

Doc No. 18-180-I-014 Rev. 0

2021年4月28日

トランスニュークリア株式会社

補足説明資料 1-4

TK-26 型の除熱設計に関する説明資料

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。

目 次

1. 設計方針	1
2. 除熱設計	2
3. 参考文献	5

別紙1 除熱解析のモデル化及び解析条件について

別添1 燃料集合体モデル及び輪切りモデルを用いた予備解析について

別紙2 二次元除熱解析モデルの妥当性について

1. 設計方針

TK-26 型は、使用済燃料集合体の健全性及び基本的安全機能を有する金属キャスクの各構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料集合体の崩壊熱を適切に除去する設計とする。具体的な設計方針は以下のとおりである。

- ・ 燃料被覆管の温度を、設計貯蔵期間を通じて燃料被覆管のクリープ破損及び燃料被覆管の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設計とする。
- ・ 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計とする。

2. 除熱設計

(1) 除熱機能に関する構造

TK-26 型は、使用済燃料集合体から発生する崩壊熱を伝導、対流、放射により TK-26 型の外表面に伝え、周囲の空気等に伝達する。TK-26 型の構造図を第 1 図に示す。

TK-26 型は、除熱性能を向上させるために以下の設計上の配慮を行っている。

- a. 金属キャスクの内部には、構造強度部材及び伝熱部材としてほう素添加アルミニウム合金製のバスケット格子材を設け、その中に使用済燃料集合体を収納する。
- b. 使用済燃料集合体を収納する空間には、熱伝導率の高いヘリウムガスを充填する。
- c. 熱伝導率の低い側部の中性子遮蔽材の内部には、銅製の伝熱フィンを設け、熱伝導性能を向上させる。

(2) 設計基準

TK-26 型の除熱機能の設計基準を第 1 表に示す。

(3) 解析モデル及び解析条件

TK-26 型の除熱解析は、第 2 図に示す除熱解析フローに従って行う。

a. 使用済燃料集合体の崩壊熱量設定

TK-26 型に収納される使用済燃料集合体の収納配置を第 3 図に示す。また、TK-26 型に収納される使用済燃料集合体の仕様を第 2 表に示す。

使用済燃料集合体の崩壊熱量（以下「発熱量」という。）は、燃料集合体の種類、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求められる。

構成部材の温度評価において、使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を考慮して、金属キャスク 1 基あたりの最大発熱量 (17.2kW) を上回る発熱量（以下「設計発熱量」という。）を次式のとおり設定する（第 4 図参照）。

$$[\text{設計発熱量}] = [\text{使用済燃料集合体 (平均燃焼度}^{(\text{注}1)}) \text{ 1 体当たりの発熱量(軸方向燃焼度分布を考慮}^{(\text{注}2)})] \times 1.05^{(\text{注}3)} \times [\text{収納体数}]$$

(注 1) 平均燃焼度とは、金属キャスク 1 基あたりに収納される使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を表す。

(注 2) 使用済燃料集合体の軸方向燃焼度の平均値に対する燃焼度の比（ピーキングファクター（以下「PF」という。））を考慮する。PF は、収納する使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を包絡するように設定する。

(注3) ORIGEN2 コードの計算結果に5%の保守性を考慮する。

収納対象燃料は、17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A/B 型)、39,000MWd/t 型 (A/B 型)、15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A/B 型)、39,000MWd/t 型 (A/B 型) である。このうち、除熱解析として発熱量の最も高い 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) を対象とする。

使用済燃料集合体の発熱量計算に用いる計算条件及び計算結果を第3表に示す。使用済燃料集合体の発熱量計算から、設計発熱量は以下のとおり計算される。

$$[\text{設計発熱量}] = \boxed{} \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 26 \text{ (体)} = \boxed{} \text{ (kW)}$$

b. 解析モデル

除熱解析は、TK-26 型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法コード ABAQUS を用いて行う。使用した解析モデルは以下の3つのモデルである。

- ・金属キャスク熱解析モデル

- ① 軸方向全体モデル (以下「全体モデル」という。)
- ② 径方向輪切りモデル (以下「輪切りモデル」という。)

- ・燃料被覆管熱解析モデル

- ③ 燃料集合体モデル

各解析モデルの形状図及び要素分割図を第5図～第10図に示す。また、モデル化の方法を別紙1に示す。

各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

- ① 全体モデル：胴、底板、蓋部、金属ガスケット、中性子遮蔽材 (蓋部、底部)
- ② 輪切りモデル：バスケット格子材、胴、外筒、中性子遮蔽材 (側部)
- ③ 燃料集合体モデル：燃料被覆管

c. 境界条件

TK-26 型周囲の環境として、以下の条件を用いる。(詳細条件を別紙1に示す。)

- ・周囲温度 : 50°C
- ・貯蔵建屋壁面温度 : 65°C
- ・貯蔵姿勢 : 縦置き

(4) 除熱解析結果

TK-26 型の除熱解析結果を第4表及び第11図～第13図に示す。

解析の結果、燃料被覆管の温度及び金属キャスク各部位の温度は第1表に示す設計基

準値を満足しており、TK-26 型は、使用済燃料集合体の発熱を適切に除去する設計となっていることが確認された。

3. 参考文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構、「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」、(平成 19 年 3 月)
- (2) (一社)日本機械学会、「使用済燃料貯蔵施設規格金属キャスク構造規格(2007 年版)」、JSME S FA1-2007、(2007 年 12 月)
- (3) (一社)日本ゴム協会編、「新版 ゴム技術の基礎 改訂版」、(2014)
- (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(中間貯蔵設備等長期健全性等試験)報告書、(平成 22 年 3 月)

第1表 除熱機能の設計基準

対象となる部位		設計基準値 (°C)	設計基準の考え方
使用済燃料 集合体	燃料被覆管	275 ⁽¹⁾	燃料被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下とする。
金属 キャスク	胴、底板、外筒及び蓋部	350 ⁽²⁾	基本的安全機能及び構造強度の維持が必要な構成部材は、健全性が維持できる温度以下とする。
	中性子遮蔽材（蓋部、 底部、側部）	150 ⁽³⁾	
	金属ガスケット	130 ⁽⁴⁾	
	バスケット格子材	250 ^(注1)	

(注1) 補足説明資料 1-7 「バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 (1B-A3J04-0) について」参照。

第2表 使用済燃料集合体の仕様

項目		仕様			
種類		17×17 燃料 48,000MWd/t 型		15×15 燃料 48,000MWd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型
形状	集合体幅	約 214mm			
	全長	約 4100mm			
質量		約 680kg		約 670kg	
初期濃縮度		4.2wt%以下		4.1wt%以下	
最高燃焼度 ^(注1)		48,000MWd/t 以下		47,000MWd/t 以下	
冷却期間		15 年以上	20 年以上	15 年以上	20 年以上
収納体数		26 体 ^(注2)			

項目		仕様			
種類		17×17 燃料 39,000MWd/t 型		15×15 燃料 39,000MWd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型
形状	集合体幅	約 214mm			
	全長	約 4100mm			
質量		約 680kg		約 670kg	
初期濃縮度		3.7wt%以下		3.5wt%以下	
最高燃焼度 ^(注1)		39,000MWd/t 以下		39,000MWd/t 以下	
冷却期間		20 年以上	20 年以上	20 年以上	20 年以上
収納体数		26 体 ^(注2)			

(注1) 最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体1体の燃焼度の最大値を示す。

(注2) 収納体数は、48,000MWd/t型燃料と39,000MWd/t型燃料を混載する場合がある。

第3表 発熱量計算条件及び結果

種類			17×17 燃料		15×15 燃料			
			A 型	B 型	A 型	B 型		
計算条件	最高燃焼度 (MWd/t)		48,000		47,000			
	平均燃焼度 (MWd/t)		44,000		43,000			
	比出力 (MW/t)							
	照射	使用済燃					最高燃焼度	
	期間(日)	料集合体					平均燃焼度	
	初期濃縮度 (wt%) (注1)							
	冷却期間 (年)						15	20
	ウラン質量 (kg)							
	軸方向 PF							
	上部							
下部								
計算結果	使用済燃料集合体 (平均燃焼度) 1 体当たりの発熱量 (PF 考慮) (W)							

(注1) 収納される使用済燃料集合体に対する最小値を用いる。

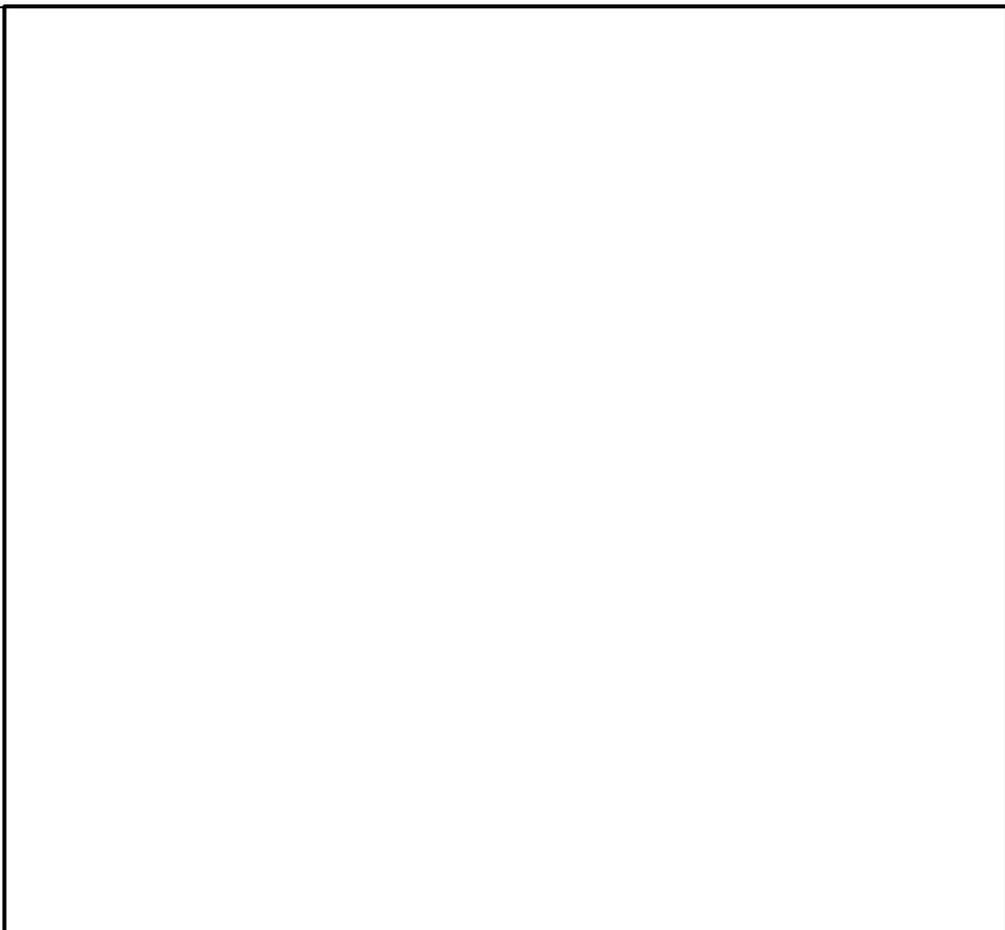
(注2) ノードは燃料有効部を軸方向に□分割したものである。

第4表 除熱解析結果

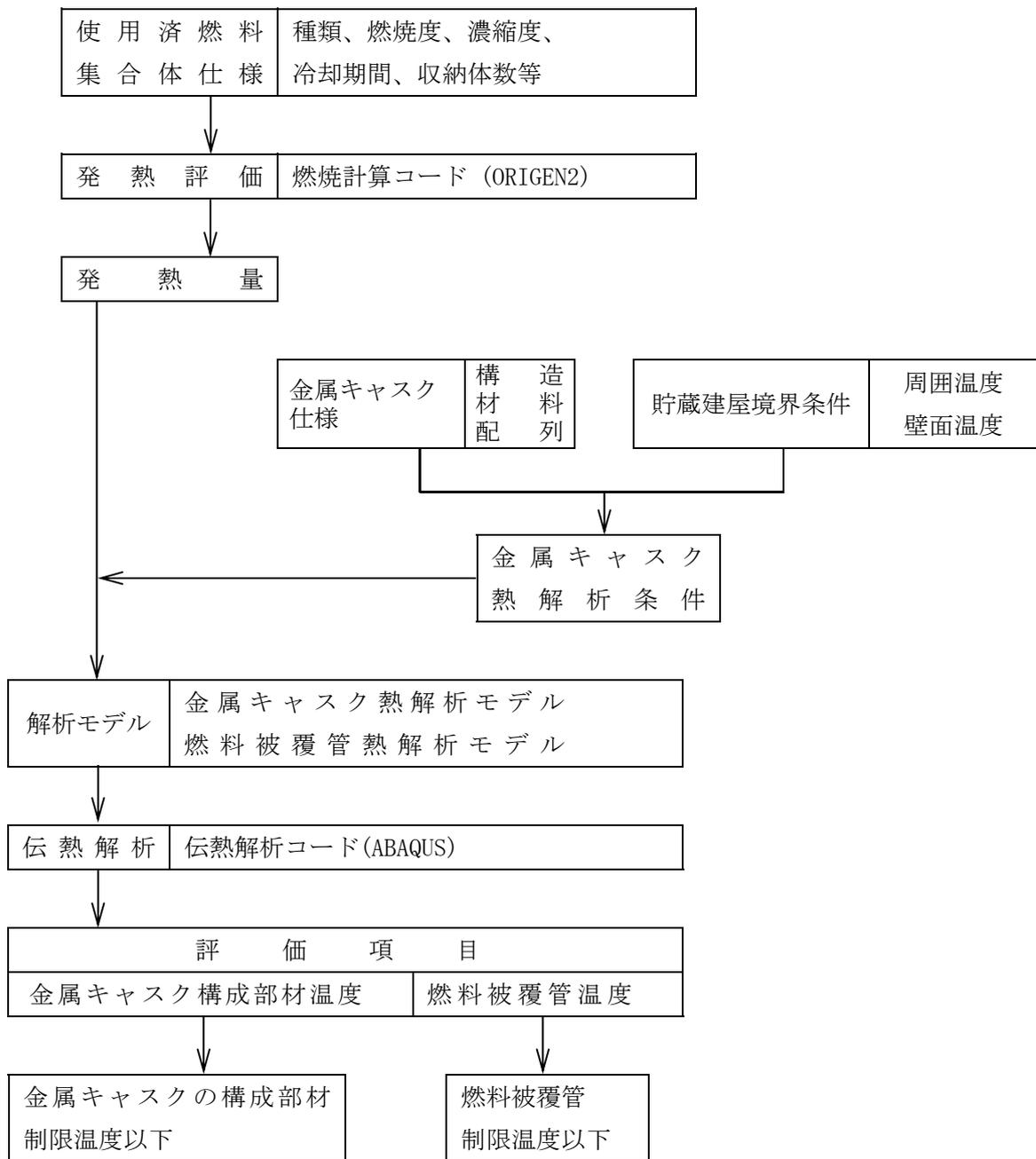
対象となる部位		評価結果 (°C)	設計基準値 (°C)
燃料被覆管		255 ^(注1)	275
金属キャスク	胴	151	350
	外筒	127	350
	一次蓋	107	350
	二次蓋	102	350
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	143 ^(注2)	150
	金属ガスケット	106	130
	バスケット格子材	225	250

(注1) 燃料被覆管の最高温度とする。

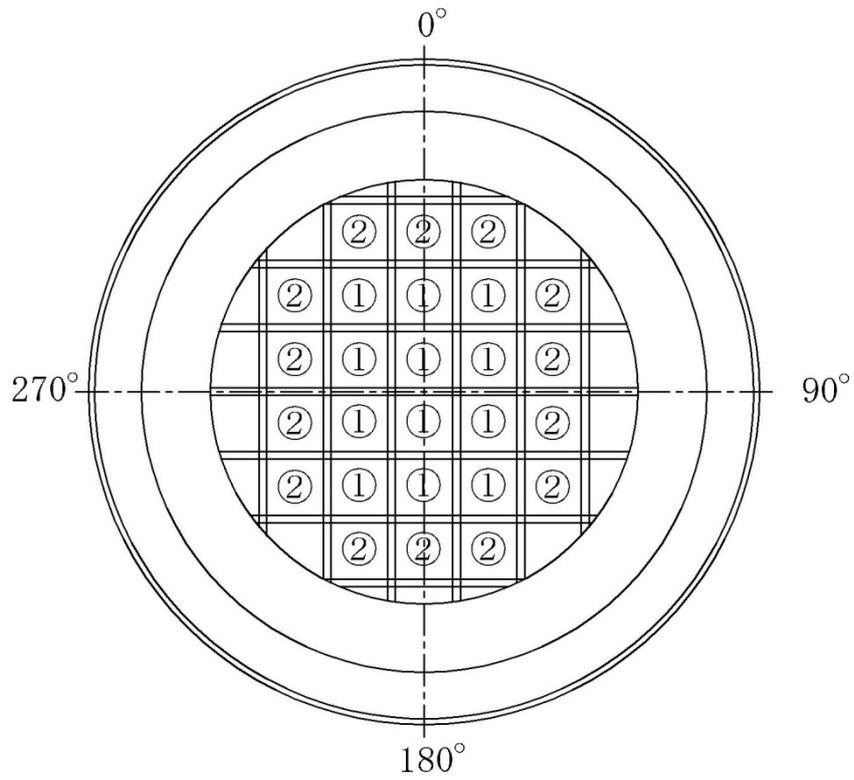
(注2) 蓋部、底部、側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度を示す。

<p>概要図</p>	
<p>主な材料</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・胴 : 炭素鋼 ・外筒 : 炭素鋼 ・バスケット格子材 : ほう素添加アルミニウム合金 ・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 ・中性子遮蔽材 : レジン (エチレンプロピレン系ゴム) ・伝熱フィン : 銅

第 1 図 TK-26 型の除熱構造図

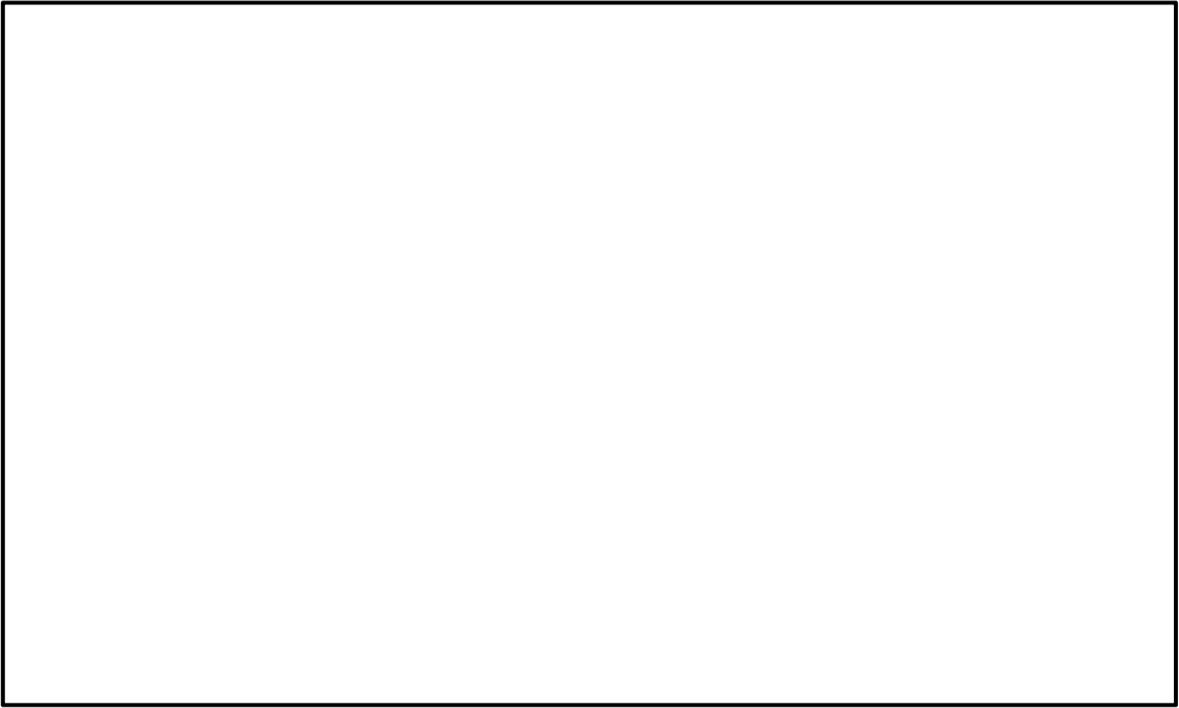


第2図 除熱解析フロー図



- ① : 最高燃焼度以下の使用済燃料集合体の収納位置 (12 体)
- ② : 平均燃焼度以下の使用済燃料集合体の収納位置 (14 体)

第 3 図 使用済燃料集合体の収納配置



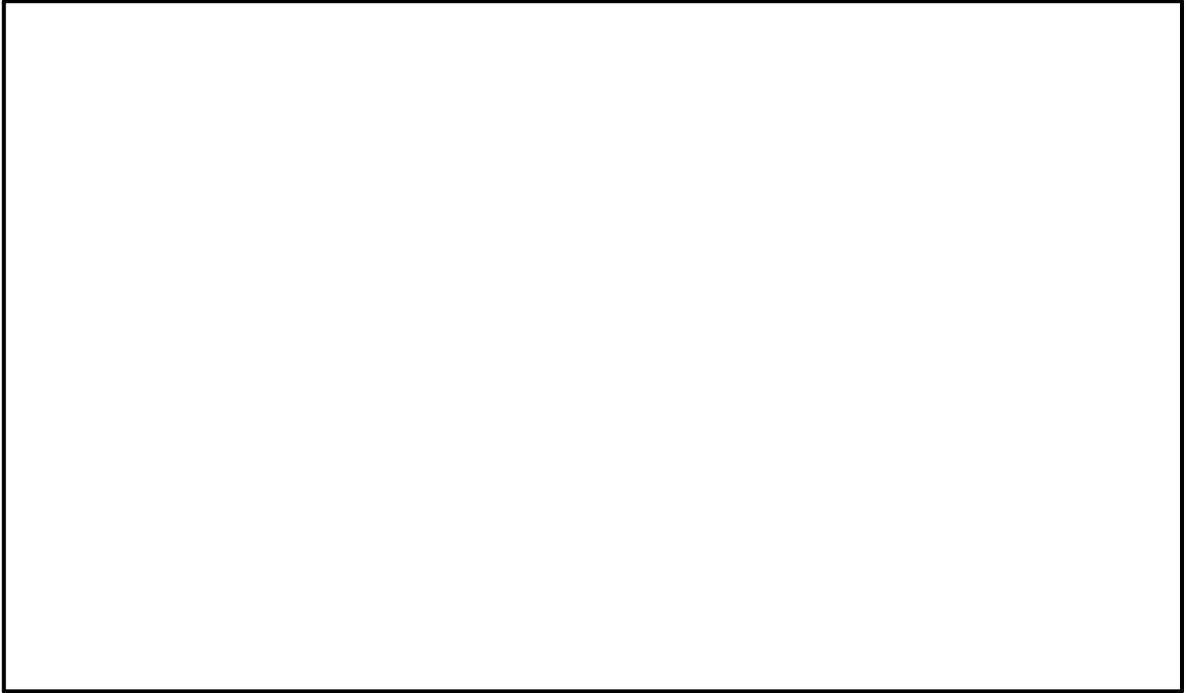
第 4 図 使用済燃料集合体（燃料有効部）の設計発熱量軸方向分布



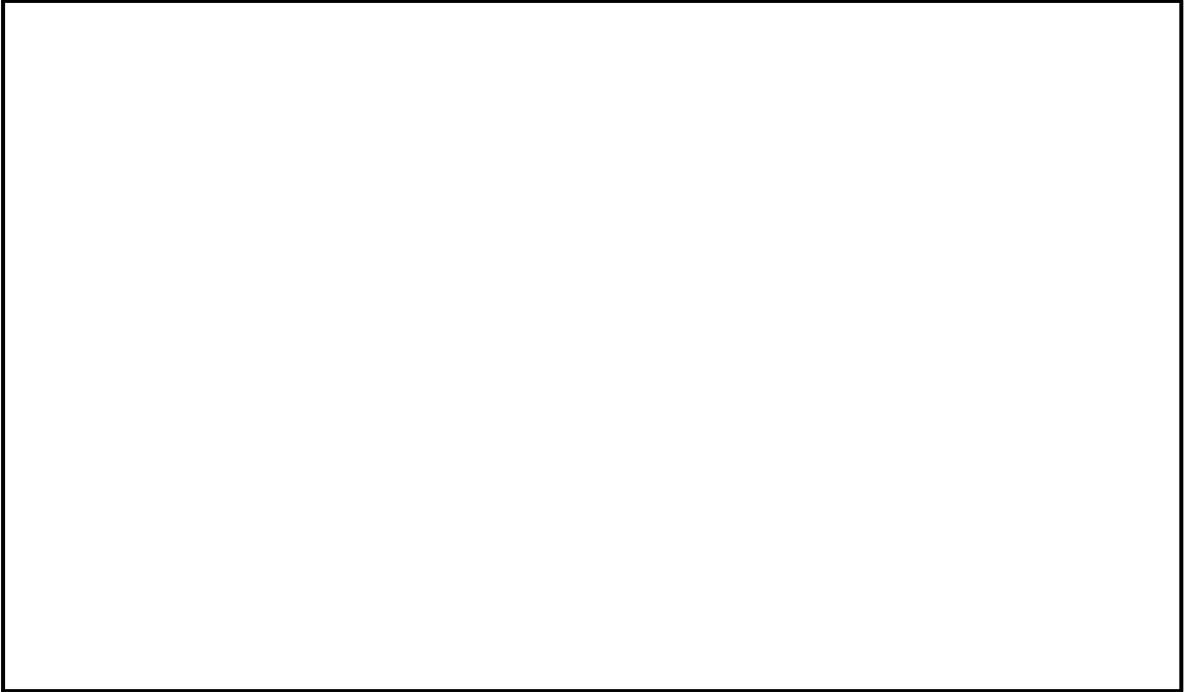
第 5 図 全体モデル形状図



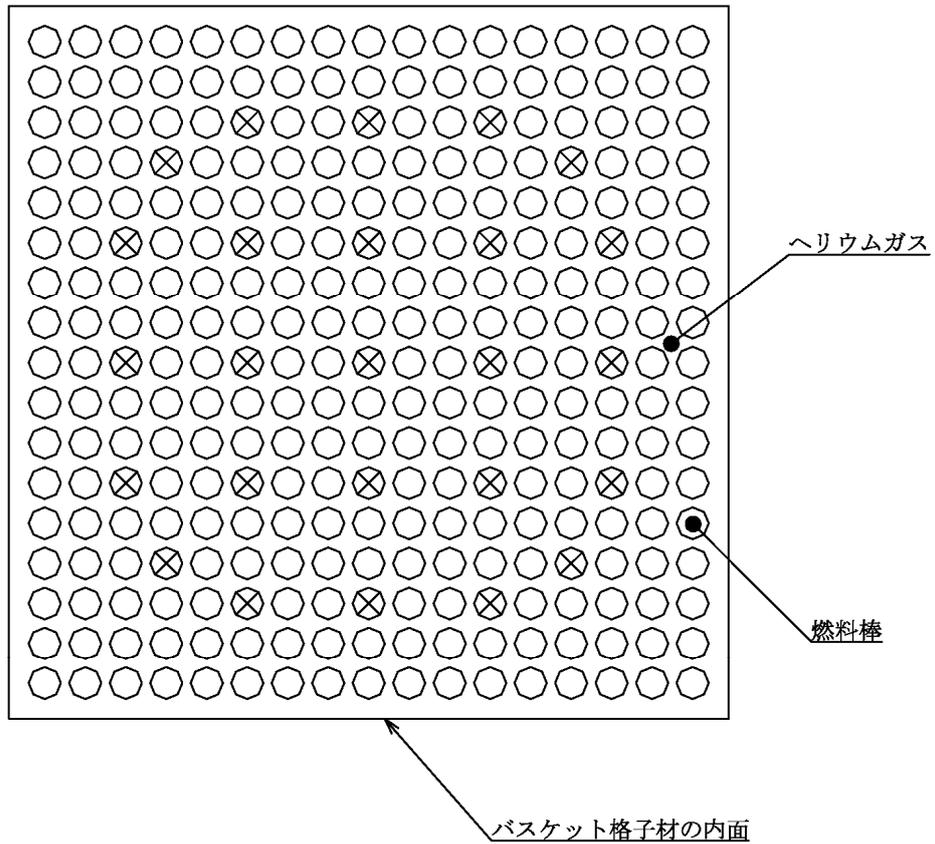
第 6 図 全体モデル要素分割図



第7図 輪切りモデル形状図

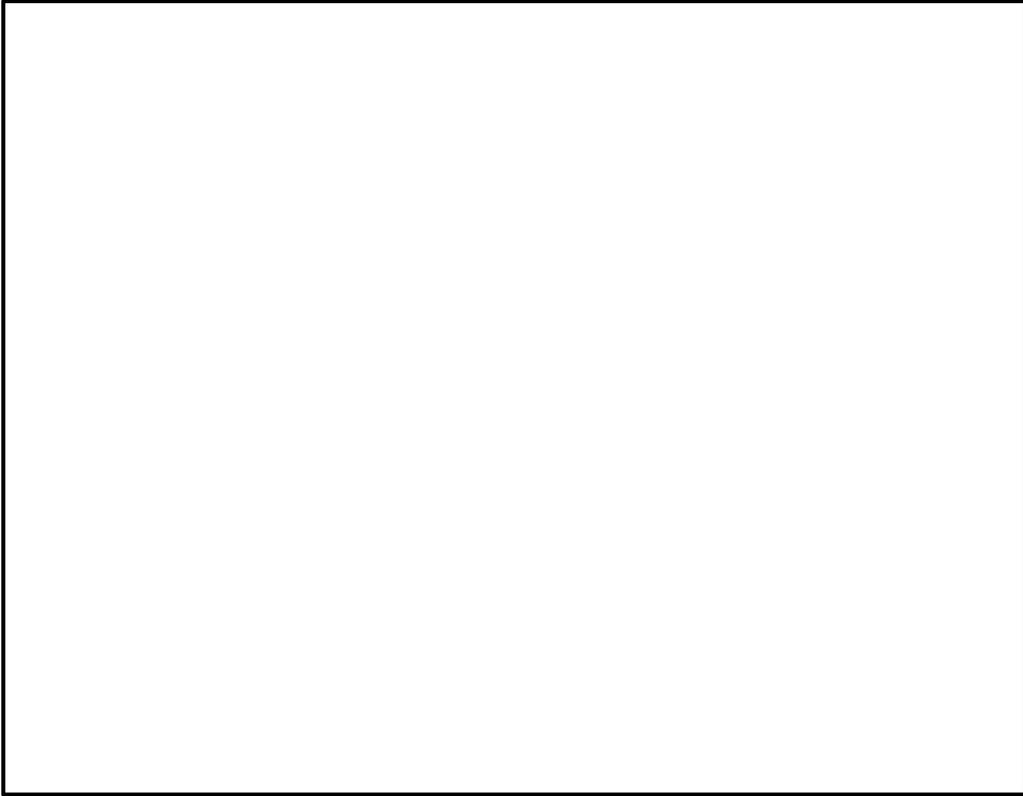


第 8 図 輪切りモデル要素分割図



⊗ : 制御棒案内シンプル等であり、発熱はない

第9図 燃料集合体モデル形状図

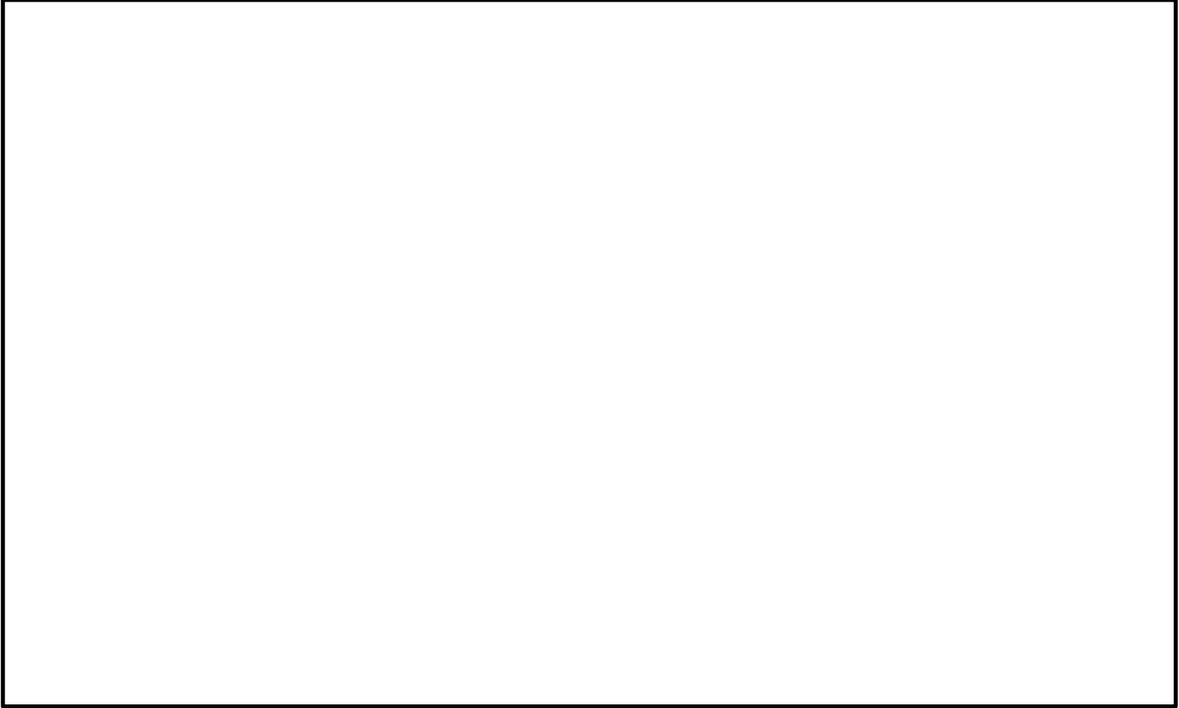


第 10 図 燃料集合体モデル要素分割図



(単位：℃)

第 11 図 除熱解析結果 (全体モデル)



(単位：℃)

第 12 図 除熱解析結果 (輪切りモデル)



(単位：℃)

図 13 除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

除熱解析のモデル化及び解析条件について

1. 伝熱形態について

TK-26 型の伝熱形態を別紙 1-1 図に示す。

使用済燃料集合体から発生した崩壊熱は、主に胴内に充填されたヘリウムガスの伝導と放射により、バスケット格子材内面に伝えられる。バスケット格子材内面に伝えられた熱は、主に伝導によりバスケット格子材外周部に伝わり、さらにバスケット格子材外周部からヘリウムガスの伝導と放射により胴内面に伝えられる。続いて、胴内面に伝えられた熱は、伝導により金属キャスク表面に伝えられ、放射と空気の自然対流により金属キャスク周囲の大気に拡散される。なお、側部中性子遮蔽材領域では、主に銅製の伝熱フィンの伝導により熱が伝えられる。

2. 除熱解析のモデル化及び解析条件

除熱解析は、TK-26 型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法コード ABAQUS を用いて行う。使用した解析モデルは以下の 3 つのモデルである。

- ・金属キャスク熱解析モデル
 - ① 軸方向全体モデル（以下「全体モデル」という。）
 - ② 径方向輪切りモデル（以下「輪切りモデル」という。）
- ・燃料被覆管熱解析モデル
 - ③ 燃料集合体モデル

これら 3 つの解析モデルの入出力フローを別紙 1-2 図に示す。また、各部位及び均質化領域の物性値をそれぞれ、別紙 1-1 表及び別紙 1-2 表に、各部材の放射率を別紙 1-3 表に示す。

各解析モデルの概要及び解析条件を以下に示す。

(1) 全体モデル

全体モデルは、金属キャスク全体を二次元の軸対称体としてモデル化したものであり、蓋部及び底部の温度を評価するためのモデルである。全体モデルの形状図を別紙 1-3 図に示す。

全体モデルは二次元モデルであるため、燃料集合体-バスケット領域及び側部中性子遮蔽材領域については、材料の存在比を考慮した均質化した熱伝導率を軸方向及び径方向のそれぞれについて個別に設定する。軸方向は領域内に存在する各材料の体積存在比に基づいて均質化した物性値を設定する。径方向は、燃料集合体-バスケット領域については、輪切りモデルを用いた予備解析から求められる等価な熱伝導率を、側部中性子

遮蔽材領域については、胴から外筒まで多層円筒の一部と考えて輪切りモデルを用いた予備解析から求められる等価な熱伝導率をそれぞれ設定する（別添 1 参照）。

次に、発熱条件として、軸方向の発熱分布を考慮した設計発熱量となるように燃料有効部の発熱密度を設定する。

全体モデルの境界条件を別紙 1-4 表に示す。周囲温度を 50℃、貯蔵建屋壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面への放射による放熱を考慮する。なお、金属キャスク底面から貯蔵架台への伝熱は保守側に断熱とする。

(2) 輪切りモデル

輪切りモデルは、使用済燃料集合体が最高温度となる金属キャスクの径方向断面を二次元でモデル化したものであり、中性子遮蔽材（側部）、胴、バスケット格子材等の温度を評価するためのモデルである。輪切りモデルの形状図を別紙 1-4 図に示す。

輪切りモデルの燃料集合体領域には、燃料集合体モデルから求められる等価熱伝導率（別添 1 参照）を設定する。

中央部には、最高燃焼度となる使用済燃料集合体の PF 最大領域の発熱量に相当する発熱密度を設定する。一方、外周部には、断面内発熱量の合計が平均燃焼度燃料の PF 最大領域の発熱量 26 体分と等しくなるように発熱密度を設定する。

その際、全体モデルにおける軸方向への熱の移動を輪切りモデルに反映するために、外周部の使用済燃料集合体の領域には、全体モデルの解析における燃料集合体-バスケット領域での軸方向熱移動量を差し引いた発熱密度を設定する。また、胴内面及び外筒外面の温度が全体モデルの温度と等しくなるように、胴内面及び外筒外面に吸熱を与えて、輪切りモデル内の熱移動量を調整する。この熱移動に関する概念を別紙 1-5 図に示す。

輪切りモデルに設定した発熱条件及び熱移動量をそれぞれ別紙 1-5 表及び別紙 1-6 表に示す。

また、輪切りモデルの境界条件を別紙 1-7 表に示す。周囲空気温度を 50℃、貯蔵建屋壁面温度を 65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達、貯蔵建屋壁面への放射による放熱を考慮する。

(3) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルは、燃料集合体の軸方向中央断面を二次元でモデル化したものであり、燃料被覆管の温度を評価するためのモデルである。燃料棒は正八角形でモデル化し、断面積等価となるように寸法を設定する。燃料集合体モデルの形状図を別紙 1-6 図に示す。

燃料棒には、二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定する。

発熱条件として、PF 最大領域の発熱量に相当する発熱密度を設定する。

燃料集合体モデルの境界条件として、バスケット格子材の内面に、輪切りモデルにおいて求められる最高温度を設定する。

また、燃料集合体モデルの伝熱形態として伝導及び放射を考慮するものとし、軸方向への伝熱を無視することで保守的な設定としている。

3. 参考文献

- (1) (一社)日本機械学会、「伝熱工学資料 改訂第4版」、(1986)、p.185, 314, 317
- (2) (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)」、(2014年11月)、p.200, 201
- (3) Vedat S. Arpaci, “CONDUCTION HEAT TRANSFER”, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY (1966), p.219, 220
- (4) 理工学社、「機械工学基礎講座 伝熱学」、(1982)、p.22, 25, 26

別紙 1-1 表 各部位の物性値

部位	材料	温度 (°C)	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		
		300		
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。

別紙 1-2 表 均質化領域の物性値

解析モデル	均質化領域		温度 (°C)	熱伝導率 (W/(m・K))	
				径方向	軸方向
全体モデル	燃料集合体 -バスケット 領域 ^(注1)	上部ノズル部	26.85 126.85 326.85		
		上部プレナム部	26.85 126.85 326.85		
		燃料有効部	26.85 126.85 326.85		
		下部ギャップ部	26.85 126.85 326.85		
		下部ノズル部	26.85 126.85 326.85		
		側部中性子遮蔽材領域	26.85 126.85 326.85		
	輪切り モデル	燃料集合体領域	26.85 126.85 326.85		
燃料集合体 モデル	燃料棒	26.85 126.85 326.85 526.85			

(注 1) 使用済燃料集合体及びバスケットが収納される領域

別紙 1-3 表 各部材の放射率

部材	表面性状	放射率
胴（内面） 一次蓋（側面） 二次蓋（側面）		
バスケット格子材 バスケットサポート		
胴（外表面） 一次蓋（外表面） 二次蓋（外表面） 外筒（外表面） 貯蔵建屋壁面	白色塗装	0.8 ^(注3)

(注 1) メーカー自社データ

(注 2) メーカー自社データ

(注 3) 参考文献(1)参照。白色塗装面の放射率 0.7~0.9 の平均値を採用した。

別紙 1-4 表 全体モデルの境界条件

項目	境界条件
周囲温度	50℃
貯蔵建屋壁面温度	65℃
貯蔵建屋壁面放射率	0.8
金属キャスク表面放射率	0.8
金属キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数	0.214 ^(注1)
金属キャスク側部 表面熱伝達率	垂直平板の乱流自然対流熱伝達の式 ^{(注2)(2)} $h=0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times \text{Pr} \right)^{1/3}$
金属キャスク上向き面 表面熱伝達率	加熱水平上面の乱流自然対流熱伝達の式 ^{(注2)(2)} $h=0.13 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times \text{Pr} \right)^{1/3}$
金属キャスク下向き面 表面熱伝達率	加熱水平下面の層流自然対流熱伝達の式 ^{(注2)(2)} $h=0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times D^3 \times \text{Pr} \right)^{1/5}$
底部熱移動	断熱

(注1) 金属キャスク配列ピッチ寸法 3.5m から算出される値。

(注2) 記号の説明を以下に示す。

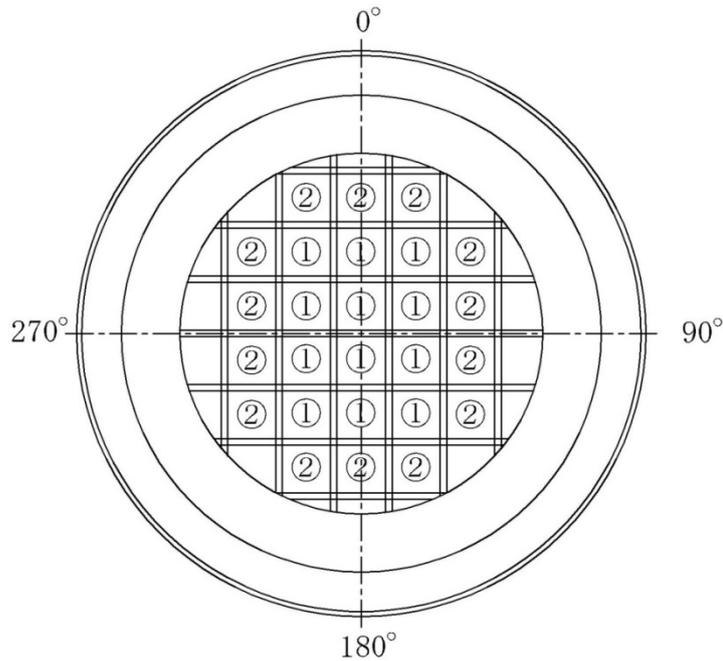
h : 熱伝達率 (W/m²/K) , λ : 熱伝導率 (W/m/K) , D : 代表長さ (m) ,
g : 重力加速度 (m/s²) , β : 体積膨張係数 (1/K) , ν : 動粘性係数 (m²/s) ,
Pr : プラントル数 (-) , Δt : 周囲空気と外表面の温度差 (K)

別紙 1-5 表 輪切りモデルの発熱条件

対象	収納体数	発熱量 (kW) (注1)(注2)	
		軸方向への熱移動考慮前	軸方向への熱移動考慮後
中央部に収納される使用済燃料集合体	12 体		
外周部に収納される使用済燃料集合体	14 体		
合計	26 体		

(注 1) 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm) の発熱量を燃料有効長 (mm) 当たりに換算した値。なお、表中の数値は、端数処理した値であるため、合計値が一致しない場合がある。

(注 2) 評価対象断面は PF 最大領域なので、軸方向への熱移動考慮前における発熱量の合計値は設計発熱量 (kW) を上回る。



① : 最高燃焼度に相当する発熱量

② : 合計発熱量が、設計発熱量 (平均燃焼度に相当する発熱量 (26 体分)) となるように、最高燃焼度燃料(①12 体分)の発熱量を差し引いた発熱量。ただし、軸方向への熱の移動を考慮する。

別紙 1-6 表 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動量

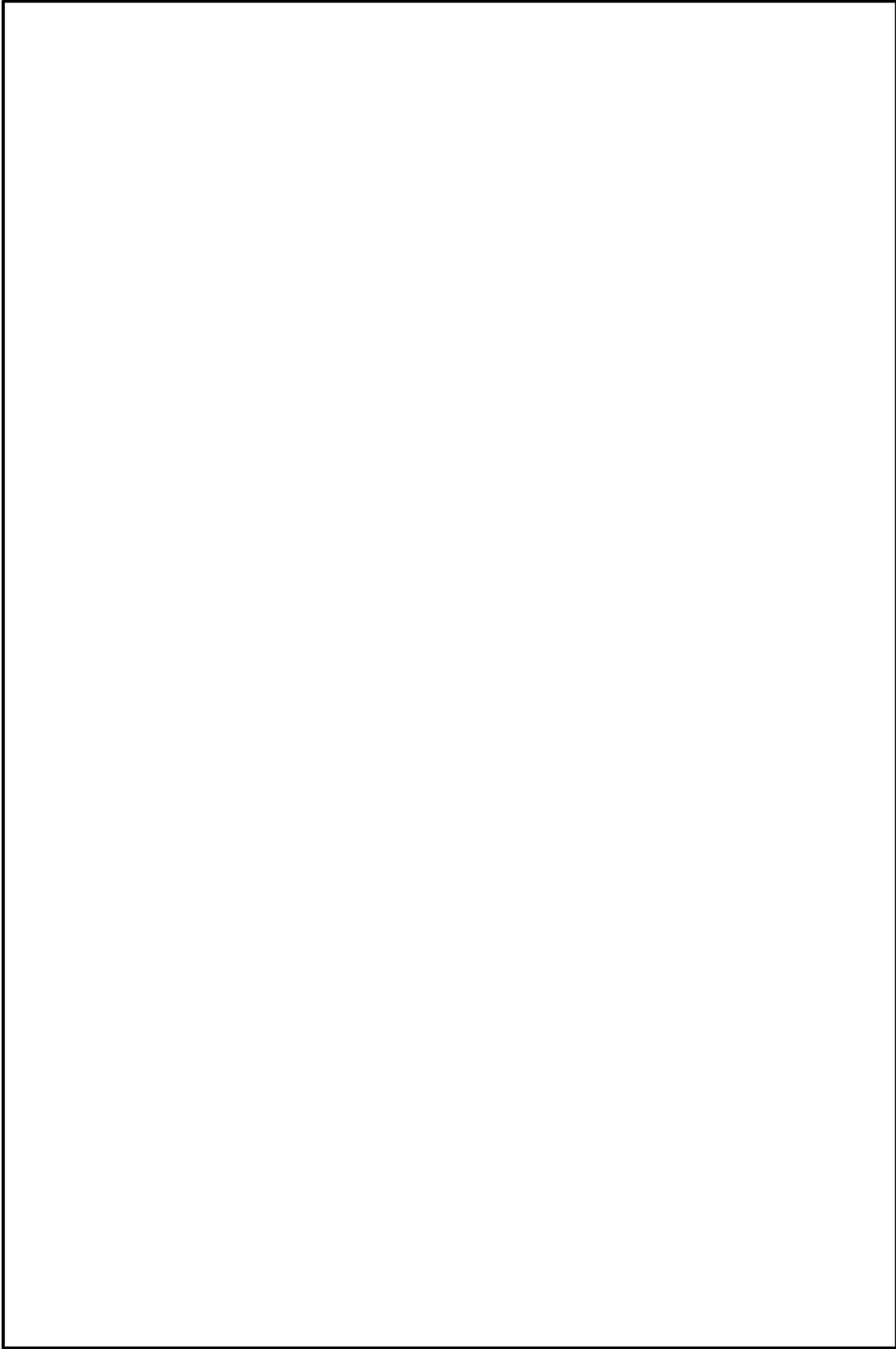
部位	軸方向への熱移動量 (kW) (注 1)
中央部に収納される 使用済燃料集合体 (12 体)	
外周部に収納される 使用済燃料集合体 (14 体)	
胴	
伝熱フィン、中性子遮蔽材 (側部)	
外筒	

(注 1) 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm) の熱移動量を燃料有効長 (mm) 当たりに換算した値

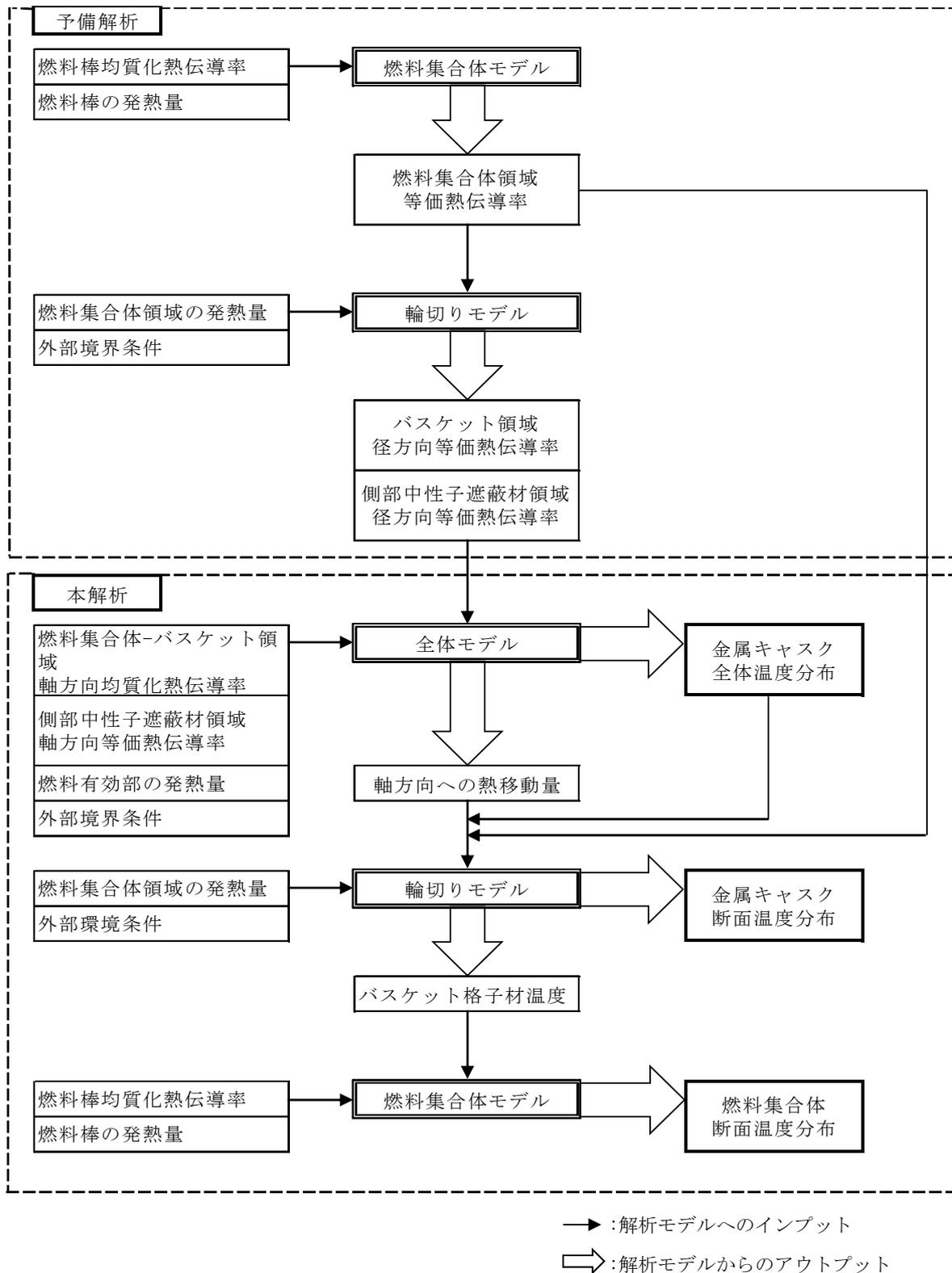
別紙 1-7 表 輪切りモデルの境界条件

項目	境界条件
周囲温度	50℃
貯蔵建屋壁面温度	65℃
貯蔵建屋壁面放射率	0.8
金属キャスク表面放射率	0.8
金属キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数	0.214 ^(注1)
金属キャスク側部表面熱伝達率	別紙 1-1 表に記載

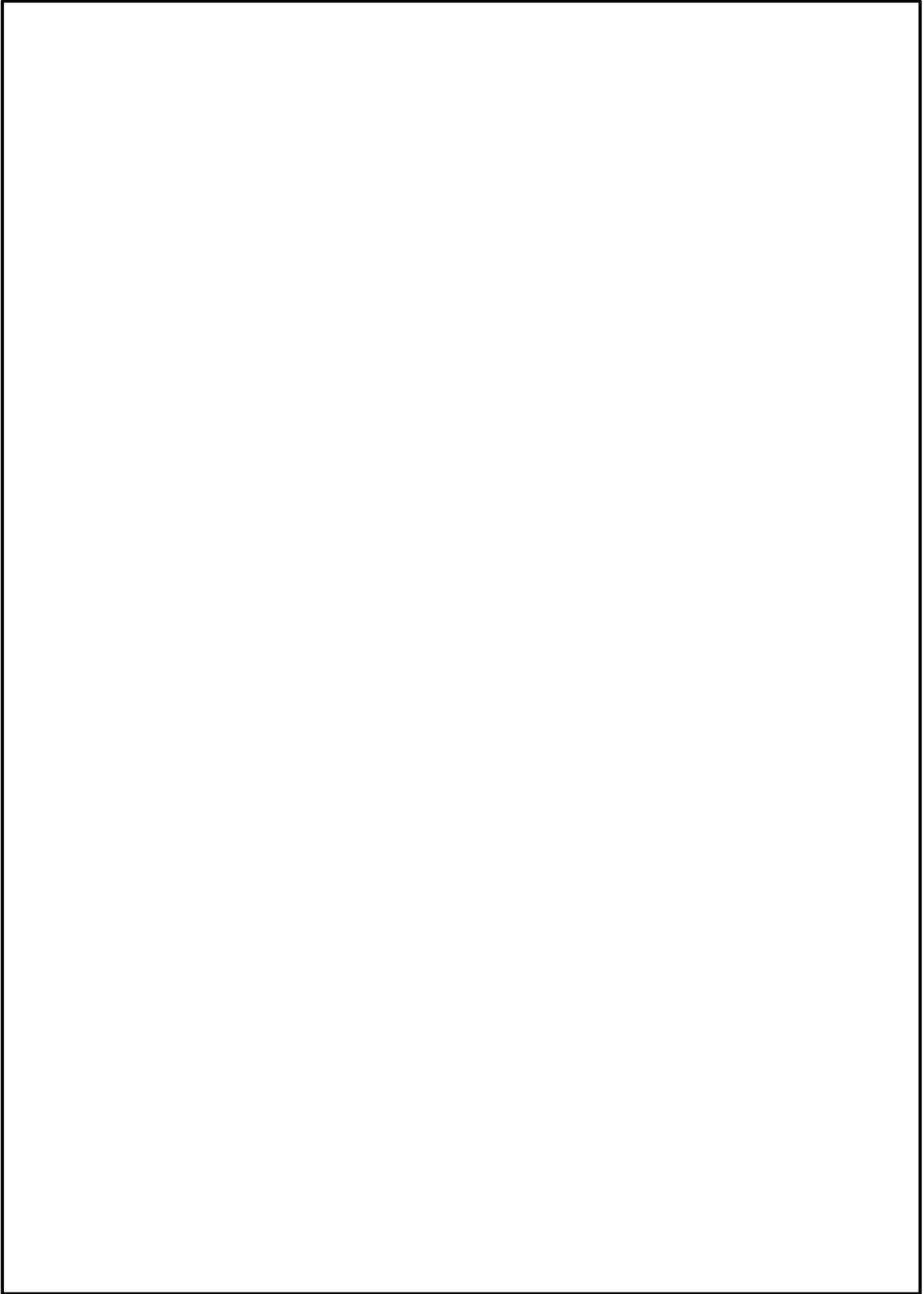
(注1) 金属キャスク配列ピッチ寸法 3.5m から算出される値。



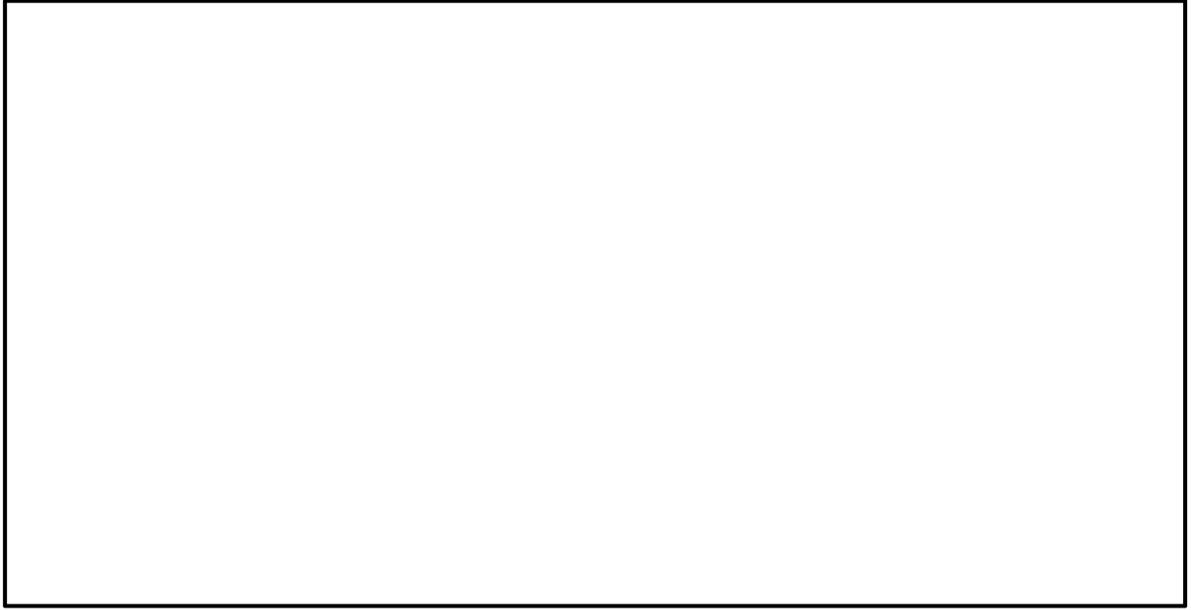
別紙 1-1 図 伝熱形態図



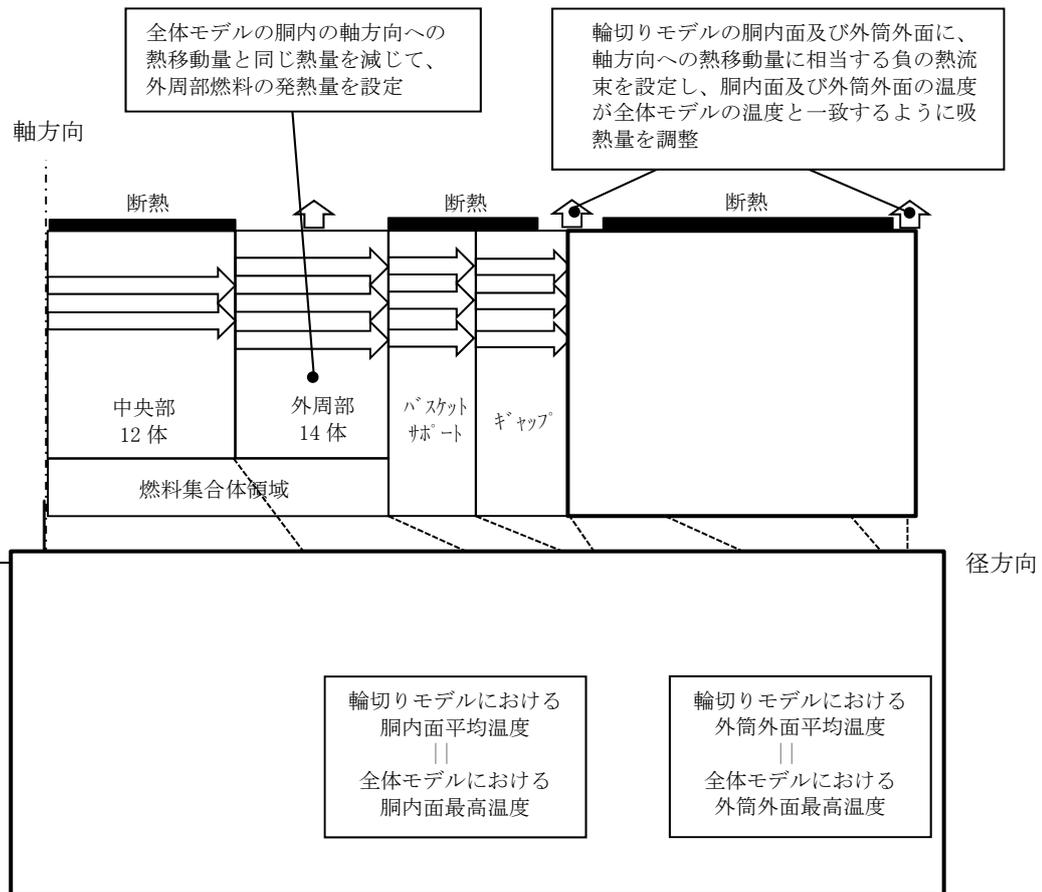
別紙 1-2 図 除熱解析モデルの入出力フロー図



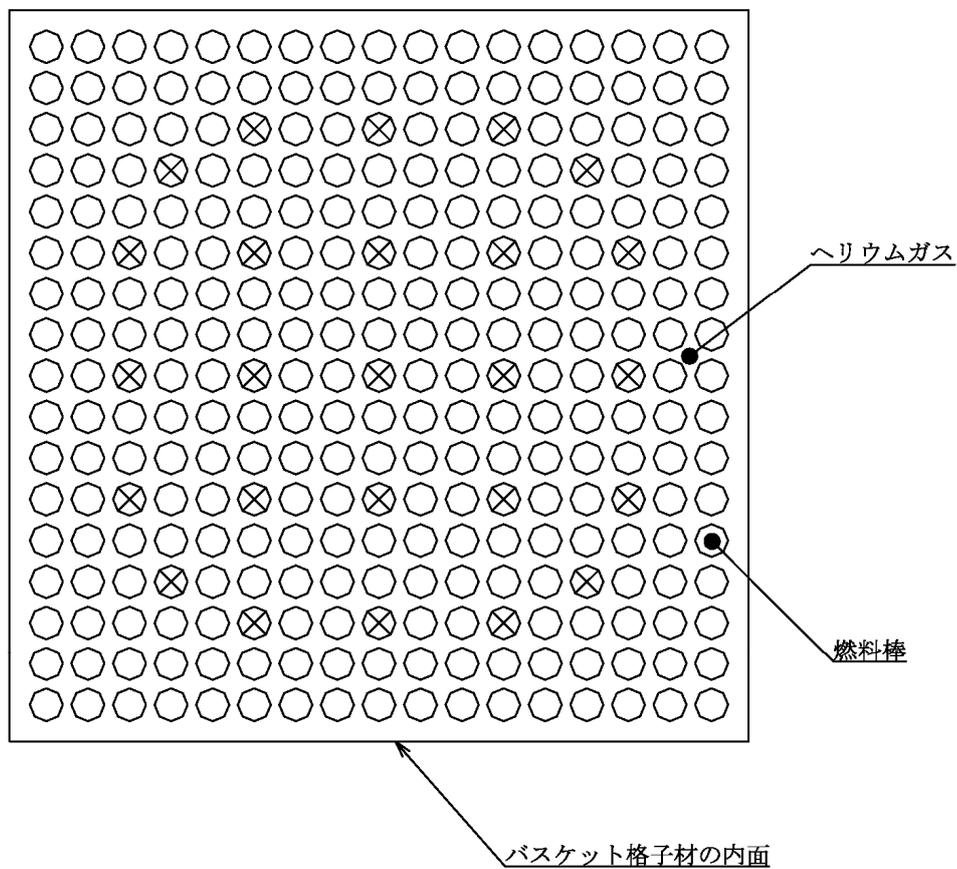
別紙 1-3 図 全体モデル形状図



別紙 1-4 図 輪切りモデル形状図



別紙 1-5 図 輪切りモデルの軸方向熱移動モデル化概念図



⊗ : 制御棒案内シンプル等であり、発熱はない

別紙 1-6 図 燃料集合体モデル形状図

燃料集合体モデル及び輪切りモデルを用いた予備解析について

輪切りモデルの燃料集合体領域に設定する等価熱伝導率は、燃料集合体モデルを用いた予備解析により求められる。また、全体モデルの燃料集合体-バスケット領域及び側部中性子遮蔽材領域に設定する等価熱伝導率は、輪切りモデルを用いた予備解析により求められる。各等価熱伝導率の算出方法を以下に示す。

1. 輪切りモデルの燃料集合体領域の等価熱伝導率

燃料集合体領域の等価熱伝導率は、燃料モデルを用いた円柱状発熱体の伝熱評価式を基に正方形直角柱形状に当てはめた評価式により求められる。

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

ここで、

- λ_f : 燃料集合体領域の等価熱伝導率 (W/(m·k))
- q_f : 燃料集合体領域の単位体積発熱量 (W/m³)
- W : 燃料集合体領域外形寸法 (m)
- K : 係数 (13.57)⁽³⁾ (—)
- T_1 : 燃料集合体領域最高温度 (K)
- T_2 : バスケット格子内面温度 (K)

燃料集合体モデルで軸方向を断熱条件とし、境界条件であるバスケット格子内面温度を 300K (26.85°C)、400K (126.85°C)、600K (326.85°C) とした 3 ケースの予備解析により T_1 及び T_2 を求め、式(1)から等価熱伝導率 λ_f を設定する。

なお、各ケースで求められる λ_f の代表温度は、 T_1 と T_2 の平均値とする。

2. 全体モデルの燃料集合体-バスケット領域の等価熱伝導率

(1) 径方向

燃料集合体-バスケット領域の径方向等価熱伝導率は、円柱状発熱体の伝熱評価式⁽⁴⁾により求められる。

$$\lambda_{r1} = \frac{qR^2}{4(T_3 - T_4)} \quad (2)$$

ここで、

- λ_{r1} : 燃料集合体-バスケット領域の径方向等価熱伝導率 (W/(m·k))
- q : 単位体積発熱量 (W/m³)

- R : 燃料集合体-バスケット領域外半径 (m)
- T₃ : 燃料集合体-バスケット領域最高温度 (K)
- T₄ : 燃料集合体-バスケット領域外面平均温度 (K)

輪切りモデルで軸方向を断熱条件とし、周囲環境温度を-25℃、38℃、100℃とした3ケースの予備解析に拠りT₃及びT₄を求め、式(2)を用いて等価熱伝導率λ_{r1}を設定する。なお、各ケースで求められるλ_{r1}の代表温度は、T₃とT₄の平均値とする。

(2) 軸方向

燃料集合体-バスケット領域の軸方向等価熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して式(3)を用いて設定する。

$$\lambda = \frac{\sum(V_i \cdot \lambda_i)}{V} \quad (3)$$

ここで、

- λ : 燃料集合体-バスケット領域の軸方向等価熱伝導率 (W/(m・k))
- V_i : 各構成部材の体積 (m³)
- λ_i : 各構成部材の熱伝導率 (W/(m・k))
- V : 均質化した領域の体積 (m³)

このとき、バスケットの軸方向の材料不連続性を考慮する。上下のバスケット格子材同士は接触するが、製造公差を考慮してギャップが存在すると仮定してバスケット格子材の軸方向熱伝導率を与える。バスケットサポートについても同様に計算する。

3. 全体モデルの側部中性子遮蔽材領域の等価熱伝導率

側部中性子遮蔽材領域の径方向の等価熱伝導率は、円管の熱通過の評価式⁽⁴⁾により求められる。

$$\lambda_{r2} = \frac{\ln(R_3/R_2)}{a} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{K} - \frac{\ln(R_2/R_1)}{\lambda_1} - \frac{\ln(R_4/R_3)}{\lambda_2}$$

$$K = \frac{Q}{2\pi(T_5 - T_6)}$$

ここで、

- λ_{r2} : 側部中性子遮蔽材領域の径方向等価熱伝導率 (W/(m・k))
- Q : 軸方向単位長さ当たりの発熱量 (W/m)
- T₅ : 胴内面平均温度 (K)
- T₆ : 外筒外面平均温度 (K)

- λ_1 : T_5 における胴の熱伝導率 (W/(m·k))
 λ_2 : T_6 における外筒の熱伝導率 (W/(m·k))
 R_1 : 胴内面の半径 (m)
 R_2 : 胴外面の半径 (m)
 R_3 : 外筒内面の半径 (m)
 R_4 : 外筒外面の半径 (m)

輪切りモデルで軸方向を断熱条件とし、周囲環境温度を -25°C 、 38°C 、 100°C とした3ケースの予備解析により T_5 及び T_6 を算定し、式(4)から等価熱伝導率 λ_{r2} を設定する。なお、各ケースで求められる λ_{r2} の代表温度は、 T_5 と T_6 の平均値とする。

4. 燃料集合体モデルの燃料棒領域の等価熱伝導率

燃料集合体モデルは、燃料集合体の軸方向中央断面を二次元でモデル化したものであり、燃料被覆管の温度を評価するためのモデルである。燃料棒は正八角形でモデル化し、断面積等価となるように寸法を設定する。

燃料棒の熱伝導率は、二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して式(3)により均質化した値を設定する。

発熱条件は、最高燃焼度燃料のPF最大領域の発熱量に相当する発熱密度を設定する。

境界条件は、輪切りモデル解析で最高温度となるバスケット格子内面の温度を設定する。また、伝熱形態として伝導及び放射を考慮し、軸方向への伝熱は無視し断熱とする。

二次元除熱解析モデルの妥当性について

TK-26 型の除熱解析で用いた二次元の輪切りモデルと全体モデルを組み合わせた解析手法(以下「2D モデル」という。)の妥当性を確認するため、TK-26 型の三次元モデル(以下「3D モデル」という。)を用いた除熱解析を行い、2D モデルと 3D モデルの除熱解析結果を比較する。

1. 3D モデルの概要

3D モデル図を別紙 2-1 図に示す。3D モデルは、バスケット格子材を均質化することなくモデル化し、燃料集合体は 1 体ずつ燃料集合体領域(バスケット格子材より内側の領域)を直方体形状で均質化してモデル化している。このため、3D モデルは実形状に則した軸方向及び径方向への熱移動を評価できるモデルとなっている。ただし、トラニオンや蓋ボルトなどの除熱解析の評価結果に大きな影響を与えないと考えられる部位はモデル化を省略している。3D モデルと 2D モデルの各部位のモデル化方針の比較を別紙 2-1 表に示す。

2. 解析条件

3D モデル及び 2D モデルを用いた除熱解析の条件の比較を別紙 2-2 表に示す。

3. 解析結果

3D モデルと 2D モデル(全体モデル、輪切りモデル)の除熱解析結果の比較を別紙 2-3 表に示す。また、温度分布の比較を別紙 2-2 図及び別紙 2-3 図に示す。

別紙 2-3 表より、胴及び蓋部、中性子遮蔽材、金属ガスケット、バスケット格子材並びに燃料集合体領域の温度は、すべての部位において 2D モデルのほうが 3D モデルよりも高い結果となった。また、燃料集合体領域で最高温度となる金属キャスク径方向断面における、軸方向及び径方向の熱移動量の割合を別紙 2-4 表に示す。別紙 2-4 表より、軸方向及び径方向の熱移動量の割合は 3D モデルと 2D モデル(全体モデル)で同等である。

4. まとめ

2D モデルを用いた除熱解析で得られている評価部位の最高温度は、3D モデルを用いた除熱解析で得られた評価部位の最高温度よりもすべての評価部位において高い結果となり、2D モデルは保守的な除熱解析モデルといえる。また、軸方向及び径方向の熱移動量の割合は、3D モデルと 2D モデル(全体モデル) で同等の結果となり、2D モデル(全体モデル)における均質化領域の物性値と軸方向熱移動の設定方法は妥当であるといえる。

以上より、2D モデルによる TK-26 型の除熱解析手法は妥当である。

別紙 2-1 表 モデル化方針

項目	3D モデル	2D モデル
燃料集合体領域	<ul style="list-style-type: none"> ・バスケット格子材より内部を直方体形状で均質化。 ・軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 ・径方向熱伝導率は、燃料集合体モデルから求められる等価熱伝導率を設定。 	<p>(全体モデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体、バスケット格子材等を均質化。 ・軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 ・径方向熱伝導率は、輪切りモデルから求められる等価熱伝導率を設定。 <p>(輪切りモデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・バスケット格子材より内部を正方形形状で均質化。 ・燃料集合体モデルから求められる等価熱伝導率を設定。
バスケット格子材	<ul style="list-style-type: none"> ・実形状をモデル化。 ・軸方向熱伝導率は、軸方向接触方面にギャップが存在すると仮定して設定。 	<p>(全体モデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体、バスケット格子材等を均質化。 ・軸方向熱伝導率は、軸方向接触面にギャップが存在すると仮定して設定。 <p>(輪切りモデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実形状をモデル化。
伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材	<ul style="list-style-type: none"> ・実形状をモデル化。 	<p>(全体モデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 ・径方向熱伝導率は、輪切りモデルから求められる等価熱伝導率を設定。 <p>(輪切りモデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実形状をモデル化。
トラニオン	省略	同左
蓋ボルト	省略	同左
金属ガスケット	省略	同左

別紙 2-2 表 解析条件

項目	3D モデル	2D モデル	
伝熱解析コード	ABAQUS	同左	
発熱量	<input type="text"/> kW (設計発熱量)	同左	
使用済燃料集合体の軸方向の発熱量設定	使用済燃料集合体の軸方向の発熱量分布を考慮(ノードごとに発熱密度を設定)。	同左	
使用済燃料集合体の収納配置ごとの発熱量設定	中央部の使用済燃料集合体 12 体は、最高燃焼度燃料の発熱量で設定。外周部の使用済燃料集合体 14 体は、使用済燃料集合体の収納体数全数 (26 本) の総発熱量が設計発熱量となるように設定。	全体モデルではすべて平均燃焼度燃料の発熱量で設定。輪切りモデルでは外周部の使用済燃料集合体 14 体に軸方向の熱移動を考慮。中央部の使用済燃料集合体 12 体は、最高燃焼度燃料の発熱量で設定。	
境 界 条 件	周囲温度	50℃	同左
	貯蔵建屋壁面温度	65℃	同左
	貯蔵建屋壁面放射率	0.8	同左
	金属キャスク表面放射率	0.8	同左
	金属キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数	0.214 ^(注1)	同左
	金属キャスク側部表面熱伝達率	垂直平板の乱流自然対流熱伝達の式 ^(注2) $h=0.129\lambda\left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2}\times Pr\right)^{1/3}$	同左
	金属キャスク上向き面表面熱伝達率	加熱水平上面の乱流自然対流熱伝達の式 ^(注2) $h=0.13\lambda\left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2}\times Pr\right)^{1/3}$	同左
	金属キャスク下向き面表面熱伝達率	加熱水平下面の層流自然対流熱伝達の式 ^(注2) $h=0.6\frac{\lambda}{D}\left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2}\times D^3\times Pr\right)^{1/5}$	同左
底部熱移動	断熱	同左	

(注 1) 金属キャスク配列ピッチ寸法 3.5m から算出される値。

(注 2) 記号の説明を以下に示す。

h : 熱伝達率 (W/m²/K) , λ : 熱伝導率 (W/m/K) , D : 代表長さ (m) ,
g : 重力加速度 (m/s²) , β : 体積膨張係数 (1/K) , ν : 動粘性係数 (m²/s) ,
Pr : プラントル数 (-) , Δt : 周囲空気と外表面の温度差 (K)

別紙 2-3 表 除熱解析結果の比較

評価部位	最高温度(°C)		温度比較(°C) (2Dモデル)-(3Dモデル)
	3Dモデル	2Dモデル	
胴及び蓋部	150	151 (輪切りモデル)	+1
中性子遮蔽材 ^(注1)	137	143 (全体モデル)	+6
金属ガスケット ^(注2)	106	107 (全体モデル)	+1
バスケット格子材	223	225 (輪切りモデル)	+2
燃料集合体領域	245	247 (輪切りモデル)	+2

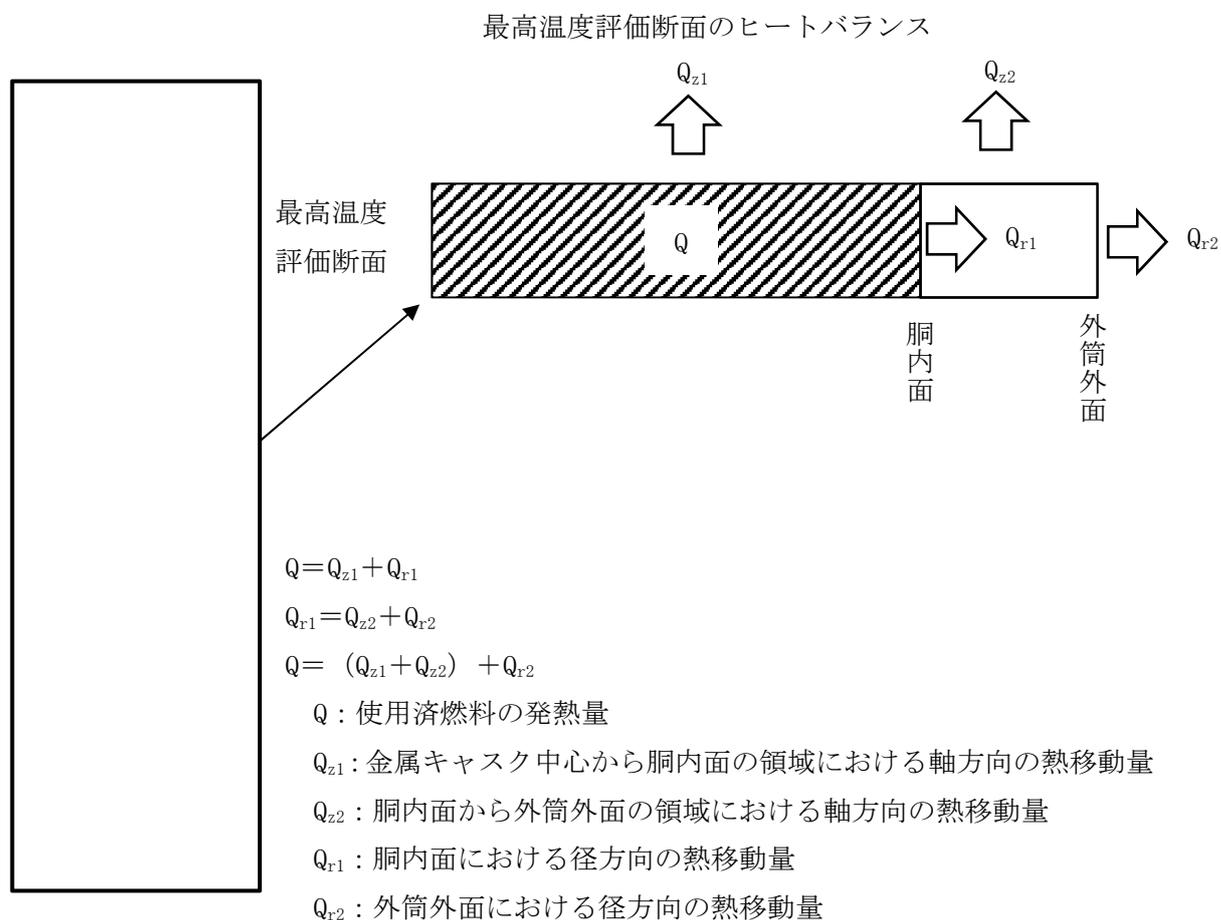
(注1) 蓋部、側部、底部中性子遮蔽材のうち最高温度となる部位。

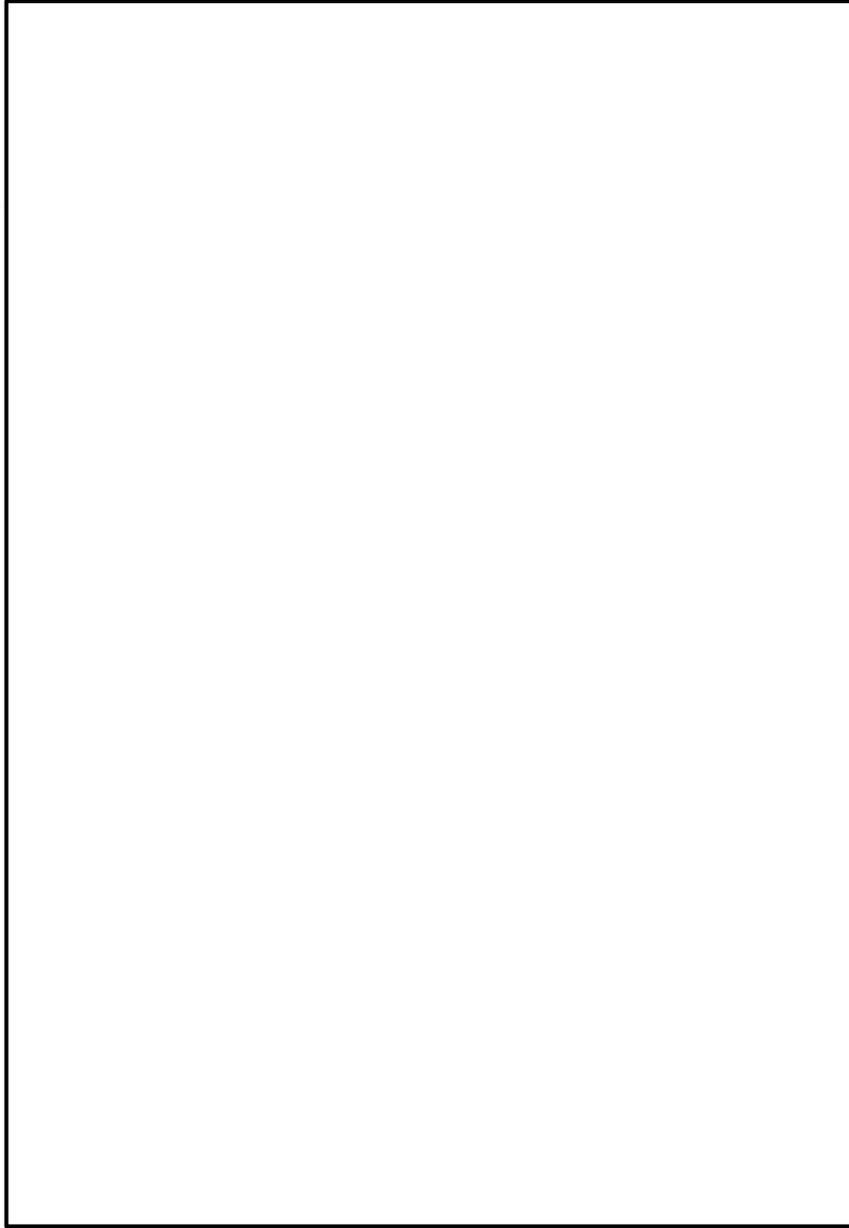
(注2) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

別紙 2-4 表 最高温度評価断面における軸方向及び径方向の熱移動量割合の比較

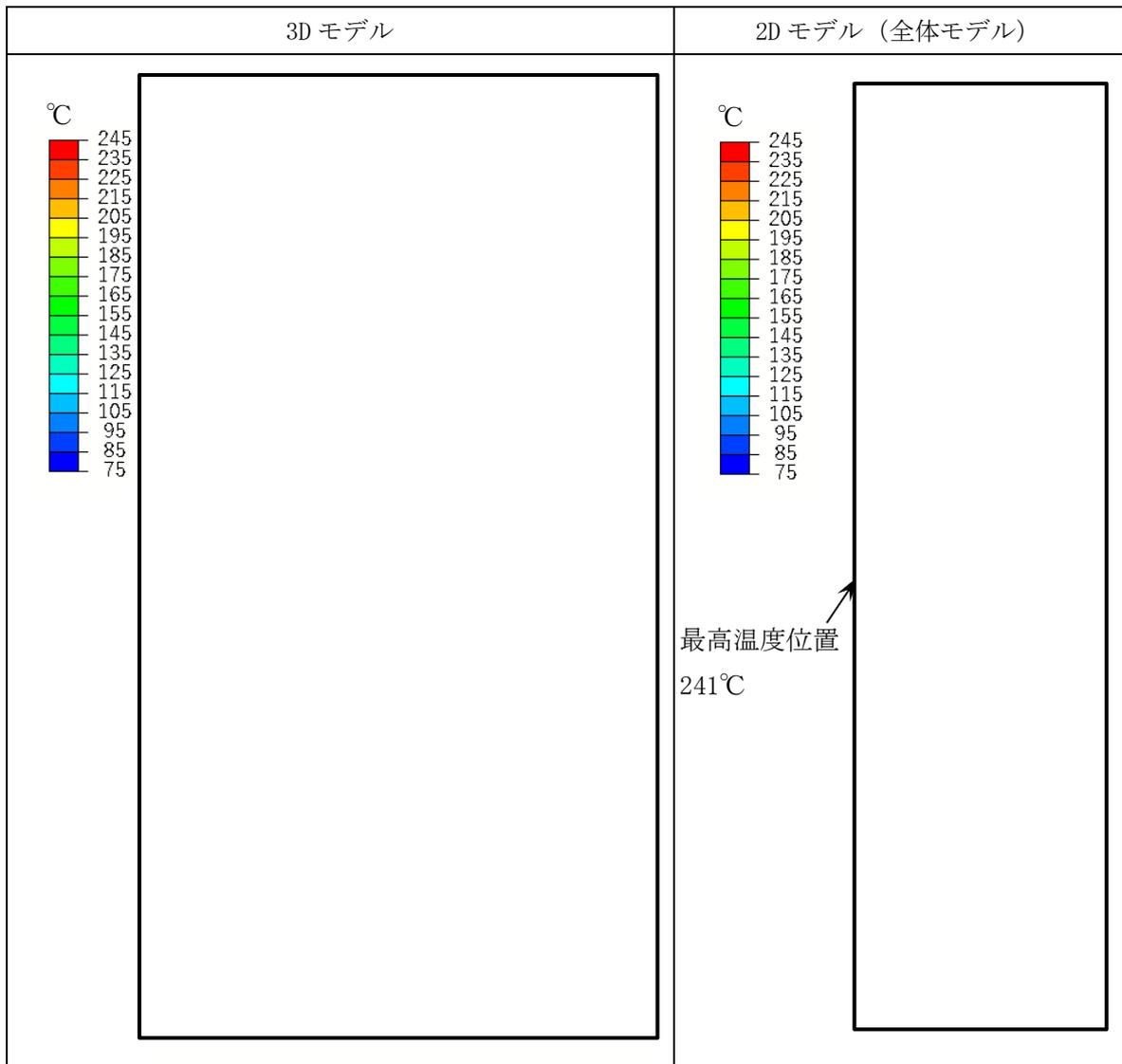
項目	記号 ^(注)	3D モデル (%)	2D モデル (全体モデル) (%)
胴内面	Q_{r1}		
	Q_{z1}		
外筒外面	Q_{r2}		
	Q_{z2}		

(注) 表中の記号は下図参照

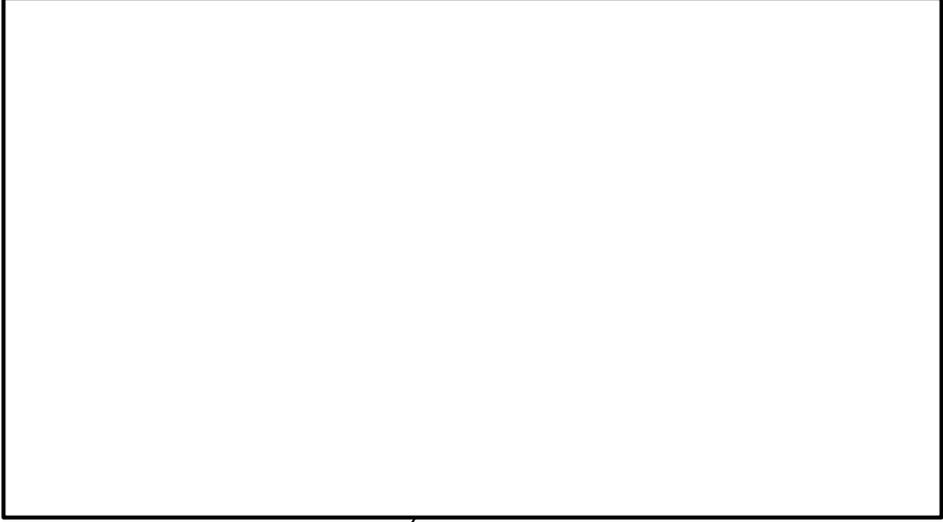
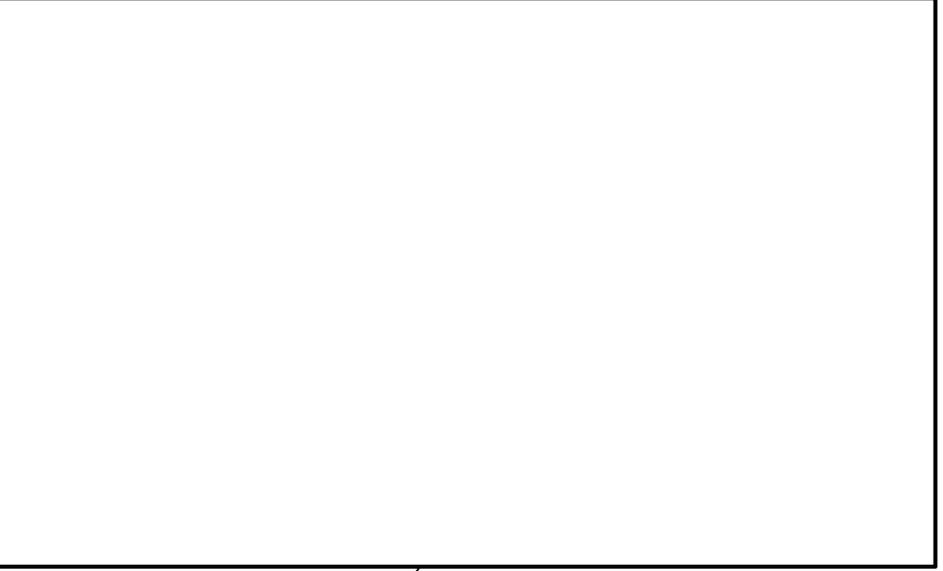




別紙 2-1 図 3D モデル (1/2 対称モデル)



別紙 2-2 図 温度分布の比較 (1/2)

<p>3Dモデル (最高温度評価 断面)</p>	 <p>最高温度位置 245°C</p>
<p>2Dモデル (輪切りモデル)</p>	 <p>最高温度位置 247°C</p>

別紙 2-3 図 温度分布の比較 (2/2)