

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

伊方発電所設計及び工事計画審査資料	
資料番号	D S F - 0 1 0
提出年月日	令和3年4月22日

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

令和3年4月  
四国電力株式会社

## 資料 10～14 に係る補足説明資料

### 【説明する添付資料】

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

## 補足説明資料目次

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

## 2-1 資料 10 に係る補足説明資料

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

■資料No. 2-1 資料10に係る補足説明資料

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

## 2-1-5 金属キャスク構造規格と設計・建設規格の 同等性について

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

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

表 金属キャスク構造規格と設計・建設規格の同等性

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

表(1/2) 評価基準の比較[金属キャスク構造規格と設計・建設規格]

計算書		金属キャスク構造規格に準拠した評価基準				設計・建設規格に準拠した評価基準				備考
密封容器	ボルト以外	設計条件	一次一般膜応力強さ	MCD-1311.1(1)	$P_m \leq S_m$	<del>設計条件</del>	<del>一次一般膜応力強さ</del>	<del></del>	<del></del>	不足なし (金属キャスク構造規格では、解説MCD-1100-1に基づき一概に包絡できる機械的荷重の組み合わせが設定できないことから、設計条件は最高使用圧力に対する評価として実施)
			一次局部膜応力強さ	MCD-1311.1(2)	$P_L \leq 1.5S_m$		<del>一次局部膜応力強さ</del>	<del></del>	<del></del>	
			一次膜+一次曲げ応力強さ	MCD-1311.1(3)	$P_L + P_b \leq \alpha S_m$		<del>一次膜+一次曲げ応力強さ</del>	<del></del>	<del></del>	
		供用状態 A 及び B	一次一般膜応力強さ	MCD-1311.1(1)	$P_m \leq S_m$	供用状態 A 及び B	一次一般膜応力強さ	PVB-3111 (1)a.	$P_m \leq S_m$	差異なし (設計・建設規格では、設計条件は最高使用圧力と機械的荷重の組み合わせで評価を実施。)
			一次局部膜応力強さ	MCD-1311.1(2)	$P_L \leq 1.5S_m$		一次局部膜応力強さ	PVB-3111 (1)b.	$P_L \leq 1.5S_m$	
			一次膜+一次曲げ応力強さ	MCD-1311.1(3)	$P_L + P_b \leq \alpha S_m$		一次膜+一次曲げ応力強さ	PVB-3111 (1)c.	$P_L + P_b \leq \alpha S_m$	
			一次+二次応力強さ	MCD-1312 (1)	$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$		一次+二次応力強さ	PVB-3112	$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$	
			疲労評価	MCD-1314 (1)	$U_f \leq 1.0$		疲労評価	PVB-3114	$U_f \leq 1.0$	
				MCD-1332(注2)(注3)	疲労評価要否			PVB-3140(注2)	疲労評価要否	
		試験状態	平均支圧応力	MCD-1316.1 (2)	$\sigma_p \leq S_y$	試験条件	平均支圧応力	PVB-3116 (2)	$\sigma_p \leq S_y$	差異なし
			圧縮応力	MCD-1317 (1)	$\sigma_c \leq \text{MIN}[S_m, B]$		圧縮応力	PVB-3117 (1)	$\sigma_c \leq \text{MIN}[S_m, B]$	
		外圧	一次一般膜応力強さ	MCD-1311.4 (1)	$P_m \leq 0.9S_y$	外圧	一次一般膜応力強さ	PVB-3111 (4)a.	$P_m \leq 0.9S_y$	差異なし
	一次局部膜応力強さ		MCD-1311.4 (2)	$P_L \leq 1.35S_y$	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-1311.4 (3)	$P_m + P_b \leq 1.35S_y$	一次膜+一次曲げ応力強さ		PVB-3111 (4)c.	$P_m + P_b \leq 1.35S_y$		
	穴の補強	外圧を受ける密封容器	MCD-1410(1)(胴) MCD-1420(平板)	$P \leq P_a$ MCD-1311による	穴の補強	外圧を受ける容器	PVB-3210 (1) (胴)	$P \leq P_a$	差異なし (金属キャスク構造規格では外面に圧力を受ける平板の評価方法が明確化されている)	
		補強要否の評価	MCD-1700	穴周辺部も上記の設計条件、供用状態 A 及び B、試験状態の基準を満足するか。		補強要否の評価	PVB-3510	穴周辺部も上記の設計条件、供用状態 A 及び B、試験状態の基準を満足するか。		
	密封シール部	供用状態 A 及び B	一次一般膜応力強さ	MCD-1318.1 (1)	$P_m \leq S_y$	設計条件	一次一般膜応力強さ	PVB-3111 (1)a.	$P_m \leq S_m$	不足なし (金属キャスク構造規格では、一次+二次応力強さも $S_y$ に入るよう、より厳しい基準を設定)
			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.	$P_L \leq 1.5S_m$	
			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.	$P_L + P_b \leq \alpha S_m$	
			一次+二次応力強さ	MCD-1318.1 (4)	$P_L + P_b + Q \leq S_y$		一次+二次応力強さ	PVB-3112	$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$	
		試験状態	一次一般膜応力強さ	MCD-1318.2 (1)	$P_m \leq 0.9S_y$	試験状態	一次一般膜応力強さ	PVB-3111 (4)a.	$P_m \leq 0.9S_y$	不足なし (金属キャスク構造規格では、一次局部膜応力や一次膜+一次曲げ応力強さも $S_y$ に入るよう、より厳しい基準を設定)
			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)	$P_L + P_b + Q \leq S_y$					
ボルト	設計条件	平均引張応力	MCD-1321.1 (1)	$\sigma_m \leq S_m$	ボルト	設計条件	平均引張応力	PVB-3121 (1)	$\sigma_m \leq S_m$	差異なし
	供用状態 A 及び B	平均引張応力	MCD-1321.1 (2)	$\sigma_m \leq 2S_m$		平均引張応力	PVB-3121 (2)a.	$\sigma_m \leq 2S_m$		
		平均引張応力+曲げ応力	MCD-1321.1 (3)	$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$		平均引張応力+曲げ応力	PVB-3121 (2)b.	$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$		
		疲労評価	MCD-1322 (1)	$U_f \leq 1.0$		疲労評価	PVB-3122	$U_f \leq 1.0$		
	MCD-1331 (3)(注4)			PVB-3130 (3)(注4)						



表(2/2) 評価基準の比較[金属キャスク構造規格と設計・建設規格]

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

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

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

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

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

(補足) 密封シール部に関する規定について

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

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

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

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

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

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

### 2-3-5 水位変動による臨界解析への影響

## 1. はじめに

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

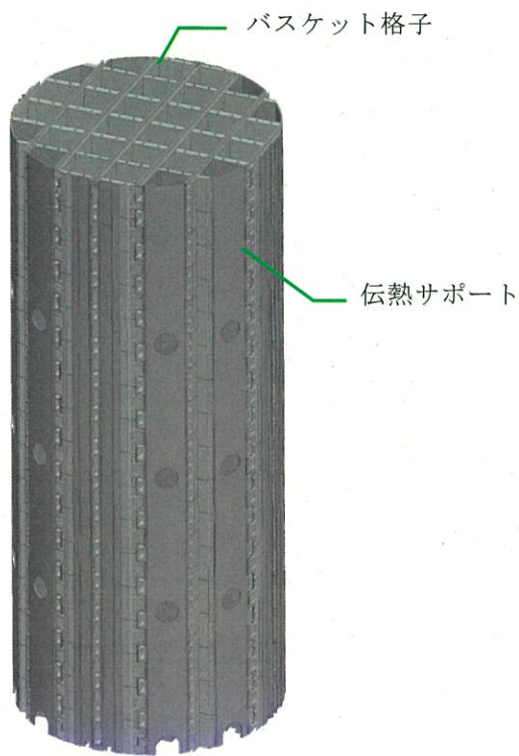
## 2. 水位変動時のバスケット内部の状態について

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

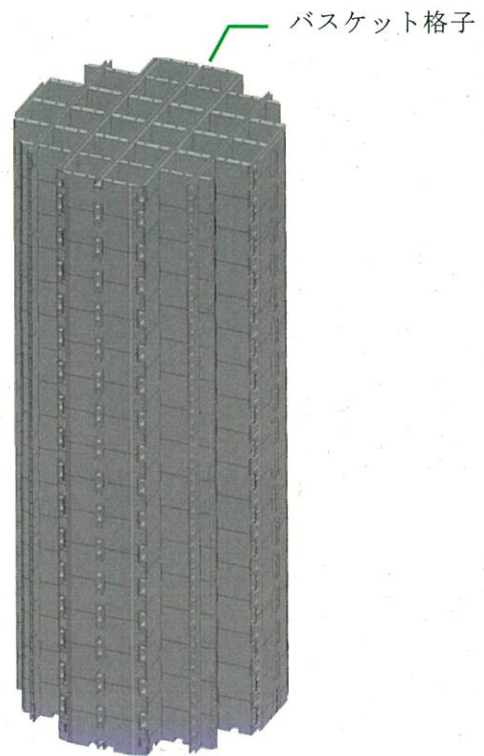
燃料集合体が収納されるバスケット格子内部及び伝熱サポートは、キャスク長手方向に空間が存在するため、注排水時に気層が局所的に留まることは無い。バスケット格子は、キャスクの長手方向に積層されるが、バスケット格子の中空構造部の水の出入りを行うために、バスケット格子の最上端から最下端まで通じた複数の通水孔が設けられており、バスケット格子の中空構造部に気層が残留しにくい構造としている。また、バスケット格子の板両端は開口しており、この部分からも水の流出入が可能な構造である。

燃料集合体を収納した状態での注排水作業は、一次蓋のドレンパイプを通じて約 1.8～2.5m<sup>3</sup>/hr 程度の非常に遅い速度で実施される。この速度では、バスケット格子 1 枚の高さ相当（約 240mm）の水位上昇（下降）には約 7～10 分を要することとなり、水位上昇（下降）速度は極めて緩慢である。

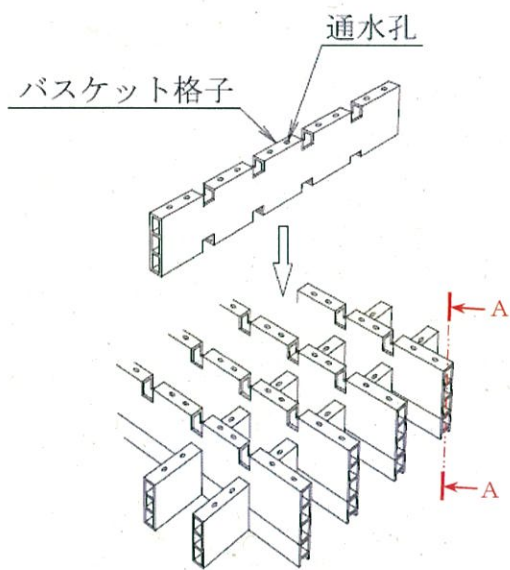
以上の通り、バスケット内外において水位差が出ないように設計上の配慮を行っていることから、バスケット内部において注水時における気層の残留または排水時における水層の残留は生じない。



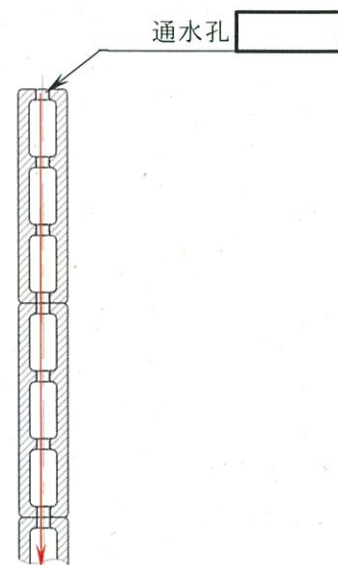
a. バスケット全体図



b. バスケット格子全体図



c. バスケット格子部分組立図

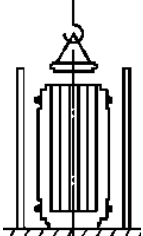
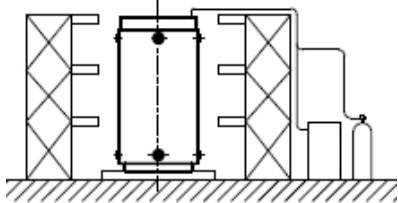
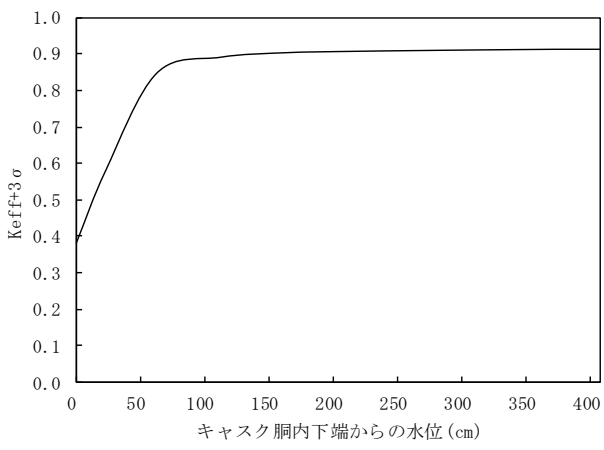
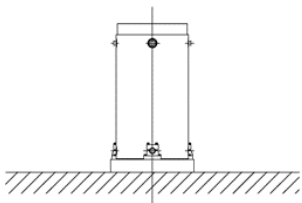


d. 通水孔詳細  
(断面A-A)

2-3-5-1 図 バスケット構造 (乾式キャスク (タイプ2) の例)

### 3. 水位変動による臨界解析への影響について

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

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

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

### 2-4-3 キャスク底部熱逃げ量の算出について

## 1. はじめに

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

## 2. キャスク底部熱逃げ量算出の詳細

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

### <伝熱経路①>

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

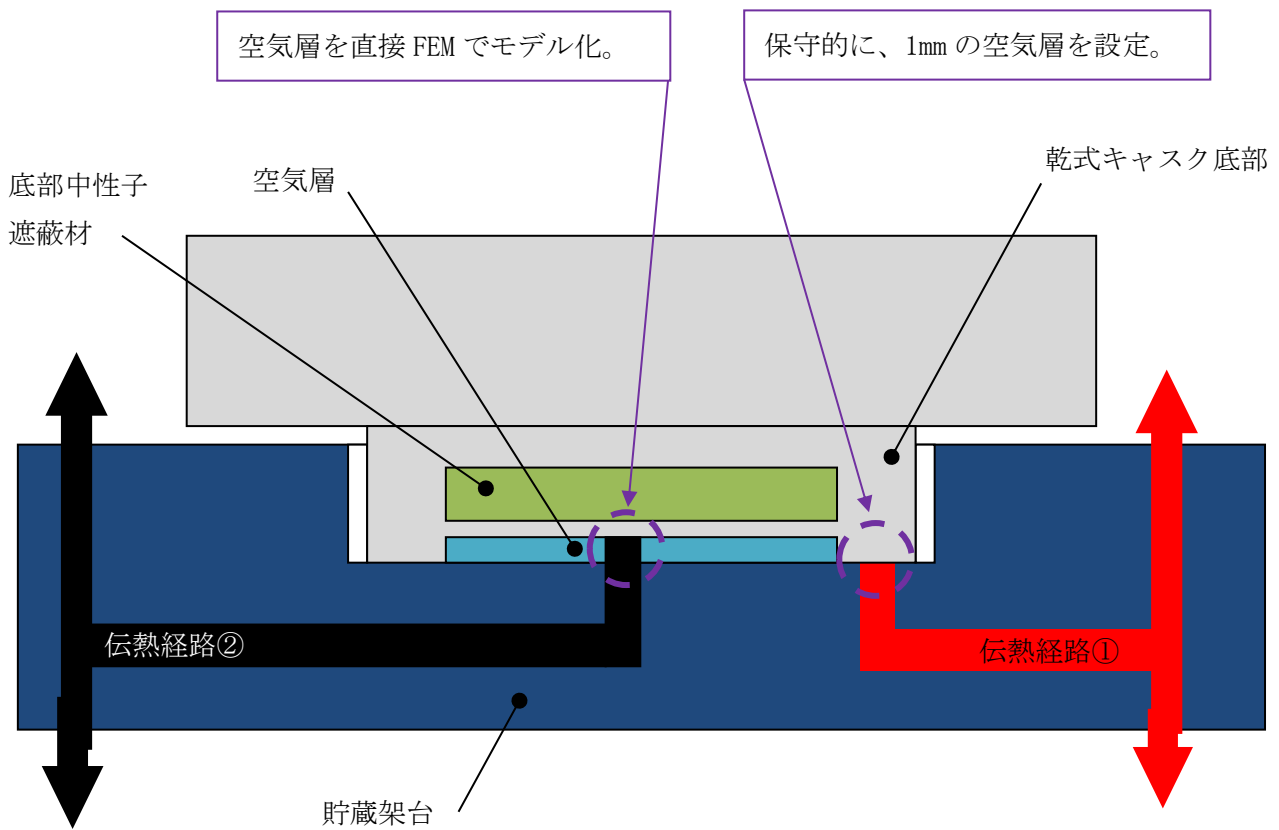
### <伝熱経路②>

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

2-4-3-1 表 伝熱経路①及び②における熱逃げ量

	伝熱経路①	伝熱経路②
熱逃げ量 (kW/mm <sup>2</sup> )	$4.0 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$





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

## 2.1 伝熱経路①の熱逃げ量算出

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

### (1) 厚さ 1mm の空気層の熱抵抗算出

厚さ 1mm の空気層の熱抵抗は、以下の式で算出できる。

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

2-4-3-2 表に、(a)式の各記号の意味、入力値及び算出値を示す。

2-4-3-2 表 (a)式の各記号の意味、入力値及び算出値

記号	意味	数値		
		乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
入力値	$\delta$	空気層の厚さ (mm)		
	$\lambda$	空気の熱伝導率 <sup>(注)</sup> (W/mm・K)		
	A	$7.40 \times 10^5$	$8.25 \times 10^5$	
算出値	$R_1$	空気層の熱抵抗 (K/W)	$4.34 \times 10^{-2}$	$3.89 \times 10^{-2}$

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

### (2) 貯蔵架台の熱抵抗算出

貯蔵架台の熱抵抗は、以下の式で算出できる。

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

2-4-3-3 表に、(b)式の各記号の意味、入力値及び算出値を示す。

2-4-3-3 表 (b)式の各記号の意味、入力値及び算出値

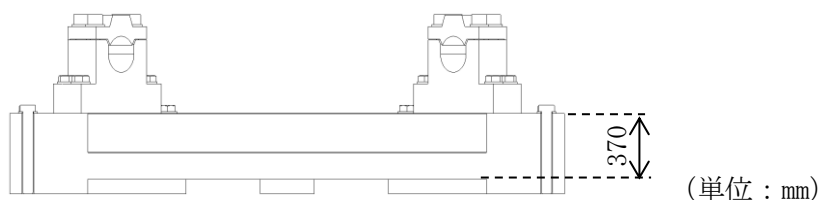
記号	意味	数値	
		乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
入力値	h	上向き水平平板の自然対流熱伝達率 <sup>(注1)</sup> (W/(mm <sup>2</sup> ・K))	
	P	6961.8	6898.9
	k	貯蔵架台(炭素鋼)の熱伝導率 <sup>(注3)</sup> (W/mm・K)	
	A	2.57×10 <sup>6</sup>	2.55×10 <sup>6</sup>
	L	334	334
算出値	R <sub>2</sub>	8.96×10 <sup>-2</sup>	9.04×10 <sup>-2</sup>

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

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

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

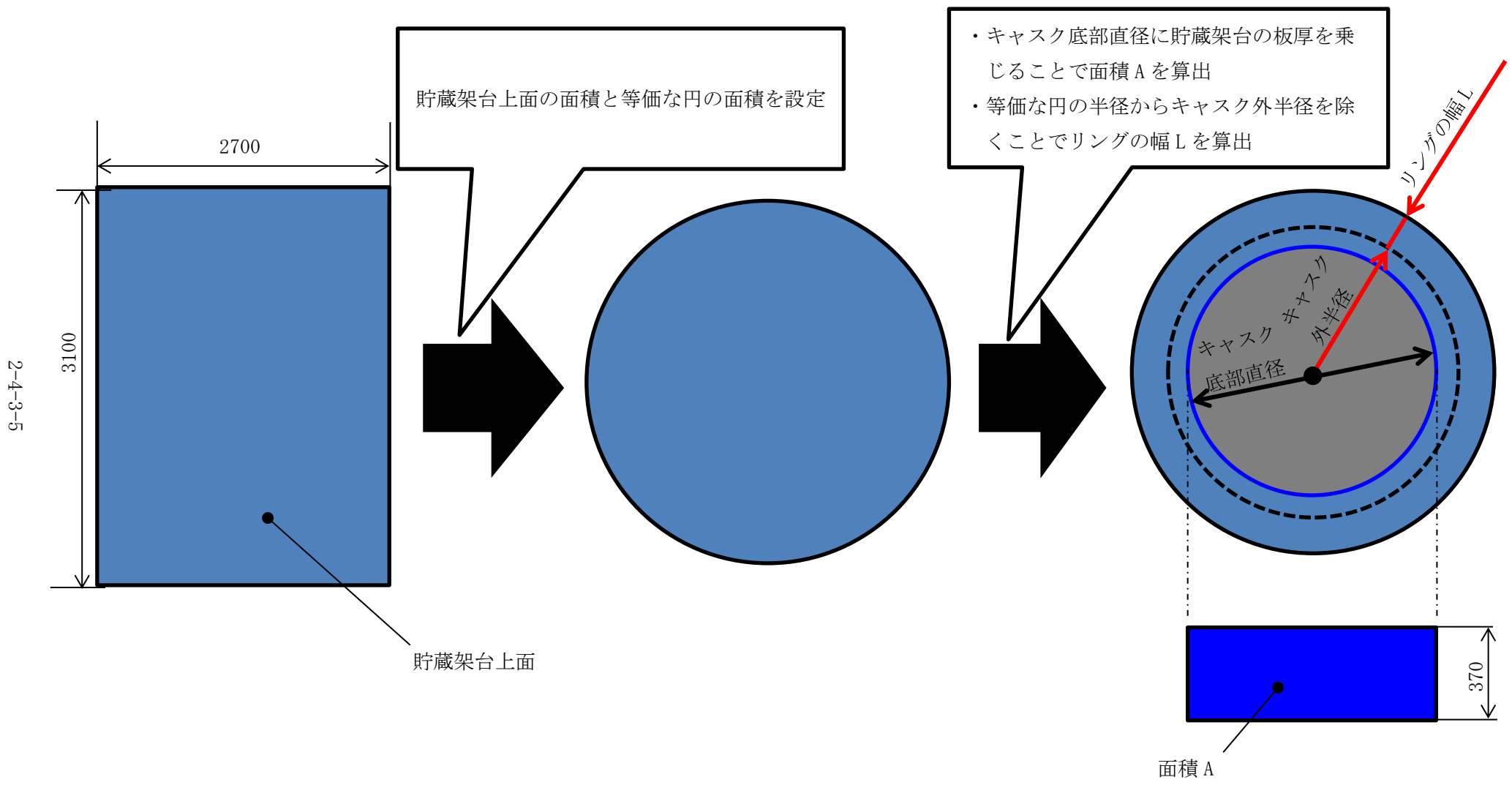
(注4) 以下の図に示す寸法である。



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

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

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



2-4-3-2 図 面積 A 及びリングの幅 L の算出方法について

### (3) 熱逃げ量算出

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

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

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

2-4-3-4 表 熱逃げ量の算出結果及び入力値の設定結果

項目	乾式キャスク (タイプ1)	乾式キャスク (タイプ2)	3D 熱解析モデル への入力値
2-4-3-2 図に示すリングの面積(mm <sup>2</sup> )	7.40×10 <sup>5</sup>	8.25×10 <sup>5</sup>	—
熱逃げ量(kW)	0.375	0.386	—
単位面積あたりの熱逃げ量(kW/mm <sup>2</sup> )	5.06×10 <sup>-7</sup>	4.67×10 <sup>-7</sup>	4.00×10 <sup>-7</sup>

## 2.2 伝熱経路②の熱逃げ量算出

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

### (1) 貯蔵架台の熱抵抗算出

貯蔵架台の熱抵抗は、以下の(d)式で算出できる。

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

2-4-3-5表に、(d)式の各記号の意味、入力値及び算出値を示す。

2-4-3-5 表 (d)式の各記号の意味、入力値及び算出値

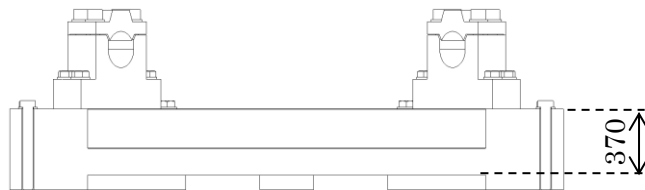
記号	意味	数値	
		乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
入力値	h 上向き水平平板の自然対流熱伝達率 <sup>(注1)</sup> (W/(mm <sup>2</sup> ・K))	4.86×10 <sup>-6</sup>	
	P キャスク底部の周長 <sup>(注2)</sup> (mm)	6961.8	6898.9
	k 貯蔵架台(炭素鋼)の熱伝導率 <sup>(注3)</sup> (W/mm・K)	0.04	
	A 乾式キャスク底部の周長に貯蔵架台板厚 (370mm) <sup>(注4)</sup> を乗じて算出した面積(mm <sup>2</sup> )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

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

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

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

(注4) 以下の図に示す寸法である。



(単位：  
mm)

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

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

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

## (2) 熱逃げ量算出

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

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

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

2-4-3-6表 熱逃げ量の算出結果及び入力値の設定結果

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

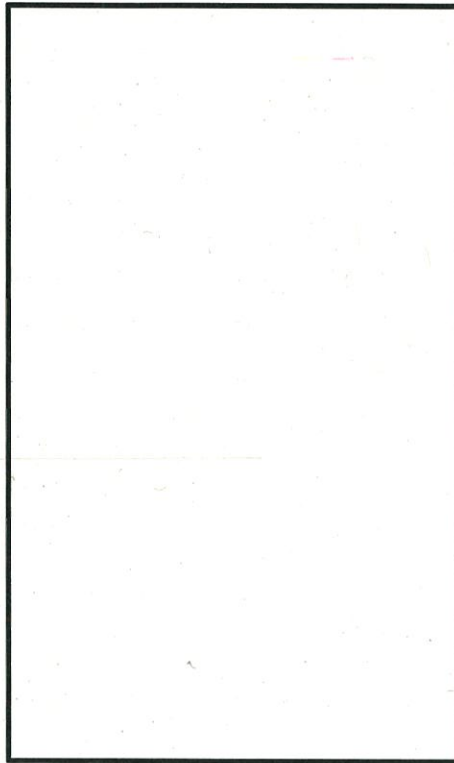
## 3. 設計承認申請における軸方向熱逃げ量との比較

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

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

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

各評価の境界条件を2-4-3-4図に示す。



2-4-3-3 図 核燃料輸送物設計承認における除熱解析モデル

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

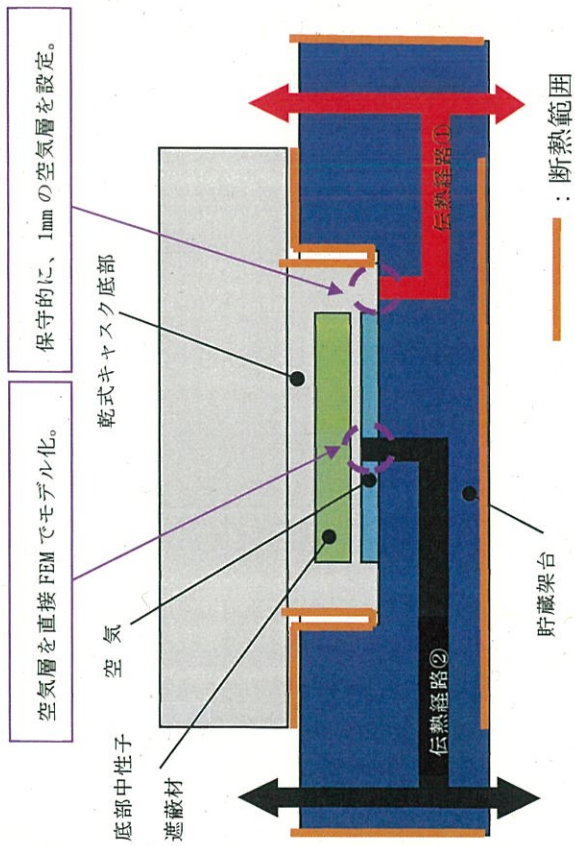
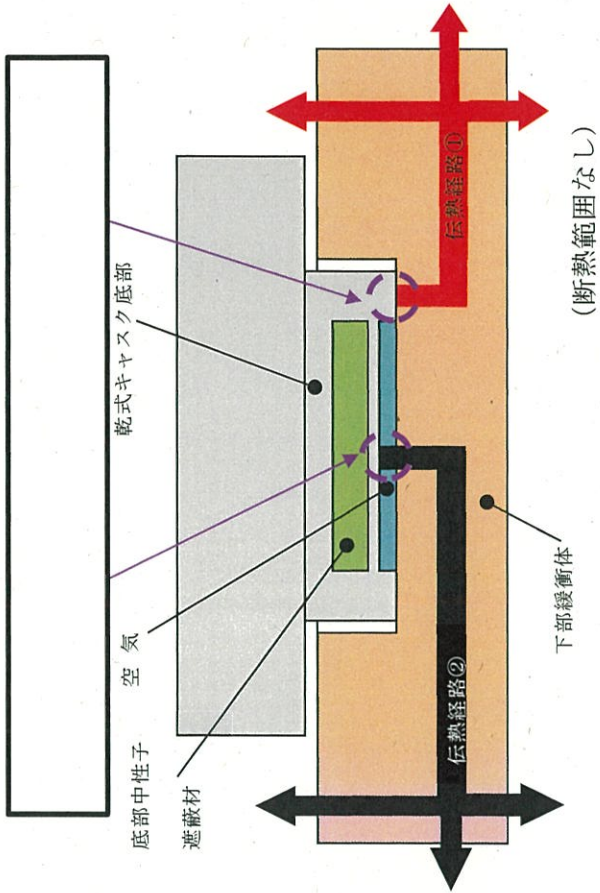
本設工認申請におけるキャスク底部熱逃げ量の設定値（伝熱効果の高い炭素鋼製の貯蔵架台からの放熱）は全放熱量のわずかに約 4% であるのに対し、設計承認における下部緩衝体（断熱効果の高い木材が充填されている）からの放熱割合（約 3%）と同程度である。

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

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

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





設計承認における境界条件

設工認における境界条件

2-4-3-4 図 キヤスク底部の境界条件について

#### 4. 参考文献

- [1] J. P. ホールマン, 「伝熱工学<上>」, (1993).

以上