

JAERI - M
87-090

RELAP4/MOD6/U4/J3へのPWR自動
初期定常設定機能の組込み

1987年7月

吉田 一雄

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

RELAP4/MOD 6/U 4/J 3 への
PWR 自動初期定常設定機能の組込み

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

吉 田 一 雄

(1987年6月3日受理)

軽水炉 LOCA 解析コード RELAP4/MOD 6/U 4/J 3 に PWR 自動初期定常設定機能を組込み、同コードの機能向上を行った。

改良は、同種コードの RELAP 4/MOD 7 に組込まれている PWR 自動初期定常設定機能を取り出して RELAP 4/MOD 6/U 4/J 3 に移植する方法で行った。なお、組込みに際しては、蒸気発生器の二次側の多ノード分割を可能とするとともに、一次側と二次側の間でのエネルギーバランス補正法の改良を行い、定常設定の精度向上も行った。

本改良により、入力データ作成作業の省力化、精度のよい初期定常状態設定により、入力データの不整合から生ずる擾乱のない解析が可能となった。

Implementation of PWR Steady State Self-Initialization
Feature into RELAP4/MOD6/U4/J3

Kazuo YOSHIDA

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

(Received June 3, 1987)

A PWR steady state self-initialization feature has been implemented into the RELAP4/MOD6/U4/J3 code which is an improved version of RELAP4/MOD6 and can analyze not only large break but also small break LOCA in LWRs.

This feature is originated from RELAP4/MOD7 which is the most updated released version of RELAP4 from INEL. Several FORTRAN subroutines in MOD7 related to this feature were transplanted into MOD6/U4/J3 with some improvements, which were the modification of method to take a balance of heat transfer between primary and secondary side at SG-U tubes, and to make it possible to nodalize secondary side of SG as multi-node.

Advantages realized by implementation of this option are saving of time in initializaing a new model and an assurance of steady state and self consistency of input data in a small break LOCA analysis of a PWR.

Keyword: RELAP4/MOD6/U4/J3, Steady State Self-Initialization, PWR,
Small Break LOCA

目 次

1. 序	1
2. 初期定常状態設定手法	2
2.1 1次系圧力バランス計算	2
2.2 1次系エネルギーバランス計算	5
2.3 蒸気発生器二次側の初期定常設定方法とその改良	7
3. テストラン結果と問題点	13
3.1 飽和状態時の蒸気表の引き方	13
3.2 基礎方程式の解法上の問題	14
4. 入力データ	20
謝 辞	25
参考文献	25

Contents

1. Introduction	1
2. Procedure of Steady State Self-Initialization	2
2.1 Pressure Balancing Model in Primary Loop	2
2.2 Energy Balancing Model in Primary Loop	5
2.3 Pressure and Energy Balancing Model in Secondary Side of SG and its Improvements	7
3. Test Run Results and Discussions	13
3.1 Problems in Using Steam Table	13
3.2 Problems in Solution Method of Basic Equations	14
4. Description of Input Data	20
Acknowledgement	25
Reference	25

1. 序

従来の RELAP 4/MOD 6/U 4/J 3 では、定常状態に近い熱水力学的諸変数の値をあらかじめ手計算により試行錯誤的に決定し、それを初期値として入力するなど、初期値決定の作業に多くの労力をさいているのが現状である。小破断 LOCA 解析などのように緩かなトランジェントに対しては特に安定した初期値の入力が必要であり、このため自動初期値設定機能の付加による初期値設定作業の効率化は避けられないものとなっている。

そこで、同種コードの RELAP 4/MOD 7 に組込まれている PWR 自動初期値設定機能を取り出して蒸気発生器 2 次側の取扱いに関して改良を加え、RELAP 4/MOD 6/U 4/J 3 に組込むことにより同コードの機能向上を行った。

一般に、熱水力学解析用のコードの初期定常状態設定については大別して 2 通りの方法がある。1 つは RETRAN コードに採用されている方法で、トランジェント計算に入る前に、質量、運動量、エネルギーの保存方程式の時間微分項をゼロとした方程式を解いて厳密な定常状態を設定する方法である。この方法では計算機の精度の範囲で非常に正確な定常状態を作り得ることができる。しかし、この方法の場合、定常を達成するためには、必ずあるパラメータを調整する必要があり、したがって達成された定常状態についての検討が必要であるが、次に述べる第 2 の方法よりはチェックの必要度は低い。この方法の欠点は、過渡計算ルーチン以外に定常状態専用のルーチンを必要とすることである。

第 2 の方法は計算コードの過渡計算ルーチン自体を使用して、外部からの擾乱のない状態を模擬して、計算がある定常状態に落ち着いた時をもって定常が達成されたと見なす方法であり、自動初期定常設定機能を持たないコードでは一般的にこの方法を用いている。この場合は、第 1 の方法にも増して達成された定常状態がユーザーの要求したものと見合っているかをチェックする必要があり、出発点となる状態によっては、一定の状態に達するまでの時間が多くかかったり、それが要求している状態にはほど遠いものとなる場合がある。したがってこの方法による定常状態の設定法は、試行錯誤的な面があり、一般的に時間と労力を必要とする欠点がある。従来の RELAP 4/MOD 6/U 4/J 3 はこの方法によっていた。

RELAP 4/MOD 7 の初期値設定機能は前者に属するものであるが、RETRAN コードのそれに比較すれば、汎用性に乏しく、PWR 型（加圧水型原子炉）のみをその対象としている。また蒸気発生器 2 次側は 1 ノードでのみモデル化するという制約があり、1 次側と 2 次側のエネルギーバランスを 2 次側の温度を修正することにより達成するため、2 次側の状態が所期の値と異ってしまうという欠点がある。そこで 2 次側を多ノードに分割できかつ、1 次側と 2 次側のエネルギーバランスは、入力された 2 次側の状態に基づき、蒸気発生器伝熱管を模擬したヒートスラブの表面積を修正することにより達成するような改良を行い、RELAP 4/MOD 6/U 4/J 3 に組込んだ。

以下の第 2 章では、今回整備した自動初期定常状態設定手法について説明し、第 3 章において、テストランの結果を示すと共に問題点を指摘する。第 4 章に、上記の機能を作動させるのに必要な入力を示す。

2. 初期定常状態設定手法

RELAP4/MOD6/U4/J3において定常状態が達成されるためには、

- i) 質量バランス
- ii) 運動量バランス
- iii) エネルギーバランス

の3つのバランスがとれていることが必要である。i)については、1つのボリュームに接続されているジャンクションの出入の収支がゼロになるように初期流量を入力すればよい。ii)についてはRELAP4/MOD6/U4/J3では、圧力残差を形状圧力損失係数を補正することでバランスを取っており、現状のままでも運動量バランスは十分に安定であるわけである。しかし、一般的に、原子炉の圧力は、細部にわたって測定されていないし、また、形状圧力損失係数は、その流路の形状より算出できるものであるから、RELAP4/MOD6/U4/J3においてある体系の熱水力的状態を模擬しようとする場合、入力された形状圧力損失係数より各ノードの圧力を決めるのが妥当と思われる。iii)については、現状のRELAP4/MOD6/U4/J3では、各ボリュームのエントルピを試行錯誤的な入力の調整により達成するしかなく、これをいかに精度よく取るかが重要となる。したがって、運動量バランス（圧力バランス）とエネルギーバランスを自動的に設定するようプログラムの改良を行った。ただし今回整備した自動初期定常設定機能はPWR型原子炉にのみ適用可能なものである。

2.1 1次系圧力バランス計算

先にも述べたように従来のRELAP4では、入力された圧力を基に、形状圧力損失係数を修正することにより圧力バランスを取っていたが、今回の改良では、形状圧力損失係数を基に、あるノードの圧力を基準にして各ノードの圧力を求めようとする方法である。すなわちRELAP4の運動量保存式内の残差項がゼロになるように圧力補正を行うものである。このとき、流路は次の5つの流路から成るとして圧力バランスをとる。図2.1にこの5つの流路の例を示す。

(1) 主ループ流路

主ループ流路はPWR体系の基準圧力ボリュームを含み、さらに蒸気発生器、ポンプおよび炉心を含んだ閉ループから成る。このループは他の流路に優先して圧力バランスがとられる。また、ループ全体の圧力バランスはポンプの回転数を調整して行う。

(2) 準ループ流路

準ループ流路は主ループと同等なグループ構成を持つ。すなわち蒸気発生器、ポンプを含みかつ、主ループ流路に属する2つのノードに接続している。このループは主ループ流路の次に圧力バランスがとられ、ループ全体の圧力バランスは主ループ流路と同様にポンプの回転数を調整して行う。

(3) 並列流路

並列流路は主ループ流路あるいは準ループ流路に両端が接している流路である。この流路の圧力バランスは流路の抵抗係数を調整して行う。

(4) デッドエンド流路

デッドエンド流路は主ループ流路、準ループ流路あるいは並列流路に一端が接している流路である。また、この流路内には冷却材の流れはない。

(5) 2次系ループ流路

2次系ループ流路は2次系の基準圧力ボリュームを含む流路であり、流路内での圧力バランスは、このループの終端のResidualを調整することによって達成される。RELAP4/MOD7のPWR自動初期定常設定機能では蒸気発生器2次側を1ボリュームでしか扱えなかったものを今回、原研において改良し2次側を多ボリュームに分割できるようにした。

以下に各流路ごとの圧力バランスの取り方について示す。

2.1.1 主ループ流路の圧力バランス

主ループ流路はPWR体系の基準圧力ボリュームを含み、さらに蒸気発生器、ポンプおよび炉心を含んだ閉ループからなる。主ループ流路の圧力バランスは、ポンプの回転数を調整して行う。具体的な計算方法について図2.2を例として説明する。

図2.2は、基準圧力ボリューム("R")とポンプボリューム("5")および閉ループを構成するためのボリューム("1", "2", "3", "4", "6", "7", "8")から成る。流れの方向は矢印の方向である。

基準ボリュームより下流方向に順次圧力を再設定し、ボリューム"6"の圧力 P'_6 を求めると、

$$P'_8 = P_8 + \Delta P_{9r} \quad (2.1)$$

$$P'_7 = P_7 + \Delta P_{9r} + \Delta P_{8r} \quad (2.2)$$

$$P'_6 = P_6 + \Delta P_{9r} + \Delta P_{8r} + \Delta P_{7r} \quad (2.3)$$

となる。ここで、 P_i は再設定前のボリューム*i*の圧力、 P'_i は再設定後のボリューム*i*の圧力、 ΔP_{jr} はジャンクション*j*の圧力残差である。

同様に、基準ボリュームの下流方向についても圧力を再設定し、ボリューム"4"の圧力 P'_4 を求めると、

$$P'_1 = P_1 - \Delta P_{1r} \quad (2.4)$$

$$P'_2 = P_2 - \Delta P_{1r} - \Delta P_{2r} \quad (2.5)$$

$$P'_3 = P_3 - \Delta P_{1r} - \Delta P_{2r} - \Delta P_{3r} \quad (2.6)$$

$$P'_4 = P_4 - \Delta P_{1r} - \Delta P_{2r} - \Delta P_{3r} - \Delta P_{4r} \quad (2.7)$$

となる。

また、ポンプボリューム"5"の上流側ジャンクションの圧損 ΔP_{js} は次式で与えられる。

$$\Delta P'_{j6} = P_5 - P_6 - \Delta P_{5r} - \Delta P_{H/2} \quad (2.8)$$

$$\Delta P'_{j5} = P_4 - P_5 - \Delta P_{5r} - \Delta P_{H/2} \quad (2.9)$$

ここで、 $\Delta P_{H/2}$ はポンプの水頭圧力の半分である。以上の式(2.3)、式(2.8)および式(2.9)、式(2.9)から、ポンプボリュームの入口圧力 P_{5I} 、出口圧力 P_{5O} が、次式から求まる。

$$P_{5I} = P'_6 - \Delta P'_{j6} \quad (2.10)$$

$$P_{5O} = P'_4 - \Delta P'_{j5} \quad (2.11)$$

従って、ポンプの補正水頭圧力 $\Delta P'_H$ は

$$\Delta P'_H = P_{5O} - P_{5I} \quad (2.12)$$

となる。またポンプボリューム圧力 P'_5 は

$$P'_5 = (P_{5O} + P_{5I}) / 2 \quad (2.13)$$

と求められる。

式(2.12)から定まるポンプ水頭圧力 $\Delta P'_H$ にポンプの水頭が一致するようにポンプの回転数が調整され、これにより主ループ流路の圧力バランスが達成される。

ここで注意すべきことは、ジョクションの抵抗係数の値いかんによっては、ポンプの回転数が、当初の値から大きくかけはなれたものとなる場合が生ずる可能性があるということである。したがって、入力データの妥当性を検討するために、ポンプの回転数をチェックする必要がある。

2.1.2 準ループ流路の圧力バランス

準ループ流路は主ループ流路と同様なループ構成を持ち、主ループ流路に属するボリュームに接している。基準圧力が主ループ流路で決定される以外、準ループ流路の圧力バランスの計算方法は、主ループ流路と同じである。したがって、準ループ流路の圧力バランス誤差も、ポンプの回転数を調整することによって吸収される。

2.1.3 並列流路の圧力バランス

並列流路は主ループ流路あるいは準ループ流路に両端が接している流路である。この流路には、ポンプを含まないために圧力バランスは流路の各抵抗係数を調整することによって達成される。

ジャンクションでの圧損 ΔP_i は、

$$\Delta P_i = \frac{K_i W_i^2}{\rho_i A_i^2} \quad (2.14)$$

と表される。ここで

K_i = ジャンクション*i*の抵抗係数

W_i = ジャンクション*i*の流量

A_i = ジャンクション*i*の流路面積

ρ_i = ジャンクション*i*の密度

である。同様に、各ジャンクションでの圧力残差 ΔP_{Ri} は

$$\Delta P_{Ri} = \frac{K_{Ri} W_i^2}{\rho_i A_i^2} \quad (2.15)$$

と表される。ここで、

K_{Ri} = ジャンクションの余剰抵抗係数

である。

式 (2.15) を並列流路に沿って和をとると、

$$\Delta P_R = \sum_{i=1}^N \Delta P_{Ri} = \sum_{i=1}^N \frac{K_{Ri} W_i^2}{\rho_i A_i^2} \quad (2.16)$$

となる。ここで、 ΔP_R は並列流路全体での圧力残差、 N は並列流路のジャンクション数である。同様に、入力された抵抗係数から算出された圧損の総和 ΔP は、式 (2.14) から、

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \Delta P_i = \sum_{i=1}^N \frac{K_i W_i^2}{\rho_i A_i^2} \quad (2.17)$$

となる。

ここで

次式 (2.18) で定義される補正係数 C を導入し、

$$C = \frac{\Delta P + \Delta P_R}{\Delta P} \quad (2.18)$$

流路に沿って K_i を新たな $K'_i = CK_i$ に置き変えると $\Delta P_R = 0$ となり、並列流路での圧力バランスが取れる。

2.1.4 デッドエンド流路の圧力バランス

デッドエンド流路は主ループ流路、準ループ流路あるいは並列流路に一端が接しており、他方の一端が閉じられている流路である。したがって、この流路の流量は定常状態ではゼロであり、例としては PWR のサージライン、加圧器等が上げられる。圧力バランスは、水頭差のみを考慮して、流路の開端から閉端へ向って各ボリュームの圧力を再設定する。

以上が、RELAP4/MOD7 に組込まれた PWR 自動初期定常状態設定機能のうちの圧力バランス計算手法であり、2次系ループの圧力バランスについては、2.3 で述べる。

2.2 一次系エネルギーバランス計算

PWR 型原子炉でのエネルギーバランスを考えると、炉心部、主冷却材ポンプのように発熱のある部分と、蒸気発生器のような熱交換が行われる個所が重要となる。この節では、炉心部、主冷却材ポンプ部のエネルギーバランスについて説明し、蒸気発生器に関しては、2.3 節で蒸気発生

器 2 次側の圧力バランスと共に述べる。

2.2.1 炉心部エネルギーバランス

炉心部のエネルギーバランスは、炉心部のジャンクションにエンタルピ・トランスポートモデルを仮定して計算される。計算方法を図 2.3 を例として説明する。

ボリューム平均エンタルピ \bar{h}_i は、エンタルピトランスポートモデルを仮定すれば、スラブ発熱 Q_s 、ガンマ発熱 Q_r 、炉心流量 W により、次式で計算される。

$$\bar{h}_i = h_{iIN} + \frac{\sum Q_{si} + Q_{ri}}{2W} \quad (2.19)$$

ここで、 h_{iIN} はボリューム i の入口エンタルピであり、上流側ボリュームの出口条件から決定され、ボリューム j がボリューム i の上流であるならば、 h_{iIN} は次式で計算される。

$$h_{iIN} = h_{jout} = \bar{h}_j + \frac{\sum Q_{sj} + Q_{rj}}{2W} \quad (2.20)$$

式 (2.19) および式 (2.20) で計算された炉心部の各エンタルピと圧力バランスより求められた圧力から蒸気表を用いて、各ボリュームの温度が決定され、炉心部出口の温度が定まる。この炉心部出口温度は、炉心部出口から蒸気発生器入口の間に加熱部あるいは除熱部がないと仮定して、この間の各ボリュームの温度として使用される。同様に上流側のポンプ出口から炉心部入口間には、炉心部入口温度が設定される。

2.2.2 ポンプ部エネルギーバランス

ポンプ部のエネルギーバランスは、ポンプ発熱 Q_p およびポンプ部流量 W_p を用いて次式で計算される。

$$\Delta h_p = Q_p / W_p \quad (2.21)$$

ここで、 Δh_p はポンプ発熱によるエンタルピ増加量である。(2.21) 式で求められた Δh_p だけ、ポンプの吐出側のボリュームエンタルピから差引き、ポンプ上流側ボリュームのエンタルピを決定する。このエンタルピと上流側ボリューム圧力から蒸気表を用いて、上流側ボリューム温度を求める。

このボリューム温度はポンプ入口側から蒸気発生器出口まで（上流側）の各ボリュームの温度を設定するのに用いられる。

2.2.3 蒸気発生器エネルギーバランス

蒸気発生器部のエネルギーバランスは、1 次側と 2 次側に分けられ、それぞれのジャンクションに対してエンタルピトランスポートが仮定される。1 次側のエネルギーバランスの誤差は蒸気発生器伝熱面積を調整することにより、また 2 次側のエネルギーバランスの誤差は、給水ジャンクションのエンタルピを補正することにより吸収される。これに対してオリジナル RELAP4/MOD7

の自動初期定常状態設定機能では、2次側の温度を調整することにより1次側のエネルギーバランスを取るようになっており、この方法では2次側の状態が目標値と掛離れたものになってしまう可能性がある。それで、上記のようなエネルギーバランスの調整法に改良した。改良後の蒸気発生器エネルギーバランスについては次節で詳述する。

2.3 蒸気発生器二次側の初期定常設定方法とその改良

2.1 から 2.3 までに説明した内容はすべてオリジナル RELAP4/MOD7 の自動初期定常状態設定機能に基づくものであるが、この節で述べる蒸気発生器のエネルギーバランスおよび2次系ループの圧力バランスについては、原研において改良整備したものである。

2.3.1 2次系ループの圧力バランス

2次系ループ流路は基準圧力ボリューム（蒸気ドーム）を含む流路であり、このループの圧力バランスの計算方法を図 2.4 を例にとり説明する。ここで基準圧力ボリュームは“37”であり、ここから上流の方向へ圧力バランスがとられる。

$$P'_{36} = P_{36} - \Delta P_{j42} \quad (2.22)$$

$$P'_{35} = P_{35} - \Delta P_{j42} - \Delta P_{j41} \quad (2.23)$$

ここで、 P_i はボリューム i の調整前圧力、 P'_i はボリューム i の調整後圧力、 ΔP_{ji} はジャンクション i の圧力損失である。このループの圧力バランス誤差は、基準圧力ボリューム“37”と2次系ループの最終ボリューム“35”間の圧力残差係数を内部計算することによって補正される。従って、このジャンクション“43”の入力データ JCALCI = 1 または 3 である必要がある。入力データの妥当性を検討するためには、この圧力残差係数のチェックが必要である。

2.3.2 蒸気発生器伝熱部エネルギーバランス

2.2.3 で述べたように蒸気発生器伝熱部のエネルギーバランスは、1次側と2次側に分けて、それぞれのジャンクションに対してエンタルピトランスポートが仮定される。1次側のエネルギーバランスの誤差は蒸気発生器伝熱面積を調整することにより、また2次側のエネルギーバランスの誤差は、給水ジャンクションのエンタルピを補正することにより吸収される。また SG 二次側はライザー部も含め、多ボリュームに分割することができる。

(1) 蒸気発生器1次側のエネルギーバランス

計算方法について図 2.5 を例にとり説明する。蒸気発生器の1次側と2次側の温度の関係は、定圧比熱を用いて表わすと次式のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_1^* - \frac{f \cdot K_1 (T_1 - T_{j1}^*)}{2 W^* C_{p1}} \\ T_i &= T_{i-1} - \left\{ \frac{f \cdot K_{i-1} (T_{i-1} - T_{ji-1}^*)}{2 W^* C_{pi-1}} + \frac{f \cdot K_i (T_i - T_{ji}^*)}{2 W^* C_{pi}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

$$, \quad (i = 2, 3, \dots, N)$$

$$T_o^* = T_N - \frac{f \cdot K_N (T_N - T_{jN}^*)}{2W^*C_{PN}}$$

- ここで、
 T_1 : 蒸気発生器1次側入口プレナム温度。
 T_o : 蒸気発生器1次側出口プレナム温度。
 W : 蒸気発生器1次側流量。
 T_i : 蒸気発生器1次側ボリューム i の温度。
 K_i : $= -\sum Q_i / (T_i - T_{ji})$
 C_{Pi} : 蒸気発生器1次側ボリューム i の定圧比熱。
 Q_i : 蒸気発生器1次側ボリューム i の除熱量。
 T_{ji} : 蒸気発生器1次側ボリュームと対応する2次側ボリューム j の温度
 N : 蒸気発生器1次側ボリュームの個数。
 f : 蒸気発生器伝熱面積パラメータ (通常 1.0)
 $*$: 既知量であることを示す。

である。

ここで1次側と2次側のエネルギーバランスをとるために蒸気発生器伝熱面積パラメータ f を調整し、式(2.24)を満足するように繰返し計算を行う。この時、入力データの妥当性を検討するため、整備パラメータである f の計算収束時の値がプリントアウトされる。

また、蒸気発生器出入口プレナム間の伝熱もオプションとして考慮可能である。計算方法を図2.6を例として説明すると、このオプションを選択した場合蒸気発生器入口プレナムボリューム温度は次式によって修正される。

$$T'_1 = T_1 - Q_P / (WC_{P1}) \quad (2.25)$$

ここで

- T'_1 : 蒸気発生器1次側入口プレナムの出口温度
 Q_P : 入口プレナムから出口プレナムへの伝熱量
 C_{P1} : 蒸気発生器1次側入口プレナムの定圧比熱
 W : 蒸気発生器1次側入口プレナム流量
 T_1 : 蒸気発生器1次側入口プレナムの入口温度

である。

(2) 蒸気発生器2次側

計算方法を図2.4を例として説明する。エネルギーバランスをとる方向は、2次系の基準圧力ボリュームである蒸気発生器蒸気ドーム、ライザー部、ダウンカマ部へと、冷却材の流れとは逆向きである。

ボリューム平均エンタルピ \bar{h}_i は、出口エンタルピ h_{jout} 、伝熱量 Q_i 、再循環流量 W を用いて次式で計算される。

$$\bar{h}_i = h_{jout} - Q_i / 2W \quad (2.26)$$

また、入口エンタルピ h_{jin} は、

$$h_{jIN} = h_{j-1out} = h_{jout} - Q_i / W \quad (2.27)$$

と計算する。

式(2.26)および(2.27)を用いて、2次系ループの各ボリュームエンタルピを順次求めてゆく。2次系ループの最終ボリュームのエネルギー誤差は、そのボリュームに接続している給水ジャンクションのエンタルピを補正することにより収束される。

また2次系ループのボリュームの中で、気泡分離モデルを適用しているボリュームに対して、そのボリュームの出口ジャンクションのエンタルピが、式(2.26)で使用された h_{jout} と一致するように、気泡分離モデルの気泡の分布の傾きが調整される。

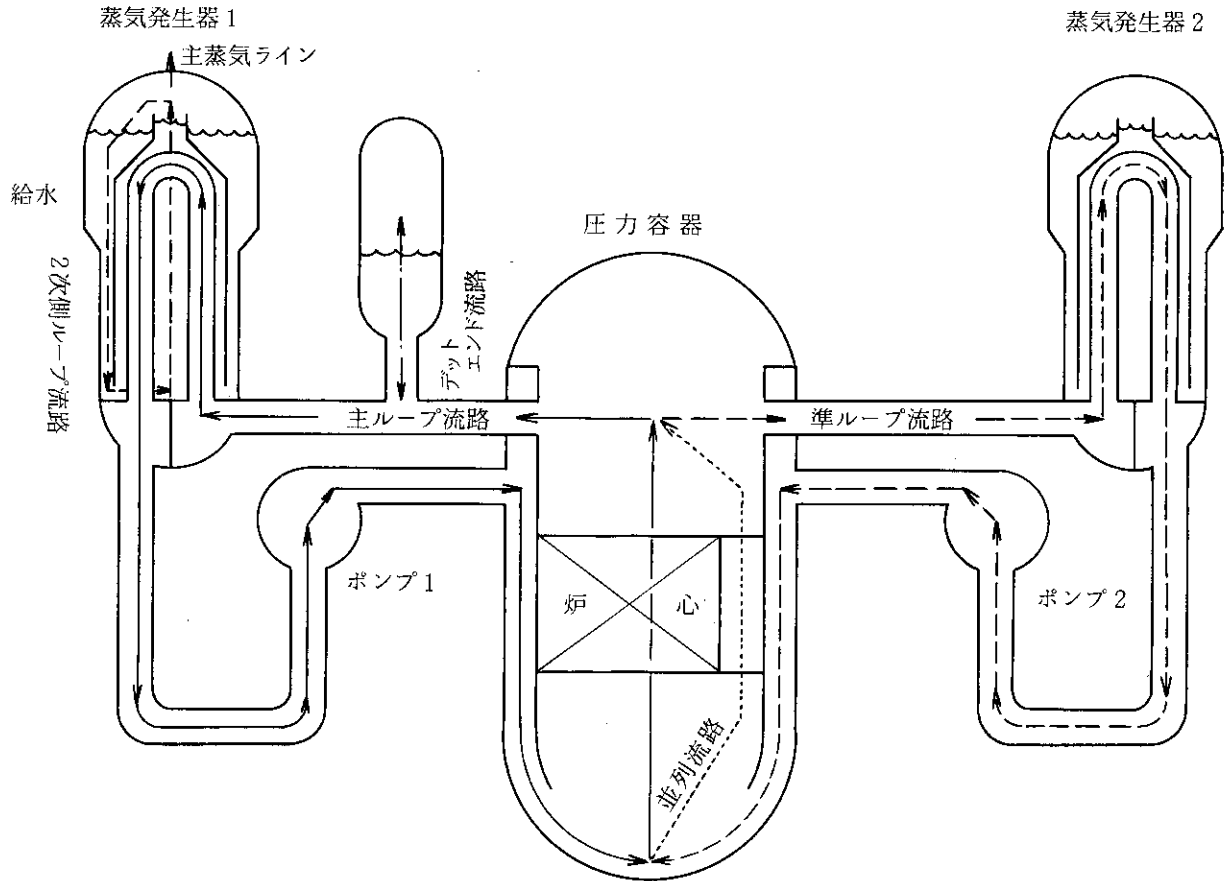
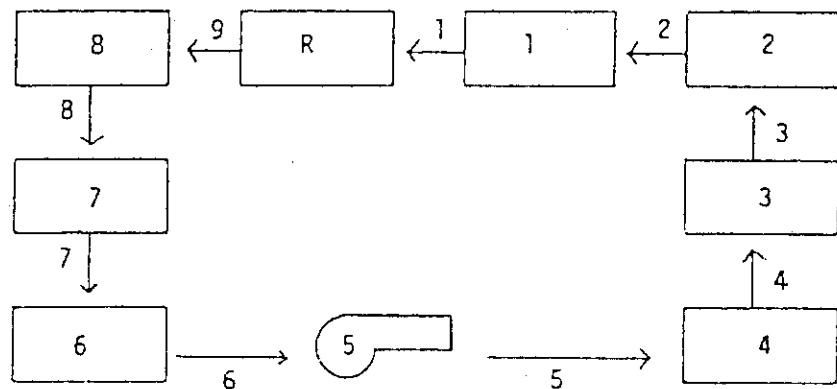


図 2.1 定常状態初期値設定流路図



"R" = Reference Pressure Control Volume

図 2.2 主ループ流路の圧力バランス

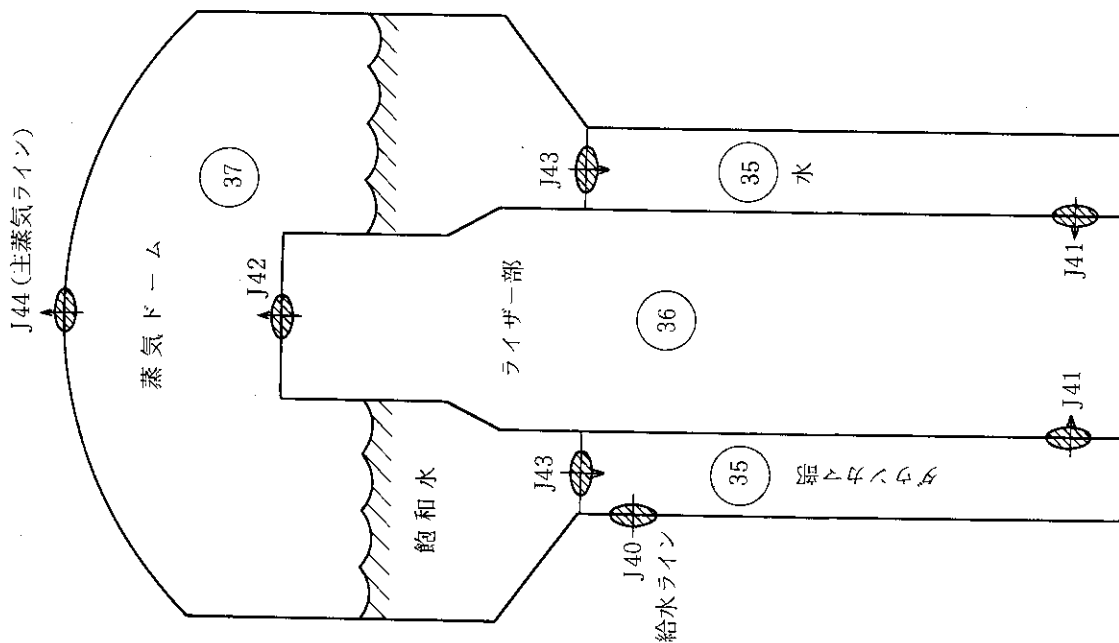


図 2.4 蒸気発生器二次側エネルギーバランス

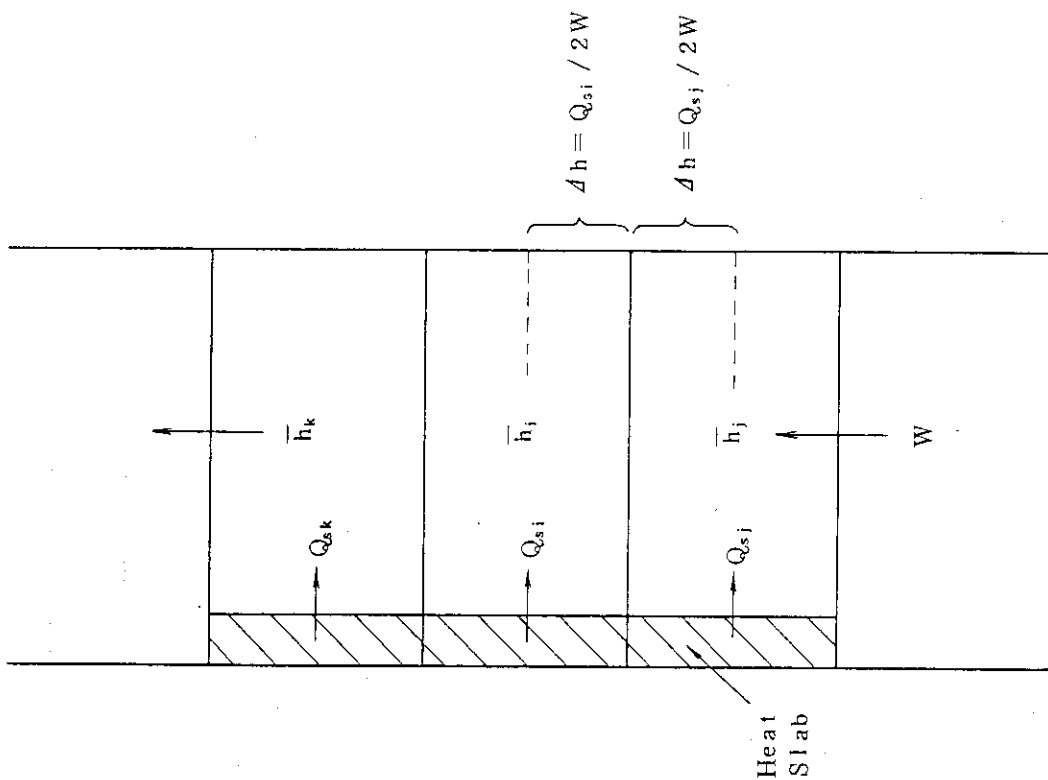


図 2.3 炉心部エネルギーバランス

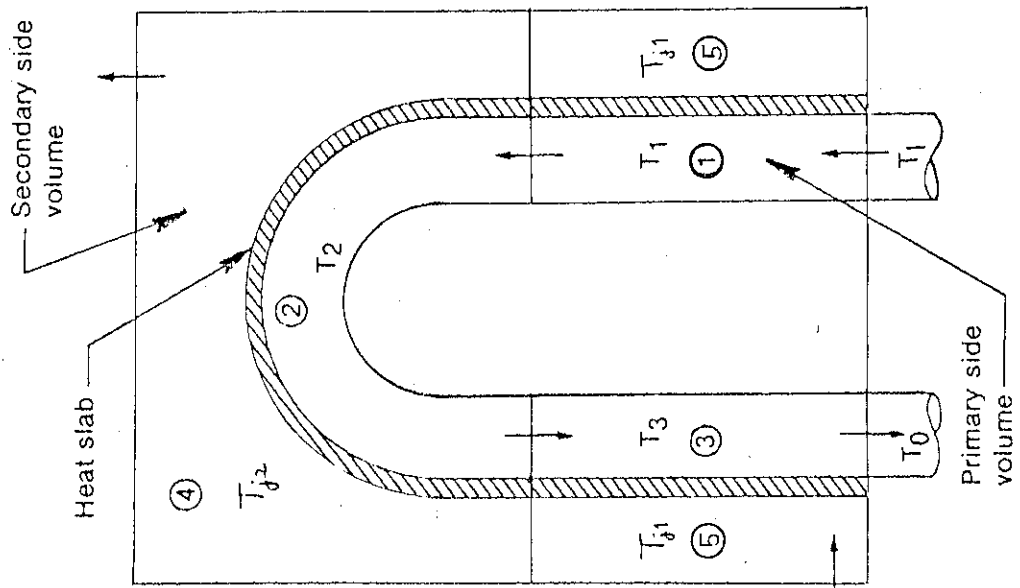


図 2.5 蒸気発生器一次・二次側エネルギーバランス

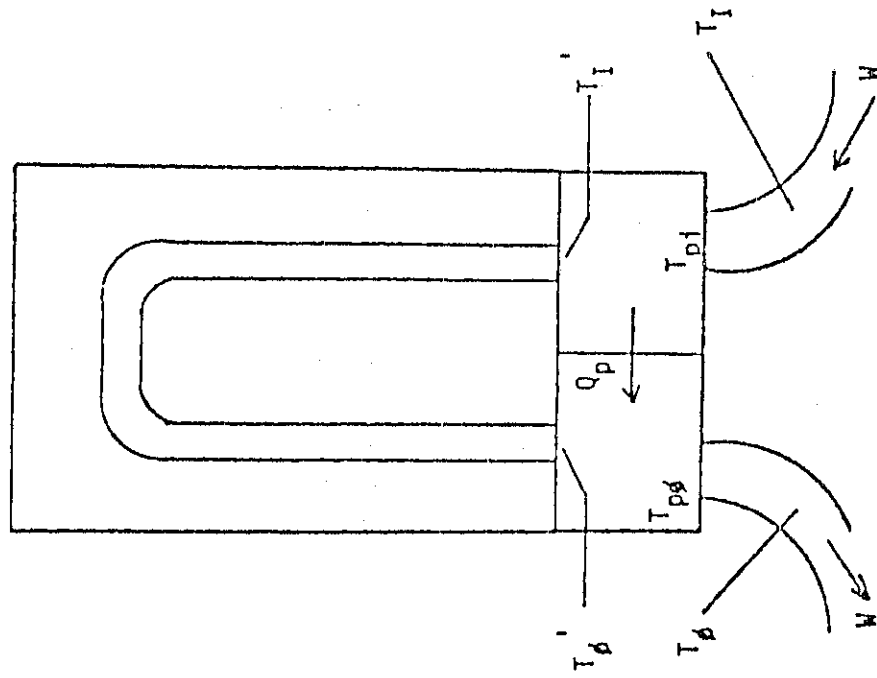


図 2.6 蒸気発生器出入口プレナムエネルギーバランス

3. テストラン結果と問題点

PWR 自動初期定常状態設定機能のチェックのために、LOFT 小破断実験 L3-6 を例にとり図 3.1 に示すようなノード分割で実験体系を表わし、これに対して定常状態初期値設定を行い、20秒間のマルチランジェント計算を行った。計算結果を図 3.2 から図 3.7 に示す。これら計算結果の図より、ほぼ安定な定常状態が達成されていることがわかる。ただし、図 3.5 に示す 2 次系圧力は多少変化している。この原因としては RELAP4 の蒸気表の引きかたと基礎方程式の解法に問題があると考えられる。以下にこれらの原因について検討する。

3.1 飽和状態時の蒸気表の引き方

RELAP4 の蒸気表サブルーチンの中に、飽和状態時の状態量を求める STH2O1 (温度とクオリティから状態量を求める) と STH2O2 (圧力とクオリティから状態量を求める) がある。状態量の一つである圧力および温度を各サブルーチンの出力とすれば、

$$P_1 = \text{STH2O1}(T_1, X) \quad (3.1)$$

$$T_2 = \text{STH2O2}(P_2, X) \quad (3.2)$$

ここで、 X はクオリティ、 P_1 、 P_2 は飽和圧力、 T_1 、 T_2 は飽和温度である。いま、飽和状態の圧力 P_{sat} と温度 T_{sat} を用いて、式 (3.1) および (3.2) に代入すると、

$$P_{\text{sat}} = \text{STH2O1}(T_{\text{sat}}, X) \quad (3.3)$$

$$T_{\text{sat}} = \text{STH2O2}(P'_2, X) \quad (3.4)$$

となる。ここで、式 (3.4) は圧力をパラメータとして、出力変数の一つである温度を T_{sat} に一致させたものである。この P_{sat} と P'_2 を比較すると圧力誤差が 0.22 psi (約 0.3%) であった。この誤差は RELAP4 の蒸気表自体が温度の関数として定義されているため、圧力から温度を求める逆関数から発生するものと考えられる。

今回組込んだ初期定常状態設定計算では、圧力バランスをとり、次にエネルギーバランスをとる。蒸気発生器等のボリュームの状態量を決定するために圧力をパラメータとして蒸気表を引くと、エネルギーバランスのとれた温度が多少変化する。また、過渡計算で用いる蒸気表ルーチンは STH2O4 (温度と比体積がパラメータ) であるため、第 1 ステップで蒸気発生器 2 次系の圧力が多少変化し、圧力バランスがくずれる。したがって今回の改良では飽和状態での状態量を決定するための新ルーチン STH2T2 および STH2T5 を作成した。これらサブルーチンは、

$$T_{\text{sat}} = \text{STH2T2}(P_{\text{sat}}, X) \quad (3.5)$$

$$T_{\text{sat}} = \text{STH2T5}(P_{\text{sat}}, H) \quad (3.6)$$

である。

プログラム上、式 (3.5) および式 (3.6) を満足するために、これら新サブルーチンの中で温度をパラメータとした収束計算を行っている。このため、出力変数である温度に打ち切り誤差が発生する。この打ち切り誤差は、STH2O2 および STH2O5 を用いた場合に比べ、充分小さいが

完全にゼロではない。時間の経過にしたがって、この打ち切り誤差が拡大され、蒸気発生器2次系の圧力を多少変化させる要因の一つと考えられる。

3.2 基礎方程式の解法上の問題

RELAP 4の基礎方程式を以下に示す。

$$\dot{W}_k = \frac{1}{L_k} (P_i - P_j + F_k |W_k| + E_k), \quad k = 1, \dots, K \quad (3.7)$$

$$\dot{U}_n = \sum_{\nu \rightarrow (\cdot, n)} H_\nu W_\nu - \sum_{\nu \rightarrow (n, \cdot)} H_\nu W_\nu + Q_n, \quad n = 1, \dots, N \quad (3.8)$$

$$\dot{M}_n = \sum_{\nu \rightarrow (\cdot, n)} W_\nu - \sum_{\nu \rightarrow (n, \cdot)} W_\nu, \quad n = 1, \dots, N \quad (3.9)$$

ここで

P_i, P_j : 流路 k の始点ノード, 終点ノード圧力

L_k : 流路 k の慣性

F_k : 時間依存の摩擦係数

E_k : 水頭

: ボリュウムエンタルピー

$$H_\nu = \begin{cases} \text{HO}, & W_k \geq 0 \\ \text{HI}, & W_k < 0, \end{cases} \quad H_\nu^* = \begin{cases} \text{HI}, & W_k \geq 0 \\ \text{HO}, & W_k < 0 \end{cases}$$

Q_n : 時間依存の加熱量

W_k : 流路 k の流量

$\sum_{\nu \rightarrow (\cdot, n)}$: ボリュウム n に接続しているジャンクションで, ボリュウム n へ流入するものの和

$\sum_{\nu \rightarrow (n, \cdot)}$: ボリュウム n に接続しているジャンクションで, ボリュウム n から流出するものの和

U_n : ノード n の内部エネルギー

M_n : ノード n の質量

また蒸気表は関数 π として与えられ,

$$P_i = \pi_i (U_i, M_i) \quad i = 1, \dots, N \quad (3.10)$$

と定義される。

式 (3.7), (3.8), (3.9) から

$$\mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{W} = \mathbf{Z} \quad (3.11)$$

が求まる。ここで

\mathbf{A} : $\{ a_{k\nu} \}$ の $k \times k$ 行列

$\Delta \mathbf{W}$: $\text{col} \{ \Delta W_1, \dots, \Delta W_k \}$

\mathbf{Z} : $\text{col} \{ Z_1, \dots, Z_k \}$ で各要素は,

$$a_{k\nu} = a_{k\nu}^* \quad (\nu \neq k) \quad (3.12)$$

$$a_{kk} = (1 - \Delta t \frac{1}{L_k} F_{k,n} |W_{k,n}| + a_{kk}^*) \quad (3.13)$$

$$Z_k = \Delta t^2 \left\{ \dot{W}_k + \frac{1}{L_k} \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial U_i} \right) \cdot \dot{U}_i - \left(\frac{\partial P_j}{\partial U_j} \right) \cdot \dot{U}_j + \left(\frac{\partial P_i}{\partial M_i} \right) \dot{M}_i - \left(\frac{\partial P_j}{\partial M_j} \right) \cdot \dot{M}_j \right] \right\} \quad (3.14)$$

となる。

定常状態初期値設定が成立するためには、式(3.11)の $\Delta \mathbf{W} = 0$ から $\mathbf{Z} = 0$ でなければならない。 $\mathbf{Z} = 0$ となるためには、要素 Z_k の \dot{W}_k , \dot{U}_i , \dot{U}_j および \dot{M}_i , \dot{M}_j がゼロとなる必要がある。 \dot{W}_k は圧力バランスをとることから、 \dot{M}_i , \dot{M}_j は使用者入力流量からゼロとすることができる。しかし、 \dot{U}_i , \dot{U}_j は前記の3.1 飽和状態時の蒸気表の引き方の理由から、完全にゼロではない。一方、 $\partial P / \partial U$ と $\partial P / \partial M$ は、下表で示すように、単相と二相では不連続であり、その値のオーダー、符号が異っている。

	$\partial P / \partial U$	$\partial P / \partial M$
単相	3.95 - 1	3.53 - 3
二相	2.00 + 2	-6.63 - 1

したがって、単相と二相を接続しているジャンクションでは、この $\partial P / \partial U$, $\partial P / \partial M$ の影響が出て、 $\mathbf{Z} = 0$ つまり $\Delta \mathbf{W} \neq 0$ となり時間の経過とともにバランスが多少くずれてくる。この変化によって、2次系側圧力等にずれが生じるものと考えられる。

なお、一次側は二次側と同様に $U \approx 0$ であるが、すべてのボリュームが単相であるため $\partial P / \partial U$, $\partial P / \partial M$ がほぼ同じ値となり、式(3.14)内の中カッコの値はキャンセルし、2次側ほどバランスがくずれないと考えられる。

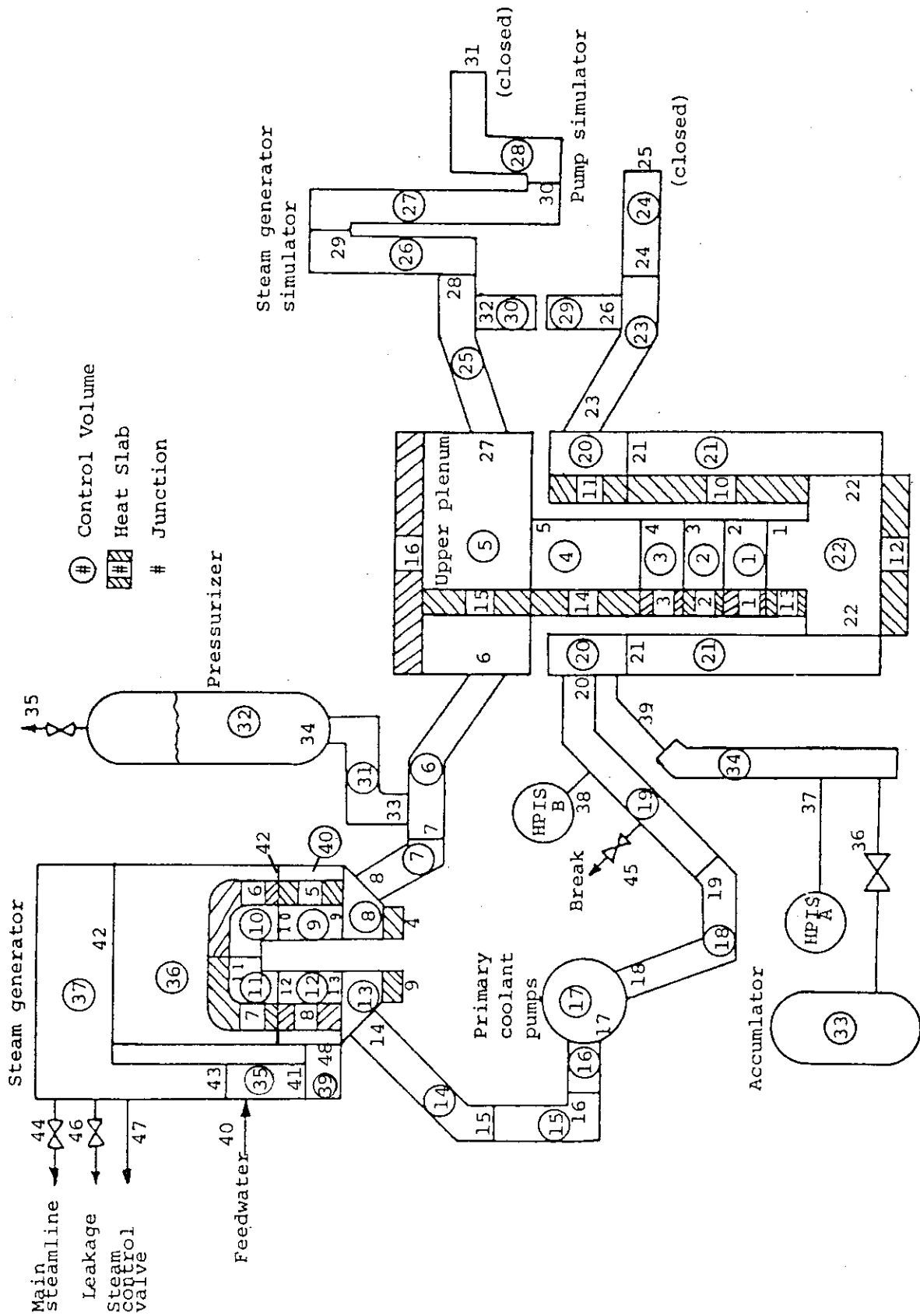


図 3.1 テストランに用いたLOFTノード分割図

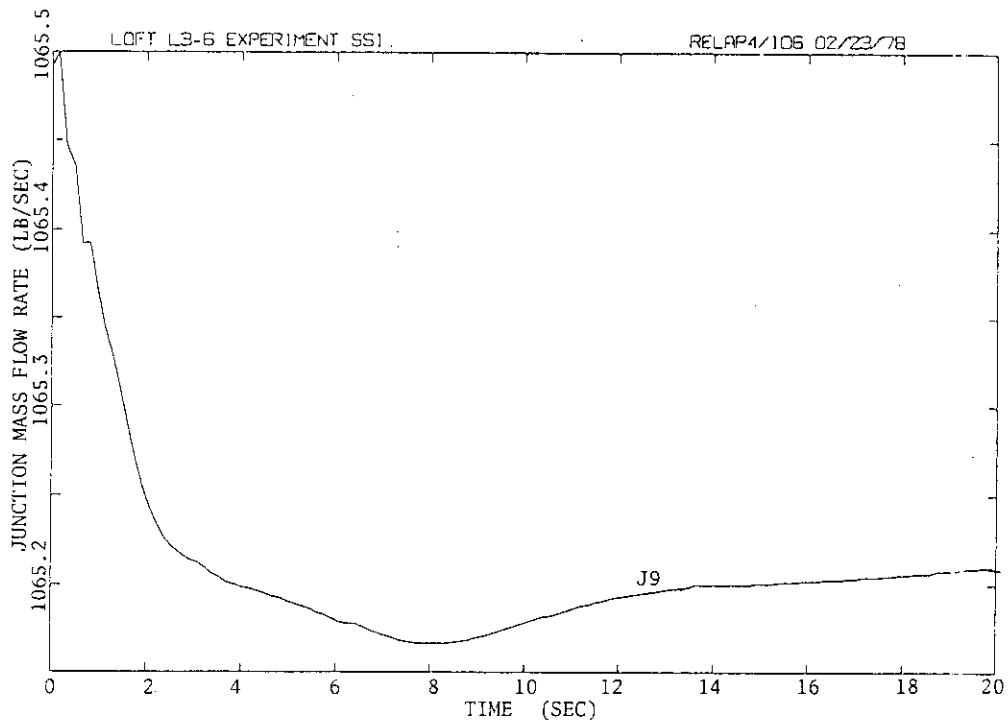


図 3.2 一次系ループ流量

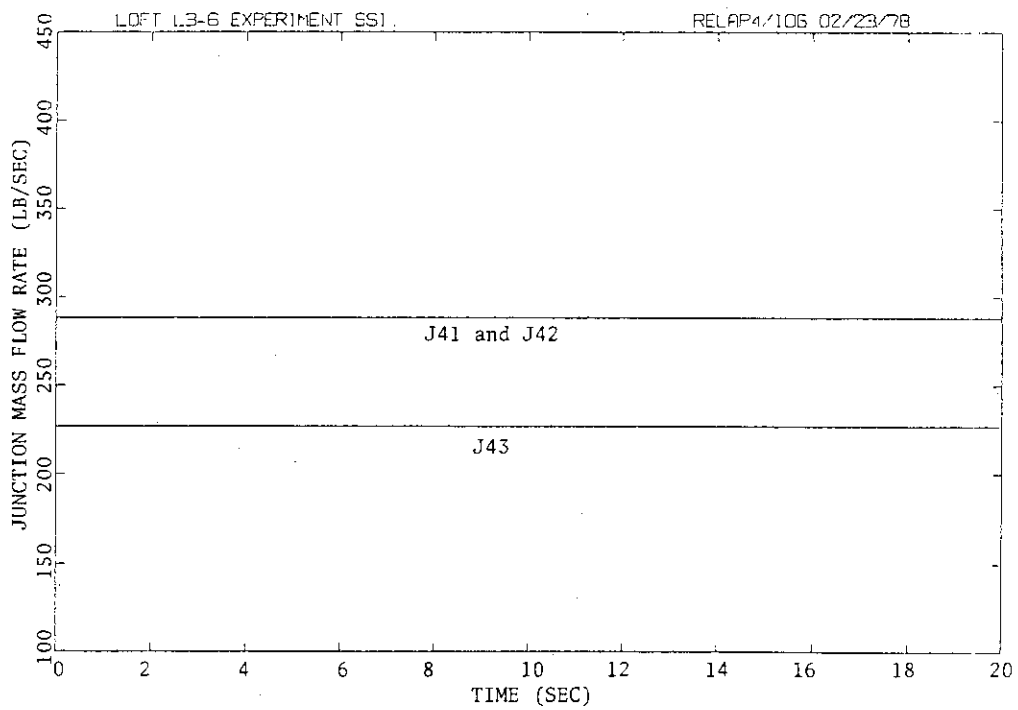


図 3.3 2次系ループ流量

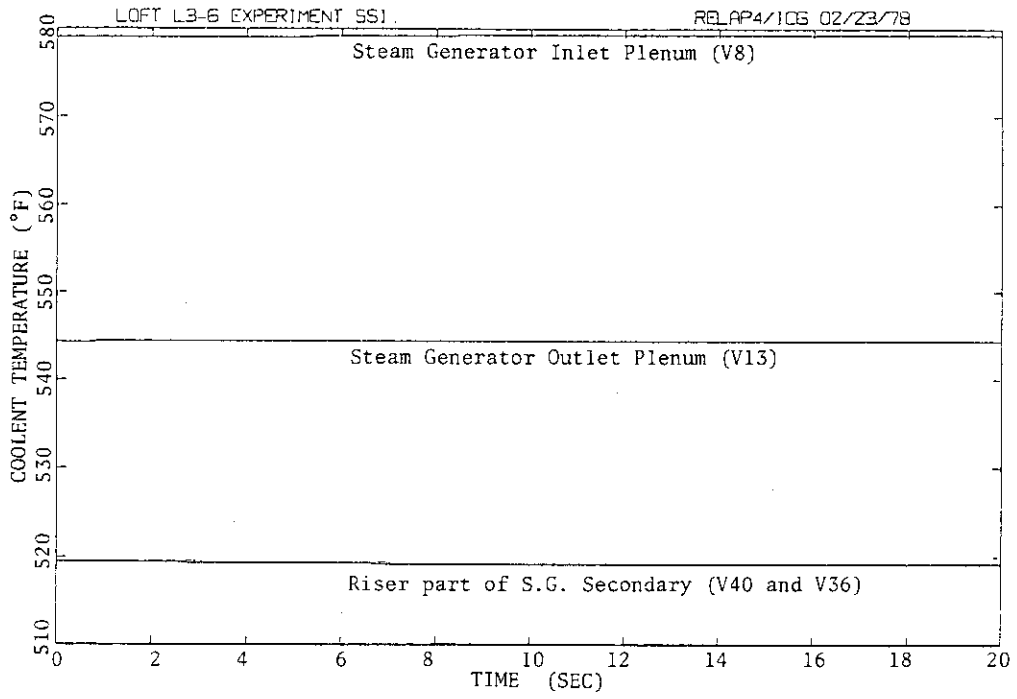


图 3.4 蒸汽发生器温度

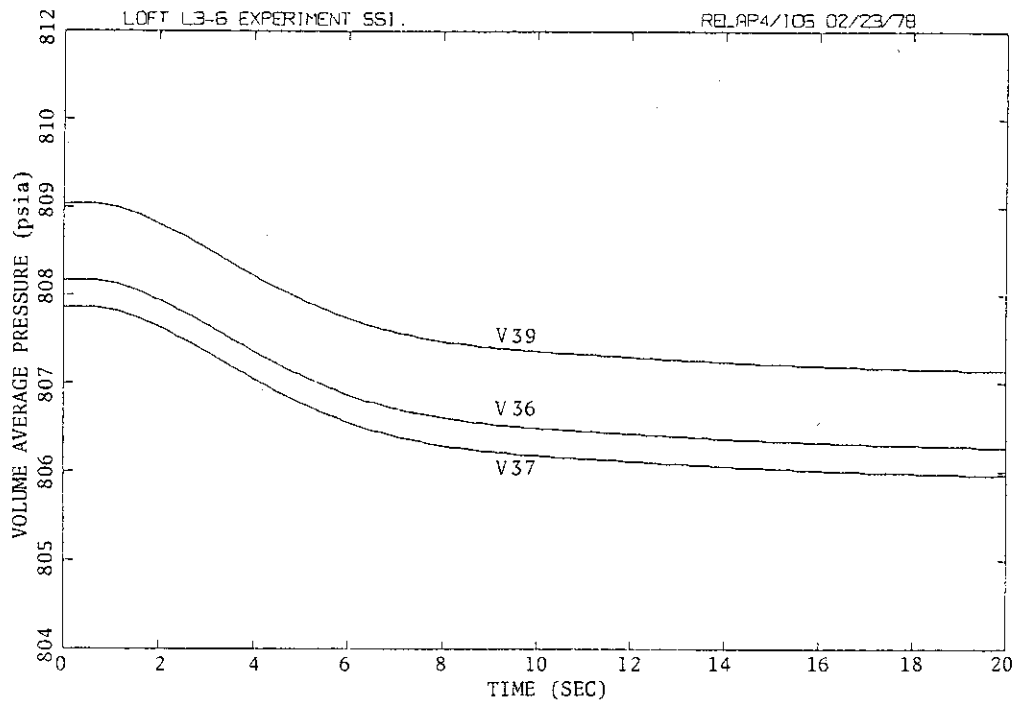


图 3.5 蒸汽发生器 2 次侧压力

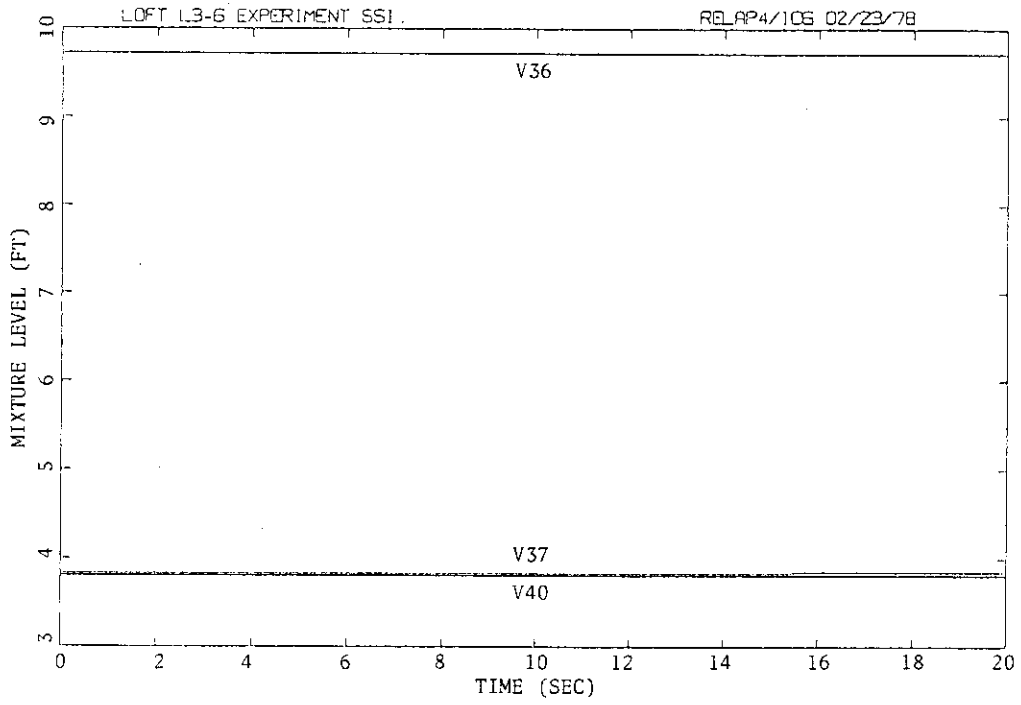


図 3.6 蒸気発生器 2 次側水位

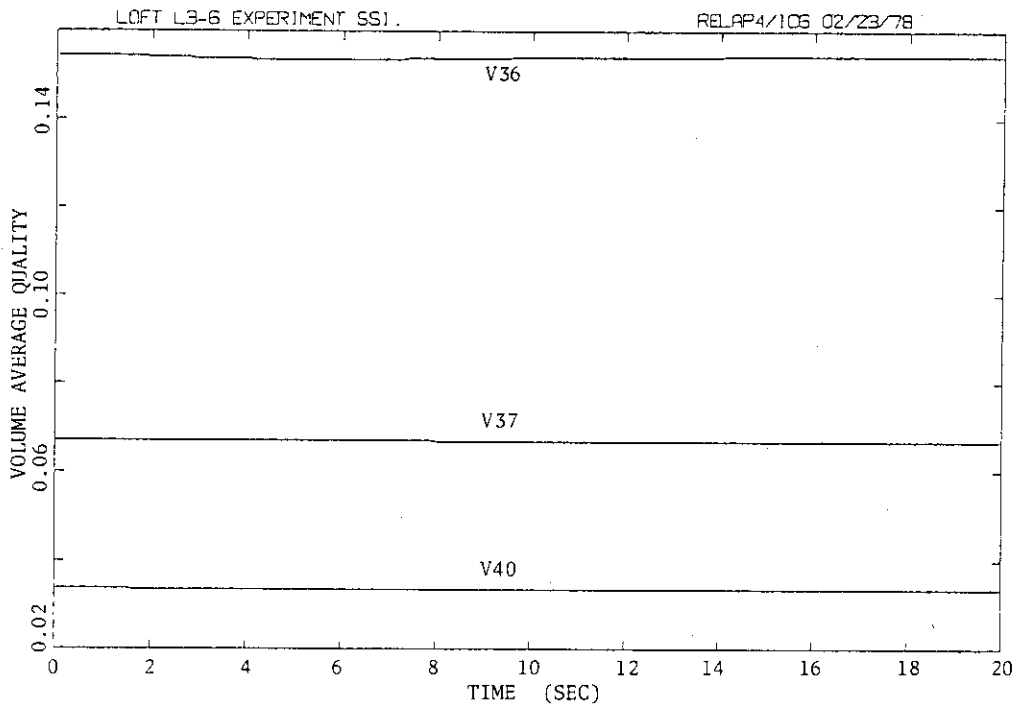


図 3.7 蒸気発生器 2 次側クオリティ

4. 入力データ

本機能は、オプション選択により機能する。以下に本機能を作動させるのに必要な入力を示す。

4.1 Self-Initialization Core Inlet/Outlet Volume Description Card 220200

This card is optional. The presence of this card sets the thermal self-initialization flag to true. It is required to use the thermal self-initialization feature.

- W1-I ICRIN = Core inlet volume number for control volume just upstream of the core.
- W2-I ICROUT = Core outlet volume number for control volume just downstream of the core.

4.2 Self-Initialization Steam Generator Description Cards 2201XY

If Card 220200 (thermal self initialization) is input. $0 < X < n$, where n is the number of steam generators (< 10). $0 < Y < 9$, where Y is the card sequence number in each steam generator set. There may be up to 9 primary volumes per steam generator.

- W1-I IVOL(1) = Steam generator inlet plenum volume number.
- W2-I IVOL(2) = First steam generator primary volume number (next to the inlet plenum).
- W3-I IVOL(3) = Next primary volume number adjacent to Volume IVOL(2).
- ⋮
- W_{M-4}-I IVOL(M-4) = Last primary volume number before outlet plenum.
- W_{M-3}-I IVOL(M-3) = Steam generator secondary side volume number.
- W_{M-2}-I IVOL(M-2) = Steam generator outlet plenum volume number.
- W_{M-2}-I IVOL(M-1) = Secondary feedwater inlet junction number. Junction IVOL(M-1) must be a fill junction.
- W_M-I IVOL(M) = Secondary steam outlet junction number. junction IVOL(M) must be a negative fill junction.

4.3 Self-Initialization Core Flow Path Description Cards 2202XY

This card is required for each core flow path only if Card 220200 (thermal self-initialization) is input. $1 < X < n$, where n is the number of flow paths to a maximum of 5 paths with up to 15 volumes per paths. $0 < Y < 9$, where Y is the card sequence number within set X .

- W1-I IVOL(1) = Volume number of core volume nearest inlet end of core.

W2-I IVOL(2) = Next core volume number.

·
·
·

WM-I IVOL(M) = Volume number of core volume nearest outlet end of core.

4.4 Self-Initialization Steam Generator to Core Description Card 22026X

This card is required only if Card 220200 (thermal self-initialization) is input. $0 < Y < 9$, where Y is the card sequence number.

W1-I ICOIN(1) = Volume numbers for all volumes between the steam generator outlet plenum and the volume upstream of the core inclusive, any other, until all M such volumes have been entered for all steam generators to core paths (no duplicate volume; $0 < M < 40$).

·
·
·

WM-I ICOIN(M)

4.5 Self-Initialization Core to Steam Generator Description Card 22028Y

This card is required only if Card 220200 (thermal self-initialization) is input. $0 < Y < 9$, where Y is the card sequence number.

W1-I ICCOUT(I) = Volume numbers for volumes between the core outlet (upper plenum) and steam generator inlet plenum inclusive, any other, until all M such volumes have been entered for all core-to-steam generator paths (no duplicated volume numbers; $0 < M < 40$).

·
·
·

WM-I ICCOUT(M)

4.6 Self-Initialization Pump to Steam Generator Description Card 22030X

This card is required only if Card 220200 (thermal self-initialization) is input. $0 < X < n$, where n is the number of steam generators ($n < 10$).

W1-I IWV(1) = Volume number of the pump for the group.

W2-I IWV(2) = Volume number of a volume between the pump volume and the steam generator outlet plenum, in order from the pump, proceeding upstream until all such volumes have been entered.

·
·
·

WM-I IWV(M) = The volume number of the steam generator outlet plenum in that group.

4.7 Self-Initialization Parallel Path Description Card 22031X

These cards are optional and may be input only if Card 220400 (pressure self-initialization) is input. These cards allow pressure flow balancing within paths parallel to the main flow paths, such as core bypass channels $0 < X < n$, where n is the number of parallel paths being described with a maximum of 10 paths.

- W1-I IJUNSC(1) = Number of the first junction in the path, either end. This junction connects the first volume of the parallel path with a volume of a primary path.
- W2-I IJUNSC(2) = Number of the next junction in the path.
- ...
- WM-I IJUNSC(M) = Number of the last junction in the path. This junction connects the last volume of the path with a volume of a primary path ($0 < M < 20$).

4.8 Self-Initialization Dead End Path Description Card 22032X

These cards are optional and may be input only if Card 200400 (pressure self-initialization) is input. These cards enable the self-initialization model to minimize initial pressure differences for dead-end paths with zero initial flow. Descriptions of dead-end paths branching from other dead-end paths must be entered with a higher sequence number than that of the present dead-end path. $0 < X < n$, where n is the number of different dead-end paths with a maximum of 10 paths, with up to 20 junctions per path.

- W1-I IJUND(1) = Number of the junction connected to the flow loop.
- W2-I IJUND(2) = Number of the next junction in the dead-end path.
- ...
- WM-I IJUND(M) = Number of the last junction in the dead-end path.

4.9 Self-Initialization Downstream Main Flow Loop Description Card 220400

The main flow channel through the core should be included in the flow loop. This card sets the pressure self-initialization flag to true. It is required if the user wishes to use the pressure self-initialization feature ($N < 38$).

- W1-I IVOL(1) = Volume number of the pressure reference volume within the flow loop. The pressure of this volume will not be adjusted during pressure self-initialization.
- W2-I IVOL(2) = Volume number of the next volume downstream in the loop.
- ...
- WM-I IVOL(N) = Volume number of the pump in the flow loop.

4.10 Self-Initialization Upstream Main Flow Loop Description Card 220401

This card is required only if Card 220400 (pressure self-initialization) is input ($N < 38$).

W1-I IVOL(1) = Number of the pressure reference volume (same as W1-I on Card 220400).
 W2-I IVOL(2) = number of the next volume upstream.
 . . .
 WN-I IVOL(N) = Number of the pump in the flow loop (same as WN-I on Card 220400).

4.11 Self-Initialization Nonmain Flow Loop Description Cards 22040Y

These cards must be entered in even/odd consecutive pairs. They are required for all nonmain flow paths only if Card 220400 (pressure self-initialization) is input (N<38).

For Y = 2, 4, 6:

W1-I IVOL(1) = Number of the last volume in common with the main reference flow loop on the core outlet end.
 W2-I IVOL(2) = Number of the next volume in the loop downstream.
 . . .
 WN-I IVOL(N) = Volume number of the pump in the loop.

For Y = 3, 5, 7:

W1-I IVOL(1) = Number of the last volume in common with the main reference flow loop on the core inlet end.
 W2-I IVOL(2) = Number of the next volume in the loop upstream.
 . . .
 WN-I IVOL(N) = Volume number of the pump in the loop.

4.12 Self-Initialization Negative Residual Turnoff Card 220408

This card is optional, but recommended for use with the self-initialization option. It may be entered only if Card 220400 (pressure self-initialization) is input.

W1-I IFLAG = Any integer. This presents negative residuals from causing the problem to fail. However, the final set of residuals must be inspected carefully to ensure that all negative residuals are, in fact, insignificant.

4.13 Self-Initialization Reference Temperature Volume Description Card 22041X

This card is optional and may be input only if Card 220200 (thermal self-initialization) is input. $1 < Y < n$, where n is the number of different

volume groups, each with a temperature reference volume, to a maximum of 9 groups, with a maximum of 10 volumes per group.

- W1-I ISAME(1) = The number of the volume to be used as a temperature reference for the following volumes on the card.
- W2-I ISAME(2) = The number of a volume whose temperature is to be set equal to the temperature of Volume ISAME(1).
- ·
- ·
- ·
- WM-I ISAME(M) Until all desired volumes have been entered.

謝 辞

本作業を実施するに際しては、センチュリ・リサーチ・センタ榎富合 氏（現、榎日本エナジー）の協力を得た。ここに、深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) S. R. Behling, et al., "RELAP4/MOD7-A Best Estimate Computer Program to Calculate Thermal and Hydraulic Phenomena in a Nuclear Reactor or Related System", NUREG/CR-1998, EG&G(1981)
- (2) S. R. Fischer, et al., "RELAP4/MOD6-A Computer Program for Transient Thermal Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related System-User's Manual", CDAP-TR003, EG&G(1978)
- (3) K. V. Moore et al., "RETRAN-A Program for One-Dimensional Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems", EPRI CCM-5 (Dec. 1978)
- (4) J. H. McFadden et al., "RETRAN-02 A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow System", EPRI NP-1850-CCM (MAY 1981)
- (5) K. Yoshida, F. Tanabe, K. Matsumoto, and T. Shimooka, "RELAP4/MOD6/U4/J3: A JAERI Improved Version of RELAP4/MOD6 for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of LWR Including Effects of BWR Core Spray", JAERI-M 9394 (March 1981)

謝 辞

本作業を実施するに際しては、センチュリ・リサーチ・センタ(株)富合 氏(現、(株)日本エナジー)の協力を得た。ここに、深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) S. R. Behling, et al., "RELAP4/MOD7-A Best Estimate Computer Program to Calculate Thermal and Hydraulic Phenomena in a Nuclear Reactor or Related System", NUREG/CR-1998, EG&G(1981)
- (2) S. R. Fischer, et al., "RELAP4/MOD6-A Computer Program for Transient Thermal Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related System-User's Manual", CDAP-TR003, EG&G(1978)
- (3) K. V. Moore et al., "RETRAN-A Program for One-Dimensional Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems", EPRI CCM-5 (Dec. 1978)
- (4) J. H. McFadden et al., "RETRAN-02 A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow System", EPRI NP-1850-CCM (MAY 1981)
- (5) K. Yoshida, F. Tanabe, K. Matsumoto, and T. Shimooka, "RELAP4/MOD6/U4/J3: A JAERI Improved Version of RELAP4/MOD6 for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of LWR Including Effects of BWR Core Spray", JAERI-M 9394 (March 1981)