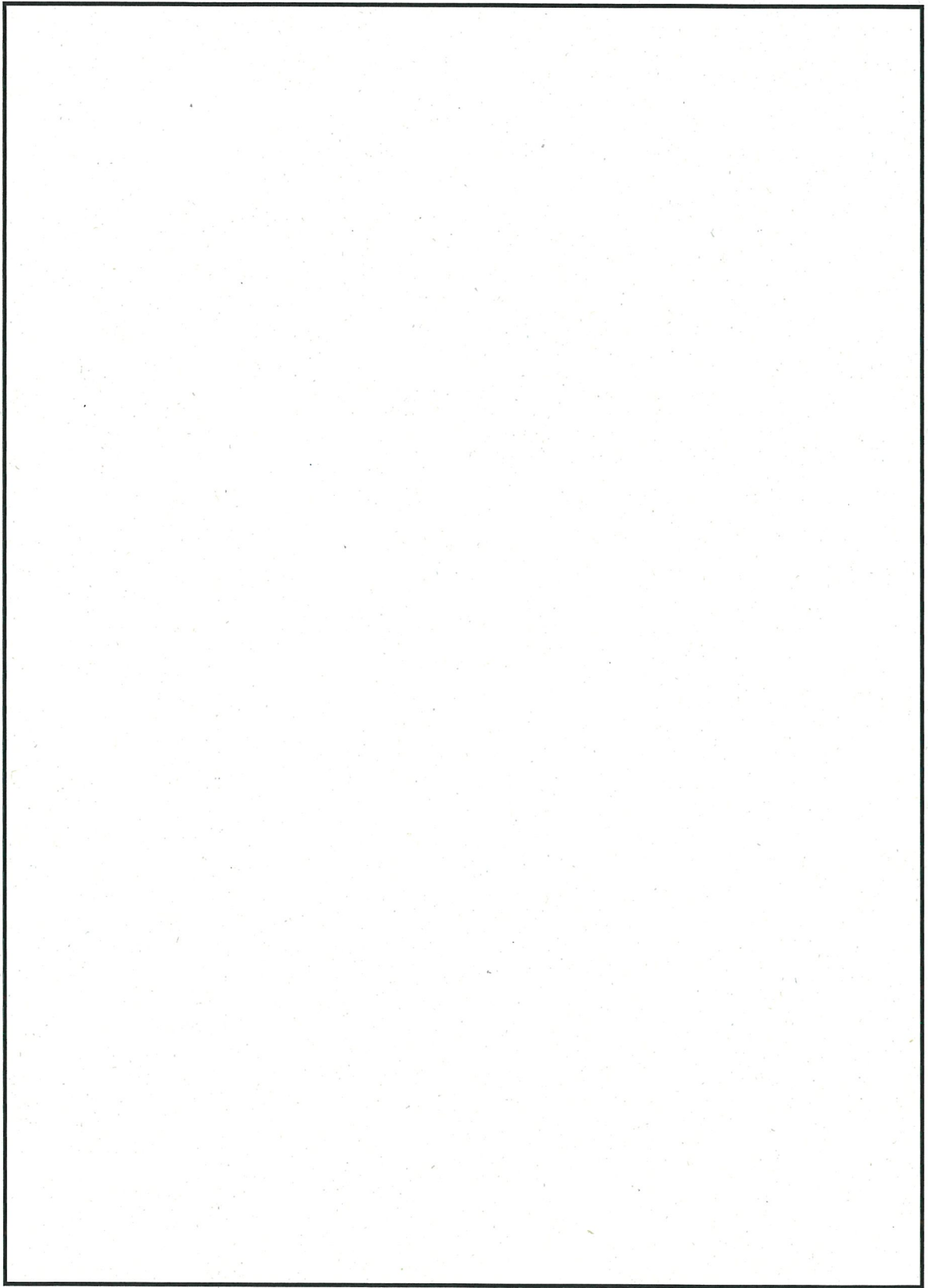
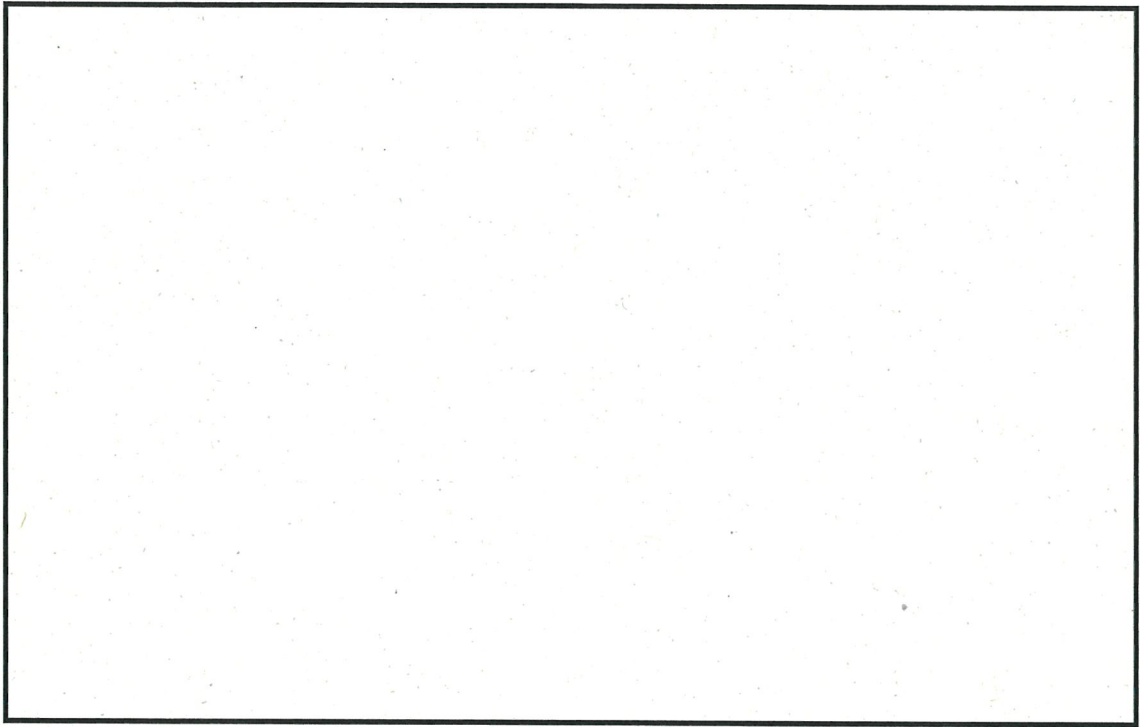


第 2.5.4-3 図 MSF-24P 型全体モデル形状図（縦断面図）



第 2.5.4-4 図 MSF-24P 型全体モデル形状図（横断面図）

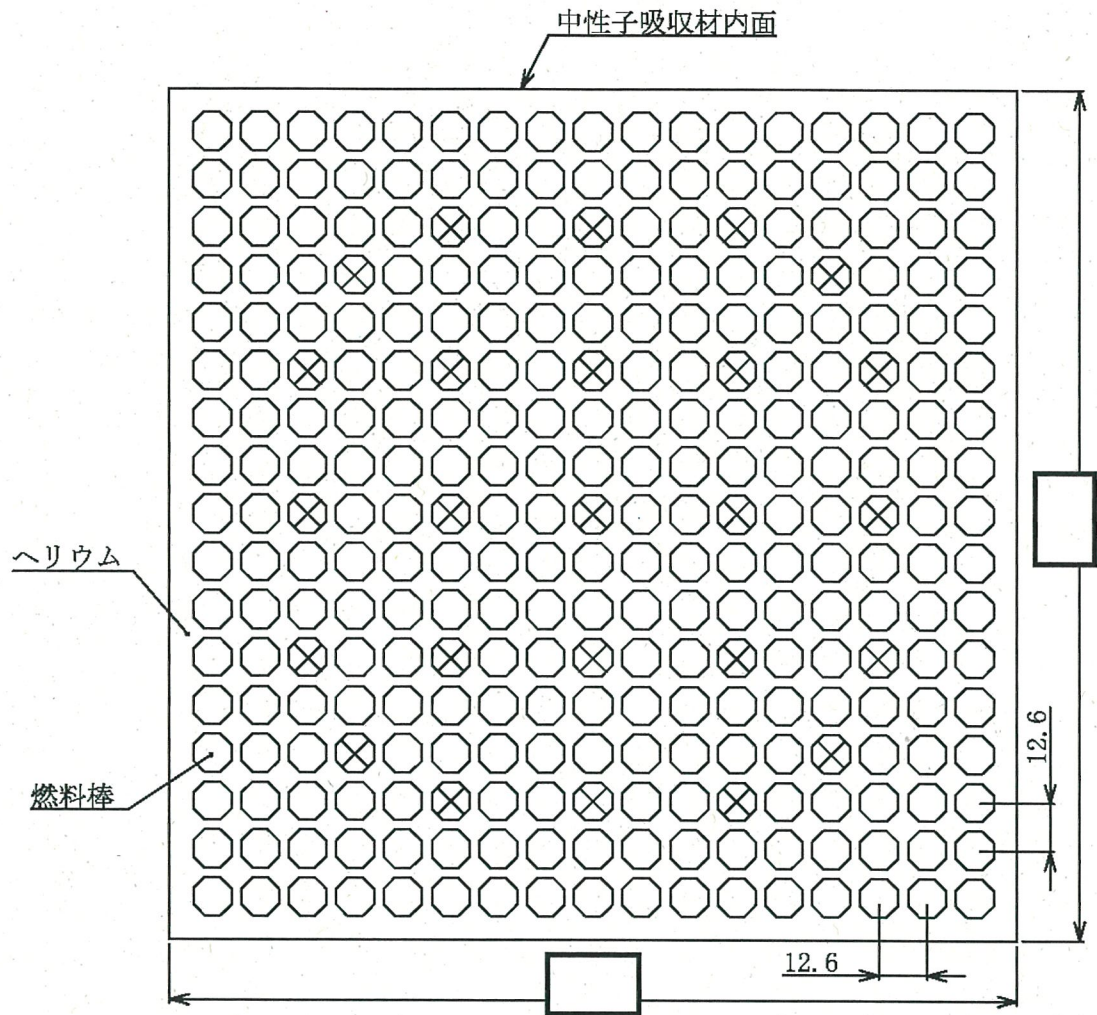


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

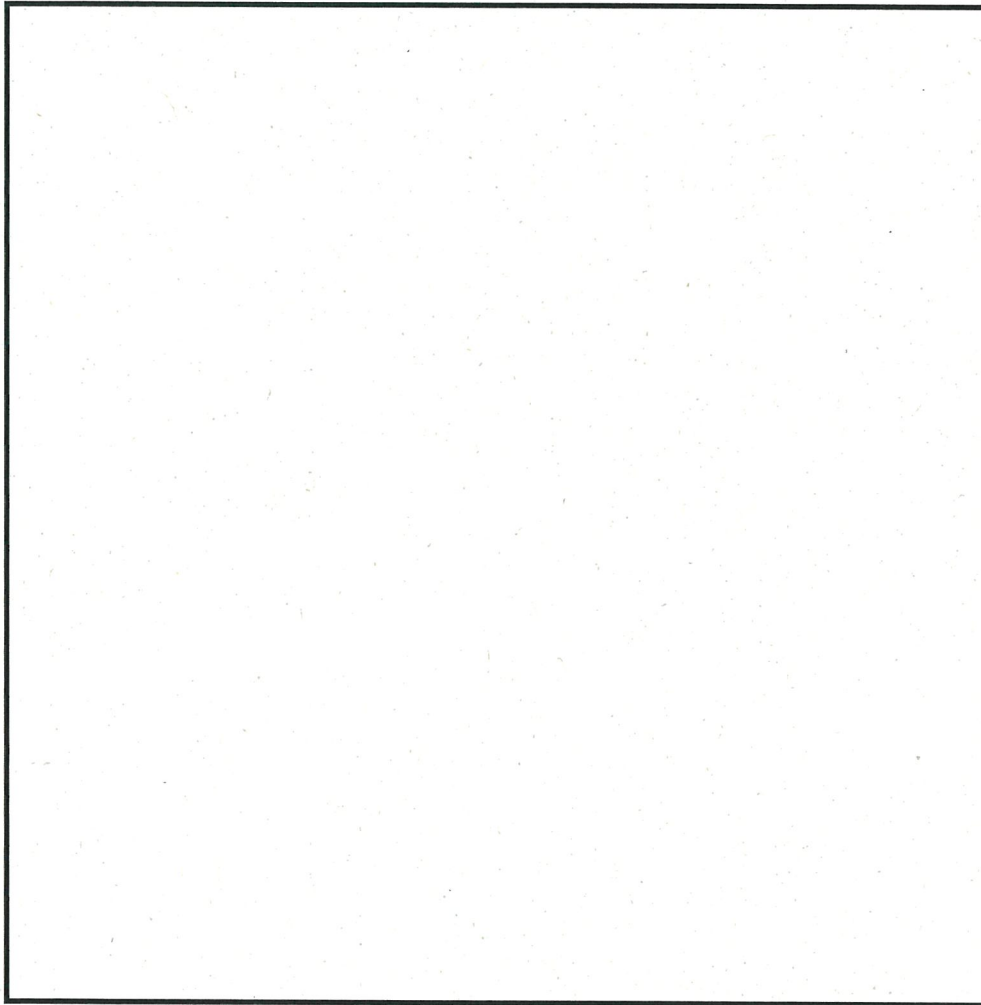
第 2.5.4-5 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図



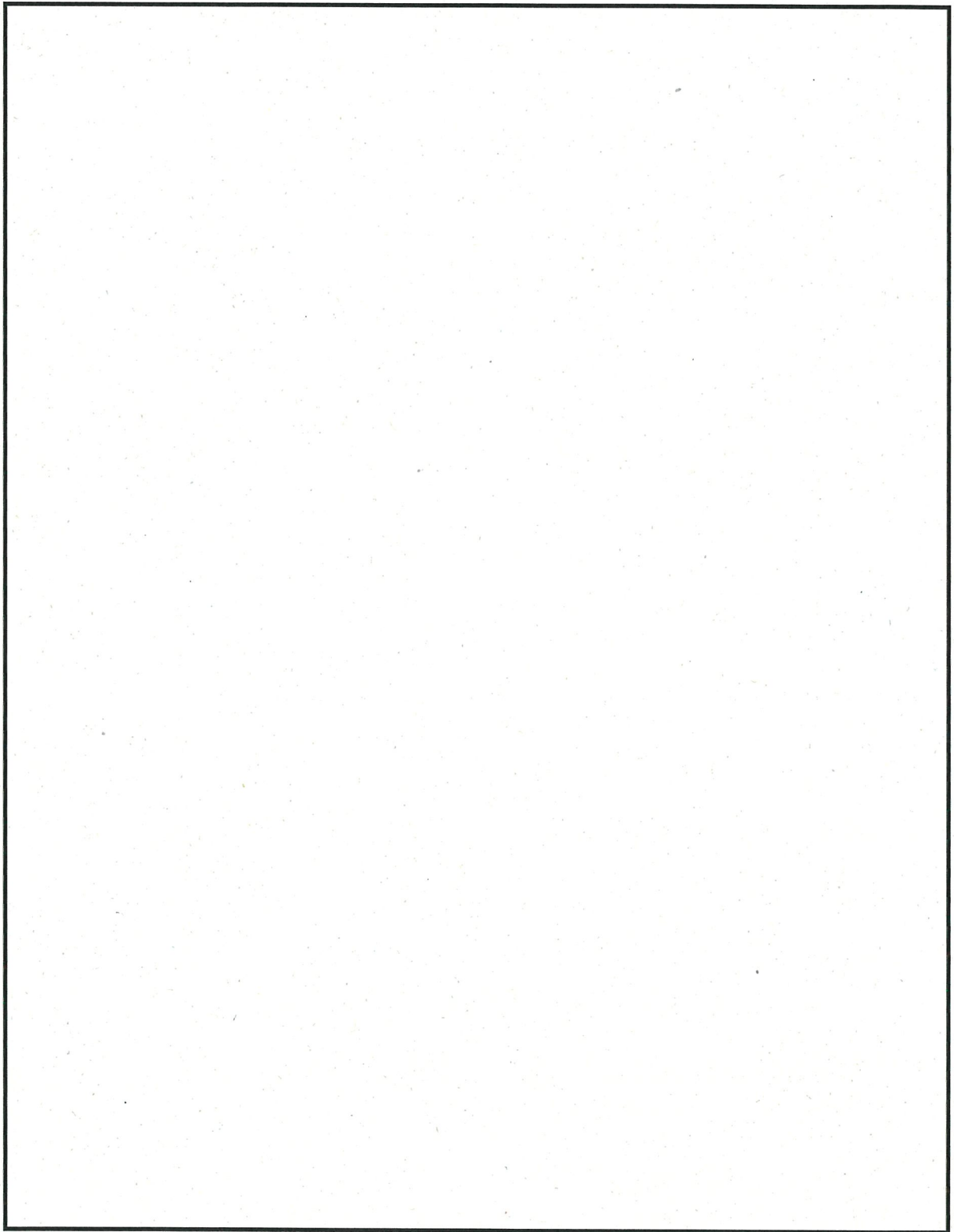
(単位：mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

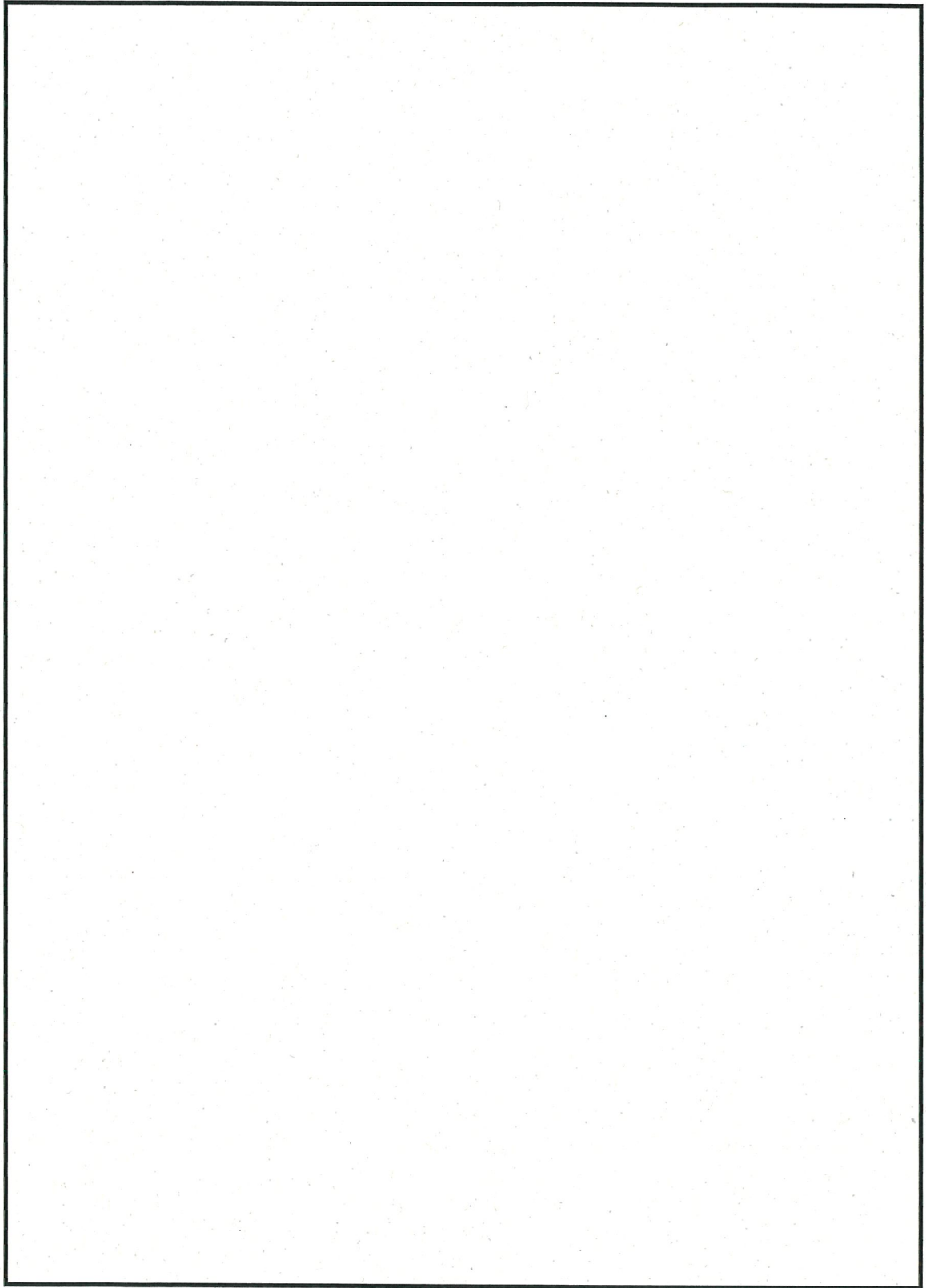
第 2.5.4-6 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図



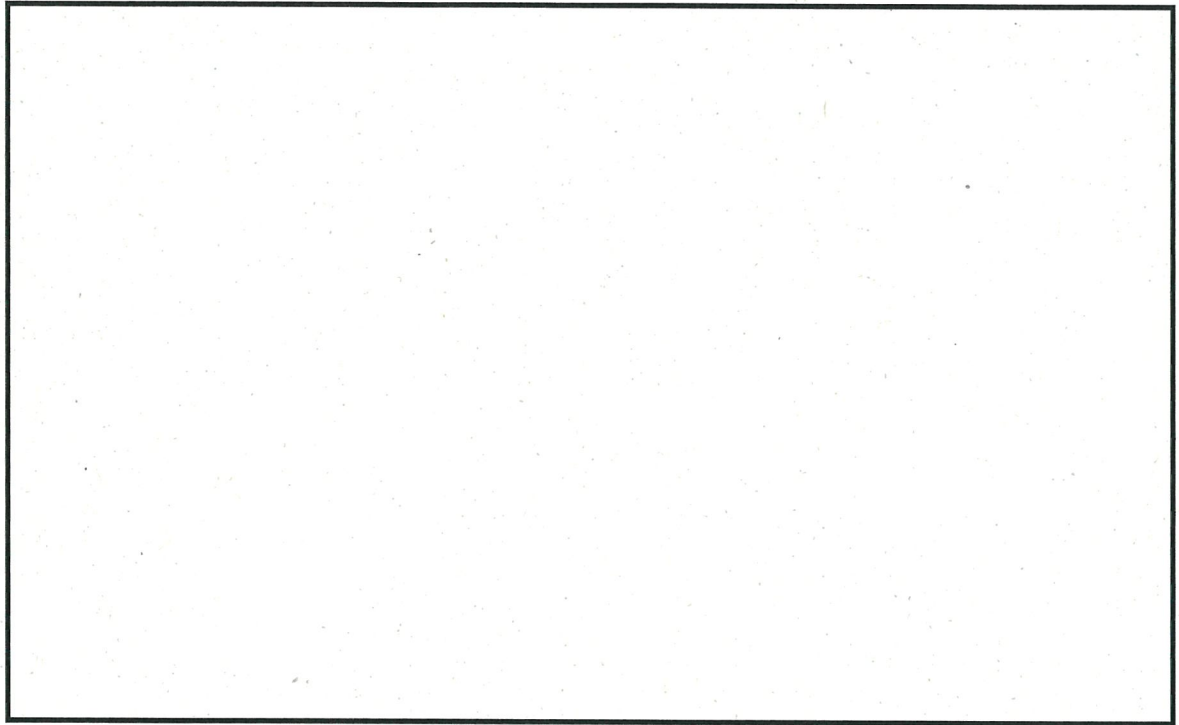
第 2.5.4-7 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図



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）

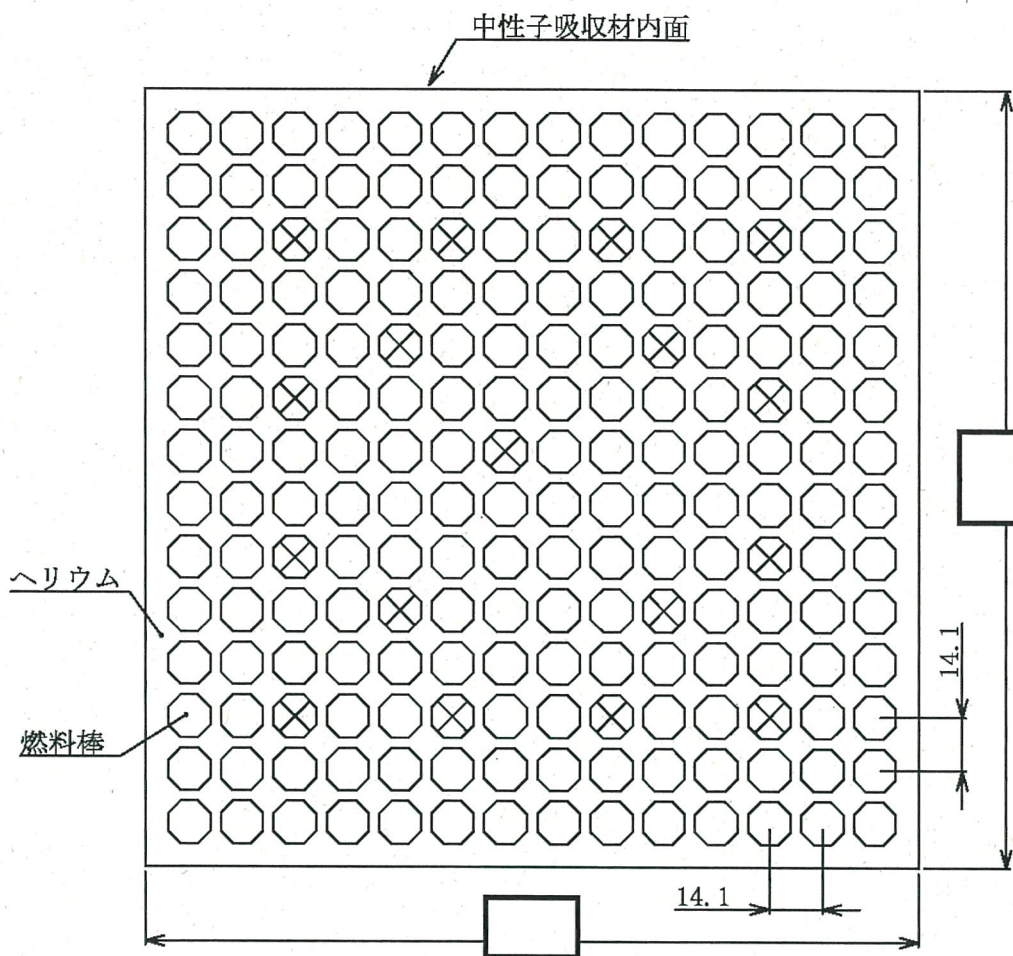


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

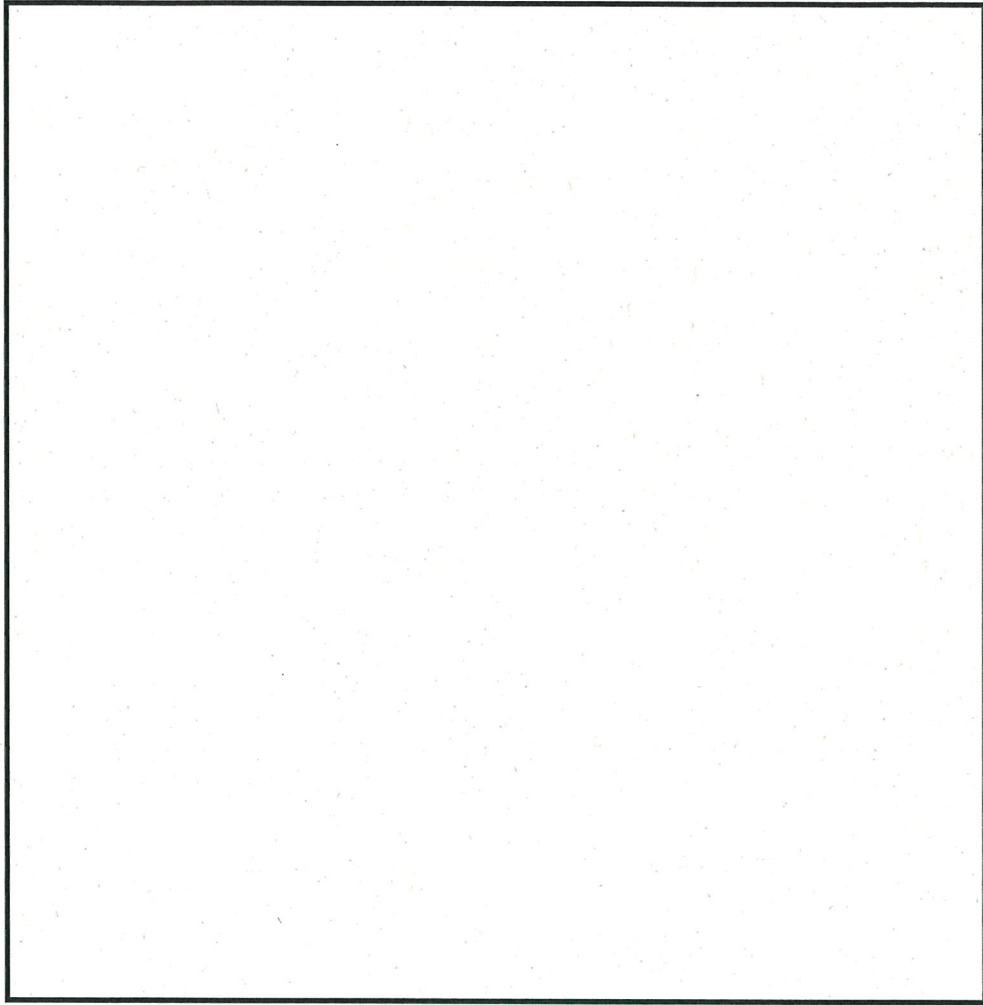
第 2.5.4-10 図 MSF-32P 型全体モデル要素分割図



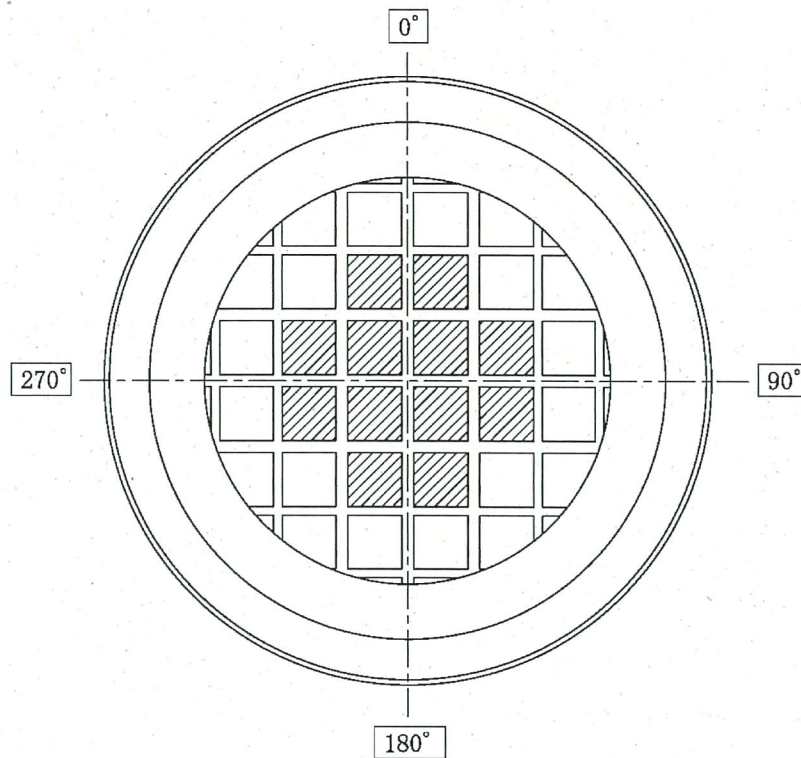
(単位 : mm)


(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



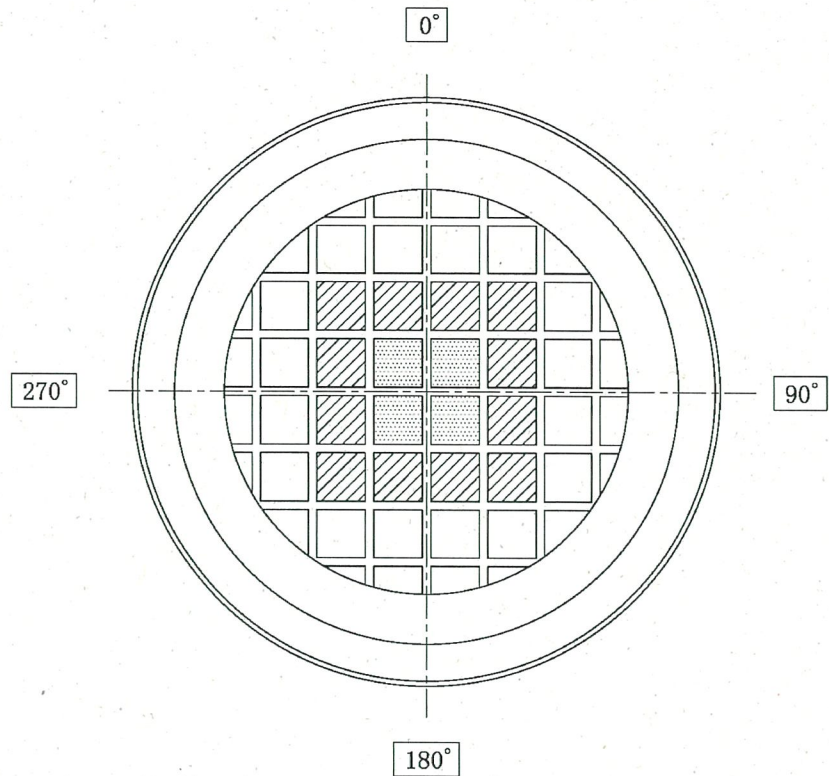
第 2. 5. 4-12 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル要素分割図






-  : 最高燃焼度の崩壊熱量 (中央部 12 体)

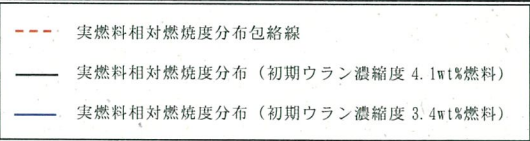
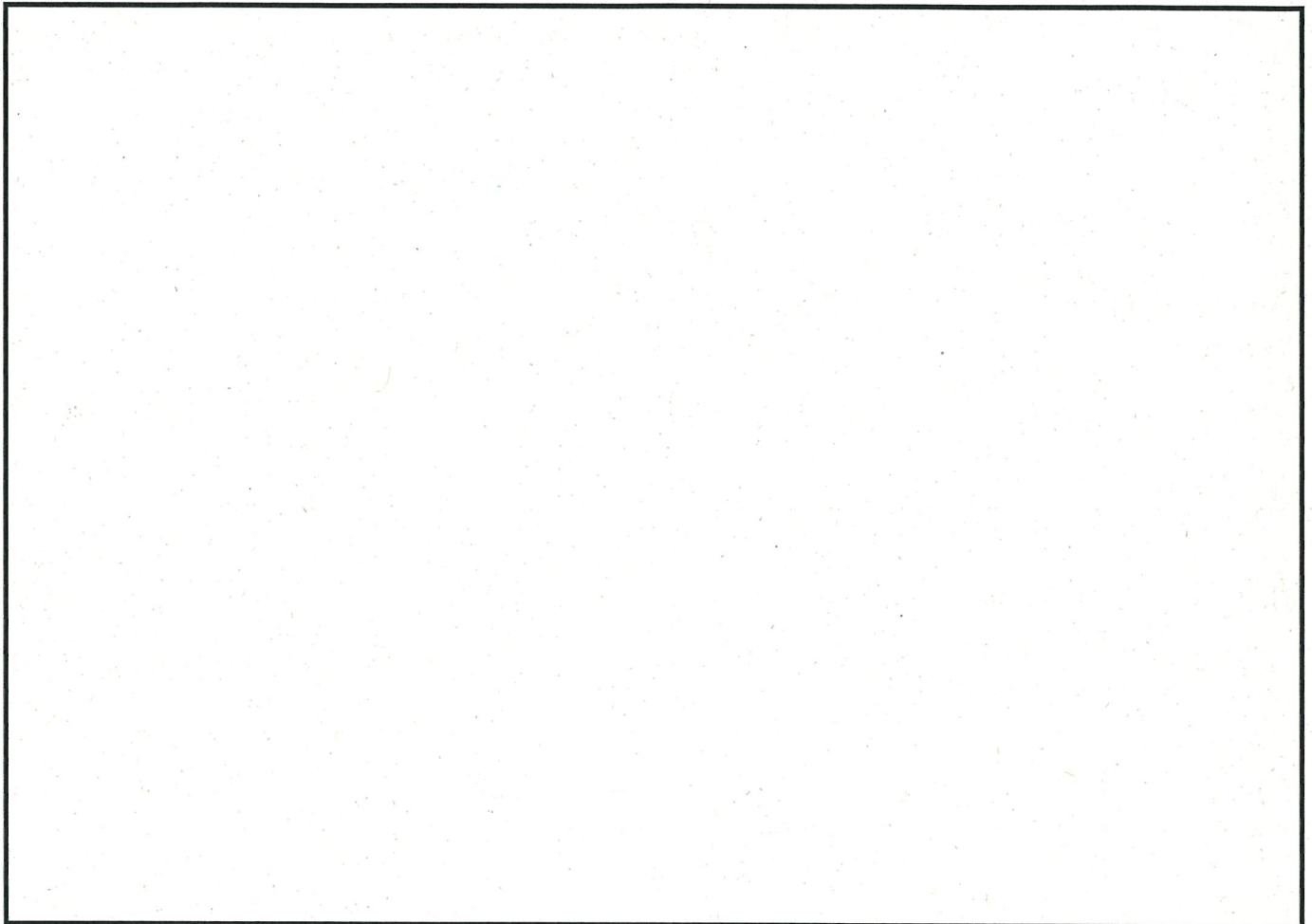
-  : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

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



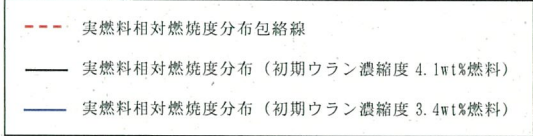
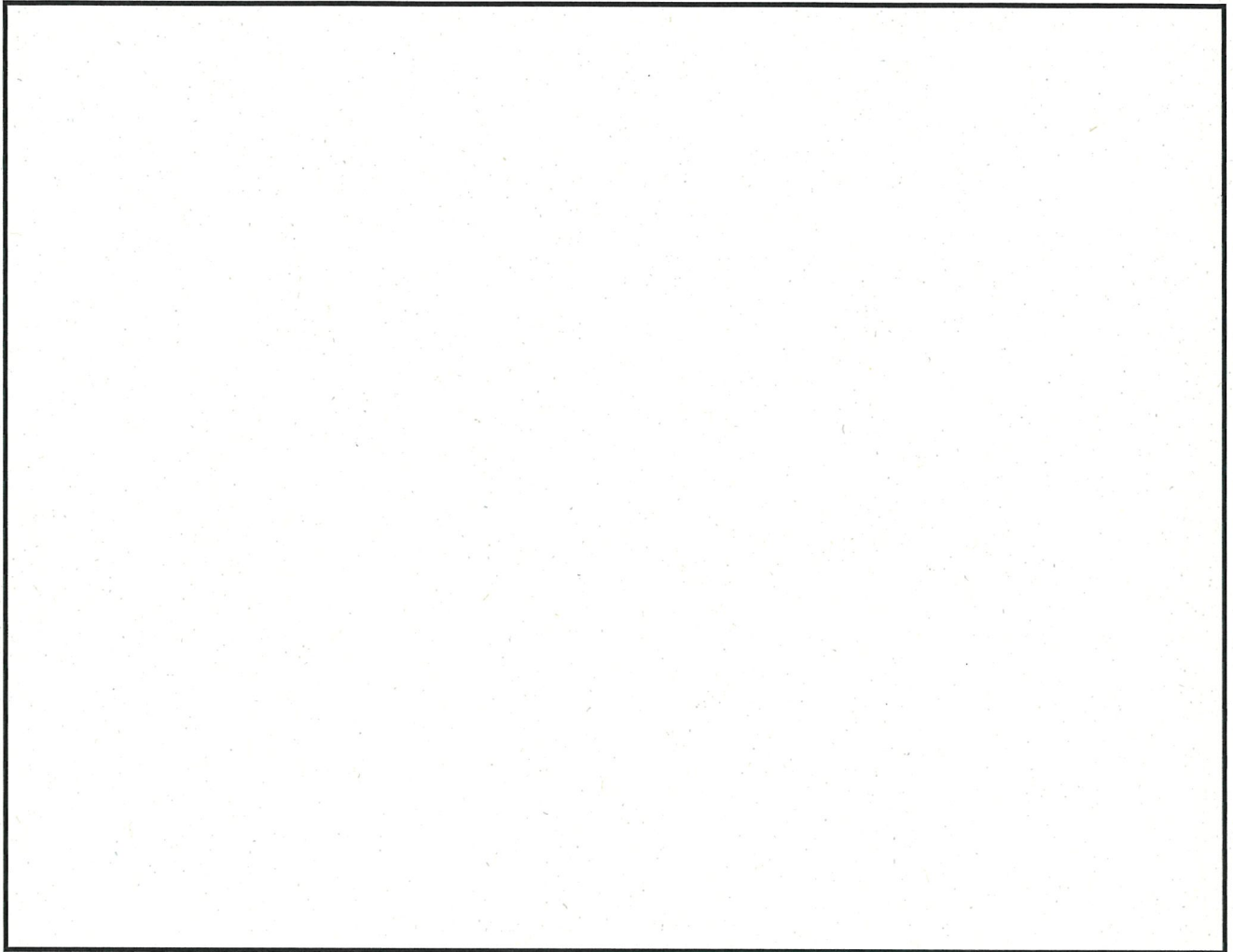
-  : 14×14 型 48GWd/t 燃料における最高燃焼度の崩壊熱量
(中央部 16 体のうち中心 4 体)
-  : 中央部 16 体の崩壊熱量が 14×14 型 48GWd/t 燃料における
平均燃焼度の崩壊熱量 16 体分となるように調整した崩壊熱量
(中央部 16 体のうち中心 4 体を除く 12 体)
-  : 14×14 型 39GWd/t 燃料における平均燃焼度の崩壊熱量
(外周部 16 体)

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



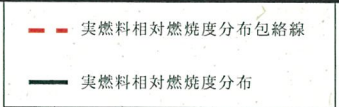
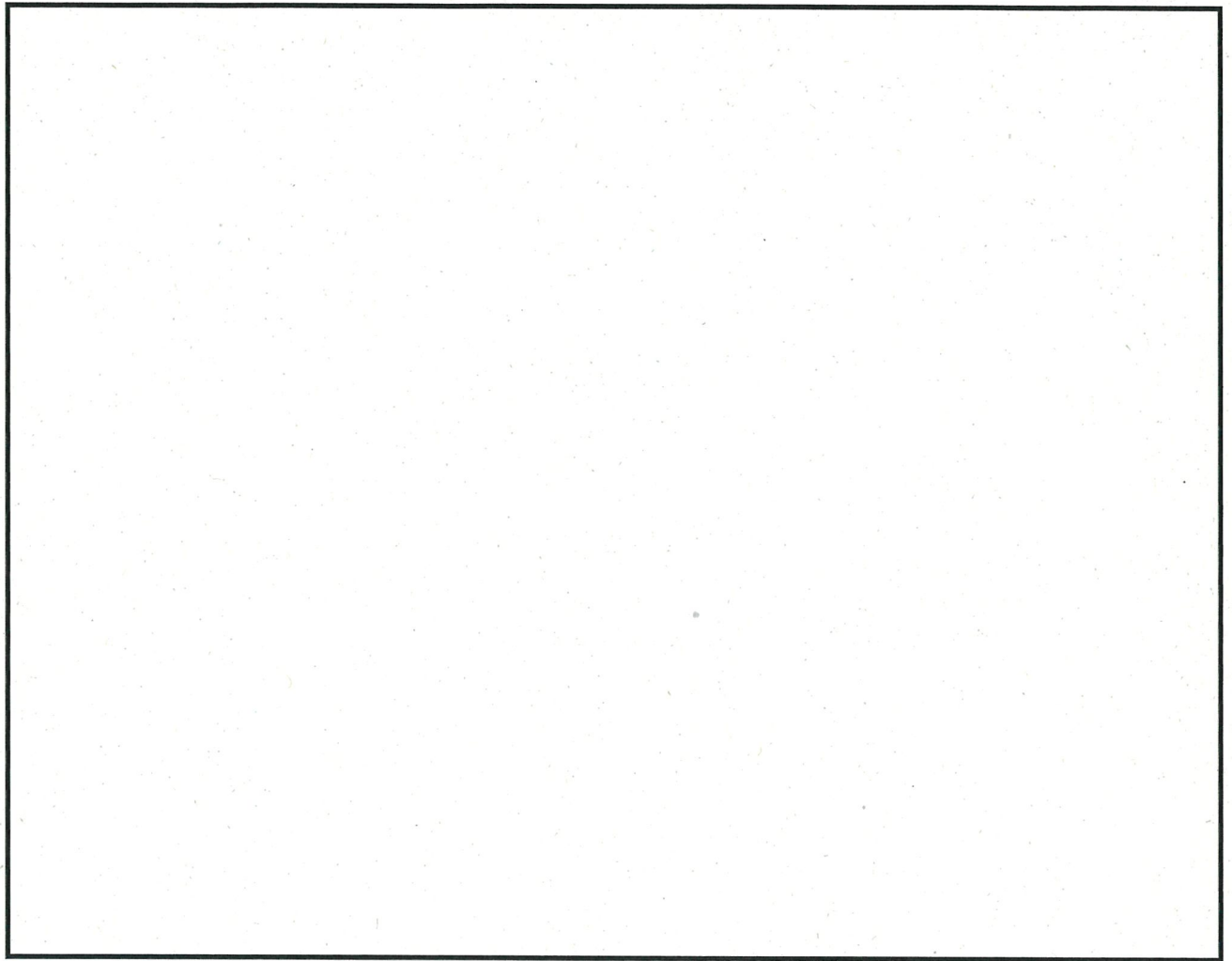
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

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。

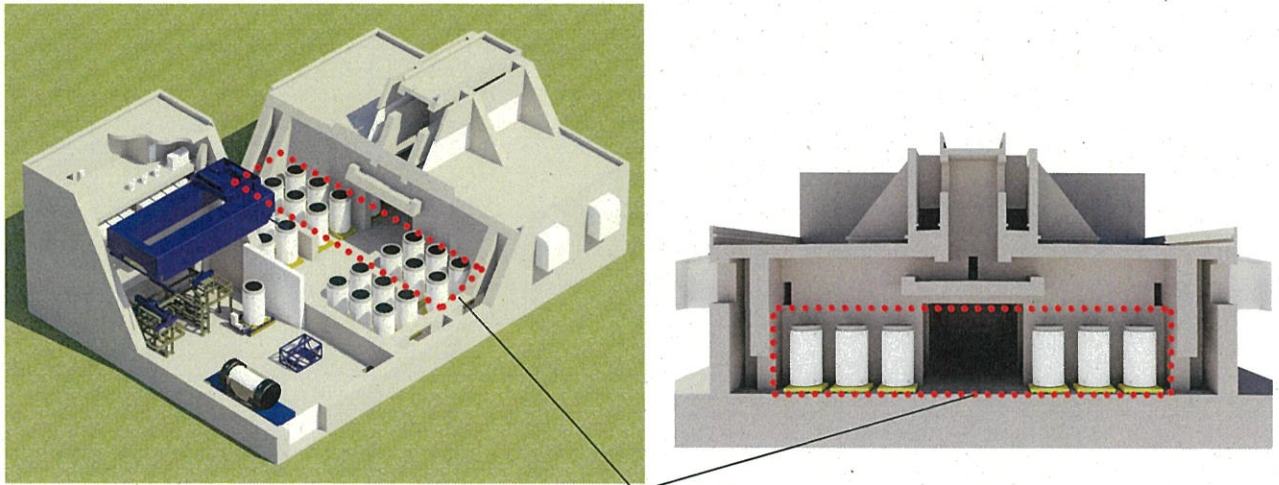
第 2.5.4.-15 図 2 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (2/3)



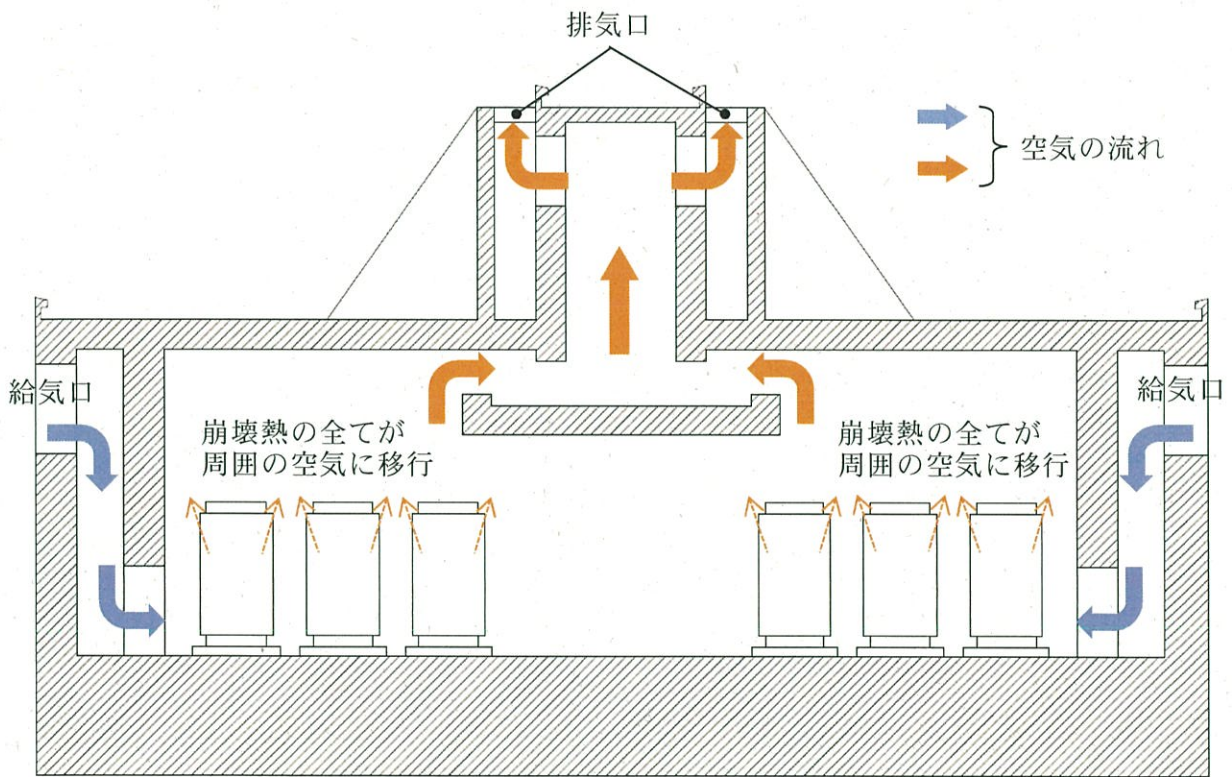
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 3号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (3/3)

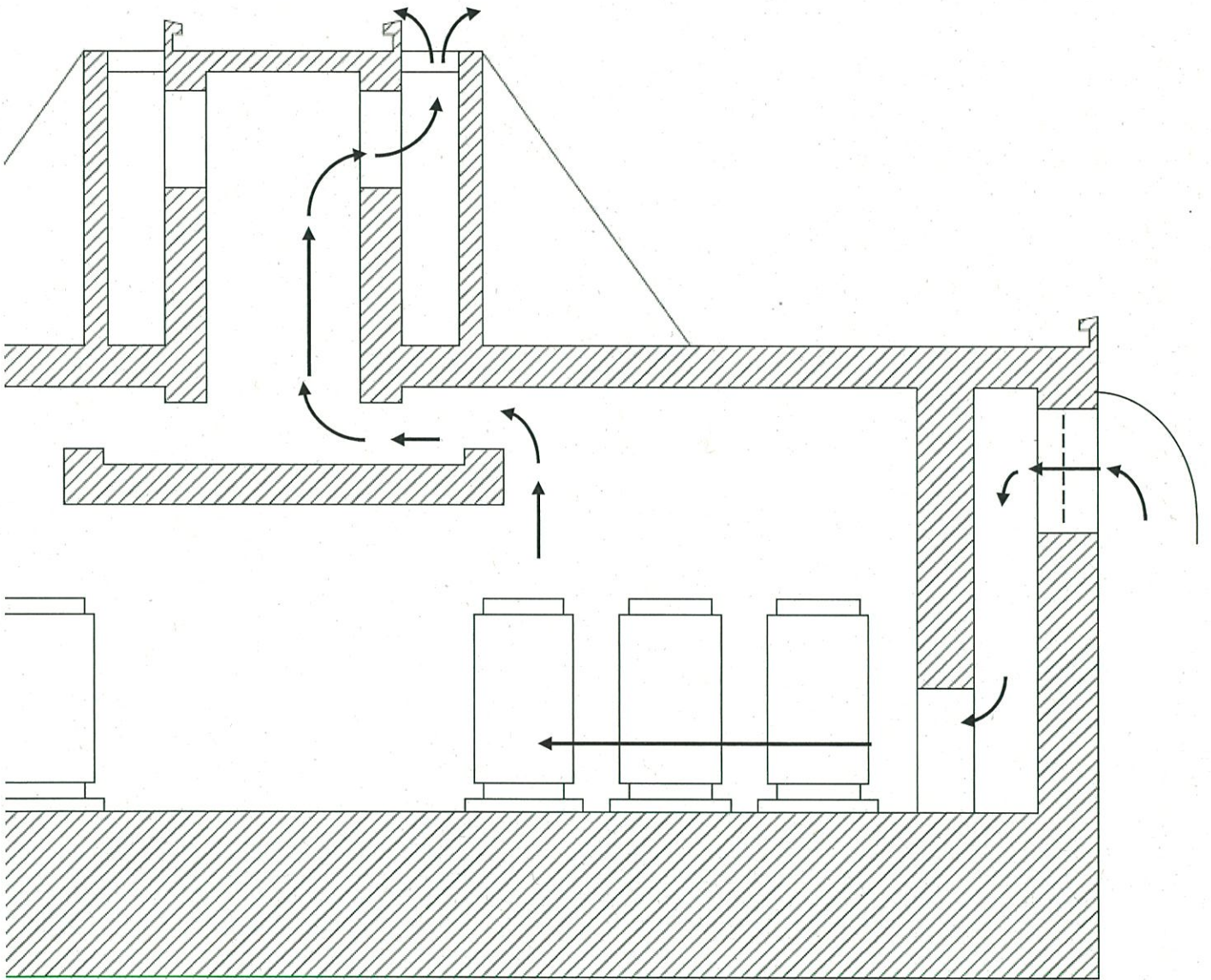
乾式貯蔵建屋のイメージ図



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。

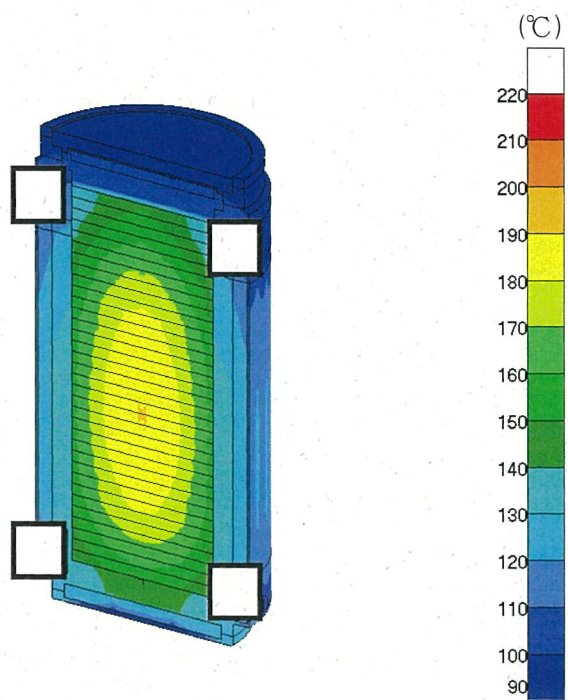
c. 乾式貯蔵建屋

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。

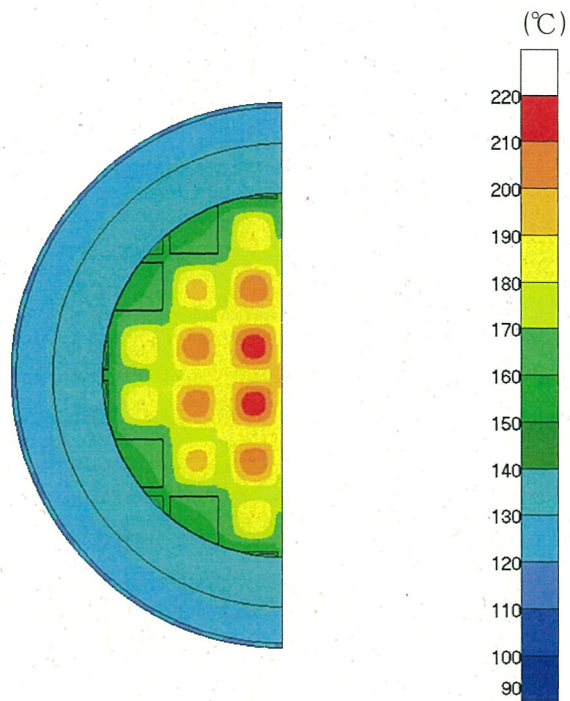
第 2.5.4-13 図及び第 2.5.4-14 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.4-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-24P 型：15.8kw、MSF-32P 型：14.8kw）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

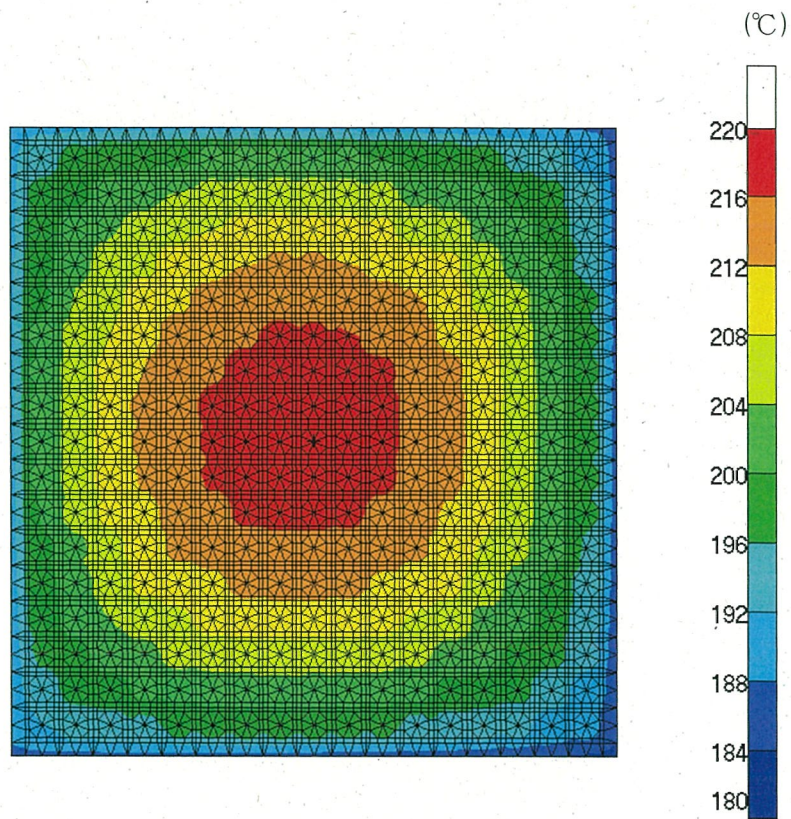


(全体)

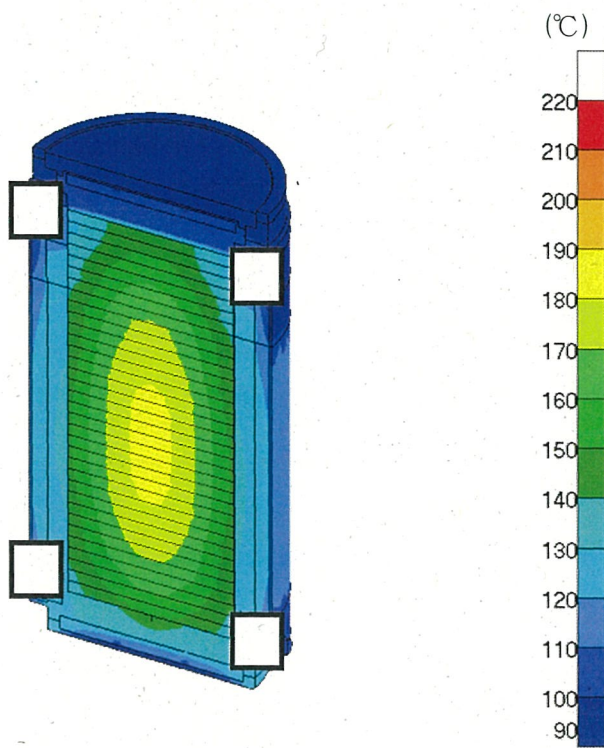


(燃料集合体最高温度位置断面)

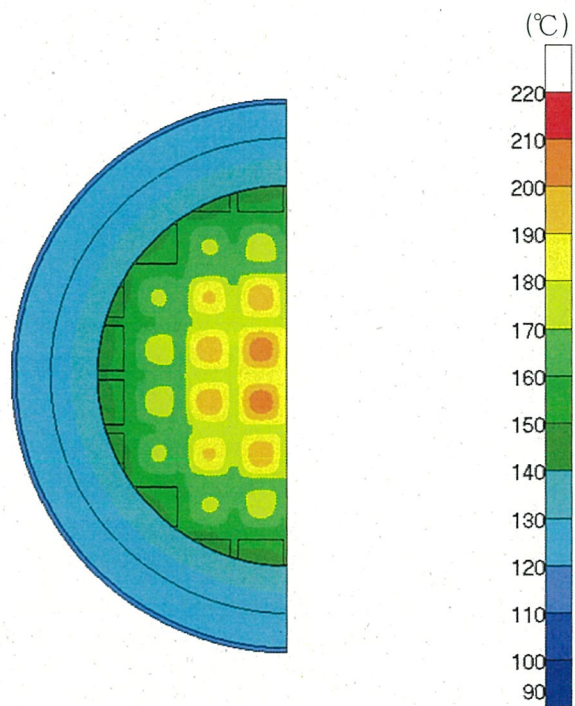
第 2. 5. 4-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果(全体モデル)



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

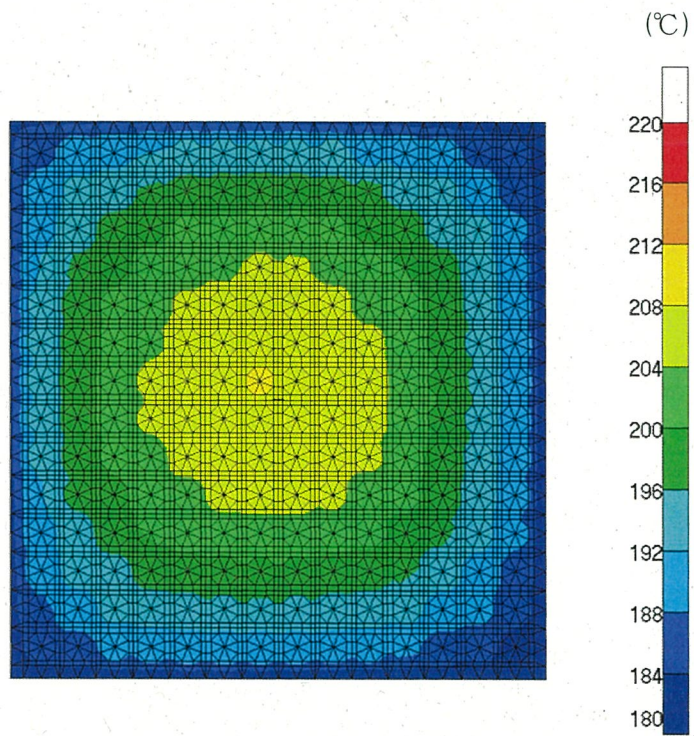


(全体)



(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。

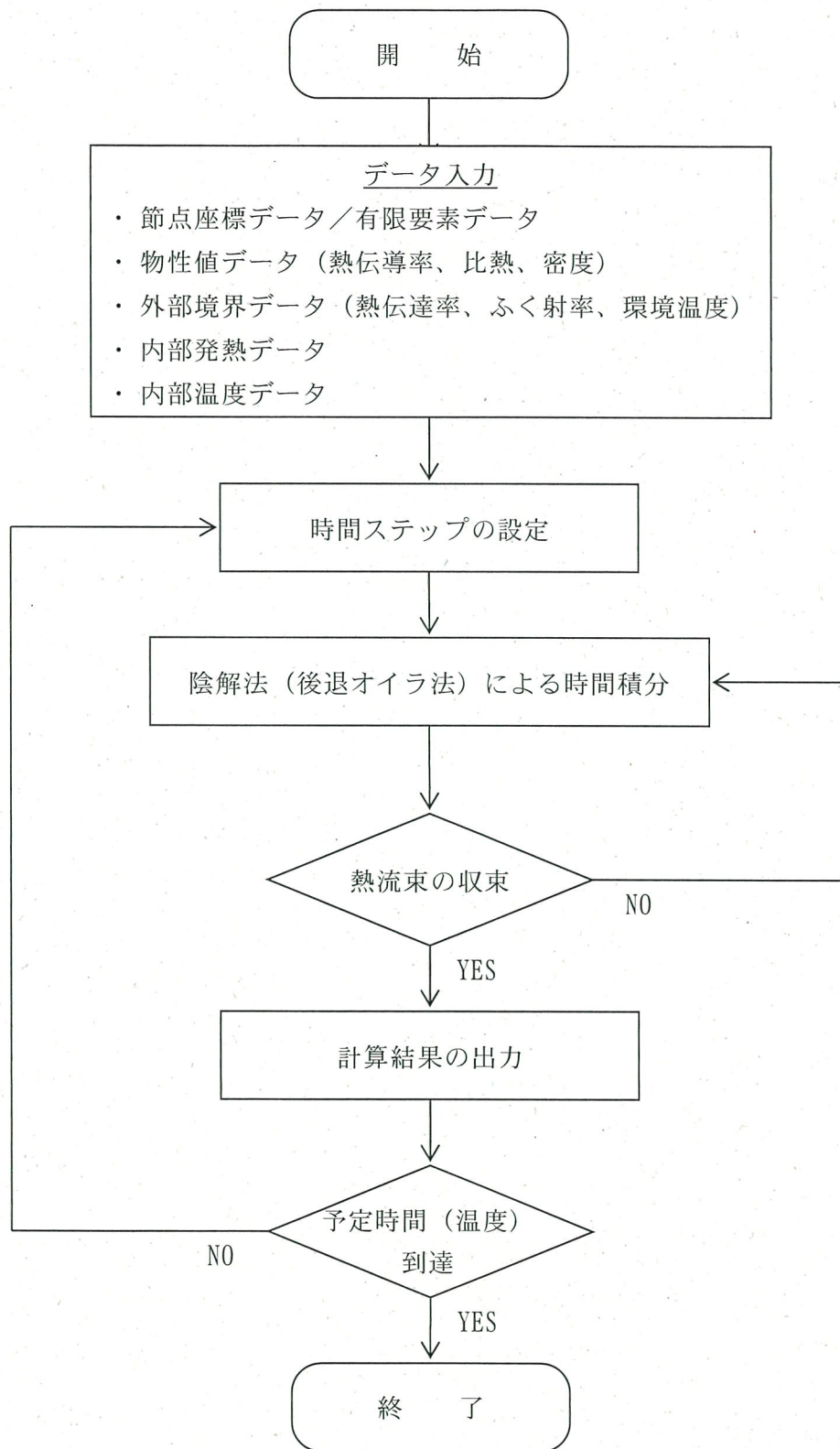
iii 解析フロー

代表的な解析フローを第 2.5.4-22 図に示す。

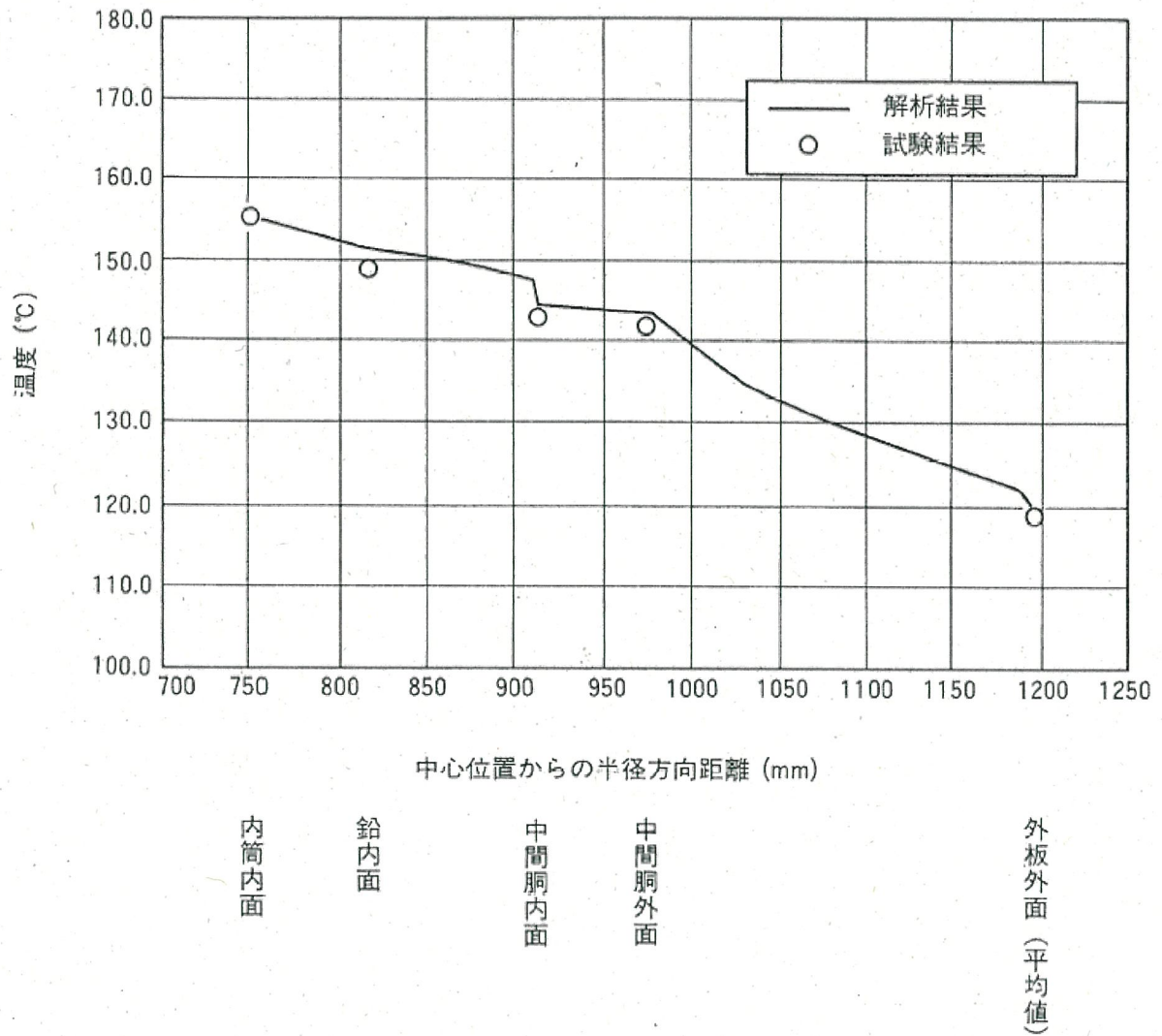
iv 使用実績及び検証

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).

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の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《別添1：閉じ込め》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献として (以下の観点から、適用すること が妥当であることと考 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%)及び日本の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)を考慮し、保守的な値として0.1%を想定する。	(一社)日本原子力学会、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010」,(2010)。	米国の使用済燃料乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)と国内の乾式貯蔵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、米国の漏えい燃料発生率は、乾式キャスクと同じ乾式貯蔵の実績、及び乾式貯蔵に比べ厳しい条件下にある乾式貯蔵(国内)における漏えい燃料発生率を考慮した上で保守的に設定しており、参考文献として妥当である。
2	別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	<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. (1986)。	本文は放射性物質輸送容器の密封機能評価方法(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、リーク率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2項)が適用される。	乾式キャスクの蓋閉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(カテゴリー)は、ヘリウムガスを用いた場合、 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度を達成可能である。	本文は、MSF-21P型及びMSF-23P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($1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)から保守的に金属ガスケットの性能を $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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2-6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2-7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⁾ 。	(一財)電力中央研究所,平成21年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書,(2010)	・金属ガスケット(外被材:アルミニウム、内被材及びコイルスプリング:ニッケル基合金)の性能について、ガスケット部の温度を約130℃から140℃の範囲で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から19年以上経過(ラーソン・ミラー・パラメータ(LMP)=7942)しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。 ・本試験結果ではLMP=7942まで健全性が示されており、貯蔵期間を60年とした場合にLMP=7942となる金属ガスケットの初期温度は134℃となり、この温度以下にすれば密封性能が維持される。	本文での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約130℃~140℃)は、乾式キャスクの貯蔵時の熱解析結果で得られた金属ガスケット下部温度(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条件に比べて、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対してより厳しい条件下で得られた結果である。以上より、参考文献として妥当である。 なお、電中研試験結果を踏まえ、金属ガスケットの性能としては、参考文献3のカタログ値より保守的な $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《臨界防止》

番号	安全審査資料		文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容				
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> 詳細基準 0.95以下)	「臨界安全ハンドブック第2版」・日本原子力研究所 JAERI 1340, (1999) SCALE Code System, ORNL/TM-2005/89 Version 6.2.1 (2016).	— (使用マニュアルのため、省略)	十分に検証されたコードシステムを用いる場合には、そのコードシステムによって算出された中性子増倍率 k_{eff} が次式を満足することにより未臨界であると判定できると記載されている。 $k_{eff} \leq 0.95$	臨界防止設計における未臨界判定基準の考え方及びその判定基準が記載されており、参考文献として妥当である。
2	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	<16条-別添2(臨界防止)-25ページ> i 概要 臨界解析には、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された公開の SCALE コードシステムリを用い、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 Code System, ORNL/TM-2005/89 Version 6.2.1 (2016).	— (使用マニュアルのため、省略)	OECD/NEA にて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006)) は、下記①～⑥の条件を満たす臨界実験が記載されている。	— (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	<16条-別添2(臨界防止)-25ページ> iv 使用実績及び検証 臨界解析で使用した SCALE コードシステムに 対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。 文献2)に示す実験について、取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3-1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。	International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, (2006)	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	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てい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

参考文献		参考文献	
帯号	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)
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(連載)-28ページ> i 概要 ORIGEN2コードは、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2コードは公開コードであり、輸送容器的の燃焼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). ・ "ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983).
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(連載)-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、原子燃料施設の燃焼熱計算に広く使用されている。また、ORNLではORIGEN2コードの燃焼熱計算結果をANS標準燃焼熱の値と比較し、ORIGEN2コードの妥当性を検証している。	・ Oak Ridge National Laboratory, "DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", COC-276, (1977).
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(連載)-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。	・ 「TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性(1)線量率」, (一社)日本原子力学会「昭和56年秋の分科会」, C17, (1981).
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(連載)-31,33ページ> iv. 使用実績及び検証 DOTコードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽計算の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器的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比較した結果は、DOT3.5 コードの影響が小さい。DOT3.5 コードは計算値が数%高い値となっている。DOT3.5 コードは計算値と測定値は良く一致している。
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(連載)-33ページ> 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を用いて、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 ⁴⁾ 。	・ 「 ²³⁵ U核分裂中性子源を用いた遅い透過実験及び二次元遮蔽性能計算コードによる輸送容器評価用断面積セットSFCX-J33の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第7巻 第3号 研究報告, (2007). ・ 「 ²³⁵ U核分裂中性子源を用いた遅い透過実験及び二次元遮蔽性能計算コードによる輸送容器評価用断面積セットSFCX-J33の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第7巻 第3号 研究報告, (2007).

使用済燃料乾式貯蔵容器的設計及び評価について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 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	<16条-別添4(除熱)-31ページ> 第2.5.4.5表 評価結果 項目 評価基準 胴、外筒、 一次蓋及び二次蓋 350℃以下 ¹⁾ 中性子遮蔽材 (レジン) 149℃以下 ²⁾ 金属ガスケット 130℃以下 ³⁾ バスケット 250℃以下 ⁴⁾ 使用済燃料被覆管 275℃以下 ⁵⁾	・(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). ・BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material" (1986). ・(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1, (2010).平成21年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査報告書	参考文献として、 ・SGV480 (外筒、蒸留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 (鋼一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト) 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。	炭素鋼は、30℃～375℃の温度範囲において、ステンレス鋼は、30℃～425℃の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、30℃～350℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蒸留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 (鋼一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト) 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、乾式キャスク各部分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内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。
2						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℃～140℃で保持し、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から19年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化はなく、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						三重工業製の乾式キャスク (MSF-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摂し、設計貯蔵期間中の熱ばく露を適切に考慮した設計用強度を規定している。	○本文献には、乾式キャスクのバスケットに用いるアルミニウム合金と同じ材料であり、同じ設計貯蔵期間が考慮された設計用強度及び物性値が示されている。アルミニウム合金の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包摂しており、参考文献として妥当である。
4				・三重工業(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). ・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).	参考文献として、 ・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、高温条件下に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約300℃では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を275℃以下、周方向応力を100MPa以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気があ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、乾式キャスクのバスケットに取納するPWR393GW/Utおよび483GW/Ut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摂して妥当である。	
5						・Dassault Systemes, "ABAQUS Analysis User's Manual(6.12)", (2012).	○本文献は、乾式キャスクのバスケットに取納するPWR393GW/Utおよび483GW/Ut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摂して妥当である。
6	別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード		<16条-別添4(除熱)-37ページ> i 概要 ABAQUSコード ¹⁾ は、米国 Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在は Dassault Systemes				○本文献は、乾式キャスクのバスケットに取納するPWR393GW/Utおよび483GW/Ut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摂して妥当である。

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

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、輸送キャスタクの伝熱解析などに広く利用されている。 iv 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、乾式キャスタ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 ²⁾ 。	「使用済燃料キャスタク貯蔵技術の確立ーキャスタクの伝熱特性評価ー」(一財)電力中央研究所(1993)。	使用済燃料の模擬物を収納した実寸大キャスタクの伝熱試験(貯蔵時)に対して、ABAQUSコードを用いた計算結果(キャスタ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	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、適用することが妥当であると考 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	安全審査資料	<p><16条-37,38,39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については、中性子照射量が 10^{16} n/cm² まででは、顕著な機械的特性変化は見られないこと、設計貯蔵期間中の中性子照射量が 10^{16} n/cm² を超えない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 (タイプ1のみ) 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、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 10^{16} n/cm² を超えない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。 (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、設計貯蔵期間中の中性子照射量は外筒では 10^{13} n/cm² を超えず、また、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 10^{16} n/cm² を超えない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>参考文献 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>参考文献として ○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	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 (タイプ1のみ) 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 (JSME S NJ1-2012)」, (2012).</p>	<p>参考文献 炭素鋼は-30℃~375℃の温度範囲において、ステンレス鋼は、-30℃~425℃の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、-30℃~350℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・SUS630 (トラニオン) ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト)</p>	<p>参考文献として ○本文献は、乾式キャスク各部位の設計用強度及び物性値の規格値、文献概要欄に示す各材料の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>

使用済燃料乾式貯蔵容器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	安全審査資料	記載箇所	記載内容	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えている。)
3	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	<16条-38ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガス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、不活性雰囲気が維持されるため、残留水分(10wt%)を考慮しても腐食の影響はない ^{a)} 。	(脚)原子力安全基盤機構、平成15年度 金属キャスク貯蔵技術検証試験報告書 最終報告(2004)。 (脚)原子力安全基盤機構、平成15年度 金属キャスク貯蔵技術検証試験報告書 最終報告(2004)。	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18μm/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。 ○本文献結果は、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、酸素が連続的に供給されないことから、より厳しい条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。
4	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	<16条-38ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロモミブデン鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率1%相当の燃料構内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない ^{a)} 。 (2) バスケケット 【熱的影響】 また、タイプ1のバスケケッ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%相当の燃料構内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はない ^{a)} 。	(脚)原子力安全基盤機構、平成15年度 金属キャスク貯蔵技術検証試験報告書 最終報告(2004)。	○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(キャスク設計貯蔵期間)での腐食量を算出し、設計手法に対して影響がないことを示しており、参考文献として妥当である。 ○本文献結果は、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、MSF-24P型約220℃、MSF-32P型約210℃)に対して試験温度が270℃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。	
5	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	<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(タイプ1のみ)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 ^{a)} 。設計貯蔵期間中の中性子照射量は 10^{16} n/cm ² を超えない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%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(タイプ1のみ)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 ^{a)} されており、その温度範囲で使用するため、低温度性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 なお、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は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件(250℃)を模倣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、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 ^{a)} 。	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)。 アルミニウム合金は、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは未照射材との機械的特性変化の有意な差は見られない。 アルミニウム合金は、40℃～250℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。	○バスケ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、本文献に示した中性子照射量(10 ¹⁶ n/cm ²)を上回る中性子照射量と機械的特性の関係を示されており、機械的特性への影響がないことが示されている。 ○本文献は、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び物性の規定値、設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件(250℃)を模倣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、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。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。	
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	<16条-38ページ> (2) バスケケット 【熱的影響】 なお、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は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件(250℃)を模倣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、クリープによる強度低下を適切に考慮している ^{a)} 。	「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)。	○本文献は、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び物性の規定値を示した文献であり、本文献に示した中性子照射量(10 ¹⁶ n/cm ²)を上回る中性子照射量と機械的特性の関係を示されており、機械的特性への影響がないことが示されている。 ○本文献は、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び物性の規定値、設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件(250℃)を模倣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、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。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。	

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

<p>7 2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について</p>	<p><16条-39ページ> (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ことが示されており、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 10^{15} n/cm² を超えないことから照射脆化の影響はない。 (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバール 【照射影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバール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、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 10^{14} n/cm² を超えない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) - 熱鈍化材の 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特性 (0.2% 耐力及び一様伸び) の有意な差はみられない。</p>	<p>○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^{15} n/cm²) を上回る中性子照射量 (10^{16} n/cm²) と 0.2% 耐力及び一様伸びの関係が示されており、機械的特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p>
--	--	--	---	--

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	安全審査資料		文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えている。)
	記載箇所	記載内容				
8	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	<16条-40ページ> 【照射影響、熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材(レジン)は、熱と照射の影響評価が行われ、使用済燃料の設計貯蔵期間中の照射量による照射の影響は加熱に比べ無視し得る ^{8),9)} ことが確認されているため、熱による経年変化のみ考慮する。 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。	(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)。	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、乾式キャスクの中性子遮蔽材と同じエボキシ系レジンを用い、乾式キャスクと同じ閉鎖系条件で行われている。また、本文献の結果に示される質量減損の式に含まれる劣化パラメータの範囲(約38000)は、乾式キャスクの設計貯蔵期間における劣化パラメータ(24P: 37140.32P: 36777)を包絡しており、参考文献として妥当である。 ○評価式による計算結果は以下の通りとなる。 24P: $5.69 \times 10^{-4} \times \{(136+273) \times (77.6 + \ln(24 \times 365 \times 60))\} - 19.2 \approx 2.0\%$ 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的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なく、熱的劣化が支配的である。	○本文献での試験は、乾式キャスクの中性子遮蔽材と同じエボキシ系レジンを用い、乾式キャスクと同じ閉鎖系条件で行われている。中性子照射量は、乾式キャス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的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) 金属ガスクケット 【照射影響】 金属ガスクケットに使用するアルミニウム及びニッケル合金は、中性子照射量がそれぞれ 10^{10} n/cm^2 又は 10^{11} n/cm^2 まででは、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、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 10^{15} n/cm^2 を超えない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).	金属ガスク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^{10} 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。	○金属ガスク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、乾式キャス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^{10} 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的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).	金属ガスクケットに使用するニッケル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^{11} 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。	○金属ガスクケットに使用されているニッケル合金に対する、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、乾式キャス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^{11} 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 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ーション・ミラー・パラメータ (LMP) で評価すると 150℃では100年以上閉じ込め機能を維持できる ¹²⁾ 。	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、金属ガスケットの漏えい率と LMP の関係が示されており、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、 $LMP = 11.0 \times 10^3 + 0.0015 \times (273.15 + 150K) \times t$ とすると、時間 t は約 190 年となる。 T: 温度 (K) t: 時間 (h)	・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、金属ガスケットの漏えい率と LMP の関係が示されており、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、 $LMP = 11.0 \times 10^3 + 0.0015 \times (273.15 + 150K) \times t$ とすると、時間 t は約 190 年となる。 LMP = $11.0 \times 10^3 + 0.0015 \times (273.15 + 150K) \times t$ T: 温度 (K) t: 時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用す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の断面の外径 (φ5.6mm) は、乾式キャスクの一次蓋のカバープレート用金属ガスケットの断面外径 (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、アルプカバール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、乾式キャスクの設計貯蔵期間を上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⁾ 。	(一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃成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 160℃で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の变化は小さく、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℃~140℃) は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度 (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、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果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-40ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】 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、顕著な機械的劣化は見られない ¹⁰⁾ ことが示されており、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 10^{16} n/cm ² を超えないことから照射劣化の影響はない。	"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 (ビッカース硬さ) の有意な差はみられない。	○本文献は、伝熱フィンに使用している銅への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{16} n/cm ²) を上回る中性子照射量 (10^{16} n/cm ²) とビッカース硬さの関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。	
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 【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 ¹³⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低湿潤性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。	(一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015)。	-40℃~200℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。	○本文献は、銅の設計用強度及び物性値の規格値、この温度範囲 (-40℃~200℃) は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包摂しており、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 【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から、銅は腐食することはない。	(公社)腐食防食協会編, 「材料腐食学入門」, 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、金属の熱力学的標準電位を示す基礎データであり、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】 伝熱フィンと銅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銅単独の場合腐食速度と同程度になることが確認されている ¹⁴⁾ 。	能登谷武記, 密閉系淡水における鋼-銅系に接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。銅を接続した鋼の腐食速度は、比表面積比、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。	密閉した水道水において銅を接続した鋼の腐食試験の結果、鋼の腐食速度は 1 週間以内に約 2 桁減少した。銅を接続した鋼の腐食速度は、比表面積比、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銅又は外筒と同じ材料である銅及び炭素鋼を用いた腐食試験の結果が示されている。本試験は、貯蔵期間中の伝熱フィンと同じ淡水条件下 (中性子照射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。	

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	記載箇所	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。)
		記載内容	参考文献			
1 8	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	<p><16条-41.42ページ> (9) 使用済燃料被覆管 【照射影響】 燃料被覆管に使用されるジルカロイは、設計貯蔵期間中の中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 を超えず、炉内の中性子照射量 ($10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2$) に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る⁽⁸⁾。</p> <p>【熱的影響】 熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化合物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある⁽⁸⁾。</p> <p>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⁽⁸⁾ ことが示されており、燃料被覆管中の水素化合物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが 1%を超えることはない。</p> <p>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⁽⁸⁾ 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。</p> <p>燃料被覆管中の水素化合物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化合物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 275℃以下、周方向応力が 100MPa 以下⁽⁸⁾ 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。</p> <p>応力腐食割れについては、燃料棒ベレットの温度上昇による腐食性核分裂生成物の放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ベレットから放出されたヨウ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⁽⁸⁾。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⁽⁸⁾。</p>	<p>総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核 燃料サイクル研究グループ 中間貯蔵ワーキンググループ 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組物の長期健全性について」, (2009).</p>	<p>・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{16} \sim 10^{17} \text{ n/cm}^2$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量 $10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ 4 被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することが確認されている。 設計貯蔵期間中には温度を制限することによりクリープひずみが 1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件下に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約 300℃では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化合物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化合物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を 275℃以下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気や蒸気条件におけるジルカロイ 4 の SCC 発生のおしきい応力は 200MPa 程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCC は発生しない。</p>	<p>○本文献には、乾式キャスクに収納する PWR39GWdt および 48GWdt 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摂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。</p>	
1 9	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	<p><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⁽⁹⁾ ため、健全性に影響はない。</p>	<p>(一社)日本原子力学会標準委員会「使用済燃料中間貯蔵施設用金属製キャスクの安全設計及び検査基準」: 2010 (AESJ-SC-F002: 2010), (2010).</p>	<p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属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。</p>		

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

参考 2

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

伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る原子力規制委員会の審査方針を踏まえた影響評価

第8回原子力規制委員会で示された以下の審査方針

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

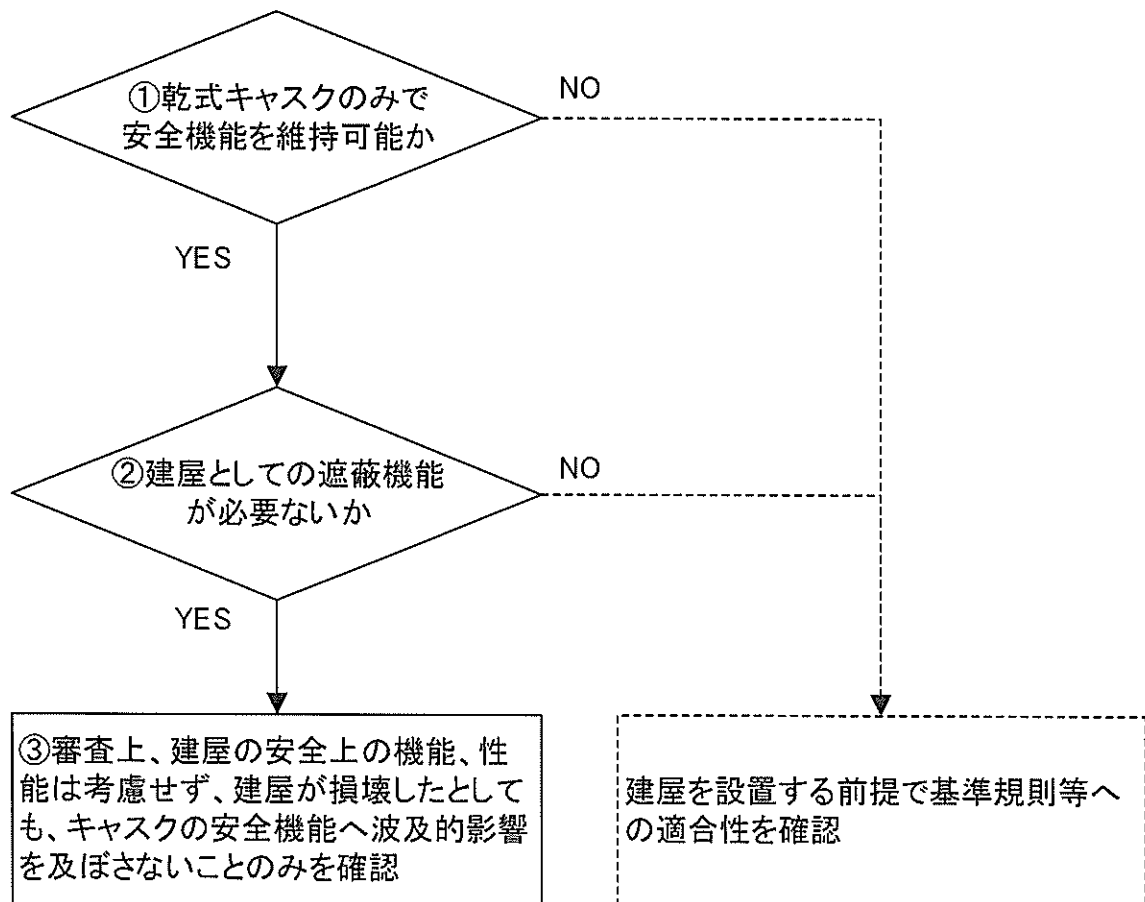


図1. 第8回 原子力規制委員会の審査方針で示された内容のフロー

1. 乾式キャスクのみでの外力に対する安全機能維持について

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

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

表1. 地震・竜巻・外部火災による乾式キャスクに対する影響評価結果

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

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

2. 建屋としての遮蔽機能の必要性について

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

表2. 伊方発電所敷地境界の年間線量試算結果（乾式貯蔵建屋なし）

評価地点 (乾式貯蔵施設からの距離)	年間線量[μSv]（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 $43\mu\text{Sv}$ + 中性子線 $135\mu\text{Sv}$ = 約 $180\mu\text{Sv}$

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

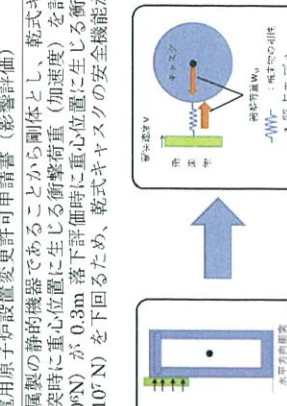
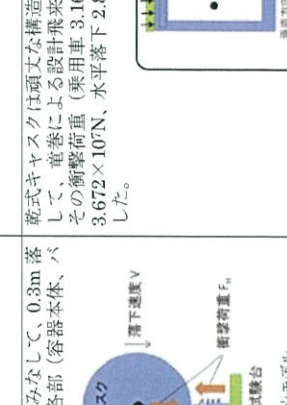
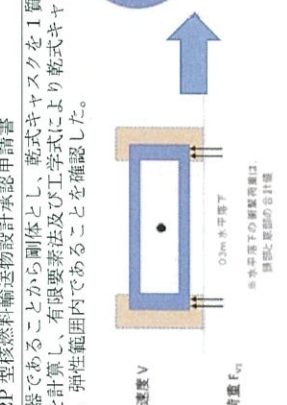
3. まとめ

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

以 上

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

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

<p>評価概要</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>MSP-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p>  <p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</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>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>																																					
<p>評価内容</p> <p>【衝撃荷重の計算方法】 落下時の衝撃荷重 (F) は、CRUSH コードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー (E_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台 (床面) を剛体とし、落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視する。)</p>  <p>落下時の衝撃荷重 (F) の計算結果は右表のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 F を輸送物質量で除して算出。</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p> <p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>	<p>【衝撃荷重の計算結果】 落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>																																					
<p>【応力計算方法】 (1) 容器本体 上記の加速度に一定の余裕をみた加速度 (設計加速度) による慣性力が作用する場合の容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。 (2) バスケット及び燃料集合体 設計加速度をもとに工学式を用いた応力評価を行う。</p>	<p>【応力計算結果】</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 水平</th> <th>解析基準値 (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮蔽・除熱 容器本体 胴</td> <td>44</td> <td>68</td> <td>1.5S_m</td> </tr> <tr> <td>遮蔽 容器本体 外筒</td> <td>50</td> <td>86</td> <td>f_b</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め 容器本体 一次蓋下部</td> <td>54</td> <td>58</td> <td>S_y</td> </tr> <tr> <td>閉果 バスケット</td> <td>7</td> <td>11</td> <td>S_m</td> </tr> <tr> <td>閉果 燃料集合体</td> <td>118</td> <td>200</td> <td>σ_y</td> </tr> <tr> <td>解析結果 (MPa)</td> <td>118</td> <td>200</td> <td>595</td> </tr> </tbody> </table> <p>(参考) S_y=設計降伏応力 (規格値)、S_m=設計応力強さ (規格値) (S_m=Sy/1.5)、f_b=Sy/1.5、σ_y=降伏応力 (文獻値) ※構造解析上は、外筒の健全性をもって中性子遮蔽材が保持されることを確認している。</p>	項目	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	解析基準値 (MPa)	遮蔽・除熱 容器本体 胴	44	68	1.5S _m	遮蔽 容器本体 外筒	50	86	f _b	閉じ込め 容器本体 一次蓋下部	54	58	S _y	閉果 バスケット	7	11	S _m	閉果 燃料集合体	118	200	σ _y	解析結果 (MPa)	118	200	595	<p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>落下姿勢</th> <th>衝撃荷重 F(N)</th> <th>加速度 (G)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>F_V:3.672×10⁷</td> <td>27.6</td> </tr> <tr> <td>0.3m 水平</td> <td>F_H:2.830×10⁷</td> <td>21.3</td> </tr> </tbody> </table>	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)	0.3m 頭部垂直	F _V :3.672×10 ⁷	27.6	0.3m 水平	F _H :2.830×10 ⁷	21.3
項目	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	解析基準値 (MPa)																																				
遮蔽・除熱 容器本体 胴	44	68	1.5S _m																																				
遮蔽 容器本体 外筒	50	86	f _b																																				
閉じ込め 容器本体 一次蓋下部	54	58	S _y																																				
閉果 バスケット	7	11	S _m																																				
閉果 燃料集合体	118	200	σ _y																																				
解析結果 (MPa)	118	200	595																																				
落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)																																					
0.3m 頭部垂直	F _V :3.672×10 ⁷	27.6																																					
0.3m 水平	F _H :2.830×10 ⁷	21.3																																					
<p>【衝撃荷重の計算方法】</p> <p>落下時の衝撃荷重 (F) は、静的な値として計算した飛来物による衝撃荷重 (N) 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台 (床面) を剛体とし、落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視する。)</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>W_m=F_m・m・V/t=m・V²/L</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p> <p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>																																					
<p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <p>衝撃荷重 (W_m) の計算結果は以下のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 W_m を乾式キャスクの貯蔵時質量 (17.0ton) で除して算出。</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>																																					
<p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <p>衝撃荷重 (W_m) の計算結果は以下のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 W_m を乾式キャスクの貯蔵時質量 (17.0ton) で除して算出。</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</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>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>																																					
<p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <p>衝撃荷重 (W_m) の計算結果は以下のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 W_m を乾式キャスクの貯蔵時質量 (17.0ton) で除して算出。</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>	<p>落下速度 V 落下試験台 1 質点モデル</p>																																					

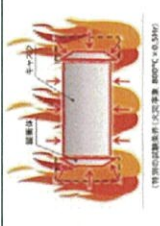
乾式キャスク単体の安全機能 (原子力規制委員会での審査方針を踏まえた対応) 【影響評価】

【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。

MSF-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書

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。

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、各部位の安全機能が確保されることが確認された。(短期健全性)



【計算方法】
ABAQUS コードを用いた有限要素法により伝熱解析 (時刻歴解析) を行った。解析モデルは、乾式キャスク各部と使用済燃料の温度算出のため、2 種類の解析モデルを使用した。
・全体モデル (三次元) ・燃料集合体モデル (二次元)

項目	火災前	火災時	火災後
設計座熱熱量		16.9 kW	
環境条件	38 °C	800 °C (30 分間)	38 °C

【計算結果】
火災事象発生時を基準とした最高温度算出時間を下表に示す。また、燃料集合体温度が最も高くなる火災事象発生から 24.8 時間後における温度分布を右図に示す。

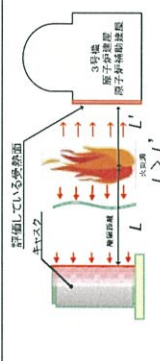
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)
遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	687	180
閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	20.8	136	190
境界	バスケット	22.8	209	250
臨界	燃料集合体	24.8	241	275°

※一般の試験条件基準

MSF-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書 (影響評価)

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。

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が確認された。(短期健全性)



【計算方法】
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、航空機落下及び重電火災等が考えられる。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。

【計算結果】
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「原子炉発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づく計算を実施する。計算式は以下の通り。

計算式

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{m^2 - n^2}} \right) + \frac{1}{\pi} \left(\frac{A(n-D)}{m\sqrt{A^2 - n^2}} \tan^{-1} \left(\frac{A(n-D)}{B(n+D)} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\frac{D(n-1)}{n+1} \right) \right)$$

$$m = \frac{H}{R} \sin \theta, \quad n = \frac{L}{R}, \quad A = (L+n)^2 + m^2, \quad B = (L-n)^2 + m^2$$

$$E = R \cdot \phi$$

R: 輻射強度 [W/m²]
 φ: 円筒火炎モデルの形態係数 [1-1]
 L: 火炎と受熱面までの距離[m]
 R: 燃焼半径 [m]
 H: 火炎の高さ [m] (H=3R, 評価ガイド)
 E: 受熱面輻射強度 [W/m²]

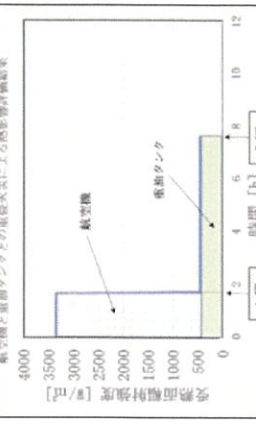
航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への輻射による受熱面輻射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²) × 1.67(h) + 460(W/m²) × 7.58(h)) となる。

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。

項目	航空機	重油タンク
燃焼継続時間 (τ)	1.67h	7.58h
受熱面輻射強度 (E)	2900 W/m ²	460 W/m ²

【結論】
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火災の入熱量の 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。

なお、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価では、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSF-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、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、MSF-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包摂される。



計算式

$$Q = (q_1 + q_2) / 2 \cdot t$$

$$q_0 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (T_0^4 + T_1^4 + T_2^4 + T_3^4) \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)$$

Q: 火災による入熱量 (単位面積) (J/m²)
 q₀: 火災による熱流束 (単位面積) (初期 n=1, 終期 n=2) (W/m²)
 t: 火災時間 (30 分 = 1800s)
 A: 容器表面積 (単位面積) (m²/m²)
 F: 表面輻射率 (総輻射率) F = 1 / (1/ε₁ + 1/ε₂ + 1/ε₃) = 0.735 (ε₁: キャスク表面 (0.8), ε₂: 火炎面 (0.9))
 σ: ステファン-ボルツマン定数 = 5.66961 × 10⁻⁸ (W/m²·K⁴)
 T₀: 雰囲気温度 (周囲空気: 800℃)
 T_n: 容器表面温度 (初期 n=1: 113℃, 終期 n=2: 715℃)

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>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> </tr> <tr> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> </tr> <tr> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	135500	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	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>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> </tr> <tr> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> </tr> <tr> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	134400	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	落下高さ H(m)	0.3																																																																												
輸送物質量 m(kg)	135500	輸送物質量 m(kg)	134400																																																																																																		
重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665																																																																																																		
落下高さ H(m)	0.3	落下高さ H(m)	0.3																																																																																																		
輸送物質量 m(kg)	134400	輸送物質量 m(kg)	134400																																																																																																		
重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665																																																																																																		
落下高さ H(m)	0.3	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> <td>安全機能</td> <td>項目</td> <td>解析基準</td> <td>解析基準値 (MPa)</td> <td>設計温度 (°C)*1</td> <td>解析結果(MPa)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td rowspan="2">容器本体 胴</td> <td rowspan="2">1.5S_m</td> <td rowspan="2">186 (183)*2</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>44</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽</td> <td rowspan="2">容器本体 外筒</td> <td rowspan="2">f_b</td> <td rowspan="2">156</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td rowspan="2">容器本体 一次蓋シェル部</td> <td rowspan="2">S_y</td> <td rowspan="2">185</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>54</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">バスケット</td> <td rowspan="2">S_m</td> <td rowspan="2">36</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">燃料集合体</td> <td rowspan="2">σ_y</td> <td rowspan="2">595</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>118</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>118</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">燃料集合体</td> <td rowspan="2">σ_y</td> <td rowspan="2">589</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>105</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</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)	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	0.3m 頭部垂直	44	0.3m 底部垂直	32	遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	0.3m 頭部垂直	50	0.3m 底部垂直	36	閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	0.3m 頭部垂直	54	0.3m 底部垂直	37	臨界	バスケット	S _m	36	0.3m 頭部垂直	7	0.3m 底部垂直	7	臨界	燃料集合体	σ _y	595	0.3m 頭部垂直	118	0.3m 底部垂直	118	臨界	燃料集合体	σ _y	589	0.3m 頭部垂直	105	0.3m 底部垂直	105	<table border="1"> <tr> <td>安全機能</td> <td>項目</td> <td>解析基準</td> <td>解析基準値 (MPa)</td> <td>設計温度 (°C)*1</td> <td>解析結果(MPa)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td rowspan="2">容器本体 胴</td> <td rowspan="2">1.5S_m</td> <td rowspan="2">186 (183)*2</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽</td> <td rowspan="2">容器本体 外筒</td> <td rowspan="2">f_b</td> <td rowspan="2">156</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td rowspan="2">容器本体 一次蓋シェル部</td> <td rowspan="2">S_y</td> <td rowspan="2">185</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">バスケット</td> <td rowspan="2">S_m</td> <td rowspan="2">36</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">燃料集合体</td> <td rowspan="2">σ_y</td> <td rowspan="2">589</td> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>105</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</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)	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	0.3m 頭部垂直	43	0.3m 底部垂直	30	遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	0.3m 頭部垂直	45	0.3m 底部垂直	39	閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	0.3m 頭部垂直	48	0.3m 底部垂直	36	臨界	バスケット	S _m	36	0.3m 頭部垂直	7	0.3m 底部垂直	7	臨界	燃料集合体	σ _y	589	0.3m 頭部垂直	105	0.3m 底部垂直	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)																																																																																																
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	0.3m 頭部垂直	44																																																																																																
				0.3m 底部垂直	32																																																																																																
遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	0.3m 頭部垂直	50																																																																																																
				0.3m 底部垂直	36																																																																																																
閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	0.3m 頭部垂直	54																																																																																																
				0.3m 底部垂直	37																																																																																																
臨界	バスケット	S _m	36	0.3m 頭部垂直	7																																																																																																
				0.3m 底部垂直	7																																																																																																
臨界	燃料集合体	σ _y	595	0.3m 頭部垂直	118																																																																																																
				0.3m 底部垂直	118																																																																																																
臨界	燃料集合体	σ _y	589	0.3m 頭部垂直	105																																																																																																
				0.3m 底部垂直	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)																																																																																																
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	0.3m 頭部垂直	43																																																																																																
				0.3m 底部垂直	30																																																																																																
遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	0.3m 頭部垂直	45																																																																																																
				0.3m 底部垂直	39																																																																																																
閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	0.3m 頭部垂直	48																																																																																																
				0.3m 底部垂直	36																																																																																																
臨界	バスケット	S _m	36	0.3m 頭部垂直	7																																																																																																
				0.3m 底部垂直	7																																																																																																
臨界	燃料集合体	σ _y	589	0.3m 頭部垂直	105																																																																																																
				0.3m 底部垂直	105																																																																																																
<table border="1"> <tr> <td>安全機能</td> <td>部位</td> <td>最高温度算出時間(h)</td> <td>温度 (°C)</td> <td>基準値 (°C)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td rowspan="2">胴</td> <td rowspan="2">0.524</td> <td rowspan="2">224</td> <td rowspan="2">350</td> </tr> <tr> <td>0.502</td> <td>701</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td rowspan="2">中性子遮蔽材</td> <td rowspan="2">19.1</td> <td rowspan="2">137</td> <td rowspan="2">180</td> </tr> <tr> <td>22.1</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">バスケット</td> <td rowspan="2">25.1</td> <td rowspan="2">218</td> <td rowspan="2">250</td> </tr> <tr> <td>25.1</td> <td>254</td> </tr> </table> <p>*1 : SAR 一般熱的試験の除熱試験の結果に包絡される *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	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	0.502	701	閉じ込め	中性子遮蔽材	19.1	137	180	22.1	190	臨界	バスケット	25.1	218	250	25.1	254	<table border="1"> <tr> <td>安全機能</td> <td>部位</td> <td>最高温度算出時間(h)</td> <td>温度 (°C)</td> <td>基準値 (°C)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">遮蔽・除熱</td> <td rowspan="2">胴</td> <td rowspan="2">0.508</td> <td rowspan="2">249</td> <td rowspan="2">350</td> </tr> <tr> <td>0.502</td> <td>687</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">閉じ込め</td> <td rowspan="2">中性子遮蔽材</td> <td rowspan="2">20.8</td> <td rowspan="2">136</td> <td rowspan="2">180</td> </tr> <tr> <td>22.8</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">臨界</td> <td rowspan="2">バスケット</td> <td rowspan="2">24.8</td> <td rowspan="2">209</td> <td rowspan="2">250</td> </tr> <tr> <td>24.8</td> <td>241</td> </tr> </table> <p>*1 : SAR 一般熱的試験の除熱試験の結果に包絡される *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	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	0.502	687	閉じ込め	中性子遮蔽材	20.8	136	180	22.8	190	臨界	バスケット	24.8	209	250	24.8	241																																																
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																																																																																																	
					0.502	701																																																																																															
閉じ込め	中性子遮蔽材	19.1	137	180																																																																																																	
					22.1	190																																																																																															
臨界	バスケット	25.1	218	250																																																																																																	
					25.1	254																																																																																															
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																																																																																																	
					0.502	687																																																																																															
閉じ込め	中性子遮蔽材	20.8	136	180																																																																																																	
					22.8	190																																																																																															
臨界	バスケット	24.8	209	250																																																																																																	
					24.8	241																																																																																															
構造解析 (一般の試験条件)	熱解析 (特別の試験条件)																																																																																																				

※一般の試験条件基準

※一般の試験条件基準

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。

影響		評価結果
積雪	堆積荷重	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、火山の影響評価に包含される。
落雷	電気的影響	金属製の静的機器である乾式キャスクは、落雷による電気的影響を受けない。
地滑り	土砂による転倒 除熱機能への影響	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	小動物による損傷	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	浸水	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）、朔望平均満潮位(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	飛来物の衝突	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	浸水 水圧による転倒	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	人員への影響	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	船舶の衝突	乾式キャスクは、船舶の衝突による影響を受けない EL. +25mの位置に設置するため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。
電磁的 障害	電気的影響	乾式キャスクは動力を用いずに自然換気により除熱を行い静的に貯蔵する設備であることから、電磁的障害による電気的影響を受けず、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。

※ 森林火災、爆発及び近隣工場等の火災をまとめて「外部火災」とする。

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た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

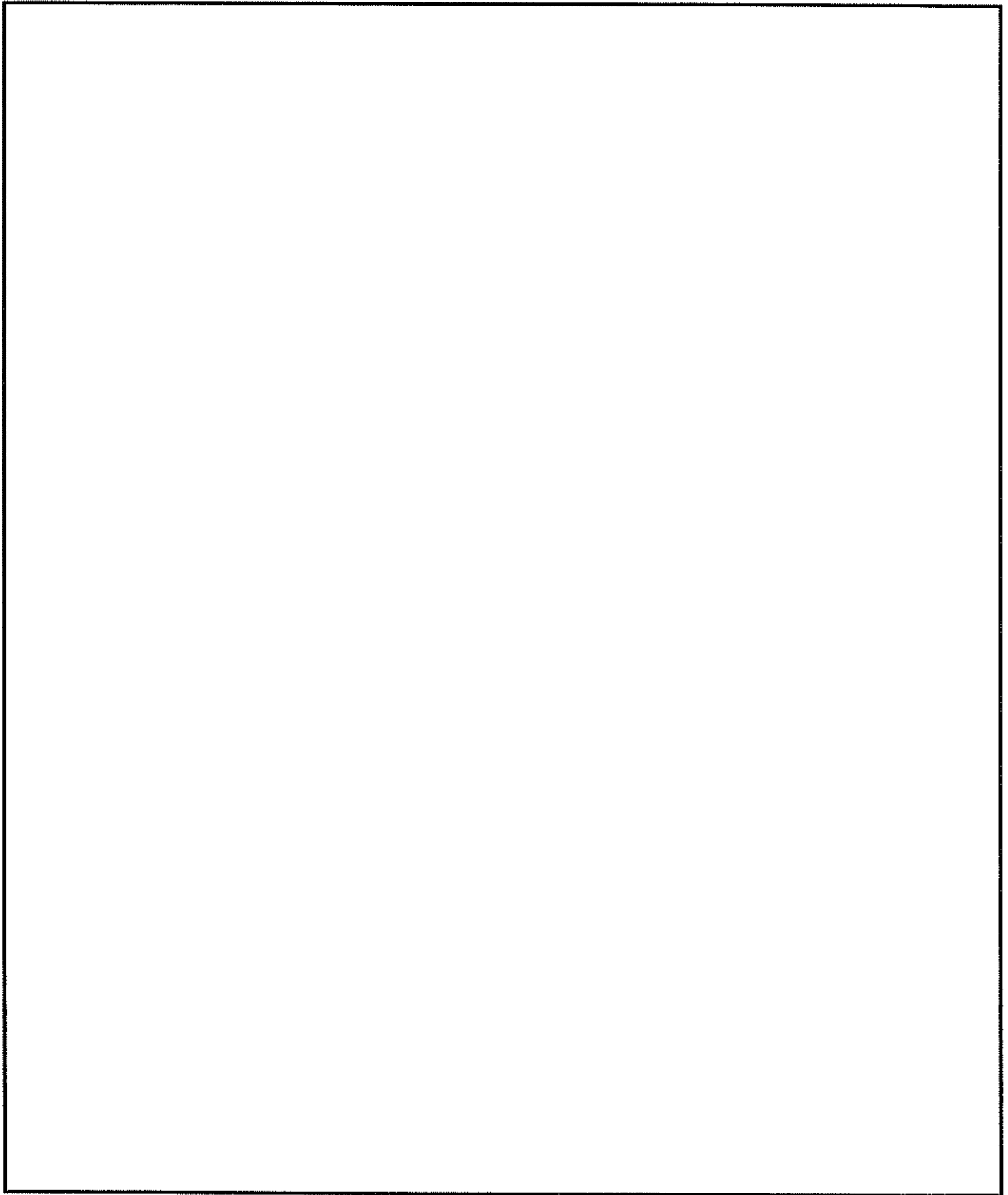
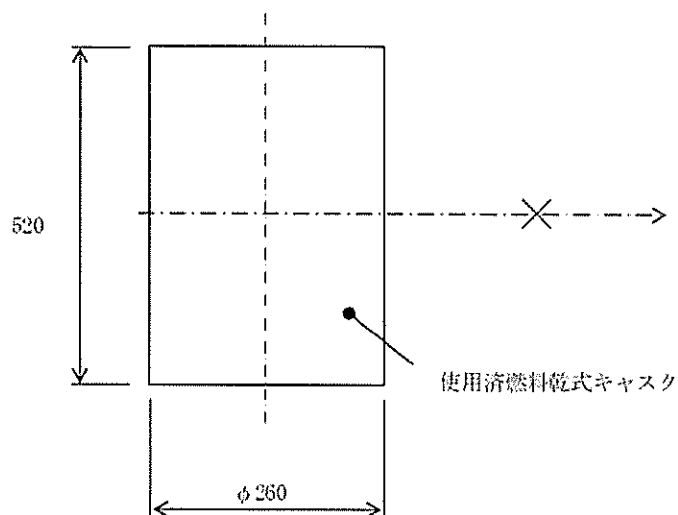


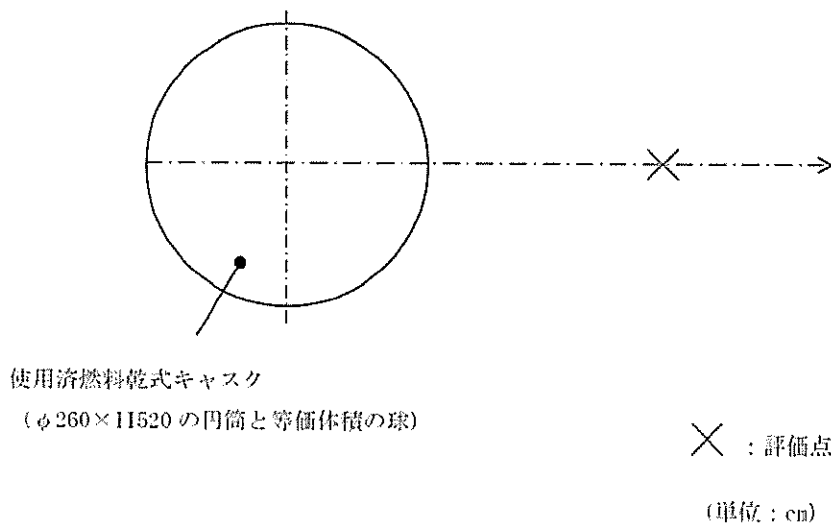
図1 乾式キャスク遮蔽評価モデル (MSF-24P)



× : 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。

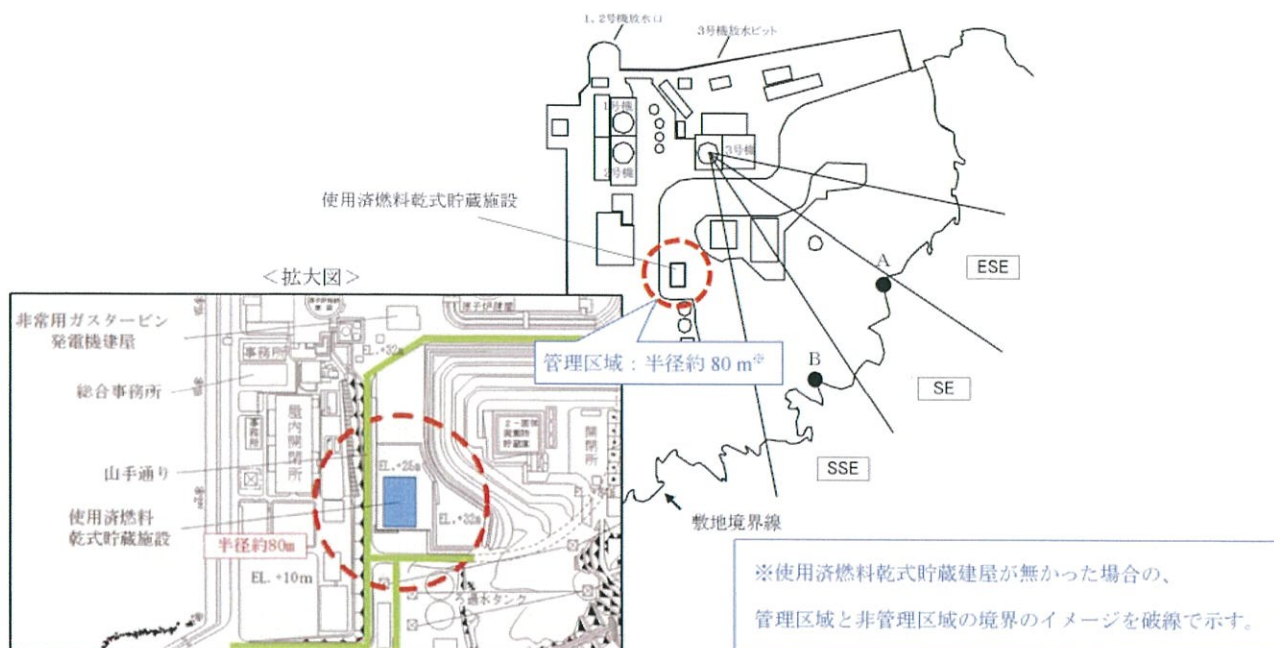


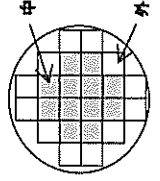
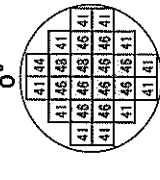
図4 乾式貯蔵施設と評価地点

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の結果、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：運用に必要な保守性
- ③：設計上必要な保守性

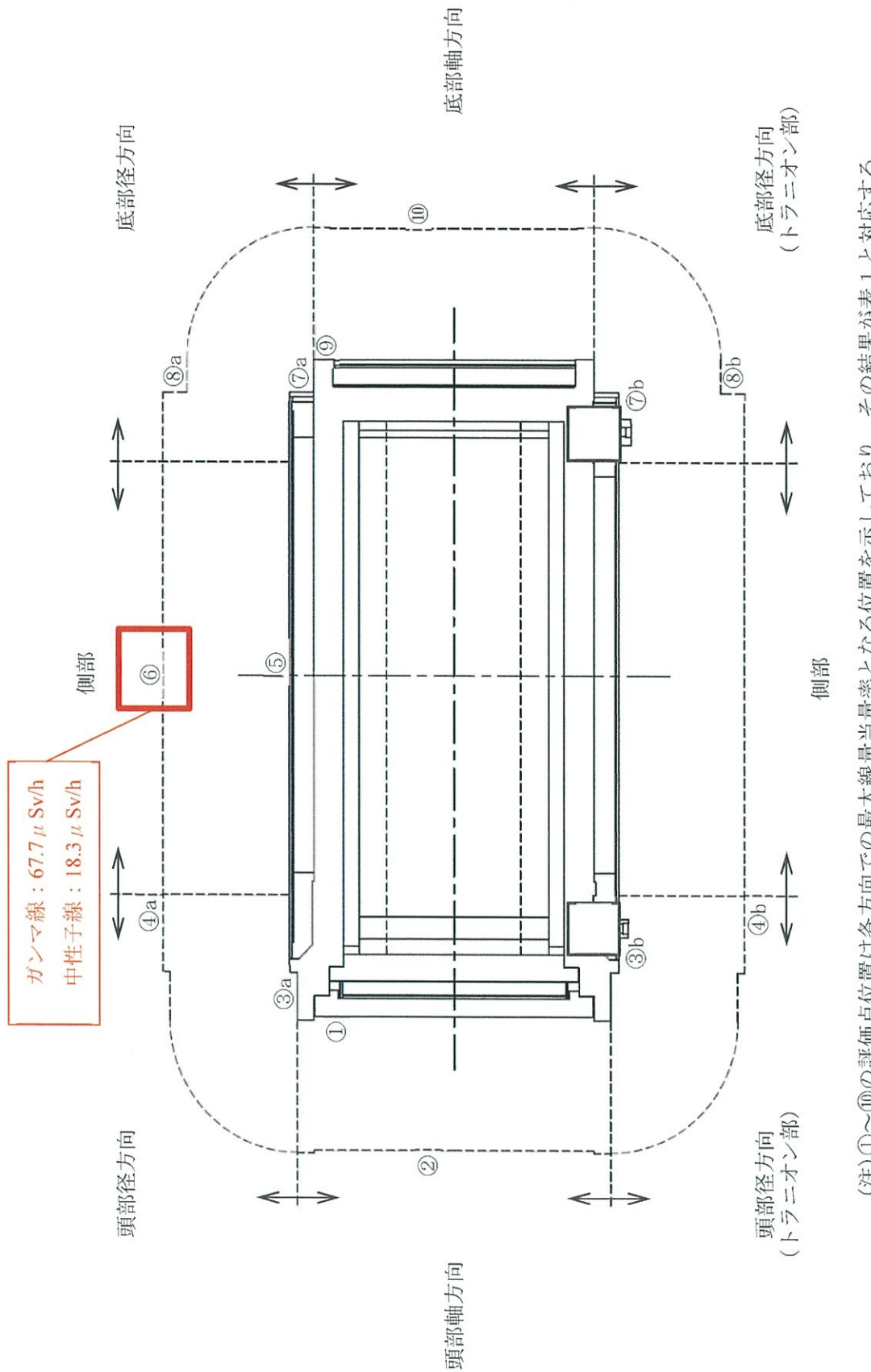
取納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納条件 配置条件		燃料スペース		解析条件		影響程度
		中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	
燃料 集合体 1体の 仕様	初期ウラン濃縮度 (wt%)	17×17型		17×17型		17×17型		濃縮度が0.05%の差異がなく、輸送強度への影響は軽微(1%未満) ① 輸送強度は重量に比例するため、影響は軽微(2%程度) ① 配置欄に記載のとおり 配置欄に記載のとおり 配置欄に記載のとおり 輸送強度として考慮しており、装荷しない場合の構造材放射ガンマ線による乾式キャスク胴部への影響は軽微(5%程度) ② 遮蔽材として考慮していないが、遮蔽効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、周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)

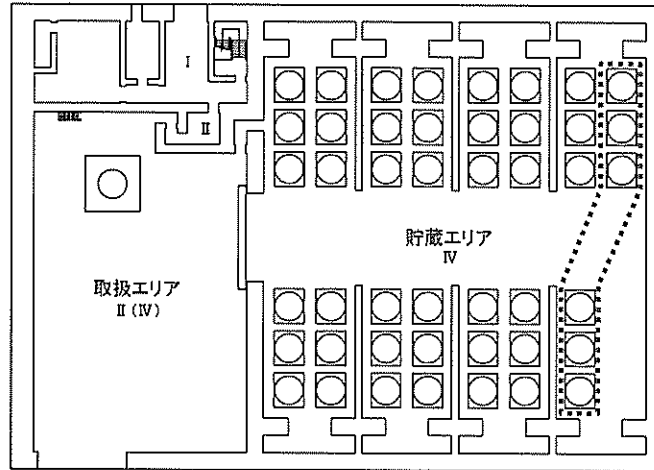
表 1. 線量当量率評価結果 (MSF-24P)

(単位 : μ Sv/h)

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

(注)0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

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

場所	既設建屋		乾式貯蔵建屋	
	SFP キャスクヒット	除染場 ビット	トレーラ エリア	構内
項目	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
状態	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
モード	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
設計	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業

取扱区域		貯蔵区域	
乾式キャスク受入	緩衝体取外し	取扱区域内搬送 (天井クレーン搬送)	取扱区域内搬送 (搬送台車搬送)
緩衝体取外し	取扱区域内搬送 (天井クレーン搬送)	貯蔵仕立て作業 (三次蓋取外し・監視設 備取付)	貯蔵区域内搬送 (搬送台車搬送)
構内輸送 (SFP/FH/B ↓ 乾式貯蔵)	発送仕立て (緩衝体取付・車両取付)	構内輸送 (SFP/FH/B ↓ 乾式貯蔵)	貯蔵指定位置据付 (アンカ固定)
燃料取扱	燃料取扱	燃料取扱	燃料取扱

通常貯蔵状態

貯蔵モード

取扱モード

乾式貯蔵に係る詳細な確認範囲

貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響 確認範囲

乾式貯蔵建屋へのルート

※：真空乾燥作業は、収納する使用済燃料の崩壊熱による温度上昇を踏まえ、作業時間等を管理することにより、使用済燃料の温度制限範囲内で実施する。

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)	乾式キヤスク発送	発送仕立て② (緩衝体取付・車両積付け)	取扱区域内搬送 (天井クレーン搬送)	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)		通常貯蔵状態					
モード	運搬モード (外運搬)		取扱モード			貯蔵モード		
設計	運搬モード (外運搬)		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なし		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。

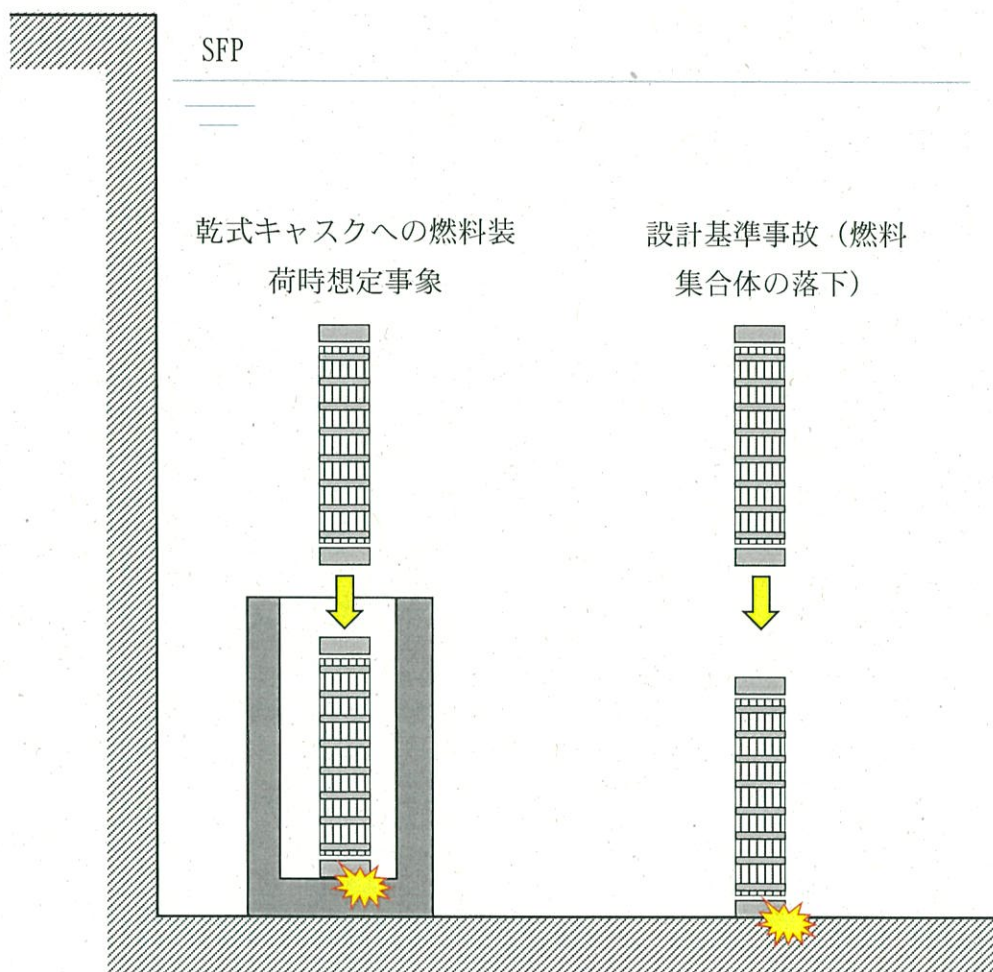
ここで、キャスクピットに据付けられた乾式キャスクに使用済燃料集合体を装荷する作業において想定される事象と、既許可において想定している事象を比較整理した結果を表1に示す。また、これらの事象について、SFPにおける燃料取扱時の高さ関係を図1に示す。

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

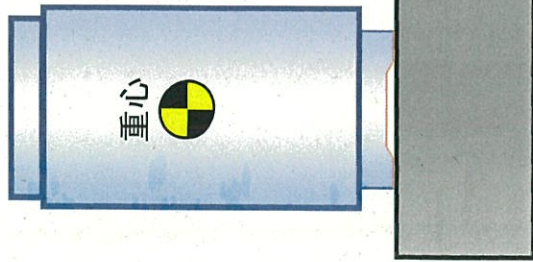


(注) 比較のため SFP とキャスクピットの区画等は省略

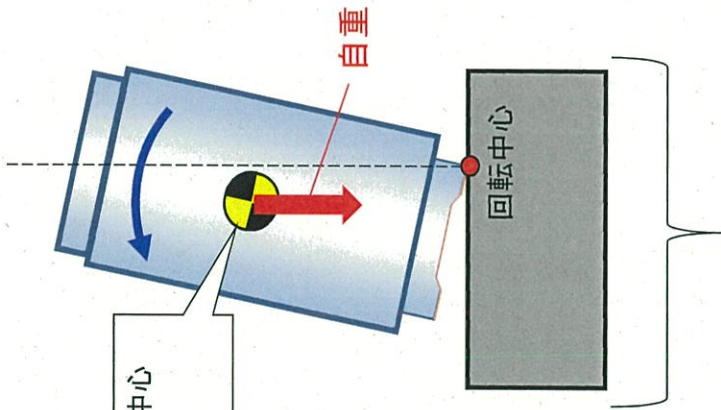
図1 SFP における燃料取扱時の高さ関係

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

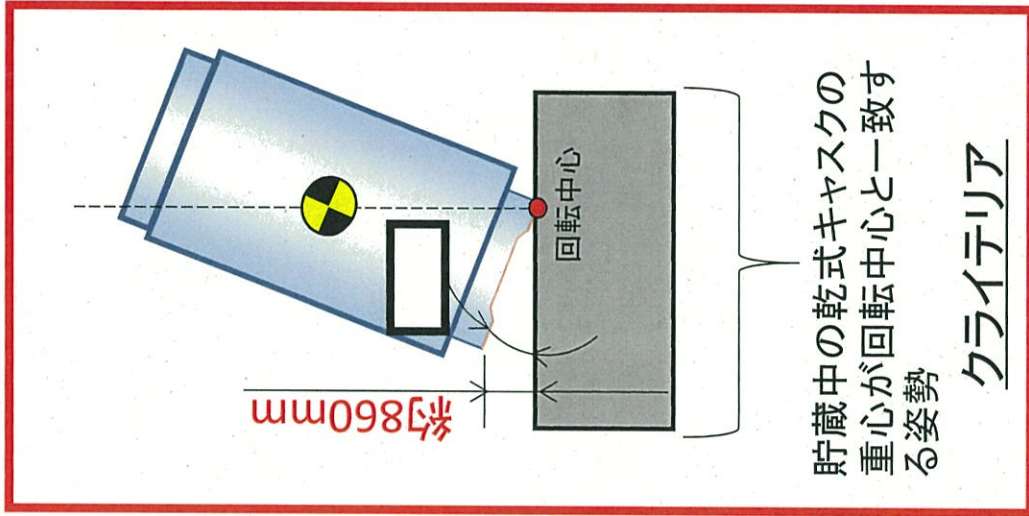
1. 貯蔵中の乾式キャスクの転倒に対するクライテリア(MSF-32P)



重心位置が回転中心位置を超えない
⇒転倒しない

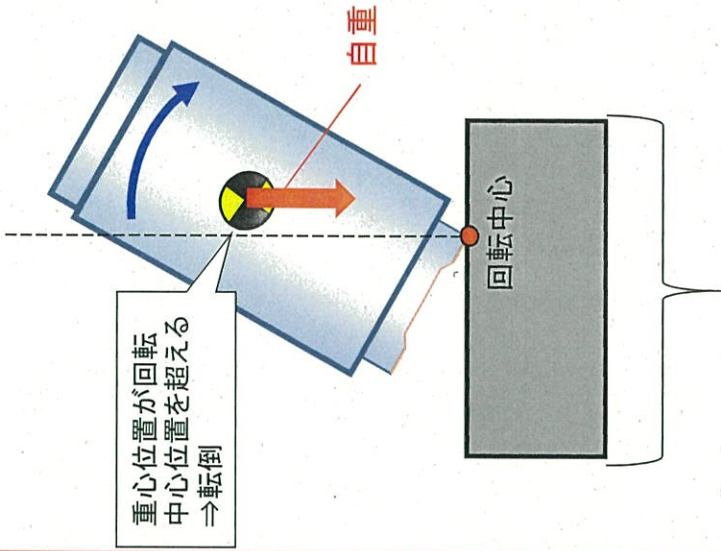


自重が貯蔵中の乾式キャスクの姿勢を復元する方向に作用するため、貯蔵中の乾式キャスクは転倒しない



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



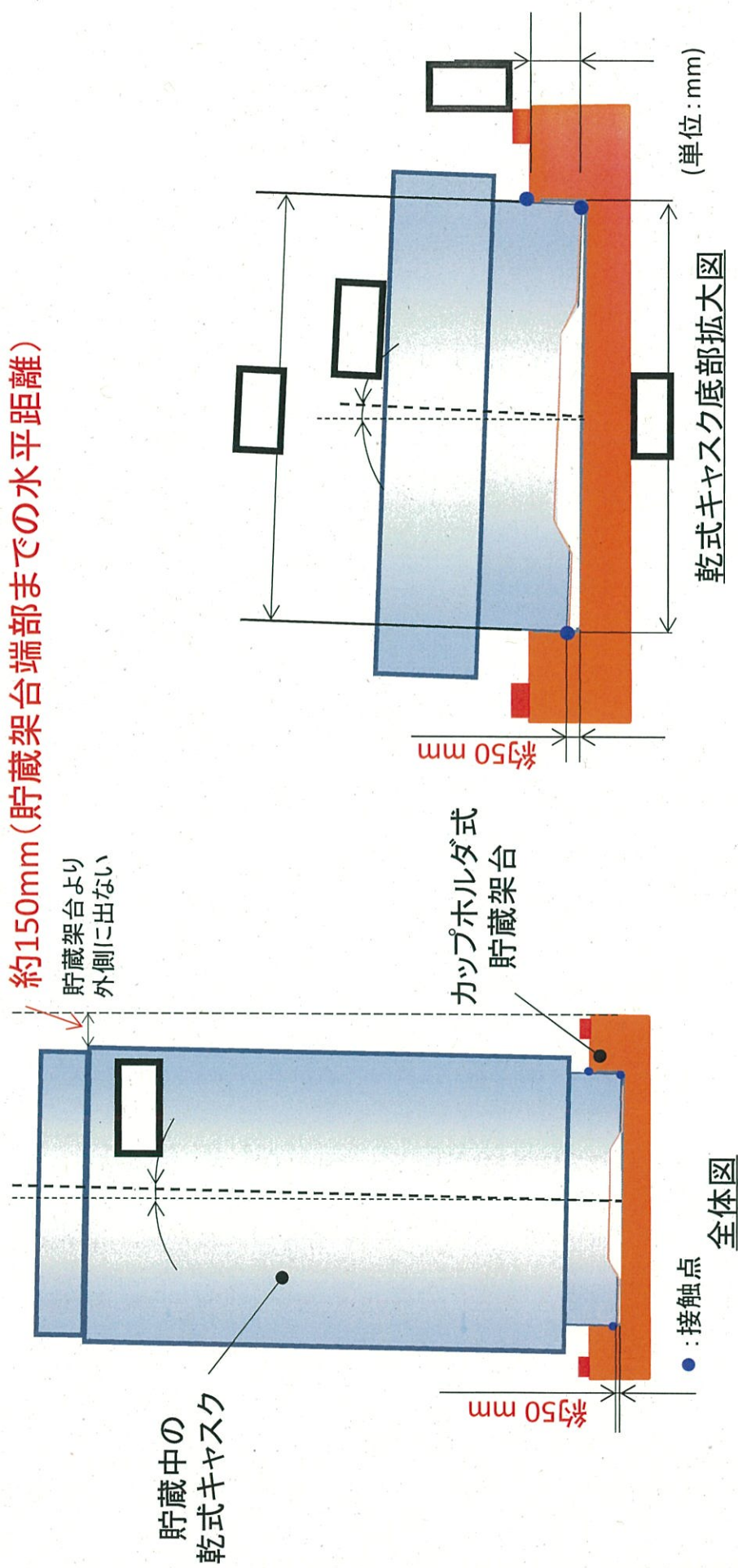
重心位置が回転中心位置を超える
⇒転倒

自重が貯蔵中の乾式キャスクを転倒させる方向に作用するため、貯蔵中の乾式キャスクが転倒

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

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

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

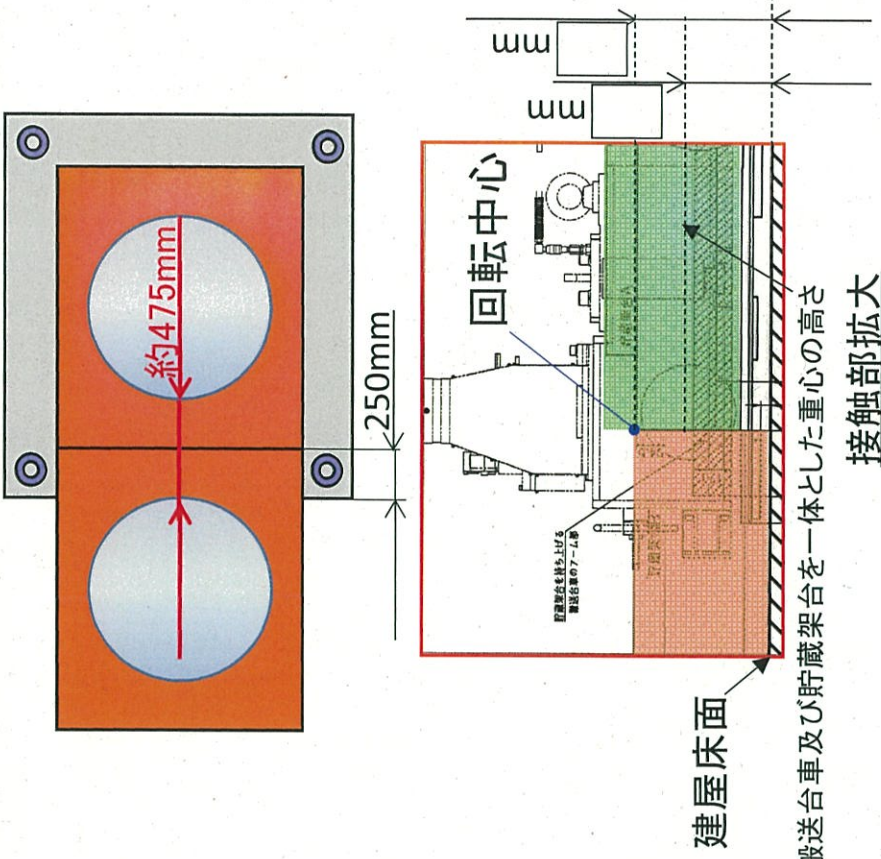
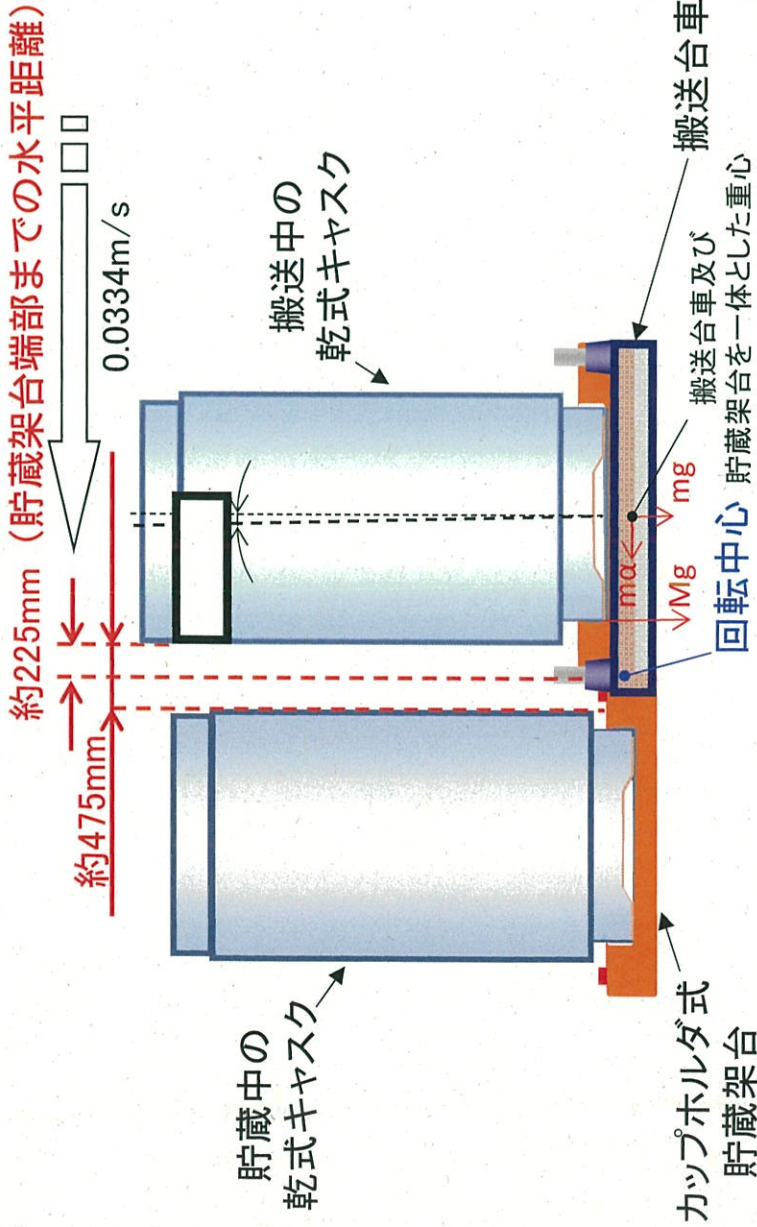
貯蔵架台設置時は、幾何学的に片側浮き上がり量を約50mmに抑制し、乾式キヤスク転倒のクライテリア(片側浮き上がり量約860mm)に対して十分裕度を有する

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



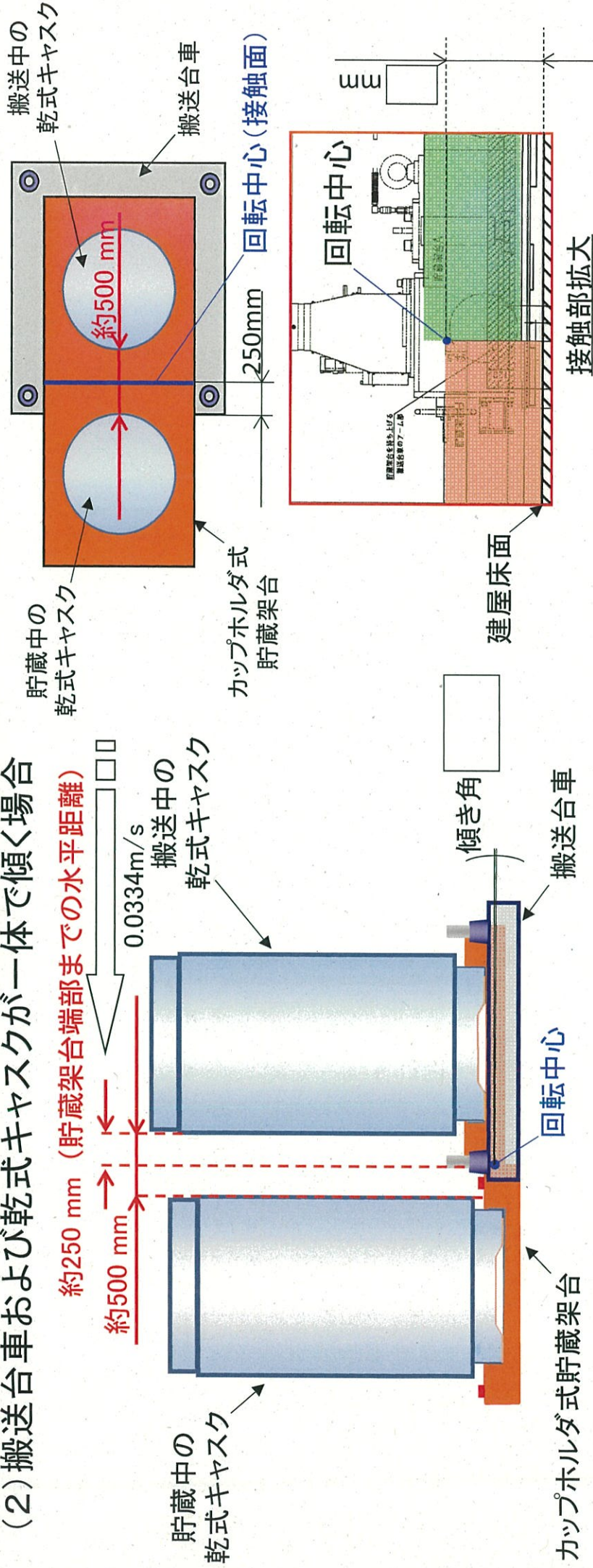
乾式キヤスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、貯蔵架台同士が衝突した場合、搬送台車及び貯蔵架台を一体とした重心が回転中心より下方にあるため、搬送中の乾式キヤスクのみが貯蔵中の乾式キヤスクの方向に傾く

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	
2				
P				
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	
4				
P				

※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。