

JAERI-M
85-107

電流リード熱解析コード
「CURRENT」

1985年8月

山口 方士^{*}・多田 栄介・畠 健一郎^{**}・島本 進

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力広済会資料センター（〒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, 1985

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

電流リード熱解析コード「CURRENT」

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部
山口方士^{*}・多田栄介^{*}・畠健一郎^{**}・島本 進

(1985年6月28日受理)

原研では、核融合炉用超電導コイル・システム開発の一環として、熱特性の優れた大型電流リードの開発を行っている。電流リードは、液体ヘリウム温度の超電導コイルと室温部の電源とを電気的に接続するものであり、液体ヘリウム温度への熱侵入の主たるものである。このため、大電流化が必要不可欠である核融合炉にとっては、電流リードによる熱侵入量の軽減化は、系全体の熱効率向上のために重要な課題である。

本報告は、このような熱特性の優れた電流リードの設計を可能とする電流リード熱解析コード「CURRENT」に関するものである。

* 核融合特別研究生（九州大学工学部）

** 日本ソフトウェア開発(株)

Current Lead Thermal Analysis Code "CURRENT"

Masahito YAMAGUCHI*, Eisuke TADA, Kenichiro HATA**
and Susumu SHIMAMOTO

Department of Thermonuclear Fusion Research,
Naka Fusion Research Establishment, JAERI

(Received June 28, 1985)

Large gas-cooled current lead with the capacity more than 30 kA and 22 kV is required for superconducting toroidal and poloidal coils for fusion application. The current lead is used to carry electrical current from the power supply system at room temperature to the superconducting coil at 4 K. Accordingly, the thermal performance of the current lead is significantly important to determine the heat load requirements of the coil system at 4 K.

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has been developed the large gas-cooled current leads with the optimum condition in which the heat load is around 1 W per 1 kA at 4 K.

In order to design the current lead with the optimum thermal performances, JAERI developed thermal analysis code named as "CURRENT" which can theoretically calculate the optimum geometric shape and cooling conditions of the current lead. The basic equations and the instruction manual of the analysis code are described in this report.

Keywords: Current Lead, Superconducting Coil, Fusion,
Computer Code, Thermal Analysis, Manual

* Visiting student from Kyushu University

** Nippon Software Company Limited.

目 次

記 号 表

1. はじめに	1
2. 解析モデル	1
3. 解析基礎式	2
3.1 定常計算	2
3.2 非定常計算	5
4. 計算手順	5
4.1 定常計算	5
4.2 非定常計算	6
5. データ入力方法	7
5.1 指定できるオプション	7
5.2 入力パラメータ	8
6. 計算結果出力	10
6.1 入力データの出力	10
6.2 計算結果出力	11
6.3 グラフ出力	12
7. リスタートファイル	13
7.1 定常計算	13
7.2 非定常計算	13
8. プログラムの構成	13
9. 使用例	18
9.1 J C L	18
9.2 入力データ	18
9.3 計算結果	18
謝 辞	18
参考文献	18
付 錄 環状四角フィン型モデル	19

Contents

Symbol	(Page)
1. Introduction	1
2. Analysis model	1
3. Basic equations	2
3.1 Steady state calculation	2
3.2 Transient state calculation	5
4. Calculation procedure	5
4.1 Steady state calculation	5
4.2 Transient state calculation	6
5. Input data	7
5.1 Input options	7
5.2 Input parameters	8
6. Output data	10
6.1 Input data list	10
6.2 Calculation results	11
6.3 Graphic output	12
7. Restart function	13
7.1 Steady state calculation	13
7.2 Transient state calculation	13
8. Program system	13
9. Calculated example	18
9.1 Control card	18
9.2 Input data	18
9.3 Calculation results	18
Acknowledgement	18
References	18
Appendix	19

記 号 表

P	圧 力	[atm]
ℓ	流 路 長 さ	[cm]
x	低温端からの距離	[cm]
Δx	ノード長さ	[cm]
T	温 度	[K]
\dot{m}	質 量 流 量	[g/s]
A	断 面 積	[cm ²]
h	エンタルピ	[J/g]
Pe	ペリメータ	[cm]
α	熱伝達係数	[W/cm ² K]
λ	熱 伝 導 率	[W/cm K]
I	電 流	[A]
R	抵 抗	[Ω]
u	流 速	[cm/s]
ρ	密 度	[g/cm ³]
D _h	水 力 直 径	[cm]
Re	レイノルズ数	
Pr	プラントル数	
C	比 热	[J/g K]
r	管中心からの距離	[cm]
r ₀	水 力 半 径	[cm]
r _e	フィン頂部半径	[cm]
r _t	フィン底部半径	[cm]
Z	フィン高さ	[cm]
δ	フィン厚さ	[cm]
t	時 間	[s]

(添 字)

Cu	銅に関する値	iu	入口に関する値
He	ヘリウムに関する値	out	出口に関する値

1. はじめに

核融合炉の実用化に向けて超電導コイルも大型化・大電流化が図られている。超電導コイルに電流を流す電流リードもそれに伴い大電流・高電圧化が必要となってきた。

電流リードは、一般に銅などの常電導金属で作られており、大電流を流すと電流リード自身がジュール発熱し、最悪の場合には、ジュール発熱により電流リード自身が溶解してしまう。また、電流リードは、常温部の電源と液体ヘリウム温度（約4K）にある超電導コイルを電気的に接続するものであるので、常温部から超電導コイルへ電流リード内を伝導で伝わる熱を出来る限り少なくする必要があり、通常ヘリウム・ガスによる冷却を行っている。しかし、本来ジュール発熱を小さくすることと低温部への熱侵入を小さくすることは相反するものであり、両者の兼ね合いを考慮して設計する必要がある。

今回開発した電流リード熱解析コード「CURRENT」は、ガス冷却型電流リードの熱的安定性を解析するものであり、これを用いて最適形状及び最適ガス流量を求めることができる。また、本解析コードでは、ガス流量が、冷凍システムの異常により変化してしまった場合等の過渡現象に対しても、電流リードの熱的動特性を解析できるように非定常計算が可能となっている。更に、本解析コードは、環状プレートフィン型等の特殊な構造を有する電流リードについても解析可能である。

なお、今回同時に「CURRENT」専用のグラフィックプログラム「CURRENTG」を作成しており、計算結果がより把握しやすいものとなっている。

2. 解析モデル

解析モデルとしては、図1に示すように電流リード（銅）とそれを冷却する冷媒（ヘリウム）とともに一次元モデルを考える。ノード番号0及びk+1は、それぞれ低温端及び高温端のNODEを表わす。境界条件として、低温端の圧力、電流リード温度、ヘリウム温度、及び高温端の圧力及び電流リード温度を与える。低温端から距離 x_n にある任意のNODEの圧力(P_n)は、低温端から高温端まで直線的に変化するものとして、

$$P_n = P_{in} + x_n (P_{in} - P_{out}) / \ell \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 P_{in} は入口圧力、 P_{out} は出口圧力及び ℓ は、電流リード全長を示す。

電流リード及びヘリウム各NODEの熱伝導度及び比熱は、温度の関数として取扱うものとし、ヘリウムの物性値は、ヘリウム物性プログラムより求めている。また、電流リード及びヘリウムの断面積、ノード長さは、各NODE毎にその値を入力することができる。

1. はじめに

核融合炉の実用化に向けて超電導コイルも大型化・大電流化が図られている。超電導コイルに電流を流す電流リードもそれに伴い大電流・高電圧化が必要となってきた。

電流リードは、一般に銅などの常電導金属で作られており、大電流を流すと電流リード自身がジュール発熱し、最悪の場合には、ジュール発熱により電流リード自身が溶解してしまう。また、電流リードは、常温部の電源と液体ヘリウム温度（約4K）にある超電導コイルを電気的に接続するものであるので、常温部から超電導コイルへ電流リード内を伝導で伝わる熱を出来る限り少なくする必要があり、通常ヘリウム・ガスによる冷却を行っている。しかし、本来ジュール発熱を小さくすることと低温部への熱侵入を小さくすることは相反するものであり、両者の兼ね合いを考慮して設計する必要がある。

今回開発した電流リード熱解析コード「CURRENT」は、ガス冷却型電流リードの熱的安定性を解析するものであり、これを用いて最適形状及び最適ガス流量を求めることができる。また、本解析コードでは、ガス流量が、冷凍システムの異常により変化してしまった場合等の過渡現象に対しても、電流リードの熱的動特性を解析できるように非定常計算が可能となっている。更に、本解析コードは、環状プレートフィン型等の特殊な構造を有する電流リードについても解析可能である。

なお、今回同時に「CURRENT」専用のグラフィックプログラム「CURRENTG」を作成しており、計算結果がより把握しやすいものとなっている。

2. 解析モデル

解析モデルとしては、図1に示すように電流リード（銅）とそれを冷却する冷媒（ヘリウム）とともに一次元モデルを考える。ノード番号0及びk+1は、それぞれ低温端及び高温端のNODEを表わす。境界条件として、低温端の圧力、電流リード温度、ヘリウム温度、及び高温端の圧力及び電流リード温度を与える。低温端から距離 x_n にある任意のNODEの圧力(P_n)は、低温端から高温端まで直線的に変化するものとして、

$$P_n = P_{in} + x_n (P_{in} - P_{out}) / \ell \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 P_{in} は入口圧力、 P_{out} は出口圧力及び ℓ は、電流リード全長を示す。

電流リード及びヘリウム各NODEの熱伝導度及び比熱は、温度の関数として取扱うものとし、ヘリウムの物性値は、ヘリウム物性プログラムより求めている。また、電流リード及びヘリウムの断面積、ノード長さは、各NODE毎にその値を入力することができる。

3. 解析基礎式

定常計算及び非定常計算における解析の基礎式として、電流リード及びヘリウム・ガスの長手方向の熱結合及び熱伝達による相互間熱結合を考慮したエネルギー・バランスを考える。

3.1 定常計算

3.1.1 ヘリウム・ガスのエネルギー・バランス

任意のヘリウム NODE n における熱流は、図 2 に示すように、 Q_1 （上流側から対流で伝えられるエネルギー）、 Q_2 （下流側へ対流で伝えられるエネルギー），及び Q_3 （電流リードから伝えられるエネルギー）であるので、それぞれ以下のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} Q_1 &= \dot{m} h_{n-1} \\ Q_2 &= \dot{m} h_n \\ Q_3 &= Pe \Delta x_n \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) \end{aligned}$$

これらの熱収支は、 $Q_1 - Q_2 + Q_3 = 0$ であるから

$$f(T_{He}) = \dot{m} (h_{n-1} - h_n) + Pe \Delta x_n \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) = 0 \quad (2)$$

で表わされる。なお、本文中における記号は、本報告書巻頭に添付する記号表に対応する。

3.1.2 電流リード・エネルギー・バランス

ヘリウムと同様に任意の NODE n の熱収支を図 3 に従って求める。ここで、

- Q_1 : 高温側より伝導で伝わる熱量
- Q_2 : 低温側に伝導で伝わる熱量
- Q_3 : ヘリウムに伝えられる熱量
- Q_4 : ジュール熱

であるので、それぞれの熱量は、以下の式で求められる。

$$Q_1 = \frac{2 A_{Cu}^n}{\frac{\Delta x_{n+1}}{\lambda_{Cu}^{n+1}} + \frac{\Delta x_n}{\lambda_{Cu}^n}} (T_{Cu}^{n+1} - T_{Cu}^n)$$

$$Q_2 = \frac{2 A_{Cu}^{n-1}}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_{Cu}^n} + \frac{\Delta x_{n-1}}{\lambda_{Cu}^{n-1}}} (T_{Cu}^n - T_{Cu}^{n-1})$$

$$Q_4 = Pe \Delta x_n \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n)$$

$$Q_4 = I^2 R$$

従って、エネルギー・バランスより

$$Q_1 - Q_2 - Q_3 + Q_4 = 0$$

$$\therefore f(T_{Cu}^n) = \frac{2A_{Cu}^n}{\Delta x_{n+1} + \Delta x_n} (T_{Cu}^{n+1} - T_{Cu}^n) - \frac{2A_{Cu}^{n-1}}{\Delta x_n + \Delta x_{n-1}} (T_{Cu}^n - T_{Cu}^{n-1}) - Pe \Delta x_n \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) + I^2 R = 0 \quad (3)$$

3.1.3 热伝達係数⁽¹⁾

(2)及び(3)式に用いる熱伝達係数 α_n については、以下のように与えるものとする。通常、熱伝達係数は、壁温一定あるいは熱流束一定の条件において求められている。例えば、定物性の層流の場合、壁温一定で、

$$\alpha = 3.65 \quad (4)$$

となるが、本計算の場合、壁温は軸方向に大きく変化するので、温度変化を考慮した熱伝達係数を用いる。

層流のエネルギー式は、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{u}{a} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

となる。

今、 $\theta = (T_w - T)/(T_w - T_e)$, $r^+ = r/r_0$, $u^+ = u/v$, $x^+ = (x/r_0)/(Re Pr)$ で無次元化すると(6)式となる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{+2}} + \frac{1}{r^+} \frac{\partial \theta}{\partial r^+} = \frac{u^+}{2} \frac{d\theta}{dx^+} \quad (6)$$

円管内の速度分布を $u = 2V \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right)$, $u^+ = 2(1 - r^{+2})$ と仮定すると

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{+2}} + \frac{1}{r^+} \frac{\partial \theta}{\partial r^+} = (1 - r^{+2}) \frac{\partial \theta}{\partial x^+} \quad (7)$$

となる。ここで、 $\theta = R(r^+) X(x^+)$ とすると

$$\theta(x^+, r^+) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n R_n(r^+) \exp(-\beta_n^2 x^+) \quad (8)$$

となる。 β_n は固有値で、 R_n は固有関数である。

従って、壁面における熱流束は、

$$q(x^+) = \frac{2\lambda}{r_0} \sum G_n \exp(-\beta_n^2 x^+) (T_w - T_e) \quad (9)$$

$$G_n = -(C_n/2) R'_n(1)$$

本計算において長さ方向の温度変化を図4のようにステップ状にn段階変化すると仮定すると、

$$T - T_e = \sum_{k=1}^n [1 - \theta(x_n^+ - x_k^+ r^+)] \Delta T_k \quad (10)$$

が成立する。このとき

$$q(x) = \frac{2\lambda}{r_0} \sum_{k=1}^n \left[\sum_{j=1}^{\infty} G_j \exp\{-\beta_j^2 (x_n^+ - x_k^+)\} \right] \Delta T_k \quad (11)$$

$$T_m - T_e = \frac{4r_0}{\lambda} \int_0^{x^+} q dx^+$$

より、

$$\begin{aligned} T_m - T_e &= 8 \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{\infty} (G_j / \beta_j^2) \Delta T_k - 8 \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} (G_j / \beta_j^2) \exp[-\beta_j^2 (x_n^+ - x_k^+)] \Delta T_k \\ &= T_0 - T_e - 8 \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} (G_j / \beta_j^2) \exp[-\beta_j^2 (x_n^+ - x_k^+)] \Delta T_k \end{aligned}$$

ここで、 $\sum_{j=1}^{\infty} (G_j / \beta_j^2) = 1/8$ であるから

$$T_0 - T_m = 8 \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} (G_j / \beta_j^2) \exp[-\beta_j^2 (x_n^+ - x_k^+)] \Delta T_k$$

故に、熱伝達率 α は、

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{q(x^+)}{T_0 - T_m} \\ &= \frac{\lambda}{4r_0} \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} G_j \exp[-\beta_j^2 (x_n^+ - x_k^+)] (T_k - T_{k-1})}{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\infty} (G_j / \beta_j^2) \exp[-\beta_j^2 (x_n^+ - x_k^+)] (T_k - T_{k-1})} \quad (12) \end{aligned}$$

となる。 (12) 式中の G_j β_j の値は表1により与えられる。

表1 (12)式における β 及び G の値

n	β	G
0	7.312	0.749
1	44.62	0.544
2	113.8	0.463
3	215.2	0.414
4	348.5	0.382

(12)式を導くにあたり物性値は、温度、圧力によらず一定であると考える。流れが乱流である場合にも、層流と同様に長さ方向の温度変化を考慮した熱伝達率を用いるべきであるが、乱流の場合、非常に複雑となるので便宜上 Dittus - Boelter の式(13)を用いる。

$$\alpha = \frac{r}{2r_0} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (13)$$

3.2 非定常計算

非定常計算における電流リード及びヘリウムのエネルギー・バランスは、時間の項を考慮して定常計算と同様な熱収支から以下のように求めることができる。

(ヘリウムのエネルギー・バランス)

$$\Delta x A_{He}^n \frac{d(\rho_{He}^n h_n)}{dt} - \dot{m}(h_{n-1} - h_n) - Pe \Delta x \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) = 0 \quad (14)$$

(電流リードのエネルギー・バランス)

$$\begin{aligned} & \Delta x A_{Cu}^n \rho_{Cu} \frac{d(C^n T_{Cu}^n)}{dt} + \frac{2 A_{Cu}^n}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_n} + \frac{\Delta x_{n+1}}{\lambda_{n+1}}} (T_{Cu}^{n+1} - T_{Cu}^n) \\ & - \frac{2 A_{Cu}^{n-1}}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_n} - \frac{\Delta x_{n-1}}{\lambda_{n-1}}} (T_{Cu}^n - T_{Cu}^{n-1}) - I^2 R + Pe \Delta x \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

非定常計算の場合の熱伝達係数 (α_n) は、定常計算と同じものを用いるものとする。

4. 計 算 手 順

4.1 定常計算

定常計算は、以下に述べる手順で行われる。

① 与えられた境界条件により各 NODE におけるヘリウム及び電流リードの各物性値を仮定する。

(圧 力) : 各 NODE における圧力は、(1)式で与えられるものとし以後の計算において変化しないものとする。

(温 度) : ヘリウム及び電流リードの各 NODE における値は入力とするか、または次式によって与える。

(12)式を導くにあたり物性値は、温度、圧力によらず一定であると考える。流れが乱流である場合にも、層流と同様に長さ方向の温度変化を考慮した熱伝達率を用いるべきであるが、乱流の場合、非常に複雑となるので便宜上 Dittus - Boelter の式(13)を用いる。

$$\alpha = \frac{r}{2r_0} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (13)$$

3.2 非定常計算

非定常計算における電流リード及びヘリウムのエネルギー・バランスは、時間の項を考慮して定常計算と同様な熱収支から以下のように求めることができる。

(ヘリウムのエネルギー・バランス)

$$\Delta x A_{He}^n \frac{d(\rho_{He}^n h_n)}{dt} - \dot{m}(h_{n-1} - h_n) - Pe \Delta x \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) = 0 \quad (14)$$

(電流リードのエネルギー・バランス)

$$\begin{aligned} \Delta x A_{Cu}^n \rho_{Cu} \frac{d(C^n T_{Cu}^n)}{dt} + \frac{2 A_{Cu}^n}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_n} + \frac{\Delta x_{n+1}}{\lambda_{n+1}}} (T_{Cu}^{n+1} - T_{Cu}^n) \\ - \frac{2 A_{Cu}^{n-1}}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_n} - \frac{\Delta x_{n-1}}{\lambda_{n-1}}} (T_{Cu}^n - T_{Cu}^{n-1}) - I^2 R + Pe \Delta x \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

非定常計算の場合の熱伝達係数 (α_n) は、定常計算と同じものを用いるものとする。

4. 計 算 手 順

4.1 定常計算

定常計算は、以下に述べる手順で行われる。

① 与えられた境界条件により各 NODE におけるヘリウム及び電流リードの各物性値を仮定する。

(圧 力) : 各 NODE における圧力は、(1)式で与えられるものとし以後の計算において変化しないものとする。

(温 度) : ヘリウム及び電流リードの各 NODE における値は入力とするか、または次式によって与える。

$$T_{He}^n = T_{Cu}^n = \exp \left[\log \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \frac{x_n}{\ell} + \log T_{in} \right] \quad (16)$$

(ヘリウム物性値)：ヘリウムの物性値は、温度と圧力より、ヘリウム物性副プログラムを用いて SUBROUTINE または FUNCTION 形式で求める。

(電流リード物性値)：熱伝導率と比抵抗については、温度の関数として入力し、補間して求める。比熱については次式で求める。

$$C = 1.08 \times 10^{-5} T_{Cu} + 7.48 \times 10^{-7} T_{Cu}^3 \quad (17)$$

② ヘリウム温度を求める。

仮定した温度 T_{Cu}^n , T_{He}^{n-1} , T_{He}^{n+1} から(2)式を満足するヘリウム温度 T_{He}^n を 2 分法を用いて求める。

③ 電流リード温度を求める。

仮定した電流リード温度 T_{Cu}^{n-1} , T_{Cu}^{n+1} と②で計算したヘリウム温度 T_{He}^n より(3)式を満足する T_{Cu}^n を 2 分法により求める。

④ 収束計算

②及び③で計算した T_{Cu}^n 及び T_{He}^n を用いて再び②, ③を計算し, T_{Cu}^n , T_{He}^n が収束判定値以内に入ったらその値を解とする。収束しない場合は収束するまで②, ③の計算を繰り返す。

4.2 非定常計算

非定常計算は、電流値 0 における定常計算結果をその初期値としてスタートする。(14)及び(15)式を変形して、

$$\frac{dT_{He}^n}{dt} = \frac{\dot{m} (h_{n-1} - h_n) + Pe \Delta x_n \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n)}{\rho_{He}^n \Delta x_n A_{He}^n C_{He}^n} \quad (18)$$

$$\frac{dT_{Cu}^n}{dt} = \left[\frac{2 A_{Cu}^n}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_{Cu}^n} + \frac{\Delta x_{n+1}}{\lambda_{Cu}^{n+1}}} (T_{Cu}^{n+1} - T_{Cu}^n) - \frac{2 A_{Cu}^{n-1}}{\frac{\Delta x_n}{\lambda_{Cu}^n} + \frac{\Delta x_{n-1}}{\lambda_{Cu}^{n-1}}} (T_{Cu}^n - T_{Cu}^{n-1}) \right. \quad (19)$$

$$\left. - Pe \Delta x_n \alpha_n (T_{Cu}^n - T_{He}^n) + I^2 R \right] / \left\{ \rho_{Cu} A_{Cu}^n \Delta x_n \left(C_{Cu}^n + \frac{\partial C_{Cu}}{\partial T_{Cu}} T_{Cu}^n \right) \right\}$$

となる。

各 NODE について(18)及び(19)式は成り立つので NODE 分割数 k の場合、合計 $2k$ 個の常微分方程式ができる。これを連立させてギア法⁽²⁾ またはアダムス法⁽²⁾ で解く。ギア法とアダムス法は常微分方程式のスティフ性により使い分ける。微分方程式が強スティフであるときギア法を用い、弱スティフあるいは非スティフである場合には、アダムス法を用いる。微分方程式のス

ティフ性がわからない場合はアダムス法を用いて解くとスティフ性が強い場合にはコンディション・コードが200となるので、あらためてギア法で解くとよい。

《スティフ性》

非線型微分方程式 $y' = f(x, y)$ がある区間 I で以下の条件を満たすとき、その方程式は区間 I でスティフであるという。

$$\operatorname{Re}(\lambda_i(x)) < 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad x \in I$$

$$\frac{\max(|\operatorname{Re}(\lambda_i(x))|)}{\min(|\operatorname{Re}(\lambda_i(x))|)} \gg 1 \quad x \in I \quad (20)$$

ここで、 $\lambda_i(x)$ はヤコビアン行列 $J = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$ の固有値である。

5. データ入力方法

データの入力は種々のパラメータを置き換える方法で行う。優先順位は、リストアトファイル(FT01F001), 通常の入力データ(FT05F001), そしてプログラム内のデオルト値の順である。通常の入力データは、1行に識別子とそれに対応するデータをひとつ入力する。識別子は、下記例のように頭から書き、ひとつ以上の空白をあけてデータを入力する。

(例) FLOW 0.5

オプション入力の場合は、下記のようにデータを2ヶ入力する。始めのデータがオプション番号で、2番目のデータがオプションスイッチである。

(例) OPTION 1 0

温度, NODE長さ, 断面積を入力で行うオプションを指定した場合は、識別子の次の行から(7E10.0)の書式でデータを入力する。銅の熱伝導率と比抵抗のテーブルを入力する時は、識別子のうしろにデータの組数を書き、次の行から(7E10.0)で温度データを、更に次の行から(7E10.0)で熱伝導率あるいは比抵抗を入力する。

(例) RESISTANCE 3
 4.E+00 10.E+00 20.E+00
 104.E-10 104.E-10 112.E-10

5.1 指定できるオプション

No. 1 計算方法の指定

= 0 定常計算のみを行う

ティフ性がわからない場合はアダムス法を用いて解くとスティフ性が強い場合にはコンディション・コードが200となるので、あらためてギア法で解くとよい。

《スティフ性》

非線型微分方程式 $y' = f(x, y)$ がある区間 I で以下の条件を満たすとき、その方程式は区間 I でスティフであるという。

$$\operatorname{Re}(\lambda_i(x)) < 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad x \in I$$

$$\frac{\max(|\operatorname{Re}(\lambda_i(x))|)}{\min(|\operatorname{Re}(\lambda_i(x))|)} \gg 1 \quad x \in I \quad (20)$$

ここで、 $\lambda_i(x)$ はヤコビアン行列 $J = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$ の固有値である。

5. データ入力方法

データの入力は種々のパラメータを置き換える方法で行う。優先順位は、リストアトファイル(FT01F001), 通常の入力データ(FT05F001), そしてプログラム内のデオルト値の順である。通常の入力データは、1行に識別子とそれに対応するデータをひとつ入力する。識別子は、下記例のように頭から書き、ひとつ以上の空白をあけてデータを入力する。

(例) FLOW 0.5

オプション入力の場合は、下記のようにデータを2ヶ入力する。始めのデータがオプション番号で、2番目のデータがオプションスイッチである。

(例) OPTION 1 0

温度, NODE長さ, 断面積を入力で行うオプションを指定した場合は、識別子の次の行から(7E10.0)の書式でデータを入力する。銅の熱伝導率と比抵抗のテーブルを入力する時は、識別子のうしろにデータの組数を書き、次の行から(7E10.0)で温度データを、更に次の行から(7E10.0)で熱伝導率あるいは比抵抗を入力する。

(例) RESISTANCE 3
 4.E+00 10.E+00 20.E+00
 104.E-10 104.E-10 112.E-10

5.1 指定できるオプション

No.1 計算方法の指定

= 0 定常計算のみを行う

= 1 定常計算と非定常計算を行う。

= 2 非定常計算のみを行う

No. 2 定常計算時の電流の有無

= 0 電流による発熱無し

= 1 電流による発熱有り

No. 3 NODE 分割法の指定

= 0 NODE の分割を一定ノード長さで自動的に行う

= 1 ノード長さ (Δx) を入力データで与える

No. 4 温度の初期設定の指定

= 0 温度の初期分布を(10式)により自動的に設定する

= 1 温度を入力データで与える

No. 5 非定常計算時の常微分方程式の解法の指定

= 0 ギア法

= 1 アダムス法

No. 6 非定常計算時の出力様式の指定

= 0 温度のみ出力

= 1 全物理量出力

No. 7 断面積の初期設定の指定

= 0 全ての NODE の断面積を平均値と同一とする

= 1 入力データで断面積を与える

No. 8 定常熱侵入量の有無の指定

= 0 热侵入無し

= 1 热侵入有り

(热侵入有りを指定した場合には、热侵入量を各NODE毎に入力する。)

No. 9 热伝達係数の指定

= 0 (12), (13)式を用いて計算

= 1 $Nu = 3.65$ を指定

No. 10 特殊モデル形状指定

= 0 通常モデル

= 1 フィンモデル

5.2 入力パラメータ

入力パラメータは、下記に示すとおりである。

TITLE	タイトル (60文字以内)
-------	---------------

NODE	ノード分割数
------	--------

CURRENT	電 流	(A)
---------	-----	-----

FLOW	質 量 流 量	(g/s)
------	---------	-------

LENGTH	流路長さ	[cm]
DIAMETER	水力直径	[cm]
PERIMETER	ペリメータ	[cm]
HEAREA	流路断面積	[cm ²]
CUAREA	銅断面積	[cm ²]
HIGHTEMP	高温端銅温度	[K]
LOWTEMP	低温端銅温度	[K]
HIGHATM	低温端圧力	[atm]
LOWATM	高温端圧力	[atm]
EPSIRONA	収束判定値	
EPSIRONR	収束判定値	
DELTATRATE	二分法解検索範囲	
N MAX1	二分法における反復上限値	
N MAX2	定常計算における反復上限値	
STIME	非定常計算開始時間	[sec]
DT	非定常計算タイムステップ	[sec]
TIMEMAX	非定常計算終了時間	[sec]
PRTINT	非定常計算出力タイムステップ	[sec]
CPUMAX	最大CPU時間	[sec]
FINDATA	フィンモデルに関するデータ	
CANG NODE	フィン寸法が変わるNODE番号	
RZERO	フィン根本半径	[cm]
PERIMETER	ペリメータ	[cm]
RE	フィン高さ半径	[cm]
HYDIAMETER	水力直径	[cm]
FINTHICKNESS	フィン厚さ	[cm]

注) フィンモデルに関しては、途中でフィン寸法が変わるものと想定する。従って、フィン厚さ以外は、2個ずつ11カラムからF10.3で入力すること。

各NODEに数値を入れる場合のパラメータ

CUTEMP	銅温度	[K]
HETEMP	ヘリウム温度	[K]
DX	ノード長さ	[cm]
AHE	ヘリウム流路断面積	[cm ²]
ACU	銅断面積	[cm ²]
HEATIN	周囲からの熱侵入	[W]

注) CUTEMP, HETEMP で温度を与えるときは、HIGHTEMP, LOWTEMP は、入力する必要はない。ACU, AHE で断面積を与えるときも同様に HEAREA, CUAREA は、入力する必要はない。温度及び断面積を各NODE毎に入力する場合は、必ず銅及びヘリウムの両方に入力しなければならない。例

えば、CUTEMPを入力して、HETEMPを入力しないということはできない。

6. 計算結果出力

計算結果の出力は、入力データ・計算結果の順序で出力される。

6.1 入力データの出力

入力データはサブルーチンPRINT1により次の順序で出力される。

1. タイトル	TITLE
2. NODE分割数	NODE
3. 電 流	CURRENT
4. 流 量	FLOW RATE
5. 流路長さ	FLOW LENGTH
6. 水力直 径	HYDORORIC DIAMETER
7. ペリメータ	PERIMETER
8. 銅の密 度	CU DENSITY
9. 非定常計算における計算終了時間	MAXIMUM TIME
10. タイムステップ	TIME STEP
11. 出力インターバル	PRINT INTERVAL
12~21. オプション	OPTION
22. 最大許容相対収束誤差	RELATIVE ERROR
23. 最大許容絶対収束誤差	ABSOLUTE ERROR
24. 二分法解検索温度範囲	DELTA T RATE
25. 最大C.P.U時間	MUXIMUM CPUTIME
26. 二分法最大繰り返し回数	NMAX1
27. 定常計算最大繰り返し回数	NMAX2
28. 銅の熱伝導率及び抵抗	

なお、フィンモデルの場合にはオプションの前にフィン形状が出力される。

フィン寸法が変わるNODE番号	CHANGE NODE
フィン根元半径	RZERO
フィン先端半径	RE
ペリメータ	PERIMETER
水力直 径	DIH
フィン厚み	FINTHICKNESS

以上の出力の後、NODE位置・銅断面積・ヘリウム流路断面積・最初に仮定された銅及びヘリウムの温度・圧力・定常侵入熱が各NODEごとに出力される。

えば、CUTEMPを入力して、HETEMPを入力しないということはできない。

6. 計算結果出力

計算結果の出力は、入力データ・計算結果の順序で出力される。

6.1 入力データの出力

入力データはサブルーチン PRINT1 により次の順序で出力される。

1. タイトル	TITLE
2. NODE 分割数	NODE
3. 電 流	CURRENT
4. 流 量	FLOW RATE
5. 流路長さ	FLOW LENGTH
6. 水力直径	HYDORORIC DIAMETER
7. ペリメータ	PERIMETER
8. 銅の密度	CU DENSITY
9. 非定常計算における計算終了時間	MAXIMUM TIME
10. タイムステップ	TIME STEP
11. 出力インターバル	PRINT INTERVAL
12~21. オプション	OPTION
22. 最大許容相対収束誤差	RELATIVE ERROR
23. 最大許容絶対収束誤差	ABSOLUTE ERROR
24. 二分法解検索温度範囲	DELTA T RATE
25. 最大CPU時間	MUXIMUM CPUTIME
26. 二分法最大繰り返し回数	NMAX1
27. 定常計算最大繰り返し回数	NMAX2
28. 銅の熱伝導率及び抵抗	

なお、フィンモデルの場合にはオプションの前にフィン形状が出力される。

フィン寸法が変わるNODE番号	CHANGE NODE
フィン根元半径	RZERO
フィン先端半径	RE
ペリメータ	PERIMETER
水力直径	DIH
フィン厚み	FINTHICKNESS

以上の出力の後、NODE位置・銅断面積・ヘリウム流路断面積・最初に仮定された銅及びヘリウムの温度・圧力・定常侵入熱が各NODEごとに出力される。

6.2 計算結果出力

6.2.1 定常計算

定常計算の場合には、計算の終了の種類として、異常終了・計算時間オーバ・そして正常終了の3種類があり、それに合わせた出力がされる。

a) 正常終了

正常終了の場合、以下のような出力が行われる。

定常計算繰り返し回数	ITERATION COUNT
低温端侵入熱	Q
全ジュール発熱量	CURRENT HEAT TOTAL
銅の全抵抗	TOTAL RESISTANCE

また次の量が各NODEごとに出力される。

NODE位置	POSITION
NODE長さ	LENGTH
熱伝達係数	ALPHA
銅からヘリウムへの伝熱量	COOLING
銅において低温側のNODEに伝導で伝わる熱量	QCOND
ヌセルト数	NUSSELT
プラントル数	PRANDTLE
レイノルズ数	REYNOLDSE

次に銅に関して次の量が各NODEについて出力される。

温 度	TEMP
断面積	PHASE
熱伝導率	LAMDA
比 熱	CP
抵 抗	RESISTANCE
ジュール熱	HEATI
エネルギーバランス	BALANCE

最後にヘリウムに関して次の量が各NODEについて出力される。

温 度	TEMP
エンタルピ	ENTHALPY
熱伝導率	LAMDA
定圧比熱	CP
密度	DENSITY
粘性係数	VISCOSITY
エネルギーバランス	BALANCE

b) 計算時間オーバ

定常計算の繰り返しで、最大C P U時間内において、

$$| (T - T_{\text{old}}) / T_{\text{old}} | < \epsilon_R$$

21

T : 新しい温度

T_{old} : 繰り返し計算における 1 回前の温度

ϵ_R : 最大許容相対収束誤差

を満足しなかった場合、最も新しい温度が出力される。

その場合、TIME OVER のメッセージとともに、He 及び銅に関する

$$\max(|(T - T_{\text{old}}) / T_{\text{old}}|)$$

の値が出力された後、正常終了と同様な出力がされる。

c) 異常終了

異常終了の場合は、エラーが発生した場所とその内容を出力する。

6.2.2 非定常計算

非定常計算の場合には、各出力時間について、定常計算の結果出力と同じ形式の出力をするものと、途中の時間については、ヘリウム及び銅の各 NODE の温度だけを出力し、最終時間のみについて定常計算の結果出力と同じ形式の出力をするものとがある。これは入力時に OPTION 6 で指定する。

6.3 グラフ出力

本計算コード「CURRENT」の計算結果は、グラフ出力プログラム「CURRENTG」により下記の種類のグラフとして出力することができる。

- ① 定常解または非定常解における最終時間の銅及びヘリウムの温度分布
- ② 銅及びヘリウムの温度分布の時間変化
- ③ 銅及びヘリウムの温度・時間・距離の 3 次元表示
- ④ 特定 NODE における銅及びヘリウム温度の時間変化

なお、グラフ出力プログラムは、グラフィック用サブルーチンとして ARGUS-V4 を使用している。上記グラフ出力の選択は、以下のように、1 行にひとつの整数を入力することにより行うことができる。

- = 0 最終時間の銅及びヘリウムの温度分布
- = -1 時間毎に出力された銅の温度分布
- = -2 時間毎に出力されたヘリウムの温度分布
- = -3 銅に関する温度・時間・距離の 3 次元表示
- = -4 ヘリウムに関する温度・時間・距離の 3 次元表示
- > 0 特定 NODE における銅とヘリウムの温度の時間変化、入力した数が NODE 番号となる。

7. リスタートファイル

リスタートファイルは、定常計算、非定常計算にかかわらず計算が異常終了しなければ作成される。リスタートファイルの出力形式は、入力データセットの書式と全く同一であり、これを用いて再度計算を行うことができる。

7.1 定常計算

定常計算において TIME OVERで終了した時、リスタートファイルを新たな入力データセットとして計算を行う。リスタートファイルには、定常繰り返し計算の最終の銅及びヘリウムの温度がNODE毎に出力されているので、もし前回の計算の時、温度分布を自動設定にしていた場合、リスタートファイルのOPTION 4の入力値を必ず1に書き直してから実行しなければならない。

7.2 非定常計算

非定常計算の場合には、リスタートファイルを、そのままFT01のファイルに割りあてればよい。リスタートファイルが割りあてられると、入力データセットは、無視されるので、最初の入力データセットをそのまま入力データセットにしていても問題はない。

8. プログラムの構成

本計算コードはMAINと19個の副プログラムにより構成される。

プログラムツリーは以下に示すとおりである。

7. リスタートファイル

リスタートファイルは、定常計算、非定常計算にかかわらず計算が異常終了しなければ作成される。リスタートファイルの出力形式は、入力データセットの書式と全く同一であり、これを用いて再度計算を行うことができる。

7.1 定常計算

定常計算においてTIME OVERで終了した時、リスタートファイルを新たな入力データセットとして計算を行う。リスタートファイルには、定常繰り返し計算の最終の銅及びヘリウムの温度がNODE毎に出力されているので、もし前回の計算の時、温度分布を自動設定にしていた場合、リスタートファイルのOPTION 4の入力値を必ず1に書き直してから実行しなければならない。

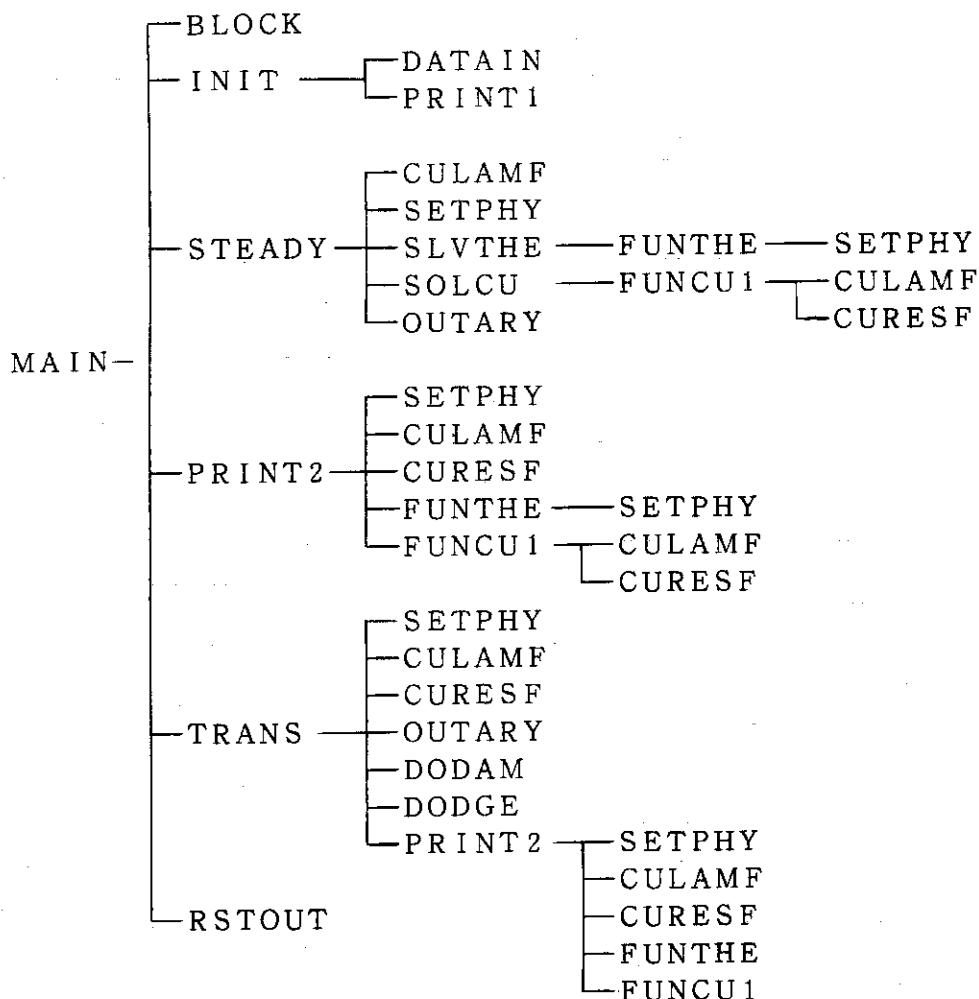
7.2 非定常計算

非定常計算の場合には、リスタートファイルを、そのままFT01のファイルに割りあてればよい。リスタートファイルが割りあてられると、入力データセットは、無視されるので、最初の入力データセットをそのまま入力データセットについてても問題はない。

8. プログラムの構成

本計算コードはMAINと19個の副プログラムにより構成される。

プログラムツリーは以下に示すとおりである。



各ルーチンの機能は、以下に示すとおりである。

(1) BLOCK

モジュールタイプ ブロックデータ

機 能 コモンデータにデフォルト値を設定する。
リストアットファイルや入力データで指定しなかったデータは、ここで設定された値となる。

(2) CULAMF

モジュールタイプ ファンクション

呼出形式 CULAMF(T) (W/m・K)

T : 銅 温 度 (K)

機 能 表形式で入力された熱伝導率と温度より内挿して、入力引数である温度に対する熱伝導率を求める。

(3) CURESF

モジュールタイプ ファンクション

呼出形式 CURESF(T) ($\Omega \cdot \text{cm}$)

T : 銅 温 度 (K)

- 機 能 表形式で入力された比抵抗と温度より内挿して、引数である温度に
対する比抵抗を求める。
- (4) DATAIN
- モジュールタイプ サブルーチン
- 呼出形式 CALL DATAIN(IU)
- IU : 入力データファイルの論理機番
- 機 能 入力データを読み込む。
- (5) FUNCU1
- モジュールタイプ ファンクション
- 呼出形式 FUNCU1(TEMP, I)
- I : NODE番号
- TEMP : 銅 温 度 (K)
- 機 能 銅のエネルギーバランスを計算する。(3式)
- (6) FUNTHE
- モジュールタイプ ファンクション
- 呼出形式 FUNTHE(I, TEMP)
- I : NODE番号
- TEMP : ヘリウム温度 (K)
- 機 能 ヘリウムのエネルギーバランスを計算する。(2式)
- (7) INIT
- モジュールタイプ サブルーチン
- 呼出形式 CALL INIT
- 機 能 入力データの読み込み。
NODEの設定
温度分布の設定
- (8) JAC
- モジュールタイプ サブルーチン
- 機 能 ギア法(DODGE)のためのダミールーチン
- (9) MAIN
- モジュールタイプ メイン
- 機 能 入力データより定常もしくは非定常の計算を行って最終結果をファイルに出力する。
- (10) OUTARY
- モジュールタイプ サブルーチン
- 呼出形式 CALL OUTARY(ID, ARY, NS, NE)
- ID : 変数のタイトル。8文字
- ARY : 出力される配列
- NS : スタート番号

- NE : エンド番号
機能 配列を出力する。
- (1) PRINT 1
モジュールタイプ サブルーチン
呼出形式 CALL PRINT 1
機能 モデル形状のデータ温度の初期値などの計算条件を出力する。
- (2) PRINT 2
モジュールタイプ サブルーチン
呼出形式 CALL PRINT 2 (II)
II : 電流のフラグ
= 0 (電流値 = 0)
= 1 (電流値 ≠ 0)
機能 各NODEの全物性値を出力する。
- (3) RSTOUT
モジュールタイプ サブルーチン
呼出形式 CALL RSTOUT
機能 リスタートファイル (FT02F001)への出力を行う。
- (4) SETPHY
モジュールタイプ サブルーチン
呼出形式 CALL SETPHY (I, TEMP)
I : NODE番号
TEMP : ヘリウム温度 (K)
機能 ヘリウムの物性値を計算する。求められる物性値は以下のとおりである。
エンタルピ (HENTA) (J/g)
密度 (RHOHE) (g/cm³)
定圧比熱 (CPHE) (J/g·K)
粘性係数 (RMU) (g/cm·s)
熱伝導率 (HELAMD) (W/cm·K)
レイノルズ数 (REN) (—)
プラントル数 (PRU) (—)
ヌセルト数 (RNUS) (—)
熱伝達係数 (ALPHAN) (W/cm²·K)
- (5) SLVTHE
モジュールタイプ サブルーチン
呼出形式 CALL SLVTHE (I, DELTA, NIT)
I : NODE番号
DELTA : ΔT_{He} $f(T_{He}) = 0$ となる T_{He} を捜す範囲

- NIT : 繰り返し回数
 機能 定常計算においてヘリウムの熱バランスを二分法を用いて解く。
 注) 求められる温度範囲は $4.4 \leq T_{He} \leq 400$ (K) である。
- (16) SOLCU
 モジュールタイプ サブルーチン
 呼出形式 CALL SOLCU(I, DELTAC, NIT)
 I : NODE番号
 DELTAC : ΔT_{Cu} $f(T_{Cu}) = 0$ となる T_{Cu} を捜す範囲
 NIT : 繰り返し回数
 機能 定常計算において銅の熱バランスを二分法を用いて解く。
 注) 求められる温度範囲は $4.4 \leq T_{Cu} \leq 450$ (K) である。
- (17) STEADY
 モジュールタイプ サブルーチン
 呼出形式 CALL STEADY
 機能 定常計算を行う。
- (18) SUBX
 モジュールタイプ サブルーチン
 呼出形式 CALL SUBX(X, Y, YP)
 X : 時間
 Y : 銅及びヘリウムの温度
 YP : 微係数
 機能 常微分方程式の微係数を与える。
- (19) TRANS
 モジュールタイプ サブルーチン
 呼出形式 CALL TRANS
 機能 非定常計算を行う。
- (20) DODGE, DODAM
 モジュールタイプ サブルーチン
 機能 ギア法(DODGE), アダムス法(DODAM)のためのサブルーチン。

なお、主要ルーチンのフローチャートを図6～図15に示す。

9. 使　用　例

9.1 J C L

CURREN 及びグラフィックプログラム CURRENTG の J C L は、それぞれ表 2(a)及び(b)に示すとおりである。

9.2 入力データ

入力データ例を表 3 に示す。フィンモデルの場合の入力データ例についても一緒に示してある。

9.3 計算結果

表 3 に示す入力データ（通常モデル）の場合の計算結果を図16に示す。この場合、入力データで OPTION 1 を 0 としているので定常計算のみの出力となる。参考のために、非定常計算でのグラフ出力例を図17に示す。

謝　　辞

本計算コードの作成にあたり御指導をいただきました九州大学工学部伊藤猛宏教授に深く感謝致します。

参　考　文　献

- 1) W.M.Kays 「Convective heat and mass transfer」 McGraw-Hill Book Company
- 2) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書
- 3) 西川兼康、藤田恭伸「伝熱学」理工学社

9. 使 用 例

9.1 J C L

CURREN 及びグラフィックプログラム CURRENTG の J C L は、それぞれ表 2(a)及び(b)に示すとおりである。

9.2 入力データ

入力データ例を表 3 に示す。フィンモデルの場合の入力データ例についても一緒に示してある。

9.3 計算結果

表 3 に示す入力データ（通常モデル）の場合の計算結果を図16に示す。この場合、入力データで OPTION 1 を 0 としているので定常計算のみの出力となる。参考のために、非定常計算でのグラフ出力例を図17に示す。

謝 詞

本計算コードの作成にあたり御指導をいただきました九州大学工学部伊藤猛宏教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) W.M.Kays 「Convective heat and mass transfer」 McGraw-Hill Book Company
- 2) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書
- 3) 西川兼康、藤田恭伸「伝熱学」理工学社

9. 使 用 例

9.1 J C L

CURREN 及びグラフィックプログラム CURRENTG の J C L は、それぞれ表 2(a)及び(b)に示すとおりである。

9.2 入力データ

入力データ例を表 3 に示す。フィンモデルの場合の入力データ例についても一緒に示してある。

9.3 計算結果

表 3 に示す入力データ（通常モデル）の場合の計算結果を図16に示す。この場合、入力データで OPTION 1 を 0 としているので定常計算のみの出力となる。参考のために、非定常計算でのグラフ出力例を図17に示す。

謝 詞

本計算コードの作成にあたり御指導をいただきました九州大学工学部伊藤猛宏教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) W.M.Kays 「Convective heat and mass transfer」 McGraw-Hill Book Company
- 2) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書
- 3) 西川兼康、藤田恭伸「伝熱学」理工学社

付録 環状四角フィン型モデル⁽³⁾

本解析コード CURRENTは、通常型電流リードの他に、環状四角フィン型電流リードの熱解析を行うことができる。

ヘリウムと銅に関する定常エネルギー式は(2), (3)式より

$$f(T_{He}) = \dot{m}(h_n - h_{n-1}) + Q_{He-Cu} = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} f(T_{Cu}) = & \frac{2 A_{Cu}^n}{\Delta x_{n+1} + \Delta x_n} (T_{Cu}^{n+1} - T_{Cu}^n) - \frac{2 A_{Cu}^{n-1}}{\Delta x_n + \Delta x_{n-1}} (T_{Cu}^n - T_{Cu}^{n-1}) \\ & - Q_{He-Cu} + I^2 R = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 Q_{He-Cu} は、銅からヘリウムへ伝えられる熱量である。

図5のような環状四角フィンからの伝熱量は、自由端での熱交換を無視すると、

$$Q_{He-Cu} = 2 \pi r_\ell q \lambda s \theta_0 \left[\frac{K_1(sr_\ell) I_1(sr_e) - I_1(sr_\ell) K_1(sr_e)}{K_0(sr_\ell) I_1(sr_e) + I_1(sr_\ell) K_1(sr_e)} \right] \quad (24)$$

$$\text{ここで } S = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \delta}}$$

であり、 I_0 及び I_1 は0次及び1次の第一種変形ベッセル関数であり、 K_0 及び K_1 は0次及び1次の第二種変形ベッセル関数である。

なお、熱伝達係数は半径 r_ℓ の円柱と流体との値を用いるものとする。

フィンが無い部分の伝熱量は

$$Q_{He-Cu} = Pe \Delta x \alpha (T_{Cu} - T_{He})$$

で与えられる。

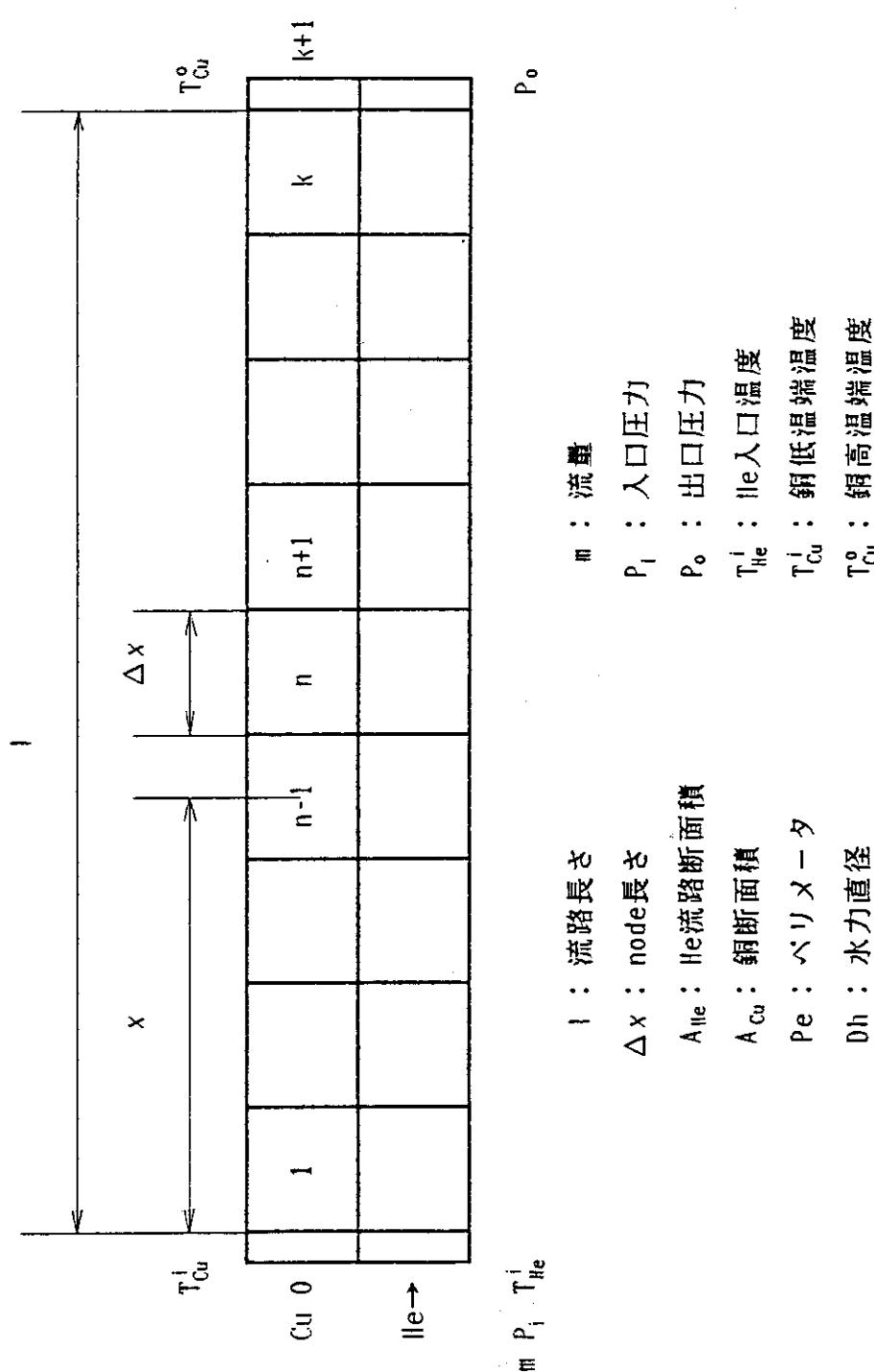


図 1 計算モデル

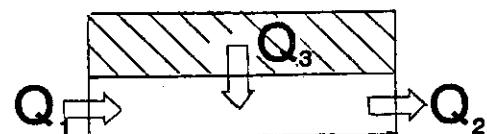


図2 ヘリウムのエネルギーバランス

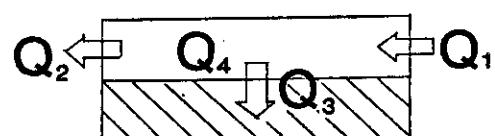


図3 銅のエネルギーバランス

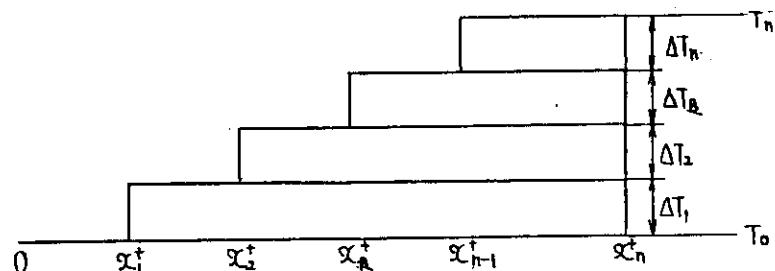


図4 溫度分布

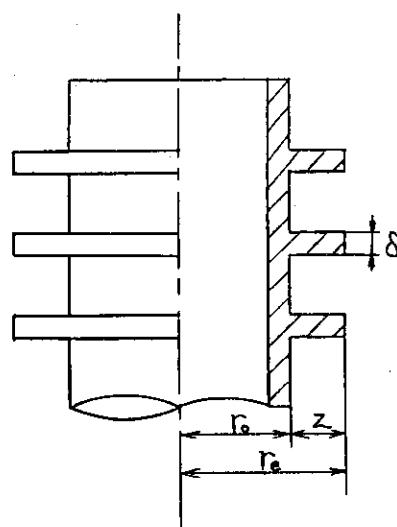
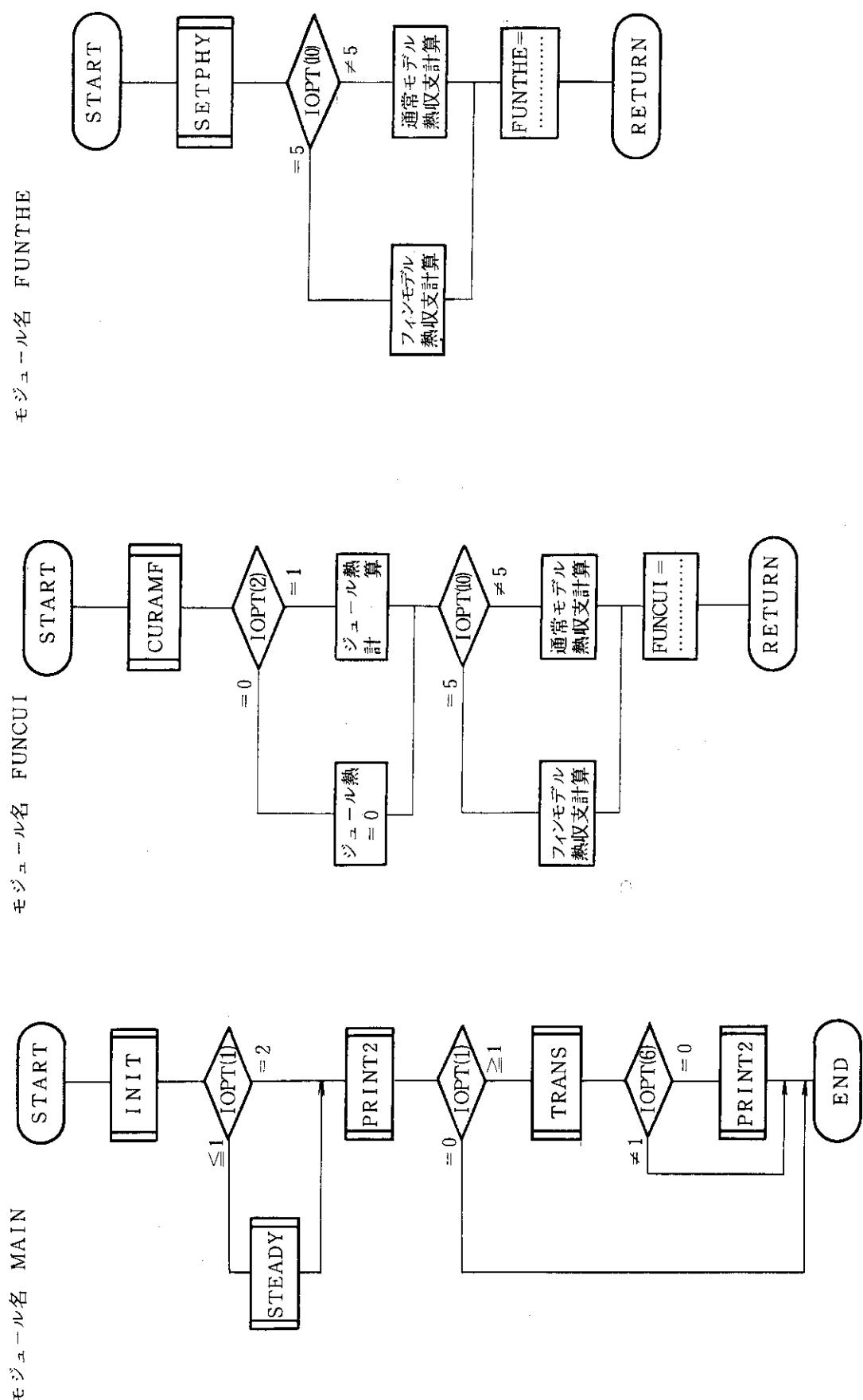


図5 フィンモデル



FUN THE フロー チャート

図 7 FUNCUI フローチャート

図6 MAIN フローチャート

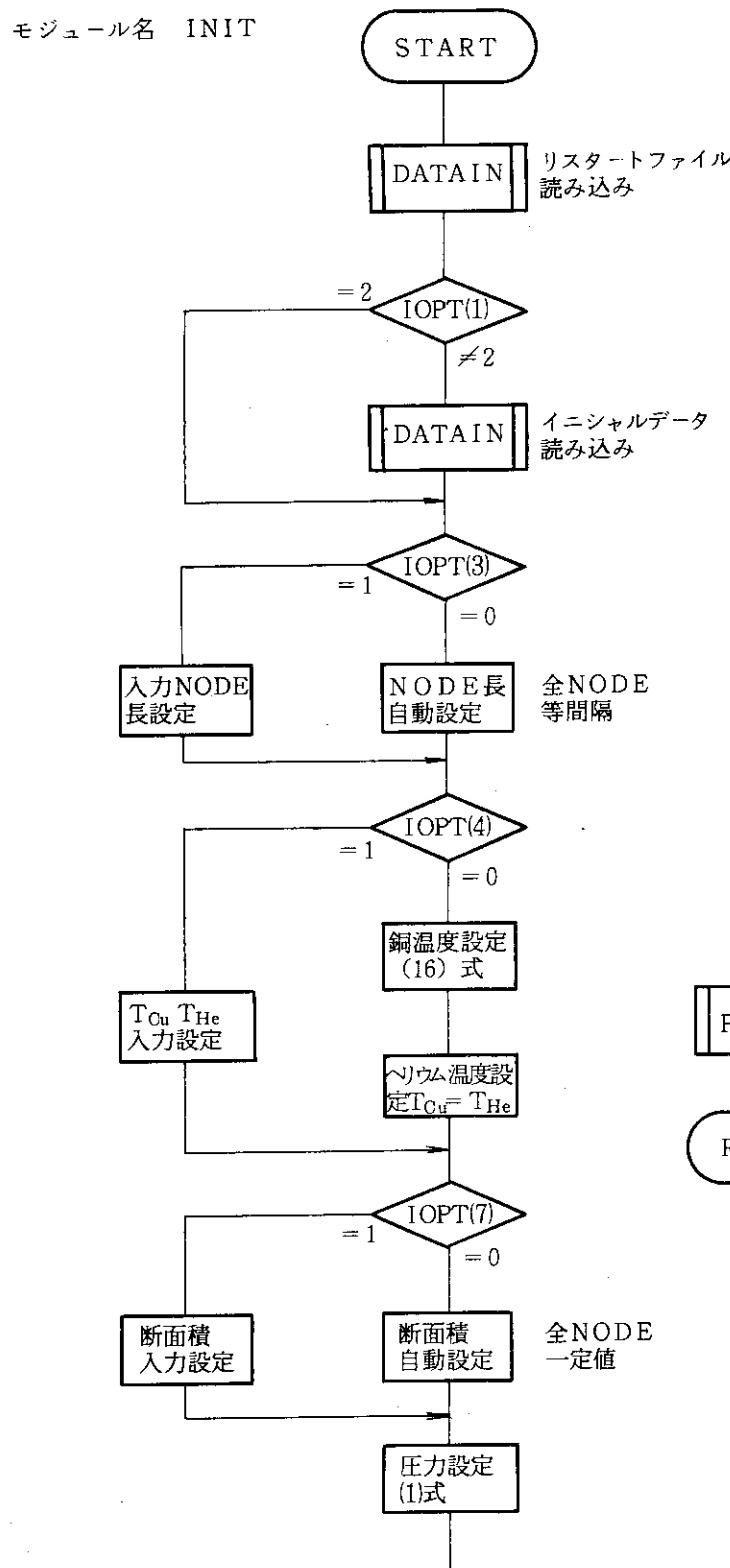


図 9 INIT フローチャート

モジュール名 SETPHY

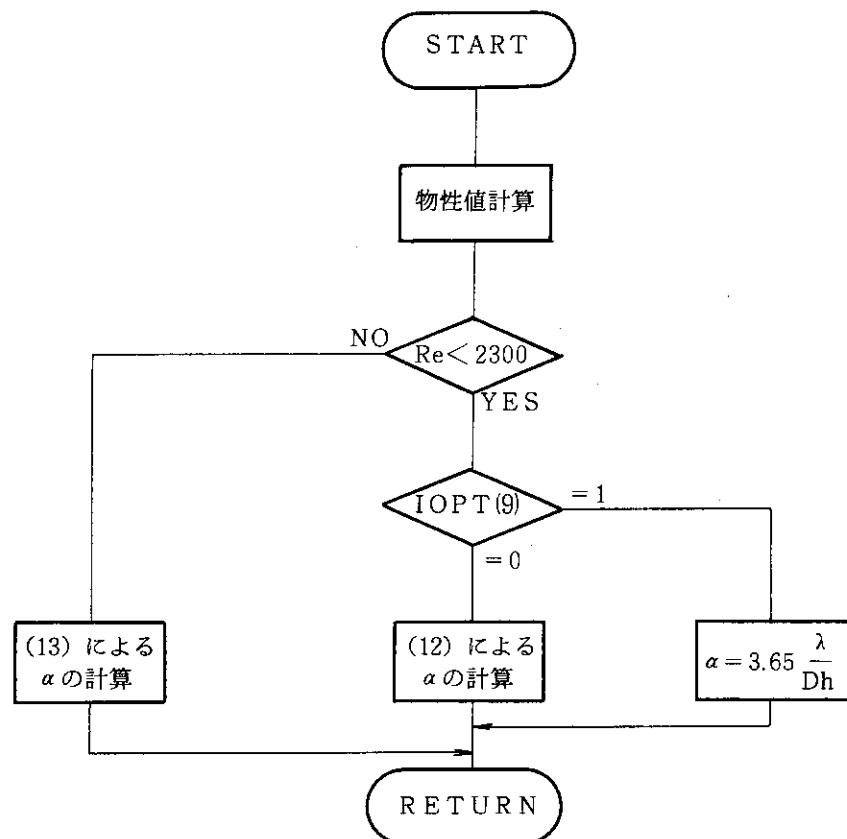


図10 SETPHY フローチャート

モジュール名 SLUTHE

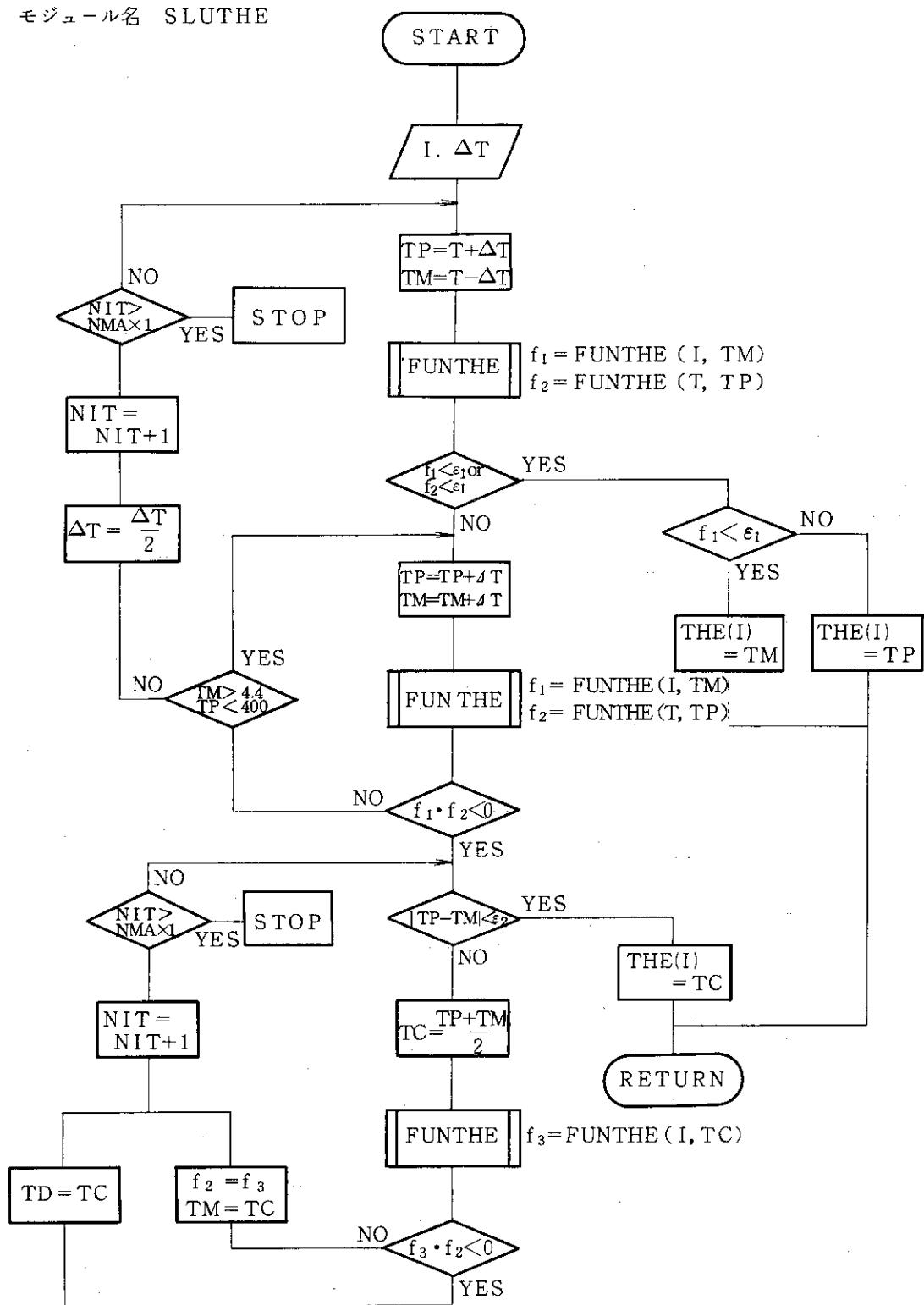


図11 SLVTHE フローチャート

モジュール名 SOLCU

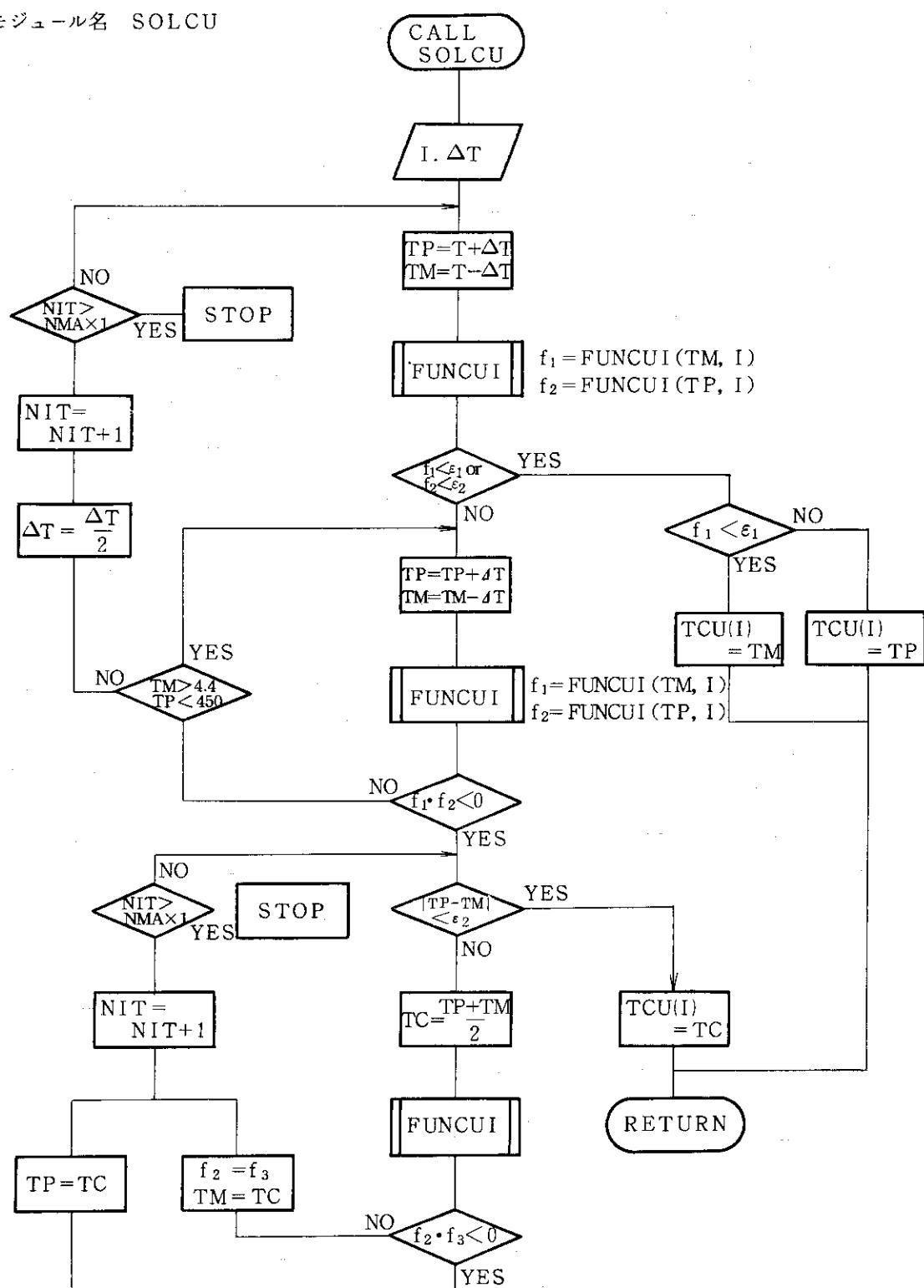


図12 SOLCU フローチャート

モジュール名 STEADY

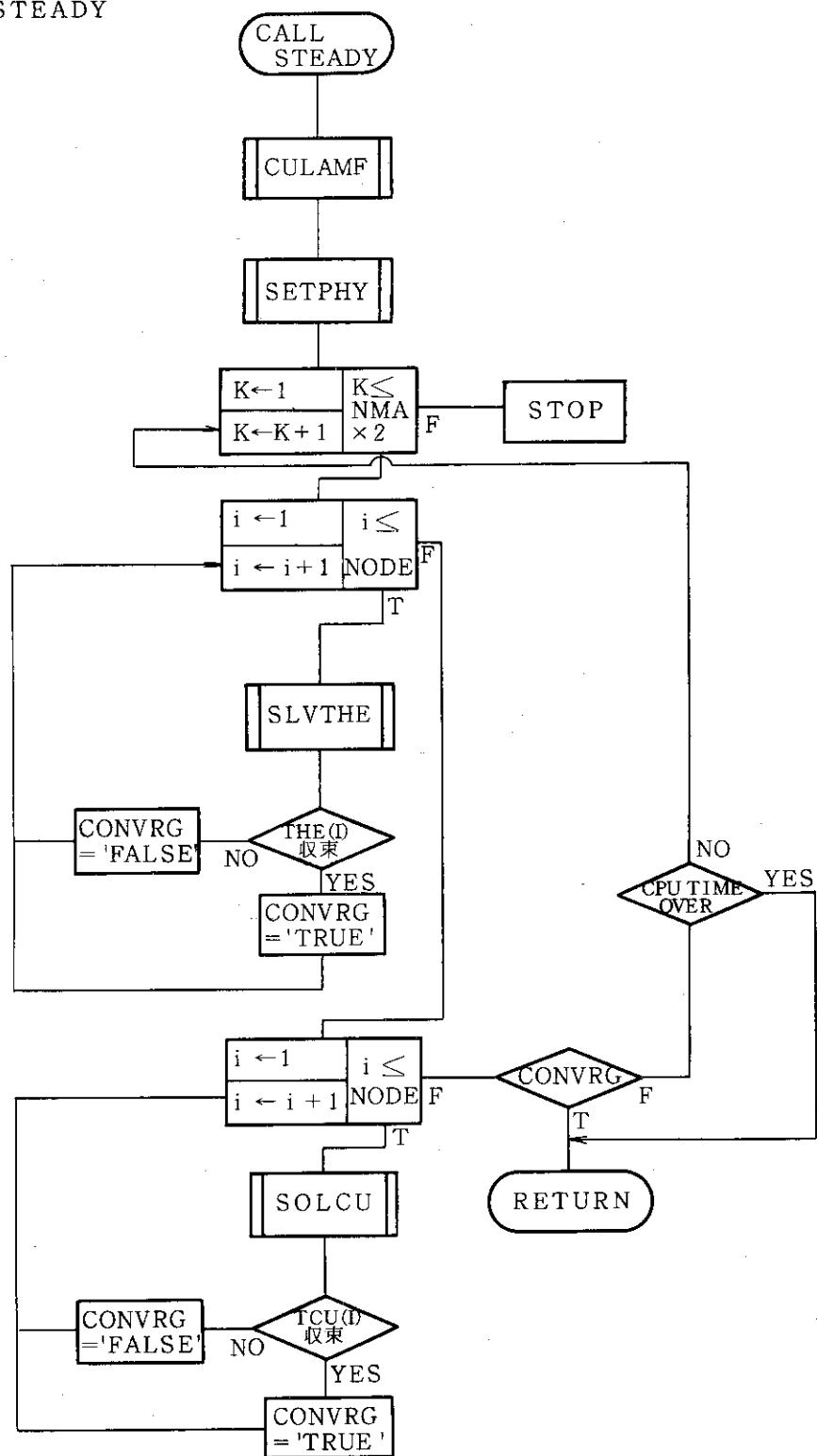


図13 STEADY フローチャート

モジュール名 SUBX

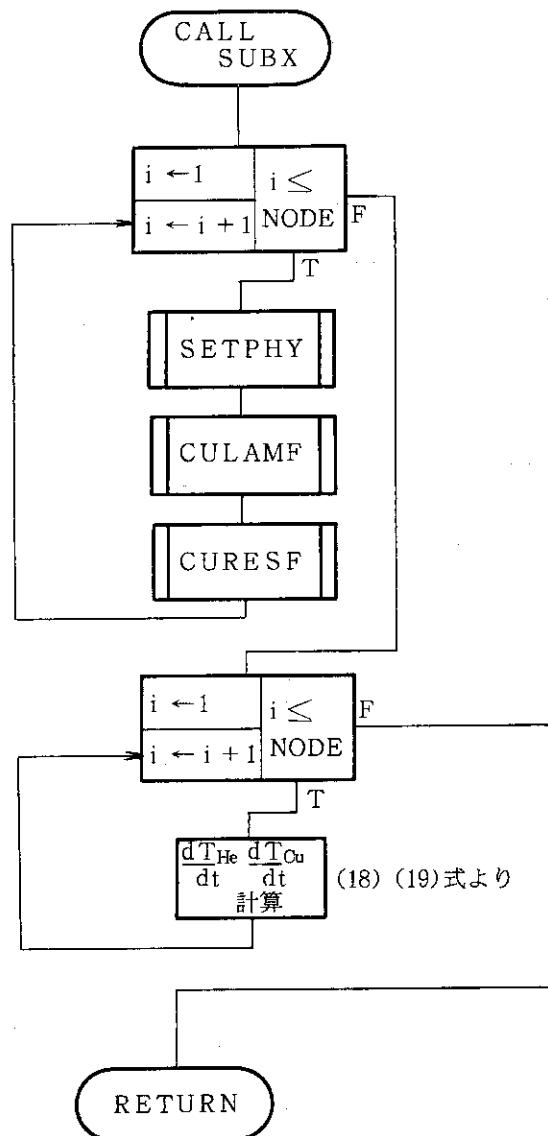


図14 SUBX フローチャート

モジュール名 TRANS

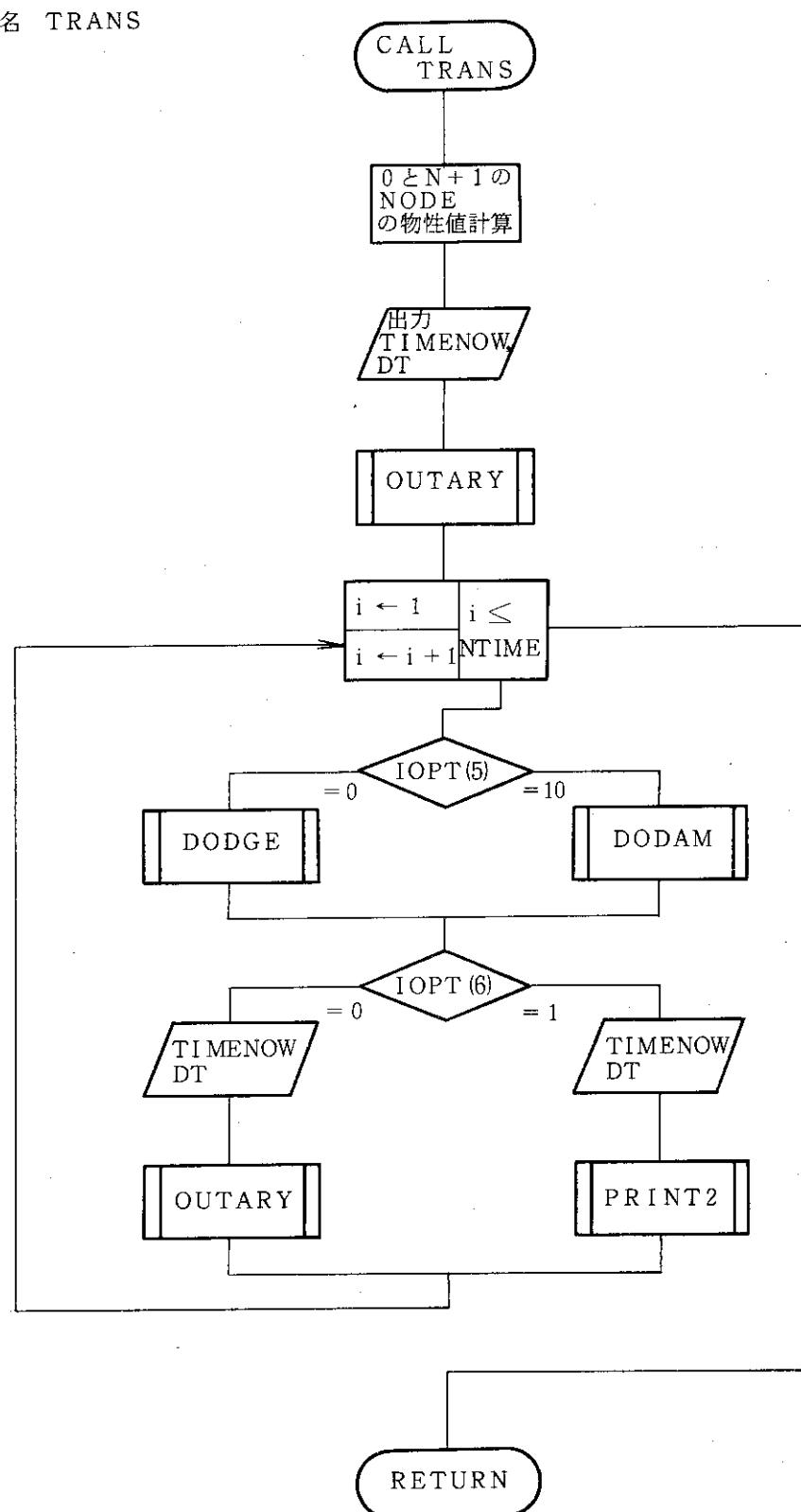


図15 TRANS フローチャート

表2 J C L 例

(a) CURRENT JCL プログラム

(b) CURRENTG JCLプログラム

```

//JCLG      JOB
//          EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 95743325,EI.TADA,0035.01
   T.3 W.1 I.3 C.4 P.0    GRP
  OOPTP PASSWORD=*
//*
//*      *****
//*      ***** GROUT *****
//*      *****
//*
//FORT77 EXEC FORT77,SO='J3325.CURRENTG',B='ELM(*)'
//FORT77.SYSINC DD DSN=J3325.INCLCU.FORT77,DISP=SHR
//FORT77 EXEC FORT77,SO='J3325.CURRENT',DISP=MOD,
//          B='ELM(DATAIN)'
//FORT77.SYSINC DD DSN=J3325.INCLCU.FORT77,DISP=SHR
//LINK    EXEC LKED77,PRVLIB='J2636.ARGLIBV4',GRLIB=PNL,
//          MOD='50,20,1'
//RUN     EXEC GO
// EXPAND GRNLN,SYSPUT=E
// EXPAND DISKTO,DDN=FT02F001,DSN='J3325.DATA01' (定常計算出力ファイル)
// EXPAND DISKTO,DDN=FT03F001,DSN='J3325.DATA03' (非定常計算出力ファイル)
// EXPAND DISK,DDN=FT96F001
// EXPAND DISK,DDN=FT97F001
// EXPAND DISK,DDN=FT98F001,SPC='(30,10)',UNIT=TSSWK
// EXPAND DISK,DDN=FT99F001

14 }--> ARGUS-V4画面制御
30,14,1 }--> ARGUS-V4画面制御
-1
-2
-3
-4           入力データ
1
10
20
30
0
++
//
```

表3 入力データ例

TITLE 15KA CURRENT LEAD VOID FRACTION 20% (RRR=100) 00000100
 NODE 36 00000200
 CURRENT 15000. 00000300
 FLOW 0.750 00000400
 LENGTH 210.0 00000500
 DIAMETER 0.0484 00000600
 PERIMETER 360.0 00000700
 HEAREA 4.50 00000800
 CUAREA 18.00 00000900
 HIGHATM 1.20 00001000
 LOWATM 1.00 00001100
 OPTION 1 0 00001200
 OPTION 2 1 00001300
 OPTION 3 1 00001400
 OPTION 4 1 00001500
 OPTION 7 0 00001600
 OPTION 8 0 00001700
 OPTION 9 0 00001800
 OPTION 10 0 00001900
 NMAX1 5000 00002000
 NMAX2 1000 00002100
 EPSIRONA 3.5E-3 00002200
 EPSIRONR 1.5E-3 00002300
 CPUMAX 1200. 00002400
 DELTATRATE 0.01 00002500
 DT 0.01 00002600
 PRTINT 240.0 00002700
 TIMEMAX 2400.0 00002800
 CUTEMP 00002900
 HETEMP
 4.4000 4.6073 4.8622 5.0706 5.2326 5.4483 5.6175 00003000
 6.1251 8.2741 11.2806 15.1448 19.8665 25.4459 31.8828 00003100
 39.1774 47.3295 56.3393 66.2066 76.9316 88.5141 100.9543 00003200
 114.2520 128.4074 143.4203 159.2909 176.0190 193.6048 212.0481 00003300
 231.3491 251.5076 264.5422 269.8499 275.2111 280.6259 286.0943 00003400
 291.6164 297.1920 300.0000 00003500
 CULAMDA 16 00003600
 4.4000 4.4033 4.4522 4.5606 4.7226 4.9383 5.2075 00003700
 6.1051 8.2541 11.2606 15.1248 19.8465 25.4259 31.8628 00003800
 39.0774 47.2295 56.2393 66.1066 76.8316 88.4141 100.8543 00003900
 114.1520 128.3074 143.3203 159.1909 175.4190 193.0048 211.4481 00004000
 230.7491 251.0076 264.0422 269.1499 275.0111 280.4259 285.8943 00004100
 290.6164 296.1920 296.1920 00004200
 00004300
 4.E+00 5.E+00 6.E+00 7.E+00 8.E+00 9.E+00 10.E+00 00004400
 12.E+00 14.E+00 16.E+00 18.E+00 20.E+00 30.E+00 50.E+00 00004500
 100.E+00 273.E+00 00004600
 623.E-02 780.E-02 919.E-02 1080.E-02 1230.E-02 1380.E-02 1520.E-02 00004700
 1780.E-02 2000.E-02 2180.E-02 2300.E-02 2380.E-02 2070.E-02 979.E-02 00004800
 469.E-02 397.E-02 00004900
 RRR 100 00005000
 RESISTANCE 6 00005100
 4.E+00 10.E+00 20.E+00 50.E+00 100.E+00 273.E+00 00005200
 157.E-10 157.E-10 165.E-10 657.E-10 366.E-09 157.E-08 00005300
 DX 00005400
 1.E-03 2.E+00 2.E+00 2.E+00 2.E+00 2.E+00 2.E+00 00005500
 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 00005600
 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 00005700
 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 8.E+00 00005800
 8.E+00 8.E+00 2.E+00 2.E+00 2.E+00 2.E+00 2.E+00 00005900
 2.E+00 2.E+00 1.E-03 00006000

フィンモデルの場合

FINDATA							
CANGE NODE	53						
RZERO	1.300	1.840					
PERIMETER	8.170	11.560					
RE	4.740	4.800					

15KA CURRENT LEAD VOID FRACTION 20%
 CURRENT = 1.5000×10^4 (A)
 $Q = 1.253360 \times 10^1$ (W)
 FLOW = 7.500000×10^{-1} (G/S)

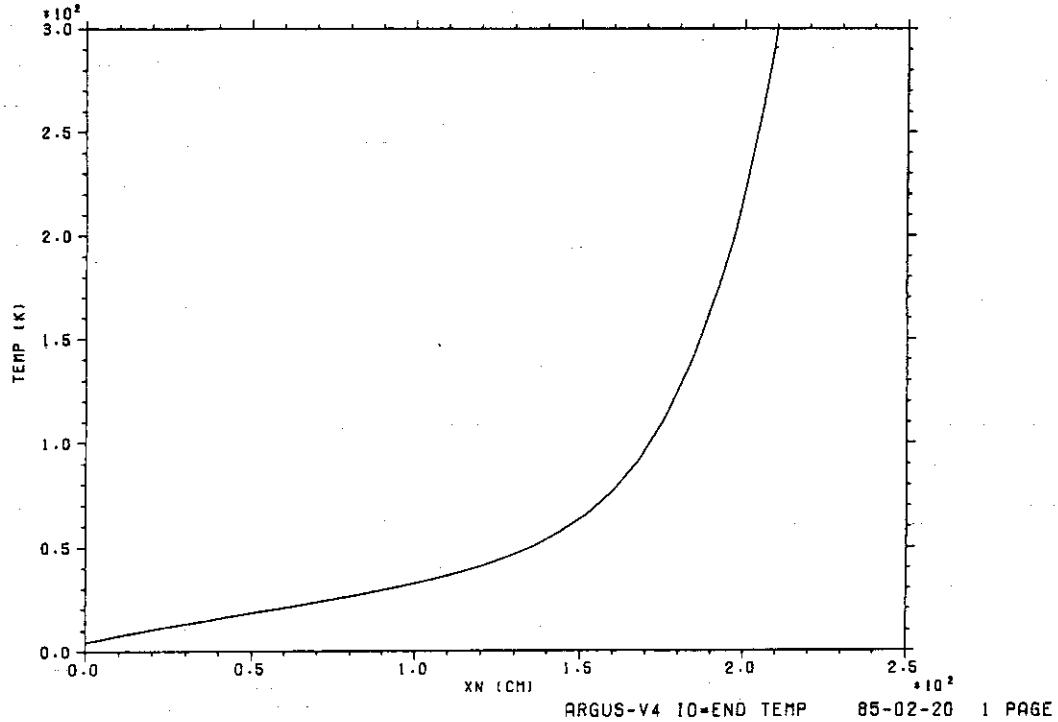


図 16 定常計算による温度分布

3KA CURRENT LEADS #14 SHOT NO.19 (ZERO FLOW)
 CURRENT = 2.9600×10^3 (A)
 $Q = 4.311070 \times 10^1$ (W)
 FLOW = 0.0 (G/S)

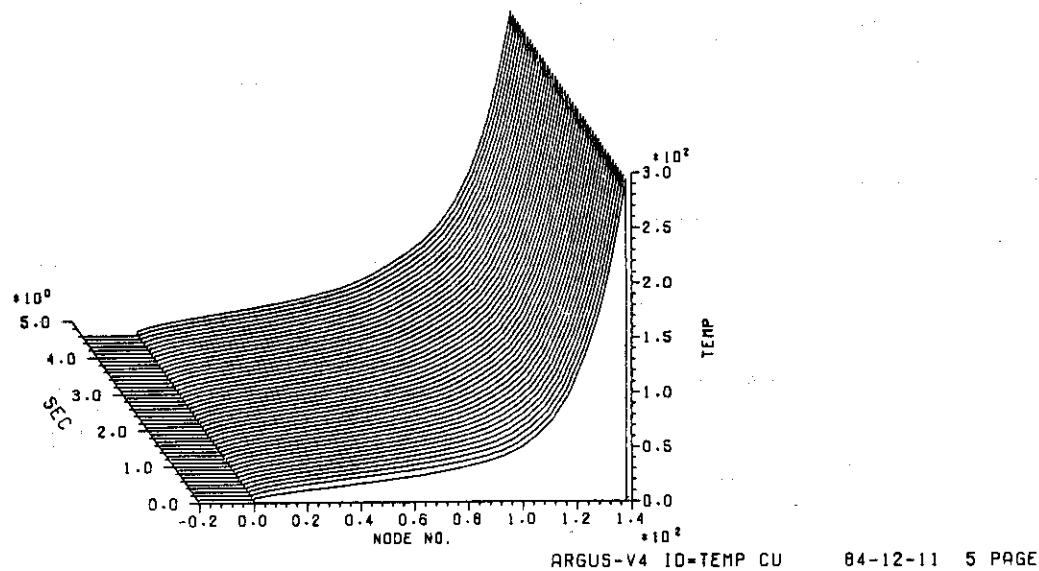


図 17 非定常計算出力例