

【ご指摘事項】

貯蔵架台の設計について、クラス3容器の支持構造物として強度設計することの妥当性を示すこと。

弊社回答

貯蔵架台は、クラス3容器である使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）の支持構造物であることから設計・建設規格のクラス3支持構造物として設計している。以下に、貯蔵架台をクラス3支持構造物として強度評価することの妥当性を示す。

○クラス3支持構造物に対する強度評価について

設計・建設規格において、クラス3支持構造物に対する強度評価として、一次応力に対する評価が要求されており、クラス1支持構造物と比較すると、表1のとおり差異がある。

○貯蔵架台における応力評価について

貯蔵架台の設置状況を図1に示す。貯蔵架台には各部の自重、ボルトの初期締め付け力等による一次応力（せん断応力、支圧応力、圧縮応力）が作用するため、各応力に対して応力評価を実施する必要がある。一方、二次応力については、次の理由から先行と同様に乾式キャスクの温度変化による応力は無視できる。

＜乾式キャスクによる熱応力＞

- ・乾式キャスク底部と貯蔵架台の箆合部は隙間があり熱応力は発生しない
- ・トラニオンと固定装置との拘束については、トラニオンの線膨張係数が大きく、トラニオンと固定装置との熱収縮差により拘束力は緩和される

＜貯蔵架台内部の熱分布による熱応力＞

- ・貯蔵架台について、有意な温度勾配は生じず、板厚方向の熱応力は無視できる

よって貯蔵架台における応力評価結果は表2のとおりとなり、一次応力と一次応力+二次応力の計算値は同じとなる。また、一次応力+二次応力の評価では、一次応力の評価に比べて許容値が大きくなることから、裕度は大きくなる。

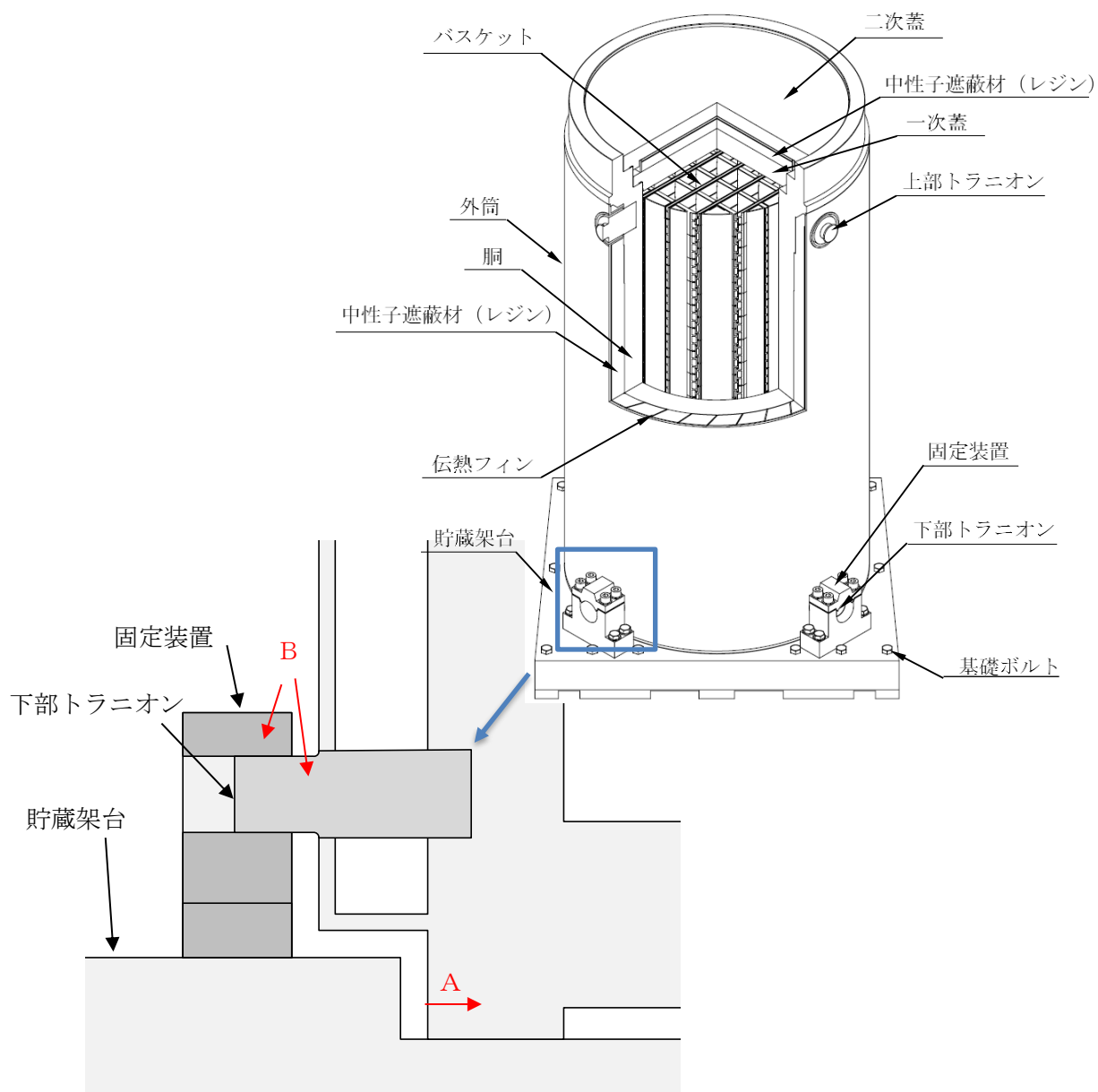
以上から、本申請に係る貯蔵架台の強度設計については、クラス3容器を支持するクラス3支持構造物として設計することでも、問題なく構造健全性が評価できるため妥当と考える。

表1 クラス3支持構造物とクラス1支持構造物の各応力に対する許容応力の比較

		クラス3支持構造物	クラス1支持構造物	
供用状態 A 及び B	一次応力	引張応力	引張応力 $\leq f_t$	引張応力 $\leq f_t$
		せん断応力	せん断応力 $\leq f_s$	せん断応力 $\leq f_s$
		圧縮応力	圧縮応力 $\leq f_c$	圧縮応力 $\leq f_c$
		曲げ応力	曲げ応力 $\leq f_b$	曲げ応力 $\leq f_b$
		支圧応力	支圧応力 $\leq f_p$	支圧応力 $\leq f_p$
		組合せ応力	組合せ応力 $\leq f_t$	組合せ応力 $\leq f_t$
	二次応力	引張応力	—	引張応力 $\leq 3f_t$
		圧縮応力		圧縮応力 $\leq 3f_t$
		せん断応力		せん断応力 $\leq 3f_s$
		曲げ応力		曲げ応力 $\leq 3f_b$
		支圧応力		支圧応力 $\leq 1.5f_p$
座屈応力	座屈応力 $\leq 1.5f_s$ or $1.5f_c$			

表2 貯蔵架台の応力評価結果（貯蔵時）（タイプ1の例）（単位：MPa）

部位	応力分類	評価位置	クラス3支持構造物			(参考) クラス1支持構造物					
			一次応力			一次応力			一次応力+二次応力		
			計算値	許容値	計算値/許容値	計算値	許容値	計算値/許容値	計算値	許容値	計算値/許容値
貯蔵架台	せん断応力	図 2①	3	89	0.04	3	89	0.04	3	269	0.02
	支圧応力	図 2②	4	291	0.02	4	291	0.02	4	436	0.01
		図 2③	12	291	0.05	12	291	0.05	12	436	0.03
	圧縮応力	図 2④	12	155	0.08	12	155	0.08	12	466	0.03
トラニオン 押さえ	支圧応力	図 3⑤	10	316	0.04	10	316	0.04	10	474	0.03



- A : 乾式キャスク底部が熱膨張している状態で設置するため、その後の使用済燃料の発熱量低下に伴う乾式キャスクの熱収縮においてキャスクは貯蔵架台へ応力を与えない
- B : 乾式キャスク底部が熱膨張している状態で設置するため、その後の使用済燃料の発熱量低下に伴う乾式キャスクの熱収縮において、キャスクは固定装置へ応力を与えない

図1 貯蔵架台の設置状況

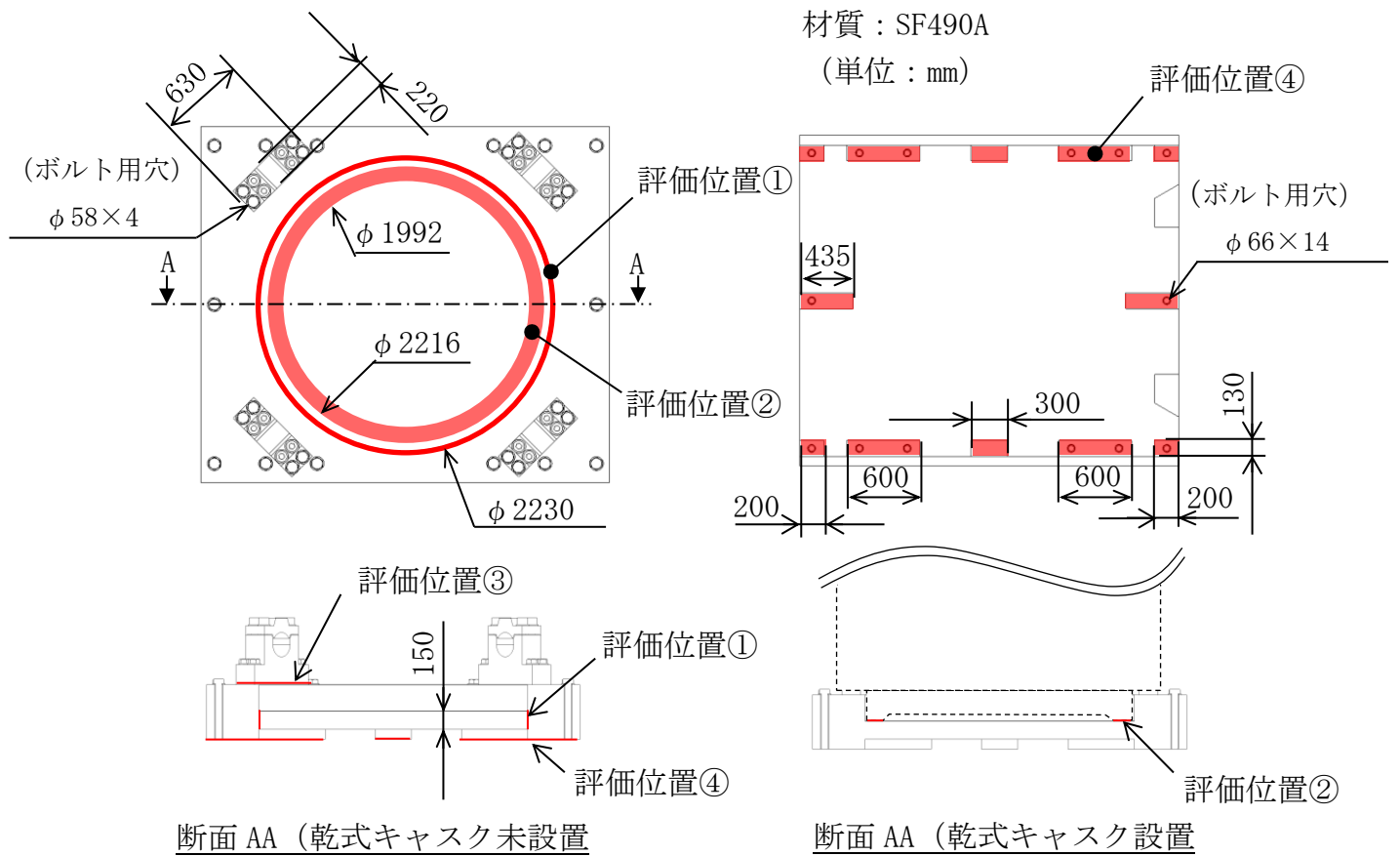


図2 貯蔵架台の形状・寸法・材料・応力評価位置

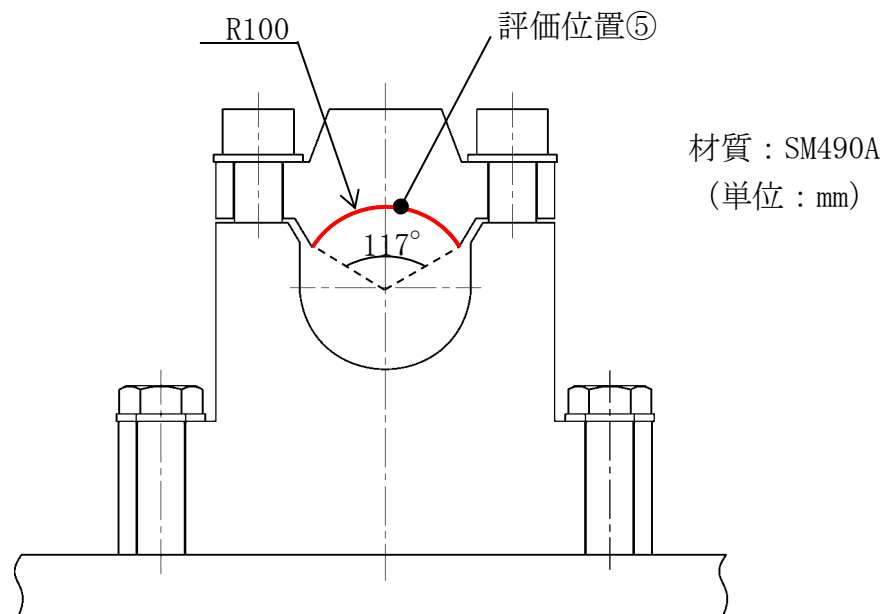


図3 トラニオン押さえの形状・寸法・材料・応力評価位置

【ご指摘事項】

乾式キャスクの除熱評価において、コンクリートの健全性を説明すること。

弊社回答

乾式キャスクを設置する床のコンクリート温度について、以下の通り 65℃以下となることから、健全性に影響を与えないことを確認している。

1. キャスクの除熱評価の精緻化による評価

乾式キャスクの除熱評価において、燃料からの発熱量や放熱条件等を保守的な条件で評価し、乾式キャスクの底部温度が100℃以上となっている。

今回、乾式キャスクを設置する乾式貯蔵建屋床面のコンクリート温度が健全性を確保できる65℃以下であることを、以下のとおり確認した。

乾式キャスクを乾式貯蔵建屋の貯蔵エリアに設置する設置状態を踏まえ、コンクリート健全性評価条件は乾式キャスクの除熱評価をベースに下表のとおり、条件を精緻化し、建屋床面に接する乾式キャスク貯蔵架台の底面温度を簡易評価にて算出し、65℃以下（約63℃）であることを確認した。

よって、建屋床面に熱を与える乾式キャスク貯蔵架台の底面温度が65℃以下であるため、建屋床面のコンクリート温度は65℃以下となり、健全であると考えられる。

表1 評価条件の精緻化（乾式キャスク（タイプ2）の例）

項目	乾式キャスク除熱評価条件		コンクリート健全性評価条件		理由
周囲温度	50℃		45℃		50℃から設置変更許可で示した建屋除熱評価における平衡温度45℃に変更。
発熱量	18.1kW		15.8kW		設計崩壊熱量から最大崩壊熱量に変更。
放熱範囲	乾式キャスク表面		乾式キャスク表面＋貯蔵架台表面		乾式キャスク表面からの放熱に加え、貯蔵架台表面（底部熱逃げ量算出のモデル化範囲を除く）からの放熱を追加。
輻射熱伝達範囲・温度	天井	65℃	天井	45℃	設置位置を考慮し、一方向の壁面を乾式キャスクからの輻射熱の伝達範囲に追加し、温度を周囲温度45℃に変更。 なお、床面については、保守的に65℃のままと想定。
	床面	65℃	床面	65℃	
	—	—	壁面	45℃	
底部熱逃げ量	0.76kW		同左		—

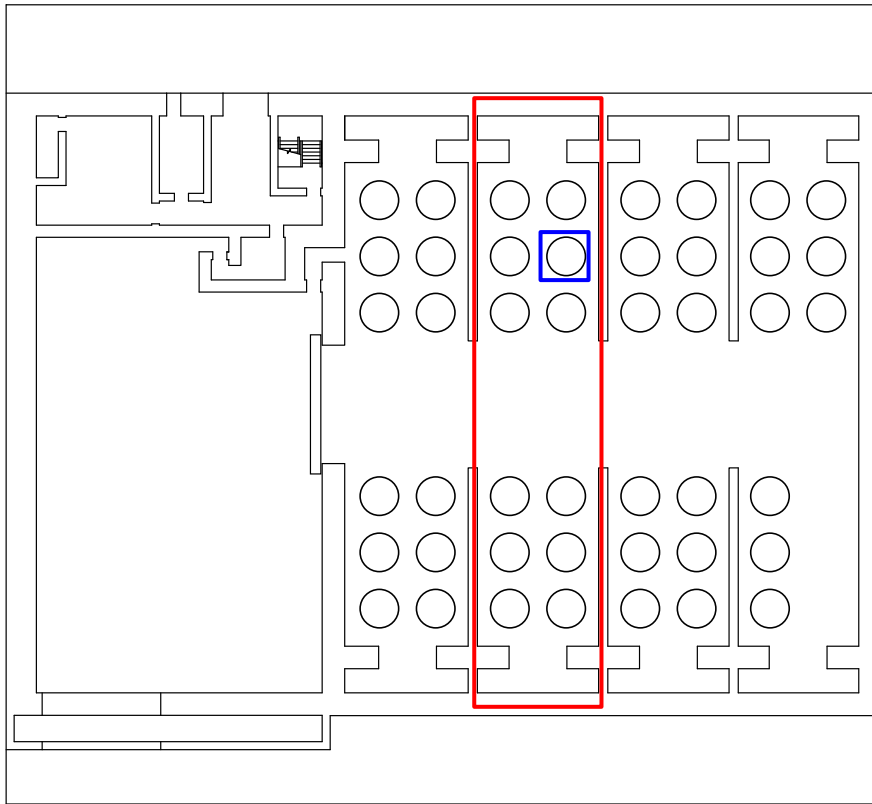
2. 乾式貯蔵建屋の三次元モデルによる評価

乾式貯蔵建屋の設計にあたって、乾式キャスクからの熱伝達を考慮した貯蔵エリアの三次元モデルを用い、表 2 の条件で直接床面温度の評価を実施している。評価範囲及び床面のコンクリート温度分布図を図 1 に示す。

乾式キャスクを設置した床面のコンクリート温度は 6.5°C 以下(約 5.9°C)となり、健全であると考えられる。

表 2 熱流動解析における評価条件

給気温度	33°C
発熱量 (乾式キャスク 1 基あたり)	16.0kW



- : 三次元モデルの評価範囲
- : コンクリート温度が最大となるキャスク位置
(温度分布は下図参照)

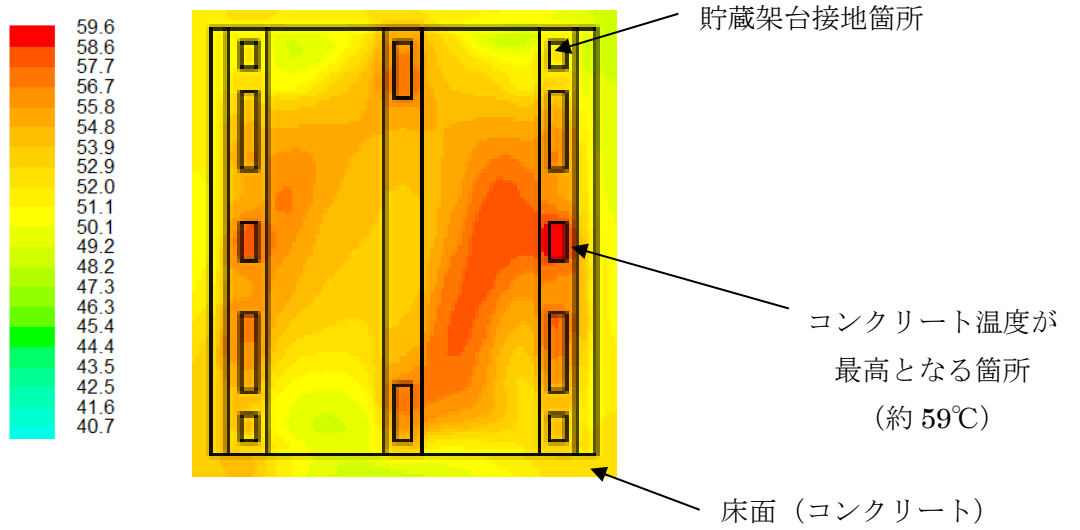


図1 熱流動解析の評価範囲及び床面コンクリート温度分布

以上

【ご指摘事項】

レジンの温度制限値の根拠の文献として引用しているレジンと、今回使用するレジンの仕様について、同等性を説明すること

弊社回答

本申請における乾式キャスクのレジン (MREX) の仕様は、表 1 に示す通り文献として引用しているエポキシ系レジン (NS-4-FR) と同じである。なお、MREX は輸送キャスクにおいて NS-4-FR の同等品として認められており、採用実績がある材料である。

表 1 レジン仕様の比較

	従来品 (NS-4-FR)	本申請における乾式キャスクで使用するレジン (MREX)
レジンの種別	エポキシ系レジン	同左
機能要求	難燃性、自己消火性を有すること	同左
線膨張係数	1.1×10^{-4} 以下 (150°C)	同左
使用可能温度	-40~149°C	同左
密度	1.67 ± 0.05 g/cm ³	同左
B ₄ C 含有量	<input type="text"/> g/cm ³ 以上	同左
H 含有量	<input type="text"/> g/cm ³ 以上	同左

内は商業機密のため、非公開とします。

【ご指摘事項】

密封シール部について、金属キャスク構造規格と設計建設規格の許容応力が異なるが、その理由を説明すること

弊社回答

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

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

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

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

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

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

以上

【ご指摘事項】

金属ガスケットの漏えい率について、メーカカタログ値とは何か。また、このメーカカタログ値を使用する妥当性を説明すること。

弊社回答

本申請における乾式キャスクに採用を予定している金属ガスケットのメーカカタログ「“METAL SEALS TECHNICAL CATALOG”, Technetics Group. , (2017).」に記載されている、当該金属ガスケットの性能の目安となる漏えい率である。

当該金属ガスケットと同型の金属ガスケットを用いた長期密封性能試験^(注1)において、カタログ値と同等の性能が長期間維持できる結果が得られており、本申請における乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）での使用条件を踏まえると、設計貯蔵期間において同等の性能が維持できると考えている。

また、密封境界部の金属ガスケットについては、使用時に気密漏えい試験を実施し、漏えい率が資料11に示すリークテスト判定基準を下回ることを確認するとともに、貯蔵中は定期的に蓋間圧力を監視することで、金属ガスケットを用いた密封機能の健全性が維持されていることを確認する。

(注1) (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).

【ご指摘事項】

キャスク底部熱逃げ量の算出について、当該評価は過去に実績のある評価なのか。ある場合、その実績を示すとともに、実績がない場合、当該評価が本申請において妥当であることを説明すること。

弊社回答

キャスク底部の熱逃げ量は、キャスク底部から貯蔵架台に熱が伝わり、貯蔵架台から自然対流により放熱される系を考慮して設定したものであり、除熱設計に対し、“キャスク底部から架台等を介して間接的に自然対流により放熱される系の考慮”は、以下のとおり実績があり、新規性はない。

また、“キャスク底部熱逃げ量の設定値”は、以下のとおり保守側の値であり、乾式キャスクの除熱設計に対する適用は妥当であると考えている。

＜“キャスク底部から間接的に自然対流により放熱される系の考慮”の実績＞

- ・既承認済の使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1及びタイプ2）の核燃料輸送物設計承認申請において、**図1**に示すとおりキャスクの底部に緩衝体を取り付けたモデルにて除熱評価を行っており、キャスク底部から下部緩衝体に熱が伝わり、下部緩衝体から自然対流により放熱される系が模擬されている。

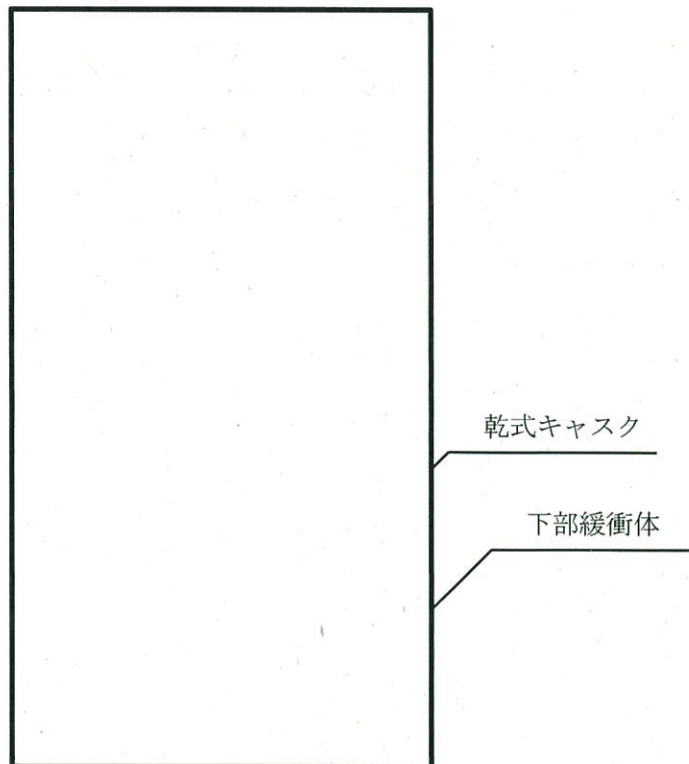


図1 設計承認申請における除熱解析モデル

□内は商業機密のため、非公開とします。

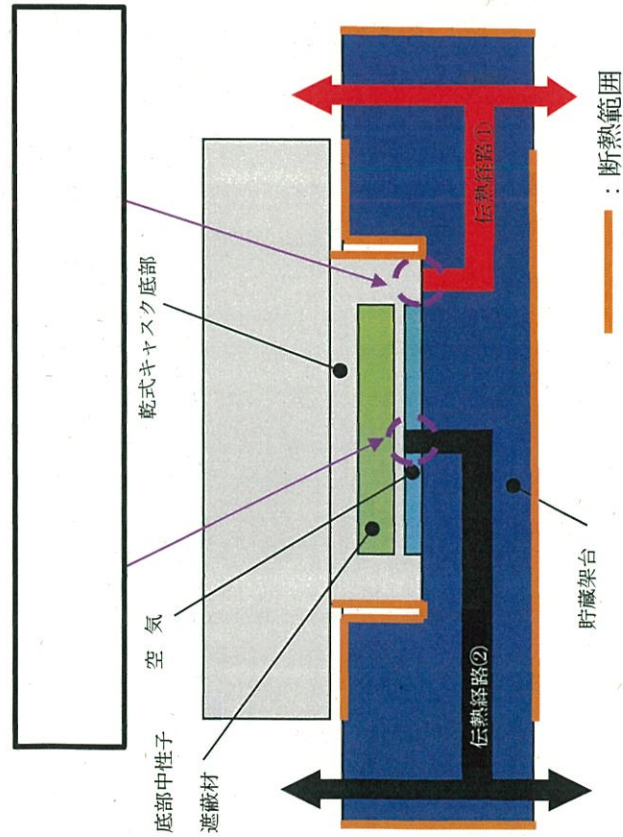
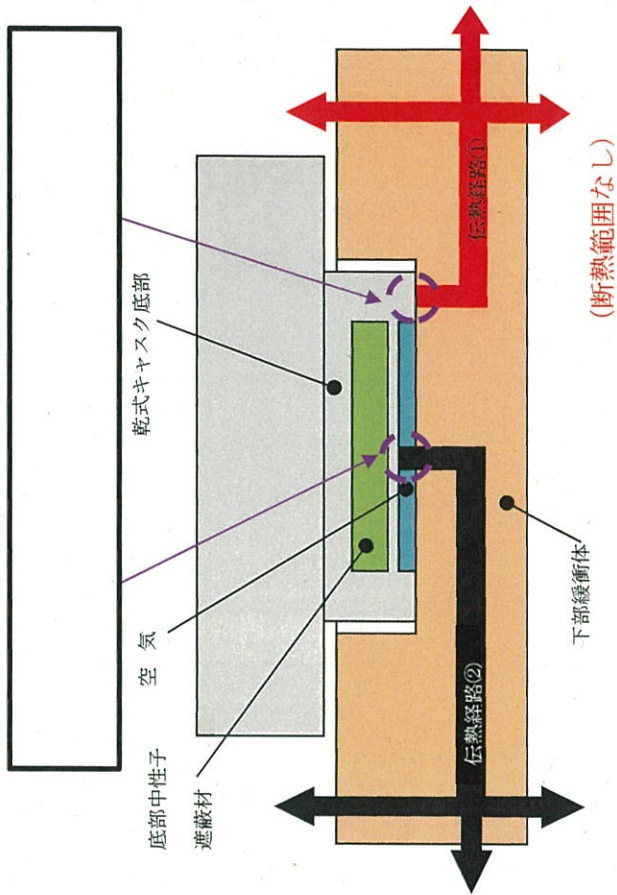
<キャスク底部熱逃げ量の設定値の保守性>

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

また、本評価における全放熱量に対する底部熱逃げ量の設定値及び割合と前述の設計承認における全放熱量に対する下部緩衝体からの放熱量及び割合を表 1 に示す。キャスク底部熱逃げ量の設定値（伝熱効果の高い炭素鋼製の貯蔵架台からの放熱）は全放熱量のわずかに約 4% であり、設計承認における下部緩衝体（断熱効果の高い木材が充填されている）からの放熱割合（約 3%）と同程度である。

表 1 貯蔵架台及び下部緩衝体からの放熱量について
(乾式キャスク (タイプ 2) の例)

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



設計承認における境界条件

設計認における境界条件

図 2 キャスク底部の境界条件について

□内は商業機密のため、非公開とします。