

JAERI - M
92-163

照射キャプセル熱計算コード
GENGTCの機能整備と2次元計算への改良

1992年11月

野村 靖・染谷 博之・伊藤 治彦

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

照射キャプセル熱計算コード
GENGTCの機能整備と2次元計算への改良

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部
野村 靖⁺・染谷 博之・伊藤 治彦

(1992年10月5日受理)

JMTRの照射試験用キャプセルは、外径30～65mmの容器（外筒）、照射試料、被覆管、試料ホルダー、内筒等から同軸多重円筒形状を構成している。それぞれの構造材の間隙には液体または気体が充填されている。また、キャプセルの冷却は、外筒外表面を流れる原子炉一次冷却水で行われる。このために、燃料試料の核分裂あるいは、キャプセル構造材のガンマ発熱のほとんどは、キャプセル構造材やギャップ層を通してキャプセル外筒外面に向かって径方向に流れる。このようなキャプセルの熱設計には、米国のオークリッジ国立研究所で開発された1次元熱計算コードGENGTCが用いられている。しかし、キャプセルを設計するためには、キャプセルを構成する構造材の材質、寸法を変えたパラメータ計算を必要とし、多くの時間と労力を要する。また、短尺燃料のようなキャプセル軸方向への熱流が有意なものについては、2次元の熱計算が必要となる。

筆者らは、キャプセル設計の効率化を目的として、(1)インプットデータ入れ替えの簡略化、(2)設計温度に基づくギャップ寸法パラメータ計算の自動化などのGENGTCコードの改良を行った。また、GENGTCに、2次元($r-z$)熱計算機能を追加したGENGTC-2の整備も行った。本報告書は、1次元熱計算コードGENGTCの改良および2次元熱計算コードGENGTC-2の整備の内容とそれぞれのコードの取扱いについてのものである。

Preparation of Functions of Computer Code GENGTIC and
Improvement for Two-dimensional Heat Transfer Calculations for
Irradiation Capsules

Yasushi NOMURA⁺, Hiroyuki SOMEYA and Haruhiko ITO

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 5, 1992)

Capsules for irradiation tests in the JMTR (Japan Materials Testing Reactor), consist of irradiation specimens surrounded by a cladding tube, holders, an inner tube and a container tube (from 30mm to 65mm in diameter). And the annular gaps between these structural materials in the capsule are filled with liquids or gases. Cooling of the capsule is done by reactor primary coolant flowing down outside the capsule. Most of the heat generated by fission in fuel specimens and gamma absorption in structural materials is directed radially to the capsule container outer surface. In thermal performance calculations for capsule design, an one(r)-dimensional heat transfer computer code entitled GENGTIC, originally developed in Oak Ridge National Laboratory, U.S.A., has been frequently used. In designing a capsule, are needed many cases of parametric calculations with respect to changes materials and gap sizes. And in some cases, two(r,z)-dimensional heat transfer calculations are needed for irradiation test capsules with short length fuel rods.

Recently the authors improved the original one-dimensional code GENGTIC, (1) to simplify preparation of input data, (2) to perform automatic calculations for parametric survey based on design temperatures, etc. Moreover, the computer code has been improved to perform r-z two-

⁺ Department of Fuel Safety Research, Tokai Research Establishment

dimensional heat transfer calculation. This report describes contents of the preparation of the one-dimensional code GENGTC and the improvement for the two-dimensional code GENGTC-2, together with their code manuals.

Keywords: Computer Code, Heat Transfer Calculation, Capsule, Irradiation Experiment, r-z Two-dimensional Calculation

目 次

1. はじめに	1
2. GENGTC 1次元熱計算モデル	2
3. 特殊目的1次元熱計算の自動化	10
4. 2次元熱計算への機能拡張	27
4.1 z方向熱流計算モデル	27
4.2 2次元計算の内容と特徴	31
4.3 計算コードの検証	34
5. 入力形式と計算実行の方法	57
6. おわりに	66
参考文献	66

Contents

1. Introduction	1
2. GENGTC One-dimensional Heat Transfer Calculation	2
3. Built-in Feature of Specific Purpose One-dimensional Thermal Calculation	10
4. Expansion of Function to Two-dimensional Heat Transfer Calculation	27
4.1 Two-dimensional Heat Transfer Calculation	27
4.2 Contents and Features of Two-dimensional Calculations	31
4.3 Verification of Computer Code	34
5. Input Data Formats and Method of Using the Code	57
6. Ending	66
References	66

1. はじめに

材料試験炉などを用いる照射実験では、照射試料の温度を一定に保持して燃料や材料の照射挙動を調べることが多い。これらの燃料や材料を収納するキャプセルを設計するに当たっては、設計目標温度を実現するため数多くの熱伝達計算を行う必要がある。キャプセルは、中心部に照射試料を配置し、その周囲を被覆管、熱媒体、内筒、外筒（外径30～65mm、長さ約800mm）の各容器が同軸多重円筒状に取り囲んでおり、その円筒間の間隙には液体または気体が充填されている構造が一般的である。そして、キャプセル内での発熱はキャプセル外筒外側を流れる原子炉一次冷却水で冷却される。これらの特徴を有するキャプセルの熱計算用には、従来、米国のオークリッジ国立研究所で開発された1次元熱計算コードGENGTC(Generalized Gap Temperature Calculation)¹⁾ が用いられることが多い。これは、このコードが比較的単純な計算方式を採用しており、燃料の核分裂発熱、固体構造材のガンマ線吸収発熱、熱伝導率及び比熱の温度依存性、輻射熱伝達率ばかりでなく、温度上昇時の熱膨張による部材の寸法変化も考慮しているからである。

しかしながら、元々のGENGTCコードでは1組の入力データに対して、1個のキャプセル内部の温度分布が求められるだけであり、設計目標を達成するためには多くの回数の計算を行われなければならない。筆者らは、これらの計算を各種目的に応じていくつかに分類できる特殊なものに対しては、自動的にプログラム内部で処理できるように改良した。これらは、(1)材質や構造を変化させて最適条件を求めるパラメータサーベイ計算、(2)設計目標温度を達成するための部材寸法の決定計算、(3)入力データに誤差を考慮したときのキャプセル内部温度の誤差変動の算出などである。

上に述べたように、GENGTCコードは元々1次元熱計算用にプログラムされており、発熱燃料の直径に比べて軸長が長く、軸方向に流れる熱流を無視した無限長円筒の熱伝達計算式を用いてもそれほど計算誤差が大きい場合用いられる。しかし、近年になって長さの短い燃料ペレットを軸方向に多段に分けて並べる場合や、1000℃以上の過酷な照射条件を課すなど、複雑なキャプセル構造あるいは照射条件の変化により、単に1次元熱計算では計算誤差が大きくなり、設計目標を達成するために2次元的な評価が要求されるようになってきた。そこで、筆者らは上述したGENGTC 1次元熱計算コードの有する特長を保存しつつ、2次元計算も可能なように機能を拡張するようプログラムを改良した。

さらに、上述したGENGTCコードの整備・改良に当たり、元々 BASICで書かれたプログラムを FORTRAN77の言語で書き直し、MS-DOSの上で稼働するパーソナルコンピュータで使用可能にした。

本報告書は、このGENGTCコードの整備・改良の内容について述べるとともに、コードの取扱説明書である。報告書の構成は、第2章に計算プログラムの根幹部分であり、また特徴を代表する GENGTC 1次元熱計算モデルについて述べ、第3章で1次元熱計算による自動化された各種目的計算の内容を説明し、第4章では2次元に計算機能を拡張したプログラムの内容と特徴について述べ、第5章に計算コード使用にあたって必要となる入力データ作成方法及び計算実行の方法を説明する。

2. GENGTC 1次元熱計算モデル

一般に燃料照射実験用キャプセルの内部構造は、中心部に棒状燃料を配し、その外側に順次ガスまたは液体の層、固体の層を交互に重ねた同軸多重円筒である。燃料部分の軸長が充分長い場合には、軸に垂直な平面で切った図2.1に示すような輪切りモデルにより、径（ r ）方向一次元熱計算によりキャプセル内部の温度分布を求めることができる。GENGTC 1次元熱計算¹⁾では、図2.1に示すように多重円筒層の各表面上にノードを置いて、固体の熱膨張計算を各ノードで行い、各ノードの温度分布を求める。計算モデルは、固体-気体（液）体-固体…の交互層となり、最外側ノードは常に固体層外表面に置かれるため、最大ノード数（ ≤ 21 ）は常に奇数となる。

最外側ノードの温度、すなわちキャプセル外表面温度 T_s (°C)は次式により求める。

$$T_s = T_\infty + \frac{Q_A}{h \cdot A} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 T_∞ : 外部冷却水温度 (°C)

Q_A : 内部で発生する全熱量 (W)

A : キャプセル外表面積 (m^2)

h : 表面熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

固体の円環層の内側ノード温度 T_i (°C)は、外側ノード温度 T_o (°C)から次の無限長円筒 r 方向熱伝導方程式により求める。

$$T_i = T_o + \frac{G(r_o^2 - r_i^2)}{4k} + \left[\frac{Q_i r_i}{A_i \cdot k} - \frac{G r_i^2}{2k} \right] \log_e \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 G : ガンマ発熱密度 (W/m^3)

r_i : 円環層の内側ノード半径 (m)

r_o : 円環層の外側ノード半径 (m)

k : 円環層の熱伝導率 ($W/m \cdot ^\circ C$)

A_i : 円環層の内側表面積 (m^2)

Q_i : 円環層の内側表面を通過して流入する熱量 (W)

円環層の熱伝導率は、内側と外側の平均温度を円環層の温度として、次に示すように多項表示に求めらる。

$$k = C_0 + C_1 \cdot \bar{T} + C_2 \cdot \bar{T}^2 + C_3 \cdot \bar{T}^3 + C_4 \cdot \bar{T}^4 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

計算コードでは、 C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 の係数の値が用意されており、外側ノード温度 T_o を基として、最初は内側ノード温度 $T_i = T_o$ とにおいて k を求め、次にこの k を(2.2)式に入れて T_i を求め、

$\bar{T} = \frac{1}{2} (T_i + T_o)$ として k を求め、というくり返し計算を 5 回行って T_i の収束値を求める。

固体と固体の間の円環気体層では、熱伝導の他に熱輻射も考慮して計算を行う。具体的には次に示すステップによって外側ノード温度 T_o から内側ノード温度 T_i を求める。

- (1) はじめに T_i を T_o に等しいと置く。これを T_i' と記すことにする。増分を $+20^\circ\text{C}$ に設定する。
- (2) 次式により円筒形状に対する熱輻射形態係数を求める。

$$F_{i/o} = \frac{1}{1/e_i + (r_i/r_o)[(1/e_o) - 1]} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで e_i, e_o はそれぞれ内側表面及び外側表面の輻射率である。

- (3) T_i' に増分を加えて求まる温度を新たに T_i' と置く。
- (4) 平均温度 $\bar{T} = \frac{1}{2} (T_o + T_i')$ として k を (2.3) 式から求める。
- (5) $G = 0$ とおいた (2.2) 式と同様な式から、熱伝導による熱流 Q_k (W) を次式により求める。

$$Q_k = \frac{k \cdot A_i (T_i' - T_o)}{r_i \cdot \log_e \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

- (6) (2.4) 式により求めた $F_{i/o}$ を用いて、熱輻射による熱流 Q_r (W) を次式により求める。

$$Q_r = \sigma \cdot F_{i/o} \cdot A_i \left[(T_i' + 273)^4 - (T_o + 273)^4 \right] \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数であり、 $5.670 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ の値をとる。

- (7) $Q_k + Q_r$ と実際にガスギャップを通過する熱流 Q_i を比較する。
- (8) $Q_k + Q_r$ が Q_i より小さいときは、 T_i' の増分 20°C のままステップ(3)に戻り、計算をくり返す。
- (9) 上記(8)で $Q_k + Q_r$ が Q_i を超えたときは、 T_i' の増分を -3°C に変更してステップ(3)に戻り計算をくり返す。
- (10) ステップ(7)で $Q_k + Q_r$ が Q_i より小さくなったときは、 T_i' の増分を 0.3°C に変更してステップ(3)に戻り、計算をくり返す。
- (11) ステップ(7)で $Q_k + Q_r$ が Q_i を超えた時点で、この T_i' をガスギャップ層内側ノード温度 T_i として、収束したものと見なす。

以上述べたようにキャプセル内部の温度分布が、外側ノードから順次内側ノードへ向けて求められる。次に、この求められた温度分布を基に、入力したノード半径（常温での値）に対し熱膨張補正を施す。このためにはまず、各ノード構成材料（固体）の線膨張係数 α を次式により求める。

$$\alpha = \beta_1 + \beta_2 \cdot T_m \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、 β_1, β_2 は計算コード内で用意され、 T_m は固体層の内側ノードと外側ノードの温度の算

術平均として与える。このようにして求まる α は、常温(20°C)から T_m までの温度変化範囲について、その材料の平均線膨張係数を与えることに注意されたい。

(2.7)式で求まる α を用いて、加熱時のノード半径をくり返し計算により求める。この場合の前の計算で求まった半径 r を用いて、今回の温度計算 T による熱膨張補正は次式により行い、新たな加熱時の半径 r' を求める。

$$r' = r + \frac{1}{4} [r_0 \cdot \{1 + \alpha(T - 20)\} - r] \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、 r_0 : 常温(20°C)での半径

上式右辺の〔 〕の前の $\frac{1}{4}$ は、いわゆる過弛緩係数(Over Relaxation Factor)であり、

くり返し計算時の不安定な振動、あるいは収束条件の改善のため経験的に用いられている。くり返し計算の回数も、GENGTCでは経験的に12回と設定されている。(2.8)式で算出される加熱時のノード半径により、ガスギャップ間隙が 1.3×10^{-5} mより小さくなるときには計算コードでは自動的にこの間隙を 1.3×10^{-5} mに固定する。この値は接触抵抗の測定値から妥当なものと判断される。

全体のGENGTC 1次元計算フローシートを図2.2に示す。なお、本章でのGENGTC 1次元計算の計算内容の説明にはSI単位を用いることに統一しているが、元々このコードは米国で開発されたのものであり、計算プログラムは英米式単位(BTU, ft, °F, h)で書かれていた。一方、キャプセル発熱量は一般に W/cm や W/cm^2 などのC. G. S単位($W, cm, ^\circ C, s$)で表わされ、熱伝達係数(率)は $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ などの工学単位($kcal, m, ^\circ C, h$)を用いることが多い。従って、入出力データの単位表示には、計算コードのユーザーに便利なように単位をSI単位から適宜変換して用いることとする。

GENGTC 1次元熱計算用の入出力データの例を、第4章に述べる炉外実験キャプセルに関して述べる。図2.3は第5章に述べる入力形式に従って作成したものである。これには、次に述べるようなデータグループNo. 1, No. 2及びNo. 3から構成される。

- データグループNo. 1, 最大ノード数(7)

r 方向各ノード半径(cm), 材質番号, 0番号指定の材質の密度, 熱伝導率係数, 熱膨張率係数及び輻射率

- データグループNo. 2

線出力(W/cm), ガンマ発熱率(W/g)

- データグループNo. 3

表面熱伝達率($kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$), 冷却水温度($^\circ C$)

ノード1外側の熱伝達率(いわゆるギャップコンダクタンス) ($BTU/ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F$)

図2.3の入力データを用いてGENGTC 1次元熱計算を行ったときの出力データを図4.4に示す。出力データの前半は入力データの記述である。0以外の番号で指定された材質の密度, 熱伝導率係数, 熱膨張係数及び輻射率のデータはコード内で用意されたものが用いられる。出力データには、各ノードごとの輻射率の値が記述される。出力データの後半は、キャプセル内温度分布計算値が表

形式で出力される。ここで、最右側の欄の熱半径（発熱時の温度分布により熱膨張補正を施した半径）の右の（ ）内には、冷半径（常温時の半径で入力データとして与えられたもの）が示されている。

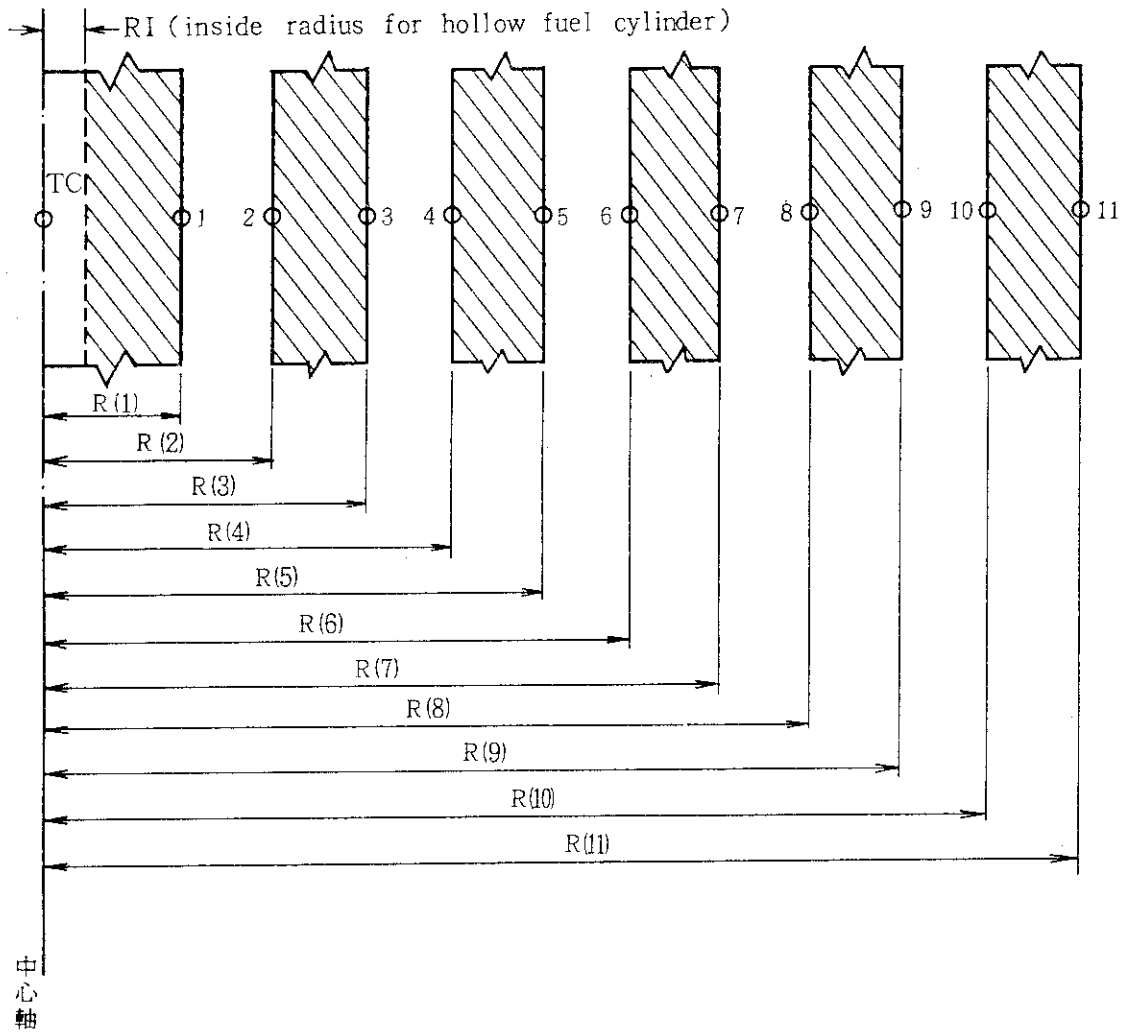


図2.1 GENGC 1次元熱計算の対象とする
キャプセル輪切りモデル

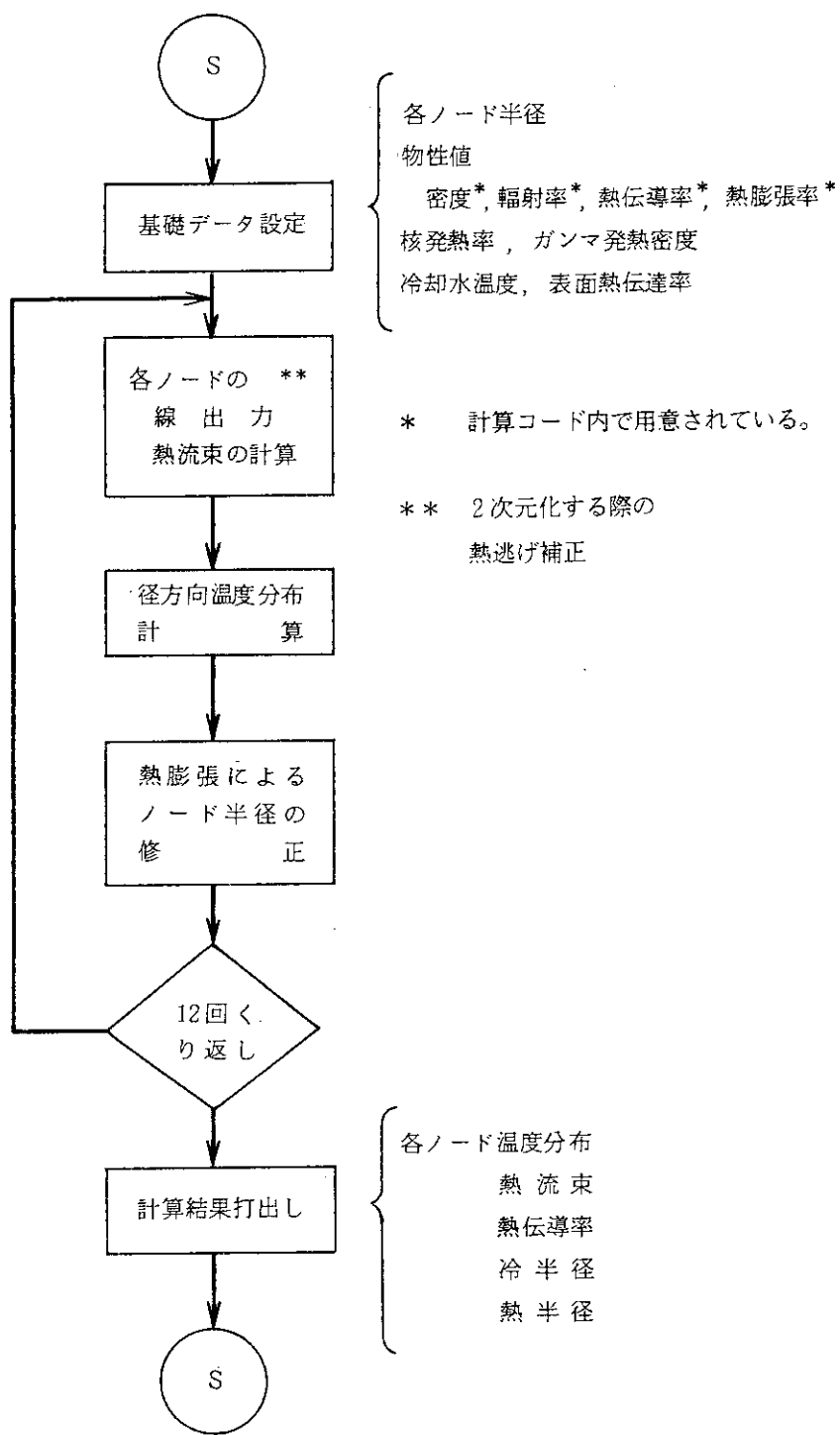


図2.2 GENGTC 1次元計算フローシート

```

00001      1  ONE DIMENSIONAL GENGTC CALCULATION DEMONSTRATION
00002      1      7
00003 0.6290,0.6460,0.7240,0.7250,1.8315,1.8430,2.0
00004      0      21      20      20      20      21      7
00005 7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00006 0.000
00007      2      1      1      1
00008 68.5
00009 0.
00010      3      -1
00011 5500.0,11.0,1000.0
00012 0
00013 0
00014 [EOF]

```

図2.3 1次元計算用入力データの例 (第5章参照)

2～6行; データグループNo.1, 最大ノード数(7)

内側より各ノードの半径 (cm)

内側より各ノードの材質番号

7～9行; データグループNo.2

線出力 (W/cm)

ガンマ発熱率 (W/g)

10～11行; データグループNo.3

表面熱伝達率 (kcal/m²・h・°C)

冷却水温度 (°C)

ノード1外側の熱伝達率 (BTU/ft²・h・°F)

(いわゆるギャップコンダクタンス)

CASE NO. 1 ONE DIMENSIONAL GENGTC CALCULATION DEMONSTRATION

INPUT DATA

DATA GROUP NUMBER 1

RADIUS (CM)
 .6290 .6460 .7240 .7250 1.8315 1.8430 2.0000
 EMISSIVITIES
 .0000 .0500 .0500 .0500 .0500 .8000 .8000
 MATERIAL TYPE NO.(0=GAS,1=LIQ.OR SOLID)
 1 0 1 1 1 0 1
 MATERIAL SELECTOR NO.(0=NON-TABULATED MATERIAL)
 0 21 20 20 20 21 7

NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS FOR 0-DESIGNATED
 NO DENSITY C0 C1 C2 C3 C4 A0 A1
 GR/CM3 (BTU/FT.H.F.) (1.0E-06/F.)
 1 7.80 .82E+01 .49E-02 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .17E+02 .00E+00

DATA GROUP NUMBER 2

FISSION HEATING NODE IS 1
 LINEAR FISSION HEATING RATE IN WATTS/CM 68.500
 GAMMA HEATING DENSITIES IN WATTS/GRAM .000

DATA GROUP NUMBER 3

SURFACE COEFF.= 5500.00 KCAL/M.M.HR.C.
 COOLANT TEMP. = 11.00 C.
 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE WILL BE COMPUTED

OUTPUT DATA / CASE NO 1

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 89.7 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 508.19 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY	HOT RADIUS	
	DEG.C		KCAL/M.H.C	CM	CM
1	482.76	68.50	.190E+02	.6377(	.6290)
2	146.93	68.50	.433E-01	.6476(	.6460)
3	146.34	68.50	.180E+03	.7259(	.7240)
4	146.33	68.50	.180E+03	.7272(	.7250)
5	141.49	68.50	.180E+03	1.8369(	1.8315)
6	25.38	68.50	.268E-01	1.8430(	1.8430)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

図2.4 1次元計算出力データの例
 (図2.3の入力データを用いた計算出力)

3. 特殊目的 1 次元熱計算の自動化

はじめに述べたように、キャプセル設計計算あるいは照射データ解析の場合には、目的に応じて異なる GENGTC 1 次元熱計算を数多く行う必要があり、この自動化のために計算プログラムを改良した。

- (1) 計算コードへの入力データのひとつ、例えば部材寸法あるいは線出力に着目して、これをパラメトリックに変化させたときのキャプセル内部温度分布の変化を出力データとして得る（パラメータ計算）。
- (2) 計算コード出力データのひとつ、例えばキャプセル内部のひとつの径方向ノードの温度計算値に着目して、これが指定した目標値に合致するように部材寸法あるいは線出力の値を求める（収束計算）。これらの計算はキャプセル設計時に目標とする温度分布を実現するような部材寸法を決めたり、照射時のキャプセル温度測定値から発熱量（線出力）を推定する場合に行われる。
- (3) 計算コード入力データ、すなわちノード半径、密度、熱伝導度、線出力、冷却水温度、表面熱伝達率、輻射率、熱膨張率、ガンマ発熱率の各々に含まれる誤差を仮定し、それが GENGTC 1 次元計算により、参照する径方向ノードの温度計算値の誤差へ伝播する大きさを求める（誤差計算）。これには、統計学のいわゆる誤差伝播法則が用いられる。これは、多変数関数 $F=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ の統計誤差 δF が入力変数の誤差変動 $\delta X_1, \delta X_2, \dots, \delta X_n$ により次のように求められることに基づいている。

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 \cdot \delta X_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)^2 \cdot \delta X_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right)^2 \cdot \delta X_n^2} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

例として、第 4 章で述べる炉外発熱実験用キャプセルをとり、これらの各種目的熱計算を行う場合の入出力データを説明する。

- (1) パラメータ計算用入力データを図 3.1 に示す。1 次元計算に必要なデータグループ No. 1, No. 2 及び No. 3（図 2.3 参照）に加えて、パラメータ計算用のデータグループ No. 4 が必要となる。この No. 4 のデータグループでは、パラメータとする変数の指定番号（この例では、ノード No. 5 の半径をパラメータとして指定するため 5 が入力されている）、パラメータ下限比(1.0)、上限比 (1.006)及びきざみ数(10)が入力される。図 3.2 は、この入力データによるパラメータ計算出力データを示す。5 番目のノードの半径をパラメータとして選び、標準値（データグループ No. 1 で入力したノード No. 5 の半径の値、1.8315cm）に増分 $(1.8315 \times 0.006 \times \frac{1}{10} = 0.0011\text{cm})$ を順次加えて 1 次元計算を 10 回行ったときの温度分布計算結果が出力されている。ここで、順次パラメータとして変更されるノード No. 5 の冷半径の値が、アンダーラインにより

示されている。

- (2) 収束計算用入力データを図3.3に示す。1次元計算用に必要なデータグループNo.1, No.2及びNo.3に, 収束計算用のデータグループNo.4が加わる。データグループNo.4では, パラメータ計算用に指定したものと同様なパラメータ変数指定番号, パラメータ下限比, 上限比, きざみ数に加えて, 収束計算目標温度指定番号(この例では, ノードNo.1の温度を目標に指定するため1が入力されている), 収束目標値(450°C)及び収束誤差(1.0°C)が入力される。図3.4は, この入力データによる収束計算出力データを示す。ノードNo.5の半径をパラメータとして選び, 標準値(1.8315cm)より, 上限と下限の指定範囲できざみ数に対応する幅で変化させたとき, ノードNo.1の温度が449°Cに収束して計算終了したときの出力データが示されている。ここで, 収束温度がアンダーラインにより示されている。
- (3) 誤差計算用の入力データを図3.5に示す。1次元計算用に必要なデータグループNo.1, No.2及びNo.3に, 収束計算用のデータグループNo.5が加わる。このデータグループNo.5では, 誤差計算の対象となる参照温度指定番号(この例では, ノードNo.1の温度を参照温度に指定するため1が入力されている), 誤差入力オプション番号(この例では, 入力データの相対誤差としてコード内で用意されている値を用いるオプションをとるため1が入力されている)。図3.6は, この入力データによる誤差計算出力データ(出力データファイル)に書き込まれたものである。この中身は, 入力データの記述と誤差計算終了時の1次元熱計算による温度分布計算結果である。誤差計算は, データグループNo.1, No.2及びNo.3で規定される標準値に, 順次誤差変動を加えて1次元計算を行い, (3.1)式に従って計算結果を累積していく。その途中経過は, 出力データファイルには書き込まれないで, パーソナルコンピュータのCRT画面に表示される。図3.7は, 誤差計算を実行している時のCRT画面表示(右半分と左半分に分けて示す)を通して示したものである。1回のGENGTC計算終了ごとに, 以下に示すような各変数のデータが一行で打ち出される。

NOR, NOR1, IDEP, DEPR/SIGMAT

ここで,

NOR ; 入力変数に誤差変動分を与えて順次実行したGENGTC 1次元計算の累積回数。

NOR1 ; ある入力変数に誤差変動を与える時の3段階のステップ数, すなわちステップ1でプラスの変動を与え, ステップ2でマイナスの変動を与え, ステップ3で元の標準値に入力変数の値を戻す。

IDEP ; 入力変数同定番号(第5章に示すように1から112までである), 順次変える。

DEPR ; 入力変数に誤差変動を与えるため, 現在の値に乗せられる係数値。

SIGMAT ; 入力変数に誤差変動を与えて計算したときのGENGTC 1次元計算による参照温度の変動幅の2乗の和の積算値((3.1)式の $(\delta F)^2$ に対応)であり, ステップ2においてDEPRの代りに同じ値が2個並んで表示される。

NOR1 = 1で示されるステップ1では, IDEPで示される入力変数の標準値(データグループ

No. 1, No. 2 及び No. 3 で与えられている) に, DEPRで示される係数值 (誤差変動幅の上限を与える) を乗じて GENGTC 1 次元計算が実行される。計算終了時にはデータグループ No. 5 で指定された参照温度の計算値を記憶しておく。次に, NORI = 2 で示されるステップ 2 では, ステップ 1 で用いた入力変数の値に, DEPRで示される係数值 (誤差変動幅の下限を与える) を乗じて GENGTC 1 次元計算が実行される。このとき算出される参照温度とステップ 1 で算出して記憶しておいた参照温度の変化幅から (3.1) 式の $(\delta F)^2$ を算出し SIGMAT として CTR 表示する。さらに, NORI = 3 で示されるステップ 3 では, ステップ 2 で用いられた入力変数の値が, DEPRで示される係数值を乗じて標準値に戻され, 次の IDEPで示される入力変数に関する誤差計算へ移るための準備が行われる (ステップ 1, 2 及び 3 で用いられる DEPRの値を全て掛け合わせると 1.0 となる)。このようにして順次計算を進め, 112 個ある全ての入力変数についてステップ 3 まで計算を実行したところで誤差計算が終了する。このとき NOR = 336 となった CTR 表示の最終行に打ち出された SIGMAT の値の平方根が, 参照温度の誤差変動の全幅を与えることとなる。図 3.7 の例では, 0.07314 の平方根の 0.27 (27%) が, 参照温度の相対誤差を与える。参照温度は, ノード No. 1 の温度計算標準値 483°C であり, これに対して $\pm 13.5\%$ に相当する $\pm 65.2^\circ\text{C}$ が最大の誤差変動として考えられることとなる。

```

00001      1  PARAMETER SURVEY CALCULATION DEMONSTRATION OF GENGTG
00002      1      7
00003 0.6290,0.6460,0.7240,0.7250,1.8315,1.8430,2.0
00004      0      21      20      20      21      7
00005 7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00006 0.000
00007      2      1      1      1
00008 68.5
00009 0.
00010      3      -1
00011 5500.0,11.0,1000.0
00012      4      5
00013 1.0,1.006,10.
00014 0
00015 0
00016 [EOF]

```

図3.1 1次元パラメータ計算用入力データの例 (第5章参照)

2~11行; 1次元計算用標準入力データ (図2.3と同一)

12~13行; データグループ4

パラメータ指定番号 (5……ノードNo.5の半径)

下限比 (1.0), 上限比 (1.006), きざみ数 (10)

CASE NO. 1 PARAMETER SURVEY CALCULATION DEMONSTRATION OF GENGTG

INPUT DATA

DATA GROUP NUMBER 1

RADIUS (CM)
 .6290 .6460 .7240 .7250 1.8315 1.8430 2.0000
 EMISSIVITIES
 .0000 .0500 .0500 .0500 .0500 .8000 .8000
 MATERIAL TYPE NO.(0=GAS,1=LIQ.OR SOLID)
 1 0 1 1 0 1
 MATERIAL SELECTOR NO.(0=NON-TABULATED MATERIAL)
 0 21 20 20 21 7

NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS FOR 0-DESIGNATED
 NO DENSITY C0 C1 C2 C3 C4 A0 A1
 GR/CM3 (BTU/FT.H.F.) (1.0E-06/F.)
 1 7.80 .82E+01 .49E-02 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .17E+02 .00E+00

DATA GROUP NUMBER 2

FISSION HEATING NODE IS 1
 LINEAR FISSON HEATING RATE IN WATTS/CM 68.500
 GAMMA HEATING DENSITIES IN WATTS/GRAM .000

DATA GROUP NUMBER 3

SURFACE COEFF.= 5500.00 KCAL/M.M.HR.C.
 COOLANT TEMP. = 11.00 C.
 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE WILL BE COMPUTED

DATA GROUP NUMBER 4

PARAMETRIC CHANGE OR CONVERGENCE TECHNIQUE

PARAMETER VARIABLE NUMBER IS 5
 LOWER LIMIT IS 1.0000
 UPPER LIMIT IS 1.0060 DEVISION NUMBER 10.0

OUTPUT DATA / CASE NO 1

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.
 LINEAR FISSON HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM
 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 88.6 BTU/FT2.H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M2.H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 502.20 DEG. C

NODE	TEMPERATURE DEG.C	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS CM
------	----------------------	--------------------	------------------------------	------------------

図3.2 1次元パラメータ計算出力データの例
 (図3.1の入力データを用いた計算出力) (1/5)

1	476.68	68.50	.189E+02	.6376(.6290)
2	136.68	68.50	.427E-01	.6475(.6460)
3	136.08	68.50	.179E+03	.7257(.7240)
4	136.07	68.50	.179E+03	.7270(.7250)
5	131.22	68.50	.179E+03	1.8376(<u>1.8326</u>)
6	25.38	68.50	.264E-01	1.8430(<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 87.6 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 495.40 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY	HOT RADIUS	
	DEG.C		KCAL/M.H.C	CM	CM
1	469.76	68.50	.188E+02	.6374(	.6290)
2	125.87	68.50	.420E-01	.6473(	.6460)
3	125.27	68.50	.179E+03	.7255(	.7240)
4	125.26	68.50	.179E+03	.7268(	.7250)
5	120.38	68.50	.178E+03	1.8382(	<u>1.8337</u>)
6	25.38	68.50	.261E-01	1.8430(	<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 86.7 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 488.86 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY	HOT RADIUS	
	DEG.C		KCAL/M.H.C	CM	CM
1	463.11	68.50	.187E+02	.6373(	.6290)
2	115.34	68.50	.413E-01	.6471(	.6460)
3	114.73	68.50	.178E+03	.7253(	.7240)
4	114.72	68.50	.178E+03	.7266(	.7250)
5	109.83	68.50	.178E+03	1.8388(	<u>1.8348</u>)
6	25.38	68.50	.257E-01	1.8430(	<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 85.7 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)

図3.2 1次元パラメータ計算出力データの例
 (図3.1の入力データを用いた計算出力) (2/5)

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS	
	DEG.C			CM	CM
1	456.19	68.50	.186E+02	.6372(	.6290)
2	104.25	68.50	.407E-01	.6470(	.6460)
3	103.64	68.50	.177E+03	.7251(	.7240)
4	103.63	68.50	.177E+03	.7264(	.7250)
5	98.72	68.50	.177E+03	1.8394(	<u>1.8359</u>)
6	25.38	68.50	.254E-01	1.8430(	<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 84.7 BTU/FT².H.F
FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
CENTER TEMP. = 475.24 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS	
	DEG.C			CM	CM
1	449.27	68.50	.185E+02	.6370(	.6290)
2	93.15	68.50	.400E-01	.6468(	.6460)
3	92.55	68.50	.177E+03	.7249(	.7240)
4	92.54	68.50	.177E+03	.7262(	.7250)
5	87.60	68.50	.177E+03	1.8400(	<u>1.8370</u>)
6	25.38	68.50	.250E-01	1.8430(	<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 83.6 BTU/FT².H.F
FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
CENTER TEMP. = 468.43 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS	
	DEG.C			CM	CM
1	442.34	68.50	.184E+02	.6369(	.6290)
2	81.78	68.50	.393E-01	.6466(	.6460)
3	81.18	68.50	.176E+03	.7247(	.7240)
4	81.17	68.50	.176E+03	.7260(	.7250)
5	76.22	68.50	.176E+03	1.8406(	<u>1.8381</u>)
6	25.38	68.50	.246E-01	1.8430(	<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 82.6 BTU/FT².H.F
FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

図3.2 1次元パラメータ計算出力データの例
(図3.1の入力データを用いた計算出力) (3/5)

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 461.62 DEG. C

NODE	TEMPERATURE DEG.C	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS	
				CM	CM
1	435.41	68.50	.183E+02	.6368(	.6290)
2	70.13	68.50	.386E-01	.6464(	.6460)
3	69.53	68.50	.176E+03	.7245(	.7240)
4	69.52	68.50	.176E+03	.7258(	.7250)
5	64.55	68.50	.176E+03	1.8412(	<u>1.8392</u>)
6	25.38	68.50	.242E-01	1.8430(	1.8430)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 81.5 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 454.81 DEG. C

NODE	TEMPERATURE DEG.C	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS	
				CM	CM
1	428.48	68.50	.182E+02	.6367(	.6290)
2	58.48	68.50	.380E-01	.6463(	.6460)
3	57.87	68.50	.175E+03	.7243(	.7240)
4	57.86	68.50	.175E+03	.7256(	.7250)
5	52.88	68.50	.175E+03	1.8418(	<u>1.8403</u>)
6	25.38	68.50	.239E-01	1.8430(	1.8430)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 86.1 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 435.45 DEG. C

NODE	TEMPERATURE DEG.C	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS	
				CM	CM
1	408.77	68.50	.180E+02	.6363(	.6290)
2	58.21	68.50	.372E-01	.6452(	.6460)
3	57.60	68.50	.175E+03	.7233(	.7240)
4	57.59	68.50	.175E+03	.7245(	.7250)
5	52.60	68.50	.175E+03	1.8418(	<u>1.8414</u>)
6	25.38	68.50	.239E-01	1.8430(	1.8430)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.

LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

図3.2 1次元パラメータ計算出力データの例
 (図3.1の入力データを用いた計算出力) (4/5)

FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M2.H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
CENTER TEMP. = 415.00 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY	HOT RADIUS	
	DEG.C		KCAL/M.H.C	CM	CM
1	387.95	68.50	.177E+02	.6359(	.6290)
2	58.22	68.50	.365E-01	.6441(	.6460)
3	57.61	68.50	.175E+03	.7222(	.7240)
4	57.60	68.50	.175E+03	.7234(	.7250)
5	52.60	68.50	.175E+03	1.8418(	1.8425)
6	25.38	68.50	.239E-01	1.8430(	1.8430)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

図3.2 1次元パラメータ計算出力データの例
(図3.1の入力データを用いた計算出力) (5/5)

```

00001 1 GENGTC CONVERGENCE DEMONSTRATION CALCULATION
00002 1 7
00003 0.6290,0.6460,0.7240,0.7250,1.8315,1.8430,2.0
00004 0 21 20 20 20 21 7
00005 7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00006 0.000
00007 2 1 1 1
00008 68.5
00009 0.
00010 3 -1
00011 5500.0,11.0,1000.0
00012 4 5 1
00013 1.0,1.006,10.
00014 450.0,1.0
00015 0
00016 0
00017 [EOF]

```

図3.3 1次元収束計算用入力データの例 (第5章参照)
2~11行; 1次元計算用標準入力データ (図2.3と同一)
12~14行; データグループ4
パラメータ指定番号 (5……ノードNo.5の半径)
目標温度指定番号 (1……ノードNo.1の温度)
下限比(1.0), 上限比(1.006), きざみ数(10)
収束目標値 (450°C), 収束誤差 (1.0°C)

CASE NO. 1 GENGTC CONVERGENCE DEMONSTRATION CALCULATION

INPUT DATA

DATA GROUP NUMBER 1

RADIUS (CM)
 .6290 .6460 .7240 .7250 1.8315 1.8430 2.0000
 EMISSIVITIES
 .0000 .0500 .0500 .0500 .0500 .8000 .8000
 MATERIAL TYPE NO. (0=GAS, 1=LIQ. OR SOLID)
 1 0 1 1 1 0 1
 MATERIAL SELECTOR NO. (0=NON-TABULATED MATERIAL)
 0 21 20 20 20 21 7

NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS FOR 0-DESIGNATED
 NO DENSITY C0 C1 C2 C3 C4 A0 A1
 GR/CM3 (BTU/FT.H.F.) (1.0E-06/F.)
 1 7.80 .82E+01 .49E-02 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .17E+02 .00E+00

DATA GROUP NUMBER 2

FISSION HEATING NODE IS 1
 LINEAR FISSION HEATING RATE IN WATTS/CM 68.500
 GAMMA HEATING DENSITIES IN WATTS/GRAM .000

DATA GROUP NUMBER 3

SURFACE COEFF. = 5500.00 KCAL/M.M.HR.C.
 COOLANT TEMP. = 11.00 C.
 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE WILL BE COMPUTED

DATA GROUP NUMBER 4

PARAMETRIC CHANGE OR CONVERGENCE TECHNIQUE

PARAMETER VARIABLE NUMBER IS 5
 LOWER LIMIT IS 1.0000
 UPPER LIMIT IS 1.0060 DEVISION NUMBER 10.0
 RADIAL NODE NUMBER REFFERED IS 1
 TARGET VALUE OF TEMPERATURE IS 450.0000
 CONVERGENCE CRITERIA NUMBER IS 1.0000

図3.4 1次元収束計算出力データの例
 (図3.3の入力データを用いた計算出力) (1/2)

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.
 LINEAR FISSION HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM
 PELLET-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 84.7 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 475.24 DEG. C

NODE	TEMPERATURE DEG.C	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY KCAL/M.H.C	HOT RADIUS CM	HOT RADIUS CM
1	<u>449.27</u>	68.50	.185E+02	.6370(	.6290)
2	<u>93.15</u>	68.50	.400E-01	.6468(	.6460)
3	92.55	68.50	.177E+03	.7249(	.7240)
4	92.54	68.50	.177E+03	.7262(	.7250)
5	87.60	68.50	.177E+03	1.8400(	<u>1.8370</u>)
6	25.38	68.50	.250E-01	1.8430(	<u>1.8430</u>)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

図3.4 1次元収束計算出力データの例
 (図3.3の入力データを用いた計算出力) (2/2)

```
00001 1 ERROR PROPAGATION ANALYSIS DEMONSTRATION OF GENGTG
00002 1 7
00003 0.6290,0.6460,0.7240,0.7250,1.8315,1.8430,2.0
00004 0 21 20 20 20 21 7
00005 7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00006 0.000
00007 2 1 1 1
00008 68.5
00009 0.
00010 3 -1
00011 5500.0,11.0,1000.0
00012 5 1 1
00013 0
00014 0
00015 [EOF]
```

図3.5 1次元誤差計算用入力データの例 (第5章参照)
 2~11行; 1次元計算用標準入力データ (図2.3と同一)
 12行 ; データグループ5
 参照温度指定番号 (1……ノードNo.1の温度)
 誤差入力オプション (1……コード内で用意)

CASE NO. 1 ERROR PROPAGATION ANALYSIS DEMONSTRATION OF GENGTG

INPUT DATA

DATA GROUP NUMBER 1

RADIUS (CM)
 .6290 .6460 .7240 .7250 1.8315 1.8430 2.0000
 EMISSIVITIES
 .0000 .0500 .0500 .0500 .0500 .8000 .8000
 MATERIAL TYPE NO. (0=GAS,1=LIQ.OR SOLID)
 1 0 1 1 1 0 1
 MATERIAL SELECTOR NO. (0=NON-TABULATED MATERIAL)
 0 21 20 20 20 21 7

 NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS FOR 0-DESIGNATED
 NO DENSITY C0 C1 C2 C3 C4 A0 A1
 GR/CM3 (BTU/FT.H.F.) (1.0E-06/F.)
 1 7.80 .82E+01 .49E-02 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .17E+02 .00E+00

DATA GROUP NUMBER 2

FISSION HEATING NODE IS 1
 LINEAR FISSON HEATING RATE IN WATTS/CM 68.500
 GAMMA HEATING DENSITIES IN WATTS/GRAM .000

DATA GROUP NUMBER 3

SURFACE COEFF.= 5500.00 KCAL/M.M.HR.C.
 COOLANT TEMP. = 11.00 C.
 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE WILL BE COMPUTED

DATA GROUP NUMBER 5
 ERROR PROPAGATION ANALYSIS

OUTPUT DATA / CASE NO 1

GAMMA HEAT RATE = .00 W/GR.
 LINEAR FISSON HEAT RATE = 68.500 WATTS/CM

 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE (CALCULATED) 89.6 BTU/FT².H.F
 FILM COEFFICIENT 5500.00 KCAL/M².H.C

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EACH NODE (DEG.C)
 CENTER TEMP. = 508.47 DEG. C

NODE	TEMPERATURE	POWER(F&G) W/CM	T.CONDUCTIVITY	HOT RADIUS	
	DEG.C		KCAL/M.H.C	CM	CM
1	483.04	68.50	.190E+02	.6377(	.6290)
2	146.93	68.50	.433E-01	.6476(	.6460)
3	146.34	68.50	.180E+03	.7259(	.7240)
4	146.33	68.50	.180E+03	.7272(	.7250)
5	141.49	68.50	.180E+03	1.8369(	1.8315)
6	25.38	68.50	.268E-01	1.8430(	1.8430)
7	19.53	68.50	.131E+02	2.0000(	2.0000)

図3.6 1次元誤差計算の出力データの例
 (図3.5の入力データを用いた計算出力)

(NOR)	(NORI)	(IDEP)	(DEPR)	(SIGMAT)	(SIGMAT)	(SIGMAT)	(SIGMAT)	(SIGMAT)
1	1	1	1.00100					
2	2	1	.99700			39	3	13
2	2	1	.00473	.00473		40	1	14
						41	2	14
3	3	1	1.00200			41	2	14
4	1	2	1.00100					
5	2	2	.99700			42	3	14
5	2	2	.00920	.00920		43	1	15
						44	2	15
6	3	2	1.00200			44	2	15
7	1	3	1.00100					
8	2	3	.99700			45	3	15
8	2	3	.01058	.01058		46	1	16
						47	2	16
9	3	3	1.00200			47	2	16
10	1	4	1.00100					
11	2	4	.99700			48	3	16
11	2	4	.01444	.01444		49	1	17
						50	2	17
12	3	4	1.00200			50	2	17
13	1	5	1.00100					
14	2	5	.99700			51	3	17
14	2	5	.01884	.01884		52	1	18
						53	2	18
15	3	5	1.00200			53	2	18
16	1	6	1.00100					
17	2	6	.99700			54	3	18
17	2	6	.02361	.02361		55	1	19
						56	2	19
18	3	6	1.00200			56	2	19
19	1	7	1.00100					
20	2	7	.99700			57	3	19
20	2	7	.02362	.02362		58	1	20
						59	2	20
21	3	7	1.00200			59	2	20
22	1	8	1.00100					
23	2	8	.99700			60	3	20
23	2	8	.02362	.02362		61	1	21
						62	2	21
24	3	8	1.00200			62	2	21
25	1	9	1.00100					
26	2	9	.99700			63	3	21
26	2	9	.02362	.02362		64	1	22
						65	2	22
27	3	9	1.00200			65	2	22
28	1	10	1.00100					
29	2	10	.99700			66	3	22
29	2	10	.02362	.02362		67	1	23
						68	2	23
30	3	10	1.00200			68	2	23
31	1	11	1.00100					
32	2	11	.99700			69	3	23
32	2	11	.02362	.02362		70	1	24
						71	2	24
33	3	11	1.00200			71	2	24
34	1	12	1.00100					
35	2	12	.99700			72	3	24
35	2	12	.02362	.02362		73	1	25
						74	2	25
36	3	12	1.00200			74	2	25
37	1	13	1.00100					
38	2	13	.99700			75	3	25
38	2	13	.02362	.02362		76	1	26

図3.7 1次元誤差計算時のCRT表示例 (1/5)

77	2	26	.50000						
77	2	26	.02362	.02362					
78	3	26	1.66667						
79	1	27	1.20000						
80	2	27	.50000						
80	2	27	.02362	.02362					
81	3	27	1.66667						
82	1	28	1.20000						
83	2	28	.50000						
83	2	28	.02362	.02362					
84	3	28	1.66667						
85	1	29	1.20000						
86	2	29	.50000						
86	2	29	.02362	.02362					
87	3	29	1.66667						
88	1	30	1.20000						
89	2	30	.50000						
89	2	30	.02362	.02362					
90	3	30	1.66667						
91	1	31	1.20000						
92	2	31	.50000						
92	2	31	.02362	.02362					
93	3	31	1.66667						
94	1	32	1.20000						
95	2	32	.50000						
95	2	32	.02362	.02362					
96	3	32	1.66667						
97	1	33	1.20000						
98	2	33	.50000						
98	2	33	.02362	.02362					
99	3	33	1.66667						
100	1	34	1.20000						
101	2	34	.50000						
101	2	34	.02362	.02362					
102	3	34	1.66667						
103	1	35	1.20000						
104	2	35	.50000						
104	2	35	.02362	.02362					
105	3	35	1.66667						
106	1	36	1.20000						
107	2	36	.50000						
107	2	36	.02362	.02362					
108	3	36	1.66667						
109	1	37	1.20000						
110	2	37	.50000						
110	2	37	.02362	.02362					
111	3	37	1.66667						
112	1	38	1.20000						
113	2	38	.50000						
113	2	38	.02362	.02362					
114	3	38	1.66667						
115	1	39	1.20000						
116	2	39	.50000						
116	2	39	.02362	.02362					
117	3	39	1.66667						
118	1	40	1.20000						
119	2	40	.50000						
119	2	40	.02362	.02362					
120	3	40	1.66667						
121	1	41	1.20000						
122	2	41	.50000						
122	2	41	.02362	.02362					
123	3	41	1.66667						
124	1	42	1.20000						
125	2	42	.50000						
125	2	42	.02362	.02362					
126	3	42	1.66667						
127	1	43	1.10000						
128	2	43	.72727						
128	2	43	.02362	.02362					
129	3	43	1.25000						
130	1	44	1.10000						
131	2	44	.72727						
131	2	44	.02362	.02362					
132	3	44	1.25000						
133	1	45	1.10000						
134	2	45	.72727						
134	2	45	.02362	.02362					
135	3	45	1.25000						
136	1	46	1.10000						
137	2	46	.72727						
137	2	46	.02362	.02362					
138	3	46	1.25000						
139	1	47	1.10000						
140	2	47	.72727						
140	2	47	.02362	.02362					
141	3	47	1.25000						
142	1	48	1.10000						
143	2	48	.72727						
143	2	48	.02362	.02362					
144	3	48	1.25000						
145	1	49	1.10000						
146	2	49	.72727						
146	2	49	.02362	.02362					
147	3	49	1.25000						
148	1	50	1.10000						
149	2	50	.72727						
149	2	50	.02362	.02362					
150	3	50	1.25000						
151	1	51	1.10000						
152	2	51	.72727						
152	2	51	.02362	.02362					
153	3	51	1.25000						
154	1	52	1.10000						
155	2	52	.72727						
155	2	52	.02362	.02362					

図3.7 1次元誤差計算時のCRT表示例 (2/5)

156	3	52	1.25000		195	3	65	1.25000	
157	1	53	1.10000		196	1	66	1.10000	
158	2	53	.72727		197	2	66	.72727	
158	2	53	.02362	.02362	197	2	66	.03636	.03636
159	3	53	1.25000		198	3	66	1.25000	
160	1	54	1.10000		199	1	67	1.10000	
161	2	54	.72727		200	2	67	.72727	
161	2	54	.02362	.02362	200	2	67	.03636	.03636
162	3	54	1.25000		201	3	67	1.25000	
163	1	55	1.10000		202	1	68	1.10000	
164	2	55	.72727		203	2	68	.72727	
164	2	55	.02362	.02362	203	2	68	.03636	.03636
165	3	55	1.25000		204	3	68	1.25000	
166	1	56	1.10000		205	1	69	1.10000	
167	2	56	.72727		206	2	69	.72727	
167	2	56	.02362	.02362	206	2	69	.03696	.03696
168	3	56	1.25000		207	3	69	1.25000	
169	1	57	1.10000		208	1	70	1.10000	
170	2	57	.72727		209	2	70	.72727	
170	2	57	.02362	.02362	209	2	70	.03697	.03697
171	3	57	1.25000		210	3	70	1.25000	
172	1	58	1.10000		211	1	71	1.10000	
173	2	58	.72727		212	2	71	.72727	
173	2	58	.02362	.02362	212	2	71	.03697	.03697
174	3	58	1.25000		213	3	71	1.25000	
175	1	59	1.10000		214	1	72	1.10000	
176	2	59	.72727		215	2	72	.72727	
176	2	59	.02362	.02362	215	2	72	.03697	.03697
177	3	59	1.25000		216	3	72	1.25000	
178	1	60	1.10000		217	1	73	1.10000	
179	2	60	.72727		218	2	73	.72727	
179	2	60	.02362	.02362	218	2	73	.03697	.03697
180	3	60	1.25000		219	3	73	1.25000	
181	1	61	1.10000		220	1	74	1.10000	
182	2	61	.72727		221	2	74	.72727	
182	2	61	.02362	.02362	221	2	74	.03697	.03697
183	3	61	1.25000		222	3	74	1.25000	
184	1	62	1.10000		223	1	75	1.10000	
185	2	62	.72727		224	2	75	.72727	
185	2	62	.02362	.02362	224	2	75	.03697	.03697
186	3	62	1.25000		225	3	75	1.25000	
187	1	63	1.10000		226	1	76	1.10000	
188	2	63	.72727		227	2	76	.72727	
188	2	63	.02362	.02362	227	2	76	.03697	.03697
189	3	63	1.25000		228	3	76	1.25000	
190	1	64	1.10000		229	1	77	1.10000	
191	2	64	.72727		230	2	77	.72727	
191	2	64	.02362	.02362	230	2	77	.03697	.03697
192	3	64	1.25000		231	3	77	1.25000	
193	1	65	1.10000		232	1	78	1.10000	
194	2	65	.72727		233	2	78	.72727	
194	2	65	.03636	.03636	233	2	78	.03697	.03697

図3.7 1次元誤差計算時のCRT表示例 (3/5)

234	3	78	1.25000		276	3	92	1.25000	
235	1	79	1.10000		277	1	93	1.10000	
236	2	79	.72727		278	2	93	.72727	
236	2	79	.03697	.03697	278	2	93	.04620	.04620
237	3	79	1.25000		279	3	93	1.25000	
238	1	80	1.10000		280	1	94	1.10000	
239	2	80	.72727		281	2	94	.72727	
239	2	80	.03697	.03697	281	2	94	.04620	.04620
240	3	80	1.25000		282	3	94	1.25000	
241	1	81	1.10000		283	1	95	1.10000	
242	2	81	.72727		284	2	95	.72727	
242	2	81	.03697	.03697	284	2	95	.04620	.04620
243	3	81	1.25000		285	3	95	1.25000	
244	1	82	1.10000		286	1	96	1.10000	
245	2	82	.72727		287	2	96	.72727	
245	2	82	.03697	.03697	287	2	96	.04620	.04620
246	3	82	1.25000		288	3	96	1.25000	
247	1	83	1.10000		289	1	97	1.10000	
248	2	83	.72727		290	2	97	.72727	
248	2	83	.03697	.03697	290	2	97	.04620	.04620
249	3	83	1.25000		291	3	97	1.25000	
250	1	84	1.10000		292	1	98	1.10000	
251	2	84	.72727		293	2	98	.72727	
251	2	84	.03697	.03697	293	2	98	.04620	.04620
252	3	84	1.25000		294	3	98	1.25000	
253	1	85	1.10000		295	1	99	1.10000	
254	2	85	.72727		296	2	99	.72727	
254	2	85	.04619	.04619	296	2	99	.04620	.04620
255	3	85	1.25000		297	3	99	1.25000	
256	1	86	1.10000		298	1	100	1.10000	
257	2	86	.72727		299	2	100	.72727	
257	2	86	.04619	.04619	299	2	100	.04620	.04620
258	3	86	1.25000		300	3	100	1.25000	
259	1	87	1.10000		301	1	101	1.10000	
260	2	87	.72727		302	2	101	.72727	
260	2	87	.04620	.04620	302	2	101	.04620	.04620
261	3	87	1.25000		303	3	101	1.25000	
262	1	88	1.10000		304	1	102	1.10000	
263	2	88	.72727		305	2	102	.72727	
263	2	88	.04620	.04620	305	2	102	.04620	.04620
264	3	88	1.25000		306	3	102	1.25000	
265	1	89	1.10000		307	1	103	1.10000	
266	2	89	.72727		308	2	103	.72727	
266	2	89	.04620	.04620	308	2	103	.04620	.04620
267	3	89	1.25000		309	3	103	1.25000	
268	1	90	1.10000		310	1	104	1.10000	
269	2	90	.72727		311	2	104	.72727	
269	2	90	.04620	.04620	311	2	104	.04620	.04620
270	3	90	1.25000		312	3	104	1.25000	
271	1	91	1.10000		313	1	105	1.10000	
272	2	91	.72727		314	2	105	.72727	
272	2	91	.04620	.04620	314	2	105	.04620	.04620
273	3	91	1.25000		315	3	105	1.25000	
274	1	92	1.10000		316	1	106	1.10000	
275	2	92	.72727		317	2	106	.72727	
275	2	92	.04620	.04620					

図3.7 1次元誤差計算時のCRT表示例 (4/5)

318	3	106	1.25000	
319	1	107	1.10000	
320	2	107	.72727	
320	2	107	.06759	.06759
321	3	107	1.25000	
322	1	108	1.10000	
323	2	108	.72727	
323	2	108	.06759	.06759
324	3	108	1.25000	
325	1	109	1.10000	
326	2	109	.72727	
326	2	109	.06759	.06759
327	3	109	1.25000	
328	1	110	1.10000	
329	2	110	.72727	
329	2	110	.06760	.06760
330	3	110	1.25000	
331	1	111	1.10000	
332	2	111	.72727	
332	2	111	.07314	.07314
333	3	111	1.25000	
334	1	112	1.30000	
335	2	112	.30769	
335	2	112	.07314	.07314
336	2	112	.07314	.07314

Stop - Program terminated.

図3.7 1次元誤差計算時のCRT表示例 (5/5)
 最終誤差伝播計算結果 δF^2 は最終行の0.07314
 で与えられる。

4. 2次元熱計算への機能拡張

4.1 z方向熱流計算モデル

キャプセルの如き多重の同軸円筒構造を (r, z) 2次元の網状構成となるように分割すると、図4.1に示すようになる。ここで、下の図に示すように r 方向ノード j と j + 1, z 方向メッシュ i と i + 1 で囲まれた領域が計算の単位領域となる。ただし、この網目模様の領域の形状は矩形であるが、実際は 360度回転した円環状のものを代表していることに注意されたい。GENGTC 2次元熱計算では、このランプ(lump)と呼ばれる単位領域の中心にノードポイントを置き、その領域の熱的性質を代表させる。隣接するランプ相互間の熱流はノードポイント間で考え、全体としては、一般に図4.2に示すような r 方向 m 個, z 方向 n 個の各ノードポイントをコンダクタで結んだ 2次元ネットワークとして考えることとなる。図中○印は、構造物外部の媒体を代表するノードポイントである。

図4.2の下の図に示すノードポイント(J, I+1)に注目して熱収支をとれば、次式のようになる。

$$P_{J-1} + Q_{I+2} + G_{J,I+1} = P_{J+1} + Q_I \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

- ここで、 P_{J-1} : ノードポイント(J-1, I+1)から流入する熱
- Q_{I+2} : ノードポイント(J, I+2)から流入する熱
- $G_{J,I+1}$: ランプ(J, I+1)で発生する熱
- P_{J+1} : ノードポイント(J+1, I+1)へ流出する熱
- Q_I : ノードポイント(J, I)へ流出する熱

z 方向熱流 Q_{I+2} 及び Q_I が共に無視し得る量ならば、(4.1)式は、次に示す r 方向 1次元の熱流方程式となる。

$$P_{J-1} + G_{J,I+1} = P_{J+1} \quad \dots\dots\dots (4.1)'$$

GENGTC 1次元熱計算は、基本的には(4.1)'式に基づいてコード化されている。z 方向熱流 Q_{I+2} 及び Q_I が無視し得ない場合には、何らかの方法でこれらの量を求め、(4.1)式を満足するように計算プログラムを改良することにより、2次元熱計算を行うことができる。

Q_I, Q_{I+2} の具体的なかたちを決めるためには熱伝導の基礎方程式から出発する。定常時には次式が成立する。

$$\nabla K \cdot \nabla T + q = 0$$

ここで、 ∇ : 微分演算子, K : 熱伝導率, T : 温度, q : 発熱密度, である。

図4.2においてランプ(J, I+1)の全体積 $V_{J, I+1}$ にわたり積分すると、

$$\int_{V_{J,I+1}} \nabla K \cdot \nabla T dV + \int_{V_{J,I+1}} q dV = 0 \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

左辺第1項は Gaussの発散定理により体積積分をランプ(J, I+1)の座標軸に垂直な4つの面における面積積分に置換えることができる。すなわち(4.2)式は、次のようになる。

$$\begin{aligned} & - \int_{A_{JI}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dA - \int_{A_{J+1,I+1}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dA - \int_{A_{J-1,I+1}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dA \\ & - \int_{A_{J,I+2}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dA + \int_{V_{J,I+1}} q \cdot dV = 0 \end{aligned}$$

- ここで、 A_{JI} : ランプ(J, I+1)とランプ(J, I)の境界面積
- $A_{J+1,I+1}$: ランプ(J, I+1)とランプ(J+1, I+1)の境界面積
- $A_{J-1,I+1}$: ランプ(J, I+1)とランプ(J-1, I+1)の境界面積
- $A_{J,I+2}$: ランプ(J, I+1)とランプ(J, I+2)の境界面積

(4.1)式と比較すれば容易にわかるように

$$\begin{aligned} P_{J-1} &= - \int_{A_{J-1,I+1}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dA, & P_{J+1} &= \int_{A_{J+1,I+1}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dA \\ Q_I &= \int_{A_{JI}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dA, & Q_{I+2} &= - \int_{A_{J,I+2}} K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dA \\ Q_{J,I+1} &= \int_{V_{J,I+1}} q \cdot dV \end{aligned}$$

ランプ体積が充分小さいとき、熱伝導率K及び温度Tのz方向の偏微分は、境界面上で一定とすることができるので、 Q_I 及び Q_{I+2} は次のように定式化される。

$$Q_I = K_I \cdot A_{JI} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_I^-} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$Q_{I+2} = -K_{I+2} \cdot A_{J,I+2} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_{I+1}^+} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

- ここで、 e_I^- : 境界面 A_{JI} のz座標 e_I よりマイナス側の値
- e_{I+1}^+ : 境界面 $A_{J,I+2}$ のz座標 e_{I+1} よりプラス側の値
- K_I, K_{I+2} : ランプ(J, I), ランプ(J, I+2)の熱伝導率

次にランプ境界における熱流の連続の法則から次式が成立する。

$$K_I \cdot A_{JI} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_I^-} = K_{I+1} \cdot A_{JI} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_I^+} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ランプ体積が充分小さいとき図4.2のコンダクタに沿ってランプ内部の温度分布は直線的に変化すると考えられるので、次式が成立する。

$$T_{J,e_1} = T_{J,I} + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_1^-} \cdot (e_1 - E_I) \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$T_{J,I+1} = T_{J,e_1} + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_1^+} \cdot (E_{I+1} - e_1) \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、 $T_{J,I}$: ノードポイント(J, I)の温度
 $T_{J,I+1}$: ノードポイント(J, I+1)の温度
 T_{J,e_1} : 境界面 $A_{J,I}$ (z座標 e_1)の温度

(4.5), (4.6), (4.7)式から次式が得れる。

$$T_{J,I+1} - T_{J,I} = \left[(E_{I+1} - e_1) \cdot \frac{K_I}{K_{I+1}} + (e_1 - E_I) \right] \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_1^-}$$

(4.3)式に代入すれば、最終的に Q_I の表式として次式が得られる。

$$\begin{aligned} Q_I &= K_I \cdot A_{J,I} \cdot \frac{(T_{J,I+1} - T_{J,I})}{\left[(E_{I+1} - e_1) \cdot \frac{K_I}{K_{I+1}} + (e_1 - E_I) \right]} \\ &= A_{J,I} \cdot \frac{(T_{J,I+1} - T_{J,I})}{\left[\frac{(E_{I+1} - e_1)}{K_{I+1}} + \frac{(e_1 - E_I)}{K_I} \right]} \quad \dots\dots\dots (4.8) \end{aligned}$$

同様に(4.4)式は Q_{I+2} の表式として最終的に次式き如く書き表わされる。

$$Q_{I+2} = -A_{J,I+2} \cdot \frac{(T_{J,I+2} - T_{J,I+1})}{\left[\frac{(E_{I+2} - e_{I+1})}{K_{I+2}} + \frac{(e_{I+1} - E_{I+1})}{K_{I+1}} \right]} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

次にランプ(J, 1)の境界面を通して外界へ流れる熱流を考える。境界面における熱流の連続方程式は次の如くなる。

$$K_1 \cdot A_{J0} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_0^+} = H_s \cdot A_{J0} \cdot (T_{J,e_0} - T_{ext}) \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

ここに、 H_s : 境界表面熱伝達率
 T_{J,e_0} : 境界表面温度
 T_{ext} : 外界温度
 A_{J0} : 外界との境界面積
 e_0^+ : 外界との境界のz座標 e_0 よりプラス側の値
 K_1 : ランプ(J, 1)の熱伝導率

ランプ体積が充分小さいとき図4.2のコンダクタに沿ってランプ内部の温度分布は直線的に変化

すると考えられるので、ノードポイント(J, 1)のz座標 E_1 、温度 $T_{J,1}$ として次式の関係が成立する。

$$T_{J,1} = T_{J,e_0} + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_0^+} \cdot (E_1 - e_0) \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

(4.10) , (4.11) 式より次式が導かれる。

$$T_{J,1} = T_{ext} + \left(E_1 - e_0 + \frac{K_1}{H_s} \right) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_0^+}$$

従って境界面をよぎって外界へ流出する熱流は、次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} Q_0 &= K_1 \cdot A_{J0} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{e_0^+} \\ &= K_1 \cdot A_{J0} \cdot \frac{(T_{J,1} - T_{ext})}{\left(E_1 - e_0 + \frac{K_1}{H_s} \right)} \\ &= A_{J0} \frac{(T_{J,1} - T_{ext})}{\left[\frac{E_1 - e_0}{K_1} + \frac{1}{H_s} \right]} \quad \dots\dots\dots (4.12) \end{aligned}$$

同様にしてランプ(J, n)の境界面を通して外界から流入する熱流は次式の如く書き表わされる。

$$Q_{n+1} = -A_{J,n+1} \cdot \frac{(T_{ext} - T_{J,n})}{\left[\frac{1}{H_s} + \frac{(e_n - E_n)}{K_n} \right]} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

- ここで、 H_s : 境界表面熱伝達率
- $T_{J,n}$: ノードポイント(J, n)の温度
- T_{ext} : 外界温度
- $A_{J,n+1}$: 外界との境界面積
- e_n : 外界との境界面のz座標値
- E_n : ノードポイント(J, n)のz座標値

以上述べたような定式化により、z方向熱流を算出し、z方向ノードメッシュに関するくり返し計算により、キャプセル内部の温度分布と熱流分布の収束値を求めることができれば、2次元定常熱計算が完了することとなる。GENGTC 2次元熱計算の計算フローシートを図4.3に示す。第2章で述べたようにz方向の各ノードメッシュごとのGENGTC 1次元計算には、熱膨張補正のためのr方向ノードに関するくり返し計算が含まれていることから、全体としてr方向→z方向の2次元のくり返し計算を行う必要がある。

4.2 2次元計算の内容と特徴

2次元計算の対象は、図4.1に示すように (r, z) 2次元に分割してモデル化する必要がある。

図4.3に示す2次元熱計算のフローシートを見るとわかるように、計算は z 軸を n 区分した各メッシュごとのGENGTC 1次元熱計算のくり返しである。このとき、 z 方向熱流 Q_{i+1} 、 Q_{i-1} を前節に述べた定式化により求め、これを図2.2の1次元計算フローシートに示すような z 方向熱にげ補正とし組み込む。

各メッシュにおけるGENGTC 1次元計算のためのノード構成・材質などは全て同一とは限らず、一般には z 方向の各位置に対応して異なるものである。これを図4.2に示すような2次元網状構成とするためには、 r 方向ノード寸法が z 方向のメッシュの位置にかかわらず同一でなければならない。このようにモデル化すると、 r 方向のノード構成が必ずしも図2.1に示すような固体と気体(液体)の交互層とはならないで、固体-固体-固体、あるいは気体-気体-気体などのように、本来気体であるべきノードに固体が存在したりあるいは本来固体であるべきノードに気体が存在したりすることがある。

図4.3の計算フローシートに示すように、2次元計算では z 軸方向に n 区分した各メッシュごとに、図2.2の示すようなGENGTC 1次元計算を順次くり返しながらい、最下部の表面ランプ($l=n$)の計算を終了したところで収束判定を行い、基準値と比較して収束したと判断されたところで2次元計算を終了する。

第2章で述べたように、GENGTC 1次元計算では熱膨張補正をくり返しながらい r 方向ノードの温度分布計算を行うため、補正係数の値によっては温度分布計算結果がくり返しごとに振動することがある。2次元熱計算ではさらに、 z 方向熱流の補正を z 方向メッシュに関してくり返し行うため、2次元温度分布の計算結果は1次元計算の場合より振動的になることが予想される。これを巧みに抑えて全体の計算を収束に向かわせるためには、次項に示すような2, 3の計算プログラム上の工夫が必要である。

- (1) キャプセルの内部で z 方向に異種の構造材が重なっている場合には、その接している部分のガスギャップは、 z 方向の幅が1mmの数分の1の狭い領域であり、 r 方向には数10mmの広がりがあることとなる。さらに気体の熱伝導が固体のそれと比較して非常に悪いことを考慮すると、このガスギャップを他の z 方向に並ぶ通常のメッシュと同等に扱いGENGTC計算を行うのでは、くり返し計算の際に収拾のつかないほど振動するおそれがある。そこで、 z 方向ガスギャップについては r 方向の熱流を無視して z 方向にのみ熱が流れるものとして温度分布が求められるようなモデル化してある。計算プログラムでは、ガスギャップのノード温度から流入する z 方向熱流と流出する z 方向熱流を算出し、この差の相対値が入力基準値ALWより小さくなるまでくり返し計算する。ALWとしてふつう0.03を与える。ギャップの性質によっては収束困難な場合も考えられ、最大回数ATBをあらかじめ決めておいて、くり返し計算の回数がこれに達したときこのギャップ計算を打ち切り次に進むことができるようにしておく。ATBとしてふつう30を入力データとして与える。

- (2) GENGTC r 方向 1 次元熱計算に z 方向熱にげ補正を施しながら 2 次元熱計算を行うため過弛緩法 (Over Relaxation Method) を採用する。これは、基本的に前回の z 方向くり返し計算の際に用いた熱にげ補正量を、大きく変更せずに今回の GENGTC 1 次元熱計算の補正のため用いようとする方法であり、次のように定式化される。

$$\Delta Q(J, I) = \Delta Q_{old} + DELIN * (\Delta Q_{new} - \Delta Q_{old}) \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

ここで、 $\Delta Q(J, I)$: r 方向温度分布を求めるためのノード (J, I) における z 方向熱にげ補正量

ΔQ_{old} : 前回の計算のノード (J, I) で隣接するノードの温度から求まる z 方向熱にげ量

ΔQ_{new} : 今回の計算のノード (J, I) で隣接するノードの温度から求まる z 方向の熱にげ量

DELIN : 過弛緩係数

上記の DELIN の標準値としては、0.03 を与えるとよいことが経験からわかっている。ただし、計算対象の熱伝導率の分布など熱的性質の違いから、解の振動しやすい体系とそうでない体系とがあり、ケースバイケースに DELIN の値を調整する必要も考えられる。

- (3) GENGTC 2 次元計算の収束性を制御するパラメータとして DELIN の他にもうひとつ C9C がある。これは、図 2.2 に示す。GENGTC 計算の r 方向ノードの熱膨張補正のくり返し計算の最大回数である。熱にげ補正を施さない r 方向 1 次元計算の場合には、経験的に C9C=12 とするとよいことがわかっているが、2 次元熱計算の場合は熱膨張補正にさらに z 方向熱にげ補正が加わるのきで一概に設定するわけにはいかない。結局、振動しやすい体系、安定な体系の違いを勘案して、ケースバイケースに入力値として与える必要がある。一般には、C9C として 3 又は 4 を与えるとよいことがわかっている。この回数を大きくすると熱膨張の補正計算としては安定するが、熱にげ補正計算には振動的に寄与する。
- (4) 熱にげ補正計算を安定させるには、基本的には図 4.3 に示す z 方向メッシュごとの 2 次元的 GENGTC 計算のくり返し数を増加させることである。計算の安定度は、最下部の表面ランプ (I=n) の計算を終了したところで次項目に示すような収束判定を行うことで判断される。
- (イ) ノードポイント (J, I) で計算された温度の、前回の計算結果の温度に対する変化の相対的割合をチェックし、その最大値 TEST が、入力された基準値 DTM より小さくなること。DTM の標準的な値として 0.001 (0.1%) を与えるとよい。
- (ロ) 上記の温度計算結果の相対的変化割合の、全てノードポイントに関する絶対値の総和 SUM が、入力された基準値 TOTAL より小さくなること。TOTAL の標準的な値としては DTM × 全ノードポイント数 (図 4.2 の n × m) × 1/3 として与えるとよい。
- (ハ) 構造物内部で発生する全熱量と境界表面ノードから外界に流出する全熱量を計算して比較し、その差の相対的割合 QTEST が、入力された基準値 SPEC より小さくなること。SPEC の標準的な値として 0.04 (4%) を与えるとよい。

計算開始後、CRTの画面上には収束判定を行うごとにTESTとDTM、SUMとTOTAL、QTESTとSPECの値が、終了したz方向くり返し計算回数と共にスクリーン上に表示される。一般にはくり返し計算の回数が増えるに従い、TEST、SUM及びQTESTの値が小さくなり、2次元計算が安定収束の方向に向かうこととなる。それにもかかわらず全てのケースでこれらの値が基準値DTM、TOTAL、SPECの入力で指定した値以下に小さくなるとは限らない。収束が困難な場合にはC9CあるいはDELINなど収束制御パラメータの値を変更する必要がある。このようにして、計算が最も安定した状態で収束し基準値を満足すると、計算コードは次のメッセージを出力し計算を終了する。

CALCULATION HAS MET THE CONVERSION TARGETS

これからわかるように、DTM等の基準値はあくまで目標値であって、計算対象によっては入力指定した基準値以上であっても充分収束し安定した状態に達したと判断される場合がある。計算コートでは温度変動割合TEST及びその絶対値の総和SUMに注目し、これが2次元熱計算のくり返しごとに変化しなくなりやがて発散傾向に転ずる時点を判断し、次のメッセージを出力して計算を終了する。

TEMPERATURE ATTAINED THE MOST STABLE CONDITIONS

このように計算終了してもTEST及びSUMの値が目標値と比較して5～6倍以上大きいときは、計算体系が充分安定に収束したとはいえないので、C9CあるいはDELINの値を変更し、次に述べるような軸方向メッシュの切り方を検討して再計算することを勧める。経験によれば、z方向くり返し計算が20回近くまで成功すれば、収束基準値をクリアしなくとも計算が充分安定したものと見做されるであろう。

- (5) z方向くり返し計算回数を増やしてできるだけ安定した計算結果を得るには、メッシュモデルの作り方が工夫される。計算の不必要な振動を回避するためのメッシュモデル作成上の一般的な注意次項は以下のようにまとめられる。
- (イ) 軸方向メッシュの切り方は、熱発生分布の上下対称性、構造の上下対称性に留意しつつできるだけ均等に分割する。
 - (ロ) 熱伝導の悪い物質たとえばステンレススチールから成る領域と熱伝導の良い物質たとえばアルミニウムから成る領域が軸方向に隣接している場合には、一般には前者の領域のメッシュを細かくとる。
 - (ハ) 発熱部に接する熱媒体領域では、温度分布の傾斜が急であり、このような領域ではメッシュを細かくとるよりも逆に幅広くとる方が、z方向繰り返し計算の安定性がよくなる。
- (ニ) z方向メッシュの外側の上部シンク及び下部シンクへの表面熱伝達率は、余り大きくとり過ぎると計算が振動的になるようである。

4.3 計算コードの検証

2次元熱計算コード検証用の実験データを得るため、図4.4に示すような炉外キャプセルを製作した。これには、中心に電気ヒータを装備し、その周囲のアルミニウム熱媒体及び上下に連なるSUS304断熱材の内部のz方向各位置に計12本のクロメル・アルメル熱電対を配置した。このキャプセルを図4.5に示すような冷却水循環装置のテストセクションに装荷し、熱平衡状態における熱電対指示温度を読み取ることによりキャプセル内部のz方向温度分布を測定した。表4.1に実験条件及び熱電対による温度測定値を示す。

この炉外キャプセルのGENGTC 2次元熱計算モデルを図4.6に示す。z方向メッシュの切り方は、ヒータ長200mmを25mm間隔で8等分し、その上下に延びるアルミニウム熱媒体を25mmあるいは50mm間隔でメッシュに切り、熱電対取付位置がランプ境界にくるようにする。上下に重なる熱媒体、断熱材、切断金具の接触する間隙は、z方向ガスギャップノードとして扱うこととする。計算モデルの全長は530mmであり、これを前節で述べたことに留意しつつ全部で30個のノードメッシュに切る。

一方、r方向ノードのとり方は、発熱部分について内側からヒータ外表面 ($r=6.29\text{mm}$)、アルミニウム熱媒体内表面 ($r=6.46\text{mm}$) 及び外表面 ($r=18.315\text{mm}$)、SUS304外筒内表面 ($r=18.43\text{mm}$) 及び外表面 ($r=20.0\text{mm}$) にノードをとる。さらに、発熱部分の上下に重なるSUS304断熱材及びアルミニウム切断金具の内表面半径は7.24mmであり、アルミニウム熱媒体内表面半径6.46mmより大きいので、全体として2次元メッシュモデルを構成するため半径7.24mm及び半径7.25mmのところにノードを設ける。特に7.25mmのところに人為的なノードを設ける理由は、GENGTC計算モデルでは奇数番目のノードは常に固体層外表面になければならないからである。

GENGTC 2次元計算用の入力データを次章の入力形式に従って作成すると図4.7に示すようになる。データグループNo.1, No.2及びNo.3は、発熱部分の1次元計算用入力データであり、これにより算出されるr方向1次元温度分布が2次元計算のための初期温度分布設定に用いられる。その他の2次元計算用入力データは、データグループNo.5に与える。

2次元熱計算の出力データを図4.8に示す。入力データの記述のあと、次の2次元変数の収束値が出力される。

XRZ(I, K) : 軸方向熱にげ補正量 (BTU/h)

WRZ(I, K) : 軸方向熱流 (BTU/h)

上方へ流れる熱に正符号を与えている。

PRZ(I, K) : 径方向熱流 (BTU/h)

YRZ(I, K) : 熱伝導率 (BTU/ft · h · °F)

ERZ(I, K) : 熱輻射率 (-)

RRZ(I, K) : ノード半径 (cm)

TRZ(I, K) : ランプ中心温度 (°C)

TINN(I, K) : ノード境界温度 (°C)

ここで、I及びKはそれぞれ、r方向ノード、z方向メッシュの番号を示すサフィックスであ

り、この計算ではIの最大が7、Kの最大が30となっている。最後のTINNは、図2.1に示すようなr方向ノード表面の温度の2次元分布計算の収束値を展開したものである。

出力データの最後に、計算終了時の収束状況を示すために、その時のz方向くり返し計算回数と入力指定した打ち切り回数の次に、各ノードメッシュ点の温度計算変動の最大値の相対値(TEST)、各ノードメッシュ点の温度計算変動の総和の相対値(SUM)及び内部総発熱量と外表面放熱量の差の相対値(QTEST)を、対応する入力基準値のDTM, TOTAL, SPECと共に並記して示す。この計算では、2次元熱計算のくり返し計算ごとの変動が、全て入力で指定した基準値をクリアしたことを示している。

2次元計算の温度分布計算及び熱収支計算の収束状況を知るために、z方向くり返し計算の収束判定ごとに上述のTEST, SUM, QTEST, DTM, TOTAL, SPECの値CRT画面上に打ち出す。図4.9は、このCRT画面上に打ち出されデータを計算終了まで示したものである。

図4.8(6/7)のランプ中心温度分布TRZ(I, K)から、熱電対埋込位置に対応するI=5の計算値をとり出し、実測データと比較してプロットしたものが図4.10である。これから、2次元温度分布計算値は実測値とよく一致していることがわかる。特にSUS304断熱材とアルミニウム熱媒体のガスギャップ部の温度変化(図4.10で実線で示した温度分布計算値のキャプセル上下方向2箇所)で急激に立上がっている部分)も、実測データの比較からほぼ妥当なことが示されている。図4.10には、参考のためキャプセル発熱部分の2次元熱計算、すなわち図4.7に示した入力データのうちデータグループNo.1, No.2及びNo.3のみを用いて算出した温度も示してある。

表4.1 キャプセル炉外発熱実験測定データ

ヒータ出力 [W/cm ²]		0	4.9	13.7	27.5	44.3	55.8	
*キャップ層ガス圧力 [kg/cm ² G]		0.2	0.2	0.15	0.15	0.15	0.15	
冷却水流量 [ℓ/min]		11	11	11	11	11	11	
熱電対指示温度	熱電対装荷位置	熱電対番号	熱電対指示温度 [°C]					
	ヒータ	1	断線					
	切断金具	2	10	12	12	12	12	15
	断熱材	3	10	12	15	18	20	20
	熱媒体	4	10	18	25	38	50	55
		5	10	20	35	55	75	85
		6	10	25	48	75	105	125
		7	10	25	50	85	115	135
		8	10	25	50	78	110	130
		9	10	20	35	58	80	95
		10	断線					
	断熱材	11	10	12	12	12	12	18
切断金具	12	10	10	12	12	12	15	

* 充てんガス：窒素

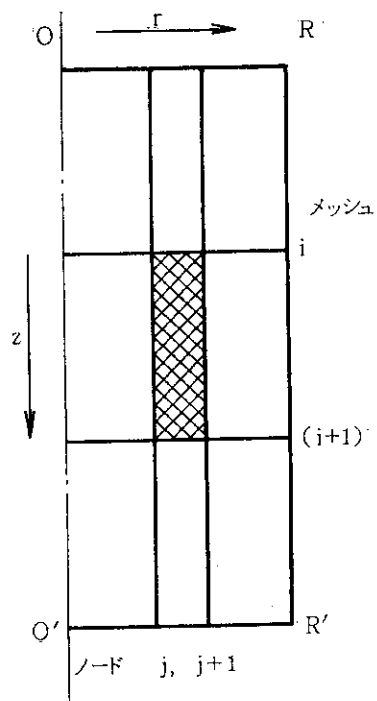
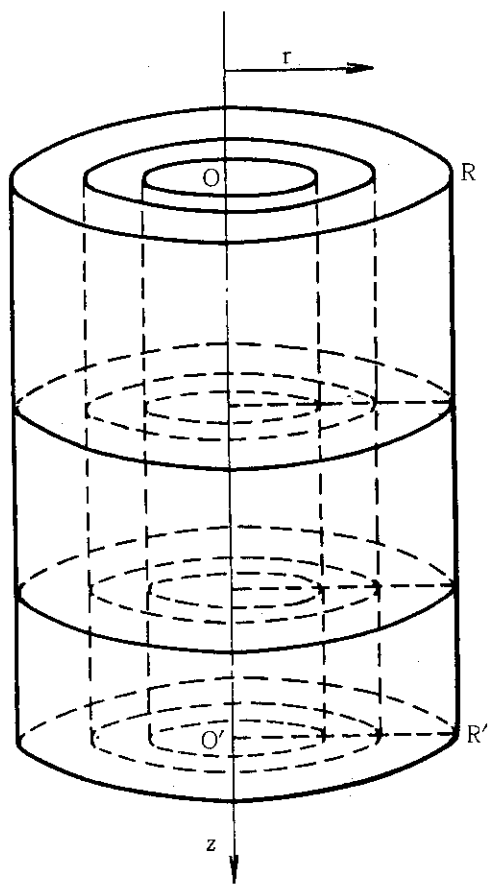


図4.1 同軸多重円筒構造の (r, z) 2次元分割

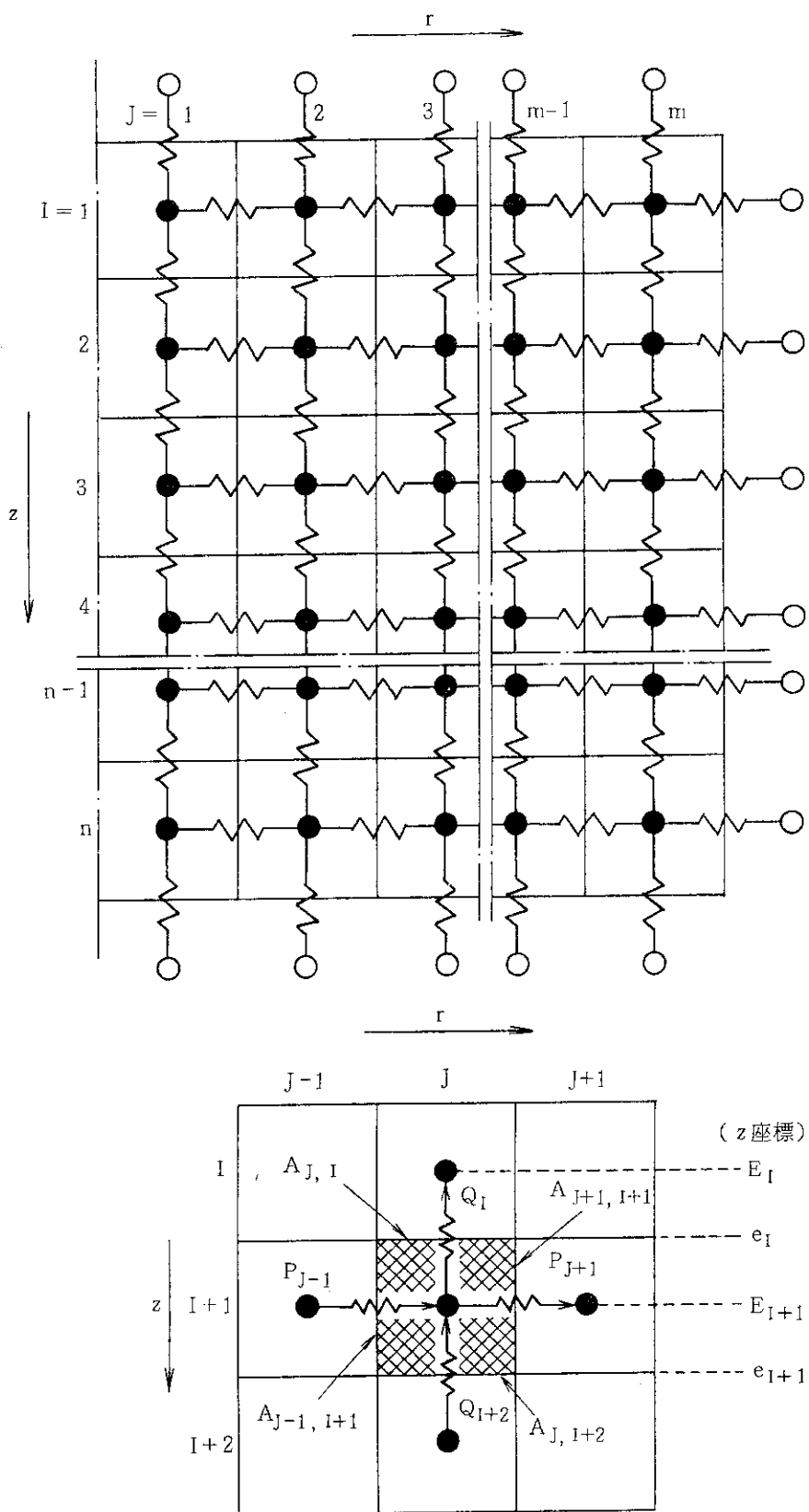


図4.2 (r, z) 2次元計算の網状構成

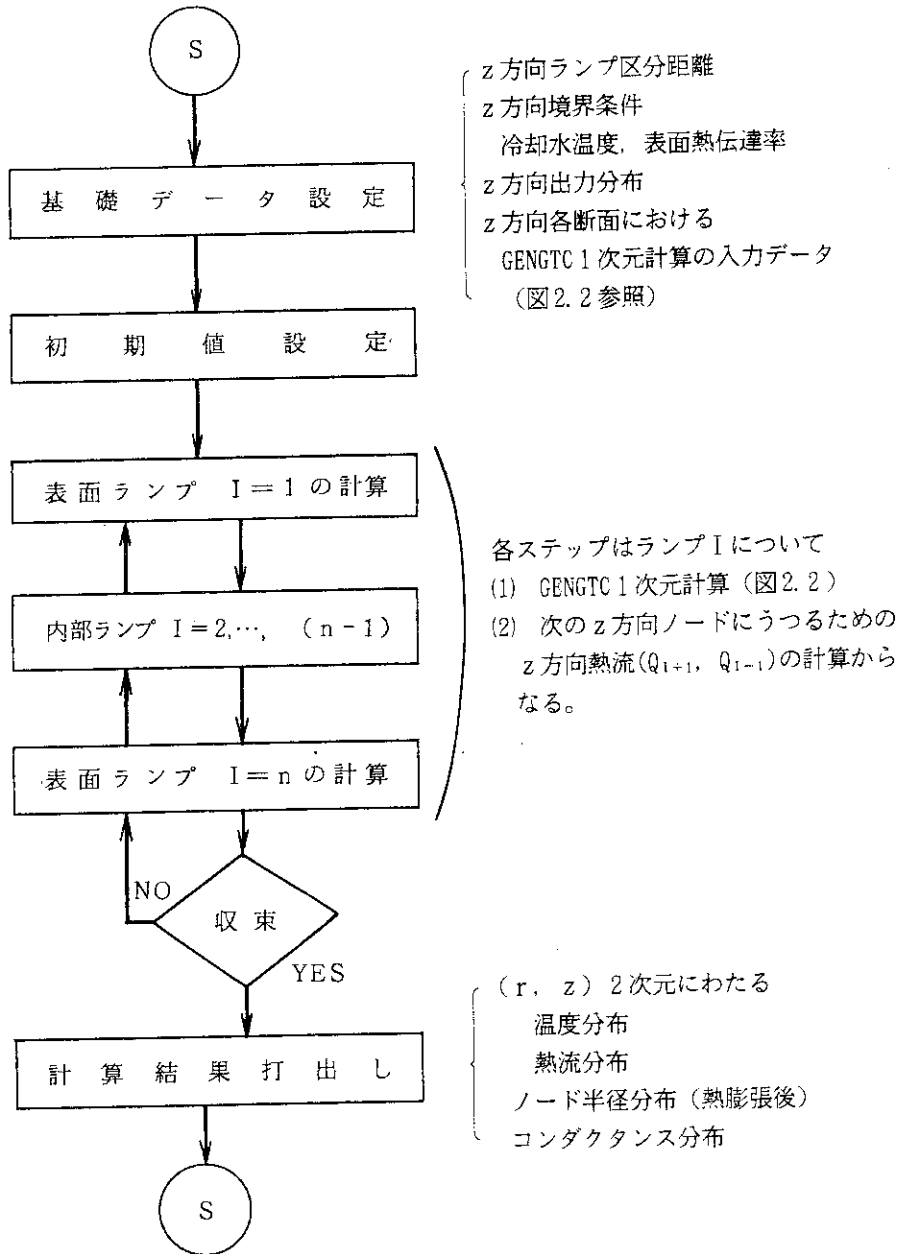


図 4.3 GENGTC 2 次元計算フローシート

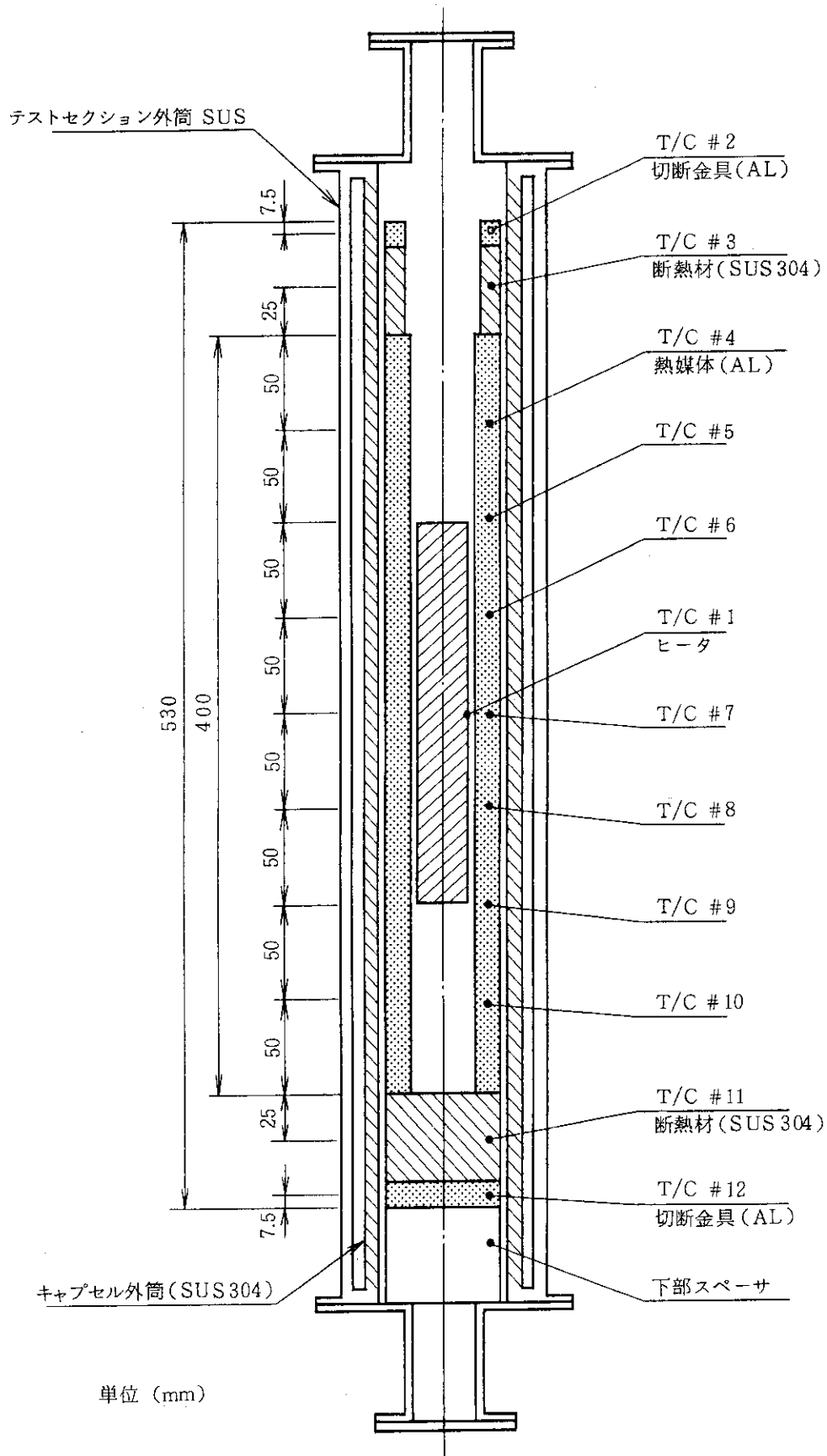
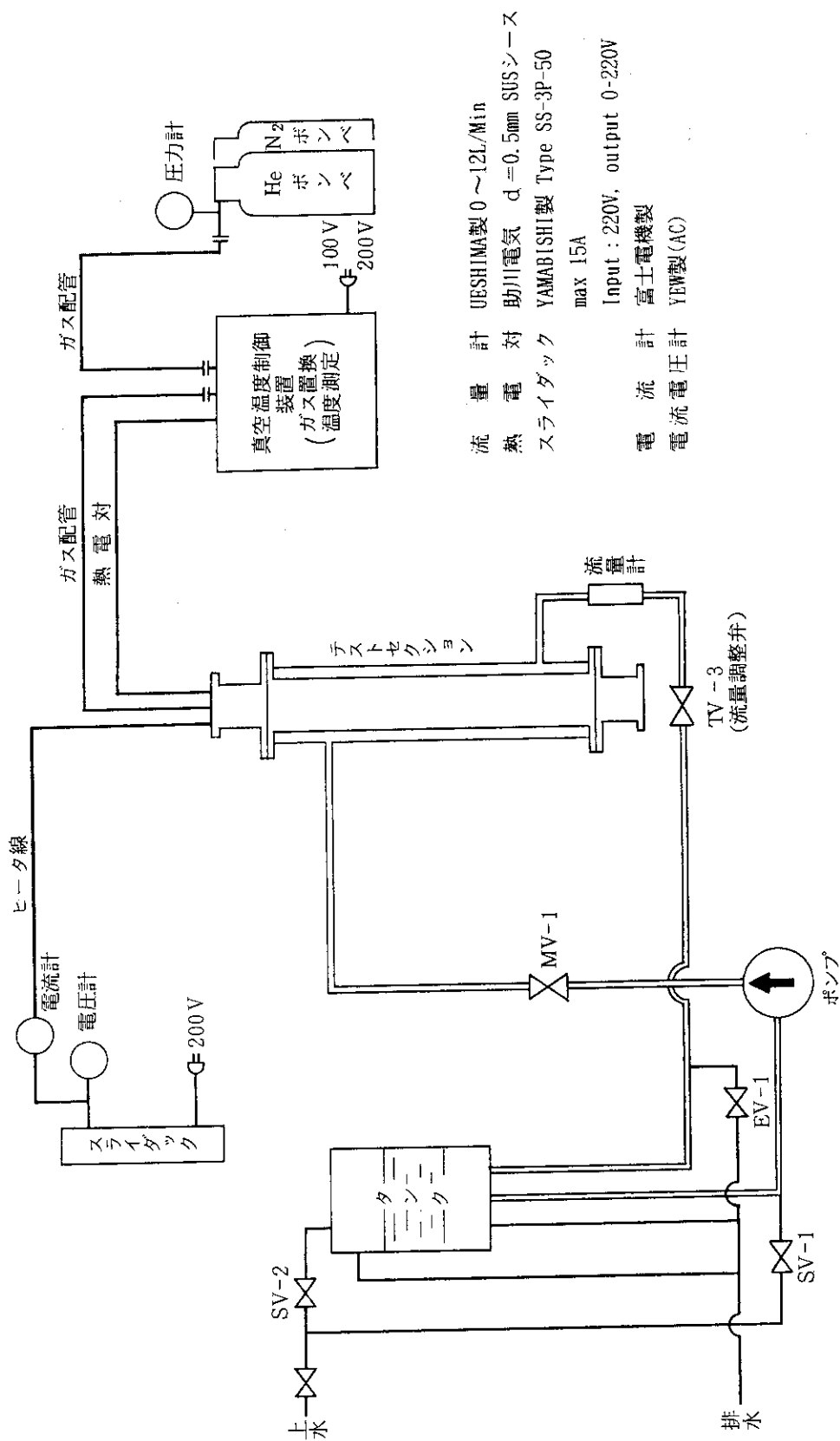


図4.4 炉外実験キャプセル組立図



流量計 UESHIMA製 0~12L/Min
 熱電対 助川電気 d=0.5mm SUSシース
 スライダック YAMABISHI製 Type SS-3P-50
 max 15A
 電流計 Input : 220V, output 0-220V
 富士電機製
 電圧計 YEW製 (AC)

図4.5 炉外実験キャセル冷却系フローシート

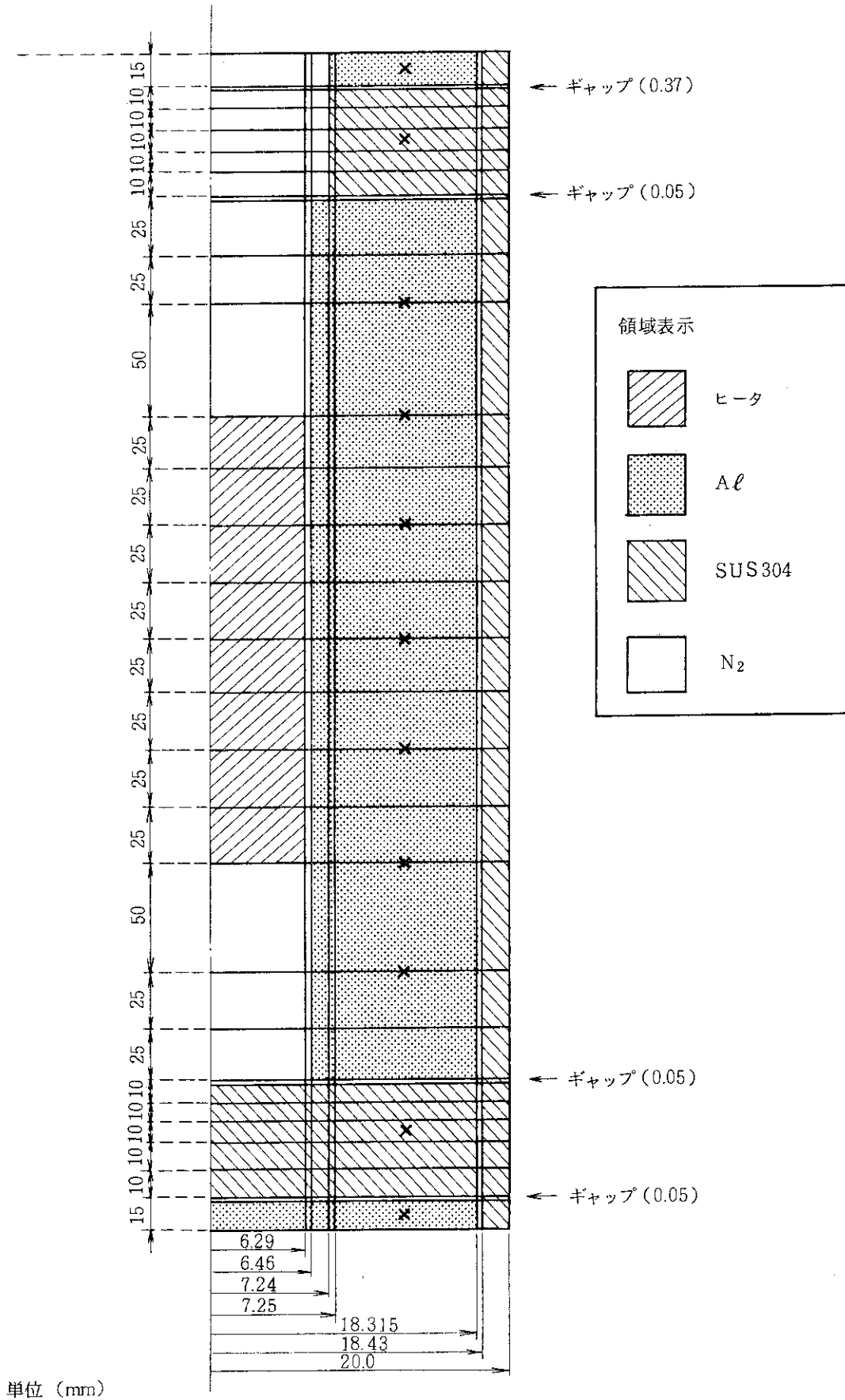


図4.6 GENGTC 2次元熱計算モデル


```

00001 1 NIJIGEN ROGAIJIKKEN
00002 1 7
00003 0.6290,0.6460,0.7240,0.7250,1.8315,1.8430,2.0
00004 0 21 20 20 20 21 7
00005 7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00006 0.000
00007 2 1 1 1
00008 68.5
00009 0.
00010 3 -1
00011 5500.0,11.0,1000.0
00012 6 30 50
00013 53.0,30.0,4.0,0.03
00014 0.001,0.01,0.03,0.03
00015 11.0,10.0,11.0,10.0
00016 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
00017 0.0,0.0,0.0,0.0,1.0,1.0,1.0
00018 1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,0.0,0.0
00019 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
00020 0.0,0.0
00021 0.0283,0.0290,0.0477,0.0664,0.0852,0.1039,0.1226
00022 0.1227,0.1698,0.2642,0.3113,0.3585,0.4057,0.4528
00023 0.5000,0.5472,0.5943,0.6415,0.6887,0.7358,0.8302
00024 0.8774,0.8775,0.8963,0.9152,0.9340,0.9529,0.9717
00025 0.9718,1.000
00026 30 100 30 30 30 30 30 100 30 30 30 1 1 1
00027 1 1 1 1 1 30 30 30 100 30 30 30 30
00028 100 30

```

- 図4.7 2次元計算用入力データの例(第5章参照)(1/2)
- 2行~11行; 1次元計算用標準入力データ(図2.3と同一)初期2次元温度分布設定のため用いられる。
 - 12行 ; データグループNo.6, z方向ノード数(30)2次元くり返し計算回数の最大(50)
 - 13行 ; 2次元計算制御パラメータ
 - 14行 ; 2次元計算制御パラメータ
 - 15行 ; 上下端境界条件
 - 16行~20行; z方向発熱分布ファクター
 - 21行~25行; z方向ノードメッシュの比距離
 - 26行~28行; z方向の発熱ノードメッシュ, ガスギャップノードの指数

```

00029  21  21  21  21  20  21  7
00030  21  21  21  21  21  21  7
00031  21  21  21  21  7  21  7
00032  21  21  21  21  7  21  7
00033  21  21  21  21  7  21  7
00034  21  21  21  21  7  21  7
00035  21  21  21  21  7  21  7
00036  21  21  21  21  21  21  7
00037  21  21  20  20  20  21  7
00038  21  21  20  20  20  21  7
00039  21  21  20  20  20  21  7
00040  0  21  20  20  20  21  7
00041  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00042  0.000
00043  0  21  20  20  20  21  7
00044  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00045  0.000
00046  0  21  20  20  20  21  7
00047  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00048  0.000
00049  0  21  20  20  20  21  7
00050  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00051  0.000
00052  0  21  20  20  20  21  7
00053  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00054  0.000
00055  0  21  20  20  20  21  7
00056  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00057  0.000
00058  0  21  20  20  20  21  7
00059  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00060  0.000
00061  0  21  20  20  20  21  7
00062  7.8,8.20,4.91E-03,0.0,0.0,0.0,16.6,0.0
00063  0.000
00064  21  21  20  20  20  21  7
00065  21  21  20  20  20  21  7
00066  21  21  20  20  20  21  7
00067  21  21  21  21  21  21  7
00068  7  7  7  7  7  21  7
00069  7  7  7  7  7  21  7
00070  7  7  7  7  7  21  7
00071  7  7  7  7  7  21  7
00072  7  7  7  7  7  21  7
00073  21  21  21  21  21  21  7
00074  20  20  20  20  20  21  7
00075  0
00076  0
00077  [EOF]

```

図4.7 2次元計算用入力データの例(第5章参照)(2/2)
 29行~74行; (r, z) 2次元材質指定番号, 0指定
 の材質には物性値データを入力する。

CASE NO. 1 NIJIGEN ROGAIJIKKEN

INPUT DATA

DATA GROUP NUMBER 1

RADIUS (CM)
 .6290 .6460 .7240 .7250 1.8315 1.8430 2.0000
 EMISSIVITIES
 .0000 .0500 .0500 .0500 .0500 .8000 .8000
 MATERIAL TYPE NO.(0=GAS,1=LIQ.OR SOLID)
 1 0 1 1 1 0 1
 MATERIAL SELECTOR NO.(0=NON-TABULATED MATERIAL)
 0 21 20 20 20 21 7

NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS FOR 0-DESIGNATED
 NO DENSITY C0 C1 C2 C3 C4 A0 A1
 GR/CM3 (BTU/FT.H.F.) (1.0E-06/F.)
 1 7.80 .82E+01 .49E-02 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .17E+02 .00E+00

DATA GROUP NUMBER 2

FISSION HEATING NODE IS 1
 LINEAR FISSON HEATING RATE IN WATTS/CM 68.500
 GAMMA HEATING DENSITIES IN WATTS/GRAM .000

DATA GROUP NUMBER 3

SURFACE COEFF.= 5500.00 KCAL/M.M.HR.C.
 COOLANT TEMP. = 11.00 C.
 PELLETT-CLAD GAP CONDUCTANCE WILL BE COMPUTED

DATA GROUP NUMBER 6

AXIAL LENGTH 53.0 CM IS DIVIDED 30 SECTIONS

MATERIAL TYPE NO.(0=GAS,1=LIQ.OR SOLID)
 ATTACHED LAST NUMBER,N(<21)=HEATING NODE NUMBER, 30=NO HEATING,100=GASGAP

1;	1	1	1	1	1	0	1	30
2;	1	1	1	1	1	1	1	100
3;	1	1	1	1	1	0	1	30
4;	1	1	1	1	1	0	1	30
5;	1	1	1	1	1	0	1	30
6;	1	1	1	1	1	0	1	30
7;	1	1	1	1	1	0	1	30
8;	1	1	1	1	1	1	1	100
9;	1	1	1	1	1	0	1	30
10;	1	1	1	1	1	0	1	30
11;	1	1	1	1	1	0	1	30
12;	1	0	1	1	1	0	1	1
13;	1	0	1	1	1	0	1	1
14;	1	0	1	1	1	0	1	1
15;	1	0	1	1	1	0	1	1
16;	1	0	1	1	1	0	1	1
17;	1	0	1	1	1	0	1	1
18;	1	0	1	1	1	0	1	1
19;	1	0	1	1	1	0	1	1

図4.8 2次元計算出力データの例 (1/7)

20;	1	1	1	1	1	0	1	30
21;	1	1	1	1	1	0	1	30
22;	1	1	1	1	1	0	1	30
23;	1	1	1	1	1	1	1	100
24;	1	1	1	1	1	0	1	30
25;	1	1	1	1	1	0	1	30
26;	1	1	1	1	1	0	1	30
27;	1	1	1	1	1	0	1	30
28;	1	1	1	1	1	0	1	30
29;	1	1	1	1	1	1	1	100
30;	1	1	1	1	1	0	1	30

MATERIAL SELECTOR NO. (0=NON-TABULATED MATERIAL)

1;	21	21	21	21	20	21	7	30
2;	21	21	21	21	21	21	7	100
3;	21	21	21	21	7	21	7	30
4;	21	21	21	21	7	21	7	30
5;	21	21	21	21	7	21	7	30
6;	21	21	21	21	7	21	7	30
7;	21	21	21	21	7	21	7	30
8;	21	21	21	21	21	21	7	100
9;	21	21	20	20	20	21	7	30
10;	21	21	20	20	20	21	7	30
11;	21	21	20	20	20	21	7	30
12;	0	21	20	20	20	21	7	1
13;	0	21	20	20	20	21	7	1
14;	0	21	20	20	20	21	7	1
15;	0	21	20	20	20	21	7	1
16;	0	21	20	20	20	21	7	1
17;	0	21	20	20	20	21	7	1
18;	0	21	20	20	20	21	7	1
19;	0	21	20	20	20	21	7	1
20;	21	21	20	20	20	21	7	30
21;	21	21	20	20	20	21	7	30
22;	21	21	20	20	20	21	7	30
23;	21	21	21	21	21	21	7	100
24;	7	7	7	7	7	21	7	30
25;	7	7	7	7	7	21	7	30
26;	7	7	7	7	7	21	7	30
27;	7	7	7	7	7	21	7	30
28;	7	7	7	7	7	21	7	30
29;	21	21	21	21	21	21	7	100
30;	20	20	20	20	20	21	7	30

NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS FOR 0-DESIGNATED

NO	DENSITY GR/CM3	C0	C1 (BTU/FT.H.F.)	C2	C3	C4	A0 (1.0E-06/F.)	A1
12	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
13	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
14	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
15	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
16	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
17	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
18	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00
19	7.80	.82E+01	.49E-02	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.17E+02	.00E+00

UPSIDE EXTERNAL CONDITIONS; TEMP.(DEG.C) = 11.00
 HEAT TRANSFER COE.(BTU/FT2/H/F) = 10.00
 DOWNSIDE EXTERNAL CONDITIONS; TEMP.(DEG.C) = 11.00
 HEAT TRANSFER COE.(BTU/FT2/H/F) = 10.00

AXIAL LENGTH RATIOS FROM THE TOP (THE BOTTOM=1.0)

.0283	.0290	.0477	.0664	.0852	.1039	.1226
.1227	.1698	.2170	.3113	.3585	.4057	.4528
.5000	.5472	.5943	.6415	.6887	.7831	.8302
.8774	.8775	.8963	.9152	.9340	.9529	.9717

図4.8 2次元計算出力データの例 (2/7)

.9718 1.0000

AXIAL HEAT GENERATION RATIOS FOR EACH SECTION

.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	.0000	.0000
.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
.0000	.0000					

ITERATION WILL BE LIMITED BY 50 TIMES

RADIAL HEAT FLOW CALCULATION REPEATS 4. TIMES
 AXIAL HEAT FLOW CORRECTION RELAXATION FACTOR .0300
 AXIAL GAS GAP MESH HEAT FLOW CALCULATION REPEATS 30.0
 CONVERSION CRITERIA OR SPECIFICATION
 GAS GAP MESH HEAT FLOW CONTINUATION .0300
 MAXIMUM TEMPERATURE DIFFERENCE OF ITERATION .0010
 TOTAL TEMPERATURE DIFFERENCE OF EACH ITERAT .0100
 HEAT BALANCE SPECIFICATION (OUT/GENERATION) .0400

OUTPUT DATA / CASE NO 1

CALCULATION HAS MET THE CONVERSION TARGETS

29

XRZ(I,K) : RADIAL HEAT FLOW CORRECTION (BTU/H)

-.11E-01	-.45E-03	-.15E-02	-.25E-04	-.20E+01	-.29E-03	-.36E+00
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
-.71E-02	-.16E-03	.36E-03	.55E-05	-.53E+01	.86E-04	-.24E-01
-.51E-02	-.17E-03	-.45E-03	-.73E-05	-.59E+01	-.76E-04	-.83E-01
-.48E-02	-.18E-03	-.52E-03	-.88E-05	-.74E+01	-.94E-04	-.94E-01
-.58E-02	-.22E-03	-.70E-03	-.12E-04	-.98E+01	-.13E-03	-.13E+00
-.14E-01	-.69E-03	-.11E-01	-.20E-03	-.14E+02	-.60E-03	-.51E+00
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
.64E-02	.47E-03	-.48E+01	-.83E-01	-.99E+02	.47E-03	.41E+00
-.37E-02	-.16E-03	-.45E+01	-.77E-01	-.12E+03	-.11E-03	-.14E+00
-.17E+00	-.37E-02	-.14E+02	-.24E+00	-.34E+03	-.30E-03	-.54E+00
-.26E+01	.20E-02	.10E+02	.17E+00	.24E+03	.13E-03	.13E+00
.11E+01	.11E-03	.55E+01	.95E-01	.15E+03	.10E-03	.24E+00
.95E+00	.82E-04	.35E+01	.59E-01	.92E+02	.68E-04	.20E+00
.72E+00	.61E-04	.25E+01	.42E-01	.65E+02	.47E-04	.16E+00
.71E+00	.60E-04	.24E+01	.42E-01	.64E+02	.47E-04	.16E+00
.94E+00	.81E-04	.34E+01	.58E-01	.90E+02	.65E-04	.20E+00
.11E+01	.11E-03	.55E+01	.94E-01	.14E+03	.10E-03	.25E+00
-.25E+01	.20E-02	.10E+02	.17E+00	.23E+03	.13E-03	.15E+00
-.17E+00	-.37E-02	-.14E+02	-.24E+00	-.34E+03	-.30E-03	-.56E+00
-.40E-02	-.17E-03	-.45E+01	-.77E-01	-.12E+03	-.12E-03	-.15E+00
.67E-02	.44E-03	-.39E+01	-.67E-01	-.10E+03	.31E-03	.26E+00
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
-.27E+01	-.51E-01	-.31E+00	-.56E-02	-.11E+02	-.59E-03	-.54E+00
-.27E+01	-.11E+00	-.35E+00	-.58E-02	-.76E+01	-.82E-04	-.10E+00
-.22E+01	-.83E-01	-.24E+00	-.41E-02	-.60E+01	-.74E-04	-.80E-01
-.20E+01	-.72E-01	-.19E+00	-.32E-02	-.50E+01	-.66E-04	-.75E-01
-.17E+01	-.60E-01	-.17E+00	-.29E-02	-.46E+01	-.55E-04	-.91E-01
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
-.28E+01	-.91E-01	-.21E+00	-.37E-02	-.52E+01	.25E-03	-.12E+00

29

WRZ(I,K) : AXIAL HEAT FLOW TOWARDS UPPER (BTU/H)

.31E-02	.14E-03	.68E-03	.11E-04	.30E+00	.14E-03	.27E-02
.39E-02	.13E-03	.10E-02	.18E-04	.93E+00	.12E-03	.14E+00
.38E-02	.20E-03	.10E-02	.18E-04	.89E+00	.21E-03	.14E+00
.82E-03	.50E-04	.26E-03	.46E-05	.41E+01	.54E-04	.35E-01
.16E-02	.89E-04	.44E-03	.77E-05	.68E+01	.90E-04	.67E-01
.34E-02	.18E-03	.90E-03	.15E-04	.14E+02	.18E-03	.12E+00

図4.8 2次元計算出力データの例 (3/7)

.54E-02	.27E-03	.13E-02	.22E-04	.19E+02	.25E-03	.21E+00
.17E-01	.58E-03	.16E-01	.27E-03	.34E+02	.56E-03	.72E+00
.17E-01	.96E-03	.16E-01	.28E-03	.35E+02	.81E-03	.76E+00
.29E-02	.16E-03	.54E+01	.92E-01	.14E+03	.13E-03	.14E+00
.57E-02	.30E-03	.97E+01	.17E+00	.26E+03	.22E-03	.28E+00
.21E+00	.27E-02	.25E+02	.42E+00	.61E+03	.43E-03	.83E+00
.29E+01	.29E-03	.13E+02	.23E+00	.36E+03	.27E-03	.69E+00
.20E+01	.18E-03	.77E+01	.13E+00	.20E+03	.15E-03	.44E+00
.90E+00	.83E-04	.36E+01	.62E-01	.96E+02	.69E-04	.22E+00
.11E+00	.40E-05	.76E-02	.13E-03	.20E+00	.24E-06	.24E-02
-.89E+00	-.79E-04	-.33E+01	-.57E-01	-.88E+02	-.66E-04	-.21E+00
-.20E+01	-.18E-03	-.77E+01	-.13E+00	-.20E+03	-.16E-03	-.44E+00
-.30E+01	-.29E-03	-.14E+02	-.24E+00	-.36E+03	-.29E-03	-.69E+00
-.21E+00	-.47E-02	-.25E+02	-.42E+00	-.61E+03	-.52E-03	-.84E+00
-.57E-02	-.30E-03	-.97E+01	-.17E+00	-.26E+03	-.24E-03	-.28E+00
-.27E-02	-.15E-03	-.51E+01	-.88E-01	-.14E+03	-.13E-03	-.14E+00
-.24E-01	-.79E-03	-.12E+01	-.21E-01	-.34E+02	-.54E-03	-.75E+00
-.46E-01	-.23E-02	-.12E+01	-.21E-01	-.33E+02	-.92E-03	-.71E+00
-.25E+01	-.13E+00	-.67E+00	-.12E-01	-.18E+02	-.24E-03	-.19E+00
-.17E+01	-.89E-01	-.44E+00	-.76E-02	-.11E+02	-.14E-03	-.10E+00
-.10E+01	-.55E-01	-.27E+00	-.47E-02	-.70E+01	-.90E-04	-.65E-01
-.64E+00	-.34E-01	-.17E+00	-.29E-02	-.42E+01	-.53E-04	-.33E-01
-.28E+00	-.85E-02	-.67E-01	-.11E-02	-.14E+01	-.26E-04	-.33E-01
-.29E+00	-.15E-01	-.71E-01	-.12E-02	-.15E+01	-.45E-04	-.43E-01
.16E+00	.88E-02	.44E-01	.76E-03	.12E+01	.52E-03	.98E-02

29

PRZ(I,K) : RADIAL HEAT FLOW FROM INNER NODE (BTU/H)

.11E-01	.11E-01	.13E-01	.13E-01	.20E+01	.20E+01	.24E+01
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
.71E-02	.72E-02	.69E-02	.69E-02	.53E+01	.53E+01	.53E+01
.51E-02	.52E-02	.57E-02	.57E-02	.60E+01	.60E+01	.60E+01
.48E-02	.50E-02	.55E-02	.55E-02	.74E+01	.74E+01	.75E+01
.59E-02	.61E-02	.68E-02	.68E-02	.98E+01	.98E+01	.10E+02
.14E-01	.15E-01	.26E-01	.26E-01	.14E+02	.14E+02	.14E+02
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
.00E+00	.00E+00	.48E+01	.49E+01	.10E+03	.10E+03	.10E+03
.37E-02	.38E-02	.45E+01	.46E+01	.12E+03	.12E+03	.12E+03
.17E+00	.17E+00	.14E+02	.15E+02	.36E+03	.36E+03	.36E+03
.59E+03	.59E+03	.58E+03	.58E+03	.34E+03	.34E+03	.34E+03
.58E+03	.58E+03	.58E+03	.58E+03	.43E+03	.43E+03	.43E+03
.58E+03	.58E+03	.58E+03	.58E+03	.49E+03	.49E+03	.49E+03
.58E+03	.58E+03	.58E+03	.58E+03	.52E+03	.52E+03	.52E+03
.58E+03	.58E+03	.58E+03	.58E+03	.52E+03	.52E+03	.52E+03
.58E+03	.58E+03	.58E+03	.58E+03	.49E+03	.49E+03	.49E+03
.58E+03	.58E+03	.58E+03	.58E+03	.43E+03	.43E+03	.43E+03
.59E+03	.59E+03	.58E+03	.58E+03	.34E+03	.34E+03	.34E+03
.17E+00	.17E+00	.15E+02	.15E+02	.36E+03	.36E+03	.36E+03
.40E-02	.41E-02	.45E+01	.46E+01	.12E+03	.12E+03	.12E+03
.00E+00	.00E+00	.39E+01	.39E+01	.11E+03	.11E+03	.10E+03
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
.27E+01	.28E+01	.31E+01	.31E+01	.14E+02	.14E+02	.15E+02
.27E+01	.28E+01	.32E+01	.32E+01	.11E+02	.11E+02	.11E+02
.22E+01	.23E+01	.25E+01	.25E+01	.86E+01	.86E+01	.87E+01
.20E+01	.21E+01	.22E+01	.22E+01	.73E+01	.73E+01	.74E+01
.17E+01	.18E+01	.19E+01	.19E+01	.65E+01	.65E+01	.66E+01
.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00	.00E+00
.28E+01	.29E+01	.31E+01	.31E+01	.83E+01	.83E+01	.84E+01

29

YRZ(I,K) : THERMAL CONDUCTIVITIES (BTU/FT/H/F)

.01	.01	.01	.01	117.23	.01	8.71
.02	.02	.02	.02	.01	.01	8.71
.02	.02	.02	.02	8.76	.01	8.71
.02	.02	.02	.02	8.76	.01	8.71
.02	.02	.02	.02	8.78	.02	8.72
.02	.02	.02	.02	8.80	.02	8.72
.02	.02	.02	.02	8.83	.02	8.72

図4.8 2次元計算出力データの例(4/7)

.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.63	.65	.72	.73	1.83	1.84	2.00
.63	.65	.72	.72	1.83	1.84	2.00
.63	.65	.72	.72	1.83	1.84	2.00
.64	.65	.73	.73	1.84	1.84	2.00
.63	.65	.72	.72	1.83	1.84	2.00
29						
TRZ(I,K) : LUMP MEAN TEMPERATURE (C)						
13.29	12.94	12.84	12.76	12.76	11.93	11.08
15.93	15.58	15.48	15.40	14.96	13.32	11.19
17.67	17.33	17.24	17.17	17.16	14.25	11.26
18.40	18.16	18.10	18.04	18.04	14.71	11.30
19.86	19.63	19.57	19.52	19.52	15.49	11.37
22.87	22.59	22.52	22.45	22.45	17.03	11.49
27.58	26.94	26.76	26.61	26.60	19.24	11.70
34.97	34.52	52.07	52.07	40.68	23.33	12.07
52.22	52.22	52.22	52.22	52.19	32.87	13.04
58.02	57.95	57.95	57.95	57.93	35.97	13.41
74.92	73.58	73.51	73.51	73.48	44.42	14.49
475.00	287.48	112.59	112.29	109.87	63.43	17.69
482.61	298.43	126.74	126.43	124.02	71.62	19.45
487.87	305.11	134.81	134.51	132.10	76.35	20.57
490.23	308.18	138.58	138.27	135.86	78.59	21.13
490.51	308.33	138.58	138.28	135.87	78.59	21.14
488.18	305.43	135.13	134.83	132.42	76.53	20.60
482.93	298.75	127.06	126.76	124.35	71.80	19.49
475.05	287.52	112.64	112.33	109.91	63.47	17.72
74.94	73.59	73.52	73.52	73.49	44.43	14.51
58.03	57.97	57.96	57.96	57.94	35.98	13.41
52.51	52.51	52.51	52.51	52.49	33.03	13.06
28.53	28.30	41.55	41.53	41.32	23.60	12.10
28.39	28.17	28.11	28.06	27.63	19.55	11.73
24.57	24.35	24.29	24.24	23.79	17.50	11.53
21.97	21.79	21.75	21.70	21.34	16.26	11.43
20.39	20.23	20.18	20.15	19.83	15.48	11.36
19.39	19.25	19.22	19.18	18.91	15.02	11.33
18.52	18.45	18.43	18.42	18.28	14.83	11.31
17.80	17.78	17.78	17.78	17.76	14.54	11.28

図4.8 2次元計算出力データの例 (6/7)

29		TINN(I,K) : NODE BOUNDARY TEMPERATURE (C)							
13.62	12.95	12.92	12.76	12.76	12.76	11.09	11.06		
15.82	15.16	15.12	14.97	14.96	14.96	11.21	11.13		
17.98	17.35	17.32	17.17	17.16	17.16	11.33	11.19		
18.63	18.17	18.15	18.04	18.04	18.04	11.37	11.22		
20.07	19.64	19.62	19.52	19.52	19.52	11.46	11.27		
23.13	22.61	22.58	22.46	22.45	22.45	11.62	11.37		
28.18	26.97	26.91	26.62	26.61	26.60	11.88	11.53		
40.20	39.59	39.56	39.41	39.41	39.39	12.72	12.02		
52.22	52.22	52.22	52.22	52.22	52.17	13.56	12.51		
58.08	57.96	57.95	57.95	57.95	57.91	14.02	12.79		
76.19	73.65	73.51	73.51	73.51	73.45	15.39	13.60		
487.94	462.06	112.90	112.29	112.28	107.46	19.40	15.97		
495.41	469.81	127.04	126.44	126.43	121.62	21.62	17.29		
500.62	475.11	135.11	134.51	134.51	129.69	23.02	18.12		
502.97	477.48	138.87	138.28	138.27	133.45	23.72	18.54		
503.25	477.77	138.88	138.29	138.28	133.45	23.73	18.54		
500.94	475.43	135.43	134.83	134.82	130.01	23.06	18.14		
495.72	470.14	127.36	126.76	126.76	121.94	21.66	17.31		
487.98	462.11	112.94	112.34	112.33	107.50	19.45	16.00		
76.22	73.67	73.52	73.52	73.52	73.46	15.41	13.61		
58.10	57.97	57.96	57.96	57.96	57.92	14.03	12.79		
52.51	52.51	52.51	52.51	52.51	52.48	13.59	12.53		
40.59	40.37	40.36	40.31	40.31	39.84	12.75	12.04		
28.60	28.18	28.16	28.07	28.06	27.19	11.91	11.55		
24.78	24.36	24.34	24.24	24.24	23.34	11.67	11.40		
22.14	21.80	21.79	21.71	21.70	20.98	11.53	11.32		
20.54	20.23	20.22	20.15	20.15	19.51	11.45	11.27		
19.52	19.26	19.25	19.18	19.18	18.63	11.41	11.24		
18.67	18.53	18.52	18.49	18.49	18.19	11.38	11.23		
17.81	17.79	17.78	17.78	17.78	17.73	11.35	11.21		
29 50									
TEST=	.9760E-03	DTM=	.1000E-02	ITER=	29				
SUM=	.7577E-02	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	29				
QTEST=	.3273E-01	SPEC=	.4000E-01	ITER=	29				

図4.8 2次元計算出力データの例 (7/7)

1	50	TEST=	.1614E+01	DTM=	.1000E-02	ITER=	1
		SUM=	.2097E+02	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	1
		QTEST=	.2389E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	1
2	50	TEST=	.1134E+00	DTM=	.1000E-02	ITER=	2
		SUM=	.9679E+00	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	2
		QTEST=	.1562E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	2
3	50	TEST=	.2757E-01	DTM=	.1000E-02	ITER=	3
		SUM=	.2255E+00	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	3
		QTEST=	.1400E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	3
4	50	TEST=	.8541E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	4
		SUM=	.1005E+00	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	4
		QTEST=	.1309E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	4
5	50	TEST=	.5849E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	5
		SUM=	.6566E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	5
		QTEST=	.1236E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	5
6	50	TEST=	.5761E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	6
		SUM=	.6472E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	6
		QTEST=	.1169E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	6
7	50	TEST=	.4774E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	7
		SUM=	.5413E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	7
		QTEST=	.1109E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	7
8	50	TEST=	.4710E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	8
		SUM=	.4819E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	8
		QTEST=	.1048E+00	SPEC=	.3000E-01	ITER=	8

図4.9 2次元計算CTR表示の例 (1/4)

9	50	TEST=	.3780E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	9
		SUM=	.4223E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	9
		QTEST=	.9929E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	9
10	50	TEST=	.2822E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	10
		SUM=	.3952E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	10
		QTEST=	.9419E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	10
11	50	TEST=	.2793E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	11
		SUM=	.4173E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	11
		QTEST=	.8912E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	11
12	50	TEST=	.2155E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	12
		SUM=	.3103E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	12
		QTEST=	.8443E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	12
13	50	TEST=	.2126E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	13
		SUM=	.3034E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	13
		QTEST=	.8003E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	13
14	50	TEST=	.2153E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	14
		SUM=	.2440E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	14
		QTEST=	.7572E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	14
15	50	TEST=	.2084E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	15
		SUM=	.2627E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	15
		QTEST=	.7173E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	15

図4.9 2次元計算CTR表示の例 (2/4)

16	50	TEST=	.2104E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	16
		SUM=	.2245E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	16
		QTEST=	.6787E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	16
17	50	TEST=	.1165E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	17
		SUM=	.2071E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	17
		QTEST=	.6422E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	17
18	50	TEST=	.1146E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	18
		SUM=	.2048E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	18
		QTEST=	.6092E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	18
19	50	TEST=	.2075E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	19
		SUM=	.2631E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	19
		QTEST=	.5783E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	19
20	50	TEST=	.1063E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	20
		SUM=	.1789E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	20
		QTEST=	.5471E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	20
21	50	TEST=	.1110E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	21
		SUM=	.1618E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	21
		QTEST=	.5186E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	21
22	50	TEST=	.1105E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	22
		SUM=	.1550E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	22
		QTEST=	.4899E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	22
23	50	TEST=	.1095E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	23
		SUM=	.1439E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	23
		QTEST=	.4643E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	23

図4.9 2次元計算CTR表示の例 (3/4)

24	50	TEST=	.1107E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	24
		SUM=	.1151E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	24
		QTEST=	.4398E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	24
25	50	TEST=	.1087E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	25
		SUM=	.1234E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	25
		QTEST=	.4165E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	25
26	50	TEST=	.1077E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	26
		SUM=	.1194E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	26
		QTEST=	.3941E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	26
27	50	TEST=	.1073E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	27
		SUM=	.1437E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	27
		QTEST=	.3732E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	27
28	50	TEST=	.1061E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	28
		SUM=	.9938E-02	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	28
		QTEST=	.3531E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	28
29	50	TEST=	.1004E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	29
		SUM=	.8187E-02	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	29
		QTEST=	.3347E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	29
30	50	TEST=	.1046E-02	DTM=	.1000E-02	ITER=	30
		SUM=	.1162E-01	TOTAL=	.1000E-01	ITER=	30
		QTEST=	.3158E-01	SPEC=	.3000E-01	ITER=	30
31	50	Stop - Program terminated.					

図4.9 2次元計算CTR表示の例 (4/4)

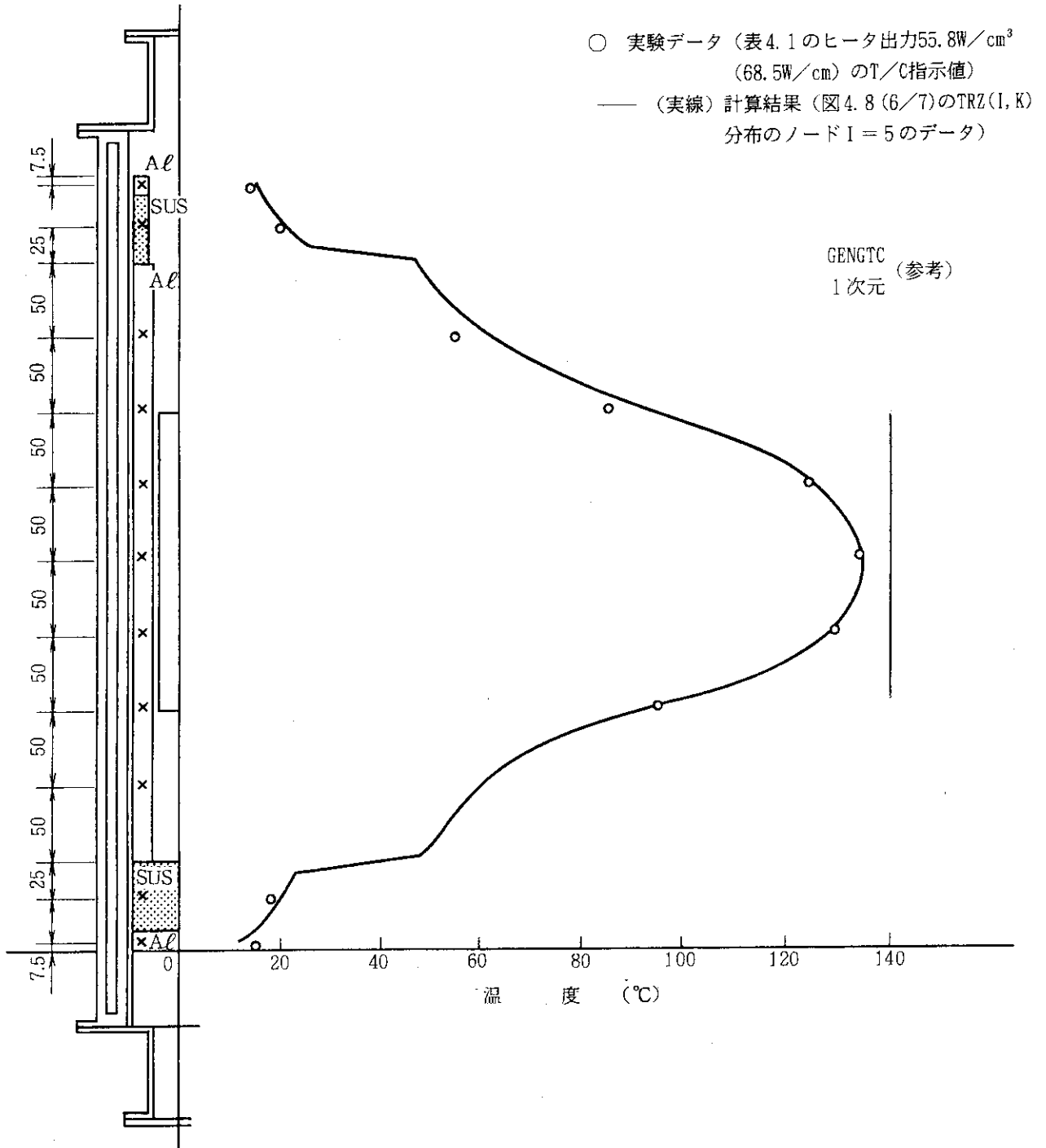


図 4.10 軸方向温度分布の実験値と計算値の比較

5. 入力形式と計算実行の方法

GENGTC 1次元あるいは2次元熱計算を行う場合の入力データについては、これまで2章から4章までの各論において炉外キャプセルを例にとり説明した。計算はバッチ形式で行われ、入力データは計算開始前にデータファイルCAPSULE. JOBの中へ収納しておく。

入力データはデータグループNo.1からNo.6まで種類ごとにまとめられ、計算モードにより表5.1に示す組み合わせを用意する。入力データの先頭に表5.2に示す計算ケース制御データ、すなわちケース番号とタイトルを1行で記述する。この後、必要な数のデータグループを続け、最後に計算開始と終了を知らせる2行の空白行を付ける。異なる計算ケースを連続して実行させたい場合には、終了の空白行の前に異なるデータグループのみ挿入すればよい（この場合にも計算ケース制御データと計算開始用空白行が必要となる）。

データファイルに書き込む入力データの形式は、表5.2から表5.11に示す通りである。ただし、前章まで例として示した入力データのフォーマットは、必ずしも表記載の入力フォーマットと一致せず、データとデータの間は適当にカンマで区切って書き込んだものとなっているが、これはパーソナルコンピューター用にFORTRAN77で書かれた計算プログラムでは許容されることに注意されたい。

計算コードは実行形式でコンパイルされており、MS-DOSバージョン3.0以上のOSで稼動するパーソナルコンピューターのCRT画面上で次のように呼び出して計算実行することができる。

```
A : >GENGTC2
```

計算実行中は、計算モードによっては必要な情報やデータがCRT画面に表示される。

計算終了時には、そのことを知らせるメッセージがCRT画面上に表示される。計算出力データは全て、出力データファイルCAPSULE. OUTに書き込まれているので、その中身をプリンターにより打ち出すことにより、印刷体として得ることができる。

表5.1 計算モードにより用意すべきデータグループ

	計 算 モ ー ド	必要十分なデータグループ No.
1	1次元熱計算 (中心部单相平均温度法)	データグループ No.1 (径方向ノード寸法, 材質番号) データグループ No.2 (線出力, ガンマ加熱率) データグループ No.3 (冷却水温度, 表面熱伝達率)
2	1次元熱計算 (パラメータ計算収束計算)	データグループ及びデータグループ No.1 " No.2 " No.3 " No.4
3	1次元熱計算 (誤差計算)	データグループ及びデータグループ No.1 " No.2 " No.3 " No.5
4	2次元熱計算 (r, z 2次元)	データグループ及びデータグループ No.1 } 発熱部の1次 " No.2 } 元計算用(初 " No.3 } 期分布決定) " No.6...2次元計算用

表5.2 計算ケース制御データ

順番	カラム	フォーマット	記 号	内 容
先頭	1~4	I4	CASE	ケース番号(0でない整数, 0を指定したときは計算停止。)
	5~72	18A4	TITLE	タイトルを記入。

表5.3 データグループNo.1の入力形式

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
1	1~5	I5	NGROUP	1を入れることによりこのデータグループでノード半径, 材質番号, 表5.3にない材質の物性値を読み込む。
	6~10	I5	ND9	径方向ノード数 ≤21
2	1~10) 61~70	7E10.5	R(I) I=1, ND9	各ノード半径, 内側から順次入れる。単位cm。カード不足の場合追加する。
3	1~5) 66~70	I4I5	NW(I) I=1, ND9	各ノード内側の材質番号を内側から順次入れる。(表5.3参照) 表5.3にないとき0あるいは30として次の4, 5行のくり返しでその物性値を内側から順次入れる。 コード内部ではキャプセル構造を固体-気体-固体-……の交互層と仮定している。気体に相当するノードが固体の場合は, コード内部で自動的に設定される。
4	1~80	8E10.2	D(I) C(I, 1)) C(I, 5) S(I, 1) S(I, 2)	密度 (g/cm ³) 熱伝導率の係数 (BTU/ft ² ・h・°F) $C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + C_4T^4$ C ₀ , C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ を順次記入。 線膨張率の係数 (1/°F) (S ₀ + S ₁ T) × 10 ⁻⁶ , S ₀ , S ₁ の順で入れる。
5	1~9	E9.3	E(1)	輻射率 (-)

表 5.4 材質指定番号とコード内に用意されている物性値

No.	Material	DENSITY (g/cm ³)	EMISSIVITY	THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENTS (BTU/ft ² ·h·°F)						THERMAL EXPANSION (*E-06/°F)	
				C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	A ₀	A ₁	
1	Nb-1%Zr	8.660	0.400	0.260E-02	0.500E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	4.100	0.212E-03
2	Hastelloy X	8.230	0.500	0.540E-01	0.583E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	6.850	0.133E-02
3	Helium	0.0	0	0.793E-01	0.105E-03	-0.137E-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	NaK-44	0.800	0	0.141E-02	0.354E-02	-0.155E-05	0.250E-09	0.0	0.0	0.0	0.0
5	Neon	0.0	0	0.260E-01	0.327E-04	-0.484E-08	0.782E-12	-0.536E-16	0.0	0.0	0.0
6	SUS316	7.800	0.800	0.800E-01	0.440E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	8.620	0.833E-03
7	SUS304	7.800	0.800	0.850E-01	0.410E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	9.440	0.840E-03
8	T-111	16.730	0	0.236E-02	0.727E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	3.330	0.335E-03
9	UN	14.300	0.900	0.558E-01	0.652E-02	-0.139E-05	0.939E-10	0.0	0.0	4.100	0.600E-03
10	UO ₂	10.960	0.900	0.610E-01	-0.699E-02	0.517E-05	-0.200E-08	0.300E-12	0.0	3.377	0.384E-02
11	W-26%Re	19.700	0.300	0.803E-02	-0.302E-01	0.139E-04	-0.266E-08	0.179E-12	0.0	2.830	0.710E-04
12	Zircaloy-2	6.470	0.426	0.616E-01	0.557E-02	-0.106E-04	0.163E-07	-0.664E-11	0.0	3.650	0.241E-03
13	Argon	0.0	0	0.799E-02	0.192E-04	-0.361E-08	-0.279E-11	0.129E-14	0.0	0.0	0.0
14	Graphite	1.800	0.900	0.822E-02	-0.422E-01	0.926E-05	-0.249E-09	-0.137E-12	0.0	2.11	0.0
15	Lithium	0.473	0	0.189E-02	-0.325E-02	0.225E-04	-0.168E-07	0.305E-11	0.0	0.0	0.0
16	Mo	10.200	0.200	0.752E-02	-0.203E-01	0.899E-05	-0.240E-08	0.278E-12	0.0	2.850	0.232E-03
17	Tungsten	19.300	0.220	0.939E-02	-0.300E-01	0.114E-04	-0.215E-08	0.196E-12	0.0	2.450	0.232E-03
18	Sol-gel	9.270	0	0.116E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	SiC	3.210	0	0.353E-02	-0.172E-01	0.251E-05	0.383E-10	-0.219E-13	0.0	18.400	0.358E-02
20	Aluminum	2.700	0.050	0.117E-03	0.309E-02	0.163E-04	0.813E-07	-0.596E-10	0.0	12.580	0.302E-02
21	N ₂	0.0	0	0.136E-01	0.234E-04	0.411E-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	Ti	4.410	0.330	0.419E-01	0.379E-02	-0.722E-05	0.111E-07	0.452E-11	0.0	3.650	0.241E-03
23	2/5He	0.0	0	0.317E-01	0.422E-04	-0.548E-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	Ta	16.600	0.300	0.307E-02	0.400E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	3.000	0.638E-03
25	Be	1.820	0.610	0.863E-02	-0.252E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	5.880	0.231E-02

表5.5 データグループNo.2の入力形式

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
1	1~5	I5	NGROUP	2を入れることによりこのデータグループで発熱条件を読み込むことを知らせる。
	6~10	I5	NPOWER	パラメータとする線出力数 ≤ 21
	11~15	I5	NGAM	パラメータとするガンマ加熱率数 ≤ 21
	16~20	I5	NOPT	線出力を1以外のノードに入れる場合、そのノード番号を記入する。
2	1~10 } 61~70	7E10.5	F11(I) I=1~NPOWER	Fissionによる発熱量(W/cm)
3	1~10 } 61~70	7E10.5	G11(I) I=1~NGAM	ガンマ加熱率(W/g) NGAM=0のときはこのデータはいらない。
(3)	1~10 } 61~70	7E10.5	H(I) I=1~ND9	各ノード内側のガンマ加熱率(W/g)を内側から順次入れる。(NGAM=0のとき)

表5.6 データグループNo.3の入力形式

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
1	1~5	I5	NGROUP	3を入れることによりこのデータグループで伝熱条件を読み込むことを知らせる。
	6~10	I5	NTG	ノード1外側の伝熱条件の選択。 = 1 熱伝達率をインプットする。 = -1 熱膨張から計算。
2	1~10	E10.5	H11	表面熱伝達率(kcal/m ² ・h・°C)
	11~20	E10.5	T11	冷却水温度(°C)
	21~30	E10.5	BTU	ノード1外側の熱伝達率 (BTU/ft ² ・h・°F) NTG=-1のときいらない。

表5.7 データグループNo.4の入力形式

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
1	1~5	I5	NGROUP	4を入れることによりこのデータグループでパラメータ計算あるいは収束計算のためのデータを読み込むことを知らせる。
	6~10	I5	NIN	入力変数指定番号 (表5.9参照)
	11~15	I5	NOUT	出力変数指定番号 (表5.10参照)
2	1~10	E10.5	WOLER	NINで指定した入力変数の下限比。ふつう1.0とする。この場合データグループNo.1~No.3までに読込んだ値を基準値とする。
	11~20	E10.5	UPPER	NINで指定した入力変数の上限比。基準値は上と同じ。
	21~30	E10.5	RSEC	パラメータ計算のきざみ数
3	1~10 }	E10.5	TCON	NOUTで指定した出力ノード温度の収束目標値 (°C)
	11~20	E10.5	ALW	計算値の目標値に対する許容偏差 (°C) NOUT=0(パラメータ計算)のときいらない。

表5.8 データグループNo.5の入力形式

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
1	1~5	I5	NGROUP	5を入れることにより、このデータグループで誤差解析計算のためのデータを読み込むことを知らせる。
	6~10	I5	NOUT	出力変数 (誤差計算の対象となる) 番号 (表5.10参照)。
	11~15	I5	NERR	誤差解析オプション = 1 コード内で用意 (表5.9参照) = 2 誤差データをインプット
2	1~108	12E9.3	ABC(1, J) J= 1~112	NERR=2のとき、表5.9の順番に入力変数の誤差変動上限値を入れる。

表5.9 入力変数の指定番号, コード内記号, 内容, 相対誤差

指定番号 (NIN)	コード内記号	内 容	相 対 誤 差*
1~21	U(1)~U(21)	ノード半径	±0.1%
22~42	E(1)~E(21)	輻射率	±20%
43~63	D(1)~D(21)	密 度	±10%
64~84	C(1, L)~C(21, L) L=1, 2, 3, 4, 5	熱伝導率	±10%
85~105	S(1, K)~S(21, K) K=1, 2	熱膨張率	±10%
106	F11(1)	線出力	±20%
107	G11(1)	ガンマ発熱率	±20%
108~111	R9 DENS H11 T11	ペレット内半径 ペレット初期密度 表面熱伝達率 冷却水温度	} ±10%
112	BTU	ギャップコンダクタンス	±30%

* コード内で用意 (オプション)

表5.10 出力変数の指定番号, コード内記号, 内容

指定番号 (NOUT)	コード内記号	内 容
1~21	0(1)~0(21)	キャプセル内部 (ノード) 温度
22	T3	キャプセル中心温度

表5.11 データグループNo.6の入力形式(1/2)

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
1	1~5	15	NGROUP	6を入れることによりこのデータグループで2次元計算のためのデータを読み込むことを知らせる。
	6~10	15	NZD	軸方向ノードメッシュ数 ≤ 60 ふつう正符号のときは径方向ノード半径はデータグループNo.1で読み込んだものが軸方向各ノードメッシュ毎に共通となる。段つき管のようにひとつの径方向ノード半径が軸方向に微小変化するときには NZDを負符号とし8番目のカードで軸方向各ノードメッシュ毎に径方向ノード半径をインプットする。
	11~15	15	LIM	2次元計算くり返し数の最大値。
	16~20	15	NDEBUG	デバッグ情報が必要なとき1を入れる。
2	1~10	E10.5	ZLEN	軸全長 (cm)
	11~20	E10.5	ATB	ガスギャップ指定のときそこの計算回数の最大。
	21~30	E10.5	C9C	熱膨張補正計算くり返し数。
	31~40	E10.5	DELIN	軸方向熱流補正のための過弛緩係数。
3	1~10	E10.5	DTM	第1の収束制御値。 ひとつのノードの温度変化率。
	11~20	E10.5	TOTAL	第2の収束制御値。 全ノードの温度変化率の総和。
	21~30	E10.5	SPEC	第3の収束制御値。 発生した熱と、系から流出する熱との差の相対値。
	31~40	E10.5	ALW	ガスギャップの熱流計算の収束制御値。流入する熱と流出する熱との差の相対値。
4	1~10	E10.5	TEXU	上部シンク温度 ($^{\circ}\text{C}$)
	11~20	E10.5	COEU	上部表面熱伝達率 ($\text{BTU}/\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{F}$)
	21~30	E10.5	TEXTL	下部シンク温度 ($^{\circ}\text{C}$)
	31~40	E10.5	COEL	下部表面熱伝達率 ($\text{BTU}/\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{F}$)

表5.11 データグループNo.6の入力形式 (2/2)

順番	カラム	フォーマット	記号	内容
5	1~10) 61~70	7E10.5	HFAX(K) K=1, NZD	軸方向出力比分布。 上から順次, データグループNo.2で読み込んだ 線出力及びガンマ加熱率に対する比を入れてい く。カード不足の場合は追加する。
6	1~10) 61~70	7E10.5	CORA(K) K=1, NZD	上部表面から測った下方のランプ境界までの距 離の全長に対する比を上から順次入れる。 CORA(NZD)=1.0
7	1~5) 65~70	14I5	NPTRZ(K) K=1, NZD	線出力の存在する径方向ノード番号を, 上から 順次ノードメッシュごとに入れる。 線出力の存在しないときは30とする。 軸方向ガスギャップノード指定のときは 100を 入れる。
8	1~10) 61~70	7E10.5	RRZ(I, K) I=1, ND9 K=1, |NZD|	NZD がマイナス符号のとき径方向ノード寸法 (cm)を軸方向各ノードメッシュ毎に内側から 順次入れる。 NZD がマイナスでないときこのカードは不用。
9	1~5) 65~70	14I5	NRZ(I, K) I=1, ND9 K=1, NZD	径方向各ノード内側の材質番号を軸方向各ノ ードメッシュ毎に内側から順次入れる。(表5.4 参照)。表5.4にないとき0として次のカード でその物性値を入れる。フォーマットはデー タグループNo.1と同様である。

6. おわりに

GENGTCコードが始めて米国のオークリッジ国立研究所から公開されてから既に20年以上が経過した。その間、科学技術用の計算機の進歩は著しく、当時大型の電子計算機を使用せざると得なかったものが、現在では記憶容量、計算速度の両面においても小型のパーソナルコンピューターを用いて十分にGENGTCコードによる計算が可能となってきた。

今度、オリジナルのGENGTCコードの計算機能を拡張して、1次元パラメータ計算、1次元収束計算、1次元誤差計算及び2次元計算が可能のように計算プログラムを改良し、しかもパーソナルコンピューターの上で稼働するように整備したので、照射キャプセル設計あるいは実験解析のため用いられる便利な道具となることを希い、公開することとした。

最後に本コードの改良整備を熱心に支持していただいた日本原子力研究所元材料試験炉部照射第2課長田中勲氏に感謝します。また、同研究所材料試験炉部長斎藤実氏ならびに東海研究所軽水炉将来技術開発計画特別チームサブリーダー中田宏勝氏には、適切な御助言と御指摘をいただいたことに感謝します。

参 考 文 献

- 1) Roland, Hall C., "GENGTC, A One-Dimensional CEIR Computer Program for Capsule Temperature Calculation in Cylindrical Geometry", ORNL-TM-1942(1967)

6. おわりに

GENGTCコードが始めて米国のオークリッジ国立研究所から公開されてから既に20年以上が経過した。その間、科学技術用の計算機の進歩は著しく、当時大型の電子計算機を使用せざると得なかったものが、現在では記憶容量、計算速度の両面においても小型のパーソナルコンピューターを用いて十分にGENGTCコードによる計算が可能となってきた。

今度、オリジナルのGENGTCコードの計算機能を拡張して、1次元パラメータ計算、1次元収束計算、1次元誤差計算及び2次元計算が可能ないように計算プログラムを改良し、しかもパーソナルコンピューターの上で稼働するように整備したので、照射キャプセル設計あるいは実験解析のため用いられる便利な道具となることを希い、公開することとした。

最後に本コードの改良整備を熱心に支持していただいた日本原子力研究所元材料試験炉部照射第2課長田中勲氏に感謝します。また、同研究所材料試験炉部長斎藤実氏ならびに東海研究所軽水炉将来技術開発計画特別チームサブリーダー中田宏勝氏には、適切な御助言と御指摘をいただいたことに感謝します。

参 考 文 献

- 1) Roland, Hall C., "GENGTC, A One-Dimensional CEIR Computer Program for Capsule Temperature Calculation in Cylindrical Geometry", ORNL-TM-1942(1967)