

JRR-3 燃料要素を炉内から
取り出した場合の残留熱による
温度上昇とその冷却

1963年3月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

**JRR-3 燃料要素を炉内から取り出した場合の残留熱による
温度上昇とその冷却**

要 旨

JRR-3 において冷却系の事故で重水が炉外に漏洩した場合とか、停電などの場合、燃料要素を重水の無い炉内、空气中、あるいはキャスクの中に放置せざるをえない事態が起らないともかぎらない。そんな場合にも燃料棒は発熱を続けているわけであるから、燃料棒の表面に被覆してあるアルミが溶融するかどうかということは緊急事故対策の一問題として検討の必要がある。この報告では、そのような場合における燃料棒の温度上昇を計算で求め、その結果の信頼性は実物大模擬燃料要素の熱伝達の実験をおこなって確かめた。

1961 年 3 月 20 日

日本原子力研究所 機械装置研究室

佐野川好母

大内光男

**On the temperature rise of the JRR-3 fuel element
by decay heat**

Summary

In cases of emergency such as the leakage of heavy water coolant and the failure of electric power supply, the fuel elements may be left in the reactor vessel without any coolant, in the air at room temperature, in the cask or under some other conditions. The decay heat will cause the temperature of the fuel elements to rise. We calculated the temperature rise in the fuel elements in such cases as mentioned and checked the reliability of the calculated results, by measuring the heat transfer rate of the JRR-3 mock-up fuel element cooled by either natural or forced convections in steady state.

March 20, 1961

KONOMO SANOKAWA

MITSUO OUCHI

Mechanical Engineering Laboratory
Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. ま え が き | 1 |
| 2. 理 論 計 算 | 1 |
| 2. 1 記号の説明 | 2 |
| 2. 2 熱伝達の機構とその方程式 | 3 |
| 2. 3 自然対流による冷却 | 4 |
| 2. 3. 1 発熱量が一定で定常状態における解 | 7 |
| 2. 3. 2 発熱量が減少していく場合の非定常解 | 8 |
| 2. 3. 3 キャスク内で放置した場合の燃料棒の温度上昇 | 12 |
| 2. 4 強制対流による冷却 | 14 |
| 2. 4. 1 発熱量が一定で定常状態における解 | 15 |
| 3. 実 験 | 16 |
| 3. 1 実験装置 | 16 |
| 3. 2 測 定 | 19 |
| 3. 3 自然対流による冷却の実験 | 20 |
| 3. 4 強制対流による冷却の実験 | 22 |
| 4. 検討および結論 | 24 |
| 5. あ と が き | 26 |
| 付 録 | 27 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Theoretical calculation | 1 |
| 2. 1 Nomenclature | 2 |
| 2. 2 Mechanism of heat transfer and its equations | 3 |
| 2. 3 Cooling by natural convection | 4 |
| 2. 3. 1 Solutions in steady state when the heat flux of fuel rod is constant | 7 |
| 2. 3. 2 Solutions in unsteady state when the heat flux of fuel rod decreases | 8 |
| 2. 3. 3 Temperature rise of fuel rod in the cask | 12 |
| 2. 4 Cooling by forced convection | 14 |
| 2. 4. 1 Solutions in steady state when the heat flux of fuel rod is constant | 15 |
| 3. Experiment | 16 |
| 3. 1 Experimental equipment | 16 |
| 3. 2 Measurement | 19 |
| 3. 3 Experiment of cooling by natural convection | 20 |
| 3. 4 Experiment of cooling by forced convection | 22 |
| 4. Discussions and conclusions | 24 |
| 5. Acknowledgment | 26 |
| Appendix | 27 |

1. まえがき

JRR-3 燃料要素を運転後空気中に取り出した場合、あるいはそれをキャスクの中に入れたが、強制通風装置の故障あるいは停電などによりそのまま放置せざるをえない場合、また事故などにより炉内の重水が漏失した場合など、発熱を続けている燃料棒はそのまま放置しておいても自然対流によって冷却がおこなわれ、温度が上昇することはないか、あるいはそれだけでは温度が上昇するので何らかの方法で強制通風をおこなう必要があるだろうかという問題は、設計の過程における事故対策の問題としてはもちろんのこと、今後の運転に際しても知っておかなければならない問題の一つである。

それには JRR-3 燃料要素のアルミ被覆が溶融しない限界に関する知識が必要とされる。この問題について理論計算ならびに実物大実験により確かめたが、その結果計算と実験はかなり近い値を示し結果的には垂直二重円管に関する自然対流と強制対流の熱伝達の実験式が良い精度で使えるということがわかったに過ぎないが、計算および実験に関する資料の散逸を防ぐためにまとめたものである。

2. 理論計算

JRR-3 燃料要素は外径 25 mm の天然ウラン棒に 2 mm の厚さの 2S アルミを被覆した有効長 2650 mm の燃料棒を、内径 38 mm の 2S アルミの外筒冷却管内に挿入した構造で、この 4.5 mm の円環状間隙内を重水が流れ、冷却される。被覆表面には 120° 間隔に 3 枚のフィンが縦方向について外筒冷却管と燃料棒の間の支えになっている。さらに燃料棒は約 900 mm の燃料棒 3 本がアルミピンで接続された構造になっているが、この計算では単にフィンなしの二重管構造と見なして取り扱った。計算におけるウラン、アルミの物性値は一定にとったが、空気の物性値は計算練習のつもりで試みにその温度による変化をすべて考慮に入れた。しかし熱計算の立場からは、それが有利な意味を持つわけではないことはいままでもない。計算をおこなった当時は現在のような高性能高速度

の電子計算機が使えない頃で、これだけ多数の物性値の温度による変化を計算の過程に入れることは困難であったので、かなりの時間を費したが電動計算機のみで結果を得た。

この計算をおこなうに当って設けた一番大きな仮定は燃料棒の発熱を一樣としたことで、実際の燃料棒の発熱は正弦分布をするからその考慮が払われていないということは、実際問題に対する解答としてはその意味を無にするかに思える。しかしここでは発熱量がいろいろに変化した場合の計算もおこなってあるので、その結果より発熱量が一樣でない場合への推定もある程度可能であり、ここに得られた計算の結果も十分利用価値があると考えられる。

2. 1 記号の説明

Q : 発熱量 kW

T_0 : 周囲空気温度 °C

T_1 : 燃料棒平均温度 °C

T_2 : 冷却管平均温度 °C

T_f : 円環状流路内空気の平均温度 °C

d_1 : 燃料棒外径 2.9×10^{-2} m

d_2 : 冷却管内径 3.8×10^{-2} m

d_e : 代表直径 $d_2 - d_1 = 9 \times 10^{-3}$ m

l : 燃料棒長さ 2.65 m

A_1 : 燃料棒表面積 $\pi d_1 l = 2.413_1 \times 10^{-1}$ m²

A_2 : 冷却管内面表面積 $3.162_0 \times 10^{-1}$ m²

A_3 : 冷却管外面表面積 $3.411_6 \times 10^{-1}$ m²

V_1 : 燃料棒体積 $\frac{\pi}{4} d_1^2 l = 1.749 \times 10^{-3}$ m³

V_2 : 冷却管体積 4.93×10^{-4} m³

S : 円環状流路断面積 $\frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) = 4.733_6 \times 10^{-4}$ m²

U_f : 円環状流路内空気の平均速度 m/sec

W : 送風流量 m³/sec

G : 単位時間、単位断面積当りの重量流量 $\rho_f U_f$ kg/m²sec

P : 圧力 kg/m²

t : 時間 min

α_1 : 燃料棒表面と円環状流路内空気との間の熱伝達率 kcal/m sec °C

α_2 : 冷却管内面と円環状流路内空気との間の熱伝達率 kcal/m sec °C

α_3 : 冷却管外面と周囲空気との間の熱伝達率 kcal/m sec °C

C_A : アルミの比熱 2.5×10^{-1} kcal/°C kg

C_U : ウランの比熱 3.5×10^{-2} kcal/°C kg

C_f : 燃料棒の平均比熱 kcal/°C kg

C_2 : 冷却管 (アルミ) の比熱 2.5×10^{-1} kcal/°C kg

C_t : 空気の比熱 kcal/°C kg

ρ_A : アルミの比重量 2.7×10^3 kg/m³

ρ_U : ウランの比重量 1.87×10^4 kg/m³

ρ_1 : 燃料棒の平均比重量 kg/m³

ρ_2 : 冷却管 (アルミ) の比重量 2.7×10^3 kg/m³

ρ_t : 空気の比重量 kg/m³

μ : 空気の粘性係数 kg sec/m²

ν : 空気の動粘性係数 m²/sec

a : 空気の温度伝導率 m²/sec

λ : 空気の熱伝導率 kcal/m sec °C

β : 空気の体膨張係数

f : 摩擦係数

σ : ステファン・ボルツマンの定数 4.88 kcal/m² h °C

ϵ : 輻射率

\bar{F}_{12} : 形態係数

\mathcal{F}_{12} : 修正形態係数

R_s : レイノルズ数

P_r : プラントル数

N_s : ヌセルト数

G_r : グラスホフ数

g : 重力加速度

2.2 熱伝達の機構とその方程式

炉内から取り出された燃料棒の発熱はまだ続いているが、その発生熱量 Q は燃料棒表面より円環状流路内空気への対流熱伝達と外筒冷却管への輻射で失われ、残った熱は燃料棒自体の温度上昇に使われて燃料棒内に蓄積されることになる。燃料棒表面より対流熱伝達によって円環状流路内空気へ伝わった熱は外筒冷却管への対流熱伝達と上昇空気によって持ち去られ、残りは空気自体の温度上昇に使われる。外筒冷却管が円環状流路内空気よりの対流熱伝達と燃料棒表面よりの輻射によって受けた熱は外部空気への対流熱伝達によって失われ、残りの熱は外筒冷却管の温度上昇に使われる。この熱伝達の機構を方程式で表わせば次のようになる。

$$\frac{1}{60} C_1 \rho_1 V_1 \frac{dT_1}{dt} = 0.238_9 Q - \alpha_1 A_1 (T_1 - T_t) - \sigma \mathcal{F}_{12} A_1 \left\{ \left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

$$\frac{1}{60} C_t \rho_t S L \frac{dT_t}{dt} = \alpha_1 A_1 (T_1 - T_t) - \alpha_2 A_2 (T_t - T_2) - S U_t C_t \rho_t (T_t - T_0) \quad (2)$$

慣用の熱伝達率の単位は kcal/mh °C であるが、ここでは kcal/msec °C の単位としたのは数値計算の便のためである。

$$\frac{1}{60} C_2 \rho_2 V_2 \frac{dT_2}{dt} = \sigma F_{12} A_1 \left\{ \left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right\} + \alpha_2 A_2 (T_f - T_2) - \alpha_3 A_3 (T_2 - T_0) \quad (3)$$

$$C_1 \rho_1 V_1 = C_U \rho_U V_U + C_A \rho_A V_A = 654.5 \times 0.0013 + 675.0 \times 0.000449 = 1.153_9 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$$

$$Sl = 4.733_6 \times 10^{-4} \times 2.65 = 1.254_4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_2 \rho_2 V_2 = C_A \rho_A V_2 = 675 \times \frac{\pi}{4} (0.041^2 - 0.038^2) \times 2.65 = 3.327_9 \times 10^{-1} \text{ kcal/}^\circ\text{C}$$

$$A_1 = \pi \times 0.029 \times 2.65 = 0.2413_1 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \pi \times 0.038 \times 2.65 = 0.3162_0 \text{ m}^2$$

$$A_3 = \pi \times 0.041 \times 2.65 = 0.3411_6 \text{ m}^2$$

2. 3 自然対流による冷却

まず燃料棒の冷却が周囲空気の自然対流によっておこなわれる場合を考えよう。この計算にあたり次の仮定を設ける。

- 1) 燃料棒内の発熱はいたるところ一様である。
 - 2) 燃料棒、外筒冷却管と燃料棒の間の空気、外筒冷却管の温度は軸方向に変化しているが、ここでは平均温度をとり軸方向の温度変化はないものとする。
 - 3) ウラン、アルミの物性値の温度による変化は無視する。
- 2) の仮定は実際とはかけ離れた仮定のように思われるが後の計算で示されるように自然対流による円環状流路内の空気の上昇速度は非常に小さく、したがって軸方向の温度変化はかなり少ないので2) の仮定は想像に反して実際に近い仮定となる。このことは後の実験でも明らかにされよう。

まず円環状流路内の空気の上昇速度を求める。

運動方程式は

$$\rho_f \frac{dU_f}{dt} = \rho_f \frac{T_f - T_0}{273 + T_0} g - \frac{dp}{dx} g \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dx} = f \frac{2 \rho_f U_f^2}{g(d_2 - d_1)} \quad (5)$$

$$f = \frac{16}{Re} \cdot \frac{1}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (6)$$

$$\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + 1}{\left(\frac{d_2}{d_1} - 1\right)^2} - \frac{\frac{d_2}{d_1} + 1}{\left(\frac{d_2}{d_1} - 1\right) \log \frac{d_2}{d_1}} \quad (7)$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{0.038}{0.029} = 1.31 \text{ であるから } \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 0.65$$

(4) 式は

$$\frac{dU_f}{dt} = \frac{T_f - T_0}{273 + T_0} g - \frac{32 \nu}{(d_2 - d_1)^2 \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} U_f \quad (8)$$

$\frac{dU_f}{dt}=0$ において, $T_0=20$ とすれば

$$U_f = \frac{(T_f - T_0)g(d_2 - d_1)^2 \phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right)}{32\nu(273 + T_0)} = 5.495 \times 10^{-8} \frac{T_f - T_0}{\nu} \quad (\text{m/sec}) \quad (9)$$

流量は

$$W = SU_f = 2.601_1 \times 10^{-13} \frac{T_f - T_0}{\nu} \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \quad (10)$$

この関係を示すと TABLE 1 のようになる。

TABLE 1 Relation between T_f and U_f in steady state natural convection

| T_f | $T_f - T_0$ | ν | U_f | W | T_f | $T_f - T_0$ | ν | U_f | W |
|-------|-------------|-------|------------------------|-------------------------|-------|-------------|-------|-------------------------|--------------------------|
| 50 | 30 | 0.185 | $8.9_1 \times 10^{-2}$ | $4.21_6 \times 10^{-5}$ | 400 | 380 | 0.646 | $32.3_2 \times 10^{-2}$ | $15.29_6 \times 10^{-8}$ |
| 100 | 80 | 0.236 | 18.6 ₃ | 8.81 ₃ | 450 | 430 | 0.726 | 32.5 ₃ | 15.40 ₃ |
| 150 | 130 | 0.292 | 24.4 ₆ | 11.57 ₆ | 500 | 480 | 0.810 | 32.5 ₆ | 15.41 ₂ |
| 200 | 180 | 0.355 | 27.8 ₆ | 13.18 ₆ | 550 | 530 | 0.890 | 32.7 ₂ | 15.48 ₆ |
| 250 | 230 | 0.422 | 29.9 ₆ | 14.17 ₇ | 600 | 580 | 0.989 | 32.2 ₃ | 15.25 ₃ |
| 300 | 280 | 0.493 | 31.2 ₁ | 14.77 ₃ | 650 | 630 | 1.37 | 31.2 ₃ | 14.81 ₁ |
| 350 | 330 | 0.566 | 32.0 ₄ | 15.16 ₆ | 700 | 680 | 1.81 | 29.7 ₃ | 14.08 ₂ |

燃料棒表面と円環状流路内の空気との間の熱伝達率は

$$Nu = 1.02 Re^{0.45} Pr^{0.5} \left(\frac{\mu T_f}{\mu T_1} \right)^{0.14} \left(\frac{d_e}{l} \right)^{0.4} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.8} G_r^{0.05} \quad (11)*$$

より

$$\frac{\alpha_1 d_e}{\lambda} = 1.02 \left(\frac{U_f d_e}{\nu} \right)^{0.45} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu T_f}{\mu T_1} \right)^{0.14} \left(\frac{d_e}{l} \right)^{0.4} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.8} \left(\frac{\beta g d_e^3 (T_1 - T_f)}{\nu^2} \right)^{0.05}$$

$$\therefore \alpha_1 = 3.46_1 \times 10^{-4} \left(\frac{\mu T_f}{\mu T_1} \right)^{0.14} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{0.05} (T_f - T_0)^{0.45} \quad (12)$$

外筒冷却管内面と円環状流路内空気との間の熱伝達率は

$$\frac{\alpha_2 d_e}{\lambda} = 1.0 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.8} \left(\frac{U_f \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2)}{\lambda l} \right)^{0.45} \left(\frac{d_e^3 g \beta (T_2 - T_f)}{\nu^2} \right)^{0.05} \quad (13)**$$

より

$$\therefore \alpha_2 = 5.76_1 \times 10^{-4} (C_f \rho_f)^{0.45} \left(\frac{\lambda}{\nu} \right)^{0.55} (T_f - T_0)^{0.45} (T_f - T_2)^{0.05} \quad (14)$$

外筒冷却管外面と周囲空気との間の熱伝達率は

$$Nu = 0.652 \left(\frac{Pr^2}{1.1 + Pr} \right)^{0.25} G_r^{0.25} \quad (15)***$$

ただし $Pr > 0.5$, $10^8 > (G_r \times Pr) > 10^4$

より

$$\therefore \alpha_3 = 2.18_5 \times 10^{-1} \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a\nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{0.25} \quad (16)$$

修正輻射係数は

* C. Y. CHEN, G. A. HAWKINS & H. L. SOLBERG: *Transactions of the ASME* 68, 99 (1946)

** C. Y. CHEN, G. A. HAWKINS & H. L. SOLBERG: *Transactions of the ASME*, 68, 99 (1946)

*** S. SUGAWARA & K. MICHIOYOSHI: The 3rd Japan National Congress for Applied Mechanics..

$$\mathcal{F}_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{F}_{12}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (17)$$

$$\bar{F}_{12} = 1, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.25 \quad \text{として} \quad \mathcal{F}_{12} = 1.590 \times 10^{-1}$$

$$\sigma = \frac{4.88}{3600} = 1.356 \times 10^{-3} \quad (\text{kcal/m}^2 \text{sec}^\circ\text{C})$$

$$\therefore \sigma \mathcal{F}_{12} = 1.356 \times 10^{-3} \times 1.590 \times 10^{-1} = 2.156 \times 10^{-4} \quad (18)$$

これらの $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \sigma \mathcal{F}_{12}$ の値を (1) (2) (3) 式に代入して

$$\begin{aligned} \frac{1}{60} 1.154 \frac{dT_1}{dt} &= 2.389 \times 10^{-4} Q - 8.353 \times 10^{-5} \left(\frac{\mu_{T_1}}{\mu_{T_1}}\right)^{0.14} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad - 5.201 \times 10^{-5} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{60} 1.254 \times 10^{-3} \frac{dT_f}{dt} &= 8.353 \times 10^{-5} \left(\frac{\mu_{T_f}}{\mu_{T_1}}\right)^{0.14} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad - 1.822 \times 10^{-5} (C_f \rho_f)^{0.45} \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^{0.55} (T_f - T_2)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad - 2.601 \times 10^{-11} C_f \rho_f \frac{1}{\nu} (T_f - T_0)^2 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{60} 3.328 \times 10^{-1} \frac{dT_2}{dt} &= 5.201 \times 10^{-5} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \\ &\quad + 1.822 \times 10^{-5} (C_f \rho_f)^{0.45} \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^{0.55} (T_f - T_2)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad - 7.456 \times 10^{-2} \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a\nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{1.25} \end{aligned} \quad (21)$$

これらの方程式で $\left(\frac{\mu_{T_f}}{\mu_{T_1}}\right)^{0.14}$ の値はほぼ 1 に近く、さらに円環状流路内の空気の応答は非常に速いから、(19) (20) (21) 式は近似的に次のように表わされる。

すなわち

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= 1.242 \times 10 Q - 4.343 \times 10^{-3} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad - 2.704 \times 10^{-3} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} 8.353 \times 10^{-5} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &= 1.822 \times 10^{-4} (C_f \rho_f)^{0.45} \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^{0.55} (T_2 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad + 2.601 \times 10^{-11} C_f \rho_f \frac{1}{\nu} (T_f - T_0)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} &= 2.488 \times 10^{-2} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \\ &\quad + 8.704 \times 10^{-2} (C_f \rho_f)^{0.45} \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^{0.55} (T_f - T_2)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &\quad - 3.562 \times 10 \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a\nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{1.25} \end{aligned} \quad (24)$$

ここで円環状流路内の上昇空気が外部に持ち去る熱量 q (kW) を計算してみると

$$q = 2.60 \times 10^{-11} C_f \rho_f \frac{1}{\nu} (T_f - T_0)^2 \times \frac{3600}{860} = 1.086 \times 10^{-7} C_f \rho_f \frac{1}{\nu} (T_f - T_0)^2 \quad (25)$$

TABLE 2 Relation between T_f and q , the amount of heat taken away by the moving air in the annular space (by natural convection)

| T_f | $C_f \rho_f$ | $\frac{1}{\nu}$ | q | T_f | $C_f \rho_f$ | $\frac{1}{\nu}$ | q |
|-------|-------------------|-------------------|---------|-------|-------------------|-------------------|--------|
| 50 | 2.56 ₆ | 5.47 ₆ | 0.00137 | 300 | 1.49 ₀ | 2.03 ₂ | 0.0258 |
| 100 | 2.23 ₆ | 4.23 ₇ | 0.00660 | 350 | 1.38 ₂ | 1.77 ₀ | 0.0290 |
| 150 | 1.98 ₅ | 3.43 ₅ | 0.0125 | 400 | 1.28 ₅ | 1.55 ₀ | 0.0313 |
| 200 | 1.78 ₇ | 2.81 ₇ | 0.0177 | 450 | 1.21 ₁ | 1.38 ₀ | 0.0336 |
| 250 | 1.62 ₆ | 2.35 ₅ | 0.0221 | 500 | 1.13 ₅ | 1.23 ₅ | 0.0352 |

このように円環状流路内の空気が自然対流のために外部に持去る熱量は非常に少なく、このことは 2 の項でのべた仮定 2) がかなりの程度で成立することを意味する。したがって近似的には (23) 式 右辺第二項を省略して

$$\begin{aligned} & 8.35_3 \times 10^{-5} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ & = 1.82_2 \times 10^{-4} (C_f \rho_f)^{0.45} \left(\frac{\lambda}{\nu} \right)^{0.55} (T_2 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \end{aligned}$$

この式を書直すと

$$T_1 - T_2 = \left\{ 0.459 - \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5} (C_f \rho_f)^{0.45}} \right\}^{\frac{1}{1.05}} (T_1 - T_f) \quad (26)$$

ここで

$$F(t_f) \equiv \left\{ 0.459 - \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5} (C_f \rho_f)^{0.45}} \right\}^{\frac{1}{1.05}} \quad (27)$$

とおけば

$$\therefore T_f = \frac{F(t_f) T_1 + T_2}{F(t_f) + 1} \quad \text{あるいは} \quad T_1 = \frac{\{F(t_f) + 1\} T_f - T_2}{F(t_f)} \quad (28)$$

すなわち $F(t_f)$ は t_f の関数であるから (28) 式と (22) (24) 式の連立微分方程式を解けばよいことになる。

2. 3. 1 発熱量が一定で定常状態における解

運転停止後の燃料の発熱量は運転時間と運転停止後の時間に関係し、停止後、発熱量は漸次減少していく。この場合の解を求めるに先立って、まず発熱が一定に続いている時発熱と冷却が丁度平衡に達し定常になった場合の解を求めることにする。

(22) (24) 式でそれぞれ $\frac{dT_1}{dt} = 0$, $\frac{dT_2}{dt} = 0$ とおいて得られる。

$$\begin{aligned} Q &= 3.49_6 \times 10^{-4} \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} (T_1 - T_f)^{1.05} (T_f - T_0)^{0.45} \\ &+ 2.17_7 \times 10^{-4} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \quad (29) \end{aligned}$$

$$Q = 3.12_1 \times 10^{-1} \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a \nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{1.25} \quad (30)$$

と (28) 式より T_1 , T_2 , T_f を求めると TABLE 3 のようになり、この関係は Fig. 1 に示してある。これより燃料棒が一定一様の発熱をおこなっている場合に、自然対流による冷却が理論上可能な限界

は約 2 kW ということになる。言い換えれば約 2 kW までの発熱ならば放置しておいても被覆が溶融するようなことはないわけである。

TABLE 3 Relation between Q and T_1 , T_2 , T_f in steady state heat transfer by natural convection.

| Q | T_1 | T_f | T_2 | 燃料棒表面より輻射で伝達される熱量の対流で伝達される熱量に対する比 |
|-----|-------|-------|-------|-----------------------------------|
| 0.1 | 108 | 49 | 33 | 0.42 _a |
| 0.2 | 165 | 70 | 45 | 0.46 _a |
| 0.3 | 218 | 89 | 56 | 0.50 _a |
| 0.4 | 259 | 104 | 65 | 0.60 _a |
| 0.5 | 295 | 118 | 74 | 0.69 _a |
| 0.6 | 338 | 133 | 83 | 0.79 _a |
| 0.7 | 364 | 144 | 91 | 0.86 _a |
| 0.8 | 394 | 155 | 98 | 0.90 _a |
| 0.9 | 421 | 166 | 106 | 1.07 _a |
| 1.0 | 458 | 178 | 113 | 1.18 _a |
| 1.5 | 552 | 222 | 149 | 1.70 _a |
| 2.0 | 638 | 262 | 182 | 2.31 _a |

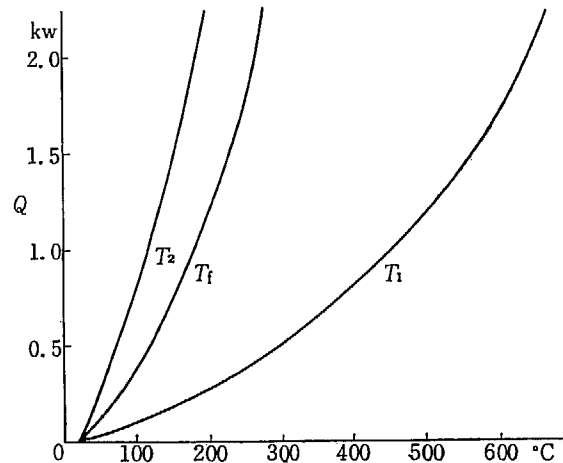


Fig. 1 Relation between Q and T_1 , T_2 , T_f in steady state heat transfer by natural convection.

2. 3. 2 発熱量が減少していく場合の非定常解

使用済み燃料一本当りの発熱量は運転時間を t_0 (分), 運転停止後の時間を t_s (分), 燃料中の最高熱中性子束を 1.4×10^{13} (n/cm²·sec) とすると

$$Q_0 = 2.518 \times [t_s^{-0.2} - (t_0 + t_s)^{-0.2}] \text{ kW} \quad (31)$$

と表わされ, この関係は Fig. 2* に示す。

無限大時間運転ならば $t_0 = \infty$ とおいて

$$Q_0 = 2.518 \times t_s^{-0.2} \text{ kW}$$

すなわち 1 分後には約 2.5 kW の発熱がおこなわれている。

燃料を炉内より外に取り出すまでには運転停止時間より 1 分以上は経過するであろうし, 炉内重水

* この資料は平山省一氏より拝借したものである。

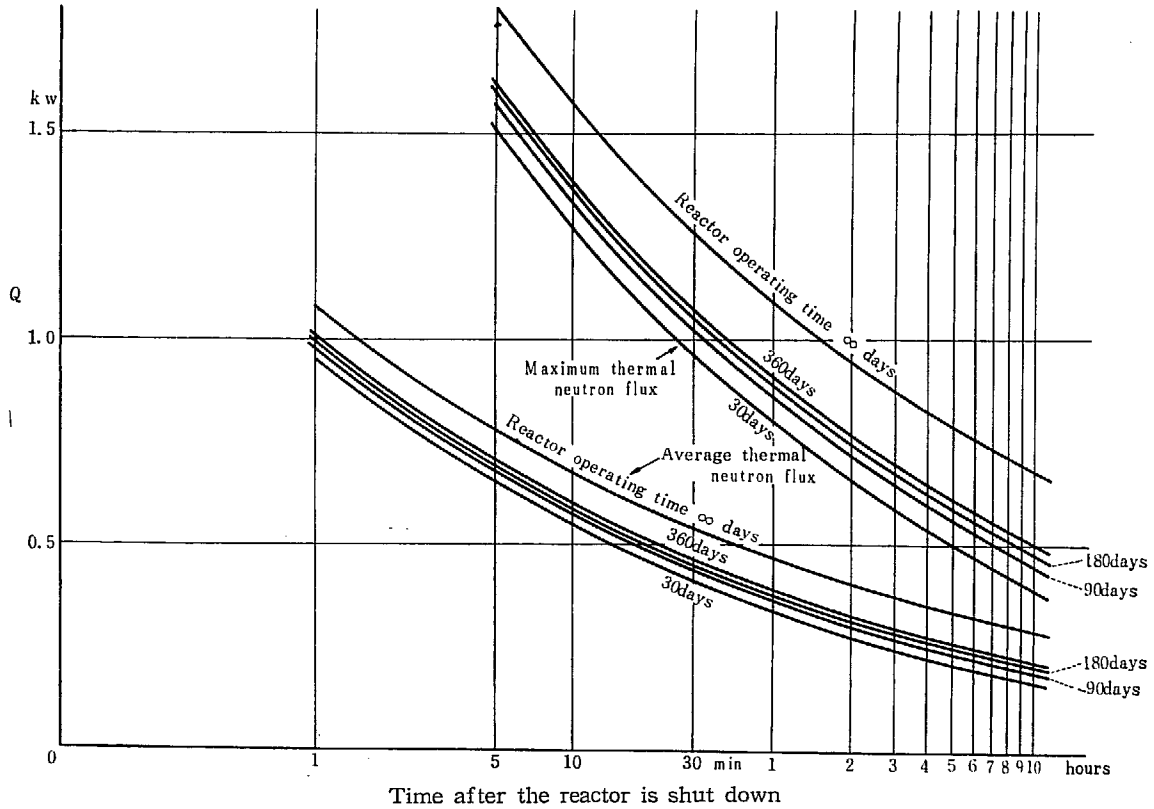


Fig. 2 Decay heat curve of JRR-3 fuel rod

| t | T_1 | T_f | T_2 |
|-----|-------|-------|-------|
| 0 | 150 | 64 | 42 |
| 1 | 185 | 77 | 49 |
| 2 | 215 | 89 | 56 |
| 3 | 241 | 98 | 62 |
| 4 | 265 | 106 | 67 |
| 5 | 287 | 115 | 72 |
| 6 | 307 | 122 | 76 |
| 7 | 326 | 130 | 81 |
| 8 | 343 | 136 | 85 |
| 9 | 359 | 142 | 89 |
| 10 | 374 | 148 | 93 |
| 15 | 444 | 176 | 113 |
| 20 | 494 | 196 | 129 |
| 25 | 519 | 207 | 138 |
| 30 | 534 | 214 | 142 |
| 35 | 539 | 216 | 144 |
| 40 | 541 | 217 | 145 |
| 45 | 540 | 216 | 145 |
| 50 | 537 | 215 | 144 |
| 55 | 533 | 213 | 142 |
| 60 | 529 | 212 | 141 |
| 70 | 521 | 208 | 138 |
| 80 | 513 | 204 | 135 |
| 90 | 506 | 202 | 133 |
| 100 | 499 | 199 | 131 |
| 110 | 495 | 197 | 130 |
| 120 | 490 | 195 | 128 |

TABLE 4

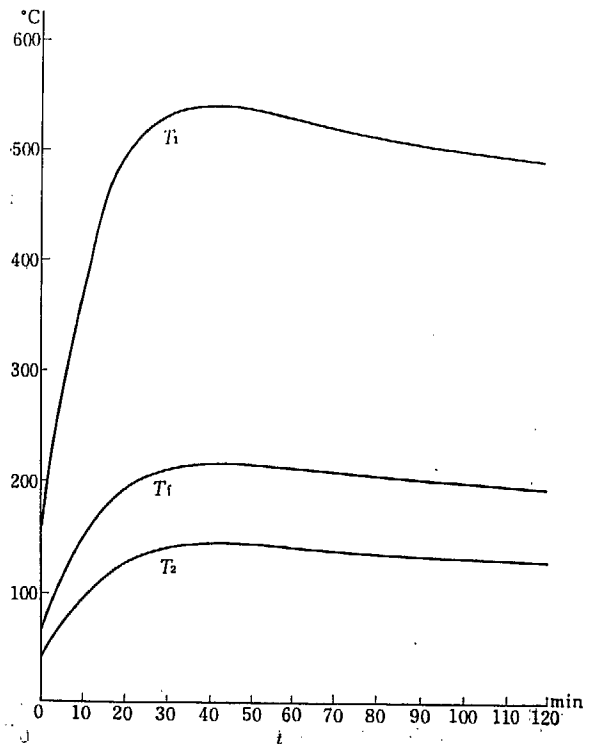


Fig. 3

Temperature rise of T_1 , T_2 and T_f when the fuel element is exposed to the air at room temperature (Initial heat flux 3.0 kW)

| t | T_1 | T_f | T_2 |
|-----|-------|-------|-------|
| 0 | 150 | 64 | 42 |
| 1 | 179 | 73 | 47 |
| 2 | 203 | 84 | 53 |
| 3 | 225 | 92 | 58 |
| 4 | 245 | 99 | 62 |
| 5 | 263 | 106 | 66 |
| 6 | 280 | 112 | 70 |
| 7 | 295 | 118 | 73 |
| 8 | 309 | 123 | 77 |
| 9 | 322 | 128 | 80 |
| 10 | 335 | 133 | 83 |
| 15 | 394 | 156 | 99 |
| 20 | 433 | 172 | 110 |
| 25 | 458 | 182 | 118 |
| 30 | 474 | 188 | 123 |
| 35 | 483 | 192 | 126 |
| 40 | 487 | 194 | 127 |
| 45 | 488 | 194 | 127 |
| 50 | 487 | 194 | 127 |
| 55 | 484 | 192 | 126 |
| 60 | 481 | 191 | 125 |
| 70 | 475 | 189 | 123 |
| 80 | 467 | 185 | 120 |
| 90 | 461 | 183 | 119 |
| 100 | 455 | 180 | 117 |
| 110 | 450 | 178 | 115 |
| 120 | 445 | 178 | 114 |

TABLE 5

Temperature rise of T_1 , T_2 and T_f when the fuel element is exposed to the air at room temperature (Initial heat flux 2.5 kW)

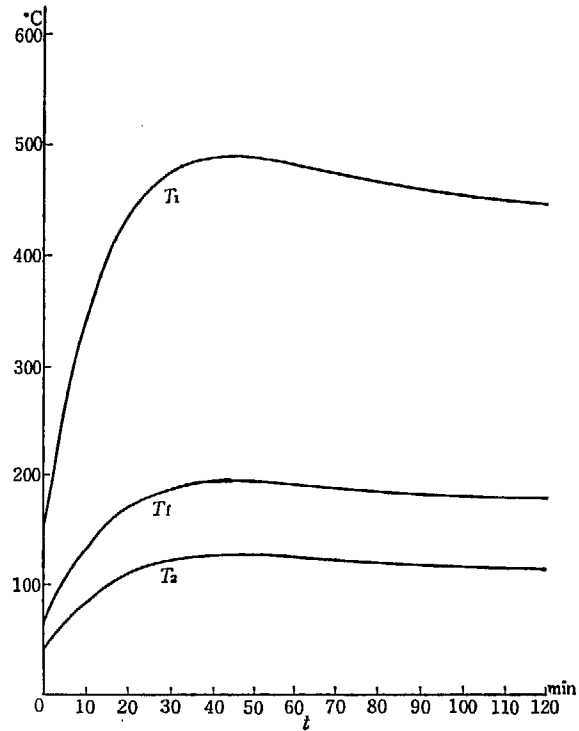


Fig. 4

| t | T_1 | T_f | T_2 |
|-----|-------|-------|-------|
| 0 | 150 | 64 | 42 |
| 1 | 173 | 72 | 47 |
| 2 | 192 | 80 | 51 |
| 3 | 209 | 86 | 55 |
| 4 | 224 | 92 | 58 |
| 5 | 238 | 97 | 61 |
| 6 | 251 | 102 | 64 |
| 7 | 263 | 106 | 66 |
| 8 | 274 | 110 | 69 |
| 9 | 285 | 114 | 71 |
| 10 | 335 | 133 | 83 |
| 15 | 374 | 148 | 93 |
| 20 | 400 | 158 | 100 |
| 25 | 417 | 165 | 105 |
| 30 | 427 | 169 | 108 |
| 35 | 432 | 171 | 110 |
| 40 | 434 | 171 | 110 |
| 45 | 434 | 171 | 110 |
| 50 | 433 | 171 | 110 |
| 55 | 430 | 170 | 109 |
| 60 | 427 | 169 | 108 |
| 70 | 421 | 167 | 107 |
| 80 | 415 | 164 | 105 |
| 90 | 409 | 160 | 102 |
| 100 | 403 | 158 | 99 |
| 110 | 398 | 157 | 98 |
| 120 | 393 | 154 | 97 |

TABLE 6

Temperature rise of T_1 , T_2 and T_f when the fuel element is exposed to the air at room temperature (Initial heat flux 2.0 kW)

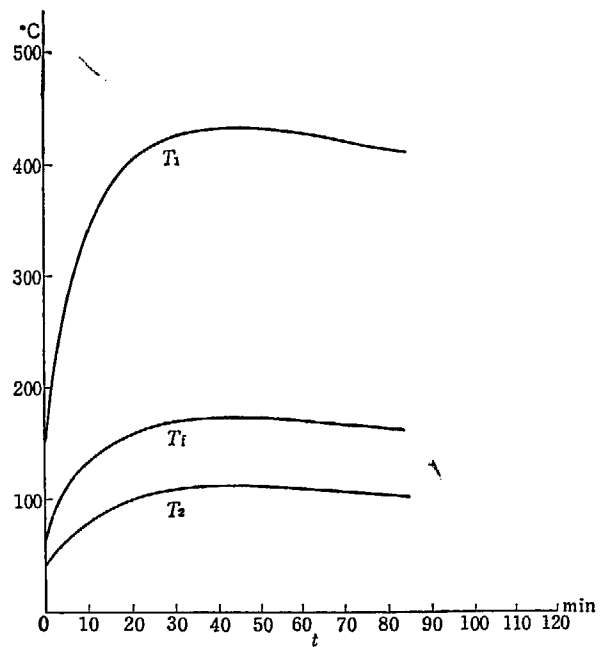


Fig. 5

| t | T_1 | T_f | T_2 |
|-----|-------|-------|-------|
| 0 | 150 | 64 | 42 |
| 1 | 167 | 70 | 46 |
| 2 | 181 | 75 | 49 |
| 3 | 193 | 80 | 51 |
| 4 | 204 | 84 | 53 |
| 5 | 214 | 88 | 56 |
| 6 | 223 | 91 | 58 |
| 7 | 232 | 95 | 60 |
| 8 | 240 | 98 | 61 |
| 9 | 248 | 100 | 63 |
| 10 | 255 | 103 | 65 |
| 15 | 289 | 115 | 72 |
| 20 | 313 | 124 | 78 |
| 25 | 330 | 131 | 82 |
| 30 | 342 | 135 | 85 |
| 35 | 350 | 138 | 87 |
| 40 | 355 | 141 | 88 |
| 45 | 358 | 142 | 89 |
| 50 | 359 | 142 | 89 |
| 55 | 359 | 142 | 89 |
| 60 | 359 | 142 | 89 |
| 70 | 356 | 141 | 88 |
| 80 | 352 | 140 | 87 |
| 90 | 348 | 137 | 86 |
| 100 | 344 | 136 | 85 |
| 110 | 340 | 135 | 84 |
| 120 | 336 | 134 | 83 |

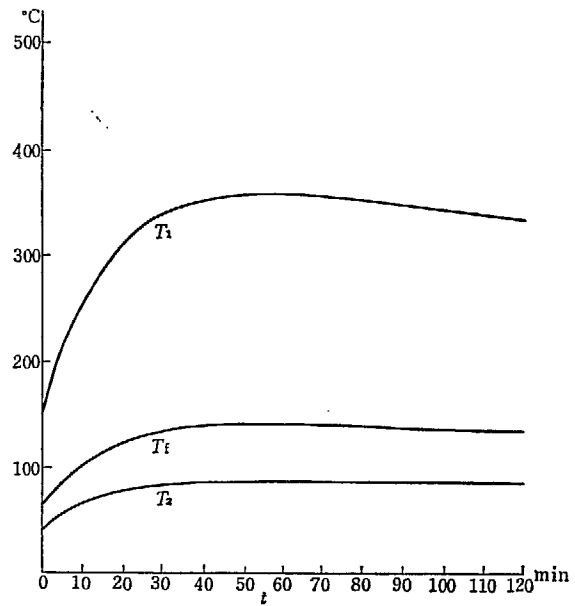


TABLE 7

Fig. 6

Temperature rise of T_1 , T_2 and T_f when the fuel element is exposed to the air at room temperature (Initial heat flux 1.5 kW)

| t | T_1 | T_f | T_2 |
|-----|-------|-------|-------|
| 0 | 150 | 64 | 42 |
| 1 | 160 | 68 | 44 |
| 2 | 168 | 71 | 46 |
| 3 | 175 | 73 | 47 |
| 4 | 182 | 75 | 49 |
| 5 | 188 | 78 | 50 |
| 6 | 194 | 80 | 51 |
| 7 | 199 | 82 | 52 |
| 8 | 204 | 84 | 53 |
| 9 | 209 | 86 | 55 |
| 10 | 213 | 87 | 55 |
| 20 | 254 | 103 | 65 |
| 30 | 273 | 109 | 68 |
| 40 | 282 | 113 | 71 |
| 50 | 284 | 113 | 71 |
| 60 | 283 | 113 | 71 |
| 70 | 280 | 112 | 70 |
| 80 | 277 | 111 | 69 |
| 90 | 274 | 110 | 69 |
| 100 | 270 | 109 | 68 |
| 110 | 266 | 107 | 67 |
| 120 | 262 | 106 | 66 |

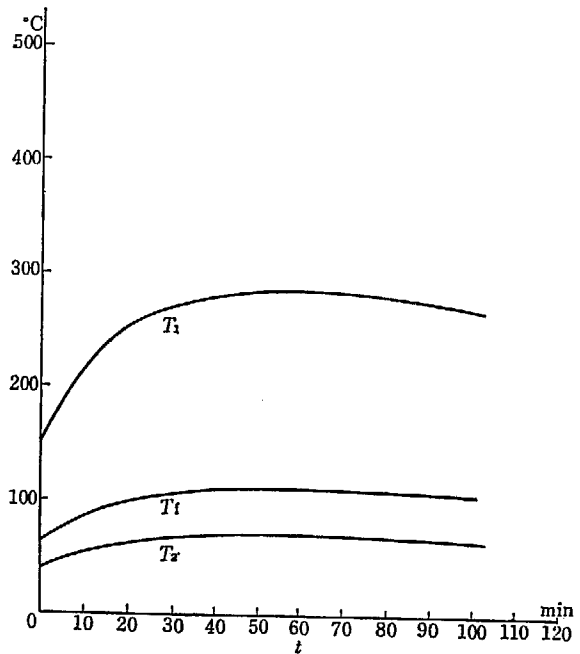


TABLE 8

Fig. 7

Temperature rise of T_1 , T_2 and T_f when the fuel element is exposed to the air at room temperature (Initial heat flux 1.0 kW)

が漏失した場合でもそれまでの重水による冷却効果は大きいと考えられるから、この問題における初期発熱量は 3.0 kW, 2.5 kW, 2.0 kW, 1.5 kW, 1.0 kW の場合を考察しておけば十分であると考

えた。したがって発熱量は計算の便のために、 $Q=3.0(t+1)^{-0.2}$, $2.5(t+1)^{-0.2}$, $2.0(t+1)^{-0.2}$, $1.5(t+1)^{-0.2}$, $1.0(t+1)^{-0.2}$ とおいてそれぞれの場合について計算をおこなった。なお運転時の燃料棒表面最高温度は約 80°C であるから、この場合の初期条件である最初の燃料棒表面温度は重水より取り出したためあるいは重水の漏失のために急に悪くなった冷却効果のための温度上昇を考えて少し高目の 150°C とした。この計算結果は TABLE 4~TABLE 8 ならびに Fig. 3~Fig. 7 に示した。これによると、最初の発熱量が 3 kW あった場合にも放置したままで約 40 分後に最高温度約 540°C に達した後、温度は下降に向かい危険なことはないという結論になる。

2. 3. 3 キャスク内で放置した場合の燃料棒の温度上昇

次に燃料要素を炉内から取り出してキャスクの中に入れたが、キャスクに付属されている強制通風装置が作動しないなどのためにそのまま放置せざるをえない場合の燃料棒の温度上昇について考えてみることにする。キャスクは内径 $110\text{ mm}\phi$ 外径 $126\text{ mm}\phi$ のステンレスの筒の外筒が 25 mm の厚さの鉛で囲まれている。ここでこのキャスクの中に燃料要素を入れた場合の燃料棒の温度上昇を求めるにはステンレスおよび鉛の筒の両方の熱容量を考慮すべきであるがステンレスと鉛の間の接触熱抵抗も小さくないと考えられるから安全側の計算としてはステンレス筒の熱容量だけを考えてみる。したがって実際はこの結果より下廻るであろう。このステンレス筒の温度、内面の表面積、体積、比重、比熱をそれぞれ T_s , A_s , V_s , ρ_s , C_s とし外筒冷却管より伝達される熱量 Q' kW はどこにも失われることなくこのステンレス筒に蓄積されるものとする、近似的に次式がなりたつ。

$$A_s=9.153_1 \times 10^{-1} \text{ m}^2, V_s=7.855 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$C_s \rho_s \doteq 8000 \times 0.11 = 880 \text{ kcal/m}^3\text{C} \text{ として}$$

$$2.38_9 \times 10^{-1} Q' = \alpha_3 A_3 (T_2 - T_0) \tag{32}$$

| t | T_1 | T_f | T_2 | T_0 | T_s |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 157 | 69 | 46 | 27 | 20 |
| 5 | 327 | 143 | 99 | 43 | 22 |
| 10 | 425 | 180 | 134 | 56 | 27 |
| 15 | 491 | 225 | 164 | 70 | 35 |
| 20 | 537 | 249 | 185 | 83 | 45 |
| 25 | 569 | 273 | 204 | 97 | 57 |
| 30 | 592 | 290 | 224 | 111 | 69 |
| 35 | 609 | 305 | 237 | 124 | 82 |
| 40 | 622 | 319 | 253 | 138 | 95 |
| 45 | 632 | 331 | 263 | 150 | 108 |
| 50 | 641 | 341 | 272 | 162 | 121 |
| 55 | 649 | 352 | 285 | 175 | 134 |
| 60 | 657 | 362 | 294 | 187 | 147 |

TABLE 9

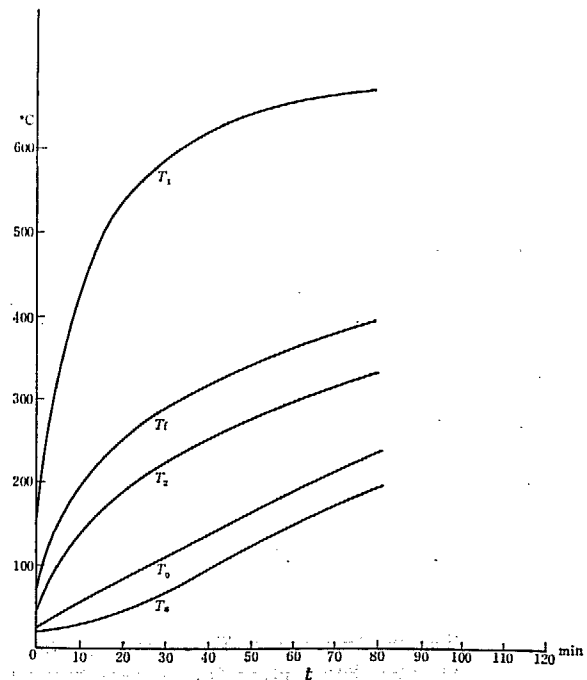


Fig. 8

Temperature rise of T_1 , T_2 , T_f , T_0 and T_s by natural convection in the cask (Initial heat flux 3.0 kW)

| t | T ₁ | T _f | T ₂ | T ₀ | T _s |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 150 | 69 | 46 | 27 | 20 |
| 5 | 296 | 131 | 92 | 41 | 22 |
| 10 | 377 | 168 | 119 | 52 | 27 |
| 15 | 433 | 197 | 141 | 63 | 34 |
| 20 | 473 | 218 | 156 | 73 | 42 |
| 25 | 502 | 238 | 176 | 85 | 51 |
| 30 | 522 | 253 | 190 | 96 | 61 |
| 35 | 538 | 266 | 203 | 107 | 71 |
| 40 | 550 | 278 | 214 | 118 | 82 |
| 45 | 560 | 288 | 225 | 129 | 93 |
| 50 | 569 | 298 | 236 | 140 | 104 |
| 55 | 577 | 307 | 244 | 150 | 115 |
| 60 | 584 | 316 | 254 | 160 | 125 |
| 70 | 597 | 332 | 270 | 179 | 145 |
| 80 | 608 | 348 | 286 | 198 | 165 |
| 90 | 620 | 365 | 306 | 218 | 185 |
| 100 | 633 | 382 | 323 | 237 | 205 |
| 110 | 647 | 398 | 341 | 255 | 223 |
| 120 | 659 | 413 | 355 | 272 | 241 |

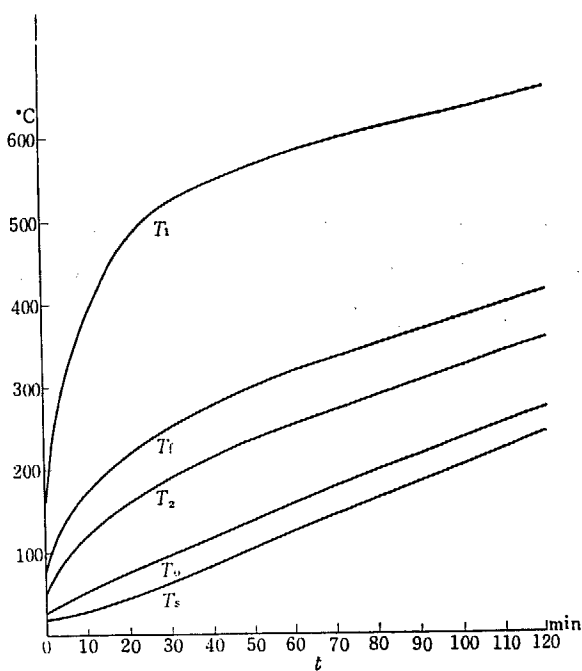


TABLE 10

Temperature rise of T₁, T₂, T_f, T₀ and T_s by natural convection in the cask (Initial heat flux 2.5 kW)

Fig. 9

| t | T ₁ | T _f | T ₂ | T ₀ | T _s |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 150 | 69 | 46 | 27 | 20 |
| 5 | 265 | 117 | 81 | 38 | 22 |
| 10 | 329 | 146 | 100 | 46 | 26 |
| 15 | 374 | 169 | 119 | 55 | 31 |
| 20 | 407 | 187 | 133 | 63 | 37 |
| 25 | 431 | 201 | 147 | 72 | 44 |
| 30 | 449 | 213 | 155 | 80 | 52 |
| 35 | 463 | 225 | 167 | 89 | 60 |
| 40 | 474 | 234 | 178 | 98 | 68 |
| 45 | 483 | 243 | 186 | 106 | 76 |
| 50 | 490 | 250 | 194 | 114 | 84 |
| 55 | 496 | 258 | 202 | 122 | 92 |
| 60 | 502 | 265 | 210 | 130 | 100 |
| 70 | 512 | 278 | 223 | 146 | 116 |
| 80 | 521 | 290 | 235 | 160 | 132 |
| 90 | 527 | 302 | 247 | 175 | 148 |
| 100 | 535 | 314 | 262 | 190 | 163 |
| 110 | 545 | 326 | 274 | 204 | 178 |
| 120 | 555 | 329 | 288 | 218 | 192 |

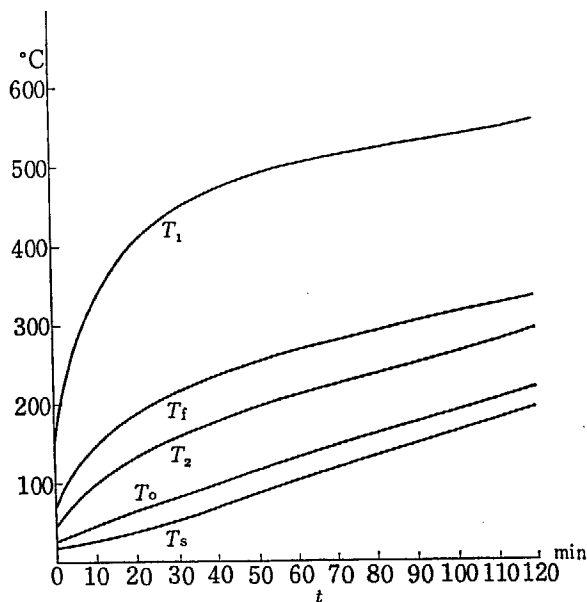


TABLE 11

Temperature rise of T₁, T₂, T_f, T₀ and T_s by natural convection in the cask (Initial heat flux 2.0 kW)

Fig. 10

$$2.389 \times 10^{-1} Q' = \frac{1}{60} C_s \rho_s V_s \frac{dT_s}{dt} = \alpha_s A_s (T_0 - T_s) \quad (33)$$

これより

$$\alpha_3 A_3 (T_2 - T_0) = \alpha_3 A_s (T_0 - T_s)$$

$$\therefore T_2 = 3.68_3 T_0 - 2.68_3 T_s \quad (34)$$

(33) を書直すと

$$\frac{dT_s}{dt} = 2.07_4 Q' \quad (35)$$

この (34) (35) 式の関係と (22) (24) (28) 式の関係より, $Q = 3.0(t+1)^{-0.2}$, $2.5(t+1)^{-0.2}$, $2.0(t+1)^{-0.2}$ の場合について計算すると, TABLE 9~TABLE 11 のようになりこの関係を Fig. 8~Fig. 10 に示す. これより初期の発熱量が約 3 kW の場合でも約 1 時間は安全ということになる.

2. 4 強制対流による冷却

次に強制通風をおこなって冷却をおこなう場合を考える. 燃料棒表面と円環状流路内の空気, 外筒冷却管内面と円環状流路内の空気との間の熱伝達率は次式で与えられる. すなわち $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ として

$$\frac{\alpha}{C_f G} \left(\frac{C_f \mu_f}{\lambda} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_{T_{1,2}}}{\mu_f} \right)^{0.14} = \frac{0.023}{\left(\frac{d_e G}{g \mu_f} \right)^{0.2}} \quad (36)$$

$$\text{ただし } G = \rho_f U_f$$

より

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.023 C_f G \left(\frac{g \mu_f}{d_e G} \right)^{0.2} \left(\frac{a}{\nu} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_{1,2}}} \right)^{0.14} \\ &= 0.023 \frac{C_f \rho_f a^{2/3} g^{0.2} U_f^{0.8}}{d_e^{0.2} \nu^{7/15}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_{1,2}}} \right)^{0.14} \\ &= 9.31_4 \times 10^{-2} C_f \rho_f \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_{1,2}}} \right)^{0.14} U_f^{0.8} \end{aligned} \quad (37)$$

これを (1) (2) (3) 式に代入して次式を得る.

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= 1.24_2 \times 10 Q - 1.16_9 C_f \rho_f \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_1}} \right)^{0.14} (T_1 - T_f) U_f^{0.8} \\ &\quad - 2.70_4 \times 10^{-3} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_f}{dt} &= 1.07_5 \times 10^3 \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_1}} \right)^{0.14} (T_1 - T_f) U_f^{0.8} \\ &\quad - 1.40_9 \times 10^3 \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_2}} \right)^{0.14} (T_f - T_2) U_f^{0.8} \\ &\quad - 2.26_4 \times 10 (T_f - T_0) U_f \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} &= 2.48_5 \times 10^{-2} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \\ &\quad + 1.51_8 \times 10 \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_2}} \right)^{0.14} (T_f - T_2) U_f^{0.8} \\ &\quad - 3.62_6 \times 10 \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a\nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{1.25} \end{aligned} \quad (40)$$

すなわちこの (38) (39) (40) の三つの連立微分方程式を解けばよいことになる.

* J. H. WIEGAND: *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 41, 141-153
W. McADAMS: *Heat Transmission*, pp. 242-243

2. 4. 1 発熱量が一定で定常状態における解

前におこなった自然対流による冷却の計算によれば、キャスクに入れた場合にも初期の発熱量が約 3kW で約 1 時間はアルミ被覆の溶融点に達しないという結果がすでに出ているのでこの強制通風による冷却の計算では、一定の発熱量でどの程度の通風をおこなえば燃料表面の温度を何度位に抑えられるかを調べてみることにする。したがって前節で得られた微分方程式において、発熱量一定で定常状態に達した時の解を求めてみよう。(38) (39) (40) 式において、 $\frac{dT_1}{dt}=0, \frac{dT_f}{dt}=0, \frac{dT_2}{dt}=0$ とおいて、さらに $\left(\frac{\mu_f}{\mu_{T_{1,2}}}\right)^{0.14} \doteq 1$ と見なすと

$$Q = 9.408 \times 10^{-2} C_f \rho_f \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} U_f^{0.8} (T_1 - T_f) + 1.369 \times 10^{-3} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} \tag{41}$$

$$9.408 \times 10^{-2} C_f \rho_f \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} U_f^{0.8} (T_1 - T_f) = 1.233 \times 10^{-1} C_f \rho_f \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} U_f^{0.8} (T_f - T_2) + 1.981 \times 10^{-3} C_f \rho_f U_f (T_f - T_0) \tag{42}$$

$$1.369 \times 10^{-3} \{ (0.01 T_1 + 2.73)^4 - (0.01 T_2 + 2.73)^4 \} + 1.233 \times 10^{-1} C_f \rho_f \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} U_f^{0.8} (T_f - T_2) = 3.121 \times 10^{-1} \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a\nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{1.25} \tag{43}$$

(41) (42) (43) 式より

$$Q = 1.981 \times 10^{-3} C_f \rho_f U_f (T_f - T_0) + 3.121 \times 10^{-1} \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a\nu)^{0.25}} (T_2 - T_0)^{1.25} \tag{44}$$

(42) 式より

$$T_1 - T_f = 1.311 (T_f - T_2) + 2.106 \times 10^{-2} \frac{U_f^{0.2}}{a^{2/3}} (T_f - T_0) \tag{45}$$

(41) (44) (45) の 3 式より通風空気の色度を 10 m/sec, 20 m/sec, 30 m/sec と仮定して計算すると TABLE 12 に示したようになり、この結果より Q と T₁, T₂, T_f および U_f との関係を Fig. 11~ Fig. 13 に示す。

| U _f | Q | T ₁ | T _f | T ₂ |
|----------------|---|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 1 | 145 | 103 | 85 |
| 10 | 2 | 254 | 177 | 144 |
| 10 | 3 | 361 | 246 | 200 |
| 20 | 1 | 104 | 78 | 70 |
| 20 | 2 | 186 | 135 | 118 |
| 20 | 3 | 269 | 193 | 167 |
| 30 | 1 | 85 | 65 | 60 |
| 30 | 2 | 153 | 112 | 100 |
| 30 | 3 | 218 | 159 | 142 |

TABLE 12

Relation between Q and T₁, T₂, T_f in steady state heat transfer by forced convection (U_f=10, 20, 30 m/sec)

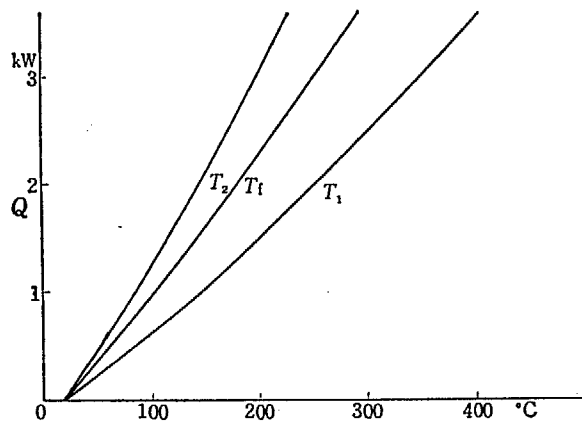


Fig. 11

Relation between Q and T₁, T₂, T_f in steady state heat transfer by forced convection (U_f=10 m/sec)

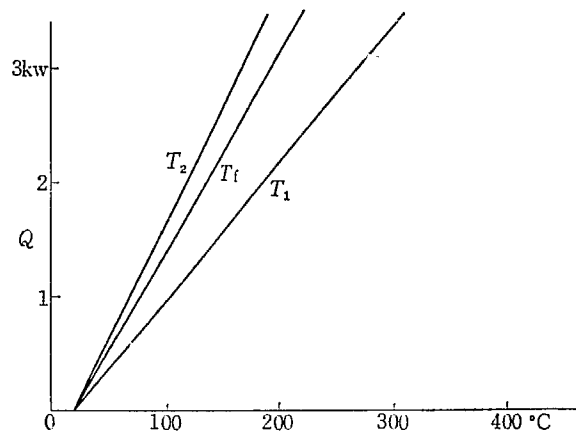


Fig. 12 Relation between Q and T_1 , T_2 , T_f in steady state heat transfer by forced convection ($U_f=20$ m/sec)

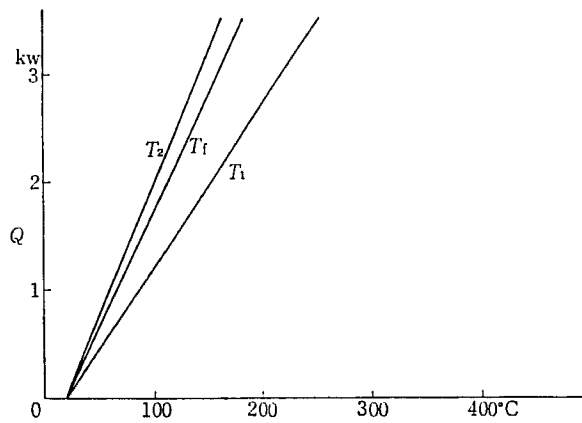


Fig. 13 Relation between Q and T_1 , T_2 , T_f in steady state heat transfer by forced convection ($U_f=30$ m/sec)

3. 実 験

実験にあたっては JRR-3 燃料要素の実物大模擬燃料要素を作り、模擬燃料棒内に電熱線を埋込んで電気加熱により発熱量を変化させて定常状態における測定をおこなった。

3. 1 実験装置

JRR-3 の燃料棒は直径 25 mm ϕ 、長さ 883.4 mm の天然ウラン棒に 2 mm の厚さの 2S アルミ

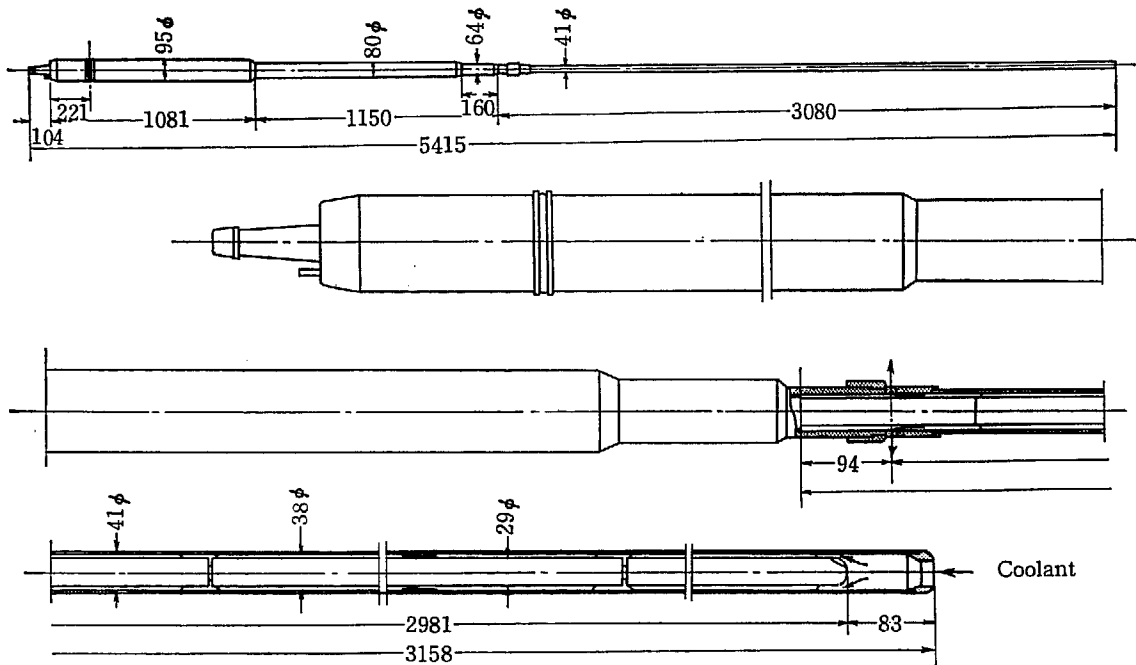
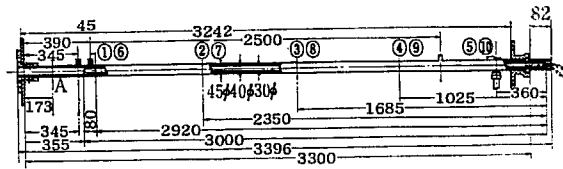


Fig. 14 JRR-3 fuel element



A: Position of hot-wire anemometer

①~⑤: Positions of thermocouples at the surface of JRR-3 mock-up fuel element

⑥~⑩: Positions of thermocouples in the annular space

Fig. 15 JRR-3 mock-up fuel element

を被覆した燃料棒3本をアルミのピンで接続したもので、有効長は2650mmである。これに内径38mm、外径41mmの外筒冷却管がこの燃料棒を包み、二重管構造となっている。燃料要素の概観および大きさはFig. 14に示してある。冷却用重水は外筒冷却管の下端部より矢印のように流れて冷却管の上部の側壁に設けられている三つの窓より外部に流れ出る。したがって燃料棒の有効冷却長さは約3000mmである。実験には燃料棒、外筒冷却管共にこれとほぼ同寸法の模擬燃料要素を製作した。模擬燃料棒は外径30mm、全長3000mm、厚さ3mmのS34Cステンレス鋼の中空円筒で、内部は石英粉中に8kWの電熱線を埋込み、先端は実際の燃料棒と同じように流線型の栓をし、後端は電熱線のタップを取り出して封じてある。実際の燃料棒の表面には120°間隔に三枚の縦フィンがついているが、実験当時にはまだフィンの構造が確定していなかったので何もつかなかった。したがって燃料棒と外筒冷却管とは二重管構造となり、その間の支えにFig. 17に見られるように外筒冷却管の外側に設けられた熱電対の取り出し部のすぐ上の5箇所リングを取り付け、三方向より外筒冷却管を通してネジで調整して支えた。この燃料要素はFig. 16の実験装置全体の概観図に見られるように上端部と下端部を架台に固定して垂直に支えられている。このFig. 16には、その他手前に送風機、その左横にトランス、左端の机の上には電位差計、右端の机の上には熱電温度計、熱線風速計、

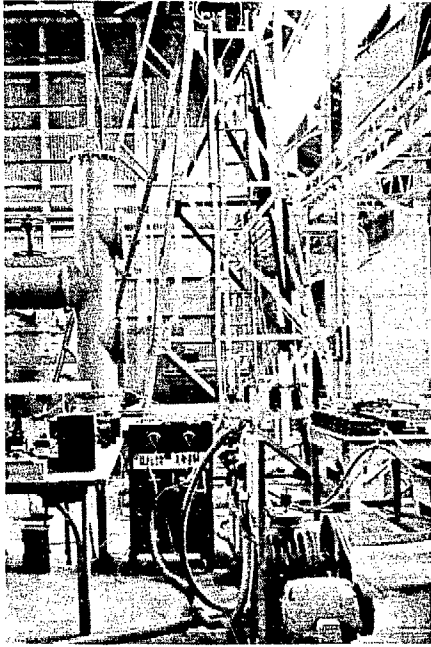


Fig. 16 General view of experimental equipment

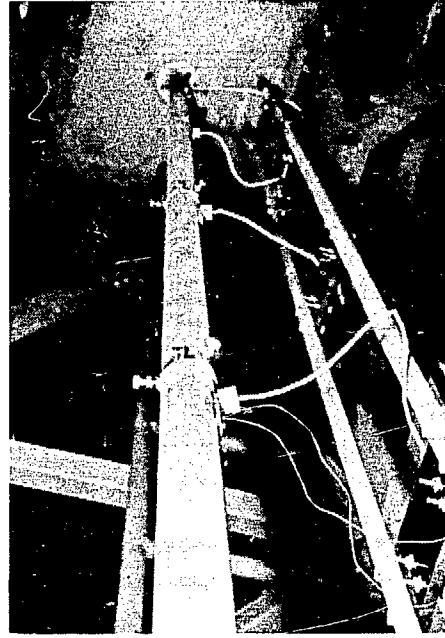


Fig. 17 JRR-3 mock-up fuel element

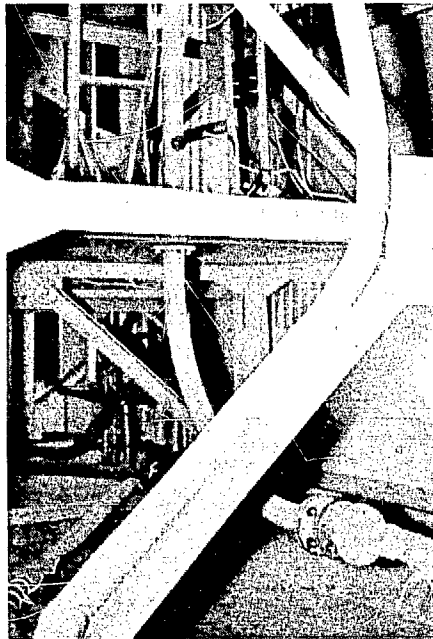


Fig. 18 Connection of JRR-3 mock-up fuel element to the blower

架台の下部鉄板の上に零接点冷却器が並べられているのが見える。燃料棒の加熱は燃料棒内部に埋込まれている電熱線により、200 V の電圧で約 6 kW までの加熱が可能である。発熱量はトランスによる電圧変化によって調節した。燃料要素上端部、下端部ともに開放であり、自然対流による冷却の実験の際は、Fig. 18 で下端部の先についている曲管をとって実験をおこない、強制対流による冷却の実験の際は Fig. 18 のように曲管を取り付け、送風機からの空気をスクリーンを通して流し、その流量は送風機出口部にあるバイパス弁の開閉によって調節した。送風機と曲管の間には、水道水による冷却器を取り付けて送風機を出た空気の温度上昇を防ぎ、それらをフレキシブルチューブで連結した。

3. 2 測 定

測定は燃料棒内の電熱線への電気入力，燃料要素内下端部における空気の流速，燃料棒表面5箇所の温度およびそれに対応する円環状流路内5箇所の空気の温度の測定をおこなった．空気の流速は熱線風速計により，温度は銅コンスタンタン熱電対を使用した．Fig. 21 は熱線風速計のプローブを差込んだところ，Fig. 22 は熱電対の取り出し部の様子を示している．温度の測定点は10点あるため，一目で全体の傾向を把握できるように10台の熱電温度計をならべて，定常状態に達するまでの測定

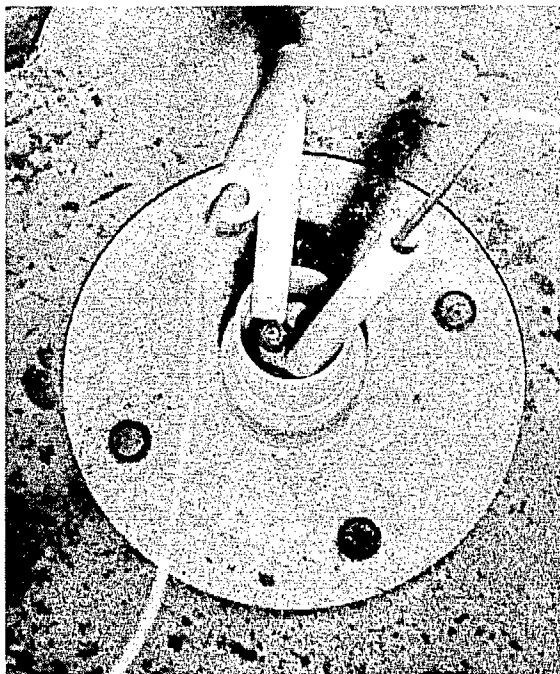


Fig. 19 Upper part of JRR-3 mock-up fuel element



Fig. 20 Two kinds of caps used for the upper part of JRR-3 mock-up fuel element

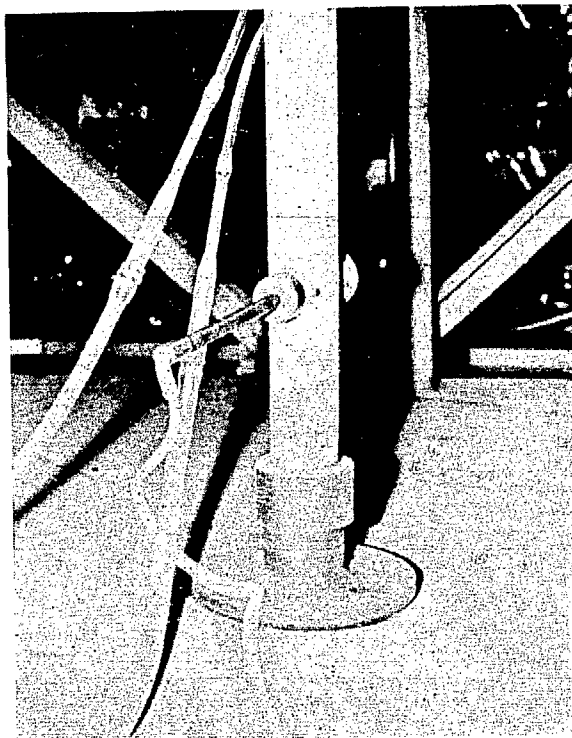


Fig. 21 Lower part of JRR-3 mock-up fuel element and the hot-wire anemometer

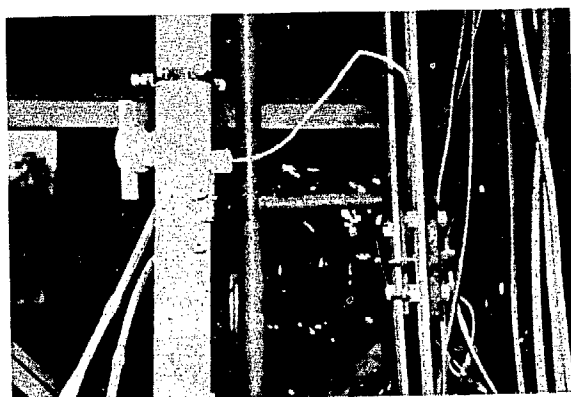


Fig. 22 Two thermocouples for the measurement of T_1 and T_2

はこれでおこない、定常になった時に電位差計に切換えて測定した。

実際の燃料要素では外筒冷却管の上端部は開放ではなく、上部の管壁に $10\text{ mm}\phi$ の穴が3つ設けられていて、円環状流路内を流れた重水はこの3つの穴より外部に流れ出るようになっている。実験では、Fig. 20 のように上端部開放のキャップと壁に3つの穴を設けたキャップを作り、自然対流の時どの程度影響があるものかを調べてみたが、上端部開放でおこなっても冷却管内の空気の上昇速度が非常に小さくて、上昇空気の持ち去る熱量は全体の発熱量に比べて数%であって、円環状流路内の空気は全く動かないとしても大差ない関係上、このキャップによる差は全くなかった。

3. 3 自然対流による冷却の実験

この実験では発熱量をそれぞれ 80, 101.3, 215.0, 307.5, 407.5, 485.0, 600.0, 685.0, 805.0,

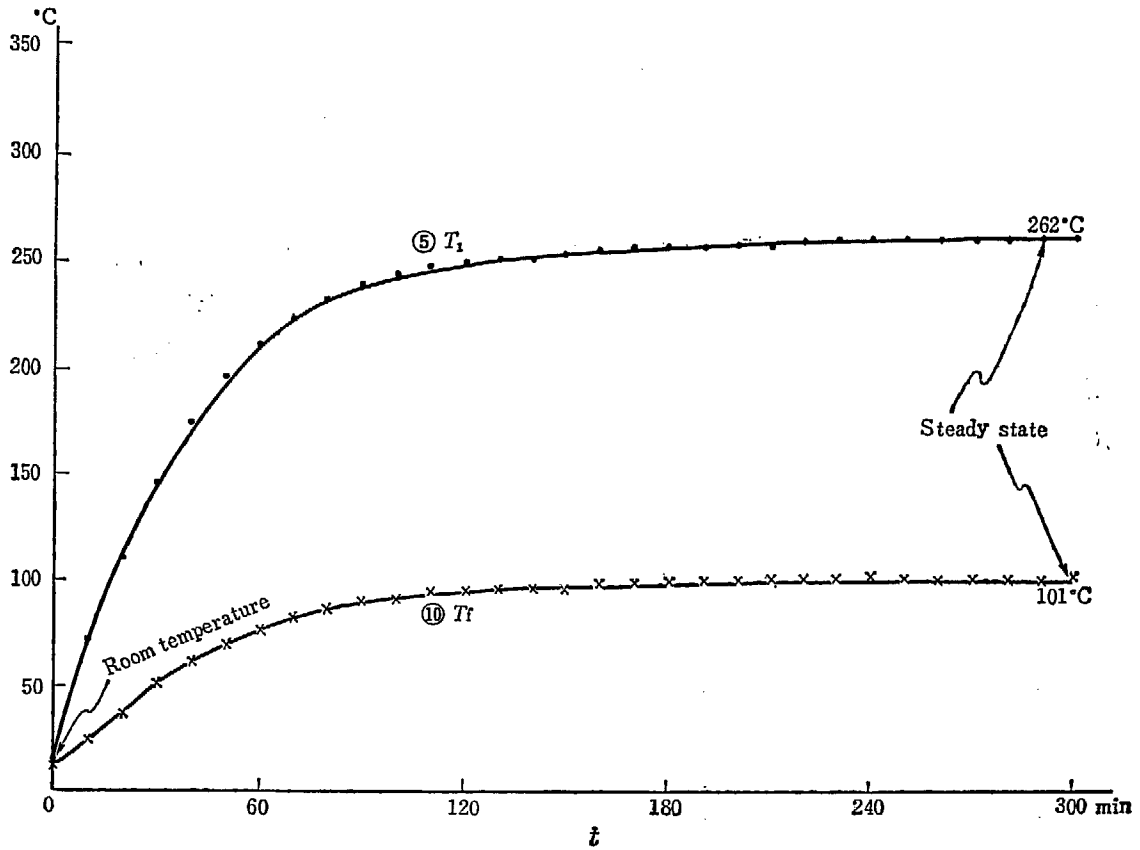


Fig. 23 One example of the experiments in cooling by natural convection Up to the steady state ($Q=600$ W)

Positions of thermocouples {⑤: At the surface of JRR-3 mock-up fuel element
⑩: In the annular space

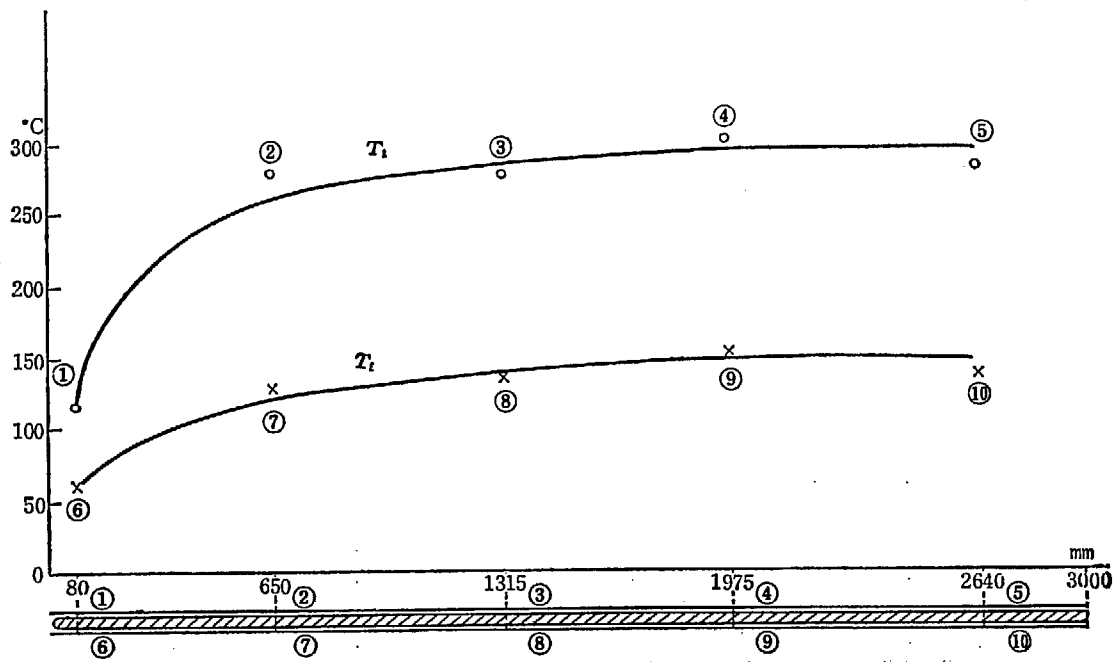


Fig. 24 One examples of the experiments in cooling by natural convection. (3 hours after the experiment is started) Axial temperature distribution of T_1 and T_t $Q=685$ W

895.0, 1005.0, 1025.0 W の 13 段階に変化させて 10 分ごとに 10 点の温度と風速を測定し定常状態における値を求めた。Fig. 23 に定常状態に達する測定結果の一例が示してある。これは発熱量 600 W の時の燃料棒表面位置⑤、円環状流路内位置⑩での測定結果で、定常状態に達するまでには約 5 時間かかっている。このようにして各点における定常状態の温度を求めて燃料棒の軸方向にプロットした図の例が Fig. 24 である。熱電対の位置①⑥に対応する場所の温度が他の点に比べて非常に低いのは、電熱線の端の位置にあたっているからである。この部分を除けば燃料棒表面、円環状流路内空気の温度分布は平坦でほとんど変化はない。これは計算でも予測をおこなった通り円環状流路内の空気の速度が 30 cm/sec~40 cm/sec の程度で、この上昇空気の持ち去る熱量は僅かであるために冷却管内の空気は全然動かないと仮定しても大差ないということが明らかに示されている。この傾向は発熱量が多くなった場合でも変りはない。実験の結果は TABLE 13 に示してあるが TABLE 1 の風速の計算結果と比べてみるとかなり近い。また発熱量と T_i , T_f との関係は Fig. 25 に示してあるが計算で求めた結果と比べてその傾向はよく出ていると思われる。

| Q | T_i | T_f | U_f |
|--------|-------|-------|--------|
| W | °C | °C | cm/sec |
| 80 | 60 | 34 | 29.2 |
| 101.3 | 73 | 38 | 28.3 |
| 215.0 | 132 | 57 | 32.6 |
| 307.5 | 193 | 74 | 35.0 |
| 407.5 | 232 | 85 | 33.5 |
| 485.0 | 256 | 90 | 32.3 |
| 600.0 | 312 | 115 | 39.0 |
| 685.0 | 337 | 151 | 38.3 |
| 805.0 | 372 | 169 | 40.7 |
| 895.0 | 399 | 180 | 41.4 |
| 1005.0 | 432 | 203 | 43.1 |
| 1025.0 | 430 | 196 | 46.7 |

TABLE 13 Results of experiment in cooling by steady state natural convection

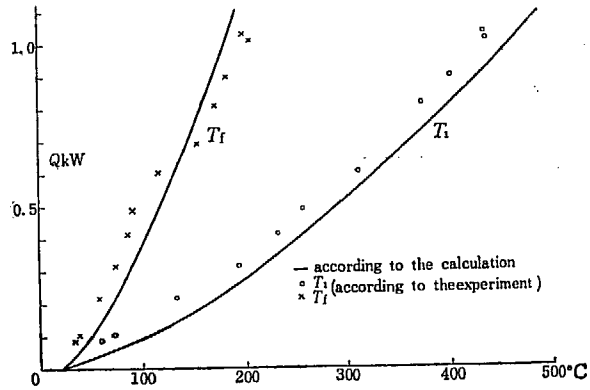


Fig. 25

3. 4 強制対流による冷却の実験

測定方法は前の自然対流による冷却の実験の場合と全く同じである。風速は円環状流路内において 10 m/sec, 20 m/sec, 30 m/sec の 3 段階について発熱量をそれぞれ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5,

| $U_f=10$ m/sec | | | $U_f=20$ m/sec | | | $U_f=30$ m/sec | | |
|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Q | T_i | T_f | Q | T_i | T_f | Q | T_i | T_f |
| kW | °C | °C | kW | °C | °C | kW | °C | °C |
| 0.5 | 76 | 45 | 0.5 | 53 | 34 | 0.505 | 47 | 34 |
| 1.0 | 142 | 76 | 1.0 | 105 | 60 | 1.0 | 73 | 50 |
| 1.5 | 190 | 103 | 1.5 | 153 | 84 | 1.5 | 115 | 68 |
| 2.0 | 273 | 144 | 2.0 | 196 | 107 | 2.0 | 153 | 87 |
| 2.5 | 329 | 176 | 2.5 | 245 | 133 | 2.5 | 185 | 107 |
| 3.0 | 436 | 219 | 3.0 | 283 | 157 | 3.0 | 231 | 127 |

TABLE 14 Results of the experiments in cooling by steady state forced convection ($U_f=10, 20, 30$ m/sec)

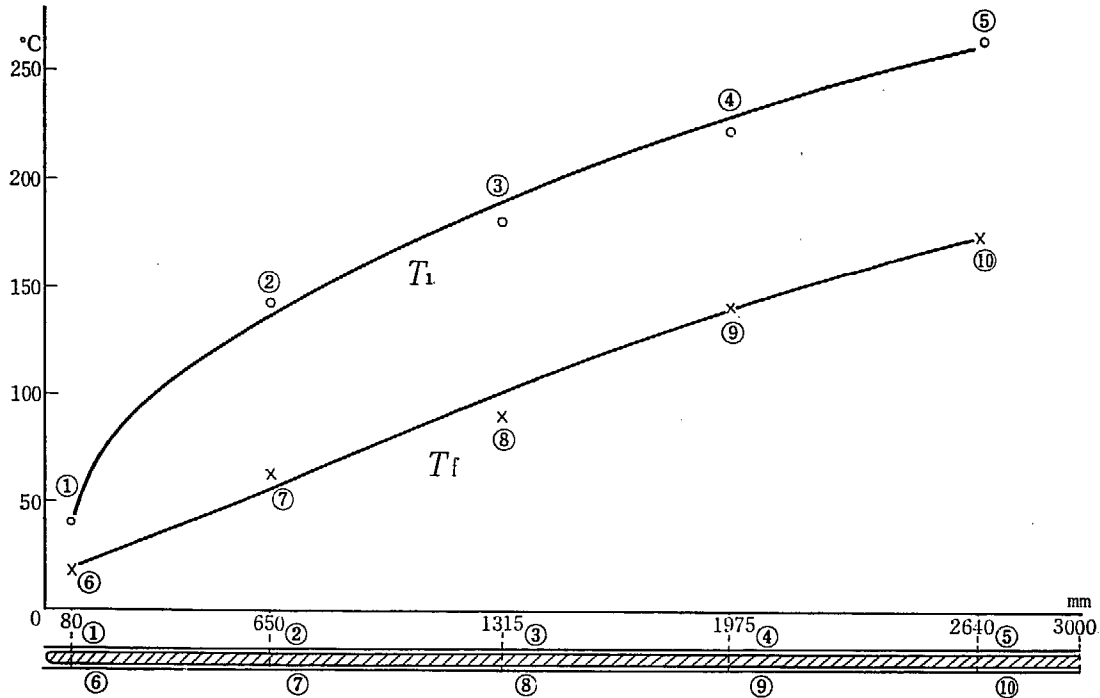


Fig. 26 One example of the experiments in cooling by forced convection. (2 hours after the experiment is started) Axial temperature distribution of T_1 and T_f
 $Q=3.0 \text{ kW}$, $U_f=30 \text{ m/sec}$

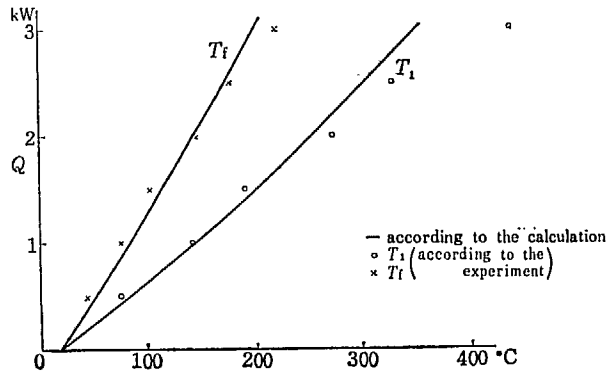


Fig. 27 Results of the experiment in cooling by steady state forced convection ($U_f=10 \text{ m/sec}$)

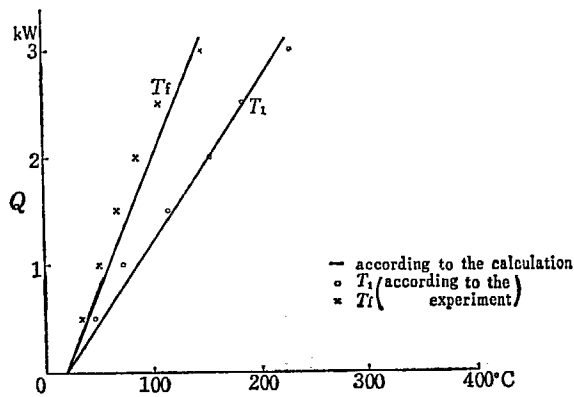


Fig. 28 Results of the experiments in cooling by steady state forced convection ($U_f=20 \text{ m/sec}$)

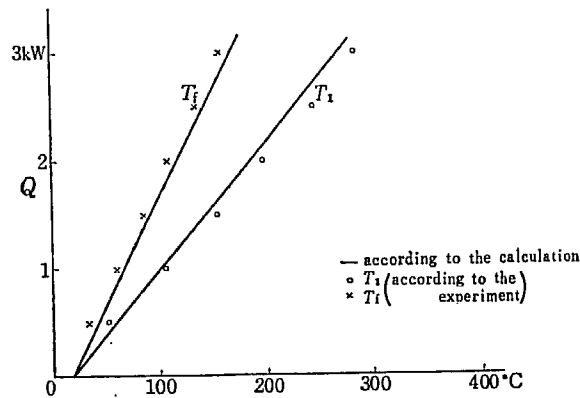


Fig. 29 Results of the experiment in cooling by steady state forced convection ($U_f=30$ m/sec)

3.0 kW に変化させた。燃料棒表面と円環状流路内空气の軸方向温度分布の例を Fig. 26 に示してある。測定結果は TABLE 14 に示した通りであるが、これを前に計算で求めた値と比較してみると、Fig. 28, 29, 30 に示したようになりに良好な一致を示している。

4. 検討および結論

実験結果と計算結果とを比較してみると全般によい一致がみられるが、このことは既に求められている二重円管に関する層流および乱流の熱伝達の実験式が精度よく使えることを示すもので、学問的に新しい事実は何もない。しかしよく考えてみると、このような大型の実験装置でしかも熱伝達に少なからぬ影響を与えていると思われる多くの原因がある装置で計算結果に近い測定結果が得られたということは想像外というよりもむしろ不思議なくらいである。それに計算では実用上の必要から実際の燃料棒の値で計算してあるが実験で使用した模擬燃料棒の寸法、材質はこれと異なっている。

すなわち

1) 燃料棒寸法

| | 実際の燃料棒 | 模擬燃料棒 |
|---------|--------|--------|
| 有効長さ | 2.65 m | 3.00 m |
| 燃料棒外径 | 29 mm | 30 mm |
| 外筒冷却管内径 | 38 mm | 40 mm |
| 外筒冷却管外径 | 41 mm | 45 mm |

2) 燃料棒材質

実際の燃料棒

模擬燃料棒

直径 25 mmφ のウラン棒に厚さ

内径 24 mm 外径 30 mm の鉄の円筒に

2 mm のアルミ被覆を施したもの

石英粉と電熱線を埋込んで封じたもの

したがって燃料棒の平均比重量, 平均比熱が異なり, $C_1 \rho_1 V_1$ の値は実際の燃料棒では 1.15 であるが, 模擬燃料棒では約 0.84 となっている。

3) 外筒冷却管の外表面より周囲空気への熱伝達については, 実験室の環境から空気の流れは不規則な攪乱気流であって層流として考える熱伝達よりも当然上回っていると思われる。

4) ふく射に関する物性値は推定値である。

などが計算と実験とが一致しない主な原因になっていると考えられるし, その他, それほど大きな影響を与える原因ではないと思われるが,

5) 発熱量が一樣でないための影響 (この実験に使った模擬燃料棒では大体一樣になっている)

6) 熱伝達率の場所による相異の影響

7) 二重円管の偏心の影響 (この実験装置ではそれほど大きい偏心をしていない)

8) 燃料棒支持部においてその部分を通して熱が直接外筒冷却管に流れるための影響

などがある。

したがって計算値と実験値とはむしろ違ってこそ当然であり, 特に燃料棒長さが実験では 1 割以上も長くなっていることは, 円環状流路内の空気が殆んど動かない関係上自然対流による冷却の場合に大きな影響があると考えられ, 実験の結果, 燃料棒表面温度が自然対流による冷却の場合にくらか低い傾向になっているのはこのためではないかと思われる。しかし, この実験は精密実験ではないので, 詳細な検討をおこなっても無意味であり, またそれが目的でもない。この実験が開発試験であるという立場から眺めれば計算の結果が十分使えそうだということがわかっただけでもまた別の意義があると考えられる。

さて, 今までの議論は実際の燃料棒が一樣に発熱していてしかも定常状態における検討であるが, 実際の場合について考えると,

i) 燃料棒の発熱は正弦状分布をしている。

ii) 金属の物性値は温度によって変化する。

の問題がある。ii) で特にウランの比熱などは温度による変化が著しいのでこの点の考慮が必要で, 計算の際空気の物性値の温度による変化のみを考えてウランの比熱の温度による変化を無視したことは無意味だったかもしれない。しかしこの上さらにウランの比熱の温度による変化を考えることは計算の複雑さを倍加し, とても手では計算できないのでやむをえず無視した。i) の発熱の分布が一樣ではないという点は実際問題への応用という点で大きな問題として残るが, 推定としては最高発熱量に対応する計算結果の燃料棒表面温度が燃料棒表面における大体の最高温度と考えてさしつかえないものと思う。炉停止 1 分後における燃料棒の平均発熱量は約 2 kW, 最高発熱部の発熱量は約 3 kW であるから, 空気中に放置した場合は 40~50 分後に燃料棒表面の最高温度は約 550°C に達して後下降に向かい, 安全である。またキャスク中に入れたままで放置した場合は約 1 時間位はアルミ被覆が溶融するようなことはないということが結論としていえると思う。

5. あとがき

本研究は JRR-3 開発試験の一環としておこなったもので、問題の提起は当時の JRR-3 建設準備室よりおこなわれて、当時の原子炉開発部開発試験室において、JRR-3 モックアップによる開発試験 (JAERI 1007) とともに始められ、筆者が原子力工学部機械装置研究室に移籍後も続けられたものである。計算は昭和 33 年 9 月より昭和 35 年 8 月にわたって三回、実験は昭和 35 年 10 月 6 日より昭和 36 年 3 月 2 日にわたっておこなわれた。この計算はそのうちで一番実験に近い第三回目におこなったものである。ここでおこなった計算はまえがきにもものべた通り、その必要はなかったにもかかわらず計算練習のつもりで空気の物性値の変化を全部考慮に入れて手で計算したので、かなりの日数を費したが、機械的に一度に数値が求められるのとは違って途中の過程が明瞭に把握できて、それはそれなりに有益だったと思っている。

最後に本研究に御指導いただいた橋藤雄主任研究員、鳥飼欣一副主任研究員、筆者が原子炉開発部原子炉開発試験室に所属していた当時、同室の副主任研究員であった長谷川修氏 (現在、九州大学原子力工学科)、ならびに JRR-3 建設室の平山省一副主任研究員に心から謝意を表す。(昭和 36 年 3 月 20 日記)

参 考 実 験 資 料

1. 佐野川好母・大内光男: JRR-3 燃料要素を炉内から取り出した後の冷却に関する実験 (資料)
(昭和 35 年 10 月 6 日～昭和 36 年 3 月 2 日) 31 p.p
2. 佐野川好母・大内光男: JRR-3 燃料要素を炉内から取り出した後の冷却に関する実験(図表 1)
(昭和 35 年 10 月 5 日～昭和 35 年 11 月 1 日) 62 p.p
3. 佐野川好母・大内光男: JRR-3 燃料要素を炉内から取り出した後の冷却に関する実験(図表 2)
(昭和 36 年 2 月 21 日～昭和 36 年 3 月 2 日) 46 p.p
4. 佐野川好母・大内光男: JRR-3 燃料要素を炉内から取り出した後の冷却に関する実験(図表 3)
(昭和 35 年 10 月 6 日～昭和 35 年 10 月 11 日) 19 p.p
5. 佐野川好母・大内光男: JRR-3 燃料要素を炉内から取り出した後の冷却に関する実験(図表 4)
(昭和 36 年 2 月 21 日～昭和 36 年 3 月 2 日) 68 p.p

付 録

計算に使用した次の関係の表とグラフを付録として掲げておく。

$$T_i \sim C_i \rho_i \text{ の関係}$$

$$T_i \sim (C_i \rho_i)^{-1} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim (C_i \rho_i)^{0.45} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim (C_i \rho_i)^{-0.55} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim \frac{1}{\nu} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim \left(\frac{\lambda}{\nu} \right)^{0.55} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim \frac{\lambda}{(1.1 a^2 + a \nu)^{0.25}} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim \frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}} \text{ の関係}$$

$$T_i \sim \left\{ 0.459 - \frac{\frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}}}{(C_i \rho_i)^{0.45}} \right\}^{\frac{1}{1.05}} \text{ の関係}$$

TABLE 1 Relation between T_f and $C_f \rho_f$, $(C_f \rho_f)^{-1}$, $(C_f \rho_f)^{0.45}$, $(C_f \rho_f)^{-0.55}$

| T_f °C | $C_f \rho_f$ | $(C_f \rho_f)^{-1}$ | $(C_f \rho_f)^{0.45}$ | $(C_f \rho_f)^{-0.55}$ |
|----------|-------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| 0 | $3.01_7 \times 10^{-1}$ | 3.31 ₄ | $5.83_1 \times 10^{-1}$ | 1.93 ₃ |
| 50 | 2.56 ₄ | 3.90 ₆ | 5.42 ₆ | 2.11 ₄ |
| 100 | 2.23 ₈ | 4.47 ₂ | 5.09 ₈ | 2.27 ₉ |
| 150 | 1.98 ₈ | 5.03 ₈ | 4.83 ₁ | 2.43 ₄ |
| 200 | 1.78 ₇ | 5.59 ₈ | 4.60 ₇ | 2.57 ₈ |
| 250 | 1.62 ₈ | 6.15 ₆ | 4.41 ₆ | 2.71 ₆ |
| 300 | 1.49 ₆ | 6.71 ₁ | 4.24 ₆ | 2.84 ₉ |
| 350 | 1.38 ₈ | 7.23 ₁ | 4.10 ₆ | 2.96 ₉ |
| 400 | 1.28 ₈ | 7.78 ₂ | 3.97 ₂ | 3.09 ₁ |
| 450 | 1.21 ₁ | 8.25 ₈ | 3.86 ₇ | 3.19 ₄ |
| 500 | 1.13 ₈ | 8.80 ₃ | 3.75 ₈ | 3.30 ₈ |
| 550 | 1.07 ₈ | 9.27 ₆ | 3.67 ₆ | 3.40 ₅ |
| 600 | 1.01 ₇ | 9.83 ₃ | 3.57 ₈ | 3.51 ₅ |

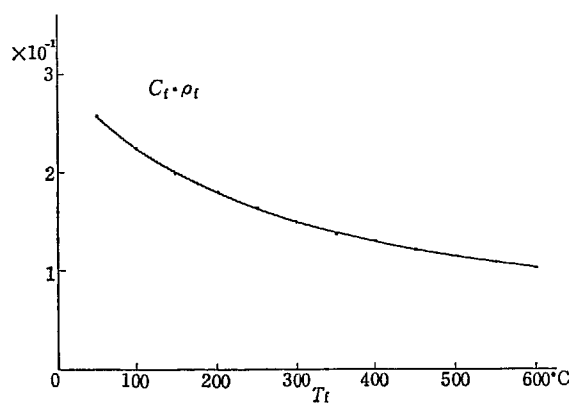
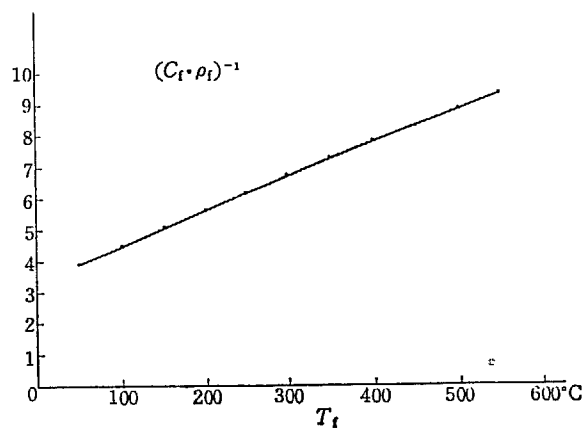
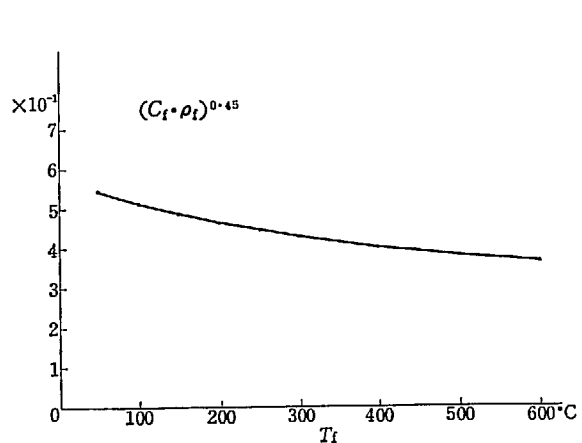
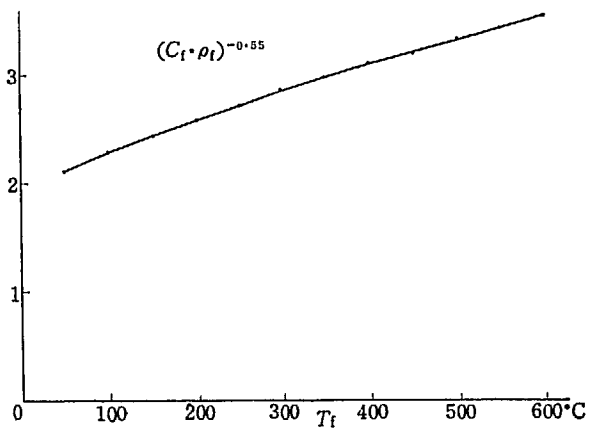
Fig. 1 Relation between T_f and $C_f \rho_f$ Fig. 2 Relation between T_f and $(C_f \rho_f)^{-1}$ Fig. 3 Relation between T_f and $(C_f \rho_f)^{0.45}$ Fig. 4 Relation between T_f and $(C_f \rho_f)^{-0.55}$

TABLE 2 Relation between T_f and $\frac{1}{\nu}$

| T_f °C | $\frac{1}{\nu}$ | T_f °C | $\frac{1}{\nu}$ |
|----------|----------------------|----------|-------------------|
| 0 | $7.24_8 \times 10^4$ | 260 | 2.29 ₄ |
| 20 | 6.36 ₉ | 280 | 2.16 ₀ |
| 40 | 5.68 ₂ | 300 | 2.03 ₂ |
| 60 | 5.12 ₈ | 320 | 1.91 ₆ |
| 80 | 4.65 ₁ | 340 | 1.81 ₈ |
| 100 | 4.23 ₇ | 360 | 1.72 ₄ |
| 120 | 3.89 ₁ | 380 | 1.63 ₁ |
| 140 | 3.57 ₁ | 400 | 1.55 ₀ |
| 160 | 3.28 ₉ | 420 | 1.47 ₇ |
| 180 | 3.04 ₉ | 440 | 1.41 ₀ |
| 200 | 2.81 ₇ | 460 | 1.34 ₈ |
| 220 | 2.61 ₈ | 480 | 1.29 ₀ |
| 240 | 2.45 ₁ | 500 | 1.23 ₅ |

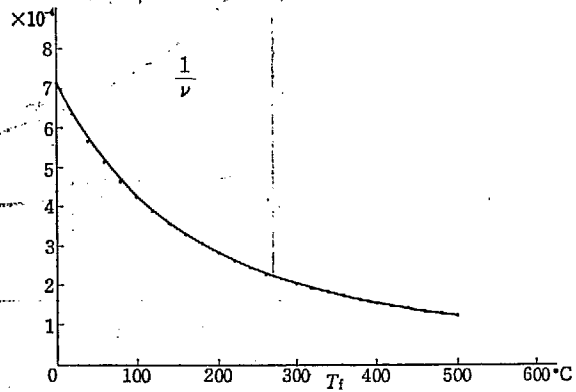


Fig. 5 Relation between T_f and $\frac{1}{\nu}$

TABLE 3 Relation between T_f and $\frac{\lambda}{a^{0.5}\nu^{0.5}}$

| T_f °C | a m ² /s | ν m ² /s | λ kcal/msec °C | $a^{0.5}$ | $\nu^{0.5}$ | $a^{0.5}\nu^{0.5}$ | $\frac{\lambda}{a^{0.5}\nu^{0.5}}$ |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 0 | $1.87_8 \times 10^{-5}$ | $1.39_8 \times 10^{-5}$ | $5.66_7 \times 10^{-6}$ | $4.33_1 \times 10^{-3}$ | $3.73_6 \times 10^{-3}$ | $1.61_9 \times 10^{-5}$ | $3.50_6 \times 10^{-1}$ |
| 10 | 2.01 ₀ | 1.48 ₂ | 5.83 ₃ | 4.48 ₃ | 3.85 ₀ | 1.72 ₆ | 3.38 ₀ |
| 20 | 2.13 ₃ | 1.56 ₈ | 6.00 ₀ | 4.61 ₆ | 3.96 ₀ | 1.82 ₉ | 3.28 ₀ |
| 30 | 2.26 ₀ | 1.66 ₀ | 6.16 ₇ | 4.75 ₄ | 4.07 ₄ | 1.93 ₇ | 3.18 ₄ |
| 40 | 2.39 ₄ | 1.75 ₂ | 6.33 ₃ | 4.89 ₃ | 4.18 ₀ | 2.04 ₈ | 3.09 ₂ |
| 50 | 2.53 ₅ | 1.84 ₇ | 6.50 ₀ | 5.03 ₆ | 4.29 ₈ | 2.16 ₄ | 3.00 ₁ |
| 60 | 2.67 ₈ | 1.94 ₃ | 6.66 ₇ | 5.17 ₆ | 4.40 ₈ | 2.28 ₁ | 2.92 ₃ |
| 70 | 2.82 ₇ | 2.04 ₅ | 6.83 ₃ | 5.31 ₁ | 4.52 ₂ | 2.40 ₁ | 2.84 ₆ |
| 80 | 2.95 ₈ | 2.15 ₀ | 7.00 ₀ | 5.43 ₉ | 4.63 ₇ | 2.52 ₂ | 2.77 ₆ |
| 90 | 3.12 ₅ | 2.25 ₈ | 7.16 ₇ | 5.59 ₀ | 4.75 ₂ | 2.65 ₀ | 2.69 ₈ |
| 100 | 3.28 ₁ | 2.37 ₀ | 7.33 ₃ | 5.72 ₈ | 4.86 ₈ | 2.78 ₆ | 2.63 ₀ |
| 120 | 3.58 ₉ | 2.59 | 7.63 ₉ | 5.99 ₁ | 5.08 ₉ | 3.04 ₉ | 2.50 ₅ |
| 140 | 3.91 ₇ | 2.82 | 7.94 ₅ | 6.25 ₀ | 5.31 ₀ | 3.32 ₄ | 2.39 ₀ |
| 160 | 4.23 ₆ | 3.06 | 8.22 ₂ | 6.50 ₈ | 5.53 ₂ | 3.60 ₀ | 2.28 ₄ |
| 180 | 4.58 ₁ | 3.30 | 8.52 ₈ | 6.76 ₆ | 5.74 ₆ | 3.88 ₈ | 2.19 ₃ |
| 200 | 4.94 ₂ | 3.56 | 8.83 ₃ | 7.03 ₀ | 5.96 ₇ | 4.19 ₅ | 2.10 ₆ |
| 250 | 5.88 | 4.22 | 9.55 ₀ | 7.66 ₈ | 6.49 ₆ | 4.98 ₁ | 1.91 ₈ |
| 300 | 6.87 | 4.92 | $1.02_5 \times 10^{-5}$ | 8.28 ₉ | 7.01 ₄ | 5.81 ₄ | 1.76 ₃ |
| 350 | 7.89 | 5.65 | 1.09 ₂ | 8.88 ₃ | 7.51 ₇ | 6.67 ₇ | 1.63 ₅ |
| 400 | 9.01 | 6.45 | 1.15 ₈ | 9.49 ₂ | 8.03 ₁ | 7.62 ₃ | 1.51 ₉ |
| 500 | $1.13_8 \times 10^{-4}$ | 8.10 | 1.28 ₉ | $1.06_5 \times 10^{-2}$ | 9.00 ₀ | 9.58 ₈ | 1.34 ₁ |
| 600 | 1.36 ₃ | 9.89 | 1.38 ₉ | 1.16 ₇ | 9.94 ₅ | $1.16_1 \times 10^{-4}$ | 1.19 ₆ |
| 800 | 1.89 | 1.37×10^{-4} | 1.59 ₇ | 1.37 ₅ | $1.17_0 \times 10^{-2}$ | 1.60 ₀ | $9.92_5 \times 10^{-2}$ |
| 1000 | 2.49 ₆ | 1.81 | 1.81 ₀ | 1.58 ₀ | 1.34 ₅ | 2.12 ₅ | 8.56 ₀ |

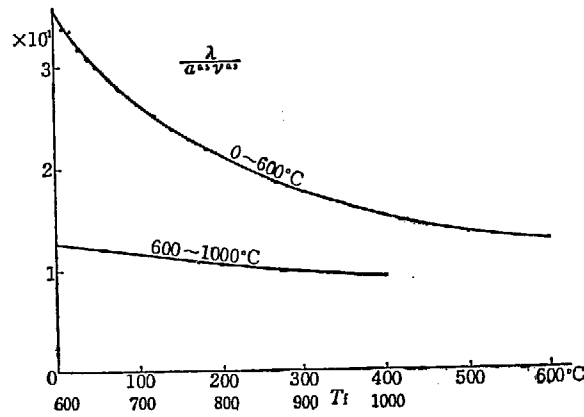


Fig. 6 Relation between T_f and $\frac{\lambda}{\alpha^{0.5}\nu^{0.5}}$

TABLE 4 Relation between T_f and $(\frac{\lambda}{\nu})^{0.55}$

| T_f °C | λ kcal/msec°C | ν m ² /sec | $\frac{\lambda}{\nu}$ | $(\frac{\lambda}{\nu})^{0.55}$ |
|----------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 0 | $5.66_7 \times 10^{-5}$ | 1.38×10^{-5} | 4.10 ₆ | 2.17 ₅ |
| 20 | 6.00 ₀ | 1.57 | 3.82 ₂ | 2.09 ₀ |
| 40 | 6.33 ₃ | 1.76 | 3.59 ₈ | 2.02 ₂ |
| 60 | 6.66 ₇ | 1.95 | 3.41 ₉ | 1.96 ₈ |
| 80 | 7.00 ₀ | 2.15 | 3.25 ₆ | 1.91 ₄ |
| 100 | 7.33 ₃ | 2.36 | 3.10 ₇ | 1.86 ₅ |
| 120 | 7.63 ₉ | 2.57 | 2.97 ₂ | 1.82 ₁ |
| 140 | 7.94 ₄ | 2.80 | 2.83 ₇ | 1.77 ₄ |
| 160 | 8.22 ₂ | 3.04 | 2.70 ₅ | 1.72 ₈ |
| 180 | 8.52 ₈ | 3.28 | 2.60 ₀ | 1.69 ₁ |
| 200 | 8.83 ₃ | 3.55 | 2.48 ₈ | 1.65 ₁ |
| 220 | 9.11 ₁ | 3.82 | 2.38 ₅ | 1.61 ₃ |
| 240 | 9.41 ₇ | 4.08 | 2.30 ₈ | 1.58 ₄ |
| 260 | 9.69 ₄ | 4.36 | 2.22 ₅ | 1.55 ₂ |
| 280 | 9.97 ₂ | 4.63 | 2.15 ₄ | 1.52 ₅ |
| 300 | $1.02_5 \times 10^{-4}$ | 4.92 | 2.08 ₃ | 1.49 ₉ |
| 320 | 1.05 ₃ | 5.22 | 2.01 ₇ | 1.49 ₈ |
| 340 | 1.08 ₁ | 5.50 | 1.96 ₅ | 1.45 ₀ |
| 360 | 1.10 ₆ | 5.80 | 1.90 ₈ | 1.42 ₅ |
| 380 | 1.13 ₃ | 6.13 | 1.84 ₉ | 1.40 ₂ |
| 400 | 1.15 ₈ | 6.45 | 1.79 ₈ | 1.38 ₀ |
| 420 | 1.18 ₆ | 6.77 | 1.75 ₂ | 1.36 ₁ |
| 440 | 1.21 ₁ | 7.09 | 1.70 ₈ | 1.34 ₂ |
| 460 | 1.23 ₉ | 7.42 | 1.67 ₀ | 1.32 ₆ |
| 480 | 1.26 ₄ | 7.75 | 1.63 ₁ | 1.30 ₉ |
| 500 | 1.28 ₉ | 8.10 | 1.59 ₂ | 1.29 ₁ |
| 600 | 1.46 ₄ | 9.89 | 1.48 ₀ | 1.24 ₁ |
| 800 | 1.69 ₄ | 1.37×10^{-4} | 1.23 ₇ | 1.12 ₄ |
| 1000 | 1.81 ₇ | 1.83 | 0.99 ₃ | 1.00 ₀ |

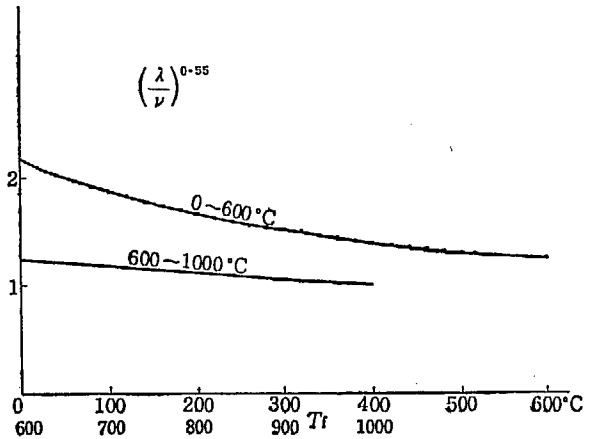


Fig. 7 Relation between T_f and $(\frac{\lambda}{\nu})^{0.55}$

TABLE 5 Relation between T_f and $\frac{\lambda}{(1.1a^2 + a\nu)^{1/4}}$

| T_f °C | λ kcal/msec°C | ν m ² /sec | a m ² /sec | $1.1a^2 + a\nu$ | $(1.1a^2 + a\nu)^{1/4}$ | $\frac{\lambda}{(1.1a^2 + a\nu)^{1/4}}$ |
|----------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| 0 | $5.66_7 \times 10^{-5}$ | 1.39×10^{-5} | 1.87×10^{-5} | $6.44_5 \times 10^{-10}$ | $5.03_5 \times 10^{-3}$ | $1.12_5 \times 10^{-2}$ |
| 20 | 6.00 ₀ | 1.57 | 2.14 | 8.39 ₇ | 5.38 ₈ | 1.11 ₅ |
| 40 | 6.33 ₃ | 1.76 | 2.40 | $1.05_5 \times 10^{-9}$ | 5.70 ₀ | 1.11 ₁ |
| 60 | 6.66 ₇ | 1.95 | 2.67 | 1.30 ₅ | 6.01 ₀ | 1.10 ₉ |
| 80 | 7.00 ₀ | 2.16 | 2.96 | 1.60 ₃ | 6.32 ₈ | 1.10 ₅ |
| 100 | 7.33 ₃ | 2.37 | 3.27 | 1.95 ₁ | 6.64 ₈ | 1.10 ₃ |
| 120 | 7.63 ₉ | 2.58 | 3.58 | 2.33 ₃ | 6.95 ₀ | 1.10 ₀ |
| 140 | 7.94 ₄ | 2.80 | 3.92 | 2.78 ₈ | 7.26 ₈ | 1.09 ₃ |
| 160 | 8.22 ₂ | 3.03 | 4.24 | 3.26 ₂ | 7.55 ₇ | 1.08 ₈ |
| 180 | 8.52 ₈ | 3.29 | 4.58 | 3.81 ₄ | 7.85 ₉ | 1.08 ₅ |
| 200 | 8.83 ₃ | 3.55 | 4.94 | 4.43 ₈ | 8.16 ₂ | 1.08 ₂ |
| 220 | 9.11 ₁ | 3.82 | 5.32 | 5.14 ₅ | 8.46 ₉ | 1.07 ₅ |
| 240 | 9.41 ₇ | 4.08 | 5.70 | 5.90 ₀ | 8.76 ₄ | 1.07 ₄ |
| 260 | 9.69 ₄ | 4.36 | 6.10 | 6.75 ₃ | 9.06 ₅ | 1.06 ₉ |
| 280 | 9.97 ₂ | 4.63 | 6.48 | 7.61 ₉ | 9.34 ₃ | 1.06 ₇ |
| 300 | $1.02_5 \times 10^{-4}$ | 4.92 | 6.88 | 8.59 ₂ | 9.62 ₈ | 1.06 ₅ |
| 320 | 1.05 ₃ | 5.22 | 7.28 | 9.63 ₀ | 9.90 ₆ | 1.06 ₃ |
| 340 | 1.08 ₁ | 5.50 | 7.68 | $1.07_1 \times 10^{-8}$ | $1.01_7 \times 10^{-2}$ | 1.06 ₂ |
| 360 | 1.10 ₅ | 5.80 | 8.12 | 1.19 ₅ | 1.04 ₅ | 1.05 ₇ |
| 380 | 1.13 ₃ | 6.13 | 8.56 | 1.33 ₁ | 1.07 ₄ | 1.05 ₅ |
| 400 | 1.15 ₈ | 6.46 | 9.01 | 1.47 ₅ | 1.10 ₂ | 1.05 ₁ |
| 420 | 1.18 ₅ | 6.77 | 9.47 | 1.62 ₈ | 1.13 ₀ | 1.05 ₀ |
| 440 | 1.21 ₁ | 7.09 | 9.92 | 1.78 ₅ | 1.15 ₅ | 1.04 ₈ |
| 460 | 1.23 ₉ | 7.42 | $1.04_0 \times 10^{-4}$ | 1.96 ₁ | 1.18 ₃ | 1.04 ₇ |
| 480 | 1.26 ₄ | 7.75 | 1.08 ₇ | 2.14 ₂ | 1.21 ₀ | 1.04 ₅ |
| 500 | 1.28 ₉ | 8.10 | 1.13 ₅ | 2.33 ₅ | 1.23 ₅ | 1.04 ₃ |

Fig. 8 Relation between T_f and $\frac{\lambda}{(1.1a^2 + a\nu)^{1/4}}$

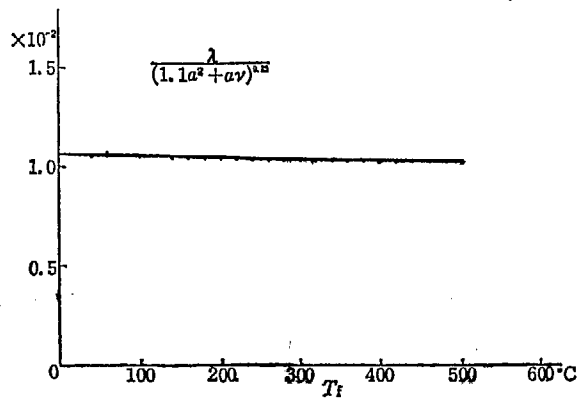


TABLE 6 Relation between T_f and $\frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}}$

| T_f °C | $a^{2/3}$ | $\nu^{7/15}$ | $\frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}}$ |
|----------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 0 | $7.04_5 \times 10^{-4}$ | 5.39×10^{-3} | $1.30_7 \times 10^{-1}$ |
| 20 | 7.70 ₈ | 5.72 | 1.34 ₈ |
| 40 | 8.32 ₀ | 6.05 | 1.37 ₈ |
| 60 | 8.93 ₂ | 6.34 | 1.40 ₉ |
| 80 | 9.56 ₃ | 6.63 | 1.44 ₃ |
| 100 | $1.02_3 \times 10^{-3}$ | 6.93 | 1.47 ₅ |
| 120 | 1.08 ₆ | 7.22 | 1.50 ₄ |
| 140 | 1.15 ₄ | 7.51 | 1.53 ₈ |
| 160 | 1.21 ₆ | 7.81 | 1.55 ₇ |
| 180 | 1.28 ₀ | 8.09 | 1.58 ₂ |
| 200 | 1.34 ₈ | 8.38 | 1.60 ₇ |
| 220 | 1.41 ₃ | 8.57 | 1.64 ₈ |
| 240 | 1.48 ₁ | 8.95 | 1.65 ₅ |
| 260 | 1.55 ₀ | 9.23 | 1.67 ₉ |
| 280 | 1.61 ₄ | 9.50 | 1.69 ₉ |
| 300 | 1.67 ₉ | 9.76 | 1.72 ₀ |
| 320 | 1.74 ₃ | $1.00_0 \times 10^{-2}$ | 1.73 ₈ |
| 340 | 1.80 ₇ | 1.02 ₉ | 1.75 ₆ |
| 360 | 1.87 ₅ | 1.05 ₆ | 1.77 ₆ |
| 380 | 1.94 ₂ | 1.08 ₂ | 1.79 ₆ |
| 400 | 2.01 ₀ | 1.10 ₈ | 1.81 ₄ |
| 420 | 2.07 ₈ | 1.13 ₄ | 1.83 ₂ |
| 440 | 2.14 ₃ | 1.15 ₈ | 1.85 ₁ |
| 460 | 2.21 ₁ | 1.18 ₂ | 1.87 ₁ |
| 480 | 2.27 ₈ | 1.20 ₈ | 1.88 ₆ |
| 500 | 2.34 ₂ | 1.23 ₂ | 1.90 ₁ |
| 600 | 2.64 ₈ | 1.29 ₂ | 2.05 ₀ |
| 800 | 3.29 ₃ | 1.57 ₃ | 2.09 ₃ |
| 1000 | 3.96 ₆ | 1.89 ₆ | 2.09 ₁ |

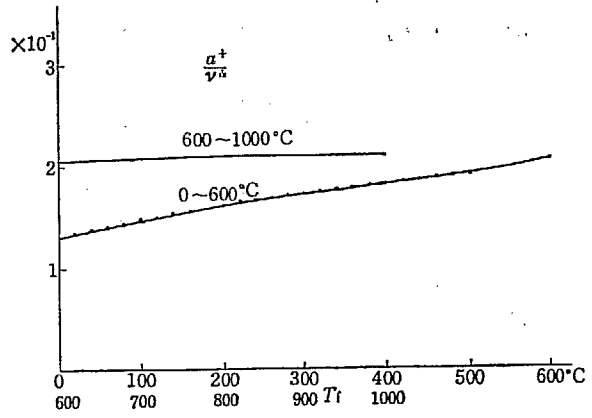


Fig. 9 Relation between T_f and $\frac{a^{2/3}}{\nu^{7/15}}$

TABLE 7 Relation between T_f and

$$F = \left\{ 0.459 - \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} \right\} \frac{1}{1.05} \frac{1}{(C_f \rho_f)^{0.45}}$$

| T_f | $\frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}}$ | F |
|-------|-------------------------------------|-----------------------|
| 0 | $2.82_7 \times 10^{-1}$ | 3.05×10^{-1} |
| 50 | 2.54 ₄ | 2.71 |
| 100 | 2.36 ₈ | 2.54 |
| 150 | 2.21 ₄ | 2.38 |
| 200 | 2.09 ₈ | 2.26 |
| 250 | 1.99 ₄ | 2.15 |
| 300 | 1.90 ₆ | 2.06 |
| 350 | 1.82 ₈ | 1.98 |
| 400 | 1.75 ₆ | 1.91 |
| 450 | 1.68 ₆ | 1.84 |
| 500 | 1.64 ₂ | 1.79 |
| 550 | 1.62 ₈ | 1.78 |
| 600 | 1.62 ₀ | 1.77 |

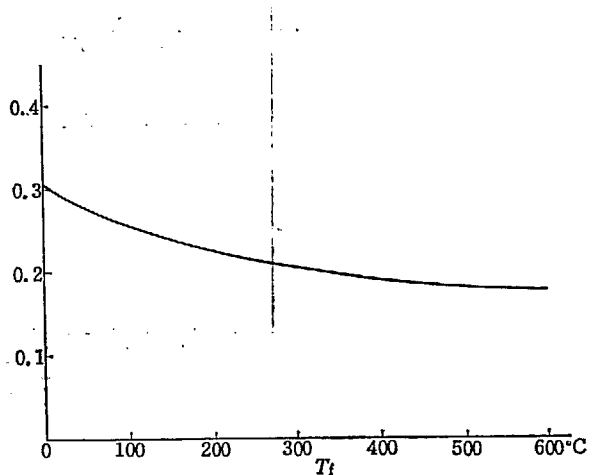


Fig. 10 Relation between T_f and

$$F = \left\{ 0.459 - \frac{\lambda}{a^{0.5} \nu^{0.5}} \right\} \frac{1}{1.05} \frac{1}{(C_f \rho_f)^{0.45}}$$