架台設置時は、幾何学的に片側浮き上がり量を約50mmに抑制し、乾式キヤスク転倒のクライテリア(片側浮き上がり量約860mm)に対して十分裕度を有する

片側浮き上がり量 = $\square \times \sin(\square)$ (注) $\square \approx$ 約50 (mm)

(注) MSF-32Pの乾式キヤスク底面外径。

3. 貯蔵中の乾式キヤスクに対する搬送中の乾式キヤスクの衝突について

(1) 搬送中の乾式キヤスクのみ傾く場合



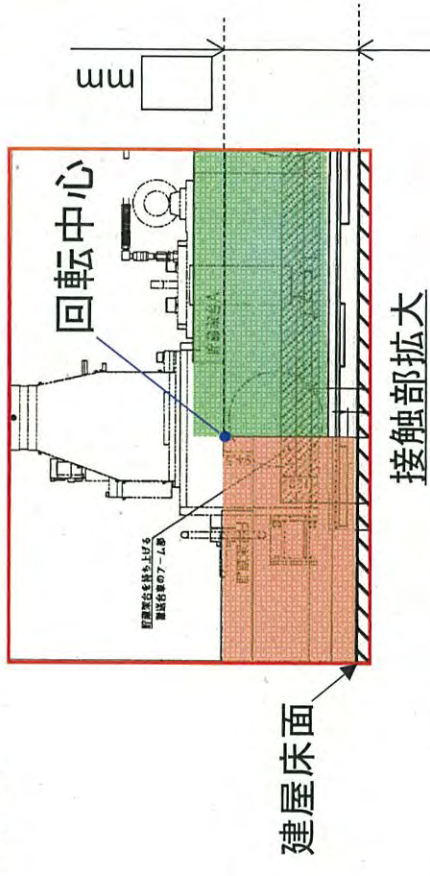
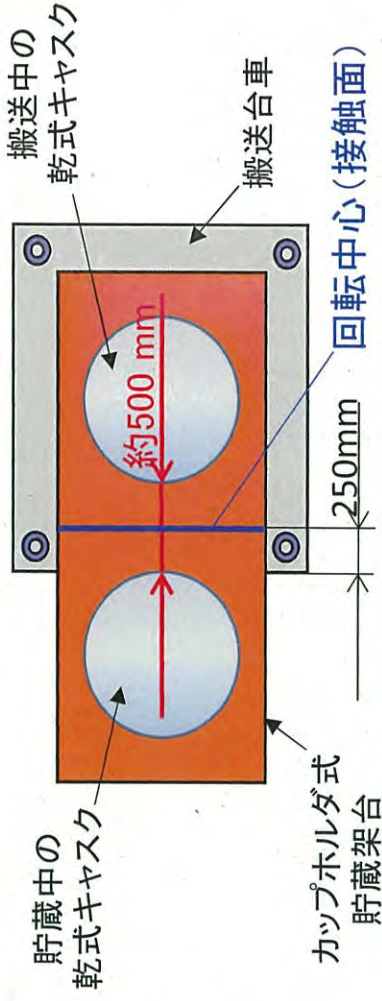
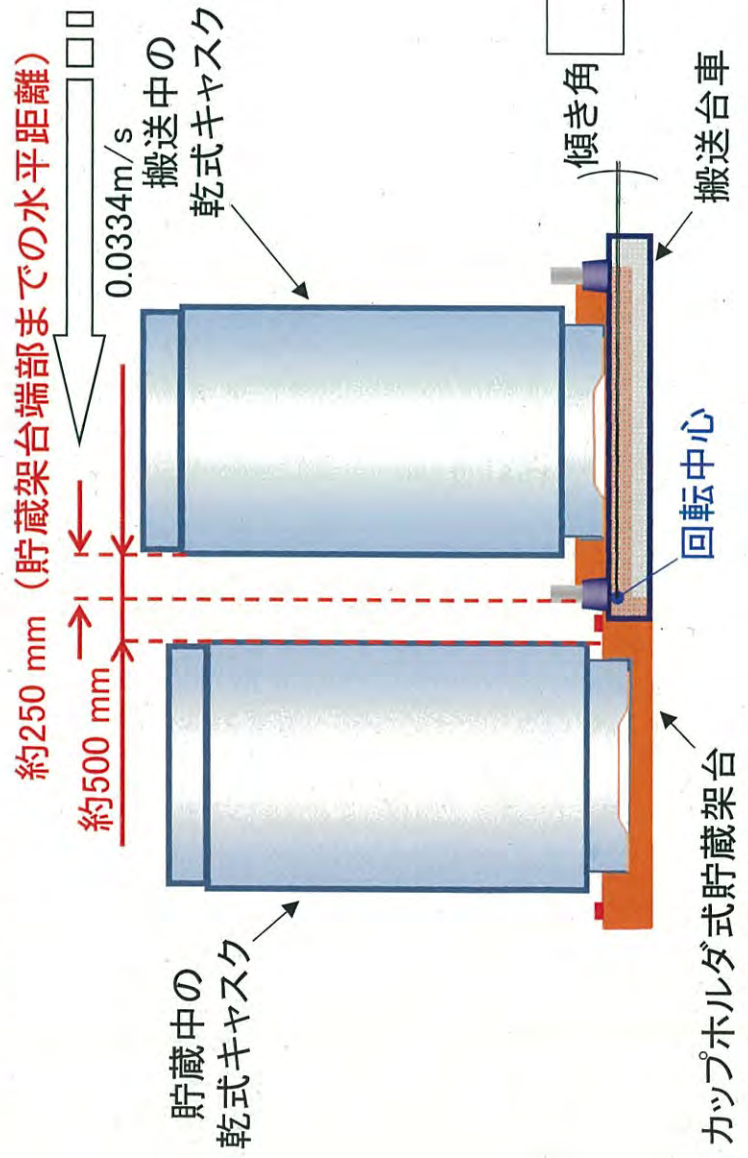
乾式キヤスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、貯蔵架台同士が衝突した場合、搬送台車及び貯蔵架台を一体とした重心が回転中心より下方にあるため、搬送中の乾式キヤスクのみが貯蔵中の乾式キヤスクの方向に傾く

貯蔵中の乾式キヤスクは搬送中の乾式キヤスクと衝突しない

- ・搬送中の乾式キヤスクが傾いても貯蔵架台より外側に出ない
- ・搬送中の乾式キヤスクが傾いても貯蔵中の乾式キヤスクとの距離(約475mm)は確保される

3. 貯蔵中の乾式キャスクに対する搬送中の乾式キャスクの衝突について

(2) 搬送台車および乾式キャスクが一体で傾く場合



乾式キャスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、貯蔵架台同士が衝突した場合、搬送中の乾式キャスクが搬送台車ごと貯蔵中の乾式キャスクの方向にわずかに傾く

貯蔵中の乾式キャスクは搬送中の乾式キャスクと衝突しない

- ・搬送中の搬送台車および乾式キャスクの傾きは非常に軽微※(傾き角が)
- ・搬送中の搬送台車および乾式キャスクが傾いても貯蔵中の乾式キャスクとの距離(約500mm)は確保される

(※: 乾式キャスクと搬送台車を一体で評価することで重心が下がり、乾式キャスク単体よりも傾きにくくなるため)

4. まとめ

	乾式キヤスクのみ	乾式キヤスクおよび 搬送台車	保守的な評価	結果
M	傾き角: <input type="text"/>	傾き角: <input type="text"/>	傾き角: <input type="text"/>	乾式キヤスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、貯蔵架台同士が衝突した場合においても、搬送中の乾式キヤスクは、幾何学的に傾き角度を制限しており、保守的に傾いたと評価しても、貯蔵架台端部から乾式キヤスクが外側に出ないため、壁および他の乾式キヤスク等へ衝突しない。
S	傾き量※1: 約25mm	傾き量※1: 約1mm	傾き量※1: <input type="text"/>	
F	片側浮き上がり量: 約20mm	片側浮き上がり量: 約1mm	約100mm	
-			片側浮き上がり量: 約50mm	
3	貯蔵架台端部までの水平距離※2: 約225mm	貯蔵架台端部までの水平距離※2,3: 約250mm	貯蔵架台端部までの水平距離※2: 約150mm	
P			約150mm	
M	傾き角: <input type="text"/>	傾き角: <input type="text"/>	傾き角: <input type="text"/>	貯蔵架台端部から乾式キヤスクが外側に出ない。
S	傾き量※1: 約30mm	傾き量※1: 約1mm	傾き量※1: <input type="text"/>	
F	片側浮き上がり量: 約20mm	片側浮き上がり量: 約1mm	約100mm	
-			片側浮き上がり量: 約50mm	
2	貯蔵架台端部までの水平距離※2: 約220mm	貯蔵架台端部までの水平距離※2,3: 約250mm	貯蔵架台端部までの水平距離※2: 約150mm	
P			約150mm	

※1 傾き量: 直立で貯蔵状態の乾式キヤスク端部から傾いた後の乾式キヤスク端部までの水平距離

※2 貯蔵架台端部までの水平距離: 乾式キヤスクの外筒端から貯蔵架台端部までの水平距離

(乾式キヤスク直立時の貯蔵架台端部までの水平距離約250mmから、傾き量を減じた値であり、この値が正であれば、貯蔵架台端部から乾式キヤスクは外側に出ない。)

※3 貯蔵架台が乾式キヤスクと一体となって傾くため、厳密には貯蔵架台端部の位置も変化しますが、傾き角が非常に軽微のため、ここでは貯蔵架台の位置が変化していないと仮定する。

解析条件等の比較

(核燃料輸送物設計承認申請／設置変更許可申請)

16 条における乾式キャスクの安全評価（遮蔽、臨界、除熱、閉じ込め）と核燃料輸送物設計承認申請における安全評価での解析条件の違いについて、MSF-24P 型の例を表 1～5 および図 1～4 に示す。

表1 線源強度計算及び崩壊熱量計算における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	ORIGEN2.2UPJ	同左	同左	同じ
燃焼度	48,000 MWd/t (中央部) 44,000 MWd/t (外周部)	同左	同左	同じ
平均比出力	38.4 MW/t	同左	同左	同じ
照射日数	1,250 日 (中央部) 1,146 日 (外周部) 2,344 日 (BP)	同左	同左	同じ
初期濃縮度		同左	同左	同じ
冷却日数	5,479 日	同左	同左	同じ
ウラン重量		同左	同左	同じ
PF	考慮	同左	同左	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

表 2 遮蔽評価における解析条件の相違

	輸送時			貯蔵時	輸送時との相違
	通常輸送時及び一般の試験条件	特別の試験条件			
解析コード	DOT3.5	同左	同左	同左	同じ
解析モデル	横置き想定 ・緩衝体：考慮（ただし、一般の試験条件下では、0.3m 落下時の変形を考慮） ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮	横置き想定 ・緩衝体：無視 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 ・外筒、側部レジンの 1m 貫通試験による貫通孔をモデル化	横置き想定 ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮	横置き想定 ・緩衝体：なし	貯蔵時は、三次蓋と緩衝体がない。
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	同左	同左	同左	同じ
密度	レジン以外：最低保証密度を使用し 使用して原子個数密度を設定 レジン：2.5%の減損を考慮（60年間の経年変化を考慮）	レジン以外：最低保証密度を使用し て原子個数密度を設定 レジン：50%の減損を考慮 （火災後の損耗を考慮）	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同じ
判定基準	通常輸送時 表面： ≤ 2000 ($\mu\text{Sv/h}$) 表面から 1 m： ≤ 100 ($\mu\text{Sv/h}$) 一般の試験条件 表面： ≤ 2000 ($\mu\text{Sv/h}$)	表面から 1 m： ≤ 10 (mSv/h)	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同じ

表3 臨界評価における解析条件の相違

解析コード	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	取扱い時	一般/特別の試験条件		
解析コード	SCALE	同左	同左	同じ
収納燃料	17×17型 (48GWd/t)	同左	同左	同じ
燃料材質	二酸化ウラン	同左	同左	同じ
被覆管材質	ジルコニウム	同左	同左	同じ
燃料密度	95 %	同左	同左	同じ
ペレット直径	0.819 cm	同左	同左	同じ
燃料有効長	364.8 cm	同左	同左	同じ
被覆管肉厚	0.057 cm	同左	同左	同じ
燃料棒数	264 本	同左	同左	同じ
初期濃縮度	wt%	同左	同左	同じ
燃料棒ピッチ	通常 (1.26 cm)	通常、1スパン拡大/縮小を考慮	同左 (取扱い時)	同じ
燃料集合体の幅	通常 (21.42 cm)	通常、1スパン拡大/縮小を考慮	同左 (取扱い時)	同じ
キャスクの配列	無限配列	同左	同左	同じ
解析モデル	BP 無視 中性子遮蔽材無視 緩衝体なし 三次蓋なし その他部位：考慮	BP 無視 中性子遮蔽材無視 緩衝体無視 (なしと同じ) 三次蓋無視 (なしと同じ) その他部位：考慮	同左 (取扱い時)	同じ
寸法公差	バスケットセルは公差考慮	同左	同左	同じ
キャビティ内条件	冠水状態：100%純水	乾燥状態：真空中に5リットルの水蒸気考慮 (浸漬時の水流入)	冠水状態：同左 (取扱い時) 乾燥状態：真空	貯蔵時は浸漬未考慮のため、乾燥状態を真空として評価
キャビティ外条件	真空	同左	同左	同じ
判定基準	実効増倍率 (+3 α 考慮) < 0.95	同左	同左	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

表4 除熱評価における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	通常時/一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	ABAQUS	同左	同左	同じ
解析モデル	<p>全体モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝体：考慮 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 <p>燃料集合体モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料被覆管：考慮 ・燃料棒同士の隙間：He 	<p>全体モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝体：考慮 (ただし、9m落下時の変形考慮) ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 	<p>全体モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮 	貯蔵時は、三次蓋と緩衝体がない
寸法公差	ノミナル寸法でモデル化	同左	同左	同じ
収納燃料の設計崩壊熱量	18.1 kW (17×17型) 表1の条件にて計算した結果から保守側に設定	同左	同左	同じ
周囲温度	38℃ (大気温度)	火災中：800℃-30分間 火災前後：38℃ (大気温度)	50℃ (建屋内周囲温度)	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
自然対流	横置き状態	同左	縦置き状態	貯蔵時は、縦置き状態の条件で評価。
ふく射	全表面を考慮 基準温度：38℃	全表面を考慮 基準温度：800℃ (火災中) ：38℃ (火災前後)	建屋の天井と床面へのふく射を考慮	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
太陽熱	通常時：考慮しない 一般：考慮	考慮	同左 (通常時)	同じ
判定基準	<p>バスケット：250℃</p> <p>燃料集合体：275℃</p> <p>レジン：149℃</p> <p>金属ガスケット：130℃</p> <p>近接表面：85℃ (通常時)</p> <p>要求なし (一般)</p>	<p>バスケット：同左</p> <p>燃料集合体：-</p> <p>レジン：180℃</p> <p>金属ガスケット：190℃</p> <p>近接表面：要求なし</p>	同左 (一般)	同じ

※：MSF-24P型の例で記載

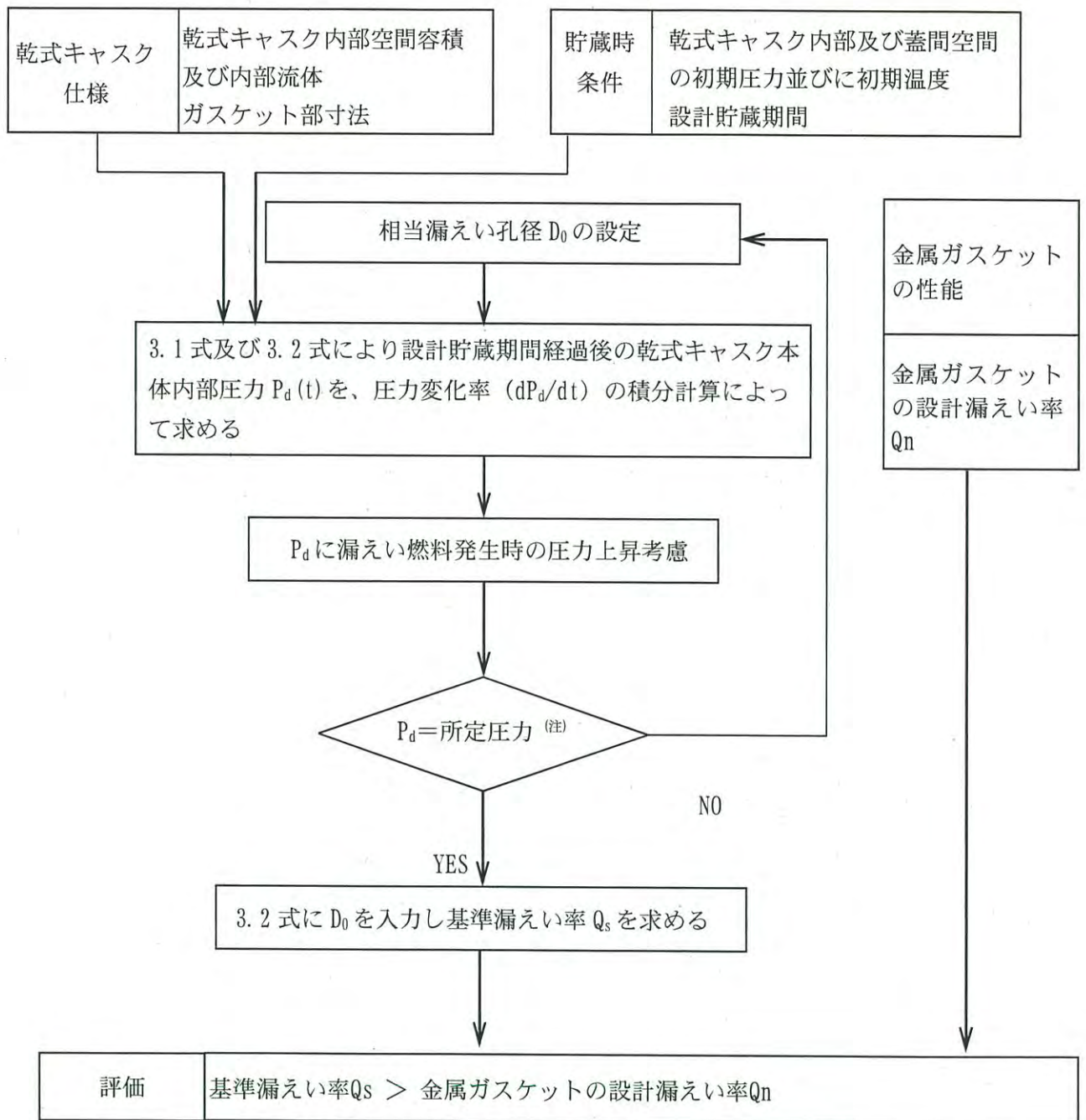
表 5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (1/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
評価方法	キャビティ内の核分裂性ガス (^3H , ^{85}KR) が大気に漏えいする計算を行い、放射性物質の漏えい率が判定基準以下であることを確認。(一次蓋-二次蓋間は正圧、キャビティ内は負圧であり、キャビティ内ガスが大気に漏えいすることはないが、仮に、一次蓋及び二次蓋を無視し、キャビティ内圧が正圧になると想定し評価を実施)	同左	一次蓋-二次蓋間に充填された He ガスがキャビティ内に漏えいする計算を行い、キャビティ内圧が負圧 (0.097 MPa 以下) を維持できる基準漏えい率を計算。また、使用する金属ガスケットの性能が上記漏えい率以下であることを確認。	貯蔵時の閉じ込め境界は一次蓋の金属ガスケット、輸送時の閉じ込め境界は三次蓋のゴム O リングとしている。
評価フロー	図 5-3 及び図 5-4 参照		図 5-1 及び図 5-2 参照	
評価式	クヌッセンの式 ボイル・シャルルの式	同左	同左	同じ
閉じ込め境界	三次蓋 (ゴム O リング)	同左	一次蓋 (金属ガスケット)	評価方法の欄参照。

表 5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (2/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
燃料破損率	0.1 %	100 %	同左 (一般の試験条件)	同じ
圧力 条件	0.105 MPa (キャビティ内圧)	0.330 MPa (キャビティ内圧)	0.41 MPa (一次蓋-二次蓋間圧力)	評価方法の欄参照。
	0.097 MPa (大気圧)	同左	0.08 MPa (キャビティ内圧)	評価方法の欄参照。
漏えい気体	He ガス 分子量：4.002602 g/mol	同左	同左	同じ
気体定数	8.3144598 J/(mol・K)	同左	同左	同じ
漏えい気体 の温度	100℃ (三次蓋0リング部温度)	195℃ (三次蓋0リング部温度)	-25℃ (外気の最低温度)	貯蔵時の周囲温度を考慮。
判定基準	放射性物質の漏えい率 <A2 値×10 ⁻⁶ /h	放射性物質の漏えい率 <A2 値/week	金属ガスケットの設計漏えい率 <基準漏えい率	貯蔵時は基準漏えい率と金属ガスケットの性能 (設計漏えい率) を比較。 (評価方法の欄参照)

※：MSF-24P 型の例で記載



(注) 所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 Pa とする。

図 5-1 基準漏えい率の計算フロー図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

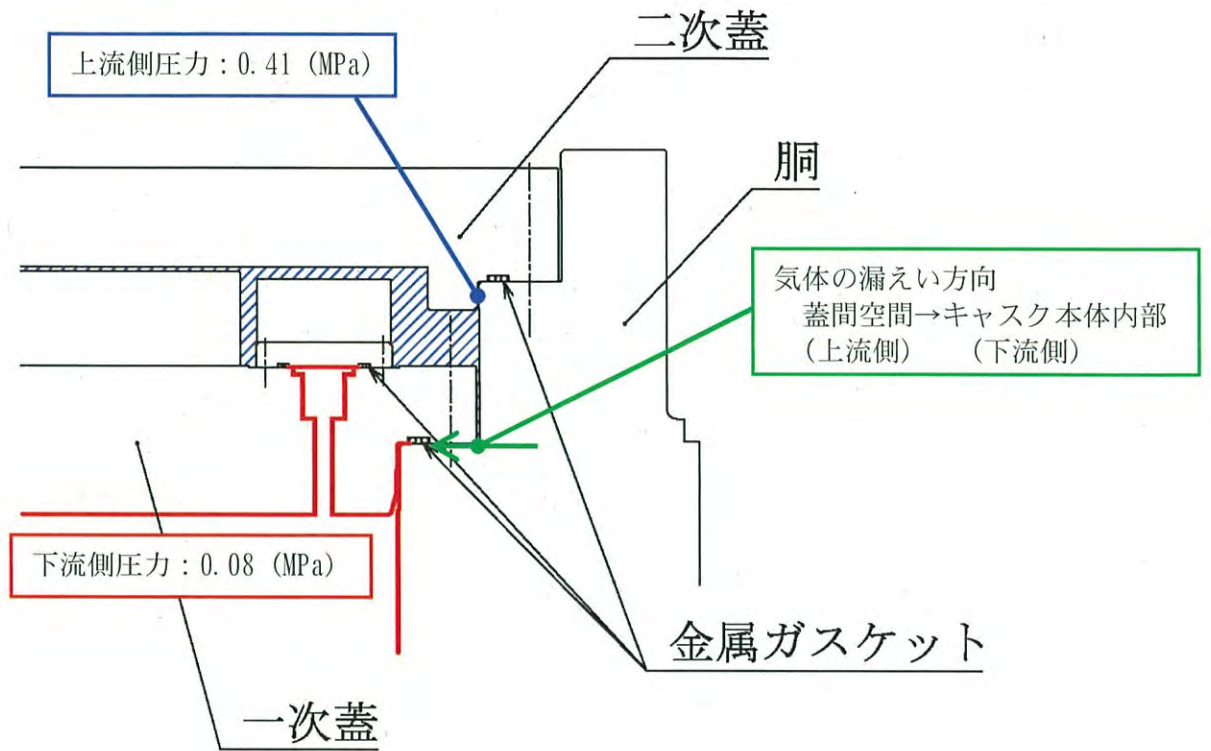


図 5-2 閉じ込め評価に係る構造図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

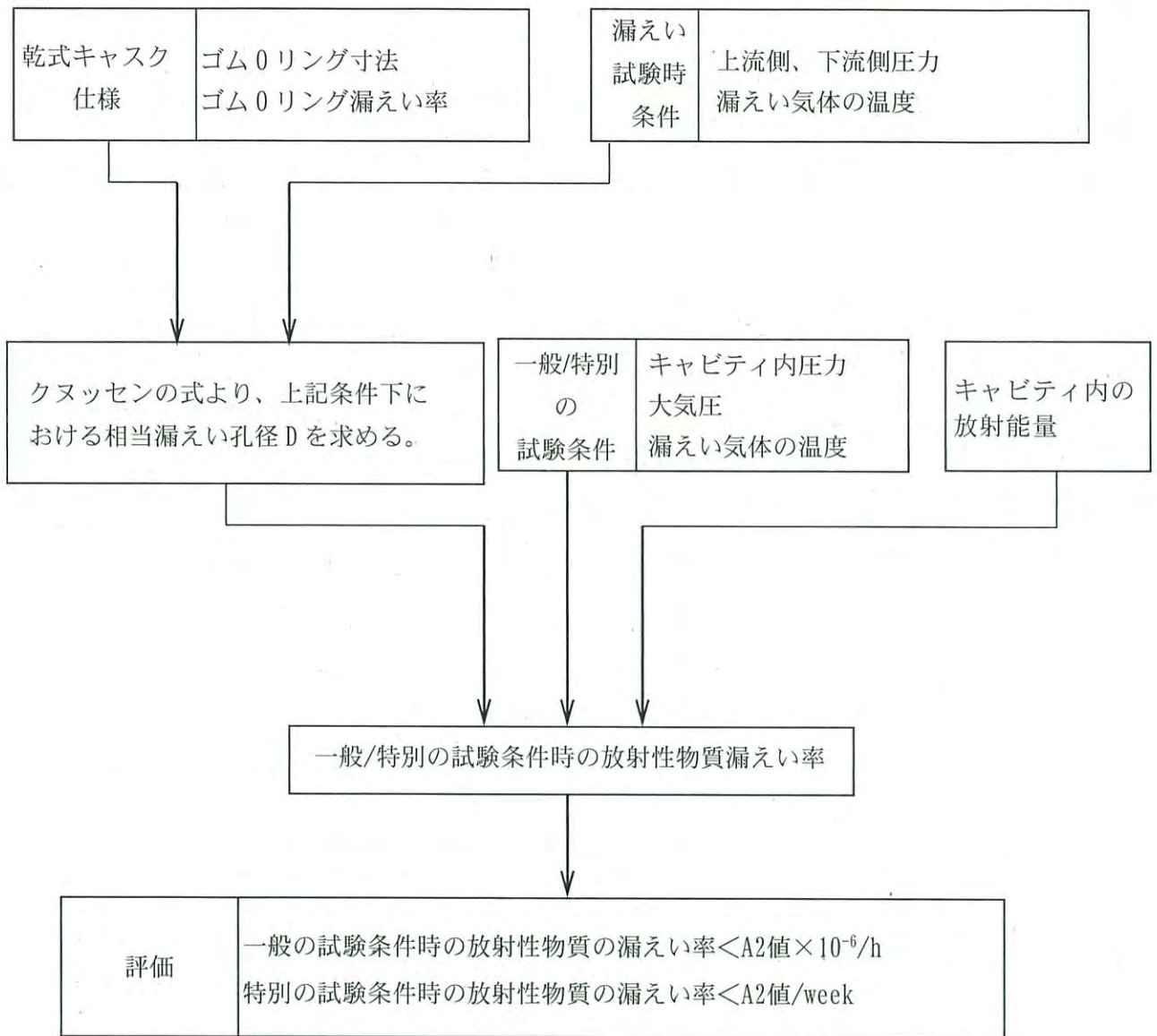
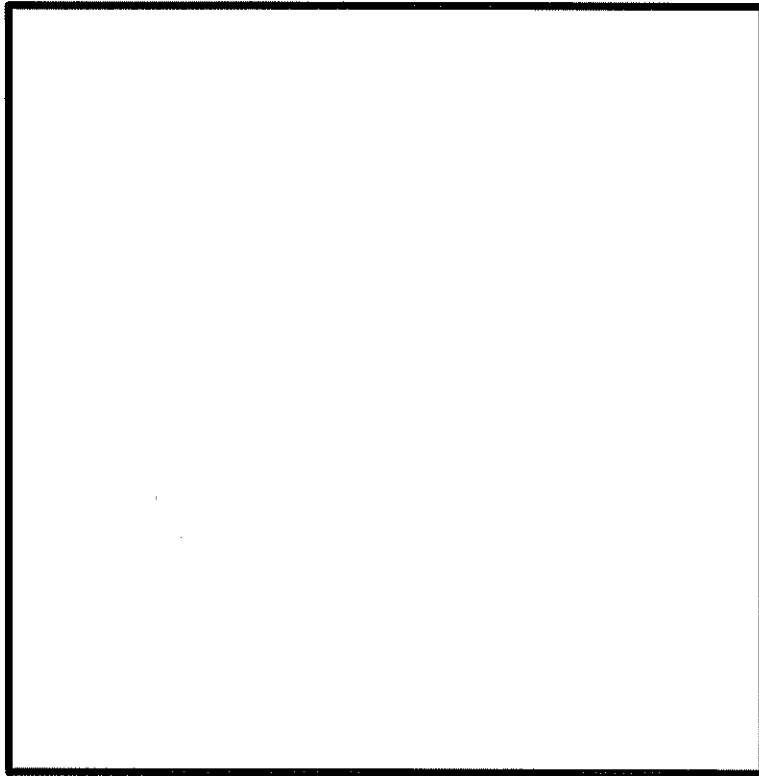
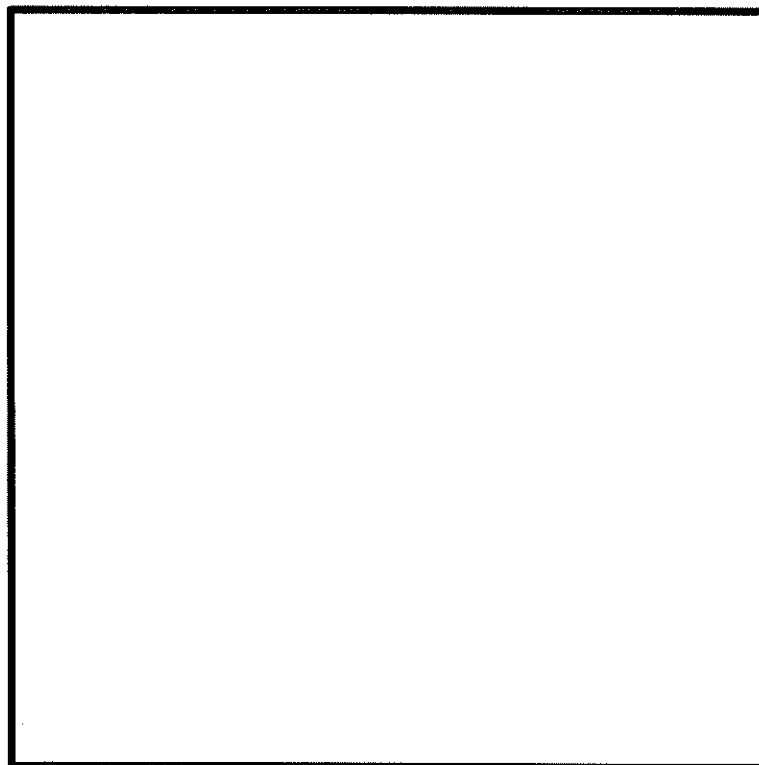


図 5-3 放射性物質の漏えい率の計算フロー図（輸送時の閉じ込め計算）



(a) 一般の試験条件



(b) 特別の試験条件

図 5-4 閉じ込め評価に係る構造図（輸送時の閉じ込め計算）