

JAERI-M

6 2 4 9

燃料棒プレナム内平均温度の考察

1975年9月

原山泰雄・泉 文男・山田礼司・鈴木元衛

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

燃料棒プレナム内平均温度の考察

日本原子力研究所・東海研究所・安全工学部

原山泰雄・泉 文男

山田礼司・鈴木元衛

(1975年9月4日受理)

燃料棒内圧を求める場合、燃料棒内プレナム温度は内圧に大きな影響を与える。内圧の評価に必要なプレナム内の平均温度を求める新しい方法を提案した。すなわち、プレナム平均温度 (T_{av} 、温度の逆数についての体積平均温度) と冷却水温度 (T_w) の比は、

$$T_{av} / T_w = C (\Delta T_c / T_w, L / D_o)$$

で表すことができる。ここで、Cは、プレナムに接するペレット中心温度 (T_c) と冷却水温度との温度差 ($\Delta T_c = T_c - T_w$) と冷却水温度の比、およびプレナム長 (L) と被覆管外径 (D_o) の比によって定まる定数である。

JAERI-M 6249

A Consideration for the Average Temperature in Fuel Rod Plenum

Yasuo HARAYAMA, Fumio IZUMI,

Rayji YAMADA and Motoe SUZUKI.

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received September 4, 1975)

In calculating the fuel rod internal pressure, the plenum in the fuel rod affects largely the pressure. A method of estimating the average plenum temperature is presented. The ratio of average plenum temperature (T_{av} , the mean volume gas temperature with respect to converse of temperature distribution in the plenum) to coolant temperature (T_w) is thus expressed as

$$T_{av}/T_w = C(\Delta T_c/T_w, L/D_o),$$

where C is the constant determined by the ratio of the temperature difference ($\Delta T_c = T_c - T_w$) between center temperature of the pellet adjoining the plenum and coolant temperature to the coolant temperature and the ratio of plenum height (L) to cladding outer diameter (D_o).

1.はじめに.....	1
2.プレナム内の平均温度について.....	1
3.圧力評価のための平均温度.....	2
3.1 プレナム内の熱の移動が伝導によると考えた場合.....	2
3.2 プレナム内軸方向温度分布に一次式を採用した場合.....	6
4.むすび.....	9

謝 辞

参考文献

1. はじめに

燃料棒内の圧力は、初期封入ガスの温度上昇、燃料ペレットからの揮発性不純物と照射に伴う燃料ペレットからの核分裂生成ガスの放出等により上昇する。ペレットから放出されたガスは、被覆管内面とペレット表面間のギャップに蓄積される。しかし、ギャップ体積は小さいので、圧力の上昇が大きくなる。このため圧力の上昇を緩和する目的で、燃料棒内には余分の空間が設けられる。この空間をプレナムと呼んでいる。この外、ペレットにディッシュが設けられる場合は、ディッシュもガスの蓄積に寄与する。

燃料棒内の内圧の評価は、被覆管強度に関して、設計あるいは安全性評価上重要な要因である。設計基準の一つとして「燃料棒の寿命の終りにおいて、被覆管は外圧の作用がなくとも、内圧に対して自立すること」がある。また、燃料棒内圧は、燃料棒の照射挙動を解析するとき、被覆管に発生する応力の評価等に必要となる。

これらの内圧の評価にさいし、封入および放出ガスが最も簡単に理想気体の状態式に従うものとしても、ガスが存在する場所における温度を知る必要がある。燃料ペレット表面と被覆管内面間の間隙（ギャップ）あるいはディッシュについては、燃料棒に関する温度分布計算によりかなり正確な情報がえられる。一方、プレナム部分の温度について、明確な実験報告等は見かけない。しかし、燃料棒の照射挙動を解析する計算機プログラムにおいては、被覆管応力評価上どうしても必要なため、何らかの仮定が行なわれている。例えば、プログラムGAPCON-THERMAL-1¹⁾では、プレナム温度は冷却水温度に10°F加えたものとしている。

また、燃料棒内の温度分布計算を目的としているプログラムのFIGRO²⁾では、プレナム内のプレナムスプリングに着目し、スプリングのヤー加熱を考慮してプレナム内の温度を求めるが、プレナム内のガス温度は軸方向に一定と仮定している。

この報告書は、燃料棒の内圧を評価するのに必要なプレナム平均温度を考察したものである。燃料棒の設計、計算機プログラムにおいて、プレナム平均温度をどのように考え、どの程度に評価するのが最も合理的であるかを考え、かつ平均温度評価法について一つの提案を行った。

2. プレナム部の平均温度について

燃料棒内のガスが、理想気体の状態式を満足していると仮定しても、ガスが一定温度でなく温度分布をもつとすると、ただちに圧力を計算することは出来ない。温度の分布に対し、何らかの平均温度を考えることが、計算処理において便利である。³⁾そこで、燃料棒内のガスのように温度分布がある場合、圧力を計算するための平均温度について考える。

プレナム部のガスについて次の二つのことを仮定する。

- 1) プレナム内のガス圧力は、あらゆる場所で一定である。⁴⁾
- 2) プレナム内のすべての場所において、ガスの微少体積に関し次式が成立しているものとする。

$$P \Delta V = R \Delta G \cdot T \quad (1)$$

ここで、P：ガス圧力、 ΔV ：微少体積、 ΔG ：微少体積に含まれるガス質量、R：ガス定数、T：温度である。

1. はじめに

燃料棒内の圧力は、初期封入ガスの温度上昇、燃料ペレットからの揮発性不純物と照射に伴う燃料ペレットからの核分裂生成ガスの放出等により上昇する。ペレットから放出されたガスは、被覆管内面とペレット表面間のギャップに蓄積される。しかし、ギャップ体積は小さいので、圧力の上昇が大きくなる。このため圧力の上昇を緩和する目的で、燃料棒内には余分の空間が設けられる。この空間をプレナムと呼んでいる。この外、ペレットにディッシュが設けられる場合は、ディッシュもガスの蓄積に寄与する。

燃料棒内の内圧の評価は、被覆管強度に関して、設計あるいは安全性評価上重要な要因である。設計基準の一つとして「燃料棒の寿命の終りにおいて、被覆管は外圧の作用がなくとも、内圧に対して自立すること」がある。また、燃料棒内圧は、燃料棒の照射挙動を解析するとき、被覆管に発生する応力の評価等に必要となる。

これらの内圧の評価にさいし、封入および放出ガスが最も簡単に理想気体の状態式に従うものとしても、ガスが存在する場所における温度を知る必要がある。燃料ペレット表面と被覆管内面間の間隙（ギャップ）あるいはディッシュについては、燃料棒に関する温度分布計算によりかなり正確な情報がえられる。一方、プレナム部分の温度について、明確な実験報告等は見かけない。しかし、燃料棒の照射挙動を解析する計算機プログラムにおいては、被覆管応力評価上どうしても必要なため、何らかの仮定が行なわれている。例えば、プログラムGAPCON-THERMAL-1¹⁾では、プレナム温度は冷却水温度に10°F加えたものとしている。

また、燃料棒内の温度分布計算を目的としているプログラムのFIGRO²⁾では、プレナム内のプレナムスプリングに着目し、スプリングの一加熱を考慮してプレナム内の温度を求めるが、プレナム内のガス温度は軸方向に一定と仮定している。

この報告書は、燃料棒の内圧を評価するのに必要なプレナム平均温度を考察したものである。燃料棒の設計、計算機プログラムにおいて、プレナム平均温度をどのように考え、どの程度に評価するのが最も合理的であるかを考え、かつ平均温度評価法について一つの提案を行った。

2. プレナム部の平均温度について

燃料棒内のガスが、理想気体の状態式を満足していると仮定しても、ガスが一定温度でなく温度分布をもつとすると、ただちに圧力を計算することは出来ない。温度の分布に対し、何らかの平均温度を考えることが、計算処理において便利である。³⁾そこで、燃料棒内のガスのように温度分布がある場合、圧力を計算するための平均温度について考える。

プレナム部のガスについて次の二つのことを仮定する。

- 1) プレナム内のガス圧力は、あらゆる場所で一定である。⁴⁾
- 2) プレナム内のすべての場所において、ガスの微少体積に関し次式が成立しているものとする。

$$P \Delta V = R \Delta G \cdot T \quad (1)$$

ここで、P：ガス圧力、 ΔV ：微少体積、 ΔG ：微少体積に含まれるガス質量、R：ガス定数、T：温度である。

上記の仮定のもとで、圧力は

$$P = \frac{\Delta G}{\Delta V} R \cdot T \quad (2)$$

と表わされる。 $\Delta G / \Delta V$ はその場所におけるガスの密度 (ρ) である。したがって、

$$P = \rho R T \quad (3)$$

となる。プレナム内の任意の位置 (r, θ, z) における密度 $\rho (r, \theta, z)$ は

$$\rho = \frac{P}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

となり、密度は温度の函数として与えられる。ここで $\int_V \rho dV$ を考えると、これはプレナム内ガスの全質量 (G) に等しい。したがって、

$$G = \int_V \rho dV \quad (5)$$

となる。上式の ρ に(4)式を代入すると

$$G = \frac{P}{R} \int_V \frac{dV}{T}$$

がえられ、プレナム圧力は

$$P = \frac{GR}{\int_V \frac{dV}{T}} = \frac{GR T_{av}}{V} \quad (6)$$

で与えられる。この式と理想気体の状態式の比較より、

$$P = \frac{GR}{\int_V \frac{dV}{T}} = \frac{GR}{V} T_{av}$$

がえられ、プレナム平均温度 (T_{av}) として

$$T_{av} = \frac{V}{\int_V \frac{dV}{T}} \quad (7)$$

がえられる。

3. 圧力評価のための平均温度

3.1 プレナム内の熱の移動が伝導によると考えた場合

プレナム部の圧力を求めるには、プレナム部内部の温度分布を知る必要がある。ギャップ、ディッシュ部と異なり、プレナム部の温度分布について、参考にしうる報告はほとんどない。

そこで、プレナム部の温度分布を知るために、まず定常熱伝導方程式を解いてみることにした。このプレナム内の温度分布の厳密解を求ることは不可能ではないが複雑なので、計算機プログラムを利

上記の仮定のもとで、圧力は

$$P = \frac{\Delta G}{\Delta V} \cdot R \cdot T \quad (2)$$

と表わされる。 $\Delta G / \Delta V$ はその場所におけるガスの密度 (ρ) である。したがって、

$$P = \rho R T \quad (3)$$

となる。プレナム内の任意の位置 (r, θ, z) における密度 $\rho (r, \theta, z)$ は

$$\rho = \frac{P}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

となり、密度は温度の函数として与えられる。ここで $\int_V \rho dV$ を考えると、これはプレナム内ガスの全質量 (G) に等しい。したがって、

$$G = \int_V \rho dV \quad (5)$$

となる。上式の P に(4)式を代入すると

$$G = \frac{P}{R} \int_V \frac{dV}{T}$$

がえられ、プレナム圧力は

$$P = \frac{GR}{\int_V \frac{dV}{T}} = \frac{GR T_{av}}{V} \quad (6)$$

で与えられる。この式と理想気体の状態式の比較より、

$$P = \frac{GR}{\int_V \frac{dV}{T}} = \frac{GR}{V} \cdot \frac{1}{T_{av}}$$

がえられ、プレナム平均温度 (T_{av}) として

$$T_{av} = \frac{V}{\int_V \frac{dV}{T}} \quad (7)$$

がえられる。

3. 圧力評価のための平均温度

3.1 プレナム内の熱の移動が伝導によると考えた場合

プレナム部の圧力を求めるには、プレナム部内部の温度分布を知る必要がある。ギャップ、ディッシュ部と異なり、プレナム部の温度分布について、参考にしうる報告はほとんどない。

そこで、プレナム部の温度分布を知るために、まず定常熱伝導方程式を解いてみることにした。このプレナム内の温度分布の厳密解を求ることは不可能ではないが復雑なので、計算機プログラムを利

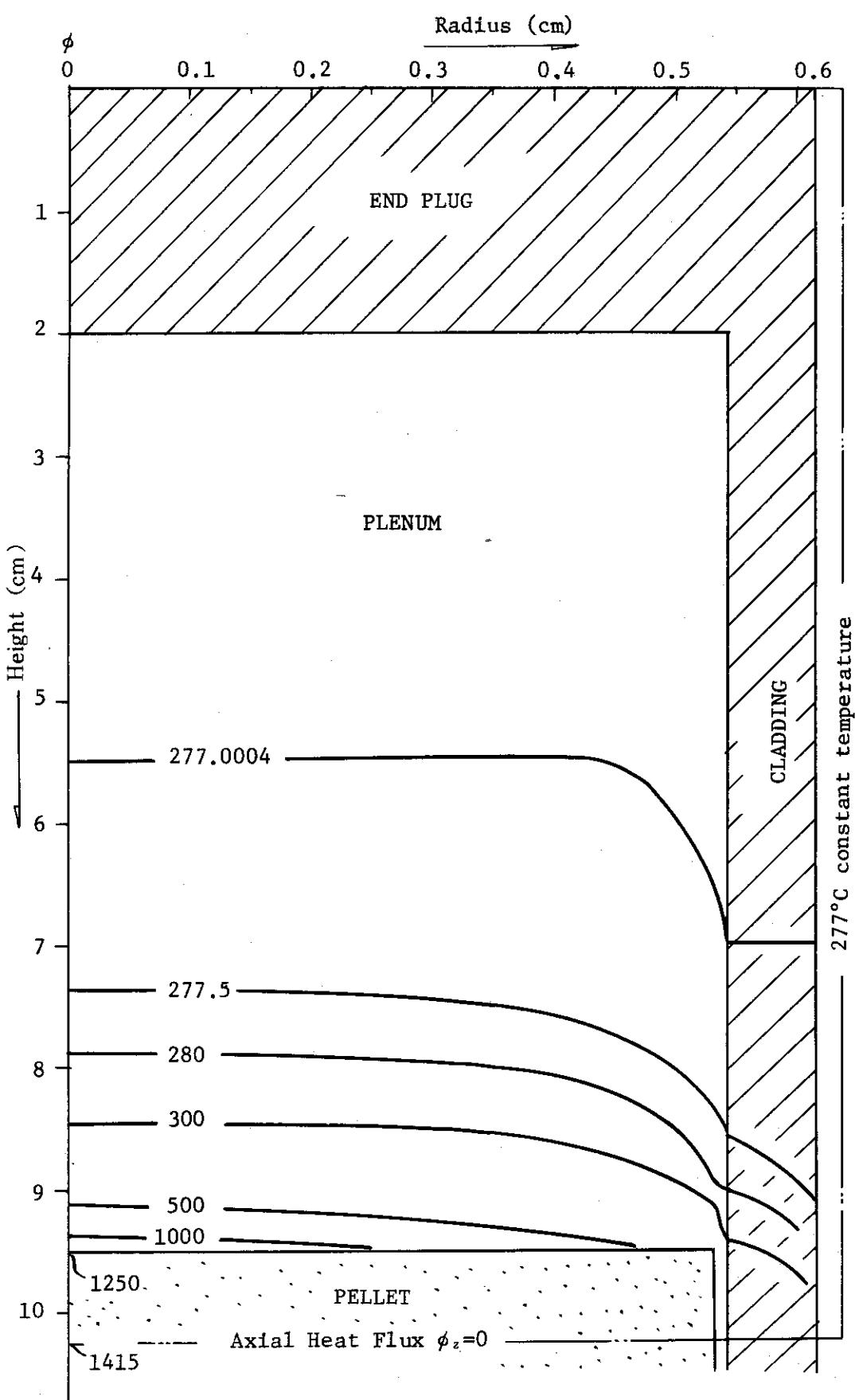


Fig. 1 Temperature Distribution in Plenum
(Conduction through the gas in the plenum)

用してプレナム部の定常状態における熱伝導の温度分布を求めた。その1例をFig.-1に示す。この計算例の境界条件は、図中に示す通り、中心軸上の半径方向および下部における軸方向の熱流束が0、被覆管表面の外側の冷却水温度、および上部のジルカロイ表面温度を一定値（この例の場合 277 °C）としたものである。なお、下部には直径 10.66 mm の発熱体（99.076 (cal/sec·cc) ≈ 371 (W/cm)）の燃料ペレットを含めている。

この計算結果の特長は、

- 1) プレナム部の大部分は、冷却水温度に近い温度である。
 - 2) 燃料ペレットに近い部分に、高温領域が現れるがこの領域は、全体に比較して非常に小さい。
- ことである。

この理由は、計算例の如き境界条件における厳密解の基本解が

$$T(r, z) = T_w + \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_n(\alpha_{0n} \frac{r}{R_0}) \frac{\sinh(\alpha_{0n} Z/R_0)}{\sinh(\alpha_{0n} L_1/R_0)} \quad (8)$$

と表わされることから明らかである。ここで、 T_w ：冷却水温度、 A ：定数、 α_{0n} ：函数 J_n の零点の値、 R_0 ：被覆管外半径、 r, z ：極座標値である。プレナム部の如く、高さと半径の比 (L_1/R_0) が少なくとも $L_1/R_0 > 5$ であるような場合、 $\sinh(\alpha_{01} L_1/R_0)$ の値は非常に大きくなり、 $\sinh(\alpha_{01} Z/R_0)/\sinh(\alpha_{01} L_1/R_0)$ の比は、 $Z = L_1$ の近傍を除いては、0 に近いためである。

圧力評価のための平均温度を求めるためには、なにか式で表示しておいた方が便利である。そこで、プレナム部分の温度を次式で近似する。

$$T(r, z) = T_w + (T_c - T_w) J_0(\alpha_{01} \frac{r}{R_0}) \frac{\sinh(\alpha_{01} Z/R_0)}{\sinh(\alpha_{01} L/R_0)} \quad (9)$$

ただし、 T_c ：プレナムに接するペレット中心温度

α_{01} ：函数 $J_0(r)$ の第1零点の値 ($\alpha_{01} = 2.40483$)

L ：プレナム高さ

である。この近似と先に求めた定常熱伝導方程式の数値解との比較をペレット表面および中心軸上の温度分布について Fig-2 に示す。図より、近似式が与えるプレナム中のガス部分の温度は、半径方向において被覆管内面近くで少し overestimate になり、軸方向で多少 underestimate 気味になることが分る。この軸方向の underestimate は、近似式中の $\sinh(\alpha_{01} L_1/R_0)$ にプレナム長 L を使用したためである。数値計算の体系では、 $L + L_0$ (L_0 ：プレナムガスの境界から一定温度を与える境界条件までの距離) となっているのに、近似式で軸方向の長さに L を使用しているためである。したがって、その修正を行い、近似式で \sinh の項を $\sinh(\alpha_{01} Z/R_0)/\sinh(\alpha_{01} (L+L_0)/R_0)$ とすれば、さらによい近似が与えられる。しかしながら、 L_0 の値は、燃料棒において必ずしも一定していないばかりか、この部分の形状も、数値計算に使用したような単純なものではなく、実際の燃料棒ではもっと複雑である。そのため、近似式ではプレナム長 L を採用する。

プレナム内の温度分布が(9)式で与えられるとして、圧力に関する平均温度 (T_{av}) を評価するため、(9)式を前節の(7)式に代入すると、

$$T_{av} = V \int_V \frac{dV}{T(r, z)}$$

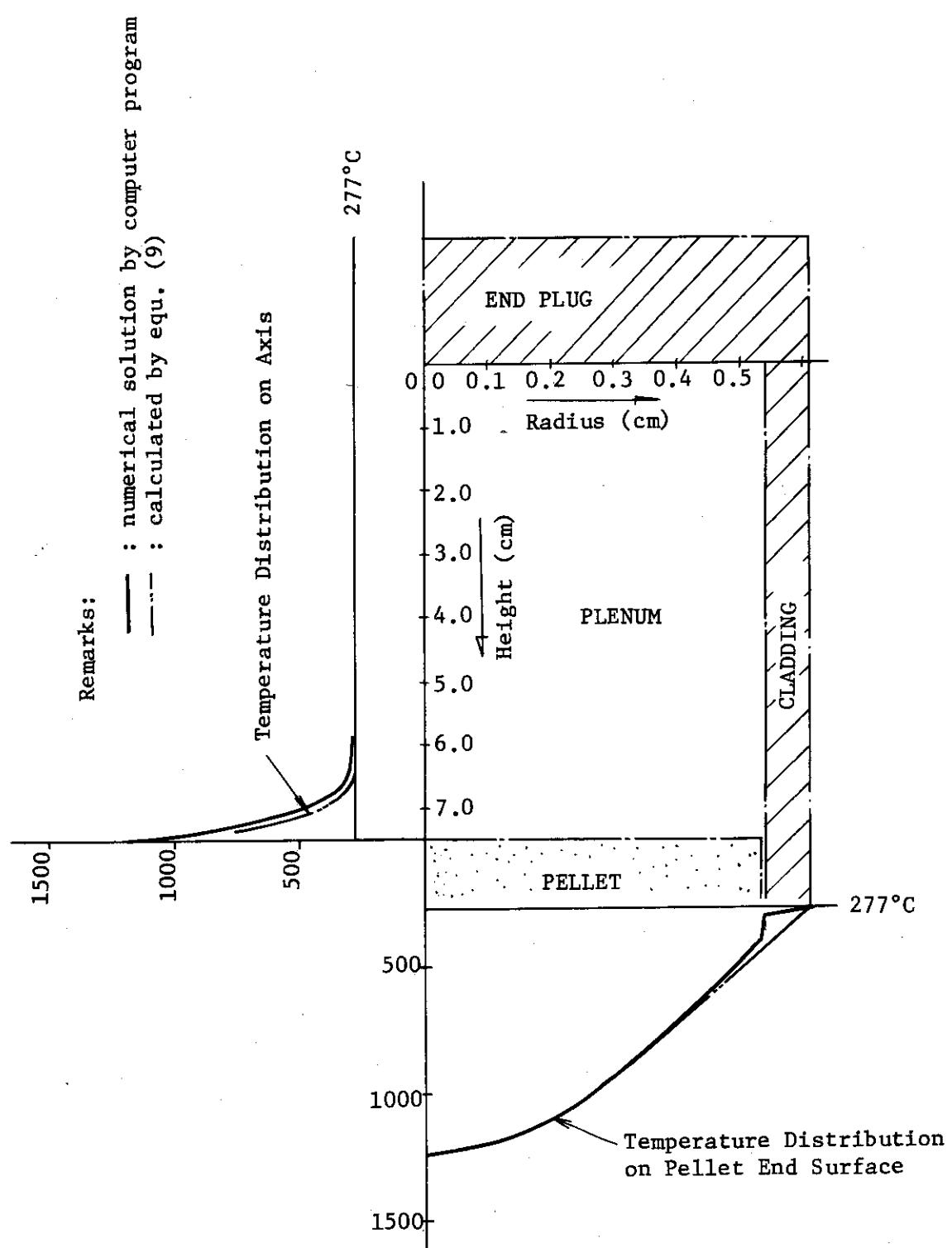


Fig. 2 Comparison Numerical Solution with Approximation by eq. (9).

$$= \frac{\pi R_i^2 \cdot L}{2 \pi \int_0^R \int_0^L \frac{r dr \cdot dz}{T_w + \Delta T_c J_0(\alpha_{01} r / R_0) \sinh(\alpha_{01} Z / R_0) / \sinh(\alpha_{01} L / R_0)}} \quad (10)$$

となる。ただし、 $\Delta T_c = T_c - T_w$, R_i = 被覆管内半径である。上式を整理すると次の様になる。

$$\frac{T_{av}}{T_w} = \frac{\alpha_{01}^3}{2} \cdot \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 \left(\frac{L}{R_0} \right) / I_c \quad (11)$$

ここで、

$$I_c = \int_0^{R_i} \int_0^L \frac{r' dr' dz'}{1 + (\Delta T_c / T_w) J_0(r') \sinh(z') / \sinh(\alpha_{01} L / R_0)} \quad (12)$$

である。

上式より、 T_{av}/T_w の比は、パラメータ R_i/R_0 , L/R_0 と $\Delta T_c/T_w$ によってその値が定まる。さらに、軽水炉の燃料棒を考えると、 R_i/R_0 の値は、PWR, BWR 共には ≈ 0.885 である。そこで、 $R_i/R_0 = 0.885$ に固定すれば、 T_{av}/T_w の比は、パラメータ L/R_0 と $\Delta T_c/T_w$ の二つによってのみ定まる。そこで、この比を $C(L/R_0, \Delta T_c/T_w)$ と表わせば

$$\frac{T_{av}}{T_w} = C(L/R_0, \Delta T_c/T_w) \quad (13)$$

となる。この圧力評価のための平均温度補正係数 C を $L/D_0 = 5 \sim 30$ ($D_0 = 2R_0$), $\Delta T_c/T_w = 1.0 \sim 3.0$ について数値計算した結果を Table 1-(A) に示す。ただし表では使用上の便を考えて L/R_0 の比に被覆管外径 (D_0) を使用した L/D_0 で示している。先に温度分布において指摘したように、プレナム内の平均温度は、ほど冷却水温度に等しい。これは Table 中の数値が $T_{av}/T_w = 1.0$ として表されている。

この表から、次のことが分る。

- 1) プレナムの長さ (L/D_0) が大きくなると、プレナム平均温度は、冷却水温度に近くなる。
- 2) ペレットの温度が高くなると、当然のことながら平均温度も高くなるが、その増加の程度は非常に小さい。
- 3) 現実の BWR 燃料棒で、被覆管直径 1.4 cm, プレナム長約 30 cm, 冷却水温度 300 °C (573°K) で、プレナムに接するペレット最高温度が 1000 °C ならば、 $L/D_0 \sim 20$, $\Delta T_c/T_w = (1000 - 300)/573 \approx 1.2$ となるので、プレナム平均温度は $T_{av} = 1.005 \times 573 = 576$ (°K), すなわち約 303 °C 程度となろう。

3.2 プレナム内軸方向温度分布に一次式を採用した場合

プレナムが燃料棒の下部に設けられている場合は、明らかにプレナム内の熱の移動は、熱伝導に支

Table - 1

Coefficient to evaluate plenum average temperature

(A) Case of heat conduction

$\Delta T_c/T_w$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
L/D											
5	1.0175	1.0202	1.0228	1.0253	1.0276	1.0298	1.0319	1.0339	1.0358	1.0376	1.0394
6	1.0145	1.0168	1.0189	1.0210	1.0229	1.0247	1.0264	1.0281	1.0296	1.0312	1.0326
7	1.0124	1.0144	1.0162	1.0179	1.0195	1.0211	1.0226	1.0240	1.0253	1.0266	1.0278
8	1.0109	1.0126	1.0141	1.0156	1.0171	1.0184	1.0197	1.0209	1.0221	1.0232	1.0243
9	1.0096	1.0111	1.0125	1.0139	1.0151	1.0163	1.0175	1.0185	1.0196	1.0206	1.0215
10	1.0087	1.0100	1.0113	1.0125	1.0136	1.0147	1.0157	1.0166	1.0176	1.0185	1.0193
15	1.0058	1.0066	1.0075	1.0083	1.0090	1.0097	1.0104	1.0110	1.0116	1.0122	1.0128
20	1.0043	1.0050	1.0056	1.0062	1.0068	1.0072	1.0078	1.0083	1.0087	1.0091	1.0096
25	1.0034	1.0040	1.0045	1.0050	1.0054	1.0058	1.0062	1.0066	1.0070	1.0073	1.0076
30	1.0029	1.0033	1.0037	1.0041	1.0045	1.0048	1.0052	1.0055	1.0058	1.0061	1.0064

(B) Case of temperature distribution assumed linear in axial direction

$\Delta T_c/T_w$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
-	1.2351	1.2770	1.3179	1.3577	1.3966	1.4347	1.4721	1.5088	1.5449	1.5804	1.6154

配されるであろう。しかし、通常の燃料棒は、プレナムを燃料棒の上部に設けている。このようなプレナム中では下面の高温のペレット表面より上方の低温状態の端栓表面に、対流によって熱が伝達されるであろう。

いま、プレナム直径 1 cm ϕ 、高さ 10 cm 、高温の下面の平均温度 1000°C 、低温の上面温度を 300°C とし、プレナム内のガスをヘリウムと考えたときの、自然対流の指標となるグラスホーフ数を計算してみると約 2.4×10^5 となる。また、このときのレイレイ数 (Ra) は約 1.6×10^5 である。いま、次式によってヌッセルト数 (Nu) を計算してみると⁵⁾

$$\text{Nu} = 0.21 \times \text{Ra}^{1/4}$$

$\text{Nu} \approx 4$ となる。すなわち、熱伝導で考えるよりも、約 4 倍の熱が対流によって上方にはこぼれると予想される。プレナムの如き閉空間内の自然対流に関する実験は高温面から低温面への熱伝達について、よく研究されている。しかし、側面の影響については、あまり考慮されていないようである。プレナムに近いものとして熱サイフォンがあるが、これは側面が加熱面であって、プレナムのように冷却面とは異なる。

いずれにしても、これら対流のおこる閉空間における熱伝達については、よく研究されているものの、その内部の温度分布については、実験式等にまとめられていない。そのため、プレナム内に対流が起るとした場合、プレナム内部の温度分布を推測することができない。そこで、ここでは、軸方向の温度分布に一次式を使用した。

$$T(r, z) = \Delta T_c J_0 \left(\frac{r}{R_0} \right) \left(\frac{Z}{L} \right) + T_w \quad (14)$$

を考える。

この式を用いたときの、プレナム平均温度は、

$$\frac{T_{av}}{T_w} = C \left(R_i / R_0, \Delta T_c / T_w \right) = \frac{\alpha_{01}^2}{2} \cdot \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 / I_c \quad (15)$$

と表わされる。ただし

$$I_c = \int_0^{\infty} \int_0^1 \frac{r' dr' dz'}{1 + (\Delta T_c / T_w) J_0(r') \cdot Z} \quad (16)$$

である。この場合も、平均温度と冷却水温度の比 (T_{av}/T_w) は、パラメータ R_i/R_0 と $\Delta T_c/T_w$ のみによって定まる。ただし、この係数には、 L/D_0 は関係しない。上式による数値計算結果を Table - 1(B) に示す。

この計算結果は、先の熱伝導による場合の値 Table - 1 - (A) に比較して 1.2 ~ 1.5 倍の値になっている。

実際の燃料棒のプレナムには、プレナムスプリングが挿入されており、このスプリングの熱伝導による熱の移動等が考えられる。プログラム FIGRO²⁾においては、プレナムスプリングの軸方向の熱伝導、 r -加熱による熱発生を考慮している。しかしながら、FIGRO では、プレナム内のガスの温度は

軸方向に一定と仮定している。またプレナム内のガスの対流については考慮されていない。

これらのことと総合的に判断して、この節で使用した軸方向に一次式を用いたプレナム内温度分布はプレナム内のガス温度に対しかなり高い温度を与えると考えられる。

4. むすび

この報告書の考察より、次のことが結論される。

- 1) 燃料棒内の圧力を求めるため、圧力に最も大きな効果をもつプレナムに関し、プレナム内の平均温度を評価する新しい方法を提案した。すなわち、平均温度 (T_{av} in $^{\circ}\text{K}$) と冷却水温度 (T_w in $^{\circ}\text{K}$) の比 (T_{av}/T_w) は、プレナムに接するペレット最高中心温度 (T_c) と冷却水温度の差 ($\Delta T_c = T_c - T_w$) の冷却水温度に対する比 ($\Delta T_c/T_w$) とプレナム長の被覆管外径 (D_o) の比 (L/D_o) によって定まる。
- 2) プレナム内の熱が、熱伝導によって移動する場合、圧力評価のための平均温度修正係数は、Table-1(A)で与えられる。プレナム平均温度は、冷却水温度と考えても大きな誤りはない。この意味で、プログラムGAPCON-THERMAL-1の仮定「プレナム内の平均温度は冷却水温度に10 $^{\circ}\text{F}$ を加えたものとする」は妥当な近似を与えるであろう。
- 3) プレナム内に対流が起る場合プレナム内の温度分布を見出すことは困難であった。近似として軸方向温度分布に一次式を使用し、平均温度を求めるための係数を求めた。この結果はTable-1(B)で与えられる。現実の燃料棒では、プレナム部には、ペレット押え板付スプリングが挿入され、押え板の半径方向の熱伝導によりプレナムに接する高温部の温度が低下すると考えられるので、軸方向に一次式を使用して求めた平均温度より低くなると予想される。また、プレナムスプリングの r -加熱等を考えても、もしガスの対流があれば、これらは対流による温度分布にマスクされ支配的因素とはならないであろう。したがって、プレナム内の平均温度は、この方法で求めた平均温度以上にはならないと考えられる。被覆管の強度設計、安全評価において、内圧を高く評価しておく必要がある場合には、この方法は有効であると考える。

謝辞

プレナム内の定常熱伝導方程式の数値解の検討に関しセンチュリ・リサーチ・センタ株式会社の石橋明弘氏の助力をえた。記して謝意を表す。

軸方向に一定と仮定している。またプレナム内のガスの対流については考慮されていない。

これらのことと総合的に判断して、この節で使用した軸方向に一次式を用いたプレナム内温度分布はプレナム内のガス温度に対しかなり高い温度を与えると考えられる。

4. むすび

この報告書の考察より、次のことが結論される。

- 1) 燃料棒内の圧力を求めるため、圧力に最も大きな効果をもつプレナムに関し、プレナム内の平均温度を評価する新しい方法を提案した。すなわち、平均温度 (T_{av} in $^{\circ}$ K) と冷却水温度 (T_w in $^{\circ}$ K) の比 (T_{av}/T_w) は、プレナムに接するペレット最高中心温度 (T_c) と冷却水温度の差 ($\Delta T_c = T_c - T_w$) の冷却水温度に対する比 ($\Delta T_c/T_w$) とプレナム長の被覆管外径 (D_o) の比 (L/D_o) によって定まる。
- 2) プレナム内の熱が、熱伝導によって移動する場合、圧力評価のための平均温度修正係数は、Table-1(A)で与えられる。プレナム平均温度は、冷却水温度と考えても大きな誤りはない。この意味で、プログラムGAPCON-THERMAL-1の仮定「プレナム内の平均温度は冷却水温度に10°Fを加えたものとする」は妥当な近似を与えるであろう。
- 3) プレナム内に対流が起る場合プレナム内の温度分布を見出すことは困難であった。近似として軸方向温度分布に一次式を使用し、平均温度を求めるための係数を求めた。この結果はTable-1(B)で与えられる。現実の燃料棒では、プレナム部には、ペレット押え板付スプリングが挿入され、押え板の半径方向の熱伝導によりプレナムに接する高温部の温度が低下すると考えられるので、軸方向に一次式を使用して求めた平均温度より低くなると予想される。また、プレナムスプリングの r -加熱等を考えても、もしガスの対流があれば、これらは対流による温度分布にマスクされ支配的因素とはならないであろう。したがって、プレナム内の平均温度は、この方法で求めた平均温度以上にはならないと考えられる。被覆管の強度設計、安全評価において、内圧を高く評価しておく必要がある場合には、この方法は有効であると考える。

謝辞

プレナム内の定常熱伝導方程式の数値解の検討に関しセンチュリ・リサーチ・センタ株式会社の石橋明弘氏の助力をえた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1 C. R. Hann, C. E. Beyer, L.J. Parchen, "GAPCON-THERMAL - 1 : A computer program for calculating the gap conductance in oxide fuel pins", BNWL - 1778 (Sep 1973) .
- 2 I. Goldberg, "A procedure for calculation of steady-state temperature in zircaloy-clad, bulk-oxide fuel elements using the FIGRO computer program", WAPD-TM - 757 (Nov. 1969) .
- 3 V. Z. Jankus and R. W. Weeks, "LIFE-II -A computer analysis of fast-reactor fuel - element behavior as a function of reactor operating history", Nucl . Eng . Design 18 (1972) 83 - 96.
- 4 J. Wordsworth , "IAMBUS -1 -A digital computer code for the design , in-pile performance prediction and post -irradiation analysis of arbitrary fuel rods ", Nucl . Eng . Design 31 (1974) 309 - 336.
- 5 W. H. McAdams , " Heat transmission " , 3 rd ed . McGraw-Hill .