

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。（別紙3参照）

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線 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

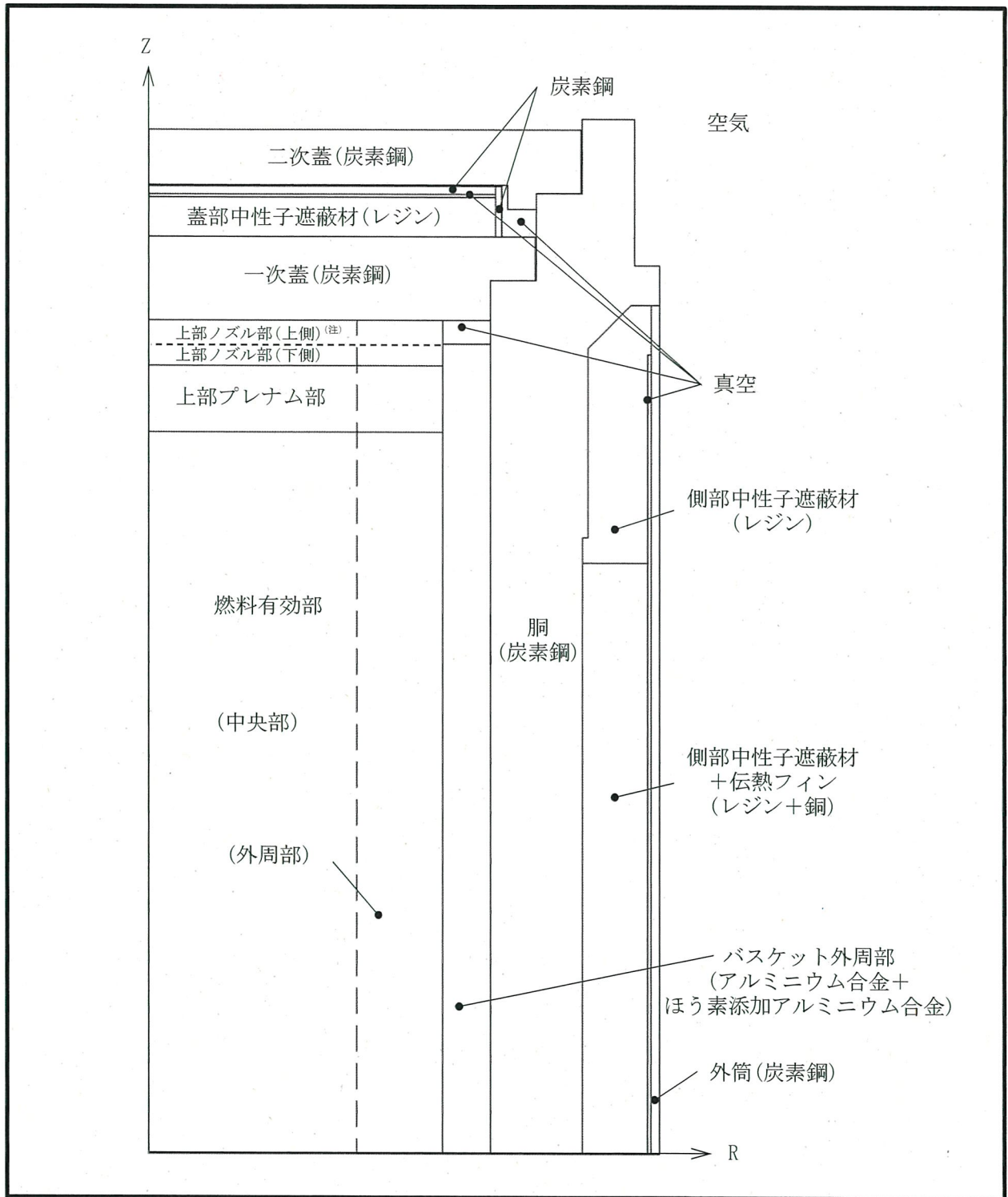
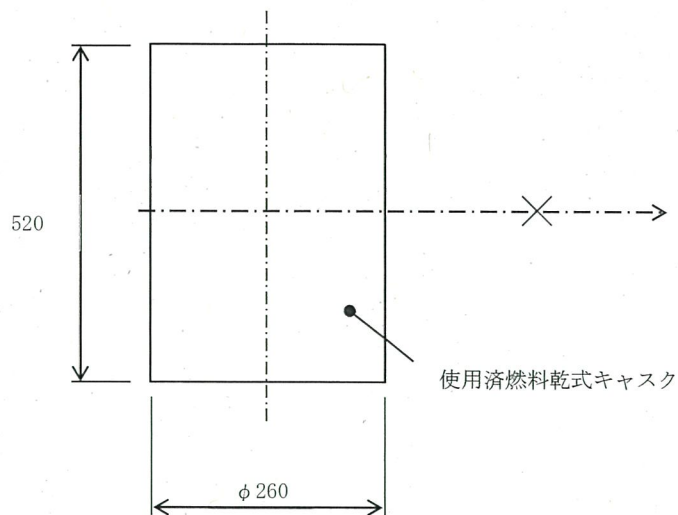


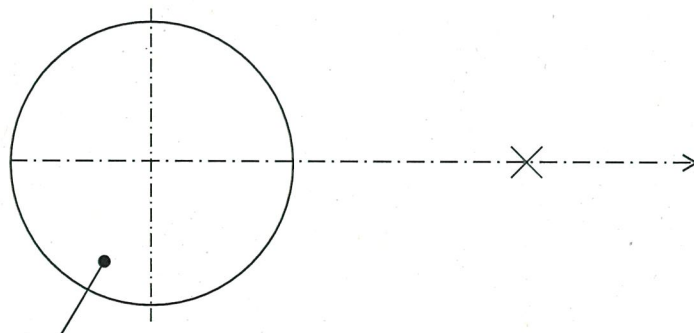
図1 乾式キャスク遮蔽評価モデル (MSF-24P)



× : 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)



使用済燃料乾式キャスク

($\phi 260 \times H520$ の円筒と等価体積の球)

× : 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。

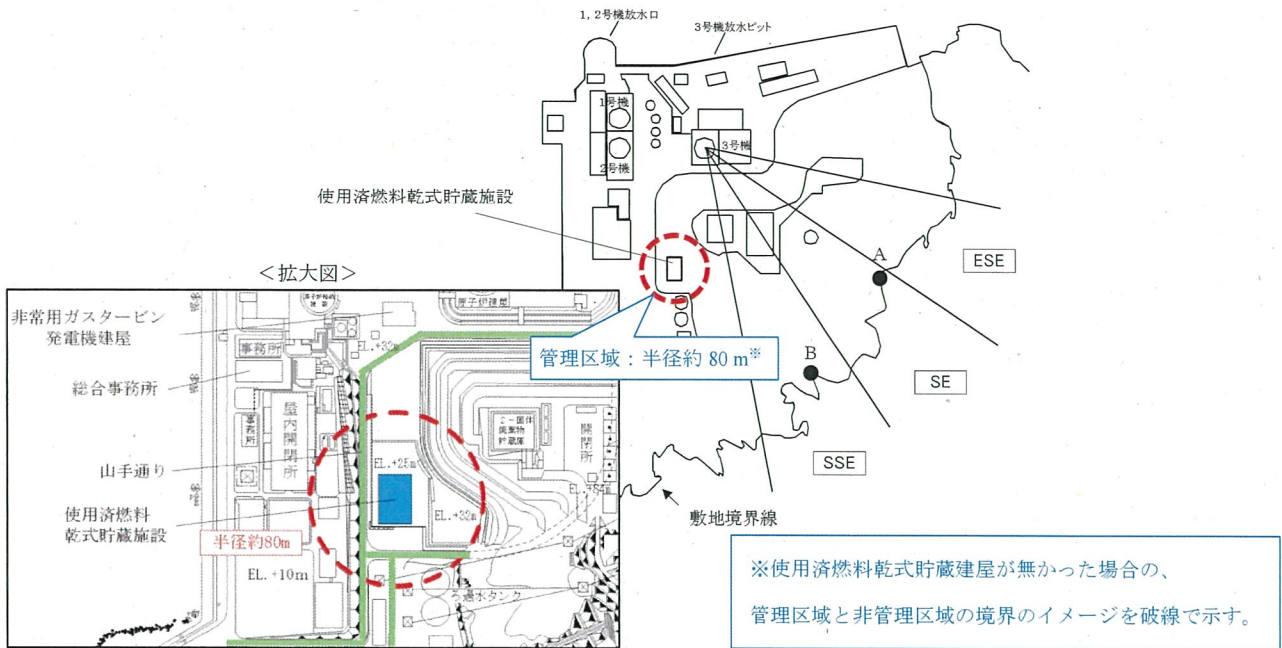


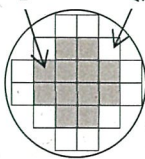
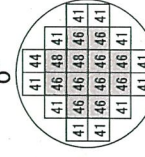
図4 乾式貯蔵施設と評価地点

以上

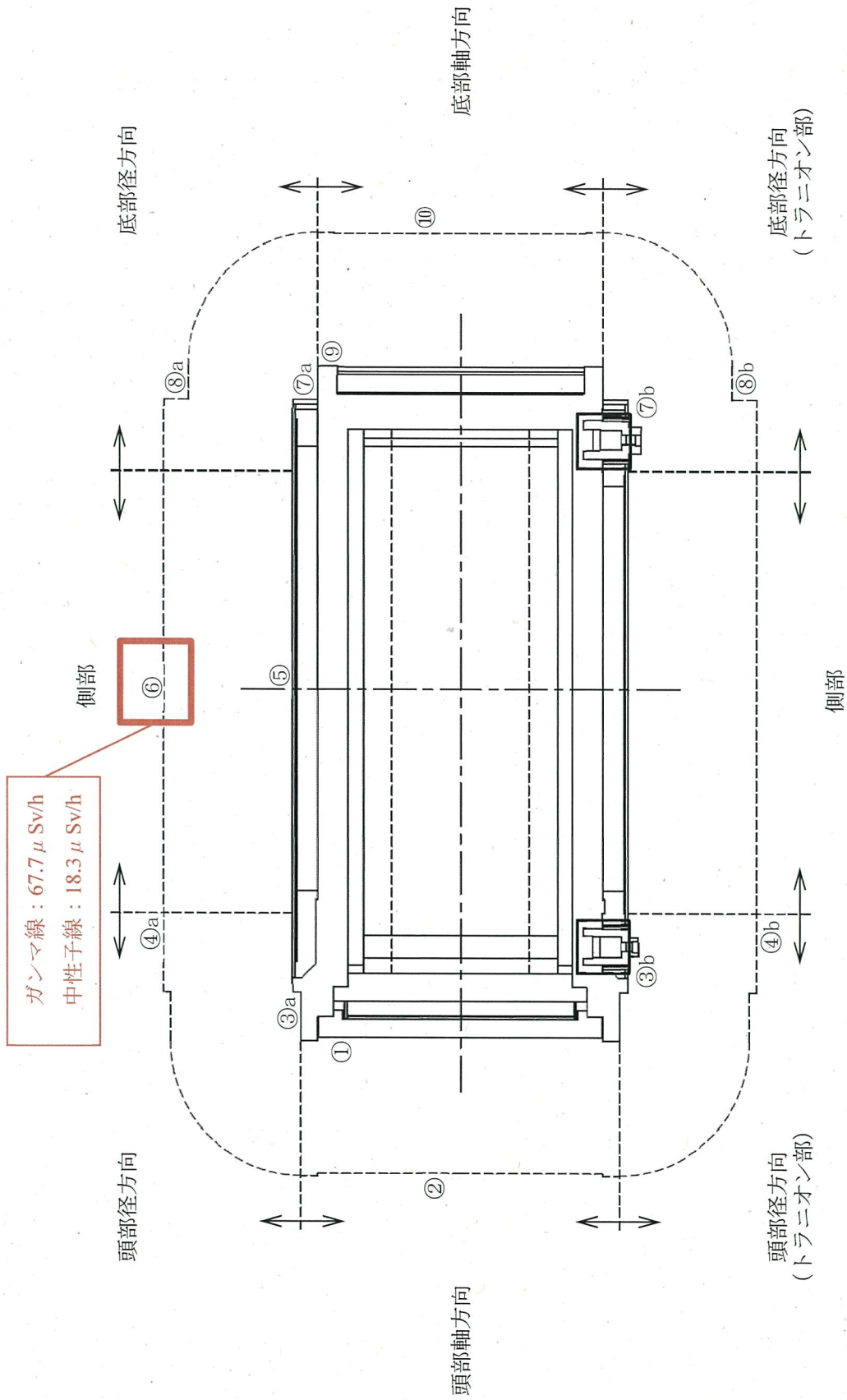
伊方3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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]：運用上必要な保守性
- [③]：設計上必要な保守性

燃料	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	
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、線源強度への影響は軽微(1%未満) [①] 線源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 線源強度として考慮しており、装荷しない場合の構造材放射化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] 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、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以下となるよう収納するが、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					
	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)	≤90	—	—	90	—	
パーナブル ホース	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	—	—	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: 1.83 mSv/h 表面から1m: 86 μSv/h		
判定基準		—		—	表面: 2 mSv/h以下 表面から1m: 100 μSv/h以下		

※1：使用済燃料ピ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に設定
 ※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]
 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]
 ※3：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)

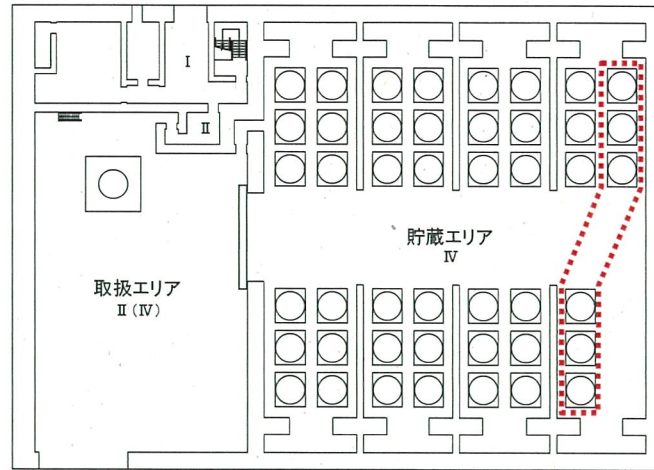
表 1. 線量当量率評価結果 (MSF-24P)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

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

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

相互遮蔽を見込む乾式キャスクについて



×
評価点

図 1 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 (1/2) (参考)

場所	既設建屋		構内	取取区域				貯蔵区域		
	SPP キヤスクピット	除染場 ピット		トレーラ エリア	緩衝体 取外し	取取区域内搬送 (天井クレーン搬送)	取取区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵仕立て作業 (三次蓋取外し・監視設 備取付)	取取区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵指定位置据付 (アソカ固定)
項目	燃料 装荷	蓋取付 真空乾燥※	構造 輸送	乾式キヤスク受入	取取区域内搬送 (天井クレーン搬送)	取取区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵仕立て作業 (三次蓋取外し・監視設 備取付)	取取区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵指定位置据付 (アソカ固定)	貯蔵中の監視
状態	燃料取扱		輸送様態 (緩衝体、三次蓋取付)	緩衝体取外し	緩衝体	搬送台車	通常貯蔵様態	搬送台車		
モード			運搬モード (外運搬相当)				取取モード			貯蔵モード
設計			<運搬モード (外運搬相当)、既認可設備範疇>							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

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. 乾式キャスクのモード、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		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)	乾式キャスク発送	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)	蓋取付 発送仕立て作業① (監視設備取外し・三次	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)	緩衝体、三次蓋	緩衝体	搬送台車	通常貯蔵状態	通常貯蔵状態	通常貯蔵状態	通常貯蔵状態	通常貯蔵状態
モード	運搬モード (外運搬)	運搬モード (外運搬)	取扱モード	取扱モード	貯蔵モード	貯蔵モード	貯蔵モード	貯蔵モード	貯蔵モード
設計	設計	設計	設計	設計	設計	設計	設計	設計	設計

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。

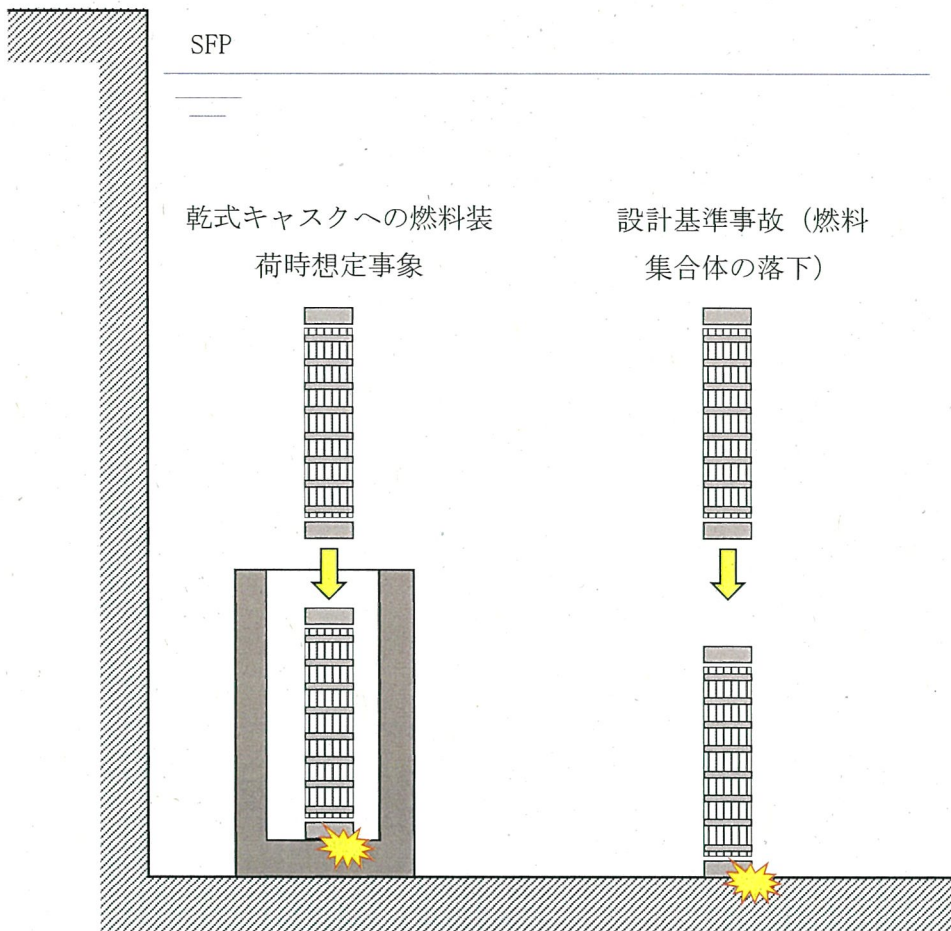
ここで、キャスクピットに据付けられた乾式キャスクに使用済燃料集合体を装荷する作業において想定される事象と、既許可において想定している事象を比較整理した結果を表1に示す。また、これらの事象について、SFPにおける燃料取扱時の高さ関係を図1に示す。

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

搬送中の使用済燃料乾式貯蔵容器の転倒及び
衝突防止について

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。）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。）を乾式貯蔵容器搬送台車（以下、「搬送台車」という。）で搬送中に転倒しないこと及び貯蔵中の乾式キャスクに衝突しないことを示す。

2. 乾式キャスクの貯蔵架台での固定条件

乾式キャスクは、図1及び図2に示すように、貯蔵架台に設置し、4つの下部トラニオンを固定する方式とする。このため、搬送中であっても、乾式キャスクが貯蔵架台から浮き上がることはない。

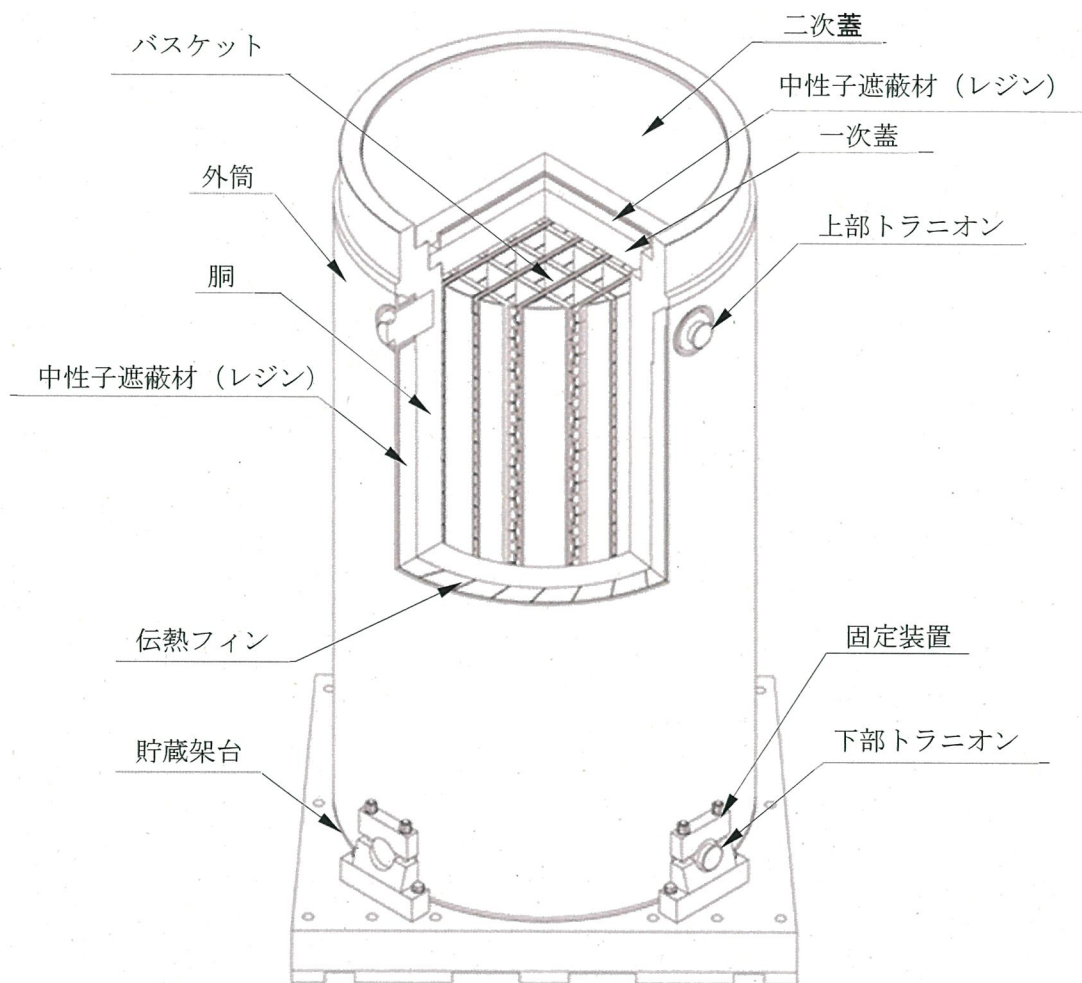


図1 貯蔵架台設置時の乾式キャスク

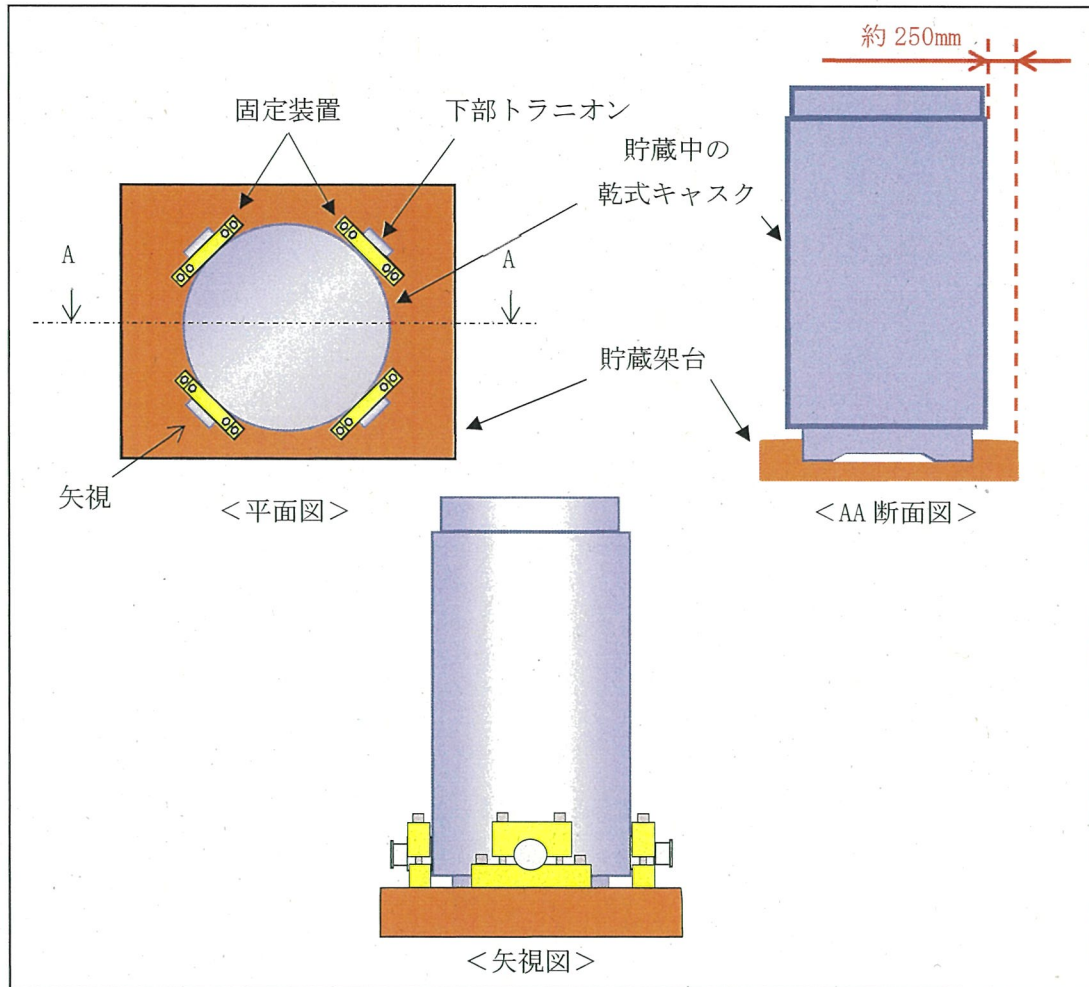


図2 貯蔵架台により支持された乾式キャスクの状態

3. 乾式キャスクの転倒に対するクライテリア

乾式キャスクを貯蔵架台に設置せずに、乾式キャスク単体で床面に貯蔵した場合の乾式キャスクの転倒に対するクライテリアを以下に示す。なお、貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態を図3及び以下の①～④に示す。

- ① 貯蔵状態
- ② 乾式キャスクの重心位置が回転中心を超えない場合、自重が自身の姿勢を復元する方向に作用するため、乾式キャスクは転倒せず、貯蔵状態に戻る状態
- ③ 貯蔵中の乾式キャスクの重心が、回転中心の直上に位置する状態（クライテリア）
- ④ 乾式キャスクの重心位置が回転中心を超える場合、自重が自身を転倒させる方向に作用し、乾式キャスクが転倒する状態

ここで、乾式キャスクが転倒する場合、乾式キャスク転倒のクライテリアは、幾何学的に図3に示すとおりとなる。

- ・MSF-24P 型:
- ・MSF-32P 型:

ここで、実際の乾式キャスクの転倒に対するクライテリアは、2. に示すように乾式キャスクが貯蔵架台及び搬送台車に固定されており、乾式キャスク単体より重心が低く、回転中心と重心との水平距離が長くなるため、乾式キャスク単体の転倒に対するクライテリアより大きくなるが、保守的に乾式キャスク (MSF-24P 型及びMSF-32P 型) 単体の転倒のクライテリア () を用い、評価する。

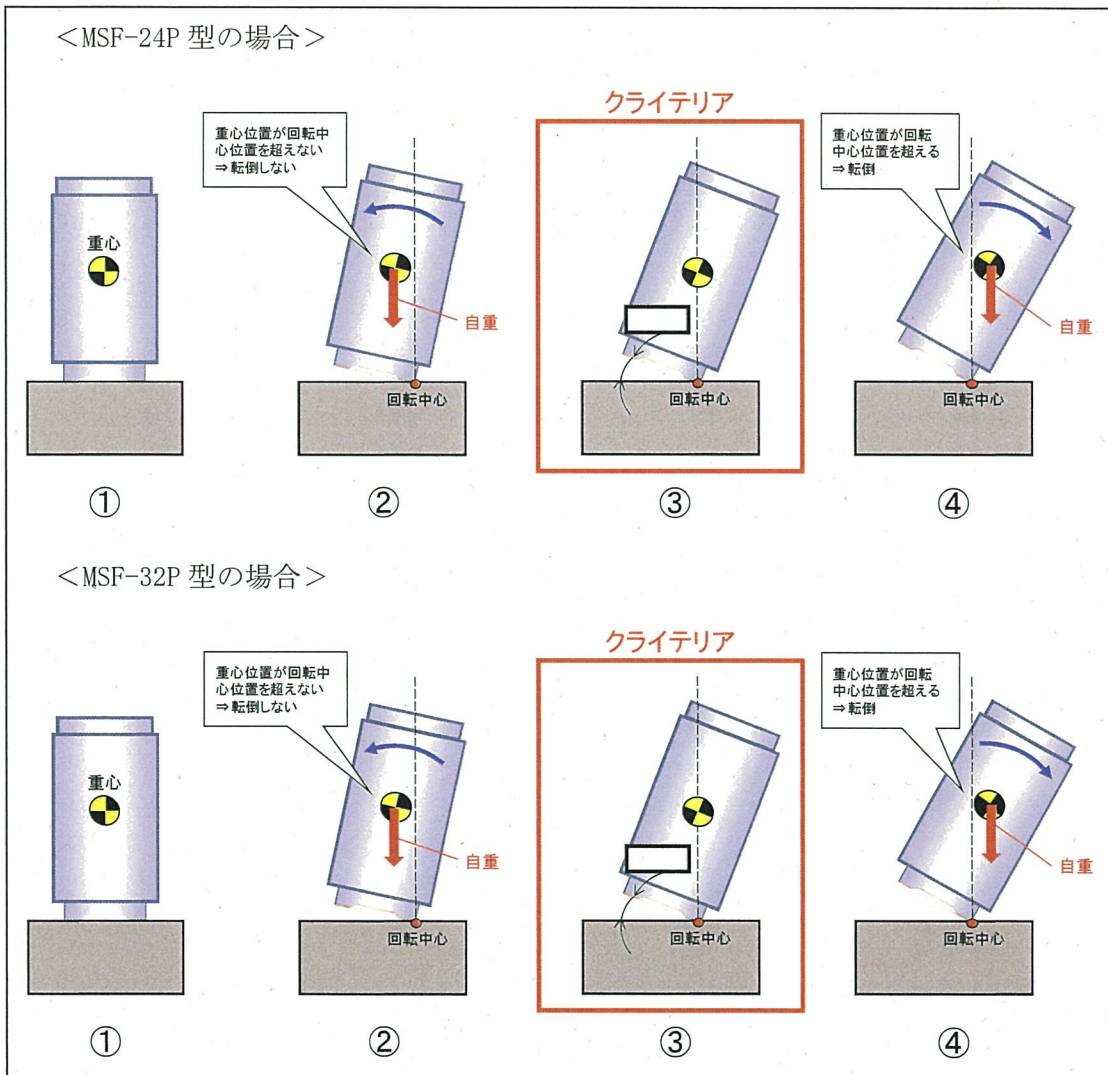


図3 乾式キャスクが貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態

4. 乾式キャスクの転倒及び乾式キャスク同士の衝突の防止

乾式キャスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、搬送中の乾式キャスクの貯蔵架台と貯蔵中の乾式キャスクの貯蔵架台同士が衝突した場合を想定し、搬送中の乾式キャスクが転倒しないこと及び貯蔵中の乾式キャスクへ衝突しないことを評価する。

ここで、衝突速度を 0.0334 (m/s) ※1とし、搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体で傾く場合を想定する。ただし、搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体となった場合の重心位置及び重量においては、保守的に搬送台車を考慮しない。

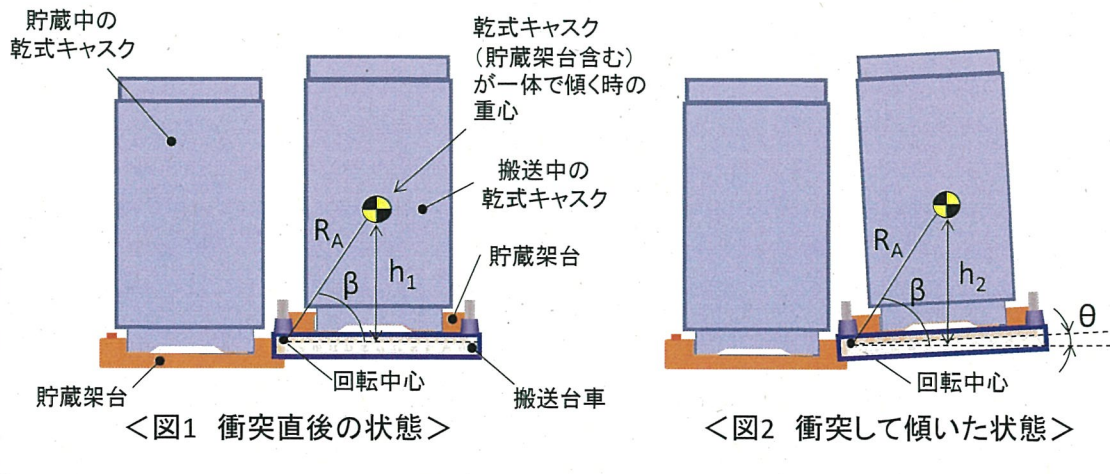
※1： 搬送台車の最大走行速度（2m/分）

このとき、衝突速度での運動エネルギーが、全て転倒エネルギー（乾式キャスク（貯蔵架台含む）の位置エネルギー）に使われたと仮定し、次式から傾き角を求めると、約 \square となり、乾式キャスク単体の転倒のクライテリア（約 \square ）より十分小さいため、搬送中の乾式キャスクは転倒しない。

$$\frac{1}{2}m(v)^2 = mgh_2 - mgh_1, \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{h_2}{R_A}\right) - \beta \approx \square$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- m : 乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重量 (kg)
- v : 衝突速度 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h_1 : 衝突直後の状態における、回転中心を基準高さとした乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心高さ (m)
- h_2 : 衝突して傾いた状態における、回転中心を基準高さとした乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心高さ (m)
- θ : 乾式キャスク（貯蔵架台含む）の傾き角 ($^\circ$)
- R_A : 回転中心から乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心までの距離 (m)
- β : 回転中心を通る水平面及び直線 R_A で構成される角度 ($^\circ$)



また、図 4 の平面図及び断面図に示すように、搬送中に搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が傾いても、搬送中の乾式キャスクの端部と貯蔵架台端部までの水平距離は約 250mm^{*2} となり、乾式キャスクの端部が貯蔵架台の端部より外側に出ることはなく、貯蔵中の乾式キャスクとの水平距離が約 500mm 確保されることから、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。

※2： 貯蔵架台が乾式キャ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するが、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。

以上より、乾式キャスク搬送中に搬送台車が逸走し、貯蔵中の乾式キャスクの貯蔵架台と衝突しても、搬送中の乾式キャスクは転倒せず、貯蔵中の乾式キャスクにも衝突しない。

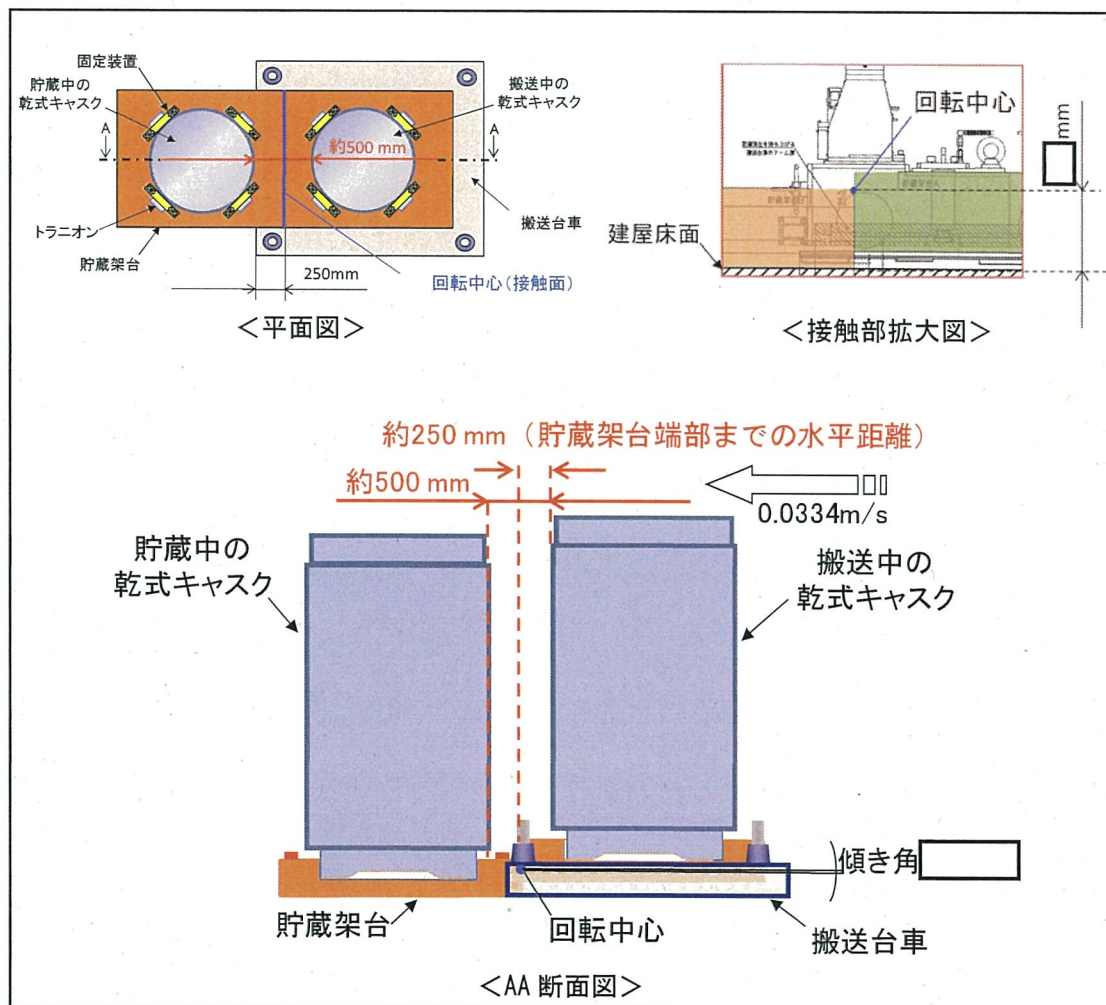


図 4 搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合の状態

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	縦置き想定 ・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
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）	同じ
判定基準	通常輸送時 表面： ≤ 2000 ($\mu\text{Sv/h}$) 表面から1m： ≤ 100 ($\mu\text{Sv/h}$) 一般の試験条件 表面： ≤ 2000 ($\mu\text{Sv/h}$)	表面から1m： ≤ 10 (mSv/h)	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

	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
キヤスクの配列	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
キヤビテイ内条件	冠水状態：100%純水	乾燥状態：真空に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
キヤビテイ外条件	真空	同左	同左	同じ
判定基準	実効増倍率 (+3σ 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	全体モデル ・緩衝体：考慮 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 燃料集合体モデル ・燃料被覆管：考慮 ・燃料棒同士の隙間：He	全体モデル ・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 同左	全体モデル ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮 同左	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°C (大気温度)	火災中：800°C-30 分間 火災前後：38°C (大気温度)	50°C (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°C	全表面を考慮 基準温度：800°C (火災中) ：38°C (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	バスケット：250°C 燃料集合体：275°C レジン：149°C 金属ガスケット：130°C 近接表面：85°C (通常時) 要求なし (一般)	バスケット：同左 燃料集合体：— レジン：180°C 金属ガスケット：190°C 近接表面：要求なし	同左 (一般)	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

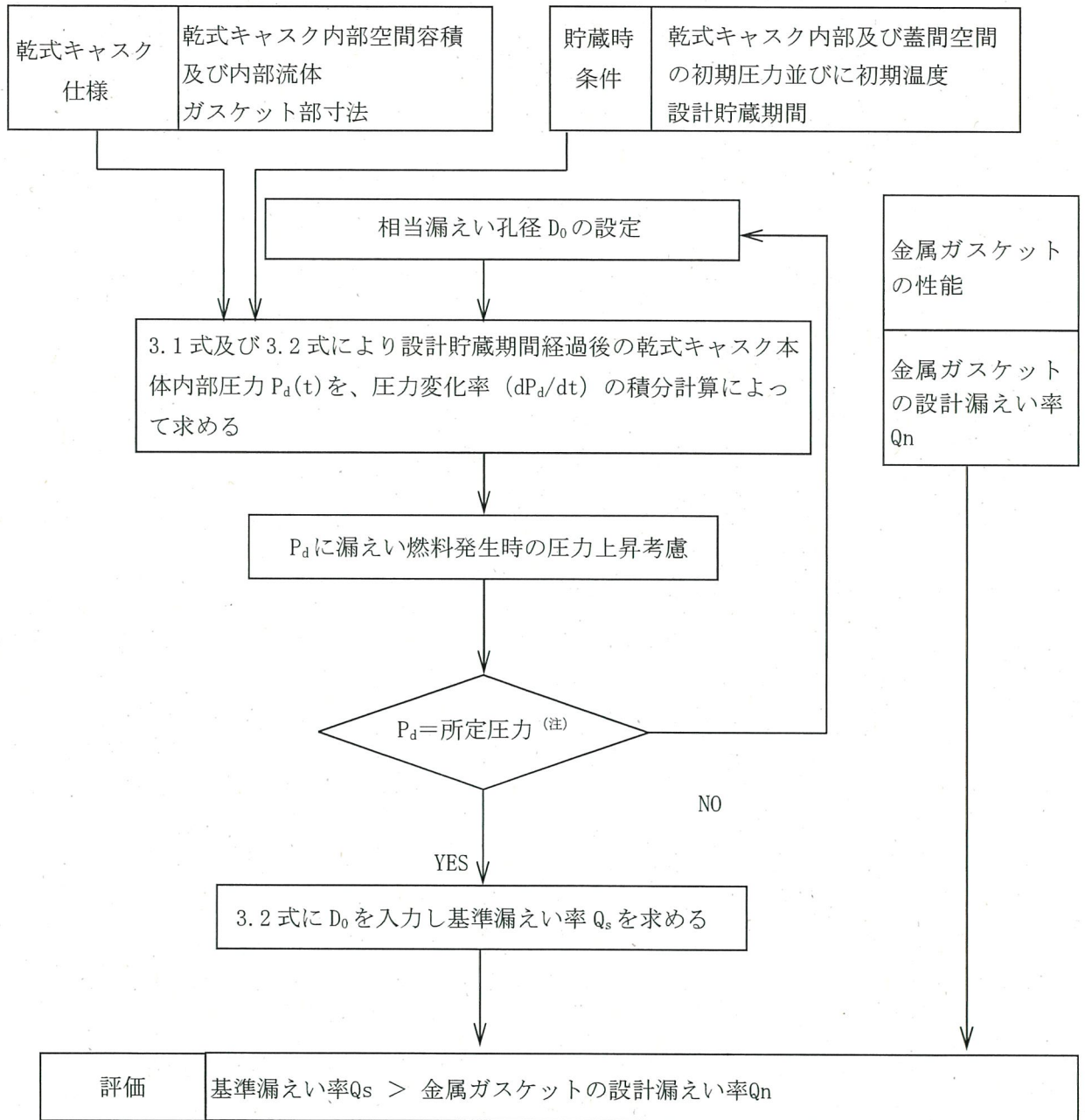
表 5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (1/2)

評価方法	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	<p>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)</p>	同左	<p>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。</p>	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 3 及び図 4 参照		図 1 及び図 2 参照	
評価式	クヌッセンの式 ポイル・シヤルルの式	同左	同左	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°C (三次蓋0リング部温度)	195°C (三次蓋0リング部温度)	-25°C (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）

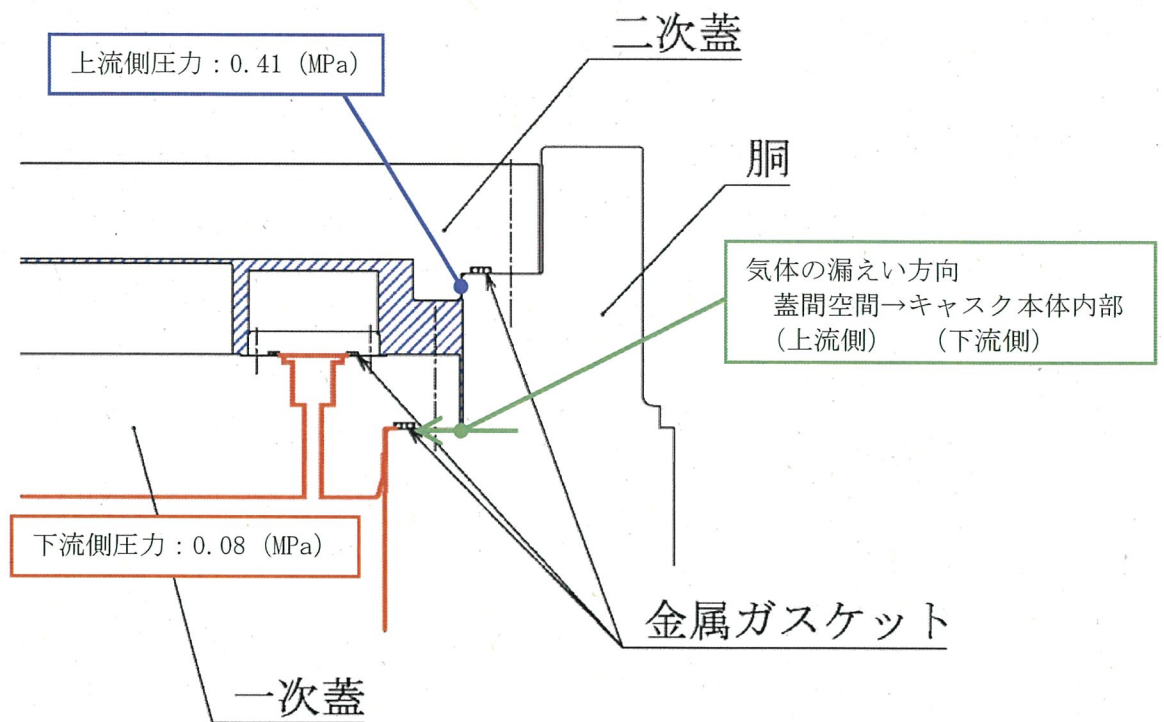


図2 閉じ込め評価に係る構造図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

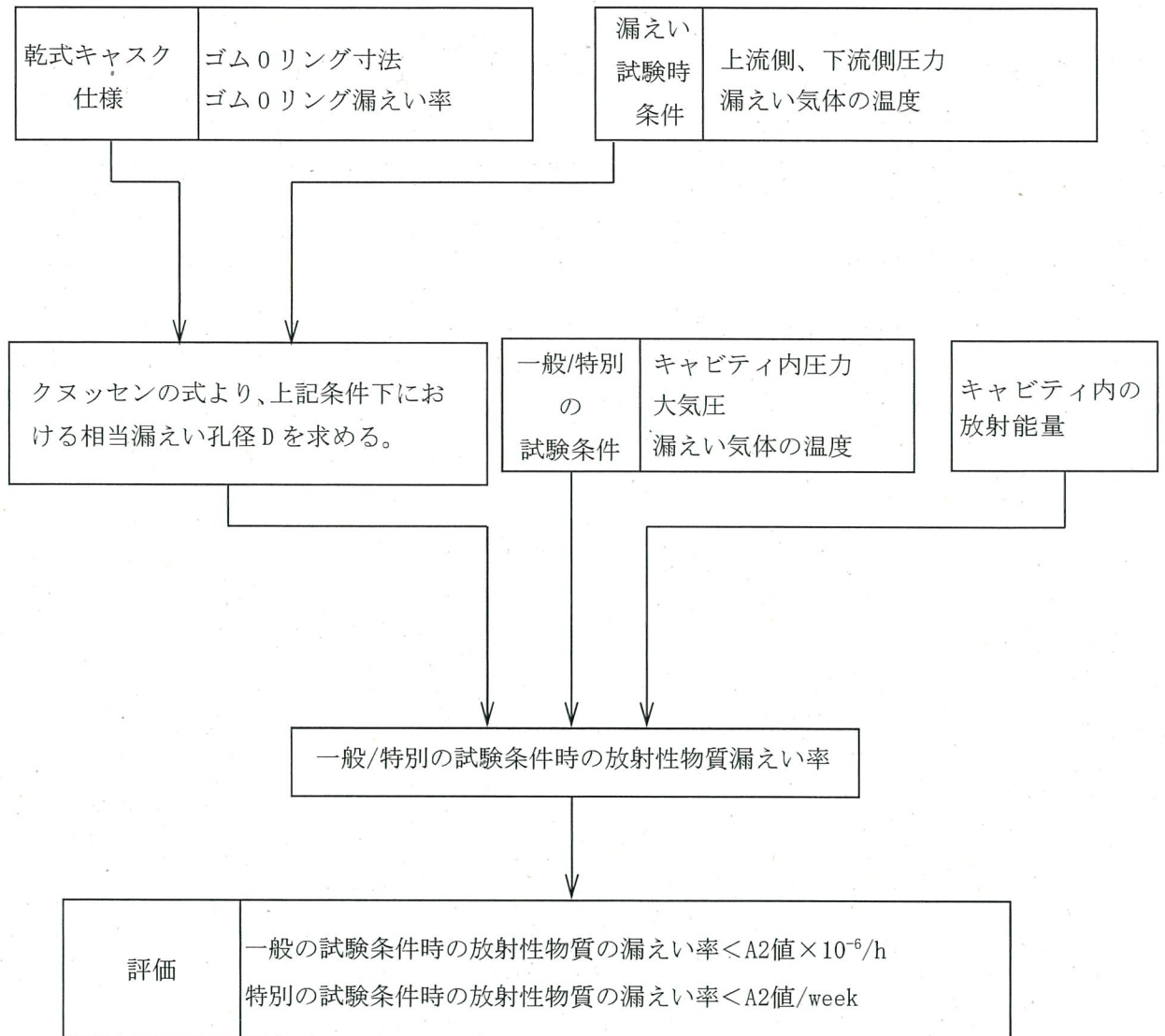
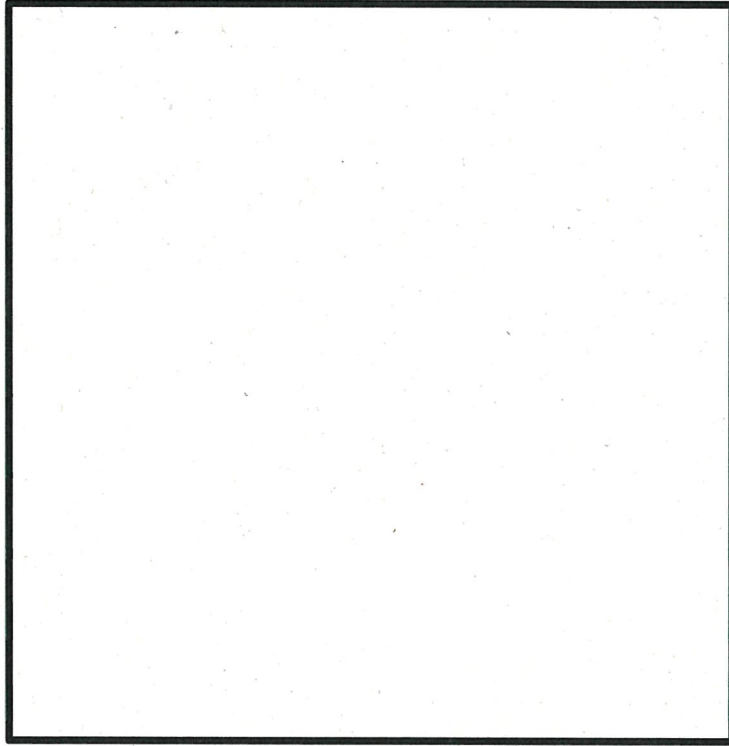
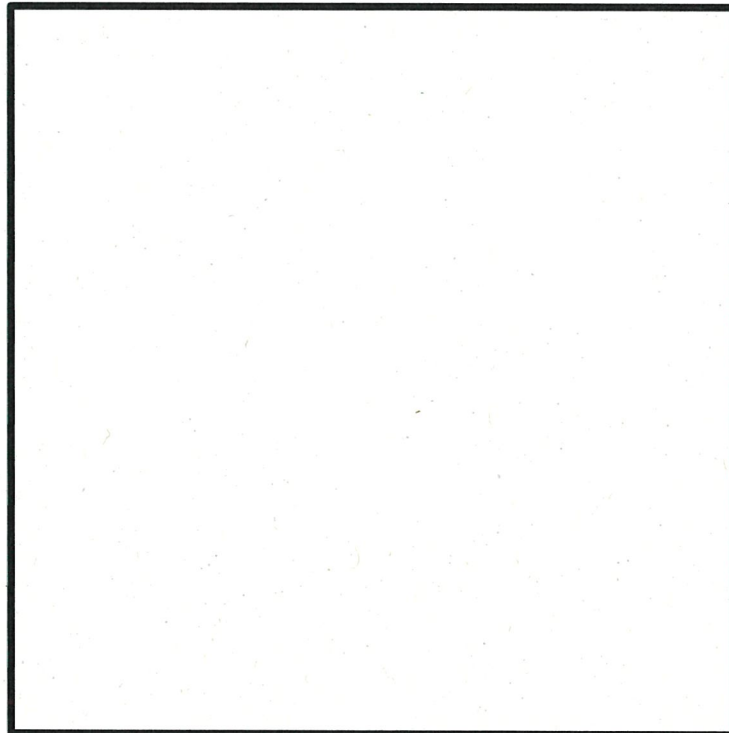


図3 放射性物質の漏えい率の計算フロー図（輸送時の閉じ込め計算）



(a) 一般の試験条件



(b) 特別の試験条件

図 4 閉じ込め評価に係る構造図（輸送時の閉じ込め計算）

乾式貯蔵建屋取扱エリアにおける乾式貯蔵建屋
天井クレーンによる乾式キャスクに対する
波及的影響について

1. 乾式貯蔵建屋天井クレーンについて

乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置および構造イメージ図を図1、2に示す。

図1に示す様に乾式貯蔵建屋天井クレーンは、レールによりその移動範囲が制限されているため、取扱エリア内しか移動できない構造になっており、主な役割として、以下を担っている。

- ・乾式キャスクの移動（トレーラ⇄検査架台）
- ・乾式キャスクの縦起し・横倒し
- ・乾式キャスクへの緩衝体等の取付け・取外し

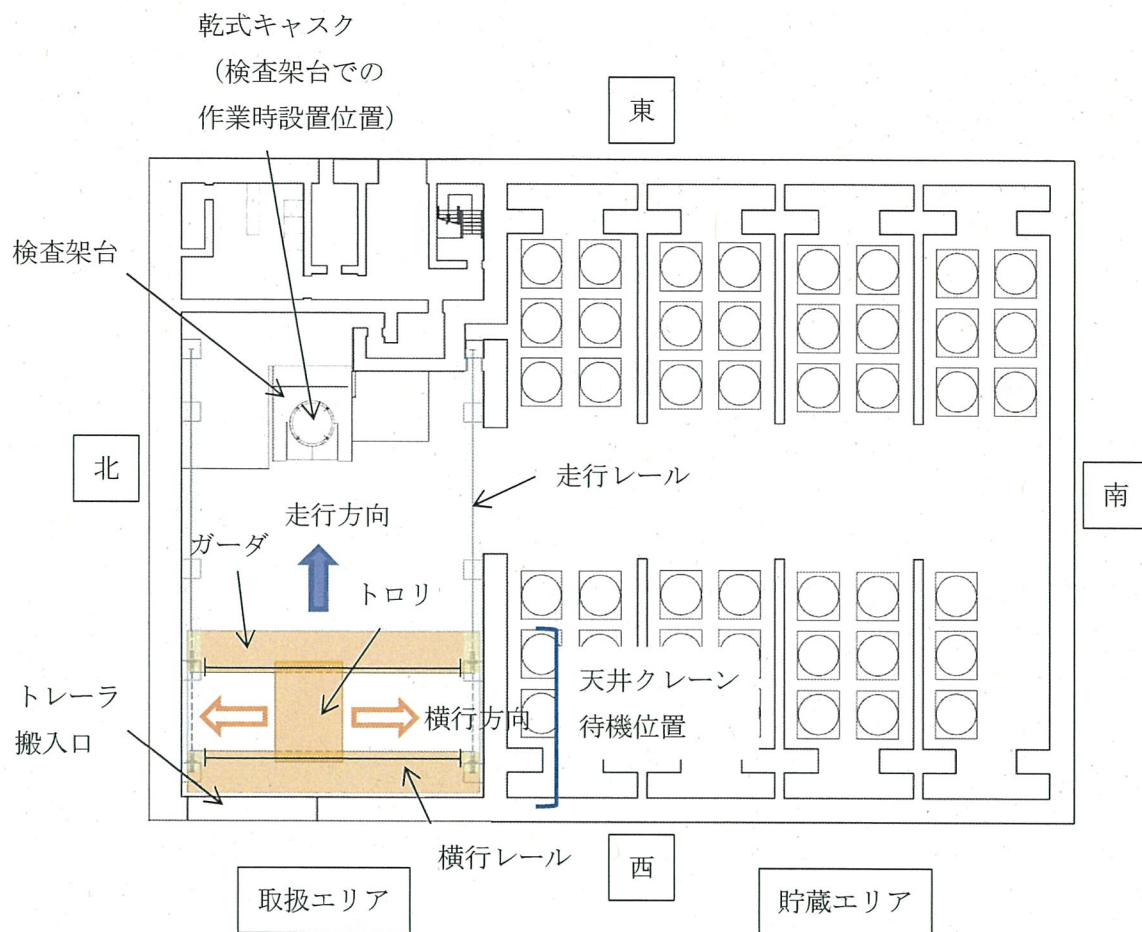
また、図2に示す様に乾式貯蔵建屋天井クレーンは、乾式貯蔵建屋の壁に設置された走行レール上をガーダが東西方向に移動（走行）し、ガーダ上の横行レール上を南北方向にトロリが移動（横行）する。横行レール上の移動及びクレーンワイヤの巻上・巻下は、ガーダ上にあるトロリにより行う。

ここで、設置許可基準規則の解釈第16条第9項「第2項第1号ハ及び第4項において、兼用キャスクの設計については、別記4のとおりとする。」への適合性の観点から、乾式キャスクは、設計上想定される状態において、安全機能が損なわれないように設計するため、乾式貯蔵建屋天井クレーンについては、審査ガイド「3. 自然現象等に対する兼用キャスク貯蔵施設の設計の基本方針」の確認事項にあるように、

- ・周辺施設は一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求される施設として区分されていること。
- ・兼用キャスク及び周辺施設は、兼用キャスクの安全機能を維持するためにこれらが担保すべき機能に応じた設計が行われていること。

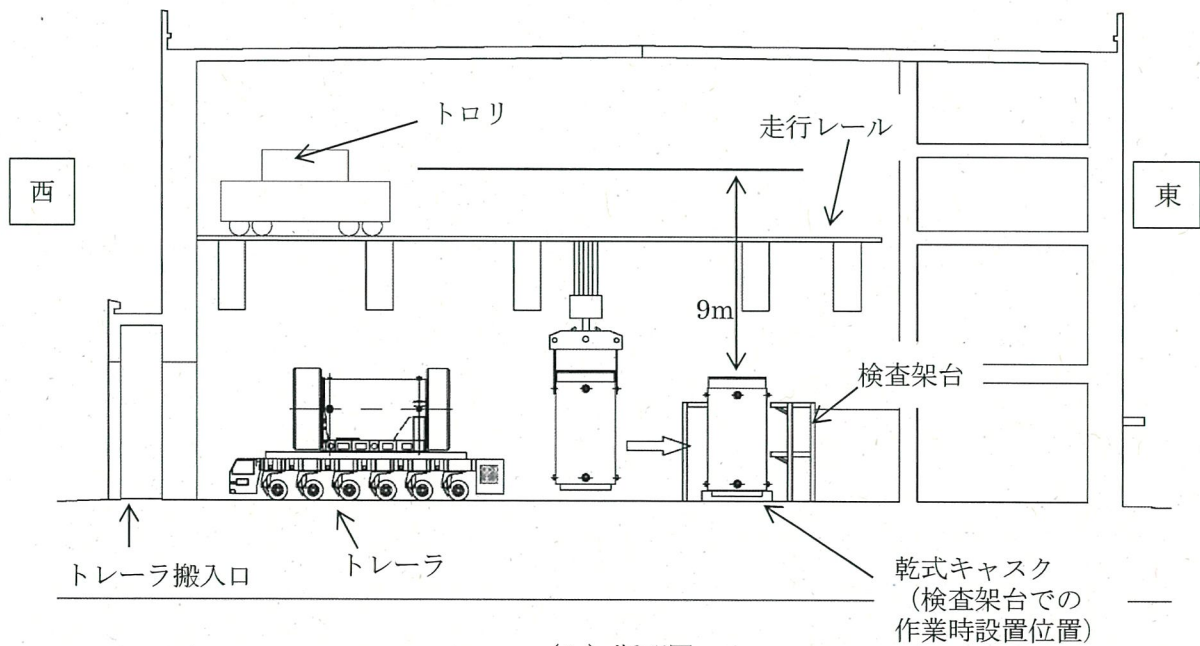
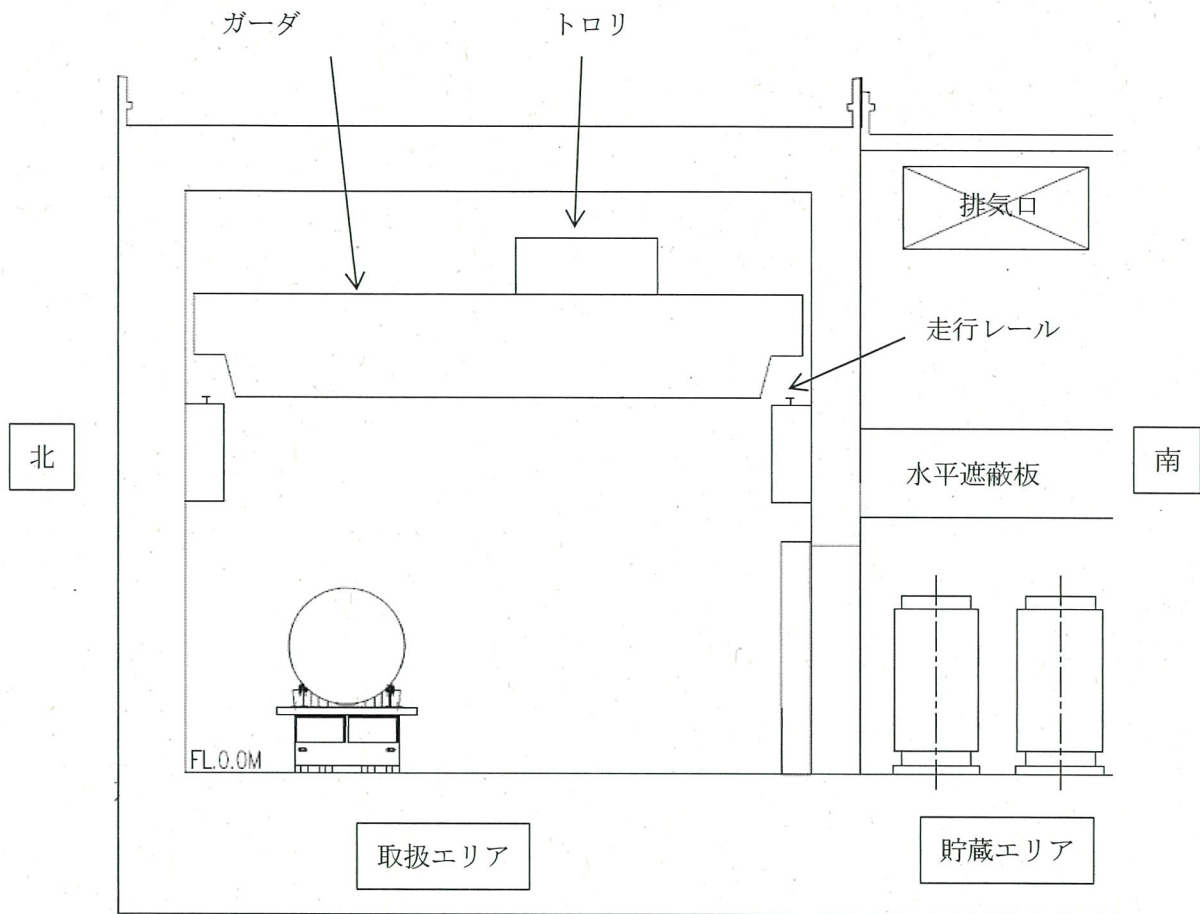
との要求に対し、一般産業施設として設計し、乾式キャスクの安全機能を維持するため、落下防止対策として以下の対策を講じている。

- ・乾式貯蔵建屋天井クレーンの走行及び横行レールには、浮き上がり防止機能を設ける設計としており、走行及び横行レールからガーダ及びトロリが浮き上がることがないように、落下防止対策を講じる。
- ・乾式貯蔵建屋は自然現象等に対し頑健な建屋であり、建屋崩落に伴う乾式貯蔵建屋天井クレーンの落下は生じない設計とする。また、乾式貯蔵乾式貯蔵建屋は、頑健な建屋であり、地震等が生じても乾式貯蔵建屋の構造は維持されることで、走行レール間距離は維持されるため、約50°ガーダが折れ曲がらない限り、ガーダは落下しない構造であり、同じく横行レール上に設置されるトロリも横行レール間距離は維持されるため、トロリも落下しない構造である。



(a) 平面図 (全体図)

図1. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置 (1/2)



(b) 断面図

図1. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置 (2/2)

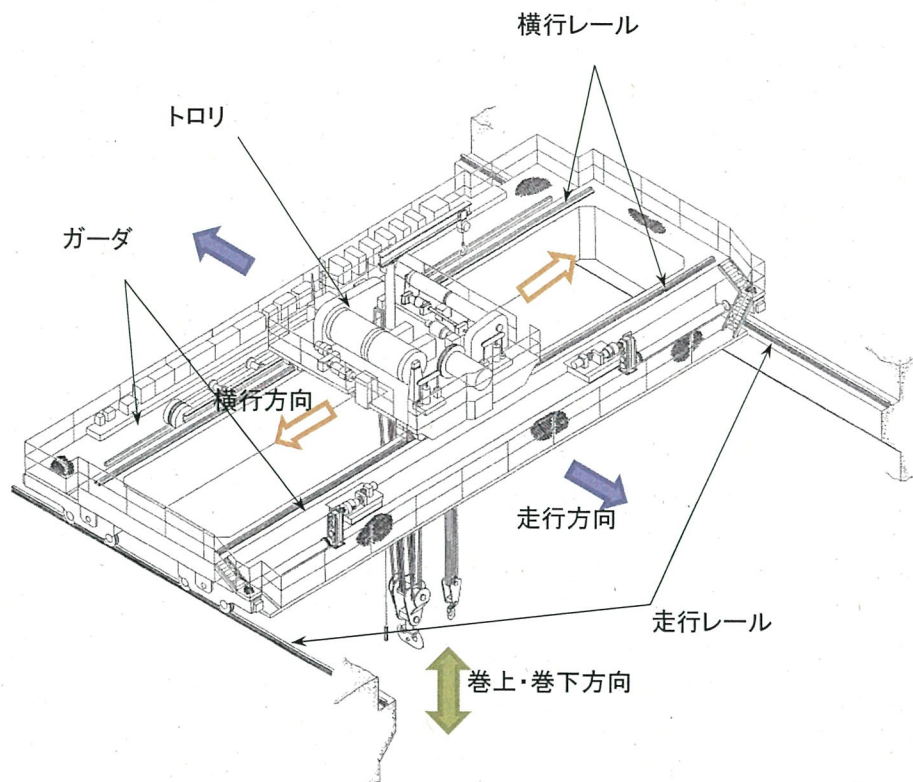


図 2. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの構造イメージ図

2. 取扱エリアでの乾式キャスクの貯蔵仕立て作業について

伊方発電所で乾式キャスクを取扱う頻度は、年間3基程度を想定しており、乾式キャスク1基あたり1日程度の取扱エリア内での取扱いが想定される。このうち、取扱エリア内での作業において、検査架台上での作業が支配的な作業であるが、検査架台上での作業としては、漏えい率検査や監視計器（圧力計）の取付作業となり、重量物を扱わないため、乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いての作業とはならない。

また、図3に示すとおり、当該天井クレーンを使わない検査架台上での作業時には、当該天井クレーンは乾式キャスクから離れた待機位置に移動させる運用とする。

よって、取扱エリアでの支配的な作業となる検査架台上での作業時において、乾式貯蔵建屋天井クレーンが乾式キャスク上に落下することは考え難い。

ここで、設置許可基準規則第4条第6項の解釈別記4第4条第2項三号^{*1}への適合の観点から、JEAG4601の地震と組み合わせるべき事象に対する発生頻度及びその状態の継続時間の考え方を準用し、天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置する時間及び地震動の超過確率を考慮し、検討した結果、乾式貯蔵建屋天井クレーンは基準地震動 S_s と組合すべき事象として選定されないことを確認した。検討にあたっての具体的な考え方は以下のとおり。

<評価条件>

- ・乾式貯蔵建屋天井クレーンは、取扱エリアにおいて乾式キャスクを取り扱うものであり、乾式キャスクを取り扱うために乾式キャスクの上方に移動するが、天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置するのは年間1.5時間程度（約3基程度）と想定する。
- ・基準地震動 S_s の発生確率は、図4及び図5に示す伊方発電所の地震ハザード解析から得られる超過確率を参照し、JEAG4601・補-1984で記載されている S_2 の発生確率($5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ /サイト・年)を S_s の超過確率に読み替え、最大値である 5×10^{-4} /年を適用する。

<評価結果>

- ・天井クレーンが乾式キャスク上方に位置する時に S_s が発生する確率は 5×10^{-4} /年 \times 1.5時間 \div (365日 \times 24時間)で算出され、 10^{-7} /年を下回る。

また、貯蔵時の乾式キャスクに対しては波及的影響を及ぼさないように、貯蔵エリアには走行レールを敷設せず、貯蔵エリア上を走行することができない構造としている。

※1:「兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。

この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、第6項地震力を適用すること。また、上記の「兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」を満たすために、少なくとも次に示す事項について、兼用キャスクがその安全機能を損なわないことを確認すること。

- ・設置地盤、地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
- ・兼用キャスク間の相互影響
- ・兼用キャスクと周辺施設との相互影響（周辺施設の損傷、転倒、落下等による兼用キャスクへの影響を含む。）

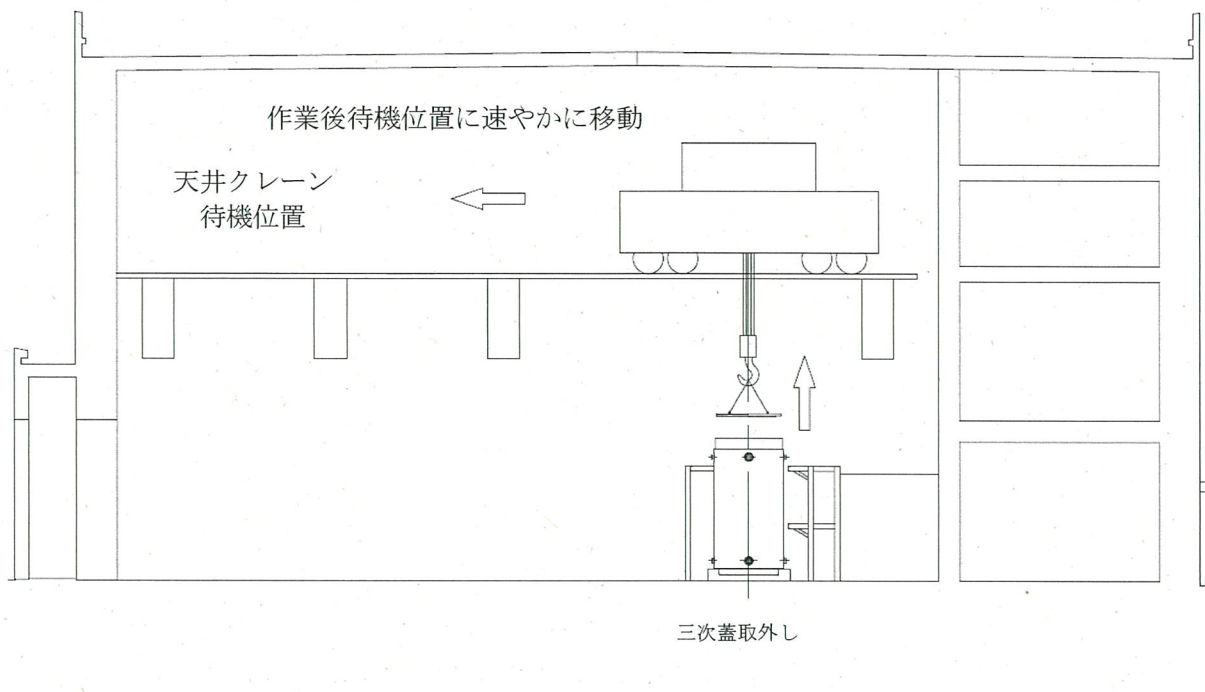


図3. 乾式キャスクの取扱い図

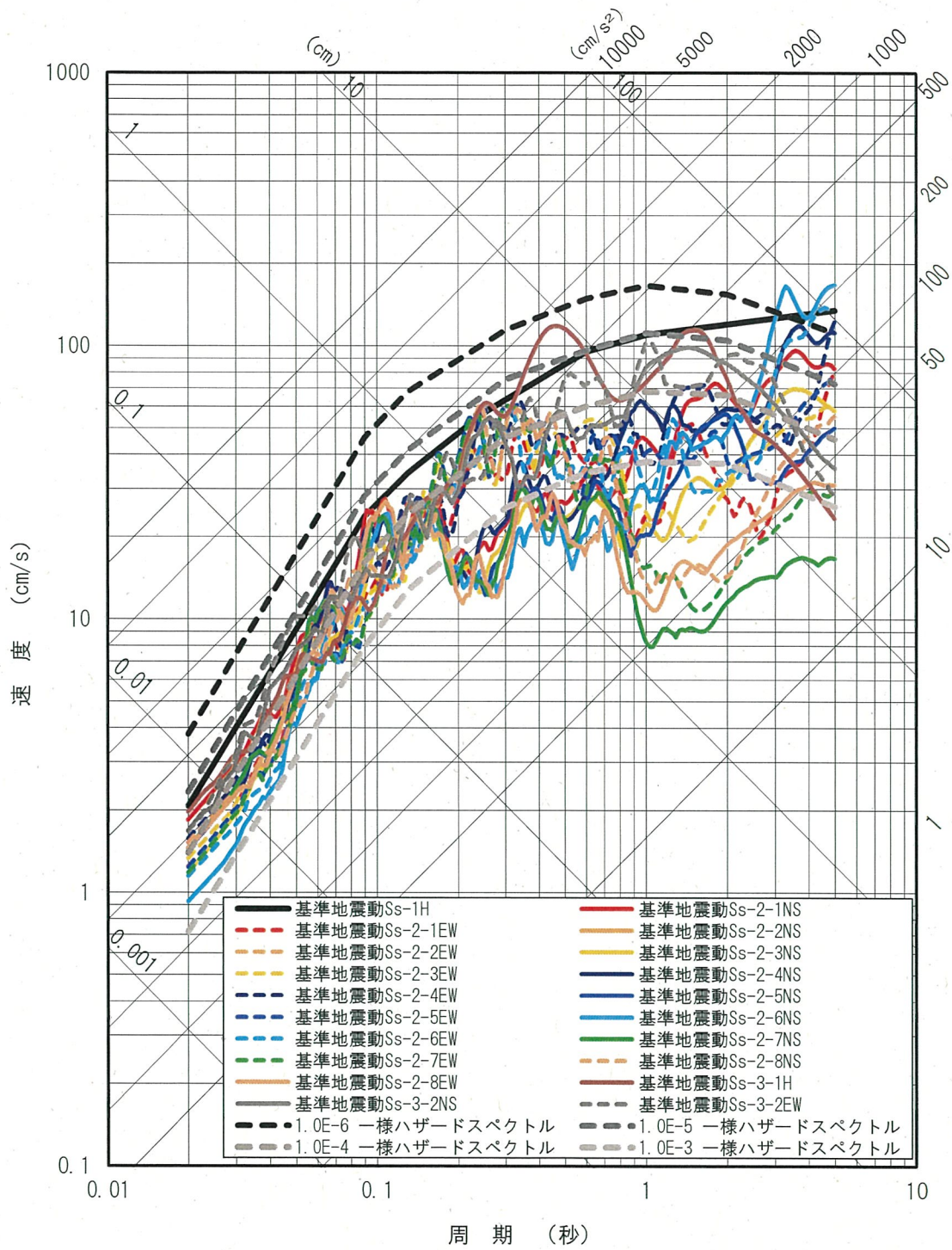


図4 基準地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル (水平方向)

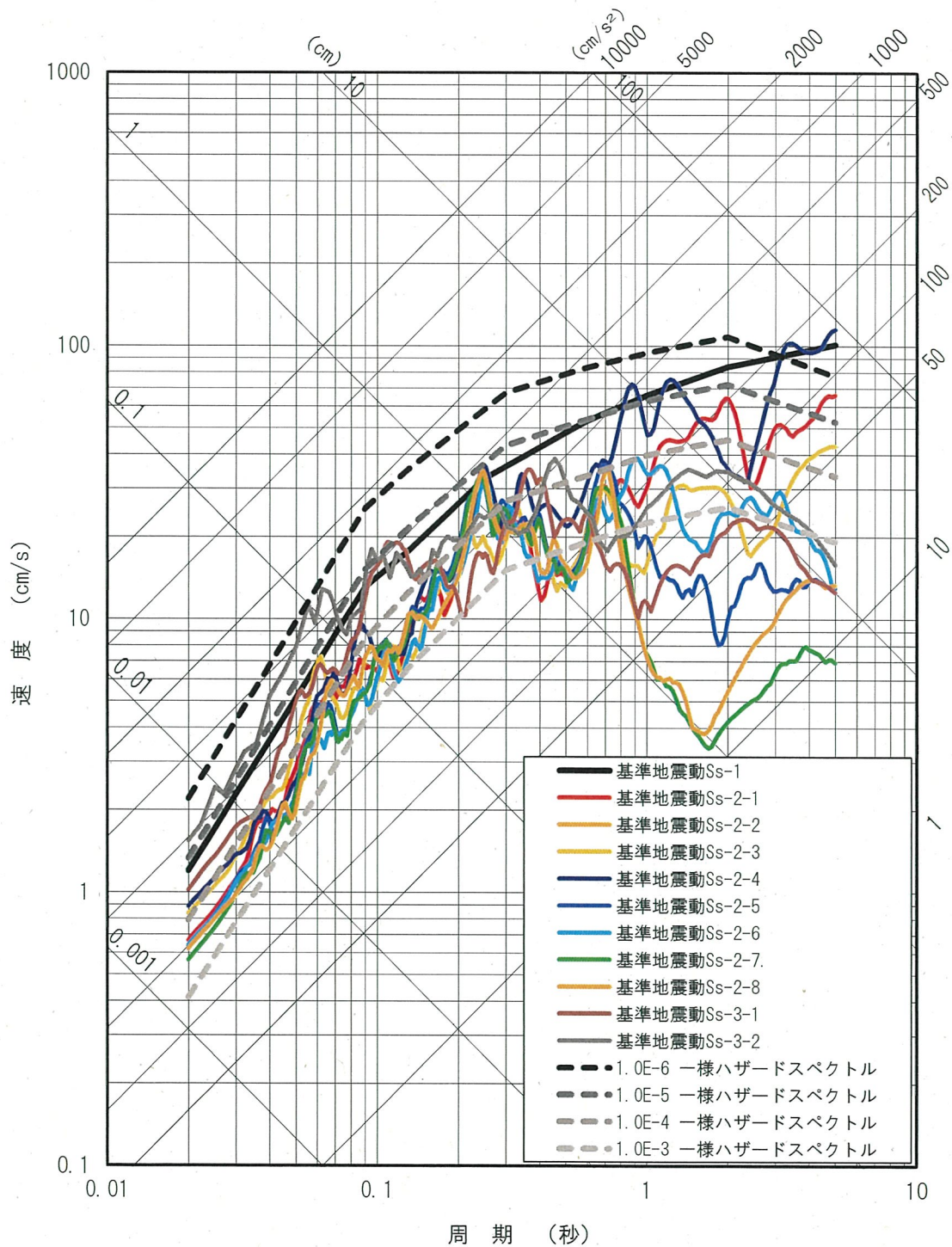


図5 基準地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル (鉛直方向)

3. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの落下による影響について

1、2より、構造上および運用上においても、取扱エリアで乾式キャスク上に乾式貯蔵建屋天井クレーンが落下することは無いと考えているが、仮に、落下した際の影響を以下の観点から評価した。

- ・乾式キャスクの頑健性を確認する観点から、乾式キャスクを検査架台に設置した状態で、乾式貯蔵建屋天井クレーンの主要部分であるトロリ^{※2}を落下させた場合の閉じ込め機能維持評価
- ・乾式キャスク内の燃料集合体が全数破損（被覆管 100%破損、ペレットからの放出率 100%）し、且つ、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合の敷地境界線量への影響評価

※2：乾式貯蔵建屋天井クレーンの主要部分であるトロリは、クレーンフック等と比べて、重量が大きいこと、及び落下高さが高いことから、評価対象とした。

(1) 乾式キャスクの閉じ込め機能維持評価（天井クレーンのトロリ落下）

乾式キャスクを検査架台に設置した状態で、乾式貯蔵建屋天井クレーンの主要部分であるトロリを落下させた場合に、乾式キャスクの閉じ込め機能維持について、図6及び表1に示すモデル及び緒元を用いてLS-DYNAにより衝突解析を行い、表2に示すとおり各部材について基準値を満足することを確認した。LS-DYNAでの解析の妥当性については別紙2に示す。

ここで、閉じ込め機能を維持する部材である一次蓋シール部（胴側）、一次蓋シール部（蓋側）及び一次蓋ボルトについては、閉じ込め機能維持のため、密封境界部がおおむね弾性範囲内^{※3}であることが要求事項であり、おおむね弾性範囲である0.2%ひずみ以内であることを基準とした。

※3：「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」の以下の【確認内容】を参考に、0.2%ひずみ以内であることを基準とした。

【確認内容】

“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。”

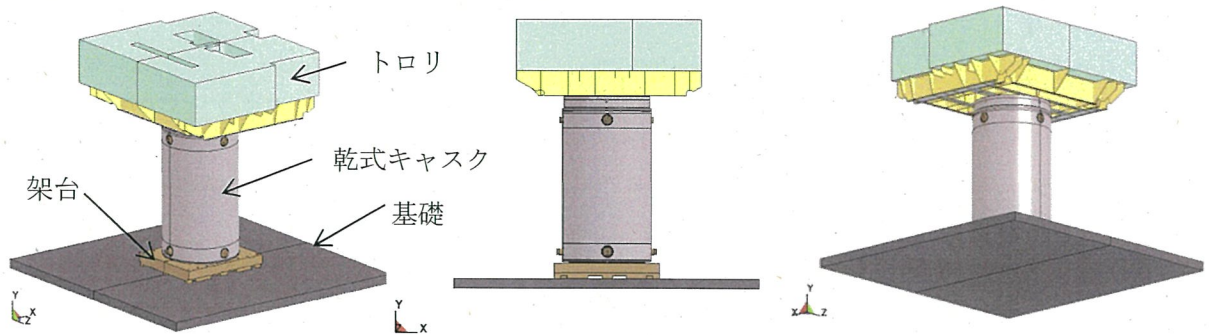


図6. トロリ落下衝突解析に係るモデル

表1. 解析緒元

部材	質量	材質	落下高さ
トロリ (落下物)	57 ton	SS400	9 m
乾式キヤスク	117 ton	GLF1 (本体胴、蓋)	—
貯蔵架台	18 ton	SF490	—
基礎	—	コンクリート	—

表2. 評価結果

機能	対象部位	評価指標・基準		評価結果 ^(注1)
閉じ込め	一次蓋シール部 (胴側)	相当塑性 ひずみ	おおむね弾性 範囲内 (ひずみ0.2%以下)	○ (ひずみ0.00%)
	一次蓋シール部 (蓋側)			○ (ひずみ0.00%)
	一次蓋ボルト			○ (ひずみ0.01% ^(注2))

(注1)：小数点以下第3位を切り上げ

(注2)：一次蓋ボルトに残留する塑性ひずみは0.2%以下であること、かつ、残留した塑性ひずみは局所的であることから、閉じ込め機能に影響はない。

(2) 敷地境界線量への影響評価

仮に、乾式キャスク内の燃料集合体が全数破損し、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合を想定し、敷地境界線量に与える影響評価を行った。評価条件は別紙1に示す。

評価の結果、当該事象における敷地境界線量は、表3のとおり線量限度(1mSv)未満*であり、敷地境界線量の線量限度を十分下回る水準である。

よって、仮に当該事象が生じて、敷地内にある使用済燃料貯蔵槽へ搬送し、閉じ込め機能を修復することにより、閉じ込め機能の異常に対して対応することが可能である。

※ 「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」の以下の【確認内容】を参考に、判断基準を1mSv/yとした。

【確認内容】

“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。” “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。”

表3. 敷地境界線量の評価結果

評価項目	評価結果 (mSv)
外部被ばくによる実効線量	約 0.015
内部被ばくによる実効線量	約 0.37
合計	約 0.39

4. まとめ

乾式貯蔵建屋取扱エリアにおける乾式貯蔵建屋天井クレーンによる乾式キャスクに対する波及的影響についての基準適合性について上述の内容を表4にまとめる。

表4. 乾式貯蔵建屋天井クレーンによる乾式キャスクへの波及的影響に係る基準適合性

設置許可基準規則	解釈	主たる要件	具体的な設計方針	備考
第4条第6項	別記4第4条第2項	兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。	使用済燃料乾式貯蔵容器は、周辺施設等の波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計する。 影響評価には、使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行うこととし、地震動又は地震力の選定に当たっては、施設の配置状況、使用時間等を踏まえて適切に設定する。	乾式貯蔵建屋天井クレーンは、耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とする。
第16条第2項1号ハ第4項	第16条第9項	兼用キャスクは、設計上想定される状態において、安全機能が損なわれないように設計すること。 <審査ガイド> ・周辺施設は一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求される施設として区分されていること。 ・兼用キャスク及び周辺施設は、兼用キャスクの安全機能を維持するためにこれらが担保すべき機能に応じた設計が行われていること。	周辺施設である天井クレーンは、一般産業施設として設計し、乾式キャスクの安全機能を維持するため、落下防止対策として以下の対策を講じる。 ・天井クレーンの走行及び横行レールには、浮き上がり防止機能を設ける設計としており、走行及び横行レールからガーダ及びトロリが浮き上がることがないように、落下防止対策を講じる。 ・乾式貯蔵建屋は自然現象等に対し頑健な建屋であり、建屋崩落に伴う天井クレーンの落下は生じない設計とする。また、乾式貯蔵乾式貯蔵建屋は、頑健な建屋であり、地震等が生じても乾式貯蔵建屋の構造は維持されることで、走行レール間距離は維持されるため、約50°ガーダが折れ曲がらない限り、ガーダは落下しない構造であり、同じく横行レール上に設置されるトロリも横行レール間距離は維持されるため、トロリも落下しない構造である。 〔一般産業施設である周辺施設（乾式貯蔵建屋天井クレーン）からの波及的影響の有無については、設置許可基準規則第4条第6項にて、確認を実施する。〕	乾式貯蔵建屋天井クレーンは、一般産業施設と同等の設計とする。

また、仮に乾式貯蔵建屋天井クレーンの落下を想定しても、乾式キャスクの閉じ込め機能は確保できていることから、乾式キャスクに波及的影響を与えないとともに、万一、取扱中の乾式キャスク1基の燃料集合体が全数破損し、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合でも敷地境界線量は線量限度1mSv/y以下となることから、重大な災害には至らない。

以上のことから、乾式貯蔵建屋取扱エリアにおける乾式貯蔵建屋天井クレーンによる乾式キャスクに対する波及的影響はないことを確認した。

以上

敷地境界線量への影響評価に係る評価条件について

乾式キャスク内の燃料集合体が全数破損し、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合を想定し、以下のとおり敷地境界に与える影響を評価した。

1. 評価方法

評価対象核種は、核燃料輸送物設計承認申請（以下、「設計承認」という）の密封評価において対象としている H-3 及び Kr-85 とする。なお、設計承認の密封評価において、外周領域にも中央領域と同じ 48GWd/t 燃料装荷されているとして、保守的にインベントリを大きく設定し評価している MSF-32P を代表として評価する。被ばく経路は、それぞれ呼吸摂取による内部被ばく及び放射性雲からの外部被ばくとし、以下の式を用いて計算した。

（呼吸摂取による内部被ばく）

$$D_B = B_\gamma \cdot K_R \cdot (\chi/Q) \cdot Q_H$$

D_B	: 呼吸摂取による実効線量	(mSv)
B_γ	: 成人の呼吸率	(m^3/s)
K_R	: 呼吸摂取による H-3 の実効線量換算係数	(mSv/Bq)
Q_H	: H-3 の大気放出量	(Bq)
χ/Q	: 相対濃度	(s/m^3)

（放射性雲からの外部被ばく）

$$E_\gamma = K_1 \cdot Q_N \cdot (D/Q)$$

E_γ	: 外部 γ 線による実効線量	(Sv)
K_1	: 空気カーマから実効線量への換算係数	(= 1 Sv/Gy)
Q_N	: Kr-85 の大気放出量 (γ 線エネルギー 0.5MeV 換算)	(Bq)
D/Q	: γ 線エネルギー 0.5MeV における相対線量	(Gy/Bq)

2. 評価条件

各評価条件及びその選定理由を表 1 に示す。

表 1. 評価条件

項目	評価条件	選定理由
キャスク型式	MSF-32P 型キャスク	インベントリの大きい MSF-32P 型キャスクからの漏えいを想定する
燃料仕様	14×14 型 平均燃焼度 45GWd/t	許認可解析条件と同じ
冷却期間	15 年	同上
燃料被覆管破損の想定	100%	キャスク 1 基分の全数燃料被覆管破損を想定する
放出放射エネルギー	H-3 : 1.54×10^{14} Bq (gross 値) Kr-85 : 2.25×10^{15} Bq (gross 値) Kr-85 : 9.90×10^{12} Bq (ガンマ線 0.5MeV 換算値)	ペレットからの FP ガス放出率を 100%とする (設計承認における密封評価のインベントリ条件を引用)
実効放出継続時間	1 時間	大気拡散条件として、保守的に最も短い実効放出継続時間を設定
放出箇所	地上	
評価点	図 1 のとおり	敷地境界において実効線量が最大となる点を選定
大気拡散条件 相対濃度 χ/Q (s/m ³) 相対線量 D/Q (Gy/Bq)	2.7×10^{-4} 1.5×10^{-18}	「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に基づき算出
呼吸率	3.33×10^{-4} m ³ /s (成人・活動時)	「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」による
実効線量換算係数	H-3 : 2.7×10^{-8} (成人)	「(財) 電力中央研究所 廃止措置工事環境影響評価ハンドブック (第 3 次版)」による

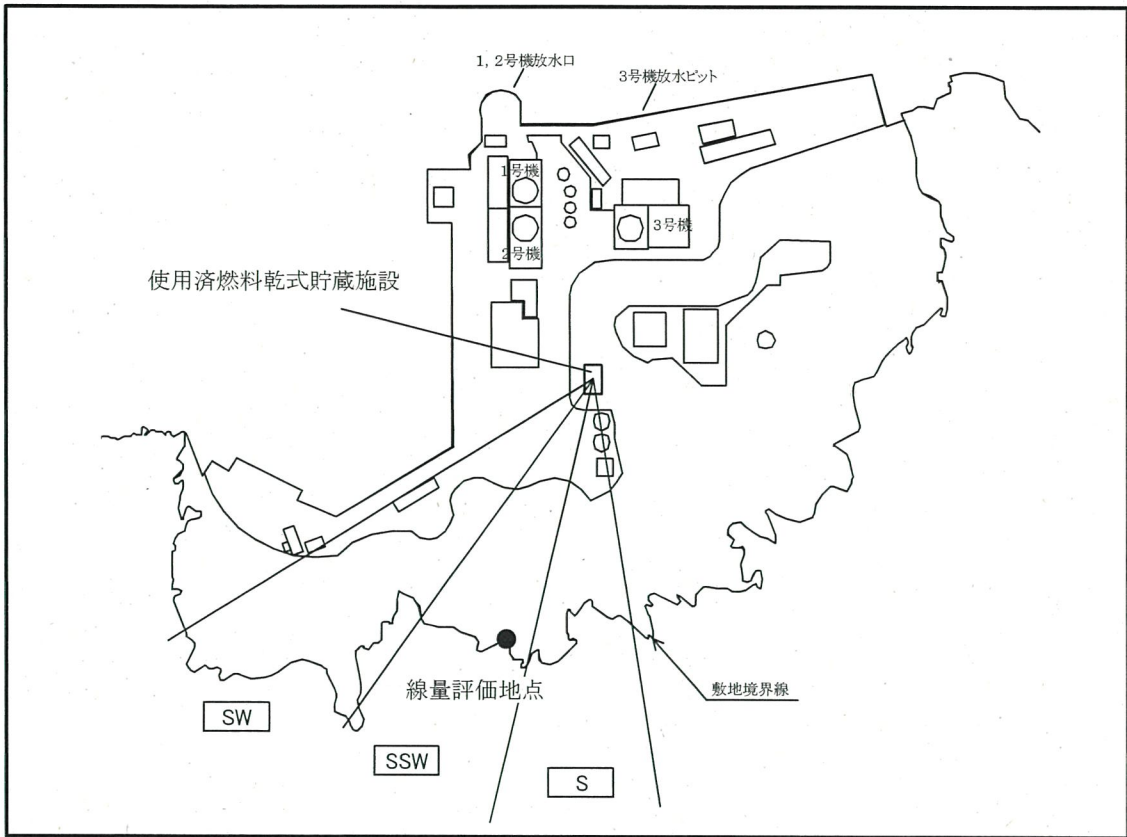


図1 評価地点

動的解析手法(LS-DYNA)の検証

1. 検証方針

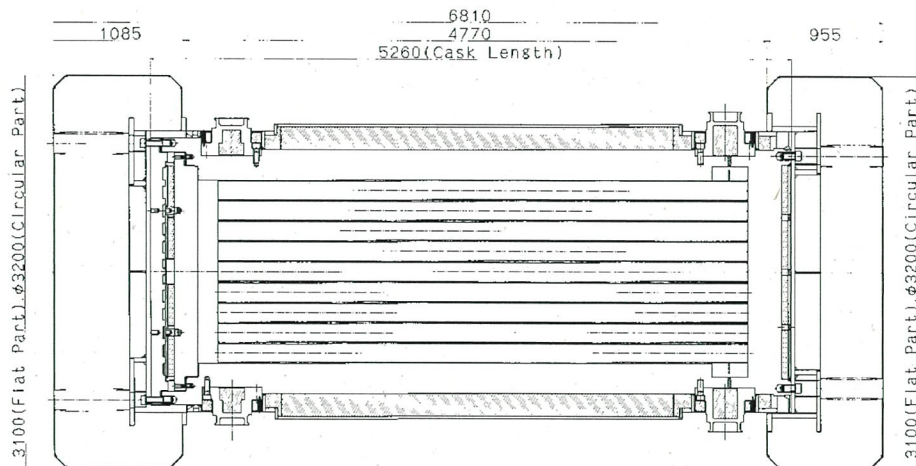
MSF 型キャスクの動的解析手法は、実規模スケールモデルを用いた落下試験で計測された蓋密封部のひずみを基に動的解析による落下試験再現解析を実施し、その結果と比較することで評価手法の妥当性を検証している。以下に検証内容を記載する。

2. 落下試験

2.1. 落下試験モデル

落下試験モデルとして、MSF 型キャスク（プロトタイプ）を実規模スケールで模擬した実規模スケールモデルを用いた。落下試験モデルの外形図を図 1 に示す。

本体は、胴（鍛造材）－レジジン層－外筒（炭素鋼）から構成され、胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。蓋密封部は、一次蓋と二次蓋の二重構造とし、本体胴フランジに、金属ガスケットを取り付けた一次蓋及び二次蓋をボルトにより締結することで密封性を維持する構造としている。



(総重量：127.3ton)

図 1 落下試験モデルの外形図

2.2. 落下試験条件

IAEA 輸送規則に従い、9.3m からの落下試験を実施した。落下試験状態図を図 2 に示す。

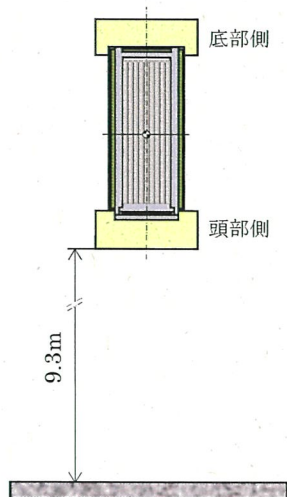


図 2 落下試験状態図

2.3. 落下試験結果

9.3m 頭部垂直落下の試験時の試験体写真を図 3 に示す。試験結果は 3 項の解析結果と併せて記載する。

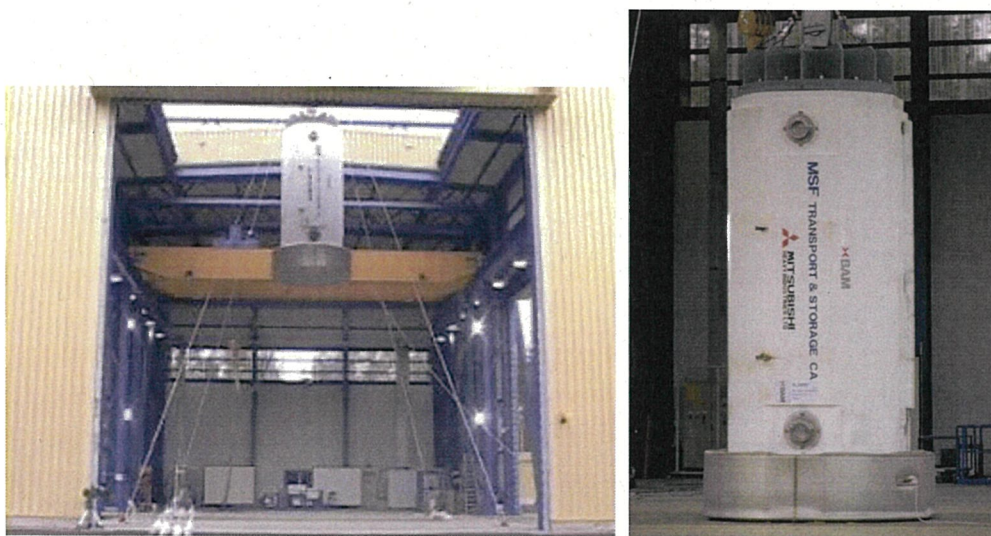


図 3 9.3m 頭部垂直落下試験時の試験体写真

3. 落下解析

(1) 解析モデル

蓋、ボルト、胴本体、内部収納物(バスケット及び模擬重量体)、外筒、レジン、上部緩衝体内鋼板、木材及び緩衝体外鋼板をモデル化した。下部緩衝体については、内鋼板のみをモデル化した。下部緩衝体解析モデルの重量が、設計重量と等価になるように、内鋼板の密度を調整した。図4に解析モデルを示す。

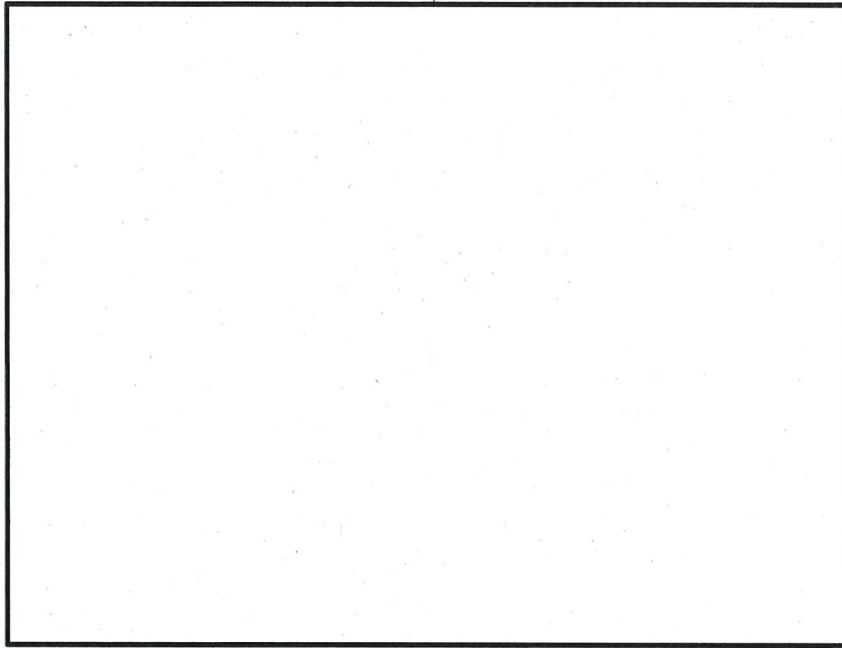


図4 9.3m 頭部垂直落下の解析モデル

(2) 初速度条件

9.3m 落下高さの位置エネルギーがすべて運動エネルギーに変換されたと考え、13.5m/s の初期速度を与える。

(3) 寸法及び材料

製作時の寸法を用いてモデル化した。材料の応力-ひずみ関係は、実際の引張試験の結果に基づいて設定した。

(4) 検証結果

a. 加速度

図5に加速度時刻歴の試験結果と解析結果の比較を示す。内部収納物が蓋に衝突する前のキャスク胴体中央の落下方向の加速度は、試験と解析で得られた最大加速度で10%の精度で再現できている。つまり、上部緩衝体から蓋への荷重が、解析で精度良く評価できていることを示している。一方、内部収納物の蓋への衝突の影響については、内部収納物が蓋に衝突するタイミングは一致しているものの、加速度応答に差がある。この原因は以下の通りと推定される。解析では燃料の全数とバスケットセルの全数が同時に一次蓋へ衝突しているため、加速度が急激に大きくな

っている。一方、試験では、燃料とバスケットセルが個別に一次蓋へ衝突し、ややならかな加速度応答になっているものと考えられる。このため、加速度の最大値に差異が生じたと考えられる。

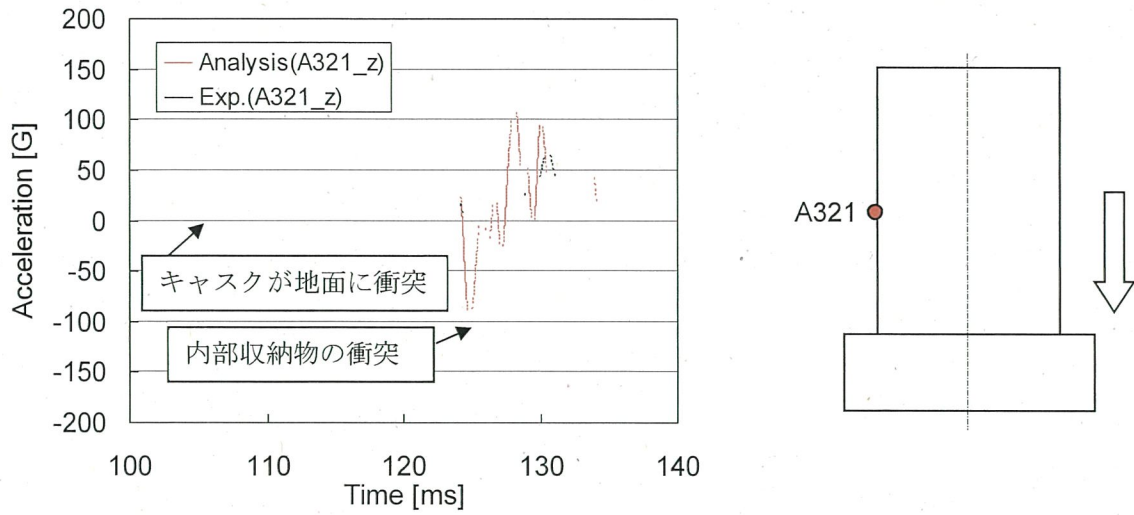


図5 9.3m 垂直落下加速度時刻歴の比較

b. ひずみ

フランジ根元及び蓋等の代表的なひずみに関する解析結果と試験結果の比較を以降に示す。

一次蓋中央のひずみの解析結果と試験結果の比較を図 6 に示す。一次蓋の最大ひずみは、試験と解析で±10%で一致している。ただし、試験で得られた E121 の X 方向のひずみのみが、解析結果のひずみに比べて大きい結果となっている。この原因は以下の通りと推定される。

解析では燃料の全数とバスケットセルの全数が同時に蓋に衝突する条件としている。一方、試験では、燃料とバスケットセルが個別に衝突したため、蓋が一様に変形せず E121 の X 方向と Y 方向のひずみ量に差異が生じたと推定される。

また、解析では E121 の X 方向のひずみが 2000 μ 以下であり弾性範囲内であるが、試験ではひずみが 2000 μ を超過しており最大約 3500 μ のひずみが発生している。E121 の X 方向以外の 3 データの最大ひずみは±10%の範囲内に入っていることから、X 方向と Y 方向の変形に大きな差はなかったものと推定される。E121 の X 方向については、ひずみが塑性域に入ったためにより大きなひずみが発生し、試験と解析で誤差が大きくなったと推定される。

二次蓋中央のひずみの解析結果と試験結果の比較を図 7 に示す。試験で得られた二次蓋のひずみは一次蓋のひずみと同じ時刻及び同じ方向に生じており、一次蓋の変形により一次蓋と二次蓋が衝突し同じ方向に変形が生じていることが読み取れる。解析で得られた二次蓋のひずみも同様に、一次蓋のひずみと同じ時刻及び同じ方向に生じており、一次蓋の変形に伴う二次蓋の衝突挙動が再現できている。

ただし、解析では燃料の全数とバスケットセルの全数が同時に一次蓋に衝突しているが、試験では燃料とバスケットセルが個別に衝突していると推定されるため、解析で得られた最大ひずみの方が試験よりも大きく、かつ、その発生時刻が早くなっている。

フランジ根元のひずみの解析結果と試験結果の比較を図 8 に示す。落下方向(Z 方向)及び周方向(θ 方向)のひずみが、試験と解析で±10%で一致しており、解析でよく再現されている。

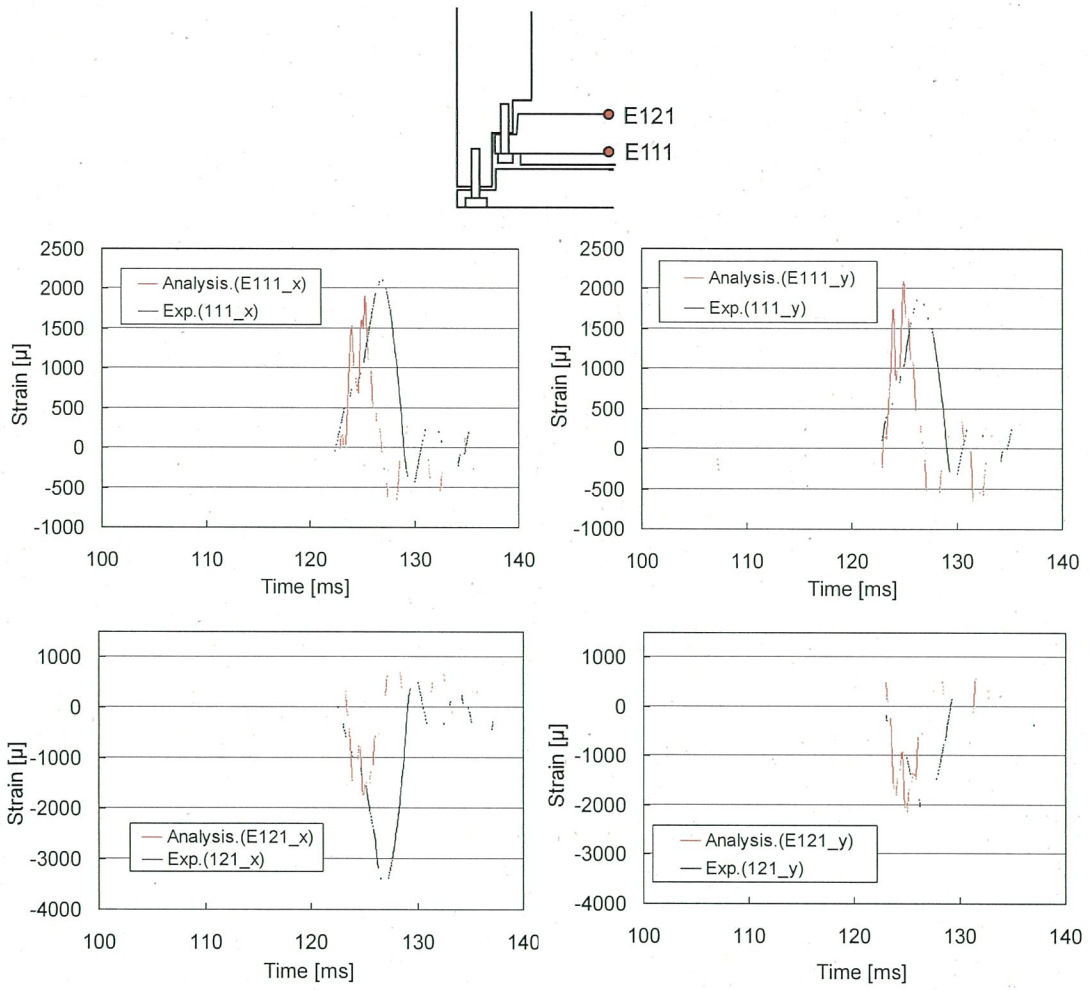


図6 9.3m 垂直落下時の一次蓋ひずみ時刻歴の比較

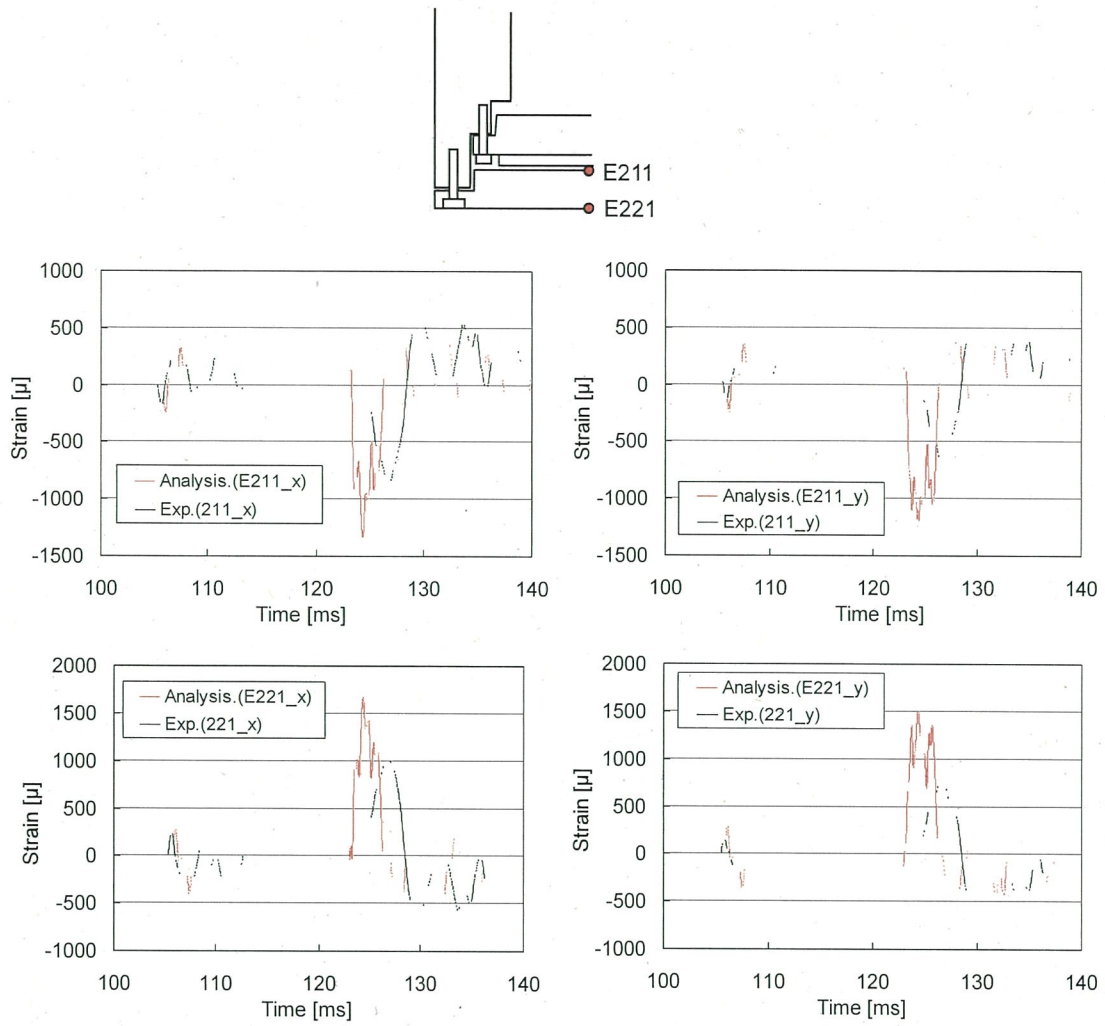


図7 9.3m 垂直落下時の二次蓋ひずみ時刻歴の比較

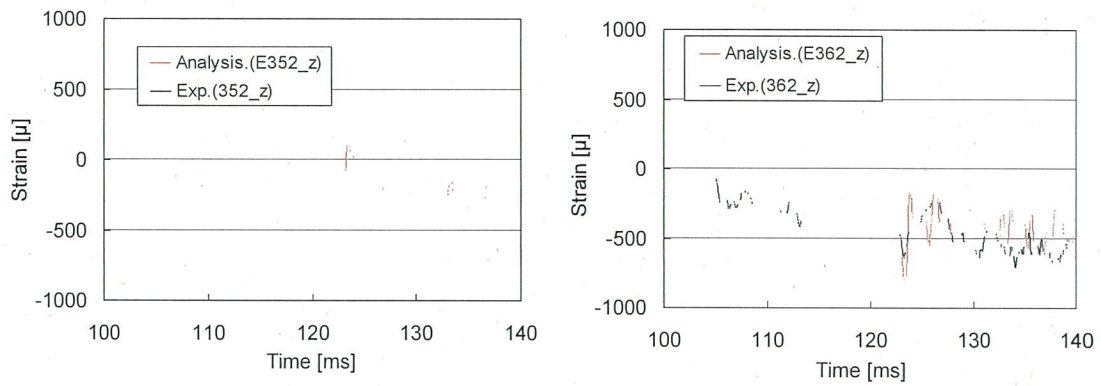
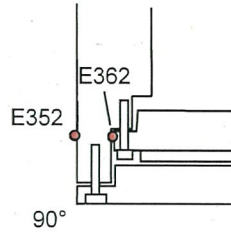


図 8 9.3m 垂直落下時の胴フランジひずみ時刻歴の比較

4. 落下解析に対する動的解析の検証

落下試験において、密封境界部周辺（胴フランジや蓋）のひずみを測定し、解析結果と比較することで動的解析手法の検証を行った。また、キャスク全体の挙動を検証する観点で加速度の比較を行った。

上述のとおり、落下試験の計測結果と解析結果を比較した結果、落下挙動としては内部収納物の衝突時の挙動に差異はあるものの、緩衝体からの荷重による加速度応答を再現できることを確認した。また、密封境界である胴フランジ及び蓋の変形挙動を再現できることを確認した。これらの結果により、蓋密封部の閉じ込め性能に関する評価手法として本動的落下解析手法を適用できることを検証した。

5. 天井クレーンに対する動的解析の適用性

天井クレーン落下事象は、静止している乾式キャスクの胴フランジ部へ荷重が作用する事象であるが、胴フランジに入力される荷重方向や負荷範囲は図9に示すとおり頭部垂直落下と同様であるため、落下試験により検証した動的落下解析手法は、天井クレーン落下事象にも適用可能である。

また、天井クレーン落下事象は使用済燃料集合体及びバスケットが一次蓋へ衝突する事象ではないため、使用済燃料集合体及びバスケットの挙動の違いによる影響を、本評価で考慮する必要はない。

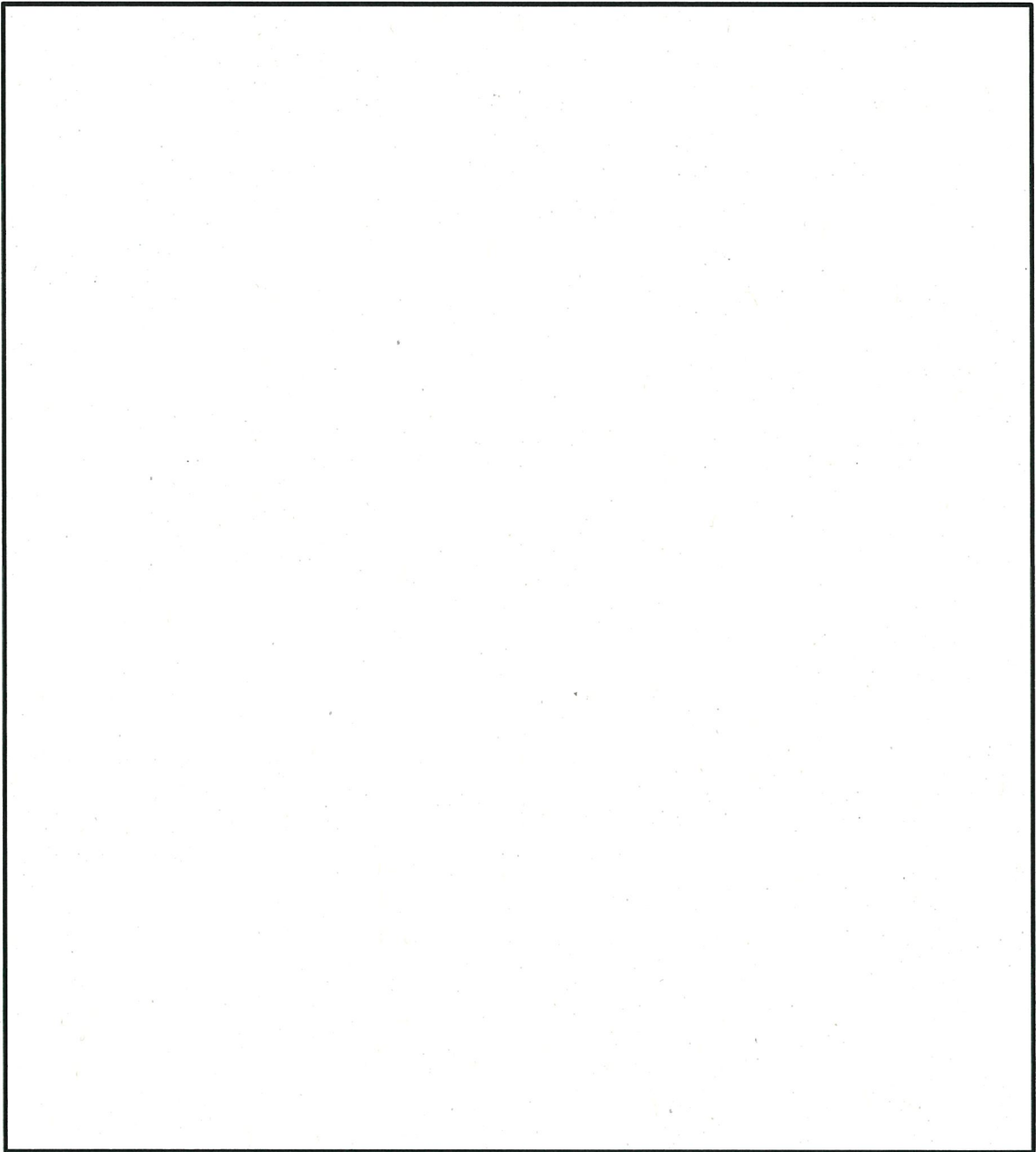


図9 荷重作用方向及び負荷範囲
(天井クレーン落下解析時と頭部垂直落下時の比較)

設置許可基準規則 第16条 第1項
の取扱いについて

1. 既許可における燃料取扱設備について

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、「設置許可基準規則」という）第 16 条第 1 項に定める燃料取扱設備については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下、「技術基準規則」という）第 26 条の解釈において、「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。」と定義されている。これは、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」（以下、「省令」という）でも同じ定義がなされており、従来から変更されていない。

(添付資料参照)

これを踏まえ、当社既設設備については表 1 のとおり整理している。

また、図 1 に、当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性を示す。

表 1. 燃料取扱設備の例

設備名称	燃料取扱設備として取扱うもの	取扱様態	左記以外で取扱うもの
燃料取扱棟クレーン	新燃料	装荷	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
新燃料エレベータ	新燃料	装荷	—
使用済燃料ピットクレーン	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
燃料移送装置	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
燃料仮置ラック	新燃料、使用済燃料	装荷・取出・保管	—
燃料取替クレーン	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
使用済燃料輸送容器	使用済燃料	保管	—

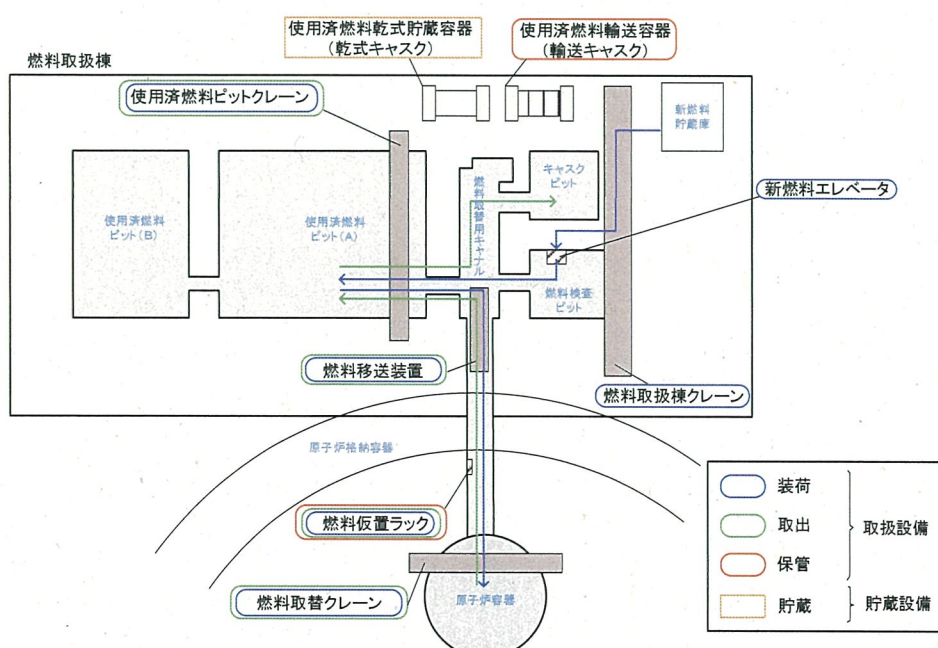


図 1 当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性

既許可の範囲としては、燃料取扱様態として

- ・原子炉容器への燃料の「装荷」に使用する燃料取扱棟クレーン、新燃料エレベータ、使用済燃料ピットクレーン、燃料移送装置および燃料取替クレーン
- ・原子炉容器からの燃料の「取出」に使用する使用済燃料ピットクレーン、燃料移送装置および燃料取替クレーン

について、燃料取扱設備として認可頂いている。

また、使用済燃料構内輸送容器(NFT-14P 型)は、使用済燃料を貯蔵するものではなく、伊方1号炉または2号炉の貯蔵設備である使用済燃料ピットから3号炉の貯蔵設備である使用済燃料ピットへの構内輸送に専ら使用することから、貯蔵設備間の一時的な「保管」と整理し、燃料取扱設備として認可頂いている。

2. 既許可における設置許可基準規則第16条第1項でのキャスク等の取扱設備の取扱い

新規制基準施行前及び新規制基準施行後において、燃料取扱設備に対する要求事項は特段変更されておらず(添付資料参照)、既許可における当社の設計方針は以下のとおり、燃料体等(通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料)の取り扱いについて記載しており、キャスク等を取り扱う設備については記載していない。よって、従来からキャスク等の取扱設備については、設置許可基準規則第16条第1項(燃料取扱設備)としての基準適合性は求められていない。

【当社設計方針】

＜新規制基準施行前(発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針4.9.)＞

- ・3号炉燃料取扱棟内の使用済燃料の取扱設備は、インターロックや二重ワイヤを設けて移送操作中の燃料集合体の落下を防止できるように設計する。
- ・燃料取扱設備は、燃料集合体を1体ずつ取り扱うこととし、臨界を防止する設計とする。

＜新規制基準施行後(設置許可基準規則第16条第1項)＞

1 について

燃料体等の取扱設備は、下記事項を考慮した設計とする。

- 一 燃料取扱設備は、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いにおいて、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連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる設計とする。
- 二 燃料取扱設備は、燃料体等を一体ずつ取扱う構造とし、臨界を防止する設計とする。
- 三 燃料体等(新燃料を除く。)の移送は、全て水中で行い、崩壊熱により溶融しない設計とする。
- 四 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設備は、取扱時において、十分な水遮蔽深さが確保される設計とするなど、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ような設計とする。
- 五 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十分な考慮を払った設計とする。

また、クレーン類は、「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」において周辺施設に分類され、一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求されていることから、一般産業施設や公衆施設以上の安全性を有する燃料取扱設備に位置付けることは適切ではないと考えられる。

3. 他プラントとの比較（キャスク取扱関係）

他プラント及び当社における乾式キャスクまたは湿式キャスクを取扱う設備について、燃料取扱設備への該非を整理した結果を以下に示す。

貯蔵専用キャスクを採用しているプラントでは、天井クレーンを燃料取扱設備に位置付けている一方、搬送台車は燃料取扱設備に位置付けていない。

輸送・貯蔵兼用キャスク又は輸送専用キャスクを採用しているプラントでは、天井クレーン及び搬送台車は燃料取扱設備に位置付けていない。

以上のとおり、キャスクを取り扱う設備については、「新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備」との燃料取扱設備の定義に該当しないことから、燃料取扱設備には基本的には位置付けていないが、貯蔵専用キャスクを取扱う天井クレーンについては、燃料取扱設備に位置付け、貯蔵専用容器として構造健全性を確認している。

なお、外運搬規則に基づき安全機能維持に係る構造健全性（頑健性）を確認している輸送・貯蔵兼用キャスク及び輸送専用キャスクを取扱う天井クレーンは、輸送・貯蔵兼用キャスク及び輸送専用キャスクの衝撃への耐性が高いことから、燃料取扱設備に位置付けないことは妥当と考える。

プラント	既設建屋	乾式貯蔵施設				キャスク保管庫※2	
		(貯蔵専用)		(輸送・貯蔵兼用)		(輸送キャスク)	
	天井クレーン※1	天井クレーン	搬送台車	天井クレーン	搬送台車	天井クレーン	搬送台車
A	○	○					
B	○	○	×				
C	○					×	
D	○					×	×
E	○			×	×	×	×
四国電力(株) 伊方	○			×	×		
		車両運搬規則に基づく耐性を有する。 (上下 3G、前後 2G、左右 1G)		外運搬規則に基づく 9m 落下試験での耐性を有する。			

※1 新燃料及びキャスクを取扱う設備

※2 輸送キャスクを仕立後、搬出するまでの間、一時的に保管するための施設
<凡例>

- ：燃料取扱設備と位置付けしている設備
- ×
- ：燃料取扱設備と位置付けしていない設備
- ：該当設備なし
- ：申請中

4. 今後の説明方針

上記内容を踏まえ、今回の申請において、表2の様に新設設備を分類すると共に、16条第2項へ適合性として説明を実施する。

表2. 設備分類および説明方針

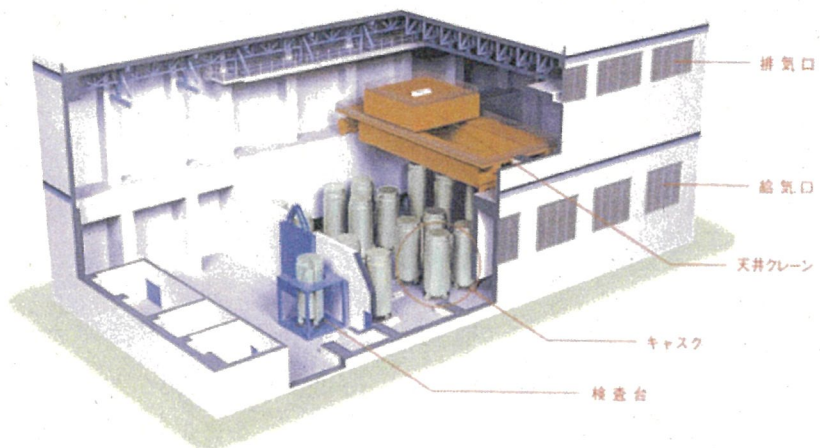
設備名称	分類	既許可上の分類	説明方針	16条 まとめ資料
乾式貯蔵建屋天井 クレーン	周辺施設		<ul style="list-style-type: none"> ・16条まとめ資料にて、想定事象を想定しても使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能に影響ないことを説明する。 ・設備については、一般産業施設を用い、クレーン等安全規則、クレーン構造規格等に基づき、落下防止措置等^{※1}を講じることを説明済。 ・貯蔵エリアに移動できない構造となっており、取扱いエリアでの乾式キャスク取扱い作業中は、乾式キャスク上部から隔離して作業を行うこと。また、クレーンが乾式キャスクへ悪影響を及ぼさないことを説明する。 	2.7項 3項 参考6
乾式貯蔵容器 搬送台車	周辺施設		<ul style="list-style-type: none"> ・16条まとめ資料にて、想定事象を想定しても使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能に影響ないことを説明する。 ・設備については、一般産業施設として、日本産業規格等の国内規則・規格類に基づいた部材、部品で構成し、構造上、搬送中の乾式キャスクが他のキャスクと衝突しないことを説明済。 	2.7項 3項 参考4

※1：主な吊荷の落下防止措置は次のとおり。

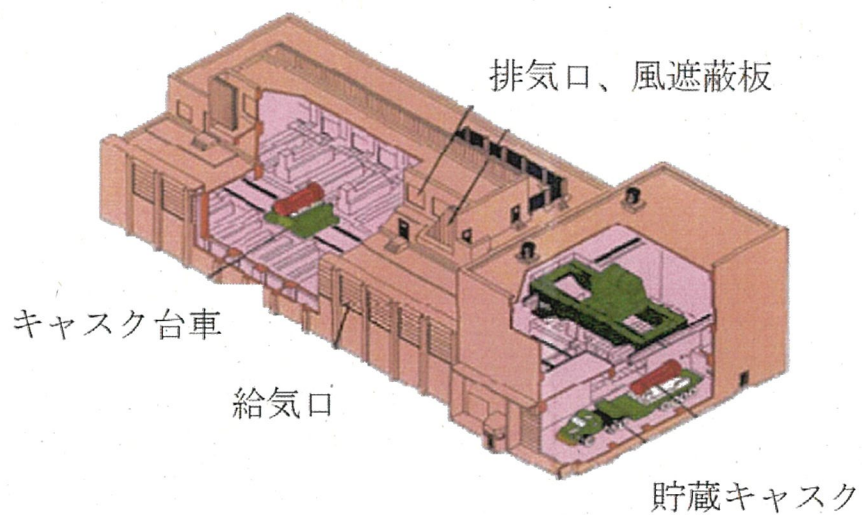
- ・電源遮断時に自動的にブレーキが作動することでワイヤが巻き下げられることを防止し吊荷を保持する。
- ・ワイヤがフックから外れることを防止するための外れ止めを設ける。
- ・巻過ぎによるワイヤの切断を防止する巻過防止装置を設ける。
- ・吊荷の安定化のためワイヤを二重化する。

(参考)

○日本原電(株)東海第二



○東京電力HD(株)福島第一 (旧キャスク保管庫)



○関西電力(株) (キャスク保管庫)

