

JAERI - M
87-055

研究炉用熱水力計算コードCOOLOD-N
を用いたJRR-3改造炉の自然循環運転
時の炉心熱水力解析

1987年3月

神永 雅紀・井川 博雅*・渡辺 終吉
安藤 弘栄・数土 幸夫

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 いばらき印刷(株)

研究炉用熱水力計算コード COOLOD-N を用いた
JRR-3 改造炉の自然循環運転時の炉心熱水力解析

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部
神永雅紀・井川博雅*・渡辺終吉
安藤弘栄・数土幸夫

(1987年3月12日受理)

本報告書は、COOLOD-Nコードを用いて行った JRR-3 改造炉の自然循環運転時の炉心熱水力解析結果、及び COOLOD-Nコードの概要について述べたものである。本計算コードには、研究用原子炉の自然循環運転時の熱水力解析ができるよう自然循環時の流量計算機能、熱水力設計限界の判定に重要な沸騰開始条件及び DNBR 等の計算機能を組込んだ。

本報では、得られた自然循環運転時の熱水力設計値が許容設計限界項目である沸騰開始条件及び DNBR 開始条件に対して十分な余裕があること、燃料芯材ブリスト発生条件に対して十分な余裕があることを示した。

Thermohydraulic characteristics analysis of natural convective cooling mode on the steady state condition of upgraded JRR-3 core ,using COOLOD-N code

Masanori KAMINAGA,Hiromasa IKAWA*,Shukichi WATANABE
Hiroei ANDO and Yukio SUDO

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 12,1987)

This report describes the results of the steady state thermohydraulic analysis of upgraded JRR-3 core under natural convective cooling mode, using COOLOD-N code. In the code, function to calculate flow-rate under natural convective cooling mode, and a heat transfer package have been newly added to the COOLOD code which has been developed in JAERI. And this report describes outline of the COOLOD-N code.

The results of analysis show that the thermohydraulics of upgraded JRR-3 core, under natural convective cooling mode have enough margine to ONB temperature, DNB heat flux and occurance of blisters in fuel meats, which are design criterion of upgraded JRR-3.

Keywords: Thermohydraulic Analysis, Natural Convective Cooling Mode, Reseach Reactor, JRR-3, COOLOD, COOLOD-N, ONB, DNB, Blister, Heat Transfer, Heat Transfer Package

* Kobe University of Mercantile Marine

目 次

1. 序	1
2. COOLOD-N コードの概要	2
2.1 コードの特徴	2
2.2 計算モデル	3
3. JRR-3 改造炉の概要及び解析モデル	20
3.1 JRR-3 改造炉の概要	20
3.2 JRR-3 改造炉の熱水力特徴	20
3.3 解析モデル	21
4. 自然循環冷却時の熱水力解析結果	32
4.1 定格出力運転時の熱水力解析結果	32
4.2 原子炉出力をパラメータとした熱水力解析結果	32
5. 結 言	40
謝 辞	40
参考文献	41
付録 A COOLOD-N コードの入力データについて	42
B COOLOD-N コードのプログラム構成	57

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of "COOLOD-N" Code	2
2.1 General Description	2
2.2 Models of Calculation	3
3. Configuration of Upgraded JRR-3 and Analytical Model	20
3.1 Configuration of Upgraded JRR-3	20
3.2 Thermohydraulic Characteristics of The JRR-3	20
3.3 Analytical Model	21
4. Thermohydraulic Analysis of Natural Convective Cooling Mode on Steady State Conditions	32
4.1 Thermohydraulic Analytical Results on Steady State Condition of Natural Convective Cooling Mode	32
4.2 Reactor Power Parameter Calculations of Natural Convective Cooling Mode	32
5. Concluding Remarks	40
Acknowledgments	40
References	41
Appendix A. Input Manual for COOLOD-N Code	42
B. Program Structures of COOLOD-N Code	57

表 目 次

Table 2.1	COOLOD コードのオリジナル熱伝達相関式一覧	12
Table 2.2	熱伝達パッケージ相関式一覧	13
Table 2.3	軽水の物性値	15
Table 2.4	重水の物性値	16
Table 3.1	燃料要素設計仕様	22
Table 4.1	自然循環冷却時の熱水力解析結果（定格出力運転時）	34
Table 4.2	自然循環冷却時の熱水力解析結果（原子炉出力パラメータ）	35

目 次

Fig. 2.1	燃料板温度計算モデル	17
Fig. 2.2	COOLOD コードのオリジナル圧力損失計算モデル	18
Fig. 2.3	COOLOD - N コード圧力損失計算モデル	19
Fig. 3.1.1	JRR - 3 改造炉冷却系統図	23
Fig. 3.1.2	JRR - 3 改造炉炉心概略図	24
Fig. 3.1.3	標準型燃料要素	25
Fig. 3.1.4	フォロー型燃料要素	26
Fig. 3.2.1	自然循環冷却モデル	27
Fig. 3.2.2	自然循環冷却モデルの軸方向出力分布	28
Fig. 3.2.3	標準型燃料要素圧力損失係数 (自然循環冷却時)	29
Fig. 3.2.4	自然循環弁圧力損失係数	30
Fig. 3.2.5	コア・バイパス圧力損失係数	31
Fig. 4.1	自然循環冷却時の平均チャンネルにおける温度分布 (定格出力運転時)	36
Fig. 4.2	自然循環冷却時のホット・チャンネルにおける温度分布 (定格出力運転時)	37
Fig. 4.3	自然循環冷却時の平均チャンネルにおける温度分布 (原子炉出力パラメータ)	38
Fig. 4.4	自然循環冷却時のホット・チャンネルにおける温度分布 (原子炉出力パラメータ)	39

1. 序

現在、日本原子力研究所では研究用原子炉 JRR-3 の改造計画が進められている。JRR-3 改造炉の炉心は、自然循環冷却と強制循環冷却の2方式によって冷却される。自然循環冷却は、約 200 kW までの低出力熱除去を目的とし、炉心下部の下部プレナムに取付けた口径約 200 mm の自然循環弁を介し原子炉プールと炉心の間で冷却水の循環経路を形成させて炉心冷却を行うものである。一方、強制循環冷却は定格 20MW までの熱除去を目的とし、原子炉プール外に配置したポンプ、熱交換器、配管等からなる 1 次冷却系を用いポンプによる強制循環によって炉心を冷却するものである。

改造炉の基本設計条件は、炉心のいかなる場所においても 1 次冷却材に沸騰が起らないようにすることである。したがって、本報告書では自然循環運転時の定常熱水力特性の把握を目的として、熱水力設計値が沸騰開始条件および DNB 開始条件、燃料芯材プリスタ発生条件に対して十分な余裕があることを定量的に評価・検討した。解析を行うにあたっては、研究炉用熱水力計算コード COOLOD-N を用いた。COOLOD-N コードは、日本原子力研究所において開発された研究炉用熱水力計算コード COOLOD¹⁾ に新たに、研究炉の熱水力解析用熱伝達パッケージ³⁾を組込み、さらに自然循環冷却時の流量計算機能を加えたものである。

なお、付録として COOLOD-N コードの入力データの説明及びプログラム構成を示した。

2. COOLOD-N コードの概要

2.1 コードの特徴

日本原子力研究所では、板状燃料を使用する研究用原子炉の定常熱水力特性を計算するためのコードとして、COOLODコードを開発し、JRR-2、JRR-3改造炉、JRR-4等の熱水力特性解析を行ってきた。COOLODコードの主な特徴は以下のとおりである¹⁾。

(1) 燃料板温度計算

燃料板の温度計算は、燃料板内の厚み方向の発熱分布を一様とし、1次元のみの熱伝導を考慮して計算する。軸方向の温度分布は、冷却材温度上昇および軸方向出力分布から求められる。燃料要素内の各燃料板の発熱密度が異なる場合やそれをはさむ冷却材流路の形状、冷却材流速が異なるような非対称冷却条件についても各燃料板の温度分布を計算することができる。また同一炉心に異なる形状の板状燃料要素が挿入されているような場合でも、出力分布係数等を用いることにより、それぞれの燃料要素内の温度分布を計算することができる。

燃料芯材は、U-Al合金燃料およびU-Alx分散型燃料を取扱うことができる。また、1次冷却材として、軽水および重水を選択できる。

(2) 冷却系温度計算

燃料板温度計算に加えて、1次冷却系ならびに2次冷却系の温度計算をそれぞれ単独に、あるいは組合わせて行うことができる。この際、冷却系の温度計算では、配管、熱交換器等から大気への熱放散は無視している。

冷却塔は向流型冷却塔を、熱交換器は向流型、並流型およびU字管型熱交換器のような胴側mパス・管側nパスの熱交換器を取扱うことができる。

(3) 沸騰開始温度(ONB温度)、DNB熱流束および圧力損失

安全評価の判断基準として用いられるONB温度およびDNB熱流束を求めることができる。また、これらの計算を行うための重要な変数となる炉心内の圧力損失および局所圧力の計算を行うことができる。流れ方向については、上昇流、下向流および水平流が取扱える。

(4) 計算結果のプロット

燃料板温度、飽和温度、ONB温度等を各燃料板毎にプロットすることができる。

COOLOD-Nコードでは、JRR-3改造炉の熱水力特性解析を進めてきた結果を踏まえ、上記COOLODコードに次に述べるような機能を付加し、併せてコードを整備した。

(1) 自然循環冷却時の温度計算

プール型研究用原子炉では、1次冷却材ポンプ、1次冷却材熱交換器、配管等より構成される1次冷却系により炉心を冷却する強制循環運転モードの他に、低出力時の熱除去を目的とした自然循環運転モードがある。

自然循環運転モードにおいては、原子炉プールから自然循環弁、炉心バイパス等の冷却材流

入流路を経て流入した冷却材が燃料要素で加熱され、冷却材密度の減少による原子炉プールと炉心部間の密度差を駆動力とした自然循環により炉心が冷却される。²⁾

自然循環流量は、冷却材の流動によって生ずる圧力損失と駆動力がバランスする条件の下で求められる。

(2) 熱伝達パッケージ

熱伝達パッケージは、JRR-3改造炉のように狭い矩形流路において低温低圧条件下で運転される板状燃料を使用する研究用原子炉の熱水力学解析に適用できるように開発されたもの³⁾で、計算プログラムとしてまとめたものである。

使用している相関式は、上記のような研究炉の熱水力特性の特徴を考慮し従来の関連実験と比較検討して導出されており、炉心内における冷却材の流れの向きが上昇流、下向流の双方に適用できるように考慮されている。

2.2 計算モデル

COOLOD-Nコードに用いられている計算モデルは、次の6種類に大別される。

- ・燃料板温度分布計算モデル
- ・熱伝達モデル
- ・圧力損失計算モデル
- ・冷却塔計算モデル
- ・熱交換器計算モデル
- ・自然循環計算モデル

本節では、これらのモデルについて説明する。ただし、COOLODコードと共通のモデルについては、報告書を参照することとし、ここでは計算式についてのみを示す。

ここで使用される主な変数は、以下に示す通りである。

- A : 流路面積 (m²)
- A_H : 加熱面積 (m²)
- C_p : 定圧比熱 (kcal/kg °C)
- De : 水力等価直径 (m)
- F : 摩擦損失係数
- F_b : バルク温度上昇因子
- F_B : ボンド層温度上昇因子
- F_f : フィルム温度上昇因子
- F_U : 燃料芯材温度上昇因子
- F_w : 被覆材温度上昇因子
- G : 質量流束 (kg/m²・s)
- G* : 無次元質量流量 = $G / \sqrt{\lambda \cdot r_g \cdot g \cdot (r_l - r_g)}$
- g : 重力加速度 (m/s²)
- h : 熱伝達係数 (kcal/m²・hr)
- h_{fg} : 蒸発潜熱 (kcal/kg)

- Δh_{in} : 入口サブクール・エンタルピー (kcal/kg)
 k : 熱伝導率 (kcal/m·hr)
 L : 流路長さ (m)
 Nu : ヌセルト数
 P : 圧力 (kg/cm²·a)
 P_c : 臨界圧力 (kg/cm²·a)
 Pe : ペクレ数
 P_H : 加熱ぬれぶち長さ (m)
 Pr : プラントル数
 q : 熱流束 (kcal/m²hr)
 q^* : 無次元熱流束 = $q/h_{fg} \sqrt{\lambda \cdot r_g \cdot g (r_\ell - r_g)}$
 Q : 発熱量 (kcal/hr または MW)
 Re : レイノルズ数
 St : スタントン数
 T : 温度 (°C)
 v : 流速 (m/s)
 w : 流路厚さ (m)
 x : クォリテイ
 y : 厚さ (m)
 Z : 流路入口からの距離 (m)
 β : 膨張率 (1/°C)
 ϵ : 管表面粗さ (m)
 λ : 臨界波長 = $\sqrt{\sigma / (r_\ell - r_g)}$ (m)
 μ : 粘性係数 (kg/m·s)
 ν : 動粘性係数 (m²/s)
 γ : 比重量 (kg/m³)
 ζ : 形状損失係数

添字

- b : 冷却材
 B : ボンド層
 DNB : DNB (Departure from Nucleate Boiling)
 g : 蒸気
 ℓ : 水
 in : 入口
 ONB : 沸騰開始 (Onset of Nucleate Boiling)
 sat : 飽和
 sub : サブクール
 U : 燃料芯材
 W : 被覆材もしくは壁面

2.2.1 燃料板温度分布計算モデル

燃料板の温度分布は、厚み方向での発熱を均一($Q_0 = q/y_u = \text{一定}$)とし、1次元のみの熱伝導を考え、Fig. 2.1に示す冷却材、被覆材、ボンド層および燃料芯材の温度は、それぞれ以下のように計算される。

(1) 冷却材温度： T_b

$$T_b = T_{bin} + F_b \cdot \frac{1}{G \cdot A \cdot C_p} \int_0^L Q(Z) dZ \quad (2.2.1.1)$$

(2) 被覆材表面温度： T_w

$$T_w = T_b + F_f \cdot q/h \quad (2.2.1.2)$$

(3) 被覆材温度 (ボンド層表面温度)： T_{wb}

$$T_{wb} = T_w + F_w \cdot q \cdot y_w/K_w \quad (2.2.1.3)$$

(4) 燃料芯材表面温度 (ボンド層温度)： T_{bu}

$$T_{bu} = T_{wb} + F_b \cdot q \cdot y_b/K_b \quad (2.2.1.4)$$

(5) 燃料芯材最高温度： T_{uo}

$$T_{uo} = T_{bu} + F_u \cdot \{ (q/y_u)/2K_u \} \cdot y_u^2 \quad (2.2.1.5)$$

燃料板をはさむ流路の冷却条件が異なる場合には、Fig. 2.1に示すようにチャンネル1およびチャンネル2でそれぞれ計算した燃料芯材最高温度が等しくなるまで熱流束 q の各チャンネルへの伝熱量配分を変化させて計算を繰り返して行う。

2.2.2 熱伝達モデル

COOLOD-Nコードでは、従来からCOOLODコードに用いられている熱伝達相関式¹⁾に加えて、JRR-3改造炉の熱水力解析用に開発された熱伝達パッケージ³⁾を用いて燃料板表面温度、ONB温度およびDNB熱流束の評価を行うことができる。^(*) Table 2.1に従来からCOOLODコードに用いられている熱伝達相関式を、Table 2.2に熱伝達パッケージに用いられている熱伝達相関式を示す。両者は入力データにより選択することができる。

Table 2.2のように、熱伝達パッケージでは、各熱伝達モード毎に上昇流と下向流に対して相関式が検討されている。

2.2.3 圧力損失計算モデル

2.2.3.1 摩擦損失係数

(1) 層流摩擦損失係数 ($Re \leq 2500$)

$$F = \frac{C_b}{Re} \quad (2.2.3.1)$$

ただし、 C_b は、流路形状に依存する係数で

(*) 熱伝達パッケージは、Post-DNB熱伝達まで検討されているが、COOLOD-Nコードでは定常熱水力解析コードであることを考慮してDNB以後の計算はモデル化していない。

円管の場合 : $C_b = 64.0$

正方形流路の場合 : $C_b = 56.9$

平行平板流路の場合 : $C_b = 96.0$

となる⁴⁾。

(2) 乱流摩擦損失係数 ($Re > 2500$)

以下の3式を選択することができる。

① Blasius の式⁴⁾

$$F = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} \quad (2.2.3.2)$$

② Kärman-Nikuradse の式⁴⁾

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = 2.0 \log_{10} (Re \cdot \sqrt{F}) - 0.8 \quad (2.2.3.3)$$

③ Cole-Brook の式⁴⁾

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2.0 \log_{10} \left[\frac{\epsilon/De}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right] \quad (2.2.3.4)$$

2.2.3.2 圧力損失計算モデル

COOLOD コードでは、Fig. 2.2 に示すような圧力損失計算モデルを採用している。この計算モデルは典型的な MTR タイプの燃料要素を想定している。

COOLOD-N コードでは、複雑な形状の出入口流路を持った燃料要素の計算にも対応できるように Fig. 2.2 における流入側プレナム～区間No.1 (入口側流路) および区間No.2～流出側プレナム (出口側流路) を任意の数の計算領域 (セグメント) に分割して計算することができるようにした。以下にその計算モデルを簡単に説明する。

Fig. 2.3 は、COOLOD-N コードの計算モデル図である。本モデルでは、摩擦による圧力損失をセグメント内の圧力損失として、流路形状の変化による圧力損失をセグメント n と $n+1$ 間の圧力損失として計算する。そこで、図中の n 番目のセグメントの局所圧力 $P_{n,1}$ および $P_{n,2}$ はベルヌーイの定理を用いて

$$P_{n,1} = P_{n,2} + \frac{1}{2g} (\tilde{\gamma}_{n+1} \cdot v_{n+1}^2 - \tilde{\gamma}_n \cdot v_n^2 - \gamma_n \cdot \zeta_n \cdot \tilde{v}_{n+1}^2) \quad (2.2.3.5)$$

$$P_{n,2} = P_{n,1} + \tilde{\gamma}_n (L \cdot \Delta Z_n - F_n \cdot \frac{\Delta Z_n}{D_{en}} \cdot \frac{\tilde{v}_n^2}{2g}) \quad (2.2.3.6)$$

と、1つ前のセグメントの局所圧力 $P_{n-1,2}$ より計算できる。但し、

$$\tilde{\gamma}_n = \frac{\gamma_n + \gamma_{n+1}}{2} : \text{セグメント } n \text{ の平均密度}$$

$$L : \begin{array}{l} \text{流れ方向係数} = -1 : \text{上昇流} \\ \phantom{\text{流れ方向係数}} = 0 : \text{水平流} \\ \phantom{\text{流れ方向係数}} = 1 : \text{下向流} \end{array}$$

$$\tilde{v}_n = \text{Max} (v_n, v_{n+1})$$

また、 $P_{0,2} = P_{i,n}$ は入力データにて与える。

非加熱の流路 (燃料領域以外) では、 $\gamma_n = \gamma_{n+1} = \tilde{\gamma}_n$ となる。

2.2.4 冷却塔および熱交換器モデル

2.2.4.1 冷却塔出入口温度計算モデル

冷却塔における空気と水の熱交換を考えた場合、基準となる交換係数は、

$$U = \frac{K_a}{G} \cdot V \quad (2.2.4.1)$$

で表わされる。ここに

K_a : エンタルピ基準総容積伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \Delta h$)

G : 空気流量 (kg/h)^(*)

V : 冷却塔の容積 (m^3)

そこで、外気湿球温度 T'_1 、水空気比 N を与え、また適当な冷却塔出入口水温度 T_{bin} 、 T_{bout} を選定して

$$U' = N \int_{\text{in}}^{\text{out}} \frac{-dT_b}{h_b - h} \quad (2.2.4.2)$$

より求められる U' が上記の U に一致するように繰返し計算を行い、出入口水温度を求める。

ただし、

h : 空気のエンタルピ (kcal/kg')^(*)

h_b : 水温 T_b と同じ温度の飽和空気のエンタルピ (kcal/kg')

2.2.4.2 熱交換器

1次冷却系の熱交換器出入口温度 T_{in} 、 T_{out} は、2次冷却系入口温度 T'_1 より次のように求められる。

$$T_{\text{in}} = T'_1 + \frac{\Delta T}{E_A} \quad (2.2.4.3)$$

$$T_{\text{out}} = T_1 - \Delta T \quad (2.2.4.4)$$

ここで、 ΔT は、1次冷却材の熱交換器出入口温度差であり、 E_A は、1次冷却材温度効率である。 E_A は熱交換器の種類により異なり、以下のように求められる。

(1) 向流型熱交換器

$$E_A = \frac{1 - \exp(-(NTU)_A \cdot (1 - R_A))}{1 - R_A \exp(-(NTU)_A \cdot (1 - R_A))} \quad (2.2.4.5)$$

(2) 並流型熱交換器

$$E_A = \frac{1 - \exp(-(NTU)_A \cdot (1 + R_A))}{1 + R_A} \quad (2.2.4.6)$$

(3) U字管型熱交換器 (胴側 m パス、管側 $2m$ パス)(イ) $m = 1$ のとき

(*) kg' は湿り空気中の乾き空気の重量を示す。

$$E_a = \frac{2}{(1+R_A) + \sqrt{1+R_A^2} \cdot \frac{1+\exp(-F)}{1-\exp(-F)}} \quad (2.2.4.7)$$

(ロ) $m \geq 2$ のとき

$$E_A = \frac{\left(\frac{1-E_a \cdot R_A}{1-E_a}\right)^m - 1}{\left(\frac{1-E_a \cdot R_A}{1-E_a}\right)^m - R_A} \quad (2.2.4.8)$$

ここに,

$$R_A \quad : \quad 1 \text{ 次冷却材と } 2 \text{ 次冷却材の水当量比} = \frac{W_1}{W_2}$$

$$(NTU)_A \quad : \quad \text{熱移動単位数} = \frac{K \cdot A_H}{W}$$

K : 熱貫流率

W : 水当量 = $G \cdot A \cdot C_p$ (kcal/hr °C)

A_H : 伝熱面積 (m²)

2.2.5 自然循環計算モデル

m 種類の燃料要素における加熱流路と n 種類の炉心バイパス流路(非加熱)を考える。ここで使用する基本式は、燃料要素加熱流路と炉心バイパス流路の間で満たされる質量保存則である。

炉心バイパスを通過する冷却材の質量流量 G_j の総和は、燃料要素加熱流路を上向きに流れる冷却材質量流量 G_i の総和に等しい。

$$\sum_{i=1} G_i = \sum_{j=1} G_j = G_0 \quad (2.2.5.1)$$

一方、燃料要素加熱流路および炉心バイパス流路における圧力損失をそれぞれ、 ΔP_{ci} ($i=1 \sim i \text{ max}$), ΔP_{bj} ($j=1 \sim j \text{ max}$) とし、加熱流路の駆動力を ΔP_{di} ($i=1 \sim i \text{ max}$) とすると

$$\Delta P_{ci}(G_i) + \Delta P_{bi}(G_i) = \Delta P_{di}(G_i) \quad (2.2.5.2)$$

$$\Delta P_{bj}(G_j) = \Delta P_b \text{ (一定)} \quad (2.2.5.3)$$

ここで流路 i の駆動力 ΔP_{di} は、各加熱流路の冷却材密度 r'_i と炉心バイパス流路における密度 r との差を加熱有効長 l_i に渡って積分することにより求められる。

$$\begin{aligned} \Delta P_{di} &= \int_0^{l_i} (r - r'_i) \cdot dx \\ &= \sum_{m=1}^{m_{\max}} (r \cdot l_{im} - r'_{im} \cdot l_{im}) \\ &= r \cdot L_i - \sum_{m=1}^{m_{\max}} r'_{im} \cdot l_{im} \end{aligned} \quad (2.2.5.4)$$

ここに L_i : 流路 i の加熱部流路長 (m) = $\sum_{m=1}^{m_{\max}} l_{im}$

l_{im} : 流路 i の m 番目の加熱セグメント長 (m)

この駆動力 $4P_{di}$ は、原子炉熱出力に依存する加熱流路の冷却材温度分布によって決定される。

COOLOD-N コードでは(2.2.5.1)～(2.2.5.4)式を連立させて、原子炉熱出力 Q に対する加熱流路および炉心バイパス流路 G_i, G_j を計算する。即ち G_i, G_j を未知数として、Newton-Raphson 法により原子炉熱出力 Q に対応する総流量 G_0 を求める。ここで、流路 i に対する Q の分布はホットチャンネル・ファクターにて与える。

炉心内で冷却材が沸騰を開始した後は、(2.2.5.4)式の右辺第2項は以下のように計算される。

$$r'_{im} \cdot l_{im} = (1 - \alpha_{im}) \cdot r_{\ell im} \cdot l_{im} \quad (2.2.5.5)$$

ここに

$r_{\ell im}$: 流路 i の m 番目の加熱セグメントの飽和水の密度 (kg/m^3)

α_{im} : 流路 i の m 番目の加熱セグメントのボイド率

なお、沸騰開始(正味蒸気発生)条件として、ここでは、

$$\text{Nu}_B = \frac{q \cdot \text{De}}{K_b \cdot (T_s - T_b)} \quad ; \text{Pe} \leq 70000 \quad (2.2.5.6)$$

$$\text{St}_B = \frac{q}{G \cdot C_{pb} \cdot (T_s - T_b)} \quad ; \text{Pe} > 70000 \quad (2.2.5.7)$$

を用いる。⁵⁾

また、ボイド率 α は、サブクール沸騰域では以下に示す(1)～(3)を選択することにより、また核沸騰域では(2.2.5.11)式を用いて計算される。

(1) サブクール沸騰域におけるボイド率 (A_{HMAD} ⁶⁾の方法)

$$\alpha = \frac{x}{x + s(1-x) \frac{\gamma_g}{\gamma_\ell}} \quad (2.2.5.8)$$

$$S = \left(\frac{\gamma_\ell}{\gamma_g} \right)^{0.205} \cdot \left(\frac{G \cdot D}{\mu_\ell} \right)^{-0.016} \quad (2.2.5.9)$$

(2) サブクール沸騰域におけるボイド率 (Zuber 等⁷⁾の方法)

$$\alpha = \frac{x}{1.13 \left(x \frac{\gamma_\ell - \gamma_g}{\gamma_\ell} + \frac{\gamma_g}{\gamma_\ell} \right) + C_b \frac{\gamma_g}{G} \left[\frac{\sigma (\gamma_\ell - \gamma_g) \cdot g}{\gamma_\ell^2} \right]^{1/4}} \quad (2.2.5.10)$$

(3) サブクール沸騰域におけるボイド率 ((1), (2)の組合)

$G \leq G_{\text{LIM}}$ のとき (2.2.5.8) 式

$G > G_{\text{LIM}}$ のとき (2.2.5.10) 式

ただし、 G_{LIM} は、(1)式と(2)式を用いる境界の流量 (kg/s) であり、データにて入力する。 G_{LIM} は、質量流束に換算して $500 \sim 1500 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 程度にとることが推奨される。

(4) 核沸騰域におけるボイド率 (Zuber 等^{7);8)}の方法)

$$\alpha = \frac{x}{1.13 \left(x_{\text{eq}} \cdot \frac{\gamma_\ell - \gamma_g}{\gamma_\ell} + \frac{g}{\ell} \right) + C_b \cdot \frac{\gamma_g}{G} \cdot \left[\frac{\sigma \cdot (\gamma_\ell - \gamma_g) \cdot g}{\gamma_\ell^2} \right]^{1/4}} \quad (2.2.5.11)$$

(1)~(4)において

$$X = \frac{X_{eq} - X_{eqB} \cdot e^{X_{eq}/X_{eqB} - 1}}{1 - X_{eqB} \cdot e^{X_{eq}/X_{eqB} - 1}} \quad (2.2.5.12)$$

$$X_{eq} = \frac{q_w \cdot P_h \cdot Z / (G \cdot A) - C_{pb} (T_s - T_{bb})}{h_{fg}}$$

X_{eqB} : 沸騰開始点における熱平衡クオリティ (-)

T_{bb} : " における冷却材温度 (°C)

Z : " からの距離 (m)

P_h : 加熱周長 (m)

C_b : Zuber の係数 = 1.18 または 1.41

以上, COOLOD-N コードの概要を述べた。付録 A, B に, COOLOD-N コードのプログラム構成, 入力データの説明を添付したので参照されたい。

2.2.6 物性値

2.2.6.1 燃料芯材の熱伝導率

現在, 研究用原子炉燃料の芯材として使用もしくは開発中のものは, U-Al 合金燃料, U-Alx 分散型燃料およびシリサイド燃料 (U-SiO, U-SiO₂) に大別される。前 2 者は, 使用実績も豊富でデータも多いが, 後者は開発中であり, 物性等も現在調査中のものが多い。そこで, COOLOD-N コードでは, U-Al 合金および U-Alx 分散型燃料の熱伝導率について, 以下に示すような計算式を用いて算出する他に, 温度に対するテーブルの形で入力データとして与えられるようにした。

(1) U-Al 合金燃料の熱伝導率 K_{U0} ¹³⁾

$$K_{U0} = 0.415 - 1.0 \times 10^{-4} T_U ; (20 \leq T_U \leq 640 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$K_{U0} = 0.135 ; (T_U > 640 \text{ } ^\circ\text{C})$$

K_{U0} : U-Al 合金の熱伝導率 (W/cmK)

T_U : U-Al 合金の温度 (°C)

(2) U-Alx 分散型燃料の熱伝導率 K_{U1}

$$K'_{U1} = 2.16546 - 2.765 x$$

K_{U1} : U-Al 分散型燃料の熱伝導率 (W/cmK)

$$x : \text{ウランの重量割合} = \frac{\rho}{0.8 \rho + 2.7 (1-P)}$$

ρ : U-Alx 分散型燃料芯材のウラン密度 (g/cm³)

P : 気孔率

K'_{U1} を求める回帰式は U-Al 合金芯材のものである。分散型燃料の場合, ボイドを 8% 前後含む。従って多孔質材料に対する熱伝導率の補正を次式で行っている。¹⁵⁾

$$K_{U1} = K'_{U1} (1-P)^{\frac{3}{2}}$$

2.2.6.2 Al 被覆材の熱伝導率¹³⁾ K_{Al}

Al 被覆材の熱伝導率は次式のような温度依存関数を用いて算出される。

$$K_{Al} = 0.390 + 2.22 \times 10^{-4} T_{Al} - 3.76 \times 10^{-7} T_{Al}^2 + 2.42 \times 10^{-10} T_{Al}^3 ; (20 \leq T_{Al} \leq 649 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$K_{Al} = 0.170 ; (T_{Al} > 649 \text{ } ^\circ\text{C})$$

ここに T_{Al} : アルミ被覆材温度 ($^\circ\text{C}$)

2.2.6.3 ボンド層の熱伝導率¹⁶⁾ K_B

板状燃料の場合、燃料芯材と Al 被覆は圧着成形されるのでボンド層の存在は無視できる。しかし、COOLOD-N コードでは、結合欠陥等のボンド層を考慮した計算も行えるように次式に示す熱伝導率算出式を採用している。

$$K_B = 0.123804 \times 10^{-4} - 0.593796 \times 10^{-7} T_B - 0.37228 \times 10^{-10} T_B^2 ; (18 \leq T_b \leq 520 \text{ } ^\circ\text{C})$$

ここに T_B : ボンド層温度 ($^\circ\text{C}$)

上式は、ボンド層内で燃焼が進んだ場合に生成する核分裂生成物のうち、生成量の多い Xe の熱伝導率である。

2.2.6.4 軽水および重水

軽水および重水の物性値^{9),17)}を Table 2.3, 2.4 に示す。このうち比重量, 比熱, 動粘性係数, 熱伝導率, 粘性係数および表面張力は温度と物性値のテーブルとして, SUBROUTINE CONST1 に用意されている。飽和圧力を関数とした時の飽和温度, 飽和水と飽和蒸気のエンタルピならびに蒸発潜熱は温度の関数として多項式近似され, FUNCTION TSATH および HFG に収められている。

Table 2.1 COOLOD コードのオリジナル熱伝達相関式一覧

熱伝達様式		相関式	備考
単相強制対流 熱伝達		$Nu = H_1 \cdot (Re^A - H_2) \cdot Pr^B \cdot [1.0 + H_3 \cdot (\frac{De}{Z})^C] \cdot (\frac{\mu_b}{\mu_w})^D$	H ₁ , H ₂ , H ₃ , H ₄ , A, B, C, D は入力 データにて与え る。
沸騰開始温度		$q_{DNB} = 0.025293 P^{1.156} \left\{ \frac{9}{5} T_w - T_{sat} \right\}^{P^{0.0234}}$	Bergles- Rohsenow の式 (c·g·s 単位系)
核 沸 騰 熱 伝 達	サブクール 沸騰域	$q = 0.023 \left(\frac{k_b}{De} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}) + \frac{4.50 \cdot e^{P/20} \cdot \Delta T_{sat}^{3.6}}{3600}$	佐藤・松村の式 (c·g·s 単位系)
	飽和沸騰域	$\Delta T_{sat} = 11.2951 \cdot q^{0.25} \cdot e^{-(P/63.0)}$	Jens-Lottes の式 (c·g·s 単位系)
DNB 熱流束		$q_{DNB} = 478800 (1 + 0.0365 \cdot v) \cdot (1 + 0.00507 \cdot \Delta T_{sub}) \cdot (1 + 0.0131P)$	Mirshak, Durant and Towell の式 (c·g·s 単位系)
		$q_{DNB} = \left(10890 \cdot \frac{De}{De + (P_H/\pi)} + 48 \cdot \frac{v}{De^{0.6}} \right) \cdot (102.6 \cdot \ln P - 97.2 \frac{P}{P+15} - \frac{v}{2.22} + 32) - (T_b)_{DNB}$	Bernath の式 (foot-pound 単位系)
		$q_{DNB} = 145.4 \theta_{(P)} [1 + 2.5 \cdot v^2 / \theta_{(P)}]^{1/4} \cdot (1 + 15.1 \frac{C_p \Delta T_{sub}}{h_{fg} P})$ $\theta_{(P)} = 0.99531 P^{1/3} (1 - P/P_c)^{4/3}$	Labuntsov の式 q : W/cm ² P : bar C _p : KJ/Kg C h _{fg} : KJ/Kg

Table 2.2 熱伝達パッケージ相関式一覧

熱伝達様式		上昇流	下向流
液単相流	層流域	(5) 式	Max[(5)式,(7)式(Collierの式)]
	遷移域	層流域と乱流域を内挿	
	乱流域	(6) 式	(Dittus-Boelterの式)
沸騰開始温度		(1) 式	(Bergles-Rohsenowの式)
核沸騰	サブクール	(8) 式	(Chenの式)
	飽和	(9) 式	(修正Chenの式)
DNB熱流束		Min{(2)式,Max[(3)式,(4)式]}	Max[(2)式,(4)式]

$$q_{DNB} = 911 \cdot P^{1.156} \left\{ \frac{9}{5} (T_w - T_{sat}) \right\}^{P^{0.0234}} \quad (1)$$

$$q_{DNB,1} = 0.005 \cdot G^{0.611} \quad (2)$$

$$q_{DNB,2} = \frac{A}{A_H} \frac{\Delta h_{in}}{h_{rg}} \cdot G \quad (3)$$

$$q_{DNB,3} = 0.7 \left(\frac{A}{A_H} \right) \left(\frac{W}{\lambda} \right)^{1/2} \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right)^{1/4} \right\}^2 \quad (4)$$

$$Nu = 4.0 \quad (5)$$

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (6)$$

$$Nu = 0.17 \cdot Re_b^{0.33} \cdot Pr_b^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_b}{Pr_w} \right)^{1/4} \cdot \{ g \cdot \beta \cdot De^3 (T_w - T_l) / \nu^2 \}_b^{0.1} \quad (7)$$

$$q = 0.023 \cdot Re_b^{0.8} \cdot Pr_b^{0.4} \cdot \frac{k_b}{De} (T_w - T_l) + S \cdot 7.228 \left[\frac{k_b^{0.79} \cdot Cp_b^{0.45} \cdot \gamma_b^{0.49}}{\sigma^{0.5} \cdot \mu_b^{0.29}} \right] \cdot (T_w - T_{sat})^{1.24} \cdot (P_w - P)^{0.75} \quad (8)$$

$$S = \frac{1}{1 + 0.12 Re'^{1.14}} ; Re' < 32.5 \quad , Re' = \frac{G \cdot De}{\mu_b} \times 10^{-4}$$

$$S = \frac{1}{1 + 0.42 Re'^{0.78}} ; 32.5 \leq Re' < 70.0$$

$$S = 0.1 ; Re \geq 70.0$$

$$q = 0.023 \cdot \{Re_b(1-x)\}^{0.8} \cdot Pr_b^{0.4} \frac{K_b}{De} (T_w - T_{sat}) \cdot F$$

$$+ S \cdot 7.228 \left[\frac{K_b^{0.79} \cdot Cp_b^{0.45} \cdot \gamma_b^{0.49}}{\sigma^{0.5} \cdot \mu_b^{0.29} \cdot h_{fg}^{0.24} \cdot \gamma_g^{0.24}} \right] \cdot (T_w - T_{sat})^{1.24} \cdot (P_w - P)^{0.75} \quad (9)$$

$$S = \frac{1}{1 + 0.12 Re'^{1.14}} \quad ; Re' < 32.5 \quad , \quad Re' = \frac{G(1-x) \cdot De}{\mu_b} \cdot F^{1.25} \times 10^{-4}$$

$$S = \frac{1}{1 + 0.42 Re'^{0.78}} \quad ; 32.5 \leq Re' < 70.0$$

$$S = 0.1 \quad ; Re' \geq 70.0$$

$$F = 1.0 \quad ; \quad \frac{1}{X_{tt}} \leq 0.1$$

$$F = 2.35 \left(\frac{1}{X_{tt}} + 0.213 \right)^{0.736} \quad ; \quad \frac{1}{X_{tt}} \leq 0.1$$

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.1}$$

Table 2.3 軽水の物性値

温度 °C	比重量 γ kg/m ³	比熱 Cp kcal/kg °C	動粘性係数 ν m ² /s $\times 10^{-6}$	熱伝導率 λ kcal/mh °C	温度伝導率 a m ² /h $\times 10^{-4}$	粘性係数 μ kg·sec/m ² $\times 10^{-4}$	表面張力 σ kg/m $\times 10^{-3}$	飽和圧力 kg/cm ²	エンタルピ(kcal/kg)	
									飽和水	飽和蒸気
0	999.9	1.008	1.79	0.489	4.85	1.829	7.72	0.006228	0.00 ^{*1}	597.49 ^{*1}
10	999.7	1.002	1.31	0.505	5.04	1.336	7.56	0.012512	10.030	601.87
20	998.2	0.999	1.00	0.518	5.08	1.022	7.39	0.023826	20.030	606.23
30	995.7	0.998	0.803	0.531	5.34	0.816	7.24	0.043251	30.014	610.57
40	992.3	0.998	0.668	0.543	5.48	0.676	7.08	0.075204	39.995	614.88
50	988.1	0.999	0.555	0.552	5.59	0.559	6.90	0.12578	49.980	619.13
60	983.2	1.000	0.480	0.562	5.72	0.482	6.74	0.20313	59.972	623.32
70	977.8	1.001	0.417	0.571	5.85	0.416	6.55	0.31776	69.975	627.43
80	971.8	1.003	0.368	0.578	5.93	0.365	6.37	0.48294	79.993	631.45
90	965.3	1.005	0.328	0.583	6.01	0.323	6.19	0.71491	90.031	635.36
100	958.4	1.007	0.297	0.586	6.08	0.290	6.00	1.03323	100.092	639.15
120	943.1	1.014	0.247	0.589	6.16	0.238	5.55	2.0246	120.311	646.31
140	926.1	1.023	0.209	0.588	6.21	0.197	5.10	3.6850	140.705	652.78
160	907.3	1.037	0.186	0.585	6.22	0.172	4.65	6.3025	161.334	658.43
180	886.9	1.054	0.168	0.578	6.25	0.152	4.17	10.224	182.267	663.10
200	864.7	1.075	0.155	0.568	6.11	0.137	3.70	15.855	203.585	666.60
220	840.3	1.102	0.146	0.544	5.98	0.125	3.24	23.656	225.393	668.75
240	814	1.136	0.139	0.537	5.81	0.115	2.78	34.138	247.827	669.30
260	784	1.183	0.133	0.517	5.57	0.106	2.32	47.869	271.076	667.91
280	751	1.250	0.128	0.493	5.25	0.098	1.85	65.486	295.414	664.09
300	712	1.36	0.13	0.462	4.77	0.091	1.40	87.621	321.261	657.07
320	667	1.54	0.13	0.423	4.12	0.083	0.95	115.12	349.337	645.76

*1 0.01 °C の値

Table 2.4 重水の物性値

温度 °C	比重量 γ kg/m ³	比熱 C _p kcal/kg °C	動粘性係数 ν m ² /s × 10 ⁻⁶	熱伝導率 λ kcal/mh °C	温度伝導率 a m ² /h × 10 ⁻⁴	粘性係数 μ kg·sec/m ² × 10 ⁻⁴	表面張力 σ kg/m × 10 ⁻³	飽和圧力 kg/cm ²	エンタルピ(kcal/kg)	
									飽和水	飽和蒸気
0	1105	1.015	0.7444	0.4782	4.266	0.7556	7.72	0.006954	1.201 ^{*1}	554.65 ^{*1}
10	1105	1.012	1.278	0.4882	4.364	1.319	7.56	0.01063	6.270	556.73
20	1105	1.009	1.135	0.5031	4.515	1.168	7.39	0.02067	16.373	560.83
30	1103	1.006	0.9044	0.5159	4.651	0.928	7.24	0.03827	26.483	564.87
40	1100	1.003	0.7297	0.5268	4.774	0.746	7.08	0.06780	36.477	568.86
50	1096	1.001	0.6034	0.5360	4.885	0.616	6.90	0.1153	46.494	572.78
60	1091	0.9991	0.5105	0.5434	4.985	0.520	6.74	0.1890	56.492	576.60
70	1085	0.9974	0.4405	0.5493	5.076	0.448	6.55	0.2994	66.473	580.37
80	1078	0.9959	0.3864	0.5537	5.157	0.392	6.37	0.4600	76.440	584.07
90	1071	0.9946	0.3438	0.5568	5.229	0.349	6.19	0.6871	86.393	587.68
100	1062	0.9937	0.3095	0.5586	5.291	0.314	6.00	1.001	96.331	591.22
120	1044	0.9932	0.2584	0.5587	5.387	0.262	5.55	1.984	116.189	598.00
140	1024	0.9959	0.2225	0.5547	5.438	0.226	5.10	3.641	136.061	604.38
160	1003	1.003	0.1963	0.5470	5.434	0.201	4.65	6.266	156.036	610.28
180	981.5	1.018	0.1765	0.5359	5.361	0.183	4.17	10.22	176.237	615.65
200	959.6	1.044	0.1611	0.5216	5.209	0.172	3.70	15.92	196.833	620.35
220	938.1	1.083	0.1489	0.5044	4.966	0.164	3.24	23.84	219.016	623.27
240	917.1	1.140	0.1390	0.4841	4.630	0.144	2.78	34.51	239.985	623.46
260	897.0	1.220	0.1308	0.4607	4.210	0.163	2.32	48.47	262.938	623.01
280	878.0	1.328	0.1339	0.4339	3.722	0.168	1.85	66.31	287.036	619.85
300	860.3	1.470	0.1180	0.4034	3.191	0.177	1.40	88.72	312.704	612.14
320	844.1	1.652	0.1129	0.3688	2.645	0.190	0.95	116.50	340.860	598.43

*1 5.0°C の値

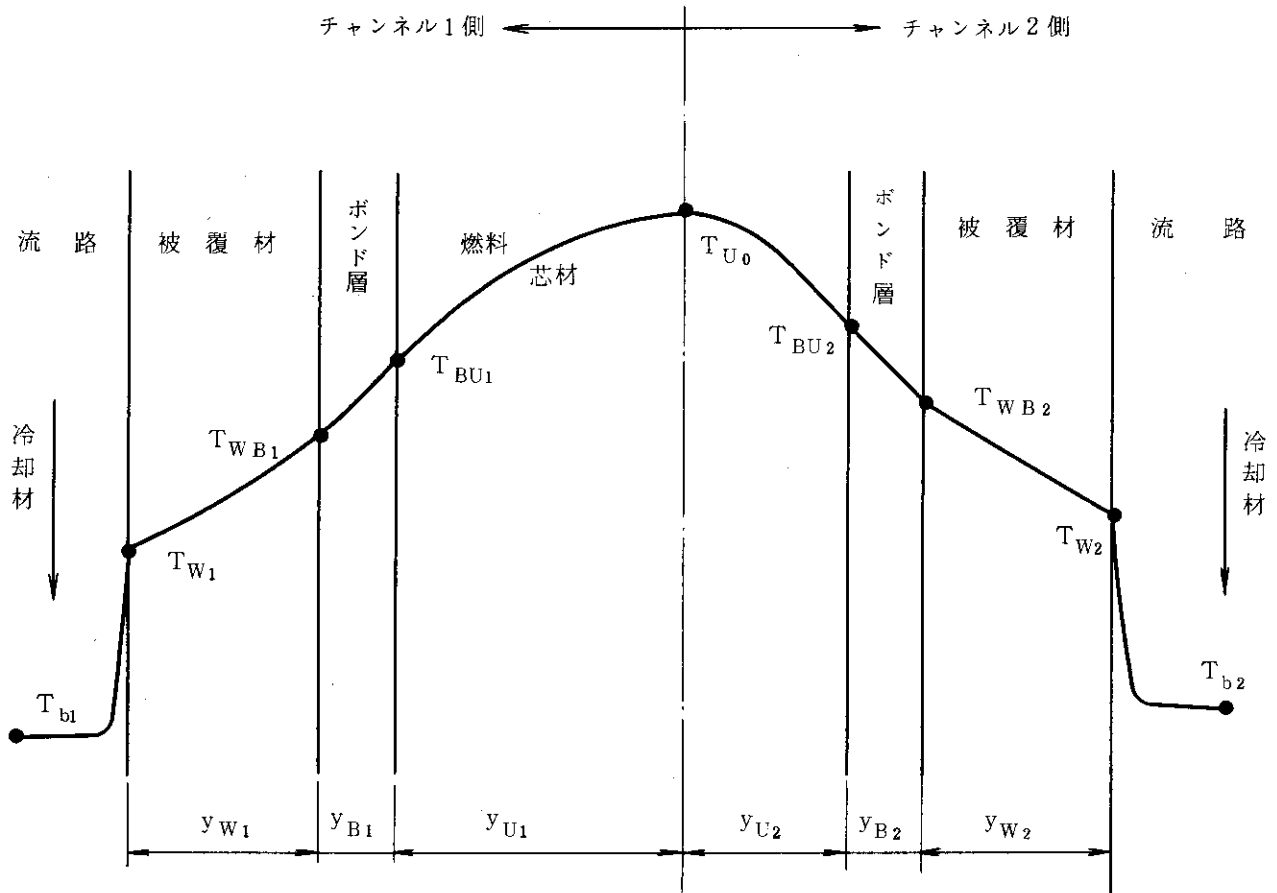


Fig. 2.1 燃料板温度計算モデル

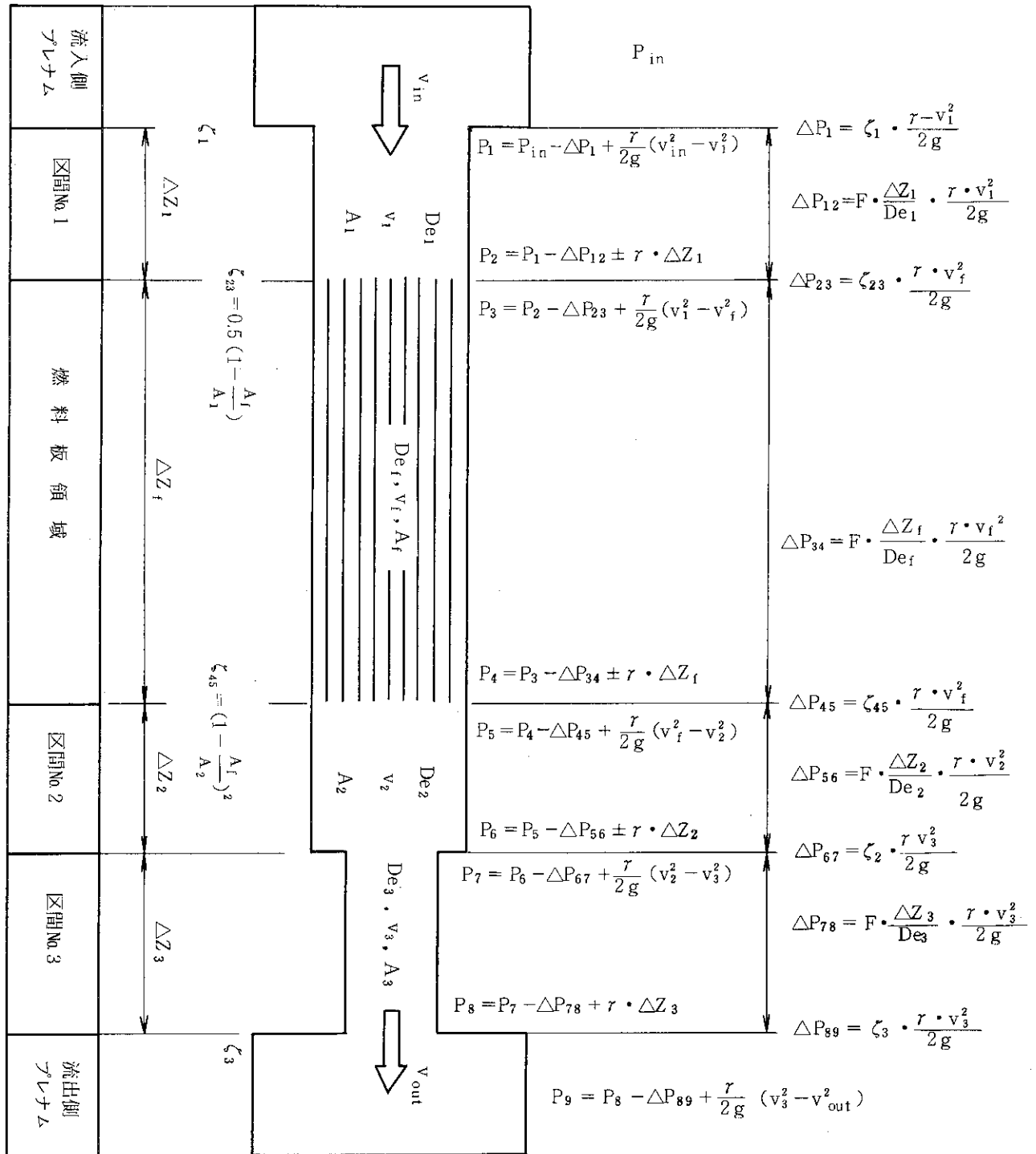


Fig. 2.2 COOLODコードのオリジナル圧力損失計算モデル

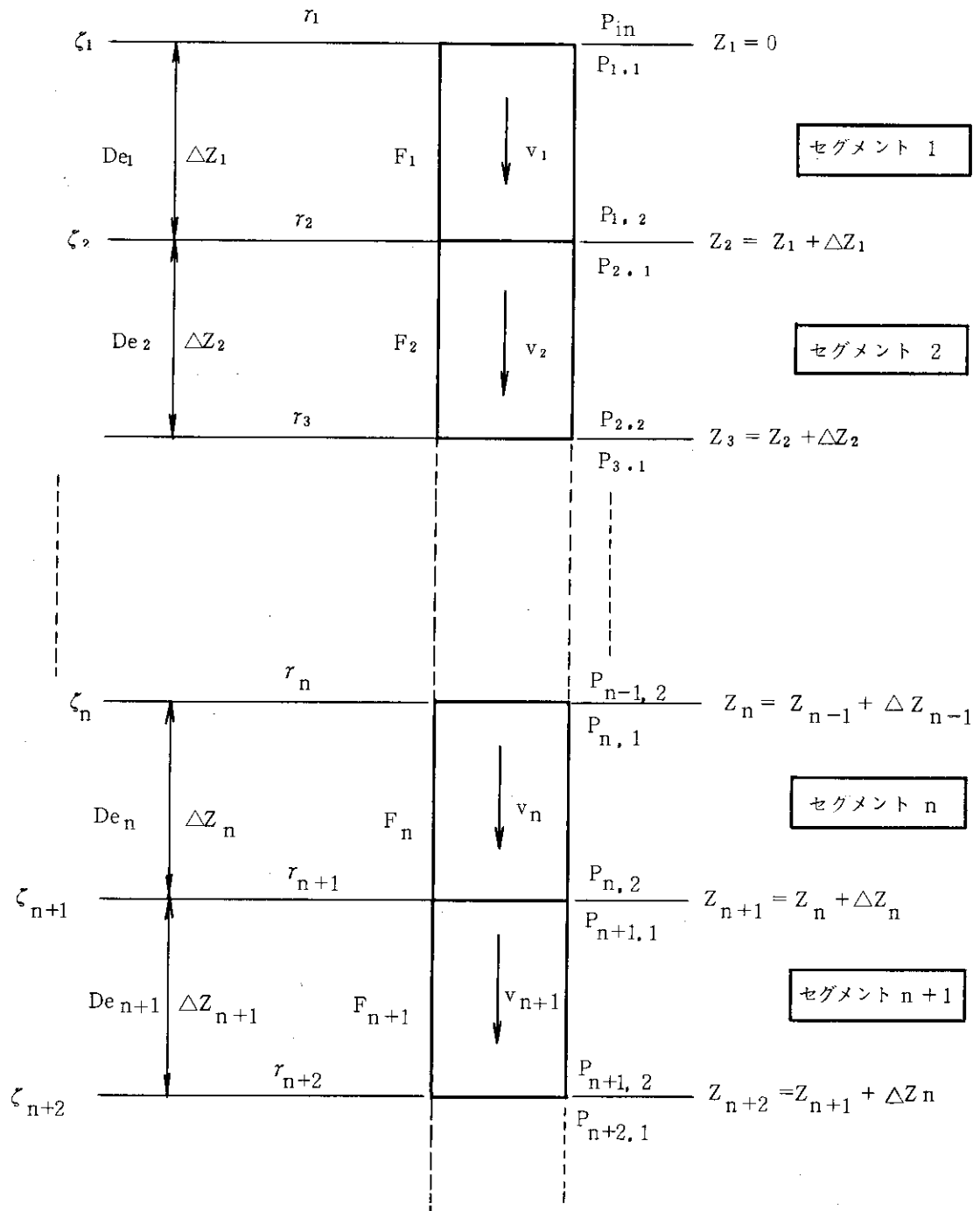


Fig. 2.3 COOLOD-Nコード圧力損失計算モデル

3. JRR-3改造炉の概要及び解析モデル

3.1 JRR-3改造炉の概要

JRR-3改造炉は定格熱出力20MWの軽水冷却プール型原子炉であり、Fig. 3.1.1に示すように原子炉プール、炉心、1次冷却系、重水冷却系、2次冷却系および原子炉プール水浄化系等より構成される。1次冷却系は、 ^{16}N 減衰タンク、1次冷却材主ポンプ、1次冷却材補助ポンプ、1次冷却材熱交換器および配管等から成り、炉心にて発生した熱の大部分を冷却する。原子炉プールは直径4.5m、深さ8.5mであり、深さ8mの位置まで水が満たされている。

炉心は、直径600mm、高さ750mmの周囲を重水タンクに囲まれた部分であり、標準型燃料要素26体、フォロワ型燃料要素6体、照射筒要素5体およびそれぞれ4体ずつのベリリウム反射体A、B、C等より構成されている。炉心の構成をFig. 3.1.2に示す。標準型燃料要素ならびにフォロワ型燃料要素はそれぞれ等間隔に配列された20枚、16枚の燃料板および2枚の燃料側板から成る。燃料板は、U-Al分散型合金の芯材をAl合金(A-5052)で被覆したものであり、燃料板、被覆材および芯材の厚さはそれぞれ1.52mm、0.38mm、および0.76mmである。燃料板、芯材の高さはそれぞれ770mm、750mmであり、その中心点は同じである。燃料芯材のU-Al分散型合金は密度 6.80g/cm^3 のU-Al₃と密度 6.06g/cm^3 のU-Al₄およびAlで構成される。標準型燃料要素およびフォロワ型燃料要素の設計仕様をTable 3.1に示す。また、それぞれの概要をFig. 3.1.3およびFig. 3.1.4に示す。

通常運転状態における炉心の冷却方式には、定格出力20MWまでの強制循環冷却、および200KWまでの自然循環冷却の2つの方式がある。強制循環冷却時には、1次冷却系を用いて熱除去を行なう。また、主として炉心内で発生する ^{16}N 等による炉上面の線量率を低減するために下向流を採用している。自然循環冷却時には、自然循環弁、コア・バイパス等を介して原子炉プールと炉心との間で冷却水の循環経路を形成して自然対流により冷却する。Fig. 3.1.2に、それぞれの冷却方式における流れの向きを示す。

3.2 JRR-3改造炉の熱水力的特徴

JRR-3改造炉の炉心を熱水力的観点から見た特徴は以下のとおりである。

- ① 基本流路は、流路ギャップ2.28mm、流路幅66.6mm、長さ770mmの長径比の大きい矩形流路である。また、流路は燃料板により両面加熱である。
- ② 通常運転時には、自然循環冷却時の上昇流、強制循環冷却時の下向流と流れの方向が2種類ある。
- ③ 通常運転時における冷却材は100℃未満の低温・低圧である。

JRR-3改造炉では、上記の熱水力的特徴を考慮して、通常運転時の設計基準として以下に示す項目を設けている。

- ① 通常運転時には、炉心内のいかなる点においても沸騰を生じさせない。
- ② 通常運転時及び異常な過渡変化時に最小 DNBR は 1.5 を下回らない。
- ③ 燃料板最高温度は、燃料芯材のブリスタ発生温度（400℃を基準値とする）未満であるようにする。

3.3 解析モデル

本節では、COOLOD-N を用いて JRR-3 改造炉の自然循環冷却時の熱水力特性を解析するために設定したモデルおよび入力データの概要について示す。

本解析モデルは、自然循環冷却をモデル化したものである。Fig. 3.2.1 にモデル図を示す。自然循環冷却時には、冷却材が下向きに流れる非加熱流路と冷却材が上向きに流れる加熱流路が存在する。本モデルにおいては、加熱流路として標準型燃料要素26体のみを考慮し、この標準型燃料要素26体において 200 KW の熱出力を発生するものとした。非加熱流路としては、自然循環弁（口径 200 A）を介した流路および重水タンク内胴とベリリウム反射体との間の約 3 mm の隙間（以下コア・バイパスと称する）を考慮した。他に非加熱流路として考え得る流路に、照射シンプル冷却管があるが、本モデルでは安全側の評価として考慮しなかった。標準型燃料要素、自然循環弁およびコア・バイパスの圧力損失係数を Fig. 3.2.3, Fig. 3.2.4 および Fig. 3.2.5 に示す。

燃料板は燃料芯材と被覆材より構成され、燃料芯材の U 密度は 2.2 g/cm^3 、ボイド率は 0.057 である。¹⁰⁾

冷却材に関しては、炉心の入口において温度 35°C 、圧力 $1.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ ($1.55 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$) とした。^(*)

本解析において使用するホット・チャンネルファクターは以下の通りである。

核的因子

- 半径方向出力分布因子： $F_R = 1.23$
- 軸方向出力分布因子： $F_Z = (\text{Fig. 3.2.2 参照})$
- 局所出力分布因子： $F_L = 1.51$
- 不確定性因子： $F_E = 1.18$

工学的因子

- バルク温度上昇因子： $F_b = 1.33$
- フィルム温度上昇因子： $F_f = 1.37$
- 熱流束因子： $F_q = 1.17$

核的因子のうち軸方向出力分布因子については、Fig. 3.2.1 に示すように、本モデルでは冷却材の温度上昇が炉心流量を決定する重要な因子となるため、強制循環冷却時に用いたものに比べより詳細に分割したものをを用いた。

流量計算に用いた熱出力は、流量を少なく見積るよう平均出力とし、温度計算に用いる熱出力は温度・DNB 熱流束を厳しめに評価するようホット・チャンネル・ファクターを用いている。熱伝達相関式は、熱伝達パッケージ（2.2.2 参照）を使用した。

(*) 冷却材入口圧力は、実際には、下部プレナムの圧力となるが、本モデルでは厳しめに強制循環冷却モデルと同じく、炉心上部の水頭圧をとり、 $1.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ とした。

Table 3.1 燃料要素設計仕様

燃料要素		標準型燃料要素	フォロワ型燃料要素	
項目				
外形寸法	(mm)	76.2 x 76.2 x 1150	64 x 64 x 880	
U-235濃縮度	(W%)	20	20	
U-235含有量	(g)	300	190	
ウラン密度	(g/cm ³)	2.2	2.2	
芯材	厚さ	(mm)	0.76	0.76
	幅	(mm)	62.0	49.0
	長さ	(mm)	750	750
被覆	厚さ	(mm)	0.38	0.38
燃料板	厚さ	(mm)	1.52	1.52
	幅	(mm)	71	60
	長さ	(mm)	770	770
冷却水流路数		19	15	
冷却水流路厚さ	(mm)	2.28 (x 19)	約 2.38 (x 15)	
燃料芯材		ウラン・アルミニウム分散型合金 (UAl _x -Al)		
被覆材、構造材		アルミニウム合金 AG3 NE 又は相当品		
燃料板の製作		ピクチュア・フレーム法による。熱間、冷間圧延を行い所定の厚さとする。		
燃料要素の組立		ロール・スウェージ法により側板に固定する。		
製作時の	燃料板	ブリスタ検査、X線透過試験、外観検査		
主要検査	要素	ウォーター・ギャブ検査、寸法検査		

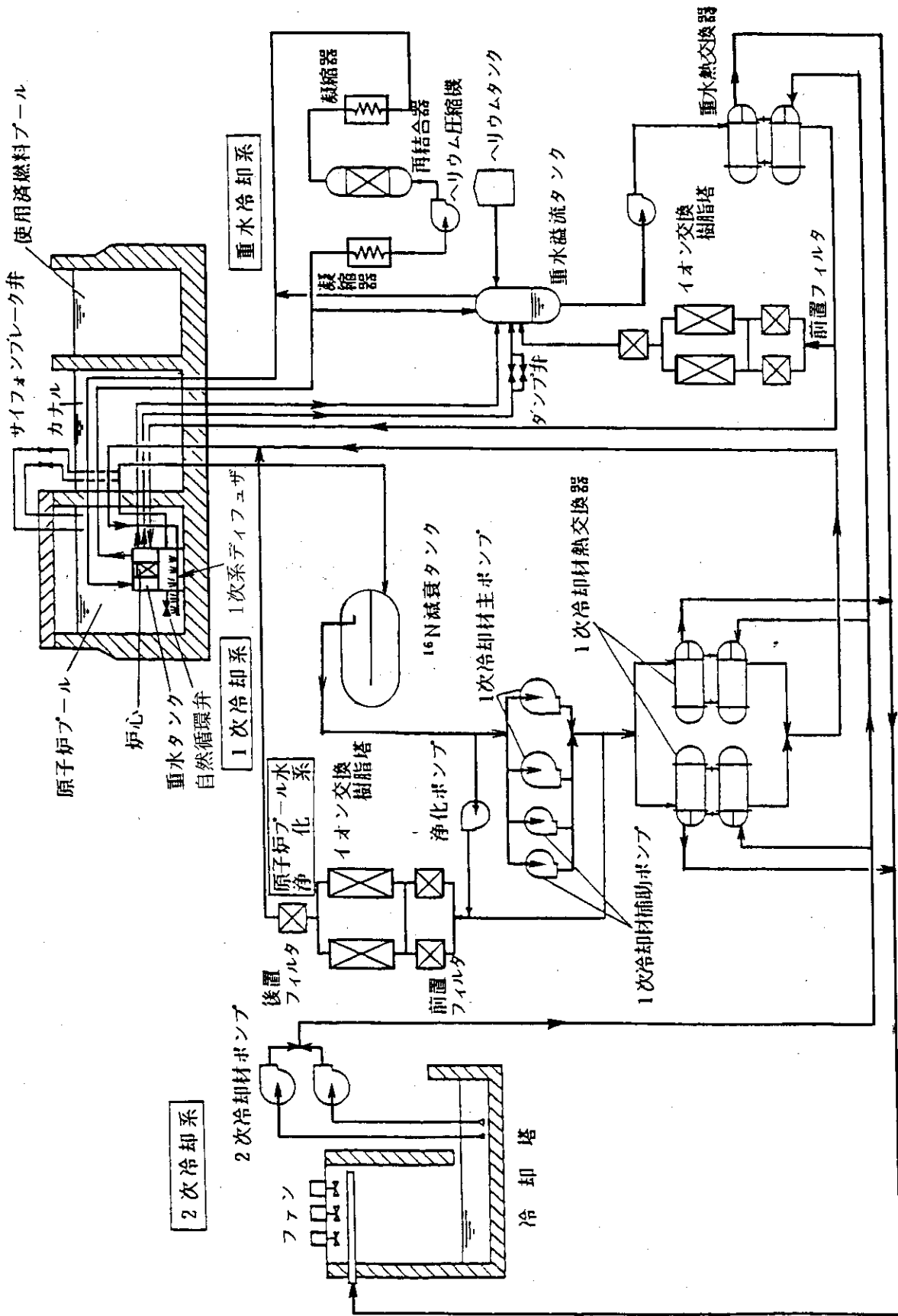


Fig. 3.1.1 JRR-3 改造炉冷却系統図

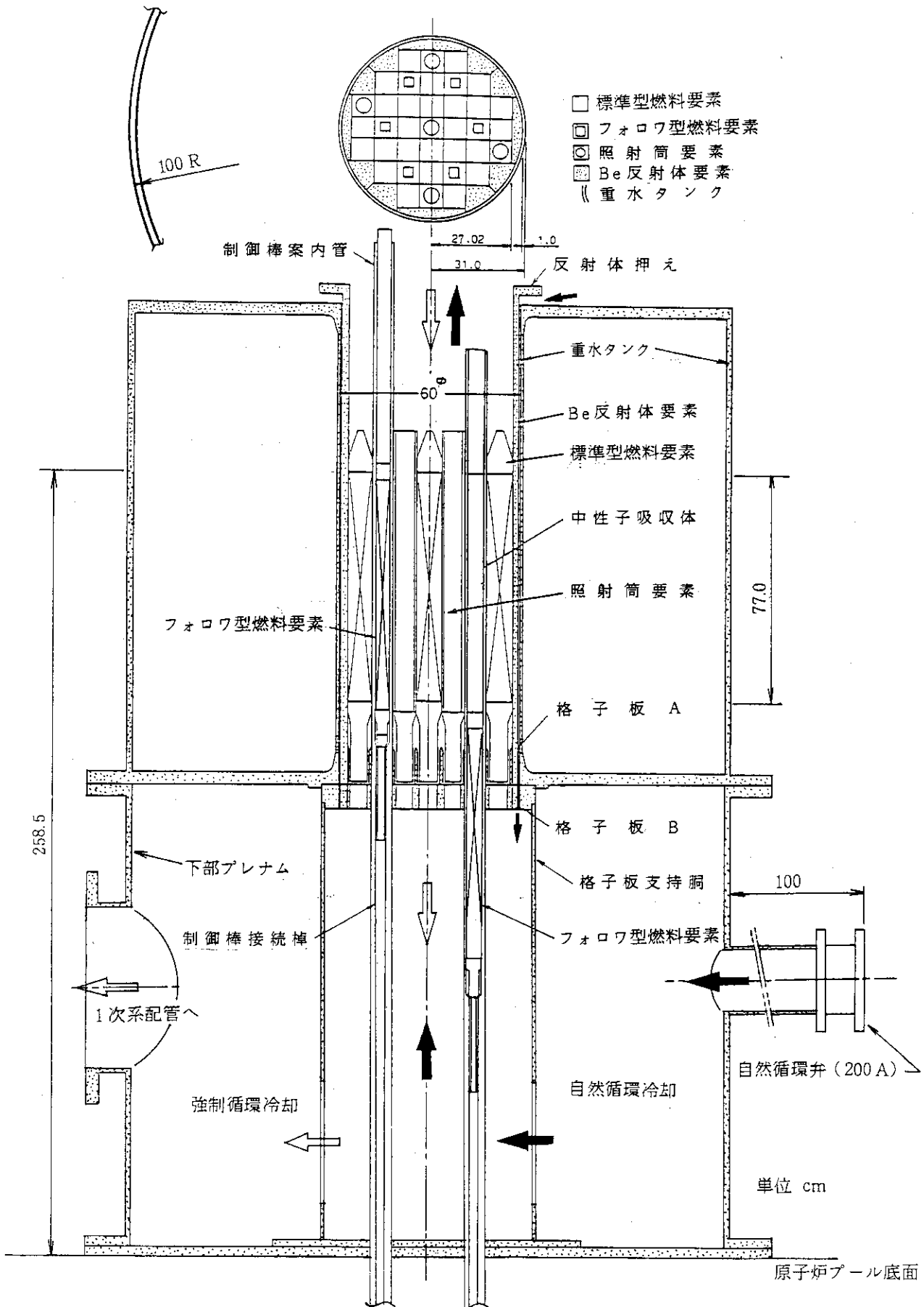


Fig. 3. 1. 2 JRR-3 改造炉炉心概略図

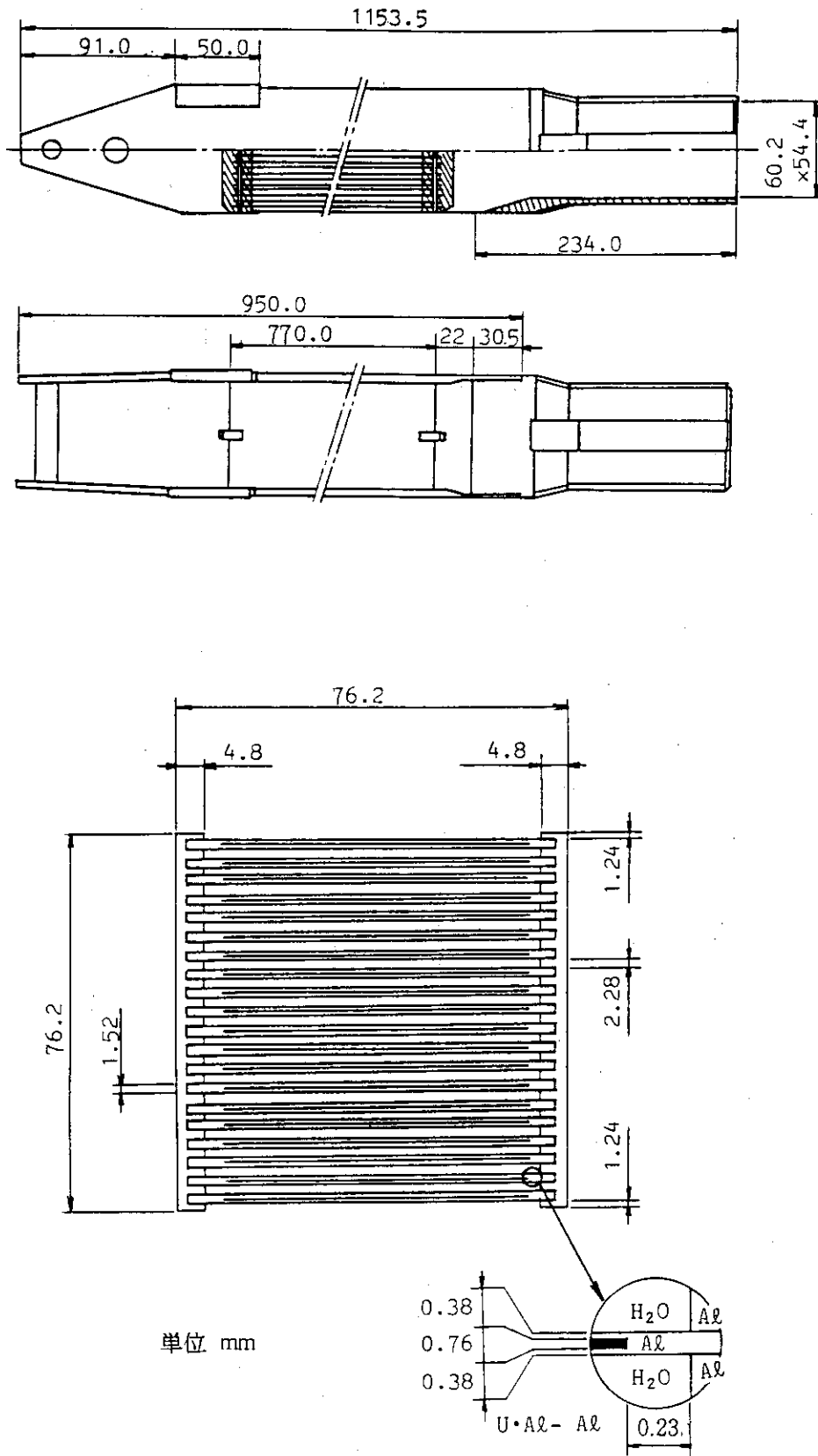


Fig. 3.1.3 標準型燃料要素

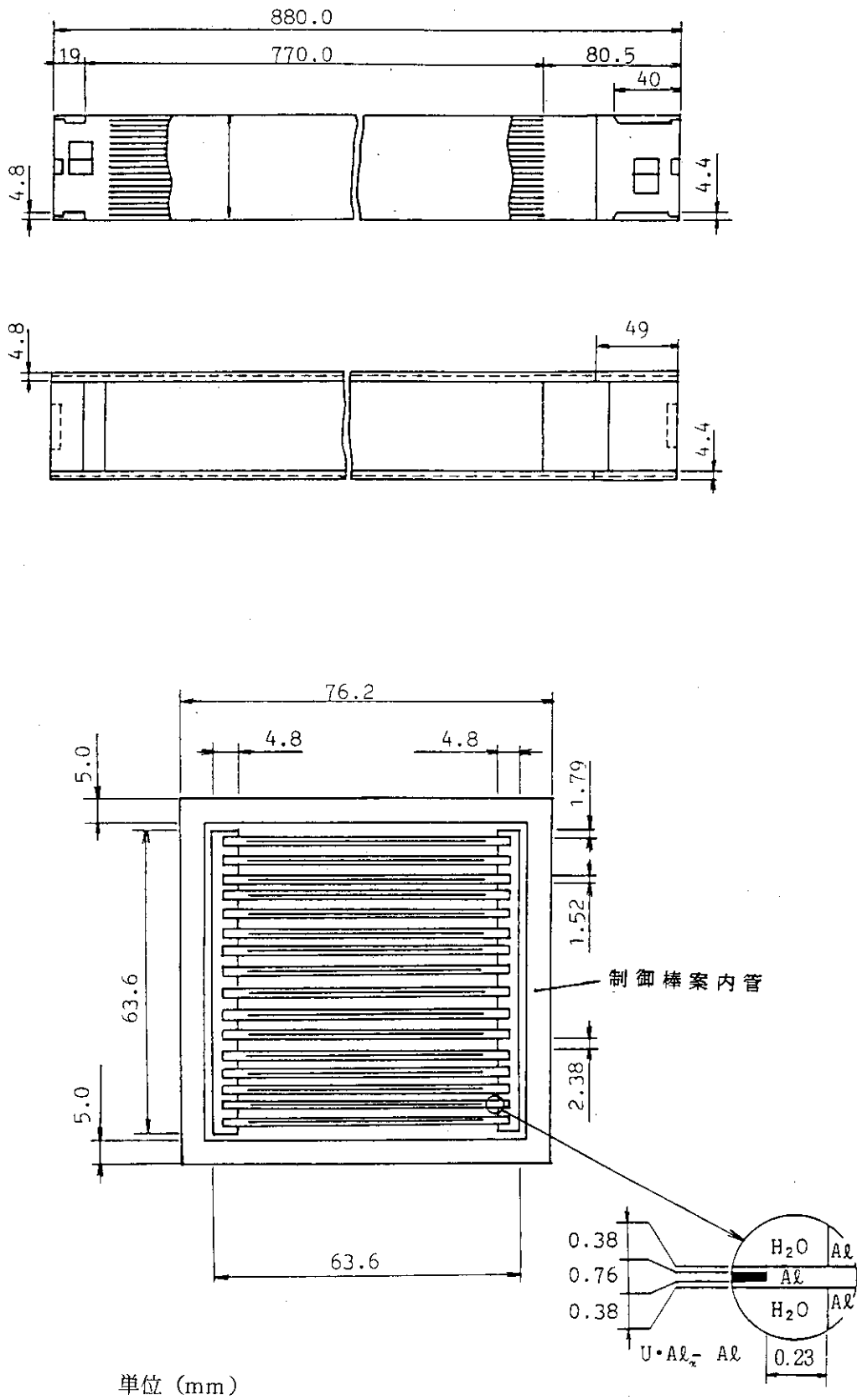


Fig. 3.1.4 フォロワ型燃料要素

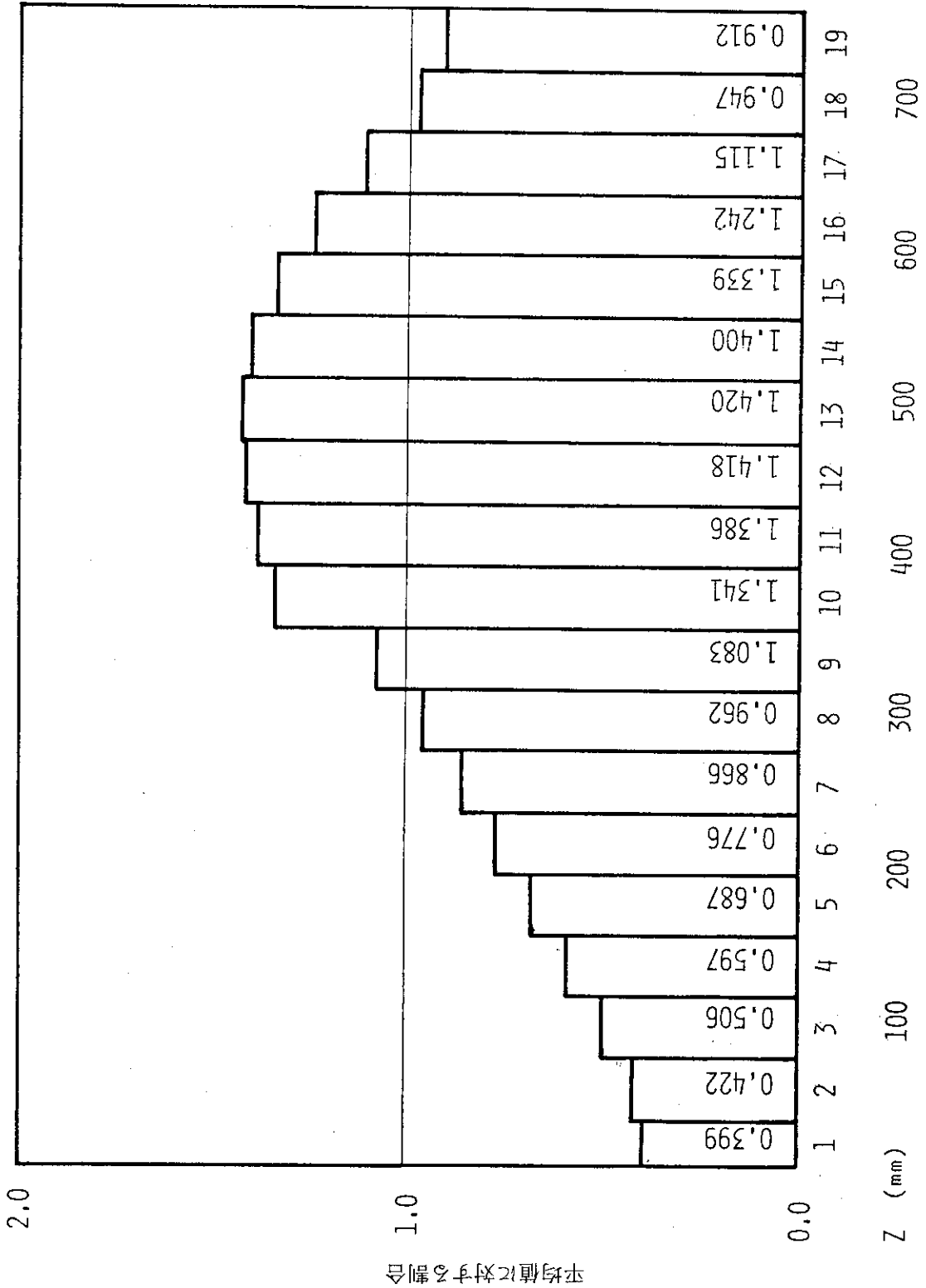
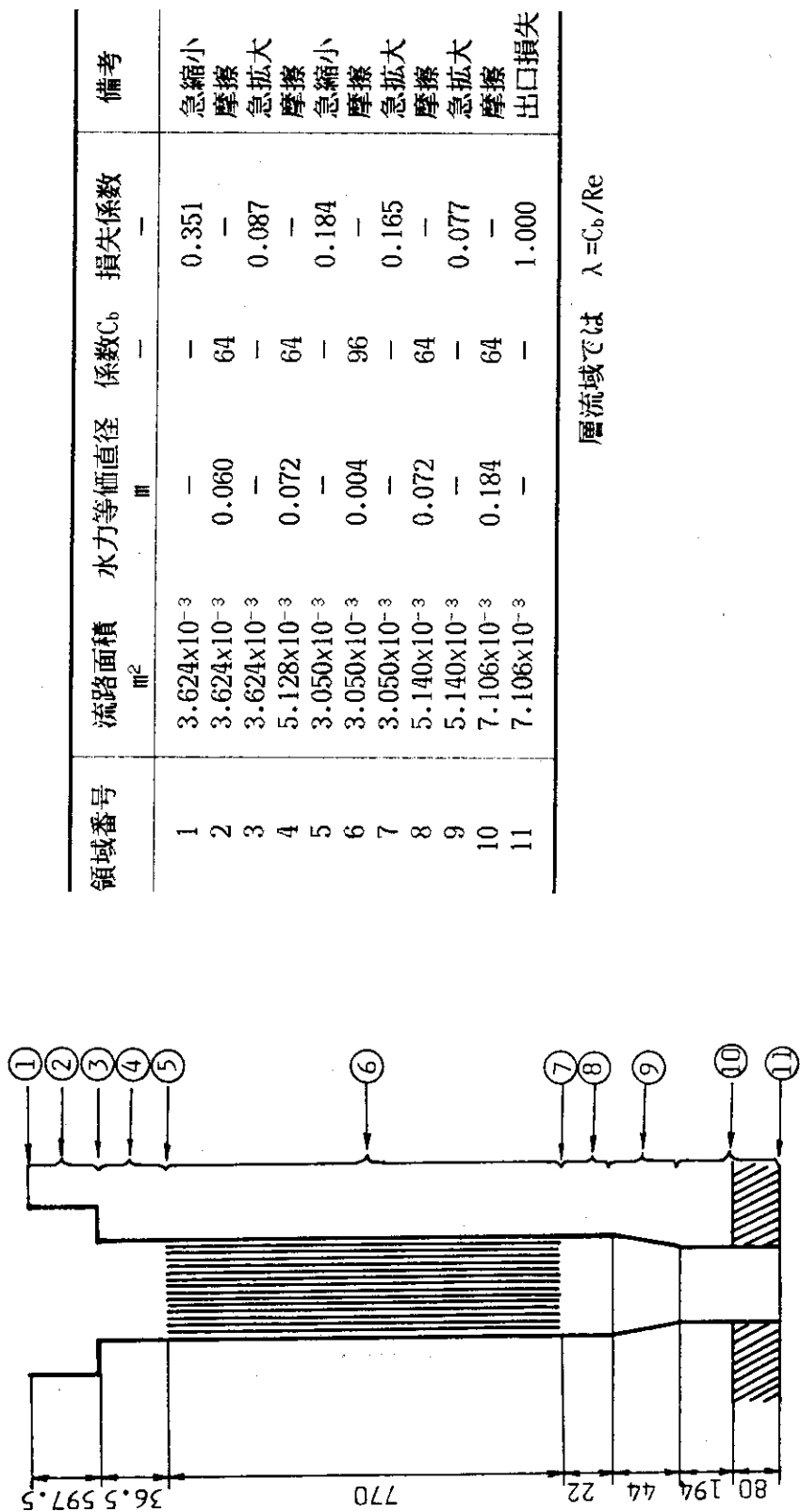


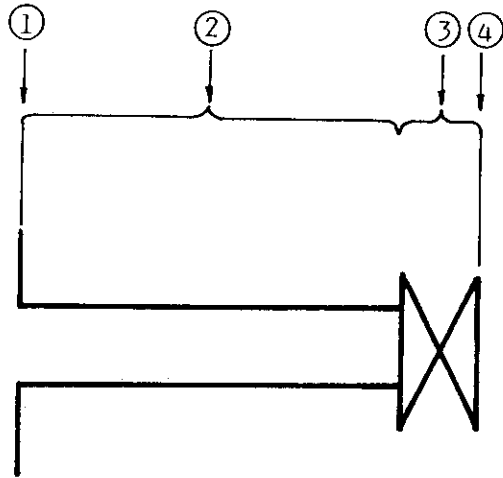
Fig. 3.2.2 自然循環冷却モデルの軸方向出力分布



領域番号	流路面積 m ²	水力等価直径 mm	係数C _b	損失係数	備考
1	3.624x10 ⁻³	—	—	0.351	急縮小
2	3.624x10 ⁻³	0.060	64	—	摩擦
3	3.624x10 ⁻³	—	—	0.087	急拡大
4	5.128x10 ⁻³	0.072	64	—	摩擦
5	3.050x10 ⁻³	—	—	0.184	急縮小
6	3.050x10 ⁻³	0.004	96	—	摩擦
7	3.050x10 ⁻³	—	—	0.165	急拡大
8	5.140x10 ⁻³	0.072	64	—	摩擦
9	5.140x10 ⁻³	—	—	0.077	急拡大
10	7.106x10 ⁻³	0.184	64	—	摩擦
11	7.106x10 ⁻³	—	—	1.000	出口損失

層流域では $\lambda = C_b / Re$

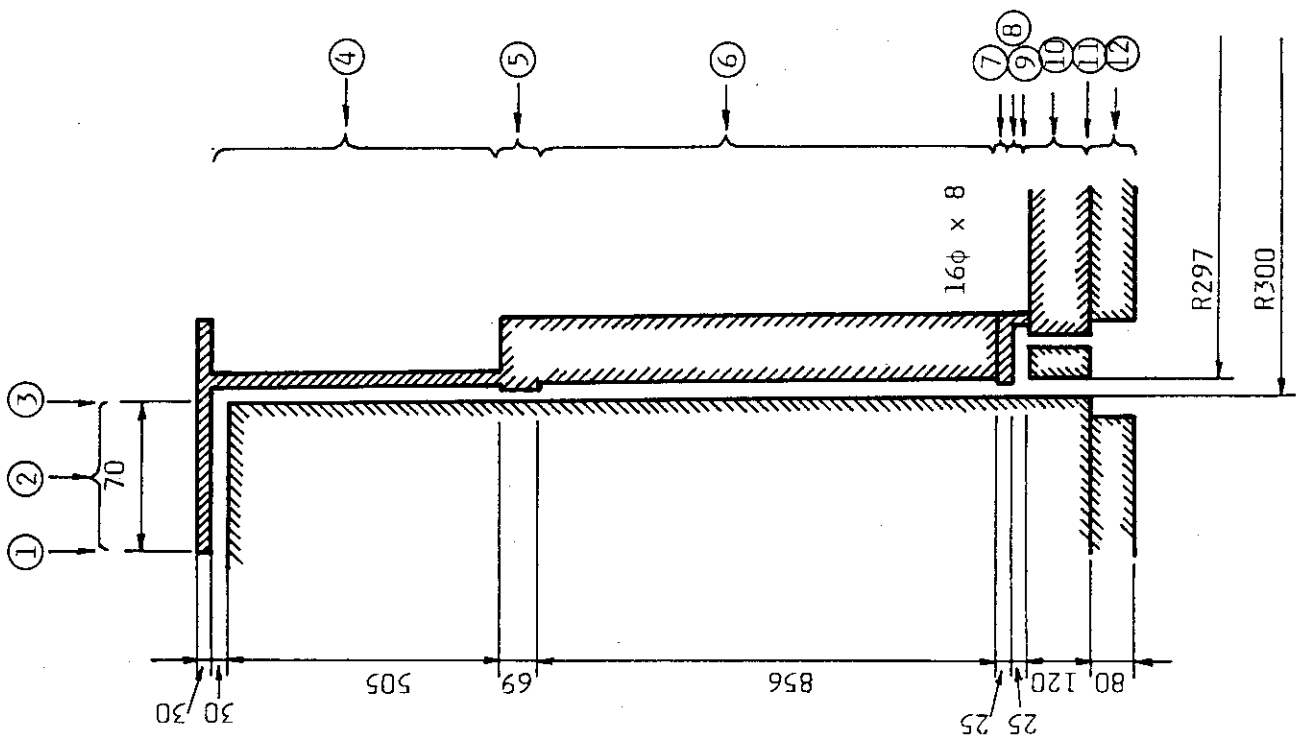
Fig. 3.2.3 標準型燃料要素圧力損失係数 (自然循環冷却時)



領域番号	流路面積 m ²	水力等価直径 m	係数C _b -	損失係数 -	備考
1	3.048×10 ⁻²	-	-	0.50	入口損失
2	3.048×10 ⁻²	0.20	64	-	摩擦
3	3.048×10 ⁻²	-	-	0.34	弁の損失
4	3.048×10 ⁻²	-	-	1.00	出口損失

層流域では $\lambda = C_b / Re$

Fig. 3.2.4 自然循環弁圧力損失係数



領域番号	流路面積 m ²	水力等価直径 m	係数C _b	損失係数	備考
1	5.655x10 ⁻²	—	—	0.50	入口損失
2	5.655x10 ⁻²	0.073	96	—	摩擦
3	5.627x10 ⁻³	—	—	0.450	急縮小
4	5.627x10 ⁻³	0.505	96	—	摩擦
5	4.134x10 ⁻³	0.069	96	0.203	急縮小、摩擦、急拡大
6	5.627x10 ⁻³	0.856	96	—	摩擦
7	4.134x10 ⁻³	0.025	96	0.486	急縮小、摩擦、急拡大
8	1.019x10 ⁻²	0.025	96	—	摩擦
9	7.235x10 ⁻³	—	—	0.145	急縮小
10	7.235x10 ⁻³	0.120	96*	—	摩擦、蔽しめの値
11	7.235x10 ⁻³	—	—	1.000	急拡大(出口)
12	8.764x10 ⁻²	0.080	96**	—	摩擦、蔽しめの値

層流域では λ = C_b/Re

Fig. 3.2.5 コア・バイパス圧力損失係数

4. 自然循環冷却時の熱水力解析結果

4.1 定格出力運転時の熱水力解析結果

Fig.4.1 および Fig.4.2 に平均チャンネル、ホット・チャンネルの温度分布をそれぞれ示す。平均チャンネル、ホット・チャンネル共に燃料板表面温度は飽和温度よりも十分低く、炉心内において沸騰を生ずることはない。ホット・チャンネルにおける飽和温度と燃料板表面温度との差の最小値は 8.13°C であり、Bergles-Rohsenow の式により求めた沸騰開始温度 (T_{ONB}) との差の最小値は 8.99°C である。また、燃料芯材温度の最高値は、ホット・チャンネルにおいても 101.5°C と十分低い値である。最小 DNBR は 10.18 であり、設計基準の 1.5 に対して十分な余裕を持っている。

以上の結果を Table 4.1 に安全審査時に行った手計算による解析結果²⁾と共に示す。表に示したように、本解析と手計算による解析結果では、1次冷却材最高温度、燃料板表面最高温度ともほぼ等しいことがわかる。両者の間で、1次冷却材最高温度が一致しているのに対して、燃料板表面最高温度に 1.5°C の差があるのは、軸方向出力分布の違い（詳しくは参考文献2）参照）による影響であると考えられる。本解析においては、沸騰開始温度余裕は、Bergles-Rohsenow の式を用いて求めた沸騰開始温度 (T_{ONB}) と表面温度との差をとった。安全審査時の解析では、沸騰開始温度余裕として飽和温度と表面温度との差をとった。ここで両解析の沸騰開始温度余裕を比較するために、本解析においても沸騰開始温度余裕として、飽和温度と表面温度との差をとれば、前述のように 8.13°C となる。安全審査時の解析では、約 7.8°C であるので両解析ともほぼ等しいと考えられる。

なお、炉心内の圧力分布については、定格出力運転時において炉心内の流速が約 3 cm/s と非常に遅いことにより圧力損失が小さく無視できる程度のものであることから、水頭による静圧によるものにほぼ等しい。

4.2 原子炉出力をパラメータとした熱水力解析結果

JRR-3 改造炉では、自然循環冷却時の定格出力を 200 KW と定めている。ここでは、自然循環冷却時の運転限界を把握するために、原子炉出力をパラメータとした解析結果について述べる。

Fig. 4.3 および Fig.4.4 に原子炉出力を 200 KW から 280 KW まで 20 KW ずつ増加させた場合の平均チャンネル、ホット・チャンネルの温度分布の変化をそれぞれ示す。平均チャンネルにおいては、原子炉出力が 280 KW においても燃料板表面温度は沸騰開始温度 (T_{ONB}) よりも十分低く、沸騰を生ずることはない。また、沸騰開始温度 (T_{ONB}) は原子炉出力が変化してもほとんど変化しない。この理由は、原子炉出力が 200 KW から 280 KW まで変化しても、炉心内の流速は約 3.0 cm/s ~ 約 3.6 cm/s と変化が少ないこと、及び流速が非常に遅く 4.1 で述べたように圧力損失が小さいことから炉心内の圧力分布が水頭による静圧にほぼ等しいことによるものである。

一方、ホット・チャンネルにおいては、原子炉出力が 280 KW のときに燃料板表面温度が沸騰開始温度 (T_{ONB}) をわずかに越え、沸騰が生ずる。本解析は、自然循環時の解析であるので、本来冷却材の入口圧力としては下部プレナムの圧力を用いるべきであるが、結果を厳しめに評価するために強制循環冷却時と同じく炉心上部の水頭圧 1.52×10^5 Pa を用いている。そのため 280 KW 運転時において沸騰が生ずるが、実際に炉心入口圧力として下部プレナムの圧力^(*) を用いれば原子炉出力 280 KW までは、沸騰を生ずることなく十分運転可能であると考えられる。また、この時の燃料板表面最高温度は、 111.1°C である。最小 DNBR に関しては、原子炉出力 280 KW 時においても 8.20 であり、設計基準の 1.5 に対して十分な余裕を持っている。

以上の結果を Table 4.2 に示す。

(*) 下部プレナム圧力 1.69×10^5 Pa を用いると、原子炉出力 280 KW 時において最小沸騰開始温度余裕は 0.26°C となる。

Table 4.1 自然循環冷却時の熱水力解析結果 (定格出力運転時)

評価項目	本解析値	安全審査解析値
1次冷却材炉心部通過流量 (kg/s)	2.325	約 2.3
1次冷却材最高温度 (°C)	平均チャンネル	-
	ホットチャンネル	約 95
燃料板表面最高温度 (°C)	平均チャンネル	-
	ホットチャンネル	約 103
燃料芯材最高温度 (°C)	平均チャンネル	-
	ホットチャンネル	-
最小沸騰開始温度余裕 (°C)	8.99	約 7.8 ¹⁾
最小DNBR	10.18	(約 9.0) ²⁾

注 1) 1) ホットチャンネルにおける飽和温度との差

注 2) 2) 熱出力240KWに対する概算値

Table 4.2 自然循環冷却時の熱水力解析結果 (原子炉出力パラメータ)

評価項目	200KW	220KW	240KW	260KW	280KW
1次冷却材炉心部通過流量 (kg/s)	2.325	2.450	2.554	2.668	2.778
1次冷却材最高温度 (°C)	平均チャンネル	55.6	57.5	58.4	59.2
	ホットチャンネル	94.9	97.6	100.5	102.9
燃料板表面最高温度 (°C)	平均チャンネル	58.3	59.4	60.6	61.6
	ホットチャンネル	101.5	104.5	107.8	110.6
燃料芯材最高温度 (°C)	平均チャンネル	58.3	59.4	60.6	61.6
	ホットチャンネル	101.5	104.5	107.8	110.6
最小沸騰開始温度余裕 (°C)	8.99	6.00	2.71	0.02	-0.61
最小DNBR	10.18	9.69	9.10	8.62	8.20

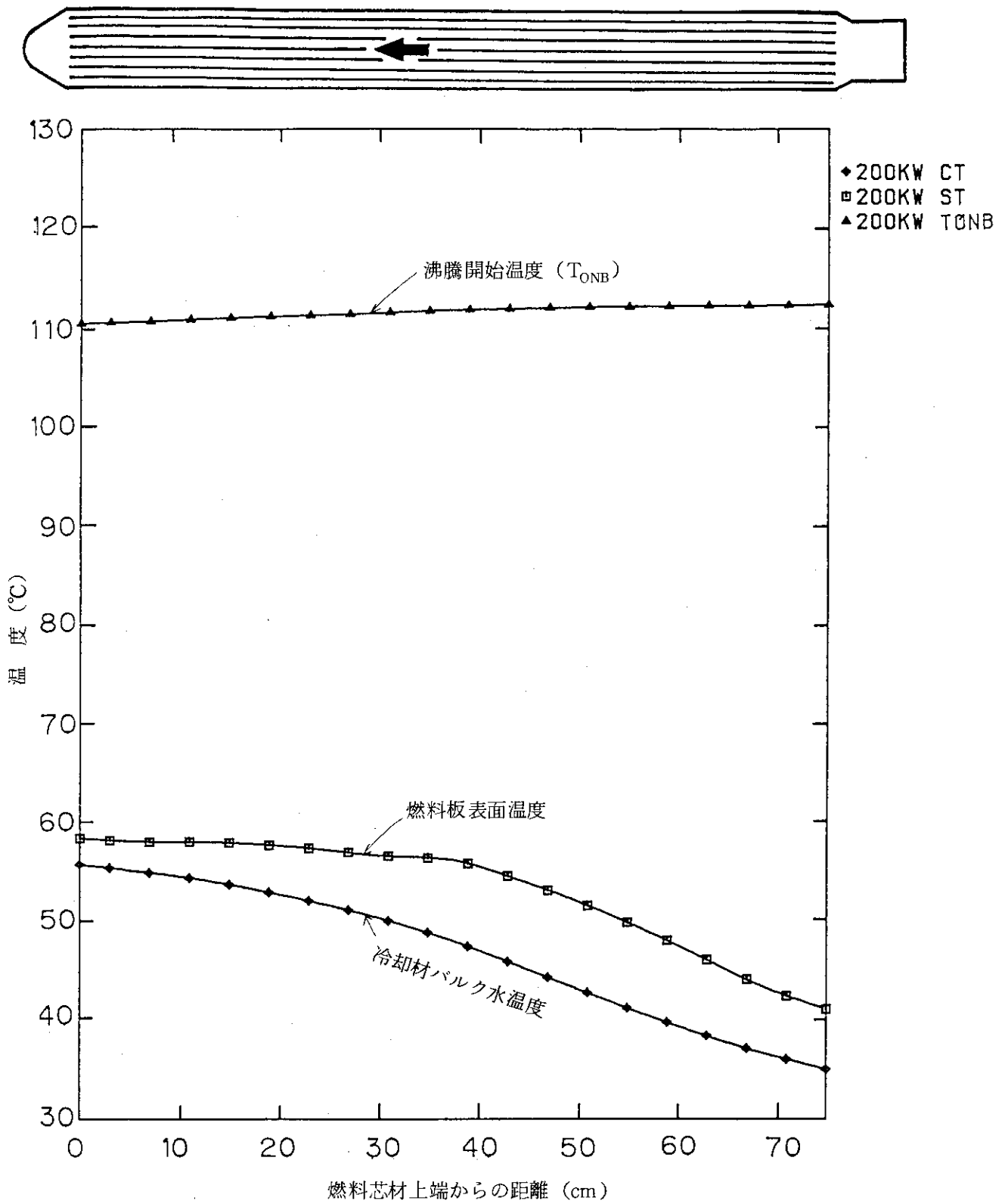


Fig. 4.1 自然循環冷却時の平均チャンネルにおける温度分布 (定格出力運転時)

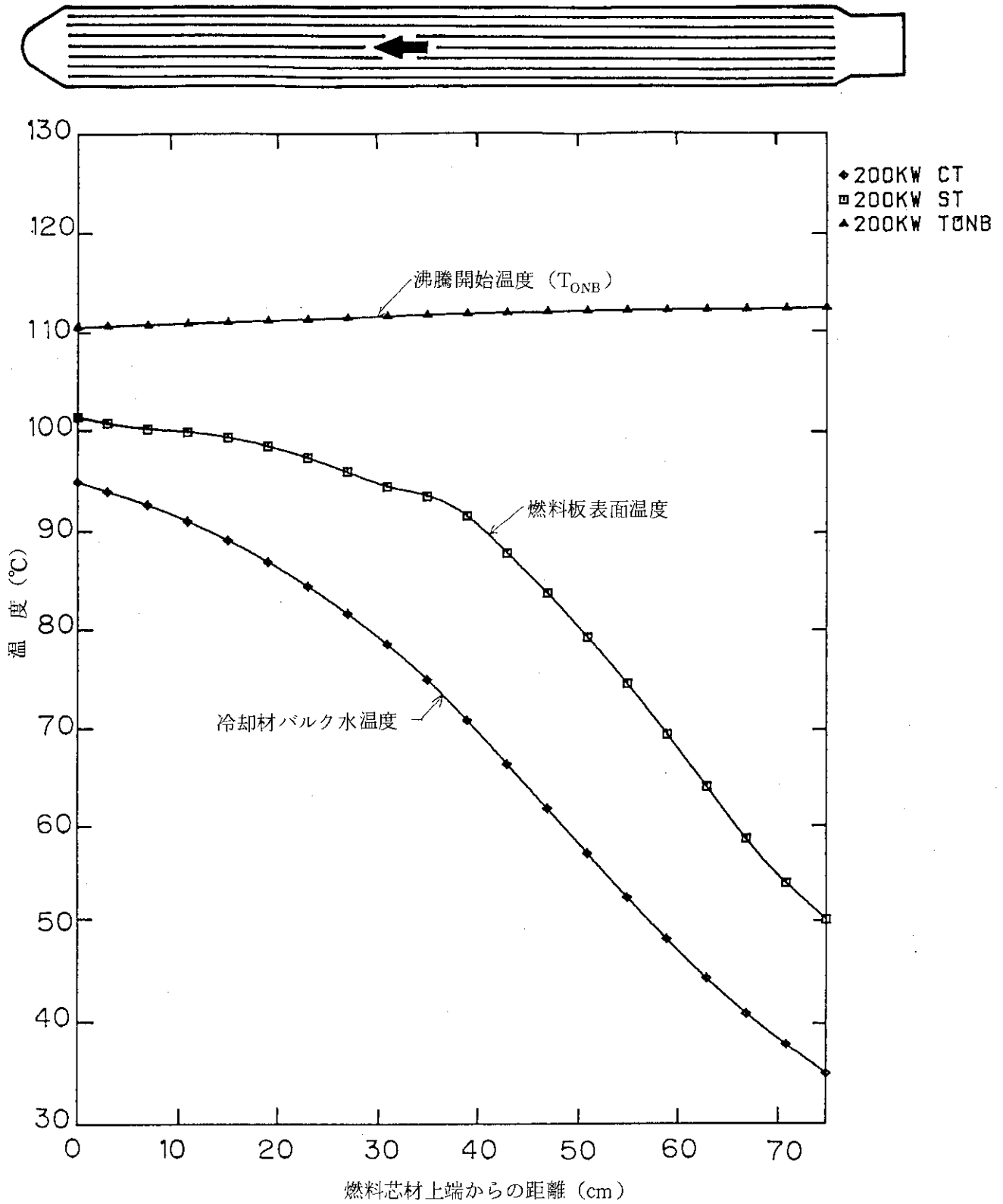


Fig. 4.2 自然循環冷却時のホット・チャンネルにおける温度分布 (定格出力運転時)

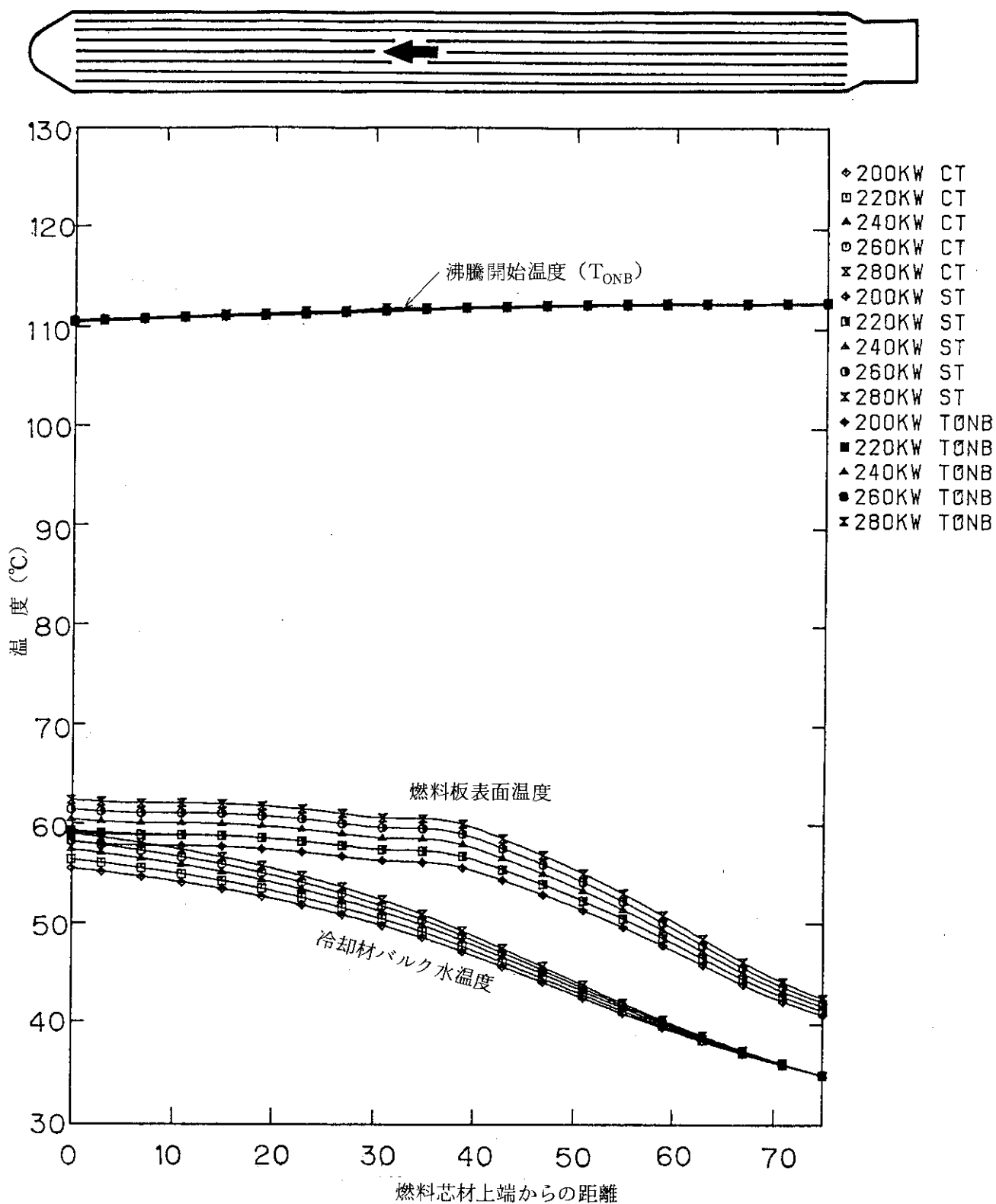


Fig. 4.3 自然循環冷却時の平均チャンネルにおける温度分布 (原子炉出力パラメータ)

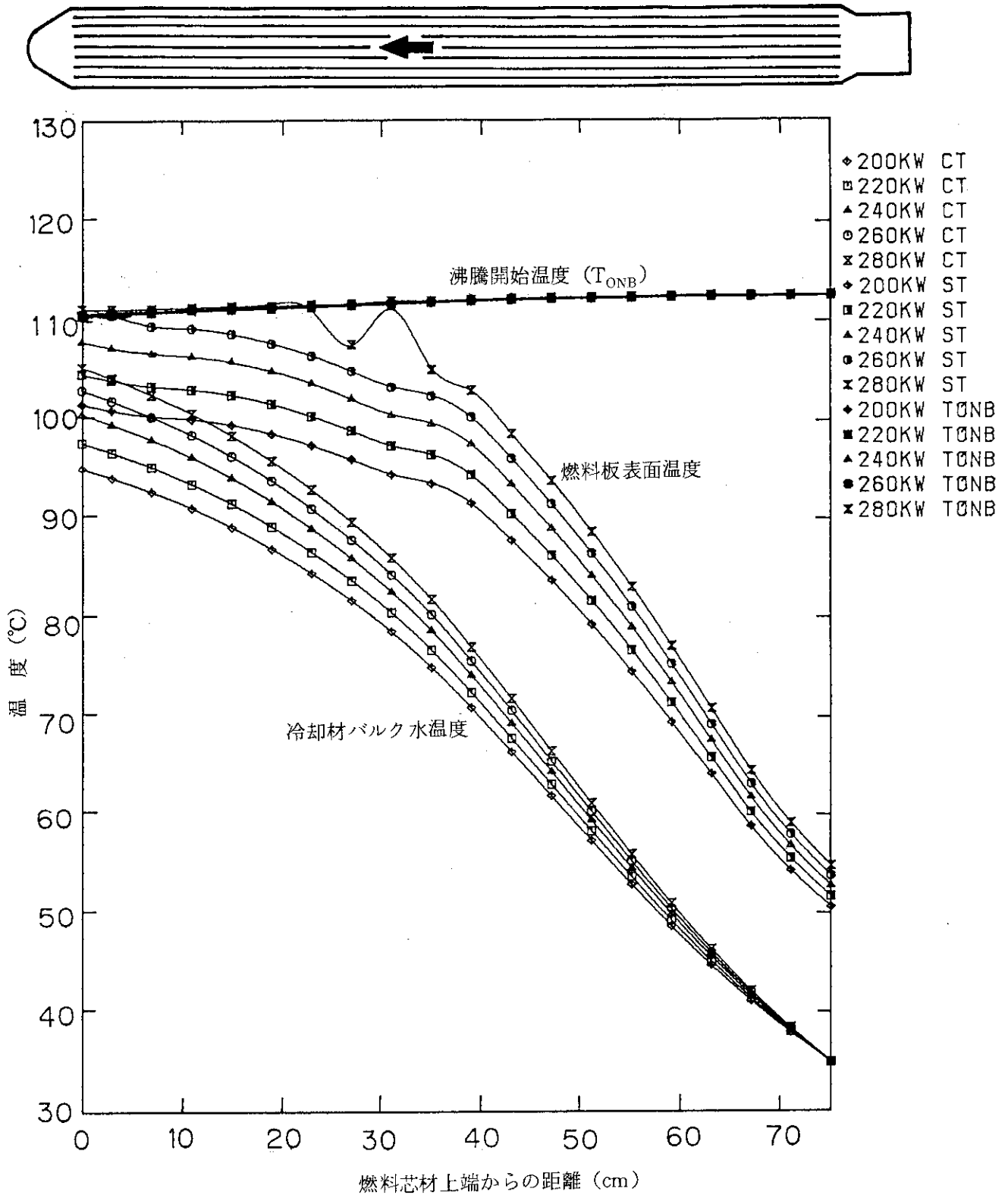


Fig. 4.4 自然循環冷却時のホット・チャンネルにおける温度分布 (原子炉出力パラメータ)

5. 結 言

JRR-3 改造炉の自然循環冷却時の定常熱水力特性の把握を目的として、研究炉用熱水力計算コード COOLOD-N を用いて炉心熱水力解析を行った。

解析の結果、自然循環冷却時においても、先に行った強制循環冷却時の解析結果¹²⁾と同様に熱水力設計値に対して十分な安全余裕があり、設計条件を満足することが確かめられた。さらに、COOLOD-N コードの自然循環時の計算結果は、安全審査時に行った簡易モデルでの計算結果とよい一致を示し、本計算コードの自然循環時の計算の妥当性が確かめられた。

謝 辞

本報告書をまとめるに当り、終始御鞭撻頂いた研究炉開発室大西信秋室長に深甚なる謝意を表す。また、研究炉開発室鶴田晴通室長代理には、核計算に関する貴重な資料および意見を頂いた。更に、COOLOD-N コードの開発に当っては、ニュークリア・データ株式会社吉村和美氏、小林容子氏に多大なる支援、協力を頂いた。ここに記し感謝の意を表す。

5. 結 言

JRR-3 改造炉の自然循環冷却時の定常熱水力特性の把握を目的として、研究炉用熱水力計算コード COOLOD-N を用いて炉心熱水力解析を行った。

解析の結果、自然循環冷却時においても、先に行った強制循環冷却時の解析結果¹²⁾と同様に熱水力設計値に対して十分な安全余裕があり、設計条件を満足することが確かめられた。さらに、COOLOD-N コードの自然循環時の計算結果は、安全審査時に行った簡易モデルでの計算結果とよい一致を示し、本計算コードの自然循環時の計算の妥当性が確かめられた。

謝 辞

本報告書をまとめるに当り、終始御鞭撻頂いた研究炉開発室大西信秋室長に深甚なる謝意を表す。また、研究炉開発室鶴田晴通室長代理には、核計算に関する貴重な資料および意見を頂いた。更に、COOLOD-N コードの開発に当っては、ニュークリア・データ株式会社吉村和美氏、小林容子氏に多大なる支援、協力を頂いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 渡辺終吉, "板状燃料を使用する研究炉の熱水力計算コード COOLOD", JAERI-M 84-162, 1984年9月
- 2) 数土幸夫, 安藤弘栄, 井川博雅, 篠津和夫, 大西信秋, "JRR-3改造炉の熱水力設計の基本的考え方", JAERI-M 84-079, 1984年5月
- 3) 数土幸夫, 井川博雅, 平野雅司, 大西信秋, "JRR-3改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討", JAERI-M 84-066, 1984年3月
- 4) 日本機械学会編, "機械工学便覧(改訂6版)第8編 水力学及び流体力学", p.13-15
- 5) Saha, Zuber, "Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling", Proc. 5th Int. Heat Trans. Conf., Tokyo, 1974, 4, p.175-179
- 6) Ahmad S.Y., "Axial distribution of bulk temperature and void fraction in a heated channel with inlet subcooling", Trans. ASME, Ser. C, 92-4, 1970, p.595-609
- 7) Zuber N., Stanb F.W. & Bijwaard G., "Vapor void fraction in subcooled boiling system", 3rd Int. Heat Transfer Conf., 1966, 5, p.24-38
- 8) Kroeger P.G. & Zuber N., "An analysis of the effects of various parameters on the average void fractions in subcooled boiling", Int. J. Heat Mass Transfer, 1968, 11, p.211-233
- 9) 日本機械学会編, "伝熱工学資料(改訂第3版)", 1980年
- 10) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一, "JRR-3改造炉の核設計", JAERI-M 84-099, 1984年5月
- 11) 数土幸夫, 井川博雅, 篠津和夫, 安藤弘栄, "JRR-3改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価", JAERI-M 84-119, 1984年6月
- 12) 篠津和夫, 井川博雅, 安藤弘栄, 数土幸夫, 大西信秋, "JRR-3改造炉の炉心定常熱水力特性解析", JAERI-M 84-238, 1985年1月
- 13) J.E. Houghtaling, Alain Sola and A.H. Spano, "Trangent temperature distribution in the SPERT1D-12/25 fuel plates during short-period power excursions", IDO 16884, 1964
- 14) Y.S. Touloukian and others, "Thermophysical properties of matter", vol.1, Thermal Conductivity, 1970
- 15) S. Nazaré, G. Ondracek and F. Thümmeler, "Investigation on UAl_x -Al dispersion fuels for high-flux reactors", J. Nuclear Materials 56, 251-259, 1975
- 16) Y.S. Touloukian and others, "Thermophysical properties of matter", vol.3, Thermal Conductivity, 1970
- 17) J.N. Elliott, "Tables of the Thermodynamic properties of heavy water", AECL-1673, Jan. 1963

付録 A COOLOD-Nコードの入力データについて

COOLOD-Nコードのデータ入力方法は、COOLODコードからの変更を極力少なくしたが自然循環流量の計算、熱伝達パッケージのオプション化等の機能が加ったことに伴い、いくつかの変更が加えられている。ここでは、COOLOD-Nコードを使用する際の簡便さを図り、COOLODコードと重複する部分についても説明する。

A-1. 入力データ作成上の留意点

入力データを作成するにあたって留意すべき点を以下に述べる。

(1) 平均発熱密度の計算は、燃料要素単位で行われる。従って、発熱部の体積が異なる燃料要素が何種類か炉心に存在する場合には、平均発熱密度は燃料要素の種類によって異ってくる。具体的には、平均発熱密度は次式のように計算され、この値に種々の発熱因子が付加される。

$$〔N型燃料要素内平均発熱密度〕 = \frac{〔原子炉熱出力〕}{〔炉心内燃料本数〕 * 〔N型燃料発熱部体積〕} \quad (A-1)$$

(2) 各燃料要素内通過流量の算出も同様の考え方で行われている。具体的には次式で計算される。

$$〔N型燃料要素内通過流量〕 = \frac{〔全燃料要素内通過流量〕 * FRATEN}{〔炉心内燃料本数〕} \quad (A-2)$$

ここで、FRATENはA-2で説明される入力データのCARD<F21>にて入力される流量分布因子である。

また、N型燃料要素内平均流速（1次冷却材流量を質量流量で与えた場合は、平均質量流束となる）は次式のように計算される。

$$〔N型燃料要素内平均流速〕 = \frac{〔N型燃料要素内通過流量〕}{〔N型燃料要素内全流路断面積〕} \quad (A-3)$$

各流路の流速決定因子（CARD<F53>のFRATEC）は、この『平均流速』に対する各流路における流速の比であり、前述のFRATENとは定義が異っているのでデータ作成に際しては注意を要する。なお、COOLOD-Nコードでは、単一の流路のみに着目し、その流路の流速を入力することもできる。

以下に述べる入力データの説明では、まずカード番号、続いて変数名と入力順が示される。次に各変数の説明が述べられているが、その順序は「変数名」、「形式」、「説明」となっている。「形式」とは、その変数が実数型か整数型か等について示されたもので以下のような記号で表わされている。

CARD コントロール・カード(1)

I AMAX, I MAX, JMAX, NMAX, NPLOT, KEY(1), KEY(2), KEY(3)
--

- I AMAX : (I) 計算ケース数(CARD<C> and/or <D>の数で最大10まで)
- I MAX : (I) 燃料芯材内半径方向節点数 (節点は等間隔に分割し, 最大5まで)
- JMAX : (I) 燃料芯材軸方向節点数 (INFORM ≤ 1) もしくはセグメント数
(INFORM = 2) : 最大20分割で21節点
軸方向節点番号 J は流入側を J = 1, 流出側を J = JMAX として扱う。
- NMAX : (I) 計算する燃料要素 (形状, 出力分布等が異なる) の種類 (最大5)
NMAX 種類の燃料要素を計算する場合, 後に述べる CARD<F1> ~
<F8> が NMAX 組必要である。
- NPLOT : (I) 燃料温度等の計算結果をプロットするかどうかのオプション
= 0 : プロットしない
= 1 : プロットする
- KEY(1) : (I) 冷却系温度計算のオプション
< 0 : 冷却塔, 熱交換器の冷却材温度のみ計算し, 燃料板温度計算はしない。
この場合, CARD<E1> 以下は不要
= 0 : 冷却材温度を計算し, その値を用いて燃料板温度を計算する。
≥ 1 : 炉心入口冷却材温度を入力し, 燃料板温度を計算する。
- KEY(2) : (I) 冷却材の流れの方向を指定するカード
= -1 : 上昇流
= 0 : 水平流
= 1 : 下向流
≥ 5 : 自然循環流 (自然循環計算モデルを使用する)
- KEY(3) : (I) 1次冷却材の指定 (2次冷却材はこの指定にかかわらず軽水の物性
値を使用する)
= 0 : 軽水
= 1 : 重水

CARD<C> 熱水力基本データ

QRR, PFLOW, TIN, DT, JMAX

本カードは, CARDにおいて KEY(1) < 1 のとき, 次の CARD<D>とともに I AMAX 組必要であり, KEY(1) ≥ 1 のときは CARD<C>のみ I AMAX 枚入力する。

- QRR : (R) 原子炉熱出力 (MW)
- PFLOW : (R) 1次冷却材流量もしくは流速
CARD<G1> において
KVELO = 0 のとき : 体積流量 (m³/min)
KVELO = 1 のとき : 質量流量 (kg/sec)
KVELO = 2 のとき : 流路内平均流速 (cm/sec)

を指定する。なお、CARDにてKEY(2)≥5として自然循環計算モデルを指定した場合、炉心流量はコード内で計算されるため、本データは使用されないが、何らかの値を入力する必要がある。

TIN : (R)

CARDにおいて

KEY(1)≥1のとき：1次冷却材炉心入口温度(°C)

KEY(1)≥1のとき：冷却塔外気湿球温度(°C)

DT : (R) "TIN"の温度増分値(°C)

JAMX : (R) 炉心入口温度または外気湿球温度を T_{inlet} とした場合、 $T_{inlet} = TIN + DT * (JAMX - 1)$ で示されるくり返し数。例えばKEY(1)=1, TIN=30.0, DT=5.0 および JAMX=3 とした場合、炉心入口温度が30.0°C, 35.0°C, 40.0°Cの3ケースについて燃料板温度を計算する。

CARD<D> 冷却塔, 熱交換器特性データ

SFLOW, AFLOW, CTKI, HEKI, SSCT, ZCT, SSHE, IHE

CARDにおいてKEY(1)<1のときのみ、CARD<C>と組み合わせてIAMX組入力する。KEY(1)≥1のときは不要。

SFLOW : (R) 2次冷却材流量(m³/min)

AFLOW : (R) 冷却塔ファン風量(m³/min)

CTKI : (R) 冷却塔エンタルピ基準総容積伝達率(kcal/m³hΔi)

HEKI : (R) 熱交換器熱貫流率(kcal/m²h°C)

SSCT : (R) 冷却塔全有効断面積(m²)

ZCT : (R) 冷却塔充填物高さ(m)

SSHE : (R) 熱交換器全伝熱面積(m²)

IHE : (I) 熱交換器の型式指定

=-1: 向流型熱交換器

=0: 並流型熱交換器

=m: 胴側mパス, 管側2mパス型熱交換器

(注) 数基の冷却塔および熱交換器もつような系をモデル化する場合、流量ならびに面積に関するデータに対して全体の合計値を入力する。

CARD<E1> 单相熱伝達相関式の係数

H₁, H₂, H₃, H₄, A, B, C, D, ITWC

单相熱伝達相関式は次式に示すように計算されるので、H₁~H₃, A~D(いずれもRタイプ)に適当な任意の値を入力し、使用したい熱伝達相関式を作成できる。

$$Nu = \langle H_1 \rangle * (Re^{\langle A \rangle} - \langle H_2 \rangle) * Pr^{\langle B \rangle} * 1.0 + \langle H_3 \rangle \frac{De^{\langle C \rangle}}{Z} * \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{\langle D \rangle}$$

ここに Nu : ヌセルト数 (-)
 Re : レイノルズ数 (-)
 Pr : プラントル数 (-)
 De : 水力等価直径 (cm)
 Z : 入口からの距離 (cm)
 μ_0 : 冷却材バルクの粘性係数 (dynes/cm²)
 μ_w : 壁面温度における冷却材バルクの粘性係数 (dynes/cm²)

ITWC : (I) 冷却材の温度依存物性値の基準温度 (TWC) の選択
 = 0 : TWC(0) = { [燃料板入口温度] + [燃料板出口温度] } / 2.0
 = 1 : TWC(1) = 軸方向 Z の位置における冷却材の断面混合平均温度
 = 2 : TWC(2) = { TWC(0) + [被覆材表面温度]_Z } / 2.0
 = 3 : TWC(3) = { TWC(1) + [被覆材表面温度]_Z } / 2.0

なお、 $D \neq 0$ のとき、ITWC の指定にかかわらず、 μ_w の基準温度は被覆材表面温度である。

注) CARD<G1>において熱伝達パッケージを使用した場合 (IHTC = 1) は、H₁ ~ H₃, A ~ D の値にかかわらず、パッケージ内に用いられている熱伝達相関式が各熱伝達様式に応じて選択される。

CARD<E2> 炉心の水力学的データ

FRATE, VIN, VOUT, PRESSIN, RAMF

FRATE : (R) FRATE = [全燃料要素内通過流量] / PFLOW (-)
 VIN : (R) 入口側プレナム冷却材流速 (cm/s)
 VOUT : (R) 出口側プレナム冷却材流速 (cm/s)
 PRESSIN : (R) 入口側プレナム冷却材圧力 (kg/cm² abs)
 RAMF : (R) 乱流域における管摩擦係数の指定
 = -1.0 : Blasius の式
 = 0.0 : Kärman-Nikuradse の式
 = ϵ/De : Cole-Brook の式

ただし、 ϵ は表面粗さ (cm), De は等価水力直径 (cm) である。

CARD<F1> 燃料要素タイトル・カード

TITLN

TITLN : (A40) 燃料要素タイトル (最初の文字は必ず英字とする)
 本カード以下 CARD<F1> ~ <F8> は NMAX 組 (CARD 参照) 必要である。

CARD<F21> 燃料要素基本パラメータ

NPMX, NFUEL, MA, UDENST, POROTY, IDPMX, IDCMX, EAREA, FRATEN

NPMX : (I) 当該型式の燃料要素内の燃料板の種類 (本データに対応して
 CARD<F51> ~ <F53> を NPMX 組入力する。最大 15)

NFUEL	:(I)	当該型式の燃料要素の炉心装荷数
MA	:(I)	燃料芯材の種類 = 0 : U-Al 合金燃料芯材 = 1 : U-Alx 分散型燃料芯材 = 2 : データ・テーブルによる芯材物性値の入力 ^(*)
UDENST	:(R)	燃料芯材のウラン密度 (g/cm ³) ^(**)
POROTY	:(R)	燃料芯材のポイド率 (-) ^(**)
IDPMX	:(R)	当該型式の燃料要素内の形状・寸法の異なる燃料板の種類 (本データに対応して CARD <F6> を IDPMX 枚入力する) ^(***)
IDCMX	:(R)	当該型式の燃料要素内の形状寸法等の異なる流路の種類 (本データに対応して CARD <F7> を IDCMX 枚入力する)
EAREA	:(R)	当該型式の燃料要素内全流路断面積 (cm ²)
FRATEN	:(R)	(A-2) 式にて示される流量分布因子 (-)

CARD <F22> 燃料芯材データ・テーブル

NUAL, (TUAL(I), UAL(I), I = 1, NUAL)

NUAL	:(I)	データ点数
TUAL	:(R)	温度 (°C)
UAL	:(R)	燃料芯材の熱伝導率 (W/cm °C)

本カードは CARD <F21> にて MA=2 を指定した場合のみ必要である。

CARD <F3> ホット・チャンネル・ファクタ

FR, FCOOL, FFILM, FHFLX, FCLAD, FBOND, FMEAT
--

FR	:(R)	半径方向出力分布因子
FCOOL	:(R)	冷却材温度上昇に関する工学的因子
FFILM	:(R)	フィルム温度上昇に関する工学的因子
FHFLX	:(R)	熱流束に関する工学的因子
FCLAD	:(R)	被覆材内の温度上昇に関する工学的因子
FBOND	:(R)	ボンド層の温度上昇に関する工学的因子
FMEAT	:(R)	燃料芯材の温度上昇に関する工学的因子

(*) MA = 2 を選択した場合は、このカードの直後の CARD <F22> にてデータをテーブル型式で入力する。

(**) UDENST および POROTY は燃料芯材が U-Alx 分散型燃料芯材の場合のみ有効である。

(***) NPMX と IDPMX の関連について説明する。燃料要素内に半径方向の出力分布がある場合、型状・寸法が同じであっても燃料板としては異った燃料板とみななければならない。しかし、このような場合、NPMX に出力分布の異なる燃料板の数を、IDPMX に型状寸法の違う燃料板の数を入力すれば、入力データの数を節約することができる。IDCMX についても同様である。

CARD <F41> 軸方向出力分布因子

FZ

FZ : (R) 軸方向の出力分布因子 (JMAX 枚入力する)
 JMAX : CARD 参照

本カードは、CARD <A> において INFORM=0 を指定した場合のみ必要である。

CARD <F42> 軸方向セグメントに対する各種因子

FZ, DDZ, ZET

FZ : (R) 軸方向出力分布因子
 DDZ : (R) 節点間距離もしくはセグメント長さ
 INFORM=1 : 節点間距離 (cm)
 INFORM=2 : セグメント長さ (cm)
 ZET : (R) セグメント間の形状損失係数 (本文 2.2.3 参照)

本カードは、CARD <A> において INFORM ≥ 1 を指定した場合のみ必要である。

CARD <F51> 燃料板タイトル・カード

TITLP

TITLP : (A20) 燃料板のタイトル (最初の文字は必ず英字とする。)

本カード以下 CARD <F51> ~ <F53> は、NPMX 組 (CARD <F21> 参照) 必要である。

CARD <F52> 燃料板に関するデータ

NPLATE, FLOC, IDPL, KMX, IPLOT, IOUT

NPLATE : (R) 燃料要素 1 体に含まれる当該燃料板の数
 FLOC : (R) 燃料要素内の出力分布因子 (当該燃料板の燃料要素に対するピーキング係数)
 IDPL : (I) 当該燃料板の形状指定番号。燃料板の形状寸法は CARD <F6> で指定するが、当該燃料板がその n 番目に対応する場合、その番号を入力する。
 KMX : (I) 燃料板に関する冷却条件の指定
 = 1 : 対称冷却として計算
 = 2 : 非対称冷却として計算
 IPLOT : (I) 当該燃料板の計算結果を図形出力するかしないかの選択。CARD において NPLOT=0 を指定した場合、IPLOT にかかわらず図形出力はされない。
 = 0 : プロットしない。
 = 1 : 流路 1 側のみ計算結果をプロットする。
 = 2 : 流路 2 側のみ計算結果をプロットする。
 = 3 : 流路 1 および 2 の計算結果をプロットする。

KMX = 1 の場合, I PLOT = 2, 3 を指定しても I PLOT = 1 とみなされる。

IOUT : (I) 当該燃料板に関する圧力, ONB 温度および DNB 熱流束等に関する熱流束を出力するかしないかの選択
 = 0 : 出力しない
 = 1 : 出力する

CARD <F53> 冷却流路に関するデータ

ICHL, NHEAT, FRATEC

本カードは, 燃料板をはさむ冷却流路に関するデータを指定するものであり, KMX 組 (CARD <F52> 参照) 入力する。

ICHL : (I) 当該流路の形状指定番号 (流路の形状および圧力損失データは IDCMX 組 (CARD <F21> 参照) の CARD <F70> ~ <F77> において指定するが, 当該流路がその何組目に対応するかを指定する。

NHEAT : (R) 流路内の冷却材の加熱条件の指定
 = 1.0 : 冷却材は片側の燃料板からのみ加熱される。(片側がアルミ板でできている流路のような場合)
 = 2.0 : 冷却材は両側の燃料板から加熱される。

FRATEC : (R) 燃料要素内平均流速 (燃料板間) に対する流路内平均流速の比 (-)

$$FRATEC = \frac{〔流路内平均流速〕}{〔燃料要素内平均流速〕}$$

CARD <F6> 燃料板の形状寸法に関するデータ

XA, XB, XC, YA, HA, HB, HC

本カードは IDPM (CARD <F21> 参照) 必要である。このうち n 番目のカードが CARD <F52> にて指定した IDPL = n に対応する。

XA : (R) 燃料芯材の半厚 (cm)
 XB : (R) 燃料芯材中心からボンド層までの厚み方向の距離 (cm)
 XC : (R) 燃料芯材中心から被覆材表面までの厚み方向の距離 (cm)
 YA : (R) 燃料芯材幅 (cm)
 HA : (R) 冷却材入口側の燃料板端から燃料芯材の入口側端までの距離 (cm)
 HB : (R) 燃料芯材の長さ^(*) (cm)
 HC : (R) 冷却材出口側の燃料芯材端から燃料板出口端までの距離 (cm)

(*) CARD <A> にて INFORM = 1 を指定したとき, $\sum_{j=1}^{JMAX-1} DDZ = HB$

INFORM = 2 を指定したとき, $\sum_{j=1}^{JMAX-1} DDZ = HB$

となる。但し, JMAX : CARD にて指定した燃料芯材軸方向節点数もしくはセグメント数
 DDZ : CARD <F42> にて指定した節点間距離もしくはセグメント長

CARD <F70> 冷却材流路の形状寸法に関するデータ(1)

XCHI, YCHI

このうち n 番目のカードが ICHL (K) = n に対応する。(CARD <F53> 参照)

CARD <A> において INFORM = 0 を選択した場合, 本カード以下 CARD <F70> ~ <F73> を IDC MX 組 (CARD <F21> 参照) 入力する。

XCHI : (R) 流路ギャップ (cm)
YCHI : (R) 流路幅 (cm)

CARD <F71> 流路の圧力損失計算データ (区間 1 : 燃料要素入口から燃料板入口まで)

ZETA(1), DH(1), HDE(1), AR(1)

ZETA(1) : (R) 燃料要素入口での抵抗係数 (-)
DH(1) : (R) 燃料要素入口から燃料板入口までの距離 (cm)
HDE(1) : (R) 燃料要素入口区間の水力等価直径 (cm)
AR(1) : (R) 燃料要素入口区間の断面積 (cm²)

本カードも CARD <F70> 同様 IDC MX 組必要である。

CARD <F72> 流路の圧力損失計算データ (区間 2 : 燃料板出口からプラグ入口まで)

ZETA(2), DH(2), HDE(2), AR(2)

ZETA(2) : (R) プラグ (区間 3) 入口での抵抗係数 (-)
DH(2) : (R) 区間 2 の距離 (cm)
HDE(2) : (R) 区間 2 の水力等価直径 (cm)
AR : (R) 区間 2 の断面積 (cm²)

本カードも CARD <F70> 同様 IDC MX 組必要である。

CARD <F73> 流路の圧力損失計算データ (区間 3 : プラグ入口から燃料要素出口まで)

ZETA(3), DH(3), HDE(3), AR(3)

ZETA(3) : (R) 燃料要素出口での抵抗係数 (-)
DH(3) : (R) 区間 3 の距離 (cm)
HDE(3) : (R) 区間 3 の水力等価直径 (cm)
AR(3) : (R) 区間 3 の断面積 (cm²)

本カードも CARD <F70> 同様 IDC MX 組必要である。

CARD <F74> 冷却材流路の形状寸法に関するデータ(2)

XCHI, YCHI, MSFLW

CARD <A> において INFORM ≥ 1, CARD において, KEY(2) <4> を選択した場合, 本カード以下 CARD <F74> ~ <F75> が IDC MX 組 (CARD <F21> にて指定) 必要である。

XCHI : (R) 流路ギャップ (cm)

YCHI : (R) 流路幅 (cm)
 MSFLW : (I) 流路流れ方向のセグメント個数

CARD <F75> 流路の圧力損失計算データ(2)

ZETA, DH, ZLAM, HDE, AR

本カードは、CARD <F74>にて指定したMSFLW枚必要である。従って、CARD <F74>と、MSFLW枚のCARD <F75>が、IDCMX組(CARD <F21>参照)必要となる。

ZETA : (R) 形状損失係数 (-)
 DH : (R) 流路長さ (cm)
 ZLAM : (R) 層流域における流路形状係数 C_b (-) (本文 2.2.3 参照)
 HDE : (R) 水力等価直径 (cm)
 AR : (R) 流路断面積 (cm²)

CARD <F76> 冷却材流路の形状寸法に関するデータ(3)

XCHI, YCHI, MSFLW, MSFUL

XCHI : (R) 流路ギャップ (cm)
 YCHI : (R) 流路幅 (cm)
 MSFLW : (I) 流路流れ方向のセグメント個数^(*)
 MSFUL : (I) 上記MSFLWのうち燃料板に相当する領域のセグメント番号(冷却材入口側から数えて何番目のセグメントであるかを指定)^(*)

CARD <A>において $INFORM \geq 1$, CARD において, $KEY(2) = 5$ を選択した場合, 本カード以下CARD <F76>~<F77>が必要となる。

CARD <F77> 流路の圧力損失データ(3)

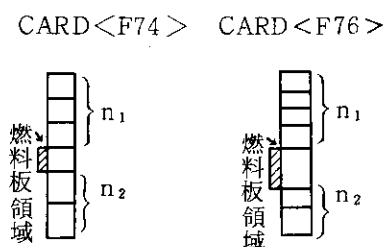
ZETA, DH, ZLAM, HDE, AR

本カードは、CARD <F76>にて指定したMSFLW枚必要である。従って、CARD <F76>とMSFLW枚のCARD <F77>が、IDCMX組(CARD <F21>参照)必要である。

ZETA : (R) 形状損失係数 (-)
 DH : (R) 各セグメントの流路長さ (cm)
 ZLAM : (R) 層流域における流路形状係数 C_b (-) (本文 2.2.3 参照)

(*) CARD <F74>とCARD <F76>におけるMSFLWは同じ変数名であるが意味が違うのでここにその違いを説明する。

CARD <F74>におけるMSFLWは流入、流出側の燃料板領域以外の流路セグメントの数であり、CARD <F76>におけるMSFLWは燃料板領域を1つのセグメントとみなしてこの領域を含めたセグメントの数である。



HDE : (R) 水力等価直径 (cm)
AR : (R) 流路断面積 (cm²)

CARD <G1> コントロール・カード(2)

KVELO, JUMAX, JLMAX, IHTC, KBFLG, NCMAX, NATIP

本カードは、CARD < A > において INFORM ≥ 1 と指定した場合のみ必要である。

KVELO : (I) 流量もしくは流速 (PFLOW: CARD < C >) の入力方法の選択
= 0 : 体積流量として指定する
= 1 : 質量流量として指定する
= 2 : 流路内の平均流速として指定する

JUMAX : (I) 入口側非加熱セグメント数

JLMAX : (I) 出口側非加熱セグメント数

IHTC : (I) 熱伝達相関式の選択
= 0 : COOLOD コードのオリジナル熱伝達相関式
= 1 : 熱伝達パッケージ

KBFLG : (I) ボイド率計算方法の選択
= 0 : 核沸騰域におけるボイド率計算式のみを使用する。
> 0 : 核沸騰域およびサブクール沸騰域におけるボイド率計算式を使用する。
サブクール域におけるボイド率計算式は以下のように選択できる。
= 1 : 本文 (2.2.5.8) 式を使用する
= 2 : 本文 (2.2.5.10) 式を使用する
= 3 : 流量 G が、CARD < G5 > における G_{LIM} よりも小さいとき (2.2.5.8) 式、大きいとき (2.2.5.10) 式を用いる。

NCMAX : (I) 炉心バイパス流路 (非加熱流路) 数

NATIP : (I) 自然循環流量計算オプション (1 を指定すると、自然循環流量計算に使用する熱出力を計算する際にホット・チャンネル係数を考慮する)

上記変数のうち、NCMAX, NATIP については、CARD < B > において KEY (2) < 5 を指定した場合、0 を入力する。

CARD <G2> 炉心バイパス流路データ

MSFLOW

MSFLOW : (I) 炉心バイパス (非加熱) 流路のセグメント数

本カード以下 CARD < G2 > ~ < G3 > は NCMAX (CARD < G1 > 参照) 組必要である。

CARD <G3> バイパス流路の圧力損失データ

ZETA, DH, ZLAM, HDE, AR

本カードは MSFLW 枚 (CARD < G2 > 参照) 必要である。従って CARD < G2 > と MSFW 枚の CARD < G3 > が NCMAX 組必要となる。

ZETA : (R) 圧力損失係数 (-)
 DH : (R) 流路長さ (cm)
 ZLAM : (R) 層流域における流路形状係数 C_b (-) (本文 2.2.3 参照)
 HDE : (R) 水力等価直径 (cm)
 AR : (R) 流路断面積 (cm^2)

CARD<G4> 流路形状指定データ

((JMSH(NP, K), NP=1, NPMX), K=1, KMX)

本カードは、CARDにおいてKEY(2)<5を指定した場合(JUMAX+JLMAX)枚がNMAX組、YEY(2)=5を指定した場合、MSFLW枚が(NMAX+NCMAX)組必要である。(JUMAX, JLMAX: CARD<G1>, MSFLW: CARD<G2>, NMAX: CARD, NCMAX: CARD<G1>, NPMX: CARD<F21>, KMX: CARD<F52>参照)

JMSH : (I) 流路形状指定フラグ

CARD<G5> ボイド率算出データ・カード

CB, GLIM

本カードは、CARDにおいてKEY(2)=5のときのみ必要である。

CB : (R) Zuber 定数 (本文 2.2.5, (2.2.5.10) 式, (2.2.5.11) 式参照)
 CB=1.18 または 1.41 が推奨される。

GLIM : (R) CARD<G1>においてKBFLG=3を指定した場合のボイド率算出式の選択基準となる流量 (kg/s) (本文 2.2.5 参照)

CARD<G6> デバッグ出力指定カード

IDBG(I), I=1, 25

IDBG(I), I=26, 50

本カードは2枚1組となっている。(I=1~25, 26~50)

IDBG : デバッグの必要なサブルーチンの番号に8を入力する。不要の場合は0を入力する。各サブルーチンの番号はTable A-1のとおりである。

CARD<P1> 図形寸法コントロール・カード

WITHX, WITHY, TMIN, TMAX, PMIN, PMAX, HMIN, HMAX
--

本カード以下CARD<P1>~<P4>は、CARDにてNPLOT=0を指定した場合は不要である。

WITHX : (R) X軸の長さ (max. 200 mm)
 WITHY : (R) Y軸の長さ (max. 230 mm)
 TMIN : (R) 温度座標の最小値 ($^{\circ}\text{C}$)
 TMAX : (R) 温度座標の最大値 ($^{\circ}\text{C}$)
 PMIN : (R) 圧力座標の最小値 ($\text{kg/cm}^2\text{a}$)

PMAX : (R) 圧力座標の最大値 (kg/cm²a)
 HMIN : (R) 熱流束座標の最小値 (W/cm²)
 HMAX : (R) 熱流束座標の最大値 (W/cm²)

注) 各座標軸は、IDPLOT (CARD<P4>参照) において温度、圧力、熱流束のプロットが指定されなければプロットされないが、その場合にも何らかの値を入力しておく必要がある。

CARD<P2> 図形処理コントロール・カード

NEWI

本カード以下 CARD<P2>~<P3>は IPLOT* NPMX組必要である。(IPLOT: CARD<F52>, NPMX: CARD<F21>参照)

NEWI : (A4) 当該燃料板の計算結果を新しいページにプロットするか、前のグラフに重ね書きするかの選択
 = "NEW" : 新しいページにプロットする
 = "OLD" : 前のグラフに重ね書きする

1番最初の図形の場合には、必ず "NEW" を指定しなければならない。

CARD<P3> 図形タイトル・カード

TITLE

TITLE : (A20) 図形のタイトル

CARD<P2>にて "OLD" を指定している場合は不要である。

CARD<P4> 図形出力コントロール・カード

IDPLOT(1)~(7), NSMBL(1)~(7)

プロットされる計算結果は7種類で、(1)から(7)まで次のように対応している。

- (1) 冷却材温度
- (2) 被覆材表面温度
- (3) 燃料芯材最高温度
- (4) 飽和温度
- (5) ONB 温度
- (6) 絶対圧力
- (7) ホット・チャンネル被覆材表面熱流束

IDPLOT : (I) 該当する計算結果をプロットするかしないかの選択およびプロットする場合にはその『線』の種類

= 0 : プロットしない

=11~15: 実線でプロットする。数値が大きくなるほど線は太くなる。

=21~25: 破線でプロットする。線の太さは上記11~15に対応する。

NSMBL : (I) 線上に記号をプロットするかしないかの選択

= 0 : 記号をプロットしない。

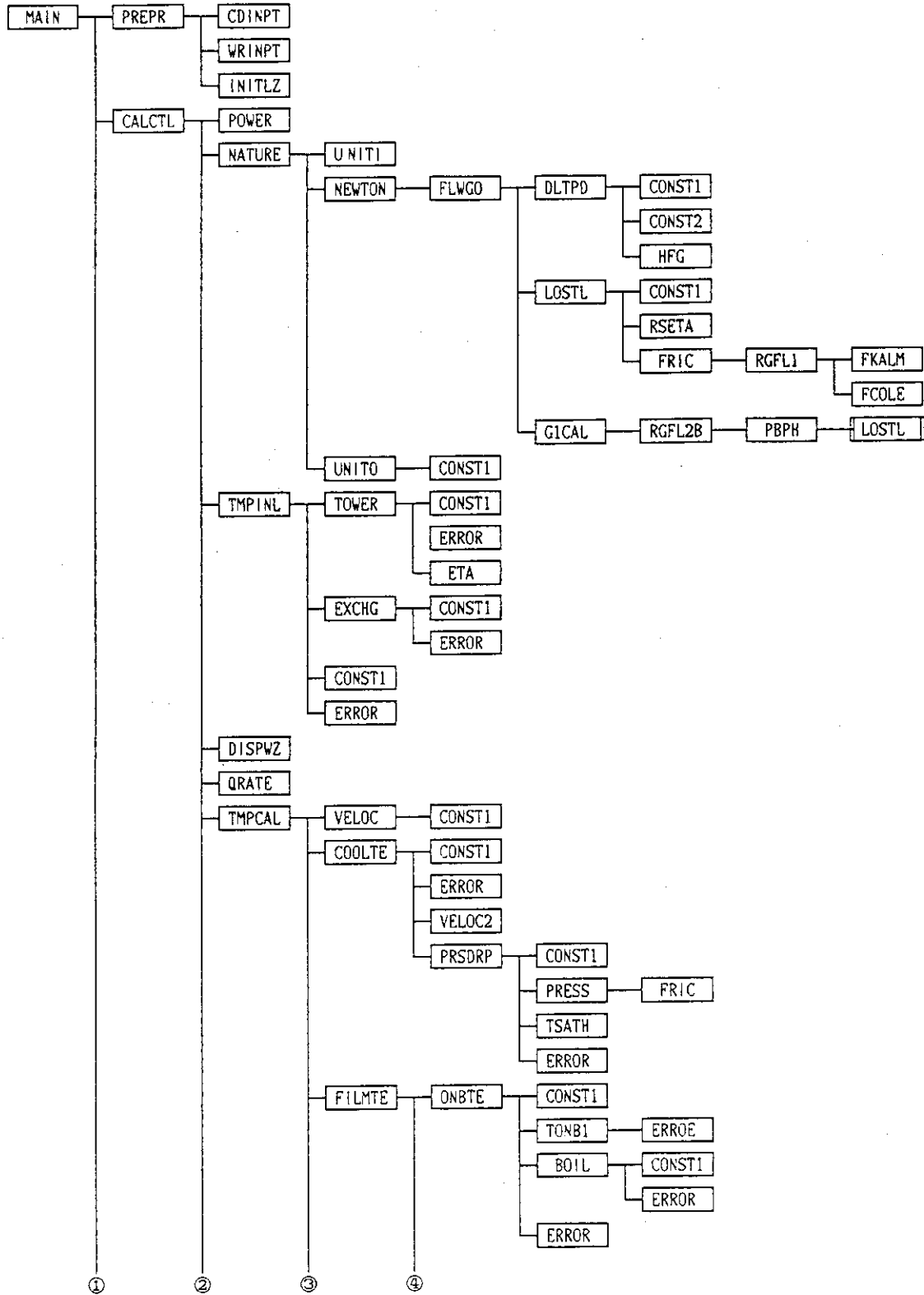
- = 1 : ○記号を線上にプロットする
- = 2 : △記号を線上にプロットする
- = 3 : +記号を線上にプロットする
- = 4 : ×記号を線上にプロットする
- = 11 : *記号を線上にプロットする

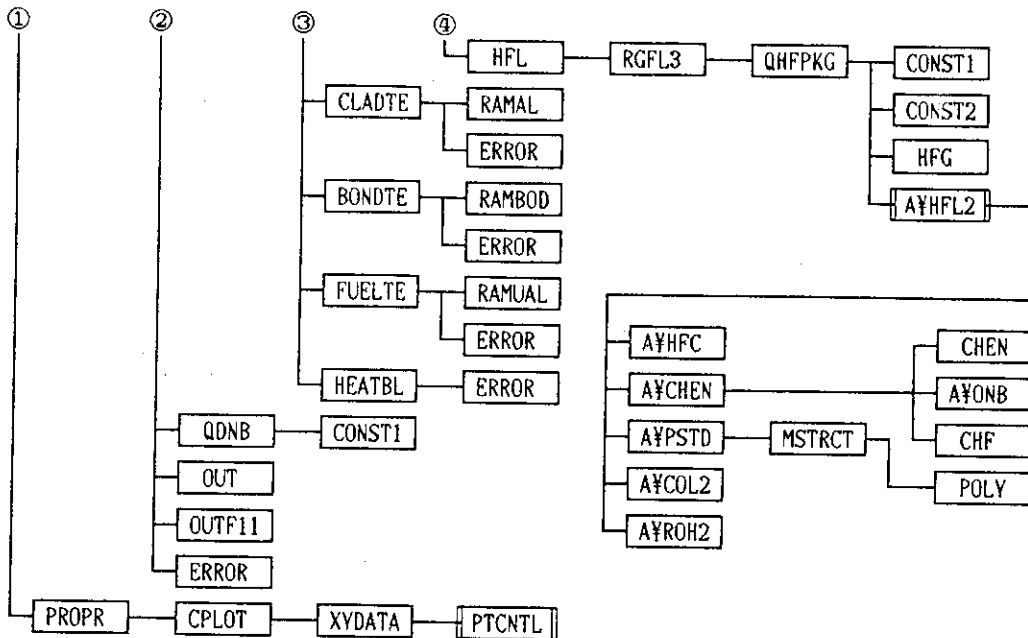
Table A-1 デバッグフラグ・サブルーチン番号対応表

サブルーチン名	No.	サブルーチン名	No.
	1	HEATBL	31
	2	QHFPKG	32
CALCTL	3		33
	4	PRESS	34
	5	QDNB	35
INITLZ	6		36
POWER	7	CONST1	37
TMPINL	8	CONST2	38
ELEPWR	9		39
DISPWZ	10	NATURE	40
QRATE	11	FLWGO	41
TMPCAL	12	DLTPD	42
	13	LOSTL	43
	14		44
	15	GICAL	45
VELOC	16		46
PRSAT	17	PBPH	47
RGFLI	18	REN	48
	19	UNITI	49
	20	UNITO	50
	21		
	22		
	23		
COOLTE	24		
PRSDRP	25		
FILMTE	26		
ONBTE	27		
CLADTE	28		
SONDTE	29		
FUELTE	30		

付録 B COOLOD-Nコードのプログラム構成

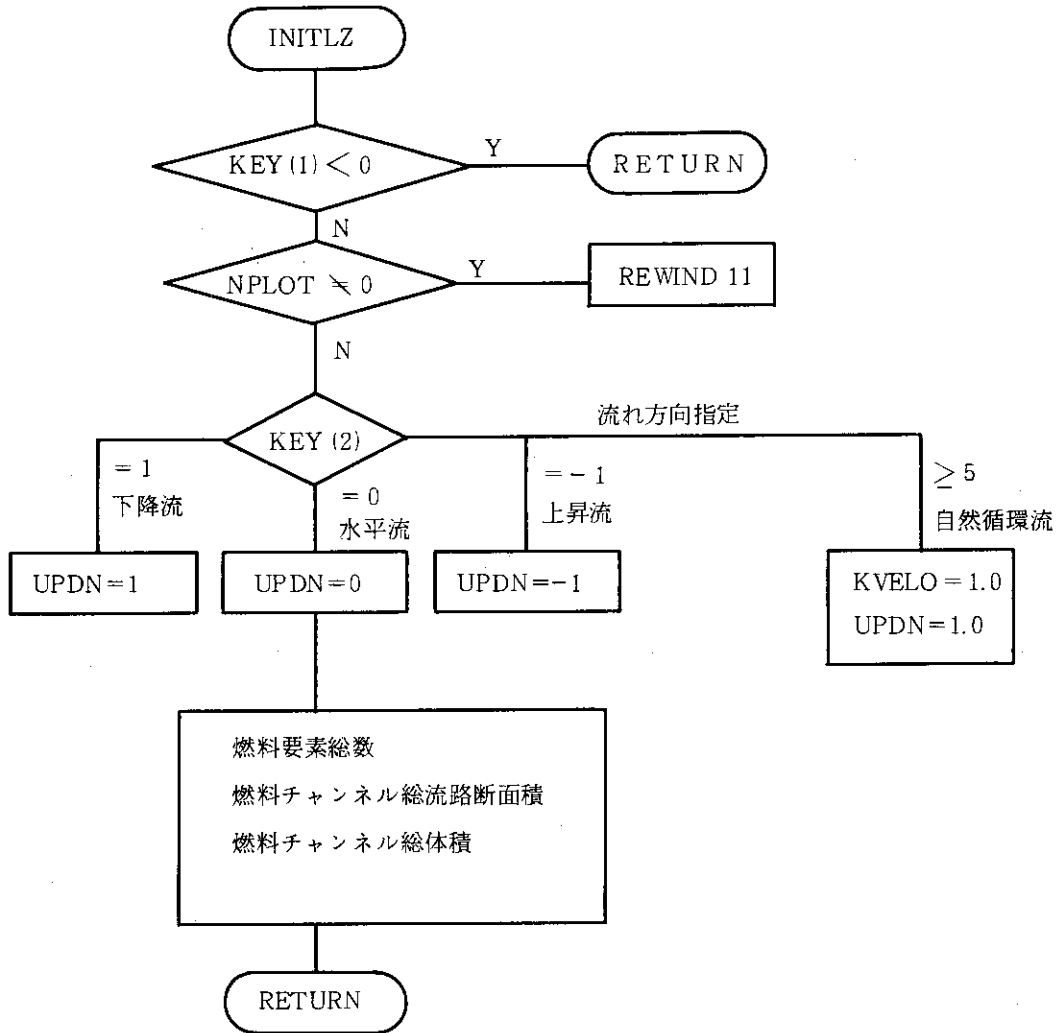
B-1 COOLOD-Nコード Tree



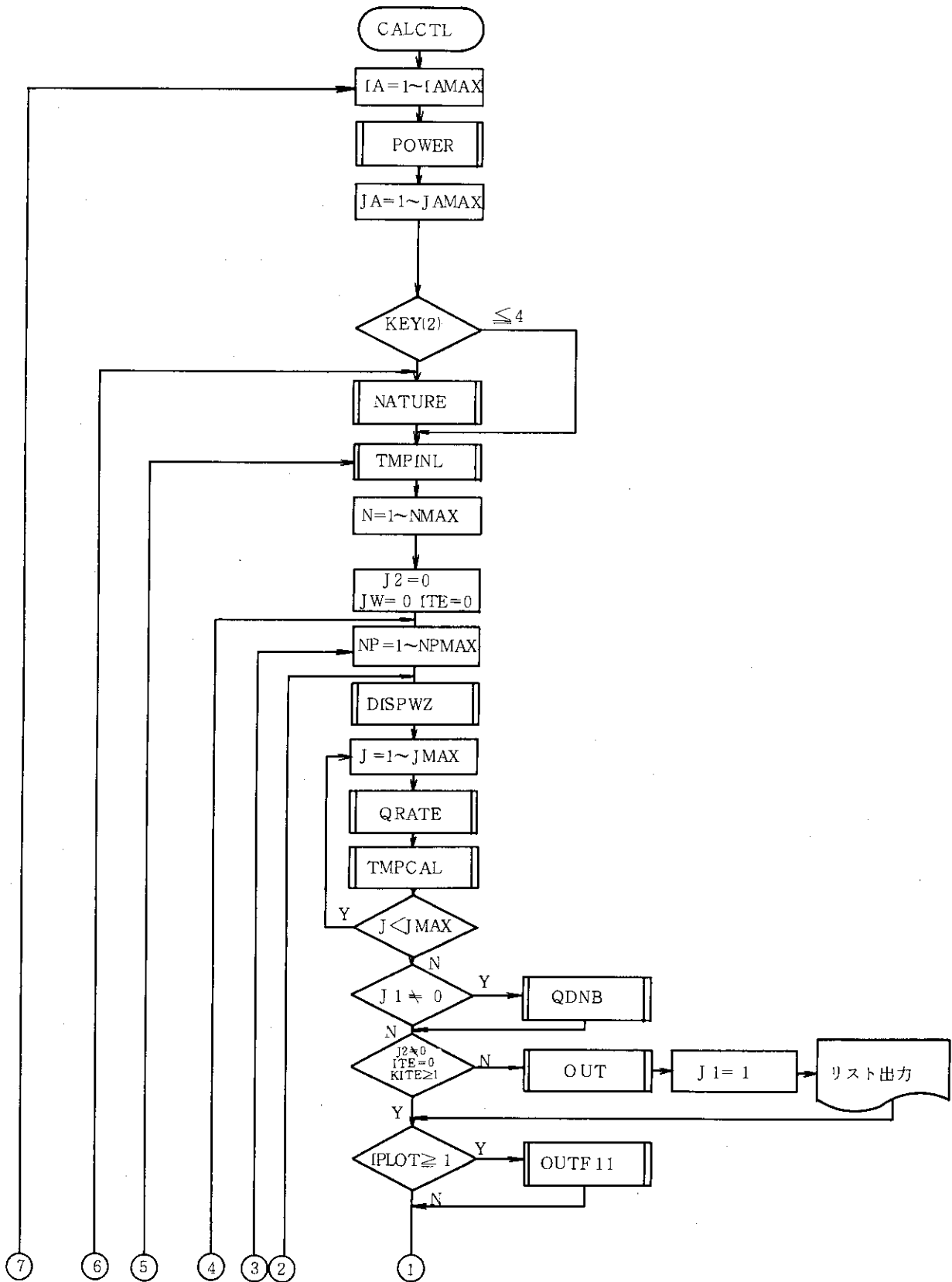


B-2 主なルーチンの計算フロー

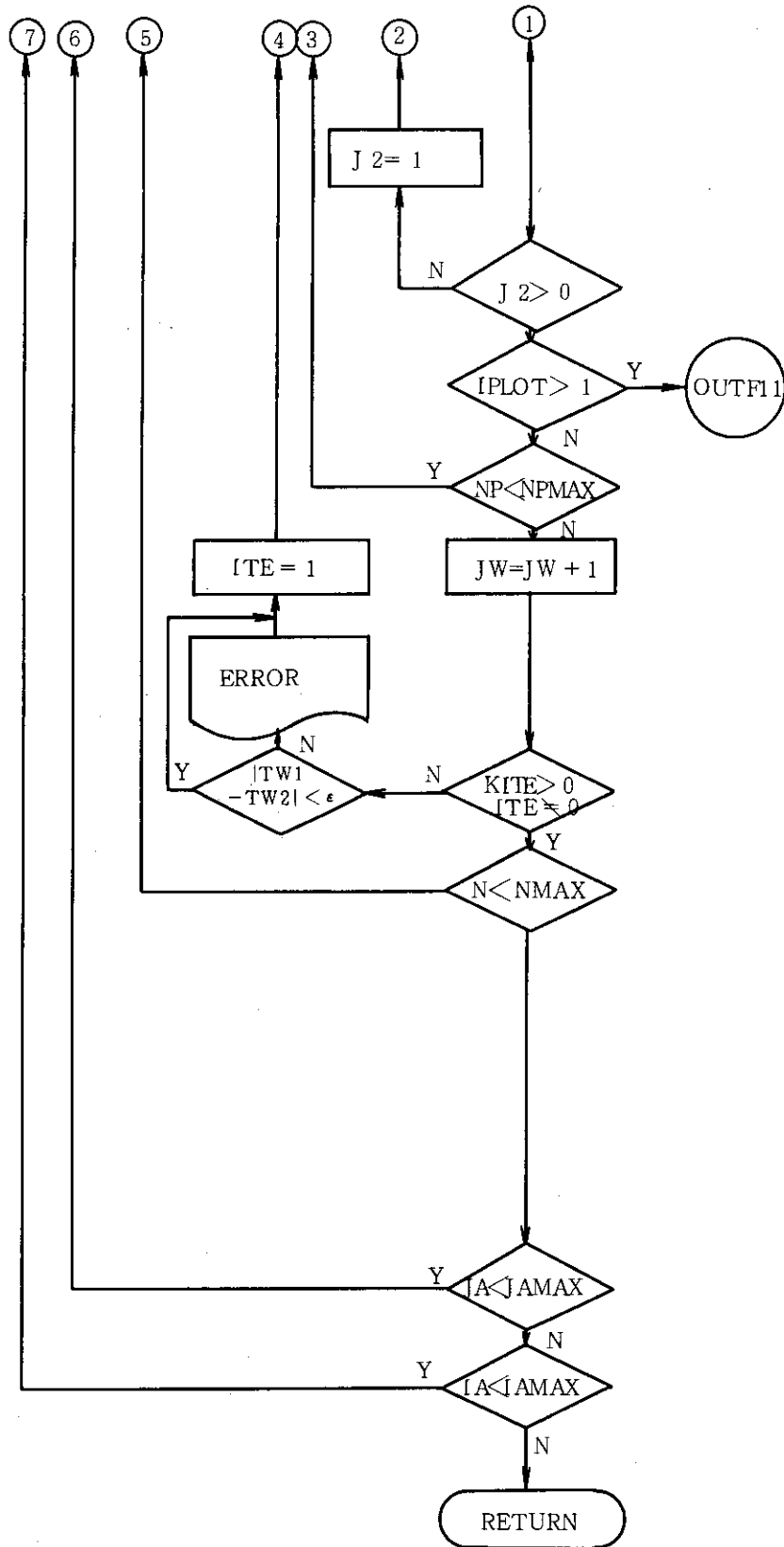
(1) INITLZ (初期設定)



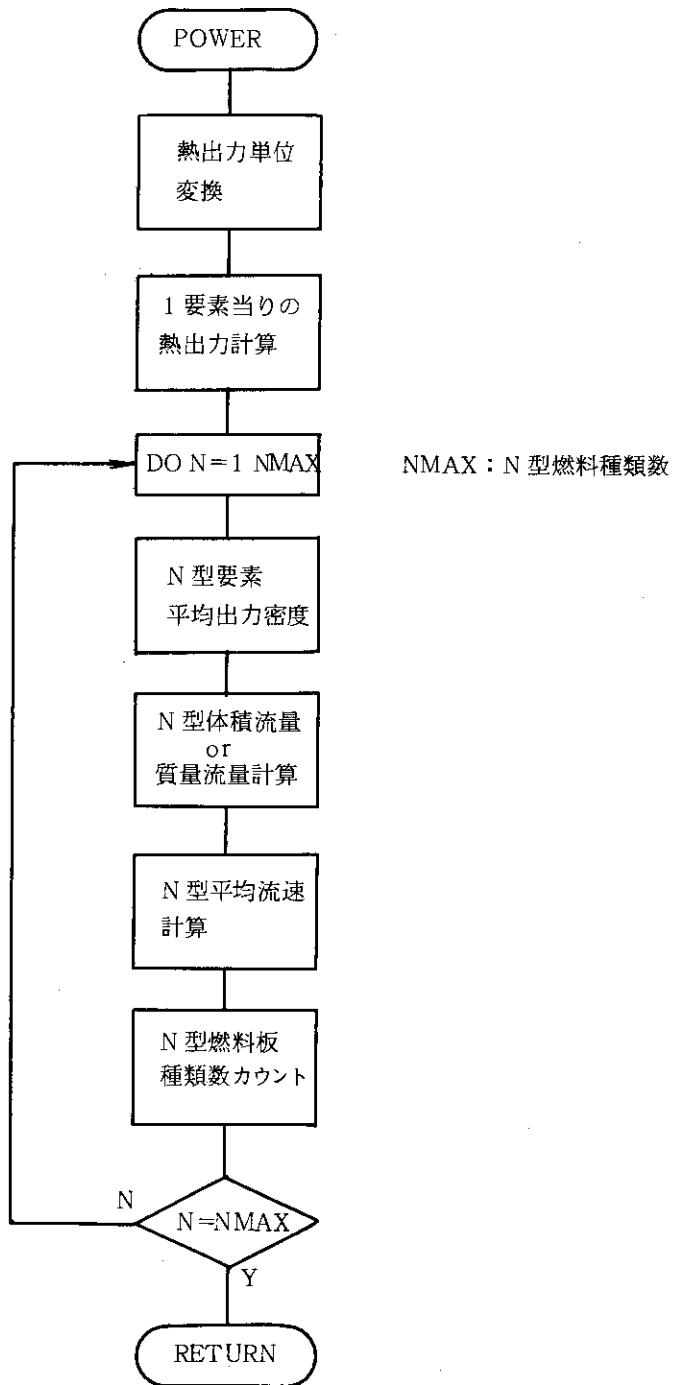
(2) CALCTL (計算のコントロール)



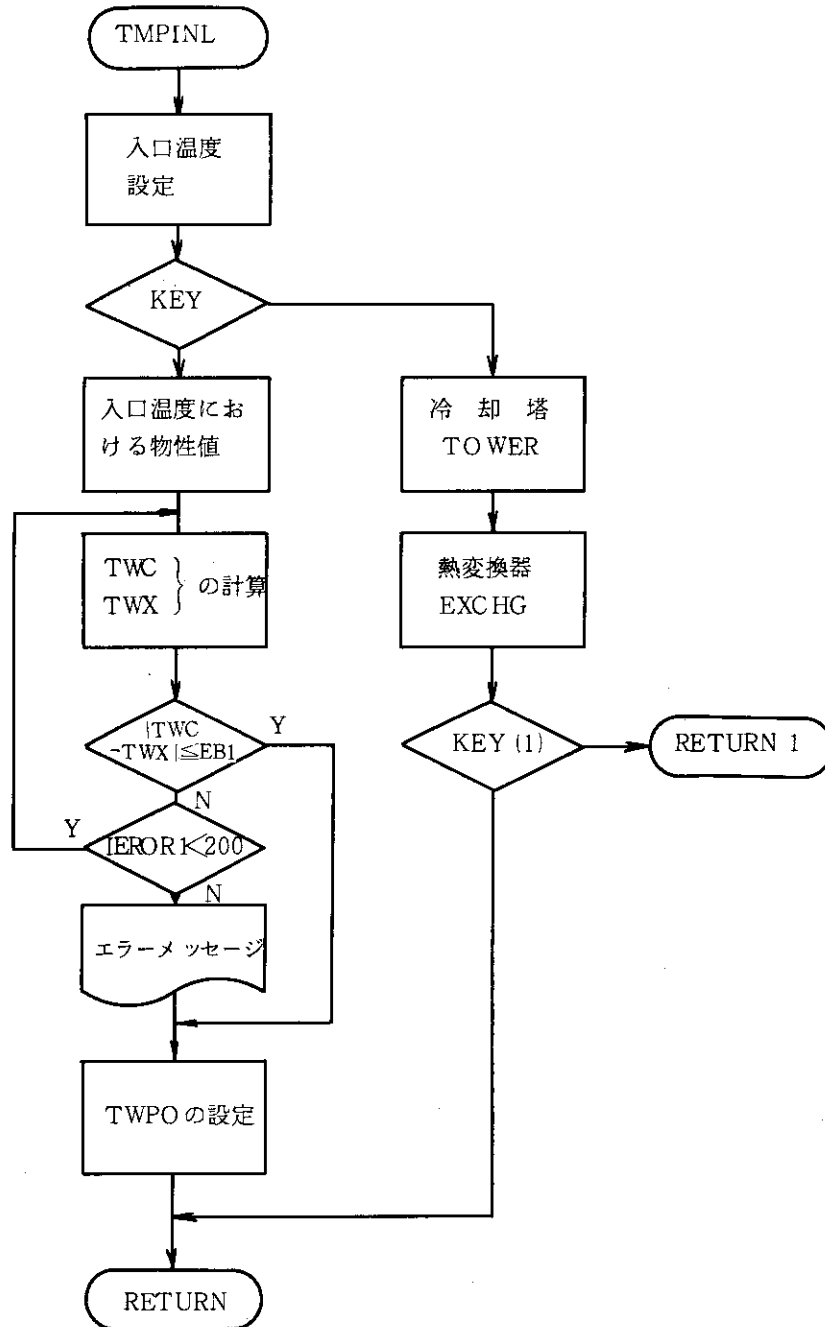
(2)のつづき



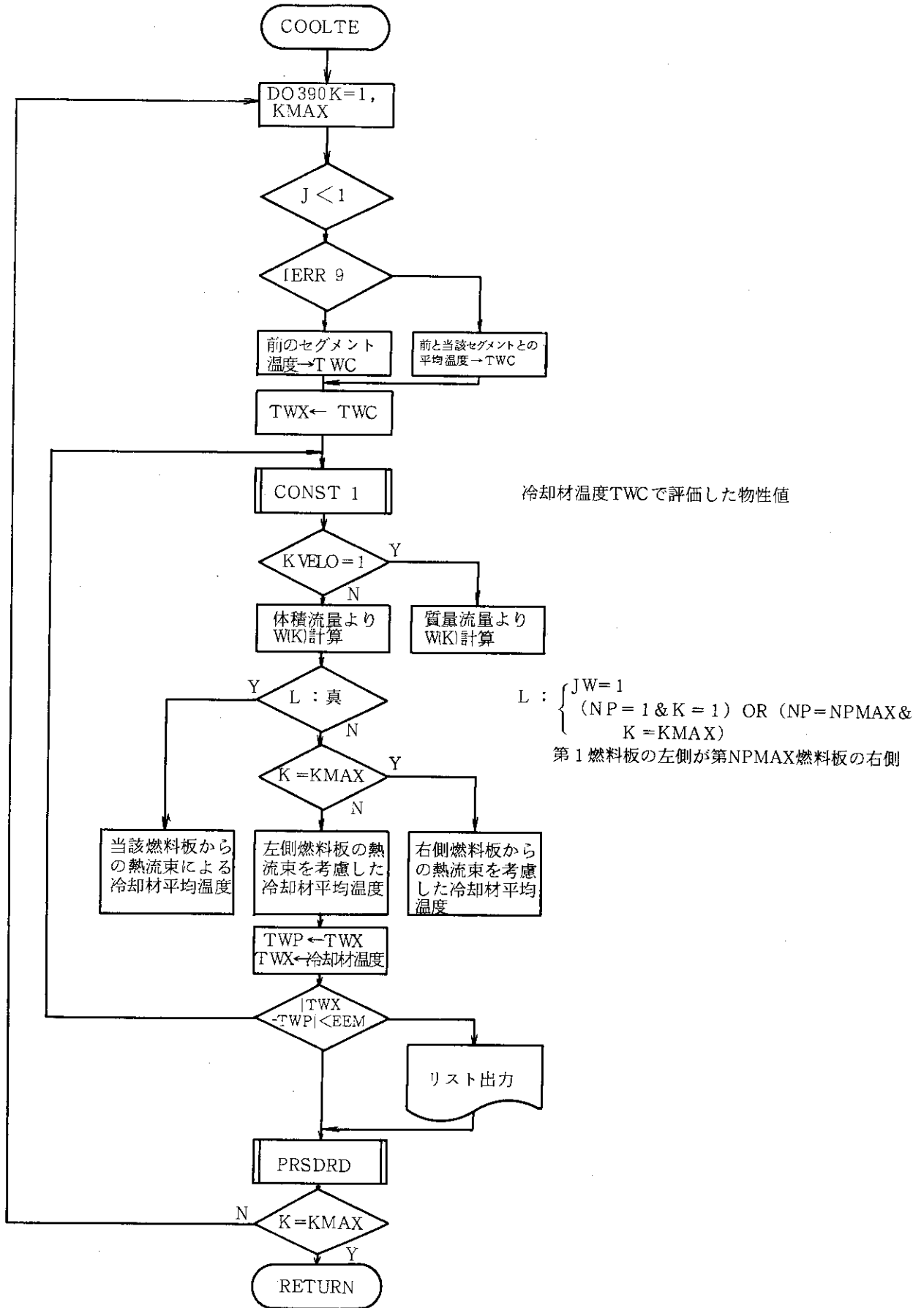
(3) POWER (炉心出力, 出力密度, 流量設定)



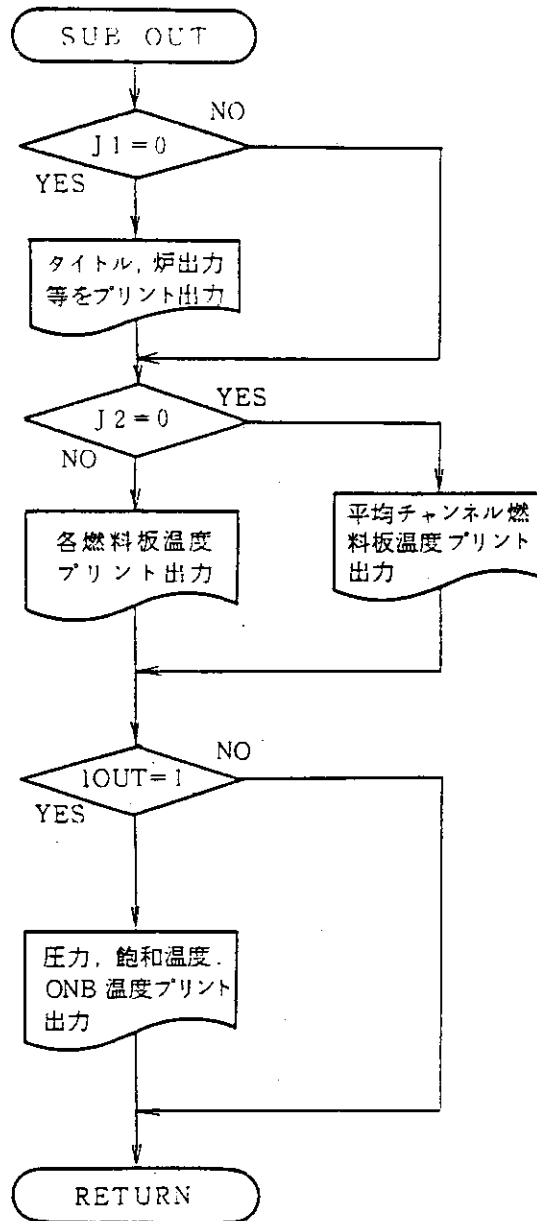
(4) TMPINL (入口温度の計算)



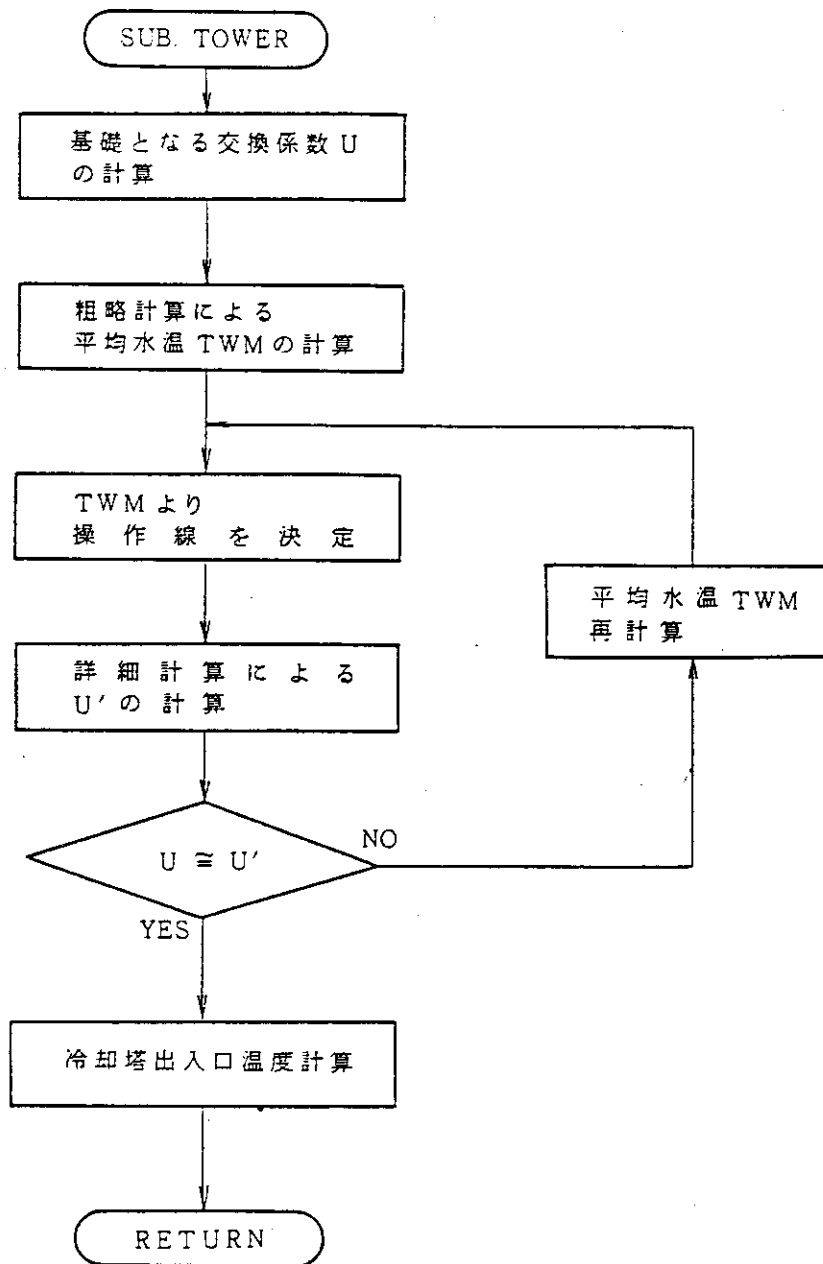
(5) COOLTE (冷却材温度の計算)



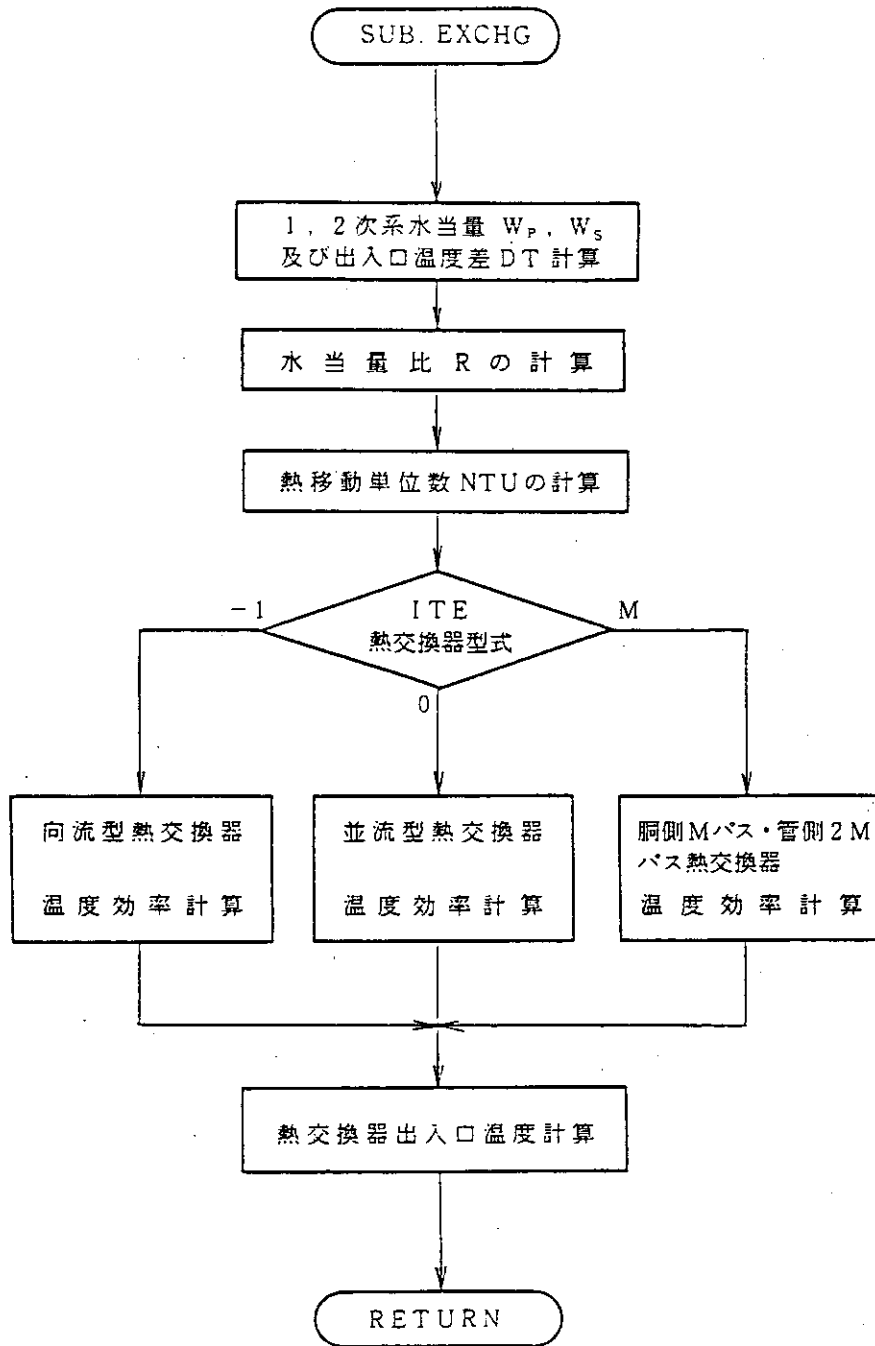
(6) OUT (計算結果のプリント)



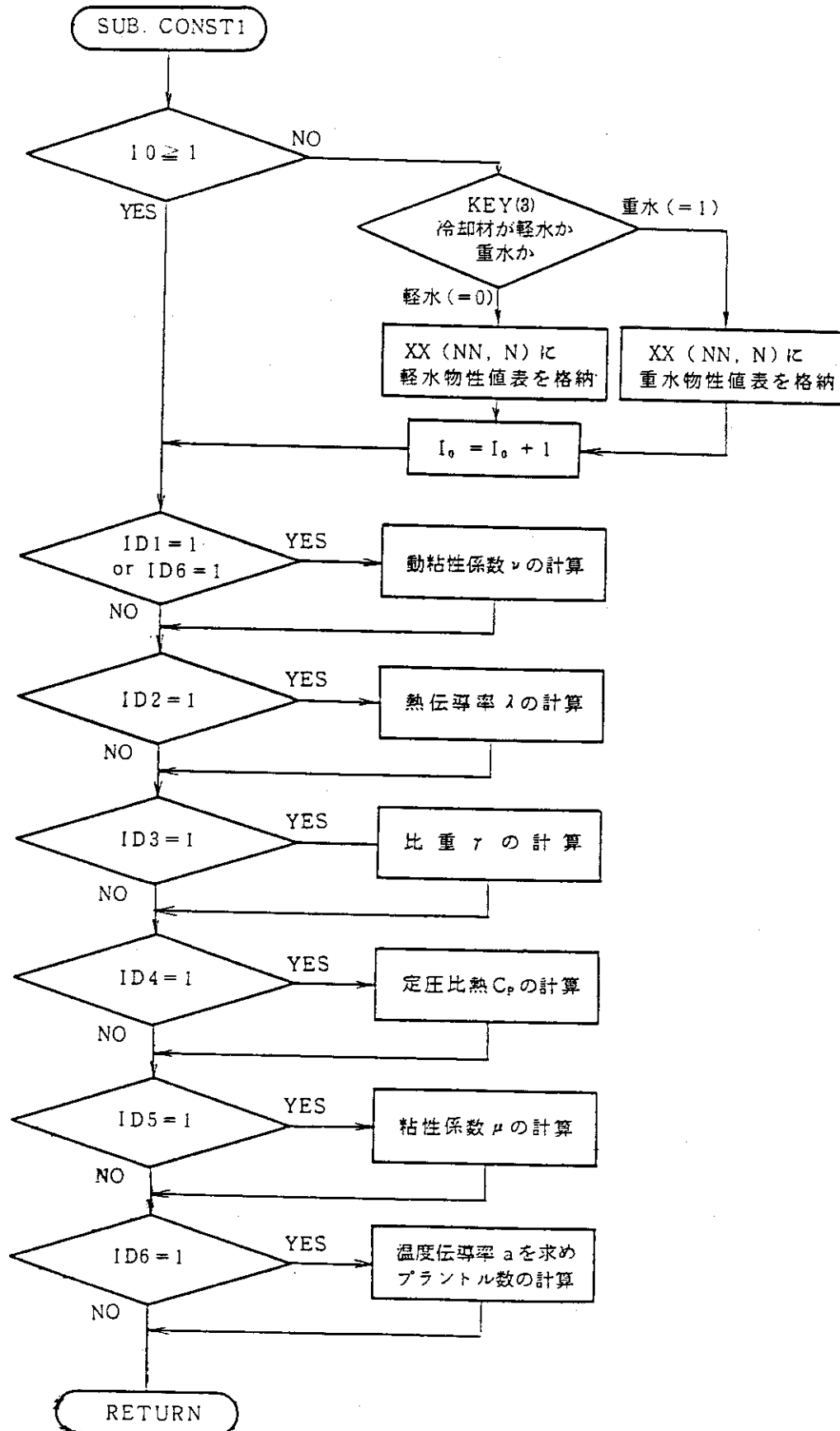
(7) TOWER (冷却塔出入口水温の計算)



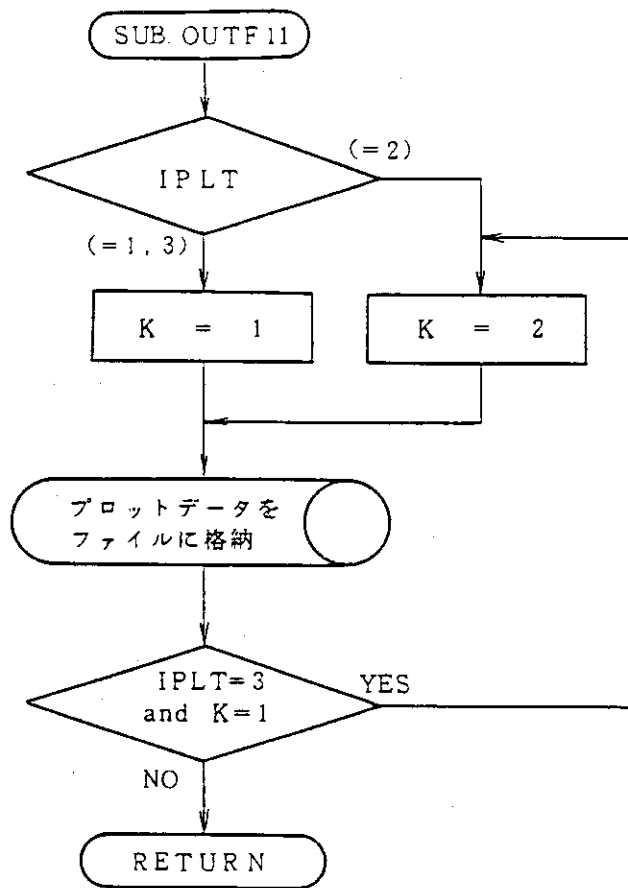
(8) EXCHG (熱交換器出入口温度の計算)



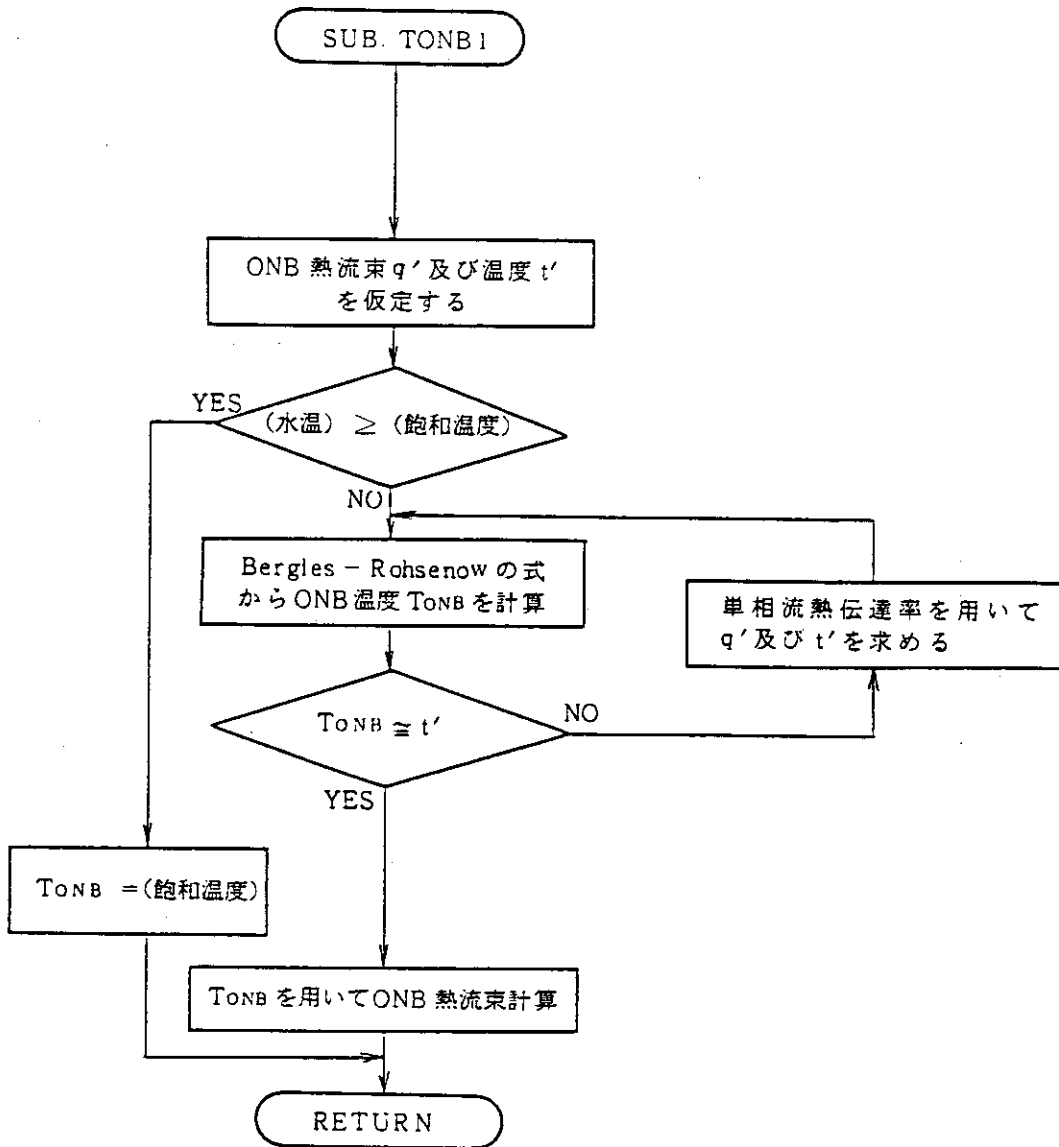
(9) CONST 1 (軽水, 重水の温度依存物性値の計算)



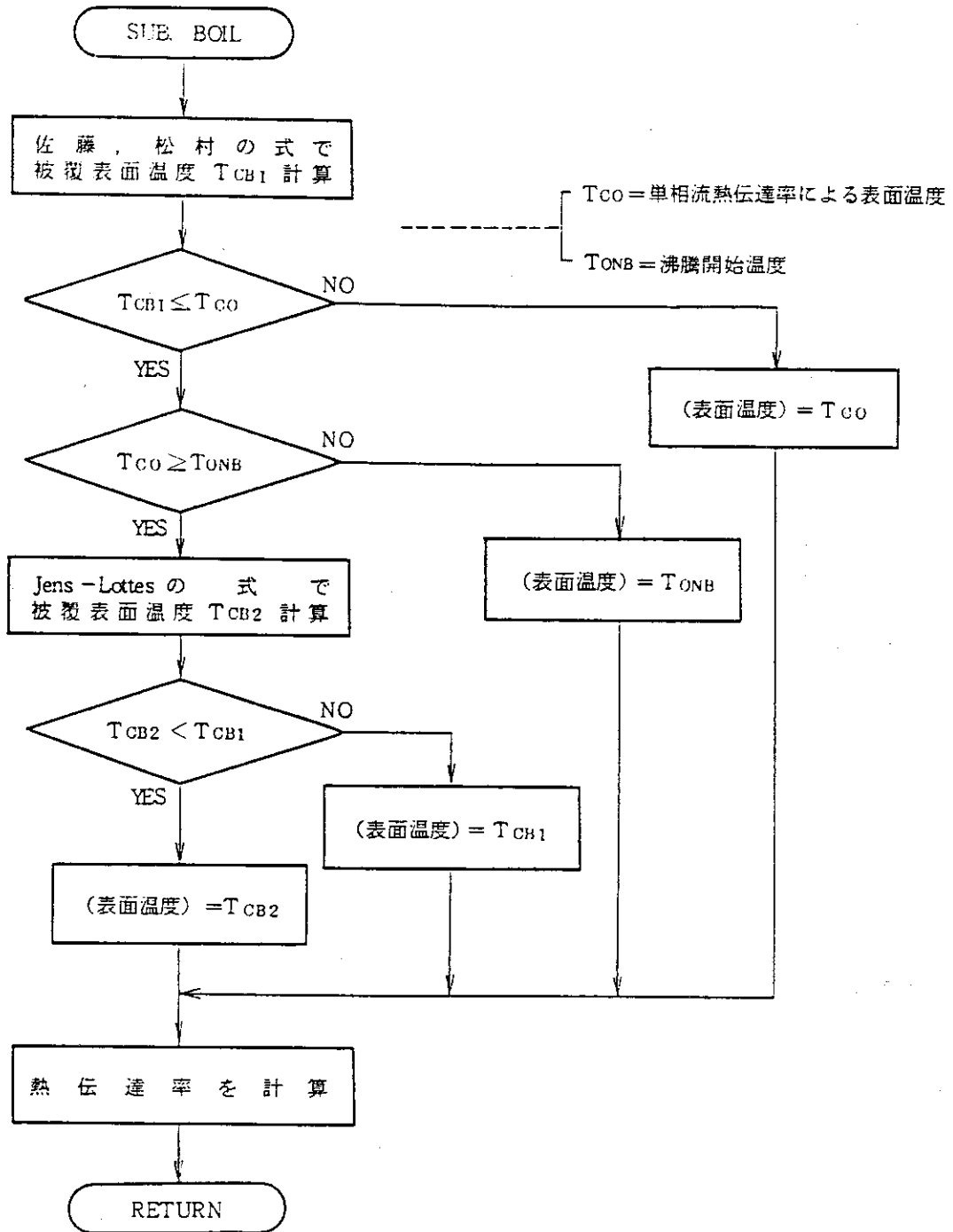
(10) OUTF 11 (プロットデータをワーク・ファイルに格納する)



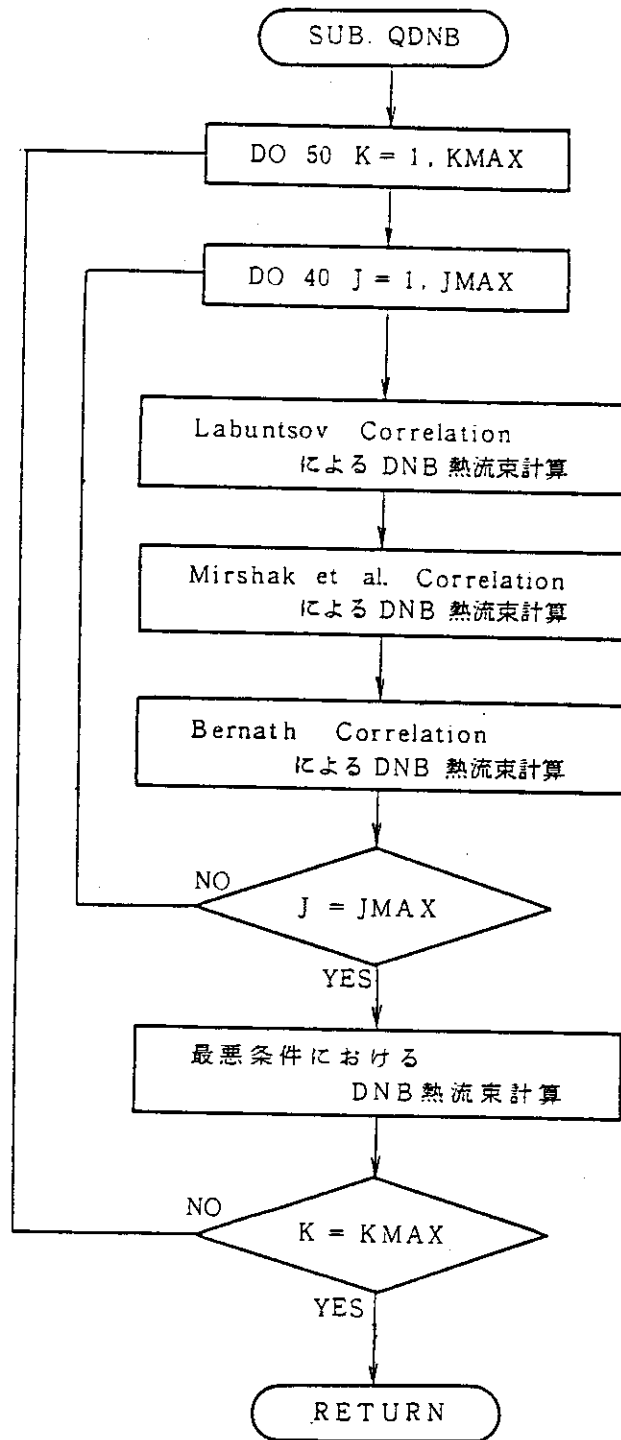
(11) TONB 1 (沸騰開始温度の計算)



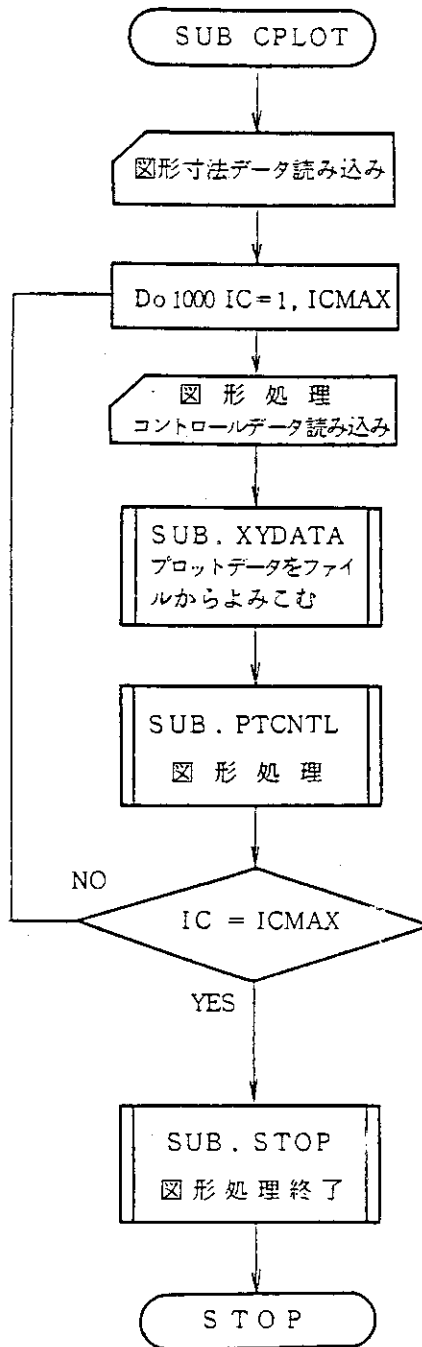
(12) BOIL (沸騰熱伝達相関式による被覆表面温度計算)



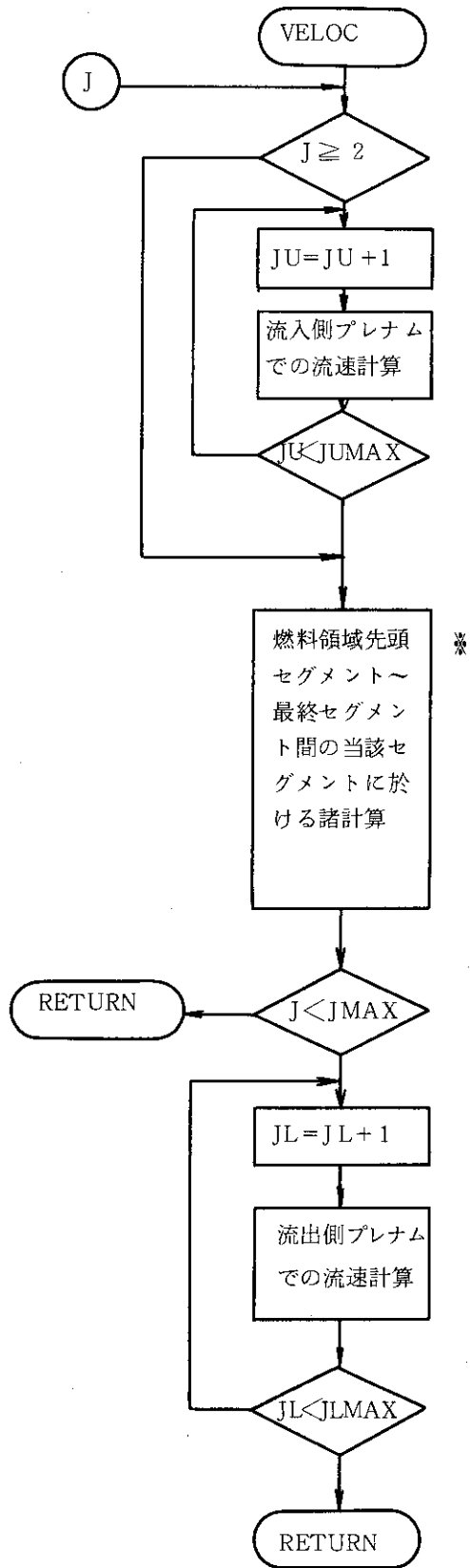
(13) QDNB (DNB熱流束の計算)



(14) CPLOT (図形処理)



(15) VELOC (各流路の冷却材流速計算)

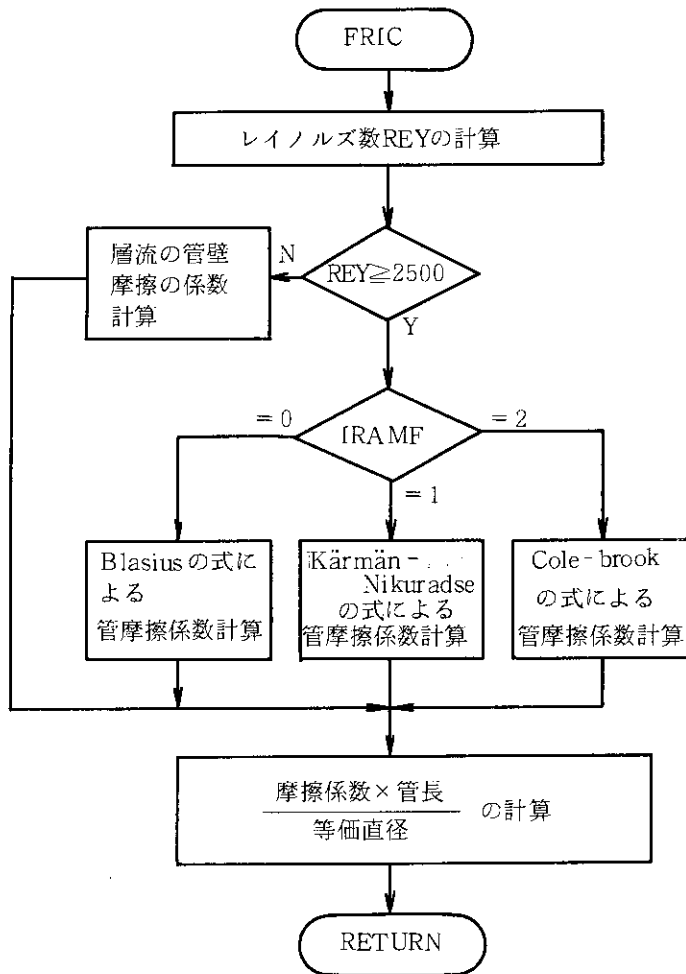


J : 加熱部

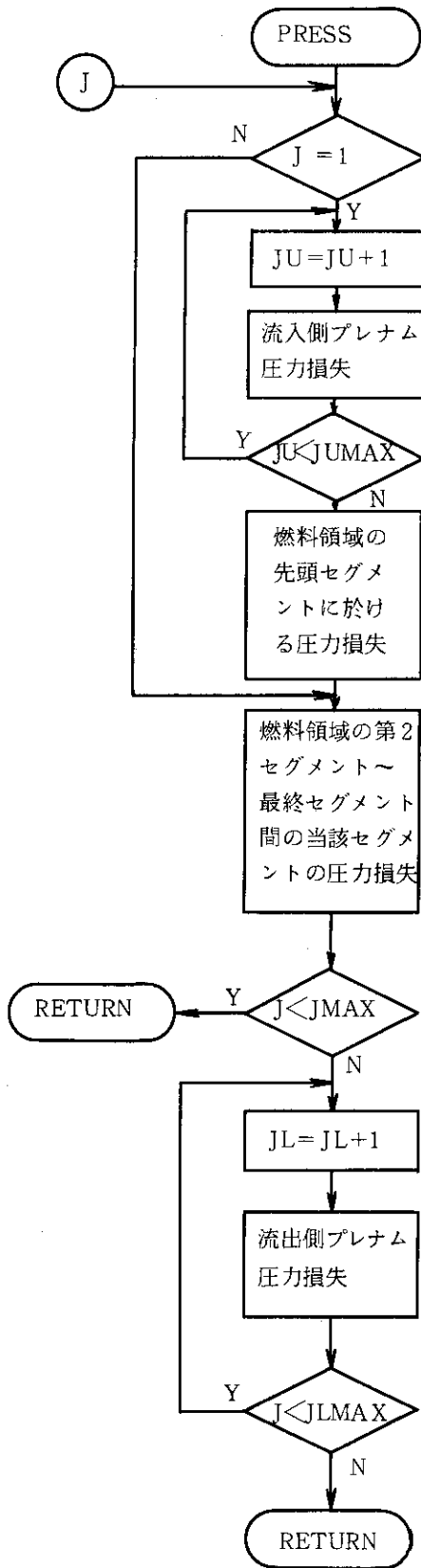
※ 燃料領域での流速計算

- (i) COOLOD 原型に従う体積流量により計算
- (ii) 質量流量により流速計算 (密度変化考慮) を選択できる。

(16) FRIC (管壁摩擦係数の計算)

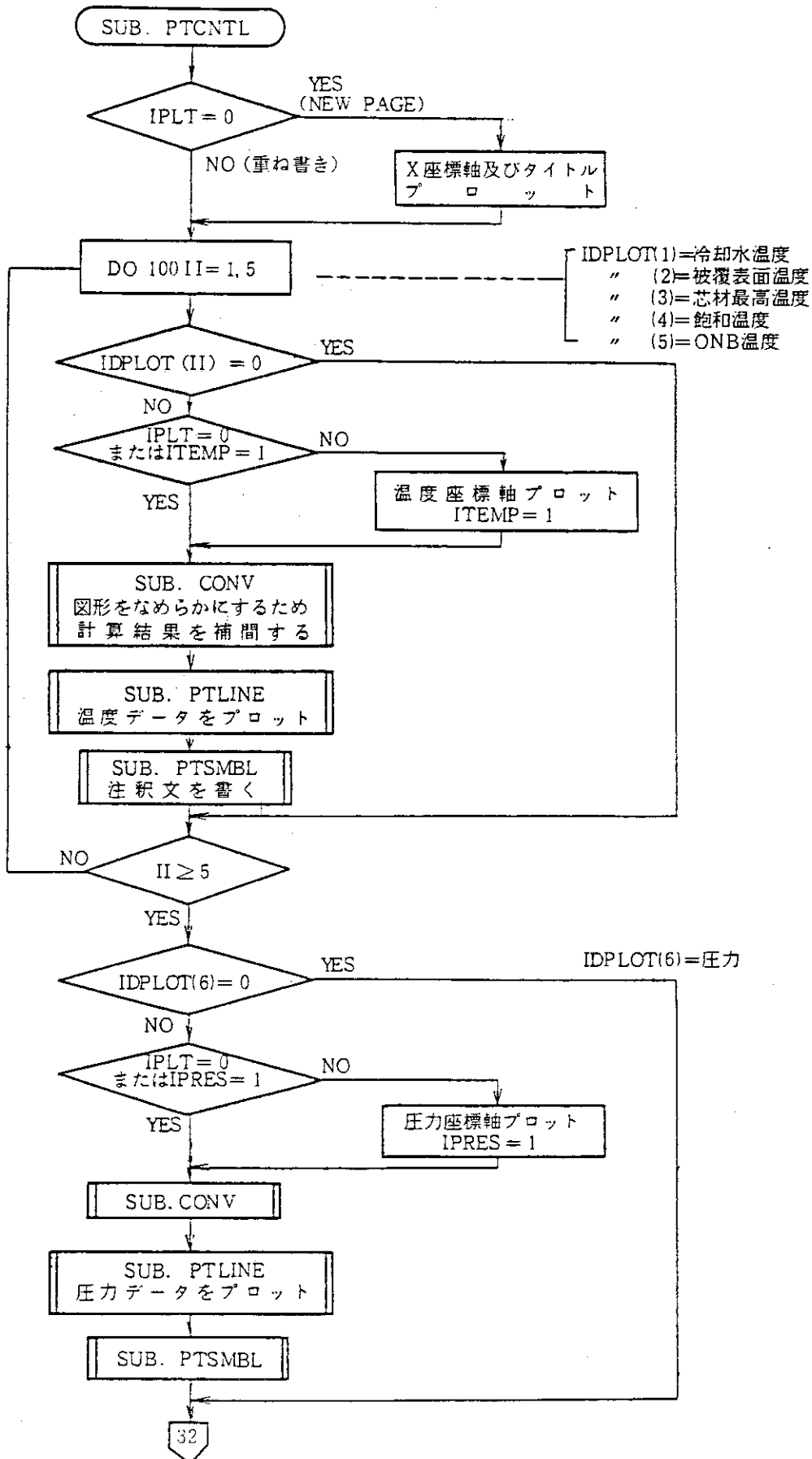


(17) PRESS (圧力損失の計算)

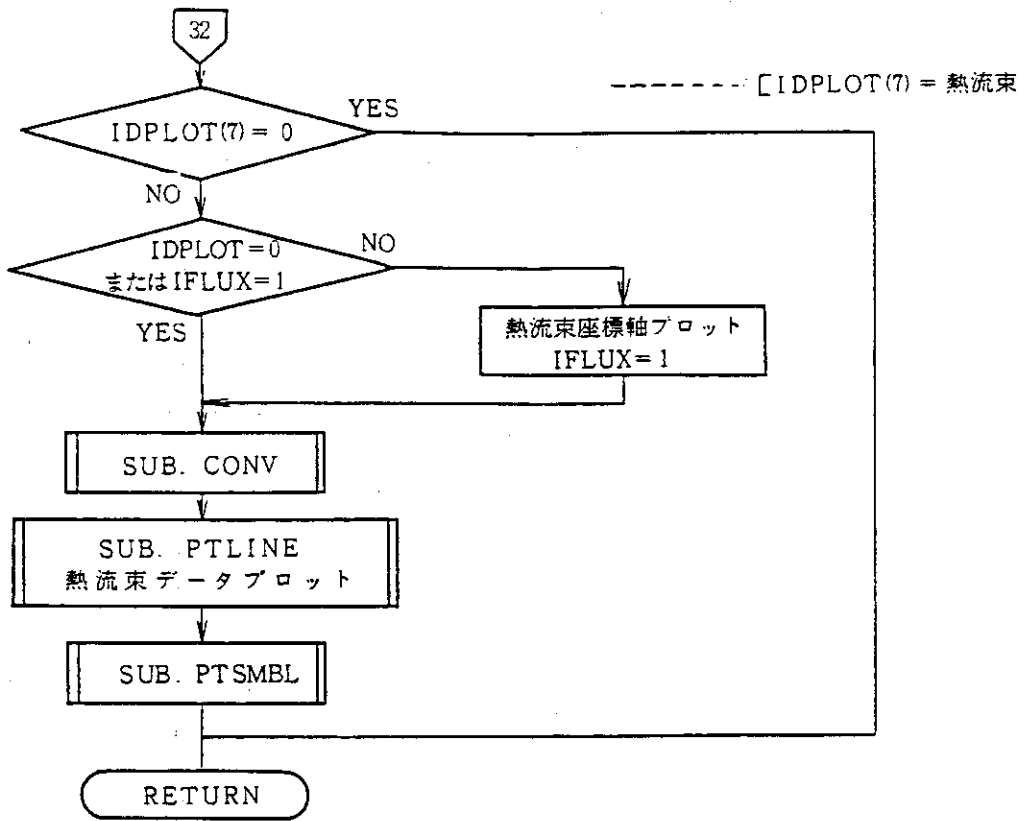


- ◎ 形状損失係数はユーザ指定値を用いる。
- ◎ 摩擦係数はレイノルズ数が2500以下の場合層流となり、それ以外はユーザ選択による経験式を用いて計算する。

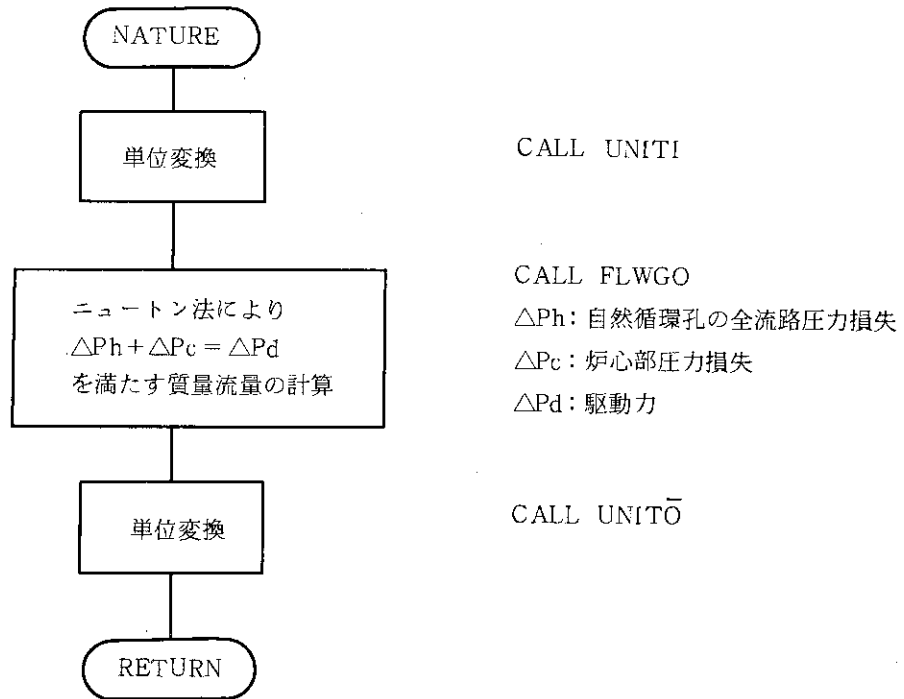
(18) PTCNTL (XYデータプロット)



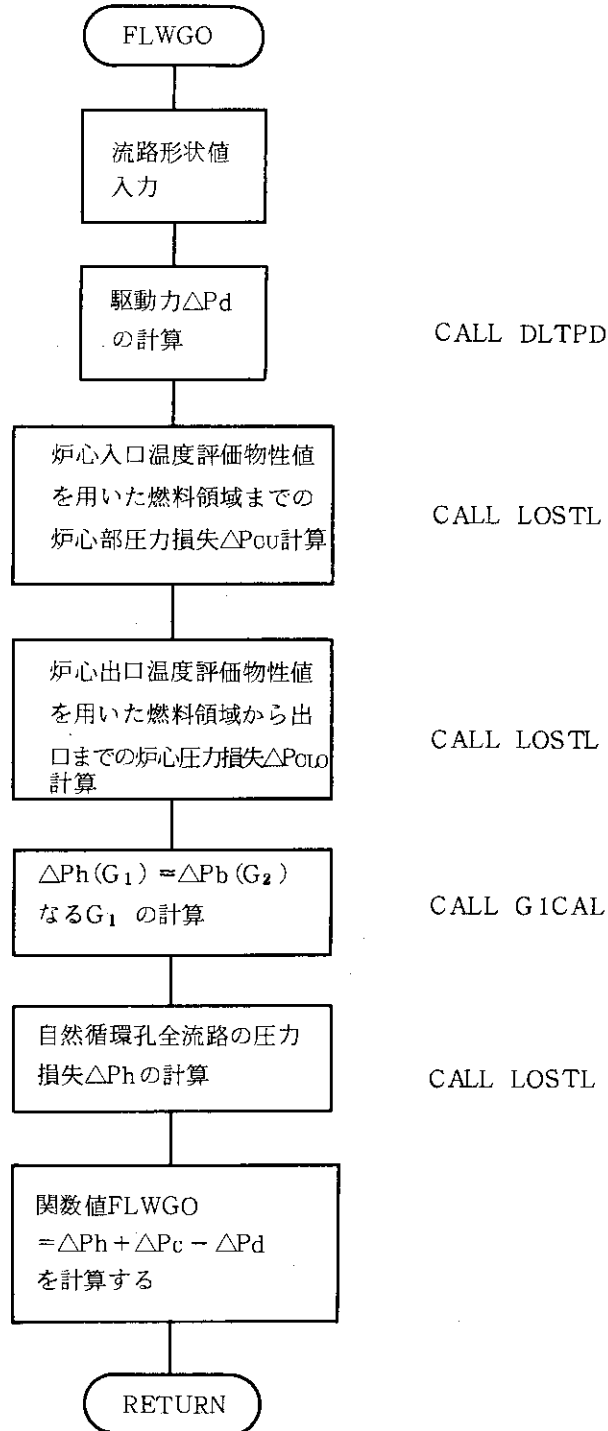
(18) PTCNTL (つづき)



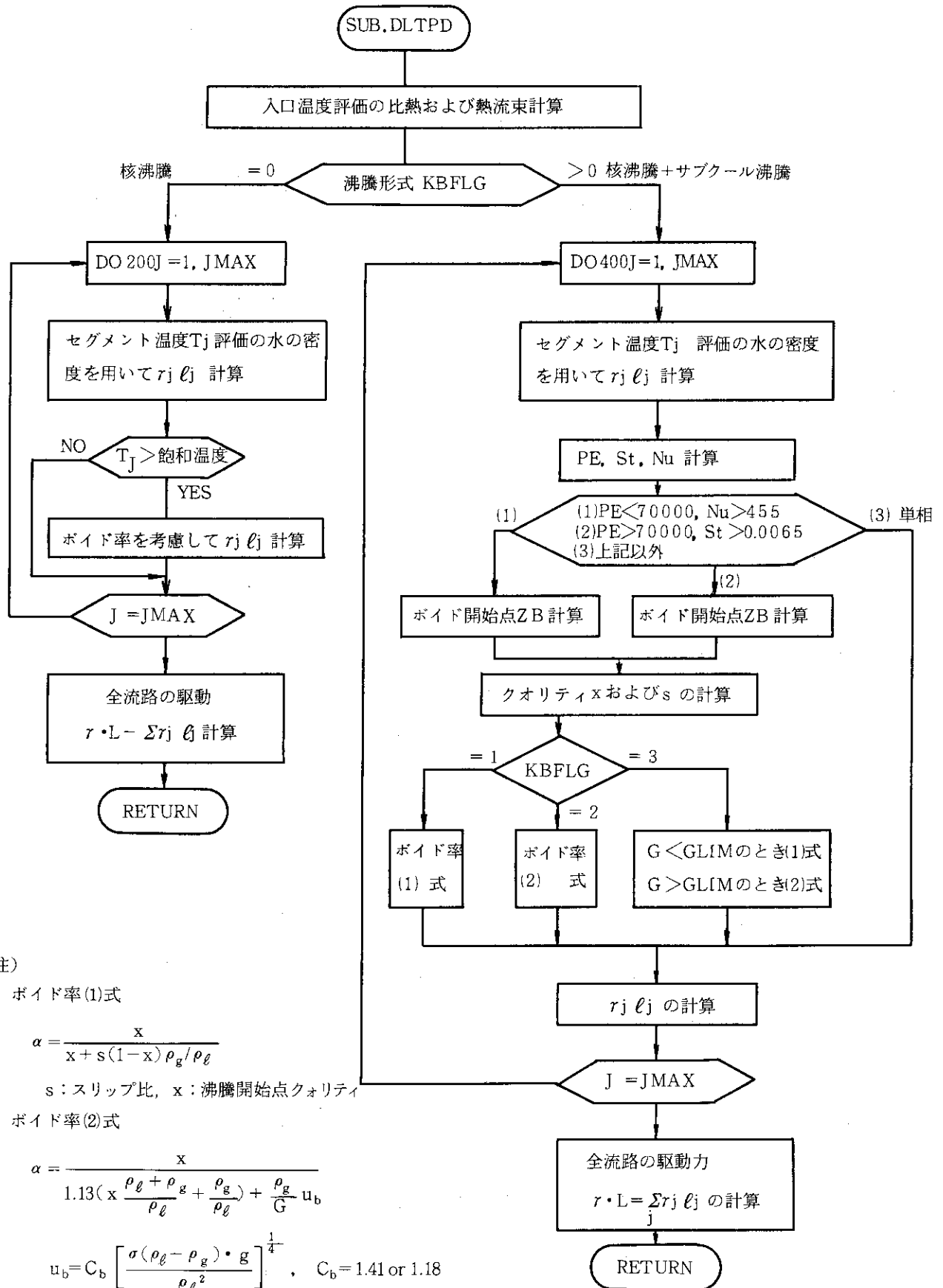
(19) NATURE (自然循環状態に於ける質量流量の計算)



(20) FUN, FLWGO (関数値, $\Delta Ph + \Delta Pc - \Delta Pd$ の計算)



(2) DLTPD (駆動力の計算)



注)

ボイド率(1)式

$$\alpha = \frac{x}{x + s(1-x) \rho_g / \rho_l}$$

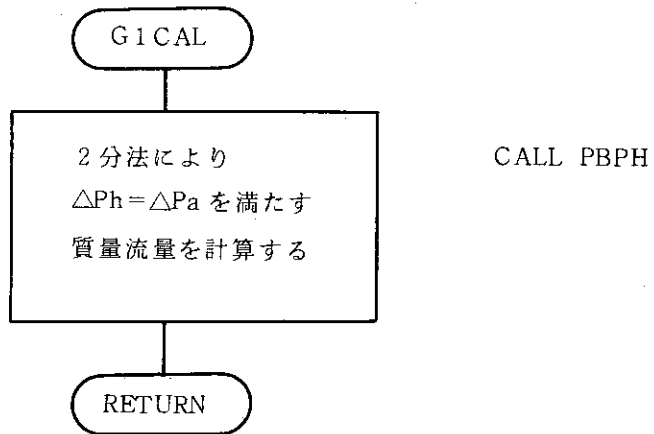
s : スリップ比, x : 沸騰開始点クオリティ

ボイド率(2)式

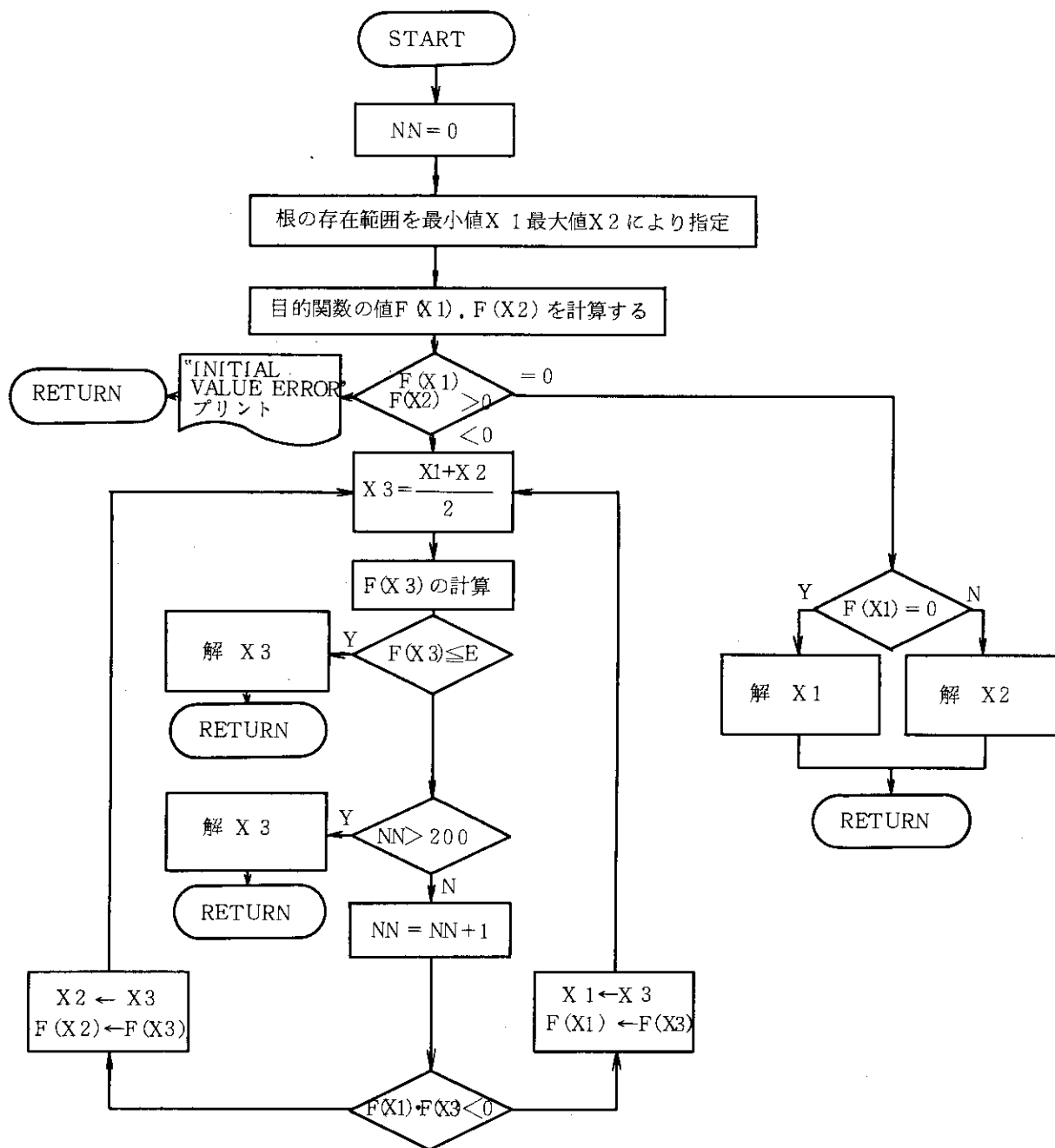
$$\alpha = \frac{x}{1.13 \left(x \frac{\rho_l + \rho_g}{\rho_l} + \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) + \frac{\rho_g}{G} u_b}$$

$$u_b = C_b \left[\frac{\sigma(\rho_l - \rho_g) \cdot g}{\rho_l^2} \right]^{1/4}, \quad C_b = 1.41 \text{ or } 1.18$$

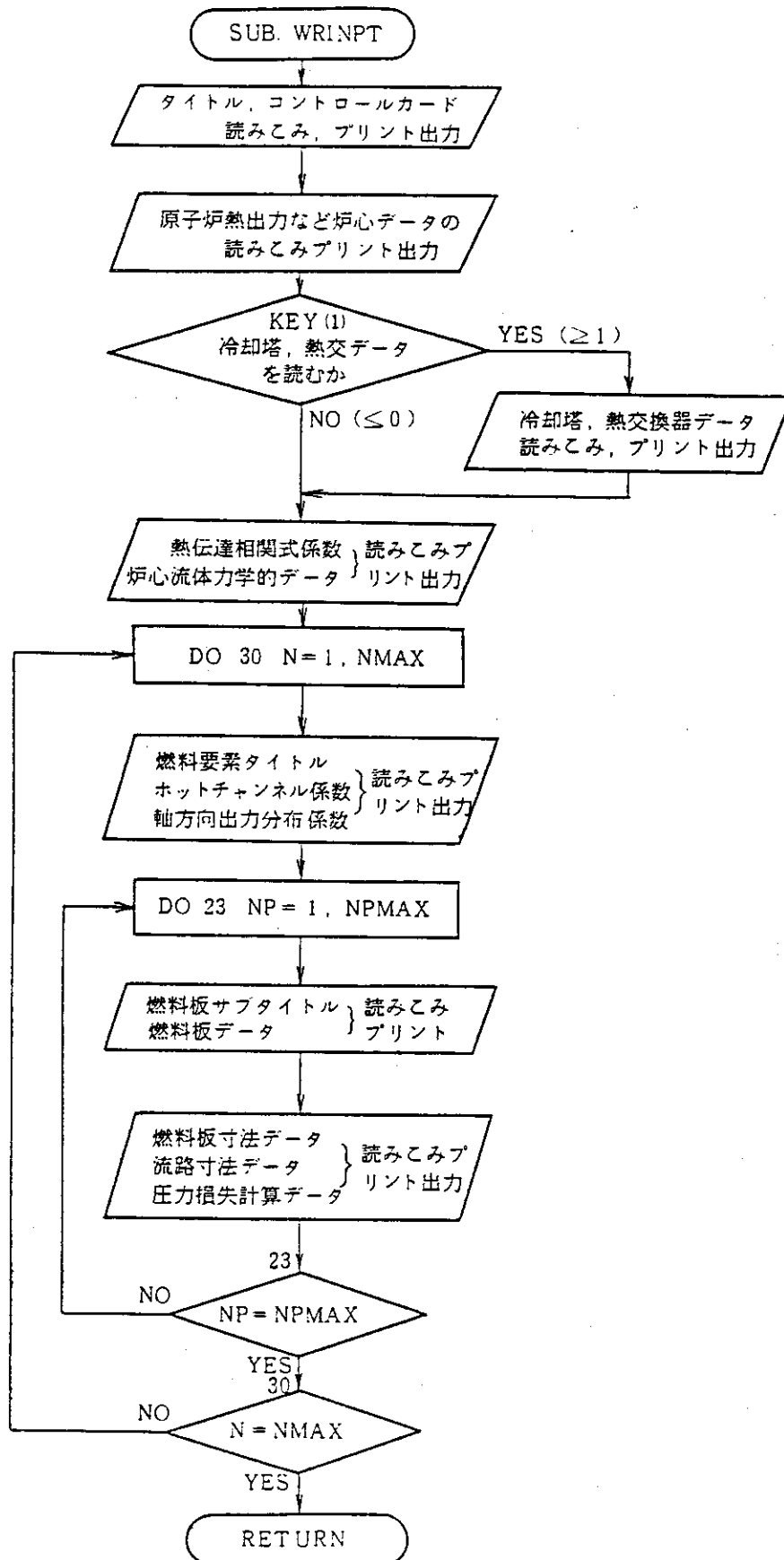
(22) G1CAL ($\Delta P_h = \Delta P_b$ を満たす質量流量の計算)



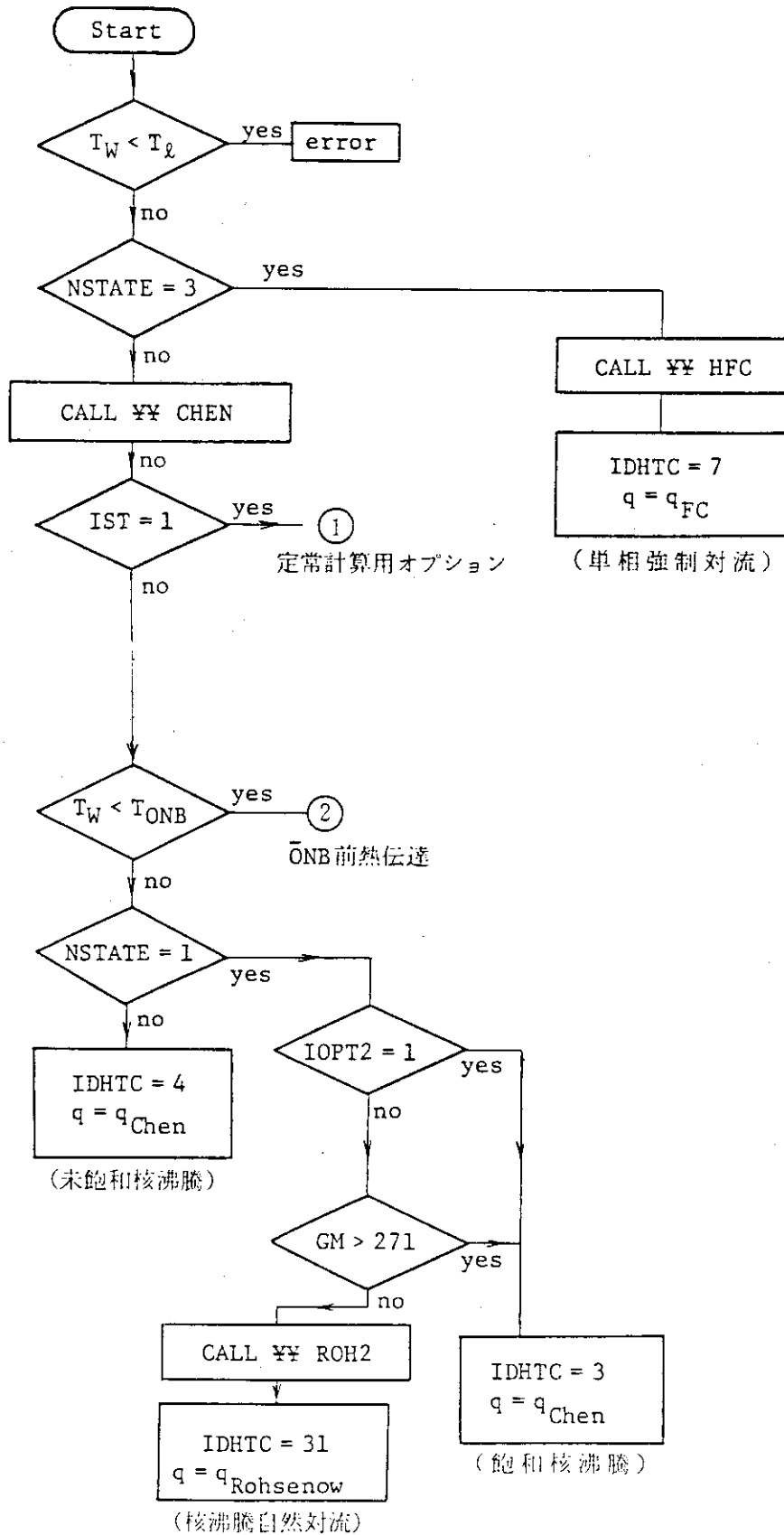
(23) RGFL 1, RGFL 2, RGFL 2B, RGFL 3 (Regule - Falsi法)



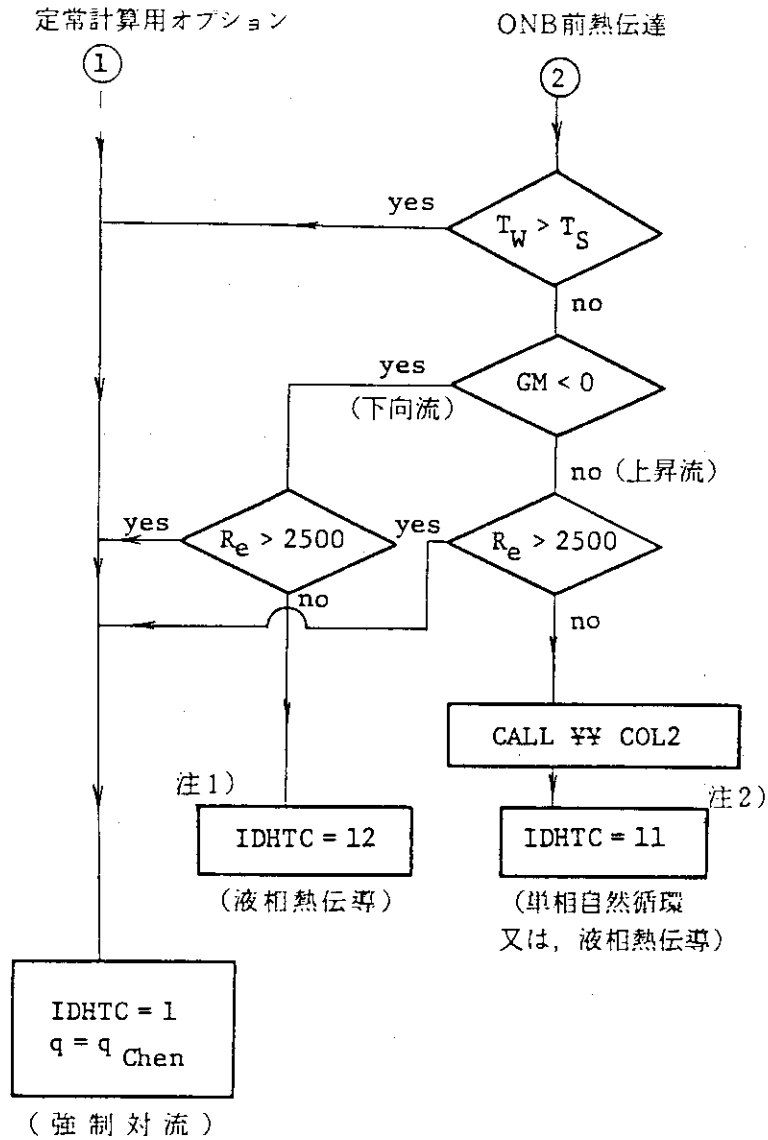
(24) WRINPT (INPUT DATAの読みこみ及びプリント)



(25) A¥HFL 2



(25) つづき



注1) IDHTC = 11 では

$$q = \begin{cases} 4 \text{ k}\ell/\text{De} & ; Re < 2000 \\ q_{FC} \text{ と } 4 \text{ k}\ell/\text{De} \text{ の内挿} & ; 2000 < Re < 2500 \end{cases}$$

注2) IDHTC = 12 では

$$q_1 = \begin{cases} q_{\text{Collier}} & ; Re < 2000 \\ q_{FC} \text{ と } q_{\text{Collier}} \text{ の内挿} & ; 2000 < Re < 2500 \end{cases}$$

$$q = \max \{ 4 \text{ k}\ell/\text{De}, q_1 \}$$

(26) A Y CHEN

