

大リーク・ナトリウム-水反応時の  
準定常圧力挙動計算コード SWAC-13

— 大リーク・ナトリウム-水反応解析(第2報) —

1977年4月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)

# 大リーク・ナトリウム-水反応時の準定常圧力 挙動計算コード SWAC-13

大リーク・ナトリウム-水反応解析(第2報)

田 辺 裕 美<sup>\*</sup>, 広 井 博<sup>\*</sup>,  
佐 藤 稔<sup>\*</sup>, 堀 雅 夫<sup>\*</sup>

## 要 旨

ナトリウム冷却高速増殖炉の蒸気発生器での大リーク・ナトリウム-水反応事故時の安全解析のため準定常圧力挙動計算コードSWAC-13を開発した。本コードは蒸発器, 過熱器などの蒸気発生器, 中間熱交換器, 二次系ナトリウム配管から構成される二次主冷却系, および収納容器, 放出系配管からなる放出系について事故時の圧力挙動とナトリウム及び水素ガスの流動をネットワークモデルによりシミュレーション計算を行なうものである。

本報告書は, 解析モデル, 数値計算手法, プログラム概要につき本コードの取扱いマニュアルとしてまとめたものである。また本コードを用いた例題計算としてSWAT-3試験装置における大リーク試験を取り上げ, ネットワーク分割法, インプットデータ計算結果につき述べてある。

本コードはJIS-FORTRANで書かれており, 190KBのコア容量を必要とし29リンク, 10,000ステップに約50CPU分要する。使用した計算機はFACOM 230/58である。

## 目 次

1. ま え が き .....	1
2. 基 本 設 計 .....	3
2.1 モデリング .....	3
2.2 数式化のための前提 .....	3
3. 数式モデルの解法 .....	4
3.1 ノードとリンク .....	4
3.2 1次元スリップモデル .....	4
3.3 基礎式 .....	5
3.4 圧力の決定 .....	6
3.5 差分近似化 .....	7
3.6 状態量の計算 .....	11
3.7 連続の式 .....	11
3.8 各部の取扱い .....	12
3.8.1 リンクの諸量 .....	12
3.8.2 流動圧損 .....	12
3.8.3 放出系配管での臨界流速 .....	14
3.8.4 収納容器 .....	14
3.8.5 水噴出率 .....	15
3.8.6 初期気泡体積 .....	15
3.8.7 水素ガス温度分布 .....	15
3.8.8 物性値 .....	16
3.9 初期条件 .....	16
3.10 変数の更新 .....	16
4. プログラムの内容 .....	18
4.1 プログラムの概要 .....	18
4.2 プログラムの構成と機能 .....	18
5. プログラムの制約と限界 .....	34
6. インプット・アウトプット .....	35
6.1 インプット形式 .....	35
6.2 アウトプット形式 .....	35

Apr., 1977

SWAC-13 : a Computer Code for the Analysis of the Behaviour of Quasi-Static Pressure and Sodium Flow on Large Scale Sodium/Water Reaction Accidents in IMFBR Steam Generator.

- Large Leak Sodium/Water Reaction Analysis (No.2) -

Hiroimi Tanabe\*, Hiroshi Hiroi\*  
Minoru Sato\*, and Masao Hori\*

## Abstract

For the analysis of large scale sodium/water reaction accident a computer program, SWAC-13 is developed to predict the behaviour of quasi-static pressure and sodium flow in the secondary cooling system composed of steam generators (EV, SH), IHX, and pipes, and pressure relief system composed of reaction product tank and pipes using network model by implicit method.

Here reported are modeling, the method of calculation, an outline of this code as users' manual and an example of simulation of SWAT-3 test.

This code is written in JIS-FORTRAN computer language and requires 190 k bites core memories. It takes about 50 minutes for FACOM-230/58 to compute 10,000 steps for 29 links.

\* Steam Generator Safety Section, Steam Generator Division, O-arai Engineering Center, PNC.

6.2.1 LP上の打出し ..... 35

6.2.2 デバッグ形式 ..... 48

7 計算例 ..... 50

7.1 SWAT-3体系への適用 ..... 50

7.2 計算結果 ..... 50

8 あとがき ..... 69

記号表 ..... 70

付録 ..... 73

図 表 目 次

図 2.1 スリッパ/比の定義

表 2.1 形状抵抗力損失係数

図 3.1 諸数値の更新

表 4.1 プログラム・サイズ

図 4.1 プログラムの構成

表 4.2 Xi の内容説明

図 4.2 カバーガス部の取扱い

図 4.3 放出系配管部の取扱い

表 4.3 エラーコード

表 4.4 警告コード

表 6.1 インプットデータの構成

図 6.1 データの構成

表 6.2 SWAC.13入力形式

図 7.1 SWAT-3装置概要

図 7.2 " Network 図

図 7.3

図 7.4

図 7.5

図 7.6

図 7.7

図 7.8

図 7.9

図 7.10

図 7.11

図 7.12

} SWAT-3 サンプル計算結果

## 1. ま え が き

高速増殖炉の蒸気発生器内で伝熱管破損によるナトリウム-ナトリウム-水反応が発生した場合の現象を解明する事は、蒸気発生器の安全設計上必要であり、これまでも対象となる現象に対応していくつかの計算コードが作られている。ナトリウム-水反応の解析には大きく分けて(1)いわゆる初期スパイク圧のSG内や二次冷却系への伝播の強さを計算するもの、(2)もっとも長い時間領域(10<sup>-2</sup>~10<sup>2</sup>sec)での準定常圧力挙動・ナトリウム流動を計算するもの、(3)水噴出率の計算をするもの、などがある。本コードで取扱うのは(2)の準定常圧力挙動の解析である。

準定常圧時間領域を対象とする場合の特徴として、事故SGを含む二次冷却系および放出系と言う大型体系でナトリウム・水素ガス二相流を含む流動を解析すると言う点が挙げられる。

これまで、この時間領域を解析する目的で作られた計算コードは、取扱う体系が固定されているものがほとんどで、体系の変更に対して適応性がなかった。このため簡略化模型であるナトリウム-水反応試験装置SWAT-1、中間規模試験装置である蒸気発生器安全性総合試験装置SWAT-3などの試験結果の解析と原型炉級の蒸気発生器システムの安全解析を同一コードを用いて行い、相互の結果、解析経緯、問題点に対する評価などを利用し合うことは困難であった。したがって本コードの開発主目的を計算対象・体系の幅広い変化に対して適応できる計算コードを作成し、試験装置にて得られた結果を実機SGの安全解析に請渡すと言うことに設定した。

本計算コードは計算手法として、ネットワークモデルを導入し、運動量と質量の保存式を時間的除解法により積分すると言う方法を採用し、幅広い体系変化への適応を可能としている。

しかしながら、このような計算手法を採用した結果、計算時間の増大と言う問題が生じる事はやむをえないものとした。

本計算コードを作成する前提として、以下の項目を設定した。

- (1) 取扱う時間領域から考えて、ナトリウムの圧縮性を無視した。
- (2) 二相流に対しては一次元スリップモデルに準ずる考え方を採用した。また、このスリップはSWAT-1, SWAT-3の試験結果を参照し、将来、適当な表示を見出すこととして現在では定常流における表示式で代用している。
- (3) 水素ガス/水転換比、水素ガス温度などのナトリウム-水反応関係定数はインプットにより与えるものとした。

本報告書は計算コードSWAC-13の取扱いマニュアルとして、これまでの開発結果をまとめたものであり、上記(2)、(3)項に関する試験結果との照合とベストフィットパラメータの選定等、詳細な解析については別に報告書としてまとめる予定であるので本報告書からは割愛した。

以下第2章に本コードの基本設計について述べ、第3章では各部モジュールの詳細な解法を説明する。第4章で各サブルーチンの概要説明を行い、第5章で本コードを使用する上での制約について述べた。第6章では入出力仕様について述べ、最後に第7章で本コードを用いたSWA T-3体系の簡単な計算例を示した。

## 2. 基本設計

### 2.1 モデリング

本コードを作成するに当たって、まず計算対象を次のように設定した。

- (1) 蒸発器 (EV)、過熱器 (SH)、再熱器 (RH) やその他の機器・配管からなる2次冷却系、及び収納容器と各SGからの圧力放出用配管からなる放出系を計算対象とする。
- (2) 時間領域としては、ナトリウム水反応発生後、いわゆる初期スパイクが充分減衰したと思われる時点から水/蒸気のブローダウンにより水リークが止まって、反応も停止すると思われる時点までの準定常圧領域を取扱う。
- (3) 伝熱管リークは、EV, SH, RHのいずれか1つのSG内で発生する。
- (4) 伝熱管リークはSG内のどの部分で発生する可能性も考える。
- (5) ナトリウム水反応の規模による違いはあるとしても、おおよそ次の現象をシミュレートする。
  - I) 反応後まず、事故SGのナトリウム液面上昇、カバー・ガス圧上昇が起こる。
  - II) 事故SG内の一部のナトリウムは2次系の他の機器に押し出される。
  - III) SG内圧が破裂板の設定圧を越え、破裂板が割れ、ナトリウム水素ガスは2相流となつて放出系に押し出される。
  - IV) 他のSGでも圧力が上昇すると同様の現象が発生する。
  - V) 更に反応が続くと、収納容器 (RT) の内圧も上昇して、破裂板設定圧を越え、圧力は大気放出される。

### 2.2 数式化のための前提

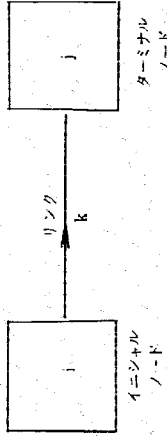
ナトリウム水反応をモデル化する上で、次のような仮定を用いた。

- (1) ナトリウムの圧縮性は無視する。
- (2) ナトリウム水素ガス二相流は1次元スリップモデルを用い、スリップ比は別に定義する。
- (3) 反応速度は無限大と考え、反応の時間遅れは無視する。
- (4) 伝熱管からの水噴出率は、時間的、空間的な変化を考慮してインプットで与える。
- (5) 事故SGから放出系に流出する2相流のボイド率は、インプットによっても与えられる形とする。
- (6) 各破裂板は設定圧に達すると直ちに割れるものとする。
- (7) 質量と運動量のバランスを考慮する。
- (8) エネルギ-のバランスは考慮せず、従って各領域の水素ガス温度はインプットにより与える。
- (9) カバー・ガスの物理的性質は水素ガスと同一とする。
- (10) カバー・ガスの圧縮過程はボイド率変化とし、ボイド率指数はインプットにより与える。

### 3. 数式モデルの解法

#### 3.1 ノードとリンク

対象となるSG, 二次系, 放熱系をいくつかのノード(Node)に分け, 更に実際の流れに従ってノード間をリンク(Link)で結ぶ。ノード内で水素ガスとNaに対してそれぞれ質量保存則を適用し, リンクでは運動量保存則を考慮する。



右図に示すように2つのノード*i, j*とリンク*k*を考える。矢印をリンクの流れの方向とすると, *i, j*はそれぞれイニシャルノード, ターミナルノードと呼ぶ。*I<sub>i</sub>* (または*T<sub>i</sub>*)を*i*をイニシャルノード(またはターミナルノード)とするリンクの集合とする。即ちここでは $k \in I_i, k \in T_j$ である。

対象となる系をこのような*N*個のノードと*L*個のリンクからなるネットワークとして考える。(図7.2参照) このモデルの展開は次のように行なう。

- (1) *L*個の運動量保存式と2*N*個(Na及び水素ガスに対して)の質量保存式を基礎方程式とする。
- (2) 除解法の手順で時間について差近似化して(2*N*+*L*)個の差分式とする。
- (3) 状態式を用いて*M<sub>S</sub>*, *M<sub>H</sub>*, *Ṁ<sub>S</sub>*, *Ṁ<sub>H</sub>*の項を消去して*N*元連立一次方程式の形で解を求め, 各流量を求める。
- (4) 質量保存の式, 状態式から各状態量を求める。

#### 3.2 一次元スリップモデル

本節ではナトリウム-水反応をモデル化するさいに, 最も重要な問題となるナトリウム-水素ガス二相流の取扱について述べる。質量流量と流速の関係は次のように表わす事ができる。

$$W_{Sh} = \rho_S U_{Sk} (1 - \alpha_k) A \quad (3.1)$$

$$W_{Hk} = \rho_{Hk} U_{Hk} \alpha_k A \quad (3.2)$$

ここでリンクのスリップ比*S<sub>k</sub>*を平均流速に対するガス流速の比として

$$S_k = U_{Hk} / U_{Sk} \quad (3.3)$$

と定義すると全質量流量とナトリウム及びガスの質量流量は

\*) ここでイニシャルノード・ターミナルノードと上流・下流ノードの用語の違いを示す。前者は各リンクにおしインプットの設備で定義されるもので, この定義は不動である。しかし後者はリンクの流れの方向で決められるもので流れによって変化する事もあり得る。

$$\rho_k = \rho_S (1 - \alpha_k) + \rho_{Hk} \alpha_k \quad (3.4)$$

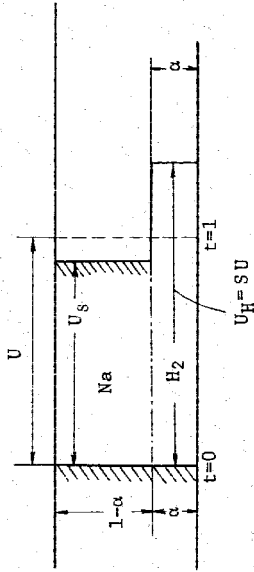
の関係から

$$W_H = \rho_k U_k A \quad (3.5)$$

$$W_{Sk} = \frac{1 - \alpha_k - \alpha_k (S_k - 1) R_{HS}}{1 - \alpha_k (1 - R_{HS})} W_k \quad (3.6)$$

$$W_{Hk} = \frac{S_k \alpha_k R_{HS}}{1 - \alpha_k (1 - R_{HS})} W_k \quad (3.7)$$

ただし  $R_{HS} = \rho_H / \rho_S$  と表わすことができる。



#### 3.3 基礎式

基礎となる式は次の2つである。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{g} u \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial \tau}{\partial s} = 0 \quad (3.8)$$

(2) 質量保存の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho u)}{\partial s} \quad (3.9)$$

これを実際の体系に適用するために流れ方向に断面1と2の間で積分すると

$$\int_1^2 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{W}{\partial A} \right) ds + \int_1^2 \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{u^2}{2} \right) ds + g \int_1^2 \frac{\partial h}{\partial s} ds + \int_1^2 \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} ds + g \int_1^2 \frac{\partial \tau}{\partial s} ds = 0 \quad (3.10)$$

$\rho$ が*s*の関数でないとする

$$K \frac{\partial W}{\partial t} = \left( \frac{u_1^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} \right) + g \Delta h + \frac{1}{\rho} (P_1 - P_2) - P_{Hk} \quad (3.11)$$



これから、リンクkに対して運動量保存の式

$$\dot{W}_k = \frac{1}{K_k} \left\{ (P_1 - P_j) + \frac{W_k}{2\rho_k} \left( \frac{1}{\Lambda_1^2} - \frac{1}{\Lambda_j^2} \right) + \rho_k g \Delta h - P_{fk} \right\} \quad (3.12)$$

が成り立つ。ここで  $K_k = \sum_j D_{kj}$ 、 $P_{fk}$  は摩擦による圧力損失を表わす。

また(3.9)の質量のバランスはNaと水素ガスに対してそれぞれ適用され次のようになる。

$$\dot{M}_{S1} = \sum_{\nu \in T_1} W_{S\nu} - \sum_{\nu \in T_1} W_{S\nu} \quad (3.13)$$

$$\dot{M}_{H1} = \sum_{\nu \in T_1} W_{H\nu} - \sum_{\nu \in T_1} W_{H\nu} + Q_1 \quad (3.14)$$

ここで、 $Q_1$  は単位時間の水素発生量を示す。

### 3.4 圧力の決定

次に(3.12)で用いられ、また諸状態量を求めるさいに用いた圧力Pの決定方法について説明する。

#### 1) Na・水素ガス2相ノード

水素ガスをおる程度以上含んだノードに対しては、完全気体の状態式を用いる。

$$P_i = \rho_{H1} R T_{H1} \quad (3.15)$$

ここで、 $T_{H1}$ は水素ガス温度であり、各ノードに対してインプットで与える。

#### 2) Na単相ノード

本ノードではNaの圧縮性を無視しているため、Na単相ノードに対しては簡単に圧力は求められない。また2相ノードでもボイド率が極めて低い場合(現在のところ経済的には $\alpha \leq 10^{-3}$ である)には、ノードの圧力を小さな水素気泡の圧力で代表させるのは発散し易いなど無理がある。従ってこのような場合、次の方法で圧力を求めた。

あるノードのNaの量が一定だとすると、(3.13)から

$$\dot{M}_{S1} = 0$$

$$\text{従って} \sum_{\nu \in T_1} W_{S\nu} = \sum_{\nu \in T_1} W_{S\nu}$$

$$\sum_{\nu \in T_1} \dot{W}_{S\nu} = \sum_{\nu \in T_1} \dot{W}_{S\nu} \quad (W_{S\nu} = W_{\nu})$$

これに(3.11)を代入すると

$$\sum_{\nu \in T_1} \frac{1}{K_\nu} (P_2 - P_1 + \Delta P_{1\nu}) = \sum_{\nu \in T_1} \frac{1}{K_\nu} (P_1 - P_1 + \Delta P_{1\nu}) \quad (3.16)$$

\* 3.4.2) 参照

となる。ここで  $\Delta P_{1\nu}$  は(3.12)右辺第2,3,4項の和である。j, 1は各リンクのそれぞれミナミノード及びイニシャルノードである。従って  $\Delta P_{1\nu}$  の値を求める事によって単相ノードの圧力  $P_1$  は連立一次方程式の解として求められる。

### 3.5 差分近似化

N個のノードとL個のリンクからなる体系で(2N+L)元ベクトルy, Fを次のように定義すると

$$y = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ M_{S1} \\ \vdots \\ M_{SN} \\ M_{H1} \\ \vdots \\ M_{HN} \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \dot{W}_1 \\ \dot{W}_2 \\ \dot{M}_{S1} \\ \vdots \\ \dot{M}_{SN} \\ \dot{M}_{H1} \\ \vdots \\ \dot{M}_{HN} \end{bmatrix}$$

(脚注)

連立一次方程式(3.16)を次のように表わす。

$$B \cdot P = C$$

B: M×M正方行列, C: M元ベクトル, M: 圧力未知ノード数

B, Cの各要素  $b_{ij}, c_i$  は次のように表わされる。

#### 1) 行列B

##### 1) j = i

$$b_{ij} = \sum_{\nu \in T_1} \frac{1}{\nu \epsilon T_1} + \sum_{\nu \in T_1} \frac{1}{\nu \epsilon T_1} \frac{1}{K_\nu} \quad (3.17)$$

##### II) j ≠ i, ただしjはノードiと隣接した単相ノード

$$b_{ij} = -\frac{1}{K_\nu} \quad (3.18)$$

#### III) その他

$$b_{ij} = 0 \quad (3.19)$$

#### 2) ベクトルC

$$c_i = \sum_{\nu \in T_1} \frac{\Delta P_{1\nu}}{K_\nu} - \sum_{\nu \in T_1} \frac{\Delta P_{1\nu}}{K_\nu} + \sum_{\nu \in T_1} \frac{P_1 + \Delta P_{1\nu}}{K_\nu} + \sum_{\nu \in T_1} \frac{P_j - \Delta P_{1\nu}}{K_\nu}$$

$$j: \text{単相ノード} \quad j: \text{単相ノード} \quad j: \text{2相ノード} \quad j: \text{2相ノード} \quad (3.20)$$

この連立方程式を解いてNa単相ノードの圧力とする。

(3.12), (3.13) 及び (3.14) は

$$\dot{y} = F(t, y) \quad (3.21)$$

の関係にあり、これを数解法によって差分近似化すると次のように表わすことができる。

$$[(I-h) dF(t^n, y^n)] \Delta y^{n+1} = h F(t^n, y^n) \quad (3.22)$$

ただし、

$$y^n = y(t^n)$$

$$h = t^{n+1} - t^n$$

$$dF = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial y_{2N+1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_{2N+1}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial F_{2N+1}}{\partial y_{2N+1}} \end{bmatrix}$$

である。この (3.22) に (3.6) (3.7) (3.13) (3.14) を用いて、(L+1) 番回以降の式を L 番目までの式に代入して、 $M_s, M_{Hj}, \dot{M}_s, \dot{M}_{Hj}$  の項を消去すると、結局  $\Delta W_k$  に関する L 元連立方程式とする事ができる。すなわち、

$$A \Delta W_k^{n+1} = Z \quad (3.23)$$

A : (L x L) 正方形行列

Z : L 元ベクトル

である。この解を求める事によって、次のようにして新しい  $W^{n+1}$  を求める事ができる。

$$W^{n+1} = W^n + \Delta W^{n+1} \quad (3.24)$$

(脚注)

係数行列 A 及び右辺ベクトル Z の各要素は次のように整理する事ができる。

(1) 行列要素  $a_{\nu\mu}$

1)  $\nu = k$  のとき

$$a_{k\nu} = 1 - h \frac{\partial f_k}{\partial W_k} + h^2 \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{Sk} - h^2 \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{Sk} \quad (3.25)$$

$$+ h^2 \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{Hk} - h^2 \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{Hk}$$

2)  $\nu \in I_1, \nu \in I_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \quad (3.26)$$

3)  $\nu \in T_1, \nu \in I_j$  のとき

$$a_{k\nu} = -h^2 \left( \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \quad (3.27)$$

4)  $\nu \in I_1, \nu \in T_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \quad (3.28)$$

5)  $\nu \in T_1, \nu \in I_j$  のとき

$$a_{k\nu} = -h^2 \left( \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \quad (3.29)$$

6)  $\nu \in I_1, \nu \in T_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} - \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} - \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \quad (3.30)$$

7)  $\nu \in T_1, \nu \in I_j$  のとき

$$a_{k\nu} = h^2 \left( -\frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{Sj} - \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{Hj} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \alpha_{S\nu} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \alpha_{H\nu} \right) \quad (3.31)$$

8) その他以外

$$a_{k\nu} = 0 \quad (3.32)$$

(2) ベクトル要素  $Z_k$

$$Z_k = h f_k + h^2 \left( \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \gamma_{Sj} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \gamma_{Hj} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} \gamma_{Sj} + \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} \gamma_{Hj} \right) \quad (3.33)$$

$$(3) f_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial W_k}$$

$$f_k = \frac{1}{\kappa_k} \left\{ (P_1 - P_j) + \frac{W_k^2}{2} \left( \frac{1}{\rho_1 A_1^2} - \frac{1}{\rho_j A_j^2} \right) + \varepsilon (\rho_1 H_1 - \rho_j H_j) - P_{fk} \right\} \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial f_k}{\partial W_k} = \frac{1}{\kappa_k} \left\{ W_k \left( \frac{1}{\rho_1 A_1^2} - \frac{1}{\rho_j A_j^2} \right) - A_k (W_k)^2 \right\} \quad (3.35)$$

(4)  $\alpha_{Sk}, \alpha_{Hk}, \gamma_{Si}, \gamma_{Hi}$

$$\alpha_{Sk} = \frac{1 - \alpha_k - \alpha_k (S_k - 1) R_{HS}}{1 - \alpha_k (1 - R_{HS})} \quad (3.36)$$

$$\alpha_{Hk} = \frac{S_k \alpha_k R_{HS}}{1 - \alpha_k (1 - R_{HS})}$$

ただし,  $R_{HS} = \rho_H / \rho_S$

(ノードにおけるボイド率も  $\alpha$  で表わし, 添字で区分することにする。)

$$\gamma_{Si} = \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{S\nu} W_\nu - \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{S\nu} W_\nu \quad (3.38)$$

$$\gamma_{Hi} = \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{H\nu} W_\nu - \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{H\nu} W_\nu + Q_i \quad (3.39)$$

$$Q_i = f_{wi} \frac{Q(t)}{\rho} f_{Hi} \quad (3.40)$$

(ここで  $Q(t)$  は水噴出率,  $f_{wi}$  は水噴出率の分配比  $f_{Hi}$  は  $H_2/H_{20}$  の転換比)

$$(5) \frac{\partial f_k}{\partial M_{Si}}, \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hi}}, \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}}, \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}}$$

$$i) \alpha_i = 0 \text{ ならば } \frac{\partial f_k}{\partial M_{Si}} = \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hi}} = 0 \quad (3.41)$$

$$ii) \alpha_i \neq 0 \text{ ならば } \frac{\partial f_k}{\partial M_{Si}} = \frac{P_i}{\epsilon_k \cdot V_{Hi} \cdot \rho_S}, \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hi}} = \frac{R T_{Hi}}{\epsilon_k \cdot V_{Hi}} \quad (3.42)$$

$$iii) \alpha_j = 0 \text{ ならば } \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} = \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} = 0 \quad (3.43)$$

$$iv) \alpha_j \neq 0 \text{ ならば } \frac{\partial f_k}{\partial M_{Sj}} = \frac{P_j}{\epsilon_k \cdot V_{Hj} \cdot \rho_S}, \frac{\partial f_k}{\partial M_{Hj}} = \frac{R T_{Hj}}{\epsilon_k \cdot V_{Hj}} \quad (3.44)$$

### 3.6 状態量の計算

前項で得られた  $W_k^{n+1}$  から各状態量の計算を行なう。まず値を保存の式に代入して、

$$\Delta M_{Si}^{n+1} = h \left( \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{S\nu} W_\nu^{n+1} - \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{S\nu} W_\nu^{n+1} \right) \quad (3.45)$$

$$\Delta M_{Hi}^{n+1} = h \left( \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{H\nu} W_\nu^{n+1} - \sum_{\nu \in I_i} \alpha_{H\nu} W_\nu^{n+1} + Q_i \right) \quad (3.46)$$

$$M_{Si}^{n+1} = M_{Si}^n + \Delta M_{Si}^{n+1} \quad (3.47)$$

$$M_{Hi}^{n+1} = M_{Hi}^n + \Delta M_{Hi}^{n+1} \quad (3.48)$$

$$V_{Si} = M_{Si} / \rho_S \quad (3.49)$$

$$V_{Hi} = V_i - V_{Si} \quad (3.50)$$

また密度  $\rho_{Hi}$ , ボイド率  $\alpha_i$  は

$$\rho_{Hi} = M_{Hi} / V_{Hi} \quad (3.51)$$

$$\alpha_i = V_{Hi} / V_i \quad (3.52)$$

となる。

### 3.7 連続の式

(3.50) 式で表わしたように, 水素ガスの体積はノードの容積から, ナトリウム分の体積を引いて求めている。従ってナトリウム単相ノードもしくは, 極めて低いボイド率を持ったノードの場合は, そこに流入・出するリンクの流断間のパラランスが完全に取れないと, ガス空間の体積変化が大きく数値上の不安定が生ずる。本コードでは (3.16) に示すように  $\Delta W_k$  に関してはこのパラランスを満して足している。しかし  $W_k$  に関しては各タイムステップでの誤差が次第に蓄積されて,  $W_k$  の値が連続の式を満足しない恐れが出て来る。従って, この対策として下記の取扱いを行ない良好な結果を得ている。

- (1) まずあるボイド率  $\alpha_0$  ( $\alpha_0 \approx 10^{-5} \sim 10^{-6}$ ) を基準としてノードをナトリウム単相ノード ( $\alpha < \alpha_0$ ) と 2 相ノード ( $\alpha \geq \alpha_0$ ) とに分類する。
- (2) 上記, 単相ノードに接続されたリンク  $k$  について

$$W_{gsk} = \frac{1 - \alpha (1 - S) (1 - R_{HS})}{1 - \alpha (1 - R_{HS})} W_k \quad (3.53)$$

これは、各リンクの体積流量に相当する量である。

(3) 单相ノードに接続されているリンクkのうち、最もリンク番号の大きいリンクについて

$W_{sgk}$ を他のリンクの $W_{sgn}$ の総和から求める。

このようにして单相ノードに対しては溢れ込み量と流出する量のバランスを保つ事ができる。

2相ノードに対してはこの方法を適用する必要はない。

3.8 各部の取扱い

3.8.1 リンクの諸値

本来、温度・密度その他の状態量は各ノードに対して定義されるものであるが、3.2で説明したように、リンクに対しては密度、ポイド率等の値を定義してやらねばならない。従って、これらのリンクの値としては原則としてその上流ノードの値を用いる。ただし事故SGの放出系配管入口部のリンクのポイド率のみは上流ノード（すなわち上部プレナム・ノード）のポイド率のほかにインプットとして与えた値を用いる事も可能とする。

3.8.2 流動圧損

i) 管路摩擦損失係数 $\lambda$ <sup>2)</sup>

レイノルズ数  $Re$  の範囲で次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 64/Re & Re < 2300 \\ \lambda &= 0.3164 Re^{-0.25} & 2300 \leq Re < 10^5 \\ \lambda &= 3.2 \times 10^{-5} - 0.221 Re^{-0.377} & Re \geq 10^5 \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

ただし

$$Re = \frac{Ud}{\nu}$$

ii) 伝熱管コイル部の摩擦損失係数 $\lambda_C$ <sup>3)</sup>

$$\lambda_C = \frac{2}{3} Re^{-0.15} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{(L_P/D_C - 1)^{1.08}} \right\} \quad (3.55)$$

ただし  $Re = \frac{UD_C}{\nu}$

iii) 二相流圧増倍係数 $\phi^2$ <sup>4)</sup>

二相流圧増倍係数は Lockhart Martinelli の式を基本として用いた。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 &= 1 + 22\sqrt{X_{tt}} + X_{tt} & \alpha_k \geq 0.2 \\ \phi_0 &= 1 + 2\sqrt{X_{tt}} + 1/X_{tt} & \alpha_k < 0.2 \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

ただし

$$X_{tt} = \left( \frac{\mu_S}{\mu_l} \right)^{0.1} \left( \frac{\rho_S}{\rho_l} \right)^{0.4} \left( \frac{1 - \alpha_k}{\alpha_k} \right)^{0.9} \quad (3.57)$$

として、 $\phi^2 = \phi_0^{2N}$

$N$  は実験との対比により適当な値を選択し、 $N=1$  とするは通常シ-Mの式として与えられる値である。

iv) ベンド部の圧損係数<sup>2)</sup>

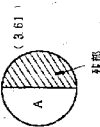
$$\left. \begin{aligned} \zeta_b &= 0.00873 \lambda \sin \theta (R/r) & R_0 (r/R)^2 < 91 \\ \zeta_b &= 0.00241 \lambda \bar{\theta} R_c^{-0.17} (R/r)^{0.84} & R_0 (r/R)^2 \geq 91 \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし } \chi &= \begin{cases} 0.95 + 1.72 (R/r)^{-1.96} & R/r < 19.7 \\ 1 & R/r \geq 19.7 \end{cases} & \end{aligned} \right\} \quad (3.60)$$

v) RD破裂開度による圧力損失係数<sup>5)</sup>

放出系ラプチャ板の不完全破断の場合はラプチャ板の残部によるオリフィス的な効果を考慮に入れる必要がある。開度  $m$  を開口部の全ラプチャ板面積に対する割合とすると

$$m = A/A_0$$

$$\zeta = (0.597 - 0.011m - 0.432m^2)^2 \quad (3.61)$$


vi) その他の圧損係数 $\zeta$

上記以外の圧力損失（管径の変化、バルブ、分岐等）に対する圧力損失は次のように表われ、圧損係数その値は

$$P_f = \zeta \frac{\rho u^2}{2g}$$

各圧損要因の形状に従って適当な値をインプットする。

ただし、原則としては次の $\zeta$ をインプットすること。

表 2.1 形状圧損係数

形状	形状	$\zeta_0$	$\zeta$
管の収縮		文献参照	$\zeta_0 \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2$
管の拡大		$1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2$	←
管の入口		~0.5	←
管の出口		1.0	←

以上の圧阻係数から (3.12) の第3項  $P_f$  は次のように与える。

$$P_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\phi^2}{\rho} \sum \frac{1}{\lambda^2 D \ell} + \frac{1}{\rho} \sum \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\rho} \sum \frac{1}{A_n^2} \right) |w| \quad (3.62)$$

管路部

伝熱管コイル部<sup>3)</sup>

$$P_f = \frac{4 \lambda_0 N_0 \phi^2}{2 \rho A^2} \cdot 1.72^2 |w| \quad (3.63)$$

ここで  $N_0$  は流路を横切る伝熱管の列数である。

3.8.3 放出系配管内の臨界流速<sup>6)</sup>

放出系配管を構成する全リンクにおいて、臨界流速を与えて上限値として、管内流速がこれを越えないようにする。臨界流速の計算には Fauske の式を用いた。

$$U_{c,r} = \sqrt{g n p^2 \frac{x \sqrt{\rho_{li}} + (1-x) \sqrt{\rho_g}}{x R T \sqrt{\rho_{li}}}} \quad (3.64)$$

3.8.4 収納容器

収納容器の大気放出弁の特性は、準定常圧力段階の後半の挙動を左右する重要な要因である。即ち、収納容器内の圧力が大気放出用アラブチャ板の設定圧を越えて、大気放出が開始されてからの圧力挙動は、大気放出弁での吹出し量を与えなければ決まらない。吹出し流量は収納容器内圧と弁の開度  $L_f$  との関数として与えられる。

$$W = 1.418 \times 10^3 S_0 D L_f P \sqrt{\frac{M_{12}}{T_H}} \quad (3.65)$$

ただし、弁の開度  $L_f$  はまた、内圧及び吹出し流量と次の関係がある。

$$L_f = \frac{1}{k_B} \left\{ A (P - P_f) + \frac{W^2}{g A \rho_{li}} \right\} \quad (3.66)$$

ここで  $k_B$ ,  $P_f$ ,  $A$  はそれぞれ、逆止弁バネ定数、吹出し圧、逆止弁部の内径でありインポートで与える。ただし  $L_f$  は上限値  $L_{f,max}$  を持つ。

(脚注) 境界条件としての  $W$  を与える事によって、収納容器をターミナルノードとするリンク  $k$  (す

なわち各放出系配管の最終リンク) の  $\alpha_{gk}$  及び収納容器ノードの  $\gamma_{gk}$  は以下の式で与えられる。

$$W_k \geq 0 \text{ ならば} \quad \alpha_{sk} = \frac{\rho_s}{\rho_k} (1 - S_k \alpha_k) \quad (3.67)$$

$$\alpha_{lik} = \frac{1}{1 + \frac{P_n \beta h}{\rho_{lin} V_{lin}}} \left\{ \frac{A_{li}}{\rho_k} S_k \alpha_k - h \frac{\rho_s}{\rho_k} (1 - S_k \alpha_k) \frac{\rho_n \beta}{\rho_s V_{lin}} \right\} \quad (3.68)$$

$W_k < 0$  ならば

$$\left\{ \alpha_{sk} = 0 \right. \quad (3.69)$$

$$\left. \alpha_{lik} = \frac{\rho_{li} / \rho_k}{1 + \frac{P_n \beta h}{\rho_{lin} V_{lin}}} \right\} \quad (3.70)$$

$$\gamma_{lin} = \sum_{j \in T_{in}} \alpha_{lj} W_j - \frac{W_n}{1 + h \frac{P_n \beta}{\rho_{lin} V_{lin}}} \quad (3.71)$$

3.8.5 水噴出率

水噴出率は全噴出率と各ノードの分配係数をインポートで与える。全噴出率を  $Q$ , ノード  $i$  の分配係数を  $f_{wi}$  とすると、ノード  $i$  の水蒸発生率  $Q_i$  は

$$Q_i = f_{wi} Q \quad \text{ただし} \quad \sum_{i=1}^{all} f_{wi} = 1.0 \quad (3.72)$$

ただし  $Q$  は時間の関数であるが  $f_{wi}$  は定数である。

3.8.6 初期気泡体積

初期スバイク圧を取扱わない本コードでは、準定常圧力段階にはいる時点での気泡体積を初期条件として与えてやらなければならない。初期においては、摩擦損失項、静ヘッドカバークラス等は、水蒸ガス圧に比べて充分小さいので無視でき、(3.12) 式は

$$\rho \Lambda \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{K_k} \frac{Q_i f_w dt P_0 (273 + T_{li})}{A (u \cdot dt) \rho_H \cdot 273 \cdot g} \quad (3.73)$$

となる。これを解いて次のようになる。

$$V_0 = u \cdot dt \cdot A = \sqrt{\frac{4 f_w R T_{li} Q_i g A}{3 H_{gr} \rho_s}} \quad (3.74)$$

3.8.7 水蒸ガス温度分布

本コードは熱移行の問題は取扱っていないため、簡単なモデルを考えて適用した。

(1) 反応熱のナトリウムによるナトリウムの温度上昇を無視する。従ってナトリウム温度は全系内、全時間にわたって一定である。

(2) 水蒸ガスは反応点ノードでは反応熱を受けて高温であるが、反応点から遠ざかるに従ってナトリウム温度まで降下する。この各ノードの温度については時間に依らない値をインポートで指

定する。

3.8.8 物性値<sup>a)</sup>

(1) ナトリウム

$$\rho_S = 1.011 \times 10^3 - 2.206 \times 10^{-4} T_3 - 1.922 \times 10^{-5} T_3^2 + 5.638 \times 10^{-9} T_3^3 \quad (3.75)$$

$$\mu_S = 1.235 \times 10^{-5} \rho_S \exp \left( \frac{6.97 \times 10^{-1} \rho_S}{T_S} \right) \quad (3.76)$$

(2) 水素ガス

$$\mu_H = 1.337 \times 10^{-5} T_H^{0.412} \quad (3.77)$$

(3) 2相流

$$\mu = (1 - \alpha) \mu_S + \alpha \mu_H \quad (3.78)$$

$$\rho = (1 - \alpha) \rho_S + \alpha \rho_H \quad (3.79)$$

3.9 初期値の設定

初期値として次のものを与えなければならない。

各リンクの質量流量  $W_k$   
 各SG, RTのカバーガス圧  $P_k$

3.10 変数の更新

以上述べて来た計算の手順を整理すると、

- (1) タイム・ステップnでの諸量を用いて  $A \Delta W^{n+1} = Z$  の係数行列A, 右辺ベクトルZの各要素の値を計算する。
  - (2) 掃き出し法によって、この連立一次方程式を解き流値増分  $\Delta W^{n+1}$  を求め  $W^{n+1}$  の値を求める。
  - (3) 連続の式を用いて、各流量  $W^{n+1}$  を更新する。
  - (4)  $W^{n+1}$  を用いて、タイム・ステップn+1での諸状態値の値を更新する。
- 以上の作業をシミュレーション設定時間に達するまで繰返す。(4)の計算はカバーガス関連ノードの圧力計算 Na 単相ノードの圧力計算等を含む。

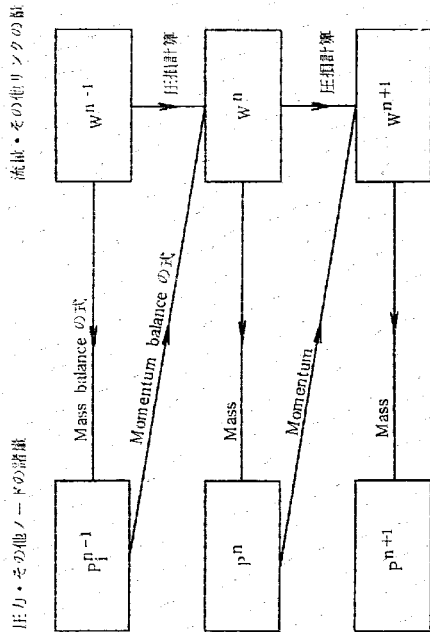


図 3.1 諸数値の更新

## 4. プログラムの内容

### 4.1 プログラムサイズ

本プログラムの大きさを表4.1に示す。

表4.1 プログラム・サイズ

カード枚数	約4100枚
必要コア容量	190KB
シミュレーションに要するCPU時間	実時間5分 25分 ただし、リンク数29 DT = 10 <sup>-3</sup> 秒
計 算 機	FACOM-230/58

### 4.2 プログラムの構成と機能<sup>9)</sup>

本プログラムは32個のサブプログラムと3つの関数ルーチンからなる。その構成を図4.1に示す。

以下に、各サブプログラムの概要を説明する。

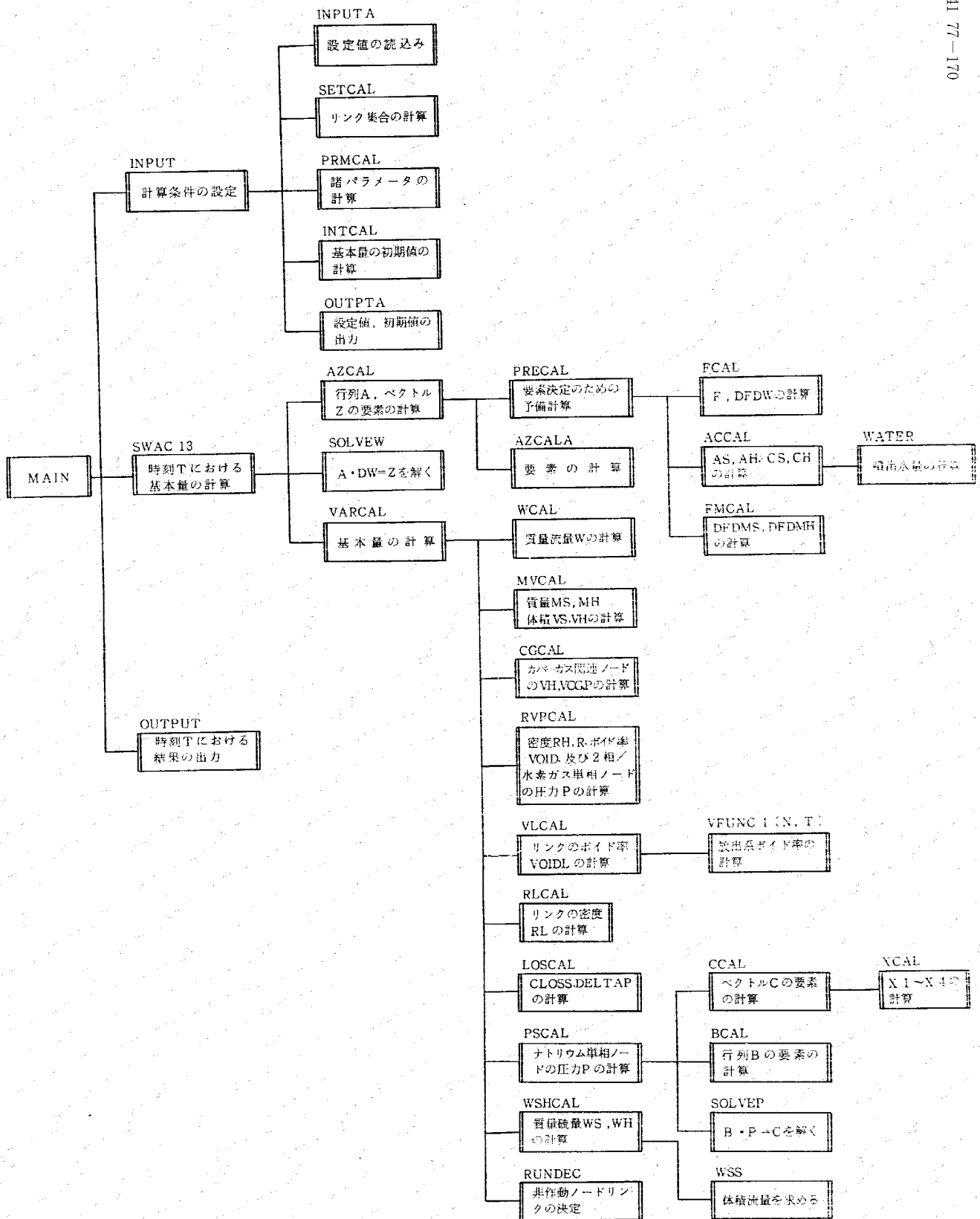
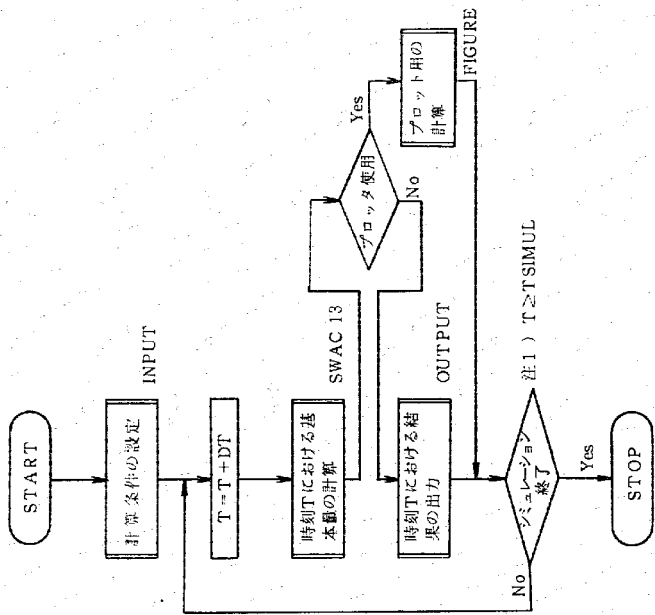


図4.1 プログラムの構成

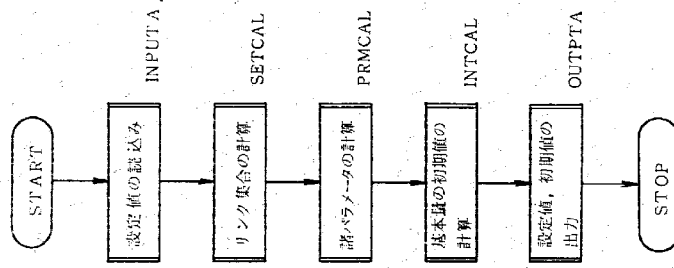


MAIN



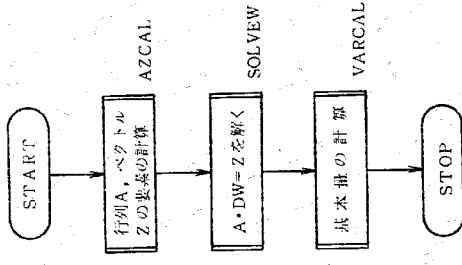
INPUT

計算条件の設定



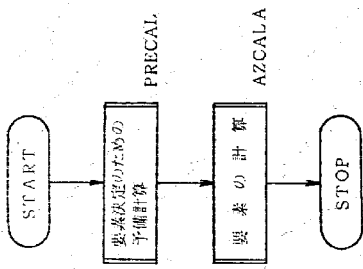
SWAC 13

時刻Tにおける基  
本量の計算



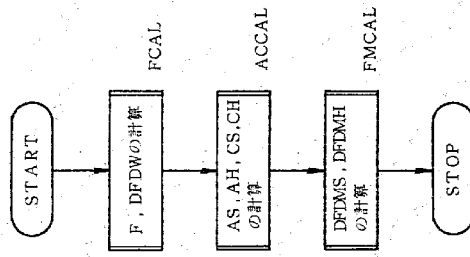
AZCAL

行列A,ベクトル  
の要素の計算



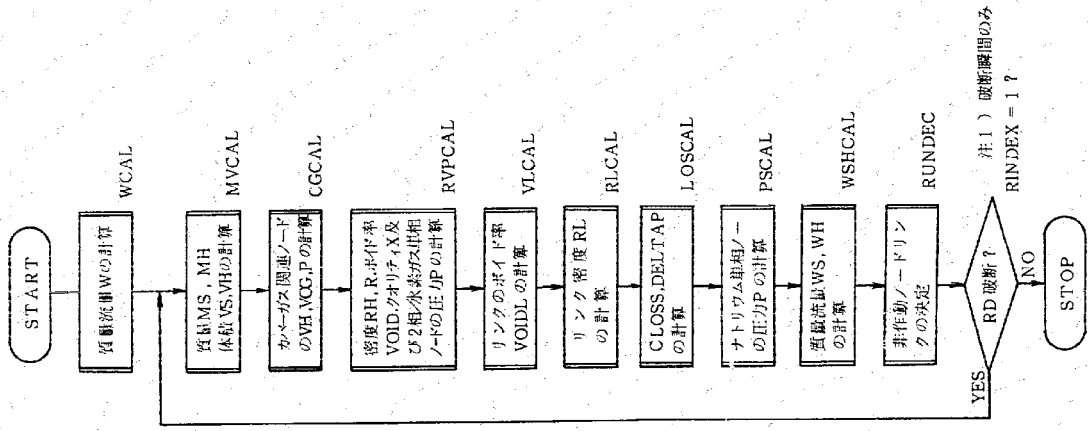
PRECAL

要素決定のための  
予備計算



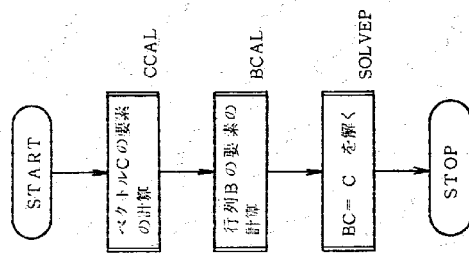
VARCAL

基本書の計算



PSCAL

マトリクス単位ノード  
FのE/Pの計算



INPUTA

諸設定値の説明

P に示したように、相対番地形式により、諸設定値の読み込みを行ない、EQUIVALENCEによる置換えを行なう。ただし一般的に数値のあまり変わらない各量に対しては、あらかじめ次のように値を与える。

W(K) = 0.0                    K = 1, 55

S(K) = 1.0

THETA(J,I) = 90.0

RR(J,I) = 3.0

FT(I) = 1.0

FW(I) = 0.0

NCOIL(I) = 0

NBEND(I) = 0

NZ(I) = 0

SETCAL

ネットワークの整理

INODE(K) (K = 1, NLINK) の同一の物を集めて SETI(I,J) (I = INODE(K)) を構成する。

TNODE(K) (K = 1, NLINK) の同一の物を集めて SETT(I,J) (I = TNODE(K)) を構成する。

PRMCAL

読み込んだ各設定値および計算されたリンク集合を用いて本計算に必要な諸パラメータ・特殊リンク番号・動粘性係数・温度・形状パラメータなどを計算する。

INTCAL

ノード・リンクに対して初期作動指標を与える。作動ノード・リンクに対しては、基本値の初期値を与え、未作動ノード・リンクに対しては作動開始に備えて基本値を与える。

OUTPTA

P38~45のOUTPTA仕様に従って設定値・初期値を出力して、最後はOUTPUTをCALLする。

FCAL

作動している全リンクに対して  $f_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial W_k}$  の値を計算する。

ACCAL

作動している全リンクに対して、 $\alpha_s, \alpha_H$  の計算を行なう。ただし収納容器ノードと直結した放出系配管リンクに対しては別の式を用いる。

また作動ノードに対して  $T_{SI}, T_{HI}$  を計算する。RTノードに対しては(3.71)式を用いる。

FMCAL

作動リンク (境界リンクを除く) に対して  $\frac{\partial f_k}{\partial M_{S_i}}, \frac{\partial f_k}{\partial M_{H_i}}$  の値を計算する。

AZCALA

作動リンク (境界リンクを除く) K及びKのイニシアルノード・ターミナルノードに接続する作動リンクNに関する行列A (K,N) の要素の計算を行なう。作動リンクKに関するベクトルZ (K) を計算する。

行列A, ベクトルZの各要素, 非作動リンク等の除外番号部をつめて, A (M,L), Z (M) とし元のリンク番号との関係及びベクトル要素数を与える。

SOLVEW

連立一次方程式解法プログラム SWEEP をCALLして, 連立一次方程式  $A \Delta W = Z$  を解く。しかる後, SHIPTW (M) を用いて元のリンク番号にもどす。

WCAL

SOLVEWで求めた  $\Delta W^{n+1}$  から新しく  $W^{n+1}$  を求める。ただし上流ノードのナトリウムや水素ガスが負にならないように  $W^{n+1}$  の上限を抑える。また放出系配管リンクの流速も臨界流速の上限値を置く。大気放出の境界リンクでは ( ) 式を用いる。

MVCAL

作動ノードのナトリウムと水素ガスの質量と体積を計算する。上部プレナムノード作動以前のカーバークスを含むノードでのナトリウムの出入の処理をする。サブチャージャー破砕時 (RINDEX = 1) には関連ノードを均質流体とするためのガス質量計算を行なう。

CGCAL

カーバークス関連ノードの圧力をカーバークス・水素ガスをいっしょにした体積と質量から求める。サブチャージャー破砕後は破砕したSGについては計算しない。

RVPCAL

作動ノードに対して, 水素ガス密度, ポイド率, クオリティを計算する。また, 2相ノードがス相ノードの圧力を計算する。またナトリウム単相ノードの指標を与える。

VICAL

作動リンク (境界リンクを除く) に対して, 以下の原則に従ってリンクのポイド率を計算する。  
 (原) リンクのポイド率は上流ノードのポイド率とする。  
 (例外1) 事故SGの放出系入口のリンクのポイド率はVICALでインポートにより与える事もできる。

(例外2) 事故SGから2次系配管入口のリンクのポイド率は, 上流ノードのポイド率が一定値に達するまでは  $\alpha_k = 0$  とする。

RLCAL

リンクにおける平均密度を次の式で与える。

$$\rho_{mk} = \rho_{Hk} \alpha_k + \rho_S (1 - \alpha_k)$$

LOSCAL

作動リンク (境界リンクを除く) に対してレイノイズ数等から各種形状圧力係数や2相流増倍係数を求めて, 諸圧力損失の和  $\Delta P_{rk}$  を求める。

CCCAL

ナトリウム単相ノードIに関するベクトルCの各要素を計算する。要素は2単ノード・未作動ノードの除外番号を詰めて元のノード番号との関係及び結要素数を与える。

XCAL (X1, X2, X3, X4, J)

CCCALにCALLされたNa単相ノードJと接続された全リンクの各種圧力損失X1~X4を計算する。ただしリンクkがノードI,Jを結んでいるとすると, X1~X4 は次の表に対応する。

表 4.2 Xi の内容説明

	上流ノード	下流ノード	ノードjは
X1	I	J	単相
X2	J	J	二相
X3	J	I	単相
X4	J	I	二相

BCAL

ナトリウム単相ノードI及びIの隣接ノードJに関する行列Bの各要素  $b_{ij}$  を計算し二相ノード等の除外番号をつめて  $b_{min}$  とする。

SOLVEP

連立一次方程式解法プログラム (本コードでは現在FACOM 230/58のSSLからSWEEPを用いている) をCALLして, 連立一次方程式  $B_{mn} P_m = C_n$  ( $m, n = 1, MMAXP$ ) を解く。



ERROR (N)

表 4.3 エラーコード

コード	エラー内容	対処方法	注
1	各ノード数より大きいノード番号を左記のコメントを印字した	「SWAC-13 ABNORMAL END」を印字してプログラムはそこでストップする。	「インプリントエラー」である。
2	あるリンクのイニシャルノードとタ-ミナルノードとが同一なものになった時	”	同上
3	全リンク数より大きいリンク番号をもったリンクがでてきた時	”	同上
4	マトリックスAが正則でなくなった場合	「エラー-4」マトリックスAが無意味になった旨を印字して「SWAC-13 ABNORMAL END」を印字してプログラムはそこでストップする。	DEBUGルーチンによる行例の元を打ち出す事ができる。
5	マトリックスBが正則でなくなった場合	「エラー-5」マトリックスBが無意味になった旨を印字して「SWAC-13 ABNORMAL END」を印字してプログラムはそこでストップする。	同上
6	圧力が負になった時	左記のコメントを印字して「SWAC-13 ABNORMAL END」を印字してプログラムはそこでストップする。	
7	質量が流過が負になった時	”	
8	ノードのポイド率が1より大きくなったり負が0になった時	”	
9	リンクのポイド率が1より大きくなったり負が0になった時	左記のコメントを印字して「SWAC-13 ABNORMAL END」を印字してプログラムはそこでストップする。	

WARN (N, I, WARN1, WARN2, WARN3)

M<sub>SI</sub>, M<sub>II</sub>の値が不適当な場合に警告を発する。

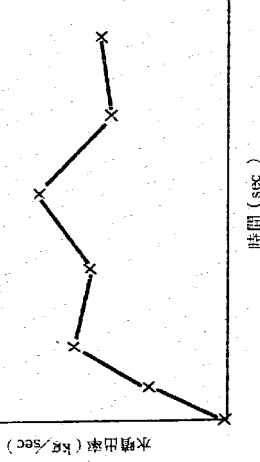
表 4.4 警告コードの意味

警告コード	内容	処 理	注
1	M <sub>SI</sub> < 0	左記の内容とノード番号を印字する	警告が50回に達すると計算を停止する
2	M <sub>II</sub> < 0	”	”
3	V <sub>SI</sub> > V	”	”

WATER (T)

水噴出率を計算する。

NWTR個 (NWTR ≤ 20) のインプリントされた時間TT, 水噴出率WTRから直線的に結んで水噴出率を時間の関数として計算する。



VFUNCI (T)

事故SGから放出される2相流のポイド率を与える。

NVOID個 (1 ≤ NVOID ≤ 20) のインプリントされた時間TV, ポイド率VALPから, 各点間を直線的に結んでポイド率を時間の関数として計算する。

WSS

Na 単相ノードに出入りするリンクに対して, 全体積流量をNaの質量流量に換算する。

## 5. プログラムの制約と限界

本コードをナトリウム水戻転解算コードとして用いる場合に制約を受け、また限界となる点について説明する。

- (1) 解算モデル・物理モデルに由来するもの
  - (a) ポンプ、オーバーフロータンクの取扱いは2次元現象をモデル化する場合、ポンプ、オーバーフロータンクは除外したため、これらを含めた解算は現状では不可能である。ただし尚ほ他のSG機器同様、単に流路としてモデルし、ポンプについては圧力差をインプットの形で与えてやることでモデルに組み入れる事は可能である。
  - (b) 本コードは圧力とNa流動の解算が目的であって熱解算及び構造解算は行なわれない。従って系内の温度分布等インプットの選択には、実験等からの推定が必要である。
  - (c) ナトリウムの圧縮性を無視しているため、初期セバイク圧、圧力波伝播などの解算は不可能である。
- (2) 数式モデルによるもの
  - (a) 基礎式を差分近似化したさいの仮定から、隣接するノードの平均密度が大きく違おうと不都合が生じる。したがって、ノードを粗く取り過ぎてはいけない。
  - (b) リンク数を元の数とする行列の計算を含んでいるため計算時間が多少かかるので、リンク数をあまり多くとすることは不経済である。

## 6. インプット・アウトプット

### 6.1 インプット形式

インプットは以下に示すように、3種類に分けて行なった。このうち、整数及び実数データについては、各カードの先頭の2個の整数(FORMAT(2I6))でデータの番地とカード上のデータ数とを与える。また整数データ、実数データの終わりにはブランクカード1枚を入れてデータの終わりを示す。

INPUT DATA CARD	FORMAT
タイトルデータ	20 A 4
整数データ	12 I 6
実数データ	2 I 6, 5 E 12.5

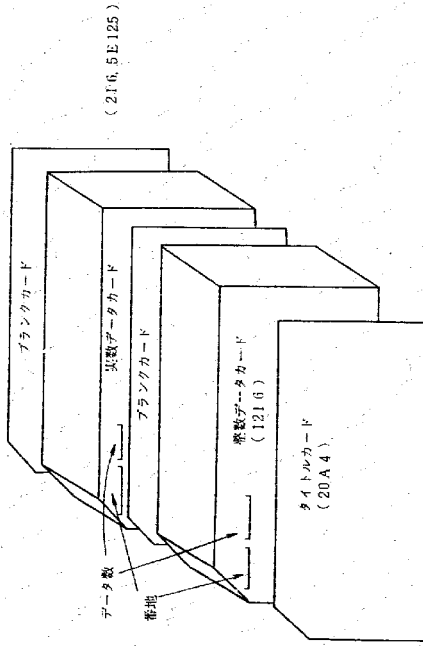


図 6.1 データの構成

### 6.2 アウト・プット形式

#### 6.2.1 L.P.上の打出し

ラインプリンタ上に出力するサブルーチンはOUTPUTとOUTPUTとがある。前者は、インプット等により与えられた設定値・初期値を整理して書出すものである。また後者は各タイムステップでの値を書出すものである。両者のアウトプット仕様についてはP.38に示す。



表 6.2 SWAC-13 入力形式

I		タイトルカード	FORMAT (20A4)
II		整数データ	FORMAT (I6, I6, I0I6)
番地	記号	内 容	
1	NSG	SG個数	
2	NNODE	総ノード数	
3	NLINK	総リンク数	
4	NODERT	収納容器のノード番号	
5	NNODEC (I=1, 3)	SG (I)のカバーガスを有するノード数	
8	NODECG (I=1, 3)	各ノード数	
11	NODEC (J, K) J=1, 5 K=1, 3	SG (I)のカバーガスを有するノード番号 D番号 SG(K)のカバーガスを有するノード番号 (SG毎に入力)	
26	NLINKD	SG間の配管部リンク総数	
27	LINKD (I=1, 20)	SG間の配管部リンク番号	
47	INODE (I=1, 55)	リンク(I)の上流側ノード番号	
102	TNODE (I=1, 55)	リンク(I)の下流側ノード番号	
157	NLINKH	伝熱管コイルと直交する流路方向を持つリンクの総数	
158	NLINKZ	バンド以外の圧掛要因を有するリンクの総数	
159	NLINKB	バンドを有するリンクの総数	
160	LINKH (I=1, 20)	伝熱管コイルと直交する流路方向を持つリンクの番号	
180	LINKZ (I=1, 30)	バンド以外の圧掛要因を有するリンクの番号	
210	NZ (I=1, 55)	リンク(I)の有するバンド以外の圧掛要因数 (リンク(I)毎にインプット)	

II	番地	記号	内 容	単 位	
265	LINKB (I=1, 20)	バンドを有するリンクの番号			各ノード
285	NBEND (I=1, 55)	リンク(I)の有するバンド数			各ノード
340	ZNUMB (J, K) J=1, 10 K=1, 55	リンクKをサブリンクに分割したとき、バンド(I)の存在するサブリンク番号 (リンク毎に入力)			
890	NNODEW	注水されるノードの総数			ノード
891	NODEW (I=1, 10)	注水されるノード番号			ノード
901	NWTR	注水率インプット点数			ノード
902	NVOID	ボイド率インプット点数			ノード
		=0 計算される上部プレナムボイド率で放出			
		≦1 インプットにより上部プレナムボイド率			
		あたる時のインプット点数			
III	整数形データ入力終了データ				
IV	FORMAT (I6, I6, 5E12.5)				
	番地	記号	内 容	単 位	
	1	LCG (I=1, 40)	カバーガス空間を有するノードのガス空間長さ (対応するノード番号について入力)	m	
	41	SOLVL	基準定からのNa液位	m	
	42	LPCOIL	伝熱管コイルの半径方向ピッチ	m	
	43	DCOIL	伝熱管外径	m	
	44	HNODE (I=1, 40)	基準点からノード(I)の中心高さ	m	
	84	DNODE (I=1, 40)	ノード(I)の相当直径	m	
	124	LNODE (I=1, 40)	ノード(I)の長さ	m	
			(ノード(I)のボリューム; $VI = \frac{\pi}{4} \cdot DNODE^2 \cdot LNODE$ )		

IV	番 地	記 号	内 容	単 位
164	D (J, K)	J=1,10 K=1,55	リングKのサブリング粗さ直径 (リングK毎に入力)	m
714	L (J, K)	J=1,10 K=1,55	リング流断面積 $\frac{\pi}{4} D^2$ リングKのサブリングの長さ (リングK毎に入力)	m
1264	THETA (J, K)	J=1,10 K=1,55	リングKのベンドJの角度 (リング毎に入力) $\leq 90^\circ$	°
1814	ZETB (J, K)	J=1,10 K=1,55	リングKのベンド以外の形状係数 (リング毎に入力)	-
2364	RR (J, K)	J=1,10 K=1,55	リングKのベンドJの曲率半径/ サブリング内半径	-
2914	NCOIL (I=1,5,5)		リング(I)内の流れ方向における伝 熱管コイル段数	-
2969	PCINT (I=1,3)		SGガバ-ガス初期圧力	Kg/m <sup>2</sup> a
2972	PATM		大気圧力	Kg/m <sup>2</sup> a
2974	PRD (I=1,4)		ラプチャー-ディスク破壊圧力 (I=4は、収納容器のラプチャー ディスク)	Kg/m <sup>2</sup> a
2978	TS		ナトリウム温度	°C
2979	W (I=1,5,5)		リング(I)の初期重量流量	Kg/sec
3034	ET (I=1,4,0)		ノード(I)における水素ガスとナト リウムの温度比	°K/°K
3074	M (I=1,3)		SG(I)付ラプチャー-ディスク破壊 開度 (完全開=1.0)	-
3077	SC		大気放出弁の縮流係数	-

IV	番 地	記 号	内 容	単 位
3078	I.V		大気放出弁の長さ	m
3079	ALPHAW		ナトリウム-水反応時のH <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O のモル転換比	-
3080	HSURF		破断点の液面からの深さ	m
3081	FW (I=1,4,0)		注水ノード(I)に注水される水の配 分率	-
3121	TT (I=1,2,0)		注水率を指定する時刻	sec
3141	WTR (I=1,2,0)		上記時間に対応する注水率	Kg/sec
3161	NFRICT		L-M法2相パラメータ $\phi^2$ に対し ( $\phi^2$ ) NFRICTの修正指数	-
3162	S (K=1,5,5)		リングKのスリップ比 S=Ug/Umix と定義 但し, Ug : ガス流速 Umix : 2相流平均流速	-
3217	TV (I=1,2,0)		整数データ902番に対応しボイド 率変化の時間座標を入力	sec
3237	VALP (I=1,2,0)		TVに対応するボイド率値	-
3257	RCONST		水素ガス定数	Kg/Kg°K
3258	GRAV		重力加速度	m/sec <sup>2</sup>
3259	GRAVC		重力換算係数	Kgm/Kgs <sup>2</sup>
3260	NT		ポリトロープ指数	-
3261	TSIMUL		シミュレーション時間	sec
3262	DT		タイムメッシュ	sec
3263	TSTDB		デバッグ開始時刻	sec
3264	TENDB		デバッグ終了時刻	sec
V	実数形データ入力終了			FORMAT (ブランクカード)

OUTPUT 仕組

{ TITLE(I) }

1. INPUT DATA

- (1) CONSTANT
  - \* RCONST (GAS CONSTANT) = { E15.7 }
  - \* GRAV (ACCELERATION OF GRAVITY) = { E15.7 }
- (2) NETWORK PARAMETERS
  - \* NLINK (TOTAL NUMBER OF LINKS) = { I4 }
  - \* NNODE (TOTAL NUMBER OF NODES) = { I4 }
  - \* NODERT (NODE NO. OF RT) = { I4 }
  - \* NODECG (SG) (UPPER PLENUM NODE NO.)

SG	NODECG (SG)
1	{ I4 }
2	{ I4 }
3	{ I4 }

- \* INODE(K), TNODE(K) (INITIAL AND TERMINAL NODE NO. OF LINK K)
- |          |          |          |
|----------|----------|----------|
| { I4 } K | INODE(K) | TNODE(K) |
| 1        | { I4 }   | { I4 }   |
| 2        | { I4 }   | { I4 }   |

[ NLINK  
まで ]

(3) GEOMETRICAL PARAMETERS

- \* NLINKB (NUMBER OF LINKS WITH BENDS) = { I4 }
- \* NLINKZ (NUMBER OF LINKS WITH PRESSURE LOSS FACTORS OTHER THAN BENDS) = { I4 }
- \* NLINKH (NUMBER OF LINKS WITH HEAT-TRANSFER PIPES) = { I4 }
- \* LINKB, NBEND, RR, THETA (LINK NO. WITH BENDS, NUMBER OF BENDS, NUMBER OF BENDS, RADIUS OF BEND CURVATURE/RADIUS OF LINK RATIO, ANGLE OF BEND)

LINKB	NBEND	RR	THETA
{ I4 }	{ I4 }	{ E15.7 }	{ E15.7 }

[ NLINKB  
組 ]

[ NBEND組 ]

- \* LINKZ, NZ, ZETB (LINK NO. WITH LOSS FACTORS OTHER THAN BENDS, NUMBER OF FACTORS, COEFFICIENT OF PRESSURE LOSS)

LINKZ	NZ	ZETB
{ I4 }	{ I4 }	{ E15.7 }

[ NLINKZ  
組 ]

[ NZ組 ]

- \* LINKH, LPD, NCOIL (LINK NO. WITH HEAT-TRANSFER PIPES, SPACING OF PIPES/PIPE DIAMETER-RATIO, NUMBER OF PIPES PER UNIT LENGTH)

LINKH	LPD	NCOIL
{ I4 }	{ E15.7 }	{ I4 }

[ NLINKH  
組 ]

- \* HNODE(I), DNODE(I), LNODE(I) (HEAD OF NODE I, DIAMETER OF NODE I, LENGTH OF NODE I)

I	HNODE	DNODE	LNODE
{ I4 }	{ E15.7 }	{ E15.7 }	{ E15.7 }

[ 1 から  
NNODE  
まで ]

- \* D(K,J), L(K,J) (DIAMETER OF A STRAIGHT PART OF LINK K, LENGTH OF A STRAIGHT-PART OF LINK K)

K	D	L
{ I4 }	{ E15.7 }	{ E15.7 }

[ 1 から  
NLINK  
まで ]

[ NBEND+1  
組 ]

(4) PLANT PARAMETERS

\* TS (TEMPERATURE OF SODIUM) = { E15.7 }  
 \* PRD(SG) (SET PRESSURE OF RUPTURE DISK)

SG NO.	PRD
1	{ E15.7 }
2	"
3	"
4(RT)	"

\* PRINT, PCINT(SG), RCG(SG) (INITIAL PRESSURE IN RL, INITIAL PRESSURE INITIAL DENSITY OF COVER GAS)

SG NO.	PRINT	PCINT	RCG
1	{	{	{
2	"	"	"
3	"	"	"

\* NNODEC(SG) (NUMBER OF NODES WITH COVER GAS IN EACH SG)

SG NO.	NNODEC
1	{14}
2	{14}
3	{14}

\* NODEC(SG, J), LCG (NODEC) (NODE NO. WITH COVER GAS, INITIAL LENGTH OF COVER GAS PART)

SG NO.	NODEC	LCG
1	{14}	{ E15.7 }
	.	[ NNODEC(1) 組 ]
2	{	{
	.	" (2)
3	{	{
	.	" (3)

\* W(K) (INITIAL MASS FLOW RATE IN LINK K)

K	W(K)
1	{ E15.7 }
2	.
.	.
.	.
.	.

} [ NLINK 組 ]

(5) SIMULATION PARAMETERS

\* TSDMUL (SIMULATION TIME) = { E15.7 }  
 \* DT (TIME MESH) = { E15.7 }  
 \* ALPHA (HYDROGEN/WATER-MOLE RATIO) = { E15.7 }  
 \* HSURF (DISTANCE FROM BREAK-POINT TO FREE SURFACE) = { E15.7 }  
 \* N (POLYTOPE INDEX) = { E15.7 }  
 \* M(SG) (OPENING FACTOR OF THE FIRST LINK IN RL FOR EACH SG)

SG NO.	M(SG)
1	{ E15.7 }
2	"
3	"

\* SC (FLOW CONVERGENCE FACTOR OF CRITICAL LINK) = { E15.7 }

\*P ATM (ATMOSPHERIC PRESSURE)  
 = { E15.7 }

\* LV (VALVE LIFT OF CRITICAL LINK)

\* S(K) (SLIP RATIO OF LINK K)

K	S(K)
1	{ E15.7 }
2	"
.	.
.	.
.	.
.	.

} [ NLINK 組 ]

\* FT(I) (HYDROGEN/SODIUM-TEMPERATURE RATIO OF NODE I)

I	F(I)
.	{ E15.7 }
.	"
.	"

} [ NNODE 組 ]

\* NNODEW (NUMBER OF NODES WITH FLOODING) = {14}

\* NODEW(J), FW(NODEW) (NODE NO. WITH FLOODING, DISTRIBUTION FACTOR OF FLOODING)

NODEW	FW(NODEW)
14	{ E15.7 }
.	"
.	"

} [ NNODEW 組 ]

\* NLINKD (NUMBER OF LINKS BELOW NODES WITH FLOODING) = {14}

\* LINKD(I) (LINK NO. BELOW NODES WITH FLOODING)  
 LINKD = {14}, {14}, ..., {14}

} [ NLINKD 個 ]

2. GENERATED DATA

\* SETI(I,J) (ELEMENT OF SET OF LINKS WHOSE INITIAL NODE NO. IS I)  
 SETI(I,J) (ELEMENT OF SET OF LINKS WHOSE TERMINAL NODE NO. IS I)  
 NSESET(I) (NUMBER OF SETI(I,I))

I	NSETI	NESETI	SETI	SETT	NESETT
{I4}	{I4}	{I4}	{I4}	{I4}	{I4}
		NESETI			NESETT
{I4}					

\* LINKCR (CRITICAL LINK NO.) = {I4}  
 \* NLINKR(SG) (NUMBER OF LINKS IN RL CONNECTED WITH EACH SG)  
 LINKRL(SG,J) (LINK NO. IN RL CONNECTED WITH EACH SG)

SG	NLINKR	LINKRL	NLINKR
1	{I4}	{I4}	{I4}
2			
3			

\* NPATH(SG) (NUMBER OF LINKS CONNECTED WITH UPPER PLENUM NODE IN EACH SG)  
 LINKCC(SG,PATH) (LINK NO. CONNECTED WITH UPPER PLENUM NODE IN EACH SG)

SG	NPATH	LINKCC
1	{I4}	{I4}
2		
3		

\* NLINKV (NUMBER OF LINKS CONNECTED WITH MAX. FLOODING NODE) = {I4}  
 LINKW(K) (LINK NO. CONNECTED WITH MAX. FLOODING NODE)  
 = {I4}, {I4}, ..., {I4}

\* V(I) (VOLUME OF NODE I)  
 AZNODE(I) (SQUARE OF SECTION AREA OF NODE I)

I	V	AZNODE
{I4}	{E15.7}	{E15.7}

\* KAPPA(K)

K	KAPPA
{I4}	{ }

\* AZLINK(K,J) (SQUARE OF SECTION AREA OF A STRAIGHT PART OF LINK K)

K	AZLINK
{I4}	{E15.7}
{I4}	{NBEND(K)+1}

\* CZ2, CZ3, CZ4

LINKB

[LINKB組]	{	{ I4 }	{ E15.7 }	{ E15.7 }	{ E15.7 }	{	[NBEND(LINKB)組]
		.	.	.	.	}	

\* CZ1

SG	{ CZ1 }
1	E15.7
2	"
3	"

\* RS, MIUS (DENSITY OF SODIUM, VISCOSITY OF SODIUM)

RS = { E15.7 }

MIUS = { E15.7 }

\* TH(I), MIUH(I) (TEMPERATURE OF HYDROGEN GAS OF NODE I, VISCOSITY OF HYDROGEN GAS OF NODE I)

I	TH	MIUH
[1からNNODEまで]	{ I4 }	{ E15.7 } { E15.7 }
	.	.
	.	.

\* BETA = { E15.7 }

\* MCG(SC)

SC	MCG
1	{ E15.7 }
2	.
3	.

3. NOMENCLATURE

- K : LINK NO.
- W : MASS FLOW RATE
- WS : MASS FLOW RATE OF SODIUM
- WH : MASS FLOW RATE OF HYDROGEN GAS
- VOIDL : VOID FRACTION IN NODE
- RUNL : INDEX OF LIN (1: RUNNING, 0: NOT RUNNING)
- I : NODE NO.
- P : PRESSURE
- R : DENSITY
- RH : DENSITY OF HYDROGEN GAS
- VH : VOLUME OF HYDROGEN GAS
- VS : VOLUME OF SODIUM
- MH : MASS OF HYDROGEN GAS
- MS : MASS OF SODIUM
- VOID : VOID FRACTION IN LINK
- RUNN : RUN INDEX OF NODE (1: RUNNING, 0: NOT RUNNING)

6.2.2 デバック仕様

本コード開発の過程で用いたデバック用プリント・アウトのフォーマットを示す。デバック開始時間TSTDB、同終了時間TENDBをそれぞれ、TSTDBとT、TENDBなる時間Tに対しては下記の変数の前を出力する。

- (1) K P(K) DFDW(K) AS(K) AH(K)
 

(リンクk)	[f <sub>k</sub> ]	[ $\frac{\partial f_k}{\partial W_k}$ ]	[α <sub>sk</sub> ]	[α <sub>pk</sub> ]
--------	-------------------	---	--------------------	--------------------

 DFDMSI DFDMSJ DFDMSK DFDMSL DFDMSM DFDMSN DFDMSO DFDMSHJ
 

[ $\frac{\partial f_k}{\partial M_{S_i}}$ ]	[ $\frac{\partial f_k}{\partial M_{H_i}}$ ]	[ $\frac{\partial f_k}{\partial M_{S_j}}$ ]	[ $\frac{\partial f_k}{\partial M_{H_j}}$ ]
---	---	---	---

 K=1, NLINK
- (2) I CS(I) CH(I)
 

[A-Fi]	[τ <sub>si</sub> ]	[τ <sub>hi</sub> ]
--------	--------------------	--------------------

 I=1, NNODE
- (3) A(I, J)
 

[a <sub>ij</sub> ]
--------------------

 I, J=1, NLINK
- (4) Z(I)
 

[z <sub>i</sub> ]
-------------------

 I=1, NNODE
- (5) K CLOSS(K) PF(K) DELTP(K)
 

(リンクk)	[ $\frac{c}{\rho_k A_k}$ ]	[ $\frac{1}{2} c \rho_k v_k  v_k $ ]	[ΔP <sub>rk</sub> ]
--------	----------------------------	--------------------------------------	---------------------

 K=1, NLINK
- (6) X1 X2 X3 X4 C(MM) PDET SHIFIP(MM) MM I I=1, NNODE
 

(x1)	(x2)	(x3)	(x4)	[C <sub>PM</sub> ]	[Na相ノード (=0)]
------	------	------	------	--------------------	------------------
- (7) B(I, J)
 

[b <sub>ij</sub> ]
--------------------

 I=1, NNODE

OUTPUT仕様

- TIME = (P 8.4) (時刻 t) sec
- WATER = (F 10.0) [水吐出率 Q] kg/sec
- K W WS WH VOIDL RUNL
 

(リンク番号k)	[全質量流量W <sub>k</sub> ]	[Na質量流量W <sub>S</sub> ]	[水蒸気質量流量W <sub>H</sub> ]	[リンクの 圧力P <sub>k</sub> ]	[リンクの 圧力P <sub>k</sub> ]	[リンクの 圧力P <sub>k</sub> ]	[リンクの 圧力P <sub>k</sub> ]
単位	kg/sec	kg/sec	kg/sec	kg/sec	kg/sec	kg/sec	kg/sec

 (リンク番号k) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5)
- I P R RH VH VS MH MS VOID RUNN PDET
 

[ノード番号]	[圧力P]	[ρ]	[V <sub>H</sub> ]	[V <sub>S</sub> ]	[M <sub>H</sub> ]	[M <sub>S</sub> ]	[α <sub>i</sub> ]	[ノードの 圧力決定 方法]
単位	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kg	kg

 (ノード番号) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5) (E 12.5)
- NLINK
 

1	(14)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(14)
2	(14)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(E 12.5)	(14)

### 7. 計算例

#### 7.1 SWAT-3 モデルへの適用

本コードを用いて、蒸気発生器安全性能総合試験装置(図7.1) SWAT-3 体系での計算を行った。SWAT-3 体系への適用に際しては次の事に気をつけた。

- ⅰ) 本装置は再熱器 RH を備えていないため、モデルは蒸発器 EV と過熱器 SH の 2 SG タイプとした。
  - ⅱ) 伝熱管は 90° ずつ開いた 4 ケ所で支持されているので、この支持材で区切られた 4 パスモデルとした。
  - ⅲ) 各試験は流れの静止した状態で行なわれているので、リングの方向や番号付けは Na 水反応初期の流れを基準に反応点に近い方から番号つけた。
  - ⅳ) 反応点は伝熱管部の下から 20 cm の箇所とした。
- 次に SWAT-3 体系にネットワークモデルを適用したのが図 7.2 である。

	ノード数
反応容器 (EV)	9 個
2 次系	6 個 (うち SH 4 個)
放出系	6 個

#### 7.2 計算結果

P.51 以後に計算に用いたインプットと、その計算結果を示す。

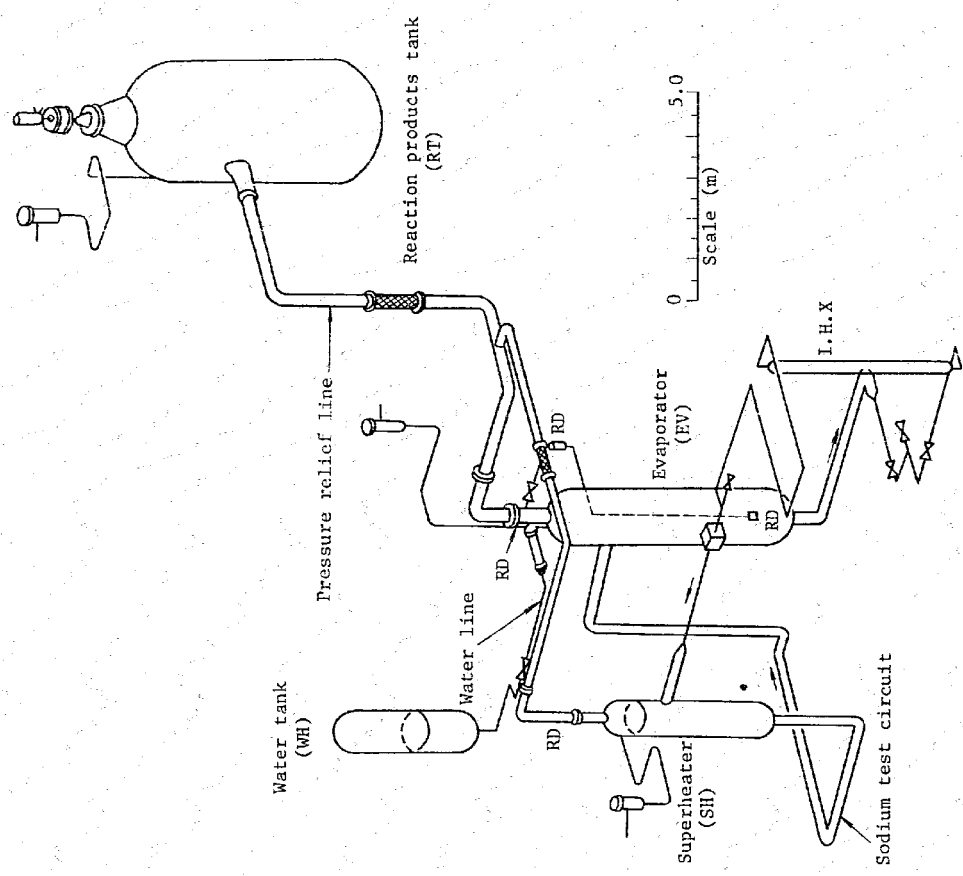


図 7.1 SWAT-3 装置概要



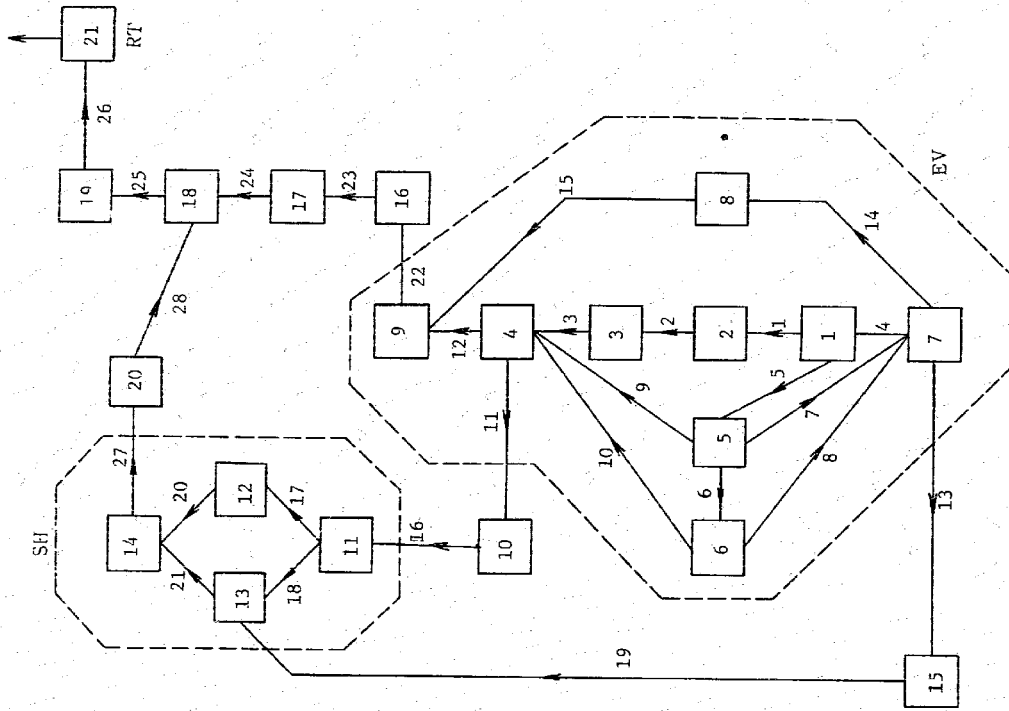


Fig. 7.2 SWAT-3 Network

\*\*\*\*  
 SWACS TEST RUN ( QUASI-STATIC PRESSURE ANALYSIS ) : SWAT-3;RUN-3 1977.9.9. \*\*\*

1 TO	7	21	10	18	10	21	12	6
8 TO	10	14	11	4	13	21	15	5
11 TO	13	8	12	13	7	14	20	6
16 TO	18	12	10	13	18	14	15	5
26 TO	26	4	11	10	18	14	20	6
27 TO	30	4	11	10	18	14	20	6
47 TO	56	1	4	4	4	4	11	11
57 TO	66	4	4	4	4	4	11	11
67 TO	75	13	13	13	13	13	20	20
102 TO	111	2	2	2	2	2	20	20
112 TO	121	10	10	10	10	10	13	13
122 TO	130	14	14	14	14	14	18	18
157 TO	159	10	10	10	10	10	18	18
160 TO	169	1	1	1	1	1	10	10
180 TO	187	11	11	11	11	11	18	18
210 TO	219	0	0	0	0	0	0	0
220 TO	229	1	1	1	1	1	0	0
230 TO	238	0	0	0	0	0	0	0
265 TO	274	11	11	11	11	11	27	27
285 TO	294	0	0	0	0	0	0	0
295 TO	304	3	3	3	3	3	0	0
305 TO	313	0	0	0	0	0	0	0
440 TO	442	1	1	1	1	1	1	1
460 TO	465	2	2	2	2	2	2	2
490 TO	491	1	1	1	1	1	0	0
520 TO	525	2	2	2	2	2	0	0
550 TO	550	2	2	2	2	2	0	0
560 TO	561	1	1	1	1	1	0	0
570 TO	570	1	1	1	1	1	0	0
580 TO	580	1	1	1	1	1	0	0
600 TO	601	1	1	1	1	1	0	0
610 TO	610	1	1	1	1	1	0	0
890 TO	891	1	1	1	1	1	0	0
901 TO	902	2	2	2	2	2	0	0

LOADING POINT INPUT DATA

4 TO 4	6.50000E-01					
8 TO 9	6.50000E-01	1.39100E+00				
12 TO 14	5.00000E-01	5.00000E-01	7.00000E-01			
41 TO 43	6.00000E+00	4.50000E-02	2.54000E-02			
44 TO 48	3.40000E+00	4.40000E+00	5.40000E+00	6.32500E+00	4.40000E+00	
49 TO 53	4.40000E+00	2.11500E+00	4.40000E+00	6.80000E+00	1.03500E+00	
54 TO 58	3.50000E+00	5.15000E+00	5.15000E+00	6.85000E+00	3.39800E+00	
59 TO 63	6.90000E+00	9.32000E+00	1.09000E+01	1.45000E+01	9.00000E+00	
64 TO 64	1.45000E+01					
84 TO 88	4.73000E-01	4.73000E-01	4.73000E-01	1.11700E+00	6.68900E-01	
89 TO 93	4.73000E-01	1.30000E+01	6.20500E-01	1.30000E+00	2.03300E-01	
94 TO 98	8.00000E-01	2.98000E-01	7.25000E-01	8.00000E-01	2.16300E-01	
99 TO 103	2.98000E-01	2.98000E-01	2.98000E-01	2.98000E-01	1.52000E-01	
104 TO 104	2.80000E+00					
124 TO 128	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	7.50000E-01	1.00000E+00	
129 TO 133	1.00000E+00	1.20900E+00	3.75000E+00	1.39100E+00	1.67200E+01	
134 TO 138	6.00000E-01	2.70000E+00	2.70000E+00	7.00000E-01	1.68900E+01	
139 TO 143	4.66600E+00	4.66600E+00	4.66600E+00	4.66600E+00	1.22000E+01	
144 TO 144	5.11000E+00					
164 TO 164	4.85000E-01					
174 TO 174	4.85000E-01					
184 TO 184	4.85000E-01					
194 TO 194	4.85000E-01					
204 TO 204	2.50000E-01					
214 TO 214	2.50000E-01					
224 TO 224	6.85900E-01					
234 TO 234	4.85000E-01					
244 TO 244	6.85900E-01					
254 TO 254	4.85000E-01					
264 TO 265	2.03300E-01	2.03300E-01				
274 TO 274	8.16400E-01					
284 TO 288	2.03300E-01	2.03300E-01	5.27000E-02	5.27000E-02	5.27000E-02	
289 TO 290	5.27000E-02	2.16300E-01				
294 TO 294	3.33400E-01					
304 TO 304	3.33400E-01					

- 54 -

314 TO 315	2.03300E-01	2.03300E-01				
324 TO 324	2.98000E-01					
334 TO 334	4.82000E-01					
344 TO 348	2.16300E-01	5.27000E-02	5.27000E-02	5.27000E-02	2.03300E-01	
354 TO 354	2.98000E-01					
364 TO 364	4.82000E-01					
374 TO 375	2.98000E-01	2.98000E-01				
384 TO 384	2.98000E-01					
394 TO 394	2.98000E-01					
404 TO 404	2.98000E-01					
414 TO 415	2.98000E-01	2.98000E-01				
424 TO 425	1.51000E-01	1.51000E-01				
434 TO 435	1.51000E-01	1.51000E-01				
444 TO 444	2.48000E-01					
714 TO 714	1.00000E+00					
724 TO 724	1.00000E+00					
734 TO 734	5.00000E-01					
744 TO 744	5.00000E-01					
754 TO 754	3.92000E-01					
764 TO 764	3.92000E-01					
774 TO 774	1.50000E+00					
784 TO 784	1.50000E+00					
794 TO 794	1.50000E+00					
804 TO 804	1.50000E+00					
814 TO 815	4.18000E+00	4.18000E+00				
824 TO 824	1.29800E+00					
834 TO 838	7.96000E-01	4.74200E+00	1.73000E+00	1.19300E+00	1.86700E+00	
839 TO 840	3.32200E+00	2.25000E+00				
844 TO 844	2.08800E+00					
854 TO 854	2.08800E+00					
864 TO 865	4.18000E+00	4.18000E+00				
874 TO 874	1.65000E+00					
884 TO 884	1.35000E+00					
894 TO 898	2.25000E+00	8.62100E+00	4.07100E+00	3.07600E+00	1.45400E+00	
904 TO 904	1.35000E+00					
914 TO 914	1.70000E+00					

- 55 -

924 TO	925	1.51200E+00	8.21000E-01				
934 TO	934	4.66600E+00					
944 TO	944	4.66600E+00					
954 TO	954	4.66600E+00					
964 TO	965	2.33300E+00	7.50000E-01				
974 TO	975	1.84600E+00	3.95200E+00				
984 TO	985	5.60800E+00	8.00000E-01				
994 TO	994	1.00000E-01					
1364 TC	1366	9.00000E+01	9.00000E+01	9.00000E+01			
1384 TO	1388	9.00000E+01	9.00000E+01	9.00000E+01	9.00000E+01		9.00000E+01
1389 TO	1389	9.00000E+01					
1414 TO	1415	9.00000E+01	9.00000E+01				
1444 TO	1448	9.00000E+01	9.00000E+01	9.00000E+01	9.00000E+01		9.00000E+01
1449 TO	1449	9.00000E+01					
1474 TO	1474	9.00000E+01					
1484 TO	1485	9.00000E+01	9.00000E+01				
1494 TO	1494	9.00000E+01					
1504 TO	1504	9.00000E+01					
1524 TO	1525	9.00000E+01	9.00000E+01				
1534 TO	1534	9.00000E+01					
1914 TO	1914	5.00000E-01					
1934 TO	1938	5.00000E-01	4.00000E-02	1.00000E+00	1.20000E+00		1.00000E+00
1939 TO	1939	1.00000E+00					
1964 TO	1964	1.00000E+00					
1994 TO	1997	5.00000E-01	1.20000E+00	4.00000E-01	1.00000E+00		
2024 TO	2024	5.00000E-01					
2064 TO	2064	1.00000E+00					
2074 TO	2074	5.00000E-01					
2084 TO	2084	2.00000E+00					
2464 TO	2466	3.00000E+00	3.00000E+00	3.00000E+00			
2484 TO	2488	3.00000E+00	3.00000E+00	3.00000E+00	3.00000E+00		3.00000E+00
2489 TO	2489	3.00000E+00					
2514 TO	2515	3.00000E+00	3.00000E+00				
2544 TO	2548	3.00000E+00	3.00000E+00	3.00000E+00	3.00000E+00		3.00000E+00
2549 TO	2549	3.00000E+00					

2574 TO	2574	3.00000E+00					
2584 TO	2585	3.00000E+00	3.00000E+00				
2594 TO	2594	3.00000E+00					
2604 TO	2604	3.00000E+00					
2624 TO	2625	3.00000E+00	3.00000E+00				
2634 TO	2634	3.00000E+00					
2914 TO	2917	2.50000E+01	2.50000E+01	1.25000E+01	1.25000E+01		
2919 TO	2923	0.0	3.75000E+01	3.75000E+01	3.75000E+01		3.75000E+01
2929 TO	2931	0.0	0.0	3.75000E+01			
2934 TO	2934	3.75000E+01					
2969 TO	2971	1.50000E+04	1.50000E+04				
2972 TO	2973	1.50000E+04	1.03300E+04				
2974 TO	2977	3.00000E+04	3.00000E+04	3.00000E+04	1.50000E+04		
2978 TO	2978	3.50000E+02					
2979 TO	2983	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
2984 TO	2988	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
2989 TO	2993	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
2994 TO	2998	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
2999 TO	3003	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
3004 TO	3007	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
3034 TO	3038	1.24000E+00	1.16000E+00	1.08000E+00	1.00000E+00		1.18000E+00
3039 TO	3043	1.08000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3044 TO	3048	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3049 TO	3053	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3054 TO	3054	1.00000E+00					
3074 TO	3076	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00			
3077 TO	3080	1.00000E+00	6.00000E-02	5.00000E-01	9.00000E+00		
3081 TO	3081	1.00000E+00					
3121 TO	3122	0.0	1.00000E+01				
3141 TO	3142	8.00000E+00	8.00000E+00				
3161 TO	3161	7.50000E-01					
3162 TO	3166	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3167 TO	3171	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3172 TO	3176	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3177 TO	3181	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
3182 TO	3186	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00

3187 TO	3190	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00
3217 TO	3217	0.0			
3237 TO	3237	1.0000E+02			
3257 TO	3260	4.20550E+02	9.80700E+00	9.80700E+00	1.66000E+00
3261 TO	3262	5.00000E+00	2.00000E-03		
3263 TO	3264	1.00000E+06	1.00001E+06		

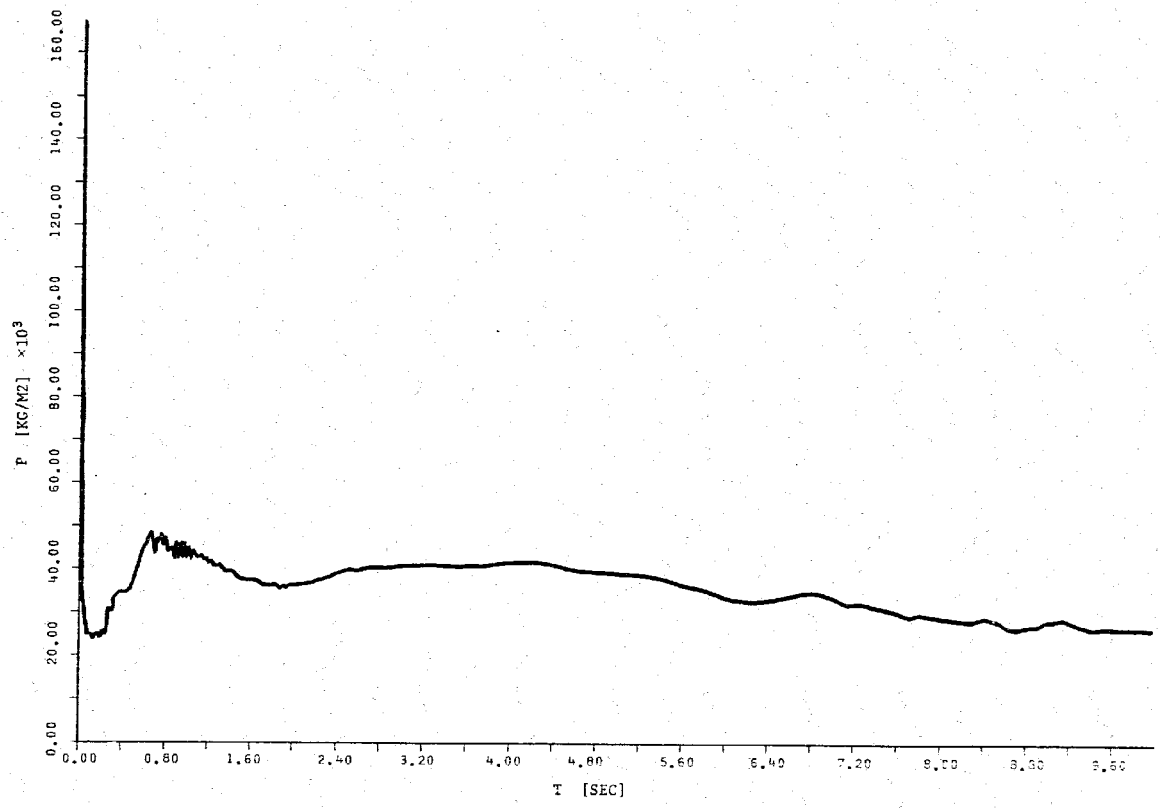


Fig. 7.3 ノード1 (反応点) の圧力

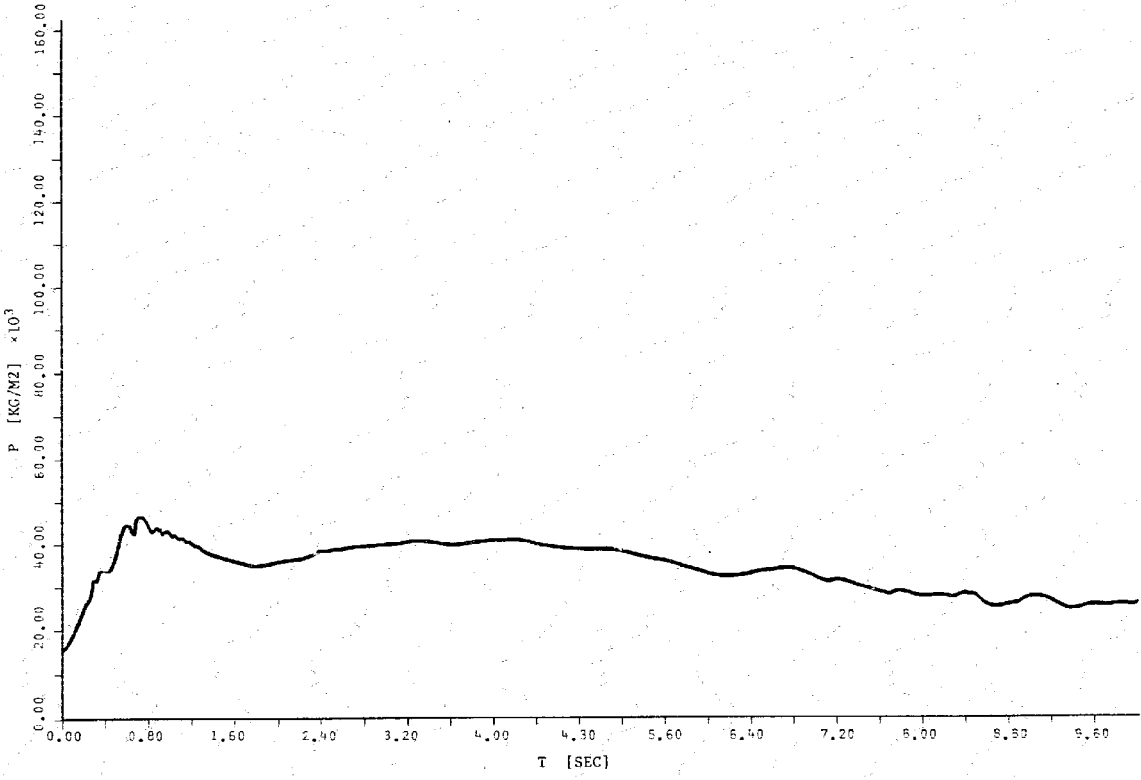


Fig. 7.4 ノード4 (反応点上部)の圧力

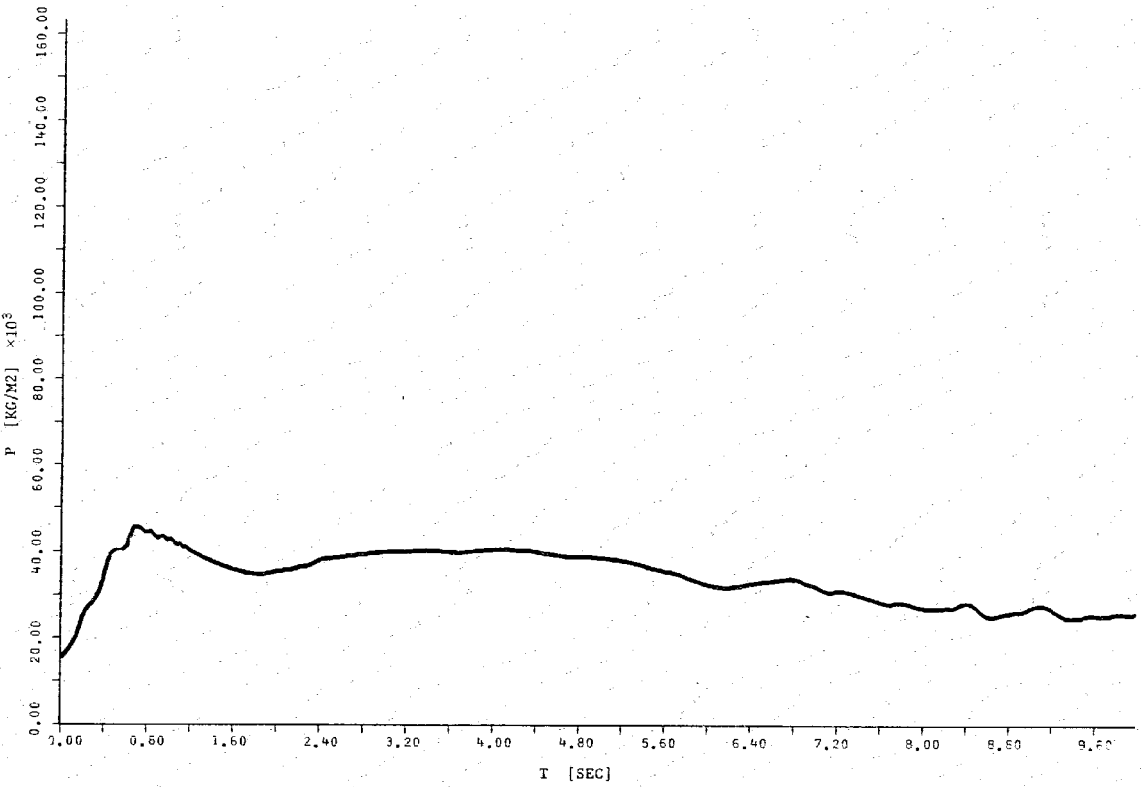


Fig. 7.5 ノード9 (反応容器カバーガス部)の圧力

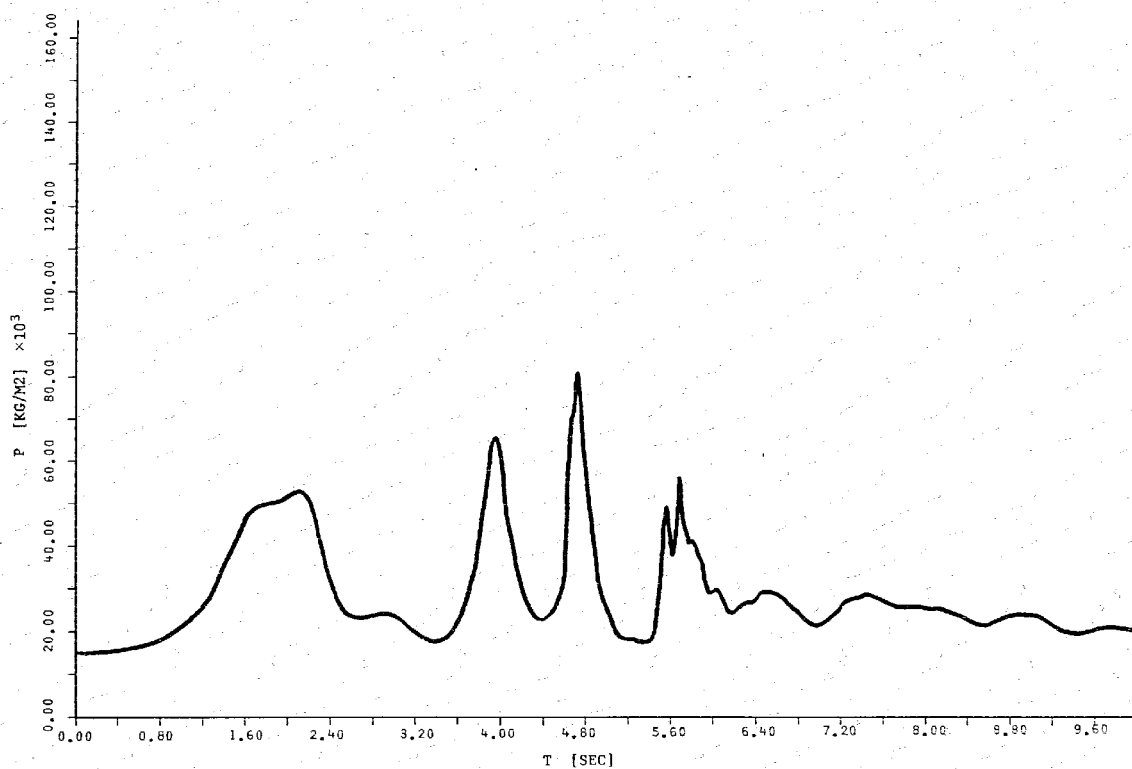


Fig. 7.6 ノード14 (SHカバ-ガス部)の圧力

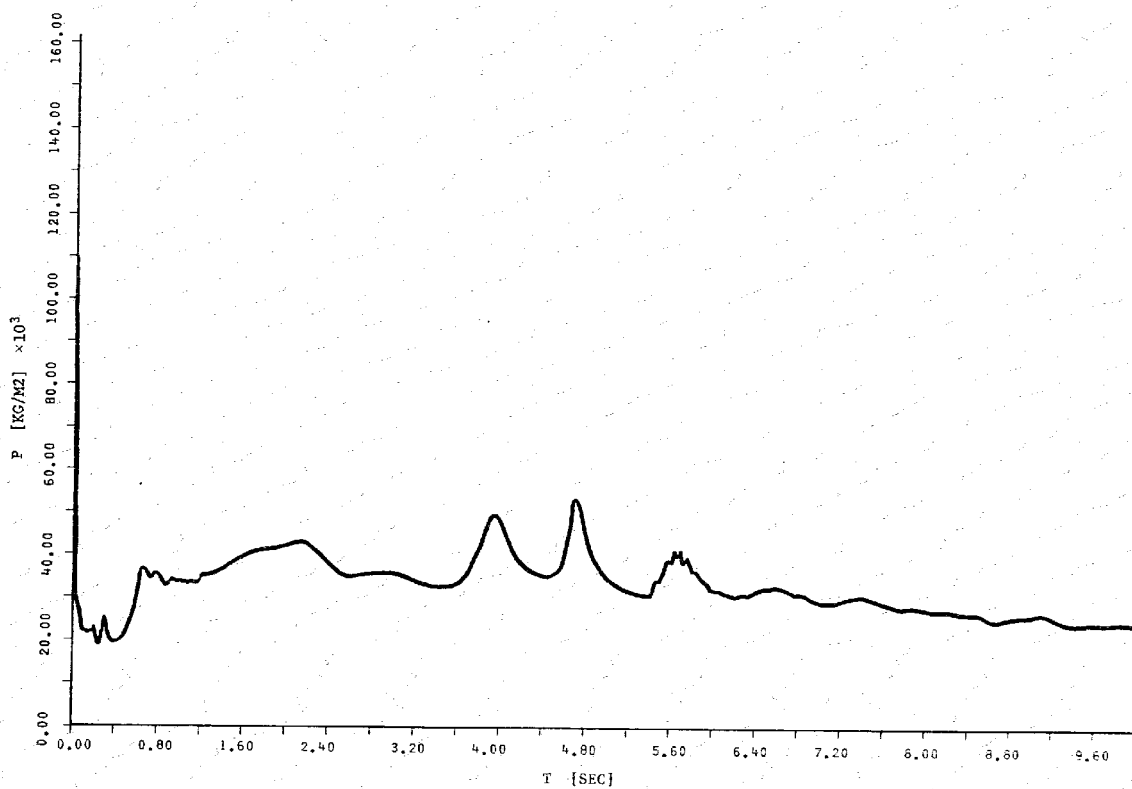


Fig. 7.7 ノード15 (IHX)の圧力

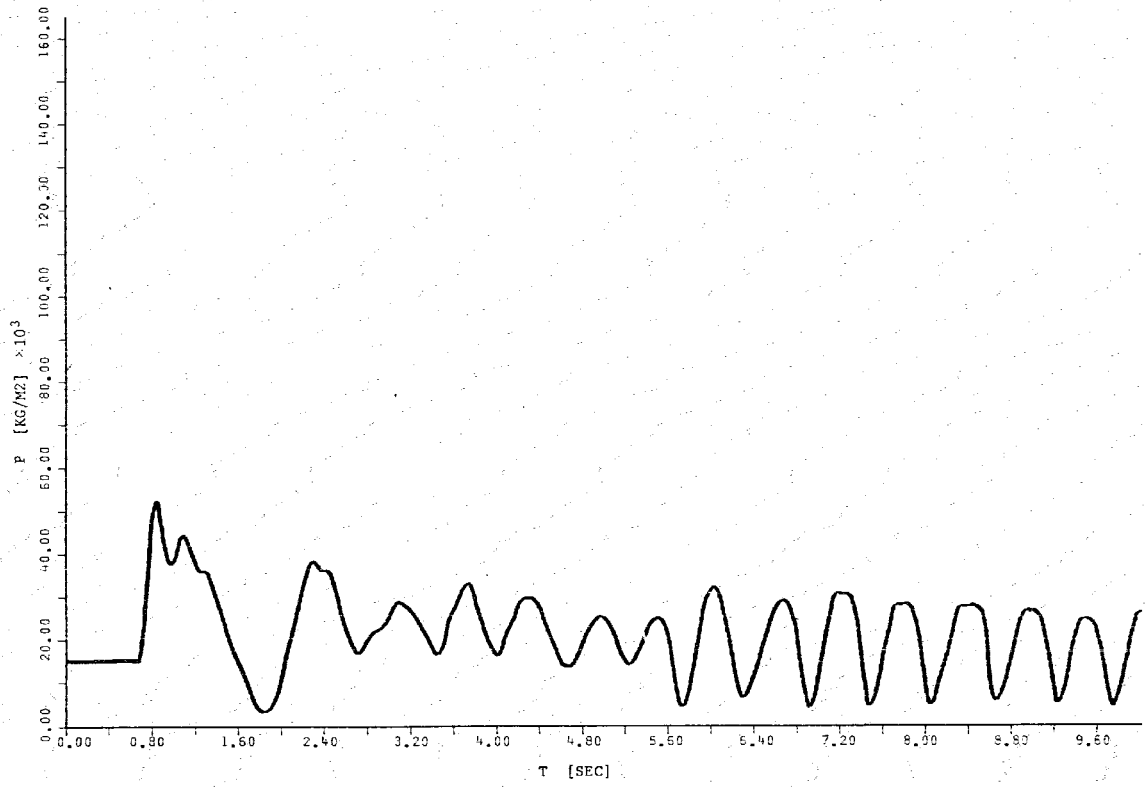


Fig. 7.8 ノード16 (放出系配管内)の圧力

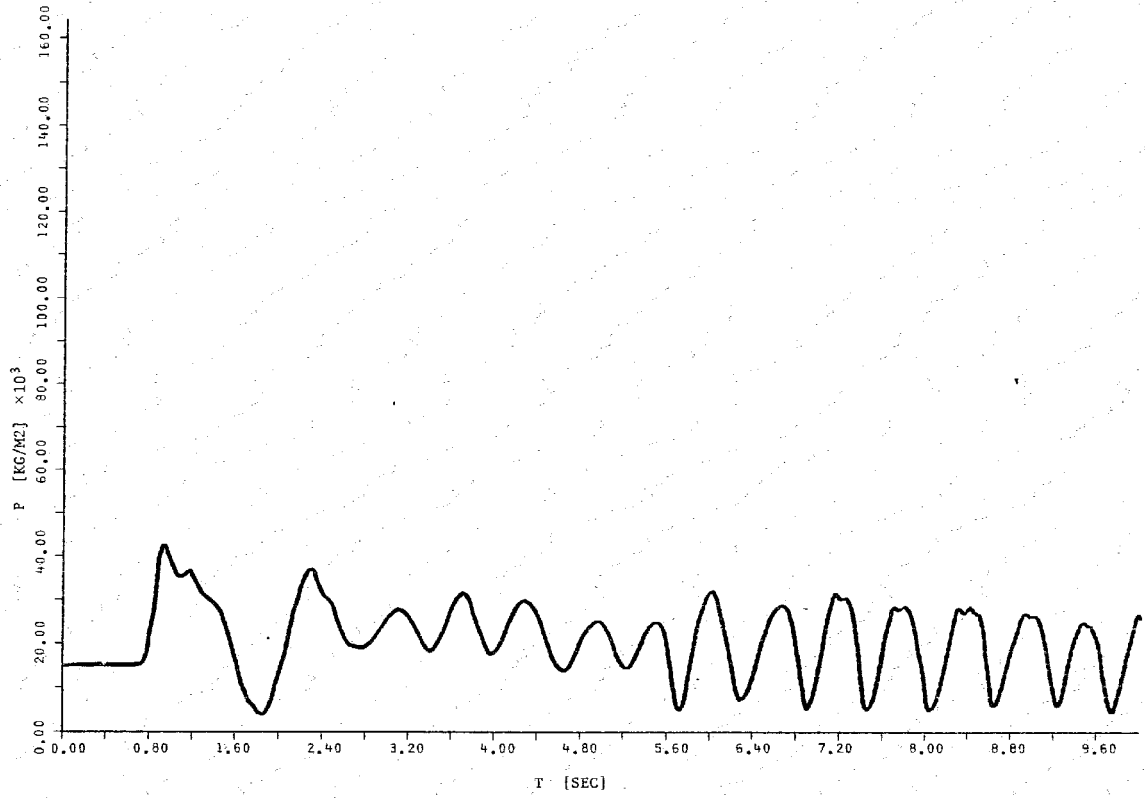


Fig. 7.9 ノード17 (放出系配管内)の圧力

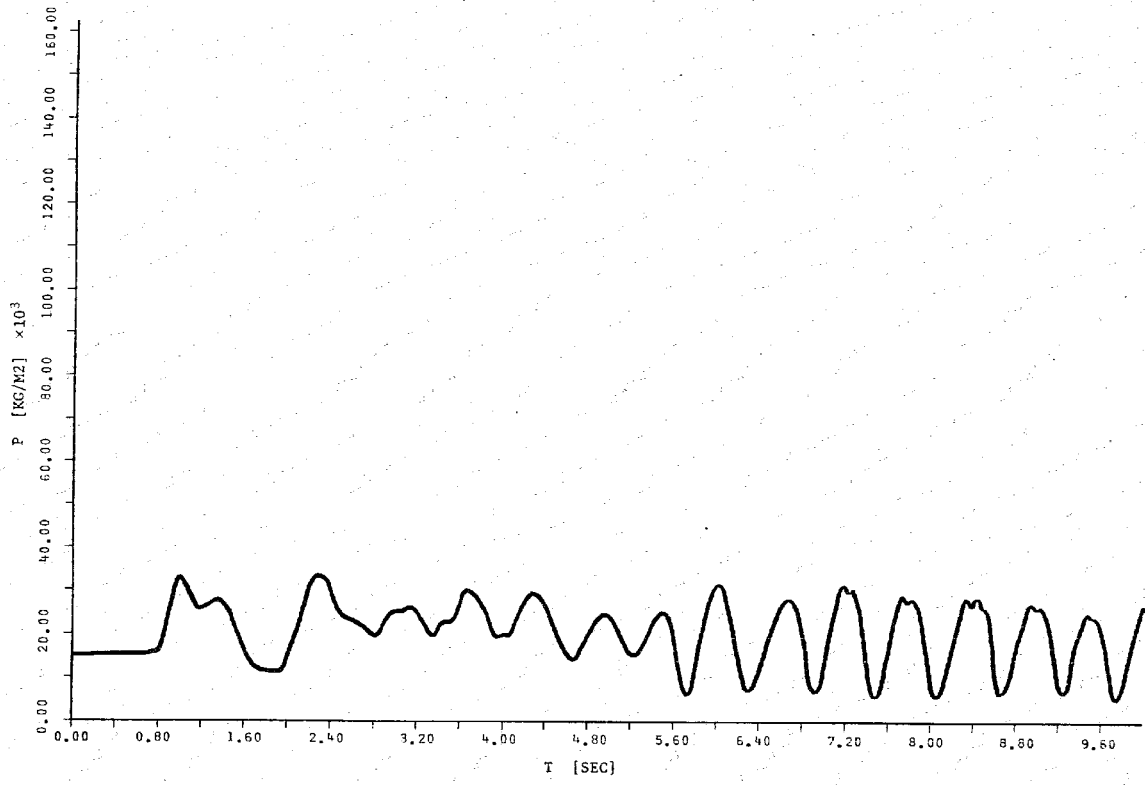


Fig. 7.10 ノード18 (放出系配管内)の圧力

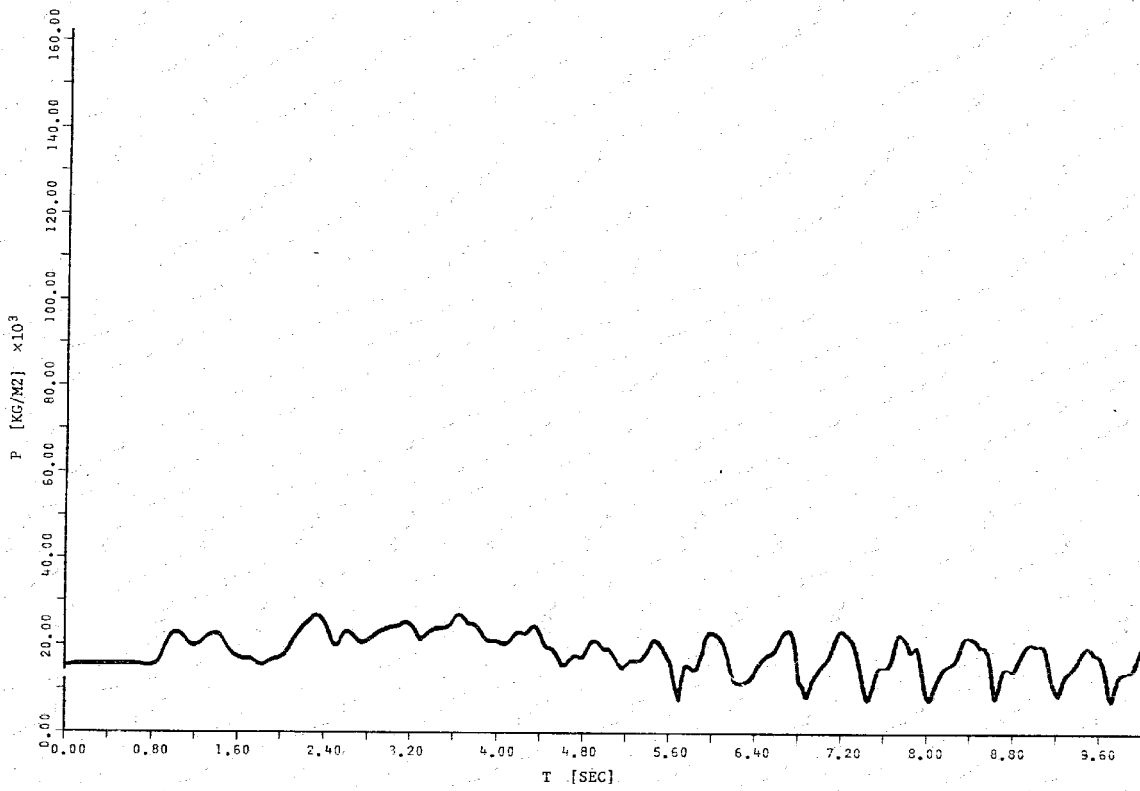


Fig. 7.11 ノード19 (放出系配管内)の圧力



### 8. あとがき

大リーク・ナトリウム-水反応事故時の確立常圧力挙動とナトリウム流動解析計算コード SWAC-1Bの計算モデルおよび、コード取扱について述べ、また SWAT-3 体系での計算例を添付した。

本報告の段階では、入力定数として与えねばならない各種定数の最適値は未定であるが、計算例に示したように本計算コードはナトリウム-水反応解析にかなり有効な手段を提供し得るものと考えられる。

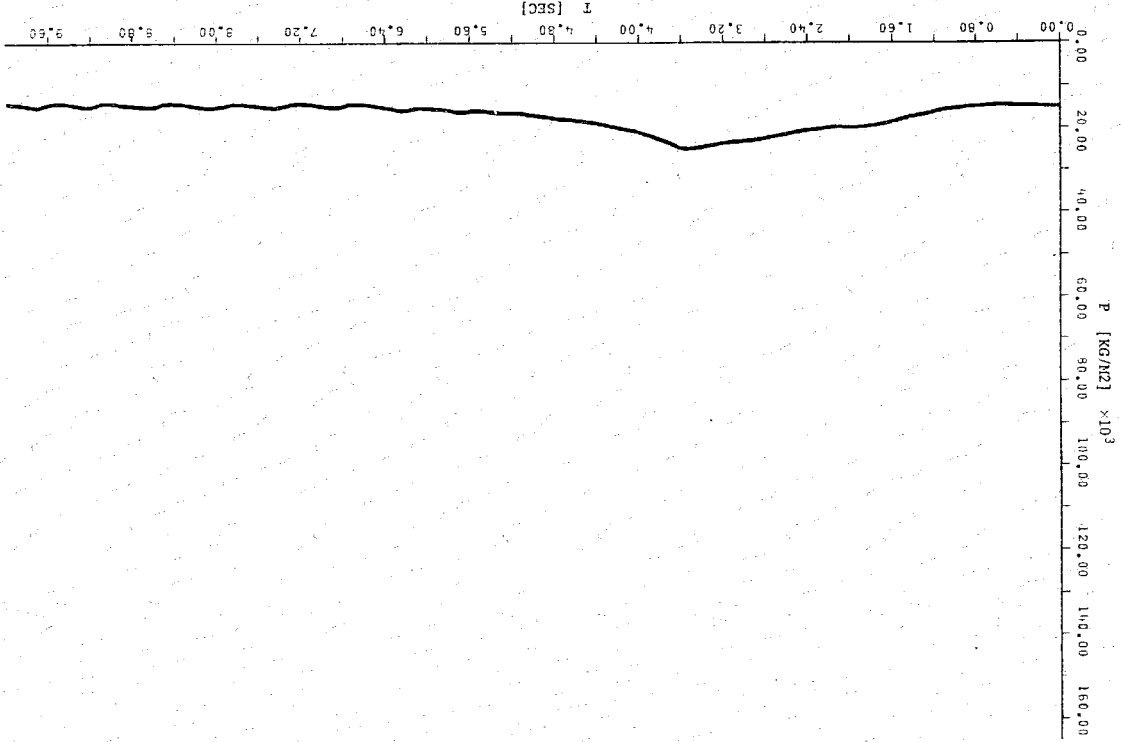
現時点で本計算コードについて残された問題点は

- (1) 計算時間の短縮化
- (2) 最適入力定数の決定

であるが、(1)については、本コード作成時の設計思想上ある程度の計算時間の増加はやむを得ないものと考ええる。また(2)については、現在 SWAT-1, SWAT-3 試験結果との照合により最適値計算決定の作業を継続中であり、この結果は別途報告する予定である。

最後に本コードの開発全般にわたり、有益な助言をたまわった三菱原子力工業渡辺氏、動燃田中信夫、吉岡直樹の各氏に深く感謝いたします。また本コードのプログラミング及びコーディングは FACOM-HITAC 社の手によって行われた事を併記し、協力に感謝の意を表します。

Fig. 7.12 ノード 21 (受熱容器) の圧力



記号

A	—	流量を求める行列
A <sub>k</sub>	m <sup>2</sup>	リンクkの断面積
a <sub>ky</sub>	—	行列Aの要素
B	—	圧力を求める行列
b <sub>ij</sub>	—	行列Bの要素
C	—	圧力を求めるベクトル
c <sub>i</sub>	—	ベクトルCの要素
D <sub>i</sub>	m	リンク・ノードの管径
D <sub>0</sub>	m	伝熱管外径
f <sub>ir</sub>	—	H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O 転換比
f <sub>wi</sub>	—	水噴出率の分配比
F(t, y)	—	関数形
f <sub>k</sub>	kg/sec <sup>2</sup>	重量 W <sub>k</sub>
g	m/sec <sup>2</sup>	重力加速度
h	m	位置水頭
h	sec	Δt
h <sub>sf</sub>	m	破断点の自由液面からの深さ
Δh	m	静的ヘッド差
I <sub>i</sub>	—	ノードiをイニシャルノードとするリンクの集合
L <sub>i</sub>	m	ノードiの長さ
L <sub>kj</sub>	m	リンクkのj番目の小要素の長さ
L <sub>f</sub>	m	大気放出弁の開度(最大持ち上がり長さ)
L <sub>p</sub>	m	伝熱管コイルのピッチ
M <sub>Si</sub>	kg	ノードiのNa or 水素ガスの質量
M <sub>H2</sub>	—	水素分子の質量数
m	—	ラプチャディスキの開度(面積比)
N <sub>ci</sub>	—	ノードiにおける伝熱管の流れ方向の列数
n	—	ポリトロープ指数
P <sub>i</sub>	kg/m <sup>2</sup>	ノードiの圧力
P <sub>rk</sub>	kg/m <sup>2</sup>	リンクkでの摩擦損失
ΔP <sub>rk</sub>	kg/m <sup>2</sup>	摩擦損失 + 静的ヘッド差
P <sub>atm</sub>	kg/m <sup>2</sup>	大気圧

Q	kg/sec	水噴出率
Q <sub>i</sub>	kg/sec	ノードiでの水素発生率
R	m <sup>3</sup> /(sec <sup>2</sup> · dag)	水素の気体定数
R <sub>lis</sub>	—	ρ <sub>lg</sub> /ρ <sub>Na</sub>
R <sub>o</sub>	—	レイノルズ数
R <sub>ib</sub>	m	バンド部の曲率半径
r <sub>B</sub>	m	バンド部の管半径
S <sub>k</sub>	—	リンクkでのスリップ比
S <sub>c</sub>	—	大気放出弁での縮流係数
T <sub>g</sub>	°K	系のNa温度
T <sub>Hi</sub>	°K	ノードiの水素ガス温度
u <sub>k</sub>	m/sec	リンクkでの平均流速
u <sub>sk</sub>	m/sec	リンクkでのNa又は水素ガス流速
u <sub>eri</sub>	m/sec	放出系配管での臨界流速
V <sub>i</sub>	m <sup>3</sup>	ノードiの容積
V <sub>si</sub>	m <sup>3</sup>	ノードiでのNa又は水素ガスの占める体積
W <sub>k</sub>	kg/sec	リンクkでの全質量流量
W <sub>sk</sub>	kg/sec	リンクkでのNa又は水素ガスの質量流量
W <sub>SSk</sub>	kg/sec	リンクkでの換算体積流量
ΔW <sub>k</sub>	kg/sec	WのΔtでの増分
X <sub>i</sub>	—	ノードiでのクオリティ
Z	—	流量を求める際の右辺ベクトル
α <sub>i</sub>	—	ノードiでのポイド率
α <sub>k</sub>	—	リンクkに対して定義されたポイド率
α <sub>sk</sub>	—	W <sub>sk</sub> /W <sub>k</sub>
β	—	大気放出弁に関する比例定数
γ <sub>i</sub>	—	—
θ	deg	バンド部の曲り角
ε <sub>k</sub>	m	Σ L <sub>kj</sub> /D <sub>ki</sub>
λ	—	円管での摩擦損失係数
λ <sub>c</sub>	—	コイル部での摩擦損失係数
μ <sub>sk</sub>	kg/(m · sec)	Na又は水素ガスの粘性係数

$\nu_k$	mm/sec	リンクkでの助粘性係数
$\pi$	-----	円周率
$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	Na又は水蒸気ガスの密度
$\phi_{10}^2$	-----	L-M式の2相相乗係数
$\phi^2$	-----	2相旋増係数
$\zeta$	-----	各種形状圧損係数
$\zeta_B$	-----	ベンド部での圧損係数
$\zeta_R$	-----	ラプチャデブノック部での圧損係数

参 考 文 献

- 1) T. A. Porsching, J. H. Murphy, and J. A. Redfield  
Stable Numerical Integration of Conservation Equations for Hydraulic Networks' Nuclear Science and Engineering 43 p.218 (1971)
- 2) 機械工学便覧 P. 8-13 第12表
- 3) 山川正剛他, PNCレポート SN 941-75-78 50 MW蒸気発生器試験施設特性試験報告書 P. 41
- 4) 赤川浩爾 "気液2相流" p.75. コロナ社
- 5) 古屋啓正, 村上光裕, 山田 豊 "流体工学" p.69 朝倉書店
- 6) Fauske, H. K. Roc. Symp. on Two-Phase Flow, U. of Exeter, Devon England
- 7) 労働省第1種圧力容器用安全弁の吐出容量算出式
- 8) 液体金属ハンドブック
- 9) SWAC-13 プログラム内部仕様書
- 10) 佐藤他 "蒸気発生器安全性総合試験要覧" (大リーク・ナトリウム-水反応試験(第1報))
- 11) カルコンアプロック・プログラミング操作手引書

Appendix ノードとリンクとサブリンク

§ 3.1 で示したように、ノードは体積を持つものの中で諸状態量が定義され、また質量保存の式が考慮される。リンクは2つのノードを接続するものとして2つのノードの中心間に定義され、運動量の保存式が考慮される。

1) ノード

実際にノードを設定する場合の分割方法については、今後分割方法と計算結果との比較が行なわれた段階で述べなければならぬ。現在は特に分割の際の制限となるような事はないが(①空間的に1塊まりの領域を形成しているもの(たとえば、下部プレナム・内筒など)は1つのノードとして区分する。

(②カバナー・ガス部は内筒の上端以上の部分を1つのノード(上部プレナムノード)に取り、内筒部・ダウンカマナー部・伝熱管コイル部から上昇して来るNaのミキシング・チャネルとしての性格と放出系配管への入口としての性格を与える。

(③取納容器は1つのノードで扱う。

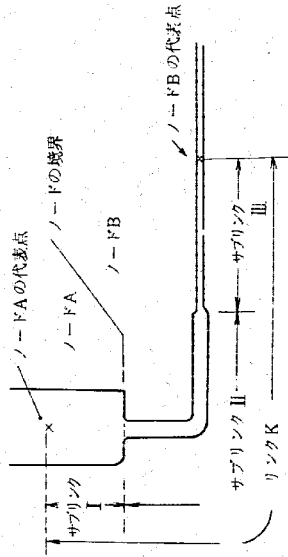
2) リンク

リンクは各ノードに適当な代表点を(なるべく空間的に中心)選び、その2点間に設定する。

3) サブリンク

リンクを流路形状の変化などで更に分割したものをサブリンクと称する。このサブリンクに対して流路の内径 $D_{jk}$ と長さ $L_{jk}$ の二つを与える。この $D_{jk}$ ,  $L_{jk}$ は流動抵抗を求めるために用いるものであるから

$D_{jk}$ は水力的相当直径でなければならぬ。サブリンクの分割の代表例を図A.1に示す。ノードA・BをつなぐリンクKはベンド1個を除いて圧損要因(管断面の変化)を2個含む。従ってこの部分で



図A.1 サブリンクの分割例

区切ることによって計3個のサブリンクに分割する事ができる。インプットとしては圧損要因の数、それぞれの圧損係数 $\zeta_j$ 、各サブリンクの内径 $D_{jk}$ 、長さ $L_{jk}$ 等を与えてやらなければならない。またその中にベンド部が含まれている場合はベンド角 $\theta$ 等半径、曲率半径の比 $R_R$ とベンドを持つサブリンク番号 $j$ をインプットする必要がある。