

照射実験解析用燃料ピン挙動解析コード・マニュアル

(GRO - II, SIEX, THERMおよびHOTGAP)



1980年4月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

照射実験解析用燃料ピン挙動解析コードマニュアル

(GRO-II, SIEX, THERM および HOTGAP)

実施責任者	加藤 和義*
報告者	永井 寛*
	小林 善光*
	篠原 正朝*
	鹿倉 栄**
	檜原英千世*

照射後試験データの評価解析機能の充実を目的として、高速炉燃料ピンの照射後試験結果から燃料ピンの熱挙動および応力-歪挙動を解析、およびギャップコンダクタンスを評価する計算コードのマニュアルを作成した。対象となったコードは、

- 1) GRO-II ; 高速炉燃料ピンの定常照射下における応力-歪履歴計算コード
- 2) SIEX ; 高速炉燃料ピンの定常照射下における熱挙動履歴計算コード
- 3) THERM ; 高速炉燃料ピン（熱中性子炉照射を含む）のギャップコンダクタンス実験的評価用コード
- 4) HOTGAP ; 高速炉燃料ピン（熱中性子炉照射を含む）のギャップコンダクタンス半理論的評価用コード

である。

これらのコードは大洗工学センター計算資料室の大型計算機 FACOM-190 で使用できるように整備されている。

また、SIEX と GRO-II をカップリングして、高速炉用燃料ピンの全体挙動を解析するコード SIMPLE が開発されつつあることをつけ加えておく。

* 大洗工学センター燃料材料試験部 技術解析室

** " 照射燃料集合体試験室

Apr., 1980

User's manuals of fuel pin performance codes for
irradiation experiment analysis

Masatomo Shinohara*, Hiroshi Nagai*,
Yoshimitsu Kobayashi*, Sakae Shikakura**,
Hidechiyo Kashihara* and Kazuyoshi Kato*

Abstract

Fuel pin performance codes have been provided in order to analyze thermal and mechanical behavior during steady state irradiation, and to evaluate gap conductance by experimental and semi-theoretical method based on post-irradiation examination data.

This documentation describes user's manuals of four fuel performance codes as follows.

- 1) GRO-II ; stress-strain analyses for fast reactor fuel pin during normal operation.
- 2) SIEX ; thermal behavior analyses for fast reactor fuel pin during steady state irradiation.
- 3) THERM ; gap conductance evaluation by experimental method for fast reactor fuel pin irradiated in fast and thermal flux.
- 4) HOTGAP; gap conductance evaluation by semi-theoretical method for fast reactor fuel pin irradiated in fast and thermal flux.

* Fuel and Material Division, Analysis and Evaluation Section, O-arai Engineering Center, PNC.

** Fuel and Material Division, Fuel Monitoring Sec.

目 次

I	GRO-II	1
II	SIEX	53
III	THERM	129
IV	HOTGAP	157

I GRO - II

I GRO-II

1. コードの概要
 2. コードの説明
 3. サブルーチンの説明
 4. 入出力
 5. モデルの説明
 6. 計算方法
 7. タイムカッティング
 8. GRO-IIの近似項目
 9. コードの較正
 10. 入力方法
- 付録1 GRO-IIで使用している物性値
- 付録2 GRO-II内で使用されている変数

NOMENCLATURE

a	Fuel ring inner radius, in.
b	Fuel ring outer radius, in.
g	Energy release rate, MeV/fission
h	Fuel-cladding gap conductance, Btu/h-ft ² ·°F
k _c	Cladding thermal conductivity, Btu/h-ft·°F
r	Cladding mean radius, in.
u _c	Cladding midwall radial displacement, in.
u _f	Fuel surface radial displacement, in.
w	Cladding wall thickness, in.
A	Atom density, atoms/cc
B	Burnup, atom fraction
B ₁	Burnup, MWd/kg
C	Period of a power cycle, h
E _c	Cladding elastic modulus, psi
E _f	Fuel elastic modulus, psi
F	Fission rate, fissions/cc-h
G	Fuel-cladding hot gap, in.
G ₀	As-fabricated fuel-cladding gap, in.
P	Fuel-cladding interface pressure, psi
P _g	Fission gas pressure, psi
P _n	Coolant pressure, psi
Q	Local linear power, kW/ft
R _p	Local power/peak power
T _c	Cladding midwall temperature, °F
T _f	Fuel surface temperature, °F
T _p	Plenum temperature, °F
V _f	Fuel volume, cc
V _p	Plenum volume, cc
ΔB	Burnup increment, atom fraction
Δφt	Fluence increment, n/cm ² , E>0.1 MeV
ε	Effective strain in the cladding, in./in.
ε _f	Linear swelling strain in the fuel, in./in.
ε _s	Linear swelling strain in the cladding, in./in.
ε _R	Reference strain in the fuel ring, in./in.
ε _θ	Inelastic hoop strain in the cladding, in./in.
φ	Flux, neutrons/cm ² -sec, E>0.1 MeV
ρ	Fuel density, fraction theoretical
σ _r	Radial stress in cladding, psi
σ _R	Reference stress in fuel ring, psi
σ _θ	Hoop stress in cladding, psi
σ _z	Axial stress in cladding, psi
σ̄	Effective stress in cladding, psi
ν _c	Poisson's ratio of cladding
ν _f	Poisson's ratio of fuel

1. コードの概要

GRO-IIは高速炉燃料ピンの定常照射下におけるPCMI評価を目的としてGE社で開発されたコードである。¹⁾

GRO-IIコードは確率論的燃料被覆管歪解析コード“PECS”(Probabilistic Evaluation of Cladding Strain)において、定常運転時及び出力変化時の混合酸化物燃料ピンの被覆管変形量を予測するためのサブプログラムとして開発されたfast running codeである。このコードでは計算の体系を燃料ピンの軸に対して対称なものとして、1次元(径方向のみを考慮する)で組み立てている。被覆管への荷重はF.P.ガスによる圧力及びペレット-被覆管機械的相互作用のみを考慮している。解析の手順は出来得るかぎり簡素化され、可能な場合には経験的なデータから得られた較正式が用いられる。

又、必要な部分については、PNC海外照射データの較正物性式が使用できる様にオプションが組まれている。

2. コードの説明

本コードは、主として定常運転状態での燃料ピンの変形解析を目的として作られている。しかし、ユーザーの入力により準定常状態（ある程度長時間にわたって出力が変化する状態）の解析にも用いる事が出来る。この場合には、出力は入力された燃焼度期間中、連続的に変化するが、各 time step 内では運転状態は一定であるとしている（出力・温度の変化はステップ状に変化する）。ステップ状の変化によって、運転条件の連続的な変化を近似する為には、定常運転状態では燃焼度期間を長くし、準定常状態では短くする必要がある。

本コードでは、燃料ピンは中心軸に対して軸対象であると仮定している。燃料ペレットは外側をペレット外径、内側を非粘性領域温度（invisid temp.）によって決定される境界を内径とする厚肉円筒モデルで近似し、また、被覆管は薄肉円筒モデルによって近似している。

照射履歴は短時間のタイムステップに分割され、各タイムステップの初めで、その時の燃料及び被覆管の寸法、及び F.P. ガスの圧力によって、燃料及び被覆管の弾性応力が計算され、この応力を基に被覆管及び燃料のクリープ速度と被覆管のクリープ損傷量が計算される。そして、その他の時間依存のパラメータの変化率（swelling, 中性子束, 燃焼度, 被覆管腐食, F.P. ガス生成量）についても、この時の条件により計算される。この時の時間依存パラメータの値により、最も適当なタイムステップが選ばれ、最終的にタイムステップの終りの各パラメータの値が計算され、この値が次のタイムステップの初期値となり、計算が続けられる。

Table 1. GRO-II コードの計算の流れ

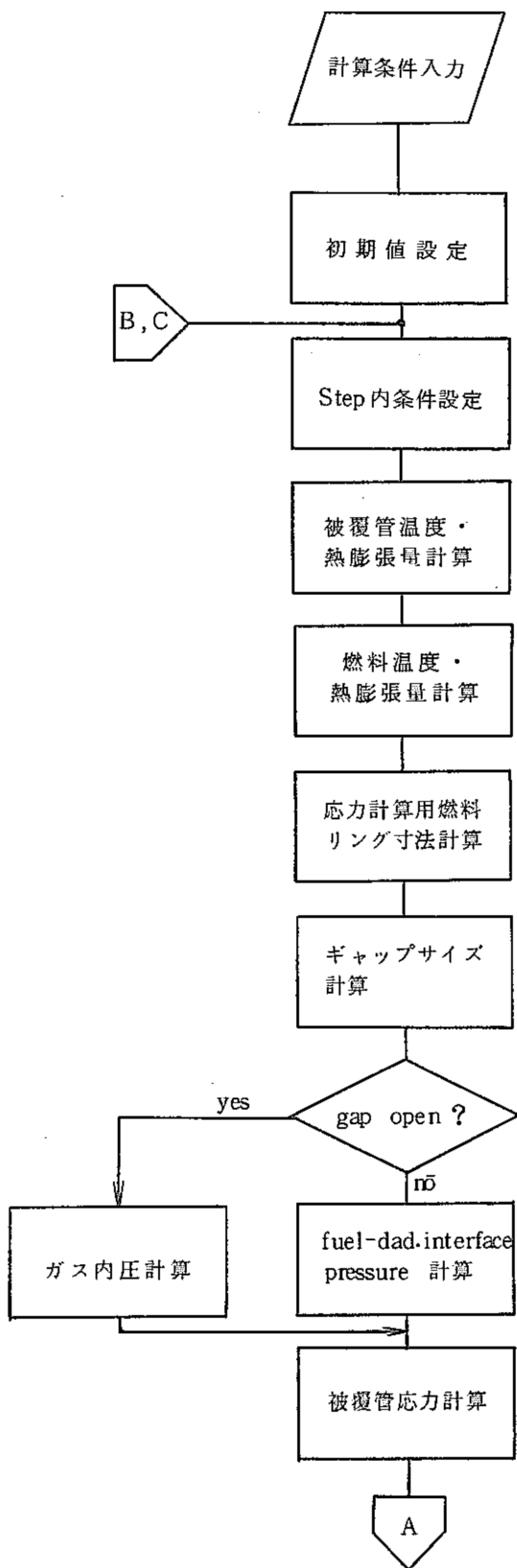


Table 1. (続き)

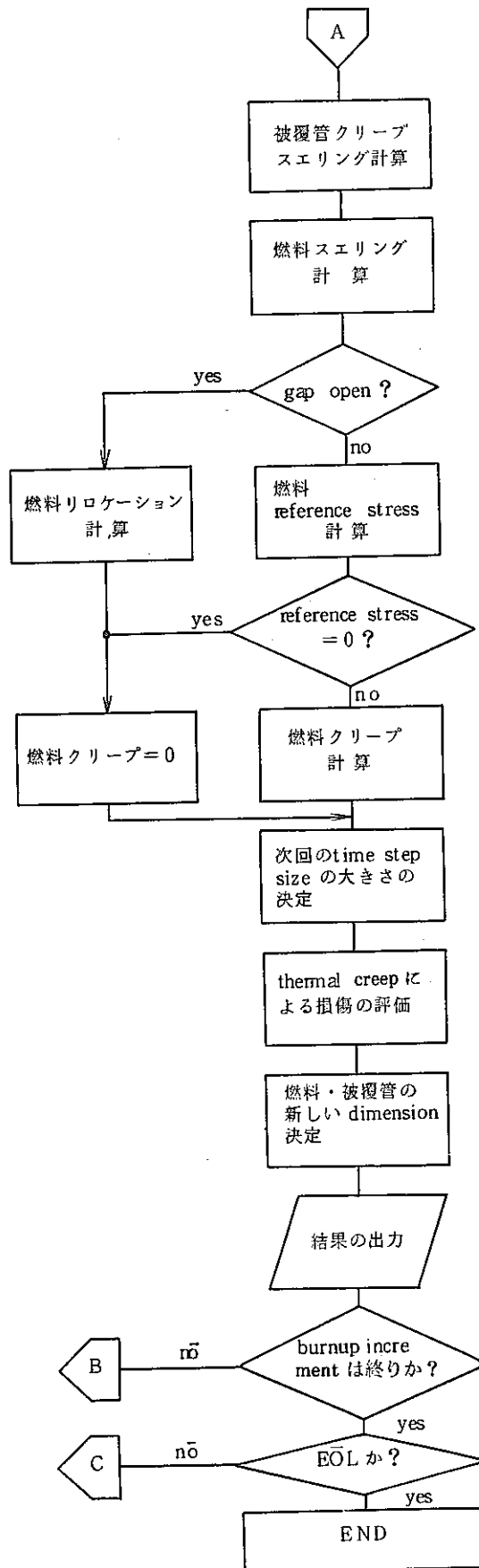


Table 2
FLOW CHART FOR THE CODE

Step A: Initialization of parameters in DATA statements.
 Step B: Transfer of values from DATA to COMMON variables. Initial Calculations.
 Step C: 100 - Start of analysis for a case.
 Step D: Initialization for a new case.
 Step E: Initial input for the new case.
 Step F: Calculations based on the input in Step E.
 Step G: 300 - Start analysis for a new burnup step. Obtain input.
 Step H: Determine the operating parameters based on the rate of power changes, RATE.

<p><u>RATE = 0.0</u></p> <p>Assume step power change. Set operating conditions to the input values.</p>	<p><u>RATE ≠ 0.0</u></p> <p>Set time step DTIME = TFAST. Calculate NUMBER of steps required to attain the power level. Calculate TRATE - rate of change of temperature.</p>
---	---

Step I: Calculate parameters dependent on the cladding temperature.
 Step J: Calculate parameters based on the local power.
 Step K: Calculate fuel temperatures.
 Step L: Calculate fuel ring dimensions and thermal expansion.
 Step M: 400 - Start analysis for a new time step.
 Step N: Calculate fuel-cladding gap.

<p>Step O: <u>Fuel-cladding gap open</u></p> <p>Cladding stresses due to the fission gas pressure; fuel reference stress = 0</p>	<p>Step P: <u>Fuel-cladding gap closed</u></p> <p>Cladding stresses and fuel reference stress based on the fuel-cladding interface pressure.</p>
--	--

Step O: Calculate fuel-cladding corrosion (subroutine CORODE), update stress components, calculate effective stress, cladding swelling and effective creep rate (subroutine CCREEP) and cladding displacement rate.
 Step R: Calculate fuel swelling rate (subroutine FSWELL), creep rate (subroutine FCREEP) and displacement rate.
 Step S: Determine the time step.

<p><u>RATE ≠ 0</u></p> <p>DTIME = TFAST</p>	<p><u>RATE = 0</u></p> <p>Gap closed: Time required to change the fuel-cladding interface pressure by FACTOR.</p>
---	---

Check limits (subroutine TIMCHK)

Step T: Update parameters, applying changes for time DTIME.
 Step U: Check output request. Print-out if IPRINT = 100 and reset IPRINT = 0.
 Step V: Branch to Step G, if the desired burnup is achieved. Branch to Step I, if RATE = 0. Branch to Step H, if RATE ≠ 0 and if the desired power is not attained. Set RATE = 0 if power is attained and branch to Step I.
 Step W: Branch to Step C if new case is to be analyzed. Otherwise stop.

3. サブルーチンの説明

本コード内で使われているサブルーチン及び副関数プログラムは以下に示す通りである。

A	TIMCHK	タイムステップ中のチェック
B	CCREEP	被覆管のクリープ及びスエリングの計算
	DAMAGE	被覆管の熱クリープ損傷量の計算
	CLADE	被覆管の弾性率の計算
	CLADNU	ポアソン比の計算
	CLADEX	被覆管の熱膨張量の計算
	CLADK	被覆管の熱伝導度の計算
	CLADYS	被覆管の降状応力の計算
	CORODE	FCCI 深さの計算
C	FCREEP	燃料のクリープ速度の計算
	FSWELL	燃料のスエリング速度の計算
	FUELE	燃料の弾性率の計算
	FUELNU	燃料のポアソン比の計算
	FUELEX	燃料の熱膨張量の計算
	FUELK	燃料の熱伝導度の計算

4. 入 出 力

4.1 入力データ

入力データの一部（燃料ピンごとに変化しないと考えられるもの）はEBR-IIの運転条件に合わせて初期値化されている。また、現段階で混合酸化物燃料、SUS 316（アニール材及びコールドワーク材）の物性値として有用な較正式もプログラム中に組み込まれている。また、SUS 316 CW材の物性値の一部はPNC照射データに基づく較正式も組み込まれている。

User が入力する主要なパラメータは以下のものである。

- | | |
|-------------|--------------------|
| i) 寸 法 | 被覆管外径 |
| | 被覆管肉厚 |
| | 燃料外径 |
| | 燃料内径 |
| | 燃料体積 |
| | ブレナム体積 |
| ii) 温 度 | ブレナム温度 |
| | 燃料非粘性領域温度 |
| | 被覆管肉厚中心温度 |
| iii) 出 力 | 局所線出力 |
| | 局所／ピーク線出力比 |
| | ピーク／平均線出力比 |
| iv) 他のパラメータ | 燃料密度 (flac. T. D.) |
| | 燃料理論密度 |
| | 燃料-被覆管ギャップコンダクタンス |

4.2 出 力

User の指定した各タイムステップの終りの値が出力される。出力される主要なパラメータは

- i) 燃料及び被覆管の寸法
- ii) " の熱クリープ変形量
- iii) " の照射クリープ変形量
- iv) " のスエリング変形量
- v) 被覆管の塑性変形量
- vi) " の熱クリープ損傷和

5. モデルの説明

本コードでは軸方向の燃料の移動は考慮しないでモデルを組み立てている。この為、燃料ペレットのクリープ変形は、面積が保存されたまま径方向の変位となって表われている。

燃料ペレットは、非粘性領域温度（inviscid temperature）により2領域に分けられる。非粘性領域に関する仮定は次の様な考察の結果から得られた。例えば、E B R - IIにおける10 KW / ft の線出力での運転状態ではスエリング及びクリープの速度は図2に示す様に分布している。この図から明らかな様に $\sim 1580^{\circ}\text{C}$ 以上の温度ではクリープ速度は1 psi以下の応力でスエリング速度とバランスしている。よって、この様な高温領域では、構造的な抵抗及び外荷重の影響はほとんど無視できると考えられ、領域内では応力分布は発生せず静水圧のみの均一な応力が働いているものと考えてよい。

G R O - IIコードでは、ペレット内の応力状態を計算するにあたって、上記の考察から非粘性領域温度を適当な値に設定し、この温度帯を境界として、厚肉円筒モデルによる応力分布を考慮する粘性領域（viscid zone）、及び応力分布を考慮せず単に外圧の伝達媒体としての役割のみを持つ非粘性領域（inviscid zone）に分離している（図1参照）。また、本コードでは軸方向の質量の移動は考えていないので、燃料中心温度が非粘性領域温度以下である場合にはペレットは剛体であると考え（質量の移動がないので、クリープ変形はできない。実際には次の場合には上記の仮定の範囲内でクリープ変形は起こり得る。即ち、組織変化により中心空孔がある場合には、ペレット内での応力分布に対応するクリープ変形は、中心空孔部の面積を減少させる事により質量バランス（平面内での）をとる事が可能である。しかし、全体の温度が低い為、この様な状態を考慮しない（G R O - IIでは温度分布に関しては組織変化は考慮していない）事による誤差は無視できる。また、逆に燃料中心温度が高い場合でも、中心空孔が無い場合には上記仮定により、燃料のクリープ変形は起こり得ない。しかし、実際には燃料中心温度が非粘性温度以上となれば組織変化により中心空孔は生成されると期待できる。）

被覆管は薄肉円筒としてモデル化されている。通常のF B R燃料ピンでは（円筒直径/円筒肉厚）は15以上であり、応力計算で薄肉円筒モデルで近似する事による誤差は無視できる。

燃料の熱膨張による変形は燃料内の熱応力を無視しており、自由熱膨張として取り扱う。また、燃料の熱クリープ速度は燃料リング（粘性領域）の体積平均値により求める。現在までに研究された燃料クリープ速度データによれば、熱クリープ速度が応力に対して1次に比例する項と高次に比例する項とによって表わされるのに対して、照射クリープ速度は応力に1次に比例する項のみで表わされる。非粘性領域のように比較的低温の領域では全燃料クリープ量に及ばず高次の項の寄与は非常に小さいので、燃料のクリープはほとんど応力に対して1次に比例すると考えられ

る。この様な仮定をする事によって燃料リング（粘性領域）では応力分布は変化しないと考える事ができ、燃料リングの形状によって求められる Reference stressによって、燃料のクリープ速度を求める事ができる。

被覆管の熱クリープと熱膨張は肉厚中心の温度によって決められる。また、被覆管-ペレット間のギャップが開いている場合、あるいはギャップが閉じていても、接触圧がガス内圧より低い場合には、被覆管の変形は薄肉・両端封入円筒として計算している。また、ギャップが閉じていて、接触圧がガス内圧より高い場合には焼きばめ状態を仮定する。そして、被覆管応力は両端開放円筒（軸方向応力が零）として平面応力状態でモデル化する。

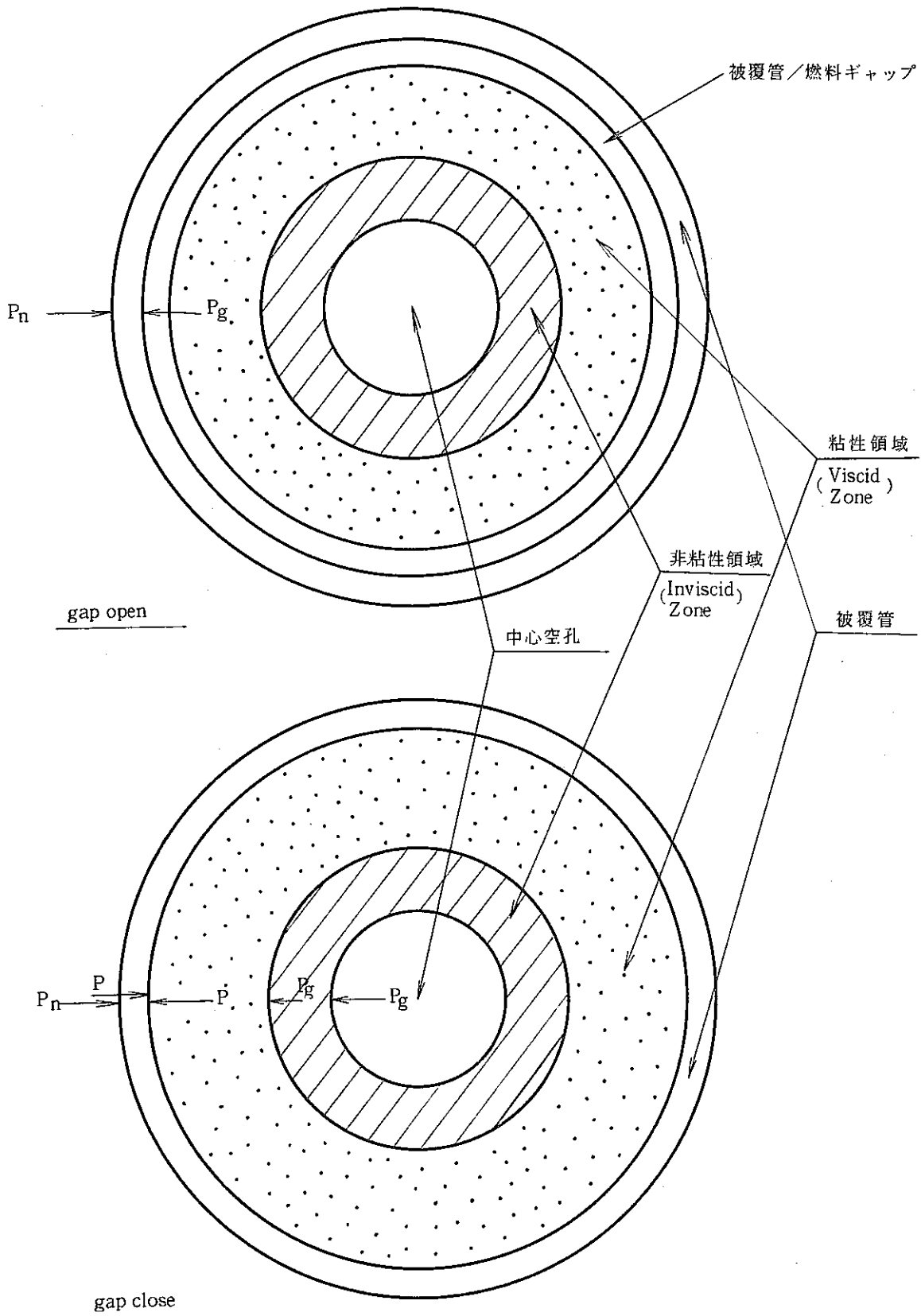


Fig. 1 ペレット内平面応力モデル

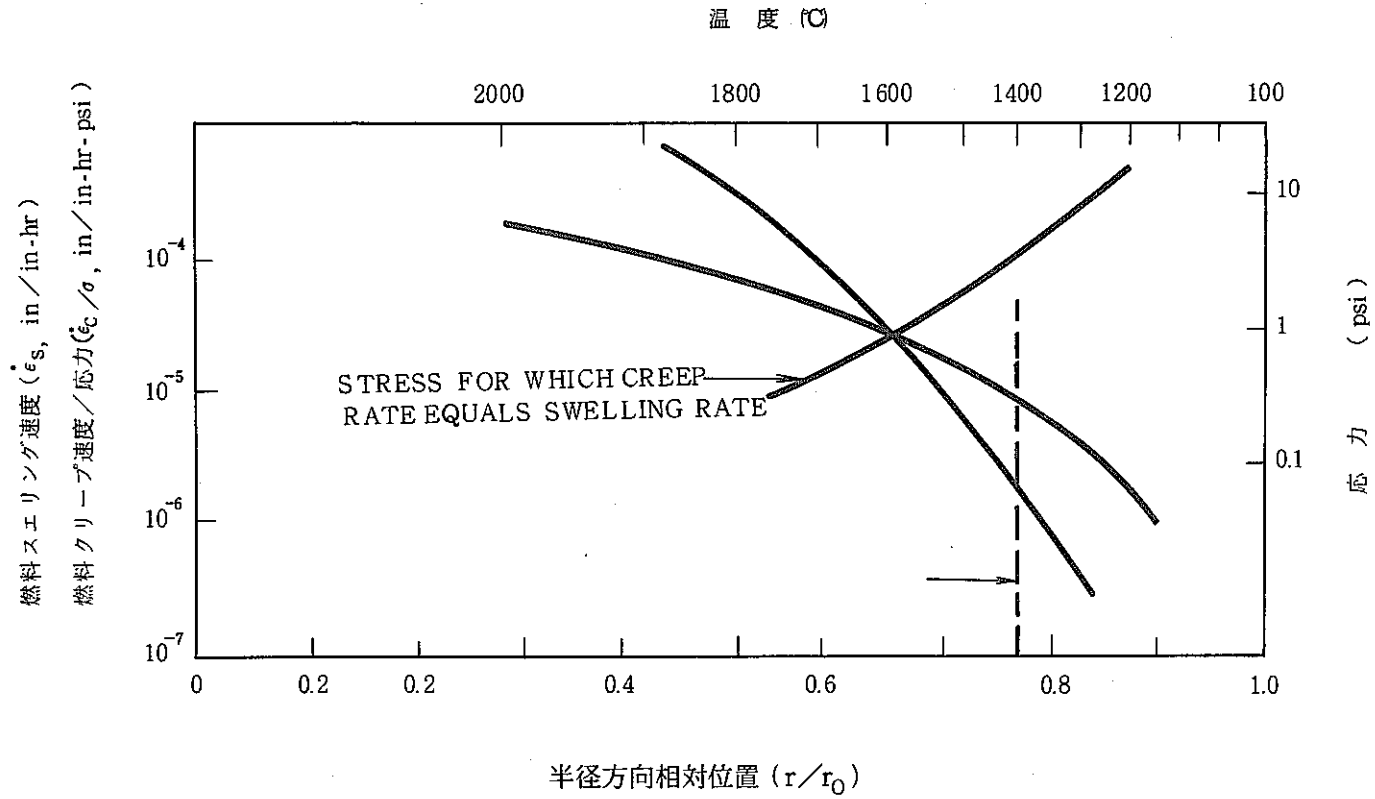


Fig. 2 燃料ペレット内の変形速度

6. 計 算 方 法

6.1 温度分布計算

温度分布計算は入力された被覆管肉厚中心温度をベースに計算されている。

燃料表面温度は以下の計算により求められる。

$$T_f = T_{MC} + \frac{1}{2} * \Delta T_c + \Delta T_g$$

$$= T_{MC} + \frac{1}{2} * \frac{3413 \cdot Q}{2 \pi r} * \frac{W}{K_c} + \frac{3413 \cdot Q}{2 \pi r} * \frac{12}{h_g} \quad (^\circ F)$$

燃料内の温度分布は燃料内の発熱分布が一樣であると仮定し、径方向を 30 に等分割して計算により求めている（組織変化（中心空孔の生成）は考慮していない）。燃料の熱膨脹は各半径方向分割区間の熱膨脹量を合計する事により求める。

6.2 燃焼度計算

核分裂割合は次の式により計算される。

$$\dot{F} = \frac{Q * (2.2472 \times 10^{19}) * 144}{g * \pi * b^2 * 2.8317} \quad (\text{fission/cc} \cdot \text{h})$$

$$g = 203 \text{ (MeV/fission)}$$

この値は EBR - II 照射条件に近似されている。

燃料の原子密度は理論密度 11 gr/cc, 原子量 268 として次式により計算する。

$$A = (\rho * 11.0) * (6.025 \times 10^{23}) / 268 \quad (\text{atoms/cc})$$

以上の 2 式により燃焼率 \dot{B} が計算される。

$$\dot{B} = \dot{F} / A$$

中性子束は、その時点における平均中性子束 / 燃焼度比から求める。

$$\phi = \dot{B} * (\Delta \phi t / \Delta B) / 3600 \quad (\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec})$$

F.P. ガス蓄積量は 100 % ガス放出率で計算している。EBR - II 照射条件に合わせて、ガス状原子生成率 0.246 (atom/fission), Peak/ave. power 比を 1.1 としている。F.P. ガス蓄積量は次の様に求める。

$$\begin{aligned} \dot{P}_g = & F * V_f * (1.2804 \times 10^{-16}) * (1.0197 \times 10^{-3}) * 16.387 \\ & * (7.233 \times 10^{-5}) * 12 * 0.246 * T_p / V_p / R_p / 1.1 \quad (\text{psi/hr}) \end{aligned}$$

6.3 応力計算

被覆管の歪解析で考慮する loading mechanism は次の3つである。

① F.P. ガス内圧

F.P. ガス内圧を計算する時の気体体積と気体温度はプレナム体積とプレナム温度に等しいと仮定する。組織変化による中心空孔及びギャップ部の気体体積はプログラム内では考慮されない（従って、ギャップ部体積、中心空孔体積を考慮したい場合にはあらかじめ入力をその様に設定しておく必要がある）。

プレナム部・ギャップ部・中心空孔（本コードでは組織変化は計算しないが、応力計算上は燃料中心温度が非粘性領域温度より低い場合を除いて、他の全ての場合には中心空孔があるものと仮定している）は互いに連結しており、これらの部分には等しい圧力が加わるものと仮定する。

② 燃料・被覆管の熱膨脹差

本コードでは各タイムステップ内では照射条件は一定であるとしている。従って、各タイムステップ内では新たな熱膨脹は生じない。しかし、各タイムステップ間では照射条件が異なる為、各タイムステップごとに、その初めに燃料内の温度分布が計算され、それに基づいて新たな燃料リング（粘性領域）の大きさが定義される。また、燃料及び被覆管の新たな寸法もこの段階で定義される。もし、この様な状態で計算された被覆管の応力が降伏応力を越えた場合には、超過応力分は被覆管の塑性変形によって調節される（被覆管応力が降伏応力と等しくなるまで被覆管の塑性変形が進行する）。この様な仮定は燃料の塑性変形を無視している為、被覆管の変形量を過大評価する事になるが、この場合には計算のタイムステップを小さくする事でその影響を最小にする事ができる。

③ 燃料・被覆管のスエリング差

本コードで採用しているスエリング速度は、低温の燃料スエリングの測定値から得られた固体 F.P. による値 $\Delta l/l = 0.15 \left(\frac{o/o}{a/o} \right)$ を採用している。この値は被覆管による拘束をも含んだ値であると考えられる。燃料被覆管のギャップが閉いている時のギャップが閉じる速度は残留ギャップの測定結果により較正された HEDL モデル

$$\begin{aligned} G = & G_0 - 0.005224 * Q * G_0 * (Q - 5.835) * (1 - \exp(-C)) \\ & - 0.365 * G_0 * (1 - \exp(-9.14 \times 10^{-2} * Q * B_1)) - 0.1735 \times 10^{-5} * B_1 \end{aligned}$$

から導びかれる次式によって計算される。

$$\begin{aligned}\dot{G} &= 0.005224 * Q * G_0 * (Q - 5.835) * \exp(-C) * \dot{C} \\ &+ 0.365 * G_0 * \exp(-9.14 \times 10^{-2} * Q * B_1) * 9.14 \times 10^{-2} * \dot{B}_1 * Q \\ &+ 0.1735 \times 10^{-5} * \dot{B}_1\end{aligned}$$

ギャップが開いた状態の時には、燃料のスエリング速度は HEDL 較正式と拘束スエリング速度の中で大きい方の値を採用する。

各タイムステップの初めにその時の燃料・被覆管の寸法に従って、燃料及び被覆管の弾性変形量が計算される。応力計算はギャップが開いた状態及びギャップが閉じた状態について、それぞれ表3に示す様に計算される。

① ギャップが閉じた状態の時の相互作用

ギャップが閉じた状態の相互作用は焼きばめモデルに従って計算される。即ち、もし仮に相互作用により、両者間にPの圧力が働いているとすると、被覆管の径方向弾性変位量 U_c は被覆管を薄肉円筒とすると次式により表わされる。

$$\begin{aligned}U_c &= \sigma_\theta * b / E_c + \sigma_z * b / E_c * V_c \\ &= \left\{ \frac{(P - P_n) * r}{W} + \frac{(P + P_n) V_c}{2} \right\} * b / E_c\end{aligned}$$

同様に厚肉円筒モデルによる燃料外径の弾性変位量 U_f は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}U_f &= \sigma_\theta|_{r=b} * b / E_f + \sigma_r * b / E_f * V_f \\ &= \left\{ \frac{2 a^2 * P_g}{b^2 - a^2} - \frac{(b^2 + a^2) * P}{b^2 - a^2} + V_f * P \right\} * b / E_f\end{aligned}$$

従って、上記の2式と燃料と被覆管の mismatch 量の関係式 $-G = U_c - U_f$ から両者の相互作用による圧力Pを求める事ができる。

$$P = \frac{\frac{2 a^2 * P_g}{(b^2 - a^2) * E_f} - \left(\frac{V_c}{2} - \frac{r}{W} \right) \frac{P_n}{E_c} - \frac{G}{b}}{\frac{b^2 + a^2}{(b^2 - a^2) * E_f} + \left(\frac{V_c}{2} + \frac{r}{W} \right) \frac{1}{E_c} - \frac{V_f}{E_f}}$$

② 変形速度

被覆管の熱クリープ及び照射クリープ速度は、実験により求められた較正式と、プラントローイツの流れ則から求められる。即ち、被覆管の実効応力 $\bar{\sigma}$ から実効変形速度 $\dot{\epsilon}$ を求め、その結果から周方向変形速度を求める。

$$\dot{\bar{\epsilon}} = f(\bar{\sigma})$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta} = 3/2 * \dot{\bar{\epsilon}} * (\bar{\sigma}_{\theta} - \frac{1}{3} * (\sigma_{\theta} + \sigma_z + \sigma_r)) / \bar{\sigma}$$

被覆管のスエリング速度を $\dot{\epsilon}_s$ とすれば、被覆管の肉厚中心径の変形速度 \dot{U}_c は次式で表わされる。

$$\dot{U}_c = r * (\dot{\epsilon}_{\theta} + \dot{\epsilon}_s)$$

燃料のクリープ速度は reference stress によって計算する。

$$\dot{\epsilon}_R = f(\sigma_R)$$

燃料表面の半径方向変位量は次の様にして求める。

$$\dot{U}_f = \frac{\dot{\epsilon}_R (b^2 - a^2)}{2b \ln(b/a)} \quad a = 0$$

$$\dot{U}_f = 0 \quad a = 0$$

燃料のスエリング速度が $\dot{\epsilon}_f$ の時、燃料表面の半径方向変位速度 \dot{U}_f は次式で表わされる。

$$\dot{U}_f = b * \dot{\epsilon}_f + \frac{\dot{\epsilon}_R (b^2 - a^2)}{2b \ln(b/a)} \quad a = 0$$

$$= b * \dot{\epsilon}_f \quad a = 0$$

Table 3 被覆管応力・歪計算モデル

	Fuel-Cladding Gap Open	Fuel-Cladding Gap Closed
モデル		
被覆管	$\sigma_{\theta} = (P_g - P_n) * r / W$ $\sigma_z = (P_g - P_n) * r / 2W$ $= 0.5 * \sigma_{\theta}$ $\sigma_r = 0.5 * (P_g + P_n)$ $\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_{\theta})^2 \}^{1/2}$ $= \frac{1}{2} (3\sigma_{\theta}^2 + 4\sigma_r^2 - 6\sigma_r\sigma_{\theta})^{1/2}$	$\sigma_{\theta} = (P - P_n) * r / W$ $\sigma_z = 0$ $\sigma_r = -0.5 * (P_g + P_n)$ $\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_{\theta})^2 \}^{1/2}$ $= (\sigma_{\theta}^2 + \sigma_r^2 - \sigma_r\sigma_{\theta})^{1/2}$ <p>Where</p> $P = \frac{\frac{2a^2 \cdot P_g}{(b^2 - a^2)E_f} - \left(\frac{V_c}{2} - \frac{r}{W}\right) \frac{P_n}{E_c} - \frac{G}{b}}{\frac{b^2 + a^2}{(b^2 - a^2)E_f} + \left(\frac{V_c}{2} + \frac{r}{W}\right) \frac{1}{E_c} - \frac{V_f}{E_f}}$
燃料	$\sigma_R = 0$	$\sigma_R = \frac{P - P_g}{\ln(b/a)}$

Table3 (続き)

	被 覆 管	燃 料
変形速度計算	$\dot{\epsilon} = f(\bar{\sigma})$	$\dot{\epsilon}_R = f(\sigma_R)$
応力 { effective reference	$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 \}^{1/2}$ $\epsilon_\theta = 3/2 \cdot \dot{\epsilon} / \bar{\sigma} \cdot (\sigma_\theta - \frac{\sigma_\theta + \sigma_z + \sigma_r}{3})$	$\sigma_R = \frac{P - P_g}{\ln(b/a)}$
境界部径方向速度	$\dot{U}_c = r(\dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_{sc})$	$\dot{U}_f = b \cdot \dot{\epsilon}_{sf} + \frac{\dot{\epsilon}_R (b^2 - a^2)}{2b \ln(b/a)} \quad a = 0$ $\dot{U}_f = b \cdot \dot{\epsilon}_{sf} \quad a = 0$

7. タイムキャッシング

本コードでは、燃料ピンの受ける照射履歴を短時間のタイムステップごとに分割し、そのタイムステップ内での照射条件をそのタイムステップの初めに値に固定して近似計算している。この為、この手法により本当に真値に近い結果が得られるのは、各タイムステップが十分に短い場合に限られる。また、同様に各タイムステップ中の変形量はタイムステップ初期の応力によって計算される値で代表される為、タイムステップは、その間の応力変化が十分に小さくなる様に制限されなければならない。以上の点から本コードで解析を行なう場合にはタイムステップの設定に十分な注意を払う必要がある。

ギャップが開いている時には、燃料及び被覆管に加わる荷重は F. P. ガスによる内圧のみであり、定常運転時の内圧変化は非常に小さい。この為、計算結果はタイムステップの大きさには比較的左右されないので、タイムステップの大きさは主として、タイムステップの初めに計算される燃料及び被覆管の変形速度によって予測されるギャップが閉じるまでの時間によって決定される。しかし、この様な制限も被覆管のスエリング速度が燃料より大きい場合にはタイムステップは主として入力 IPT 1 で定義されている最大値 (GREAT = 100 hr) に設定される。

ギャップが閉じている時には、被覆管応力は燃料—被覆管の相互作用の程度によっては急激に変化する。この様な場合にはタイムステップは燃料—被覆管の接触圧の変化が user の指定する割合 (FACTOR) 以下となる様に設定される。本コードでは FACTOR の値は、EBR-II における混合酸化物の定常状態における挙動解析の結果から 0.1 に設定してある。もし、他の炉あるいは他の運転状態での解析を実施する場合にはこの値も再度設定しなおす必要がある。

基本的には、定常運転時のタイムステップは上記の条件に従って設定されるが、実際の計算ではその他に次に示す制限条件にも合致する様に設定される。

- ① タイムステップは user によって指定される最小値 (SMALL) 及び最大値 (GREAT) の間に入る様に設定される。
- ② user によって指定される計算区間 (burnup step) 及び計算結果の出力時間を越えない様に設定される。
- ③ 準定常状態 (出力変化時) には、タイムステップは user によって指定される値 (TFAST = 0.01 hr) に固定される。この値は EBR-II の標準的な出力上昇時の解析で使用するのに充分小さな値である。

8. GRO - IIの近似項目

GRO-II の中では次の様な近似を計算の筒略化の為にしている。

- ① 被覆管は薄肉円筒モデルで近似している。FBR 用燃料ピンの直径対肉厚の比 (~ 15) は、充分真値に近い近似を与える。
- ② 燃料は外径をペレット外径、内径を非粘性領域外側とするリングと考え、このリング内のみで応力分布を考慮する。
- ③ 燃料のクリープ速度を計算する為に reference stress を使っている。この手法は多くの実験と解析によって確認されている。
- ④ 燃料のクリープ速度の計算に体積平均温度を使っている。
- ⑤ 変形量の計算の為に、 successive elastic approximation method が採用されている。タイムステップの大きさは接触圧の変化量が定められた値より小さくなる様にコントロールされる。
- ⑥ 燃料-被覆管接触圧は、各タイムステップの初めの状態に基づいて、やきばめモデルによって計算される。この手法が妥当性を持つ為には、燃料リングの応力が接触圧に比例して変化することとその分布がクリープによって変化しない必要がある。この様な近似は、燃料のクリープ速度が、非粘性領域温度以下では、応力に対してほぼ 1 次に比例することから妥当である。

9. コードの較正

GRO-II は GE の 30 組の EBR-II 照射データ (スエリング・非弾性歪) を使って較正されている (表 4)。表に示されているデータはこの較正の為に特別に評価が行なわれ、最も妥当な値が選ばれた。

較正は、燃料及び被覆管の照射クリープ・熱クリープ・スエリングの 6 個のパラメータについて、特定な 1 次の較正係数の組み合わせについて次の統計的パラメータ (標準偏差) を計算し、標準偏差が最小になる様な組み合わせを求めた。

$$R_i = \text{Robserved}_{(i)} - \text{Rcalculated}_{(i)}$$

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2 \right\}^{1/2}$$

実際には被覆管のスエリングは応力に依存しないと考えられるので、スエリングに関しては、上記の手順によらず、直接スエリングの測定値と評価式とを比較して較正を行なったが、その結果較正係数は 0.651 となった。

また、GRO-II による感度解析評価では、燃料及び被覆管の熱クリープ速度に対する変形量の感度は比較的小さかった。これは燃料においては、このプログラムでモデル化されている外側リング (粘性領域) では温度が低く、又、被覆管においても温度が低い事と通常の運転状態では被覆管応力がそれほど大きくならない事によるものと考えられる。熱クリープ速度は各ピンごとに異なる事が予想されるが、これらの係数を較正する為には、ほんの少しの較正の場合でも、較正係数を大きく変化させなければならない。以上の点から燃料及び被覆管の熱クリープ速度の較正係数を決定する事は困難であると同時に、その係数の効果はあまり大きくないと考えられる事から、本コードの中では両者は 1.0 に固定している。

結局、本コードによって較正を行ったのは、被覆管スエリング・被覆管照射クリープ・燃料照射クリープである。結果を表 5 に示す。

Table 4 DATA USED IN THE CALIBRATION OF THE GRO-II CODE

Fuel Rod Data								Section Data																	
Fuel Rod	Cladding Type	Fuel Volume (cc)	Plename Volume (cc)	Peak Power, MW/Vt		Peak Fluense Increment ($E > 0.1$ Mev $10^{22}n/cm^2$)	Peak Burnup Increment (atom %)	Section	Fuel Radius (in.)	Fuel Fractional Density	Cladding Outer Radius (in.)	Cladding Thickness (in.)	Local/Peak Power Ratio	Cladding Midwall Temperature (°F)	Cladding Swelling (%)	Cladding inelastic hoop Strain (%)									
				Beginning of Increment	End of Increment																				
P38-15	216A	10.35	16.20	14.49	14.25	0.874	1.42	C	0.122	0.900	0.145	0.020	0.987	856	0.18	0									
				14.73	14.48	0.886	1.41	F	0.122	0.903	0.145	0.020	1.0	1022	0.18	0									
				14.48	14.39	0.350	0.55																		
				14.39	14.38	0.040	0.07																		
E1H-26	316A	8.2	8.2	14.80	14.47	1.28	1.88	D	0.108	0.905	0.126	0.015	0.91	939	0.65	0.04									
				13.35	13.09	2.43	1.64	B	0.100	0.943	0.125	0.015	0.968	982	0.13	0.31									
				13.53	12.66	6.28	5.30																		
				14.65	14.56	0.361	0.56																		
F5F	316A	8.2	10.62	14.55	14.30	0.899	1.44	E	0.108	0.935	0.125	0.015	1.0	1091	0.16	0.20									
				14.30	14.24	0.230	0.37	H	0.108	0.940	0.125	0.015	0.784	1157	0.06	0.14									
				14.24	13.67	2.140	3.30	B	0.108	0.941	0.125	0.015	0.981	983	0.17	0.35									
				14.82	14.71	0.367	0.58																		
F5M	321A	8.1	10.62	14.71	14.46	0.913	1.44	F	0.108	0.941	0.125	0.015	1.0	1101	0.33	0.31									
				14.46	14.39	0.240	0.37	J	0.108	0.941	0.125	0.015	0.797	1161	0.11	0.19									
				14.39	13.81	2.190	0.33	C	0.108	0.882	0.125	0.015	0.828	760	0.11	0.41									
				12.20	11.39	3.56	5.64																		
F9C31	316A	8.05	12.98	11.79	11.65	0.66	0.90	G	0.108	0.882	0.125	0.015	1.0	870	0.29	0.31									
				N	0.108	0.884	0.125	0.015	0.9	978	0.04	0.28													
													14.61	14.51	0.359	0.58	B	0.108	0.965	0.125	0.015	0.943	966	0.0	0.44
													14.51	14.26	0.891	1.43	E	0.108	0.96	0.125	0.015	1.0	1082	0.0	0.52
F5Q	316 50% CW	8.14	10.62	14.26	14.20	0.230	0.37	I	0.108	0.943	0.125	0.015	0.793	1154	0.0	0.24									
				14.20	13.63	2.130	3.29	4	0.109	0.952	0.125	0.015	0.988	952	0.45	0.71									
				16.24	16.20	0.142	0.23																		
				17.37	16.54	2.55	3.99																		
F2H	316A	8.72	14.04	15.25	15.01	0.85	1.28	7B	0.109	0.965	0.125	0.015	1.0	987	0.49	0.7									
				14.92	14.58	1.19	1.76	7A	0.109	0.96	0.125	0.015	0.959	1006	0.45	0.7									
				14.28	14.25	0.136	0.22	C	0.108	0.898	0.124	0.015	0.853	873	1.30	0.3									
				16.36	15.56	2.64	4.10	E	0.108	0.901	0.124	0.015	0.826	912	2.44	0.3									
F2V	316A	8.57	13.8	14.35	14.11	0.87	1.32	F	0.108	0.891	0.124	0.015	1.0	945	2.54	0.8									
				13.81	13.50	1.21	1.78	J	0.108	0.895	0.124	0.015	0.993	958	2.82	1.1									
				12.93	12.08	3.63	5.11	M	0.108	0.898	0.124	0.015	0.933	973	1.96	1.1									
				P	0.108	0.899	0.124	0.015	0.816	973	0.99	0.65													
													16.04	15.99	0.140	0.23	8	0.109	0.963	0.125	0.015	1.0	987	0.75	0.96
				F2T	347	8.8	14.0	17.55	16.10	2.57	4.04	9	0.109	0.947	0.125	0.015	0.97	996	0.67	1.03					
15.40	15.15	0.86	1.30					11	0.109	0.964	0.125	0.015	0.872	1005	0.45	0.61									
15.01	14.67	1.19	1.78					D	0.108	0.962	0.125	0.015	0.902	914	1.93	1.48									
16.06	16.02	1.43	0.199																						
F2G	347	8.84	14.0	16.78	15.99	2.51	3.41	H	0.108	0.961	0.125	0.015	1.0	985	3.34	1.47									
				14.75	14.51	0.84	1.10	M	0.108	0.946	0.125	0.015	0.865	1106	1.83	1.44									
				14.52	14.20	1.17	1.51	.	0.108	0.962	0.125	0.015	0.902	914	1.93	1.48									
				13.53	12.66	3.51	4.33																		

Table 5. 標準的な校正係数 (GRO-II 標準計算式を使用した場合)

PRELIMINARY CALIBRATION FACTORS FOR USE IN GRO-II

<u>Correlation</u>	<u>Ranges of Factors Investigated</u>		<u>Factors which Minimize the Standard Deviation for the Strain Residuals</u>	
	<u>Fuel</u>	<u>Cladding</u>	<u>Fuel</u>	<u>Cladding</u>
Swelling	0 to 5	0.551	1.72	0.551
Irradiation Creep	0 to 1	0 to 6	0.015	5.1
Thermal Creep	0 to 1	0 to 5	1.0	1.0

10. 入力方法

ここでは、実際の GRO-II の実行手順に関して DFR 332/10 S130 ピンについて説明する。

(1) データの作成

GRO-II コードでは燃料の照射状態については各 Burnup increment ごとに順時入力する形式を取っている。また、各 Burnup increment は①定常運転状態（Burnup increment の最初と最後の時点における線出力・被覆管温度が等しい）及び②準定常運転状態（ゆるやかな線出力・被覆管温度の変化がある）の2つのみを考慮している。従って、現実の複雑な照射履歴を GRO-II に簡略化する必要がある。また、計算時間を短縮する為にも計算回数を出来るかぎり少なくする様な簡略化が必要である。

以上の点から、燃料ピンの GRO-II 流簡略化の基本的な形は、

(A) 燃料ピンの照射条件を各サイクルごとに ① 出力上昇時、② 定常運転時、③ shut down 時の3つの Burnup increment に分離することである。

この場合には、定常運転時の線出力・被覆管温度は入力される一定値に固定される。定常運転時の照射条件 (POWER・TEMP) をどの値で代表させるかは、解析の目的によって異なる。DFR 332/10 S130 ピンについての簡略化の例を表7に示す。

しかし、上記の3つの Burnup increment の中で③の shut down は計算上燃料ピンの変形には何ら寄与しない（準定常状態では熱膨脹差のみが有効である為）。また、同様の理由により前回の出力レベルまでの出力上昇時の計算も意味がない（前回の shut down による変形量が回復する。即ち、前回 gap=0 で shut down した場合には、同一 power で gap=0 の状態となる）。従って、各サイクル間の出力変化は前回のステップにおける線出力に比べて大きくなる場合のみ考慮すれば良い（input ①, ⑦, ⑧）。即ち、

(B) サイクル間の出力変化は、低下する場合には無視する（ステップ状変化）。

(C) サイクル間の出力変化が、上昇する場合には、前回の shut down 前の出力と新しいサイクルの出力の差の部分だけを準定常出力としてモデル化する。

以上の点を考慮して DFR 332/10 S130 ピンの炉心位置（出力最大位置）に関する入力データの作成例を表10に示す。

入力データセット (IPT2) 数は9となる。更に近似を良くする為には、各サイクルを数 burnup increment に分割すれば良い。

(2) 計算実行までの手順

計算実行までの手順を以下に示す。

① プログラム内データのチェック

解析対象の特性とプログラム内データとの合致の確認を行なう。特に注意すべき項目としては次のものがある。

- ・ 燃料・被覆管の材料特性（特に swelling・irrd. creep・thermal creep の校正係数）

② 各ケースごとの入力の作成 IPT 1（表 8）

IPT 1 により入力するデータの中で特に注意が必要な変数

- ・ PSTEP, TMPVSC, PKAVG, GAPK, ITH EXP, IGAP, JGAP

③ 各 Burnup increment ごとの入力データの作成 IPT 2（表 9）

前述の作成例に基づきデータを作成する。

(3) データセット例

「GRO-Ⅱ」による解析計算のデータセット例を図 5 に示す。

また、サンプルラン入力データ例（DFR332/10 S131 ピン）を表 10 に示し、表 11 に出力例を示す。

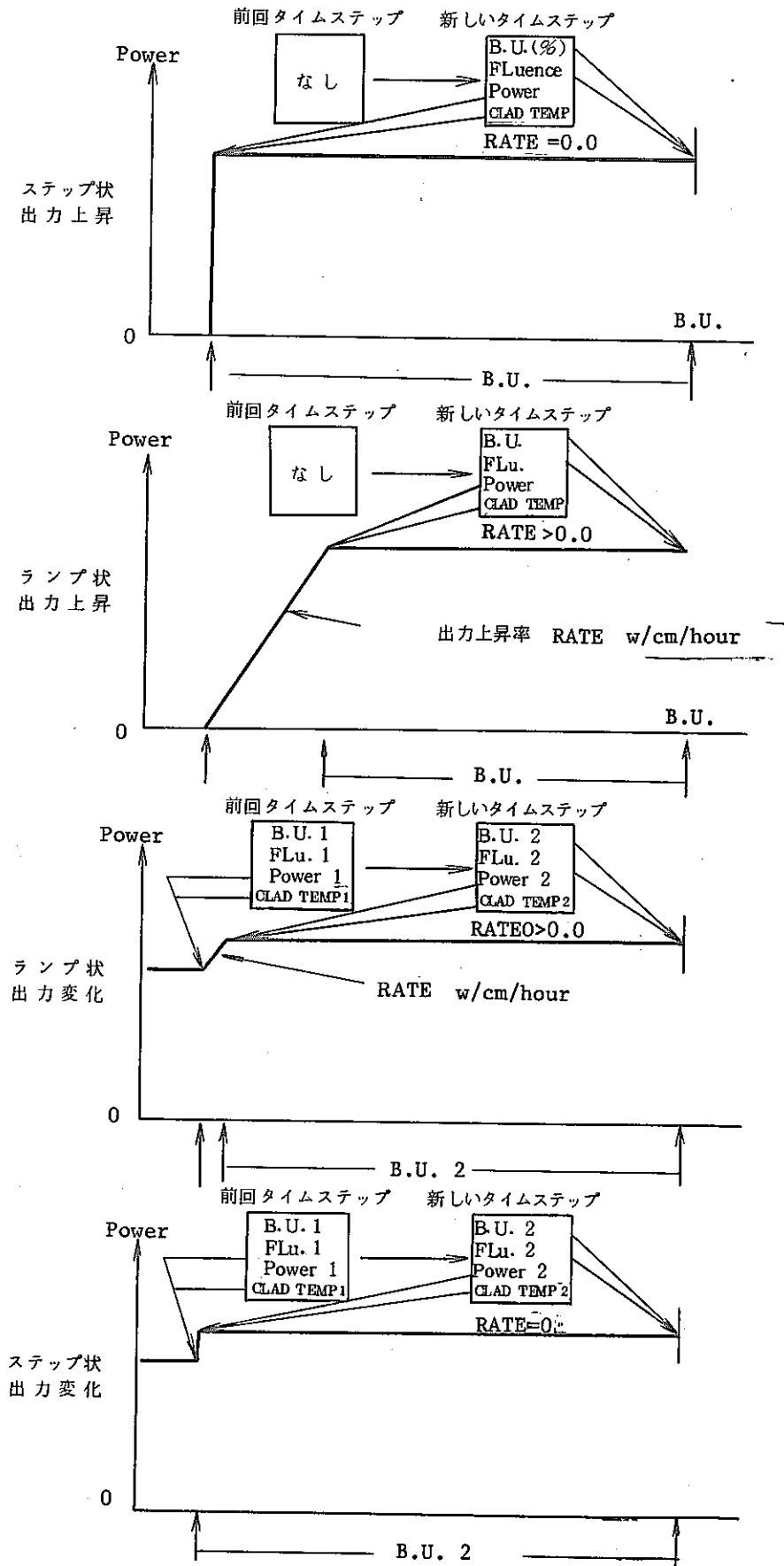


Fig. 3 照射履歴の近似の仕方

Table 6. DFR 332/10 照射条件概略 (S130, S131)

・ ピッチ15でのEFPD ** ピッチ7でのEFPD

Run No.	燃料比出力 w/g 最大 平均	燃料線出力 w/cm 最大 平均	燃 焼 度 atom % 最大 平均	ピークフルエンス $\times 10^7$ ml Total $E \geq 0.1$ MeV	実効照射日数 EFPD	燃 焼 度 (MWD/T) 最大 平均	燃 焼 度 (MWD/MTM) 最大 平均	照 射 リ グ 名 称	照 射 孔 ピ ッ チ	年, 月, 日
69 (Start)	192.1 176.1	412.1 377.8	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	332/7	26	71. 5. 16
(end)	189.0 172.4	405.4 369.8	1.31 1.19	0.94 0.82	56.2	10709 9759	12156 11323	"	"	71. 5. 29
70 (end)	186.0 169.8	399.0 364.3	2.58 2.35	1.87 1.64	111.9	21153 19288	24010 21893	"	"	71. 11. 9
71 (end)	182.9 167.2	392.4 358.7	3.91 3.56	2.85 2.49	170.8	32016 29212	36341 33158	"	"	72. 2. 22
72 (end)	179.5 164.3	385.1 352.5	5.33 4.87	3.93 3.44	235.4	43719 39918	49624 45310	"	"	72. 6. 24
73 (end)	176.1 161.5	377.8 346.5	6.75 6.16	5.01 4.38	300.6	55307 50535	62778 57361	"	"	72. 10. 21
74	中間検査のため照射中断									
75 (end)	173.7 159.4	372.6 341.9	7.78 7.11	5.82 5.09	349.1	63790 58315	72406 66192	332/9	26	73. 8. 26
76 (Start)	197.4 179.5	423.5 385.1	"	"	"	"	"	"	15	73. 10. 26
76 (end)	192.6 175.5	413.2 376.5	9.60 8.77	7.30 6.46	425.4 (76.3)*	78670 71858	89286 81564	"	"	74. 2. 4
77	中間検査のため照射中断									
78 (Start)	204.4 185.9	438.5 398.8	9.65 8.78	7.31 6.47	425.4 (76.3)	78786 71938	89428 81655	332/10	7	75. 4. 6
78 (end)	199.8 182.1	428.6 390.6	11.25 10.26	8.68 7.18	491.6 (66.2)**	92165 8 120	104614 95482	"	"	75. 6. 25
79 (end)	195.3 178.3	418.9 382.5	12.87 11.74	10.06 8.90	558.8 (133.4)**	105429 96230	119681 109228	"	"	76. 2. 26

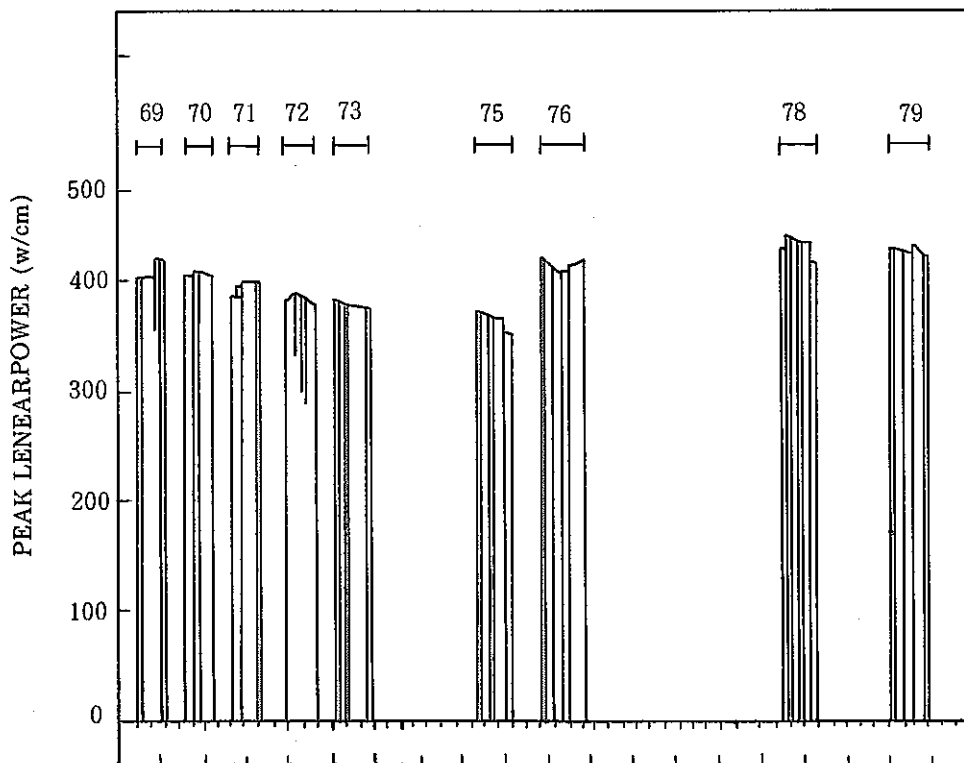
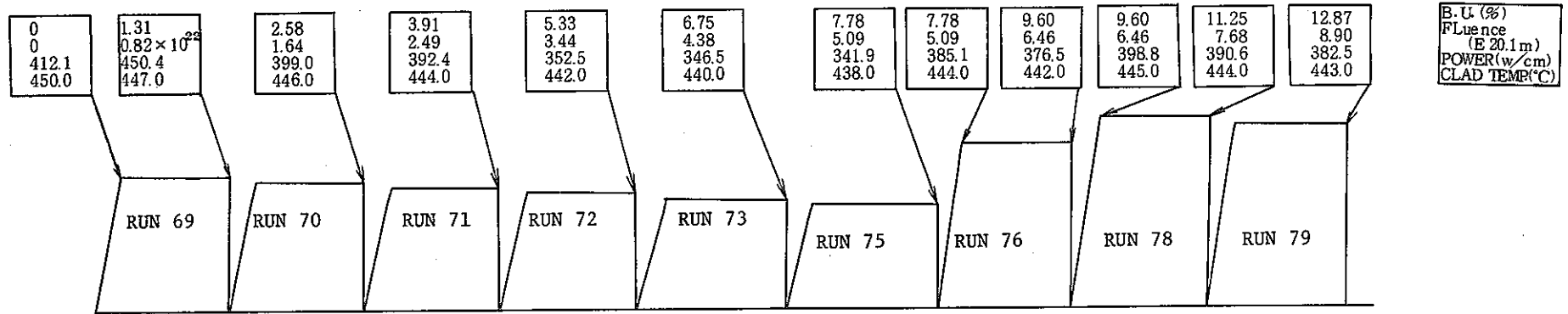
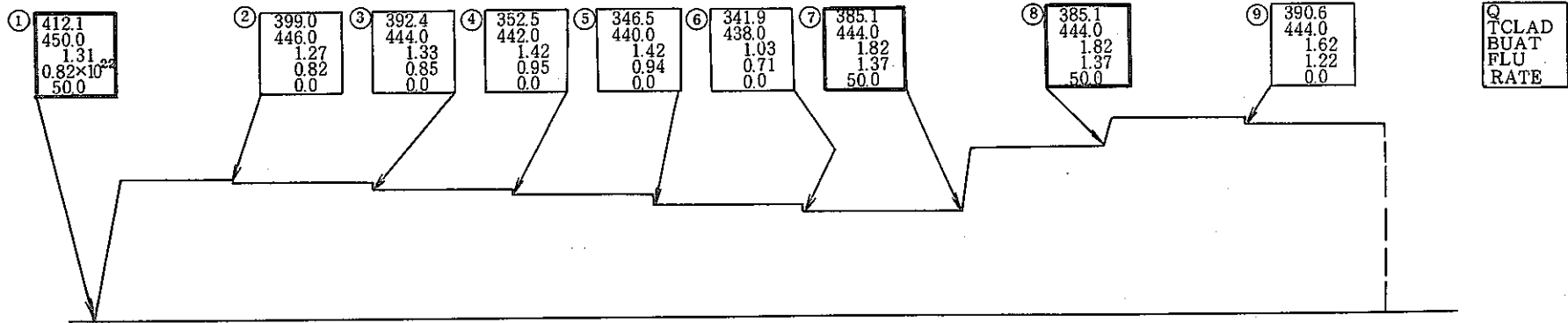


Fig. 4 DFR 332/10 照射履歴

Table 7 基本的な出力履歴分割例 (DFR 332/10 炉心中心部)



IPT2 データ例



上記以外の変数

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
Peak	1.16	"	"	"	"	"	"	"	"
-HGAP	1700	"	"	"	"	"	"	"	"
NCYCL	.	"	"	"	"	"	"	"	"
NEXT	o

VARI Able

Table 8 IPT 1 入力変数

IPT 1

Variable	Description	DATA*	INPUT UNIT	備 考
FACTOR	Max. permissible change in fuel/cladding interface pressure during the time step	0.1	fraction	
GREAT	Max. time increment limit	100	Hr	
SMALL	Min. time increment limit	10	Hr	
TFAST	Time step during power changes	0.01	Hr	
PSTEP	Printout interval	480	Hr	
TDEN	Theoretical fuel density	11.0	gr/cc	
WTMOL	Fuel molecular weight	268		
FISMEV	Energy release rate	203	MeV/fission	
GATOMS	Gas atoms released fission	0.246		
TMPVSC	Fuel inviscidity temperature	1300	°C	本文 第5章参照
DCLAD	Cladding outer diameter		mm	
THIC	Cladding wall thickness		mm	
DFUEL	Fuel outer diameter		mm	
DHOLE	Fuel inner diameter	0	mm	
FDEN	Fuel fractional density			もんじゅタイプ ≈ 0.85, 常陽タイプ ≈ 0.93
FVOL	Fuel Volume		cc	
PTEMP	Plenum temperature		°C	
PVOL	Plenum volume		cc	
PCL	Coolant pressure	1.758	kg/cm ²	
PKAVG	Peak/Average power ratio	1.1		炉型によって異なるので注意する事!
CYCLE	Length of power cycle to be constant	0	Hr	
GAPK	Gap conductance assumed to be constant during irradiation	1700	BTU/Ft ² ·°F·Hr	IPT 2 でステップごとに再定義
IPROP	Material property index	5		
	= 1/3 ; GRO.2 model (Annealed 316 ss)			3: irradiation induced deformation
	= 2/4 ; GRO.2 model (20% CW 316 ss)			4: 同上
	= 5 ; PNC model (PNC-2, 4 (S-cladding))			
	= 6 ; PNC model (照射クリープの式に stress affected 式を使用)			

Table 8 (続き)

IPT 1 continue

Variable	Description	DATA*	INPUT UNIT	備考
C1, C2, C3	Factor in AGF Correlations for FCCI	0		付録 物性式参照
CO	= $1/[\text{Achieved Buruup (at. \%)}^{0.5}]$	0		
FCCI	FCCI measured in AGF	0		
ITRUP	Used to select nominal/upper limit/lower limit of creep rupture time (0/1/-1)	0		
IGAP	Used to include/exclude (1/0) thermal expansion of viscid zone			
IGAP	Used to select gap closure model	1		
	= 1 ; HEDL-SA-1288 (New correlation)			
	= 2 ; HEDL TME 74-19 (Old correlation)			
JGAP	Used to select fuel swelling model after gap close			
	= 0 ; GRO. 2 model			
	= 1 ; The third term of gap closure model			
IATACK	Used to include/exclude FCCI	2		
	= 0 ; exclude			
	= 1 ; GRO. 2 correlation			
	= 2 ; AGF measured FCCI			付録 物性式参照
CIRFAC, CTHFAC, CSWFAC, FIRFAC, FTHFAC, FSWFAC		全て 1.0		Table 5 参照

* DATA 欄に記入されている数字は標準的な入力値。ユーザーによる入力がない場合にはこの値が定義される。

Table 9 IPT 2 入力変数

IPT 2

Variable	Description	DATA	INPUT UNIT	備 考
Q	Local linear power		w/cm	
TCLAD	Local Cladding midwall temperature		°C	
PEAK	Local/peak power ratio			
BUAT	Burnup increment in a power step	0	at. %	} どちらか一方を入力すれば良い
BUMW	Burnup increment in a power step	0	MWD/MTM	
FLU	Fluence increment in a power step		n/cm ²	
RATEO	Rate of change in power	0	W/cm/Hr	出力の変化はステップの最初に発生するものとしてモデル化される
HGAP	Gap conductance in a power step	GAPK	BTU/Ft ² ·°F·Hr	
NCYCL	Number of power cycles in a power step	1		
NEXT	Used to decide next calculation case	1		
	= 1 ; calculate next powep			
	=10 ; calculate next irradiation case to be same clata as previous case			
	= 100 ; calculate next case			
	= 0 ; Stop to calculate			

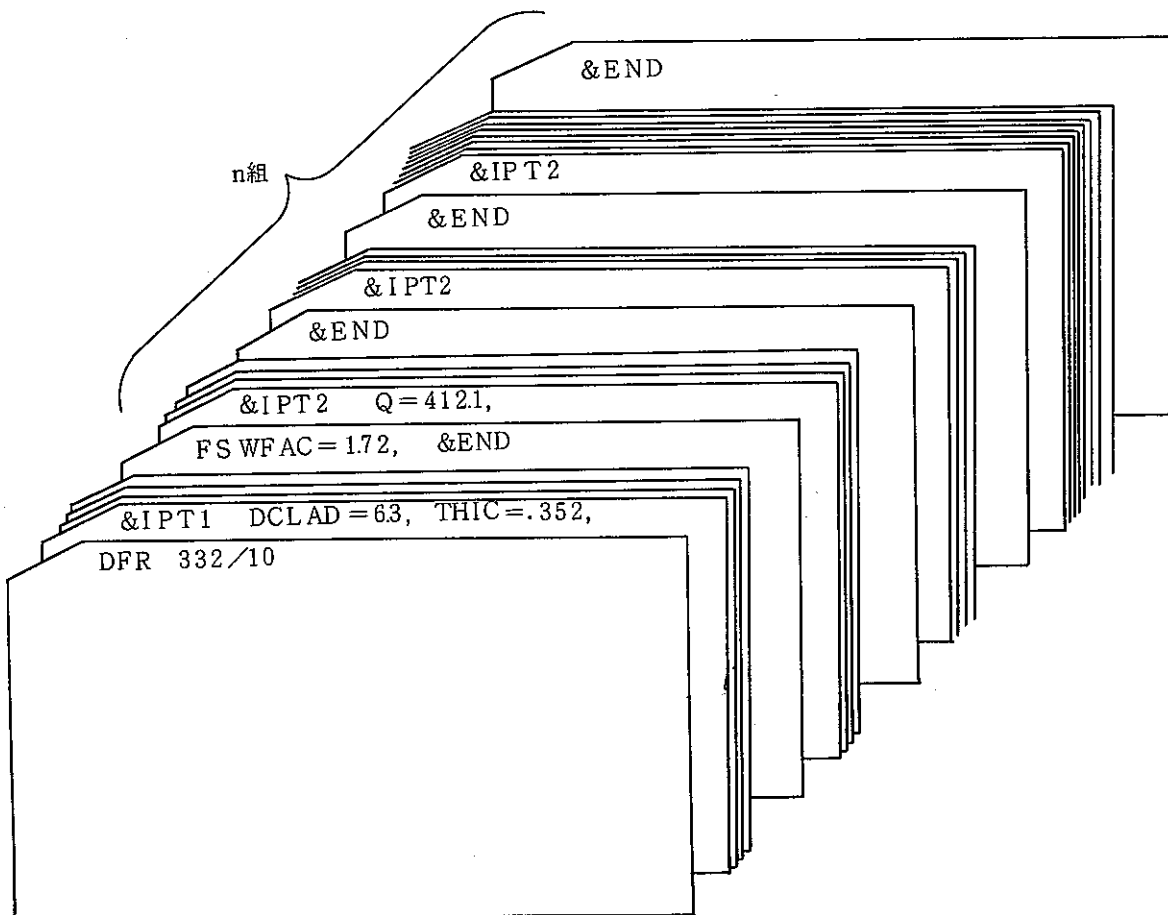


Fig. 5 データ・セットアップ例

Table 10 Sample Run Data

```

L
      OFR332/10
&IPT1
DCLAD = 6.3, THIC = .352, DFUEL = 5.412, FV0L = 8.281,
PTEMP = 233., PV0L = 2.949, IPROP = 1, IATAK = 0,
CIRFAC = 5.1, CTHFAC = 1., CSWFAC = .651,
FIRFAC = .015, FTHFAC = 1., FSWFAC = 1.72,
&END
&IPT2
Q = 412.1, TCLAD = 450., BUAT = 1.31, FLU = .82E22, RATE0 = 50.,
&END
&IPT2
Q = 399., TCLAD = 446., BUAT = 1.27, FLU = .82E22, RATE0 = 0.,
&END
&IPT2
Q = 392.4, TCLAD = 444., BUAT = 1.33, FLU = .85E22, RATE0 = 0.,
&END
&IPT2
Q = 352.5, TCLAD = 442., BUAT = 1.42, FLU = .95E22, RATE0 = 0.,
&END
&IPT2
Q = 346.5, TCLAD = 440., BUAT = 1.42, FLU = .94E22, RATE0 = 0.,
&END
***
&IPT2
Q = 341.9, TCLAD = 438., BUAT = 1.33, FLU = .71E22, RATE0 = 0.,
&END
&IPT2
Q = 335.1, TCLAD = 444., BUAT = 1.32, FLU = 1.37E22, RATE0 = 50.,
&END
&IPT2
Q = 398.8, TCLAD = 445., BUAT = 1.55, FLU = 1.22E22, RATE0 = 50.,
&END
&IPT2
Q = 390.6, TCLAD = 444., BUAT = 1.62, FLU = 1.22E22, RATE0 = 0.,
NEXT = 0,
&END
END OF DATA SET

```

Table 11 Sample Run Output

 DFR332/10

***** CALCULATION CONDITIONS *****

CLADDING TYPE AND ENHANCEMENT EFFECTS -----
 20% CW 316SS - WITH ENHANCEMENT EFFECTS
 CLADDING WASTAGE ----- EXCLUDE
 THERMAL EXPANSION OF FUEL INVISCID ZONE ----- EXCLUDE
 GAP CLOSURE CORRELATION ----- HEDL-SA-1288 (NEW CORRELATION)
 FUEL SWELLING AFTER GAP CLOSE ----- GR0.2 MODEL

 ***** OUTPUT *****
 ##### STEP 1 ##### ← 入力された1組のIPT 2ごとに出力される。

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	DFLUENCE (MWD/MTM)	DCYCLE (N/CM2)
412.1	450.0	0.50E+02	1700.0	57.8	1.31	11085.6	0.82E+22

TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HOTG (MIC)	(1) COLDG (MIC)	(1) FCCI (MIC)	(1) PRESS. (K/CM2)	(1) E-PLAST. (FRAC)	(1) E-THERM. (FRAC)	(1) E-IRRAD. (FRAC)	(1) E-SWELL. (FRAC)
20.0	0.46	158.	163.	0.	5.37E+00	0.0	3.23E-22	7.71E-06	3.32E-09
		(2) 2.96E+01		(2) 3.05E+01	1.53E+01	-3.56E+00	1.32E-20		1.14E-21
40.0	0.91	(1) 146.	(1) 151.	(1) 0.	9.63E+00	0.0	2.31E-20	3.27E-05	8.59E-09
		(2) 6.26E+01		(2) 6.65E+01	3.32E+01	-5.69E+00	9.42E-19		5.78E-20
57.9	1.31	(1) 138.	(1) 143.	(1) 0.	1.39E+01	0.0	2.21E-19	6.97E-05	1.66E-08
		(2) 9.56E+01		(2) 1.02E+02	5.12E+01	-7.82E+00	9.00E-18		4.63E-19

STEP 2

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	DFLUENCE (MWD/MTM)	DCYCLE (N/CM2)
399.0	446.0	0.0	1700.0	57.9	1.27	10747.1	0.82E+22

TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HOTG (MIC)	(1) COLDG (MIC)	(1) FCCI (MIC)	(1) PRESS. (K/CM2)	(1) E-PLAST. (FRAC)	(1) E-THERM. (FRAC)	(1) E-IRRAD. (FRAC)	(1) E-SWELL. (FRAC)
60.0	1.36	(1) 137.	(1) 142.	(1) 0.	1.41E+01	0.0	2.54E-19	7.51E-05	1.82E-08
		(2) 9.76E+01		(2) 1.05E+02	5.23E+01	-7.95E+00	1.04E-17		5.25E-19
80.0	1.80	(1) 128.	(1) 133.	(1) 0.	1.80E+01	0.0	9.82E-19	1.34E-04	3.81E-08
		(2) 1.28E+02		(2) 1.37E+02	6.87E+01	-9.89E+00	4.01E-17		1.76E-18
100.0	2.24	(1) 121.	(1) 127.	(1) 0.	2.21E+01	0.0	3.44E-18	2.10E-04	7.28E-08
		(2) 1.60E+02		(2) 1.72E+02	8.61E+01	-1.19E+01	1.40E-16		5.53E-13

Table 11 (continue 1)

115.8 2.58 (1) 117. 122. 0. 2.54E+01 0.0 8.12E-18 2.82E-04 1.18E-07
 (2) 1.85E+02 2.00E+02 9.99E+01 -1.36E+01 3.31E-16 1.22E-17

STEP 3

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE
392.4	444.0	0.0	1700.0	61.7	1.33	11254.8	0.85E+22 1.00

TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HOTG (MIC)	COLDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)
		(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)		
120.0	2.67	(1) 116. 121.	0.	2.69E+01	0.0	9.55E-18	3.03E-04	1.34E-07	(2) 1.97E+02 2.13E+02 1.06E+02 -1.43E+01 3.90E-16 1.42E-17
140.0	3.11	(1) 110. 115.	0.	3.03E+01	0.0	2.08E-17	4.09E-04	2.46E-07	(2) 2.23E+02 2.41E+02 1.21E+02 -1.60E+01 8.47E-16 2.90E-17
160.0	3.54	(1) 105. 110.	0.	3.44E+01	0.0	4.34E-17	5.32E-04	4.36E-07	(2) 2.55E+02 2.76E+02 1.38E+02 -1.81E+01 1.77E-15 5.77E-17
177.5	3.91	(1) 100. 105.	0.	3.84E+01	0.0	7.87E-17	6.53E-04	7.09E-07	(2) 2.86E+02 3.10E+02 1.55E+02 -2.01E+01 3.21E-15 1.01E-16

STEP 4

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE
352.5	442.0	0.0	1700.0	73.3	1.42	12016.4	0.95E+22 1.00

TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HOTG (MIC)	COLDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)
		(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)		
180.0	3.96	(1) 101. 105.	0.	3.86E+01	0.0	8.39E-17	6.70E-04	7.63E-07	(2) 2.87E+02 3.11E+02 1.56E+02 -2.02E+01 3.44E-15 1.07E-16
200.0	4.35	(1) 97. 100.	0.	4.21E+01	0.0	1.37E-16	8.16E-04	1.32E-06	(2) 3.14E+02 3.41E+02 1.70E+02 -2.19E+01 5.84E-15 1.71E-16
220.0	4.74	(1) 92. 95.	0.	4.57E+01	0.0	2.22E-16	9.77E-04	2.23E-06	(2) 3.43E+02 3.72E+02 1.86E+02 -2.37E+01 9.96E-15 2.69E-16
240.0	5.13	(1) 87. 91.	0.	4.94E+01	0.0	3.50E-16	1.15E-03	3.74E-06	(2) 3.71E+02 4.03E+02 2.01E+02 -2.56E+01 1.67E-14 4.19E-16
250.8	5.33	(1) 85. 88.	0.	5.15E+01	0.0	4.44E-16	1.25E-03	4.91E-06	(2) 3.88E+02 4.21E+02 2.10E+02 -2.66E+01 2.19E-14 5.28E-16

このタイムステップ内で
 PCMIが発生していない。
 発生した場合には、この
 ラインは(---++---)
 で表示される。

Table 11 (continue 2)

STEP 5

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE								
346.5	440.0	0.0	1700.0	74.6	1.42	12016.4	0.94E+22	1.00							
TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HGTG (MIC)	COLDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)	(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)
260.0	5.51	(1) 83.	86.	0.	5.34E+01	0.0	5.17E-16	1.34E-03	6.25E-06	(2) 4.03E+02	4.37E+02	2.19E+02	-2.76E+01	2.62E-14	6.11E-16
280.0	5.89	(1) 79.	82.	0.	5.66E+01	0.0	7.21E-16	1.55E-03	1.04E-05	(2) 4.27E+02	4.64E+02	2.32E+02	-2.92E+01	3.88E-14	8.46E-16
300.0	6.27	(1) 75.	78.	0.	6.02E+01	0.0	1.01E-15	1.78E-03	1.69E-05	(2) 4.55E+02	4.94E+02	2.47E+02	-3.10E+01	5.76E-14	1.18E-15
320.0	6.65	(1) 71.	74.	0.	6.37E+01	0.0	1.40E-15	2.04E-03	2.73E-05	(2) 4.83E+02	5.25E+02	2.62E+02	-3.28E+01	8.50E-14	1.65E-15
325.3	6.75	(1) 70.	73.	0.	6.51E+01	0.0	1.53E-15	2.12E-03	3.09E-05	(2) 4.93E+02	5.36E+02	2.68E+02	-3.34E+01	9.41E-14	1.80E-15

STEP 6

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE								
341.9	438.0	0.0	1700.0	54.8	1.03	8716.1	0.71E+22	1.00							
TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HGTG (MIC)	COLDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)	(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)
340.0	7.03	(1) 67.	70.	0.	6.75E+01	0.0	1.84E-15	2.35E-03	4.42E-05	(2) 5.12E+02	5.57E+02	2.78E+02	-3.46E+01	1.17E-13	2.16E-15
360.0	7.41	(1) 64.	67.	0.	7.08E+01	0.0	2.37E-15	2.71E-03	7.03E-05	(2) 5.38E+02	5.85E+02	2.93E+02	-3.63E+01	1.59E-13	2.80E-15
380.0	7.78	(1) 61.	65.	0.	7.44E+01	0.0	3.07E-15	3.15E-03	1.08E-04	(2) 5.66E+02	6.15E+02	3.08E+02	-3.81E+01	2.17E-13	3.68E-15
380.1	7.78	(1) 61.	65.	0.	7.50E+01	0.0	3.08E-15	3.16E-03	1.09E-04	(2) 5.71E+02	6.20E+02	3.10E+02	-3.84E+01	2.18E-13	3.68E-15

Table 11 (continue 3)

STEP 7

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%) (MWD/MTM)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE			
385.1	444.0	0.50E+02	1700.0	86.0	1.82 15401.4	0.14E+23	1.00			
TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) H0TG (MIC)	C0LDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)	
		(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)			
400.0	8.20	(1) 57.	62.	0.	7.83E+01	0.0	5.26E-15	3.81E-03	1.73E-04	
		(2) 5.97E+02	6.49E+02	3.25E+02	-4.00E+01	3.93E-13	6.62E-15			
420.0	8.63	(1) 56.	61.	0.	8.23E+01	0.0	8.17E-15	4.65E-03	2.68E-04	
		(2) 6.28E+02	6.83E+02	3.42E+02	-4.20E+01	6.40E-13	1.07E-14			
440.0	9.05	(1) 57.	61.	0.	8.62E+01	0.0	1.20E-14	5.68E-03	3.93E-04	
		(2) 6.60E+02	7.18E+02	3.59E+02	-4.40E+01	9.81E-13	1.63E-14			
460.0	9.47	(1) 58.	63.	0.	9.02E+01	0.0	1.70E-14	6.91E-03	5.45E-04	
		(2) 6.92E+02	7.52E+02	3.76E+02	-4.60E+01	1.45E-12	2.39E-14			
466.2	9.60	(1) 59.	64.	0.	9.17E+01	0.0	1.88E-14	7.33E-03	5.96E-04	
		(2) 7.04E+02	7.66E+02	3.83E+02	-4.67E+01	1.62E-12	2.68E-14			

STEP 8

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%) (MWD/MTM)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE			
398.8	445.0	0.50E+02	1700.0	75.3	1.65 13962.8	0.12E+23	1.00			
TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) H0TG (MIC)	C0LDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)	
		(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)			
480.0	9.91	(1) 61.	66.	0.	9.47E+01	0.0	2.42E-14	8.34E-03	7.22E-04	
		(2) 7.28E+02	7.92E+02	3.96E+02	-4.82E+01	2.14E-12	3.55E-14			
500.0	10.34	(1) 64.	70.	0.	9.84E+01	0.0	3.39E-14	9.93E-03	9.18E-04	
		(2) 7.58E+02	8.25E+02	4.12E+02	-5.01E+01	3.11E-12	5.20E-14			
520.0	10.78	(1) 69.	74.	0.	1.02E+02	0.0	4.64E-14	1.16E-02	1.12E-03	
		(2) 7.92E+02	8.62E+02	4.31E+02	-5.21E+01	4.42E-12	7.45E-14			
540.0	11.22	(1) 74.	79.	0.	1.07E+02	0.0	6.23E-14	1.35E-02	1.34E-03	
		(2) 8.26E+02	8.99E+02	4.49E+02	-5.42E+01	6.15E-12	1.05E-13			
541.6	11.25	(1) 75.	80.	0.	1.07E+02	0.0	6.38E-14	1.36E-02	1.36E-03	
		(2) 8.31E+02	9.05E+02	4.52E+02	-5.45E+01	6.30E-12	1.08E-13			

Table 11 (continue 4)

STEP 9

POWER (W/CM)	CTEMP (C)	RATE (W/CM/HR)	HGAP (BTU/)	DTIME (DAYS)	DBURNUP (%)	(MWD/MTM)	DFLUENCE (N/CM2)	DCYCLE	
390.6	444.0	0.0	1700.0	75.5	1.62	13708.9	0.12E+23	1.00	
TIME (DAY)	BURNUP (%)	(1) HOTG (MIC)	COLDG (MIC)	FCCI (MIC)	PRESS. (K/CM2)	E-PLAST. (FRAC)	E-THERM. (FRAC)	E-IRRAD. (FRAC)	E-SWELL. (FRAC)
		(2) STRESS-E (KG/CM2)	STRESS-T (KG/CM2)	STRESS-Z (KG/CM2)	STRESS-R (KG/CM2)	STR-DAM (FRAC)	LIFE-DAM (FRAC)		
560.0	11.65	(1) 80.	85.	0.	1.11E+02	0.0	8.01E-14	1.53E-02	1.56E-03
		(2) 8.62E+02	9.38E+02	4.69E+02	-5.64E+01	8.18E-12	1.41E-13		
580.0	12.08	(1) 87.	91.	0.	1.15E+02	0.0	1.02E-13	1.73E-02	1.78E-03
		(2) 8.93E+02	9.72E+02	4.86E+02	-5.82E+01	1.08E-11	1.89E-13		
600.0	12.51	(1) 93.	98.	0.	1.19E+02	0.0	1.30E-13	1.93E-02	2.00E-03
		(2) 9.27E+02	1.01E+03	5.05E+02	-6.03E+01	1.42E-11	2.54E-13		
617.0	12.87	(1) 100.	104.	0.	1.23E+02	0.0	1.59E-13	2.12E-02	2.20E-03
		(2) 9.61E+02	1.05E+03	5.23E+02	-6.23E+01	1.79E-11	3.27E-13		

READY
 LOGOFF
 M3383 LOGGED OFF AT 18:22:51 ON DECEMBER 19, 1979+
 KEQ54100I SESSION ENDED

参 考 文 献

- 1) M. Patel and D.E. White, GEAP-14051 (1975)

付録 1. GRO-Ⅱ で使用している物性値

(1) 被覆管

被覆管物性値は GRO-Ⅱ が採用している物性値（アニール材及び 20% 冷間加工材）及び PNC 海外照射データによる較正式を選択することができる。これらの計算のコントロールは IPROP で行う。

IPROP = 1 SUS 316 アニール材

IPROP = 2 SUS 316 20% CW材 ; stress free swelling & irradiation creep

IPROP = 3 SUS 316 アニール材 ; stress enhanced swelling & irradiation creep

IPROP = 4 SUS 316 20% CW材 ; "

IPROP = 5 PNC 照射データ (PNC-24 S材)

IPROP = 6 " ; stress enhanced irradiation creep

(a) ヤング率

Annealed and 20% cold worked Type-316 stainless steel :

$$E = 31.3 \times 10^6 - 8800 \times T$$

E = Young's modulus, psi

T = Temperature, °F

(b) ポアソン比

Annealed and 20% cold worked Type-316 stainless steel :

$$\nu = 0.3 + (T - 860) / 24000$$

ν = Poisson's ratio

T = Temperature, °F

(c) 熱膨張率

Annealed and 20% cold worked Type-316 stainless steel :

$$\alpha = 8.878 \times 10^{-6} + 1.481 \times 10^{-9} \times T$$

α = Coefficient of linear expansion, in./in.

T = Temperature, °F

(d) 熱伝導度

Annealed and 20% cold worked Type-316 stainless steel :

$$K = 9.18 + 4.214 \times 10^{-3} \times T$$

K = Thermal conductivity, Btu/h-ft-°F

T = Temperature, °F

(e) 熱クリープ速度

Annealed Type-316 stainless steel :

$$\dot{\epsilon} = \text{CTHFAC} \times \exp(A/T + B) (\sinh C\sigma)^D$$

$\dot{\epsilon}$ = Creep rate , in./in.-h

σ = Stress , psi

T = Temperature , °K

A = -58870

B = 62.48

C = 1.79×10^{-5}

D = 8.23

CTHFAC = Calibration factor

20% cold worked Type -316 stainless steel :

$$\dot{\epsilon} = \text{CTHFAC} \times \exp(A/T + B) (\sinh C\sigma)^D$$

$\dot{\epsilon}$ = Creep rate , in./in.-h

σ = Stress , psi

T = Temperature , °K

A = -73787.6

B = 66.248

C = 6.1477×10^{-5}

D = 4.9875

CTHFAC = Calibration factor

PNC 照射データ (PNC-2, 4 S材)

$$\dot{\epsilon}_{th}^c = 0.01 \times 10^{[17.47 - F \times 1000/T]}$$

$$F = 23.006 - 4.263 \times \log_{10} \sigma + 3.111 \times (\log_{10} \sigma)^2 - 2.323 \times (\log_{10} \sigma)^3$$

T : cladding midwall temperature (°K)

σ : equivalent stress (kg/mm²)

$\dot{\epsilon}_{th}^c$: thermal creep rate (fraction/hr)

(f) 照射クリープ速度

Annealed and 20% cold worked Type -316 stainless steel :

$$\dot{\epsilon} = \text{CIRFAC} \times 3 \times 10^{-30} \times \sigma \times \phi \times 3600$$

$\dot{\epsilon}$ = Creep rate , in./in.-h

σ = Stress , psi

ϕ = Flux, E > 0.1 MeV, n/cm²-sec

CIRFAC = Calibration factor

PNC 照射データ (PNC-2, 4 S材)

$$\dot{\epsilon}_{irr}^c = \sigma \cdot \phi \cdot \{ 3 \times 10^{-30} + 2.2 \times 10^{-5} \cdot R \cdot F(\phi t) \times 10^{-24} \}$$

$$F(\phi t) = 1 - \exp(-\phi t / \tau)$$

σ : equivalent stress (psi)

ϕ : n/cm²-hr

ϕt : $\times 10^{22}$ nvt (E > 0.1 MeV)

R, τ : from stress free swelling equation*

$\dot{\epsilon}_{irr}^c$: thermal creep rate (fraction/hr)

$$R_0 = -0.518691E+03 \quad \tau_0 = -0.507258E+02$$

$$R_1 = 0.392931E+01 \quad \tau_1 = 0.404582E+00$$

$$R_2 = -0.112465E-01 \quad \tau_2 = -0.115664E-02$$

$$R_3 = 0.143878E-04 \quad \tau_3 = 0.145419E-05$$

$$R_4 = -0.692318E-08 \quad \tau_4 = -0.681394E-09$$

T : cladding midwall temperature (°C)

* ; stress free swelling equation is derived from PNC-3 and EBR-II clad irradiation data.

(g) 照射スエリング

Annealed Type-316 stainless steel :

$$\Delta V/V = \text{CSWFAC} \times (\phi t)^A \times B / 100$$

$$\Delta V/V = \text{Volumetric swelling in.}^3/\text{in.}^3$$

ϕt = Fluence, E > 0.1 MeV, 10^{22} n/cm²

T = Temperature, °C

$$A = \frac{2 + 3 \times \exp[0.05(T - 475)]}{1 + \exp[0.05(T - 475)]}$$

$$B = \frac{0.022 \times \exp[0.09(T - 340)]}{\{1 + \exp[0.09(T - 304)]\} \times \{1 + \exp[0.05(T - 600)]\}}$$

$$+ \frac{0.06}{1 + \exp[0.06(T - 460)]}$$

CSWFAC = Calibration factor

20% Cold Worked Type-316 stainless steel :

$$\Delta V/V = \text{CSWFAC} \times R \times \left[\phi t + 1/\alpha \ln \frac{1 + \exp[\alpha(r - \phi t)]}{1 + \exp(\alpha r)} \right]$$

$$\Delta V/V = \text{Volumetric swelling, in.}^3/\text{in.}^3$$

T = Temperature, °C

R = $0.01 \times \exp(B)$

$$B = -88.549 + 0.531072 \times T - 1.24156 \times 10^{-3} \times T^2 + 1.37215$$

$$\begin{aligned} & \times 10^{-6} \times T^3 - 6.14 \times 10^{-10} \times T^4 \\ \tau & = \exp(-16.7382 + 0.130532 \times T - 3.81081 \times 10^{-4} \times T^2 \\ & \quad + 5.51979 \times 10^{-7} \times T^3 - 3.26491 \times 10^{-10} \times T^4) \\ \phi t & = \text{fast fluence (E > 0.1 MeV), } 10^{22} \text{ n/cm}^2 \end{aligned}$$

CSWFAC = Calibration factor

PNC 照射データ (PNC-2, 4 S材)

$$\dot{\epsilon}_{sw}^c = \frac{R \cdot \phi}{300 \cdot \{1 + \exp[\alpha(\tau - \phi t)]\}}$$

$$R = \exp(R_0 + R_1 \cdot T + R_2 \cdot T^2 + R_3 \cdot T^3 + R_4 \cdot T^4)$$

$$\tau = \exp(\tau_0 + \tau_1 \cdot T + \tau_2 \cdot T^2 + \tau_3 \cdot T^3 + \tau_4 \cdot T^4)$$

$$R_0 = -0.588140D + 04 \quad \tau_0 = -0.645760D + 03$$

$$R_1 = 0.452519D + 02 \quad \tau_1 = 0.493371D + 01$$

$$R_2 = -0.130445D + 00 \quad \tau_2 = -0.140989D - 01$$

$$R_3 = 0.166895D - 03 \quad \tau_3 = 0.179101D - 04$$

$$R_4 = -0.799242D - 07 \quad \tau_4 = -0.853665D - 08$$

$\dot{\epsilon}_{sw}^c$: swelling rate (fraction/hr)

$$\alpha = -1.12 + 0.689 \times 10^{-2} \cdot T$$

ϕt : $\times 10^{22}$ nvt (E > 0.1 MeV)

ϕ : $\times 10^{22}$ n/cm² · hr

T : cladding midwall temperature (°C)

(h) 応力促進照射クリープ速度

Annealed Type-316 stainless steel :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 3/2 S_{ij} \left[B \phi + D \frac{\Delta V}{V} \right]$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$ = Strain rate tensor, in./in.-sec

$\delta_{ij} = 1$ for $i=j$; 0 for $i \neq j$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_H \delta_{ij}$$

σ_{ij} = Stress tensor, psi

σ_H = Hydrostatic stress, psi

$\frac{\Delta V}{V}$ = Swelling rate, obtained by differentiating swelling correlation given above

ϕ = Neutron flux, E > 0.1 MeV, n/cm² · sec

$$B = 3.0 \times 10^{-30}$$

$$D = (4 - 100 \Delta V / V + 0.5) \times 10^{-5} \quad 0 \leq \frac{\Delta V}{V} \leq 0.04$$

$$= 0.5 \times 10^{-5} \quad \frac{\Delta V}{V} > 0.04$$

20% cold worked Type-316 stainless steel :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 1/3 [1 + P \sigma_H] \frac{\Delta \dot{V}}{V} \delta_{ij} + 3/2 S_{ij} [B \phi + D \frac{\Delta \dot{V}}{V} (1 + P \sigma_H)]$$

ϵ_{ij} = Strain rate tensor , sec^{-1}

δ_{ij} = 1 for $i = j$, 0 for $i \neq j$

S_{ij} = $\sigma_{ij} - \sigma_H \delta_{ij}$, psi

σ_H = Hydrostatic stress , psi

σ_{ij} = Stress tensor , psi

$\frac{\Delta \dot{V}}{V}$ = Stress free swelling rate , obtained by differentiating the swelling correlations given above

ϕ = Neutron flux , $E > 0.1 \text{ MeV}$, $\text{n/cm}^2\text{-sec}$

$B = 3.0 \times 10^{-30}$

$D = [(4 - 100 \Delta V / V) + 0.5] \times 10^{-5} \quad 0 < \Delta V / V \leq 0.04$
 $= 0.5 \times 10^{-5} \quad \Delta V / V > 0.04$

$P = 0.00375 \Delta V / V \quad 0 < \Delta V / V < 0.04$
 $= 0.00015 \quad \Delta V / V > 0.04$

(i) 限界伸び

annealed and 20% cold worked Type-316 stainless steel :

$$\epsilon L = F \times \epsilon U \quad \phi t \leq (\phi t)_0$$

$$= F \times \epsilon U \times \left[\frac{\phi t}{(\phi t)_0} \right]^m \quad \phi t > (\phi t)_0$$

ϵL = Strain limit , in./in.

T = Temperature , °F

ϕt = Fluence , $E > 0.1 \text{ MeV}$, 10^{22} n/cm^2

$F = 1 \quad T \leq 1000$
 $= 9.566 - 0.01367 \times T + 5.091 \times 10^{-6} \times T^2 \quad T > 1000$

$\epsilon U = 0.0245 \quad T \leq 1000$
 $= 0.0662 - 4.25 \times 10^{-5} \times T \quad T \geq 1000$

$m = -1.759 + 1.043 \times 10^{-3} \times T$

$$(\phi t)_o = 2897 - 1.161 \times T + 1.681 \times 10^{-3} \times T^2 - 1.03 \times 10^{-6} \times T^3 \\ + 2.263 \times 10^{-10} \times T^4$$

$$t_1 = \exp[-7478 + 82000/T_K] [\sinh(B\sigma)]^{-4.4105}$$

$$t_2 = 4.0 F / \dot{W}$$

(j) クリープ破断時間

◦ GRO-II式

$$\text{Time to rupture} = \min(t_1, t_2)$$

$$t_1 = \exp[-7478 + 82000/T_K] [\sinh(B\sigma)]^{-4.4105}$$

$$t_2 = 4.0 \times F / \dot{W}$$

σ = Stress, psi

T_c = Temperature, °C

T_K = Temperature, °K

$$B = 0.849697 \times 10^{-4} / \exp[0.001534(T_K - 977)]$$

$$F = (\phi t)^{-0.59524} \exp[115.2801 - 0.265969T_c + 1.9476 \times 10^{-4}T_c^2]$$

$$\dot{W} = \frac{\exp[7478 - 82800/T_K] [\sinh(B\sigma)]^{5.5105}}{4.4105(B\sigma) \cosh(B\sigma)}$$

ϕt = Fluence, $E > 0.1 \text{ MeV}$, n/cm^2

◦ PNCデータ (PNC-2, 4 S材)

$$t_{rup} = 10^Y$$

$$Y = A + B - X_1 + C \cdot X_2$$

$$X_1 = 1/T$$

$$X_2 = \log_{10}(\log_{10}(H/\sigma))$$

$$A = -0.14262 \times 10^2$$

$$B = 0.18159 \times 10^5$$

$$C = 8.5774$$

T : cladding midwall temperature (°K)

σ : hoop stress (kg/mm^2)

$$H = 543$$

t_{rup} = creep rupture time (hr)

i) 95% upper limit $Y = Y + \Delta Y$

ii) 95% lower limit $Y = Y - \Delta Y$

$$\Delta Y = C_0 \cdot (1 + D)^{1/2}$$

$$D = C_1 + C_2 \cdot X_1 + C_3 \cdot X_2 + C_4 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$+ C_5 \cdot X_1^2 + C_6 \cdot X_2^2$$

$$C_0 = 0.29888009D + 00$$

$$C_1 = 0.48492526D + 02 \quad C_2 = -0.10205746D + 06$$

$$C_3 = -0.38845656D + 02 \quad C_4 = 0.42110128D + 05$$

$$C_5 = 0.53905433D + 08 \quad C_6 = 0.98656563D + 01$$

(k) FCCI

◦ GRO-II モデル

$$\Delta D = 2.16 \times \exp(-12770/R \cdot T) \times \Delta B$$

ΔD ; タイムステップ間の FCCI 量 (inch)

$$R = 1.987$$

T; 被覆管温度 (°C)

ΔB ; 燃焼度増加量 (atom fraction)

◦ PNCモデル (PNC-2材データ)

$$D = C_0 \times B^{0.5} \times D_{FCCI}$$

C_0 ; $1 / (\text{局所到達燃焼度})^{0.5}$

B; 局所燃焼度 (a/o)

D_{FCCI} ; 最終腐食深さ (μ)

$$D_{FCCI} = 1.02 \times 10^3 - 4.21 \times T + 4.30 \times 10^{-3} \times T^2$$

T; 時間平均内面温度 (°C)

(2) 燃料

(a) ヤング率

$$E = 3.59 \times 10^7 \times [1 - 2.35 \times (1 - \rho)] \times (1 - T / 22200)$$

E = Young's modulus, psi

ρ = Fuel fractional density

T = Temperature, °F

(b) ポアソン比

$$\nu = A + \frac{(T - 77) \times (0.5 - A)}{(22200 - 77)}$$

ν = Poisson's ratio

T = Temperature, °F

ρ = Fractional density

$$A = 0.317 \times [1 - 0.46 \times (1 - \rho)]$$

(c) 熱膨脹率

$$\alpha = 8.192 \times 10^{-6} + 2.43 \times 10^{-9} (T - 20)$$

α = Coefficient of linear expansion, in./in.

T = Temperature , °C

(d) 熱伝導度

$$k = \frac{1}{3.11 + 0.0273 \times T} + 5.39 \times 10^{-13} \times T^3$$

k = Thermal conductivity , watts/cm , °K

T = Temperature , °K

(e) 熱クリープ

$$\dot{\epsilon} = \text{FTHFAC} \times \frac{2.33 \times 10^7}{G^2} \times \sigma \times [1 + 2.11 \times (0.97 - D)] \times \exp(-92500/RT)$$

$$+ 0.001 \times \sigma^{4.4} \times [1 + 2.2 \times (0.97 - D)] \times \exp(-136000/RT)$$

$\dot{\epsilon}$ = Creep rate , in./in.-h

σ = Stress , psi

G = Grain size , μM

R = Gas constant

T = Temperature , °K

D = Fractional density

FTHFAC = Calibration factor

(f) 照射クリープ速度

$$\dot{\epsilon} = \text{FIRFAC} \times [1.96 \times 10^{-19} \times \sigma \times f \times \exp(-13700/RT) + 3.72 \times 10^{-23} \times \sigma \times f]$$

$\dot{\epsilon}$ = Creep rate , in./in.-h

σ = Stress , psi

f = Fission rate , fissions/cc-sec

R = Gas constant

T = Absolute temperature , °K

FIRFAC = Calibration factor

(g) スエリング

$$\Delta R/R = \text{FWSFAC} \times 0.15 \times B$$

$\Delta R/R$ = Linear swelling rate , in./in.-h

B = Burnup rate , atom fraction/h

FWSFAC = Calibration factor

(h) HEDL リロケーションモデル

$$G = G_0 - 0.006224(Q)(G_0)(Q - 5.835)[1 - \exp(-C)]$$

$$- 0.365(G_0)[1 - \exp(-0.0194 \times Q \times B)]$$

$$- 0.00347(B)$$

G = Diametral fuel cladding gap , mils

G_o = As fabricated fuel cladding gap , mils

Q = Linear power , kW/ft

C = Full - power cycles

B = Burnup MWd/kg

付録2 「GRO-II」内で使用されている変数

APPENDIX B

DEFINITIONS OF VARIABLES IN GRO-II

<u>Variable</u>	<u>Type</u>	<u>Description</u>
BUPLUS	I	Burnup increment, atom fraction
BURN		Burn rate, atom fraction/h
BURNC		Conversion factor, fraction to MWd/kg
BURNUP		Cumulative burnup, atom fraction
CEXP		Cladding thermal expansion multiplier = $1 +$ (midwall temperature \times thermal expansion coefficient)
CIRFAC, CIRFC2	D	Calibration factor for cladding irradiation creep
CIRRAT		Cladding irradiation creep rate (effective or hoop), in./in. \cdot h
CLADIR		Cladding irradiation creep strain (hoop), in./in.
CLADPL		Cladding plastic strain (hoop), on./in.
CLADTH		Cladding thermal creep strain (hoop), in./in.
CLADSW		Cladding linear swelling strain, in./in.
CTEMPC		Cladding midwall temperature, $^{\circ}$ C
CTEMPF, CTEMP2	I	Cladding midwall temperature, $^{\circ}$ F
CTEMPK		Cladding midwall temperature, $^{\circ}$ K
CTHFAC, CTHFC2	D	Calibration factor for cladding thermal creep
CTHRAT		Cladding thermal creep rate (effective or hoop), in./in. \cdot h
CSWFAC, CSWFC2	D	Calibration factor for cladding linear swelling
CSWRAT		Cladding linear swelling rate, in./in. \cdot h
CYCLE, CYCLE2	D	Length of a power cycle, h
DAMLIF		Cladding Thermal creep damage, life fraction
DAMSTR		Cladding thermal creep damage, strain fraction
DCTH		Cladding thermal creep strain increment, in./in.
DTIME		Time increment, h
ECLAD		Cladding elastic modulus, psi
EFUEL		Fuel elastic modulus, psi
ERATIO		Fuel modulus/cladding modulus
FACTOR	D	Maximum permissible change in fuel-cladding interface pressure during the time step fraction
FATOMS		Fuel atom density, atoms/cc

<u>Variable</u>	<u>Type</u>	<u>Description</u>
FDEN	I	Fuel fractional density
FEXP		Fuel thermal expansion multiplier = $1 + (\text{volume-averaged temperature of the fuel ring} \times \text{expansion coefficient})$
FIRFAC, FIRFC2	D	Calibration factor for fuel irradiation creep
FISMEV	D	Energy release rate, MeV/fission
FISION		Specific fission rate, atoms/cc·h
FISRAT		Expression used in computation of fission rate
FLUNCE		Accumulated fluence, n/cm ² E>0.1 MeV
FLPLUS	I	Fluence increment, n/cm ² E>0.1 MeV
FLUX		Fast flux, neutrons/cm ² -sec. E>0.1 MeV
FLUXH		Fast flux. 10 ²² neutrons/cm ² -h, E>0.1 MeV
FTHFAC, FTHFC2	D	Calibration factor for fuel thermal creep
FTEMPC		Fuel surface temperature, OC
FTEMPF		Fuel surface temperature, °F
FTEMPK		Fuel surface temperature, °K
FTHRAT		Fuel creep rate (thermal + irradiation creep) corresponding to the reference stress in the fuel ring, in./in.·h
FSWFAC, FSWFC2	D	Calibration factor for fuel swelling
FSWRAT		Fuel linear swelling rate, in./in.·h
FVOL	I	Fuel volume, cc
GAP		Fuel-cladding radial hot gap, in.
GAPC1		Factor in HEDL gap closure correlation
GAPC2		Factor in HEDL gap closure correlation
GAPC3		Factor in HEDL gap closure correlation
GAPC4		Factor in HEDL gap closure correlation
GAPK	D	Gap conductance assuming the gap to be closed
GAP0		As fabricated fuel-cladding radial gap
GAPRAT		Radial gap closing rate based on HEDL correlation
GATOMS	D	Gas atoms released/fission
GREAT, GREAT2	D	Maximum time increment limit, h
HALFMU		0.5 × cladding Poisson's ratio.
IATAACK	D	Used to include/exclude (1/10) fuel-cladding attack
IPRINT		Flag used to control printout. Printout occurs when IPRINT is not equal to 0

<u>Variable</u>	<u>Type</u>	<u>Description</u>
IPROP	I	Material property index IPROP = 1,3 annealed Type-316 stainless steel = 2,4 20% cold worked Type-316 stainless steel 1,3: No swelling enhancement of irradiation creep or stress enhancement of swelling 2,4: Correlations assuming stress enhancement of swelling and swelling enhancement of creep
ITHEXP	D	Used to include/exclude (1/0) thermal expansion of fuel inviscid zone
JYES	D	"Y" (for yes)
NUMBER		Number of constant power steps during a power change
OFISS		Previous fission rate, No./cc-h
OPOWER		Previous linear power, kW/ft
OTEMP1		Previous cladding temperature, °F
OTEMP2		Previous cladding temperature, °F
OTEMP3		Previous cladding temperature, °F
OTEMP4		Previous cladding temperature, °F
OTEMP5		Previous cladding temperature, °F
PDOT		Rate to fission gas buildup. psi/h
PEAK	I	Local/peak power ratio
PGAS		Fission gas pressure, psi
P1		π
PKAVG	D	Peak/average power ratio
PNA	D	Coolant pressure, psi
POWER		Local power, kW/ft
POWER2	I	Local power, kW/ft
PRESUR		Fuel-cladding interface pressure, psi
PRSRAT		Expression used in calculation of fission gas pressure buildup
PSTEP, PSTEP2	D	Printout interval. Printout is forced after every PSTEP hours
PTEMPF	I	Plenum temperature, °F
PTEMPK		Plenum temperature, °K
PTIME		Next printout time, h
PVOL	I	Plenum volume, cc
RADLOG		\ln (fuel ring o.d./fuel ring i.d.)

<u>Variable</u>	<u>Type</u>	<u>Description</u>
RATE	I	Rate of change in power, kW/ft-h
RCLAD1		Cladding inner radius, in.
RCLADM		Cladding midwall radius, in.
RCLADO	I	Cladding o.d., reduced to cladding outer radius in the program
RDIFF		$(\text{Fuel outer radius})^2 - (\text{fuel inner radius})^2$
RFUELO	I	Fuel o.d., reduced to fuel outer radius in the program, in.
RHOLE	I	Fuel i.d., reduced to fuel inner radius (annular pellet) in the program, in.
RL2		$(\text{RFUELO})^2$
RINGMU		Poisson's ratio for the fuel ring
R02		$(\text{RFUELO})^2$
SMALL, SMALL2	D	Minimum time increment limit, h
STRESE		Cladding effective stress, psi
STRESF		Fuel ring reference stress, psi
STRESR		Cladding radial stress, psi
STREST		Cladding hoop stress, psi
STRESY		Cladding yield stress, psi
STRESZ		Cladding axial stress, psi
TDEN	D	Theoretical fuel density, gm/cc
TFAST	D	Time step during power changes, h
THICK	I	Cladding wall thickness, in.
THICK2		Cladding wall thickness after allowing for fuel-cladding chemical reaction, in.
TIME		Elapsed time, hr
TIMEND		Time corresponding to the end of the current burnup step, in.
T.EANC		Volume-averaged temperature of the fuel ring, °C
TMEANF		Volume-averaged temperature of the fuel ring, °F
TMEANK		Volume-averaged temperature of the fuel ring, °K
TMPVSC	D	Fuel inviscidity temperature, °C
TMPVSK		Fuel inviscidity temperature, °F
TRATE		Rate of change of cladding temperature, °F/h
TWOPI		2π
UCRATE		Radial velocity of the cladding, in./h

<u>Variable</u>	<u>Type</u>	<u>Description</u>
UFRATE		Radial velocity of the fuel surface, in./h
WTMOL	D	Fuel molecular weight
	I:	Input variables
	D:	Variables initialized in the data statements

* The list does not include local variables which do not transfer values to different parts of the program and which are used only for the intermediate calculations (e.g., X,Y,Z,SWAAA,SWBBB, etc.)

II SIEX

- 1, はじめに
- 2, コードの説明
- 3, 入/出力
- 4, 数学的モデル
- 5, 実験式モデル

Appendix A GLOSSARY

1. はじめに

SIEX コードは、米国 HEDL で開発された燃料要素の全履歴を通して冷却材、被覆管および燃料の温度等を短時間に計算できる定常状態高速炉用燃料ピン熱挙動解析コードである。

高速中性子照射下における混合酸化物燃料ピンの熱挙動を正確に評価できる手段を持つことは、単にそれ自体ばかりでなく、さらに次のような解析のために不可欠の基礎データとなることから極めて重要である。

- (1) 以後の定常または過渡状態応力解析
- (2) 定常または過渡状態での破損モード、破損時間の推定
- (3) 事故解析と関連した安全性評価

短時間で計算でき、比較的小容量のコアで済む SIEX のような解析コードは、設計、評価の手段として日常的に使用するのに便利であり、以後のより詳細な解析の初期条件を計算する上でもその有用性は高い。

SIEX は、一連の分割されたモジュールから構成されるが、これは、計算モデルを柔軟に使いこなすこと、ならびに今後の照射試験によりモデルが変更、完成された場合にコードの改良を容易にするためである。

本コードでは、21個の軸方向セグメントについて定常熱伝導を計算でき、熱挙動に影響を及ぼす全ての事象を定量的に計算する。(Restructuring, FP ガス生成・放出等)

SIEX は現在大洗工学センターの大型計算機 M-190 でランできるように整備されている。M-190 での計算時間は1ケース数秒である。

2. コードの説明

SIEX は高速中性子環境下での混合酸化物燃料の熱挙動の特性と形状変化(スウェリングと熱膨張)を計算する計算コードである。SIEX は高速炉の燃料挙動をモデル化している一連のサブルーチンからなり、各モデルは EBR-II 等での照射試験データとつき合せている。短い計算時間とモデルのモジュール独立性を有するように種々のプログラム開発技術と数値解析技術が本コードには適用されている。本コードは LMFBR プログラムでのデータ解析と設計ツールの必要性を満たすものである。

燃料ピンは Figure 1. に示されたような形状にモデル化されている。燃料カラムはユーザーの指定する数で等しい高さ(等燃料体積)に軸方向に分割される。これらの領域の軸中心から一次元の半径方向熱伝達を仮定して熱計算が行われる。

各領域の発熱及び FP ガス放出の計算は冷却材温度及びプレナム圧力の計算のために全領域について積算される。各領域について次の計算が行われる。

1. 冷却材温度
2. 被覆管表面温度

3. 燃料-被覆管熱伝達係数
4. 燃料温度
5. 燃料再組織半径
6. スエリング及び熱膨張による燃料及び被覆管の変位
7. 生成及び放出FPガス

時間（燃焼度）の増分数はユーザーの判断による。各時間増分毎に、FPガス放出量が更新され、プレナム圧力が計算され、ギャップコンダクタンスの変化に応じて、燃料温度が調整される。SIEXの結果は、タイムステップの大きさに依存しない。

SIEXコードは、制御ルーチン、入出力ルーチン、数式モデル及び、物理的根拠のある実験式モデルからなる。数式モデルは、熱伝導、ガス圧力、及び限定された範囲での燃料と被覆管の形状変化である。これらのモデルの簡略な説明または検証もこの報告書に記した。実験式モデル（ガス放出、再組織等）については、実験式に使われたデータ、モデルの合理性及びモデルの記述についてのサマリーを記載した。たいていの場合、これらのモデルは、コードの他の部分にほとんど影響を与えることなく更新または完全な置き換えが可能である。コード内の計算はcgs単位で行われる。使用に便利な単位の変換は入出力ルーチンで行われる。

主要ルーチンを、その使用の説明と共にTable 1に示す。補助ルーチンが使われている場合はそれも示した。Figure 2にルーチン・シーケンスを示す。Figure 3にSIEXのフローチャートを示す。

3. 入/出力

入出力ルーチンは、ユーザー側の便利さとコードとしての柔軟さを併せ持つように作られている。コード内に組込まれたデータに“Override”する形でインプットできるようにした理由は、コードの適用範囲をさらに広げるためである。

カード入力の手順については、ユーザーにどのような形でオプションを用意したら良いかという観点から、今後も検討を進める必要がある。

3.1 出力、中性子束、中性子エネルギー-軸方向分布

軸方向中性子束分布は、関数AFP、出力分布はPMP、平均中性子エネルギーはEBR、0.1 MeV以上の中性子束と全中性子束の比はFTXによって与えられる。AFPとPMPについては、プロファイルはピーク値でノーマライズされる。FTXとEBRは実際の値で戻して計算する。4つのオプションが分布を定める際にユーザーに用意されている。

- 1) 出力と中性子束軸方向分布は、ユーザーの与える外挿距離Eまで、等分割し、cosineカーブに割りつける。平均中性子エネルギー及び0.1 MeV以上と全中性子の中性子束の比は、EBR-IIの運転データの値と同一にしている。

- 2) 出力と中性子束の分布の値は、ユーザーの与えるデータ表から内挿し、同じ形をとるとみなす。データ表は、BLKDATのデータ行にプログラムされている。最初のケースでは、平均中性子エネルギー及び0.1 MeV以上と全中性子の中性子束比は一定とされる。
- 3) 関数と評価されるものについて、ユーザーが関数形を決める、二次式の例として、EBR-IIガンマスキャンデータを解析して得られたものがプログラムされている。
- 4) 4種すべてを、ユーザー入力の表の値から内挿する。これについては、カード入力の項で説明する。

3.2 モデル入力のオプション

1. FPガス放出は、第5章に記されているFPガス放出モデル、またはユーザーが各領域で放出率を与える3領域モデルによって評価される。ユーザーの与えるガス放出率の3領域とは柱状晶、等軸晶、不変組織の各燃料領域と仮定される。ユーザーが放出率を与える場合は、その値は、燃焼度または炉内時間に依存しない。
2. セ氏表示の温度は、柱状晶と等軸晶成長の半径方向範囲を定めるのに用いられるが、第5章に示された値か、ユーザーの与える値をとることができる。
3. 第5章に記されている燃料-被覆管ギャップコンダクタンスのモデルは、ユーザーの与える定数で置き換えることが可能である。

上述のすべてのケースにおいて、モデルは系統的基礎のもとに開発された。ユーザーの“override”は他のモデルに対するその効果を考慮した後でのみ使用されるべきである。例えば、ガス放出モデルの“override”は圧力と温度の最大値を決めるのに有効であろうが、再組織のoverrideはガス放出とギャップコンダクタンスについて誤った結果を与えるかもしれない。

3.3 物性値のオプション

SIEXコードに使われる物性値はBLKDATルーチンにプログラムされている。しかし、これらはユーザーのカード入力により変更可能である。

ユーザーによって変えられる物性値は次の通りである。

1. 被覆管熱膨張係数：SIEXコードは平均熱膨張係数を次のようにしている。

$$\alpha^c = \alpha_0^c + \alpha_T^c T$$

ここに T = 温度 (°C)

$$\alpha^c = \text{熱膨張係数 (cm/cm} \cdot \text{°C)}$$

2. 被覆管ヤング率： $E^c = E_0^c + E_T^c T$

ここに E^c = ヤング率 (dynes/cm²)

3. 被覆管ポアソン比：一定
 4. 被覆管熱伝導度：これは、カード入力項で述べるような定数が入力される。もし、入力がなければ、SIEX は温度に依存する熱伝導度を次のように定める。

$$K^c = K_o^c + K_T^c T$$

ここに $K^c =$ 熱伝導度 (watts/cm °C)

温度依存の単純反復計算は熱伝導式の中で次のようにプログラムされている。

$$K^c = K_o^c + K_T^c \left[T_o^c + \frac{0.5 t \cdot q_e}{2\pi (r_o^c - 0.5 t) (K_o^c + K_T^c T_o^c)} \right]$$

ここで $\frac{0.5 t q_e}{2\pi (r_o^c - 0.5 t) (K_o^c + K_T^c \cdot T_o^c)}$ は、被覆管温度 T_o^c の初期推定値に対する温度

補正であり、 $T_o^c =$ 被覆管表面温度 (°C)

$q_e =$ 発熱

$r_o^c =$ 被覆管外径

$t =$ 被覆管肉厚

燃料の熱膨張率とヤング率の値はそれぞれ次の形である。

$$\alpha^f = \alpha_o^f + \alpha_T^f \cdot T \quad (\text{cm/cm } ^\circ\text{C})$$

$$E^f = E_o^f + E_T^f \cdot T \quad (\text{dynes/cm}^2)$$

入力に対し "override" オプションは用意されていないが、これらの値はブロックデータルーチンの変更により変えることができる。

3.4 カード入力

カード入力は NAMELIST による。これは標準 ANSI と同じ形ではないが、ユーザーの使い易さは良いものである。NAMELIST の入力は自由形式であり、多数のランをさせる時には、全ての変数を入力する必要はない。パラメトリックサーベイの場合、タイトルカードと問題とする変数のみを入力すれば良い。NAMELIST の変数は IPT である。Table II は NAMELIST 変数 (及びコード変数)、単位及びそれぞれの説明の一覧表である。

3.5 パラメータ入力

実験式モデルのパラメータの値と物性値の係数は、コードのラベル付コモンに移される。これらの値はデータステートメントによりブロックデータルーチン BLKDAT のメモリーに置かれる。このコードパラメータの集中化は、モデルの値を変更するときにブロック全体を変更する必要性を省いている。ルーチン自体は必要な変更をし易いように、十分コメントのついたものである。

3.6 出力

出力は、特別のモデルまたは計算手法を取り扱う一連の表を作るよう構成されている。結果の例を Appendix B に示す。

4. 数学的モデル

4.1 FSINTR : 燃料温度計算

FSINTR サブルーチンは、円柱状燃料ピンの定常状態半径方向温度分布を計算する。計算法は熱伝導度の積分を用いる。これは熱伝導度とデンスフィケーション（熱伝導度と形状の変化）の温度依存性を考慮できる。理論の基礎は引用文献 2 に記されているが、ここに一応の概要を紹介する。又、現在使用されている燃料熱伝導度の式とコードに取り入れた手法も述べる。

燃料内の温度(T)は、定常熱伝導の式で表わせると仮定する。

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = -q$$

K = 熱伝導度 (温度依存)

q = 単位体積当り熱発生

円筒座標で、軸対称と長円柱（軸方向に熱移動なし）の条件下では、上式は

$$\left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r K \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = -q(r) \quad (1)$$

となる。(1)式に r を乗じ、半径 r_m から r まで積分すれば、次式を得る。

$$r K \frac{\partial T}{\partial r} = - \int_{r_m}^r \zeta q(\zeta) d\zeta \quad (2)$$

r で(2)式を除し、r から r_o まで積分すれば、

$$\int_T^{T_o} K dT = - \int_r^{r_o} \frac{1}{\xi} \int_{\xi_m}^{\xi} \zeta q(\zeta) d\zeta d\xi \quad (3)$$

ここで $q(\zeta)$ は同心輪内では一定とみなせるので、(3)式を積分でき、次式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \int_T^{T_o} K dT &= - \frac{q}{2} \int_r^{r_o} \frac{1}{\xi} (\xi^2 - \xi_m^2) d\xi \\ &= - \frac{q}{2} \left\{ \frac{r_o^2 - r^2}{2} - r_m^2 \ln \left(\frac{r_o}{r} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

半径 r と r_o における燃料熱伝導度として、それぞれ $S(r)$ と S_o という変数を導入すれば(4)式は

$$S(r) - S_o = \frac{q}{2} \left\{ \frac{r_o^2 - r^2}{2} - r_m^2 \ln \left(\frac{r_o}{r} \right) \right\} \quad (5)$$

となる。

これが FSINTER ルーチンで使っている式である。S (r) は単位体積当りの発熱量(q), 半径(r) 及び燃料表面温度 (T_o) (S_o 評価に使用) の関数として計算できる。これにより対応する温度 T を計算できる。表を検索するようなやり方で、適当な解を与え、また柔軟で迅速に解を与えることが認められた。

燃料の再結晶がある場合、(5)式は次のように置き換えることによって、焼結領域での温度を決めることができる。

$$S_o \rightarrow S_b = S(T_b), \quad T_b \text{ は再結晶の起きる最低温度}$$

$$q \rightarrow q' = q \frac{r_b^2 - r_m^2}{r_b^2 - r_c^2} \quad (\text{質量保存})$$

$$r_o \rightarrow r_b$$

$$r_m \rightarrow r_c$$

この手法は、燃料の密度変化と発熱変化のある領域について、その数を拡張しうる。

FSINTR は現在 2 領域のみを考慮してプログラムしている。等軸晶と組織未変化で特徴づけられる領域が 1 つのタイプ (単一の密度と発熱率) であり、柱状晶で特徴づけられる領域は、高密度化と中心空孔の成長を仮定している。

Figure 5 に FSINTR の論理フローを示す。

4.2 燃料熱伝導度に関するルーチン

これは簡単なフローチャートであるので示さない。

4.3 S : 熱伝導度積分の評価

熱伝導度の式は次の形である。

$$K^f = K^D \left[\frac{1}{K_1^f + K_2^f \cdot T} + K_3^f \cdot T^3 \right]$$

ここに K^f = 熱伝導度 (w/cm °K)

$$K^D = K_p^f \cdot P \cdot (1 + 10(1-P))(1-P)^{-1}$$

T = 温度 (°K)

P = 密度 (理論密度に対する割合)

K_p^f , K_1^f , K_2^f , K_3^f は係数

SIEX では、これを T について積分することを要し、次の結果を得る。

$$\int K^f dT = K^D \cdot \left[\frac{\ln(K_1^f + K_2^f T)}{K_2^f} + 0.25 K_3^f \cdot T^4 \right] \quad (6)$$

関数Sは(6)式を評価するようプログラムされている。SINPUT サブルーチンが密度依存の係数を計算する。これは、200℃間隔での $\int KdT$ 値の表を計算するのに使われ、この表を次節で述べる内挿ルーチンで使う。

4.4 T: $\int KdT$ に対応する温度

200℃間隔のTと $\int KdT$ の間の値について単純な線型補間法を使用する。もし、精度の向上が必要ならば、(6)式の逆数を計算するルーチンが与えられる。

4.5 RFIND: 温度に対応する半径の計算

再結晶と溶融領域の半径を得るために、(5)式の逆数を得ることが必要である。即ち、T、 S_o 、 q が決れば r が求まる。数値解法は簡単なNewton-Raphson法である、前掲の(5)式を変形し、 S_T を得るために問題の温度での $\int KdT$ を求める。その結果は、

$$4(S_T - S_o)/q = r_o^2 - r^2 - 2r_m^2 \ln(r_o/r) \quad (7)$$

ところで $T = r_o^2 - 4(S_T - S_o)/q$

であるから、(7)式は

$$0 = r^2 + 2r_m^2 \ln(r_o/r) - T$$

となり、 r を解くことができる。

4.6 CSINTR: 冷却材と被覆管の温度分布計算

冷却材のピンに沿っての温度上昇は、各軸方向ノードにおける冷却材への熱付与を積算して計算される。各軸方向領域から冷却材へ流れる熱量は

$$q_\ell \cdot h$$

ここに $q_\ell = q \cdot \pi (r_o^2 - r_m^2)$; 各領域中心部の値で計算されたピン表面の出力

h = 要素の長さ

これにより生ずる温度変化は次で与えられる

$$\Delta T_c = q_\ell \cdot h / C_p \cdot M_F \quad (9)$$

ここに C_p = 熱容量

M_F = 冷却材流量

それぞれの温度上昇は燃料ピン全長にわたり積算される。SIEXでは、冷却材流量はピンの周りで均一と考えている。

被覆管表面の冷却材薄膜を通しての温度上昇は、熱伝達係数の定義を適用して簡単に与えられる。即ち

$$\Delta T = \frac{q_\ell}{AH}$$

ここに H = 膜係数

A = 単位長さ当り表面積

あるいは、被覆管外側温度を計算するために

$$T_o^c = T_c + \frac{q_\ell}{2\pi r_o^c \cdot H} \quad (10)$$

ここに T_o^c = 被覆管外側温度

T_c = 冷却材温度

r_o^c = 被覆管外半径

被覆管の温度分布は、(1)式の q を 0 とおいて計算できる。すなわち

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

あるいは

$$\frac{\partial}{\partial r} (r\bar{Q}) = 0$$

と表わされる。

ここに $\bar{Q} = -K \frac{\partial T}{\partial r}$ は熱流束のベクトルである。

r_o^c から r まで積分して

$$-K \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{r_o^c \bar{Q}_o}{r}$$

これをもう一度積分して次式を得る。

$$T = T_o^c + \frac{r_o^c \bar{Q}_o}{K} \ln \left(\frac{r}{r_o^c} \right) \quad (11)$$

SIEX では、被覆管内側表面温度を計算するために、 T_o^c 、 K 、 r_o^c 、及び q_ℓ (線出力) が与えられる場合、この式を用いる。ところで、 $\bar{Q}_o = q_\ell / 2\pi r_o^c$ なので、SIEX では(11)式は、次式の形で用いられる。

$$T_i^c = T_o^c + \frac{q_\ell}{2\pi K^c} \cdot \ln \left(\frac{r_i^c}{r_o^c} \right)$$

Figure 7 に CSINTR の論理フローを示す。

4.7 CDELD : 被覆材の形状変化計算

被覆管の熱膨張は入力した温度の線型式から計算する。つまり、被覆管の半径変化は次で与えられる。

$$\Delta L/L = (\alpha_o^c + \alpha_T^c T) (T - T_R)$$

ここで、 α_o^c と α_T^c は入力データ、 T_R は室温、 T は被覆管平均温度、 $\Delta L/L$ は長さ変化率である。

材質依存性である被覆管のスエリングの計算には、3種の関数が組み込まれている。溶体化304ステンレス鋼に対しては、

$$\% \Delta V/V_c = A (\phi t)^m + B$$

$$\text{ここに } A = 2.65 \times 10^{-8} \alpha^3 - 1.54 \times 10^{-5} \alpha^2 + 2.24 \times 10^{-3}$$

$$B = \frac{0.2 [1 - \exp(-1.12 \phi t)]}{[1 + \exp(0.1 \times (T - 480))]}$$

$$m = 0.872 + 2.98 \times 10^{-3} T$$

$$\alpha = T - 348$$

$$T = \text{温度 (}^\circ\text{C)}$$

$$\phi t = \text{中性子照射量 (n/cm}^2\text{)} \times 10^{-22} \quad (E > 0.1 \text{ MeV})$$

$$\% \Delta V/V_c = \% \text{スエリング}$$

溶体化316ステンレス鋼に対しては、

$$\% \Delta V/V_c = f(T) \{ \phi t \}^{N(T)}$$

$$f(T) = \left\{ \frac{\exp(C)}{1 + \exp(C)} \right\} \left\{ \frac{0.02}{(1 + \exp(A))} + \frac{0.06}{(1 + \exp(B))} \right\}$$

$$N(T) = \{ 2 + 3 \cdot \exp(D) \} / \{ 1 + \exp(D) \}$$

$$A = 0.05 (T - 600)$$

$$B = 0.06 (T - 460)$$

$$C = 0.09 (T - 340)$$

$$D = 0.05 (T - 475)$$

$$T = \text{温度 (}^\circ\text{K)}$$

20%冷間加工316ステンレス鋼に対しては

$$\% \Delta V/V_c = f(T) \{ \phi t \}^{N(T)}$$

$$f(T) = \left\{ \frac{\exp(C)}{1 + \exp(C)} \right\} \left\{ \frac{0.0022}{(1 + \exp(A))} + \frac{0.006}{(1 + \exp(B))} \right\}$$

従って被覆管半径は

$$r'_c = r_o^c \times (1 + \Delta L/L) \times (1 + \Delta V/3V)$$

ここに r_o^c は製造時の寸法である。

4.8 FDEL D: 燃料形状変化の計算

燃料の熱膨張は体積的な平均半径方向変位を見出して計算される。各半径方向ノードにおいて、変位は与えられた熱膨張係数を使い計算される。

$$\alpha^f = \alpha_o^f + \alpha_T^f \times T$$

ここに α^f = 熱膨張係数 (cm/cm℃)

T = 温度 (℃)

体積平均熱膨張は次のようになる

$$\begin{aligned} \Delta D/D &= \frac{\int r \Delta D/D \, dr}{\int r \, dr} \\ &= \frac{\int_{r_c}^{r_o} \alpha^f T r \, dr}{\int_{r_c}^{r_o} r \, dr} = \frac{\int_{r_c}^{r_o} \alpha^f T r \, dr}{\frac{1}{2} (r_o^2 - r_c^2)} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式の積分は、台形法を用いて数値的に解く。

燃料のスエリング (ΔD_s) は第3章で議論される経験式ルーチン FSWEL で与えられる。運転条件での燃料半径は、従って次式で計算される。

$$r'_f = (r_o + \Delta D_s) \times (1 + \Delta D/D)$$

ここに r'_f はホットの燃料半径である。

4.9 PPRES: プレナム圧力の計算

プレナム圧力を上昇させるガス源としては次のものを考慮する。

1. 充填ガス (V_f)
2. 燃料中の吸着ガス (V_s)
3. 燃料中の水蒸気 (V_w)
4. 放出FPガス (V_r)

圧力は次のように計算される。

$$P_p = (V_f + V_s + V_w + V_r) \cdot T_c \cdot P_{atm} / (273 \times V)$$

ここに T_c = 冷却材出口温度 (°K)

P_{atm} = 1気圧

V = 実効プレナム容積

実効プレナム容積，吸着ガス，水蒸気は入力データである。放出 FP ガスの体積は，FP ガス放出実験式モデルによる FISGAS ルーチンから得られる。

5. 実験式モデル

この章は，EBR-II で照射された燃料ピンについてハンフォード工学研究所（HEDL）で得られたデータ等を参考にして作成した実験式の部分を述べる。出力と燃焼度の範囲を Figure 7 に示す。データは広範囲の燃料密度，3種の被覆材（溶体化304，溶体化316，20%冷間加工316 ステンレス鋼）及び2種の燃料製造法（プレス，プレスラッジ）を含んでいる。

関係のある測定項目は

1. 照射後の燃料-被覆管ギャップ
2. 柱状晶成長領域
3. 等軸晶成長領域
4. プレナム中に存在する FP ガス
5. 初期溶融の軸方向位置（P-19テスト）

Figure 8 に，これら測定量と開発されたモデルの関連を示す。実験式は，各々，かなり詳細に検討されるであろうが，実験式間の相互作用とシーケンスが物理的に重要である。データは，相互の関連をとるために，図の右方と上方へと送られる。モデルが開発され，データとの関連がとれば，それは続いてのモデル開発に用いられる。一貫したデータセットを保証するために，Nd-148 による燃焼度分析を行った燃料ピンのデータのみを使用した。各ピンの時間平均出力は一貫した手法で計算され，燃料要素中で発熱すると仮定されたエネルギーで調整された。

5.1 FSWEL：残留ギャップ式

燃料-被覆管のホットギャップを推定することは，燃料-被覆管の熱伝達係数を正確に推定するために必要である。照射後燃料-被覆管ギャップ（照射後金相試験で測定される）は，熱膨張によって，照射中の混合酸化物燃料ピンのホットギャップを計算するのに使うことができる。

燃料変形機構の詳細は LIFE と PECT コードで扱える。その場合，評価式を解くのに小さなタイムステップが必要とされるので，計算時間は長くなる。本コードは短時間計算コードであるべきであるという方針を保つために，照射後ギャップデータとの関係が使われる。

照射後燃料ギャップは，研磨後，×75 の燃料ピン横断面写真から測定された。測定は等角度で4個所で行い，その4測定データの平均を実効照射後直径ギャップとした。

232個の平均残留ギャップ測定データを計算コード REEP を用いて回帰分析を行い実験式を開発した。モデルはその位置での線出力と燃焼度，製造時ギャップ，炉運転サイクル数に依存する。式は次の形となる。

$$G' = G \{ 1 - [\alpha (1 - \exp(-G_3 \cdot C)) + G_4 (1 - \exp(-G_5 \cdot q_\ell \cdot B)) + (G_6 - \alpha) (1 - \exp(-G_7 \cdot B))] \} \quad (16)$$

ここに

G' = コールド照射後直径ギャップ (cm)

G = 製造時燃料-被覆管ギャップ (cm)

$\alpha = G_1 - q_\ell \cdot (q_\ell - G_2)$

q_ℓ = 局所線出力 (KW/ft)

B = 局所燃焼度 (MWD/kg)

C = 全出力運転サイクル数

$G_1 \sim G_7$ = フィッティング係数

データの変動に伴う適合の程度を Figure 9 に示す。燃料ピンの残留ギャップに影響を及ぼすと思われるその他のパラメータについても一特に被覆材、燃料形状、ペレット製造法、ピン直径-調査した。これらのケースにおいては、残留ギャップの変化に対する大きな寄与は認められなかった。

Figure 12 は、ある仮定的条件のもとでのモデル挙動を例示したものである。6 mil の直径ギャップの燃料ピンに対し、3 段階の出力でもって、(16) 式を燃焼度とサイクル数の関数として評価した。運転サイクルによる挙動は、燃料要素の寿初期に相当のギャップ閉鎖を生じさせる。1 サイクル 1 MWD/kg と仮定した運転サイクルによる挙動は恣意的なものであるが、データセット中の燃料要素の経歴の典型的なものである。

5.2 HGAP : 燃料-被覆管ギャップコンダクタンス

SIEX のギャップコンダクタンスのモデルは、GAPCON 等と同じである Ross-Stoute ギャップコンダクタンスモデルの簡略モデルである。モデルの一部は効率化のため簡略化されている。なぜなら定数の入力値に精度の落ちるものがあるからである。燃料ピン挙動の照射後観察とキャリブレートした 3 種のパラメータをギャップコンダクタンスモデルは有している。特に、P-19 試験の溶融位置の観察によってキャリブレートしている。

モデルは、燃料-被覆管ギャップの熱伝達に寄与する 3 つの要素を考えている。燃料と被覆管が接触していない場合、その機構は燃料-被覆管ギャップ内のガスを通しての放射熱伝達と熱伝導である。燃料と被覆管が接触するようになった場合、3 番目の要素である、燃料-被覆管接触面での、固体-固体間の熱伝導が使われる。この場合においても、接触部分の間に捕まえられているガスのポケットを通しての熱伝達が残っている。これらの 2 つのケースについての図解を Figure 11 に示す。

(1) 半径方向熱伝達

2 つの同心円柱間の放射熱伝達の関係は次のように書ける。

$$q_{\ell}/A_f = \sigma \left[\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} [T_f^4 - (T_i^c)^4] \quad (17)$$

ここに
 T_f = 燃料温度 (°K)
 T_i^c = 被覆管温度 (°K)
 A_f = 燃料単位長さ当り面積
 A_c = 被覆管単位長さ当り面積
 ϵ_f = 燃料放射率
 ϵ_c = 被覆管放射率
 σ = ボルツマン定数

ギャップ係数を次のように定義すれば

$$H_r = [q_{\ell}/A_f] / [T_f - T_i^c]$$

(16)式は次のようになる。

$$H_r = \sigma \left[\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} [T_f^2 + (T_i^c)^2] [T_f + T_i^c] \quad (18)$$

(2)ガスの満たされた実効ギャップの熱伝達

Ross and Stoute のギャップコンダクタンスは次式で与えられる。

$$H_{gas} = \frac{K_m}{C(r_f + r_c) + (g_f + g_c) + GAP} \quad (19)$$

ここで
 K_m = 燃料-被覆管ギャップの混合ガスの熱伝導度
 GAP = 燃料-被覆管ホットギャップ
 g_f, g_c = 次に述べる, 温度ジャンプ距離
 $C(r_f + r_c)$ = 燃料と被覆管の表面粗さを示す項
 C = フィッティングパラメータ

温度ジャンプ距離 (g_f, g_c) は, 表面とガスの間でのエネルギーの交換が不完全である結果として起る燃料と被覆管表面の温度上昇を表わすものであり, 次のように書ける。

$$g' = \frac{2-a}{a} (2\pi R_m T)^{1/2} \frac{K_m}{(r+1) C_v P_p}$$

ここに
 a = エネルギー伝達の程度を反映する調整係数
 R_m = 混合ガスのガス定数
 P_p = ギャップのガス圧
 $r = C_p / C_v$

T = 燃料表面 (g_f) または被覆管表面 (g_c) での温度

C_v = 混合ガス定容比熱

g' は、燃料と被覆管の両方について ($g_f + g_c$) を得るため求められねばならない。この式は同類項を整理すれば

$$g_f + g_c = \frac{2-a}{a} \frac{\sqrt{2\pi R_m}}{(1+r) C_v P_p} (K_m^f \sqrt{T_f} + K_m^c \sqrt{T_i^c})$$

最後の項が ($2\bar{K}_m\sqrt{\bar{T}}$) で置きかえられると仮定すれば (但し $\bar{T} = \frac{1}{2}(T_f + T_i^c)$, K_m は温度 \bar{T} における K_m)

$$g_f + g_c = 2 \frac{2-a}{a} \frac{\sqrt{2\pi R_m}}{(1+r) C_v P_p} \bar{K}_m \sqrt{\bar{T}}$$

ここで、既知の値と近似値を代入する。

$$2\pi = 6.2832$$

$$(1+r) \simeq 1.659$$

$$R_m \simeq 8.308/\bar{W}$$

$$C_v \simeq 2.988/\bar{W}$$

$$W = \text{混合ガス原子量}$$

その結果次式を得る

$$g = g_f + g_c = 1373 \left(\frac{2-a}{a} \right) \frac{\bar{K}_m \sqrt{\bar{T}} \bar{W}}{P_p} \quad (\text{cm}) \quad (20)$$

(3) 固体-固体間熱伝達

Ross と Stoute は、固体-固体間熱伝達係数が次のように書けると示唆した。

$$H_s = K_s P / (A_o \cdot r^{1/2} H) \quad (\text{w/cm}^2 \cdot \text{C})$$

ここに $K_s = 2K^c \cdot K^f / (K^c + K^f)$ 実効固体コンダクタンス ($\text{w/cm} \cdot \text{C}$)

$$r = \left[\frac{1}{2}(r_c^2 + r_f^2) \right]^{1/2} \quad \text{平均粗さ} \quad (\text{cm})$$

$$P = \text{接触圧力} \quad (\text{dynes/cm}^2)$$

$$H = \text{マイヤー硬さ} \quad (\text{dynes/cm}^2)$$

$$A_o = \text{フィッティング定数} \quad (\text{cm}^{1/2})$$

この式を、粗さとブリネル硬さの項の値を置き換え、降伏強さに比例するとして簡略化すれば、

$$H_s = A \cdot K_s \cdot P / Y \quad (21)$$

ここに Y は降伏強さであり、 A は、実験データから求められる、室温での降伏強さ、 A_o , $r^{1/2}$ 及びブリネル硬さを含むパラメータである。

(4) ガス熱伝導度

燃料-被覆管ギャップは、ヘリウム、窒素、アルゴン、キセノン、クリプトンからなる混合ガスで満たされている。成分ガスの熱伝導度のデータは、二次式 $K_i = A_i + B_i T + C_i T^2$ (T : °C) を得る標準的な回帰法を分析される。成分元素の熱伝導度から混合ガスの熱伝導度は Brokaw の法則を用いて計算される。

$$K_m = \frac{1}{2} \left(\sum X_i K_i + \frac{1}{\sum X_i / K_i} \right)$$

ここで X_i は i 要素のモル分率である。

(5) 調整係数

ガスの原子量への調整係数に関する式は、Ref 16 に示された値に回帰法を施して導かれる。式は次の形である。

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

調整係数は、混合ガスの平均分子量 (\bar{W}) を基礎とする。 A_1, A_2, A_3 はフィッティングパラメータである。

(6) 接触圧の計算は、弾性変形のみが生ずるとして行われる。もし、Figuer 12 に示されるように、燃料外半径が被覆管内半径よりも Δr だけ大きいならば、被覆管と燃料はこの量だけ弾性的に変形すると仮定される。接触圧を導くために以下の記号を定義する。

$\sigma_r^c, \sigma_\theta^c = r_{fc}$ における被覆管の半径方向及び周方向応力

$\sigma_r^f, \sigma_\theta^f =$ " 燃料の " "

$\epsilon_r^c, \epsilon_\theta^c =$ " 被覆管の半径方向及び周方向歪

$\epsilon_r^f, \epsilon_\theta^f =$ " 燃料の " "

$E^f, E^c =$ 燃料及び被覆管のヤング率

$\nu^f, \nu^c =$ " " ポアソン比

$P_p =$ プレナム圧力

$P_o =$ 被覆管の外圧

$P =$ 接触圧

$r_{fc} =$ 燃料-被覆管接触面半径

$r_f =$ 燃料内半径

$r_c =$ 被覆管外半径

$\Delta r =$ 燃料-被覆管の干渉しろ

半径方向応力の関係式は Ref-17 から

$$\sigma_r^c = \frac{E^c}{1 - (\nu^c)^2} \{ \epsilon_r^c + \nu^c \epsilon_\theta^c \} = -P \text{ at } r_{fc} \quad (1P)$$

$$\sigma_r^f = \frac{E^f}{1-(\nu^f)^2} \{ \epsilon_r^f + \nu^f \epsilon_\theta^f \} = -P \text{ at } r_{fc} \quad (2P)$$

周方向応力の関係式は

$$\sigma_\theta^c = \frac{E^c}{1-(\nu^c)^2} \{ \epsilon_\theta^c + \nu^c \epsilon_r^c \} = \frac{P(r_c^2 + r_{fc}^2)}{(r_c^2 - r_{fc}^2)} + \frac{2P_e r_c^2}{(r_c^2 - r_{fc}^2)} \quad (3P)$$

$$\sigma_\theta^f = \frac{E^f}{1-(\nu^f)^2} \{ \epsilon_\theta^f + \nu^f \epsilon_r^f \} = \frac{-P(r_{fc}^2 + r_f^2)}{(r_{fc}^2 - r_f^2)} + \frac{2P_p r_f^2}{(r_{fc}^2 - r_f^2)} \quad (4P)$$

$$\epsilon_\theta^c - \epsilon_\theta^f = \Delta r / r \quad (5P)$$

式(3P)を ϵ_r^c について解くと

$$\epsilon_r^c = \frac{P(r_c^2 + r_{fc}^2)(1-(\nu^c)^2)}{(r_c^2 - r_{fc}^2)\nu^c E^c} - \frac{\epsilon_\theta^c}{\nu^c} + \frac{2P_e r_c^2(1-(\nu^c)^2)}{(r_c^2 - r_{fc}^2)\nu^c E^c} \quad (6P)$$

式(4P)を ϵ_r^f について解くと

$$\epsilon_r^f = \frac{-P(1-(\nu^f)^2)(r_{fc}^2 + r_f^2)}{(r_{fc}^2 - r_f^2)\nu^f E^f} - \frac{\epsilon_\theta^f}{\nu^f} + \frac{2P_p r_f^2(1-(\nu^f)^2)}{(r_{fc}^2 - r_f^2)\nu^f E^f} \quad (7P)$$

(6P)と(7P)を(1P)と(2P)に代入すれば

$$-P = \frac{P(r_c^2 + r_{fc}^2)}{\nu^2(r_c^2 - r_{fc}^2)} - \frac{E^c}{1-(\nu^c)^2} \left(\frac{\epsilon_\theta^c}{\nu^c} \right) + \frac{2P_e r_c^2}{(r_c^2 - r_{fc}^2)\nu^c}$$

つまり

$$-P = \frac{P(r_c^2 + r_{fc}^2)}{\nu^c(r_c^2 - r_{fc}^2)} - \frac{E_c}{\nu^c} \epsilon_\theta^c + \frac{2P_e r_c^2}{(r_c^2 - r_{fc}^2)\nu^c}$$

および

$$-P = \frac{-P(r_{fc}^2 + r_f^2)}{\nu^f(r_{fc}^2 - r_f^2)} - \frac{E_f}{\nu^f} \epsilon_\theta^f + \frac{2P_p r_f^2}{(r_{fc}^2 - r_f^2)\nu^f}$$

となる。上記の式は次のように書ける。

$$\epsilon_\theta^c = \left\{ \nu^c + \frac{(r_c^2 + r_{fc}^2)}{(r_c^2 - r_{fc}^2)} \right\} \frac{P}{E^c} + \left\{ \frac{2P_e r_c^2}{(r_c^2 - r_{fc}^2)} \right\} / E^c \quad (8P)$$

及び

$$\epsilon_\theta^f = \left\{ \nu^f - \frac{(r_{fc}^2 + r_f^2)}{(r_{fc}^2 - r_f^2)} \right\} \frac{P}{E^f} + \left\{ \frac{2P_p r_f^2}{(r_{fc}^2 - r_f^2)} \right\} / E^f \quad (9P)$$

(8P)から(9P)を引けば

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta}^c - \varepsilon_{\theta}^f = & \left[\nu^c + \frac{(r_c^2 + r_{fc}^2)}{(r_c^2 - r_{fc}^2)} + \left\{ \frac{(r_{fc}^2 + r_f^2)}{(r_{fc}^2 - r_f^2)} - \nu^f \right\} \frac{E_c}{E^f} \right] \cdot \frac{P}{E^c} \\ & + \left[\frac{2P_e r_c^2}{(r_c^2 - r_{fc}^2)} + \frac{2P_p r_f^2}{(r_{fc}^2 - r_f^2)} \cdot \frac{E^c}{E^f} \right] / E^c \end{aligned}$$

これをPについて解き(5P)を代入すれば、

$$\begin{aligned} P = & \left\{ \frac{\Delta r}{r} E^c + 2 \left[\frac{P_e r_c^2}{r_c^2 - r_{fc}^2} + \frac{P_p r_f^2}{r_{fc}^2 - r_f^2} \left(\frac{E^c}{E^f} \right) \right] \right\} \times \\ & \left\{ \nu^c + \frac{r_c^2 + r_{fc}^2}{r_c^2 - r_{fc}^2} + \left(\frac{r_{fc}^2 + r_f^2}{r_{fc}^2 - r_f^2} - \nu^f \right) \frac{E^c}{E^f} \right\}^{-1} \quad (10P) \end{aligned}$$

熱応力はこの計算においては無視している。なぜならば、広範囲の定常運転条件のもとでは、クリープ機構のために、ほとんど零に緩和することが示されるからである。

式(10P)により計算された圧力は、被覆管の降伏を起す圧力に限定される。

(7) 燃料から被覆管への熱伝達実験式

ギャップコンダクタンスは、power-to-melt 実験(P-19)からのデータより求められた(Figure 13)。この実験は、スタートアップ時の運転(出力)限界を見出すために必要なデータを得るべく計画された。このデータは種々の製造時ギャップに対して、よく特色付けられた燃料パラメータ条件下での燃料温度(溶融位置)を明瞭に示すことができる。実験の設計上、データは燃料ピンの寿命初期の運転履歴を現わし、多くの変数の重要な不確定さは除かれている。(燃料-被覆管ギャップガス組成、ホットギャップ巾、燃料熱伝導度の燃焼効果等)このことは、実際の照射下での燃料ピンの熱挙動をノーマライズするのに、このデータが最も良いものとして使われることを示唆している。

接触圧の式(21)と(19)の係数AとCは、係数調整法 Simplex を用いて、データと最も良く合うものが得られた。

照射後ギャップデータとギャップコンダクタンスの準理論的モデルに沿ってデータを規定する実験式は、燃料ピンの全寿命にわたってギャップコンダクタンスを推定するのに使われる。

Figure 14にHGAPのフローチャートを示す。

5.3 STRUCT: 燃料の微小组織(再組織)

燃料組織の特色の計算は、従来2つの異なる手法を用いて行われてきた。一つは気孔の移動と結合を計算する現象論的アプローチである。この手法の version は LIFE コードにプログラムされている。もう一つの方法は、明瞭に規定できる特徴に組織が安定する温度を見出すものである。これは時に結晶成長温度と呼ばれる。このような温度は、Christensen によって報告されたように時間依存とするか、あるいは定数でもよい。2つの理由から SIEX では再結晶温度による手

法をとった。1) 結晶粒界の位置と密度を知ることは、温度分布の計算をするのに十分である。2) 現象論的手法はより長い計算時間を必要とする。計算は、気孔と気泡が粒界を越えて移動する際に、バランスを正確に保つことを保証するため、比較的小さな時間巾で繰返し行われなければならない。

燃料の微小组織、柱状晶と等軸晶成長半径の測定は、前述した残留ギャップの測定時にモザイク写真で行われた。柱状晶成長半径は、レンズ状ボイドと柱状の（半径方向に伸びた）結晶の観察される範囲である。等軸晶成長半径は、等軸の（細長くなっていない）結晶が、粒界上のガスにより他と分けることができなれないと思われる領域（範囲）として確認された。

柱状晶と等軸晶の観察された温度は、燃焼度レベル毎に測定された再組織化半径について計算された。全てのケースで最高温度はスタートアップ時（約60 MWD/MTM）に起きた。データ解析の結果、燃料組織の記述に使われた温度の時間依存は認められなかった。簡単な静的データ解析が行われ、“柱状晶成長”温度に対し勾配依存関数、“等軸晶成長”温度に対し定数の結果を得た。

Figure 15とFigure 16に、柱状晶、等軸晶成長範囲のSIEX予測値の適合性を示す。

5.4 FISGAS : FPガス放出

SIEXのガス放出モデルはRef 19と同じである。SIEXのものとよく似ているモデルを記述した報告書が最近出された。（Ref 20）

FPガス放出機構は気泡の中心空孔への移行と高温領域での拡散及び中・低温領域での粒界からの放出である。この解析モデルでは次のように仮定している。

1. 結晶成長の特徴をもつ燃料領域では、生成FPガスは高温と温度勾配のため、ほとんど燃料中に保持されず、結果的にガスの速い拡散と放出がある。
2. 再組織化の起らない領域では、生成FPガスの大部分が保持される。放出は熱と照射に起因する拡散現象の組み合わせによりコントロールされる。
3. 生成ガスの放出率は次式を適用する。

$$F = F_r A_r + F_u A_u$$

ここにFは全放出率、右辺はそれぞれ再組織化及び非再組織化領域の放出率と放出面積である。このモデルを適用する時には、軸方向プロファイルを計算するため、軸方向ノード毎にAとFを計算する。

FPガス放出率のデータはEBR-IIで照射された燃料要素から得られた。各ピンから捕集された全ガス量が測定され、質量分析機により組成割合を同定された。全ケースについて、燃料要素の燃焼度を定めるためにNd-148の化学分析が利用された。

データ評価は回帰分析コードREEPを使って行われ、各領域の放出率について次式の結果を得た。

$$F_r = F_{1_4} + (1 - F_1) \times \left[1 - F_2 \cdot \frac{\{ 1 - \exp(-\frac{B}{F_3}) \}}{B} \right]$$

$$F_u = 0 \quad (B < F_5)$$

$$= 1 - F_4 \left[1 - \exp\left\{-\frac{(B - F_5)}{F_5}\right\} \right] \frac{\exp(-F_6 \cdot q_\ell)}{B} \times F'(B) \quad (B \geq F_5)$$

ここで

B = 局所燃焼度 (MWD / kg)

q_e = 局所線出力 (w / cm)

$F'(B) = 1$ ($B > F_7$)

$= F_8(B - F_7)$ ($B < F_7$)

FISGAS ルーチンは、3領域の面積、FPガス生成量、前述のモデルによる放出率を、ユーザーの指定した軸方向セグメント数に対して計算する。次に入力放出率か、実験式モデルのいずれかによって、各セグメントの放出ガス量が計算される。各セグメントの放出ガス量を燃料ピン全長について積算し、プレナム領域への放出ガス全量を決定する。この値は、ピンについての放出率計算に使われる。FISGASのフローチャートを Figure 18 に示す。

SIEX が予測した放出率と測定した放出率の値を、適合性を示すために Figure 19 に示す。Figure 21 は、燃焼度の関数としての第 I 章の例と同じく燃料ピンの3種の出力量レベルについての放出率を評価している、後者のプロットは、ガス放出率とプレナム圧力予測値の燃焼に伴う挙動を示している。

6. 参考文献

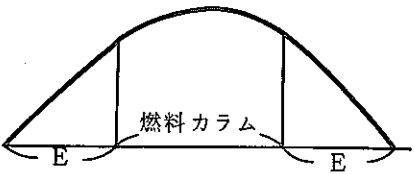
1. S. Glasstone and A. Sesonske, Nuclear Reactor Engineering, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1967.
2. K.R. Merckx and G.L. Fox, SINTER - A Program for Calculating Radial Temperature Distributions in Oxide Fuel Pins Undergoing Sintering, BNWL - 1241, UC-80, January, 1970.
3. J.B. Scarborough, Numerical Mathematical Analysis, John Hopkins Press, Baltimore, Md, 1966.
4. J.F. Bates and J.L. Straalsund, A Compilation of Data and Empirical Representations of Irradiation Induced Swelling of Solution Treated Types 304 and 316 Stainless Steel, HEDL, Richland, Wa, HEDL-TME 71-139, September, 1971..
5. R.D. Leggett, R.B. Baker, E.O. Ballard, G.R. Horn, D.S. Dutt, "Linear Heat Rating for Incipient Fuel Melting in UO₂-PuO₂ Fuel," Trans. Amer. Nucl. Soc., Volume 15, No. 2, p. 752, 1972.
6. D.S. Dutt, R.B. Baker, S.A. Chastain, "Modeling of the Fuel-Cladding Postirradiation Gap in Mixed Oxide Fuel Pins," Trans. Amer. Nuc. Soc., Volume 17, No. 2, p. 1975, 1973.
7. V.F. Jankus and R.W. Weeks, "LIFE-11 - A Computer Analysis of Fast-Reactor Fuel-Element Behavior as a Function of Reactor Operating History," First International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Germany, September 20-24, 1971.
8. David F. Shanno, REEP-Nonlinear Estimation Package, IBM Share Program Library, January 27, 1967.
9. C.M. Cox, F.J. Homan, R.L. Diamond, LMFBR Fuel Cycle Progress Report, ORNL-TM-3759, February, 1972.
10. G.R. Horn and F.E. Panisko, Users' Guide for GAPCON: A Computer Program to Predict Fuel-to-Cladding Heat Transfer Corfficients in Oxide Fuel Pins, HEDL-TME 72-128, September, 1972.
11. E.R.G. Echert, Heat and Mass Transfer, McGraw Hill, New York, 1959.
12. A.M. Ross and R.L. Stoute, Heat Transfer Coefficient Between UO₂ and Zircolloy 2, AECL-1552, June 1962.
13. E.H. Kennard, Kinetic Theory of Gases, McGraw Hill, New York, p. 311.
14. Handbook of Chemistry and Physics, 43rd Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio, p. 2167 (1961).

15. R.S. Brokaw, "Estimating Thermal Conductivities for Non-Polar Mixtures: Simple Empirical Method," Ind. Eng. Chem. 47 (11), pp. 2398-2400, 1955.
16. R. Godesar, "COMETHE-11 - A Computer Code for Predicting the Mechanical and Thermal Behavior of a Fuel Pin," Nuclear App. and Tech., Volume 9, p. 205, August, 1970.
17. Charles O. Harris, Introduction to Stress Analysis, McMillian Company, New York, 1963.
18. J.A. Christensen, "Columnar Grain Growth in Oxide Fuels," Trans. Amer. Nucl. Soc., Vol. 15, No. 1, June, 1972.
19. D.S. Dutt, D.C. Bullington, R.B. Baker, L.A. Pember, "A Correlated Fission Gas Release Model for Fast Reactor Fuels," Trans. Amer. Nucl. Soc., Vol. 15, No. 1, June, 1972.
20. K. Ehrlich, et al, UO₂PuO₂ Fuel Pin Irradiation in Trefoil Insert DFR-304 Evaluation of the Investigation Results on Irradiated Fuel Rods, EURFNR-1151, January, 1974.
21. K.A. Varteressian and Leslie Burris, Fission-Product Spectra from Fast and Thermal Fission of ²³⁵Pu, ANL-7678, March, 1970.
22. HEDL Fast Reactor Materials Dosimetry Center, 1972.
23. J. Jedruch and R.J. Nodvik, Experimentally Determined Burnup and Spent Fuel Composition of Yankee Core 1., Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, Pa., Atomic Power Division, July, 1965, Table 7.4, p. 62, WCAP 6071.
24. J.H. Kittel, Guide for Irradiation Experiments in EBR-11, Revision 4, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, February, 1971.

Table - I SIEX 主要ルーチンの説明

区分	ルーチン名	処 理 内 容	呼び出しルーチン
メイン	SIEX		
物理モデル	FSINTR	径方向の燃料ペレット内温度分布を計算する。この計算に際しては、二領域（柱状晶領域とその他の領域）に分けて熱伝導を計算する。Kdt（Kは熱伝導度）の積分はファンクションSで行う。燃料と被覆管のギャップコンダクタンスの計算はHGAPで行う。	STRUCT S T RFIND
	CSINTR	軸方向冷却材温度上昇を計算する。併せて被覆管の内外表面も計算する。	SINPUT
	CDELD	照射中の被覆管の変形を計算する。変形はスウェリングと熱膨張を考慮している。	
	FDELD	熱膨張とFSWELで計算される経験的に求まる変形量を考慮して、燃料の外径を計算する。	FSWEL
	PPRES	プレナムガス圧を完全気体の法則をもとに計算する。	
実験式モデル	HGAP	Ross-Stoutのモデルをもとに被覆管と燃料のギャップコンダクタンスを計算する。	FSINTR CONMIX FDELD PPRES FISGAS
	FISGAS	FPガスの生成および放出を計算する。	
	STRUCT	燃料の再結晶組織径を計算する。	S T RFIND
	FSWEL	燃料の変形を計算する。	
入／出力	INPUT	入力データを“工学”単位で読み込む。単位はcgsに変換される。	SPAGE FISGAS FDELD
	OUTPUT	cgs単位を“工学”単位に変換し、選択された出力テーブルをプリントする。	SPAGE

Table - II SIEX インプットデータの説明

入力 パラメーター	定 義	単 位	プログラム内で 与えられる値
FLEN	燃料カラム長	cm	
E	<p>軸方向のフラックス分布, 出力分布を定める値で, 以下のようなオプションが設定されている。</p> <p>① $E > 0$: 分布を cosine 関数で表わした時の外挿距離</p>  <p>② $E = 0$: プログラム内のデータテーブルにより定められる。</p> <p>③ $0 > E > -1$: ユーザーが与えた関数により定められる。</p> <p>④ $E < -1$: 入力データのテーブルから分布を定める。入力する数は E 個である。</p>		
FD	燃料直径	cm	
VOID	中空燃料の中心空孔径	cm	0
DP	被覆管外径	cm	
CT	被覆管肉厚	cm	
PM	燃料ピン最大線出力	w/cm	
CMF	冷却材流量	g/sec	
CP	冷却材比熱 (入力されていない場合は, SIEX コード内蔵の値を使う。)	joul/g °C	1.277
HF	冷却材と被覆管の熱伝達係数	w/cm ² °C	17.028
HG	被覆管と燃料の熱伝達係数 (計算で求めるギャップコンダクタンスの最初の見積値となる。)	w/cm ² °C	0.5676
CK	<p>被覆管熱伝導係数</p> <p>CK > 0 : 温度と独立な一定値</p> <p>CK ≤ 0 : プログラム中の値を使用</p>	w/cm °C	
TI	冷却材入口温度	°C	

入 力 パラメーター	定 義	単 位	プログラム内で 与えられる値
TB	柱状晶領域境界の予測温度 TB > 0: 入力値がそのまま予測温度となる。 TB < 0: プログラム内で与えられている値を 予測温度とする。	℃	
TEMP 2	等軸晶領域境界の予測温度 TEMP 2 > 0: 入力値がそのまま予測温度とな る。 TEMP 2 < 0: プログラム内で与えられている 値を予測温度とする。	℃	
DENLO	製造時の燃料密度 (T. D.)	Fraction	
DENHI	等軸晶領域の燃料密度 (T. D.)	Fraction	
TD	燃料理論密度	gm/cc	
DISH	製造時のディッシュ等による体積減少割合	Fraction	0.
PU	Pu-239, Pu-241の燃料中の割合 (但しメタ ルでの割合)	Fraction	.25
U235	U-235の燃料中の割合 (但しメタルでの割合)	Fraction	0.
SEGNUM	軸方向分割数。但し、燃料ピン最上部のノード はコード内で追加される。 SEGNUM ≤ 21		
PBU	到達最高燃焼度 もしEFPD (次に示すパラメーター) がゼロで あれば定める必要がある。EFPDが示された場 合は無視される。 PBUが負の値である場合は、出力サイクル数 を与える。	MWD /MTM	0.
EFPD	最終的な、実効 Full Power Day EFPD > 0: このEFPDの値と燃料重量および PMの値から燃焼度を計算する。 EFPD = 0: 燃焼度と燃料重量およびPMの値 からEFPDを計算する。	EFPD	0.
CCPGM	水蒸気を除いた吸着ガス量	CC (STP) /gm Oxide	
FN	HeとH ₂ を除いた吸着ガスの割合。このガスは N ₂ の熱伝導度を有するとして計算する。	Fraction	0.1

入力 パラメーター	定 義	単 位	プログラム内で 与えられる値
PPM	製造時の水蒸気量 (PPM)	PPM	
EPL	実効プレナム長さ	cm	
XEFIL	充填ガス中の Xe タグガスのパーセント	%	0.
KRFIL	充填ガス中の Kr タグガスのパーセント	%	0.
ALPHAO	被覆管の線膨張率は、温度に直線的に変化するとすると次式で表わされる。	cm/cm-℃	16.2×10^{-6}
ALPHAS	$\alpha^c = \alpha_o^c + \alpha_T^c T$ ここで $\alpha_o^c = \text{ALPHAO}$ $\alpha_T^c = \text{ALPHAS}$	cm/cm-℃	3.7908×10^{-9}
YMOD0	被覆管のヤング率は、温度に直線的に変化するとすると次式で表わされる。	kg/cm ²	2.1236×10^{12}
YMODS	$E^c = E_o^c + E_T^c T$ ここで $E_o^c = \text{YMODE}$ $E_T^c = \text{YMODS}$	kg/cm ² ・℃	-9.18×10^8
STEPS	STEPSにより出力される燃焼度と時間は以下のようになる。 STEPS < 0: STEPS の数だけ出力する。出力時間は TIINCR で定める。 STEPS = 0: 最高燃焼度時の結果のみ出力。 STEPS = 1: ゼロ燃焼度と最高燃焼度の時を出力。 STEPS > 1: ゼロ燃焼度と最高燃焼度の時の他に、PBU/STEPS の燃焼度毎に出力する。		
Z 1	柱状晶領域での FP ガス放出率	Fraction	1.
Z 2	等軸晶領域での FP ガス放出率	Fraction	1.
Z 3	未変化領域での FP ガス放出率 Z 3 ≤ 0 の場合 FP ガス放出の計算モデルで放出率を求める。	Fraction	-1.
STEPST	タイムステップ数		20.
PNU	Cladding Poisson の比。もし NAMELIST 文で定義されていない場合はプログラム内の値を用いる。		0.3

入 力 パラメーター	定 義	単 位	プログラム内で 与えられる値
PFLUX	ピークフラックス 0.1 MeVの中性子束	N/cm ² -sec	
	被覆管スウェリングモデルを選択する。 TMSWC = 1.0 (304 annealed SUS) TMSWC = 2.0 (306 annealed SUS) TMSWC = 3.0 (316 20% cold work SUS)		
EXTERP	外部圧力	kg/cm ²	
ITAB 1	FPガスとプレナム圧力計算のオプション ITAB 1 = 0 計算も出力も行わない ITAB 1 = 1 計算および結果の出力を行 う。		1
ITAB 2	燃料および被覆管直径増加計算のオプション ITAB 2 = 0 計算も出力も行わない。 ITAB 2 = 1 計算および結果の出力を行 う。		1
ITAB 3	燃料-被覆管熱伝達係数計算のオプション ITAB 3 = 0 入力値 HG で一定 ITAB 3 = 1 ギャップコンダクタンスを 計算で求める。		1
ITAB 4	被覆管 elastic stress 計算のオプション ITAB 4 = 0 計算も出力も行わない。 ITAB 4 = 1 計算および結果の出力を行 う。		1 注) ITAB 1~4 の値は整数入力
TIINCR	STEPS が負で入力された場合、 STEPS 個の時間増分値 (TIINCR) を入力する必要 がある。TIINCR は最大 10 個まで入力可能	day	
PRATIO	入力されたピーク出力 (PM) に対する上記 の時間増分値での出力割合。時間ゼロの時は PMの値をそのまま使用する。		
CRATIO	入力された冷却材流量 (CMF) に対する上記 の時間増分値での流量割合、時間ゼロの時は CFMの値をそのまま使用する。		

入力 パラメーター	定 義	単 位	プログラム内で 与えられる値		
POWCYL	PBUの値がゼロ以下である場合、上記の時間増分値に対応してその間のパワーサイクル数が心要とされる。				
READX	入力パラメーター E が -1 以下の場合、出力、フラックスあるいは 0.1MeV 以上の中性子フラックスの割合の相対分布を入力する必要がある。この場合の分布を入力する軸方向位置を READX で入力する。入力個数は E 個である。				
READFP	上記の軸方向位置 (READX) における軸方向フラックス分布 (PFLUX に対する相対値で入力)。 READFP の入力個数は E 個である。				
READP	上記の軸方向位置 (READX) における軸方向出力分布 (PM に対する相対値で入力)。 READP の入力個数は E 個である。				
READEB	上記の軸方向位置 (READX) における軸方向平均中性子エネルギーの分布。 READEB の入力個数は E 個である。	MeV			
READTF	0.1 MeV 以上の中性子の全中性子束に対する割合の軸方向分布、READTF の入力個数は E 個である。				
MTOUT	図形処理のオプション MOUT = 0 : OFF MOUT = 1 : ON <table style="display: inline-table; vertical-align: middle; border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 0 10px;">{</td> <td style="padding: 0 10px;">MOUT = 1 の時、プロッターで図形処理するために結果を MT (またはディスク) に出力する</td> </tr> </table>	{	MOUT = 1 の時、プロッターで図形処理するために結果を MT (またはディスク) に出力する		0
{	MOUT = 1 の時、プロッターで図形処理するために結果を MT (またはディスク) に出力する				
KPGn n = 1 ~ 7	出力制御フラッグ KPGn = 1 (n 頁目を出力する。) KPGn = 0 (n 頁目を出力しない。)				

TABLE-III SIEX ジョブ制御文, インプットデータ例

- ジョブ制御文

```

//M3558SIX JOB ,CLASS=C,MSGCLASS=A
// EXEC FORTCLG,PARM.FORT=(G0STMT,SOURCE)
//FORT.SYSIN DD DSN=M3383.SIN0.DATA(PNCSX3),DISP=SHR
//G0.SYSIN DD DSN=M3383.SIN0.DATA(P19SX),DISP=SHR
//

```

- インプットデータ例

```

HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT
&IPT FLEN=34.29, E=0., FD=0.49784, VOID=0., PBU=-10.,
DP=0.5842, CT=0.0381, PM=514.26, CMF=56.5, TI=371.0,
DENL0=0.904, DENHI=0.980, TD=11., DISH=0.01, SEGNUM=10.,
CCPCM=0.022, PPM=11.0, EPL=17.762, STEPS=2., PFLUX=2.0E15,
TMSWC=3., EXTERP=2.461, FN=0.61, PU=0.1927,
U235=0.6175, EFPD=0.2, TB=2144., TEMP2=1650.,
TIINCR=0.16667,0.0104,
PRATIO=1.0,1.1468,
CRATIO=2*1.0,
P0WCYL=1.0,0.,
OXTOME=1.96, KEYMOD=1,
&END
HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=20KW/FT
&IPT PM=572.17, CMF=68.0, &END
HEDL P-19 GAP=6MILS, PM=17KW/FT
&IPT FD=0.49276, PM=486.35, CMF=51.5, &END
HEDL P-19 GAP=6MILS, PM=19KW/FT
&IPT PM=543.56, CMF=61.76, &END

```

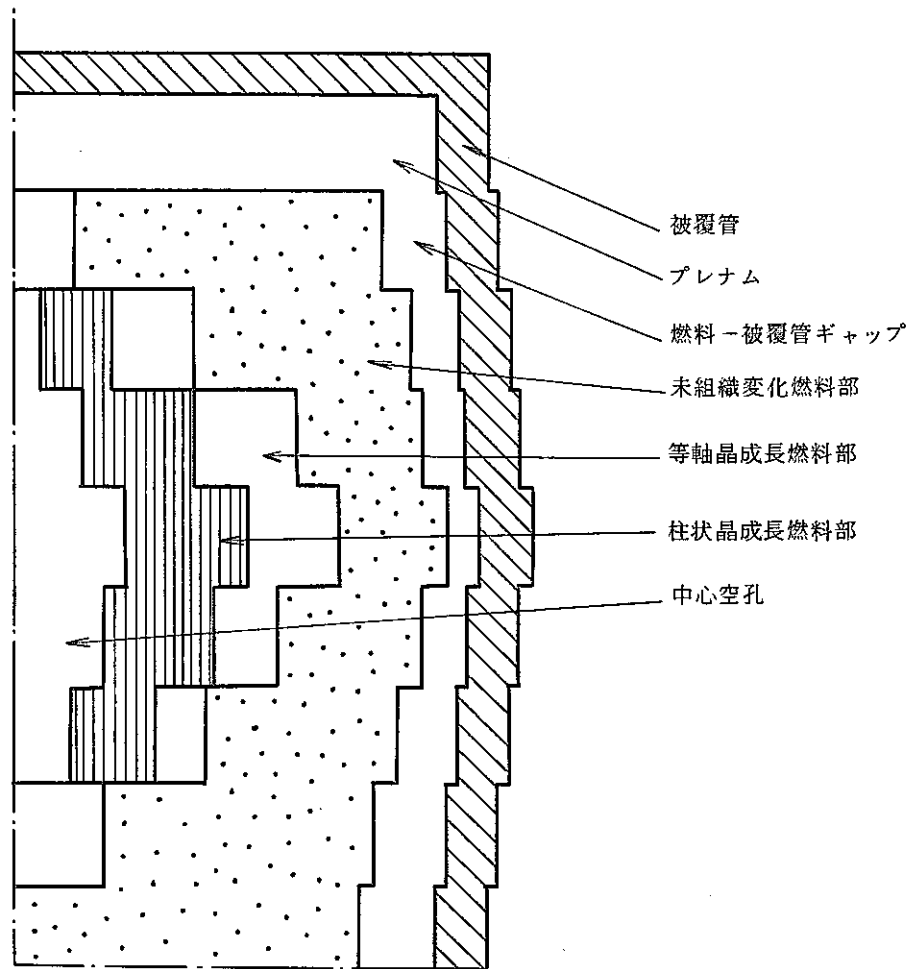



Figure 1, SIEX 燃料ピン配置

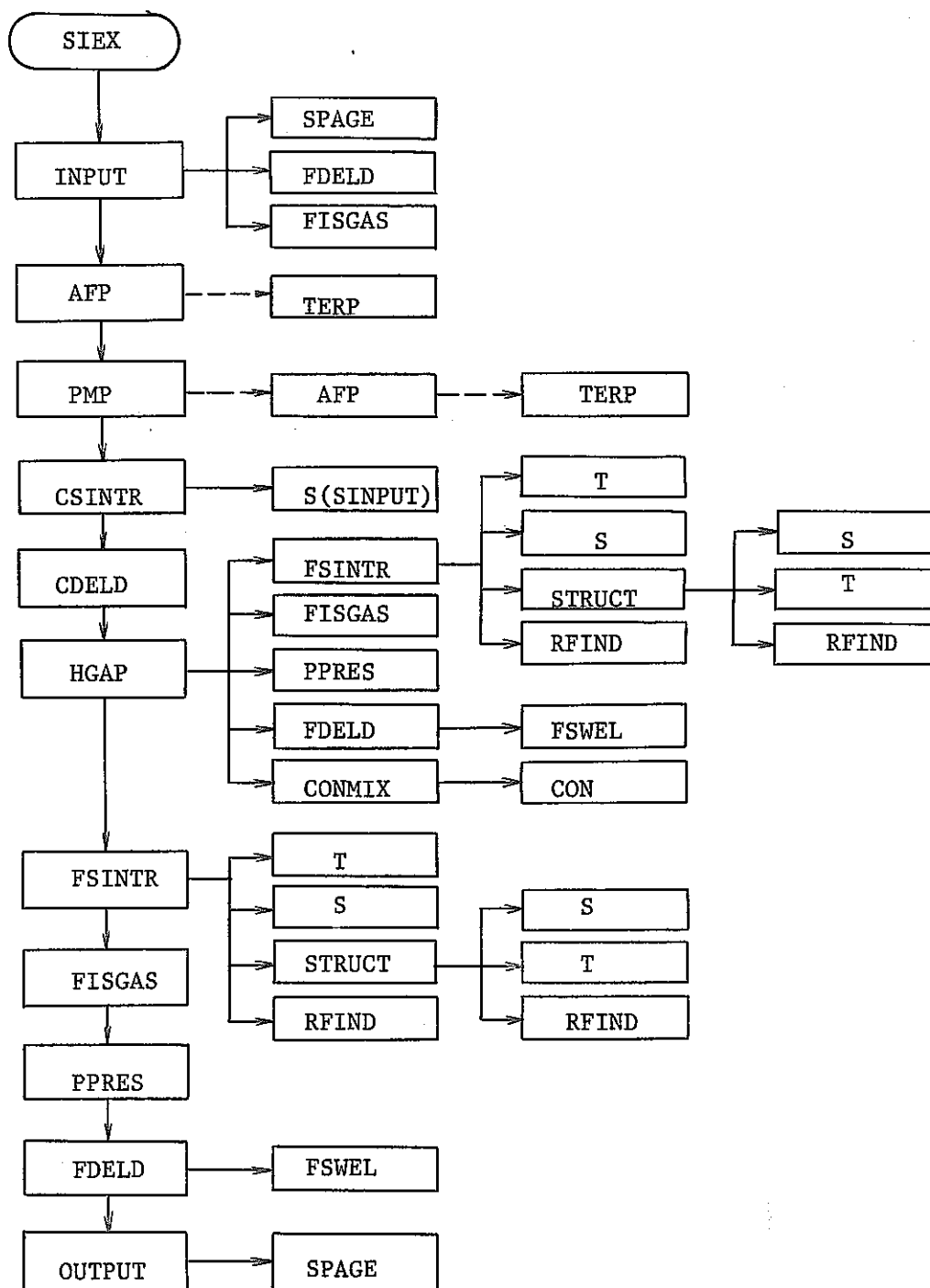


Figure 2. SIEX 主要なルーチンの呼び出しシーケンス

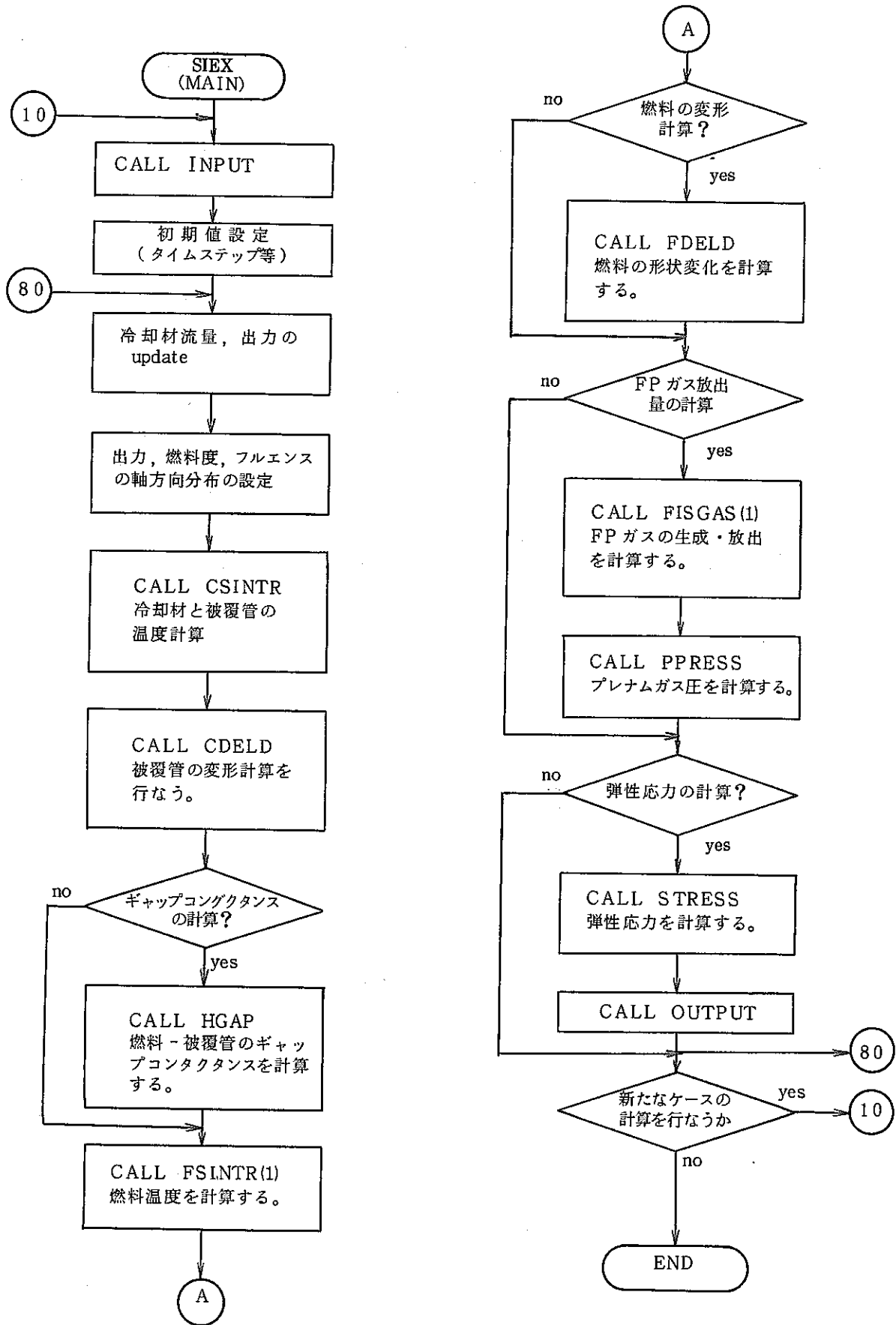


Figure 3 SIEX フローチャート

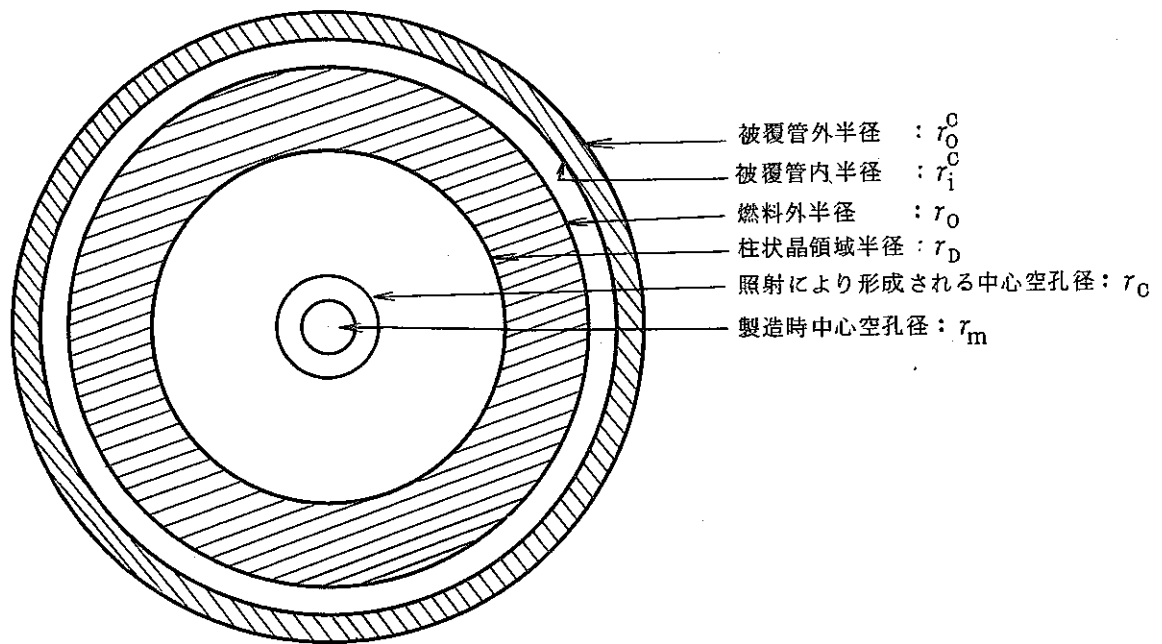


Figure 4 燃料・被覆管熱伝達計算モデル

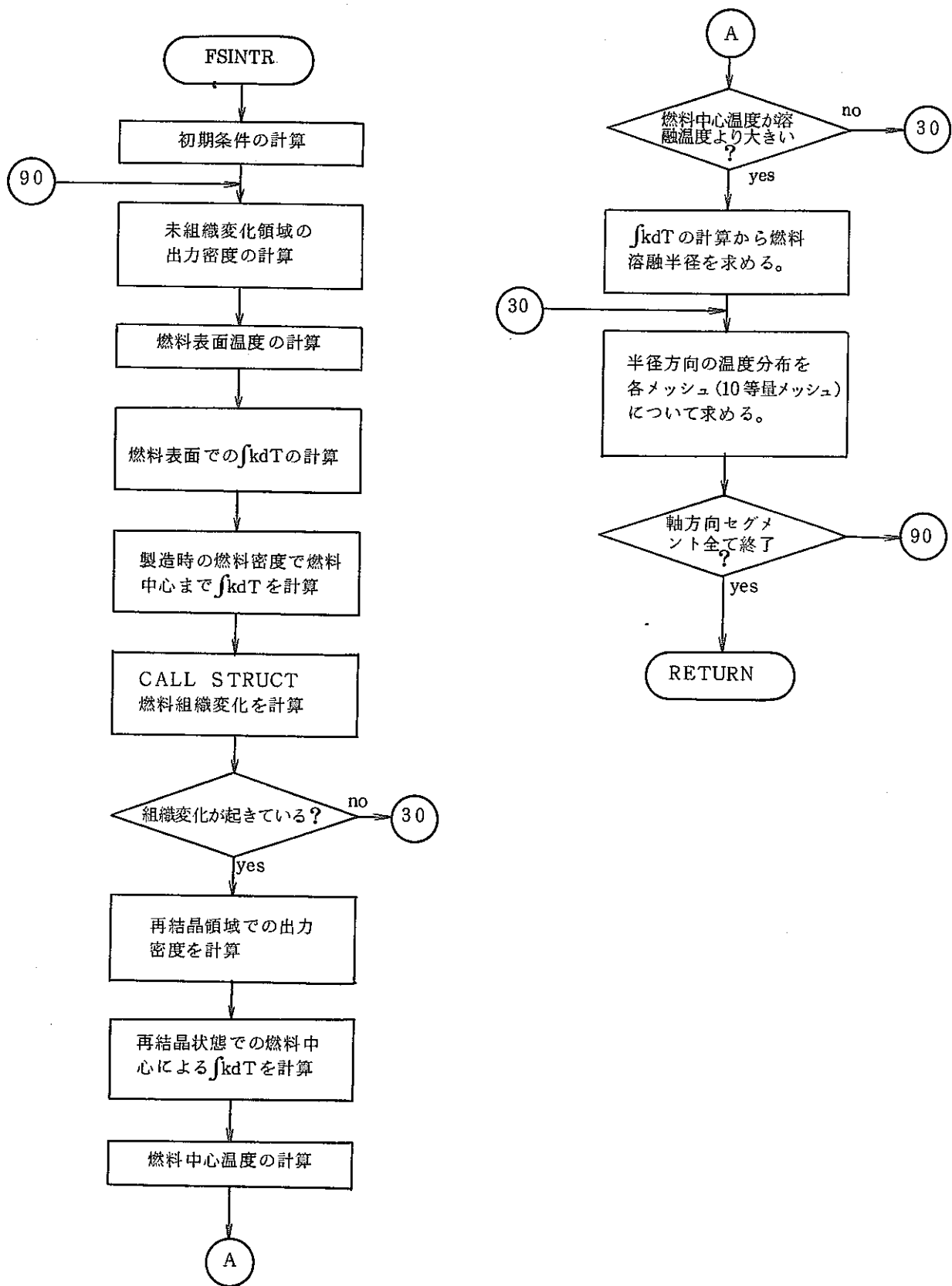


Figure 5 サブルーチン FSINTR フローチャート

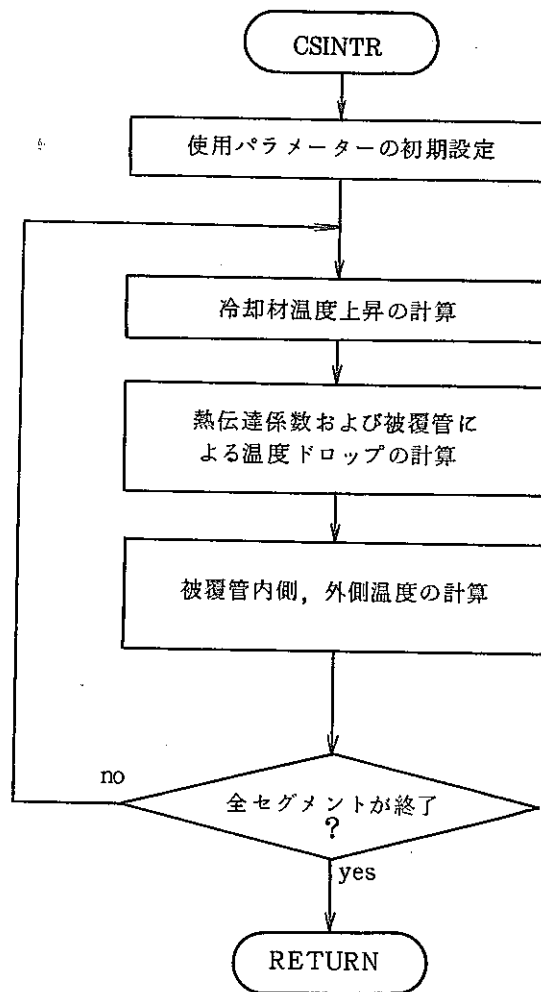


Figure 6 サブルーチン CSINTR フローチャート

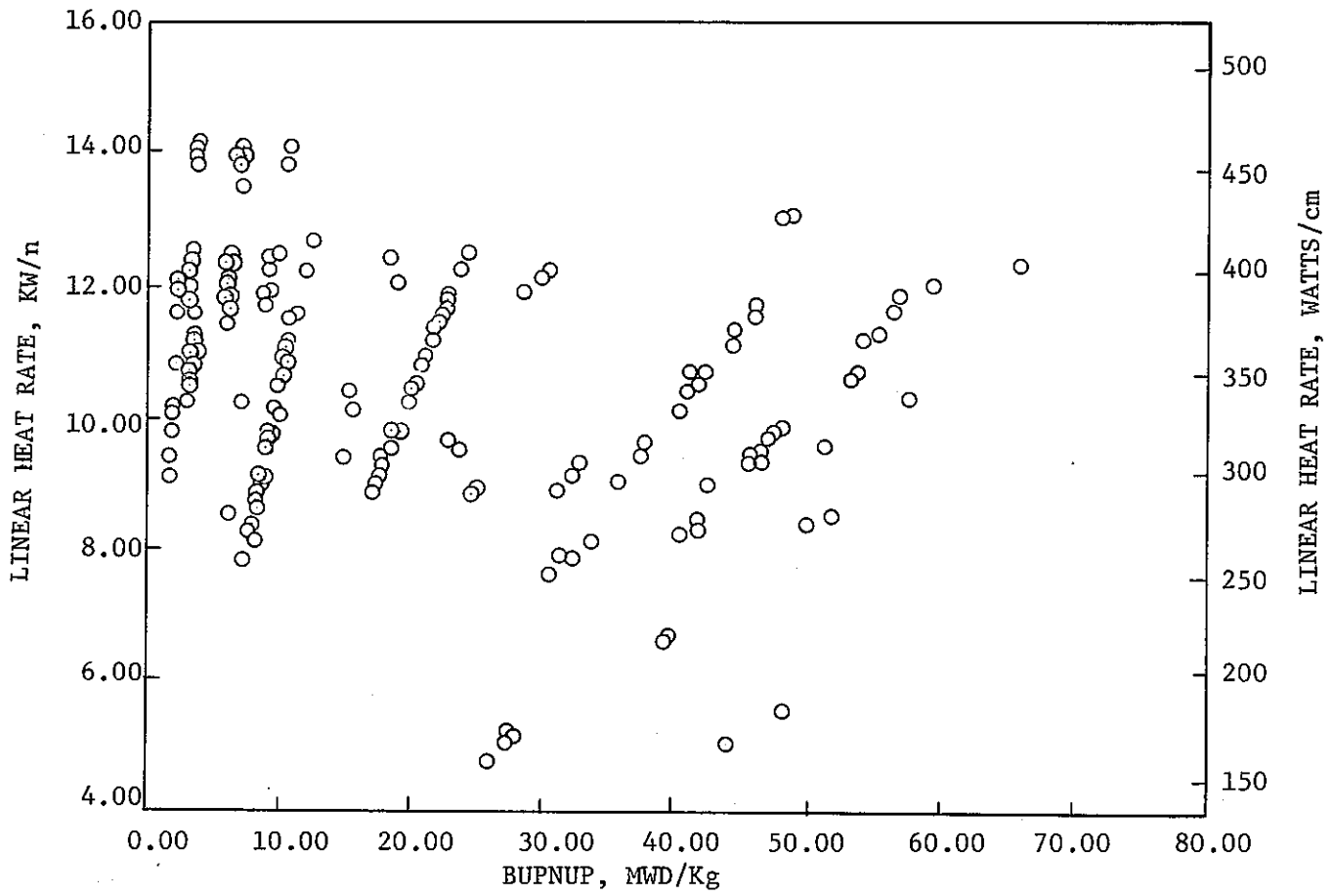


FIGURE 7. Data Field for Postirradiation Fuel-Cladding Gap Correlation

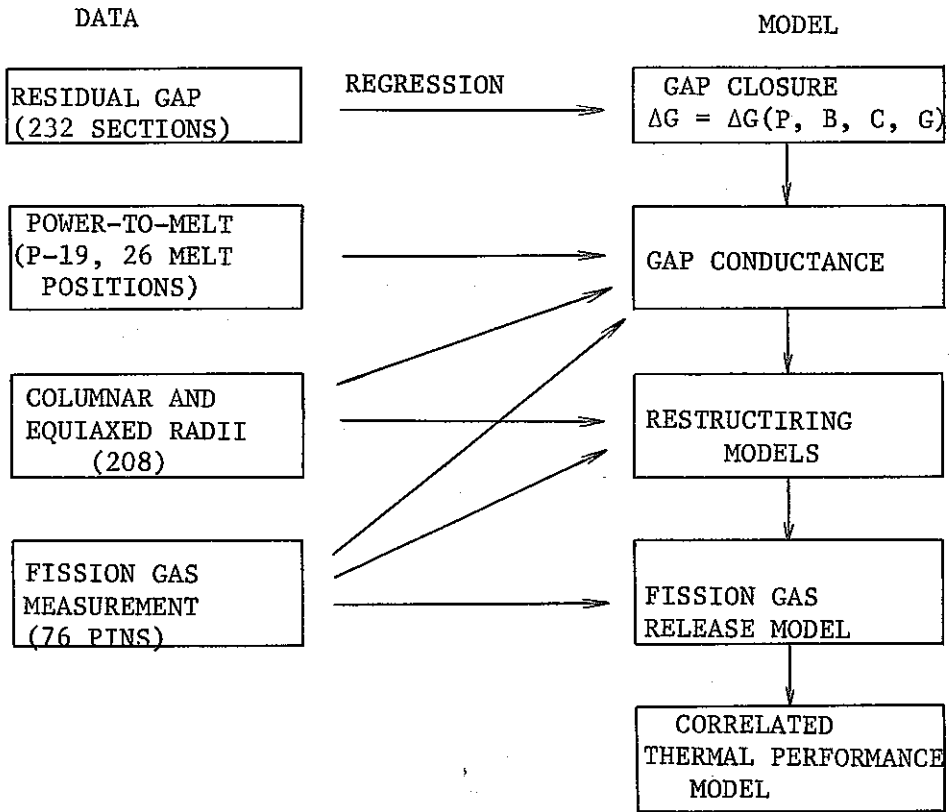


Figure 8 SIEX に用いられた実験式と基礎データの相互関連

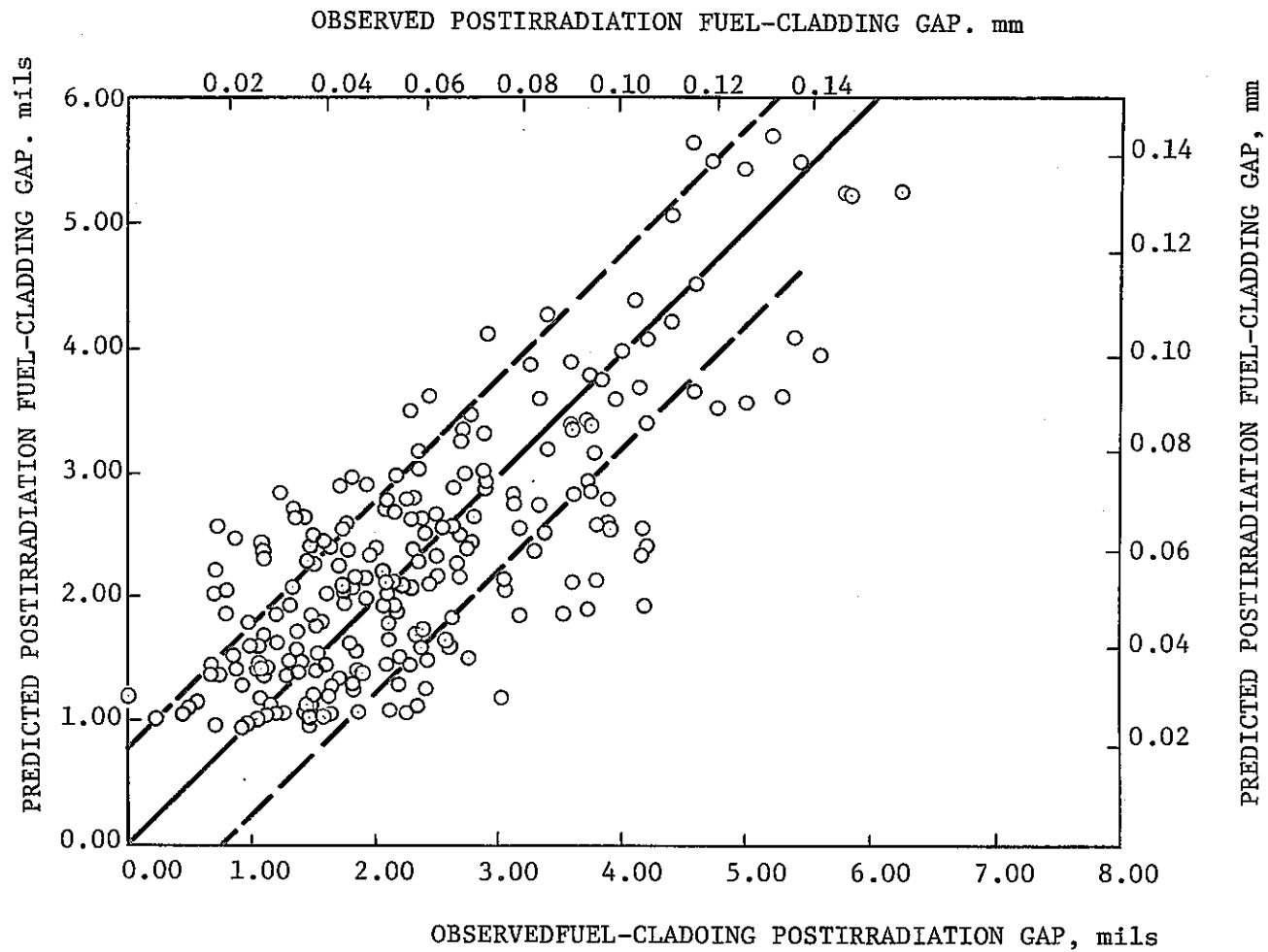


FIGURE 9. Postirradiation Diametral Fuel-Cladding Gap Correlation

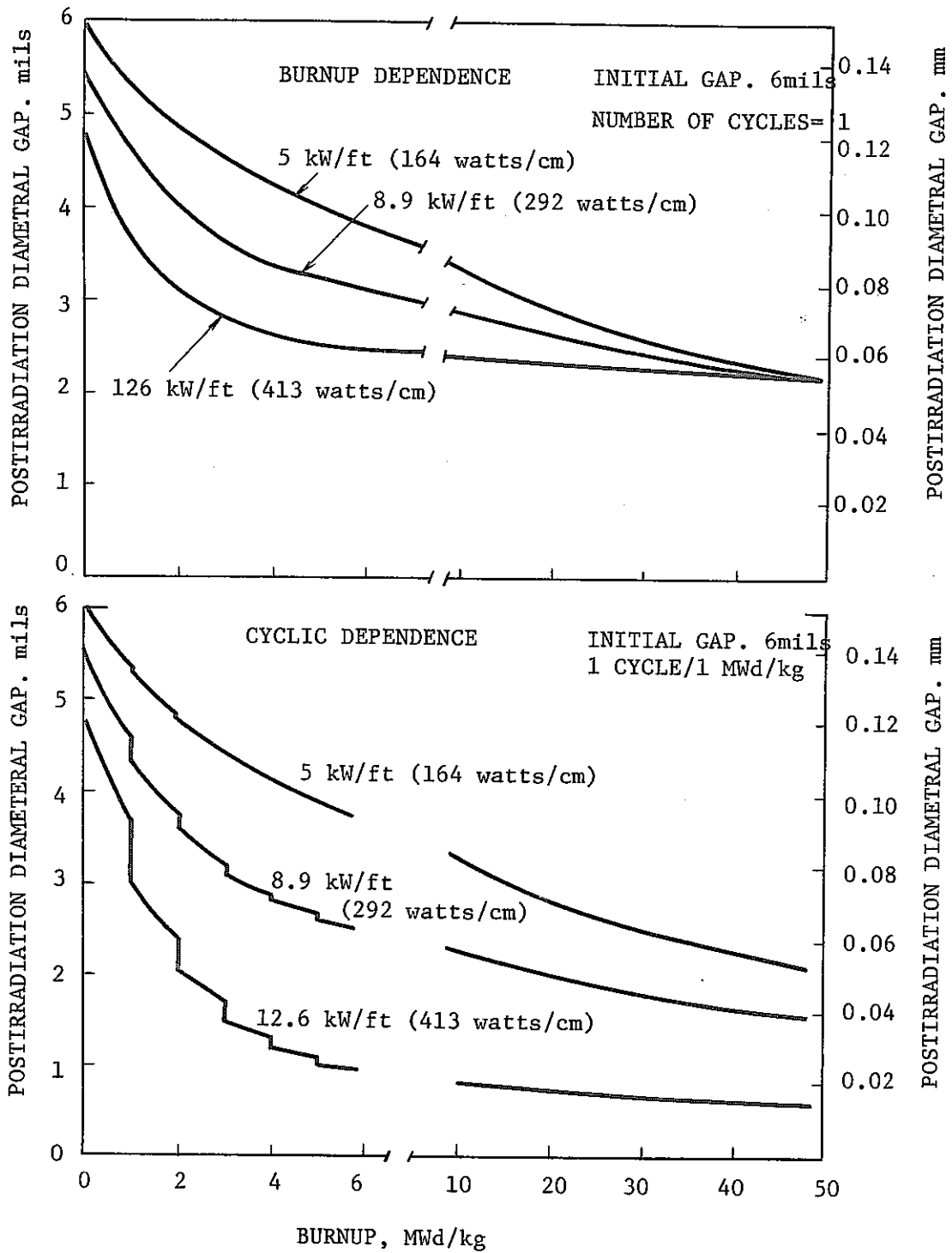


FIGURE 10. Fuel-Cladding Postirradiation Gap Model

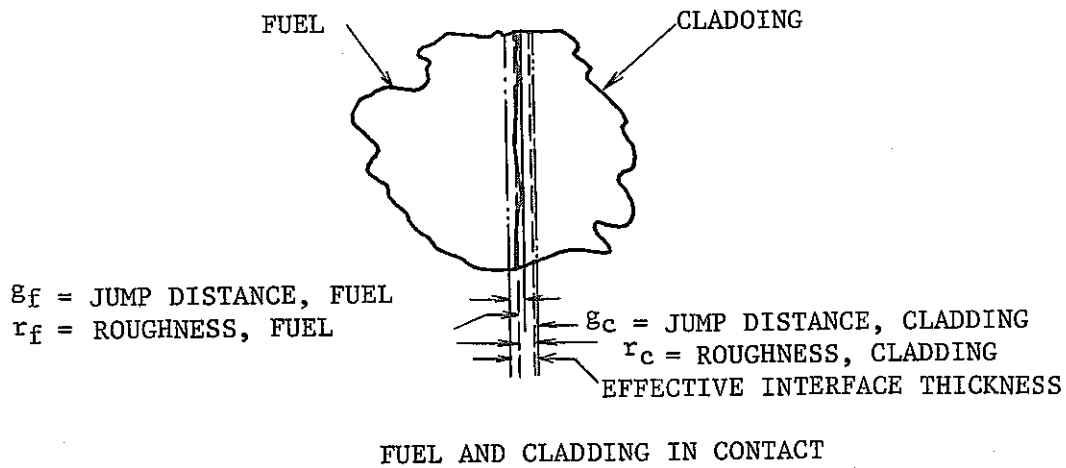
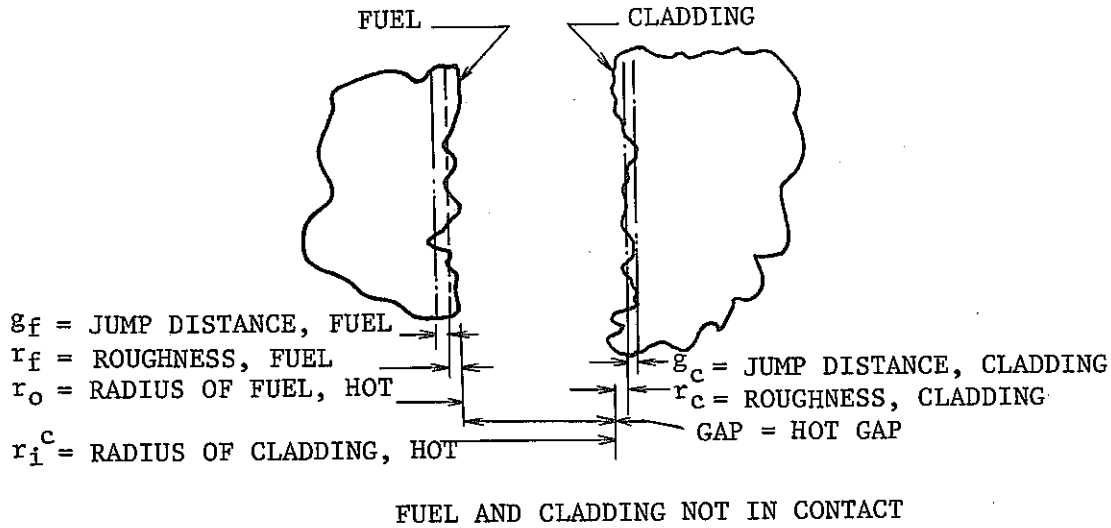


FIGURE 11. Fuel-Cladding Heat Transfer Schematic

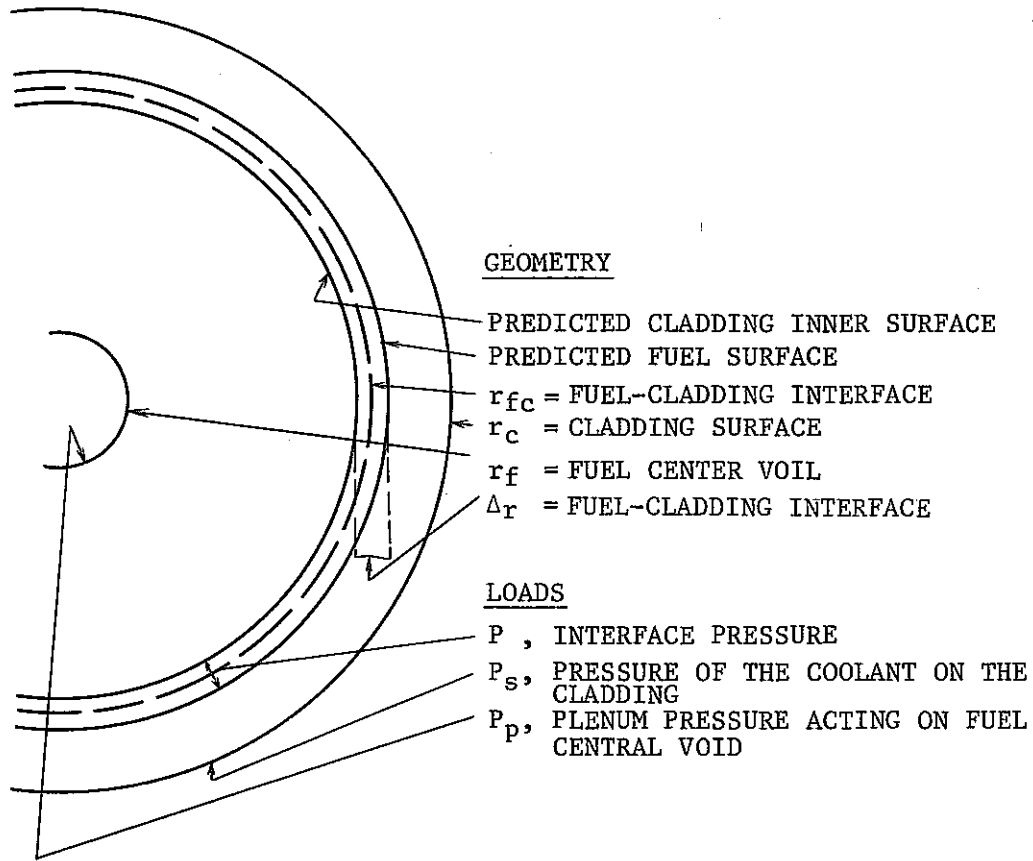


FIGURE 12. Elastic Fuel-Cladding Mechanical Interaction Schematic

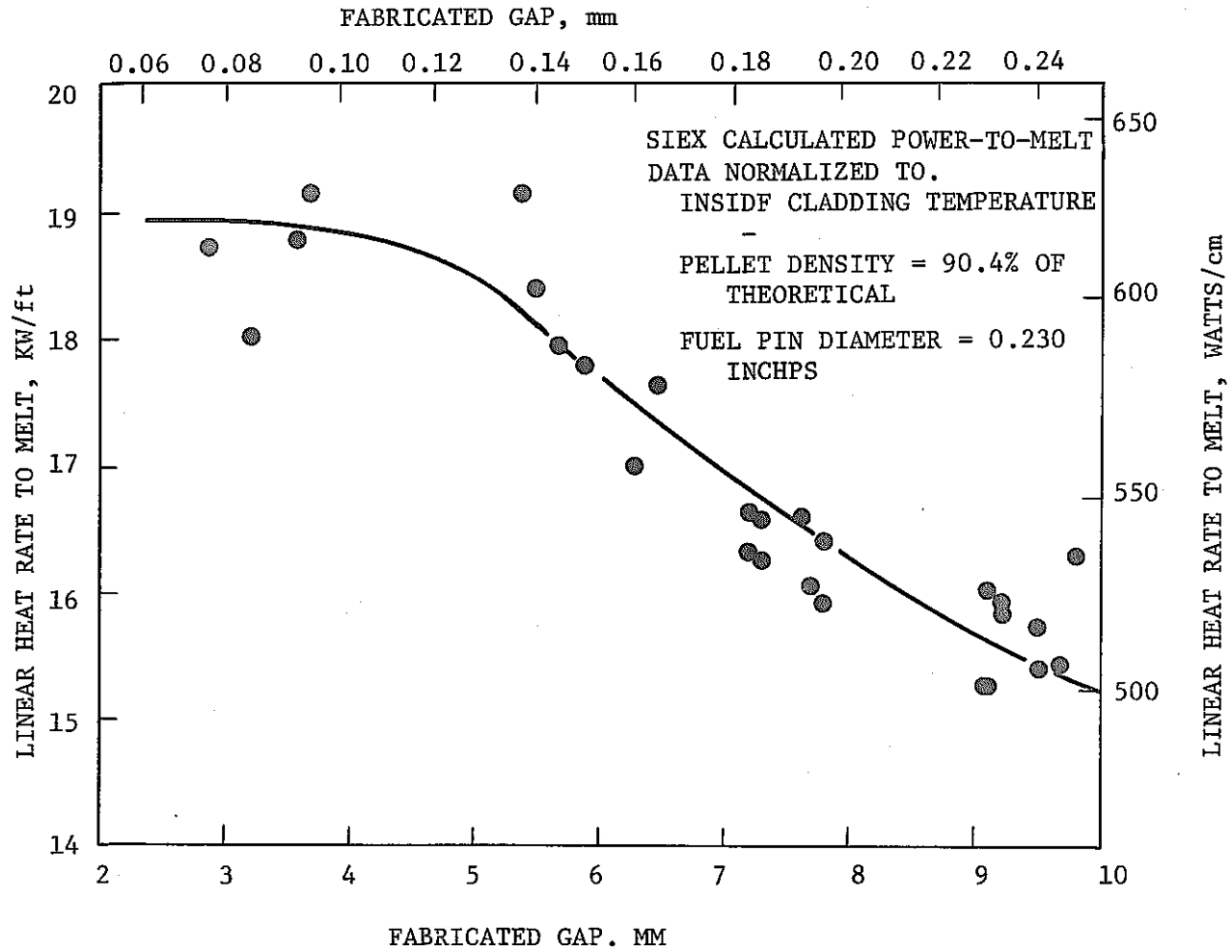


FIGURE 13. SIEX Predicted Linear Heat Rate to Incipient Melt

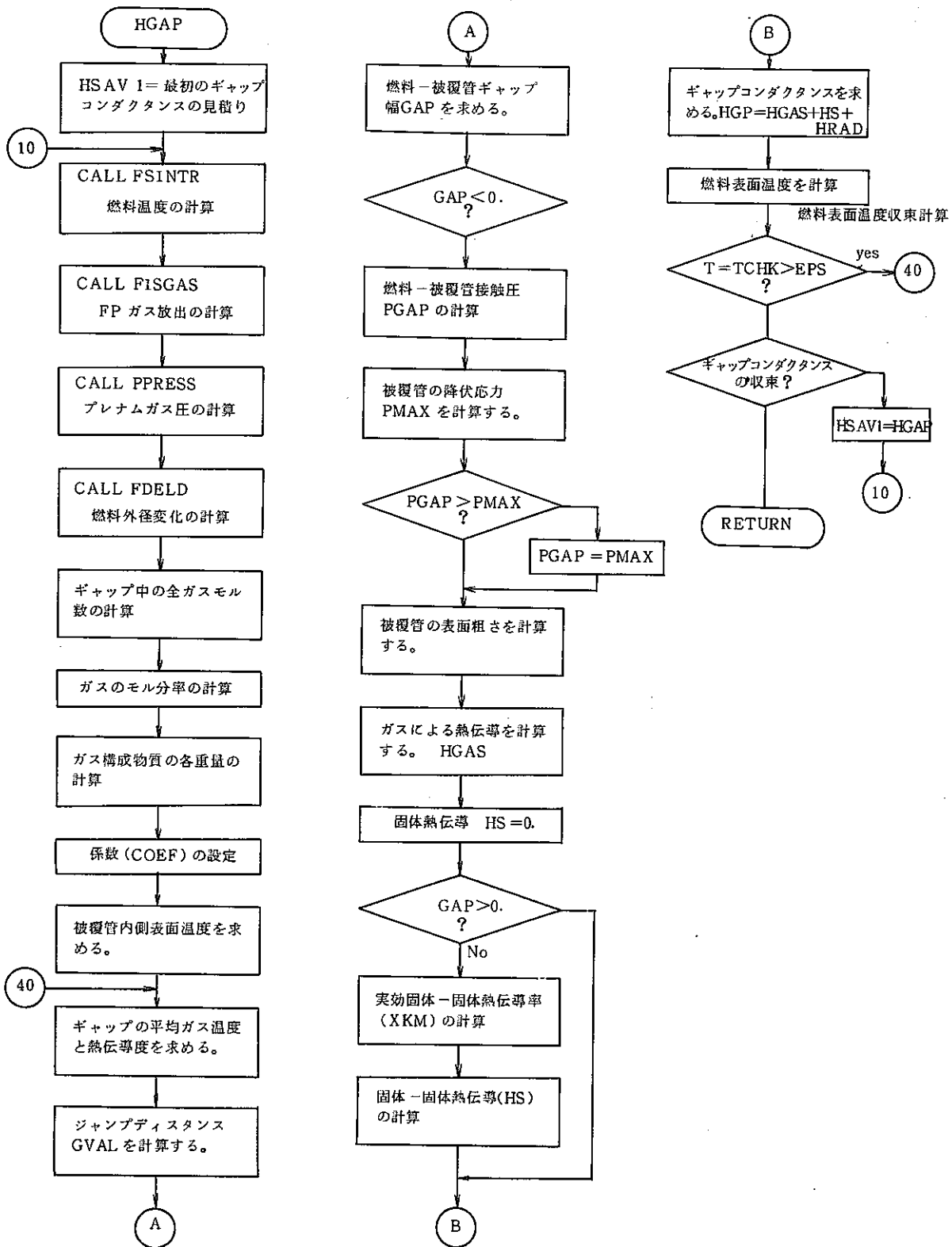


Figure 14 HGAP フローチャート

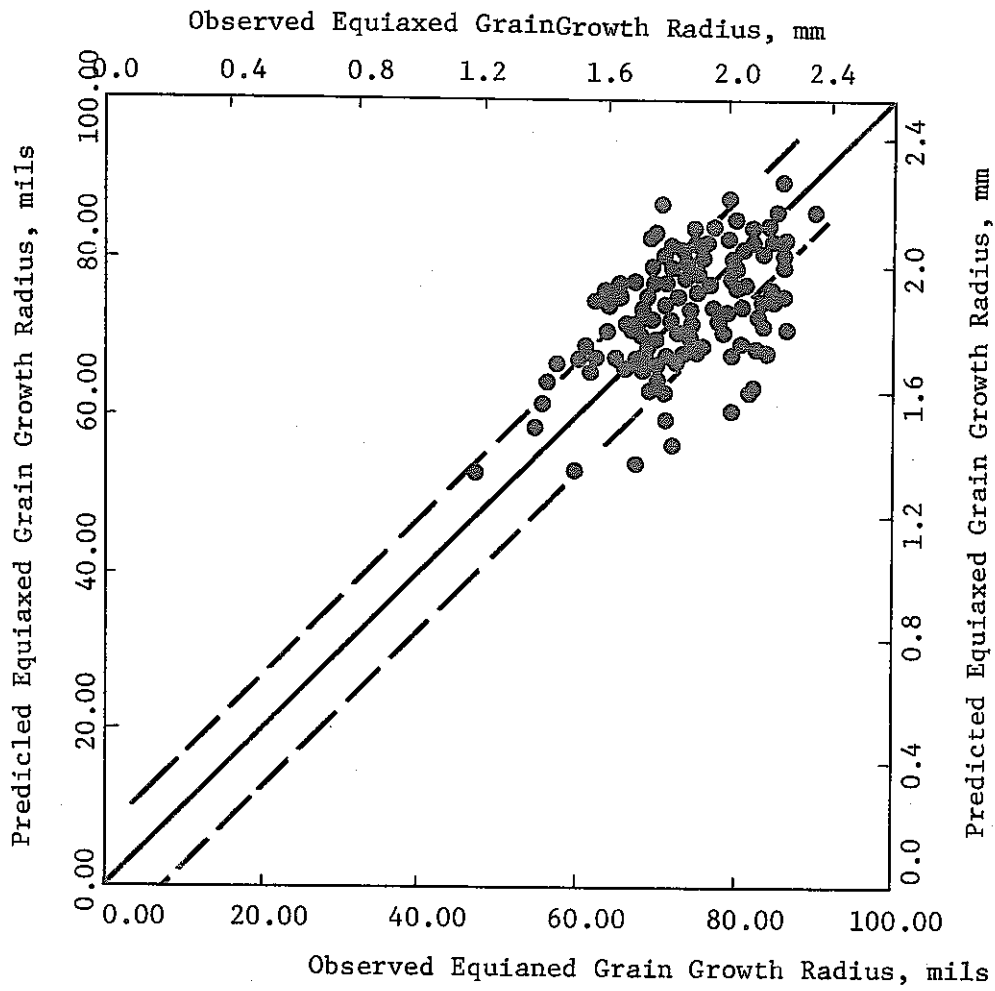


FIGURE 15. Equiaxed Grain Growth Correlation

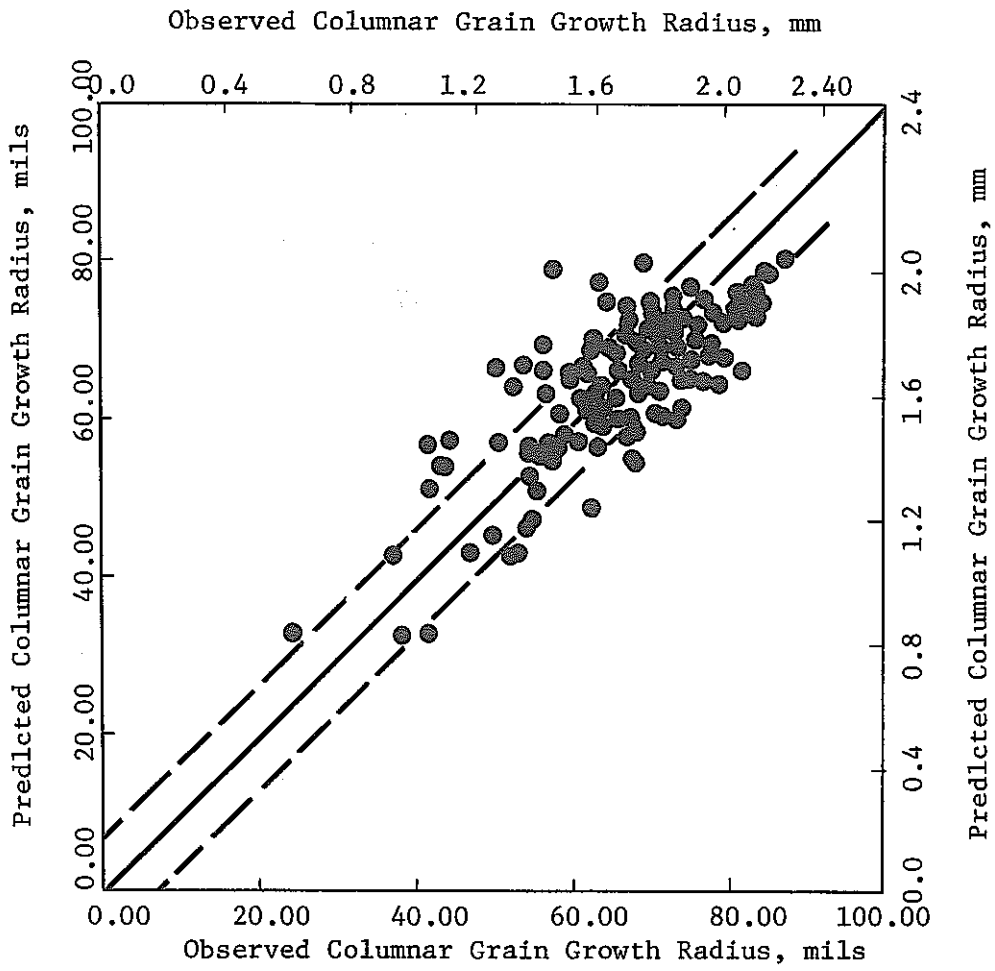


FIGURE 16. Columnar Grain Growth Correlation

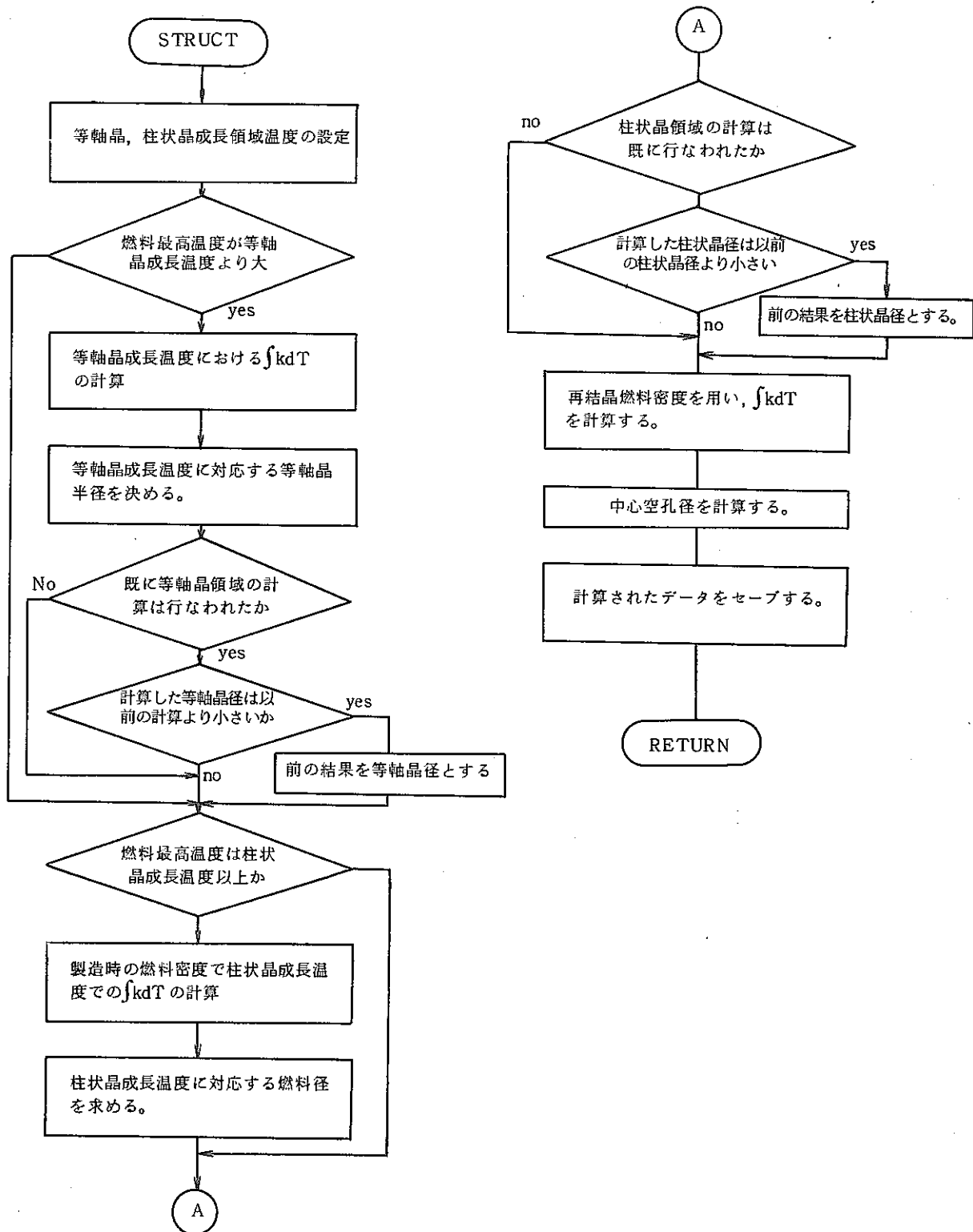


Figure 17 STRUCT フローチャート

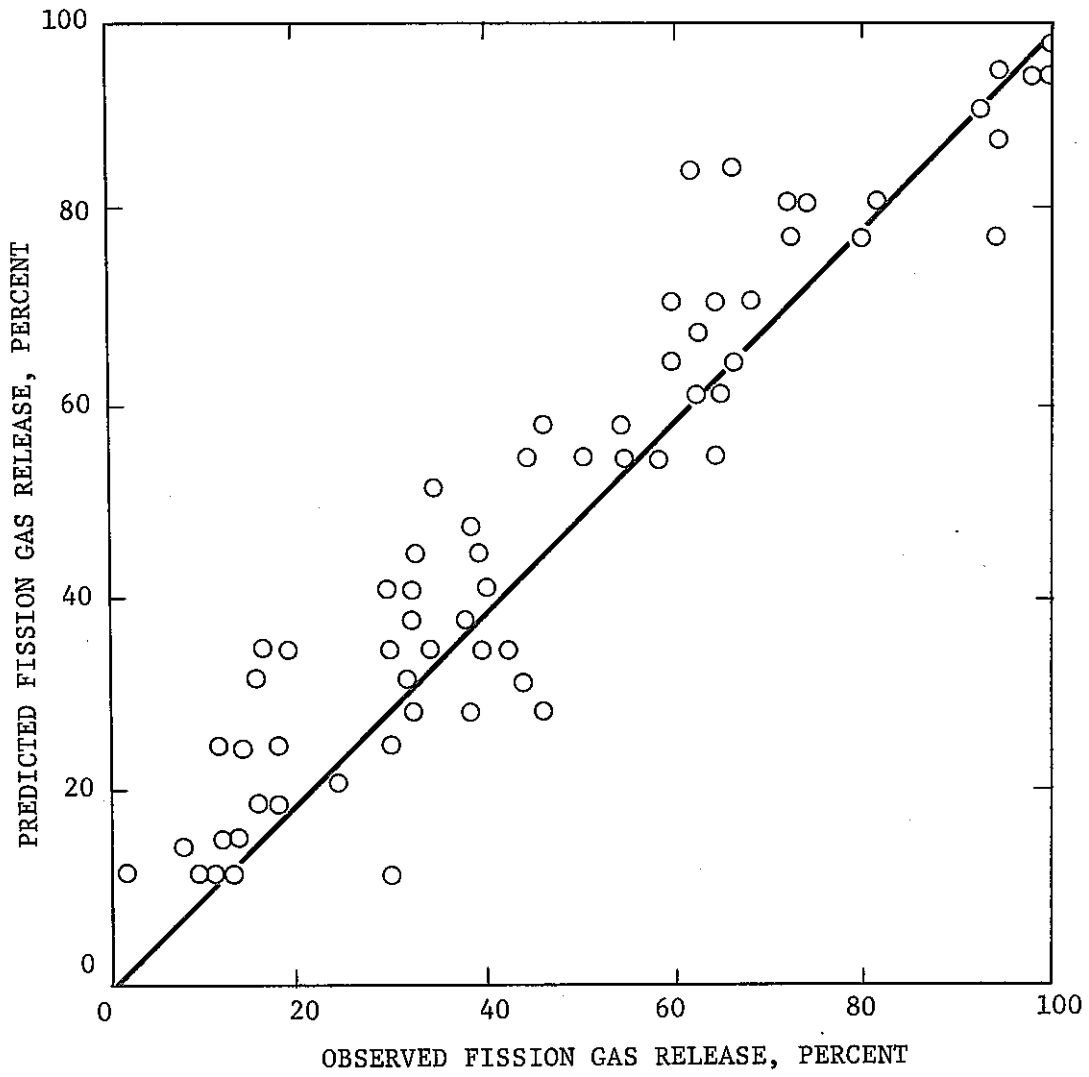


FIGURE 18. Fission Gas Release Correlation

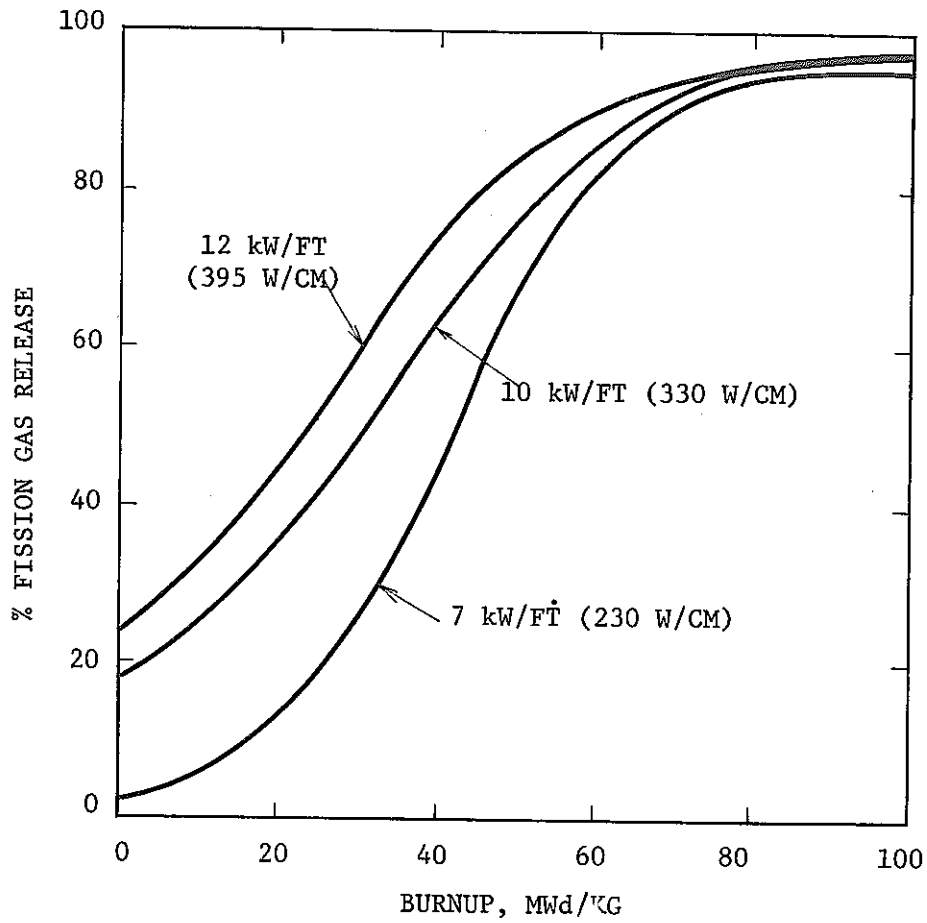


FIGURE 19. Fission Gas Release vs. Burnup

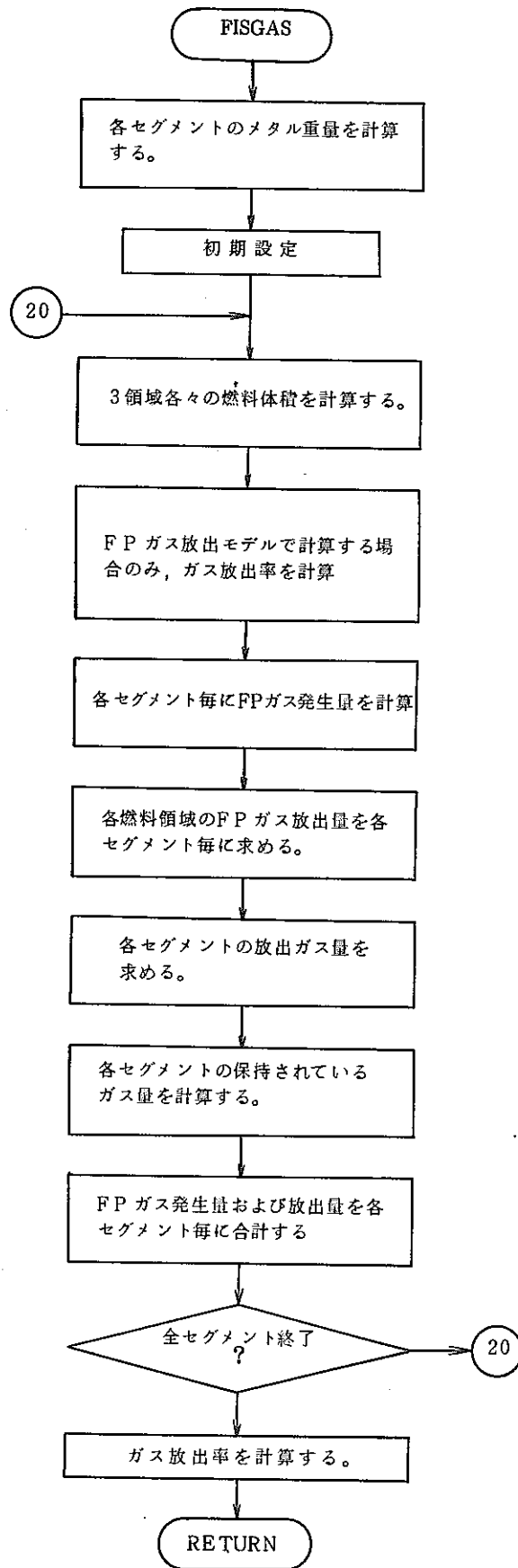


Figure 20 FISGASフローチャート

APPENDIX A GLOSSARY

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output
α^c		被覆管平均熱膨張係数 $\alpha^c = \alpha_o^c + \alpha_T^c T$	cm/cm-°C	in/in-°F
α_o^c	ALPHAO	被覆管平均熱膨張係数の定数部分	cm/cm-°C	in/in-°F
α_T^c	ALPHAS	被覆管平均熱膨張係数の温度比例部分	cm/cm-°C ²	in/in-°F ²
B		部分燃焼度	MWd/kgM	MWd/kgM
	BU(I)	セグメント i の燃焼度	MWd/MTM	MWd/MTM
	BUI(I)	セグメント i の燃焼度増分	MWd/MTM	MWd/MTM
	CCPGM	製造時燃料の吸着ガス量	cc/gm of oxide	cm/gm of oxide
r_i^c	CLIDT(I)	被覆管内側温度	°C	°F
r_o^c	CLODT(I)	“ 外側温度	°C	°F
a	COEF	補正係数	---	---
K^c	CK	被覆管熱伝導度	w/cm-°C	Btu/hr-ft-°F
M_p	CMF	冷却材流量	gm/sec	lb/hr
G'	COLDSP(I)	燃料-被覆管径方向ギャップ (コールド時)	cm	inches
	CRATIO(L)	冷却材流量のタイムステップごとの変化割合	---	---
t	CT	被覆管肉厚	cm	inches
k_i	COM(K)	ガス成分の熱伝導度	W/cm-°C	Btu/hr-ft-°F
C_p	CP	冷却材比熱	W-sec/gm-°C	Btu/lb-°F
C	Cr	サイクル数	---	---
	DENHI	柱状晶領域燃料理論密度	---	---
	DENLO	製造時燃料理論密度	---	---
$\% \Delta V/V_c$	DELTAD(I)	被覆管照射スウェリング率	percent	percent

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output Units
	DISH	ディッシュの燃料全体に占める割合	---	---
r_f'	DFSWEL(I)	ホットでの燃料半径	cm	inches
	DP	被覆管外径	cm	inches
r_c'	DPSWEL(I)	ホット時の被覆管外径	cm	inches
	E	軸方向出力分布の外挿距離	cm	inches
E_c		被覆管ヤング率	dynes/cm ²	lb/in ²
E_f		燃料ヤング率	dynes/cm ²	lb/in ²
	EPL	実効プレナム長さ	cm	inches
	EFPD	EFPD	EFPD	EFPD
V	EPV	実効プレナムボリューム	cc	cc
P_e	EXTERP	被覆管への外部圧力	dynes/cm ²	lb/in ²
	FD	燃料ペレット直径	cm	inches
	FLEN	燃料カラム長	cm	in
ϕ^t	FLUENCE(I)	軸方向ノードにおけるフルエンス ($E > 0.1 \text{ MeV}$)	Neutrons/cm ²	Neutrons/cm ²
	FLUNCI(I)	各軸方向ノードのフルエンス	Neutrons/cm ²	Neutrons/cm ²
	FN	ヘリウム、水素以外の燃料吸着ガスの割合。ガスは窒素として計算する。	---	---
G		製造時燃料・被覆管ギャップ	cm	inches
X_i	GMOL(K)	ギャップ中の各ガス成分のモル数	Moles or molar fraction	Moles
g	GVAL	燃料-被覆管ギャップコンダクタンス計算でのジャンプデイスタンス	cm	inches
H	HF	被覆管と冷却材の熱伝達係数	W/cm ² -°C	Btu/hr-ft ² -°F

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output Units
	HG	燃料-被覆管熱伝達係数入力 一定値	W/cm ² -°C	Btu/hr-ft ² -°F
H _{gas}	HGAS	ギャップコンダクタンスの中 のギャップガスに依存する部 分	W/cm ² -°C	Btu/hr-ft ² -°F
h	HIGHT	燃料セグメント長さ	cm	inches
	HGP(I)	燃料-被覆管ギャップコンダ クタンス	W/cm ² -°C	Btu/hr-ft ² -°F
C	HG 1	ギャップコンダクタンスコリ レーション係数	--	--
	HG 2	同上	--	--
A	HG 3	同上	--	--
H _s	HS	ギャップコンダクタンス中の 放射伝熱に依存する部分	W/cm ² -°C	Btu/hr-ft ² -°F
H _r	HR	ギャップコンダクタンス中の 固体-固体伝熱に依存する部 分	W/cm ² -°C	Btu/hr-ft ² -°F
	ITAB 1	出力オプション- FP ガス放 出出力の選択	--	--
	ITAB 2	出力オプション-形状変化	--	--
	ITAB 3	出力オプション-ギャップコ ンダクタンス計算	--	--
	ITAB 4	出力オプション-被覆管弾性 応力計算	--	--
K ^f		燃料熱伝導度	W/cm-°C	Btu/hr-ft-°F
	KRFIL	内封ガス中のクリプトンのパ ーセント	--	--
q _i	P(I)	セグメント i の線出力	W/cm	kW/ft
	PBU	ピーク燃焼度	MWd/MTM	MWd/MTM

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output Units
	PFLUX	ピーク中性子フラックス (0.1MeV以上)	Neutrons/ cm ² -sec	Nuetrons/cm ² sec
P	PGAP	燃料と被覆管の接触圧	dynes/cm ²	lb/in. ²
	PGR	FPガス放出率	Percent	Percent
P _p	PLENP	プレナム圧力, 燃料ボイド圧 力	dynes/cm ²	lb/in. ²
	PM	ピーク線出力	W/cm	kW/ft
ν ^c	PNU	被覆管ポイソン比	---	---
ν _f		燃料ポイソン比	---	---
	PPM	燃料中の水蒸気量	ppm	ppm
	PRATIO(K)	タイム間隔ごとの出力比	---	---
q	PTERM	発熱密度-未変化燃料	W/cm ³	Btu/ft ³ -hr
	PU	Pu-239, Pu-241の燃料 (金属)の割合	---	---
r	R(L)	温度計算のための径方向ノ ード	cm	inches
r _b	RBX(I)	柱状晶成長半径	cm	inches
r _c	RCX(I)	中心空孔半径(照討による中 心空孔)	cm	inches
	RETFG(I)	FPガス保持率	cc/gm of oxide	cc/gm of oxide
r _e	REX(I)	等軸晶成長半径	cm	inches
r _o ^c		被覆管外径	cm	inches
r _i ^c	RIDP	被覆管内側半径	cm	inches
	RISWEL(I)	ホット時の被覆管内側半径	cm	inches
r _m	RM	製造時中心空孔半径	cm	inches
	RMELT(I)	燃料熔融範囲	cm	inches
r _o	RO	燃料外半径	cm	inches
	RT(J,I)	径および軸方向燃料温度分布	°C	°F

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output Units
S(r)	S	半径 r で推定される f/kdT の値	W/cm	Btu/hr-ft
	SEGNUM	軸方向セグメント数	---	---
	STEPS	計算および出力の時間間隔数	---	---
	TB	入力で与えられる柱状晶成長 温度	℃	℃
T _b	TC(I)	燃料最高温度	℃	°F
	TCG(I)	柱状晶成長温度	℃	°F
	TCL(I)	未組織変化状態での燃料 最高温度	℃	°F
T _c	TCOOL(I)	冷却材温度	℃	°F
	TD	燃料理論密度	gm/cc	gm/cc
T _e	TEG(I)	等軸晶成長温度	℃	℃
	TEMP 2	入力で与えられる等軸晶成長 温度	℃	℃
	TI	冷却材入口温度	℃	°F
T _m	TIINCR(L)	計算または出力に使われる時 間増分	Equiv. full power days	Equiv. full power days
	TBAR	燃料-被覆管ギャップ中のガ ス平均温度	℃	°F
	TMSWC	被覆管の材質を指示するイン ディケーター	---	---
	TMTM	燃料カラム中の金属としての 燃料の重量	Metric ton	Metric ton
V _r	TOTFGR	放出した FP ガスの全体積	cc @ STP	cc @ STP
	TVFGR(I)	各軸方向セグメントの FP ガ ス放出量	cc @ STP	cc @ STP
r _f	TZ	燃料表面温度	℃	°F

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output Units
	U ₂₃₅	U-235の燃料中の金属換算 での割合	--	--
	VFG(I)	各軸方向セグメントのFPガ ス発生量	cc θ STP	
	VFGR(K,I)	各軸方向セグメント各燃料領 域でのFPガス放出量	cc θ STP	cc θ STP
V _f	VOFG	封入ガス量	cc θ STP	cc θ STP
	VOID	製造時燃料中心空孔直径	cm	inches
V _s	VSG	水蒸気を除く燃料内の吸着ガ ス量	cm θ STP	cc θ STP
V _w	VWV	燃料中の水蒸気量	cc θ STP	cc θ STP
\bar{W}	WBAR	燃料-被覆管ギャップに依存 するガスの平均分子量	gm/mole	gm/mole
	X(I)	各軸方向燃料中心のボトムか らの距離	cm	inches
	XEFIL	封入ガスにおけるXeのパー セント	--	--
K _s	XKM	実効固体-固体熱伝導率	W/cm-°C	Btu/hr-ft-°F
\bar{K}_m	XKMIX	燃料-被覆管ギャップ中のガ ス熱伝導率	W/cm-°C	Btu/hr-ft-°F
Y			dynes/cm ²	lb/in ²
E _o	YMOD0	被覆管のヤング率で温度に依 存しない部分の係数	dynes/cm ²	lb/in ²
E _t	YMODS	被覆管のヤング率で温度に依 存する(1次関数)部分の係 数	dynes/cm ² -°C	lb/in ² -°F
F _c	Z1	柱状晶成長領域からのFPガス 放出の割合	--	--

Symbol	FORTTRAN Equivalent	Description	Code Units	Input/Output Units
F_e	Z 2	等軸晶成長領域からのFPガス 放出の割合	--	--
F_u	Z 3	未組織変化領域からのFPガス 放出の割合	--	--

APPENDIX-B INPUT PARAMETERS USED FOR THIS ANALYSIS

PNC SX 出力リスト例	DESCRIPTION	NAME	VALUE
**	ACTIVE FUEL COLUMN LENGTH	FLEN	3.4290E+01 CM
**	EXTRAPOLATION DISTANCE	E	0.0 CM
	FUEL DIAMETER	FD	4.9784E-01 CM
	FUEL CENTRAL ANNULUS DIAMETER	VOID	0.0 CM
	PIN DIAMETER	DP	5.8420E-01 CM
	CLADDING THICKNESS	CT	3.8100E-02 CM
	MAXIMUM PIN HEATING RATE	PM	5.1496E+02 W/CM
	COOLANT MASS FLOW RATE	CMF	5.6500E+01 G/SEC
	COOLANT SPECIFIC HEAT	CP	1.2770E+00 JUUL/G-DEG C
	FILM COEFFICIENT	HF	1.7028E+01 W/CM**2-DEG C
	GAP COEFFICIENT	HG	5.6760E-01 W/CM**2-DEG C
**	CLADDING CONDUCTIVITY	CK	0.0 W/CM-DEG-C
	INLET COOLANT TEMPERATURE	TI	3.7100E+02 DEG C
**	TEMP. AT COLUMNAR (SINTERING) BOUNDARY	TB	2.1440E+03 DEG C
**	TEMP. AT EQUIAXED GRAIN BOUNDARY	TEMP2	1.6500E+03 DEG C
	FRACTION OF THEORETICAL DENSITY-UNSIPTRO	DENLO	9.0400E-01
	FRACTION OF THEORETICAL DENSITY-SINTERED	DENHI	9.8000E-01
	FUEL THEORETICAL DENSITY	TD	1.1000E+01 GM/CC
**	FRACTION OF FUEL VOLUME OCCUPIED BY DISH	DISH	1.0000E-02
**	FRACTION OF METAL WHICH IS PU239 + PU241	PU	1.9270E-01
**	FRACTION OF METAL WHICH IS URANIUM 235	U235	6.1750E-01
	NUMBER OF AXIAL SEGMENTS	SEGNUM	1.0000E+01
**	PEAK BURN UP	PBU	-1.0000E+01 MW0/HTH
**	OPERATING TIME-EFFECTIVE FULL POWER DAYS	EFPD	2.0000E-01 DAYS
**	NUMBER OF CALCULATIONS/PRINTOUTS	STEPS	-2.0000E+00
**	FISSION GAS RELEASE - COLUMNAR ZONE	Z1	1.0000E+00 FRACTION
**	FISSION GAS RELEASE - EQUIAXED ZONE	Z2	1.0000E+00 FRACTION
**	FISSION GAS RELEASE - UNRESTRUCTURED ZONE	Z3	-1.0000E+00 FRACTION
	SORBED GAS PER GRAM OF FUEL	CCPGM	2.2000E-02 CC/GM
**	FRACTION OF SORBED GAS WHICH IS NITROGEN	FN	6.1000E-01
	PARTS PER MILLION WATER VAPOR	PPM	1.1000E+01
	EFFECTIVE PLENUM LENGTH	EPL	1.7762E+01 CM
	PERCENT OF XENON IN THE FILL GAS	XEFIL	0.0
	PERCENT OF KRYPTON IN THE FILL GAS	KRFIL	0.0
**	COEF LINEAR EXPANSION - INTERCEPT	ALPHA0	1.6200E-05 CM/CM-DEG C
**	COEF LINEAR EXPANSION - SLOPE	ALPHAS	3.7908E-09 CM/CM-(DEG-C)**2
**	YOUNGS MODULUS - INTERCEPT	YMOD0	2.1655E+06 KG/CM**2
**	YOUNGS MODULUS - SLOPE	YMODS	-9.3610E+02 KG/CM**2-DEG C
**	POISSONS RATIO	PNU	3.0000E-01
	PEAK FLUX (ENERGY.GT.0.1 MEV)	PFLUX	2.0000E+15 NEUT/CM**2-SEC
	MATERIAL (1=ANNEALED TYPE 304 SS 2=ANNEALED TYPE 316 SS 3=20% CW TYPE 316 SS)	TMSWC	3.0000E+00
	EXTERNAL PRESSURE	EXTERP	2.4610E+00 KG/CM**2
	FISSION GAS RELEASE/PLENUM PRESS. OPTION	ITAB1	1.0000E+00 1=CALC 0=BYPASS
	PIN DELTA D/D OPTION	ITAB2	1.0000E+00 1=CALC 0=BYPASS
	HOT GAP COEFFICIENT OPTION	ITAB3	1.0000E+00 1=CALC 0=HG FROM ACTIVE TS USLD
	ELASTIC STRESS OPTION	ITAB4	1.0000E+00 1=CALC 0=BYPASS
	TIME STEP FOR THE START OF UPSET OPTION	STEPST	2.5000E+01
	MODEL OPTION: 0=MELT/K-HED, 1=MELT/K-GE, 2=DUTT/K-HED, 3=DUTT/K-GE	KEYMOD	1.0000E+00
	CALCOMP OPTION, 1=ON	MTOUT	0.0

--- SUMMARY TABULATION OF PIN POWER AND COOLANT FLOW RATE VERSUS TIME INCREMENT FOR THIS ANALYSIS ---

TIMESTEP	ELAPSED TIME WITHIN STEP DAYS(EFPD)	ANALYSIS CUMULATIVE TIME DAYS(EFPD)	TIMESTEP POWER RATIO TO INPUT PM (RATIO)	TIMESTEP POWER W/CM	TIMESTEP FLOW RATIO TO INPUT CMF (RATIO)	TIMESTEP COOLANT FLOWRATE G/SEC	NUMBER OF POWER CYCLES
1	0.2	0.2	1.00	515.0	1.00	56.50	1
2	0.0	0.2	1.15	590.6	1.00	56.50	0

EFPD 0.0 PEAK BURN UP 0.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

PAGE 2

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOTTOM OF FUEL, CM	COOLANT TEMP, DEG C	CLAD OD TEMP, DEG C	CLAD ID TEMP, DEG C	FUEL OUTER SURE TEMP, DEG C	RESTRUC FUEL INNER SURFACE TEMP, DEG C	SEGMENT POWER, W/CM	FUEL-CLAD GAP COEF, W/CM**2-DEG C
1	1.714	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
2	5.143	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
3	8.572	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
4	12.001	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
5	15.430	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
6	18.859	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
7	22.288	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
8	25.717	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
9	29.146	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
10	32.575	376.	376.	376.	376.	381.	0.10	0.2479
TOP	34.290	376.	376.	376.			0.10	

EFPD 0.0 PEAK BURN UP 0.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

PAGE 3

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOTTOM OF FUEL, CM	FUEL EQUIAXED ZONE RADIUS, CM	EQUIAXED TEMP, DEG C	FUEL COLUMNAR ZONE RADIUS, CM	COLUMNAR TEMP, DEG C	RADIUS OF MELTED FUEL, CM	FUEL CENTRAL VOID RADIUS, CM
1	1.714	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
2	5.143	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
3	8.572	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
4	12.001	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
5	15.430	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
6	18.859	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
7	22.288	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
8	25.717	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
9	29.146	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0
10	32.575	0.0	1650.	0.0	2144.	0.0	0.0

EFPD		0.0 PEAK BURN UP		0.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT								PAGE 4	
		RADIUS (CM)											
		0.249	0.224	0.199	0.174	0.149	0.124	0.100	0.075	0.050	0.025		
		(RADIUS/OUTER RADIUS)**2											
		1.000	0.810	0.640	0.490	0.360	0.250	0.160	0.090	0.040	0.010		
SEG	CM	TEMPERATURE (DEG C)											
1	1.714	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
2	5.143	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
3	8.572	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
4	12.001	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
5	15.430	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
6	18.859	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
7	22.288	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
8	25.717	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
9	29.146	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	
10	32.575	376.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	381.	

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOT FUEL CM	GENERATED FISSION GAS CC AT STP	- - VOLUME OF FISSION GAS RELEASED (CC) - -				RETAINED FISSION GAS CC/GM UXTDE
			COLUMNAR ZONE	EQUAXED ZONE	UNREST. ZONE	TOTAL	
1	1.714	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
2	5.143	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
3	8.572	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
4	12.001	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
5	15.430	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
6	18.859	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
7	22.288	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
8	25.717	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
9	29.146	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001
10	32.575	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.001

PERCENT FISSION GAS RELEASED	0.0
VOLUME OF RELEASED FISSION GAS	0.0 (CC AT STP)
VOLUME OF SORBED GAS	1.45 (CC AT STP)
VOLUME OF WATER VAPOR	1.35 (CC AT STP)
EFFECTIVE PLENUM VOLUME	3.60 (CC AT 20 DEG C)
VOLUME OF FILL GAS	3.35 (CC AT STP)
PLENUM PRESSURE	3.163 (KG/CM**2)
EXTERNAL PRESSURE	2.461 (KG/CM**2)
MOLES OF HELIUM	1.50E-04
MOLES OF XENDN	0.0
MOLES OF KRYPTON	0.0
MOLES OF NITROGEN	3.94E-05
MOLES OF ARGON	6.46E-07

- 113 -

PNC TN952 80-01

EFPD 0.0 PEAK BURN UP 0.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT PAGE 6

AXIAL SEGMENT NUMBER	FLUENCE NEUT/CM**2	CLADDING SWELLING, PERCENT	CLAD OUTER RADIUS,HOT CM	FUEL OUTER RADIUS,HOT CM	CLAD INNER RADIUS,HOT CM	FUEL-CLAD HOT GAP CM	FUEL-CLAD COLD GAP CM	FUEL/CLADDING GAP CONDUCTANCE W/CM**2-DEG C			
								HGAP	HGAS	HSOL	HRAD
1	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
2	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
3	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
4	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
5	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
6	0.0		0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
7	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
8	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
9	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
10	0.0	0.0	0.2939	0.2497	0.2556	0.00594	0.00508	0.2479	0.2430	0.0	0.0046
11	0.0	0.0	0.2939								

EFPD 0.0 PEAK BURN UP 0.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

CLADDING STRESS DISTRIBUTIONS(KG/CM**2)

SEG	--- INSIDE STRESS ---			--- OUTSIDE STRESS ---		
	TANGENTIAL	AXIAL	EFFECTIVE	TANGENTIAL	AXIAL	EFFECTIVE
1	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
2	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
3	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
4	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
5	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
6	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
7	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
8	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
9	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
10	2.	-1.	5.	2.	0.	4.
11	2.	-1.	5.	2.	0.	4.

EFPD 0.17 PEAK BURN UP 53.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT PAGE 8

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOTTOM OF FUEL, CM	COOLANT TEMP, DEG C	CLAD OD TEMP, DEG C	CLAD ID TEMP, DEG C	FUEL OUTER SURE TEMP, DEG C	RESTRUC FUEL INNER SURFACE TEMP, DEG C	SEGMENT POWER, W/CM	FUEL-CLAD GAP COEF, W/CM#2-DEG C
1	1.714	381.	394.	444.	836.	2307.	421.75	0.6754
2	5.143	402.	416.	470.	860.	2410.	458.31	0.7369
3	8.572	424.	440.	496.	882.	2494.	489.73	0.7944
4	12.001	448.	464.	522.	904.	2550.	508.78	0.8329
5	15.430	472.	489.	546.	926.	2577.	514.96	0.8481
6	18.859	497.	513.	569.	948.	2576.	508.27	0.8392
7	22.288	520.	536.	589.	968.	2544.	486.18	0.8068
8	25.717	543.	558.	607.	984.	2493.	460.37	0.7640
9	29.146	564.	578.	622.	996.	2424.	425.87	0.7146
10	32.575	583.	596.	637.	1004.	2352.	392.40	0.6700
TOP	34.290	593.	605.	645.			386.73	

EFPD 0.17 PEAK BURN UP 53.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

PAGE 9

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOTTOM OF FUEL, CM	FUEL EQUIAXED ZONE RADIUS, CM	EQUIAXED TEMP, DEG C	FUEL COLUMNAR ZONE RADIUS, CM	COLUMNAR TEMP, DEG C	RADIUS OF MELTED FUEL, CM	FUEL CENTRAL VOID RADIUS, CM
1	1.714	0.1728	1650.	0.0996	2144.	0.0	0.0277
2	5.143	0.1827	1650.	0.1226	2144.	0.0	0.0342
3	8.572	0.1899	1650.	0.1375	2144.	0.0	0.0383
4	12.001	0.1944	1650.	0.1459	2144.	0.0	0.0406
5	15.430	0.1971	1650.	0.1501	2144.	0.0	0.0418
6	18.859	0.1983	1650.	0.1509	2144.	0.0	0.0420
7	22.288	0.1977	1650.	0.1479	2144.	0.0	0.0412
8	25.717	0.1958	1650.	0.1416	2144.	0.0	0.0394
9	29.146	0.1920	1650.	0.1309	2144.	0.0	0.0365
10	32.575	0.1873	1650.	0.1169	2144.	0.0	0.0320

EFPD		0.17 PEAK BURN UP									
		53.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT									
		PAGE 10									
		RADIUS (CM)									
		0.249	0.224	0.199	0.174	0.149	0.124	0.100	0.075	0.050	0.025
		(RADIUS/OUTER RADIUS)**2									
		1.000	0.810	0.640	0.490	0.360	0.250	0.160	0.090	0.040	0.010
SEG	CM	TEMPERATURE (DEG C)									
1	1.714	836.	1122.	1393.	1637.	1843.	2012.	2143.	2233.	2287.	2367.
2	5.143	860.	1173.	1471.	1734.	1954.	2131.	2259.	2348.	2403.	2410.
3	8.572	882.	1221.	1541.	1820.	2049.	2227.	2354.	2442.	2484.	2494.
4	12.001	904.	1259.	1592.	1879.	2114.	2288.	2417.	2502.	2546.	2550.
5	15.430	926.	1288.	1624.	1913.	2149.	2320.	2447.	2532.	2574.	2577.
6	18.859	948.	1307.	1639.	1923.	2155.	2324.	2447.	2532.	2573.	2576.
7	22.288	968.	1313.	1632.	1906.	2131.	2296.	2419.	2499.	2541.	2544.
8	25.717	984.	1311.	1612.	1871.	2085.	2248.	2367.	2447.	2483.	2493.
9	29.146	996.	1298.	1577.	1819.	2020.	2179.	2293.	2373.	2417.	2424.
10	32.575	1004.	1282.	1539.	1763.	1951.	2103.	2217.	2294.	2341.	2352.

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOT FUEL CM	GENERATED FISSION GAS CC AT STP	VOLUME OF FISSON GAS RELEASED (CC)				RETAINED FISSION GAS CC/GM OXIDE
			COLUMNAR ZONE	EQUIAXED ZONE	UNREST. ZONE	TOTAL	
1	1.714	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
2	5.143	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
3	8.572	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
4	12.001	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
5	15.430	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
6	18.859	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
7	22.288	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
8	25.717	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
9	29.146	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
10	32.575	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001

PERCENT FISSON GAS RELEASED	-14.11
VOLUME OF RELEASED FISSON GAS	-0.01 (CC AT STP)
VOLUME OF SORBED GAS	1.45 (CC AT STP)
VOLUME OF WATER VAPOR	1.35 (CC AT STP)
EFFECTIVE PLENUM VOLUME	3.60 (CC AT 20 DEG C)
VOLUME OF FILL GAS	3.35 (CC AT STP)
PLENUM PRESSURE	4.556 (KG/CM ²)
EXTERNAL PRESSURE	2.461 (KG/CM ²)
MOLES OF HELIUM	1.50E-04
MOLES OF XENON	-3.81E-07
MOLES OF KRYPTON	-7.12E-08
MOLES OF NITROGEN	3.94E-05
MOLES OF ARGON	6.46E-07

- 119 -

PNC TN952 80-01

EFPD 0.17 PEAK BURN UP 53.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT PAGE 12

AXIAL SEGMENT NUMBER	FLUENCE NEUT/CM**2	CLADDING SWELLING, PERCENT	CLAD OUTER RADIUS,HOT CM	FUEL OUTER RADIUS,HOT CM	CLAD INNER RADIUS,HOT CM	FUEL-CLAD HOT GAP CM	FUEL-CLAD COLD GAP CM	FUEL/CLADDING GAP CONDUCTANCE W/CM**2-DEG C			
								HGAP	HGAS	HSCL	HRAD
1	2.359E+19	9.800E-09	0.2942	0.2536	0.2558	0.00223	0.00508	0.6754	0.6612	0.0	0.0133
2	2.563E+19	5.118E-09	0.2943	0.2539	0.2559	0.00199	0.00508	0.7369	0.7218	0.0	0.0143
3	2.739E+19	9.350E-10	0.2945	0.2542	0.2560	0.00181	0.00508	0.7944	0.7736	0.0	0.0154
4	2.845E+19	1.140E-10	0.2946	0.2545	0.2562	0.00172	0.00508	0.8329	0.8160	0.0	0.0166
5	2.880E+19	3.213E-11	0.2947	0.2546	0.2563	0.00171	0.00508	0.8481	0.8300	0.0	0.0177
6	2.843E+19	1.844E-11	0.2949	0.2546	0.2564	0.00179	0.00508	0.8392	0.8198	0.0	0.0189
7	2.730E+19	1.279E-11	0.2950	0.2546	0.2565	0.00196	0.00508	0.8068	0.7559	0.0	0.0200
8	2.575E+19	8.331E-12	0.2951	0.2544	0.2566	0.00219	0.00508	0.7640	0.7417	0.0	0.0210
9	2.382E+19	4.567E-12	0.2952	0.2542	0.2567	0.00248	0.00508	0.7146	0.6915	0.0	0.0217
10	2.195E+19	2.170E-12	0.2953	0.2540	0.2568	0.00276	0.00508	0.6700	0.6470	0.0	0.0224
11	2.163E+19	1.506E-12	0.2954								

EFPD 0.17 PEAK BURN UP 53.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

CLADDING STRESS DISTRIBUTIONS(KG/CM**2)

SEG	--- INSIDE STRESS ---			--- OUTSIDE STRESS ---		
	TANGENTIAL	AXIAL	EFFECTIVE	TANGENTIAL	AXIAL	EFFECTIVE
1	-1272.	-1281.	1272.	1173.	1167.	1173.
2	-1356.	-1365.	1356.	1249.	1243.	1248.
3	-1420.	-1429.	1420.	1307.	1300.	1306.
4	-1446.	-1454.	1446.	1330.	1323.	1329.
5	-1434.	-1443.	1434.	1319.	1313.	1318.
6	-1388.	-1396.	1388.	1278.	1271.	1277.
7	-1308.	-1317.	1308.	1206.	1200.	1205.
8	-1212.	-1221.	1212.	1120.	1114.	1119.
9	-1104.	-1112.	1103.	1022.	1016.	1021.
10	-1002.	-1010.	1002.	930.	924.	929.
11	-980.	-988.	980.	910.	904.	910.

EFPD 0.18 PEAK BURN UP 57.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

PAGE 14

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOTTOM OF FUEL, CM	COOLANT TEMP, DEG C	CLAD ID TEMP, DEG C	CLAD ID TEMP, DEG C	FUEL OUTER SURE TEMP, DEG C	RESTRUC FUEL INNER SURFACE TEMP, DEG C	SEGMENT POWER, W/CM	FUEL-CLAD GAP COEF, W/CM**2-DEG C
1	1.714	382.	398.	455.	843.	2455.	433.67	0.7805
2	5.143	406.	423.	484.	866.	2562.	525.59	0.8625
3	8.572	432.	450.	514.	888.	2651.	561.62	0.9409
4	12.001	459.	478.	543.	911.	2709.	583.47	0.9923
5	15.430	487.	506.	571.	937.	2738.	590.56	1.0110
6	18.859	515.	534.	597.	963.	2738.	592.88	0.9957
7	22.288	542.	560.	620.	989.	2706.	559.85	0.9484
8	25.717	568.	585.	640.	1013.	2655.	527.96	0.8879
9	29.146	592.	608.	658.	1031.	2534.	488.39	0.8200
10	32.575	614.	629.	675.	1046.	2507.	450.00	0.7607
TOP	34.290	625.	639.	684.			443.51	

EFPD 0.18 PEAK BURN UP 57.HEDL P-19 GAP=4MILS, PN=18KW/FT

PAGE 15

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOTTOM OF FUEL, CM	FUEL EQUIAXED ZONE RADIUS, CM	EQUIAXED TEMP, DEG C	FUEL COLUMNAR ZONE RADIUS, CM	COLUMNAR TEMP, DEG C	RADIUS OF MELTED FUEL, CM	FUEL CENTRAL VOID RADIUS, CM
1	1.714	0.1851	1650.	0.1299	2144.	0.0	0.0362
2	5.143	0.1930	1650.	0.1458	2144.	0.0	0.0406
3	8.572	0.1989	1650.	0.1568	2144.	0.0	0.0437
4	12.001	0.2028	1650.	0.1634	2144.	0.0	0.0455
5	15.430	0.2053	1650.	0.1670	2144.	0.0	0.0465
6	18.859	0.2066	1650.	0.1681	2144.	0.0	0.0468
7	22.288	0.2066	1650.	0.1663	2144.	0.0	0.0463
8	25.717	0.2056	1650.	0.1623	2144.	0.0	0.0452
9	29.146	0.2033	1650.	0.1553	2144.	0.0	0.0433
10	32.575	0.2003	1650.	0.1464	2144.	0.0	0.0408

EFPD 0.18 PEAK BURN UP 57.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

		RADIUS (CM)									
		0.249	0.224	0.199	0.174	0.149	0.124	0.100	0.075	0.050	0.025
		(RADIUS/OUTER RADIUS)**2									
		1.000	0.810	0.640	0.490	0.360	0.250	0.160	0.090	0.040	0.010
SEG	CM	TEMPERATURE (DEG C)									
1	1.714	843.	1173.	1488.	1765.	1996.	2177.	2307.	2393.	2447.	2455.
2	5.143	866.	1228.	1572.	1869.	2112.	2292.	2425.	2512.	2553.	2562.
3	8.572	888.	1279.	1646.	1960.	2208.	2390.	2521.	2610.	2649.	2651.
4	12.001	911.	1321.	1702.	2024.	2271.	2454.	2587.	2671.	2701.	2709.
5	15.430	937.	1354.	1739.	2061.	2306.	2487.	2619.	2702.	2737.	2738.
6	18.859	963.	1378.	1757.	2074.	2313.	2492.	2622.	2702.	2737.	2738.
7	22.288	989.	1389.	1753.	2059.	2291.	2465.	2592.	2671.	2705.	2706.
8	25.717	1013.	1391.	1734.	2025.	2250.	2418.	2539.	2619.	2654.	2655.
9	29.146	1031.	1382.	1700.	1971.	2189.	2348.	2465.	2544.	2582.	2584.
10	32.575	1046.	1368.	1662.	1914.	2121.	2275.	2390.	2465.	2504.	2507.

AXIAL SEGMENT NUMBER	DIST FROM BOT FUEL CM	GENERATED FISSION GAS CC AT STP	VOLUME OF FISSION GAS RELEASED (CC) COLUMNAR ZONE	EQUJAXED ZONE	UNREST. ZONE	TOTAL	RETAINED FISSION GAS CC/GM OXIDE
1	1.714	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
2	5.143	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
3	8.572	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
4	12.001	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
5	15.430	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
6	18.859	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
7	22.288	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
8	25.717	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
9	29.146	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001
10	32.575	0.01	-0.00	-0.00	0.0	-0.00	0.001

PERCENT FISSION GAS RELEASED	-8.81
VOLUME OF RELEASED FISSION GAS	-0.01 (CC AT STP)
VOLUME OF SORBED GAS	1.45 (CC AT STP)
VOLUME OF WATER VAPOR	1.35 (CC AT STP)
EFFECTIVE PLENUM VOLUME	3.60 (CC AT 20 DEG C)
VOLUME OF FILL GAS	3.35 (CC AT STP)
PLENUM PRESSURE	4.769 (KG/CM**2)
EXTERNAL PRESSURE	2.461 (KG/CM**2)
MOLES OF HELIUM	1.50E-04
MOLES OF XENON	-2.55E-07
MOLES OF KRYPTON	-4.76E-08
MOLES OF NITROGEN	3.94E-05
MOLES OF ARGON	6.46E-07

EFPD 0.18 PEAK BURN UP 57.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT PAGE 1b

AXIAL SEGMENT NUMBER	FLUENCE NEUT/CM**2	CLADDING SWELLING, PERCENT	CLAD OUTER RADIUS,HOT CM	FUEL OUTER RADIUS,HOT CM	CLAD INNER RADIUS,HOT CM	FUEL-CLAD HOT GAP CM	FUEL-CLAD COLD GAP CM	FUEL/CLADDING GAP CONDUCTANCE W/CM**2-DEG C			
								HGAP	HGAS	HSOL	HVAL
1	2.506E+19	1.092E-08	0.2942	0.2541	0.2558	0.00177	0.00505	0.7805	0.7670	0.0	0.0136
2	2.723E+19	5.509E-09	0.2944	0.2544	0.2560	0.00154	0.00505	0.8625	0.8479	0.0	0.0148
3	2.910E+19	9.785E-10	0.2945	0.2548	0.2561	0.00135	0.00506	0.9409	0.9251	0.0	0.0160
4	3.023E+19	1.216E-10	0.2947	0.2550	0.2563	0.00126	0.00506	0.9923	0.9752	0.0	0.0173
5	3.060E+19	3.602E-11	0.2949	0.2551	0.2564	0.00126	0.00506	1.0110	0.9925	0.0	0.0186
6	3.020E+19	2.122E-11	0.2950	0.2552	0.2565	0.00134	0.00506	0.9957	0.9759	0.0	0.0201
7	2.901E+19	1.451E-11	0.2952	0.2552	0.2567	0.00152	0.00506	0.9484	0.9272	0.0	0.0215
8	2.735E+19	9.125E-12	0.2953	0.2550	0.2568	0.00176	0.00505	0.8879	0.8657	0.0	0.0228
9	2.530E+19	4.856E-12	0.2954	0.2548	0.2569	0.00205	0.00505	0.8200	0.7967	0.0	0.0240
10	2.332E+19	2.268E-12	0.2955	0.2546	0.2570	0.00236	0.00505	0.7607	0.7365	0.0	0.0249
11	2.298E+19	1.564E-12	0.2956								

126

EFPD 0.18 PEAK BURN UP 57.HEDL P-19 GAP=4MILS, PM=18KW/FT

PAGE 19

CLADDING STRESS DISTRIBUTIONS(KG/CM**2)

SEG	--- INSIDE STRESS ---			--- OUTSIDE STRESS ---		
	TANGENTIAL	AXIAL	EFFECTIVE	TANGENTIAL	AXIAL	EFFECTIVE
1	-1451.	-1461.	1451.	1337.	1330.	1336.
2	-1543.	-1552.	1543.	1419.	1412.	1418.
3	-1611.	-1621.	1611.	1481.	1473.	1479.
4	-1635.	-1644.	1635.	1502.	1495.	1501.
5	-1617.	-1626.	1617.	1486.	1479.	1485.
6	-1560.	-1570.	1560.	1435.	1428.	1434.
7	-1467.	-1476.	1467.	1351.	1344.	1350.
8	-1356.	-1365.	1356.	1252.	1245.	1251.
9	-1231.	-1241.	1231.	1140.	1133.	1139.
10	-1115.	-1125.	1115.	1035.	1028.	1034.
11	-1090.	-1099.	1090.	1012.	1005.	1011.

III THERM

1. はじめに
2. コードの特徴
3. プログラムの概要
4. 入力方法
5. 計算例

1. はじめに

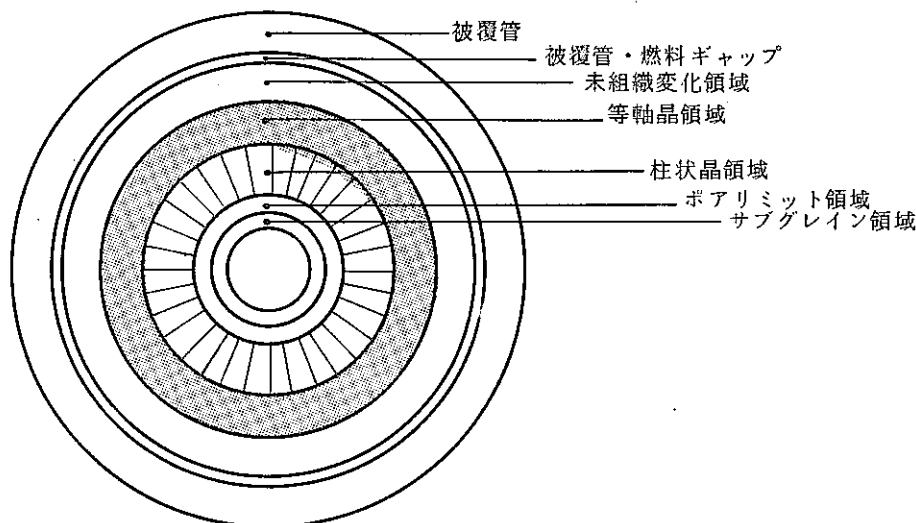
Thermコードは、燃料内の出力の depression 効果および組織変化による出力分布の変化を考慮して燃料温度を計算するコードであり、GE社で開発されたTK-PEFTコードを母体として作成されたものである。TK-PEFTコードはPEFT (Probabilistic Evaluation of Fuel Temperature ……照射中の燃料の温度や溶融率を物性値や照射条件の誤差や変動を考慮に入れて、統計学的に処理する。)コード¹⁾の燃料温度計算部を熱中性子照射燃料の解析に適用できるように独立させたものである。

本コードは、いわゆる燃料挙動解析コードと比べ、燃料の温度と組織変化を計算することが目的であるため極めて単純化したモデルを用いており、従って非常に短時間のうちに燃料温度等を計算できる。

2. コードの特徴

2-1 Thermで取扱うモデル

Thermでは、1次元の燃料モデルを取扱う。



燃料内は、次の5領域に分けて計算する。

- REGION 1 …… 未組織変化領域
 - REGION 2 …… 等軸晶領域
 - REGION 3 …… 柱状晶領域
 - REGION 4 …… ポアリミット領域
 - REGION 5 …… サブグレイン領域
- } 熔融領域

上記の各領域は、種々の照射後試験で明らかに異なる領域と認められているものであり、本コードにおいても他の多くのコードで採用されている3領域モデルの考え方（通常は柱状晶領域ま

での3領域)を計算の基本としている。

各領域の密度、O/M比等の物性値や領域境界温度を特定の値に定めることは極めて難しい問題であるが、これまでの種々の実験、解析から種々のケースについて妥当と思われる領域境界温度、燃料密度を求めた。また、同様に燃料の熱伝導率についても実験から求められ、種々の解析コードで用いられている Correlation 式を採用している。

計算は、入力された被覆管内面温度とギャップコンダクタンスから燃料表面温度を計算することから始められ、まず未組織変化領域について熱伝導方程式(後述)を解いて、等軸領域径(または境界温度)を求める。次に中心空孔径、発熱密度を補正した後、等軸晶領域径の内側が全て等軸晶領域として熱伝導方程式を計算し、柱状晶領域径(または境界温度)を求める。以下同様にして他の領域径(または境界温度)を求める。本コードでは、あらかじめ入力された領域境界温度に合致するよう領域径を求めることも、逆に領域径を入力して、領域境界温度を求めることもどちらも可能である。

本コードでは、ギャップコンダクタンスは、入力データもしくはプログラム内での計算値を使用するが、そのギャップコンダクタンスの収束計算(たとえば入力された領域境界温度から計算された境界径と比較すべき境界径とが合うようギャップコンダクタンスを変えていく。)を行うことも可能である。また、本コードの重要な機能として THERMAL 炉で見られる燃料内での出力の Depression を模擬できることを挙げる事ができる。

2-2 熱計算モデル

通常の計算では、既知の領域境界温度から対応する領域境界径を求める。この場合まず入力された被覆管内面温度とギャップコンダクタンスから燃料外径温度を求める。

$$T_{fs} = T_{cl} + \frac{q'}{\pi \cdot D_f \cdot hgap} \quad (1)$$

T_{fs} : 燃料外径温度 (°C)

T_{cl} : 被覆管内面温度 (°C)

q' : 線出力 (w/cm)

D_f : 燃料外径 (cm)

$hgap$: ギャップコンダクタンス $w/cm^2 \cdot ^\circ C$

ギャップコンダクタンスが入力されていない場合、 $hgap$ は次式で計算される。

$$hgap = 5.678 \times 10^{-4} (1000 + 0.01 B_u) \times \frac{2}{1 + 90 D_{gap}} \quad \text{燃焼度} < 10000 \quad (BTU/FT^2 \cdot h \cdot ^\circ F)$$

$$hgap = 5.678 \times 10^{-4} \times 1100 \times \frac{2}{1 + 90 D_{gap}} \quad \text{燃焼度} > 10000 \quad BTU/FT^2 \cdot h \cdot ^\circ F$$

$$\begin{aligned}
 B_u & : \text{燃焼度} && \text{BTU/FT}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°F} \\
 D_{\text{gap}} & : \text{ダイヤメトラルギャップ (cm)} && (2)
 \end{aligned}$$

IHGAPの値が1以外の値の場合、たとえば IHGAP = 6 とすると計算で求めた中心空孔径と入力値の中心空孔径とを比較し、その差がある一定値に収まるよう収束計算を行う。

領域境界温度（または径）を求める計算の基本は次の一般に用いられている方程式である。

$$\frac{d}{dr} \left(r K \frac{dT}{dr} \right) + r q'''(r) = 0 \quad (3)$$

(3)式より

$$\int_{T_1}^{T_2} K dT = - \int_{R_1}^{R_2} \left[\frac{1}{r} \int r q'''(r) dr + \frac{C}{r} \right] dr \quad (4)$$

ここで

$$C = q_i'' R_1 - \left[\int r q'''(r) dr \right] \quad (5)$$

が導かれる。

今、径方向の出力分布が次式で表わされるとすると

$$\frac{q'''(r)}{q'''(R_o)} = \sum_{i=0}^n C_i \left(\frac{r}{R_o} \right)^i \quad (R_o : \text{燃料外半径}) \quad (6)$$

(4)式は次式で表わされることになる。

$$\int_{T_{\text{region}}}^{T_{\text{next}}} K dT = \frac{q_{\text{region}}}{F_{\text{avg}}} \sum_{i=0}^n \frac{C_i (R_{\text{region}}^{i+2} - R_{\text{next}}^{i+2})}{R_o^i (i+2)^2} + C \ln \left(\frac{R_{\text{region}}}{R_{\text{next}}} \right) \quad (7)$$

ここで

$$C = \frac{q'_{\text{region}}}{2\pi} - \frac{q'''_{\text{region}}}{F_{\text{avg}}} \sum_{i=1}^n \frac{C_i R_{\text{region}}^{i+2}}{R_o^i (i+2)} \quad (8)$$

$$F_{\text{avg}} = \frac{2}{R_o^2 - R_I^2} \left[R_o^2 \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{i+2} - \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{R_o^i} \cdot \frac{R_I^{i+2}}{(i+2)} \right] \quad (9)$$

(R_I : 燃料中心空孔半径……中空ペレットの取扱も可能とした。)

なお $K(T)$ の値としては次の3式が用意されている。

ICOND=1の時 : GE Correlation 式 (GEAP-13967)

$$K(T) = 0.01169 + \frac{1}{0.06717 + \frac{0.0226(1-\rho)}{O/M - 1.90}} + 0.7214 \times 10^{-12} T^3 \quad (10)$$

ICOND=2の時 : GE New Correlation 式

$$K(T) = \left[\frac{1}{8.3233 + 0.02708T + 195.67X} + 1.157 \times 10^{-12} T^3 \right] \frac{1-P}{1+\beta P} \quad (11)$$

ICOND=3の時 : WARD Correlation 式 (HEDL-TME 75-9)

$$K(T) = \frac{1.133(1-P)}{1 + (1+10P)P} \left[\frac{1}{0.78 + 0.02935T} + 6.6 \times 10^{-13} T^3 \right] \quad (12)$$

O/M : O/M 比

ρ : 密度 T.D.

P : Porosity 割合 (1 - ρ)

X : 1 - O/M

β : Porosity Factor Ar ガスの場合 $\beta = 1.4$

He ガスの場合 $\beta = 6916 \cdot T^{-1.375}$ $1.98 \leq O/M \leq 200$

$\beta = 26275 \cdot T^{-1.615}$ $O/M < 1.98$

(7)の" region " のパラメーターは既知であるから、それをもとに" next " のパラメーターを繰返し計算で求めることができる。(最初の" region " は未組織変化領域, " next " は通常等軸晶領域となる。)

" q''' " で示される変数は、単位体積当りの発熱量であるが、(7)式から求められた R_{next} (または入力された R_{next}) と q'''_{region} から q'''_{next} は次式で求まる。

$$q'''_{next} = q'''_{region} \frac{\int_{RV_{region}}^{R_{region}} 2\pi r(r) dr}{\int_{RV_{next}}^{R_{next}} 2\pi r f(r) dr} = q'''_{region} \frac{\sum_{i=0}^n \frac{C_i (R_{next}^{i+2} - RV_{region}^{i+2})}{R_o^i (i+2)}}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i (R_{next}^{i+2} - RV_{next}^{i+2})}{R_o^i (i+2)}} \quad (13)$$

(13) 式中の" RV " で示されるパラメーターは中心空孔径を意味し、 RV_{next} は次式で計算される。

$$RV_{next} = \sqrt{R_{next}^2 - \frac{\rho_{region}}{\rho_{next}} (R_{next} - RV_{region}^2)} \quad (14)$$

なお、一番外側の領域即ち未組織変化領域の発熱量 q''' は、

$$q'''_{avg} = \frac{\int_{R_I}^{R_o} 2\pi r q'''(r) dr}{\int_{R_I}^{R_o} 2\pi r dr} = \frac{q'}{\pi(R_o^2 - R_I^2)} \quad (15)$$

で示される。ここで q' は入力で与えられる線出力値である。

“ next ” の境界での線出力値は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} q'_{next} &= q'''_{next} \int_{RV_{next}}^{R_{next}} 2\pi r f(r) dr \\ &= \frac{2\pi q'''_{next}}{F_{avg}} \cdot \sum_{i=0}^n \frac{C_i (R_{next}^{i+5} - RV_{next}^{i+2})}{R_o^i (i+2)} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。

今、 $R_I = 0$ であるとすると、“ next ” を等軸晶領域として (13) 式は

$$q'''_{eq} = \frac{\rho_{eq}}{\rho_{fab}} \cdot q'''_{fab} \cdot S \quad (17)$$

ここで

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i R_{eq}^{i+2}}{R_o^i (i+2)}}{\sum_{i=0}^n \frac{C_i R_{eq}^{i+2}}{R_o^i (i+2)} \left\{ P^{i+1} + (1-P)^i \frac{\rho_{eq}}{\rho_{fab}} \right\}} \quad (18)$$

$$P = (1 - \rho_{fab} / \rho_{eq})^{1/2} \quad (19)$$

となる。さらに燃料内での出力分布がフラットであるとすると (17) 式はさらに簡単になり、

$$q'''_{eq} = \frac{\rho_{eq}}{\rho_{fab}} q''' \quad (20)$$

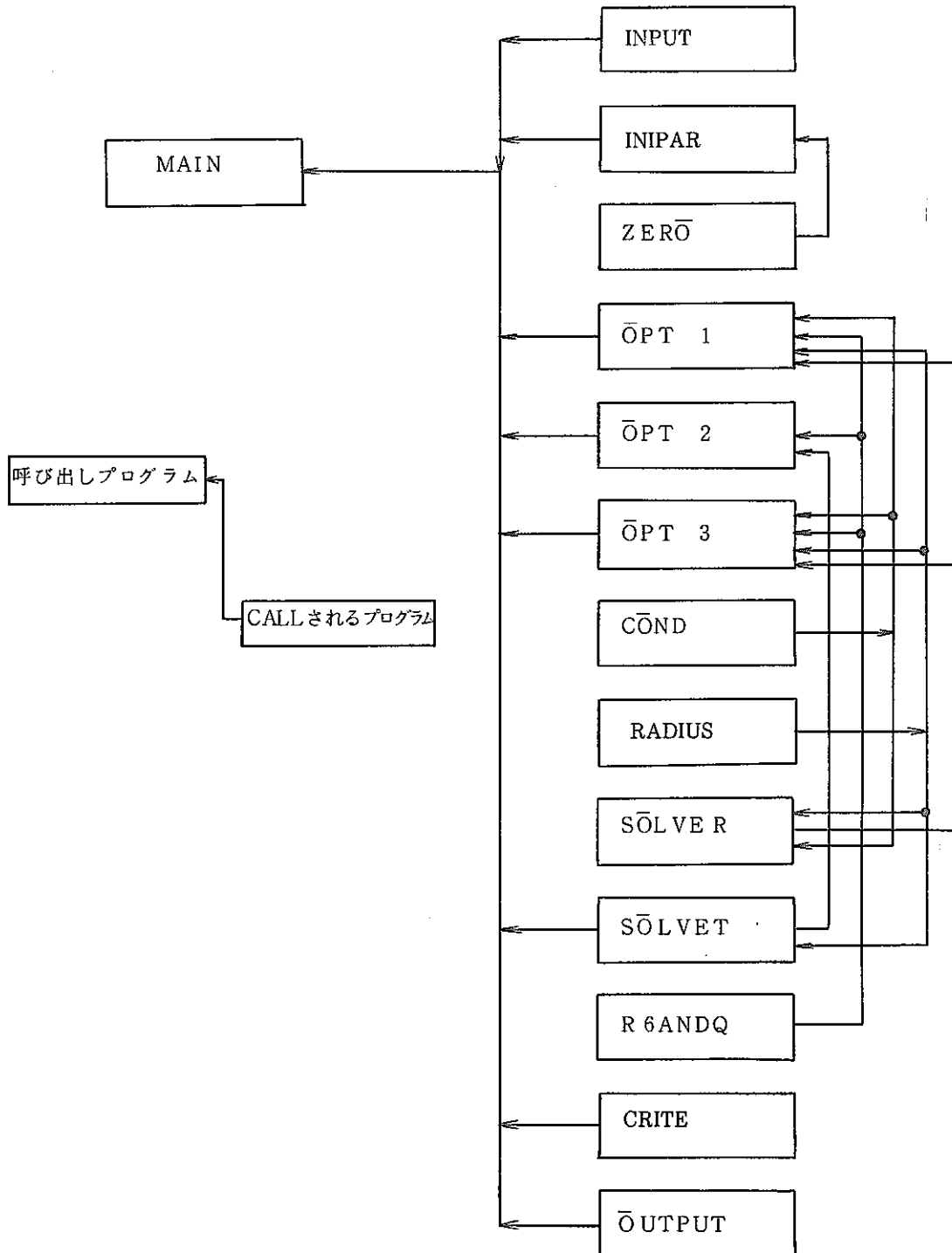
で表わされる。

Fig. 1 に計算の過程での各領域境界径と中心空孔、発熱量の関係を模式的に示す。サブルーチンについてはそのフローチャートを添付した。

プログラムはまず入力データの読み込みから始められる (INPUT)。入力データは、表 2 に示した各パラメーターであり、NAMELIST 文で入力される。入力データの一部は BLOCK DATA 文で定義されており、データの値が同じであればそのパラメーターは省略できる。

3. プログラムの概要

THERM プログラムは、MAiNプログラムの他に次の各サブルーチンより構成される。



各サブルーチンの機能については表1に示す。また、MAIN以外に特に重要と思われるINIPAR, OPT 1, OPT 2, OPT 3, CRITE SOLVER, SOLVETの各サブルーチンについては末尾にフローチャートを示した。

入力データの読み込みおよび入力データの出力が終了すると次に種々のパラメータの初期設定が行われる (INIPAR)。ここでは、直径で入力された領域の半径を求めること、ギャップコンダクタンスの計算、熱計算で使用される各式の係数等が行われる。

次に組織変化領域境界径あるいは境界温度の計算に入るが、処理手順は IOPT の値により大きく異なる。

IOPT=1の時 : 入力された組織境界温度 TREST(i) から組織境界径 R(i) を計算する。

計算に当っては、まず(7)式の左辺 ($\int_{T_{region}}^{T_{next}} KdT \dots \dots COND$) と右辺

$$\left(\int_{R_{region}}^{R_{next}} \left[\frac{1}{r} (rq'''(r) dr) + \frac{C}{r} \right] dr \dots \dots RADIUS, RNEXT (=R_{next}) \right)$$

まず中心空孔として計を解き両者の値 QK, QP を比較して差が一定以下となるよう RNEXT の値を変えて右辺 (RADIUS) の繰返し計算を行う。

IOPT=2の時 : 入力された組織境界径 DREST(i) から組織境界温度 TEMP(i) を計算する。計算に当っては、IOPT=1の時と同様に(7)式の左辺と右辺を計算し、両者の値 QK, QP を比較するが、この場合は左辺 (COND) の繰返し計算により最適の TEMP (next) を定める。

IOPT=3の時 : 組織境界径 DREST(i) が与えられている場合には、IOPT=2の場合と同じであり、DREST(i) が与えられていない場合は IOPT=1 と同じになる。

上記の各処理では、いずれも最後に求めた領域径 (または境界温度) から中心空孔径と発熱量の補正を行う (R6ANDQ)。計算は順次燃料の外側の領域から行われ、上記の計算を繰返して全領域の境界径または境界温度を計算する。

以上の計算で求めた結果は、ITHGP=1の場合、そのまま出力されるが、ITHGP=2~6の場合はその ITHGP の値に応じた組織境界径または境界温度 (入力で定められる) と比較し、値の異なる場合は、その差に応じてギャップコンダクタンスを補正し (CRITE)、再びパラメータの初期設定から計算をやり直す。なお、ITHGP=6の場合は、中心空孔の径のみを比較するため、ITHGP=6を用いるときは IOPT=1 または 3 でなければならない。

ITHGP=2~5の場合は、等軸晶領域からサブグレイン領域の入力された境界径または境界温度 (入力された TREST(i), DREST(i) の ITHGP の値は一致しなくても良い。) の1つと計算結果を比較する。比較対象が境界径か境界温度かは、IOPTの値により選択される。

プログラム内で用いられている主なパラメータについては表3に示したので、フローチャートを見る際には参考にしていきたい。

4. 入力方法

入力データは前述したように NAMELIST 文で入力される。入力するパラメータは表 2 に示した。入力データの一部は、BLOCK DATA で与えられており、BLOCK DATA と同じで良ければそのデータの入力は省略できるが、他のデータは省略してはならない。

Fig. 2 に入力データ例とジョブ制御文を示す。Fig. 2 の場合ディスクファイル上のデータを入力しているが、カードで入力する場合は 4 行目以降を次のようにすれば良い。

$$\left[\begin{array}{l} 11 \text{ GO} \cdot \text{SYSIN DD} * \\ \quad \boxed{\text{入力データ}} \\ 11 \end{array} \right]$$

なお、ジョブ制御文は、FACOM M-190 (大洗工学センターに設置されている。) の場合のものである。

5. 計算例

Fig. 3 に入力データの出力例をまた Fig. 4 に計算結果の出力例を示す。これらの結果は、Fig. 2 で示した入力データを計算したものである。

表1-(1) THERM サブルーチン一覧 (1)

サブルーチン名	処 理 内 容
INPUT	Job のタイトルおよびインプットデータをカードから読み込む。インプットデータはNAMELIST文で入力される。 入力された各データは、インプットデータリストとしてラインプリンターに出力される。
INIPAR	種々のパラメーターの初期設定を行う。 (フローチャート参照のこと。)
ZERO	COMMON 文中 COMON で定義された領域のゼロクリアーを行う。ただし、NEXTのみはクリアーしない。
OPT 1	入力された境界温度 TREST(i) から組織境界径を計算する。 (フローチャート参照のこと)
OPT 2	入力された組織境界径 (DREST(i) から境界温度を計算する。 (フローチャート参照のこと)
OPT 3	組織境界径 DREST(i) が与えられている場合はサブルーチンOPT 1 と同じになり、DREST(i) が与えられていない場合はサブルーチンOPT 2 と同じになる。(フローチャート参照のこと)
COND	$QK = \int_{T_{REGION}}^{T_{NEXT}} K dT$ を計算する。熱伝導式としては、次の3式が用意されている。 (1) GE Correlation 式: $K(T) = 0.01169 + \frac{1}{0.06717 + \frac{0.02226(1-\rho)}{O/M - 190} + 0.7214 \times 10^{-12} T^3}$ (2) GE New Correlation 式: $K(T) = \left[\frac{1}{0.3233 + 0.02708T + 195.67(2 - O/M) + 1.157 \times 10^{-12} T^3} \right] \left(\frac{1-P}{1+\beta P} \right)$ (3) WARD Correlation 式: $K(T) = \frac{1.133(1-P)}{[1+(1+10P)P]} \left[\frac{1}{0.78 + 0.02935T} + 6.6 \times 10^{-13} T^3 \right]$ O/M : O/M 比 P : Porosity 割合 ρ : 密度 T. D β : Porosity Factor Ar ガスの場合 = 1.4 He ガスの場合 = 6916T ^{-1.375} (2.00 ≥ O/M ≥ 1.98) = 26275T ^{-1.615} (O/M < 1.98)

表 1-(2) THERM サブルーチン一覧(2)

サブルーチン名	処 理 内 容
RADIUS	$QP = \frac{q''_{Region}}{F_{avg}} \sum_{i=0}^n \frac{C_i (R_{Region}^{i+2} - R_{next}^{i+2})}{R_o^i (i+2)^2} + C \ln\left(\frac{R_{Region}}{R_{next}}\right)$ $\left[\begin{aligned} C &= \frac{q'_{Region}}{2\pi} - \frac{q''_{Region}}{F_{avg}} \sum_{i=0}^n \frac{C_i R_{Region}^{i+2}}{R_o^i (i+2)} \\ F_{avg} &= \frac{1}{R_o^2 - R_I^2} \left[R_o^2 \left(\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{i+2} - \sum_{i=0}^n \frac{C_i R_I^{i+2}}{R_o^i (i+2)} \right) \right] \end{aligned} \right]$
SOLVER	<p>の計算を行う。</p> $\left 1 - \frac{QP}{QK} \right < ERAD \text{ (収束判定値) となるよう組織境界径 } R \text{ (NEXT)}$ <p>を順次変えて真の R (NEXT) を求める。</p>
SOLVET	$\left 1 - \frac{QK}{QP} \right < ETEMP \text{ (収束判定値) となるよう組織境界温度 } TEMP$ <p>(NEXT) を順次変えて真の TEMP (NEXT) を求める。</p>
R 6 ANDQ	<p>R(6)(中心空孔径)と発熱量を計算する。</p>
CRITE	<p>計算して得られた組織境界径(または組織境界温度)との差の大きさを求め、GAP CONDUCTANCE の収束計算のパラメータとする。 (フローチャート参照のこと)</p>
OUTPUT	<p>計算結果の出力</p>

表 2 - (1) THERM インプットデータ (1)

記号	単位	定義	BLOCK DATA で与えている値
CLID	cm	照射後被覆管内直径	
FODI	cm	製造時燃料直径	
FOD	cm	照射後燃料直径	
DREST(i) i = 1, 4	cm	DREST(1) ……等軸晶直径	0
		DREST(2) ……柱状晶直径	0
		DREST(3) ……ポアリミット直径	0
		DREST(4) ……サブグレイン組織直径	0
CLIT	°C	被覆管内面温度	
TREST(i) i = 1, 4	°C	TREST(1) ……等軸晶境界温度	1650
		TREST(2) ……柱状晶境界温度	2144
		TREST(3) ……ポアリミット境界温度	2760
		TREST(4) ……サブグレイン組織境界温度	2810
DEN(i) i = 1, 5	TD (理論密度)	DEN(1) ……製造時領域密度	
		DEN(2) ……等軸晶領域密度	
		DEN(3) ……柱状晶領域密度	
		DEN(4) ……ポアリミット領域密度	
		DEN(5) ……サブグレイン領域密度	
OMR		燃料の O/M 比	
POWER	w/cm	線出力	
VOID	cm	照射後中心空孔直径	0.0
IOPT		i) IOPT=1 : 入力された組織境界温度=TREST(i)となるような組織径を計算する。 ii) IOPT=2 : 入力された組織境界径=DREST(i)となるような組織境界温度を計算する。 iii) IOPT=3 : 組織境界径 DREST(i)が入力されている場合は IOPT=2 と同じ。DREST(i)が入力されていない時は IOPT=1 と同じになる。	1

表 2 - (2) THERM インプットデータ (2)

記号	単位	定義	BLOCK DATA で与えている値
ICOND		<p>i) ICOND=0 : GE Correlation (GEAP-13967) を選択する。</p> $K(T) = A(1) + \frac{1}{A(2) + \frac{A(3)(1-\rho)}{OMR-1.90}} + A(4)T^3$ <p>A(1)= 0.01169 A(2)= 0.06717 A(3)= 0.02226 A(4)= 0.7214 × 10⁻¹²</p> <p>ρ : 密度</p> <p>ii) ICOND=1 : GE new correlation 式を選択する。</p> $K(T) = \left[\frac{1}{B(1) + B(2) \cdot T + B(3) \cdot X} + B(4) \cdot T^3 \right] \left(\frac{1-P}{1+\beta \cdot P} \right)$ <p>B(1)= 8.3233 B(2)= 0.02708 B(3)= 195.67 B(4)= 1.157 × 10⁻¹²</p> <p>X : 2-OMR P : POROSITY 比 β : POROSITY FACTOR Ar ガスの場合 β = 6916 · T^{-1.375} 1.98 ≤ O/M ≤ 2.00 He ガスの場合 β = 26275 · T^{-1.615} O/M < 1.98 β = 1.4</p> <p>iii) ICOND=2 : WARD correlation (J. H. Scott et. al HEDL-TME 75-9)</p> $K(T) = \frac{C(1)(1-P)}{[1+(1+10P)P]} \left[\frac{1}{C(2)+C(3)T} + C(4)T^3 \right]$ <p>C(1)= 1.133 C(2)= 0.78 C(3)= 0.02935 C(4)= 6.6 × 10⁻¹³</p> <p>P : POROSITY 比</p>	0

表2-(3) THERM インプットデータ (3)

記号	単位	定義	BLOCK DATA で与えている値
ICASE		i) ICASE=0の時次の計算は実行しない ii) ICASE≠0の時次の計算を実行する。	0
ITHGP		i) ITHGP=1の時 hgap の収束計算はしない。 ii) ITHGP=J (J=2~5) 時 DREST (J-1)=TREST (J-1) となるような hgap を計算する。 iii) ITHGP=6の時中心空孔計算値=VOID となるような hgap を計算する。	1
LIMIT		最良多項式で近似した出力分布式の次数	
F(i) i=1~10		出力分布式の係数 $f(R)=F(1)+F(2)R+F(3)R^2+\dots$	
HGPI	BTU/F _t ² °F hr	hgap の初期値	0
BURN	MWD/T	燃焼度	0
CLIDI	cm	製造時被覆管内直径	
ITTEMP		組織境界温度を収束計算するときの最大繰返し数	50
ITRAD		組織境界径を収束計算するときの最大繰返し数	50
ETEMP		組織境界温度を収束計算するときの収束判定値	5×10^{-4}
ERAD		組織境界径を収束計算するときの収束判定値	5×10^{-4}
EHGP		hgap の収束判定値	1×10^{-3}
A(i) i=1~4		GE correlation (GEAP) 式 (ICOND の項で述べている。) の各係数	A(1)=0.01169 A(2)=0.06717 A(3)=0.02226 A(4)= 0.7214×10^{-12}
B(i) i=1~4		GE New correlation 式の各係数	B(1)=8.3233 B(2)=0.02708 B(3)=195.67 B(4)= 1.157×10^{-12}
C(i) i=1~4		WARD correlation 式の各係数	C(1)=1.133 C(2)=0.78 C(3)=0.02935 C(4)= 6.6×10^{-13}
DHGP		hgap 収束計算のステップ幅を求める係数	2.0

表3-(1) THERM 主要パラメーター (1)

記号	定義
CLIR	$CLIR = 0.5 \times CLID$ 照射後被覆管内半径
FOR	$FOR = 0.5 \times FOD$ 照射後燃料半径
RREST(i)	$RREST(i) = DREST(i)$ 入力された各組織境界の半径
R(i) i = 1~6	R(1).....照射後燃料半径 R(2).....等軸晶領域境界半径 R(3).....柱状晶領域境界半径 R(4).....ポアリミット領域境界半径 R(5).....サブグレイン領域境界半径 R(6).....中心空孔半径
RSQR(i) i = 1~6	R(1)~R(6)を2乗した値
RSQR16	$RSQR16 = R(1)^2 \sim R(6)^2$
DIAGAP	$DIAGAP = CLIDI - FODI$ 製造時のダイアメトラルギャップ
DELCRT	$DELCRT = \frac{R(J) - RREST(J)}{RREST(J)}$ <p>または</p> $DELCRT = \frac{TEMP(J) - TREST(J)}{TREST(J)}$ <p>計算で求めた組織境界径（または組織境界温度）とITHGPで指定された組織境界径（または組織境界温度）の入力値の差の大きさがDELCRTであり、HGAP収束計算のパラメーターである。</p>
PROFYL(i) i = 1~5	各領域の出力密度の比 $PROFYL(i) = Q111(i) / Q111(1)$
QAVG	R(1)=照射後燃料半径 $R(6) = 0.5 \times \sqrt{(照射後燃料直径)^2 - (製造時燃料直径)^2}$ で $QAVG = \frac{線出力}{\pi (R(1)^2 - R(6)^2)}$ で表わされる平均出力密度
Q111(i) i = 1~5	各領域の出力密度

表3-(2) THERM 主要パラメータ-(2)

記号	定義
Q1(i) i = 1~5	各領域での線出力
AVGFAC	AVGFAC = F_{avg} (式(9) 参照)
TEMP(i)	TEMP(1).....燃料表面温度 TEMP(2).....等軸晶領域境界温度 TEMP(3).....柱状晶領域境界温度 TEMP(4).....ポアリミット領域境界温度 TEMP(5).....サブグレイン領域境界温度 TEMP(6).....中心空孔境界温度
QK(i) i = 1~5	$QK = \int_{T_{REGION}}^{T_{NEXT}} K dT$ の計算結果
QP(i) i = 1~5	$QP = \int_{T_{REGION}}^{R_{NEXT}} \left[\frac{1}{r} \int r q'''(r) dr + \frac{C}{r} \right] dr$ の計算結果
QPQK	QPQK = QP - QK 収束判定に用いられる。
ITT	GAP CONDUCTANCE 収束計算の繰返し回数
IREG	計算対象としている領域ナンバー
NEXT	計算対象としている領域の次の領域のナンバー
RVOID(i) i = 1~5	計算対象としている領域ナンバーに対応する中心空孔径
RHO(5) i = 1~5	各領域の密度

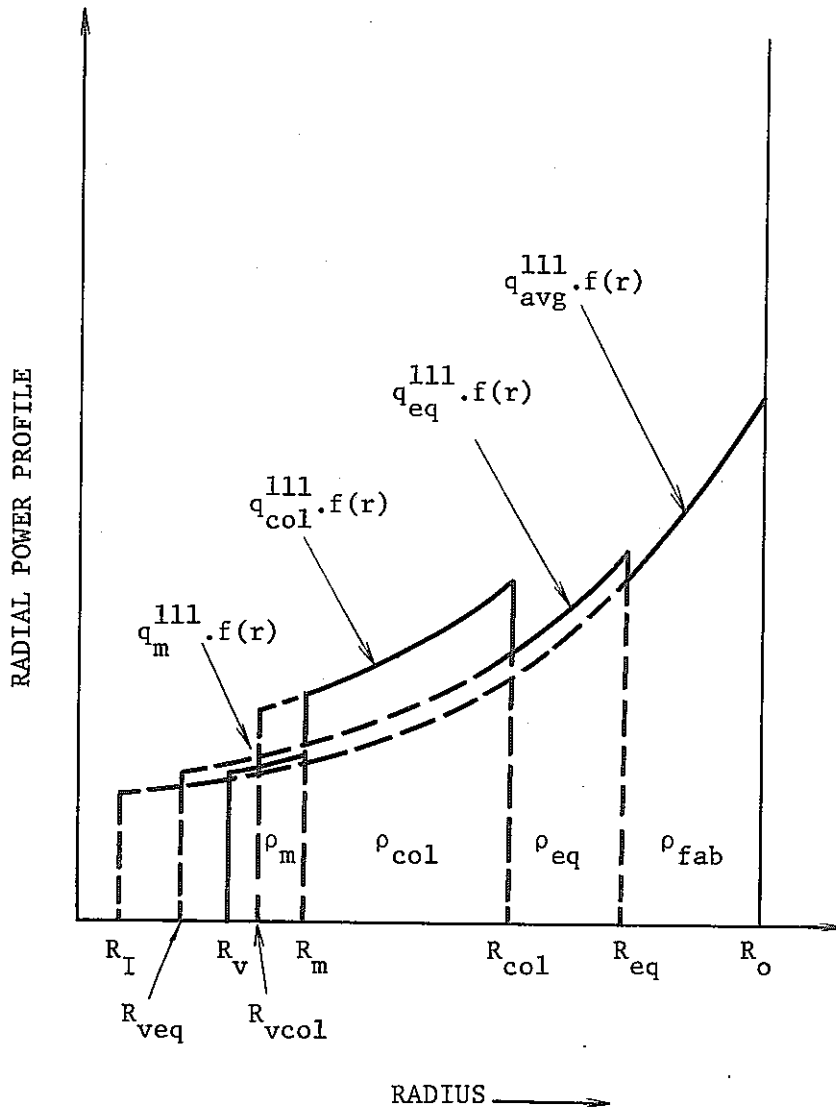


Fig. 2 RADIAL POWER DISTRIBUTION AFTER THE COMPLETION OF FUEL RESTRUCTURING (in the case $T_{center} > T_{melt}$)

① ジョブ制御文

```
//M3558THM JOB (060540,753581T),HIROSHI,CLASS=C,MSGCLASS=A
// EXEC FORTCLG,PARM.FORT=(GOSTMT,SOURCE)
//FORT.SYSIN DD DSN=M3383.SIN0.DATA(THERM);DISP=SHR
//G0.SYSIN DD DSN=M3383.SIN0.DATA(PE01X),DISP=SHR
//
```

② 入力データ例

```
      CASE D1-1
&IPT CLIDI=.56,CLID=.56,CLIT=484.,F0DI=.544,F0D=.544,
TREST=2190.,2670.,2700.,2730.,DEN=.85,3*.98,1.,0MR=1.97,
POWER=450.,LIMIT=1,F=1.,9*0.,IC0ND=2,ICASE=1,
HGPI=2000.,
&END
      CASE D1-2
&IPT POWER=470., &END
      CASE D1-3
&IPT POWER=490., &END
      CASE D3-1
&IPT F0DI=.5346,HGPI=1260.,F0D=.5346,POWER=420.,CLIT=466.,&END
      CASE D3-2
&IPT POWER=440., &END
      CASE D3-3
&IPT POWER=460., &END
      CASE D3-1-1
&IPT POWER=400.,CLIT=632., &END
      CASE D3-2-1
&IPT POWER=420., &END
```

Fig.2 ジョブ制御文および入力データ例

CASE D1-1

INPUT DATA

```

CLIDI = 0.56000 (CM) -----CLADDING INNER DIAMETER (AS FABRICATED)
CLID = 0.56000 (CM) -----CLADDING INNER DIAMETER (IRRADIATED)
CLIT = 484.0 (DEG C) -----CLADDING INNER TEMPERATURE

FCDI = 0.54400 (CM) -----FUEL OUTER DIAMETER (AS FABRICATED)
FCD = 0.54400 (CM) -----FUEL OUTER DIAMETER (IRRADIATED)
DREST = 0.0 (CM) -----RESTRUCTURING DIAMETER (EQUAXED)
      0.0 -----(COLUMNAR)
      0.0 -----(PORE LIMIT)
      0.0 -----(SUBGRAIN)
VOID = 0.0 (CM) -----VOID DIAMETER(IRRADIATED)

TREST = 2190.0 (DEG C) -----RESTRUCTURING TEMPERATURE (EQUAXED)
      2670.0 -----(COLUMNAR)
      2700.0 -----(PORE LIMIT)
      2730.0 -----(SUBGRAIN)

DEN = 0.85000 -----SPECIFIC DENSITY (AS FABRICATED REGION)
      0.98000 -----(EQUAXED REGION)
      0.98000 -----(COLUMNAR REGION)
      0.98000 -----(PORE LIMIT REGION)
      1.00000 -----(SUBGRAIN REGION)

QMR = 1.97000 -----Q/P (CONSTANT)

POWER = 450.0 (W/CM) -----AVERAGE LINEAR POWER
BURN = 0.0 (MWD/T) -----AVERAGE BURNUP

ITEMP = 50 -----MAX. NO. OF ITERATIONS IN THE TEMP. CAL.
ETEMP = 0.5E-03 -----CONVERGENCE CRITERION IN THE TEMP. CAL.
ITRAD = 50 -----MAX. NO. OF ITERATIONS IN THE RADIUS CAL.
ERAD = 0.5E-03 -----CONVERGENCE CRITERION IN THE RADIUS CAL.

IHGP = 1 -----INDICATOR OF ITERATION PHASE
EHGP = 0.1E-02 -----CONVERGENCE CRITERION IN THE HGAP CAL.

LIMIT = 1 -----DIMENSION OF POWER PROFYL EQUATION
F = 0.10000E+01 -----COEFFICIENTS OF POWER PROFYL EQUATION

ICPT = 1 -----INDICATOR OF CALCULATION PHASE

ICOND = 2 -----SELECTOF OF FUEL CONDUCTIVITY EQUATION
FACTOR = 1.00 -----CONTROL FACTOR OF FUEL CONDUCTIVITY

```

Fig. 3. 入力データの出力例

```

-----
OUTPUT
-----
CALCULATION PHASE ---- CALCULATE THE RADIUS AT THE FUEL RESTRUCTURING
TEMPERATURE GIVEN BY USER

CONVERGENCE CALCULATION OF GAP CONDUCTANCE ---- NO

GAP CONDUCTANCE = 2000.0 (BTU/FT**2-DEG.F-HR)
                  1.13522 (W/CM**2-DEG.C)

*****
REGION      INTEGRAL K-DT (W/CM)      S111(REGION)/S111(1)
-----
1           JK = 25.622          1.0000
2           JK = 7.037          1.1529

FUEL        EQUAXED      COLUMNAR      PURE LIMIT      SUBGRAIN      VOID
SURFACE     GRAIN             GRAIN         RADIUS;         RADIUS;       RADIUS;
RADIUS;     RADIUS;           RADIUS;       R(4),(CM)      R(5),(CM)    R(6),(CM)
R(1),(CM)  R(2),(CM)        R(3),(CM)
-----
0.27200    0.14503          0.0           0.0            0.0          0.05282

R(1)/R(1)  R(2)/R(1)        R(3)/R(1)    R(4)/R(1)      R(5)/R(1)    R(6)/R(1)
-----
1.00000    0.53320          0.0           0.0            0.0          0.19420

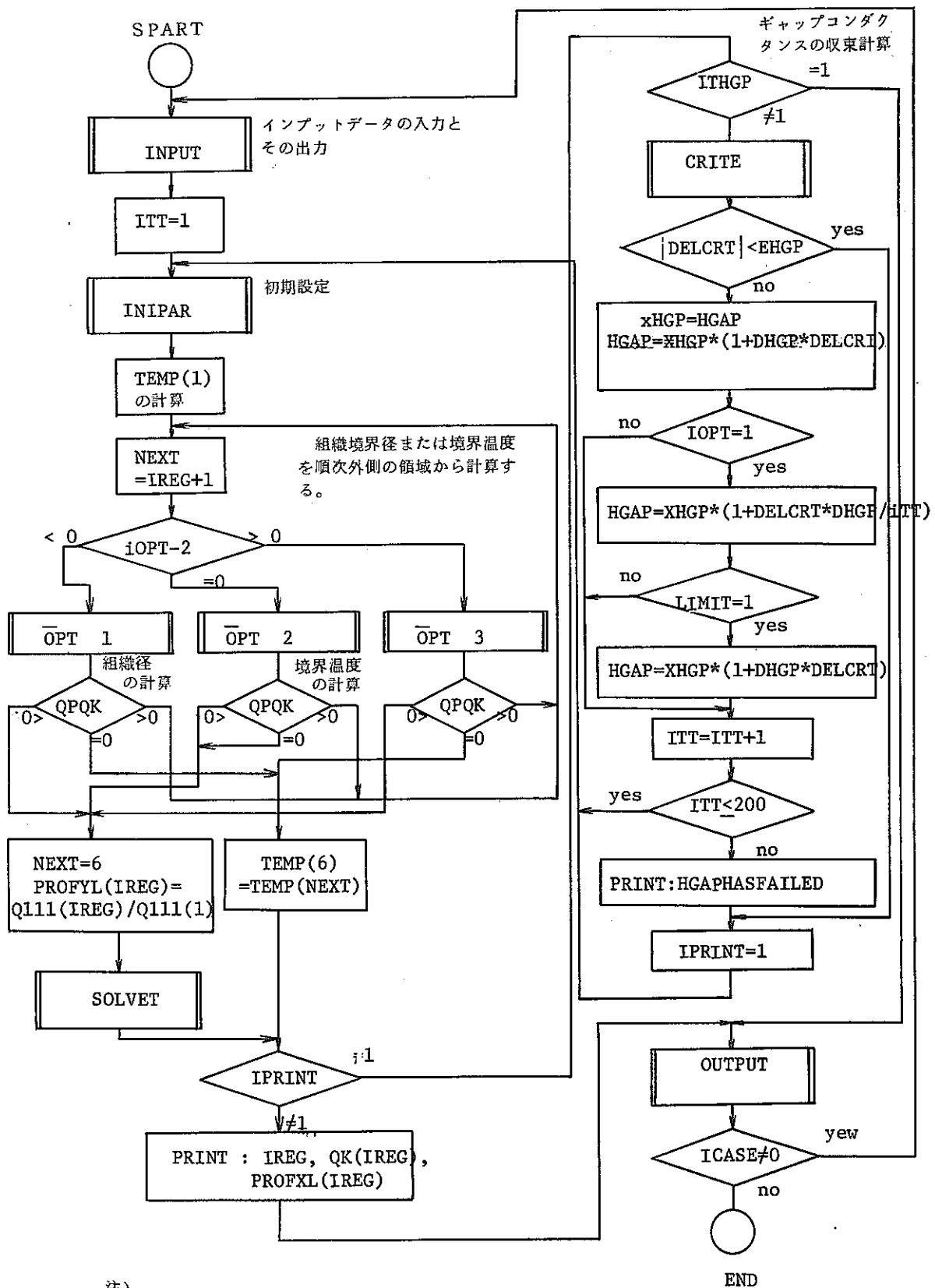
FUEL        EQUAXED      COLUMNAR      PURE LIMIT      SUBGRAIN      VOID
SURFACE     GRAIN             GRAIN         TEMPERATURE     TEMPERATURE   TEMPERATURE
TEMPERATURE TEMPERATURE     TEMPERATURE  ;(DEG.C)       ;(DEG.C)     ;(DEG.C)
;(DEG.C)   ;(DEG.C)        ;(DEG.C)    ;(DEG.C)      ;(DEG.C)    ;(DEG.C)
-----
712.6     2190.0          2670.0       2700.0         2730.0       2454.1

*****

```

Fig. 4. 計算結果の出力例

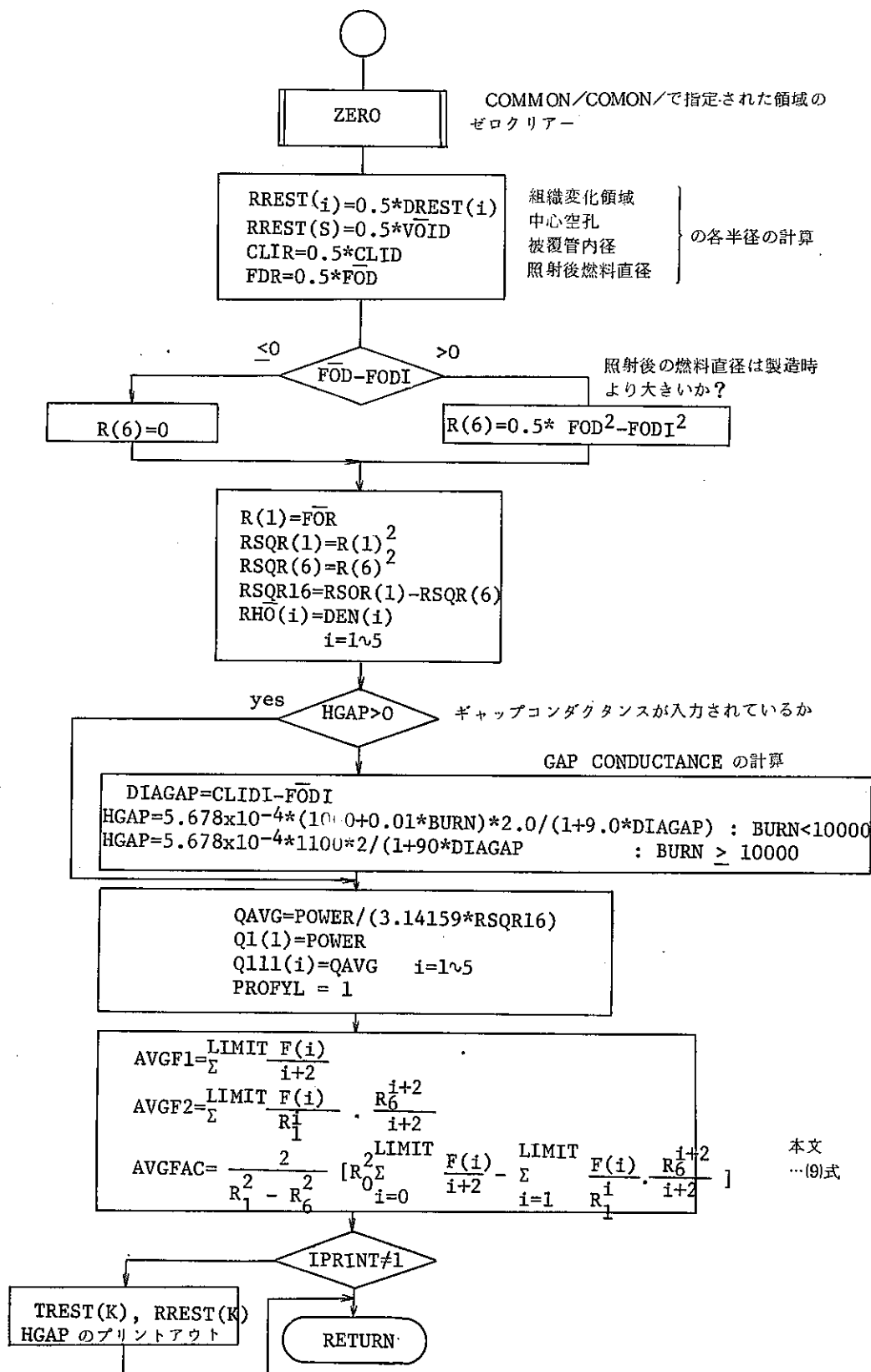
MAIN フローチャート



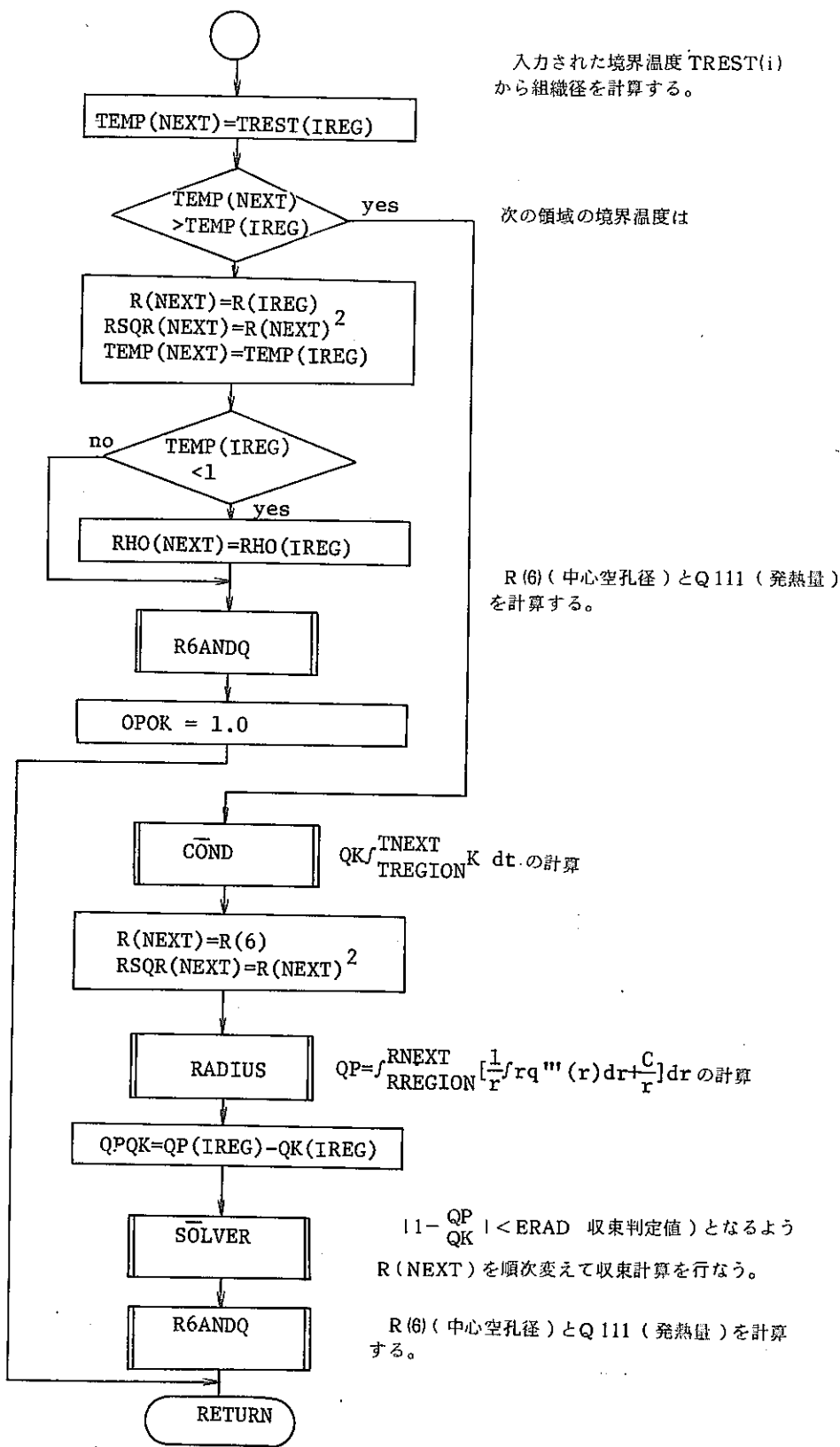
注)

AAA サブルーチン "AAA" を示す。

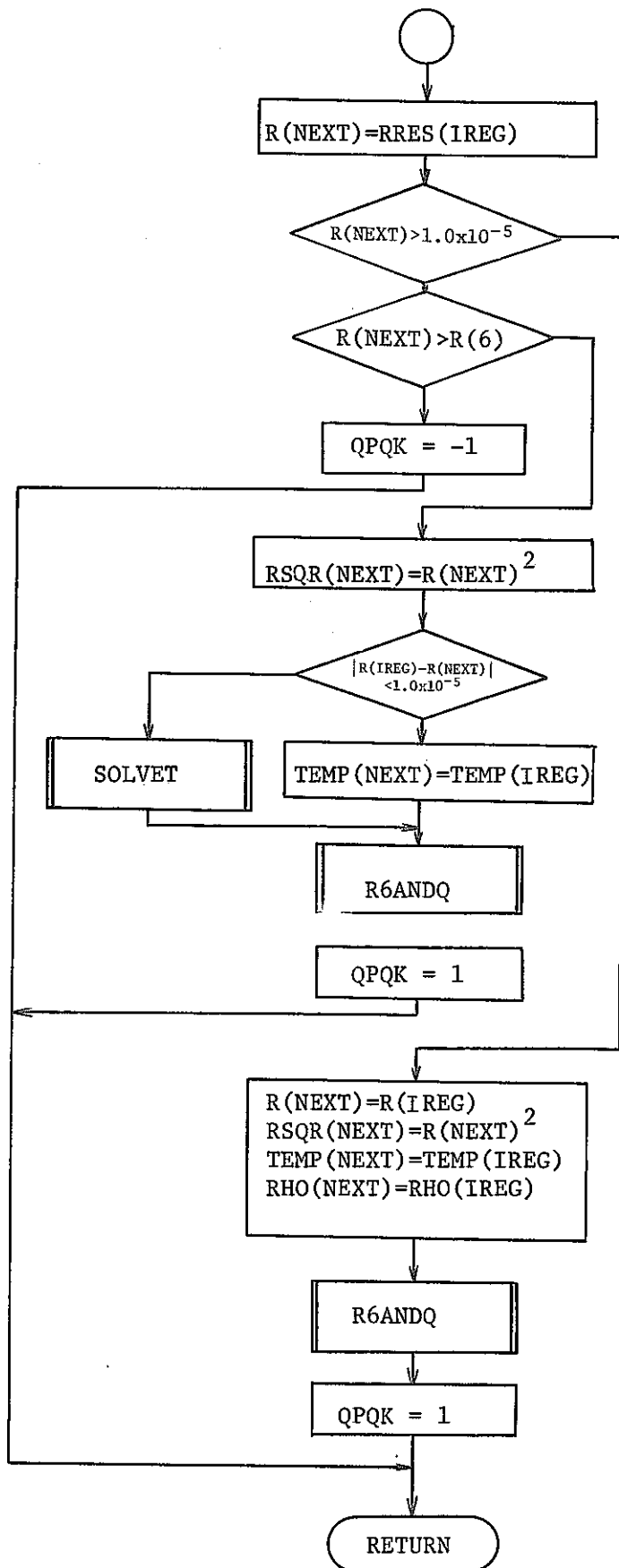
サブルーチン INIPAR フローチャート



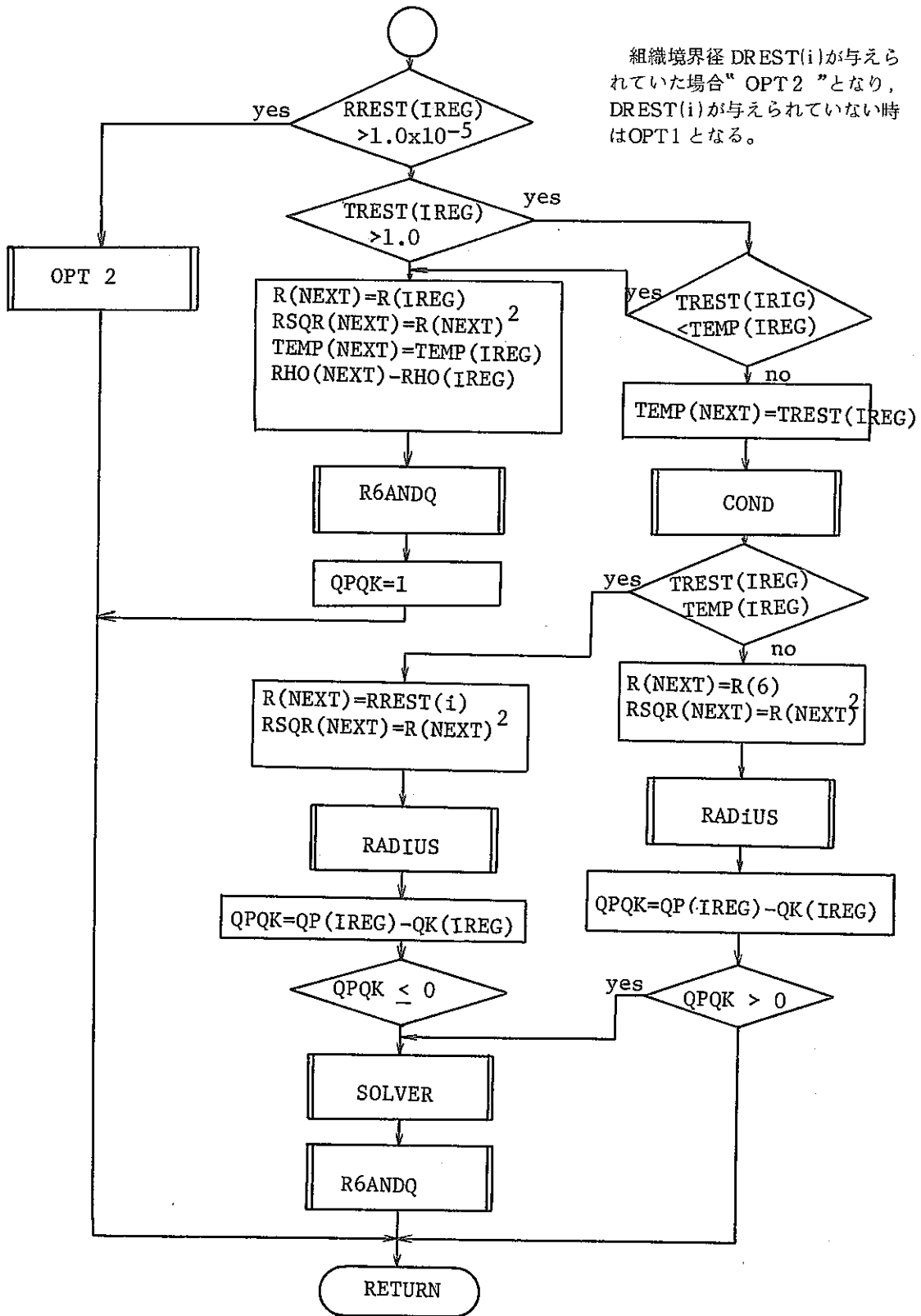
サブルーチン OPT 1 フローチャート



サブルーチン OPT 2 フローチャート

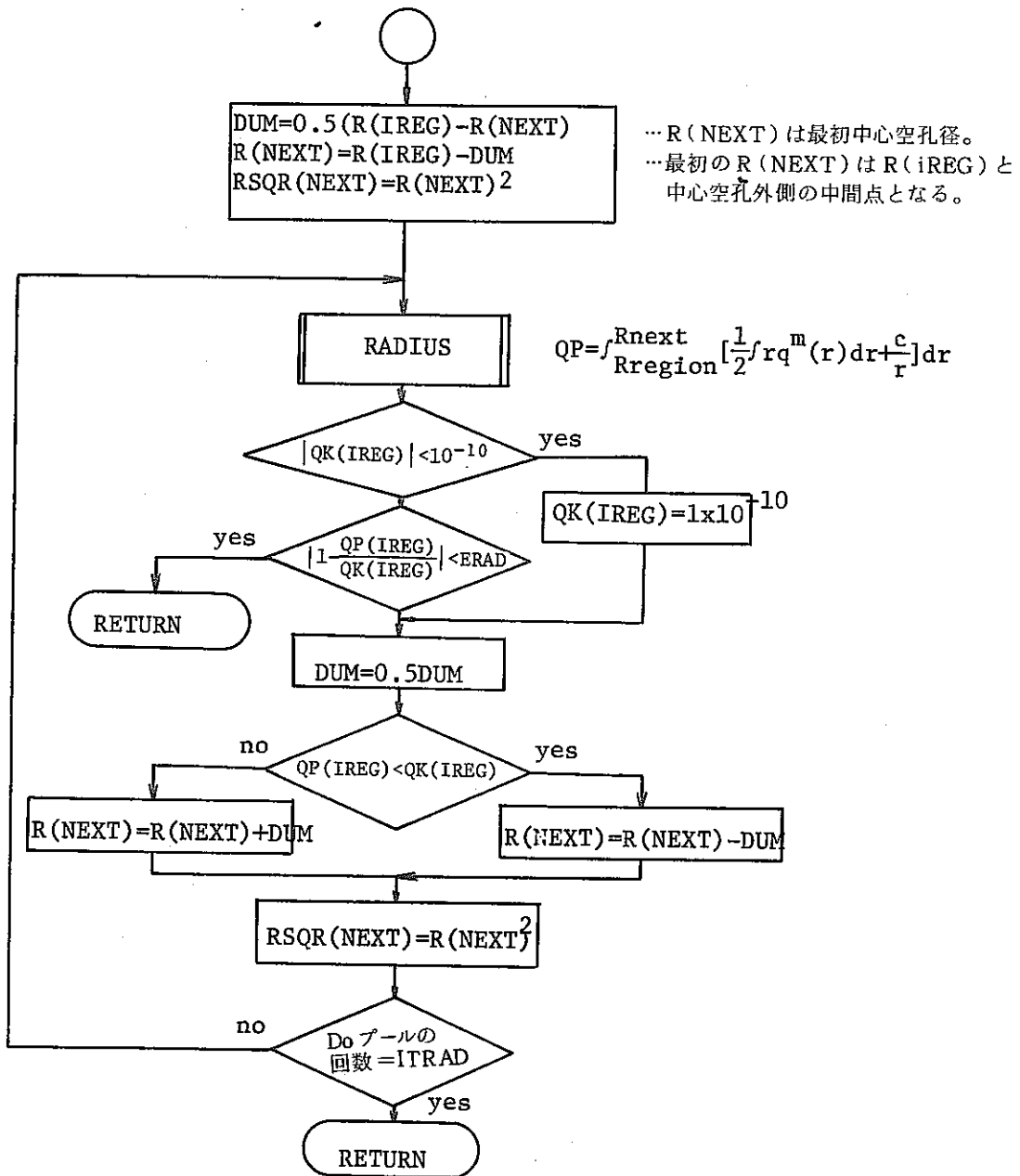


サブルーチン OPT 3 フローチャート

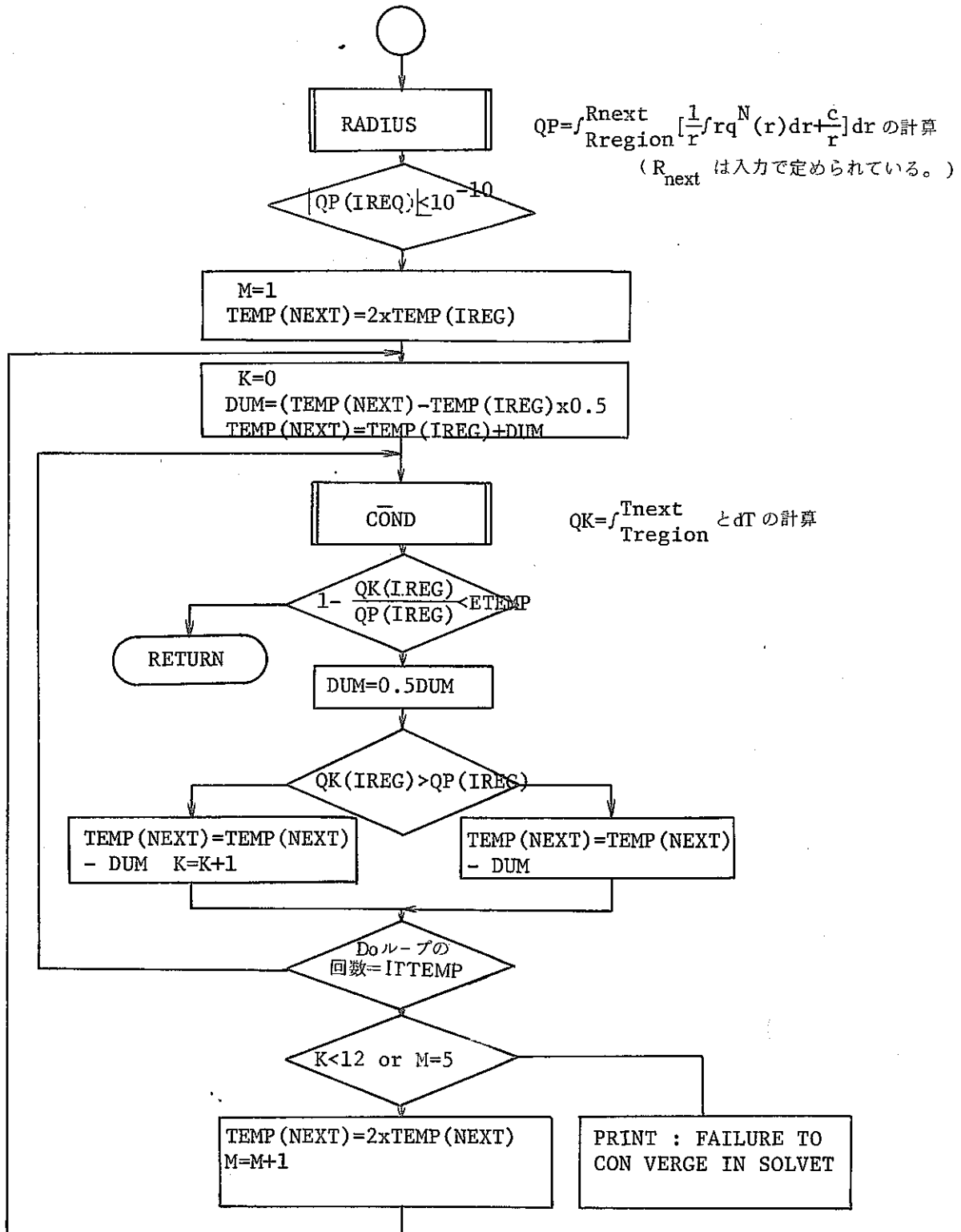


組織境界径 DREST(i)が与えられていた場合“OPT 2”となり、DREST(i)が与えられていない時はOPT1となる。

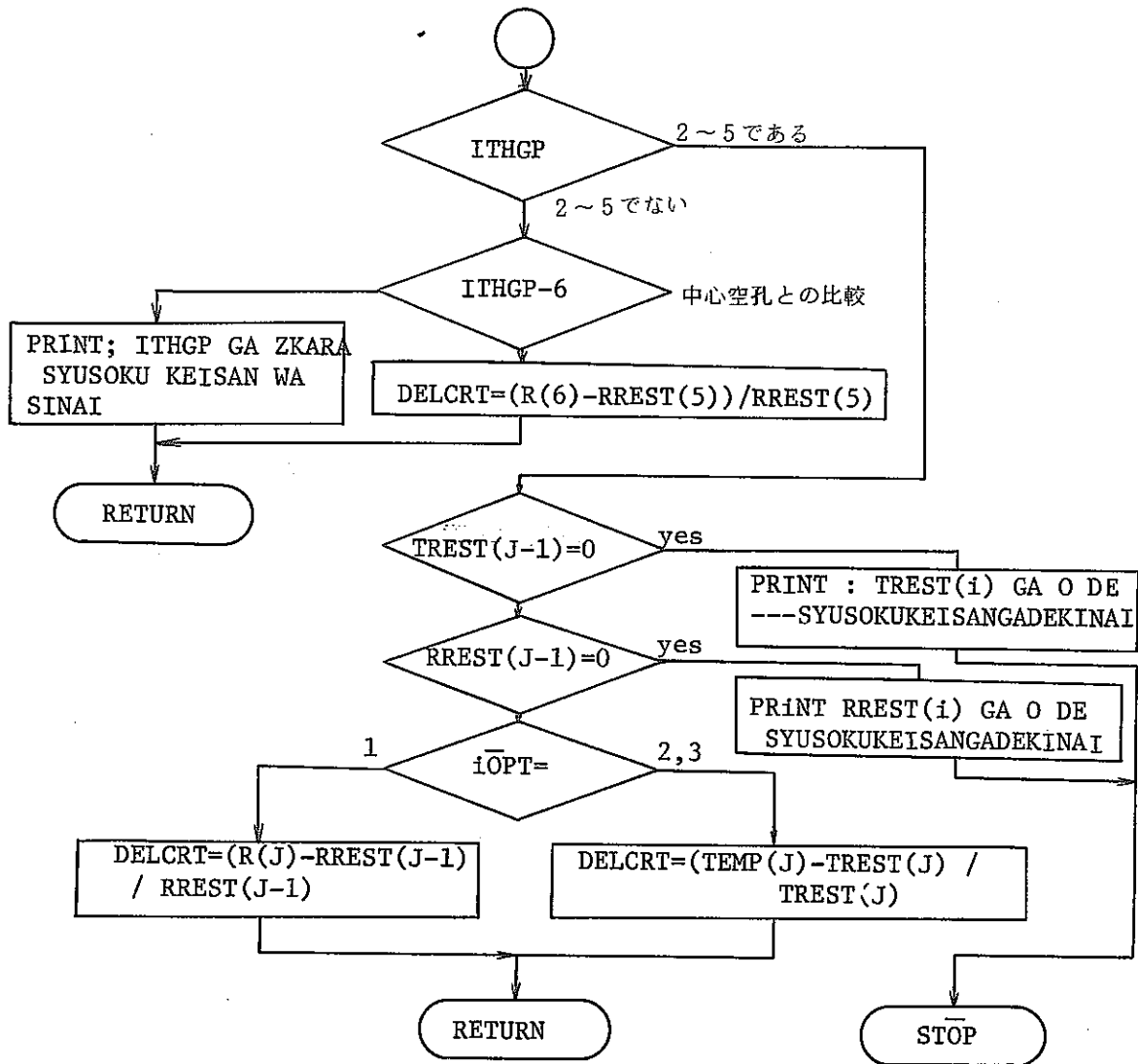
サブルーチン SOLVER フローチャート



サブルーチン SOLVET フローチャート



サブルーチン CLITE フローチャート



DELCRTはHGAP収束パラメータとなる。

参考文献

- 1) 河田, SN 241 76-29 (1976)

IV HOTGAP

1. はじめに
2. 計算方法
3. 物性値
4. 入力/出力

1. はじめに

高速炉燃料の照射後解析の一つにギャップコンダクタンスの評価があり、評価方法としては

- (1) 燃料の組織変化の大きさとその境界温度から燃料表面温度を計算し、これと被覆管内面温度との差から実効的なギャップコンダクタンスを計算する。
- (2) 照射中のギャップ中、ガス組成および燃料/被覆管接触圧（接触時）等を計算した上これを基に理論式を用いてギャップコンダクタンスを計算する。

の2通りに大別される。前者(1)の方法は実験的な評価方法であり、後者(2)の方法は燃料挙動解析コードの中で一般に使用されている理論的評価方法である。しかしこれらの方法はいずれも短所がありギャップコンダクタンスを評価する方法として決定的方法とは言い難い。すなわち

- (1)の方法（実験的評価）では組織境界温度および燃料の熱伝導式の不確定さが含まれる。
- (2)の方法（理論的評価）ではリロケーション、熱膨張あるいはガス放出等が複雑に関与し合った照射挙動を精度良く評価する必要があるし、またギャップコンダクタンスを計算する理論式も結局は実験とのキャリブレーションを必要とする。

といった短所を有しているからである。従って、現時点では両者の方法による計算結果を併せて評価していくのが良いであろう。

ところで(1)の実験的評価を行うための計算コードとしては THERM が整備されており、ここで述べる HOTGAP は(2)の理論的評価を行うための計算コードである。

2. 計算方法

計算は軸方向および時間方向1点で径方向1次元モデルにより行う。

ギャップコンダクタンスの計算は Ross & Stout モデル¹⁾ をベースにした理論計算であるが式中の各所に実験と fitting を行うための fitting parameter が入っており、従って半理論計算と呼ぶべきであろう。

プレナムガス組成、ホット（照射中）ギャップおよび燃料組織変化は照射後試験の結果得られるプレナムガス量、cold（照射後）ギャップおよび組織変化量を基に計算される。

従って HOTGAP コードにより計算されるギャップコンダクタンスは炉停止直前の値であり、照射期間中の変化は計算しない。

しかしながらギャップコンダクタンスの計算上重要なガス組成等を実測値をベースに計算することは一般の照射挙動解析コードに比べ実際状態の再現という点で有利である。

また熱中性子炉照射燃料に対しても使用できるように出力分布の径方向変化を考慮して燃料内の温度分布を計算するようになっている。

HOTGAP コードのメインフローを Fig. 1 に示す。

2.1 ギャップコンダクタンス計算モデル

ギャップコンダクタンスは燃料/被覆管ギャップ内のガスを通しての熱伝導および放射、および燃料と被覆管が接触した場合の接触面での固体-固体間熱伝導の3要素からなる。すなわち

$$H_{\text{gap}} = H_{\text{gas}} + H_{\text{solid}} + H_{\text{rad}} \quad (1)$$

但し

H_{gap} : ギャップコンダクタンス

H_{gas} : ガスの熱伝導による熱伝達成分

H_{solid} : 固体-固体間の熱伝導による熱伝達成分

H_{rad} : 放射による熱伝達成分

である。燃料と被覆管が接触しない時は $H_{\text{solid}} = 0$ となる。

(1) ガスの熱伝導による熱伝達

ガスの熱伝導による熱伝達成分 H_{gas} は次式で与えられる。

$$H_{\text{gas}} = \frac{K_g}{B \cdot \exp(D \cdot P) + G_H + (g_f + g_c)}$$

K_g : ギャップ中のガスの熱伝導度

B : 表面荒さ効果を決定する fitting parameter

D : 燃料/被覆管接触圧の増加に伴う表面荒さの減少を決定する fitting parameter

P : 燃料/被覆管接触圧 (接触しない時はプレナムガス圧)

G_H : 燃料/被覆管距離 (ホットギャップ)

$g_f + g_c$: 燃料と被覆管の jump distance の和

1) ガス熱伝導 K_g

混合ガスの熱伝導度は Brokaw の法則により次式で計算される。

$$K_g = \frac{1}{2} \left(\sum_i X_i \cdot K_i + \frac{1}{\sum_i X_i / K_i} \right)$$

X_i : i 成分のモル分率

K_i : i 成分単体のガス熱伝導度

$$K_i = A_i + B_i \cdot T + C_i \cdot T^2$$

A_i, B_i, C_i : 定数

T : ギャップ中の平均温度

なお HOTGAP コードではギャップ中のガスとして He, Xe, Kr, N₂ および Ar の 4 成分が考慮される。

2) jump distance $g_f + g_c$

jump distance は表面とガスの間でのエネルギーの交換が、完全に行われないうために起こる表面の温度上昇を表わすもので次式で計算される。

$$g_f + g_c = 1373 \cdot \left(\frac{2-a}{a} \right) \frac{\bar{K}_g \cdot (\bar{T} \cdot \bar{W})^{1/2}}{P}$$

a : accommodation coefficient

\bar{K}_g : 温度 \bar{T} におけるガス熱伝導度

\bar{T} : ギャップ平均温度

\bar{W} : 混合ガスの平均原子量

P_G : ギャップ中のガス圧

また accommodation coefficient a は次式で計算される。

$$a = A_1 \cdot \exp \left\{ - \left[\ln(W) - A_2 \right]^2 / A_3 \right\}$$

A_1, A_2, A_3 : fitting parameter

(2) 固体-固体間の熱伝導による熱伝達

固体-固体間の熱伝導による熱伝達成分 H_{solid} は次式で与えられる。

$$H_{solid} = \frac{A \cdot K_S \cdot P}{Y}$$

A : fitting parameter

K_S : 実効固体熱伝導度

$$K_S = 2 \cdot K_c \cdot K_f / (K_c + K_f)$$

K_c : 被覆管の熱伝導度

K_f : 燃料の熱伝導度

P : 燃料/被覆管接触圧力

Y : 被覆管の降伏強さ

(3) 放射による熱伝達

放射による熱伝達成分 H_{rad} は次式で与えられる。

$$H_{rad} = b \cdot (T_f + T_c) \cdot (T_f + T_c) / \left[\frac{1}{\epsilon_f} \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right]$$

b : ボルツマン定数

T_f : 燃料表面温度

T_c : 被覆管内面温度

- ϵ_f : 燃料の放射率
 ϵ_c : 被覆管の放射率
 A_f : 燃料の単位長当りの面積
 A_c : 被覆管の単位長当りの面積

2.2 物理計算モデル

HOTGAP コード中に組み込まれている物理計算モデルは次のとおりである。

(1) ギャップ中のガス組成 (サブルーチン FISGAS)

FP ガスの体積は次式で与えられる。

$$V_{FP} = V_{tot} - (V_{pl} + V_{SG} + V_{wv})$$

- V_{FP} : FP ガス体積
 V_{tot} : 全ガス体積 (照射後試験からの実測値)
 V_{pl} : 照射前プレナムガス体積
 V_{SG} : 吸着ガス体積
 $V_{SG} = \beta_{SG} \cdot M_f$
 β_{SG} : 燃料単位重量当りの吸着ガス量
 M_f : 燃料重量
 V_{wv} : 水分体積
 $V_{wv} = \beta_{wv} \cdot M_f$
 β_{wv} : 燃料単位重量当りの水分量

各ガスのモル分率は次式で与えられる。

1) He のモル分率, X_{He}

$$X_{He} = V_{pl} \cdot [1 - (v_{xe} + v_{Kr})] / V_{tot}$$

- v_{xe} : タグガスとして封入された Xe の体積比
 v_{Kr} : タグガスとして封入された Kr の体積比

2) Xe のモル分率, X_{Xe}

$$X_{Xe} = [V_{FP} \cdot \frac{\sum y_{xe,i} \cdot f_i}{\sum y_{xe,i} \cdot f_i + \sum y_{Kr,i} \cdot f_i} + v_{xe} \cdot V_{pl}] / V_{tot}$$

- $y_{xe,i}$: fissile i からの Xe の fission yield
 $y_{Kr,i}$: fissile i からの Kr の fission yield
 f_i : fissile i の全核分裂に対する核分裂比

3) Kr のモル分率, X_{Kr}

$$X_{Kr} = [V_{FP} \cdot \frac{\sum y_{Kr,i} \cdot f_i}{\sum y_{Xe,i} \cdot f_i + \sum y_{Kr,i} \cdot f_i} + v_{Xe} \cdot V_{pl}] / V_{tot}$$

4) N₂ のモル分率, X_N

$$X_N = x_N \cdot V_{SG} / V_{tot}$$

x_N : 吸着ガス中の N₂ の体積比

5) Ar のモル分率, X_{Ar}

$$X_{Ar} = x_{Ar} \cdot V_{SG} / V_{tot}$$

x_{Ar} : 吸着ガス中の Ar 体積比

(2) ホットギャップ

照射中における燃料/被覆管ギャップ, すなわちホットギャップは次式で与えられる。

$$G_H = R_{C,H} - R_{f,H}$$

G_H : ホットギャップ ($G_H \geq 0$)

$R_{C,H}$: 照射中の被覆管内径

$R_{f,H}$: 照射中の燃料半径

照射中の被覆管内径および燃料半径は次式で与えられる。

1) 照射中の被覆管内径, $R_{c,H}$

$$R_{c,H} = R_{c,c} \cdot [1 + \alpha_c \cdot (T_c - 20)]$$

$R_{c,c}$: 照射後の被覆管内径 (照射後試験からの実測値)

α_c : 被覆管の線膨張率

$$\alpha_c = \alpha_1^c + \alpha_2^c \cdot T_c$$

α_1^c, α_2^c : 定数

T_c : 被覆管肉厚平均温度

2) 照射中の燃料半径, $R_{f,H}$ (サブルーチン FDELD)

$$R_{f,H} = R_{f,c} \cdot \left[1 + \frac{\int_{R_c}^{R_{f,c}} \alpha_f \cdot T_f \cdot r \cdot dr}{\int_{R_c}^{R_{f,c}} r \cdot dr} \right]$$

$R_{f,c}$: 照射後の燃料半径 (照射後試験からの実測値)

R_c : 照射後の中心空孔径 (照射後試験からの実測値)

α_f : 燃料の線膨張率

$$\alpha_f = \alpha_1^f + \alpha_2^f \cdot T_f$$

α_1^f, α_2^f : 定数

T_f : 半径 r における燃料温度

r : 燃料中心からの距離

(3) 燃料/被覆管接触圧

燃料と被覆管が接触しない時被覆管はプレナムガスによる内圧を受ける。

$$P_{pl} = \left(\frac{V_{tot} \cdot T_H}{V_{pl} \cdot T_c} - 1 \right) P_o$$

P_{pl} : 照射中のプレナムガス圧力

V_{tot} : 常温での全プレナムガス体積 (照射後試験からの実測値)

V_{pl} : プレナム体積

T_H : 照射中のプレナム温度

T_c : 常温

P_o : 常温の大気圧

一方、燃料と被覆管が接触する時、その接触圧は燃料と被覆管の弾性変形のみを考慮して2つの薄肉円筒の焼きばめと同様の取扱いにより計算される。

$$P = \frac{\frac{G}{R_{c,o}} \cdot E_c + 2 \cdot \left[\frac{P_E \cdot R_{c,o}^2}{R_{c,o}^2 - R_{c,i}^2} + \frac{P_{pl} \cdot R_{f,o}^2}{R_{f,o}^2 - R_{f,i}^2} \cdot \left(\frac{E_c}{E_f} \right) \right]}{\nu_c + \frac{R_{c,o}^2 + R_{c,i}^2}{R_{c,o}^2 - R_{c,i}^2} + \left(\frac{R_{f,o}^2 + R_{f,i}^2}{R_{f,o}^2 - R_{f,i}^2} - \nu_f \right) \cdot \left(\frac{E_c}{E_f} \right)}$$

$$G = R_{c,i} - R_{f,o}$$

$R_{c,o}$: 熱膨張による自由状態下の被覆管外径

$R_{c,i}$: " 内径

$R_{f,o}$: " 燃料外径

$R_{f,i}$: " 内径

E_c : 被覆管のヤング率

ν_c : " ポアソン比

E_f : 燃料のヤング率

ν_f : 燃料のポアソン比

P_{ex} : 被覆管外圧

P_{pl} : プレナムガス圧

但し、接触圧に基づいて計算される被覆管の周方向応力が、被覆管の降伏応力を越える時、接触圧は降伏応力に基づいて計算される。

$$P = \{ \sigma_y \cdot (R_{c,o}^2 - R_{c,i}^2) - 2 \cdot P_{ex} \cdot R_{c,o}^2 \} / (R_{c,o}^2 + R_{c,i}^2)$$

σ_y : 被覆管の降伏応力

(4) 燃料温度 (サブルーチン PEFT)

燃料表面温度は次式で表わされる。

$$T_s = T_{cl} + \frac{Q}{\pi \cdot D_g \cdot H_{gap}}$$

T_s : 燃料温度

T_{cl} : 被覆管内面温度

Q : 線出力

D_g : ボヤップ中心直径

H_{gap} : ギャップコンダクタンス

燃料内の温度分布は THERM コードと同様の計算方法により計算される。すなわち円柱燃料の径方向一次元熱伝達に関する定常状態を表わす式を解くことにより計算される。

$$\int_{T_i}^{T_{i+1}} K_n dT = - \int_{R_i}^{R_{i+1}} \left[\frac{1}{r} \int r \cdot q_n'''(r) dr + \frac{C}{r} \right] dr$$

$$C = \frac{q'_{r=R_n}}{2\pi} - \left[\int r \cdot q_n'''(r) dr \right]_{r=R_n}$$

T_i : $r = R_i$ の温度

T_{i+1} : $r = R_{i+1}$ の温度

K_n : 領域 n の燃料熱伝導度

R_i, R_{i+1} : 領域 n 内の半径

$q_n'''(r)$: 領域 n の出力密度分布

$q'_{r=R_n}$: $r = R_n$ の円柱の線出力

R_n : 領域 n の最外径

組織変化を考えない時の径方向出力密度分布を表わす関数 $f(r)$ が

$$\frac{\int_{R_I}^{R_O} 2\pi r \cdot f(r) \cdot dr}{\int_{R_I}^{R_O} 2\pi r \cdot dr} = 1$$

R_0 : 燃料外径

R_I : 燃料内径

の条件で規格化されている時、領域 n の出力密度分布は

$$q_n'''(r) = Q_n''' \cdot f(r)$$

Q_n''' : 領域 n の体積平均出力密度

で表わされる。この時 Q_n''' は

$$Q_n''' = Q_{n-1}''' \cdot \frac{\int_{R_{v,n-1}}^{R_n} 2\pi r \cdot f(r) \cdot dr}{\int_{R_{v,n}}^{R_n} 2\pi r \cdot f(r) \cdot dr}$$

$$R_{v,n} = \left[R_n^2 - \frac{\rho_n}{\rho_{n-1}} (R_n^2 - R_{v,n-1}^2) \right]^{1/2}$$

$R_{v,n}$: 1 ~ n 迄の領域があるときの中心空孔径

$R_{v,n-1}$: 1 ~ $n-1$ "

ρ_n : 領域 n の燃料密度

ρ_{n-1} : " $n-1$ "

で表わされる。但し領域 1 の体積平均出力密度は

$$Q_1''' = \frac{Q}{\pi \cdot (R_0^2 - R_I^2)}$$

である。

また $q'_{r=R_n}$ は

$$q'_{r=R_n} = Q_n''' \cdot \int_{R_{v,n}}^{R_n} 2\pi r \cdot f(r) \cdot dr$$

で与えられる。

出力密度分布関数 $f(r)$ はコード中では半径 r の多項式 (最大次数 8) で近似される。

HOTHAP コードは燃料内組織を

- i) 製造時領域
- ii) 等軸晶領域
- iii) 柱状晶領域
- iv) 溶融領域

の4領域モデルとしており、各領域外径は次の2つの方法のどちらかを選択することにより決められる。

1) 組織境界温度の定義 (INITAL = 1 と入力)

等軸晶、柱状晶の発達温度および溶融温度を入力することにより、これらの温度に基づいて境界径が計算される。

2) 領域外径の定義 (INITAL = 2 と入力)

等軸晶、柱状晶または溶融領域径を直接入力する。通常これらの領域径は照射後試験の結果得られる各組織外径の実測値を使用する。

なおいずれの場合も組織変化に伴う密度の変化は考慮され、各組織の密度は入力することにより定められる。

3. 物性値

HOTGAPコードで使用される物性値について以下に述べる。

(1) 燃料の熱伝導度

1) GEAP-13967の式²⁾

$$K = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.0226(1-\rho)}{O/M - 1.90}\right] T} + 7.214 \times 10^{-3} T^3$$

K : Thermal conductivity, W/cm·°C

T : Fuel temperature, °C

ρ : Fractional fuel density

O/M : Oxygen to metal ratio

本式を使用する時は ICOND = 0 と入力する。

2) Evans の式³⁾

$$K = \frac{1-P}{1+\beta \cdot P} \left[\frac{1}{8.3233 + 0.02708 T + 195.67 (2.0 - O/M)} + 1.157 \times 10^{-12} T^3 \right]$$

K : Thermal conductivity, W/cm·°C

T : Fuel temperature, °C

O/M : Oxygen to metal ratio

P : Fractional porosity

β : Porosity shape factor

for Ar or N₂ gas in pores, $\beta = 1.4$ and

for He gas in pores ,

$$\beta = 6916 T^{-1.375} \quad \text{for } 1.98 \leq O/M \leq 2.00$$

$$\beta = 26275 T^{-1.615} \quad \text{for } O/M < 1.98$$

$$\beta = 1.4 \quad \text{for fuel irradiated to high burnup}$$

本式を使用する時は ICOND = 1 と入力する。

3) WARDの式⁴⁾

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

K : Thermal conductivity, W/cm·°K

T : Fuel temperature, °K

P : Fractional porosity

本式を使用する時は ICOND = 2 と入力する

(2) 熱膨張率

1) 被覆管

$$\alpha_c = 1.62 \times 10^{-5} + 3.7908 \times 10^{-9} \cdot T$$

α_c : 被覆管の線膨張率

T : 被覆管温度, °C

2) 燃料

$$\alpha_f = 0.6578 \times 10^{-5} + 2.997 \times 10^{-9} T$$

α_f : 燃料の線膨張率

T : 燃料温度, °C

(3) ヤング率

1) 被覆管

$$E_c = 2.1655 \times 10^6 - 9.36108 \times 10^2 T$$

E_c : 被覆管のヤング率, dynes/cm²

T : 被覆管温度, °C

2) 燃料

$$E_f = 2.5 \times 10^{12} - 4.455 \times 10^8 T$$

E_f : 燃料のヤング率, dynes/cm²

T : 燃料温度, °C

(4) ボアソン比

$$\nu = 0.3 \quad \text{for cladding and fuel}$$

(5) 降伏応力

$$\sigma_y = 4.82 \times 10^9 - 1.078 \times 10^7 (T - 555)$$

σ_y : 被覆管の降伏応力, dynes/cm²

T : 被覆管内面温度, °C

(6) ガスの熱伝導度

$$K_{\text{He}} = 1.3084 \times 10^{-3} + 3.691 \times 10^{-6} T - 5.848 \times 10^{-10} T^2$$

$$K_{\text{Xe}} = 5.7392 \times 10^{-5} + 1.4509 \times 10^{-7} T - 2.3229 \times 10^{-11} T^2$$

$$K_{\text{Kr}} = 9.5598 \times 10^{-5} + 2.1357 \times 10^{-7} T - 3.5057 \times 10^{-11} T^2$$

$$K_{\text{N}_2} = 2.570 \times 10^{-4} + 5.651 \times 10^{-7} T - 7.336 \times 10^{-11} T^2$$

$$K_{\text{Ar}} = 1.716 \times 10^{-4} + 4.122 \times 10^{-7} T - 8.015 \times 10^{-11} T^2$$

K_{He} : He ガスの熱伝導度, W/cm · °C

K_{Xe} : Xe "

K_{Kr} : Kr "

K_{N_2} : N₂ "

K_{Ar} : Ar "

T : ギャップ温度, °C

4. 入力/出力

入力は NAMELIST 形式 (変数名 IPT) で読み込まれ, いくつかのパラメーターは BLOCK DATA で定義されており入力されない時は BLOCK DATA の値が入るようになっている。

入力するパラメーターとその内容を Table 1 に示す。

入力および出力のサンプルを Fig. 2 および Fig. 3 に, またこの時の JOB 制御文を Fig. 4 に示す。

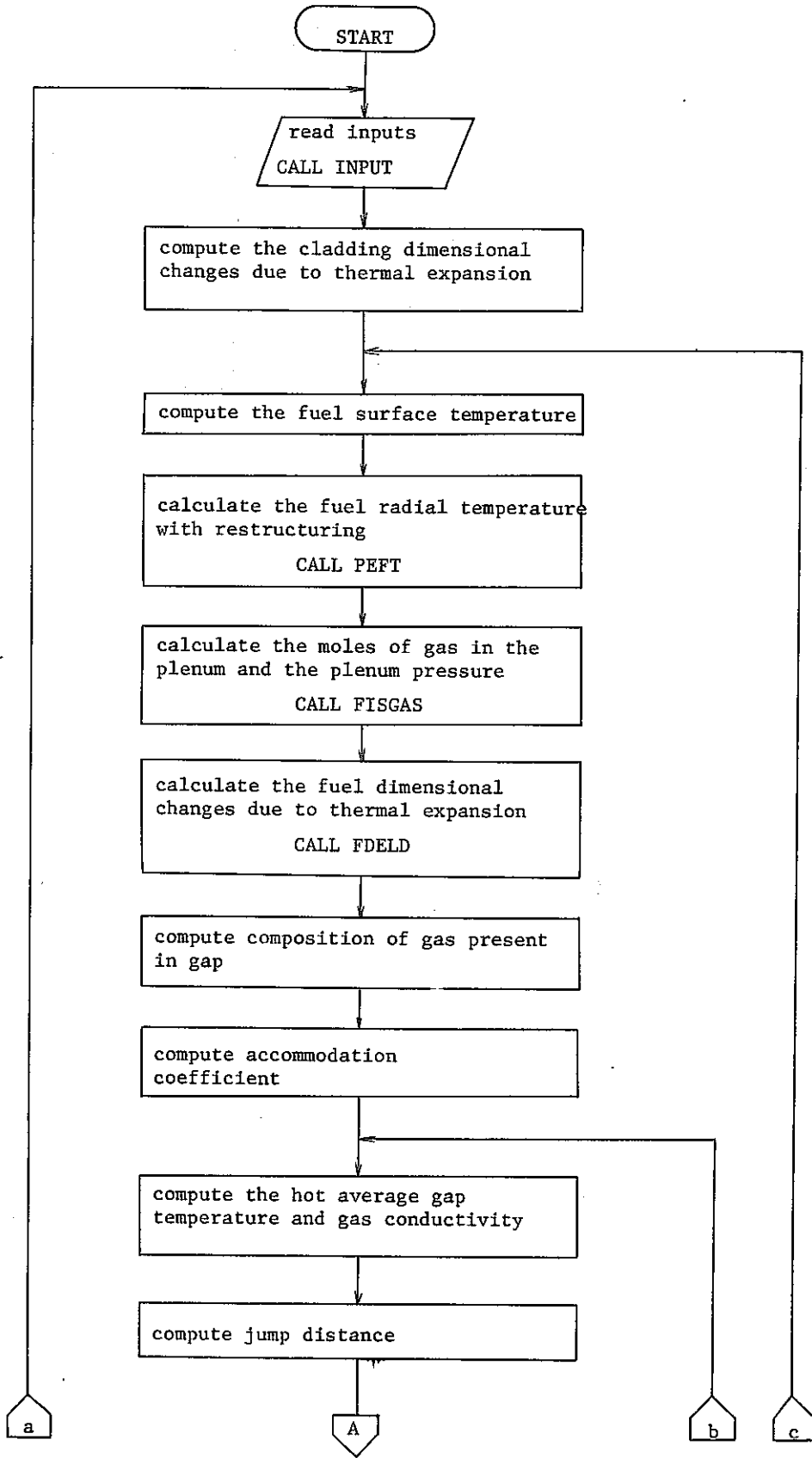


Fig. 1 HOTGAP code main flow

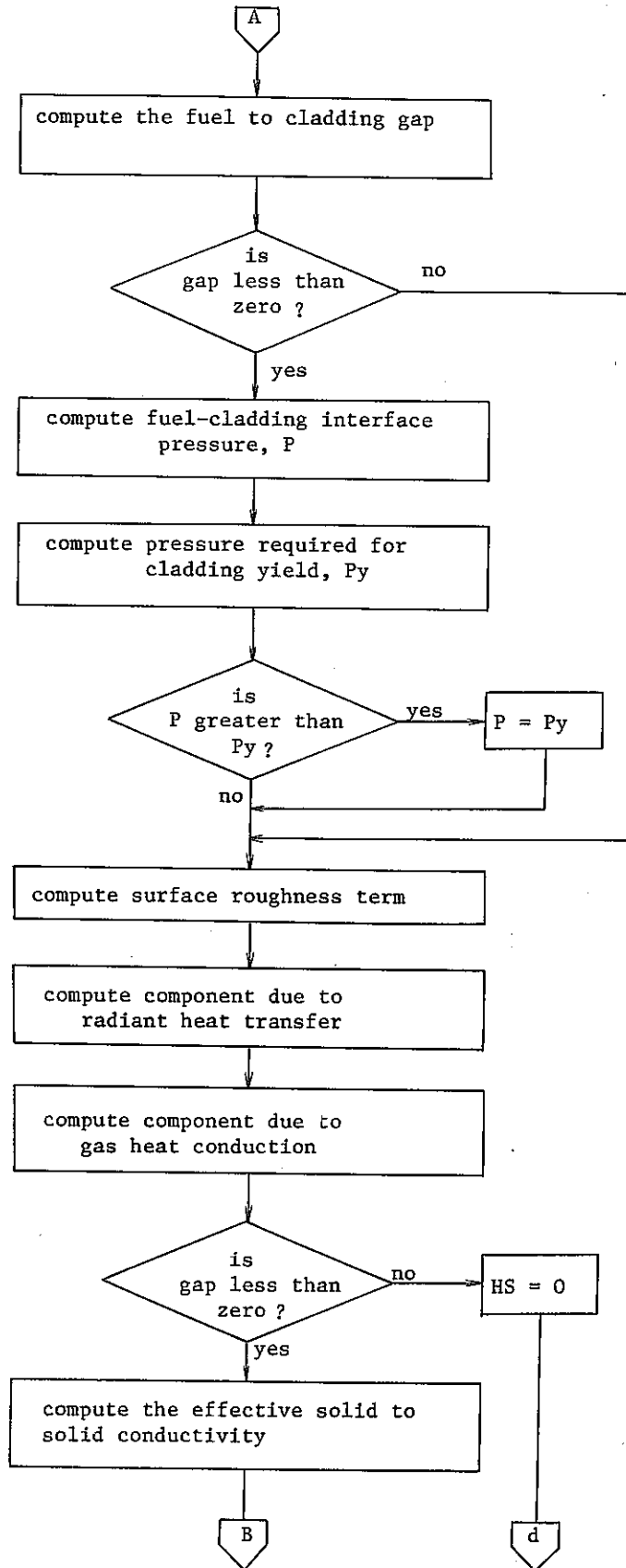


Fig. 1 continued

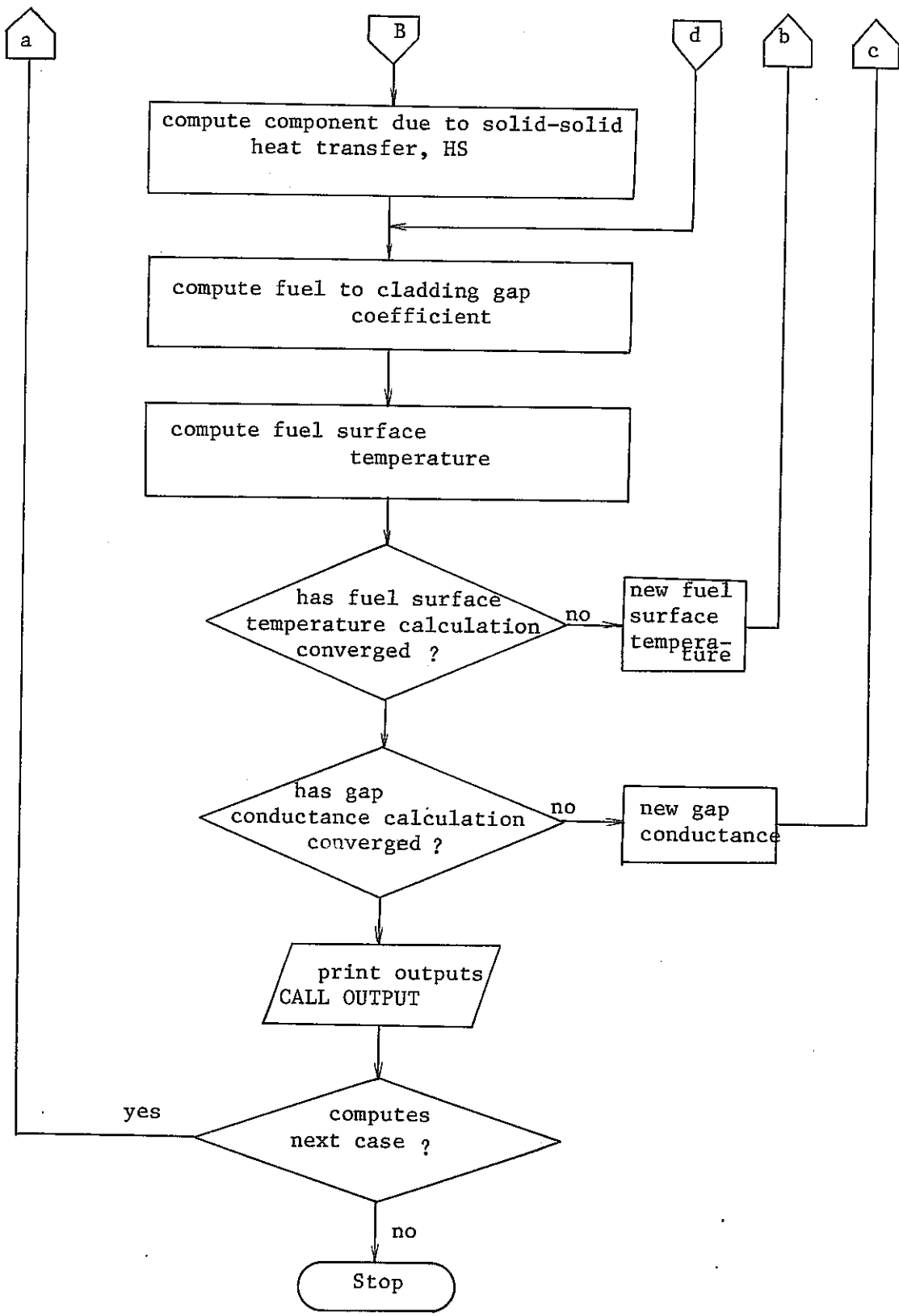


Fig. 1 continued

Table 1 Description of HOTGAP input

SYMBOL	UNIT	DESCRIPTION	VALUE (given in code)
ALPHAO	cm/(cm. °C)	Intercept in the linear equation for the mean coefficient of thermal wxpansion	1.62×10^{-5}
ALPHAS	cm/(cm. °C)	Slope in the linear equation for the mean coefficient of thermal expansion	3.7908×10^{-9}
A1 A2 A3		Fitting coefficient in the expression relating the accommodation coefficient in the temperature jump distances	0.8121 4.5167 7.7139
CCLOD	cm	Cladding outer idameter as irradiated	
CCLID	cm	Cladding inner diameter as irradiated	
C(I) I=1~8		Coefficients of the polynomial equation relating the radial power density profile	C(1)=1. C(I)=0. I=2~8
CFOD	cm	Fuel outer diameter as irradiated	
CK	w/(cm. °C)	Cladding conductibity	0
CK1	w/(cm. °C)	Intercept of the linear expression for the cladding conductivity	0.13283
CK2	w/(cm. °C ²)	Slope of the linear expression for the cladding conductivity	1.3×10^{-4}
CCPGM	cc/gr of oxide	Sorbed gas in fabricated fuel	
CGGD	cm	Columnar grain growth diameter as irradiated	0
CLADOD	cm	Cladding outer diameter as fabricated	
CLADID	cm	Cladding inner idameter as fabricated	
CLODT	°C	Caldding outer surface temperature	
CLIDT	°C	Cladding inner surface temperature	
CSU235	barns	Fission cross section for U-235	582
CSU238	barns	Fission cross section for U-238	0
CSPU	barns	Fission cross section for Pu	746

Table 1 continued

SYMBOL	UNIT	DESCRIPTION	VALUE (given in code)
DISH		Fraction of the fuel column volume occupied by the dished ends of the pellets	0
DEN(I) I=1~4	% TD	DEN(1); As-fabricated fuel density DEN(2); Equiaxed region density DEN(3); Columnar region density DEN(4); Melted region density	
DMLT	cm	Melted region diameter	0
DVOIDI	cm	Fuel inner diameter as fabricated	0
EFPD	day	Equivalent Full Power Days	Calculate based on power and burnup
EGGD	cm	Equiaxed grain growth diameter as irradiated	0
EHGP		Criteria for gap conductance convergence	0.002
EMC		Cladding emissivity in the expression for the radiant heat transfer coefficient	0.9
EMF		Fuel emissivity in the expression for the radiant heat transfer coefficient	0.8
ELGAMA	MeV	Energy loss due to gamma radiation	9.2
EPU		Deposited energy per fission for Pu	211
ETCHK		Criteria for fuel surface temperature in gas conductance convergence	2
EU235	MeV	Deposited energy per fission for U-235	203
EU238	MeV	Deposited energy per fission for U-238	201
EXTERP	kg/cm ²	External cladding pressure	
FACTOR		Uncertainty factor for fuel thermal conductivity	1
FALFO	cm/(cm.°C)	Intercept in the linear equation for the mean coefficient of fuel thermal expansion	6.578×10^{-6}

Table 1 continued

SYMBOL	UNIT	DESCRIPTION	VALUE (given in code)
FALFT	cm/(cm. $^{\circ}$ C 2)	Slope in the linear equation for the mean coefficient of fuel thermal expansion	2.997×10^{-9}
FLEN	cm	Active fuel column length	
FN		Fraction of the sorbed gas which is not helium or hydrogen. This gas is assumed to have the physical characteristics of the nitrogen	0.1
FODI	cm	Fuel outer diameter as fabricated	
FYU5X		Fission yield of xenon for U-235	0.24632
FYU5K		Fission yield of krypton for U-235	0.03623
FYU8X		Fission yield of xenon for U-238	0
FYU8K		Fission yield of krypton for U-238	0
FYPUX		Fission yield of xenon for Pu	0.27503
FYPUK		Fission yield of krypton for Pu	0.016165
GMW(I) I=1~5		GMW(1); Molecular weight of helium GMW(2); Molecular weight of xenon GMW(3); Molecular weight of krypton GMW(4); Molecular weight of nitrogen GMW(5); Molecular weight of argon	4.0 131.3 83.7 7.14 39.94
HSAV1	w/(cm 2 . $^{\circ}$ C)	Initial value of gap conductance	0.6
HG1		Fitting coefficient in the expression relating the surface roughness effect	1.1095×10^{-3}
HG2		Fitting coefficient in the expression relating the surface roughness effect	-3.394×10^{-10}
HG3		Fitting parameter in the expression relating the solid to solid heat transfer coefficient	13.7
HG4		Fitting parameter in the expression relating the surface roughness effect	3.0×10^{-3}

Table 1 continued

SYMBOL	UNIT	DESCRIPTION	VALUE (given in code)
ICOND		Indicator for the selection of the equation relating fuel thermal conductivity	0
INITAL		Indicator for the selection of the calculation relating fuel restructuring	1
ISTOP		Indicator for the running of next calculation case	0
KRFIL	%	Percent of krypton in the fill gas	0
LIMIT		Order of the polynomial equation relating the radial power density profile	1
OMR		O/M (Oxygen to metal ratio)	
PBU	MWD/MTM	Local burnup	0
PLENL	cm	Active plenum length	
PLENT	°C	Plenum temperature	Cladding outer surface temperature
PNU		Cladding and fuel poisson's ratio	0.3
POWER	w/cm	Local linear power	
PPM	ppm	Water vapor content in fabricated fuel	
PU		Fraction of the metal in the fuel which is either Pu-239 or Pu-241	0.1773
TD	g/cc	Fuel theoretical density	
TOTGAS	CC(STP)	Total gas volume in the plenum of the as irradiated fuel pin	
TREST(I) I=1~3	°C	TREST(1); Equiaxed grain growth temperature TREST(2); Columnar grain growth temperature TREST(3); Melting temperature	1650 2144 2760
U-235		Fraction of the metal in the fuel which is U-235	0.7405
XEFIL	%	Percent of xenon in the fill gas	0

Table 1 continued

SYMBOL	UNIT	DESCRIPTION	VALUE (given in code)
YEO	dynes/cm ²	Intercept in the linear equation of yield strength for cladding	4.82×10^9
YES	dynes/(cm ² .°C)	Slope in the linear equation of yield strength for cladding	-1.078×10^7
YMOD0	dynes/cm ²	Intercept of the linear expression for young's modulus of cladding	2.1655×10^6
YMODS	dynes/(cm ² .°C)	Slope of the linear expression for young's modulus of cladding	-9.36108×10^2
YMODFO	dynes/cm ²	Intercept of the linear expression for uoung's modulus of fuel	2.5×10^{12}
YMODFS	dynes/(cm ² .°C)	Slope of the linear expression for young's modulus of fuel	-4.455×10^8

Fig. 2 Sample input

```
ANALYSIS OF GETR-T DATA (21-PIN, NO.50307)
&IPT FLEN=7.99,FODI=0.551,CFOD=0.559,
DEN=0.9093,0.96,0.96,0.99,0.9,OMR=1.987,
TD=10.981,INITAL=2,EGGD=0.417,CGGD=0.174,
DMLT=0.165,CLADOD=0.63,CLADID=0.559,
CCLOD=0.63146,CCLID=0.56086,CLODT=566,
CLIDT=638.,PLENL=3.117,POWER=869.,PBU=9287.,
LIMIT=8,C=0.20563,2.8749,-47.643,3.0102E02,
-9.1281E02,1.4469E03,-1.15E03,3.6321E02,
TOTGAS=4.028,CCPGM=0.05,FM=0.5,PPM=3.375,
EXTERP=1.92,ICOND=2,
&END
```

Fig. 3 Sample output

ANALYSIS OF GETR-T DATA (21-PIN, NO.50307)

INPUT DATA

```

-----
FLEN = 7.990 (CM)-----FUEL COLUMN LENGTH
FODI =0.55100 (CM)-----FUEL OUTER DIAMETER (AS FABRICATED)
DVOIDI =0.0 (CM)-----FUEL INNER DIAMETER (AS FABRICATED)
CFOD =0.55900 (CM)-----FUEL OUTER IDAMETER (IRRADIATED)

DEN =0.90930,96000,99000,9000-----FUEL DENSITY
TREST =1650,02144,02760,0(DEG.C)----FUEL RESTRUCTURING TEMPERATURE
OMR =1.987 -----O/M
TD =10.981 (GM/CC)-----FUEL THEORETICAL DENS ITY
DISH =0.0 -----FRACTION OF FUEL VOLUME OCCUPIED BY DISH

INITAL =2 -----INDICATOR OF THE STARTING PHASE
EGGD =0.41700 (CM)-----EQUAXED GRAIN FROWTH DIAMETER
CGGD =0.17400 (CM)-----COLUMNAR GRAIN GROWTH DIAMETER
DMLT =0.16500 (CM)-----MELT DIAMETER

PU =0.177 -----FRACTION OF METAL WHICH IS PU239+PU241
U235 =0.740 -----FRACTION OF METAL WHICH IS U235

CLADOD =0.63000 (CM)-----CLADDING OUTER DIAMETER (AS FABRICATED)
CLADID =0.55900 (CM)-----CLADDING INNER DIAMETER (AS FABRICATED)
CCLOD =0.63146 (CM)-----CLADDING OUTER DIAMETER (IRRADIATED)
CCLID =0.56086 (CM)-----CLADDING INNER DIAMETER (IRRADIATED)
CLODT = 566.0 (DEG.C)-----CALDDING OUTER SURFACE TEMPERATURE
CLIDT = 638.0 (DEG.C)-----CLADDING INNER SURFACE TEMPERATURE

CK = 0.0 (W/CM-DEG.C)-----CLADDING CONDUCTIVITY
ALPHAO = 0.1620E-04 (CM/CM-DEG.C)---CLADDING LINEAR EXPANSION COEF.-INTERCEPT
ALPHAS= 0.3791E-08 (CM/CM-DEG.C**2)-CLADDING LINEAR EXPANSION COEF.-SLOPE
YMOD0 = 0.2165E+07 (KG/CM**2)-----CLADDING YOUNGS MODULUS - INTERCEPT
YMODS=-0.9361E+03 (KG/CM**2-DEG.C)---CLADDING YOUNGS MODULUS - SLOPE
PNU = 0.3000E+00 -----CLADDING POISSONS PATIO

PLENL = 3.1170 (CM)-----PLENUM LENGTH

POWER = 869.0 (W/CM)-----LOCAL LINEAR POWER
PBU = 9287.0 (MWD/T)-----LOCAL BURN UP
EFPD = 21.4 (DAYS)-----OPERATING TIME-EFFECTIVE FULL POWER DAYS
LIMIT =8 -----DIMENSION OF POWER PROFYL EQUATION
C = 0.205630E+00 0.287490E+01 ---COEFICIENTS OF POWER PROFYL EQUATION
    -0.476430E+02 0.301020E+03
    -0.912810E+03 0.144690E+04
    -0.115000E+04 0.363210E+03

TOTGAS = 0.4028E+01 (CC)-----TOTAL GAS RELEASED IN PLENUM
CCPGM = 0.5000E-01 (CC/GM)-----SORBED GAS PER GRAM OF FUEL
FN = 0.5000E+00-----FRACTION OF SORBED GAS WHICH IS NITROGEN
PPM = 0.3375E+01 -----PAPTS PER MILION WATER VAPOR

EXTERP = 0.1920E+01 (KG/CM**2)-----EXTERNAL PRESSURE
PLENT = 566.0 (DEG.C)-----PLENUM TEMPERATURE

ICOND =2 -----SELECT CONDUCTIVETY EQUATION
FACTOR = 1.00 (CM)-----CONTROL FACTOR OF FUEL CONDUCTIVITY

```

Fig. 3 continued

 OUTPUT

NUMBER OF ITERATION = 8

HOT CLADDING OUTER DIAMETER = 0.63825 (CM)
 HOT CLADDING INNER DIAMETER = 0.56689 (CM)
 HOT FUEL OUTER DIAMETER = 0.56843 (CM)
 HOT GAP DISTANCE = -0.00077 (CM)

GAP CONDUCTANCE = 1368.85 (BTU/FT**2-DEG.F-HR). 0.77698 (W/CM**2-DEG.C)
 HGAS = 1238.14 0.70278
 HS = 73.14 0.04151
 HRAD = 57.58 0.03268

GAS MOLE FRACTION

HELIUM = 0.2071E+00
 XENON = 0.5797E+00
 KRYPTON = 0.7220E-01
 NITROGEN = 0.1383E+00
 ARGON = 0.2765E-02

PLENUM PRESSURE = 0.1455E+02 (KG/CM**2)

REGION	INTEGRAL K-DT (W/CM)	Q(REGION)/QAVG
1	QK = 20.209	1.0000
2	QK = 9.075	1.0246
3	QK = 0.064	1.0537
4	QK = 0.108	0.9645

FUEL SURFACE RADIUS: R(1) (CM)	EQUAXED GRAIN RADIUS: R(2) (CM)	COLUMNAR GRAIN RADIUS: R(3) (CM)	MELT RADIUS : R(4) (CM)	VOID RADIUS : R(5) (CM)
0.27950	0.20850	0.08700	0.08250	0.06530
R(1)/R(1)	R(2)/R(1)	R(3)/R(1)	R(4)/R(1)	R(5)/R(1)
1.00000	0.74597	0.31127	0.29517	0.23362

FUEL SURFACE TEMPERATURE (DEG.C)	EQUAXED GRAIN TEMPERATUER (DEG.C)	COLUMNAR GRAIN TEMPERATURE (DEG.C)	MELT TEMPERATUER (DEG.C)	VOID TEMPERATUER (DEG.C)
1267.0	2277.3	2619.3	2760.0	2626.0

Fig. 4 Sample job control

```
1      ¥ CPMJOB AGFGRP,HOTGAP,ACCT='060510752592216 AGF',LIST=F
2      ¥          JOB   HOTGAP,LIST=(F,JD),ACCT='060510752592216 AGF',
3      ¥          PRTY=(1,1),TIME=30
4      ¥ EX E.HGP.B,FILE=ST.752592.THERM,VOL=000002,TIME=1
5      ¥ FD LIST=DA,VOL=WORK,CYL=(2,1),SOUT=F
6      ¥ FD UIN=DA,VOL=000003,FILE=ST.752592.SINOHARA,MEMBER=HGP.G.B1
7      ¥ JEND
```

参考文献

- 1) D.S. Dutt and R.B. Baker, HEDL-TME 74-55 (1975)
- 2) R.F. Hilbert et al., GEAP-13967 (1973)
- 3) 河田, SN 960 76-08 (1976)
- 4) J.H. Scott et al., HEDL-TME 75-9 (1975)