

## 流量変化による燃料冷却性能への影響

## 1. 概要

模擬燃料体が部分的に装荷されないことにより、その部分のナトリウム流量が増え、その結果燃料体に流れるナトリウム流量が減少する。燃料体に流れるナトリウム流量が減少しても、燃料体頂部から流出するナトリウムの温度上昇は小さいことを示すものである。

## 2. 炉心の流量配分

炉内の燃料集合体は、炉心に装荷される場所に応じて発熱量に差がある。このため、燃料集合体の定格出力運転時の被ふく管最高温度がほぼ均一となるように、各燃料集合体に流れる冷却材流量を調整(流量配分)している。具体的には、燃料集合体を添付図 1 に示すように、11 の領域に分割し流量配分を行い、被ふく管肉厚中心最高温度を 675℃以下となるようにしている。

## 3. 燃料交換時の流量配分

もんじゅの設備図書「冷却材流量配分計画」における、燃料交換時の流量配分を添付表 1～2 に、炉内流量配分を添付図 2～3 に示す(燃料引抜き無し及び燃料 1 体引抜き時)。この表と図において流量の差を比較すると、燃料 1 体引抜き時の流量が 20.9kg/s(炉内流量配分図参照)と多くなる。即ち、評価上この量のナトリウムが、燃料体 1 体引抜いた空間に流れる流量となる。この時、燃料集合体 1 体当たりの流量と、燃料体 1 体を引抜いた空間に流れる流量の比は、12.1(=20.9÷1.73)となる。

## 4. 1 次主冷却系を循環する冷却材流量の限界

燃料体を順次引抜いていくと、その部分の流量が増え、炉心部を流れる冷却材流量が増え、結果的に 1 次主冷却系を循環する冷却材流量が増える。しかしながら、どこまでもナトリウム流量が増えるわけではなく、上限は循環ポンプの揚程(吐出圧力)から制限される。ポニーモータ運転時の性能曲線の一例(A 号機)を添付図 4 に示す。ポニーモータでポンプ 3 台運転時の 1 次主冷却系の流量は約 600 m<sup>3</sup>/h である。ポンプの性能曲線から、冷却材流量が増えるとポンプの揚程が低下する。例えば流量 600 m<sup>3</sup>/h が 800 m<sup>3</sup>/h に増えると、ポンプ揚程は 1.1 mNa が 0.982 mNa に低下する。

炉心部を除いた系統の圧力損失は、ポニーモータ 1 台運転時 184.5 kg/s (750 m<sup>3</sup>/h)664 kg/h: 定格流量の 4.3%)において、           kg/cm<sup>2</sup> (設計時の評価)である。圧力損失が流速  $v$  (即ち流量  $Q$ ) の 2 乗に比例する<sup>註1</sup>と考えれば、例えば流量  $Q$

が 1.3 倍 (955m<sup>3</sup>/h~~863.2 kg/h~~) に増えると圧力損失は 1.69 倍に増え、炉心部を除いた系統の圧力損失だけで            kg/cm<sup>2</sup> (           mNa) となる。この値は、添付図 4 のポンプの性能曲線においてポンプの揚程を超えており、計算上はここまでのナトリウムは系統内を循環しない。

性能曲線は水試験において取得されたことを考えれば、実機との間に若干の差は生じる。しかし、炉心部にも圧力損失が存在することを考えれば、流量が 850 m<sup>3</sup>/h を超えると、1 次主冷却系の循環流量に限界が出ると推定される。なお、1 次主循環ポンプの特性試験では、ポニーモータ 1 台運転時最大 880 m<sup>3</sup>/h 程度 (流量計による) の流量が確認されている。

注1: 経路の流路面積を  $A_n$ 、経路の流速を  $v_n$  とすれば流量  $Q$  と流速  $v_n$  の関係は

$$Q = A_n \cdot v_n = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = A_3 \cdot v_3 = \dots$$

一方、経路の圧力損失係数を  $\zeta_n$ 、 $\rho$  を流体の密度とすれば、各経路の圧力損失  $\Delta P_n$  は

$$\Delta P_n = \zeta_n \cdot \rho \cdot v_n^2 = \rho \cdot \zeta_n \cdot (Q/A_n)^2 = (\rho \cdot \zeta_n / A_n^2) \cdot Q^2$$

経路全体の圧力損失  $\Delta P$  は

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots \\ &= \zeta_1 \cdot \rho \cdot v_1^2 + \zeta_2 \cdot \rho \cdot v_2^2 + \zeta_n \cdot \rho \cdot v_n^2 + \dots \\ &= (\rho \cdot \zeta_1 / A_1^2) \cdot Q^2 + (\rho \cdot \zeta_2 / A_2^2) \cdot Q^2 + (\rho \cdot \zeta_3 / A_3^2) \cdot Q^2 + \dots \\ &= \rho \cdot \{ (\zeta_1 / A_1^2) + (\zeta_2 / A_2^2) + (\zeta_3 / A_3^2) + \dots \} \cdot Q^2 \\ &= K \cdot Q^2 \end{aligned}$$

となり圧力損失は流量  $Q$  の 2 乗に比例する。

## 5. 部分装荷状態における炉心流量の配分

添付図 2 から、炉心燃料領域 (高圧プレナム部) に流れるナトリウムと、ブランケット・中性子遮へい体領域 (低圧プレナム部) に流れるナトリウムの比率は 5:1 (11.984 × 10<sup>5</sup> kg/h : 2.467 × 10<sup>5</sup> kg/h) である。部分装荷では、最終段階において、模擬燃料体を装荷しない 124 体の燃料体を残し、炉心燃料領域から 66 体、ブランケット燃料領域から 58 体の燃料体を順次引き抜く。

燃料体を引き抜くと、流動抵抗の少ない燃料体未装荷部分にナトリウムの流量が増える。しかし、いくらでも炉心流量が増えるわけではなく、前項で述べたように流量の上限がある。また、燃料体の発熱量は最大 205W であり、ナトリウム中に浸漬されていれば燃料被ふく管肉厚中心温度は 219°C を超えることはない。このため、ナトリウム温度上昇の概算を求めることとし、炉心流量の配分も概算とする。

炉心流量は 800 m<sup>3</sup>/h × 3 ループ = 2400 m<sup>3</sup>/h (= 21.8422 × 10<sup>5</sup> kg/h) で流量が

飽和すると仮定する。このうち  $5/6$ 、即ち  $17.47218 \times 10^5 \text{ kg/h}$  のナトリウムが炉心燃料領域に流れるとする。(実際の燃料体取出しでは、炉心領域の燃料体から順に取り出すため、ブランケット領域燃料領域の燃料体を取り出されるまでは、低圧プレナム側に流れるナトリウム流量はそれほど増加しない。)

## 6. 燃料体装荷部と未装荷部の流量バランス

次に、燃料体装荷部と未装荷部の流量配分を以下のように仮定し、燃料体装荷部と未装荷部の流量バランスを推定する。

燃料体装荷部と未装荷部を比較すると、高圧プレナムと炉容器プレナム部間の差圧  $\Delta P$  は同じであり、それぞれ流動抵抗の比に応じてナトリウムが流れる。差圧  $\Delta P$  を流速  $v$  (即ち流量  $Q$ ) の 2 乗に比例するとすれば、圧損係数  $\zeta$  として

$$\Delta P = \zeta_F \cdot v_F^2 = \zeta_N \cdot v_N^2$$

となる。ここに  $\zeta_F$ 、 $v_F$  は燃料体装荷部の圧力損失係数及び流速、 $\zeta_N$ 、 $v_N$  は燃料体未装荷部の圧力損失係数及び流速である。

一方、燃料体の圧力損失係数  $\zeta_F$  はレイノルズ数  $Re (= \rho \cdot L \cdot v_F / \mu)$  に依存する傾向があり、単純に流速の 2 乗比例とはならず

$$\zeta_F \doteq \alpha Re^{-m}$$

の形で概略整理される。添付図 5 に炉容器内の全圧力損失と流量の関係を示す。炉容器内全圧力損失  $\Delta P$  は流速の 2 乗よりも小さくなる。添付図 5 において炉容器内の全圧力損失と流量の関係はほぼ直線状となっており、低流量域では、圧力損失は概ね流量の 1.63 乗に比例する。

4 項で示したように、燃料未装荷部の流量  $Q_N$  に対する圧力損失係数  $K_N$  を考える。添付図 3 から圧力損失係数  $K_N$  を推定すれば

$$\begin{aligned} \Delta P &= K_N \cdot Q_N^2 \\ 0.060 \text{ [kg/cm}^2\text{]} &= K_N \times (20.9 \text{ [kg/s]})^2 \\ K_N &= 1.37 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

となる。燃料体装荷部の平均流量  $Q_F$  を添付図 3 から算定すると、 $1.53 \text{ [kg/s]}$  ( $= 10.862 \times 10^5 \div 197 \div 3600$ ) となる。平均的な圧力損失係数  $K_F$  を考え、炉容器内全圧力損失と同じように流量の 1.63 乗に比例するとして、

$$\begin{aligned} \Delta P &= K_F \cdot Q_F^{1.63} \\ 0.060 \text{ [kg/cm}^2\text{]} &= K_F \times (1.53 \text{ [kg/s]})^{1.63} \\ K_F &= 3.00 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

とおく。

燃料体未装荷部を 66 ヶ所、燃料体装荷部を 132 ヶ所とすれば、炉心燃料領域を流れる単位時間当たりの総流量  $Q_T (= 17.47218 \times 10^5 \text{ kg/h} = 4.853 \times 10^3 \times 500$

kg/s) と  $Q_N$  と  $Q_F$  との関係は

$$Q_T = 66 \cdot Q_N + 132 \cdot Q_F$$

$$4.853500 \times 10^3 = 66 \cdot Q_N + 132 \cdot Q_F$$

となる。一方、 $Q_N$  と  $Q_F$  関係は、

$$K_N \cdot Q_N^2 = K_F \cdot Q_F^{1.63}$$

$$1.37 \times 10^{-4} Q_N^2 = 3.00 \times 10^{-2} Q_F^{1.63}$$

となる。これより  $Q_N$ 、 $Q_F$  を求めると以下となり、

$$Q_N = 6.616.8 \text{ kg/s} \quad Q_F = 0.3720.4 \text{ kg/s}$$

燃料体装荷部の流量は 0.372-0.4kg/s となる。

## 7. ナトリウムの温度上昇概算

200°C のナトリウムの定圧比熱  $C_p$  は 1.34 kJ/kg°C である。部分装荷状態が進み、使用済燃料体に流れる流量が 0.372-0.4kg/s に低下したとする。使用済燃料体 1 体当たりの発熱量は最大 205W (=205J/s) なので、その熱がナトリウムに入熱される。従って、使用済燃料体頂部から流れ出すナトリウムの温度は 0.4510.4°C 上昇する。

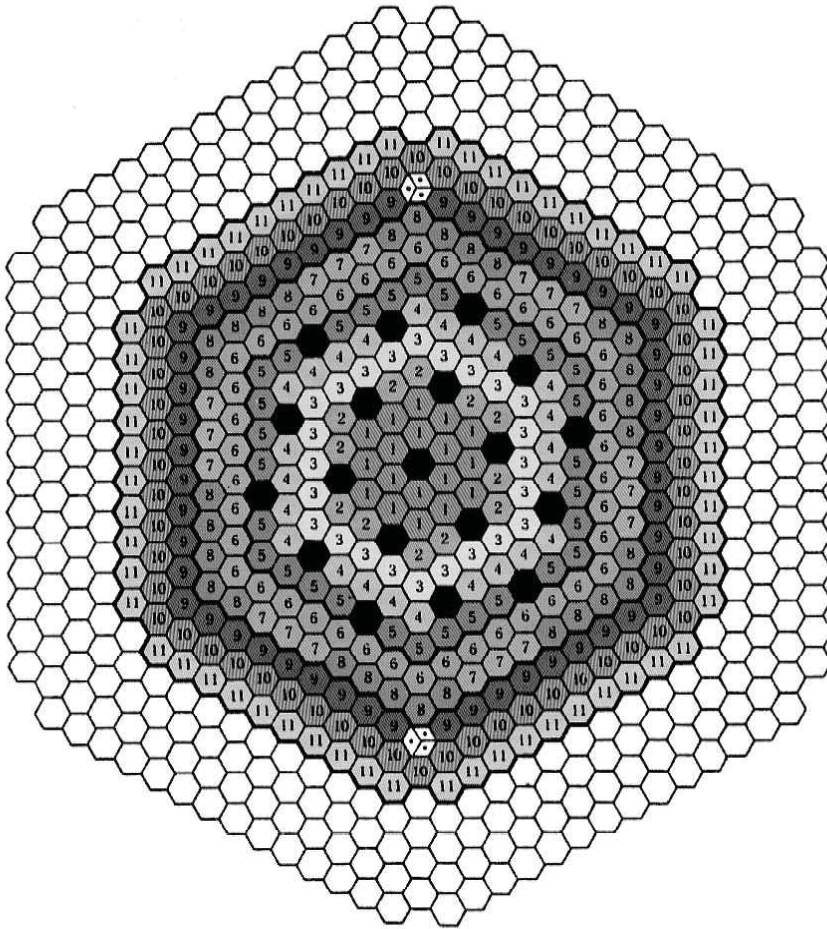
$$205 \div (1.34 \times 10^3 \times 0.3720.4) = 0.4510.4$$

概算なので、流量に 2 倍の誤差を見込んでも温度上昇は 1°C 未満。未装荷部と装荷部を流れる温度差  $\Delta T$  がこの程度であれば、構造物への熱的影響を考慮する必要はない。

## 8. まとめ

炉心領域から燃料体を取り出した後の、炉心流量と流量配分の変化を概略評価し、流れが変わることによってナトリウムの温度がどの程度変化するかを確認した。その結果、燃料体装荷部のナトリウムの温度上昇は 1°C 未満であった。模擬燃料体の部分装荷では、炉心部ナトリウム温度に大きな差は発生せず、構造物への熱的影響まで考慮する必要がないことを確認した。





記号	領域	
①	流量領域 1	内側炉心
②	流量領域 2	
③	流量領域 3	
④	流量領域 4	
⑤	流量領域 5	
⑥	流量領域 6	外側炉心
⑦	流量領域 7	
⑧	流量領域 8	
⑨	流量領域 9	半径方向 ブランケット
⑩	流量領域 10	
⑪	流量領域 11	
●	制御棒集合体	
☆	中性子源集合体	
○	中性子しゃへい体等	

図 もんじゅの炉心の流量配分領域図

表 もんじゅの炉心構成要素の種類

炉心構成要素		数量
	内側炉心	108
	外側炉心	90
ブランケット燃料集合体		172
制御棒集合体	微調整棒	3
	粗調整棒	10
	後備炉停止棒	6
中性子源集合体		2
中性子しゃへい体		316
サーベイランス集合体		8



