

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には中性子吸収材(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。

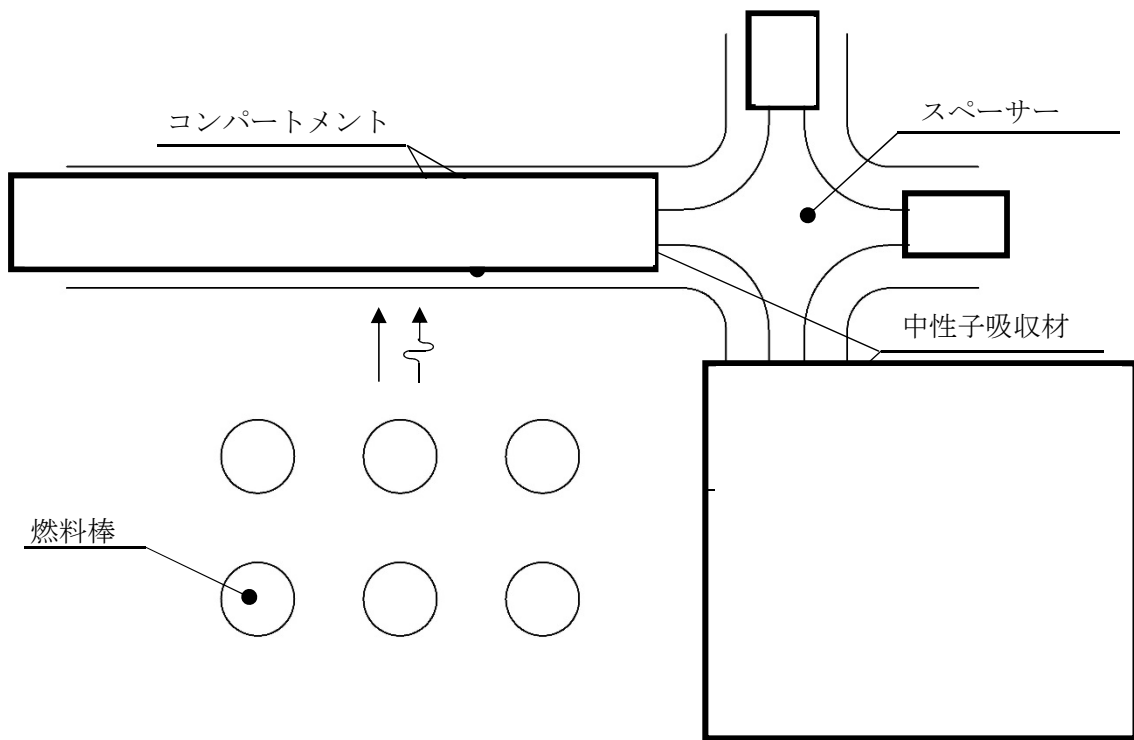


図 1-1 Hitz-B52 型の伝熱形態 (1/4)

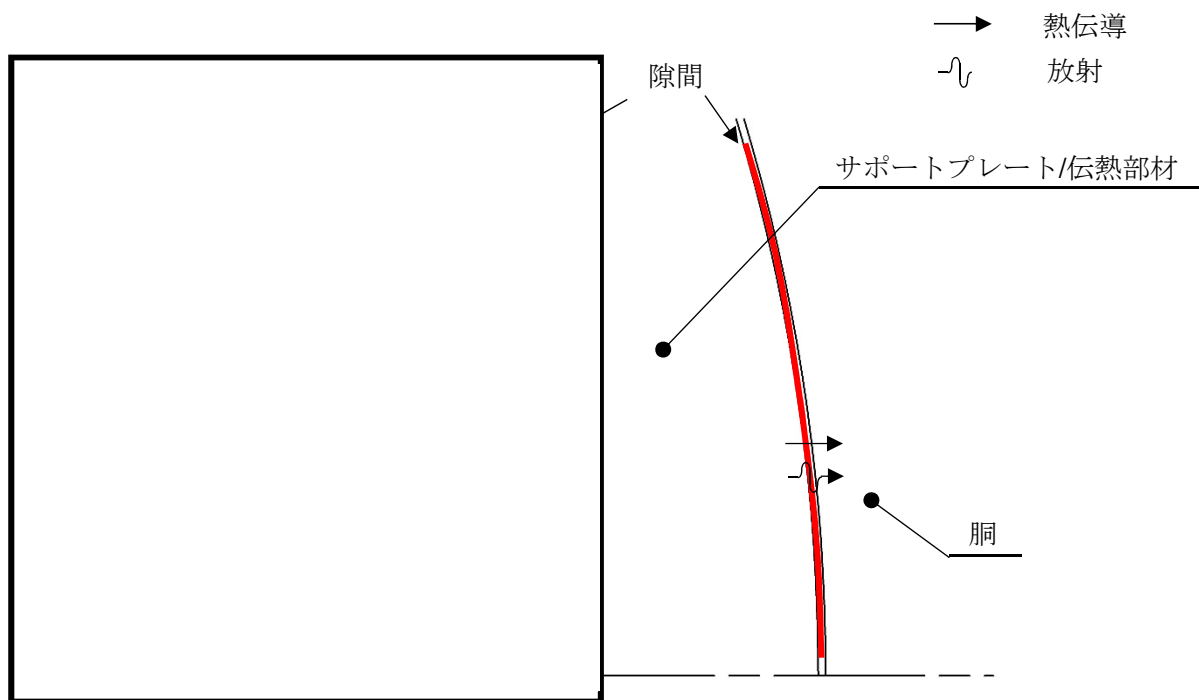


図 1-2 Hitz-B52 型の伝熱形態 (2/4)

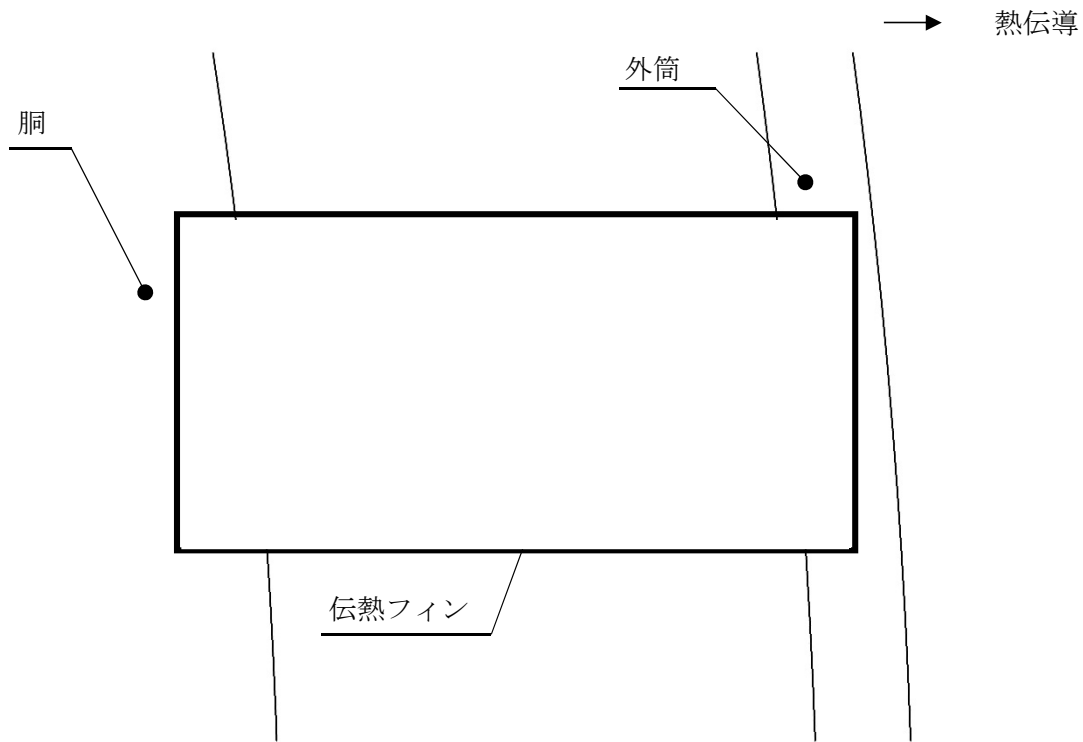


図 1-3 Hitz-B52 型の伝熱形態 (3/4)



※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)

表 1-1 部材間の隙間の設定について

部位	設定
コンパートメント-伝熱部材	<p>コンパートメントと伝熱部材等、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を考慮し、部材の接触部に <input type="text"/> の接触熱抵抗層を設定する。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。</p>
コンパートメント-スペーサー	
伝熱部材-スペーサー	
伝熱部材-胴	<p>本体胴及びバスケット外径はノミナル寸法としており、部材間の <input type="text"/> の隙間はガスの層を設定する。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。</p>
サポートプレート-胴	
スペーサー-中性子吸収材	<p>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 <input type="text"/> に対しては、中性子吸収材の厚さは <input type="text"/>、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。</p>

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。

表 3-1 除熱機能の設計基準

対象部位		設計基準値 (°C)	設計基準値の考え方
燃料 被覆管	新型 8×8 燃料	200	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性質が著しく低下 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 ない温度及び燃料被覆管のフープ応力が 70MPa 以下となる温度以下とした。
	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	300	
	高燃焼度 8×8 燃料		
金属 キャスク	胴(底板)	375	(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 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャ スク構造規格」という。)で定めている 温度範囲の上限値を設計基準値と設定 した。
	外筒及び二次蓋	350	
	一次蓋及びトランニオン	425	
	コンパートメント及び 蓋部ボルト	350	
	伝熱フィン	200	
	中性子遮蔽材 (樹脂)	149	樹脂メーカー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 149°Cを設定した。 (ただし、熱による中性子遮蔽材の重量 減損が僅かに生じるため、遮蔽評価上、 保守的に重量減損を考慮している。)
	金属ガスケット	130	なお、金属ガスケットの設計基準値に ついては、参考文献である一財) 電力 中央研究所、「使用済核燃料貯蔵の基 礎」、ERC 出版、(2014)に示された長 期密封性能評価の結果を基に安全側に 設定した。
	伝熱部材	370	アルミニウムハンドブックで引張強度 が規定されている上限の温度を設計基 準値と設定した。
中性子吸収材 (B-Al)	370		

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。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。

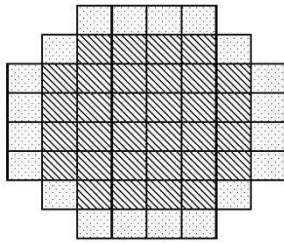
解析の結果、燃料の最高温度は 176℃となり、制限値である 200℃を超えないことが確認できた。

(4) 結論

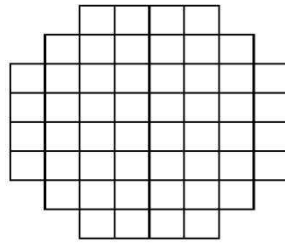
結論は次のとおり。

- ・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。

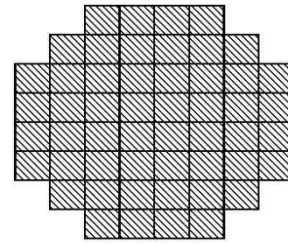
以上より、設計発熱量を上限とする以外は、新型 8×8 燃料には配置制限は設けず、代表として実施したケース 7 の解析結果を、保守的に新型 8×8 燃料の最高温度とする。



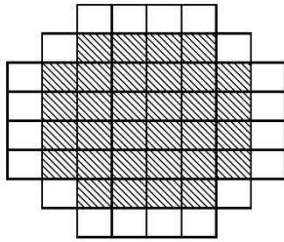
[ケース1：高燃焼度8×8]
(最高32体、平均以下20体)



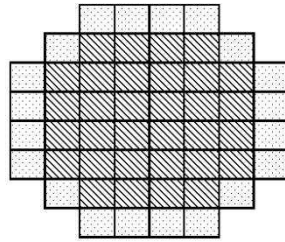
[ケース2：新型8×8]
(平均52体)



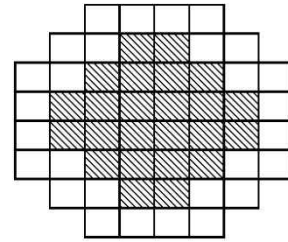
[ケース3：新型8×8]
(最高52体)



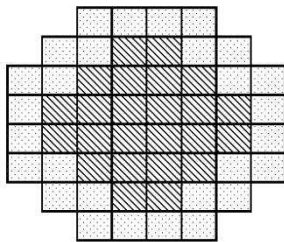
[ケース4：新型8×8]
(最高32体、平均20体)



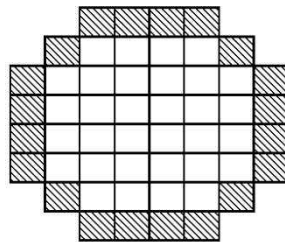
[ケース4a：新型8×8]
(最高32体、平均以下20体)



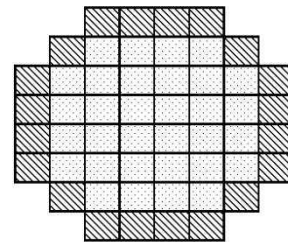
[ケース5：新型8×8]
(最高24体、平均28体)



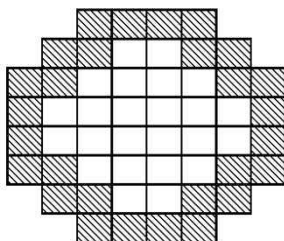
[ケース5a：新型8×8]
(最高24体、平均以下28体)



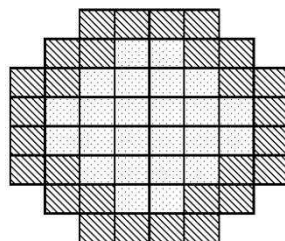
[ケース6：新型8×8]
(平均32体、最高20体)



[ケース6a：新型8×8]
(平均以下32体、最高20体)



[ケース7：新型8×8]
(平均24体、最高28体)



[ケース7a：新型8×8]
(平均以下24体、最高28体)

- : 最高燃焼度 (最高)
- : 平均燃焼度 (平均)
- : 平均燃焼度以下 (平均以下)

* 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)

図 4-1 新型 8×8 燃料の配置

表 4-1 発熱量比例による燃料温度検討

No.	ケース	体数 (体)		発熱量 (kW)		総発熱量 (kW)	燃料温度 (°C)	
		中央部	周辺部	中央部 (Hc')	周辺部 (Hs')		中央部 (Tc')	周辺部 (Ts')
1	高燃焼度 8×8 燃料 (ハースケース)	32 (最高)	20 (平均以下)	12.58 (=Hc)	3.52 (=Hs)	16.10	243 (=Tc)	180 (=Ts)
2	新型 8×8 燃料	52 (平均)	0	10.19	0	10.19	170.3	130.4
3	新型 8×8 燃料	52 (最高)	0	12.23	0	12.23	195.4	147.6
4	新型 8×8 燃料	32 (最高)	20 (平均)	7.53	3.92	11.45	185.8	141.0
4a	新型 8×8 燃料	32 (最高)	20 (平均以下)	7.53	2.67	10.20	170.4	130.5
5	新型 8×8 燃料	24 (最高)	28 (平均)	5.65	5.49	11.13	181.9	138.3
5a	新型 8×8 燃料	24 (最高)	28 (平均以下)	5.65	4.55	10.20	170.4	130.5
6	新型 8×8 燃料	32 (平均)	20 (最高)	6.27	4.70	10.98	180.0	137.0
6a	新型 8×8 燃料	32 (平均以下)	20 (最高)	5.50	4.70	10.20	170.4	130.5
7	新型 8×8 燃料	24 (平均)	28 (最高)	4.70	6.59	11.29	183.8	139.7
7a	新型 8×8 燃料	24 (平均以下)	28 (最高)	3.61	6.59	10.20	170.4	130.5

注記*1：外気温 Ta は 45°C とする。

*2：燃料温度は次のとおり発熱量比例で計算する。

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

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

表 4-2 除熱解析結果

ケース	燃料タイプ	配置		最高温度 (°C)
		中央	周辺	
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 4-3 除熱解析結果

ケース	燃料タイプ	配置		最高温度 (°C)
		中央	周辺	
7	新型 8×8	平均 24 体	最高 28 体	176