

JAERI-M
87-148

GENGTC-JB：照射用キャプセル内
温度評価プログラム

1987年9月

染谷 博之・小林 敏樹・新見 素二
星屋 泰二・原山 泰雄

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。
入手の問合わせは、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, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

GENGTC-JB:照射用キャプセル内温度評価プログラム

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

染谷 博之・小林 敏樹・新見 素二・星屋 泰二
原山 泰雄

(1987年8月25日受理)

JMTRで照射するための照射試料を含んだキャプセルの設計において、その温度評価にGENGTCプログラムを一般的に使用してきた。このプログラムは元来ORNLで作成されたプログラムであり、内容的には、簡単な計算法で構成されている。

組込まれた計算法が基本的なだけに、プログラムは、はなはだ使い易く、多くのキャプセル設計への汎用性を持っている。しかし、現在の計算機の能力等から見た場合、一層の合理的計算法に修正が可能と考えられた。また、入力等の点で使用上の困難がみうけられた。そこで、計算法の適正化、および入力法の改善等を行いversion upを行った。

この報告書はプログラムの修正点および新しい入/出力の説明を記載している。

GENGTC-JB: A computer program to calculate temperature
distribution for cylindrical geometry capsule

Hiroyuki SOMEYA, Toshiki KOBAYASHI, Motoji NIIMI
Taiji HOSHIYA and Yasuo HARAYAMA

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

(Received August 25, 1987)

In design of JMTR irradiation capsules contained specimens, a program (named GENGTC) has been generally used to evaluate temperature distributions in the capsules. The program was originally compiled by ORNL(U.S.A.) and consisted of very simple calculation methods. From the incorporated calculation methods, the program is easy to use, and has many applications to the capsule design.

However, it was considered to replace original computing methods with advanced ones, when the program was checked from a standpoint of the recent computer abilities, and also to be complicated in data input. Therefore, the program was versioned up as aim to make better calculations and improve input method.

The present report describes revised calculation methods and input/output guide of the version-up program.

Keywords: GENGTC, Capsule, Temperature Distribution, Heat Conductivity, Thermal Expansion Coefficient, Emissivity, Program

目 次

1. はじめに	1
2. 計 算 法	1
3. 入 力 法	5
4. 出力について	12
5. 断面が円，円環でない部品を含むキャプセルへの適用	18
謝 辞	21
参考文献	21
付録 計算法について	22

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation methods	1
3. Guide to input	5
4. Guide to output	12
5. Application of the program to non-symmetrical heat generative parts in capsule	18
Aknowledgements	21
References	21
Appendix Expalanation of calculations	22

1. はじめに

JMTRにおける照射において、照射試料は通常キャプセルに装荷されて照射される。これらキャプセルの設計においてキャプセルの強度、安全性確認のためキャプセル内の温度の評価が行われる。温度評価の手段としてJMTRではGENGT Cプログラムを一般的に使用してきた¹⁾これは元来米国ORNLでキャプセル内の温度計算用に作成されたプログラムである。このプログラムはかなり古くに作成されたもので、いくつかの改良、拡張も行われてきた^{2) 3)}しかし、原プログラムは、単純な構成となっているため逆に汎用性があり、現在でも原プログラムは使用されている。

しかしながら、今後、照射によって取得したデータ等をもとに、新しいモデルの追加等を考慮すると、原プログラムはデータの入力について等かなり使いにくい点がみうけられるばかりか、プログラム構成が新しいモデルの追加等に不適になっている。そこで、原プログラムの長所を生かしながら、さらに使いやすくし、かつプログラムの再構成を行う等の改良を行った。

主要改良点は次の事項である。

- (1) プログラム上、入、出力が混在していたものを入力部分、出力部分、をそれぞれ独立させる等の再構成を行い、今後の新しいモデルの修正、追加を容易にした。
- (2) 入力データの読み込みを入力カード上の入力番号法に改めた。
- (3) 上記に伴い出力イメージも改めた。

2. 計 算 法

改良の基本方針として、大幅な計算法の修正は行わないこととした。理由は現在までキャプセル設計用として使われてきており、今までに得られてきた結果との統一性を保ちたかったためである。また、使用上の無用な混乱をさけたいためでもある。ただし、明らかに修正すべきだと考えられる定数等はこれを修正した。

2.1 計算対象

このプログラムで扱うキャプセルは、Fig. 1に示すような構造である。キャプセルの内部には照射試料があり、最外部の外筒表面は、原子炉冷却水に接する。

計算上、試料から外筒まですべて中心軸対称と考える。かつ、これらの単位長さを計算対象とする。この結果、計算対象内の物質あるいは間隙は中心軸を同一とするリング状の形状と考える。

1. はじめに

JMTRにおける照射において、照射試料は通常キャプセルに装荷されて照射される。これらキャプセルの設計においてキャプセルの強度、安全性確認のためキャプセル内の温度の評価が行われる。温度評価の手段としてJMTRではGENGT Cプログラムを一般的に使用してきた¹⁾これは元来米国ORNLでキャプセル内の温度計算用に作成されたプログラムである。このプログラムはかなり古くに作成されたもので、いくつかの改良、拡張も行われてきた^{2) 3)}しかし、原プログラムは、単純な構成となっているため逆に汎用性があり、現在でも原プログラムは使用されている。

しかしながら、今後、照射によって取得したデータ等をもとに、新しいモデルの追加等を考慮すると、原プログラムはデータの入力について等かなり使いにくい点がみうけられるばかりか、プログラム構成が新しいモデルの追加等に不適になっている。そこで、原プログラムの長所を生かしながら、さらに使いやすくし、かつプログラムの再構成を行う等の改良を行った。

主要改良点は次の事項である。

- (1) プログラム上、入、出力が混在していたものを入力部分、出力部分、をそれぞれ独立させる等の再構成を行い、今後の新しいモデルの修正、追加を容易にした。
- (2) 入力データの読み込みを入力カード上の入力番号法に改めた。
- (3) 上記に伴い出力イメージも改めた。

2. 計 算 法

改良の基本方針として、大幅な計算法の修正は行わないこととした。理由は現在までキャプセル設計用として使われてきており、今までに得られてきた結果との統一性を保ちたかったためである。また、使用上の無用な混乱をさけたいためでもある。ただし、明らかに修正すべきだと考えられる定数等はこれを修正した。

2.1 計算対象

このプログラムで扱うキャプセルは、Fig. 1に示すような構造である。キャプセルの内部には照射試料があり、最外部の外筒表面は、原子炉冷却水に接する。

計算上、試料から外筒まですべて中心軸対称と考える。かつ、これらの単位長さを計算対象とする。この結果、計算対象内の物質あるいは間隙は中心軸を同一とするリング状の形状と考える。

2.2 計算手法

プログラムで求めるキャプセル内温度は、定常熱伝導方程式の解である。ただし、熱伝導率の温度依存性を考慮する。また、プログラムでは温度による各構造材等の熱膨張による半径寸法変化を考慮する。すなわち、この寸法変化による温度へのfeed back を評価する。

これらの計算手法の詳細は、付録に記述しているので、そちらを参照されたい。

2.3 プログラム構成

このプログラムに含まれるsubroutine 主要機能は、Table 1 に記載の通りである。また、プログラム全体の処理の流れを Fig. 2 に示す。

Table 1 Subroutines and these functions

Subroutine name	Function
AMAIN	各subroutineの制御、 ならびに温度、node寸法変化の計算を行う。
BLDATA	Block data, 組込み物性値の設定ならびに計算初期値、定数の設定。
SLITE	入力データ イメージのプリント。
INPUT1	タイトル・カードおよび入力番号による入力データの読み込み。
INOUT1(0)	組込み物質の物性値に関する係数データをプリントする。
INOUT1(1)	入力データに簡単な説明を付して、入力番号順にプリントする。
INOUT	計算において使用する変数のプリント。
OUTPUT	計算結果の出力。
CETUS	キャプセル中央に燃料が装荷され、出力分布に関しdepression を考慮するとき、中心温度を計算する。

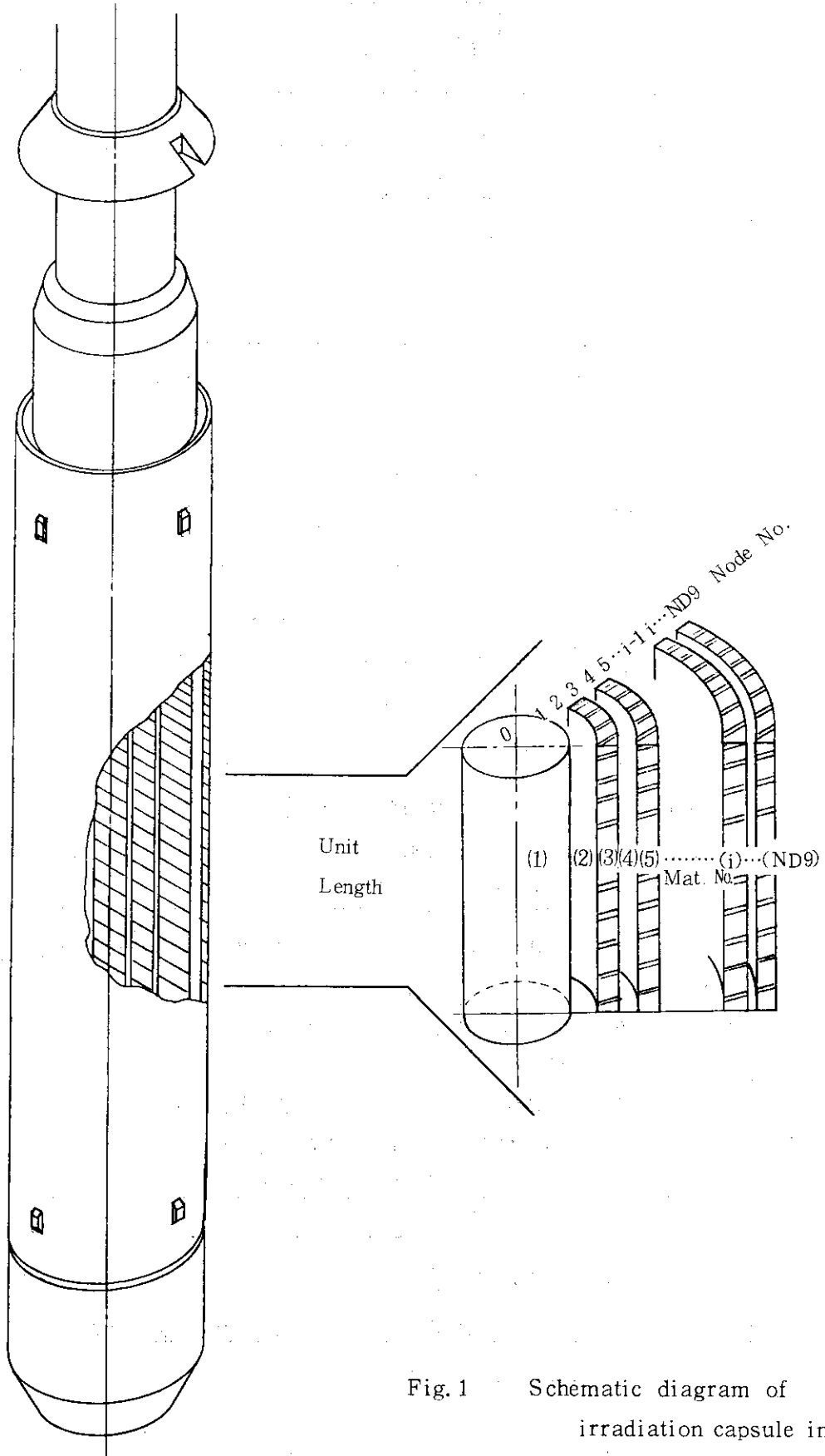


Fig.1 Schematic diagram of irradiation capsule in program.

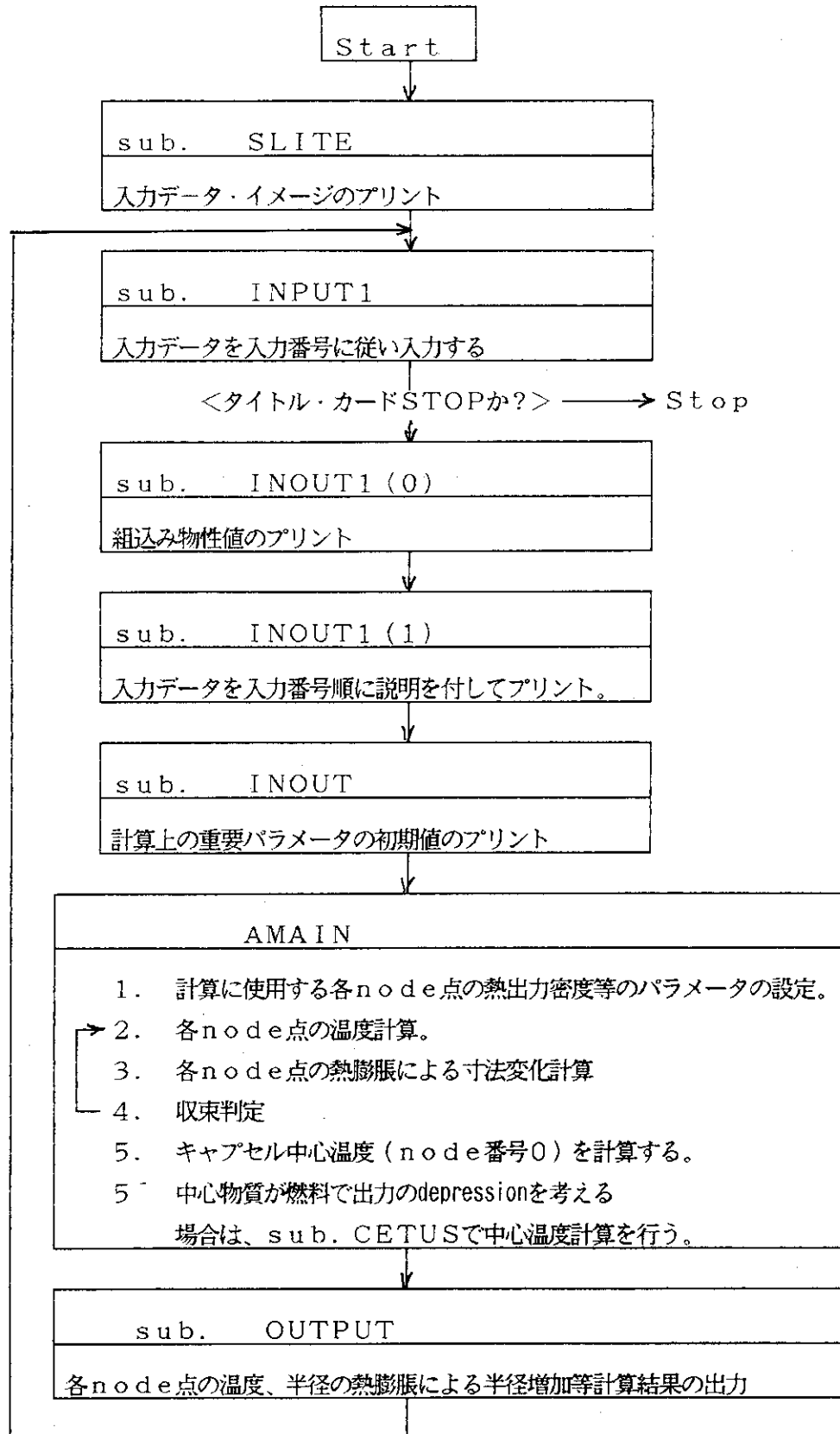


Fig. 2 Flow chart of the program.

3. 入 力 法

3.1 入力データの全体構成

入力はすべてカード形式である。入力カードは、タイトルカードと変数入力カードの2種類である。タイトルカードは一枚で計算の入力カード群の先頭に置かなければならない。タイトルカードはFORMAT (18A 4) で読込まれ1~72コラムまで使用可能である。タイトルカードの先頭4コラムが“STOP”の場合計算は終了する。

入力データの読み込みは、入力番号付のカード形式である。すべての入力変数に対し同一FORMATを採用している。一つの入力カードは、入力番号、入力補助整数2個 (INT1, INT2) と変数入力データ5個 (VAL(I), I=1, 5) の組み合わせで、FORMAT 3 I 3, 5 E 10.3) で読込まれる。この入力法において、最初の3個の整数を除き、変数はすべてFloating type である。入力変数には、計算コントロールに使われる整数のものもあるが、これらもすべてFloating型として入力されねばならない。具体的には、すべての入力変数は少数点(.)を持って入力される必要がある。この点注意されたい。変数として整数のものは、入力後ただちに整数に変換される。

2個の入力補助整数 (INT1, INT2) は、入力変数が配列のものの場合に主として使用される。二次元配列の変数入力は、第3.2節の入力番号40の例に示すように入力補助変数を使用する。一次元配列の変数入力は入力補助変数1あるいは2を使用しているが、使用上は

	INT1	INT2	
入力番号	1	1	VAL(1), VAL(2), ..., VAL(5)
入力番号	2	2	VAL(6), VAL(7), ..., VAL(10)
入力番号	3	3	VAL(11), VAL(12), ..., VAL(15)

の如く入力されたい。

入力番号とその番号で入力される変数は、3.2節に記載の通りである。変数は入力カード上の指定の入力番号についてのみ入力される。入力番号のコラムが指定番号以外のもの (ブランクカードも許される) はすべてskipされる (skip cardと言う)。

変数入力の最後は入力番号999でなければならない。すなわち、入力番号999で入力データ群の1セットの終了を指示する。入力データ群を入力番号999で区切ってゆけば、数セットの計算を連続して計算することが可能となっている。なお、先のskip card はデータの先頭カード、入力番号999と次のタイトルカードあるいはSTOPカードの間に入れてはならない。

以上に述べたことをもとに、全体としての入力データ構成を例示すると次の様になる。

```

< Title card >
  b10bbbbbb VAL(1), VAL(2), . . . . ., VAL(5)
  b11bbbbbb VAL(1), VAL(2), . . . . ., VAL(5)
    .
    .
  300  2  3 VAL(1), VAL(2), . . . . ., VAL(5)
  999
< Title card >
  b10bbbbbb VAL(1), VAL(2), . . . . ., VAL(5)
    .
    .
  999
< Title card >
    .
  999
  S T O P

```

3.2 変数入力

第3.1節で説明したように、このプログラムの入力は入力番号形式である。以下、各変数入力に従い説明する。

入力番号 10 - 計算に関する制御変数の読み込み -

変数第1フィールド, ND9

計算対象の半径方向のノード数, $ND9 \leq 21$ でかつ奇数でなければならない。

ND9 = 0, あるいは偶数の場合, 計算はSTOPする。

変数第2フィールド, NP

計算対象のキャプセルにおける中央物質について, その内部の温度をさらに分割して詳しく温度を求める場合の分割数である。中央物質が燃料の場合に有効である。

NP = 0 : このoptionはskipされる。

NP = 1 : 分割数を入力する。

このoptionを使用する場合には入力番号, 101, 102で分割の半径とその半径における出力密度比(相対値)が入力されねばならない。また, 物質が燃料の場合には, 入力番号30でfissionによる出力(W/cm)を与える必要がある。

変数第3フィールド, NGE0

他の計算パラメータを同一とし, 形状寸法データの値(node点の半径値)のみ切換えて計算するとき, 計算ケースの数である。形状寸法の値は, 入力番号40で入力する。(註参照)

変数第4フィールド, NGAM

他の計算パラメータを同一とし、ガンマ加熱率の値のみ切替えて計算するときの、計算ケースの数である。ガンマ加熱率の値は、入力番号35あるいは60番で入力する。どちらの方法で入力するかは計算制御変数、N9（入力番号11、第1フィールド）の値による。

(注)参照

変数第5フィールド, NPOWER

形状変数、ガンマ加熱率の値を同一とし、Fission heat rateの値のみを変更して計算させたいとき、その計算ケース数を入力する。(注)参照

Fission heat rateの値は入力番号30で入力する。

入力番号 11 - 計算に関する制御変数の読み込み -

変数第1フィールド, N9

ガンマ線による加熱率の入力法選択 key word である。

$N9 \leq 0$: 計算対象に含まれる物質のガンマ線による加熱率 (W/gr) をその物質の外側のノード点の番号に従って個別に入力する。

その値は入力番号60の入力値

(HNG(I, NG), I = 1, ND9), NG = 1, NGAM)

で与える。計算にさいし、ガンマ線による加熱率 $H(I) = HNG(I, NG)$ に置き換えて使用する。

$N9 = 1$: すべての物質のガンマ線による発熱率を一樣とする。そのデータは、入力番号35で入力の (G11(NG), NG = 1, NGAM) で与えられる。

計算にさいし、計算対象内の物質のすべてのガンマ線による加熱率、 $H(I)$ は G11(NG) で置換えられる。

変数第2フィールド, NTG

node 番号1~2間の温度を求めるとき、node間の温度を基準に1~2 node間の温度をGap conductance で設定するかどうかのoptionである。中央物質が燃料等の場合、このoptionを有効に利用すること。

Gap conductance の値を使用する場合は、入力番号25、第5フィールドの値GAPが使用される。

(注) NGEO, NGAM, NPOWERは、計算ケースの制御に使用される。プログラム内では、次のようなloop構造としている。

```

DO 590 NG=1, NGEO
DO 580 NY=1, NGAM
DO 570 NX=1, NPOWER
. . . .
. . . .
. . . .
. . . .
570 CONTINUE
580 CONTINUE
590 CONTINUE

```

NTG = 0 : このoption使用

NTG = -1 : このoption使用されない。他のnode点の温度と同一手法で求められる（付録参照）。

変数第3フィールド, NOPT

核分裂する物質が計算対象内になればNOPT = 0とする。また、核分裂する物質があって、キャプセルの中央にある場合もNOPT = 0とする。核分裂する物質がnode番号01以外に存在するとき、その物質の外側のnode番号を指定する。Fission heat rate (W/cm)の値は入力番号30の変数(F11(I), I = 1, NPOWER)で与える。ただし、核分裂する物質は計算対象内に1個のみとする。

このoptionを使用してヒータを組み込んだキャプセルのヒータを模擬させることができる。ただし、この方法でヒータを模擬する場合は、本来核分裂する物質でないので、NFUEL = 0としておく必要がある。

変数第4フィールド, NFUEL

中央物質が燃料の場合、温度計算に使用する熱伝導率の指定key word, 中央物質が燃料でない場合、あるいは別途の式で与える場合は、NFUEL = 0とすること。

NFUEL = 1 : Lyonsの実験式

NFUEL = -1 : Baily - Asamotoの (Pu, U) O₂ に関する実験式

NFUEL = -2 : Asamoto のUO₂に関する実験式

変数第5フィールド, MOD

中央物質（燃料を想定している）の温度をさらに分割して計算する場合、温度が1400℃～1900℃および1900℃以上となる領域に分け燃料密度をそれぞれ97%TD, 99%TDとして、温度評価を行う。また、そのときのそれぞれの半径を計算し、出力させるためのoption key wordである。

付録A.3を参照されたい。

MOD = 0 : このoptionはskipされる。

MOD ≥ 1 : optionは実行される。ただし、option key word NP ≥ 2でなければならない。

入力番号 25 - キャプセルに関する熱伝達率に関する入力である -

変数第1フィールド, (H11)

キャプセル外筒表面における熱伝達率 (w/cm²・℃)

変数第2フィールド, (T11)

キャプセル外筒表面における原子炉冷却水温度（境界条件）, (℃)

変数第3フィールド, (R11)

中央物質が燃料であり、それが孔開き燃料の場合、中心孔半径を入力する, (cm)

変数第4フィールド, (DENS)

中央物質が燃料である場合は、そのFractional Density.

中央物質が燃料でない場合は、DENS = 1とする。

変数第5 フィールド, (GAP)

中央物質が燃料である場合で表面の温度計算に一定のギャップ熱伝達率を与えて計算したいとき, そのギャップ熱伝達率 ($w/cm^2 \cdot ^\circ C$) を入力する。

GAP = 0 の場合は, 表面に接する物質の熱伝達率, ガスの場合は, さらにふく射を考慮して計算する。(Appendix に述べる計算法と同じである)

入力番号 30

核分裂する物質が計算対象内にある場合, その Fission heat rate を線出力密度, W/cm の位で入力する。入力の個数は NPOWER (入力番号10, 第5 フィールド入力値) 個とする。

入力番号 35

このデータは $N9 = 1$ (入力番号11第1 フィールド入力) のとき必要なガンマ加熱率 (W/gr) である。計算対象内のすべての物質のガンマ加熱率をここで与えた値に設定する。

入力番号 40

計算対象で考えている各リングの半径を cm の単位で入力する。ただし, リングの外側の半径を入力すること。Fig.1で1~ND9までの半径。プログラムでは他のパラメータを固定し, この半径のみを変更した計算が可能とたっている。ただし, そのときは, 入力番号10の第3 フィールド入力のNGEOを実行したい計算回数2回以上としなければならない。

この番号で入力される変数は,

((RNG (I, NG), I = 1, NG), NG = 1, NGEO)

であり, 配列変数である。そのため, この入力カードでは入力補助整数を使用する。

入力補助整数1 (INT1) でNGを指定する。

一回で入力できる変数が5個に制限されているので, 5個をこえる (ND9 : node数) の場合, 入力補助整数2を, 順次1, 2, 3, 4, 5とする。

(例)

40 1 1 (RNG (I, 1), I = 1, 5)

40 1 2 (RNG (I, 1), I = 6, 10)

40 1 3 (RNG (I, 1), I = 11, 15)

・

・

・

40 J 1 (RNG (I, J), I = 1, 5)

40 J 2 (RNG (I, J), I = 6, 10)

入力番号 45 -ふく射率-

入力の必要はない。ふく射率を入力したければ入力番号300で入力補助整数 (INT2) を4として入力のこと。

入力番号 50 - 物質の相の指定 -

各node番号間の物質について、その物質の相を外側node番号で指定する。ガス相の場合は0、液および固体相の場合は1で入力する。

入力番号 55 - 物質の指定 -

各node番号間の物質について、その物質を外側node番号で指定する。この値を0と指定した場合は、その物質についての物性値（密度、熱伝導率、熱膨脹率、ふく射率）を入力番号300で入力しなければならない。

その物質としてのデータが、プログラム組込みデータとして存在し、かつ組込み物性値（詳細は4.2節参照）を修正せず使用するのであれば、その番号をFig.4に示す番号で指定する。

入力番号 60 - 物質毎のガンマ加熱率 -

この入力は、入力番号11、第1フィールド入力の $NG = 0$ の場合、入力しなければならない。

入力データは入力番号55で指示した各物質のガンマ加熱率 (W/gr) であり、入力変数は

$$((NHG(I, NG), I = 1, ND9), NG = 1, NGAM)$$

である。すなわち、node数 $ND9$ 個で一組のデータを $NGAM$ 組入力しなければならない。

入力方法は、入力番号40の $RNG(I, NG)$ の入力例と同一である。

入力番号 101 - $(RP(J), J = 1, NP)$ -

計算対象の中央物質が燃料の場合で、さらに燃料内の出力分布にdepressionを考慮して計算する場合に使用する。ただし、入力番号10、第2フィールド入力の NP で分割数 ($NP \geq 2$) が入力されねばならない。

入力番号 102 - $(CP(J), J = 1, NP)$ -

上記入力番号101で入力する各半径における出力分布を入力する。ただし、 $CP(J) = 0$ とはしないこと。使用条件は入力番号101と同様である。

入力番号 300 - キャプセル構成材の物性値を入力する -

すべての使用構成材の物性値として、組込みの物性値を使用する場合には、この入力は省略できる。しかし、使用材料が組込みの物質であっても、物性値を切換えて使用したい場合には入力しなければならない、入力番号55で入力の物質指定のとき、0と指定したものについては必ず入力しなければならない。

入力補助整数1, 2を使用して入力する。入力補助整数1は、計算対象としての物質の番号 (Fig.2 参照)、入力補助整数2は物性値として使用する密度、熱伝導率、熱膨脹係数、ふく射率の区別に使用し、それぞれ入力補助整数2 ($INT2$) を1, 2, 3, 4とする。それぞれの単位は、(gr/cc)、($w/cm^2 \cdot ^\circ C$)、($/^\circ C$)、(-)である。入力するデータ中、熱伝導率 k は

$$k = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4 \quad (1)$$

で表されるとしたときの係数を示す。ただし、T：温度(°C)である。熱膨張係数についても同様に

$$\alpha = A_0 + A_1 \cdot T, \quad (T \text{ in } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

の形式としたときの係数である。ただし、熱膨張係数 α の値は $1.E+06$ を乗じた値とすること。これ等の入力例については、Fig. 3の300番代の箇所を参照されたい。

4. 出力について

このプログラムでの出力は4種のグループに分かれる。以下、各グループの出力プリント内容について解説する。

4.1 第1グループ

入力データ・イメージをプリントする。その例をFig.3に示す。左側の数字は、プリントにさいしてのシリーズナンバーであって入力したものではない。入力データのチェックに利用すると便利である。

DATA FOR CALCULATION									
CARD NO.	INPUT	DATA	CARD	IMAGE	LIST				
.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8		
1.	83M-39G	CAPSULE							00001600
2.	10	5.	0.	1.	1.	1.			00001700
3.	11	0.	-1.	0.	0.	0.			00001800
4.	25	2.325	50.	0.	1.	0.			00001900
5.	30	1 1 0.							00002000
6.	35	1 1 0.							00002100
7.	40	1 1 1.2732	1.2796	1.83	1.85	2.			00002200
8.	45	1 1 0.							00002300
9.	50	1 1 1.	0.	1.	0.	1.			00002400
10.	55	1 1 0.	3.	0.	3.	7.			00002500
11.	60	1 1 3.5	0.	2.8	0.	3.5			00002600
12.									00002700
13.	300	1 1 6.5							00002800
14.	300	1 2 0.374							00002900
15.	300	1 3 14.05							00003000
16.	300	3 1 3.25							00003100
17.	300	3 2 0.203E+01	0.136E-03	0.133E-05	0.744E-08	0.108E-10			00003200
18.	300	3 3 22.818	0.						00003300
19.									00003400
20.	999								00003500
21.	XXX	FUEL CAPSULE.							00003600
22.	10	5.	5.	1.	1.	1.			00003700
23.	11	0.	-1.	0.	1.	1.			00003800
24.	25	2.325	50.	0.	0.95	0.			00003900
25.	30	1 1 0.							00004000
26.	35	1 1 0.							00004100
27.	40	1 1 0.5	0.51	0.62	1.0	2.			00004200
28.	45	1 1 0.							00004300
29.	50	1 1 1.	0.	1.	0.	1.			00004400
30.	55	1 1 10.	3.	12.	3.	7.			00004500
31.	60	1 1 3.5	0.	2.8	0.	3.5			00004600
32.	101	1 1 0.1	0.2	0.3	0.4	0.5			00004700
33.	102	1 1 1.	1.	1.	1.	1.			00004800
34.									00004900
35.	300	1 1 6.5							00005000
36.	300	1 2 0.374							00005100
37.	300	1 3 14.05							00005200
38.	300	3 1 3.25							00005300
39.	300	3 2 0.203E+01	0.136E-03	0.133E-05	0.744E-08	0.108E-10			00005400
40.	300	3 3 22.818	0.						00005500
41.									00005600
42.	999								00005700
43.	STOP								00005800

Fig. 3 1st output group.

4.2 第2グループ

このプログラムに組み込みの物性値のプリントである。例を Fig. 4 に示す。

左側の数値は組み込み物質の物質No, 次は密度 (gr/cc) である。以下, 左側から7コラム (上側に C 0, C 1, C 2, C 3, C 4, A 0, A 1 で示される) はその物質の熱伝導率, 熱膨脹係数を示す。第 3.2 節の入力番号 300 の説明で与えた式を参照されたい。熱伝導率の単位は, (w/cm・℃) であり, 熱膨脹の係数の値としてここでプリントされる値は 1.E+0.6 を乗じた値である。

次のコラムは (上部に E で示す), その物質のふく射率を示す。最後のコラムは, その物質名の略称を示す。

入力番号55で指定すべき物質が, この出力グループ内の物質で, 使用物性値がこのプリントの数値でよければ, 左側の物質番号を入力番号55のデータとして指定すればプログラム内で自動的に設定される。

	DENSITY GR/CC.	C0 W/CM.C.	C1	C2	C3	C4	A0 *1.E-06/C.	A1	E	MAT. NAME
1	8.660	0.453E+00	0.156E-03	0.0	0.0	0.0	7.392	0.687E-03	0.400	NB-1XZR
2	8.230	0.967E-01	0.182E-03	0.0	0.0	0.0	12.407	0.431E-02	0.500	HASTELLOY
3	0.0	0.143E-02	0.325E-05	-0.768E-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	HELIUM
4	0.800	0.247E+00	0.107E-03	-0.856E-07	0.252E-10	0.0	0.0	0.0	0.0	NAK-44
5	0.0	0.463E-03	0.101E-05	-0.267E-09	0.783E-13	-0.974E-14	0.0	0.0	0.0	NEON
6	7.800	0.141E+00	0.137E-03	0.0	0.0	0.0	15.564	0.270E-02	0.800	SUS-316
7	7.800	0.149E+00	0.128E-03	0.0	0.0	0.0	17.040	0.272E-02	0.800	SUS-304
8	16.730	0.413E+00	0.227E-03	0.0	0.0	0.0	6.013	0.109E-02	0.0	T-111
9	14.300	0.100E+00	0.200E-03	-0.774E-07	0.948E-11	0.0	7.415	0.194E-02	0.900	UN
10	10.960	0.102E+00	-0.208E-03	0.279E-06	-0.198E-09	0.545E-13	9.610	0.157E-02	0.900	UO2
11	19.700	0.137E+01	-0.914E-03	0.765E-06	-0.266E-09	0.325E-13	5.098	0.230E-03	0.300	W-26%RE
12	6.470	0.110E+00	0.154E-03	-0.509E-06	0.156E-08	-0.121E-11	6.584	0.781E-03	0.426	ZR-2
13	0.0	0.149E-03	0.592E-06	-0.217E-09	-0.265E-12	0.234E-15	0.0	0.0	0.0	ARGON
14	1.800	0.140E+01	-0.130E-02	0.518E-06	-0.269E-10	-0.249E-13	0.0	0.0	0.0	GRAPHITE
15	0.473	0.326E+00	-0.580E-04	0.117E-05	-0.166E-08	0.554E-12	0.0	0.0	0.0	LITHIUM
16	10.200	0.129E+01	-0.614E-03	0.491E-06	-0.239E-09	0.505E-13	5.143	0.752E-03	0.200	MOLYBDENUM
17	19.300	0.161E+01	-0.912E-03	0.630E-06	-0.215E-09	0.356E-13	4.423	0.752E-03	0.220	W
18	9.270	0.200E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	SOL-GEL
19	3.210	0.602E+00	-0.531E-03	0.141E-06	0.358E-11	-0.398E-14	33.326	0.116E-01	0.0	SI-C
20	2.700	0.203E+01	0.136E-03	0.133E-05	0.744E-08	-0.108E-10	22.818	0.978E-02	0.050	ALUMINIUM
21	0.0	0.248E-03	0.739E-06	0.230E-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	N-2
22	4.410	0.745E-01	0.105E-03	-0.344E-06	0.118E-08	0.821E-12	6.584	0.781E-03	0.330	TITANIUM
23	0.0	0.572E-03	0.130E-05	-0.307E-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	HEX 2/5
24	16.600	0.534E+00	0.125E-03	0.0	0.0	0.0	5.437	0.207E-02	0.300	TANTALUM
25	1.820	0.148E+01	-0.785E-03	0.0	0.0	0.0	10.717	0.748E-02	0.610	BERYLLIUM

Fig. 4 2nd output group.

4.3 第3グループ

入力番号順に入力時の変数名を付して入力データをプリントしている。例を Fig.5 に示す。
 なお、入力データのチェックに便利かと考え、多少の説明等を付している。入力番号は---
 (No.) --- : で示してある。この出力にさいし、配列変数でない変数の入力時のフィールド
 順は、縦の順に並びかえてプリントしている。

```

--( )-- : TITLE CARD ,TITL(I),I=1,18)
          83M-39G CAPSULE
--( 10)-- : CONSTANTS ON CALCULATION
          ND9 = NUMBER OF NODE                : 5
          NP  = NUMBER OF DIVIDING FUEL INTO RINGS : 0
          NCEO = NUMBER OF GEOMETRY ON CALCULATION : 1
          NGAM = NUMBER OF GAMMA HEAT RATE ON CALCULATION: 1
          NPOWER= NUMBER OF REPEAT CALCULATION FOR
          FISSION HEAT RATE (LHGR).           : 1
--( 11)-- : CONSTANTS ON CALCULATION
          N9 = SELECTION OF INPUT METHOD FOR GAMMA HEAT
          RATE.                                : 0
          N9= 0 : HEAT RATE GIVEN EACH NODE.
          N9= 1 : UNIFORM HEAT RATE AT EACH NODE.
          (GIVEN AS LINER HEAT RATE)
          NTG = SELECTION OF HEAT TRANSFER AT FUEL SURFACE : -1
          NTG= 0: USE HEAT TRANSFER COEFFICIENT
          NTG=-1: USE THERMAL CONDUCTIVITY IN GAP
          NOPT = NODE NUMBER TO BE GIVEN FISSION HEAT RATE. : 0
          NFUEL= SELECTION NUMBER OF FUEL THERMAL COND. : 0
          NFUEL= 1: LYONS , UO2
          NFUEL= 0: THERE IS NO FUEL.-AVERAGE TEMP.-
          NFUEL=-1: DAILY-ASAMOTO, ((PU,U)O2)
          NFUEL=-2: ASAMOTO, UO2
          MOD = MODE TO CONSIDER FUEL PELLETT DENSITY CHANGE.: 0
--( 25)-- : HEAT TRANSFER VARIABLES
          H11 = HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT OUTER TUBE (W/CM**2/C): 2.3250
          T11 = REACTOR COOLANT TEMP. (DEG-C) : 50.000
          R11 = INNER RADIUS OF HOLLOW FUEL (CM) : 0.0
          DENS = FRACTIONAL DENSITY OF FUEL PELLETT: 1.0000
          GAP = GAP CONDUCTANCE : 0.0
--( 30)-- : FISSION HEAT RATE (W/CM) * (F11(NX),NX=1,NPOWER)
          0.0
--( 35)-- : UNIFORM GAMMA HEAT RATE AT EACH NODE (W/GR)* (G11(NY),NY=1,NGAM)
          0.0
--( 40)-- : OUTER RADIUS OF EACH RING (CM) * ((RNG(I,NG),I=1,ND9),NG=1,NGEO)
          NG = 1
          1.273 1.280 1.830 1.850 2.000
--( 45)-- : EMISSIVITY OF MATERIAL * (E (I),I=1,ND9)
          0.0 0.0 0.0 0.0 0.8000
--( 50)-- : SELECTION OF MATERAIL* (0=GAS, 1=SOLID)* (MX (I),I=1,ND9)
          1 0 1 0 1
--( 55)-- : NUMBER OF MATERJAL AT EACH NODE* (0=INPUT, .NOT.1=FROM INCORPORATED BLOCK DATA)* (NW (I),I=1,ND9)
          0 3 0 3 7
--( 60)-- : GAMMA HEAT GENERATION RATE GIVEN AT EACH NODE (W/GR)* ((HUG(I,NY),I=1,ND9),NY=1,NGAM)
          NY = 1
          3.500 0.0 2.800 0.0 3.500
--(101)-- : RADIUS GIVEN HEAT RATE RATIO FOR FUEL (RP(J),J=1,NP)
--(102)-- : HEAT RATE RATIO AT THE ABOVE RADIUS* (CP(J),J=1,NP)
--(300)-- : COEFFICIENTS OF MATERAIL PROPERTIES *
          1 6.500 0.3740 0.0 0.0 0.0 0.0 14.05 0.0 0.0
          2 0.0 0.1430E-02 0.3250E-05-0.7680E-09 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
          3 3.250 2.030 0.1360E-03 0.1350E-05 0.7440E-08-0.1080E-10 22.82 0.0 0.0
          4 0.0 0.1430E-02 0.3250E-05-0.7680E-09 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
          5 7.800 0.1490 0.1280E-03 0.0 0.0 0.0 0.0 17.04 0.2720E-02 0.8600
    
```

Fig. 5 3rd output group.

4.4 第4グループ

このグループの出力は、おおむね原プログラムの出力によっている。ただし、入力時の変数名を追加する等の手直しを行っている。出力の1例をFig.6(a), (b)に示す。以下Fig.6(a)参照されたい。

先頭の<TITLE ON CALCULATION>はタイトル・カードのプリントである。

ND9からMODまでのname list typeでプリントのものは、計算の条件を定めるkey wordsである。

MAX, NODE NO. (ND9) でプリントされる行は計算ケースの数を示す。

次のCOOLANT TEMP. よりMATERIAL SELECTOR NO. は入力変数のプリントである。ただし、ふく射率Eについては、MATERIAL SELECTION NO. , MX(I)で組込みの物質を指定した場合このふく射率Eについても自動的に設定される。

DENSITY AND COEFFICIENTS OF MATERIAL PROPERTIES は計算に使用する組込みデータおよび入力データのすべての物性値をnode順に整理してプリントしている。なお、最後のコラムに、組込みのものについては物質名の略称を、入力データについてはその表示を付している。

ここまでの出力は、subroutine INOUT によっている。

OUTPUT-PRINTING FROM SUB. OUTPUT- として示されるものより以下のプリントがこのプログラムによる計算結果である。以下Fig. 6(b)を参照されたい。

NG, NY, NXは、計算が第何番目の計算ケースであるかを示している。

RADIUSで示す行は計算に使用した半径寸法(各nodeの入力時半径)を示す。

GAMMA HEATとしてプリントされるものは、この計算ケースにおいて使用されたガンマ加熱率である。入力番号35入力のG11あるいは60のHNGで与えた値がプリントされる。どちらによるかはkey word N9の値によるが、プリントされている値が1個ならば入力番号35の値である(N9=1)。N9=0ならば、各node点毎に与えたガンマ加熱率をプリントしている。

次は核分裂による線出力密度である。このパラメータを使用しなければ、値は0.0で表示される。

TEMP. DISTRIBUTIONの表示のもとに8コラムに分けてプリントされるものが、このプログラムによる主要計算結果である。

第1コラムは、node番号である。

第2コラムは、第1コラムのnode点における計算結果としての温度である。

最下段に原子炉冷却水温度をプリントしている。

第3コラムは、各node点における出力(ガンマ発熱および核分裂するものがあればその核分裂による出力を加算する)を線出力密度(w/cm)の単位で示す。

第4コラムは、熱伝導率を示している。ここでの熱伝導率はそのプリント位置の前後のnode間の物質(第5コラムにその番号で示される)についての値である。最下段

にキャプセル表面での熱伝達率をプリントしている。

第5コラムは、第3コラムと同じ方法で表す、物質入力番号である。

第6コラムは、入力時の半径すなわち Cold radius をプリントしている。

第7と第8コラムは、第2コラムの温度に達した時の熱膨脹後の半径を示す。ただし、第8コラムは第2コラムで得られた温度をもとに算出したものである。この両者の値は許された誤差範囲で通常一致するが、もし計算上のトラブル、未収束があれば、大きな不一致が発生する。計算状態のチェックになりうる。

もし、NP（入力番号10、第2フィールド入力のoption key word）が、2以上の場合（ $NP \geq 2$ ）は、中央物質について、さらに分割を進めたときの計算結果が出力される。また、MOD（入力番号11、第5フィールド入力のkey word）が、1以上の場合（ $MOD \geq 1$ ）も、関係の計算結果が追加出力される。

```

83M-39G CAPSULE
INPUT DATA -- PRINT OUT FROM INOUT --

&NAM1
ND9=5*NP=0*NGEO=1*NGAM=1*NPOWER=1*NG=0*NTG=-1*NOPT=0*NFUEL=0*MODIF=0
&END

MAX. NODE NO.          (ND9)= 5
NO. OF GEOMETRY        (NGEO)= 1
NO. OF GAMMA HEAT RATE (NGAM)= 1
NO. OF FISSION HEAT RATE (NPOWER)= 1

COOLANT TEMP.         (T11) = 50.00 C.
SURFACE COEFF.        (H11) = 2.32 W/CM2.C.
GAP CONDUCTANCE       (GAP) = 0.0 W/CM2.C.
INSIDE HOLE RADIUS (R11) = 0.0 CM.

OPTION OF FUEL THERMAL COND. (NFUEL) = 0
CETUS
NO. OF REGION FOR POWER DIST. (NP) = 0
INITIAL DENSITY        (DENS) = 1.0000

RADIUS (CM): ((RNG(I*NG)*I=1,ND9)*NG=1,NGEO)
1.2732 1.2796 1.8300 1.8500 2.0000

EMISSIVITIES (E(I)*I=1,ND9)
0.0 0.0 0.0 0.0 0.8000

MATERIAL TYPE NO. (Q=GAS*1=LIQ. OR SOLID)* (MX(I),I=1,ND9)
1 0 1 0 1
MATERIAL SELECTOR NO. (Q=NON-TABULATED MATERIAL)* (NW(I),I=1,ND9)
0 3 0 3 7

DENSITY AND COEFFICIENTS OF MATERIAL PROPERTIES
DENSITY CO C1 C2 C3 C4 A0 A1 E MAT. NAME
GR/CC. W/CM.C. *1.E=06/C.
1 ( 0) 6.500 0.374E+00 0.0 0.0 0.0 0.0 14.050 0.0 0.0 <NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS>
2 ( 3) 0.0 0.143E-02 0.325E-05-0.768E-09 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 HELIUM
3 ( 0) 3.250 0.203E+01 0.136E-03 0.133E-05 0.744E-08-0.108E-10 22.818 0.0 0.0 <NON-TABULATED MATERIAL CONSTANTS>
4 ( 3) 0.0 0.143E-02 0.325E-05-0.768E-09 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 HELIUM
5 ( 7) 7.800 0.149E+00 0.128E-03 0.0 0.0 0.0 17.040 0.272E-02 0.800 SUS-304
    
```

Fig. 6(a) 4th output group.

```

OUTPUT - PRINTING FROM SUB. GUTPUT -
NG ( NO. OF GEOMETRY ) = 1
NY ( NO. OF GAMMA HEAT RATE ) = 1
NX ( NO. OF FISSION HEAT RATE ) = 1

RADIUS (CM): ((RNG(I*NG)*I=1,ND9)
1.2732 1.2796 1.8300 1.8500 2.0000

GAMMA HEAT, WATTS/GRAM* PRINTING PARAMETER - G11(NY),I=1,ND9)
0.350E+01 0.0 0.280E+01 0.0 0.350E+01

LINER FISSION HEAT RATE (F11(NX)) = 0.0 WATTS/CM

TEMP. DISTRIBUTION, C. -- PRINT OUT FROM OUTPUT --
NODE TEMPERATURE POWER(F+G) T.CONDUCTIVITY MAT. NO. COLD RADIUS CALC. RADIUS ACT. RADIUS
C. W/CM. W/CM.C. CM. CM. CM.
0 263.46 0.374E+00 0 1.2732 1.2771 1.2771
1 238.66 115.86 0.209E-02 3 1.2796 1.2840 1.2845
2 191.50 115.86 0.214E+01 0 1.8300 1.8363 1.8370
3 187.85 164.79 0.184E-02 3 1.8500 1.8512 1.8514
4 72.23 164.79 0.157E+00 7 2.0000 2.0013 2.0015
5 57.33 214.32 2.32 (W/CM**2/C: HEAT TRANSFER COEFF.)
50.00 (COOLANT TEMP.)
    
```

Fig. 6(b) 4th output group.

5. 断面が円，円環でない部品を含むキャプセルへの適用

このプログラムは中心軸対称なキャプセルを扱う。しかし，キャプセルによっては全ての構成部品の断面が円や円環ではない形状のものもある。このようなキャプセルについては，形状寸法等を計算可能なように計算上修正することにより，大きな誤差を生じることなく，プログラムの目的（温度を求めること）を達成できることもある。

ここでは，必ずしも中心軸に対称でないキャプセル部品を含む計算対象に関し，経験的にこのプログラムを適用してきた事項のいくつかを解説する。

5.1 四角枠の取扱い

例えば，Fig. 7 に示す如き，四角形の枠（一辺の長さ $2a$ ，肉厚 t ）がキャプセル部品として装備されたとき，本来このプログラムでは取扱えないものであるが，これを近似的に次のような方法で扱うことは可能である。

四角の枠の外周に等しい円形の外半径 R_0 に次のように変換する。

$$R_0 = 4a / \pi$$

次いで，円径の内径 R_i は，外径の内側に四角の枠の断面積が等しくなるように肉厚を定め，変換した外径から肉厚分を差引いて設定する。すなわち，

$$R_i = (2 / \pi) \cdot \{ 4a^2 - \pi t (2a - t) \}^{1/2}$$

円周を等しくするのは外面での熱流束を等しくしておくことであり，断面積を等しくするのは内部の発熱量を等価に変換するためである。

5.2 四角柱の取扱い

照射試料は，その断面が円形とは限らず，しばしば四角形の場合がある。特に材料試験片では四角形となることが多い。

(1) 断面が正方形の場合

このプログラムを適用するには，円柱形と考えて入力データを作成しなければならないが，方法として2通りの考え方がある。一つは断面積が等しい円形に変換することであり，他の一つは先に 5.1 節で述べたような等周の円に変換することである。

このプログラムの使用経験からは，後者による方法が照射中のデータ等との一致が良いことを示している。Fig. 8 に示す如き正方形断面の場合には，半径 $R = 4a / \pi$ の円形に変換する。ただし，この変換では，断面積は等しくならない，断面積は $4 / \pi$ 倍になる。そこで，全体としての発熱量が等しくなるように出力密度あるいはその物質の密度（ガンマ加熱を考慮するも

のであれば)に係数 $1 / (4 / \pi)$ を乗じて密度等の値を切下げおかねばならない。

(2) 細長い長方形の場合

プログラムは全体として円柱、円筒形を計算対象としているため、形状が異なるものについても原則として熱流束が変わらないように変換する方が良いでしょう。

Fig. 9 に示す如き細長い長方形についても、表面の熱流束が揃うように、次のような半径寸法 R に変換する。すなわち、

$$R = 2 (w+t) / \pi$$

とする。なお、この寸法変換を行うと、断面積は一致しなくなり出力密度が異なってくるので、出力密度あるいはその物質の密度（ガンマ加熱を考慮するものであれば）の変換を行っておく必要がある。すなわち、それらの密度に係数

$$(\pi t)^2 / \{ 2 (w+t)^2 \}$$

を乗じた値を入力値とする。

密度の係数は、細長い板状の場合、表面と中心の温度差 (ΔT) が

$$\Delta T = q''' t^2 / (2k)$$

で近似しうることを考慮したものである (k : 熱伝導率)

先の密度の変換は上記の温度差となるように出力密度 q''' を修正するための係数である。

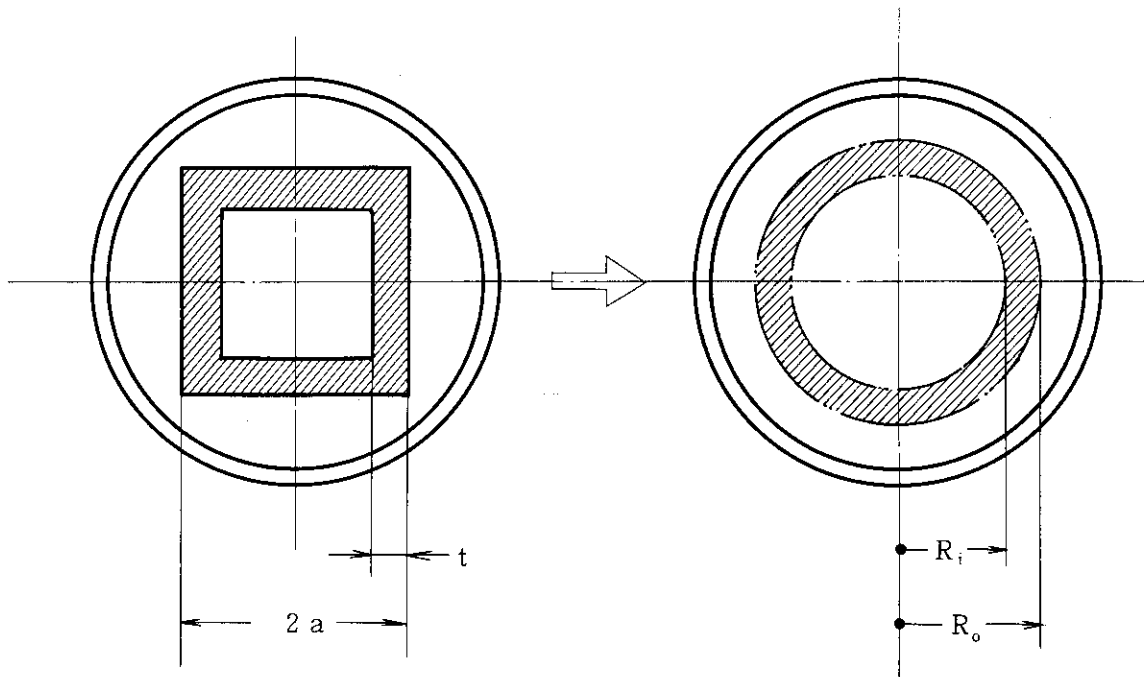


Fig. 7 四角棒の変換

外周を等価な円に変換，断面積を等しいように内半径と定める

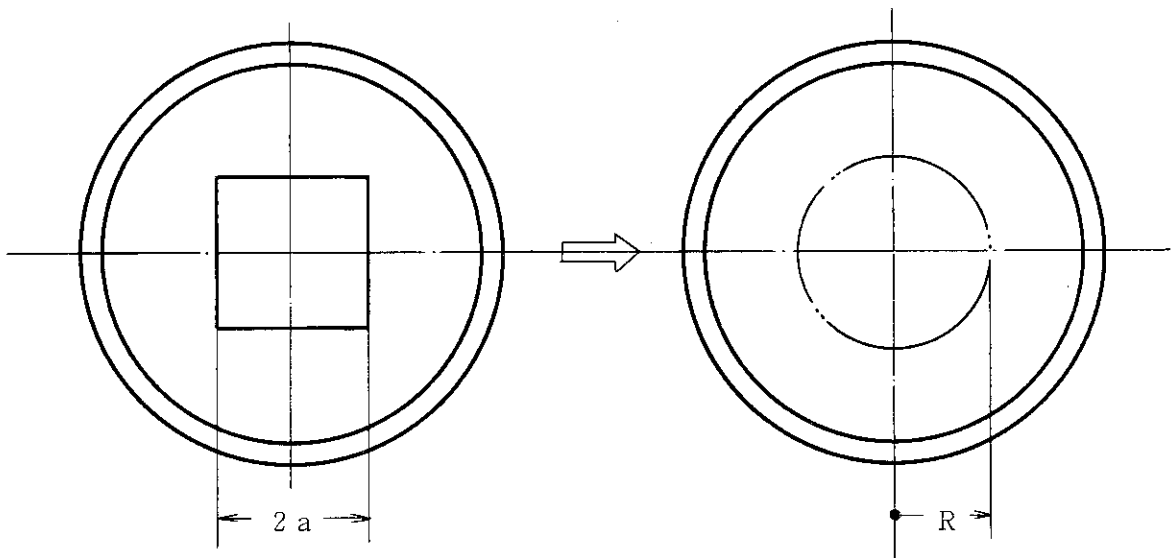


Fig. 8 四角柱（正方形断面）の変換
（周等価変換，出力密度修正要）

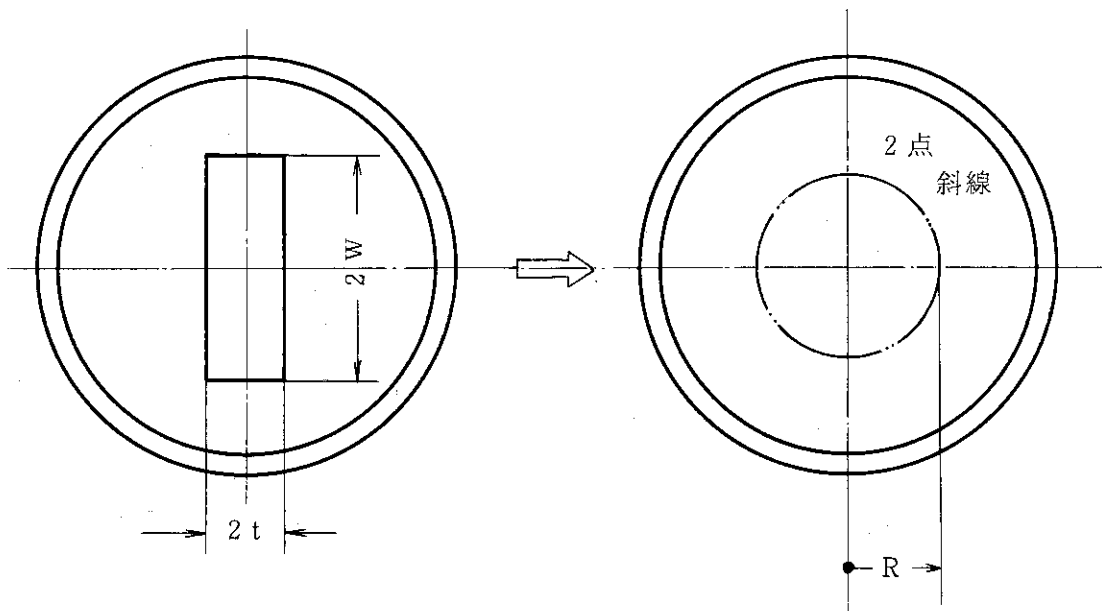


Fig. 9 四角柱（細長い）の変換
（周等価変換，出力密度修正要）

謝 辞

このプログラムの改造に当り、横山憲夫氏（クールズ科学K.K）には原プログラムの使用法等について、遠藤泰一氏（JMTR照射第1課）には改良すべきデータの入力法等について、白石忠男氏（JMTR計画課）にはプログラムの作成上計算機システムのファイルの取扱等について、有益な助言を得た。ここにその氏名を記して、謝意を表す。

参考文献

- (1) Hall C. Roland, "GENGTC, A onedimensional CEIR Computer Program for Capsule Temperature Calculation in Cylindrical Geometry", ORNL-TM-1942, (Dec. 1967)
- (2) 野村靖, "キャプセル熱計算コードGENGTCの整備と二次元熱計算", private communication, (April, 1978).
- (3) 横山憲夫, private communication, (Dec., 1986)

謝 辞

このプログラムの改造に当り、横山憲夫氏（クールズ科学K.K）には原プログラムの使用法等について、遠藤泰一氏（JMTR照射第1課）には改良すべきデータの入力法等について、白石忠男氏（JMTR計画課）にはプログラムの作成上計算機システムのファイルの取扱等について、有益な助言を得た。ここにその氏名を記して、謝意を表す。

参考文献

- (1) Hall C. Roland, "GENGTC, A onedimensional CEIR Computer Program for Capsule Temperature Calculation in Cylindrical Geometry", ORNL-TM-1942, (Dec. 1967)
- (2) 野村靖, "キャプセル熱計算コードGENGTCの整備と二次元熱計算", private communication, (April, 1978).
- (3) 横山憲夫, private communication, (Dec., 1986)

付 録

計算方法について

この付録で解説するところは、原プログラムを解説したものである。今回の修正に際し、原プログラムの基本計算法はそのままとしている。ただし、収束法等については修正を加えている。

プログラムで計算する主要事項は3つある。第1は各nodeの温度、第2は計算されたnodeの温度に伴う熱膨張によるnode点の半径寸法の変化である。最後の一つはnode番号0における、キャプセル中心温度の計算である。

A.1 温度計算

キャプセル各部の発熱量の評価を最初に行う。このプログラムの温度分布計算においては、発熱の種類として2種の発熱を考える。すなわち、構造材等のガンマ加熱および燃料の如く核分裂する物質についてはその核分裂による発熱を考える。なお、ガンマ加熱等においては熱膨張による物質の体積変化をも考慮する。

温度計算は通常の温度分布計算と同様に最外部から、原子炉冷却水温度を境界条件として出発する。

キャプセル表面温度は、入力で与えた熱伝達率を用い定める。なお、このプログラム内の計算における温度の単位は絶対温度(K)に統一している。各構成材の内面温度 (T_i) を外面温度 (T_o) を基準に計算する。その評価は次式による。

$$T = T_o + \frac{q'''}{4k} (R_o^2 - R_i^2) + \frac{Q}{2\pi k} \ln (R_o / R_i) - \frac{q'''}{2k} R_i^2 \ln (R_o / R_i) \quad (\text{A.1})$$

ここで、

R_i, R_o : リング内, 外半径

q''' : そのリングにおける発熱率

Q : 計算対象のリングに内側から流入する熱量

k : 熱伝導率

である。

上記計算において、熱伝導率は温度依存性があるとする。このため原プログラムでは単純なくりかえし法で5回の計算を行うこととなっていた。この修正においてNewton-Raphson法で収束させることに変更した。Fig.1に示す如く温度計算対象部分が構造材でなくガス層の場合は、ガス層の熱伝導とふく射を考慮した次の評価式で温度差が求められる。

$$Q_1 = \sigma \cdot f \cdot S (T_1^4 - T_o^4) \\ Q_2 = k \cdot S (T_i - T_o) / \ln (R_o / R_i) \quad (\text{A.2})$$

ここで、 S : 内面の面積

Q_1 : ふく射による移動熱量

Q_2 : 熱伝導による移動熱量

k : ガスの熱伝導率

である。

(A.2) 式を用い、 Q_1+Q_2 が内面からの熱流出量 P に等しくなる様に T_i を繰り返し計算法で求める。ただし、原プログラムでは Q_1+Q_2 が内面からの熱流出量 P に等しくなるまで、単純な繰り返し漸近法になっていたが、この version では Newton - Raphson 法に変更した。

A.2 node点の寸法（半径）変化の計算

構造物の膨脹による半径寸法変化の評価は次式による。

$$\begin{aligned} R_i^+ &= R_i^+ + 0.05 \{ R_{i,0} (1 + \alpha \Delta T) - R_i^+ \} \\ R_o^+ &= R_o^+ + 0.05 \{ R_{o,0} (1 + \alpha \Delta T) - R_o^+ \} \end{aligned} \quad (A.3)$$

ここで、 R_i^+ , R_o^+ : 熱膨脹したリング内、外半径

$R_{i,0}$, $R_{o,0}$: 常温におけるリング内、外半径

α : 熱膨脹率

である。

ΔT は考えているリングの内外面温度の算術平均温度である。ただし、熱膨脹の基準温度として 21.1°C をとる。

上記 (A.3) 式で熱膨脹による半径寸法は、例えば内径は $R_i(1 + \alpha \Delta T)$ で求められるものであるが、温度計算において、寸法変化による影響を考慮しているため、この寸法変化計算においては、増分を一挙に行わず小さく押えるため softening factor を 0.05 として収束値に漸近させる方法をとっている。そのため、この寸法変化計算は先の温度計算と組合わせて、最低 25 回の繰り返し計算を行うことにしている。

A.3 中心温度

A.3.1 中心温度

このプログラムでは、計算対象の node 番号付けを Fig. 1 に示すように中央物質の外側から始める。このため中心温度は変数配列寸法の範囲外になるため、別途に計算する。ただ、プログラムでは中央についてのみそこに燃料がある場合をも取扱えるようにしている。温度計算手法は先の A.1 で述べたところと全く同じである。以下、中央の物質が燃料の場合の取扱いについて述べる。

- (1) 燃料内では中性子束の depression のため、中央部で凹となる出力分布となる。そこで、プログラムは燃料内の出力分布を考慮して中心温度を算出することをもできるようにしている。ただし、この場合は計算すべき燃料内の分割数、燃料の分割半径、出力密度の相対分布等は入力値で与えられねばならない。

- (2) 中央物質が燃料であっても、内部の中性子束のdepressionを考慮しない場合は、この燃料を一領域として中心温度を算出する。
- (3) 中央物質が燃料の場合、その熱伝導率について3種の評価式を組込んでいる。

i) Lyons (N = 1), UO₂

$$k = \frac{38.24}{T + 129} + 4.788 \times 10^{-13} T^3 \quad (W/cm \cdot K)$$

(T in K) (A.4)

ii) Baily - Asamoto, (Pu, U) O₂ (N = -1)

$$k = 0.0110 + \frac{1}{T (0.4848 - 0.4465 D)}$$

(A.5)

T in °C, D : Fractional density

iii) Asamoto, UO₂ (N = -2)

$$k = 0.0130 + \frac{1}{T (0.4848 - 0.4465 D)}$$

(A.6)

T in °C, D : Fractional density

A.3.2 燃料内での出力depressionを考慮するときの中心温度計算

中心物質（燃料を想定する）内の温度を詳しく計算したい場合、あるいは出力のdepressionを考慮する場合、全体の分割で与えたnode番号1の半径寸法をさらに分割して温度を計算し、かつ出力することができる。この計算はsubroutine C E T U Sで扱われる。

中心物質に関する分割数 (NP), 分割の半径寸法, またはその半径における出力密度の相対値は入力で与えねばならない。

分割半径における温度を, node番号1の温度を境界条件として, 外側から内側へと算出していく。各分割点間の温度差 (ΔT) は

$$\Delta T = \frac{Q}{2 \pi k} \ln (R_o / R_i) + \frac{q'''}{4 k} (R_o^2 - R_i^2) - \frac{q''' R_i^2}{2 k} \ln (R_o / R_i)$$

(A.7)

で計算する。ここで,

Q : 内側からこのリングに流れ込む熱量。

R_o, R_i : リングの外, 内半径

q''' : 出力密度

k : 熱伝導率

である。

出力分布は, 各リングのQ, q''' の計算において考慮される。また, ここでの出力には燃料の場合, 核分裂による出力の外, γ 加熱による出力も考慮し, 加算する。

温度計算は, 入力で与えられた各分割点間をさらに10等分に分割して計算される。熱伝導率

は考えているリングの内外温度の中央値を用いて先に述べた3式で評価される。

ただし、入力変数NFUELを0とした場合は、第3.2節で述べた入力係数を用いた(1)式による熱伝導率を使用される。

中央物質内の温度が1400, 1900℃となるような半径が欲しいときは、入力の計算制御変数、MODを1以上($MOD \geq 1$)とすることによりその半径を算出する。このとき、熱伝導率として先の(A.5), (A.6)を用いる場合には、1400~1900℃の範囲についてはその密度を97%TD, 1900℃以上については99%TDとした熱伝導率を使用して温度を計算する。