

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

# 燃料ピン挙動解析コード DIRAD - II

Fuel Pin Performance Analysis Code DIRAD-II

1980年2月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

配布限定

SN841-80-09

1980年2月

## 燃料ピン挙動解析コード DIRAD - II



報告者 山口俊弘\* 金子洋光\* 本田 裕\*  
石橋明弘\*\*

### 要 旨

DIRAD - II は、昭和 54 年 7 月より 12 月にかけて、旧 DIRAD コードを改良・修正したものである。本コードは照射初期（燃焼度 10,000 MWD/MTM 以下）における原子炉燃料要素の主に熱と燃料内の組織変化の挙動予測、解析プログラムの第 1 版であり、ここにその内容を報告する。

プログラムは、1 燃料要素を解析の対象とし、軸対称体系を仮定し、軸方向、半径方向に燃料要素を分割し、与えられた照射履歴に従い、計算を行っていく。燃料要素の解析体系は燃料ペレット、被覆管、冷却材から構成され、プログラム内に用意された材料を指定することにより、種々の原子炉タイプの燃料要素の解析が可能である。更に、燃料要素をキャプセルに封入した構造の体系についての熱的解析も用意されているため、キャプセル照射の解析も可能である。又、物性値も複数の種類が用意してあるため、問題に応じた解析が可能である。また、熱中性子炉の条件下での解析を行うことも出来る。

プログラムは FORTRAN IV で記述され、軸方向 10 分割計算例で、FACOM - M - 160 により計算時間は CPU Time 6 秒/TIME STEP である。JRR - 2 の照射試験での解析の場合、1 分間 21 秒で計算終了する（31 TIME STEP、軸方向 5 分割）。

---

\* プルトニウム燃料部・開発課・開発係

\*\* センチュリーリサーチセンター株式会社

## 目 次

まえがき	1
第1章 プログラム概要	2
第2章 各計算モデルの説明	5
第3章 使用物性値	31
第4章 照射データとのフィッティングと VOF-9Hキャプセル内温度分布予測計算	35
第5章 入力データの説明	45

## ま え が き

DIRADコードの開発は、昭和43年頃から、JRR-2、SAXTON、GETR等の照射試験の予測、解析計算のために金子（現、プル燃・開発係長）、横内（現、プル燃・設計課主査）両研究員等が行った。このコードは、軸方向単一メッシュで、半径方向51等分割のコードであり、キャプセル、および燃料ピン内温度分布、燃料内組織変化をPore Migrationを使って解く手法で開発された。この経験は後の大型コンピューターコード“HPER”コードに十分に生かされた。

このコードは、最近まで、JRR-2、SAXTON-GETR、JMTR等の照射後試験解析に活用された。今回、改良・修正を行ったのは、軸方向の多重分割、燃料ペレットからのF.P-ガス放出、リロケーション、熱膨張、熱伝導等である。このことにより、被覆管—燃料間のHot Gapの取扱いが可能となった。

近年、燃焼初期における燃料溶融線出力を調べるための照射試験結果が米国から報告されている。また、動燃事業団でも、米国エネルギー省（D.O.E.）との協力で「もんじゅ」仕様の燃料についてEBR-IIを利用した同種の実験が行われている。これらの結果とのフィッティングを行い、これからの照射試験の解析をより精度の良いものにするために、DIRADコードの修正、改良を行った。今回、改良したコードをDIRAD-IIとし、今後も継続して、より精度の高いコードに改良していく計画である。

## 第1章 プログラム概要

DIRAD-IIは燃料要素1本を解析の対象とし、軸対称形状を保持し、与えられた照射履歴に従い、燃料の主に熱的挙動を予測するプログラムである。燃料は軸方向に任意分割が可能であり、分割されたノードの平均出力（線出力）により、定常状態の仮定のもとに、半径方向温度分布を計算する。ここでは、軸方向ノード間の熱伝導及び円周方向の分布はないものとし、キャプセル外周冷却材、キャプセル内任意点、被覆管外冷却材及び被覆管内表面からペレット中心への温度計算が可能である。被覆管-ペレット・ギャップ・コンダクタンス評価モデルは、複数種類用意されており、繰返し収斂計算の必要があるモデルが選択された場合は、その収斂が得られるまで繰返し計算が行われる。温度分布が収斂すると、熱変形、組織変化（ボイド分布）、FPガス放出及び内圧の計算が行われ、必要な情報を出力し、次のタイム・ステップへ移る。計算形状を図1.1、出力履歴の模擬図を図1.2に示す。以下、各計算モデルの詳細を記す。

又、プログラム全体のフローチャートを図1.3に示す。

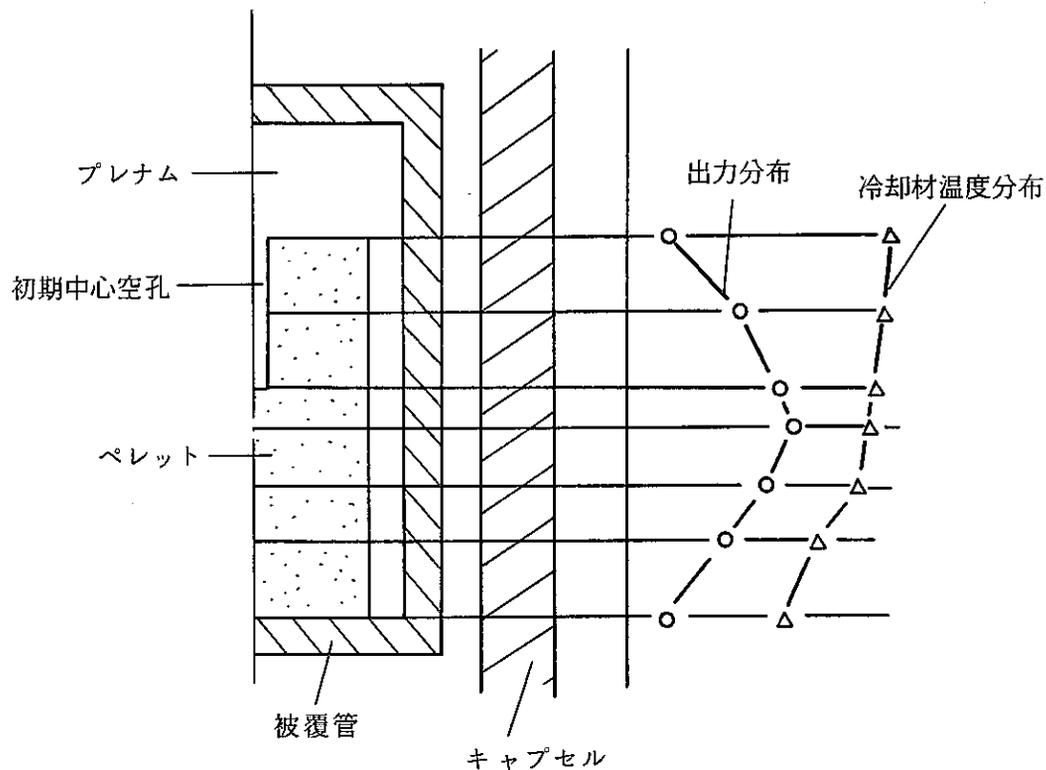


図1-1 形状図

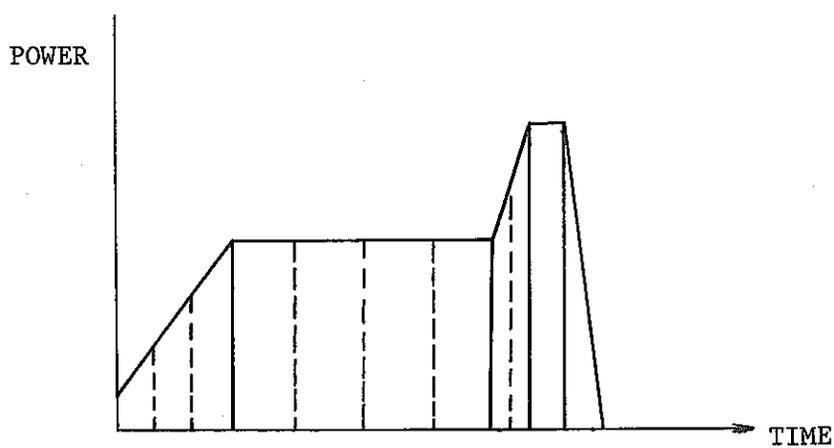
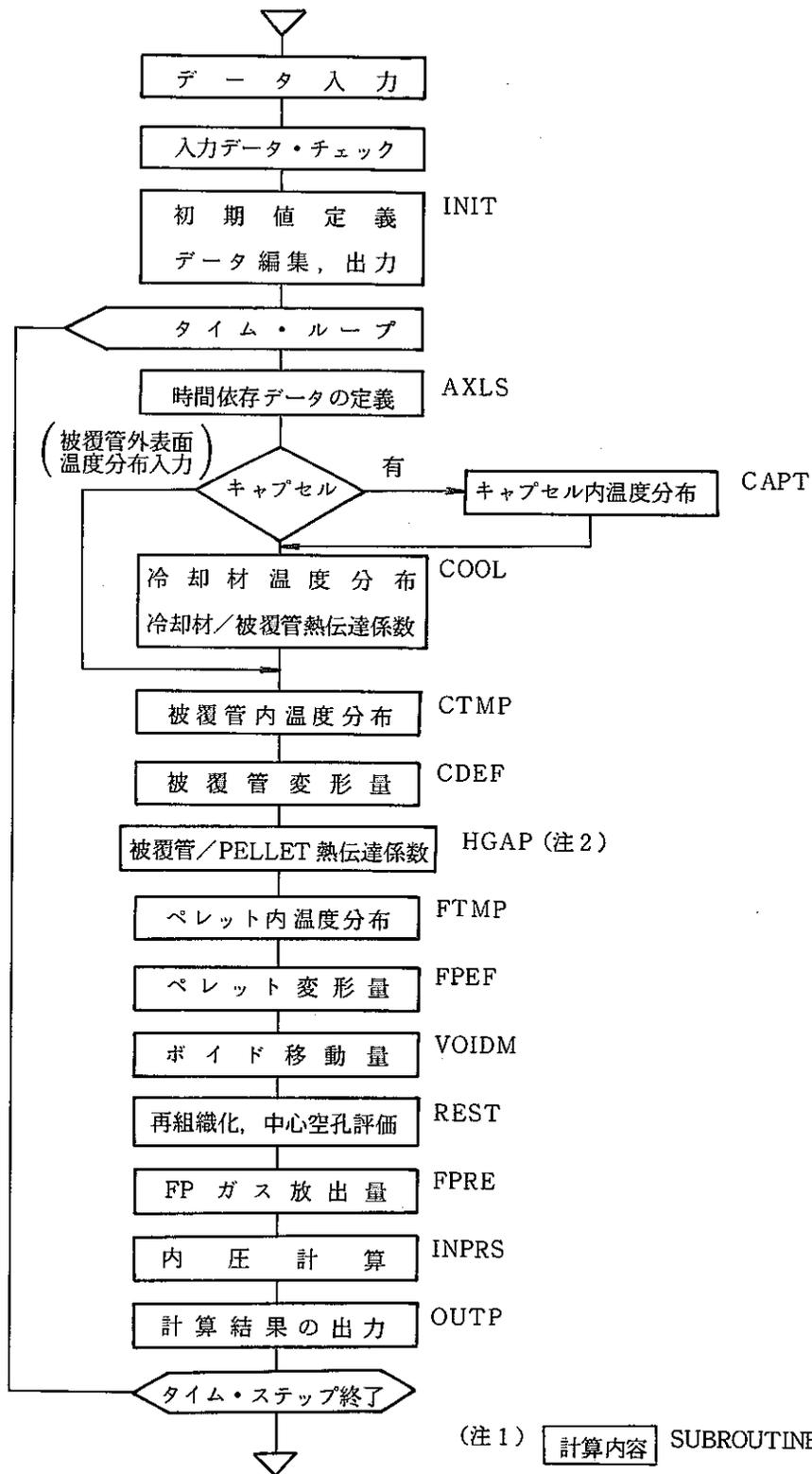


図1-2 出力履歴

DIRAD - II MAIN BLOCK DIAGRAM



(注1) 計算内容 SUBROUTINE NAME

(注2) GAP CONDUCTANCEの評価モデルが繰返し収斂計算が必要な場合は、以後のSUBROUTINE FTMP~INPRSがHGAPよりCALLされる。

## 第 2 章 各計算モデルの説明

2.1 キャプセル内温度分布

2.2 冷却材温度分布

2.3 被覆管内温度分布

2.4 被覆管変形計算

2.5 ギャップ・コンダクタンス・モデル

2.6 燃料ペレット内温度分布

2.7 燃料ペレット変形計算

2.8 ボイド分布計算

2.9 組織変化, 中心空孔の決定

2.10 FP ガス生成, 放出計算

2.11 燃料棒内圧計算

## 2.1 キャプセル内温度分布

キャプセル内装燃料の解析にあたっては、キャプセル内構成材の各温度を算出することが可能であり、各構成材は円筒形状、均質物質を仮定し熱流束連続式

$$q' = h \cdot \Delta T \quad \text{又は} \quad = k \frac{\partial T}{\partial r} + q'''$$

により、平均温度を算出する。

計算にあたっては、構成材層数、各境界半径、構成材物質の指定をしておく必要があり、温度分布計算境界条件は、キャプセル外冷却材温度、もしくは、構成材任意半径での“固定温度条件”である。もし、構成材中にキャプセル被覆管冷却材として Nak を指定した場合、Nak 中を熱伝導に支配されると仮定し、Nak 内側半径（すなわち被覆管外半径）までの温度計算を行う。

又、熱源としては  $r$ -発熱も考慮することが可能である。

プログラム内に用意されている材質を以下に示す。使用者は物質番号を指定することにより、任意のキャプセル構成を作り出すことができる。使用物性値は、温度依存性が考慮できるため、プログラムでは収斂繰返し計算が、各構成材の温度を計算する毎に行われる。

物質	熱伝導率 (W/cm <sup>2</sup> ・°C)			密度(Gr/cm <sup>3</sup> )	物質番号
	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>		
SUS 304	0.15	1.55 × 10 <sup>-4</sup>	0.	7.9	1
SUS 316	0.13	1.36 × 10 <sup>-4</sup>	0.	8.04	2
SUS 343	0.	1.0	0.	8.04	3
Zry - 2	0.1237	1.17 × 10 <sup>-4</sup>	0.	6.55	4
52 S Aℓ	1.32	2.4 × 10 <sup>-3</sup>	0.	2.702	5
2 S Aℓ	2.022	0.9286 × 10 <sup>-3</sup>	0.	2.702	6
61 S Aℓ	1.4782	2.4 × 10 <sup>-3</sup>	0.	2.702	7
Na <sub>22</sub> -K <sub>78</sub>	0.2377	7.1 × 10 <sup>-5</sup>	0.	0.84	8
Na <sub>56</sub> -K <sub>44</sub>	0.2483	0.7967 × 10 <sup>-4</sup>	-3.1238 × 10 <sup>-8</sup>	0.80	9
He	1.4267 × 10 <sup>-3</sup>	3.1122 × 10 <sup>-6</sup>	-1.8593 × 10 <sup>-9</sup>	—	-1
Ar	1.6015 × 10 <sup>-4</sup>	4.9539 × 10 <sup>-7</sup>	-1.9093 × 10 <sup>-10</sup>	—	-2

(注 - 1)

$$K(T) = k_0 + k_1 \cdot T + k_2 \cdot T^2$$

T : 温度 (°C)

(注 - 1)

ギャップの物質番号は 0 である。

## 境界温度の指定法

## 1) キャプセル外冷却材温度入力の場合

キャプセル最外筒外表面温度は

$$T_{CO} = \frac{P}{2\pi r_{CO}} / H_f + T_{COOL} \quad (2.1.1)$$

ここで

$P$  : 線出力密度 (W/cm)

$r_{CO}$  : 最外半径 (cm)

$H_f$  : キャプセル外筒-冷却材熱伝達係数 (W/cm<sup>2</sup>-°C) 入力値

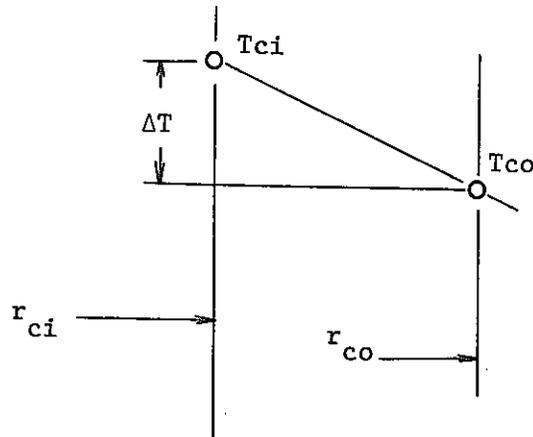
$T_{COOL}$  : 冷却水温度

## 2) 指定位置固定温度

入力により軸方向位置対温度分布 (固定温度) 表を用意し、内挿により得る。このとき、温度は時間依存変化も考慮できる。

## 計算法

任意の構成材について注目した場合 (このときその構成材の内外半径、物質、外側境界温度は与えられている)



$$\text{熱流束 } Q = P / (\pi (r_{CO} + r_{Ci}))$$

$$k(\bar{T}) = k_0 + k_1 \cdot \bar{T} + k_2 \cdot \bar{T}^2$$

$$\bar{T} = (T_{CO} + T_{Ci}) / 2$$

$$\Delta T = \frac{P \cdot \ln\left(\frac{r_{CO}}{r_{Ci}}\right) + \frac{\pi}{2} \rho \cdot \gamma (r_{CO}^2 - r_{Ci}^2) - \pi \rho \gamma \left(\frac{D_{CO}}{2}\right)^2 \ln\left(\frac{r_{CO}}{r_{Ci}}\right) - 2 \pi \int_{T_{Ci}}^{T_{CO}} k dT}{2 \pi \cdot k (\bar{T})} \quad (2.1.2)$$

$\gamma$  発熱がある場合 (METAL)

$D_{CO}$  : 被覆管外径

$\gamma$  :  $\gamma$  発熱 (Watt/gr)

$T_{CO} = T_{Ci} + \Delta T$  とし再度  $\bar{T}$ ,  $k(\bar{T})$  を評価し,  $\bar{T}$  が収斂 (判定条件  $0.1^\circ\text{C}$ ) が満足するまで繰返される。

$$\Delta T = \frac{P \ln(r_{CO}/r_{Ci})}{2 \pi k(\bar{T})} \quad (2.1.3)$$

$\gamma$  発熱がない場合 (Gas 領域)

接触領域 (Gap 領域) では Gap Conductance を入力で与えなければならない。現在は Gap は全て、同じ Gap Conductance となっている。

$$\Delta T = q'' / h_{gap} \quad (2.1.4)$$

現在、構成材の数 (領域, Gap も含む) は 10 以下でなければならない。

## 2.2 冷却材温度分布

被覆管外表面を流れる冷却材の軸方向分布は、オプションの組合せにより、幾つかの定義法がある。

- 1) キャプセル温度計算が行われた場合、キャプセル温度分布計算ルーチンにより、流動のない物質として、熱伝導により算出される。
- 2) 軸方向高さ 対 温度分布表を入力によって与え、それを用いる。(時間依存変化が考慮できる)
- 3) 計算により求める。

各温度は軸方向ノード中心位置で定義され、次式により算出される。このとき、冷却材流速、圧力は軸方向に一定であると仮定する。

$$\Delta T_C = q' \cdot \ell / (C_P \cdot M_F) \quad (2.2.1)$$

ここで、 $\Delta T_C$  : 冷却材温度上昇 ( $^\circ\text{C}$ )

$q'$  : 局所線出力密度 (W/cm)

$\ell$  : 軸方向ノード長さ (cm)

$C_P$  : 冷却材比熱 (Watt・sec/gr・°C)

$M_F$  : 質量流速 (gr/sec) (入力値: 時間依存変化考慮可能)

$C_P$  に温度依存性があるため, 平均温度が収斂するまで, 繰返し収斂計算を行う。

各軸方向ノード中心部温度は次式で与えられる。

$$T_{\text{cool}}^j = T_{\text{inlet}} + \sum_i^{j-1} \Delta T_i \quad (2.2.2)$$

この場合,  $T_{\text{inlet}}$ ,  $M_F$  が入力パラメータ ( $C_P$  一定にした場合は,  $C_P$  も入力値) であるが,  $M_F$  は照射履歴に従って変化させることができる。

被覆管—冷却材熱伝達係数もオプションによって定義が異なる。

- 1) キャプセル温度計算を行った場合は, 熱伝達係数を定義しない。
- 2) 入力で指定する。この場合軸方向に一定値である。
- 3) 冷却材が水である場合は Jens & Lottes 関係式により評価する。

### 2.3 被覆管内温度分布

被覆管外表面温度は, キャプセル温度計算を行った場合は, 計算されており, 又, 外表面温度を指定した場合は, 入力により, 空間的, 時間的变化が表で入力できるため, それを用いる。その他の場合は, 次式によって算出される。

$$T_{\text{CO}}^j = T_{\text{cool}}^j + q' / 2\pi r_{\text{CO}} \cdot h_C \quad (2.3.1)$$

ここで,  $T_{\text{cool}}^j$  :  $j$  - ノード冷却材温度 (°C)

$q'$  : 局所出力 (W/cm)

$r_{\text{CO}}$  : 被覆管外表面半径 (cm)

$h_C$  : 熱伝達係数 (W/cm<sup>2</sup>・°C)

被覆管温度分布は薄肉円筒非発熱を仮定し, 半径方向 1 次元熱伝導方程式を解くことにより得る。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.2.2)$$

又は

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot q'') = 0 \quad (2.3.3)$$

ここで、 $q''$  は heat flux であり  $-k \frac{\partial T}{\partial r}$  である。

(2.3.3) 式を  $r$  について積分すると

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = r_{CO} q'' / r \quad (2.3.4)$$

再び積分すると

$$T = T_{CO} + \{r_{CO} q'' \ln(r_{CO}/r)\} / k \quad (2.3.5)$$

となる。

ここで、被覆管内表面についての温度を得るために、(2.3.5) 式に  $r = r_{Ci}$  を代入に  $q'' = q' / 2\pi r_{CO}$  とすると

$$T_{Ci} = T_{CO} + q' / (2\pi k) \cdot \ln(r_{CO}/r_{Ci}) \quad (2.3.6)$$

となる。

ここで、 $k$  は被覆管中心温度で評価するが、温度依存性及び、任意の関数型が用いられるように、繰返し計算の手法を用いる。収斂判定条件は平均温度  $0.5^\circ\text{C}$  の差である。

## 2.4 被覆管変形計算

被覆管の変形は次の2項目によって生じるとし、全て等方性であり、半径方向変位のみが計算される。計算は被覆管内・外表面で行われる。

- (1) 熱膨張変形
- (2) 塑性変形

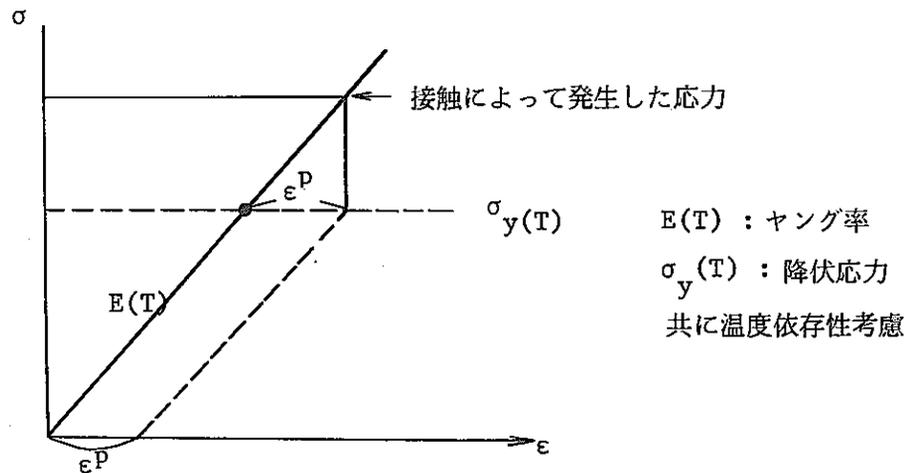
- (1) 熱膨張変形

$$\Delta L / L = \alpha(T) (T_{av} - T_R) \quad (2.4.1)$$

ここで、 $T_{av}$  は内外表面温度、 $T_R$  は基準温度 ( $20^\circ\text{C}$ ) である。 $\alpha(T)$  は物性値関数より、使用者により任意の材質、関数型が選択できる。

- (2) 塑性変形

PCMI による接触力が被覆管を降伏させた場合、次のようなモデルにより塑性歪が発生するとし、残留永久歪として、次のタイム・ステップ以後、被覆管変形に考慮される。



〔モデル〕 完全弾性体として、降伏応力 ( $\sigma_y(T)$ ) を越えた応力 ( $\sigma_{PCI}$ ) が発生した場合、塑性歪 ( $\epsilon_p$ ) を次式で定義する。

$$\epsilon_p = (\sigma_{PCI} - \sigma_y(T)) / E(T) \quad (2.4.2)$$

(注1)

$\sigma_y(T)$ 、 $E(T)$  は温度依存性を考慮しているため、温度条件、その他の条件により、 $\epsilon_p$  が異なるが、残留歪は、経験した最大値が残るとする。

$E(T)$  : 温度 T におけるヤング率

被覆管変位量計算

$$\begin{aligned} r_{co}^h &= r_{co} \times (1 + \Delta L / L) (1 + \epsilon_p^0) \\ r_{ci}^h &= r_{ci} \times (1 + \Delta L / L) (1 + \epsilon_p^I) \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

$r_{ci}$ 、 $r_{co}$  : 被覆管内外表面半径 (製造時寸法)

$r_{ci}^h$ 、 $r_{co}^h$  : " (Hot dimension)

(注-1)  $\sigma_{PCI}$  の定義は、接触圧力を  $P_{inf}$  とすると

$$\sigma_{PCI} = (P_{inf} - P_{exf}) \cdot t / r \quad (2.4.4)$$

であり、

$P_{exf}$  : 冷却材圧力

$t$  : 被覆管肉厚

$r$  : 内外表面半径

## 2.5 ギャップ・コンダクタンス・モデル

燃料棒の燃焼挙動解析に当って、燃料一被覆管ギャップ熱伝達係数の評価が、最も重要であることは言うまでもない。本プログラムはこの評価について、幾つかのモデルを用意し、使用者の目的に合った解析が可能であるよう配慮されている。モデル中、とりわけ、修正Ross & Stoute Mode が選択された場合、Hot gap, ギャップ・ガス熱伝導率, 接触有無, FPガス放出などが主たるパラメータとなるため、繰返し収斂計算により、解を得るようになっている。このため、収斂性に計算時間の大部分が支配されることになり、関連するモデル間の一貫性を保つことが重要である。

又、ギャップ・コンダクタンスの評価に当って、ギャップ中に放出された、ペレット内の吸着ガス、生成FPは、燃料棒内で“瞬時に”混合され、均一となるとするため、個々の軸方向セグメント・レベルでのギャップ・コンダクタンスが収斂しても、他の軸方向セグメントからの影響を考慮し、燃料棒内圧の収斂（DIRAD-IIでは、この収斂性のcheckを行わず、全軸方向セグメントのギャップ・コンダクタンスの収斂が得られたときと等価としている）が得られるまで、繰返し計算が続行される。繰返し計算では繰返し回数を軽減するために、繰返し回数に依存した加速因子が用いられるようになっており、通常3～6回の回数で収斂し、10回を越えることはほとんどない。収斂判定は、指定された打ち切り回数と誤差判定基準（双方入力変数）で行い、未収斂となった場合は、その旨警告のプリントと、更に、繰返し状況をプリントするが、計算は続行される。

GAP CONDUCTANCE の評価法はKFCHGにより選択が可能とし、以下にその詳細を記す。

KFCHG = 0	GAP CONDUCTANCE を一定値として評価する。(HGAPO)	
	このとき、軸方向ノード、線出力、時間にかかわらず一定である。	
= 1	修正ROSS & STOUTE式	
= 2	$Hg = 27. + \frac{6385.0}{HOT\ GAP}$	(NUS - 1871)
KFCHG = 3	$Hg = 1873. \times e^{-53.25 \cdot HOT\ GAP}$	(ACTIVE - II)
= 4	$Hg = ho (GF)(PF)(BF)(TF)$	(GEAP - 13967)

HFCHG = 4 の場合、この評価式はLocal Power のみに依存するため、繰返し計算の必要がない。

HFCHG = 2, 3 の場合、これらの評価式はHOT GAPに依存するため、繰返し収斂計算が必要である。収斂の判定は、HOT GAPが収斂すれば充分であるが、他のモデルと共通とするため、GAP CONDUCTANCEの収斂判定を行う。

GAP CONDUCTANCEの予測値をHGAP 1, 計算値をHGAP 2とすると、

$\epsilon = |HGAP 1 - HGAP 2| / HGAP 1$  により  $\epsilon < EPSHG$  の判定により収斂したと

する。これらは、軸方向ノード全てについて満足されるまで、繰返される。

HFCHG = 1 の場合、修正 ROSS & STOUTE 式

GAP CONDUCTANCE  $H_g$  は次の3つの熱伝達モードから成るとする。

$$H_g = H_{\text{gas}} + H_{\text{SOLID}} + H_{\text{RAD}} \quad (2.5.1)$$

①  $H_{\text{gas}}$  実効ギャップ中に含まれる Gas による熱伝達

$$H_{\text{gas}} = \frac{K_m}{C(r_f + r_c) + (g_f + g_c) + \text{GAP}} \quad (2.5.2)$$

$K_m$  : ギャップ中の混合ガス熱伝導率

GAP : ホットギャップ

$g_f, g_c$  : Temperature Jump distance

$C(r_f + r_c)$  : 表面粗さ

$C$  : 係数

$$g_f + g_c = g \approx 1373 \cdot \left( \frac{2-a}{a} \right) \left( \frac{\bar{K}_m \sqrt{\bar{T} \bar{W}}}{P_p} \right) \quad (2.5.3)$$

$a$  : エネルギー伝達の評価を反映させる緩和係数

$$a = A_1 \exp(-[\ln(\bar{W}) - A_2]^2 / A_3) \quad (\text{COMETHE - II}) (4)$$

$\bar{W}$  : 混合ガスの平均分子量,  $A_1, A_2, A_3$  : fitting Coeff.

$\bar{T}$  : GAP平均温度

$P_p$  : GAP圧力

$K_m = \bar{K}_m$  混合ガス熱伝導率

$$K_m = 0.5 \left( \sum X_i K_i + \frac{1}{\sum X_i / K_i} \right) \quad (2.5.5)$$

$i$  : GAP中のガス成分。ヘリウム・窒素・アルゴン・キセノン・クリプトン

$X_i$  : 各成分のモル分率

$K_i$  : 各成分の熱伝導率。次の温度2次式で表わされる。

$$K_i = A_i + B_i \cdot T + C_i \cdot T^2 \quad (2.5.6)$$

$T = ^\circ\text{C}$

$$K_i = \frac{\text{Watts}}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}$$

成分 \ 係数	$A_i$	$B_i$	$C_i$
ヘリウム	$1.43 \times 10^{-3}$	$3.17 \times 10^{-6}$	$-2.24 \times 10^{-10}$
窒素	$2.72 \times 10^{-4}$	$4.81 \times 10^{-7}$	$9.68 \times 10^{-12}$
アルゴン	$1.83 \times 10^{-4}$	$3.58 \times 10^{-7}$	$-2.32 \times 10^{-11}$
キセノン	$5.15 \times 10^{-5}$	$1.69 \times 10^{-7}$	$-3.50 \times 10^{-11}$
クリプトン	$9.05 \times 10^{-5}$	$2.47 \times 10^{-7}$	$-4.89 \times 10^{-11}$

(2.5.2) 式の  $C(r_f + r_c)$  については,  $C$  は "PIPER" モデルを用い

$$C = 2.75 - 0.0025 \cdot P$$

とし,  $P$  は接触圧力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) であり,  $r_f, r_c$  (表面粗さ) は各々

$$r_f = 3.75 \mu\text{m}$$

$$r_c = 1.0 \mu\text{m}$$

を使用している。

②  $H_{\text{SOLID}}$  固体接触熱伝達

$$H_{\text{SOLID}} = K_s \cdot P / (A_0 \cdot r^{1/2} \cdot H) \quad (2.5.7)$$

$K_s$  : 実効固体熱伝導率

$$K_s = 2 K^c \cdot K^f / (K^c + K^f)$$

$$r = \{(r_c^2 + r_f^2) / 2\}^{1/2}$$

自乗平均粗さ

$P$  : 接触圧

$H$  : メイヤー硬度

$A_0$  : 定数

③  $H_{\text{RAD}}$  輻射熱伝達

$$q' / A_f = \sigma \left[ \frac{1}{\epsilon_f} + A_f / A_c \left( \frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} (T_f^4 - T_{ci}^4) \quad (2.5.8)$$

$T_f, T_{ci}$  : 燃料・被覆管表面温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$A_f, A_c$  : 単位長さ当りの燃料・被覆管伝熱面積

$\epsilon_f, \epsilon_c$  : 燃料・被覆管エミシビィティ

$\sigma$  : Stefan Boltzmann Constant

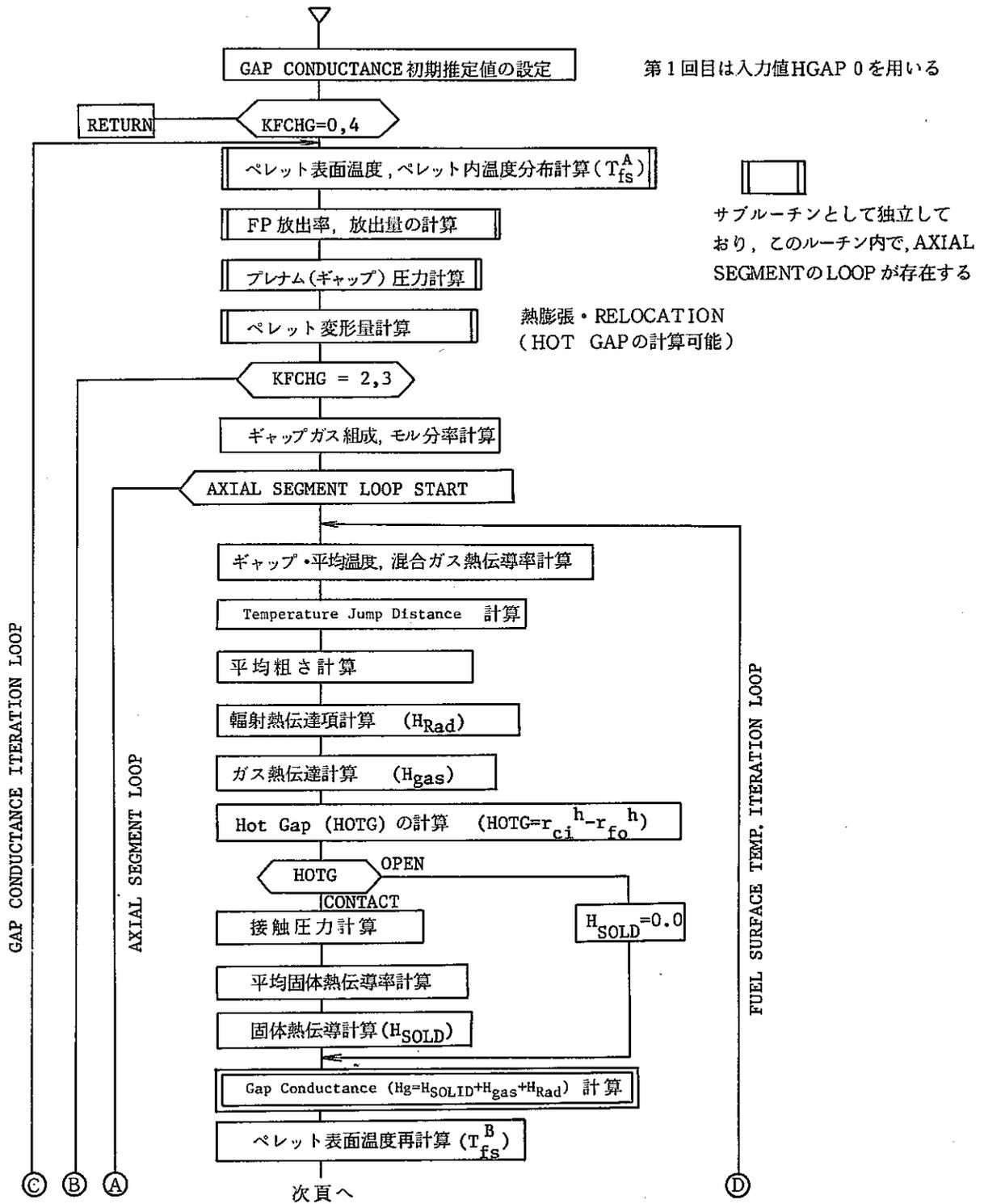
ギャップ熱伝達を次式で定義する。

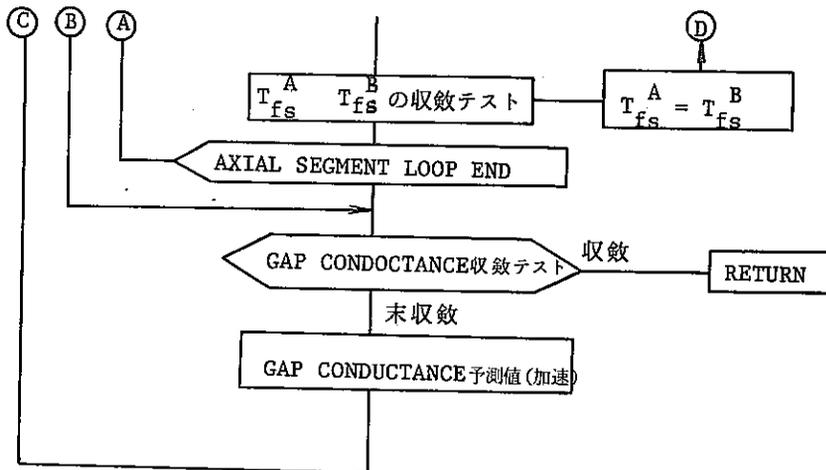
$$H_{\text{RAD}} = q' / A_f / (T_f - T_{\text{ci}})$$

(2.5.8) 式を代入すると,

$$H_{\text{RAD}} = \sigma \left[ \frac{1}{\varepsilon_f} + A_f / A_c \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} (T_f^2 + T_{\text{ci}}^2) (T_f - T_{\text{ci}}) \quad (2.5.9)$$

GAP CONDUCTANCE の各々評価法を考慮した場合の、計算フローチャートを次に示す。特に、収斂計算を必要とするとき、評価式に現われるいくつかのパラメータを算出するために、サブルーチンがコールされるが、ここでは、収斂計算のためであり、GAP CONDUCTANCE が収斂すれば、再度計算され直すことになる。この方法によれば、GAP CONDUCTANCE を定数で与えたような場合でも、全体の流れを乱すことはない。





KFCHG = 0,4 の場合は、一定値もしくは、線出力密度依存のため以後計算はしない。

KFCHG = 2,3 の場合はHOT GAP依存であるので、HOT GAPの計算まで行ない繰返し計算となる。

KFCHG = 1 の場合は"Ross & Stoute"で種々の計算となる。

## 2.6 燃料ペレット内温度分布

[計算条件]

1. 半径方向1次元熱伝導方程式を解く。(定常状態)
2. 半径方向座標は、初期内径/外径を  $R_{fi}$ ,  $R_{fo}$  とし 50 等分割された点 (半径方向ノード) で計算し、計算生涯変わらないとする。
3. 半径方向発熱分布 (FLUX DEPRESSION) を考慮することが可能。
4. 熱伝導率の温度依存性を考慮し、繰返し計算を行う。

[解法]

$$V \cdot (K \Delta T) = -q''' \quad (2.6.1)$$

T : 温度

K : 熱伝導率

$q'''$  : 発熱密度

軸対称円筒座標系に書きかえると (Z方向に熱移動がないと仮定)

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot K \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = -q'''(r) \quad (2.6.2)$$

(2)式を2回積分すると

$$\int_T^{T_0} K dt = - \int_r^{r_0} \frac{1}{\xi} \int_{\xi_m}^{\xi} \xi q'''(\xi) d\xi d\xi \quad (2.6.3)$$

(3)式を半径方向ノード点での差分に展開すると

$$\Delta T_i = \frac{q'''}{4K} (r_{i+1}^2 - r_i^2) - \left( \frac{q'''}{2K} r_i^2 - \frac{q'}{2\pi K} \right) \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \quad (2.6.4)$$

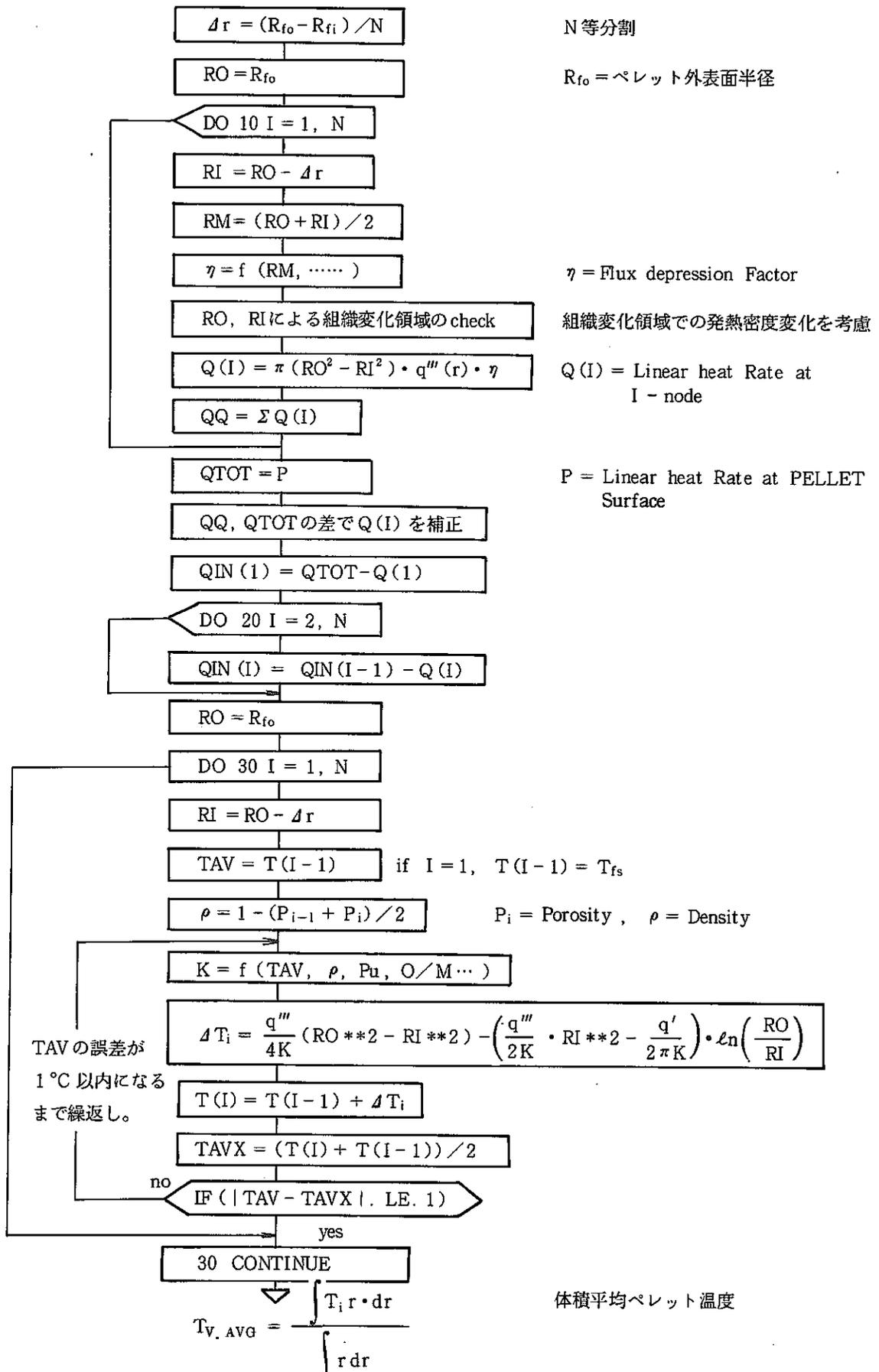
となる。

半径方向 flux depression, 及び組織変化を考慮すると  $q'''$ ,  $q'$  は各リング毎に変化する。

ここで  $T_{i+1} = T_i + \Delta T_i$  とし、K が温度依存であるため、リング平均温度  $T_i^{\text{av}} =$

$(T_i + T_{i+1}) / 2$  を計算し、収斂するまで、繰返し計算を行う。

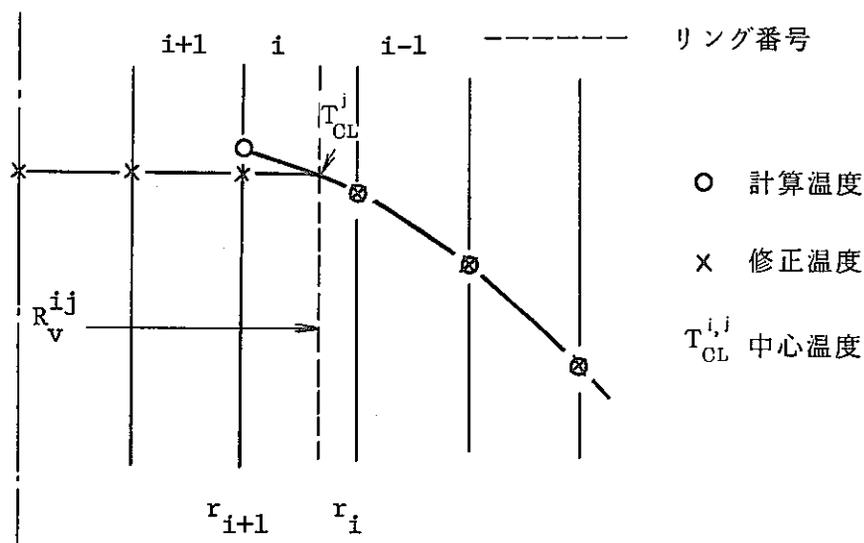
次にフローチャートを示す。



以上が、ペレット内温度分布計算の基本であるが、DIRAD-IIは更に、次の様な仮定を行っている。

- (1) 中心空孔内の温度計算は行わない。前タイム・ステップ(i)で得られた、中心空孔径を  $R_V^{i,j}$  (j - axial node) とすると (Gap Conductanceを収斂計算で求める場合は、iは前iteration状態である)、ペレット内を50等分割したリング中、 $R_V^{i,j}$ が存在するリングを見出し、そのリングの内半径位置までの計算を行う。次に、そのリングの内・外半径、温度及び  $R_V^{i,j}$ を用いて、直線近似により、中心温度を定義する。

更に、もし、そのリングより内側にリングが存在すれば、それらのリングは、先に求めた中心温度に置き換える。(すなわち、中心空孔ボイド部分である)



- (2) 計算された温度が融点以上の場合、融点(入力値)に置き換える。この際、計算された温度分布を基に、最初に融点を越えるリングを50リング中より見出し、そのリングの内外半径及び温度を用い、溶融領域内径  $r_{met}$  を決定し、(1)と同様な方法で、計算された温度を修正する。

## 2.7 燃料ペレット変形計算

燃料ペレットの応力-歪計算は行わず、半径方向1次元外径変位を以下のように算出する。

ペレットの外径変形は

- 1) 熱膨張
- 2) Relocation

によって、変形し、組織変化モデルによる中心空孔の形成がなされる。

### 2.7.1 熱膨張モデル

与えられた温度における線熱膨張率を次式のように、ペレット全体において平均化する。

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_{th} &= \overline{\alpha(T) \cdot T} = \int d(t) \cdot t \cdot dt \\ &= \sum_i \alpha(\bar{t}_i) \cdot \bar{t}_i \cdot \Delta r_i\end{aligned}\quad (2.7.1)$$

ここで、 $\bar{t}_i$  は半径方向リング i の平均温度であり、 $\Delta r_i$  はリング幅である。

外径変位量は

$$\Delta r = \bar{\varepsilon}_{th} \cdot R_{fo} \quad (2.7.2)$$

となる。

### 2.7.2 RELOCATION モデル

Relocation Model は選択オプション KFREL により制御されいくつかのモデルを有している。

- KFREL = 0 Relocation を考慮しない
- = 1 Dutt & Baker Model
- = 2 PNC Model

#### Dutt & Baker Model

$$\Delta G = G_0 \cdot (1 - G_1 - G_2) + G_3$$

$$G_1 = \tau \cdot (1 - \exp(\alpha_3 \cdot P_c))$$

$$G_2 = (\alpha_4 - \tau) \times (1 - \exp(-\alpha_5 \cdot Bu/1000))$$

$$G_3 = P \cdot \alpha_6 / G_0$$

$$\tau = \alpha_1 \cdot P \cdot (P - d_2)$$

ここで、 $P$  = local power (W/Ft)

$Bu$  = Burnup (MWD/MTM)

$\alpha_1 \sim \alpha_6$  fitting factor

$$\alpha_1 = 0.00672$$

$$\alpha_2 = 12.5$$

$$\alpha_3 = 0.919$$

$$\alpha_4 = 0.89$$

$$\alpha_5 = 7.11$$

$$\alpha_6 = 0.239$$

## PNCモデル

$$\Delta R_{\text{Rel}} = \frac{RR}{\pi} \times (2 \cdot \text{NCRACK} - \sqrt{2} \cdot (\text{NCRACK} - 4)) / 4$$

ここで、NCRACKは

$$\begin{aligned} \text{NCRACK} &= 0 & P < 100 \\ \text{NCRACK} &= 2 & 100 \leq P < 125 \\ \text{NCRACK} &= P \cdot 8 / 500 & 125 \leq P < 450 \\ \text{NCRACK} &= 7 & 450 \leq P \end{aligned}$$

P = 線出力密度 (W/cm)

であり、RRは

$$RR = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot G + \alpha_3 \cdot G^2 + \alpha_4 \cdot G^3$$

であり、

G = 前タイムステップでの "COLD GAP" ( $\mu\text{m}$ )

$\alpha_1 \sim \alpha_4$

$$\alpha_1 = 2.24997 \times 10^{-2}$$

$$\alpha_2 = 4.9611 \times 10^{-2}$$

$$\alpha_3 = 8.9030 \times 10^{-4}$$

$$\alpha_4 = -6.0928 \times 10^{-7}$$

以上でRelocationによる半径方向変位が定義されるが、これに、Reactor Power Cycleの依存性を考慮する。Reactor Power Cycleは入力により履歴データとして定義することも可能であるが、プログラム内で判定する場合には、出力の下降時で、Rod Peak Powerが50 W/cm以下になった場合を1 Reactor Cycleとしている。

又、PNCモデルにおいては、Relocation歪を前タイム・ステップまでの"Cold Gap"の関数としているため、2 Reactor Cycle以後のRelocation歪は、歪増分が算出されている。

尚、負のRelocation歪増分は0とみなしている。

## 2.8 ボイド分布計算

燃料ペレット内のボイド移動を、与えられた温度分布(勾配)により計算を行う。計算モデルは以下の仮定によって行われている。

- (1) ボイド移動は半径方向のみである。
- (2) 軸対称円筒座標系定常状態
- (3) 半径方向等分割51メッシュ

- (4) 製造時は一様分布  
 (5) ペレット外表面からのボイド流出はない

## 計算モデル

## 基本方程式

$$Q_+ = \int_t^{t+\Delta t} v(r, t) \rho(r, t) 2\pi r dt \quad (2.8.1)$$

$$Q_- = \int_t^{t+\Delta t} v(r - \Delta r, t) \cdot \rho(r - \Delta r, t) 2\pi r dt \quad (2.8.2)$$

$$Q = \pi [r^2 - (r - \Delta r)^2] [\bar{\rho}(t + \Delta t) - \bar{\rho}(t)] = Q_+ - Q_- \quad (2.8.3)$$

- $\rho$  : ボイド率  
 $t$  : 時間  
 $dt$  : 時間増分  
 $v$  : ボイド移動速度  
 $r$  : 半径  
 $\Delta r$  : 1メッシュ幅

初期条件  $\rho(r, t_0) = \rho_0$

境界条件  $v(r_0, t) = 0$

1メッシュ内の分布を直線近似

$$\rho(r) = a + b \cdot r \quad (2.8.4)$$

(注-1)

移動速度の時間平均を

$$\bar{v}(r) = \{v(r, t) + v(r, t + \Delta t)\} / 2 \quad (2.8.5)$$

として、(2.8.1) ~ (2.8.3) を差分近似し、積分を行う。

(2.8.1), (2.8.2) 式の積分は、平均速度  $\bar{v}(r)$  を用い

(注-1)

$$b = \frac{1}{\Delta r} \{\rho(r) - \rho(r - \Delta r)\}$$

$$a = \frac{1}{\Delta r} \{r \cdot \rho(r - \Delta r) - (r - \Delta r) \rho(r)\}$$

$$Q_+ = \bar{v}(r) \cdot \frac{1}{2} \{ \rho(r, t) + \rho(r, t + \Delta t) \} \cdot 2\pi r \cdot \Delta t \quad (2.8.6)$$

$$Q_- = \bar{v}(r - \Delta r) \cdot \frac{1}{2} \{ \rho(r - \Delta r, t) + \rho(r - \Delta r, t + \Delta t) \} \cdot 2\pi(r - \Delta r) \cdot \Delta t \quad (2.8.7)$$

とする。

(2.8.3) 式中の  $\bar{\rho}(r)$  は (2.8.4) 式を用い、 $r \sim r - \Delta r$  間を平均すると、

$$\begin{aligned} \bar{\rho}(r) &= \frac{\int_{r-\Delta r}^r (a + b \cdot r) \cdot r \cdot dr}{\int_{r-\Delta r}^r r \cdot dr} \\ &= \{ a(2r - \Delta r) + \frac{2}{3}b(3r^2 - 3r \cdot \Delta r + \Delta r^2) \} / (2r - \Delta r) \quad (2.8.8) \end{aligned}$$

となる。

ここで、変数 A, B を用いて (2.8.8) 式を表わすと

$$\bar{\rho}(r) = (aA + bB) / A \quad (2.8.9)$$

となり

$$A = 2r - \Delta r \quad (= r - (r - \Delta r))$$

$$B = \frac{2}{3} (3r^2 - 3r \cdot \Delta r + \Delta r^2) \quad (= \frac{2}{3} \{ r^2 + (r - \Delta r)^2 + r(r - \Delta r) \})$$

である。

ここで、(2.8.3) 式に (2.8.9) 式を代入し、両辺から  $\pi$  を消去し、左辺について整理すると

$$\begin{aligned} Q &= \rho(r - \Delta r, t + \Delta t) \{ rA - B \} + B \{ \rho(r, t + \Delta t) - \rho(r, t) + \rho(r - \Delta r, t) \} \\ &\quad + A \{ -(r - \Delta r) \rho(r, t + \Delta t) - r \rho(r - \Delta r, t) + (r - \Delta r) \rho(r, t) \} \quad (2.8.10) \end{aligned}$$

となり、次に右辺について整理すると

$$\begin{aligned} Q_+ - Q_- &= [ \bar{v}(r) \{ \rho(r, t) + \rho(r, t + \Delta t) \} r \Delta t ] \\ &\quad - \bar{v}(r - \Delta r) \{ \rho(r - \Delta r, t) + \rho(r - \Delta r, t + \Delta t) \} (r - \Delta r) \cdot \Delta t \quad (2.8.11) \end{aligned}$$

であり、ボイドの保存則より

$$Q = Q_+ - Q_-$$

とし、 $\rho(r - \Delta r, t + \Delta t)$  について書きかえると

$$\begin{aligned} & \rho(r - \Delta r, t + \Delta t) [rA - B + \bar{v}(r - \Delta r)(r - \Delta r) \cdot \Delta t] \\ &= \Delta t \{ \bar{v}(r) [\rho(r, t) + \rho(r, t + \Delta t)] r - \bar{v}(r - \Delta r) \cdot \rho(r - \Delta r, t)(r - \Delta r) \} \\ & \quad + B [\rho(r, t) - \rho(r - \Delta r, t) - \rho(r, t + \Delta t)] \\ & \quad + A [(r - \Delta r) \rho(r, t + \Delta t) + r \cdot \rho(r - \Delta r, t) - (r - \Delta r) \rho(r, t)] \end{aligned} \quad (2.8.12)$$

が与えられる。

境界条件  $\rho(r_0, t) = \rho_0$  であることより、 $\tau = t + \Delta t$  における分布は、(2.8.12)式に、逐時、外半径リングでのボイド率  $\rho(r, t + \Delta t)$  を代入していくことにより得られる。

又、計算プログラム中には、次の近似と制限を設けてある。

(1) 移動速度  $v$  を定義する温度勾配  $dT/dr$  は

$$(T_i - T_{i-1}) / \Delta r$$

とする。

(2) 計算されたボイド率が、使用者の与えた最小ボイド率以下であれば、その値に置きかえ、次のタイム・ステップではその最小ボイド率であるリング以内は計算しない。  
ボイド移動速度を与える関数は、以下の式が用意されており使用者の選択による。

$$\begin{aligned} \text{KFPOR} &= 1 && \text{MIPEC MODEL} \\ &= 2 && \text{PNC MODEL} \\ &= 3 && \text{PIPER MODEL} \end{aligned}$$

## 2.9 組織変化，中心空孔の決定

ペレット内ボイド分布（密度分布）が計算されると、それを基にただちに、ペレット内金相変化及び中心空孔の形成を算出することができる。

組織変化の計算は以下の手順によって行われる。

- 1) 不変化一等軸晶領域境界，等軸晶一柱状晶領域境界の“密度”を入力によって使用者が与える。<sup>(注1)</sup> ( $\rho_{eq}$ ,  $\rho_{col}$ )。各領域の平均密度ではなく、境界密度であることに注意。
- 2) 算出された密度分布及び  $\rho_{eq}$ ,  $\rho_{col}$  を用い、境界の存在するリング及び半径を計算する

(リング内での分布は直線近似であり、ペレット内を50メッシュ分割しているので充分であると思われる)。又、その時の半径方向温度分布も算出されているので、各境界温度も決定できる(各半径  $r_{eq}$ ,  $r_{col}$ , 温度  $T_{eq}$ ,  $T_{col}$ )。ここで決定された各半径は、FPガス放出計算モデルで用いられることになる。

- (3) 上記  $r_{eq}$ ,  $r_{col}$  は、各タイム・ステップ毎にその最大値が記憶され組織変化領域が小さくなることはないとする。

#### 中心空孔決定モデル

中心空孔の定義は、下記のボイド保存則を満足する方程式の  $x$  であるとする。

$$2\pi \int_{r_{fi}}^x 1.0 \cdot r dr + 2\pi \int_x^{r_{fo}} V(r) r dr = 2\pi \int_{r_{fi}}^{r_{fo}} V_0(r) r dr \quad (2.9.1)$$

$V_0(r)$  は初期のボイド率である。

ボイド分布は“2.8 ボイド分布計算”で述べたように、半径メッシュ上で算出されているために、次のような操作により  $x$  を決定する。

- (1) 外側メッシュリングより内側に向け、メッシュ半径を  $x^*$  と仮定し

$$\begin{aligned} \delta R(x_i^*) &= \left[ \int_{r_{fi}}^{x_i^*} 1.0 r \cdot dr + \int_{x_i^*}^{r_{fo}} V(v) r dr \right] - \int_{r_{fi}}^{r_{fo}} V_0(r) r dr \\ &= (R_v - R_p) - R_0 \end{aligned} \quad (2.9.2)$$

を計算し、 $\delta R(x_i^*)$  が負になったリング  $i$  に中心空孔が存在することを予測する。

- (2) 積分を増分に置きかえるため

$$\Sigma \Delta V_i = \Sigma \bar{V}_i \cdot \Delta r \cdot r_i$$

と近似し、このときの  $\bar{V}_i$  は、 $i$ ,  $i+1$  メッシュでのボイド率  $V_i$ ,  $V_{i+1}$  を用いて、この間直線近似 ( $V_i = a + b \cdot r$ ) し、

$$\Delta \bar{V}_i = \frac{\int_{r-\Delta r}^r (a + b \cdot r) r \cdot dr}{\int_{r-\Delta r}^r r \cdot dr}$$

(注1) 入力オプション変数 MREST キ 1 の場合は次のように定義する。

$$\rho_{eq} : DV \cdot 0.97$$

$$\rho_{co} : DV \cdot 1.0$$

$$DV : 0.2 \cdot f + 79.0 \quad \text{ここで } f = \text{ペレット初期密度 (\% TD)}$$

とする。

(3) リング $i$ 中に存在する中心空孔径は

$$r_{cv} = \left( R_v + \frac{1}{2} \delta R(x_i^*) \right)^{1/2} \quad (2.9.3)$$

である。

## 2.10 FPガス生成・放出計算

FPガスの生成は、ペレットの組成などに依存せず一定の、1 fission 当りの放出エネルギー、FPガス生成率（各々入力可能）を用い、燃焼度依存で算出される。

又、FP放出率は、ペレット内各組織変化領域毎に放出率を定義し（入力）各領域の体積平均放出率を用いて、生成されたFPを放出する。プレナム中に放出されたFPは、各タイム・ステップ毎に蓄積され、内圧上昇をもたらす。

以後に、算出式、定数を示す。

- $W_j$  : 単位長さ当りの重量 (MTM/cm)
- $\Delta BU_j$  : 燃焼度増分 (MWD/MTM)
- EFISS : 1 fission 当りの放出エネルギー (MeV)
- GFISS : 1 fission 当りのガス状FP発生量 (個)
- $j$  : 軸方向セグメントインデックス

タイム・ステップ ( $\Delta T$ ,  $\Delta BU$ ) 間に発生するFP量 (体積) は

$$\begin{aligned} \text{核分裂数} \quad N_j &= \Delta BU_j \cdot W_j \cdot 5.392 \times 10^{23} / \text{EFISS} \\ \text{FP発生量} \quad \Delta G_j^i &= N_j \cdot \text{GFISS} \cdot 22.4 \times 10^3 / 6.025 \times 10^{23} \\ \text{積算発生量} \quad G_j &= \sum_i \Delta G_j^i \end{aligned}$$

- FPGRC : 柱状晶領域FP放出率 (INPUT value)
- FPGRE : 等軸晶 "
- FPGRU : 不変化 "
- VC : 柱状晶領域体積 ( $r_{col}^2 - r_{fi}^2$ )
- VE : 等軸晶 "
- VU : 不変化 "
- VTOT : ペレット全体積 ( $r_{fo}^2 - r_{fi}^2$ )

平均FP放出率は、各領域放出率の体積重み付平均により

$$\bar{r}_j = (FPGRC \cdot VC + FPGRE \cdot VE + FPGRU \cdot VU) / VTOT$$

とし、FP放出量は

$$R_j = G_j \cdot \bar{r}_j$$

燃料棒 1 本当りの生成量、放出量は

$$\Delta G_{ROD} = \sum_j^{\text{セグメント}} \Delta G_j$$

$$G_{ROD} = \sum_j G_j$$

$$R_{ROD} = \sum_j R_j$$

となり、燃料棒当りの平均放出率は

$$\bar{r}_{ROD} = R_{ROD} / G_{ROD}$$

である。

GAP CONDUCTANCE 繰返し計算の際には、温度分布が変化するため、境界半径が変わり、平均放出量が異なる。

## 2.11 燃料棒内圧計算

燃料棒内のガス空間は、プレナム及び燃料被覆管ギャップとし、燃料より放出されたFPガス、燃料吸着ガスはただちに初期封入ガスと混合され、燃料棒内に均一に分布するとする。

又、プレナム体積は燃焼生涯一定であり、ギャップ空間は、接触していても表面粗さの空間は残っているものとする。

以下に計算式を示す。

ガス圧力に寄与するガスを次の4種類とする。

- (1) 初期封入ガス・モル数  $n_f$
- (2) 初期吸着ガス  $n_s$
- (3) 水蒸気  $n_w$
- (4) 放出FPガス  $n_{fp}$

ガスは完全理想気体として

プレナム圧力  $P_p$  は

$$P_p = \frac{n}{\frac{V_{pl}}{T_{pl}} + \sum_j \frac{V_{gap}^j}{T_{gap}^j}}$$

であり, ここで

- $T_{pl}$  : プレナム平均温度 (=冷却材出口温度) (°K)  
 $V_{pl}$  : プレナム体積 (燃焼生涯変化しないとする, INPUT)  
 $T_{gap}^j$  : 軸方向ノード j のギャップ平均温度 (°K)  
 $V_{gap}^j$  : " ギャップ体積  
 $n$  : 全モル数  $n = n_f + n_s + n_w + n_{fp}$

FP ガス中の  $K_R$ ,  $X_e$  成分の決め方

FP 放出全量を TOTFPG (体積) とし,  $K_R$ ,  $X_e$  の各原子 ( $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu$ ) の核分裂収率, Total 収率を各々

$$Y_{K_R}^{235}, Y_{K_R}^{238}, Y_{K_R}^{Pu}$$

$$Y_{X_e}^{235}, Y_{X_e}^{238}, Y_{X_e}^{Pu}$$

$$Y_{TOT}^{235}, Y_{TOT}^{238}, Y_{TOT}^{Pu}$$

とすると

$$X_{e\text{non}} (\text{モル数}) = \frac{\text{TOTFPG}}{2.24 \times 10^4} (Y_{X_e}^{235} \cdot \Sigma^{235} + Y_{X_e}^{238} \cdot \Sigma^{238} + Y_{X_e}^{Pu} \cdot \Sigma^{Pu}) / \text{TOT}$$

$$K_{R\text{rypton}} (\text{モル数}) = \frac{\text{TOTFPG}}{2.24 \times 10^4} (Y_{K_R}^{235} \cdot \Sigma^{235} + Y_{K_R}^{238} \cdot \Sigma^{238} + Y_{K_R}^{Pu} \cdot \Sigma^{Pu}) / \text{TOT}$$

$$\text{TOT} = (Y_{TOT}^{235} \cdot \Sigma^{235} + Y_{TOT}^{238} \cdot \Sigma^{238} + Y_{TOT}^{Pu} \cdot \Sigma^{Pu})$$

$\Sigma$  : 核分裂断面積比で次のように定義する。

$$\Sigma^{235} = \sigma^{235} \cdot f^{235} / \Sigma^{\text{TOT}}$$

$$\Sigma^{238} = \sigma^{238} \cdot (1 - f^{235} - f^{Pu}) / \Sigma^{\text{TOT}}$$

$$\Sigma^{Pu} = \sigma^{Pu} \cdot f^{Pu} / \Sigma^{\text{TOT}}$$

$$\Sigma^{\text{TOT}} = \sigma^{235} \cdot f^{235} + \sigma^{238} \cdot (1 - f^{235} - f^{Pu}) + \sigma^{Pu} \cdot f^{Pu}$$

$$f^{235} = U^{235} \text{ Metal fraction (INPUT)}$$

$$f^{Pu} = Pu^{239} + Pu^{241} \text{ Metal fraction (INPUT)}$$

使用 data

## FISSION YIELD

	U <sup>235</sup>	U <sup>238</sup>	Pu
K <sub>R</sub>	0.0482	0.03085	0.0238
X <sub>e</sub>	0.21749	0.2135	0.23314
TOTAL	0.26569	0.24435	0.25694

## FISSION CROSS SECTION

$\sigma$	1.36	0.0855	1.64
----------	------	--------	------

### 第3章 使用物性値

#### 3.1 熱膨張係数

##### ① 燃料

$$(イ) \quad \alpha = \frac{1}{T} (4.36 \times 10^{-4} + 6.793 \times 10^{-6} \cdot T + 2.92 \times 10^{-9} \cdot T^2) : (U, Pu) O_2$$

$$(ロ) \quad \alpha = 9.61 \times 10^{-6} + 1.57 \times 10^{-9} \cdot T : (UO_2)$$

##### ② 被覆管

$$(イ) \quad \alpha = 1.63656 \times 10^{-5} + 7.29 \times 10^{-9} \cdot T : (SUS)$$

$$(ロ) \quad \alpha = 5.675 \times 10^{-6} + 1.7 \times 10^{-9} \cdot T : (Zry)$$

$\alpha$  : 熱膨張係数 (1/°C)

T : 温度 (°C)

#### 3.2 熱伝導率

##### ① 燃料

$$(イ) \quad K_{f(p)} = 4.7125 \times 10^{-3} + \frac{1}{\{3.8431 \times 10^{-2} + 9.8955 \times 10^{-2} \times (1.0 - \rho)\} T} + 7.1165 \times 10^{-13} \times T^3$$

K = (W/cm · °C)

T = °C

(UO<sub>2</sub> PNC MODEL)

$$(ロ) \quad K_f (95 \% T. D.) = \frac{38.24}{T + 129.4} + 6.1256 \times 10^{-13} \cdot T^3 \quad (W/cm \cdot ^\circ C)$$

$$K_{f(p)} = \frac{KT(1-P)}{1+P(\alpha-1)}$$

KT = 100% T. D. の熱伝導率 (W/cm · °C)

P = 空孔率

$\alpha$  = 1.5 (90 ~ 100% T. D.)

= 2.0 (< 90% T. D.)

$K_{f(p)}$  については PNC MODEL と同じ。

(UO<sub>2</sub> MODEL)

$$(ハ) \quad K_{f(p)} = \left( \frac{1-P}{1+1.5P} \right) \cdot \left( \frac{1}{2.88 + 0.0252 \cdot T} + 5.82 \times 10^{-13} \cdot T^3 \right) \quad (W/cm \cdot ^\circ K)$$

[(U, Pu) O<sub>2</sub> MODEL]

$$(二) K_{f(p)} = 0.01169 + \frac{1}{\left[ 0.06717 + \frac{0.0226 \cdot (1-\rho)}{O/M - 1.90} \right] \cdot T} + 0.7214 \times 10^{-12} \cdot T^3$$

(W/cm · °C)

[(U, Pu) O<sub>2</sub> MODEL]

$$(ホ) K_{f(p)} = \left\{ \frac{1.133 (1-P)}{[1 + (1 + 10P) P]} \right\} \cdot \left\{ \frac{1}{0.78 + 0.02935 \cdot T} + 6.60 \times 10^{-13} \cdot T^3 \right\}$$

(W/cm · °C)

[(U, Pu) O<sub>2</sub> MODEL]

$$(ニ) K_{f(p)} = 0.009855 + \frac{1}{[0.04094 + 0.4555 \times (2.0 - O/M) + 0.1998 \cdot (1.0 - \rho)] T} + 4.6518 \times 10^{-13} \cdot T^3$$

(W/cm · °C)

[(U, Pu) O<sub>2</sub> MODEL]

### 3.3 Young's MODULUS

#### ① 燃料

$$(イ) E = 2.02 \times 10^6 - 3.6428 \times 10^6 \cdot P - 1.4586 \times 10^2 \cdot T \quad [(U, Pu) O_2 \text{ MODEL}]$$

$$P = \text{Porosity}, \quad T = ^\circ\text{C}, \quad E = \text{kg/cm}^2$$

$$(ロ) E = 3.59 \times 10^7 \times (1 - 2.35 \times P) (1 - T/22200)$$

$$T = ^\circ\text{F} \quad E = \text{psi}$$

#### ② 被覆管

$$(イ) E = 2.0793 \times 10^6 - 8.8592 \times 10^2 \cdot T \quad (\text{SUS})$$

$$(ロ) E = 9.898 \times 10^5 - 9.265 \times 10^2 \cdot T \quad (\text{Zry})$$

### 3.4 Poisson's Ratio

#### ① 燃料

$$(イ) \nu = 0.319 - 0.3348 \cdot P + 8.888 \times 10^{-6} \cdot T \quad [(U, Pu) O_2]$$

$$P = \text{Porosity} \quad T = ^\circ\text{C}$$

$$(ロ) \nu = \frac{0.317 \times (1 - 0.46 \times P) \times (22200 - T) + 0.5 \times (T - 77)}{22200 - 77} \quad [\text{UO}_2]$$

$$T = ^\circ\text{F} \quad P = \text{Porosity}$$

#### ② 被覆管

$$(イ) \nu = 0.261 + 7.875 \times 10^{-5} \cdot T \quad (\text{SUS})$$

$$(ロ) \nu = 0.325 + 2.14 \times 10^{-4} \cdot T \quad (\text{Zry})$$

$$T = ^\circ\text{C}$$

### 3.5 Yield stress

#### ① 被覆管

$$(イ) \quad \sigma_y = 22.873 - 5.7139 \times 10^{-2} \cdot T + 1.0541 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 6.8768 \times 10^{-8} \cdot T^3$$

[SUS] (kg/mm<sup>2</sup>)

$$(ロ) \quad \dot{\sigma}_y = (7944.319 - 35.9893 \cdot T + 0.85010 \times 10^{-1} \cdot T^2 - 0.74316 \cdot T^3)^{\frac{1}{2}}$$

[Zry] (ksi)

### 3.6 Pore migration Velocity

$$① \quad V = C_1 \cdot T^{-\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{T}\right) \frac{dT}{dr}$$

V = 気泡移動速度 (cm/h)

T = 温度 (°K)

$$C_1 = 2.0 \times 10^{12}, \quad C_2 = 7.0 \times 10^4 \text{ (Columnar grain zone or } T \geq 1900 \text{ °C)}$$

$$C_1 = 3.33 \times 10^{13}, \quad C_2 = 5.0 \times 10^4 \text{ (Equiaxed grain zone or } 1400 \text{ °C} \leq T < 1900 \text{ °C)}$$

[MIPEC]

$$② \quad V = 5 \times 10^{-16} \cdot (0.988 + 6.395 \times 10^{-6} \cdot T + 3.543 \times 10^{-9} \cdot T^2 + 3 \times 10^{-12} \cdot T^3) \\ \times T^{-\frac{5}{2}} \cdot \Delta H \cdot P_0 \exp(\Delta H/RT) \times \left(\frac{dT}{dr}\right)_{\text{matrix}}$$

V = 気泡移動速度 (cm/sec)

T = 温度 (°K)

P = P<sub>0</sub> exp(ΔH/RT); UO<sub>2</sub> および (U, Pu) O<sub>2</sub> の蒸気圧

#### UO<sub>2</sub> の蒸気圧

<u>T (°C)</u>	<u>ln P<sub>0</sub> (dyne/cm<sup>2</sup>)</u>	<u>ΔH (erg/mole)</u>
1500 ~ 2000	33.7085	5.98 × 10 <sup>12</sup>
2000 ~ 2200	34.8107	6.17 × 10 <sup>12</sup>
2200 ~ 2800	35.8130	6.35 × 10 <sup>12</sup>

[PNC]

(U, Pu) O<sub>2</sub> の蒸気圧

<u>T(°C)</u>	<u>TOTAL P(log P)</u>	<u>T(°C)</u>	<u>TOTAL P(log P)</u>	<u>T(°C)</u>	<u>TOTAL P(log P)</u>
400	- 36.61	1400	- 9.59	2400	- 2.26
600	- 26.43	1600	- 7.45	2600	- 1.51
800	- 20.03	1800	- 5.71	2800	- 0.87
1000	- 15.58	2000	- 4.29	3000	- 0.31
1200	- 12.23	2200	- 3.16		

**3.7 Gap Conductance MODEL**

① Ross and Stout MODEL

$$\textcircled{2} \quad Hg = 27 + \frac{6385}{\text{Hot Gap (mils)}} \quad (\text{Btu/ft}^2 \cdot \text{°F} \cdot \text{hr}) \quad [\text{NUS} - 1871]$$

$$\textcircled{3} \quad Hg = 1873 \times e^{-53.25 \times \text{Hot Gap}} \quad (\text{Btu/ft}^2 \cdot \text{°F} \cdot \text{hr})$$

$$\textcircled{4} \quad Hg = h_o \cdot (\text{GF}) \cdot (\text{PF}) \cdot (\text{BF}) \cdot (\text{TF})$$

$$h_o = \text{經驗定数} = 413 \quad (\text{Btu/ft}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{°F})$$

$$\text{GF} = \text{Gap factor} = 10/g \quad g = \text{製造時の直径ギャップ (mile)}$$

$$\text{PF} = \text{Power factor} = 0.07256 \cdot P + 1.0 \quad P = \text{Power (kW/ft)}$$

$$\text{BF} = 1.0, \quad \text{TF} = 1.0$$

## 第4章 照射データとのフィッティングと VOF-9Hキャプセル内温度分布予測計算

現在、動燃では、JRR-2を用い、燃料中心温度測定技術開発の一環として、VOF-9H (Apin) キャプセルの照射を計画し進行中である。その温度分布予測計算結果と、LDシリーズ照射の実験結果とのフィッティングを行った結果を合わせて、計算例として報告する。

### (1) LDシリーズ、GC-3ピンとのフィッティング結果

この燃料ピンは、燃料中心温度測定用の熱電対を、燃料ピンに設け、温度測定を行ったものである。この熱電対は、4日程度で測定不能となってしまったが、照射初期における測定結果は得られているので、このデータを基にしてフィッティングを行った。

GC-3ピンはFig. 1のようにJRR-2 6C孔において、図中のような位置で照射された。この時、原子炉のstart up時のキャプセルおよび燃料中心の温度は、Fig. 2のようであった。

DIRAD-IIコードでの計算の出発点は、この実験で、被覆管の表面温度を測定しているのので、このデータを用いて行った。結果は、Fig. 3, 4に示すようにほぼ実験値と一致する結果となった。しかし、スクラム後再起動したが、この時のフルパワー時で、Ross and Stoute Modelのギャップコンダクタンスを用いた時の中心温度計算結果では、約200°Cの差が出る。しかし、第1回目の起動時のデータとは良く一致している。この原因は、まだコールドギャップの取扱い方に問題があると思われる。今後、ハルデン等の実測データをもとにフィッティング、改良を進める計画でいる。LIFE-II MODELのギャップコンダクタンスの場合は、Hot Gap取扱わないので、Fig. 3のようによく一致する。このようにしてフィッティングを行い、コードの精度を確かめた上で、今回の照射キャプセルであるVOF-9H (Apin) の温度分布予測計算を行った。その結果をFig. 5に示す。

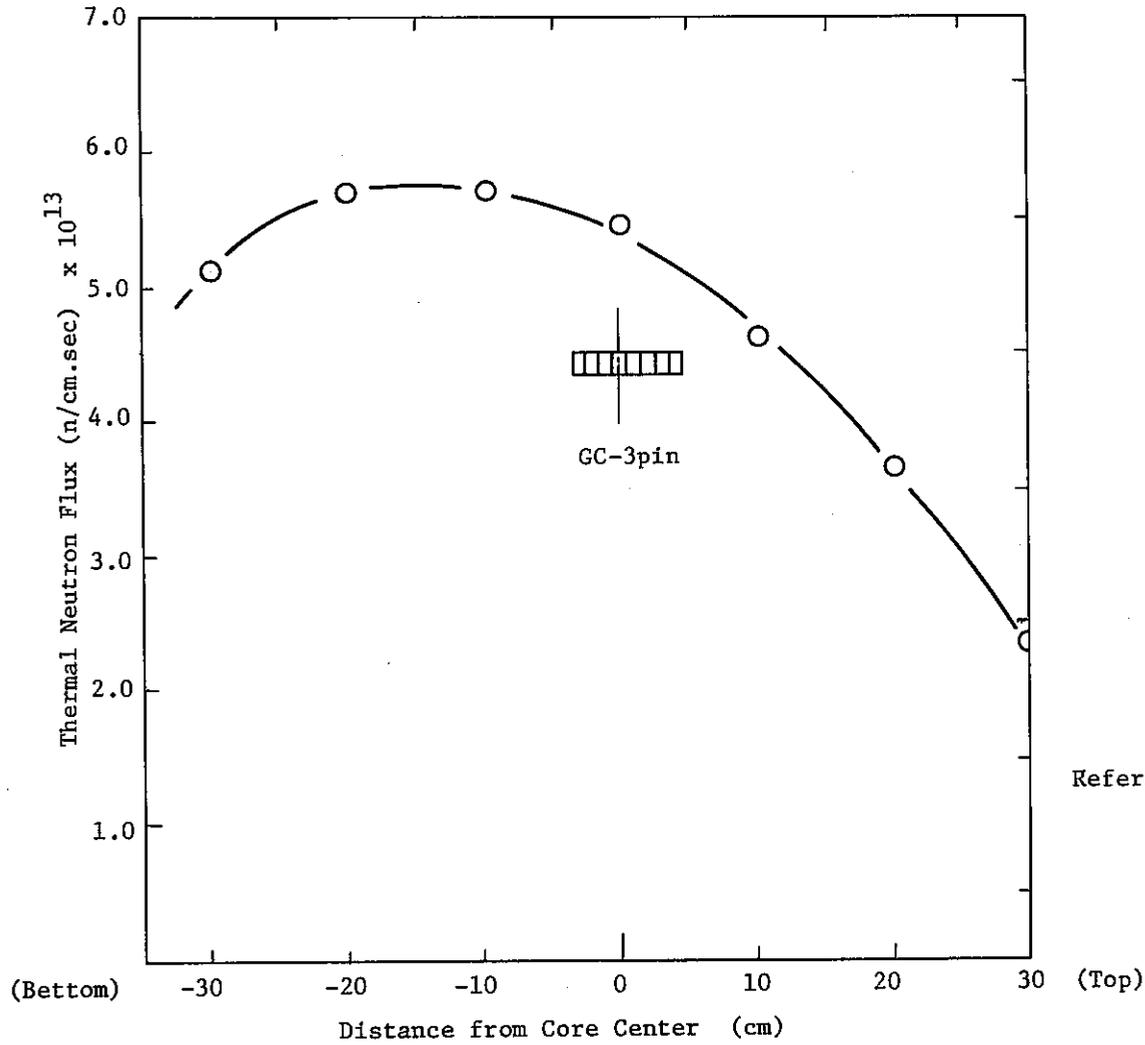
DIRADコードは、計算の出発点として、以下のようなオプションを用意している。

- (1) 被覆管の表面温度を固定して計算する場合。
- (2) 燃料ピン外側冷却材の軸方向温度を固定して計算する場合。
- (3) 燃料ピン外側冷却材の温度を計算によりもとめる場合。
- (4) キャプセルの外側冷却材の温度を計算によりもとめる場合。
- (5) キャプセルの外側冷却材温度を固定して計算する場合。
- (6) キャプセル内の任意点から計算する場合。(例：キャプセル内の熱電対で温度測定している時は、その位置の温度から計算出来る。)

以上のように、多くの計算の出発点を設けたのは、照射試験の種類により、計装条件が違って

くるからである。

高速炉ピンの計算例として、Fig. 6にP-19, 20シリーズの実験結果とDIRAD-IIコードでの計算結果を示す。



Reference : JAERI-memo 4052  
(1970.6)

Fig. 1 Neutron Flux Axial Distribution of Cylindrical Fuel Element at 6C

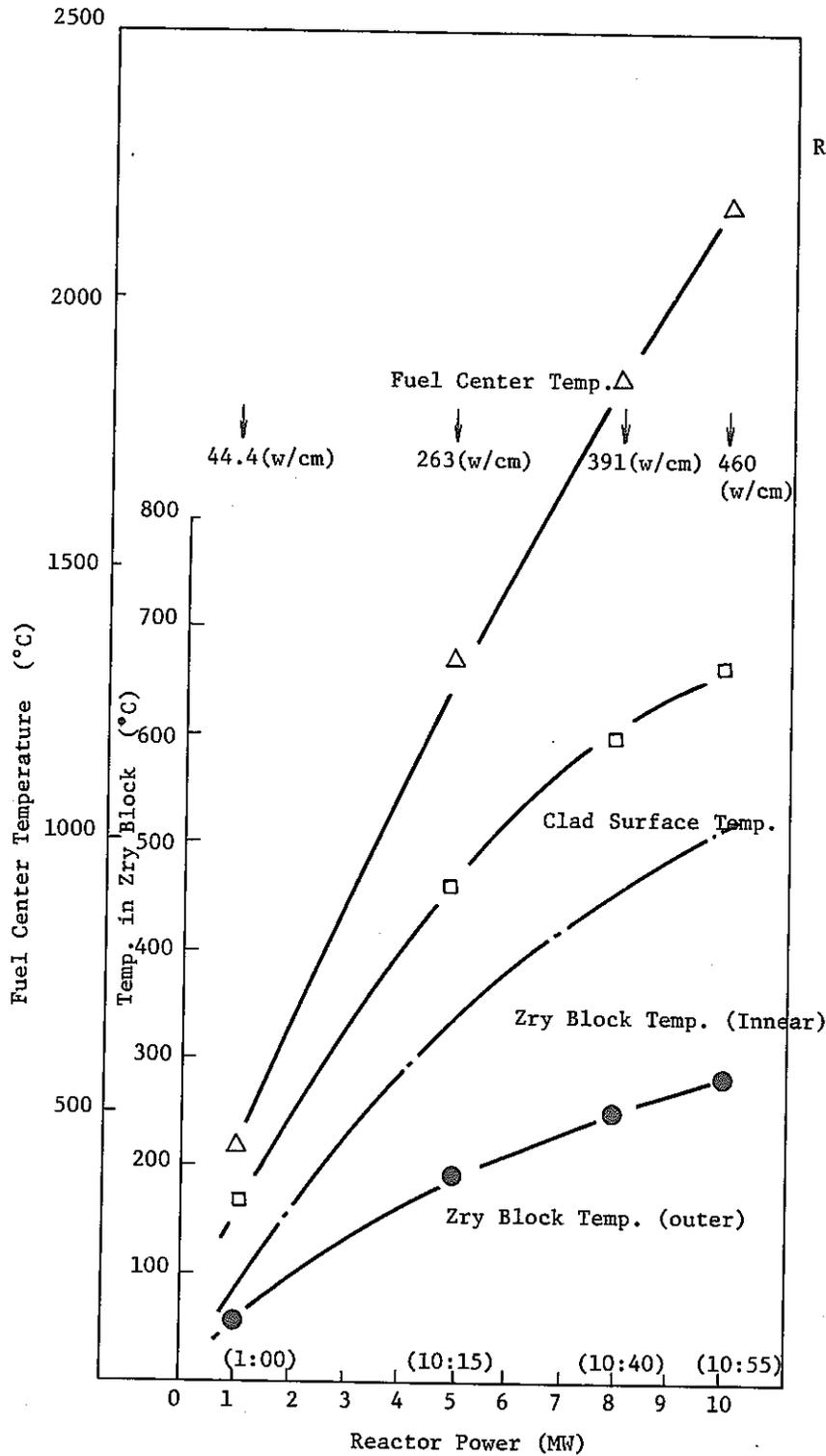


Fig. 2 Irradiation Temperature in LD-2 (GC-3 pin) Capsule  
(Untill reactor full power from start-up)

Reference : SN841-74-05 (1974-3)

Irradiation of  $UO_2$  and  $(U,Pu)O_2$  Fuels

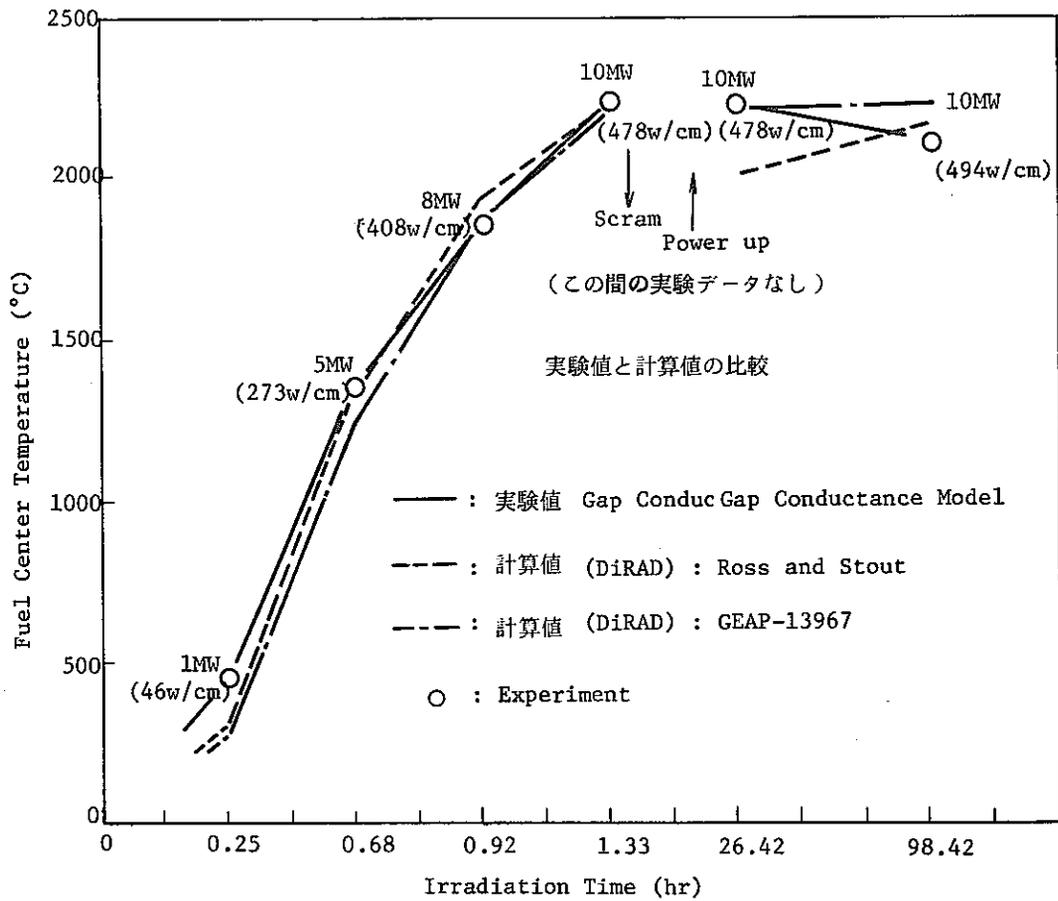


Fig. 3 燃料中心温度の実験値と計算値との比較

Reference : SN841-74-05 (1974-3)

Irradiation of  $UO_2$  and  $(U,Pu)O_2$  Fuels

SN841-80-09

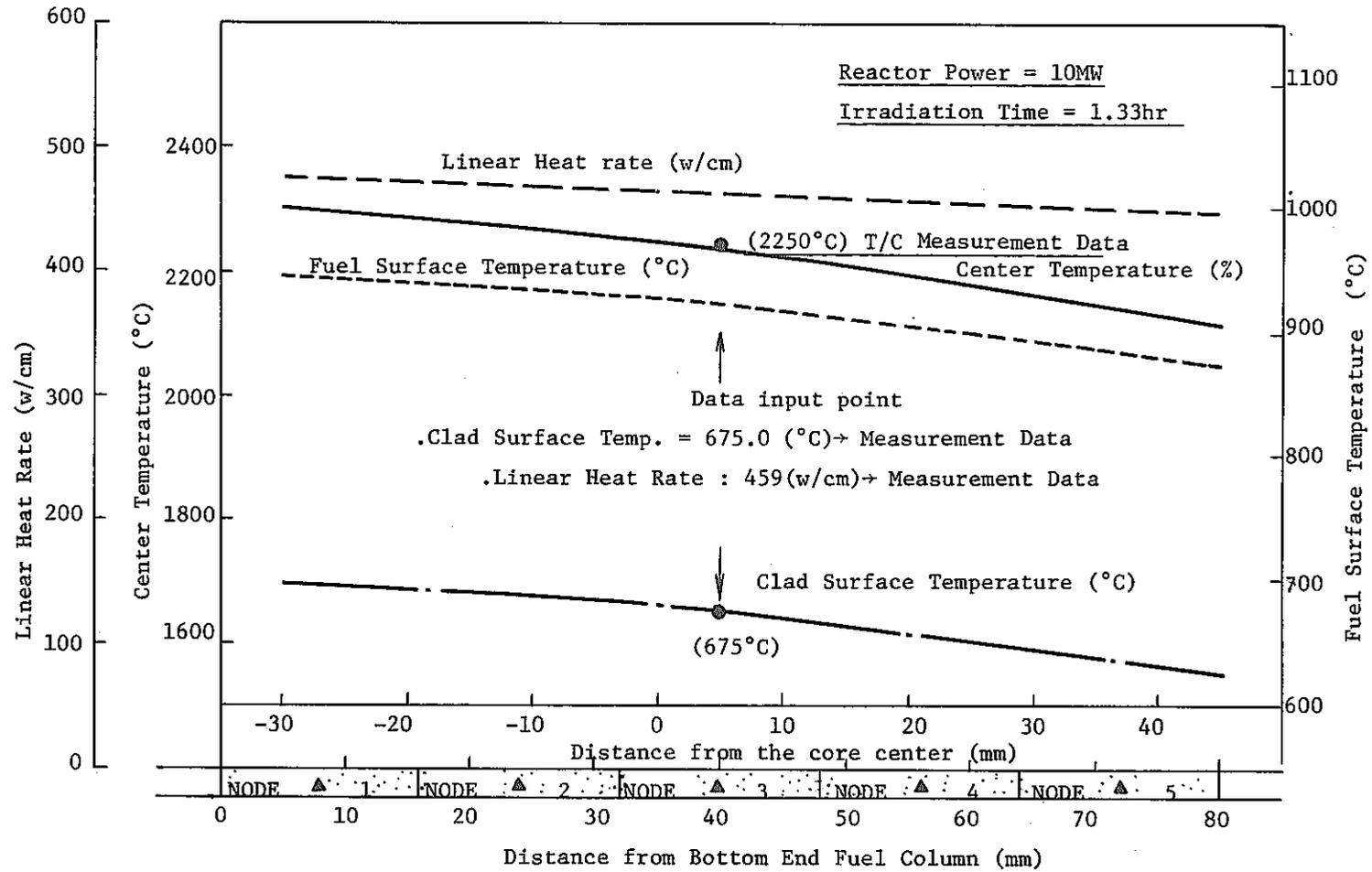


Fig. 4 Axial Temperature Distribution (LD-2 GC-3 Pin)

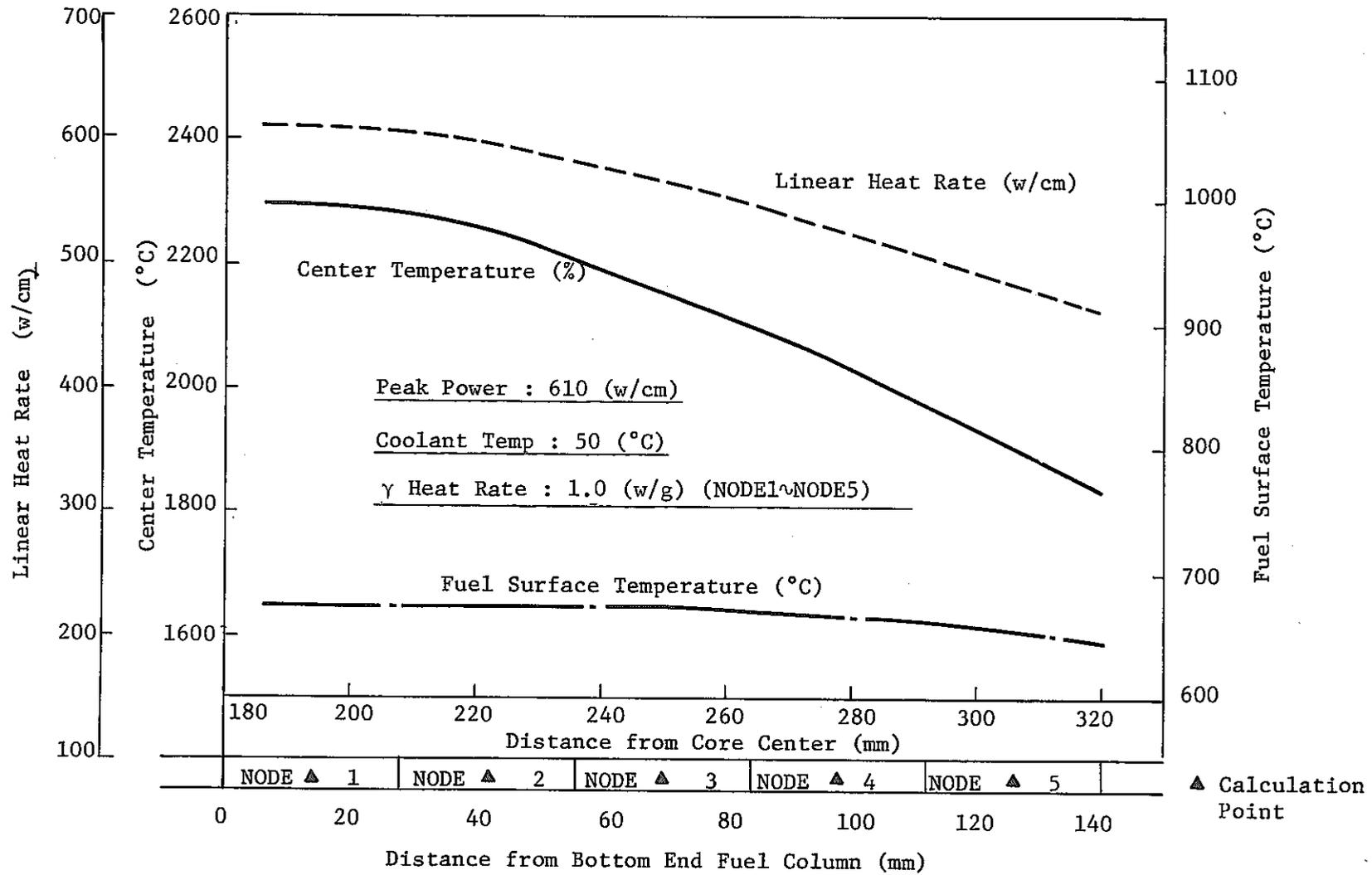


Fig. 5 Axial Temperature Distribution (VOF-9H Apin)

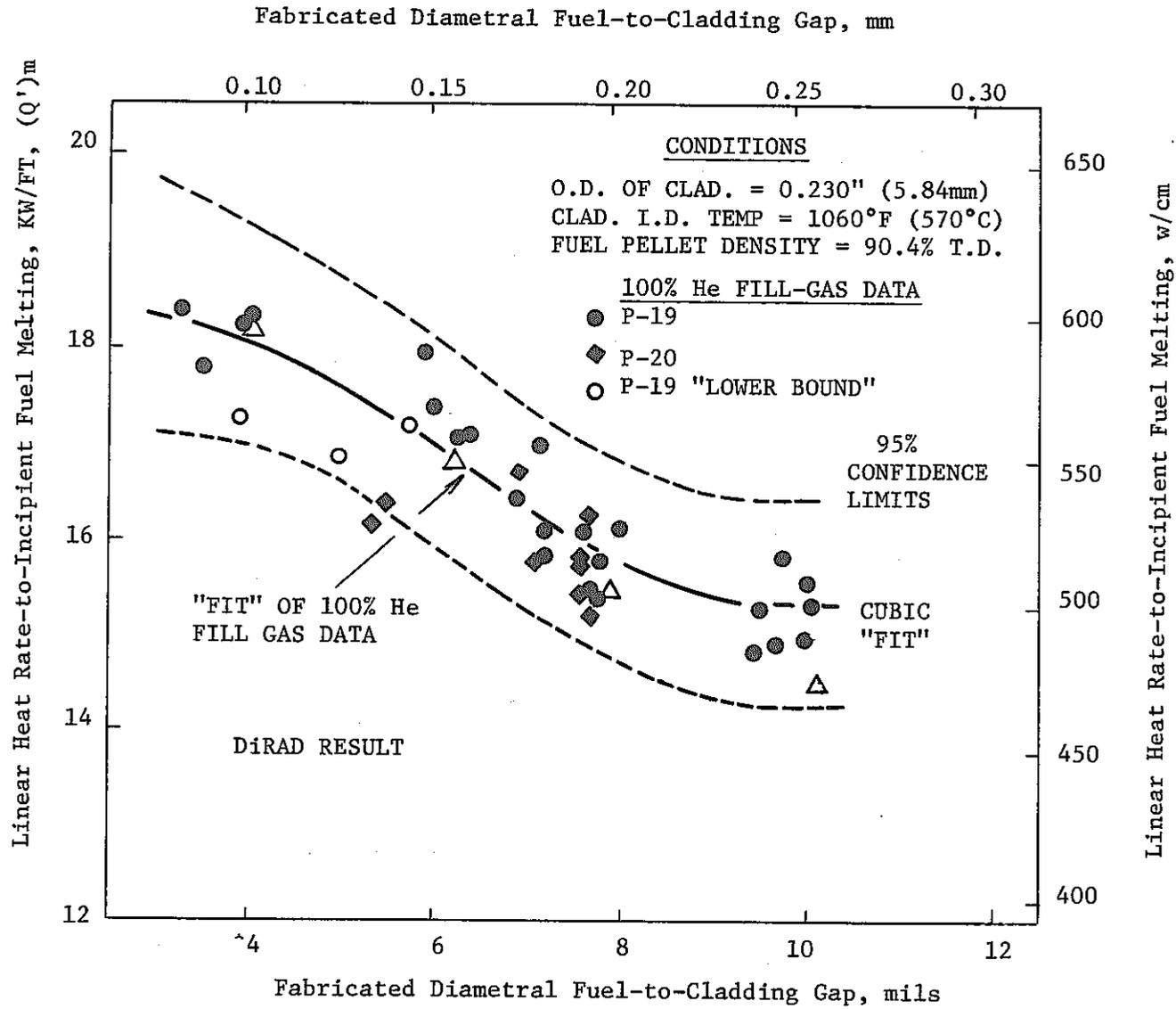


Fig. 6 Comparison of Experimental Data with DIRAD Code Result

## 第5章 入力データの説明

5-1. 入力データの構成

5-2. 入力法

5-3. NAMELIST 入力変数の説明

5-4. 入力例

## 5-1. INPUT DATA の構成

DIRAD - II の DATA 群は、次の 2 つから構成される。

(1) TITLE カード

最初の 1 枚目のカードに 2~80 カラムまで任意の文字を書くことができる。この TITLE カードは、OUT PUT の各項の第 2 行に PRINT される。もし、TITLE を必要としない場合は、ブランクカードを入れておけば良い。

(2) NAMELIST DATA

NAMELIST 形式によって入力される。詳細は後述。

## 5-2. NAME LIST DATA の入力法

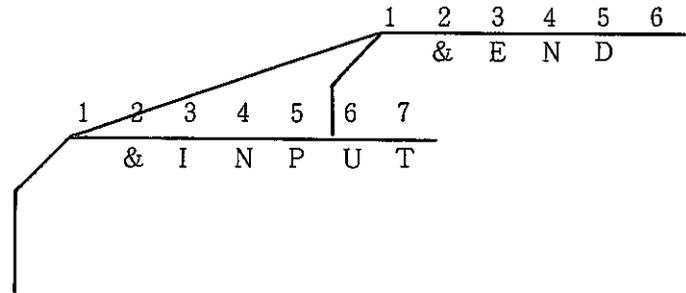
FACOM NAME LIST形式を用いて入力させる。

- (1) データの最初は、カラム“2”に&、カラム3～7に“INPUT”と書いて初まり、最後はカラム“2”から“&END”を書く。

例

燃料カラム長 = 34.3 の場合

FLEN = 34.3,



- (2) データは、(NAME LIST 変数) = (数値) の形式で与える。上記例を参照のこと。
- (3) データとデータの分離は (,) で行い、1枚のカードの終わりは (,) でなければならない。
- (4) また、各カードの第1カラムは使用してはならない。
- (5) 配列変数の場合
- (i) 1次元配列 (POWER, TIME など)
- INDEX を指定しない場合は、その配列の先頭から入力値が格納される。

例

TIME = 0.0, 1.0, 2.0,

↓ 同 値

TIME (1)= 0.0, TIME (2)= 1.0, TIME (3)= 2.0,

- INDEXを指定した場合は、指定したINDEX が先頭としてとられ、そこから入力値が格納される。

例

TIME (3)= 0.0, 1.0, 2.0,

↓ 同 値

TIME (3)= 0.0, TIME (4)= 1.0, TIME (5)= 2.0,

- (ii) 2次元配列 (TCOZT) TCOZT = 被覆管外表面温度(°C)であり、この温度をINPUT する時に用いる。

TCOZT (i, j)  $\left( \begin{matrix} i \cdots \cdots \text{軸方向分布} \\ j \cdots \cdots \text{タイムステップ} \end{matrix} \right)$

入力法

NODE

TIME STEP	TCOZT (1, 1) = a(1,1,) a(2,1,) a(3,1,) ..... a(i, 1,)
	TCOZT (1, 2) = a(1,2,) a(2,2,) a(3,2,) ..... a(i, 2,)
	TCOZT (1, 3) = a(1,3,) a(2,3,) a(3,3,) ..... a(i, 3,)
	⋮
	TCOZT (1, j) = a(1,j,) a(2,j,) a(3,j,) ..... a(i, j,)

a (i, j) : 温度( )

## (iii) 温度分布計算外側境界条件

## A. キャプセル装荷の場合

- ① キャプセル外冷却材軸方向温度分布指定
- ② キャプセル最外表面軸方向温度分布指定
- ③ キャプセル内任意半径上軸方向温度分布指定

## B. キャプセル装荷でない場合

- ① 被覆管外冷却材軸方向温度分布計算
- ② 被覆管外冷却材軸方向温度分布指定
- ③ 被覆管外表面軸方向温度分布指定

( キャプセルに装荷した燃料ピンの表面温度から計算する場合も含まれる。 )

## CONTROL FLAG

KCAPS = -1    キャプセル装荷

A - ①, ②, ③の計算の可能性はある。

= 0    キャプセル無装荷

B - ①, ②の計算の可能性はある。

= 1    被覆管外表面温度指定

B - ③のみとなる。

A - ①の場合    ( KCAPS = -1, KTCOL = 不必要, KCAPT = 0 )

☆ キャプセル外周冷却材温度分布を入力する。

このとき    ZPROF    軸方向規格化高さ

TCOOL    ZPROF 点に対応する温度を

“ NTABZ 個 ” 入力しておく。

但し、キャプセル壁温を計算する際にキャプセル-冷却材熱伝達係数が必要なため、もしこの熱伝達係数 (HFCAP) が 0.0 であれば、ここで与えた TCOOL はキャプセル壁温とする。すなわち A-②と同じ。

A-②の場合 (KCAPS = -1, KTCOL = 不必要, KCAPT = 1)

☆ キャプセル最外壁温度を指定する。(但し、最外壁といっても RCAP (1) で与えた半径上の点である)

このとき ZPROF

TCOOL ZPROF 点に対応する壁面温度を

"NTABZ 個" 入力しておく。

上記 2 つの場合の温度分布は時間的に変化しない。

A-③の場合 (KCAPS = -1, KTCOL = 不必要, KCAPT = 1)

☆ キャプセル内任意点 (RCAP (1) で指定した半径上の点をいう) の温度指定

このとき ZPROF 軸方向規格化高さ

に対応する温度を指定するが、時間変化を考慮することを考え、TCAPT (I, J) に温度を入力する。

但し、I は軸方向インデックスで "NTABZ 個"、J は時間インデックスで、MSTEP 個" 必要である。

プログラム上の処理

MAIN PROGRAM において

サブタイムステップ NTDIV が指定された場合は、その間を直線内挿し "TCOOL" Array へ格納しておく。

B-① (KCAPS = 0, KTCOL ≤ 0, KCAPT = 不必要)

☆ 被覆管外冷却材軸方向温度分布を計算する

必要な入力データ

TINL : 冷却材入口温度

KACAP : 冷却材比熱計算式オプション

ACMFR : 冷却材流量 (時間依存考慮可)

B-② (KCAPS = 0, KTCOL > 0, KCAPT = 不必要)

☆ 被覆管外冷却材軸方向温度分布指定入力

このとき ZPROF

TCOOL

に各々データを "NTABZ 個" 入力しておく。

TCOOL の内挿により、冷却材温度分布を得る。

B-①, ② いずれも、冷却材温度分布は TNA (J) に格納される。

プレナム部冷却材温度は仮定により  $TNA(J+1) = TNA(J)$  とする。

B-③ (KCAPS = 1, KTCOL = 不必要, KCAPT = 不必要)

☆ 被覆管外表面温度の指定入力

ここで, ZPROF

に対した点での被覆管外表面温度を TCOZT (I, J) に入力しておく。

I は軸方向インデックス ("NTABZ 個")

J は時間インデックス ("MSTEP 個")

サブタイムインデックス NTDIV が指定された場合、時間方向に内挿し、軸方向 1 次元 Array TCOZ (J) に与えておく。

SUBROUTINE COOL で TCOZ (J) を内挿し、TCO (J) を定義する。この際、被覆管-冷却材熱伝達係数の指定は必要なく、又、冷却材温度分布 (TNA (J)) の計算も行なわない。

	KCAPS	KCAPT	KTCOL	計 算 目 的	必要入力変数	備 考	ケース
キャプセル装荷	-1	0	- (注-1)	キャプセル外周冷却材温度分布入力(時間依存無し)	TCOOL(I), HFCAP	HFCAP=0 の場合はケースBとみなす。	A
	-1	1	-	キャプセル最外壁温度分布入力(時間依存無し)	TCOOL(I)	TCOOL は壁面温度	B
	-1	-1	-	キャプセル内任意温度分布入力(時間依存有り)	TCAPT(I, J) (注-4)	RCAP(1)が任意点半径であり、そこでの軸方向分布を与える。 (注-2)	C
キャプセル無し	0	-	≤0	被覆管外冷却材軸方向分布を計算する	TINL, KACAP, 冷却材流量, (注-3)		D
	0	-	>0	被覆管内冷却材軸方向分布を入力する(時間依存無し)	TCOOL (注-3)		E
	1	-	-	被覆管内表面軸方向温度分布入力(時間依存有り)	TCOZT(I, J) (注-4)		F

(注-1) -は他の2つの選択因子の組合せにより意味をもたないことを示す。

(注-2) RCAP(1)=キャプセル最外壁半径とすればケース" B "と同じとなり、但しこの場合は時間依存有りとなる。

(注-3) 被覆管-冷却材熱伝達係数を与えなければならない。(KCHTC参照)

(注-4) Iは軸方向インデックスを示し、ZPROFに位置している温度でNTABZ個。Jは時間インデックスで、MSTEP個データ(すなわちNTABZ × MSTEP)を必要とする。

(注) ケースA, B, Cはキャプセル計算を行なうため、構造材半径、材質を必ず入力しなければならない。又、構造材は被覆管外側の材質まで必要である。構造材層数(NREG)が≤0の場合はKCAPS=0とする。

(注) ケース" F "では、被覆管外側冷却材温度分布は、定義されない。

(注) TCOOLはケースA, B, Eに用いるために、各々の物無量に注意

(注) プログラム内標準値として

$$KCAPS = 0$$

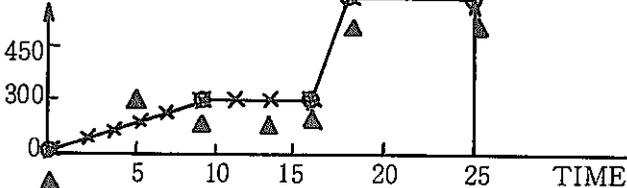
$$KCAPT = 0$$

$$KTCOL = 0$$

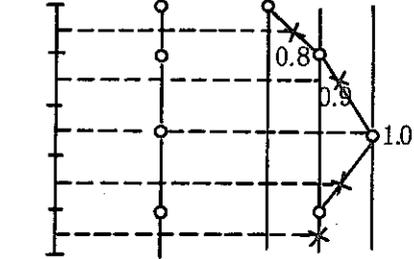
が用意されている。

## 5-3. NAMELIST BALIABLE の説明

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
FLEN	燃料カラム有効長, (INSULATER PELLETT は除く。)	cm	0.0
VPLEN	プレナム実効体積,	cm <sup>3</sup>	0.0
PLEN	プレナム実効長, (注) (注) VPLEN と PLEN のいずれかを入力すればよい。但し, 両方が入力された場合 "VPLEN" が優先される。	cm	0.0
DCO	CLAD OUTER DIAMETER	cm	0.0
DCI	" INNER DIAMETER	cm	0.0
DFO	FUEL OUTER DIAMETER	cm	0.0
DFI	FUEL INNER DIAMETER (初期中心空孔直径)	cm	0.0
DENS	燃料製造時の燃料密度 (FRACTION) 例 95% T.D.. の場合, "0.95" と入力。	cm	0.0
DENC	燃料ペレット等軸晶領域密度 ( " ) (注)		0.0
DENE	燃料ペレット柱状晶領域密度 ( " ) (注) (注) MREST = 1 のときのみ入力。		0.0
VDISH	燃料ペレット全体積対全空間体積比 (FRACTION), (DISH部の空間体積)		0.0
OM	燃料 O/M比		1.98
TDEN	燃料ペレットの理論密度	g/cc	10.49
FPGRC	柱状晶領域での F.P. ガス放出率 (FRACTION)		0.8
FPGRE	等軸晶領域での " "		0.2
FPGRU	不変領域での " "		0.05
EFISS	1核分裂あたりの全生成エネルギー		200.0
GFISS	" ガス生成率		0.27
PINT	初期内圧	kg/cm <sup>2</sup>	0.0
NDT	Time Step 分割点数		0
IPRIN	Print Out 箇所の指定		0

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
PEXT	初期外圧 (計算全期にわたって一定値)	cm <sup>3</sup> /g	0.0
U <sup>235</sup>	ペレット中の U <sup>235</sup> のメタル比		0.0
Pu	" (Pu <sup>239</sup> + Pu <sup>241</sup> ) のメタル比		0.0
SGAS	燃料グラム当りの吸着量 (水分は除く。)		0.0
FNITR	吸着ガス中のチッ素含有量比 (注) (FRACTION) (注) 残りのガスは, アルゴンと同じ物性とみなす。		0.0
VAPOR	燃料ペレット中の水分量	ppm	0.0
XMOL (1)	封入ガス中の He の割合	モル分率	0.0
XMOL (2)	" Xe の割合	"	0.0
XMOL (3)	" Kr の割合	"	0.0
XMOL (4)	" Nz の割合	"	0.0
XMOL (5)	" Ar の割合	"	0.0
	(注) $\sum_{i=1}^5 \text{MOL}(i) = 1.0$ でなければならない。		
VMIN	最小ボイド率 (FRACTION)		0.0015
PFLUX	Peak 中性束 (0.1 Mev 以上の中性子)		0.0
	例		
	○ 入力点		
	× 計算点		
	▲ OUT PUT 点		
		<p>MSTEP = 6,  POWER = 0.0, 300.0, 450.0,  = 450.0, 0.0,  TIME = 0.0, 9.0, 16.0, 18.0,  = 25.0 25.1  NDT = 1, 6, 3, 1, 1,  IPRIN = 1, 3, 2, 0, 0, 1,</p>	

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
<p>NAXL</p> <p>ELEV</p>	<p>軸方向セグメント分割数 (注)</p> <p>(注) 正值の場合は, 等分割としてプログラム内で自動的に分割する。 任意分割のときは, 分割数を負で入力し, 各分割境界の高さを ELEV に入力する。 ELEV (1) = 0.0 ELEV (  NAXL  + 1 )</p> <p>軸方向セグメント任意分割 (NAXL &lt; 0 ) の場合の各分割境界の高さ。</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>(注) <math>ELEV (  NAXL  + 1 ) = FLEN</math> この条件に合わなかった場合は, 自動的に FLEN がとられる。</p>	<p>cm</p>	<p>10</p>
<p>NTABZ</p>	<p>軸方向プロフィールデータ入力点の数</p>		<p>1.0</p>
<p>ZPROF</p>	<p>各入力点の BOTTOM から相対高さ。(FRACTION)</p> <p>( NTABZ 点を与える。 ) ( FLEN を 1.0 とする。 )</p>		<p>1.0</p>
<p>PPROF</p>	<p>出力軸方向分布 (FRACTION)</p> <p>( 各入力点での相対出力比 ) ( ピーク出力を 1.0 とする。 )</p>		<p>0.0</p>
<p>FPROF</p>	<p>中性子束軸方向分布</p> <p>( 各入力点での相対中性子束比 ) ( ピーク中性子束を 1.0 とする。 )</p>		<p>0.0</p>

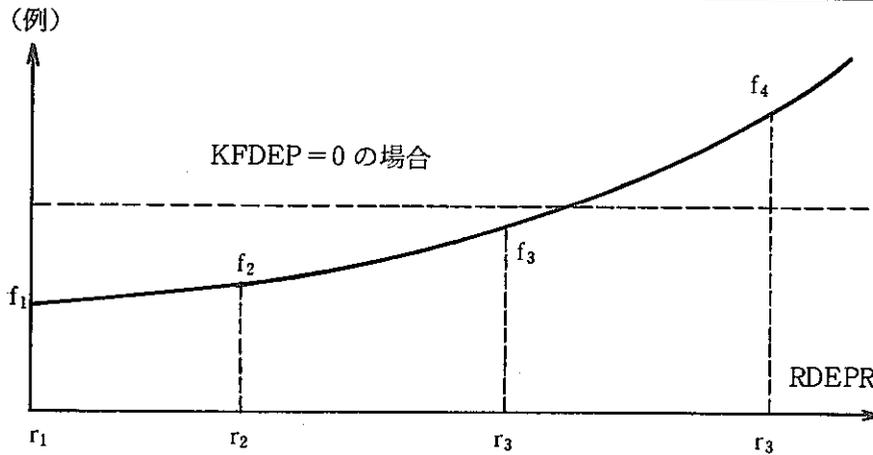
INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
<p>TCOOL</p> <p>TCOZT</p>	<p>冷却材軸方向分布            ( 各入力点での冷却材温度            ( KTCOL = 1 の場合のみ入力 ) )</p> <p>各入力点での被覆管外表面温度            ( KCAPS=1の場合のみ入力            ( 出力履歴に依存して入力が可能であるので (NTABZ * MSTEP) 個のデータが必要である。 ) )</p> <p>&lt;例&gt;</p> <p>NTABZ = 4,            NAXL = 5,            ZPROF = 0.2, 0.5, 0.8, 1.0 } (NTABZ 依存)            PPROF = 0.9, 1.0, 0.9, 0.8 }</p> <p>FPROF, TCOOL については, PPROFと同様である。TCOZTは, 時間的变化についても考慮するので, 各タイムステップでの軸方向温度分布を入力。</p> <p>NAXL=5 ZPROF PPROF</p>  <p>○----- 入力点            ×----- 計算点</p> <p>NAXLとNTABZは, Fixi しないでよい。</p>	<p>℃</p> <p>℃</p>	<p>0.0</p> <p>0.0</p>
<p>KCAPS</p>	<p>キャプセル温度計算オプション</p> <p>= -1. キャプセル装荷燃料とし, キャプセル外側冷却材より温度計算する。            = 0. 冷却材温度から温度計算する。            = 1. 被覆管外表面温度 (TCOZT) 入力</p>		<p>0</p>

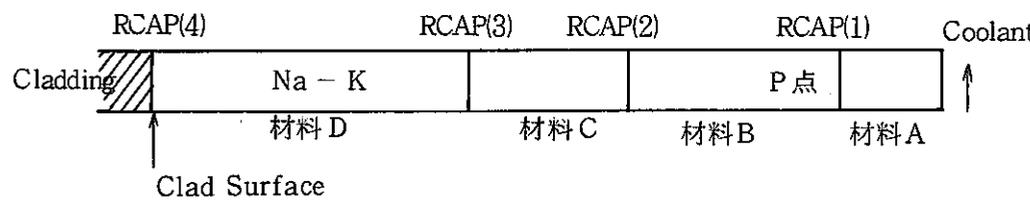
INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
MESHP	ペレットを50等分割(固定)計算するが, 出力はMESHP おきに出力できる。 (1,および50番目は必ず出力される。) <例> MESHP = 1 の場合 出力メッシュ点 (1, 2, 3,.....49, 50) MESHP = 30の場合 出力メッシュ点 (1, 30, 50)		0.0
PDEPR	THERMAL FLUX FACTOR (FRACTION) (KFDEP = N の時入力, 詳細は, KFDEP 参照)		0.0
RDEPR	FLUX DEPRESSION ペレット内半径(規格化半径又は実長。) (KFDEP = N の時入力) (詳細は KFDEP 参照)		0.0
FCONF	燃料の熱伝導率を補正する乗数。		1.0
FEXPF	" 熱膨張率 "		"
FYMDF	" ヤング率 "		"
FPOIF	" ポアソン比 "		"
CCONF	被覆管熱伝導率 "		"
CEXP	" 熱膨張率 "		"
CYMDF	" ヤング率 "		"
CPOIF	" ポアソン比 "		"
CYLDF	" 降状応力 "		"
AHTCF	燃料-被覆管の熱伝達係数を補正する乗数。		"
ACONF	Coolant の熱伝導率を補正する。		"
ACAPF	Coolant の熱容量を補正する乗数。		"

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
VOIDF	ボイド移動速度 //		
KFCON	燃料熱伝導率関係式オプション = 1 UO <sub>2</sub> PNC MODEL = 2 UO <sub>2</sub> Lyon's MODEL = 3 (U, Pu)O <sub>2</sub> R. L. Giby MODEL = 4 (U, Pu)O <sub>2</sub> GEAP-13967 = 5 // HEDL MODEL = 6 (U, Pu)O <sub>2</sub> PNC MODEL		1
KFEXP	燃料熱膨張率関係オプション = 0 考慮せず = 1 SUS 被覆管の場合 = 2 Zry //		1
KFYMD	燃料ヤング率関係式オプション = 1 SUS 被覆管の場合。 = 2 Zry //		1
KFPOI	燃料ポアソン比関係式オプション = 1 SUS 被覆管の場合。 = 2 Zry //		1
KCCON	被覆管熱伝導率関係式オプション = 1 SUS 被覆管の場合。 = 2 Zry //		1
KCEXP	被覆管熱膨張率関係式オプション = 0 考慮せず = 1 SUS 被覆管の場合。 = 2 Zry //		1

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
KCYMD	被覆管ヤング率関係式オプション = 1. SUS 被覆管の場合。 = 2. Zry "		1
KCPOI	被覆管ポアソン比関係式オプション = 1. SUS 被覆管の場合。 = 2. Zry "		1
KCYLD	被覆管降伏応力関係式オプション = 1. SUS 被覆管の場合。 = 2. Zry - 2 "		1
KCHTC	冷却材-被覆管熱伝達係数関係式オプション = 1. INPUT (注) = 2. WATER (注) HCOEF		1
HCOEF KACON	冷却材-被覆管熱伝達係数 冷却材熱伝導率関係式オプション = 1. WATER = 2. SODIUM	w/cm <sup>2</sup> ・°C	2
KACAP	冷却材熱容量関係式オプション = 1. WATER = 2. SODIUM		2
KFPOR	ボイド移動速度関係式オプション = 1. MIPEC MODEL = 2. PNC MODEL = 3. PIPER MODEL		2
KFREL	燃料再配置オプション = 0. 計算しない。 = 1. Dutt and Baker MODEL		0

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
KTCOL	= 2. PNC MODEL 軸方向冷却材温度分布		0
	≤ 0. 計算		
	< 0. 温度分布 (TCOOL) 入力		
KFCHG	ギャップ熱伝達係数オプション	w/cm・°C	1
	= 0 一定値 (入力変数は, HGAP 0)		
	= 1. Ross & Stoute		
	= 2. NUS - 1871		
	= 3. ACTIVE		
	= 4. GEAP - 13967		
MREST	柱状晶, 等軸晶到達密度計算オプション		0
	= 0 PNC		
	= 1 INPUT (DENE, DENC)		
TMLT	ペレット熔融温度	°C	2760 °C
TINL	冷却材入口温度	°C	0.0
KFDEP	半径方向 THERMAL FLUX DEPRESSION FACTOR		
	= 0 高速炉の場合。		
	= N 熱中性子炉の場合		
CMFR	Coolant flow rate	g/sec	0.0

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
<p>KCAPT</p> <p>TCAPT</p>	<p>(例)</p>  <p>KFDEP = 0 の場合</p> <p>RDEPR</p> <p><math>r_1</math>   <math>r_2</math>   <math>r_3</math>   <math>r_3</math></p> <p><math>f_1</math>   <math>f_2</math>   <math>f_3</math>   <math>f_4</math></p> <p>KFDEP = 4 で図のように入力したい場合</p> <p>RDEPR = <math>r_1, r_2, r_3, r_4</math></p> <p>PDEPR = <math>f_1, f_2, f_3, f_4</math></p> <p>(注) <math>r_i</math>は, 実長又は規格値のどちらでもよい。   <math>f_i</math>は, USER任意の採用値でよい。</p> <p>キャプセル温度計算における固定温度</p> <p>条件オプション: (KCAPS = -1 の場合)</p> <p>= 0.   キャプセル外側冷却材より計算 (時間依存なし)</p> <p>          (冷却材温度係数 TCOOL を必ず入力)</p> <p>= 1.   キャプセル最外壁面温度入力 (時間依存なし)</p> <p>= -1.   キャプセル内の任意地点より計算 (時間依存あり)</p> <p>          (注) キャプセル内時間依存温度変数TCAPT を必ず入力)</p> <p>キャプセル内任意点の時間依存温度変数</p> <p>条件オプション: (1) KCAPS = -1 かつ KCAPT = -1 の場合のみ入力。</p>	<p>°C</p>	

INPUT DATA 名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
	<p>(2) 出力履歴に依存して入力が可能であるので (NTABZ * MSTEP) 個のデータが必要。</p> <p>(3) ZPROFに対応する点の温度を入力。</p> <p>(注) KCAPT = -1 の場合の諸注意            (P点) の温度を入力したと仮定</p> <p>(1) 半径RCAPはPの位置より内側へ入力する。</p> <p>(2) 下図では, NREG = 3 (材料B, C, D)</p> <p>(3) MAT では, 材料B, C, D, の材質を指定。</p> 		
	<p>キャプセル計算 (KCAPS = -1) の時に必要な入力</p> <p>NREG    キャプセル半径分割点数</p> <p>RCAP    中心から各材料境界までの半径。</p> <p>HGCAP    キャプセル内にギャップが存在した場合のギャップ熱伝達係数。</p> <p>HFCAP    キャプセル-冷却材熱伝達係数</p> <p>GAM    各材料内GAMMA - HETFNG 値</p> <p>TCOOL    キャプセル外側冷却材温度</p> <p>MAT    キャプセル構成材質の指定。</p> <p>        = -2 Ar                    } ガス</p> <p>        = -1 He                    }</p> <p>        = 0                        } ギャップ</p>		<p>0</p> <p>cm</p> <p>w/cm-°C</p> <p>w/cm-°C</p> <p>w/gr</p> <p>°C</p> <p>0</p>

INPUT DATA名	変数説明, 注意	入力単位	省略時の数値
	<p>= 1 SUS 304                      = 2 SUS 316                      = 3 SUS 347                      = 4 Zry - 2                      = 5 52 S Al                      = 6 2 S Al                      = 7 61 S Al                      = 8 Na 22 - K 8                      = 9 Na 56 - K 44</p> <p>(例)</p> <p>NREG = 5,                      RCAP = 2.0, 1.85, 1, 735, 0.65, 0.55, 0.2921,                      MAT = 1, 0, 6, 1, 8.                      HGCAP = 0.567                      HFCAP = 2.326                      TCOOL = 11 * 50.0,</p>		

### 5-4. 入 力 例

\*\*\*\*\* DIRAD=2 INPUT CARD IMAGE \*\*\*\*\*

```

1          ***** P-19-27R PIN (POWER-TO-MELT) YAMA *****
2      &INPUT
3      FLEN=34.3,      DCO=0.635,      DCI=0.57404,      DFO=0.56384,      DFI=0.0,
4      PLEN=20.58,     VDISH=0.0,      U235=0.90,      PU=0.25,      DENS=0.924,
5      OM=1.96,        TMLT=2775.,      FPGRC=1.0,      FPGRE=0.2,      FPGRU=0.05,
6      PEXT=1.333,     TINL=370.0,      PINT=1.0,      SGAS=0.08,      FNITR=0.9,
7      VAPOR=0.02,     HCOEF=6.674,     PFLUX=0.2E+16,  KFCHG=1,      KFREL=2,
8      KFPOR=2,        KACAP=2,         KFCON=3,      KCCON=1,      KCPOI=1,
9      NTABZ=10,       XMOL(1)=0.9,     XMOL(2)=0.1,   KACON=2,      KCAPS=1,
10     ZPROF=0.146,0.292,0.321,0.437,0.463,0.583,0.700,0.729,0.875,1.00,
11     ELEV=0.0,5.00,10.02,11.01,14.99,15.88,20.00,24.01,25.00,30.01,34.3,
12     NDT=1,3,3,3,2,1,
13     TIME=0.0,0.116,0.2021,0.3646,0.3806,0.3813,
14     POWER=0.0,214.1,321.1,537.3,616.2,0.0,
15     PPROF=0.8857,0.9601,0.9714,0.9982,1.0,0.9762,0.9304,0.9155,0.8155,0.7548,
16     FPROF=0.8857,0.9601,0.9714,0.9982,1.0,0.9762,0.9304,0.9155,0.8155,0.7548,
17     HGAP0=1000.0,
18     NAXL=-10,      MESH=3,          VPLEN=4.474,    TDEN=11.11,    MSTEP=6,
19     TCOZT(1,1)=10*370.0,
20     TCOZT(1,2)=382.0,396.0,398.0,408.0,411.0,418.0,425.0,426.0,436.0,446.0,
21     TCOZT(1,3)=392.0,412.0,417.0,431.0,433.0,446.0,459.0,461.0,475.0,488.0,
22     TCOZT(1,4)=415.0,448.0,455.0,481.0,487.0,513.0,535.0,540.0,564.0,578.0,
23     TCOZT(1,5)=424.0,467.0,474.0,504.0,510.0,539.0,565.0,570.0,596.0,617.0,
24     TCOZT(1,6)=10*370.0,
25     CMFR=10*174.0,
26     &END
    
```

\*\*\*\*\* DIRAD-2 INPUT CARD IMAGE \*\*\*\*\*

```

1          ***** JRR-2 VOF-9H CAPSULE (A PIN) YAMA *****
2      &INPUT
3      FLEN=14.0,   PLEN=24.0,   DCO=1.160,   DCI=1.060,   DFO=1.043,
4      DFI=0.190,   DENS=0.94,   OM=2.00,   FPGRC=0.8,   FPGRE=0.2,
5      FPGRU=0.05,   U235=0.055,   SGAS=0.003,   FNITR=0.9,   VAPOR=0.0008,
6      XMOL(1)=1.0,   NAXL=5,   KCAPS=-1,   KCAPT=0,   MESH=2,
7      MSTEP=13,   NTABZ=4,   KFDEP=6,   NREG=6,   HFCAP=3.0,
8      POWER=0.0,150.0,300.0,570.0,0.0,150.0,300.0,570.0,0.0,150.0,300.0,570.0,0.0,
9      ZPROF=0.2,0.5,0.8,1.0,
10     PPROF=1.00,0.917,0.833,0.75,
11     FPROF=1.00,0.917,0.833,0.75,
12     RDEPR=0.0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,
13     PDEPR=1.0,1.005,1.023,1.043,1.088,1.158,
14     RCAP=2.0,1.82,1.80,1.65,0.7325,0.5825,0.580,
15     MAT=6,-1,6,6,6,-1,
16     GAM=1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,
17     TCOOL=6*50.0,
18     TIME=0.0,0.01,0.02,12.02,12.03,12.04,12.05,24.05,24.06,24.07,24.08,36.08,36.09,
19     NDT=1,3,3,4,1,3,3,4,1,3,3,4,1,
20     IPRIN=1,3,3,4,1,3,3,4,1,3,3,4,1,
21     KTCOL=1,   KFCHG=4,   MREST=0,   TMLT=2865.0,   KEREL=2,
22     PINT=1.0,   PEXT=5.0,   KFCON=2,   KACON=1,   KACAP=1,
23     KFEXP=2,   KFYMD=2,   KFPOI=2,   KCHTC=2,   VDISH=0.0,
24     HGCAP=1.0,   PFLUX=1.8E+13,   HGAP0=1000.0,
25     &END

```

参考文献

- (1) S.Nagai et al. : PNCT 841 - 76 - 16 Fast Breeder Reactor Fuel Pin Performance Code "PIPER" (1976. 4.)
- (2) M.Katsuragawa et al. : PNCT 841 - 75 - 17 Fuel Performance Code "ACTIVE - II" (1975. 7.)
- (3) H.Kaneko et al. : PNCT 841 - 79 - 15 Physical and Chemical Properties of Nuclear Fuels ~Feb. 1979 (1979. 3.)
- (4) N.Nakae et al. : IAEA Specialist's Meeting (France 1979. 3.) Fuel Relocation Model
- (5) R.B.Baker : HEDL - TME 77 - 23 Integral Heat Rate - to - Incipient Melting in  $\text{PuO}_2$  -  $\text{UO}_2$  Fast Reactor Fuel.
- (6) T.Yamaguchi et al. : SN 841 - 74 - 05 Irradiation of  $\text{UO}_2$  and  $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$  Fuels in JRR - 2 (1974. 3.)
- (7) Y.Miyasaka et al. : JAERI - memo 4052 Summary of the JRR - 2 in - core Irradiation Facility and Irradiation Experiences (1970. 6.)