

Doc No. 18-180-I-314 Rev. 0

2021年6月1日

トランスニュークリア株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（TK-26型）

2021年4月28日の面談時質問に対する回答
（除熱設計関連）

本資料のうち、枠囲いの内容は、商業機密等に属しますので公開できません。

番号	ページ	対象	コメント内容
9	9	補足説明資料 1-4	レジン温度 143℃が基準値に対し余裕がない。この温度の裕度について説明すること。

(回答)

補足説明資料 1-4 第 4 表に示した中性子遮蔽材の評価結果 (143℃) は、底部中性子遮蔽材における温度である。除熱解析で使用する解析モデルは軸方向全体モデル (以下「全体モデル」という。)、径方向輪切りモデル (以下「輪切りモデル」という。)、及び燃料集合体モデルの 3 種類あるが、底部中性子遮蔽材の温度は、上記解析モデルのうち全体モデルから求められる。全体モデルは、トラニオンを除いて実形状もしくは、部材の存在比を考慮した等価な熱伝導率をもつ均質化領域としてモデル化しており、金属キャスク本体底部を断熱条件とするなどの保守性を確保している。また、設計発熱量についても最大の発熱量 17.2kW に対して余裕を見た発熱量 19.59kW を与えることにより保守性を有している。

更に、より実態に近い三次元モデルの解析も行っており、二次元モデルとの比較を補足説明資料 1-4 別紙 2 に示している。これらの解析モデルによる中性子遮蔽材の温度を表 9-1 に示す。二次元モデルは三次元モデルに対して保守性をもった解析結果となっている。

以上から、保守的な設定条件により評価した中性子遮蔽材の最高温度は、基準値に対して裕度を持って下回っている。

表 9-1 中性子遮蔽材における最高温度の比較

評価部位	二次元モデル (°C)	三次元モデル (°C)	基準値 (°C)
底部中性子遮蔽材	143 ^{*1)}	137	150
蓋部中性子遮蔽材	102 ^{*1)}	101	
側部中性子遮蔽材	137 ^{*2)}	135	

*1) 全体モデルの結果

*2) 輪切りモデルの結果

番号	ページ	対象	コメント内容
10	21～22	補足説明資料 1-4	温度 Max の箇所に矢印と温度を記載すること。

(回答)

拝承。補足説明資料 1-4 第 12 図～第 13 図を以下のように修正する。



(補足説明資料 1-4) 第 12 図 除熱解析結果 (全体モデル)



(補足説明資料 1-4) 第 13 図 除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

番号	ページ	対象	コメント内容
11	別 1-5	補足説明資料 1-4	B-A1 の熱伝導率で 300℃のデータがある。B-A1 の申請は 250℃までなので削除できるなら削除すること。記載必要なら注記で説明すること。

(回答)

補足説明資料 1-4 別紙 1-1 表を以下のように修正する。

(補足説明資料 1-4) 別紙 1-1 表 各部位の物性値

部位	材料	温度 (℃)	熱伝導率 (W/(m・K))
胴 一次蓋 二次蓋 外筒	炭素鋼 ⁽¹⁾	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
中性子遮蔽材 (蓋部/側部/底部)	レジン (エチレンプロピレン系ゴ ム) ^(注1)	20	
		100	
		125	
		150	
バスケット格子材	ほう素添加アルミニウム合金 ^(注2)	25	
		100	
		150	
バスケットサポート	ほう素添加アルミニウム合金 或いはアルミニウム合金 ^(注3)	200	
		250	
伝熱フィン	銅 ⁽¹⁾	26.85	398
		326.85	383
		526.85	371

(注1) メーカー自社データ

(注2) メーカー自社データ

(注3) (注2)と同じ値とする。

番号	ページ	対象	コメント内容
12	別 1-8	補足説明資料 1-4	形態係数の算出根拠を示すこと。

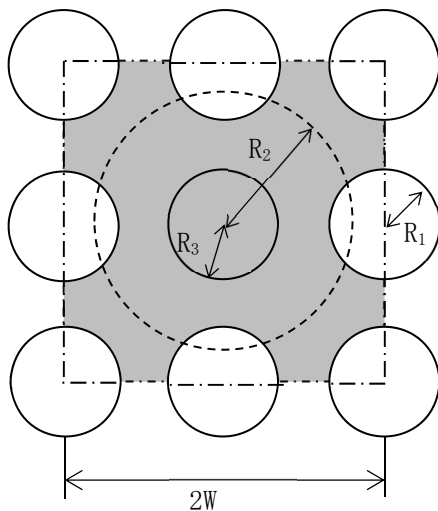
(回答)

金属キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数の算出方法を以下に示す。

貯蔵時における金属キャスク表面から貯蔵建屋壁面への放射に関わる形態係数は、「(一社)日本原子力学会、「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013 (AESJ-SC-F006:2013)」の附属書ATに基づき、円環フィン形状の形態係数を求める式から算出する。

金属キャスクの貯蔵配置図を図 12-1 に示す。1 辺の長さが $2W$ で囲まれた設置床面積のうち、中心に配置した金属キャスクと隣接する金属キャスク間の床面面積 (図 12-1 の網掛け部) の等価断面半径 R_2 を以下の式で求める。

$$R_2 = \sqrt{4W^2/\pi - 3R_1^2} \quad (1)$$



- W : 金属キャスクの貯蔵ピッチ (3.5m)
- R_1 : 周辺キャスクの外半径
- R_2 : 金属キャスク間領域の等価半径
- R_3 : 中心キャスクの外半径
- L : 金属キャスク全長

図 12-1 金属キャスク貯蔵配置図

その他の寸法の算出式及び各放射面の定義をそれぞれ式(2)から式(5)、及び図 12-2 に示す。ここで、 b に R_3 を、 a に R_2 を、 c に L を代入して、2 面から 3 面への形態係数 F_{23} を求めた。算出条件は形態係数が安全側の設定となるように定めた。算出条件及び結果を表 12-1 に示す。

以上により、金属キャスク表面から貯蔵建屋壁面への形態係数は、2 面から 3 面への形態係数 F_{23} である 0.214 である。

$$\begin{cases} A_n \cdot F_{nk} = A_k \cdot F_{kn} \\ \sum_n F_{kn} = 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

$n=1, 2, 3, \dots, M$

ここで、 A_n : n 面の面積 (m^2)

F_{kn} : k 面より n 面への形態係数 (-)

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left\{ \sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{XA} \right) + B \sin^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - \frac{\pi A}{2} \right\} \right] \quad (3)$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left(\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left\{ \frac{4(X^2-1) + (Y^2/X^2)(X^2-2)}{Y^2+4(X^2-1)} \right\} - \sin^{-1} \left(\frac{X^2-2}{X^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

$$F_{13} = 1 - F_{12} - F_{11} \quad (5)$$

ここで、 $X = a/b$

$Y = c/b$

$A = X^2 + Y^2 - 1$

$B = Y^2 - X^2 + 1$

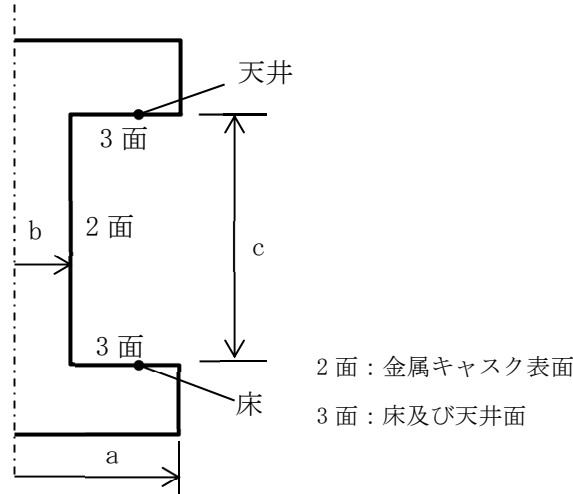


図 12-2 放射面の定義

表 12-1 形態係数の算出条件及び結果

算出条件	形状 (m)	R_1	1.350
		a (R_2)	3.183
		b (R_3)	1.315
		c (L)	5.890
		W	3.50
	係数 (-)	X	2.42
		Y	4.48
		A	24.92
		B	15.20
結果	形態係数 (-)	F_{12}	0.325
		F_{21}	0.786
		F_{23}	0.214

番号	ページ	対象	コメント内容
13	別 1-13	補足説明資料 1-4	等価熱伝導率の係数 K について説明すること。

(回答)

輪切りモデルの燃料集合体領域の等価熱伝導率を求める際に用いる係数 K について、以下に説明する。

係数 K は正方形内部が一様な熱伝導率と発熱密度である場合に、周囲境界温度と最高温度との関係を示す理論値である。矩形内部が一様な熱伝導率 k で単位体積発熱量 u''' で発熱している場合、下記 (FIG. 4-28) の熱伝導に関する理論式は、(4-133) 式である。 $x=y=0$ 、 $L=l$ (正方形) の厳密解は 0.29469 (= (4-133) 式の右边) である。

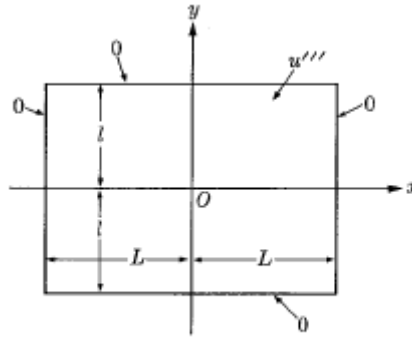


FIG. 4-28

$$\frac{\theta(x, y)}{u'''L^2/k} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda_n L)^3} \left(\frac{\cosh \lambda_n y}{\cosh \lambda_n l} \right) \cos \lambda_n x, \quad (4-133)$$

$$\text{where } \lambda_n L = (2n + 1)\pi/2, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ここで、等価熱伝導率の式

$$\lambda_f = \frac{q_f W^2}{K(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

と (4-133) 式を比較すると、

$\theta(x=0, y=0) = T_1 - T_2$ 、 $u''' = q$ 、 $2L = 2l = w$ 、 $k = \lambda_f$ となるため、これを (4-133) 式に代入して k を求めると、

$$\frac{\theta}{u'''L^2/k} = \frac{T_1 - T_2}{q \left(\frac{W}{2} \right)^2 / \lambda_f} = \frac{4(T_1 - T_2)}{qW^2/\lambda_f} = \frac{4}{K} = 0.29469$$

よって、 $K=13.57$ となる。

上記に加え、以下に示すように、ABAQUS コードを用いた計算によって、係数 K の値を確認した。

燃料集合体領域に相当するバスケット内幅 $w(m)$ をもつ正方形の二次元簡易モデル (図 13-1) を作成し、ABAQUS コードを用いた解析結果から、係数 K の値を求めた。

この解析においては、表 13-1 に示すように、等価熱伝導率 λ_f 、単位体積発熱量 q_f 、及びバスケット内幅の境界温度 T_2 をパラメータとし、TK-26 の解析使用値を包絡するように設定した。

ここで、上記(1)式を変形すると、

$$K = \frac{q_f w^2}{\lambda_f (T_1 - T_2)} \quad (2)$$

この結果、表 13-1 に示す通り、いずれのケースについても $K=13.57$ となり、理論値と一致した。

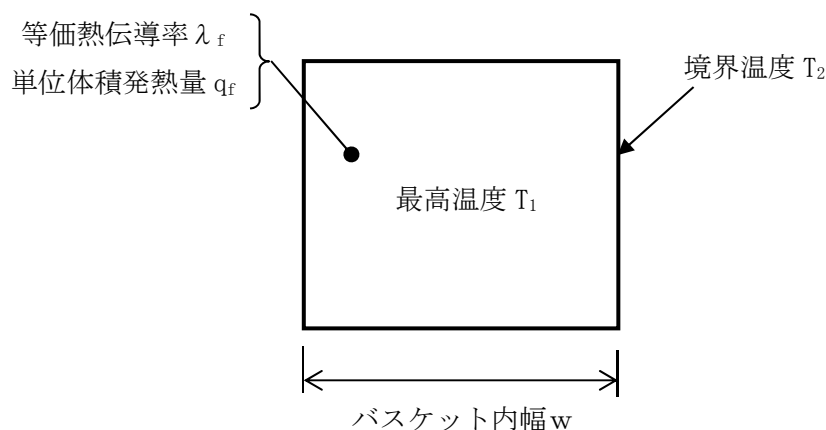


図 13-1 二次元簡易モデル (概念図)

表 13-1 二次元簡易モデルの解析条件と解析結果

解析条件	等価熱伝導率 λ_f (W/(m·K))	0.10、0.50、1.00、1.50
	単位体積発熱量 q_f (W/m ³)	2.0×10^3 、 4.0×10^3 、 6.0×10^3
	バスケット内幅の境界温度 T_2 (K)	300、400、600
解析結果	最高温度 T_1 から求めた K の値	全 36 ケースとも 13.57