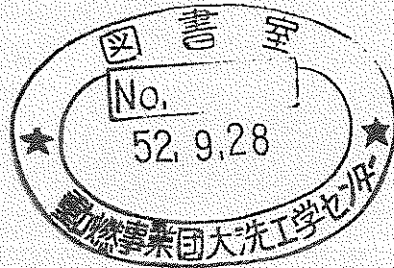


配布限定

区分変更	
変更後資料番号	二六
決裁年月日	平成13年7月31日

水噴出率計算コード(SWAC-11)

—大リーク・ナトリウム—水反応解析(第1報) —



1977年5月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

布す
この

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



配 布 限 定

PNC TBN952 77-05

1 9 7 7 年 5 月

水噴出率計算コード (SWAC-11)

大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第1報)

吉 岡 直 樹 *

Y . W . Shin **

錦 見 正 和 *

佐 藤 稔 *

要 旨

ナトリウム加熱蒸気発生器の大リーク・ナトリウム-水反応時における、破断伝熱管からの水噴出率を求める目的で計算コード“SWAC-11”を作成した。

本計算コードでは、水の相変化を考慮しており、サブクール水、飽和水、過熱蒸気の噴出率計算が可能である。

計算手法は、伝熱管部に対し修正ICE法を、他の部分に対してボリューム・ジャンクションモデルを適用した。

また、本コードの基本的なチェックのために、簡単なモデルを対象とした計算を行い、さらに、大型体系への適用例として、“もんじゅ”クラスの蒸発器における伝熱管4本破断時の水噴出率を解析した。

本コードはJIS-FORTRANで書かれており、120Kバイトのコア容量を必要とする。伝熱管を76分割した場合、5,000時間ステップの演算に要する計算時間はFACOM-230/58で約70分である。

* 動力炉核燃料開発事業団 大洗工学センター 高速炉安全性試験室

** 現在 Argonne National Laboratory



NOT FOR PUBLICATION
PNC/TN952 77-05
MAY, 1977

SWAC-11 : A Computer Code for the Analysis of Water/
Steam Leak from Ruptured Heat Transfer Tubes in LMFBR
Steam Generators

— Large Leak Sodium/Water Reaction Analysis (No. 1)—

Naoki Yoshioka*, Y.W. Shin**,
Masakazu Nishikimi*, Minoru Sato*

ABSTRACTS

For the analysis of large scale sodium/water reaction accidents in LMFBR steam generators, a computer program, SWAC-11, is developed to predict water injection from double-ended guillotine rupture of heat transfer tubes. Considering the phase change in water flow, SWAC-11 can simulate the injection of subcooled water, saturated water and superheated steam.

The method of numerical calculation in the code is the modified ICE (Implicit Continuous Eulerian) Method for the thermal-hydraulic transient in heat transfer tubes, while the volume-junction model is employed for the other part of water system.

Simplified problems were selected to make a fundamental check of the model. Moreover, to show the applicability of the SWAC-11 to the prototypic conditions, the water/steam leak from four tube double-ended guillotine rupture in the MONJU class evaporator was calculated as an example.

This code is written in JIS-FORTRAN computer language and requires 120 K bytes core memories. Typical running time for a problem with 76 cells in a tube is about 70 minutes for FACOM-230/58 to compute 5,000 time steps.

* Fast Reactor Safety Test Section, O-arai Engineering Center, PNC.
** Presently with Argonne National Laboratory.

目 次

1. まえがき	1
2. 解析対象のモデル化と解法	3
2.1 解析対象とそのモデル化	3
2.2 配管系部のモデルと解法	6
2.2.1 ボリューム諸量の更新	6
2.2.2 ジャンクションの諸量の更新	7
2.3 伝熱管部のモデルと解法	10
2.3.1 基礎方程式の導入	10
2.3.2 差分表示	11
2.3.3 境界条件	14
2.3.4 初期条件	18
2.3.5 圧力方程式の解法と諸量の計算	18
2.3.6 伝熱管部での解法手順	21
2.4 配管部と伝熱管部の計算の結合	23
3. プログラム	24
3.1 プログラム構成	24
3.2 主要サブルーチンのフローチャート	28
3.3 使用計算機	36
4. プログラム機能の制限と限界	37
5. インプット・アウトプット・データのフォーマット	38
5.1 インプット・フォーマット	38
5.2 アウトプット・フォーマット	50
6. 例題計算	54
6.1 加圧水の噴出率計算	54
6.2 “もんじゅ”調(Ⅱ)蒸気発生器での水噴出率計算	60
7. 今後の課題	69
8. あとがき	71
9. 謝 辞	72
記号表	73
参考文献	75
Appendix A ナトリウムから管内水への熱伝達	76
" B 擬似粘性係数 λ , μ	77
" C インプット・データリスト	78

図 表 目 次

図 2.1	蒸気発生器廻りの水-蒸気系系統図 (一例)	4
図 2.2	解析モデルの概念図	5
図 2.3	メッシュの取り方と変数の定義	11
図 2.4	入口境界付近での変数	14
図 2.5	破断点付近での変数	16
図 2.6	配管部と伝熱管部の計算の結合	23
図 3.1	プログラム構成	25
表 4.1	SWAC-11 の機能の制限と限界	37
表 5.1	インプット・データフォーマット	39
図 6.1	加圧水噴出率計算のために想定した体系	55
図 6.2	加圧水噴出率計算のための計算モデル	55
図 6.3	圧力・流速の時間変化	56
図 6.4	摩擦のない場合の圧力波面の移動	57
図 6.5	$X = X_0$ における圧力・流速の時間変化	57
図 6.6	水噴率変化 ($\Delta t, \Delta x$: パラメータ)	59
図 6.7	蒸発器まわりの水蒸気系配置・配管例	61
図 6.8	配管系のボリューム分割	62
図 6.9	上例のボリューム・ジャンクションモデル	62
表 6.1	蒸発器伝熱管主要目	63
図 6.10	蒸気発生器まわりのヒートバランス (定格負荷)	64
図 6.11	“もんじゅ”調 (II) EV 内圧力・温度分布	65
図 6.12	破断伝熱管内圧力・流速分布 (0~10 [msec])	66
図 6.13	“ ” “ (15~50 [msec])	67
図 6.14	水噴出率 (0~200 [msec])	68

1. ま え が き

ナトリウム加熱蒸気発生器の大リーク・ナトリウム-水反応事故の現象は、破断伝熱管からの水噴出率に大きく依存する。その為、ナトリウム-水反応実験の解析及び蒸気発生器の安全設計を進める際、水噴出率の時間変化、全噴出水量を正確に推定することが必要不可欠である。

伝熱管破断時、管内の高温高圧水が噴出する際、流出水は気液二相流になることが考えられるが、実験上、この二相流に対して、流量を直接測定し得る適当な流量計は、現在のところ存在しない。その為、現状では水噴出率の実験的解明は不可能である。

一方、数値計算による解析面では、従来、水系解析用計算コード開発のために、一定の努力がなされてきたが、有効な手段を供し得なかった。その主な原因は、二相流問題に最も特徴的な、相変化時の音速の急激な変化に対して、差分様式の選択が適切でなかったことにあると考えられる。

ここでは、これらの経験を踏まえ、SWAT-1,3実験の注水系解析と蒸気発生器の伝熱管破断時の水系挙動解析を目的として、新たに計算コード“SWAC-11”を作成した。

現在まで、大きな圧力変化を伴う過渡流問題を解く方法として、特性曲線法^{1), 2)}及び他の有用と思われる幾つかの方法³⁾が提案されてきている。SWAT-1, 3装置^{4), 5)}を使用した実験の場合、注水孔上流側の真空部の存在、オリフィス部存在のために、超音速流、衝撃波が発生することも考えられる。従って、SWAC-11では、過渡変化の大きい伝熱管部の計算には、上記手法のうち、衝撃波と超音速流を扱える修正ICE法^{6), 7)}適用した。一方、破断伝熱管部初期流動に比べて、穏かな挙動を示すと思われる水系配管部での計算には、軽水炉の流量喪失事故時の水系解析で広く用いられてきた、ボリューム・ジャンクションモデル⁸⁾を採用した。

しかし、現在、時間等の制約により、このボリューム・ジャンクションモデルを採用した配管系の計算部分は、その一部の収束計算がうまくゆかない為(7章で詳述するが)未完成である。この為、本コードの適用は、出入口ヘッダの圧力・エンタルピー条件を時間的に一定と仮定した場合の伝熱管部を対象とした計算に限られる。しかしながら、本コードは既に配管系計算部を含んだ構成になっている。こうした事情から、本報告書に記載する内容は配管系計算部を含んだものとした。但し、例題計算の結果は、配管系の計算を実施したものではなく、修正ICE法を用いた伝熱管部のみを対象とした計算の結果であることを始めに述べておく。

本報告書の内容と構成は以下の通りである。

第2章には、本コードの解析対象とモデル化及びその解法を示し、次いで第3章には、プログラム構成、主要サブルーチンのフローチャート等を記述して本コードの概要を示した。また、第4章には、本コードを使用する場合、念頭に置くべきコードの機能の制限と限界を示した。更に第5章には、インプット・データの作成要領とアウトプット・データの内容を示し、6章では、本コードを用いて行った例題計算について記述した。そして最後に、7章には、本コードが有する問題

点とその解決のための方向性を示した。

更に附録として伝熱管部におけるナトリウムから水への熱伝達の扱い方並びに擬似粘性係数の効果の検討と、例題計算に用いたインプット・データを示す。

2. 解析対象のモデル化と解法

2.1 解析対象とそのモデル化

“もんじゅ”蒸気発生器まわりの水-蒸気系系統図の一例を図 2.1 に示す。

解析対象を次の様にモデル化する。

- 1) 伝熱管破断事故は蒸発器，過熱器，再熱器のうちいずれか1つの機器にて起こるものとする。
- 2) 解析対象を事故蒸気発生器，及びその出入口側に設備されている隔離弁から，事故蒸気発生器に近い配管，及び水フロー系に限定する。
- 3) 気液分離器に関しては，事故蒸気発生器が蒸発器の場合のみ設定されるものとする。
- 4) 伝熱管は，インプット・データとして与える任意の数， n 本まで同時に破断するものとする。但し，計算は代表する1本の破断管について行ない，蒸気発生器出入口ヘッダ部での計算，水噴出率及び総噴出量の計算では n 本まで考慮する。
- 5) 伝熱管破断は，解析開始時に瞬時に起こるものとし，水-蒸気系隔離弁の全閉，水系フロー弁の全開時刻はインプット・データとして与える。
- 6) 計算の初期状態量，流量等は破断前の値をインプットデータとして与える。
- 7) 解法に関しては，破断管，健全管の各部における計算は修正ICE法で行い，他の部分はボリューム・ジャンクションモデルで計算を行うものとする。

解析モデルの概念図を図 2.2 に示す。

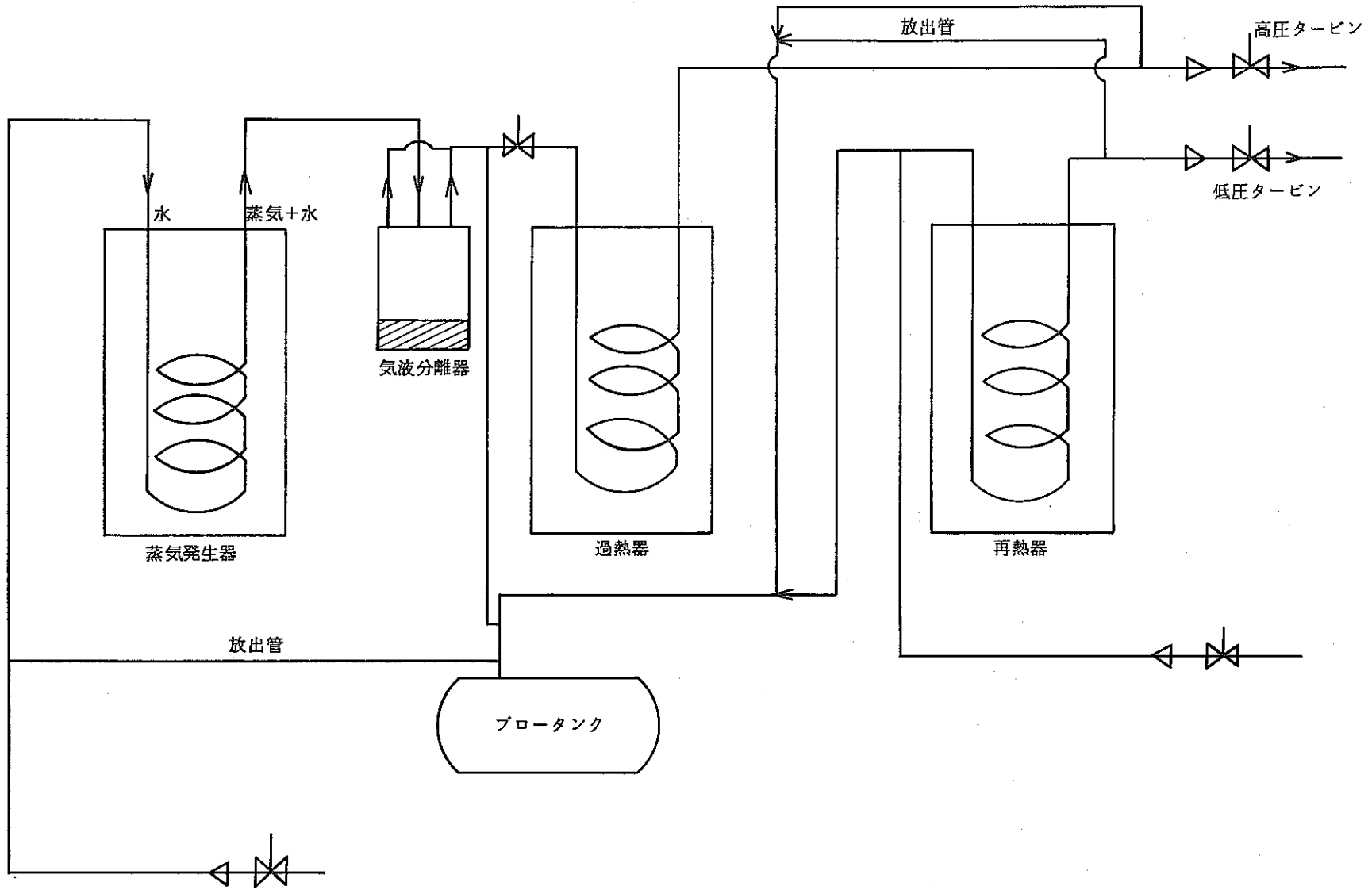


図 2.1 蒸気発生器廻りの系統図 (一例)

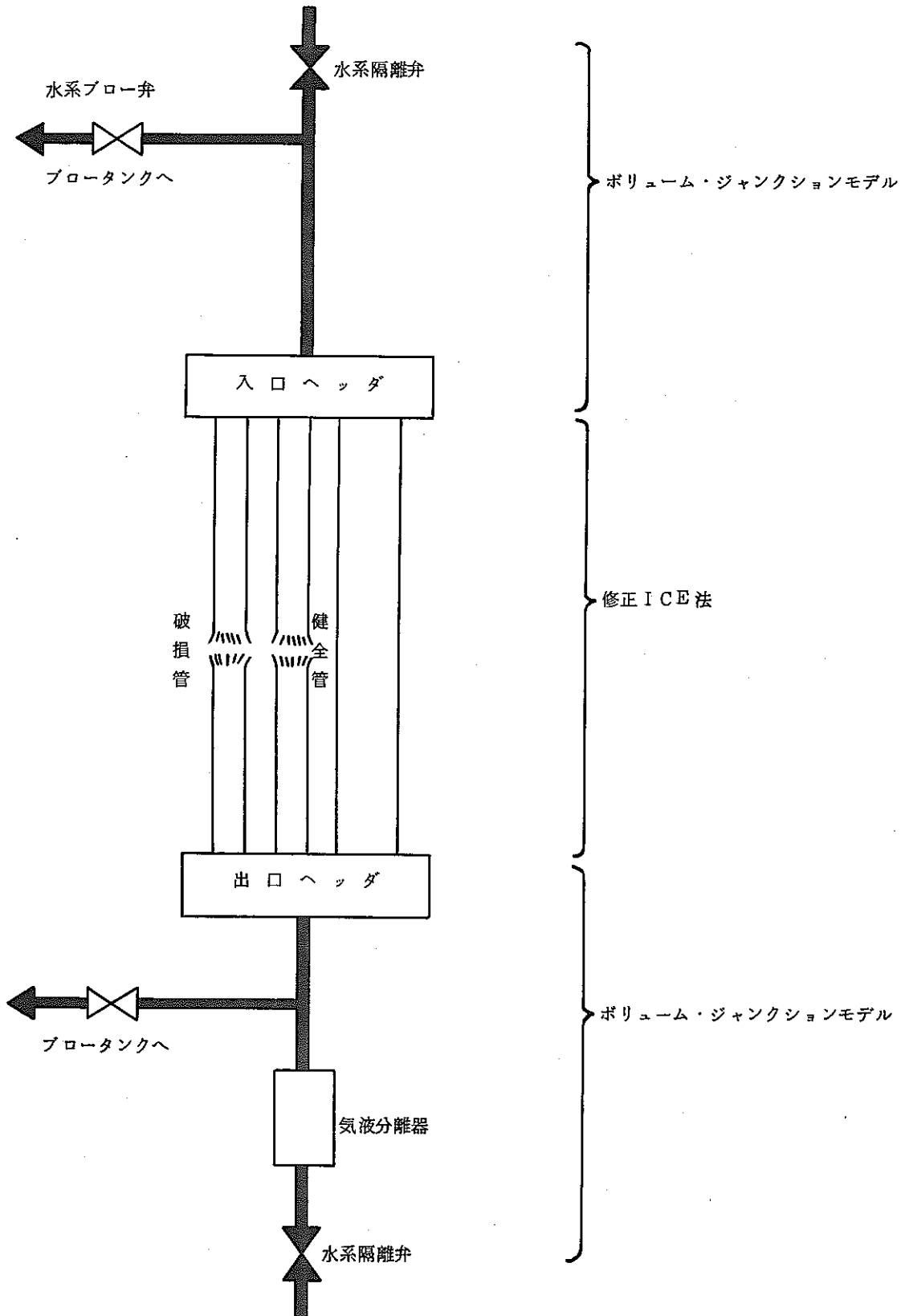


図 2.2 解析モデルの概念図

2.2 配管系部のモデルと解法

配管系部の流動計算は、次の様にモデル化して行う。

- 1) 蒸発器，過熱器，再熱器内の伝熱管部を除く水-蒸気系配管部の流動は，ボリューム・ジャンクション・モデルで解く。
- 2) 流れは1次元流動として扱い，二相流の場合気液均質混合流と考える。
- 3) サブクール水，飽和二相流，過熱蒸気の流動を考える。
- 4) 計算の初期状態量は，伝熱管破断前の値をインプット・データとして与える。

詳細については，以下に述べる。

2.2.1 ボリュームの諸量の更新

(1) 重量の更新

ボリューム i に関する重量バランスの式から

$$dM_i / dt = - \sum_{j=1}^N W_{ij} \quad (2-1)$$

従って，重量の更新は，前進差分を仮定して

$$M_i^{n+1} = M_i^n + (dM_i / dt)^n \cdot \delta t \quad (2-2)$$

となる。

(2) 内部エネルギーの更新

ボリューム i に関するエネルギー・バランスの式から

$$dI_i / dt = - \sum_{j=1}^N W_{ij} H_{ij} + Q_i \quad (2-3)$$

但し，運動エネルギー，ポテンシャルエネルギー，粘性力及び圧力による仕事量の寄与を無視している。従って，内部エネルギーの更新は

$$I_i^{n+1} = I_i^n + (dI_i / dt)^n \cdot \delta t \quad (2-4)$$

(3) 圧力，エンタルピーの更新

ブロータンク部を除いた通常ボリューム部においては，圧力とエンタルピーは繰り返し計算により定める。その手順は

- ① 比重量 $\rho_i = M_i / V_i$ の計算
- ② 圧力 P_i の仮定
- ③ エンタルピー H_i の計算

$$H_i = I_i / M_i + P_i M_{ow} / \rho_i / A_j \quad (2-5)$$

- ④ P_i ， H_i を用いて水の状態式から比重量 ρ_i^* を算出
- ⑤ ρ_i と ρ_i^* の比較

⑥ 一致したら終了，一致しなかったら圧力を

$$P_i^{n+1} = P_i^n + C (\rho_i - \rho_i^*) / (\rho M_{cm}) \quad (2-6)$$

として③に戻る。

また，ブロータンクの圧力は，大気圧に等しいものとする。

(4) その他の諸量の更新

ボリューム部の相状態，温度，クオリティ等は，水の状態方程式から算出するものとする。

2.2.2 ジャクションの諸量の更新

(1) 管摩擦圧損係数の算出

ボリューム i での管摩擦圧損係数 f_i は

$$f_i = f_s \cdot \xi \cdot f_T$$

の積として表わされる。

① f_s の算出

臨界レイノズル数 $\approx 2,300$ を境として，

層流の場合 $f_s = 64 / Re$

乱流の場合

滑かな管の時 $f_s = 0.3164 / \sqrt{Re}$

粗い管の時

$$1 / \sqrt{f_s} = -2 \log_{10} \left[\frac{e/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_s}} \right]$$

② ξ の算出 (管の曲率の影響)

ヘリカルコイル圧力損失増倍係数 ξ は

$$\xi \begin{cases} = \left\{ Re \cdot \left(\frac{d_i}{D_e} \right)^2 \right\}^{0.05} & \text{ヘリカルコイルの場合} \\ = 1.0 & \text{直管の場合} \end{cases}$$

配管は直管であるから $\xi = 1$

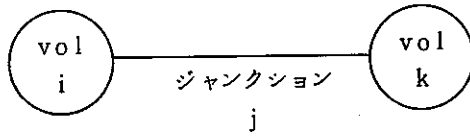
③ f_T の算出 (二相の影響)

単相の場合 $f_T = 1$

二相の場合 Martinelli - Nelson 係数を圧力・クオリティの関数として，
テーブル化して表わし，値は，内・外挿して求める。

尚，管摩擦圧損係数には，PNC 50MWSGTF 所有コード POPAI の中の圧損係数計算用サブルーチンをそのまま借用した。

(2) 抵抗係数の算出



抵抗係数を次のように定義する。

$W_{ij} \geq 0$ の時 (vol i から流出する)

$$RES_i = \frac{1}{2\rho_i A_i^2} \left[\left(\frac{f_i L_i}{2D_i} \right) + K_f \right] \quad [1 / (Kg \cdot m)]$$

(2-7)

$W_{ij} < 0$ の時 (vol i へ流入する)

$$RES_i = \frac{1}{2\rho_k A_k^2} \left(\frac{f_i L_i}{2D_i} \right) \quad [1 / (Kg \cdot m)]$$

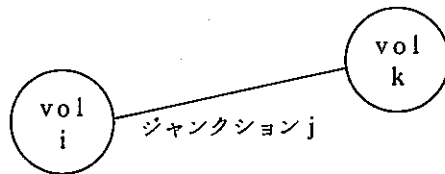
(3) 流量の更新

ジャンクション j の流れは、次の一次元運動方程式から計算する。

$$\left(\frac{L}{A} \right)_j \frac{dW_{ij}}{dt} = (P_k - P_i) \rho M_{CM} + \rho g (Z_k - Z_i)$$

$$- (RES_i + RES_k) W_{ij} | W_{ij} | \quad (2-8)$$

$$W_{ij}^{n+1} = W_{ij}^n + (dW_{ij}/dt)^n \delta t \quad (2-9)$$



但し、慣性項の係数は

$$\left(\frac{L}{A} \right)_j = \frac{1}{2} \left(\frac{L_i}{A_i} + \frac{L_k}{A_k} \right)$$

で表わす。

(4) エンタルピーの更新

ジャンクション j の流れのエンタルピーは、流出源ボリュームのものとする。

$$W_{ij} \geq 0 \text{ の時} \quad H_{ij} = H_i \quad (2-10)$$

$$W_{ij} < 0 \text{ の時} \quad H_{ij} = H_k$$

(5) 臨界流量のチェック

ジャンクション流量は臨界流出現象により制限される。臨界流量は Moody の二相臨界流

モデルを採用する。ジャンクション j での臨界流量は

$$W_{\text{CHOK}ij} = A_{\text{CHOK}ij} f_n(P, H) \quad (2-11)$$

と表わす。ここで、 $A_{\text{CHOK}ij}$ は、ジャンクション j における最小流路断面積である。また $f_n(P, H)$ は、流体の圧力とエンタルピーの関数として表わした二相臨界流量である。計算コード内ではこれをテーブル化して扱っている。

そして、

$$\begin{aligned} \text{もし, } W_{ij} > W_{\text{CHOK}ij} \text{ ならば } W_{ij} &= W_{\text{CHOK}ij} \\ \text{もし, } W_{ij} \leq W_{\text{CHOK}ij} \text{ ならば } W_{ij} &= W_{ij} \end{aligned} \quad (2-12)$$

として、(2-9)式から求められる流量を臨界流量で制限する。

2.3 伝熱管部のモデル化と解法

伝熱管部の流動計算は、次の様にモデル化して行う。

- ① 蒸発器，過熱器，再熱器の各伝熱管部での流動計算には修正 I C E 法を適用する。
- ② 流れは一次元で扱い，二相流の場合，気液均質混合流と考える。
- ③ サブクール水，飽和二相流，過熱蒸気の流動を考える。
- ④ 水の圧縮性を考慮する。
- ⑤ 蒸気発生器内では，ナトリウムから水への熱の移動を考えられるようにする。
- ⑥ 流体内部での熱の伝導は無視する。
- ⑦ 流体のせん断応力によるエネルギー変化は無視する。
- ⑧ 状況に応じて，精度，或は安定性を高めるために擬似粘性項，及び質量拡散項を入れる。

2.3.1 基礎方程式の導入

質量保存の法則より，

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = \tau \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (2-13)$$

但し，右辺は，数値計算上の安定化のための質量拡散項である。

次に，運動量保存の法則より

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} (PM_{cm} + q) \tau + \rho \tau \cos \theta \quad (2-14)$$

$$q = -(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x}$$

ここで，(2-14)式，右辺第一項目の q は，衝撃波を扱い，数値計算上の安定化のために挿入した，擬似粘性項である。

また，エネルギー保存則より

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho E u}{\partial x} = & \frac{\rho u \cos \theta}{A_J} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\tau B \mu \frac{\partial I}{\partial x} - P u M_{cm} / A_J \right. \\ & \left. - \left\{ \left(\frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \right) q u - \mu \frac{\partial u^2}{\partial x} \right\} \frac{1}{A_J} \right] + Q \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$E = I + \frac{u^2}{2} \frac{1}{\tau A_J} \quad (2-16)$$

更に，水-蒸気の状態方程式が基礎式として必要であるが，ここでは，煩雑さを避けるために詳細を記述は省略する。また，音速は次式から計算する。

(a) 単相の場合

$$\frac{a^2}{g} = \frac{-v^2}{\left[\left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_H + \frac{v}{A_j} \left(\frac{\partial v}{\partial H} \right)_P \right]} \quad (2-17)$$

(b) 二相状態の場合

気液均質混合状態を考え、且つ、二相間の熱非平衡を考えないものとする

$$\begin{aligned} \frac{a^2}{g} = & -v^2 \left\{ (1-X) \left(\frac{dv_r}{dP} \right) + X \left(\frac{dv_g}{dP} \right) + \frac{v_{rg}}{H_{rg}^2} \left[H_{rg} \frac{v}{A_j} + (H-H_g) \right. \right. \\ & \left. \left. \times \frac{dH_r}{dP} - (H-H_r) \frac{dH_g}{dP} \right] \right\} \quad (2-18) \end{aligned}$$

ここで、 $\left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_H$ 、 $\left(\frac{\partial v}{\partial H} \right)_P$ 、 X 、 $\frac{dv_r}{dP}$ 、 $\frac{dv_g}{dP}$ 、 $\frac{dH_r}{dP}$ 、 $\frac{dH_g}{dP}$ 等は、状態方程式から計算する。

2.3.2 差分表示

2.3.1項で述べた一連の非線型偏微分方程式は、陰的な差分方法を用いて解かれる。その概要は次の通りである。連続の式では、質量流束は、未知数である次タイム・ステップの密度と流束の関数として表現される。同様に、運動方程式中の圧力は、未知数である次タイム・ステップの密度の関数として示される。これらの式中から、未知の流速を消去して新しい密度に関するポアソン方程式が得られる。更に、密度から圧力に関する方程式に変換して、実際にはこの方程式を解く。この結果から、逆に新しいタイム・ステップでの密度、そして流速が得られる。最後に、エネルギー変化が計算される。

メッシュの取り方と変数の定義の仕方を図2.3に示す。

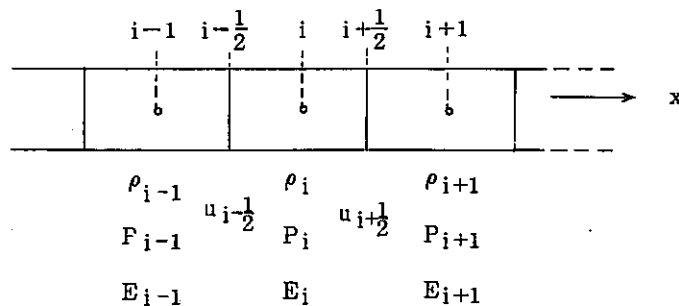


図 2.3 メッシュの取り方と変数の定義

セル中心は、添字 i 、 $i \pm 1$ 等で標号され、セル端点は $i \pm \frac{1}{2}$ 等で示される。流速はセル端点で定義され、また ρ 、 P 、 E 、 I のような状態量は、セル中心で定義される。

差分法としては、時間微分を含む項は、1次の前進差分法で近似され、空間微分を含む項は中心差分法で近似される。

連続の式 (2-13) 式より

$$\begin{aligned} \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} \left[(\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \right] + \frac{1-\phi}{\delta x} \left[(\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n \right] \\ &+ \frac{\tau}{\delta x^2} (\rho_{i+1}^n + \rho_{i-1}^n - 2\rho_i^n) \end{aligned} \quad (2-19)$$

また, 運動方程式 (2-14) 式より

$$\begin{aligned} \frac{(\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} (P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1}) M_{CM} \mathcal{G} \\ &+ \frac{1-\phi}{\delta x} (P_i^n - P_{i+1}^n) M_{CM} \mathcal{G} + R_{i+\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (2-20)$$

但し,

$$\begin{aligned} R_{i+\frac{1}{2}}^n &= \frac{1}{\delta x} \left[\rho_i u_{i+\frac{1}{2}} u_{i-\frac{1}{2}} - \rho_{i+1} u_{i+\frac{3}{2}} u_{i+\frac{1}{2}} - \frac{\lambda+2\mu}{\delta x} (u_{i+\frac{3}{2}} + u_{i-\frac{1}{2}} - 2u_{i+\frac{1}{2}}) \mathcal{G} \right. \\ &\left. + \rho_{i+\frac{1}{2}} \mathcal{G} \cos \theta - \frac{f_i}{2d} (\rho u | u |)_{i+\frac{1}{2}} \right] \end{aligned}$$

ここで, 添字 n はタイム・ステップを示すものである。但し, タイム・ステップが n の場合には煩雑さを避けるために省略することもある。

また, ϕ, φ は重み定数であり, $0 \leq \phi, \varphi \leq 1$ である。(2-19) 式と (2-20) 式を見てわかるように, それぞれ 0 の時は完全陽解法となり, 1 の時には完全陰解法となる。

次に, 流体の状態式は差分形で,

$$P_i^{n+1} \equiv P_i^n + c_i^n (\rho_i^{n+1} - \rho_i^n) / (\mathcal{G} M_{CM}) \quad (2-21)$$

ここで,

$$c_i^n \equiv \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_i^n \text{ は, 音速に関する量である。}$$

更に, エネルギーの式 (2-15) 式は差分形で

$$\begin{aligned} (\rho E)_i^{n+1} &= (\rho E)_i^n + \frac{\delta t}{\delta x} \left[(\rho u E)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u E)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \right. \\ &+ (P_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} u_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - P_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} u_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}) M_{CM} / A_J \left. \right] \\ &+ \delta t \left[\rho_i^{n+1} u_i^{n+1} \cos \theta / A_J + Q_i \right] \end{aligned} \quad (2-22)$$

上式で, エネルギー束については (n+1) ステップの値を用い陰的に計算を行う。また

入熱 Q については Appendix A を参照のこと。

(2-20) 式より

$$\begin{aligned}
 (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} &= (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n + \frac{\phi \delta t}{\delta x} (P_{i-1}^{n+1} - P_i^{n+1}) M_{CM} \vartheta \\
 &\quad + \frac{(1-\phi) \delta t}{\delta x} (P_{i-1}^n - P_i^n) M_{CM} \vartheta + R_{i-\frac{1}{2}}^n \delta t
 \end{aligned} \tag{2-23}$$

$$\begin{aligned}
 (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} &= (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n + \frac{\phi \delta t}{\delta x} (P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1}) M_{CM} \vartheta \\
 &\quad + \frac{(1-\phi) \delta t}{\delta x} (P_i^n - P_{i+1}^n) M_{CM} \vartheta + R_{i+\frac{1}{2}}^n \delta t
 \end{aligned} \tag{2-24}$$

(2-21) 式より

$$\frac{P_i^{n+1}}{c_i^{n+1}} = \frac{P_i^n}{c_i^n} + (\rho_i^{n+1} - \rho_i^n) / (\vartheta M_{CM}) \tag{2-25}$$

(2-19) 式に (2-23)・(2-24) 式を代入し、更に (2-25) 式を用いて密度を消去し、整理すると

$$\begin{aligned}
 \frac{P_i^{n+1}}{c_i^{n+1}} &= \frac{P_i^n}{c_i^n} + \left\{ \frac{\delta t}{\delta x} [(\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n] + \frac{\delta t^2 \phi \phi}{\delta x^2} (P_{i-1}^{n+1} + P_i^{n+1} - 2P_i^{n+1}) M_{CM} \vartheta \right. \\
 &\quad + \frac{\delta t^2 \phi (1-\phi)}{\delta x^2} (P_{i-1}^n + P_{i+1}^n - 2P_i^n) M_{CM} \vartheta \\
 &\quad \left. + (R_{i-\frac{1}{2}}^n - R_{i+\frac{1}{2}}^n) \frac{\psi \delta t^2}{\delta x} + \frac{\tau \delta t}{\delta x^2} (\rho_{i+1}^n + \rho_{i-1}^n - 2\rho_i^n) \right\} / (\vartheta M_{CM})
 \end{aligned} \tag{2-26}$$

上式を更に整理して書くと

$$\frac{P_i^{n+1}}{c_i^{n+1}} \cdot \vartheta \cdot M_{CM} = \frac{\psi \phi \delta t^2}{\delta x^2} (P_{i-1}^{n+1} + P_{i+1}^{n+1} - 2P_i^{n+1}) \vartheta M_{CM} + G_i \tag{2-27}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 G_i &= \frac{P_i^n}{c_i^n} \vartheta M_{CM} + \frac{\delta t}{\delta x} [(\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^n - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^n] \\
 &\quad + \frac{\phi (1-\phi) \delta t^2}{\delta x^2} \vartheta M_{CM} (P_{i-1}^n + P_{i+1}^n - 2P_i^n) + \frac{\psi \delta t^2}{\delta x} (R_{i-\frac{1}{2}}^n - R_{i+\frac{1}{2}}^n) \\
 &\quad + \frac{\tau \delta t}{\delta x^2} (\rho_{i+1}^n + \rho_{i-1}^n - 2\rho_i^n)
 \end{aligned}$$

更に、上式は

$$-P_{i-1}^{n+1} + \left(2 - \frac{1}{c_1^2} \cdot \frac{\delta x^2}{\psi \phi \delta t^2} \right) P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1} = \frac{\delta x^2}{\psi \phi \delta t^2 g M_{CM}} \cdot G_i \quad (2-28)$$

とまとめられる。

但し、

$$\begin{aligned} \rho_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} (\rho_i + \rho_{i+1}) \\ (\rho u | u |)_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} (\rho_i + \rho_{i+1}) u_{i+\frac{1}{2}} \left| u_{i+\frac{1}{2}} \right| \\ u_i &= \frac{1}{2} (u_{i-\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2}}) \\ P_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} (P_i + P_{i+1}) \\ q_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} (q_i + q_{i+1}) \\ (\rho u E)_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{4} (\rho_i + \rho_{i+1}) u_{i+\frac{1}{2}} (E_i + E_{i+1}) \\ I_i &= E_i - \frac{1}{8} (u_{i-\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2}})^2 / g A_J \end{aligned} \quad (2-29)$$

2.3.3 境界条件⁹⁾¹⁰⁾

前述した様に、修正ICE法を用いた流動計算は伝熱管部に限っている。その為、計算上の境界を出入口ヘッダと破断点に定める。従って、健全伝熱管内の流動計算の境界は、出入口ヘッダとなる。また破断点より上流側伝熱管の計算では、入口ヘッダと破断点が境界となり、逆に、破断点より下流側伝熱管での計算では破断点と出口ヘッダが境界となる。

1) ヘッダ側境界条件

入口ヘッダ付近の変数を図2.4に示す。(出口ヘッダの場合、変数の添字は異なるが、入口ヘッダの場合と同様に考えられる。)

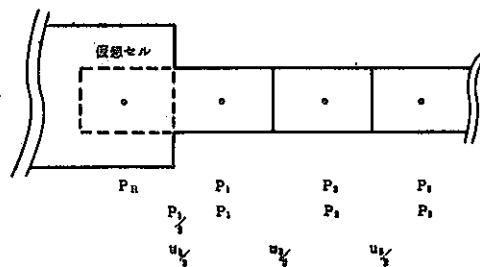


図 2.4 入口境界付近での変数

圧力，密度，流速の境界条件を次の様に定める。ヘッダ内に設定した仮想セル圧力 P_R は，有限差分時間 δt 内では一定であると考え。また，仮想セルと1番目のセルの間の流動は定常1次元流で近似する。また， $u_{1/2}$ は流路領域内部の値を線型外挿して求める。更に， $\rho_{1/2}$ は，ヘッダ内部での値と2番目のセルの密度を平均して求められる。すなわち

$$P_1^{n+1} = P_R - K_R \left[\frac{1}{2\varphi} \rho_{1/2}^n (u_{1/2}^n)^2 \right] \quad (2-30)$$

$$u_{1/2}^n = u_{3/2}^n + 2(u_1 - u_{3/2}^n) \quad (2-31)$$

$$\rho_{1/2}^n = (\rho_2 + \rho_R) / 2 \quad (2-32)$$

ここで K_R は圧力損失係数であり，入力定数として与える。

また，エネルギーに関しては， $E_2^{n+1} = E_1^{n+1}$ とする。

また，圧力に対する方程式は次の様に求められる。

連続の式より

$$\begin{aligned} \frac{\rho_2^{n+1} - \rho_2^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} \left[(\rho u)_{3/2}^{n+1} - (\rho u)_{5/2}^{n+1} \right] + \frac{1-\phi}{\delta x} \left[(\rho u)_{3/2}^n - (\rho u)_{5/2}^n \right] \\ &\quad + \frac{\tau}{\delta x^2} (\rho_3^n + \rho_1^n - 2\rho_2^n) \end{aligned} \quad (2-33)$$

また，セル端点 $3/2, 5/2$ に対する運動量の式は，

$$\begin{aligned} \frac{(\rho u)_{3/2}^{n+1} - (\rho u)_{3/2}^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} (P_1^{n+1} - P_2^{n+1}) M_{CM} \varphi \\ &\quad + \frac{1-\phi}{\delta x} (P_1^n - P_2^n) M_{CM} \varphi + R_{3/2}^n \end{aligned} \quad (2-34)$$

$$\begin{aligned} \frac{(\rho u)_{5/2}^{n+1} - (\rho u)_{5/2}^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta t} (P_2^{n+1} - P_3^{n+1}) M_{CM} \varphi \\ &\quad + \frac{1-\phi}{\delta x} (P_2^n - P_3^n) M_{CM} \varphi + R_{5/2}^n \end{aligned} \quad (2-35)$$

ここで， $R_{3/2}^n$ ， $R_{5/2}^n$ は(2-20)式で示した通りである。

更に，流体の密度変化に対する圧力変化の関連式は2番目のセルに対して

$$P_2^{n+1} = P_2^n + c_2^n (\rho_2^{n+1} - \rho_2^n) / \varphi M_{CM} \quad (2-36)$$

運動量の式の $(n+1)$ スラップ目の運動量束を連続の式の右辺に代入し，更に，(2-36) 式中の $(n+1)$ スラップ目の密度を代入し，整理すると2番目のセルに対して，圧力方程

式は

$$\frac{P_2^{n+1}}{c_2^n} = \frac{\phi \phi \delta t^2}{\delta x^2} (P_3^{n+1} - 2P_2^{n+1} + P_1^{n+1}) + \frac{1}{\rho M_{CM}} G_2 \quad (2-37)$$

となる。ここで、 G_2 は(2-27)式で示した通りである。(2-37)式において、 P_1^{n+1} は(2-30)式から既に求められているので、未知数 P_2^{n+1} 、 P_3^{n+1} を右辺において、

$$\left(2 + \frac{1}{c_2^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2}\right) P_2^{n+1} - P_3^{n+1} = P_1^{n+1} + \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} G_2 \quad (2-38)$$

と書かれる。これは、流路領域内部における圧力方程式と同時に後述する方法で解かれる。

2) 破断点側境界条件

破断点上流側の流路領域の計算を例として、破断点側境界条件の定式化を示す。破断点付近の変数を図2.5に示す。(破断点下流側の流路領域の場合も、変数の添字を代えることによって、同様に定式化できる。)

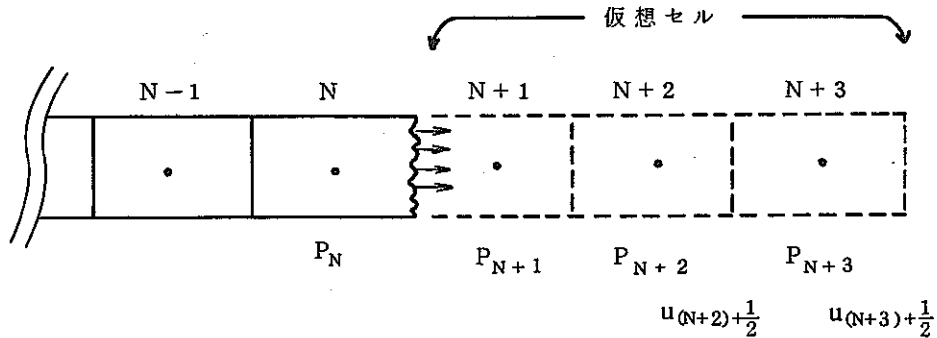


図2.5 破断点付近での変数

水の定常二相臨界現象の解明の為に、現在まで数多くの実験が行われてきた。^{11), 12)} これらによれば、水噴出状態時、管出口端の圧力は外圧よりも高くなることが示されている。しかしながら、管出口端近傍の2次元効果、或は気液2相間の熱的非平衡の問題等の難しさのために、その定量評価は未だなされていない。従って、ここでは水の噴出ジェットの拡がりを簡単に模擬して、破断点下流側に3つの仮想セルを設け、その3番目のセルを境界セルと定め、その圧力が外圧に等しいものとする。また、流速に関してN+3番目のセルの両端の流速は等しいとの境界条件を採用する。更に仮想セルであるN+2番目とN+3番目の間のセルでは流体は等エンタルピ変化をするものとした。

すなわち、

$$P_{N+3} = P_{ex} \quad (2-39)$$

$$u_{(N+3)+\frac{1}{2}}^{n+1} = u_{(N+2)+\frac{1}{2}}^{n+1} \quad (2-40)$$

$$H_{N+3}^{n+1} = H_{N+2}^{n+1} \quad (2-41)$$

これらの条件より，境界セルに対する圧力方程式は，次の様に求められる。連続の式より，

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{N+2}^{n+1} - \rho_{N+2}^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} [(\rho u)_{(N+1)+\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{(N+2)+\frac{1}{2}}^{n+1}] \\ &\quad + \frac{1-\phi}{\delta x} [(\rho u)_{(N+1)+\frac{1}{2}}^n - (\rho u)_{(N+2)+\frac{1}{2}}^n] + \frac{\tau}{\delta x^2} (\rho_{N+1}^n + \rho_{N+3}^n - 2\rho_{N+2}^n) \end{aligned} \quad (2-42)$$

また，N+2番目のセルの両端での運動量の式は，

$$\begin{aligned} \frac{(\rho u)_{(N+1)+\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{(N+1)+\frac{1}{2}}^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta t} (P_{N+1}^{n+1} - P_{N+2}^{n+1}) M_{CM} \mathcal{F} \\ &\quad + \frac{1-\phi}{\delta x} (P_{N+1}^n - P_{N+2}^n) M_{CM} \mathcal{F} + R_{(N+1)+\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (2-43)$$

$$\begin{aligned} \frac{(\rho u)_{(N+2)+\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{(N+2)+\frac{1}{2}}^n}{\delta t} &= \frac{\phi}{\delta x} (P_{N+2}^{n+1} - P_{N+3}^{n+1}) M_{CM} \mathcal{F} \\ &\quad + \frac{1-\phi}{\delta x} (P_{N+2}^n - P_{N+3}^n) M_{CM} \mathcal{F} + R_{(N+2)+\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (2-44)$$

ここで， $R_{(N+1)+\frac{1}{2}}^n$ ， $R_{(N+2)+\frac{1}{2}}^n$ は(2-20)式で示した通りである。

更に，流体の密度変化に対する圧力変化の関連式は，N+2番目のセルに対して，

$$P_{N+2}^{n+1} = P_{N+2}^n + c_{N+2}^n (\rho_{N+2}^{n+1} - \rho_{N+2}^n) / \mathcal{F} M_{CM} \quad (2-45)$$

である。運動量の式中，(n+1)ステップ目の運動量束を連続の式の右辺に代入し，更に(2-45)式中の(n+1)ステップ目の密度を代入し，整理すると，N+2番目のセルに対する圧力方程式は，

$$\frac{P_{N+2}^{n+1}}{c_{N+2}^n} = \frac{\phi \phi \delta t^2}{\delta x^2} (P_{N+3}^{n+1} - 2P_{N+2}^{n+1} + P_{N+1}^{n+1}) + \frac{1}{\mathcal{F} M_{CM}} G_{N+2} \quad (2-46)$$

となる。ここで， G_2 は(2-27)式で示した通りである。(2-46)式において， P_{N+3}^{n+1} は境界条件より求められているので，未知数 P_{N+1}^{n+1} ， P_{N+2}^{n+1} を左辺に残して，

$$-P_{N+1}^{n+1} + \left(2 + \frac{1}{c_{N+2}^n} \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2}\right) P_{N+2}^{n+1} = P_{N+3}^{n+1} + \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \mathcal{F} M_{CM}} G_{N+2} \quad (2-47)$$

と表わすことができる。これは，ヘッダ側境界セルに対する方程式と合わせ，流路領域内部における圧力方程式と同時に解かれる。

2.3.4 初期条件

修正ICE法による計算では、初期以前の条件に対する特別な計算を必要としなかった。すなわち、初期における管内流動状態を示す諸量を各セルに対して与えてやればよい。

本コードでは、伝熱管破断以前の状態について、特別な定常計算等は行わず、管内流動状態を示すのに必要な量 (P, H, u) をインプットデータとして与える。(与えることができる最大の点数は10点である。)

そして、伝熱管の両端の位置を含む任意の点で与えた諸量から、その点での計算に必要な初期流動状態量 (ρ, c^2, I, E) を水の状態式から計算する。更に、セル中心、或はセル端点での初期流動状態量は、インプット・データから既に求められている任意の点での値を線型内挿して求める。

2.3.5 圧力方程式の解法と諸量の計算

前項に記した様に流路領域内部での各セル中心に対する圧力方程式は

$$-P_{i-1}^{n+1} + \left(2 + \frac{1}{c_i^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2}\right) P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1} = \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} \cdot G_i \quad (2-28)$$

(i=3~N+1)

であり、境界でのそれは、

$$\left(\frac{1}{c_2^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2}\right) P_2^{n+1} - P_3^{n+1} = P_1^{n+1} + \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} \cdot G_2 \quad (2-38)$$

$$-P_{N+1}^{n+1} + \left(2 + \frac{1}{c_{N+2}^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2}\right) P_{N+2}^{n+1} = P_{N+3}^{n+1} + \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} \cdot G_{N+2} \quad (2-47)$$

であった。ここで、

$$K_j = \frac{1}{c_{j+1}^n} \cdot \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2} + 2 \quad (j=1, N+1)$$

$$D_1 = P_1^{n+1} + \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} G_2 \quad (2-48)$$

$$D_j = \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} G_{j+1} \quad (j=2, N)$$

$$D_{N+1} = P_{N+3}^{n+1} + \frac{\delta x^2}{\phi \phi \delta t^2 \rho M_{CM}} G_{N+2}$$

とし、更に、次の様に変数の置換えをすると

$$P_j \leftarrow P_{j+1} \quad (j=1, N+1)$$

圧力方程式は、最終的に次の様にマトリックスで示される。

$$\begin{pmatrix} K_1 - 1 & & & & & \\ -1 & K_2 - 1 & & & & \\ & -1 & K_3 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & K_{N-1} - 1 & \\ & & & & -1 & K_N - 1 \\ & & & & & -1 & K_{N+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1^{n+1} \\ P_2^{n+1} \\ \vdots \\ P_N^{n+1} \\ P_{N+1}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1^{n+1} \\ D_2^{n+1} \\ \vdots \\ D_N^{n+1} \\ D_{N+1}^{n+1} \end{pmatrix} \quad (2-49)$$

これは三項方程式と云われるもので、既存の方法を用いて解くことが出来る。解法の概要は次の通りである。

先ず、上のマトリックスをベクトル形で示すと、

$$A \cdot P = D$$

係数行列Aは、 $A = L \cdot U$ の形に一意に分解される。

三角化法により

$$L \cdot U \cdot P = D \quad \text{において}$$

$$L \cdot Z = D \text{ から前進代入で } Z \text{ を求め}$$

$$U \cdot P = Z \text{ から後進代入で } P \text{ を求める。}$$

尚、LとUは次の様になる。

$$L = \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ B_1 & 1 & & & & \\ & B_2 & 1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & B_{N-1} & 1 \\ & & & & & B_N & 1 \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} -1/B_1 & -1 & & & & \\ & -1/B_2 & -1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & -1 & \\ & & & & & -1/B_N & -1 \\ & & & & & & -1/B_{N+1} \end{pmatrix} \quad (2-50)$$

ここで

$$B_1 = -1/K_1, \quad B_2 = -1/(K_2 + B_1) \dots \dots \dots, \quad B_{N+1} = -1/(K_{N+1} - B_N)$$

である。

また、このようにして一次連立方程式から得られた P_j^{n+1} から

$$P_{j+1} \leftarrow P_j \quad (j=1, N+1)$$

と置きかえることによつて、 $(n+1)$ ステップ目のセル中心での圧力が計算される。

更に、他の流動状態量の計算は次の様に行われる。

(2-21) 式より、

$$\rho_i^{n+1} = (P_i^{n+1} - P_i) \cdot (\varphi M_{cm}) / c_i + \rho_i \quad (i=1, N+3) \quad (2-51)$$

(2-20) 式より

$$u_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \left[\left\{ \frac{\phi}{\delta x} (P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1}) \varphi M_{cm} + \frac{1-\phi}{\delta x} (P_i + P_{i+1}) \varphi M_{cm} \right. \right. \\ \left. \left. + R_{i+\frac{1}{2}} \right\} \delta t + (\rho u)_{i+\frac{1}{2}} \right] \times 2 / (\rho_i^{n+1} + \rho_{i+1}^{n+1}) \quad (2-52) \\ (i=2, N+2)$$

また、 E_i^{n+1} は次の様に求める。

$$(2-22) \text{ 式に, } E_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} = (E_{i-1}^{n+1} + E_i^{n+1}) / 2, E_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = (E_i^{n+1} + E_{i+1}^{n+1}) / 2$$

を代入して整理すると、

$$-\left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} E_{i-1}^{n+1} + \left[\rho_i^{n+1} - \left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} \{ (\rho u)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \} \right] E_i^{n+1} \\ + \left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} E_{i+1}^{n+1} = GH_i \quad (i=2 \sim N+1) \quad (2-53)$$

但し、

$$GH_i = (\rho E)_i + \frac{\delta t}{\delta x} \{ (Pu)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - (Pu)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \} (M_{cm} / A_j) \\ + \{ (\rho u)_i^{n+1} \varphi \cos \theta + Q_i \} \delta t$$

また、ヘッダ側境界近傍では、 $E_2^{n+1} = E_1^{n+1}$ であるから、(2-53) 式に相当する式は次のようになる。

$$\left[\rho_1^{n+1} - \left(\frac{\delta t}{\delta x}\right) \{ (\rho u)_{\frac{3}{2}}^{n+1} - \left(\frac{1}{2}\right) (\rho u)_{\frac{5}{2}}^{n+1} \} \right] E_2^{n+1} + \left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} (\rho u)_{\frac{5}{2}}^{n+1} E_3^{n+1} = GH_2 \quad (2-54)$$

また、破断点側境界では

$$E_{N+3}^{n+1} = H_{N+3}^{n+1} + \frac{1}{2} (u_{N+3}^{n+1})^2 / \varphi / A_j - (P_{N+3}^{n+1} / \rho_{N+3}^{n+1}) M_{cm} / A_j \\ H_{N+2}^{n+1} = E_{N+2}^{n+1} - \frac{1}{2} (u_{N+2}^{n+1})^2 / \varphi / A_j + (P_{N+2}^{n+1} / \rho_{N+2}^{n+1}) M_{cm} / A_j$$

であり, $H_{N+3}^{n+1} = H_{N+2}^{n+1}$ の境界条件より

$$E_{N+3}^{n+1} = E_{N+2}^{n+1} + \frac{1}{2} \{ (u_{N+3}^{n+1})^2 - (u_{N+2}^{n+1})^2 \} / \vartheta / A_J - (P_{N+3}^{n+1} / \rho_{N+3}^{n+1} - P_{N+2}^{n+1} / \rho_{N+2}^{n+1}) M_{CM} / A_J$$

これを, (2-53) 式で $i = N+2$ の場合の式に代入すると,

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{1}{2}\right) \frac{\delta t}{\delta x} (\rho u)_{(N+2)}^{n+1} - \frac{1}{2} E_{(N+2)}^{n+1} + \left[\rho_{N+2}^{n+1} - \left(\frac{\delta t}{\delta x}\right) \left\{ \left(\frac{1}{2}\right) (\rho u)_{(N+2)}^{n+1} - (\rho u)_{(N+2)}^{n+1} \frac{1}{2} \right\} \right] E_{N+2}^{n+1} \\ & = GH_{N+2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta t}{\delta x}\right) (\rho u)_{(N+2)}^{n+1} \left[(P_{N+3}^{n+1} / \rho_{N+3}^{n+1} - P_{N+2}^{n+1} / \rho_{N+2}^{n+1}) M_{CM} / A_J \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{2} \{ (u_{N+3}^{n+1})^2 - (u_{N+2}^{n+1})^2 \} / \vartheta / A_J \right] \end{aligned} \quad (2-55)$$

となる。(2-53)(2-54)(2-55) 式は E_i^{n+1} を未知数とする連立1次元方程式を構成し, 三項方程式と呼ばれる。これは既存の科学用サブルーチン・ライブラリー (SSL) を用いて解くことができる。

更に, 内部エネルギー I_i , エンタルピー H_i は, それぞれ

$$\begin{aligned} I_i &= E_i - \frac{1}{2} (u_i)^2 / (\vartheta \cdot A_J) \quad \text{但し, } I_1, I_{N+3} \text{ は計算しない} \\ H_i &= I_i + P_i M_{CM} / \rho_i / A_J \quad \text{但し, } H_1, H_{N+3} \text{ は計算しない} \end{aligned} \quad (2-56)$$

から計算できる。

水噴出率 q は

$$q = A \rho_N |u_N| \quad (2-57)$$

である。ここで, 伝熱管の流路断面積は, $A = \pi D^2 / 4$ である。

但し, 本節の式中 n ステップ目の値を示す頭標字 n については, 式の煩雑さを避けるために省いた。

また, 本節の記述は, 破断点上流側伝熱管部での計算を念頭においたものであるが, 境界条件, 添字を変えることによって, 他の流路部分の計算も同様に行うことができる。

2.3.6 伝熱管部での解法手順

ここでは, 境界部を除いた伝熱管部での計算手順を述べる。詳細は第3章に示す。

- 1) 伝熱管各セルの音速の2乗の計算 $c_1 \sim c_{N+3}$
- 2) " Re 数の計算 $Re_1 \sim Re_{N+3}$
- 3) " 摩擦圧損係数の計算 $f_1 \sim f_{N+3}$
- 4) 境界での圧力 P_1, P_{N+3} の計算
- 5) $\rho_{i+1/2}$ の計算 $i = 1, N+2$

- 6) R_{i+2} の計算 $i=1, N+2$
- 7) G_i の計算 $i=2, N+2$
- 8) K_i, D_i の計算 $i=1, N+1$
- 9) P_i^{n+1} の計算 $i=2, N+2$
- 10) ρ_i^{n+1} の計算 $i=2, N+2$
- 11) u_{i+2}^{n+1} の計算 $i=2, N+2$
- 12) E_i, I_i, H_i の計算 $i=2, N+2$
- 13) $\rho_{\frac{1}{2}}, u_{\frac{1}{2}}, u_{(N+3)+\frac{1}{2}}$ の計算
- 14) H_i, H_N の計算

また、摩擦圧損係数の計算は配管部における計算と本質的に同じである（2.2.2項参照）
 ので、ここでは記述しない。

2.4 配管部と伝熱管部の計算の結合

水-蒸気系の配管部に対してはボリューム・ジャンクションモデルを適用し、伝熱管部に対しては修正ICE法を適用している。性格の異なるモデルをどのように結合して計算するかはシミュレーション結果に大きな影響を与える。このコードでは、結合点を蒸気発生器のヘッダと定めた。すなわち、2.3.3項で述べたように伝熱管部の計算ではヘッダを境界とみなし、一方、配管部ではヘッダに相当するボリュームの諸量を計算する際に、健全伝熱管群と破断伝熱管群をそれぞれ1つのジャンクションとみなした。(ここでは、これを伝熱管ジャンクションと呼ぶことにする。これに対して、普通の配管を通常ジャンクションと呼ぶ。図2.7参照)

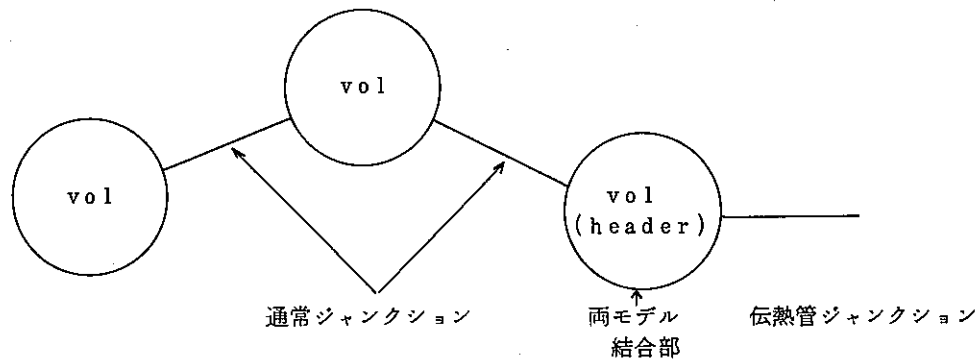


図 2.6 配管部と伝熱管部の計算の結合

以下、その計算手順を示す。

- 1) n タイムステップにおけるジャンクション (伝熱管ジャンクションの量を含む) をもとに $(n+1)$ タイムステップにおけるボリュームの諸量 (結合部であるヘッダのボリュームを含む) の諸量を求める。
- 2) n タイムステップでの伝熱管の諸量に基づいて、 $(n+1)$ タイムステップでのヘッダ・ボリュームの状態を境界条件として、 $(n+1)$ ステップにおける伝熱管の諸量を求める。
- 3) 両隣のボリュームの諸量をもとに $(n+1)$ ステップにおける通常ジャンクションの諸量を求める。

3. プログラム

本章では、本コードのプログラム構成を示すと同時に、主要なサブルーチンのフローチャートを示すことにより計算プロセスを記述する。

3.1 プログラム構成

本コードは、JIS-FORTRAN(FORTRAN-W)で書かれた、約2,800ステップの長さをもつプログラムである。コードは33個のサブプログラムから構成され、その必要記憶容量は約120KBである。

本コードの構成を図3.1に示す。

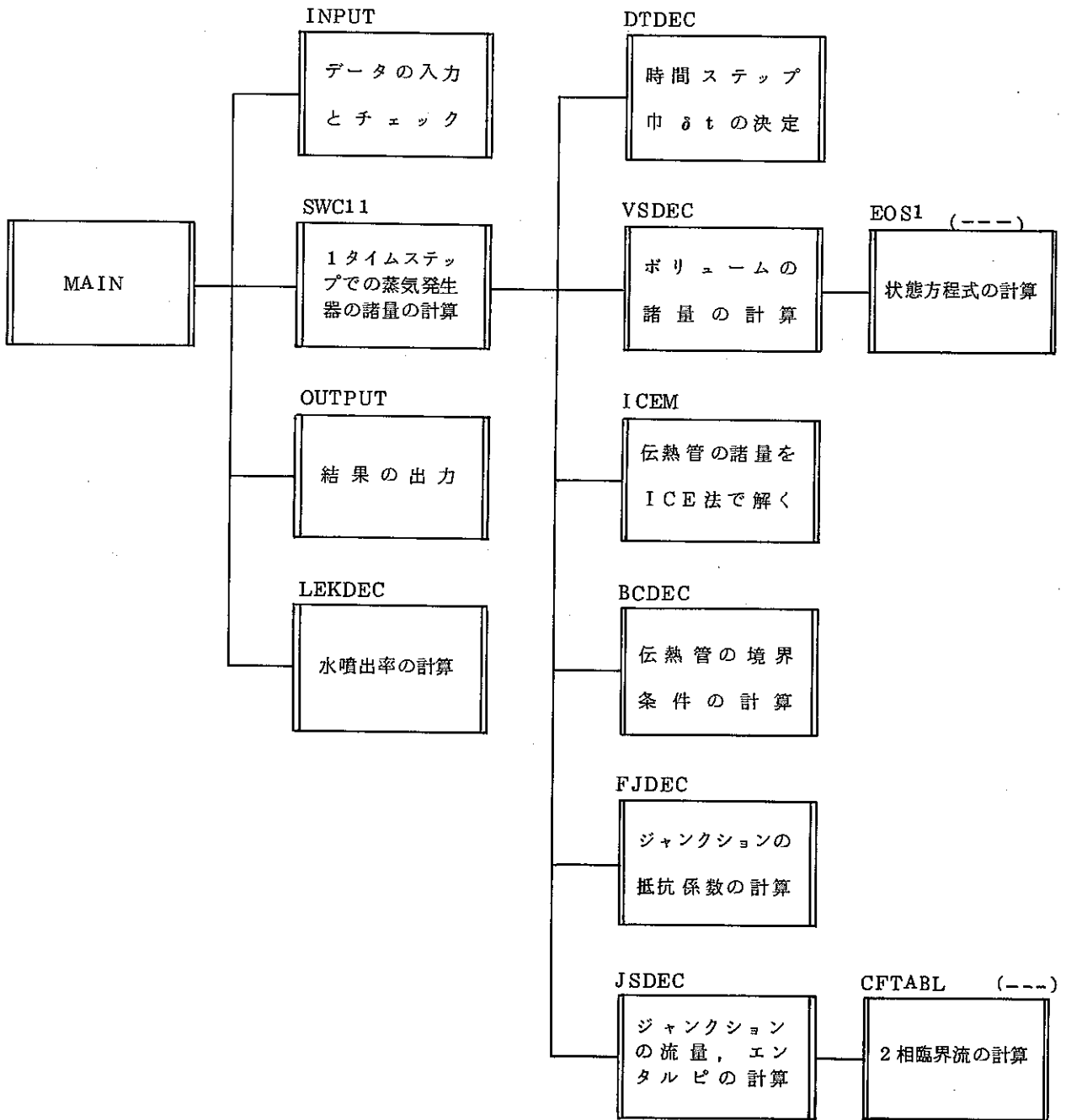
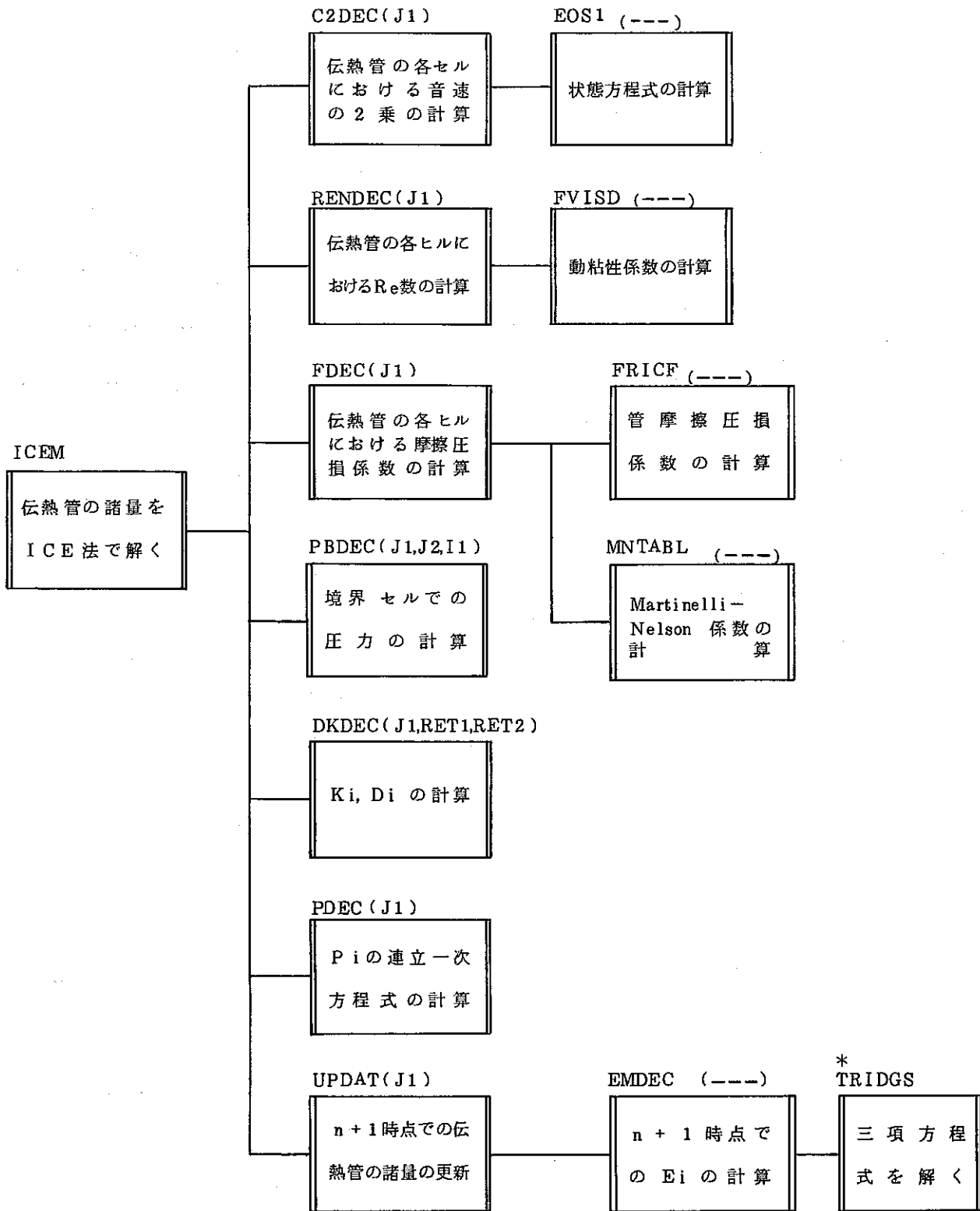


図 3.1 プログラム構成



* TRIDGSはFACOM-SSLに収録されているもの

図 3.1 プログラム構成 (続き)

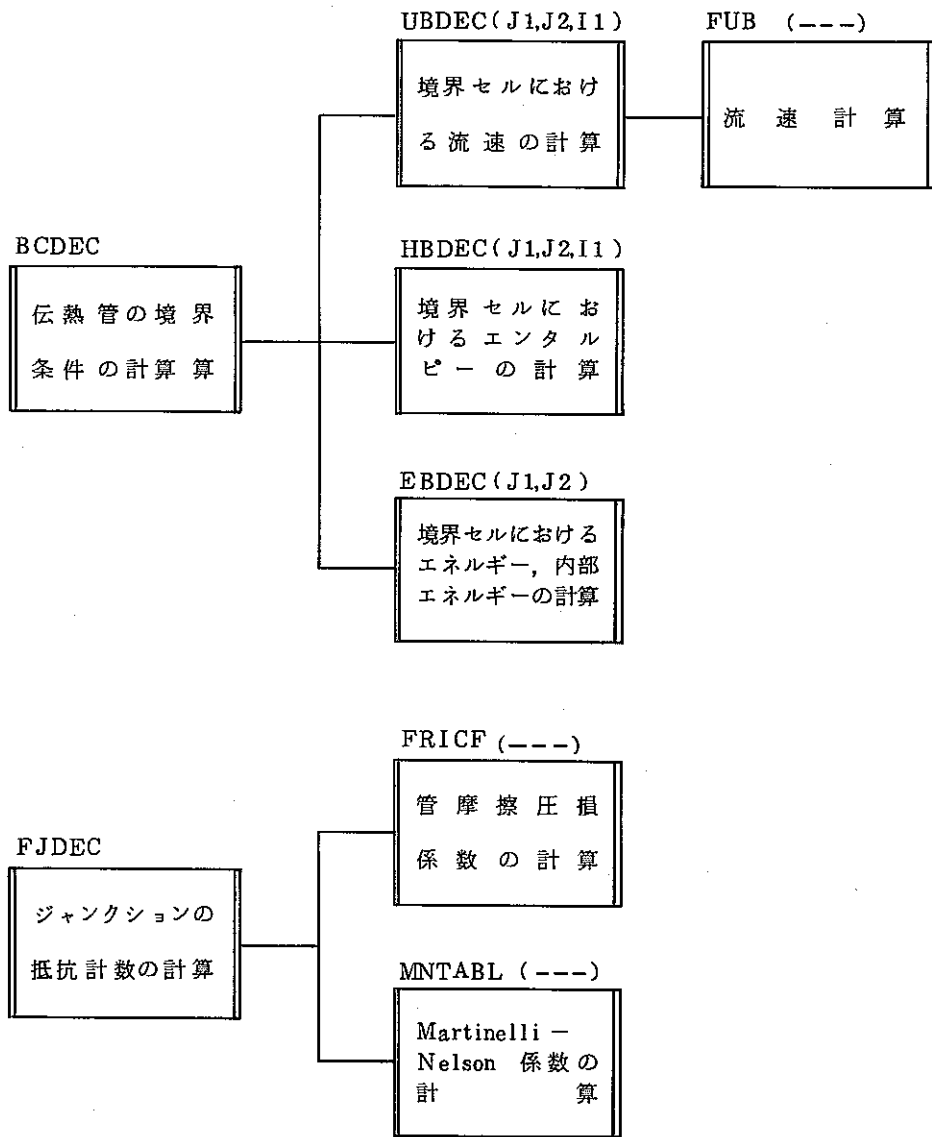
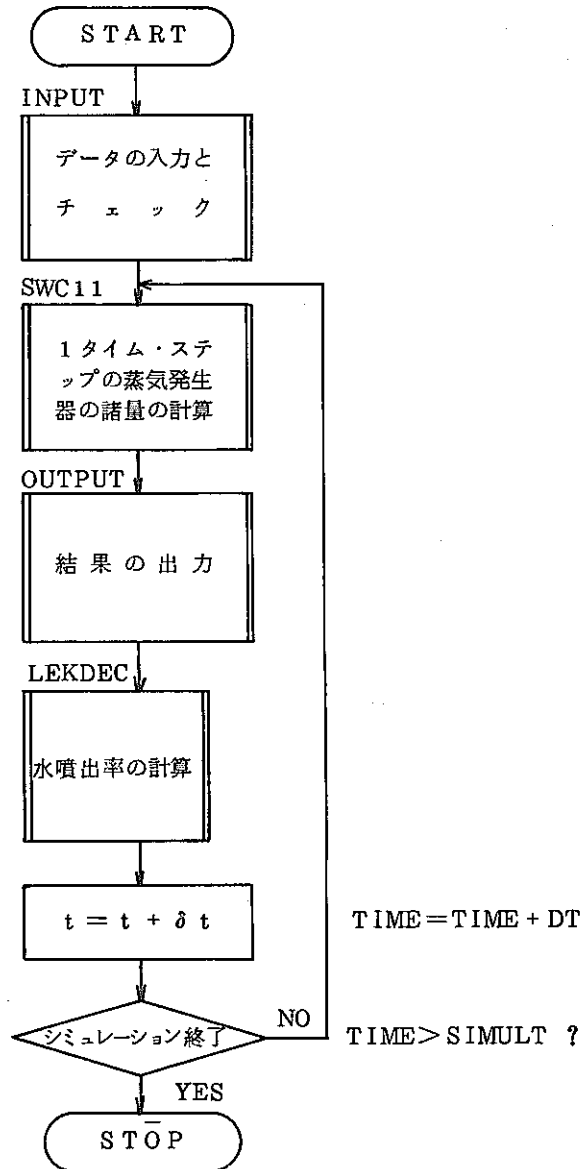
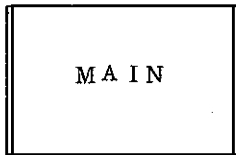


図 3.1 プログラム構成 (続き)

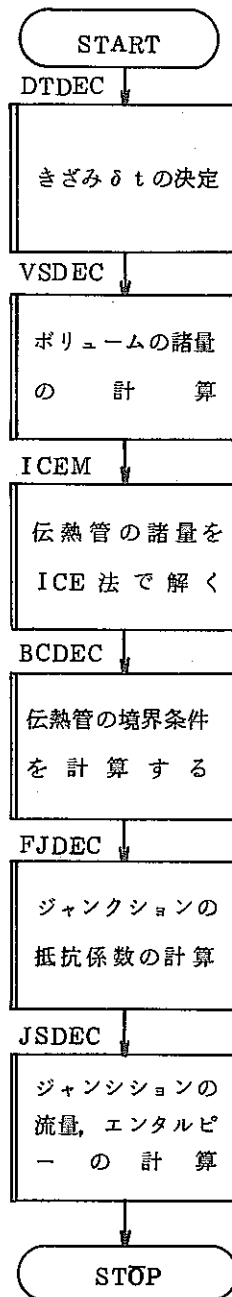
3.2 主なサブルーチンプログラムのフローチャート

本コードの計算プロセスを示すために、主なサブルーチンプログラムのフローチャートとその説明を記述する。



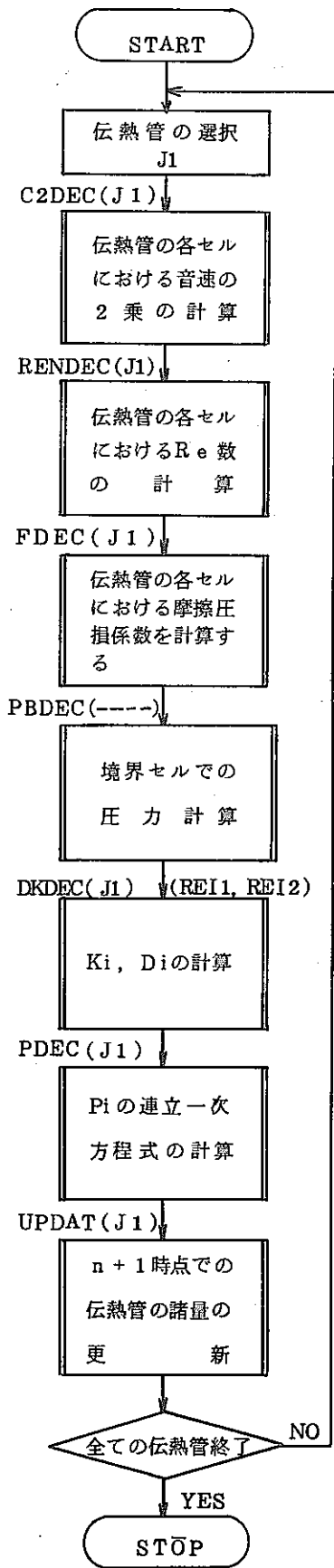
SWC11

蒸気発生器の
諸量を計算する



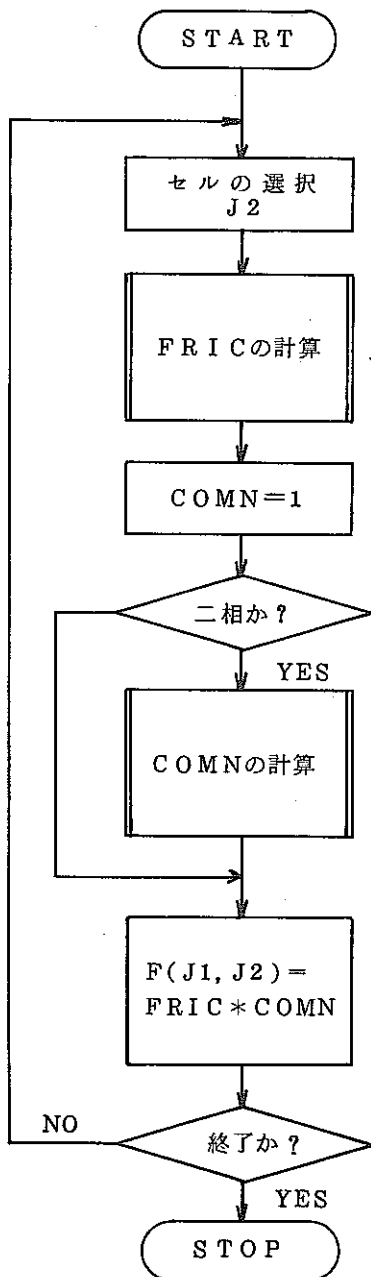
ICEM

伝熱管の諸量を
ICE 法で解く



FDEC(J1)

伝熱管の各セルにおける摩擦圧損係数の計算



$J2 = 1 \sim N$

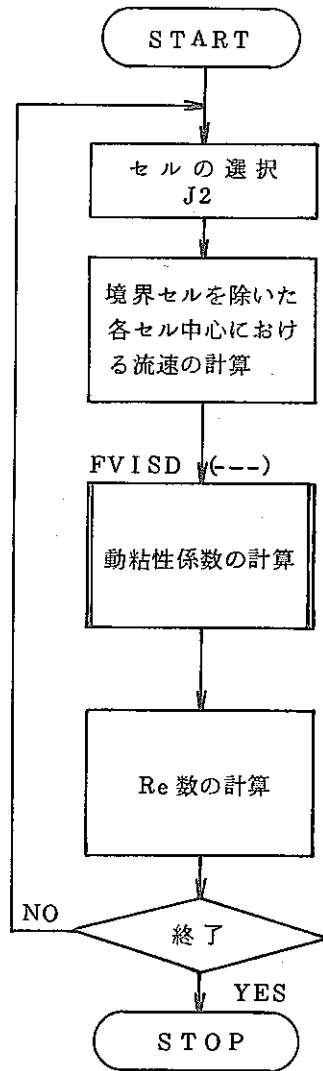
管摩擦圧損係数（ヘリカルコイル圧力損失増倍係数も含む）の計算（2.2.2項参照）
（POPAIのサブルーチンプログラムを借用）

圧力、クオリティの関数としてテーブル化されて与えられているMartinelli-Nelson係数から内外挿して、2相流摩擦圧損増倍係数を計算する。
（POPAIのサブルーチンプログラムを借用）

$J2 = N$?

RENDEC(J1)

伝熱管各セルにおけるRe数の計算



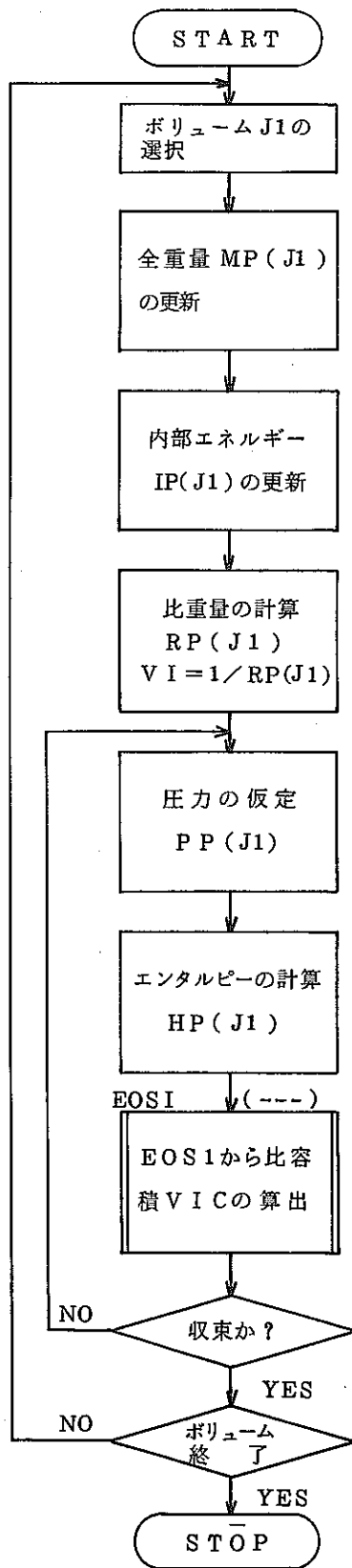
$J2 = 1 \sim N$

圧力、温度、クオリティの関数として、テーブル化されて与えられている水の粘性係数より、内外挿して計算する。
(POPAIのサブルーチンプログラムをそのまま借用)

$J2 = N$ か ?

VSDEC

ポリュームの諸量の計算



$J1 = 1 \sim VMAX - 1,$

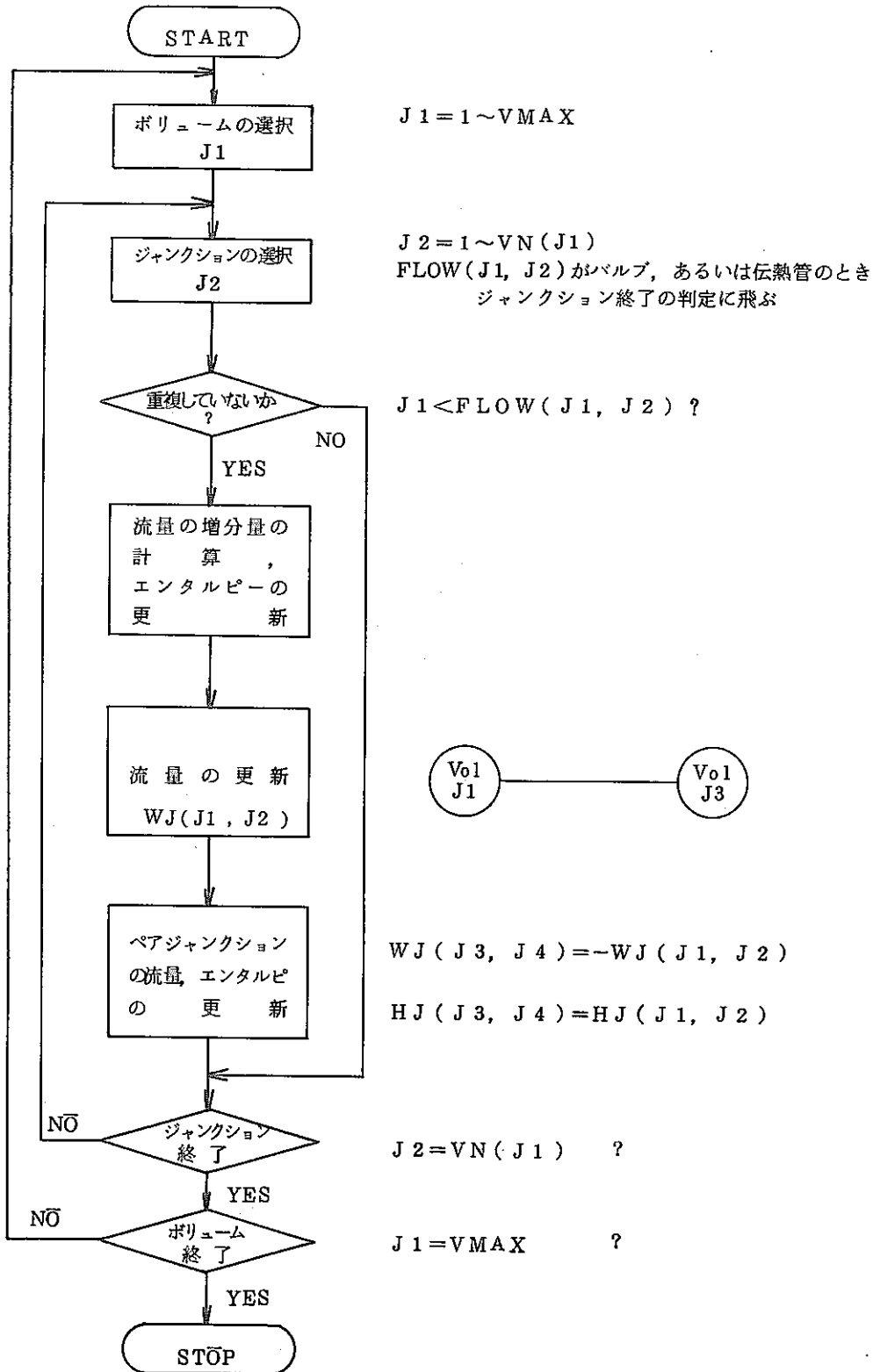
$$HP(J1) = IP(J1) / MP(J1) + PP(J1) * MCM * VI / AJ$$

$$ABS(VI - VIC) / VI \leq EPSP \text{か?}$$

$J1 = VMAX - 1$ か?

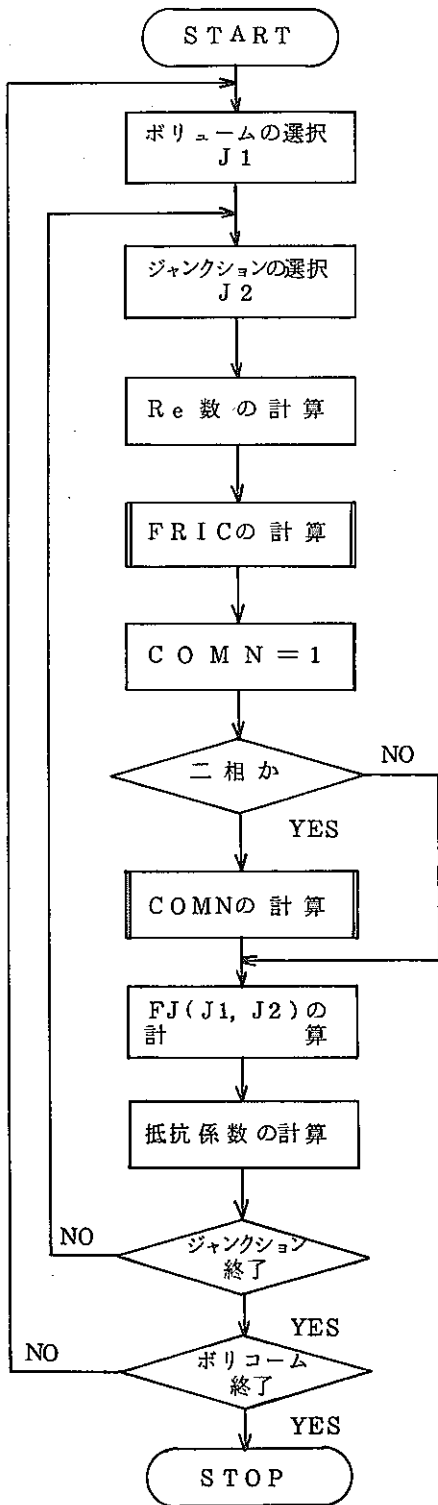
JSDEC

ジャンクションの
諸量の計算



FJDEC

ボリューム J1
における摩擦圧
損係数の計算



J1 = 1 ~ VMAX

J2 = 1 ~ VN(J1)

相手先ボリューム FLOW(J1, J2) がバルブ, 伝熱管の場合
ジャンクション終了の判定に飛ぶ

J2 = VN(J1) ?

J1 = VMAX ?

3.3 使用計算機

本コードはFACOM-230/58及びCDC-6600を使用して実行された実績をもっている。他の機種を用いる場合、特別なコンバージョンは必要ないが、2章で述べたエネルギーの三項方程式を解く部分で、各機種で登録されているSSLの中から適切なものを選ぶ必要がある。(CDC-6600を用いる場合、三項方程式解法部分で、マトリックスの配列を若干変える必要があった。)

4. プログラム機能の制限と限界

ここでは、本コードの使用に際し、使用者が知っておくべきであると考えられる、本コードの機能の制限と限界について記述する。これらは、解析モデル設定時に生ずるもの、物理モデル設定時に生ずるもの、数値計算上生ずるもの、等考えられるが、まとめて表 4.1 に示す。

表 4.1 SWAC-11 の機能の制限と限界

- (1) 水系隔離弁の弁閉時刻は、解析開始時刻と同時であり、弁閉時間は瞬時である。従って、伝熱管破断時刻から隔離弁の弁閉までの時間遅れは考慮できない。また、有限な弁作動時間も考慮できない。
- (2) 水系ブロー弁の弁開時間は瞬時である。従ってブロー弁弁開に要する有限時間は考慮できない。
- (3) 拡大・収縮・分岐・閉塞端を持つ系に対して、修正 I C E 法を適用した計算は行えない。
- (4) 伝熱管部におけるナトリウムから水への熱の移動は、SG 総伝熱量を伝熱面積で割った値（平均値）であり、且つ、一定としてしか扱うことができない。
- (5) 伝熱管破断はギロチン破断を模擬し、破断口拡大を考慮することはできない。
- (6) 仮想セルの大きさは、伝熱管部分割巾 Δx と等しいので、 Δx をむやみに大きくすると、破断点近傍の圧力分布が実際の現象と異ってしまう。
- (7) ボリューム数の最大値は 11 個、伝熱管部分割数の最大値は 100 個である。
- (8) 伝熱管部の分割数は最低 10 個である。
- (9) 本コードでは伝熱管破断前の流動状態を計算する機能を有していないため、初期値は伝熱管各点の諸量をインプット・データとして与える。伝熱管部の場合、その点数の最大値は 10 である。従って、伝熱管内における諸量の空間変化の特徴を踏まえた与え方が必要である。

5. インプット・アウトプット・データのフォーマット

本章では、本コードのインプット・データの作成要領及びそのフォーマットとアウトプット・データの説明を記述する。

5.1 インプット・フォーマット

インプット・データの内容とその作成要領を表 5.1 に示す。

表 5.1 インプット・データフォーマット(1)

カード番号	変数	内 容	次 元	FORMAT	備 考
1) タイトルカード (1枚)					
1	TITLE(I)	タイトルおよびアウトプットフォーマット	[———]	20A4	注①参照
2) 計算条件カード (6枚)					
2	REACTN	反応器番号	[———]	3I3	=1:EV, =2:SH, =3:RH 最大NTUBE本まで
	NBRK	破断管本数	[———]		
	NMESH	メッシュ数	[———]		
	LBRK	上部ヘッダから破断点までの伝熱管長さ	[m]	2F10.0	
	SIMULT	シュミレーション時間	[sec]		
3	*TIMEC1	モデル切り換え時刻	[sec]	4F10.0	注②参照 (=SIMULT) 注③参照
	TDTC1	δt 切り換え時刻(1)	[sec]		
	TDTC2	同 上 (2)	[sec]		
	TDTC3	同 上 (3)	[sec]		
4	DT1	きざみ時間(1)	[sec]	4F10.0	注③参照
	DT2	同 上 (2)	[sec]		
	DT3	同 上 (3)	[sec]		
	DT4	同 上 (4)	[sec]		
5	LAMDA	体積粘性係数	[kg·s/m ²]	4F10.0	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻² の値 10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻² の値
	MIU	粘性係数	[kg·s/m ²]		

表 5.1 インプット・データフォーマット(2)

カード番号	変数	内 容	次 元	FORMAT	備 考
6	T A U	質量拡散係数	[m^2/sec]	4 F 1 0.0	0.を与える
	D T	初期きざみ時間	[sec]		$\sim 10^{-6}$ の値
	E P S	δt の収束判定用定数	[—]		0.01 以下
	* E P S P	配管部圧力収束判定用定数	[—]		0.01 以下 [= 0.01]
	P S I	重み係数	[—]		0.~1. = 0. : 解法は完全陽的, = 1.0 : 陰 的
7	F A I	同 上	[—]	4 F 1 0.0	0.~1. 同 上
	* C	圧力収束計算時の係数	[m^2/sec^2]		$10^5 \sim 10^6$ [= 10^5]
	D T M A X	δt_{max}	[sec]		1.0×10^{-1}
	D T M I N	δt_{min}	[sec]		1.0×10^{-6}
	L A M D A M	λ_{max}	[$kg \cdot s/m^2$]		10^2 を与える
3) 配管部カード (1 枚 + VMAX組)					
8	* V M A X	配管系のボリューム数	[—]	I 3	注④参照 [= 3]
	* P E X P	ブロータンク圧力	[kg/cm^2]	F 1 0.0	ブロータンクを大気と見なしているの [= 1.0]
9 { 8.+Y VMAX組	* Q P (J 1)	ボリューム - J 1 への熱入力	[kcal/sec]	4 F 1 0.0	[= 0.0]
	* L P (J 1)	" の長さ	[m]		[= 1.0]
	* D P (J 1)	" の水力直径	[m]		[= 1.0]
	* Z P (J 1)	" の中心高さ	[m]		[= 1.0]

表 5.1 インプット・データフォーマット(3)

カード番号	変数	内容	次元	FORMAT	備考
VN枚	* VN(J1)	ボリュームJ1との接続ボリューム数	[—]	I 3	注⑤参照 [VN(1)=2, VN(2)=3 VN(3)=1]
	* FLOW(J1, J2)	接続ボリューム番号	[—]	I 3	注⑥参照
	* AKF(J1, J2)	ボリュームJ1から接続ボリュームの方向に流れる時の拡大・収縮・曲り等の流動変化による圧損係数	[—]	2 F 1 0.0	ボリュームJ1で代表される流速基準の係数である。 [= 1.0]
	* ACHOK(J1, J2)	ボリュームJ1から接続ボリュームの方向に流れる時の流路最小断面積	[m ²]		
ただし、 $Y = \sum_{J1=1}^{VMAX} (1 + VN(J1))$					
4) 伝熱管部カード(3枚)					
9+Y	NTUBE	伝熱管総本数	[—]	2 I 3	= 0 : コイル状由管 = 1 : 直管
	ITUBE	管の種類	[—]		
10+Y	QT	総伝熱量	[MW]	8 F 1 0.0	鉛直方向からの角度
	AHTT	総伝熱面積	[m ²]		
	PEXB	破断点の伝熱管外部圧力	[kg / cm ²]		
	THETA	伝熱管傾斜角度	[rad.]		
	ROUGH	管壁の不規則突起の平均値	[m]		

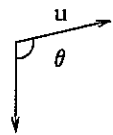


表 5.1 インプット・データフォーマット(4)

カード番号	変数	内 容	次 元	FORMAT	備 考	
11+Y	DCOIL	コイル径	[m]	5 F 1 0.0	この圧損係数は現在使用していない。0でない実数を入力のこと。	
	LHEX	伝熱管長さ	[m]			
	DHEX	" 内径	[m]			
	DOHEX	伝熱管外径	[m]			
	KLOSH1	ヘッダ部圧損係数	(ヘッダ→管)			[—]
	KLOSH2		(管→ヘッダ)			[—]
	KLOSB1	破断点部圧損係数	(管外→管)			[—]
	KLOSB2		(管→管外)			[—]
5) 伝熱管初期値カード(1+NY枚)						
12+Y	NY	任意の点でデータを与えられるが、その点数	[—]	I 3	伝熱管内の諸量の分布を内挿によってよく表現できるように、点の位置と数を決めること。	
13+Y	Y(I)	上流ヘッダから各ポイントまでの距離	[m]	4 F 1 0.0		
12+Y+NY	PY(I)	その点における圧力	[kg/cm ²]			
NY枚	HY(I)	" エンタルピー	[kcal/kg]			
	UY(I)	" 流速	[m/sec]			
6) 配管部初期値カード(Y枚)						
13+Y+NY	*HP(J1)	ボリュームJ1でのエンタルピー	[kcal/kg]	2 F 1 0.0	[HP(1)=入口ヘッダでのエンタルピー HP(2)=出口ヘッダでのエンタルピー HP(3)=600]	

表 5.1 インプット・データフォーマット(5)

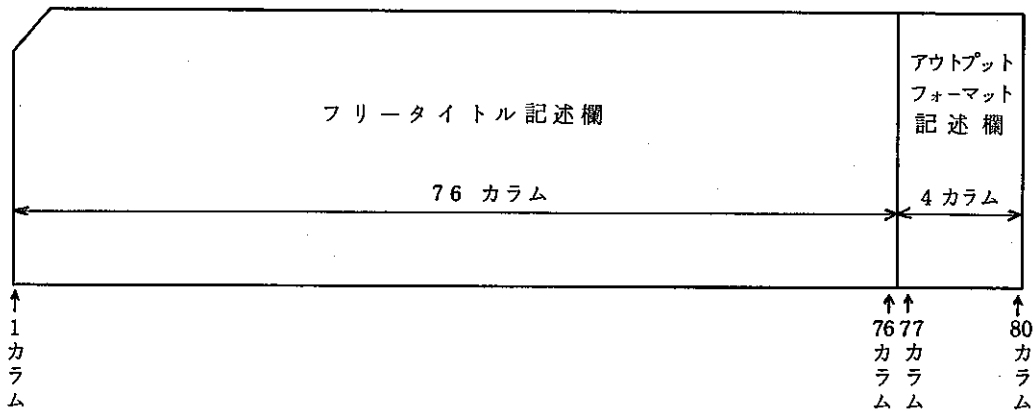
カード番号	変数	内容	次元	FORMAT	備考
12+2Y+NY	*PP(J1)	ボリュームJ1での圧力	[kg/cm ²]	F10.0	[PP(1)=入口ヘッダでの圧力 PP(2)=出口ヘッダでの圧力 PP(3)=1.0] ボリュームJ1から出てゆく流量を正とする。 [=0.0]
VMAX組 VN(J1)枚	*WJ(J1, J2)	ボリュームJ1に属するジャンクジョンにおける流量	[kg/s]		
7) アウトプットおよびデバッグ用カード					
13+2Y+NY	MNOI	デバッグしようと思うセル群のうち番号の最小のもの	[—]	2 I 3	注⑦参照
	MNOF	デバッグしようと思う " " 最大のもの	[—]		
14+2Y+NY	NPRT	出力サイクル(計算スラップの)数	[—]	I 3	=1:毎回, =2:1回各に, ……
15+2Y+NY	NPRTI	デバッグしようと思うスラップの最初の数	" " 最後の数 " " 最初の数 " " 最後の数 " " 最初の数 " " 最後の数 " " 最初の数 " " 最後の数	8 I 5	注⑧参照
	NPRTF				
	NW1 I				
	NW1 F				
	NW2 L				
	NW2 F				
	NW3 I				
	NW3 F				
但し, *印の付いた変数は配管系の計算部に関するもので, この計算部が未完成の現状では, これにはダミー値([] 内の値)をインプットしてもよい。					

注① タイトルカードの説明

INPUTルーチンでのPRINT FORMAT(LP or MT)の選択

入力データが次の条件の時, それぞれのPRINT FORMAT(LP or MT)で出力結果をOUTPUTする。

1) 入力データのタイトルカードFORMAT



2) アウトプットフォーマット記述欄記入法

○アウトプットフォーマットがLP(ラインプリンタ)の場合

T = LP
 ↑ ↑
 77 80
 カ カ
 ラ ラ
 ム ム

○アウトプットフォーマットがMT(磁気テープ)の場合

T = MT
 ↑ ↑
 77 80
 カ カ
 ラ ラ
 ム ム

○アウトプットフォーマットが指定無し, 又は上記2例以外の場合プログラムは,
 ERR-18. SELECTION OF PRINT FORMAT TYPE(LP
 OR MT) ERR のメッセージを出力してストップする。

注② モデルの切り換えについて

TIMEC1 以前は, 伝熱管部のみをICEモデルで解き, その後は配管部を含めてポリ
 ューム・ジャンクションモデルも結合して解く。

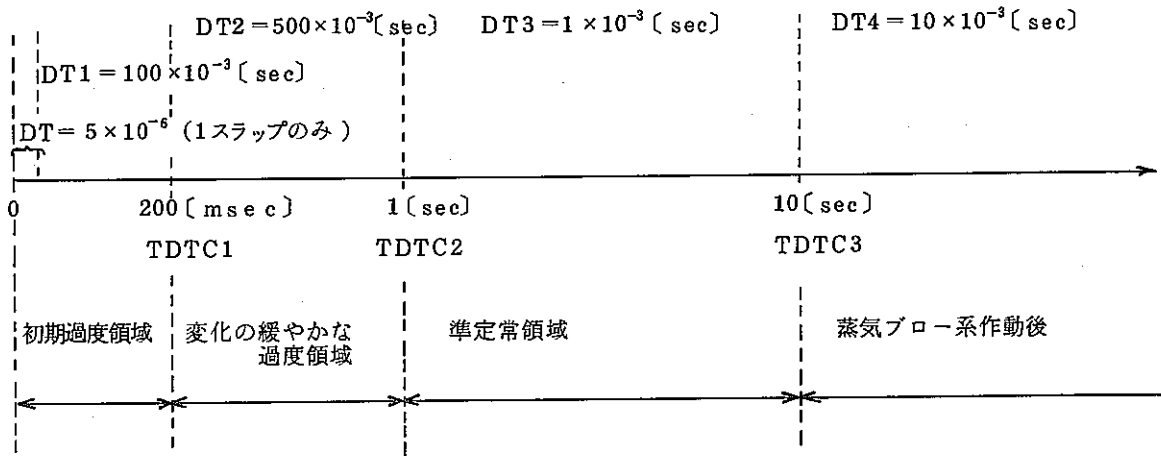
TIMEC1 をシュミレーション時間(SIMULT)と等しくすることにより, 伝熱管部

のみの計算が可能である。

また、TIMEC1を水系隔離弁の全閉時刻、蒸気ブロー弁の全閉時刻とすることにより、長時間の水系挙動のシミュレーションが可能である。

注③ きざみ時間 (δt) の変更

計算時間を短くするためのものである。過渡変化の激しい初期には、小さな δt を与え、順次大きくしていくことも可能。例えば、

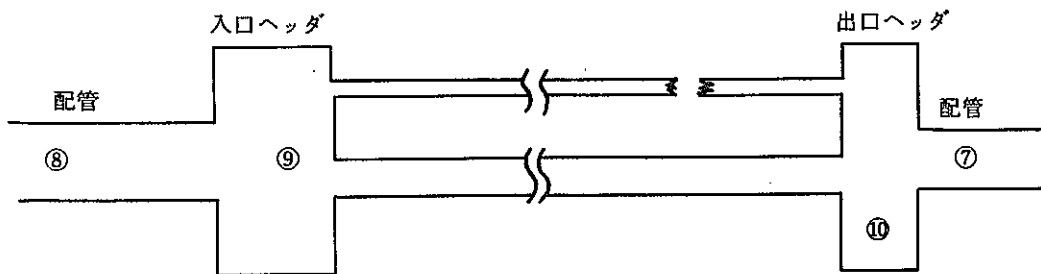


注④ ボリューム番号の割当て

- | | |
|--------------|-------------------------------|
| 1 ~ VMAX - 3 | 通常配管ボリューム |
| VMAX - 2 | 入口ヘッダ |
| VMAX - 1 | 出口ヘッダ |
| VMAX | ブロータンク (= 大気) |
| VMAX + 1 | 伝熱管部 (ヘッダ部に出す FLOW を定める時のみ必要) |

注⑤ 接続ボリューム数 VN (J I)

ヘッダ部の場合、接続する通常配管ボリューム数に、破断伝熱管群と健全伝熱管群を夫々1つのボリュームと見なし2を加える。例えば

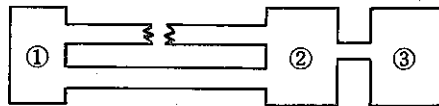


番号⑨のボリュームの接続ボリューム数

$$VN(9) = 3$$

である。

また、[]で示したダミー値は次のモデルによる。



注⑥ 接続ボリューム番号 $FLOW(J1, J2)$

ボリューム3から、ボリューム4, 7へ流れ出るとすると

$$FLOW(3, 1) = 4$$

$$FLOW(3, 2) = 7$$

$$VN(3) = 2$$

となる。但し、ヘッダの場合、伝熱管群は破断、健全管とも $VMAX + 1$ で示す。

上図を例にとると、 $VMAX = 3$ であるから

$$FLOW(1, 1) = 4$$

$$FLOW(2, 1) = 3$$

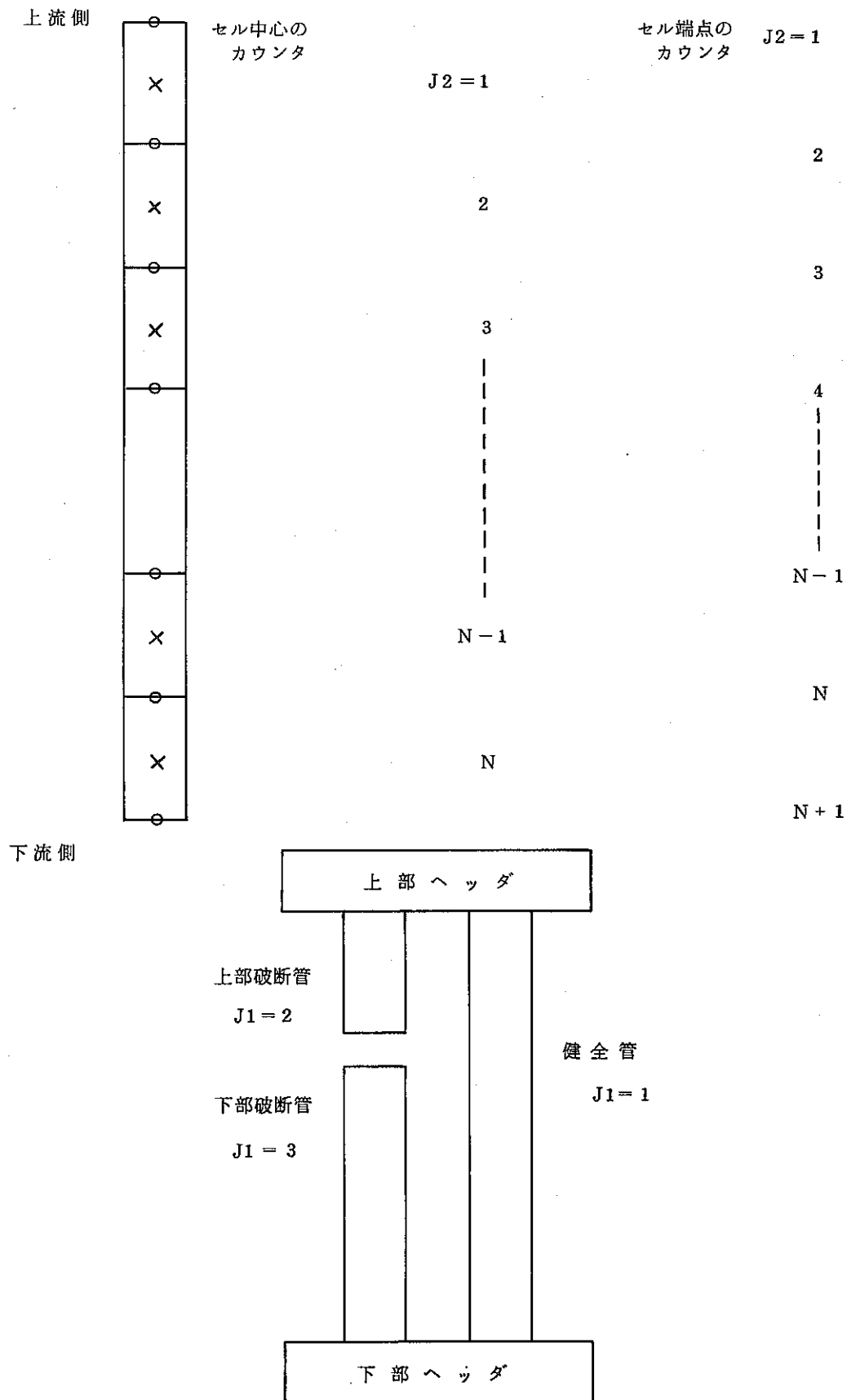
$$FLOW(1, 2) = 4$$

$$FLOW(2, 2) = 4$$

$$FLOW(2, 3) = 4$$

となる。

注⑦ 伝熱管における諸量の定義



注⑧ デバック文の使用方法

以下のデバック変数によって任意の時間きざみに主な変数をプリントアウトすることができる。

(1) NPRT

時間きざみNPRT回毎に伝熱管の諸量(流速, 圧力, エンタルピー, 比重量, 温度, ボイド率, 音速の2乗), 配管部のボリュームの諸量(重量, 内部エネルギー, 圧力, エンタルピー, 比重量, 温度, ボイド率, 重量流量, エンタルピー, 摩擦圧損係数, 抵抗係数), 流出速度, リーク量をプリントアウトする。

(2) NPRTI, NPRTF

時間きざみの回数がNPRTI~NPRTFの間にあるとき(1)の諸量, U_{max} , Z_1 , Z_4 , λ , μ , τ , δt をプリントアウトする。

(3) NW1I, NW1F

時間きざみの回数がNW1I~NW1Fの間にあるとき K , D , Z , B , P (PDECルーチン), R , U , RI , G (DKDECルーチン)の諸量をプリントアウトする。

(4) NW2I, NW2F

時間きざみの回数がNW2I~NW2Fの間にあるとき REN , F , C_2 , I の諸量を打出す。(RENDEC, FDEC, C2DECルーチルの諸量)

(5) NW3I, NW3F

時間きざみの回数がNW3I~NW3Fの間にあるとき次の諸量を打出す。

I_1 , VI , VIC (VSDECルーチン)

I_1 : 圧力算出の収束回数

但し, NPRT, NPRTI, NPRTF, NW1I, NW1F, NW2I, NW2F, NW3I, NW3F等のデバック変数は, インプット・データとして任意に与えることができる。

もし, デバックする必要がない場合には, 関係するデバック変数を $\text{---}I > \text{---}F$ となるようインプットする。例えば,

$NPRTI = 1$, $NPRTF = 0$

INPUT ルーチンでの INPUT DATA のチェックの方法

入力データが次の条件を満足しないときは, 入力変数名をプリントして計算をストップする。

1) $1 \geq PSI > 0$

2) $1 \geq FAI > 0$

- 3) $1 \geq EPS > 0$
- 4) $1 \geq ERSP > 0$
- 5) $LAMDAM > LAMDA$
- 6) $NTUBE > NBRK$
- 7) $ITUBE = 0 \text{ OR } 1$
- 8) $3 \geq VN(J1) \geq 1$
- 9) $13 \geq VMAX$
- 10) $QPU \geq QP(J1) \geq QPD$
- 11) $LPU \geq LP(J1) \geq LPD$
- 12) $DPU \geq DP(J1) \geq DPD$
- 13) $ZPU \geq ZP(J1) \geq ZPD$
- 14) $VMAX + 2 \geq FLOW(J1, J2) \geq 1$
- 15) $Y(1) = 0 \text{ AND } Y(NY) = LHEX$
- 16) $PYU \geq PY(II) \geq PYD, PYU \geq PP(J1) \geq PYD$
- 17) $HYU \geq HY(II) \geq HYD, HYU \geq HP(J1) \geq HYD$
- 18) $UYU \geq UY(II) > 0$
- 19) $WJU \geq WJ(J1, J2) \geq WJD$

但し、QPU, QPD, LPU, LPD, DPU, DPD, ZPU, ZPD, DYU, DYD, HYU, HYD, UYU, WJU, WJD等の上下限値はINPUTルーチンの中に適当な値を代入文の形で入れて下さい。

例, QPU = 100.0

QPD = 0.0

現状は次の通りである。

QPD =	0.0
QPU =	0.0
LPD =	0.0
LPU =	100.0
DPD =	0.0
DPU =	10.0
ZPD =	0.0
ZPU =	100.0
PYD =	1.0
PYU =	300.0
HYD =	10.0
HYU =	1000.0
UYU =	500.0
WJD =	-100.0
WJU =	100.0

5.2 アウトプット・フォーマット

○ ラインプリンタに出力される変数の説明

THIS IS A FORTRAN PROGRAM OF SWAC SERIES NO 11
MADE BY FACOM HITAC LTD AND PNC — (タイトル) —

** PARAMETER PRINT ** (パラメータの印刷)

REACTN 反応器番号 [-]	NBRK 破断管本数 [-]	LBRK 上部ヘッダか らの破断位置 [m]	SIMULT シミュレー ション時間 [sec]	NMESH メッシュ数 [-]	MBRKU 上部破断管 のメッシュ数 [-]	MBRKD 下部破断管 のメッシュ数 [-]
AJ 熱の仕事当量 [kg m / kcal]	GRAVC 重力の換算係数 [kg m / sec ² / kgw]	GRAV 重力の加速度 [m / sec ²]	MCM 面積の換算係数 [cm ² / m ²]			
LAMBDA 体積粘性係数 [kg · s / m ²]	MIU 粘性係数 [kg · s / m ²]	TAU 拡散係数 [-]	DT きざみ時間 [sec]	DX きざみ幅 [m]	EPS δ t の収束 判定用定数 [-]	EPSP 圧力の収束 判定用定数 [-]
PSI 重み係数 [-]	FAI 重み係数 [-]	C 圧力収束計 算時の係数 [-]	DTMAX δ t _{max} [sec]	DTMIN δ t _{min} [sec]	LAMB DAMAX λ _{max} [kg · s / m ²]	

** GEOMETRY OF PIPE ** (パイプの諸量の印刷)

J1 管の指定	QP ボリューム J1への熱 入力 [kcal / sec]	VP ボリューム J1の容積 [m ³]	AP ボリューム J1の流路 断面積 [m ²]	LP ボリューム J1の長さ [m]	DP ボリューム J1の水力 直径 [m]	ZP ボリューム J1の中心 高さ [m]	VN ボリューム J1の接続 ボリューム数 [-]
PEXP フロータンク の圧力 [kg / cm ²]	VMAX 総ボリューム 数 [-]	KLOS B1 破断点の流 動損失係数 (管の中へ) [-]	KLOS B2 " 流動損失係数 (管の外へ) [-]	KLOS H1 ヘッダ部境界の 流動損失係数 (管の中へ) [-]	KLOS H2 " 流動損失係数 (管の外へ) [-]		

JI	J2	FLOW	AKF
管の指定	メッシュの 指 定	ボリュームJ1の 接続ボリューム番号	ボリュームJ1からJ2番目の接続ボリ ームへの流れの流動変化による圧損係数

** GEOMETRY OF TUBE ** (伝熱管独自の諸量)

DHEX	DOHEX	LHEX	DCOIL	ROUGH	THETA	AHTT
伝熱管内径	伝熱管外径	伝熱管長	コイル径	管の平均突起	傾斜角度	総伝熱面積
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[rad.]	[m ²]
AH	AB	JH1	JB1	JH2	JB2	
健全管の総 断 面 積	破断管の総 断 面 積	上部ヘッダに付 属する健全管ジ ヤンクレヨンの 番 号	上部ヘッダに付 属する破断管ジ ヤンクレヨンの 番 号	下部ヘッダに付 属する健全管ジ ヤンクレヨンの 番 号	下部ヘッダに付 属する破断管ジ ヤンクレヨンの 番 号	
[m ²]	[m ²]					

** INITIAL STATE OF PIPE ** (配管部の初期諸量)

JI	MP	IP	PP	HP	RP	TP	VOID
ボリ ームの 指定	ボリ ーム J1の流 体の 重 量	ボリ ーム J1の流 体の 内部エ ネ ル ギ ー	ボリ ーム J1の流 体の 圧 力	エ ンタル ピー	比 重 量	温 度	ボ イド 率
[-]	[kg]	[kcal]	[kg/cm ²]	[kcal/kg]	[kg/m ³]	[°C]	[-]

J1	J2	WJ	HJ	FJ	RES
ボリ ームの 指定	ボリ ーム の指 定	ボリ ーム J1か らJ2 管目 の接 続 ボリ ーム への 流 量	エ ンタル ピー	管 摩 擦 係 数	抵 抗 係 数
[-]	[-]	[kg/sec]	[kcal/kg]	[-]	[1/kg·m]

** INITIAL DATA OF TUBE ** (伝熱管のインプット・データ)

Y	PY	RY	EY	IY	HY	UY
諸量 の伝熱 管内の 位置	伝熱管 内の 圧 力	比 重 量	エ ネ ル ギ ー	エ ネ ル ギ ー 内 部	エ ンタル ピー	流 速
[m]	[kg/cm ²]	[kg/m ³]	[kcal/kg]	[kcal/kg]	["]	[m/sec]

** INITIAL STATE OF TUBE ** (伝熱管の初期諸量)

J1	J2	U	P	H	R	T	VOID
管の指定	メッシュの 指 定	伝熱管 J1 の J2 番目のセ ル中心におけ る 流 速 [m / s]	圧 力 [kg / cm ²]	エンタルピー [kcal / kg]	比重量 [kg / m ³]	温 度 [℃]	ボイド率 [-]
	UMAX	Z1	Z4	LAMBDA	MIU	DT	
	伝熱管部流 速の最大値 [m / sec]	$3\rho u_{max}^2 / 2$ [kg / m / sec ²]		体積粘性係 数の最大値 [kg · s / m ²]	粘性係数 [kg · s / m ²]	きざみ時間 [sec]	

** STATE OF TUBE ** (伝熱管の諸量)

TIME	DT	I2
時 間 [sec]	きざみ時間 [sec]	時間きざみ の 回 数 [-]

J1	J2	U	P	H	R	T	VOID
管の指定	メッシュの 指 定	伝熱管 J1 の J2 番目のセ ル中心におけ る 流 速 [m / sec]	圧 力 [kg / cm ²]	エンタルピー [kcal / kg]	比重量 [kg / m ³]	温 度 [℃]	ボイド率 [-]

** STATE OF PIPE ** (配管部の諸量)

J1	MP	IP	PP	HP	RP	TP	VOID
ボリュー ムの指定	ボリューム J1 の流体 の 重 量 [kg]	" 内 部 エ ネ ル ギ ー [kcal]	" 圧 力 [kg / cm ²]	" エ ン タ ル ピ ー [kcal / kg]	" 比 重 量 [kg / m ³]	" 温 度 [℃]	" ボ イ ド 率 [-]

J1	J2	WJ	HJ	FJ	RES
ボリュー ムの指定	ボリューム の 指 定	ボリューム J1 か ら J2 番目の接続 ボリュームへの流量 [kg / sec]	" エ ン タ ル ピ ー [kcal / kg]	" 管 摩 擦 係 数 [-]	抵 抗 係 数 [1 / (kg m)]

I 2 =

時間きざみの回数

TIME(I 2) =

時間 [sec]

UMAX	Z1	Z4
伝熱管部の 最大流速	$3\rho u_{max}^2/2$	
[m/sec]	[kg/m/sec]	[kg/m/sec]

LAMBDA	MIU	DT
体積粘性係 数の最大値	粘性係数	きざみ時間
[kg · s / m ²]	[kg · s / m ²]	[sec]

6. 例 題 計 算

本章では、本コードの総チェックと機能の検証を目的として幾つかの例題計算を行ったので、その結果を記述する。例題計算は

- (1) 加圧水（単相）の噴出率計算
- (2) “もんじゅ”調（Ⅱ）蒸発器の伝熱管破断時の水噴出率計算

である。但し、1章で記述したように、配管系の計算部分は未完成なので、この部分の計算は行っていない。従って、上記2例の計算ではタンク（或はヘッダ）の圧力・エンタルピー条件は時間的に変化しない。しかし、配管系における計算部分が近々開発されることを予想して参考のために、計算モデル等では配管系のものも含めて示す。

6.1 加圧水の噴出率計算

想定したモデルは、容積無限大タンクに、内径19〔mm〕、長さ660〔mm〕の直管が付いている簡単な体系である。タンクと直管には、圧力：150〔ata〕、エンタルピー：100〔kcal/kg〕の加圧水が一様に静止充填されているものとした。想定したモデルを図6.1に示す。また本コードに対する計算モデルは、蒸気発生器の伝熱管破断を模擬しているため、この計算においても、計算モデルとしては、蒸気発生器の伝熱管破断体系をとる必要がある。無限大タンクを入口ヘッダと見なし、直管を破断点上流側伝熱管と見なすと、これらに加えて、出口ヘッダ、破断点下流側伝熱管、健全管、ブロータンクを想定する必要がある。直管（破断点上流側）を33分割（ $\Delta x = 20$ 〔mm〕）とし、下流側伝熱管として3メッシュ分とすると、その長さは、60〔mm〕となる。この計算モデルを図6.2に示す。

この圧力・エンタルピー条件下における音速は約812〔m/s〕であるのでタイムステップ巾は $\Delta t = 10$ 〔 μsec 〕（ $< \frac{\Delta x}{a} = \frac{0.2}{812}$ ）とした。また、膨張、圧縮波の数回の往復を計算するため、計算シミュレーション時間は約5〔msec〕とした。この計算に用いたインプット・データをAppendix Cに示す。

計算結果のうち、直管各部における圧力、流速の時間変化を図6.3(a)～6.3(d)に示す。

時刻 $t = 0$ で直管は外界に対して瞬時全開口する。管出口端圧力と外圧の差により、膨張波（希薄波）は出口端で生じ、タンク側に伝播してゆく。と同時に水の流動が生じ、膨張波の伝播と同じ速さで、その流動域は拡大する。生ずる流速は、解析的には運動量方程式から

$$\Delta U = \frac{\Delta P}{\rho a} g M_{cm}$$

但し $\Delta P = P_T - P_{.x}$

と求められる。また、 a は管内の圧力波伝播速度であるが、ここでは管の圧縮性を考えていないので、無限大媒質中の音速に等しい。

また、圧力波伝播中、圧力と流速の不連続面である圧力波面の両側では、圧力と流速は一定である。

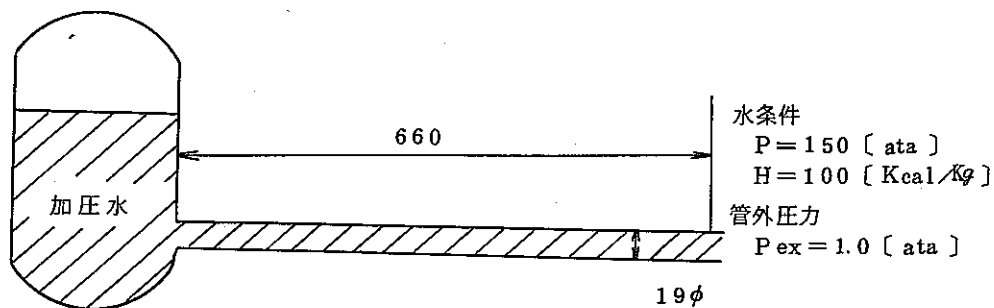


図 6.1 加圧水噴出率計算のために想定した体系

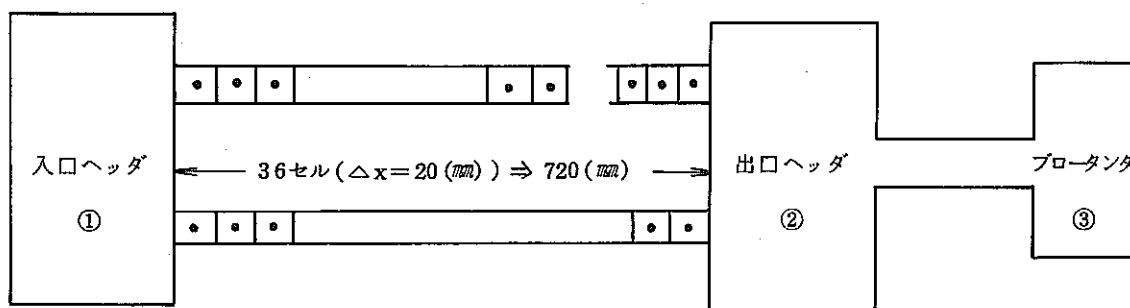


図 6.2 加圧水噴出率計算のための計算モデル

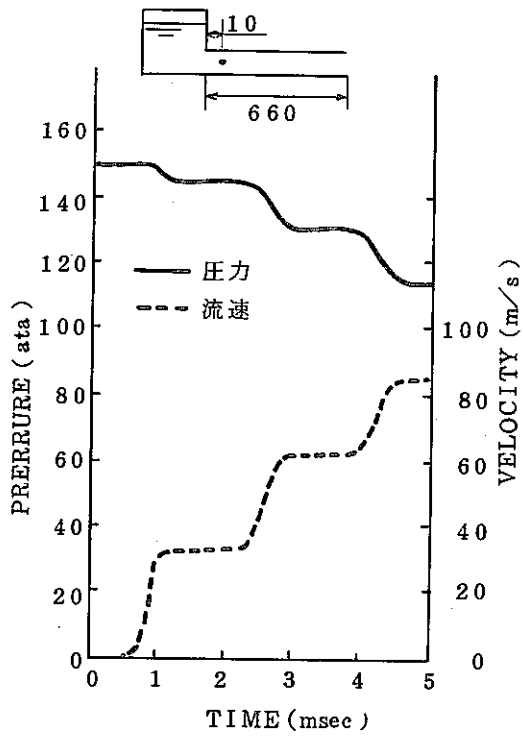


図 6.3 (a) 圧力・流速の時間変化
(タンクより 1.0 [cm] 位置)

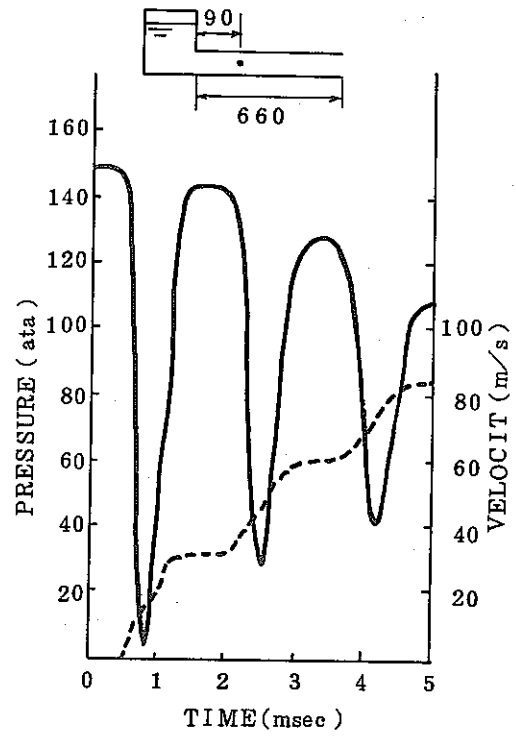


図 6.3 (b) 圧力・流速の時間変化
(9.0 [cm] 位置)

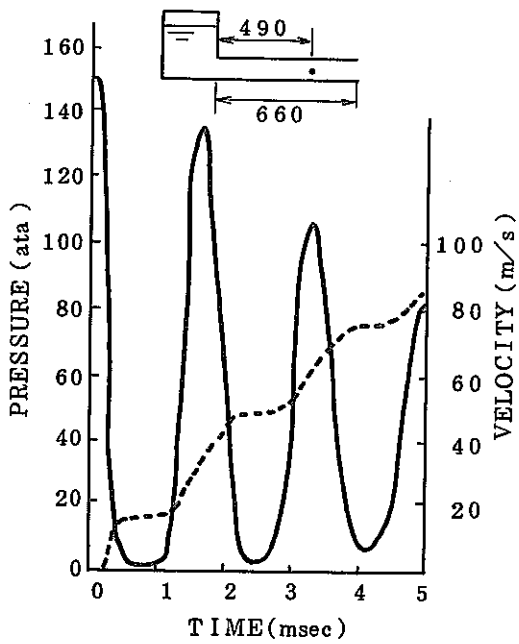


図 6.3 (c) 圧力・流速の時間変化
(49.0 [cm] 位置)

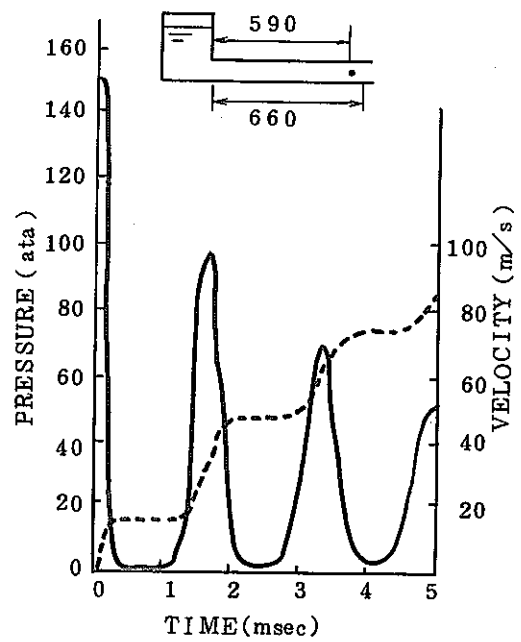


図 6.3 (d) 圧力・流速の時間変化
(59.0 [cm] 位置)

そして、膨張波がタンクに到達すると、タンクと直管の圧力差の存在により直管のタンク取付端で、圧力は再びタンク圧力と等しくなる。生じた圧縮波は管出口端に向って伝播してゆく。その際、流速は再び、 $\Delta U = \Delta P \rho_{CM} / \rho a$ 増加する。更に、圧縮波が管出口端に達すると、そこで再び膨張波が生じ流速が増加する。この膨張、圧縮波の伝播の繰り返して、流速が次第に増加し摩擦のある管では定常値に達する。この際、圧力波が管出口端からタンクまで到達するのに要する時間は $\Delta t = L/a$ であり、往復に要する時間は $2L/a$ である。圧力波の移動を時間-距離 ($t-x$) ダイアグラム上に示すと図 6.4 になる。また $x=x_0$ における圧力と流速の時間変化を図 6.5 に示す。

以上は摩擦のない直管の場合の解析であるが、本コードによる計算結果といつかの点で対比検討することができる。まず、流速の増加量 ΔU は、解析的には

$$P_T = 150 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$P_{ex} = 1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\rho_0 = 1056.0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$a = \frac{a_0 + a_1}{2} = \frac{871.1 + 811.8}{2} = 841.5 \text{ (m/s)}$$

(但し、 a_0, a_1 はそれぞれ膨張波伝播前後の音速である。)

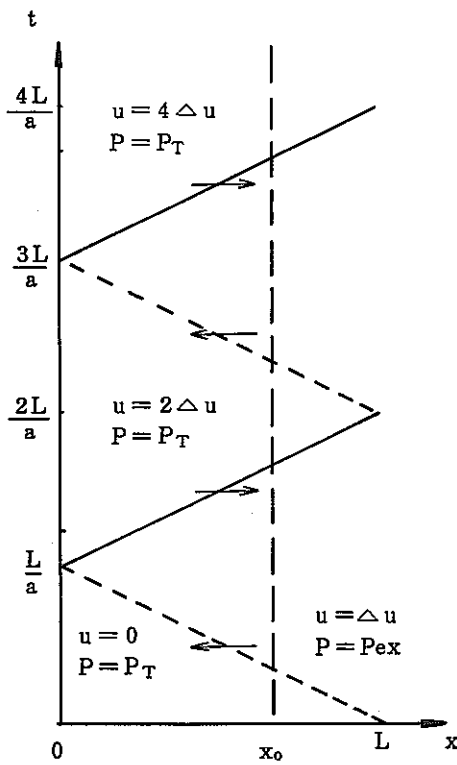


図 6.4 摩擦のない場合の
圧力波面の移動

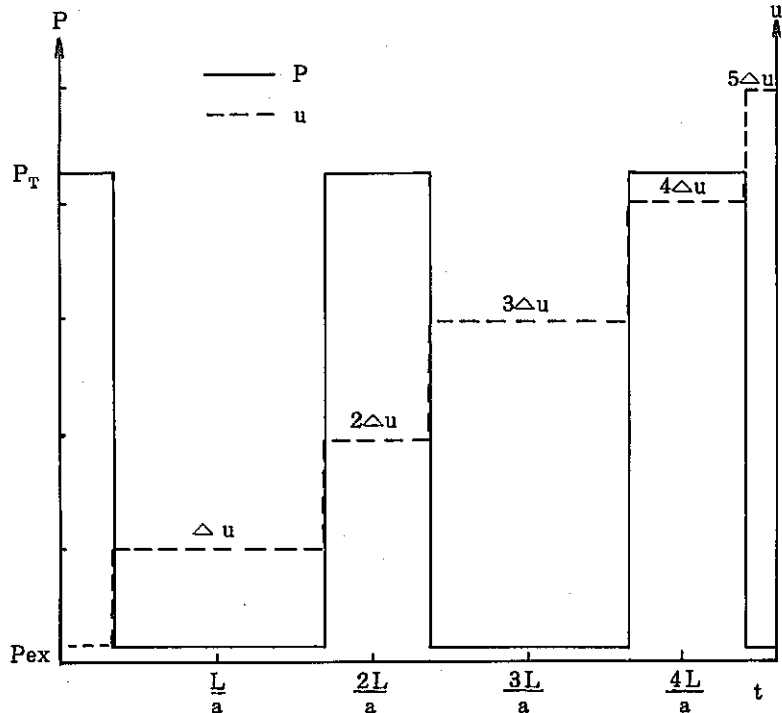


図 6.5 $x=x_0$ における圧力、流速
の時間変化

であるから

$$\Delta U = \frac{(P_T - P_{x}) \cdot \rho M_{CM}}{\rho \cdot a_0} = 16.6 \text{ (m/s)}$$

一方、本コードによる計算値では、破断点近傍での $t = 0.5 \text{ [msec]}$ の流速は 16.6 [m/s] であり、解析的に求めたものと非常によく一致している。

また、圧力破伝播時間についてみると、膨張波が管出口端からタンクに到達するまでの時間は $L/a = 0.66/871.1 = 7.58 \times 10^{-4} \text{ [sec]}$ である。一方タンク取付点で圧力が減少し始める時刻から、本コードによる伝播時間の計算結果を見る（図 6.3 a 参照）と、伝播時間は、約 $7.50 \times 10^{-4} \text{ [sec]}$ であり、これもよく一致していると言える。

ところで図 6.3 (C) と図 6.5 を比較してわかるように本コードによる計算結果は、膨張、圧縮波伝播を基本的には表わしているが、圧力波形は解析解に比べて相当変形している。これは、計算では擬似粘性を取り入れているための波形のなまりと、管摩擦を考慮していることによる圧力勾配の存在が原因と考えられる。特に図 6.3 (a) で、タンクから 1.0 [cm] の位置での圧力が時間と共にステップ状に、減少しているが、これは、タンクから直管部への流動圧損を計算に取入れているからである。

次に計算時間の短縮化を目的とした領域再分割 (rezoning) の検討を行ったので、その結果を示す。想定した体系及び計算モデルは図 6.1 と図 6.2 に示したものをを用いた。上述したケースを基準計算とし、 Δx , Δt を変化させ、他の 4 種のケースについて計算を実施した。計算条件と水噴出率に関する計算結果を図 6.6 に示す。

この結果によれば、 Δx と Δt を小さくすればするほど水噴出率の立ち上がりは速くなり、解析解に近づく。反対に Δx と Δt を大きくすると、水噴出率の立ち上がりがなまってくるのが観察される。従って、水単相の計算では、初期の圧力変化の急激なところを除けば rezoning による計算時間の短縮も可能であると言える。

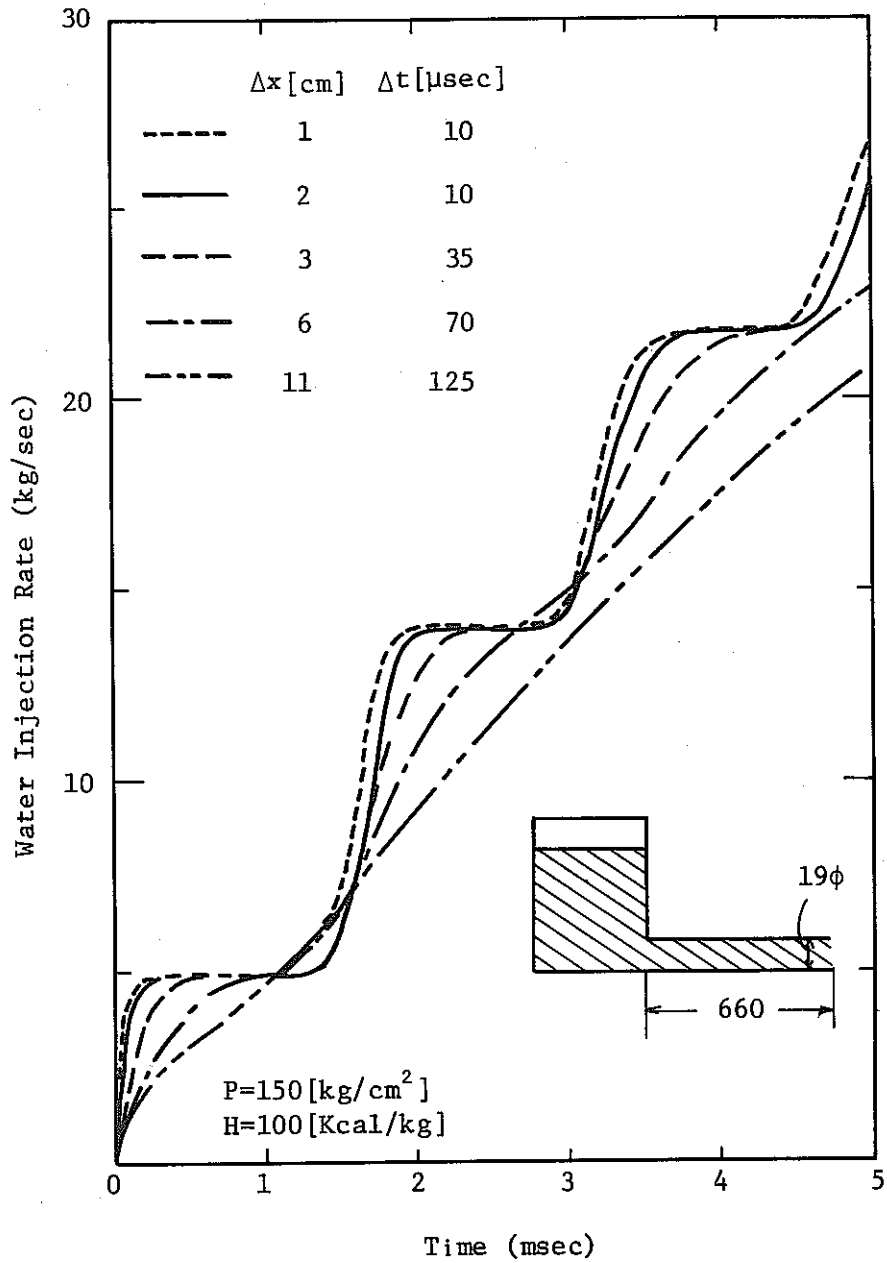


図 6.6 水噴出率変化 (Δt , ΔX : パラメータ)

6.2 “もんじゅ”調(Ⅱ)蒸気発生器での水噴出率計算

次に例題計算として，“もんじゅ”調整設計(Ⅱ)の蒸気発生器の1例について水噴出率計算を行った。事故蒸気発生器は蒸発器と仮定。また，伝熱管破断本数は4本と仮定した。

蒸発器廻りの水-蒸気系配管配置の例を図6.7に示す。計算のため，この配管系を図6.8に示すように11個のボリュームで示す。更にボリュームとジャンクションで，この体系を模式化して示すと図6.9となる。ここで，ボリューム⑨と⑩は入口及び出口ヘッダであり，⑪がブロータンクである。また，蒸発器伝熱管の主要目を表6.1に，蒸気発生器まわりのヒートバランサを図6.10に示す。更に定格負荷運転時の伝熱管内部の水の圧力，温度条件を図6.11に示す。入口ヘッダで154.2[atg]，247.2[°C]の加圧水は，伝熱管部で加熱され，出口ヘッダで145.7[atg]，369[°C]の過熱蒸気となって出てゆく。伝熱管長さは76[m]で，内径19[mm]である。破断点は入口ヘッダから20[m]の位置と仮定した。この位置は，蒸発器伝熱管部の下部にあたる。定格運転時，この点での水の状態は加圧水状態である。

また，伝熱管は76分割した。すなわち $\Delta x=1$ [m]。また $\Delta t=200$ [μ sec]である。計算に用いたインプット・データをAppendix Cに示す。

計算結果を図6.12～14に示す。図6.12には，伝熱管破断後10[msec]までの破断伝熱管内の圧力・流速分布を示す。また，図6.13には同じく15～50[msec]の圧力・流速分布を示す。また，図6.14には，伝熱管破断後200[msec]までの水噴出率を示した。ここで破断は両端破断であるから，破断点上流側からの1本当りの水噴出率を1点鎖線で示し，下流側からの噴出率を破線で示した。更に，破断点上・下からの水噴出率を加えて4倍したものが総噴出率で実線で示した。

破断点上流側の場合，破断と同時に破断点で膨張波が生じ，上流側に伝播し，水噴出率は立上る。その後，20～30[msec]で圧縮波が下流側に伝播してくるが，管途中で低クオリティ部分が生じ，そこで臨界現象を起し，噴出率は一時低下する。更に，圧縮波が破断点にまで伝播してしまうと，流量はほぼ定常になる。

一方，破断点下流側では，破断と同時に管内に逆流が生じ，それが上流側に伝播し，約200[msec]で出口ヘッダに到達する。その後は，ほぼ定常となっている。定常流量としては，1本当り，上下合わせて12.5[kg/sec]で妥当な値と考えられる。

尚，計算時間はFACON-230/58を用いた場合，シミュレーション時間1[sec]($\Delta T=200$ [μ sec]，5000タイムスラップ，伝熱管76分割)に対し，67[mm]である。

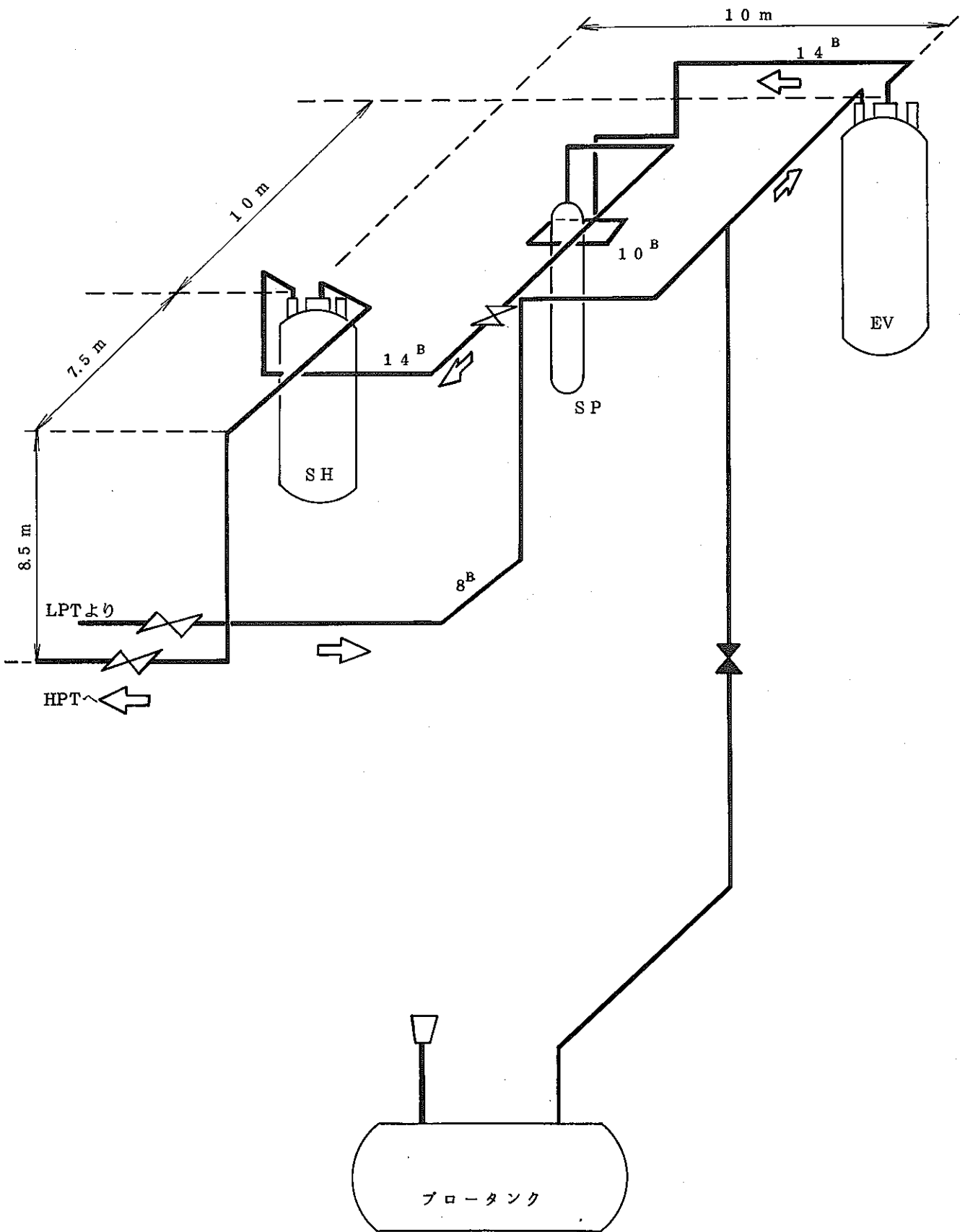


図 6.7 蒸発器廻りの水蒸気系配置，配管の例

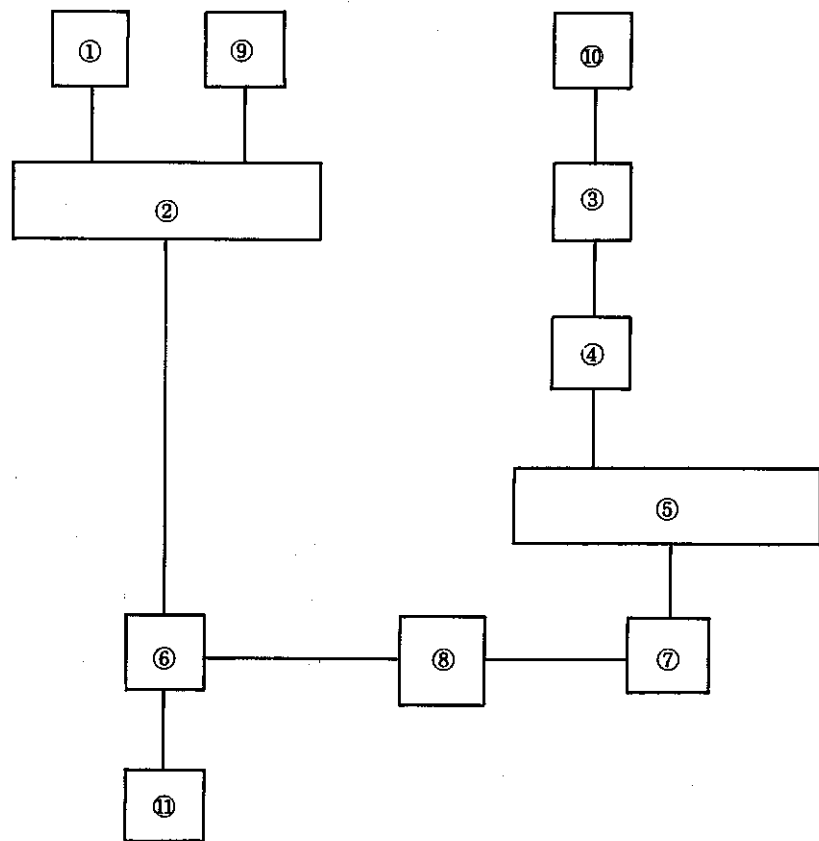
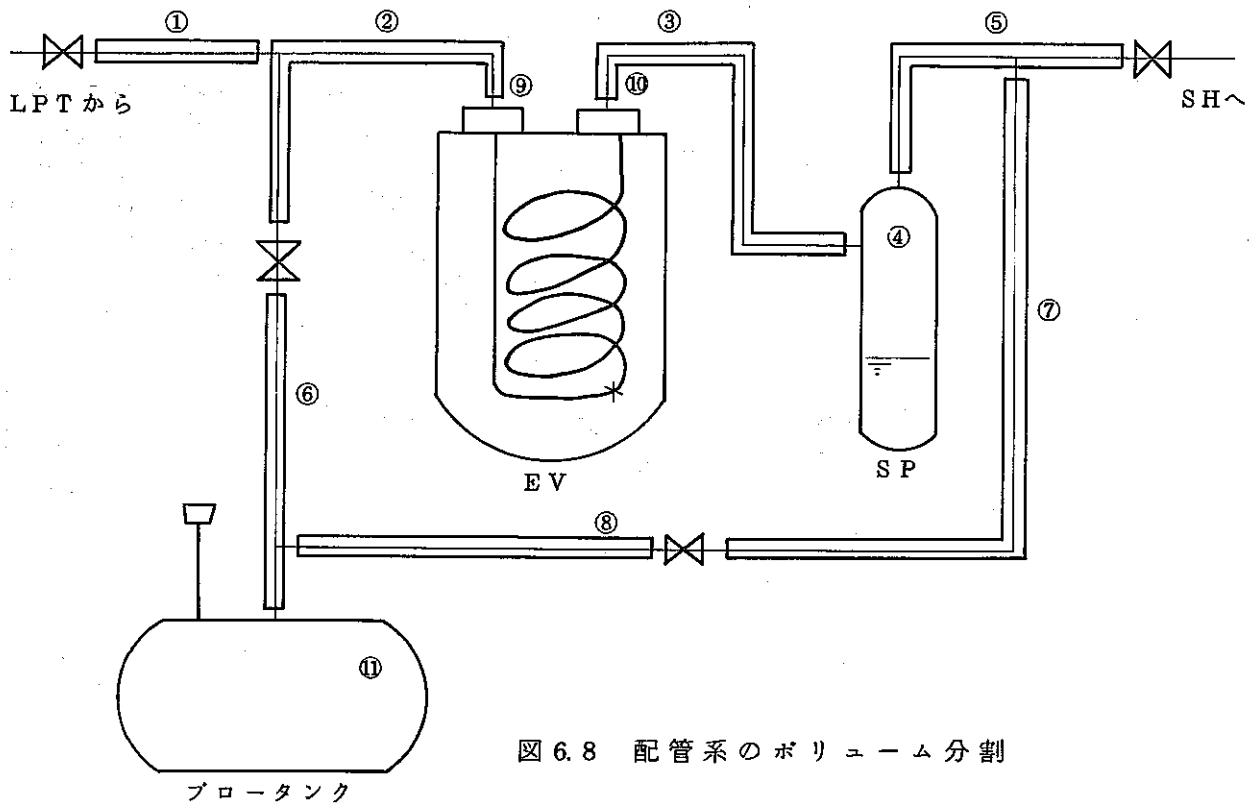


表 6.1 蒸発器伝熱管主要目

管 寸 法	管 外 径	mm	25.4
	管 内 径	mm	19.0
管 本 数		本	255
伝 熱 面 積	コ イ ル 部	m ²	1,120
	降 水 管 部	m ²	208
	ア ル ゴ ン ガ ス 部	m ²	224
	合 計	m ²	1,552

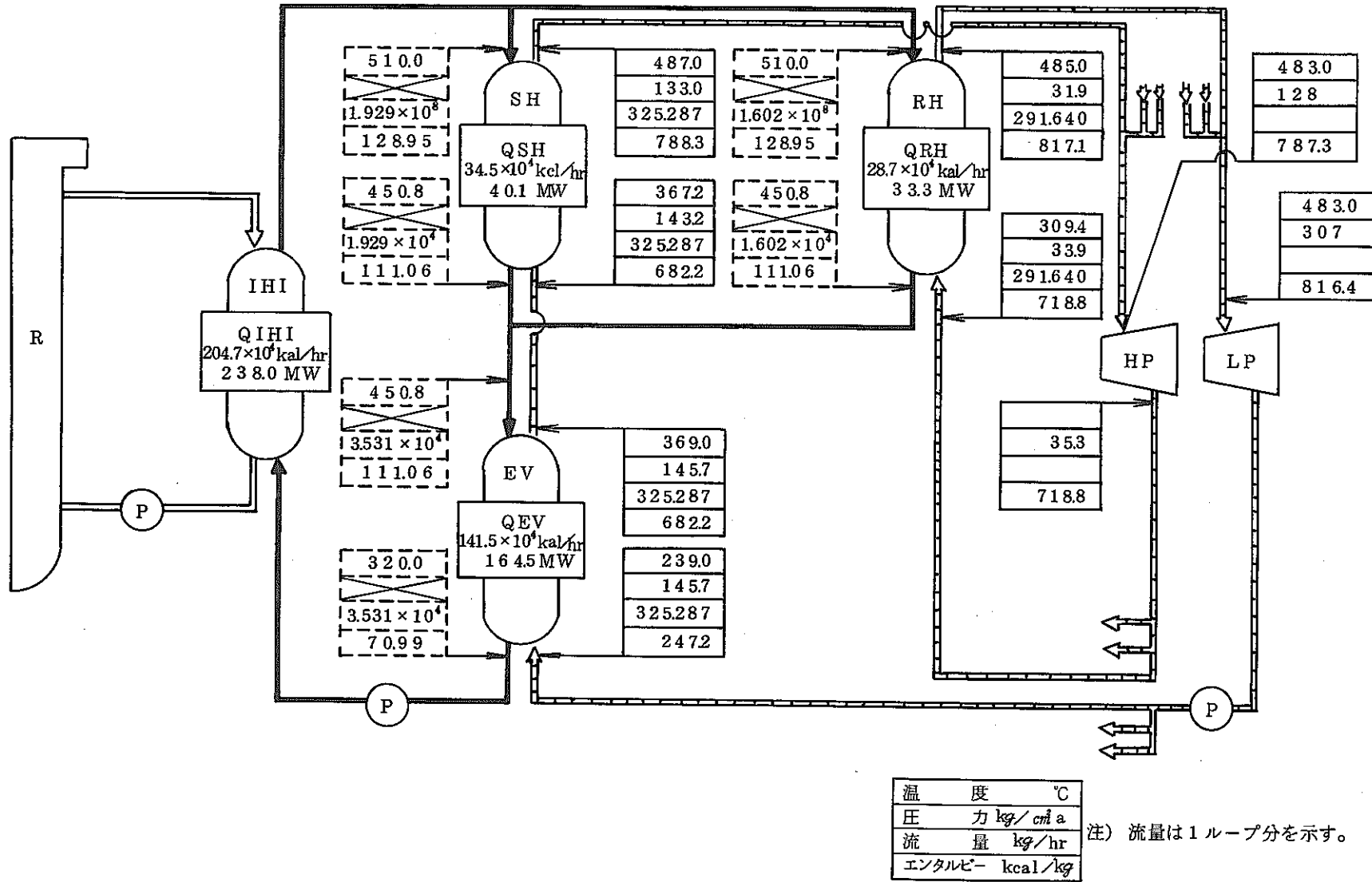


図 6.10 蒸気発生器まわりヒートバランス (定格負荷・714 MW・t) Dirty Condition

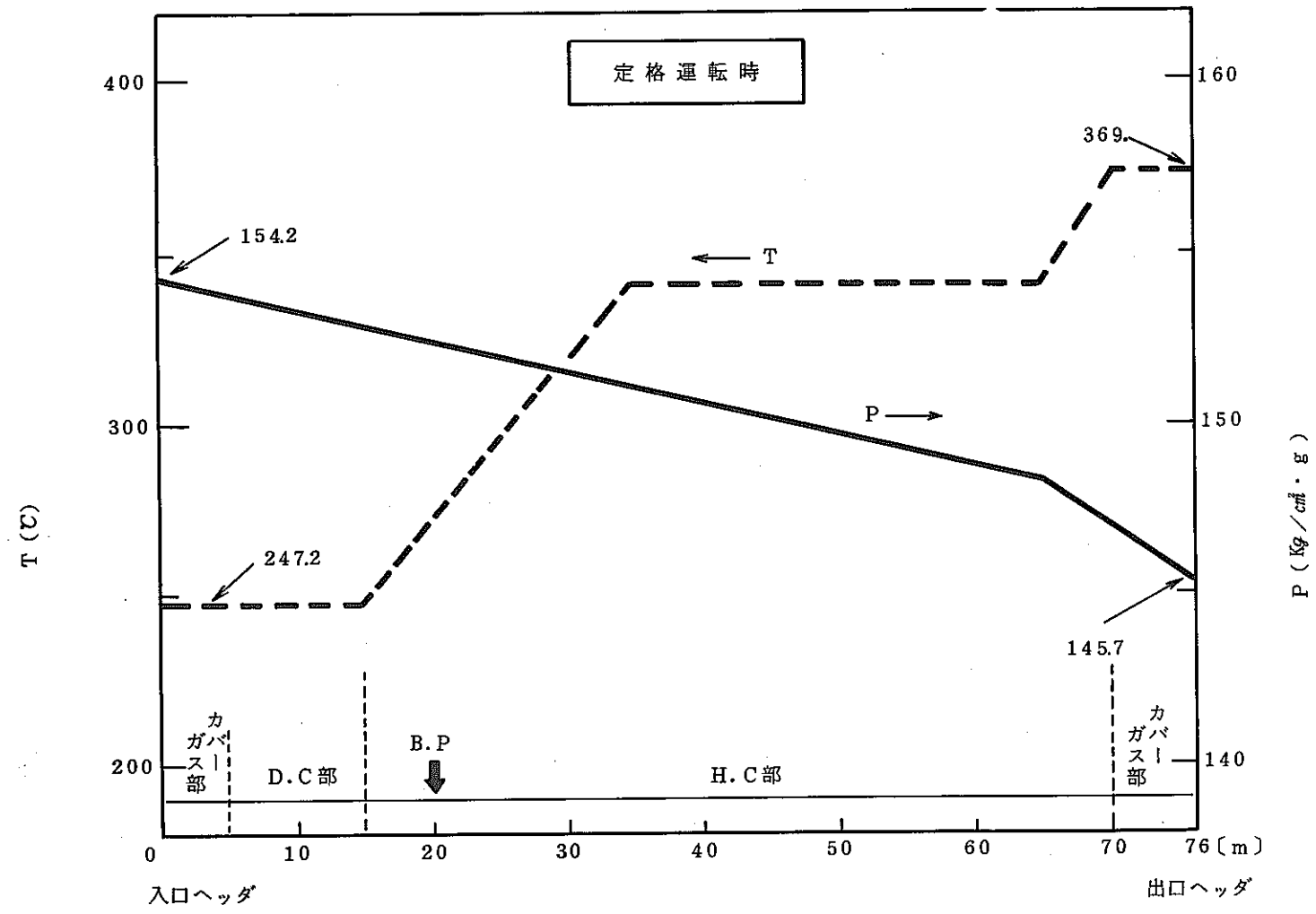


図 6.11 “もんじゅ” 調 (II) EV 内圧力・温度分布

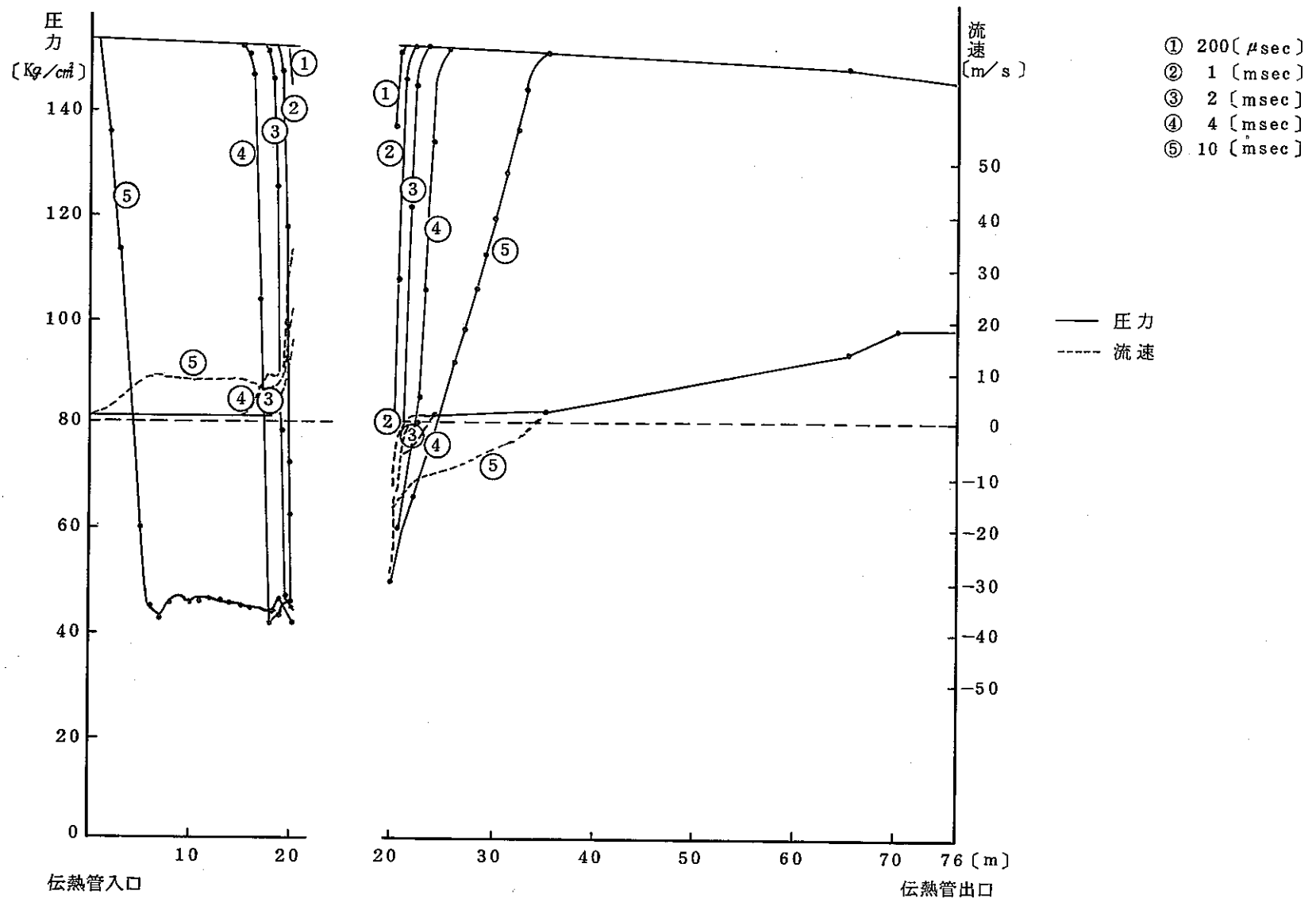


图 6.1 2 破断伝熱管内压力・流速分布 (0 ~ 10 [msec])

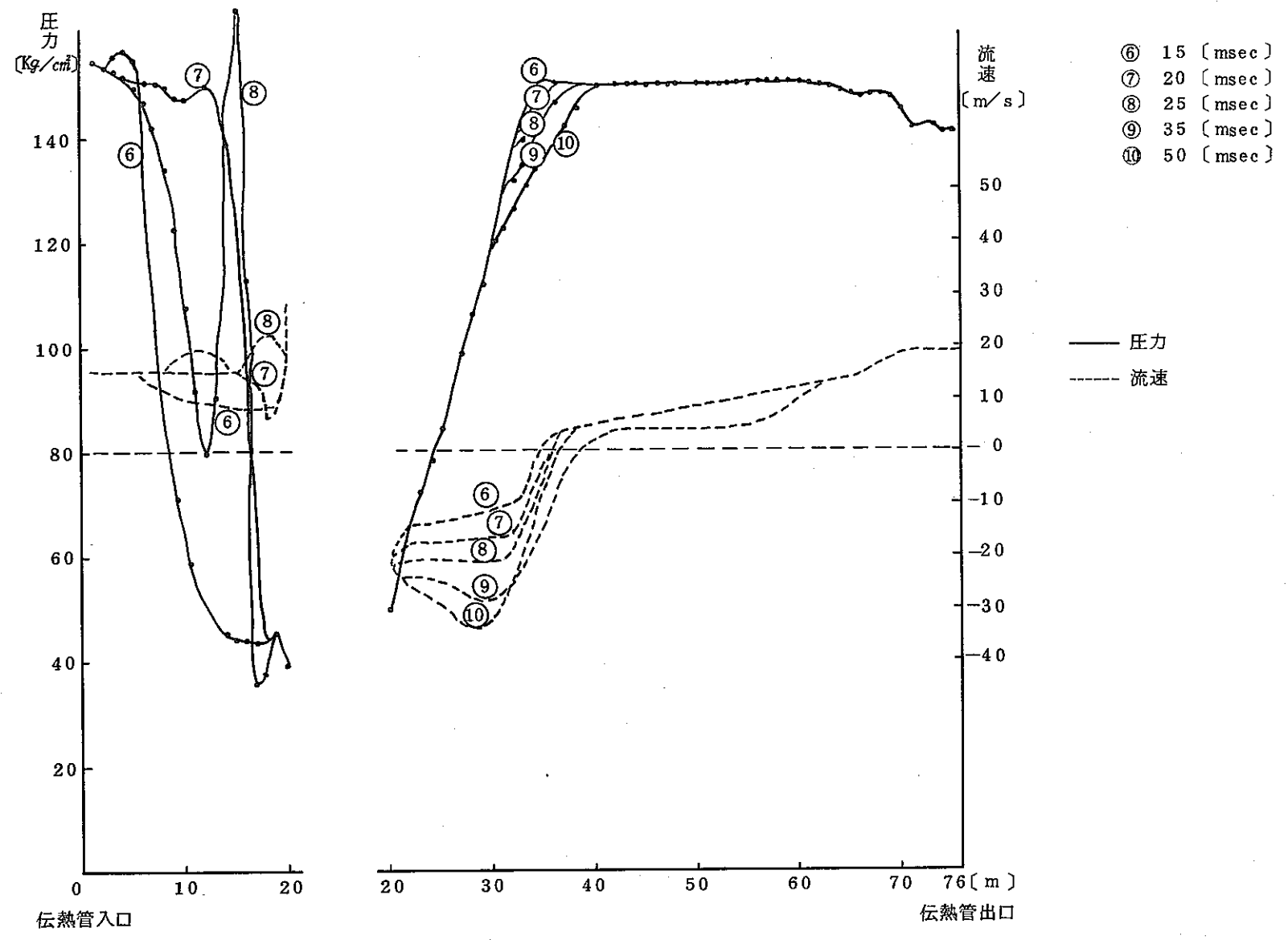


図 6.1 3 破断伝熱管内压力・流速分布 (15 ~ 50 [msec])

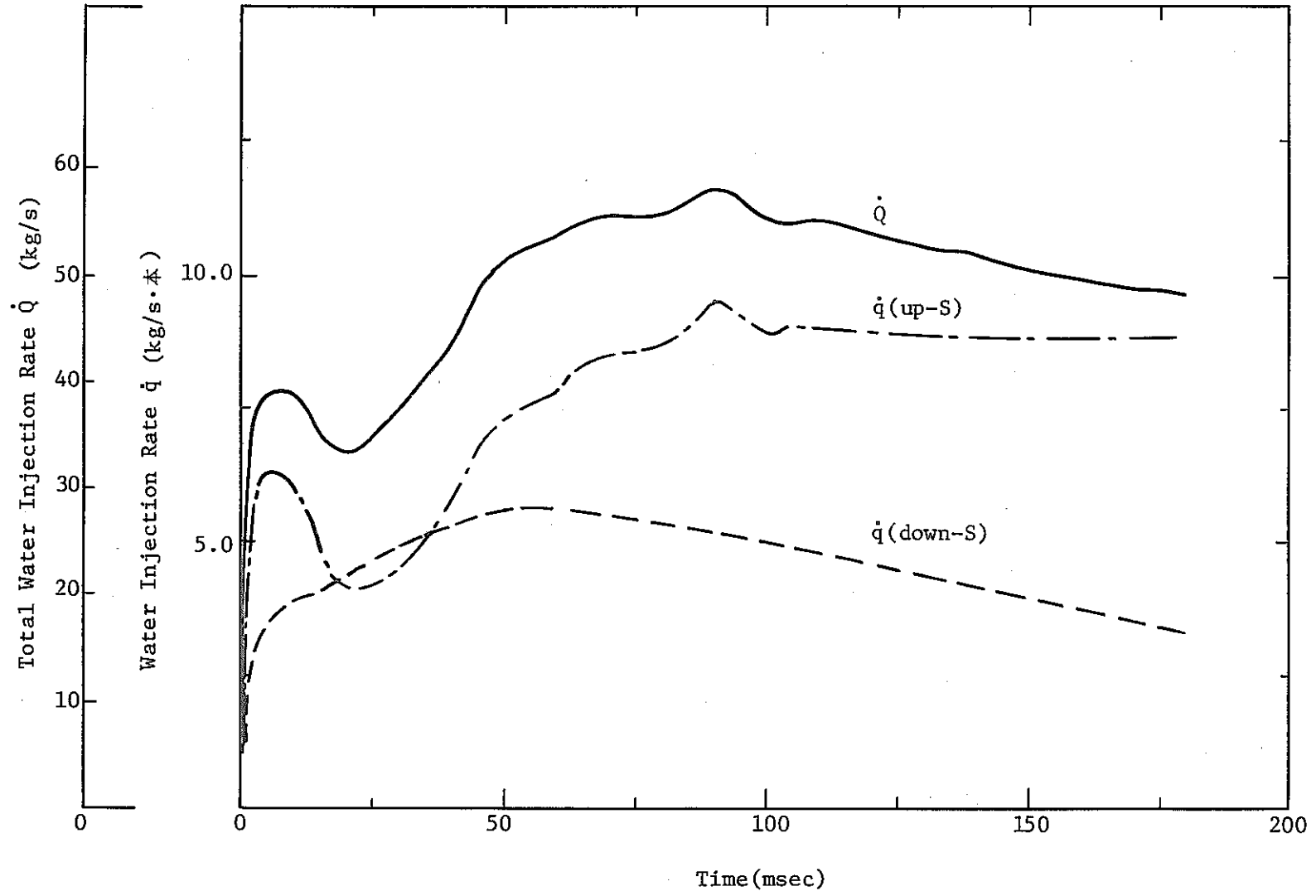


图 6.14 水噴出率 (0 ~ 200 [msec])

7. 問題点と今後の課題

本コードを作成し、計算を実行してきた過程で、いくつかの問題に直面した。この問題の内容とその発生原因及び解決への方向を明らかにしておくことは、本コードを利用し、改良して行く上で大事なことだと思われる。本章では、これらを箇条書にして記述する。

- (1) 本コードで、配管部を計算する部分が未完であることは前述したが、これは、2.2節で述べたボリュームでの圧力・エンタルピーの収束計算が、ボリューム内の水が相変化する際には、うまく収束しないためである。現在採用している水の状態式の形は $P=P(p, h)$ の形をしているために、収束計算が必要となる。この状態式とは、別に $P=P(\rho, I)$ 及び $h=h(\rho, I)$ の形の状態式を作成し、サブプログラム化しておくことによって、収束計算は不要となる。
- (2) 破断点下流側に、仮想セル3個を設けて、その最下流のセルの圧力が外圧に等しいとして境界条件を定式化している。しかしセルの大きさ Δx は伝熱管側のそれと等しいものとしているため、計算時間の短縮等を目的として、伝熱管の分割数を小さく (Δx を大きく) すると、この境界条件が現実と合わなくなる。また、このために、背圧変化が管上流側に伝わりにくくなる。仮想セルの大きさ Δx として、伝熱管部でのセルの大きさ Δx と、異なる値を使えるよう改良が必要である。
- (3) 蒸気単相、及び、高クオリティ(2相状態)の水噴出の計算がうまく実行できない。これは、数値計算上、次の現象による。まず、破断孔出口部で流体の流速が音速の5~6倍もの値になる。このため、流体の持つ全エネルギーに対し、運動エネルギー分が増大し、逆に、流体のエンタルピーは ~ 100 [kcal/kg] 以下に減少する。その結果、流体は、2相状態から水単相状態へと急激に相変化し、これに伴い出口部の音速が急に大きくなるからである。
現在は、便宜的に、流速を音速の2倍で押えてエンタルピーの減少を防いでいる。
今後、伝熱管内流体の初期密度が小さい場合、破断直後に生ずるとされる超音速流に関し、その現象の詳細な調査が必要である。
- (4) 本コードは、伝熱管部の計算に修正 ICE 法を適用しているが、この方法で準定常状態の水噴出率までを計算するには、計算時間が膨大となる。伝熱管側流動計算を初期スパイク圧力領域用 (0~50 msec) と準定常圧力領域用に分けた方が効率的であると考えられる。その方法として、1つは rezoning の方法が考えられる。この場合には、(2)項で述べた、仮想セルの大きさを、伝熱管部のセルの大きさとは独立に扱えるようにする改良が前提となる。
もう1つの方法は、準定常圧力領域での水噴出率を、修正 ICE 法を用いた過渡流動計算ではなく、定常流動計算から求める方法である。具体的には、定常2相流量計算に広く用いられている Moody 等の臨界流モデル¹³⁾ を使って、予め、伝熱管実効長さ： $\frac{fL}{D}$ 、ヘッド圧力： P_H 、ヘッドエンタルピー： H_H の関数として臨界流量： q_{cr} を

$$q_{cr} = q_{cr} \left(\frac{fL}{D}, P_H, H_H \right)$$

の形 (Table化してもよい) で求めておき, これを本コードのサブプログラムとして挿入しておく方法である。

但し, この場合2つの異なるモデルにより計算される水噴出率の, 時間的結合部における不連続が大きき問題となることが考えられる。いずれにしても, 計算時間の短縮化が重要な課題である。

8. あ と が き

大リーク・ナトリウム-水反応事故時の水噴出率計算用コードとしてSWAC-11を作成した。本コードは、一部未完成ではあるが、これを使用することにより伝熱管部での流動計算が可能となった。

また、水単相噴出計算で本コードの基本的なチェックを行った。更に、“もんじゅ”蒸発器を対象とした例題計算では、水噴出率として妥当な値を得ることができ、実機蒸気発生器への適用も可能なことが示された。

今後、未完部分の完成のための作業はもとより、計算時間の短縮化、更に、SWAT-注水系解析のために、収大、収縮、分岐等に対する境界条件の定式化作業を進めてゆく予定である。

9. 謝 辞

本コードの作成に際し、コードの基本設計、プログラム設計、コーディング、及び大部分のデバッグ作業は、ファコム・ハイタック株式会社の方々の手で行われたことを附記し、短期日の困難な作業を、昼夜の区別なく遂行して下さいました関係各位に深く感謝の意を表します。

また、本コードの作成計画立案時から本報告書の内容の討論まで直接、間接に御指導、御協力をいただいた堀雅夫室長、田中信夫氏、広井博氏、田辺裕美氏に紙面をかりて深く感謝の意を表します。

記 号 表

A	: { m^2 }	流路断面積
A_{chox}	: { m^2 }	ジャンクションの最小流路断面積
A_J	: { $kgm/kcal$ }	熱の仕事当量 $A_J = 427.0$
B	: { — }	Pr 数の逆数
D	: { m }	流路の水力直径
E	: { $kcal/kg$ }	全エネルギー
H	: { $kcal/kg$ }	エンタルピー
I	: { $kcal/kg$ } 或は { $kcal$ }	内部エネルギー
K_F	: { — }	流路形状変化による圧損係数
K_R	: { — }	ヘッダー管板部の流動圧損係数
L	: { m }	流路長さ
M	: { kg }	ボリューム内流体の全重量
M_{cm}	: { cm^2/m^2 }	面積換算係数 $M_{\text{cm}} = 10^4$
N	: { — }	ボリュームに接続するジャンクション数或は流動領域分割数
P	: { kg/cm^2 }	圧力
P_T	: { kg/cm^2 }	タンク内圧力
P_{ex}	: { kg/cm^2 }	管外圧力
Q	: { $kcal/sec$ } 或は { $kcal/m^2/sec$ }	ボリューム或はセルへの入熱
RES	: { $1/(kg \cdot m)$ }	流路抵抗係数
V	: { m^3 }	ボリューム容積
W	: { kg/s }	ボリュームから流出する流体の重量流速
X	: { — }	クオリティー
Z	: { m }	ボリューム中心の高さ
a	: { m/s }	音速
c	: { m^2/sec^2 }	圧力収縮計算時の係数
e	: { m }	管壁の粗度
f	: { — }	摩擦圧損係数
g	: { m/sec^2 }	重力加速度
t	: { sec }	時刻
u	: { m/sec }	流速

v	: [m^3/kg]	比容積
x	: [m]	距離
q	: [kg/s]	水噴出率

ギリシャ文字

δx	: [m]	空間分割巾
δt	: [sec]	時間ステップ巾
θ	: [$rad.$]	伝熱管傾斜角度
λ	: [$kg \cdot s/m^2$]	第2粘性係数
μ	: [$kg \cdot s/m^2$]	第1粘性係数
$\rho \cdot \rho^*$: [kg/m^3]	比重量
ρ_R	: [kg/m^3]	ヘッド部流体の比重量
τ	: [m^2/sec]	質量拡散係数
ξ	: [—]	ヘリカルコイル圧力損失増倍係数

添字

i	:	ボリューム番号或はセル番号
ij	:	ボリューム i に接続するジャンクション番号
k	:	ボリューム番号
f	:	飽和水を示す
g	:	飽和蒸気を示す
fg	:	飽和水から飽和蒸気への変化
n	:	時間スラップ数
N	:	ボリュームに接続するジャンクション数或は流動領域分割数
S	:	单相状態を示す
T	:	2相状態を示す
0	:	膨張波伝播前を示す
1	:	“ 伝播後を示す
H	:	ヘッド部
cr	:	臨界状態

参 考 文 献

1. V.L. Streeter and E.B. Wylie, "Hydraulic Transients", McGraw-Hill Inc., (1967).
2. N.G. Galluzzo, "Unsteady Water Injection Models for Analysis of Sodium/Water Reactions in Steam Generators", 75-PVP-67.
3. Y.W. Shin, "Two-Step Explicit Procedure Formulation for Fast Decompression of Two-Phase Water/Steam Mixture", ANL-CT-76-46 (1976).
4. 原崎堯, 田中信夫, 大高仁護, 佐々木和一, 山田敏雄, 堀雅夫, "SWAT-1 試験装置による大リーク・ナトリウム-水反応試験, 第Ⅲ報", SN941 74-46 (1974)
5. 堀雅夫, 他, "蒸気発生器安全性総合試験(第7報;試験の概要)", 日本原子力学会, 50年度秋期分科会予稿集
6. F.H. Harlow and A.A. Amsden, "A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Speeds", J. Comp. Phys., 8, pp197~213 (1971).
7. C.Y. Wang, "ICECO-An Implicit Eulerian Method for Calculation Fluid Transients in Fast-Reactor Containment", ANL-75-81 (1975).
8. 大西信秋, 傍島真, 清水定明, "ブローダウン実験解析による RELAP-3 コードの評価", JAERI-M 5808 (1974)
9. C.K. Chu and Aron Sereny, "Boundary Conditions in Finite Difference Fluid Dynamic Codes", J. Comp. phys., 15, pp476~491 (1974).
10. Y.W. Shin, 室内メモ (FS-76-12)
11. H.S. Isbin, H.K. Fauske, T. Grace, and I. Garcia, "Two-phase Steam-Water Pressure Drops for Critical Flow", Mech. Engr. (London) (1962).
12. R.E. Henry, "A Study of One-and Two-Component, Two-Phase Critical Flows at Low Qualities", ANL-7430 (1968).
13. F.J. Moody, "Maximum Two-Phase Vessel Blowdown from Pipes". APED-4827 (1965).

Appendix A ナトリウムから管内水への熱伝達

モデル設定に当り、次の仮定を置く。

- ① 総伝熱量は、事故開始前の値とし、水側、及びNa側の流動変化の影響は考えないものとする。従って時間的な変化はないものとする。
- ② 伝熱量は、空間的に均一とする。
- ③ 伝熱管内部での温度勾配は考えないものとする。

総伝熱量	Q_T	[MW]
総伝熱面積	A_T	[m^2] (外径基準)
伝熱管1メッシュ当りの入熱	Q	[kcal/s]
伝熱管内、外径	d_i, d_o	[m]
平均熱伝達量	Q_{AV}	[kcal/ m^2 s]

平均熱伝達量は

$$Q_{AV} = \frac{Q_T \times 10^3}{418 \times A_T} \quad [\text{kcal}/m^2 \cdot \text{s}] \quad (\text{A-1})$$

伝熱管1メッシュ当りの入熱

1メッシュ当りの伝熱管表面積

$$A_M = \pi d_o \delta_x \quad [m^2] \quad (\text{A-2})$$

入熱量

$$Q' = Q_{AV} \times A_M \quad [\text{kcal}/\text{s}]$$

原方程式に挿入する時は、単位体積当りの入熱であるから

$$Q = Q' / \left(\frac{\pi d_i^2}{4} \delta_x \right) = Q_{AV} A_M \left(\frac{\pi d_i^2}{4} \delta_x \right) \quad (\text{A-3})$$

Appendix B 擬似粘性係数 λ, μ

擬似粘性が数値計算の安定化の上で、大きな役割を果たすのは衝撃波を伴う超音速流を扱う場合である。ところが、6章で記述した様な計算モデルで起り得る主な現象は、膨張波伝播現象であるから、前述した現象下での擬似粘性の効果の大きさを直接検討することは難しい。また、擬似粘性係数として、極端に大きな値を与えた場合には、通常膨張波伝播現象の解析計算にも、有害な影響を及ぼすことが考えられる。

ここでは、インプット・データとして、どれ位のオーダーの値を選べば良いか、その上限の目安をつけるために擬似粘性係数をパラメータとした計算を行った。解析モデルと計算条件及び計算結果を図 B.1 に示す。タンク及び直管内の水の状態は加圧水とし、粘性係数は $10^{-4}, 10^{-2}, 10^2, 10^4$ [$\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$] と変化させて計算した。計算結果は、4番目と8番目のセル中心での圧力の時間変化について示した。

擬似粘性係数 λ, μ が 10^{-4} と 10^{-2} [$\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$] の場合では、計算結果にほとんど差異はなく、安定して計算することが出来、結果も妥当なものと考えられる。また、 λ, μ が 10^2 の場合、図には示されていないが、膨張波が伝播し、圧縮波として帰ってくる段階で、数値計算上、不安定な現象が起っている。また、 λ, μ が 10^4 [$\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$] では、膨張波伝播段階で予想される現象と甚だ異った結果を示した。

従って、単純な系の膨張、圧縮波の伝播現象について計算する限り、擬似粘性係数として $\sim 10^{-2}$ [$\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$] 以下の値を与えてやればよいと考えられる。

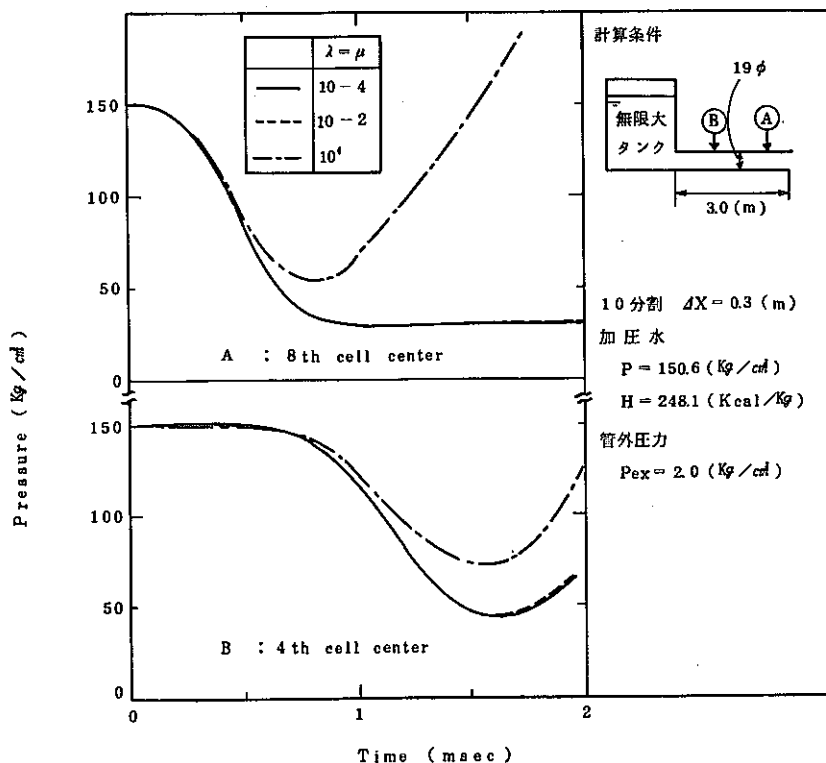


図 B.1 擬似粘性の圧力変化に対する影響

Appendix C インプット・データリスト

ここでは、6章で述べた2つの例題計算のインプット・データを示す。示したデータは、シュミレーション時間が、単相水噴出率計算の場合5[msec]、“もんじゅ”蒸発器の水噴率計算の場合、1[sec]のものである。

(1) 単相水噴率計算のインプット・データ

....*....1....*....2....*....3....*....4....*....5....*....6....*....7....*....8

*** CAL. OF SINGLE PHASE WATER DISCHARGE S51/12/05 *** T=LP

```

1 1 33 0.66 5.E-3
1.0 1.0 1.0 1.0
10.00E-06 1. 1. 1.
0.67 E-04 1. E-04 0. 1. E-06
0.01 0.01 1.0 1.0
1. E+06 0.1 1.0 E-06 1.0 E+04
3 1.
0. 1. 1. 1. 2
4 0. 0.
4 0. 0.
0. 1. 1. 1. 3
3 1. 1.
4 0. 0.
4 0. 0.
0. 1. 1. 1. 1
2 1. 1.
2 1
0. 1. 1. 1.5708 0.005E-03 1. 0.72 0.019
0.024 1. 1. 1. 1.
2
0.0 150.0 100.0 0.01
0.72 150. 100. 0.01
100. 150.
0.
0.
100. 150.
0.
0.
0.
600. 1.
0.
33 34
10
1 0 1 0 1 0 1 0

```

(2) “もんじゅ” 蒸発器破断伝熱管からの水噴出率計算のインプット・データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8
*** SWAC-11 TEST CAL. ON 'MONJU SG SYSTEM' OF TOSHIBA EV *** T=LP
1 4 76 20.0 1.0
10. 10. 10. 10. 10.
0.0002 0.0005 0.001 0.002
0.67E-04 1.00E-04 0.0 5.00E-06
0.01 0.01 1.0 1.0
1.0 E+05 1.0 E-01 1.0 E-05 1.0 E+04
11 1.0
0.0 35.0 0.1703 30.0 1
2 1.2 0.0228
0.0 17.5 0.2842 33.0 3
1 0.5 0.0228
6 1.3 0.0228
9 1.0 0.0228
0.0 14.0 0.2842 35.0 2
4 2.2 0.0634
10 2.5 0.0634
0.0 8.89 0.814 27.0 2
3 0.5 0.0347
5 0.5 0.0634
0.0 15.0 0.2842 35.0 2
4 1.6 0.0634
7 1.6 0.0634
0.0 25.0 0.2842 10.0 3
2 0.9 0.0634
8 1.6 0.0634
11 1.6 0.0634
0.0 15.0 0.2842 27.5 2
5 1.0 0.0634
8 0.3 0.0634
0.0 13.0 0.2842 15.0 2
6 1.0 0.0634
7 0.6 0.0634
0.0 3.54 0.320 33.0 3
12 0.0 0.0
12 0.0 0.0
2 5.0 0.0228

```

.....*	1.....*	2.....*	3.....*	4.....*	5.....*	6.....*	7.....*	8
0.0	0.665	0.665	35.0	3				
12 0.0	0.0							
12 0.0	0.0							
3 0.5	0.0634							
0.0	0.00	4.0	0.0	1				
6 0.5	0.0634							
255 0								
0.0	1.552	2.0	1.74	5.0 E-06	1.7	76.0	0.019	
0.0254	0.5	1.0	0.5	1.5				
7								
0.0	154.2	256.3	1.53					
15.2	152.8	256.3	1.53					
20.0	152.4	282.5	1.60					
34.5	151.0	383.0	2.06					
65.6	148.0	627.8	13.61					
70.2	146.7	681.3	17.95					
76.0	145.7	681.3	18.15					
256.3	158.0							
90.36								
256.3	156.0							
-90.36								
0.0								
90.36								
681.3	144.5							
90.36								
-90.36								
681.3	142.5							
-90.36								
90.36								
681.3	141.5							
-90.36								
0.0								
686.8	1.0							
0.0								
0.0								
0.0								

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*
681.3      141.5
0.0
0.0
686.8      1.0
0.0
0.0
256.3      154.2
-90.36
0.0
0.0
681.3      145.7
90.36
0.0
0.0
10         1.0
0.0
19.21
100
1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1

```