2021年10月28日

日立造船株式会社

型式証明時における除熱解析の考え方について

1. 除熱解析の伝熱パスについて

使用済燃料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熱伝導と放 射によりコンパートメントに伝えられ、さらにコンパートメントの熱伝導により伝熱部 材及びサポートプレートに伝えられる。このコンパートメントと伝熱部材は別部材であ り溶接による接合をしないため、各部材は実際には接触しているが、熱伝達を妨げる要 因となる表面の凹凸などの影響により隙間があるものと考え、の接触熱抵抗層を 設定し、その間はガスの熱伝導及び放射による伝熱が行われるものとする。

使用済燃料からコンパートメントに伝えられた崩壊熱は、コンパートメントの熱伝導 により、軸方向にも伝えられる。コンパートメントから伝熱部材及びサポートプレート に伝わった崩壊熱は、半径方向だけでなく軸方向へも伝熱が行われる。コンパートメン トの外側に伝熱部材及びサポートプレートが軸方向に交互に配置されており、それぞれ の部材間は径方向と同じく接触熱抵抗層を設定していることから、伝熱部材内の熱伝導 により伝えられた熱は、接触熱抵抗層の間のガスの熱伝導及び放射によって、サポート プレートに伝熱が行われる。サポートプレートからは同様に接触熱抵抗層を介して、伝 熱部材への伝熱が行われる。

また、コンパートメント間は中性子吸収材(B-AL)が存在するが、中性子吸収材は最小 寸法としてコンパートメント・中性子吸収材間に隙間を設定する。中性子吸収材周辺部は ヘリウムガスで囲まれているものとし、ヘリウムガスの熱伝導及び放射により半径方向 及び軸方向に伝熱が行われるものとする。

そして、伝熱部材/サポートプレートに伝えられた熱は、バスケットと胴の隙間に充 填されているヘリウムガスの熱伝導及び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、熱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熱伝導により熱が伝えられる。伝熱フィンは

としているため、は最小寸法としてこの接続をモデルに反映し、溶接で接続した箇所以外は伝熱フィンと胴及び伝熱フィンと外筒の隙間に を設定し、その熱伝導を考慮している。

なお、胴内面、側部中性子遮蔽材、伝熱フィン及び外筒では径方向だけでなく軸方向 にも熱伝導が行われる。

図 1-1 から図 1-4 に上記説明を考慮した Hitz-B52 型の伝熱形態を示す。また、部材間の隙間の設定について、表 1-1 に示す。

1



図 1-1 Hitz-B52 型の伝熱形態 (1/4)



図 1-2 Hitz-B52 型の伝熱形態 (2/4)



図 1-3 Hitz-B52 型の伝熱形態 (3/4)

※軸方向のみの熱の移動を示す。

図 1-4 Hitz-B52 型の伝熱形態 (4/4)

部位	設定		
コンパートメント-伝熱部材	コンパートメントと伝熱部材等、各部材は		
コンパートメントースペーサー	実際には接触しているが、熱伝達を妨げる		
	要因となる表面の凹凸などの影響を考慮		
仁教如せて、シーサー	し、部材の接触部にの接触熱抵抗		
広熱部材=スパーサー	層を設定する。その間はガスの熱伝導及び		
	放射による伝熱が行われるものとする。		
	本体胴及びバスケット外径はノミナル寸法		
石浆:即构 一师	としており、部材間の の隙間はガス		
과구 나~ 나 떠	の層を設定する。その間はガスの熱伝導及		
リホードノレード一個	び放射による伝熱が行われるものとする。		
	中性子吸収材は最小寸法としており、コン		
	パートメント間の隙間 に対しては、		
スペーサーー中性子吸収材	中性子吸収材の厚さは、コンパー		
	トメント・中性子吸収材間に隙間を設定し、		
	中性子吸収材周辺部はヘリウムガスで囲ま		
	れているものとする。ヘリウムガスの熱伝		
	導及び放射により半径方向及び軸方向に伝		
	熱が行われるものとする。		

表 1-1 部材間の隙間の設定について

2. 全体モデルでの伝熱パス

全体モデルでは収納物である使用済燃料及びバスケットが収納される領域(以下「燃料 均質化領域」という。)を均質化して等価熱伝導率を設定するが、この燃料均質化領域で は輪切りモデルを用いた予備解析によりこの領域の最高温度と外面の平均温度を算出し、 内部発熱を伴う円柱の評価式にて等価熱伝導率を求めていることから、輪切りモデルの 伝熱パスが模擬されていることになる。

また側部中性子遮蔽材及び伝熱フィンのある領域(以下「側部中性子遮蔽材領域」という。)についても、燃料均質化領域と同様に、均質化部分は輪切りモデルと等価の伝熱パ スが全体モデルにも模擬されていることになる。

この均質化領域を考慮した全体モデルでの伝熱パスは次のとおりとなる。

使用済燃料から発生した崩壊熱は燃料均質化領域の熱伝導により、バスケットと胴の 隙間に充填されているヘリウムガスの熱伝導及び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、側部中性子遮蔽材領域の熱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、燃 料均質化領域及び側部中性子遮蔽材領域は、均質化により輪切りモデルで設定された伝 熱パスと同等の熱伝導が模擬される。

3. 設計基準値について

設計基準値について、表 3-1 に示す。

設計基準		設計基準値			
対象部位		(°C)	設計基準値の考え方		
新型 8×8 燃料		200	 		
		_00	超えたい温度 昭射硬化回復現象に上		
	新型8×8ジルコニウム		2.2.3、温久、小川以口口及九家によ り燃料被磨管の機械的性質が茎」 く任		
冰 米!	ライナ燃料				
加西站		200	「しない価度及び小糸化物の母配向に		
恢復官		300	よる旅科恢復官の機械的特性の低下が		
	 高燃焼度 8×8 燃料				
			応力か 70MPa 以下となる温度以下と 、、		
	_ 胴(底板)	375	(社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵		
	外筒及び二次蓋	350	施設規格 金属キャスク構造規		
	一次蓋及びトラニオン	425	JSME S FA1-2007」(以下「金属キャ		
	コンパートメント及び	250	スク構造規格」という。) で定めている		
	蓋部ボルト	390	温度範囲の上限値を設計基準値と設定		
	伝熱フィン	200	した。		
		149	樹脂メーカの文献を参考に遮蔽性能の		
			健全性が維持される設計基準値として		
	中性子遮蔽材(樹脂)		 149℃を設定した。		
			 (ただし、熱による中性子遮蔽材の重		
金属			量減損が僅かに生じるため、遮蔽評価		
キャスク			上、保守的に重量減損を考慮してい		
			なお、金属ガスケットの設計基準値に		
			ついてけ参考文献である一財)電力		
	金属ガスケット		中央研究所「毎日落核燃料貯蔵の其		
		130	中人の元の人、人の行為人が行う人間の本 本 \mathbf{PDC} 出版 (9014) にテキれた長		
			期留到性能評価の福米を基に女生側に		
		253			
	伝熱部材	370	アルミニワムハンドブックで引張強度		
	 中性子吸収材(B-Al)	370	が規定されている上限の温度を設計基		
			準値と設定した。		

表 3-1 除熱機能の設計基準

4. 新型 8×8 燃料の配置検討

新型8×8燃料の配置に関して、以下のとおり検討を行った。

(1) 高燃焼度 8×8 燃料の解析結果による燃料温度の予測

高燃焼度8×8燃料の発熱量と最高温度の解析結果をもとにした発熱量の比例計算で 以下のとおり燃料温度の検討を行った。検討に用いた配置パターンを図4-1に示す。 燃料温度の検討結果を表4-1に示す。

検討に当たり、最高燃焼度 52 体とした場合を含めて燃料温度が 185℃を超える場合 には、詳細解析を実施した際に制限値を超える可能性があることから、以降の詳細検討 の対象からは外すこととした。

これは中央部の燃料温度はおおよそ総発熱量で決まるものと考えるが、検討する総 発熱量が設計発熱量を大きく上回る場合は、過度に安全側となり燃料の制限温度を超 える可能性があるため、設計発熱量を大きく超えない範囲で燃料の配置の検討を行う。

(2) 除熱解析による検討

上記の検討結果の確認のため、ケース 6a、7 及び 7a について除熱解析を実施する。ここで、燃料温度が 185℃を超えない配置パターンの中で、ケース 7 が最高の温度となるため評価対象とし、配置による影響の確認としてケース 6a 及び 7a を選定した。

今回は簡易評価とし、軸方向の熱の移動は考慮しない。この解析結果を表 4-2 に示す。 除熱解析の結果より、今回選定したケースでは制限温度 200℃を超えないことを確認し た。推定した燃料温度より 10℃以上高くなっているが、これは軸方向の熱の移動を考慮 していないことが理由と考えられる。なお、ケース 6a とケース 7a については燃料の配 置(最高燃焼度燃料の体数)が異なるが、燃料温度に大きな差異はないことから、おおむ ね総発熱量で燃料温度が決まることが確認できた。

また上記(1)の検討結果と同様に、総発熱量で設計発熱量を上回るケース7の結果がケース6a及び7aより10℃以上高くなっていることから、ケース7を代表とすることは妥当であると考える。以降は引き続き、ケース7を代表として詳細の除熱解析を実施する。

(3) 詳細評価

ケース 7 を代表として軸方向の熱の移動を考慮し、型式証明時に説明した手法と同様 のやり方で詳細解析を実施した。解析結果を表 4-3 に示す。

解析の結果、燃料の最高温度は176℃となり、制限値である200℃を超えないことが確認できた。

(4) 結論

結論は次のとおり。

- ・燃料温度は配置にかかわらず、おおむね総発熱量で決まる。
- ・総発熱量が設計発熱量を大きく超える場合(全数最高燃焼度燃料を配置する場合や、 最高 32 体、平均 20 体とする場合)には燃料温度が制限値を超える可能性があるの で、設計発熱量を超えないような配置とすることが前提条件である。
- ・ケース7では、保守的に総発熱量(11.3 kW)が設計発熱量(10.2 kW)を上回るように条件を設定していることから、設計発熱量で制限される実運用上の燃料配置では、ケース7の燃料温度を超えることはない。

以上より、設計発熱量を上限とする以外は、新型8×8燃料には配置制限は設けず、代表として実施したケース7の解析結果を、保守的に新型8×8燃料の最高温度とする。



[ケース1:高燃焼度8×8] (最高32体、平均以下20体)



[ケース4:新型8×8] (最高32体、平均20体)



[ケース5a:新型8×8] (最高24体、平均以下28体)



[ケース6:新型8×8] (平均32体、最高20体)



* 平均燃焼度以下は、総発熱量が平均燃焼度の燃料集合体52体の発熱量に合うように構成した発熱量 (平均燃焼度燃料の発熱量より下回る燃料)

[ケース6a:新型8×8] (平均以下32体、最高20体)

図 4-1 新型 8×8 燃料の配置



[ケース2:新型8×8] (平均52体)



[ケース4a:新型8×8] (最高32体、平均以下20体)



[ケース6:新型8×8] (平均32体、最高20体)



[ケース3:新型8×8] (最高52体)



[ケース5:新型8×8] (最高24体、平均28体)

	Γ		
			-

[ケース6a:新型8×8] (平均以下32体、最高20体)

		体数		発熱量			燃料温度	
N	5.7	(体)		(kW)		総発熱量	(°C)	
INO.	7-5	ф ф ф7	1月17日477	中央部	周辺部	(kW)	中央部	周辺部
		中天即	同辺部	(Hc')	(Hs')		(Tc')	(Ts')
	高燃焼度	20	20	10 50	9 59		049	190
1	8×8燃料	- 32 (県古)	20 (亚地い下)	12.98 (_IL)	3.92 (_11.)	16.10	243 (-TL)	180 (-m.)
	(ベースケース)	(取向)	(平均以下)	(=Hc)	(=Hs)		(=1c)	(=18)
0	新型	52	0	10.10	0	10.10	170.0	190.4
	8×8燃料	(平均)	0	10.19	0	10.19	170.3	130.4
0	新型	52	0	10.00	0	10.00	105 4	147.0
3	8×8燃料	(最高)	0	12.23	0	12.23	195.4	147.6
	新型	32	20		2.00	11 45	1050	141.0
4	8×8燃料	(最高)	(平均)	7.53	3.92	11.45	185.8	141.0
10	新型	32	20	7 59	9.07	10.90	170.4	120 5
4a	8×8 燃料	(最高)	(平均以下)	7.53	2.67	10.20	170.4	150.5
F	新型	24	28	5 65	5 40	11 19	191.0	190 9
0	8×8 燃料	(最高)	(平均)	5.65	0.49	11.15	101.9	190.9
50	新型	24	28	ECE	1 55	10.90	170 4	120 5
ba	8×8 燃料	(最高)	(平均以下)	0.60	4.55	10.20	170.4	130.5
C	新型	32	20	C 97	4 70	10.09	190.0	197.0
6	8×8燃料	(平均)	(最高)	6.27	4.70	10.98	180.0	137.0
C	新型	32	20	5 50	4 70	10.90	170.4	190 5
6a	8×8 燃料	(平均以下)	(最高)	5.50	4.70	10.20	170.4	150.5
7	新型	24	28	4.70	6 50	11 20	109 0	120 7
· ·	8×8 燃料	(平均)	(最高)		6.99	11.29	105.0	159.7
70	新型	24	28	9.61	6 50	10.20	170 4	120 5
18	8×8燃料	(平均以下)	(最高)	5.61	6.59	10.20	170.4	190.9

表 4-1 発熱量比例による燃料温度検討

注記*1:外気温 Ta は 45℃とする。

*2:燃料温度は次のとおり発熱量比例で計算する。

 $Tc'=(Tc - Ta) \times (Hc'+Hs') / (Hc+Hs) + Ta$

 $Ts'=(Ts - Ta) \times (Hc'+Hs') / (Hc+Hs) + Ta$

ケーフ	ぬき ロノー	西面	最高温度	
<u> </u>	旅行クイノ	中央	周辺	(°C)
6a	新型 8×8	平均以下 32 体	最高 20 体	184
7a	新型 8×8	平均以下 24 体	最高 28 体	180
7	新型 8×8	平均 24 体	最高 28 体	199

表 4-2 除熱解析結果

表 4-3 除熱解析結果

ケーフ 御出りノー			最高温度	
7-2	<u> 深いわれ ク</u> イ ノ	中央	周辺	(°C)
7	新型 8×8	平均 24 体	最高 28 体	176