

「冷却材流路閉塞事故」における流路閉塞の想定

1. 流路閉塞の想定

「冷却材流路閉塞事故」における流路閉塞の想定を第 1 図に示す。閉塞物の軸方向位置や領域は、以下に示す知見等に基づき、解析結果が厳しくなるように設定したものである。

2. 流路閉塞の形成に関する実験的知見

「常陽」炉心燃料集合体は冷却材流路をワイヤスペーサにより確保している。ワイヤスペーサ型の燃料集合体では、想定される異物量において大規模な流路閉塞には至らないことが、炉外試験で確認されている。また、多量の異物を流入させた場合、以下のメカニズムで閉塞が生じ、ポーラス状の閉塞が、バンドル入口部でサブチャンネルごとに独立に生じることが確認されている^{[1], [2]}。

- 以下に示すメカニズムにより、閉塞に寄与する異物の粒径は、ワイヤスペーサ径より大きく、サブチャンネル最大径以下の範囲に限定される（第 2 図参照）。
 - ・ SPD（サブチャンネルを通過できる最大口径）よりも大きく SMD（サブチャンネルに流入し得る最大径）よりも小さな異物が、ワイヤスペーサと燃料要素の間で停止した場合に閉塞の起点となる。
 - ・ 閉塞の起点が形成された後、ワイヤスペーサ径よりも大きな異物が同一サブチャンネルに入ると堆積し、閉塞に発達する。ワイヤスペーサ径よりも小さな異物は隣接サブチャンネルに流れだし閉塞部をバイパスするため閉塞部に留まることは認められない。
- 閉塞はワイヤスペーサ径よりも大きな粒子により構成される。また、ポーラス状の閉塞を形成し、冷却材が通過できる。
- 閉塞の起点となるサブチャンネル（ワイヤスペーサを有し、流路が狭くなるサブチャンネル）には、1本の燃料要素の周囲の同一高さに位置する 6 サブチャンネルのうち、一つ置きに位置する 3 サブチャンネルが該当する。したがって、同一高さの全ての 6 サブチャンネルが同時に閉塞する状態には至らない（第 3 図参照）。
- 閉塞の起点となる粒子は、ほぼ全てがバンドル下端付近で停止し、発熱部での閉塞は生じ難い。また、隣接するサブチャンネル間では、閉塞の起点となるサブチャンネルはワイヤスペーサ巻きピッチ（以下「ワイヤピッチ」という。）の 6 分の 1 高さが異なる（第 3 図参照）。

3. 冷却材流路閉塞の想定保守性

(1) 軸方向位置

実験的知見より、流路閉塞はバンドル部入口に形成される。したがって、冷却材は、閉塞位置通過後、隣接サブチャンネルから流入するため、被覆管肉厚中心最高温度が最も高くなる炉心部上端において、その影響は無視できる程度となる。ここでは、流路閉塞の軸方向位置を炉心部上端とし、さらに、当該箇所初期温度を熱的制限値と同じとすることで、大きな保守性を確保した。

(2) 閉塞形態

実験的知見より、冷却材流路には、ポーラス状の閉塞が形成される。ここでは、完全閉塞を想定し、冷却材の通過を許容しないことで、更なる保守性を確保した。

(3) 閉塞高さ

実験的知見より、閉塞は1/6ワイヤピッチごとに生じることから、1サブチャンネル分の体積が閉塞すると仮定すると、閉塞物の形状は三角錐型で、高さは1/6ワイヤピッチとなる。「常陽」のワイヤピッチは209mmであり、1/6ワイヤピッチの長さは約35mmとなる。

解析では、閉塞物を第1図に示したように三角柱で模擬することとし、閉塞物と被覆管の接触面積を保存して、閉塞高さを1/12ワイヤピッチに設定した。三角柱型は接触面が上方で狭くなる三角錐に比べ、熱のこもりやすい形状であり保守的な設定である。また、閉塞物の体積は1/6ワイヤピッチの三角錐型に対し、1/12ワイヤピッチの三角柱型では1.5倍過大に設定している。また、「常陽」のワイヤピッチの公差±15mmを考慮した1/12ワイヤピッチの長さ約19mmに対して、閉塞高さは約22mmと保守的な設定としている。

なお、被覆管肉厚中心最高温度の評価においては、閉塞物の径方向の熱伝達が支配的であり、軸方向の熱伝導の影響は小さいことから、閉塞高さを22mm以上としても、被覆管肉厚中心最高温度が顕著に上昇することはない。閉塞高さをパラメータとした感度解析結果を第4図に示す。

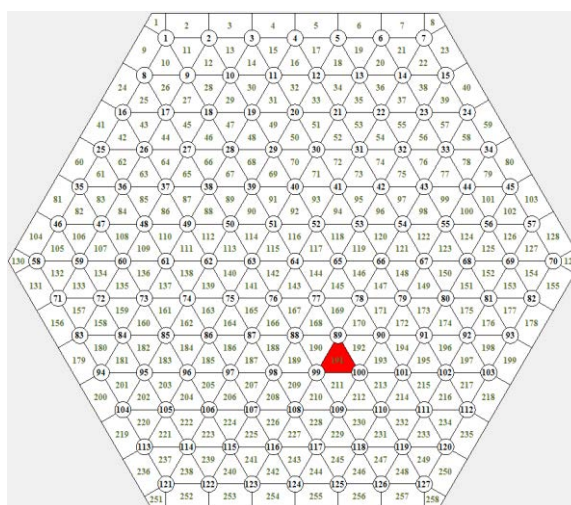
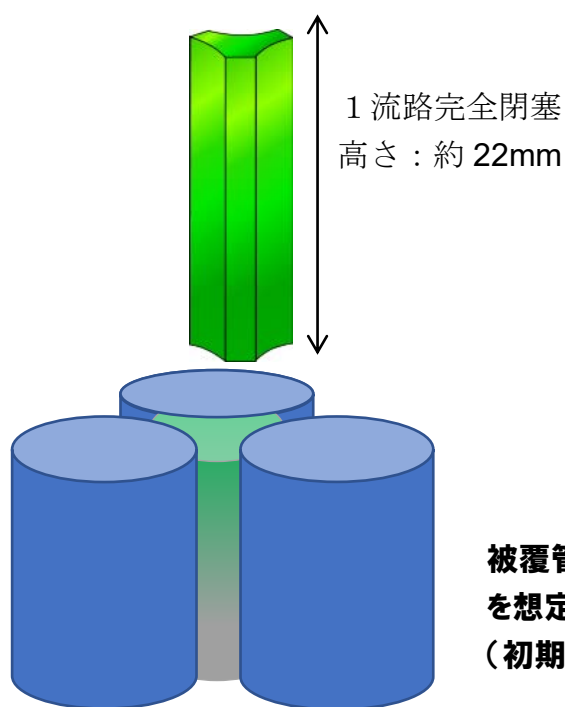
(4) 閉塞サブチャンネル数

閉塞サブチャンネル数を1サブチャンネル以上としても、被覆管肉厚中心最高温度は顕著に上昇することはない。閉塞サブチャンネル数をパラメータとした感度解析結果を第5図に示す。なお、実験的知見より、想定される異物量において大規模な流路閉塞の形成に至ることはなく、また、上記(1)～(3)のとおり、保守的な解析条件を設定していることから、設計基準事故では1サブチャンネルの閉塞を想定することが妥当である。

[1] K. Koyama, et al., “Study on Local Blockage in FBR Fuel Subassembly,” Proc. of Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, 1991.

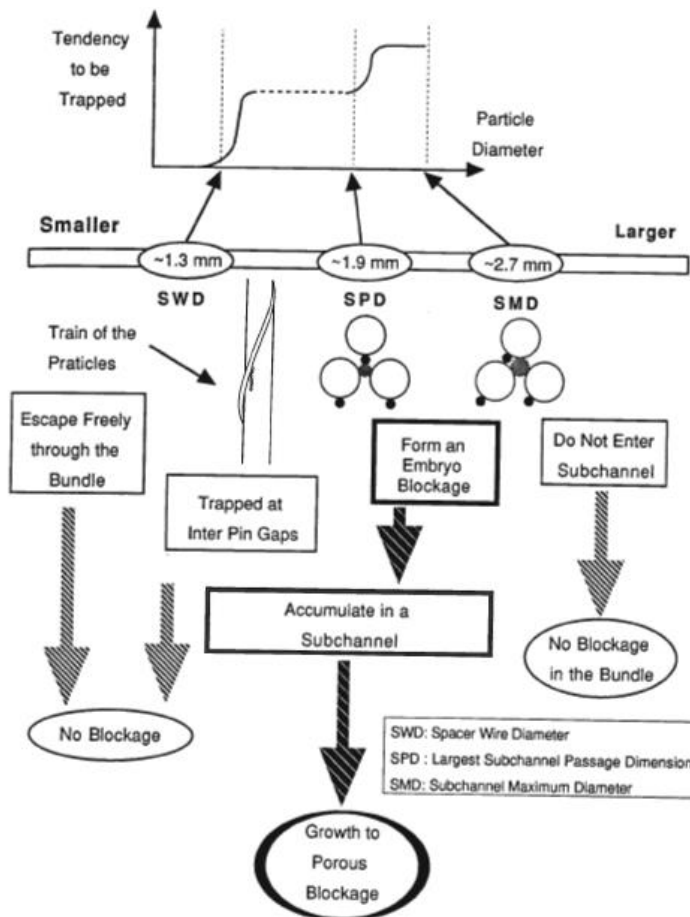
[2] 黒木修二, 高速増殖炉における燃料局所閉塞規模の研究, 三菱原子力技報 No.61 p.16-19, 1992

| | | | |
|------------|---------|-----------------------|-----------|
| 初期状態 | 原子炉出力 | 100 % | |
| | 原子炉入口温度 | 352 °C | |
| | 原子炉出口温度 | 458 °C | |
| 燃料・被覆管初期温度 | | 燃料 | 約2,350 °C |
| | | 被覆管 | 約620 °C |
| 起因事象 | | 燃料集合体の1次冷却材の流路が局部的に閉塞 | |
| 閉塞物 | | 原子炉容器内構造物(ステンレス鋼) | |
| 閉塞領域 | | 燃料集合体内のサブチャンネル1カ所 | |
| 閉塞領域の閉塞率 | | 完全閉塞 | |
| 閉塞高さ | | 約22mm | |
| 閉塞位置(軸方向) | | 被覆管肉厚中心温度が最も高くなる炉心上端 | |



被覆管肉厚中心温度が最も高くなる炉心上端での閉塞を想定
(初期温度は熱的制限値に設定)

第 1 図 冷却材流路閉塞の想定

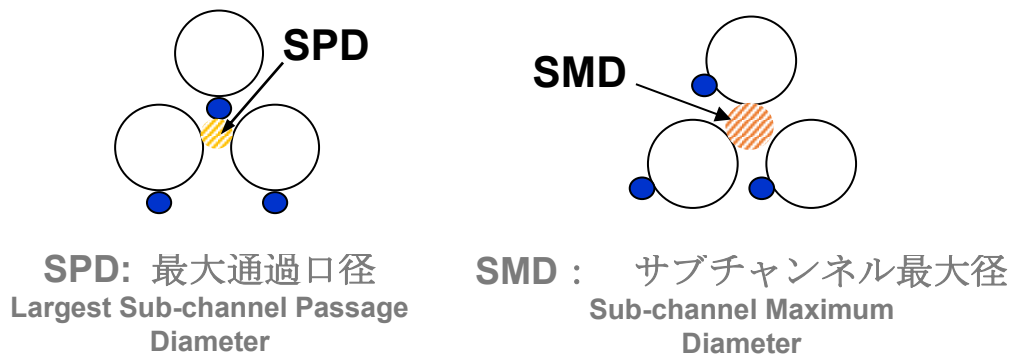


実験結果

以下に示す寸法は「常陽」の炉心燃料集合体の仕様の値)

- (1) ワイヤ径 (SWD(0.9mm)) 以下の粒子は、旋回流に乗ってバンドル内を自由に動き、閉塞の原因となることはない。
- (2) サブチャンネル最大径 (SMD(約 2.0mm)) 以上の粒子は、バンドル入口で捕捉される。
- (3) SWD~SMD の粒子は、バンドル内に流入し、ワイヤに捕捉されうる。最大通過口径 (SPD(約 1.4mm)) ~SMD の粒子の補足は閉塞の起点となり、ポーラス状の閉塞に成長する。

Fig. 4. Effect of Particle Sizes on Blockage Formation



第 2 図 冷却材流路閉塞挙動の実験結果

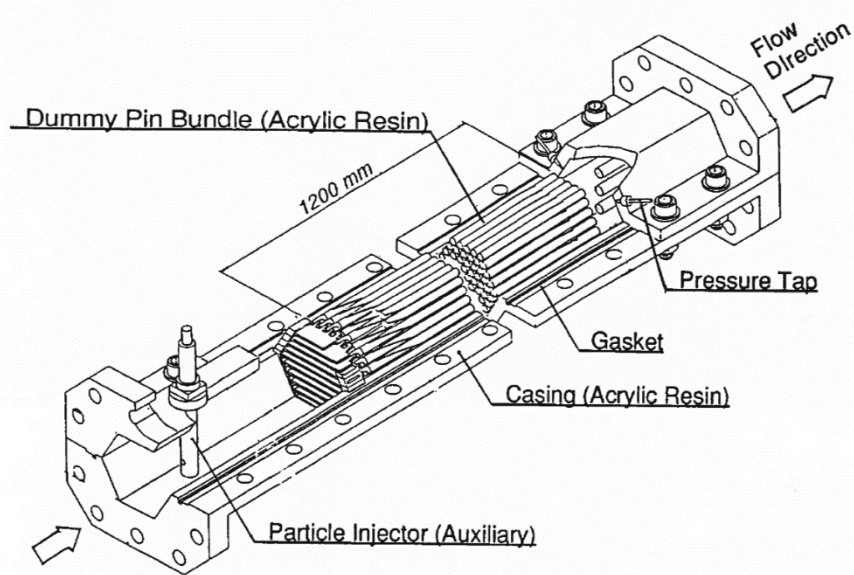


Fig. 3. Perspective View of the Visible Bundle

試験体構造図

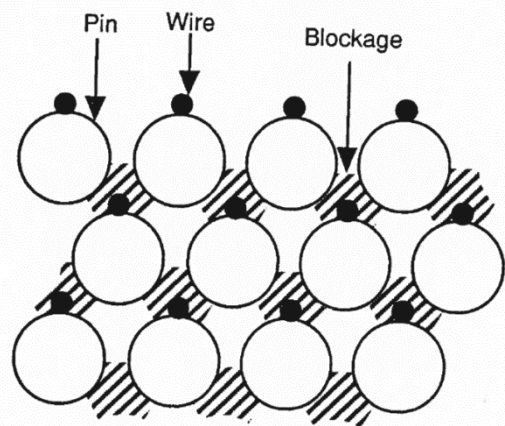
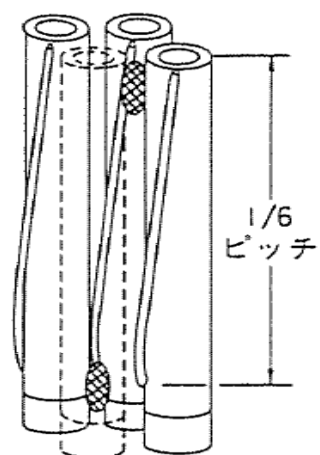
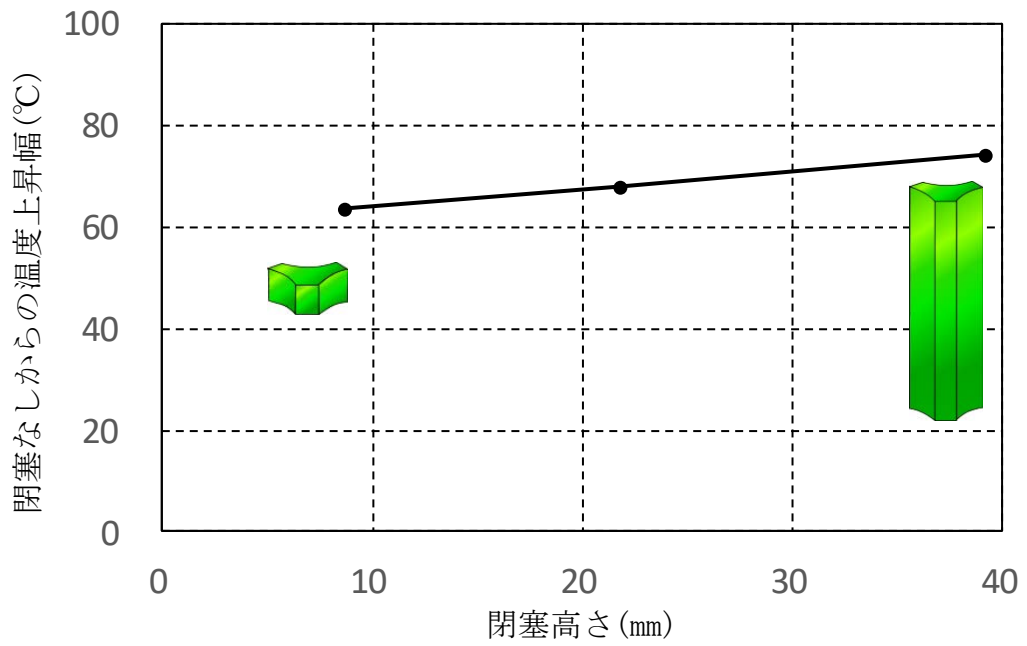


Fig. 7. Every-Other-Subchannel Type Blockage Pattern

実験で確認された閉塞状況

試験体に金属粉を多量に投入した結果、バンドルに流入する粒径のうち、特に大きめの粒子が、バンドル入口側でワイヤに補足され、それを起点に入口側にポーラス状の閉塞が生じる。この際、1燃料要素周囲の6サブチャンネルが閉塞することはなく、千鳥配列で閉塞が生じる。

第3図 冷却材流路閉塞状況の実験結果



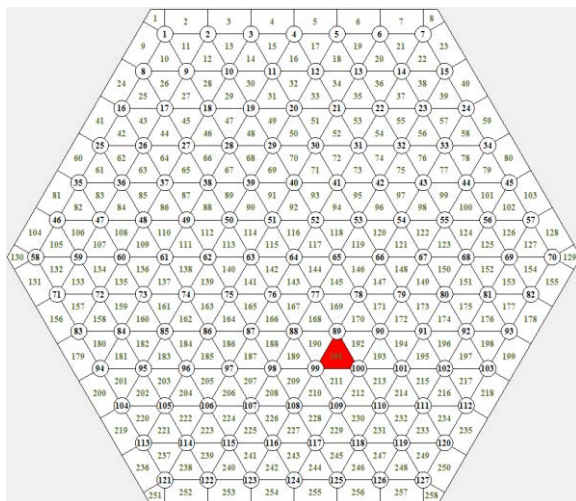
| 閉塞高さ | 被覆管肉厚中心最高温度 [°C] | 熱設計基準値 [°C] | 集合体出口冷却材温度の上昇幅 ^{※1} [°C] |
|--------|------------------|-------------|-----------------------------------|
| 閉塞なし | 620 | 840 | — |
| 約 9mm | 684 | | 0.04 |
| 約 22mm | 688 | | 0.04 |
| 約 39mm | 694 | | 0.05 |

※1：集合体出口冷却材温度が約 20°C 上昇した場合は集合体出口冷却材温度計で異常検知可

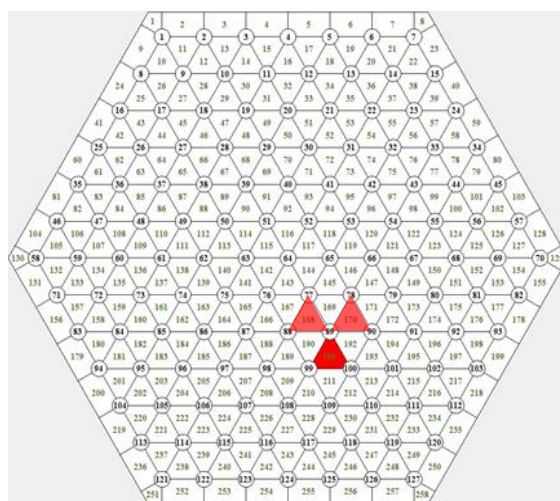
第 4 図 冷却材流路閉塞高さの感度解析結果

| 閉塞サブチャンネル数 | 被覆管肉厚中心 最高温度[℃] | 熱設計基準値 [℃] | 集合体出口冷却材温度 の上昇幅 ^{※1} [℃] |
|------------|--------------------|---------------|---|
| 閉塞なし | 620 | 840 | — |
| 1 (下図参照) | 688 | | 0.04 |
| 3 (下図参照) | 692 | | 0.13 |

※1：集合体出口冷却材温度が約 20℃上昇した場合は集合体出口冷却材温度計で異常検知可



1 サブチャンネル閉塞 (赤色部閉塞)



3 サブチャンネル閉塞 (赤色部閉塞)

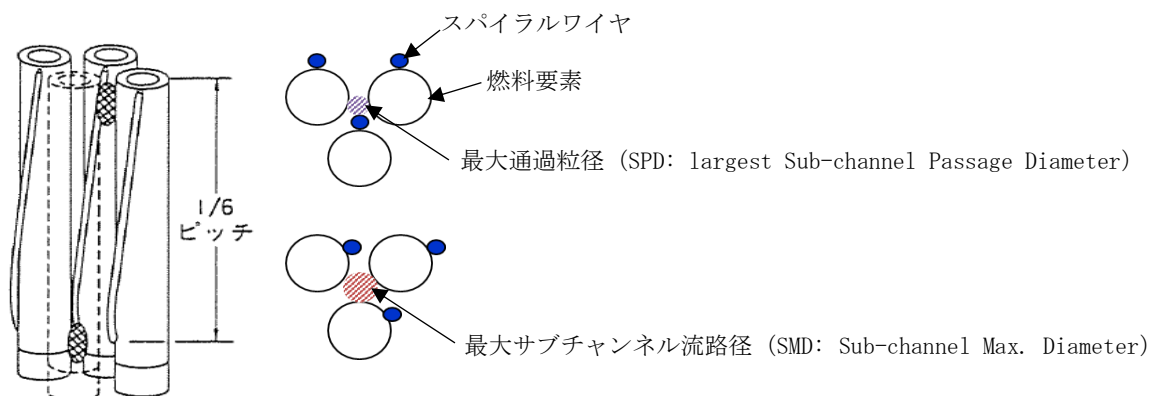
第 5 図 冷却材流路閉塞サブチャンネル数の感度解析結果

冷却材流路閉塞における閉塞高さの設定について

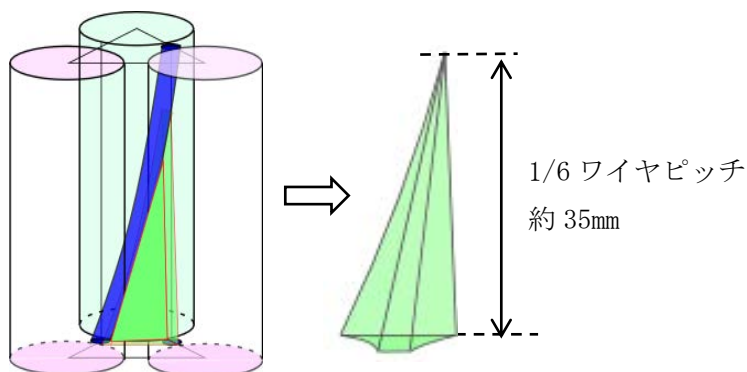
燃料集合体への異物の混入を模擬した炉外試験¹⁾によれば、閉塞の発生は、第1図に示すように、異物の粒径がサブチャンネルの最大通過粒径 (SPD) から最大サブチャンネル流路径 (SMD) の間の大きさのものから、サブチャンネルの最小流路部で閉塞が開始するとされている。隣接するサブチャンネルの最小流路部は 1/6 ワイヤピッチ分高い位置となることから、1 サブチャンネル分が完全閉塞した場合、閉塞物の形状は第2図に示すような三角錐型で、高さは1/6 ワイヤピッチとなる。「常陽」のワイヤピッチは209mmであり、1/6 ワイヤピッチの長さは約35mmとなる。

サブチャンネル解析コードでは、第3図に示すようにこの閉塞物を三角柱で模擬することとし、閉塞物と被覆管の接触面積を保存して、閉塞高さを1/12 ワイヤピッチに設定した。三角柱型は接触面が上方で狭くなる三角錐に比べ、熱のこもりやすい形状であり保守的な設定である。また、閉塞物の体積は1/6 ワイヤピッチの三角錐型で約0.065cm³に対し、1/12 ワイヤピッチの三角柱型では約0.098cm³となることから、閉塞物の体積は1.5倍過大に設定している。

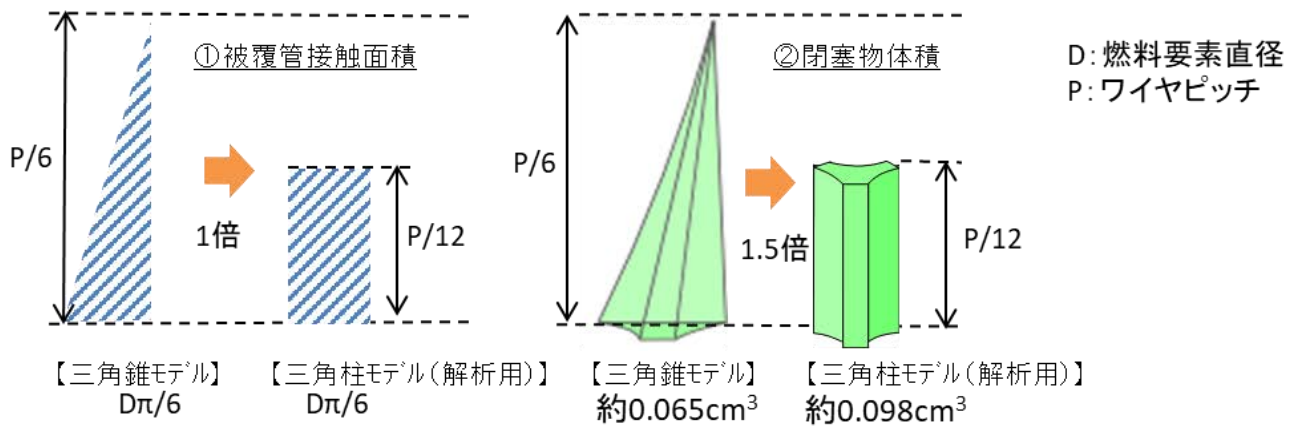
冷却材流路閉塞の解析では、「常陽」のワイヤピッチの公差±15mmを考慮した1/12 ワイヤピッチの長さ18.7mmを繰り上げて、5メッシュ分に相当する21.77mmを閉塞高さとして設定している。



第1図 燃料集合体内での閉塞機構



第2図 閉塞物の形状



第3図 三角錐モデル（1/6 ワイヤピッチ）と三角柱モデル（1/12 ワイヤピッチ）（解析用）との比較

1) 黒木修二, 高速炉における燃料局所閉塞規模の研究, 三菱原子力技報 No. 61 p. 16-19, 1992